HAL
open science

Atlas des latérites nickélifères de Nouvelle-Calédonie. Les gisements de nickel latéritique de Nouvelle-Calédonie, volume V

Emmanuel Fritsch, Laurent Bailly, Brice Sevin

To cite this version:

Emmanuel Fritsch, Laurent Bailly, Brice Sevin. Atlas des latérites nickélifères de Nouvelle-Calédonie. Les gisements de nickel latéritique de Nouvelle-Calédonie, volume V. [Rapport de recherche] Programmes Nickal et Analyse fine des minerais. Tome Nickel et Technologie, CNRT Nickel et son environnement. 2017, 57 p. ird-02160802v2

HAL Id: ird-02160802

https://ird.hal.science/ird-02160802v2

Submitted on 26 Oct 2021

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"

Edition 2017

Tome Nickel et Technologie

ATLAS des latérites nickélifères de Nouvelle-Calédonie

CNRT NICKEL & son environnement

ATLAS

DES LATERITES NICKELIFERES

DE NOUVELLE-CALEDONIE

« ATLAS DES LATERITES NICKELIFERES DE NOUVELLE-CALEDONIE »

Juillet 2017

Ouvrage collectif coordonné par Emmanuel FRITCH (IRD)

AUTEURS

Emmanuel FRITSCH, Institut de Recherche pour le Développement (IRD)

Laurent BAILLY, Bureau de recherche Géologique et Minière (BRGM)

Brice SEVIN, Service géologique de Nouvelle-Calédonie (SGNC)

CITATION DU DOCUMENT

Mots clés : Latérite, goethite, nickel, cobalt, saprolite, garniérite, altération

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
Fritsch E., Bailly L., Sevin B. (2017) – *Atlas des latérites nickélifères de Nouvelle-Calédonie*. Programme « Les gisements de nickel latéritique de Nouvelle-Calédonie ». CNRT « Nickel & son environnement. 57 pages.

Photo centrale de la couverture : Zone de transition entre saprolite et latérite sensu stricto des latérites nickélifères de Nouvelle-Calédonie (région de Poro, CFTMC, carrière Stanislas). Les niveaux saprolitiques (harzburgite altérée : à gauche et à droite sur la photo) abritent de nombreuses minéralisations silicatées Mg/Ni (veines blanches à vertes : deweylite/garniérite), bordées de serpentine et présentes dans un réseau entrecroisé de failles (minerai quadrillé). Ces minéralisations silicatées se retrouvent partiellement préservées dans le niveau latéritique encaissant, jaune brunâtre à brun rougeâtre. Elles "nourrissent" en Ni les latérites de transition, composées pour l'essentiel d'oxyhydroxydes de fer.

L'Atlas des latérites nickélifères de Nouvelle-Calédonie a été produit dans le cadre du programme « **Les gisements de nickel latéritique de Nouvelle-Calédonie - Typologie des profils, caractérisation des latérites et identification des porteurs de Ni et Co** » financé par le CNRT « Nickel et son environnement ».

Cet ouvrage, à visée pédagogique, complète les quatre rapports scientifiques regroupant les contributions des différents partenaires de ce programme majeur de l'axe 'Nickel et Technologie' du CNRT :

- **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 LATERITIQUES – Facteurs de minéralisation Ni/Co des latérites de Nouvelle-Calédonie »**
- **Tome IV – Rapport scientifique du projet « LES OXYDES DE MANGANESE ASSOCIES AUX LATERITES DE TRANSITION »**
- **Tome V – « ATLAS DES LATERITES NICKELIFERES DE NOUVELLE-CALEDONIE »**

Rédigé à l'usage opérateurs miniers, l'Atlas vise à fournir au lecteur les données nécessaires à la reconnaissance des différents faciès d'altération sur fronts miniers, comme guide éventuel à la prospection minière, et également les éléments clés d'une meilleure compréhension de la genèse des couvertures d'altération sur substrat péridotitique (qualifiées également dans la zone intertropicale de latérites nickélifères).

Les données sélectionnées pour cet atlas correspondent essentiellement à des observations macroscopiques réalisées sur les différents massifs miniers dans le but d'être directement exploitables sur le terrain. Elles ne représentent qu'une petite partie des données acquises depuis l'échelle des paysages jusqu'à celle des minéraux ou assemblages de minéraux. Les lecteurs désireux d'aller plus loin dans la caractérisation des différents minéraux et dans les hypothèses génétiques concernant leur formation sont invités à consulter les rapports finaux de ces deux projets ainsi que les nombreuses références bibliographiques citées.

Avant propos

Considérée comme l'une des premières réserves mondiales de Ni-Co (Elias 2001, Dalvi *et al*. 2004), la Nouvelle-Calédonie exploite et traite en pyrométallurgie des minerais silicatés à une teneur de coupure supérieure à 2,5 % Ni-Co. Ces minerais silicatés, communément qualifiés de "minerais garniéritiques" par les mineurs, sont exploités dans les épais niveaux d'altération (saprolite) des péridotites. L'exploitation de ces minerais, initiée en 1880 par la "Société Le Nickel" (SLN), a été accrue en 2013 par la mise en service de la nouvelle usine de la Province Nord par "Koniambo Nickel Society" (KNS).

Le développement de nouveaux procédés hydrométallurgiques a permis d'augmenter les ressources en nickel de la Nouvelle-Calédonie et d'envisager l'exploitation des minerais oxydés situés dans les niveaux supérieurs des profils d'altération (latérites *sensu stricto*). Ces niveaux constitués presqu'exclusivement d'oxyhydroxydes de fer, et plus localement d'oxydes de manganèse, présentent des teneurs en Ni-Co plus faibles (< 2,2 %) et ne sont exploités de nos jours qu'à une teneur de coupure généralement supérieure à 0,9 %. L'usine hydrométallurgique de la Province Sud de la compagnie minière VALE a ouvert de nouvelles perspectives pour l'exploitation des immenses gisements en minerais oxydés des plaines du Massif du Sud et à plus longs termes de ceux de l'ensemble du pays.

Selon les estimations actuelles (Mudd & Jowitt 2014), la Nouvelle-Calédonie disposerait de plus de 25 % des ressources en nickel de la planète et environ 40 % des ressources mondiales en minerais oxydés. L'augmentation de la ressource et de la capacité du pays à traiter ces deux types de minerais (silicatés et oxydés) ont amené le "CNRT Nickel et son environnement" à lancer en 2009 un appel à projet de recherche sur les "*Facteurs de minéralisation Ni/Co des latérites de Nouvelle-Calédonie*". Cet appel visait à obtenir une meilleure connaissance des processus et facteurs environnementaux à l'origine de l'enrichissement en Ni et Co des minerais oxydés destinés au traitement hydrométallurgique.

Pour atteindre ces objectifs, deux projets ont été retenus et financés dans le cadre de cet appel d'offre, "*Analyse fine de minerais latéritiques*" et "*Nickal*". Ces deux projets ont entre autres cherché à obtenir une meilleure caractérisation des phases minérales porteuses de métaux d'intérêt économique (plus particulièrement de Ni et Co) et des structures dans lesquelles ces phases sont susceptibles d'être observées sur le terrain (Bailly *et al.* 2014 ; Fritsch *et al.* 2015). Ces types de données récoltées dans le cadre des deux projets précités ont permis d'élaborer cet atlas.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION 7

2. SEQUENCE OPHIOLITIQUE ET DIVERSITE LITHOLOGIQUE 10

2.1. LES PRINCIPALES LITHOLOGIES 10

2.2. LA SERPENTINISATION 13

3. PROFILS D'ALTERATION 16

3.1. PROFIL TYPE 16

3.2. FACIES ALTERES 16

3.3. LES SAPROLITES 16

3.3.1. Les latérites de transition 19

3.3.2. Les latérites jaunes, rouges et la cuirasse 22

3.3.3. Les filons et sills de wehrlites et gabbros 22

3.3.4. Les oxydes de manganèse cobaltifères 27

3.3.5. Faciès à gley et horizon supérieur acide (HSA) 27

4. GRADIENTS MINERALOGIQUES 31

5. GRADIENTS GEOCHIMIQUES 34

6. PAYSAGES LATERITIQUES 37

7. CONCLUSIONS 51

8. BIBLIOGRAPHIE 52

1. INTRODUCTION

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). Ce gisement est hérité 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'Éocène (Cluzel *et al.* 2001). Rattaché au groupe des latérites nickélifères (Brand *et al.* 1998), essentiellement formées en milieu bien drainé et oxydant de la zone intertropicale, cette catégorie de gisement s'oppose aux gisements sulfurés cupro-nickélifères, associés à des intrusions basiques à ultrabasiques (ex. Sudbury, Canada, Norilsk, Russie).

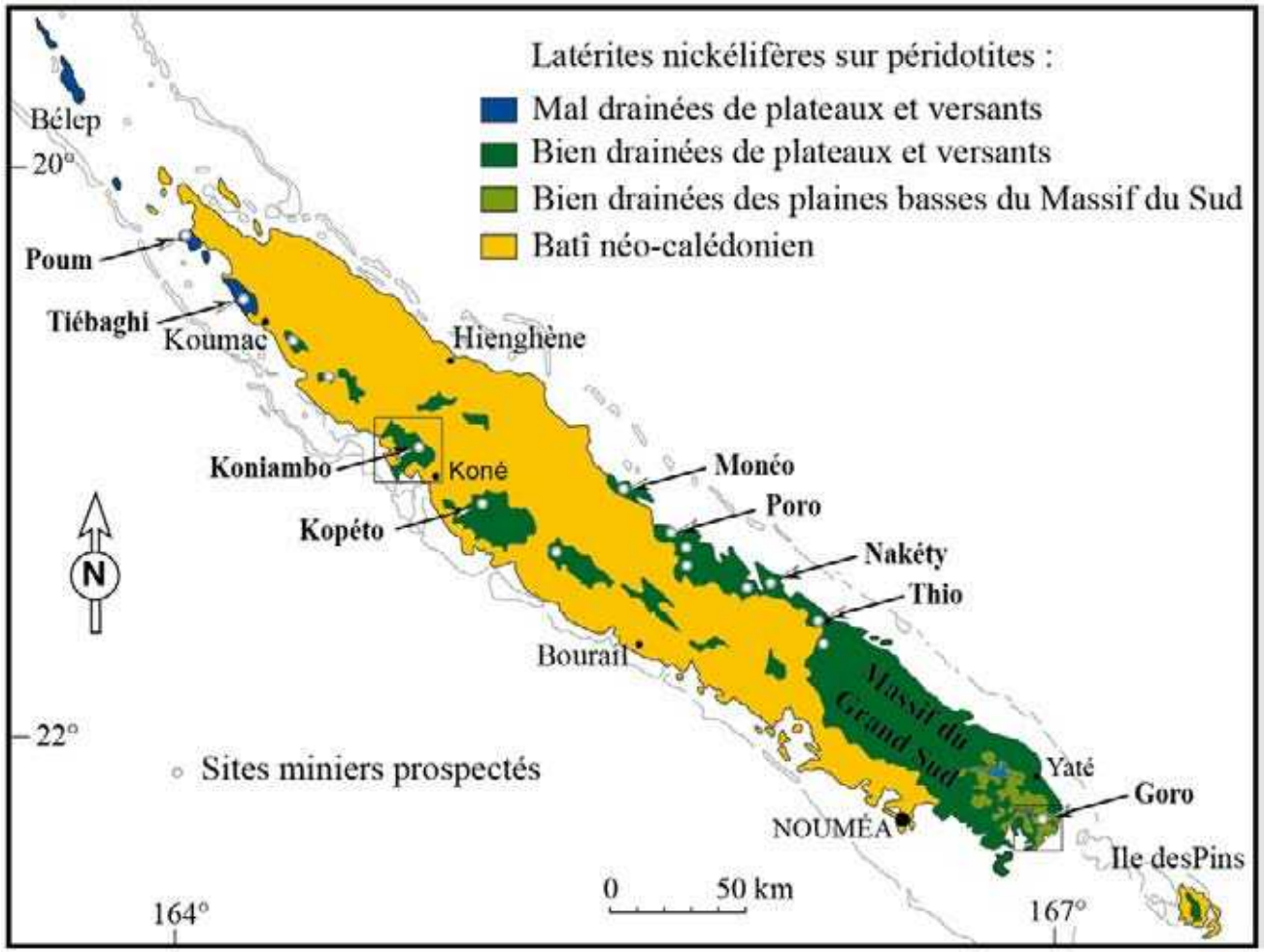


Figure 1 : Les latérites nickélifères des massifs péridotitiques de la Nouvelle-Calédonie.

Quatre grands types de minerais à Ni-Co sont classiquement reconnus dans ces contextes (Brand et al. 1998, Gleeson et al. 2004, Freyssinet et al. 2005, Fritsch *et al.,* 2016) (Fig . 2) suivant :

- Les minerais silicatés, hydratés à deweylite et garniérite (*hydrous Mg/Ni silicate ores*). Ces minerais sont constitués de phyllosilicates trioctaédriques 1:1 et 2:1, non (ou peu) 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). Des phyllosilicates riches en Ni (verts), correspondant au minerai silicaté type (en moyenne 1,8 à 2,5 % de Ni), côtoient des phyllosilicates riches en Mg et dépourvus de Ni (pôle blanc à deweylite). Ces phyllosilicates trioctaédriques (Mg/Ni) sont présents sous forme de veines dans le réseau de fracturation des massifs péridotitiques. Ces veines peuvent également contenir des passées siliceuses à quartz. Elles sont particulièrement bien préservées à la base des profils d'altération (i.e. à la "racine" de ces profils), à la transition entre la roche-mère et la saprolite sus-jacente. En termes de vocabulaire, l'appellation « garniéritique » est quelques fois dédiée aux premiers gisements exploités par scheidage en suivant des veines riches en garniérites nickélifères (jusqu'à 40 % de Ni).
- 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 (smectites ferrifères), les montmorillonites ferrifères et les beidellites alumineuses (Gaudin *et al.* 2004). Ces argiles sont présentes sur la partie haute des niveaux saprolitiques, dans les pièges structuraux ménagés par le réseau de fracturation. Dissociées des veines à garniérite et deweylite, ces argiles moins riches en nickel (jusqu'à 4 % de Ni pondéral) sont localisées dans l'encaissant péridotitique altéré. Elles sont intimement associées à des nano-oxydes de fer, mal cristallisés, le mélange intime des argiles et des oxydes étant parfois qualifié d'iddingsite (Delvigne 1998, Trescases 1975).
- Les minerais à oxydes de fer (Ni oxide ores). Présents en profondeur dans les cavités ménagées par la dissolution des silicates, les oxydes de fer deviennent très nettement majoritaires (jusqu'à 95 %) dans l'ensemble latéritique (latérites de transition, jaunes, rouges). Ces oxyhydroxydes sont associés à de faibles proportions de chromite résiduelle (parfois aussi à des proportions encore plus faibles de talc et quartz résiduels) et, à la base de cet ensemble, à des proportions variables d'oxydes de Mn et veines démantelées à deweylite et garniérite. Les oxyhydroxydes de fer sont représentés majoritairement par la goethite (α-FeOOH) qui constitue la principale phase minérale porteuse du nickel dans l'ensemble latéritique (Dublet *et al.* 2012, 2015). Exclusive dans les latérites jaunes, la goethite est associée à de faibles proportions d'hématite (Fe_2O_3) dans les latérites rouges et niveaux cuirassés sus-jacents. Les teneurs en nickel de ces minerais sont généralement faibles et décroissantes (1 à 1,7 % de Ni en moyenne) de la base vers le sommet de l'ensemble latéritique. Seuls les horizons de latérite jaune et de transition sont réellement exploités en hydrométallurgie.
- Les minerais à oxydes de manganèse (Ni/Co oxide ores). Les oxydes sont essentiellement composés de phyllomanganates du groupe des asbolanes, des lithiophorites et des birnessites (Ploquin *et al.* 2015). Il s'agit de phases minérales secondaires pour l'accumulation du Ni (élément essentiellement présent dans les asbolanes) et majeures pour le cobalt (minerai initialement extrait à la main dans des galeries creusées par les "cobaleurs"). Les zones minéralisées s'observent de façon localisée sous forme de plages ou dans des fractures et parfois à la périphérie de corps intrusifs. Peu abondants dans les saprolites, ces amas minéralisés sont plus fréquemment observés à la base des latérites, dans les latérites de transition, parfois aussi dans les latérites jaunes qui les surmontent.

En Nouvelle-Calédonie, les minerais silicatés rencontrés au niveau de la saprolite et les minerais à oxydes de fer, présents au niveau des horizons de latérite jaune et de transition sont exploités. Le cobalt, autrefois exploité de façon sélective par les « cobaleurs », est récupéré comme sous-produit de la pyrométallurgie et de l'hydrométallurgie des minerais nickelifères.

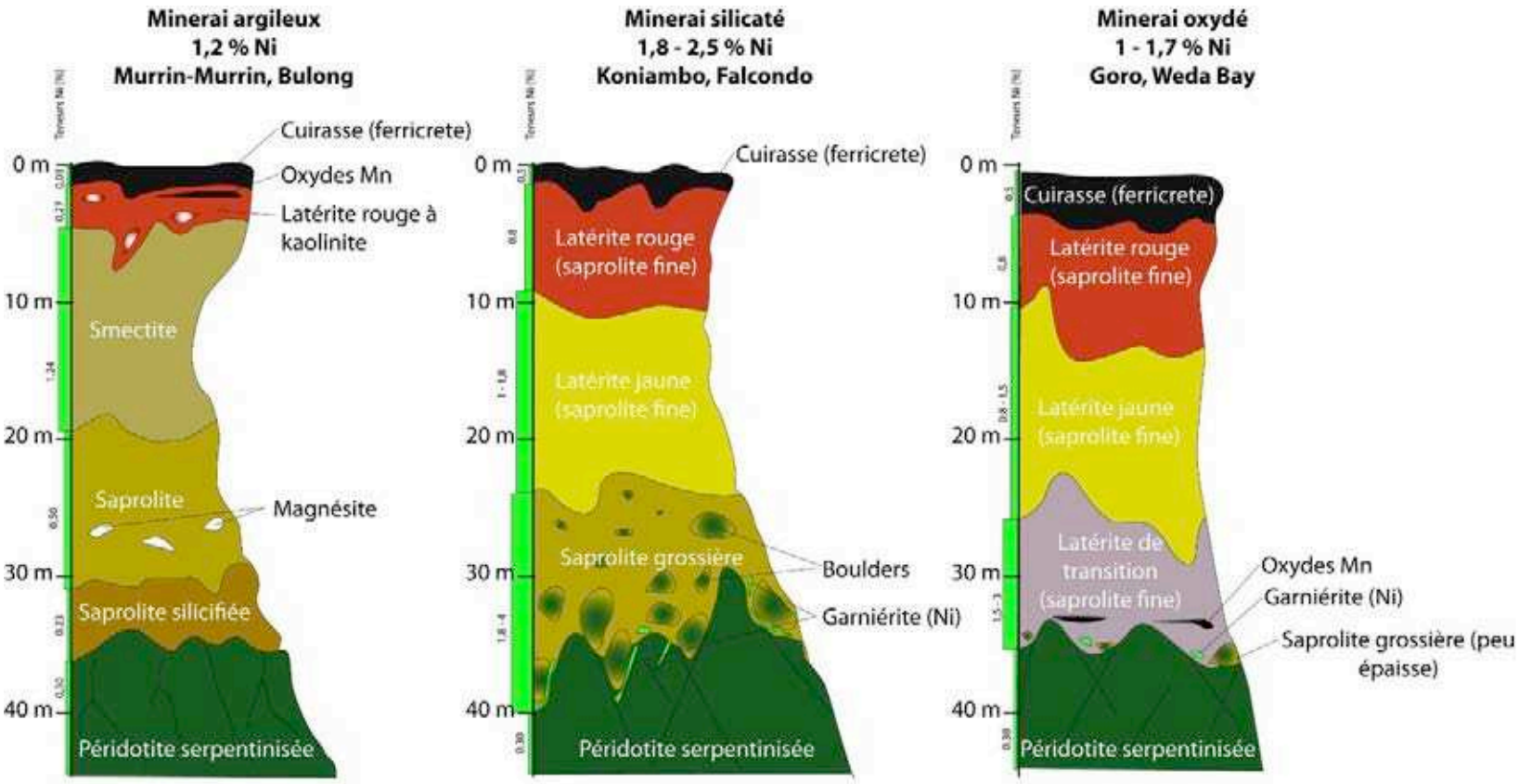


Figure 2 : Les différents types de gisements de nickel latéritique dans le monde et en Nouvelle-Calédonie, à noter que Tiébaghi s'apparente au type argileux et que le minerai à oxyde de manganèse est souvent associé au minerai oxydé, et plus rarement au minerai silicaté (Jébrak et Marcoux, 2008, d'après Troly 1979 , Elias 2002).

2. SEQUENCE OPHIOLITIQUE ET DIVERSITE LITHOLOGIQUE

2.1. LES PRINCIPALES LITHOLOGIES

En Nouvelle-Calédonie, les principales roches rencontrées à la base des profils d'altération sont des dunites (Ol±Cpx±Opx-Chr), des harzburgites (Ol-Opx±Cpx), des pyroxénites (Opx±Cpx±Ol), des lherzolites à plagioclases (Ol-Opx-Cpx±Plg), des wehrlites à plagioclase (Ol-Cpx±Plg) et des gabbros (Opx-Plg±Cpx±Ol). Ces roches appartiennent à différents niveaux de la séquence ophiolitique dont la coupe synthétique théorique est rappelée figure 3. La minéralogie et le mode d'association des roches sont susceptibles de varier significativement d'Est en Ouest et du Nord vers le Sud de la Grande Terre. Les harzburgites sont nettement dominantes, plus particulièrement dans la partie centrale de la Grande Terre (Fig. 4a-b). Elles sont localement intercalées par des niveaux à dunite (Fig. 4c), à pyroxènite (Fig. 4d) et plus rarement par des intrusions de gabbros (Fig. 4f).

Dans le Sud de l'île, la "stratification magmatique" des péridotites devient beaucoup plus affirmée (Fig. 4e), des niveaux dunitiques (décimètriques) et pyroxénitiques (centimétriques) s'intercalant dans les harzburgites (Trescases 1975).

