



REPLACEMENT PROGRESSIF DES SILICATES
PAR LES HYDROXYDES DE FER ET DE NICKEL DANS LES PROFILS
D'ALTÉRATION TROPICALE DES ROCHES ULTRABASIQUES
ACCUMULATION RÉSIDUELLE ET ÉPIGÉNIE

Jean-Jacques TRESCASES*

RÉSUMÉ — L'altération en conditions tropicales est responsable de la formation des «latérites nickélicifères» aux dépens des roches ultrabasiques (0,1 à 0,4 % NiO). Cette altération affecte successivement les deux minéraux principaux des roches : noyaux de péridots et trame de rubans serpentineux (rétrodiagenèse). Les péridots abandonnent des cavités tapissées d'hydroxyde de fer résiduel enrichi en nickel. Les cloisons serpentineuses sont progressivement épigénisées par des hydroxydes de fer fortement enrichis en nickel (parfois après formation d'une seconde génération de serpentine, nickélicifère).

Avant la disparition du maillage serpentineux, la roche altérée (faciès de saprolite grossière) constitue le minerai de nickel «silicaté» (2 à 3 % NiO). Plus haut, le profil d'altération ne renferme plus que les hydroxydes épigénisant ces cloisons : c'est le minerai «latéritique» ou «oxydé» (1 à 2 % NiO). Dans les deux cas, l'épigénie est le mécanisme essentiel de la formation des minerais de nickel supergène.

INTRODUCTION

La majeure partie des réserves mondiales de minerai de nickel est associée aux latérites développées en climat tropical aux dépens des roches ultrabasiques, constituant ce que les mineurs appellent les «latérites nickélicifères». Ces «latérites nickélicifères» sont traditionnellement, et encore récemment (AVIAS, 1978), divisées en deux types de gisements :

- gisements *silicatés* lorsque l'essentiel du nickel exploité est apparemment associé à des silicates, en général surtout dans la partie basale des profils d'altération ;
- gisements *oxydés* lorsque l'horizon enrichi en nickel et exploité n'est pratiquement constitué que d'hydroxyde, où le fer prédomine largement.

Une telle distinction est malgré tout beaucoup plus minière, économique et métallurgique que géochimique. De nombreux profils d'altération associent en effet les deux types évoqués : souvent un horizon de base «silicaté» est coiffé par un horizon d'hydroxydes. Mais les épaisseurs respectives de ces horizons varient beaucoup d'un endroit à un autre. Et l'exploitation minière ne s'intéresse en général, dans un gisement donné, qu'à un seul type de niveau.

L'objet de ce travail est de montrer les relations étroites d'interdépendance entre les deux «types» d'accumulation nickélicifère : l'histoire d'un gisement supergène de nickel est, pour l'essentiel, une substitution progressive des silicates de la roche mère par des hydroxydes de fer et de nickel.

* ORSTOM, Section de Géologie, Institut des Géosciences, Université de Sao Paulo, C.P. 20 899, Sao Paulo (Brésil).

10 AVRIL 1981

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 217 ex 1

Cote : B

I — MORPHOLOGIE DES PROFILS D'ALTERATION

Les profils d'altération développés sur les roches ultrabasiques comprennent en gros, de bas en haut, la succession ci-dessous (TRESCASES, 1973).

1. Roche partiellement altérée, ou saprolite grossière, au-dessus de la roche saine dont le toit dessine une surface extrêmement tourmentée

Les premiers signes de l'altération se manifestent :

- soit par une modification brutale de la teinte, en général sombre, de la roche mère (éclaircissement, ou apparition de nuances beiges à ocre, dues à l'oxydation du fer) ;
- soit par une diminution progressive de la densité apparente de la roche, de 3 jusqu'à 1,5 ;
- soit par une diminution de la cohésion, et l'apparition d'une fraction fine, peu abondante au début, emballant de nombreux fragments millimétriques, centimétriques, voire décimétriques, de roche peu transformée ;
- et souvent par des combinaisons de ces trois mécanismes, dont les caractéristiques s'accroissent progressivement vers le haut de cet horizon de saprolite grossière.

