

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

*Paix – Travail – Patrie*

\*\*\*\*\*

UNIVERSITE DE YAOUNDE I  
FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE SCIENCES DE LA  
TERRE

\*\*\*\*\*



REPUBLIC OF CAMEROUN

*Peace – Work – Fatherland*

\*\*\*\*\*

UNIVERSITY OF YAOUNDE I  
FACULTY OF SCIENCES  
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

\*\*\*\*\*

**PETROLOGIE ET METALLOGENIE (Au-EGP) DES  
ENCLAVES DE GRANITES ET DE PERIDOTITES DANS  
LES REGIONS DE NYOS ET KUMBA (LIGNE  
VOLCANIQUE DU CAMEROUN)**

Docteur/Ph.D en Sciences de la Terre

Par :

**Elisé SABABA**  
**DEA en Sciences de la Terre**

Sous la direction  
**BILONG Paul**  
Professeur

Année Académique  
2014-2015





## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire de Yaoundé I. Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [biblio.centrale.uyi@gmail.com](mailto:biblio.centrale.uyi@gmail.com)

## WARNING

This document is the fruit of an intense hard work defended and accepted before a jury and made available to the entire University of Yaounde I community. All intellectual property rights are reserved to the author. This implies proper citation and referencing when using this document.

On the other hand, any unlawful act, plagiarism, unauthorized duplication will lead to Penal pursuits.

Contact: [biblio.centrale.uyi@gmail.com](mailto:biblio.centrale.uyi@gmail.com)

Je dédie cette thèse à mes très chères nièces Blessing Joy,  
Bérénice Faith et mon fils Marcel Francky.

Je vous aime !

## *AVANT-PROPOS*

Au moment où la rédaction de cette thèse s'achève, fruit d'une vaste collaboration, je voudrai sans prétendre être exhaustif rendre un vibrant hommage à ceux qui ont contribué.

Ma première pensée est pour le Professeur Paul BILONG, Doyen de la Faculté des Sciences de l'Université de Douala quand nous commençons ce projet, et aujourd'hui de Yaoundé I, pour avoir accepté de superviser ce travail en dépit de ses multiples occupations.

Je tiens à remercier particulièrement le Professeur Paul-Désiré NDJIGUI, Maître de Conférences à l'Université de Yaoundé I, directeur de cette thèse. Dès lors qu'il m'a accepté pour un DEA en 2006, il m'a entièrement accordé sa confiance. Ses multiples efforts ont abouti à ce travail. Une fois de plus merci Prof.

Les enseignants du Département des Sciences de la Terre (Nzenti Jean Paul, BITOM Dieudonné, FOUATEU Rose, NJILAH Isaac, NGOS III Simon, TEMDJIM Robert, NYECK Brunot, NGO BIDJECK, NJOM Bernard, ONANA Vincent, TCHOUANKOUE Jean-Pierre...) m'ont encadré depuis ma première année. Qu'ils acceptent mes sincères remerciements.

Je n'oublierai jamais tous les efforts consentis par mon papa Hodefoul Magounek et ma maman Nglissa Marie pour faire de moi l'homme que je suis. Merci chers parents.

Je voudrai exprimer ma profonde gratitude à mon épouse Mme Sababa née Mérima, pour sa compréhension pendant mes absences à ses côtés et plus encore ses encouragements et ses prières sans relâche. Qu'elle trouve en ces termes ma parfaite reconnaissance.

Mille fois merci à Mr et Mme Magounek Marcel, votre soutien multiforme a été sans faille. Je n'ai pas trouvé les mots justes pour exprimer ma gratitude.

Je suis très reconnaissant au Dr Ebah Abeng Appolonie Sandrine, de regrettée mémoire, celle que j'appelai affectueusement ma grande sœur. Sa contribution dans ce travail est énorme.

Je dois beaucoup à mes camarades et amis Dr Kanouo Sylvestre Ngouo et M. Banankeng Lucian. Leur amitié et les multiples discussions m'ont été d'une grande utilité.

J'exprime ma reconnaissance aux thésards : Mfayakouo Bachirou, Temga Jean-Pierre, Aye Beyanu, Tessontsap Teutsong, Mbabi André, Mbih Paul, Mbanga Jules, Ngimbous Rosalie, Assomo Gaele, Nguimatsia Wilfried, Ngo Mandeng Sidonie, Lindjeck Marthe. Vous m'avez beaucoup apporté.

Il m'est particulièrement agréable de remercier les familles Ounice Foubert, Doue Jean, Donkeng Joël, Majilla Gabriel, Biyong Alphonse, Doumdasso Jean-Albert, Gymkié Jacques, Mazukin, Polom Dakola et Maman Mbanta Alice pour les conseils, les encouragements, le réconfort et tout ce que nous avons partagé ensemble.

Mes remerciements vont également à mes amis le Docteur Maogé Jean, Bakary Salmon, Ntonga Rose, Ndi'i M'fou Gisèle, Ekodo Marcel, Mbock Serge, Balogo Jacques et Zina Ndalaimé. Vos encouragements m'ont incité au travail.

J'ai également beaucoup bénéficié de l'amitié de mes collègues du Lycée Général Leclerc et ceux du Département de SVT en particulier. Merci beaucoup pour les encouragements.

Je voudrai, enfin, dire merci à Dieu tout puissant de qui j'ai tout et à qui je dois tout.

## LISTE DES ABREVIATIONS

Cpx :	Clinopyroxène
Dam :	Damourite
HREE:	Heavy Rare Earth Elements
EGPI :	Elements du Groupe du Platine et de l'Iridium
LREE:	Light Rare Earth Elements
Sp:	Spinelle
Sér:	Séricite
Opx :	Orthopyroxène
Bt:	Biotite
Mi:	Microcline
Or:	Orthose
EGP:	Eléments du Groupe du Platine
Pl :	Plagioclase
EGPP :	Eléments du Groupe du Platine et du Palladium
Qtz :	Quartz

## TABLE DES MATIERES

<b><i>LISTE PROTOCOLAIRE</i></b> .....	<b><i>I</i></b>
<b><i>AVANT-PROPOS</i></b> .....	<b><i>XIV</i></b>
<b><i>LISTE DES ABREVIATIONS</i></b> .....	<b><i>XV</i></b>
<b><i>TABLE DES MATIERES</i></b> .....	<b><i>XVI</i></b>
<b><i>LISTE DES TABLEAUX</i></b> .....	<b><i>XX</i></b>
<b><i>LISTE DES FIGURES</i></b> .....	<b><i>XXII</i></b>
<b><i>RESUME</i></b> .....	<b><i>XXV</i></b>
<b><i>ABSTRACT</i></b> .....	<b><i>XXVII</i></b>
<b><i>INTRODUCTION GENERALE</i></b> .....	<b><i>I</i></b>
I. PROBLEMATIQUE ET BUT DE L'ETUDE.....	2
II. METHODOLOGIE .....	3
II.1. Méthode de travail sur le terrain.....	3
II.2. Méthodes de travail au laboratoire .....	4
II.2.1. Préparation des échantillons .....	4
II.2.2. Analyses pétrographiques.....	4
II.2.3. Analyses géochimiques .....	5
III. STRUCTURE DE LA THESE .....	6
<b><i>CHAPITRE I : MILIEU NATUREL</i></b> .....	<b><i>8</i></b>
INTRODUCTION.....	9
I. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE.....	9
I.1. Localisation.....	9
I.1.1. Site de Nyos .....	9
I.1.2. Site de Kumba.....	9
I.2. Climat.....	9
I.2.1. Site de Nyos .....	9
I.2.2. Site de Kumba.....	11
I.3. Végétation.....	12
I.3.1. Site de Nyos .....	12
I.3.2. Site de Kumba.....	13
I.4. Sols.....	15
I.4.1. Site de Nyos .....	15
I.4.2. Site de Kumba.....	15
I.5. Géomorphologie .....	15
I.5.1. Site de Nyos .....	15
I.5.2. Site de Kumba.....	16
I.6. Hydrographie .....	17
I.6.1. Site de Nyos .....	17
I.6.2. Site de Kumba.....	17
II. CONTEXTE GEOLOGIQUE.....	17
II.1. Aperçu sur la Ligne Volcanique du Cameroun (LVC).....	18
II.2. Site de Nyos.....	20
II.3. Site de Kumba .....	20

CONCLUSION .....	23
<b>CHAPITRE II : TRAVAUX ANTERIEURS .....</b>	<b>24</b>
INTRODUCTION.....	25
I. ETUDES ANTERIEURES EFFECTUEES A NYOS ET A KUMBA.....	25
I.1. Site de Nyos .....	25
I.2. Site de Kumba.....	27
I.3. Péridotites de la Ligne Volcanique du Cameroun .....	29
II. COMPORTEMENT GEOCHIMIQUE DE L'OR ET DES ELEMENTS DU GROUPE DU PLATINE .....	31
II.1. Comportement géochimique de l'or et EGP dans les roches basiques et ultrabasiques.....	31
II.2. Comportement géochimique de l'or et EGP dans les matériaux d'altération .....	34
CONCLUSION .....	36
<b>CHAPITRE III : PETROLOGIE ET METALLOGENIE DES ENCLAVES DE GRANITES DE NYOS.....</b>	<b>37</b>
INTRODUCTION.....	38
I. PETROLOGIE DES ENCLAVES DE GRANITES DE NYOS .....	38
I.1. Pétrographie .....	38
I.2. Géochimie .....	39
I.2.1. Eléments majeurs .....	39
I.2.2. Eléments traces .....	43
I.2.3. Terres rares.....	47
I.2.4. Or et éléments du groupe du platine .....	51
CONCLUSION .....	51
<b>CHAPITRE IV : PETROGRAPHIE, MINERALOGIE ET DISTRIBUTION DES ELEMENTS MAJEURS DANS LES PERIDOTITES ET LEURS PRODUITS D'ALTERATION .....</b>	<b>52</b>
INTRODUCTION.....	53
I. PETROGRAPHIE ET MINERALOGIE .....	53
I.1. Péridotites .....	53
I.1.1. Site de Nyos .....	53
I.1.2. Site de Kumba.....	56
I.2. Péridotites altérées .....	59
I.2.1. Site de Nyos .....	59
I.2.2. Site de Kumba.....	60
II. GEOCHIMIE DES ELEMENTS MAJEURS .....	62
II.1. Péridotites .....	62
II.1.1. Site de Nyos.....	62
II.1.2. Site de Kumba .....	63
II.2. Péridotites altérées.....	64
II.2.1. Site de Nyos.....	64
II.2.2. Site de Kumba.....	66
III. BILANS GEOCHIMIQUES .....	70
III.1. Méthode.....	70
III.2. Choix de l'élément invariant .....	71
III.3. Bilans géochimiques des éléments majeurs .....	72
III.3.1. Site de Nyos .....	73
III.3.2. Site de Kumba .....	73

CONCLUSION .....	74
<b>CHAPITRE V: DISTRIBUTION DES ELEMENTS TRACES, TERRES RARES ET AU-EGP DANS LES PERIDOTITES ET LEURS PRODUITS D'ALTERATION.....</b>	<b>75</b>
INTRODUCTION.....	76
I. GEOCHIMIE DES ELEMENTS TRACES .....	76
I.1. Péridotites .....	76
I.1.1. Site de Nyos .....	76
I.1.2. Site de Kumba.....	76
I.2. Péridotites altérées .....	79
I.2.1. Site de Nyos .....	79
I.2.2. Site de Kumba.....	85
II. GEOCHIMIE DES TERRES RARES .....	91
II.1. Péridotites .....	91
II.1.1. Site de Nyos.....	91
II.1.2. Site de Kumba.....	91
II.2. Péridotites altérées.....	94
II.2.1. Site de Nyos.....	94
II.2.2. Site de Kumba .....	99
III. GEOCHIMIE DE L'OR ET DES ELEMENTS DU GROUPE DU PLATINE .....	104
III.1. Péridotites.....	104
III.1.1. Site de Nyos .....	104
III.1.2. Site de Kumba .....	104
III.2. Péridotites altérées.....	107
III.2.1. Site de Nyos .....	107
III.2.2. Site de Kumba .....	109
III.3. Diagrammes de corrélations.....	110
III.3.1. Corrélations entre le Silicium et quelques EGP .....	110
III.3.2. Corrélations entre le magnésium et quelques EGP .....	111
III.3.3. Corrélations entre le fer et quelques EGP .....	112
III.3.4. Corrélations entre quelques éléments traces et les EGP .....	113
III.3.5. Corrélations entre les terres rares et les EGP .....	114
III.3.6. Corrélations entre les éléments du groupe du platine .....	115
IV. BILANS GEOCHIMIQUES .....	116
IV.1. Bilan géochimiques des éléments traces.....	116
IV.1.1. Site de Nyos .....	116
IV.1.2. Site de Kumba.....	117
IV.2. Bilans géochimiques des terres rares .....	118
IV.2.1. Site de Nyos .....	118
IV.2.2. Site de Kumba.....	118
IV.3. Bilans géochimiques des éléments du groupe du platine.....	120
IV.3.1. Site de Nyos .....	120
IV.3.2. Site de Kumba.....	120
CONCLUSION .....	121
<b>CHAPITRE VI : DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS.....</b>	<b>122</b>
INTRODUCTION.....	123
I. PRINCIPAUX RESULTATS .....	123
I.1. GRANITES .....	123

I.1.1. PETROGRAPHIE.....	123
I.1.2. GEOCHIMIE.....	123
I.2. Péridotites .....	123
I.2.1. Pétrographie et minéralogie .....	123
I.2.2. Géochimie .....	124
I.3. Péridotites altérées .....	126
I.3.1. Morphologie et minéralogie.....	126
I.3.2. Géochimie .....	126
II. DISCUSSION ET INTERPRETATION .....	134
II. 1. PETROLOGIE DES GRANITES DE NYOS .....	134
II.1.1. Pétrographie et éléments majeurs .....	134
II.1.2. Eléments traces .....	134
II.1.3. Terres rares .....	135
II.1.4. Eléments du groupe du platine .....	137
II.2. Péridotites .....	137
II.2.1. Pétrographie et minéralogie.....	137
II.2.2. Eléments majeurs.....	138
II.2.3. Eléments traces .....	138
II.2.4. Terres rares .....	139
II.2.5. Or et éléments du groupe du platine .....	140
II.3. Péridotites altérées.....	142
II.3.1. Morphologie et minéralogie .....	142
II.3.2. Eléments majeurs.....	143
II.3.3. Eléments traces .....	144
II.3.4. Terres rares .....	145
II.3.5. Or et les éléments du groupe du platine .....	146
CONCLUSION .....	148
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>134</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>134</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>I</b>

## ***LISTE DES TABLEAUX***

<b>Tableau 1:</b> Précipitations et températures moyennes mensuelles dans la région de Nyos (Kah, 2004).....	11
<b>Tableau 2:</b> Précipitations et températures moyennes mensuelles dans la région de Kumba (Mulutakwi, 2006).....	12
<b>Tableau 3:</b> Pétrographie de quelques enclaves de péridotites de la Ligne Volcanique du Cameroun. ....	30
<b>Tableau 4:</b> Distribution des éléments majeurs (%) dans les granites à Nyos. ....	41
<b>Tableau 5:</b> Distribution des éléments traces (ppm) dans les granites à Nyos.....	44
<b>Tableau 6:</b> Teneurs en terres rares (ppm) dans les granites à Nyos.....	47
<b>Tableau 7:</b> Distribution des Au-EGP (ppb) dans les granites à Nyos.....	51
<b>Tableau 8:</b> Distribution des éléments majeurs (%) dans les péridotites à Nyos. ....	63
<b>Tableau 9:</b> Distribution des éléments majeurs (%) dans les péridotites à Kumba. ....	64
<b>Tableau 10:</b> Distribution des éléments majeurs (%) dans les péridotites altérées à Nyos. ....	65
<b>Tableau 11:</b> Distribution des éléments majeurs (%) dans les péridotites altérées à Kumba.....	68
<b>Tableau 12:</b> Distribution des éléments traces (ppm) dans les péridotites à Nyos.....	77
<b>Tableau 13:</b> Distribution des éléments traces (ppm) dans les péridotites à Kumba. ....	78
<b>Tableau 14:</b> Distribution des éléments traces (ppm) dans les péridotites altérées à Nyos. ....	80
<b>Tableau 15:</b> Matrice de corrélation entre quelques éléments traces dans les péridotites altérées à Nyos.....	81
<b>Tableau 16:</b> Distribution des éléments traces (ppm) dans les péridotites altérées à Kumba. ....	86
<b>Tableau 17:</b> Matrice de corrélation entre quelques éléments traces dans les péridotites altérées à Kumba. ....	87
<b>Tableau 18:</b> Distribution des terres rares (ppm) dans les péridotites à Nyos.....	92
<b>Tableau 19:</b> Distribution des terres rares (ppm) dans les péridotites à Kumba. ....	93
<b>Tableau 20:</b> Distribution des terres rares (ppm) dans les péridotites altérées à Nyos. ....	95
<b>Tableau 21:</b> Distribution des terres rares (ppm) dans des péridotites altérées à Kumba. ....	100
<b>Tableau 22 :</b> Distribution des Au-PGE (ppb) dans les péridotites à Nyos.....	105
<b>Tableau 23:</b> Distribution des Au-EGP (ppb) dans les péridotites à Kumba. ....	106
<b>Tableau 24:</b> Distribution des Au-EGP (ppb) dans les péridotites altérées à Nyos. ....	108
<b>Tableau 25:</b> Distribution des Au-PGE (ppb) dans les péridotites altérées à Kumba. ....	110

**Tableau 26:** Teneurs moyennes en Au-EGP (ppb) dans quelques roches ultrabasiques du Cameroun. .... 140

## **LISTE DES FIGURES**

<b>Figure 1:</b> Carte de localisation de Nyos et Kumba.....	10
<b>Figure 2:</b> Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1957) de la région de Nyos. ....	11
<b>Figure 3:</b> Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1957) de la région de Kumba.....	12
<b>Figure 4:</b> Vue d'ensemble de la végétation autour du lac Nyos.....	13
<b>Figure 5:</b> Vue d'ensemble de la végétation autour du lac Mbarombi-Mbo.....	14
<b>Figure 6:</b> Présentation de la Ligne Volcanique du Cameroun (Marzoli et al., 2000 ; Reusch et al., 2010). .....	19
<b>Figure 7:</b> Carte géologique de la région de Nyos (Temdjim, 2005).....	21
<b>Figure 8:</b> Carte géologique de la région de Kumba (Teitchou et al., 2007).....	22
<b>Figure 9:</b> Microphotographie en lumière polarisée et analysée des granites de Nyos.....	40
<b>Figure 10:</b> Diagramme de variation $SiO_2$ -A/CNK dans les granites à Nyos.....	41
<b>Figure 11 :</b> Diagrammes de Harker des éléments majeurs des granites de Kitongo (cercles pleins, d'après Kouske et al., 2012) et de Nyos (cercles vides, données actuelles).....	42
<b>Figure 12 :</b> Spectres élargis des éléments traces des granites de Nyos normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995). ....	43
<b>Figure 13 :</b> Corrélations entre certains éléments traces et le silicium dans les granites de Kitongo (cercles pleins, d'après Kouske et al., 2012) et de Nyos (cercles vides, données actuelles). ....	45
<b>Figure 14 :</b> Corrélations entre certains éléments traces et l'aluminium dans les granites de Kitongo (cercles pleins, d'après Kouske et al., 2012) et de Nyos (cercles vides, données actuelles)....	46
<b>Figure 15 :</b> Diagramme de variation $(La/Yb)_N$ -Ce/Ce* dans les granites à Nyos. ....	48
<b>Figure 16 :</b> Spectres des terres rares des granites de Nyos normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995). ....	48
<b>Figure 17 :</b> Corrélations entre les terres rares et le silicium dans les granites de Kitongo (cercles pleins, d'après Kouske et al., 2012) et de Nyos (cercles vides, données actuelles).....	49
<b>Figure 18 :</b> Corrélations entre les terres rares et l'aluminium dans les granites de Kitongo (cercles pleins, d'après Kouske et al., 2012) et de Nyos (cercles vides, données actuelles).....	50
<b>Figure 19 :</b> Prélèvement des enclaves de péridotites vert-clair à Nyos. ....	53
<b>Figure 20 :</b> Microphotographie en lumière polarisée et analysée des péridotites de Nyos. ....	55
<b>Figure 21 :</b> Diffractogramme de rayons X des péridotites de Nyos (LNY22). ....	56
<b>Figure 22 :</b> Enclave de péridotites de Kumba moulée par son encaissant.....	57
<b>Figure 23 :</b> Microphotographie en lumière polarisée et analysée des péridotites de Kumba. ....	58
<b>Figure 24 :</b> Diffractogramme de rayons X des péridotites de Kumba (LKU12).....	59
<b>Figure 25 :</b> Enclave de péridotites montrant une altération centripète à Nyos.....	60
<b>Figure 26 :</b> Diffractogramme de rayons X des péridotites altérées de Nyos (LNY10). ....	61
<b>Figure 27 :</b> Echantillon de péridotites altérées à Kumba.....	61
<b>Figure 28 :</b> Diffractogramme de rayons X des péridotites altérées de Kumba (LKU02).....	62
<b>Figure 29 :</b> Corrélations entre certains éléments majeurs et le silicium dans les péridotites de Nyos. ....	66
<b>Figure 30 :</b> Diagrammes binaires illustrant le comportement de quelques éléments majeurs par rapport au couple $MgO+Fe_2O_3$ dans les péridotites de Nyos. ....	67
<b>Figure 31 :</b> Corrélations entre certains éléments majeurs et le silicium dans les péridotites de Kumba. ..	69
<b>Figure 32 :</b> Diagrammes binaires illustrant le comportement de quelques éléments majeurs par rapport au couple $MgO+Fe_2O_3$ dans les péridotites de Kumba. ....	70

<b>Figure 33</b> : Diagramme illustrant la mobilité des éléments au cours de l'altération chimique des péridotites. ....	72
<b>Figure 34</b> : Représentation graphique du bilan géochimique des éléments majeurs dans les péridotites altérées de Nyos. ....	73
<b>Figure 35</b> : Représentation graphique du bilan géochimique des éléments majeurs des péridotites altérées de Kumba. ....	74
<b>Figure 36</b> : Spectres élargis des éléments traces des péridotites de Nyos normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995). ....	77
<b>Figure 37</b> : Spectres élargis des éléments traces des péridotites de Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995). ....	79
<b>Figure 38</b> : Spectres élargis des éléments traces des péridotites altérées de Nyos normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995). ....	80
<b>Figure 39</b> : Corrélations entre certains éléments traces et le silicium dans les péridotites de Nyos. ....	82
<b>Figure 40</b> : Corrélations entre certains éléments traces et le magnésium dans les péridotites de Nyos. ....	83
<b>Figure 41</b> : Corrélations entre certains éléments traces et le fer dans les péridotites de Nyos. ....	84
<b>Figure 42</b> : Spectres élargis des éléments traces des péridotites altérées de Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995). ....	85
<b>Figure 43</b> : Corrélations entre certains éléments traces et le silicium dans les péridotites de Kumba. ....	88
<b>Figure 44</b> : Corrélations entre certains éléments traces et le magnésium dans les péridotites de Kumba. ....	89
<b>Figure 45</b> : Corrélations entre certains éléments traces et le fer dans les péridotites à Kumba. ....	90
<b>Figure 46</b> : Spectres des terres rares des péridotites de Nyos normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995). ....	92
<b>Figure 47</b> : Spectres des terres rares des péridotites de Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995). ....	93
<b>Figure 48</b> : Spectres des terres rares des péridotites altérées de Nyos normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995). ....	94
<b>Figure 49</b> : Diagrammes de variation des terres rares par rapport à SiO <sub>2</sub> des péridotites de Nyos. ....	96
<b>Figure 50</b> : Corrélations entre les terres rares et le magnésium dans les péridotites de Nyos. ....	97
<b>Figure 51</b> : Corrélations entre les terres rares et le fer dans les péridotites de Nyos. ....	98
<b>Figure 52</b> : Spectres des terres rares des péridotites altérées de Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995). ....	99
<b>Figure 53</b> : Corrélations entre les terres rares et le silicium dans les péridotites de Kumba. ....	101
<b>Figure 54</b> : Corrélations entre les terres rares et le magnésium dans les péridotites de Kumba. ....	102
<b>Figure 55</b> : Corrélations entre les terres rares et le fer dans les péridotites à Kumba. ....	103
<b>Figure 56</b> : Spectres des Au-EGP des péridotites de Nyos normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995). ....	106
<b>Figure 57</b> : Spectres des Au-EGP des péridotites de Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995). ....	107
<b>Figure 58</b> : Spectres des Au-EGP des péridotites altérées de Nyos normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995). ....	108
<b>Figure 59</b> : Spectres des Au-EGP des péridotites altérées de Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995). ....	109
<b>Figure 60</b> : Diagrammes binaires illustrant le comportement de quelques EGP vis-à-vis du silicium. ..	111

<b>Figure 61</b> : Diagrammes binaires illustrant le comportement de quelques EGP vis-à-vis du magnésium.	112
<b>Figure 62</b> : Diagrammes binaires illustrant le comportement de quelques EGP vis-à-vis du fer.	113
<b>Figure 63</b> : Diagrammes binaires illustrant le comportement des EGP vis-à-vis de quelques éléments traces.	114
<b>Figure 64</b> : Diagrammes binaires illustrant le comportement des EGP vis-à-vis des terres rares.	115
<b>Figure 65</b> : Diagrammes binaires illustrant les corrélations entre les EGP.	116
<b>Figure 66</b> : Représentation graphique du bilan géochimique des éléments traces dans les péridotites altérées à Nyos.	117
<b>Figure 67</b> : Représentation graphique du bilan géochimique des éléments traces dans les péridotites altérées à Kumba.	118
<b>Figure 68</b> : Représentation graphique du bilan géochimique des terres rares dans les péridotites altérées à Nyos.	119
<b>Figure 69</b> : Représentation graphique du bilan géochimique des terres rares dans les péridotites altérées à Kumba.	119
<b>Figure 70</b> : Représentation graphique du bilan géochimique des EGP dans les péridotites altérées à Nyos.	120
<b>Figure 71</b> : Représentation graphique du bilan géochimique des EGP dans les péridotites altérées à Kumba.	121
<b>Figure 72</b> : Spectres des terres rares des péridotites altérées de Nyos et Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).	125
<b>Figure 73</b> : Spectres des Au-EGP des péridotites de Nyos et Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).	126
<b>Figure 74</b> : Diagrammes de Harker des éléments majeurs des péridotites de Nyos et Kumba.	127
<b>Figure 75</b> : Corrélations entre certains éléments traces et le silicium dans les péridotites de Nyos et Kumba.	128
<b>Figure 76</b> : Corrélations entre certains éléments traces et MgO dans les péridotites de Nyos et Kumba.	129
<b>Figure 77</b> : Corrélations entre certains éléments traces et Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> dans les péridotites de Nyos et Kumba.	130
<b>Figure 78</b> : Spectres des terres rares des péridotites altérées de Nyos et Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).	131
<b>Figure 79</b> : Corrélations entre les terres rares et certains éléments majeurs dans les péridotites de Nyos et Kumba.	132
<b>Figure 80</b> : Spectres des Au-EGP des péridotites altérées de Nyos et Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).	133
<b>Figure 81</b> : Spectres des terres rares des granites de Nyos et Kitongo normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).	137
<b>Figure 82</b> : Spectres des Au-PGE de quelques roches ultrabasiques du Cameroun normalisés par rapport aux valeurs chondritiques (McDonough et Sun, 1995).	141

## ***RESUME***

Les secteurs d'étude (Nyos et Kumba), qui appartiennent à la partie sud de la Ligne Volcanique du Cameroun, possèdent un substratum granito-gneissique. Ce substratum est surmonté par des coulées basaltiques récentes, au sein desquelles les péridotites et les granites sont encaissés. Ces enclaves et leurs produits d'altération ont été étudiés dans le cadre de l'exploration de l'or et des éléments du groupe du platine.

Les caractéristiques pétrographiques et minéralogiques montrent que les péridotites de Nyos et de Kumba ont une texture porphyroclastique et parfois protogranulaire, tandis que les granites de Nyos à tendance monzonitique et sujets à l'altération hydrothermale, sont à texture grenue. Les péridotites sont composées d'olivine, de pyroxènes et de spinelles alors que les granites sont constitués essentiellement de quartz, feldspaths et biotite. Les deux types lithologiques, au cours de l'ascension, ont été soumis à la fusion partielle qui a modifié leurs compositions chimiques. Les teneurs en SiO<sub>2</sub> (41,84-46,60%), MgO (33,92-47,40%) et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (8,56-10,06%) dans les péridotites sont caractéristiques des roches ultrabasiqes. Seuls le Ni, Cr et Co ont des teneurs élevées ; respectivement 1717-2436 ppm, 1770-2681 ppm et 96-130 ppm. Malgré les teneurs faibles en terres rares ( $\Sigma\text{REE}=2-60$  ppm), on note un enrichissement relatif en terres rares légères. Les teneurs en Au-EGP sont également faibles (Au-EGP=9-21 ppb). Parmi ces éléments, le Ru (3-7 ppb) et le Pt (3-6 ppb) sont les plus dominants. Les rapports Pt/Pd, Pt/Rh et Pt/Ru montrent que le Pd et le Ru sont plus mobiles que le Pt et ce dernier est plus mobile que le Ru. Les spectres des Au-EGP révèlent des anomalies positives en Ru et négatives en Pt.

Par contre, les granites sont silico-alumineux, de composition peralumineuse appartenant aux granitoides de type S. Les teneurs sont élevées en Ba (760-986 ppm), Zr (189-329 ppm), Sr (199-252 ppm), Rb (157-192 ppm) et en terres rares (248-381 ppm). Les valeurs normalisées par rapport à la chondrite montrent des anomalies négatives en Eu. Les teneurs en Au-EGP sont faibles, proche de la limite de détection.

Les caractéristiques minéralogiques et géochimiques des péridotites altérées de Nyos et de Kumba sont fonction du degré d'altération qui décroît de Kumba à Nyos. Les péridotites altérées de Nyos ont une composition géochimique proche de celle des roches saines à l'exception du Ba qui s'est beaucoup accumulé au cours de l'altération supergène. A Kumba, les péridotites altérées sont caractérisées par des teneurs modérées en Cr, Ni, Ba, Co, Sr et terres rares. Les spectres des terres rares normalisées par rapport à la chondrite montrent : (i) des spectres homogènes avec un

enrichissement en terres rares légères dans les péridotites altérées de Kumba ; (ii) des petites anomalies négatives en Ce dans les péridotites altérées de Nyos. Les teneurs en Au-EGP sont plus faibles à Kumba qu'à Nyos. Le bilan iso-cobalt montre qu'au cours de l'altération des péridotites, les Au-EGP ont été accumulés à Nyos alors qu'à Kumba, ils ont été évacués. Le rhodium, Ru et Pt sont plus mobiles que le palladium à Kumba tandis que Rh et Pt sont plus mobiles que le Ru à Nyos. Les valeurs normalisées à la chondrite montrent des anomalies négatives en Pt dans les deux sites. Les éléments du groupe du platine et de l'iridium sont corrélés positivement avec le Ni et le Co mais négativement avec les terres rares. Le comportement de l'iridium montre un degré de fusion partielle variable et plus élevé à Nyos par rapport à Kumba.

Ainsi, la prospection géochimique de l'or et des éléments du groupe du platine montre que les teneurs sont plus intéressantes à Nyos qu'à Kumba. Les péridotites de Kumba, plus altérées, auraient été contaminées par leur encaissant basaltique.

**Mots clés :** Ligne Volcanique du Cameroun ; Péridotites ; Granites ; Altération supergène ; Géochimie ; Distribution des Au-EGP.

## ***ABSTRACT***

The study area (Nyos and Kumba), belong to the southern part of the Cameroon Volcanic Line, comprised of a granite-gneissic basement rocks. This basement is overlain by recent basaltic flows enclosing peridotite and granite xenoliths. These xenoliths have been studied here within the framework of the gold and platinum group elements exploration.

The petrographic and mineralogical characteristics show that the peridotites have a porphyroclastic to protogranular texture. The granites which have a monzonitic tendency show a granular texture and have been submitted to hydrothermal alteration. Peridotite xenoliths are mainly composed of olivine, pyroxene and spinel whereas granite xenoliths are made up of quartz, feldspars and biotite. The two rock types have been submitted to partial melting during their ascension and this influenced their chemical composition. SiO<sub>2</sub> (44-47 %), MgO (33-48%) and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (8-11%) contents of the peridotite xenoliths are characteristic of ultramafic rocks. Only Cr, Ni and Co have high contents (1717-2436 ppm, 1770-2681 ppm and 96-130 ppm respectively). Meanwhile, the total REE contents ( $\Sigma$ REE~ 2-60 ppm) are low but naturally with LREE-enrichment. The Au-PGE concentrations are low (9-21 ppb). Within these elements, Ru (3-7 ppb) and Pt (3-6 ppb) are dominant. The Pt/Pd, Pt/Rh and Pt/Ru ratios show that Pd and Rh are more mobile than Pt. The latter is more mobile than Ru. The chondrite-normalized Au-PGE spectra display positive Ru and negative Pt anomalies.

Conversely, the Nyos granites are aluminosiliceous. They have peraluminous compositions and belong to the S-type. Trace elements such as Ba (868- 985 ppm), Zr (317-329 ppm), Sr (201-235 ppm) and Rb (157-191 ppm) have high contents. REE contents are also high, ranging from 248 to 381 ppm. The chondrite-normalized data reveal negative Eu anomalies. The Au-PGE contents are very low, close to the detection limit.

The mineralogical and geochemical features of weathered peridotites of Nyos and Kumba depend on the weathering degree which is higher in Kumba than Nyos. Weathered peridotites in Nyos are geochemically similar to the fresh xenolith samples, exception of Ba which is highly accumulated during the weathering process. The Kumba weathered products are characterized by moderate Cr, Ni, Ba, Co, Sr and REE contents. The chondrite-normalized REE patterns reveal (i) the homogeneous spectra with LREE-enrichment in Kumba weathered peridotites; (ii) and slight negative Ce anomalies in Nyos weathered peridotites. The Au-PGE contents are lower in Kumba than the Nyos site. The mass balance assessment shows that PGE are depleted from weathered

peridotites in Kumba whereas they are remobilized in Nyos. Ru and Pt have good positive correlations with Cr, Ni and Co. Rh, Ru and Pt are more mobile than Pd in weathered peridotites of Kumba while Rh and Pt are more mobile than Ru in those of Nyos. The chondrite-normalized Au-PGE patterns show negative Pt anomalies in both sites. IPGE possess positive correlations with Ni and Co but negative ones with REE. The contrasting iridium behavior could be due to the varying degree of partial melting which is higher in Nyos than Kumba.

Overall, this geochemical survey of gold and platinum groupe elements has revealed that the concentrations are more interesting in Nyos than in Kumba. The peridotites in Kumba which are more weathered could be contaminated by their basaltic host.

***Keywords:*** Cameroon Volcanic Line; Peridotites; Granites; Weathering; Geochemistry; Au-PGE distribution.

***INTRODUCTION GENERALE***

## **I. PROBLEMATIQUE ET BUT DE L'ETUDE**

Les métaux nobles tels que les Eléments du Groupe du Platine (Pt, Pd, Ir, Os, Ru et Rh), le nickel, le cobalt et le chrome se rencontrent préférentiellement dans les roches ultrabasiques et basiques (Ebah Abeng et *al.*, 2012 ; Bilong et *al.*, 2011 ; Maier et Barnes, 1999). L'altération supergène les remobilise dans la zone saprolitique en zone tropicale humide (Ndjigui et *al.*, 2008) ou dans les matériaux ferruginisés fortement indurés (Ndjigui, 2008). Les concentrations en EGP s'accompagnent le plus souvent de l'or (Varajão et *al.*, 1999).

La forte demande en platine et palladium sur le marché mondial à cause de leur utilisation dans plusieurs domaines incite à la recherche de potentiels gisements en éléments du groupe de platine. Au Cameroun, les travaux existant sur la prospection desdits éléments ont porté sur les enclaves de roches ultrabasiques serpentinisées du Sud-Est Cameroun (Ndjigui et *al.*, 2008 ; Ndjigui et Bilong, 2010), sur les enclaves de pyroxénites à grenat et d'amphibolites dans la série des roches vertes de la série du Nyong (Ebah Abeng et *al.*, 2012), sur les enclaves de talcschistes et d'amphibolites dans les formations gneissiques de Pouth-Kellé, Centre Cameroun (Ndjigui et *al.*, 2009) et sur les roches ferrifères du Sud-Est Cameroun (Nforba, 2013). Ces précédents travaux ont révélé des teneurs faibles en Au-EGP.

Les travaux récents sur la Ligne Volcanique du Cameroun, ont montré que les régions de Nyos (Temdjim et *al.*, 2004), de Kumba (Teitchou et *al.*, 2007) et de Kapsiki (Tamen, 1998) comportent des appareils volcaniques caractérisés par la présence de nombreuses enclaves mantelliques et des formations granito-gneissiques (Nana, 1991). Ces travaux dont l'objectif était l'étude du manteau supérieur et l'explication du magmatisme à l'origine de la Ligne Volcanique du Cameroun ont essentiellement porté sur les roches saines. Les études portant sur les matériaux d'altération dans ces régions sont quasi inexistantes. Aussi, les études métallogéniques préliminaires à Nyos ont montré que les teneurs en or et éléments du groupe de platine sont significatives dans les péridotites (Bilong et *al.*, 2011 ; Sababa, 2008). Les données sur la prospection des Au-EGP dans les matériaux issus de l'altération supergène des péridotites n'existe pas encore. Il faudrait de même mener ce travail sur les autres sites de la ligne du Cameroun.

Le manteau supérieur sous la ligne du Cameroun a subi des phénomènes de fusion partielle et de métasomatisme à des degrés différents. Les variations de compositions chimiques d'un site à un autre sont la conséquence d'une évolution indépendante de plusieurs petits diapirs

et de leur degré de fusion partielle plus poussé au Nord qu'au Sud (Nana, 2001). Les péridotites ayant donc subi un taux de fusion partielle plus élevé (réfractaires) sont appauvries en éléments traces. Par ailleurs, les EGP sont piégés dans le manteau par les sulfures ou sous forme d'alliages riches en EGP (Lorand et Alard, 2001; Maier et *al.*, 2003) et ont un comportement similaire lors de la fusion partielle du manteau. Les EGP restent dans le résidu de fusion si le taux de fusion est faible (Li et *al.*, 2012; Rao et *al.*, 2013). Si ce taux est élevé, ils sont exportés avec le liquide de fusion. C'est pour cette raison que les sites de Kumba et de Nyos avec des enclaves mantelliques moins réfractaires ont été choisis.

Les éléments du groupe du platine se concentrent dans les minéraux porteurs tels que la pentlantite, la pyrrotite et la chalcopyrit (Godel et *al.*, 2007). Quelles seraient en milieu supergène les phases minérales stables qui les portent ?

Ce travail est axé sur l'étude pétrologique des enclaves de granites et de péridotites et leurs produits d'altération. L'aspect métallogénique concerne la prospection géochimique de l'or et des éléments du groupe du platine dans lesdites formations. Il vise à comprendre la distribution des éléments majeurs, des éléments traces, de l'or et des éléments du groupe du platine. La pétrographie, la morphologie et la minéralogie seront nécessaires pour la compréhension des processus géochimiques tant au niveau des roches que des matériaux d'altérations. Aussi, le processus de mise en place des éléments utiles présents dans les enclaves de granites et de péridotites et leur devenir géochimique en milieu supergène sont à expliquer.

## **II. METHODOLOGIE**

Le travail a commencé par une recherche bibliographique et des campagnes de collectes d'informations qui ont permis de choisir les différents sites d'étude. Ensuite, les travaux ont été menés sur le terrain et en laboratoires.

### **II.1. Méthode de travail sur le terrain**

Plusieurs campagnes de terrain ont été effectuées dans les deux sites d'étude (Nyos et Kumba). Elles ont permis de répertorier les différentes formations lithologiques et d'établir leur extension paysagique afin de réaliser un échantillonnage représentatif sur les péridotites et les granites. Après une description macroscopique, les échantillons ont été étiquetés et emballés pour les travaux de laboratoire.

## **II.2. Méthodes de travail au laboratoire**

Les échantillons récoltés ont été soumis aux analyses pétrographiques, minéralogiques et géochimiques.

### **II.2.1. Préparation des échantillons**

Le conditionnement des échantillons a été effectué au laboratoire de Géologie Appliquée-Métallogénie du Département des Sciences de la Terre (Université de Yaoundé I). Les échantillons ont été broyés et 15 à 30 grammes ont été empaquetés pour des analyses minéralogiques et géochimiques. Certains échantillons non altérés ont été sélectionnés pour la confection des lames minces.

### **II.2.2. Analyses pétrographiques**

La confection des lames minces a été effectuée à l'Institut de Recherches Géologiques et Minières (I.R.G.M.) de Nkolbisson (Yaoundé). La roche brute est tronçonnée en « sucres » d'une taille de 5×6 cm<sup>2</sup> à peu près, à bords orthogonaux. A cause de la friabilité des échantillons, les sucres sont d'abord indurés à l'aide de la résine. Ensuite ils subissent un polissage sur une face pour être collés sur une lame de verre. Le polissage se fait sur une dalle circulaire en présence d'eau à l'aide d'une poudre abrasive à granulométrie de plus en plus fine. La préparation est collée et séchée sur une plaque chauffante à 50°C pendant 12 heures. L'épaisseur de la lame de roche ainsi préparée est encore épaisse (entre 5 et 20 mm). Il faut donc la raboter ou la meuler avec une meule en diamant qui va ramener l'épaisseur de cette lame de roche à 3-0,5 mm. La phase la plus délicate est le passage à une épaisseur de 0,03 mm par une succession de poudres abrasives. Cette opération, assez longue (1 heure) et manuelle, permettra d'obtenir la lame mince. Et enfin cette dernière est contrôlée au microscope avant qu'elle ne soit, si nécessaire, recouverte d'une lame de verre protectrice.

L'observation des lames minces a été faite à l'aide d'un microscope polarisant au laboratoire de Géologie Appliquée-Métallogénie du Département des Sciences de la Terre (Université de Yaoundé I).

### **II.2.3. Analyses minéralogiques**

La méthode d'analyses minéralogiques utilisée est la diffractométrie des rayons X (DRX) dans les laboratoires de Géosciences de "Ontario Geological Survey" à Sudbury (Canada). Les échantillons ont été pulvérisés à l'aide d'un mortier et d'un pilon en agate. La poudre obtenue a été prélevée à l'aide du ruban avant d'être exposée aux radiations  $\text{CuK}\alpha$  dans un diffractogramme. Le diffractomètre utilisé est du type PAN analytical X'PERT PRO.

### **II.2.3. Analyses géochimiques**

Les échantillons ont été analysés pour une gamme d'éléments majeurs et traces dans les laboratoires de Géosciences de "Ontario Geological Survey" à Sudbury.

Après broyage, les échantillons ont été soumis à la perte au feu. D'abord, les poudres ont été chauffées à  $105^\circ\text{C}$  sous l'azote ; ceci dans le but d'éliminer l'eau adsorbée et par la suite, elles ont été chauffées à nouveau mais cette fois à une température de  $1000^\circ\text{C}$  sous l'oxygène pour éliminer les éléments volatils et le fer oxydé.

#### **➤ Éléments majeurs**

Après la perte au feu, les concentrations en éléments majeurs ont été déterminées par Fluorescence de rayons X. Les poudres ont été fondues avec un flux de tétraborate de lithium avant d'être analysées. Les standards internationaux et internes (BIR-1-0949, SDU-1-0295 et SDU-1-0296) aux laboratoires ont été utilisés.