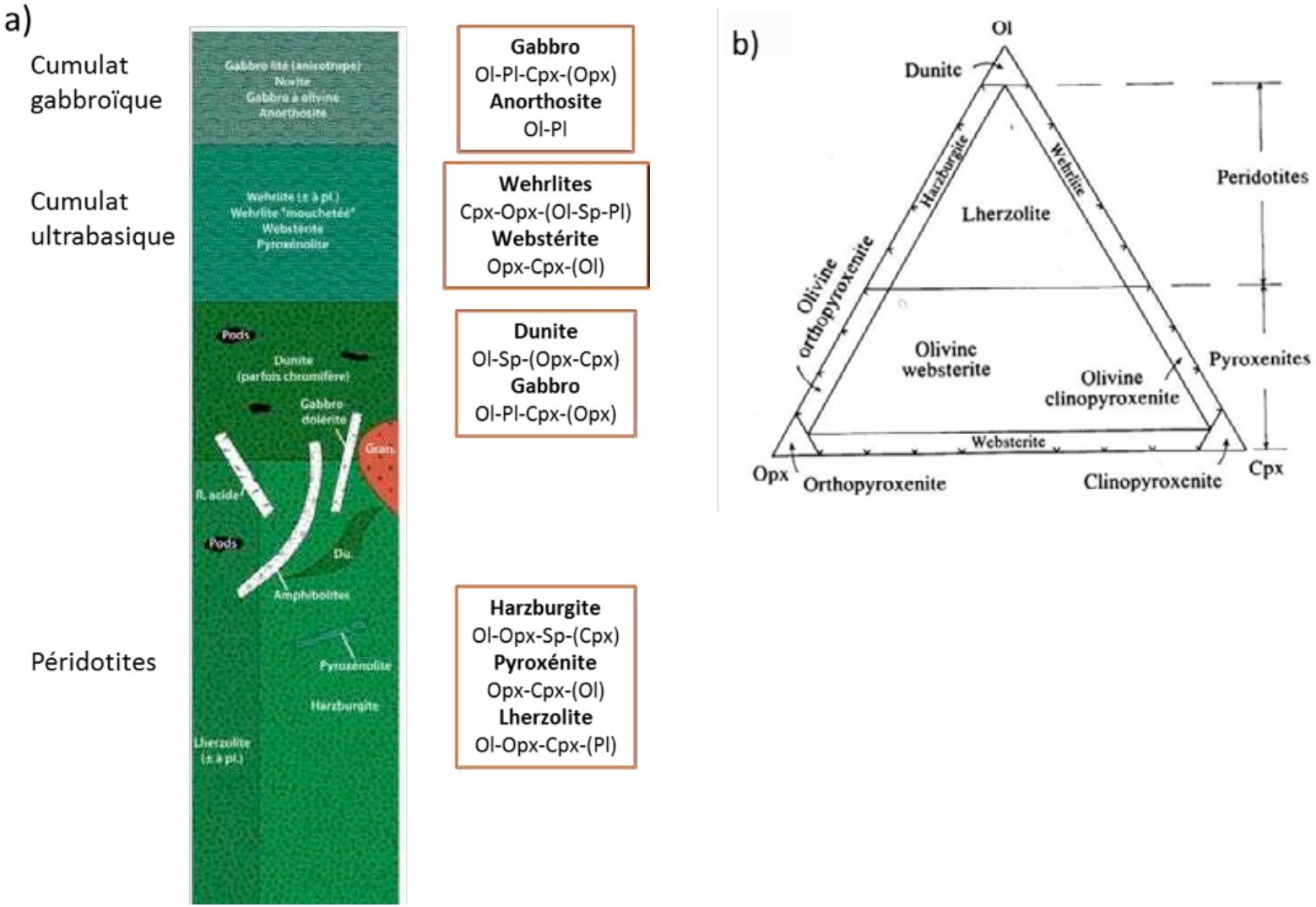
A plus petite échelle, les cristaux de pyroxène sont souvent alignés renforçant l'aspect rubané de ces roches. La ségrégation des cristaux de spinelle chromifère produit des amas lenticulaires, allongés dans le plan du rubanement et localisés principalement dans les niveaux à dunite.

Par ailleurs, la masse péridotitique principale peut être recoupée par des îlots dunitiques métriques à kilométriques et par de nombreuses intrusions ou veines horizontales de wehrlites à plagioclase, et par des gabbros.

Dans le Nord de l'île (massifs de Tiébaghi et de Poum), les roches plus diversifiées montrent un litage magmatique nettement redressé et les cortèges filoniens y sont abondants. Les harzburgites sont remplacées par des lherzolites à plagioclase.

De grandes enclaves à dunite et spinelle chromifère sont fréquentes et des intrusions gabbroïques sont localement observées. Des écailles de serpentinite recoupées par un réseau de veinules de carbonate de magnésium (giobertite = magnésite) sont localement intercalées dans ces roches, à proximité de la semelle ophiolitique.

Figure 3 : Stratigraphie et minéralogie des ophiolites. (a) Coupe synthétique d'une pile ophiolitique et des principales associations minérales rencontrées, (b) Diagramme triangulaire olivine (Ol) - orthopyroxène (Opx) - clinopyroxène (Cpx) de représentation des différents types de roches basiques-ultrabasiques. Ol : olivine, Opx : orthopyroxène, Cpx : clinopyroxène, Pl : plagioclase, Sp : spinelle chromifère.



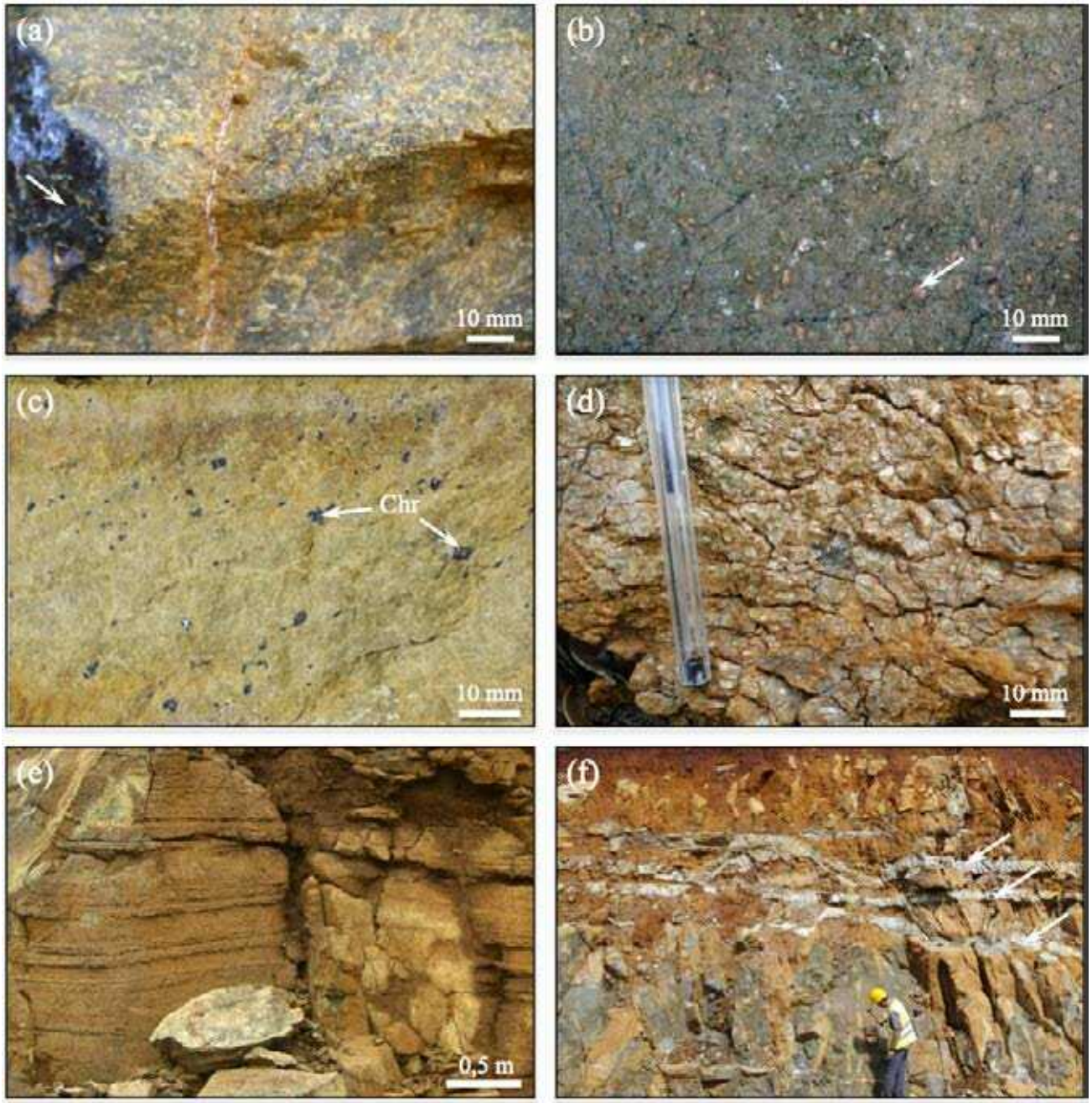


Figure 4 : Principaux faciès lithologiques rencontrés. (a) Harzburgite associant olivine (dominante, partiellement altérée, réseau jaune verdâtre) et orthopyroxène (cristaux non altérés gris brun d'aspect vitreux), échantillon (Kopeto) peu serpentinisé, noter toutefois à gauche une veine épaisse de serpentine noire (flèche), (b) Harzburgite (Poro, Stanislas) fortement serpentinisée (fines veinules entrecroisées noires), les pyroxènes sont également serpentinisés (flèche : bastite beige clair), (c) Dunite brun verdâtre composée essentiellement d'olivine, échantillon (Poro, Bonini) peu serpentinisé, présence éparse de cristaux noirs de chromite (Chr) (d) Pyroxénite composée essentiellement d'orthopyroxène, échantillon de roche (Koniambo) partiellement altérée (les cristaux de pyroxène sont en partie "déchaussés"), (e) "Stratification magmatique" des péridotites (rivière des japonais), (f) Sills de gabbros (flèches) recoupant horizontalement les péridotites (Col Paillard).

2.2. LA SERPENTINISATION

Compte-tenu de l'abondance des veines de serpentine au niveau de la roche mère et de leur préservation ou non dans les différents horizons des profils d'altération développés sur péridotite, il nous a paru nécessaire de décrire brièvement le phénomène de serpentinisation.

Cette serpentinisation est attribuée à une hydratation de silicates magnésiens tels que les olivines et les pyroxènes qui sont les constituants majeurs des péridotites (formation de phyllosilicates de la famille des serpentines, et plus localement de celles des talcs, chlorites et amphiboles) couplée à une oxydation du fer (individualisation de magnétite) (Trescases 1975).

Dans le cadre de cet atlas, nous rappellerons brièvement les travaux d'Orloff (1968), à l'origine des différentes terminologies utilisées par les mineurs néo-calédoniens pour rendre compte du degré de serpentinisation des péridotites (Fig. 5). Ces travaux, établis à partir d'observations réalisées sur les klippes de la côte Est de l'île, ont montré que la serpentinisation massive des silicates à la base de la nappe ophiolitique (semelle de serpentinite) diminuait graduellement vers la partie sommitale de ces klippes (Fig. 5). Le degré de serpentinisation des roches est appréhendé par les miniers par des observations de terrain (Fig. 6), parfois pétrographiques, et à l'aide d'analyses chimiques en mesurant la perte au feu, cette dernière reflétant essentiellement la proportion de minéraux "hydratés", essentiellement phyllosilicates, dans l'échantillon.

La caractérisation macroscopique et microscopique des différents types de serpentines rencontrés en Nouvelle-Calédonie ainsi que des hypothèses génétiques ont fait l'objet, d'un projet CNRT (Lahondère et al. 2011). Plusieurs études récentes permettent de se familiariser avec la complexité et l'origine de ces minéraux (e.g. Mevel 2003, Andreani *et al.* 2007, Ulrich 2010).

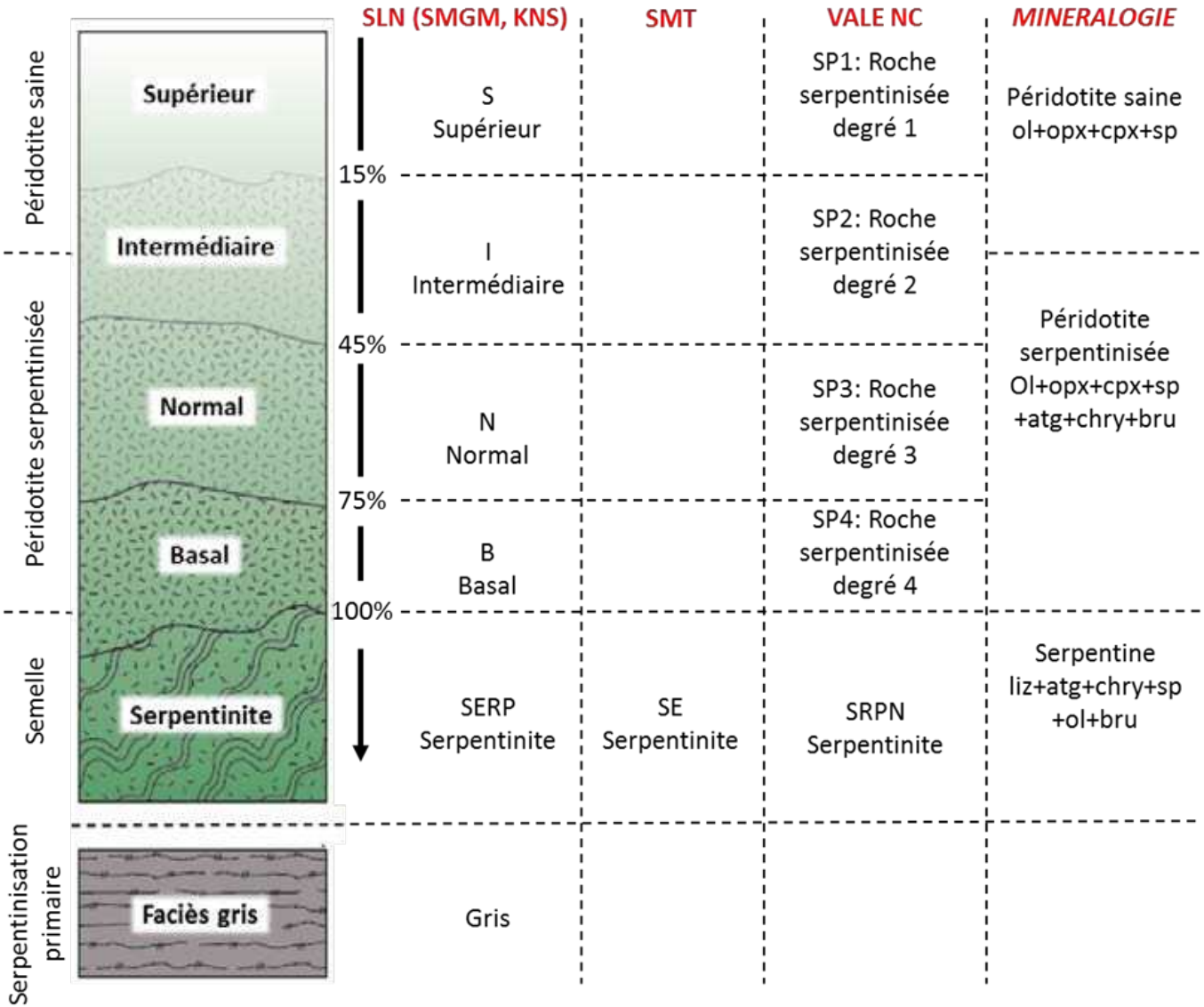
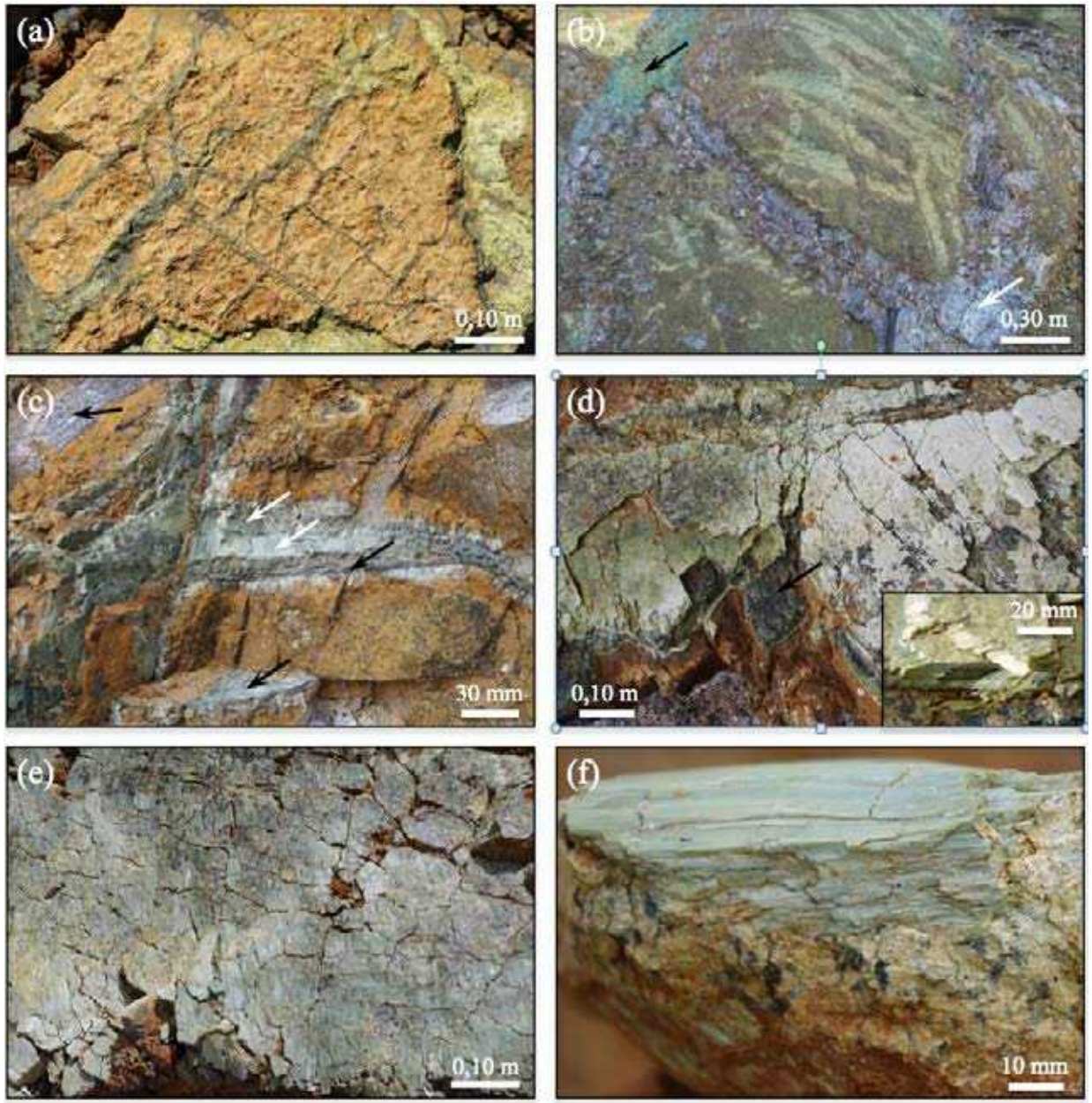


Figure 5 : Serpentinisation des péridotites. Terminologie comparée du degré de serpentinisation des péridotites par les différents acteurs miniers. Ol : olivine, opx : orthopyroxène, cpx : clinopyroxène, sp : spinelle, atg : antigorite, chry : chrysotile, bru : brucite, liz : lizardite.

Figure 6 : Diversité texturale des veines épaisses à serpentine des massifs péridotitiques.(a) Veines entrecroisées de serpentine noire (dominance de lizardite) dans un encaissant à harzburgite altérée, à noter dans ce réseau de serpentine la présence de zones minéralisées nickélifères vert olive (Moneo, CSV), (b) Veines très épaisses (environ 0,30m) de serpentine noire, enveloppant et recoupant (au milieu de la photo) une boule de dunite (Poro, Stanislas), à noter également la présence dans ce réseau de plages turquoises nickélifères (flèche noire) et blanches magnésiennes (flèche blanche), (c) Plans de fracturation bordés de serpentine noire (flèches noires) et abritant localement des lentilles brun verdâtre (flèches blanches), composées de rangées discontinues de nanotubes jointifs de chrysotile ("crack-seal") (Kopeto, Kariki), (d) Veine de serpentine noire (flèche noire), couverte par des rangées de nanotubes jointifs de chrysotile (environ 20mm d'épaisseur) brun verdâtre (à gauche) à blancs (à droite), (encadré : vue transversale montant l'inflexion des rangées de nanotubes et leur changement de couleur : brun verdâtre à la base → blanc au sommet) (Poro, Bonini), (e) Plaquage ondulé (surface de cisaillement) d'antigorite brun verdâtre à blanc (Poro, Bonini), (f) Vue transversale sur les écailles brun verdâtre d'antigorite (Kopeto).



3. PROFILS D'ALTERATION

3.1. PROFIL TYPE

En Nouvelle-Calédonie, les péridotites sont soumises à l'altération météorique depuis le chevauchement (obduction) d'une partie du manteau océanique sur le bâti calédonien au nord de la ride de Norfolk (Ulrich 2010) à la fin de l'Éocène, il y a environ 35 Ma (Paris 1981, Cluzel *et al.* 2001). Des âges paléomagnétiques de 25 Ma ont été obtenus sur des échantillons de cuirasse du massif de Tiébaghi (Sevin et al. 2011 ; Sevin, 2014).

Les profils d'altération sont structurés verticalement en plusieurs horizons dont la dénomination varie selon les géologues, les altérologues ou les géomorphologues. À l'échelle du Territoire, les termes employés pour désigner ces différents ensembles varient également selon les opérateurs miniers. La correspondance entre ces différents termes est synthétisée sur la figure 7.

Dans le cadre de cet atlas, trois grands ensembles d'horizons seront distingués, avec de bas en haut : (1) la roche-mère non altérée (RM) ou faiblement altérée (SR : SAP-RM), (2) la saprolite (SAP) à structure de la roche conservée et (3) l'ensemble des horizons latéritiques *sensu stricto* (LAT) dans lequel les structures et volumes de la roche sont plus rarement conservés. Ce troisième ensemble comprend de bas en haut : la latérite de transition (LAT-T), la latérite jaune (LAT-J), la latérite rouge (LAT-R) et enfin le niveau supérieur induré, formé de pisolithes (grenaille) et de cuirasse (Fer : Ferricrète).

3.2. FACIES ALTERES

L'altération différentielle des minéraux de la roche (d'abord olivine puis pyroxène et enfin serpentine) permet de reconnaître assez facilement la nature des anciens substrats rocheux dans les différents faciès d'altération (saprolites et base des niveaux latéritiques) reconnus sur fronts miniers.

3.3. LES SAPROLITES

Dans les saprolites, les dunites altérées montrent des surfaces lisses à matrice fine jaune vif (altération des olivines en oxydes de fer) (Fig. 8a). Les fronts d'altération des harzburgites montrent des surfaces rugueuses (pyroxènes moins altérés en relief, associés dans les creux à une matrice fine jaune brunâtre) (Fig. 8b-c). Dans les pyroxénites faiblement altérées, les cristaux de pyroxènes en relief sont nombreux et presque jointifs (Fig. 8d). Les veines de serpentine de ces roches altérées apparaissent également en relief (Fig. 8b-d).

