



**HAL**  
open science

## Géochimie et minéralogie du scandium dans les latérites : rapport scientifique final

Yoram Teitler, Michel Cathelineau, Manuel Munoz, J. P. Ambrosi, Marc Ulrich

### ► To cite this version:

Yoram Teitler, Michel Cathelineau, Manuel Munoz, J. P. Ambrosi, Marc Ulrich. Géochimie et minéralogie du scandium dans les latérites : rapport scientifique final. [Rapport de recherche] Programme Scandium. Tome Nickel et Technologie, CNRT Nickel et son environnement. 2018, 114 p. ird-02160801

**HAL Id: ird-02160801**

**<https://ird.hal.science/ird-02160801v1>**

Submitted on 20 Jun 2019

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

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



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

CNRT "Nickel et son environnement"

Tome Nickel et Technologie

R a p p o r t   s c i e n t i f i q u e

Edition 2018

## LA RESSOURCE EN SCANDIUM

Géochimie et minéralogie  
du scandium dans les latérites





# Rapport Scientifique 2018

## GÉOCHIMIE ET MINÉRALOGIE DU SCANDIUM DANS LES LATÉRITES RAPPORT FINAL



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

Juillet 2018





# GÉOCHIMIE ET MINÉRALOGIE DU SCANDIUM DANS LES LATÉRITES

Rapport final

Juillet 2018

Ouvrage collectif coordonné par Yoram TEITLER et Michel CATHELINÉAU (Laboratoire GéoRessources, Université de Lorraine)

Pour le consortium Université de Lorraine laboratoire-Géoressources – CEREGE – Géosciences Montpellier - IPGS-EOST – SGNC et BRGM

AUTEURS :

Yoram TEITLER (GéoRessources)

Michel CATHELINÉAU (GéoRessources)

Manuel MUNOZ (Géosciences Montpellier)

Jean-Paul AMBROSI (CEREGE)

Marc ULRICH (IPGS - EOST)

RÉVISION DU DOCUMENT

Réf.	CSF n° CSF N°8PS2013-CNRT.CNRS/Scandium du 20/05/2015 Scandium et terres rares			
Version	Date	Rédacteur(s)	Qualité du rédacteur(s)	Révision pour CNRT
V1	16 Juillet /2018	Yoram Teitler (GéoRessources) Michel Cathelineau GéoRessources)	Rédacteur principal Coordinateur du Projet	F. Bailly CNRT

CITATION DU DOCUMENT

**Mots clés** : scandium, latérite, Ni-latérite, Nouvelle-Calédonie, goethite.

**En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :**

Teitler, Y., Cathelineau, M., Ulrich, M, Ambrosi, J.P., M. Munoz (2018) – *Géochimie et minéralogie du scandium dans les latérites - Rapport final*. Programme « scandium ». CNRT « Nickel & son environnement. 118 pages.

## SOMMAIRE

<b>1. SOMMAIRE EXÉCUTIF</b> .....	<b>12</b>
1.1. CONTEXTE ECONOMIQUE ET ENJEUX .....	12
1.2. OBJECTIFS GÉNÉRAUX DU PROJET ET MÉTHODOLOGIE .....	13
1.3. STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE.....	14
1.4. FERTILITÉ DU PROTOLITHE .....	14
1.5. ENRICHISSEMENTS EN SC .....	15
1.6. SPÉCIATION DU SC DANS LES ROCHES ET MINÉRAUX.....	15
1.6.1. <i>Apport des extractions chimiques séquentielles</i> .....	15
1.6.2. <i>Spéciation du Sc : Distribution du Sc et identification des phases porteuses par spectroscopie d'absorption des rayons X</i> .....	16
1.7. TESTS D'ANALYSE PAR XRF PORTABLE .....	17
1.8. MODÉLISATION DE LA RESSOURCE SC À L'ÉCHELLE DU GISEMENT .....	17
1.9. IMPLICATIONS POUR L'EXPLORATION.....	18
1.10. IMPLICATIONS POUR LA VALORISATION DES MINÉRAIS.....	19
<b>2. INTRODUCTION</b> .....	<b>20</b>
2.1. CONTEXTE ÉCONOMIQUE ET ENJEUX .....	20
2.2. OBJECTIFS GÉNÉRAUX DU PROJET ET MÉTHODOLOGIE .....	23
2.3. STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE.....	24
2.4. MÉTHODOLOGIE .....	26
<b>3. DÉROULEMENT DU PROJET</b> .....	<b>28</b>
<b>4. FACTEURS ÉTUDIÉS</b> .....	<b>29</b>
4.1. FACTEUR 1 : VARIATIONS LITHOLOGIQUES.....	29
4.2. FACTEUR 2 : IMPACT DU PROCESSUS DE LATÉRITISATION SUR LES CONCENTRATIONS .....	30
4.3. FACTEUR 3 : IMPACT DU PROCESSUS DE LATÉRITISATION SUR L'ENRICHISSEMENT EN MÉTAUX.....	31
<b>5. SITES ÉCHANTILLONNÉS</b> .....	<b>32</b>
5.1. PROFILS LATÉRITIQUES SUR GISEMENTS DE PLATEAU .....	32
5.1.1. <i>Massif de Tiébaghi (gisements de plateau continu)</i> .....	32
5.1.2. <i>Massifs de Koniambo et Nakéty (gisements de type plateau disséqué à harzburgite dominante)</i> .....	34
5.2. PROFILS LATÉRITIQUES SUR GISEMENTS DE TYPE PENTE.....	34
5.3. PROFILS LATÉRITIQUES DÉVELOPPÉS SUR FILONS INTRUSIFS .....	36
5.3.1. <i>Massifs de N'Go et Nakéty : amphibolites/pyroxénites et gabbros</i> .....	36
5.3.2. <i>Massifs de Koniambo et Tiébaghi : Gabbros saprolitisés encaissants de latérite jaune</i> ..	36
<b>6. PÉTROLOGIE DES LATÉRITES</b> .....	<b>38</b>
6.1. ROCHES SAINES .....	38
6.1.1. <i>Péridotites</i> .....	38
6.1.2. <i>Intrusifs magmatiques</i> .....	40
6.2. SÉQUENCES PARAGÉNÉTIQUES ASSOCIÉES À LA LATÉRITISATION .....	42
6.2.1. <i>Latérisation des péridotites</i> .....	42
6.2.2. <i>Latérisation des intrusifs</i> .....	44
<b>7. FERTILITÉ DU PROTOLITHE</b> .....	<b>46</b>
7.1. ROCHE TOTALE .....	46
7.1.1. <i>Péridotites</i> .....	46
7.1.2. <i>Intrusifs</i> .....	48
7.2. COMPOSITIONS MINÉRALES.....	49
7.2.1. <i>Péridotites</i> .....	49

7.2.2. Intrusifs.....	52
<b>8. ENRICHISSEMENTS EN SC, REE .....</b>	<b>53</b>
8.1. ROCHE TOTALE.....	53
8.1.1. Profils sur péridotites.....	53
8.1.2. Profils sur intrusifs.....	57
8.1.3. Synthèse et Corrélations élémentaires.....	60
8.2. COMPOSITIONS MINÉRALES.....	62
8.2.1. Analyses des teneurs en Sc (et autres éléments de transition) dans les (hydr)oxydes de fer par LA-ICP-MS : impact de la standardisation sur la fiabilité des mesures.....	62
8.2.2. Oxydes et oxyhydroxydes développés sur péridotite (LA-ICP-MS).....	65
8.2.3. Oxyhydroxydes développés sur intrusifs (microsonde wds).....	66
<b>9. SPÉCIATION DU SC DANS LES ROCHES ET MINÉRAUX : APPORT DES EXTRACTIONS SÉQUENTIELLES .....</b>	<b>69</b>
<b>10. SPÉCIATION DU SC DANS LES ROCHES ET MINÉRAUX : DISTRIBUTION DU SC ET IDENTIFICATION DES PHASES PORTEUSES PAR SPECTROSCOPIE D'ABSORPTION DES RAYONS X ....</b>	<b>76</b>
10.1. ÉTUDE DE L'INCORPORATION DU SC DANS LA STRUCTURE DE LA GOETHITE .....	76
10.2. DISTRIBUTION DU SC ET SPÉCIATION IN-SITU : EXEMPLE D'ANALYSE DE PISOLITHES PRÉLEVÉS SUR LE MASSIF DE KONIAMBO .....	80
10.3. COMPORTEMENT ET SPÉCIATION DU SC LE LONG DE PROFILS LATÉRITIQUES : EXEMPLE D'UN PROFIL ÉCHANTILLONNÉ SUR LE MASSIF DE TIÉBAGHI.....	82
<b>11. TESTS D'ANALYSE PAR XRF PORTABLE .....</b>	<b>85</b>
11.1. OBJECTIFS ET STRATÉGIE .....	85
11.2. RÉSULTATS.....	86
11.2.1. Mode de préparation .....	86
11.2.2. Analyse des éléments majeurs et traces d'intérêt.....	86
11.2.3. Filtres analytiques et durée d'acquisition.....	87
11.2.4. Analyse du Sc : programme in-house NitON vs. routine de déconvolution.....	89
11.2.5. Diminution de la dispersion par répétition des mesures.....	91
<b>12. MODÉLISATION DE LA RESSOURCE SC À L'ÉCHELLE DES GISEMENTS .....</b>	<b>93</b>
12.1. DÉTERMINATION DU PROXY AL-SC À L'ÉCHELLE DES CHANTIERS.....	93
12.2. ESTIMATION DES TENEURS, TONNAGES ET DE LA DISTRIBUTION EN SC.....	96
12.2.1. Chantiers Ma-Oui et Mimine (Koniambo).....	96
12.2.2. Chantier East Alpha (Tiébaghi).....	102
<b>13. IMPLICATIONS POUR L'EXPLORATION ET LA VALORISATION DES MINÉRAIS.....</b>	<b>108</b>
13.1. IMPLICATIONS POUR L'EXPLORATION .....	108
13.2. IMPLICATIONS POUR LA VALORISATION.....	109
<b>14. CONCLUSIONS.....</b>	<b>110</b>
<b>15. RÉFÉRENCES.....</b>	<b>112</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Prédiction d'évolution de la demande mondiale en scandium. Kaiser, 2014. ....	21
Figure 2 : Principales questions concernant le comportement du scandium dans les latérites. ....	24
Figure 3 : Carte géologique de Grande Terre (Nouvelle-Calédonie) et localisation des cinq districts miniers étudiés. (carte d'après Maurizot & Vendé-Leclerc (2009)).....	25
Figure 4 : Schéma des différents objectifs analytiques poursuivis dans ce travail avec indication des méthodes utilisées. ....	27
Figure 5 : Les principales phases minérales des péridotites : dunite (olivine dominante) - harzburgite (olivine et orthopyroxène), lherzolite (olivine orthopyroxène et clinopyroxène).....	29
Figure 6 : Enrichissements secondaires liés à la latéritisation. ....	30
Figure 7 : Paramètres principaux contrôlant le développement des enrichissements en Sc. 31	
Figure 8 : Classification schématique des différents types de gisements latéritiques nickélicifères de Nouvelle-Calédonie. D'après Maurizot al. (in press). ....	32
Figure 9 : Profils latéritiques développés sur péridotite.....	33
Figure 10 : Représentation schématique des différents types de profils latéritiques étudiés. 35	
Figure 11 : Profils développés sur faciès intrusifs. ....	37
Figure 12 : Textures et assemblages minéraux des principaux faciès péridotitiques. ....	39
Figure 13 : Textures et assemblages minéraux des principaux faciès d'intrusifs. ....	41
Figure 14 : Microphotographies MEB de profils développés sur péridotite.....	43
Figure 15 : Évolution des assemblages minéraux le long d'un profil latéritique caractéristique développé sur harzburgite. ....	44
Figure 16 : Microphotographies MEB de profils développés sur intrusifs .....	45
Figure 17 : (A) Teneurs (roche totale) en Sc dans les différents protolithes péridotitiques et intrusifs. (B) Corrélations élémentaires observées dans les péridotites saines entre Sc, Al et V. (C) Corrélations élémentaires observées dans les intrusifs sains entre Sc, Ti et V. Les points de petite taille représentent les données acquises antérieurement à ce projet par Ulrich (2013).....	47
Figure 18 : Teneurs (roche totale) en REE dans les différents protolithes péridotitiques et intrusifs. 48	
Figure 19 : Teneurs (in-situ par analyse LA-ICP-MS) en Sc dans les différentes phases minérales constitutives des péridotites (forstérite, enstatite, lizardite, spinelle) et intrusifs	

(hornblende, orthopyroxène magmatique, olivine magmatique, plagioclases, magnétite).  
50

- Figure 20 : Corrélations élémentaires au sein des phases minérales constitutives (A-C) des péridotites saines (Sc-Al-V-Ti) et (D-F) des intrusifs sains (Sc-Fe-V-Ti).....51
- Figure 21 : Distribution des éléments majeurs et des métaux d'intérêt sur le profil PZ1B (Cap Bocage), développé sur dunite. ....54
- Figure 22 : Distribution des éléments majeurs et des métaux d'intérêt sur le profil OPB7 (Koniambo), développé sur harzburgite.....55
- Figure 23 : Distribution des éléments majeurs et des métaux d'intérêt sur le profil TIEA (Tiébaghi), développé sur lherzolite.....56
- Figure 24 : Distribution des éléments majeurs et métaux d'intérêt sur le profil NGPB (N'Go concession PB5, NMC), développé sur amphibolite et encaissant harzburgitique .....58
- Figure 25 : Distribution des éléments majeurs et des métaux d'intérêt sur le profil NGAD (N'Go mine Ada), développé sur microgabbro et encaissant dunitique ± harzburgitique.  
59
- Figure 26 : Distribution des éléments majeurs et des métaux d'intérêt sur le profil KNGA (Koniambo), développé sur gabbro et encaissant harzburgitique. ....59
- Figure 27 : Distribution des éléments majeurs et des métaux d'intérêt sur le profil TIAG (chantier Alpha Sud, Tiébaghi), développé sur gabbro et encaissant lherzolitique.....60
- Figure 28 : (A) Teneurs (roche totale) en Sc en fonction de Fe, Al, V au sein des profils développés sur péridotites. (B) Teneurs en Sc en fonction de Fe, Ti, V au sein des profils développés sur intrusifs. ....61
- Figure 29 : Comparaison entre les concentrations mesurées par microsonde électronique (EPMA) et par LA-ICP-MS en utilisant le NIST SRM 610 comme standard externe (standard interne : Fe).....62
- Figure 30 : Tests de reproductibilité sur le standard StdGoe1.1 pour une taille de spot de 44 µm (30 analyses) et 90 µm (30 analyses). Les barres d'erreur (pour l'essentiel inférieures à la taille du point) représentent l'écart-type sur les mesures ( $2\sigma$ ).....64
- Figure 31 : Analyse d'une pisolithe au LA-ICP-MS et comparaison des concentrations calculées à partir d'une standardisation au NIST SRM 610 et au StdGoe1.1. ....65
- Figure 32 : Teneurs in situ en Sc des oxydes et oxyhydroxydes développés sur péridotites (ex. du profil OPB7).....66
- Figure 33 : Teneurs en Sc en fonction de Fe, Al, Cr, V, Ni des goethites alumineuses au sein des profils NGPB et NGTR. ....67
- Figure 34 : Cartographie chimique par microsonde électronique (WDS) des teneurs en Si, Al, Ni, V et Sc sur un assemblage à Al-goethite (Go) – Gibbsite –Gi) – Kaolinite (Ka) au sein du profil NGPB (échantillon NGPB-09).....68

Figure 35 : Bilan des extractions séquentielles pour le silicium. (en gras les concentrations totales des échantillons).....	70
Figure 36 : Bilan des extractions séquentielles pour le magnésium. (en gras les concentrations totales des échantillons).....	70
Figure 37 : Bilan des extractions séquentielles pour le fer. (en gras les concentrations totales des échantillons).....	71
Figure 38 : Bilan des extractions séquentielles pour le manganèse. ( <i>en gras les concentrations totales des échantillons</i> ).....	71
Figure 39 : Bilan des extractions séquentielles pour l'aluminium. ( <i>en gras les concentrations totales des échantillons</i> ).....	72
Figure 40 : Bilan des extractions séquentielles pour le nickel. (en gras les concentrations totales des échantillons).....	72
Figure 41 : Bilan des extractions séquentielles pour le cobalt. (en gras les concentrations totales des échantillons).....	73
Figure 42 : Bilan des extractions séquentielles pour le scandium. ( <i>en gras les concentrations totales des échantillons</i> ).....	73
Figure 43 : Proportion de scandium extrait par les différents réactifs chimiques.....	74
Figure 44 : Proportion de nickel extrait par les différents réactifs chimiques.....	74
Figure 45 : Proportion de cobalt extrait par les différents réactifs chimiques.....	75
Figure 46 : Diffractogrammes de rayons X et évolution des paramètres a, b et c et du volume de maille des goethites dopées en Sc (0, 18, 30, 58, 80 et 100%mol de substitution).....	78
Figure 47 : Clichés de microscopie électronique à transmission pour les goethites #1 (a : 0% Sc), #7 (b : 30% Sc), #8 (c : 58% Sc) et #9 (d : 100% Sc). ( <i>réalisés par O. Grauby, CINAM Marseille, a, b, c et d sont à la même échelle</i> ).....	79
Figure 48 : A : Montage photographique au microscope optique en réflexion de pisolithes montés sur un plot époxy ( $\Phi=1''$ ) et polis.....	80
Figure 49 : A : Carte SXRF de répartition du Sc, Ca et Mg, dans un grain de pisolithe. B : Spectres $\mu$ -XANES enregistrés sur deux grains enrichis en Sc.....	81
Figure 50 : A : Exemple de cliché de diffraction et de raffinement Rietveld pour les échantillons prélevés en base et sommet de profil. ....	82
Figure 51 : A : Spectres XANES au seuil K du Sc pour les différents standards. B : Spectres XANES au seuil K du Sc pour les différents échantillons collectés le long du profil étudié. Les courbes rouges représentent le résultat des fits par combinaison linéaire pour chaque spectre. ....	83
Figure 52 : Évolution, de la base au sommet du profil d'altération du site EAST ALPHA (Tiébaghi) de la teneur en Sc en roche totale(gauche), l'abondance modale des	

principales phases minérales (milieu), et des différents modes d'incorporation du Sc (spéciation) en fonction de la minéralogie (droite).....	84
Figure 53 : Calibrations obtenues avec traitement par le programme in-house Niton pour le éléments majeurs (+V) d'intérêt.....	88
Figure 54 : Calibrations obtenues pour le Sc avec traitement par (A) programme in-house Niton et (B) routine de déconvolution développée au cours du projet. Détermination du rapport Ca/Sc maximum pour une mesure pertinente du Sc par (C) traitement via le programme in-house Niton et (D) via la routine de déconvolution.....	90
Figure 55 : Domaines d'applicabilité pour l'analyse du Sc par XRF portable NITON XL3T GOLDD+, en fonction de la teneur en Ca et en Sc et du type de traitement (programme in-house NITON vs. routine de déconvolution).....	91
Figure 56 : Évolution des écarts-types maximaux obtenus en fonction du nombre de mesures réalisées.....	92
Figure 57 : Localisation des profils/forages échantillonnés et nombre d'échantillons collectés sur les chantiers East Alpha (A) et Ma-Oui (B).....	94
Figure 58 : Corrélations obtenues entre Sc, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> et Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> sur les chantiers East Alpha (Tiébaghi), Ma-Oui (Koniambo) et sur la zone de Trazy (Koniambo).....	95
Figure 59 : Teneurs en SiO <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> et Ni en fonction des teneurs en Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> et Sc (Sc recalculé via la corrélation établie) des différents faciès d'altération du chantier Ma-Oui (données KNS).....	97
Figure 60 : Box-plots des teneurs en SiO <sub>2</sub> , MgO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ni (wt.%) et Sc (ppm, recalculé selon la corrélation établie) des différents faciès d'altération du le chantier Ma-Oui (données KNS).....	97
Figure 61 : Bloc-modèles des chantiers Ma-Oui et Mimine vus du dessus vers le NE et teneurs en Sc des blocs supérieurs.....	98
Figure 62 : Distribution des teneurs en Sc, Co, Ni sur deux coupes E-O dans la portion sud du chantier Ma-Oui.....	99
Figure 63 : Distribution des teneurs en Sc, Co, Ni sur une coupe E-O dans la portion centrale du chantier Mimine.....	100
Figure 64 : Estimation sur la portion latéritique des blocs altérés du chantier Ma-Oui des tonnages de minerai (sec et humide) et des teneurs moyennes en Sc (ppm), Ni (wt.%) et Co (wt.%) en fonction de la teneur de coupure sur le Sc.....	101
Figure 65 : Estimation sur la portion latéritique des blocs altérés du chantier Mimine des tonnages de minerai (sec et humide) et des teneurs moyennes en Sc (ppm), Ni (wt.%) et Co (wt.%) en fonction de la teneur de coupure sur le Sc.....	101
Figure 66 : Teneurs en SiO <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> et Ni en fonction des teneurs en Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> et Sc (Sc recalculé via la corrélation établie) des différents faciès d'altération du chantier Ma-Oui (données KNS).....	103

Figure 67 : Box-plots des teneurs en SiO <sub>2</sub> , MgO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ni (wt.%) et Sc (ppm, recalculé selon la corrélation établie) des différents faciès d'altération du le chantier Ma-Oui (données KNS).....	103
Figure 68 : Distribution schématique des faciès d'altération et des DTM à disposition (pour l'interrogation du bloc-modèle) sur le chantier East Alpha. ....	104
Figure 69 : Bloc-modèle et teneurs en Sc des blocs supérieurs sur le chantier East Alpha (vue du dessus en plan, et vue inclinée orientée vers l'ouest. ....	105
Figure 70 : Haut : distribution des blocs à fortes teneurs en Sc (100-125 ppm) formant une couverture superficielle. Bas : distribution des blocs riches en Al (en dehors de la corrélation Al-Sc) et correspondant notamment à la présence d'un filon de gabbro identifié sur le terrain. ....	105
Figure 71 : Chantier East Alpha ; estimation des tonnages de minerai (sec et humide) et des teneurs moyennes en Sc (ppm), Ni (wt.%) et Co (wt.%) en fonction de la teneur de coupure sur le Sc, au sein de la portion latéritique des blocs situés dans la zone des latérites analysées.....	106

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Ressources et états d'avancement des principaux projets australiens d'exploitation du scandium .....	22
Tableau 2 Abondance relative du Fe et du Sc mesurée par une analyse totale (ICP-AES) et locale (EDX/MET). ( <i>Incertitudes sur la mesure des éléments Fe/Sc (ICP-AES), écart-type sur 10 mesures (EDX/MET)</i> ).....	77

## LISTE DES SIGLES & ABREVIATIONS

<b>CNRT</b>	Centre National de Recherche Technologique
<b>KNS</b>	Koniambo Nickel SAS
<b>SMT</b>	Société des Mines de la Tontouta
<b>SLN</b>	Société Le Nickel
<b>MKM</b>	Maï Kouaoua Mines
<b>NMC</b>	Nickel Mining Company
<b>CRPG</b>	Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques
<b>MEB</b>	Microscope Électronique à Balayage
<b>DRX</b>	Diffraction des Rayons X
<b>LA-ICP-MS</b>	Laser Ablation – Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry
<b>XRF</b>	X-Ray Fluorescence
<b>PCT</b>	Pourcent (concentration massique en poids pourcent). Notation équiv. wt.%
<b>WT.%</b>	Weight %. Notation équivalente à Pct
<b>PPM</b>	Partie Par Million (concentration massique)
<b>REE</b>	Rare Earth Elements (terres rares)
<b>SOFC</b>	Solid Oxide Fuel Cell
<b>SXRF</b>	Synchrotron X-Ray Fluorescence
<b>XANES</b>	X-Ray Absorption Near Edge Structure
<b>MET-EDX</b>	Microscopie Electronique en Transmission – Energy Dispersive X-Ray spectr.

# 1. SOMMAIRE EXÉCUTIF

## 1.1. CONTEXTE ECONOMIQUE ET ENJEUX

Le scandium possède des propriétés remarquables pour de nombreuses applications industrielles dont (i) la métallurgie des alliages Al-Sc pour l'aéronautique et les équipements sportifs haut de gamme, (ii) les piles à combustible oxyde solide (« solid oxide fuel cells », SOFCs), le scandium pouvant y remplacer l'yttrium, ou encore (iii) les lampes halogènes. Le marché global du scandium est jusqu'à présent très peu développé (10 à 15 tonnes par an) mais cet élément est considéré par certains analystes économiques comme un potentiel « game changer » (via la généralisation des alliages Al-Sc pour l'industrie automobile et/ou le développement des SOFCs). Il n'existe pour le moment pas de marché organisé pour le scandium et celui-ci se négocie entre parties privées, essentiellement sous forme d'oxyde  $Sc_2O_3$ . Le degré de pureté du produit influe fortement son prix (~2000 à 5000\$/kg  $Sc_2O_3$  pour des teneurs de 99,0 à 99,99% ; USGS, 2018). L'absence de production fiable et le prix élevé du scandium en limitent pour le moment les applications commerciales. Néanmoins, toute pérennisation et augmentation de la production de scandium favorisera l'intérêt porté à ce métal par les acteurs industriels, générant vraisemblablement un mécanisme d'auto-alimentation de l'offre et de la demande. La Chine est le principal producteur actuel de scandium. Celui-ci est essentiellement extrait des résidus miniers des gisements de terres rares (principalement Bayan Obo).

Le scandium est un élément relativement commun mais qui n'a pas de porteurs spécifiques et de concentrations naturelles exploitées en tant que telles. Le scandium est de fait exclusivement exploité en tant que sous-produit de gisements d'uranium, de terres rares, de titane ou de tungstène. Dans ces gisements, les concentrations en scandium restent assez modérées (100-200 ppm ou g/t scandium).

Les latérites nickélfères (et cobaltifères) développées sur roches ultrabasiques présentent des teneurs en scandium allant jusqu'à la centaine de ppm et constituent donc aussi des cibles potentiellement valorisables pour l'exploitation du scandium, dans la mesure où les zones enrichies en scandium coïncident avec les zones enrichies ou sub-enrichies en Ni ( $\pm$ Co). C'est le cas de profils latéritiques notamment aux Philippines, à Cuba et en République Dominicaine, mais aussi ceux de Nouvelle Calédonie ; les zones enrichies en scandium surmontent ou recoupent partiellement les zones riches en nickel et cobalt au sein des profils latéritiques. Dans les latérites développées sur roches ultrabasiques, la plupart des éléments métalliques contenus initialement dans les faciès sont enrichis par un facteur 10 correspondant à la dissolution totale des silicates. De fait, le scandium qui est relativement peu mobile en conditions oxydantes est donc vraisemblablement adsorbé ou intégré dans le réseau cristallin des oxyhydroxydes de fer. Cette évolution a déjà été proposée sur la base d'analyses en roche totale de profils latéritiques des Philippines, de Cuba et République Dominicaine, ainsi qu'en Nouvelle Calédonie (Aiglsperger et al., 2016 ; Ulrich, 2013).

Certains pays dont l'Australie ont initié des recherches systématiques, ainsi que le développement des méthodes de co-extraction du scandium à partir de minerais nickélfères d'origine latéritique. En Australie, plusieurs projets sont en cours de développement et prévoient pour certains une production de Sc à relativement court terme. Les principaux projets de Sc latéritique en Australie sont (i) Nyngan (Scandium international mining corp.), (ii) Sunrise (ex projet Syerston, Clean TeQ), (iii) Flemington (Australian mines) et (iv) SCONI (Australian Mines). Ces projets ciblent des ressources en Sc au sein de latérites développées sur clinopyroxénite et/ou périclote. Les latérites développées sur

clinopyroxénites contiennent des teneurs très élevées en Sc (typiquement 300 à 600 ppm) mais ne présente à priori pas de teneurs économiquement intéressantes en Ni et/ou Co. Le Sc y est donc considéré comme une ressource primaire. Les latérites développées sur péridotites contiennent des teneurs plus modestes en Sc (100 à 200 ppm) mais sont associées à des teneurs sub-économiques en Ni et Co. L'exploitation de ces dernières est alors envisagée dans la perspective d'une covalorisation Ni-Co-Sc. Le projet Nyngan apparaît à ce jour comme le projet le plus abouti, avec la production et la commercialisation d'alliage Al-Sc à l'horizon 2020.

## 1.2. OBJECTIFS GÉNÉRAUX DU PROJET ET MÉTHODOLOGIE

Sur la base des données bibliographiques existantes, le projet Scandium a été proposé afin d'estimer quels étaient les facteurs susceptibles de contrôler les concentrations en scandium des sapolites et latérites de Nouvelle Calédonie, afin de disposer d'éléments chiffrés et concrets sur l'existence d'une ressource potentielle additionnelle qui pourrait constituer une ressource future lors de l'exploitation et la co-valorisation des ressources néo-calédoniennes.

Les objectifs de ce projet ont concerné :

- l'identification des formations potentiellement hôtes des teneurs les plus élevées en Sc et REE (géochimie roche totale), soit l'identification des protolithes les plus favorables,
- l'analyse du comportement du scandium dans les profils d'altération grâce à la caractérisation géochimique en roche totale des profils d'altération, en suivant l'évolution dans les différents horizons (saprock, sapolite, latérite jaune, latérite rouge, cuirasse),
- l'analyse localisée du Sc et des autres éléments d'intérêt économique (Ni, Co, REE), à différentes échelles dans les phases porteuses,
- la détermination des modèles de spéciation du Sc dans les profils latéritiques par la caractérisation cristalochimique des phases porteuses au synchrotron (spectroscopie XANES), et par extractions séquentielles,
- le test de faisabilité de l'utilisation de méthodes portables (XRF), en particulier la calibration sur la base de poudres analysées par voie chimique et l'estimation des gammes de concentration pour lesquelles cette technique peut s'appliquer,
- la caractérisation de la ressource Sc (distribution, tonnages, teneurs) sur des gisements sélectionnés par application de proxies géochimiques et interrogation des bloc-modèles existants,
- la synthèse générale présentant un modèle des conditions de transport et de piégeage de Sc (et REE), et d'enrichissement du Sc dans les profils latéritiques de Nouvelle-Calédonie.

### 1.3. STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE

Un échantillonnage stratégique et exhaustif de séquences latéritiques potentiellement hôtes de teneurs économiques en scandium a été effectué à travers l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie. Cinq massifs miniers, représentatifs et répartis sur l'ensemble de l'île, ont été sélectionnés pour échantillonnage. Ils constituent des exemples types des différents protolithes, et des profils de latérites développés sur massif de roche ultrabasiques tels que définis (Plateau continu/disséqué, pente, bassin) dans les synthèses récentes (Maurizot et al., in press) :

- Profils de type Plateau continu : Tiébaghi (SLN)
- Profils de type Plateau disséqué : Koniambo (KNS), Cap Bocage (SMT), Nakéty (NMC)
- Profils de type Pente : N'Go (MKM), Cap Bocage (SMT)

Suite au retrait de Vale NC du projet Scandium, nous n'avons pas eu accès à des profils sur gisements de type Bassin, caractéristiques de la zone de Goro.

Nous avons adopté une stratégie d'échantillonnage consistant à cibler prioritairement (i) les profils d'altération complets (depuis la roche mère jusqu'à la cuirasse latéritique), (ii) les profils d'altération accessibles de manière continue, en combinant échantillonnage sur carotte et sur carrière, (iii) l'ensemble des protolithes ophiolitiques « représentatifs » (péridotites : harzburgite, dunite, lherzolite ; intrusifs : amphibolite, pyroxénite, gabbro et microgranite) et leurs produits d'altération. L'échantillonnage a ainsi également couvert les profils d'altération développés sur roches intrusives :

- Amphibolite/pyroxénite : N'Go (NMC), Nakéty (NMC)
- Gabbro : Koniambo (KNS), Tiébaghi (SLN), N'Go (MKM), Nakéty (NMC)
- Microgranite : N'Go (MKM)

La bonne coordination sur place des partenaires académiques (GéoRessources, CEREGE, IPGS-EOST, ISTERRE-Géosciences Montpellier), gouvernementaux (SGNC, CNRT) et industriels (SMT, KNS, NMC, MKM et SLN) a permis de remplir l'ensemble des objectifs de mission.

### 1.4. FERTILITÉ DU PROTOLITHE

La nature du protolithe, à partir duquel se développe l'altération latéritique, constitue un facteur majeur contrôlant au premier ordre le potentiel Sc de ses équivalents altérés. Le principal facteur contrôlant la teneur en Sc des péridotites saines est la proportion relative initiale (pré-serpentinisation) entre enstatite (orthopyroxène) et forstérite (olivine). L'évolution depuis les faciès dunitiques jusqu'aux faciès harzburgitiques puis lherzolitiques est ainsi associée à une augmentation de la teneur initiale du protolithe (dunite de Cap Bocage 2-5 ppm Sc, harzburgite de Koniambo 7-8 ppm Sc, lherzolite de Tiébaghi 10-20 ppm Sc).

Les différents faciès d'intrusifs magmatiques étudiés (amphibolites, pyroxénites, gabbros et granites) révèlent également une variété de composition et de teneurs en Sc. Ces intrusifs sont essentiellement présents dans le sud de l'île de Grande Terre, notamment sur les sites de N'Go et Nakéty. Les intrusifs amphibolitiques présentent des teneurs variables (y compris à l'échelle de l'affleurement) et généralement élevées en Sc (30 à 128 ppm Sc), le Sc y étant essentiellement porté par la hornblende (teneurs in situ variables de 45 à 135 ppm de Sc). Les intrusifs gabbroïques (N'Go mine Ada, Nakéty, Tiébaghi) présentent également des teneurs significatives en Sc ; le Sc y est essentiellement porté par les amphiboles ou clinopyroxènes magmatiques. Le gabbro à amphibole de Tiébaghi est le plus fertile vis-à-vis du Sc (80 ppm Sc), en raison de fortes teneurs in situ dans l'amphibole (160 ppm Sc). Enfin, les intrusifs granitiques (N'Go mine Ada) ne sont pas fertiles vis-à-vis du Sc (2 ppm Sc), en raison de l'absence de pyroxènes ou d'amphiboles.

## 1.5. ENRICHISSEMENTS EN SC

Sur tous les profils investigués, le développement et la maturation de zones riches en goethite est également nécessaire à la formation d'enrichissements d'intérêt économique en Sc. Au sein des profils latéritiques classiquement développées sur péridotite, le Sc présente un enrichissement significatif depuis la base jusqu'au sommet du profil. La teneur en Sc augmente progressivement à partir de la saprolite pour atteindre un maximum généralement localisé dans les zones supérieures de la latérite jaune. L'intensité de l'enrichissement maximum en Sc est d'un facteur ~10 depuis le protolithe. Ainsi, seuls certains profils contiennent des horizons de latérite jaune exhibant des teneurs en Sc potentiellement intéressantes (> 80 ppm et localement jusqu'à 95 ppm), principalement ceux développés sur harzburgite (Koniambo) et sur lherzolite (Tiébaghi). Dans ces horizons, la teneur en Ni est de ~1 à 1,5 wt.% (% concentration massique).

L'altération des intrusifs amphibolitiques fertiles vis-à-vis du Sc (jusqu'à 130 ppm) conduit à la formation d'altérites à goethite alumineuse-kaolinite-gibbsite enrichies en Sc (> 200 ppm et localement jusqu'à 314 ppm). Le scandium y est essentiellement porté par la goethite alumineuse (500-1000 ppm). À contrario, l'altération des gabbros conduit préférentiellement à la formation d'assemblages à kaolinite-hématite ± goethite généralement appauvris en Sc. Le Sc, expulsé lors de l'altération des gabbros, se retrouve sur-enrichi (jusqu'à > 200 ppm) sur ~1 à 2 m dans les latérites jaunes aux épontes des filons.

## 1.6. SPÉCIATION DU SC DANS LES ROCHES ET MINÉRAUX

### 1.6.1. APPORT DES EXTRACTIONS CHIMIQUES SÉQUENTIELLES

La spéciation du Sc a été abordée par son partitionnement en fonction de la lixiviation des échantillons par des réactifs d'extraction de manière séquentielle, à l'instar de ce qui avait été déjà réalisé dans le cadre du projet CNRT « Nickal » sur la répartition du Ni et Co dans les phases minérales des différents horizons d'altération latéritiques. 38 échantillons provenant de l'ensemble des sites miniers étudiés dans ce projet ont été sélectionnés pour leur représentativité vis-à-vis des teneurs en scandium en relation avec Ni et Co, leur appartenance aux principaux horizons d'altération, ou leurs caractéristiques spécifiques. Pour les éléments majeurs, les taux d'extraction pour Si et Mg, quelques soient les réactifs, sont très faibles, indiquant la préservation des phases silicatés de nos échantillons. À l'inverse, l'extraction de Fe (fractions oxalate et citrate dithionite) et de Mn (fraction

hydroxylamine) est très poussée et associée à une proportion de l'Al extrait des oxy-hydroxydes de fer (fraction citrate dithionite des goethites et hématites). Le Ni est majoritairement extrait par le citrate dithionite (en association avec les goethites et hématites) et en plus faibles proportions avec l'oxalate et l'hydroxylamine. Le cobalt est par contre préférentiellement extrait par l'hydroxylamine en liaison avec les phases manganésifères (asbolanes). Le scandium est particulièrement bien extrait par l'oxalate et par le citrate dithionite avec une prépondérance pour le second réactif, il serait donc associé préférentiellement aux oxy-hydroxydes de fer et dans une moindre mesure aux phases ferrifères mal cristallisées. Si l'on compare les différentes proportions extraites de Sc, Ni et Co, le scandium est associé préférentiellement aux phases ferrifères comme le Ni, le Co est fortement lié au Mn mais aussi aux oxy-hydroxydes de fer dans les horizons sommitaux des profils

### 1.6.2. SPÉCIATION DU SC : DISTRIBUTION DU SC ET IDENTIFICATION DES PHASES PORTEUSES PAR SPECTROSCOPIE D'ABSORPTION DES RAYONS X

L'environnement atomique du scandium dans les échantillons naturels a été déterminé par des mesures de spectroscopie d'absorption des rayons X notamment grâce à des goethites de référence. Plusieurs synthèses de goethites et hématites à Sc ont été réalisées : (i) Sc co-précipité dans de la goethite et l'hématite avec des concentrations en Sc variant de 0 à 100% de substitution du fer (pour étudier les effets de la substitution du Fe par le Sc sur la cristallinité et la morphologie des particules obtenues), et (ii) Sc adsorbé sur des goethites. L'introduction de Sc modifie la morphologie des particules, qui à 0% Sc sont de forme aciculaire (nano-bâtonnets), puis pseudo-sphérique à 58% Sc et sous losangique à 100% Sc. L'évolution des paramètres et du volume de maille est linéaire avec le taux de substitution du Sc et suit une loi de Vegard. La solution solide décrite ici est idéale malgré une différence de rayon ionique relativement importante entre le Fe (55pm) et le Sc (75pm) (soit 36% de différence) ce qui semble contredire la loi de Goldschmidt qui stipule que pour que deux ions puissent se remplacer l'un l'autre dans un cristal, leurs rayons ioniques ne doivent pas différer de plus de 15 %.

Les analyses synchrotron ont été effectuées sur la ligne de lumière ID21 à l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble, France). Elles ont consisté à caractériser plusieurs séries d'échantillons selon deux approches analytiques :

1/ Des analyses in-situ en mode micro-faisceau (taille du spot d'analyse 1x1  $\mu\text{m}$ ) permettant, (i) de réaliser des cartes de répartition du scandium sur échantillons consolidés et polis (mesures  $\mu$ -SXRF ; Synchrotron X-Ray Fluorescence) ; ces analyses montrent des répartitions relativement homogènes du Sc avec quelques surconcentrations locales, (ii) d'effectuer des mesures par spectroscopie d'absorption X (spectroscopie  $\mu$ -XANES au seuil K du Sc) afin de déterminer la spéciation in-situ du Sc, c'est-à-dire d'identifier de manière directe les phases minérales porteuses et le mode d'incorporation du Sc dans les minéraux. Pour la très large majorité des spectres obtenus sur des pisolithes, les signatures sont caractéristiques de goethite avec Sc adsorbé.

2/ Des analyses en mode « bulk », c'est-à-dire sur roche totale. Le spot d'analyse fait 200x200  $\mu\text{m}$ . Ces analyses sont réalisées sur poudres broyées, homogénéisées et pastillées. Pour ces approches, les analyses SXRF permettent une quantification du scandium alliant précision, rapidité (quelques dizaines de secondes) et très haute sensibilité (limites de détection ~ppm). Sur le profil latéritique de Tiébaghi (carrière East Alpha), l'évolution des pics de fluorescence du Mg, Al et Si, ainsi que Ca et Sc, le long du profil montre, du bas vers le haut, la diminution de la quantité de serpentine au profit de

smectites, puis de goethite. Le pic du Sc augmente jusqu'à atteindre un maximum dans le faciès des limonites. Le long du profil d'altération, cette approche analytique permet de quantifier les évolutions, (i) de la teneur en Sc, (ii) de l'abondance modale des différentes phases minérales, et enfin (iii) de la spéciation du Sc et donc de sa répartition selon différents modes de sorption dans les silicates puis les oxyhydroxydes.

### 1.7. TESTS D'ANALYSE PAR XRF PORTABLE

Les travaux réalisés sur NITON ont eu pour objectif de déterminer les conditions dans lesquelles l'estimation par XRF portable des teneurs en Sc (mesure directe et/ou estimation indirecte via la mesure d'éléments proxies) est possible et pertinente. Plusieurs challenges inhérents à l'analyse du Sc ont été adressés : (i) la dispersion analytique due aux faibles teneurs (centaine de ppm), (ii) la quantification et la minimisation des effets perturbateurs du Ca sur l'analyse du Sc (interférences des pics de fluorescence), et (iii) la variété des lithologies analysées (roches saines, latérites sur péridotites et sur intrusifs). Notamment, une routine automatisée de déconvolution spectrale et d'analyse d'aires de pics a été développée et est comparée au programme in-house de l'appareil NITON. L'analyse de pastilles compactées fournit les meilleurs résultats et permet l'homogénéisation de volumes choisis. Des droites de calibration ont été correctement établies pour les éléments Si, Al, Ca, Fe, Ti, V, permettant ainsi de déterminer, dans un premier temps, la nature des protolithes et de leur produits d'altérations, et ainsi de contraindre indirectement leurs teneurs en Sc. Nous montrons ensuite que l'analyse directe du Sc par le programme NITON est envisageable seulement sous certaines conditions : (i) les teneurs en Sc doivent être supérieures à ~75 ppm, (ii) le rapport Ca/Sc doit être inférieur à 60, (iii) la mesure doit être dupliquée 3 à 5 fois pour réduire la dispersion analytique de la mesure ( $\pm 55$  ppm). Le programme de déconvolution développé dans ce projet permet de mieux corriger l'effet de teneurs importantes en Ca sur l'analyse du Sc, notamment pour des échantillons dont le rapport Ca/Sc est compris entre 60 et 100.

### 1.8. MODÉLISATION DE LA RESSOURCE SC À L'ÉCHELLE DU GISEMENT

Les corrélations Al-Sc ont été établies et affinées certains gisements, permettant ainsi d'y estimer les teneurs, tonnages et distribution du scandium à partir des teneurs en aluminium, via interrogation des bloc-modèles existants. Les résultats d'analyse témoignent, sur les différentes zones étudiées, d'une bonne corrélation entre  $Al_2O_3$  et Sc à l'échelle des chantiers, permettant ainsi d'estimer les teneurs en scandium à partir des teneurs en aluminium. Notamment, sur le chantier East Alpha (Tiébaghi), les teneurs en Sc peuvent être estimées selon la relation :  $Sc \text{ (ppm)} = 7,46 * Al_2O_3 \text{ (wt.\%)}$  avec une dispersion telle que  $R^2 = 0,84$ . Sur le chantier Ma-Oui (et son extension, le chantier Mimine ; Koniambo), les teneurs en Sc peuvent être estimées selon la relation  $Sc \text{ (ppm)} = 12,5 * Al_2O_3 \text{ (wt.\%)}$  avec une dispersion telle que  $R^2 = 0,92$ .

Dans les zones de latérites, les tonnages de minerai et teneurs en Sc, Ni et Co ont été estimés en fonction de la teneur de coupure en Sc. Certains gisements présentent des accumulations et des teneurs en Sc très significatives. Sur le chantier Mimine, en considérant une teneur de coupure de 50 ppm Sc, le tonnage sec calculé est de 2485 kt pour des teneurs de 61,2 ppm Sc (soit une accumulation métal de 265 t  $Sc_2O_3$ ), 1,25 wt.% Ni et 0,17 wt.% Co. Sur le chantier East Alpha, en considérant une teneur de coupure de 80 ppm, le tonnage sec calculé est de 300 kt pour des teneurs de 97,2 ppm Sc (soit une accumulation métal de 44,6 t  $Sc_2O_3$ ), 0,98 wt.% Ni et 0,14 wt.% Co. Sur la base de la formulation du Ni équivalent  $Ni_{eq}$  considérant les teneurs en Co et Sc associées au Ni (voir

section 2.1), les teneurs  $Ni_{eq}$  apparaissent supérieures à 2 wt.% sur tous les gisements étudiés, et à toutes les teneurs de coupure testées. Les plus basses teneurs en Ni des latérites de East Alpha comparées à celles de Koniambo (1,0 vs 1,3 wt.% Ni) sont largement contrebalancées par de plus fortes teneurs en Sc (90 vs. 50 ppm Sc).

L'approche utilisée, consistant à établir à l'échelle du chantier les corrélations Al-Sc puis à interroger directement les bloc-modèles existants sur l'aluminium, présente l'avantage d'être relativement rapide à mettre en œuvre. Cependant, une telle approche, qui nécessite de disposer d'une base de données exhaustive et d'un bloc-modèle bien contraint, est davantage applicable en phase d'exploitation qu'en phase d'exploration. Cette approche reste également limitée par l'absence de variogrammes spécifiques pour le scandium. L'élaboration de variogrammes pour le Sc, tout comme la création des enveloppes de minéralisation spécifiques au Sc, permettraient, dans un second temps, d'affiner la caractérisation de la ressource Sc, en particulier lors des phases d'exploration.

## 1.9. IMPLICATIONS POUR L'EXPLORATION

La nature du protolithe constitue un paramètre essentiel influant au premier ordre sur les teneurs en Sc des horizons latérités. Il est donc nécessaire, afin d'identifier les zones d'enrichissements majeurs en Sc, de précisément cibler les protolithes fertiles vis-à-vis du Sc : la harzburgite et la lherzolite pour les faciès péridotitiques, l'amphibolite pour les faciès magmatiques intrusifs (il ne semble pas recommandé de cibler les altérites issues des gabbros car celles-ci apparaissent appauvries en Sc). Au sein des latérites classiquement développées sur péridotites, une meilleure discrimination entre les différents types de péridotite est ainsi requise, à travers la combinaison d'observations de terrain et d'analyses géochimiques des éléments majeurs (la teneur en Al, les rapports Mg/Si, Fe/Si et Ca/Si, permettant d'appréhender les proportions relatives d'olivine et de pyroxène). Similairement, le ciblage des intrusifs amphibolitiques, puis la discrimination entre faciès riches en hornblende (les plus fertiles) et faciès riches en enstatite, peuvent s'appuyer sur la combinaison d'un travail de terrain à l'échelle du massif minier et d'analyses chimiques (en ciblant les intrusifs sains avec un rapport initial  $Fe_2O_3/Al_2O_3$  supérieur à 0,75 et des teneurs en Ca  $> \sim 6$  wt.%). Enfin, parmi les corps intrusifs ainsi sélectionnés, la mesure de la teneur en V et/ou Ti peut permettre d'estimer au premier ordre la teneur en Sc associée.