#### **➤ Éléments traces**

Les poudres de roches ont été préparées pour des analyses à l'ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry), dans le but de déterminer les concentrations en éléments lithophiles par une attaque triacide dans un récipient clos. Les poudres ont alors été traitées dans un mélange acide de HCl et de  $\text{HClO}_4$  à  $120^\circ\text{C}$  maintenu dans un récipient clos pendant une semaine. Après cette période, les solutions ont été rincées dans une solution de  $\text{HNO}_3$  diluée et chauffées à sec. Les résidus obtenus ont été redissouts dans des solutions acides (HCl et  $\text{HClO}_4$ ) et chauffés à sec une seconde fois avant d'être à nouveau dissouts dans un mélange triacide ( $\text{HNO}_3$ , HCl et HF) chauffé à  $100^\circ\text{C}$ .

Les échantillons dissous ont été analysés à l'aide de l'ICP-MS de type Perkin Elmer Elan 9000. Dans un premier temps, l'analyse a été réalisée en utilisant une bande analytique IM100 dans laquelle un poids moyen d'instrument répond pour trois matériaux de référence certifiés préparés de la même manière que l'inconnu (le blanc) pour chaque élément. Les solutions standard ont été mesurées entre chaque série de 30 échantillons avec un test après le passage de 10 échantillons. Les données sont reportées pour une large gamme de métaux de transition. A cause de l'incertitude des concentrations en éléments dans les matériaux de référence, les limites de détection pour la bande IM100 sont plus élevées que les capacités maximales (limite supérieure) de l'instrument. Lorsque certaines concentrations sont en deçà de la limite de détection pour la bande analytique IM100, les solutions peuvent être ré-analysées en utilisant un second groupe de 4 solutions synthétiques d'égales concentrations contenant 14 terres rares, Y, U, Th, Hf, Zr, Nb, Ta, Rb et Sr. Les limites de détection résultantes ont été plus faibles, mais ce paquet ne concernait que quelques éléments.

#### ➤ **Au-EGP**

Les concentrations en or et éléments du groupe du platine (Au-EGP) ont été déterminées par la méthode "NiS fire Assay" à l'aide de l'ICP-MS "finish" (Burnham et Schweyer, 2004). Quinze grammes d'échantillons ont été fusionnés avec le carbonate de sodium et du tétraborate de sodium en présence d'une fonte de NiS. Après refroidissement de chaque échantillon, les grains de NiS sont broyés hors du creuset et digérés par l'acide chloridrique concentré dans des vaiselles en téflon. La co-précipitation du tellure est utilisée pour s'assurer que le résidu insoluble a retenu tous les Au-EGP par digestion acide. Les solutions ont été séchées sous vide, après, elles ont été dissoutes dans une solution contenant l'eau dé-ionisée. Les solutions résultantes ont été analysées par ICP-MS de type Perkin Elmer Elan 500.

### **III. STRUCTURE DE LA THESE**

Après une introduction générale qui présente la problématique, le but et la méthodologie de ce travail, la thèse est présentée en six chapitres.

Le premier chapitre est consacré à la présentation du milieu naturel des différents sites d'étude. Il s'agit du contexte géographique et géologique de chaque site afin de mieux comprendre les phénomènes d'altération et les mécanismes géochimiques.

Le deuxième chapitre porte sur la synthèse bibliographique subdivisé en deux parties : la première partie est une synthèse des travaux effectués à Nyos et Kumba ; la deuxième est une revue de la littérature sur la distribution de l'or et les éléments du groupe du platine tant dans les roches que dans leurs matériaux d'altération.

Le troisième chapitre traite de la pétrologie et de la métallogénie des enclaves de granites de Nyos.

Le quatrième chapitre s'occupe de la pétrographie, la minéralogie et la distribution des éléments majeurs dans les péridotites et leurs produits d'altération.

Le cinquième chapitre s'intéresse à la distribution des éléments traces, terres rares, or et éléments du groupe du platine dans les mêmes matériaux géologiques.

Le sixième chapitre, enfin, commence par un récapitulatif des principaux résultats sur la pétrologie et la métallogénie des enclaves de granites et de péridotites de Nyos et de Kumba. Il est couronné par la discussion et interprétation des résultats.

En dernier ressort, une conclusion générale présente les grands enseignements de cette thèse qui ouvre une brèche sur les perspectives en vue des travaux de recherche à venir.

*CHAPITRE I : MILIEU NATUREL*

## **INTRODUCTION**

L'altération chimique est la dissolution, l'oxydation et l'hydrolyse des minéraux de roche par les eaux plus ou moins chargées en dioxyde de carbone. La mobilisation et la redistribution des éléments chimiques pendant l'altération supergène est un processus complexe, contrôlé à la fois par la dissolution des minéraux primaires, la formation de phases secondaires, les phénomènes d'oxydoréduction, les transferts de matière, les co-précipitations et les échanges ioniques entre divers minéraux (Traoré, 2005). Ces processus dépendent de nombreux facteurs dont les plus importants sont le climat, la végétation, le sol, la géomorphologie et l'hydrographie.

## **I. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE**

### **I.1. Localisation**

#### **I.1.1. Site de Nyos**

La localité de Nyos est située dans la partie centrale de la Ligne Volcanique du Cameroun (LVC), à 43 km au NNE de Wum et à environ 250 km au NE du Mont Cameroun dans le Département de la Mentchum, Région du Nord-Ouest (fig. 1), entre les latitudes 6°18' et 6°30'N et les longitudes 10°02' et 10°19'E.

#### **I.1.2. Site de Kumba**

Le secteur de Kumba s'étend entre les latitudes 4°29' et 4°48' Nord et les méridiens 9°12' et 9°30' Est (fig. 1). Il est à 60 km au nord du Mont Cameroun et 30 km à l'ouest des Monts Roumpi dans le Département de la Memé, Région du Sud-Ouest.

### **I.2. Climat**

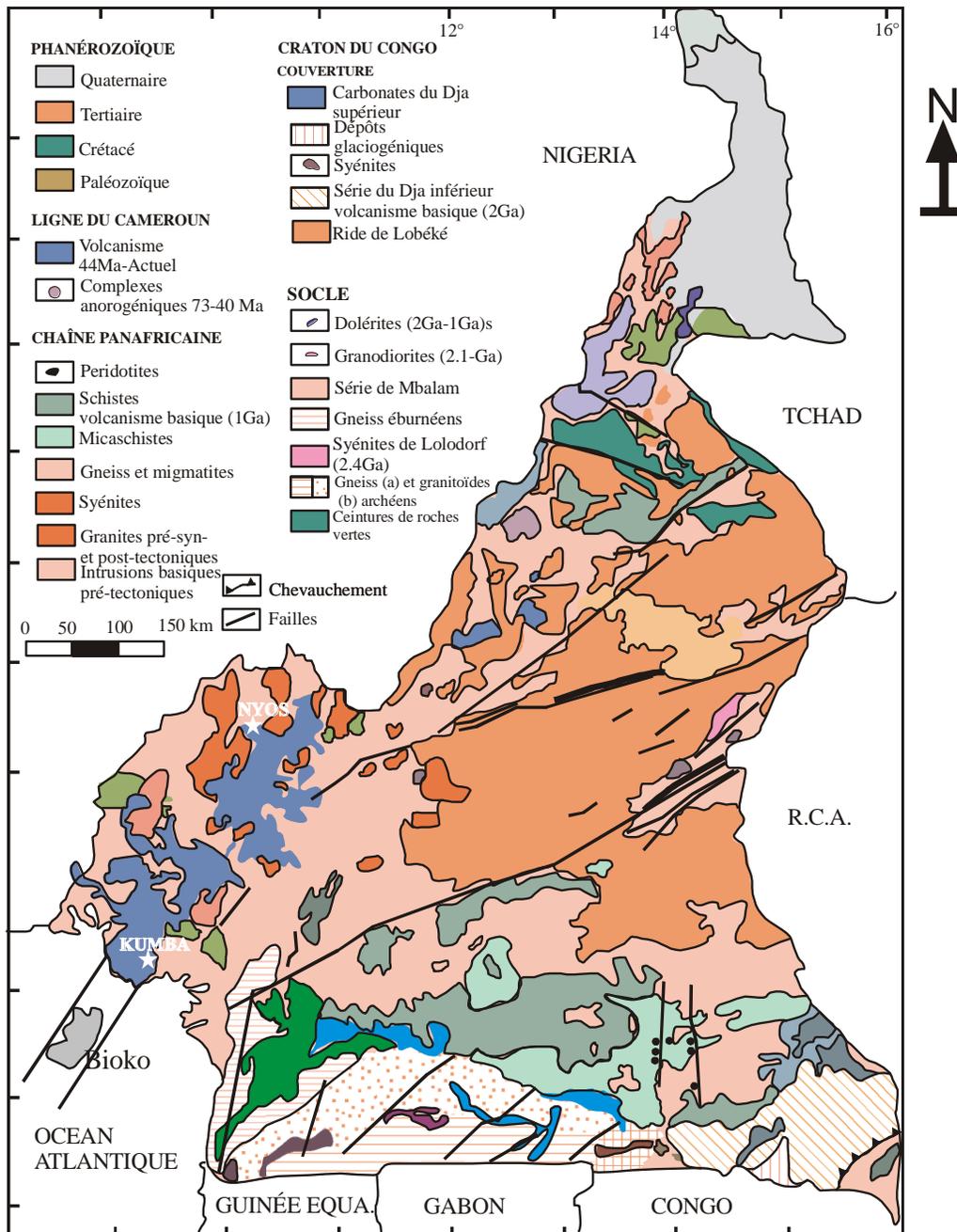
#### **I.2.1. Site de Nyos**

Le climat de Nyos est équatorial de type camerounien influencé par la mousson équatoriale, qui domine les côtes camerounaises et les zones montagneuses de l'Ouest. Les précipitations y sont très abondantes et varient entre 2 et 10 m par an, les températures sont de 26°C pour les zones basses et 21°C en altitude (Sighomnou, 2004). Ce climat est marqué par l'altitude variable des différentes zones considérées.

A Nyos, le climat correspond à une variante montagnarde du climat tropical humide et se raccorde au climat subéquatorial de l'Ouest africain (Olivry, 1986). Il s'agit d'une région très

humide caractérisée par des températures nettement plus basses que dans le reste du pays. Le tableau 1 présente les précipitations et les températures moyennes mensuelles pendant 20 ans, de 1982 à 2002. Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1957) (Fig. 2) montre que la région est marquée par :

- une longue saison de pluie de 8 mois (mars à octobre) ;
- une courte saison sèche de 4 mois (novembre à février).

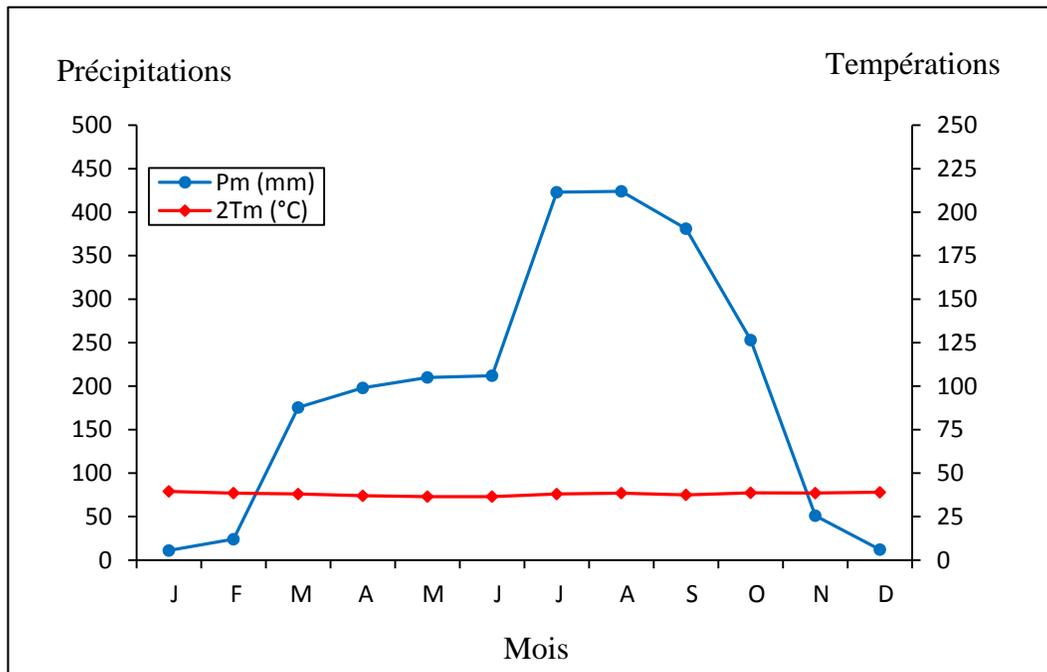


**Figure 1:** Carte de localisation de Nyos et Kumba.

**Tableau 1:** Précipitations et températures moyennes mensuelles dans la région de Nyos (Kah, 2004).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Ta	Pt/an
Pm (mm)	11,00	24,00	175,51	198,00	210,00	212,00	423,00	424,00	381,00	253,10	51,00	12,00	-	2375
Tm (°C)	19,75	19,25	19,00	18,50	18,25	18,25	19,00	19,25	18,75	19,33	19,27	19,50	19,00	-

Pm = précipitations moyennes mensuelles ; Pt = total des précipitations ;  
Tm = température moyenne mensuelle ; Ta = température moyenne annuelle.



**Figure 2:** Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957) de la région de Nyos.

### I.2.2. Site de Kumba

Le climat est équatorial de type guinéen à deux saisons (Suchel, 1972). Les vents chargés d'humidité venant de l'océan atlantique situé au Sud-Ouest se heurtent aux hauts reliefs de la dorsale camerounaise et provoquent de fortes précipitations. Les données climatiques de 1995 à 2002 (Mulutakwi, 2006) montrent que les précipitations sont de l'ordre de 2500 mm/an avec un maximum au mois d'août et un minimum au mois de décembre (tableau 2). Les températures moyennes mensuelles varient très peu (23-24°C).

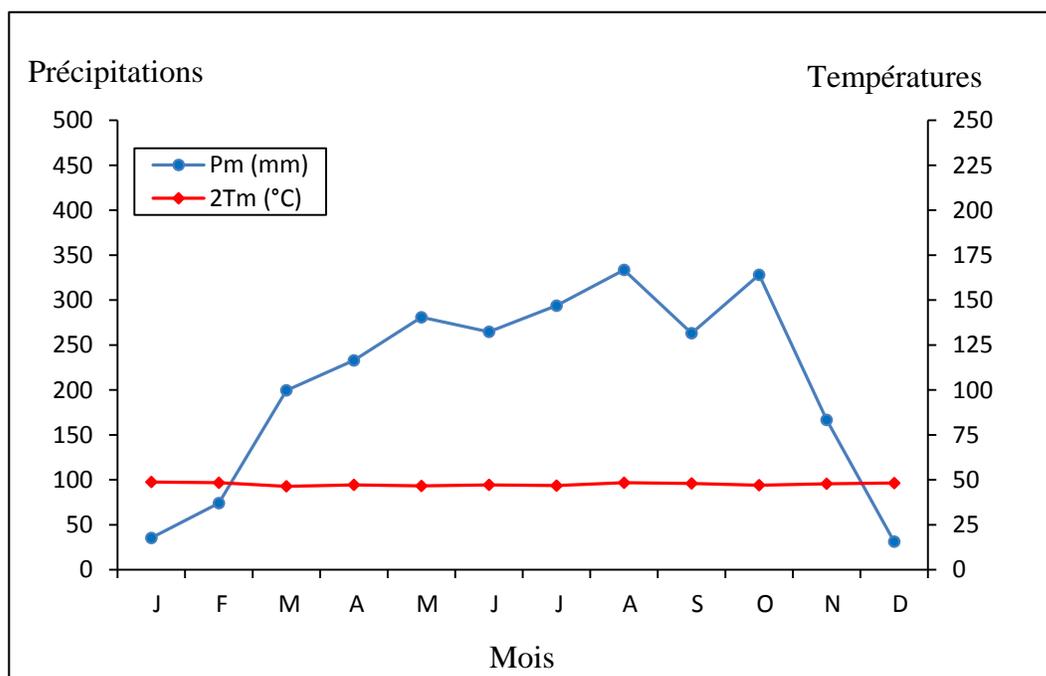
Ce climat est caractérisé par deux saisons (fig. 3) :

- une saison de pluies qui dure 9 mois allant de mars à novembre ;
- une saison sèche qui s'étend sur 3 mois de décembre à février.

**Tableau 2:** Précipitations et températures moyennes mensuelles dans la région de Kumba (Mulutakwi, 2006).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Ta	Pt/an
Pm (mm)	35,40	74,00	199,50	232,90	280,90	264,70	293,80	333,50	263,10	328,10	166,70	31,20	-	2503,00
Tm (°C)	24,40	24,20	23,20	23,60	23,30	23,60	23,40	24,20	24,00	23,50	23,90	24,10	23,78	-

Pm = précipitations moyennes mensuelles ; Pt = total des précipitations ;  
Tm = température moyenne mensuelle ; Ta = température moyenne annuelle.



**Figure 3:** Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1957) de la région de Kumba.

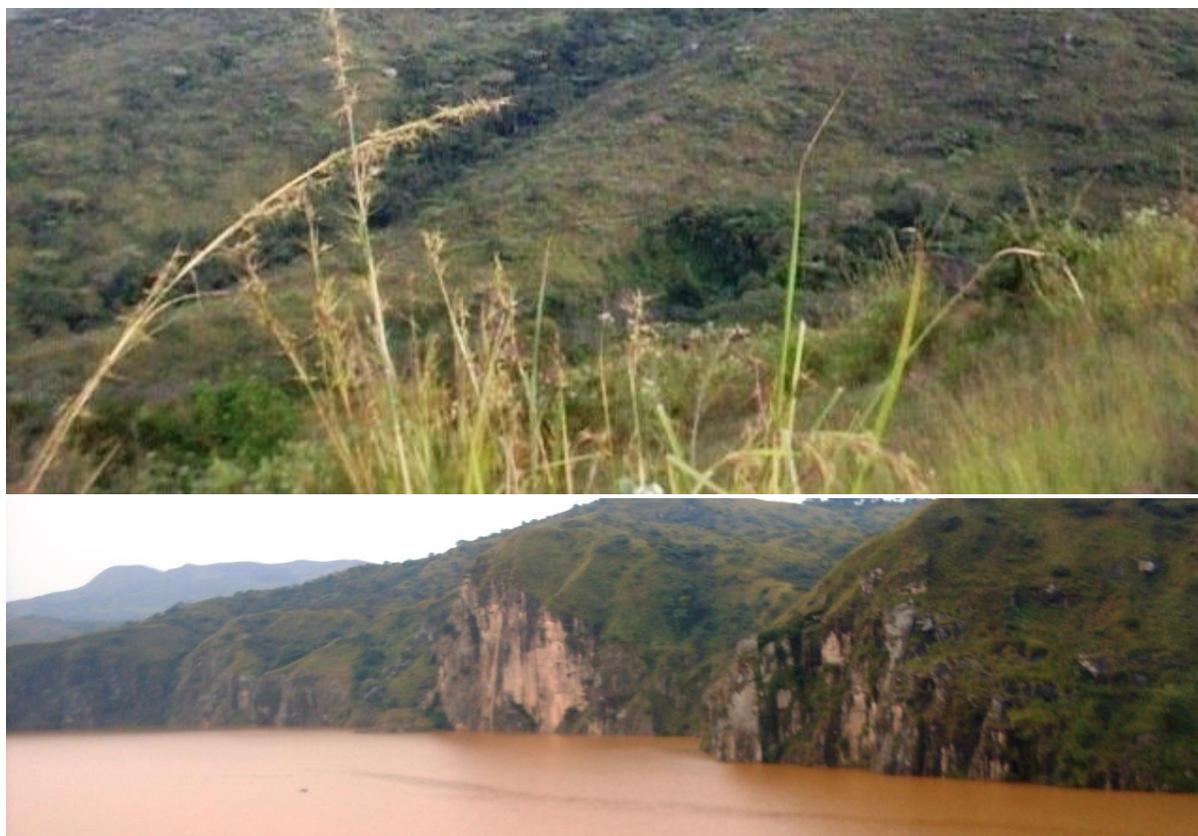
### I.3. Végétation

#### I.3.1. Site de Nyos

La végétation fait partie du vaste ensemble de « grassfields » caractérisé par des formations mixtes forestières et graminéennes. Il s'agit d'une formation mixte qui constitue le secteur post forestier guinéo-soudanien. Seules subsistent des forêts galeries et quelques recrus de forêt semi-décidue le long des vallées (Fig. 4). Les savanes sont soit herbueses à *Pennisetum*

*purpercum* et *Imperata cylindrica*, soit arbustives à *Bridelia ferruginea* et *Annona senegalensis*, soit enfin des savanes boisées à *Daniella oliveri* et *Lophira lanceolata*. Par suite d'un pâturage excessif, la végétation se dégrade avec apparition de *Sporobolus*.

L'habitat est entouré d'arbres qui modifient la végétation originelle. Il existe le long des vallées des forêts d'eucalyptus et de raphiales.



**Figure 4:** Vue d'ensemble de la végétation autour du lac Nyos.

### **I.3.2. Site de Kumba**

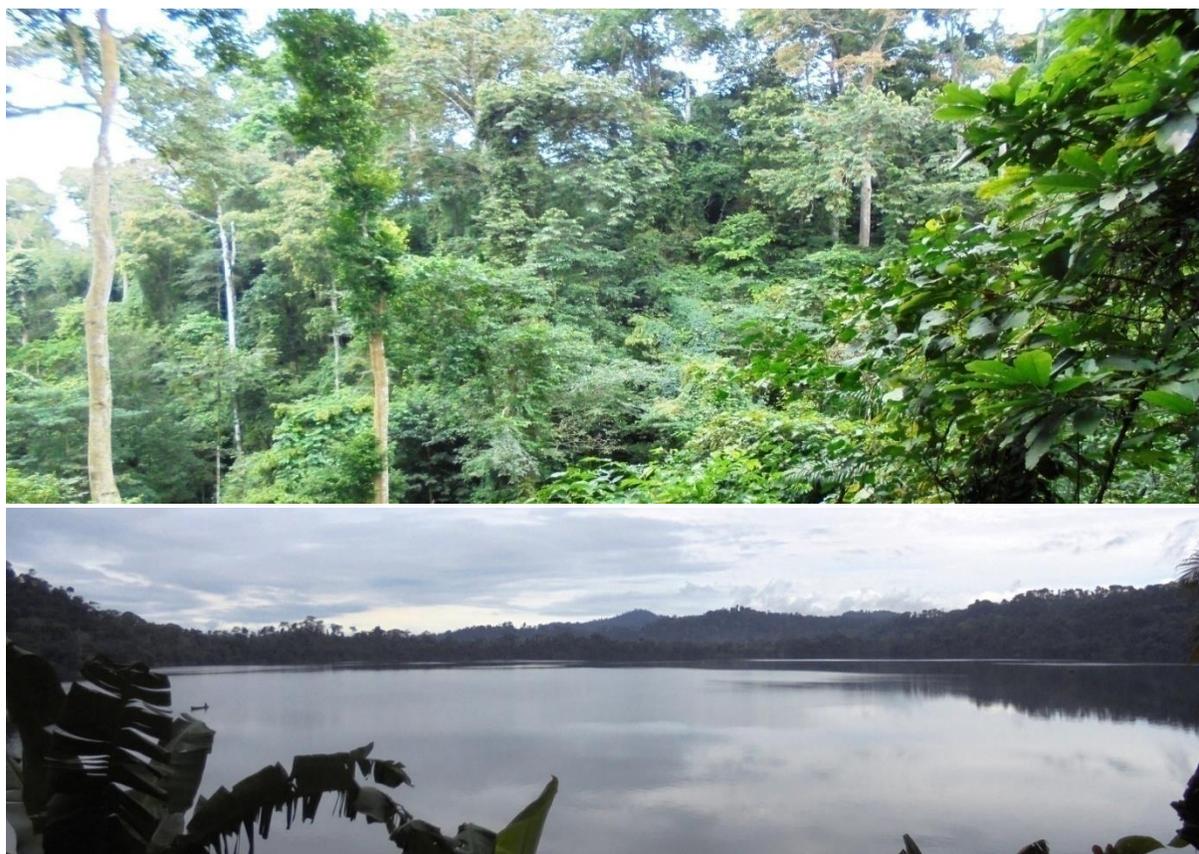
La végétation y est très diversifiée. Il s'agit surtout d'une forêt dense sempervirente de basse altitude (Fig. 5). C'est une forêt ombrophile d'aspect très homogène dans son ensemble où l'on peut toutefois reconnaître plusieurs faciès (Olivry, 1986) :

- une forêt dense, constituée principalement de *Lophira alata*, *Saccoglottis gabonensis*, *Cynometra hankei* et *Coula edubis* ;

- une forêt à petits arbres qui s'étend en moyenne altitude ;
- une forêt dense semi-décidue dans les zones à conditions écologiques un peu plus sèches comme celles du nord du pays ;
- la mangrove est essentiellement constituée de *Rhizophora* et plus à l'intérieur de *Pandanus* et de *Raphiales* ;
- les forêts marécageuses sont colonisées par des formations à *Uapaca*, *Raphia*, *Pandanus*, et *Ficus*.

Les mousses et les lichens colonisent les coulées volcaniques les plus récentes. La forêt dense recouvre les matériaux les plus anciens.

Les cours d'eau du bassin versant du Mungo sont entièrement recouverts par la forêt qui a, en partie laissé la place dans la région de Kumba et à l'aval du bassin à des grandes plantations (hévées, palmiers à huile, bananeraies de la société CAMEROON DEVELOPMENT COOPERATION) (Olivry, 1986)



**Figure 5:** Vue d'ensemble de la végétation autour du lac Mbarombi-Mbo.

## **I.4. Sols**

### **I.4.1. Site de Nyos**

On y distingue trois classes de sols d'après la classification française (Vallerie, 1971):

- les sols ferrallitiques dérivés des basaltes recouvrent la majeure partie de la région. Leurs propriétés physiques et chimiques sont très peu favorables à l'agriculture à cause du relief très accidenté. Ainsi de vastes zones ne sont pas cultivées, elles sont alors utilisées comme terrains de pâture ;

- les sols jeunes dérivés des cendres volcaniques qui sont peu épais. Les caractéristiques de la partie supérieure sont celles d'un sol ferrallitique. La forte concentration en éléments chimiques, due à un taux élevé de matière organique, leur confère un bon potentiel de fertilité. Ils sont intensément utilisés et fournissent de très bons rendements pour les cultures vivrières. Toutefois, ils sont très sensibles à la sécheresse, ce qui explique l'absence totale de cultures arbustives ;

- les sols hydromorphes qui se rencontrent dans les zones inondables des vallées. Ils sont mis en place par des particules arrachées aux hauts reliefs par l'érosion et la présence d'eau. Ces sols légers sont très utilisés pour les cultures vivrières et maraîchères. A cause de leur fertilité, ils favorisent la diversification des cultures mais également la pratique des cultures de contre-saison comme le maïs, la tomate....

### **I.4.2. Site de Kumba**

On distingue presque les mêmes classes de sols qu'à Nyos. Les andosols apparaissent par endroits. Aussi, les altitudes basses accompagnées par les fortes humidités ont permis le développement des sols ferrallitiques jaunes.

## **I.5. Géomorphologie**

### **I.5.1. Site de Nyos**

La région volcanique de Nyos appartient au massif d'Oku délimité par les monts Bamenda et le plateau de l'Adamaoua. Elle fait partie du grand domaine montagneux du Cameroun occidental, formé de hautes terres étagées de 500 à 3000 m et nettement délimitées par des rebords escarpés (Nana, 2001). On distingue à Nyos deux unités morphologiques principales :

- l'unité d'altitude 1000-1400 m : elle couvre la majeure partie du secteur d'étude et constitue l'édifice volcanique de Nyos. On y trouve le lac Nyos (6°26'78''N et 10°17'76''E) situé à 1100 m d'altitude, il s'encaisse dans des granites très fracturés et cataclasés dont les falaises surplombent de 100 m le niveau de l'eau et le plancher lacustre (Temdjim et Tchoua, 1991). Les roches volcaniques affleurent largement dans cette unité morphologique ;

- l'unité d'altitude 800-1000 m : elle est représentée essentiellement par les vallées et quelques plaines.

De point de vue lithologique, le substratum des volcans de Nyos est constitué de roches métamorphiques (micaschistes, gneiss, migmatites, amphibolites) que recourent des granites monzonitiques (Nana, 2001). Toutes ces formations sont parfois surmontées de laves de nature et d'âge variés (Nana, 1991).

### **I.5.2. Site de Kumba**

Les roches sont en majorité volcaniques, avec cependant de larges affleurements de socle et l'apparition des séries sédimentaires. Deux grands ensembles constituent les reliefs très complexes de la zone de Kumba (Vallerie, 1971) :

- les plaines côtières d'altitude inférieure à 100m correspondent à des terrains sédimentaires recouverts ou non de matériaux volcaniques. Cette surface à peine gauchie et largement étalée est jonchée de petits appareils volcaniques ;

- les basses collines de 100 à 500 m d'altitude présentent un relief un peu plus tourmenté, surtout vers le Nord. Les zones à peine ondulées reposent soit sur socle, soit sur recouvrement basaltique largement étendu. De nombreux petits cônes volcaniques très récents jalonnent le Nord de Kumba. Les collines aux formes adoucies constituent en général le socle.

La plaine de Kumba est jalonnée de 47 cônes volcaniques de 20 à 700 m de haut caractérisés par de faibles pentes (Teitchou, 2007). Par endroits, les épanchements volcaniques forment des reliefs tabulaires de planèzes, terminés par des ruptures de pentes abruptes aux extrémités des coulées. L'ensemble de la plaine est caractérisé par quatre lacs volcaniques : Barombi Mbo, Barombi Koto, Mbwandong et Dissoni.

## **I.6. Hydrographie**

### **I.6.1. Site de Nyos**

Le secteur de Nyos appartient au bassin versant de la Katséna. Le réseau hydrographique est tributaire de la Bénoué inférieure et du Niger. L'écoulement des cours d'eau est permanent. Son cours est parfois très encaissé, indiquant une forte reprise d'érosion soulignée par des vallées confluentes suspendues (Olivry, 1986).

### **I.6.2. Site de Kumba**

La zone de Kumba est située dans le bassin versant du Mungo. Le Mungo prend sa source dans les monts Bakossi à l'Ouest du Wouri à 1755 m d'altitude. Les cours du Mungo et de ses affluents sont torrentueux et rapides. En aval, les cours d'eau deviennent navigables et se terminent par un vaste delta rejoignant la mangrove du Wouri. Le tarissement est régulièrement observé sur le Mungo en décembre et janvier. Il commence à être perturbé par les premières pluies à partir de février (Olivry, 1986).

Le Mungo reçoit en rive droite de courts affluents issus des versants Est des monts Rumpi. En rive gauche, il reçoit de petits torrents, nés dans les monts Bakossi et, surtout, la Jide qui draine les versants ouest des monts Koupé et le Sud-ouest du massif Manengouba. En aval, le Mungo traverse une zone de basses collines avant de recevoir les torrents issus des versants ouest et nord du Mont Cameroun. Il se jette dans un delta aux chenaux étroits qui limitent l'amplitude des marées dans le bief maritime qui remonte jusque dans le village Mondani (Vallerie, 1971).

Les lits des cours d'eau matérialisent quelques directions de cassures principales du socle (Teitchou, 2007). Le contact avec le socle est marqué par des chutes et des rapides comme à Kumba Water.

## **II. CONTEXE GEOLOGIQUE**

Le secteur de Nyos, situé en contre bas des massifs des monts Oku, forme l'une des principales unités tandis que la plaine de Kumba fait partie de la série de grabens qui alternent avec les horsts de la Ligne Volcanique du Cameroun. Ces deux ensembles géologiques sont constitués de nombreux volcans monogéniques de la Ligne Volcanique du Cameroun.

## II.1. Aperçu sur la Ligne Volcanique du Cameroun (LVC)

La Ligne Volcanique du Cameroun (Fig. 6) est un alignement N30°E de massifs volcaniques océaniques et continentaux, et de complexes plutoniques anorogéniques depuis l'île de Pagalù jusqu'au lac Tchad (Déruelle et *al.*, 2000). L'activité magmatique le long de cette ligne a débuté il y a 65 Ma (Njilah et *al.*, 1999). Elle est matérialisée dans sa partie océanique par quatre îles du Golfe de Guinée (Pagalù, Sao Tomé, Principe et Bioko) et dans sa partie continentale par les massifs volcaniques du Mont Cameroun, Mont Rumpi, Mont Manengouba, Mont Bambouto, Mont Oku, les cônes pyroclastiques du graben de Kumba, de la plaine du Tombel, du plateau du Noun, les émissions volcaniques du fossé de Garoua et le plateau Kapsiki (Ngounouno, 1998).

Elle offre ainsi la particularité d'être une des rares entités magmatiques édifiées pour moitié en domaine océanique et pour moitié en domaine continental (Déruelle et *al.*, 2007). La partie continentale peut être encore subdivisée en terrains monogéniques (plaines de Tombel, Kumba, Noun, Nyos) et polygéniques (Monts Cameroun, Manengouba, Bambouto, Bamenda) (Sato et *al.*, 1991). Dans le domaine occidental, les quatre îles, bien alignées avec le Mont Cameroun, sont les témoins méridionaux de ce grand accident tectonique qui serait probablement lié à la formation du Golfe de Guinée dont les îles occupent à peu près l'axe (Suchel, 1972).

La Ligne Volcanique du Cameroun est encore active dans sa partie centrale, à l'île de Bioko et au Mont Cameroun où sont reportées des éruptions du 21<sup>ème</sup> siècle. Les manifestations magmatiques actuelles sont les émanations des gaz toxiques dans les lacs Monoun en 1984 (Sigurdson et *al.*, 1987) et Nyos en 1986 (Kling et *al.*, 1987) et l'éruption du Mont Cameroun en 1999 (Nkoumbou et *al.*, 1999 ; Ghogomu et *al.*, 1999) et 2000 (Wandji et *al.*, 2001).

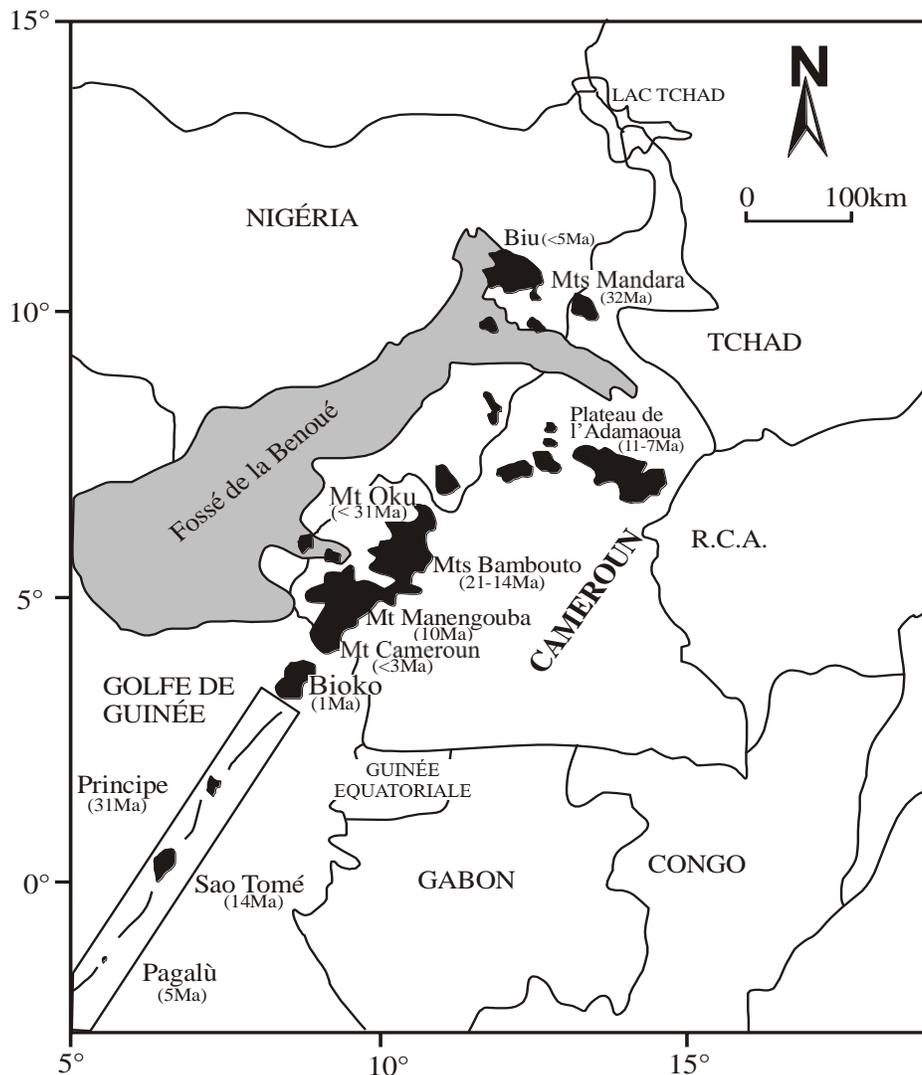
La Ligne Volcanique du Cameroun qui jouxte les domaines océaniques et continentales est long de 1800 Km (Koch et *al.*, 2012). Le modèle à l'origine du volcanisme n'est pas facile à expliquer par un seul point sous une plaque mobile (Lee et *al.*, 1994 ; Burke, 2001). De nombreuses études menées avaient pour objectifs de déterminer :

- les caractéristiques de la source mantellique fondue (Nkoumbou, 1990 ; Halliday et *al.*, 1990 ; Lee et *al.*, 1994) ;
- les processus de différenciation magmatique (Déruelle et *al.*, 2000 ; Kagou et *al.*, 2001) ;
- le dynamisme de migration des produits fondus (Nkoumbou et *al.*, 1995) ;
- des relations entre les volcans monogéniques et polygéniques (Sato et *al.*, 1999).

Malgré ces différentes études, son origine reste encore très controversée. Les modèles les plus récents proposent :

(i) une interaction complexe entre d'une part au moins deux bordures mantelliques réagissant successivement et d'autre part des fractures lithosphériques qui induisent des alignements obliques des complexes magmatiques (Koch et *al.*, 2012 ; Ngako et *al.*, 2006) ;

(ii) certains auteurs (Déruelle et *al.*, 1991 ; Reusch et *al.*, 2010) émettent plutôt l'hypothèse d'un point chaud dans un manteau sublithosphérique.



**Figure 6:** Présentation de la Ligne Volcanique du Cameroun (Marzoli et *al.*, 2000 ; Reusch et *al.*, 2010).

## II.2. Site de Nyos

La région de Nyos, sur le flanc nord du massif d'Okou, est caractérisée par 13 cônes stromboliens ayant parfois de grands cratères d'explosion occupés par des lacs (Nana, 1991). On peut citer le lac Njupi et le lac Nyos (Temdjim et Tchoua, 1991) (fig. 7). Les données géochronologiques sur les laves de cette région recouvrent deux grandes périodes (Nana, 2001) :

- le volcanisme ancien, entre 22 et 18 Ma, comprend essentiellement les basanites, les basaltes alcalins et les hawaïtes, mais aussi des trachytes et rarement des trachyandesites. Ce magmatisme est de loin le plus important en volume ;

- le volcanisme récent (inférieur à 2 Ma) se traduit par un volcanisme basaltique, et qui, la plupart de temps remonte une très grande quantité d'enclaves mantelliques. Cette activité récente est responsable de courtes coulées et de nombreux cônes et maars encore parfaitement conservés.

Le socle des volcans de Nyos appartient à la zone mobile de l'Afrique centrale, ensemble intensément fracturé et plissé au cours de l'orogénèse panafricaine (Nzenti et *al.*, 2006). Il se compose de roches métamorphiques (gneiss, migmatites, anatexites et schistes), recoupées par des granites monzonitiques. Ces terrains sont recouverts par des formations volcaniques correspondant essentiellement à des empilements de coulées massives, localement associées à des alluvions d'épaisseur métrique et souvent séparées par des minces niveaux tufacés (Bessoles et Tompette, 1980).

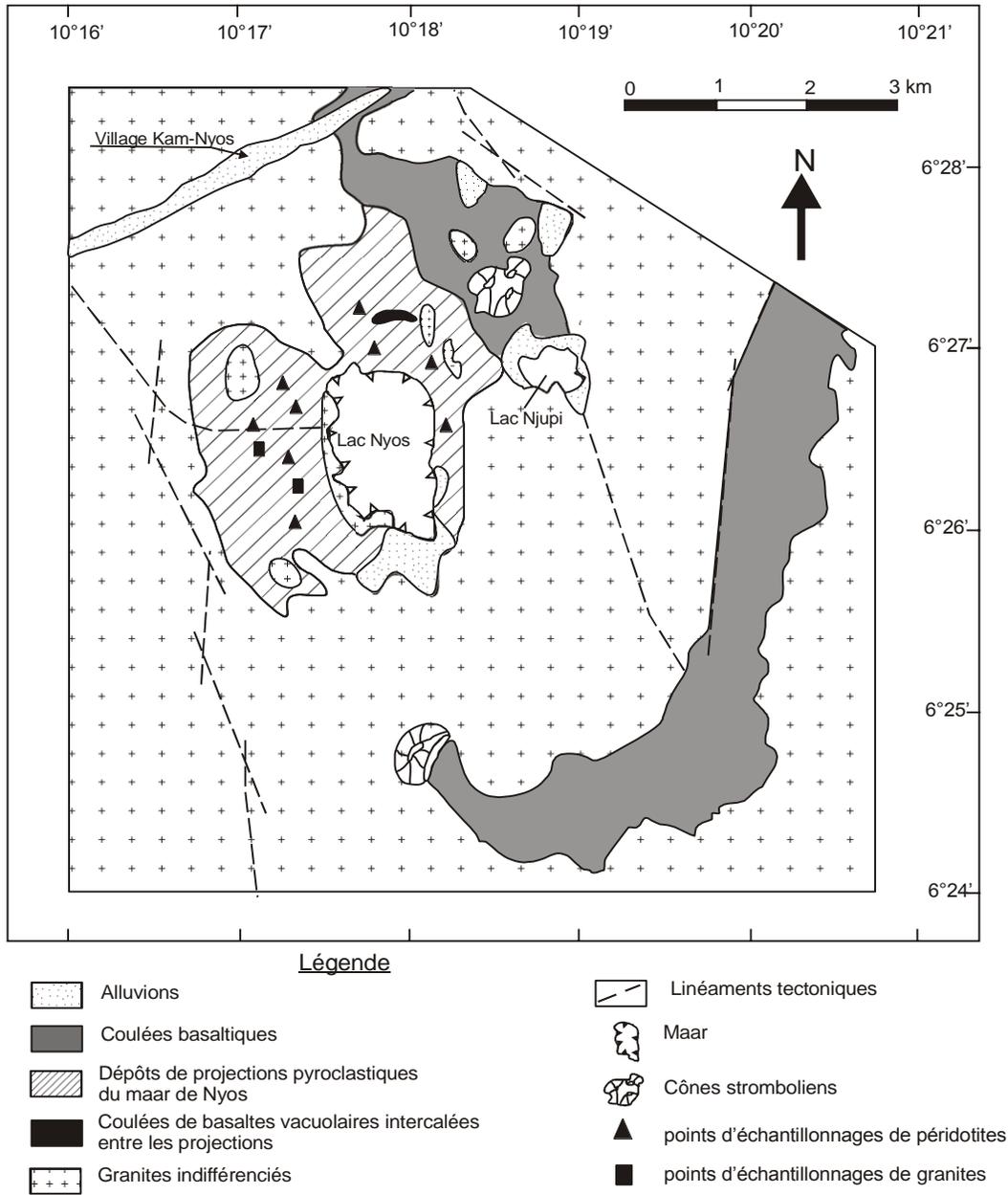
Une éruption gazeuse d'origine mantellique s'est produite au lac Nyos en 1986 et a causé de nombreuses victimes (Kling et *al.*, 1987). Ces gaz confèrent à cette région un taux élevé de risques volcaniques.