Géologique	Altérologique	Mineur calédonien en général	SLN (SMGM, KNS)		SMT		Vale NC
Cuirasse (ferricrète)	Ferricrète	Grenaille Cuirasse démantelée Cuirasse en place Grenaille	G/GR: Grenaille C/CU: Cuirasse G/GR:Grenaille	6	G: Grenaille CL: Cuirasse démantelée CF: Cuirasse de fer G: Grenaille	6	ISH: Grenaille de fer ICP: Cuirasse de fer ISH: Grenaille de fer
Saprolite fine/ latérite	Allotérite (perte de masse et de volume)	Latérite rouge	LR: Latérite rouge	6	LF: Latérite rouge	5	LATR: Latérite rouge
	Isaltérite (perte de masse)	Latérite jaune	LJ: Latérite jaune	6	LA: Latérite jaune Ou LB: Latérite boueuse	5	LATJ: Latérite jaune
Niveau à oxydes de Mn et Co		Latérite de transition à asbolane	LT: Latérite de transition	6	TM: Terre minéralisée Ou TB: terre boueuse	5	TRN: Transition Ou ASB: Asbolane et/ou Co: Cobalt
Saprolite grossière		Saprolite	Saprolite terreuse	5 4	MT: Minerai tendre Ou MB: Minerai boueux	5 4	SSP: Saprolite molle
	Horizon fissuré		Saprolite dure	3	MA: Minerai tendre + Noyaux altérés	3	HSP: Saprolite dure
				2	MD: Minerai tendre + Noyaux durs	2	
Roche-mère bed rock	Roche-mère	Bed rock Péridotite	Roche saine	1	Roche saine	1	RX: Rocheux

Figure 7 : *Correspondance entre les différentes dénominations des grands ensembles d'un profil d'altération type développé sur péridotite*

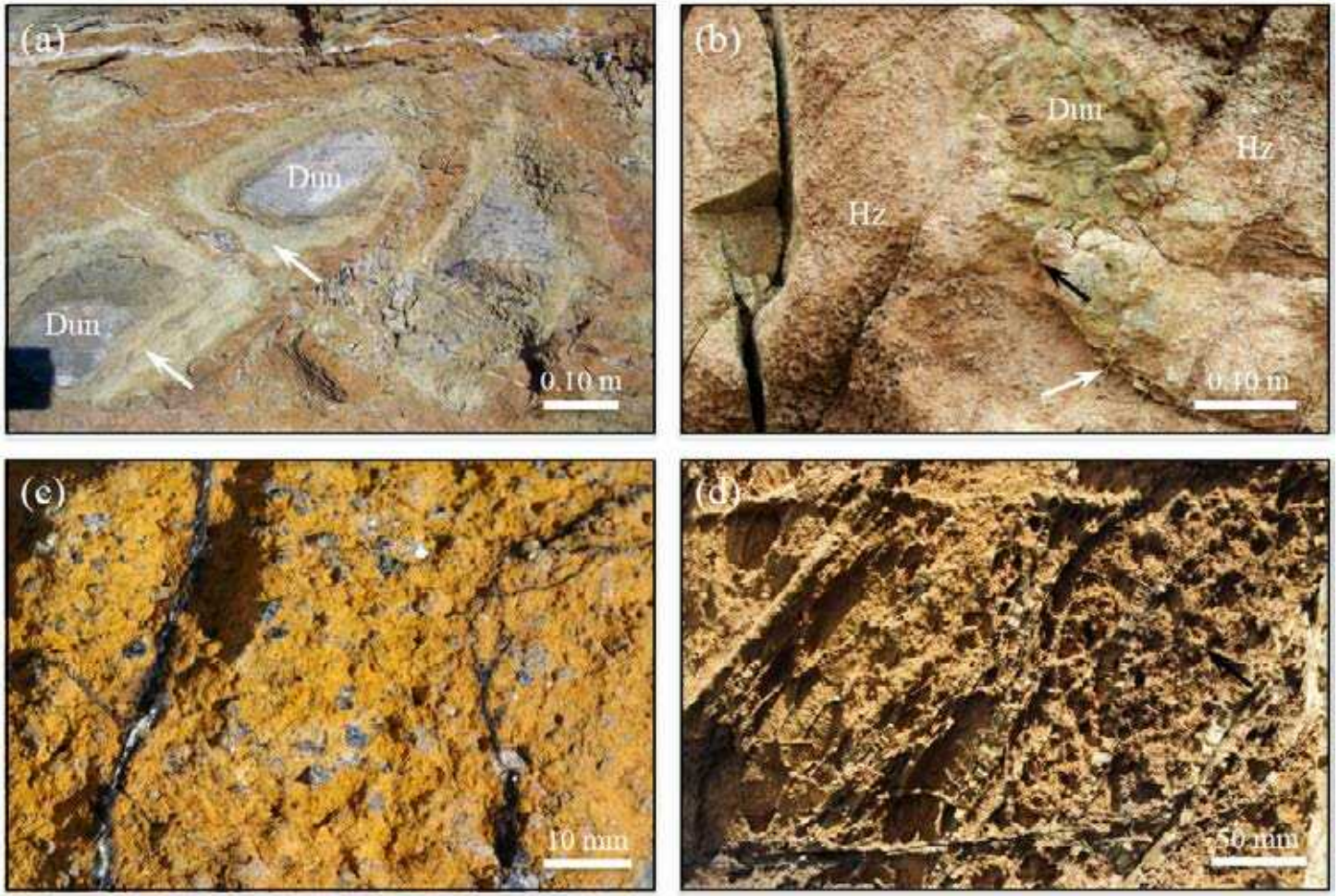


Figure 8 : Altération au niveau de la saprolite. (a) Boules de dunite (Dun) altérées à leur périphérie en une matrice meuble jaune vif (flèches) montrant une surface lisse (absence de pyroxène), l'encaissant meuble, jaune brunâtre à brun rouge, est vraisemblablement issu de l'altération d'harzburgite (Poro, Bonini), (b) Les niveaux à harzburgite du substrat rocheux (Hz) développent des surfaces rugueuses dans l'ensemble saprolitique (les pyroxènes moins altérés apparaissent en relief), l'altération se concentre dans les zones fracturées, les veines de serpentine peu nombreuses apparaissent en relief (flèche), noter également la présence d'une boule de dunite (Dun) (Poro, Bonini), (c) Détail d'un bloc d'harzburgite altéré, jaune brunâtre, montrant des cristaux sains de pyroxène (Poro, Isabelle), (d) Veines de serpentines en relief dans un encaissant péridotitique altéré (Thio, Camp des Sapins).

3.3.1. LES LATERITES DE TRANSITION

Les latérites de transition (LAT-T) montrent des faciès très variés, liés à l'abondance relative et à la diversification des minéralisations Ni/Co. Ces latérites peuvent être absentes dans certains profils d'altération, plus particulièrement dans les niveaux peu minéralisés et/ou fortement remaniés et pauvres en Ni. A l'opposé, dans les niveaux les plus minéralisés, certaines de ces latérites gardent les textures et les structures de la roche (matériau alors qualifié par certains miniers de saprolite terreuse). Il s'agit des minerais "bouchons" qui n'ont été observés que dans des matériaux issus de l'altération d'harzburgite (faciès "pain d'épice" ou bariolé jaune brunâtre à plages brun rouge: LAT-T_{Hz}). L'altération poussée de ces matériaux (prédominance d'oxydes de fer) et le maintien des structures et textures de la roche expliquent la très faible densité de ces latérites (proche de 0,9). Le maintien des structures de la roche est assuré par les réseaux de serpentine les plus épais (Fig. 9a) qui peuvent être partiellement ou totalement remplacés par des argiles (phyllosilicates Mg/Ni de type deweylite : Dew ou garniérite : Gar) ou de la silice (Si) (Fig. 9b-f). Dans les latérites riches en veines argileuses vertes (Gar), la contribution des phyllosilicates à l'enrichissement en Ni des minerais oxydés peut être importante (Fig. 9b, c). Cette contribution à l'enrichissement en Ni, mais aussi en Co, peut être accrue par l'adjonction à ce réseau de précipités noirs à oxydes de manganèse (Ox-Mn) (Fig. 9d). Elle est à l'inverse nulle dans les latérites de transition à veines argileuses blanches (Dew) (Fig. 9e) ou siliceuses grises à gris rougeâtre (Si) (Fig. 9f).

Dans certaines latérites de transition, le maintien des structures de la roche n'est que partiel (Fig. 10a-d) ou n'est plus assuré (Fig. 10e,f). La perte de ces structures s'accompagne d'un accroissement de la densité des latérites. La perte partielle des structures de la roche est attribuée à l'adjonction dans les latérites bariolées des minerais bouchons (LAT-T_{Hz}) d'une matrice plus dense à coloration jaune brunâtre plus homogène (Fig. 10a-d). Cette matrice jaune brunâtre comble généralement des vides fissuraux. Elle montre fréquemment des surfaces plus ou moins lissées, attribuées à des contraintes mécaniques (déformation et cisaillement). Cette matrice jaune brunâtre devient nettement majoritaire plus haut dans les profils d'altération (LAT-J). Dans les zones d'interpénétration de ces deux types de latérite (LAT-T_{Hz} et LAT-J), soumises localement à des déformations importantes, les veines silicatées à deweylite (Dew) (Fig. 10a) et à garniérite (Gar) (Fig. 10b), voire même lorsqu'elles sont présentes à oxydes de manganèse (Ox-Mn) (Fig. 10c), sont très nettement fragmentées. Dans d'autres profils d'altération, la perte brutale des structures de la roche peut être reliée à l'absence de ces veines. Les latérites bariolées (LAT-$T_{(Hz)}$) se tassent sous le poids des matériaux sus-jacents (Fig. 10e,f).

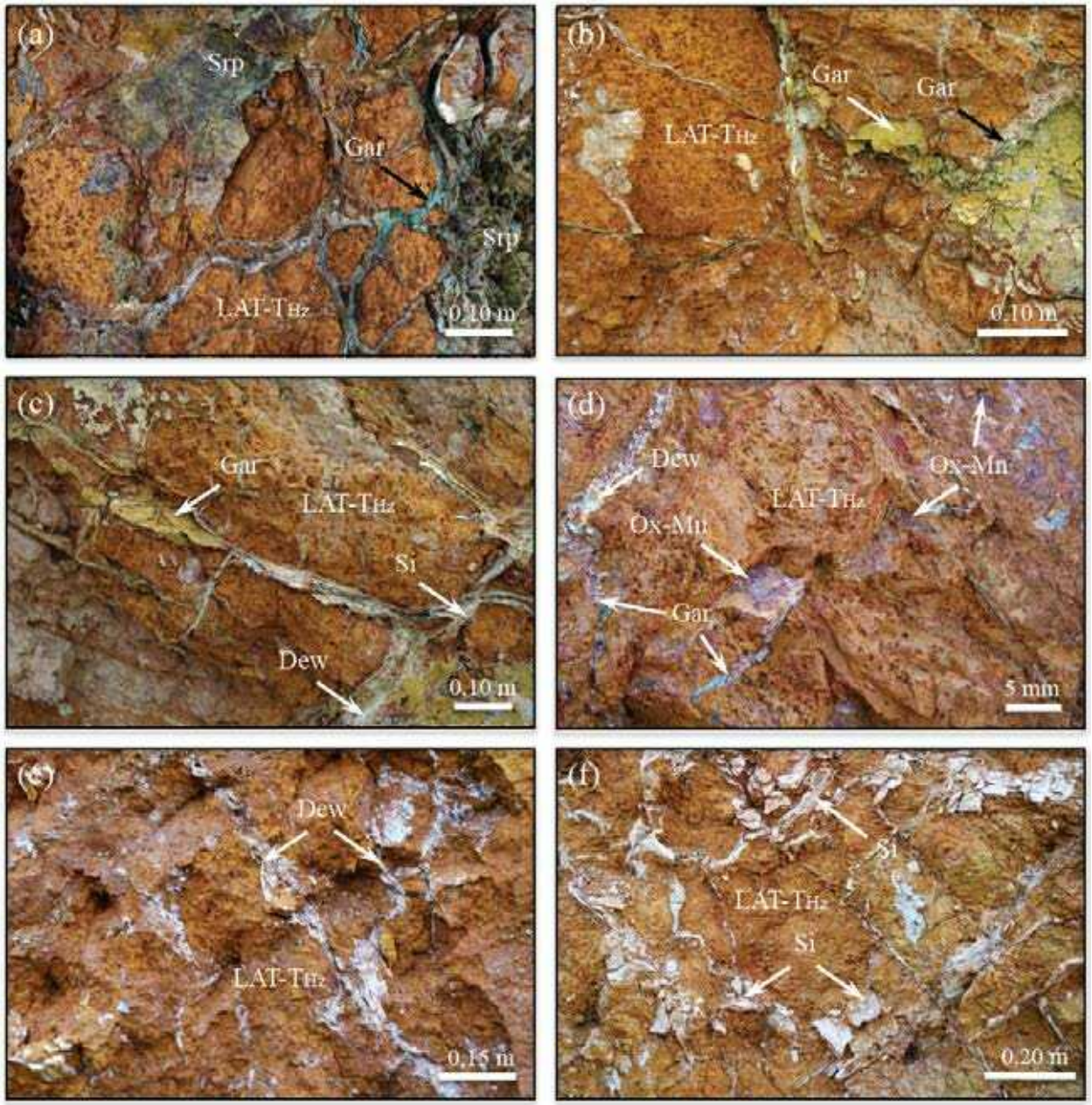


Figure 9 : Les latérites de transition. Minerai "bouchon" (densité 0,9) jaune brunâtre à plages brun rouge (issu de l'altération d'harzburgite : LAT-THz) avec cloisons entrecroisées de serpentine plus ou moins minéralisées (phyllosilicates Mg/Ni de types deweylite : Dew et garniérite : Gar) : (a) Minerai "bouchon" avec cloisons à dominance de serpentine noire (Srp), localement à remplissages argileux turquoises (Gar) (Poro, Isabelle), (b) Autre minerai "bouchon" montrant des remplissages argileux vert olive (Gar) dominants et quelques remplissages turquoises (flèche noire) (Poro, Isabelle), (c) Autre minerai "bouchon" montrant également le passage latéral à des remplissages argileux blancs (Dew) et siliceux gris (Si), (d) Présence également dans ce minerai "bouchon" d'oxydes de manganèse (Ox-Mn) jouxtant les remplissages verts (Gar) et blancs (Dew), (e) Minerai "bouchon" montrant un réseau entrecroisé de fractures , comblées essentiellement de remplissages « argileux » blancs (Dew) (Poro, Stanislas), (f) Même type de minerai avec toutefois des remplissages siliceux (Si) nettement dominants.

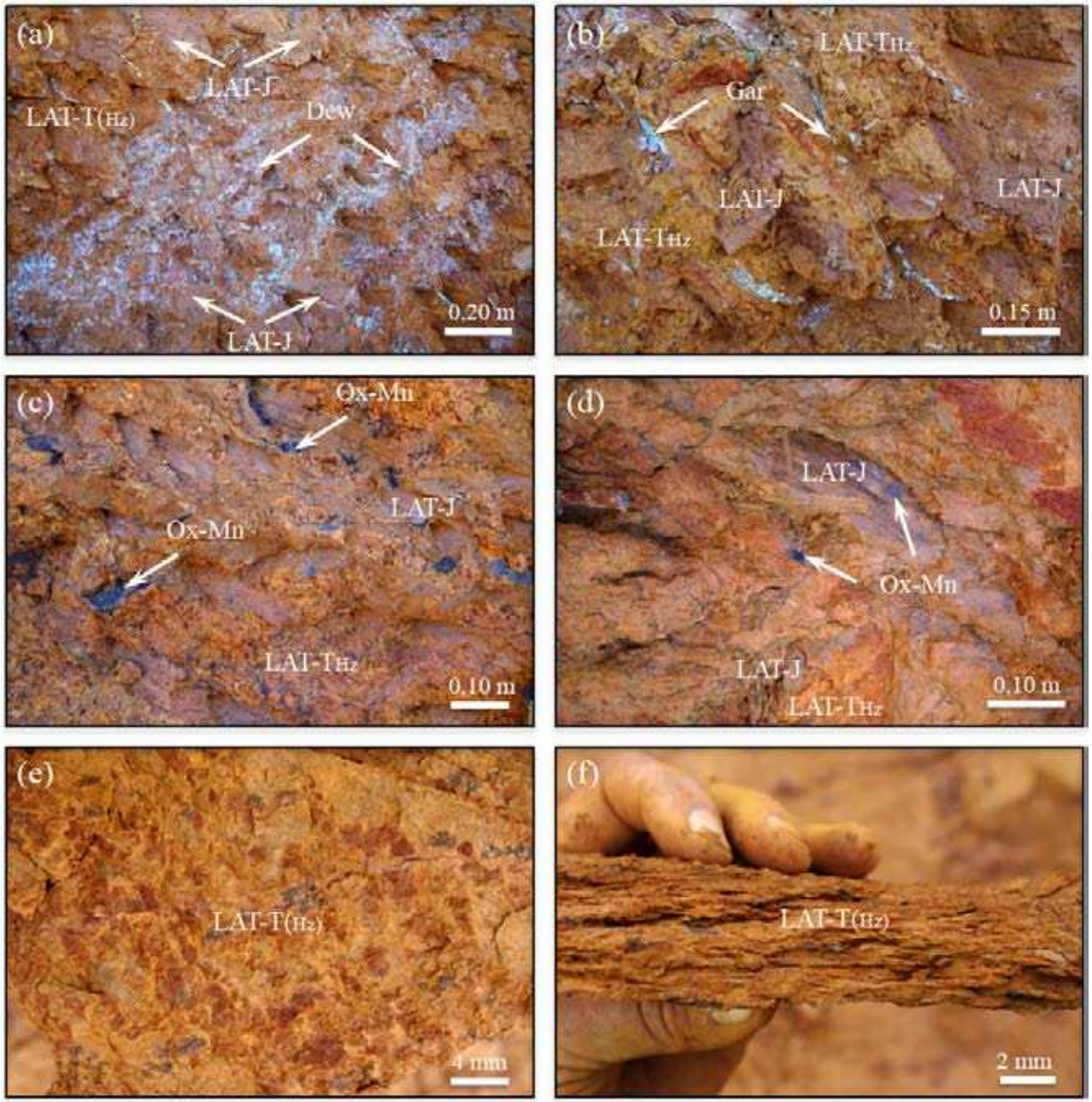


Figure 10 : Perte progressive des structures héritées du substrat rocheux dans les latérites de transition. (a) Vue d'ensemble sur une latérite bariolée (issue de l'altération d'une harzburgite : LAT-THz) traversée par des veines « d'argile » blanche (Dew) plus ou moins fragmentées, présence également d'une trame plus ou moins anastomosée de matériaux plus denses et de coloration homogène, identique à celle des latérites jaune brunâtre sus-jacentes (LAT-J), (b) Latérite bariolée (LAT-THz) traversée par des veines de garniérite plus ou moins disloquées (Gar), vides fissuraux comblés de matériaux plus denses jaune brunâtre (LAT-J), présence dans ce niveau de surfaces lissées (ou striées) témoignant de plans de déformation et/ou de décrochement, (c) Latérite bariolée (LAT-THz) dépourvue de veines silicatées Mg/Ni (deweylite/garniérite) et à nombreux précipités noirs d'oxydes de manganèse (Ox-Mn), recoupée par une réseau plus ou moins anastomosé de matériaux jaune brunâtre (LAT-J), (d) Idem avec des matériaux jaune brunâtre (LAT-J) plus abondants, présence également d'une surface de décrochement lissée, (e) Le tassement des latérites bariolées dépourvues de veines majeures à deweylite et garniérite (LAT-T(Hz)) est révélé par l'aplanissement des plages rouges marquant l'ancien emplacement des pyroxènes, (f) Ce tassement est aussi révélé par un débit feuilleté des latérites.

3.3.2. LES LATERITES JAUNES, ROUGES ET LA CUIRASSE

Les niveaux supérieurs des profils latéritiques se caractérisent par une plus grande homogénéisation des matrices qui les constituent sous l'effet du tassement, du remaniement et des transports particulaires. De bas en haut, ces niveaux se différencient en trois grandes unités : les latérites jaunes (LAT-J), les latérites rouges (LAT-R) et les niveaux supérieurs indurés à pisolithes (nodules ferrugineux à cortex) et à cuirasse (Fer) (Fig. 11). Certaines structures héritées du substrat peuvent localement se maintenir dans ces unités, témoignant ainsi d'une homogénéisation partielle de ces matériaux, essentiellement constitués d'oxydes de fer. Les résidus silicatés sont généralement peu abondants ou absents dans ces matériaux et les oxydes de Mn peuvent se maintenir dans certaines latérites jaunes (absents dans les latérites rouges et niveaux indurés sus-jacents).

Localement, les horizons de latérite jaune et rouge peuvent être traversés par des veines épaisses de coloration rouge violacé (ou "lie de vin") à rouge foncé (Fig. 12). Ces veines épaisses contiennent de plus grandes proportions d'hématite que les latérites jaunes. Elles peuvent révéler sur fronts miniers des plis ondulés de très grande envergure ou envelopper des corps intrusifs (Fig. 12a). Elles peuvent également révéler à plus grande échelle un aspect maillé (Fig. 12d), semblable à celui reporté pour les réseaux de serpentinites des péridotites, et résulter de ce fait de l'altération de ces derniers.

3.3.3. LES FILONS ET SILLS DE WEHRLITES ET GABBROS

Des lentilles ou veines blanches de grande envergure sont fréquemment rencontrées dans les saprolites et latérites des différents massifs miniers (Fig. 13). Elles sont issues de l'altération d'intrusions ou sills de wehrlites à plagioclase et gabbros. Elles présentent des proportions variables de phyllosilicates dioctaédriques (kaolinite et halloysite) et d'hydroxydes alumineux (gibbsite). Ces veines felsiques (riches en aluminium) sont nombreuses et sensiblement horizontales dans les latérites des plaines du massif du Grand Sud (Fig. 13a, b). Des faciès mixtes ont également été observés dans la grande majorité des sites miniers étudiés dans le cadre de ces projets. Des faciès rouge violacé mouchetés de blanc ont par exemple été observés dans les latérites de Goro (Fig. 13c) et des faciès blancs auréolés de rouge violacé dans celles de la klippe de Tiébaghi au nord de l'île (Fig. 13d).

Ces faciès sont particulièrement bien représentés lors de l'altération des cumulats gabbroïques du Sud du Massif du Sud (Fig. 14).

