

Stage de fin d'étude du master Argiles à l'IRD de Nouméa (Nouvelle-Calédonie)

Dans le cadre du projet du CNRT :

Facteurs de minéralisation Ni/Co des latérites de Nouvelle-Calédonie

## **Modélisation 3D de la répartition du nickel du site minier de GORO en Nouvelle-Calédonie**

Pacreau Marielle

Encadré par

Fritsch Emmanuel

Et

Mangeas Morgan



## Remerciements

### *Je remercie très sincèrement...*

Mes parents, ma famille, mes amis de métropole qui ont su me montrer leur présence malgré la distance.

Mes maîtres de stage, Emmanuel Fritsch et Morgan Mangeas, qui m'ont fait découvrir le domaine de la programmation et de la recherche en contexte minier, et sans qui je n'aurais pu découvrir la Nouvelle-Calédonie.

Farid Juillot, pour le temps précieux qu'il m'a accordé.

Lionel et Louise pour leurs précieux conseils et qui m'ont bien aiguillé à mon arrivée.

Mes 11 colocataires, Flo, Philippine, Max et tous ceux qui ont croisés mon chemin, pour tous ces merveilleux moments passés avec vous.

Vincent et Gaby pour une ambiance sympathique dans le bureau.

Et pour tous ceux que j'aurais oubliés...

## Résumé

La Nouvelle-Calédonie fait partie des gisements latéritiques les plus importants et représentent 20 à 25% des ressources mondiales en nickel. Les dépôts latéritiques se forment dans les climats tropicaux et subtropicaux par la dégradation prolongée de la roche-mère de type ultrabasique pendant des périodes plus ou moins marquées de sécheresse et de pluie s'étalant sur des millions d'années. La pluie et l'eau souterraine circulent à travers la roche-mère fracturée, lessivant graduellement les éléments mobiles tels le magnésium et la silice, et laissant le nickel et le cobalt (moins mobiles) en concentrations résiduelles et le fer s'accumuler. Cela donne des latérites puissantes (au moins 30 mètres) comme le cas du site de GORO.

VALE Nouvelle-Calédonie nous donne accès aux données acquises lors de campagnes de sondages (plus de 1000) comprenant leur log et leur description ainsi que les 87000 analyses chimiques effectuées sur ces carottes. Grâce au logiciel R, nous avons pu traiter ces données et dans un premier temps sortir les grands ensembles avec une signification minéralogique. Puis dans un second temps, nous avons pu observer les transferts du nickel par rapport au bedrock par la méthode des fonctions de transfert. Pour enfin, sortir les grandes structures (failles, jeu de cisaillement...) de ce site afin de comprendre les processus de répartition du nickel.

Ainsi, les gains en nickel sont concentrés dans la couche saprolitique notamment dans la partie la plus siliceuse. Aucun gain n'est constaté dans les couches latéritiques. Quand nous nous intéressons aux structures 3D, nous distinguons des figures d'érosion en chevrons qui joueraient un rôle dans la distribution du nickel. En effet, les gains en nickel semblent être localisés dans ces structures.

## Abstract

New Caledonia is a part of lateritics deposits the most important and represents 20 to 25 % of the nickel world resources. The lateritics deposits form in the tropical and subtropical climates by the prolonged degradation of the ultrabasic bedrock during periods more or less marked with drought and with rain spreading out on millions of years. The rain and the groundwater circulate through the broken bedrock, washing gradually the mobile elements such the magnesium and the silica, and letting the nickel and the cobalt (less mobile) in residual concentrations and the iron accumulate. It gives powerful laterites (at least 30 meters) as the case of GORO's site

VALE Nouvelle-Calédonie gives us access to the data acquired during campaigns of drilling (more than 1000) including their log and their description as well as 87000 chemical

analyses made on these carrots. Thanks to the software R, we were able to handle these data and at first to take out complexes with a mineralogical meaning. Then secondly, we were able to observe the transfers of the nickel with regard to the bedrock by the method of the functions of transfer. For finally, take out the big structures (faults, set of cutting) of this site to understand the processes of distribution of the nickel.

So, the nickel gains are concentrated in the saprolitic layer in particular in the most siliceous part. Losses are noticed in lateritics layers. When we are interested in the 3D structures, we distinguish figures of erosion in chevrons which would play a role in the distribution of the nickel. Indeed, the gains seem to be localized in these structures.

# Sommaire

Remerciements .....	p2
Résumé /Abstract .....	p3
Introduction .....	p6
Etat de l'art .....	p8
Nouvelle-Calédonie	
Site d'étude : Mine de Goro	
Processus d'altération	
Etude dans le cadre du projet du CNRT	
Matériels et Méthodes .....	p18
VALE Nouvelle-Calédonie	
R CRAN	
Fonction de transfert	
Définition du log .....	p22
Méthodes	
Résultats et Discussion	
Comportement du Nickel selon les grands ensembles .....	p28
Méthodes	
Résultats et Discussion	
Comportement du Nickel selon les grands structures .....	p29
Méthodes	
Résultats et Discussion	
Conclusion .....	p33
Bibliographie .....	p34

# Introduction

Les gisements de nickel latéritique constituent 40% de la production et 70% des ressources en nickel. Les latérites nickélifères correspondent à des roches ultramafiques (dunites, péridotites, serpentinites...) ayant subi une altération tropicale. Les gisements les plus importants sont situés dans la zone équatoriale entre 22°N et 22°S aux frontières des plaques. Une longue période d'altération dite de latéritisation a affecté ces roches depuis le milieu du Tertiaire jusqu'au Quaternaire qui a permis une concentration plus importante en éléments traces métalliques tels que le nickel, le cobalt, le chrome ou encore le manganèse... Jebrak et Mercaux (2008)

La Nouvelle-Calédonie représente un bon exemple de ce contexte, située à une latitude de 22°S, au niveau de la ride Norfolk, issue de la collision de la plaque australienne et de la plaque pacifique. Les péridotites qui recouvrent plus d'un tiers de la surface de la Nouvelle-Calédonie, ont subies d'intenses périodes d'altération depuis 35 millions d'années offrant ainsi des couvertures d'altération puissantes et riche en éléments traces métalliques. En effet, la Nouvelle-Calédonie fait partie des gisements latéritiques les plus importants et représentent 20 à 25% des ressources mondiales en nickel. De plus, le Nickel est la seconde ressource du territoire.

Bien qu'exploité depuis environ 1875, la compréhension des phénomènes géologiques de mise en place du substratum et de la formation de ces minerais ne sont pas encore complètement dévoilés. Il est important de dissocier la serpentinitisation et la latéritisation, Trescases,(1979), Pelletier (2003), Traore (2005).

Dans un premier temps exploitée pour ses minerais silicatés, les avancées en matière d'extraction depuis une quinzaine d'années permettent à la Nouvelle-Calédonie de s'étendre à l'exploitation des minerais latéritiques. C'est le cas du site de Goro au sud de la Nouvelle-Calédonie qui est l'une des premières mines où VALE Nouvelle-Calédonie exploite les latérites.

Afin de mieux connaître pour mieux exploiter ces minerais et mieux contrôler l'impact sur l'environnement, depuis 2007, le Centre National de Recherche Technologique(CNRT) développe des projets sur le Nickel et son environnement en Nouvelle-Calédonie. Trois thématiques sont abordées : l'impact de l'exploitation sur la société, son environnement et sa technologie. C'est dans ce dernier point que se situe cette étude, en cherchant des éléments de compréhension des facteurs de minéralisation du nickel dans les latérites afin de mieux connaître, explorer, exploiter les minerais de Ni et métaux associés, et de développer des technologies de restauration des sites. L'objectif de la présente étude étant de comprendre les facteurs structuraux mettant en jeu la répartition du nickel dans les latérites de Nouvelle-Calédonie plus particulièrement dans les massifs du sud. Dans un premier temps, en délimitant les grands ensembles qui constituent les Massifs du Sud à partir de données géochimiques. Puis dans un second temps observer le comportement des éléments traces métalliques dans ces

ensembles et le long du profil d'altération. Puis enfin, il s'agit de déterminer le rôle des structures dans la répartition du nickel

Dans un premier temps, nous rappellerons les bases géologiques du site d'étude puis développerons sur les processus d'altération des profils du site. Ensuite, nous expliciterons les jeux de données et les différentes méthodes employées. Nous définirons les grands ensembles de ce site. Puis nous traiterons ces données dans le but de déterminer des paramètres jouant dans la mise en place de ces minerais.

# Etat de l'art

## Nouvelle-Calédonie

### Géographie

La Nouvelle-Calédonie se situe dans le sud-ouest de l'Océan pacifique, entre 20° - 23° de latitudes Sud, et 160° - 170° de longitude. Elle est au nord du tropique du Capricorne et à l'Est Nord-Est de l'Australie : 1980 km de Sydney, à 1860 km de la Nouvelle Zélande (Auckland), et à 18370 km de la métropole (Paris).

Elle s'étend sur plus de 400 km, selon une direction générale NW-SE, et sur 50 à 70 kms en largeur, elle couvre une superficie d'environ 16 000km<sup>2</sup> dont environ 5000 représentent des massifs ultrabasiques, Trescases (1975). Elle s'entoure de plusieurs dépendances de plus petite taille : Bélep au nord, l'île des Pins au sud, et les îles Loyauté à l'est (figure 1).

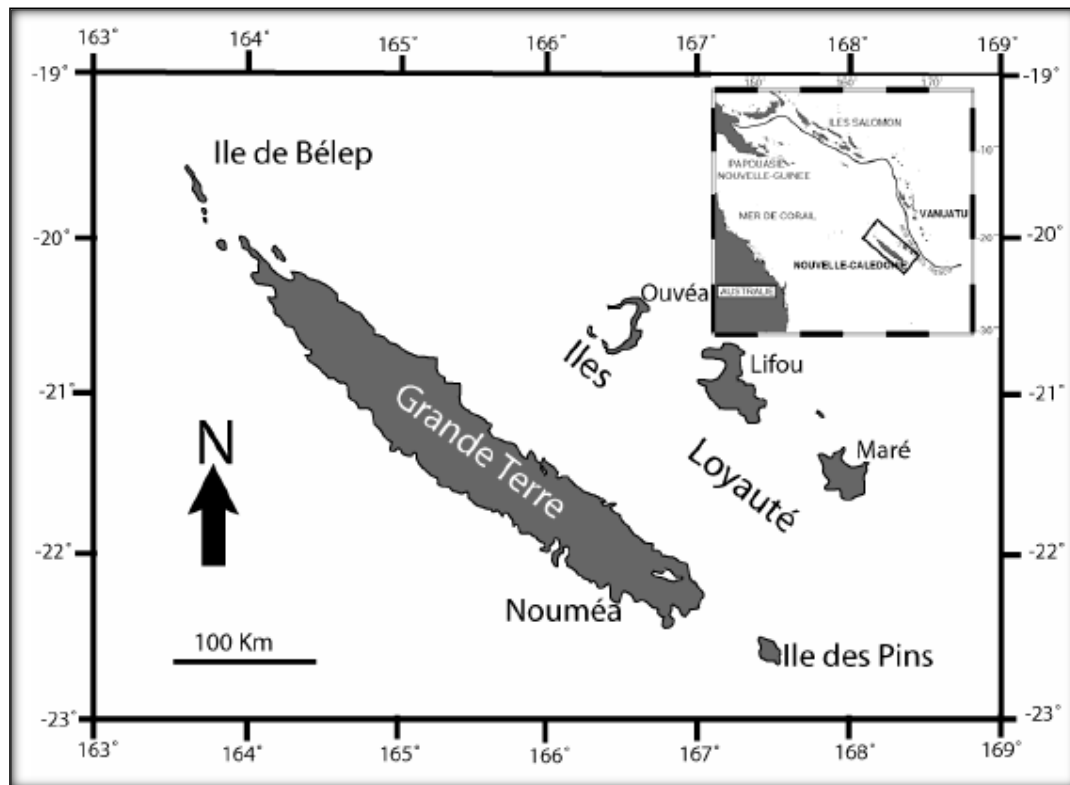


Figure 1. Carte de localisation de la Nouvelle-Calédonie dans le Pacifique Sud-Ouest d'après Traoré (2005)

### Climat

La Nouvelle-Calédonie est soumise à un climat subtropical contrôlé par un régime d'alizés. On distingue classiquement deux saisons pluvieuses (Trescases, 1975) :

→ l'été austral, de décembre à mars, qui correspond à une saison chaude et humide. C'est également la saison des cyclones,

→ l'hiver austral, de juin à août, durant lequel il tombe des précipitations d'intensité modérée.