## II.3. Site de Kumba

Le graben de Kumba (Fig. 8) est limité par trois différents horsts de la ligne volcanique du Cameroun :

- le Mont Cameroun est composé de laves basanitiques, basaltiques et hawaïtes, et de cônes de cendre (Deruelle et *al.*, 1991) ;

- les monts Rumpi correspondent à deux suites de roches volcaniques. La première est formée de basaltes, trachytes et de phénolites. La deuxième comprend les basaltes alcalins et les rhyolites peralcalins (Nkoumbou, 1990) ;

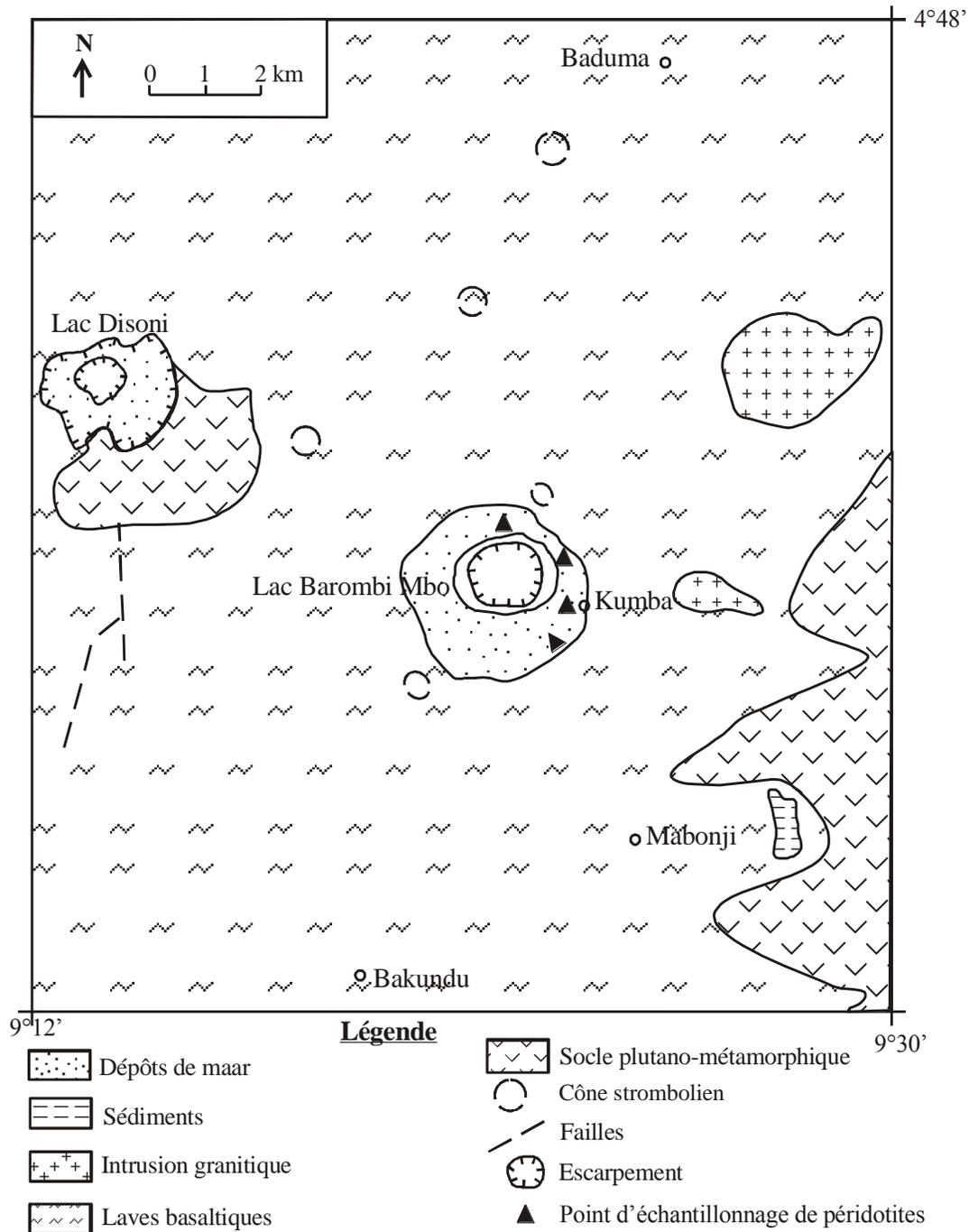


**Figure 7:** Carte géologique de la région de Nyos (Temdjim, 2005).

- le mont Manengouba est composé d'une suite de roches alcalines différenciées des basaltes aux trachytes et rhyolites (Tchoua, 1974 ; Kagou et *al.*, 2001).

Le graben de Kumba est composé d'un substratum métamorphique et plutonique d'âge Précambrien partiellement recouvert des grès datés du Crétacé et du Cénozoïque (Njome et Suh, 2005). Ce socle panafricain est granito-gneissique et comporte parfois des niveaux

d'amphibolites et de quartzites (Teitchou, 2008). Trois événements volcaniques ont été identifiés dans la plaine de Kumba (Lee et *al.*, 1996) :



**Figure 8:** Carte géologique de la région de Kumba (Teitchou et *al.*, 2007).

- le premier, d'âge supérieur à 100 Ma, a donné naissance à des basaltes de plateau ou basaltes anciens ;

- le second, d'âge compris entre 1 et 10 Ma, est responsable de la formation des appareils stromboliens et phréatomagmatiques ;

- enfin, le troisième, d'âge inférieur à 1 Ma, qualifié de terminal, est responsable de courtes coulées généralement vacuolaires.

Des nodules de péridotites, accidentellement remontés par les laves basaltiques, sont associés aux projections de cônes volcaniques.

## **CONCLUSION**

On peut retenir de l'étude du milieu naturel des localités de Nyos et Kumba situé sur la partie sud de la Ligne Volcanique du Cameroun que :

(i) Nyos est soumis à un climat équatorial camerounien avec mousson équatoriale. Elle appartient à la zone montagneuse des « grassfields » de l'Ouest Cameroun, caractérisée par une végétation à dominance de savane herbeuse. Le substratum lithologique granito-gneissique est surmonté par des coulées basaltiques aux seins desquelles apparaissent des enclaves de péridotites et de granites.

(ii) Kumba jouit d'un climat équatorial de type guinéen à deux saisons. Sa végétation très diversifiée, est à dominance de forêt entrecoupée de mangroves. Le substratum plutono-métamorphique est surmontée par des cônes volcaniques. Des enclaves de péridotites ont été accidentellement remontées par les laves basaltiques.

(iii) Les différents types pétrographiques dans ces régions (Nyos et Kumba), soumis à l'altération supergène, conduisent essentiellement à la formation des sols ferrallitiques qui alternent avec les sols jeunes dérivés des cendres volcaniques mais également des sols riches en alluvions dans les bas-fonds.

***CHAPITRE II : TRAVAUX ANTERIEURS***

## **INTRODUCTION**

Ce chapitre commence par une synthèse des travaux réalisés à Nyos et Kumba. Il présente particulièrement les caractéristiques des péridotites de la Ligne Volcanique du Cameroun d'une part et d'autre part le comportement géochimique de l'or et des éléments du groupe de platine dans les roches et les matériaux qui en dérivent.

### **I. ETUDES ANTERIEURES EFFECTUEES A NYOS ET A KUMBA**

La Ligne Volcanique du Cameroun a fait l'objet de nombreux travaux. Cependant, les résultats de ces travaux de recherche restent encore très controversés. Dans cette partie, il sera question de rappeler les travaux ayant trait aux secteurs de Nyos et Kumba et de présenter un répertoire des enclaves de péridotites de la ligne du Cameroun.

#### **I.1. Site de Nyos**

Depuis l'émanation des gaz toxiques le 21 août 1986 qui a causé la mort de plus de 1746 personnes ainsi qu'un bétail estimé à 3000 têtes (Tchindjang et Njilah, 2001), le maar de Nyos et partant toute la région quoique isolée et devenue lugubre et abandonnée, tend à devenir le nouveau pôle de la recherche scientifique au Cameroun.

Temdjim et Tchoua (1991) signalent 3 systèmes de failles qui encadrent le lac Nyos (direction : N30°E, N70°E et N120°E) dont 2 couloirs de fracturation. En cas de rupture du barrage de pyroclastites, les eaux descendraient par le couloir de Kam-Subum pour rejoindre la Kimbi au NE ou secondairement pour rejoindre le Mbum à l'Ouest ; ces deux principaux collecteurs de la région sont des affluents de la Katsina au Nigeria (Tchindjang et Njilah, 2001). Pour Mckie (2000), la rupture de ce barrage ferait au moins 10000 morts au Cameroun et au Nigeria. Aussi, les gaz d'origine mantellique emprisonnés dans des poches intracrustales confèrent à la région de Nyos un taux élevé de risques naturels (Nana *et al.*, 1998).

La région de Nyos présente de nombreuses manifestations volcaniques. Ce volcanisme a édifié des maars et des cônes stromboliens qu'accompagnent des coulées basaltiques d'épaisseur et d'extension variables (Nana, 2001). En fonction des produits émis, on distingue trois types de dynamisme à savoir le dynamisme fissural, strombolien et phréatomagmatique. Les coulées basaltiques sont dominantes mais recoupées par endroits de coulées et dépôts pyroclastiques

(Temdjim et Tchoua, 1991). Elles forment ainsi deux phases de volcanisme dans cette région qui s'étale de 31 Ma à l'Actuel (Njilah, 1991).

En ce qui concerne les enclaves ultramafiques de Nyos, Temdjim (2005) a montré que la minéralogie des péridotites de Nyos apparaît très homogène : olivine, orthopyroxène, clinopyroxène et spinelles constituent la phase majeure parfois complétée par l'amphibole brune. Ces enclaves ultrabafiques sont de nature variée: lherzolites, harzburgites et webstérites (Nana, 2001 ; Temdjim, 2005) et proviennent d'une colonne mantellique comprise entre 24 et plus de 80 km de profondeur (Nana et *al.*, 1998). Les péridotites ne sont pas les seules enclaves remontées par les laves récentes dans la région. Quelques études (exemple : Nana, 1991 ; Sababa, 2008) font mention des roches du substratum granito-gneissique dans les dépôts volcaniques de Nyos.

La distribution des éléments majeurs et traces des amphiboles et des clinopyroxènes des péridotites de Nyos permet de mettre en évidence un épisode ancien de fusion partielle (Temdjim et *al.*, 2004). Deux épisodes d'enrichissement en éléments incompatibles sont identifiés ; l'une riche en terres rares légères et affectant des échantillons préalablement appauvris, l'autre très riche en U et Th et plus pauvre en terres rares. Cependant, l'étude des éléments traces suggère une source mantellique unique au niveau de ce secteur (Teitchou, 2008). Le fait que plusieurs rapports entre éléments traces existent dans une même zone et même dans tout le secteur au cours du temps suggère que les péridotites proviennent certes d'une source unique, mais que le réservoir sous-jacent a probablement été réalimenté plusieurs fois au cours de son existence. Ces péridotites remontées par les volcans de Nyos ont subi une fusion partielle avec un enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes (Nana, 2001 ; Sababa, 2008). Une alimentation par des fluides métasomatiques riches en terres rares légères est mise en évidence.

Peronne (1969) montre que le secteur de Nyos est marqué par deux phases tectoniques ; ancienne et récente. La tectonique ancienne a affecté le socle et se caractérise par des plissements intenses de style isoclinal. Les axes de plis ont une direction dominante SSW-NNE. La tectonique récente est essentiellement cassante (failles, diaclases) et définit des linéations dans le district volcanique de Nyos.

Les données géophysiques sont rares, les seules disponibles sont celles sur la sismique récente de la partie centrale de la Ligne Volcanique du Cameroun (Nnange, 1991 ; Tabot et *al.*, 1992). Elles montrent que la sismique de Nyos est très faible comparativement à celle du secteur

du Mont Cameroun. Elles révèlent aussi la présence des plans composites compatibles avec des failles normales. L'exploitation des ondes P télésismiques montre :

- des zones à faibles vitesses de propagation sous Bamenda et le Mont Cameroun ;
- une hétérogénéité plus importante dans la croûte continentale que dans le manteau supérieur. Une perturbation des vitesses des ondes P moins importante dans le secteur des monts Oku que du Mont Cameroun a été liée à la présence probable de chambres magmatiques associées. Les petites perturbations au niveau des monts Oku seraient liées aux poches remplies de fluides liquides et gazeux. L'émission du gaz toxique de 1986 en est une preuve indéniable (Nana, 2001).

Enfin, dans le domaine de la métallogénie, des travaux récentes (Bilong *et al.*, 2011 ; Sababa, 2008) montrent que les granites ont des teneurs faibles en éléments du groupe du platine (EGP). Par contre, les péridotites présentent des teneurs significatives en ces éléments. Ces travaux ont porté essentiellement sur les granites et les péridotites en enclaves dans les formations volcaniques de Nyos.

## **I.2. Site de Kumba**

Plusieurs travaux ont été effectués dans le secteur de Kumba (Tagne-Kamga, 2003 ; Njome, 2005 ; Teitchou *et al.*, 2007 ; Tamen *et al.*, 2007).

Les formations volcaniques de la plaine de Kumba reposent sur le socle panafricain (Lassere, 1978). Ce socle, daté à 657 Ma vers l'Est de la plaine (Tagne-Kamga, 2003), appartient à la chaîne panafricaine Nord (Nzenti, 1987). Selon Teitchou (2008), il est constitué de roches plutoniques et métamorphiques surmontées par endroits par des formations sédimentaires :

- les formations sédimentaires observées dans la plaine de Kumba sont associées au prolongement méridional du bassin de Douala auquel il faut associer les formations du bassin de Mamfé situé au nord de Kumba. Ce sont des grès fins à ciment ferrugineux ou des brèches à ciment calcaire ;

- les formations plutoniques rencontrées dans la plaine de Kumba sont essentiellement des granites observables de Kumba à Mamfé. Ils se trouvent également en fragments dans les projections volcaniques du lac Barombi Mbo. On distingue les granites rosâtres et les granites blancs.

- les formations métamorphiques sont d'origine sédimentaire. Ce sont les gneiss, quartzites et amphibolites :

(i) les gneiss sont rubanés ou oillés et parfois associés à des mylonites. Ils affleurent de façon sporadique dans les projections du lac Barombi Mbo. Ces gneiss mésocrates sont caractérisés par une alternance de lits clairs quartzo-feldspatiques et de lits sombres biotitiques. Les paillettes de biotite pouvant inclure quelques grains de grenat, sont orientées préférentiellement et confèrent à la roche une schistosité ;

(ii) les quartzites, hololeucocrates, forment des bancs de dimensions réduites dans le gneiss. Ils correspondent à d'anciens accidents détritiques dans une sédimentation franchement pélitique (Dumort, 1968) ;

(iii) les amphibolites se rencontrent toujours en lentilles associées aux gneiss. Ce sont des roches sombres et compactes ne présentant ni foliation, ni litage. Elles affleurent à Bakondo et à Barombi Mbo. Les lentilles sont de taille inférieure au mètre.

D'après Tamen et *al.* (2007), les laves des volcans de Barombi Koto (au Sud-Ouest de Barombi Mbo) comprennent des picrobasaltes, des basanites, des basaltes alcalins et des hawaiiites. A cause de leur teneur élevée en Ni, Co, Cr et MgO, ils correspondent aux roches faiblement différenciées ou primitives. Leur composition en éléments majeurs et traces est proche de celle des laves alcalines provenant d'autres volcans monogéniques de la Ligne Volcanique du Cameroun. Des éruptions fissurales tortoniennes de picrobasaltes ont été suppléées par des éruptions phréatomagmatiques et stromboliennes. Chaque volcan est indépendant et proviendrait d'un faible taux de fusion du manteau asthénosphérique.

Teitchou et *al.* (2007) ont montré que :

- le manteau supérieur à spinelle à l'aplomb de la plaine de Kumba est essentiellement constitué des lherzolites. Ce manteau a très peu fondu avant d'être légèrement enrichi notamment en terres rares légères. Il est non ou peu perturbé par les processus magmatiques et volcaniques, responsables de l'éruption des laves porteuses des enclaves. Aussi, le manteau supérieur sous la plaine volcanique de Kumba paraît plus homogène en comparaison à celui de Nyos ou de Dibi, situé dans la zone de l'Adamaoua (Dautria et Girod, 1986) ;

- les enclaves de péridotites remontées par les laves alcalines de la plaine de Kumba ont été équilibrées dans le domaine de lherzolites mantelliques à spinelle. Ces lherzolites se caractérisent par une grande homogénéité des paragenèses minérales ; uniquement à olivine +

orthopyroxène + clinopyroxène + spinelle et sans minéraux hydroxylés (amphiboles et phlogopite), mais aussi par une grande homogénéité de composition des éléments majeurs et traces, aussi bien dans les minéraux que dans les roches totales. Les lherzolites n'ont pas été contaminées par les basaltes au cours de la remontée des enclaves. Le clinopyroxène peut expliquer les teneurs en terres rares dans les lherzolites.

Sur le plan structural, le substratum métamorphique est marqué par deux événements tectoniques (Njome, 2005) :

- une foliation mylonitique d'orientation NE-SW qui est un vestige d'une déformation ductile le long d'une faille ;

- un événement cassant caractérisé par trois groupes de failles de direction N140E-N150E, N120E-N130E, N090E-N110E qui tronquent la précédente déformation ductile. Cet événement cassant peut être rattaché au premier stade du volcanisme.

Aussi, Tchoua (1974) a montré que la plaine de Tombel au NE de Kumba est un véritable fossé d'effondrement bordé par des fracturations très marquées surtout dans la partie occidentale. Cette plaine est jalonnée du Sud vers le Nord par une série de petits puys, aux sommets hardis, formés de pyroclastites qui accentuent l'axe structural de la ligne du Cameroun. Elle est d'origine tectonique et a été le siège d'une activité volcanique récente à dominance strombolienne.

### **I.3. Péridotites de la Ligne Volcanique du Cameroun**

Des enclaves de péridotites ont été décrites dans les massifs d'Oku (dans les dépôts de maar de Nyos), les plaines de Kumba et dans les monts Kapsiki (tableau 3). Elles affleurent dans les cônes stromboliens, les projections de maars et les coulées récentes. Dans les monts Kapsiki, les péridotites sont fortement altérées en dunite (Tamen, 1998). Dans la plaine de Tombel, les péridotites sont intimement liées à la lave et sont de taille millimétrique à centimétrique (Lee et *al.*, 1996).

### **I.4. Xénolites mantelliques des maars de Nyos et Kumba**

Les données sur les enclaves mantelliques des maars de Nyos et de Kumba sont abondantes (Lee et *al.*, 1996 ; Nana, 2001 ; Temdjim et *al.*, 2004 ; Temdjim, 2005 ; Teitchou et *al.*, 2007 ; Teitchou, 2008). Il ressort que :

**Tableau 3:** Pétrographie de quelques enclaves de péridotites de la Ligne Volcanique du Cameroun.

Régions	Types pétrographiques	Textures	Paragenèses minérales	Références
Kumba (Barombi Mbo)	Lherzolites à spinelle	Protogranulaire Porphyroclastique	Olivine, eustatite, diopside, spinelle ± amphibole	Lee et <i>al.</i> , 1996 Teitchou et <i>al.</i> , 2006 Teitchou, 2007
Nyos (cônes, maars, coulées récentes)	Lherzolites à spinelle Harzburgites à spinelle	Protogranulaire Porphyroclastique	Olivine, eustatite, diopside, spinelle ± amphibole	Lee et <i>al.</i> , 1996 Nana et <i>al.</i> , 1998 Nana, 2001 Temdjim, 2005
Kapsiki	Lherzolites à spinelle Harzburgites à spinelle Dunite	Protogranulaire Porphyroclastique	Olivine, eustatite, diopside, spinelle ± amphibole	Lee et <i>al.</i> , 1996 Tamen, 1998

- le manteau sous la région de Nyos est constitué de quatre types pétrographiques (lherzolites, harzburgites, werhlites et pyroxénites) tandis qu'un seul type est défini à Kumba, les lherzolites ;

- les lherzolites de Kumba se caractérisent par une grande homogénéité des paragenèses minérales uniquement à olivine, orthopyroxène, clinopyroxènes, spinelle et sans minéraux hydroxylés (amphibole, phlogopite) ;

- la nature variée des enclaves et les compositions en éléments majeurs et traces des matériaux mettent en évidence une grande hétérogénéité du manteau à l'aplomb du lac Nyos ;

- les enclaves à Kumba présentent une grande homogénéité dans la distribution des éléments chimiques dans les minéraux et dans les roches totales. Mais elles présentent des spectres des terres rares légères beaucoup plus variés qu'à Nyos ;

- le manteau de Nyos a été localement fondu et ensuite affecté par des processus de métasomatisme cryptique (enrichissement chimique seul) et modal (enrichissement chimique plus apparition de nouvelles phases minérales) ;

- le manteau à Kumba a très peu fondu avant d'être légèrement enrichi notamment en terres rares légères (léger métasomatisme cryptique). Malgré cet enrichissement, il est peu modifié par rapport à celui de Nyos, mais aussi moins réfractaire.

Toutes ces caractéristiques font que le manteau sub-continental à l'aplomb de la plaine de Kumba apparaît très différent de celui à l'aplomb des massifs de Nyos.

## **II. COMPORTEMENT GEOCHIMIQUE DE L'OR ET DES ELEMENTS DU GROUPE DU PLATINE**

Depuis les temps les plus anciens, l'or est considéré comme le métal précieux par excellence. Toutes les civilisations l'ont utilisé pour la réalisation de bijoux, pour la frappe de la monnaie et d'objets d'apparat, ou comme symbole de richesse. L'or est un élément relativement rare dans la croûte terrestre. On le rencontre dans les veines de quartz et à l'état libre ou sous forme d'alliage dans les sédiments (stream sediments).

Les éléments qui constituent le groupe de platinoïdes sont : le ruthénium (Ru), le rhodium (Rh), le palladium (Pd), l'osmium (Os), l'iridium (Ir) et le platine (Pt). Ils sont utilisés dans l'industrie en vertu de leurs propriétés catalytiques, leur grande réactivité chimique et leur point de fusion élevé (Mattheys, 2004). Comme catalyseurs, ils sont utilisés dans l'industrie automobile, dans l'industrie chimique pour la fabrication des engrais chimiques, des silicones et des piles à combustibles, et en pétrochimie dans la production pétrolière. On les utilise également en médecine, en bijouterie et dans la fabrication des verres en vertu de leur grande résistance....

Les éléments du groupe du platine se concentrent dans les roches ultrabasiques ou basiques, dans leurs manteaux d'altération ou dans les alluvions. Selon Maier et Barnes (1999), ces éléments possèdent des faibles teneurs dans les roches acides.

En fonction des affinités au sein des EGP, on peut les subdiviser en deux sous groupes : (i) les éléments du groupe du platine et du palladium notés EGPP (Pt, Pd et Rh) ; et (ii) les éléments du groupe du platine et de l'iridium notés EGPI (Os, Ir et Ru).

### **II.1. Comportement géochimique de l'or et EGP dans les roches basiques et ultrabasiques**

La concentration des platinoïdes peut se faire de concert avec celle de l'or (Varajão et al., 1999). L'or est présent dans la nature sous sa forme native ou comme constituant majeur

d'alliages contenant de l'argent, du cuivre ou des platinoïdes. D'après Boyle (1979), les teneurs moyennes en or sont de l'ordre de 7 ppb dans les roches ultrabasiques.

Les platinoïdes sont des éléments dont les teneurs sont faibles dans les roches. Ils se concentrent préférentiellement dans les roches ultrabafiques et bafiques (Gueddari et *al.*, 1994). Les teneurs sont en général de l'ordre de ppm voire du ppb. Les EGP se concentrent généralement sous forme d'alliages dans les minéraux du groupe du platine tels que la pentlantite, la pyrrhotite et la chalcopyrite (Godel et *al.*, 2007).

Les travaux de Maier et Barnes (1999) dans la vallée de Curaça au Brésil révèlent que les teneurs en PGE sont de 38 ppb dans les péridotites, inférieure à 10 ppb dans les serpentinites et peuvent atteindre 500 ppb dans les ortho-pyroxénites.

Les études menées par Barnes et Francis (1995) montrent que la teneur en (Pt+Pd+Au) est de 200 ppm dans l'intrusion litée du Muskox (Canada). Les roches riches en sulfures ont des rapports Pd/Ir, Pd/Pt et Rh/Ir plus élevés que ceux des roches pauvres en sulfures. Ceci est dû au fait que les sulfures sont plus enrichis en Pd et Rh qu'en Pt et Ir (Barnes et Francis, 1995).

D'après Traoré (2005), les pyroxénites chromifères de la rivière des Pirogues (Nouvelle-Calédonie) possèdent des teneurs de l'ordre de 15 à 23 ppb en platine et de 3 à 4 ppb en palladium. Il montre que les werhlites à chromites platinifères ont des concentrations de 206 à 227 ppb en Pt et de 15 à 16 ppb en Pd tandis que les werhlites dépourvues de chromites platinifères possèdent des teneurs de l'ordre de 4 ppb en platine et de 52 ppb en Pd.

Luguet et *al.* (2007) ont caractérisé les minéraux résiduels du groupe de platine des harzburgites du massif de Lherz (France). Quatre échantillons de harzburgites à spinelle ont permis d'estimer les concentrations en EGP dans la fraction totale ainsi que dans les probables minéraux porteurs d'EGP tels que l'olivine, l'orthopyroxène, le clinopyroxène et les spinelles. L'olivine et les spinelles présentent les teneurs les plus élevées en Os, Ir, Ru et Pt.

D'après Gueddari et *al.* (1994), les teneurs en Rh, Pt et Pd sont liées à certains oxydes permettant de renseigner sur le caractère primitif ou déprimé des matériaux. Les EGP, en particulier le Pd et le Pt, peuvent être considérés comme de très bons indicateurs du degré de fusion partielle. Les anomalies négatives en Pd sont relatives au taux global d'extraction des liquides. Barnes et *al.* (1997) ont observé des variations importantes dans l'enrichissement en métaux parmi les intrusions d'une même région géographique. Les minéralisations à EGP au Québec comprennent (i) les gîtes où les EGP sont dominants avec le Ni et le Cu comme sous-

produits possibles, et (ii) les gîtes de Ni-Cu où les EGP apparaissent comme sous-produits (Clark, 2001).

Les processus de fusion partielle, de fractionnement magmatique et d'altération hydrothermale sont les principaux facteurs qui contrôlent la distribution des EGP dans les roches (Leblanc et Nicolas, 1992). Lorsque le manteau subit une fusion partielle, les EGP sont fractionnés ; le liquide de fusion est enrichi en EGPP alors que les EGPI sont retenus dans le résidu de fusion (Rao et al., 2013). Il en résulte un appauvrissement en EGPP dont le Pd et le Pt sont des indicateurs (Gueddari et al., 1994). Les magmas fertiles en EGP peuvent être générés lors d'une importante fusion partielle du manteau (plus d'environ 25 %), de sorte que tous les sulfures et les EGP incompatibles (Pd, Pt, Rh) disponibles dans le manteau soient incorporés dans le magma issu de la fusion partielle, par exemple un magma ultramafique komatiitique (Keays, 1982; Barnes et al., 1997). Les produits de cristallisation de tels magmas saturés en sulfures seraient de bonnes cibles pour l'exploration des EGP. Une autre façon de générer un magma fertile en EGP est de refusionner une partie du manteau qui aurait expérimenté au préalable une fusion partielle à un degré faible ou modéré (par exemple, moins de 20 %). Selon ce scénario, le magma produit par le premier épisode de fusion partielle, saturé en sulfures, aurait incorporé une partie des sulfures disponibles mais seulement une petite fraction des EGP incompatibles, ces derniers demeurant de préférence avec les sulfures résiduels; ainsi, le magma généré serait appauvri en EGP. Le magma produit par le deuxième épisode de fusion partielle aurait pu incorporer les sulfures restants et la plus grande partie des EGP incompatibles présents initialement; ce magma serait sous saturé en sulfures et fertile en EGP (Hamlyn et Keays, 1986). Il est possible que de tels magmas aient alimenté plusieurs des grandes intrusions mafiques litées à EGP retrouvées dans le monde (Hamlyn et al., 1985; Hamlyn et Keays, 1986). Les magmas produits lors du premier épisode de fusion partielle à un degré faible ou modéré seraient de mauvaises cibles pour l'exploration des EGP, tandis que les magmas du deuxième épisode fourniraient de bonnes cibles, dans la mesure où ils deviennent saturés en sulfures juste avant la mise en place finale.

Très peu de travaux ont été menés sur le comportement géochimique des EGP dans les roches au Cameroun. Ebah Abeng (2012) montrent que la somme des EGP est de l'ordre de 25 à 120 ppb dans les pyroxénites à grenat de Lolodorf (partie centale de l'unité du Nyong). Le palladium et le platine représentent 95% des teneurs en EGP. Minyemeck (2006) a étudié les

amphibolites et les talcschistes du secteur de Pouth-Kellé sur la bordure orientale de la plaine côtière. Ces travaux ont révélé que les amphibolites et talcschistes de la bordure septentrionale de l'unité du Nyong possèdent de très faibles teneurs en platine (1-2 ppb). La teneur en palladium est de 3 ppb dans les amphibolites et inférieure à la limite de détection dans les talcschistes. Dans la région de Nyos, les études menées tant sur les enclaves de péridotites et de granites montrent que les péridotites présentent des teneurs significatives en EGP ( $\sum\text{EGP}=14$  ppb) par rapport aux granites dont les teneurs sont inférieures à la limite de détection (Bilong et *al.*, 2011 ; Sababa, 2008). Pour les serpentinites de Lomié (SE Cameroun), les teneurs sont très variables, les sommes des EGP varient entre 7 et 22 ppb (Ndjigui et *al.*, 2008). Les concentrations les plus élevées sont celles en iridium et en ruthénium. Aye (2010) a obtenu des résultats beaucoup plus intéressants dans la partie Sud de l'unité de Nyong à Nyabitandé. Les teneurs en palladium atteignent 83 ppb et celles en platine 26 ppb dans les amphibolites.

## **II.2. Comportement géochimique de l'or et EGP dans les matériaux d'altération**

Le processus d'altération supergène intense concentre dans les altérites et parfois jusqu'au seuil d'accumulation économique, divers métaux semi-précieux et précieux (Traoré, 2005).

L'or est un élément chimique qui se concentre dans les matériaux d'altération des roches ultrabasiques et basiques (Edou-Minko et *al.*, 1995). C'est un élément mobile à cause de ses propriétés physico-chimiques. La mobilité physique est à l'origine d'une part, des fortes concentrations dans les matériaux d'altération (Craver et *al.*, 1987) et d'autre part de la formation des placers à l'échelle du paysage (Le Count Evans, 1980). La mobilité chimique est importante au cours de l'altération superficielle (Colin, 1992). Cette altération apparaît comme précurseur de la dispersion de l'or dans les manteaux d'altération.

Le comportement des platinoïdes dans les matériaux altérés et les roches n'est pas régi par les mêmes lois thermodynamiques. Deux hypothèses sont à prendre en compte pour expliquer la distribution des éléments du groupe du platine dans les matériaux d'altération : (i) la concentration résiduelle, due à la dissolution et à l'évacuation par les eaux de surface des autres constituants minéraux de la roche mère et (ii) la concentration supergène, régie par le transport en solution des EGP et leur dépôt différencié dans les parties inférieures du profil.

Les EGP se concentrent à la base des profils d'altération et les nodules malgré leur très faible proportion observée dans la roche parentale (Bowles, 1986 ; 1990 ; Traoré, 2005 ; Ndjigui,

2008 ; Ndjigui et *al.*, 2008). Cette concentration serait corrélative à celle des oxydes de fer et à certains éléments sidérophiles comme le chrome et le nickel (Ndjigui et Bilong, 2010). Ils sont soit incorporés dans les minéraux porteurs tels que la goethite (Singh et *al.*, 2002), soit constituent des espèces minérales secondaires différentes de celles rencontrées dans la roche parentale (Salpéteur et *al.*, 1995). Les oxydes métalliques seraient des minéraux porteurs des platinoïdes et par conséquent d'excellents traceurs en vue de la prospection de ces derniers au sein des matériaux d'altération des roches ultrabasiques.

Dans la partie supérieure des matériaux d'altération, certains auteurs (Wood, 1996 ; Azaroual et *al.*, 2001) montrent que les acides fulviques seraient à l'origine de la mise en solution des EGP. Ce phénomène est favorisé par la baisse des teneurs en oxydes de fer, en chromite et la présence d'une importante quantité de matière organique. Le platine est moins soluble dans les eaux de surface et souterraines, et plus stable que le palladium. Il subit une migration mécanique du sommet vers la base des profils d'altération et réagit en présence de la matière organique à cause des acides humiques qui favorisent sa dissolution (Bowles, 1995).

Salpéteur et *al.* (1995) ont mené des travaux sur la mobilité du platine et palladium dans les sols ferrallitiques développés sur pyroxénites dans la localité d'Andriamena (Madagascar). Les teneurs en platine varient entre 30 et 210 ppb et celles en palladium entre 35 et 130 ppb. Ces auteurs ont établi des corrélations entre quelques éléments du groupe du platine.

Traoré (2005) a étudié la mobilité des EGP en milieu supergène en Nouvelle-Calédonie. Les matériaux d'altération développés sur pyroxénite chromifère présentent des teneurs en Pt et en Pd variant respectivement de 37 à 301 ppb et 5 à 74 ppb. Sur werhlite à filonnets de chromites platinifères, les produits d'altération présentent des concentrations en platine de l'ordre de 203 à 647 ppb et en palladium de l'ordre de 17 à 48 ppb. Dans le troisième profil d'altération développé sur werhlite dépourvue de chromites platinifères, les teneurs en platine varient entre 56 et 262 ppb et celles en palladium de 5 à 20 ppb.

Les travaux de Ndjigui et *al.* (2008), effectués sur les matériaux d'altération des serpentinites du complexe ultrabasique de Lomié (SE Cameroun), montrent que les teneurs en EGP sont variables. En fonction des niveaux des profils d'altération, elles varient entre 70 et 212 ppb. Les concentrations les plus élevées sont obtenues dans la sapolite grossière et dans les nodules où les EGP seraient liés aux oxydes métalliques.

L'étude géochimique des boules altérées de talcschistes et d'amphibolites contenues dans les produits d'altération du gneiss à biotite de la plaine côtière du Cameroun révèle des teneurs très faibles en Pt, Pd et Au (Oumarou et *al.*, 2005). Les teneurs en Pt varient entre 2 et 4 ppb, celles en Pd entre 1 et 2 ppb. Les échantillons récoltés en surface ont des teneurs les plus faibles. D'après Ebah Abeng et *al.* (2012), les faibles teneurs en EGP dans les roches altérées seraient dues à l'altération rapide des minéraux primaires. Ces auteurs ont obtenu des teneurs très faibles dans les enclaves de pyroxénites et d'amphibolites en début d'altération par rapport aux roches saines.

## **CONCLUSION**

Le volcanisme de Nyos et de Kumba montre de grandes similitudes et fait partie du volcanisme qui caractérise la Ligne Volcanique du Cameroun. Ce manteau a très peu fondu et reste plus homogène à Kumba qu'à Nyos. Il est à noter que les travaux effectués aussi bien à Nyos qu'à Kumba n'ont pas abordé l'aspect pétrologique des matériaux d'altération.

Par ailleurs, il ressort de ce qui précède que les enclaves de roches ultrabasiques regorgent de nombreux métaux nobles susceptibles de présenter un intérêt économique. Aussi, l'altération météorique joue un rôle métallotectique positif dans la remobilisation des métaux nobles. Ainsi, des études métallogéniques seront menées sur les poches de péridotites et de granites en vue de quantifier leur teneur en or et éléments du groupe du platine. Elles constitueront aussi une contribution à l'étude pétrologique afin de mieux comprendre la dynamique du manteau supérieur à l'aplomb des volcans de Nyos et de Kumba.

***CHAPITRE III : PETROLOGIE ET  
METALLOGENIE DES ENCLAVES DE  
GRANITES DE NYOS***

## **INTRODUCTION**

Les coulées basaltiques de Nyos au cours de leur ascension ont également remonté des enclaves de granites qui constituent le socle. Ce chapitre porte sur une étude pétrologique de ces enclaves de granites de Nyos. L'aspect métallogénique concerne la prospection géochimique de l'or et des éléments du groupe du platine.

### **I. Pétrologie des enclaves de granites de Nyos**

#### **I.1. Pétrographie**

Les granites sont denses, roses et légèrement altérés. Ils sont matérialisés par leur degré de friabilité élevé et par les teintes de décoloration. Ils présentent une microstructure grenue porphyroïde et sont constitués d'un même cortège minéralogique composé de : quartz (45%), feldspaths (35%), biotite (~15%), et de minéraux accessoires comme les pyroxènes et les minéraux opaques.

Le quartz est le minéral le plus abondant et occupe près de 45% du volume de la roche. Les cristaux sont de dimensions millimètres. Les phénocristaux sont parfois fragmentés (Fig. 9a). Ils sont xénomorphes à subcirculaires et présentent une extinction roulante. Très souvent, les porphyrocristaux englobent des inclusions de biotite ou de feldspaths. Des microcristaux de quartz se retrouvent souvent en inclusion dans les feldspaths (Fig. 9b).

Les feldspaths alcalins (20%) sont le microcline et l'orthose. La taille des cristaux est très variable pouvant atteindre des porphyrocristaux de plus de 6 mm de diamètre (Fig. 9d). Les porphyrocristaux contiennent parfois des granules de quartz, de pyroxène ou d'autres types de feldspaths. Les feldspaths alcalins ont été sujets à l'altération hydrothermale qui les transforme progressivement en séricite (Fig. 9c et Fig. 9d)

Les plagioclases (15%) sont présents dans tous les échantillons étudiés. Ils sont de forme allongée, moulés par les feldspaths alcalins ou le quartz. Les bordures sont pour la plupart très irrégulières. Ils s'altèrent intensément en damourite (Fig. 9b). Ils sont porteurs de microcristaux de quartz, de pyroxène et de biotite (Fig. 9b). La taille varie très peu, de moins de 1 mm à 2 mm selon les échantillons.

La biotite représente environ 15% et est soit en amas avec des cristaux de la taille de l'ordre du millimètre (Fig. 9a), soit en liséré constituant une forme de ciment entre les

porphyrocristaux de quartz. Elle est fortement déstabilisée et possède des amas des minéraux néoformés tel que le chlorite.

Les pyroxènes sont rares dans les granites de Nyos. Le minéral le plus fréquent est l'augite avec des cristaux automorphes de petite taille.

## **I.2. Géochimie**

### **I.2.1. Eléments majeurs**

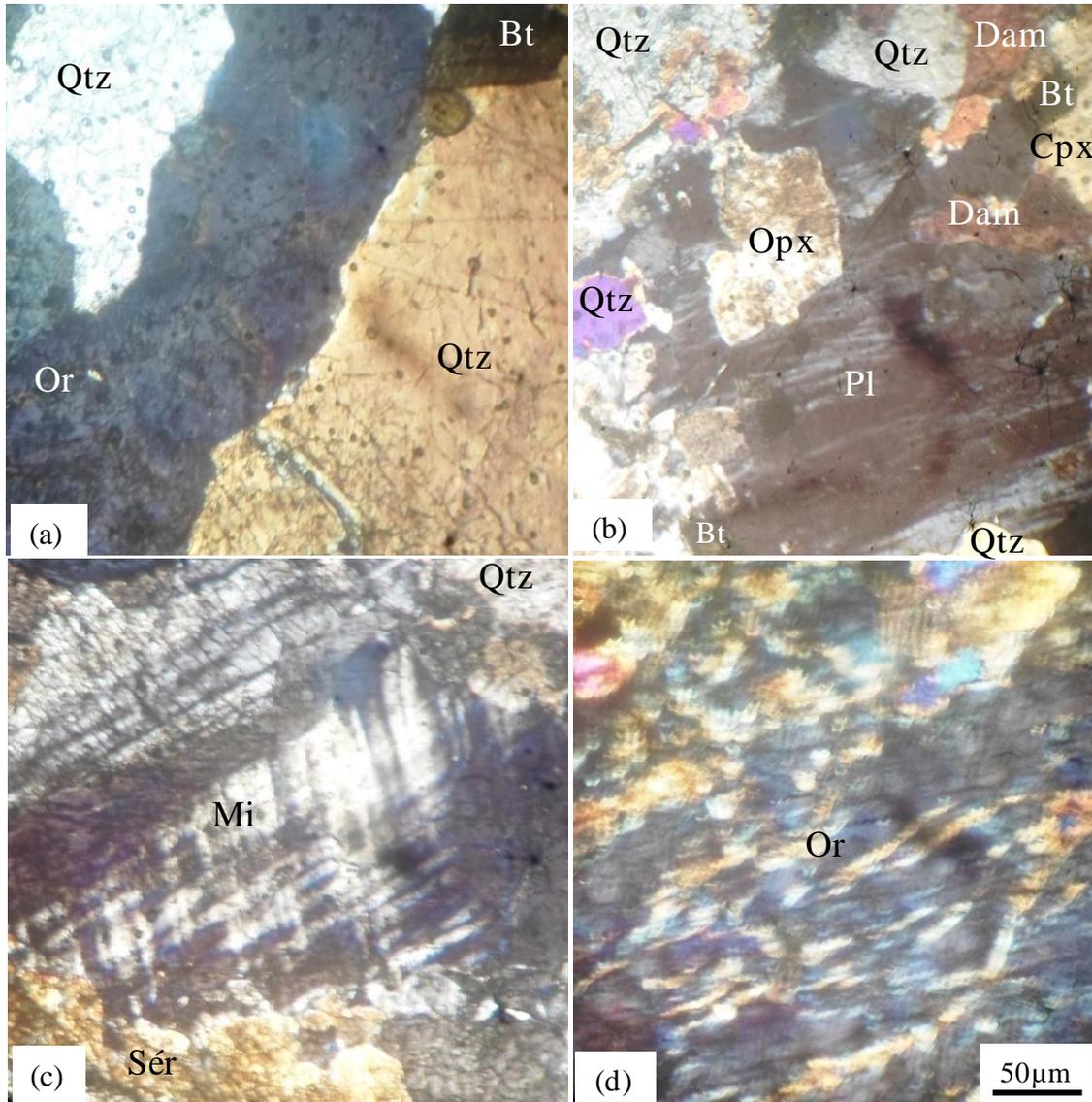
Les granites sont très siliceux avec des concentrations en  $\text{SiO}_2$  comprises entre 70 et 73% et riches en alcalins ( $7\% < \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} > 10\%$ ) (tableau 4). Les concentrations en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sont élevées, comprises entre 14 et 15% selon les échantillons (tableau 4). Les teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$  et  $\text{TiO}_2$  sont faibles (tableau 4). Le comportement du  $\text{P}_2\text{O}_5$  est proche de celui des éléments ferromagnésiens (tableau 4). La perte au feu varie de 0,59 à 1% (tableau 4).

Les rapports A/CNK varient entre 1,41 et 1,50 (tableau 4). Le diagramme  $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  (A/CNK) (Fig. 10) montre que les granites de Nyos sont peralumineux (A/CNK>1) et appartiennent aux granitoïdes de type S (A/CNK>1,1).

- **Corrélation entre éléments majeurs**

Les données sur les granites de Kitongo (Kouske et *al.*, 2012) y ont été associées, pour mettre en évidence les similitudes de comportement des éléments chimiques dans les granites de Nyos.

Les diagrammes de Harker établis entre  $\text{SiO}_2$  et les autres éléments majeurs montrent des petites corrélations négatives du  $\text{SiO}_2$  avec  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$  et  $\text{MnO}$  (Fig. 11a, b, c, h et g).  $\text{SiO}_2$  ne possède aucune corrélation avec,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{CaO}$  (Fig. 11d, e et f).



### **Légende**

(a) Cristal de quartz imbriqué dans un phénocrystal d'orthose.

(b) Orthopyroxène en inclusion dans le plagioclase.

(c) Microcline en cours d'altération hydrothermale.

(d) Séricitisation d'un phénocrystal d'orthose.

Qtz : quartz ; Or : orthose ; Pl : plagioclase ; Mi : microcline ; Bt : biotite ; Opx : orthopyroxène ; Cpx : clinopyroxène ; Sér : séricite ; Dam : damourite.

