

Master STUE (M2) Matériaux Naturels Eaux et Expertises Environnementales

Année 2011-2012

Rapport de stage



Caractérisation d'échantillons
nickélifères de Nouvelle-Calédonie

Bernardeau Clément

Stage effectué du 09 janvier au 15 juin 2012

Laboratoire IC2MP

Responsable du stage : Laurent Caner

Sommaire

Introduction.....	1
I. Présentation générale : Synthèse bibliographique	2
A. Formation de la Nouvelle-Calédonie et roches ultrabasiques.....	2
B. Les profils latéritiques nickélifères	3
II. Le massif de Tiébaghi et les échantillons	14
A. Généralités	14
B. Présentation des échantillons	15
C. Problématique	16
III. Caractérisation chimiques et minéralogiques	17
A. Données chimiques	17
B. Données granulométriques.....	19
C. Données des poudres DRX	21
D. Données DRX des lames orientées	25
E. Données infrarouge	32
F. Données BET	34
G. Analyse thermique différentielle et thermogravimétrie	35
H. Interprétation générale	38
Conclusion	41
Bibliographie.....	42
Annexes	
Résumé	
Abstract	

Introduction

Dans le cadre de mon stage de deuxième année de Master Matériaux Naturels Eau et Expertises Environnementales (MNE³), j'ai été amené à travailler sur des échantillons de roches nickélifères provenant de Nouvelle-Calédonie. Ce stage s'est déroulé sur une durée de 5 mois au laboratoire IC2MP.

La Nouvelle-Calédonie possède une abondance exceptionnelle de roches ultrabasiques, ce qui lui confère toute son originalité. En effet, près d'un tiers de l'île est formé de ces vastes massifs. Ces roches ont la caractéristique de renfermer du nickel. C'est à partir de l'altération des péridotites que se forment les minerais de nickel. Ainsi, la Nouvelle-Calédonie possède près de 20 à 25% des ressources mondiales en nickel. Il s'agit du 3^{ème} producteur mondial, après la Russie et le Canada qui exploitent des minerais de nickel sulfurés. De son côté, la Nouvelle-Calédonie produit du nickel à partir de minerais silicatés.

Sur la Grande Ile, c'est la garniériste qui était très exploitée pour l'obtention du nickel. Il s'agit d'un minerai qui contient du nickel en proportions élevées (entre 14 et 40%). D'un point de vue historique, les garniéristes sont les premiers minerais de nickel exploités en Nouvelle-Calédonie. Leur forte concentration en nickel autorisait une exploitation artisanale. Elles sont pratiquement épuisées de nos jours et ce sont désormais les saprolites et les latérites qui intéressent l'industrie minière.

Les échantillons étudiés ici proviennent du centre minier de Tiébaghi, sur la commune de Koumac. Après que Jules Garnier ait découvert du nickel sous forme de garniériste, une véritable ruée vers l'or vert débute et la région de Koumac est alors mise en avant pour son exploitation minière. La Société Le Nickel (SLN) y a ouvert son centre minier nickélifère.

D'un point de vue géologique, l'île de Nouvelle-Calédonie et ici le centre de Tiébaghi sont donc intimement liés aux roches ultrabasiques et à ses fortes ressources en nickel. C'est pourquoi, afin d'y valoriser au mieux ces minerais, une caractérisation est nécessaire. Les échantillons issus du site vont donc subir une caractérisation minéralogique et chimique. L'objectif est de caractériser au mieux ces échantillons.

Dans une première partie, un état des lieux des connaissances sur les gisements nickélifères sera effectué. Dans un second temps, les échantillons étudiés et le massif de Tiébaghi seront présentés. Enfin, les différents résultats obtenus par les analyses chimiques et minéralogiques seront mis en avant.

I. Présentation générale : Synthèse bibliographique

A. Formation de la Nouvelle-Calédonie et roches ultrabasiques

Les roches ultrabasiques occupent une surface d'environ 6900 km² en Nouvelle-Calédonie, ce qui représente environ 40% de la superficie de l'île. C'est cette abondance exceptionnelle qui donne toute son originalité à la Grande Terre. Ces roches se répartissent en plusieurs vastes massifs (figure 1) : le plus important, au Sud, occupe 5000

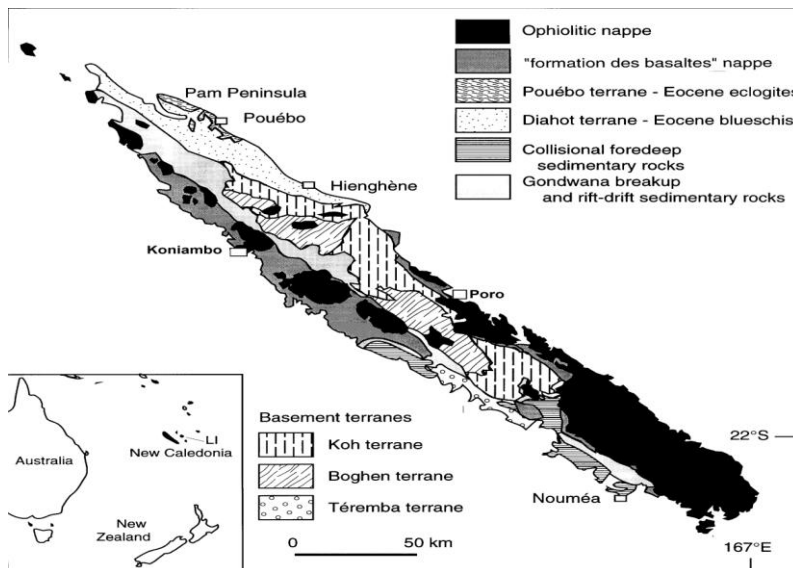


Figure 1 : Massifs ultrabasiques de la Nouvelle-Calédonie

km² ; tandis qu'un autre de 1000 km² s'étale le long de la côte Ouest. Il convient aussi d'ajouter les sommets ultrabasiques de la chaîne centrale qui reposent par contacts anormaux sur des formations d'âge et de nature variés. Le grand massif du Sud a pendant longtemps tenu la réputation d'être le plus grand du Monde. Celui-ci n'a été détrôné que dans les années 1970 par un massif localisé en Oman. Les roches ultrabasiques proviennent du manteau, qui est une couche profonde sous l'écorce terrestre. Il est donc important de savoir par quels processus elles se sont mises en place.

La Nouvelle-Calédonie doit son existence à la dérive des continents. Il y a 50 millions d'années, l'île est une zone de subduction (figure 2), où la plaque tectonique Australienne passe sous la plaque tectonique Pacifique. La première se déplace vers l'Est et la seconde vers l'Ouest, à une vitesse d'environ 3 à 5 cm par an. La plaque Australienne porte un continent, dont un fragment s'est détaché vers l'Est.

Il y a 37 millions d'années, ce fragment de continent s'engage dans la zone d'enfoncement et la bloque. Etant moins dense que les roches océaniques qui le surmontent, il les pousse alors vers la surface, créant ainsi une île. Ce phénomène explique la géologie de la Nouvelle-Calédonie, c'est à dire : les plaines de la côte Ouest qui correspondent au fragment de continent coincé et les massifs miniers de l'Est qui s'apparentent aux roches soulevées en surface. Une vaste partie du manteau a donc été charriée par-dessus les terrains de la plaque Australienne, ce processus est appelé obduction. L'érosion s'est ensuite chargée de le disséquer en plusieurs massifs.

Pour la plus grande partie, ces roches soulevées sont grenues et constituées d'un assemblage de minéraux dominé par l'olivine, un minéral qui contient la majeure partie du nickel. Elles portent le nom de péridotites et se situent initialement à une profondeur de 30 à 70 km dans le manteau supérieur.

La zone de subduction ayant été bloquée, une autre dut naître plus loin au Vanuatu.

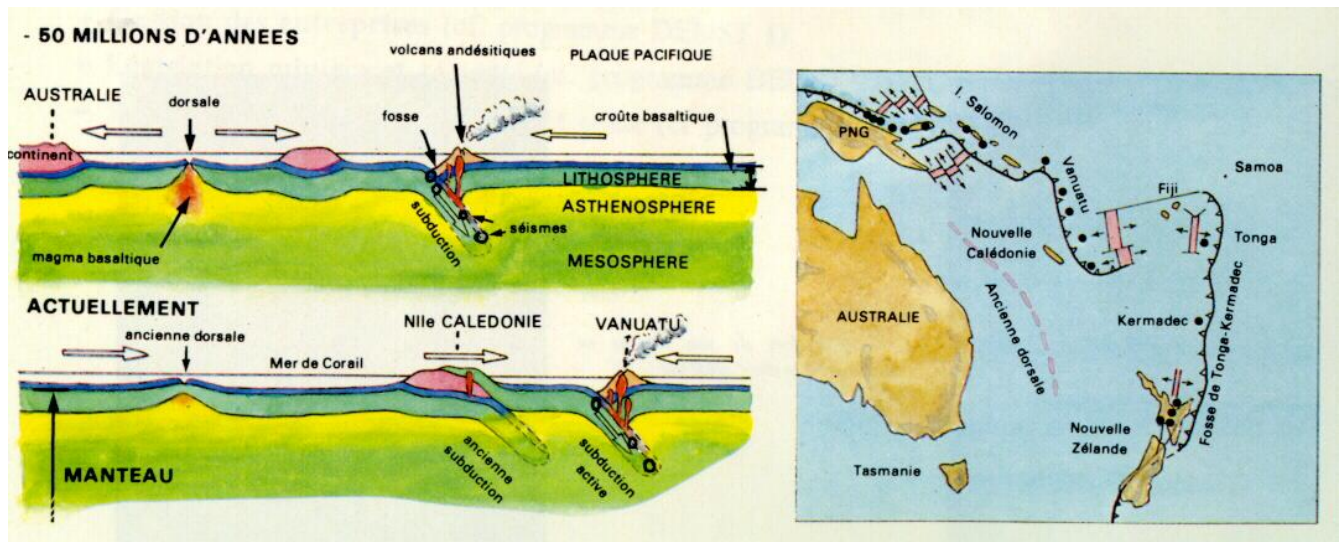


Figure 2 : Evolution géologique de la Nouvelle-Calédonie (Villedieu 2011)

B. Les profils latéritiques nickélifères

1. Généralités sur le nickel

Depuis très longtemps, le nickel est utilisé dans la fabrication de toutes sortes d'outils et d'objets. En effet, il y a déjà 3500 ans avant J.-C. il entrerait dans la composition de bronzes découverts en Syrie. Plus vieux encore, d'anciens manuscrits de Chine avancent que celui-ci était utilisé là bas entre le XVIII et le XVe siècle avant J.-C.. Néanmoins, ce minerai était souvent confondu avec celui de l'argent. C'est pourquoi, son étude et ses applications ont été développées bien plus tard.

L'élément chimique numéro 28 est aujourd'hui omniprésent autour de nous. Son utilisation s'est développée et fait aujourd'hui partie intégrante de nombreux objets très communs : dans la batterie d'un téléphone portable, les pièces de monnaie, les montures de lunettes, les ustensiles de cuisine, ou encore dans les constructions comme sur les bateaux, les structures d'immeubles ou les chemins de fer. De nos jours, il est le cinquième élément le plus utilisé sur la planète.

C'est un métal dur, très résistant à l'oxydation et à la corrosion. Il entre ainsi dans la composition de nombreux inoxydables et alliages. Sa consommation est de 1,3 million de tonnes par an, contre

10000 en 1880 quand son exploitation a commencée. En 130 ans, la teneur moyenne en nickel des minerais extraits est passée de 15 à 2,6%.

De nombreuses prospections à travers le monde ont permis de révéler un nombre important de gisements latéritiques nickélifères. Ce sont ces gisements qui sont aujourd'hui la source majoritaire du nickel (40% d'origine sulfurée, 60% d'origine latéritique). Ils se situent généralement au niveau de la zone intertropicale là où les latérites se sont développées (Amérique du Sud, Afrique, Australie...).

En Nouvelle-Calédonie, c'est la garniérite qui était très exploitée pour l'obtention du nickel. C'est Jules Garnier en 1864, un ingénieur français des Mines, lors d'une mission en Nouvelle-Calédonie qui découvre cette roche verte alors inconnue. Il s'agit d'un minerai qui contient du nickel en proportions élevées (entre 14 et 40%). En 1877, une première fonderie est ouverte à Nouméa. Toute cette frénésie minière et métallurgique est encouragée par le marché mondial qui apprécie la garniérite calédonienne. En effet, celle-ci ne possède pas d'impuretés gênantes pour les fondeurs. Au début du XX^{ème} siècle, la garniérite est le seul minerai de nickel exploité en Nouvelle-Calédonie. Un siècle plus tard, elles sont pratiquement épuisées et ce sont désormais les saprolites et les latérites qui intéressent l'industrie minière.

2. Description des profils d'altération pédologiques

Au contact de l'atmosphère, les affleurements de roches subissent des évolutions qui sont dues à différents facteurs (climatiques, biologiques). Comme l'ensemble des roches formées à de hautes pressions et fortes températures, les péridotites sont extrêmement sensibles aux conditions de surface. Ainsi, les minéraux de ces roches ultrabasiques (olivine, pyroxène et serpentine) ont été exposés au climat tropical de Nouvelle-Calédonie pendant plusieurs millions d'années. C'est à dire à la chaleur et aux fortes pluies. La seule circulation de l'eau suffit à produire une intense altération géochimique qui a conduit à la formation de saprolites puis de latérites. Il y a donc génération d'un épais manteau latéritique. Cette évolution du substratum se traduit par une transformation chimique et minéralogique des roches.

Le processus de latérisation est un processus de pédogenèse, qui se caractérise par une très forte dégradation des minéraux et une forte concentration de fer et d'aluminium.

Horizon	Fe ₂ O ₃ %	MgO %	SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ /MgO
Cuirasse	75 – 77	0,5 – 1,5	1 – 2	76
Grenaille	73 – 75	0,5 – 1,5	1 – 2	74
Latérite « rouge »	70 – 72	1 – 2	1 – 3	35 - 70
Latérite « jaune »	50 – 70	2 – 5	2 – 10	10 - 35
Saprolite « terreuse »	15 – 25	10 – 30	35 – 40	0,8
Saprolite « dure »	10 – 15	30 – 35	40 – 45	0,4

Figure 3 : Composition chimique typique des altérites développées sur les péridotites de Nouvelle-Calédonie (Pelletier, 2003)

Ce terme désigne une évolution pédologique qui correspond à la transformation d'un sol tropical ferrallitique en latérite. Il a été vu précédemment que ces sols se formaient par altération des couches superficielles des roches sous l'action d'un climat chaud et humide. Une des caractéristiques de ceux-ci est qu'ils sont peu fertiles et riches en nickel.

La latérisation se produit à partir du moment où le couvert végétal forestier est détruit et ainsi ne protège plus les sols ferrallitiques du fort lessivage des pluies tropicales. Tous ces mouvements d'eau conduisent à la formation dans les horizons inférieurs du sol de nodules de précipitation de gibbsite, d'hématite et de goëthite. Ces nodules réagissent ensuite en présence de silice et de fer, les concrétions se soudent et conduisent à la formation de cuirasses dont la consistance et la couleur rappellent la brique. Enfin, en l'absence de couverture végétale, les couches superficielles sont rapidement entraînées par l'érosion et les cuirasses profondes ainsi mises à jour.

Les différents horizons caractéristiques d'un sol issu d'un processus de latérisation.

Gaudin (2002) reprend dans sa thèse sur la cristalochimie des smectites du gisement latéritique nickélicifère de Murrin Murrin les études de Golightly (1981) et Trescases (1986). Chacun d'eux propose un profil théorique (figure 4).

