

2014

LES GISEMENTS DE NICKEL LATÉRITIQUE DE NOUVELLE-CALÉDONIE

*TYOLOGIE DES PROFILS,
CARACTÉRISATION DES LATÉRITES
ET IDENTIFICATION DES PORTEURS
DE Ni ET Co*

Synthèse des résultats des projets CNRT :

« NICKAL » - Typologie des minerais
latéritiques de Nouvelle-Calédonie et facteurs
de concentration de Co et Ni

« Analyse fine des minerais latéritiques » -
Facteurs de minéralisation Ni/Co des latérites
de Nouvelle-Calédonie

Juillet 2014

SYNTHESE

CNRT
NICKEL
& son environnement


Institut de recherche
pour le développement


UNIVERSITÉ
de la
NOUVELLE-CALÉDONIE


GOUVERNEMENT DE LA
NOUVELLE
CALÉDONIE

GLENCORE

LES GISEMENTS DE NICKEL LATÉRITIQUE DE NOUVELLE-CALÉDONIE

Typologie des profils, caractérisations des latérites et identification des porteurs de Ni et Co



AVANT PROPOS LES GRANDS TYPES DE MINERAIS NICKELIFERES

La Nouvelle-Calédonie abrite **le troisième plus grand gisement nickélique du monde** qui couvre près d'un tiers de la superficie de la grande terre (Fig. 1). Fréquemment qualifiés de **latérites nickéliques** (e.g. Brand *et al.*, 1998), ces gisements sont hérités de l'altération d'un des plus grands **complexes ophiolitiques** de la planète qui s'est mis en place sur la ride de Norfolk à la fin de l'Eocène (Cluzel *et al.*, 2001). Ces gisements représentent en moyenne **1/4 des ressources en latérites nickéliques** du monde (Elias, 2001).

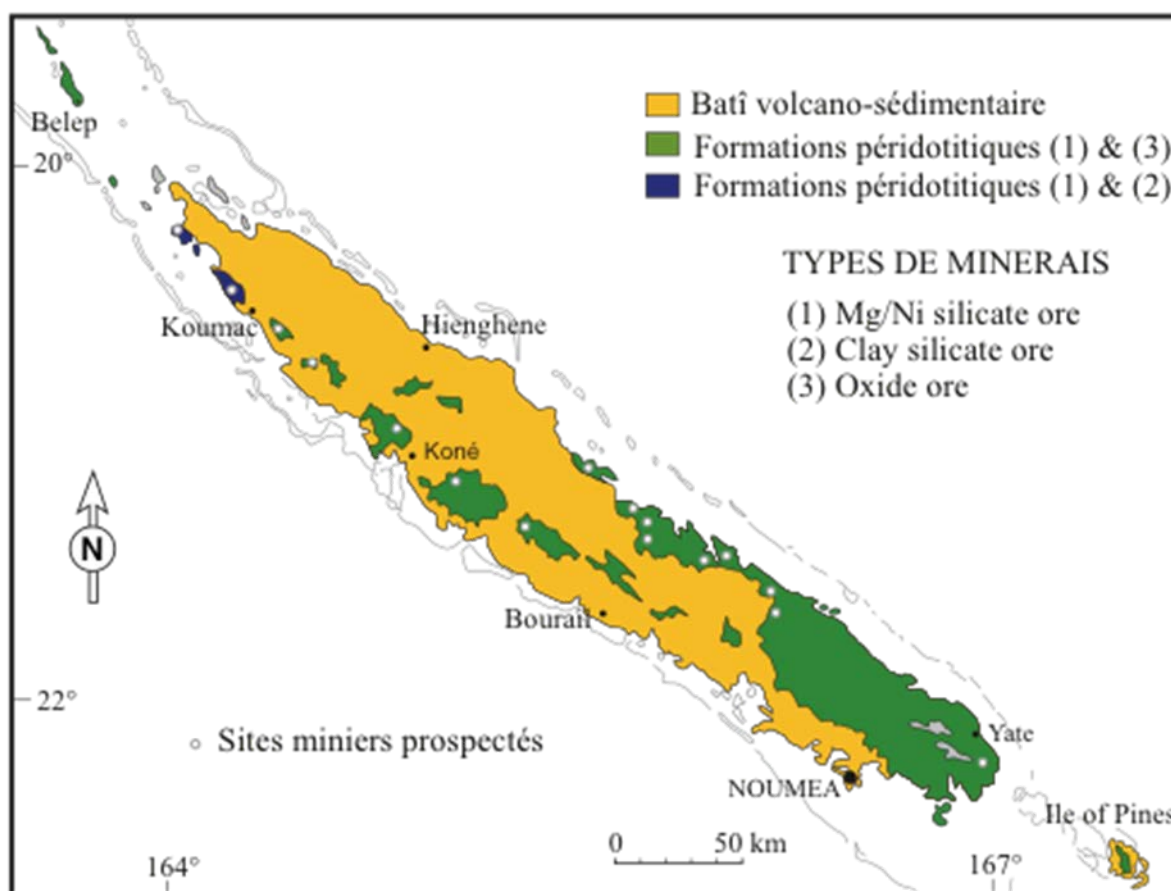


Figure 1 : Massifs péridotitiques de Nouvelle-Calédonie et principaux types de gisements

Suivant la nature et l'abondance des principales phases minérales porteuses du nickel et la distribution de ces phases dans les profils latéritiques formés sur roches péridotitiques, **trois catégories de minerais nickéliques** (Fig. 1) sont communément admises dans la littérature (Brand *et al.*, 1998; Gleeson *et al.*, 2004; Freyssinet *et al.*, 2005):

- i. Les **minerais silicatés**, hydratés Mg/Ni (*hydrous Mg/Ni silicate ores*) également qualifiés par les mineurs de minerais silicatés à garniériste. Ces minerais sont constitués de phyllosilicates trioctaédriques 1:1 et 2:1, faiblement cristallisés et non expansibles, de la famille des serpentines, des talcs et des sépiolites (Gleeson *et al.*, 2004; Lewis *et al.*, 2006; Tauler *et al.*, 2009; Butt et Cluzel, 2013; Villanova-de-Benavent *et al.*, 2014). En

Nouvelle-Calédonie, ces minéraux sont présents dans **le réseau de fracturation** des massifs péridotitiques et particulièrement bien préservés à la base des profils d'altération dans le **saprock** (i.e. à la transition entre la roche-mère et la saprolite sus-jacente).

- ii. Les **minerais silicatés argileux** (*clay silicate ores*). Ces minerais de la famille des **smectites** (argiles gonflantes) sont essentiellement constitués de phyllosilicates dioctaédriques 2:1 tels que les **nontronites** et montmorillonites ferrifères et les beidellites alumineuses (Gaudin *et al.*, 2004). Ces argiles sont intimement associées aux oxydes de fer et essentiellement présentes à la base des niveaux saprolitiques. Le mélange intime de ces deux phases minérales (argiles et oxydes) a conduit certains auteurs à le qualifier d'iddingsite.
- iii. Les **minerais oxydés** à Ni (*Ni oxide ores*). Ces minerais sont constitués majoritairement d'oxy-hydroxydes de fer (principalement d'hydroxyde de la goethite) et de faibles quantités de chromite (minéral résiduel, très peu altéré). Ils peuvent également contenir des teneurs variables en résidus de phyllosilicates Mg/Ni et en phylломanganates Ni/Co. Ils sont fréquemment localisés dans la partie inférieure des niveaux latéritiques qui surmontent le manteau saprolitique (latérite de transition et latérite jaune) et peuvent pénétrer profondément dans ce dernier à la faveur des plans sub-verticaux de fracturation des massifs péridotitiques (bancs, cônes ou trièdres d'altération).

Les teneurs en nickel (Ni pondéral) sont comprises **entre 30% dans les veines silicatées les plus riches en Ni (garniélite) et moins de 2% dans les minerais oxydés**, avec des valeurs intermédiaires (< 4%) dans les minerais silicatés argileux à smectites. En Nouvelle-Calédonie, les latérites nickélifères sont généralement bien drainées et les 1^{er} et 3^{ème} types de minerais (minerais silicatés à garniélite et oxydés) sont de ce fait les plus fréquemment observés (Fig. 1). Néanmoins, les minerais du 2^{ème} type (minerais silicatés à smectites) sont suffisamment abondants dans les massifs du Nord de la Grande Terre (Tiébaghi et Poum) pour être également exploités.

I. INTRODUCTION

Le présent document synthétise les résultats acquis dans la cadre de deux projets de recherche financés par le CNRT « Nickel et son Environnement » concernant la typologie des latérites de Nouvelle-Calédonie, les facteurs de concentration et la caractérisation fine des porteurs de Ni et Co.

Cette synthèse a été rédigée dans le cadre du **Symposium « Latérites et gisements supergènes » (Nouméa, 24 et 25 Juillet 2014)** au cours duquel les deux projets sont restitués.