**Figure 9:** Microphotographie en lumière polarisés et analysée des granites de Nyos.

**Tableau 4:** Distribution des éléments majeurs (%) dans les granites à Nyos (L.d.=0,01%).

Eléments majeurs	Granites				
	LNY01	LNY02	LNY04	LNY05	LNY06
SiO <sub>2</sub>	70,64	71,01	70,93	72,92	70,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,77	14,09	14,93	13,35	14,36
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,03	2,52	2,14	2,14	2,29
MgO	0,57	0,47	0,38	0,35	0,41
K <sub>2</sub> O	4,62	4,77	5,36	4,29	5,03
Na <sub>2</sub> O	4,11	3,71	3,88	3,62	4,02
CaO	1,28	0,90	1,15	0,98	1,13
TiO <sub>2</sub>	0,45	0,37	0,32	0,34	0,34
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14	0,11	0,09	0,09	0,09
MnO	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
LOI	0,72	0,93	0,68	1,00	0,59
Total	100,37	98,91	99,87	99,11	98,79
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	8,73	8,48	9,24	7,91	9,05
A/CNK	1,47	1,50	1,47	1,50	1,41
a	4,09	3,39	2,85	2,86	3,07

LOI : Loss on ignition.

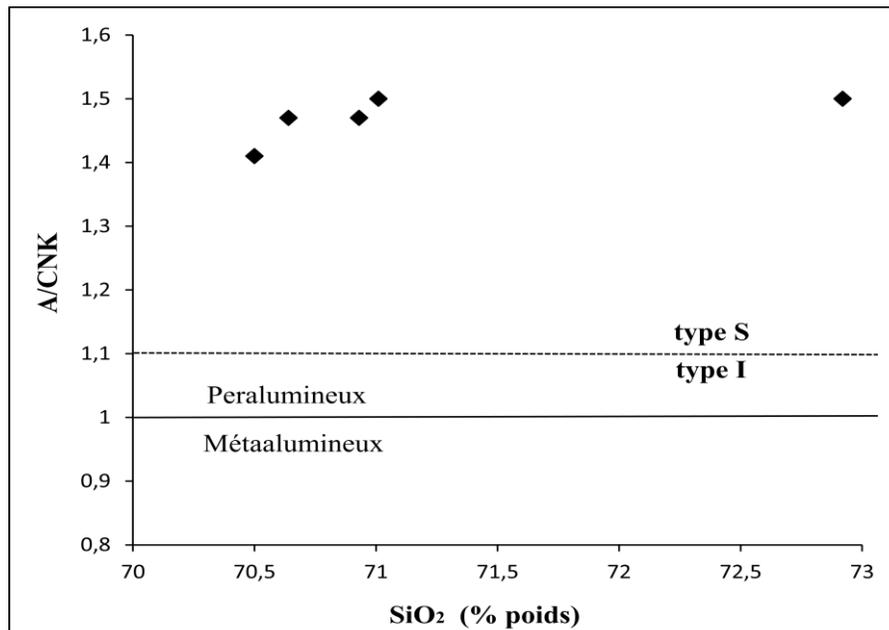
L.d.: Limite de détection.

$A/CNK = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$ .

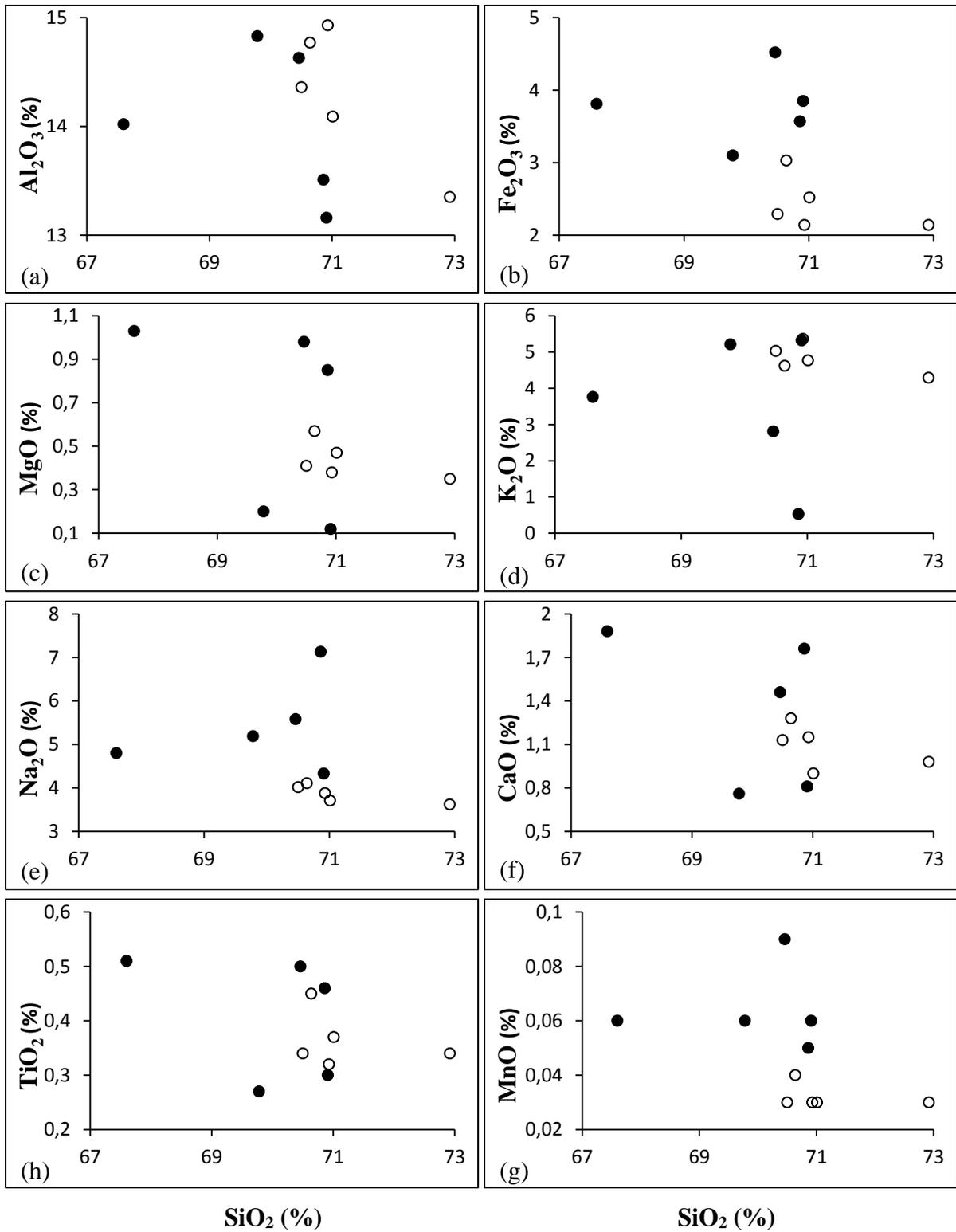
$a = Fe_2O_3 + MgO + MnO + TiO_2$ .

LNY04, LNY05, LNY06 : Données actuelles.

LNY01, LNY02 : Sababa (2008).



**Figure 10:** Diagramme de variation SiO<sub>2</sub>-A/CNK dans les granites à Nyos.



**Figure 11 :** Diagrammes de Harker des éléments majeurs des granites de Kitongo (cercles pleins, d'après Kouske *et al.*, 2012) et de Nyoos (cercle vides, données actuelles).

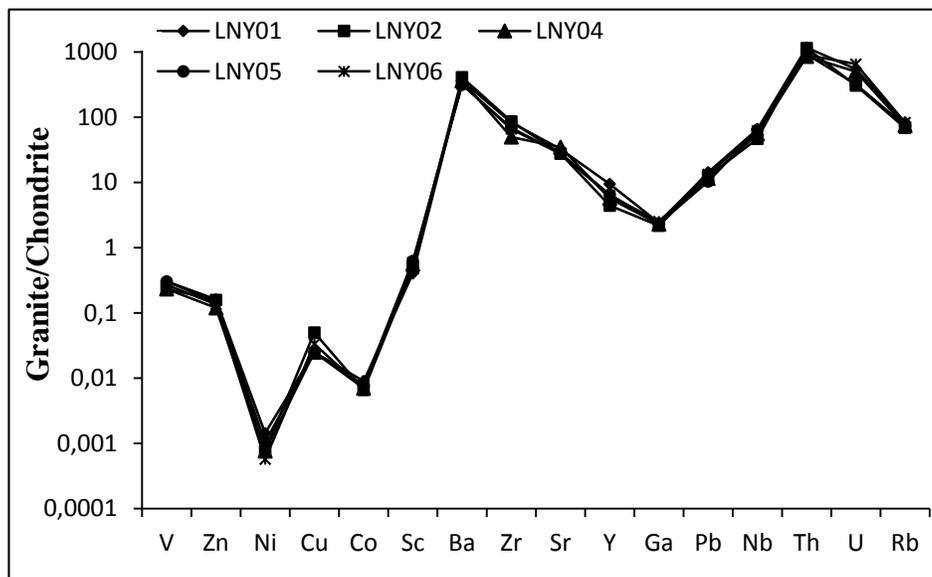
### I.2.2. Eléments traces

Les granites de Nyos présentent des teneurs élevées en Ba, Zr, Sr et Rb (tableau 5). Les concentrations en Ba varient entre 760 et 868 ppm, celles en Zr entre 189 et 329 ppm, celles en Sr entre 199 et 252 ppm, tandis que celles Rb oscillent entre 157 et 191 ppm. Les rapports Ba/Sr sont compris entre 3 et 5 avec des concentrations en baryum plus étendues que celles en strontium. Les teneurs en uranium varient de 2 à 4 ppm (tableau 5).

Les éléments à concentrations modérées sont le zinc (37-50 ppm), le lithium (17-35 ppm), le plomb (25-35 ppm), le thorium (24-34 ppm) et dans une moindre mesure le gallium (19-22 ppm) (tableau 5).

Le cobalt, Cr, V, Sc, Ni et Cu ont des teneurs faibles souvent inférieures à la limite de detection (tableau 5). Ceci est caractéristique des roches acides.

Les spectres (Fig. 12) normalisés des éléments traces par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995) des granites montrent globalement une allure assez uniforme et sont caractérisés par des anomalies positives en Cu, Ba et Th et négatives en Ni, Co et Ga. Cette homogénéité milite pour une origine plutonique ou magmatique commune.



**Figure 12** : Spectres élargis des éléments traces des granites de Nyos normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

- **Corrélations éléments majeurs-éléments traces**

Des diagrammes de corrélations entre les éléments traces à teneurs les plus élevées et SiO<sub>2</sub> d'une part (Fig. 13) et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> d'autre part ont été élaborés (Fig. 14).

**Tableau 5:** Distribution des éléments traces (ppm) dans les granites à Nyos.

Eléments traces	L.d.	Granites				
		LNy01	LNy02	LNy04	LNy05	LNy06
Cr	24,00	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
V	10,00	17,00	13,00	13,00	17,00	15,00
Zn	8,00	50,00	49,00	37,00	45,00	42,00
Ni	3,00	15,00	8,00	8,00	11,00	6,00
Cu	2,00	3,00	6,00	3,00	3,00	4,00
Co	0,10	4,50	3,30	3,50	3,90	3,40
Sc	0,01	2,40	2,90	3,30	3,70	3,50
Ba	0,90	868,30	985,40	870,50	760,10	765,70
Zr	3,00	317,00	329,00	189,00	262,00	252,00
Sr	2,00	235,00	201,00	252,00	202,00	199,00
Y	0,08	14,83	6,93	8,92	10,22	9,82
Li	0,02	17,40	32,00	24,20	24,2	34,40
Ga	0,05	22,09	19,96	21,14	21,59	23,12
Pb	0,40	35,30	31,00	28,50	25,60	32,90
Nb	0,04	15,73	11,20	13,29	15,21	14,84
Hf	0,09	8,62	8,19	5,14	6,60	6,68
Mo	0,03	0,84	2,49	0,96	0,69	0,90
Th	0,09	33,86	33,20	24,75	26,80	25,96
U	0,02	4,05	2,27	3,70	2,36	4,84
Ta	0,20	1,10	0,60	0,90	1,20	0,90
Be	0,06	3,88	2,83	3,60	3,83	4,06
Bi	0,01	0,09	0,10	0,09	0,17	0,11
Cd	0,01	0,07	0,08	0,05	0,06	0,06
Cs	0,01	3,17	1,50	2,75	3,27	3,46
Rb	0,20	191,40	157,60	171,60	171,10	190,30
Tl	0,01	1,18	0,92	0,96	0,95	1,07
Ba/Sr	-	3,69	4,90	3,45	3,76	3,85

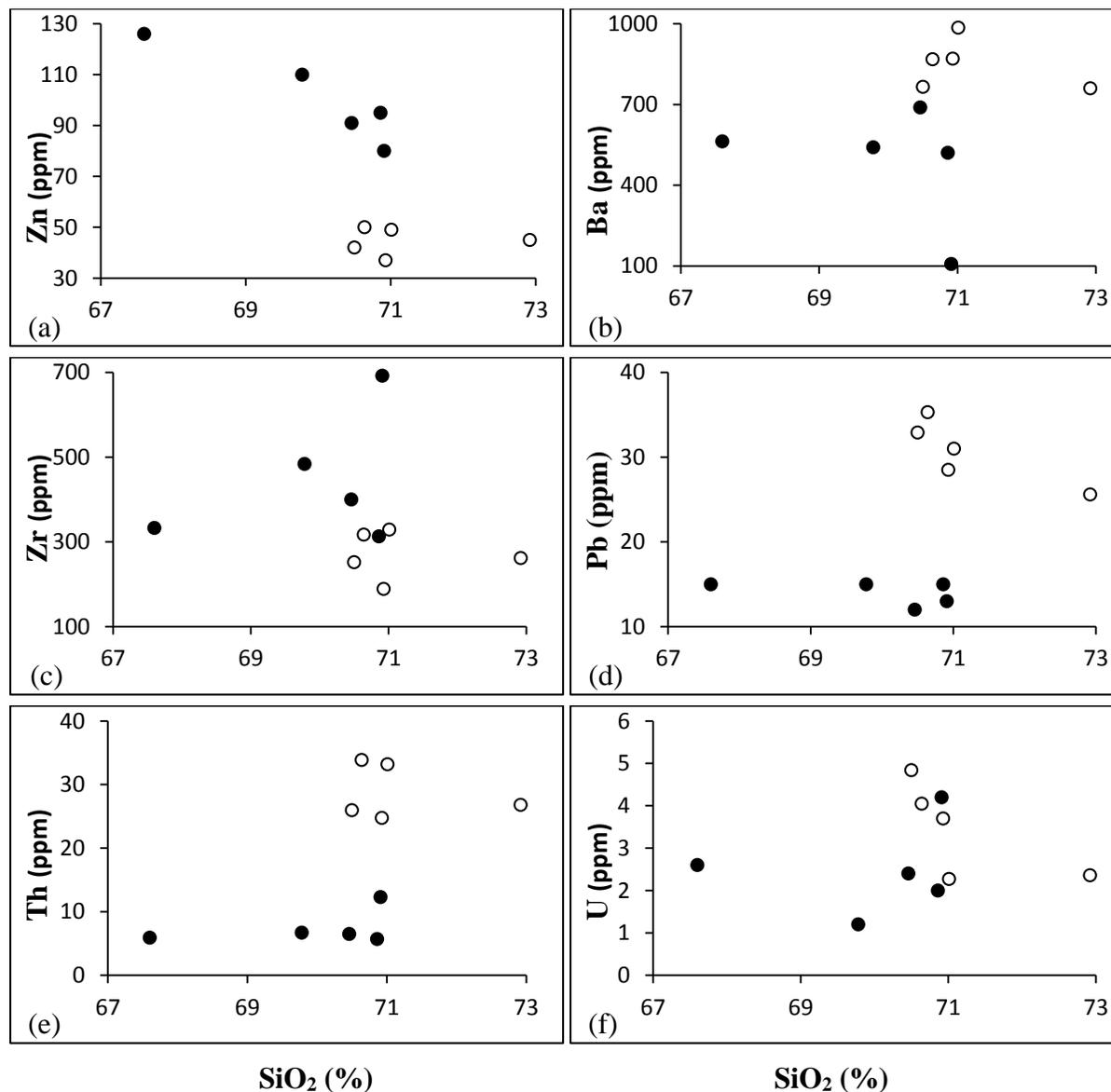
L.d.: Limite de détection.

LNy04, LNy05, LNy06 : Données actuelles.

LNy01, LNy02 : Sababa (2008).

- **Corrélations entre SiO<sub>2</sub> et certains éléments traces**

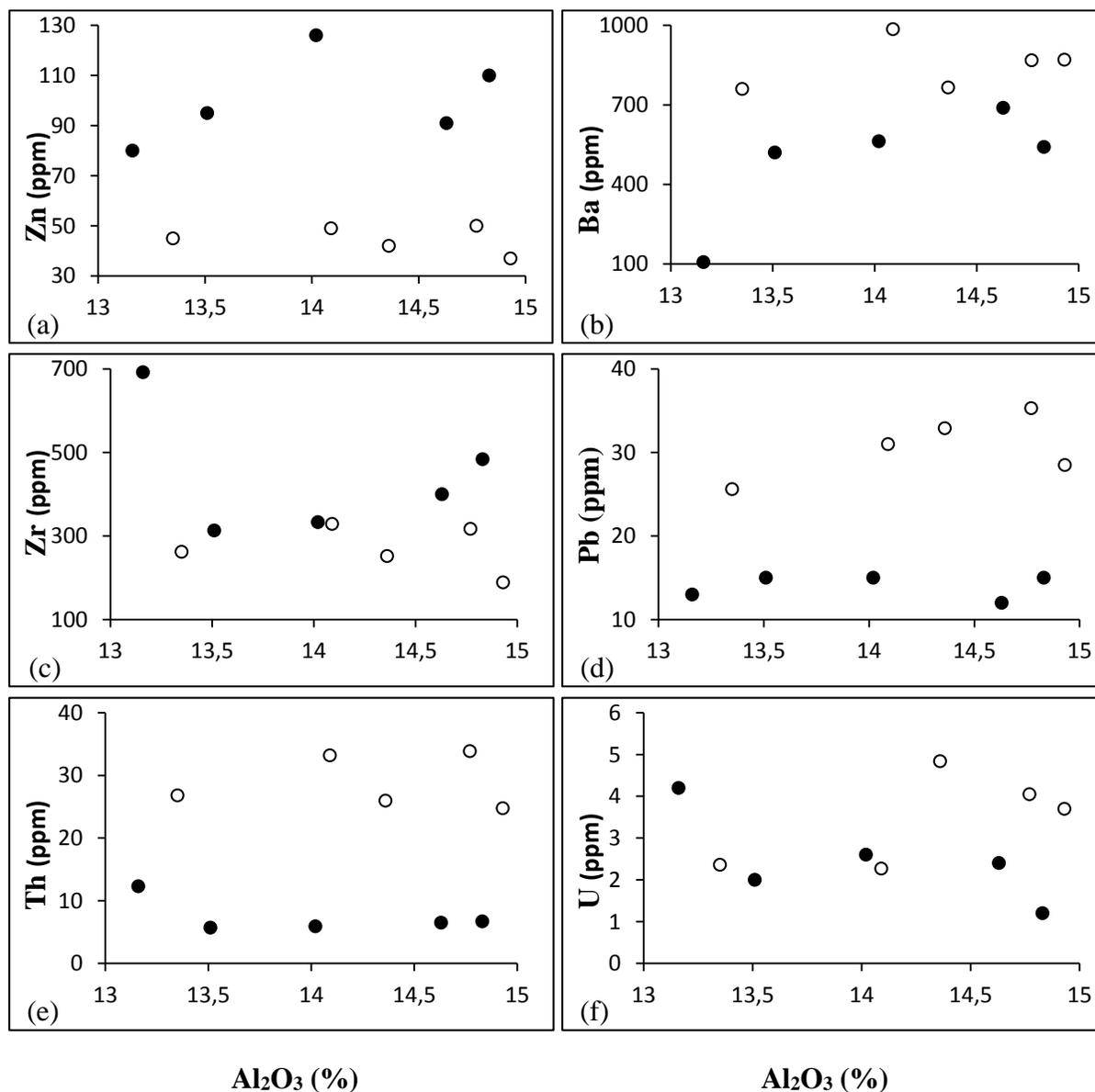
La silice possède des corrélations positives avec le baryum, Pb, U (Fig. 13b, d et f) et des corrélations négatives avec le zinc et Zn (Fig.13a et b). Par ailleurs, elle présente une corrélation nulle avec le thorium (Fig.13e).



**Figure 13 :** Corrélations entre certains éléments traces et le silicium dans les granites de Kitongo (cercles pleins, d'après Kouske et *al.*, 2012) et de Nyos (cercles vides, données actuelles).

- **Corrélations entre  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et certains éléments traces**

A l'exception du baryum qui possède une faible corrélation positive avec l'alumine (Fig. 14b), le zinc, Pb, Zr, Th et U (Fig. 14a, d, c, e et f) possèdent une corrélation nulle avec ce dernier.



**Figure 14 :** Corrélations entre certains éléments traces et l'aluminium dans les granites de Kitongo (cercles pleins, d'après Kouske et *al.*, 2012) et de Nyos (cercles vides, données actuelles).

### I.2.3. Terres rares

Les teneurs en terres rares dans les granites sont élevées et comprises entre 248 et 464 ppm (tableau 6). Les teneurs en LREE sont plus élevées que celles en HREE (LREE/HREE=20-32 ppm). Les rapports  $(La/Yb)_N$  sont élevés avec des valeurs comprises entre 50 et 154 (tableau 6).

Les granites de Nyos sont caractérisés par des anomalies négatives en europium ( $Eu/Eu^*=0,40-0,66$ ). Par contre, les anomalies en cérium sont positives dans certains échantillons ( $Ce/Ce^*=0,99-1,46$ ) (tableau 6). D'autre part, les échantillons présentant des indices de fractionnement  $((La/Yb)_N)$  plus élevées montrent des anomalies négatives en Eu les plus accentuées. Ainsi, la corrélation entre les rapports  $(La/Yb)_N$  et  $Ce/Ce^*$  est négative (Fig. 15).

**Tableau 6:** Teneurs en terres rares (ppm) dans les granites à Nyos.

Terres rares	L.d.	Granites				
		LNY01	LNY02	LNY04	LNY05	LNY06
La	0,09	104,43	116,94	59,37	61,65	67,02
Ce	0,01	178,80	223,50	128,40	156,60	131,80
Pr	0,02	18,20	22,20	11,02	10,91	11,94
Nd	0,08	58,76	70,77	36,26	34,48	39,03
Sm	0,02	7,89	7,77	4,99	4,98	5,16
Eu	0,01	1,15	0,86	0,89	0,77	0,83
Gd	0,02	5,16	4,35	3,36	3,41	3,40
Tb	0,01	0,67	0,50	0,43	0,48	0,45
Dy	0,02	2,80	1,50	1,90	2,20	2,00
Ho	0,01	0,48	0,24	0,33	0,37	0,34
Er	0,02	1,25	0,56	0,82	0,91	0,86
Tm	0,01	0,20	0,08	0,12	0,13	0,13
Yb	0,01	1,24	0,52	0,80	0,82	0,87
Lu	0,01	0,18	0,08	0,12	0,11	0,13
$\Sigma$ REE	-	381,20	463,37	248,81	277,83	263,97
LREE	-	369,23	442,04	240,93	269,39	255,79
HREE	-	11,97	21,33	7,89	8,44	8,18
LREE/HREE	-	30,84	20,73	30,54	31,93	31,26
$(La/Yb)_N$	-	57,35	153,20	50,41	51,19	52,27
$Ce/Ce^*$	-	0,99	1,06	1,21	1,46	1,13
$Eu/Eu^*$	-	0,55	0,45	0,66	0,56	0,64

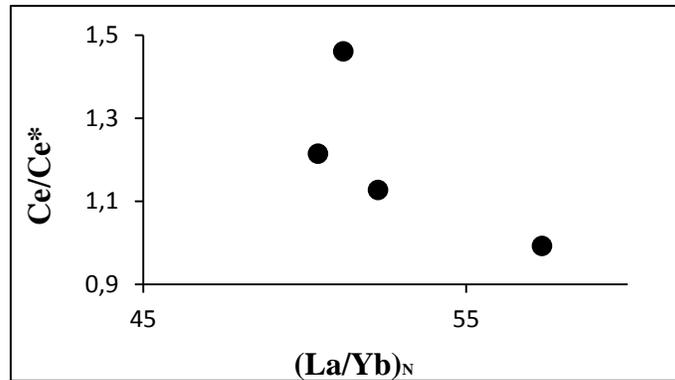
L.d.: Limite de détection.

$(La/Yb)_N : (La_{\text{échantillon}}/La_{\text{chondrite}})/(Yb_{\text{échantillon}}/Yb_{\text{chondrite}})$ .

$Ce/Ce^* : (Ce_{\text{échantillon}}/Ce_{\text{chondrite}})/(La_{\text{échantillon}}/La_{\text{chondrite}})^{1/2}(Pr_{\text{échantillon}}/Pr_{\text{chondrite}})^{1/2}$ .

$Eu/Eu^* : (Eu_{\text{échantillon}}/Eu_{\text{chondrite}})/(Sm_{\text{échantillon}}/Sm_{\text{chondrite}})^{1/2}(Gd_{\text{échantillon}}/Gd_{\text{chondrite}})^{1/2}$ .

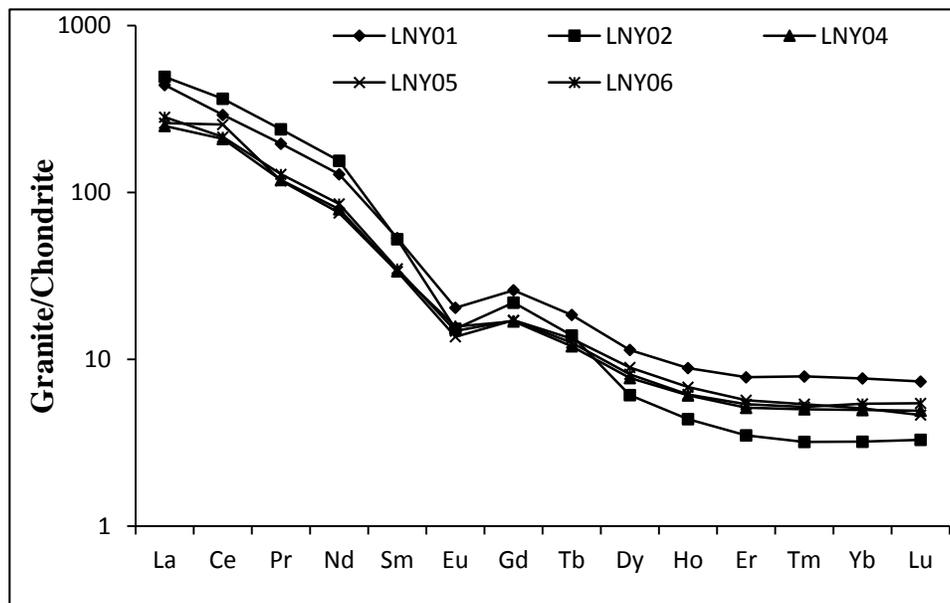
LNY01, LNY02 : Sababa (2008).



**Figure 15 :** Diagramme de variation  $(La/Yb)_N-Ce/Ce^*$  dans les granites à Nyos.

Les spectres normalisés des terres rares des granites par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995) indiquent (Fig. 16) :

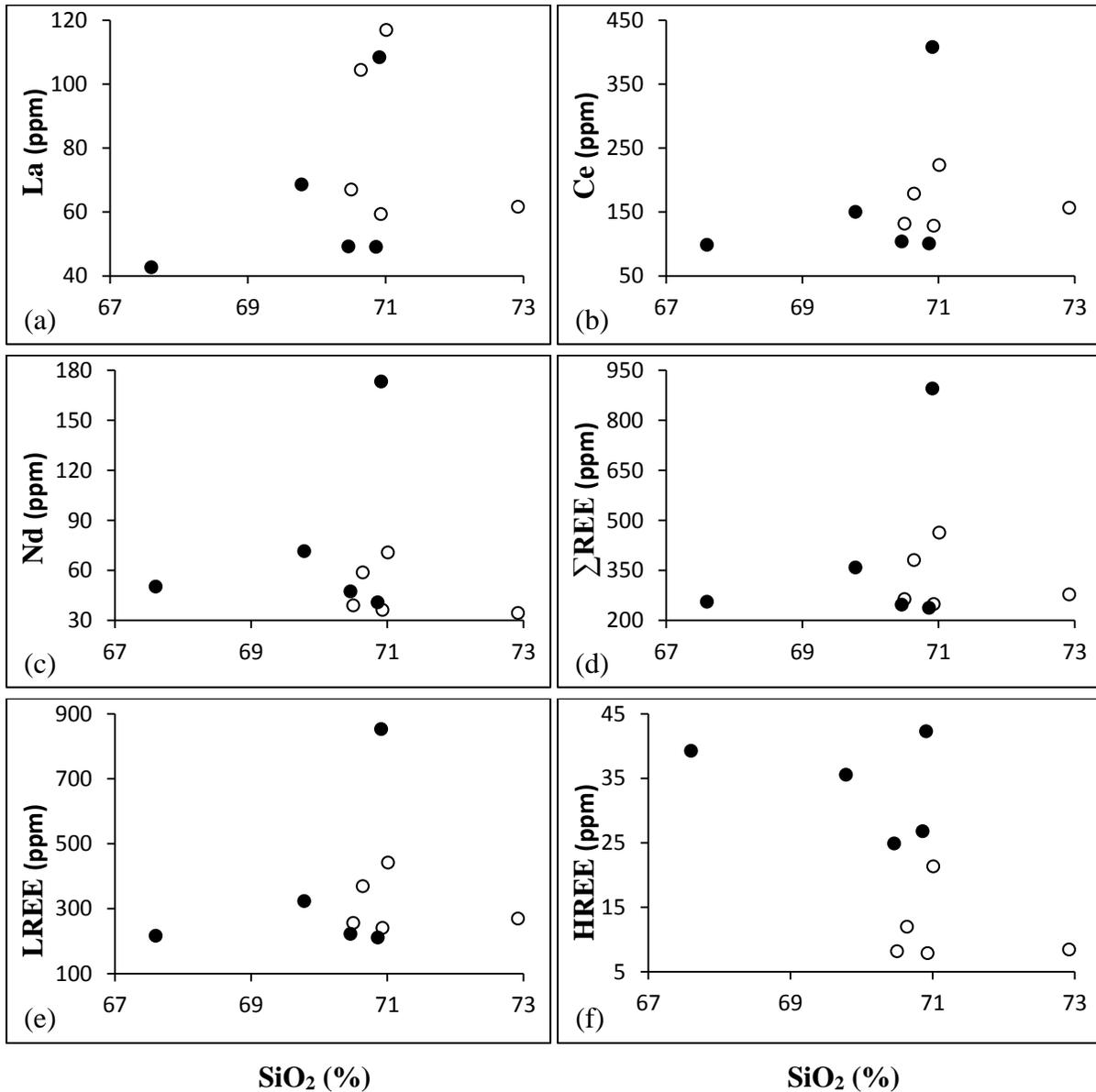
- (i) un fort enrichissement en terres rares légères de plus de 100 fois supérieur aux valeurs de la chondrite ;
- (ii) la présence d'anomalies négatives en europium ;
- (iii) la présence des petites anomalies en cérium dans certains échantillons ;
- (iv) des spectres parallèles et parfois confondus ;
- (v) que les indices de fractionnement sont à l'image des spectres.



**Figure 16 :** Spectres des terres rares des granites de Nyos normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

- **Corrélations entre les éléments majeurs et les terres rares**
- **Corrélations entre SiO<sub>2</sub> et les terres rares**

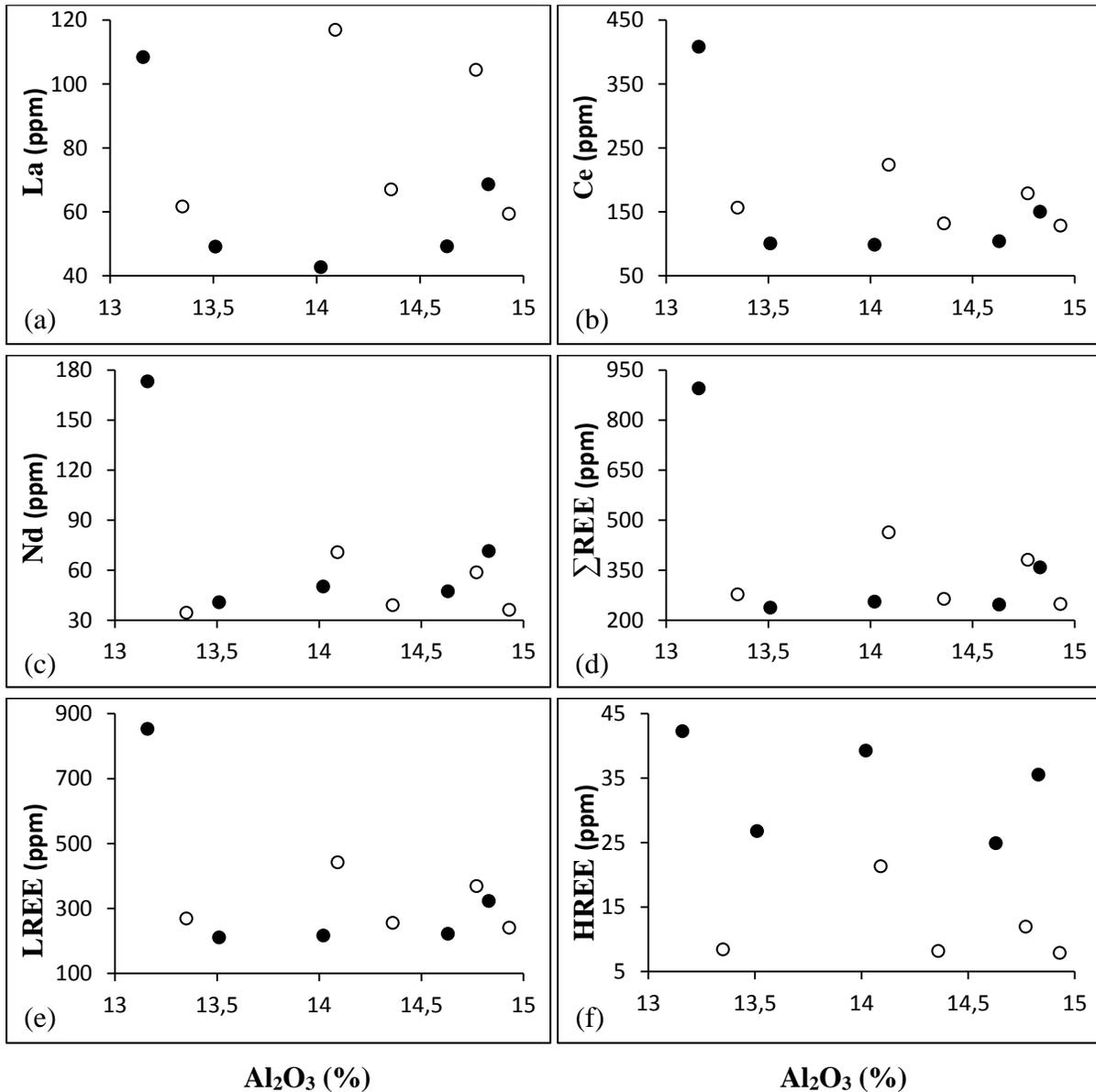
La silice possède une corrélation positive avec le lanthane, cérium,  $\Sigma$ REE et LREE (Fig. 17a, b, d et e). Par contre, il possède une corrélation négative avec HREE (Fig. 17f) et nulle avec le néodyme (Fig. 17c).



**Figure 17** : Corrélations entre les terres rares et le silicium dans les granites de Kitongo (cercles pleins, d'après Kouske et *al.*, 2012) et de Nyos (cercles vides, données actuelles).

- **Corrélations entre  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et les terres rares**

Les diagrammes binaires des terres rares par rapport à l'aluminium des granites de Nyos associés aux données de Kouske et *al.* (2012) montrent que le lanthane, Ce, Nd,  $\Sigma\text{REE}$ , LREE et HREE ne possèdent pas de corrélation avec  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Fig. 18).



**Figure 18 :** Corrélations entre les terres rares et l'aluminium dans les granites de Kitongo (cercles pleins, d'après Kouske et *al.*, 2012) et de Nyos (cercles vides, données actuelles).

#### I.2.4. Or et éléments du groupe du platine

Dans les granites, seuls les échantillons LNY01 et LNY02 ont des teneurs en or et éléments du groupe du platine supérieures à la limite de détection. Elles sont de 0,33 ppb pour l'or et 0,23 ppb pour le platine. Les autres échantillons ont des concentrations très proches ou inférieures à la limite de détection (tableau 7).

**Tableau 7:** Distribution des Au-EGP (ppb) dans les granites à Nyos.

Au-EGP	L.d.	Granites				
		LNY01	LNY02	LNY04	LNY05	LNY06
Au	0,22	0,33	0,24	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Ir	0,01	<l.d.	0,01	0,01	<l.d.	<l.d.
Pd	0,12	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Pt	0,17	0,23	0,20	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Rh	0,02	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Ru	0,08	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.

L.d.: Limite de détection.

LNY04, LNY05, LNY06 : Données actuelles.

LNY01, LNY02 : Sababa (2008).

## CONCLUSION

Les enclaves de granites de Nyos sont constituées de quartz, feldspath et biotite. Elles sont acides et peralumineux avec des concentrations élevées en une large gamme d'éléments traces. Les teneurs en éléments de transition sont faibles. Par ailleurs, ces granites ont des concentrations élevées en terres rares. Les rapports LREE/HREE sont supérieurs à 1 avec des anomalies négatives en Eu et positives en Ce. Les teneurs en Au-EGP sont faibles.

***CHAPITRE IV : PETROGRAPHIE, MINERALOGIE  
ET DISTRIBUTION DES ELEMENTS MAJEURS  
DANS LES PERIDOTITES ET LEURS PRODUITS  
D'ALTERATION***

## INTRODUCTION

Ce chapitre est axé sur l'étude pétrographique et minéralogique des péridotites de Nyos et de Kumba. La géochimie se limite au comportement des éléments majeurs.

## I. PETROGRAPHIE ET MINERALOGIE

### I.1. Péridotites

#### I.1.1. Site de Nyos

Dans les maars de Nyos, les enclaves de péridotites se distinguent par la variabilité de la forme, de la taille et de la couleur (vert-clair à vert-foncé). Elles apparaissent sous forme de blocs angulaires, et occupent souvent le cœur des bombes en choux-fleur parfois fragmentées. Leurs dimensions peuvent atteindre une trentaine de centimètres dans les dépôts de projections phréato-magmatiques. Ce sont des roches denses et friables (Fig. 19). Les xénolites se rencontrent également dans les coulées de lave intercalées dans les brèches pyroclastiques stratifiées, mais en quantité nettement subordonnée et de plus petite taille.



**Figure 19** : Prélèvement des enclaves de péridotites vert-clair à Nyos.

L'étude des péridotites au microscope optique montre qu'elles ont une texture porphyroclastique à protogranulaire. Les phases minérales identifiées sont olivine, pyroxènes et spinelles. Les marques de déformations et de fusion sont fréquentes : écrasement des minéraux

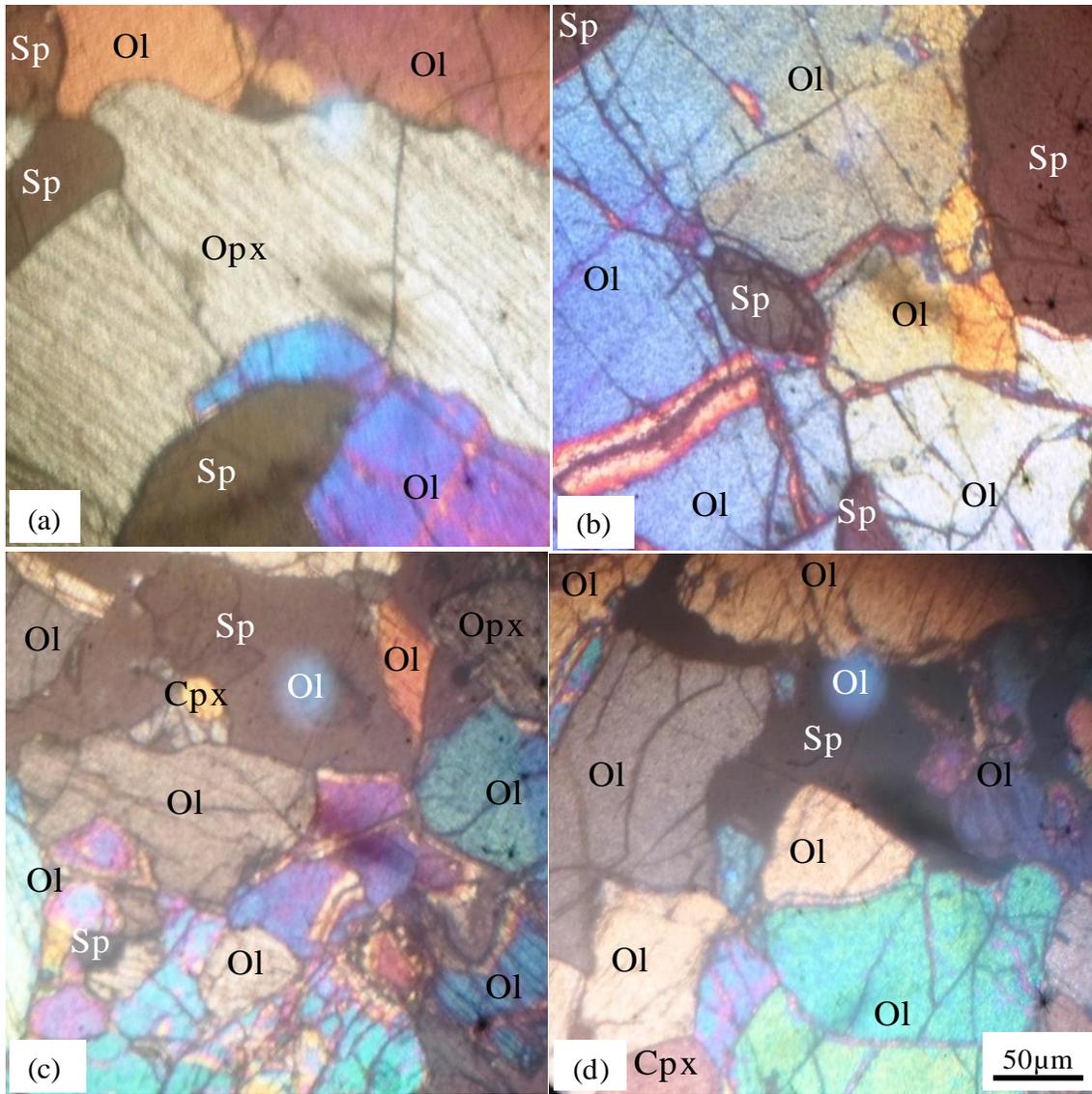
d'olivine, phénomènes de recristallisation à l'intérieur des fractures ou autour des cristaux de grande taille, des craquelures et des clivages épais parfois bourrés par des néoprécipitations.

L'olivine est le minéral le plus abondant avec des proportions variables (60-85% du volume de la roche). La forme est également variable et liée à la taille du minéral. Les cristaux dont la taille est comprise entre 1 et 2mm sont xénomorphes (Fig. 20b) tandis que ceux dont la taille est inférieure à 1mm sont arrondis et sub-automorphes (Fig. 20d). Il y a deux générations d'olivine : l'olivine primitive (la plus abondante) et l'olivine secondaire issue de la reprécipitation à partir des liquides de fusion. Cette dernière est très peu représentée ; elles sont en inclusion dans les cristaux d'olivine de grande taille ou de pyroxène, en lisérés dans les cassures (Fig. 20b), en excroissance ou auréole autour des minéraux primitifs (Fig. 20c). Certains cristaux d'olivine ont des craquelures épaisses bourrées par des inclusions minérales (Fig. 20b).