La puissance de cet horizon est extrêmement variable. Elle dépasse quelquefois la dizaine de mètres, et cet horizon peut même représenter l'essentiel des profils (en particulier, dans le cas de roches mères très serpentinisées, ou en climat sec). Mais ailleurs ce niveau peut n'être qu'une mince frange centimétrique à la base des profils.

2. Roche totalement altérée et ferruginisée, ou saprolite fine

De couleur brun-jaune à brun-rouge, cet horizon est à granulométrie très fine, et sa densité apparente peut être inférieure à 1. La structure de la roche initiale, plus ou moins tassée, est souvent reconnaissable. Comme pour l'horizon précédent, l'épaisseur de ce niveau varie de zéro à plusieurs dizaines de mètres. Il semble que, quand l'horizon inférieur se développe, l'horizon supérieur se réduit et inversement.

Ces deux horizons sont les plus caractéristiques des profils d'altération tropicaux. La présence d'un niveau superficiel, ou subsuperficiel, de cuirasse ferrugineuse est beaucoup plus aléatoire, de même que celle d'une tranche silicifiée, à la base ou, plus rarement, au sommet des profils (TRESCASES et de OLIVEIRA, 1978).

II — MICROMORPHOLOGIE DE L'ALTERATION ET DONNÉES MINÉRALOGIQUES

Associée aux rayons X et à l'analyse thermique différentielle, l'étude des lames minces est d'un grand intérêt pour suivre les étapes de l'altération de chaque minéral, l'apparition de nouvelles phases et les relations entre chaque phase.

1. Les minéraux des roches mères

Les roches ultrabasiques sont composées essentiellement de périclites et de pyroxènes, dont les proportions définissent diverses catégories de roches. Mais les principaux massifs ultrabasiques sont constitués de roches à olivine seule (dunites) et de roches à olivine et orthopyroxènes (harzburgites). L'olivine, et, à un moindre degré, l'orthopyroxène sont le plus souvent partiellement, et parfois totalement, transformés en serpentine. Cette transformation s'est produite en profondeur, vraisemblablement pendant la mise en place des massifs : c'est un phénomène de rétrodiagenèse hydrothermale, avec expression partielle du fer sous forme de magnétite. En définitive, hormis les cas, rares, de serpentinisation nulle, les deux principaux minéraux offerts à l'altération météorique par les roches ultrabasiques sont le périclote (olivine en général très magnésienne, à 90 % de forstérite) et la serpentine (lizardite dominante). L'olivine se présente en petits cristaux craquelés, subautomorphes, isolés au sein d'un réseau maillé de serpentine, plus ou moins

dense et ramifié. Les roches apparaissent ainsi comme associant des *cloisons serpentineuses* et des *noyaux d'olivine*. Les olivines sont composées de SiO₂ (40 %), de MgO (jusqu'à 50 %), de FeO (jusqu'à 10 %), et renferment 2000 à 4000 ppm de nickel régulièrement réparti dans le cristal, probablement en substitution de Mg. Les cloisons serpentineuses sont constituées de deux empilements contigus de lamelles de lizardite (ou de chrysotile), chaque lamelle étant perpendiculaire au plan de la cloison. Entre les deux empilements subsiste souvent, au centre de la cloison, un vide central où sont accumulés des granules de magnétite, éventuellement nickélique (Pl. I, 1).

Dans les cas extrêmes de serpentinisation totale, il est encore possible de reconnaître un réseau maillé serpentineux de première génération, et la trace des anciens noyaux d'olivine, remplacés par une serpentine de seconde génération, nettement moins bien cristallisée.

2. L'altération de l'olivine

De très nombreux auteurs ont minutieusement décrit, à l'aide du microscope, les étapes de l'altération des noyaux d'olivine (LACROIX, 1913 et 1942 ; MILLOT et BONIFAS, 1955 et 1956 ; BONIFAS, 1959 ; DEL VIGNE, 1965 ; TRESCASES, 1973). Les bordures des cristaux sont d'abord corrodées (Pl. I, 2, 3, et 4). Ensuite, les plages d'olivine sont fragmentées en très petits nodules résiduels noyés dans une masse fortement colorée par des hydroxydes de fer, soit essentiellement amorphe, soit dans certains cas microcristallisée en nontronite (Pl. I, 5). Très rapidement, toute trace d'olivine disparaît, laissant des cavités microscopiques, tapissées par des produits amorphes ou cryptocristallins, riches en hydroxydes de fer (Pl. I, 8). Tous ces phénomènes interviennent dès la base de l'horizon de saprolite grossière.