A la suite du Symposium, le CNRT éditera les rapports scientifiques relatant les travaux et résultats des deux projets. Un guide opérationnel à l'intention des professionnels du secteur minier en Nouvelle-Calédonie sera également produit, reprenant les principaux éléments nécessaires à la compréhension des phénomènes d'altération supergène de la nappe des péridotites dans le but de guider les travaux d'exploration vers les domaines les plus prospectifs en termes de minéralisations Ni-Co.

Les principaux aspects abordés dans ce document concernent :

- Les **facteurs environnementaux** associés à la mise en place des latérites nickélifères de Nouvelle-Calédonie (lithologie, géomorphologique, tectonique : la fracturation des massifs péridotitiques, l'âge et la durée de l'altération) et **les changements de spéciation de Ni** le long des profils d'altération ;
- La **proposition d'une typologie des profils d'altération** s'appuyant sur ces facteurs, mais aussi sur la minéralogie et la géochimie (cette description de profils types pouvant servir de référence dans le ciblage des contextes les plus favorables à la présence de tel ou tel type de minéralisation).
- Les **minéralisations** associées aux types proposés ;
- La présentation d'**un modèle de mise en place des latérites et des minéralisations Ni/Co associées** ;

II. LES FACTEURS

Cette section décrit les facteurs/paramètres mis en jeu dans la genèse, l'évolution et la distribution des profils latéritiques nickelifères.

La roche-mère

Une pile ophiolitique est constituée de différentes unités géologiques composées de roches montrant des assemblages minéralogiques et donc un chimisme variés. En Nouvelle-Calédonie, les principales roches rencontrées sont des **harzburgites** (Ol-Opx±Cpx), des **dunites** (Ol±Cpx±Opx-Chr), des **gabbros** (Cpx±Opx±Plg±Ol), des **wehrlites** (Ol-Cpx±Plg), des **pyroxénites** (Cpx-Opx±Ol) (Fig. 2). En fonction de la nature et de la minéralogie de la roche affectée par l'altération, Les éléments chimiques susceptibles d'être lessivés (éléments mobiles) ou au contraire de rester sur place (éléments immobiles) au cours de l'altération météorique vont donc varier en fonction de la nature et de la minéralogie des phases affectées.

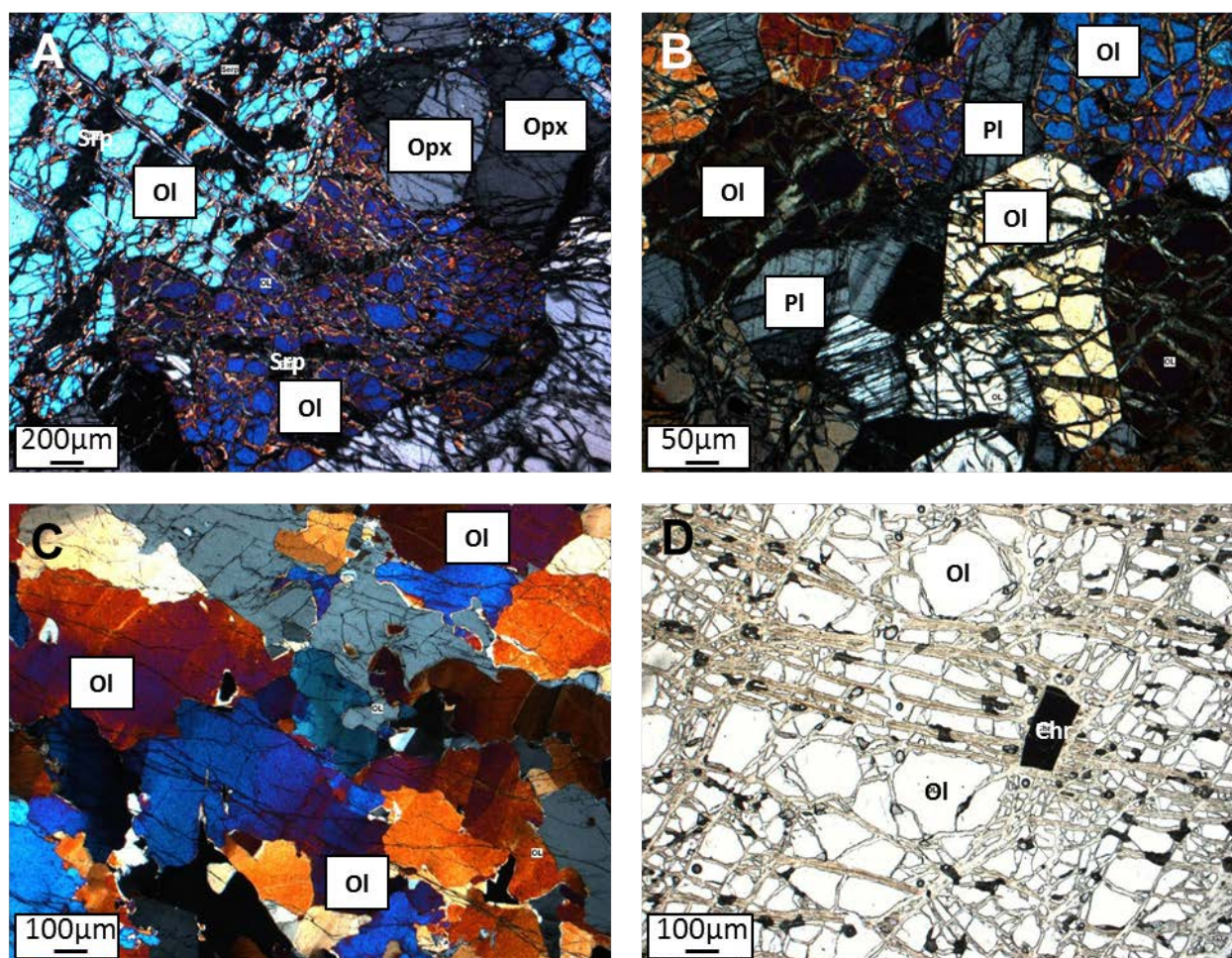


Figure 2 : Microphotographie en lumière transmise de quelques-unes des principales roches primaires rencontrées. A. Harzburgite de Goro, B. Wehrlite à plagioclase de Goro, C. Harzburgite de Poro, D. Dunite de Poro. A, B et C en lumière polarisée et analysée, D, lumière polarisée. Ol : olivine, Opx : orthopyroxène ; Pl : plagioclase, Chr : chromite, Srp : serpentine.

La plupart des sites visités dans le cadre du projet sont tous caractérisés par **des alternances de harzburgites et de dunites** en base de profils latéritiques. La seule exception concerne **Tiébaghi caractérisé par un important cortège filonien et des lherzolites à plagioclases**. Des réseaux de veines de gabbros et de wehrlites à plagioclase ont été rencontrés sur la plupart des sites visités, encore bien visibles dans la plupart des horizons des profils d'altérations. Des lits de chromite, provenant de l'altération probable de niveaux de dunite sont fréquemment observés dans les profils. Ils sont à l'origine des variations de teneurs en Cr_2O_3 observées dans la plupart des sondages. La chimie des cristaux de chromite permet de déterminer leur origine, les chromites des niveaux de wehrlites à plagioclases étant plus alumineuses que celles des harzburgites et des dunites.

Contexte géomorphologique

Les massifs de péridotites de la Grande Terre sont localisés dans des contextes géomorphologiques différents. Les klippes de la côte Ouest (Tiébaghi, Koniambo, Boulinda) ainsi que le Nord du Massif du Sud sont considérés comme typiques d'**un environnement de montagne**. Le Sud du Massif du Sud, d'altitude moindre, est considéré comme **un environnement de bassin**.

En contexte de montagne, les massifs de péridotites sont morcelés en sous-unités qui montrent des évolutions différentes face à l'altération. Les unités ou compartiments portés en altitude sont le siège d'une intense altération mécanique. Les profils d'altération sont tronqués, les horizons les plus meubles sont fréquemment décapés amenant la saprolite à l'affleurement. D'autres compartiments, caractérisés par une altitude moindre et bordés de hauts reliefs constituent des zones de plateau et sont caractérisés par des profils plus complets où l'ensemble des horizons d'altération sont représentés.

En contexte de bassin dont le site de Goro est le principal représentant, les plateaux où se développent l'altération, également bordés de hauts reliefs, sont généralement de grandes dimensions, et montrent des profils d'altération bien développés et complets.

Des profils d'altération complets sont rencontrés en contexte de montagne dans des zones de plateaux préservés de l'altération mécanique par le jeu de failles. En termes de dimensions, ces zones sont d'extension réduites en comparaison de celles développées en contexte de bassin. En termes de chimie, il semble que les latérites jaunes en contexte de montagne soient plus riches en SiO_2 et MgO suggérant des profils moins matures où les conditions de drainages des fluides superficiels ne permettent pas une évacuation de ces éléments aussi efficace que celle observée en contexte de bassin.