Les pyroxènes sont surtout l'orthopyroxène et rarement le clinopyroxène. Ils ont des proportions très variables (10-25%). Ils sont soit de petite taille, sub-arrondis, isolés ou piégés dans l'olivine ou les spinelles (Fig. 20c), soit en larges cristaux (Fig. 20a) souvent très allongés dans lesquels on peut retrouver des inclusions d'olivine. Certains minéraux sont parcourus par des cassures occupées par de l'olivine néoprécipitée. Les clivages sont parfois épais et discontinus (Fig. 20a). Les cristaux sont souvent étirés avec par endroits de larges cristaux couronnés d'olivine. La taille du minéral est variable mais très voisine de celle de l'olivine.

Les spinelles sont rares. La couleur est caractéristique de la chromite (brune). Ils sont constitués de cristaux arrondis coincés dans les phénocristaux d'olivine fragmentés (Fig. 20b et c) ou en feuilles déchiquetées remplissant les vides entre les cristaux d'olivine (Fig. 20c et d). Quelques inclusions d'olivine y sont relevées (Fig. 20c et d).

L'étude des diffractogrammes de rayons X montre qu'elles contiennent également du chlorite. Elle révèle aussi que certaines spinelles sont de la magnétite. Dans l'échantillon LNY22, les spinelles sont essentiellement constituées de la magnétite (Fig. 21).



**Légende**

(a) Texture protogranulaire montrant un phénocristal d’orthopyroxène dans lequel les cristaux d’olivine et de spinelle sont imbriqués.

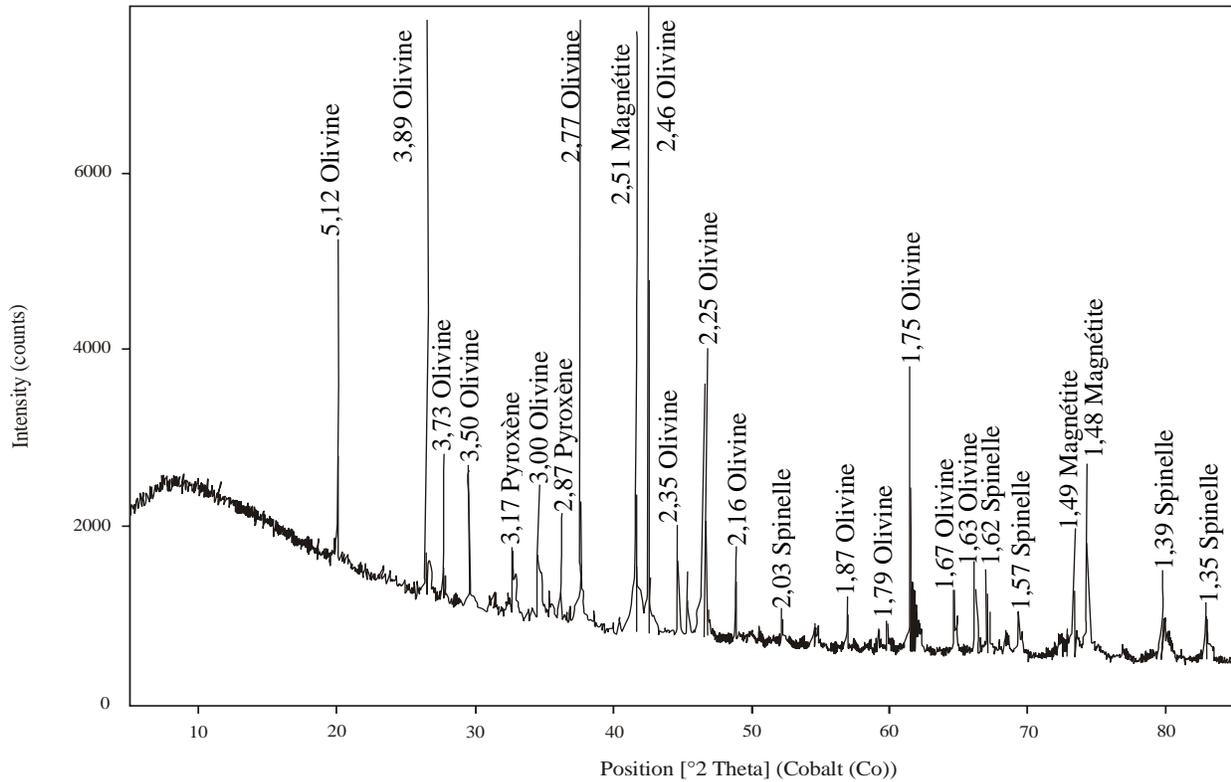
(b) Texture porphyroclastique avec une inclusion de spinelle dans l’olivine déformée et présentant des recristallisations.

(c) Texture porphyroclastique avec beaucoup des microcristaux d’olivines issus de la déformation. Le spinelle porte des inclusions d’olivine et de clinopyroxène.

(d) Texture protogranulaire. Le liséré de spinelle forme un ciment entre les cristaux d’olivine.

Ol : olivine ; Opx : orthopyroxène ; Cpx : clinopyroxène ; Sp : spinelle.

**Figure 20 :** Microphotographie en lumière polarisée et analysée des péridotites de Nyos.



**Figure 21** : Diffractogramme de rayons X des péridotites de Nyo (LNY22).

### I.1.2. Site de Kumba

Les enclaves de péridotites de Kumba sont de très petite taille et intimement liées à leur encaissant basaltique (Fig. 22). Elles sont denses, très peu friables et de couleur vert-clair principalement. Elles sont incrustées dans les coulées volcaniques (LKU04 et LKU10) ou dans les dépôts sédimentaires (LKU07 et LKU12). L'échantillon LKU10 est une péridotite moulé par le basalte enfoui dans des matériaux d'altération. Les dépôts sédimentaires sont des brèches constituées de matériaux très anguleux de taille centimétrique. Ces matériaux sont pour la plupart de nature basaltique avec quelques fragments de quartzites, grès et gneiss dispersés dans l'ensemble.

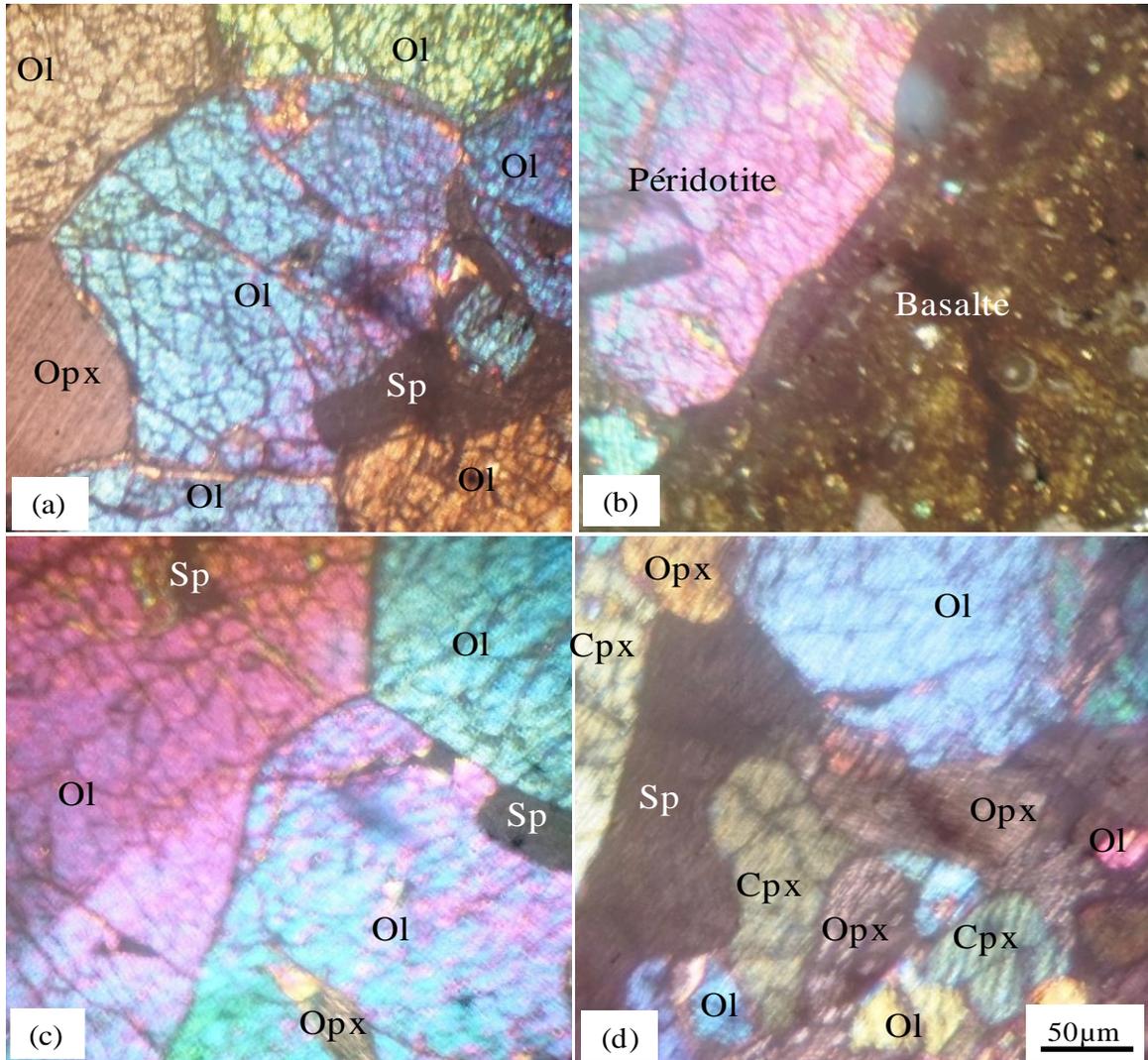
Les péridotites sont vert-clairs et constituées de grains distincts les uns des autres dont la taille ne dépasse pas 2 mm de diamètre. Au microscope optique, elles ont une texture beaucoup plus protogranulaire. Elles sont constituées d'olivine, pyroxènes et spinelles. On relève des minéraux orientés et des cristaux d'olivine légèrement écrasés.



**Figure 22 :** Enclave de péridotites de Kumba moulée par son encaissant.

L'olivine est le minéral le plus abondant (60-80% du volume de la roche). Les macrocristaux dont la taille peut atteindre 2 mm sont xénomorphes parfois très allongés et très craquelés (Fig. 23c). On y rencontre des inclusions de pyroxènes et de spinelles. Les craquelures sont rarement bourrées d'oxydes opaques. Les cristaux dont la taille varie entre 0,5 et 1mm ont une forme arrondie et rarement automorphe avec de fréquentes cassures de déformations (Fig. 23a). Les microcristaux (<0,5 mm) sont moins abondants et automorphes ou arrondis, quelques fois en inclusion dans les pyroxènes. Les minéraux d'olivine en contact avec le basalte sont allongés et orientés (Fig. 23b).

Les pyroxènes sont majoritairement constitués d'orthopyroxène (Fig. 23a) accompagné de clinopyroxène de taille plus réduite (Fig. 23d). Ils représentent 15 à 35% du volume de la roche. Certains cristaux présentent des macles en sabliers caractéristiques de l'augite (Fig. 23c). En général, la taille est inférieure à celle de l'olivine et avec des cassures. Les bordures arrondies ou rectilignes forment des contacts intimes avec l'olivine. Les cristaux de taille moyenne sont localisés et forment des amas avec des microcristaux d'olivine (Fig. 23d). Les microcristaux sont coincés entre les cristaux d'olivine ou en agrégats.



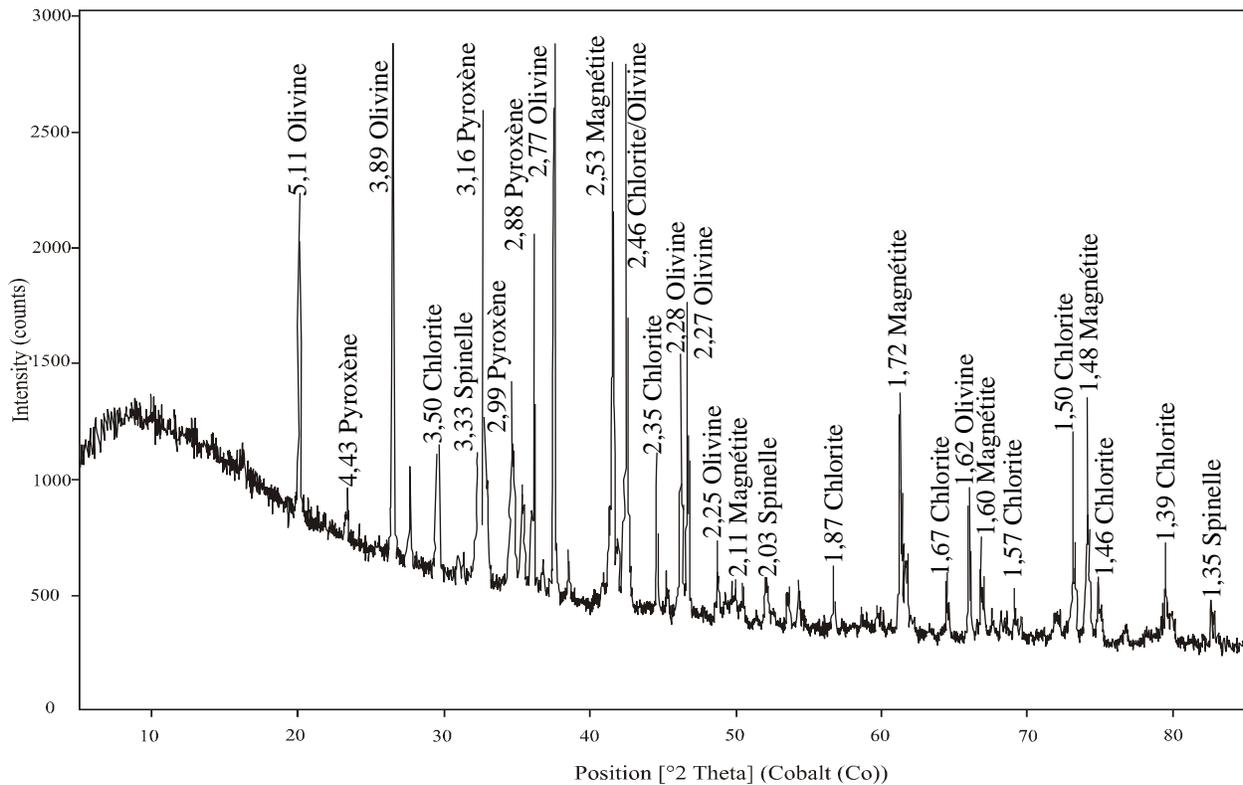
**Légende**

- (a) Texture protogranulaire avec des joints espacés. Les craquelures des cristaux d'olivine porte des recristallisation de spinelle.
- (b) Plaque montrant le contact très intime entre les enclaves de péridotites et leur encaissant basaltique (voir Fig. 22).
- (c) Texture protogranulaire avec des joints serrés et des microcristaux d'orthopyroxène et de spinelle en inclusion dans l'olivine.
- (d) Texture protogranulaire. Cette texture est également proche de la texture porphyroclastique.
- Ol : olivine ; Opx : orthopyroxène ; Cpx : clinopyroxène ; Sp : spinelle.

**Figure 23 :** Microphotographie en lumière polarisée et analysée des péridotites de Kumba.

Les spinelles sont peu abondantes et représentent environ 5% de la roche. Il s'agit de la chromite brune (Fig. 23a) ou hercynite chromifère brun-vert (Fig. 23d). L'automorphisme est masqué par des prolongements en feuilles déchiquetées qui forment souvent des couronnes autour de l'olivine (Fig. 23a). Les grains de petite taille sont automorphes et rencontrés en inclusions dans les autres phases minérales.

L'étude des diffractogrammes de rayons X montre que la composition minéralogique est en plus faite de chlorite de façon significative et de la magnétite dans la famille des spinelles (Fig. 24).



**Figure 24 :** Diffractogramme de rayons X des péridotites de Kumba (LKU12).

## I.2. Péridotites altérées

### I.2.1. Site de Nyos

Les péridotites de Nyos sont très peu altérées mais très friables montrant une altération centripète (Fig. 25). Les couleurs originelles des péridotites (vert-clair à vert-foncé) cèdent

progressivement la place aux couleurs rougeâtres ou jaunâtres caractéristiques de l'altération supergène. Les cristaux d'olivine y sont encore reconnaissables.

L'étude des diffractogrammes de rayons X révèle une prédominance des minéraux primaires (olivine, pyroxène et spinelle) et du chlorite (Fig. 26). La magnétite est très peu représentée.



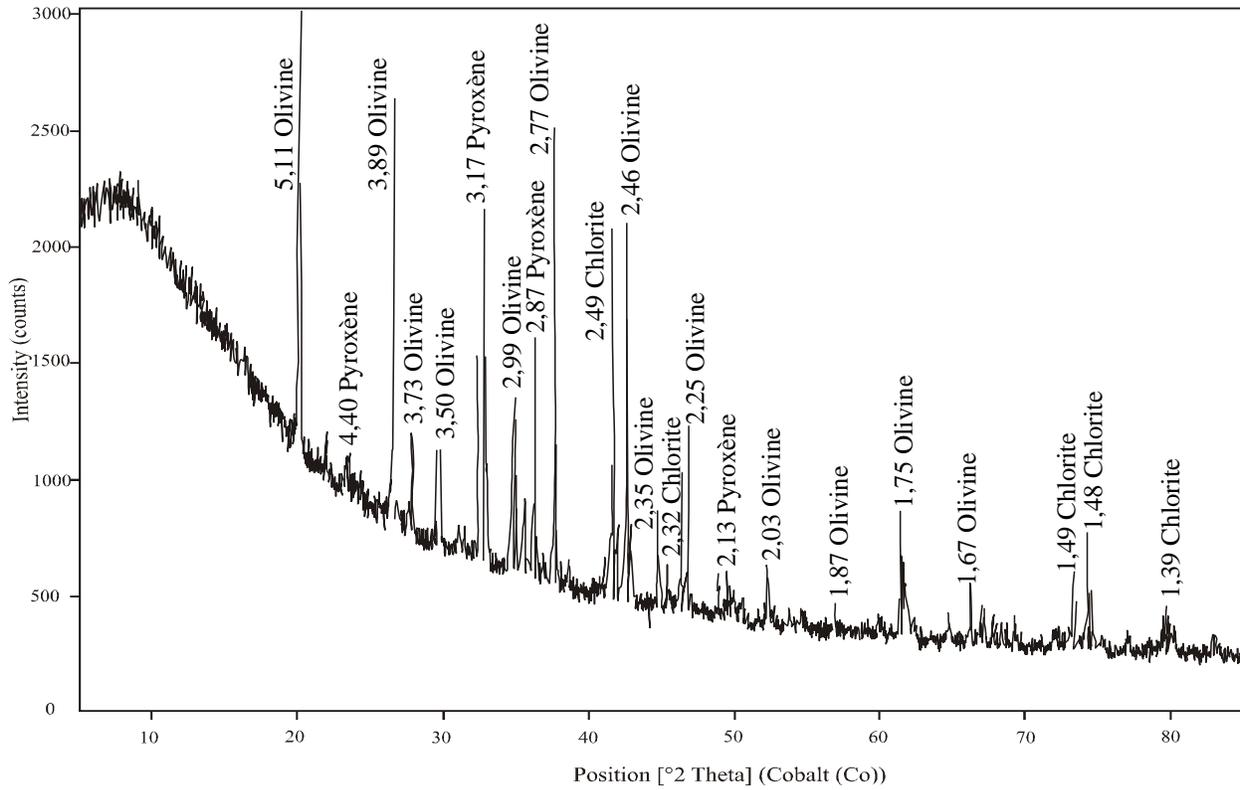
**Figure 25 :** Enclave de péridotites montrant une altération centripète à Nyos.

### **I.2.2. Site de Kumba**

Le long de la tranchée routière qui mène au lac Mbarombi Mbo, on peut observer des enclaves à différents degrés d'altération (LKU06, LKU08, LKU09 et LKU11). L'olivine encore identifiable est rose, jaune ou rouge.

Les échantillons fortement altérés sont de couleur sombre (LKU02, LKU03 et LKU05). Mais les cristaux d'olivine y sont encore identifiables avec de taille pouvant atteindre 2 mm (Fig. 27). Ce sont des formations poreuses dont la porosité est accentuée par les phénomènes de lessivages.

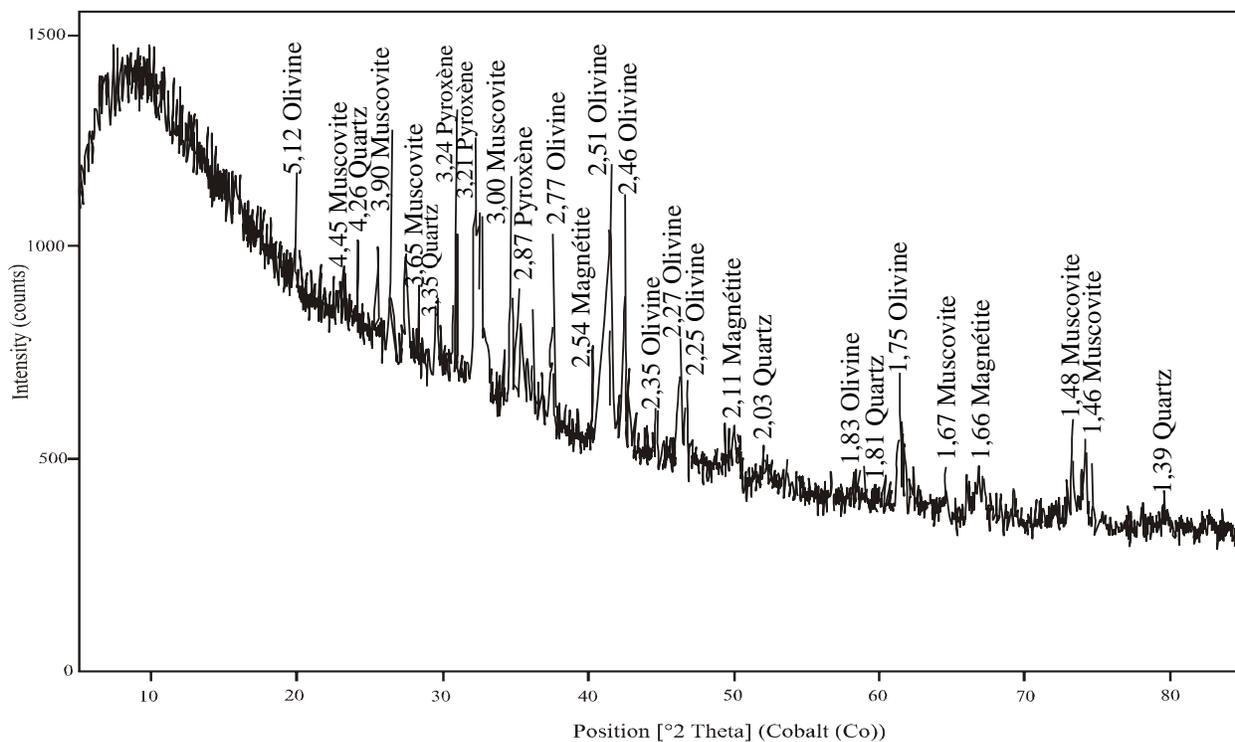
L'examen des diffractogrammes de rayons X confirme la présence des minéraux primaires (olivine, pyroxènes et magnétite) (Fig. 28) et des minéraux secondaires représentés par le quartz, muscovite, smectite et hématite.



**Figure 26 :** Diffractogramme de rayons X des péridotites altérées de Nyo (LNY10).



**Figure 27 :** Echantillon de péridotites altérées à Kumba.



**Figure 28** : Diffractogramme de rayons X des péridotites altérées de Kumba (LKU02).

## II. GEOCHIMIE DES ELEMENTS MAJEURS

### II.1. Péridotites

#### II.1.1. Site de Nyos

Les péridotites de Nyos présentent des teneurs élevées en  $\text{SiO}_2$  (41-45%) et  $\text{MgO}$  (40-48%) et modérées en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (8-9%) (tableau 8). L'alumine et  $\text{CaO}$  ont aussi des concentrations considérables. Les teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  varient de 0,75 à 3,36% et celles en  $\text{CaO}$  de 0,63 à 3%. Les teneurs en  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  et  $\text{MnO}$  sont faibles (tableau 8). Les concentrations en  $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{K}_2\text{O}$  sont très proches de la limite de détection. La perte au feu est inférieure à la limite de détection (tableau 8).

Les teneurs en  $\text{SiO}_2$  sont proches de celles en  $\text{MgO}$  ( $\text{SiO}_2/\text{MgO} \sim 1$ ). Les rapports  $\text{MgO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$  sont supérieurs à 4. La somme  $\text{MgO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$  oscille entre 49 et 57% (tableau 8) et est supérieure à la teneur en silice ( $\text{SiO}_2/\text{MgO}+\text{Fe}_2\text{O}_3 < 1$ ).

## II.1.2. Site de Kumba

Les péridotites de Kumba possèdent des teneurs en silice qui varient très peu, entre 43 et 45% (tableau 9). MgO et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> possèdent des concentrations élevées alors que les concentrations en TiO<sub>2</sub> et MnO sont très faibles (tableau 9). Les teneurs en MnO varient très peu (0,13-0,15%) alors que celles en TiO<sub>2</sub> sont très variables (0,02-0,59%). Les teneurs en CaO varient entre 0,7 et 3,41% (tableau 9). L'alumine a des teneurs faibles et variant entre 1,12 et 5,11%. La perte au feu est inférieure à la limite de détection dans l'échantillon LKU12 et comprise entre 0,17 et 0,84% dans les autres échantillons (tableau 9).

Ainsi, le fer est 5 à 6 fois moins abondant que le magnésium. La somme MgO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se situe entre 44 et 55%. Les rapports SiO<sub>2</sub>/MgO oscillent entre 0,96 et 1,34 (tableau 9). Les teneurs en alcalins sont faibles ; la somme Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O n'atteint pas l'unité. Le potassium est l'élément alcalin le moins représenté.

**Tableau 8:** Distribution des éléments majeurs (%) dans les péridotites à Nyos.

Eléments majeurs	L.d.	Péridotites					
		LNY03	LNY09	LNY16	LNY18	LNY20	LNY22
SiO <sub>2</sub>	0,04	43,60	44,39	44,21	44,26	43,85	41,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	2,26	3,07	3,36	2,92	3,15	0,75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	8,56	8,97	9,02	8,91	9,04	9,05
MgO	0,01	42,28	40,74	40,18	41,16	41,32	47,40
K <sub>2</sub> O	0,01	0,03	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0,01	0,01
Na <sub>2</sub> O	0,02	0,22	0,19	0,21	0,15	0,20	<l.d.
CaO	0,01	2,23	2,81	3,01	2,65	2,66	0,63
TiO <sub>2</sub>	0,01	0,06	0,13	0,13	0,05	0,13	0,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01	0,06	0,01	0,01	0,05	0,01	0,02
MnO	0,01	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
LOI	0,05	0,12	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Total	-	99,84	100,44	100,26	100,28	100,50	99,85
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	-	0,25	0,19	0,21	0,15	0,21	0,01
MgO+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	50,84	49,71	49,20	50,07	50,36	56,45
MgO/Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	4,94	4,54	4,45	4,62	4,57	5,24
SiO <sub>2</sub> /MgO	-	1,03	1,09	1,10	1,08	1,06	0,88
SiO <sub>2</sub> /MgO+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,86	0,89	0,90	0,88	0,88	0,74

L.d. : Limite de détection.

LOI : Loss on ignition.

LNY03 : Sababa (2008).

## II.2. Péridotites altérées

### II.2.1. Site de Nyos

Les péridotites altérées ont des teneurs élevées en silice (42-45%) et MgO (40-47%) (tableau 10). Le fer a également des teneurs significatives ; elles sont entre 8 et 9% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Les teneurs en éléments alcalins sont faibles dans les péridotites altérées de Nyos. Elles sont pour la plus part inférieures à la limite de détection (tableau 10). Les concentrations en alumine et CaO sont supérieures à l'unité ; elles varient entre 1 et 4% en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et entre 1 et 3% en CaO. La perte au feu est inférieure à la limite de détection (tableau 10).

Comme dans les péridotites non altérées, le magnésium est 4 à 5 fois plus enrichi que le fer. SiO<sub>2</sub> et MgO ont un comportement similaire. Le fer et le magnésium représentent un peu plus de la moitié des éléments majeurs (tableau 10).

**Tableau 9:** Distribution des éléments majeurs (%) dans les péridotites à Kumba.

Eléments majeurs	L.d.	Péridotites			
		LKU04	LKU07	LKU10	LKU12
SiO <sub>2</sub>	0,04	44,99	43,63	45,29	44,90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	2,98	1,12	5,11	3,60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	8,88	9,23	10,06	9,20
MgO	0,01	40,35	45,36	33,92	39,39
K <sub>2</sub> O	0,01	0,06	0,02	0,19	0,04
Na <sub>2</sub> O	0,02	0,21	0,02	0,62	0,30
CaO	0,01	2,32	0,70	3,41	2,90
TiO <sub>2</sub>	0,01	0,02	0,04	0,59	0,20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01	0,05	0,01	0,22	0,02
MnO	0,01	0,13	0,13	0,15	0,14
LOI	0,05	0,51	0,17	0,84	<0,05
Total	-	100,50	100,43	100,40	100,69
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	-	0,27	0,04	0,81	0,34
MgO+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	49,23	54,59	43,98	43,59
MgO/Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	4,54	4,91	3,37	4,28
SiO <sub>2</sub> /MgO	-	1,11	0,96	1,34	1,14
SiO <sub>2</sub> /MgO+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,91	0,80	1,03	0,92

L.d. : Limite de détection.

LOI : Loss on ignition.

**Tableau 10:** Distribution des éléments majeurs (%) dans les péridotites altérées à Nyos.

Eléments majeurs	L.d.	Péridotites altérés							
		LNy08	LNy10	LNy11	LNy12	LNy13	LNy17	LNy19	LNy24
SiO <sub>2</sub>	0,04	44,36	44,16	44,10	42,31	43,86	43,44	43,32	44,39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	3,01	3,78	1,87	1,48	2,87	1,76	1,32	2,16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	8,60	8,37	8,72	9,45	8,61	9,23	9,48	8,53
MgO	0,01	40,57	40,10	43,61	46,24	41,33	44,22	45,27	43,01
K <sub>2</sub> O	0,01	<l.d.	0,01	0,01	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0,03
Na <sub>2</sub> O	0,02	0,18	0,24	<l.d.	<l.d.	0,19	0,03	0,03	0,06
CaO	0,01	2,70	3,17	1,40	0,76	2,61	1,16	0,85	1,18
TiO <sub>2</sub>	0,01	0,09	0,15	0,02	0,04	0,08	0,05	0,03	0,07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01	0,01	0,01	<l.d.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
MnO	0,01	0,13	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
LOI	0,05	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Total	-	96,65	100,11	99,86	100,42	99,69	100,03	100,44	99,57
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	-	0,18	0,25	0,01	<l.d.	0,19	0,03	0,03	0,06
MgO+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	49,17	48,47	52,33	55,69	49,94	53,45	54,75	51,54
MgO/Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	4,72	4,79	5,00	4,89	4,80	4,79	4,78	5,04
SiO <sub>2</sub> /MgO	-	1,09	1,10	1,01	0,92	1,06	0,98	0,96	1,03
SiO <sub>2</sub> /MgO+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,90	0,91	0,84	0,76	0,88	0,81	0,79	0,86

L.d. : Limite de detection.

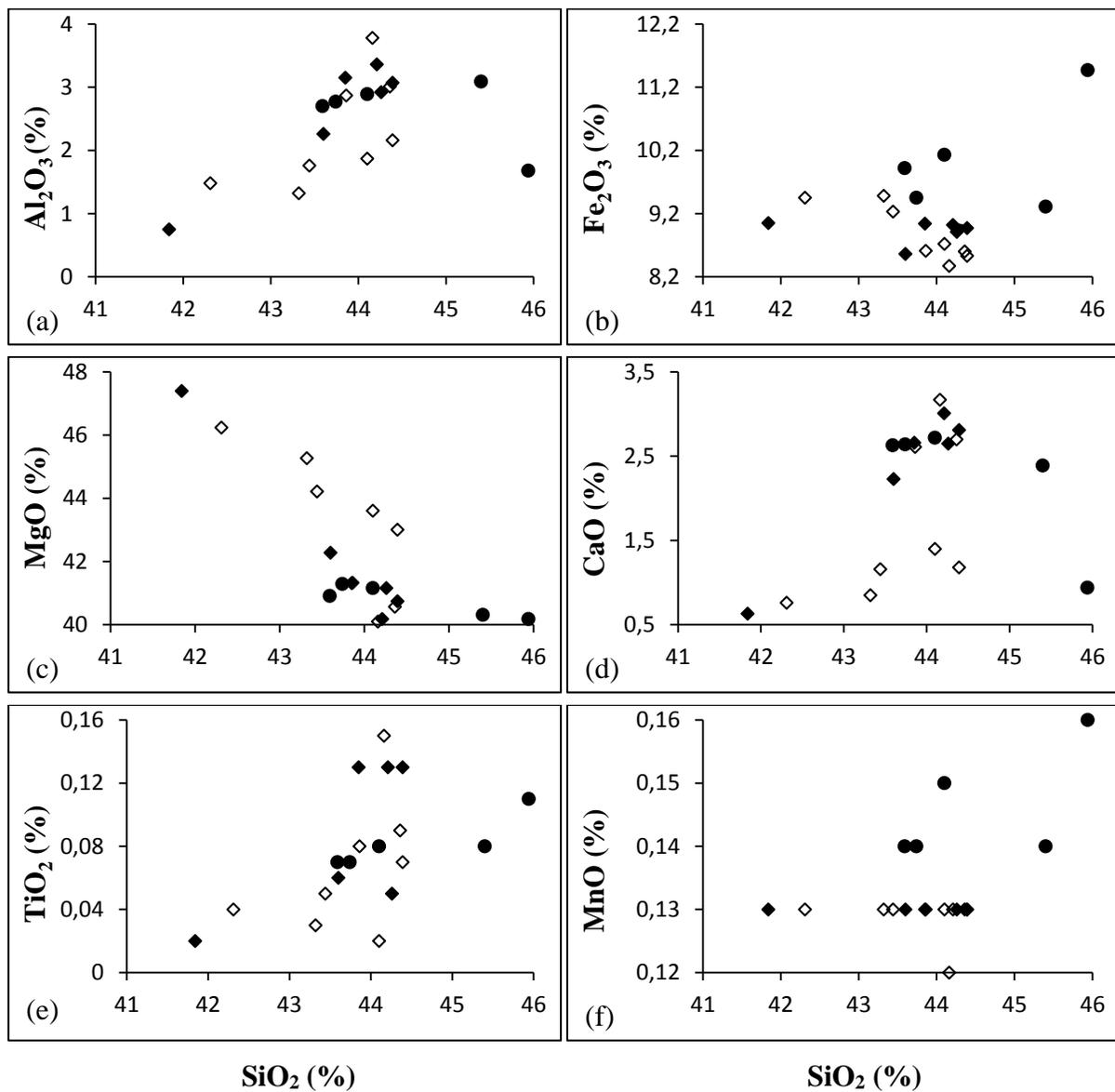
LOI: Loss on ignition.

#### • Corrélations entre certains éléments majeurs

Les diagrammes binaires entre éléments permettent de comprendre les similitudes de comportement entre eux. Dans les mêmes diagrammes, les péridotites saines et altérées sont associées pour montrer le comportement des éléments au cours de l'altération supergène.

Les diagrammes binaires établis entre éléments majeurs montrent des corrélations positives du silicium avec Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO et TiO<sub>2</sub> (Fig. 29a, b, d et e). Les corrélations sont plutôt négatives avec le MgO (Fig. 29c). Le SiO<sub>2</sub> est globalement corrélé positivement avec le MnO (Fig. 29f). Il faut cependant relever que le MnO possède des teneurs constantes dans les matériaux de Nyos.

Les ferromagnésiens (MgO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) présentent des corrélations très négatives avec SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Fig. 30a et b), les alcalins (CaO+K<sub>2</sub>O) et TiO<sub>2</sub> (Fig. 30c et d).



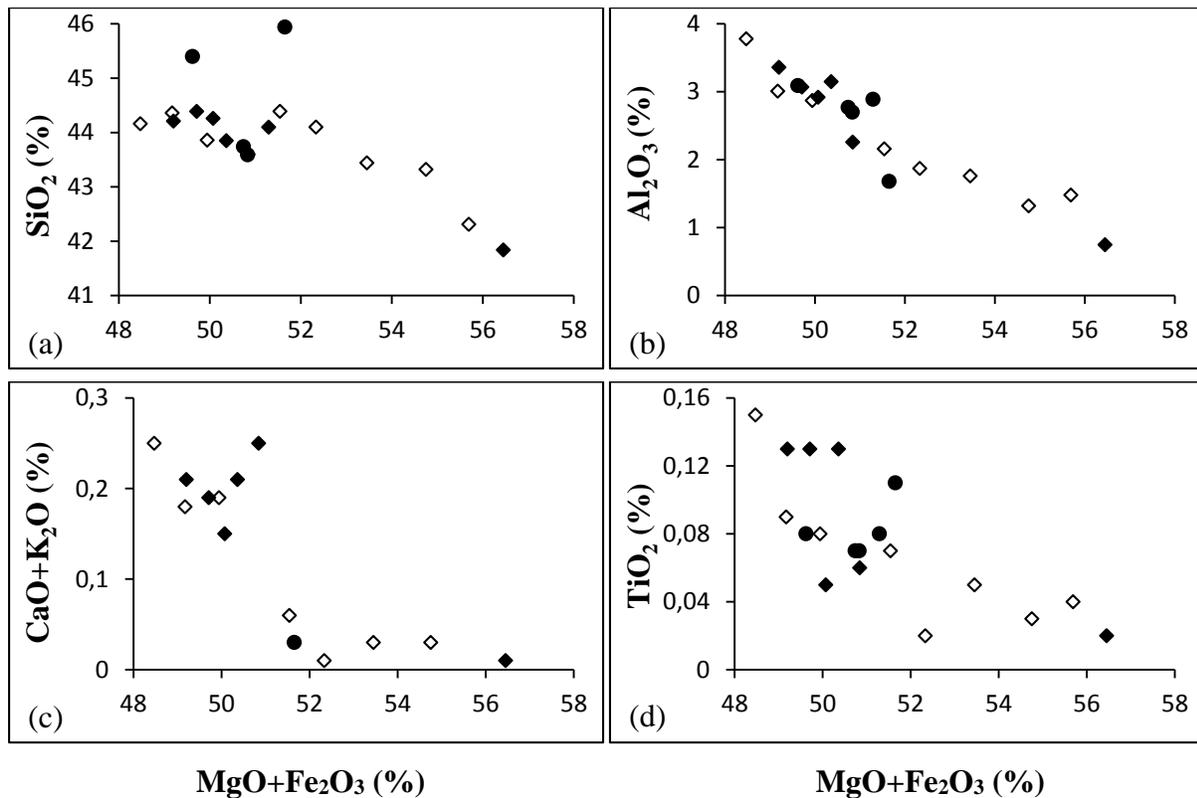
- ◆ Péridotites saines (Données actuelles).
- ◇ Péridotites altérées (Données actuelles).
- Péridotites saines (Teitchou, 2008).

**Figure 29 :** Corrélations entre certains éléments majeurs et le silicium dans les péridotites de Nyos.

### II.2.2. Site de Kumba

La silice est fortement présente par rapport aux autres éléments majeurs. Sa teneur varie entre 34 et 44% (tableau 11). Elle est suivie par Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et MgO. Les concentrations en

$\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  varient très peu. Elles sont entre 11 et 15% pour  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et entre 11 et 14% pour  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Les teneurs en  $\text{MgO}$  se situent entre 6 et 13% (tableau 11). Les teneurs en titane et calcium sont modérées. Les teneurs en  $\text{TiO}_2$  sont presque constantes se situant au tour de 2,5%. Celles en calcium sont aussi considérables et varient entre 1 et 6% de  $\text{CaO}$ . Les concentrations en  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{P}_2\text{O}_5$  sont faibles et proches avec des moyennes de l'ordre de 0,5%. Le manganèse est l'élément le moins abondant ; sa teneur quasi constante a une moyenne de 0,17% (tableau 11). La perte au feu a des valeurs très fortes variant entre 8 et 25% (tableau 11).



- ◆ Périidotites saines (Données actuelles).
- ◇ Périidotites altérées (Données actuelles).
- Périidotites saines (Teitchou, 2008).

**Figure 30 :** Diagrammes binaires illustrant le comportement de quelques éléments majeurs par rapport au couple  $\text{MgO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$  dans les périidotites de Nyos.

Les rapports interélémentaires montrent que la somme  $\text{MgO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$  a des teneurs 2 fois plus faibles que celles de la silice (tableau 11). Contrairement aux périidotites non altérées, elles

sont plus riches en fer qu'en magnésium. La teneur en silice est 3 à 6 fois plus élevée que celle du MgO. Le rapport MgO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> est inférieur ou égal à 1. Les alcalins (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) sont mieux représentés dans les péridotites altérées avec des concentrations très variables et comprises entre 0,58 et 2,24% (tableau 11).

**Tableau 11:** Distribution des éléments majeurs (%) dans les péridotites altérées à Kumba.

Eléments majeurs	L.d.	Péridotites altérés						
		LKU02	LKU03	LKU05	LKU06	LKU08	LKU09	LKU11
SiO <sub>2</sub>	0,04	43,90	39,73	43,13	42,91	41,76	34,90	43,52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	11,35	13,81	13,18	13,18	12,72	14,42	12,54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	11,84	12,54	11,59	11,70	11,66	13,79	11,32
MgO	0,01	12,97	8,50	7,25	7,14	8,86	6,31	8,31
K <sub>2</sub> O	0,01	0,69	0,69	0,73	0,71	0,34	0,16	0,70
Na <sub>2</sub> O	0,02	1,49	1,51	1,51	1,44	1,14	0,42	1,36
CaO	0,01	5,60	5,30	5,15	4,96	4,42	1,57	5,17
TiO <sub>2</sub>	0,01	2,24	2,80	2,63	2,67	2,52	2,92	2,44
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01	0,61	0,72	0,55	0,54	0,56	0,39	0,61
MnO	0,01	0,16	0,17	0,16	0,17	0,16	0,20	0,15
LOI	0,05	8,37	12,74	13,43	14,08	16,18	24,49	14,18
Total	-	99,22	98,51	99,31	99,50	100,32	99,57	100,30
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	-	2,18	2,20	2,24	2,15	1,48	0,58	2,06
MgO+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	24,81	21,04	18,84	18,84	20,52	20,10	19,63
MgO/Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	1,10	0,68	0,63	0,61	0,76	0,46	0,73
SiO <sub>2</sub> /MgO	-	3,38	4,67	5,95	6,01	4,71	5,53	5,24
SiO <sub>2</sub> /MgO+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	1,77	1,89	2,29	2,28	2,04	1,74	2,22

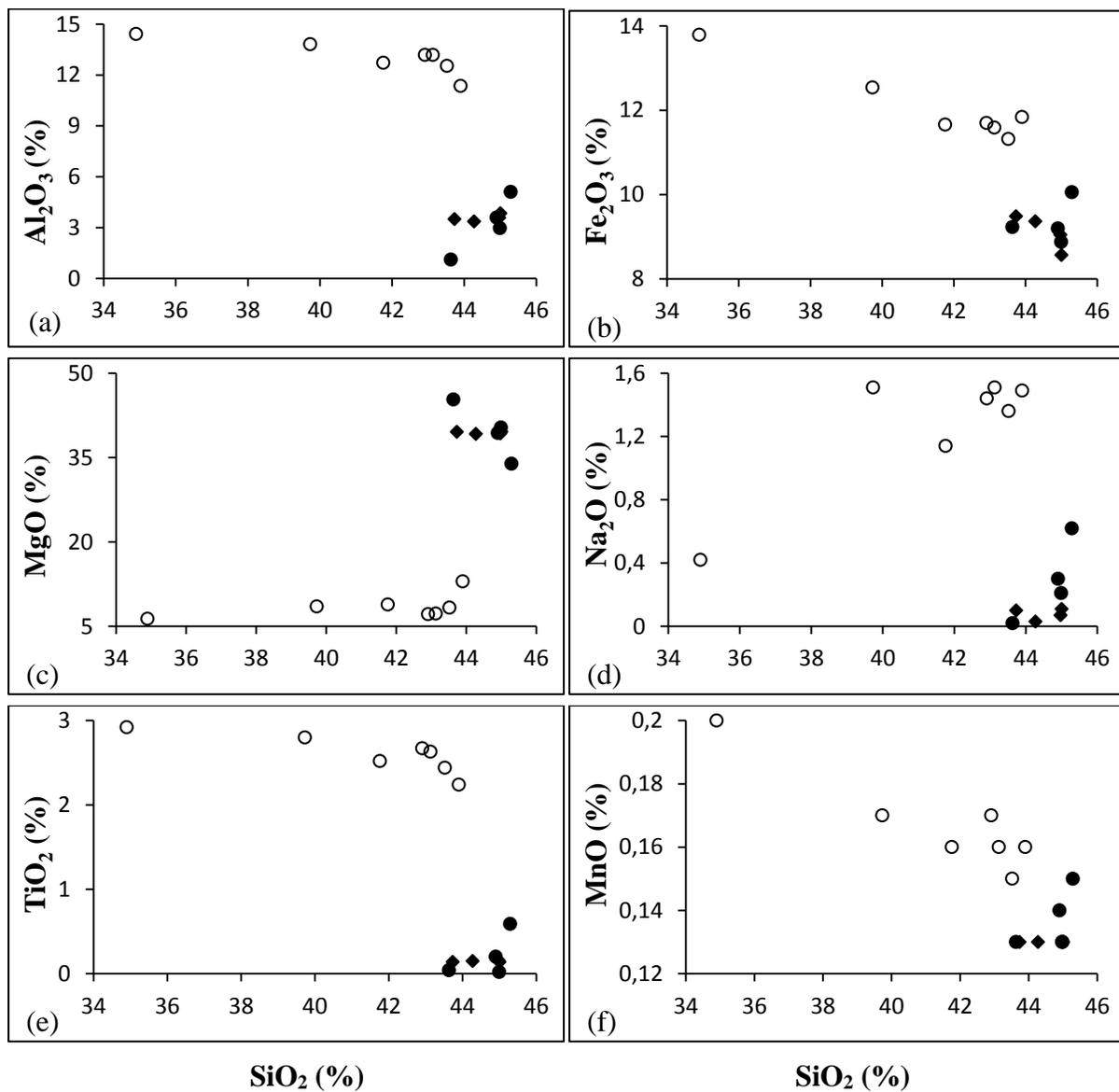
L.d. : limite de détection.