Entre les deux saisons humides se placent deux saisons plus sèches : d'avril à mai et de septembre à novembre : ce sont les périodes d'alizés.

### **Pluviométrie**

Les précipitations en Nouvelle-Calédonie sont tributaires du relief et de l'exposition au vent. La pluviométrie moyenne annuelle est estimée à 1700 mm, avec néanmoins des écarts très importants: de moins de 1000 mm/an pour certains secteurs de la côte Ouest, à plus de 4000 mm/an au voisinage des sommets les plus élevés.

Le régime pluviométrique en Nouvelle-Calédonie a connu des fluctuations importantes au cours des temps géologiques. Un épisode plus humide que l'actuel a marqué la fin du tertiaire et/ou le début du quaternaire. A cet épisode, a succédé une période plus sèche que l'actuel, Trescases (1975), Traore (2005).

### **Température**

En dépit des variations pluviométriques, un climat chaud s'est maintenu sur la Nouvelle-Calédonie durant les périodes ci-dessus citées (Trescases, 1975), et la température moyenne annuelle a toujours été proche des valeurs actuelles.

### **Aperçu géologique**

La spécificité géologique de la Nouvelle-Calédonie est ses formations ophiolitiques. Leur mise en place s'est faite à l'éocène supérieur par obduction sur un substratum volcanosédimentaire : le noyau ancien et sa couverture sédimentaire, Cluzel (2006), Traore (2005) ; Fandeur (2009).

#### *Le noyau ancien*

Il peut être scindé en trois unités :

→ l'unité de Boghen, datée du paléozoïque. Elle est constituée de schistes quartzo-feldspathiques, qui reposent sur un socle volcanique. Cette unité correspond à un paléo-océan ;

→ l'unité de Koh, d'âge variant entre le permien et le trias inférieur. Elle a été reconnue dans la chaîne centrale. C'est des formations essentiellement sédimentaires surmontant des basaltes et gabbros ;

→ l'unité de Téremba, c'est une alternance de sédiments et de dépôts volcaniques reconnue entre la baie de Saint-Vincent et la baie de Moindou. Elle est d'âge variant entre le permien et le jurassique supérieur, Cluzel (2006).

### *La couverture sédimentaire*

A partir du crétacé inférieur, on assiste à l'ouverture de la mer de Tasman, qui conduit à la séparation la Grande Terre du continent Australien. Cette dislocation de la bordure Est du super-continent Gondwana s'est accompagnée du démantèlement des reliefs en cours de surrection et la formation de dépôts sédimentaires au crétacé supérieur.

Cluzel et al., (2001) divisent les dépôts du crétacé supérieur en trois ensembles :

- un ensemble inférieur, formant la base de la série : il est constitué d'éléments grossiers arrachés au noyau ancien,
- un ensemble intermédiaire fait de grès, de shales riches en matière organique fossile (charbon),
- un ensemble supérieur, constitué de grès fins, renfermant des ammonites et des mollusques bivalves.

Le processus de sédimentation a été interrompu à l'éocène par la mise en place de l'unité basaltique de Poya et de la nappe de péridotites.

### *L'orogénèse néo-calédonienne*

#### *L'unité de Poya*

Elle se compose principalement de laves basaltiques organisées en coussins, de dolérites et de gabbros, le tout couvert de radiolarites stratifiées. Souvent considérés comme des épanchements volcaniques in-situ ou non loin du site actuel, le modèle aujourd'hui largement admis est celui d'une nappe « ophiolitique » ayant chevauchée le noyau ancien et sa couverture sédimentaire au crétacé supérieur, Cluzel (2006). L'unité de Poya n'aurait aucun lien génétique avec la nappe de péridotites.

#### *La nappe des péridotites*

L'épisode le plus spectaculaire dans la construction de l'édifice géologique néocalédonien, a été le chevauchement du noyau ancien, de l'ensemble sédimentaire et de l'unité basaltique de Poya par une nappe de péridotites à l'éocène supérieur. La nappe à sa mise en place, couvrait une part importante de la Grande Terre, et a été progressivement décapée par une succession d'épisodes d'altération chimique et d'érosion mécanique, Trescases (1975), Fandeur (2009).

Aujourd'hui, les témoins de cet événement géologique sont (figure 2) :

- le massif ultrabasique du sud : il représente avec son prolongement de la côte est, 81% de la superficie des péridotites de Nouvelle-Calédonie,
- les klippes en chapelet de la côte Ouest et du Nord (Kopéto-Boulinda, Koniambo, Tiébaghi, Poum, île de Bélep, etc...).

En résumé : la Nouvelle-Calédonie s'est séparée de l'Australie il y a environ 65 millions d'années et a dérivé vers le Nord-Est pour rejoindre sa situation actuelle il y a environ 50 millions d'années.

Durant cette période, d'importants secteurs de l'île ont été submergés à plusieurs reprises et la quasi-totalité de la Grande Terre a été recouverte jusqu'à 2 000 m de péridotite. La Nouvelle-Calédonie est donc représentée par une séquence épaisse de strates marines et terrestres comprenant des nappes de charriage de péridotite, telle que celle qui abrite le gisement de nickel de Goro.

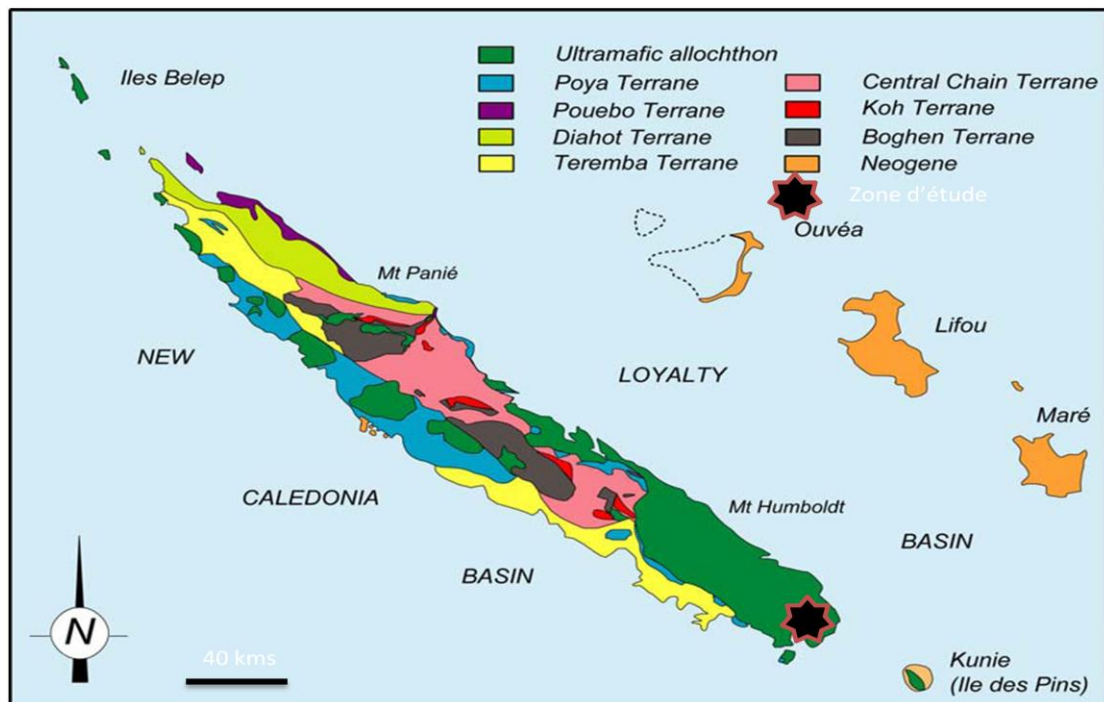


Figure 2. Schéma géologique de la Nouvelle-Calédonie d'après Cluzel (2006)

## Site d'étude : Mine de Goro

### **Géographie**

Le site d'étude se situe au sud du Massif du Sud (voir figure 2).

### **Pluviométrie**

Le grand massif péridotitique du Sud est le plus arrosé, la moyenne annuelle de précipitation y est estimée à 2000 mm, avec des maxima à 4000 mm/an au-dessus de 1000 m d'altitude, Traoré (2005).

### **Végétation**

La végétation adaptée aux formations ultrabasiques est appelée maquis minier. Il présente une formation végétale très diversifiée à Gymnospermes, Casuarinacées, Cunoniacées, Epacridacées,

Rubiacées etc..., et contribue pour une part importante à la richesse et à la spécificité de la flore néo-calédonienne.

Outre le maquis minier, on rencontre des forêts humides à pandanus, palmiers, fougères arborescentes et kaoris sur les versants et les talwegs abrités des vents, et plus humides. Les crêtes constituent le domaine de forêts plus sèches à araucarias et bois de fer (Trescases, 1975).

### Morphologie et le modelé des péridotites

Le paysage néo-calédonien est une juxtaposition de surfaces topographiques dont les reliefs de commandement sont des péridotites, à l'exception du secteur Nord-Est. Ces surfaces ont été considérées comme des témoins d'épisodes successifs d'altération chimique et d'érosion mécanique catalysées par une tectonique post obduction, Trescases (1975). Selon lui, ce modelé est le résultat d'un fonctionnement karstique des péridotites, comparable à celui des régions calcaires avec dolines et poljés (Figure 3).

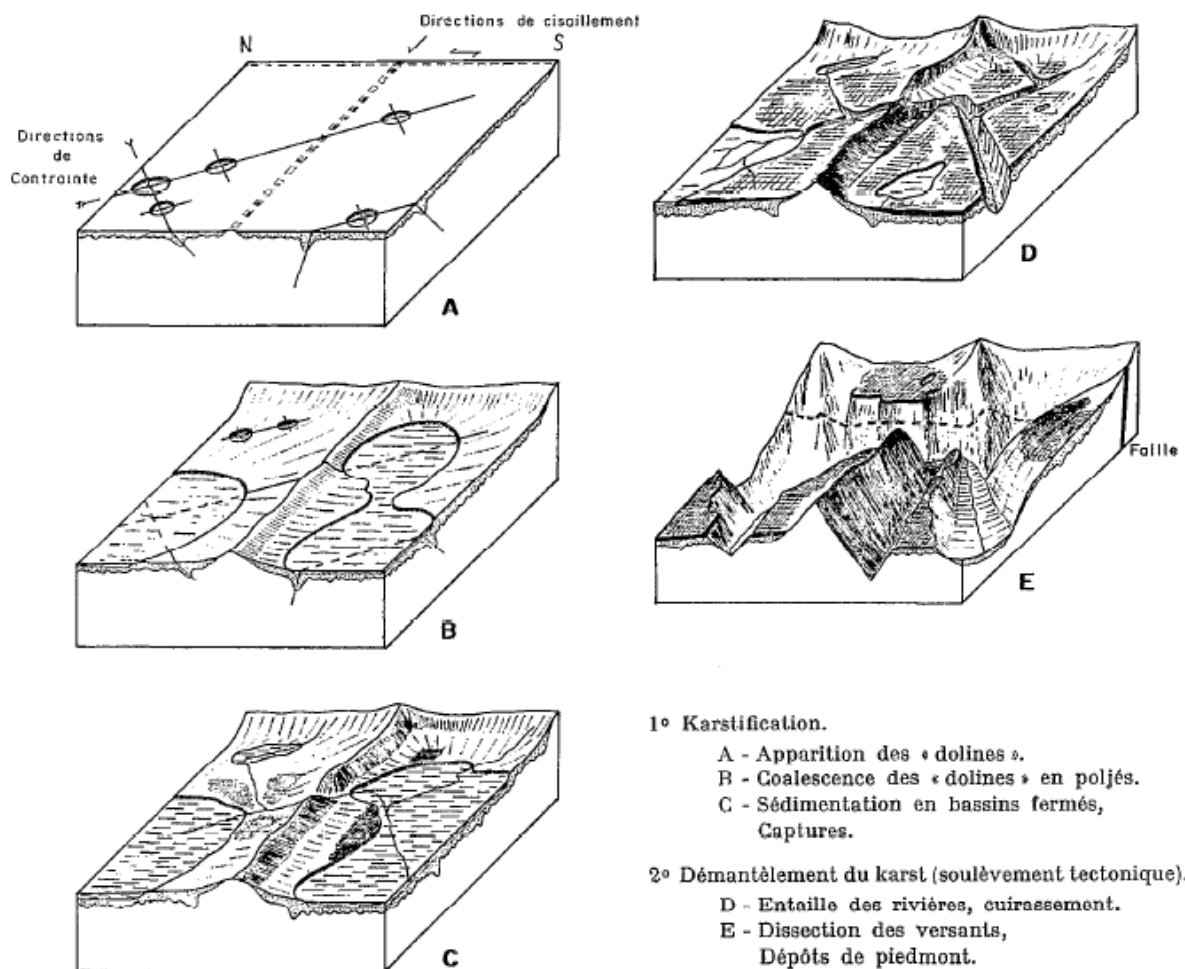


Figure 3. Evolution du modelé des péridotites. d'après Trescases (1975)