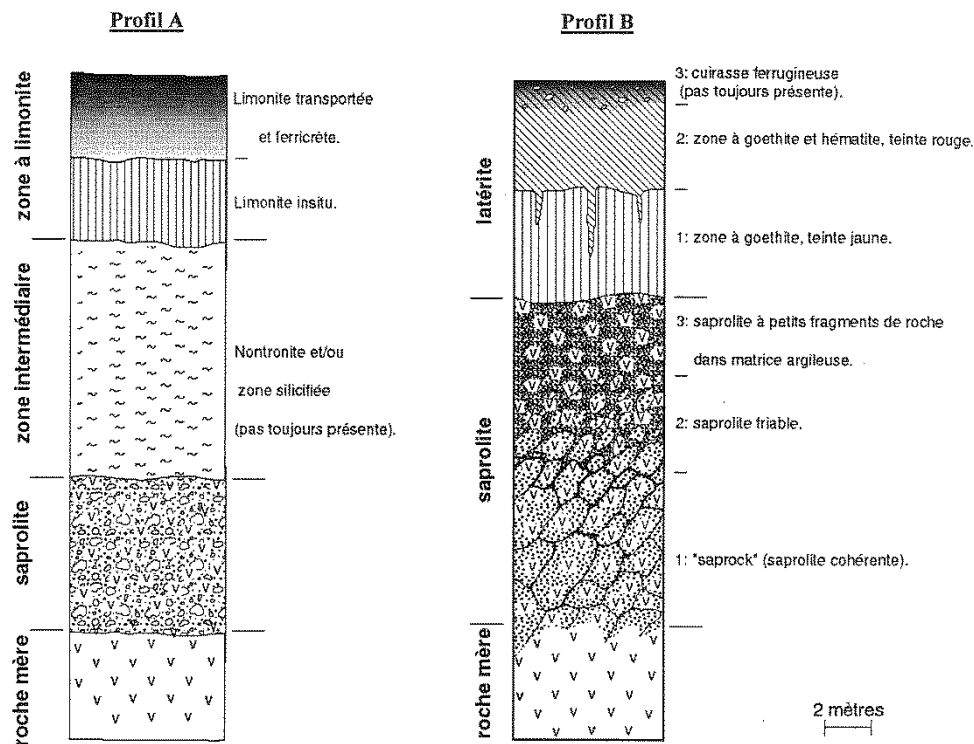


Figure I1-1 : Modèles de profils d'altération nickélicifères. Profil A : d'après Golightly (1981), profil B : d'après Trescases (1986). L'échelle ainsi que les épaisseurs relatives des différentes zones (très variables d'un profil à l'autre) sont à considérer à titre d'exemple.

Figure 4 : Modèles de profils d'altération nickélicifères (Gaudin, 2002)

Le profil avancé par Golightly présente 4 zones principales. On retrouve de bas en haut : la roche mère non altérée, la saprolite qui conserve la structure de la roche mère, la zone intermédiaire à nontronite où la structure de la roche mère est peu ou pas conservée, et pour finir la zone à limonite. La présence ou l'absence de la zone intermédiaire à nontronite s'explique par une différence au niveau du climat. Ainsi, sous l'action d'un climat relativement humide, cette zone sera absente. Au contraire, sous un climat moins humide avec des saisons sèches, la zone intermédiaire se développera.

Trescases propose lui 3 zones principales. De bas en haut on a : la roche mère, la saprolite et la latérite qui correspond à la zone à limonite. Ensuite, en fonction de différents critères (minéralogie et texture de la roche), la saprolite et la latérite sont divisées en sous-catégories. La différence entre ces deux profils théoriques est au niveau de la zone intermédiaire à nontronite, qui est absente dans le profil de Trescases.

Pour ces deux profils, les horizons avancés par Golightly et Trescases correspondent à une altération de plus en plus prononcée du bas vers le haut du profil.

3. Les différents types de gisements

Deux grands types de gisements nickelifères existent dans le monde : les gisements dits silicatés et les gisements oxydés. Ils sont distingués en fonction de la localisation du nickel au sein du profil.

Pour les gisements silicatés, le nickel s'associe surtout aux phases silicatées de la saprolite et quelques fois de la zone intermédiaire.

Au contraire dans les gisements oxydés, le nickel s'associe à la goethite au niveau de la zone ferrugineuse.

4. Description du processus d'altération des péridotites

La transformation essentielle subie par les péridotites est la serpentinisation. Il a été vu précédemment que ce phénomène affectait la majeure partie des péridotites de Nouvelle-Calédonie. Il s'agit d'une altération dite hypogène, c'est-à-dire qui affecte la roche ultrabasique avant qu'elle ne parvienne à l'affleurement et qu'elle ne subisse l'altération météorique dite supergène. Pour cette altération hypogène, il est possible de parler de serpentinisation primaire comme l'indique J. Avias (1949).

La serpentinisation primaire est complètement différente de l'altération météoritique ; de plus elle se produit en profondeur, vraisemblablement pendant la mise en place des roches ultrabasiques, sous l'action d'eau magmatique. Trescases (1975) apparente cela à un phénomène de rétrodiagenèse. De son côté l'altération supergène est en partie contrôlée par la mobilité des éléments qui constituent la roche mère. Pour Trescases pour les profils de Nouvelle-Calédonie, la classification des éléments les plus mobiles aux moins mobiles est la suivante : Mg, Si, Al, Mn, Ni, Cr, Co et Fe. Comme les roches ultrabasiques sont très magnésiennes, cela explique leur forte vulnérabilité sous l'action de l'eau météorique. Dans un premier temps, l'altération hypogène sera traitée puis dans une seconde partie ce sera au tour de l'altération supergène.

a. Altération hypogène : serpentinisation des péridotites

Ce mécanisme est relativement complexe. En effet, il s'agit d'un phénomène d'auto-hydratation accompagné d'une oxydation ménagée pendant lequel l'olivine est principalement affectée. Celle-ci est maillée et parcourue par un réseau d'antigorite qui est un minéral de serpentine (la proportion de ce dernier dans l'olivine varie entre 20 et 80%), tandis que le pyroxène se transforme en

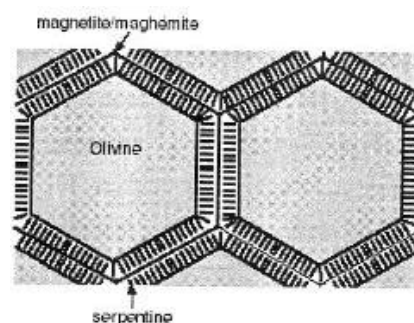


Figure 5 : Représentation schématique d'olivines serpentinisées (Gaudin, 2002)

bastite. Cette transformation s'accompagne d'une grande augmentation de volume et n'est possible qu'avec des conditions physiques particulières (phénomènes de métamorphisme). C'est un phénomène de rétro-morphisme. En effet, la serpentinisation s'étend de la bordure vers le cœur des grains d'olivine (figure 5).

L'hydratation et ces conditions physiques particulières ont donc créé de nouveaux minéraux qui sont des serpentines (antigorite, chrysotile), le talc, des amphiboles. Il est possible de trouver également associés à ces minéraux des vermiculites et des chlorites.

Sur l'île de Nouvelle-Calédonie, les péridotites sont pour l'ensemble partiellement serpentinisées (figure 6). Il est possible de trouver d'épaisses formations de serpentinites à la base des massifs, celles-ci proviennent d'un métamorphisme de la base des péridotites lors de leur charriage sur les autres terrains. Les serpentinites forment aussi de grands filons dans les formations métamorphiques de la chaîne et du Nord.

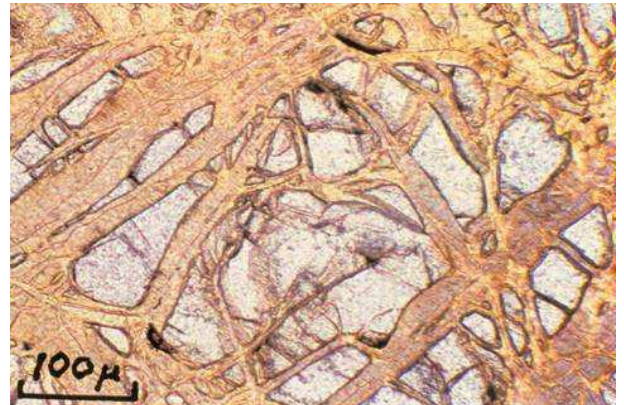


Figure 6 : Lame mince de péridotite partiellement serpentinisée : grains d'olivine séparés par des petites veines de serpentine (Pelletier, 2003)

Voyons maintenant plus en détails ce phénomène de serpentinisation.

La serpentine est un silicate magnésien hydraté dont la formule chimique est la suivante : $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$. Ce minéral contient parfois du fer mais en très faibles quantités. Il est donc logique que le fer contenu dans les olivines et pyroxènes soit libéré pendant la serpentinisation. Il entre alors dans la formation de minéraux qualifiés d'accessoires, comme la magnétite (Fe_3O_4) ou encore la brucite qui est un oxyde hydraté ($Mg(OH)_2$) où le fer se substitue au magnésium.

La formation de magnétite à partir du fer en excès consomme de l'oxygène de l'eau et s'accompagne donc d'un dégagement d'hydrogène. La réaction type de serpentinisation est visible en figure 7 :

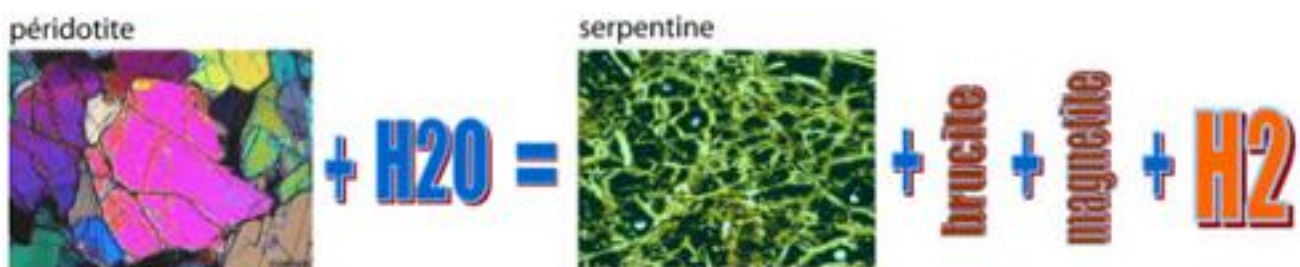


Figure 7 : Processus chimique de la serpentinisation (Cannat, et al., 2007)

Pour conclure, des études expérimentales menées et réalisées par Bowen et Tuttle (1949) démontrent que la serpentinisation n'est possible qu'à des températures inférieures à 500°C, de même la formation de serpentine par action de l'eau n'est réalisable qu'en dessous de 400°C. Dans cette première étape, il faut noter qu'aucune accumulation de nickel n'est visible.

b. Altération supergène

Lors de l'affleurement de la roche, celle-ci est soumise à l'altération par les eaux de pluie. La roche mère ultrabasique va subir une intense altération géochimique. Les minéraux constitutifs des péridotites (olivine, pyroxène, serpentine) vont s'altérer sous l'action de ces nouvelles contraintes.

L'olivine est le premier minéral à s'altérer. Le magnésium et une partie de la silice libérés par l'altération sont rapidement lessivés. Le cœur de l'olivine est pseudomorphosé par des produits secondaires qui varient en fonction des conditions de drainage (Trescases, 1975). Dans le cas d'un fort drainage, l'hydrolyse est importante et donc la totalité du magnésium et silicium est rapidement lessivée. Le fer résiduel va alors précipiter sous la forme de gel ferrifère appelé limonite. Dans le cas d'un drainage faible, le milieu est alors plus confiné et l'hydrolyse donc moins importante. Le lessivage du silicium est alors partiel. La partie non-lessivée de celui-ci se recombine alors avec le fer ou le magnésium, dans le cas où celui-ci n'a pas été complètement lessivé non plus, et précipite ainsi en saponite ou en nontronite en fonction de l'activité du magnésium et du fer dans le fluide.

Dans n'importe quelle condition, il y a un départ important de magnésium et plus ou moins fort de silicium. Cela va entraîner un enrichissement relatif en nickel des produits d'altération par rapport au nickel contenu au départ dans l'olivine.

La serpentine est plus résistante que l'olivine et subsiste assez longtemps dans la saprolite, ce qui contribue à préserver la structure de la roche mère. Elle s'altère toutefois progressivement en un mélange hétérogène de calcédoine, de limonite, de smectites Fe-Mg néoformées et de serpentine résiduelle (Pelletier 1983). L'orthopyroxène, plus résistant, est également progressivement altéré. Il est épigénisé par du talc et associé à du quartz. Le fer libéré par cette altération est oxydé et cristallisé en goethite dans les plans de clivages (Besset, 1980). Seule la chromite subsiste jusque dans les latérites (Annexe I).

5. Les phases porteuses du nickel

Les principales phases porteuses du nickel sont (Gaudin, 2002) :

- dans la **zone ferrugineuse** : la goethite et les oxydes de cobalt et de manganèse ;
- dans la **zone silicatée** : la serpentine résiduelle, les produits amorphes ferrugineux, les smectites et les phyllosilicates magnésiens constituant les garniérites.

Le nickel est l'élément fondamental des garniérites. Pendant l'altération de la roche saine, ce n'est qu'un élément trace (<0,5%) au moment de sa libération. Ensuite, il s'est concentré pour former des minerais nickélifères enrichis en silice, appelés garniérites (Sciences au Sud, mai/juin 2003). Il est important de s'intéresser à la distribution du nickel dans les différents horizons pédologiques, ainsi qu'à son devenir au cours de l'altération.

Sur l'île de la Nouvelle-Calédonie, les gisements de garniérites sont surtout concentrés au niveau de l'horizon de la saprolite grossière. Toutefois, il est aussi possible d'en trouver, mais plus occasionnellement, dans la saprolite fine. Schellmann (1971) a ainsi distingué 3 types de gisements dans le monde :

- **Type A** : le nickel est uniformément réparti sur toute la hauteur de l'horizon saprolitique, avec un taux de concentration assez faible ;
- **Type B** : le nickel est fortement concentré à la base de la saprolite fine ;
- **Type C** : le nickel est fortement concentré dans un horizon silicaté à la base de la saprolite grossière.

On l'a vu précédemment, la Nouvelle-Calédonie présente à la fois des caractères de type A et C.

Trescases (1975) explique de la manière suivante, les différents processus intervenant dans la formation de ces gisements de garniérites.

Dans un premier temps, le nickel, qui est contenu au départ dans les olivines, est libéré lors de leur hydrolyse. Il précipite ainsi à pH 8.5 sous forme d'hydroxyde ($\text{Ni}(\text{OH})_2$). Une partie reste alors sur place dans les amas silico-ferrugineux amorphes, qui se substituent aux noyaux d'olivine. Mais le milieu est vite lessivé de ses bases et son pH a tendance à baisser. Cela favorise donc la mobilisation du nickel. Le milieu le plus favorable au piégeage du nickel est alors formé par le réseau maillé de serpentine primaire. Ce processus est facilité par le pH du milieu qui reste élevé entre les lamelles encore peu altérées. Le drainage reste donc faible dans ce milieu compact. L'hydroxyde de nickel et le fer vont se loger dans les lacunes du maillage serpentineux, par adsorption.

Ensuite au sommet de la saprolite grossière, les lamelles d'antigorite subissent l'hydrolyse à leur tour et vont se dissocier. Le nickel est alors libre dans un milieu où le pH est moins alcalin

qu'auparavant. Une partie du nickel est alors mobile et migre vers la base du profil où les conditions optimales d'immobilisation sont retrouvées. Il vient alors enrichir un peu plus le maillage des serpentines primaires des roches qui sont en cours d'altération. Si l'altération se poursuit sur une longue période et sans érosion, on peut admettre, qu'à la suite de toutes ces libérations et migrations successives, la quantité de nickel accumulée à la base du profil devienne importante. En effet, si l'apport de nickel se poursuit alors que la saprolite est saturée, il se forme alors des garniérites dans toutes les cavités existantes : fissures, brèches, pores de la saprolite (figure 8). La garniérite est un indicateur de la saturation en nickel de la saprolite. L'autre partie du nickel libéré au sommet de la saprolite grossière échappe à la mobilisation en s'intégrant à la goethite ou à l'asbolane (oxyhydroxyde de manganèse) qui cristallisent. Associé à ces hydroxydes, le nickel est conservé dans la saprolite fine (ou latérite jaune).

Trescases (1975) soulève un problème : on devrait retrouver dans l'horizon de saprolite grossière la totalité du nickel absent de la saprolite fine. Or le bilan du nickel montre qu'il y a en général un déficit pour l'ensemble des horizons d'altérations et très vraisemblablement un déficit encore plus grand pour l'ensemble du profil vertical. En revanche, d'autres profils révèlent un excédent. Il ne s'agit pas des bases de profils, mais de zones faillées (figure 8), de dolines, de dépressions du substrat rocheux, du rebord des plateaux. Pour résumer, en tous points où se concentrent des circulations souterraines. En plus du mouvement général vertical du nickel, une lixiviation latérale du nickel avec accumulation intense aux exutoires avals expliquerait ce phénomène.



Figure 8 : Brèche à ciment de garniérite

Trescases (1975) caractérise donc les gisements de Nouvelle-Calédonie par les 3 pièges suivants :

- **Piège I :** la serpentine héritée encore peu altérée. L'accumulation accompagne alors la descente du front d'altération et n'implique pas un déplacement du nickel des horizons supérieurs vers l'horizon silicaté de base ;
- **Piège II :** les hydroxydes qui cristallisent au sommet de la saprolite grossière au moment où le réseau de la serpentine primaire est détruit. Le nickel libéré s'associe à la goethite et l'asbolane et échappe ainsi au premier piège. Le piège II est très efficace à cause de la stabilité des édifices hôtes et n'est détruit qu'à proximité de la surface ;

- **Piège III** : les circulations d'eaux souterraines au contact roche saine-roche altérée qui entraînent un peu du nickel de la saprolite grossière et tendent à limiter la concentration dans les pièges de type I. Le nickel subit une migration latérale et va enrichir un troisième type de piège dans des matériaux comparables à l'origine aux accumulations du premier type mais situé en aval. Ces pièges sont constitués par les serpentines primaires (comme le piège I) et par les produits d'altération des olivines (amorphe ou smectite), à moins que de véritables silicates nickélifères n'apparaissent (garniérites).