Structuration des massifs

Les différentes phases tectoniques ayant affectées la Nouvelle-Calédonie, en particulier celles intervenues après la mise en place de la nappe ophiolitique sont à l'origine : i) de **la surrection** des massifs présents sous forme de klippes le long de la côte Ouest de la Grande Terre et au Nord du Massif du Sud, surrection ayant préservée le Sud du Massif du Sud ; ii) **du découpage**

des péridotites par de nombreuses failles à l'origine du morcèlement des massifs. Là encore le Sud du Massif du Sud semble relativement peu affecté par ce découpage et les cellules d'altération sont préservées sous forme de **plateaux** de grandes dimensions.

Les études structurales menées sur la plupart des massifs de péridotites mettent en évidence la diversité d'origine et de fonctionnement des failles. Elles peuvent en effet être antérieures, contemporaines voire postérieures à l'obduction. Des failles normales, formées en contexte d'extension côtoient des failles inverses typiques de contexte en compression. Certaines failles montrent des rejeux multiples. Une méthodologie de caractérisation de ces structures a été mise en place, basée sur l'abondance des structures présentant des orientations et des cinématiques communes et leur richesse en phases nickélicifères. Des orientations communes sont observées sur la plupart des massifs étudiés mais leur importance en termes de minéralisation varie d'un site à l'autre voire au sein d'un même massif.

Cette hiérarchisation des structures a permis de proposer, à l'échelle des chantiers, **un modèle du piège** ayant conduit à l'expression de la minéralisation. Parmi ces pièges, **les dièdres et les sillons** semblent les plus répandus. L'intersection de failles de pendage opposé permet l'individualisation de cellules où l'altération va pouvoir se développer par focalisation des fluides supergènes. Des failles peu pentées, à la base de certains chantiers pourraient également être à l'origine de l'individualisation de cellules d'altération mais leur origine et leur rôle reste encore à démontrer. Sur certains sites (Nakéty en particulier) **des dolines** de grandes dimensions développées à l'intersection de deux directions majeures de fracturation semblent constituer de bons pièges permettant la préservation des horizons d'altération et des latérites en particulier. Des dolines de dimensions comparables sont observées en contexte de bassin comme à Goro (« Trou du Tahitien »). Dans ce contexte, les produits d'altération sont complètement évacués par des conduits karstiques actifs laissant le bedrock à l'affleurement. Ce fonctionnement actif (Goro) versus passif (Nakéty) des conduits karstiques reste à étayer de façon plus certaine.

Datation

Les datations revêtent un grand intérêt de caractérisation des profils d'altération car elles sont un outil très efficace de corrélation entre latérites établies sur des replats géométriquement raccordés ou non. En outre, connaître la durée des processus, et établir les différents stades de la morphogenèse néocalédonienne permet d'expliquer la genèse des latérites et de leur contexte de formation.

Les cuirasses ferrugineuses couronnant les profils latéritiques sur péridotites peuvent être datées par **paléomagnétisme** pourvu qu'aucun remaniement n'ait eu lieu en leur sein. Les âges obtenus sur plusieurs sites (Tiébaghi, Goro, Népoui) s'échelonnent **entre 0-5 et 25 Ma** permettent de reconstituer avec cohérence l'histoire géologique postérieure à l'obduction de la Grande Terre. Localement, sur les massifs au relief le plus étagé au cœur de la Grande Terre (Kopéto-Boulinda-Népoui), des remaniements ont eu lieu, le long d'une paléotopographie très différenciée et vraisemblablement contemporaine du dépôt du conglomérat de Pindaï (sédiment post-obduction), soit du Miocène inférieur (plus précisément 19 à 22 Ma). Cette évolution est possiblement envisageable sur Koniambo-Oundjo-Ouazangou-Tiégamus à l'Ouest et Gwa N'Doro-Kadjitra à l'Est, mais reste spéculative et n'est pas encore démontrée formellement.

Les oxydes de fer des manchons racinaires et concrétions datés par U-Th/He, après leur étude pétrographique approfondie, sont d'âges bien plus jeunes que les plus anciennes cuirasses et

anciens bancs ferrugineux intercalés dans la Formation du fluvio-lacustre du Sud (sédiment post-obduction), et plutôt très récents (quaternaires). De rares oxydes de manganèse à potassium (type cryptomélane) ont localement été identifiés dans les altérites de péridotites. Cependant, leur faible abondance n'a pas permis de les séparer des autres phases présentes en vue de leur datation par radiométrie (K/Ar). Toutefois les altérites de roches plus acides comme les granitoïdes post-obduction semblent receler des oxydes de Mn avec potassium dans le réseau, permettant leur datation par cette méthode et par $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Les âges obtenus sont tous **Miocène pour les oxydes de Mn des altérites de la granodiorite** de Saint-Louis, et sont cohérents avec les datations paléomagnétiques obtenues par ailleurs à Goro ou Tiébaghi et indiquent eux-aussi une altération météorique polyphasée ayant conduit aux minerais de nickel de Nouvelle-Calédonie, ayant commencé très tôt après la mise en place et à l'affleurement des granitoïdes.

L'étude de la composition isotopique en $\delta^{18}\text{O}$ de minéraux argileux et d'oxydes de fer révèlent que la Nouvelle-Calédonie est probablement soumise à **un régime climatique tropical depuis 25 à 30 Ma**.

Très peu de roches néo-calédoniennes recèlent des apatites susceptibles d'être analysées en thermo-chronologie traces de fission et U-Th/He basse température. Seuls les granitoïdes post-obduction en possèdent. La concordance entre les âges absolus (U/Pb) et thermo-chronologiques (traces de fission et (U-Th)/He) sur apatites et sur zircons implique qu'ils ont connu des températures basses (<100°C) très vite après leur mise en place. Ces données impliquent une **exhumation rapide accompagnée d'une certaine érosion**, puisque ces granitoïdes se sont mis en place à une profondeur non négligeable.

Ce soulèvement très rapide entre 30 et 20 Ma est cohérent pro parte avec l'âge du Mb du conglomérat de Pindaï et les âges probables des remaniements mis en évidence dans les cuirasses des massifs à la topographie la plus différenciée de la zone centrale de la Grande Terre. Les zones aujourd'hui les moins soulevées, aux extrémités nord et sud de la Grande Terre n'enregistrent pas forcément aussi clairement (ou intensément) ces remaniements, et leur évolution verticale a probablement été plus complexe. Au Nord, **à Tiébaghi, la cuirasse est fossile et date de 25 Ma**, la topographie du plateau de Tiébaghi incliné vers l'Ouest qui supporte le profil d'altération latéritique et cette cuirasse date probablement lui aussi de 25 Ma, et il est possible de proposer à titre d'hypothèse un âge similaire ou à peine plus jeune pour le minerai saprolitique de Tiébaghi. Au Sud, **à Goro les âges obtenus entre 0-5 et 25 Ma impliquent un continuum de genèse et développement des profils d'altération** et une histoire plus complexe, probablement moins influencée par le soulèvement de la zone centrale.

Changement de spéciation du Ni le long des profils

Les changements de spéciation de Ni ont été établis dans des profils d'altération complets représentatifs des latérites nickelifères bien drainées des klippes du Nord (sondage Y5 du mont Koniambo) et des pénéplaines du Sud (sondages S4 et S78 du site minier de Goro). Cette étude a fait appel à des outils de spectroscopie du solide, et plus particulièrement à la spectroscopie d'absorption des rayons X sur rayonnement synchrotron qui permet de quantifier la contribution des différentes phases minérales au stockage des éléments étudiés (Ni, Co et Mn, pour ce qui nous concerne) dans divers environnements.

Les résultats obtenus pour **le nickel** montrent que cet élément **est essentiellement porté par les silicates** (olivine) et **phyllosilicates** (serpentine) **dans la roche-mère. Dans les saprolites,**

le nickel est incorporé dans des **phyllosilicates** et dans des **oxydes de Fe** (goethite) dont la proportion relative augmente avec le degré d'altération des matériaux saprolitiques.

L'analyse détaillée des spectres EXAFS¹ montre par ailleurs une distribution différente de Ni dans le réseau cristallin des phyllosilicates de la roche-mère (distribution aléatoire) et dans celui des phyllosilicates de la saprolite (ségrégré). Ce changement de mode de distribution et de concentration de Ni suggère l'existence de deux générations de phyllosilicates. La première, qui se serait formée à plus haute température, serait associée à la serpentinisation de la croûte océanique (contexte anté-obduction). La seconde, qui se serait formée à plus basse température, serait associée à l'altération post-obduction de la nappe ophiolitique. Enfin, les résultats de l'étude de la spéciation de Ni indiquent que c'est essentiellement la goethite qui contribue au stockage de cet élément dans les latérites qui surmontent les saprolites. Toutefois, une quantité non négligeable de Ni (jusqu'à 30% de la fraction totale) peut également être incorporée dans des **oxydes de manganèse** (essentiellement des phyllo-manganates de la famille des asbolanes et des lithiophorites), ces derniers étant observés à différents endroits dans les profils d'altération (essentiellement dans les latérites de transition et les latérites jaunes).