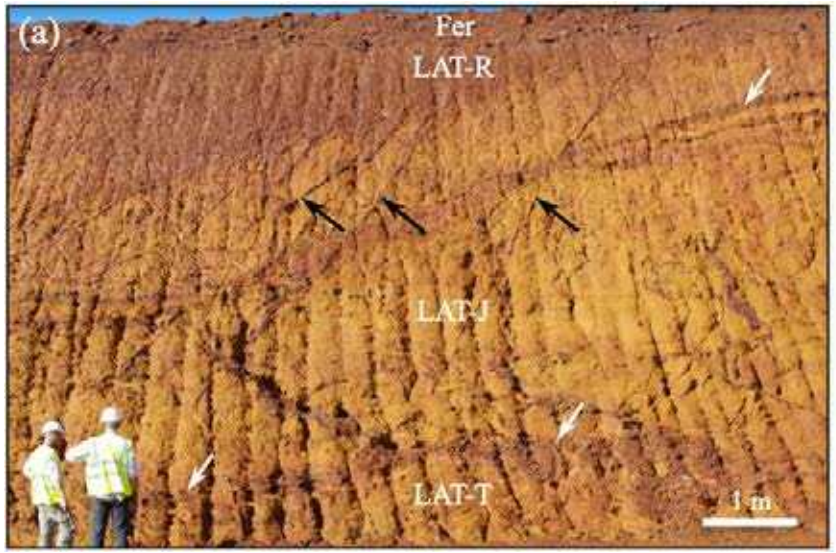


Figure 11 : Latérites jaune, rouge et cuirasse.

(a) Partie supérieure des profils d'altération du test minier de Goro (photo prise depuis le niveau 190m d'altitude) montrant les principales unités latéritiques (de bas en haut) : latérite bariolée (LAT-T), latérite jaune (LAT-J), latérite rouge (LAT-R), niveau supérieur induré à pisolithes et cuirasse (Fer), noter également la présence de veines ondulées rouge foncé à rouge violacé (flèches blanches), légèrement indurées, abritant localement des produits blancs d'altération de gabbros ainsi que des failles subverticales (flèches noires) comblées de matériaux latéritiques (les failles recoupent les veines rouge violacé, rejet de faille faible à nul au niveau de ces veines) ;

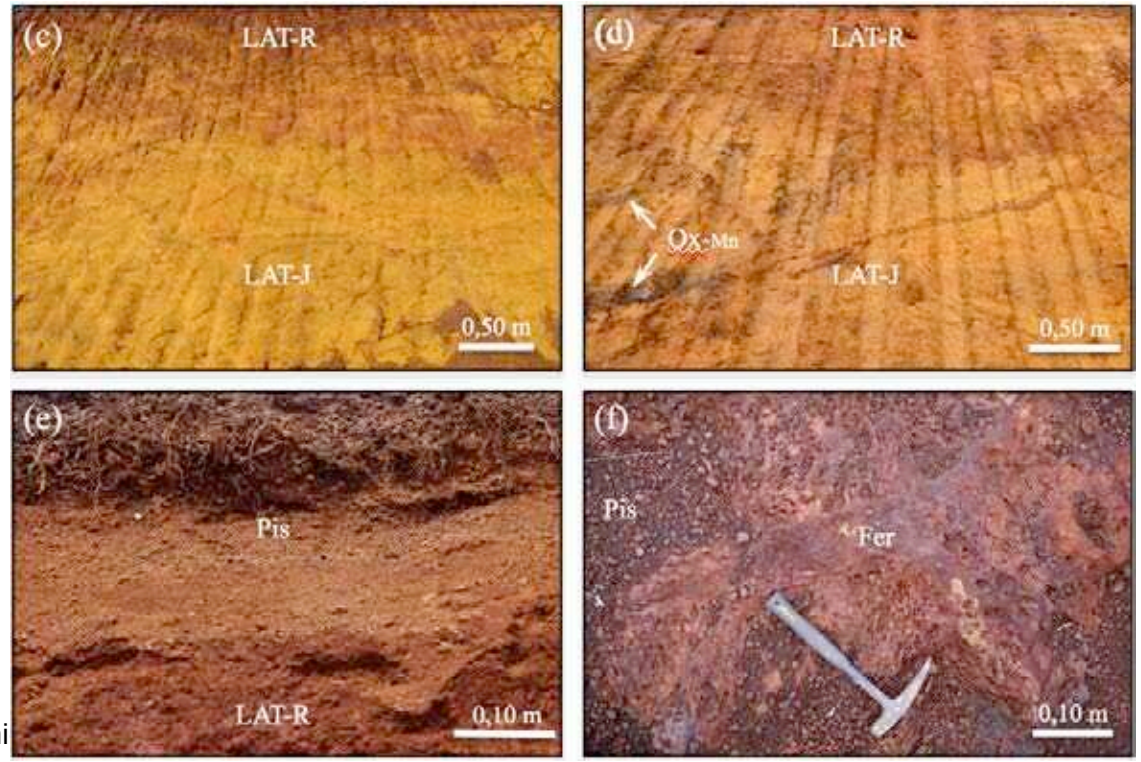
(b) Détail d'une de ces failles traversant la latérite bariolée, cette faille de faible ouverture (20mm) est comblée de matériau latéritique jaune brunâtre (flèche) issue du niveau latéritique sus-jacent (LAT-J) ;

(c) Vue sur la transition entre la latérite jaune et la latérite rouge du test minier de Goro (photo prise depuis le niveau 200m) ;

(d) Vue similaire avec une veine noire à oxydes de manganèse (Ox-Mn) dans latérite jaune (LAT-J) ;

(e) Partie supérieure du profil d'altération du plateau de Trazy (Koniambo) montrant la latérite rouge (LAT-R) et le niveau superficiel de démantèlement à pisolithes (Pis) (au niveau du mat racinaire superficiel absence de matrices fines, les pisolithes ou nodules ferrugineux sont pratiquement jointifs), noter aussi l'absence de cuirasse ;

(f) Niveau cuirassé (Fer) de ce plateau, rouge vif à brun noir, montrant un faciès nettement réticulé et lité, nombreux pisolithes (Pis) recouvrant localement cette cuirasse.



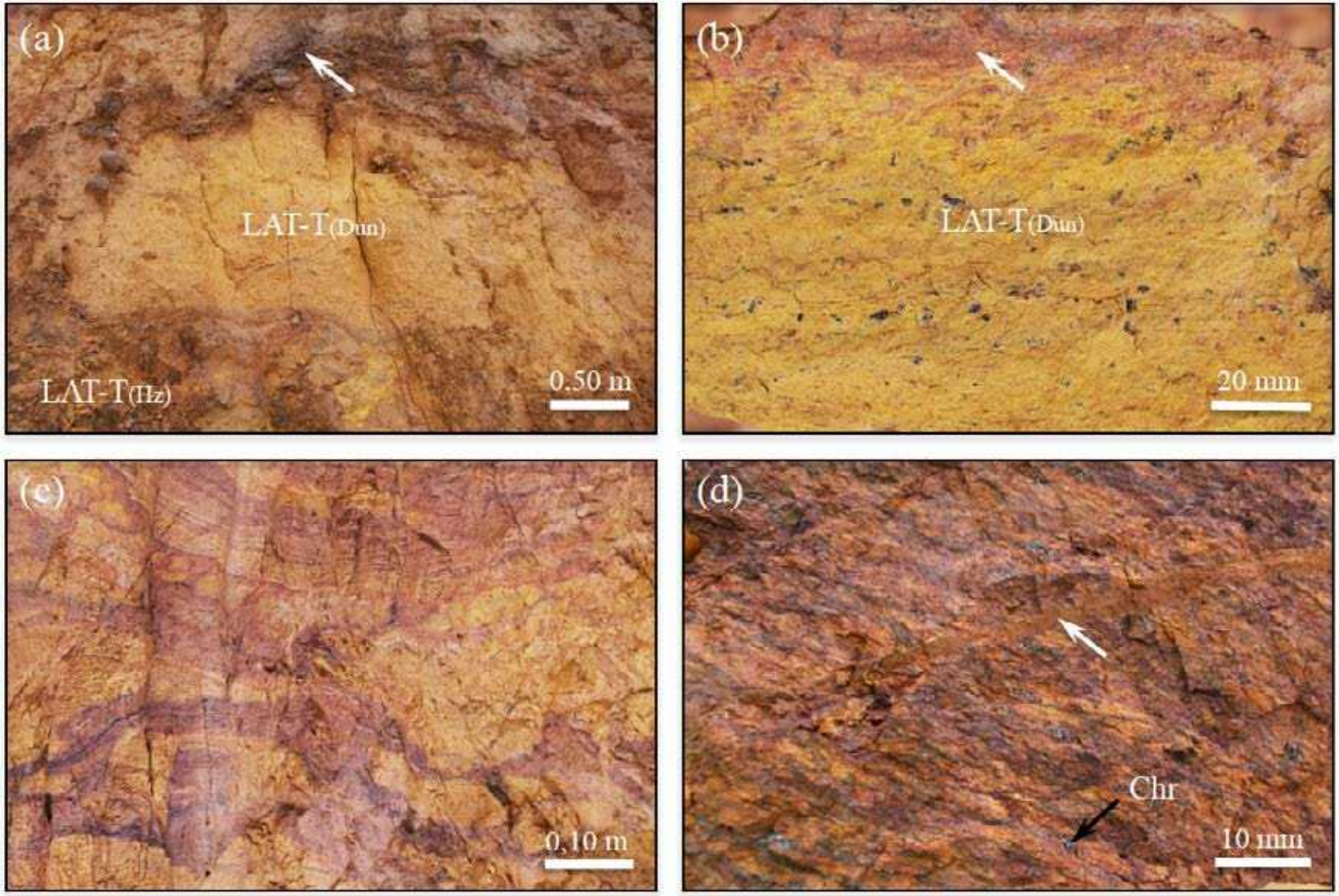


Figure 12 : Détail des profils d'altération de Goro. (a) Boule jaune vif issue de l'altération d'une dunite, bordée d'une veine (ou gaine) rouge violacé à rouge foncé, composée d'oxydes de fer (flèche), (b) Détail sur la bordure de cette boule montrant ces deux faciès, (c) Veines rouge violacé (oxydes de fer), plus ou moins anastomosées et localement d'aspect zoné, traversant une latérite bariolée (altération d'harzburgite), (d) Vue rapprochée montrant l'aspect maillé des veines ou veinules rouge violacé à rouge foncé, présence locale d'amas noirs de chromite (Chr), noter également la présence d'une microfaille (environ 2mm d'ouverture) comblée de matériau latéritique homogène, rouge brunâtre (flèche blanche).

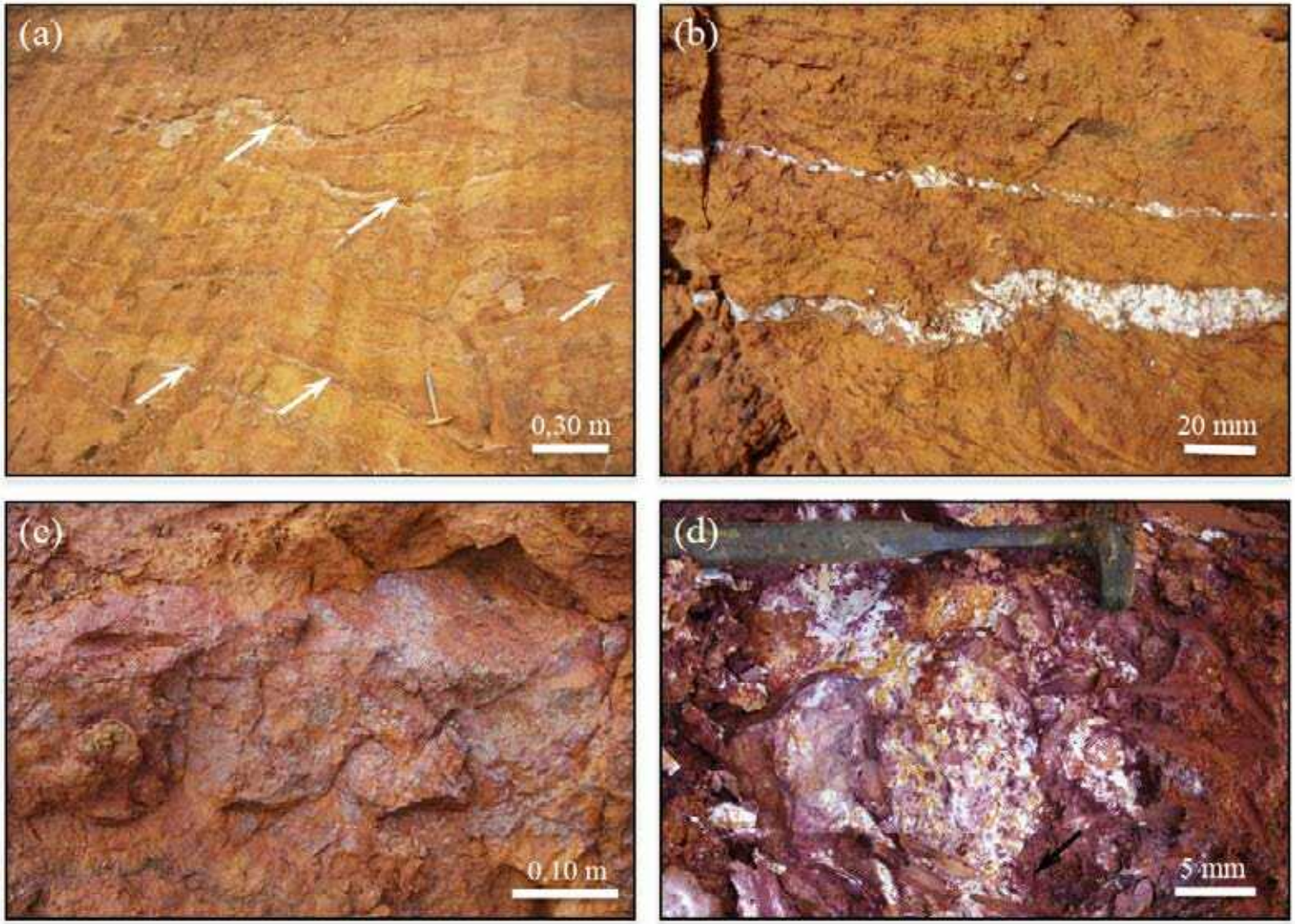


Figure 13 : Altération des wehrlites et gabbros. (a) Succession verticale de veines blanches à kaolinite et gibbsite (flèches), issues de l'altération in situ d'intrusions à wehrlites dans les latérites de Goro, (b) Détail sur deux de ces veines, (c) Veine rouge violacé (oxydes de fer), mouchetée de blanc (kaolinite et gibbsite), dans une latérite bariolée issue de l'altération d'une harzburgite (Goro, niveau 180m), (d) Intrusion de gabbro altéré blanc (kaolinite), à nombreuses plages et à auréole rouge violacé (oxydes de fer) dans latérites bien drainées brun rougeâtre (Tiébaghi, Alpha/doline).

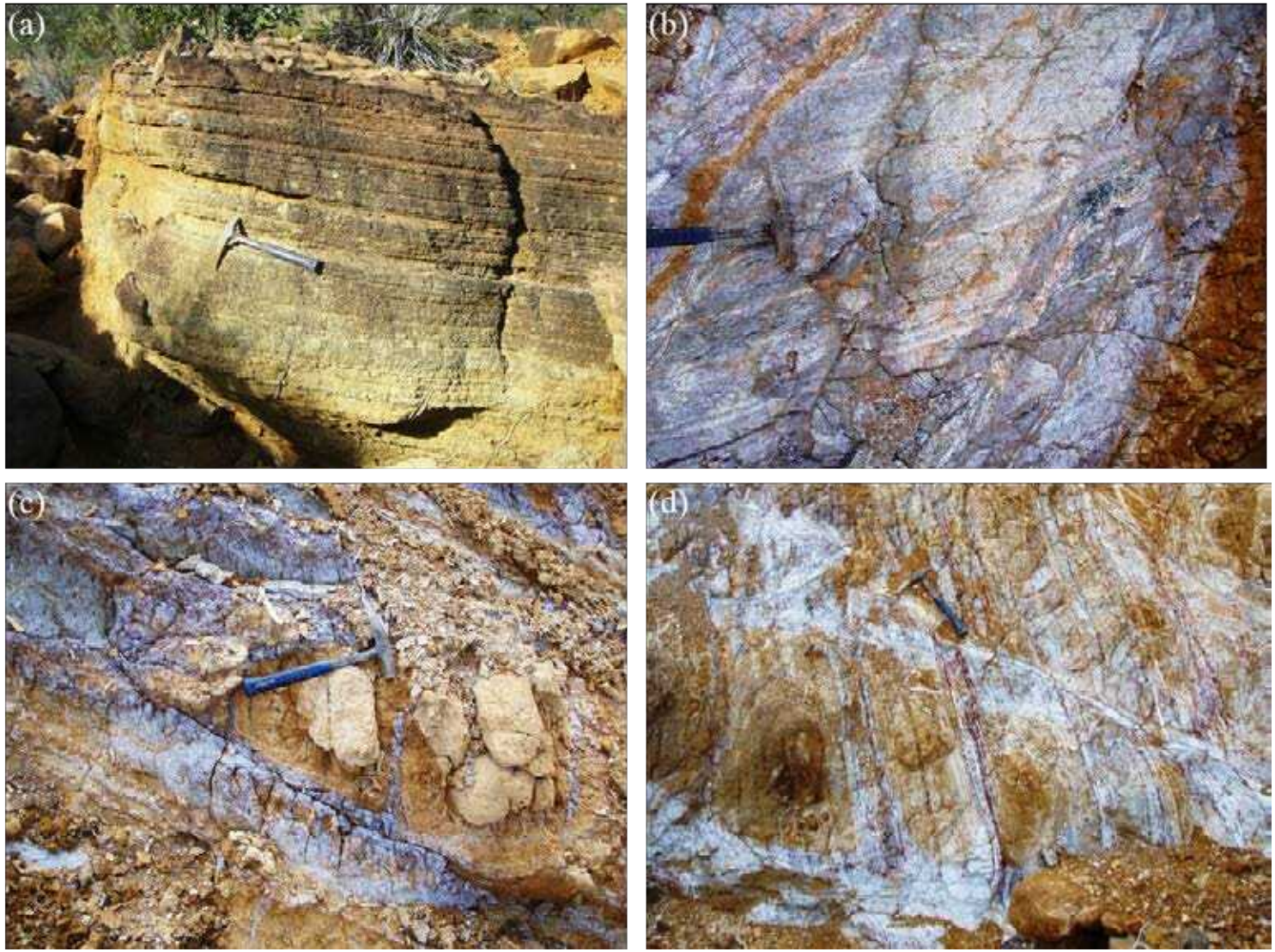


Figure 14 : Altération des cumulats gabbroïques. a) Cumulat gabbroïque non altéré. (b), (c) et (d) Cumulats gabbroïques altérés. L'altération riche en kaolinite et gibbsite se développe préférentiellement le long des niveaux les plus riches en cristaux de plagioclase ou le long de fractures. En (b) les blocs d'apparence saine sont composés exclusivement de gibbsite.

3.3.4. LES OXYDES DE MANGANESE COBALTIFERES

Les oxydes de manganèse de ces minerais oxydés sont essentiellement présents dans les latérites de transition (LAT-T) et parfois aussi, et d'une façon plus localisée, dans les latérites jaunes (LAT-J) qui les surmontent. Ils apparaissent sur le terrain sous forme de veines noires millimétriques à centimétriques, plus ou moins disloquées et également sous forme d'amas brun foncé aux limites plus diffuses (Fig. 15). Ces veines et amas noirs à brun foncé n'ont été étudiés d'une façon détaillée que sur les sites miniers du massif du Koniambo et de la plaine de Goro. Sur ces deux sites miniers, les oxydes de manganèse ont été attribués à diverses espèces de phyllomangantes (Fritsch *et al.* 2015 ; Ploquin *et al.* 2015). Ceux du site minier du Koniambo contiennent des quantités variables d'asbolane et de birnessite. Ceux de la plaine de Goro correspondent de leur côté à des mélanges intimes d'asbolane et de lithiophorite.

3.3.5. FACIES A GLEY ET HORIZON SUPERIEUR ACIDE (HSA)

Dans les massifs du nord, l'extrême diversité des substrats et la structure redressée des roches expliquent l'alternance de niveaux oxydés (latérites bien drainées) et de niveaux réduits (latérites mal drainées de type Murin-Murin, Australie) d'épaisseur hectométrique (Fig. 16a, b). Les niveaux réduits peuvent côtoyer des enclaves de dunite fortement serpentinisées (noires) à spinelles chromifères (chromites) (Fig. 16c, d).

Dans les niveaux réduits de ces massifs, la dominance de beidellites alumineuses et montmorillonites ferrifères doit être reliée à la nature du substrat rocheux: semelle redressée de serpentinite, intensément broyée (cataclasite argileuse) à carbonate de magnésium (Fig. 17a,b), lherzolites serpentinisées à plagioclases et à veines de gabbros (Fig. 17c). Ces bancs réduits sont généralement associés aux zones déprimées (dolines) des plateaux et à des nappes perchées. D'après la nomenclature des miniers, ils se différentient verticalement (de bas en haut) en : (i) un horizon de saprolite fine (Fig. 17d), (ii) un horizon à gley (Fig. 17e) et (iii) un horizon superficiel noir riche en matière organique (Fig. 17f). Ces horizons réduits présentent également de nombreuses fissures, comblées de sulfures (pyrite, millérite, polydimite) et carbonate de fer (sidérite).