Après identification des protolithes fertiles vis-à-vis du Sc, il convient de cibler prioritairement les horizons riches en goethite issus directement de ces protolithes (notamment les horizons de latérite jaune pour les profils développés sur péridotite). Ce ciblage peut être effectué par observation directe de terrain et complété par analyse de la teneur en Fe (ex. par XRF portable). Sur des faciès péridotitiques altérés, le rapport Al/Fe permet de déterminer la nature du protolithe. Également, les teneurs en Al et V peut permettre d'estimer indirectement la teneur en Sc dans les péridotites altérées. L'interrogation sur l'aluminium des bloc-modèles existants peut donc permettre, après détermination de la corrélation Al-Sc, d'estimer la ressource Sc sur des gisements en voie d'exploitation. Sur les intrusifs altérés, l'analyse du V et du Ti peut également permettre d'estimer indirectement la teneur en Sc. La calibration de l'analyse XRF portable indique que les instruments commercialisés comme le NITON peuvent être programmés de manière optimale, mais que l'applicabilité est essentiellement valable dans les domaines de haute concentration ( $> 75$  ppm) et pour des roches dont la concentration en Ca est inférieure à 1% afin d'éviter les interférences. L'analyse par XRF portable du Sc reste, dans tous les cas, limitée par une dispersion analytique assez élevée pour le Sc. Cette dispersion peut être réduite par duplication des mesures sur un même échantillon. Cependant, l'analyse par XRF portable d'éléments tels que Al, Si, Fe, Ca, Ti ou V permet de renseigner aussi bien sur la nature et donc la fertilité

des roches saines et altérées, que sur la teneur en Sc via utilisation des proxies géochimiques.

## 1.10. IMPLICATIONS POUR LA VALORISATION DES MINERAIS

Les procédés hydrométallurgiques (lixiviations, suivies d'extraction par solvant ou par échange ioniques et précipitations) sont les plus couramment utilisés pour la récupération du scandium. De tels procédés apparaissent ainsi adaptés pour la production de scandium en sous-produit de minerai latéritique à Ni-Co (Altinsel et al., 2018 ; Ferizoglu et al., 2018 ; Ricketts and Duyvesteyn, 2018 ; Wang et al., 2011). Les procédés de lixiviation de type HPAL généralement utilisés pour le nickel et cobalt permettent en effet de lixivier l'essentiel du scandium (85-95%) depuis son minerai latéritique. Il reste à déterminer si des processus moins coûteux en énergie seraient susceptibles d'obtenir des rendements acceptables (lixiviation à plus basse température). La séparation se réalise ensuite en général grâce à des composés organophosphorés acides. Il reste néanmoins nécessaire d'améliorer les procédés existants, ou de développer de nouveaux procédés de lixiviation ou d'extraction (par solvants ou par échanges ioniques), afin d'améliorer la sélectivité et l'efficacité de ces processus.

Les lixiviations ont permis d'évaluer l'extractibilité du scandium et autres métaux (Ni, Co, Zn, V) lors de lixiviations séquentielles, allant jusqu'au milieu acide, en suivant les protocoles habituels de l'analyse de la spéciation des métaux dans les sols. Ceci a permis de mieux connaître le type de liaison chimique au sein des oxyhydroxydes de fer, et phases minérales associés (par ex. oxydes de manganèse). Ce travail constitue la première phase préliminaire à de plus amples recherches sur la co-valorisation des minerais latéritiques par hydrométallurgie.

## 2. INTRODUCTION

Ce rapport présente les recherches effectuées dans le cadre du projet « Géochimie et minéralogie du Scandium dans les latérites en Nouvelle-Calédonie », cofinancé par le CNRT et le LABEX21, sur une durée totale de 31 mois.

Les données synthétiques présentées dans ce rapport incluent les observations de terrain issues des missions réalisées en avril 2016 et juin 2017, ainsi que les résultats obtenus sur l'ensemble du projet initial et de son extension.

Cette extension s'est attachée à explorer le devenir du Scandium lors de l'altération des gabbros et la caractérisation de la ressource Scandium sur gisements à partir du proxy Aluminium-Scandium.

### 2.1. CONTEXTE ÉCONOMIQUE ET ENJEUX

Le scandium (Sc) est le 21<sup>ème</sup> élément du tableau périodique. Sa masse molaire de 44.9559 g.mol<sup>-1</sup>, il possède une densité de 2.985 g.cm<sup>-3</sup> et un point de fusion élevé (1541°C). Le scandium est le 31<sup>ème</sup> élément en abondance dans la croûte terrestre, avec une abondance moyenne dans la croûte de 22 ppm (Hedrick, 2009, 2012). Bien qu'appartenant techniquement au groupe des métaux de transition, le scandium possède des propriétés physico-chimiques similaires aux lanthanides et est ainsi souvent classé dans le groupe des terres rares (tout comme l'yttrium). Parce qu'il se substitue facilement avec le fer et l'aluminium, le scandium se retrouve essentiellement en traces dans certains oxydes (cassitérite, hématite) et oxy-hydroxydes (wolframite, columbite, goethite).

Le scandium est un élément relativement commun mais qui n'a pas de porteurs spécifiques et de concentrations naturelles exploitées en tant que tel, et est principalement est un sous-produit de l'industrie extractive de l'uranium, des terres rares du titane ou du tungstène. Le scandium a par contre des propriétés tout à fait intéressantes pour de nombreuses filières (Royset & Ryum, 2005 ; Toropova et. al, 1998 ; Williams-Jones & Vazyukova, 2018) dont (i) la métallurgie des alliages Al-Sc pour l'aéronautique notamment, mais aussi pour les équipements sportifs haut de gamme, (ii) les piles à combustible oxyde solide (« solid oxide fuel cells », SOFCs), le scandium pouvant y remplacer l'yttrium, et (iii) les lampes halogènes. Le marché global du scandium est jusqu'à présent très peu développé (10 à 15 tonnes par an) mais cet élément est considéré par certains analystes économiques comme un potentiel « game changer » (via la généralisation des alliages Al-Sc pour l'industrie automobile et/ou le développement des SOFCs). Il n'existe pour le moment pas de marché organisé pour le scandium et celui-ci se négocie entre parties privées, essentiellement sous forme d'oxyde Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Le degré de pureté du produit influe fortement son prix (~2000 à 5000\$/kg Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pour des teneurs de 99,0 à 99,99% ; USGS, 2018).

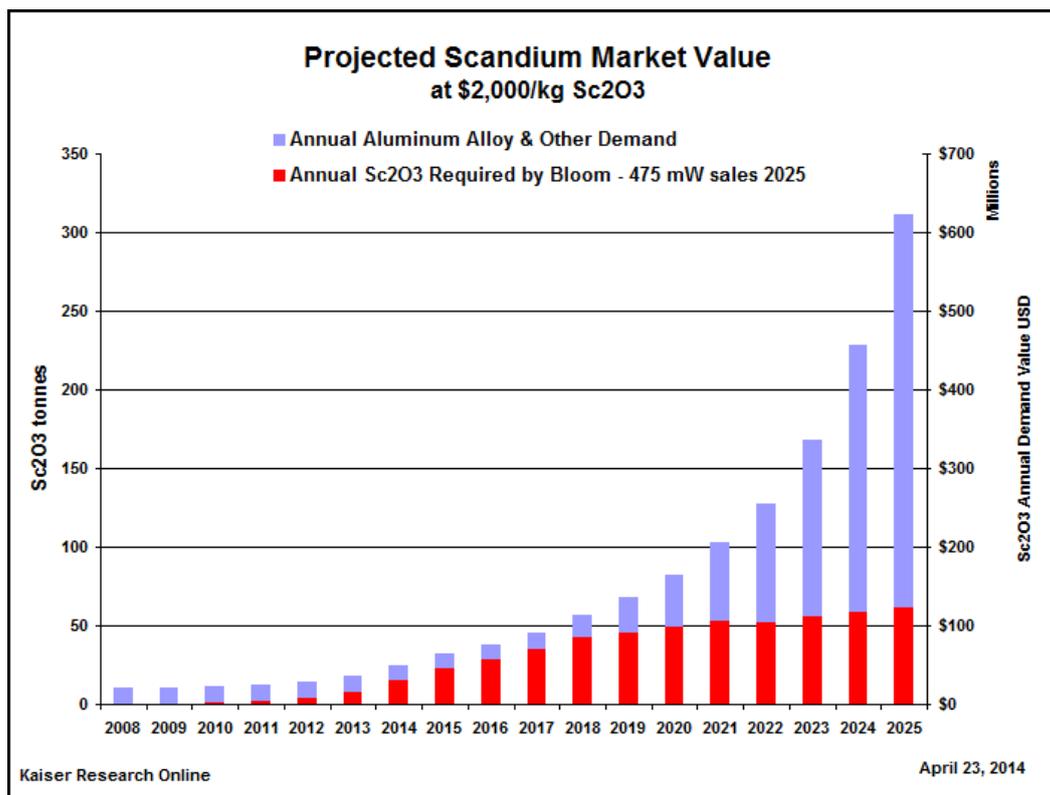


Figure 1 : Prédiction d'évolution de la demande mondiale en scandium. Kaiser, 2014.

Le scandium, dont la production est marginale (actuellement de l'ordre de 10 tonnes d'oxyde Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> par an), est le moins produit de tous les métaux. Celui-ci est essentiellement produit en sous-produit par la Chine durant la production de terres rares, notamment dans le complexe minier de Bayan Obo où les teneurs en scandium peuvent atteindre ~160 ppm (Duyvesteyn et Putnam, 2014). Dans une moindre mesure, la Russie, l'Ukraine et le Kazakhstan produisent également du scandium. Les prospects d'Australie sont encore en stade et les ressources publiées par les différentes compagnies minières ne préjugent en rien de leur devenir.

L'absence de production fiable et le prix élevé du scandium en limitent pour le moment les applications commerciales. Néanmoins, toute pérennisation et augmentation de la production de scandium favorisera l'intérêt porté à ce métal par les acteurs industriels, générant vraisemblablement un mécanisme d'auto-alimentation de l'offre et de la demande. La Chine est le principal producteur actuel de scandium. Celui-ci est essentiellement extrait des résidus miniers des gisements de terres rares (principalement Bayan Obo).

Dans la plupart des gisements où le scandium est extrait comme sous-produit, ses concentrations restent assez modérées (100-200 ppm ou g/t scandium). Les latérites nickélifères (et cobaltifères) développées sur roches péridotites peuvent présenter des teneurs en scandium allant jusqu'à la centaine de ppm pourraient donc être économiquement intéressantes, si toutefois les concentrations étaient localisées dans des horizons exploitables pour Ni (±Co) ce qui permettrait une co-valorisation. Ces zones surmontent ou recoupent partiellement les zones riches en nickel et cobalt au sein des profils latéritiques. Également, les latérites développées sur clinopyroxénites peuvent présenter des teneurs particulièrement élevées en Sc (typiquement 300 à 600 ppm) mais ne contiennent pas de teneurs économiquement intéressantes en Ni et Co. Dans les latérites développées

sur roches ultrabasiques (péridotites et pyroxénites), la plupart des éléments métalliques contenus initialement dans les faciès sont enrichis par un facteur 10 correspondant à la dissolution totale des silicates, le scandium qui est relativement peu mobile en conditions oxydantes étant donc adsorbé ou absorbé (intégré dans le réseau cristallin) des oxyhydroxydes de fer. Cette évolution a déjà été proposée sur la base d'analyses en roche totale de profils latéritiques d'Australie, des Philippines, de Cuba et République Dominicaine, ainsi qu'en Nouvelle Calédonie.

Le scandium pouvant donc vraisemblablement être exploité comme sous-produit de ces latérites, certains pays ont initié des recherches systématiques, ainsi que le développement des méthodes d'extraction. C'est en particulier le cas de l'Australie, où plusieurs projets miniers ont rapidement progressé ces dernières années tant dans l'étude de faisabilité, et l'estimation des réserves, que dans l'obtention des permis d'exploitation et des fonds nécessaires au démarrage des projets miniers. Le procédé de traitement est de type HPAL, avec un rendement atteignant 97%, et permettant d'obtenir un produit très pur. Tous les projets concernent des latérites plus ou moins remaniées, d'âge tertiaire, sur roches basiques à ultrabasiques. Les gisements sont listés ci-dessous, avec une estimation de la réserve en Sc exprimée en produit commercial Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Tableau 1 : Ressources et états d'avancement des principaux projets australiens d'exploitation du scandium**

Projet	Sunrise (ex Syerston)	Flemington	Nyngan	SCONI
Companie	Clean TeQ	Australian Mines	Scandium Int. Mining Corp.	Australian Mines
Ressource Sc	11,8Mt @ 419ppm (> 300ppm) 1,0Mt @ 670ppm (>600ppm)	3,1Mt @ 434ppm (>300ppm)	16,9Mt @ 235ppm (>100ppm) 1,44Mt @ 409ppm (>155 ppm)	12Mt @ 162 ppm (>100 ppm)
Planification	Étude de faisabilité en cours (prévu Juin 2018)	Pré-faisabilité en cours (mai 2018)	Production horizon 2020	Étude de faisabilité en cours

Pour le projet SCONI, des teneurs exprimées en Ni équivalent Ni<sub>eq</sub>, et tenant compte des teneurs en Ni, Co et Sc, sont présentés dans les études de faisabilité (Metallica Minerals Ltd., ASX release 21 octobre 2013). Défini en 2013, le calcul du Ni équivalent est exprimé tel que Ni<sub>eq</sub> (wt.%) = Ni (wt.%) + 1,5\*Co (wt.%) + 0,01\*Sc (ppm). Cette formule est basée sur les cours respectifs du Ni et Co à cette date (Ni ~22000 \$/t et Co~33000\$/t) et sur le cours prévu du Sc suite à la mise en place d'une potentielle production industrielle (1500\$/kg Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contre 4600\$/kg actuellement). Il est à noter qu'une valeur de 1500\$/kg pour l'oxyde de scandium est considéré comme adoptable par l'industrie automobile. Les facteurs multiplicatifs pour le Co et le Sc nécessiteraient d'être modifiés compte-tenu de l'évolution des cours du Ni et du Co depuis 2013.

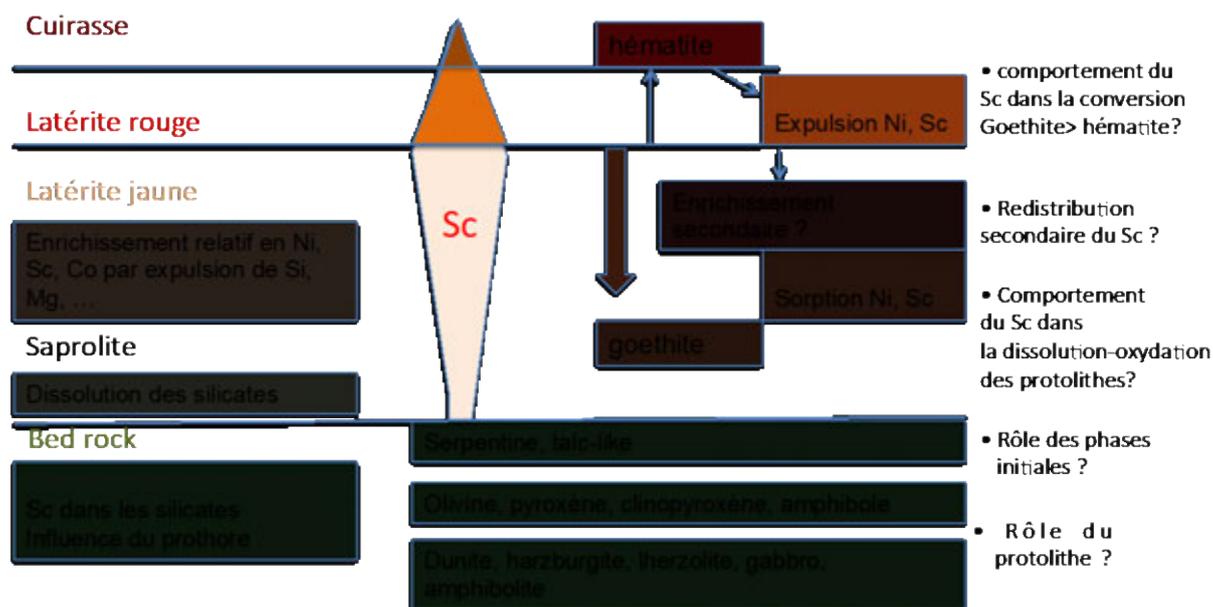
## 2.2. OBJECTIFS GÉNÉRAUX DU PROJET ET MÉTHODOLOGIE

Sur la base des données bibliographiques existantes, le projet Scandium a été proposé afin d'estimer quels étaient les facteurs susceptibles de contrôler les concentrations en scandium des saprolites et latérites de Nouvelle Calédonie, afin de disposer d'éléments chiffrés et concrets sur l'existence d'une ressource potentielle additionnelle qui pourrait constituer une ressource future lors de l'exploitation et la co-valorisation des ressources néo-calédoniennes.

Les principales questions concernant le comportement du scandium lors de l'altération latéritique sont résumées dans la Figure 02.

Les objectifs de ce projet ont concerné :

- l'identification des formations potentiellement hôtes des teneurs les plus élevées en Sc et REE (géochimie roche totale), soit l'identification des protolithes les plus favorables,
- l'analyse du comportement du scandium dans les profils d'altération grâce à la caractérisation géochimique en roche totale des profils d'altération, en suivant l'évolution dans les différents horizons (saprock, saprolite, latérite jaune, latérite rouge, cuirasse),
- l'analyse localisée du Sc et des autres éléments d'intérêt économique (Ni, Co, REE), à différentes échelles dans les phases porteuses,
- la détermination des modèles de spéciation du Sc dans les profils latéritiques par la caractérisation cristalochimique des phases porteuses au synchrotron (spectroscopie XANES), et par extractions séquentielles,
- le test de faisabilité de l'utilisation de méthodes portables (XRF), en particulier la calibration sur la base de poudres analysées par voie chimique et l'estimation des gammes de concentration pour lesquelles cette technique peut s'appliquer,
- la caractérisation de la ressource Sc (distribution, tonnages, teneurs) sur des gisements sélectionnés par application de proxies géochimiques et interrogation des bloc-modèles existants,
- la synthèse générale présentant un modèle des conditions de transport et de piégeage de Sc (et REE), et d'enrichissement du Sc dans les profils latéritiques de Nouvelle-Calédonie.



**Figure 2 : Principales questions concernant le comportement du scandium dans les latérites.**

### 2.3. STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE

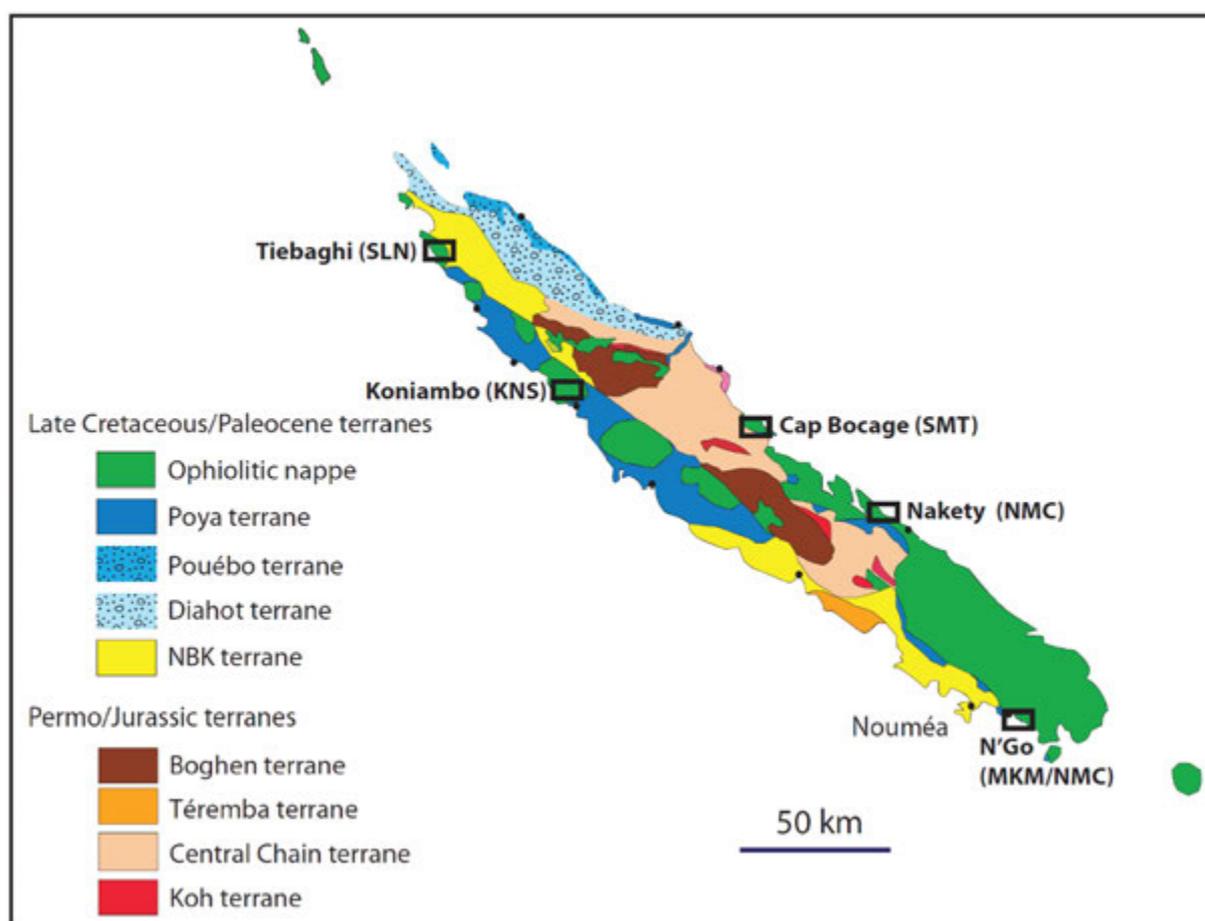
Un échantillonnage stratégique et exhaustif de séquences latéritiques potentiellement hôtes de teneurs économiques en scandium a été effectué à travers l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie. Cinq massifs miniers, représentatifs et répartis sur l'ensemble de l'île, ont été sélectionnés pour échantillonnage. Ils constituent des exemples types des différents protolithes, et des profils de latérites développés sur massif de roche ultrabasiques tels que définis (Plateau continu/disséqué, pente, bassin) dans les synthèses récentes (Maurizot et al., in press) :

- Profils de type Plateau continu : Tiébaghi (SLN)
- Profils de type Plateau disséqué : Koniambo (KNS), Cap Bocage (SMT), Nakéty (NMC)
- Profils de type Pente : N'Go (MKM), Cap Bocage (SMT)

Suite au retrait de Vale NC du projet Scandium, nous n'avons eu accès à des profils sur gisements de type Bassin, caractéristiques de la zone de Goro.

Nous avons adopté une stratégie d'échantillonnage consistant à cibler prioritairement (i) les profils d'altération complets (depuis la roche mère jusqu'à la cuirasse latéritique), (ii) les profils d'altération accessibles de manière continue, en combinant échantillonnage sur carotte et sur carrière, (iii) l'ensemble des protolithes ophiolitiques « représentatifs » (péridotites : harzburgite, dunite, lherzolite ; intrusifs : amphibolite, pyroxénite, gabbro et microgranite) et leurs produits d'altération. L'échantillonnage a donc également couvert les profils d'altération développés sur roches intrusives :

- Amphibolite/pyroxénite : N'Go (NMC), Nakéty (NMC)
- Gabbro : Koniambo (KNS), Tiébaghi (SLN), N'Go (MKM), Nakéty (NMC)
- Microgranite : N'Go (MKM)



**Figure 3 : Carte géologique de Grande Terre (Nouvelle-Calédonie) et localisation des cinq districts miniers étudiés. (carte d'après Maurizot & Vendé-Leclerc (2009)).**

## 2.4. MÉTHODOLOGIE

L'analyse géochimique en roche totale (majeurs et traces) des profils échantillonnés en 2016 et 2017 a été réalisée au CRPG (SARM) avec analyses de 37 éléments. Une série d'analyse complémentaire sur les échantillons collectés en 2018 (pour le volet « proxy Al-Sc et modélisation sur gisements » de l'extension du projet) a été réalisée au laboratoire calédonien Nilab. Ces analyses (éléments majeurs en poids d'oxydes, perte au feu, Ni, Co et Sc) montrent une excellente correspondance avec les analyses SARM (certaines analyses ayant été effectuées au SARM ont été dupliquées à Nilab).

La caractérisation des séquences paragenétiques, notamment l'analyse des textures, des relations entre les phases minérales replacées dans leur contexte lithologique et la séquence d'altération, a été réalisée par différentes approches d'imagerie et d'identification des phases (microscopie optique, cartes et imagerie MEB, DRX, Raman)

L'analyse des compositions minérales a été effectuée au laboratoire GéoRessources, grâce à une approche multitechnique : analyses MEB-WDS, microsonde électronique, et LA-ICP-MS.

La spéciation a été abordée par fluorescence X au synchrotron (cartes du scandium, spectres EXAFS). Elle est complétée par une approche par lixiviations séquentielles qui permet de discriminer les proportions relatives de Sc adsorbé sur les surfaces minérales, ou absorbé (substitué à d'autres éléments dans les structures cristallines) par dissolutions successives dans différents solvants.

Les tests de faisabilité ont été réalisés avec un spectromètre portable de fluorescence X de type Niton, afin d'évaluer les limitations dans l'utilisation de cette approche de terrain. La déconvolution des spectres acquis sur Niton a été effectuée via l'utilisation du logiciel en libre accès PyMCA.

Enfin, la caractérisation de la ressource Sc (distribution tonnages et teneurs) à partir du proxy Al-Sc sur certains gisements de Koniambo et Tiébaghi a été effectuée via l'interrogation, sur l'aluminium, des bloc-modèles mis à disposition par KNS et la SLN, avec le concours des géologues-modélisateurs de ces compagnies.

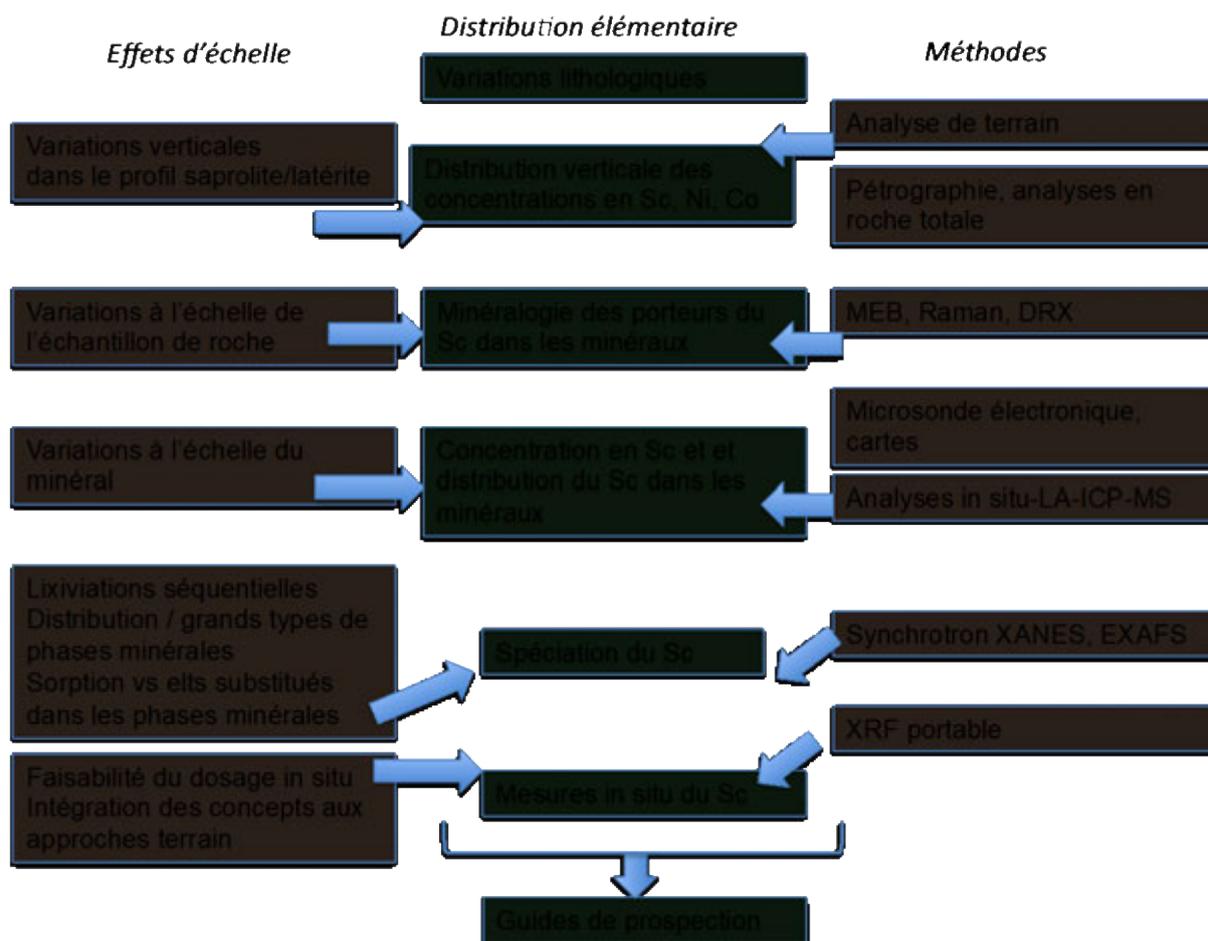


Figure 4 : Schéma des différents objectifs analytiques poursuivis dans ce travail avec indication des méthodes utilisées.

### 3. DÉROULEMENT DU PROJET

D'une manière générale, l'ensemble des tâches prévues a été exécuté, ce qui permet d'aboutir à une vision assez exhaustive du comportement du scandium dans plusieurs sites représentatifs. Les travaux ont donné lieu à la restitution de plusieurs livrables :

- Un rapport bibliographique traitant de la gîtologie et du potentiel économique du scandium a été communiqué au CNRT dans les trois premiers mois du projet (Teitler et al., 2016).
- Une communication orale aux sponsors et partenaires a été organisée en Nouvelle-Calédonie en avril 2016 à la suite de la mission de terrain, présentant l'avancement des travaux de recherche et les sites investigués lors de la mission.
- Un rapport détaillé de la mission d'échantillonnage a été réalisé en Juillet 2016.
- Un rapport d'avancement analytique sur les principales caractéristiques pétrographiques et géochimiques des profils étudiés a été réalisé en Février 2017.
- Un rapport de synthèse a été communiqué en mai 2017, documentant l'ensemble des travaux réalisés par le groupe au cours des 21 mois du projet Scandium 1.
- Une communication orale a été organisée en mai 2017 pour restituer l'ensemble des résultats acquis par le groupe à cette date. Cette communication a été présentée à l'auditorium de la province Sud à Nouméa puis à l'hôtel de la province Nord à Koné.
- Une communication orale a été organisée en juin 2018 à l'IRD. Cette communication a présenté (i) l'état d'avancement des différents projets Scandium dans le monde et des perspectives applications industrielles du scandium à cette date, (ii) une synthèse des résultats acquis précédemment lors du projet Scandium 1 (2015-2017), et (iii) l'ensemble des nouveaux résultats acquis lors de l'extension du projet, concernant les volets « devenir du Sc lors de l'altération des gabbros » et « caractérisation de la ressource Sc sur gisements à partir du proxy Al-Sc ».

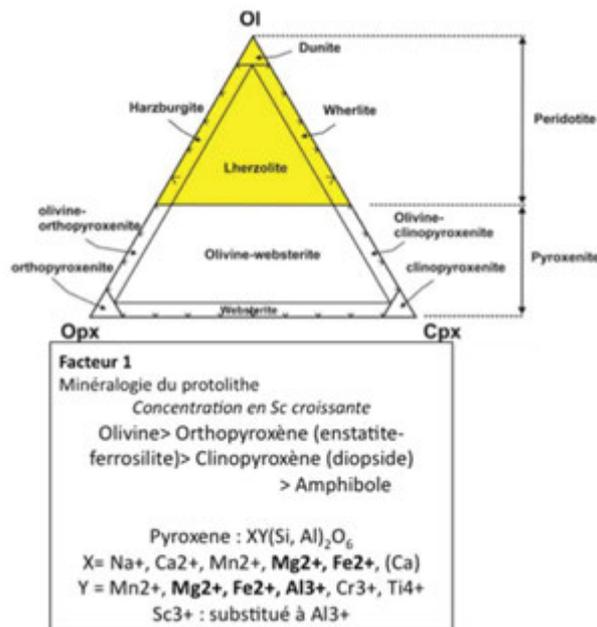
Le présent rapport, communiqué au CNRT en juillet 2018, constitue le rapport final du projet Scandium et de son extension. Ce rapport consiste en une synthèse exhaustive de l'ensemble des données acquises depuis le début du projet jusqu'à la fin de son extension.

## 4. FACTEURS ÉTUDIÉS

Sur la base des données bibliographiques (cf. rapport bibliographique, Teitler et al., 2016), le scandium est contrôlé par trois grands paramètres :

### 4.1. FACTEUR 1 : VARIATIONS LITHOLOGIQUES

Le scandium est un élément trivalent présent à faible concentration dans les silicates (olivine, pyroxènes, amphiboles) soit à des niveaux de concentration de quelques ppm à quelques dizaines de ppm. Il est potentiellement substitué à d'autres éléments trivalents comme l'aluminium, qui est peu abondant dans les structures de ces silicates mais à des niveaux de concentration supérieurs au Sc. L'introduction de  $Sc^{3+}$  dans ces structures exige des niveaux faibles de substitution pour maintenir les équilibres de charge, qui sont déjà régulés par les équilibres site tétraédriques (Si, Al) et sites X et Y (Figure 5).



**Figure 5 : Les principales phases minérales des péridotites : dunite (olivine dominante) - harzburgite (olivine et orthopyroxène), lherzolite (olivine orthopyroxène et clinopyroxène).**

Les données de la littérature indiquent une progression des teneurs en Sc depuis les olivines jusqu'aux clinopyroxènes. Les niveaux de concentrations dans les phases minérales des péridotites néocalédoniennes restaient à déterminer tout comme les fourchettes et moyennes représentatives de chaque faciès magmatique sain (gabbro, pyroxénite, amphibolite, microgranite).

## 4.2. FACTEUR 2 : IMPACT DU PROCESSUS DE LATÉRITISATION SUR LES CONCENTRATIONS

Les processus de latéritisation se caractérisent par une dissolution progressive à complète de tous les silicates, ce qui est dû à un temps de résidence court des eaux météoriques, et à l'impossibilité pour le système d'atteindre les produits de solubilité des silicates dans la partie haute du profil.

Seuls les sauts pH entre 6,5 (eau à l'équilibre avec la  $p\text{CO}_2$  atmosphérique) et 9 (pH résultant de l'interaction entre eau et olivine), et l'influence des processus d'évaporation (qui relèvent les niveaux de concentration en solution de Si et Mg) permettent d'atteindre les produits de solubilité et des états de saturation vis à vis d'espèces minérales comme les talc-like ou la sépiolite, ou le quartz (Golightly, 2010 ; Gali et al. 2012).

Dans ce processus de dissolution généralisée en milieu oxydant, les oxyhydroxydes sont les premières phases à précipiter :

- en premier lieu le fer sous forme de ferrihydrite  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  qui est remplacée par la goethite  $\text{FeO}(\text{OH})$  puis l'hématite  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en fonction de l'activité de l'eau, de la température et du pH,
- si disponibilité de Al, par la précipitation de gibbsite  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , puis de boehmite  $\text{AlO}(\text{OH})$ . C'est le cas dans les faciès contenant des minéraux plus riches en Al comme les plagioclases (cas des gabbros).

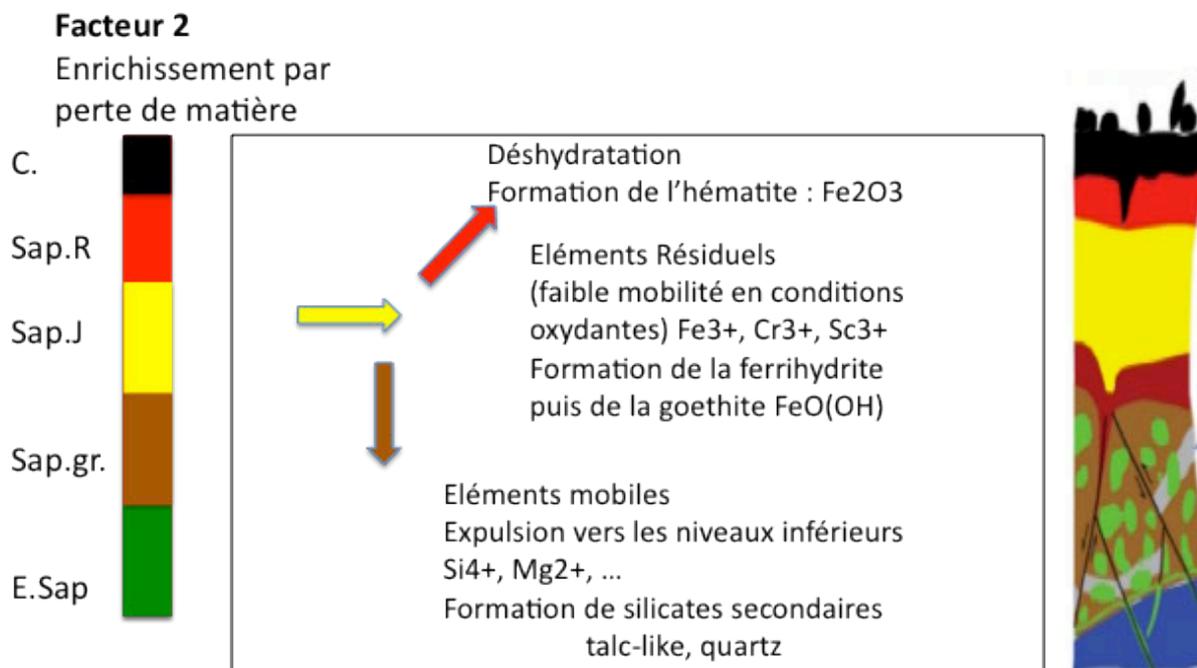


Figure 6 : Enrichissements secondaires liés à la latéritisation.

Le premier facteur d'enrichissement secondaire est donc lié au comportement résiduel des autres éléments peu solubles :  $\text{Fe}^{3+}$  et  $\text{Al}^{3+}$ . L'essentiel des autres éléments, s'ils ne sont pas adsorbés sur les minéraux à forte surface spécifique comme la goethite, sont exportés plus bas : c'est le cas de la silice ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ), et des cations divalents ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ , ...).

#### 4.3. FACTEUR 3 : IMPACT DU PROCESSUS DE LATÉRITISATION SUR L'ENRICHISSEMENT EN MÉTAUX

Les niveaux inférieurs du profil latéritique se caractérisent par un front pH autour de 9 qui participe à la reprécipitation de nombreux éléments lixiviés plus haut dans le profil : c'est le cas de la formation des silicates néoformés (talc-like, sépiolite, ou smectites).

Dans la partie intermédiaire du profil, des processus complexes sont liés aux fluctuations du niveau de la nappe, aux processus de déshydratation associés, et aux fluctuations du pH. On peut lister :

- la mise en disponibilité des métaux dans les horizons supérieurs : des processus d'expulsion par non-réincorporation des métaux dans le processus de conversion goëthite-hématite, et la capacité moindre de l'hématite à adsorber les métaux (moindre surface spécifique)
- les transferts potentiels des métaux, vers le bas du profil, par des solutions de pH plus acides, lors du renouvellement des solutions
- les processus de sorption à pH plus élevés, typiques des niveaux plus profonds, qui favorisent un nouveau piégeage des métaux suivant des fronts spécifique

L'ensemble favorise une redistribution des métaux, bien connue pour le nickel avec l'enrichissement de la saprolite et du saprock qui constituent les principaux minerais. Dans ces niveaux, la combinaison de la (i) la stabilité des silicates de type talc-like ou sépiolite suivant le pH, et (ii) l'atteinte des pH optimaux pour l'adsorption sur les hydroxydes de fer, favorise le second enrichissement secondaire.

En conclusion, les paramètres recherchés lors de ce travail sont représentés dans la Figure 7, la concentration en scandium dans un endroit précis d'un profil latéritique étant une combinaison des trois facteurs cités ci-dessus.

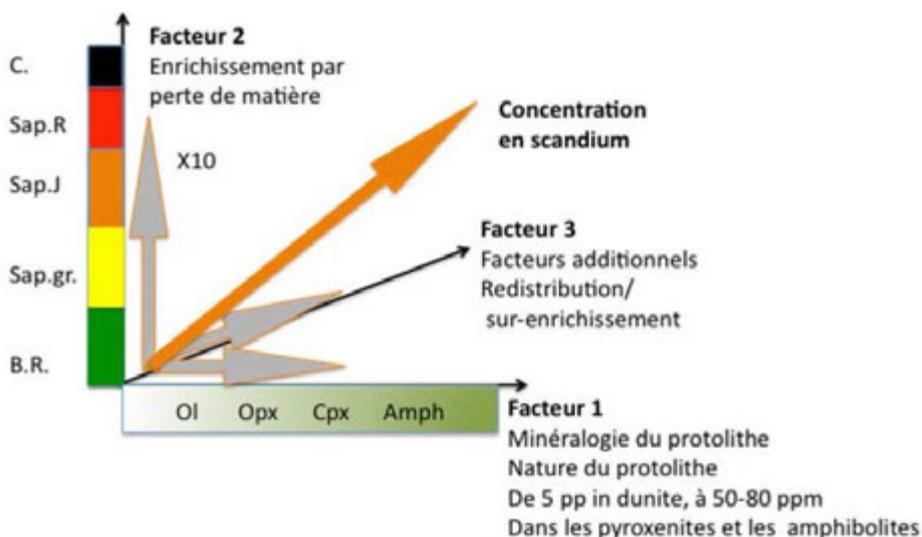


Figure 7 : Paramètres principaux contrôlant le développement des enrichissements en Sc.

## 5. SITES ÉCHANTILLONNÉS

L'échantillonnage réalisé a cherché à couvrir l'ensemble des paramètres cités. Les sites de Koniambo, Nakéty, N'Go et Cap Bocage ont permis d'échantillonner des profils développés sur harzburgite (lithologie dominante des péridotites). Des profils développés sur dunite ont également été échantillonnés à N'go et Cap Bocage. Les faciès de type Iherzolite ont été échantillonnés à Tiébaghi. Les profils latéritiques étudiés, couvre deux des trois types de gisements tels que présentés dans la classification de Maurizot et al. (in press) : les gisements de type plateau (continu et disséqué) et les gisements de type pente. L'échantillonnage y a été réalisé sur forage et/ou carrière depuis le bedrock jusqu'à la latérite rouge ou la cuirasse. Enfin, les profils d'altération développés sur intrusifs de type gabbro, pyroxénite, amphibolite et microgabbro ont été échantillonnés à Tiébaghi, N'Go, Koniambo et Nakéty.

	Setting	Basin	Plateau		Slope
			Continuous	Dissected	
Examples		Port Boisé Goro Prouty	Tiébaghi	Poum Koniambo Kopéto Thio	Ouaninou Camp des Sapins
Geology - geomorphology		1-2	3	3	4
Altitude ranges (m)		<0 - 200	300 - 600	700 - 900	> 1 000
Water table		High	Medium - high	Low	No
Structural control		Weak	High	High	Very high
Ore host rock		Fine saprolite	Saprolite	Saprolite saprock	Saprock
Dominant ore type		Oxide	Mg hydrous silicate		
Metals		Ni > Co	Ni		
Wt % Ni		1.5	1.6 - 2.5	1.6 - 2.5	> 2
Typical size (km <sup>2</sup> )		20	10	n x 1	n x 0.5
Tonnage (Mt)		100	50 - 100		n x 1
Stripping ratio		<1	7 - 10	5 - 7	3 - 5
Overburden thickness		Important	Important	Weak	Very weak
Economic factors					

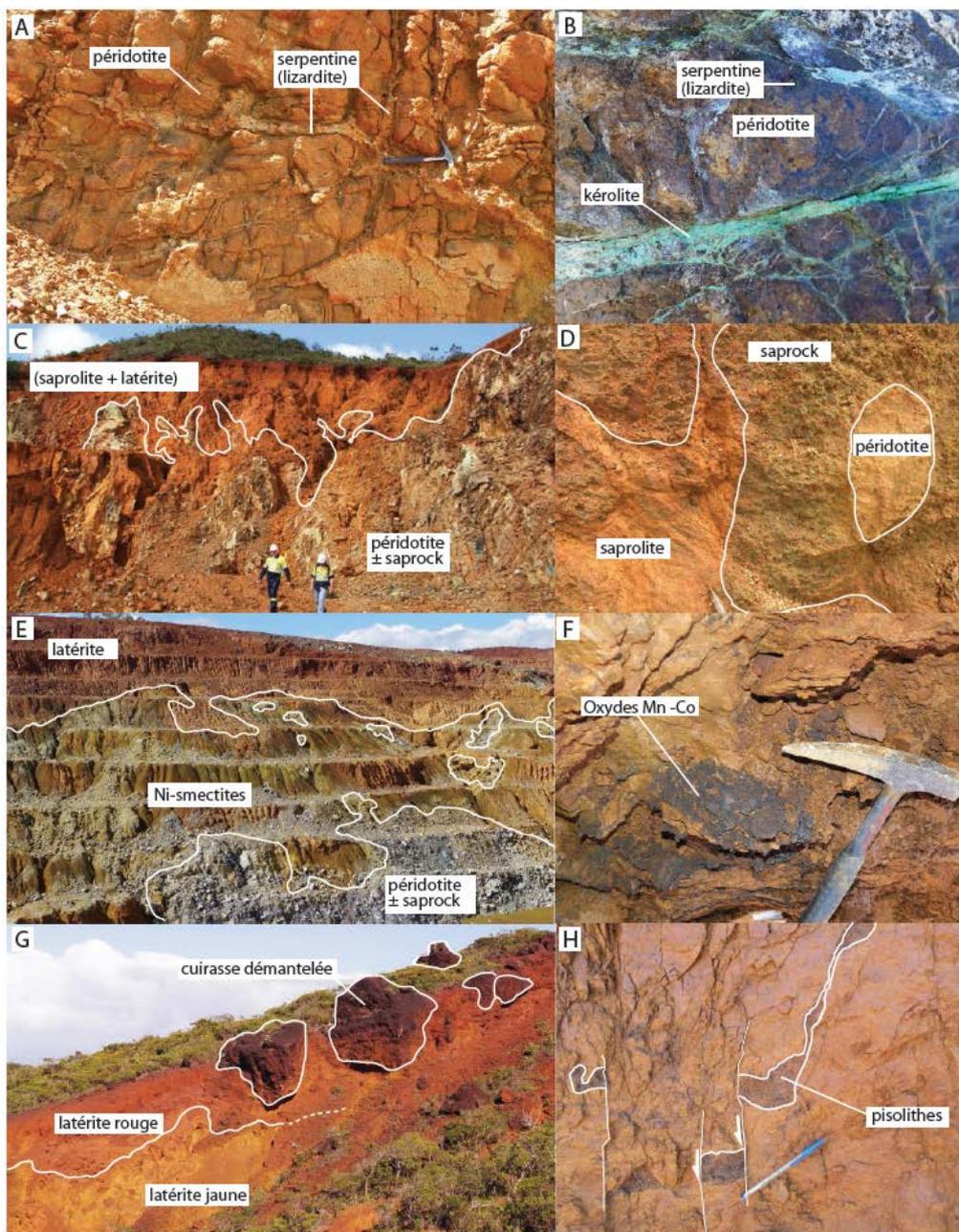
Figure 8 : Classification schématique des différents types de gisements latéritiques nickélifères de Nouvelle-Calédonie. D'après Maurizot al. (in press).