LOI : Loss on ignition.

- **Corrélations entre certains éléments majeurs**

Comme dans le cas des péridotites de Nyos, des diagrammes binaires ont été élaborées.

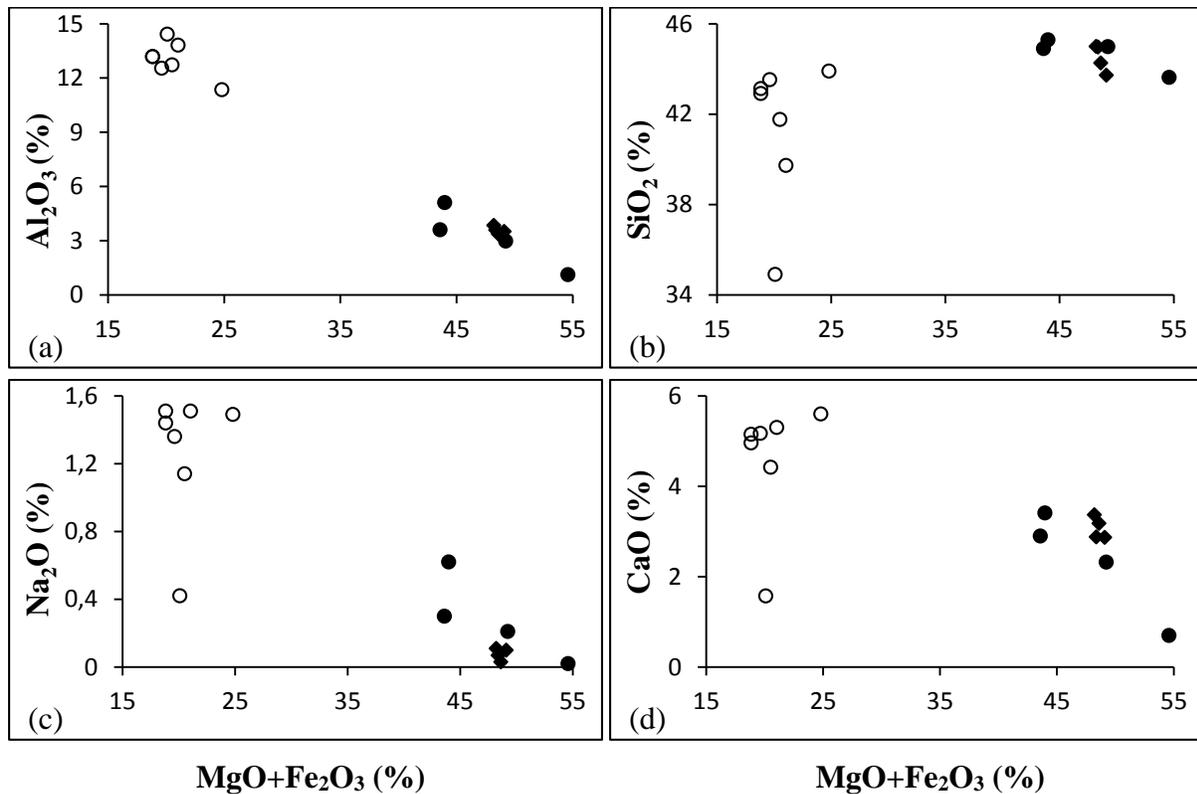
La silice possède des corrélations négatives avec Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, TiO<sub>2</sub> et Na<sub>2</sub>O (Fig. 31b, e, f et d). Le comportement du magnésium et de l'aluminium vis-à-vis du silicium est fonction du degré d'altération des matériaux. Les corrélations sont négatives et très marquées entre SiO<sub>2</sub> et MgO dans les péridotites saines tandis que dans les péridotites altérées, il y a plutôt des petites corrélations positives (Fig. 31c). Le comportement de l'aluminium est contraire ; SiO<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> possèdent des petites corrélations négatives dans les péridotites altérées et des corrélations positives très nettes dans les péridotites saines (Fig. 31a).



- Périidotites saines (Données actuelles).
- Périidotites altérées (Données actuelles).
- ◆ Périidotites (Teitchou, 2008).

**Figure 31** : Corrélations entre certains éléments majeurs et le silicium dans les périidotites de Kumba.

Les ferromagnésiens (Mg, Fe) possèdent des corrélations négatives avec l'aluminium, Na<sub>2</sub>O et CaO (Fig. 32a, c et d). La silice et les ferromagnésiens ne présentent aucune corrélation dans les périidotites altérées mais sont corrélés négativement dans les périidotites non altérées (Fig. 32b).



- Péridotites saines (Données actuelles).
- Péridotites altérées (Données actuelles).
- ◆ Péridotites saines (Teitchou, 2008).

**Figure 32 :** Diagrammes binaires illustrant le comportement de quelques éléments majeurs par rapport au couple MgO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dans les péridotites de Kumba.

### III. BILANS GEOCHIMIQUES

#### III.1. Méthode

Les bilans géochimiques permettent de quantifier les processus d'altération supergène en termes de gains ou de pertes de matières. Ce sont des comparaisons chiffrées entre l'état initial (roche saine) et l'état ayant subi des transformations en milieu supergène. Deux méthodes sont classiquement utilisées pour quantifier les bilans d'altération : la méthode iso-volume et la méthode iso-élément. Le principe consiste dans tous les cas à prendre en compte un invariant durant le processus de transformation.

La méthode iso-volume (Milot et Bonifas, 1995) est appliquée lorsque les transformations se sont effectuées à volume constant. Dans ce cas, l'altération doit se faire avec

conservation des structures de la roche mère. Cette méthode n'est donc pas applicable dans ce travail.

La méthode iso-élément prend en compte un élément chimique dont la concentration est constante ou varie peu entre le matériau parental et les différentes phases d'altération. L'élément de référence varie selon les auteurs : le thorium (Braun et *al.*, 1993 ; Ndjigui, 2008), le zirconium (Brimhall et Dietrich, 1986 ; Colin et *al.*, 1993), le chrome (Colin et *al.*, 1990 ; Marker et *al.*, 1991), le titane (Mungall et Martin, 1994 ; Cornu et *al.*, 1999)....

Le taux d'enrichissement ou d'appauvrissement est calculé suivant la formule de Nesbitt and Wilson (1992) améliorée par Moroni et al. (2001) ci-dessous :

$$X (\%) = \{(X_{pa}/Y_{pa})/(X_{mp}/Y_{mp}) - 1\} * 100$$

X= taux d'enrichissement ou d'évacuation.

X<sub>pa</sub>= concentration de l'élément dans la phase d'altération.

Y<sub>pa</sub>= concentration de l'élément invariant dans la phase d'altération.

X<sub>mp</sub>= concentration de l'élément dans le matériau parental.

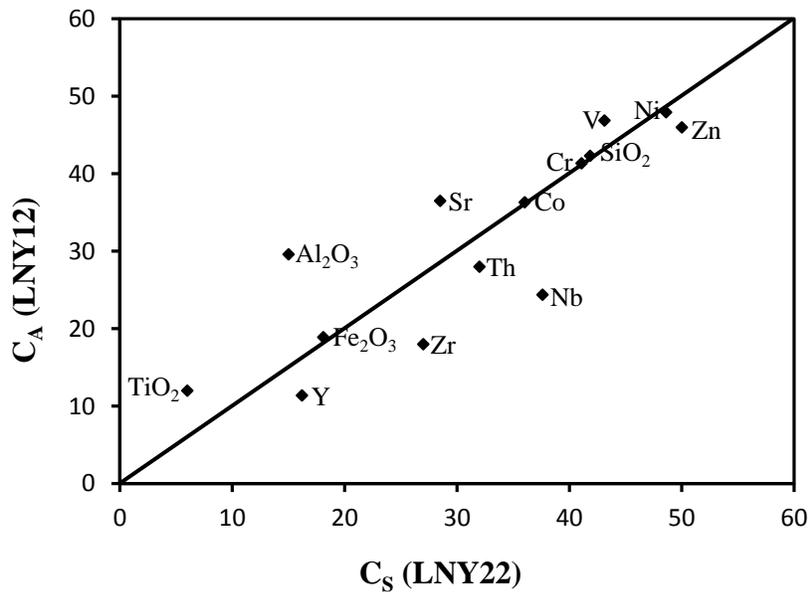
Y<sub>mp</sub>= concentration de l'élément invariant dans le matériau parental.

### III.2. Choix de l'élément invariant

On considère l'élément le plus stable, c'est-à-dire celui qui se maintient le mieux au cours des processus de latéritisation, voire s'enrichit relativement par rapport aux autres éléments qui sont lixiviés (Beauvais, 1991). Les péridotites altérées de Kumba ont été très influencées par leur encaissant. Les péridotites de Nyos seront donc utilisées pour déterminer l'élément invariant.

La méthode des isocones basée sur les théories de Gresen permettent d'identifier l'élément immobile (Chu et *al.*, 2014; Grant, 2005). L'équation qui décrit la relation entre les concentrations de l'élément immobile dans la roche saine et dans la roche altérée ou isocone est la suivante :  $C_{Ai} = M_S/M_A(C_{Si} + \Delta C_i)$  où  $C_i$  est la concentration de l'élément "i", "S" indique la roche saine et "A" la roche altérée,  $M_S$  and  $M_A$  correspondent aux masses avant et après altération.  $\Delta C_i$  est la variation de la concentration de l'élément "i". Pour tous les éléments, il y a une équation sous cette forme où le rapport  $M_S/M_A$  est constant. Un élément est immobile si  $\Delta C_i$

= 0 et on obtient  $M_s/M_A$  en résolvant l'équation  $C_{Ai} = (M_s/M_A)C_{Si}$ . On peut résoudre cette équation graphiquement en projetant les valeurs  $C_{Ai}$  et  $C_{Si}$  dans un diagramme binaire. Les éléments immobiles vont occuper une droite passant par l'origine du repère. Ils peuvent également être obtenus à partir des rapports  $C_{Ai}/C_{Si}$  (tableau 1, annexe). La figure 33 obtenue en utilisant les données du tableau 1 de l'annexe montre que  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ , Ni, Cr and Co constituent l'isocone. Le cobalt est l'élément immobile le plus approprié pour les péridotites de Nyos et de Kumba.



$C_s$  : concentrations des éléments chimiques dans la roche saine (LNY22).  
 $C_A$  : concentrations des éléments chimiques dans la roche altérée (LNY12).

**Figure 33 :** Diagramme illustrant la mobilité des éléments au cours de l'altération chimique des péridotites.

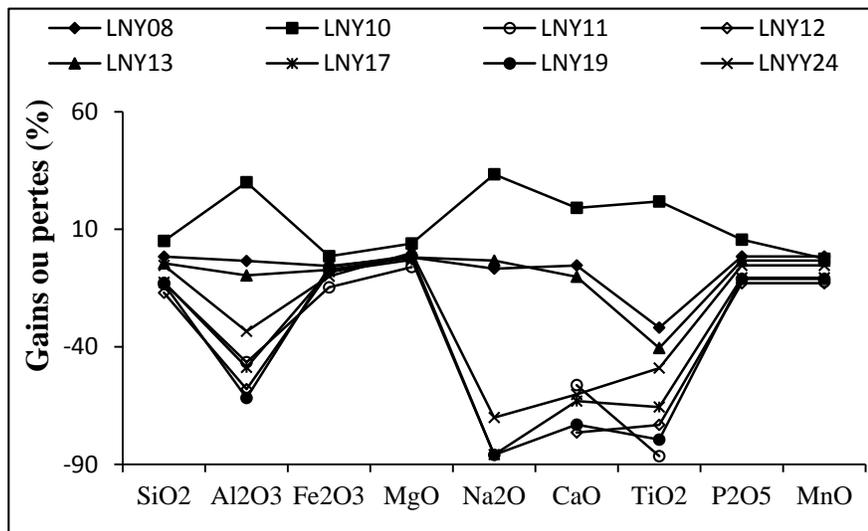
### III.3. Bilans géochimiques des éléments majeurs

Les bilans géochimiques chiffrés qui ont servi à la réalisation des graphiques sont rapportés à l'annexe (tableaux 2 et 3).

### III.3.1. Site de Nyos

Le comportement géochimique des éléments majeurs des péridotites altérées de Nyos est similaire de celui des péridotites saines (Fig. 34). Les pertes enregistrées sont faibles (Fig. 34). L'aluminium est évacué, stable ou remobilisé. Seuls le sodium, le calcium et le titane sont fortement évacués de certains échantillons. Les autres éléments majeurs ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) ont été stables pendant l'altération supergène. L'échantillon LNY10 est légèrement enrichi en  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Na}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Ti}^{4+}$  (Fig. 34).

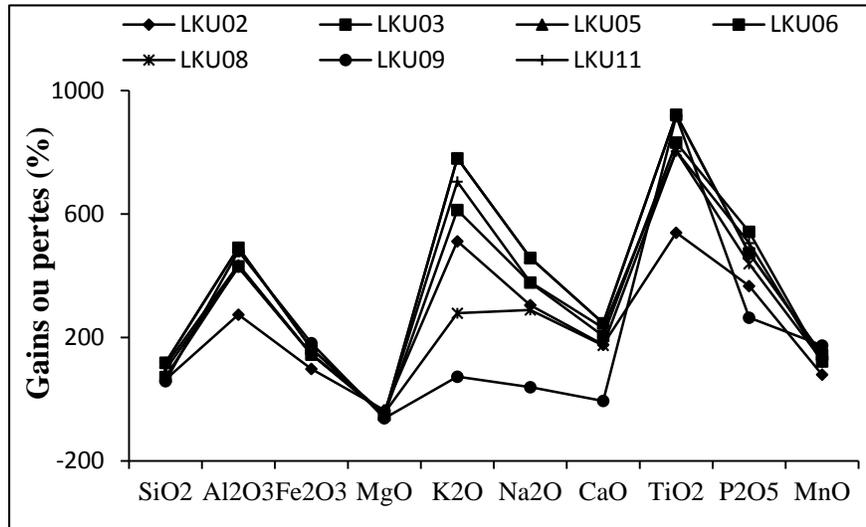
Ce bilan montre que les péridotites de Nyos sont très peu altérées.



**Figure 34** : Représentation graphique du bilan géochimique des éléments majeurs dans les péridotites altérées de Nyos.

### III.3.2. Site de Kumba

Les éléments majeurs des péridotites altérées de Kumba présentent la même signature géochimique. Hormis le magnésium, légèrement évacué, tous les autres éléments majeurs ont été accumulés. L'accumulation est faible en calcium, silicium et manganèse tandis qu'elle est intense en aluminium, potassium et titane (Fig. 35).



**Figure 35 :** Représentation graphique du bilan géochimique des éléments majeurs des péridotites altérées de Kumba.

## CONCLUSION

Les péridotites des sites d'étude ont des textures protogranulaires et parfois porphyroclastiques. Le cortège minéralogie est constitué de l'olivine, pyroxènes, spinelle et accessoirement du chlorite. Elles possèdent des teneurs élevées en SiO<sub>2</sub>, MgO et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> avec des teneurs en SiO<sub>2</sub> et MgO proches (SiO<sub>2</sub>/MgO~1). Les éléments ferromagnésiens (Mg et Fe) possèdent des corrélations négatives avec l'alumine et les éléments alcalins.

On retrouve dans les péridotites altérées une prédominance des minéraux primaires par rapport aux minéraux secondaires. Le chlorite apparaît accessoirement à Nyos. A Kumba, il y a apparition du quartz, muscovite, smectite et hématite ; synonyme d'un degré d'altération avancé. Le bilan géochimique effectué montre que, en dehors des alcalins et du titane qui ont été évacués, les éléments majeurs ont été stables au cours de l'altération des péridotites de Nyos. Par contre dans les péridotites de Kumba, à l'exception du magnésium, tous les éléments majeurs sont fortement accumulés.

***CHAPITRE V: DISTRIBUTION DES ELEMENTS  
TRACES, TERRES RARES ET Au-EGP DANS  
LES PERIDOTITES ET LEURS PRODUITS  
D'ALTERATION***

## **INTRODUCTION**

Dans le chapitre précédent, l'étude géochimique des péridotites et de leurs produits d'altération s'est limitée au comportement des éléments majeurs. Le présent chapitre vient compléter cette étude géochimique. Il présente le comportement géochimique des éléments traces, des terres rares, de l'or et les éléments du groupe du platine.

## **I. GEOCHIMIE DES ELEMENTS TRACES**

### **I.1. Péridotites**

#### **I.1.1. Site de Nyos**

Les péridotites sont caractérisées par des teneurs élevées en Cr, Ni et Co (tableau 12). Les teneurs en chrome oscillent entre 1770 et 2080 ppm, les teneurs en nickel entre 1960 et 2430 ppm, et celle en cobalt varient très peu (102 à 120 ppm). Les teneurs sont modérées en V (53-92 ppm), Zn (42-50 ppm), Sc (5-14 ppm), Cu (4-14 ppm), Zr (7-11 ppm) et Sr (2-10 ppm). Les concentrations sont inférieures à 5 ppm en Ba, Y, Li, Ga et Hf (tableau 12). Les autres éléments traces (Nb, Mo, Th, U, Be, Bi, Cd) possèdent des concentrations très faibles (tableau 12).

Les spectres des éléments traces des péridotites de Nyos normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995) sont caractérisés par des anomalies positives en V, Sc, Zr et Y et négatives en Cu, Ba et Ga (Fig. 36).

#### **I.1.2. Site de Kumba**

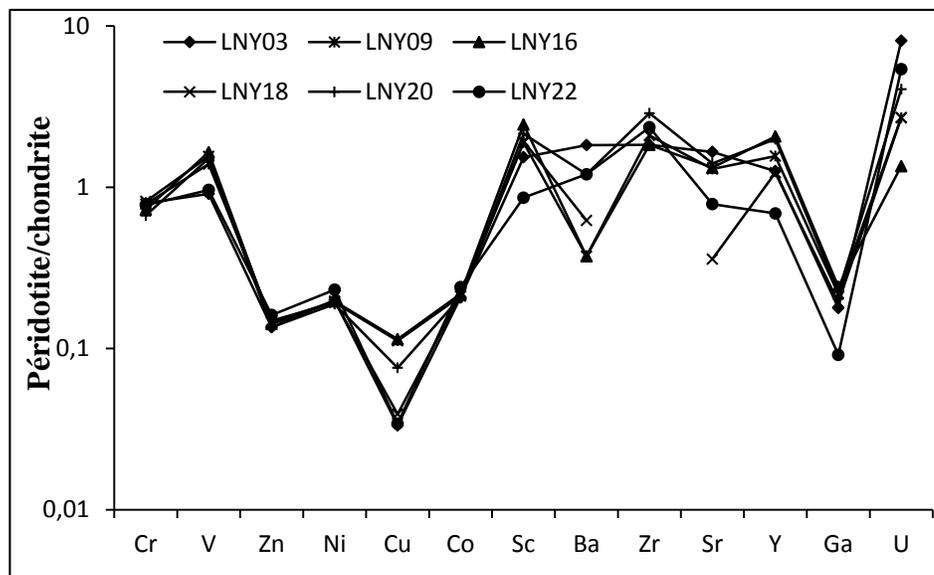
Le chrome, Ni et Co ont des teneurs élevées à Kumba. Les teneurs en Cr varient entre 1836 et 2681 ppm, celles en Ni entre 1717 et 2436 ppm et en Co de 97 à 130 ppm (tableau 13). Les concentrations en V, Zn et Ba sont modérées (tableau 13). Les teneurs en Zr et Sr, élevées, ont une grande variabilité d'un échantillon à un autre. Les teneurs vont de 8 à 62 ppm pour le zirconium et de 9 à 158 ppm pour le strontium (tableau 13). Le reste des éléments traces ont des teneurs faibles ( $\leq 10$  ppm). On atteint la dizaine de ppm pour le scandium, le cuivre et le niobium. L'yttrium et le gallium ont quelques ppm de concentrations tandis que les autres éléments traces ont des concentrations proches ou en deçà de 1 ppm (tableau 13).

**Tableau 12:** Distribution des éléments traces (ppm) dans les péridotites à Nyos.

Eléments traces	L. d.	Péridotites de Nyos					
		LNY03	LNY09	LNY16	LNY18	LNY20	LNY22
Cr	3,00	2110,00	2080,00	1926,00	2164,00	1770,00	2054,00
V	0,80	51,00	77,90	92,40	87,00	84,40	53,90
Zn	7,00	42,00	46,00	44,00	45,00	42,00	50,00
Ni	1,60	2096,00	2025,00	2062,60	2064,60	1979,50	2430,30
Cu	1,40	4,00	13,40	13,70	4,70	9,10	4,10
Co	0,13	103,70	105,41	109,12	107,55	104,07	120,05
Sc	1,10	9,10	11,20	14,50	11,40	12,70	5,10
Ba	0,80	4,40	0,90	0,90	1,50	2,90	2,90
Zr	6,00	7,00	8,00	7,00	<l.d.	11,00	9,00
Sr	0,60	12,00	9,40	9,60	2,60	10,20	5,70
Y	0,05	1,98	2,45	3,24	1,93	3,12	1,08
Li	0,40	0,40	1,10	1,20	0,70	0,90	3,40
Ga	0,04	1,64	2,00	2,22	1,78	2,06	0,84
Nb	0,03	1,28	0,11	<l.d.	0,19	0,46	0,94
Hf	0,14	0,15	0,24	0,21	0,14	0,29	0,19
Mo	0,08	0,29	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0,09
Th	0,02	0,14	0,02	<l.d.	0,02	0,13	0,08
U	0,01	0,06	0,02	0,01	0,02	0,03	0,04
Be	0,04	4,40	0,06	<l.d.	0,05	0,06	0,06
Bi	0,15	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0,18	0,2
Cd	0,01	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,02

L.d.: Limites de détection.

LNY03 : Sababa (2008).



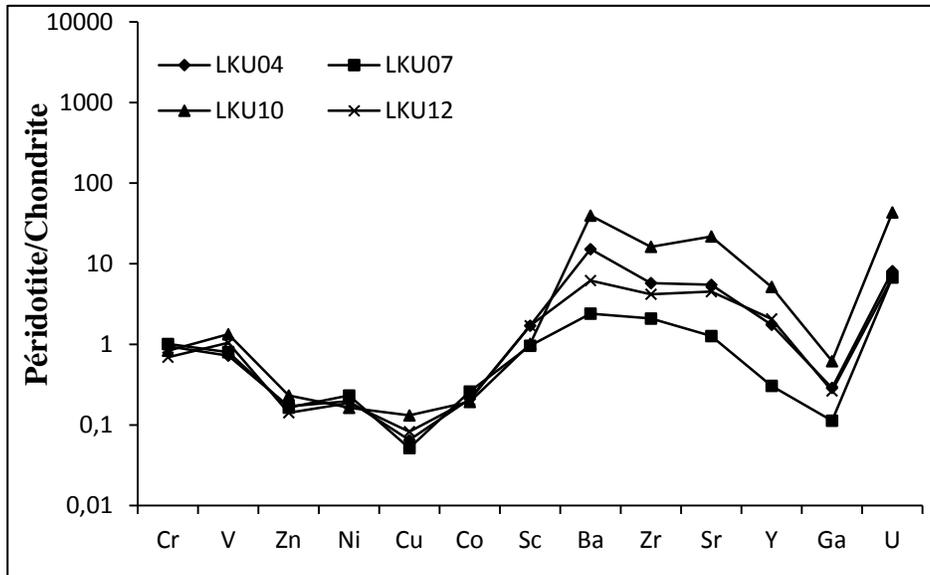
**Figure 36 :** Spectres élargis des éléments traces des péridotites de Nyos normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

**Tableau 13:** Distribution des éléments traces (ppm) dans les péridotites à Kumba.

Eléments traces	L. d.	Péridotites			
		LKU04	LKU07	LKU10	LKU12
Cr	3,00	2505,00	2681,00	2210,00	1836,00
V	0,80	40,60	44,90	74,70	58,70
Zn	7,00	53,00	51,00	72,00	44,00
Ni	1,60	2075,30	2435,90	1717,20	1960,50
Cu	1,40	7,80	6,20	15,80	9,90
Co	0,13	105,28	130,02	96,78	102,28
Sc	1,10	10,10	5,70	6,00	10,10
Ba	0,80	36,60	5,80	95,50	14,90
Zr	6,00	22,00	8,00	62,00	16,00
Sr	0,60	39,80	9,20	158,10	32,70
Y	0,05	2,75	0,48	8,10	3,25
Li	0,40	0,50	0,40	1,00	0,40
Ga	0,04	2,65	1,04	5,70	2,43
Pb	0,60	< l.d.	< l.d.	0,90	< l.d.
Nb	0,03	4,14	1,00	12,74	2,26
Hf	0,14	0,51	0,16	1,38	0,36
Mo	0,08	0,11	0,13	0,28	0,17
Th	0,02	0,16	0,05	0,58	0,13
U	0,01	0,06	0,05	0,32	0,05
Ta	0,02	0,25	0,04	0,79	0,14
Be	0,04	0,18	0,10	0,40	0,13
Bi	0,15	<l.d.	0,15	0,21	<l.d.
Cd	0,01	0,06	0,03	0,08	0,05
Cs	0,01	0,04	0,02	0,12	0,05
Rb	0,23	1,94	0,40	3,98	1,04
Tl	0,01	0,01	<l.d.	0,01	0,01
In	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01
Sn	0,16	0,18	< l.d.	0,45	< l.d.
W	0,05	< l.d.	0,41	0,10	< l.d.

L.d.: Limite de détection.

Les spectres des éléments traces des péridotites de Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995) sont semblables et se caractérisent par des anomalies positives en V et Ba et négatives en Cu et Ga (Fig. 37).



**Figure 37:** Spectres élargis des éléments traces des péridotites de Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

## I.2. Péridotites altérées

### I.2.1. Site de Nyo

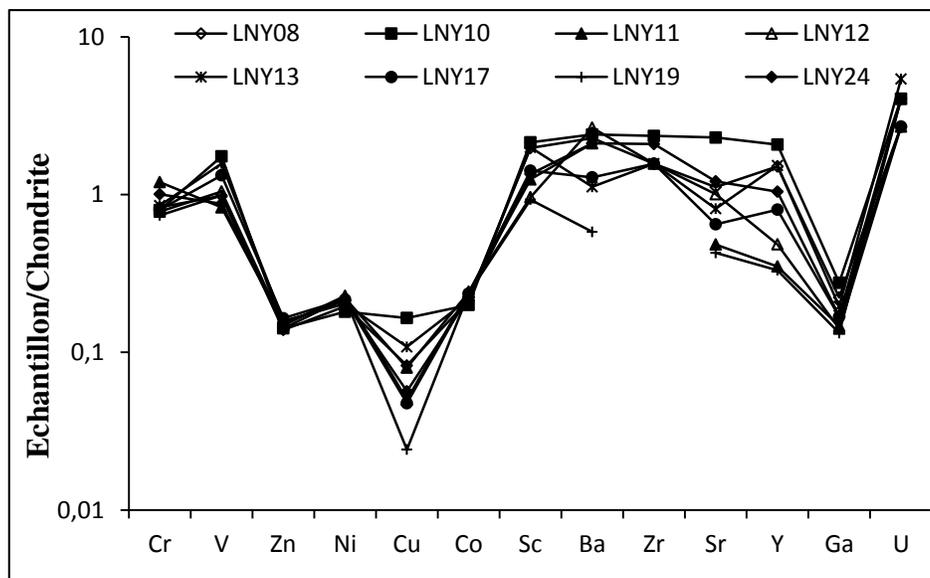
Les péridotites altérées comme les péridotites saines ont des teneurs faibles en éléments traces. Seuls le chrome, Ni et Co ont des teneurs élevées (tableau 14). La concentration en Cr varie de 1958 à 3182 ppm, celle en Ni est comprise entre 1900 et 2310 ppm et celle en Co oscille entre 100 et 121 ppm. Les concentrations sont significatives en vanadium, Zn, Sr, Sc, Cu, Zr et Ba (tableau 14). Les teneurs en Y et Ga sont supérieures à 1 ppm. Les autres éléments traces (Nb, Hf, Mo, Th, U, Ta, Be, Cd, In) ont des teneurs très faibles (tableau 14).

Les spectres des éléments traces des péridotites altérées de Nyo normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995) sont comparables et se caractérisent par des anomalies négatives en Cu et Ga (Fig. 38).

**Tableau 14:** Distribution des éléments traces (ppm) dans les péridotites altérées à Nyos.

Eléments traces	L. d.	Péridotites altérées							
		LNY08	LNY10	LNY11	LNY12	LNY13	LNY17	LNY19	LNY24
Cr	3,00	2204,00	2113,00	3182,00	2068,00	2259,00	2127,00	1958,00	2667,00
V	0,80	55,10	97,90	46,50	58,60	88,20	74,30	55,40	49,00
Zn	7,00	43,00	44,00	47,00	46,00	49,00	51,00	44,00	48,00
Ni	1,60	2056,20	1900,60	2308,40	2396,90	2135,00	2271,20	2309,90	2230,50
Cu	1,40	9,90	19,80	9,60	6,00	13,00	5,70	2,90	6,80
Co	0,13	107,07	99,82	120,13	121,06	109,04	117,94	118,6	111,38
Sc	1,10	11,70	12,70	7,40	5,70	11,80	8,40	5,50	8,00
Ba	0,80	5,50	5,80	5,10	6,40	2,70	3,10	1,40	5,10
Zr	6,00	6,00	9,00	<l.d.	6,00	6,00	6,00	<l.d.	8,00
Sr	0,60	8,10	16,70	3,50	7,30	5,90	4,70	3,10	8,80
Y	0,05	2,37	3,26	0,55	0,76	2,40	1,26	0,52	1,64
Li	0,40	1,10	0,50	0,60	1,20	0,80	1,30	0,70	1,00
Ga	0,04	2,05	2,54	1,35	1,3	1,8	1,55	1,22	1,56
Nb	0,03	0,54	0,40	0,30	0,61	0,06	0,26	0,45	0,68
Hf	0,14	0,17	0,28	<l.d.	<l.d.	0,18	0,15	<l.d.	0,20
Mo	0,08	0,08	0,08	0,09	<l.d.	0,08	0,09	0,12	0,10
Th	0,02	0,06	0,03	0,03	0,07	0,04	0,04	0,04	0,07
U	0,01	0,02	0,03	0,03	0,02	0,04	0,02	0,03	0,03
Ta	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,04	0,02	0,03	0,03
Be	0,04	0,08	0,09	<l.d.	<l.d.	0,09	0,09	0,08	0,08
Cd	0,01	0,02	0,04	0,02	0,02	0,03	<l.d.	<l.d.	0,13
Rb	0,23	<l.d.	0,24	0,36	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0,79
In	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

L.d. : Limites de détection.



**Figure 38 :** Spectres élargis des éléments traces des péridotites altérées de Nyos normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

- **Corrélations géochimiques**

Des matrices de corrélations et des diagrammes binaires ont été élaborées en vue de comprendre les affinités entre les éléments chimiques. En raison du nombre réduit des échantillons de péridotites saines, les matrices de corrélation concernent seulement les péridotites altérées. Les données sur les péridotites saines ont été ajoutées dans les diagrammes binaires pour mettre en évidence l'influence de l'altération. Les diagrammes portent sur les éléments traces, les plus représentés, avec SiO<sub>2</sub>, MgO et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

- **Corrélation entre éléments traces**

La matrice de corrélation fait apparaître des corrélations positives ou négatives dans les péridotites altérées de Nyos. Elles sont fortes lorsque le coefficient est supérieur à 0,70 en valeur absolue. Les coefficients positifs montrent que les éléments sont associés dans les mêmes processus ou dans les mêmes phases minéralogiques. Tandis que les coefficients négatifs témoignent d'une incompatibilité entre les éléments.

La corrélation est parfaitement positive entre l'uranium et le tantale (1,00) (tableau 15). Les corrélations positives sont aussi notées entre V et Cu (0,72), V et Y (0,72), Cu et Sc (0,84), Cu et Sr (0,78), Cu et Y (0,84), Cu et Ga (0,88), Sc et Y (0,95), Sc et Ga (0,92), Sr et Y (0,80), Sr et Ga (0,85), Y et Ga (0,96) et Li et Pb (0,84) (tableau 15).

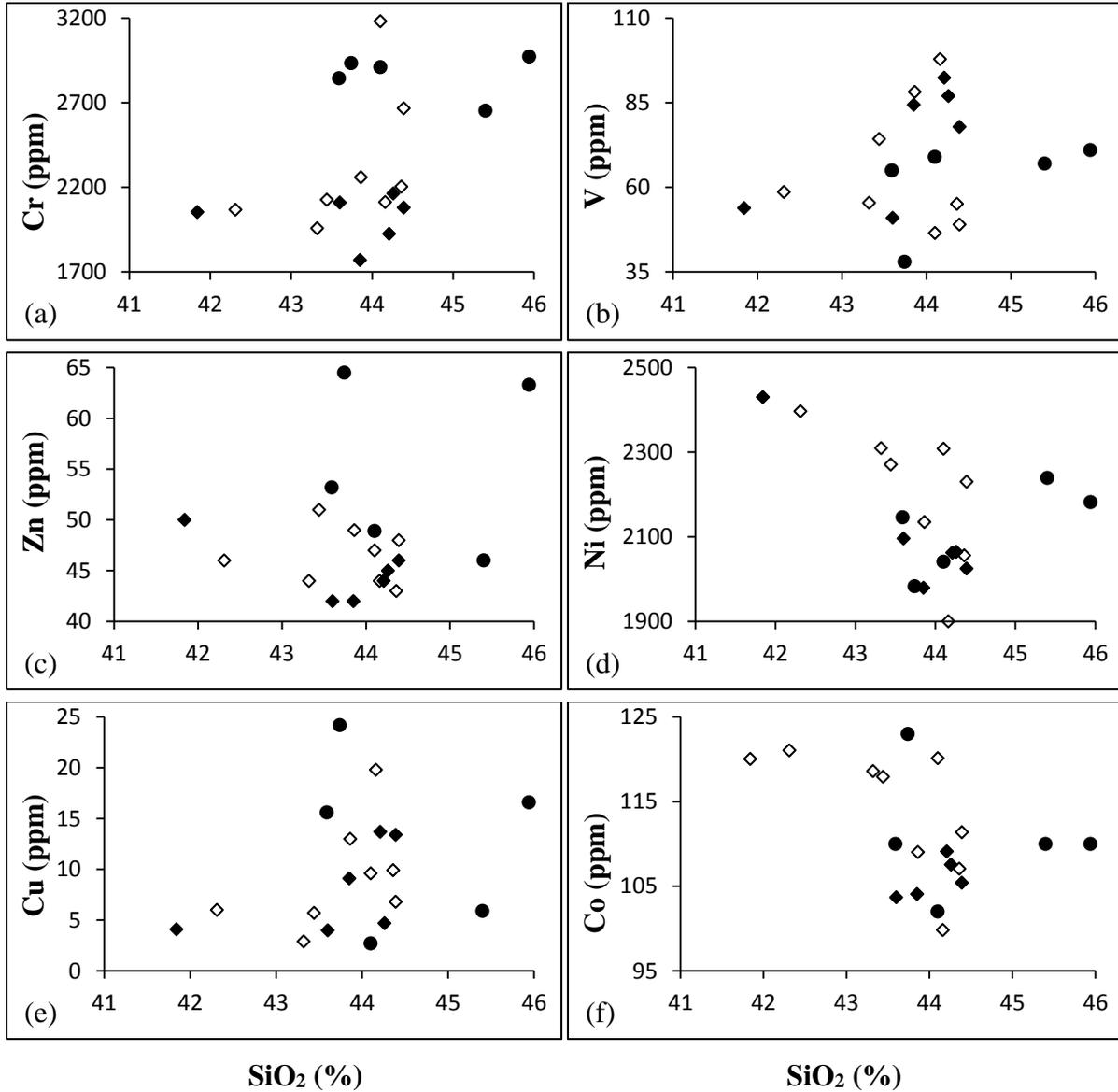
Par contre, les corrélations sont négatives entre Ni et Cu (-0,86), Ni et Ga (-0,98), Cu et Co (-0,83), Co et Sc (-0,90), Co et Sr (-0,82), Co et Y (-0,97) et Co et Ga (-0,95) (tableau 15).

**Tableau 15:** Matrice de corrélation entre quelques éléments traces dans les péridotites altérées à Nyos.

	Cr	V	Zn	Ni	Cu	Co	Sc	Ba	Sr	Y	Li	Ga	Nb	Th	U	Ta
Cr	1,00															
V	-0,47	1,00														
Zn	0,24	0,12	1,00													
Ni	0,18	-0,65	0,36	1,00												
Cu	0,05	<b>0,72</b>	-0,21	<b>-0,86</b>	1,00											
Co	0,20	-0,63	0,33	<b>0,98</b>	<b>-0,83</b>	1,00										
Sc	-0,09	0,68	-0,11	-0,93	<b>0,84</b>	<b>-0,90</b>	1,00									
Ba	0,27	-0,10	-0,28	-0,20	0,38	-0,23	0,18	1,00								
Sr	-0,22	0,57	-0,36	<b>-0,78</b>	<b>0,78</b>	<b>-0,82</b>	0,63	0,57	1,00							
Y	-0,25	<b>0,72</b>	-0,19	-0,95	<b>0,84</b>	<b>-0,97</b>	<b>0,95</b>	0,25	<b>0,80</b>	1,00						
Li	-0,29	-0,25	0,39	0,40	-0,55	0,35	-0,24	0,10	-0,27	-0,21	1,00					
Ga	-0,21	-0,10	-0,28	<b>-0,98</b>	<b>0,88</b>	<b>-0,95</b>	<b>0,92</b>	0,34	<b>0,85</b>	<b>0,96</b>	-0,29	1,00				
Nb	-0,05	-0,56	-0,46	0,16	-0,32	0,06	-0,37	0,52	0,25	-0,16	0,28	-0,12	1,00			
Th	-0,13	-0,47	-0,06	0,31	-0,43	0,14	-0,27	0,40	0,01	-0,12	0,67	-0,24	<b>0,75</b>	1,00		
U	0,25	0,33	0,15	-0,23	0,38	-0,29	0,27	-0,40	0,02	0,24	-0,69	0,11	-0,52	-0,42	1,00	
Ta	0,25	0,33	0,15	-0,23	0,38	-0,29	0,27	-0,40	0,02	0,24	-0,69	0,11	-0,52	-0,42	<b>1,00</b>	1,00

- **Corrélations entre le silicium et quelques éléments traces**

Le silicium possède des corrélations positives avec le chrome, Cu et dans une moindre mesure avec le Zn (Fig. 39a, b, c et e). Par contre, les corrélations sont négatives avec le nickel et Co (Fig. 39d et f).

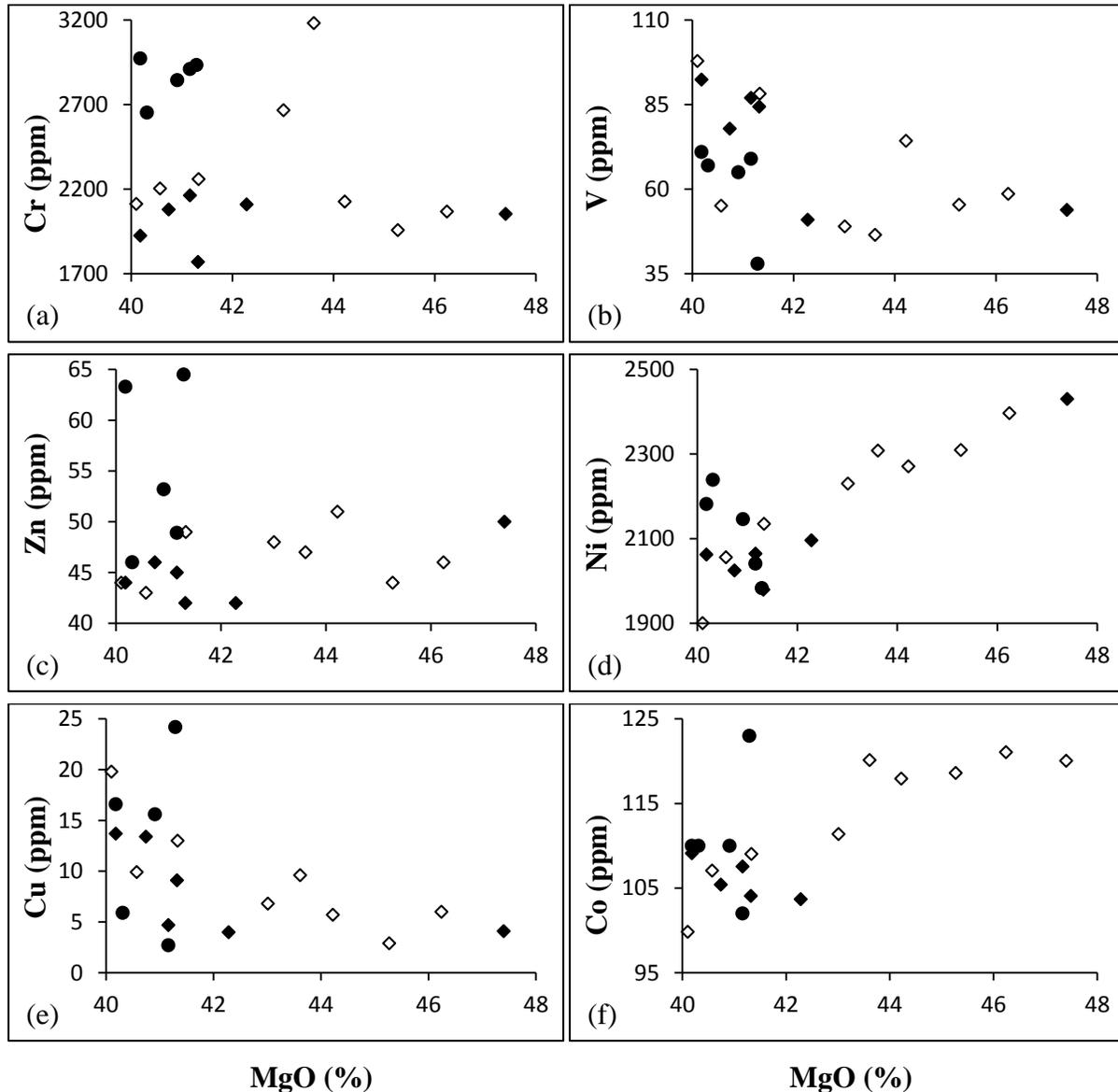


- ◆ Péridotites saines (Données actuelles).
- ◇ Péridotites altérées (Données actuelles).
- Péridotites saines (Teitchou, 2008).