3. L'altération du réseau maillé serpentineux

Le réseau serpentineux cloisonnant résiste beaucoup plus longtemps à l'altération que les noyaux d'olivine, et subsiste à peu près intact, bien après la disparition des derniers périclites (Pl. I, 2 à 8). Dès le début de l'altération, toutefois, une partie du matériel ferrugineux, issu de l'hydrolyse des noyaux d'olivine, vient se fixer dans les discontinuités des cloisons serpentineuses : soit sur leurs bordures, soit dans le vide axial rempli de magnétite, cette dernière s'altérant très vite, soit dans les plans de clivage de l'empilement des lamelles de lizardite (en particulier Pl. I, 6 et 7). Ce réseau cloisonnant apparaît ainsi de plus en plus intensément coloré en jaune-brun en lame mince, quoique toujours constitué de *serpentine essentiellement héritée*.

Vers le sommet de l'horizon de saprolite grossière, la serpentine est à son tour altérée (Pl. I, 9) : les cloisons s'amincissent, les feuillettes accolés s'écartent les uns des autres. Cette altération paraît souvent proche d'une dissolution (TRESCASES, 1973) et n'abandonne qu'une petite quantité de produits amorphes, très fortement colorés par les hydroxydes de fer. Ces produits viennent s'adjoindre à ceux qui étaient issus de l'hydrolyse des périclites, et qui s'étaient fixés dans les lacunes du réseau cloisonnant. Ce réseau serpentineux est de la sorte *progressivement remplacé par du matériel ferrugineux*, sans que l'architecture générale de la roche ne soit affectée.

4. L'évolution des produits secondaires

Les produits secondaires résiduels, qui tapissent les cavités abandonnées par les noyaux d'olivine, puis remplacent les cloisons de serpentine, sont constitués de matériel amorphe à cryptocristallin, où prédominent les sesquioxides de fer, transitoirement la silice, mais ils renferment aussi du nickel. La présence de ce nickel pourrait expliquer le retard à la cristallisation des précipités ferrugineux (NALOVIC, 1977). Dans l'horizon de saprolite fine, la serpentine achève de disparaître, mais son fantôme ferrugineux subsiste (Pl. I, 10 et 11), évoluant progressivement en goéthite (alumineuse, chromifère, siliceuse, et bien entendu nickélique ; TRESCASES, 1973 ; SCHELLMANN, 1978). Ce squelette goéthitique est malgré tout fragile, d'autant plus que tout le reste de la roche a été dissous : des tassements interviennent rapidement et la structure initiale de la roche est progressivement détruite (Pl. I, 12).

Le passage d'une roche silico-magnésienne à un produit résiduel ferrugineux (et nickélique) est néanmoins intervenu *avant* la disparition de l'architecture initiale, par *épigénie très progressive* du cloisonnement serpentineux par les produits secondaires.

III – CARACTÉRISTIQUES GÉOCHIMIQUES DE L'ÉPIGÉNIE DES SILICATES MAGNÉSIENS

De nombreuses analyses chimiques de chaque phase de l'altération ont déjà été publiées. L'utilisation de la microsonde électronique a permis de mettre en évidence la distribution précise des éléments à travers l'ensemble des constituants minéralogiques de chaque type d'horizon (BESSET, 1978).

1. Analyse semi-quantitative. Localisation des éléments

Les travaux de AMMOU-CHOKROUM (1972) et de BESSET (1978) ont confirmé les résultats obtenus au microscope et par l'analyse des phases, par attaques sélectives et séparations minéralogiques (TRESCASES, 1973).