### 5.1. PROFILS LATÉRIQUES SUR GISEMENTS DE PLATEAU

#### 5.1.1. MASSIF DE TIÉBAGHI (GISEMENTS DE PLATEAU CONTINU)

La Société Le Nickel (SLN) exploite plusieurs carrières dans le massif de Tiébaghi, caractérisé par des latérites développées sur Iherzolite. Nous avons échantillonné deux profils complets d'altération sur le chantier East Alpha. Les profils d'altération y sont bien développés (puissance max. ~40m) et présentent notamment une importante accumulation

de smectites (Figure 9E). Un second profil, similaire mais de puissance plus modeste (~25m), a été échantillonné sur la carrière Fantoche. L'échantillonnage sur le chantier East Alpha a été complété par 4 nouveaux profils répartis sur l'ensemble de la carrière, dans le cadre du volet « proxy Al-Sc » de l'extension du projet.



**Figure 9 : Profils latéritiques développés sur péridotite.**

(A) harzburgite saine et réseau de veines de (Koniambo), (B) Veine de kherolite à l'interface bedrock-saprock (Koniambo), (C) Transition abrupte entre bedrock+saprock (dominés par les silicates) et saprolite+latérite (dominés par les oxydes de fer) (Koniambo). (D) Altération d'un bloc de péridotite en saprock et en saprolite (Cap Bocage), (E) Zone à Ni-smectites bien développée (Tiébaghi), (F) Zone de transition à oxydes de Mn-Co à l'interface saprolite-latérite (Cap Bocage), (G) latérite jaune, latérite rouge et cuirasse démantelée (Tiébaghi), (H) Dyke neptunien de matériel pisolithique dans la latérite jaune (Cap Bocage).

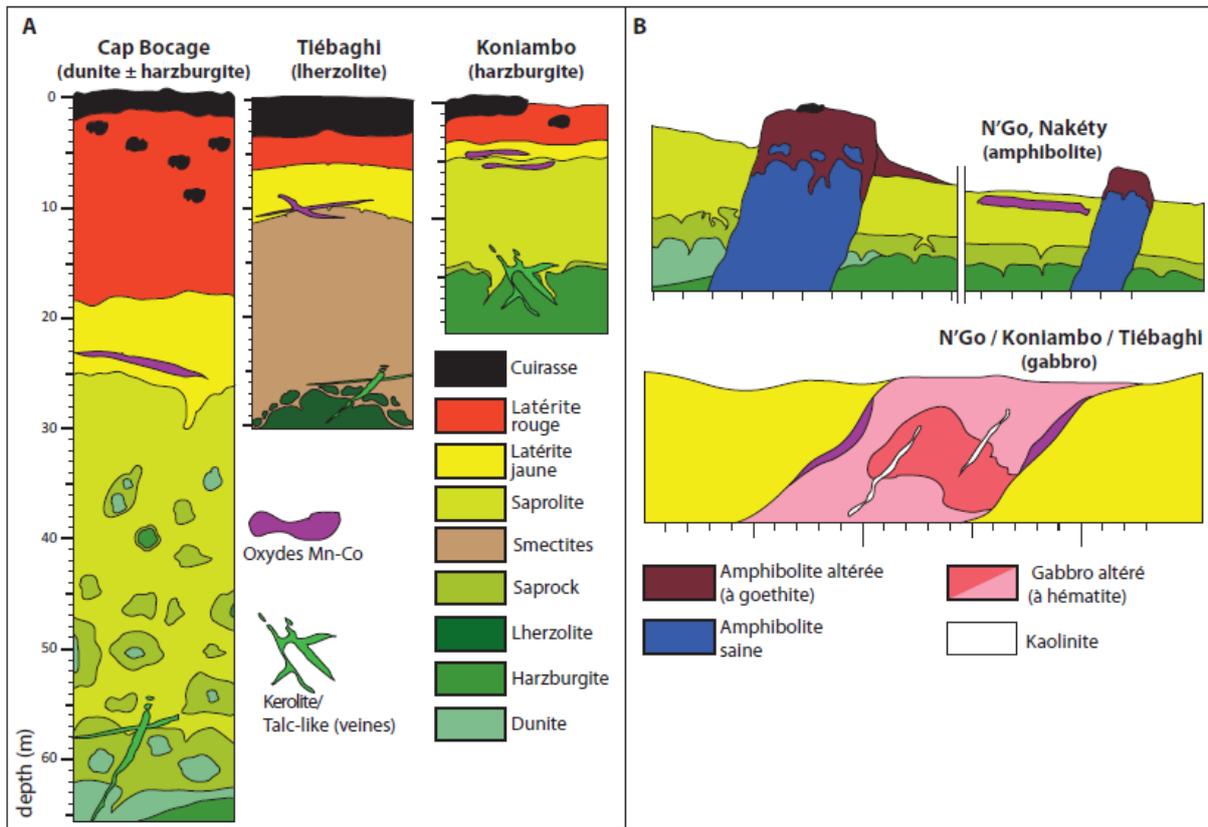
### 5.1.2. MASSIFS DE KONIAMBO ET NAKÉTY (GISEMENTS DE TYPE PLATEAU DISSÉQUÉ À HARZBURGITE DOMINANTE)

La compagnie Koniambo Nickel SAS (KNS) exploite plusieurs carrières dans le massif de Koniambo. Nous avons porté notre attention sur 3 zones : Trazy, Test Pit et Ma-Oui. Le massif de Koniambo a déjà fait l'objet de plusieurs études portant sur les processus d'enrichissement en Ni dans la saprolite, notamment les zones de Trazy et Test Pit (Cathelineau et al., 2016a, 2016b) où plusieurs types de minéralisations ont été décrits (Ni-kérolite, pimélite). Certains des échantillons précédemment collectés sur la zone de Trazy par Ulrich (2013) et Bailly et al. (2014, projet NICKAL) avaient été préalablement intégrés et investigués dans la première phase du projet Scandium. Sur Trazy, nos investigations ont principalement ciblé sur des échantillons provenant de deux profils latéritiques (forages OPB7, Figure 10, et I5690) développés sur harzburgite. Le forage I5690 présente le profil latéritique le plus développé (~50m contre ~15m pour OPB7). Trois autres carottes de forages ont par la suite été échantillonnées sur la zone de Trazy dans le cadre du volet « proxy Al-Sc » de l'extension du projet. La zone du Test Pit représente le deuxième site d'échantillonnage au sein du massif de Koniambo. Sur le chantier Test-pit, deux carottes de forages recoupant la plupart des horizons depuis la roche quasi-saine jusqu'à la latérite rouge ont été échantillonnées. Enfin, sur Ma-Oui, l'échantillonnage a été réalisé sur 5 carottes de forages dans le cadre du volet « proxy Al-Sc » de l'extension du projet.

A Nakéty, un profil d'altération développé sur harzburgite a été échantillonné sur la concession Ménélik. Un second profil a été échantillonné sur le chantier Eureka 1.

### 5.2. PROFILS LATÉRIQUES SUR GISEMENTS DE TYPE PENTE

Les gisements de Cap Bocage et de N'Go (Massif du Sud) peuvent s'apparenter à des gisements de type pente. À Cap Bocage, nous avons focalisé notre échantillonnage sur la carrière de CVW et sur deux forages carottés (PZ1B et PZ2B). Sur la carrière CVW, le protolithe est principalement harzburgitique, avec quelques alternances de dunité. Les deux séries d'échantillons des forages étudiés (PZ1B et PZ2B) présentent chacune un profil complet d'altération depuis le protolithe jusqu'à la cuirasse latéritique. Sur PZ1B (Figure 10), le protolithe est principalement dunitique. La saprolite reste peu développée et limitée aux épontes des blocs de roche saine. La portion supérieure du profil présente des horizons latéritiques caractéristiques : latérite jaune, latérite, cuirasse et grenaille. Sur PZ2B, le protolithe est essentiellement harzburgitique. À N'Go, au sein de la mine Ada (MKM), un forage (PS43, 17m) mis à disposition par MKM sur la zone de « plateau nord » nous a permis d'échantillonner un profil d'altération développé sur dunité + harzburgite et intrudé par un filon de microgabbro. Une série additionnelle d'échantillons provenant de forages réalisés sur la concession PB4 (NMC), conditionnés sous forme de perles boratées, a été fournie par NMC en vue d'y estimer les teneurs en Sc (dans le cadre de l'extension du projet).



**Figure 10 : Représentation schématique des différents types de profils latéritiques étudiés.**

(A) Profils sur péridotites, (B) profils sur roches intrusives

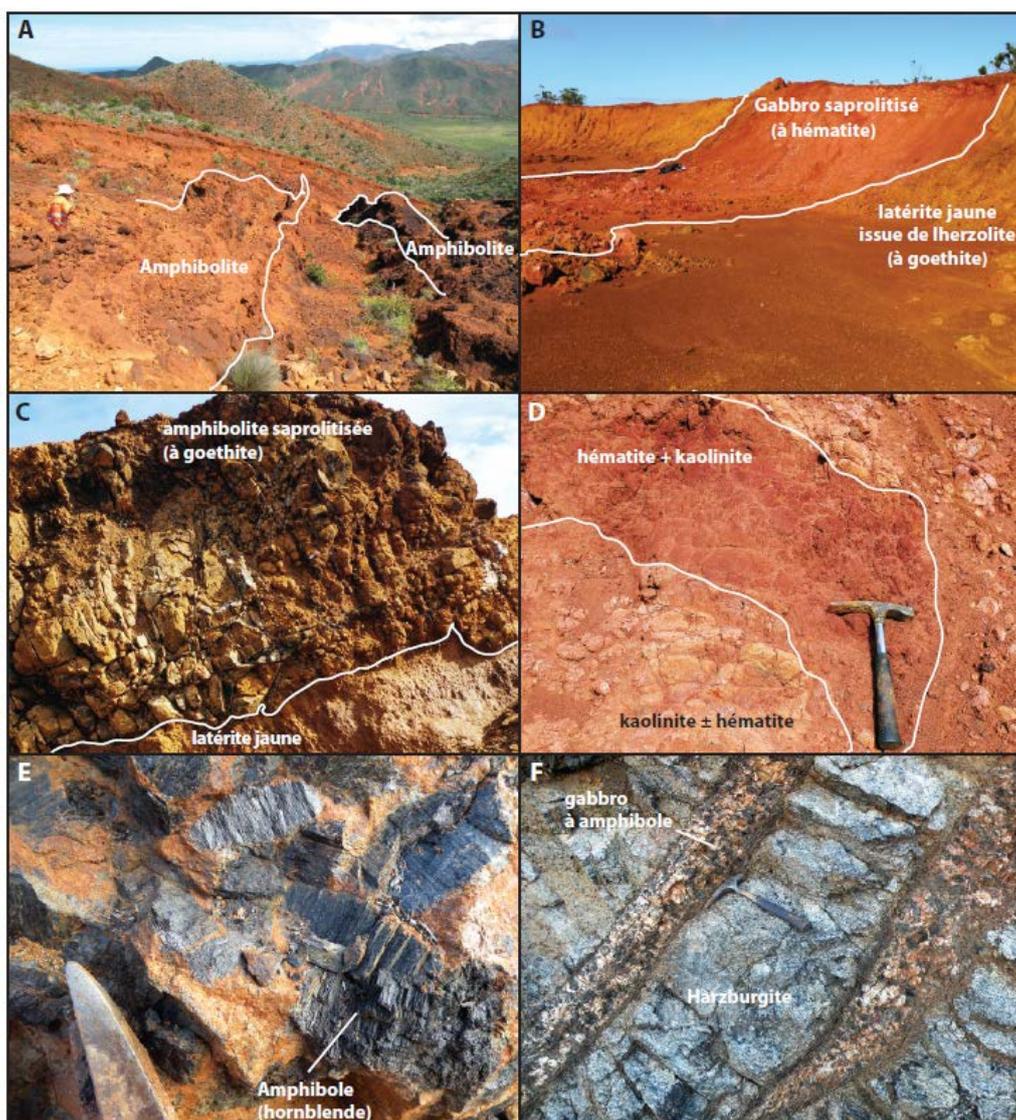
### 5.3. PROFILS LATÉRITIQUES DÉVELOPPÉS SUR FILONS INTRUSIFS

#### 5.3.1. MASSIFS DE N'GO ET NAKÉTY : AMPHIBOLITES/PYROXÉNITES ET GABBROS

Plusieurs profils d'altération sur amphibolites, pyroxénites à amphibole et gabbros ont été échantillonnés sur les massifs de N'Go de Nakéty, qui présentent une densité et diversité importantes de filons. A N'Go, les profils sur amphibolites et pyroxénites ont été essentiellement échantillonnés sur les concessions de la NMC (PB4, PB5, Triangulaire et Ouragan ; Figure 11A, 11C), ainsi que sur un affleurement à proximité de la rivière N'Go (Figure 11E). Sur la mine Ada (MKM), l'échantillonnage des faciès intrusifs a ciblé des profils d'altération sur microgabbro (zone de « plateau sud ») et sur microgranite (zone de « plateau nord »). À Nakéty, deux filons d'amphibolite et de pyroxénite à amphibole ont été échantillonnés sur la concession Joseph. Quelques échantillons de gabbros sains et altérés y ont également été collectés. Enfin, sur la concession Ménélik, un forage destructif mis à disposition par la NMC a été échantillonné ; celui-ci intersecte (i) un profil latéritique « classique » et quasi-complet (roche saine jusqu'à latérite jaune) développé sur harzburgite, et (ii) des passages de type intrusifs (essentiellement gabbroïques, avec quelques veines de pyroxénite).

#### 5.3.2. MASSIFS DE KONIAMBO ET TIÉBAGHI : GABBROS SAPROLITISÉS ENCAISSANTS DE LATÉRITE JAUNE

Dans le cadre du volet « devenir du Sc lors de l'altération des gabbros » de l'extension du projet, plusieurs profils d'altération comprenant des filons majeurs de gabbros altérés (à kaolinite et hématite) et leurs encaissants de péridotites latérisées ont été échantillonnés à Koniambo et Tiébaghi. A Koniambo, un profil vertical intersectant le gabbro saprolitisé de grande dimension (~25 m d'épaisseur) et la latérite jaune sous-jacente (issue de harzburgite) a été échantillonné à proximité de la rampe d'accès de la mine. À Tiébaghi, deux profils horizontaux intersectant un filon subvertical de gabbro (~8 m d'épaisseur) dans le chantier Alpha Sud et l'encaissant de latérite jaune (issue de lherzolite) ont également été échantillonnés (Figure 11B, 11D). Enfin, la zone « aire de stockage », en base du massif de Tiébaghi, a également été investiguée pour ses occurrences de gabbros sains (Figure 11F). Cette zone est caractérisée par la présence de dykes (épaisseur max. ~30cm) de gabbro pegmatitique recoupant la harzburgite.



**Figure 11 : Profils développés sur faciès intrusifs.**

5A) Filons d'amphibolite saprolitisés (N'Go), (B) Gabbro saprolitisé à kaolinite-hématite (Tiébaghi), (C) Amphibolite saprolitisée à goéthite (N'Go), (D) Gabbro saprolitisé avec zonations internes (Tiébaghi), (E) Amphibolite saine à porphyroblastes d'amphibole (hornblende) (N'Go), (F) Filons de gabbro nonaltérés (Tiébaghi).

## 6. PÉTROLOGIE DES LATÉRITES

L'étude par microscopie optique et microscopie électronique à balayage (MEB) des différents profils d'altération échantillonnés sur l'ensemble de la Nouvelle Calédonie révèle des séquences paragenétiques complexes évoluant depuis les protolithes sains, de nature variable, jusqu'à la latérite et la cuirasse ferrugineuse.

### 6.1. ROCHES SAINES

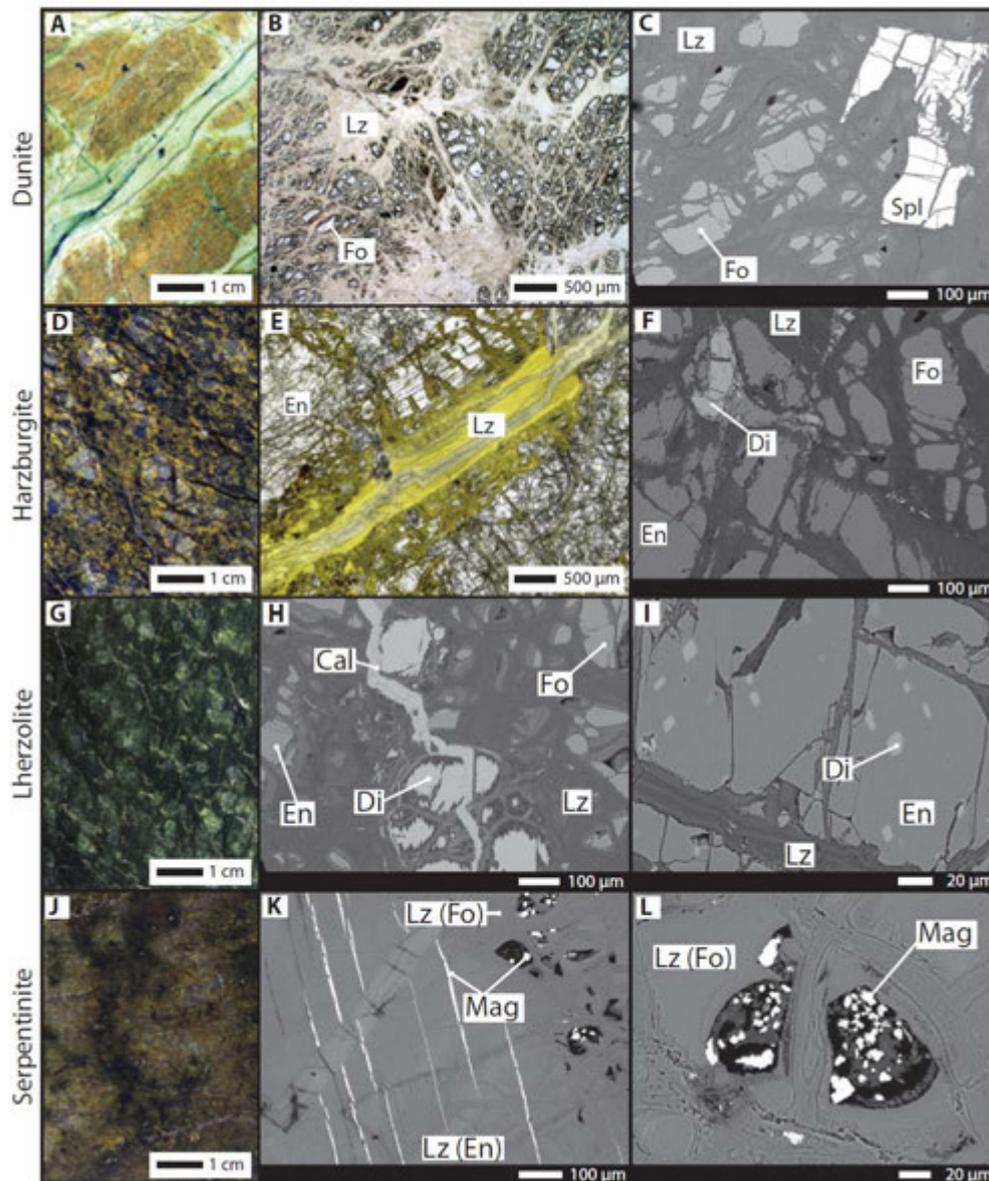
#### 6.1.1. PÉRIDOTITES

Les protolithes péridotitiques présentent des assemblages minéraux variables depuis les faciès dunitiques jusqu'aux faciès harzburgitiques puis lherzolitiques (Figure 12). Une grande variabilité du degré de serpentinisation est également observée. La serpentinisation s'initie par la formation du maillage de lizardite, puis par le remplacement partiel ou total des silicates primaires par la lizardite, et la formation de magnétite.

Les dunites, échantillonnées à Cap Bocage et à N'Go, sont essentiellement constituées d'olivine (forstérite) et de serpentine (lizardite), avec orthopyroxène (enstatite) et spinelle chromifère en phases accessoires (Figure 12A-12C).

Les harzburgites, présentes et échantillonnées sur l'ensemble des sites étudiés (à l'exception de Tiébaghi où seules les lherzolites ont été considérées), sont constituées d'un assemblage minéral à forstérite – enstatite – lizardite  $\pm$  spinelle  $\pm$  clinopyroxène (diopside) (Figure 12D-12F). Les harzburgites étudiées présentent des proportions relatives variables de forstérite et d'enstatite : les harzburgites de Koniambo et Nakéty apparaissent les plus riches en enstatite et contiennent du diopside en phase accessoire (le diopside est vraisemblablement absent des harzburgites de N'Go et de Cap bocage).

À Tiébaghi, les protolithes lherzolitiques sont intensément serpentinisés (Figure 12J-12L), et l'assemblage minéral péridotitique primaire n'est ainsi que localement préservé. Les silicates constitutifs de la lherzolite sont l'enstatite + forstérite  $\pm$  diopside  $\pm$  spinelle (Figure 12G-12I). Contrastant avec les harzburgites à diopside observées à Koniambo et à Nakéty, le diopside constitutif de la lherzolite de Tiébaghi forme de grandes plages automorphes ainsi que des textures d'exsolutions dans l'enstatite (Figure 12H-12I). La proportion de diopside au sein du protholithe lherzolitique est significativement supérieure à celle observée sur protolithe harzburgitique mais reste largement en deçà des proportions d'enstatite et de forstérite. Il est à noter que les lherzolites néocalédoniennes présentent une certaine variabilité de composition : les lherzolites à spinelle de Tiébaghi étudiées dans le cadre de ce projet sont relativement pauvres en clinopyroxènes en comparaison des lherzolites à spinelle du massif de Poum (Ulrich et al., 2010), et diffèrent également des lherzolites à plagioclases, notamment décrites à Belep (Bailly et al., 2015). La calcite observée en veines dans les lherzolites de Tiébaghi est possiblement issue de la dissolution du diopside lors de la serpentinisation, en présence de CO<sub>2</sub>. Dans la lherzolite fortement serpentinisée, tous les silicates magnésiens sont remplacé par la lizardite (Figure 12J-12L). Les textures héritées (forstérite vs. enstatite ou diopside) sont préservées et notamment mises en évidence par la texture des magnétites secondaires (sub-automorphes en remplacement de la forstérite, ou le long des plans de clivage des pyroxènes).



**Figure 12 : Textures et assemblages minéraux des principaux faciès péridotitiques.**

(A-C) dunite, (D-F) Harzburgite, (G-I) Iherzolite à spinelle modérément serpentinisée, (J-L) Iherzolite à spinelle intensément serpentinisée (serpentinite). Lz = lizardite, Fo = forstérite, Spl = spinelle, En = enstatite, Di = diopside, Cal = calcite, Lz (fo) = lizardite après forstérite, Lz (En) = lizardite après enstatite, Mag = magnétite.

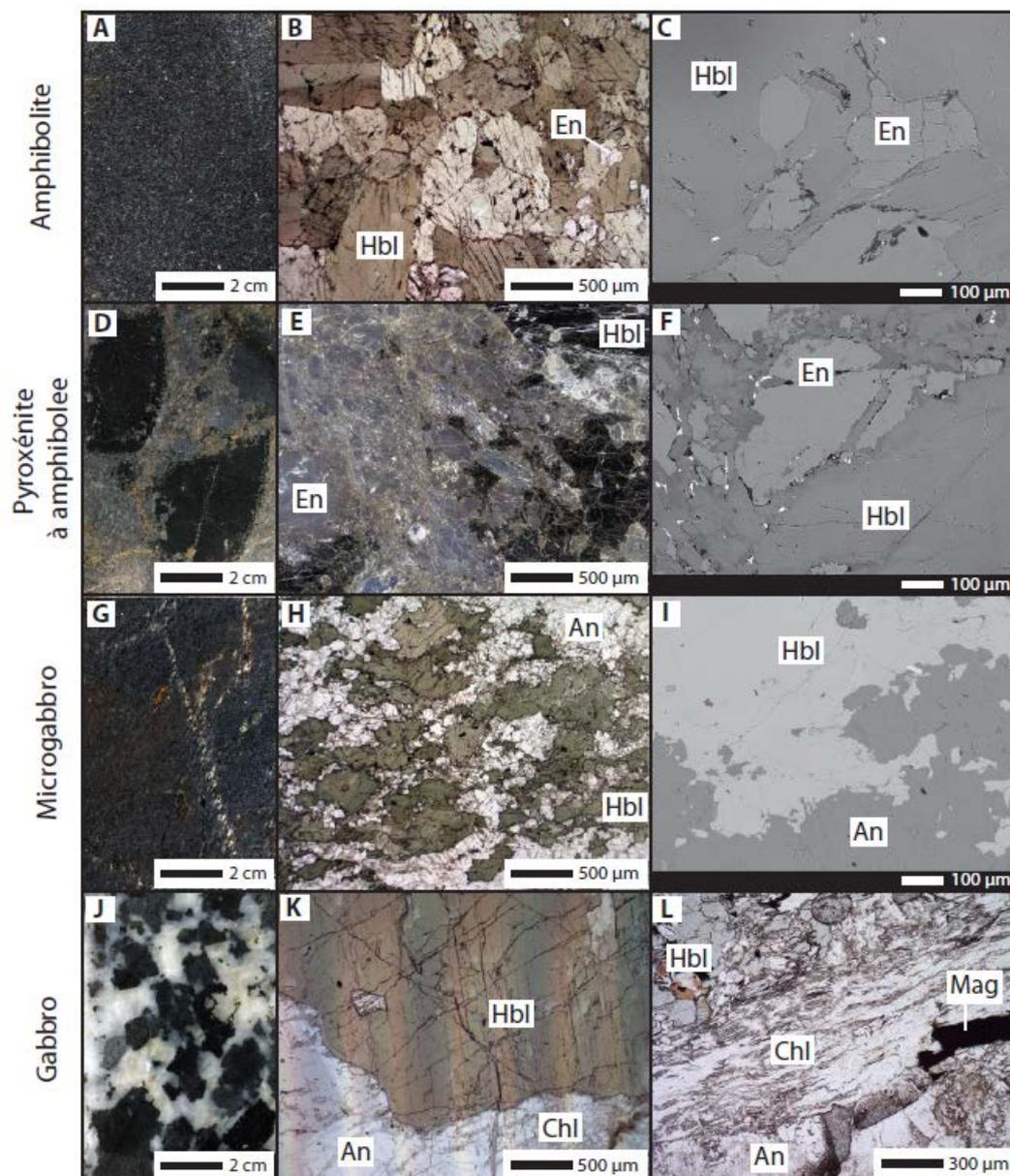
### 6.1.2. INTRUSIFS MAGMATIQUES

Les intrusifs magmatiques échantillonnés à N'Go, Nakéty et Tiébaghi (amphibolites, gabbros amphibolitiques, pyroxénites et microgranites) présentent une large variabilité d'assemblages minéraux et de textures, microgrenues à pegmatitiques (Figure 13).

Les amphibolites, échantillonnées à N'go et Nakéty, sont constituées d'un assemblage à hornblende + orthopyroxène ± magnétite. La proportion entre hornblende et orthopyroxène est variable, depuis des faciès essentiellement dominés par la hornblende (Figure 13A-13C) jusqu'à des faciès dominés par l'orthopyroxène (pyroxénite à amphibole, Figure 13D-13F). Les amphibolites (ou pyroxénites à amphiboles) présentent des textures variables depuis des faciès microgrenus jusqu'à des faciès pegmatitiques.

Les gabbros à amphiboles, échantillonnés à N'Go (microgabbro, Figure 13G-13H) et Tiébaghi (gabbro pegmatitique, Figure 13J-13L), sont essentiellement composés de plagioclases (généralement anorthite ou andésine) et d'amphiboles ± chlorite ± magnétite ± muscovite ± apatite ± pyrite.

Les larges variations de composition minéralogique et de texture des amphibolites et pyroxénites sont souvent observées jusqu'à l'échelle de l'affleurement. Deux filons amphibolitiques distants de quelques mètres et visuellement semblables au premier abord peuvent ainsi présenter des assemblages minéraux et des textures radicalement différentes. Une telle variabilité peut également est observée au sein d'un même corps intrusif.



**Figure 13 : Textures et assemblages minéraux des principaux faciès d'intrusifs.**

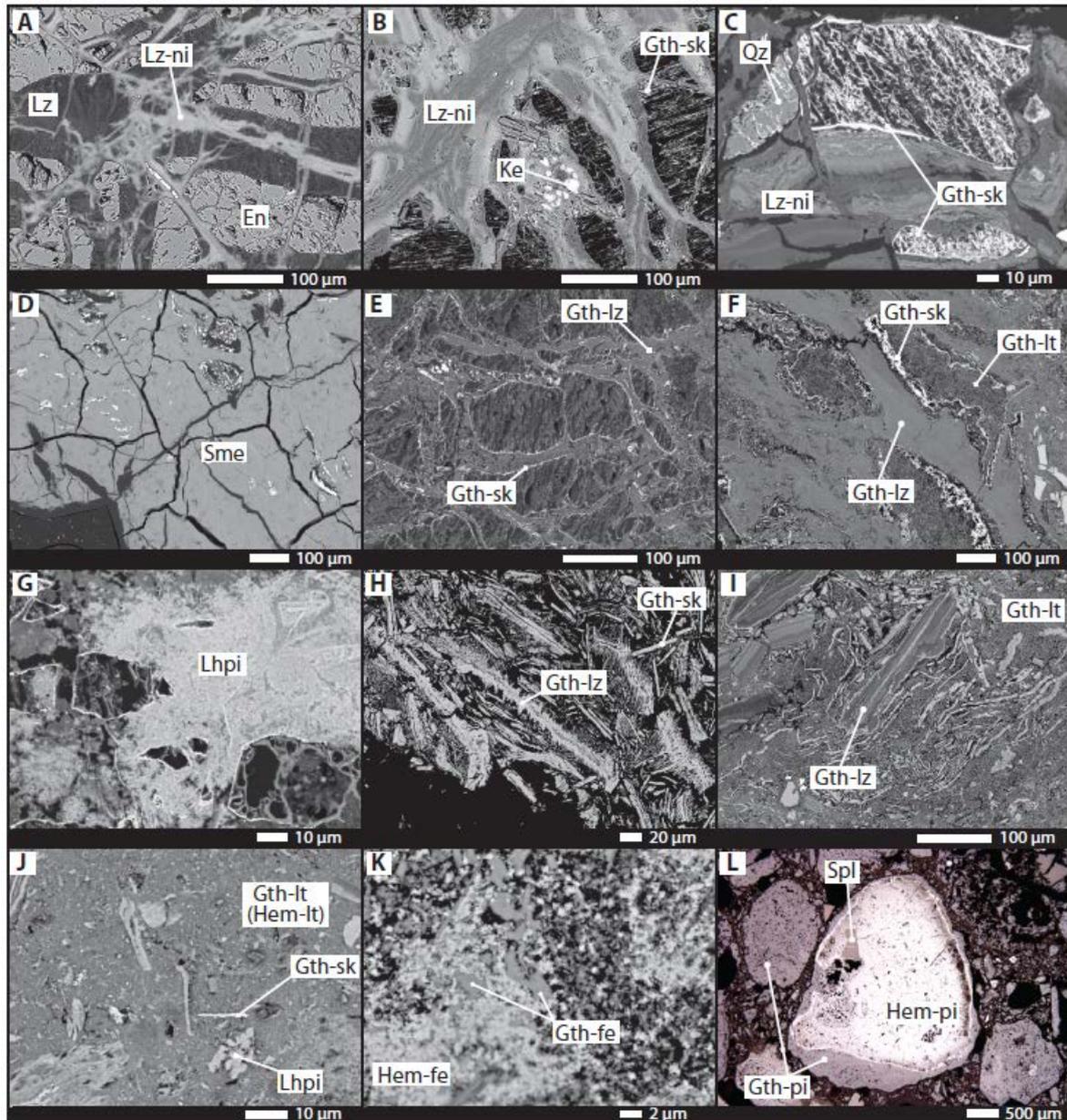
(A-C) amphibolite microgrenue, (D-F) pyroxénite à amphibole, (G-I) microgabbro, (J-L) gabbro. Hbl = hornblende, En = enstatite, An = anorthite, Chl = chlorite, Mag = magnétite.

## 6.2. SÉQUENCES PARAGÉNÉTIQUES ASSOCIÉES À LA LATÉRITISATION

### 6.2.1. LATÉRITISATION DES PÉRIDOTITES

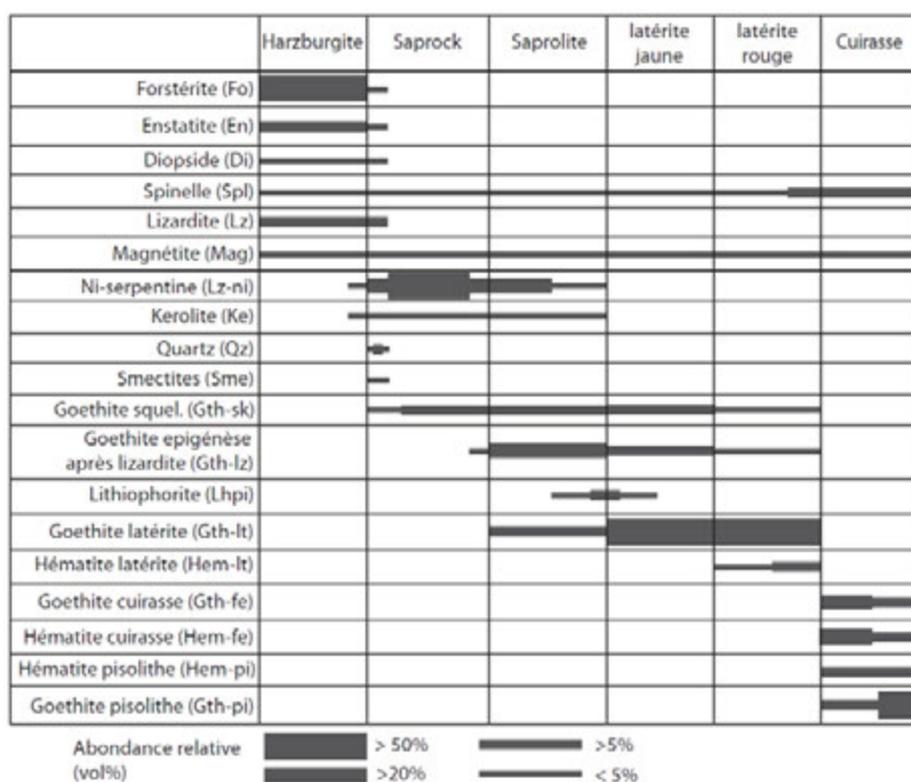
Mis à part les profils atypiques observés à Tiébaghi où de larges zones à smectites (nontronites) sont développées dans la saprolite, l'altération des péridotites suit une séquence paragénétique globalement similaire sur l'ensemble des profils étudiés (Figures 14, 15), incluant notamment, depuis la base vers le sommet :

- Une zone de saprock caractérisée par la dissolution et squelettisation des silicates primaires en goethite « squelettique » nickélifère (Gth-sk) et la formation de serpentine nickélifère (Lz-ni) et de kérolite (Ke) aux dépens de la lizardite (Lz).
- Une zone de saprolite caractérisée par le remplacement progressif du maillage serpentineux par la goethite, avec préservation des textures (Gth-lz).
- Une zone de latérite de transition marquée par la destruction progressive des textures héritées et par des enrichissements significatifs en oxydes de Mn (lithiophorite, asbolane) porteurs du Co.
- Une zone de latérite jaune essentiellement constituée de goethite latéritique Gth-lt, avec fragments de goethites pré-existantes Gth-sk et Gth-lz (présentant une destruction avancée des textures héritées). La goethite ayant épigénisé la lizardite (Gth-lz) se délite ainsi progressivement suivant les plans de croissance initiaux, et s'enrichit en Ni, formant des fragments aciculaires texturalement similaires à la goethite « squelettique » Gth-sk.
- Une zone de latérite rouge marquée par la formation d'hématite (Hem-lt) au sein du ciment de goethite latéritique (Gth-lt).
- Une cuirasse ferrugineuse présentant, selon les conditions de préservation, une évolution depuis des textures litées à la base jusqu'à des textures pisolithiques au sommet. La cuirasse à texture litée est constituée de cristaux de goethite et d'hématite de dimensions micrométriques (Gth-fe, Hem-fe) formant un ciment cuirassé compétent. La cuirasse à texture pisolithique est constituée de pisolithes d'hématite (Hem-pi) et de goethite (Gth-pi) cimentés par une matrice également goethitique ou hématitique de texture massive (indurée par néoformation de goethite et hématite) à pisolithique (issu du démantèlement de la cuirasse). La majorité des pisolithes sont de nature goethitique, et se forment parfois en surcroissance de pisolithes ou de clastes hématitiques. Des clastes angulaires de goethite sont également localement observés.



**Figure 14 : Microphotographies MEB de profils développés sur péridotite**

(A) Interface Bedrock–saprock : initiation de la dissolution des silicates olivine/pyroxène et formation de serpentine/talc-like nickélifères (Lz-ni) aux dépens de la lizardite (Lz). (B-C) Saprock : dissolution des silicates primaires olivine/pyroxène, formation de goethite squelettique (Gth-sk) préservant la structure de silicates primaires, et formation de serpentine/talc-like nickélifère (Lz-ni) et de kérolite (Ke). (D) zone à Ni-smectites deTiébaghi : remplacement des serpentines primaires et secondaires par les smectites (Sme), (E-F) Saprolite : transformation isovolumétrique des serpentines en goethite (Gth-lz) et remplissage des pores par la goethite latéritique (Gth-lt). (G) Zone de transition : accumulation d'oxydes à Mn-Co-Ni, principalement lithiophorite (Lhpi). (H-I) latérite jaune : fragmentation des structures pré-existantes. (J) latérite rouge : destruction avancée des textures pré-existantes, et formation of d'hématite latéritique (Hem-lt) dans la matrice de goethite latéritique (Gth-lt). (K) cuirasse ferrugineuse : formation de goethite (Gth-fe) et hématite (Hem-fe) bien cristallisées (L) horizon pisolithique : formation de goethite pisolithique et nodulaire (Gth-pi) localement en surcroissance d'hématite pisolithique (Hem-pi) et/ou encapsulant du spinelle chromifère (Spl).

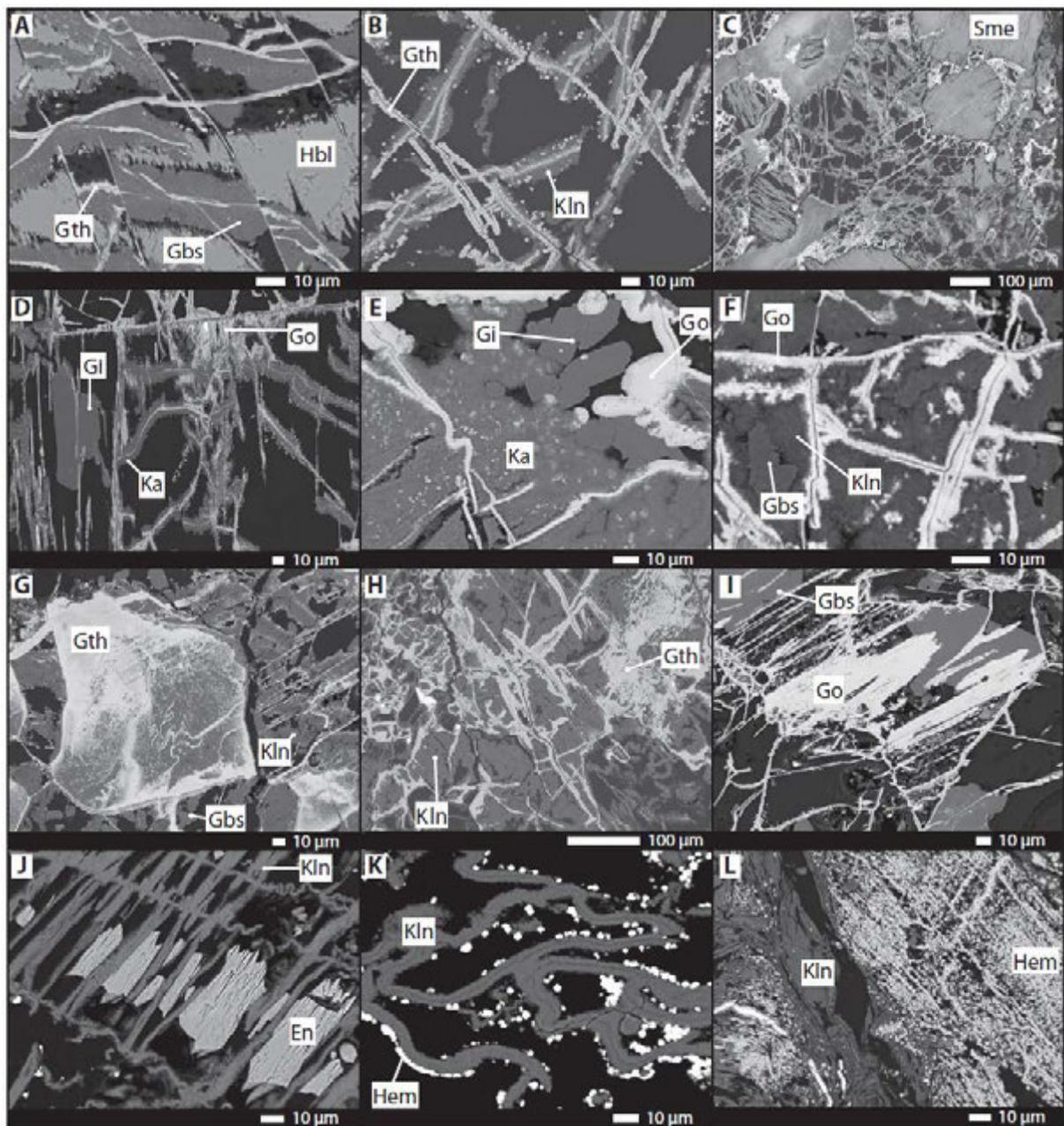


**Figure 15 : Évolution des assemblages minéraux le long d'un profil latéritique caractéristique développé sur harzburgite.**

### 6.2.2. LATÉRITISATION DES INTRUSIFS

L'altération des intrusifs magmatiques, relativement riches en aluminium, conduit à la formation d'assemblages minéraux distincts de ceux produits par l'altération des péridotites, pauvres en aluminium.

L'altération des amphibolites et des pyroxénites s'initie par la dissolution des minéraux primaires (hornblende, pyroxènes), puis par le remplacement des pyroxènes préférentiellement par des smectites (Sme), et de la hornblende soit par la kaolinite (Kln) + Al-goethite (Gth), soit par la gibbsite (Gbs) + Al-goethite. Ce remplacement s'effectue notamment le long des plans de clivage qui constituent des plans de circulation préférentielle pour les fluides altérants (Figure 16A-16D). L'altération se poursuit par la ferruginisation des smectites, le lessivage partiel de la kaolinite ou son remplacement par la gibbsite, et la surcroissance de Al-goethite ((Figure 16E-16I). Il apparait, de manière générale, que la goethite alumineuse soit le principal porteur du Fe dans les amphibolites et les pyroxénites altérées. À contrario, l'altération des gabbros conduit préférentiellement à la formation d'assemblages à kaolinite + hématite alumineuse ± gibbsite (Figure 16J-16L). Cette observation, c.-à.-d. l'altération préférentielle des amphibolites/pyroxénites et des gabbros en goethite et en hématite, respectivement (pour les porteurs secondaires du Fe), est observée de manière assez systématique et est interprétée comme résultant principalement de différences du rapport Al/Fe des protolithes intrusifs. Il est cependant à noter qu'un profil latéritique développé sur cumulat gabbroïque provenant de Goro (échantillonné par B. Sevin ; Bailly et al., 2015) contient vraisemblablement des proportions de goethite plus élevées que les altérites des filons gabbroïques décrites dans ce rapport, dominées par kaolinite-goethite.



**Figure 16 : Microphotographies MEB de profils développés sur intrusifs**

(A-I) amphibolite saprolitisée. (J-L) gabbro saprolitisé et latéritisé. Hbl = hornblende, Gth = goethite, Gbs = gibbsite, Kln = kaolinite, En = enstatite, Hem = hematite.

## 7. FERTILITÉ DU PROTOLITHE

La fertilité des protolithes, c'est-à-dire la teneur initiale en Sc (et REE) des roches saines, constitue un des contrôles majeurs sur les teneurs de leurs équivalents latérisées. Ce chapitre documente la variabilité des teneurs en Sc (et REE) des différents protolithes étudiés (péridotites + intrusifs), sur la base de données en roche totale (acquises au SARM par ICP-MS) et de données in-situ sur les différents silicates primaires (acquises à GéoRessources par LA-ICP-MS).

### 7.1. ROCHE TOTALE

#### 7.1.1. PÉRIDOTITES

Les analyses en roche totale des différents faciès de péridotites saines confirment l'existence d'un important contrôle lithologique sur les teneurs en Sc :

- les dunites (Figure 17A) présentent les teneurs les plus faibles (2 –7 ppm Sc). Les dunites de Cap Bocage sont vraisemblablement les plus appauvries vis-à-vis du Sc, avec des teneurs n'excédant pas 3 ppm, alors que les dunites de N'Go et certaines dunites de Koniambo (précédemment analysées par M. Ulrich) présentent des teneurs légèrement supérieures (5-7 ppm).
- les harzburgites, échantillonnées sur la plupart des sites étudiés, présentent des teneurs d'environ 4-12 ppm Sc (entre 7 et 9 ppm pour la plupart).
- les lherzolites représentent les péridotites les plus fertiles vis-à-vis du Sc avec des teneurs d'environ 8-25 ppm. Plus précisément, les lherzolites échantillonnées sur les chantiers East Alpha et Fantoche (Tiébaghi) dans le cadre de ce projet (carrières East Alpha et Fantoche) présentent des teneurs de 8-10 ppm, alors que les lherzolites échantillonnées par M. Ulrich sur la zone de Babouillat (Tiébaghi), présentent des teneurs jusqu'à 25 ppm Sc (Figure 17A).

Le Sc apparaît assez bien corrélé à l'Al et au V dans les péridotites saines, depuis les faciès dunitiques pauvres en Al-V-Sc jusqu'aux faciès lherzolitiques relativement plus riches (Figure 17B). Les teneurs en Al ou en V des protolithes péridotitiques sont ainsi caractéristiques du type de péridotite (dunite, harzburgite ou lherzolite) et la détermination de ces teneurs permet indirectement d'estimer la teneur en Sc de ces protolithes, tel que :

$$\text{Sc (ppm)} = 20,4 * \text{Al (\%)}$$

$$\text{Sc (ppm)} = 0,20 * \text{V (ppm)}$$

Toutes les péridotites saines présentent des teneurs très faibles en terres rares (REE), la somme des REE excédant rarement 1 ppm (Figure 18).