**Figure 39:** Corrélations entre certains éléments traces et le silicium dans les péridotites de Nyos.

- **Corrélations entre le magnésium et quelques éléments traces**

Le MgO possède des corrélations positives avec le nickel, cobalt, dans une moindre mesure le chrome et le zinc (Fig. 40a, c, d et f). Il possède par contre des corrélations négatives avec le V et Cu (Fig. 40b et e).

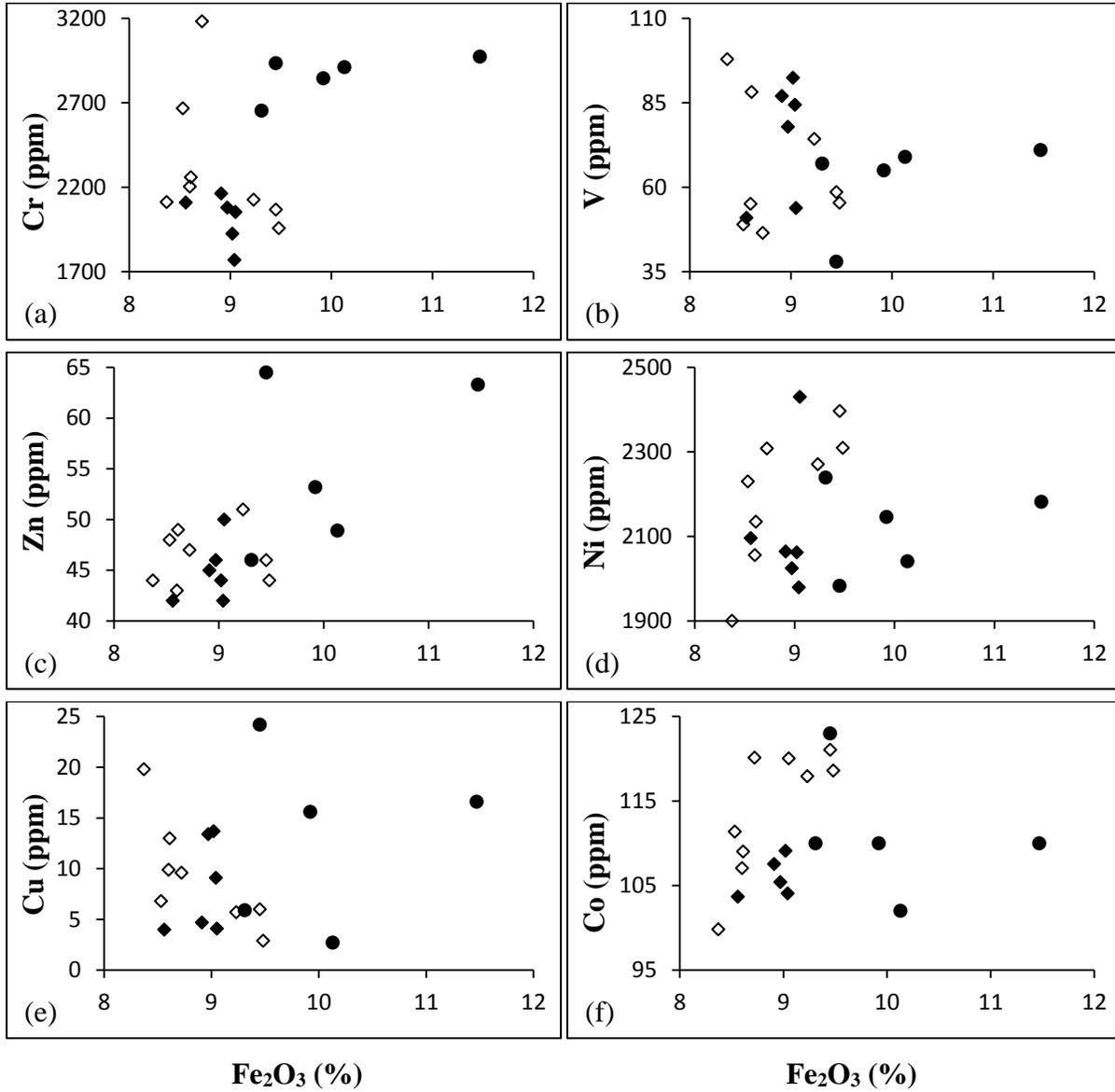


- ◆ Péridotites saines (Données actuelles).
- ◇ Péridotites altérées (Données actuelles).
- Péridotites saines (Teitchou, 2008).

**Figure 40 :** Corrélations entre certains éléments traces et le magnésium dans les péridotites de Nyos.

- **Corrélations entre le fer et quelques éléments traces**

Le fer est corrélé positivement avec le chrome, Ni, Zn et Co (Fig. 41a c, d et f). Il présente des corrélations nulles avec le vanadium et le cuivre (Fig. 41b et e).



- ◆ Péridotites saines (Données actuelles).
- ◇ Péridotites altérées (Données actuelles).
- Péridotites saines (Teitchou, 2008).

**Figure 41 :** Corrélations entre certains éléments traces et le fer dans les péridotites de Nyos.

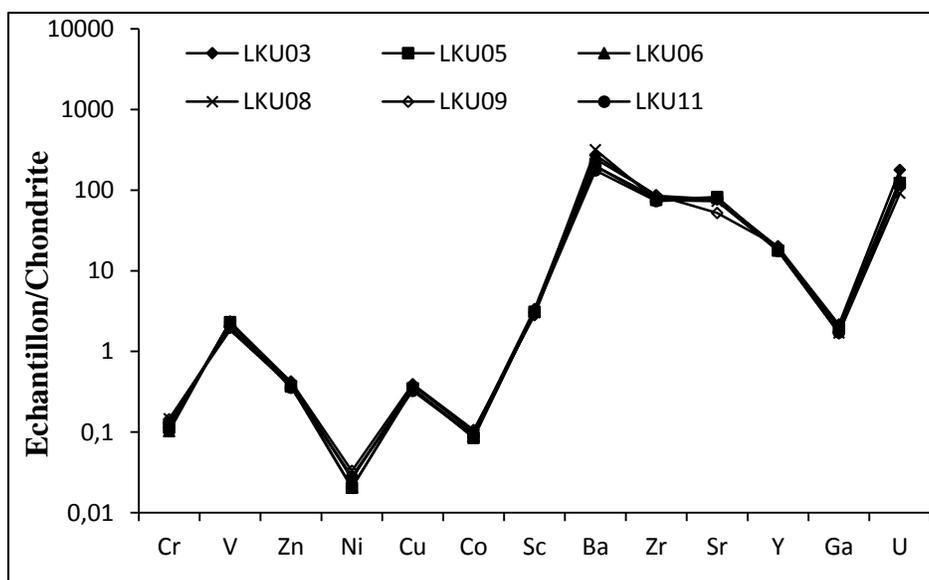
### I.2.2. Site de Kumba

Les péridotites altérées de Kumba sont riches en un large spectre d'éléments traces avec des concentrations modérées et variant très peu d'un échantillon à un autre (tableau 16). Les concentrations en chrome varient entre 272 et 543 ppm et en strontium entre 378 et 580 ppm. Les teneurs en baryum sont comprises entre 424 et 654 ppm et celles en Ni varient de 213 à 346 ppm (tableau 16). Les teneurs en zinc varient entre 110 et 129 ppm (tableau 16).

Le cuivre, Co, Y et Nb ont des teneurs de l'ordre de plusieurs dizaines de ppm. Le cuivre a une concentration qui varie entre 36 et 47 ppm, le cobalt de 42 à 57 ppm, l'yttrium de 27 à 32 ppm et celle en niobium varie entre 48 et 63 ppm (tableau 16). Le scandium, le gallium et le rubidium ont aussi des teneurs significatives souvent inférieures à 20 ppm (tableau 16).

Les autres éléments traces ont des teneurs soit de l'ordre de quelques ppm (Li, Pb, Hf, Th et Ta), de l'unité de ppm (Be, Sn) soit inférieures à 1 ppm (Mo, U, Gd, Cs, Tl, In, Sb et W) (tableau 16).

Les spectres des éléments traces des péridotites altérées de Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995) sont semblables et se caractérisent par des anomalies négatives en Ni, Co et Ga et positives en V et Ba (Fig. 42).



**Figure 42** : Spectres élargis des éléments traces des péridotites altérées de Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

**Tableau 16:** Distribution des éléments traces (ppm) dans les péridotites altérées à Kumba.

Eléments traces	L. d.	Péridotites altérées						
		LKU02	LKU03	LKU05	LKU06	LKU08	LKU09	LKU11
Cr	3,0	543,00	301,00	299,00	272,00	387,00	380,00	352,00
V	0,8	140,80	130,10	129,30	130,60	103,30	109,70	115,70
Zn	7,0	116,00	129,00	114,00	118,00	116,00	131,00	110,00
Ni	1,6	554,80	274,90	213,20	216,40	294,80	345,60	290,70
Cu	1,4	36,50	45,70	41,80	40,70	40,90	47,10	38,90
Co	0,1	57,47	49,31	42,23	44,05	45,72	52,82	44,31
Sc	1,1	19,00	19,80	18,30	18,50	17,90	16,70	18,00
Ba	0,8	554,60	653,60	478,70	479,20	764,90	588,9	424,10
Zr	6,0	256,00	325,00	290,00	308,00	288,00	331	280,00
Sr	0,6	539,00	556,80	595,60	580,60	529,30	378,10	567,20
Y	0,05	32,44	30,86	27,98	29,68	27,97	31,59	27,62
Li	0,40	6,90	9,30	8,30	7,70	7,80	9,10	8,80
Ga	0,04	16,58	19,79	18,05	18,28	15,55	15,44	15,79
Pb	0,60	3,00	3,80	3,70	3,60	3,30	3,60	3,7
Nb	0,03	48,05	62,42	56,95	59,53	54,38	63,10	51,94
Hf	0,14	5,61	7,30	6,49	6,81	6,39	7,38	6,14
Mo	0,08	0,99	0,56	0,89	0,87	0,49	0,26	0,95
Th	0,02	4,08	5,22	4,82	4,93	4,42	5,04	4,61
U	0,01	0,94	1,32	0,91	0,99	0,68	0,86	0,87
Ta	0,02	2,94	3,84	3,51	3,70	3,36	3,88	3,16
Be	0,04	1,44	1,80	1,67	1,69	1,59	1,90	1,55
Cd	0,01	0,201	0,21	0,17	0,16	0,20	0,20	0,20
Cs	0,01	0,46	0,44	0,71	0,69	0,45	0,52	0,65
Rb	0,23	18,39	14,89	33,68	32,90	11,46	8,81	19,93
Tl	0,01	0,06	0,08	0,09	0,08	0,06	0,08	0,09
In	0,01	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08
Sb	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06	0,07	0,07
Sn	0,16	1,46	2,62	2,27	2,34	2,32	2,05	2,23
W	0,05	0,46	0,43	0,55	0,55	0,33	0,69	0,64

L.d.: Limite de détection.

- **Corrélations géochimiques**

Comme pour les péridotites de Nyos des corrélations géochimiques ont été faites pour les mêmes objectifs.

- **Corrélation entre éléments traces**

Les matrices de corrélation entre certains éléments traces dans les péridotites altérées de Kumba font apparaître des fortes similitudes et divergences de comportement.

Les fortes corrélations positives entre Cr et Ni (0,96), Ni et Co (0,90), Cr et Co (0,81), Zn et Nb (0,80), Zn et Zr (0,82), Zn et Cu (0,86), Cu et Zr (0,95), Cu et Nb (0,94) et Li et Pb (0,84) (tableau 17) montrent une similarité de mobilité de ces couples. Ainsi, ces éléments se concentreraient dans les mêmes conditions physico-chimiques et par conséquent dans les mêmes phases minérales secondaires.

Par ailleurs, les corrélations sont fortement négatives entre Cr et Pb (-0,88), Ni et Pb (-0,81). Le plomb est incompatible avec le chrome et le nickel dans les péridotites altérées de Kumba (tableau 17).

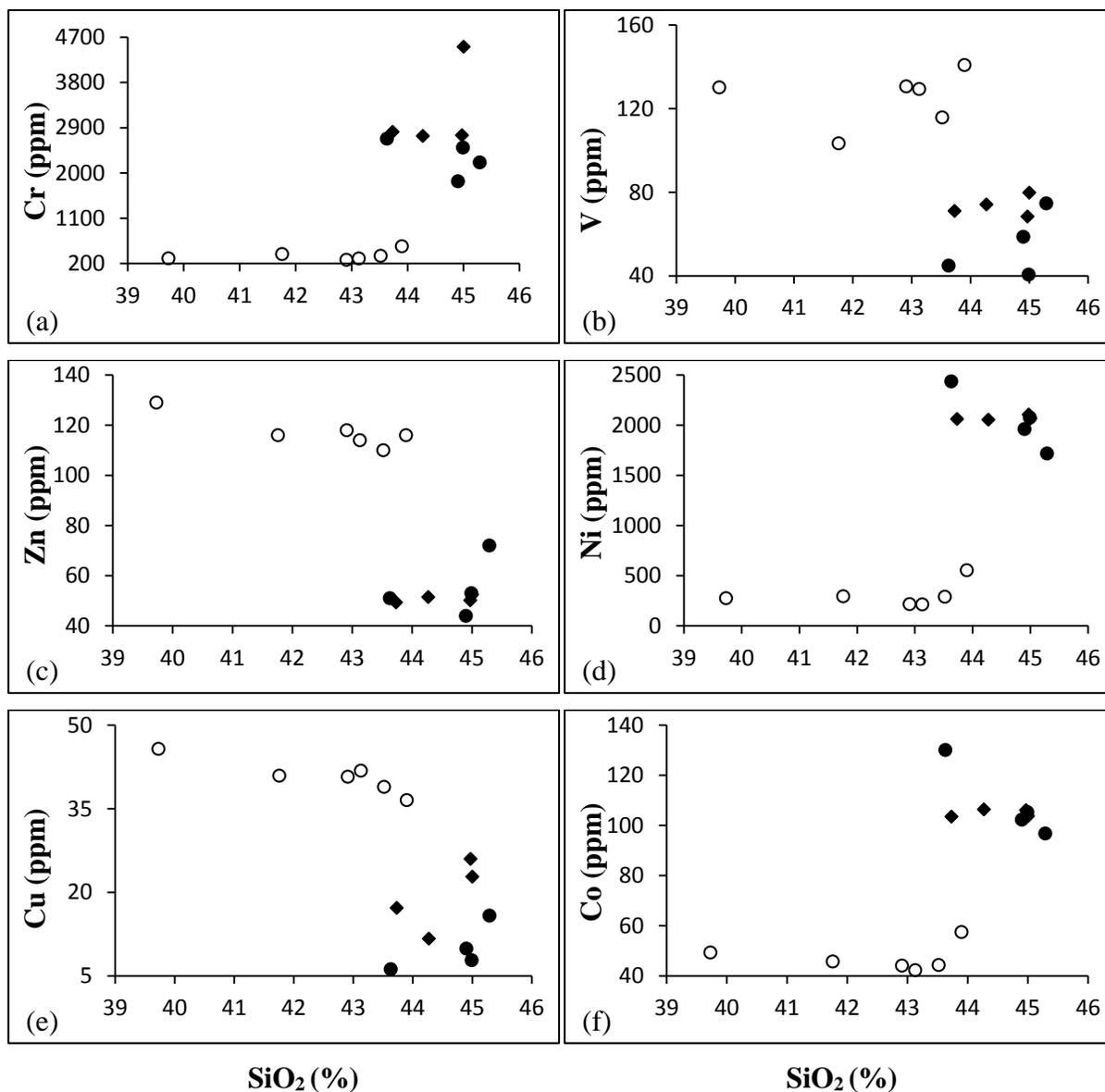
**Tableau 17:** Matrice de corrélation entre quelques éléments traces dans les péridotites altérées à Kumba.

	Cr	V	Zn	Ni	Cu	Co	Sc	Ba	Zr	Sr	Y	Li	Ga	Pb	Nb	Rb
Cr	1,00															
V	0,14	1,00														
Zn	-0,12	-0,09	1,00													
Ni	<b>0,97</b>	0,29	0,02	1,00												
Cu	-0,49	-0,36	<b>0,86</b>	-0,42	1,00											
Co	<b>0,81</b>	0,27	0,44	<b>0,90</b>	-0,02	1,00										
Sc	-0,05	-0,16	-0,52	-0,08	-0,36	-0,29	1,00									
Ba	0,20	-0,42	0,43	0,14	0,33	0,27	-0,52	1,00								
Zr	-0,63	-0,30	<b>0,82</b>	-0,53	<b>0,95</b>	-0,12	-0,30	0,21	1,00							
Sr	0,21	-0,04	0,05	0,28	-0,24	0,28	0,28	0,22	-0,05	1,00						
Y	0,52	0,45	0,64	0,69	0,18	<b>0,90</b>	-0,47	0,16	0,15	0,24	1,00					
Li	-0,56	-0,39	0,53	-0,49	0,80	-0,23	0,26	0,01	0,75	-0,14	-0,13	1,00				
Ga	-0,53	0,65	0,24	-0,37	0,23	-0,20	-0,26	-0,09	0,31	-0,07	0,12	0,17	1,00			
Pb	<b>-0,88</b>	-0,16	0,25	<b>-0,81</b>	0,62	-0,61	0,27	-0,30	0,68	-0,25	-0,38	<b>0,84</b>	0,45	1,00		
Nb	-0,67	-0,20	<b>0,80</b>	-0,57	<b>0,94</b>	-0,16	-0,40	0,18	<b>0,98</b>	-0,17	0,15	0,69	0,41	0,69	1,00	
Rb	-0,45	0,55	-0,51	-0,44	-0,35	-0,57	0,02	-0,67	-0,21	-0,38	-0,35	-0,30	0,48	0,23	-0,09	1,00

#### - Corrélations le silicium et quelques éléments traces

Le vanadium, le zinc et le cuivre possèdent des corrélations négatives avec le silicium (Fig. 43b, c et e). Le chrome, nickel et cobalt ont des teneurs qui varient très peu dans les péridotites altérées (Fig. 43a, d et f). Dans les péridotites saines, ces éléments (Cr, Ni et Co) possèdent des corrélations négatives avec la silice (Fig. 43a, d et f).

Aussi, le vanadium, le zinc et le cuivre, corrélés négativement avec la silice, ont été accumulés dans les péridotites altérées. Le chrome, le nickel et le cobalt ont été évacués au cours de l'altération des péridotites (Fig. 43).



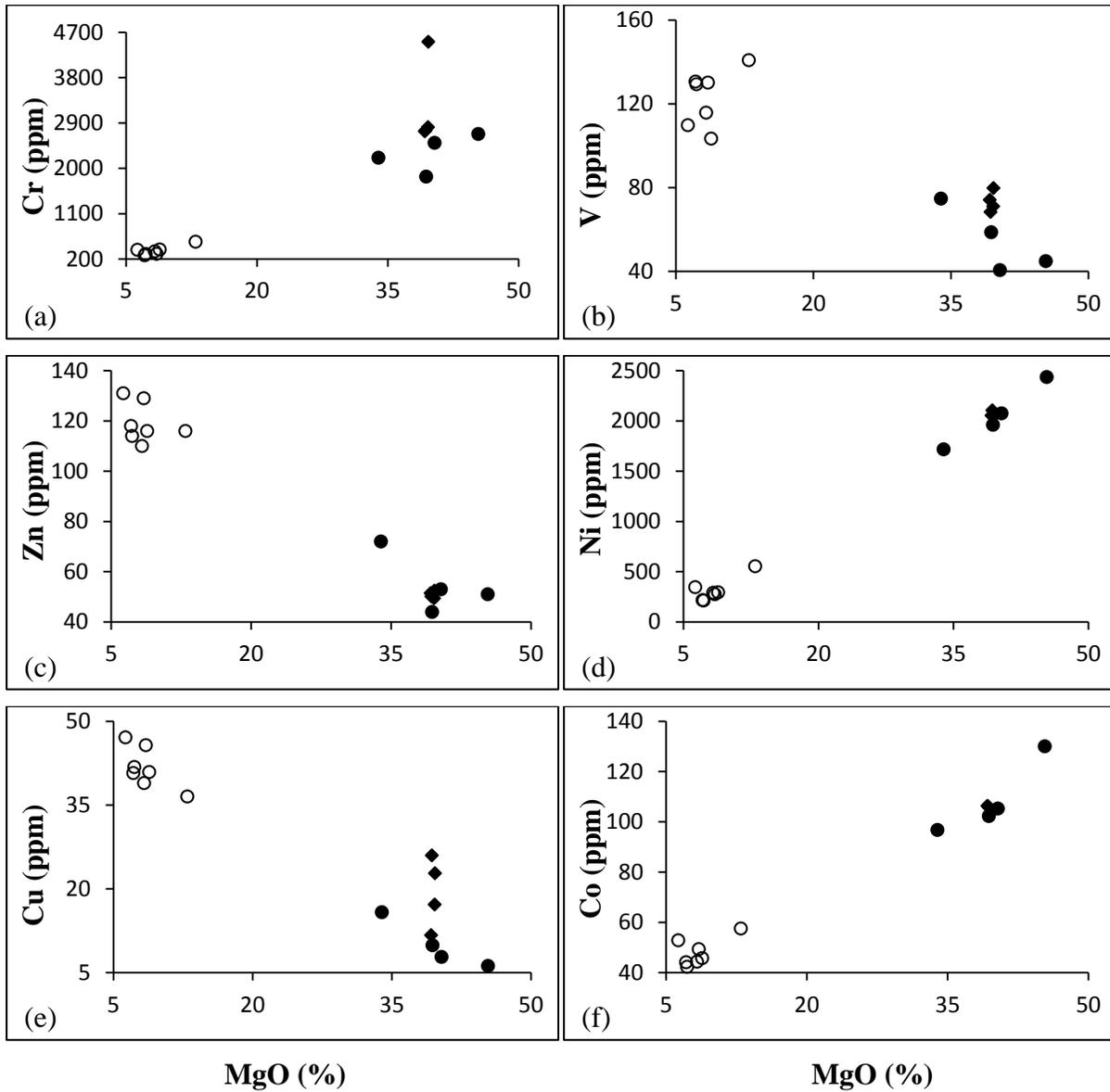
- Péridotites saines (Données actuelles).
- Péridotites altérées (Données actuelles).
- ◆ Péridotites saines (Teitchou, 2008).

**Figure 43** : Corrélation entre certains éléments traces et le silicium dans les péridotites de Kumba.

- **Corrélation entre le magnésium et quelques éléments traces**

Les diagrammes binaires établis entre quelques éléments traces (Cr, V, Zn, Ni, Cu et Co) et Mg montre :

- une corrélation positive du chrome, nickel et cobalt avec le Mg (Fig. 44a, d et f);
- une corrélation négative du vanadium, zinc et cuivre avec le Mg (Fig. 44b, c et e).

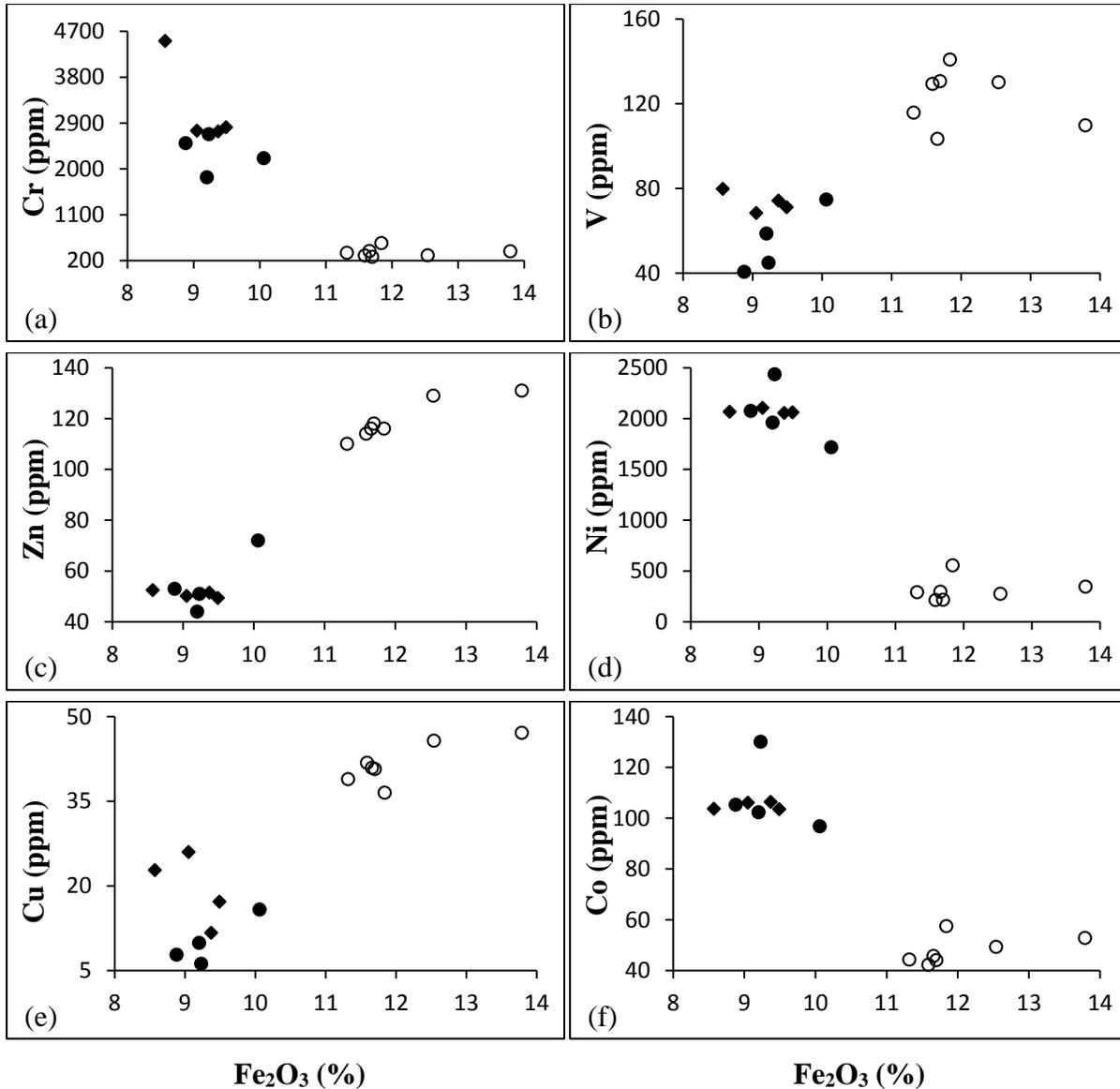


- Péridotites saines (Données actuelles).
- Péridotites altérées (Données actuelles).
- ◆ Péridotite saines (Teitchou, 2008).

**Figure 44** : Corrélation entre certains éléments traces et le magnésium dans les péridotites de Kumba.

- **Corrélation entre le fer et quelques éléments traces**

Le comportement du fer vis-à-vis des éléments traces (Cr, V, Zn, Ni, Cu et Co) dans les péridotites de Kumba est l'opposé de celui du magnésium. Le chrome, nickel et cobalt possèdent des corrélations négatives avec  $Fe_2O_3$  (Fig. 45a, d et f) tandis que le vanadium, zinc et cuivre possèdent des corrélations positives avec  $Fe_2O_3$  (Fig. 45b, c et e).



- Péridotites saines (Données actuelles).
- Péridotites altérées (Données actuelles).
- ◆ Péridotite saines (Teitchou, 2008).

**Figure 45 :** Corrélation entre certains éléments traces et le fer dans les péridotites à Kumba.

## II. GEOCHIMIE DES TERRES RARES

### II.1. Péridotites

#### II.1.1. Site de Nyos

Les concentrations en terres rares dans les péridotites sont faibles, comprises entre 2 et 15 ppm. Les teneurs en terres rares légères sont largement supérieures à celles en terres rares lourdes (LREE/HREE compris entre 0,96 et 17,19). Le rapport  $(La/Yb)_N$  qui indique le taux de fractionnement est aussi très variable de 0,37 à 21,81 (tableau 18).

Dans le détail, seuls le cérium, le lanthane et le néodyme ont des teneurs supérieures à l'unité dans certains échantillons (tableau 18). Les calculs des anomalies montrent qu'un seul échantillon (LNY18) possède des anomalies négatives en Ce (tableau 18).

Les spectres des terres rares des péridotites altérées de Nyos normalisées par rapport à la chondrite d'après les données de McDonough et Sun (1995) sont hétérogènes et montrent trois caractéristiques (Fig. 46):

- (i) il y a un fractionnement des terres rares légères (du lanthane à l'euporium) ;
- (ii) certains échantillons sont enrichis en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes et d'autres inversement ;
- (iii) il y a un parallélisme et une platitude des spectres des terres rares lourdes.

#### II.1.2. Site de Kumba

Les concentrations en terres rares dans les péridotites de Kumba et les rapports  $Ce/Ce^*$  et  $Eu/Eu^*$  sont consignés dans le tableau 19. Les concentrations en terres rares sont variables ( $\sum REE < 60$  ppm). Les échantillons (LKU07 et LKU12) montrent les teneurs les plus faibles en terres rares (tableau 19).

Les péridotites de Kumba présentent un enrichissement modéré en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes (LREE/HREE varie entre 3 et 10) (tableau 19). L'indice de fractionnement varie de 2 à 15 et n'est pas fonction de l'enrichissement en terres rares (tableau 19). Les spectres des terres rares des péridotites normalisés par rapport à la chondrite d'après les données de McDonough et Sun (1995) (Fig. 47) ont des allures globalement semblables. Les terres rares lourdes montrent une platitude des profils. La dilatation des courbes quoique presque parallèle est à l'image des concentrations en terres rares très variables d'un échantillon à un autre.

**Tableau 18:** Distribution des terres rares (ppm) dans les péridotites à Nyos.

Terres rares	L.d.	Péridotites de Nyos					
		LNY03	LNY09	LNY16	LNY18	LNY20	LNY22
La	0,04	1,47	0,24	0,20	0,31	1,38	3,53
Ce	0,12	2,90	0,67	0,55	0,42	2,62	6,96
Pr	0,01	0,34	0,11	0,11	0,06	0,32	0,68
Nd	0,06	1,20	0,71	0,67	0,25	1,33	2,31
Sm	0,01	0,25	0,24	0,27	0,10	0,33	0,35
Eu	0,01	0,08	0,10	0,11	0,05	0,12	0,09
Gd	0,01	0,27	0,36	0,4	0,20	0,45	0,26
Tb	0,02	0,05	0,06	0,08	0,04	0,08	0,04
Dy	0,01	0,30	0,46	0,55	0,32	0,56	0,21
Ho	0,01	0,07	0,09	0,12	0,07	0,12	0,04
Er	0,01	0,21	0,29	0,37	0,22	0,37	0,11
Tm	0,01	0,04	0,04	0,05	0,03	0,05	0,02
Yb	0,01	0,21	0,29	0,37	0,24	0,33	0,11
Lu	0,01	0,04	0,04	0,06	0,04	0,05	0,02
∑REE	-	7,43	3,70	3,91	2,35	8,11	14,73
LREE	-	6,24	2,07	1,91	1,19	6,10	13,92
HREE	-	1,19	1,63	2,00	1,16	2,01	0,81
LREE/HREE	-	5,26	1,27	0,96	1,03	3,04	17,19
(La/Yb) <sub>N</sub>	-	4,69	0,56	0,37	0,88	2,84	21,81
Ce/Ce*	-	0,99	1,00	0,90	0,75	0,95	1,09
Eu/Eu*	-	0,97	1,04	1,02	1,08	0,95	0,91

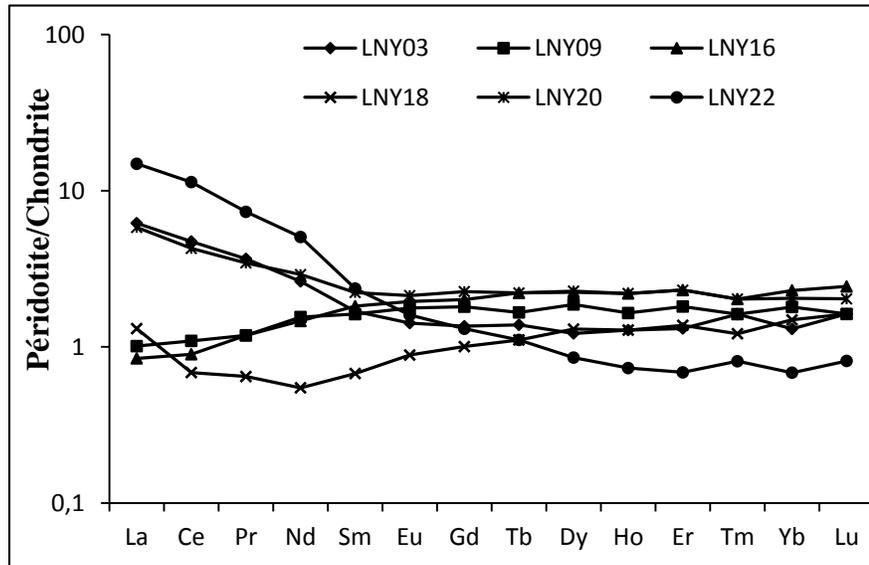
L.d. : Limites de détection.

LNY03 : Sababa (2008).

(La/Yb)<sub>N</sub> :  $(\text{La}_{\text{échantillon}}/\text{La}_{\text{chondrite}})/(\text{Yb}_{\text{échantillon}}/\text{Yb}_{\text{chondrite}})$ .

Ce/Ce\* :  $(\text{Ce}_{\text{échantillon}}/\text{Ce}_{\text{chondrite}})/(\text{La}_{\text{échantillon}}/\text{La}_{\text{chondrite}})^{1/2}(\text{Pr}_{\text{échantillon}}/\text{Pr}_{\text{chondrite}})^{1/2}$ .

Eu/Eu\* :  $(\text{Eu}_{\text{échantillon}}/\text{Eu}_{\text{chondrite}})/(\text{Sm}_{\text{échantillon}}/\text{Sm}_{\text{chondrite}})^{1/2}(\text{Gd}_{\text{échantillon}}/\text{Gd}_{\text{chondrite}})^{1/2}$ .



**Figure 46 :** Spectres des terres rares des péridotites de Nyos normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

**Tableau 19:** Distribution des terres rares (ppm) dans les péridotites à Kumba.

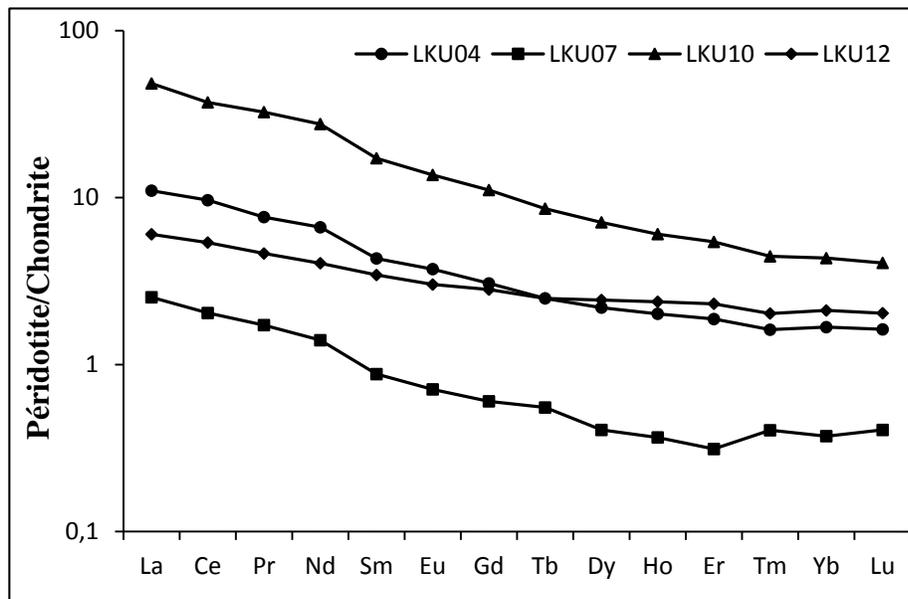
Terres rares	L.d.	Péridotites de Kumba			
		LKU04	LKU07	LKU10	LKU12
La	0,04	2,61	0,60	11,44	1,43
Ce	0,12	5,92	1,25	22,79	3,30
Pr	0,01	0,71	0,16	3,02	0,43
Nd	0,06	3,04	0,64	12,61	1,85
Sm	0,01	0,64	0,13	2,55	0,51
Eu	0,01	0,21	0,04	0,77	0,17
Gd	0,01	0,61	0,12	2,21	0,56
Tb	0,02	0,09	0,02	0,31	0,09
Dy	0,01	0,54	0,10	1,75	0,60
Ho	0,01	0,11	0,02	0,33	0,13
Er	0,01	0,30	0,05	0,87	0,37
Tm	0,01	0,04	0,01	0,11	0,05
Yb	0,01	0,27	0,06	0,70	0,34
Lu	0,01	0,04	0,01	0,10	0,05
∑REE	-	15,13	3,21	59,56	9,88
LREE	-	13,13	2,82	53,18	7,69
HREE	-	2,00	0,39	6,38	2,19
LREE/HREE	-	6,57	7,23	8,34	3,51
(La/Yb) <sub>N</sub>	-	6,67	7,41	11,10	2,88
Ce/Ce*	-	1,05	0,98	0,94	1,02
Eu/Eu*	-	1,03	0,92	0,99	0,96

L.d.: Limite de détection.

$(La/Yb)_N : (La_{\text{échantillon}}/La_{\text{chondrite}})/(Yb_{\text{échantillon}}/Yb_{\text{chondrite}})$ .

$Ce/Ce^* : (Ce_{\text{échantillon}}/Ce_{\text{chondrite}})/(La_{\text{échantillon}}/La_{\text{chondrite}})^{1/2}(Pr_{\text{échantillon}}/Pr_{\text{chondrite}})^{1/2}$ .

$Eu/Eu^* : (Eu_{\text{échantillon}}/Eu_{\text{chondrite}})/(Sm_{\text{échantillon}}/Sm_{\text{chondrite}})^{1/2}(Gd_{\text{échantillon}}/Gd_{\text{chondrite}})^{1/2}$ .



**Figure 47 :** Spectres des terres rares des péridotites de Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

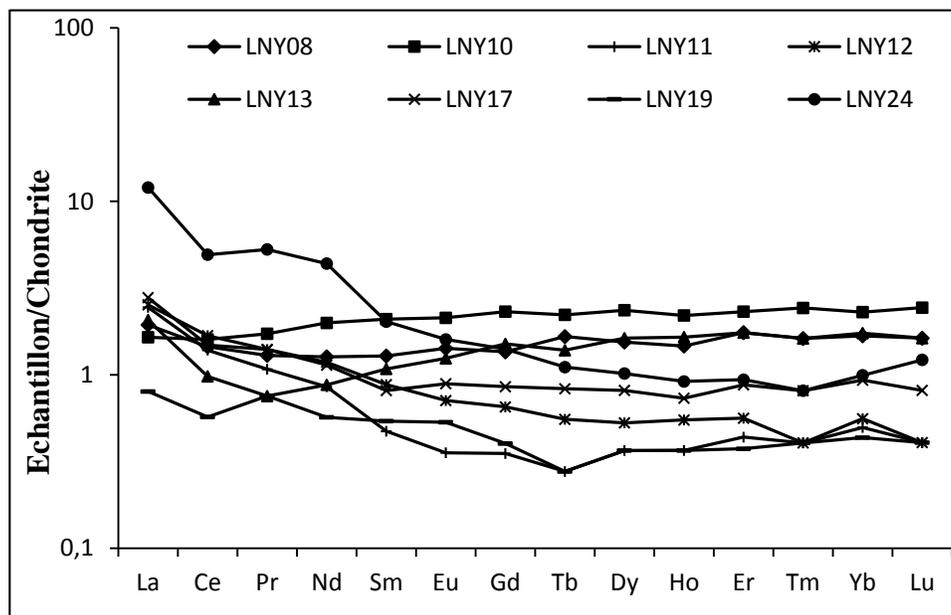
## II.2. Péridotites altérées

### II.2.1. Site de Nyos

Le comportement géochimique des terres rares dans les péridotites altérées de Nyos est similaire à celle des péridotites saines. Elles sont riches en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes ( $LREE/HREE = 1-9$ ) ; les teneurs en terres rares légères varient entre 1 et 9 ppm tandis que celles en terres rares lourdes sont comprises entre 0,3 et 2 ppm (tableau 20). Le taux de fractionnement est également variant ( $(La/Yb)_N = 0,77-12,1$ ) (tableau 20).

Toutes les terres rares ont des teneurs proches dans les péridotites altérées de Nyos ; globalement inférieures à 1 ppm à l'exception de l'échantillon LNY24 qui a des teneurs relativement élevées en terres rares légères. Le lanthane, le cérium et le néodyme ont des teneurs comprises entre 1 et 3 dans les échantillons LNY12 et LNY24. La somme des teneurs en terres rares varie entre 1 et 10 ppm (tableau 20).

Les péridotites altérées de Nyos ont des teneurs en terres rares proches de celles de la chondrite. Les spectres montrent une certaine platitude d'allure (Fig. 48). Les spectres présentent des anomalies négatives en cérium tandis que l'euprimum ne possède que des petites anomalies positives dans certains échantillons.



**Figure 48** : Spectres des terres rares des péridotites altérées de Nyos normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

**Tableau 20:** Distribution des terres rares (ppm) dans les péridotites altérées à Nyos.

Terres rares	L.d.	Péridotites altérées de Nyos							
		LNy08	LNy10	LNy11	LNy12	LNy13	LNy17	LNy19	LNy24
La	0,04	0,46	0,39	0,58	0,60	0,49	0,66	0,19	2,85
Ce	0,12	0,89	0,98	0,85	1,03	0,60	0,91	0,35	3,02
Pr	0,01	0,12	0,16	0,10	0,13	0,07	0,13	0,07	0,49
Nd	0,06	0,58	0,91	0,39	0,54	0,40	0,52	0,26	2,00
Sm	0,01	0,19	0,31	0,07	0,13	0,16	0,12	0,08	0,3
Eu	0,01	0,08	0,12	0,02	0,04	0,07	0,05	0,03	0,09
Gd	0,01	0,27	0,46	0,07	0,13	0,30	0,17	0,08	0,28
Tb	0,02	0,06	0,08	0,01	0,02	0,05	0,03	0,01	0,04
Dy	0,01	0,38	0,58	0,09	0,13	0,40	0,20	0,09	0,25
Ho	0,01	0,08	0,12	0,02	0,03	0,09	0,04	0,02	0,05
Er	0,01	0,28	0,37	0,07	0,09	0,28	0,14	0,06	0,15
Tm	0,01	0,04	0,06	0,01	0,01	0,04	0,02	0,01	0,02
Yb	0,01	0,27	0,37	0,08	0,09	0,28	0,15	0,07	0,16
Lu	0,01	0,04	0,06	0,01	0,01	0,04	0,02	0,01	0,03
∑REE	-	3,74	4,97	2,37	2,98	3,27	3,16	1,33	9,73
LREE	-	2,32	2,87	2,01	2,47	1,79	2,39	0,98	8,75
HREE	-	1,42	2,10	0,36	0,51	1,48	0,77	0,35	0,98
LREE/HREE	-	1,63	1,37	5,58	4,84	1,21	3,10	2,80	8,93
(La/Yb) <sub>N</sub>	-	1,16	0,72	4,92	4,53	1,19	2,99	1,84	12,10
Ce/Ce*	-	0,92	0,95	0,85	0,89	0,78	0,75	0,44	0,62
Eu/Eu*	-	1,08	0,97	0,87	0,93	0,97	1,07	1,14	0,95

L.d. : Limites de détection.