Les points hauts sont donc constitués par un réseau de collines étroites et très allongées (en vert clair sur la figure 4, en rouge site minier de Goro), orientées principalement 80-90° et 150-170°, c'est-à-dire conformément aux directions de stress maximum. Les versants en pente forte (plus de 50 %) sont le siège d'une érosion intense. En marron sur la figure 4 représente les plateaux latéritiques.

La zone en noir sur la figure 4 est perpendiculaire aux directions de contraintes maximums : c'est une zone de forts cisaillements avec de nombreuses fractures. Il semblerait que l'altération des péridotites y soit plus importante.

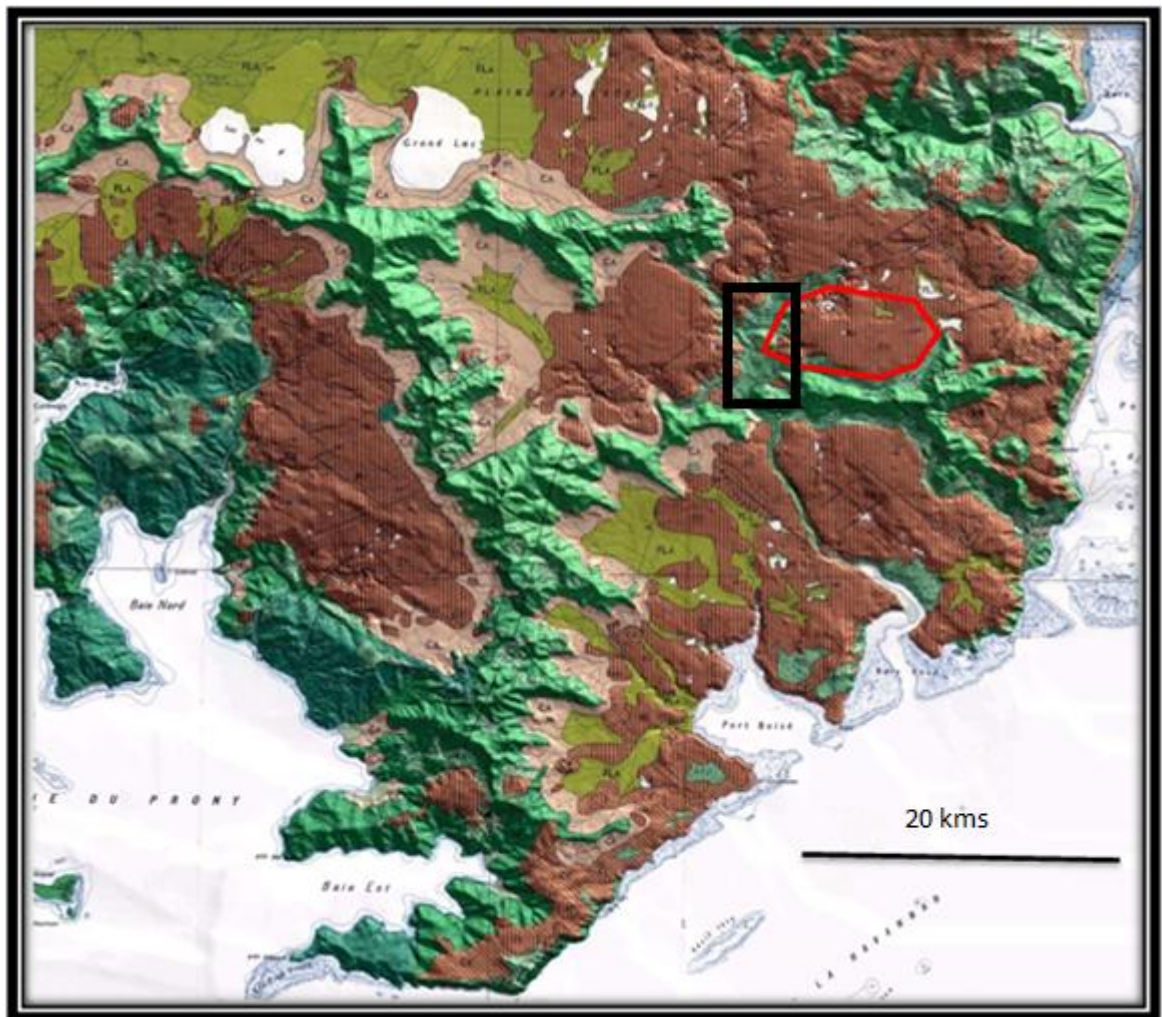


Figure 4. Carte morphologique du Sud de la Nouvelle-Calédonie, en rouge : le site minier, en noir : zone de fort cisaillement, d'après les données des miniers.

### **Aperçu géologique**

Le gisement du Plateau de Goro, en Nouvelle-Calédonie, est un gisement classique dans sa composition, c'est-à-dire constitué d'oxydes de fer en surface (latérites) et de silicates magnésiens en profondeur (saproлите), résultant de la décomposition en climat tropical humide de la roche-mère péridotitique. De plus, sa localisation dans un milieu particulièrement humide, fracturé et drainé par des eaux souterraines, a contribué à développer une morphologie en bassins expliquant sa taille et ses concentrations en métaux résiduels. Il s'agit d'un des dépôts latéritiques

à plus haute teneur en nickel au monde (voir site GORO Nickel et celui de VALE Nouvelle-Calédonie).

Les massifs de péridotites sont sur le plan lithologique, dominés par une masse harzburgitique, appelée masse péridotitique principale (Guillon, 1969). Elle compose l'essentiel du massif du Sud. Cette monotonie lithologique est localement interrompue, soit par des rubans de dunites qui peuvent être associés à des gabbros noritiques (unité discordante) et de pyroxénites. Elle est constituée principalement d'olivine et de pyroxènes et est classée comme roche « ultramafique » ou « ultrabasique », ce qui traduit sa forte teneur en fer et en magnésium et sa teneur relativement faible en silice.

L'épaisseur totale du profil du Plateau de Goro peut atteindre jusqu'à 60 mètres, bien que, en moyenne, elle soit plutôt de 40 mètres. Elle contient un taux élevé de fer et un faible taux de silice et de magnésie, et sa teneur en nickel augmente avec la profondeur. D'ordinaire, la limonite présente une granulométrie très fine; elle constitue une terre compacte à forte. La concentration élevée de fer dans la partie supérieure donne au sol une teinte rouge-brunâtre caractéristique. C'est dans la partie inférieure, appelée saprolite, que se produit la lixiviation active. La saprolite est caractérisée par des concentrations plus élevées de nickel, de silice et de magnésie et par une concentration plus faible de fer. On peut trouver dans la saprolite des blocs rocheux partiellement décomposés de tailles variables et disposés de façon aléatoire. La couche de saprolite peut parfois être séparée de la couche de limonite sus-jacente par une couche de transition.

Sept horizons géologiques principaux définissent le profil latéritique du plateau de Goro (voir figure 5) :

- Une couche de cuirasse de fer
- Une couche de grenaille de fer
- Une couche de latérite rouge dont les concentrations en nickel et en cobalt ne sont pas considérées comme économiques dans le cadre du procédé de Vale Nouvelle-Calédonie.
- Une couche de latérite jaune (appelée aussi limonite) contenant de 0.8 à 1,7% de nickel et de 0,1 % à 0,5 % de cobalt. Seule une partie de la latérite jaune (nickel supérieur à 1.2%) est considérée comme économique.
- Une zone de transition peu abondante contenant de 1.2 à 2.0% nickel et de 0.1 à 0.5% cobalt
- Une couche irrégulière de saprolite, minerais silicatés dont la teneur en nickel varie de 0.9 à 2.5%, et qui inclut des blocs rocheux. En triant les grains fins, riches en nickel et pauvres en magnésie, on obtient un minerai exploitable, contenant environ 2% de nickel.
- La roche-mère péridotitique, à 0.3-0.5 % de teneur de nickel.

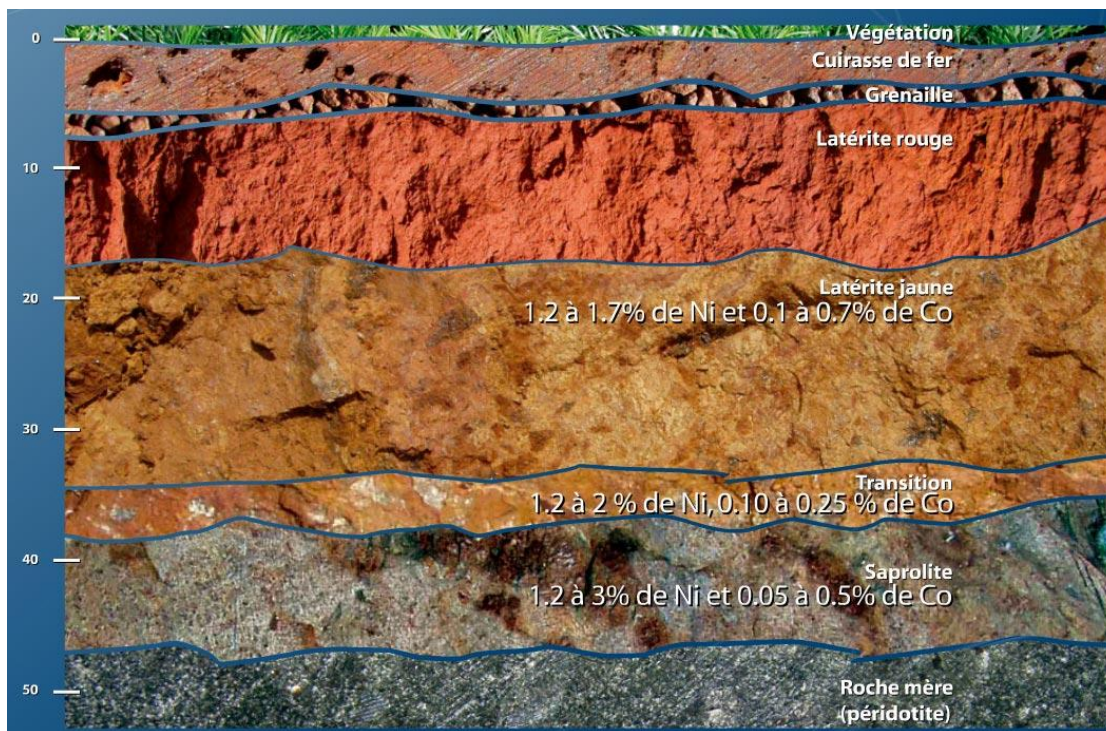


Figure 5. Profil latéritique du plateau de Goro, d'après le site de GORO Nickel

## Processus d'altération

Nous avons vu précédemment les péridotites sont des harzburgites, les dunités étant nettement moins abondantes. Ces roches sont essentiellement constituées d'olivine, minéral dans lequel se trouve la majeure partie du nickel des péridotites.