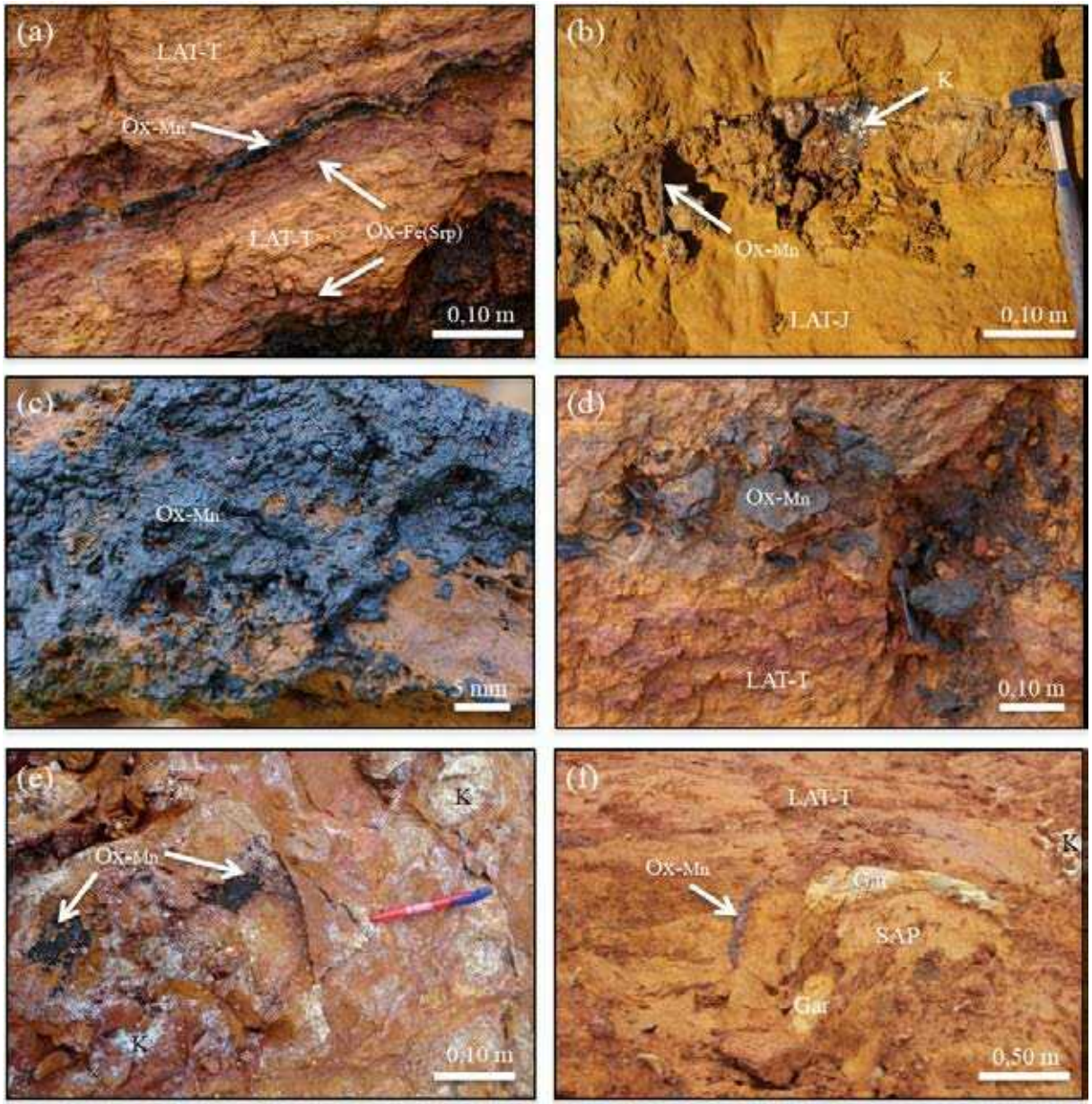


Figure 16 : Les oxydes de manganèse.
(a) Veine noire subhorizontale d'oxydes de Mn (Ox-Mn) bordée de matériaux rouge violacé (Ox-Fe(Srp)) dans latérite de transition (LAT-T) (Goro test minier, niveau 170m),
(b) Banc subhorizontal à cloisons entrecroisées (boxwork) noires d'oxydes de Mn (Ox-Mn) dans latérite jaune (LAT-J), ce banc contient localement des plages blanches à kaolinite (K) issues de l'altération de gabbros (Goro test minier, niveau 180m),
(c) Revêtements d'oxydes de Mn noirs (Ox-Mn) à aspect mamelonné (botryoïdes),
(d) Fines cloisons noires (Ox-Mn) démantelées dans latérite bariolée (LAT-T),
(e) Vue sur blocs de gabbros altérés en kaolinite et gibbsite (plages blanches : K), localement couverts d'oxydes de Mn noirs (Ox-Mn), (f) Boule de péridotite altérée (SAP), au sein d'une latérite (LAT-T), bordée d'écailles blanc verdâtre de silicates Mg/Ni (Gar) et d'une épaisse écaille noire d'oxydes de Mn (Ox-Mn) (Goro test minier, niveau 180m).

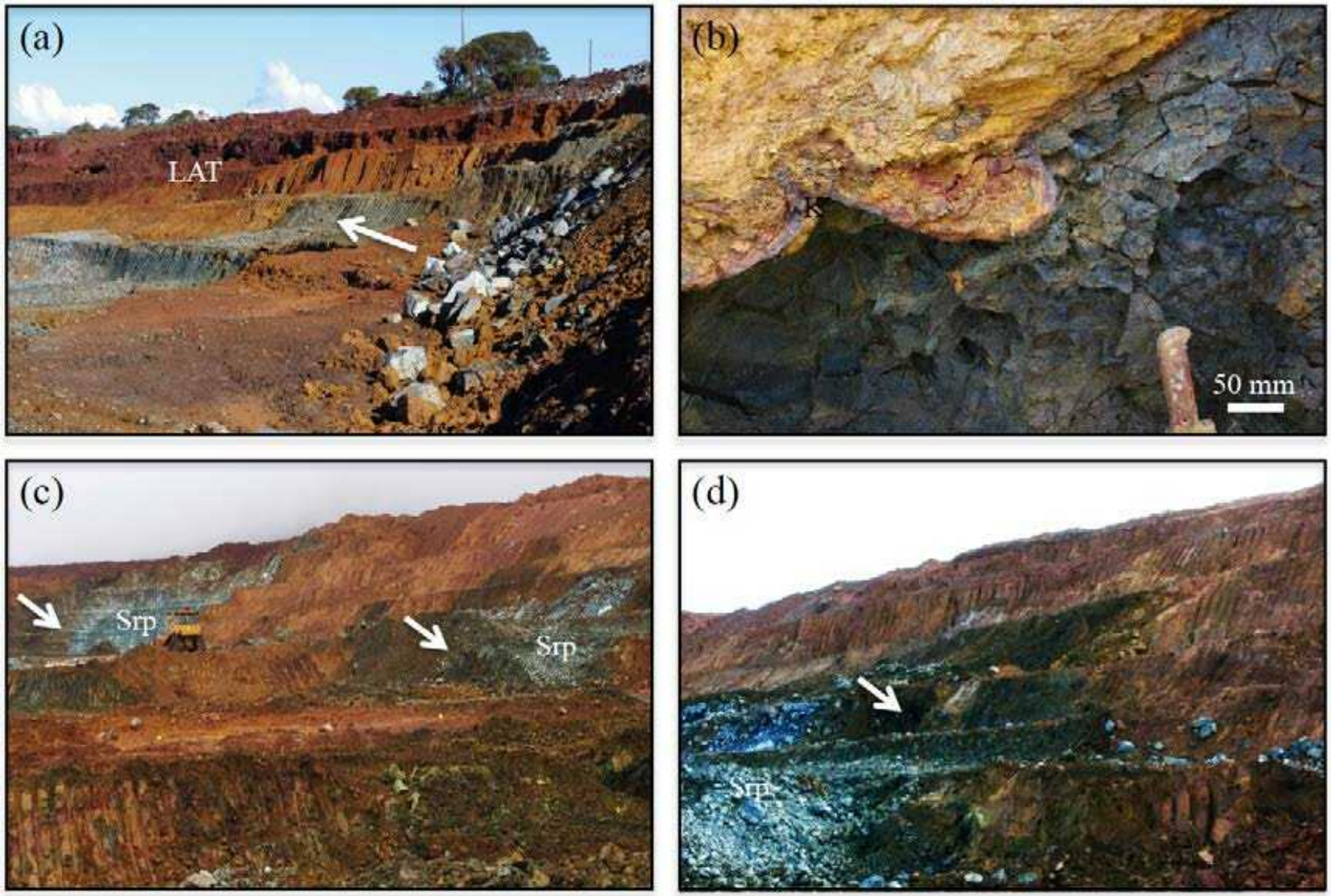
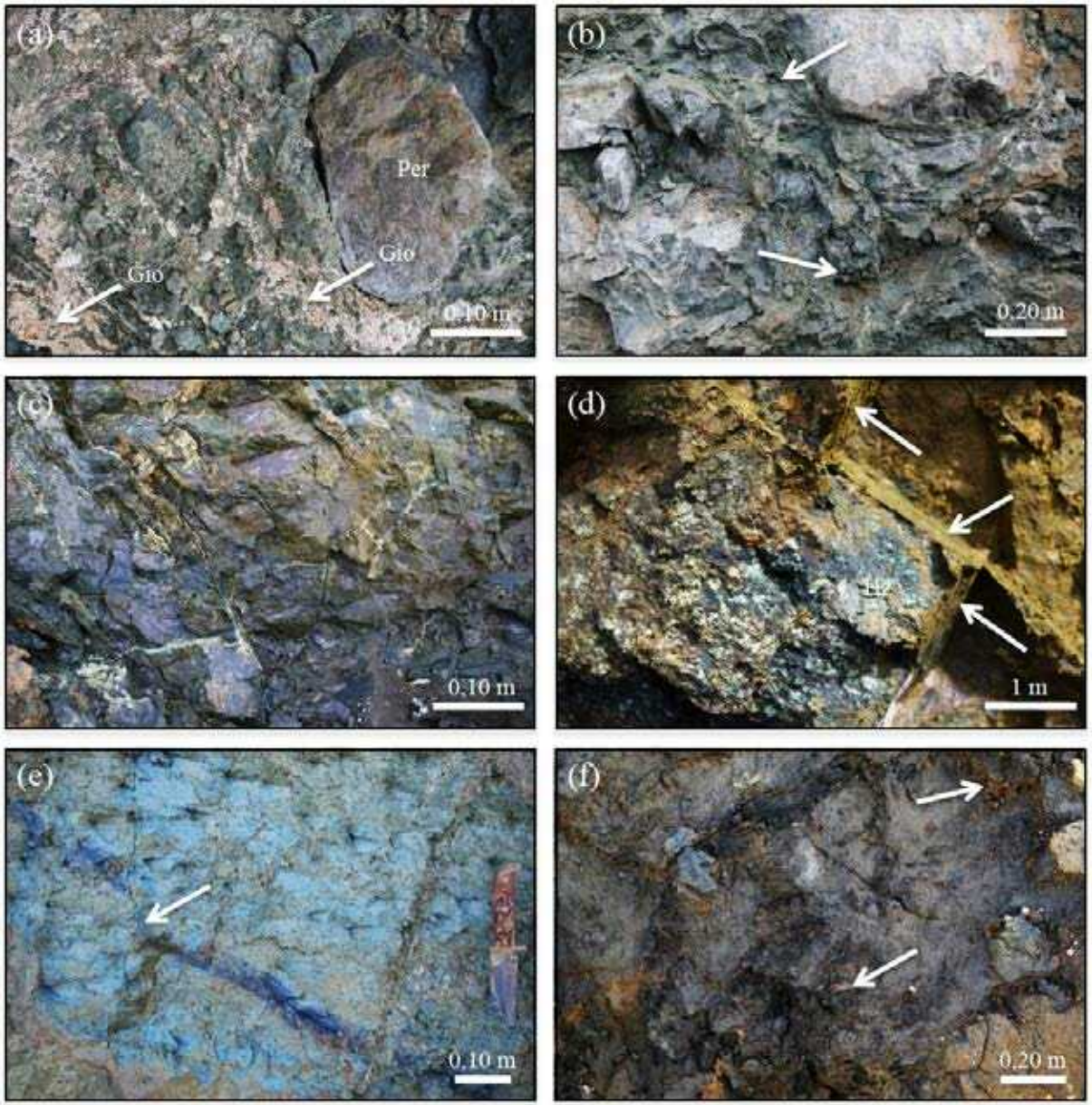


Figure 17 : Faciès à gley et horizon supérieur acide. (a) Intercalation d'un niveau réduit (flèche) dans un encaissant oxydé (Tiébaghi, Doline), le niveau réduit riche en smectite présente des colorations grises à brun foncé (latérites mal drainées) et l'encaissant à dominance d'oxydes de fer une coloration jaune brunâtre à rouge foncé (LAT : latérites mieux drainées), (b) Détail de la transition (subverticale) entre le niveau oxydé, jaune et rouge (induré : cuirasse) et le niveau réduit brun verdâtre à brun foncé, riche en smectite Fe/Al (c) Vue d'ensemble sur deux niveaux réduits brun foncé (flèches) qui jouxtent des enclaves noires peu altérées et fortement serpentinisées (Srp), (d) Vue rapprochée sur l'un d'entre eux.

Figure 18 : Faciès à gley et horizon supérieur acide.
(a) Ecaille redressée de semelle de serpentinite (Tiébaghi, Vivaneau), noter l'aspect broyé de la roche avec un bloc résiduel de péridotite (Per), la présence de serpentine brun verdâtre et des précipitations blanches (Gio) de carbonates de magnésium (aspect de "chou-fleur") le long de zones fracturées, (b) Les zones intensément mylonisées et argilisées (gouges) de cette semelle (flèches) contribue à la production de smectites brun verdâtre à brun foncé,
(c) Saprolite argileuse smectitique brun foncé à brun verdâtre (altération de Lherzolite) à veinelettes blanches (gabbros), compacte, fissurée à faces luisantes (Tiébaghi, Doline),
(d) Saprolite argileuse d'aspect moucheté (brun foncé à ilots blancs) riche en smectite (probablement issue de l'altération de lherzolite à plagioclases), présence de revêtements de coloration moutarde dans les fissures de la saprolite (flèches),
(e) Horizon de gley, argileux, gris bleuté, veine centrale bleu foncé montrant un net décrochement (flèche),
(f) Horizon superficiel acide (HSA) brun foncé, riche en sulfures (pyrite), carbonates de Fe (sidérite) et débris végétaux (flèches : racines partiellement décomposées).



4. GRADIENTS MINERALOGIQUES

La figure 18 présente les principales familles de minéraux identifiés le long des profils d'altération. La représentation simplifiée qui en est faite dans cette figure (profil à gauche situant les principaux ensembles structuraux des latérites nickélifères et à droite les grands types de minéraux rencontrés) s'applique essentiellement aux latérites bien drainées à cuirasses plus ou moins démantelées de massifs (ou klippes) fortement fracturés et minéralisés dominants dans le Territoire. Cette représentation montre d'abord une altération préférentielle des silicates du substrat rocheux (olivine et pyroxène) puis des phyllosilicates (serpentines) à la base des profils d'altération (SAP). Les spinelles chromifères (Chr) de ces roches, peu abondants et difficilement altérables, se maintiennent dans les ensembles latéritiques sus-jacents (LAT-T, LAT-J, LAT-R et Fer). Par ailleurs, des minéraux accessoires (non cités dans la figure 18) peuvent localement être présents dans les veines de serpentines et le réseau de fracturation de ces roches, plus spécifiquement à proximité (ou périphérie) de corps intrusifs plus alcalins et felsiques (wehrlites et gabbros). Il s'agit pour l'essentiel de talcs, de chlorites (clinochlore), d'amphiboles (trémolite-actinolite, anthophyllite), et pour les corps intrusifs de plagioclases et de leurs produits d'altération (kaolinite, halloysite et gibssite).

Aux échelles microscopiques, l'altération différentielle des minéraux de la roche (généralement une harzburgite) se traduit par une dissolution sélective des olivines, puis des pyroxènes et *in fine* des serpentines (Fig. 19). C'est de ce fait le réseau entrecroisé de serpentine qui assure le maintien des structures de la roche dans les niveaux saprolitiques. L'altération n'est généralement plus iso-volumique dans les niveaux latéritiques sus-jacents où la dissolution des serpentines et des minéraux associés (par ex. garniérites) est plus poussée. Les structures de la roche s'effondrent et les latérites se tassent.

D'après l'échelle d'altérabilité des minéraux des roches (Goldich, 1938), les dunites devraient s'altérer plus rapidement que les harzburgites. En réalité, l'inverse est généralement observé, la texture plus compacte des dunites (meilleure cohésion des grains jointifs d'olivine) limitant leur altération.

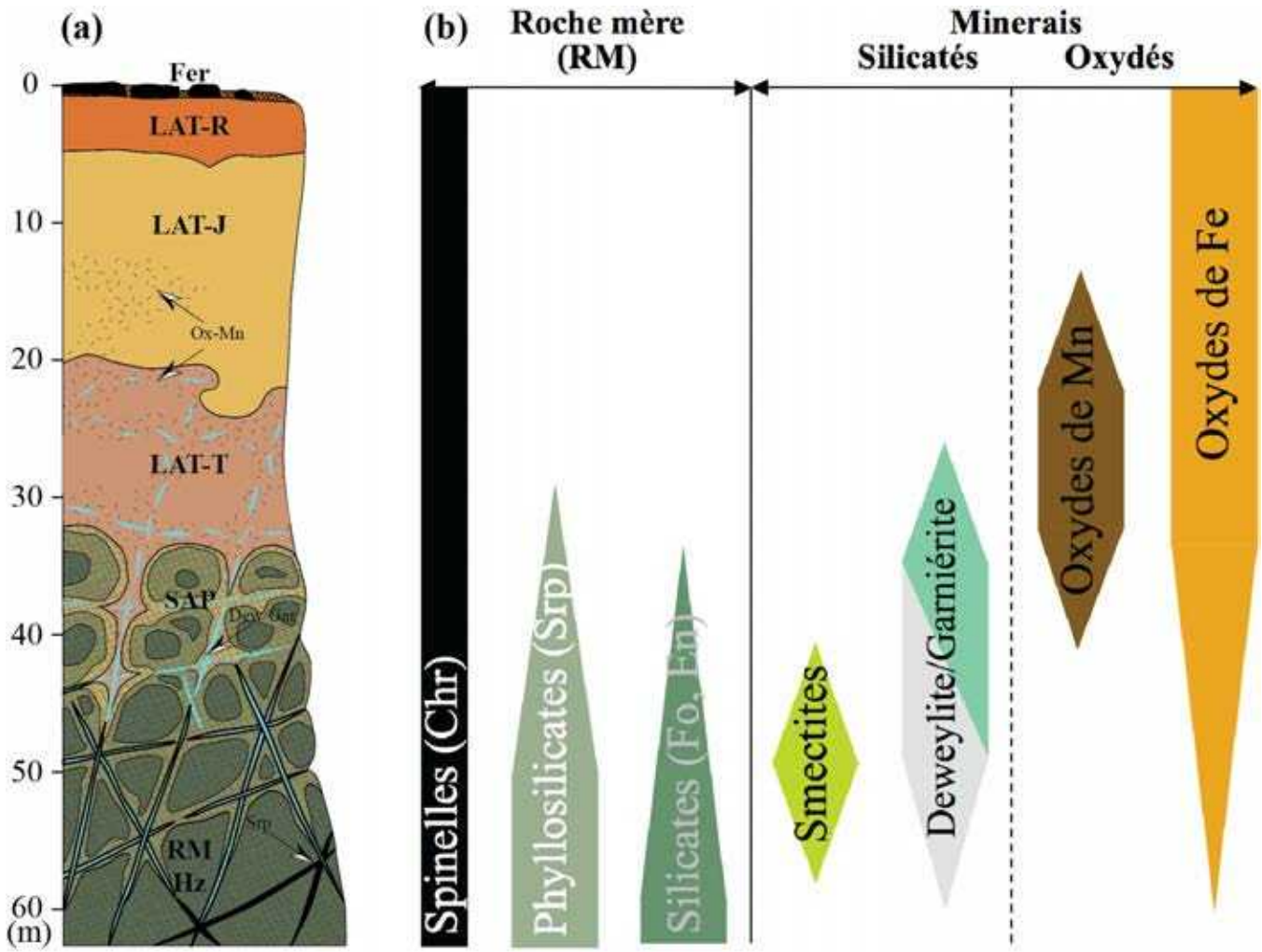


Figure 19 : Gradient minéralogique. (a) Représentation schématique des grands ensembles structuraux des latérites (RM roche mère, SAP saprolite, LAT-T latérite de transition, LAT-J latérite jaune, LAT-R latérite rouge, Fer bloc de cuirasse et grenaille) développées sur roches ultrabasiques (Klippe du Koniambo, essentiellement à harzburgite) et (b) Identification des grandes familles de minéraux (Chr : chromite, Srp : serpentine, Fo : forstérite, En : enstatite) et des types de minerais (silicatés et oxydés) reconnus dans ces ensembles.

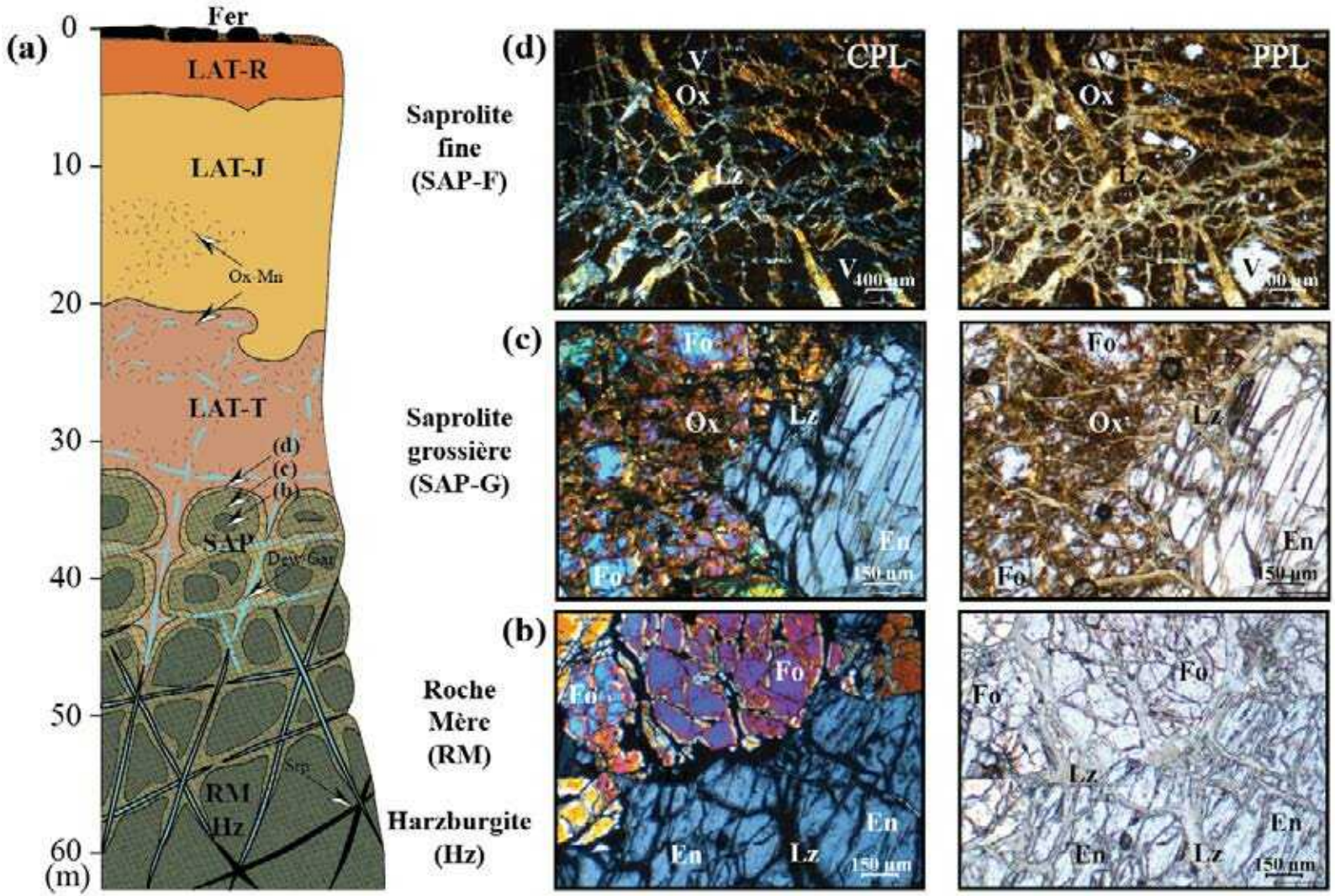


Figure 20 : Pétrographie des saprolites (CPL : lumière polarisée analysée, PPL : lumière polarisée non analysée) d'un profil latéritique. (a) illustrant l'altération en pelure d'oignon des boules de roche et l'altération différentielle des minéraux de la roche : (b) Le coeur des boules est sain et les minéraux de l'harzburgite (Fo : Forstérite, En : Enstatite) et les veinules de Lizardite (Lz) ne sont pas altérés, (c) L'altération à la bordure de ces boules se traduit par la dissolution préférentielle des olivines et leur remplacement par des oxydes de fer (Ox), à noter que les grains d'enstatite (En) et le maillage de serpentine (Lz) se maintiennent, ils sont pratiquement inaltérés, (d) L'altération plus avancée de ces boules, se traduit par la disparition de l'ensemble des silicates (Fo et En) et le maintien du réseau de serpentine, les oxydes de fer (Ox) sont plus abondants et la porosité ("V" pour vide) devient très élevée

5.GRADIENTS GEOCHIMIQUES

Les gradients géochimiques, observés le long de profils d'altération types, sont illustrés par les sondages Y5 du sommet du Koniambo et RFOD localisé sur le Massif du Sud, au niveau du site « exercice Minier » de Goro.