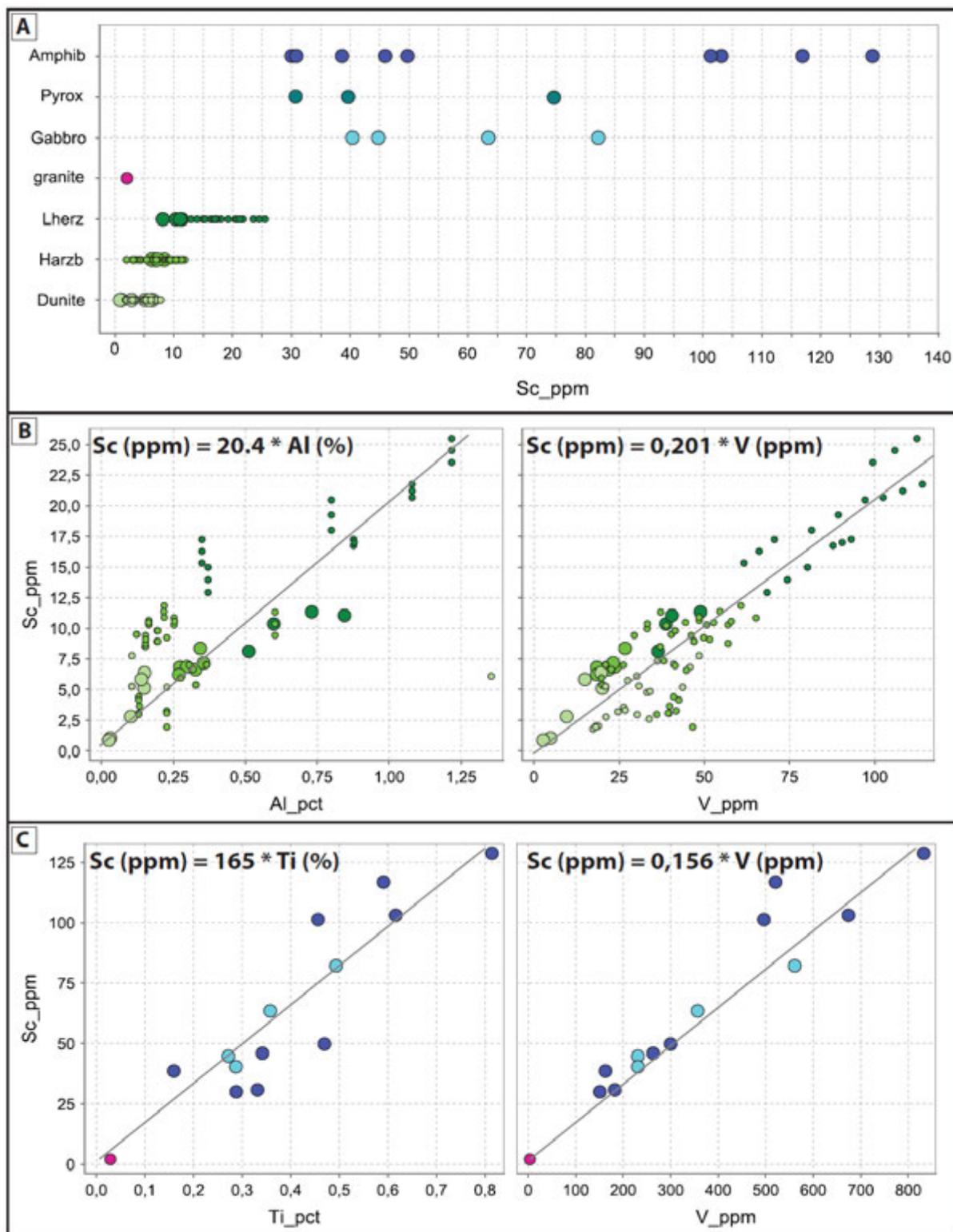
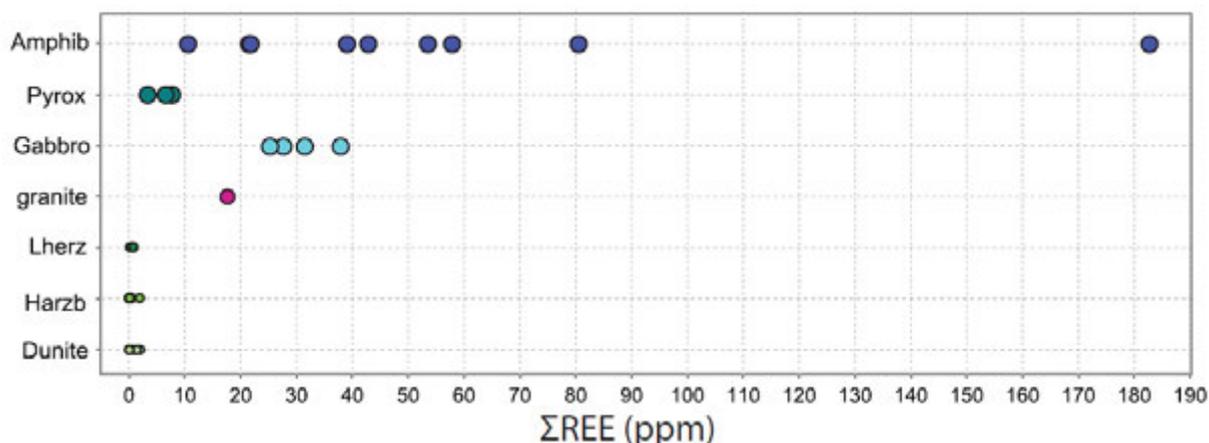


Figure 17 : (A) Teneurs (roche totale) en Sc dans les différents protolithes péridotitiques et intrusifs. (B) Corrélations élémentaires observées dans les péridotites saines entre Sc, Al et V. (C) Corrélations élémentaires observées dans les intrusifs sains entre Sc, Ti et V. Les points de petite taille représentent les données acquises antérieurement à ce projet par Ulrich (2013).



**Figure 18 : Teneurs (roche totale) en REE dans les différents protolithes périclinitiques et intrusifs.**

### 7.1.2. INTRUSIFS

Les différents types d'intrusifs sains étudiés présentent des teneurs (en roche totale) spécifiques en Sc, depuis des faciès granitiques pauvres en Sc jusqu'aux faciès amphibolitiques particulièrement enrichis (Figure 17A).

- Le microgranite échantillonné à N'Go présente des teneurs en Sc d'environ 2 ppm, soit des teneurs inférieures à celles rencontrées dans les dunites.
- Les (micro)gabbros amphibolitiques échantillonnés à N'Go, Nakéty et Tiébaghi, présentent des teneurs significatives en Sc, variant de 40 à 82 ppm.
- Les pyroxénites, échantillonnées à N'Go et Nakéty, présentent des teneurs en Sc similaires à celles des gabbros (30-75 ppm)
- Les amphibolites, échantillonnées à N'Go et Nakéty, constituent le type d'intrusif le plus fertile vis-à-vis du Sc. L'analyse du Sc au sein des différents filons d'amphibolite analysés suggère l'existence de deux groupes distincts, le premier regroupant les amphibolites modérément fertiles vis-à-vis du Sc (30-50 ppm), et le second regroupant les amphibolites riches en Sc (100-130 ppm). Ces groupes ne se distinguent aucunement par leur origine géographique, deux filons voisins de quelques mètres pouvant respectivement correspondre à l'un et à l'autre de ces groupes. Il s'agirait donc de variations liées aux pulses magmatiques.

Le Sc apparaît assez bien corrélé au Ti et au V dans les faciès intrusifs sains, depuis les faciès granitiques pauvres en Ti-V-Sc jusqu'aux faciès amphibolitiques plus riches (Figure 17C). La détermination des teneurs en Ti ou en V des protolithes peut ainsi permettre d'estimer indirectement la teneur en Sc de ces protolithes, tel que :

$$\text{Sc (ppm)} = 165 \cdot \text{Ti (\%)}$$

$$\text{Sc (ppm)} = 0,156 \cdot \text{V (ppm)}$$

Tous les intrusifs sains présentent des teneurs relativement faibles en terres rares (Figure 18), la somme des REE excédant rarement quelques dizaines de ppm dans les amphibolites (soit des teneurs inférieures à celles considérées pour les roches volcaniques ou sédimentaires moyennes, d'environ 175 ppm).

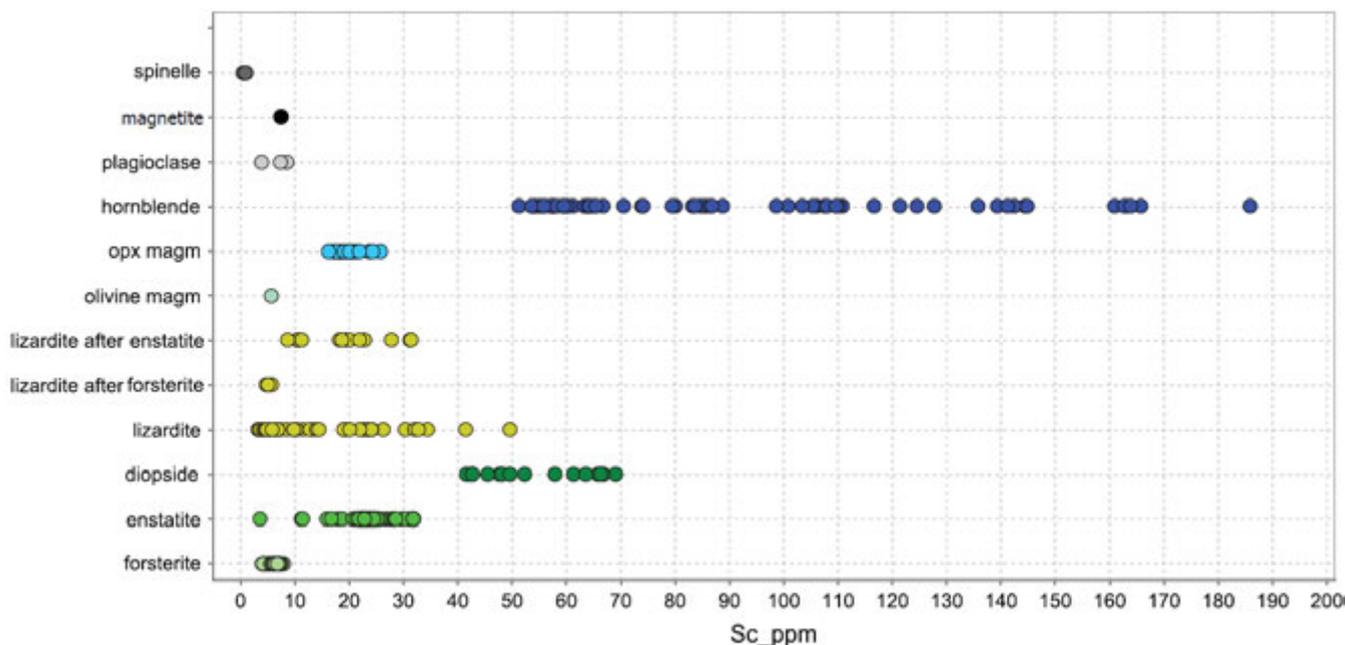
## 7.2. COMPOSITIONS MINÉRALES

L'analyse in-situ par LA-ICP-MS des différentes phases minérales constitutives des protolithes étudiés (péridotites et intrusifs) révèle un important contrôle minéralogique sur les teneurs en Sc des roches saines (Figures 19, 20).

### 7.2.1. PÉRIDOTITES

Les différentes phases constitutives des péridotites présentent chacune des teneurs spécifiques en Sc :

- La forstérite (olivine magnésienne des péridotites), phase dominante dans la dunite, présente de faibles teneurs en Sc, de 3 à 7 ppm. La forstérite constitutive des dunites de Cap Bocage présente les plus basses teneurs en Sc (3-5 ppm), alors que la forstérite constitutive des dunites de N'Go, des harzburgites de Nakéty et Koniambo, et des lherzolites de Tiébaghi, sont légèrement plus riches en Sc (5-7 ppm)
- L'enstatite (orthopyroxène magnésien des harzburgites et lherzolites), présente des teneurs en Sc essentiellement comprises entre 15 et 32 ppm Sc. L'enstatite constitutive des harzburgites de N'Go présente les plus basses teneurs en Sc (15-20 ppm). L'enstatite constitutive des harzburgites de Koniambo et des lherzolites de Tiébaghi présentent des teneurs en Sc significativement plus élevées (20-32 ppm et 30-32 ppm, respectivement).
- Le diopside (clinopyroxène calcique des harzburgites et lherzolites) présente les teneurs en Sc les plus élevées, de 40 à 70 ppm. Le diopside présente des teneurs significativement différentes selon qu'il soit issu des harzburgites à clinopyroxène de Koniambo (40-50 ppm) ou des lherzolites de Tiébaghi (60-70 ppm). Il reste à préciser si cette différence est liée au massif péridotitique (Koniambo vs. Tiébaghi) et/ou au type de protolithe (harzburgite à clinopyroxène vs. lherzolite) considéré.
- La lizardite, formée lors de la serpentinisation des péridotites en remplacement des silicates primaires sus-cités, présente des teneurs variables en Sc, de 3 à 50 ppm. Cette variabilité reflète essentiellement l'héritage minéral de la lizardite, selon qu'elle se développe aux dépens de forstérite, d'enstatite ou de diopside.
- Le spinelle chromifère présente des teneurs particulièrement faibles en Sc (<3 ppm).



**Figure 19 : Teneurs (in-situ par analyse LA-ICP-MS) en Sc dans les différentes phases minérales constitutives des péridotites (forstérite, enstatite, lizardite, spinelle) et intrusifs (hornblende, orthopyroxène magmatique, olivine magmatique, plagioclases, magnétite).**

A l'instar des données issues des analyses en roche totale, les analyses in-situ des phases minérales primaires péridotitiques révèlent que le Sc y apparaît relativement corrélé à plusieurs éléments (Figure 20A-20C). La corrélation Al-Sc identifiée sur roches totales résulte du fait que les principaux porteurs du Sc dans les péridotites saines (enstatite et diopside) sont également relativement enrichis en Al (comparé à la dunite). Plus spécifiquement, une corrélation Al-Sc plus nette est remarquée au sein des enstatites (Figure 20A). De même, la relativement bonne corrélation V-Sc identifiée en roche totale est également exprimée dans les données minérales in-situ, mettant en évidence le progressif co-enrichissement en V-Sc depuis la forstérite jusqu'au diopside (Figure 20B). Enfin, plusieurs corrélations Ti-Sc, de pentes spécifiques aux massifs péridotitiques considérés, sont mises en évidence (Figure 20C).

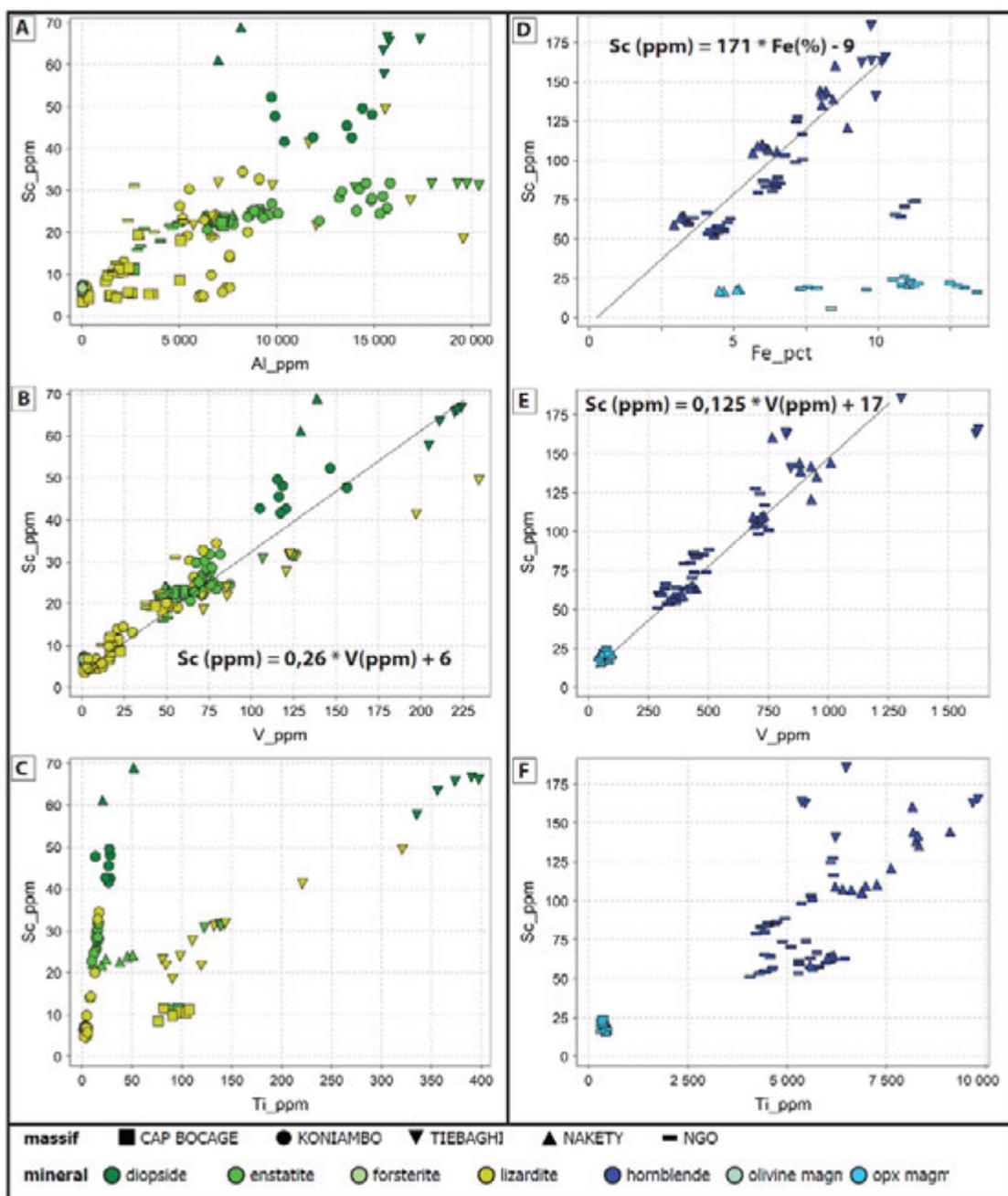


Figure 20 : Corrélations élémentaires au sein des phases minérales constitutives (A-C) des péridotites saines (Sc-Al-V-Ti) et (D-F) des intrusifs sains (Sc-Fe-V-Ti).

## 7.2.2. INTRUSIFS

Les différentes phases constitutives des intrusifs magmatiques (gabbros, pyroxénites et amphibolites) présentent également des teneurs spécifiques en Sc (Figures 19, 20) :

- Les orthopyroxènes magmatiques issus des amphibolites et des pyroxénites présentent des teneurs en Sc modérées (15-25 ppm), similaires aux teneurs des enstatites périclites.
- La hornblende issue des amphibolites, des pyroxénites et des gabbros à amphibole présente des teneurs élevées et particulièrement variables en Sc (50-170 ppm). La hornblende porte ainsi l'essentiel du Sc dans ces intrusifs, et contrôle les fortes teneurs identifiées en roche totale dans certains filons amphibolitiques (cf. section 7.1.2). Les teneurs en Sc, largement variables dans la hornblende, ne semblent pas dépendantes de leur localisation géographique : deux filons amphibolitiques distants de quelques mètres peuvent contenir des amphiboles aux teneurs en Sc largement différentes. Une telle configuration a notamment été observée aussi bien à N'Go qu'à Nakéty.
- Les olivines magmatiques, localement identifiées dans les filons de pyroxénite, présentent de faibles teneurs en Sc (5-7 ppm), similaires aux teneurs des forstérites périclites.
- Les plagioclases (essentiellement issus des gabbros) et la magnétite présentent de faibles teneurs en Sc (<10 ppm).

Les analyses in-situ des phases minérales primaires constitutives des intrusifs révèlent que le Sc y apparaît relativement corrélé à plusieurs éléments (Figure 20D-20F). Une corrélation entre Fe et Sc est identifiée au sein des amphiboles, suggérant que les amphiboles les plus riches en fer sont également les plus fertiles vis-à-vis du Sc. Cette corrélation ne se retrouve pas dans les données en roche totale car l'orthopyroxène, qui est aussi un porteur majeur du fer, est relativement pauvre en Sc. À l'instar des données issues des analyses en roche totale, une bonne corrélation entre V et Sc est mise en évidence au sein des phases minérales, et notamment pour l'amphibole dont les teneurs en V et Sc co-varient étroitement, cette corrélation étant largement similaire à celle observée sur roches totales. La détermination de la teneur en V d'amphiboles d'un intrusif sain peut donc permettre d'en estimer indirectement leur teneur en Sc, tel que :

$$\text{Sc (ppm)} = 0,125 \cdot \text{V (ppm)} + 17$$

Enfin, une corrélation est suggérée entre Ti et Sc (pour la hornblende), mais celle-ci présente une dispersion significative, possiblement liée à une variabilité géographique des teneurs en Ti (comme les silicates périclites primaires).

## 8. ENRICHISSEMENTS EN SC, REE

Les processus de latéritisation se caractérisent par une dissolution progressive à complète de tous les silicates. Dans les horizons supérieurs, le lessivage des éléments solubles Si et Mg résulte en un enrichissement résiduel des éléments peu solubles dont  $\text{Fe}^{3+}$  et  $\text{Al}^{3+}$ . A ce premier facteur d'enrichissement secondaire se superpose un second facteur lié à la redistribution et à la concentration de certains métaux dans les horizons inférieurs des profils d'altération, dont notamment le Ni. Le scandium et les REE, relativement peu solubles à faible température, subissent ainsi des enrichissements résiduels significatifs à travers les processus de latéritisation, auxquels s'ajoutent probablement des processus de remobilisation et de concentration. Ce chapitre traite des enrichissements en Sc et REE et de leurs distributions au sein des profils d'altération étudiés.

### 8.1. ROCHE TOTALE

#### 8.1.1. PROFILS SUR PÉRIDOTITES

A l'instar des profils exposés à Cap Bocage et Koniambo (Figures 21, 22), l'essentiel des profils latéritiques développés sur péridotite en Nouvelle-Calédonie sont caractérisés par une évolution directe depuis des horizons essentiellement silicatés vers des horizons essentiellement ferrugineux (type oxique). Cette évolution est ainsi associée à une diminution majeure, souvent localisée à la transition saprock– saprolite, des teneurs en  $\text{SiO}_2$  et MgO (de  $>35$  wt.% à  $<5$  wt.%) et une concomitante augmentation de la teneur en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (de  $\sim 7$  wt.% à  $> 65$  wt.%). À contrario, les profils investigués sur le massif de Tiébaghi (Figure 23) se distinguent par la présence d'un horizon à smectites (nontronites nickélicifères) localisé entre le saprock et la latérite jaune, et associé à un découplage des teneurs en Si et Mg (préservation du Si dans l'horizon à smectites). Similairement au fer, tout un cortège d'éléments présentent un enrichissement à partir de la transition saprock – saprolite. Ce cortège inclut principalement des éléments généralement considérés comme peu mobiles (Al, Cr, Ti, V, Sc). Cependant, bien que ces éléments et notamment le Sc présentent un enrichissement comparable, au premier ordre, à celui du fer, des différences significatives de distribution sont observées.

Le Sc présente un enrichissement significatif depuis la base jusqu'au sommet des profils. La teneur en Sc augmente progressivement à partir de la saprolite pour atteindre un maximum généralement localisé dans les zones supérieures de la latérite jaune. La teneur en Sc décroît ensuite dans les horizons de latérite rouge et de cuirasse, les teneurs en sommet de profils étant généralement inférieures à 20 ppm Sc. L'intensité de l'enrichissement maximum en Sc est d'un facteur  $\sim 10$  depuis le protolithe. Ainsi, seuls certains profils exhibent des horizons de latérite jaune avec des teneurs en Sc potentiellement intéressantes ( $>80$  ppm et localement jusqu'à 95 ppm) : le profil OPB7 (Koniambo) développé sur harzburgite et le profil TIEA (Tiébaghi) développé sur lherzolite. Dans ces horizons, la teneur en Ni est de  $\sim 1$  wt.%. Par ailleurs, sur le profil TIEA, une des trois variétés de nontronite identifiées est également co-enrichie en Sc ( $\sim 80$  ppm) et en Ni (1,2-1,8 wt.% Ni). À contrario, les profils développés sur dunite présentent des teneurs maximales en Sc de l'ordre de 60 ppm.

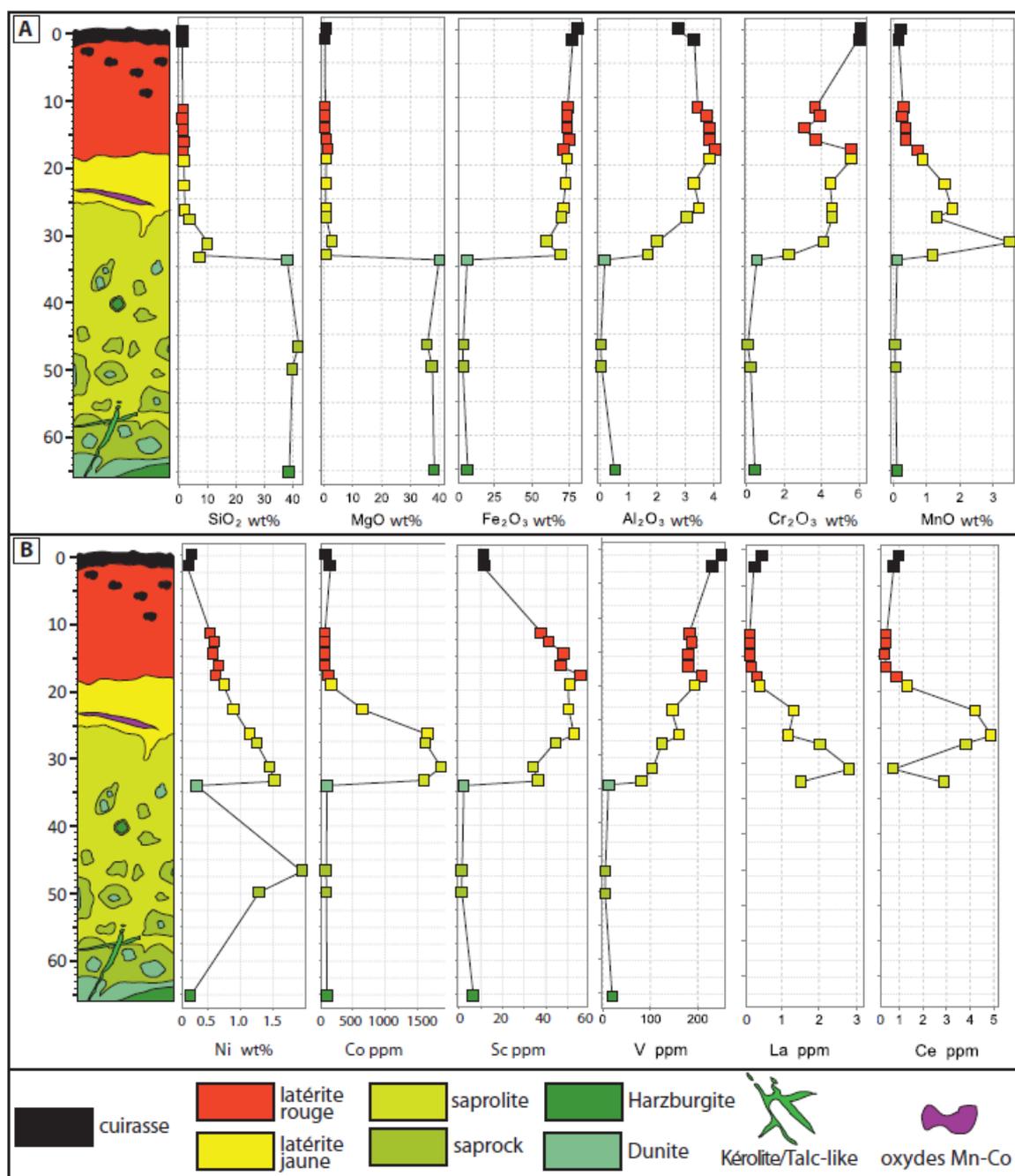
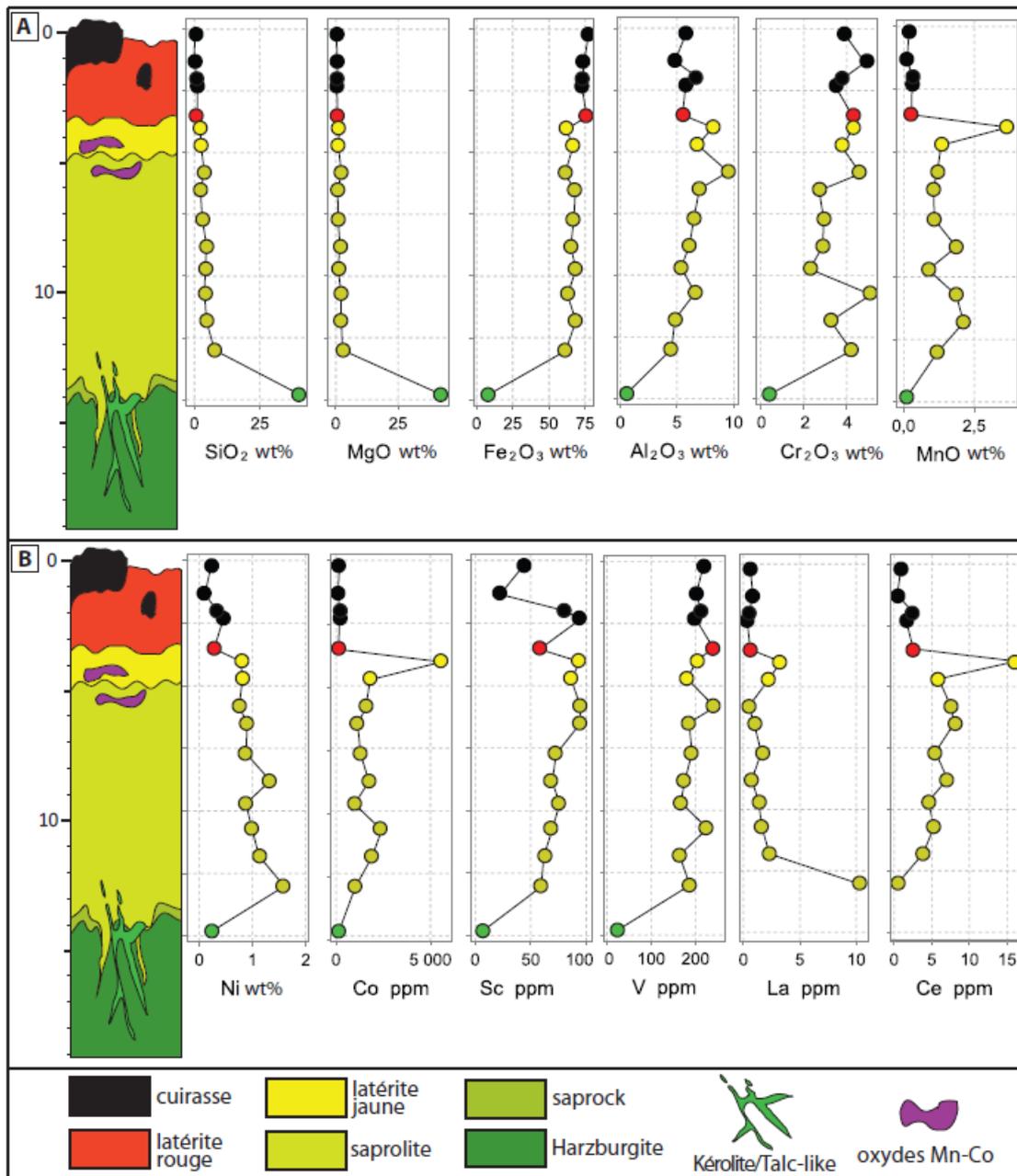


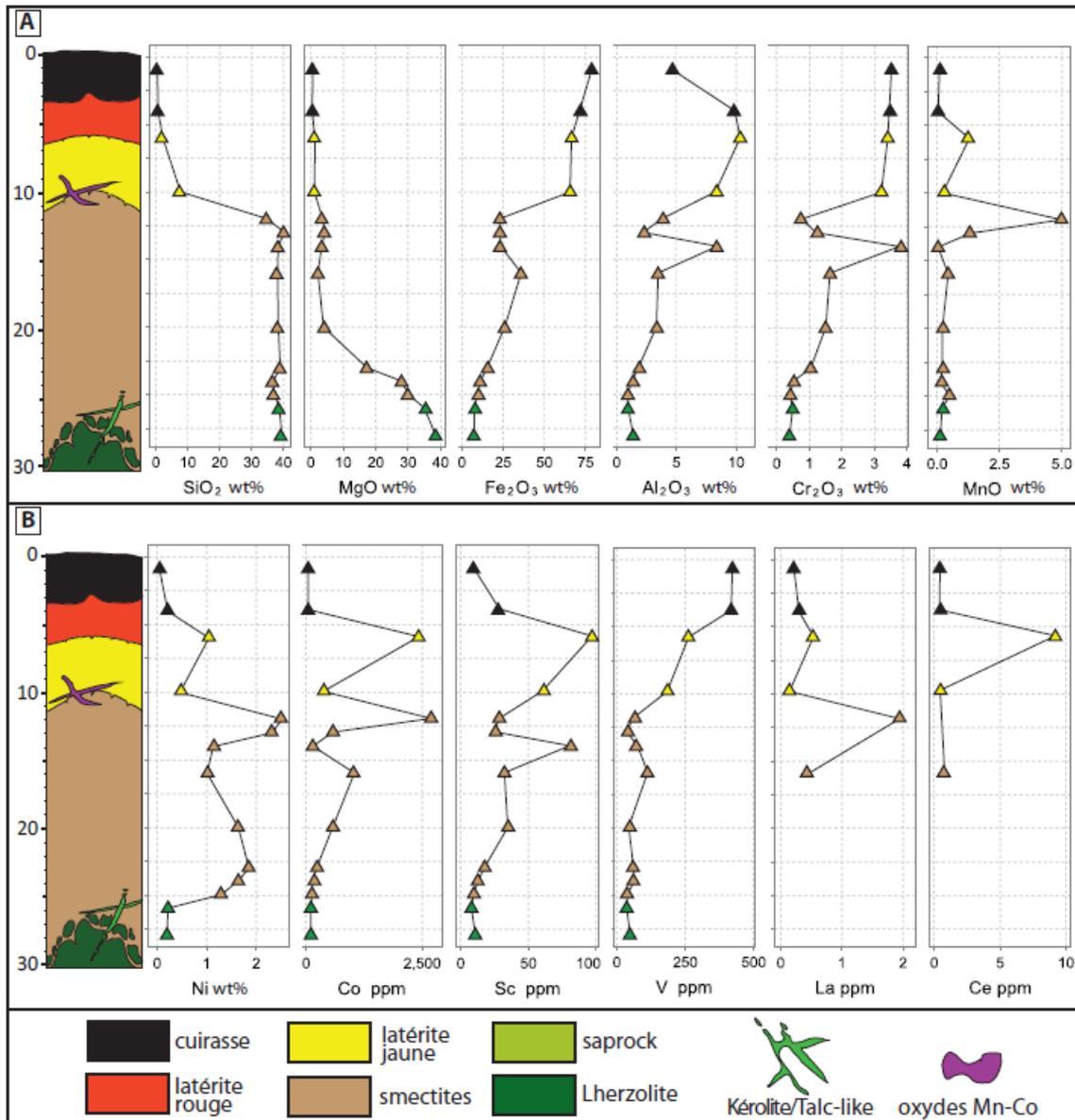
Figure 21 : Distribution des éléments majeurs et des métaux d'intérêt sur le profil PZ1B (Cap Bocage), développé sur dunite.



**Figure 22 : Distribution des éléments majeurs et des métaux d'intérêt sur le profil OPB7 (Koniambo), développé sur harzburgite**

Contrastant avec la distribution du Sc, les teneurs maximales en Ni (~2 wt.%) sont classiquement observées à la base de la saprolite et décroissent progressivement vers le sommet des profils (~1,2 wt.% au sommet de la saprolite, ~0,6 wt.% au sommet de la latérite jaune et < 0,3 wt.% dans la cuirasse). Cette remarquable distribution dans les faciès oxydés est vraisemblablement héritée de processus de recristallisation de la goéthite (augmentation de la cristallinité) et d'expulsion du Ni (Dublet et al., 2015). Les zones à smectites des profils développés à Tiébaghi présentent des teneurs variables en Ni comprises entre 1 et 2,5 wt.% Ni, suggérant une certaine variabilité de la teneur en Ni au sein des smectites.

Des teneurs significatives en Co (> 2000 ppm) sont observées sur la plupart des profils au sein de la saprolite et à la base de la latérite jaune (correspondant à la latérite de transition). La distribution du Co suit, au premier ordre, celle du Mn, confirmant que l'essentiel du Co est associé aux oxydes de Mn (lithiophorite, asbolane, cryptomelane).



**Figure 23 : Distribution des éléments majeurs et des métaux d'intérêt sur le profil TIEA (Tiébaghi), développé sur lherzolite.**

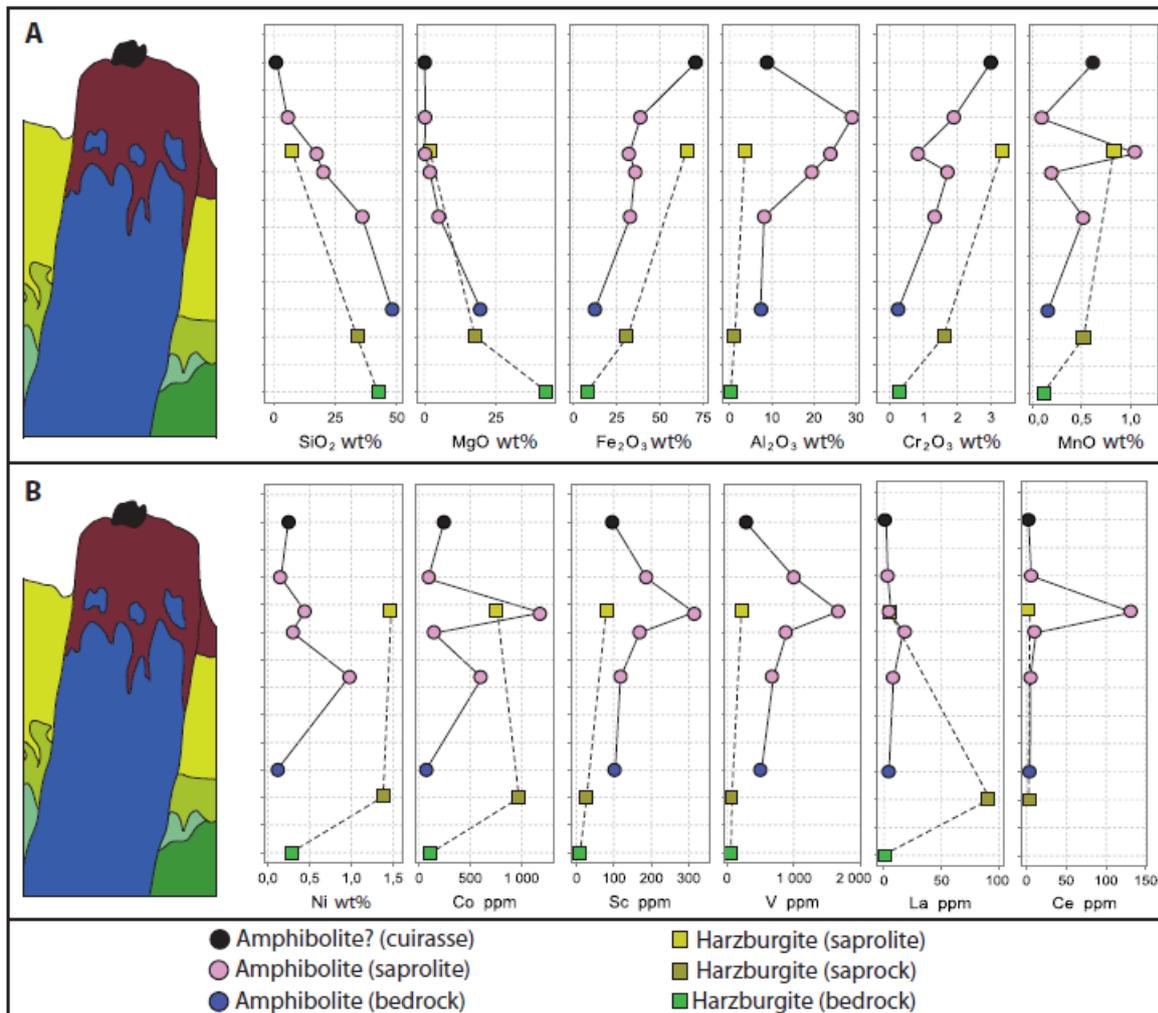
Enfin, les REE telles que le La (lanthane) présentent, au sein des profils étudiés, un enrichissement significatif depuis le protolithe. Cet enrichissement, maximum au sein de la saprolite, résulte vraisemblablement de la remobilisation des REE depuis les horizons supérieurs. Le Ce (cérium) suit quant à lui un comportement distinct de celui des autres terres rares et montre des enrichissements relatifs remarquables au sein des latérites à Mn-Co, indiquant vraisemblablement son association aux oxydes de Mn. En raison des très

faibles teneurs initiales en REE des protolithes péridotitiques (< 1 ppm au total), les teneurs en REE observées dans les profils latéritiques développés sur péridotite restent a priori largement en deçà des teneurs économiquement exploitables.

### 8.1.2. PROFILS SUR INTRUSIFS

Contrairement aux péridotites, les intrusifs magmatiques sont constitués de silicates primaires aussi bien riches en Fe qu'en Al. Il en résulte que les profils d'altération développés sur intrusifs voient les oxydes et oxyhydroxydes de fer (goethite ou hématite alumineuses) cohabiter avec des phases alumineuses et/ou alumino-silicatées telles que la gibbsite et la kaolinite, alors que les produits terminaux de la latéritisation des péridotites sont essentiellement dominés par la goethite, et dans une moindre mesure l'hématite. En conséquent, l'évolution géochimique observée depuis les faciès intrusifs sains jusqu'à leurs équivalents altérés se caractérise par un co-enrichissement majeur en Fe et Al, associé à un fort appauvrissement en Mg et Ca, et un appauvrissement progressif et généralement modéré en Si. Localement, dans certaines zones où l'altération est maximale, le Si est largement lessivé formant des assemblages dominés par Al et Fe, à gibbsite ± goethite ou hématite alumineuses.

L'altération des amphibolites (Figure 24) et des pyroxénites conduit essentiellement à la formation d'altérites à goethite alumineuse ± kaolinite ± gibbsite, systématiquement enrichies en Sc. Les teneurs en Sc au sein des profils développés sur amphibolites fertiles (roches saines >100 ppm Sc) dépassent couramment le seuil de 200 ppm, et pouvant localement atteindre plus de 300 ppm. Un enrichissement très prononcé en Ce (~130 ppm) est observé dans certaines altérites amphibolitiques en association avec des oxydes de Mn-Co. Les autres terres rares apparaissent quant à elles particulièrement enrichies (par ex. La, jusqu'à 90 ppm) dans l'encaissant harzburgitique saprolitisé, suggérant leur remobilisation depuis l'intrusif amphibolitique.



**Figure 24 : Distribution des éléments majeurs et métaux d'intérêt sur le profil NGPB (N'Go concession PB5, NMC), développé sur amphibolite et encaissant harzburgitique**

A contrario, l'altération des intrusifs gabbroïques (Figures 25-27) conduit, généralement, à la formation d'assemblages à kaolinite + Al-hématite riches en Al et Si (jusqu'à 30 wt.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et 50 wt.% SiO<sub>2</sub>). Il est important de remarquer que les altérites gabbroïques sont souvent significativement appauvries en Sc en comparaison des teneurs initiales des gabbros (>50 ppm). La diminution significative de la teneur en Sc depuis les gabbros sains jusqu'à leurs équivalents altérés, malgré le lessivage des éléments majeurs Mg et Ca, suggère que la formation de kaolinite et d'hématite alumineuse (préférentiellement à la goéthite alumineuse) s'accompagne d'une expulsion du Sc. Celui-ci se retrouve alors capté et dilué et dans l'encaissant altéré aux épontes, riche en goéthite. Les profils d'altération de Koniambo et Tiébaghi, réalisés sur gabbros altérés et leurs encaissants (Figures 26, 27), indiquent que le Sc ainsi expulsé se retrouve en effet enrichi aux épontes sur une distance de ~1-2m, avec des concentrations pouvant dépasser 200 ppm dans la latérite jaune encaissante.

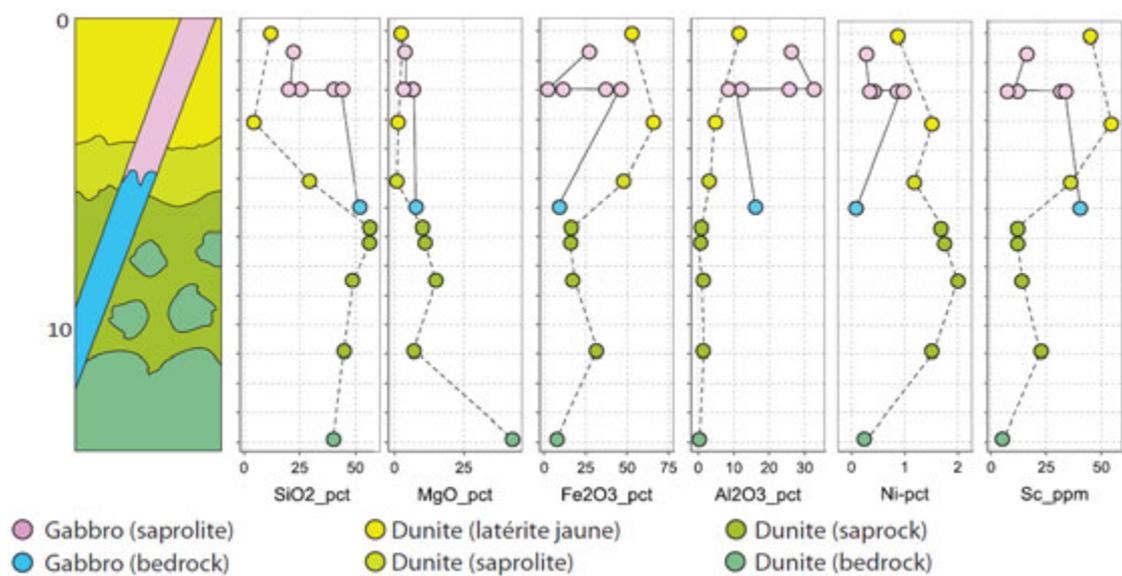


Figure 25 : Distribution des éléments majeurs et des métaux d'intérêt sur le profil NGAD (N'Go mine Ada), développé sur microgabbro et encaissant dunitique ± harzburgitique.