### **La serpentinisation des péridotites**

En Nouvelle Calédonie, les péridotites ont généralement subi une serpentinisation lors de leur mise en place. Localement une serpentinisation antérieure, vraisemblablement liée aux activités hydrothermales des fonds océaniques, est bien visible.

La serpentinisation est une hydratation qui a lieu généralement à une température inférieure à 450°C. L'eau infiltrée dans les profondeurs à la faveur des fractures, des joints de grains et des craquelures des cristaux réagit au contact de l'olivine et du pyroxène pour donner la serpentine, un phyllosilicate.

→ harzburgite :



Péridot + Enstatite                      Serpentine

Cette réaction conduit également à la formation de brucite qui est mise en solution et disparaît :



l'altération va maintenir les structures dans un premier temps puis à la base des latérites, la destruction de la roche est telle que la structure s'effondre et la densité apparente augmente donc.

Quant au nickel, il a un comportement variable. Des saprolites provenant d'un même chantier et ayant le même rapport  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MgO}$  peuvent avoir des teneurs en nickel variant de moins de 1 % à plus de 4 %, Pelletier (2003).

## Etude dans le cadre du projet du CNRT

L'enjeu scientifique majeur reste de faire la part de ce qui est imputable à l'altération météorique en environnement tropical (latéritisation) de ce qui est hérité des hétérogénéités du substrat et donc attribuable à l'histoire de l'ophiolite. Cet objectif principal reste crucial pour élaborer des modèles robustes qui relient la dynamique des éléments métalliques (transferts, bilans) à des changements de spéciation des phases minérales porteuses (silicates, hydrosilicates puis oxydes) dans l'optique d'une meilleure compréhension des processus (endogènes et supergènes) associés aux concentrations et à la dispersion des métaux dans l'environnement. Ces modèles devraient servir de guides utiles à l'exploration et l'exploitation des sites miniers et également à la sélection, voir même, au traitement des minerais.

L'étude est envisagée dans le cadre du GIS CNRT « Nickel et son Technologie » en étroite collaboration avec l'opérateur minier VALE qui met à notre disposition un jeu de données de 533 sondages géo référencés a permis d'estimer les ressources, de déterminer les épaisseurs des principales couches du manteau d'altération (roches altérées ou saprolites grossière et fine) et des sols (latérites de transition, jaune, rouge...) qui les surmontent puis de visualiser la répartition du nickel dans de ces différentes couches par des modèles 3D. Cette étude préliminaire réalisée par l'équipe MRI de VALE (E Landao, M Bouquet) a révélé des zones de bombement et surcreusement (dôme, sillon) et des minéralisations intéressantes dans des sillons qui suivent les principales directions structurales du paysage.

Le cadre de cette étude est de re-exploiter ce jeu de données qui a été complété par de nouveaux sondages plus serrés (500 de plus) acquis dans le cadre de l'entrée du site dans sa phase de production. Ce nouveau jeu de données permettra d'affiner le modèle et de mieux dissocier les évolutions géochimiques imputables à la latéritisation de celles attribuables aux hétérogénéités de substrat (passage d'une dunite à une harzburgite, veines à gabbro, zones fortement serpentinisée, minéralisée (Ni, Mn et Co), enrichie en silice ...). Il s'agit d'étudier le comportement des métaux d'intérêt économique (Ni) en utilisant d'autres techniques. Notamment, par le calcul des pertes et gains d'autres éléments par la méthode des bilans. Ce premier traitement devrait nous permettre de mieux révéler les hétérogénéités du substrat. Il nous

amènera aussi à revoir la définition des matériaux (logs des fiches de sondage) en reliant la géochimie aux faciès des matériaux rencontrés dans ce type d'environnement (massif du sud, peu fracturé, à nombreux cumulas et très altéré). Dans une seconde étape, nous utiliserons des modèles 3D pour visualiser la répartition des métaux dans les grands ensembles structuraux du site d'étude (couche, matériaux ou faciès), révélant ainsi les héritages lithologiques et les redistributions gravitaires liées à la latéritisation. Une attention particulière sera accordée au nickel dans la mesure où des traitements préliminaires semblent relier les zones de minéralisations-Ni à des passées à gabbro, ce qui à première vue paraît très surprenant. Ce travail contribuera à l'élaboration d'une typologie des faciès d'altération sur roches ultramafiques et orientera également la sélection de profils types pour des études détaillées de spéciation des métaux (travaux envisagés par Dublet Gabrielle associée au projet).

## Matériels et Méthodes

### VALE Nouvelle-Calédonie

VALE Nouvelle-Calédonie est une entreprise d'extraction de minerai et de production de nickel et cobalt, localisée dans le Sud de la Nouvelle-Calédonie. Vale Nouvelle-Calédonie procède par hydrométallurgie les latérites, faibles en teneur nickélifère, pour produire de l'oxyde de nickel et du carbonate de cobalt, destiné au marché asiatique. Elle déploie la politique de développement durable de Vale, qui s'est donnée comme mission de « transformer les ressources minières en richesses et développement durable ».

Elle est responsable de l'exploitation commerciale du gisement de nickel-cobalt du plateau de Goro, situé au sud de la Grande Terre de la Nouvelle-Calédonie. Le gisement de Goro constitue un des dépôts latéritiques à plus haute teneur en nickel au monde.

Elle nous donne accès aux données prises lors des campagnes de terrains de plus de 1070 sondages qui sont géo-référencés selon les coordonnées IGN 72 (utilisées par les miniers en Nouvelle-Calédonie). Les sondages ont été effectués dans un premier temps tous les 100 m puis dans les zones intéressantes économiquement tous les 50m, puis pour l'ouverture de la mine la zone où ils exploitent a été quadrillée tous les 25m. Ces données comprennent les logs et les descriptions de ces sondages, déterminés de visu par les miniers sur le terrain. Le log est composé essentiellement du BRK (roche mère, bedrock), SAP (saproлите), TRN (latérites de transition), LATJ (latérites jaunes), LATR (latérites rouges) et différents éléments de surface tels que la cuirasse, la grenaille ... Elles comprennent aussi les analyses chimiques réalisées sur ces

sondages soient plus de 80 000 analyses où les éléments suivants ont été dosés : Mg, Si, Fe, Ni, Co, Mn, Cr, Al et la LOI (perte au feu). Parfois le calcium, le potassium, le cuivre, le zinc et le titane ont été mesurés.

Il est important de noter que certaines valeurs sont parfois manquantes ou aberrantes. De plus, la définition et la description du log des sondages sont établies sur le terrain selon le minier qui les décrit et sont donc parfois discutables. Notamment dans le cas des latérites de transition dont la nature du matériau est souvent discutée. En effet, les miniers s'accordent à dire que ce matériau ne contient pas plus de 8% de Magnésium, en revanche sur le terrain la définition reste subjective. Pour certains, cela correspondrait à une zone où les oxydes de manganèse seraient accumulés entre la saprolite et les latérites jaunes, pour d'autres, c'est une zone où la boue serait plus visqueuse. Cela illustre bien les problèmes d'identification auxquels il est possible d'être confronté.

## R CRAN

Pour traiter ces gros volumes de données, il a fallu un outil puissant : R est un langage orienté vers le traitement de données et l'analyse statistique, Barnier (2008).

Il est développé depuis plus de 10 ans par un groupe de volontaires de différents pays. C'est un logiciel libre, publié sous licence GNU General Public Licence.

L'utilisation de R présente plusieurs avantages :

- c'est un logiciel multiplateforme, qui fonctionne aussi bien sur des systèmes Linux, Mac OS X ou Windows ;
- c'est un logiciel libre, son développement et sa distribution sont assurés par plusieurs statisticiens rassemblés dans le R Development Core Team et ses utilisateurs ;
- c'est un logiciel gratuit ;
- c'est un logiciel très puissant, dont les fonctionnalités de base peuvent être étendues à l'aide d'extensions (packages).
- c'est un logiciel avec d'excellentes capacités graphiques. R comporte de nombreuses fonctions pour les analyses statistiques et les graphiques ; ceux-ci sont visualisés immédiatement dans une fenêtre propre et peuvent être exportés sous divers formats (jpg, png, bmp, ps, pdf... ; les formats disponibles peuvent dépendre du système d'exploitation). Les résultats des analyses statistiques sont affichés à l'écran, certains résultats partiels (valeurs de P, coefficients de régression, résidus, . . .) peuvent être sauvés à part, exportés dans un fichier ou utilisés dans des analyses ultérieures.

L'utilisation de R présente aussi quelques inconvénients :

– par son mode de fonctionnement, R charge normalement l'intégralité des données traitées en mémoire. Il nécessite donc une machine relativement puissante pour travailler sur des grosses enquêtes de plusieurs milliers d'individus ; Toutes les actions de R sont effectuées sur les objets présents dans la mémoire vive de l'ordinateur : aucun fichier temporaire n'est utilisé.

R fonctionne à l'aide de scripts (des petits programmes) édités et exécutés au fur. R est un langage interprété et non compilé, c'est-à-dire que les commandes tapées au clavier sont directement exécutées sans qu'il soit besoin de construire un programme complet comme cela est le cas pour la plupart des langages informatiques (C, Fortran, Pascal, . . .).

Ensuite, la syntaxe de R est très simple et intuitive. Par exemple, un graphique pourra être fait avec la commande `plot(x,y)`.

Deux points particuliers dans le fonctionnement de R peuvent parfois dérouter les utilisateurs habitués à d'autres logiciels :

– sous R, en général, on ne voit pas les données sur lesquelles on travaille ; on ne dispose pas en permanence d'une vue des données sous forme de tableau. Ceci peut être déroutant au début, mais on se rend vite compte qu'on n'a pas besoin de voir en permanence les données pour les analyser ;

– avec les autres logiciels, en général la production d'une analyse génère un grand nombre de résultats de toutes sortes dans lesquels l'utilisateur est censé retrouver et isoler ceux qui l'intéressent. Avec R, c'est l'inverse : par défaut l'affichage est réduit au minimum, et c'est l'utilisateur qui demande à voir des résultats supplémentaires ou plus détaillés. En effet, l'utilisateur peut alors extraire uniquement la partie des résultats qui l'intéresse. Par exemple, si l'on doit faire une série de 20 régressions et que l'on veuille comparer les coefficients des différentes régressions, R pourra afficher uniquement les coefficients estimés : les résultats tiendront donc sur une ligne, alors qu'un logiciel plus classique pourra ouvrir 20 fenêtres de résultats.

De plus, une aide accessible depuis le terminal de R avec la fonction `help.start()` facilite la prise en main de ce langage et de nombreux ouvrages ont été réalisés pour compléter cette aide, Genolini, Paradis.

## Fonction de transfert

Afin d'observer les pertes et les gains des éléments chimiques le long d'un profil, nous avons utilisé la méthode des bilans, Brimhall and Dietrich (1987), Brimhall et al. (1991), Fandeur (2009). Cette approche consiste à choisir un élément immobile durant le processus d'altération. Usuellement il se veut que ce soit le titane comme élément invariant mais cet élément ne fait pas

parti des composés de notre système. De plus, le chrome qui aurait pu éventuellement remplacer le titane est en trop faible teneur. Quant à l'aluminium, du fait de la présence de gabbro et donc d'anomalie positive de cet élément il ne peut être considéré comme immobile. Nous prendrons donc dans notre cas comme indice d'altération le fer, qui est certes moins efficace mais ici le mieux adapté à notre cas.