Dans le sondage Y5 du Koniambo, l'altération du substrat rocheux (essentiellement à harzburgite) se traduit par des baisses importantes des teneurs en magnésie et en silice (Fig. 20a) et, à l'opposé, par des accroissements marqués des teneurs en fer, dans une moindre mesure des teneurs en alumine et en chrome (Fig. 20b). L'amplitude de ces variations reste toutefois limitée dans la saprolite (SAP). Elle en demeure pas moins très irrégulière (altération en boules des péridotites). Ces variations sont encore plus marquées dans la latérite de transition (LAT-T: nette prédominance du fer) puis deviennent optimales dans les latérites sus jacentes : LAT-J, LAT-R et Fer. Ces variations résultent essentiellement d'une dissolution des silicates de la roche (spinelles exceptées), couplée à une formation d'oxydes de fer. D'autre part, les teneurs en nickel, initialement beaucoup plus faibles (autour de 0,3 à 0,4 %) dans la roche mère (RM) augmentent dans la saprolite (SAP) (Fig. 20c). Cette augmentation traduit un changement de spéciation du nickel (Dublet *et al.* 2012). Cet élément, initialement présent dans les olivines et serpentines du substrat rocheux, se retrouve dans les deux types de phyllosilicates (di et trioctaédrique) des minerais silicatés de la saprolite :

- Les phyllosilicates Mg/Ni tri-octaèdriques constituent les minerais silicatés à garniérite. Ils sont apparentés au réseau majeur de serpentinisation et fracturation des péridotites. Ils s'observent dans des veines, parfois entrecroisées, d'épaisseur centimétrique, de coloration blanche (deweylite) à verte (garniérite). Ces veines sont essentiellement constituées de résidus de serpentine de petite taille et de produits néoformés de la famille des talcs et des sépiolites. Ces derniers constituent des solutions solides allant d'un pôle magnésien (blanc) à un pôle nickélifère (vert) ;
- Les phyllosilicates Fe/Al di-octaèdriques de la famille des nontronites, montmorillonites ferrifères et beidellites alumineuses sont rencontrés dans les minerais silicatés à smectites (argiles gonflantes). Ces smectites sont aussi susceptibles d'incorporer du nickel dans leur structure mais en moindre proportion. Dans les faciès réduits (gris à gris bleuté), les smectites peuvent être héritées de l'altération de passées plus felsiques du substrat rocheux.

Des variations en "dent de scie" des teneurs en nickel dans la saprolite sont observables, les teneurs les plus élevées correspondant aux veines à garniérite. Ces variations en "dent de scie" s'atténuent dans les niveaux latéritiques sus-jacents. Par rapport à la saprolite, les teneurs moyennes en nickel restent sensiblement inchangées dans la latérite de transition (LAT-T), puis décroissent progressivement vers la surface (flèche de la Fig. 20c) dans les niveaux supérieurs (LAT-J, LAT-R et Fer). Des variations encore plus erratiques et très localisées sont reportées pour le manganèse et le cobalt (Fig. 20c : 5 zones majeures de concentration de ces deux éléments). Ces augmentations marquées des teneurs en manganèse (et en moindre mesure des teneurs en cobalt) situent les principales veines et amas à oxydes de manganèse.

Par rapport au sondage précédent (Y5), les données géochimiques reportées le long du sondage RFOD de la plaine de Goro présentent des évolutions similaires de la base vers le sommet du profil d'altération mais également des différences dues à une plus grande hétérogénéité et une "stratification" du substrat rocheux et des latérites qui le surmontent (Fig. 20d-f). En particulier, les teneurs en magnésie et silice (Fig. 20d) sont moindres dans l'ensemble saprolitique (SAP) et celles en fer plus élevées, témoignant ainsi d'une plus grande altération des masses rocheuses dans cet ensemble.

Les teneurs en magnésie sont également nettement plus faibles que les teneurs en silice (Fig. 20d) et des pics de concentration en alumine sont notés à la fois dans l'ensemble saprolitique et l'ensemble latéritique sus-jacent (flèches bleues dans Fig. 20e). Ces variations témoignent d'une grande abondance dans le profil d'altération de veines et amas blancs (parfois diffus : aspect moucheté) à wehrlites et gabbros (partiellement altérés dans la saprolite et complétement altérés dans les latérites).

Les variations "en dent de scie" des teneurs en nickel (Fig. 20f) sont également moins marquées, sauf à la base du profil d'altération. A la base de ce profil, certains pics de nickel sont très proches des pics d'aluminium montrant une relation possible entre certaines intrusions felsiques altérées (à dominance de kaolinite et/ou de gibbsite) et les veines à garniérite (à dominance de serpentine et talc cryptocristallins).

Un constat presque similaire peut aussi être établi pour le couple manganèse et cobalt, associé à la présence d'oxydes de manganèse (Fig. 20f). Ces derniers sont en effet soit inclus dans des passées d'oxydes de fer rouge foncé à rouge violacé pouvant marquer l'emplacement d'anciennes zones fortement serpentinisées du substrat rocheux soit observés également à la périphérie de corps intrusifs à werhlites et gabbros altérés (prédominance de kaolinite et/ou de gibbsite). Il importe enfin de noter que, malgré ces contrastes lithologiques entre les deux sondages, les variations verticales des teneurs en nickel sont proches et semblables à celles mise en évidence sur d'autres sites miniers : valeurs optimales des teneurs en nickel dans l'ensemble saprolitique puis décroissante vers la surface dans l'ensemble latéritique sus-jacent (surtout dans LAT-J, LAT-R et Fer).

La décroissance régulière des teneurs en nickel de la base vers le sommet des unités latéritiques (Fig. 20c) est en faveur d'un développement sur place des profils d'altération (autochtonie des matériaux) même si ce gradient peut être perturbé par des variations en dents de scie de faibles amplitudes, attribuées à l'existence d'anciennes zones minéralisées. A l'opposé, des variations abruptes et de faibles teneurs en nickel enregistrées dans d'épais niveaux latéritiques témoignent le plus vraisemblablement d'incision, de transport et d'accumulation de "stériles" (allochtonie des matériaux).

Les principales variations minéralogiques reliées à la perte graduelle en Ni de la base vers le sommet des unités latéritiques sont attribuées (i) à une augmentation de la taille et de la cristallinité des oxydes de fer (majoritairement goethite, principale phase porteuse du Ni) et (ii) à l'apparition de plus fortes teneurs en hématite vers la surface (rougissement des latérites). Ces gradients minéralogiques et structuraux traduisent des mécanismes de densification et de dissolution/recristallisation des oxydes de fer propices à l'expulsion du nickel de leurs structures (Fandeur, 2009, Dublet *et al.* 2012). Ces mécanismes témoignent d'une évolution du contexte physico-chimique vers des conditions de surface plus sèches et plus chaudes qu'en profondeur (Tardy & Roquin, 1998). Ces gradients et mécanismes ne sont pas spécifiques à la Nouvelle-Calédonie puisqu'ils se retrouvent pratiquement dans toutes les couvertures latéritiques nickélifères développées sur roches ultrabasiques décrites à travers le monde (Trescases, 1975; Colin *et al*. 1990; Elias, 2001; Gleeson *et al*. 2004; Gaudin *et al*. 2004; Lewis *et al*. 2006; Soler *et al*. 2008; Thorne *et al*. 2009; Wells *et al*. 2009; Sagapoa *et al*. 2011; Dublet *et al*. 2012).

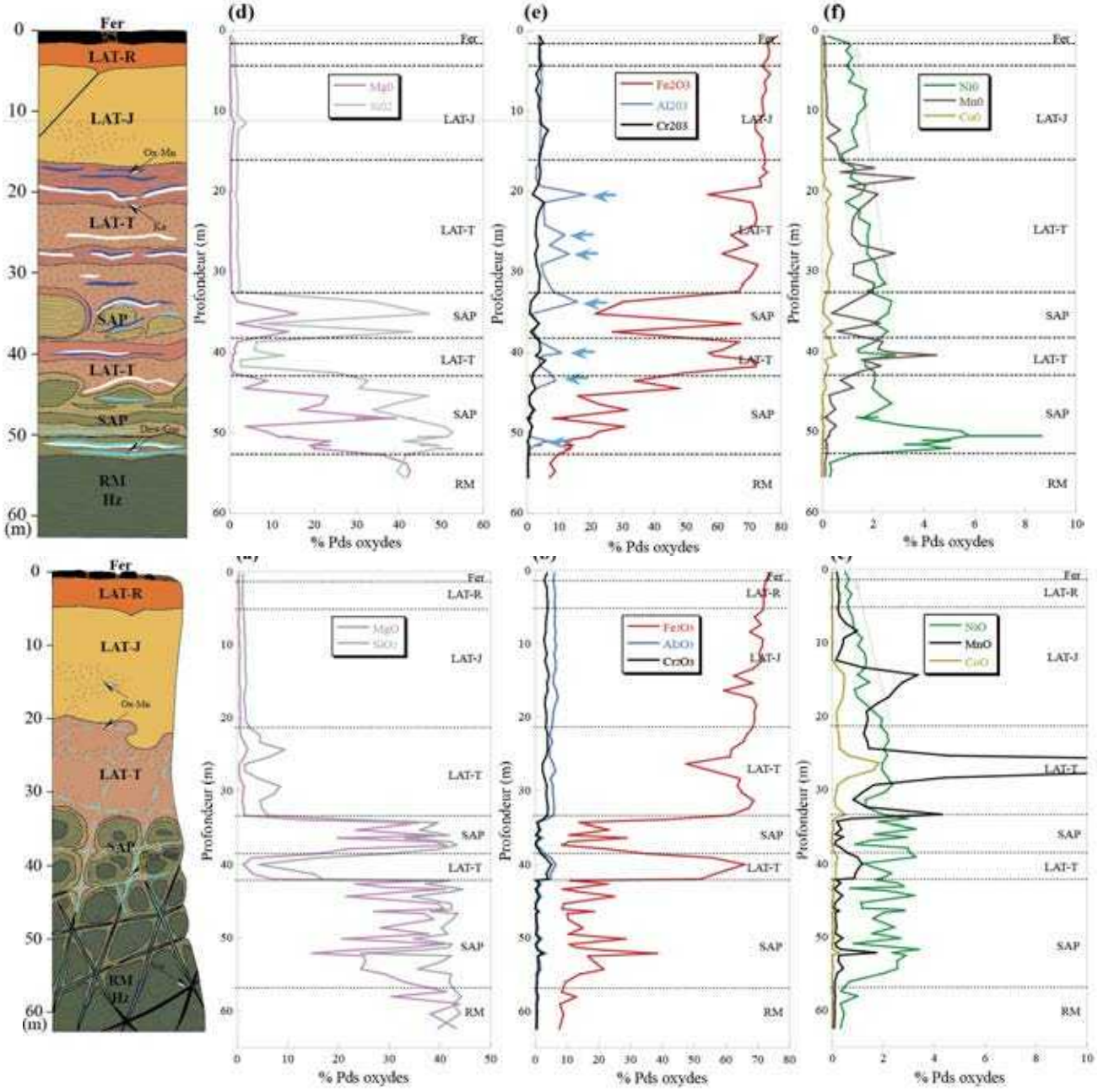


Figure 21 : Distribution des éléments métalliques le long de profils latéritiques types.
(a, b, c) Plateau du Koniambo (Trazy : sondage Y5),
(d, e, f) Pénéplaine de Goro (Test minier : sondage RFOD),
(a) et (d) Eléments très mobiles (Mg et Si), (b) et (e) Eléments peu mobiles (Fe, Al et Cr), (c) et (f) Eléments plus mobiles (Ni, Mn et Co).

6. PAYSAGES LATERITIQUES

Les différences d'altitude des surfaces cuirassées abritant les latérites nickélifères ont amené certains auteurs à admettre différentes phases d'aplanissement associées à des cycles d'altération et d'érosion, propices à l'individualisation de surfaces étagées, comme cela est généralement évoqué pour la zone tropicale de l'Afrique de l'Ouest (e.g. Latham 1977, Chardon et Chevillote, 2006 ; Chevillotte et al. 2006 ; Beauvais & Chardon 2013). Néanmoins, d'autres auteurs évoquent la possibilité d'une dislocation d'une pénéplaine unique (Davis 1925) en différents blocs étagés, suite à l'émergence de la nappe ophiolitique, à son altération et démantèlement au cours d'épisodes tectoniques post-obduction (e.g. Lagabrielle *et al.* 2005, Lagabrielle & Chauvet 2008).

Des taux de surrection et d'érosion importants au centre et au nord de la Grande-Terre, associés à une fracturation extensive de l'ensemble de la nappe ophiolitique, expliqueraient la présence de latérites nickélifères couvertes de cuirasses plus ou moins démantelées sur les plateaux des klippes longeant les côtes Ouest et Est de la Grande Terre, ainsi qu'une grande partie du massif du Grand Sud (Fig. 1 et Fig. 21).

À l'opposé, l'extrémité sud du massif du Grand Sud semble être moins affectée par cette surrection et l'érosion des surfaces cuirassées y est nettement moins poussée. Ces surfaces, organisées en damiers et inclinées vers le sud-est, sont bordées de reliefs élevés. Elles abritent également d'épaisses latérites nickélifères qui s'observent non plus en position haute mais basse du paysage.

Cette structuration de la nappe de péridotite conduit à distinguer plusieurs types de profils d'altération dont les principales caractéristiques sont résumées sur les fiches :

- Les profils de type A sont rencontrés en contexte de bassin, principalement au niveau des chantiers du Massif du Sud et localement sur des zones de plateaux en contexte de montagne (ex. : chantier Trazy, massif du Koniambo). Ces profils sont caractérisés par un horizon latéritiques puissant et un horizon saprolitique peu épais pauvre en minerai silicaté. Le profil A1 correspondant à un profil d'altération complet a été distingué du profil A2 caractérisé par la présence de dépôts fluvio-lacustres au-dessus d'un profil de type A1 (Folcher *et al.* 2014; Folcher *et al.* 2015) ;

- Les profils de type B correspondent aux profils d'altération le plus communément rencontré en contexte de montagne au niveau des klippes de la côte Ouest et dans la partie Nord du Massif du Sud. Ces profils se développent 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 voire de la roche mère peut être observée. Ces profils sont exploités pour leur richesse en minerai silicaté ;

- Le profil de type C se développe sur une roche mère plus riche en aluminium et semble exclusivement rencontré sur le massif de Tiébaghi (le massif de Poum montre d'après la littérature, de fortes analogies avec Tiébaghi). Ces profils sont caractérisés par des horizons de gleys suggérant de mauvaises conditions de drainage et des environnements réducteurs pouvant conduire à la formation de sulfures.

- Le profil de type D 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 en lien avec des conditions de drainage très limitées.

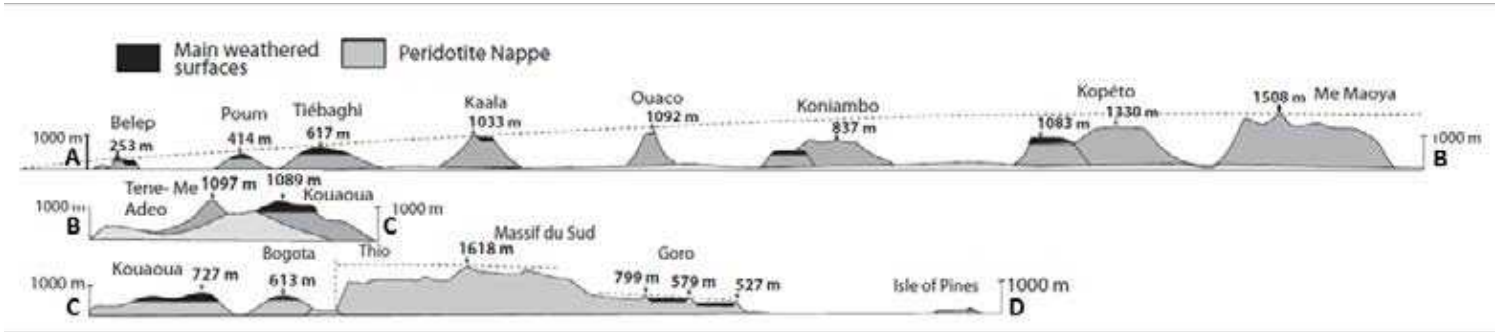


Figure 22 : Altitude des principaux massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie et position des principales surfaces d'altération (d'après Sevin et al. 2012).

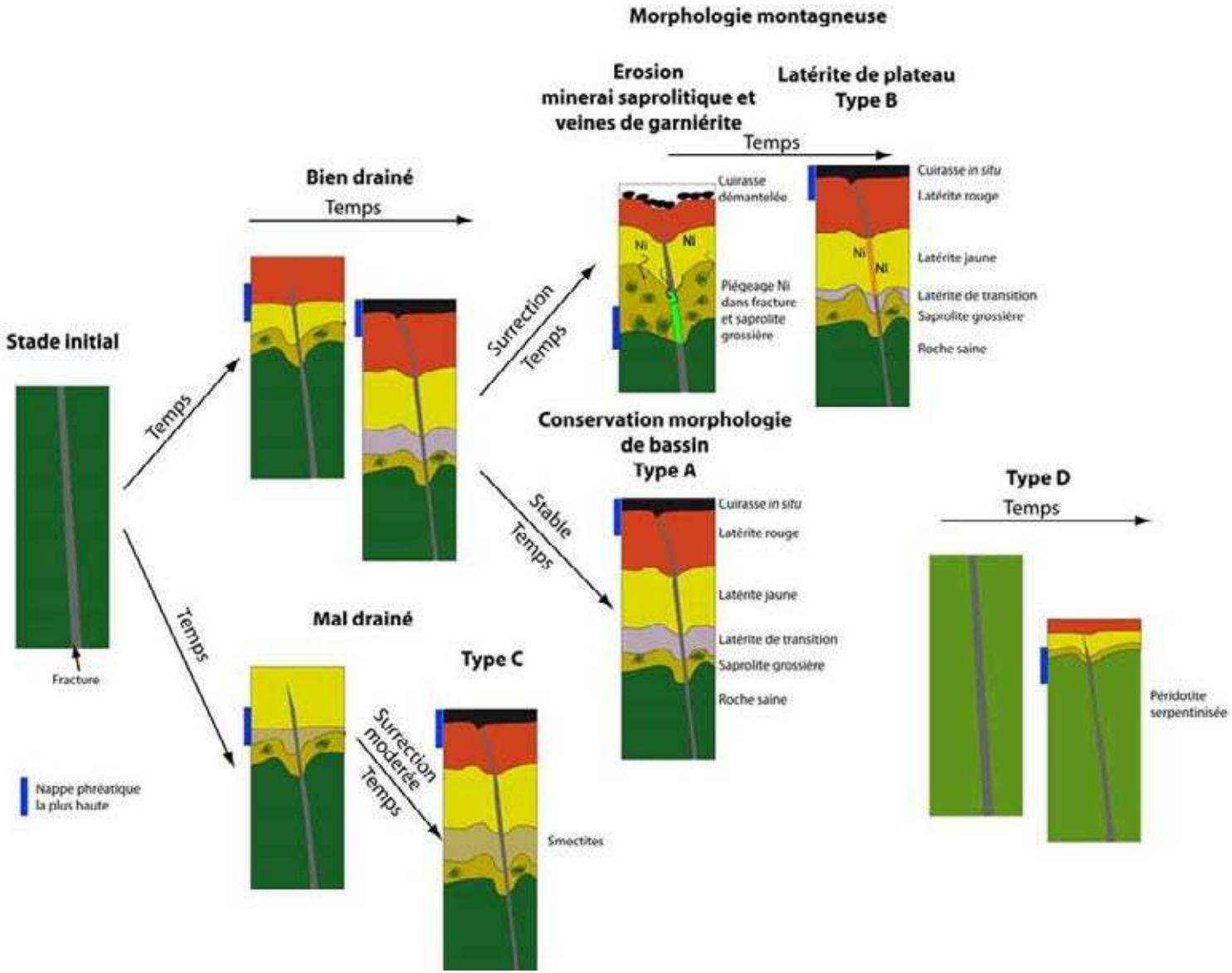


Figure 23 : Schéma synthétique d'évolution spatio-temporelle des péridotites de Nouvelle-Calédonie (d'après Sevin, 2014).