Pour résumer :

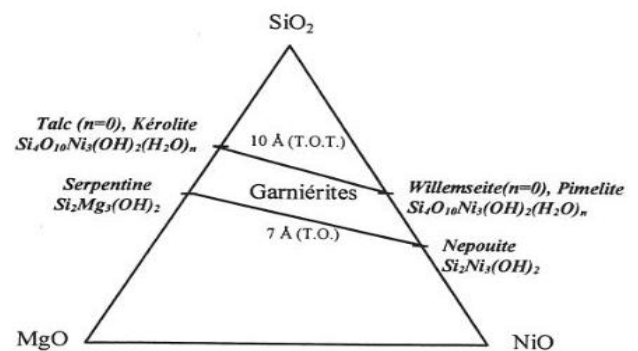
- 1/3 du nickel libéré échappe à la mobilisation et s'associe à la goethite et à l'asbolane ;
- Le reste migre vers le bas du profil où les conditions sont favorables à son d'immobilisation (serpentine ou nontronite).

Après cette distribution, les circulations d'eaux souterraines entraînent latéralement une partie du nickel immobilisé à la base du profil. Le silicium et le magnésium, qui avaient été lessivés par l'eau météorique dès les premiers temps de l'altération, ont précipité sous la forme de phyllosilicates magnésiens dans les zones broyées et les diaclases (Trescases 1986). Le nickel entraîné latéralement par les circulations d'eau se recombine alors au silicium et au magnésium pour former les garniérites.

En effet, la nature de ce minéral est assez complexe. Il s'agit du mélange intime de deux ou plusieurs composants. A la fin des années 1960, de nouvelles études par DRX conduisent à identifier deux types de phyllosilicates dans les garniérites : des serpentines (7Å) et des phyllosilicates apparentés aux smectites (10Å), mais qui n'ont pas la faculté de gonfler.

Brindley et Pham Thi Hang (1973), en se basant sur des caractères structuraux, appuient cela en remarquant que de nombreuses garniérites sont des mélanges de silicates à feuillets 1/1 et 2/1 ; plus précisément de type serpentine pour les 1/1 et pour les 2/1 : talc et smectite. Ils se sont ainsi basés sur des études par DRX qui montrent à la fois des espacements de 7 à 10Å.

Quelques années plus tard, Maksimovic (1975) conclut que les garniérites sont constituées de deux séries de phyllosilicates évoluant entre un pôle magnésien et un pôle nickélifère (figure 9) :



- **Série TO** : Lizardite (Mg) – Népouite

Figure 9 : Composition et minéralogie des garniérites (Gaudin, 2002)

(Ni) : phase à 7 Å ;

- **Série TOT** : Talc (Mg) – Willemseite (Ni) : phase à 10 Å avec un empilement ordonné, et surtout Kérolite (Mg) – Pimélite (Ni) qui ont la même structure qu'un talc mais avec un empilement désordonné et une teneur en eau plus élevée.

La proportion d'une série par rapport à l'autre dépend des conditions physico-chimiques du fluide minéralisateur. Les minéraux de la série TOT précipitent par exemple à partir d'un fluide plus riche en silicium que ceux de la série TO.

Il faut ajouter que Manceau et Calas (1985,1986) ont montré par spectroscopie EXAFS que le nickel dans les garniérites ne se distribue pas de façon aléatoire dans la couche octaédrique mais qu'il se concentre en clusters (micro-domaines).

6. Les facteurs de formation des profils latéritiques nickélifères

Il a été vu précédemment que le drainage était le paramètre le plus important et donc le plus influant lors de l'altération d'une roche ultrabasique. Ces conditions de drainage sont contrôlées entre autre par la nature de la roche mère, le climat, la topographie et l'activité tectonique de la région. Trescases (1975) résume ainsi les principaux caractères.

Tout d'abord, le climat subtropical doit être suffisamment agressif afin que d'importantes quantités de nickel soient libérées. Néanmoins, il doit laisser subsister à la base des profils une tranche silicatée qui représente le piège le plus efficace.

Pour la roche mère, ici une péridotite, c'est le degré de serpentinisation qui entraîne les variations minéralogiques. Golightly (1981) montre que pour une péridotite entièrement serpentinisée, la partie saprolitique est assez homogène et les garniérites peu présentes. Au contraire pour une péridotite non serpentinisée, la saprolite est très hétérogène (fragments plus ou moins altérés) et les garniérites importantes. En règle générale, les péridotites sont partiellement serpentinisées. C'est dans ce cas qu'une latérite nickélifère est le plus souvent économiquement intéressante. En effet, la serpentine résiduelle est plus résistante que l'olivine à l'altération. Du coup, elle piège de façon plus efficace le nickel en solution et permet alors une concentration du nickel dans la saprolite au cours de l'altération.

Ensuite, le modelé karstique doit jouer un grand rôle métallogénique. En effet, une préconcentration s'élabore grâce au piégeage du nickel à la base des profils d'abord, dans les points bas du paysage karstique ensuite.

Enfin, l'activité tectonique du plio-quadernaire, qui a soulevé la Nouvelle-Calédonie, a démantelé le karst et remodelé le paysage où un premier stock de nickel s'était constitué dans les bas fond, devenus ensuite glacis puis actuellement plateaux. Ce bouleversement a activé les remobilisations latérales, qui élaborent les gisements à haute teneur dans les compartiments moins soulevés, sur les pourtours des plateaux, dans les zones faillées. Finalement, la mise en relief des plateaux n'est qu'un stade éphémère dans la dissection du modelé. Mais avant cette mise en relief, le nickel s'était accumulé dans les profils d'altération ; et c'est grâce à cette mise en relief que ce métal est redistribué en concentrations élevées.

II. Le massif de Tiébaghi et les échantillons

A. Généralités



Figure 10 : Localisation des centres miniers de la SLN en Nouvelle-Calédonie (ERAMET)

Les échantillons qui vont être étudiés proviennent du centre minier de Tiébaghi. Celui-ci se situe dans le grand nord de l'île, sur la commune de Koumac, sur la côte Ouest, à environ 385km de Nouméa. Il compte deux gisements : Alpha et Dôme. Après que Jules Garnier ait découvert du nickel sous forme de garniérite dans le Nord de la Grande Terre, une véritable ruée vers l'or vert débute. La région de Koumac est alors mise en valeur par son exploitation minière. Après que le premier acte de concession du massif de Tiébaghi soit signé en 1877, l'exploitation démarre en 1901. En 1919, la Société

Le Nickel (SLN) rachète le domaine minier. Il est surtout célèbre jusqu'en 1990 par son exploitation du chrome. Mais depuis 1997, la Société Le Nickel (SLN) y a ouvert son centre minier nickélifère. Le massif s'impose sur 10km de long et 5km de large, avec un point culminant à 600m d'altitude.

D'un point de vue pédologique, le massif est marqué par la présence d'une cuirasse ferrugineuse, qui résulte de l'accumulation relative d'aluminium et de fer au sommet du profil d'altération. Cet horizon est présent sur l'ensemble du plateau. Sa résistance ne l'empêche toutefois pas d'être en partie démantelé et bréchifié car l'érosion est très active. Cela a donc conduit à la formation de langues de débris de cuirasse qui recouvrent partiellement les latérites dans les versants.

Les échantillons étudiés proviennent du gisement de Dôme. Les péridotites de ce gisement sont fortement structurées et serpentinisées. Cela a donc permis de mettre en place un important manteau d'altérites lors de l'altération supergène. Une des caractéristiques de ces altérites est aussi de contenir une nappe, cela à cause de leur faible perméabilité.

B. Présentation des échantillons

Les échantillons sont séparés en 6 lots. Chaque lot comportant 4 fractions granulométriques : 0-15 μm , 15-63 μm , 63-200 μm et 200 μm -5 mm. Ce sont les types de minerais caractéristiques qui seront amenés à être extraits pour être valorisés dans les laveries de la SLN.



Figure 11 : Gisement de Tiébaqhi

Parmi ces échantillons, on trouve :

- **Les gleys** : il s'agit d'un horizon hydromorphe réducteur (figure 12). Ce type de sol se forme lorsque le régime hydrique est stationnaire avec saturation en eau, et réduction du fer et du manganèse.



Figure 12 : Photographie des gleys



Figure 13 : Photographie des HSA

- **Les HSA** : c'est un horizon supérieur acide (figure 13), il s'agit d'une saprolite fine à smectites, de type Murrin-Murrin. L'acidité est due à un ratio MgO/SiO_2 faible.

- **Les T, TT et TTT** : il s'agit de saprolites avec différents degrés d'altération, T correspondant aux saprolites les plus grossières et TTT aux saprolites les plus fines. Contrairement au gley, c'est un horizon oxydé.

Ces trois types de matériaux marquent les grandes étapes de l'altération latéritique nickélique hydromorphe à smectites (avec une altération croissante allant de T, TT, TTT à G20, puis HSA0).

Le nickel est surtout localisé dans les phyllosilicates (serpentes, smectites, talc) et les oxyhydroxydes de fer.

C. Problématique

La problématique est la suivante : lors du traitement dans les laveries, il y a difficulté à faire flocculer les fines riches en nickel pour les récupérer. En effet, ces laveries sont des usines d'enrichissement du minerai par voie humide. Elles comportant 4 étapes qui sont : une mise en pulpe, un transport, une unité d'enrichissement et une séparation solide/liquide qui permet de recycler l'eau et d'obtenir des concentrés solides.



Figure 14 : Unité de traitement des minerais de nickel de Tiébaqhi (ERAMET)

C'est pourquoi ces échantillons doivent subir une étude afin d'en effectuer une caractérisation minéralogique et chimique. L'objectif est de caractériser au mieux ces matériaux.

III. Caractérisation chimiques et minéralogiques

A. Données chimiques

1. Méthode

Un tableau d'analyses chimiques, faites par spectrométrie de fluorescence X sur perle, nous a été transmis par la SLN (figure 15).

Cette technique est en général utilisée pour analyser des matériaux hétérogènes solides résistants à de hautes températures, tels que les roches. Le matériau est réduit en poudre et mélangé à un fondant lui-même pulvérulent ; les proportions sont d'environ 1/5 de matériau pour 4/5 de fondant en masse. Le mélange est chauffé vers les 1 100 °C dans un creuset en platine. Le fondant fond et le matériau se dissout dedans ; le matériau en lui-même ne fond en général pas. Pour assurer l'homogénéité du mélange, le creuset est agité d'un mouvement de rotation.

2. Résultats/Interprétations

Les ratios suivants ont été ajoutés :

- MgO/SiO_2 : qui est utilisé pour estimer l'état d'altération et l'indice d'acidité ;
- MgO/Fe_2O_3 : qui est à coupler avec le 1^{er} indice, en effet Fe étant moins mobile que Si, il peut mieux rendre compte de l'état d'altération.

Sondage	Granulométrie	Ni %	Fe ₂ O ₃ %	MgO %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	MgO/SiO ₂	MgO/Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃
T1	200µm-5mm	1,94	17,8	25,7	36,9	2,03	0,70	1,44	0,11
T1	63-200µm	1,56	22,7	18,4	41,1	2,57	0,45	0,81	0,11
T1	15-63µm	1,84	25,1	23,0	34,6	1,52	0,66	0,92	0,06
T1	0-15µm	3,48	25,0	22,5	33,2	1,74	0,68	0,90	0,07
TT0	200µm-5mm	2,01	30,0	16,9	29,2	2,70	0,58	0,56	0,09
TT0	63-200µm	1,92	26,8	12,2	40,8	3,05	0,30	0,46	0,11
TT0	15-63µm	2,14	30,1	17,3	32,2	2,44	0,54	0,57	0,08
TT0	0-15µm	3,62	22,7	20,1	34,8	2,96	0,58	0,88	0,13
TT1	200µm-5mm	1,99	22,0	17,3	32,4	4,54	0,53	0,79	0,21
TT1	63-200µm	1,82	29,4	13,6	34,0	4,70	0,40	0,46	0,16
TT1	15-63µm	1,98	33,6	15,4	30,3	3,03	0,51	0,46	0,09
TT1	0-15µm	3,03	30,1	13,4	35,0	3,03	0,38	0,45	0,10
TTT0	200µm-5mm	2,42	16,2	13,2	41,2	11,60	0,32	0,81	0,71
TTT0	63-200µm	1,53	30,2	6,6	44,9	5,56	0,15	0,22	0,18
TTT0	15-63µm	1,96	36,7	7,7	36,2	5,00	0,21	0,21	0,14
TTT0	0-15µm	3,22	29,1	7,9	38,0	6,24	0,21	0,27	0,21
G20	200µm-5mm	1,88	24,0	11,5	39,5	5,69	0,29	0,48	0,24
G20	63-200µm	1,65	30,6	6,8	44,6	4,52	0,15	0,22	0,15
G20	15-63µm	1,85	41,8	6,0	32,7	3,66	0,18	0,14	0,09
G20	0-15µm	3,04	41,6	6,7	29,3	5,42	0,23	0,16	0,13
HSA0	200µm-5mm	2,71	48,9	2,6	26,6	3,78	0,10	0,05	0,08
HSA0	63-200µm	1,68	38,4	2,6	41,7	4,44	0,06	0,07	0,12
HSA0	15-63µm	2,13	50,4	3,4	25,2	4,82	0,14	0,07	0,10
HSA0	0-15µm	3,27	45,3	3,6	27,2	4,88	0,13	0,08	0,11

Figure 15 : Analyse chimique de l'ensemble des échantillons (SLN)

En regardant individuellement les pourcentages en MgO, SiO₂ et Fe₂O₃, on voit que MgO diminue très fortement de T1 vers HSA0 et cela de manière continue. SiO₂ de son côté a tendance à diminuer un peu, tandis que Fe₂O₃ augmente sensiblement laissant penser à la formation d'oxydes de fer. Il est donc visible, en sachant cela et en regardant les indices, que le taux d'altération augmente ainsi : T1<TT0<TT1<TTT0<G20<HSA0. C'est tout à fait logique avec ce qu'il a pu être dit précédemment. Cela correspond à une vision verticale de l'altération.

De manière générale, le taux d'altération est aussi croissant des fractions grossières vers les fractions fines (à nuancer pour TT0 et HSA0).

Le nickel se concentre principalement dans la fraction la plus fine (0-15 µm) et cela pour tous les échantillons. Le fer de son côté est globalement aussi concentré dans ces fractions fines, sauf pour TT0 où cela est à nuancer. Le nickel est donc sans doute associé aux oxydes de fer. A un degré moindre, le nickel se retrouve aussi dans la fraction la plus grossière (associé aux garniériles, sulfures ?).

Pour ce qui est du pourcentage de Fe_2O_3 , on note que TT0 présente un taux élevé. En effet, il présente un pourcentage en Fe_2O_3 un peu fort par rapport à sa position dans le profil (peu altérée) et aussi la particularité d'être important dans la fraction la plus grossière.

Au niveau du pourcentage d' Al_2O_3 , celui-ci est très faible, ce qui est tout à fait normal pour un profil d'altération de roches ultrabasiques. Cependant, il est très faible en T1 et TT0 mais augmente de manière notable à partir de TT1. Il prend ensuite une valeur un peu plus forte en G20 et HSA0. On notera une valeur très forte pour l'échantillon TTT0.

B. Données granulométriques

1. Matériel et Méthode

La granulométrie laser utilise le principe de diffraction et de diffusion d'un faisceau laser frappant une particule.

Les particules passent à travers un rayon laser fixe. Chaque particule diffracte la lumière selon un angle qui est fonction de sa taille. La lumière diffractée est recueillie par un détecteur multi-éléments. L'image de diffraction obtenue est transformée en utilisant un modèle optique et une procédure mathématique appropriés (théorie de Mie : pour les petites particules ou théorie de Fraunhofer : s'applique pour les grandes particules par rapport à la longueur d'onde). Le résultat est une distribution de la taille particules en fonction du pourcentage volumique.

Pour les fractions 0-15 μm et 15-63 μm de chacun de nos échantillons, le contenu d'une spatule a été mis en suspension dans des béchers remplis d'eau. Dans un premier temps, ces suspensions sont ultrasonnées afin de bien les homogénéiser et passées à la granulométrie laser.

Afin d'affiner cette granulométrie, les fractions 0-15 μm sont mises en contact avec 1mL d'hexamétaphosphate de sodium de concentration 102 g/L. Ce traitement a pour but de mieux disperser et donc de pouvoir mieux faire la différence au niveau des plus fines.

Les résultats ont été enregistrés en utilisant un granulomètre laser Mastersizer IP.

