



HAL
open science

**Typologie des profils, caractérisation des latérites et
identification des porteurs de nickel et cobalt : synthèse.
Les gisements de nickel latéritique de
Nouvelle-Calédonie, volume I**

Emmanuel Fritsch, Laurent Bailly

► **To cite this version:**

Emmanuel Fritsch, Laurent Bailly. Typologie des profils, caractérisation des latérites et identification des porteurs de nickel et cobalt : synthèse. Les gisements de nickel latéritique de Nouvelle-Calédonie, volume I. [Rapport de recherche] Programmes Nickal et Analyse fine des minerais. Tome Nickel et Technologie, CNRT Nickel et son environnement. 2016, 30 p. ird-02160820

HAL Id: ird-02160820

<https://ird.hal.science/ird-02160820>

Submitted on 20 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

CNRT "Nickel et son environnement"

Rapport scientifique

Edition 2016

LES GISEMENTS DE NICKEL LATERITIQUES DE NOUVELLE-CALEDONIE

Synthèse



Tome Nickel et Technologie

Rapport Scientifique 2014

LES GISEMENTS DE NICKEL LATÉRITIQUE
DE NOUVELLE-CALÉDONIE

VOLUME I : SYNTHÈSE



*Étude réalisée dans le cadre des programmes de recherche financés par
le CNRT « Nickel & son environnement »*

CNRT
NICKEL
& son environnement

Juillet 2014



LES GISEMENTS DE NICKEL LATÉRIQUE DE NOUVELLE-CALÉDONIE

**TYPOLOGIE DES PROFILS, CARACTÉRISATION DES LATÉRITES ET
IDENTIFICATION DES PORTEURS DE NICKEL ET COBALT**

SYNTHESE

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 LATÉRIQUES** » - Facteurs de minéralisation Ni/Co des latérites de Nouvelle-Calédonie

Synthèse rédigée par Emmanuel FRITSCH (IRD) et Laurent BAILLY (BRGM)

dans le cadre du Symposium

« LATÉRITES ET GISEMENTS SUPERGÈNES EN NOUVELLE-CALÉDONIE »,

Nouméa, 24 et 25 Juillet 2014

PRÉAMBULE

Le programme « **Les gisements de nickel latéritique de Nouvelle-Calédonie - Typologie des profils, caractérisation des latérites et identification des porteurs de Ni et Co** » a fait l'objet d'une restitution publique en Juillet 2014, lors d'un symposium organisé par le CNRT « Nickel et son environnement »¹.

Parallèlement à cette restitution, trois rapports ont été produits, regroupant l'ensemble des contributions des différents partenaires de ce programme majeur de l'axe Nickel et Technologie du CNRT. Ces rapports scientifiques sont complétés par un ouvrage à visée pédagogique conçu sous la forme d'un atlas. Ainsi le programme comporte 5 tomes déclinés comme suit :

- **Tome I – Synthèse** des principaux résultats du programme
- **Tome II – Rapport scientifique** du projet « **NICKAL – Typologie des minerais latéritiques de Nouvelle-Calédonie et facteurs de concentration de Co et Ni** »
- **Tome III – Rapport scientifique** du projet « **ANALYSE FINE DES MINERAIS LATÉRITIQUES – Facteurs de minéralisation Ni/Co des latérites de Nouvelle-Calédonie** »
- **Tome IV – Rapport scientifique** du projet « **LES OXYDES DE MANGANÈSE ASSOCIÉS AUX LATÉRITES DE TRANSITION** »
- **Tome V – « ATLAS DES LATÉRITES NICKÉLIFÈRES DE NOUVELLE-CALÉDONIE »**

L'objectif du présent document est de présenter au lecteur les résultats essentiels que l'on peut dégager des efforts de recherche réalisés dans le cadre de ce vaste programme « latérites » du CNRT, les avancées obtenues, les difficultés rencontrées et les actions restant à produire pour conforter les acquis.

Le lecteur pourra utilement se référer aux rapports scientifiques pour obtenir les éléments d'information dont il pourrait avoir besoin pour compléter ceux présentés dans cette synthèse sous un format volontairement réduit.

¹ *Symposium « Latérites et gisements supergènes de Nouvelle-Calédonie », organisé à Nouméa les 24 et 25 Juillet 2014 par le CNRT « Nickel et son environnement » en partenariat avec l'IRD et l'UNC et avec le soutien du Gouvernement de Nouvelle-Calédonie et de Glencore.*

SOMMAIRE

PRÉAMBULE	4
AVANT PROPOS - LES GRANDS TYPES DE MINERAIS NICKELIFERES	7
2. INTRODUCTION	9
3. LES FACTEURS	10
4. TYPOLOGIE DES LATÉRITES	15
5. LES MINÉRALISATIONS	18
5.1. LES AMAS MINÉRALISÉS	18
5.2. MINÉRAIS OXYDÉS DES LATÉRITES	23
6. PROPOSITION DE MODELE DE MISE EN PLACE DES LATÉRITES ET MINÉRALISATIONS NI-CO	27
7. BIBLIOGRAPHIE	30

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Massifs péridotitiques de Nouvelle-Calédonie et principaux types de gisements	7
Figure 2 : Microphotographie en lumière transmise de quelques-unes des principales roches primaires rencontrées.....	10
<i>Figure 3</i> : Profils d'altération types.....	16
Figure 4 : Profils d'altération types (<i>suite</i>).....	17
Figure 5 : Aspect microscopique des amas silicatés Mg/Ni (phyllosilicates trioctaédriques) à deweylite (Dew) et garniérite (Gar) (Klippe de Poro, carrière Stanislas).	20
Figure 6 : Cristalochimie des amas minéralisés Ni/Co à oxydes de manganèse (Klippe de Koniambo).....	21
Figure 7 : Schémas illustrant les processus cristalochimiques de distribution du nickel et du cobalt au cours de la différenciation es profils d'altération sur péridotites.....	24
Figure 8 : 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).	26
Figure 9 : Structuration des klippes du Centre et du Nord (exemple Mt Koniambo)	28
Figure 10 : Localisation des sites.....	29

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Analyses à la microsonde électronique des lithiophorites de Poro et de Goro.....	22
Tableau 2 : Compositions géochimiques moyennes des échantillons de latérite jaune des différents chantiers. N : nombre d'échantillons.	25

AVANT PROPOS - LES GRANDS TYPES DE MINERAIS NICKELIFERES

La Nouvelle-Calédonie abrite **le troisième plus grand gisement nickélifère du monde** qui couvre près d'un tiers de la superficie de la grande terre (Fig. 1). Fréquemment qualifiés de **latérites nickélifères** (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 nickélifères** du monde (Elias, 2001).