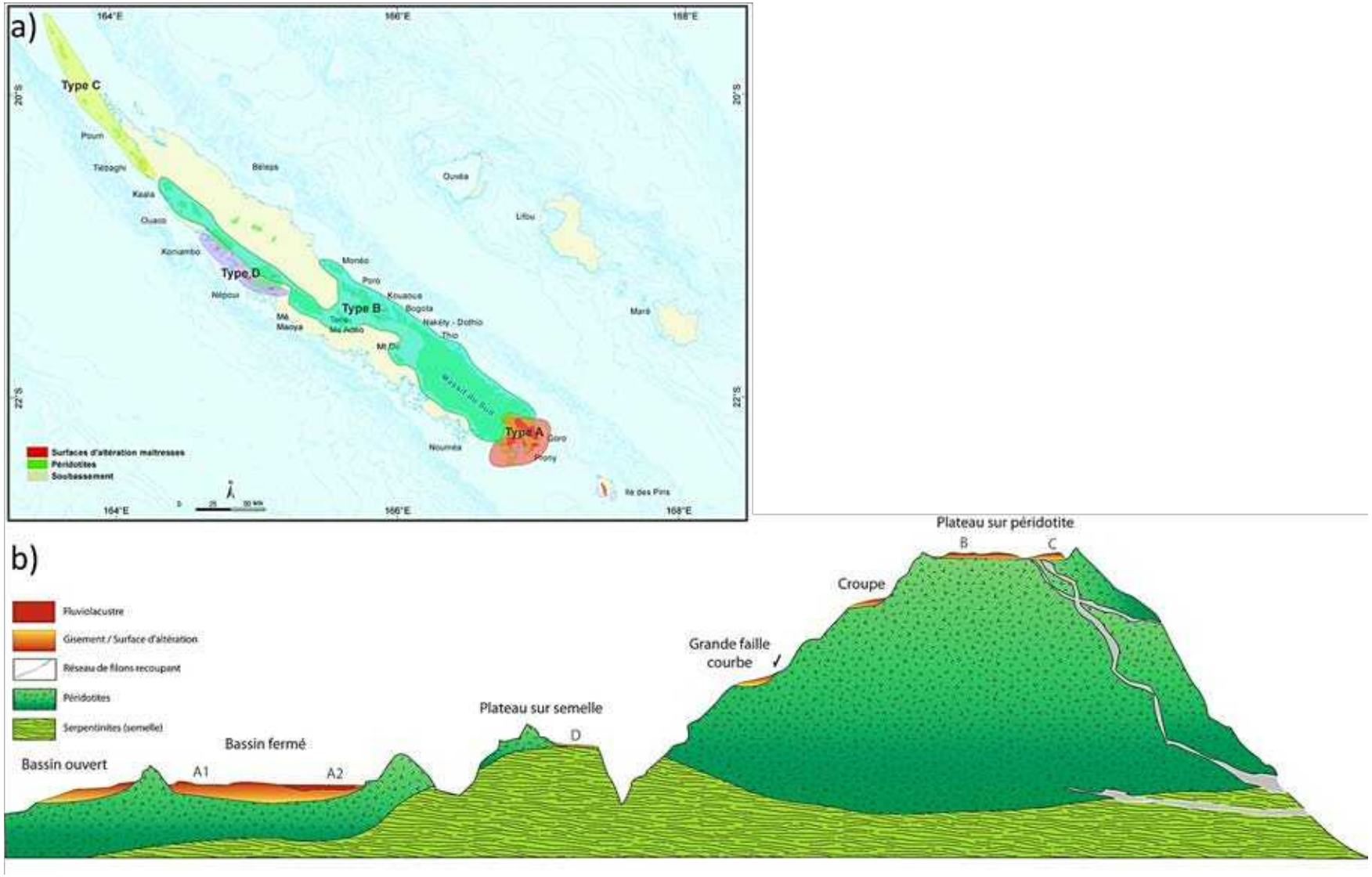


Figure 24 : a) distribution des différents profils d'altération à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie. b) Profil synthétique de distribution des différents profils d'altération en fonction de l'altitude et de la nature du substratum.

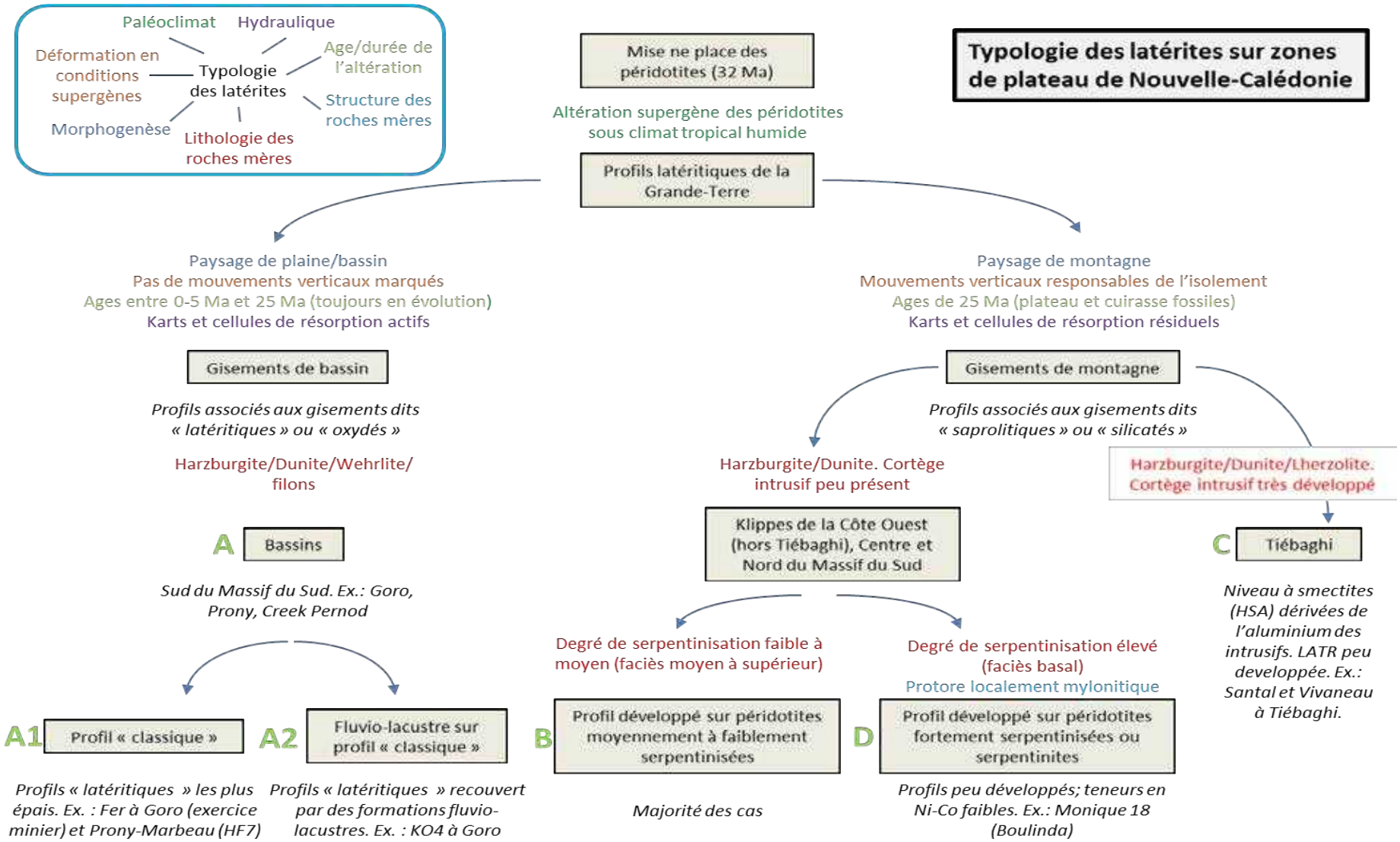
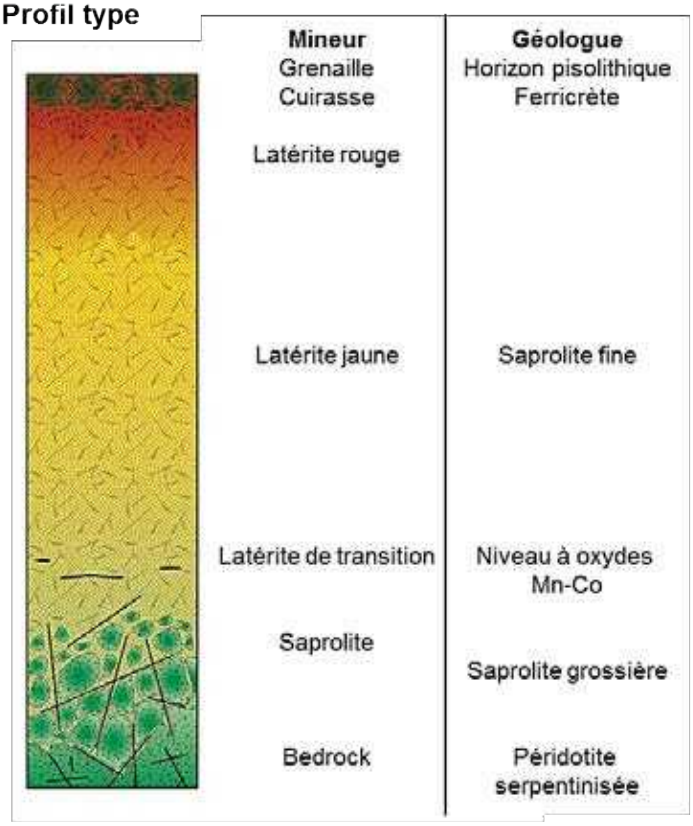


Figure 25 : Synthèse des différents profils d'altération rencontrés en Nouvelle-Calédonie en fonction de la nature de la roche mère, de la géomorphologie et de l'hydrogéologie.

TYPE A

TYPE A - Bassin
Sous-type A1: Profil « classique »

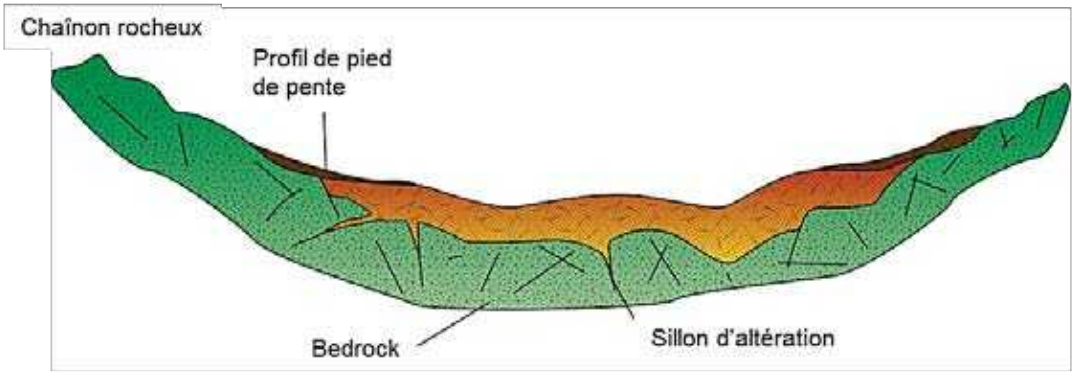
Profil type



Exemples
Sud de FER à Goro (essai minier) ; HF7 à Prony.

Cible
•Gisement de type oxydé, uniquement exploité pour les latérites.
•Gisement de fort tonnage > 100 million de tonnes, moyenne de 1,4% en Ni et 0,10 en Co.
•Type uniquement observé dans l'extrémité sud du Massif du Sud.
•Faibles teneurs en Si et Mg.
•Forte teneur en Fe > 40%

Morphologie
•Bassin endoréique ou bassin partiellement ouvert.
•Chaînon rocheux entoure ces bassins.
•Généralement deux types de profils, celui de bassin mais aussi celui de pied de pentes (pauvres en Ni/Co) constitué d'éléments très remaniés du type colluvion.
•Profil cuirassé sur sa partie supérieure.
•Epaisseur de profil maximum au centre du bassin et se biseaute graduellement sur les bordures.



TYPE A

Profil

	Epaisseur (m)	Moy. en Ni (%)	Moy. en Fe (%)	Minéralogie
Cuirasse (+ grenaille)	3	-	-	Hem±Gt
LATR	5	0,8	52	Gt+Hem
LATJ	25	1,3	50	Gt±Hem±Tlc±Cr ±Gbs si passées wehrlite ou gabbro)
LAT-T	5	1,7	38	
Saprolite	10	1,8	12	Ol+Opx+Lz±Cr (±Tlc±Chl±Sme)
Bedrock	-	-	-	

Altération

• Toit des horizons d'altération parallèle à la surface topographique.
• Irrégularités du bedrock s'estompent sur la haut du profil.
• Présence d'un niveau développé de «latérite de transition», intermédiaire entre la saprolite et la latérite jaune.
•Variétés lithologiques dans la séquence (dont la présence de wehrlite et gabbro) vont être à l'origine de variations de chimisme soit sous forme de barrière influant sur le transfert vers la profondeur des eaux de surface, soit en termes de potentiel en Ni.

Critères géochimiques

• Fe très élevé, souvent supérieur à 40% dès que l'on sort de la saprolite.
• Fe varie en opposition avec Al.
• Ni indépendant des autres éléments (1,4% en moyenne dans l'ensemble du profil).
• Cr et Zn fluctuent ensemble.
• Si indépendant avec parfois quelques associations avec Mg (silicates).
•Mn-Co sont liés aux oxydes de Mn (wads).
• Sc > 40 ppm.

Hydrogéologie

•Géométrie du profil d'altération dépendant du pseudo-karst sous jacent.
•Trois aquifères distingués sur ce type de gisement i) aquifère superficiel à la base du cuirassement ; ii) aquifère profond de la zone de transition et la couche de saprolite ; iii) aquifère du socle dans la roche-mère.
•Des traçages hydrogéologiques ont mis en évidence des structures souterraines drainantes NS.

Structure

•Progression irrégulière du front d'altération d
les niveaux inférieurs où l'influence probable
drains (failles probables) est à l'origine d
drainage important avec approfondisseme
locaux de la saprolite et de l'horizon de transitio
•Sillons NS sont les principaux observés a
quelques EW.
•Trois familles de failles sont bien marquées
linéaments de surface et en structures du bedr
i) N0-10° ; ii) N30-40° ; iii) N90°.

Minéralisation

•Enrichissement maximum en Co se situe d
l'horizon de transition.
•Zone à latérite riche en Ni ne surplombe pas
zones de saprolite « riche ».
•Teneurs les plus élevés en Ni sont à la base
latérites jaunes.
•Concentration en oxydes de Mn-(Co) observés
contact des veines à gibbsite.
•Les latérites jaunes développées
wehrlite/harzburgite les moins riches en Fe s
les plus riches en Ni.
•Les latérites jaunes les plus riches en Ni sont
moins riches en Mn et Co.

Porteurs

•Porteurs vraisemblables de Ni dans les mine
magnésiens seraient les silicates résiduels (tal
lizardite).
• Dans les minerais les plus riches en Fe, le port
serait les oxyhydroxydes de fer (goet
principalement).
• Porteur du Co le plus probable est la lithiopho
et aussi l'asbolane au niveau des wehrlites.

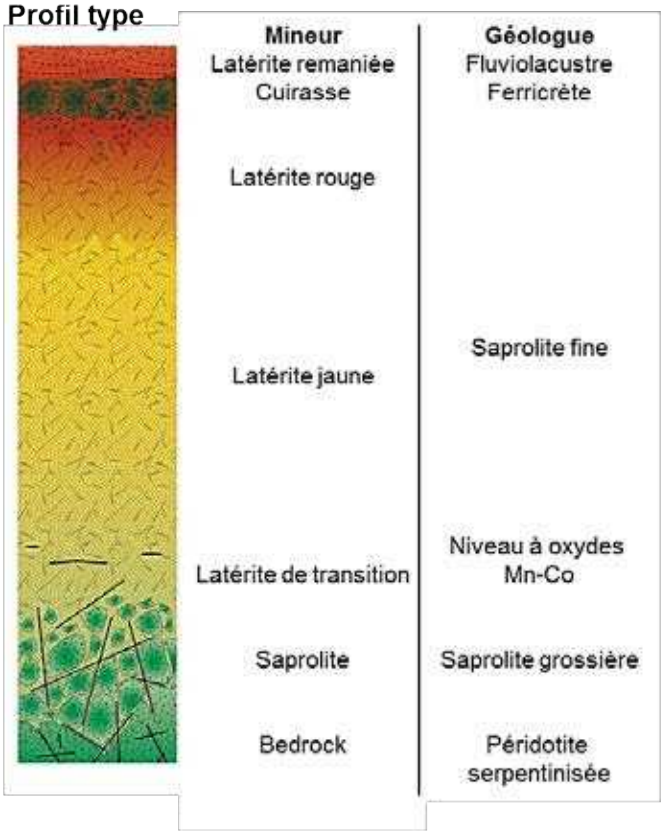
Commentaire sur la genèse

• La présence d'Al et de minéraux de type gibb
signe la présence de niveaux à wehrlites ou
gabbros.
• Les niveaux riches en chromite correspond
vraisemblablement à des passes dunitiq
altérées.
• Domaine dans lequel on se situerait à un niv
structural assez haut dans la pile ophiolitic
(abondance des dykes) donc différent de la C
Ouest.
• Gisement n'ayant pas connu de mouveme
verticaux importants (vs klippes).
• Altération marquée de l'Oligocène jusqu'à l'ac
(25 à 0 Ma).
• Minerai magnésien (et moins ferrugineux) sont
plus riches en Ni (Fe/Mg < 40 et Ni ~ 2,2- 3%).

TYPE A

TYPE A - Bassin
Sous-type A2: Profil « fluvio-lacustre »

Profil type



Exemples

Creek Pernod ; KO4 sur la région de Goro.

Cible (Identique à A1)

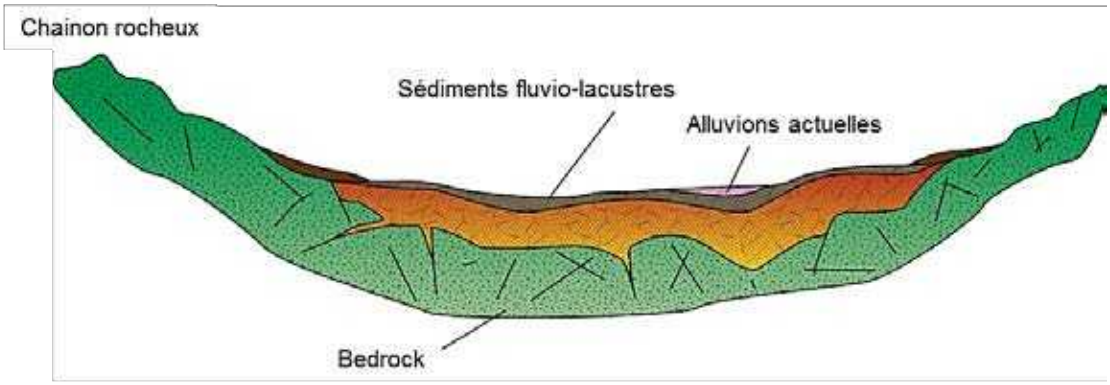
•Gisement de type oxydé, uniquement exploité pour les latérites.
•Gisement de fort tonnage > 100 million de tonnes, moyenne de 1,4% en Ni et 0,10 % en Co.
•Faibles teneurs en Si et Mg.
•Forte teneur en Fe > 40%

Morphologie

• Identique au profil A1 mais se superpose des sédiments fluvio-lacustres voir des alluvions actuelles.
• Bassin endoréique ou bassin partiellement ouvert.
• Chaînon rocheux entoure ces bassins.
• Des chenaux sont parfois bien visibles.

Commentaire sur la genèse

• Les sédiments fluvio-lacustres sont en général appauvris en Ni/Co. Ce niveau pouvant aller de quelques cm à 30 m devra donc être décapé tout comme la cuirasse *in situ*.
• La cuirasse coiffant les sédiments fluvio-lacustres est facilement identifiable par la présence de nombreuses concrétions racinaires.



TYPE B

TYPE B
Plateau sur péridotites

Profil type

Mineur	Géologue
Cuirasse	Ferricrète
Latérite rouge	
	Saprolite fine
Latérite jaune	
Latérite de transition Avec asbolane	Niveaux à oxydes Mn-Co
Saprolite terreuse	Saprolite grossière
Bedrock	Péridotite serpentinisée

Exemples

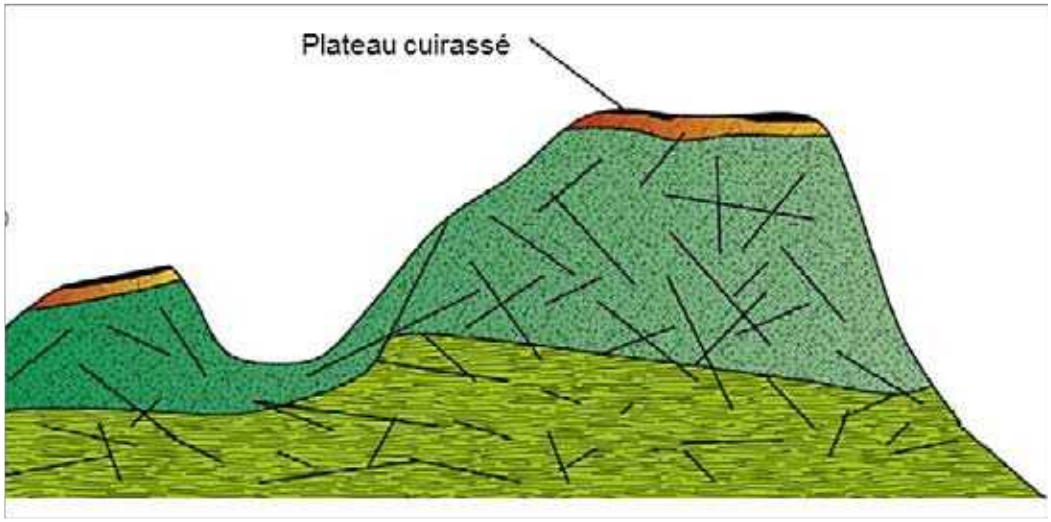
- Massif du Koniambo et du K Boulinda (côte Ouest) et No Massif du Sud.

Cible

- Gisement de type silica possibilités locales de m type oxydé.

Morphologie

- Plateau présentant une cuirassée importante déco marches d'escalier.
- Ce plateau résulte d'une de type « pseudo-karstiqu des dolines et des avens.
- Versants plus abrupts affleurer la péridotite.



TYPE B

Profil*

	Epaisseur (m)	Moy. en Ni (%)	Moy. en Fe (%)	Minéralogie
Cuirasse(+ grenaille)	-	-	-	Hem±Gt
Latérite rouge	1,2 à 6,7	1,16	46	Gt+Hem
Latérite jaune	3 à 13	1,3	48	Ol+Opx+Lz±Cr (±Tlc±Chl±Sme)
Saprolite	-	-	-	
Bedrock	-	-	-	

*Exemple du chantier Trazy – Massif du Koniambo

Altération

- Des profils d'altération complets sont localement présents. C'est par exemple le cas du chantier Trazy sur le massif du Koniambo. Tous les horizons du profil sont représentés et l'horizon saprolitique est puissant (contrairement aux profils observés dans les gisements de type bassin).
- Les mêmes massifs peuvent montrer des profils incomplets, tronqués où les horizons les plus superficiels ont été démantelés par érosion.
- La saprolite est dite «terreuse » car elle est constituée de blocs pris dans une matrice à granulométrie très fine et riche en nickel.
- On note la présence d'oxydes de Mn potassiques de type cryptomélane suggérant l'addition exotique de K issu d'un parent gabbroïque.