2. Résultats/Interprétations

Les résultats obtenus après le premier passage à la granulométrie laser se trouvent figure 16 (1^{er} et 2^{ème} graphe). A la vue de ceux-ci, il a été mis en évidence pour l'ensemble des échantillons :

- pour la fraction 15-63 μm : un pic principal à 43 μm ;
- pour la fraction 0-15 μm : 2 pics principaux, un petit à 0,6 μm et un grand à 6 μm .

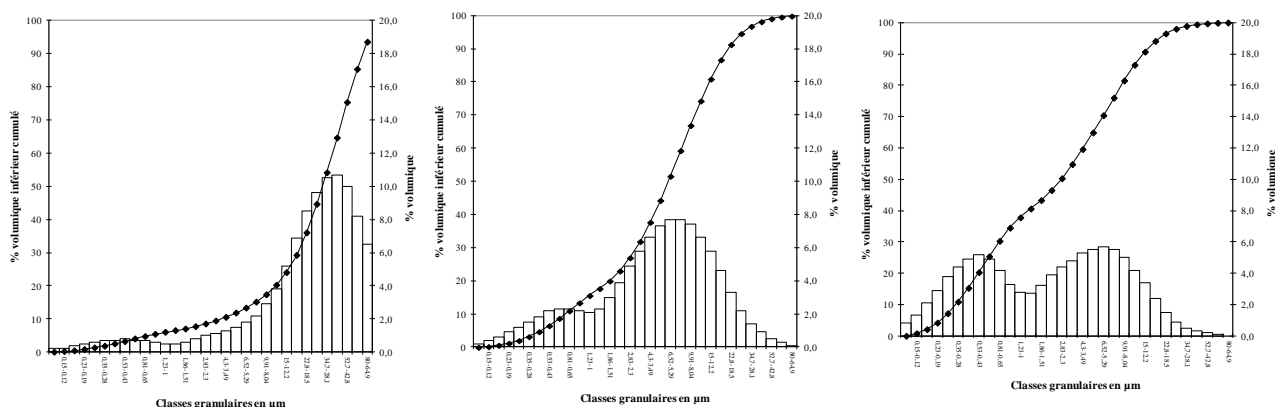


Figure 16 : Comparaison de la granulométrie laser de TT1 pour la fraction 15-63 μm (à gauche), 0-15 μm (au milieu) et 0-15 μm après contact avec un dispersant (à droite)

Dans un second temps, les échantillons sont mis en contact avec un dispersant (3^{ème} graphe figure 16). Les résultats sont les suivants : on a toujours la même disposition avec un pic petit à moyen à 0,6 μm et un second plus important vers 6 μm . La seule différence est à noter au niveau de l'intensité de ceux-ci. En effet, le pic de particules fines à 0,6 μm est plus important, ce qui est logique avec l'ajout du dispersant. A noter que l'échantillon TT0, qui avait des valeurs anormales au premier passage, présente la même disposition que les autres (Annexes II-III). Il y a sûrement eu un mauvais lavage entre le passage de cet échantillon et celui le précédent.

Pour résumer (Annexe IV), aux niveaux de la fraction fine 0-15 μm , il y a la présence de deux populations bien distinctes : la première autour de 0,5-0,6 μm , la seconde autour de 6-7 μm . La population de taille plus grossière pourrait correspondre à des éléments résiduels comme la serpentine, le talc ou la chlorite, tandis que la population la plus fine pourrait s'apparenter à des éléments néoformés comme les smectites ou les oxydes de fer.

C. Données des poudres DRX

1. Matériel et Méthode

Afin de réaliser des poudres, les échantillons ont été broyés à l'aide d'un broyeur à anneaux puis tamisés à 50 μm , ceci afin de mieux désordonner les poudres car cela permet de former des petits agrégats. L'ensemble des échantillons est alors passé au DRX.

Les diffractogrammes DRX ont été enregistrés en utilisant un spectromètre Bruker D8 Advance ® diffractomètre, avec un rayonnement $\text{CuK}\alpha$. Les diffractogrammes ont été enregistrés de 2 à 65 °, avec un pas de 0,025 ° et temps de comptage de 0.65 s/pas.

L'ensemble des diffractogrammes a été traité sous X-Pert Highscore.

2. Résultats/Interprétations

Dans un premier temps, les diffractogrammes ont été regroupés en fonction de la taille de la fraction (figure 17 et 18 : fraction la plus grossière et la plus fine ; en annexes V-VI les fractions intermédiaires) :

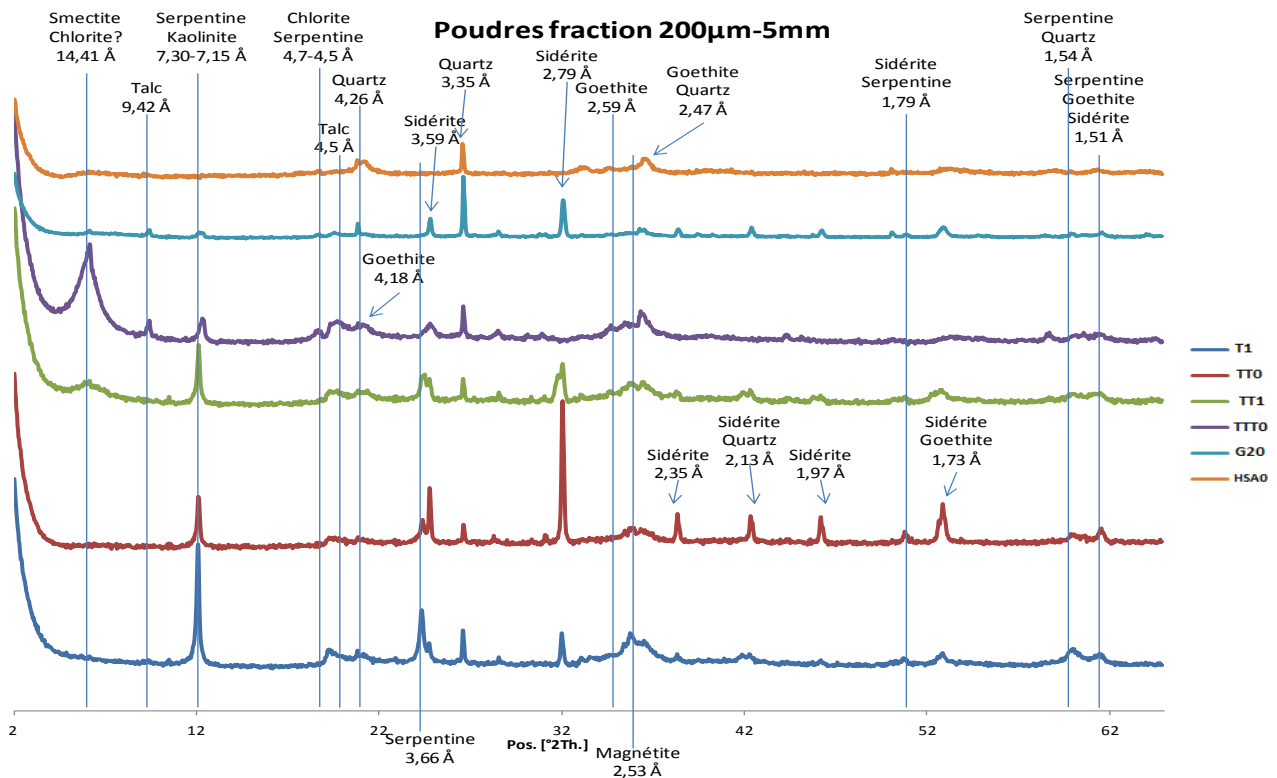


Figure 17 : Diffractogrammes de poudres de l'ensemble des échantillons pour la fraction 200 μm -5mm

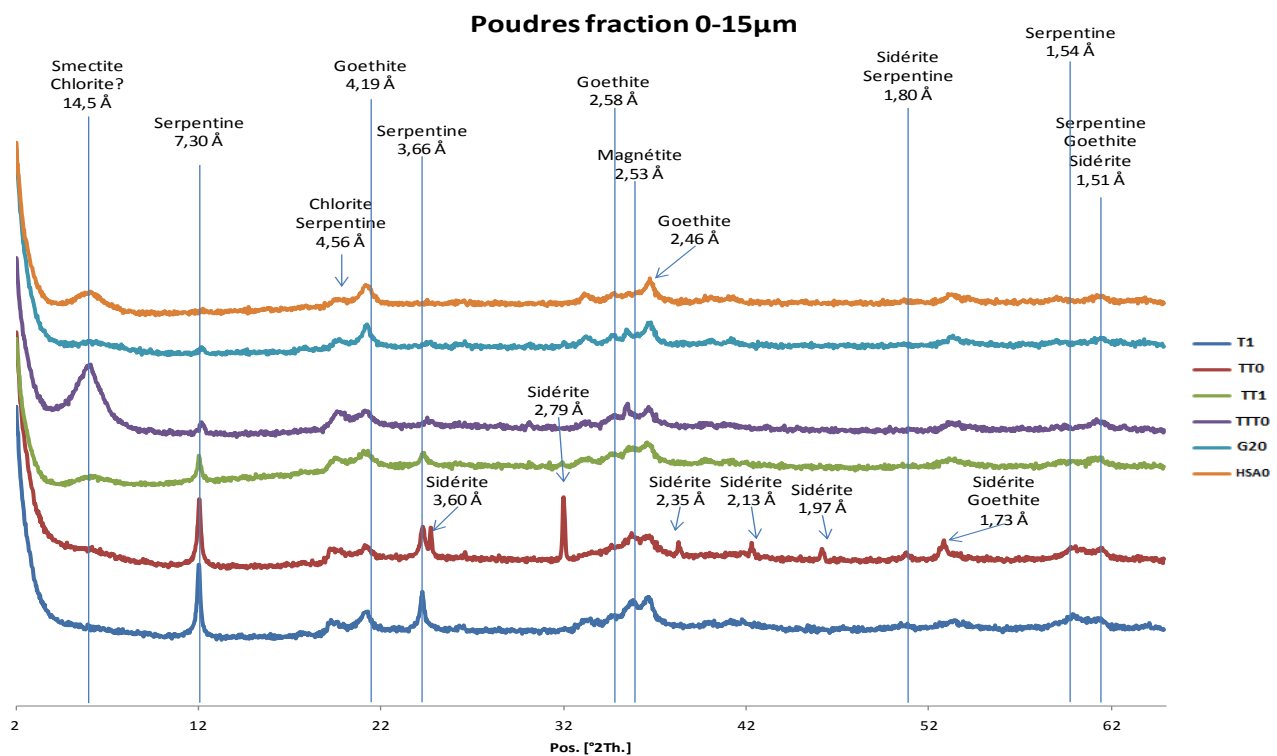


Figure 18 : Diffractogrammes de poudres de l'ensemble des échantillons pour la fraction 0-15µm

L'indexation des différents pics des diffractogrammes montre la présence de serpentine, talc, smectite et/ou chlorite, sidérite, quartz, goethite et peut être de kaolinite.

Au niveau des argiles, il est visible que le pic de serpentine (sans doute de la lizardite) décroît pour les fractions fines. Il semblerait aussi qu'il y ait un autre pic vers 7,15 Å, il pourrait correspondre à de la kaolinite. L'étude des diffractogrammes sur lame orientée pourra préciser cette hypothèse. Pour le talc est présent en faible quantité et est contenu dans les fractions les plus grossières. Le plus intéressant se situe au niveau du pic à 14-15 Å. En effet, il est possible d'émettre l'hypothèse qu'il s'agit de smectite (à confirmer sur lame orientée EG). Ce pic est plus important pour les fractions les plus fines, sauf pour TTT0 qui a aussi un pic très important dans les fractions grossières. Il faut noter cependant que TTT0 et G20 possèdent un pic plus fin au sommet du pic à 14-15 Å, et cela seulement pour les fractions grossières. Il est donc possible de penser que ces échantillons possèdent aussi de la chlorite, qui est surtout contenue dans les fractions les plus grossières. Cela permettrait d'expliquer le pic important à 15 Å dans les grossières pour TTT0 : il y aurait donc de la chlorite concentrée dans les fractions grossières et de la smectite (à confirmer) dans les fractions les plus fines.

Au niveau des autres minéraux, la sidérite, quand elle est présente, diminue avec les fractions fines. Le quartz de son côté est absent dans les très fines et fort dans les autres fractions. Et enfin, la goethite est surtout concentrée dans les fractions fines.

Dans un second temps, les diffractogrammes ont été regroupés par échantillons (figure 19-20 et Annexes VII à X) :

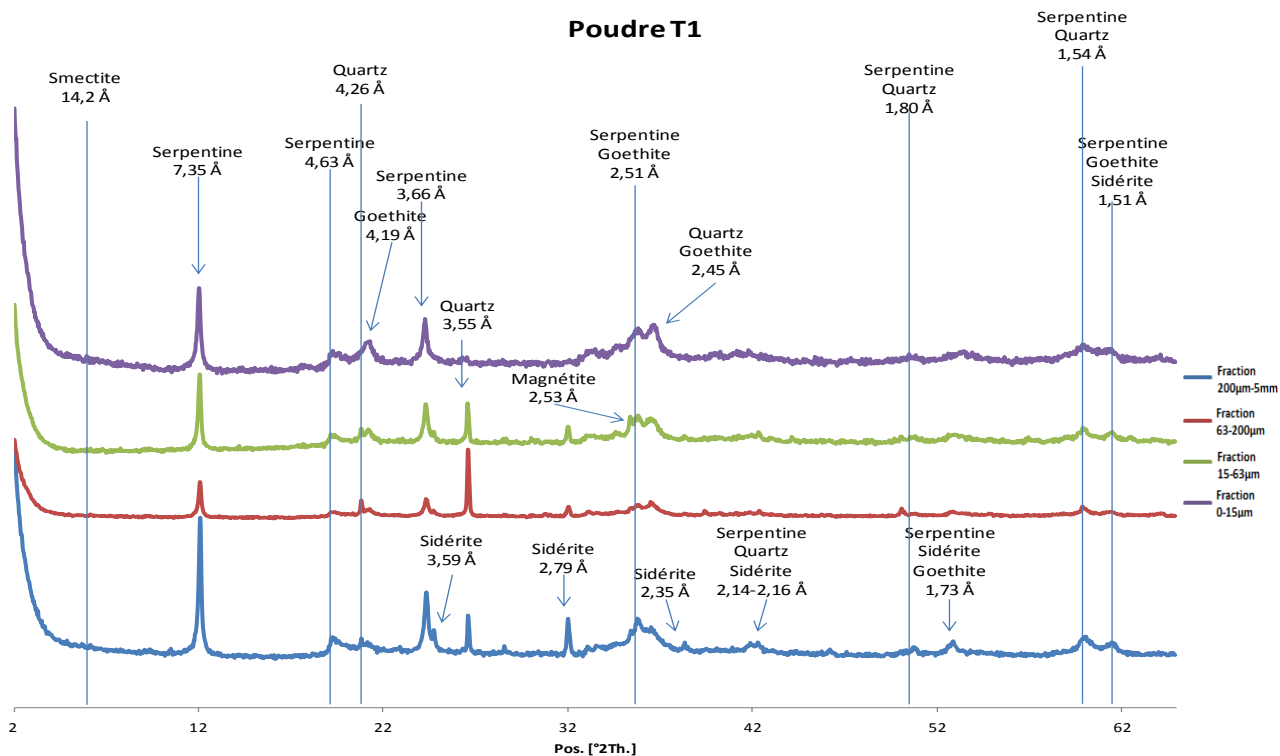


Figure 19 : Diffractogrammes de poudres pour l'échantillon T1

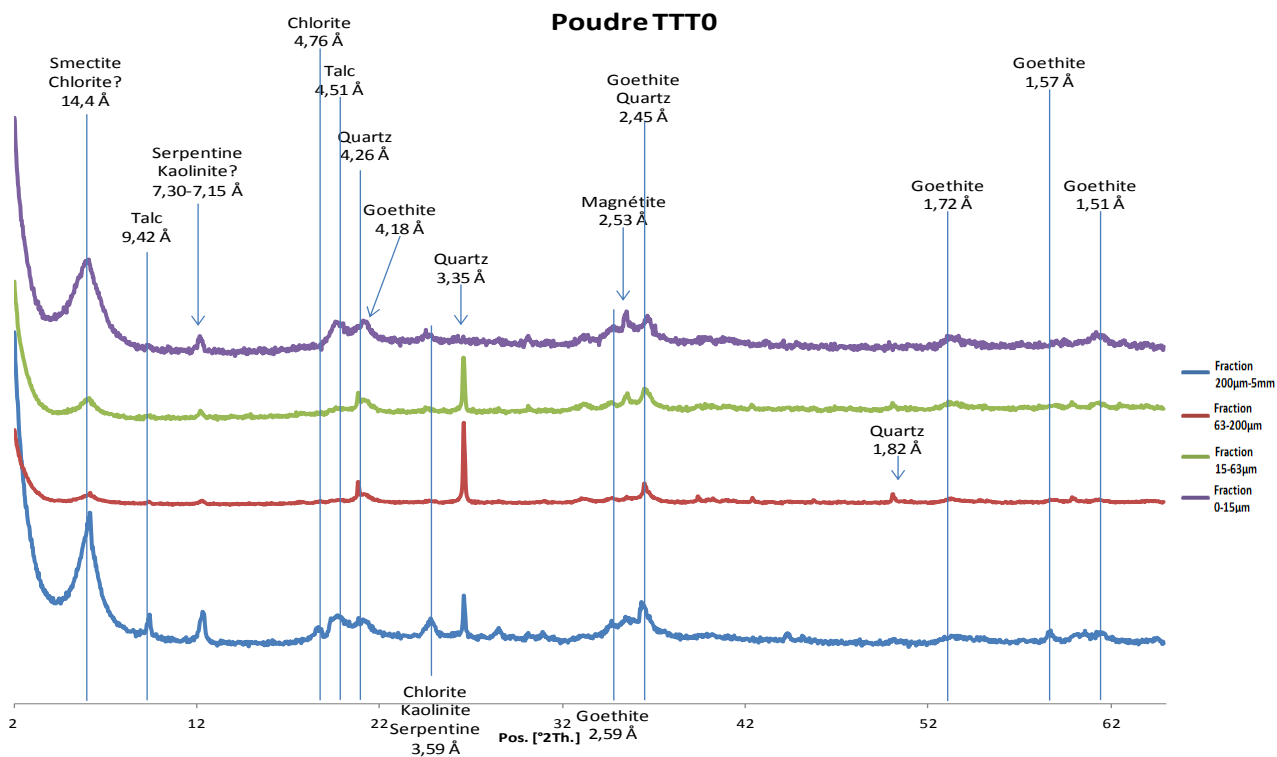


Figure 20 : Diffractogrammes de poudres pour l'échantillon TTT0

Au niveau des argiles, il y a une diminution du pic de serpentine avec l'altération jusqu'à ne plus en avoir en HSA0. Le pic à 14 Å (smectite ?) est très faible, voire inexistant pour T1 et TT0 et commence à croître à partir de TT1. On peut considérer qu'il y a une augmentation de ce pic avec l'altération. Au niveau du pic de chlorite, dont nous avons parlé plus haut : il est présent pour les échantillons TTT0 et G20. Le talc lui est uniquement présent, et cela en faible quantité en TTT0 et G20.