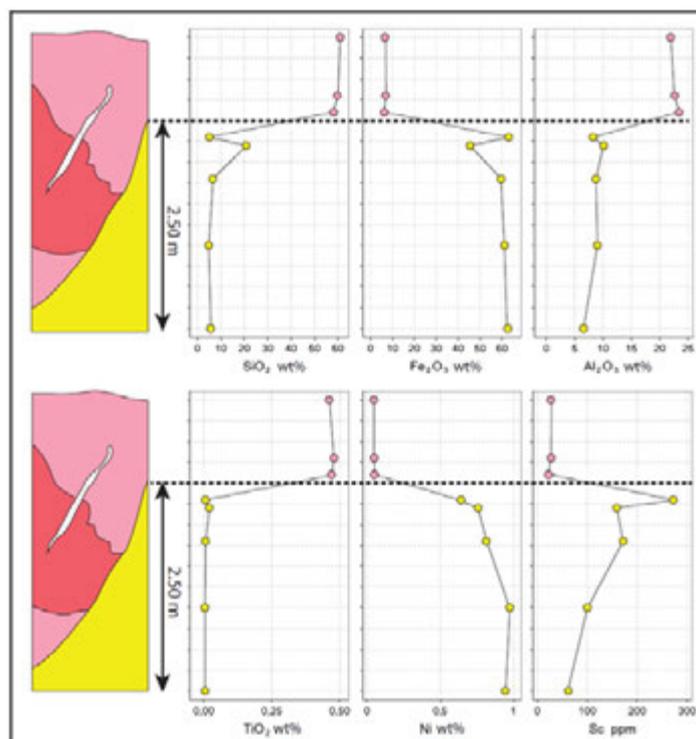
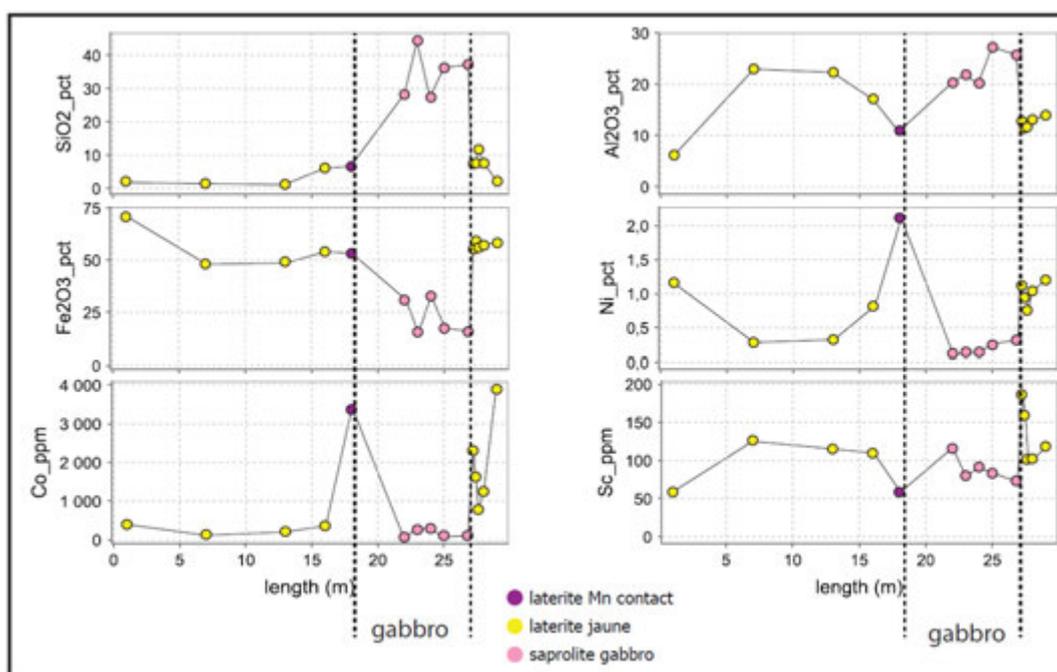


Figure 26 : Distribution des éléments majeurs et des métaux d'intérêt sur le profil KNGA (Koniambo), développé sur gabbro et encaissant harzburgitique.



**Figure 27 : Distribution des éléments majeurs et des métaux d'intérêt sur le profil TIAG (chantier Alpha Sud, Tiébaghi), développé sur gabbro et encaissant lherzolitique.**

### 8.1.3. SYNTHÈSE ET CORRÉLATIONS ÉLÉMENTAIRES

Les données géochimiques en roche totale de l'ensemble des profils d'altération étudiés indiquent que les enrichissements maximums en Sc correspondent aux faciès d'altération riches en goethite. Dans les profils issus de péridotites, les horizons de latérite jaune sont ainsi les plus enrichis vis-à-vis du Sc. Les altérites gabbroïques, riches en hématite, sont particulièrement appauvries en Sc en comparaison des altérites amphibolitiques riches en goethite. Dans ces zones enrichies, les teneurs en Sc dépendent directement de la teneur initiale du protolithe, si bien que les enrichissements maximums sont de l'ordre d'un facteur 10 pour les profils développés sur péridotite et d'un facteur 3 pour les profils développés sur amphibolites. Il est à noter que les terres rares (principalement le Ce) apparaissent particulièrement enrichies dans les latérites à Mn-Co, même lorsque celles-ci sont développées sur péridotites (localement  $\Sigma\text{REE} > 100$  ppm).

Un certain nombre d'éléments apparaissent corrélés au Sc au cours des processus d'altération (Figure 28). Dans les profils développés sur péridotites, le Sc apparaît bien corrélé au fer depuis la roche saine jusqu'aux niveaux inférieurs de la saprolite (Figure 28A), traduisant vraisemblablement un co-enrichissement résiduel de ces deux éléments. Dans les horizons supérieurs, le Sc apparaît décorrélé du Fe, et présente notamment un sur-enrichissement dans les niveaux supérieurs de la saprolite et dans la latérite jaune, puis une décroissance de plus en plus marquée dans la latérite rouge et dans la cuirasse. Un tel comportement résulte vraisemblablement de l'expulsion du Sc par la goethite lors de sa maturation et/ou de sa transformation en hématite. Les concentrations en vanadium, et dans une moindre mesure en aluminium, décroissent également dans la latérite rouge, et apparaissent donc corrélées au Sc sur l'ensemble des lithologies à l'exception de la cuirasse (Figure 28A).

Dans les profils développés sur intrusifs (Figure 28B), le Sc apparaît assez bien corrélé au Ti, si bien que la mesure de la teneur en Ti d'un intrusif altéré (notamment les amphibolites) permet d'en estimer indirectement la teneur en Sc. Enfin, une certaine corrélation est observée, au premier ordre entre Sc et V, mais celle-ci présente, pour les fortes teneurs, des pentes spécifiques selon le profil considéré.

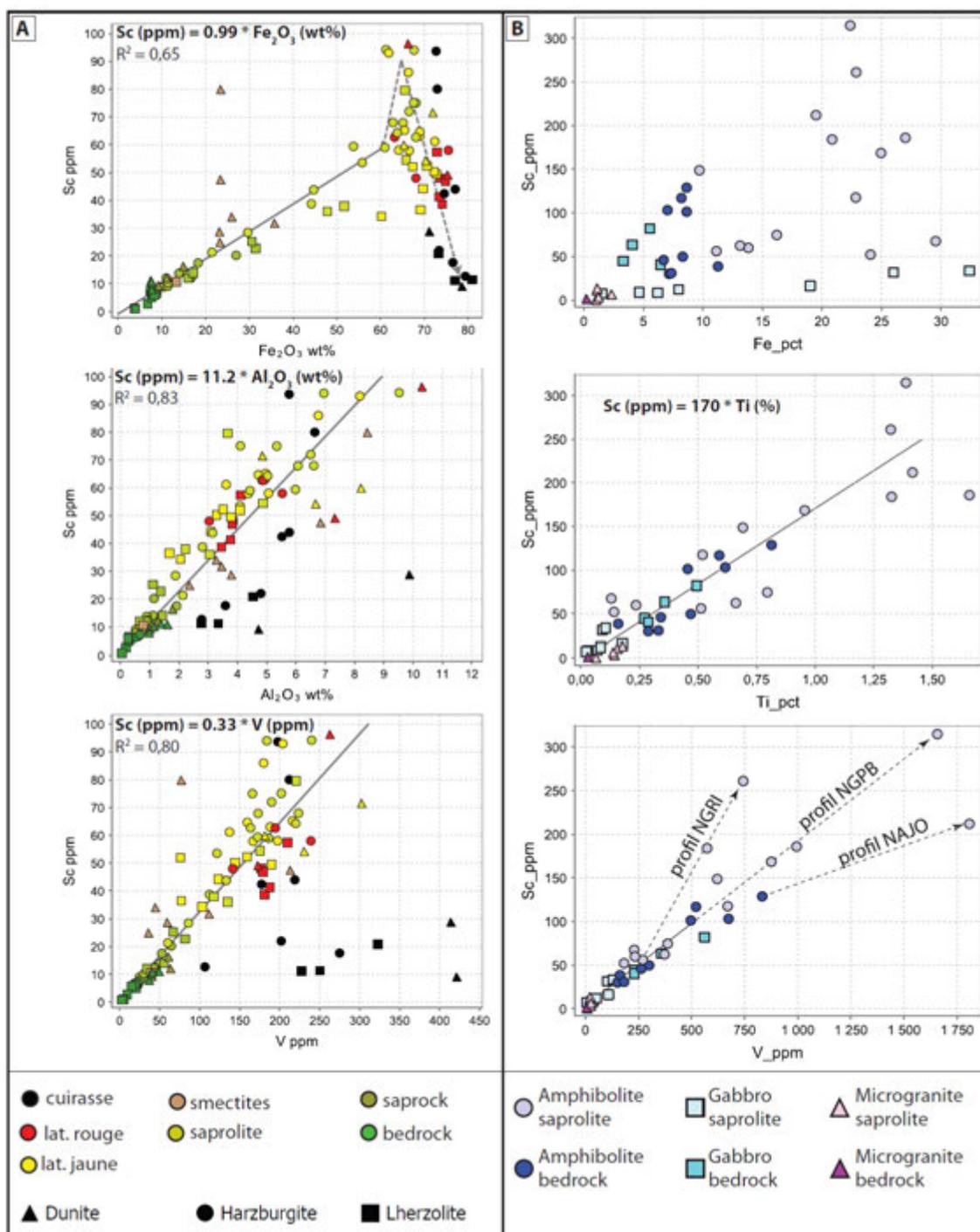
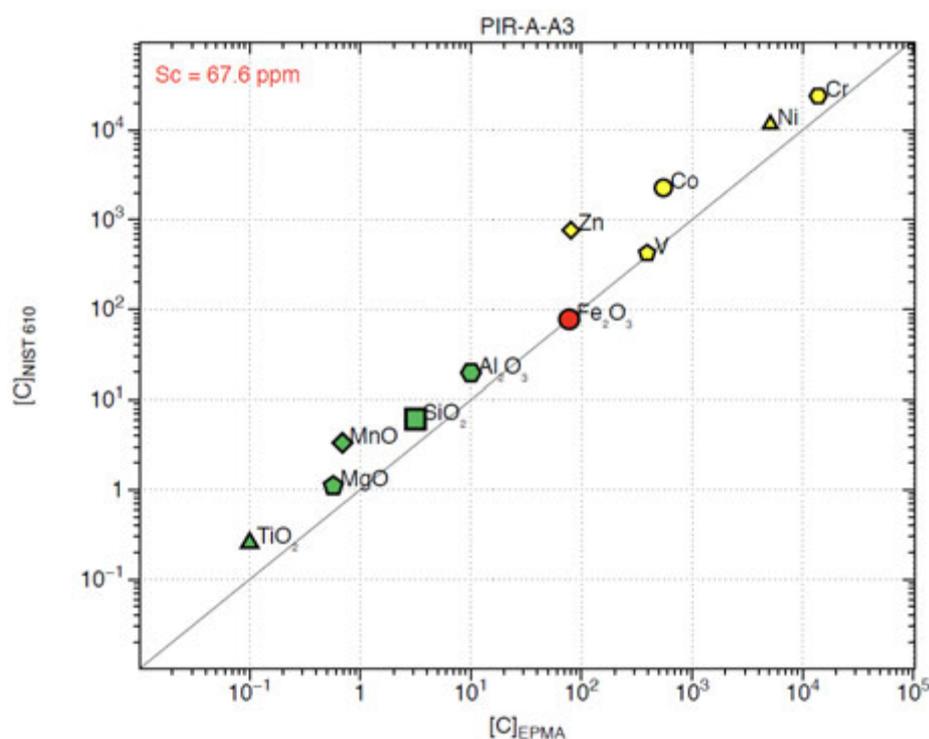


Figure 28 : (A) Teneurs (roche totale) en Sc en fonction de Fe, Al, V au sein des profils développés sur péridotites. (B) Teneurs en Sc en fonction de Fe, Ti, V au sein des profils développés sur intrusifs.

## 8.2. COMPOSITIONS MINÉRALES

### 8.2.1. ANALYSES DES TENEURS EN SC (ET AUTRES ÉLÉMENTS DE TRANSITION) DANS LES (HYDR)OXYDES DE FER PAR LA-ICP-MS : IMPACT DE LA STANDARDISATION SUR LA FIABILITÉ DES MESURES

Dès fin 2012, des essais de mesures localisées des concentrations en Sc et des autres éléments de transition (Ti, V, Cr, Co, Ni) par ablation laser couplée à un spectromètre de masse induit (LA-ICP-MS) ont été effectués sur une série de pisolithes prélevées sur différents massifs de Nouvelle-Calédonie. Les résultats ont rapidement mis en évidence des problèmes analytiques, caractérisés par une surestimation significative et quasi-systématique des concentrations dans les éléments ayant pu être analysés à la fois à la microsonde électronique (EPMA) et au LA-ICP-MS (Figure 29). Dès lors, la question se pose sur l'origine de ce biais analytique et son effet sur les concentrations mesurées en Sc. Pour expliquer ce biais analytique, deux hypothèses sont avancées : la différence de taille de point d'analyse (1  $\mu\text{m}$  en EPMA contre 44 ou 90  $\mu\text{m}$  en LA-ICP-MS) et/ou la standardisation. Concernant la première hypothèse, son effet a été estimé en moyennant plusieurs analyses à l'EPMA sur la surface couverte par le spot en LA-ICP-MS. La même déviation des concentrations a été observée, suggérant qu'elle reflète plutôt un problème de standardisation.



**Figure 29 : Comparaison entre les concentrations mesurées par microsonde électronique (EPMA) et par LA-ICP-MS en utilisant le NIST SRM 610 comme standard externe (standard interne : Fe).**

Les résultats bruts en LA-ICP-MS sont obtenus en nombre de coups par masse. Dans le processus de traitement des données, la standardisation intervient pour la conversion des nombres de coups en concentration. Deux types de standardisation sont utilisées : un standard interne (un élément dont la concentration au sein de l'échantillon est connue) et un

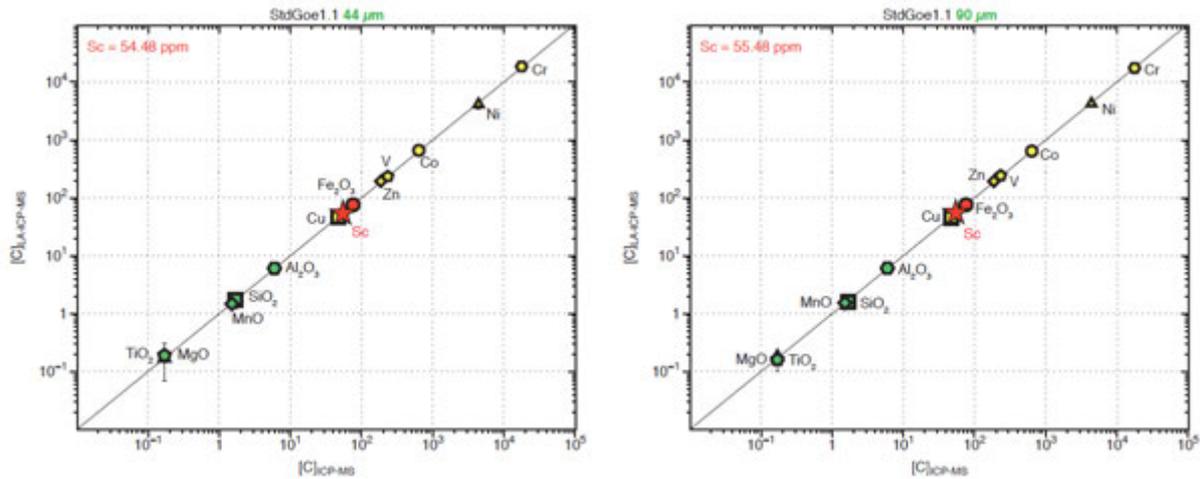
standard externe, généralement un standard international de référence, analysé avant, pendant et à la fin des séquences analytiques et qui permet, avec le standard interne, de (i) convertir le nombre de coups en concentration pour chaque échantillon, et (ii) corriger la dérive instrumentale au cours du temps. Concernant les oxydes de fer, les précédentes études ont systématiquement utilisé le  $^{56}\text{Fe}$  comme standard interne et le standard international NIST SRM 610 (verre silicaté synthétique de composition rhyolitique) comme standard externe. Or il apparaît évident que les différences à la fois de matrice entre le SRM 610 et nos échantillons et de concentrations de Fe (450 ppm dans le SRM 610 contre ~50% dans nos échantillons) peuvent entraîner un biais de mesure. Pour corriger ce biais, un standard goethitique a été réalisé.

Le standard de goethite (nommé StdGoe1.1) a été réalisé à partir de pisolithes échantillonnées dans la zone « Doline » du massif de Koniambo. ~1 kg de pisolithes a été rincé, séché, broyé (broyeur à disques, à billes puis manuel) et tamisé afin d'obtenir une poudre de granulométrie inférieure à 50  $\mu\text{m}$ . La fraction <20 $\mu\text{m}$  a ensuite été extraite par décantation dans l'eau miliQ en appliquant la loi de Stokes :

$$V = \frac{2r^2 \cdot g \cdot \Delta\rho}{9\eta}$$

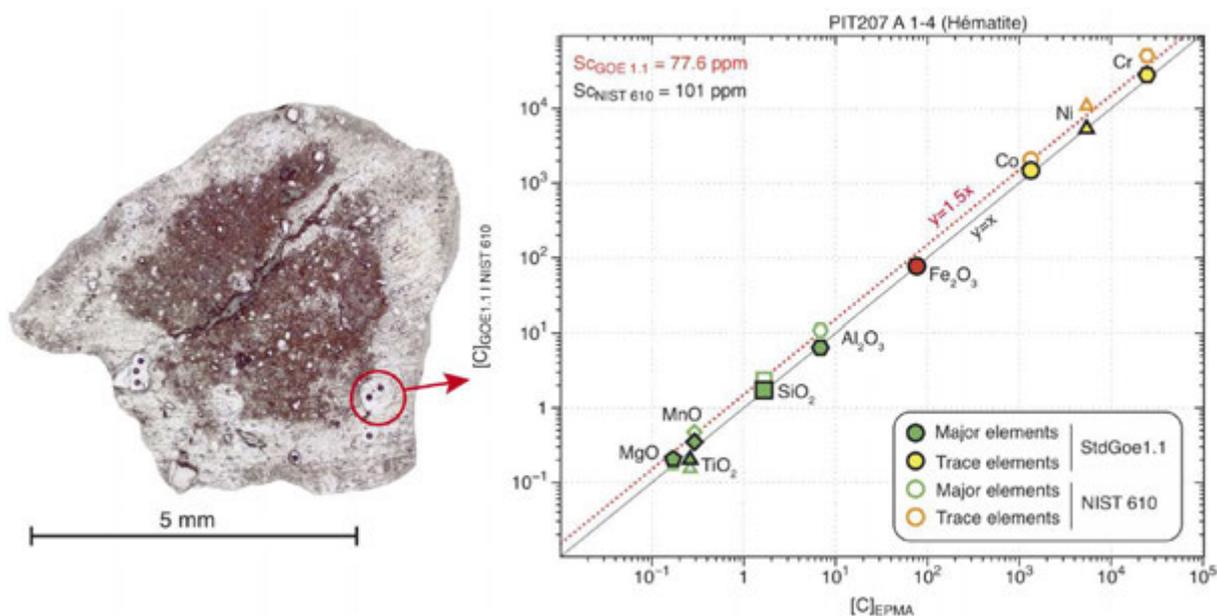
avec : V, la vitesse limite de chute ; r, le rayon de la particule ; g, l'accélération de la pesanteur ;  $\Delta\rho$ , la différence de densité entre la goethite et l'eau miliQ à 20°C ; et  $\eta$ , la viscosité dynamique du fluide. Une dizaine d'analyses chimiques de cette poudre ont été réalisées afin d'en connaître la composition en éléments majeurs et traces et de s'assurer de son homogénéité. Une analyse XRD a été réalisée afin de s'assurer de la minéralogie unique de la poudre, ce qui a été complété par une trentaine de spectres Raman une fois la poudre pastillée.

La Figure 30 montre les tests de reproductibilité sur 60 analyses du standard StdGoe1.1 à 44 et 90  $\mu\text{m}$ . Pour la totalité des éléments, les concentrations mesurées au LA-ICP-MS sont en accord avec les valeurs du standard mesurées à l'ICP-MS, quelle que soit la taille du point d'analyse. Les mesures se sont également montrées parfaitement reproductibles, avec une variance <5% à 90  $\mu\text{m}$  et <10% à 44  $\mu\text{m}$ .



**Figure 30 : Tests de reproductibilité sur le standard StdGoe1.1 pour une taille de spot de 44 µm (30 analyses) et 90 µm (30 analyses). Les barres d'erreur (pour l'essentiel inférieures à la taille du point) représentent l'écart-type sur les mesures ( $2\sigma$ ).**

Concernant les analyses sur pisolithes, la Figure 31 montre une comparaison pour une hématite des concentrations calculées à partir d'une analyse standardisée au NIST SRM 610 d'une part, et au StdGoe1.1 d'autre part (standard interne  $^{56}\text{Fe}$ ). Les résultats montrent clairement une amélioration des mesures dans le cas d'une calibration au standard goéthitique et valide donc notre méthode. Cette approche démontre également que la standardisation au NIST SRM 610 entraîne une surestimation des teneurs en Sc mesurées de 20 à 50%. En conséquence, les mesures *in situ* des éléments traces dans les (hydr)oxydes de fer pour des contextes géologiques similaires disponibles dans la littérature (Aiglsperger et al., 2013, 2015) doivent être considérées avec précaution.

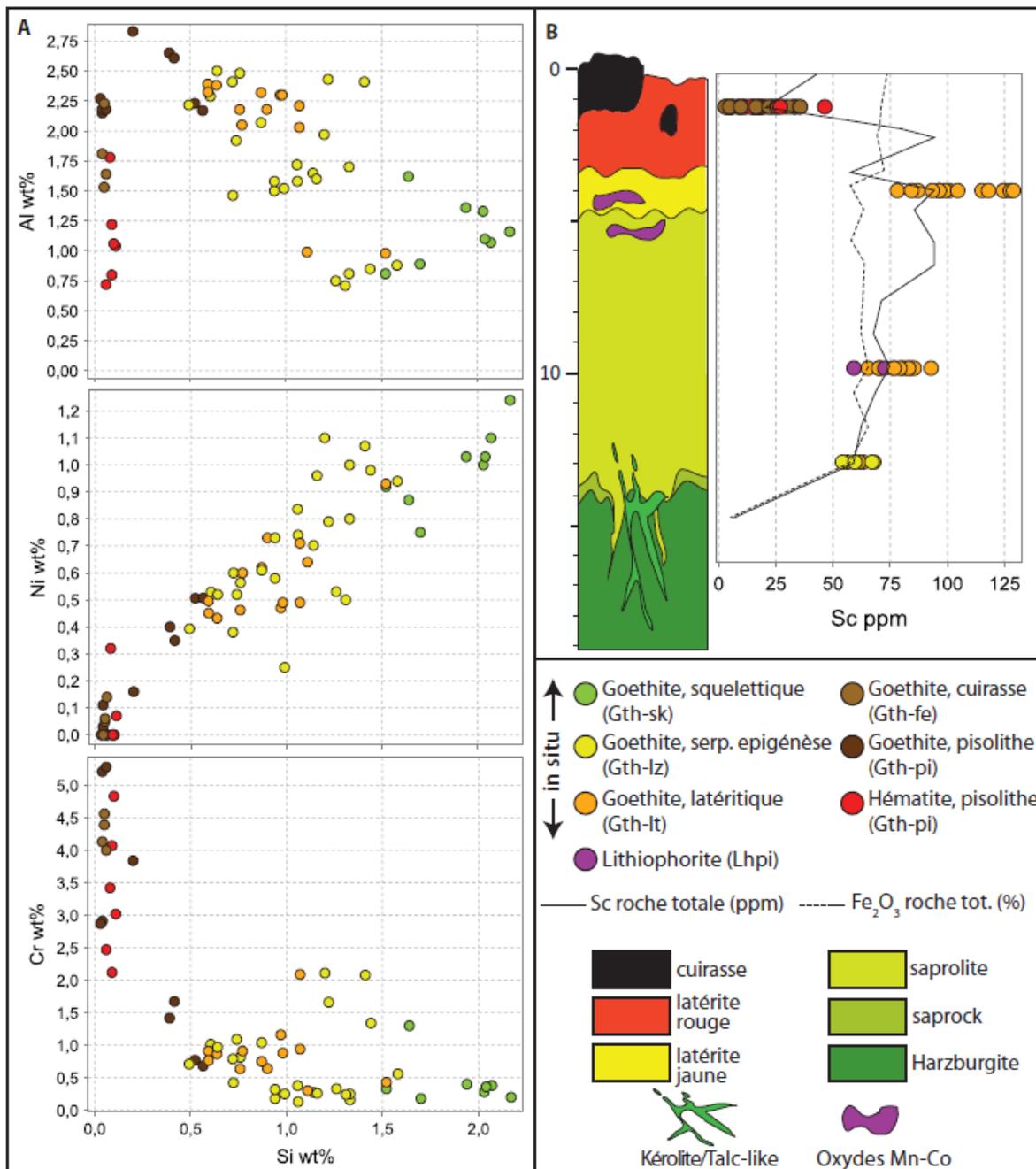


**Figure 31 : Analyse d'une pisolithe au LA-ICP-MS et comparaison des concentrations calculées à partir d'une standardisation au NIST SRM 610 et au StdGoe1.1.**

Les résultats montrent clairement une surestimation des concentrations en Sc avec une standardisation au NIST SRM 610 (dans ce cas >30%).

### 8.2.2. OXYDES ET OXYHYDROXYDES DÉVELOPPÉS SUR PÉRIDOTITE (LA-ICP-MS)

Cette section documente les résultats d'analyse in-situ par microsonde et LA-IC-MS des teneurs en Si, Ni, Al, Cr et Sc des principaux oxydes et oxyhydroxydes constitutifs des latérites développées sur péridotites, obtenues notamment en utilisant le protocole détaillé ci-dessus. Les différentes générations de goethite et d'hématite (cf. section 6.2.1) incluant (i) la goethite après lizardite (Gth-lz), (ii) la goethite formant la masse latéritique après destruction des textures primaires (Gth-lt), (iii) la goethite et l'hématite de la cuirasse, présentent des teneurs significativement différentes en éléments traces (Figure 32). En particulier, les goethites de type Gth-lz et Gth-lt présentent les teneurs les plus élevées en Sc, alors que la goethite et surtout l'hématite de la cuirasse sont fortement appauvries. La bonne correspondance entre les teneurs en Sc de la goethite et les teneurs en Sc en roche totale, le long du profil d'altération, indique que la goethite est le porteur prédominant du Sc, et que les variations des teneurs en Sc des échantillons sont essentiellement contrôlées par les variations de teneurs dans la goethite.



**Figure 32 : Teneurs in situ en Sc des oxydes et oxyhydroxydes développés sur péridotites (ex. du profil OPB7)**

(A) teneurs en Al, Ni et Cr en fonction Si (données microsonde WDS). (B) évolution des teneurs en Sc des différentes générations d'oxydes et d'oxyhydroxydes le long du profil d'altération, et comparaison avec teneurs Sc et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en roche totale.

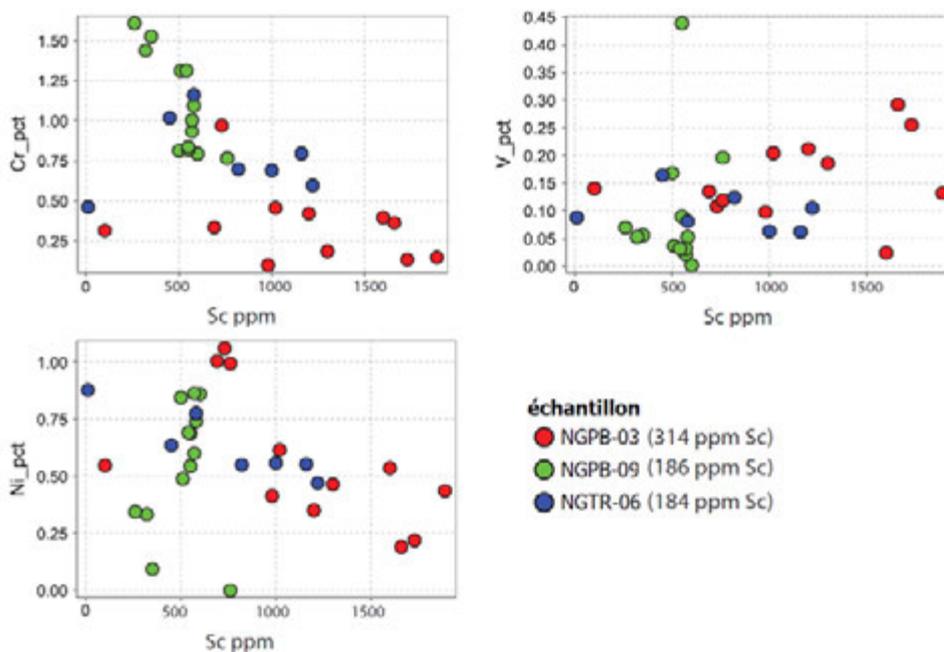
### 8.2.3. OXYHYDROXYDES DÉVELOPÉS SUR INTRUSIFS (MICROSONDE WDS)

La faible dimension (<10 µm) des goethites alumineuses, issues de l'altération des intrusifs amphibolitiques, prohibe leur analyse par LA-ICP-MS. L'estimation des teneurs in situ en Sc de ces goethites alumineuses est néanmoins possible par analyse microsonde, en raison de

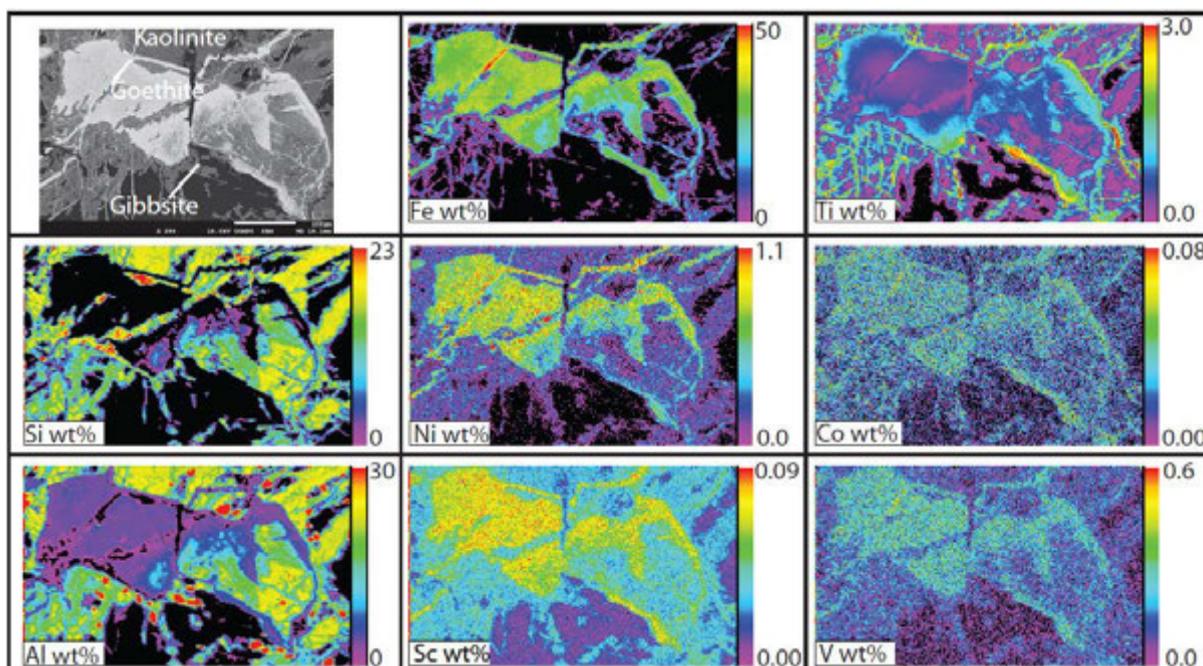
teneurs particulièrement élevées en Sc (Figures 33-34). À cette fin, des conditions particulières ont été adoptées aussi bien pour les mesures ponctuelles (25kV / 150 nA / 60 s) que pour les cartographies chimiques (25kV / 150 nA / 2000 ms). Ces conditions permettent de détecter le Sc pour des teneurs > 50 ppm.

Les trois échantillons sélectionnés pour analyse in situ du Sc des goethites alumineuses proviennent des profils NGPB et NGTR (N'Go). Dans l'échantillon NGTR-06 (profil NGTR, 184 ppm Sc en roche totale), la goethite présente des teneurs en Sc relativement constantes d'environ 0,06 wt.% soit 600 ppm Sc. Sur le profil NGPB, les teneurs en Sc de la goethite apparaissent plus dispersées. Dans l'échantillon NGPB-09 (186 ppm Sc), la teneur en Sc de la goethite varie entre 500 et 1200 ppm Sc. Dans l'échantillon NGPB-03 (314 ppm Sc), la teneur en Sc de la goethite varie entre 700 à 1800 ppm Sc. Les teneurs en Sc de la goethite apparaissent, au premier ordre, anti-corrélées aux teneurs en Cr (Figure 33). Le Sc ne présente pas de corrélation apparente avec les autres éléments analysés.

La cartographie chimique par microsonde électronique des teneurs en Fe, Ti, Si, Ni, Co, Al, Sc et V sur un assemblage à goethite alumineuse– Gibbsite — Kaolinite au sein du profil NGPB (échantillon NGPB-09) est présentée en Figure 34. Le scandium est essentiellement localisé dans la goethite alumineuse (~700-800 ppm Sc), formée principalement dans les fractures internes des anciens silicates magmatiques et, plus tardivement, en remplacement de la kaolinite. La distribution spatiale du V, et dans une moindre mesure du Ni, est similaire à celle du Sc, démontrant que ces trois éléments sont co-enrichis dans la goethite alumineuse (Figure 34). A contrario, la distribution du Ti, essentiellement le long des fractures internes et en bordure des zones de remplacement de la kaolinite, indique que le Ti est surtout incorporé de manière précoce dans la goethite et qu'il ne s'associe pas à la goethite formée plus tardivement en remplacement de la kaolinite.



**Figure 33 : Teneurs en Sc en fonction de Fe, Al, Cr, V, Ni des goethites alumineuses au sein des profils NGPB et NGTR.**



**Figure 34 : Cartographie chimique par microsonde électronique (WDS) des teneurs en Si, Al, Ni, V et Sc sur un assemblage à Al-goethite (Go) – Gibbsite – Gi) – Kaolinite (Ka) au sein du profil NGPB (échantillon NGPB-09).**

## 9. SPÉCIATION DU SC DANS LES ROCHES ET MINÉRAUX : APPORT DES EXTRACTIONS SÉQUENTIELLES

La spéciation du Sc est abordée ici par son partitionnement en fonction de la lixiviation des échantillons par des réactifs d'extraction de manière séquentielle. Nous nous sommes appuyés sur le mode opératoire validé dans le cadre du projet CNRT « Nickal » qui avait permis de caractériser la répartition du Ni et Co dans les phases minérales des différents horizons d'altération latéritiques.

Le principe de l'extraction séquentielle est d'utiliser successivement une série de réactifs considérés comme spécifiques d'un élément et/ou d'une phase minérale et d'agressivité croissante. L'action de ces réactifs sur les échantillons réduits en poudre (<50µm) conduit à la mise en solution des éléments chimiques constitutifs. On répète cette extraction avec un réactif donné jusqu'à épuisement des éléments libérés. Nous avons fait le choix des réactifs suivants conformément au protocole du projet « Nickal ».

- Eau ultra-pure : éléments facilement solubles
- Chlorhydrate d'hydroxylamine (NH<sub>2</sub>OH-HCL, 0,1M, pH=3,5) : particulièrement actif et sélectif des phases manganésifères
- Oxalate d'ammonium (Ac. Oxalique – Oxalate NH<sub>4</sub>, 0,2M oxalate, pH=3) : formes du fer facilement solubles (phase amorphe et/ou mal cristallisée)
- Citrate /Dithionite (Na citrate 22% et Na dithionite 1g) : forme bien cristallisée du fer.

Si un résidu d'extraction persiste, il est constitué des phases résistantes (en général, spinelles et silicates).

Nous avons utilisé un rapport solide - solution de 1g / 50mL pour toutes les extractions. La durée de contact d'une extraction (agitation par rotation complète des tubes) est de 76 h. Les tubes sont ensuite centrifugés à 10000t/min et le surnageant est filtré à 0,2µm avant analyse élémentaire à l'ICP-AES (des blancs de réactifs et d'extraction sont réalisés pour chaque étape). Le culot (solide restant dans le tube) est repris pour une nouvelle extraction après remise en suspension.

38 échantillons ont été sélectionnés pour leur représentativité de leur teneur en scandium en relation avec Ni et Co, leur appartenance aux principaux horizons d'altération ou leur caractéristique particulière. 11 échantillons proviennent du sondage I5690 sur le massif du Koniambo, ce profil ayant été étudié dans le cadre de « Nickal » et avait montré l'existence de teneur en Sc d'intérêt. 12 proviennent du sondage OPB7 également issu du massif du Koniambo. Ce forage avait été étudié précédemment par les équipes de Nancy et Strasbourg et a fait l'objet d'un complément d'échantillonnage. 6 échantillons proviennent d'amphibolites latéritisées de N'Go, à forte teneur en Sc (profils NGPB et NGTR, concessions NMC). 4 échantillons proviennent du sondage PZ1B de Cap Bocage, 3 échantillons de la carrière East Alpha à Tiébaghi, et enfin 2 échantillons de Nakéty (concessions Menelik et Eureka).

Pour les éléments majeurs, les taux d'extraction pour Si (Figure 35) et Mg (Figure 36), quelques soient les réactifs, sont très faibles, indiquant la préservation des phases silicatés

des échantillons. A l'inverse, l'extraction de Fe (fractions oxalate et citrate dithionite) et de Mn (fraction hydroxylamine) est très poussée et associée à une proportion de l'Al extrait des oxyhydroxydes de fer (fraction citrate dithionite des goethites et hématites).

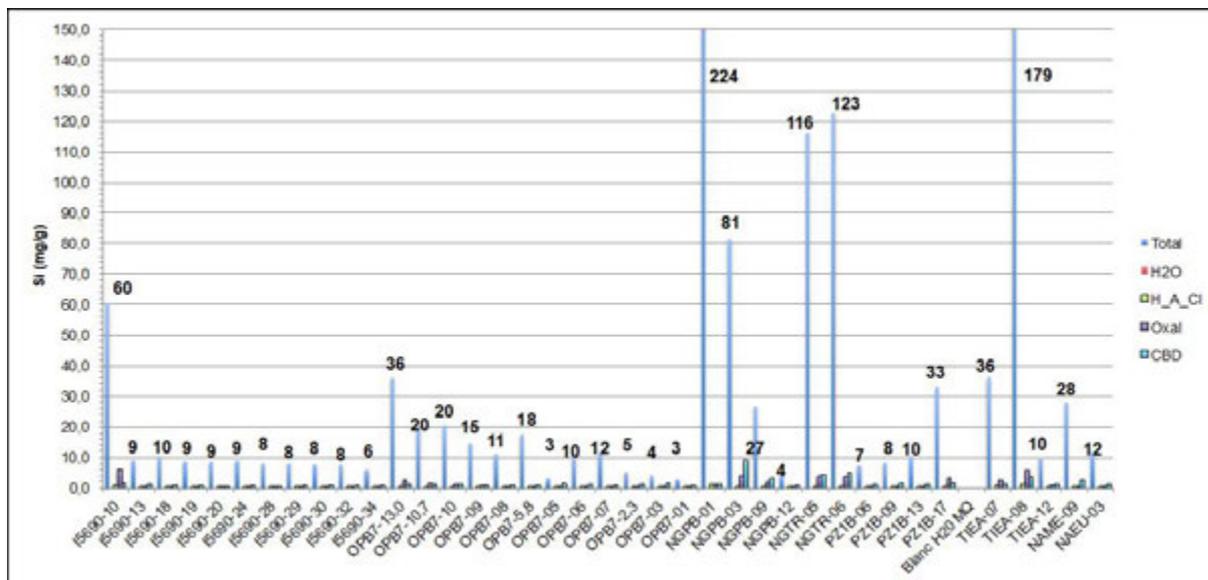


Figure 35 : Bilan des extractions séquentielles pour le silicium. (en gras les concentrations totales des échantillons)

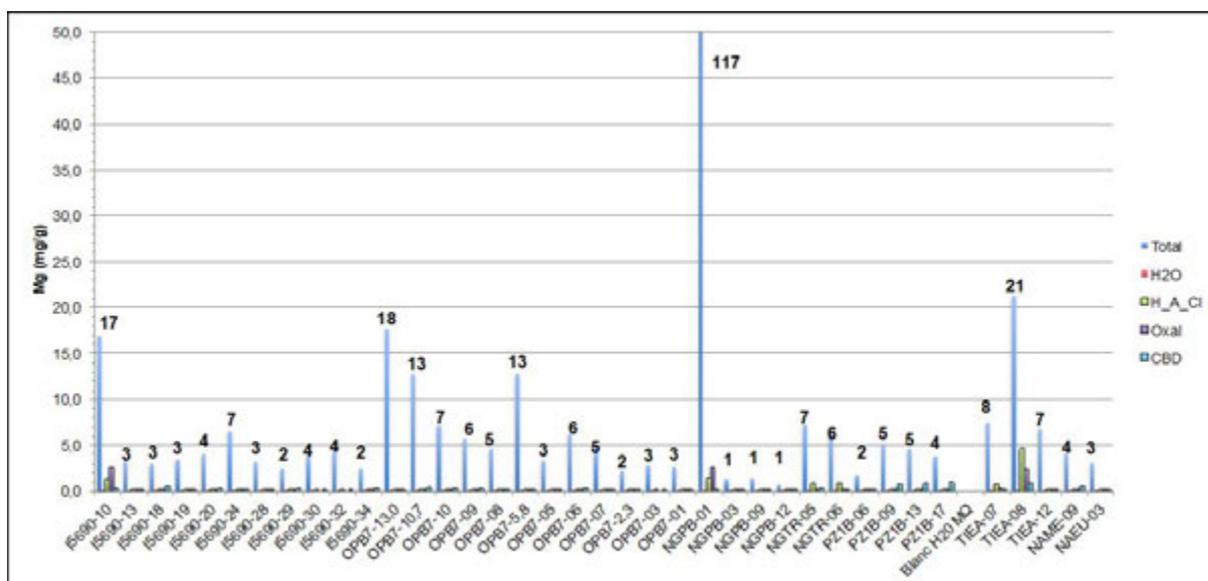


Figure 36 : Bilan des extractions séquentielles pour le magnésium. (en gras les concentrations totales des échantillons).

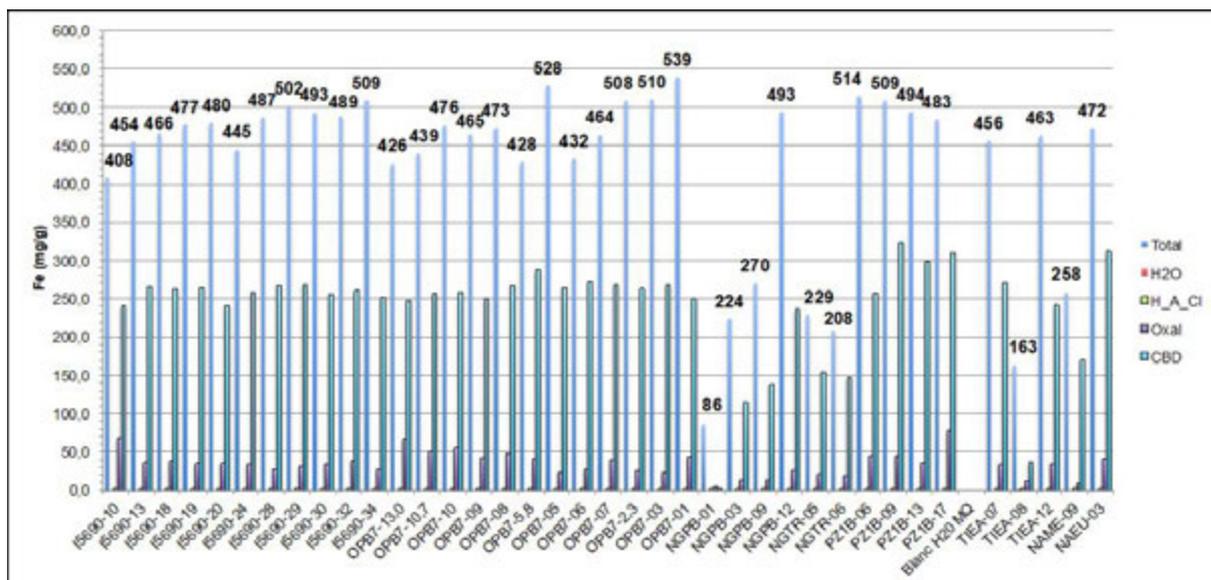


Figure 37 : Bilan des extractions séquentielles pour le fer. (en gras les concentrations totales des échantillons)

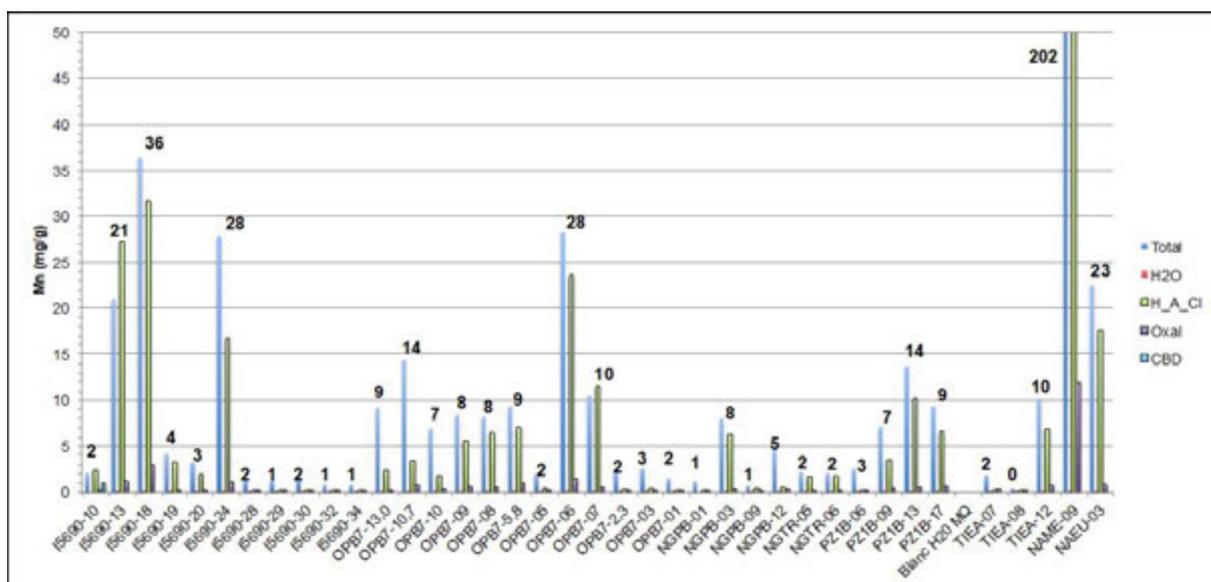
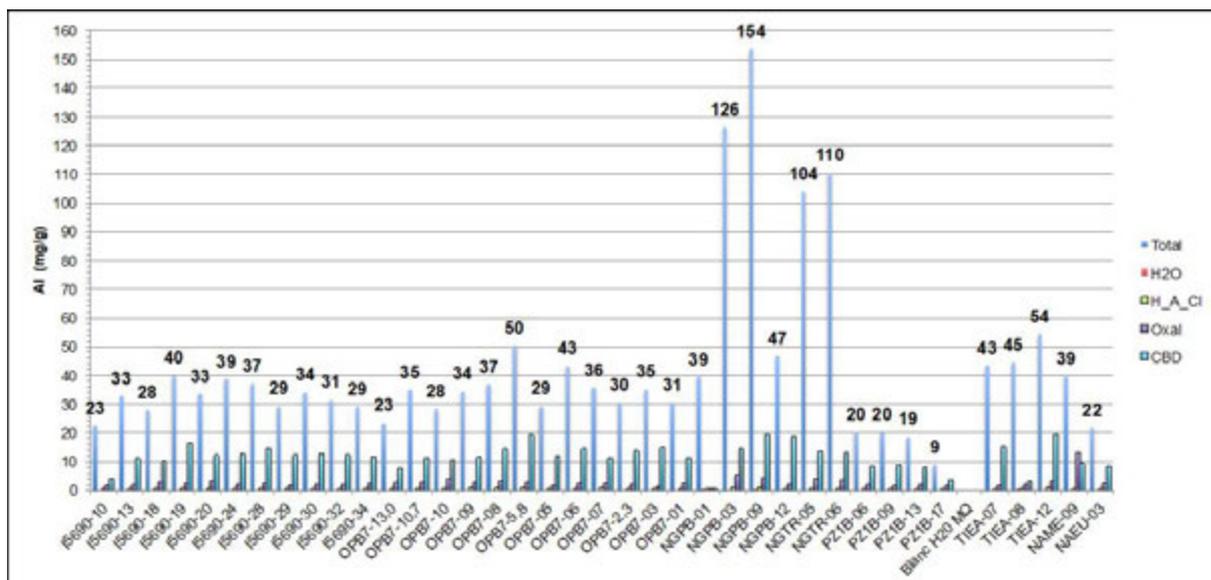
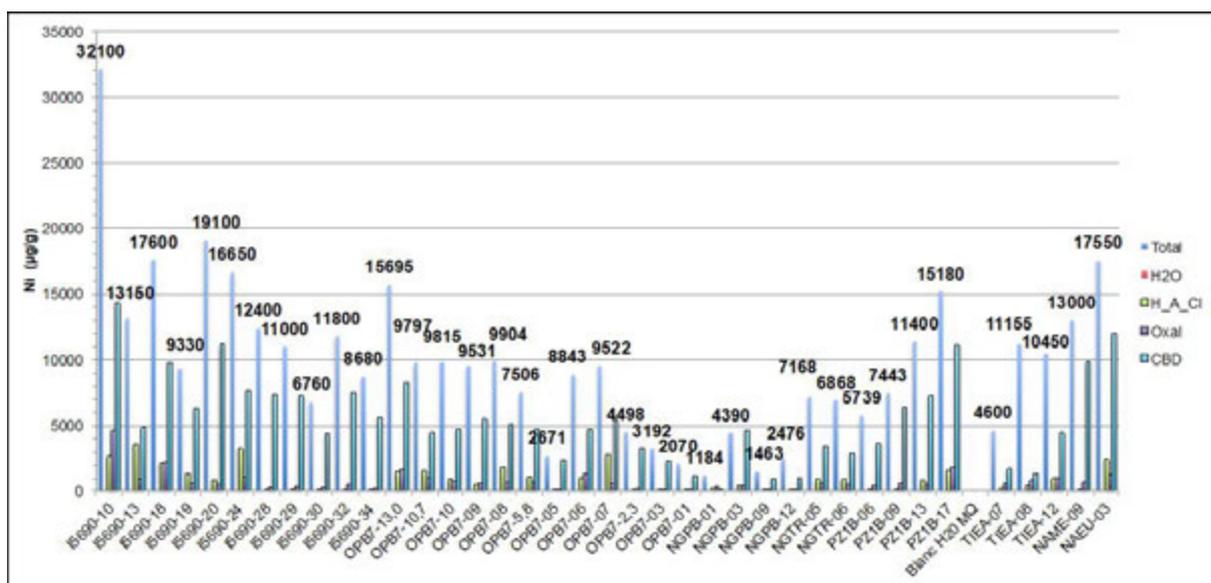


Figure 38 : Bilan des extractions séquentielles pour le manganèse. (en gras les concentrations totales des échantillons).