¹ Extended X-Ray Absorption Fine Structure : technique d'analyse de spectrométrie d'absorption des rayons X

II. TYPOLOGIE DES LATERITES

Sur la base des différents critères précédemment décrits, plusieurs profils d'altération-types ont été distingués:

- **les profils développés en contexte de montagne** (klippes de la côte Ouest et partie Nord du Massif du Sud) et ceux développés **en contexte de bassin** (Massif du Sud principalement) ;
- les profils développés sur des **alternances harzburgites/dunités dominantes** et ceux développés sur **une roche mère source d'Al**, pour le moment, uniquement sur le site de Tiébaghi.

Le type A correspond à des profils d'altération complets où tous les horizons sont présents. C'est en particulier le cas des profils rencontrés dans le sud du Massif du Sud mais également localement sur des zones de plateaux en contexte de montagne. Dans ce cas, ces profils sont de dimensions moindres mais montrent des caractéristiques identiques. Dans le cas du site de Goro nous avons introduit une distinction - profil A2 – pour décrire les profils caractérisés par la présence de dépôts fluvio-lacustres au-dessus d'un profil complet de type A1.

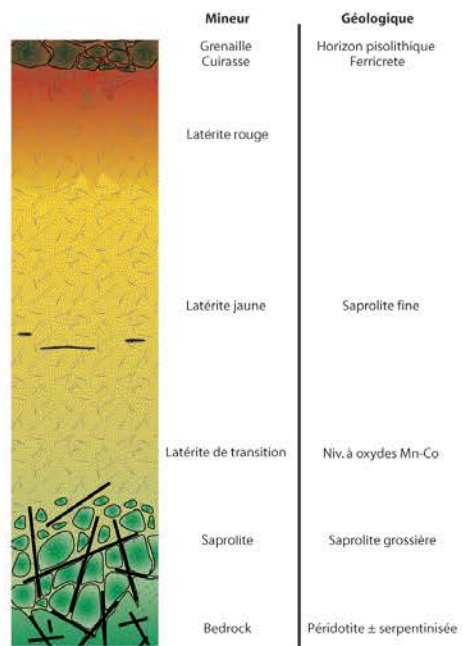
Le type B est le profil d'altération le plus communément rencontré en contexte de montagne. Il se développe sur des péridotites montrant un faible degré de serpentinisation. Les différents horizons d'altération sont généralement présents, mais des variantes sont rencontrées avec notamment l'absence de cuirasse, ou la présence d'une cuirasse démantelée. Ces profils plus ou moins complets sur les zones de plateaux sont généralement associés à des profils tronqués dès que l'on s'en écarte. Une gradation progressive depuis des profils complets jusqu'à des affleurements de saprolite peut être observée.

Le type C a été défini pour les profils se développant sur une roche mère fortement serpentinisée, à proximité de la semelle de serpentinite. Ces profils sont généralement peu puissants et faiblement minéralisés, et ne seront pas conséquents abordés dans la caractérisation fine.

Le type D semble exclusivement rencontré sur le massif de Tiébaghi où la roche mère différente de celle rencontrée sur les autres massifs de péridotite est à l'origine du développement d'horizons d'altération particuliers liés aux fortes teneurs en Al_2O_3 . Du fait de sa particularité, il ne sera pas non plus abordé dans la caractérisation fine.

Les 4 profils d'altération-types sont schématisés dans les figures 3a et 3b ci-après.

A1



A2

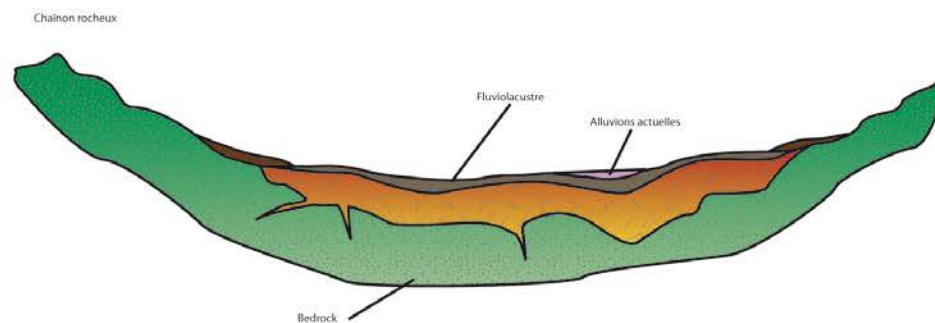
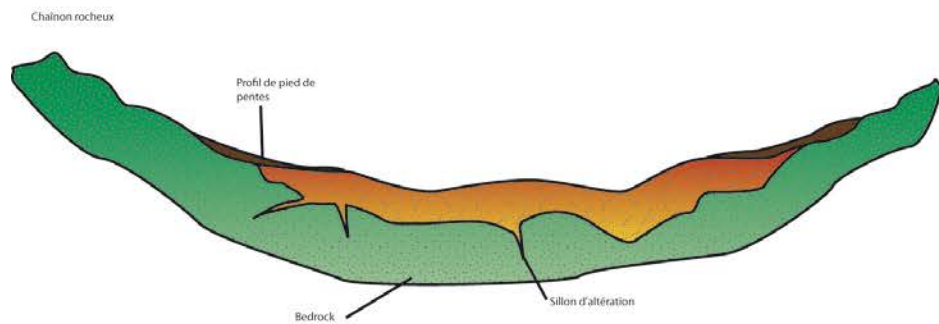
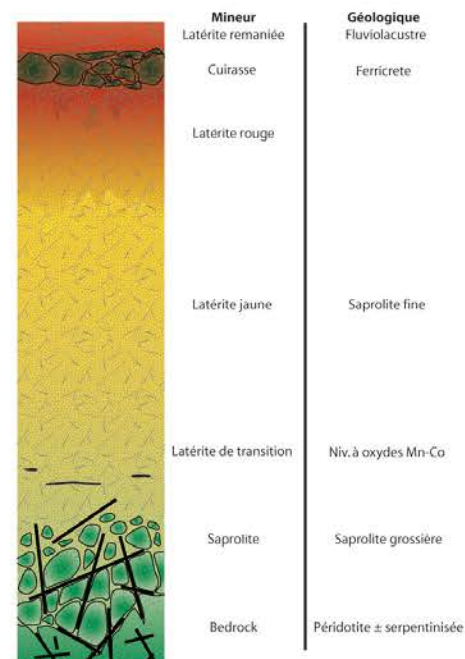
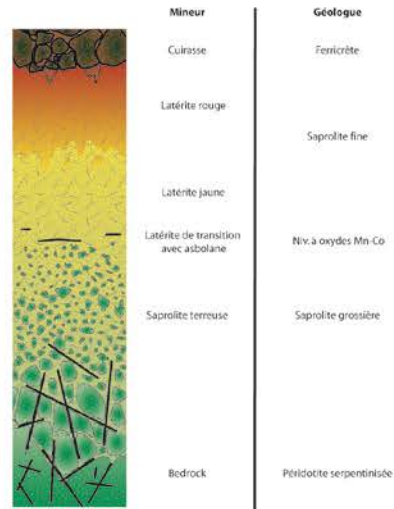


Figure 3a : Profils d'altération types

Synthèse des résultats des projets « Nickal » & « Analyse fine des minerais latéritiques »

B (C sur schéma)



D

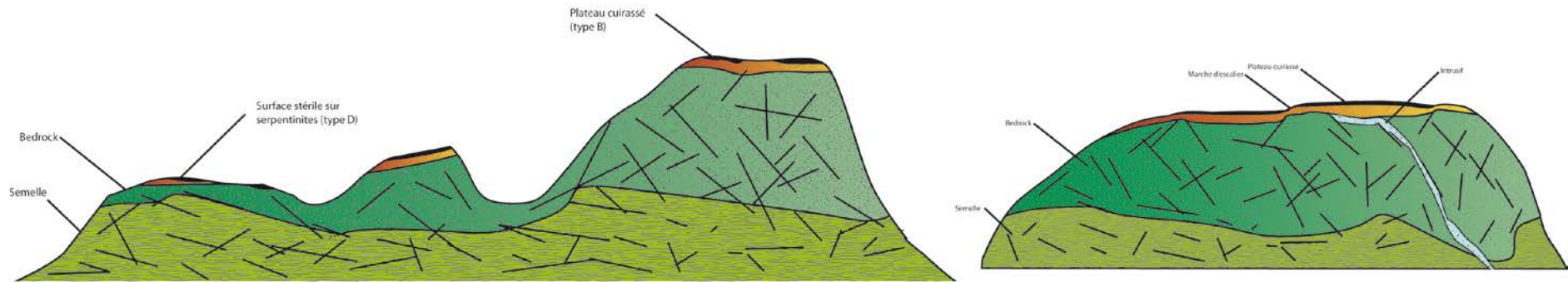
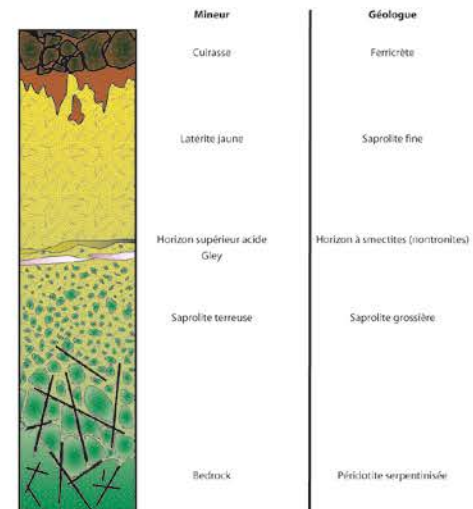


Figure 3b : Profils d'altération types

III. LES MINERALISATIONS

Les amas minéralisés

Les résultats des études de spéciation abordés par spectroscopie d'absorption des rayons X nous ont amenés à nous interroger sur la nature réelle des phyllosilicates et phylломanganates identifiés comme des phases porteuses importantes de Ni et Co et sur les contextes pétrographiques et gîtologiques susceptibles de leur être associés. Ce second volet engagé par l'équipe du projet « Analyse fine de minerais latéritiques » nous a amenés à étudier les amas minéralisés à Ni et Co sur un plus grand nombre de sites miniers pour nous assurer de la représentativité des faciès identifiés à l'échelle des massifs péridotitiques du territoire et pour mieux comprendre leur(s) mode(s) de mise en place.