De plus, pour cette approche il est nécessaire de sélectionner une roche mère homogène qui représente la couche sur laquelle s'est développé le profil latéritique. Or comme nous l'avons vu précédemment la complexité géologique met en œuvre un milieu hétérogène. Ainsi en considérant le bedrock déterminé par VALE Nouvelle-Calédonie et en prenant le barycentre des 3 pôles suivants : Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/MgO\_NiO, nous pouvons obtenir une première approximation de la composition de la roche mère et ainsi calculer les fonctions de transfert (FT) avec l'équation suivante :

$$FT = \frac{[\text{élément considéré} / \text{élément invariant}] \text{ dans niveau altéré}}{[\text{élément considéré} / \text{élément invariant}] \text{ dans roche mère}} - 1$$

La figure 6 illustre les fonctions de transfert de l'aluminium (en violet) et du chrome (en orange) d'un profil en fonction de la profondeur. Lorsque la fonction de transfert est égale à 0 cela signifie qu'il n'y a ni de perte ni de gain de l'élément considéré. Si elle est inférieure à 0 alors nous observons une perte de l'élément. Donc si elle est supérieure à 0, cela représente des gains de cet élément par rapport à la composition de la roche mère.

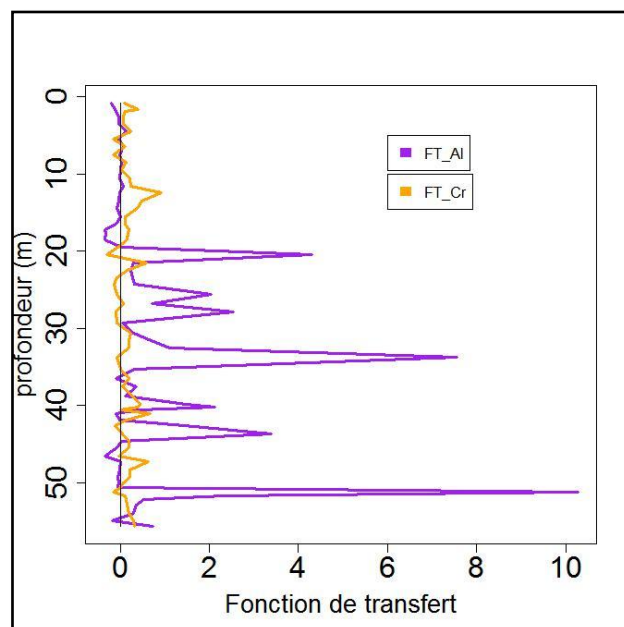


Figure 6. Fonction de transfert du chrome (orange) et de l'aluminium (violet) d'un sondage en fonction de la profondeur

La figure 6 confirme bien les pics liés à l'hétérogénéité du système avec des pics de la fonction transfert de l'aluminium bien prononcé dus à la présence de gabbro. Ainsi cette méthode pourrait montrer les différents comportements des éléments face aux hétérogénéités de la roche.

## Limite de cette approche

Il est important de noter que les résultats des points les plus éloignés du barycentre de la composition de la roche mère seront affectés, la valeur correspondant à la non-mobilité des éléments n'est plus tout à fait égale à 0 et est à prendre en compte pour la suite de l'étude. De même qu'il est important de savoir que le fait de prendre une même roche mère pour tous les profils augmentent l'incertitude des résultats. Mais cela nous permet d'obtenir une première approche quant aux éventuels pertes et gains des éléments. Il serait intéressant de comparer ces résultats avec ceux obtenus en prenant une roche mère différente pour chaque profil (c'est-à-dire en considérant la base du sondage comme roche mère pour chaque profil et non une roche mère pour tous les profils).

## Définition du log

### Méthodes

La deuxième étape était de trouver un moyen de discriminer les grands ensembles que sont le bedrock, la saprolite, les latérites de transition, les latérites jaunes, les latérites rouges et les éléments de surface par la différence de composition chimique de ceux-ci.

Tout d'abord, l'analyse sous forme de graphiques bi-variés (voir figure 7) d'un élément face à un autre élément des différents ensembles définis par les miniers semble nécessaire. Cela permet de se représenter la teneur en élément selon le type de matériau.

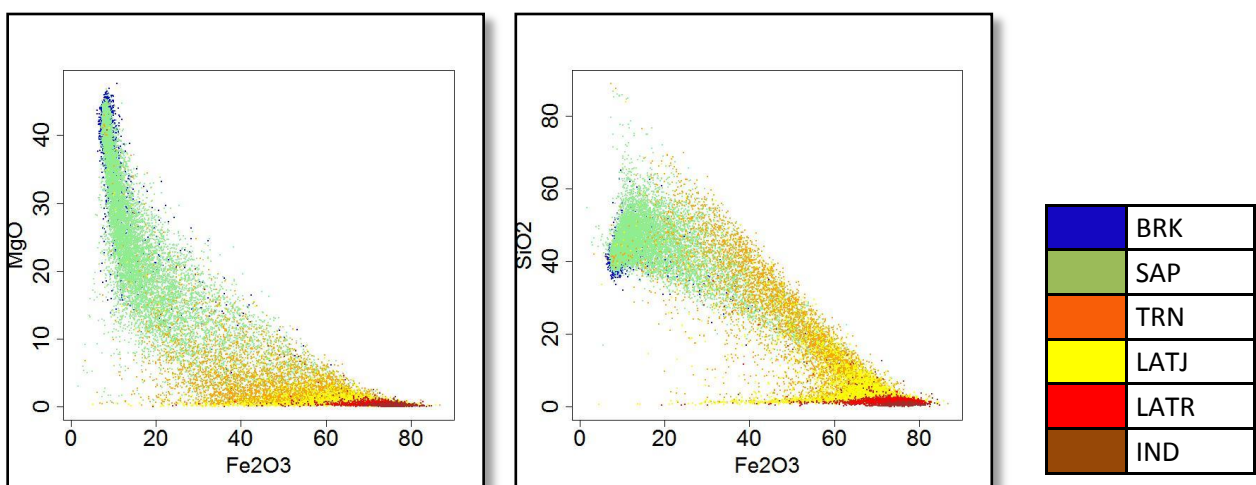


Figure 7. Différents ensembles selon le log des miniers, à gauche MgO en fonction de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> à droite : SiO<sub>2</sub> en fonction de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Nous pouvons constater sur la figure 7, que le fer est bien un indice de l'altération, depuis la base (en bleu et vert) jusqu'au sommet (rouge et brun) nous constatons l'augmentation de la teneur en fer, de plus, nous constatons la perte en magnésium et en silicium. Le but étant de mettre en évidence des critères pouvant délimiter ces grands ensembles.

Ensuite, il s'agit de déterminer le meilleur critère à l'aide de méthode statistique tel que l'arbre de décision. Un arbre de décision est la représentation graphique d'une procédure de classification. Il est utilisé pour répartir une population d'individus (de matériau dans notre cas) en groupes homogènes, selon un ensemble de variables discriminantes (teneur en éléments en poids d'oxydes ou en pourcentage atomique, rapport entre les éléments, fonction de transfert) en fonction d'un objectif fixé et connu (log défini par les miniers), Rakotomalala R.(2005).

Ses principales caractéristiques :

-lisibilité du modèle de prédiction par l'arbre de décision, cela permet une interprétation rapide et efficace.

-capacité à sélectionner automatiquement les variables discriminantes dans un fichier de données contenant un très grand nombre de variables potentiellement intéressantes. En ce sens, un arbre de décision constitue une technique exploratoire pour appréhender de gros fichiers de données.

Le package « tree » dans R permet d'utiliser cet outil.

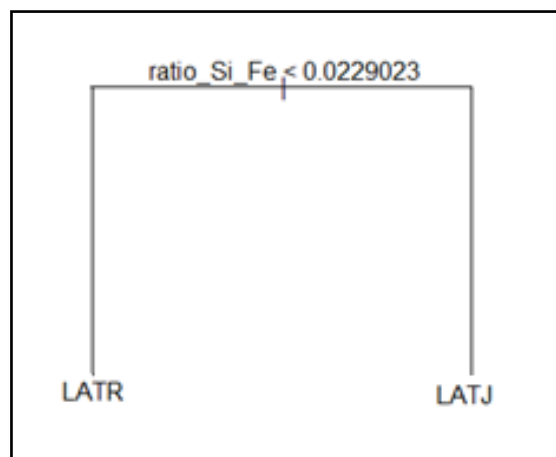


Figure 8. Arbre de décision entre les latérites rouges et les latérites jaunes

Par exemple, la figure 8 nous montre l'arbre de décision qui permet de classer les latérites rouges des latérites jaunes, ce sont les populations d'individus. Parmi toutes les variables entrées, c'est le rapport  $\text{SiO}_2 / \text{Fe}_2\text{O}_3$  qui semble être le critère le plus discriminant pour différencier ces 2 matériaux selon le log de VALE Nouvelle-Calédonie. Lorsque ce rapport est inférieur à 0.023, nous sommes donc en présence de latérites rouges (LATR).

Il est important de noter que les variables discriminantes concernent le magnésium lorsque nous nous situons en bas d'un profil et plus on remonte l'élément le plus discriminant sera le silicium,

ce qui est cohérent avec les processus d'altération d'un profil. En effet, nous avons vu précédemment que le silicium était plus résistant à l'altération.

L'arbre de décision est assez efficace pour les matériaux en haut de profil, à partir des latérites jaunes. En revanche, l'arbre de décision n'est pas applicable pour classer tous les matériaux. En effet, la méthode a des difficultés pour distinguer le bedrock (BRK) de la saprolite (SAP) dû aux nombreux points ayant la même composition chimique selon le code des miniers. Ainsi il est nécessaire de coupler avec d'autres méthodes.

Dans la littérature, il est possible de trouver de nombreux points de repères. Par exemple, Guillon (1969), Guillon & Routhier (1971), Trescases (1975) et les analyses chimiques d'une étude en cours par Fonteneau à l'IRD de Nouméa ont montré que dans une roche mère (dunite ou harzburgite) la teneur en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ne dépasse pas 15 %. C'est un premier indice pour délimiter le bedrock, ensuite en jouant sur la valeur de la fonction de transfert du magnésium et en comparant avec les données des miniers concernant leur définition du bedrock, nous pouvons redéfinir une zone qui correspondrait au bedrock. Lorsque nous vérifions le taux de nickel dans cette roche mère, nous trouvons un taux en  $\text{NiO} < 0.5$  ce qui est cohérent avec les valeurs trouvées dans la littérature, Guillon & Routhier (1971), Pelletier (2003). En revanche la composition chimique des dunites et des harzburgites étant tellement proche qu'il nous a été impossible de les distinguer.

L'autre zone délicate à traiter et facilement discutable concerne les latérites de transition. En effet, nous avons vu que c'est un matériau encore très mal défini. L'arbre de décision réussi à discriminer les latérites de transition de la saprolite en suggérant un taux de  $\text{MgO}/\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.043$  pour les latérites de transition. En demandant plus de précision aux miniers, ils nous certifient que la moyenne de ce rapport est de 0.07. Ainsi les deux valeurs sont sensiblement proches, nous garderons la valeur moyenne comme seuil. De plus lorsque nous vérifions le taux de magnésium, il ne dépasse pas 8%.

Dans le Sud du Massif du Sud nous nous situons dans la partie supérieure de la nappe ophiolitique, c'est pour cela que nous avons des passées à gabbros. Il serait intéressant de voir le comportement du Nickel au niveau de ses structures. En effet, lors de la mise en place de ces gabbros, il y a eu des fractures facilitant la circulation des fluides. Est-ce que ces passées à gabbro (absente dans le Nord de l'île) ont un impact sur la minéralisation ?

Avec l'altération les gabbros vont se transformer en minéraux hydroxylés de type kaolinite. La présence des groupements  $\text{S-OH}$  vont alors augmenter ce qui aura pour conséquence une croissance de la perte au feu. Si on conjugue ce fait avec la teneur en aluminium dont les fortes teneurs sont essentiellement aux gabbros, nous pouvons les discriminer. Ainsi, nous avons utilisé la LOI (perte au feu) en fonction de l'aluminium, l'arbre de décision a des difficultés à départager les gabbros des autres matériaux mais le rapport  $\text{LOI}/\text{Al}_2\text{O}_3$  semble être le plus

déterminant avec une valeur seuil à 1.7. Nous garderons ce seuil car le but est de séparer les zones à gabbros (passées, rubanement, veines...) des autres matériaux. Il ne faut pas perdre de vue que ces passées à gabbro correspondent aux gabbros et éventuellement aux composés localisés au niveau de ces gabbros.