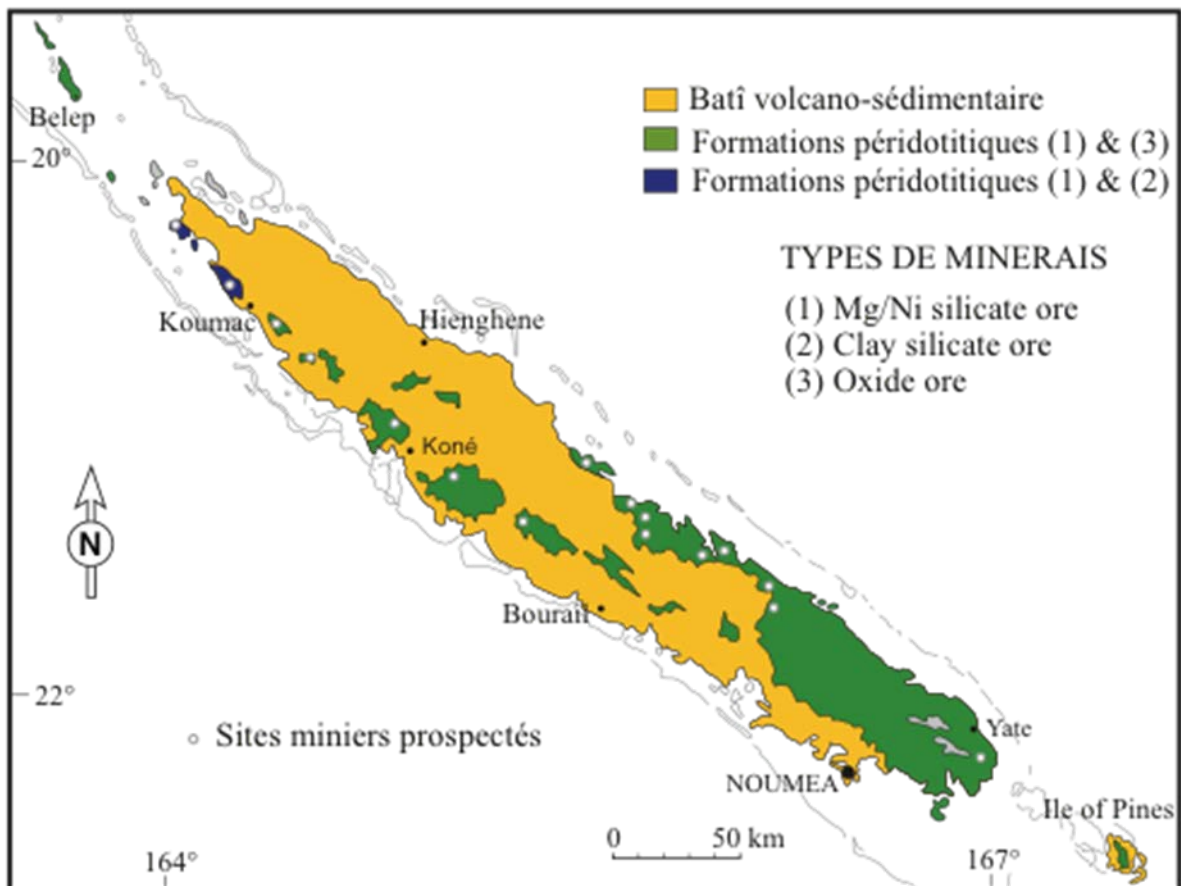


Figure 1 : Massifs péridotitiques de Nouvelle-Calédonie et principaux types de gisements

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 nickélifères** (Fig. 1) sont communément admises dans la littérature (Brand *et al.*, 1998; Gleeson *et al.*, 2004; Freyssinet *et al.*, 2005):

1. Les **minerais silicatés**, hydratés Mg/Ni (*hydrous Mg/Ni silicate ores*) également qualifiés par les miniers 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).
2. 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.
3. 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 (garniériste) 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 garniériste 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.

2. INTRODUCTION

Le présent document synthétise les résultats acquis dans le cadre du programme de recherche financé 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 résultats ont été restitués.

Les principaux aspects abordés dans cette synthèse 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**.

3. LES FACTEURS

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

● 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.