**Figure 39 : Bilan des extractions séquentielles pour l'aluminium. (en gras les concentrations totales des échantillons).**

On retrouve les modalités d'extraction du Co et du Ni caractérisées lors du projet Nickal. Le Ni est majoritairement extrait par le citrate dithionite (en association avec les goethites et hématites) et en plus faibles proportion avec l'oxalate et l'hydroxylamine (Figure 40). Le cobalt (Figure 41) est par contre préférentiellement extrait par l'hydroxylamine en liaison avec les phases manganésifères (asbolanes), on notera que l'échantillon provenant de la concession de Menelik (Nakéty, NAME-09) montre un comportement différent car le Co, en très forte teneur, est extrait par le citrate dithionite bien que la teneur totale en Mn soit également très forte.



**Figure 40 : Bilan des extractions séquentielles pour le nickel. (en gras les concentrations totales des échantillons).**

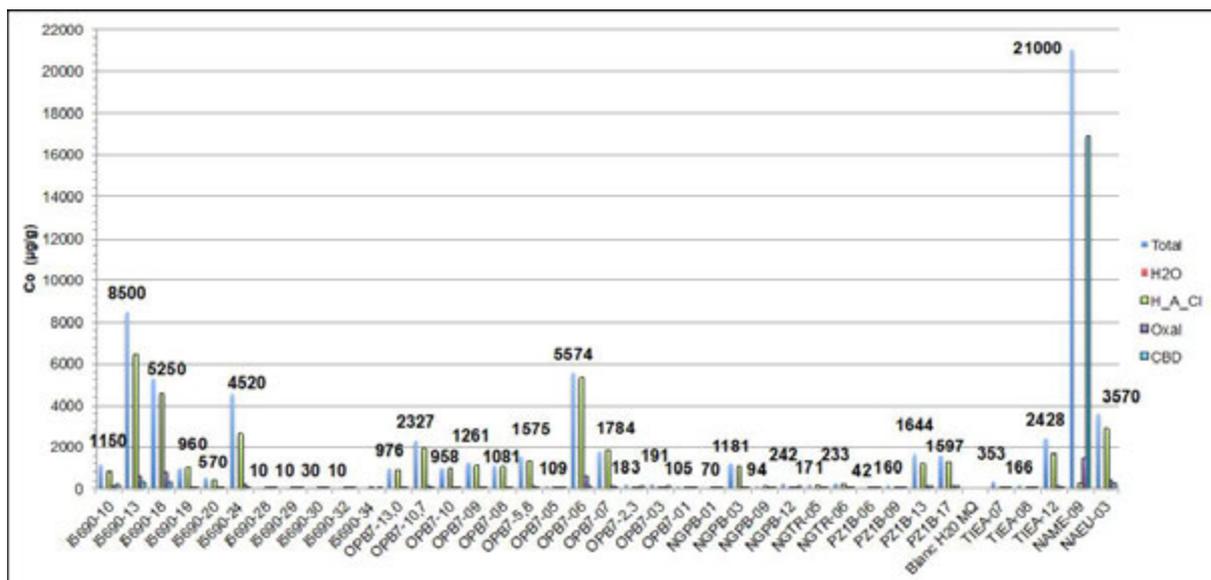


Figure 41 : Bilan des extractions séquentielles pour le cobalt. (en gras les concentrations totales des échantillons).

Le scandium (Figure 42) est particulièrement bien extrait par l'oxalate et par le citrate dithionite avec une prépondérance pour le second réactif, il serait donc associé préférentiellement aux oxy-hydroxydes de fer et dans une moindre mesure aux phases ferrifères mal cristallisées. On notera que le Co de l'échantillon du site de Ngo (NGPB-01) est exclusivement extrait par l'oxalate mais en très faible proportion par rapport à la teneur totale (faible extractabilité par ces réactifs).

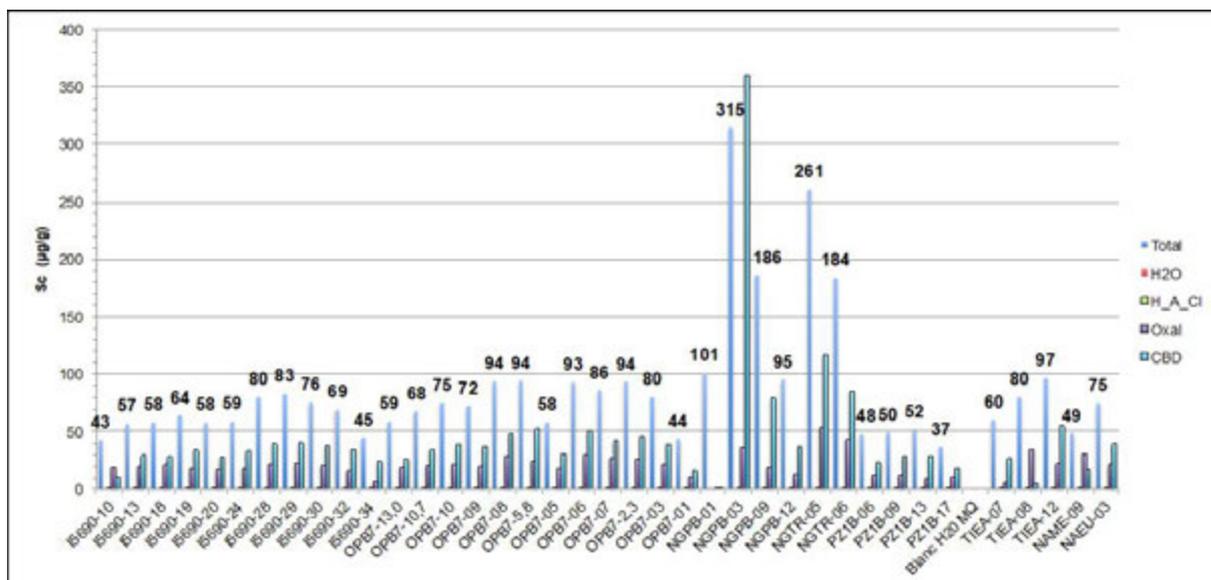


Figure 42 : Bilan des extractions séquentielles pour le scandium. (en gras les concentrations totales des échantillons)

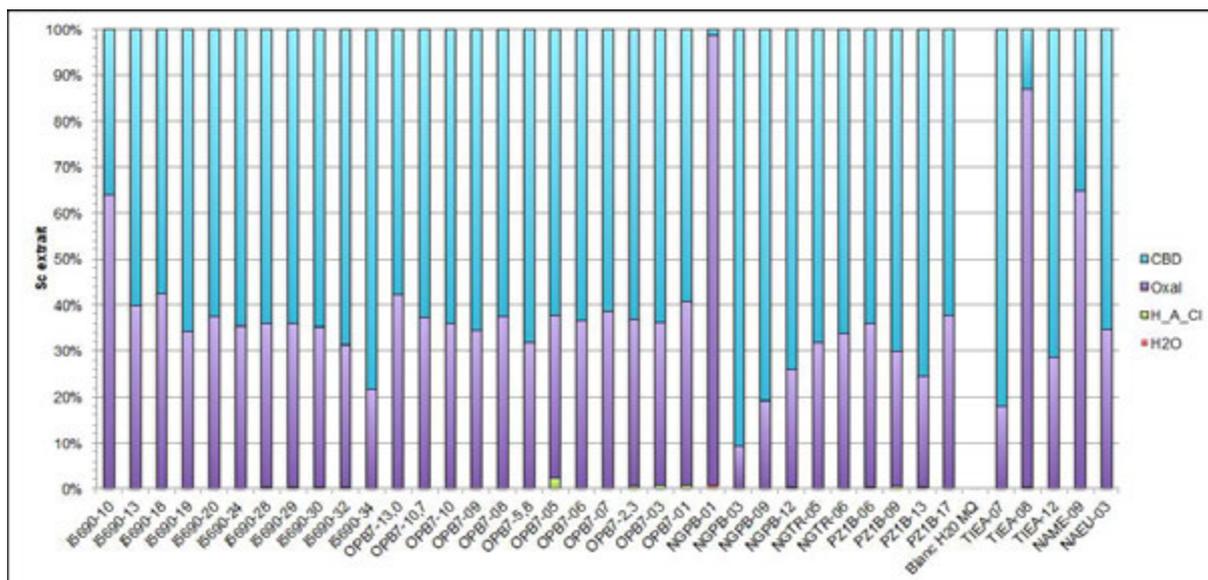


Figure 43 : Proportion de scandium extrait par les différents réactifs chimiques.

Si l'on compare les différentes proportions extraites de Sc, Ni et Co (Figures 43-45), le scandium est associé préférentiellement associé aux phases ferrifères comme le Ni, le Co est fortement lié au Mn (en association avec une faible proportion du Ni) et se partage avec les oxy-hydroxydes de fer dans les horizons sommitaux des profils.

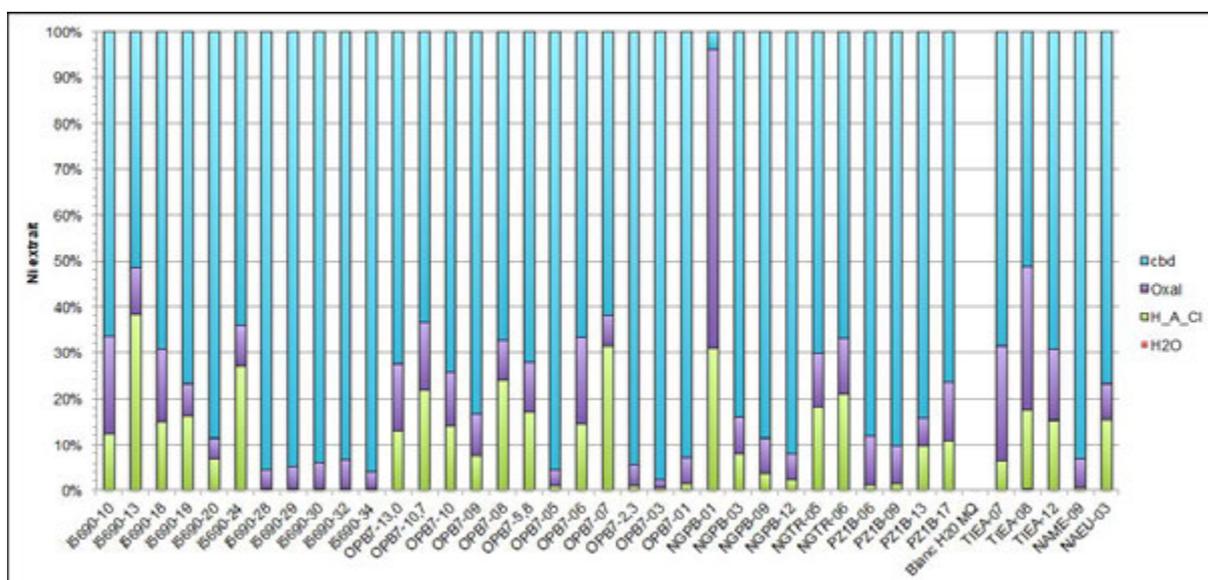


Figure 44 : Proportion de nickel extrait par les différents réactifs chimiques.

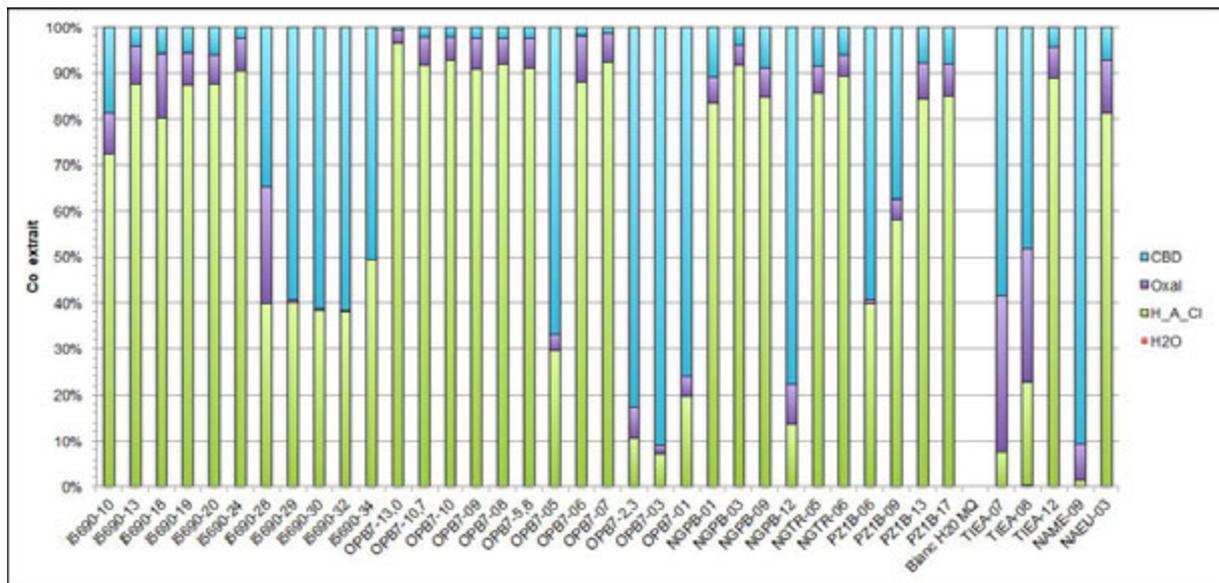


Figure 45 : Proportion de cobalt extrait par les différents réactifs chimiques.

## 10. SPÉCIATION DU SC DANS LES ROCHES ET MINÉRAUX : DISTRIBUTION DU SC ET IDENTIFICATION DES PHASES PORTEUSES PAR SPECTROSCOPIE D'ABSORPTION DES RAYONS X

La spéciation du scandium dans les profils étudiés a été déterminée par des mesures de spectroscopie d'absorption des rayons X. Plusieurs séries d'échantillons prélevés le long de profils latéritiques sur les sites de Koniambo et de Tiébaghi ont été analysés au synchrotron ESRF (Grenoble, France), sur la ligne de lumière ID21. L'accès à la machine a été obtenu sur dépôt de projet ESRF au 1<sup>er</sup> mars 2016 (projet ES-523), et les mesures réalisées sur 5 jours, du 03/11 au 07/11/2016.

Deux types de mesures ont été réalisés :

1/ des analyses in-situ en mode micro-faisceau (taille du spot d'analyse 1x1  $\mu\text{m}$ ) permettant, (i) de réaliser des cartes de répartition du scandium sur échantillons consolidés et polis (mesures  $\mu\text{-SXRF}$  ; Synchrotron X-Ray Fluorescence), (ii) d'effectuer des mesures par spectroscopie d'absorption X (spectroscopie  $\mu\text{-XANES}$  au seuil  $K$  du Sc) afin de déterminer la spéciation in-situ du Sc, c'est-à-dire d'identifier de manière directe les phases minérales porteuses et le mode d'incorporation du Sc dans les minéraux.

2/ des analyses en mode « bulk », c'est-à-dire sur roche totale. Le spot d'analyse fait 200x200  $\mu\text{m}$ . Ces analyses sont réalisées sur poudres broyées, homogénéisées et pastillées. Pour ces approches, les analyses SXRF permettent une quantification du scandium alliant, précision, rapidité (quelques dizaines de secondes) et très haute sensibilité (limites de détection  $\sim\text{ppm}$ ). Par ailleurs, les mesures XANES permettent de déduire la spéciation du scandium dans la roche totale ; le traitement des données permettant de déconvoluer les contributions des différentes espèces minérales.

L'ensemble de ces travaux a préalablement nécessité la préparation de standards à teneurs et états de spéciation du Sc connus.

### 10.1. ETUDE DE L'INCORPORATION DU SC DANS LA STRUCTURE DE LA GOETHITE

L'identification de l'environnement atomique du scandium dans les échantillons naturels nécessite l'analyse de composés de référence. Pour cela, nous avons synthétisé une série de composés de référence pertinente au regard des observations minéralogiques et des corrélations chimiques observées sur le terrain (distribution du Sc corrélé à la distribution de fer et présence de goethite et d'hématite). Les composés de référence suivants ont été synthétisés : Sc co-précipité dans de la goethite et l'hématite et Sc adsorbé sur des goethites. Les travaux sur les hématites substituées et sur l'adsorption du Sc ne sont pas totalement finalisés.

La synthèse a été réalisée selon le protocole classique décrit par Schwertmann et coll. avec des concentrations en Sc variant entre 0 à 100% de substitution du fer. Des goethites avec des faibles teneurs en Sc ont été utilisées pour simuler un scénario environnemental réaliste (entre 0,1 et 1%mol de Sc). Ces goethites sont utilisées pour le traitement des données de

spectroscopie d'absorption des rayons X. Nous avons également synthétisé des goethites avec des taux de substitution importants voire total (5 à 100%mol de Sc) pour étudier les effets de la substitution du Fe par le Sc sur la cristallinité et la morphologie des particules obtenues.

La nature des phases et la cristallinité des particules obtenues ont été déterminées par diffraction des rayons X. Les paramètres de maille ont été obtenus par affinement Rietveld. La morphologie des particules et une analyse chimique locale a été obtenue par microscopie électronique à transmission (MET/EDX, effectué par Olivier Grauby du CINAM, Marseille). La concentration relative du Fe et du Sc a également été mesurée par ICP-AES après minéralisation mais aussi à l'échelle de la particule par analyse EDX couplée à de la microscopie électronique à transmission. Les résultats obtenus à l'échelle locale sont identiques aux résultats obtenus par analyse totale (bulk) ce qui confirme l'homogénéité de la composition chimique des objets formés (Tableau 2).

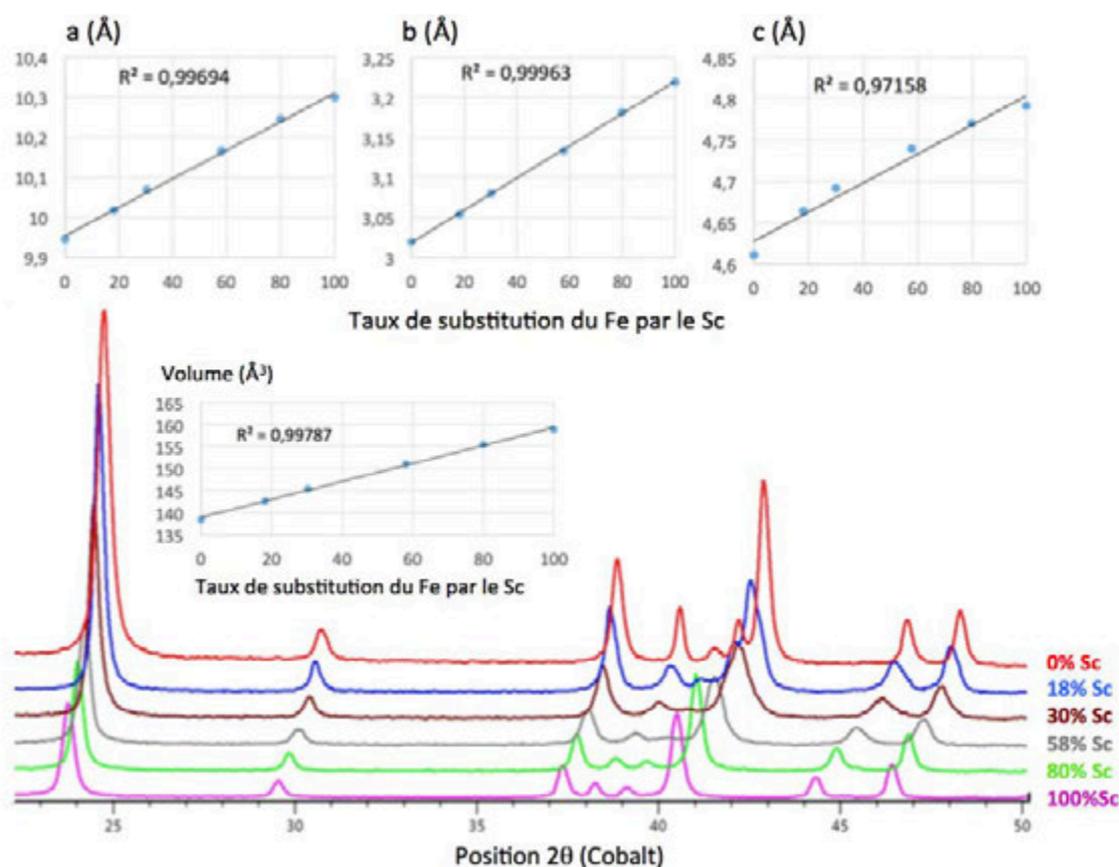
**Tableau 2 Abondance relative du Fe et du Sc mesurée par une analyse totale (ICP-AES) et locale (EDX/MET). (Incertitudes sur la mesure des éléments Fe/Sc (ICP-AES), écart-type sur 10 mesures (EDX/MET)).**

échantillon	ICP-AES		EDX/MET
	mole % Fe	mole % Sc	mole % Sc
#1	100 ± 1		
#2	99,93 ± 0,69	0,07 ± 0,002	
#3	98,84 ± 0,55	1,16 ± 0,01	1,21 ± 0,25
#4	94,18 ± 0,25	5,82 ± 0,10	6,28 ± 1,33
#5	81,75 ± 1,24	18,25 ± 0,30	17,89 ± 5,31
#6	69,79 ± 1,03	30,21 ± 0,30	28,65 ± 4,21
#7	42,07 ± 0,35	57,93 ± 0,40	54,97 ± 0,68
#8	20,09 ± 0,39	79,91 ± 1,10	78,89 ± 0,38
#9		100	

Les abondances relatives de Fe et Sc sont de l'ordre de grandeur des abondances relatives des réactifs initiaux d'où une incorporation complète des éléments dans la structure cristalline. Enfin, les analyses chimiques en microscopie n'ont pas montré de démixtion de phase.

Le diffractogramme de l'échantillon contrôle (Figure 46 : 1, 0%mol Sc) est caractéristique de la goethite et les particules formées sont anisotropes, sous forme de nano-bâtonnets conformes aux résultats obtenus par Schwertmann (Figure 47A). La substitution du fer par le

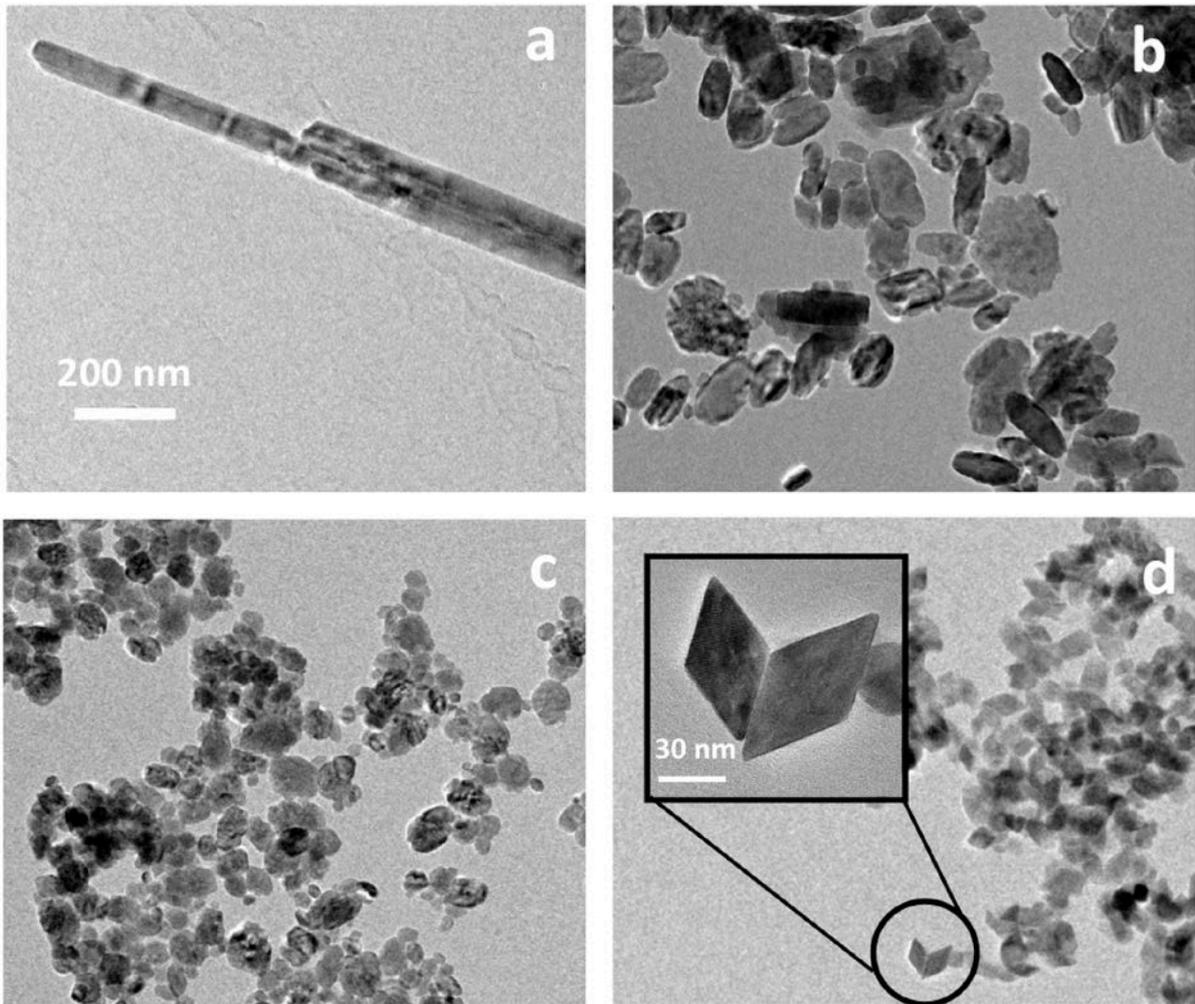
Sc entraîne un décalage des pics de diffraction vers les grandes distances (petits angles) mais la phase orthorhombique est préservée jusqu'à 100% de substitution. L'évolution des paramètres et du volume de maille est linéaire avec le taux de substitution et suit une loi de Végard (Figure 46). Si l'on regarde en détail, l'évolution du paramètre de maille c n'est pas parfaitement linéaire. Ce processus a été décrit dans la littérature (Schulze, 1984) et s'explique par le fait que les liaisons selon a et b dans les chaînes d'octaèdres sont covalentes et que chaque octaèdre partage 4 de ses arêtes avec des octaèdres adjacents. Selon c les liaisons entre chaîne se font par un oxygène apical et par liaison hydrogène ce qui est moins stable. Lors de la croissance du cristal, étant donné la faiblesse de cette liaison, l'empilement des chaînes dans cette direction peut facilement être interrompu.



**Figure 46 : Diffractogrammes de rayons X et évolution des paramètres a, b et c et du volume de maille des goethites dopées en Sc (0, 18, 30, 58, 80 et 100%mol de substitution).**

La morphologie des particules formées est fortement affectée par la substitution du Fe par du Sc. Initialement anisotropiques, les particules sont pseudo-sphériques pour un taux de Sc de 58% (Figure 47C) et se présentent sous la forme losangique pour 100% de Sc (Figure 47D). La taille des particules formées diminue avec le pourcentage de Sc.

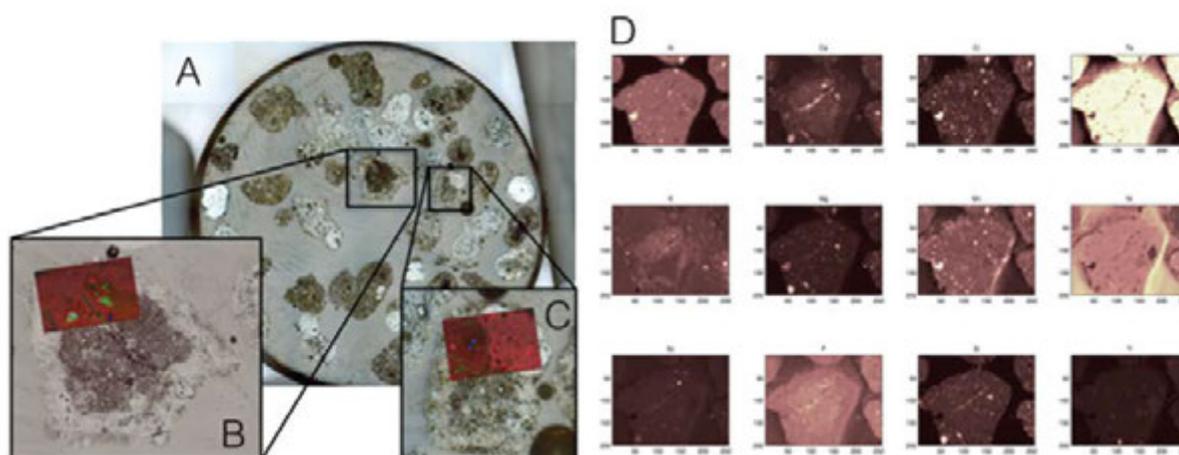
La solution solide décrite ici est idéale malgré une différence de rayon ionique relativement importante entre le Fe (55pm) et le Sc (75pm) (36% de différence) ce qui semble contredire la loi de Goldschmidt qui stipule que pour que deux ions puissent se remplacer l'un l'autre dans un cristal, leurs rayons ioniques ne doivent pas différer de plus de 15 %. De 15 % à 30 %, la substitution peut se faire mais elle serait partielle.



**Figure 47 : Clichés de microscopie électronique à transmission pour les goethites #1 (a : 0% Sc), #7 (b : 30% Sc), #8 (c : 58% Sc) et #9 (d : 100% Sc). (réalisés par O. Grauby, CINAM Marseille, a, b, c et d sont à la même échelle)**

## 10.2. DISTRIBUTION DU SC ET SPÉCIATION IN-SITU : EXEMPLE D'ANALYSE DE PISOLITHES PRÉLEVÉS SUR LE MASSIF DE KONIAMBO

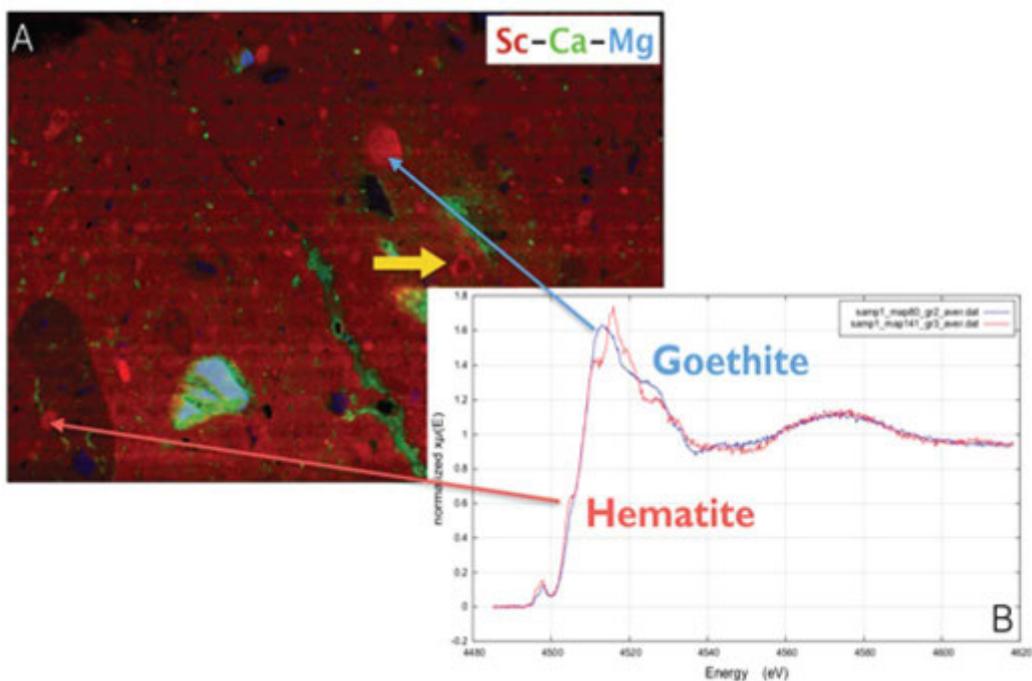
Plusieurs pisolithes ont été préparés et analysés en cartographie  $\mu$ -XRF. La figure 48 montre différents grains en microscopie lumière réfléchi, ainsi que différentes cartes de distributions élémentaires. La figure 48D présente des cartes élémentaires (en niveau de gris) effectuées à partir d'une  $\mu$ -XRF de laboratoire. Les teneurs en Fe, Al et Ni sont relativement homogènes, et quelques grains de chromite sont clairement identifiés (Cr, Al, Mn). Quelques résidus de phases silicatées sont également observés (Si, Mg, Ca). Il est aussi possible de distinguer une faible zonation des éléments mineurs (K, Ca) en accord avec les contrastes de couleur observés sur les images optiques. Il est à noter que la carte de distribution Sc présente quelques spots nettement identifiés. Cependant, après analyse fine des spectres XRF, ces derniers sont apparus résulter de phénomènes parasites de diffraction des grains de chromite. Cette technique ne permet donc pas de visualiser la répartition du Sc pour les teneurs considérées ici.



**Figure 48 : A : Montage photographique au microscope optique en réflexion de pisolithes montés sur un plot époxy ( $\Phi=1''$ ) et polis.**

*B et C : zoom sur différents pisolithes, et superposition de cartes de distribution élémentaires réalisées sur synchrotron (ID21, ESRF) ; Ca en vert, Si en bleu, Sc en rouge. D : Cartes de distribution élémentaires réalisées par  $\mu$ -XRF de laboratoire (à ISTERre, Grenoble) avec une taille de spot d'analyse de  $40\ \mu\text{m}$ , sur le pisolithe représenté en B.*

En revanche, les figures 48B et 48C montrent très clairement la répartition du Sc pour deux grains (cartes synchrotron : SXRF). La carte présentée en figure 48B, ainsi qu'en figure 49A, mesure  $1.5\ \text{mm}$  de longueur, pour une taille de pixels  $2 \times 2\ \mu\text{m}$ . Elle présente un fond relativement homogène en Sc, ainsi que quelques spots très nettement enrichis.

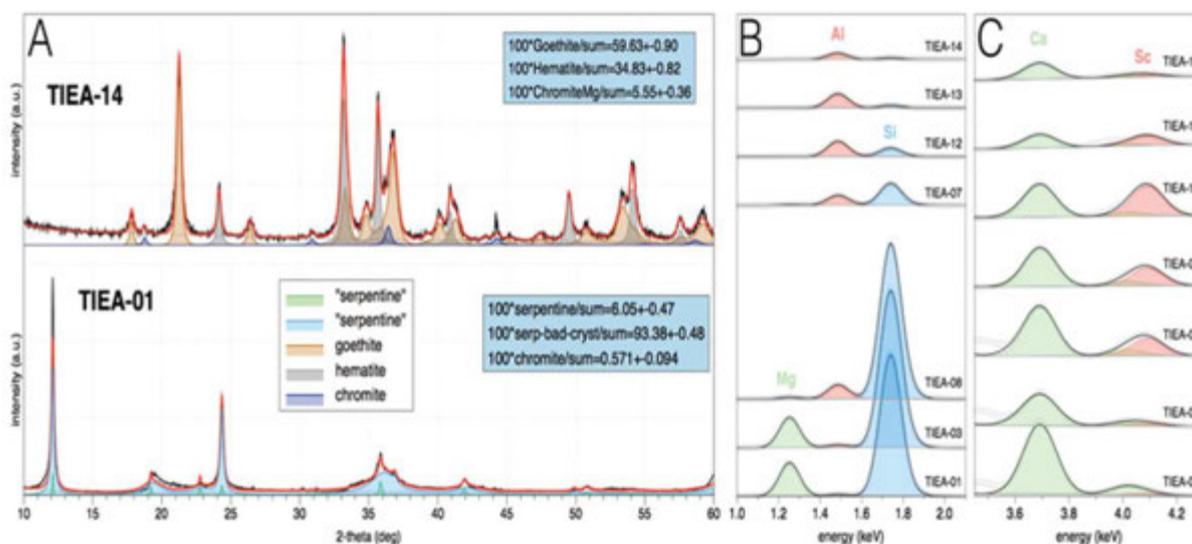


**Figure 49 : A : Carte SXRF de répartition du Sc, Ca et Mg, dans un grain de pisolithe. B : Spectres  $\mu$ -XANES enregistrés sur deux grains enrichis en Sc**

Les spectres  $\mu$ -XANES enregistrés pour 2 grains enrichis en Sc (indiqués par des flèches sur la carte) présentent des signatures caractéristiques de goethite et d'hématite (e.g., Chassé et al., 2017 ; nos travaux). Cependant, la très large majorité des spectres enregistrés dans les différentes zones de cette pisolithe présentent une signature de goethite. Des textures coronitiques sont également observées (flèche jaune), suggérant potentiellement une affinité du Sc contrastée lors de la transition goethite-hématite dans la partie sommitale des profils latéritiques.

### 10.3. COMPORTEMENT ET SPÉCIATION DU SC LE LONG DE PROFILS LATÉRITIQUES : EXEMPLE D'UN PROFIL ÉCHANTILLONNÉ SUR LE MASSIF DE TIÉBAGHI.

Un échantillonnage a été réalisé le long d'un profil latéritique complet, sur la mine de Tiébaghi (carrière East Alpha). Les échantillons ont été broyés, homogénéisés puis pastillés. Dans un premier temps, ils ont été caractérisés par diffraction de rayons X sur poudres (XRPD). Les clichés de diffractions ont été traités par raffinement Rietveld afin d'en déduire les abondances de chaque espèce minérale (Figure 50).

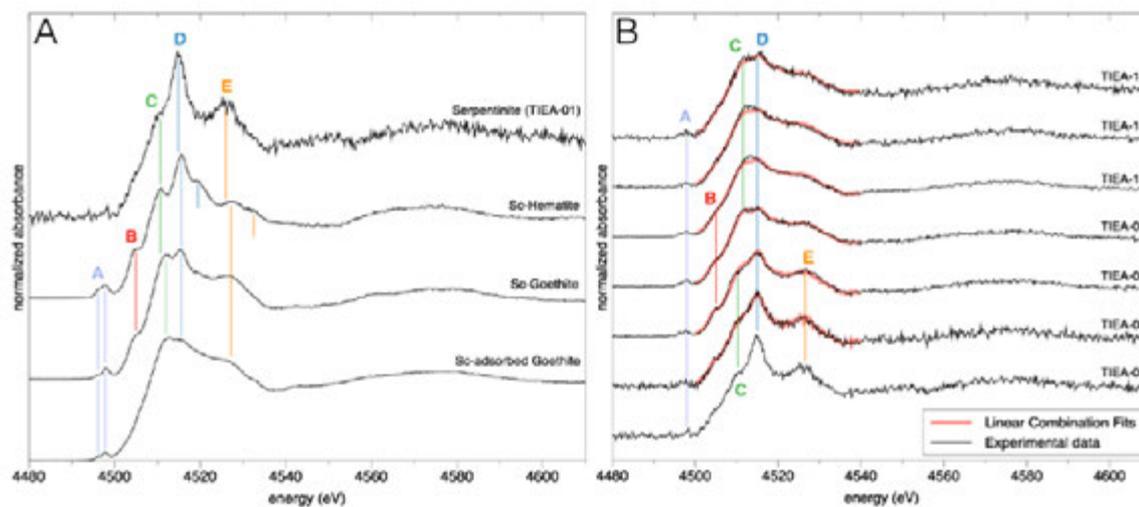


**Figure 50 : A : Exemple de cliché de diffraction et de raffinement Rietveld pour les échantillons prélevés en base et sommet de profil.**

*B : Spectres SXRF montrant les fits des pics du Mg, Al et Si. C : Spectres SXRF montrant les fits des pics du Ca, et Sc.*

Les figures 50B et 50C montrent l'évolution des pics de fluorescence du Mg, Al et Si, ainsi que Ca et Sc, le long du profil latéritique étudié. Du bas vers le haut, le profil s'appauvrit significativement en Mg (forte diminution de la quantité de serpentine) et s'enrichit en Al à partir du faciès sapolite à smectites. La teneur en Si baisse brutalement à partir du faciès latérite. Le pic du Sc augmente jusqu'à atteindre un maximum dans les faciès latéritiques. En se basant sur un échantillon de concentration connue, l'aire des pics du Sc permet de déduire les teneurs avec une grande précision et sensibilité.

Ces échantillons ont ensuite été mesurés par spectroscopie XANES au seuil K du Sc (Figure 51B). Cette série de spectre montre une évolution progressive des différentes caractéristiques spectrales avec l'avancée du degré d'altération supergène. Une analyse de ces spectres par combinaison linéaire, basée sur différents spectres standard (voir Figure 51A), permet d'en déduire de manière particulièrement robuste le partage du scandium entre les différentes phases (ou modes d'incorporation). Dans le cas présent, les phases susceptibles de piéger le Sc sont la serpentine (roche mère), la goethite par mécanisme d'absorption ou d'adsorption, et enfin l'hématite.



**Figure 51 : A : Spectres XANES au seuil K du Sc pour les différents standards. B : Spectres XANES au seuil K du Sc pour les différents échantillons collectés le long du profil étudié. Les courbes rouges représentent le résultat des fits par combinaison linéaire pour chaque spectre.**

En couplant les différents résultats présentés précédemment, il est possible de déduire, le long du profil d'altération, l'évolution, i) de la teneur en Sc, ii) de l'abondance modale des différentes phases minérales, et enfin iii) de la spéciation du Sc et donc de sa répartition selon différents modes de sorption pour chaque espèce minérale (Figure 52). Cette figure montre l'enrichissement progressif en Sc depuis la roche mère serpentinisée, jusqu'aux latérites, avant de diminuer au niveau de la cuirasse de fer. L'analyse par XRPD montre une diminution rapide de la quantité de phases silicatées aux dépens de la goéthite, chromite, et plus haut dans le profil, de l'hématite. En parallèle, la spectroscopie XANES met en évidence que la phase porteuse principale dans la roche mère est la serpentine. Dans les niveaux saprolitiques, c'est la goéthite qui absorbe et piège préférentiellement le scandium. Le niveau d'enrichissement atteint environ 50 ppm. Enfin, à partir des niveaux latéritiques et au-dessus, le mécanisme d'adsorption sur la goéthite semble être très nettement privilégié, au détriment du mécanisme d'absorption. La concentration en Sc atteint environ 100 ppm en roche totale. Enfin, en sommet de cuirasse, l'hématite présente une partie faible mais significative de Sc, bien que le mécanisme d'adsorption sur la goéthite reste très nettement favorisé.

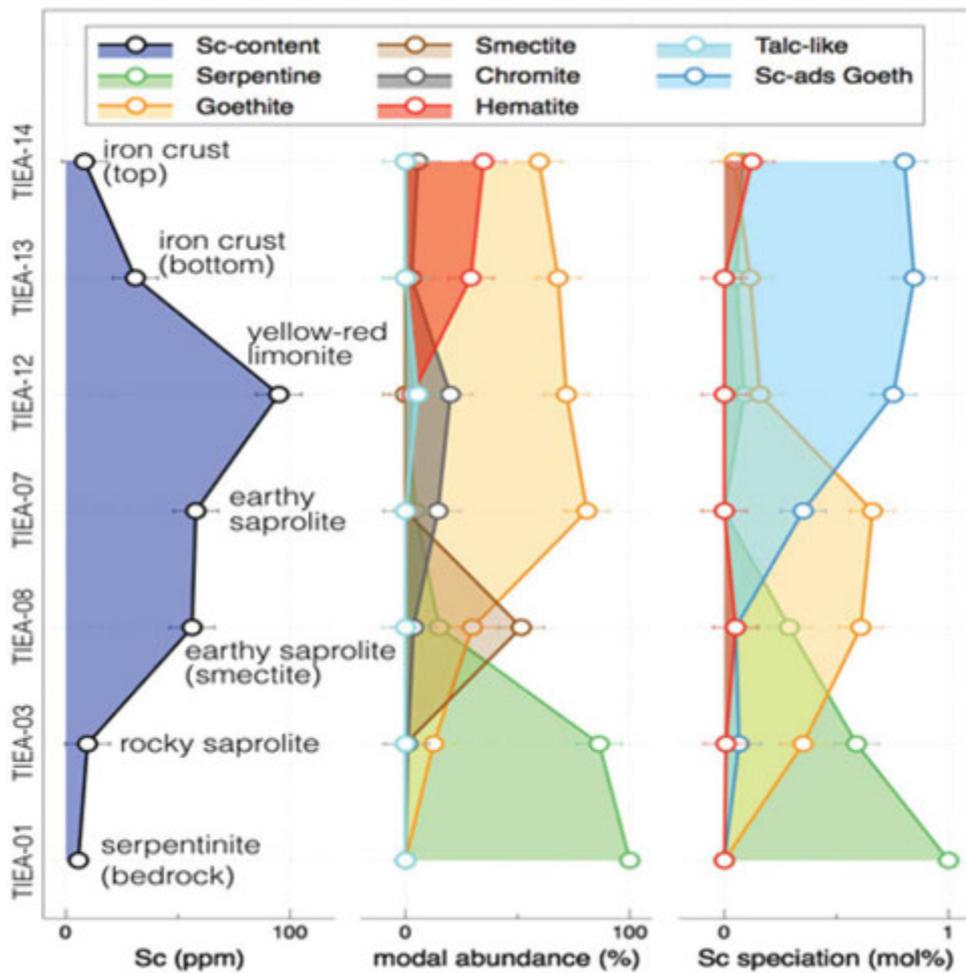


Figure 52 : Évolution, de la base au sommet du profil d'altération du site EAST ALPHA (Tiébaghi) de la teneur en Sc en roche totale (gauche), l'abondance modale des principales phases minérales (milieu), et des différents modes d'incorporation du Sc (spéciation) en fonction de la minéralogie (droite).