Il est important de noter que les limites des grands ensembles dans notre cas sont assez strictes. Or dans la nature ces limites sont certainement plus graduelles.

## Résultats et discussion

Le tableau 1 représente les valeurs seuils choisies pour les différents matériaux, ICP correspond à tous les éléments de surface de type grenaille et cuirasse donc déterminé à l'aide de l'arbre de décision. Les latérites rouges et jaunes ont aussi été déterminées par l'arbre de décision. Entre les latérites de transition et la saprolite, nous avons vu précédemment que ce n'était pas aussi évident, de même pour le bedrock (BRK) et la saprolite. Nous avons décidé de créer un ensemble plus siliceux au niveau de la saprolite pour voir l'impact de ces zones sur la minéralisation. Cette zone pourrait correspondre aux zones les plus serpentinisées.

Log :	Seuils :
ICP	Si/Fe > 0.01
LATR	Si/Fe > 0.023
LATJ	Si/Fe > 0.011
TRN	Mg/Fe > 0.07
SAP(Si)	FT Si > -0.35
SAP	FT Mg > -0.25 & %Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> < 13
BRK	

Tableau 1. Log redéfinir à partir des compositions chimiques

Sur la figure 9, nous pouvons comparer les résultats sous 3 formes différentes ( $MgO=f(Fe_2O_3)$ ,  $SiO_2=f(Fe_2O_3)$  et  $NiO=f(Fe_2O_3)$ ) du log obtenus par la définition des miniers et ceux obtenus avec nos rapports. Nous constatons qu'il y a une assez bonne corrélation entre les deux logs excepté pour les latérites de transition et la saprolite. Pour les différents matériaux lorsque nous calculons la matrice de confusion entre deux matériaux (par exemple ICP et LATR) c'est-à-dire le pourcentage de points correspondant à un matériau (LATR) se trouvant à la fois dans les deux logs par rapport à l'ensemble des points que représentent ces deux matériaux (LATR et ICP des miniers, LATR et ICP définis par nos critères), nous obtenons entre 70 et 90% de corrélation, ce qui est correct.

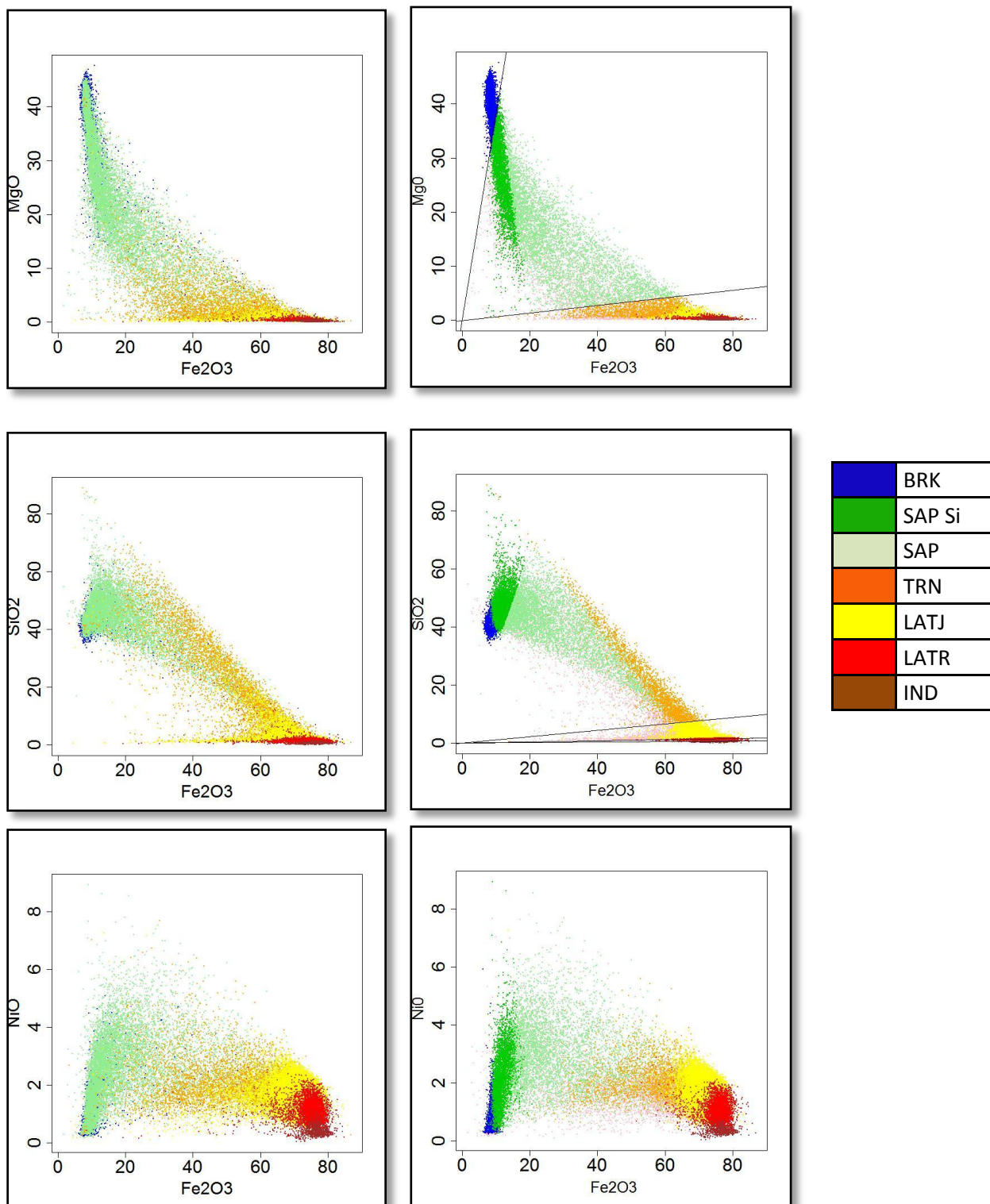


Figure 9. Comparaison des données des miniers (à gauche) avec les données obtenues par nos critères (à droite) en fonction de  $MgO=f(Fe_2O_3)$  (en haut),  $SiO_2=f(Fe_2O_3)$  (au milieu) et  $NiO=f(Fe_2O_3)$  (en ba).

Pour les gabbros, la figure 10 nous montre la comparaison des gabbros obtenus par VALE Nouvelle-Calédonie et les nôtres. Au niveau des fortes teneurs en aluminium nous distinguons une sous-estimation des gabbros de la part des miniers. De plus nous distinguons un degré d'altération à l'aide notamment de la teneur en fer et qui est cohérent avec l'augmentation de la perte au feu (au vu de l'augmentation des groupements S<sub>OH</sub>).

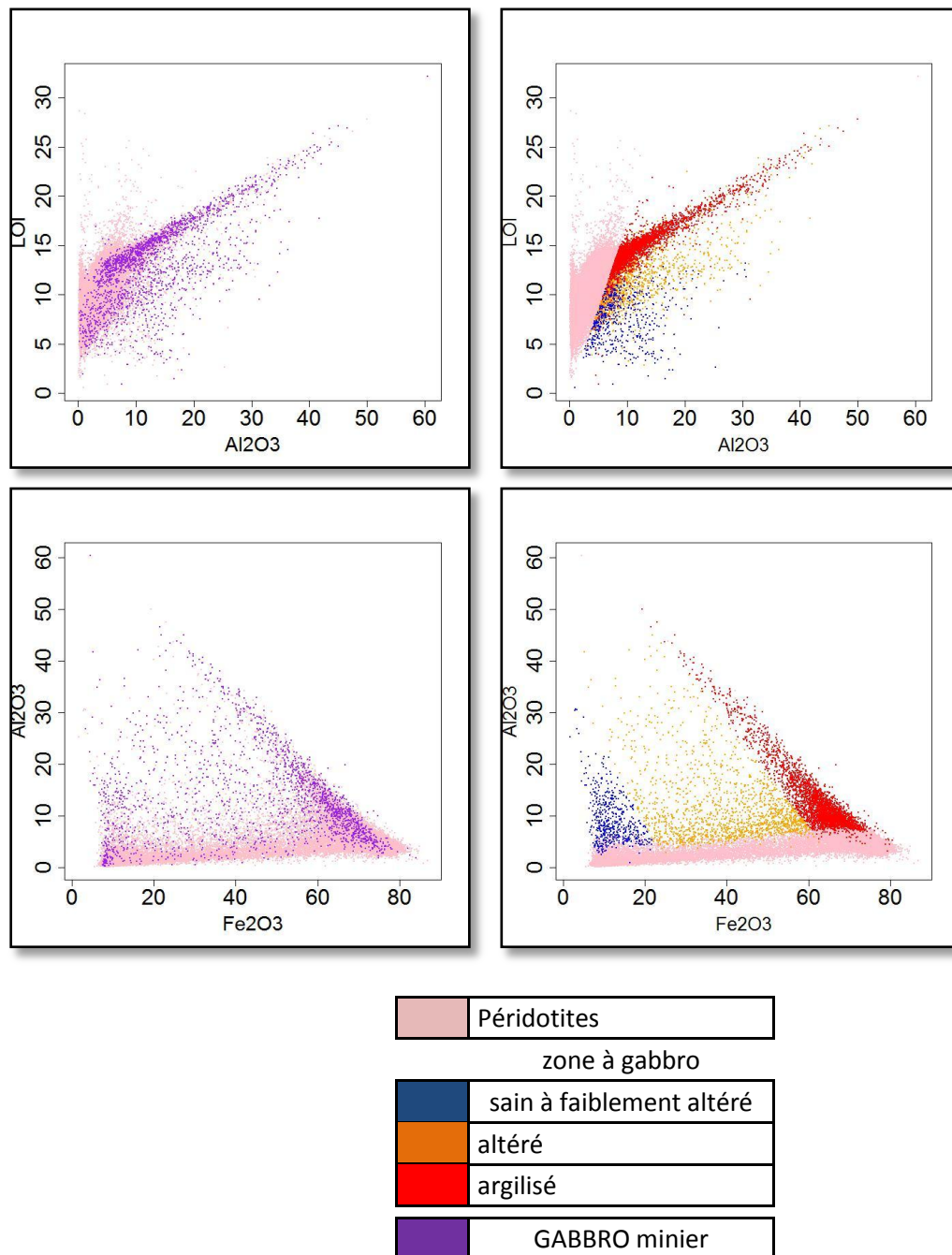


Figure 10. Comparaison des passées gabbros obtenues par les miniers (à gauche) avec celles obtenues par nos critères (à droite) en fonction de  $LOI=f(Al_2O_3)$  (en haut),  $Al_2O_3=f(Fe_2O_3)$  (en bas).

Nos ensembles enfin déterminés de façon minéralogique, nous pouvons observer le comportement des éléments métalliques face à ces différents matériaux.

# Comportement du Nickel selon les grands ensembles

## Méthodes

La fonction de transfert du nickel nous permet de constater les enrichissements ou les pertes selon un profil. En choisissant un seuil, par exemple où la fonction de transfert est supérieure à 1, nous observerons les zones qui seront enrichies en nickel. Pour voir les pertes nous prendrons -0.5 comme valeur limite.

## Résultats

La figure 11 nous montre l'enrichissement du nickel (en noir) selon les graphiques bi-variés de MgO en fonction de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. La zone la plus enrichie en nickel est la partie la plus profonde de la saprolite et surtout nous distinguons que la partie la plus siliceuse est bien enrichie. Les pertes en nickel (en gris), en revanche, se retrouvent en haut du profil à partir des latérites jaunes. Nous pouvons constater quelques pertes au niveau du bedrock mais cela est certainement dû aux approximations faites lors de la composition moyenne de la roche mère pour le calcul des fonctions de transfert.