Dans les noyaux d'olivine sont ainsi prouvés : l'élimination précoce et préférentielle du Mg à la périphérie des cristaux ainsi que le long des clivages et des fractures, puis, après une phase Si - Fe - Ni, un enrichissement relatif en Fe - Ni de ces noyaux. Sur les cloisons serpentineuses, l'enrichissement en Fe - Ni des bordures, du plan axial, puis des cavités apparues avec la progression de l'altération est également confirmé.

2. Analyse quantitative. Composition chimique de chaque phase minéralogique

BESSET (1978) a procédé à un grand nombre d'analyses quantitatives ponctuelles d'échantillons de Nouvelle-Calédonie, à l'aide de la microsonde électronique. J'ai calculé à partir de ces données les rapports Ni/Fe dans les noyaux d'olivine et les cloisons serpentineuses, à divers stades d'altération. Ces résultats sont rassemblés dans le tableau I.

Tableau I
Teneurs moyennes en Fe et Ni des minéraux dans les roches fraîches et altérées (sapolite grossière)

		FeO %	NiO %	NiO/FeO	nombre d'échant.
Noyaux d'olivine	olivine fraîche	7,93	0,66	0,08	12
	noyaux peu altérés (MgO > 25 %)	8,47	2,53	0,30	3
	noyaux altérés (10 < MgO < 20 %)	13,75	4,43	0,32	5
	zones très altérées (MgO < 5 %)	16,22	4,79	0,30	11
Cloisons serpentineuses	serpentine fraîche	6,0	0,35	0,06	*
	serpentine peu altérée (MgO > 30 %)	6,10	4,12	0,67	37
	zones altérées (25 < MgO < 30 %)	5,80	6,40	1,10	16
	zones très altérées (MgO < 25 %)	13,28	4,8	0,36	2

* in TRESCASES (1973) ; tous les autres chiffres ont été calculés à partir des analyses fournies par BESSET (1978)

Dans les noyaux d'olivine, le rapport Ni/Fe passe de 0,08 dans les minéraux frais à 0,30 - 0,32 lorsque le périclase est détruit, quel que soit le stade atteint par cette évolution. Au niveau des cloisons serpentineuses, les phénomènes sont un peu plus complexes puisque ce rapport Ni/Fe passe très brutalement de 0,06 à 0,67 dès le début de l'altération, et même à 1,10, alors que les minéraux serpentineux ne sont pas encore très altérés (MgO est encore supérieur à 25 %, et il n'y a pas d'accumulation relative de fer). Dans les parties les plus altérées, toutefois (bordures, plan axial), on re-

trouve un matériel très proche de celui qui était issu de l'hydrolyse des noyaux d'olivine, enrichi en Fe et Ni, avec $Ni/Fe = 0,36$.

IV – ESSAI D'INTERPRÉTATION DES MÉCANISMES

L'altération commence dans les noyaux d'olivine. L'hydrolyse de ces édifices silico-magnésiens se fait avec exportation massive du magnésium. Le fer et le nickel restent sur place sous forme d'hydroxydes, avec, au début, une partie de la silice. Mais le nickel est relativement plus concentré que le fer dans les résidus, car la base des profils d'altération reçoit un apport absolu de nickel en provenance du reste du profil, et surtout des profils situés en amont (TRESCASES, 1973).

Une partie de ce résidu d'hydroxydes de fer et de nickel émigre à partir de la cavité abandonnée par le noyau d'olivine et vient se fixer dans les discontinuités physiques du cloisonnement serpentiniteux voisin (bordures, sillon médian, clivages, qui font de chaque cloison un véritable «peigne»). Cette migration à très courte distance pourrait être expliquée par la solubilité des complexes Fe - Ni, sous forme d'ions hydroxo-hétéro-polynucléaires $[(OH)Fe^{III}(OH)_2Ni]^{3+}$ dont la formation, est favorisée par l'abondance locale du nickel (NALOVIC, 1977). Lors du passage saprolite grossière - saprolite fine, lorsque les cloisons serpentiniteuses sont dissoutes, il en subsiste la réplique ferri-nickélique qui a commencé à les épigéniser dès la base de la saprolite grossière. Ce maillage secondaire évolue progressivement en goethite, au fur et à mesure qu'il est lessivé d'une partie de son nickel.