## 11. TESTS D'ANALYSE PAR XRF PORTABLE

### 11.1. OBJECTIFS ET STRATÉGIE

Les travaux réalisés sur NITON (modèle XL3T GOLDD+) ont eu pour objectif de déterminer les conditions dans lesquelles l'estimation par XRF portable des teneurs en Sc (mesure directe et/ou estimation indirecte via la mesure d'éléments proxies) est possible et pertinente. La totalité des échantillons utilisés pour les tests de calibration ont été préalablement analysés par ICP-MS au SARM. Ces échantillons proviennent essentiellement des profils d'altération collectés lors de la mission de terrain de 2016, et complétés par certains échantillons fournis par Brice Sevin (Bailly et al., 2015). Plusieurs paramètres importants ou challenges inhérents à l'analyse du Sc par XRF portable ont été abordés :

- (i) Le mode de préparation de l'échantillon. Certaines analyses ont été dupliquées sur fragment de roche humide, sur fragment de roche sèche, sur poudre non compactée (coupelle), et sur poudre compactée (pastille). L'utilisation d'un film mylar étant nécessaire à la mesure sur fragment et sur coupelle, les analyses sur pastilles ont été elle mêmes dupliquées avec et sans film.
- (ii) La variété des lithologies et des teneurs en Sc. Les principales lithologies analysées incluent les latérites sur péridotites (goethite  $\pm$  hématite ; 75 à 95 ppm Sc), les intrusifs sains (hornblende  $\pm$  orthopyroxènes  $\pm$  plagioclases ; 75 à 128 ppm Sc), et les intrusifs altérés (goethite – kaolinite  $\pm$  gibbsite ; 116 à 315 ppm Sc). Ces échantillons naturels ont été complétés par des échantillons issus de mélanges (aux proportions et donc à la composition contrôlées) afin de balayer correctement la gamme des teneurs en Sc (75 à 315 ppm).
- (iii) Les paramètres d'acquisition. Le spectromètre utilisé permet des analyses selon plusieurs filtres. Chaque filtre consiste à associer une tension d'accélération dans le tube et une membrane entre le tube à RX et l'échantillon agissant comme une source secondaire. Les filtres testés sont : « light » et une version adaptée du filtre light pour ne pas stimuler la fluorescence du Fe (« light modifié ») ainsi que le filtre « low » et une version adaptée de ce filtre low pour diminuer la stimulation de la fluorescence du Fe (« low modifié »). Le dernier paramètre accessible à l'utilisateur est le temps d'acquisition.
- (iv) Le traitement des spectres. L'ordinateur inclus dans le spectromètre donne accès à plusieurs méthodes d'interprétation des spectres, ce sont les modes « soil » et « mining ». Les évaluations des effets de matrice sont basées sur deux méthodes différentes. Le premier (normalisation Compton) suppose une forte proportion d'éléments légers (Al et Si) et donne accès à la quantification du Sc. Le second mode est basé sur des calculs en paramètres fondamentaux, permettant de faire face à une faible proportion d'éléments légers parfois mais ne prévoit pas la quantification du Sc.
- (v) La dispersion analytique due aux faibles teneurs (centaine de ppm). Pour la plupart des échantillons analysés, la mesure a été dupliquée 8 fois, et jusqu'à 34 fois sur un échantillon de composition idéale (Sc < 150 ppm et Ca < 0,1%).

- (vi) La quantification et la minimisation des effets perturbateurs du Ca sur l'analyse du Sc (interférences des pics de fluorescence). Les interférences spectrales se produisent lorsque la distance en énergie entre deux raies spectrales est inférieure à la résolution spectrale du détecteur (130eV, ex : As  $K\alpha$ /Pb  $L\alpha$ ). Cette interférence est également possible lorsque la distance en énergie entre deux raies est supérieure, mais que l'une des deux raies spectrales est beaucoup plus importante que l'autre (Zn  $K\beta$ /Ge  $K\alpha$ ). Dans les échantillons considérés, les deux conditions sont satisfaites : la raie  $K\beta$  du Ca est à moins de 130 eV de la raie  $K\alpha$  du Sc et le signal sur la raie  $K\beta$  du Ca est généralement très supérieur au signal sur la raie  $K\alpha$  du Sc. Une méthode de déconvolution spectrale avec PyMCA a été testée pour être comparée au programme in-house de l'appareil NITON fonctionnant par Régions d'Intérêt.

## 11.2. RÉSULTATS

### 11.2.1. MODE DE PRÉPARATION

Le mode de préparation de l'échantillon influe largement sur l'analyse XRF, en particulier pour la mesure du Sc (numéro atomique relativement bas et présent en faibles teneurs). L'analyse sur fragment humide, déjà particulièrement délicate pour le Ni, est à proscrire pour la mesure du Sc. L'analyse sur fragment sec pourrait être envisageable mais reste largement limitée par une large dispersion de la mesure. L'analyse de pastilles compactées sans film mylar fournit les meilleurs résultats sur l'ensemble des éléments d'intérêt et permet l'homogénéisation de volumes choisis. L'utilisation d'un film mylar réduit légèrement l'intensité du signal (atténuation ~10%) et donc le rapport signal sur bruit.

### 11.2.2. ANALYSE DES ÉLÉMENTS MAJEURS ET TRACES D'INTÉRÊT

L'analyse de certains éléments majeurs et traces peut permettre de contraindre la nature et la fertilité des protolithes et de leurs produits d'altération, certains de ces éléments étant directement corrélés au Sc (cf. section 13) : Al, Si, Fe, Ca, Ti, V. L'analyse des éléments Al et Si n'est possible qu'en mode Mining. Pour les autres éléments, les analyses ont été dupliquées en mode Mining et en mode Soil. Des calibrations ont pu être correctement établies pour ces éléments (Figure 53). Les éléments Al et Si (analysés en mode Mining) apparaissent légèrement surestimés (115% de la valeur réelle). Le Fe analysé en mode Mining apparaît également légèrement surestimé (110%). L'analyse en mode soil résulte en une très large surestimation, non linéaire, de la teneur en Fe jusqu'à 450%. Le Ca présente une bonne calibration dans les deux modes, et une bonne mesure de la teneur sans nécessité d'appliquer un facteur correctif. Le Ti et le V présentent d'assez bonnes calibrations de leurs teneurs respectives, mais montrent un effet significatif, sur la pente de calibration, du mode d'analyse (Mining vs. Soil) et de la lithologie (possiblement liés à des effets de fluorescence secondaire du Fe). A l'inverse de Al et Si, le Sc ne peut être analysé qu'en mode Soil.

### 11.2.3. FILTRES ANALYTIQUES ET DURÉE D'ACQUISITION

Les filtres « light » et « light modifié » se sont avérés stimuler trop fortement le Ca. L'interférence entre Ca et Sc devient impossible à résoudre par le logiciel d'ajustement des spectre (PyMCA). Les filtres « low » et « low modifié » donnent de meilleurs résultats. Les données présentées ont été acquises avec le filtre « low » disponible par défaut. Les données acquises avec les filtres « low modifiés » semblent présenter une légère amélioration du rapport signal/bruit. Ce second filtre n'a pas bénéficié d'autant d'efforts que la filtre pour deux raisons. La première est une limitation du temps disponible pour mener cette étude, la deuxième est due ce filtre modifié n'est normalement pas possible à mettre en œuvre sans passer par le fabricant. Ce travail sur les filtres n'est possible qu'associé à une déconvolution des interférences spectrales, parmi les programmes in-house du NITON, seul le mode « soil » donne accès au Sc à partir du filtre « low ».

Plusieurs échantillons, couvrant une large gamme de teneurs en Sc, ont été analysés avec des temps d'acquisition de 30, 60, 90 et 120 secondes. Pour les échantillons ayant des teneurs en Sc > 100 ppm, un temps d'acquisition de 60 s apparaît optimal, le rapport signal sur bruit n'étant pas amélioré pour des temps d'acquisition plus longs. Pour les échantillons relativement pauvres en Sc (>100 ppm), il apparaît nécessaire d'avoir un temps d'acquisition de 90 s.

En ce qui concerne les modes d'analyse in-house des spectres, la différence entre le mode « soil » et le mode « mining » apparaît nettement sur les quantifications du Fe. Au-delà d'une concentration d'environ 10% de Fe, le dosage du mode « soil » diverge de la valeur de référence (SARM) alors que le dosage en mode « mining » reste satisfaisante. L'utilisation de la normalisation Compton, qui prévoit une forte teneur en Al et Si, aboutit à des valeurs aberrantes en Fe avec une tendance non-linéaire. Cet effet ne se voit pas sur les autres éléments, soit parce qu'ils ne sont accessibles qu'avec l'un des deux modes, soit parce que leur concentration reste limitée au maximum à quelques pourcents.

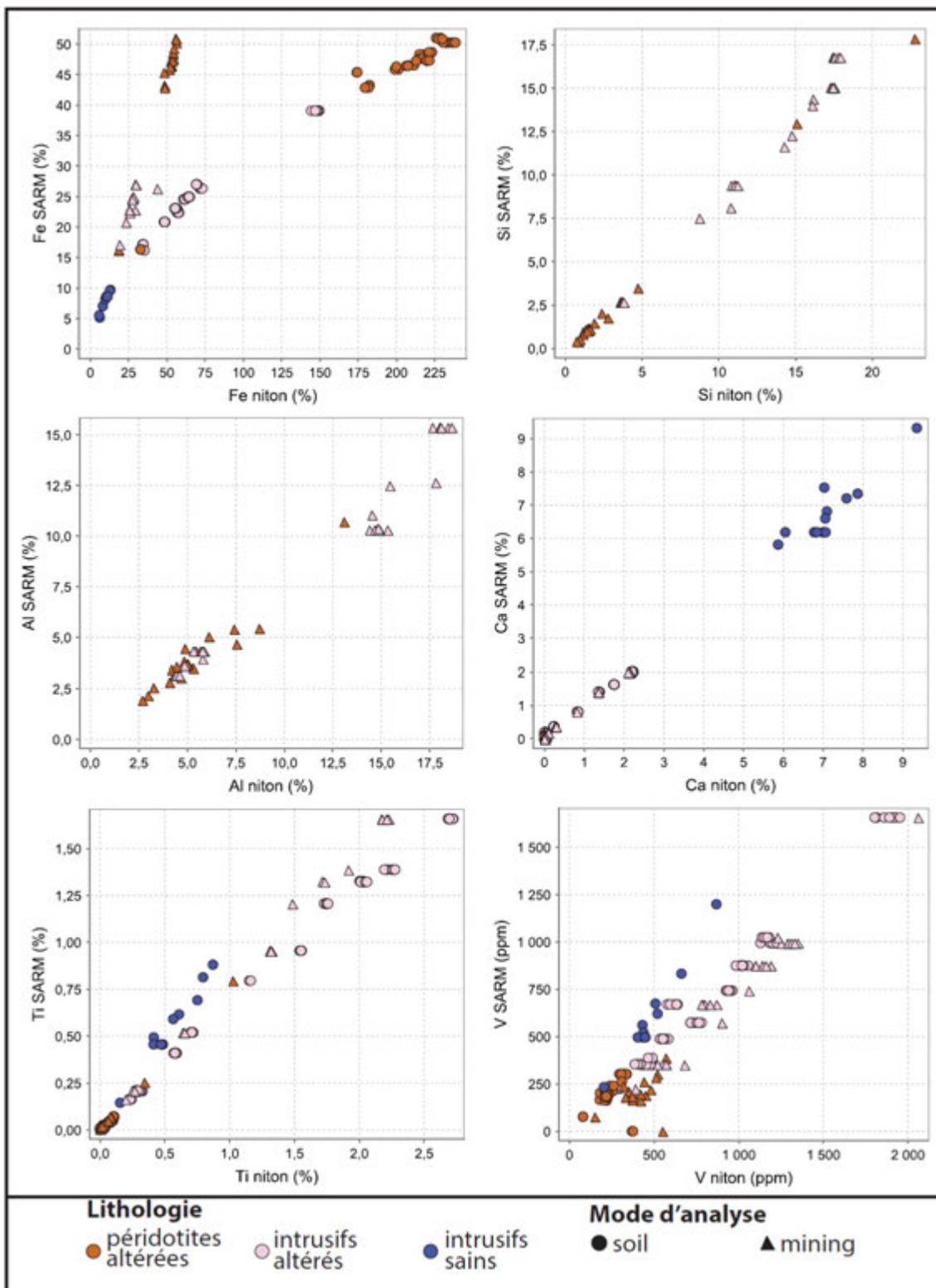


Figure 53 : Calibrations obtenues avec traitement par le programme in-house Niton pour le éléments majeurs (+V) d'intérêt

#### 11.2.4. ANALYSE DU SC : PROGRAMME IN-HOUSE NITON VS. ROUTINE DE DÉCONVOLUTION

L'analyse du Sc et son traitement en mode Soil par le programme in-house niton permet d'établir une relativement bonne calibration entre teneurs déterminées par l'appareil et teneurs « réelles » analysées au SARM, tel que  $Sc(SARM) = 2,1 * Sc(niton) - 25$  (Figure 54A). Cette calibration reste cependant limitée par la dispersion analytique et par l'effet perturbateur du Ca. La dispersion analytique, mise en évidence par la répétition des mesures sur les mêmes pastilles, est d'environ  $\pm 55$  ppm ( $\pm 25$  ppm teneurs NITON). Dans ces conditions, la mesure d'échantillons relativement pauvres en Sc ( $< 75$  ppm voir  $< 100$  ppm) apparaît non pertinente. Enfin, les échantillons riches ( $> 1\%$ ) en Ca présentent des teneurs en Sc systématiquement surestimées et hors calibration. La routine développée à Géoressources permet, à partir de spectres d'analyse, de déconvoluer la contribution de chacun des éléments, dont le scandium, et de mesurer l'aire des pics ainsi déconvolués. Plus spécifiquement, pour l'analyse du Sc, cette routine estime l'aire de pic de la raie  $K\alpha$  du Sc une fois soustraite la contribution de la raie  $K\beta$  du Ca. Cette routine, appliquée à l'ensemble des spectres, permet également d'établir une assez bonne corrélation, telle que  $Sc(SARM) = 24 * Sc(K) - 5$  (Figure 54B). La dispersion analytique, de l'ordre de  $\pm 55$  ppm, est similaire à celle des analyses traitées par le programme in-house de NITON. Cependant, la routine de déconvolution permet d'atténuer très largement l'effet du Ca sur la mesure du Sc pour les échantillons  $> 1\%$  Ca. La figure 54C et 54D met en évidence l'effet du Ca (plus spécifiquement la teneur en Ca rapportée à celle du Sc, soit Ca/Sc) sur la pertinence de la mesure du Sc explicitée par le rapport  $Sc(SARM) / Sc(niton \text{ ou } K)$ . Une telle représentation permet notamment de contraindre le rapport de concentration seuil Ca/Sc au-delà duquel la mesure du Sc n'est plus pertinente. Ce seuil Ca/Sc est d'environ 60 dans le cas d'un traitement des analyses par le programme in-house NITON. L'application de la routine de déconvolution permet de repousser la valeur seuil Ca/Sc à environ 110, offrant ainsi la possibilité d'obtenir une mesure pertinente de la teneur en Sc sur des échantillons plus riches en Ca (Figure 55).

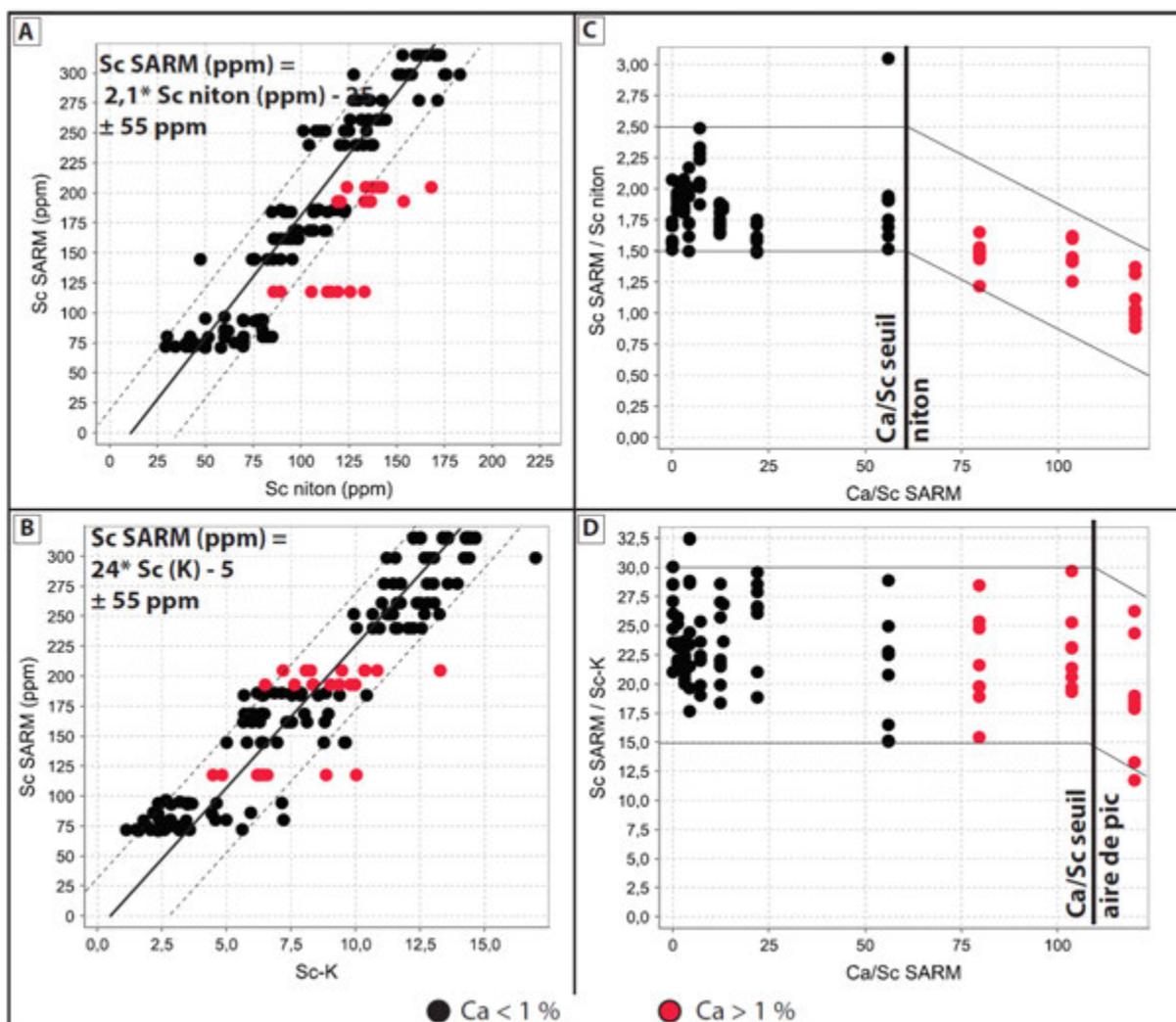
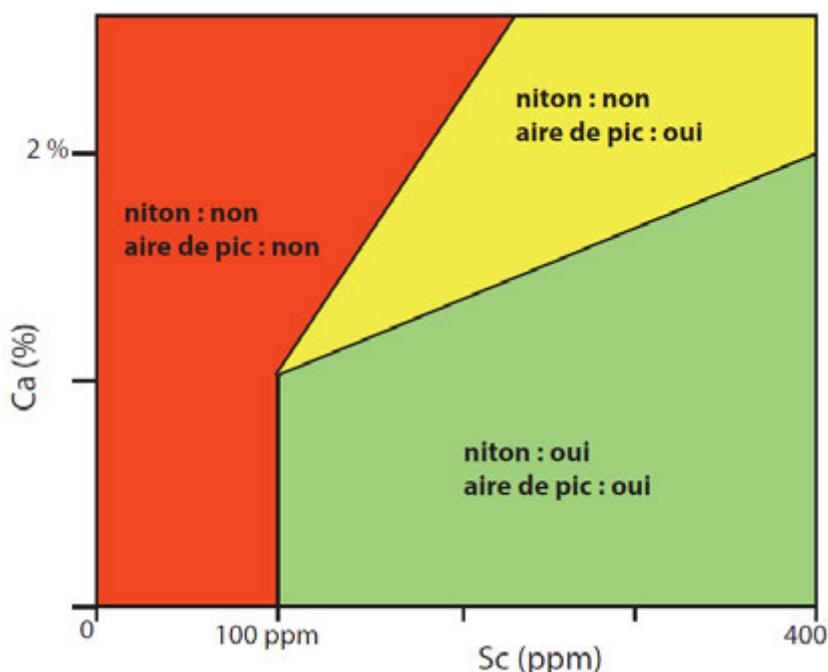


Figure 54 : Calibrations obtenues pour le Sc avec traitement par (A) programme in-house Niton et (B) routine de déconvolution développée au cours du projet. Détermination du rapport Ca/Sc maximum pour une mesure pertinente du Sc par (C) traitement via le programme in-house Niton et (D) via la routine de déconvolution.



**Figure 55 : Domaines d'applicabilité pour l'analyse du Sc par XRF portable NITON XL3T GOLDD+, en fonction de la teneur en Ca et en Sc et du type de traitement (programme in-house NITON vs. routine de déconvolution).**

#### 11.2.5. DIMINUTION DE LA DISPERSION PAR RÉPÉTITION DES MESURES

L'incertitude importante sur la mesure du Sc ( $\pm 55$  ppm) peut être réduite statistiquement par duplication des mesures. Afin de quantifier la réduction de l'incertitude en fonction du nombre de mesures, un échantillon « idéal » a été analysé 34 fois. Pour les 34 valeurs de Sc ainsi estimées, l'écart type a été calculé pour l'ensemble des combinaisons possibles de couples de 3, 4, 5, 6, 7 et 8 mesures. La figure 56 présente l'évolution des écarts-types maximaux obtenus en fonction du nombre de mesures considérées. Il apparaît que la répétition des mesures permet de diminuer significativement l'écart type maximum ( $\pm 37$  ppm maximum pour 5 mesures répétées).

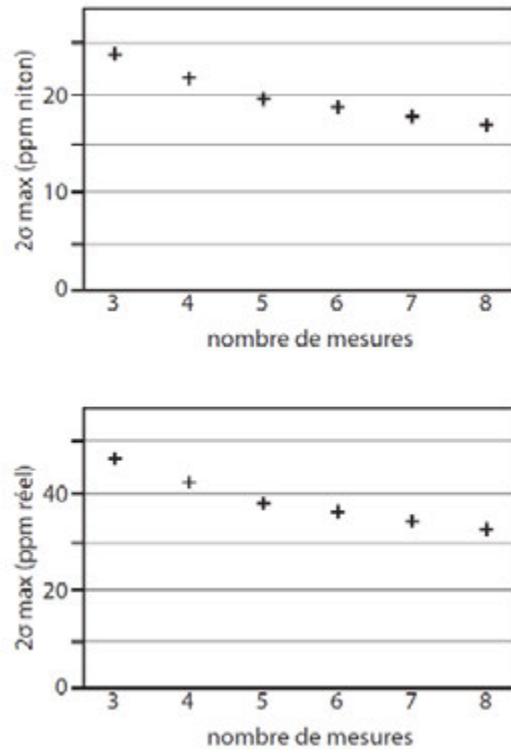


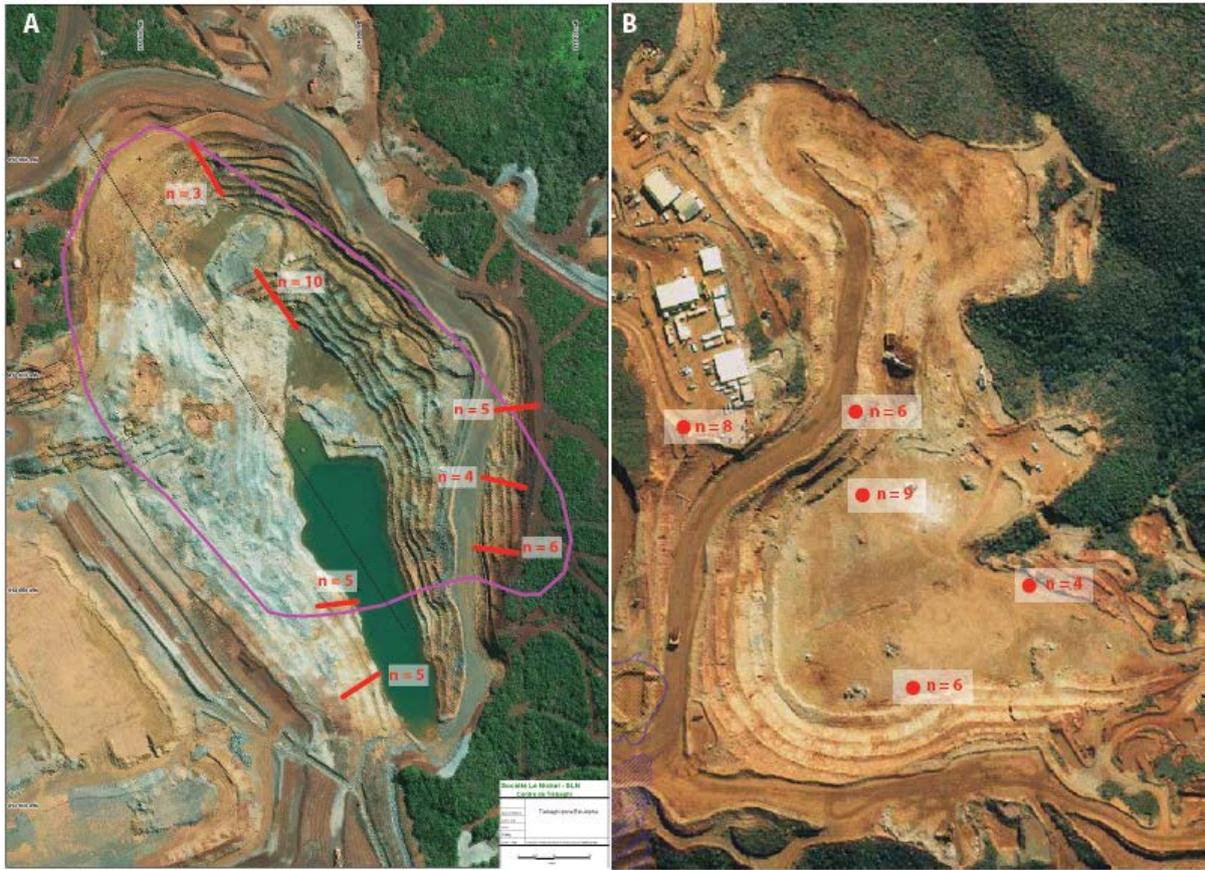
Figure 56 : Évolution des écarts-types maximaux obtenus en fonction du nombre de mesures réalisées.

## 12. MODÉLISATION DE LA RESSOURCE SC À L'ÉCHELLE DES GISEMENTS

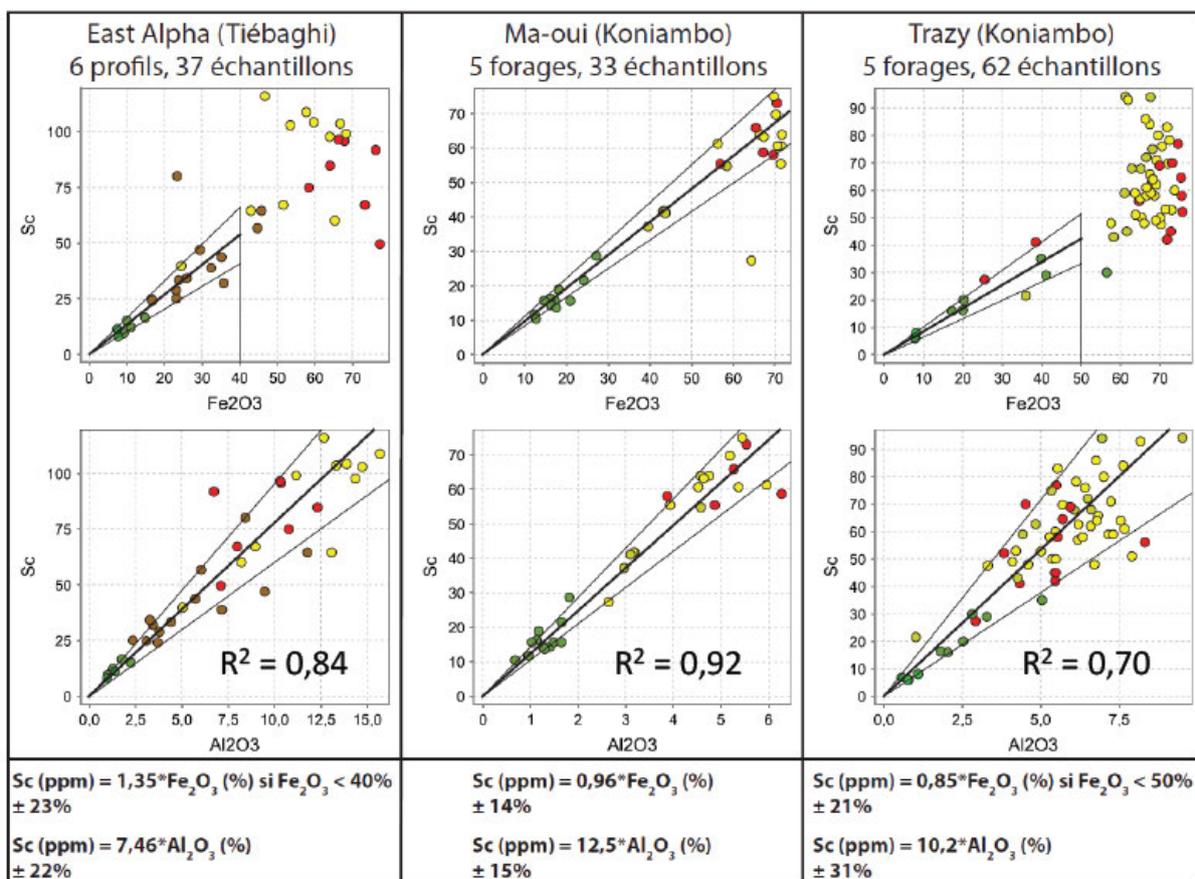
### 12.1. DÉTERMINATION DU PROXY AL-SC À L'ÉCHELLE DES CHANTIERS

Les données acquises au cours du projet Scandium ont mis en évidence l'existence d'une corrélation, sur l'ensemble des profils latéritiques développés sur péridotites (à l'exception des faciès de cuirasse), entre teneurs en Sc et teneur en  $Al_2O_3$  (voir section 8.1.3). Prises dans leur ensemble, ces données témoignent cependant d'une certaine dispersion de la corrélation Al-Sc. Afin d'utiliser la corrélation Al-Sc pour caractériser la ressource Sc sur certains gisements, il est donc nécessaire d'affiner cette corrélation et d'en tester la pertinence à l'échelle du gisement. Pour cela, une série additionnelle d'échantillons a été collectée sur les chantiers Trazy, Ma-Oui (Koniambo) et East Alpha (Tiébaghi) et analysée au laboratoire calédonien Nilab. Cette série additionnelle d'analyse vient compléter les analyses acquises précédemment sur East Alpha et Trazy lors du projet Scandium 1. Sur East Alpha (Tiébaghi), la corrélation Al-Sc est ainsi testée sur 37 échantillons collectés le long de 6 profils (Figure 57A). Sur Ma-Oui (Koniambo), la corrélation est testée sur un total de 33 échantillons collectés sur 5 carottes de forage (Figure 57B). Enfin, sur Trazy (Koniambo), la corrélation est testée sur un total de 62 échantillons collectés sur 5 carottes de forage (incluant les analyses du forage I5690 issues du projet Nickal, Bailly et al., 2014). Les profils ou forages ainsi échantillonnés sont distribués de manière relativement homogène et couvrent la majeure partie de leurs zones respectives.

Les résultats obtenus témoignent, sur les différentes zones étudiées, d'une bonne corrélation entre  $Al_2O_3$  et Sc à l'échelle des chantiers, permettant ainsi d'estimer les teneurs en scandium à partir des teneurs en aluminium (Figure 58). Sur le chantier East Alpha, les teneurs en Sc peuvent être estimées selon la relation :  $Sc \text{ (ppm)} = 7,46 * Al_2O_3 \text{ (wt.\%)}$  avec une dispersion telle que  $R^2 = 0,84$ . Sur le chantier Ma-Oui, les teneurs en Sc peuvent être estimées selon la relation  $Sc \text{ (ppm)} = 12,5 * Al_2O_3 \text{ (wt.\%)}$  avec une dispersion telle que  $R^2 = 0,92$ . Enfin, sur le chantier Trazy, les teneurs en Sc peuvent être estimées selon la relation  $Sc \text{ (ppm)} = 10,2 * Al_2O_3 \text{ (wt.\%)}$  avec une dispersion telle que  $R^2 = 0,70$ . Il est à noter que le facteur de proportionnalité entre  $Al_2O_3$  et Sc diffère significativement entre le chantier East Alpha d'une part, et les chantiers Ma-Oui et Trazy d'autre part. Cette différence est interprétée comme résultant de rapports Al/Sc différents dans les protolithes respectifs de ces chantiers (Iherzolite à Tiébaghi vs. harzburgite à Koniambo). En effet, les teneurs en Al et en Sc du bedrock contrôlent au premier ordre les teneurs en Al et en Sc de leurs équivalents altérés, si bien que le rapport Al/Sc reste relativement constant lors de l'altération des péridotites.



**Figure 57 : Localisation des profils/forages échantillonnés et nombre d'échantillons collectés sur les chantiers East Alpha (A) et Ma-Oui (B).**



**Figure 58 : Corrélations obtenues entre Sc, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sur les chantiers East Alpha (Tiébaghi), Ma-Oui (Koniambo) et sur la zone de Trazy (Koniambo).**

## 12.2. ESTIMATION DES TENEURS, TONNAGES ET DE LA DISTRIBUTION EN SC

À partir des corrélations établies à l'échelle des chantiers entre  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et Sc, les bloc-modèles mis à disposition par KNS et la SLN ont été interrogés pour estimer les teneurs, tonnages et distribution du Sc à partir des données d'analyse de forages sur l'aluminium, ce dernier étant analysé en routine et inclus dans les bloc-modèles.

### 12.2.1. CHANTIERS MA-OUI ET MIMINE (KONIAMBO)

À Koniambo, la ressource Sc a été estimée sur le chantier Ma-Oui en se basant sur la corrélation  $\text{Sc (ppm)} = 12,5 * \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ (wt.\%)}$ . Cette corrélation a été extrapolée au chantier Mimine, adjacent du chantier Ma-Oui. Sur ces deux chantiers, la distribution, les teneurs et tonnages en Sc ont ainsi été investigués à l'aide des bloc-modèles correspondants. Ceux-ci sont basés sur des forages réguliers avec une maille de forage réduite à 10 m centré. La zone de Trazy étant encore au stade de l'exploration, la maille de forage est significativement espacée (40 m) et le bloc-modèle en résultant présente une précision plus faible. La caractérisation de la ressource Sc à Koniambo a ainsi été focalisée sur les chantiers Ma-Oui et Mimine uniquement.

La classification des lithologies et des faciès d'altération telle que documentée dans la base de données de KNS permet dans un premier temps de caractériser l'évolution géochimique de ces différents faciès, d'un point de vue non spatialisé (Figures 59, 60). Les faciès notés 1 à 5 correspondent à la saprolite (1 = sain ; 5 = saprolite proche latérite). Le faciès LAT correspond à la latérite indifférenciée (jaune et rouge) et inclut également le faciès de saprolite 6 (géochimie très similaire à la latérite). Le faciès BSI correspond aux brèches siliceuses. Pour des raisons de confidentialité, les teneurs en Ni des faciès 2 à 5 ne sont pas représentées dans les figures 59 et 60. La figure 59 présente les teneurs en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et Ni en fonction des teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et Sc (Sc recalculé *via* la corrélation établie) pour les différents faciès d'altération, et témoigne de l'augmentation caractéristique des teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et Sc, aux dépens des teneurs en  $\text{SiO}_2$ , au cours de l'altération. Il est intéressant de noter qu'au sein des échantillons de latérite, le Sc et le Ni semblent être positivement corrélés jusqu'à des teneurs en Ni et Sc de 1,4 wt.% et 60 ppm, respectivement, puis anti-corrélés pour des teneurs en Sc > 60 ppm (Figure 59). La représentation des données via des diagrammes de type box-plots (Figure 60) suggère que les latérites au sein du chantier Ma-Oui présentent des teneurs moyennes et Ni et Sc de l'ordre de 1,5 wt.% et 50 ppm, respectivement.

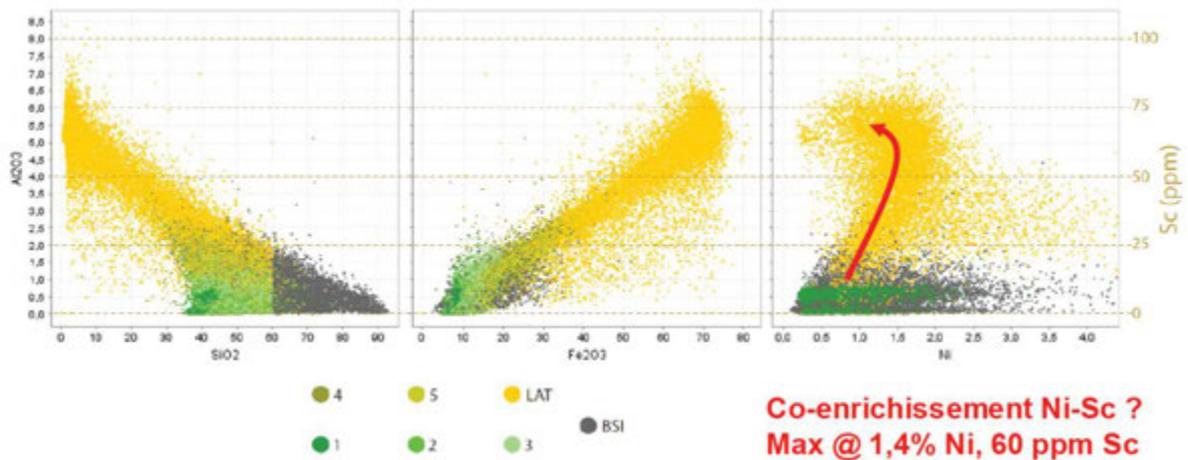


Figure 59 : Teneurs en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et Ni en fonction des teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et Sc (Sc recalculé via la corrélation établie) des différents faciès d'altération du chantier Ma-Oui (données KNS).

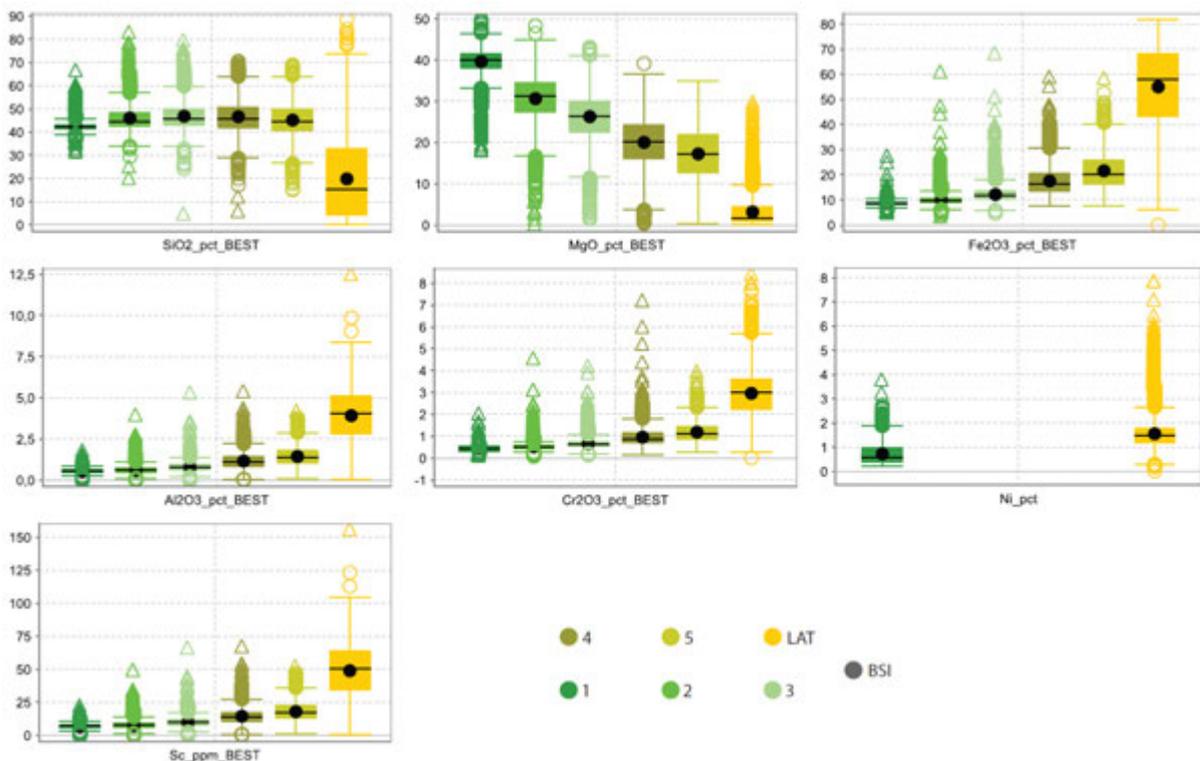
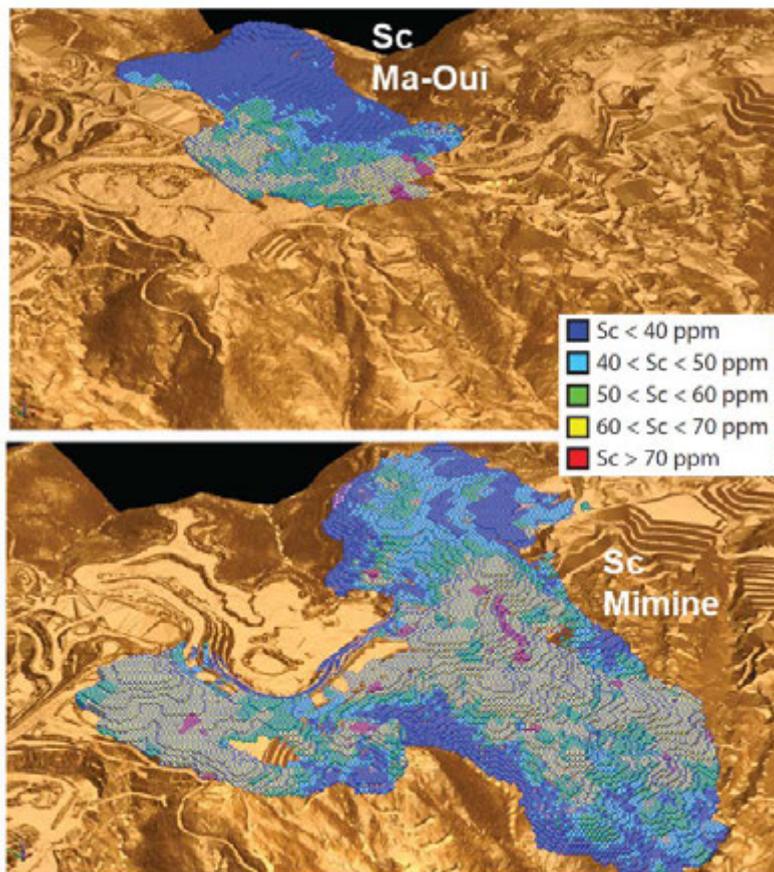


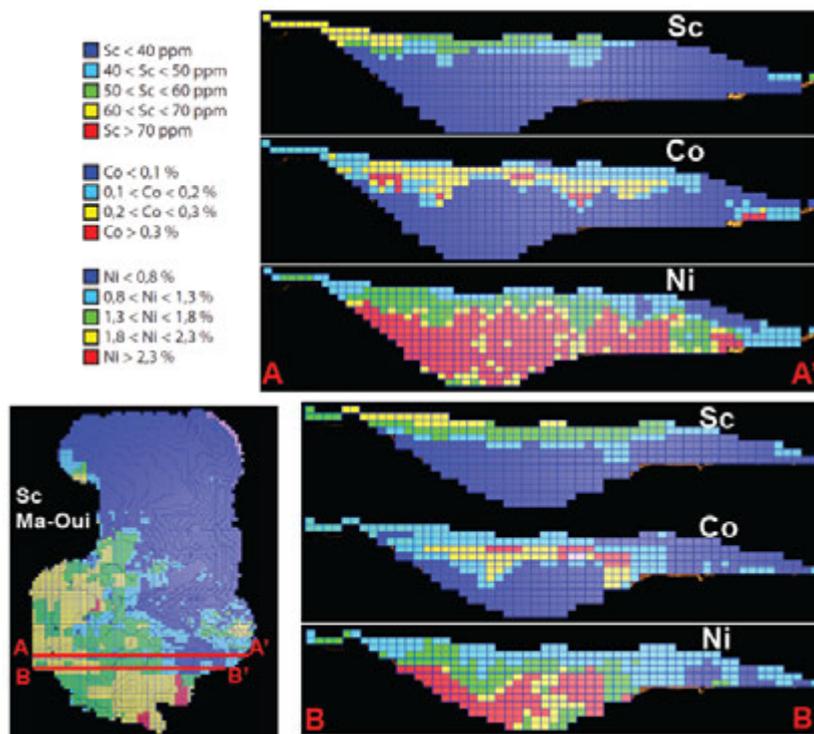
Figure 60 : Box-plots des teneurs en  $\text{SiO}_2$ , MgO,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , Ni (wt.%) et Sc (ppm, recalculé selon la corrélation établie) des différents faciès d'altération du le chantier Ma-Oui (données KNS).

La modélisation des teneurs en Sc sur les bloc-modèles de Ma-Oui et Mimine (dimension des blocs x-y-z = 5x5x4 m) a été réalisée sur l'ensemble des blocs altérés (comprenant une fraction non nulle de latérite et/ou saprolite). Les teneurs en Sc supérieures à 50 ppm sont localisées essentiellement dans les zones de latérite, où les teneurs sont

globalement comprises entre 40 et 70 ppm (Figures 61-62). Sur Ma-Oui, seule la portion sud-ouest du chantier contient des latérites ayant été forées et analysées. Par conséquent, les blocs contenant des teneurs en Sc supérieures à 50 ppm sont quasi-exclusivement localisés dans cette zone (Figure 61). Les deux coupes E-O réalisées dans la portion sud du chantier Ma-Oui (Figure 62) indique que les blocs enrichis en Sc (>50 ppm) forment une couverture superficielle d'une épaisseur maximale de ~10-15 m. Ces zones d'enrichissement en Sc recoupent en partie les zones d'enrichissement en Co (>0,2 wt.%) mais sont spatialement distinctes des zones principales d'enrichissement en Ni. Les zones d'enrichissement en Sc > 50 ppm sont en effet associées à des teneurs en Ni généralement inférieures à 1,3 wt.%. Il apparaît par ailleurs que les zones d'enrichissement maximales en Co correspondent à des puits de latérite (enfouissement de l'interface latérite-saprolite).