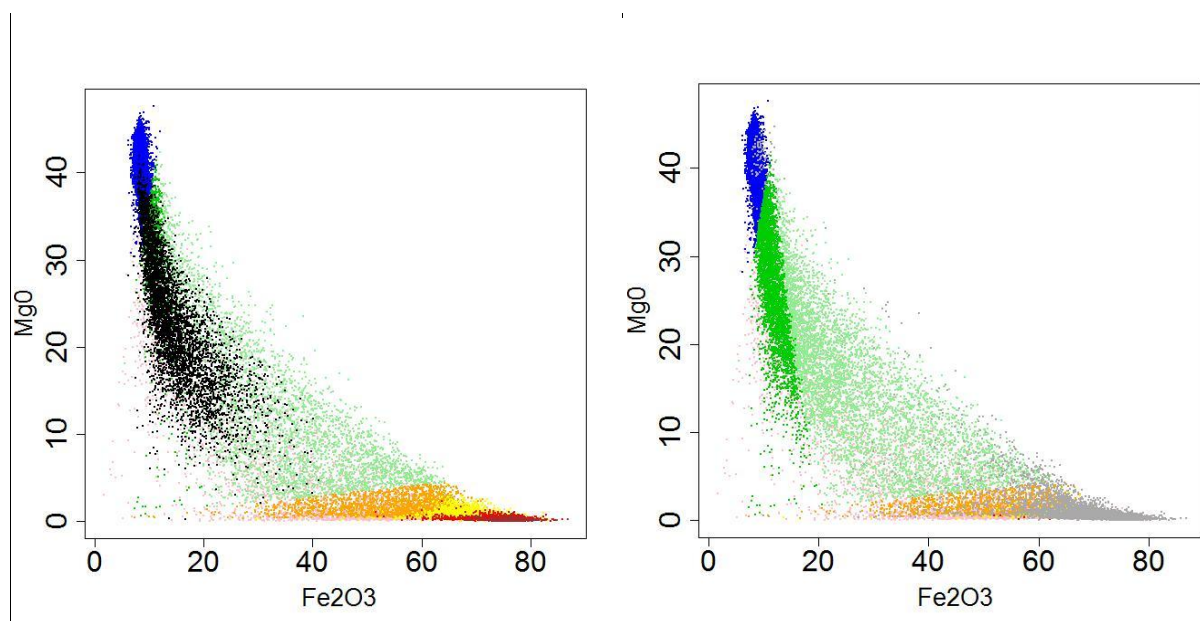


Figure 11.  $MgO=f(Fe_2O_3)$ , à gauche : les gains en Ni (en noir) avec  $FT Ni > 1$  et à droite : les pertes en Ni avec  $FT Ni < -0.5$ .

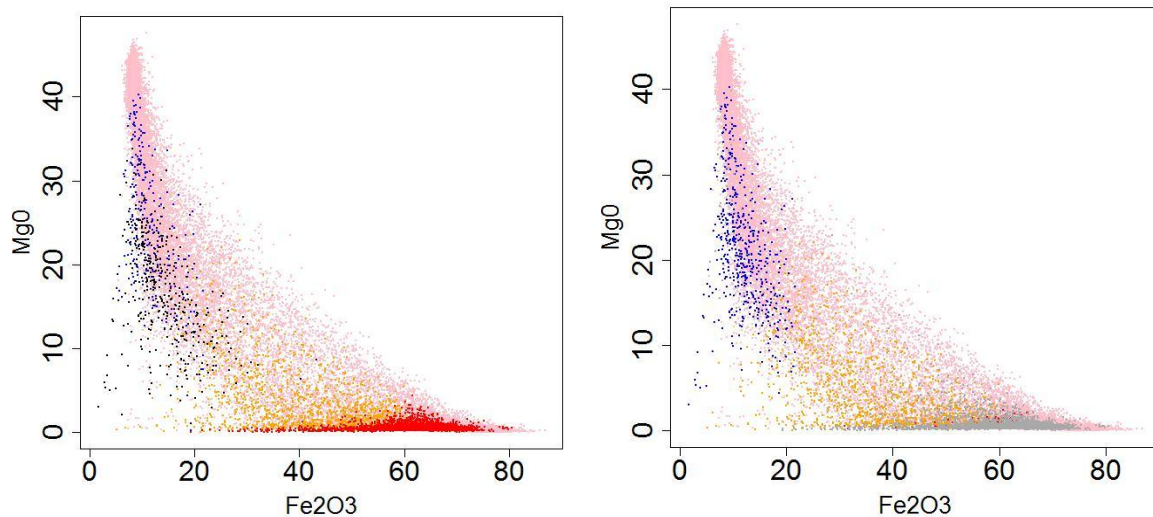


Figure 11 bis. MgO=f(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) des passées à gabbros, à gauche : les gains en Ni (en noir) avec FT Ni > 1 et à droite : les pertes en Ni avec FT Ni < -0.5.

Sur la figure 11 bis, nous constatons que les gains en nickel se situent au niveau des passées à gabbros plutôt sains et les pertes au niveau des passées très altérées.

L'étape suivante consiste à mettre ses enrichissements en Nickel en relation avec les structures du système. Nous cherchons à savoir si ces gains sont localisés et peut-être contrôlés par des structures ou bien si cela est complètement aléatoire.

## Comportement du Nickel en 3D selon les grandes structures

### Outils

Pour les représentations en 3D, nous avons utilisé le package « rgl ». Celui-ci ouvre une interface qui permet de visualiser en temps réel en 3 dimensions. Nous voulons nous intéresser aux vues correspondant aux grandes structures gérant la morphologie du paysage, c'est-à-dire les directions de contraintes maximum et celles de forts cisaillements vues dans la partie Etat de

l'art. Par manque de temps, nous vous présenterons ici des plans correspondant à peu près à ces plans cités mais cela donne déjà une première approche sur les différentes structures (figure 12). La vue A est quasi parallèle aux zones de forts cisaillements et la vue B approche le plan des contraintes maximales.

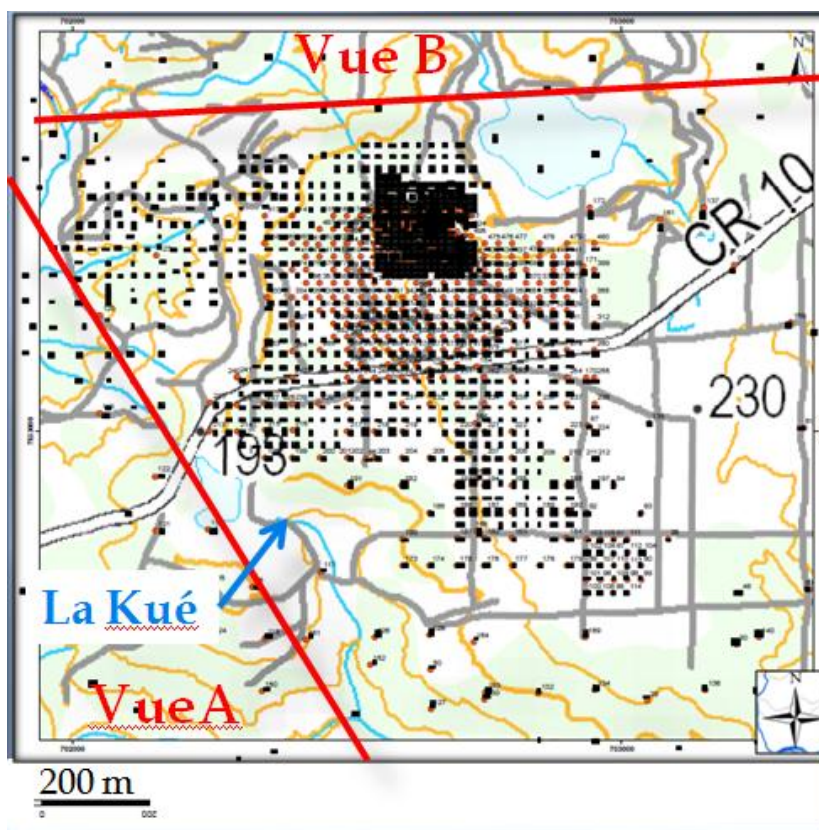


Figure 12. Plan des sondages avec les différentes vues utilisées par la suite. Vue A : parallèle aux cisaillements, Vue B : parallèle aux contraintes maximales.

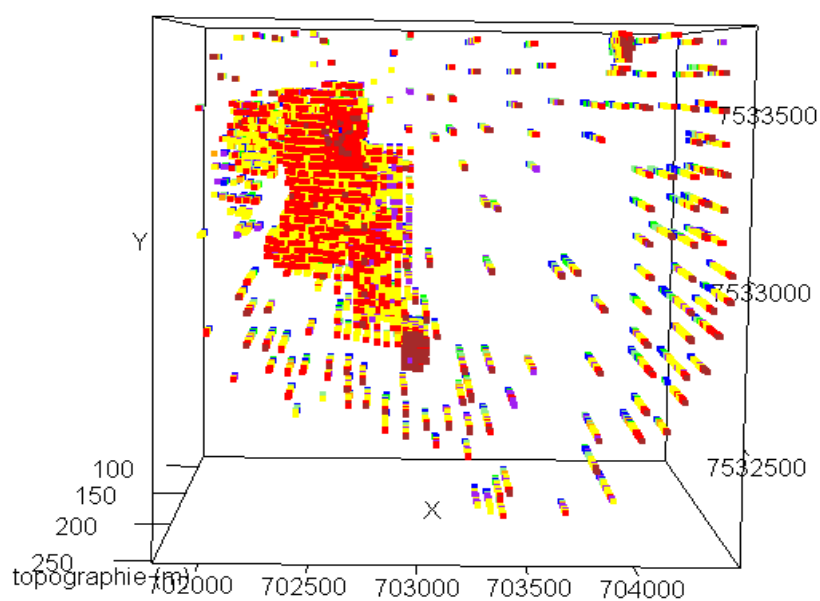


Figure 13. Vue de dessus des sondages avec R

Nous constatons par la figure 13 que le quadrillage des données est irrégulier et rend difficile d'interpoler les points. Pour l'axe des abscisses et l'axe des ordonnées 1 unité correspond à 500m.

## Résultats et Discussion

Le premier objectif est de repérer les différentes structures, pour cela nous représentons les différents ensembles en 3D (figure14). Nous distinguons ainsi une structure en chevron (noir) qui représente finalement les figures d'érosion du bedrock.

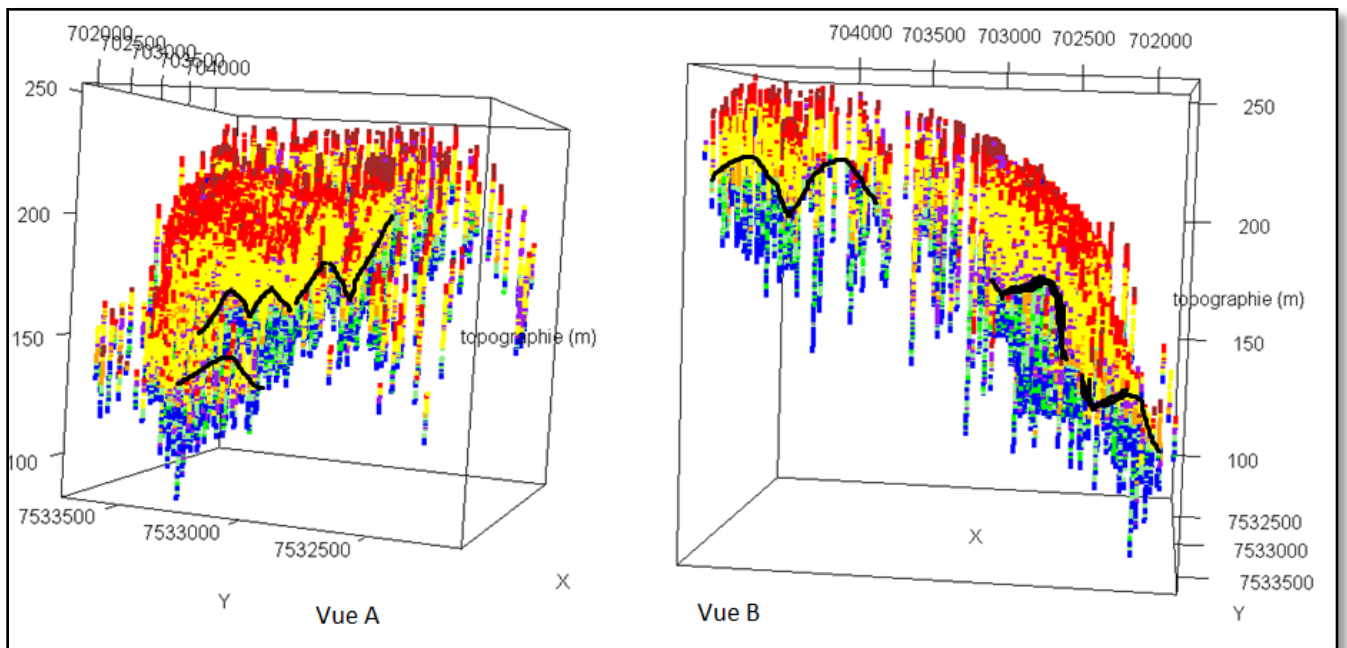


Figure14. Représentation des grands ensembles en 3D, bleu =BRK, vert = SAP, orange=TRN, jaune=LATJ, rouge=LATR, brun=ICP,violet=gabbro, noir = figure en chevron : à gauche : vue A ; à droite : vue B