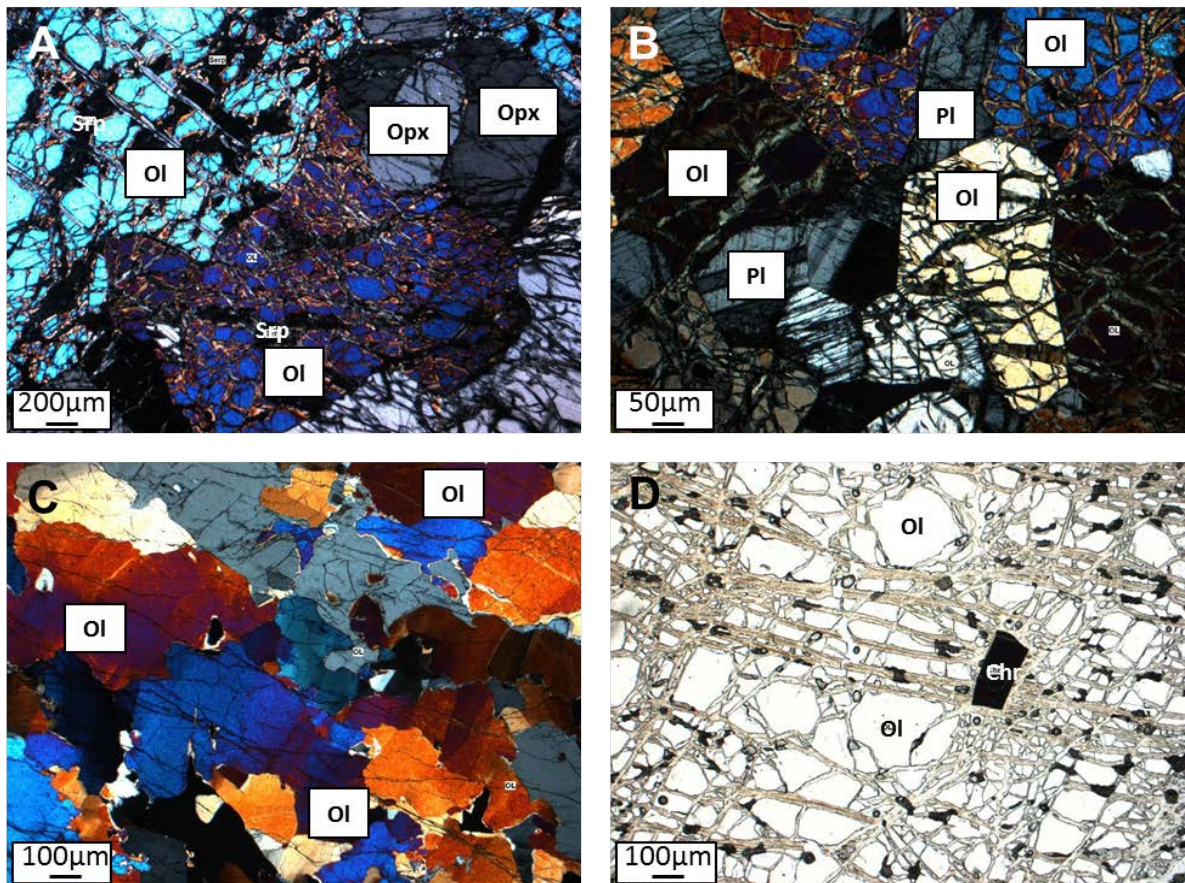


Figure 2 : Microphotographie en lumière transmise de quelques-unes des principales roches primaires rencontrées

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 des projets 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'altération. 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 développe l'altération, également bordés de hauts reliefs, sont généralement de grande dimension 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 réduite 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 drainage 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 :

- 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 ;
- **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 grande dimension.

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 de chaque type de chantier, **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 en particulier des latérites. 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 altérites 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 recéler 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. Ils indiquent eux-aussi une altération météorique polyphasée, ayant conduit aux minerais de nickel de Nouvelle-Calédonie, commencée 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 révèle 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 nickel et du cobalt le long des profils d'altération**

Les changements de spéciation du nickel et du cobalt 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**, cet élément 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. Dans ces niveaux inférieurs des profils d'altération, l'analyse détaillée des spectres EXAFS² montre par ailleurs une distribution différente du nickel 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 du nickel 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 du nickel le long des profils

² *Extended X-Ray Absorption Fine Structure : technique d'analyse de spectroscopie d'absorption des rayons X*

d'altération indiquent que c'est essentiellement la goethite qui piège cet élément dans les latérites qui surmontent les saprolites. Toutefois, une quantité non négligeable de nickel (jusqu'à 30% de la fraction totale) peut également être incorporée dans des **oxydes de manganèse** (essentiellement des phyllo-manganates de la famille de l'asbolane et de la lithiophorite), ces derniers étant observés à différents niveaux dans les profils d'altération (essentiellement dans les latérites de transition et les latérites jaunes).

Les résultats obtenus pour le **cobalt** indiquent une évolution différente de la **spéciation** le long des profils d'altération. En effet, le cobalt est essentiellement porté par les **silicates** (olivine) et **phyllosilicates** (serpentine) dans la **roche-mère** et dans les premiers niveaux de la **saprolite**. Au cours de la maturation des profils d'altération, les **oxydes de manganèse** (et plus modestement les oxydes de fer) se substituent cependant progressivement à ces phases silicatées pour devenir les principales phases porteuses du cobalt dans la partie supérieure de la **saprolite**. Cette tendance se poursuit jusque dans les **latérites de transition** où la contribution des **oxydes de manganèse** au piégeage du cobalt peut représenter jusqu'à 90%. Cependant, la tendance s'inverse à partir des **latérites jaunes** où, du fait de la disparition progressive des oxydes de manganèse au cours de la latéritisation, la contribution des **oxydes de fer** au piégeage du cobalt augmente progressivement vers la surface. Dans les **latérites rouges**, du fait de la quasi-disparition des oxydes de manganèse, les **oxydes de fer** (principalement la goethite) sont généralement la seule phase porteuse du cobalt.

Il apparaît ainsi une différence significative dans la contribution relative des oxydes de fer et de manganèse au piégeage du nickel et du cobalt au cours de la maturation des profils d'altération sur péridotites. Les oxydes de fer apparaissent très rapidement et majoritairement comme les principales phases qui contrôlent la distribution du nickel au cours de la différenciation des profils d'altération, et ceci même dans les latérites de transition où la contribution des oxydes de manganèse au piégeage du nickel ne dépasse pas 30%. En revanche, les oxydes de manganèse apparaissent comme les principales phases contrôlant la distribution du cobalt depuis les premiers stades jusqu'aux stades intermédiaires d'altération (i.e. depuis les saprolites jusqu'aux latérites jaunes). Dans les stades ultimes de différenciation des profils d'altération (latéritisation), cette importance des oxydes de manganèse dans la distribution du cobalt disparaît cependant au profit des oxydes de fer.

4. TYPOLOGIE DES LATERITES

Sur la base des différents critères précédemment décrits, plusieurs profils d'altération-type 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.