Pour les autres minéraux, la goethite est présente en faible quantité dans les deux premiers échantillons (T1 et TT0), avant d'augmenter pour atteindre un pic de taille moyenne dans les autres. Il y a peut-être une légère augmentation de ce pic avec l'altération. La sidérite est présente en très forte quantité dans TT0 et G20, et absente ou en très faible quantité dans les autres échantillons. Le quartz, enfin, est en forte quantité dans l'ensemble des échantillons.

	Serpentine	Smectite	Chlorite	Talc	Goethite	Sidérite	Quartz
T1	+++	0	0	0	+	+	+++
TT0	++	+	0	0	+	+++	+++
TT1	++	++	0	0	++	+	++
TTT0	+	+++	+++	+	++	0	+++
G20	+	++	++	+	++	++	+++
HSA0	0	++	0	0	++	0	+++

0 : absence ; + : présence en faible quantité
 ++ : présence en quantité moyenne ; +++ : présence en forte quantité

Figure 21 : Comparaison des différents minéraux présents dans les échantillons

Pour résumer, il y a dans les fractions grossières des minéraux résiduels : serpentines, talc, chlorite, quartz. Alors qu'au contraire dans les fractions fines, on retrouve les minéraux secondaires : smectite (à confirmer) et goethite.

Enfin, il est important de constater une diminution du pic de serpentine (sans doute de la lizardite) avec l'altération. Et à l'inverse, une augmentation du pic de smectite (à confirmer), qui est présent à partir de TT1, et de la goethite avec l'altération. Le talc et la chlorite seraient surtout présents dans TTT0 et G20. Enfin, la sidérite est présente en très forte quantité dans TT0 et G20. Le quartz lui a une répartition uniforme.

Il faut noter aussi la présence probable de magnétite en petite quantité dans la totalité des échantillons, excepté HSA0. Cette remarque est néanmoins à prendre avec précautions car le pic de

magnétite placé à 2,53Å sur nos diffractogrammes n'est pas totalement fiable. En effet, l'indexation de pics dans cette zone a été difficile.

D. Données DRX des lames orientées

1. Matériel et Méthode

A la vue des résultats précédemment obtenus (DRX des poudres), il est maintenant nécessaire d'étudier plus précisément les argiles en préparant des lames orientées afin de mieux les faire ressortir. En effet, la méthode suivante vise à orienter au maximum les minéraux argileux de façon à renforcer leur réflexion principale liée aux plans (001).

Pour cela, la fraction 0-15 µm des échantillons a été mise en contact avec du NaCl (1M) afin de saturer l'échantillon en Na et pour assurer la dispersion. La partie <2 µm est alors extraite plus efficacement.

A la suite de cette manipulation, la partie <2 µm extraite par centrifugation est floculée avec l'ajout de CaCl₂ et saturée Ca. Une dialyse est réalisée afin de supprimer l'excès de CaCl₂. Des lames orientées sont ensuite réalisées et passées au DRX en AD et EG (faites sous vide à 40°C) pour différencier les argiles gonflantes ou non.

Juste avant la dialyse, 2 tubes pour chaque échantillon ont été prélevés. Le premier tube est saturé K à l'aide d'ajout de KCl et le second saturé K puis Ca. Une fois les saturations K et K-Ca terminées, les échantillons sont lavés à l'eau afin d'éliminer l'excès de sels. Des lames orientées sont réalisées et passées au DRX. Les lames des échantillons saturés Ca-K sont ensuite repassées au DRX après avoir été chauffées à 110, 330 et 550°C ; celles saturées Ca-K-Ca en EG.

La saturation Ca-K et ses chauffages permettent de fermer à 10 Å les feuillets de smectites. Pour la saturation Ca-K-Ca, si l'échantillon présente encore un pic à 14-15 Å, on qualifie la smectite de basse charge. En effet, cela veut dire que le K s'est rééchangé avec le Ca. Au contraire, si le pic reste à 10 Å, la smectite est qualifiée de haute charge car elle ne ré-échange pas le K fixé lors de la fermeture à 10 Å.

En effet, en ne considérant que le diffractogramme AD, certains minéraux ne sont pas dissociables. Pour le même échantillon, il va donc être enregistré des diffractogrammes obtenus dans des conditions expérimentales différentes : par exemple après saturation à l'éthylène glycol, chauffage ou encore différentes saturations cationiques.

A noter que pour la réalisation de certaines lames il a été nécessaire de mettre l'échantillon en contact avec de l'éthanol. En effet, quand les échantillons sont dispersés dans l'eau et que l'on fait les lames orientées, les particules s'agrègent pour certaines lames et l'argile se décolle de la lame. Comme l'éthanol s'évapore plus vite, il est possible de réaliser les lames.

Les diffractogrammes DRX ont été enregistrés en utilisant un spectromètre Bruker D8 Advance ® diffractomètre, avec un rayonnement CuK α . Les diffractogrammes ont été enregistrés de 0.01 à 35°, avec un pas de 0,025 ° et temps de comptage de 1 s/pas.

2. Résultats/Interprétations

Les résultats obtenus sont regroupés par échantillon (figure 22-23 et Annexes XI à XIV) :

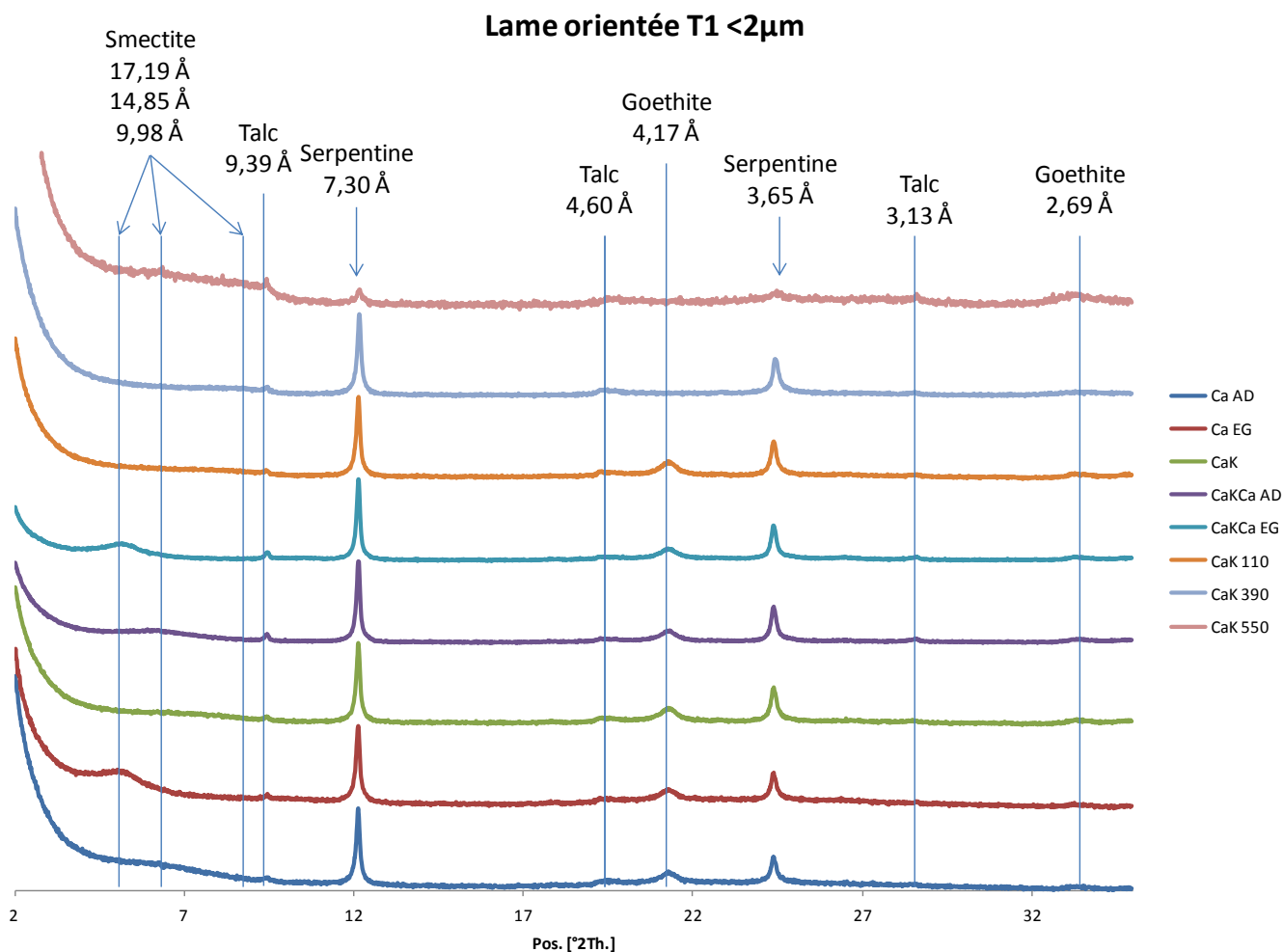


Figure 22 : Diffractogrammes de lames orientées pour l'échantillon T1 <2 μ m avec différents chauffages et saturations

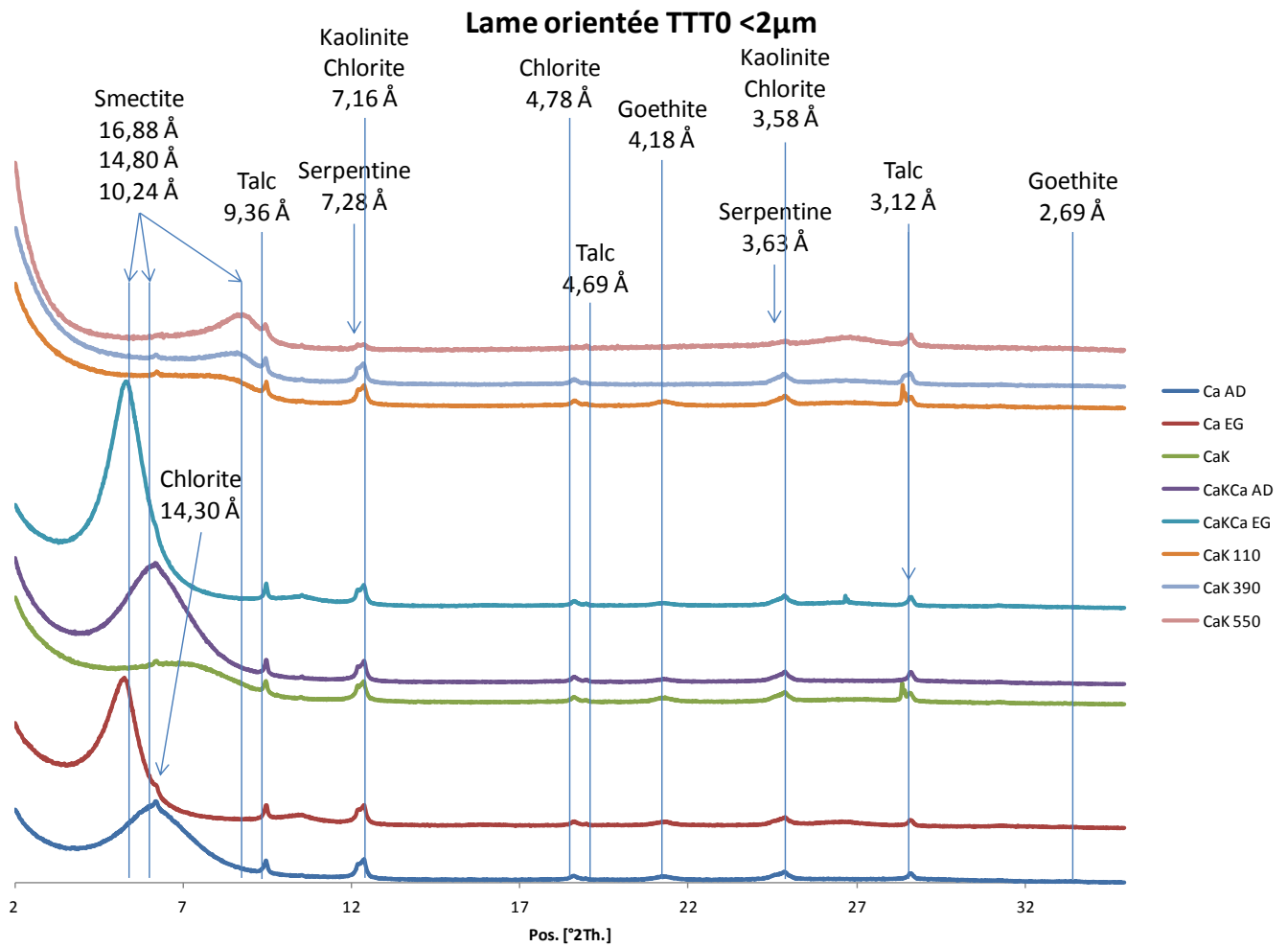


Figure 23 : Diffractogrammes de lames orientées pour l'échantillon TTT0 <2µm avec différents chauffages et saturations

L'indexation des différents pics des diffractogrammes montrent la présence de serpentine, kaolinite, talc, smectite, chlorite, sidérite, goéthite.

Dans les grandes lignes, il est possible de voir qu'il y a bien des phases résiduelles : serpentine, talc, chlorite et des phases néoformées : smectites et goéthite, kaolinite. En effet, le pic à 14-15 Å est donc bien de la smectite car on a un gonflement vers 17 Å à l'EG. De plus il y a un double pic (pour TT1, TTT0, G20, HSA0) à 7,30-7,15 Å et le pic à 7,15 Å disparaît après le chauffage à 550°C. Il ne s'agit pas que de la d002 de la chlorite mais de kaolinite (figure 24).