- *Amas minéralisés Mg/Ni à deweylite et garniériste*

Les amas minéralisés Mg/Ni à deweylite et garniériste correspondent à des phyllosilicates trioctaédriques 1:1 et 2:1 de la famille des serpentines, des talcs et des sépiolites. Ces phyllosilicates constituent **les phases porteuses majoritaires de Ni dans les unités saprolitiques** des massifs ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie. Ils sont présents dans la partie supérieure du réseau de fracturation des péridotites. Ce réseau de fracturation a été particulièrement bien étudié sur différents sites miniers par l'équipe du projet « Nickal » qui a également noté la nature des remplissages (argileux blancs à verts et siliceux). De nombreuses ont signalé **un contrôle tectonique majeure** dans la mise en place de ces amas minéralisés Mg/Ni à deweylite et garniériste.

Les travaux réalisés sur ces amas ont permis de relier leur production à l'altération des épontes serpentineuses du réseau de fracturation, à une remobilisation précoce de Ni (individualisation de plages blanches et vertes dans le réseau de fracturation), ainsi qu'à la production d'une succession de remplissages argileux puis siliceux, générés au cours de différents épisodes tectoniques. Trois séquences de remplissages ont notamment pu être identifiées (Fig. 3): (i) remplissage argileux (blanc dans les plages à deweylite, vert olive dans les plages à garniériste) constitué d'un mélange intime de serpentines cryptocristallines et de talcs cryptocristallins, (ii) remplissage argileux (blanc laiteux dans les plages à deweylite, turquoise dans les plages à garniériste) à nette dominance de talcs cryptocristallins, et (iii) remplissage siliceux de coloration grise, puis brune, composé essentiellement de quartz microcristallins (associés à des goethites dans les remplissages bruns les plus tardifs) et de quartz géodique. Dans certaines veines minéralisées (peu nombreuses en Nouvelle-Calédonie), les talcs microcristallins sont remplacés par des sépiolites.

Cette séquence de minéraux (serpentines, talcs cryptocristallins, sépiolite et quartz) est identique à celle établie récemment par Gali et al. (2012) en utilisant une approche thermodynamique. Elle traduit un accroissement séquentiel de l'activité en silice des différentes solutions d'altération au cours de trois épisodes tectoniques majeurs. Les résultats de l'étude cristallographique et

cristallochimique (DRX², ATD-ATG³, MEB-MET⁴, microsonde électronique) des phases minérales composant ces différents remplissages suggère que les serpentines cryptocristallines sont des résidus d'altération des serpentines cristallines observées à la bordure des veines minéralisées et que ces serpentines cryptocristallines sont elles-mêmes graduellement remplacées par des talcs cryptocristallins. Ces résultats indiquent par ailleurs que ce sont les talcs cryptocristallins qui sont les principaux porteurs de Ni (en particulier dans les plages à garniérite). Les résultats des analyses isotopiques suggèrent, quant à eux, une origine météorique pour les fluides associés à ces remplissages en indiquant une baisse progressive de la température des solutions d'altération depuis environ 160°C pour les serpentines cristallines des épontes à la température ambiante pour la sépiolite ou le quartz.

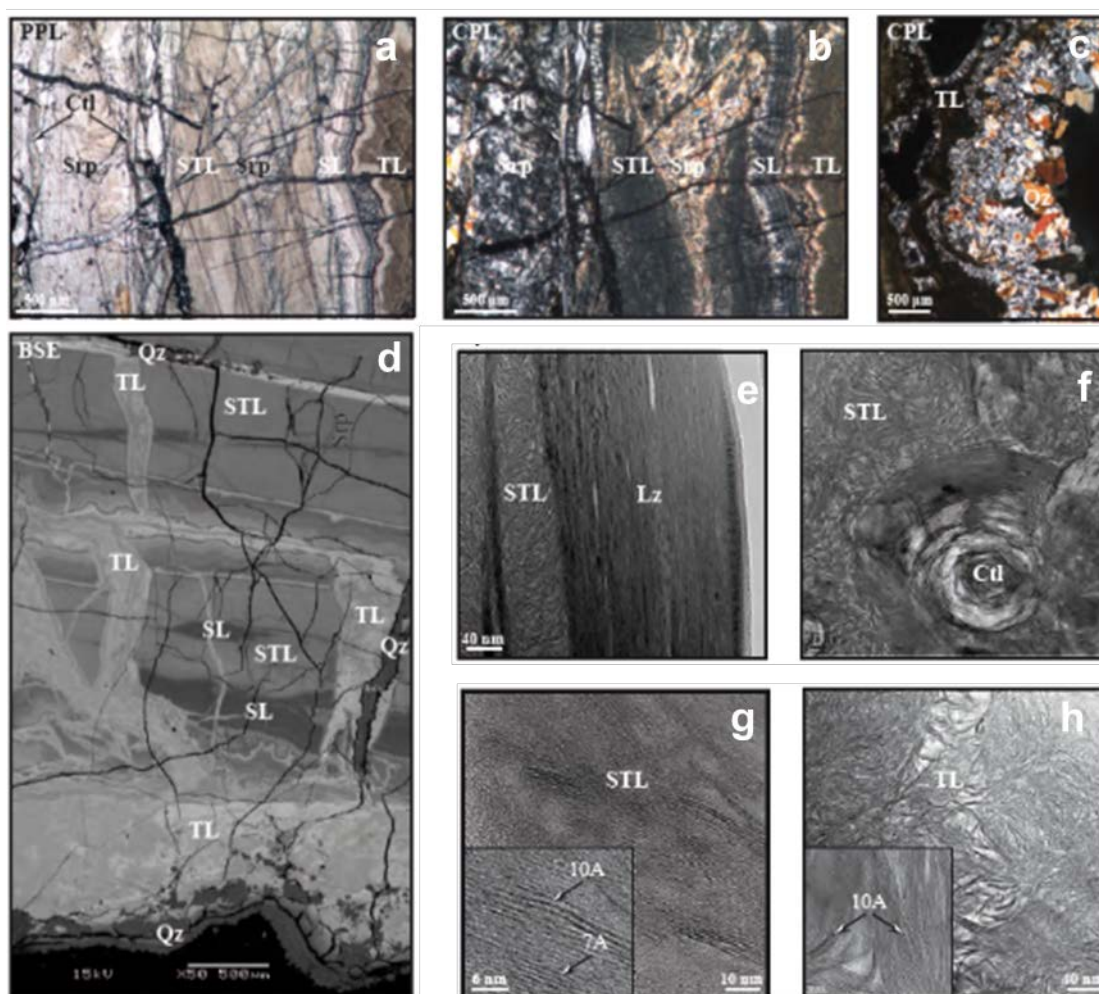


Figure 4 : Aspect microscopique des amas silicatés Mg/Ni (phyllosilicates trioctaédriques) à deweylite (Dew) et garniérite (Gar) (Klippe de Poro, carrière Stanislas): vue optique d'une veine minéralisée en (a) lumière normale (PPL) et (b) lumière polarisée (CPL) illustrant la baisse d'anisotropie (décroissance de la taille des particules) depuis la bordure serpentinisée noire (gauche: Srp) vers le remplissage vert olive (milieu: STL) puis turquoise (droit: TL), noter la présence (i) de chrysotile (Ctl) dans deux seal-cracks, (ii) d'une bande étirée de serpentine résiduelle (Srp) dans STL et (iii) d'une zone rubanée de 200µm

² Diffractométrie de rayons X

³ Analyse thermo-différentielle - analyse thermogravimétrique

⁴ Microscope électronique à balayage – microscope électronique à transmission

d'épaisseur (SL) à la transition entre STL et TL, (c) vue optique (CPL) sur le remplissage siliceux ultime à quartz géodique, les quartz pointent vers la cavité centrale de la veine minéralisée, (d) image électronique (BSE) montrant la transition cataclastique entre les remplissages vert olive (STL) et turquoise (TL) (zones claires riches en Ni, sombres pauvres en Ni), les remplissages ultimes siliceux composés de quartz (Qz) s'observent dans les fissures radiales et dans les espaces poreux centraux des veines minéralisées, (e) éléments résiduels de plaquette de lizardite et (f) de fibre de chrysotile dans matrice cryptocristalline STL, (noter la desquamation des grosses particules de lizardite et chrysotile en petites plaquettes incurvées), (g) vue détaillée (TEM) sur le remplissage vert olive composé à la fois (encadré) de phyllosilicates à 7 et 10Å, (h) vue détaillée (TEM) sur le remplissage turquoise montrant (encadré) la nette prédominance de feuillets flexueux de phyllosilicates à 10Å.