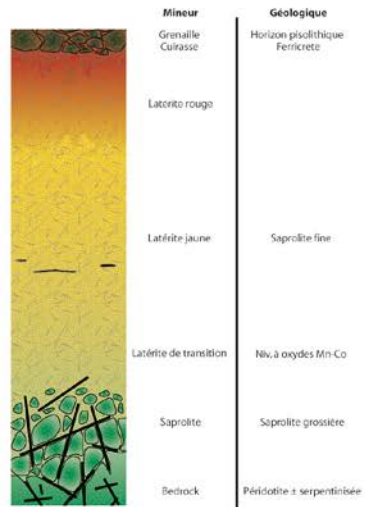
Le type B est le profil d'altération le plus communément rencontré en contexte de montagne. Il se développe sur des péridotites montrant un faible degré de serpentinisation. Les différents horizons d'altération sont généralement présents, mais des variantes sont rencontrées avec notamment l'absence de 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 conséquent 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 3 et 4 ci-après.

A1



A2

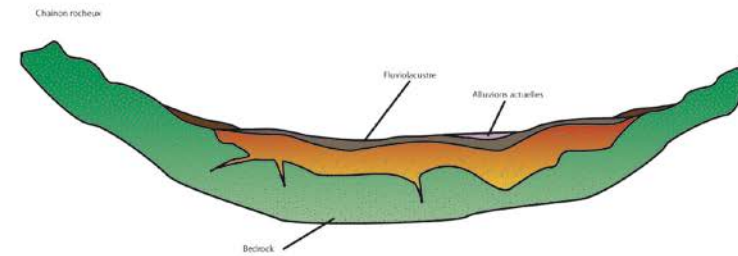
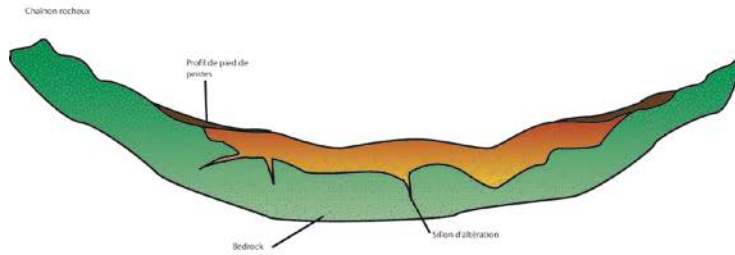
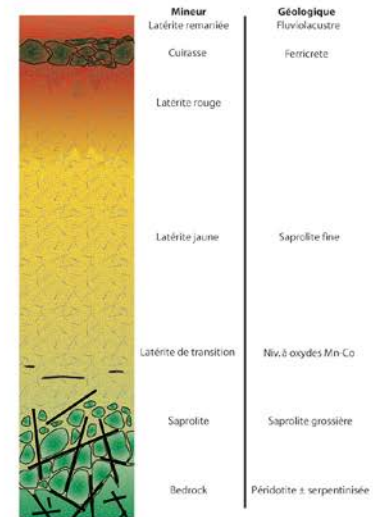
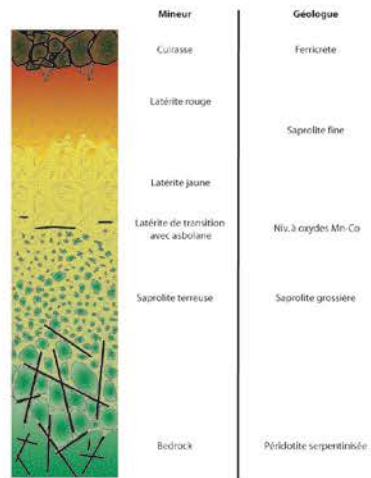


Figure 3 : Profils d'altération types

B (C sur schéma)



D

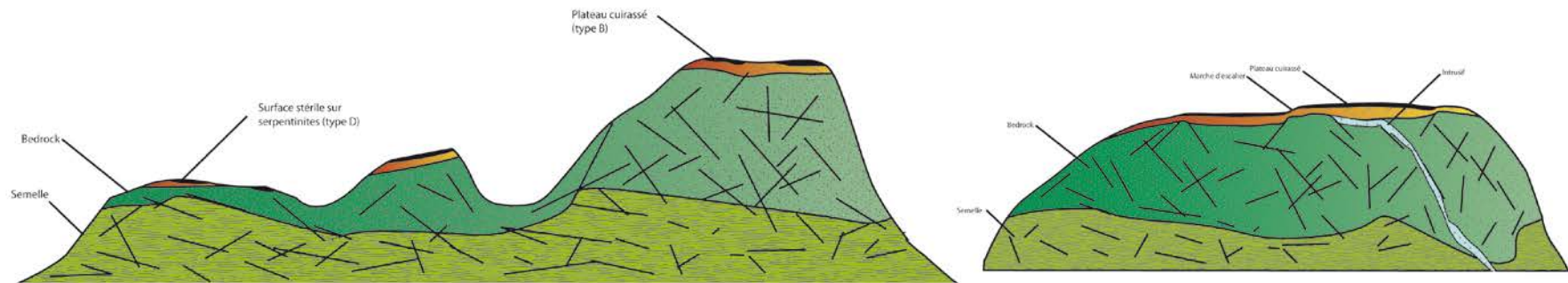
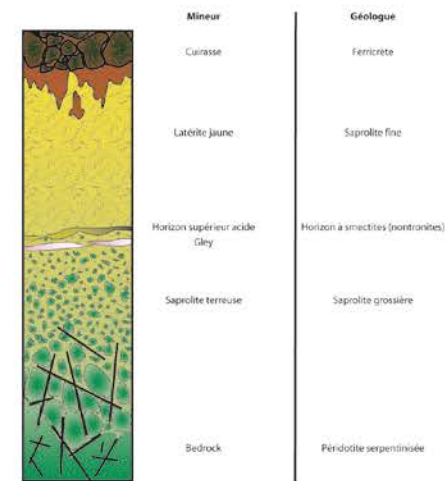


Figure 4 : Profils d'altération types (suite)

5. LES MINÉRALISATIONS

5.1. LES AMAS MINÉRALISÉS

Les résultats des études de spéciation abordée 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 du nickel et du cobalt 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 » a étudié les amas minéralisés à nickel et cobalt sur un plus grand nombre de sites miniers pour assurer 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 garniérite

Les amas minéralisés Mg/Ni à deweylite et garniérite 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 du nickel 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 publications ont signalé **un contrôle tectonique majeure** dans la mise en place de ces amas minéralisés Mg/Ni à deweylite et garniérite.