Les fortes teneurs en nickel des minéraux serpentiniteux analysés par BESSET (1978) semblent toutefois montrer que l'épigénie, à partir du comblement des *discontinuités* des cloisons serpentiniteuses, par des hydroxydes de fer et de nickel, ne doit pas être l'unique mécanisme en jeu. On peut proposer deux hypothèses complémentaires de substitutions :

- au niveau de la *couche octaédrique et magnésienne des serpentines*, qui pourrait être remplacée, octaèdre par octaèdre, par une couche nickélique ;
- au niveau du *cristal de serpentinite magnésienne*, qui serait hydrolysée ; une nouvelle espèce serpentiniteuse, nickélico-magnésienne, plus stable dans ces conditions de milieu, serait néoformée dans l'espace libéré.

Dans ces conditions, l'épigénie du cloisonnement serpentiniteux est encore la règle, mais les silicates magnésiens ne seraient pas seulement remplacés par des hydroxydes de fer et de nickel, mais aussi, dans certains cas, par des silicates Ni - Mg du type «garniérite». Ces silicates ne subsistent cependant que dans l'horizon de saprolite grossière, et cèdent la place aux hydroxydes dans le niveau de saprolite fine qui constitue le «minerai de nickel latéritique».

V – CONCLUSIONS

Les roches ultrabasiques comprennent essentiellement deux types de minéraux : des noyaux de péridot isolés dans une trame de rubans de serpentine. L'altération météorique, en zone tropicale, de ces roches faiblement nickélicifères (0,1 à 0,4 %) est responsable de la formation d'un manteau d'altérites nickélicifères (minerai à 1-3 %). Cette altération passe par deux étapes.

- Une hydrolyse précoce des péridots, avec accumulation initiale, dans les clivages et fissures, de fer résiduel enrichi en nickel, qui conduit à la disparition rapide des olivines, laissant des cavités tapissées par le matériel résiduel.
- Une épigénie progressive des rubans de serpentine par les hydroxydes de fer, mais avec un enrichissement en nickel encore plus intense, soit par l'intermédiaire d'une serpentine nickélique transitoire, transformée ou néoformée, soit par remplacement direct de ces rubans.

Deux types d'horizons saprolitiques se succèdent ainsi dans le profil.

- A la base, un niveau où subsistent les cloisons serpentines, en voie d'imprégnation ferri-nickélique : c'est le minerai de nickel «silicaté» (2 à 3 % NiO).
- Au-dessus, un horizon qui ne renferme plus que les hydroxydes épigénisant ces cloisons ; l'architecture du maillage initial y est cependant affectée par des tassements : c'est le minerai de nickel «latéritique» ou «oxydé» (1 à 2 % NiO).

En définitive, à la suite d'enrichissements successifs, l'épigénie est le mécanisme essentiel des accumulations nickéliques supergènes à caractère économique. Et ces minerais, désignés par le terme général de «latérites nickéliques», représentent la majeure partie des réserves mondiales de nickel.

Manuscrit déposé le 27 décembre 1978

Summary

Weathering in tropical conditions is responsible for the formation of «nickeliferous laterites» at the expense of ultrabasic rocks (0,1 - 0,4 % NiO). This weathering successively affects the two principal minerals of rocks, i.e. the cores of peridotites and the weft of the serpentinitic bands (retrodiagenesis). The peridotites leave holes covered by residual Ni-enriched iron hydroxide. The serpentinitic bands are progressively epigenized by strongly Ni-enriched iron hydroxides (sometimes after formation of a second generation of serpentine which is nickeliferous).

Before disappearing of the serpentinitic network, the weathered rock (with a facies of coarse-grained saprolite) constitutes the «silicated» nickel ore (2 - 3 % NiO). Upper, the weathering profile contains only hydroxides epigenizing these bands : that is the «lateritic» or «oxidized» ore (1 - 2 % NiO). In both cases, epigenesis is the principal mechanism of the formation of supergene nickel ores.