Les amas minéralisés Mg/Ni à deweylite et garniérite sont de ce fait précoces puisqu'ils sont attribués au refroidissement de la masse ophiolitique et à des épisodes tectoniques post-obduction. Ils sont plus ou moins abondants d'un massif à l'autre. Particulièrement bien préservés dans les failles du saprock (transition entre roche-mère et saprolite), ils restent dominants dans le réseau majeur de fracturation des saprolites et se retrouvent sous forme de résidus dans les latérites de transition sus-jacentes. Lorsque les plages à garniérites y sont abondantes, ces amas peuvent de ce fait apporter une contribution importante à la minéralisation des latérites de transition localisées à la base des latérites et à l'aplomb des zones de fracturation.

- *Amas minéralisés Ni/Co à oxydes de Mn*

Les amas minéralisés Ni/Co, brun foncé à noirs, sont attribués à des oxydes de Mn de la famille des **phylломanganates** (principalement lithiophorite, asbolane et birnessite). Ces amas s'observent essentiellement dans les latérites de transition, mais également dans les latérites jaunes sus-jacentes. Par rapport aux phyllosilicates des amas minéralisés Mg/Ni à deweylite et garniérite, ils peuvent de ce fait se retrouver plus haut dans les profils d'altération (en l'occurrence dans les latérites jaunes alors que les résidus de phyllosilicates ont disparus).

Deux générations de phylломanganates ont pu être identifiées dans les sites étudiés. La première est observée dans des fractures, parfois entrecroisées (box-work). Ces phylломanganates présentent un faciès rubané bien affirmé, attribué à une séquence minérale bien précise qui se répète de la périphérie vers la partie centrale des fractures (jusqu'à quatre zones rubanées) (Fig. 4). Cette séquence minérale correspond aux zonations à dominance de birnessite, puis de lithiophorite et enfin d'asbolane. A fort grossissement, les asbolanes s'observent sous forme de fines cloisons (2µm) entrecroisées (micro box-work) présentant de nettes excroissances vers la partie centrale du vide des fractures (cloisons plus lâches fibroradiées). La composition chimique de ces phylломanganates (avec en particulier la présence de K dans les phases à birnessite alors que l'encaissant latéritique est connu pour en être particulièrement dépourvu) et leur habitus (zonations de phases riches en Al, K puis Ni, distribution fibro-radiée ou en box-works des phases riches en Ni), suggèrent une origine hydrothermale pour cette première génération d'oxydes de Mn. La deuxième génération de phylломanganates correspond à des phases cryptocristallines intimement associées aux oxydes de Fe. Ces phylломanganates résultent très vraisemblablement d'une altération supergène des faciès précédents à lithiophorite, birnessite et asbolane, d'une redistribution des éléments dissous et d'une recristallisation d'oxydes de Mn secondaires lors des processus de latérisation.

L'équipe du projet « Nickal » a par ailleurs montré que les passées de gabbros et wherlites (donc riches en aluminium) des latérites de Poro et Goro sont remplacées par des oxydes d'aluminium (gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$ principalement). Elles constituent des barrières chimiques autour desquelles des oxydes de manganèse, dont la lithiophorite souvent riche en Co et en Ni, viennent précipiter (Tableau 1).

Comme pour les phyllosilicates des amas minéralisés Mg/Ni à deweylite et garniérite, les différents faciès à oxydes de Mn sont particulièrement abondants dans les latérites de transition et à l'aplomb des zones intensément fracturées et minéralisées des péridotites.

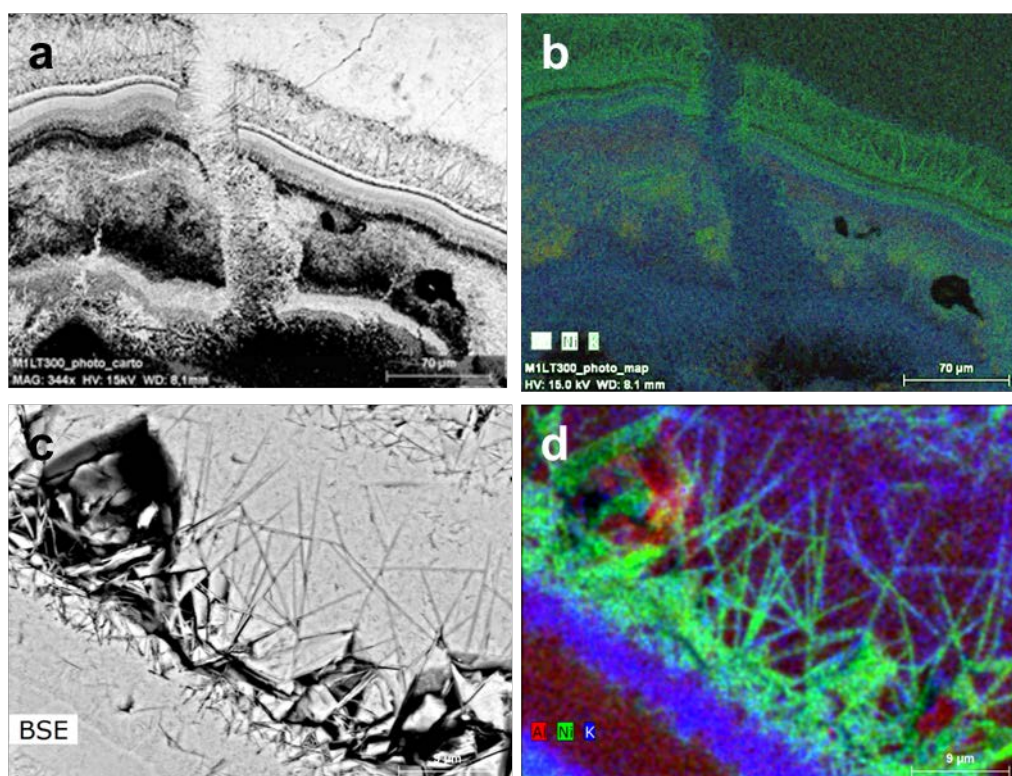


Figure 4 : Vue générale sur les rubanements des veines d'oxydes de Mn (a) en électrons rétrodiffusés, (b) carte composite correspondante d'éléments (Al en rouge, Ni en vert et K en bleu), ces clichés montrent l'alternance de zones riches en Al (pôle à linphorite) puis en K (pôle à birnessite) et enfin en Ni (pôle à asbolane, noter l'aspect fibro radié de ce dernier pôle), fracturation centrale avec remplissage riche en K (birnessite), (c) vue rapprochée sur ces rubanements et sur les cloisons entrecroisées (mini box-work) d'asbolane et (d) carte composite d'éléments (Al, Ni et K) correspondante (noter que les extrémités des cloisons d'asbolane deviennent plus riches en K).

	PORO – LA FRANCAISE							GORO – EXERCICE MINIER				
No	8	6	7	14	11	12	10	40	43	41	42	45
SiO ₂	0,17	0,30	0,14	0,26	0,17	0,31	0,22	0,10	0,04	0,14	0,29	0,04
FeO	1,37	1,21	0,54	1,15	0,43	1,74	1,23	0,00	0,00	0,00	1,61	0,00
Al ₂ O ₃	17,76	21,48	21,57	20,44	21,42	14,77	16,56	23,19	22,35	22,30	23,10	24,52
MnO	34,01	34,73	36,45	35,65	38,27	36,45	37,92	33,68	35,95	36,04	33,72	34,38
ZnO	0,15	0,26	0,32	0,20	0,25	0,37	0,44	0,17	ns	0,18	0,23	0,00
NiO	5,82	3,19	4,22	4,90	4,06	11,56	10,68	1,01	0,64	0,83	1,08	1,01
MgO	0,25	0,13	0,13	0,16	0,16	0,54	0,66	0,12	0,04	0,11	0,10	0,06

CoO	9,93	9,25	9,00	8,92	7,22	6,46	5,60	10,17	10,01	9,18	8,38	7,82
Total	69,48	70,56	72,36	71,69	71,98	72,21	73,29	68,43	69,03	68,78	68,53	67,84

Tableau 1 : Analyses à la microsonde électronique des lithiophorites de Poro et de Goro.