Les travaux réalisés sur ces amas ont permis de relier leur production à l'altération des éponges serpentineuses du réseau de fracturation, à une remobilisation précoce du nickel (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 garniérite) 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 garniérite) 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 (serpentes, 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 cristalochimique (DRX³, ATD-ATG⁴, MEB-MET⁵, microsonde électronique) des phases minérales composant ces différents remplissages suggère que les serpentes cryptocristallines sont des résidus d'altération des serpentes cristallines observées à la bordure des veines minéralisées et que ces serpentes 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 du nickel (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 serpentes cristallines des épointes à la température ambiante pour la sépiolite ou le quartz.

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.

³ *Diffraction de rayons X*

⁴ *Analyse thermo-différentielle - Analyse thermogravimétrique*

⁵ *Microscopie électronique à balayage – Microscopie électronique à transmission*

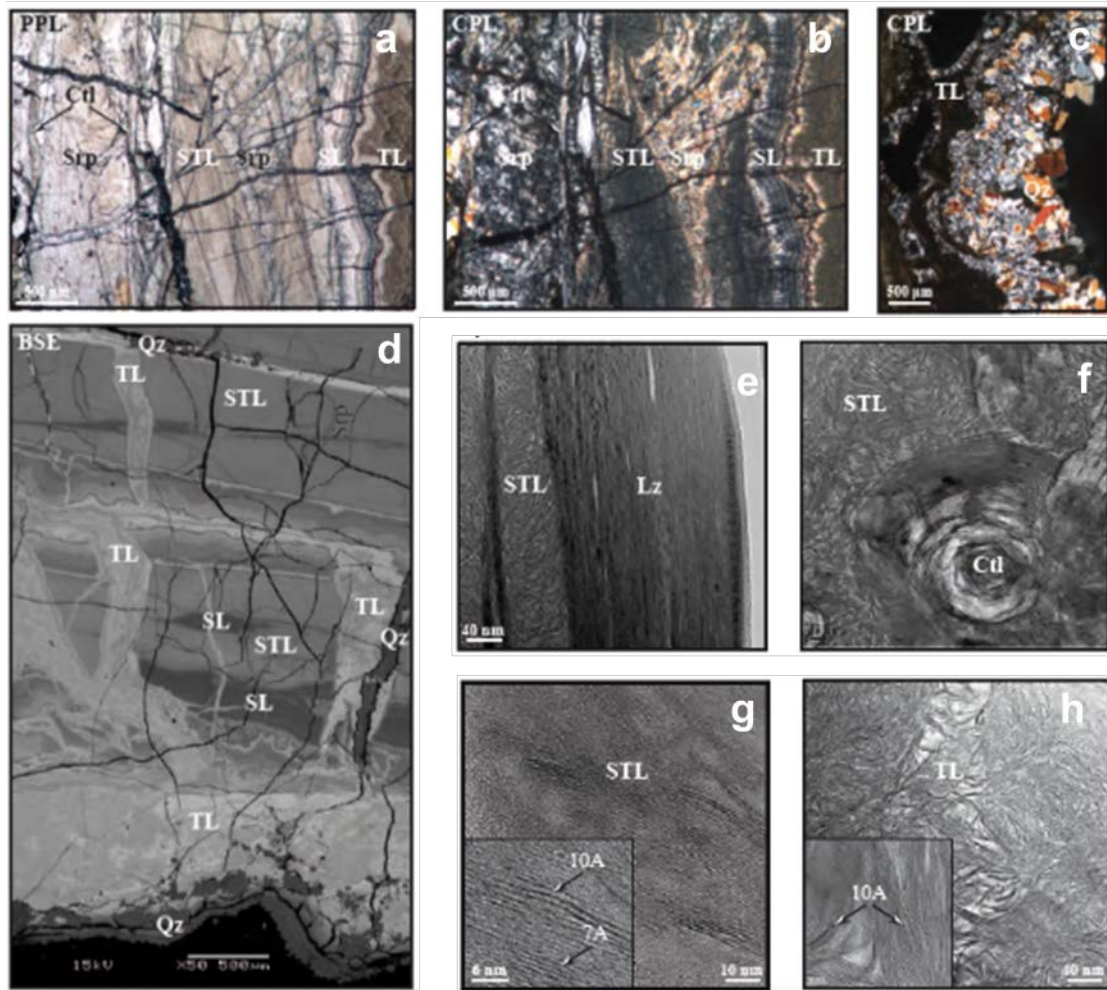


Figure 5 : Aspect microscopique des amas silicatés Mg/Ni (phyllosilicates trioctaédriques) à deweylite (Dew) et garniérite (Gar) (Klippe de Poro, carrière Stanislas).

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 (Ct) dans deux seal-cracks, (ii) d'une bande étirée de serpentine résiduelle (Srp) dans STL et (iii) d'une zone rubanée de 200µm 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 feuillet flexueux de phyllosilicates à 10Å.

○ Amas minéralisés Ni/Co à oxydes de manganèse

Les amas minéralisés Ni/Co, brun foncé à noirs, sont attribués à des oxydes de manganèse de la famille des **phylломanganates** (principalement lithiophorite, asbolane, birnessite et vernadite). 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 génération de phylломanganates 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. 6).