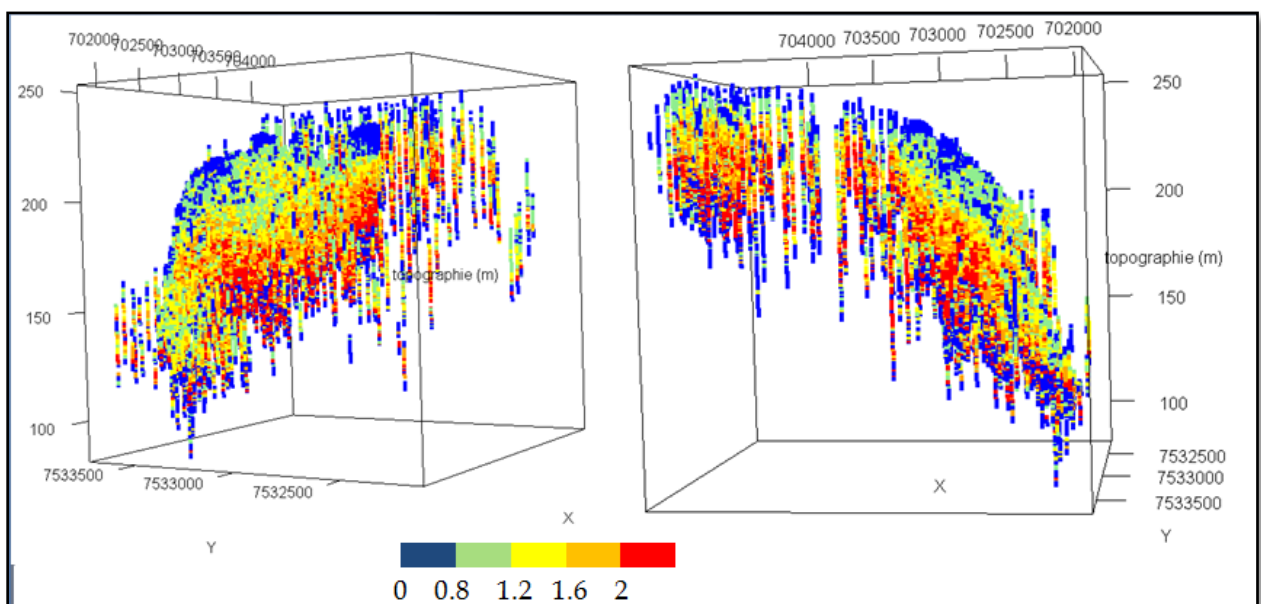


Figure15. Représentation de la répartition du nickel selon la teneur en Ni, à gauche : vue A ; à droite : vue B

La figure 15 représente la répartition du nickel selon les concentrations en Ni. Cela permet de confirmer que le niveau saprolitique et les latérites jaunes sont en effet les plus riches. Mais le nickel semble réparti uniformément latéralement. Nous distinguons sensiblement quelques structures en chevrons mais sans comportement distinctif. Les miniers avaient repérés une zone plus minéralisées qu'ils appellent « le sillon ». Dans ce contexte il est difficile de montrer ce sillon.

Alors qu'en travaillant avec les fonctions de transfert (figure 16), il est possible de mieux distinguer ces zones enrichies en nickel.

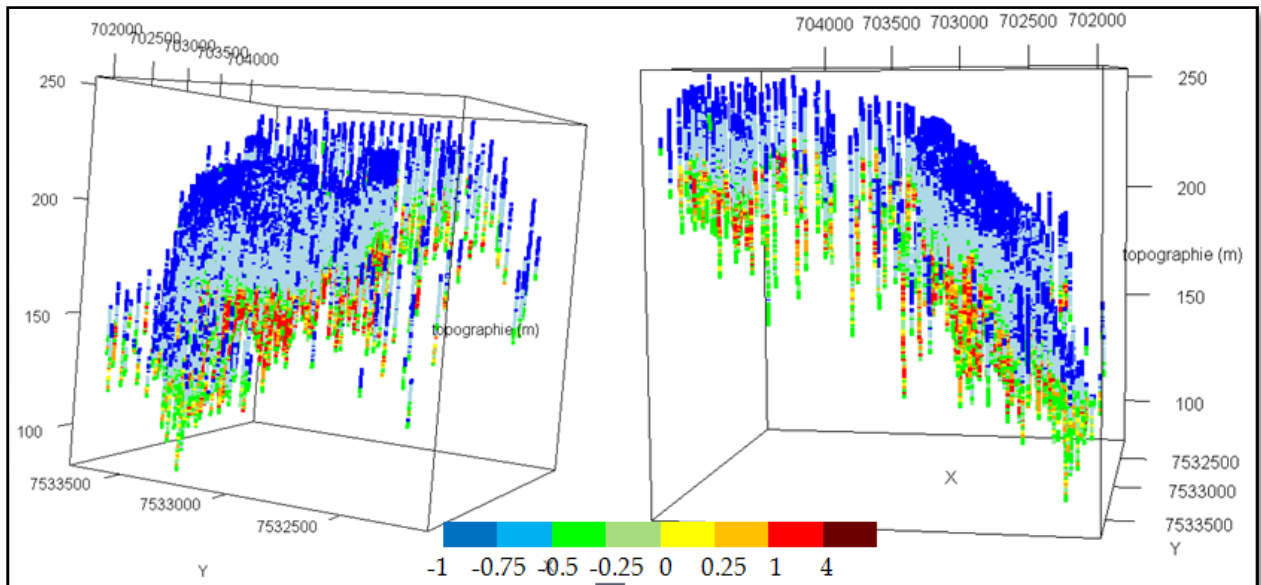


Figure 16. Représentation de la répartition du nickel selon la fonction de transfert du Ni (bleu = les pertes, brun = les gains), à gauche : vue A ; à droite : vue B

En effet, nous distinguons assez bien les structures en chevrons qui de plus, représentent des zones de gains en nickel. Le « sillon » (environ à l'abscisse 702500 sur la vue B) est nettement plus visible. Nous discernons que la topographie joue un rôle dans la distribution du nickel. En effet, sur le plan B vers l'abscisse 702000, nous savons que la rivière Kué coule à droite de ce repère. Nous constatons que c'est plus une zone de perte de Nickel.

Pour les gabbros, pour le moment nous n'avons pas trouvé de moyen de le représenter de façon à deviner des structures.

De plus, nous avons essayé de réaliser des coupes selon certains plans mais la dispersion des sondages ne permet d'obtenir quelque chose de concluant. En effet, ça permet de confirmer la perte en Nickel lorsque nous remontons dans le profil mais nous ne distinguons pas de masse plus riche que d'autres du fait d'un trop grand lissage lors de l'interpolation.

## Conclusion et perspectives

Par cette approche, nous avons donc pu définir les matériaux en reliant la géochimie aux faciès des matériaux rencontrés. C'est une étape longue, qui nécessite réflexion et qui sur certains points, notamment le cas des latérites de transition peut être discuté. Avec les fonctions de transfert, notamment celle du Nickel, nous avons pu mettre en évidence les gains de Nickel face aux bedrock dans les zones saprolitiques en particulier la zone plus siliceuse. La visualisation en 3D permet de mettre en évidence les figures d'érosion du bedrock en chevrons sur lesquels les saprolites se sont développés. Ainsi qu'avec les fonctions de transfert de mettre en évidence un gain en nickel dans ses fameuses structures.

Il reste encore à améliorer ses visualisations en 3D, et à comparer avec les grandes structures (principalement les failles) afin de mieux déterminer si elles ont un rôle dans la minéralisation des métaux.

De plus, si nous avions pu obtenir les données des porosités alors nous aurions pu calculer les bilans de matière.

Nous avons aussi débuté à regarder le comportement du manganèse (car il est souvent associé au cobalt et en plus grande concentration). Les premiers résultats montraient très clairement un comportement différentiel vis-à-vis du nickel. En effet, il se trouve plus haut dans le profil. Il serait intéressant mettre cela plus en évidence.

# Bibliographie

- Bourdoin E. et Becquer T. (1992) Etude de l'organisation pédologique des sols ferrallitiques des Massifs du Sud de la Grande Terre : zone de la Coulée et de la Lembi. Nouméa : ORSTOM.
- Brimhall G. H. and Dietrich W. E. (1987) Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume, density, porosity, and strain in metasomatic hydrochemical systems: Results on weathering and pedogenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta* **51**, 567-587.
- Brimhall G.E., Lewis C.J., Ford C., Bratt J., Taylor G. and Warin O. (1991) Quantitative geochemical approach to pedogenesis: importance of parent material reduction, volumetric expansion, and eolian influx in lateritization. *Geoderma*, **51**, 51-91.
- Fandeur D.(2009) Géochimie et cristallographie du chrome au cours de l'altération de roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie (Massif du Koniambo) Thèse de doctorat de l'Université Paris 7-Denis Diderot à l'Institut de Physique du Globe de Paris.
- Guillon J.H. (1969). Données nouvelles sur la composition et la structure du grand massif péridotitique du sud de la Nouvelle Calédonie. Cah. ORSTOM, sér. Géol. (1969), I, 1, 7-25 7
- Guillon J.H. et Routhier P. (1971) Les stades d'évolution et de mise en place des massifs ultramafiques de Nouvelle-Calédonie. Bulletin du B. R. G. M. (deuxième série),Section IV, no 2, 1971, p. 5-38
- Jebrak M. et Mercoux E. (2008) Géologie des ressources minérales. Ressources naturels et Faune québécoise, p 457-476.
- Pelletier B. (2003) Les minerais de nickel de Nouvelle Calédonie. Publication dans le bulletin de l'Union Française des Géologues
- Traore D. (2005) Serpentinisation hydrothermale et alteration lateritique des roches ultrabasiques en milieu tropical : Evolution Géochimique et Minéralogique de la Minéralisation en Platine de la Rivière des Pirogues, (Nouvelle-Calédonie) Thèse de doctorat de l'Université de la Nouvelle-Calédonie.
- Trescases J.J. (1975) L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale : Formations des gisements nickélifères de Nouvelles-Calédonie. Paris : ORSTOM. Mém., 78 : 254p
- Trescases J.J. (1979) Remplacement progressif des silicates par les hydroxydes de fer et de nickel dans les profils d'altération tropicale des roches ultrabasiques. Sci.Géol.Bull.,32,4 p 181-188

## Bibliographie pour R

Barnier J., 2008 R pour les sociologues (et assimilés)

Genolini,C. Lire ; Compter ; Tester... avec R : Préparation des données / Analyse univariée / Analyse bivariée

Paradis E., 2005. R pour les débutants

Rakotomalala R., 2005. Arbres de Décision. Revue MODULAD- 163 - Numéro 33

## Site des miniers :

<http://www.vale.nc/pages/geologie/plateau.htm>

<http://www.agence-cyclone.nc/goro/technique/geologie.htm>