Zusammenfassung

Die Verwitterung unter tropischen Bedingungen bewirkt die Bildung von «Nickel Lateriten» auf ultrabasischen Gesteinen (0,1 bis 0,4 % NiO). Diese Verwitterung greift nach und nach die beiden Hauptminerale dieser Gesteine an : Peridotit Einsprenglinge und Serpentin Fasern (Retrodiagenese). Die Peridotite hinterlassen häufig Hohlräume, deren Wandungen mit residuellem Eisen, das an Nickel angereichert ist, ausgekleidet sind. Das Serpentin Netzwerk wird allmählich durch stark an Nickel angereicherte Eisenhydroxide verdrängt (manchmal nach der Bildung einer zweiten nickelführenden Serpentinergeneration).

Vor dem Verschwinden des Serpentinnetzwerkes ist in dem verwitterten Gestein (in der grobkörnigen Saprolitfazies) ein Nickel «Silikat» (2 bis 3 % NiO) anzutreffen. Höher im Verwitterungsprofil werden nur die Hydroxide angetroffen, die das Serpentinnetzwerk verdrängt haben : das ist das «Laterit» oder «Oxyd» Erz (1 bis 2 % NiO). In beiden Fällen ist die Epigenese der wesentliche Mechanismus bei der Bildung des oberflächennahen Nickel Erzes.

BIBLIOGRAPHIE

- AMMOU-CHOKROUM M. (1972) — Contribution à la valorisation des ferrallites nickéliques de Nouvelle-Calédonie. Distribution minéralogique des éléments et étude de leur comportement au cours de la réduction solide - gaz des matériaux. Thèse Sci. Nancy I, multigr. 170 p.
- AVIAS J. (1978) — L'évolution des idées et des connaissances sur la genèse et sur la nature des minerais de nickel, en particulier latéritiques, de leur découverte à nos jours. *Bull. Bur. Rech. géol. min.*, sect. II, 3, p. 165 - 172.
- BESSET F. (1978) — Localisations et répartitions successives du nickel, au cours de l'altération latéritique des péridotites de Nouvelle-Calédonie. Thèse 3ème cycle Univ. Sci. Tech. Languedoc, Montpellier, multigr., 129 p.
- BONIFAS M. (1959) — Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. Thèse Doct. Ing. Strasbourg et *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 17, 159 p.

- DELVIGNE J. (1965) – Pédogenèse en zone tropicale. La formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique. *Mém. ORSTOM*, 13, 177 p.
- LACROIX A. (1913) – Les latérites de la Guinée et les produits d'altération qui leur sont associés. *Nouv. Arch. Mus.*, 5, p. 255 - 358.
- LACROIX A. (1942) – Les péridotites de la Nouvelle-Calédonie, leurs serpentines et leurs gîtes de nickel et de cobalt. Les gabbros qui les accompagnent. *Mém. Acad. Sci. Paris*, 66, 143 p.
- MILLOT G. et BONIFAS M. (1955) – Transformations isovolumétriques dans les phénomènes de latéritisation et bauxitisation. *Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, 8, p. 3 - 20.
- MILLOT G. et BONIFAS M. (1956) – Bilan géochimique dans l'altération de quelques roches de Guinée (A.O.F.). C.R. VIème Congr. Internat. Sci. Sol., Paris, Comm. V.
- NALOVIC L. (1977) – Recherches géochimiques sur les éléments de transition dans les sols. *Trav. et Doc. ORSTOM*, 66, 235 p.
- SCHELLMANN W. (1978) – Behaviour of nickel, cobalt and chromium in ferruginous lateritic nickel ores. *Bull. Bur. Rech. géol. min.*, sect. II, 3, p. 275 - 282.
- TRESCASES J.J. (1973) – L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiqes en zone tropicale. Formation des gisements nickélifères de Nouvelle-Calédonie. Thèse Sci. Strasbourg et *Mém. ORSTOM*, 78, (1975), 259 p.
- TRESCASES J.J. et de OLIVEIRA S.M.B. (1978) – Alteração dos serpentinitos de Morro do Niquel (M.G.) Brasil. XXXe Congr. Brasileiro de Geol., Recife, nov. 1978.