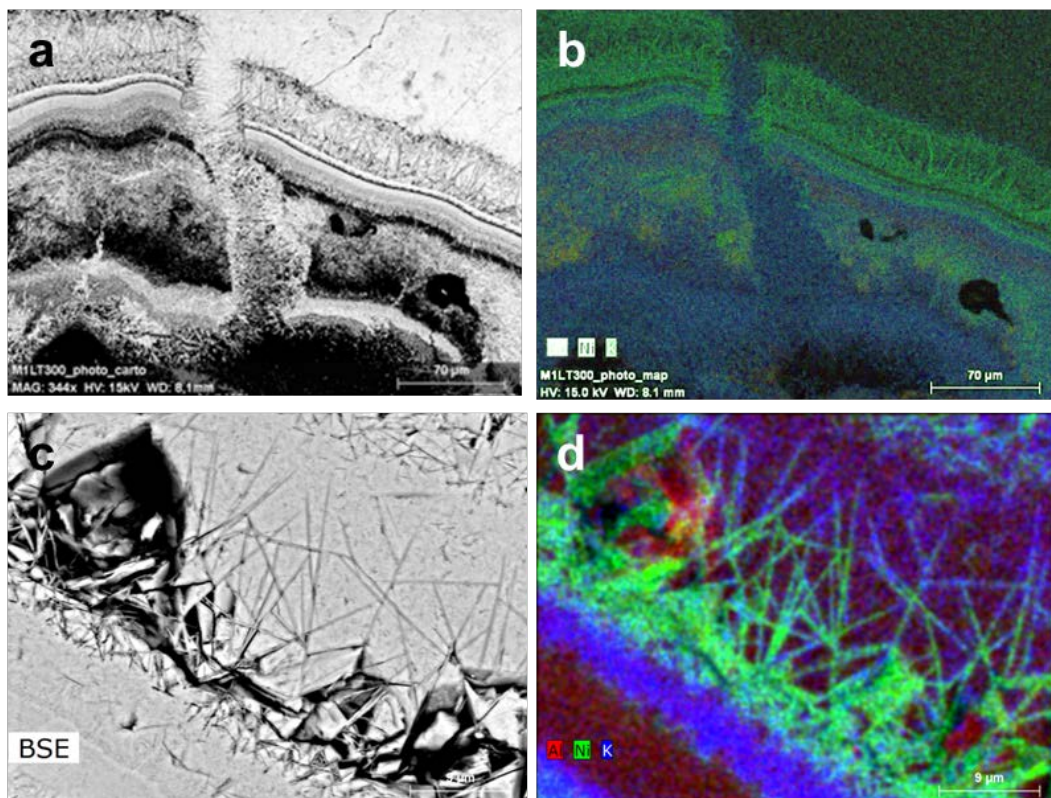


Figure 6 : Cristalchimie des amas minéralisés Ni/Co à oxydes de manganèse (Klippe de Koniambo)

Vue générale des faciès rubanés en (a) microscopie électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés et (b) carte composite correspondante avec les éléments aluminium (Al, rouge), nickel (Ni, vert) et potassium (K, bleu). Ces clichés montrent l'alternance de zones riches en Al (pôle à vernadite), puis en K (pôle à birnessite) et enfin en Ni (pôle à asbolane, noter l'aspect fibro-radié de ce dernier pôle). La fracturation centrale apparaît particulièrement riche en K (birnessite). (c) Vue rapprochée en électrons rétrodiffusés sur les rubanements et sur les cloisons entrecroisées (mini box-work) d'asbolane et (d) carte composite correspondante avec les mêmes éléments (Al, Ni et K). Noter que les extrémités des cloisons d'asbolane (vert car riche en Ni) s'enrichissent en potassium (K, bleu).

Cette séquence minérale correspond à des zonations à dominance d'**asbolane**, puis de **birnessite**, et enfin de **vernadite**. 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 fibro-radiées).

Les habitus (distribution fibro-radiée ou en box-works) de l'asbolane et de la birnessite, ainsi que la composition chimique (i.e. présence de potassium alors que l'encaissant latéritique est particulièrement dépourvu en cet élément) et les caractéristiques cristallographiques (i.e. distance entre plans atomiques caractéristiques de phases synthétisées à 120-150°C) de la birnessite, suggèrent une **contribution hydrothermale** à la mise en place des premiers oxydes de manganèse de cette première génération d'oxydes de manganèse. Cependant, le caractère cryptocristallin de la vernadite indique des conditions de mise en place dans des conditions plus proches de la température ambiante, ce qui suggère un refroidissement des fluides hydrothermaux au cours de la séquence de cristallisation de cette première génération de phylломanganates.

La deuxième génération de phylломanganates correspond uniquement à des phases cryptocristallines qui sont intimement associées aux oxydes de fer. Ces phylломanganates résultent très vraisemblablement d'une **altération supergène** de la première génération de phylломanganates à asbolane, birnessite et vernadite. Cette altération aurait favorisé la redistribution à courte distance des éléments dissous, puis la recristallisation d'oxydes de manganèse secondaires dans l'encaissant à oxydes de fer au cours du 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 (principalement gibbsite $Al(OH)_3$). Ces passées constituent des environnements chimiques locaux particuliers au sein desquels des oxydes de manganèse différents tels que la lithiophorite (souvent riche en cobalt et nickel) précipitent (Tableau 1).

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

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

No	PORO – LA FRANCAISE						GORO – EXERCICE MINIER					
	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

5.2. MINÉRAIS 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 miniers) montre que l'exportation massive de magnésium et silicium lors des processus secondaires de latéritisation est couplée à une accumulation résiduelle d'éléments traces métalliques (principalement chrome, aluminium, nickel, manganèse et cobalt). 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 goëthite nickélique, 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 jaunes, puis rouges, qui les surmontent. La disparition progressive du réseau de serpentinisation (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 jaunes, rouges puis indurées), puis l'apparition de structures sédimentaires associées au transport particulaire.

○ Facteurs de dispersion des porteurs **du nickel et du cobalt**

Les processus de latéritisation ont également été reliés à des mécanismes (1) de dissolution/recristallisation des oxydes de fer qui s'accompagnent d'une expulsion graduelle du nickel et du cobalt de la structure de ces minéraux et (2) de dissolution des oxydes de manganèse qui libèrent le nickel et le cobalt en phase aqueuse (Fig. 7). Ces mécanismes contribuent de ce fait à l'appauvrissement progressif de ces éléments métalliques d'intérêt économique vers la surface des unités latéritiques. Ils débutent à la base des latérites jaunes, 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. Si la maturation des profils d'altération est principalement proposée pour expliquer la dissolution/recristallisation des oxydes de fer, une contribution éventuelle de processus d'oxydo-réduction doit être envisagée pour expliquer la dissolution des oxydes de manganèse. En contribuant ainsi à l'altération des minerais Ni/Co à oxydes de manganèse, ces processus d'oxydo-réduction pourraient avoir contribué à la redistribution des éléments métalliques au sein des couvertures latéritiques étudiées.