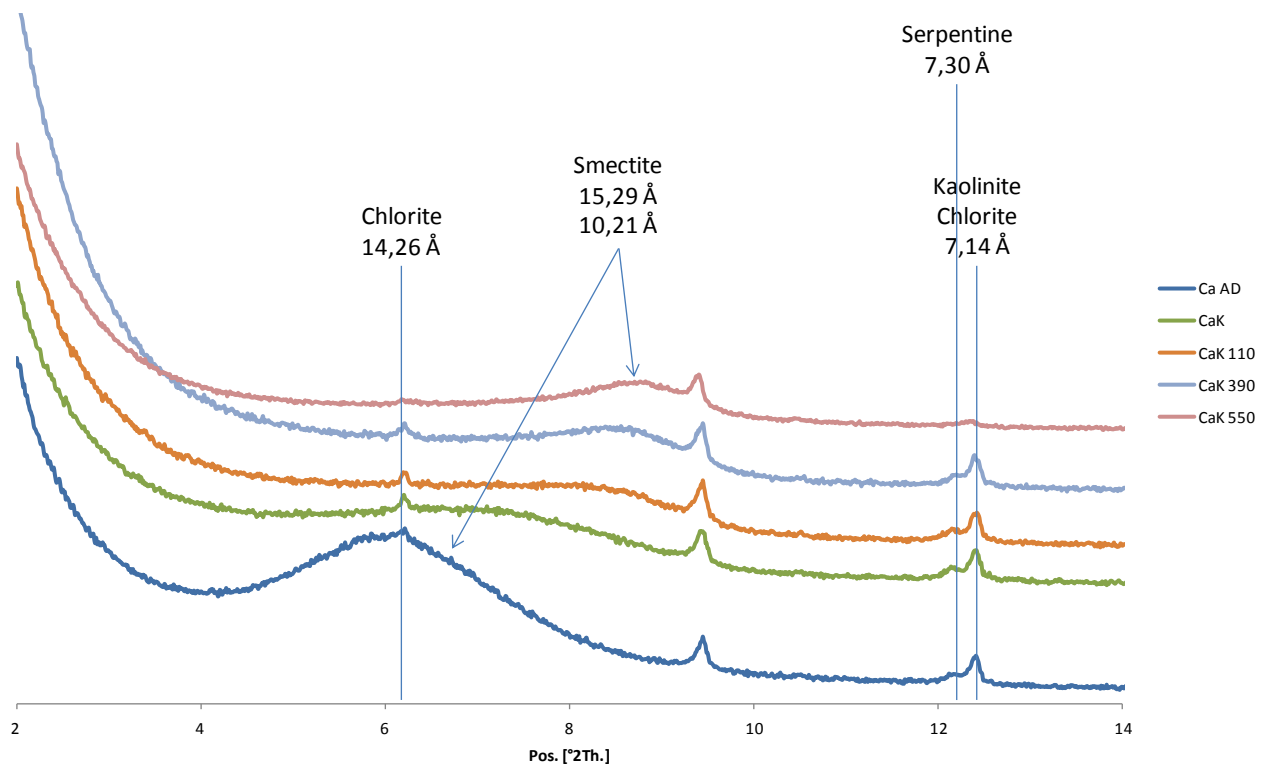


Figure 24 : Diffractogrammes de lames orientées pour HSA0 <2μm avec différents chauffages

Plus précisément, il y a 3 grands types d'échantillons :

Les échantillons T1 et TT0 qui sont riches en serpentine, avec peu de smectite et pas de kaolinite (figure 22).

Les échantillons TTT0, G20 et HSA0 qui sont riches en smectites et pauvres en serpentines (figure 23). Ils possèdent un pic à 14,3 Å constant quelque soit le traitement, il s'agit de chlorite. Ils possèdent aussi un pic à 7,15 Å qui disparaît après chauffage à 550°C, c'est donc de la kaolinite.

L'échantillon TT1 est intermédiaire. En effet, il présente un pic moyen de serpentine, de smectite et un petit de kaolinite. A noter aussi qu'il présente un pic de chlorite mais beaucoup moins important que celui des échantillons TTT0, G20 et HSA0.

D'une manière plus générale, on notera que les smectites regonflent à nouveau à l'EG après saturation Ca-K-Ca ce qui indique que ce sont des smectites basses charges (figure 25).

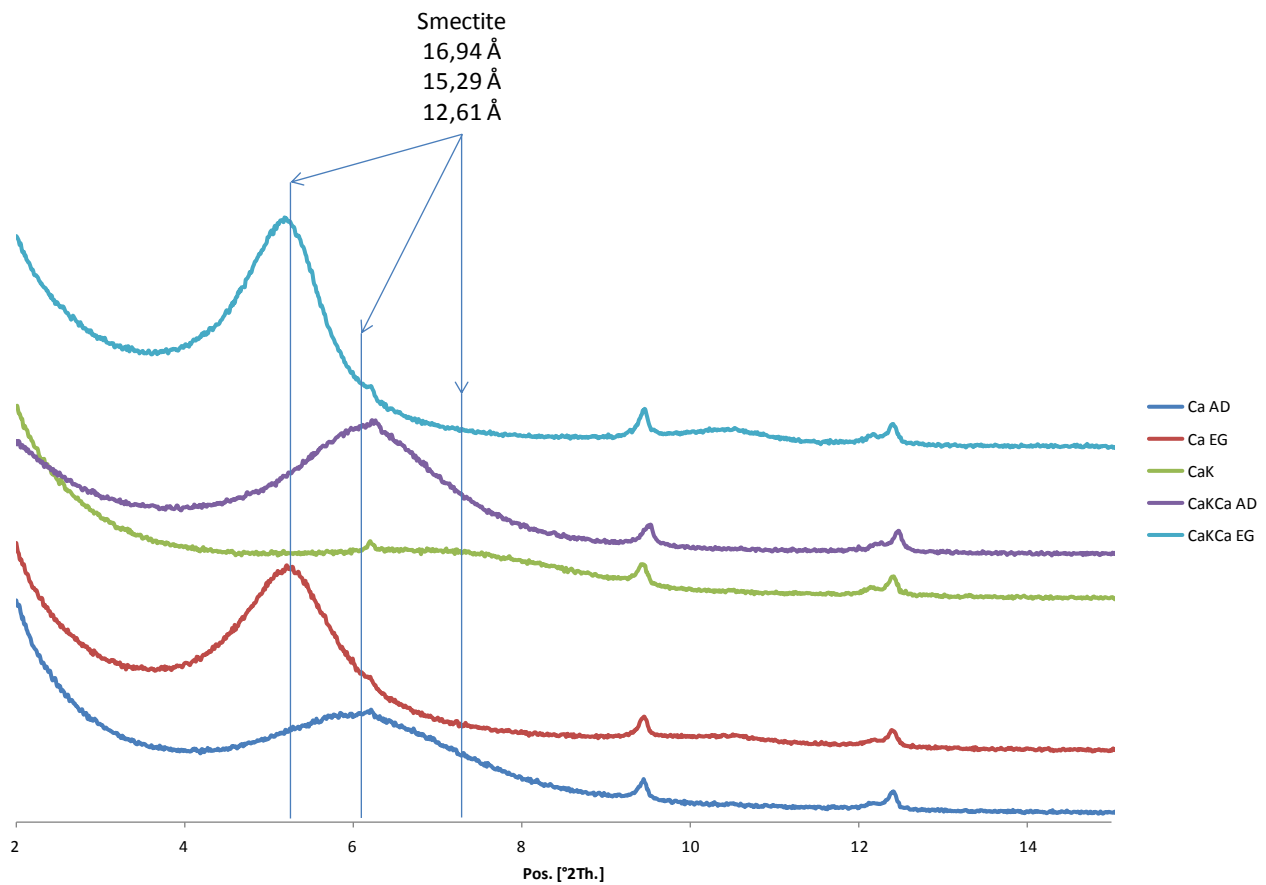


Figure 25 : Diffractogrammes de lames orientées pour HSAO <2µm avec différentes saturations

Les diffractogrammes des échantillons saturés Ca AD et EG ont ensuite été mis sur un même graphique afin que la comparaison soit plus facile (figure 26-27).

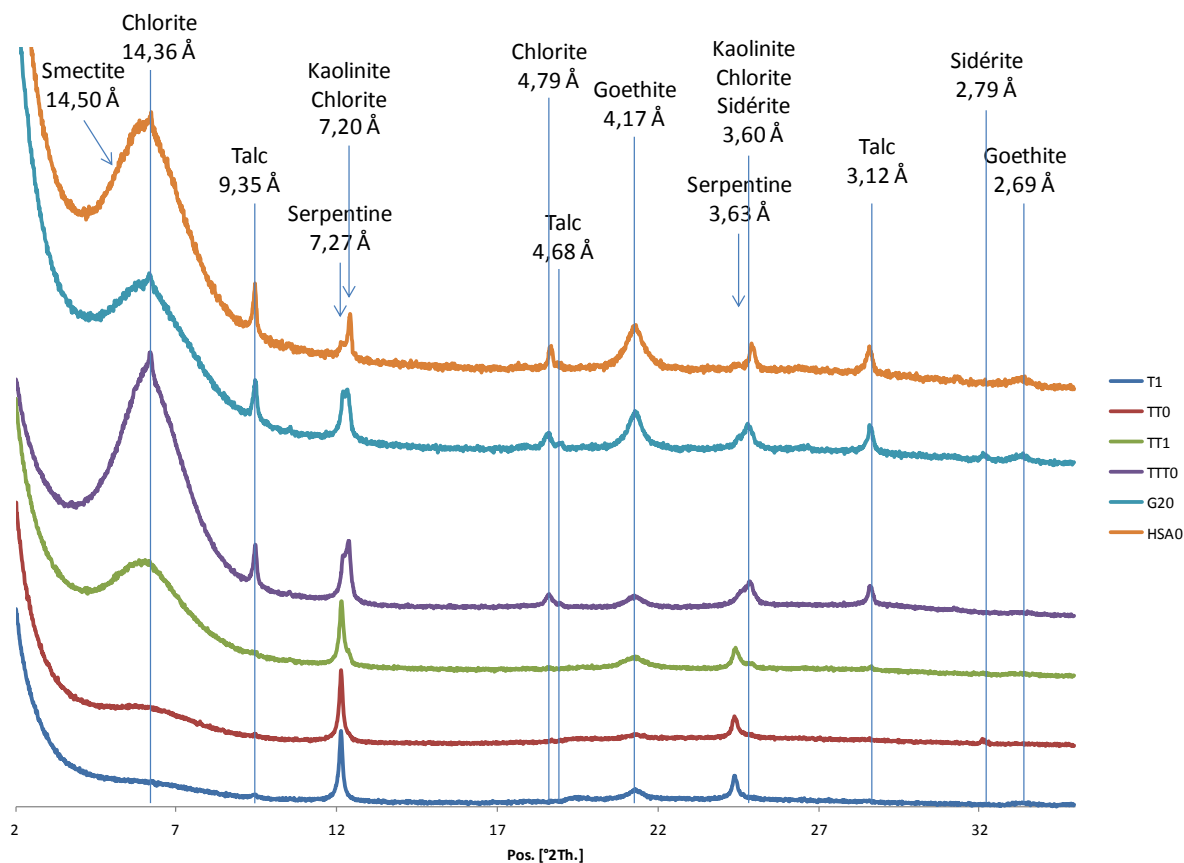


Figure 26 : Comparaison des diffractogrammes <2μm Ca AD de lames orientées, pour l'ensemble des échantillons

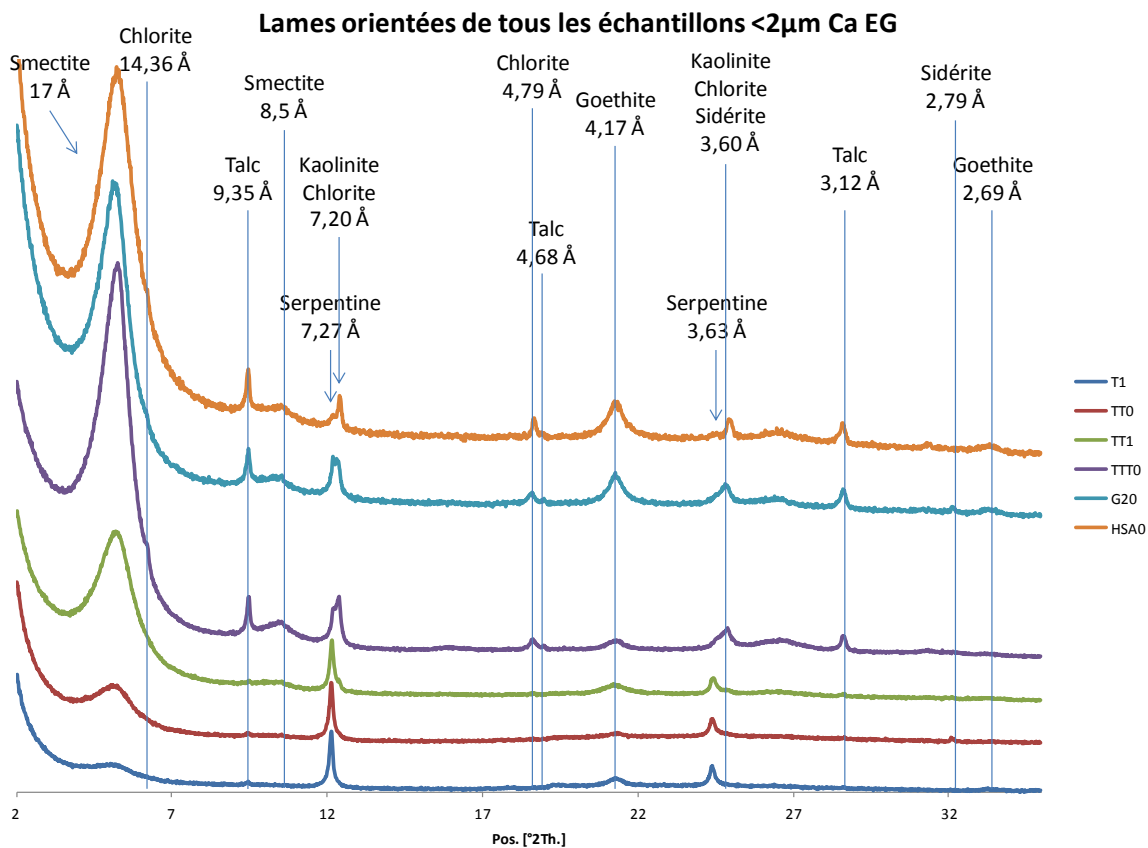


Figure 27 : Comparaison des diffractogrammes <2μm Ca EG de lames orientées, pour l'ensemble des échantillons

Ce graphique comparatif pour les diffractogrammes Ca AD permet de mettre en évidence le fait qu'il y a bien 3 types d'échantillons.

Les échantillons T1 et TT0 qui correspondent au début de l'altération possèdent un pic important de serpentine et très peu de smectite et de talc. Il n'y a pas de kaolinite.

Les échantillons TTT0, G20 et HSA0, au contraire, qui correspondent à une altération plus poussée, montrent un pic important de smectite, goethite et un pic de serpentine qui se réduit. Il faut aussi souligner l'apparition d'un pic plus conséquent de talc et aussi l'apparition tout simplement d'un de kaolinite et de chlorite. On notera que le pic de kaolinite de TTT0 est beaucoup plus important que les autres. Pour ce qui est du talc et de la chlorite, ceux-ci étant des minéraux résiduels, le pic est plus important car il s'agit d'un enrichissement relatif.

L'échantillon TT1 est un échantillon intermédiaire. Il présente un pic intermédiaire de smectite et de serpentine, un pic de talc semblable aux échantillons de début d'altération et un début de pic de kaolinite et de chlorite.

Il faut noter que les échantillons TT0 et G20 possèdent un pic de sidérite.

En résumé, les proportions s'inversent. Il y a donc une diminution avec l'altération de la quantité de serpentine pour une augmentation de celle de smectite, goethite, talc et chlorite (mais eux dus à un enrichissement relatif) et l'apparition de kaolinite. La sidérite se retrouve dans l'horizon réducteur G20 et TT0.

Cela correspond à une vision verticale de l'altération. On notera quand même une nette coupure entre les échantillons T1, TT0 et TT1 au niveau de la quantité de smectite qui augmente brusquement.

Pour revenir au problème rencontré avec la réalisation des lames orientées, il convient de souligner que cela concernait surtout les deux premiers échantillons T1 et TT0. Leur difficulté à disperser est sans doute due à la présence des phyllosilicates sans charges, serpentines, en grande quantité alors que les autres possèdent aussi et en majorité des phyllosilicates à charges (smectites basses charges).

E. Données infrarouge

1. Matériel et Méthode

Les résultats pour l'infrarouge proche sont obtenus par réflexion par la méthode de la sphère d'intégration avec un Thermo Scientific Nicolet 6700 spectrometer. Le séparateur est CaF₂, le détecteur InGaAs et les résultats sont pris pour une fenêtre allant de 12000 à 3.800cm⁻¹.

Les résultats pour l'infrarouge moyen sont obtenus par transmission avec un Magna-IR760 Nicolet. Le séparateur est KBr, le détecteur DTGS-KBr et les résultats sont pris pour une fenêtre allant de 7400 à 350cm⁻¹. Un spectre est obtenu après avoir fait la moyenne de 100 analyses avec une résolution de 4cm⁻¹.

Des pastilles (1mg d'échantillon pour 150mg de KBr) ont été réalisées et compactées sous une presse pour l'infrarouge moyen pour l'ensemble de nos échantillons. Les pastilles sont ensuite mises à sécher une nuit à l'étuve à 105°C afin d'éliminer l'eau car le KBr constituant les pastilles absorbe très vite celle-ci.