Minerais oxydés des latérites

- *Mise en place des principales unités latéritiques*

La mise en place des minerais oxydés est attribuée à l'altération supergène (latéritisation en milieu tropical). Le calcul des fonctions de transferts (permettant d'estimer les pertes et gains relatifs en éléments) sur des profils d'altération (sondages de miniers) montre que l'exportation massive de Mg et Si lors des processus secondaires de latéritisation est couplée à une accumulation résiduelle d'éléments traces métalliques (principalement Cr, Al, Ni, Mn et Co). Ces pertes considérables de matières ont été reliées, d'une part, à des changements importants de spéciation des éléments métalliques, et d'autre part, à des transformations texturales et structurales majeures associées à la mise en place des principaux niveaux latéritiques.

L'altération préférentielle des silicates (olivine et pyroxène), puis des phyllosilicates (serpentes et phyllosilicates Mg/Ni des amas minéralisés), et leur remplacement par des oxydes de fer mal cristallisés (essentiellement goethite nickélifère, la production d'argiles smectitiques étant limitée dans les profils bien drainés étudiés), s'amorcent dans les niveaux saprolitiques et s'amplifient dans les latérites de transition pour atteindre leur maximum dans les latérites jaune, puis rouge, qui les surmontent. La disparition progressive du réseau de serpentinitisation (plus ou moins minéralisé) devient importante dans les latérites de transition. Le maintien des structures de la roche dans des matériaux qui deviennent extrêmement poreux ne peut plus être assuré et ces structures s'effondrent. Ces systèmes karstiques donnent ainsi lieu à des phénomènes de tassement et de glissement de terrain, ainsi qu'à des remplissages de galeries qui peuvent également être associés au comportement thixotropique particulier de ces matériaux (aptitude à se liquéfier à forte hydratation). Ces phénomènes, bien identifiés sur le terrain, nous ont permis de reconnaître différents faciès d'altération pour les niveaux latéritiques incluant, soit la préservation des textures et structures de la roche dans la zone de transition entre saprolite et latérite (e.g. minerais bouchons et quadrillés), soit la disparition progressive de ces textures et structures vers la surface (latérites jaune, rouge puis indurée), puis l'apparition de structures sédimentaires associées au transport particulaire.

- *Facteurs de dispersion des porteurs de Ni et Co*

Les processus de latéritisation ont également été reliés à des mécanismes de dissolution et de recristallisation des oxydes de fer et de manganèse et à l'expulsion graduelle du nickel et du cobalt de la structure de ces minéraux. Ces mécanismes contribuent de ce fait à l'appauvrissement progressif en éléments métalliques d'intérêt économique (essentiellement Ni et Co) vers la surface des unités latéritiques reconnues dans le cadre des deux projets. Ces mécanismes s'amorcent à différentes profondeurs suivant la nature des oxydes considérés.

Ainsi, ils débutent à la base des latérites jaunes pour **les oxy-hydroxydes de fer** (goethite), puis s'amplifient vers la surface dans les latérites rouges et les niveaux supérieurs indurés à pisolites et à cuirasse. Ils sont de ce fait associés aux processus de tassement et d'induration des matériaux. Le calcul des fonctions de transfert montre que la dissolution des oxydes de manganèse n'est significative que dans la partie supérieure des latérites jaunes et les latérites rouges et indurées sus-jacentes. Cette dissolution nourrit plus en profondeur de nouvelles générations d'oxydes de manganèse.

Si le vieillissement des sols est proposé pour la dissolution et de recristallisation des oxydes de fer (avec expulsion de Ni de leur structure), des processus redox seraient plus à l'origine de l'altération des oxydes de manganèse et d'une redistribution des éléments métalliques ainsi libérés dans les couvertures latéritiques étudiées.

- *Variabilité des teneurs en Ni et Co des latérites jaunes (sondage miniers)*

Il est remarquable de constater que malgré des différences notoires en terme de nature de la roche mère, les teneurs en Ni et Co des latérites jaunes sont globalement très comparables d'un site à l'autre, autour de 1,3 % Ni et 0,1-0,2% Co (Tableau 2). Cette apparente homogénéité masque en réalité une variabilité des teneurs en Ni et Co d'un sondage à l'autre, même situés à une dizaine de mètres de distance (Fig. 5). Les enrichissements en Ni, Mg, Si observés à la base de l'horizon de latérite jaune et lié à la persistance de silicates nickélifères non entièrement altérés, suggèrent que l'altération ne parvient pas à homogénéiser les teneurs en Ni et Co dans l'horizon de latérite jaune contrairement à ce qui est observé dans les latérites rouges sus-jacentes. En résumé, la variabilité des teneurs en Ni et Co au sein d'un sondage et entre sondages est un héritage et un reflet de la variabilité des teneurs en ces éléments dans les saprolites.

Site	N	Ni	Co	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO
MASSIF DU SUD									
Goro – Exercice Minier	13847	1,30	0,11	70,93	2,56	0,50	5,85	3,69	1,03
Goro – KO4	22	2,19	0,12	69,9	6,85	1,55	2,55	3,03	1,00
Prony – Bossuet	11	1,34	0,19	67,43	3,91	1,10	5,58	3,83	2,62
Prony – HF7	27	1,17	0,13	72,1	2,64	1,12	4,92	3,73	1,24
Prony – Marbeau	51	1,14	0,13	69,42	4,21	1,15	4,85	3,82	1,21
Prony - Penamax	9	2,24	0,20	66,06	9,43	2,01	3,67	3,31	0,99
KLIPPES DE LA COTE OUEST									
KNS – Trazy	1710	1,30	0,19	68,43	6,01	1,26	5,29		
KNS – Manguen	513	1,62	0,24	60,98	12,02	3,42	5,00		
KNS - Centre	8273	1,33	0,21	63,38	11,66	1,74	4,50		
Tiébaghi - Vivaneau	5109	1,31	0,09	61,92	7,75	1,73	10,35	3,07	

Tableau 2 : Compositions géochimiques moyennes des échantillons de latérite jaune des différents chantiers. N : nombre d'échantillons.

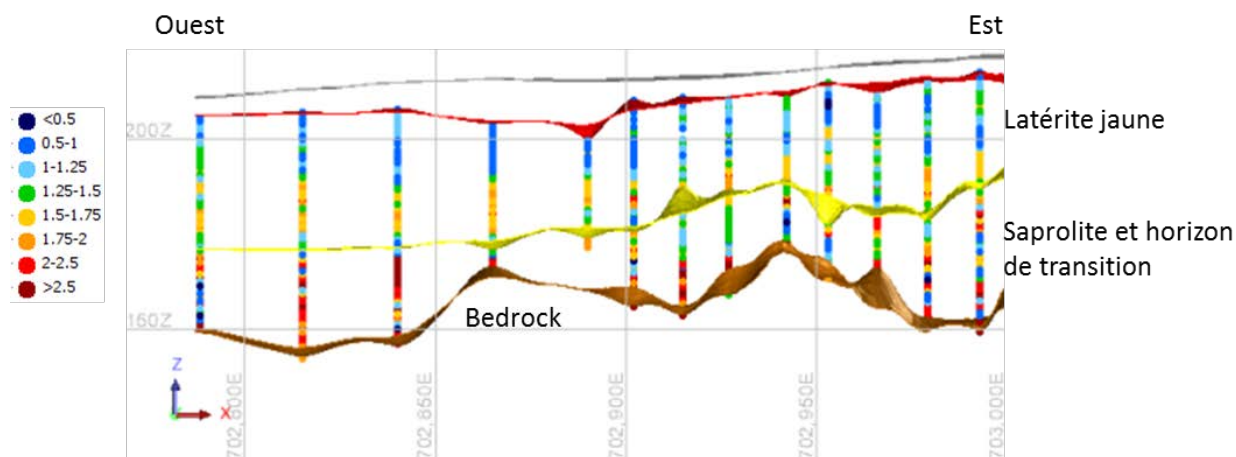


Figure 5 : Exemple de variabilité des teneurs en Ni dans les latérites jaunes et dans la saprolite sur une coupe Ouest –Est du chantier Exercice Minier (Goro).

Les niveaux de gabbros et de wehrlites à plagioclases sont remplacés par des oxydes d'aluminium peu mobiles (principalement gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$) et d'oxydes de fer qui sont, quant à eux, à l'origine des fortes variations des teneurs en Al_2O_3 des latérites. Le traitement des données géochimiques de sondage de différents sites miniers met en évidence les différences de teneur en Al_2O_3 des latérites du chantier « Exercice Minier » à Goro (Massif du Sud) et du chantier Vivaneau à Tiébaghi, où les teneurs en Al_2O_3 sont deux fois plus élevées qu'à Goro (Tableau 2). L'aluminium permet également la cristallisation, dans les profils d'altération, de phases argileuses (smectites dont la nontronite et des beidellites alumineuses) susceptibles de piéger le nickel.