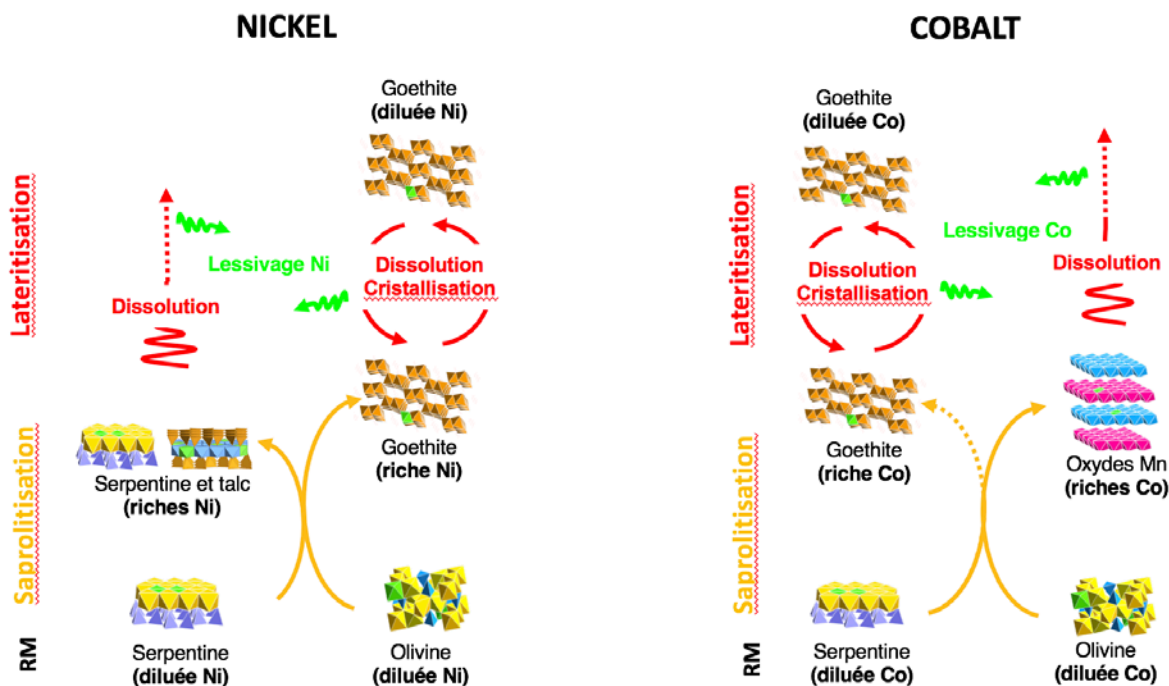


Figure 7 : Schémas illustrant les processus cristallochimiques de distribution du nickel et du cobalt au cours de la différenciation es profils d'altération sur péridotites

○ **Variabilité des teneurs en nickel et cobalt des latérites jaunes (sondages miniers)**

Il est remarquable de constater que malgré des différences notoires en termes de nature de la roche mère, les teneurs en nickel et cobalt 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 nickel et cobalt d'un sondage à l'autre, même situés à une dizaine de mètres de distance (Fig. 8). Les enrichissements en nickel, magnésium et silicium observés à la base de l'horizon de latérite jaune et lié à la persistance de silicates nickélicifères non entièrement altérés, suggèrent que l'altération ne parvient pas à homogénéiser les teneurs en nickel et cobalt 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 nickel et cobalt 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.

Les niveaux de gabbros et de wehrlites à plagioclases sont remplacés par des oxydes d'aluminium peu mobiles (principalement gibbsite $Al(OH)_3$) 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.

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

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	

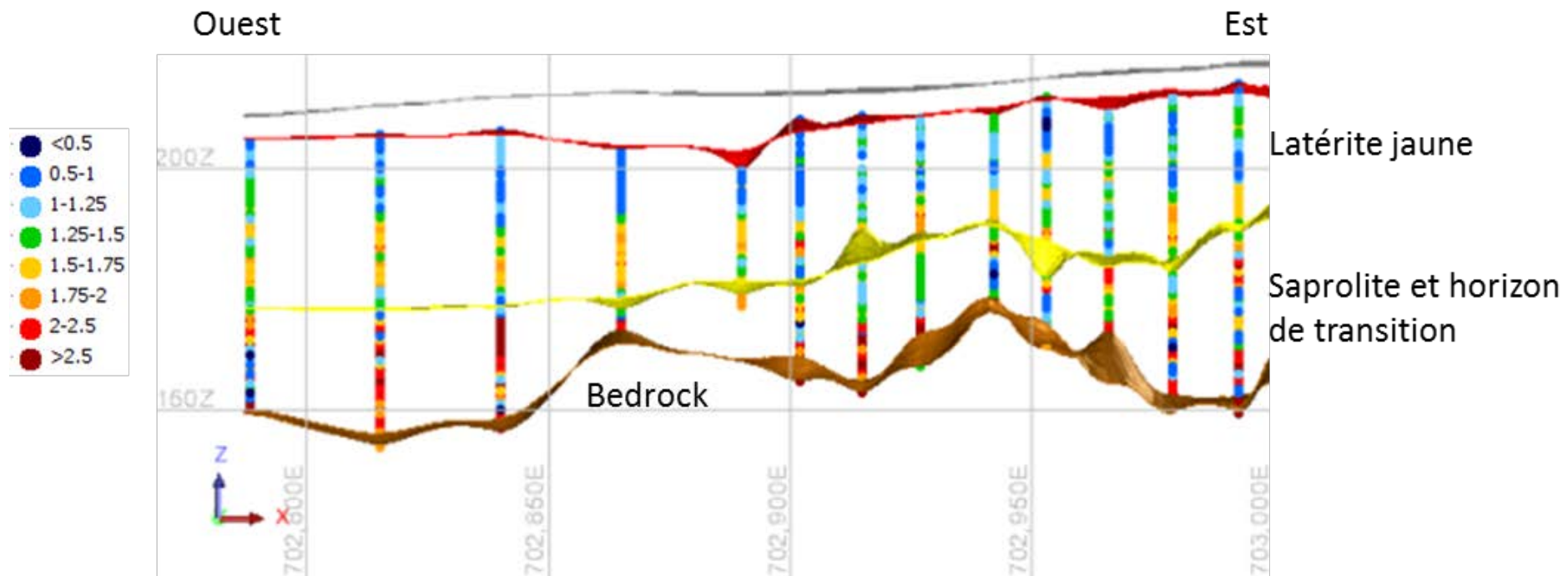


Figure 8 : Exemple de variabilité des teneurs en Ni dans les latérites jaunes et dans la saprolite sur une coupe Ouest –Est du chantier Exercice Minier (Goro).