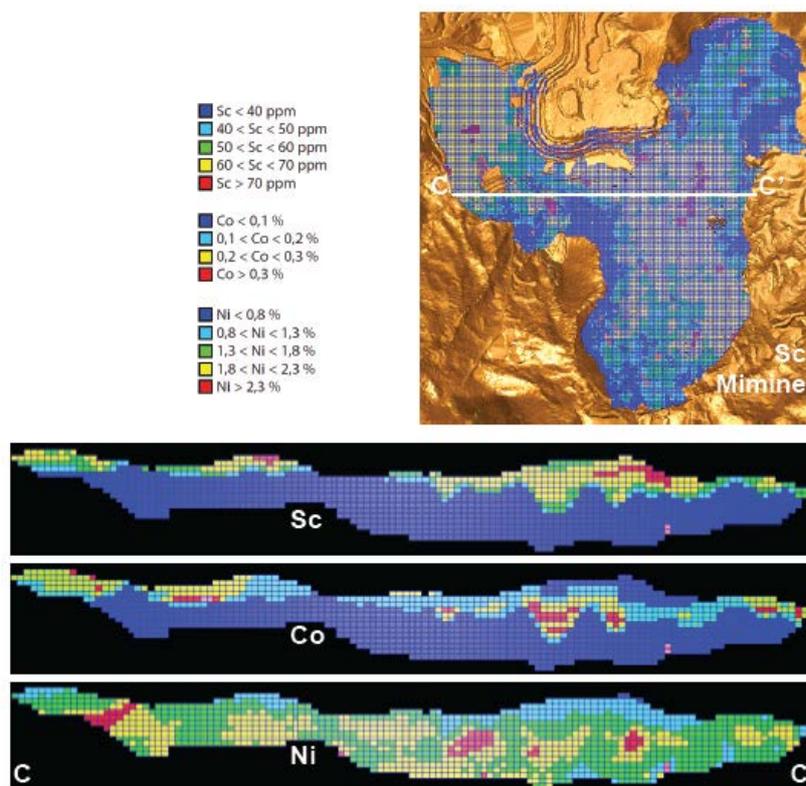


**Figure 61 : Bloc-modèles des chantiers Ma-Oui et Mimine vus du dessus vers le NE et teneurs en Sc des blocs supérieurs.**



**Figure 62 : Distribution des teneurs en Sc, Co, Ni sur deux coupes E-O dans la portion sud du chantier Ma-Oui**

Sur le chantier Mimine, les teneurs en Sc dans la latérite sont significativement plus élevées qu'à Ma-Oui et sont essentiellement comprises entre 60 et 80 ppm (Figure 63). La coupe E-O réalisée dans la zone centrale du chantier Mimine révèle également l'existence de puits de latérites où la zone d'enrichissement en Sc > 60 ppm avoisine 20 m de puissance. Ces puits de latérites sont également associées à de fortes teneurs en Co (>0,3 wt.%) et des teneurs significatives en Ni (1,3 à 1,8 wt.%). Ces puits de latérites peuvent donc constituer des cibles privilégiées dans la perspective d'une co-valorisation Ni-Co-Sc des latérites.



**Figure 63 : Distribution des teneurs en Sc, Co, Ni sur une coupe E-O dans la portion centrale du chantier Mimine**

Sur la portion latéritique des blocs altérés, les tonnages de minerai et teneurs en Sc, Ni et Co sont présentés en fonction de la teneur de coupure en Sc (Figure 64 : chantier Ma-Oui ; Figure 65 : chantier Mimine). Sur Ma-Oui, en considérant une teneur de coupure de 50 ppm Sc, le tonnage sec ainsi calculé est de 317 kt pour des teneurs de 58,9 ppm Sc (soit une accumulation métal de 28,6 t  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ ), 1,30 wt.% Ni et 0,19 wt.% Co. En considérant une teneur de coupure de 60 ppm, le tonnage sec calculé est de 134 kt pour des teneurs de 64,2 ppm Sc (soit une accumulation métal de 13,3 t  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ ), 1,19 wt.% Ni et 0,14 wt.% Co. Sur la base de la formulation du Ni équivalent  $\text{Ni}_{\text{eq}}$  considérant les teneurs en Co et Sc associées au Ni (voir section 2.1, formule basée sur les cours respectifs du Ni et Co en 2013 et sur la base d'une valeur commerciale de  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  à 1500\$/kg), les teneurs  $\text{Ni}_{\text{eq}}$  apparaissent supérieures à 2 wt.% aussi bien avec une teneur de coupure de 50 ppm que de 60 ppm Sc. Sur Mimine, en considérant une teneur de coupure de 50 ppm Sc, le tonnage sec calculé est de 2485 kt pour des teneurs de 61,2 ppm Sc (soit une accumulation métal de 265 t  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ ), 1,25 wt.% Ni et 0,17 wt.% Co. En considérant une teneur de coupure de 60 ppm, le tonnage sec calculé est de 1666 kt pour des teneurs de 64,7 ppm Sc (soit une accumulation métal de 165 t  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ ), 1,19 wt.% Ni et 0,15 wt.% Co. Tout comme sur Ma-Oui, les teneurs  $\text{Ni}_{\text{eq}}$  apparaissent supérieures à 2 wt.% aussi bien avec une teneur de coupure de 50 ppm que de 60 ppm Sc. Tant du point de vue des tonnages et teneurs en Sc estimés, et de la distribution des zones enrichies en Sc relativement aux zones enrichies en Ni et Co, il apparaît que le chantier Mimine est plus favorable que le chantier Ma-Oui pour une potentielle covalorisation Ni-Co-Sc des latérites.

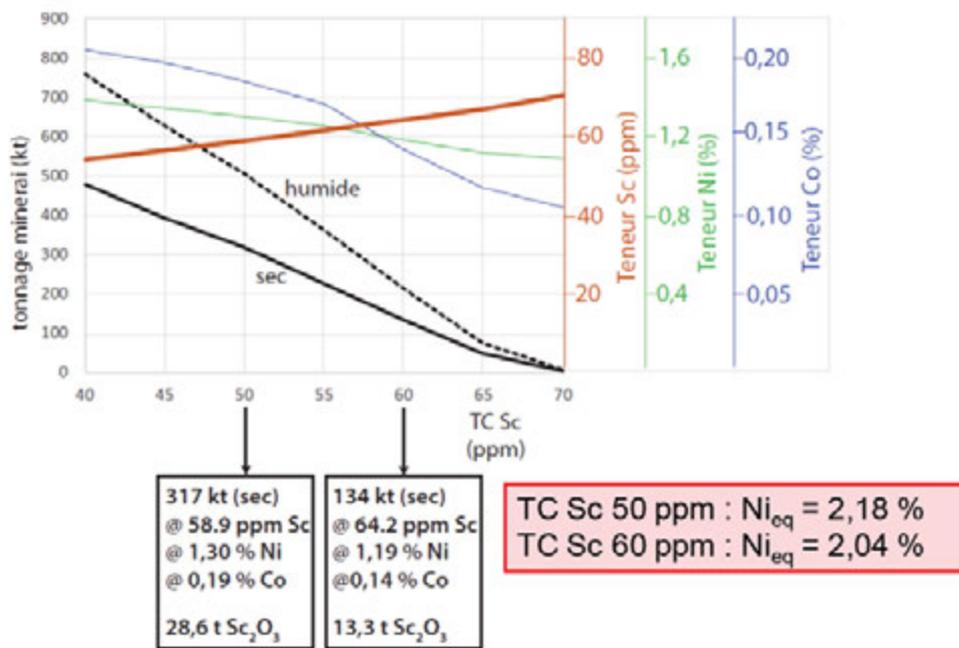


Figure 64 : Estimation sur la portion latéritique des blocs altérés du chantier Ma-Oui des tonnages de minerai (sec et humide) et des teneurs moyennes en Sc (ppm), Ni (wt.%) et Co (wt.%) en fonction de la teneur de coupure sur le Sc.

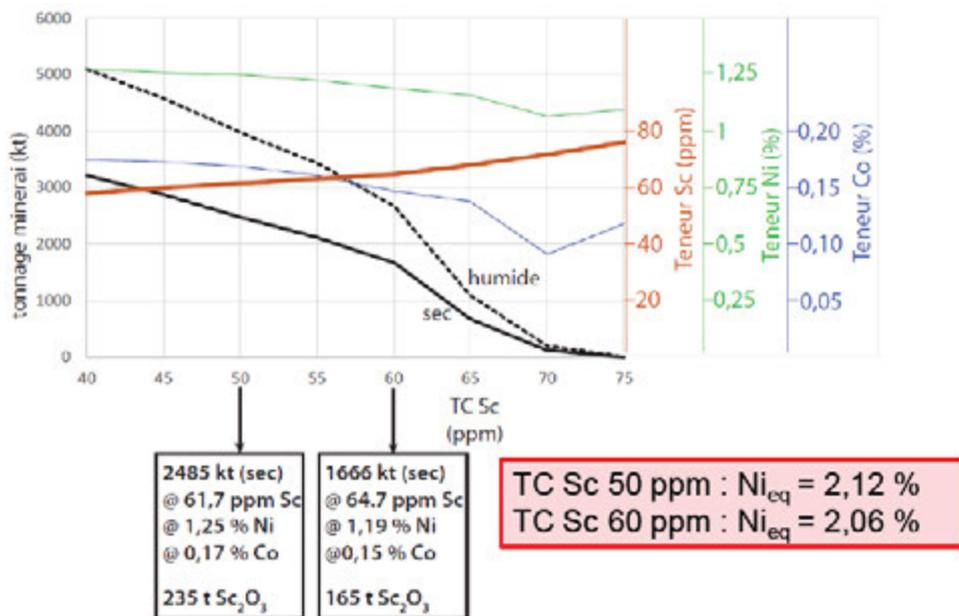


Figure 65 : Estimation sur la portion latéritique des blocs altérés du chantier Mimine des tonnages de minerai (sec et humide) et des teneurs moyennes en Sc (ppm), Ni (wt.%) et Co (wt.%) en fonction de la teneur de coupure sur le Sc.

### 12.2.2. CHANTIER EAST ALPHA (TIÉBAGHI)

À Tiébaghi, la ressource Sc a été estimée sur le chantier East Alpha en se basant sur la corrélation  $Sc \text{ (ppm)} = 7,46 * Al_2O_3 \text{ (wt.\%)}$ . Sur ce chantier, la distribution, les teneurs et tonnages en Sc ont ainsi été investigués à l'aide du bloc-modèle correspondant. Celui-ci est basé sur des forages réguliers avec une maille de forage réduite à 12,5 m centré.

La classification des lithologies et des faciès d'altération telle que documentée dans la base de données de la SLN permet dans un premier temps de caractériser l'évolution géochimique de ces différents faciès, d'un point de vue non spatialisé (Figures 66, 67). Le chantier East Alpha (et plus généralement les gisements du massif de Tiébaghi) contient, en plus des faciès d'altération classiquement rencontrés en Nouvelle-Calédonie (saproлите à silicates magnésiens hydratés, latérite), des lithologies spécifiques : les gleys et les zones à smectites (nommées HSA lorsqu'elles sont partiellement latérisées). Pour des raisons de confidentialité, les teneurs en Ni des faciès gleyeux et saprolitiques (saproлите à silicates magnésiens hydratés et/ou à smectites) ne sont pas représentées dans les figures 66 et 67. La figure 66 présente les teneurs en  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$  et Ni en fonction des teneurs en  $Al_2O_3$  et Sc (Sc recalculé *via* la corrélation établie) pour les différents faciès d'altération, et témoigne de l'augmentation caractéristique des teneurs en  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  et Sc, aux dépens des teneurs en  $SiO_2$ , au cours de l'altération. Il est intéressant de noter que les teneurs en Al peuvent atteindre localement 35-40 wt.%  $Al_2O_3$  sur le chantier East Alpha. Ces fortes teneurs en aluminium sont vraisemblablement associées à des gleys alumineux, des smectites alumineuses et/ou à des gabbros altérés. La teneur en Sc de ces zones à fortes teneurs en Al ne peut être estimée *via* la corrélation Al-Sc telle qu'établie, cette dernière se basant sur des échantillons dont la teneur maximum en  $Al_2O_3$  est de ~16 wt.%. Il a ainsi été considéré que la corrélation Al-Sc ne pouvait pas être extrapolée aux échantillons dont la teneur en  $Al_2O_3$  était supérieure à 17,5 wt.% (équivalent à 125 ppm Sc). Ces échantillons hors corrélation correspondent essentiellement aux faciès latéritiques et ne représente que 3% des échantillons latéritiques analysés. La représentation des données via des diagrammes de type box-plots (Figure 67) suggère que les latérites au sein du chantier East Alpha présentent des teneurs moyennes et Ni et Sc de l'ordre de 1 wt.% et 90 ppm, respectivement.

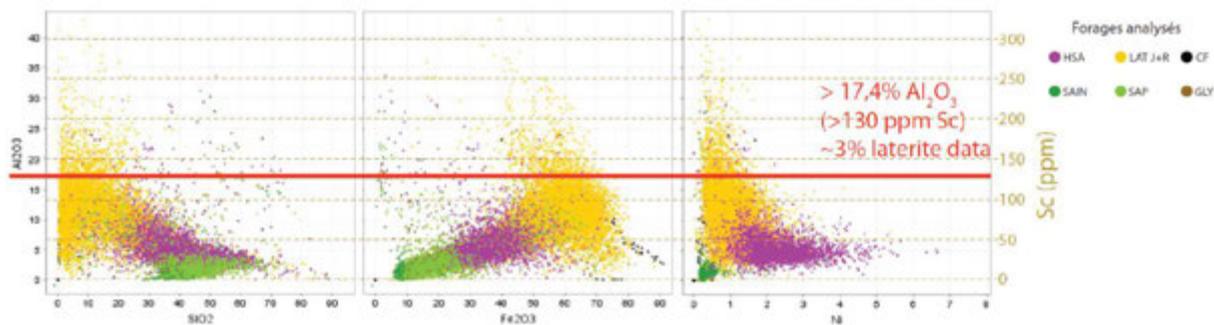


Figure 66 : Teneurs en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et Ni en fonction des teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et Sc (Sc recalculé via la corrélation établie) des différents faciès d'altération du chantier Ma-Oui (données KNS).

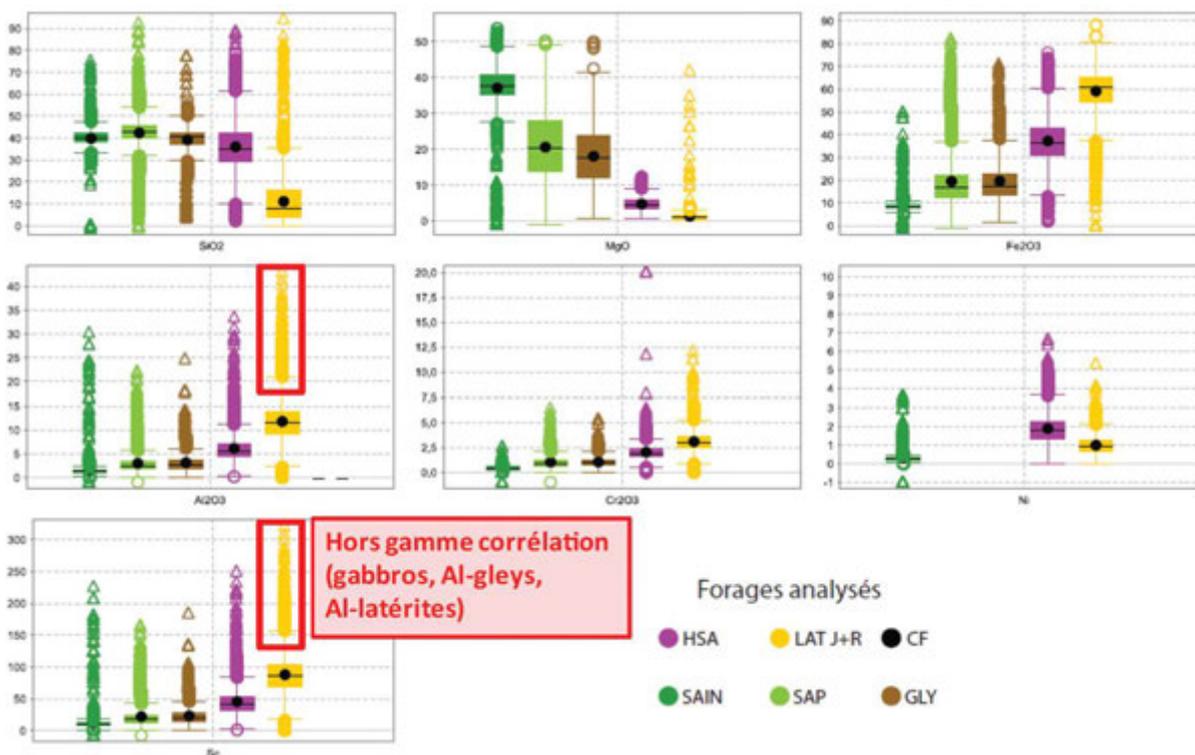
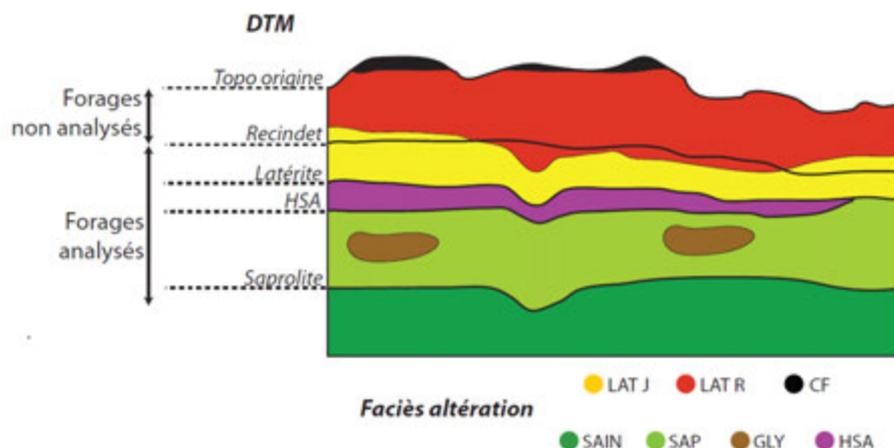


Figure 67 : Box-plots des teneurs en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , Ni (wt.%) et Sc (ppm, recalculé selon la corrélation établie) des différents faciès d'altération du le chantier Ma-Oui (données KNS).

La modélisation des teneurs en Sc sur le bloc-modèle de East Alpha (dimension des blocs x-y-z = 6,25x6,25x3 m) a été réalisée sur l'ensemble des blocs situés dans la zone des latérites forées et analysées. Cette zone a été contrainte à l'aide de DTM (Digital Terrain Model), en interrogeant le bloc modèle, dans la zone du chantier, au-dessus de l'interface HSA-latérite et en dessous de l'interface latérites analysées – latérites non analysées (car considérées stériles) (Figure 68).



**Figure 68 : Distribution schématique des faciès d'altération et des DTM à disposition (pour l'interrogation du bloc-modèle) sur le chantier East Alpha.**

Les teneurs en Sc sont essentiellement supérieures à 50 ppm dans les zones de latérite, avec des teneurs globalement comprises entre 50 et 125 ppm (Figures 69-71). La portion sud-est du chantier est notamment marquée par la présence d'un puit de latérite avec des teneurs relativement modestes en Sc (50 à 75 ppm). Les teneurs élevées en Sc (100 à 125 ppm) forment une couverture superficielle et plutôt localisée sur le pourtour du chantier (Figure 70). Enfin, les teneurs anormalement hautes en Sc (> 125 ppm) et considérées comme erronées (car en dehors de la corrélation Al-Sc) sont essentiellement localisées en bordure Ouest du chantier. Notamment, les blocs les plus enrichis en Al correspondent à des occurrences ponctuelles de gabbros (Figure 70).

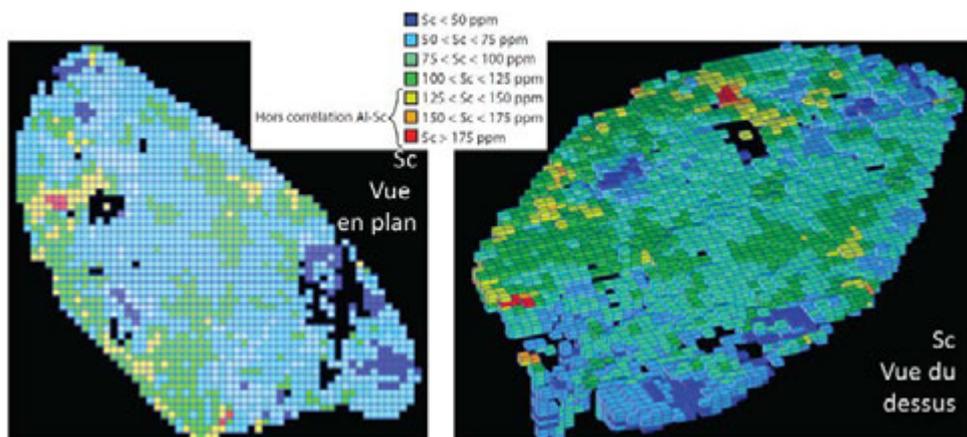


Figure 69 : Bloc-modèle et teneurs en Sc des blocs supérieurs sur le chantier East Alpha (vue du dessus en plan, et vue inclinée orientée vers l'ouest).

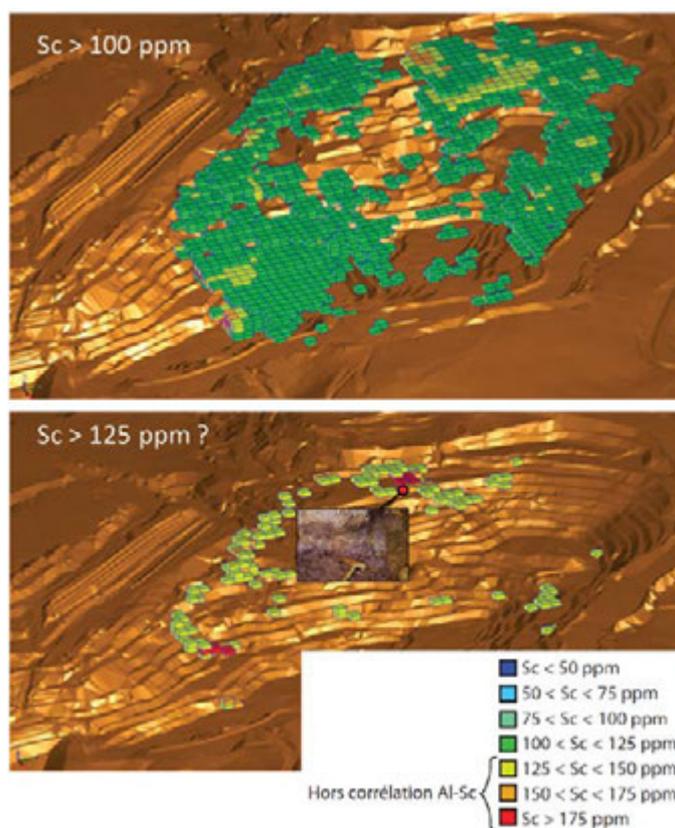
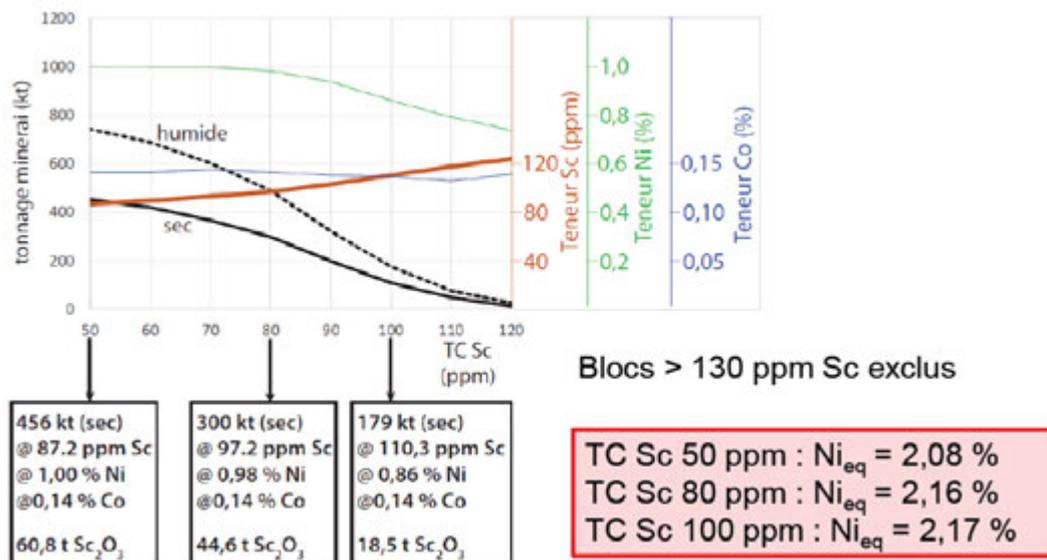


Figure 70 : Haut : distribution des blocs à fortes teneurs en Sc (100-125 ppm) formant une couverture superficielle. Bas : distribution des blocs riches en Al (en dehors de la corrélation Al-Sc) et correspondant notamment à la présence d'un filon de gabbro identifié sur le terrain.

Sur la portion latéritique des blocs compris dans la zone des latérites analysées du chantier East Alpha, les tonnages de minerai et teneurs en Sc, Ni et Co en fonction de la teneur de coupure en Sc sont présentés en Figure 71. Tous les blocs dont la teneur en Sc calculée était supérieure à 130 ppm (en dehors de la corrélation Al-Sc) ont été exclus des estimations. En considérant une teneur de coupure de 50 ppm Sc, le tonnage sec ainsi calculé est de 456 kt pour des teneurs de 87,2 ppm Sc (soit une accumulation métal de 60,8 t Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 1,00 wt.% Ni et 0,14 wt.% Co. En considérant une teneur de coupure de 80 ppm, le tonnage sec calculé est de 300 kt pour des teneurs de 97,2 ppm Sc (soit une accumulation métal de 44,6 t Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 0,98 wt.% Ni et 0,14 wt.% Co. Enfin, en considérant une teneur de coupure de 100 ppm Sc, le tonnage sec calculé est de 179 kt pour des teneurs de 110,3 ppm Sc (soit une accumulation métal de 18,5 t Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 0,86 wt.% Ni et 0,14 wt.% Co. Sur la base de la formulation du Ni équivalent Ni<sub>eq</sub> considérant les teneurs en Co et Sc associées au Ni (voir section 2.1), les teneurs Ni<sub>eq</sub> apparaissent supérieures à 2 wt.%, aussi bien avec une teneur de coupure de 50 ppm que de 80 ou de 100 ppm Sc. Les plus basses teneurs en Ni des latérites de East Alpha comparées à celles de Koniambo (1,0 vs 1,3 wt.% Ni) sont largement contrebalancées par de plus fortes teneurs en Sc (90 vs. 50 ppm Sc). Au regard des tonnages et des teneurs respectives en Ni, Co et Sc sur le chantier East Alpha, il apparaît que l'application d'une teneur de coupure de 80 ppm Sc, permettant d'obtenir un minerai à plus de 90 ppm Sc tout en maintenant la teneur en Ni à ~1 wt.%, serait la plus pertinente pour une potentielle covalorisation Ni-Co-Sc des latérites.



**Figure 71 : Chantier East Alpha ; estimation des tonnages de minerai (sec et humide) et des teneurs moyennes en Sc (ppm), Ni (wt.%) et Co (wt.%) en fonction de la teneur de coupure sur le Sc, au sein de la portion latéritique des blocs situés dans la zone des latérites analysées.**

L'approche utilisée, consistant à établir à l'échelle du chantier les corrélations Al-Sc puis à interroger directement les bloc-modèles existants sur l'aluminium, présente l'avantage d'être relativement rapide à mettre en œuvre. Cependant, une telle approche, qui nécessite de disposer d'une base de données exhaustive et d'un bloc-modèle bien contraint, est davantage applicable en phase d'exploitation qu'en phase d'exploration. Cette approche reste également limitée par l'absence de variogrammes spécifiques pour le scandium. L'élaboration de variogrammes pour le Sc, tout comme la création des enveloppes de minéralisation spécifiques au Sc, permettraient, dans un second temps, d'affiner la caractérisation de la ressource Sc, en particulier lors des phases d'exploration.

## 13. IMPLICATIONS POUR L'EXPLORATION ET LA VALORISATION DES MINÉRAIS

### 13.1. IMPLICATIONS POUR L'EXPLORATION

L'ensemble des observations et données acquises à ce jour permet de définir un certain nombre de critères et outils afin de cibler de potentielles ressources en scandium de Nouvelle-Calédonie.

Au sein des latérites développées sur péridotites, seuls les profils développés sur harzburgite et lherzolite sont susceptibles d'exhiber des teneurs significatives en Sc (80-100 ppm), principalement localisées dans les horizons de latérite jaune. Il est donc recommandé en premier lieu de porter une attention particulière à la nature des protolithes sur lesquels se développent les latérites. Une meilleure discrimination sur le terrain entre les différents types de péridotites est ainsi nécessaire, mais celle-ci peut être ineffective pour des faciès fortement serpentinisés. L'analyse des éléments majeurs de la roche mère peut alors fournir des informations supplémentaires sur sa nature : la teneur en Al permet d'appréhender les proportions relatives d'olivine et de pyroxène, et est directement corrélée à la teneur en Sc du protolithe. Après identification des profils latéritiques développés sur péridotite fertile, il convient de cibler prioritairement les horizons de latérite jaune. La mesure directe du Sc par analyse XRF portable (Niton, X-MET, Brucker, ...) apparaît non fiable pour des teneurs inférieures à 80 ppm, que ce soit sur affleurement ou sur échantillon pastillé. L'analyse par mesure XRF du V, à partir de laquelle peut être indirectement estimée la teneur en Sc, apparaît également limitée par les faibles teneurs en V. L'analyse des teneurs en Al apparaît par contre comme un moyen adapté pour estimer au premier ordre les teneurs en Sc *via* le proxy Al-Sc, bien que la présence de certaines lithologies à fortes teneurs en Al (ex. gabbros) puisse conduire à surestimer les teneurs en Sc. Sur les gisements pour lesquels il existe déjà une base de données de forage incluant notamment les teneurs en aluminium, il apparaît alors possible d'estimer la distribution, les teneurs et les tonnages en Sc des zones de latérite, à partir de l'interrogation des bloc-modèles sur l'aluminium. L'élaboration de variogrammes et la construction d'enveloppes de minéralisations spécifiques au Sc permettraient dans un second temps d'affiner cette estimation.

Au sein des latérites développées sur filons magmatiques, seuls les profils développés sur amphibolites semblent susceptibles d'exhiber des teneurs significatives en Sc (jusqu'à 100-315 ppm). Il est ainsi recommandé de cibler ce type d'intrusif, particulièrement présent dans le sud de l'île de Grande Terre, notamment en se basant sur un travail de terrain à l'échelle du massif minier. La discrimination entre faciès riches en hornblende et faciès riches en enstatite peut être faite sur la base d'observations de terrain. Enfin, parmi les corps intrusifs ainsi sélectionnés, la mesure de la teneur en V et/ou Ti (envisageable par analyse XRF portable) permet d'estimer au premier ordre la teneur en Sc associée. Après identification des intrusifs amphibolitiques riches en Sc (>100 ppm), il convient de cibler prioritairement les horizons riches en goethite alumineuse, notamment par observation directe de terrain mais également par analyse de la teneur en Fe (ex. par XRF portable). La mesure directe des teneurs en Sc par analyseur XRF portable apparaît envisageable pour des teneurs supérieures à 80-100 ppm, mais nécessite de dupliquer les mesures pour réduire la dispersion analytique. De plus, cette technique ne peut être utilisée qu'à faibles teneurs en Ca (Ca/Sc < 60 avec traitement in-house NITON et Ca/Sc < 110 avec traitement par routine de déconvolution). Alternativement, la mesure du V et/ou du Ti dans les amphibolites altérées permet d'en estimer indirectement la teneur en Sc

### 13.2. IMPLICATIONS POUR LA VALORISATION

Les séries ultrabasiques (dunite, harzburgite, lherzolite) qui constituent l'essentiel des protolithes des saprolites et latérites nickélicifères exploitées en Nouvelle Calédonie ont des concentrations en Sc dans une fourchette assez basse (5-15ppm), ne permettant pas d'espérer des enrichissements par altération à des concentrations supérieures à la fourchette 50-150 ppm. Dans ces conditions, seule une co-valorisation Ni-(Co)-Sc est envisageable, lorsque les recouvrements entre les zones d'enrichissement sont suffisamment favorables. Cette co-valorisation est surtout possible dans le cas de traitement hydrométallurgiques. Les données de lixiviation séquentielle, qui ne peuvent pas servir de test de faisabilité de procédés de traitement, donnent toutefois quelques indications de base sur l'extractibilité : le scandium n'est pas désorbé à l'eau pure, ni en solution pH3, ce qui tend à indiquer qu'il n'est pas envisageable d'utiliser des procédés de lixiviation modérée. Il est en effet nécessaire de dissoudre les goethites pour libérer Ni et Sc, ce qui nécessiterait de recourir à une lixiviation acide sous pression (HPAL). La réserve géologique « scandium » est assez importante. Sur chacun des chantiers où la ressource Sc a été estimée indirectement (à partir de l'interrogation des bloc-modèles sur l'aluminium), l'accumulation métal en  $Sc_2O_3$  dans les latérites est de l'ordre de quelques dizaines à centaines de tonnes, et les teneurs en Sc y sont de l'ordre de 50 à 90 ppm en association avec des teneurs en Ni de 1 à 1,3 wt.% et en Co de ~0,14 wt.%. Pour des latérites comme celles de Goro, si l'on considère une teneur moyenne de l'ordre de 50 ppm, un gisement de 120 millions de tonnes de minerai à 50 ppm Sc (et 1,5% de Ni) constituerait une réserve géologique de 9000 tonnes de  $Sc_2O_3$ . La covalorisation de ces latérites nécessiterait cependant que le rendement de la séparation à partir du lixiviat, issu du traitement du nickel, soit économique. La présence de Sc permet également d'envisager l'estimation de la valeur ajoutée aux minerais latéritiques de Ni s'ils sont exportés. Il reste à faire accepter l'idée aux acheteurs potentiels qu'ils détiennent alors un minerai à valeur ajoutée par la présence d'autres métaux valorisables (Co, Sc).

Les enrichissements significatifs (> 200 ppm et localement jusqu'à 314 ppm Sc) identifiés au sein des latérites développées sur amphibolites, seraient plus propices à une exploitation du Sc en tant que ressource principale (avec co-valorisation potentielle du Co et du Ni), malgré de plus faibles teneurs en Ni en comparaison des latérites développées sur péridotites. Cependant, les teneurs et volumes considérés restent assez faibles au regard des gisements émergents australiens dédiés au Sc.

## 14. CONCLUSIONS

Les observations de terrain, les observations pétrologiques et les données géochimiques (en roche totale et in situ) obtenues jusqu'à présent permettent une première caractérisation du potentiel du scandium dans les latérites de Nouvelle-Calédonie. Les sites étudiés dans le cadre de ce projet couvrent l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie : le Massif du Sud (N'Go), les péridotites de la côte Est (Nakéty, Cap Bocage) et les klippes de péridotites de la côte Ouest (Koniambo, Tiébaghi). En complément des profils latéritiques classiquement développés sur péridotites, des latérites issues d'intrusifs magmatiques ont également été ciblées sur certains de ces sites (N'Go, Nakéty, Tiébaghi), en raison de leur potentiel élevé vis-à-vis du scandium.

La nature du protolithe, à partir duquel se développe l'altération latéritique, constitue un facteur majeur contrôlant au premier ordre le potentiel Sc de ses équivalents latéritisés. Le principal facteur contrôlant la teneur en Sc des péridotites saines est la proportion relative initiale (pré-serpentinisation) entre enstatite (orthopyroxène) et forstérite (olivine). Les différents faciès d'intrusifs magmatiques investigués sur les sites de N'Go, Nakéty et Tiébaghi révèlent également une variété de composition et de teneurs en Sc. Les intrusifs de type amphibolitique présentent des teneurs variables (y compris à l'échelle de l'affleurement) et généralement élevées en Sc (30 à 128 ppm Sc), le Sc y étant essentiellement porté par la hornblende (teneurs in situ 50-135 ppm Sc). Les intrusifs de type gabbroïque présentent des teneurs moindres mais néanmoins significatives en Sc (max. 80 ppm Sc). Les intrusifs de type granitique (N'Go mine Ada) ne sont pas fertiles vis-à-vis du Sc (~2 ppm).

Sur tous les profils investigués, le développement et la maturation de zones riches en goethite constituent les principales conditions nécessaires à la formation d'enrichissements d'intérêt économique en Sc. Au sein des profils latéritiques classiquement développés sur péridotite, la teneur en Sc augmente progressivement à partir de la saprolite pour atteindre un maximum (enrichissement d'un facteur ~10 depuis le protolithe) généralement localisé dans les zones supérieures de la latérite jaune. Ainsi, seuls certains profils exhibent des teneurs en Sc potentiellement intéressantes (> 80 ppm et localement jusqu'à 100 ppm), en particulier les profils de Tiébaghi développés sur lherzolite, et certains profils de Koniambo, N'Go et Nakéty développés sur harzburgite. Dans ces conditions, seule une co-valorisation Ni-(Co)-Sc est envisageable, lorsque les recouvrements entre les zones d'enrichissement sont suffisamment favorables. Cette co-valorisation est surtout possible dans le cas de traitement hydrométallurgiques.

L'altération des amphibolites conduit à la formation d'altérites à Al-goethite – kaolinite – gibbsite systématiquement enrichies en Sc (jusqu'à 314 ppm sur le profil NGPB à N'Go). La goethite alumineuse issue de l'altération des amphibolites présente des teneurs variables en Sc, d'environ 500 à 1100 ppm en moyenne selon les échantillons, et atteint localement un maximum à 1800 ppm. À contrario, l'altération des gabbros conduit à la formation d'altérites essentiellement à kaolinite + hématite et particulièrement pauvres en Sc (8-30 ppm). Le Sc migre alors vers les épontes où l'encaissant altéré en goethite présente localement des concentrations plus élevées (jusqu'à >200 ppm Sc).

La nature du protolithe constituant un paramètre essentiel influant sur les teneurs en Sc des horizons latéritisés, il apparaît nécessaire de précisément cibler les protolithes fertiles vis-à-vis du Sc : la harzburgite et la lherzolite pour les faciès péridotitiques, l'amphibolite pour les faciès magmatiques intrusifs. Après identification des protolithes fertiles vis-à-vis du Sc, il convient de cibler prioritairement les horizons riches en goethite issus directement de ces

protolithes. Un travail sur le terrain précis et adapté peut permettre une première identification de ces faciès d'intérêts. Ce travail de reconnaissance peut être complété par des analyses géochimiques plus poussées en roche totale, et via l'utilisation d'analyseur XRF portable (teneurs, en Fe, Al, Ti, V). À ce jour, l'analyse directe par XRF portable des teneurs en Sc est envisageable pour des teneurs supérieures à 80-100 ppm Sc et un rapport Ca/Sc <60 (<110 si application d'une routine dédiée, développée au cours de ce projet), mais requiert de réduire la dispersion analytique par duplication des analyses.

L'estimation des réserves potentielles indique, selon les teneurs de coupures considérées (50 à 100 ppm Sc), que le Sc pourrait constituer dans certains cas (ex. gisements sur lherzolites de Tiébaghi, certains gisements sur harzburgite de Koniambo ou d'autres massifs), un sous-produit valorisable du minerai latéritique, en complément du Ni et du Co.

Du point de vue de la spéciation du scandium, il apparaît comme dans le cas du nickel que le scandium est fortement liée aux oxyhydroxydes de fer sous une forme adsorbée, mais qu'il n'est libérable qu'à très bas pH lorsque les oxyhydroxydes de fer sont dissous. Une étude hydrométallurgique resterait à réaliser afin d'établir les gammes de pH permettant d'optimiser la libération du Sc.

## 15. RÉFÉRENCES

- Aiglsperger, T., Proenza, J.A., Lewis, J.F., Labrador, M., Svojtka, M., Rojas-Purón, A., Longo, F., Ďurišová, J. (2015). Critical metals (REE, Sc, PGE) in Ni laterites from Cuba and the Dominican Republic. *Ore Geology Reviews* 73, 1–69.
- Aiglsperger, T., Proenza, J.A., Lewis, J.F., Zaccarini, F., Garuti, G., Rojas-Puron, A., Longo, F., Chang, A. (2013). Rare earth elements and scandium in different types of Ni-laterite profiles from the northern Caribbean: a geochemical comparison, presented at the SGA Meetings, 1683–1686.
- Altinsel, Y., Topkaya, Y., Topkaya, Kaya, S., Şentürk, B. (2018) Extraction of Scandium from Lateritic Nickel-Cobalt Ore Leach Solution by Ion Exchange: A Special Study and Literature Review on Previous Works. In: Martin O. (eds) *Light Metals 2018*. TMS 2018. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham
- Bailly, L., Ambrosi, J.P., Barbarand, J., Beauvais, A., Cluzel, D., Lerouge, C., Prognon, C., Quesnel, B., Ramanaidou, E., Ricordel-Prognon, C., Ruffet, G., Sevin, B., Wells, M., Yans, J. (2014) *Projet NICKAL – Typologie des minerais latéritiques de Nouvelle-Calédonie et facteurs de concentration de Co et Ni*
- Bailly L., Sevin B., Lesimple S., Mazier, S. (2015) – Etude d'orientation sur le potentiel en métaux stratégiques de la Nouvelle-Calédonie. Rapport final. Rapport BRGM/RP-65 171-FR, 41 p., 23 fig., 6 tab., 1 ann.
- Cathelineau, M., Quesnel, B., Gautier, P., (2016) Nickel dispersion and enrichment at the bottom of the regolith: formation of pimelite target-like ores in rock block joints (Koniambo Ni deposit, New Caledonia). *Mineralium Deposita* (2016) 51: 271.
- Cathelineau, M., Myagkiy, A., Quesnel, B., Boiron, M.C., Gauthier, P., Boulvais, P., Ulrich, M., Truche, L., Golfier, F., Drouillet, m. (2016) Multistage crack seal vein and hydrothermal Ni enrichment in serpentinized ultramafic rocks (Koniambo massif, New Caledonia). *Mineralium Deposita*
- Chassé, M., Griffin W.L., O'Reilly, S.Y., Cals, G.. (2017) Scandium speciation in a world-class lateritic deposit. *Geochemical Perspective Letters* 105-114.
- Cluzel, D., Bosch, D., Paquette, J.L., Lemennicier, Y., Montjoie, P., Ménot, R.P. (2005) Late Oligocene Post-obduction granitoids of New Caledonia: A case for reactivated subduction and slab break-off. *The Island Arc*, 14, 254 – 27.
- Cluzel, D., Meffre, S., Maurizot, P., Crawford, A.J. (2006) Earliest Eocene (53 Ma) convergence in the Southwest Pacific: evidence from pre-obduction dikes in the ophiolite of New Caledonia. *Terra Nova* 18 (6), 395–402.
- Dublet, G., Juillot, F., Morin, G., Fritsch, E., Fandeur, D., Brown Jr, G.E. (2015) Goethite aging explains Ni depletion in upper units of ultramafic lateritic ores from New Caledonia. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 160 (2015) 1–15
- Duyvesteyn, W.P.C., Putnam, G.F. (2014) Scandium: A review of the element, its characteristics, and current and emerging commercial applications. EMC Metals Corporation May 2014, 12pp.
- Ferizoglu, E., Kaya, S., Topkaya, Y.A. (2018) Solvent extraction behaviour of scandium from lateritic nickel-cobalt ores using different organic reagents. *Physicochem. Probl. Miner.*

Process., 54 (2), 538-545

Gali, S., Soler, J-M., Proenza, J.A., Lewis, J.F., Cama, J., Tauler, E. (2012): Ni enrichment and stability of Al-free garnierite solidsolutions: A thermodynamic approach. *Clays Clay Miner.*, 60, 121–135.

Golightly J.P. (1981) Nickeliferous laterite deposits. *Economic Geology*, 75th anniversary volume 710-735

Golightly J.P. (2010) Progress in understanding the evolution of nickel laterites. *Soc Eco Geo Spe Pub* 15: 451-485

Hedrick, J. (2012) Scandium, *USGS Minerals Yearbook. Mineral Commodity Summaries 2012*

Hedrick, J.B. (2009) Rare earths. *USGS Minerals Yearbook 2007*, 60.1–60.19

Kaiser J.A. (2014) Spec Value Hunter Comment: Recommendation Strategy for EMC Metals Corp Publisher: Kaiser Research Online,  
<https://www.mininginteractive.com/assets/docs/KaiserEMCComment20140423.pdf>

Maurizot, P., Vendé-Leclerc, M. (2009) New Caledonia geological map, scale 1/500 000, Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Énergie – Service de la Géologie de Nouvelle-Calédonie, Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

Maurizot, P., Sevin, B., Lesimple, S., Bailly, L., Iseppi, M., Robineau, B. (in press) Mineral resources and prospectivity of the ultramafic rocks of New-Calédonia. In: Mortimer, N. (ed) new Calédonia, Geology, Geodynamic evolution and mineral resources. Geological Society, London, Memoir, chapter 10.

Ricketts N.J., Duyvesteyn W.P.C. (2018) Scandium Recovery from the Nyngan Laterite Project in NSW. In: Martin O. (eds) *Light Metals 2018*. TMS 2018. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham.

Royset, J., Ryum, N. (2005) Scandium in aluminium alloys, *International Materials Reviews* 50 (1), 19-44.

Schulze, D.G. (1984) The influence of aluminum on iron oxides. VIII. Unit cell dimensions of Al-substituted goethites and estimation of Al from them. *Clays and Clays Minerals*, 32, 36-44

Teitler, Y., Cathelineau, M., Ulrich, M. (2016) – La ressource scandium : potentiel économique et gîtologie. Programme « Géochimie et minéralogie du scandium dans les latérites ». CNRT « Nickel & son environnement ». 36 pages.

Toropova, L.S., Eskin, D.G., Kharakterova, M.L., Dobatkina, T.V. (1998) *Advanced Aluminium Alloys Containing Scandium. Structure and Properties*, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, pp. 175

Ulrich, M., Picard, C., Guillot, S., Chauvel, C., Cluzel, D., Meffre, S. (2010) Multiple melting stages and refertilization as indicators for ridge to subduction formation: The New Caledonia ophiolite. *Lithos* Volume 115, Issues 1–4, March 2010, Pages 223–236

Ulrich, M. (2013) Enrichissement en Scandium des profils latéritiques de Nouvelle-Calédonie : Origine, spéciation et potentiel d'exploitation. Unpublished report.

U.S. Geological Survey (2018) Scandium. In: Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey, Reston, USA, 144–145.

Wang, W., Pranolo, Y., & Cheng, C. Y. (2011) Metallurgical processes for scandium recovery from various resources: A review. *Hydrometallurgy*, 108 (1-2), 100-108.

Williams-Jones, A.E., Vazyukova, O.V. (2018) The Economic Geology of Scandium, the Runt of the Rare Earth Element Litter. *Economic Geology*, 113 (4), 973–988.



# CNRT "Nickel et son environnement"