IV. PROPOSITION DE MODELE DE MISE EN PLACE DES LATÉRITES ET MINÉRALISATIONS Ni-Co

L'ensemble des résultats obtenus suggère que l'altération des massifs péridotitiques de Nouvelle-Calédonie s'est faite en deux grandes étapes :

La première étape s'est d'abord focalisée sur le réseau majeur de serpentinisation. L'altération précoce de ce réseau de serpentinisation lors d'épisodes tectoniques post-obduction est à l'origine de la mise en place des amas minéralisés Mg/Ni à deweylite et garniérite. La production en contexte hydrothermale d'une première génération de phyllomanganates pourrait également être rattachée à ces épisodes tectoniques post-obduction.

Dans une seconde étape, l'altération s'est focalisée sur l'encaissant péridotitique et elle a abouti à la production d'oxydes de fer (la production de minéraux argileux smectitiques étant limitée à des contextes mal drainés peu répandus sur le territoire) au cours d'une latéritisation massive de la masse ophiolitique qui s'est propagée dans cette dernière à la faveur de zones intensément fracturées et préalablement minéralisées (Fig. 6).

Selon cette évolution en deux grandes étapes suggère, ce sont donc les minéralisations silicatées Mg/Ni (principalement le pôle garniéritique) qui auraient «nourri» les latérites et non l'inverse comme cela est souvent suggéré dans la littérature (e.g. Brand *et al.*, 1998; Gleeson *et al.*, 2004; Butt & Cluzel, 2013). Dans les latérites, la richesse des minerais oxydés à Ni dépend étroitement de l'abondance des phases résiduelles issues de ces minéralisations primaires, mais également, et plus particulièrement, de l'abondance des phases nickélifères à garniérite (les zones à deweylite ne contribuant pas à cet enrichissement). Ce point a été en particulier constaté dans les latérites de transition des massifs péridotitiques de la région de Poro (jusqu'à 2,2% pds de Ni) qui hébergent les fameux minerais quadrillés. Par des processus de dissolution et de recristallisation opérés sur des périodes géologiques, cette latéritisation est propice à la dispersion des éléments métalliques et plus particulièrement à l'expulsion du nickel de la structure de la goethite et la production de formations indurées (pisolithes et cuirasses).

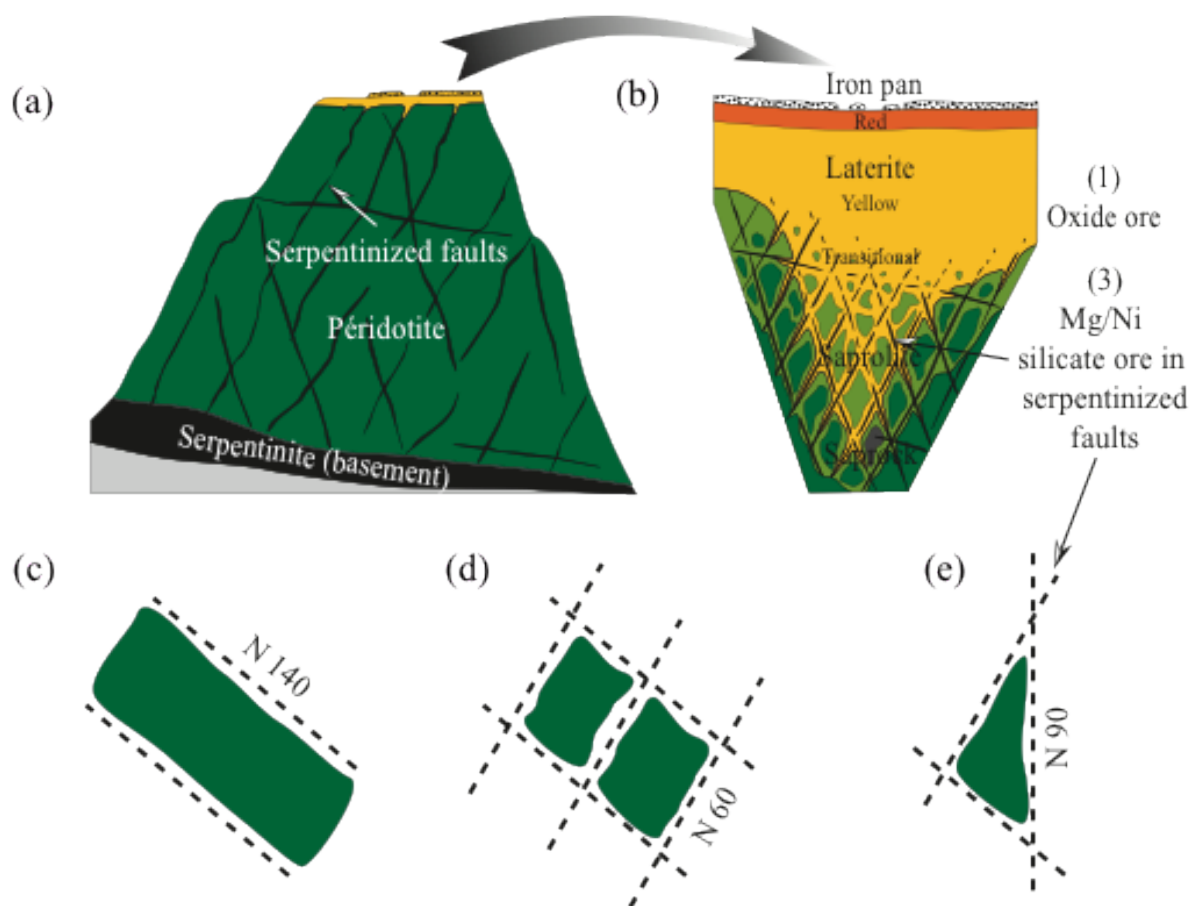


Figure 6 : Structuration des klippes du Centre et du Nord (exemple Mt Koniambo) : (a) coupe du massif montrant la semelle intensément serpentinisée, le fracturation et serpentinitisation de l'ensemble du massif et les latérites-Ni sur le plateau, (b) représentation simplifiée des latérites avec les amas minéralisés à Ni dans le réseau de fracturation et serpentinitisation, (c) (d) et (e) distribution des minéralisations à Ni (en pointillé) en fonction du type de réseau de fracturation rencontré.

Localisation des sites



BIBLIOGRAPHIE

- Brand, N. W., C. R. M. Butt, et M. Elias (1998), Nickel laterites: classification and features, *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(4), 81-88.
- Butt, C. R., et D. Cluzel (2013), Nickel laterite ore deposits: Weathered serpentinites, *Elements*, 9(2), 123-128.
- Cluzel, D., J. C. Aitchison, et C. Picard (2001), Tectonic accretion and underplating of mafic terranes in the Late Eocene intraoceanic fore-arc of New Caledonia (Southwest Pacific): geodynamic implications, *Tectonophysics*, 340(1-2), 23-59.
- Elias, M. (2001), Global Lateritic Nickel Resources, paper presented at Presentation at the New Caledonian Nickel Conference.
- Freyssinet, P., C. Butt, R. Morris, et P. Piantone (2005), Ore-forming processes related to lateritic weathering, *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 1, 681-722.
- Galí, S., J. Soler, J. Proenza, J. Lewis, J. Cama, et E. Tauler (2012), Ni Enrichment and stability of Al-free garnierite solid-solutions: a thermodynamic approach, *Clays and Clay minerals*, 60(2), 121-135.
- Gaudin, A., O. Grauby, Y. Noack, A. Decarreau, et S. Petit (2004), Accurate crystal chemistry of ferric smectites from the lateritic nickel ore of Murrin Murrin (Western Australia). I. XRD and multi-scale chemical approaches, *Clay Minerals*, 39(3), 301-315.
- Gleeson, S., R. Herrington, J. Durango, C. Velásquez, et G. Koll (2004), The mineralogy and geochemistry of the Cerro Matoso SA Ni laterite deposit, Montelíbano, Colombia, *Economic Geology*, 99(6), 1197-1213.
- Lewis, J. F., G. Draper, J. A. Proenza Fernández, J. Espaillet, et J. Jiménez (2006), Ophiolite-related ultramafic rocks (Serpentinites) in the Caribbean region: a review of their occurrence, composition, origin, emplacements and Ni-Laterite soil formation, *Geologica Acta*, 2006, vol. 4, núm. 1-2, p. 237-263.
- Tauler, E., J. A. Proenza, S. Galí, J. F. Lewis, M. Labrador, E. García-Romero, M. Suarez, F. Longo, et G. Bloise (2009), Ni-sepiolite-falcondoite in garnierite mineralization from the Falcondo Ni-laterite deposit, Dominican Republic, *Clay Minerals*, 44(4), 435-454.
- Villanova-de-Benavent, C., J. A. Proenza, S. Galí, A. García-Casco, E. Tauler, J. F. Lewis, et F. Longo (2014), Garnierites and garnierites: textures, mineralogy and geochemistry of garnierites in the Falcondo Ni-laterite deposit, Dominican Republic, *Ore Geology Reviews*, 58, 91-109.