6. 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 phyllo-manganates 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. 9).

Selon cette évolution en deux grandes étapes, ce sont donc les minéralisations silicatées Mg/Ni (principalement le pôle garniéritique), ainsi que la première génération des minéralisations Ni/Co à phyllo-manganates, qui auraient *alimenté* les latérites au cours de la latéritisation, 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 nickel et cobalt dépend étroitement de l'abondance des phases résiduelles issues de ces minéralisations primaires, mais également, et plus particulièrement, de l'abondance des phases nickélicifères à garniérite (les zones à deweylite ne contribuant pas à cet enrichissement) et des phases manganésifères à cobalt. Pour ce qui concerne le nickel, ce point a été particulièrement 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.

Cependant, par des mécanismes de dissolution et de recristallisation des phases porteuses de nickel et cobalt répétés sur des périodes de temps géologiques, le stade ultime de latéritisation conduit à l'expulsion progressive du nickel et du cobalt de la structure de la goethite. Du fait du lessivage du nickel et du cobalt ainsi expulsés, ce stade ultime de latéritisation tend à gommer la contribution des phases résiduelles mentionnées ci-dessus et à favoriser la production de formations indurées (pisolithes et cuirasses) particulièrement appauvries en ces éléments.

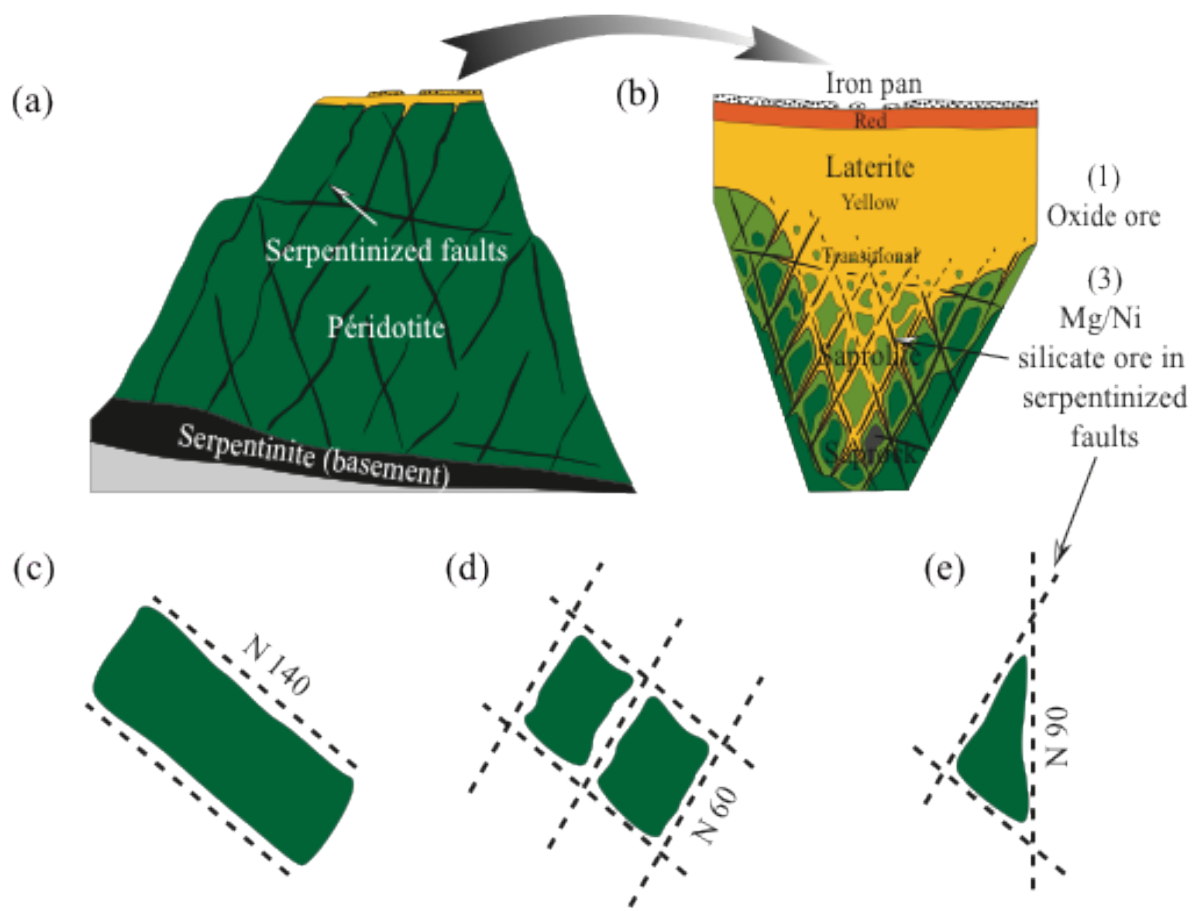


Figure 9 : Structuration des klippes du Centre et du Nord (exemple Mt Koniambo)

(a) coupe du massif montrant la semelle intensément serpentinisée, le fracturation et serpentinisation 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 serpentinisation, (c) (d) et (e) distribution des minéralisations à Ni (en pointillé) en fonction du type de réseau de fracturation rencontré.



Figure 10 : Localisation des sites

7. 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.

CNRT "Nickel et son environnement"

Edition 2016

Tome Nickel et Technologie