Dans un second temps, les échantillons de la fraction 0-15 µm sont passés à l'infrarouge proche. Au niveau de la préparation il suffit juste de disposer un peu de l'échantillon dans un petit pot.

2. Résultats/Interprétations

L'ensemble des spectres a été traité sous OMNIC. Les spectres pour l'infrarouge proche (Annexe XXI) ont été séparés en deux graphiques afin que l'indexation des bandes soit plus lisible (figures 28-29).

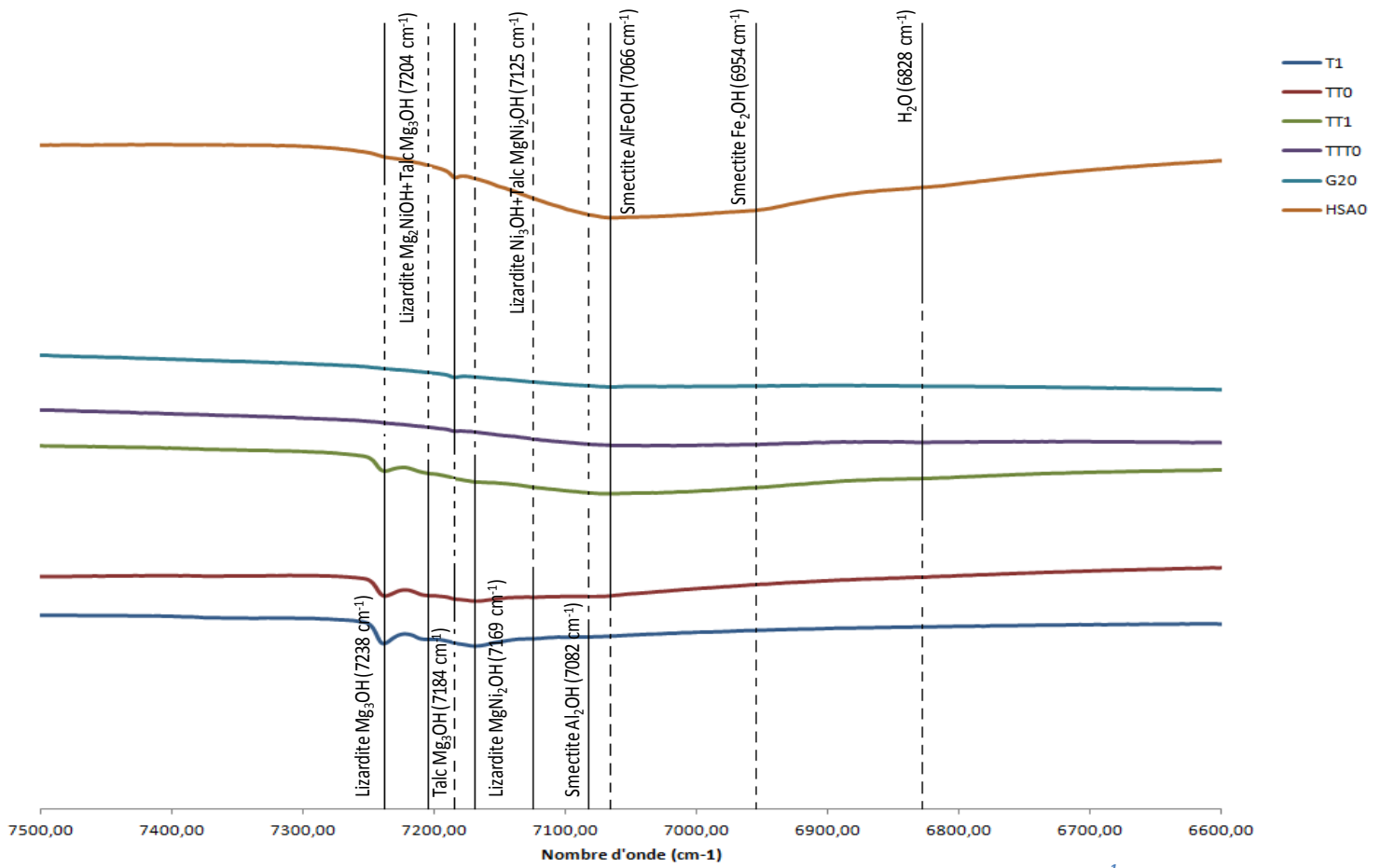


Figure 29 : Spectres de l'infrarouge proche pour l'ensemble des échantillons (7500 à 6600 cm^{-1})

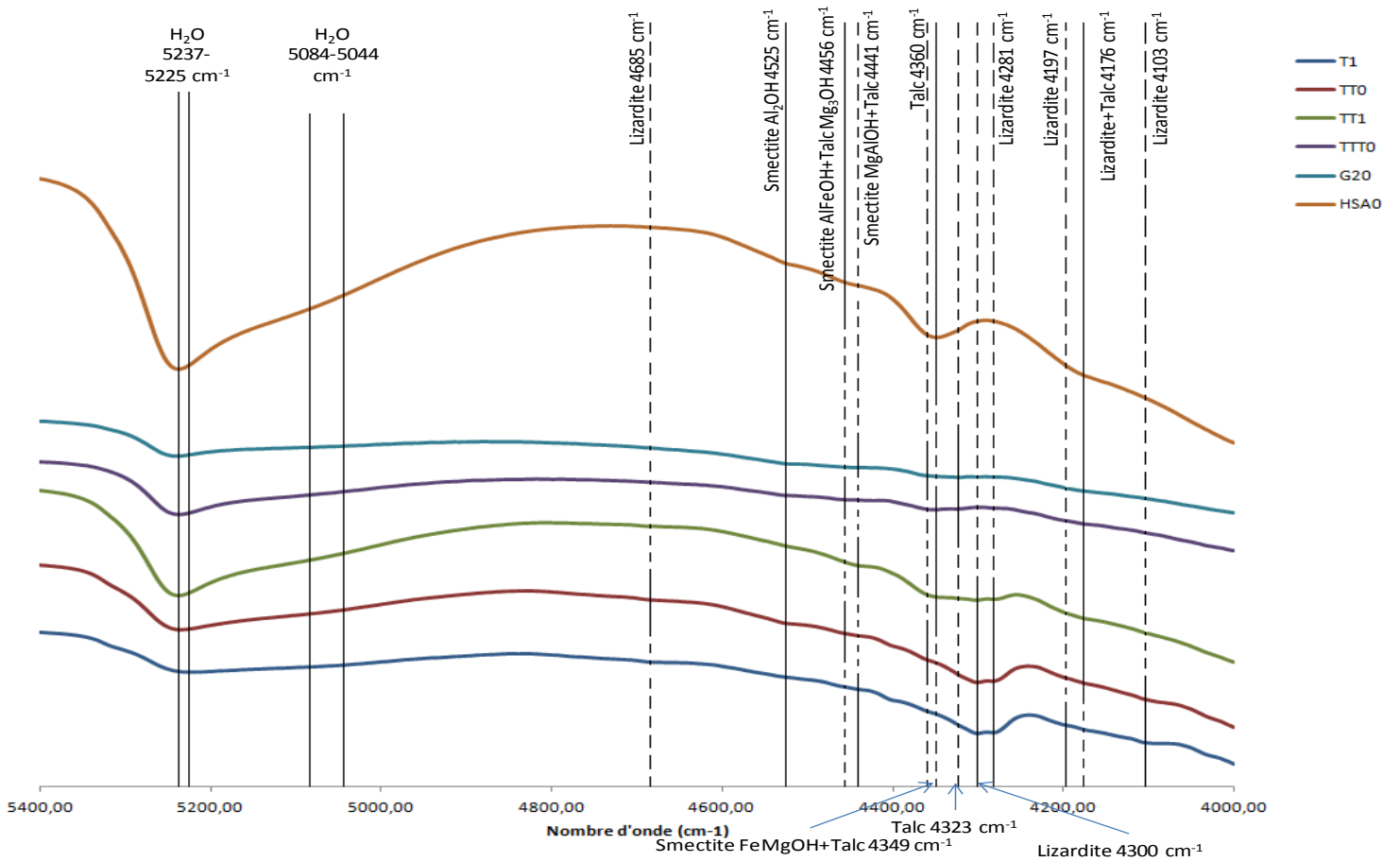


Figure 28 : Spectres de l'infrarouge proche pour l'ensemble des échantillons (5400 à 4000 cm^{-1})

L'étude des spectres de l'infrarouge proche montre la présence de serpentine pour les échantillons T1, TT0, TT1 et HSA0. L'échantillon HSA0 présente seulement une serpentine purement magnésienne (bande Mg_3OH), qui correspond à la lizardite. Tandis que T1, TT0 et TT1 sont constitués d'une série évoluant d'un pôle magnésien (lizardite : $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$) à un pôle nickélifère (népouite : $Ni_3Si_2O_5(OH)_4$) : Mg_3OH , Mg_2NiOH , $MgNi_2OH$ et Ni_3OH . Il faut préciser que TT1 ne possède pas le pôle exclusivement nickélifère de la série.

Les échantillons possèdent aussi du talc. Celui-ci serait surtout magnésien (bande Mg_3OH). On voit pour les échantillons T1 et TT0 qu'il présente aussi du Ni (bande $MgNi_2OH$).

Pour ce qui est des smectites, elles sont présentes dans tous les échantillons. Cela se voit au niveau des spectres de l'infrarouge grâce à la bande d'eau asymétrique (vers $5237-5225\text{ cm}^{-1}$) caractéristique de la smectite. On observe une smectite principalement dioctaédrique présentant des substitutions octaédriques qui sont : Fe^{3+} , Mg. On note que l'échantillon HSA0, le plus altéré, à un pôle purement ferrique, qui correspond à la nontronite $((Si_{4-x}Al_x)Fe^{III}_2O_{10}(OH)_2(Ca,Na,K)_x)$.

En résumé, le nickel est uniquement contenu dans les serpentines et le talc. Au contraire, il ne se retrouve pas dans les smectites.

Les spectres pour l'infrarouge moyen (Annexe XXII) n'ont pas encore été analysés.

F. Données BET

1. Méthode

Des mesures de surface spécifique ont été réalisées par la méthode BET. Ainsi, la surface spécifique d'une poudre est estimée à partir de la quantité d'azote adsorbée, après formation d'une couche mono moléculaire sur la surface, en relation avec sa pression à la température d'ébullition de l'azote liquide et sous une pression atmosphérique normale.

On réalise donc l'adsorption de l'azote à sa température d'ébullition par augmentation progressive de sa pression relative au dessus d'une surface propre et déshydratée. En faisant l'hypothèse d'une adsorption multicouches et d'un encombrement de la molécule d'azote, la quantité adsorbée à la première couche permet de calculer la surface spécifique du produit.

2. Résultats/Interprétations

Les résultats obtenus sont les suivants :

- T1 : 105 m²/g
- TT0 : 122 m²/g
- TT1 : 128 m²/g
- TTT0 : 130 m²/g
- G20 : 99 m²/g
- HSA0 : 136 m²/g

La première constatation est que les valeurs de TT1, TTT0 et HSA0 sont plus fortes que celles de T1 et TT0. En effet, les échantillons plus altérés possèdent des smectites ce qui explique des surfaces spécifiques plus grandes. Au contraire, T1 et TT0 sont surtout chargés en serpentine et très peu en smectites, cela explique leurs valeurs plus faibles.

Pour finir, la valeur de G20 est très faible, alors qu'on pouvait s'attendre à une valeur de l'ordre de 130 m²/g comme les autres échantillons plus altérés. Celle de TT0 est un peu forte par rapport à ce que l'on pouvait attendre : aux alentours de 105m²/g (comme T1 qui est un échantillon du même type).

Les résultats pour TT0 et G20 étant un peu difficiles à expliquer, le calcul de la surface totale va être effectué pour nos échantillons par la méthode EGME. Cette méthode consiste à prendre environ 0,5g d'échantillon sec (ici <2μm Ca). Les échantillons sont mis dans des capsules et placés à l'étuve à 105°C pendant 5 jours. Ensuite, ils sont récupérés et placés 2 heures dans une cloche à (P₂O₅) afin de capter les derniers résidus d'eau. Ils sont ensuite pesés et pour finir placés dans une cloche à EGME pendant 2 semaines. Après quoi ils seront repesés et il sera possible d'en déduire la surface totale.

G. Analyse thermique différentielle et thermogravimétrie

1. Matériel et Méthode

L'analyse Thermique Différentielle (ATD) est une méthode consistant à suivre l'évolution de la différence de température entre l'échantillon étudié et un corps témoin inerte thermiquement, dit de référence. L'Analyse Thermogravimétrie (ATG) est elle une technique d'analyse thermique qui consiste à mesurer la variation de masse de l'échantillon en fonction de la température.

1. L'échantillon et la référence sont soumis à la montée en température
2. Quand l'échantillon subit un changement de phase, sa réponse en température va varier par rapport à la référence.
3. Le thermocouple va mesurer cette variation et aussi celle de la masse d'échantillon.
4. Le type de réaction (exo ou endothermique) va produire un pic.

Les résultats sont acquis avec un appareil SDT 600 Thermal Analysis de 25 à 1000°C sous air avec des creusets en platine. Les résultats de l'ensemble des échantillons sont présentés individuellement de l'annexe XV à XX.

2. Résultats/Interprétations

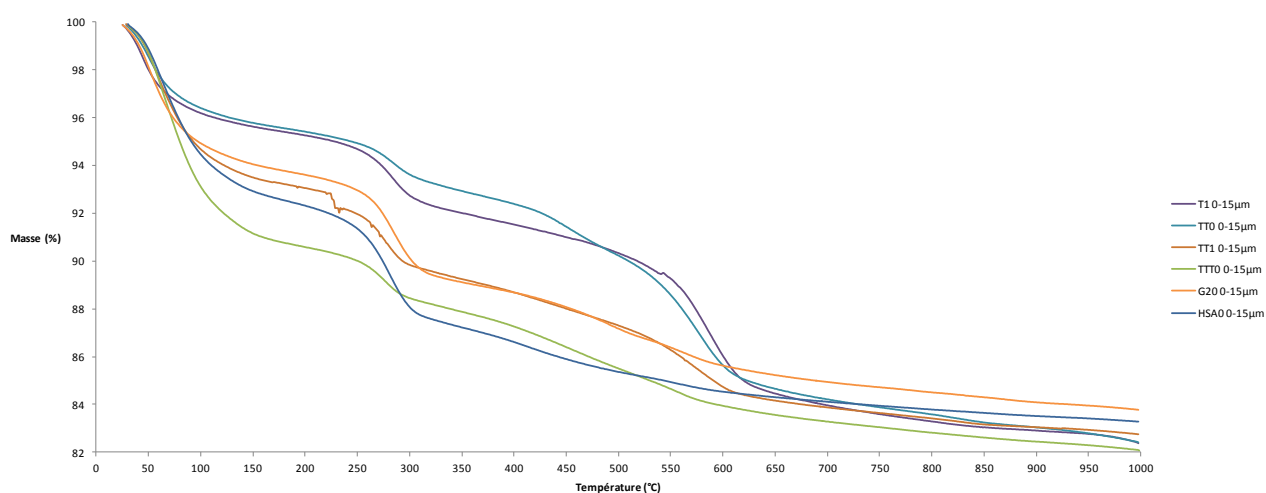


Figure 30 : Données de l'Analyse ThermoGravimétrique (ATG)

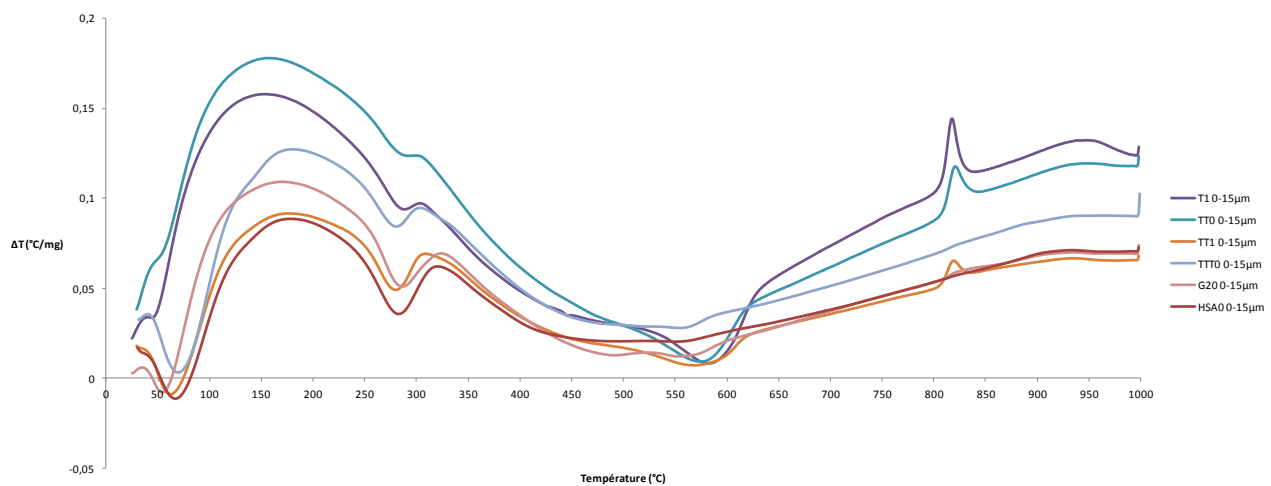


Figure 31 : Données de l'Analyse Thermique Différentielle (ATD)

Les données obtenues pour l'ATG nous permettent de tracer la perte de masse d'échantillon en fonction de la température (figure 30). On rappelle que l'expérience a été réalisée pour les fractions $<2\mu\text{m}$ saturées Ca.