Hydrogéologie

- Figures pseudo-karstiques présentes: doline, avens et criques de versants.

Structure

- Plateau est structuré par des marches d'escalier formant des seuils à grande échelle (N140°).
- Des failles plates serpentineuses compartimentent l'ensemble.
- Trois familles de failles sont bien marquées : i) N140°, ii) N0°, et localement iii) N110°. Ces trois familles contrôlent clairement l'altération.
- Les dolines se rencontrent au croisement de deux familles de failles.

Minéralisation

- Le minerai saprolitique est le minerai principal avec une saprolite « terreuse ».
- Le minerai latéritique est localement présent avec de fortes épaisseurs, mais les volumes sont sans comparaison avec ceux observés dans les gisements de type bassin.

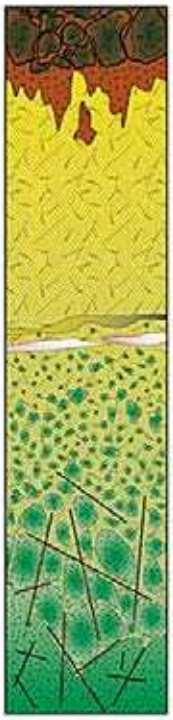
Porteurs

- Les silicates nickélifères présents dans la saprolite « terreuse » sont les principaux porteurs de Ni. Les minéraux nickélifères de la famille des garnièrites sont abondamment représentés.
- La goethite nickélifère est présente au niveau des profils d'altération complets.
- Les oxydes de Mn de type lithiophorite et asbolane, peuvent contenir des teneurs localement élevées en CoO et NiO.
- La granulométrie est très fine (5000 à 100 µm).

TYPE C

TYPE C
Plateau sur péridotites à cortège intrusif

Profil type



Mineur	Géologue
Cuirasse	Ferricrète
Latérite jaune	Saprolite fine
Horizon Supérieur Acide (HSA) Gley	Horizon à smectites (nontronites)
Saprolite terreuse	Saprolite grossière
Bedrock	Péridotite Serpentinisée

Exemples

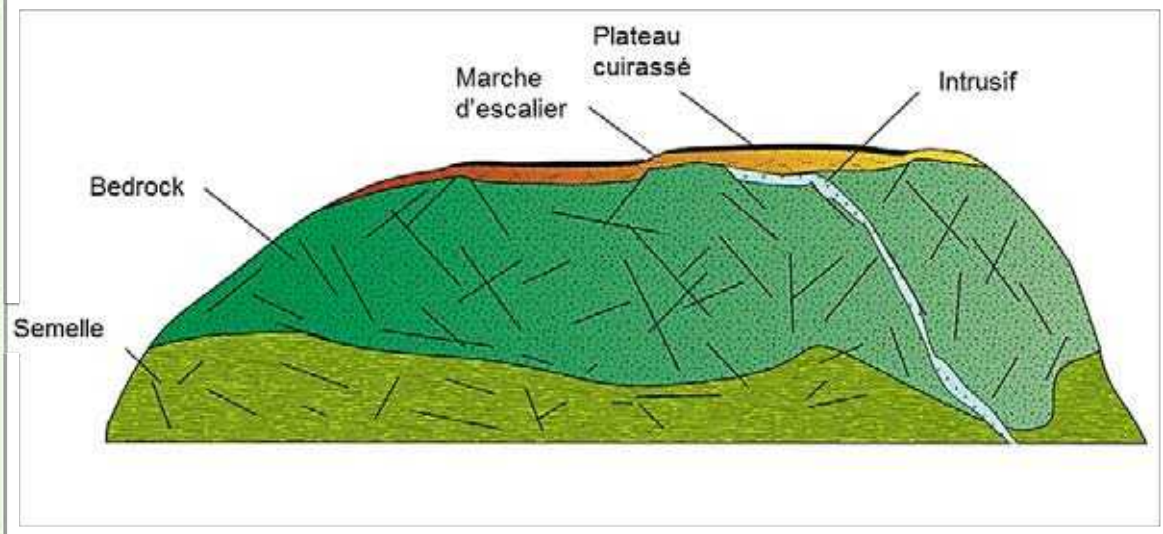
- Vieille Montagne 1 (Santal) et Alp (Vivaneau), massif de Tiébaghi.

Cible

- Gisement de type silicaté, mai rapproche des gisements de argileux ou «latérite sèche», cor ailleurs dans le monde (ex.: M Murrin, Australie ; Buruktal, Ou Sao Joao do Piaui, Brésil).

Morphologie

- Plateau présentant une su cuirassée importante découpée marches d'escalier.
- Ce plateau résulte d'une altératic type « pseudo-karstique » avec dolines et des avens.
- Versants plus abrupts lai affleurer la péridotite.



TYPE D

TYPE D
Profil sur péridotites fortement serpentinisées

Exemples

- Plateau inférieur du massif du Boulinda (côte Ouest), plateau de Tia, Kafeate.

Cible

- Gisement de type silicaté, mais pauvre en teneurs et en épaisseur.

Hydrogéologie

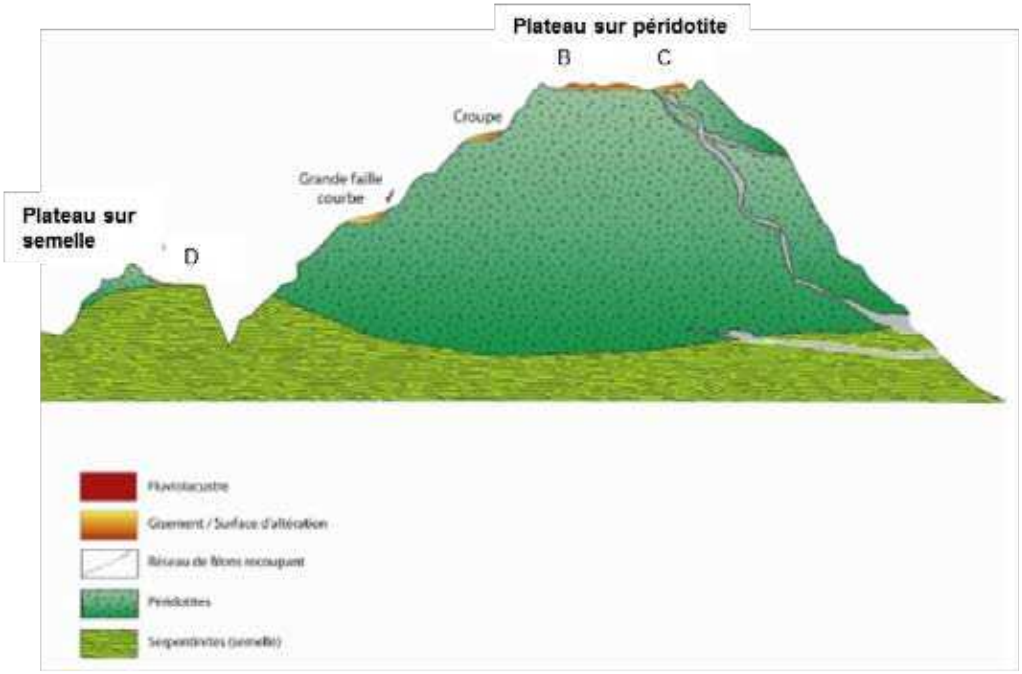
- Très mauvaises conditions de drainage liées au caractère relativement imperméables des serpentinites.

Morphologie

- Replats inférieurs des massifs portant des paléosurfaces étagées.
- Profils d'altération généralement peu développés. Tous les horizons d'altération peuvent être présents mais sont caractérisés par de faibles puissances.
- La semelle de serpentinites constitue la base des profils d'altération.

Porteurs

- De rares veines de silicates nickélifères, localement présentes dans la saprolite sont les principaux porteurs de Ni.



7. CONCLUSIONS

Cet atlas fournit des éléments clés à la reconnaissance, sur le terrain, des principaux types de roches rencontrés sur les massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie ainsi que de leurs équivalents altérés dans les différents horizons des profils d'altération développés sur péridotite. Les observations réalisées pour l'essentiel au niveau des fronts de taille des différents chantiers visités ou sur carottes de sondage permettent une meilleure interprétation des données géochimiques acquises sur échantillons de forage. Ainsi des enrichissements en chrome sont susceptibles de correspondre à des passées de dunite. Des teneurs localement élevées en aluminium suggèrent la présence de filons ou de sills de gabbros et/ou wehrlite à plagioclase.

Deux types de minerais à Ni-(Co) sont rencontrés dans les niveaux profonds des profils d'altération que sont les saprolites. Les premiers, qualifiés de minerais silicatés à garniérite (phyllosilicates Mg/Ni tri-octaédriques), sont apparentés au réseau majeur de serpentinisation et fracturation des péridotites. Les minerais silicatés à smectites (argiles gonflantes) sont constitués de phyllosilicates Fe/Al di-octaédriques de la famille des nontronites, montmorillonites ferrifères et beidellites alumineuses. Ces smectites sont aussi susceptibles d'incorporer du nickel dans leur structure mais en moindre proportion.

Les minerais à oxydes de Fe des latérites de transition et des latérites jaunes sont essentiellement constitués de goethite qui constitue la principale phase minérale porteuse du nickel (jusqu'à 2% de Ni). D'une manière générale, les teneurs en Ni augmentent vers la base de l'horizon de latérites jaunes. L'horizon de transition contient fréquemment des reliques plus ou moins préservées de veines à deweylite et garniérite. C'est également le site préférentiel de précipitation des oxydes de manganèse attribués à des phyllomanganates de la famille des birnessites, des asbolanes et des lithiophorites. Ce sont des phases secondaires pour le stockage de Ni mais majeures pour le piégeage de Co.

Quatre grands types de profils d'altération ont été définis sur la base de critères pétrologiques (nature de la roche mère, intensité de la serpentinisation), géomorphologiques (contexte de bassin versus contexte de montagne), et hydrogéologiques (milieu bien drainé versus profil ennoyé). Une zonalité de la distribution de ces différents types à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie est également proposée.

8. BIBLIOGRAPHIE

Andreani, M., Mével, C., Boullier, A.M., & Escartin, J. (2007) Dynamic control on serpentine crystallization in veins : Constraints on hydration processes in oceanic peridotites, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 8, 1-24.

Bailly, L., Ambrosi, J.P., Barbarand, J., Beauvais, A., Cluzel, D., Lerouge, C., Prognon, C., Quesnel, F., Ramanaïdou E., Ricordel-Prognon, C., Ruffet, G., Sevin, B., Wells, M., & Yans, J. (2014),Typologie des minerais latéritiques de Nouvelle-Calédonie et facteurs de concentration de Co et Ni (Projet NICKAL), Rapport de fin d'étude CNRT.

Beauvais, A., & Chardon, D. (2013) Modes, tempo and spatial variability of cenozoic cratonic denudation: the West African example, *Geochem. Geophys. Geosyst.* 14, 1590-1608.

Brand, N. W., Butt, C. R. M., & M. Elias, M. (1998), Nickel laterites: classification and features, *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics 17*, 81-88.

Butt, R.M. & Cluzel, D. (2013) Nickel Laterite Ore Deposits: Weathered Serpentines, *Elements* 9, 123-128.

Chardon, D., & Chevillotte, V. (2006) Morphotectonic evolution of the New Caledonia ridge (Pacific Southwest) from post-obduction tectonosedimentary record, *Tectonophysics* 402, 473-491.

Chevillotte V., Chardon D., Beauvais A., Maurizot P., & Colin F. (2006) Long-term tropical morphogenesis of New Caledonia (Southwest Pacific): Importance of positive epeirogeny and climate change, *Geomorphology* 81, 361-375.

Cluzel, D., J. C. Aitchison, & 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*, 23-59.

Colin F., Nahon D., Trescases J.J., & Melfi A.J. (1990) Lateritic weathering of pyroxenites at Niquelandia, Goias, Brazil – The supergene behavior of Nickel, *Economic Geology 85*, 101-1023.

Dalvi A.D., Bacon W.G., & Osborne R.C. (2004) The past and the future of nickel laterites. *in* « PDAC 2004 International Convention », Trade Show & Investors Exchange, March 7-10, 1 – 27.

Davis, W.M. (1925) Les côtes et les récifs coralliens de la Nouvelles-Calédonie, *Ann. Geograph*, 244-269.

Delvigne, J.E. (1998) *Atlas* of Micromorphology of Mineral Alteration and Weathering. *Canadian Mineralogist* Special Publication 3 (Ed.: R.F. Martin), Mineralogical Association of Canada, 494p.

Dublet, G., Juillot, F., Morin, G., Fritsch, E., Fandeur, D., Ona-Nguema, G., & Brown Jr, G.E. (2012) Ni speciation in a New Caledonian lateritic regolith: a quantitative X-ray absorption spectroscopy investigation, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 95, 119–133.

Dublet, G., Juillot, F., Morin, G., Fritsch, E., Fandeur, D., & Brown Jr, G.E. (2012) Goethite aging explains Ni depletion in upper units of ultramafic lateritic ores from New Caldonia, *Geochimica and Cosmochimica Acta* 160, 1-15.

Elias, M. (2001) Global lateritic resources, *Aust. J. Mining* 16, 64 – 65.

Elias, M. (2002) Nickel laterite deposits-geological overview, resources and exploitation. In: Giant Ore Deposits: characteristics, genesis and exploration, D.R. Cooke, and J. Pongratz (Eds.), University of Tasmania, Centre for Ore Deposit Research, Special Publication 4, 205-220.

Fandeur, D. (2009) Géochimie et cristallochimie du chrome au cours de l'altération de roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie, Thèse de doctorat de l'Université Paris Diderot –IPGP. 300 pp.

Freyssinet, P., Butt, C.R.M., Morris, R.C., & Piantone, P. (2005) Ore-forming processes related to lateritic weathering. In: Hedenquist JW, Thomson JFH, Goldfarb RJ, Richards JP (eds), *Economic Geology 100th Anniversary Volume,* Economic Geology Publishing Company, New Haven, Connecticut, 681-722.

Fritsch, E., Juillot F., Dublet, G., Fonteneau, L., Fandeur, D., Martin, E., Caner, L., Auzende; A-L., Grauby, O., & Beaufort, D. (2016) An alternative model for the formation of hydrous Mg/Ni layer silicates ('deweylite'/'garnierite') in faulted peridotites of New Caledonia: I. Texture and mineralogy of a paragenetic succession of silicate infillings, European Journal of Mineralogy, 28, 295-311.

Fritsch, E., Juillot, F., Dublet, G., Fandeur, N., Fonteneau, L., Martin, E., Auzente, A.L., Morin, G., Robert, J.L., Galoisy, L., Calas, G., Grauby, O., Boulvais, Ph., Cathelineau, M. (2015) Analyse fine de minerais latéritiques (approches pétrographique, minéralogique, géochimique et isotopique), Rapport de fin d'étude CNRT.

Gaudin, A., Grauby, O., Noack, Y., A. Decarreau, A., & S. Petit, S. (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, 301–315.

Gleeson, S.A., Herrington, R.J., Durango, J., Velasquez, A., & Koll, G. (2004) The Mineralogy and Geochemistry of the Cerro Matoso S.A. Ni Laterite Deposit, Montelibano, Colombia, *Economic Geology* 99, 1197–1213.

Goldich, S. (1938) A study in rock weathering, Journal of Geology 46, 17-58.

Jébrak, M. & Marcoux, E. (2008) Géologie des ressources minérales, *Ed*. : Gouvernement du Québec, 667p.

Lagabrielle, Y., Maurizot, P., Lafoy, Y., Cabioch, G., Pelletier, B., Regnier, M., Wabeteg, I. & Calmanth, S. (2005) Post-Eocene extensional tectonics in Southern New Caledonia (SW Pacific): Insights from onshore fault analysis and offshore seismic data, *Tectonophysics* 403, 1-28.

Lagabrielle Y. and Chauvet A. (2008) The role of extensional tectonics in shaping Cenozoic New Caledonia, *Bull. Soc. Geol. Fr*. 179, 315-329.

Lahondère, D., Lesimple, S., Cagnard, F., Lahfid. A., Wille ; G., Maurizot, P., Cluzel , D., & Baumann, F. (2011) Amiante-serpentinisation et fibrogénèse dans les massifs de péridotite de Nouvelle-Calédonie, Rapport BRGM/RP-60192-FR, 458p.

Latham, M. (1977) On geomorphology of northern and western new-caledonian massifs, *in*: International Symposium on Geodynamics in the South-West Pacific, Noumea, New Caledonia, 27 August-2 September 1976, Technip ed. 1977, 235-244.

Lewis, J.F., Draper, G., Proenza, J.A., Espaillat, J., & Jiménez, J. (2006) Ophiolite-related ultramaficrocks (serpentinites) in the Caribbean Region: a review of their occurrence, composition, origin, emplacement and Ni-laterite soils formation, *Geol. Acta* 4, 237–263.

Mevel, C. (2003) Serpentinization of abyssal peridotites at mid-ocean ridges, *C. R. Geosciences* 335, 825-852.

Mudd, M. & Jowitt, S.M. (2014) A detailed assessment of global nickel resource trends and endowments, *Economic Geology* 109, 1813-1841.

Orloff, O. (1968) Etude géologique et géomorphologique des massifs d'ultrabasites compris entre Houailou et Canala (Nouvelle-Calédonie), Thèse 3e cycle, Montpellier, 189p.

Paris, J.P. (1981) Géologie de la Nouvelle-Calédonie: Un essai de synthèse, Mémoire BRGM no. 113, Orléans, 278p.

Ploquin, F., Fritsch, E., Juillot, F., Dublet, G., Fandeur, D., Fonteneau, L., Martin, E., Auzende, A.L., Robert, J.L., Esteve, I., Guinier, J-M., Fiallin, M., & Morin G. (2015) Rapport final Partie II : Les oxydes de manganèse associés aux latérites de transition. Analyse fine de minerais latéritiques (approches pétrographique, minéralogique, géochimique et isotopique), CNRT ''Nickel & son environnement'', 107 p.

Sagapoa, C.V., Imai, A., & Watanabe K. (2011) Lateritization process of ultramafic rocks in Siruka, Solomon Islands, *J. Novel Carbon Res. Sci*. 3, 32-39.

Sevin, B., Ricordel-Prognon, C., Quesnel, F., Cluzel, D., Lesimple, S., & Maurizot, P. (2012) first Paleomagnetic dating of ferricrete in New Caledonia: new insights on the morphogenesis and paleoweathering of Grande Terre, *Terra Nova* 24, 77-85.

Sevin, B. (2014) Cartographie du régolithe sur massifs ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie : distribution dans l'espace et le temps des gisements nickelifères. Thèse Univ. Nouvelle-Calédonie, 536 p.

Soler, J.M., Cama, J., Gali, S., Melendez, W., Ramirez, A. & Estanga, J. (2008) Composition and dissolution kinetics of garnierite from the loma de hierro Ni-laterite deposit, Venezuela, *Chem. Geol*. 249, 191-202.

Tauler, E., Proenza, J.A., Gali, S., Lewis, J.F., Labrador, M., Garcia-Romero, E., Suarez, M., Longo, F. & Bloise, G. (2009) Ni-sepiolite-falcondoite in garnierite mineralization from the Falcondo Ni-laterite deposit, Dominican Republic, *Clay Minerals* 44, 435–454.

Thorne, R., Herrington, R., & Roberts, S. (2009) Composition and origin of the Caldag oxide nickel laterite West Turkey, *Mineralium Deposita* 44, 581-595.

Trescases, J-J. (1975) L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale: formation des gisements nickélifères de Nouvelle-Calédonie, *Mémoire ORSTOM* 78, 278p.

Troly, G., Esterle, M., Pelletier, M., & Reibell, W. (1979) Nickel deposits in New Caledonia. Some factors influencing their formation. In : International laterite Symposium, D.J.I. Evans, R.S. Shoemaker and H. Veltman (Eds.), New York, AIME, 85-119.

Ulrich, M. (2010) Péridotites et serpentinites du complexe ophiolitique de la Nouvelle-Calédonie. Études pétrologiques, géochimiques et minéralogiques sur l'évolution d'une ophiolite de sa formation à son altération, Thèse Univ. Nouvelle-Calédonie et Univ. Joseph Fourrier Grenoble, 212 p.

Villanova-de-Benavent, C., Proenza, J.A., Galí, S., García-Casco, A., Tauler, E., Lewis, J.F. & Longo, F. (2014) Garnierites and garnierites: Texture, mineralogy and geochemistry in the Falcondo Ni-laterite deposit, Dominican Republic, *Ore Geology Reviews* 58, 91 – 109.

Wells, M.A., Ramanaidou, E.R., Verrall, M. & Tessarolo, C. (2009) Mineralogy and crystal chemistry of ''garnierites'' in the Goro lateritic nickel deposit, New Caledonia, *European Journal of Mineralogy* 21, 467–483.

Remerciements

Cet atlas a été commandité par le CNRT "Nickel et son environnement", Nouméa (Nouvelle-Calédonie). Sa réalisation s'appuie sur de nombreuses observations de terrain et les résultats de travaux entrepris dans le cadre de deux projets CNRT "*Analyse fine de minerais latéritiques*" et "*Nickal*" (2010-2015). Les auteurs de cet ouvrage remercient Fabien Trotet, Pierre Epinoux, Philippe Bains, Philippe Hoffler, Gilles Monteil (SLN), Julie Michaud (SMT/SMCB), Yann Dijkstra, René Feré (CFTMC), Clément Couteau, Frédéric Villedieu (KNS) et Christian Tessarolo (Goro-VALE) qui ont fourni leur soutien logistique pour l'accès aux fronts miniers et de la documentation technique sur les sites visités. Les auteurs remercient plus particulièrement les sociétés SLN, KNS et VALE NC qui ont mis à leur disposition les résultats d'analyses de sondages miniers sur tests miniers (Poro/CFTMC, Koniambo, Goro) et fourni plusieurs sondages de référence pour les caractérisations minéralogiques. Denis Paquet de l'université de Poitiers (IC2MP) est remercié pour sa contribution à la production de 55 lames minces destinées aux observations et analyses au microscope optique et électronique. Michel Fialin et Frédéric Couffignal du centre de microanalyses CAMPARIS (Université Pierre et Marie Curie, Paris 6) sont également remerciés pour leur assistance à l'observation et analyse de ces lames à la microsonde.

Page suivante : Sondage minier (de gauche à droite et de haut en bas) dans la région des minerais quadrillés (Poro CFTMC, carrière Stanislas) montant un contrôle structural majeur : Les fractures fortement minéralisées à garniérite (vert) s'intercalent avec des blocs de roches saines (alternance d'harzburgite et de boules de dunite plus claires). La latérisation exploite cette zone de faiblesse. Elle altère la bordure de ces blocs (jaune brunâtre) tout en préservant les veines minéralisées. Ces dernières se retrouvent à la base de l'ensemble latéritique sus-jacent (jaune brunâtre à brun rouge).

CNRT "Nickel et son environnement"