PLANCHE I

Les photos illustrent la progression de l'altération, de la base vers le haut des profils

- 1 – Nouvelle-Calédonie. Dunite serpentinisée non altérée : les noyaux d'olivine, petits, sont isolés par de doubles cloisons serpentineuses épaisses. Dans le plan axial des cloisons est accumulée de la magnétite en petits granules (LN).
- 2 – Nouvelle-Calédonie. Dunite serpentinisée en voie d'altération. A gauche, la roche est saine. A droite, l'altération commence et se traduit macroscopiquement par l'apparition d'une teinte ocre ; en lame mince, les noyaux d'olivine apparaissent corrodés ou fragmentés, et, surtout, le maillage serpentineux se révèle fortement coloré par des hydroxydes de fer (LN).
- 3 – Nouvelle-Calédonie. Dunite serpentinisée en début d'altération, à la base de la saprolite grossière. Les noyaux d'olivine sont corrodés, et parfois disséqués, abandonnant un résidu d'hydroxydes de fer. Dans les cloisons serpentineuses, encore intactes, la magnétite s'oxyde, et le maillage serpentineux tout entier est coloré par des hydroxydes de fer (LN).
- 4 – Nouvelle-Calédonie. Harzburgite serpentinisée altérée, à la base de la saprolite grossière. Les noyaux d'olivine sont plus intensément atteints que sur la photo n° 3 : il n'en subsiste souvent que de petits nodules résiduels, noyés dans une masse amorphe d'hydroxydes de fer. La serpentine n'est que colorée par des produits ferrugineux (LN).
- 5 – Nouvelle-Calédonie. Dunite serpentinisée altérée, dans la saprolite grossière. Les noyaux d'olivine ont pratiquement disparu, laissant des cavités partiellement comblées par les produits ferrugineux résiduels, amorphes ou cryptocristallins. Le maillage serpentineux n'est toujours pas altéré (L P).
- 6 – Nouvelle-Calédonie. Harzburgite serpentinisée altérée, dans la saprolite grossière. Comme sur la photo n° 5, les noyaux d'olivine ont presque entièrement disparu, remplacés par des hydroxydes de fer, alors que les cloisons serpentineuses sont intactes. Cependant, le plan axial de ces cloisons, ainsi que les clivages entre chaque lamelle, sont fortement imprégnés d'hydroxydes de fer (LN).
- 7 – Morro de Niquel. Brésil. Serpentine altérée. Accumulation d'hydroxydes de fer sur les bordures et dans les plans de clivage d'une cloison serpentineuse (LN).
- 8 – Nouvelle-Calédonie. Harzburgite serpentinisée altérée, dans la saprolite grossière. Toute trace d'olivine a disparu, laissant des cavités tapissées par des hydroxydes de fer. Les cloisons serpentineuses ne sont pas altérées, mais simplement colorées par des hydroxydes de fer adsorbés (LN).
- 9 – Nouvelle-Calédonie. Dunite serpentinisée altérée, au sommet de la saprolite grossière. Les cloisons serpentineuses commencent à être altérées à leur tour, en abandonnant leur fantôme ferruginisé (LN).
- 10 – Nouvelle-Calédonie. Harzburgite serpentinisée très altérée, à la base de la saprolite fine. Tous les silicates ont disparu. L'ancien cloisonnement subsiste, mais la goethite a remplacé la serpentine, sans modification de l'architecture générale. Les cavités (ex-olivine) sont partiellement remplies de goethite (LN).
- 11 – Nouvelle-Calédonie. Harzburgite serpentinisée très altérée, à la base de la saprolite fine. Comme sur la photo n° 10, la goethite fossilise l'aspect initial du maillage serpentineux, mais la structure commence à être partiellement écrasée par endroits (LN).
- 12 – Nouvelle-Calédonie. Harzburgite serpentinisée très altérée, à la base de la saprolite fine. L'échantillon est identique aux deux précédents, mais ici des tassements sont intervenus, et la structure initiale de la roche s'efface peu à peu (LN).