Les données obtenues pour l'ATD nous permettent de visualiser les variations de température (figure 31).

A partir du graphique obtenu, il est possible de tirer les observations suivantes. Il y a une première perte de masse de 40 à 120°C correspondant à la déshydratation des smectites, qui est une réaction endothermique. Ainsi, on voit que les échantillons T1 et TT0, qui possèdent très peu de smectites, ont une perte de masse inférieure à 3%. Au contraire, les échantillons TT1, G20 et HSA0, qui eux possédait un pic significatif de smectites en DRX, ont une perte de masse de près de 6%. L'échantillon TTT0, qui présentait un pic très important de smectites en DRX, subit une perte de masse d'environ 8%.

La seconde perte de masse se situe vers 280°C. Elle correspond au départ des hydroxydes des oxyhydroxydes de fer et est une réaction endothermique. Entre 250 et 310°C, T1 et TT0 perdent un peu moins de 2% de leurs masses, TT1 et TTT0 environ 2%, G20 et HSA0 près de 4%. Ces résultats sont cohérents avec le fait que G20 et HSA0 sont les échantillons les plus altérés et donc comportent le plus d'oxydes de fer.

Entre 515 et 620°C, T1 et TT0 perdent 5% de leurs masses, TT1 environ 2% et TTT0, G20 et HSA0 environ 1%. Cette zone correspond au départ des hydroxydes des serpentines. C'est une réaction endothermique. T1 et TT0 présentaient un pic important de serpentine au DRX, TT1 un pic

intermédiaire et les autres échantillons un pic très faible. Les résultats sont donc en concordance. A noter aussi que la courbe de T1 est un peu décalée vers des températures plus élevées. Cela peut s'expliquer par le fait que les serpentines de T1 sont mieux cristallisées que celles de TT0. Cet échantillon possède également des pics légèrement plus étroits en DRX. C'est aussi logique dans le sens où TT0 est plus altéré que T1.

La dernière variation se situe à 820°C et est uniquement présente pour T1, TT0 et TT1, mais en moins prononcée. Cette réaction exothermique correspond à la cristallisation de forstérite.

L'ensemble des données ATD-ATG concorde bien avec ce qui a été vu précédemment. On retrouve toujours trois grands types d'échantillons : T1, TT0 les moins altérés ; TT1 qui est intermédiaire et enfin TTT0, G20 et HSA0 qui ont subi plus d'altération. L'ensemble des résultats montrent donc la contribution des oxyhydroxydes de fer, des smectites et des serpentines.

H. Interprétation générale

L'ensemble des données qu'il a été possible de récolter des échantillons a permis de faire ressortir la constatation suivante : il y a une altération croissante $T1 < TT0 < TT1 < TTT0 < G20 < HSA0$. Cela correspond à l'organisation verticale du profil.

Ces résultats DRX nous ont permis de caractériser plus en détails les échantillons, en effet dans ceux-ci il a été possible de retrouver notamment : de la serpentine, smectite, talc, chlorite, kaolinite, goéthite, sidérite, quartz. Les saturations successives Ca, Ca-K, Ca-K-Ca ont permis de mettre en évidence que l'ensemble des échantillons comportaient des smectites basses charges.

Les données granulométriques montrent qu'il y a deux populations bien distinctes pour les fractions très fines (0-15 µm). On peut dire que la première population, de taille plus petite (0,6µm), peut correspondre aux éléments néoformés (smectites, goéthite). Celle de taille plus importante (6µm) correspondrait aux éléments résiduels : serpentine, talc, chlorite.

Les données obtenues par DRX et celles par l'ATD-ATG permettent de mettre en évidence 3 grands types d'échantillons.

- Le premier type correspond à T1 et TT0, qui coïncident au début d'altération, ils possèdent un pic important de lizardite en DRX et très peu de smectite et de talc ;

- le second type d'échantillon contient TTT0, G20 et HSA0, qui ont une altération plus poussée. Ils possèdent un pic beaucoup plus faible de serpentine et un très important de smectite. Il a été recensé aussi de la chlorite, de la kaolinite et un pic plus fort de talc ;
- le dernier type d'échantillon est représenté par TT1 qui possède des caractéristiques des deux premiers groupes. En effet, il a un pic moyen de serpentine, un important de smectite et un peu de talc, chlorite et kaolinite. Cet échantillon peut être qualifié d'intermédiaire.

D'une manière générale l'altération conduit à une diminution de la serpentine, qui était très abondante dans T1 et TT0 et au contraire à une augmentation de la smectite et de la goethite. Il y a aussi l'apparition d'un pic de kaolinite à partir de TT1 qui a tendance à augmenter avec l'altération. L'augmentation du pic de chlorite et de talc, qui sont des éléments résiduels, peut être attribuée à une accumulation relative.

La DRX montre également que la serpentine, la chlorite, le talc, la sidérite et le quartz sont contenus principalement dans les fractions grossières, tandis que la smectite et la goethite dans les fractions fines. Grâce au tableau d'analyse chimique, il a été possible de voir que le nickel était surtout concentré dans les fractions fines. Ainsi il serait surtout concentré dans les phyllosilicates et les oxydes de fer. Les données de l'infrarouge montrent également une partition des éléments au cours de l'altération. La serpentine et le talc contiennent du nickel alors que les smectites n'en contiennent apparemment pas. Les différentes analyses sur les smectites obtenues permettent de dire qu'il s'agirait de smectite dioctaédrique et plus précisément de nontronite $(\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x)\text{Fe}^{\text{III}}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{Ca,Na,K})_x$. Ceci doit être complété par des DRX sur poudre (060) sur la fraction fine ($<0,1\mu\text{m}$) qui vient d'être obtenue et des analyses chimiques. On peut supposer que le nickel est dans les oxydes de fer.

Enfin en recoupant les observations faites sur le tableau d'analyses chimiques et la DRX, il est possible de tirer plusieurs observations. Tout d'abord, il avait été fait la remarque que le pourcentage de Fe_2O_3 était fort pour sa position dans le profil d'altération et aussi très fort dans la fraction grossière contrairement aux autres échantillons. Cela peut s'expliquer par la présence de sidérite qui est un carbonate de fer. La sidérite étant contenue principalement dans les fractions grossières, cela peut expliquer le pourcentage important dans la fraction grossière. Au niveau du pourcentage d' Al_2O_3 , on avait vu que celui-ci était faible dans T1 et TT0 mais augmentait dans les échantillons suivants. Cela peut être expliqué par la présence de kaolinite dans ces échantillons. De plus, il avait été noté que l'échantillon TTT0 avait un pourcentage bien plus fort que les autres, cela est logique car nous avons pu voir que celui-ci avait un pic plus important de kaolinite.

Les problèmes de floculation/défloculation abordés en introduction n'ont pu totalement être abordés. Les caractérisations des propriétés de surface sont en cours :

- surface totale EGME ;
- la zétamétrie a été essayée mais n'a pas été concluante à cause de la sédimentation des particules. Il est envisagé de le faire avec des conditions optimisées ;
- des titrages potentiométriques sont également envisageables pour les charges de surface.

Le problème peut être cependant lié aux propriétés des échantillons qui sont riches en particules fines ($<0,5\mu\text{m}$) : riches en minéraux argileux 1/1 (Fe, Mg, Ni) et riches en smectites basses charges et oxyhydroxydes de fer pour les plus altérés.

Toutes ces caractéristiques ne sont pas favorables à la dispersion dans l'eau (pas de point isoélectrique bien marqué).

Conclusion

Un des plus grands gisements nickélifères se situe en Nouvelle-Calédonie. Ceux-ci se forment sous un climat tropical où les eaux de pluies sont chaudes et abondantes. Ces eaux font alors subir une hydrolyse intense aux minéraux présents dans les roches ultrabasiques (olivine, pyroxènes). Lors du processus d'altération de la roche mère, la silice et le magnésium sont expulsés des silicates qui les contiennent et exportées hors des profils d'altération. Les saprolites peuvent contenir au maximum 6 à 7% de nickel. Cette altération supergène a donc la caractéristique de permettre la ségrégation des éléments chimiques composant la roche originelle. C'est pourquoi les saprolites ont la particularité d'être le plus souvent enrichies en nickel.

Pour valoriser au mieux les échantillons qui vont être traités dans les laveries, il est donc important de caractériser minéralogiquement et chimiquement ces échantillons. Au cours de ces chapitres, il a donc été question d'expliquer le processus de formation des profils latéritiques nickélifères, puis ensuite de mettre en avant plusieurs résultats d'analyses chimiques et minéralogiques : DRX de poudres et lames orientées, BET, ATD-ATG, infrarouge et granulométrie laser.

La DRX a permis de caractériser plus en détails les échantillons, en effet dans ceux-ci il a été possible de retrouver notamment : de la serpentine, smectite, talc, chlorite, kaolinite, goethite, sidérite, quartz. Il y a 3 types différents d'échantillons. Un type avec un fort taux de smectites et peu de serpentines, un second avec beaucoup de serpentines et peu de smectites et enfin un dernier qui est intermédiaire entre les deux autres. Les différentes analyses sur les smectites obtenues permettent de dire qu'il s'agirait de smectites dioctaédriques basses charges et plus précisément de nontronites.

D'une manière générale l'altération conduit à une diminution de la serpentine, qui était très abondante dans T1 et TT0 et au contraire à une augmentation de la smectite et de la goethite.

Enfin, l'ensemble des résultats a permis de dire que le nickel était sans doute localisé dans les serpentines, les talcs et les oxydes de fer.

Bibliographie

- Avias, J. (1978). L'évolution des idées et des connaissances sur la genèse et sur la nature des minerais de nickel, en particulier latéritiques, de leur découverte à nos jours. *Bulletin B.R.G.M. (deuxième série), II (3)*. Montpellier: CERGH.
- Avias, J. (1969). Métallogénie. *C. R. Acad. Sc. Paris*, , 268 . Montpellier.
- Besset, F. (1980). *Localisations et répartitions successives du nickel au cours de l'altération latéritique des péridotites de Nouvelle-Calédonie* (Vol. XV). Montpellier: Mémoire Centres d'Etudes et de Recherches Géologiques et Hydrologiques.
- Brand, N. (1998). Exploration model : The Cawse shear-controlled Ni-oxide and associated Mn-Co-Ni deposit, Western Australia. *Nickel laterites : classification and features*, 17 (4) . AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics.
- Cannat, M., & Silantiev, S. (2007, Avril 27). *Réaction eau de mer - manteau : formation de la serpentine*. Consulté le Décembre 10, 2011, sur Ifremer: <http://www.ifremer.fr/serpentine/fiches/fiche5.htm>
- Gaudin, A. (2002). *Cristallochimie des smectites du gisement latéritique nickélifère de Murrin Murrin (Australie Occidentale)*. Aix-Marseille: Université de Droit, d'Economie et des Sciences.
- Géologie des argiles*. (s.d.). Consulté le Mai 15, 2012, sur Argiles, Géochimie et Environnement sédimentaire : http://www.ages.ulg.ac.be/cours/argiles/argiles-chap_2.pdf
- Geowiki. (2011, Mars 29). *Garniérite*. Consulté le Décembre 20, 2011, sur Geowiki: <http://www.geowiki.fr/index.php?title=Garni%C3%A9rite>
- Gineste, C. (2009). *Nickel*. Consulté le Novembre 29, 2011, sur PangeaMinerals.org: http://www.pangeaminerals.org/nllecaledonie/nc_Ni.html
- Moutte, J. (1979). *Le massif de Tiébaghi, Nouvelle Calédonie, et ses gîtes de chromite* . Consulté le Mai 15, 2012, sur École Nationale Supérieure des Mines de St-Étienne: <http://www.emse.fr/~moutte/frulmafi/frthese/index.htm#top>
- Pelletier, B. G. (2003). Le bulletin de l'Union Française des Géologues. *Les minerais de nickel de Nouvelle-Calédonie* . Nouméa: Département Géologie – Sondages, Société Le Nickel.
- QuestMachine. (2010, Décembre 15). *Garniérite*. Consulté le Décembre 15, 2011, sur QuestMachine: <http://www.questmachine.org/article/Garni%C3%A9rite>
- Sciences au Sud. (mai/juin 2003). Nouvelle-Calédonie : Mine et environnement. (20).
- Segalen, P. (1993). Le processus de ferrallitisation et ses limites. *Services Scientifiques Centraux* .
- Société Le Nickel SLN. (s.d.). Consulté le Mai 5, 2012, sur Société Le Nickel - Home: <http://www.sln.nc/>
- Trescases, J.-J. (1975). *L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale : formation des gisements nickélifères de Nouvelle-Calédonie* (Vol. 78). Paris: Mémoire Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.
- Villedieu, F. (s.d.). *La Garniérite de Nouvelle-Calédonie*. Consulté le Décembre 10, 2011, sur Curiosités ou Curios Site de Nouvelle Calédonie: <http://membres.multimania.fr/curiosnc/Curiosite3.html>

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier mon maître de stage Laurent Caner qui m'a permis d'effectuer mon stage au sein du laboratoire Hydrasa. Un grand merci pour sa disponibilité, ses conseils et sa bonne humeur tout au long de ce stage.

Je tiens à remercier Nathalie Dager et Claude Fontaine pour leurs aides, leurs recommandations et les réponses aux questions que j'ai pu me poser lors des manipulations. Aude Naveau pour son temps pris à m'expliquer la zétamétrie et pour tous les problèmes rencontrés avec mes échantillons.

Merci à Thierry pour les longs moments passés sur la zétamétrie.

Je souhaite remercier Fabien de sa grande aide pour l'infrarouge. Valentin pour son aide et sa disponibilité dans le laboratoire.

J'aimerais aussi remercier Julien et Raymond pour m'avoir bien fait rire. Et enfin Marie pour son aide, dès que j'en avais besoin, et les relectures de ce mémoire.

Annexes

Résumé

Un des plus grands gisements nickélifères se situe en Nouvelle-Calédonie. C'est à partir de l'altération, causée par les eaux de pluies abondantes du climat tropical, des péridotites que se forment les minerais de nickel. Cela permet la ségrégation des éléments chimiques composant la roche originelle et donne des saprolites souvent enrichies en nickel. Les échantillons étudiés proviennent du centre minier de Tiébaghi, sur la commune de Koumac. Afin qu'ils soient valorisés au mieux, une caractérisation chimique et minéralogique est nécessaire.

La DRX a montré que les échantillons contenaient : de la serpentine, smectite, talc chlorite, kaolinite, goethite, sidérite et quartz. On y retrouve 3 types différents d'échantillons : un type avec un fort taux de smectites et peu de serpentines, un second avec beaucoup de serpentines et peu de smectites et enfin un dernier qui est intermédiaire. D'une manière générale l'altération conduit à une diminution de la serpentine, qui était très abondante et au contraire à une augmentation de la smectite et de la goethite. Les différentes analyses sur les smectites permettent de dire qu'il s'agirait de smectites dioctaédriques basses charges (et plus précisément de nontronites). Enfin, l'ensemble des résultats a permis de dire que le nickel était sans doute localisé dans les serpentines, les talcs et les oxydes de fer. Des titrages potentiométriques sont envisagés pour caractériser les charges de surface.

Abstract

One of the biggest nickel deposits is located in New Caledonia. It is from the weathering, caused by abundant rainwater of the tropical climate, of peridotites that the nickel ores are forming. This allows the segregation of chemical elements composing the original rock and gives saprolite often enriched in nickel. The samples studied come from the mining center of Tiébaghi, near Koumac. To be valued at best, a chemical and mineralogical characterization is necessary.

XRD showed that the samples contained: serpentine, smectite, chlorite, talc, kaolinite, goethite, siderite and quartz. It includes three different types of samples: one type with a high rate of smectites and few serpentines, a second with many serpentines and few smectites and to finish an intermediate. In general the alteration results in a decrease of serpentine, which was very abundant and rather to an increase of smectite and goethite. The various analyzes of smectites can say that this would be dioctahedral smectites low charges and more specifically of nontronite. Finally, all the results allowed to say that nickel was probably located in the serpentine, talc and iron oxides. Potentiometric titrations are considered to characterize the charges of surface.