(La/Yb)<sub>N</sub> : (La<sub>échantillon</sub>/La<sub>chondrite</sub>)/(Yb<sub>échantillon</sub>/Yb<sub>chondrite</sub>).

Ce/Ce\* : (Ce<sub>échantillon</sub>/Ce<sub>chondrite</sub>)/(La<sub>échantillon</sub>/La<sub>chondrite</sub>)<sup>1/2</sup>(Pr<sub>échantillon</sub>/Pr<sub>chondrite</sub>)<sup>1/2</sup>.

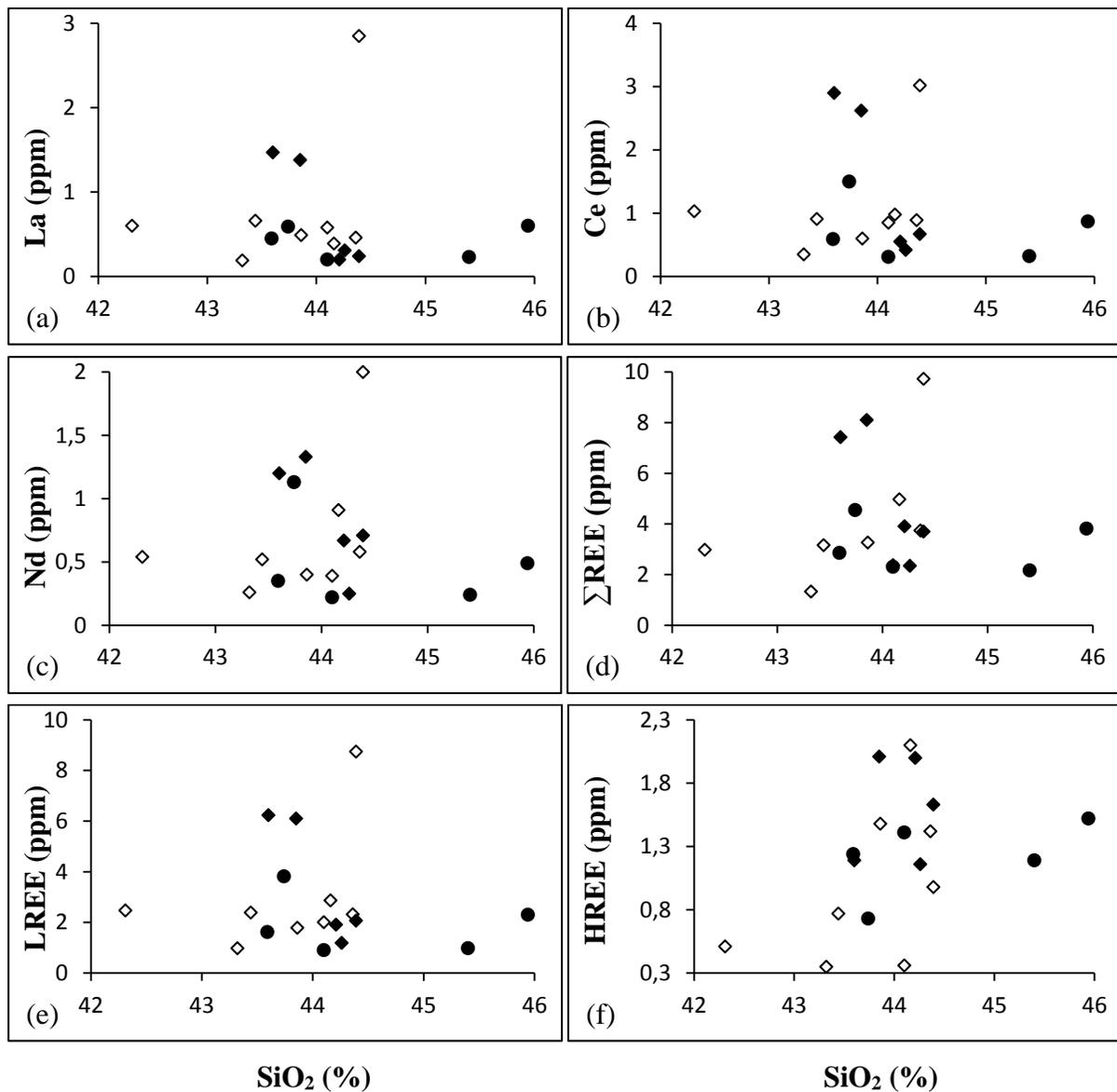
Eu/Eu\* : (Eu<sub>échantillon</sub>/Eu<sub>chondrite</sub>)/(Sm<sub>échantillon</sub>/Sm<sub>chondrite</sub>)<sup>1/2</sup>(Gd<sub>échantillon</sub>/Gd<sub>chondrite</sub>)<sup>1/2</sup>.

- **Corrélation entre les éléments majeurs et les terres rares**

Les éléments majeurs à teneurs élevés (SiO<sub>2</sub>, MgO et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et les terres rares ont été projetés dans des diagrammes binaires (Figs. 49, 50 et 51).

- **Corrélation entre le silicium et les terres rares**

Le lanthane, Ce et Nd ne possèdent pas d'affinité avec le silicium dans les péridotites de Nyos (Fig. 49a, b et c). Ainsi, les terres rares légères ne présentent pas de corrélation avec le silicium (Fig. 49e) tandis que les terres rares lourdes possèdent des corrélations positives avec SiO<sub>2</sub> (Fig. 49f). L'altération a conduit à un fractionnement des terres rares. La somme des terres rares est corrélée positivement avec la silice dans les péridotites saines (Fig. 49d).



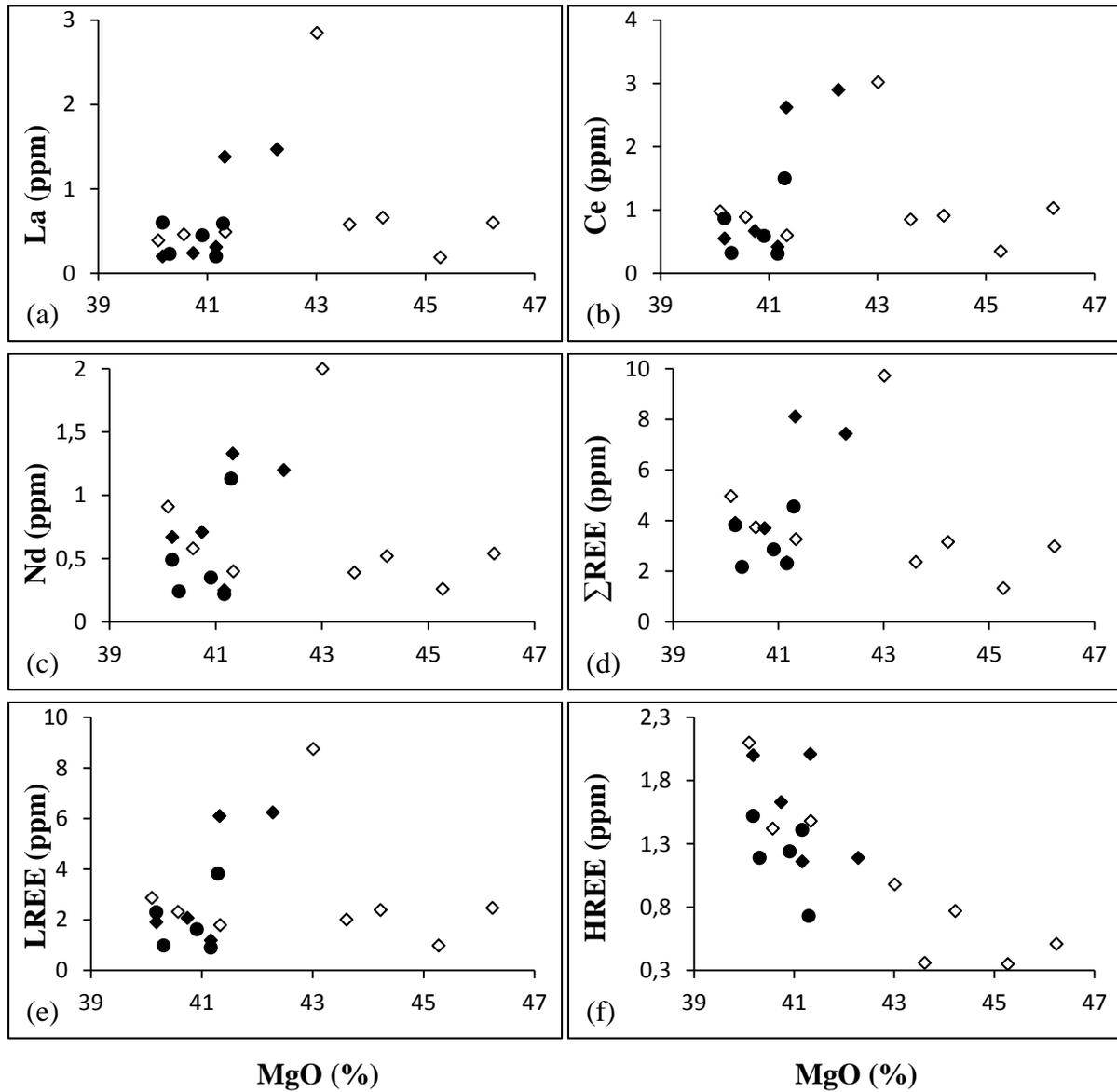
- ◆ Péridotites
- ◇ Péridotites altérées
- Péridotites (Teitchou, 2008)

**Figure 49** : Diagrammes de variation des terres rares par rapport à  $\text{SiO}_2$  des péridotites de Nyos.

- **Corrélation entre le magnésium et les terres rares**

Contrairement au silicium, les terres rares lourdes possèdent des corrélations négatives avec  $\text{MgO}$  (Fig. 50f). Aussi, le lanthane, le cérium et le néodyme ont des corrélations positives avec le  $\text{MgO}$  malgré quelques échantillons de péridotites altérées qui sont discriminés (Fig. 50a-e). Les éléments ont été redistribués au cours de l'altération des péridotites de Nyos. Les

corrélations positives entre la somme des terres rares et le magnésium (Fig. 50d) montrent la prédominance des terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes.



- ◆ Périidotites.
- ◇ Périidotites altérées.
- Périidotites (Teitchou, 2008).

**Figure 50** : Corrélation entre les terres rares et le magnésium dans les périidotites de Nyos.

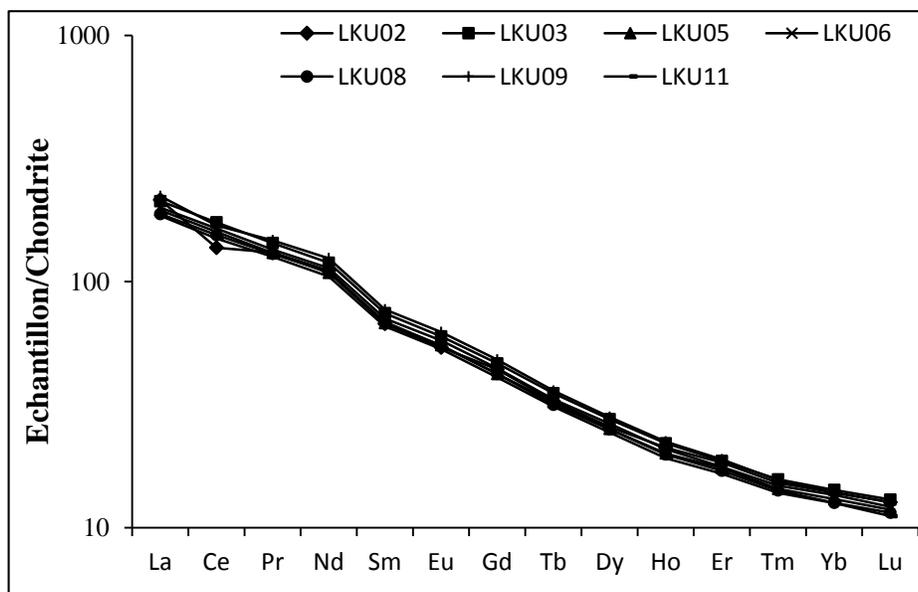


## II.2.2. Site de Kumba

Dans les péridotites altérées de Kumba, les teneurs en terres rares sont très élevées par rapport aux valeurs chondritiques (McDonough et Sun, 1995) (Fig. 52) et même à celles des péridotites saines. On assiste donc à une forte accumulation des terres rares dans les péridotites altérés de Kumba pendant les processus supergènes. La somme des concentrations en terres rares dans les différents échantillons varie entre 229 et 265 ppm (tableau 21).

Les teneurs en lanthane varient entre 43 et 53 ppm et celles en néodyme varient entre 47 et 54 ppm. La concentration en cérium varie entre 84 et 107 ppm. Les teneurs en praséodyme et samarium sont de l'ordre de la dizaine de ppm. Parmi les terres rares légères, seul l'euprium a des teneurs très faibles et peu variantes ( $\geq 3$  ppm) (tableau 21).

Parmi les terres rares lourdes, seules le gadolinium et le dysprosium ont des concentrations supérieures à 5 ppm. Les teneurs en Gd varient entre 8 et 10 ppm et celles en Dy sont de l'ordre de 6 ppm. L'holmium a des teneurs de l'ordre de l'unité tandis que l'erbium et l'yttrium ont des teneurs similaires et variant très peu (2-3 ppm). Le thulium et le lutétium ont des teneurs inférieures à 1 ppm (tableau 21).



**Figure 52** : Spectres des terres rares des péridotites altérées de Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

Ainsi, on a un enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes (LREE/HREE~9). L'indice de fractionnement est élevé et varie de 14 à 22 (tableau 21). On a de

petites anomalies négatives en cérium dans l'échantillon LKU02 ( $Ce/Ce^*=0,82$ ) et en europium dans l'échantillon LKU03 ( $Eu/Eu^*=0,88$ ) (tableau 21).

Les spectres des terres rares normalisées à la chondrite (McDounough et Sun, 1995) sont parallèles (Fig. 52). Ils montrent un enrichissement en terres rares légères avec des profils à pente forte et régulière.

**Tableau 21:** Distribution des terres rares (ppm) dans des péridotites altérées à Kumba.

Terres rares	L.d.	Péridotites altérées						
		LKU02	LKU03	LKU05	LKU06	LKU08	LKU09	LKU011
La	0,04	50,90	51,26	46,19	47,38	44,61	52,73	43,91
Ce	0,12	84,19	106,67	97,74	100,82	94,82	103,73	91,82
Pr	0,01	12,18	13,32	12,13	12,52	12,03	13,65	11,72
Nd	0,06	50,56	54,52	49,58	51,84	50,06	56,84	47,94
Sm	0,01	9,98	11,02	10,03	10,49	10,15	11,41	9,74
Eu	0,01	3,04	3,37	3,10	3,25	3,09	3,51	3,00
Gd	0,01	8,75	9,26	8,38	8,84	8,39	9,59	8,12
Tb	0,02	1,18	1,27	1,17	1,20	1,14	1,30	1,12
Dy	0,01	6,32	6,79	6,19	6,52	6,18	6,93	6,00
Ho	0,01	1,15	1,20	1,09	1,14	1,08	1,22	1,05
Er	0,01	2,94	2,99	2,79	2,82	2,73	3,03	2,65
Tm	0,01	0,38	0,39	0,36	0,37	0,35	0,39	0,34
Yb	0,01	2,23	2,29	2,10	2,19	2,03	2,24	2,03
Lu	0,01	0,31	0,32	0,29	0,30	0,28	0,31	0,27
$\Sigma$ REE	-	235,87	267,23	243,48	252,16	239,17	269,45	231,74
LREE	-	210,86	240,15	218,77	226,29	214,77	241,86	208,12
HREE	-	25,02	27,07	24,72	25,87	24,41	27,59	23,62
LREE/HREE	-	8,43	8,87	8,85	8,75	8,80	8,77	8,81
$(La/Yb)_N$	-	15,49	15,19	14,92	14,71	21,97	15,98	14,72
$Ce/Ce^*$	-	0,82	0,99	1,00	1,00	0,99	0,94	0,98
$Eu/Eu^*$	-	0,99	0,88	1,03	1,03	1,02	1,02	1,03

L.d.: Limite de détection.

$(La/Yb)_N$  :  $(La_{\text{échantillon}}/La_{\text{chondrite}})/(Yb_{\text{échantillon}}/Yb_{\text{chondrite}})$ .

$Ce/Ce^*$  :  $(Ce_{\text{échantillon}}/Ce_{\text{chondrite}})/(La_{\text{échantillon}}/La_{\text{chondrite}})^{1/2}(Pr_{\text{échantillon}}/Pr_{\text{chondrite}})^{1/2}$ .

$Eu/Eu^*$  :  $(Eu_{\text{échantillon}}/Eu_{\text{chondrite}})/(Sm_{\text{échantillon}}/Sm_{\text{chondrite}})^{1/2}(Gd_{\text{échantillon}}/Gd_{\text{chondrite}})^{1/2}$ .

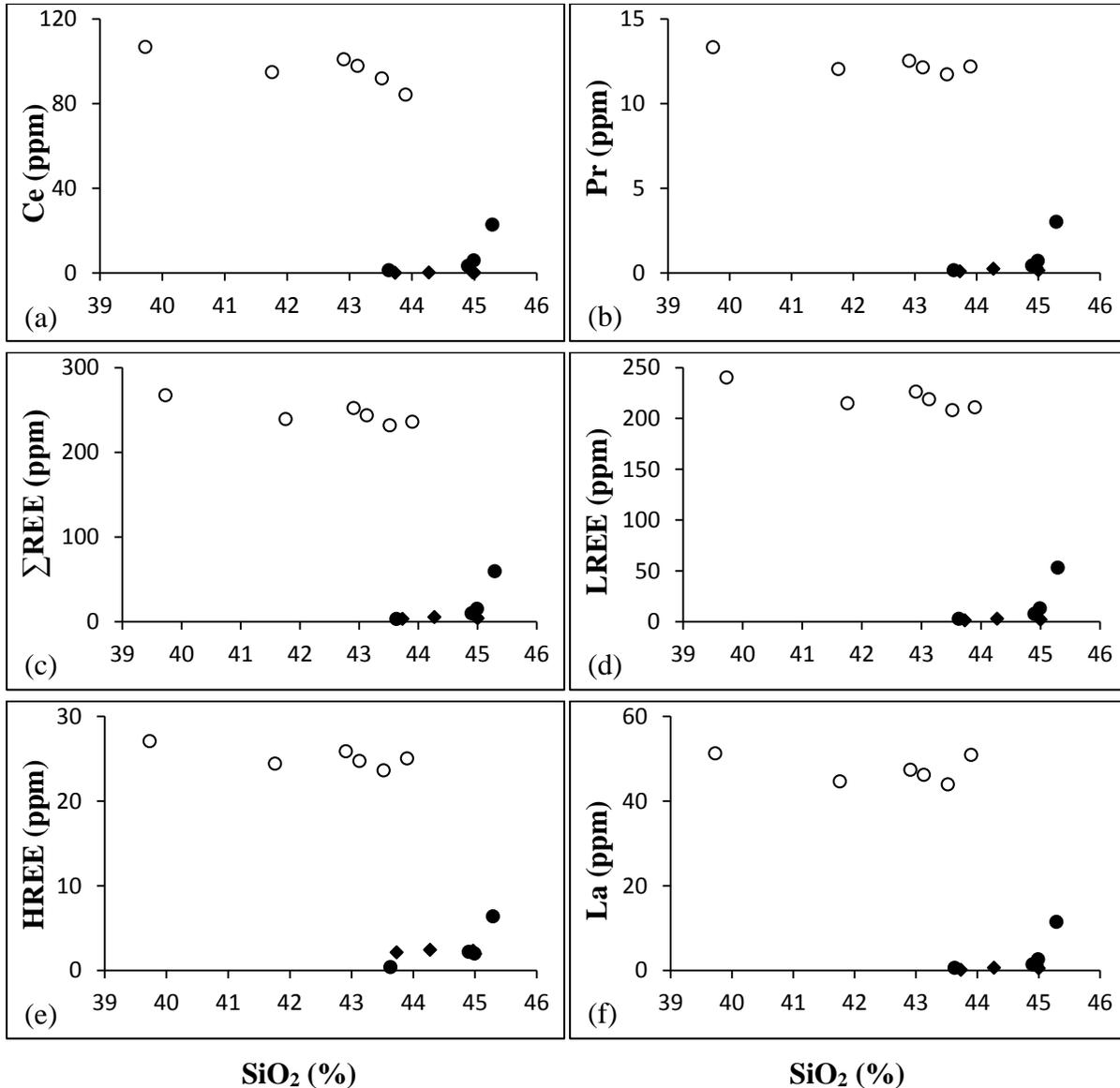
- **Corrélation entre les éléments majeurs et les terres rares**

Les diagrammes binaires dans lesquels les éléments majeurs à teneurs élevées ( $SiO_2$ ,  $MgO$  et  $Fe_2O_3$ ) et les terres rares ont été projetés montrent que toutes les terres rares ont été fortement accumulées au cours de l'altération (Figs. 53-55).

- **Corrélation entre le silicium et les terres rares**

Le comportement des terres rares par rapport à la silice est différentiel :

- dans les péridotites altérées, le lanthane, Ce, Pr,  $\Sigma$ REE, LREE et HREE possèdent des corrélations négatives avec le SiO<sub>2</sub> (Fig. 53a-f);
- dans les péridotites saines, ces éléments présentent plutôt des corrélations positives avec le SiO<sub>2</sub> (Fig. 53a-f).

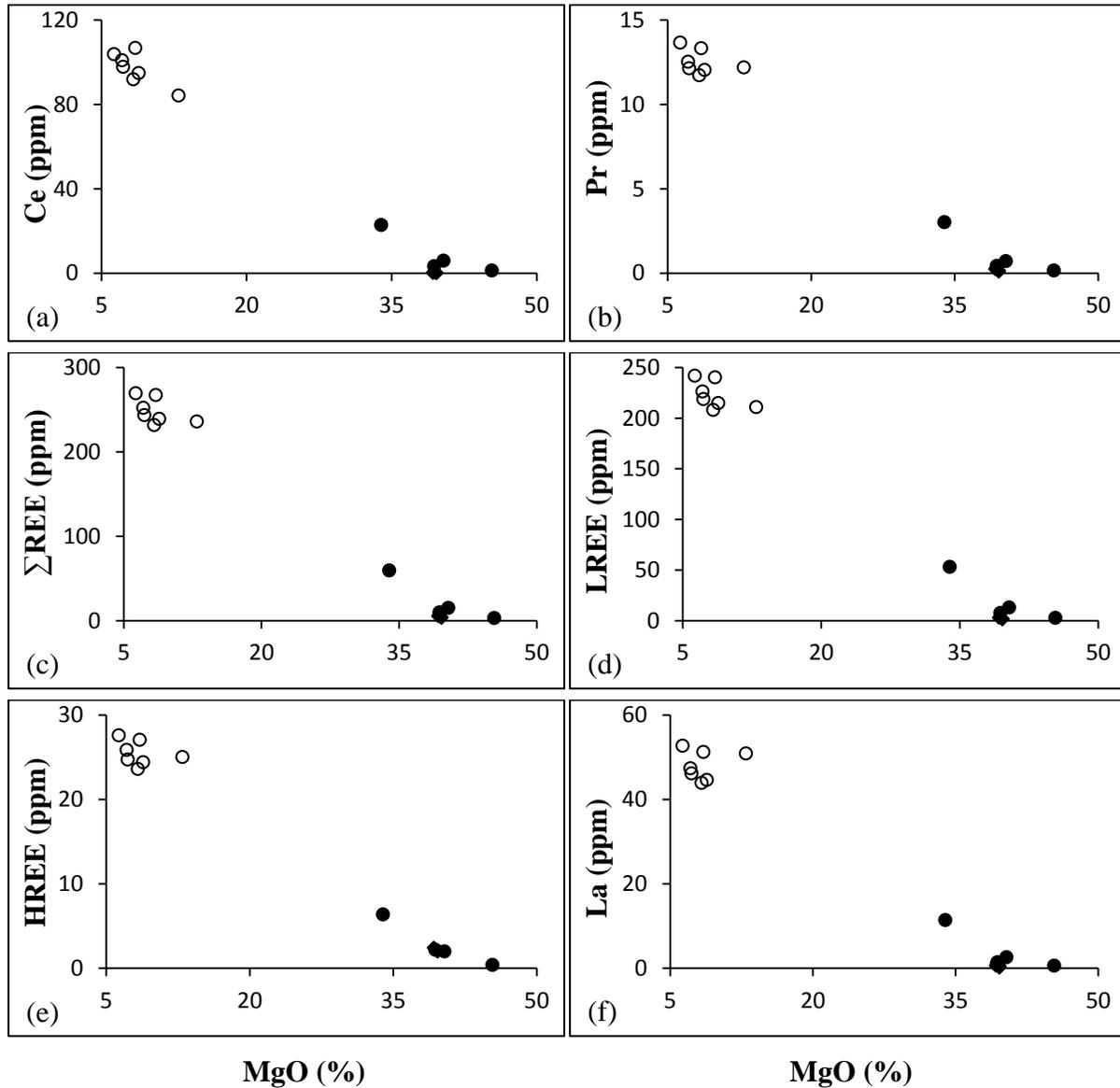


- Périidotites.
- Périidotites altérées.
- ◆ Périidotites (Teitchou, 2008).

**Figure 53 :** Corrélation entre les terres rares et le silicium dans les péridotites de Kumba.

- **Corrélations entre le magnésium et les terres rares**

Le comportement du magnésium et des terres rares est antagoniste. Les terres rares sont fortement accumulées et le magnésium fortement mobilisé au cours de l'altération. C'est ainsi que les corrélations sont nettement négatives entre les terres rares et le MgO (Fig. 54a-f).

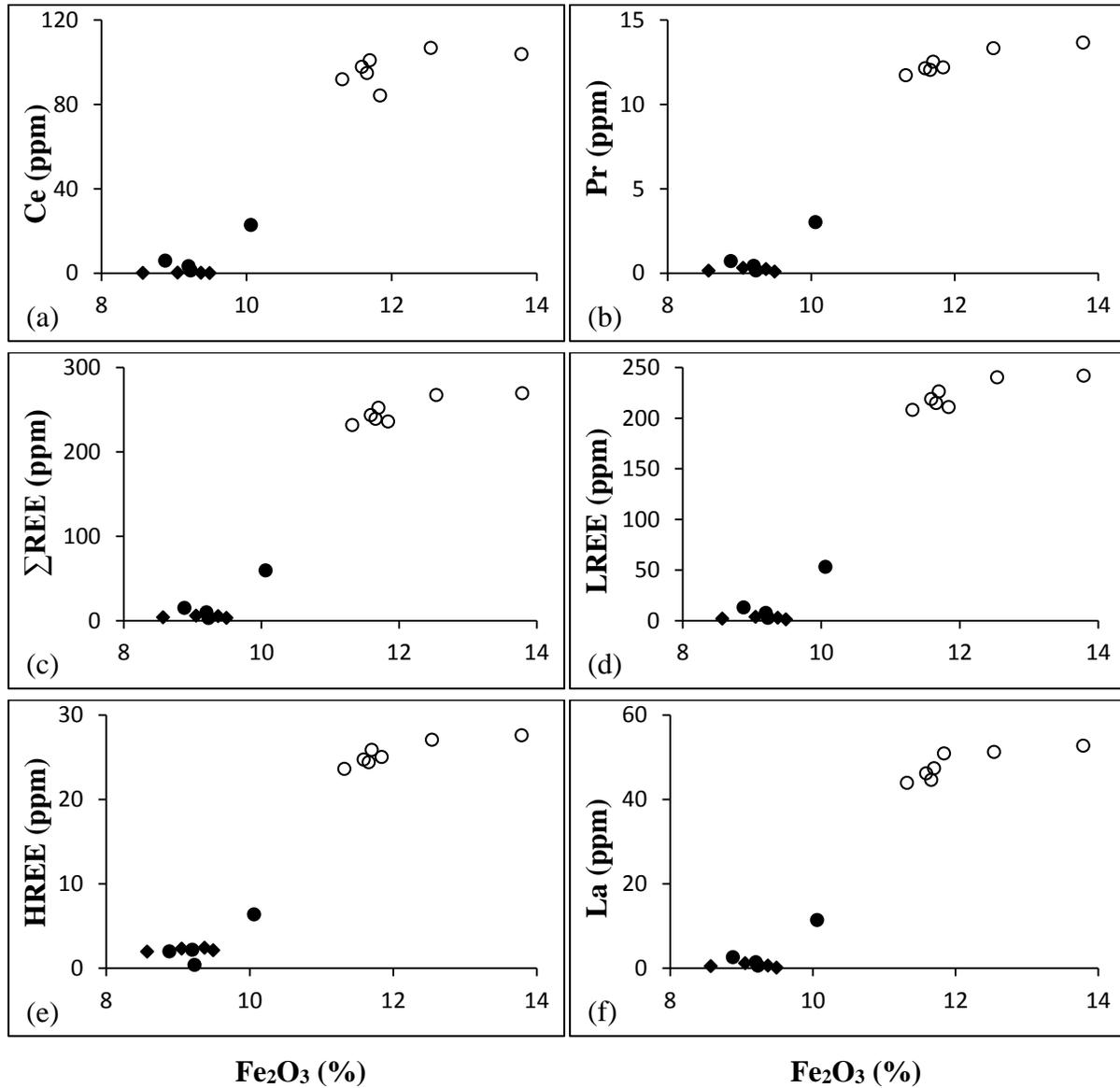


- Péridotites.
- Péridotites altérées.
- ◆ Péridotites (Teitchou, 2008).

**Figure 54 :** Corrélations entre les terres rares et le magnésium dans les péridotites de Kumba.

- **Corrélation entre le fer et les terres rares**

Les terres rares et le fer ont des comportements similaires. Ils sont remobilisés au cours de l'altération des péridotites de Kumba. Pour cela ils possèdent des corrélations nettement positives (Fig. 55a-f).



- Péridotites.
- Péridotites altérées.
- ◆ Péridotites (Teitchou, 2008).

**Figure 55 :** Corrélation entre les terres rares et le fer dans les péridotites à Kumba.

### **III. GEOCHIMIE DE L'OR ET DES ELEMENTS DU GROUPE DU PLATINE**

Les éléments du groupe du platine sont subdivisés en deux sous-groupes : les éléments du groupe du platine et de l'iridium (osmium, iridium et ruthénium) et les éléments du groupe du platine et du palladium (platine, palladium et rhodium) ; EGPI et EGPP.

La mobilité de l'or et des éléments du groupe du platine peut être étudié en faisant des rapports des concentrations : Pt/Pd, Pt/Ir, Pt/Rh, Pt/Ru et Pt/Au.

#### **III.1. Péridotites**

##### **III.1.1. Site de Nyos**

Parmi l'or et les éléments du groupe de platine, le ruthénium, le platine, le palladium et l'iridium ont des concentrations les plus considérables (tableau 22). La somme des concentrations en PGE varie de 13 à 20 ppb. On note un enrichissement relatif en EGPI par rapport aux EGPP ( $EGPI/EGPP = 0,91-2$ ). Les rapports Pt/Pd et Pt/Rh sont supérieurs à 1 (tableau 22) ; le rhodium et le palladium sont plus mobiles que le platine dans les péridotites de Nyos (tableau 22). Le rapport Pt/Ru est inférieur à 1, ceci montre que le platine est plus mobile que le ruthénium dans les péridotites de Nyos. Le comportement de l'iridium est très contreversé ; les rapports Pt/Ir varient entre 0,76 et 1,68. Les rapports  $(Pt+Pd)/\Sigma EGP$  oscillent entre 0,28 et 0,47 (tableau 22).

Les concentrations en or sont proches de la limite de détection dans les péridotites de Nyos (0,47 ppb) (tableau 22). L'or est plus mobile que tous les éléments du groupe du platine.

Les concentrations normalisées par rapport aux valeurs de la chondrite (McDonough et Sun, 1995) montrent que les péridotites à Nyos ont des teneurs faibles en Au-EGP. Les spectres montrent de petites anomalies négatives en platine (fig. 56).

##### **III.1.2. Site de Kumba**

Les teneurs en éléments du groupe du platine (EGP) dans les péridotites de Kumba ne sont pas élevées. La somme des concentrations en EGP varie entre 9 et 16 ppb (tableau 23). Les teneurs sont relativement élevées en Ru, Pt et Ir. Les concentrations en ruthénium sont comprises entre 3,32 et 6,48 ppb, celles en platine entre 2,7 et 4,6 ppb et la teneur en iridium oscille entre 1,82 et 3,67 ppb. Le palladium a des teneurs supérieures à celle du rhodium ; elles se situent entre 1,15 et 2,37 ppb pour le palladium tandis qu'elles sont inférieures à 1 ppb pour le rhodium

(tableau 23). Comme dans le cas des péridotites de Nyos, les EGPI sont plus enrichis que les EGPP ( $EGPI/EGPP = 1,04-1,97$ ) ; la somme des concentrations en EGPI varie de 5 à 10 ppb alors que la somme des concentrations en EGPP se situe entre 4 et 8 ppb (tableau 23).

L'or possède également des teneurs faibles dans les péridotites de Kumba. Les teneurs ne dépassent pas 0,40 ppb (tableau 23).

Les valeurs des rapports Pt/Pd, Pt/Ir, Pt/Rh et Pt/Au, quoique variables, sont supérieures à 1 (tableau 23) ; ce qui indique que le palladium, iridium, rhodium et or sont plus mobiles que le platine. Par contre, le rapport Pt/Ru est inférieur à 1 (tableau 23) ; le platine est plus mobile que le ruthénium. Le ruthénium est donc l'élément le moins mobile, juste devant le platine, parmi les Au-EGP dans les péridotites de Kumba. Le platine et le palladium représentent près de la moitié des EGP ( $Pt+Pd/\sum EGP = 0,29-0,44$ ).

**Tableau 22** : Distribution des Au-PGE (ppb) dans les péridotites à Nyos.

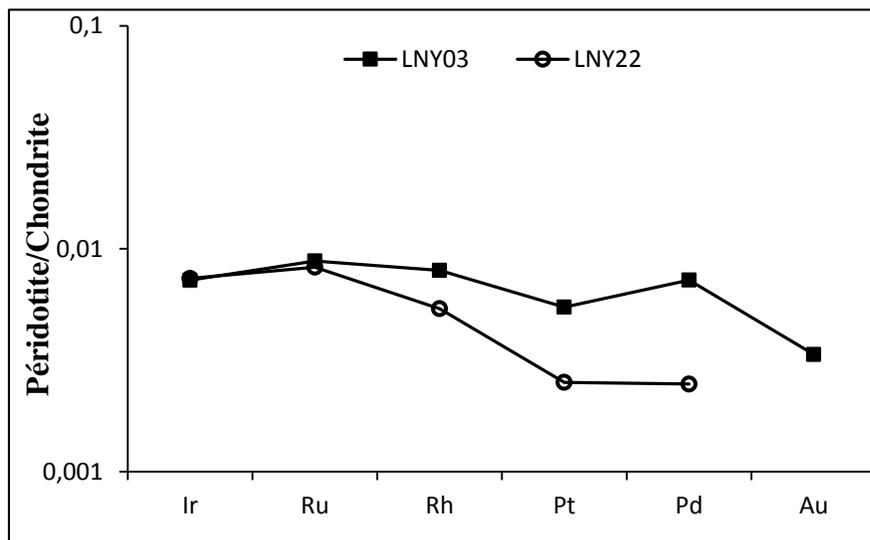
Au-PGE	L. d.	Péridotites de Nyos	
		LNY03	LNY22
Ir	0,01	3,29	3,35
Ru	0,08	6,26	5,87
Rh	0,02	1,04	0,70
Pt	0,17	5,53	2,54
Pd	0,12	3,98	1,36
Au	0,22	0,47	< l.d.
Au-EGP	-	20,57	13,82
EGP	-	20,10	13,82
EGPI	-	9,55	9,22
EGPP	-	10,55	4,60
EGPI/EGPP	-	0,91	2,00
Pd/ $\sum$ EGP	-	0,19	0,10
Pt/ $\sum$ EGP	-	0,27	0,18
Pd+Pt/ $\sum$ EGP	-	0,47	0,28
Pt/Pd	-	1,39	1,87
Pt/Ir	-	1,68	0,76
Pt/Rh	-	5,32	3,63
Pt/Ru	-	0,88	0,43
Pt/Au	-	11,50	-

L.d. : Limite de détection.

LNY03 : Sababa (2008).

Les teneurs en or et éléments du groupe du platine normalisées par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995) montrent que les péridotites de Kumba ont des teneurs faibles en Au-

EGP. Les spectres révèlent des petites anomalies négatives en platine et positives en ruthénium (Fig. 57).

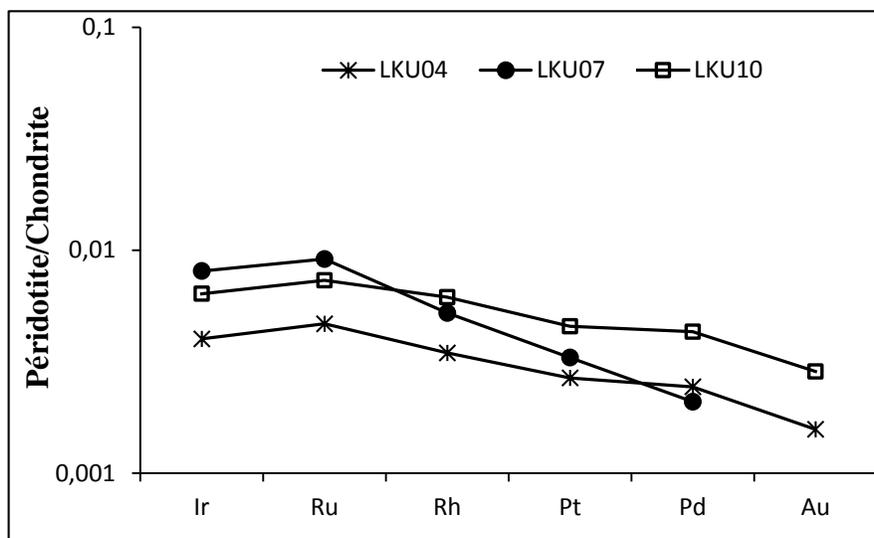


**Figure 56 :** Spectres des Au-EGP des péridotites de Nyo normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

**Tableau 23:** Distribution des Au-EGP (ppb) dans les péridotites à Kumba.

Au-EGP	L.d.	Péridotites de Kumba		
		LKU04	LKU07	LKU10
Ir	0,01	1,82	3,67	2,90
Ru	0,08	3,32	6,48	5,20
Rh	0,02	0,45	0,68	0,80
Pt	0,17	2,70	3,33	4,60
Pd	0,12	1,34	1,15	2,37
Au	0,22	0,22	<l.d.	0,40
ΣAu-EGP	-	9,85	15,31	16,27
ΣEGP	-	9,63	15,31	15,87
EGPI	-	5,14	10,15	8,10
EGPP	-	4,49	5,16	7,77
EGPI/EGPP	-	1,14	1,97	1,04
Pd/ΣEGP	-	0,14	0,75	0,15
Pt/ΣEGP	-	0,28	0,22	0,29
Pd+Pt/ΣEGP	-	0,42	0,29	0,44
Pt/Pd	-	2,01	2,90	1,94
Pt/Ir	-	1,48	0,91	1,59
Pt/Rh	-	6,00	4,90	5,75
Pt/Ru	-	0,81	0,51	0,88
Pt/Au	-	12,27	-	11,50

L.d. : limite de détection.



**Figure 57 :** Spectres des Au-EGP des péridotites de Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

## III.2. Péridotites altérées

### III.2.1. Site de Nyos

Les teneurs en or et éléments du groupe du platine varient très peu dans les péridotites altérées de Nyos ( $\Sigma Au\text{-EGP} = 16\text{-}24$  ppb). Le ruthénium, le platine et l'iridium ont les teneurs les plus élevées parmi les Au-EGP (tableau 24). Dans l'échantillon LNY11, la teneur en or est de 0,51 ppb tandis que dans les autres échantillons, elle est inférieure à la limite de détection (tableau 24). On a un enrichissement en EGPI relatif aux EGPP ( $EGPI/EGPP = 1,16\text{-}2,09$ ).

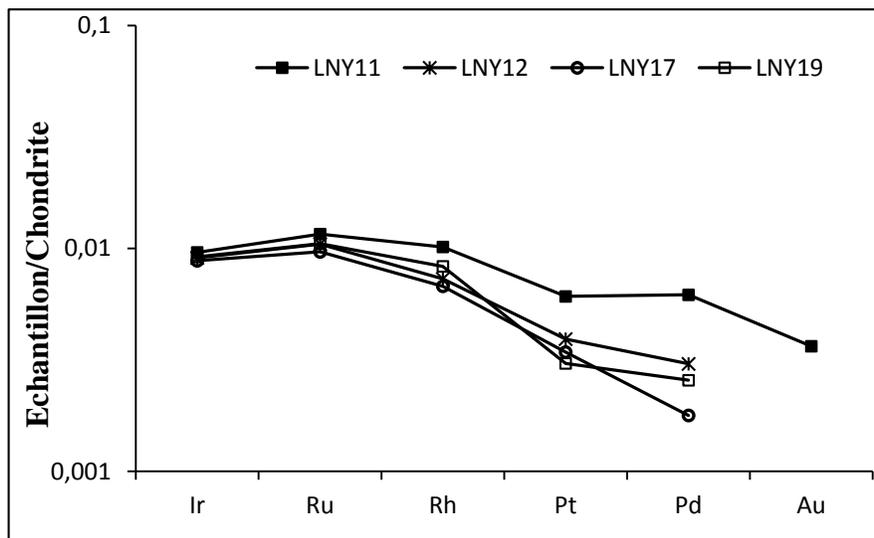
Les rapports Pt/Rh et Pt/Pd montrent que le rhodium et le palladium sont plus mobiles que le platine. Le rapport Pt/Ru indique que le platine est plus mobile que le ruthénium. Comme pour les péridotites saines l'iridium a un comportement contreversé (tableau 24).

Les teneurs en Au-EGP normalisées à la chondrite montrent que les péridotites altérées de Nyos ont des concentrations très faibles en Au-EGP. Les spectres révèlent des anomalies négatives en platine (Fig. 58).

**Tableau 24:** Distribution des Au-EGP (ppb) dans les péridotites altérées à Nyos.

Au-PGE	L. d.	Péridotites altérées de Nyos			
		LNY11	LNY12	LNY17	LNY19
Ir	0,01	4,37	4,13	4,01	4,17
Ru	0,08	8,24	7,43	6,86	7,46
Rh	0,02	1,32	0,95	0,88	1,08
Pt	0,17	6,16	3,96	3,46	3,08
Pd	0,12	3,41	1,67	0,98	1,41
Au	0,22	0,51	<l.d.	<l.d.	<l.d.
$\Sigma$ Au-EGP	-	24,01	18,14	16,19	17,20
$\Sigma$ EGP	-	23,50	18,14	16,19	17,20
EGPI	-	12,61	11,56	10,87	11,63
EGPP	-	10,89	6,58	5,32	5,57
EGPI/EGPP	-	1,16	1,76	2,04	2,09
Pd/ $\Sigma$ EGP	-	0,15	0,09	0,06	0,08
Pt/ $\Sigma$ EGP	-	0,26	0,22	0,21	0,18
Pd+Pt/ $\Sigma$ EGP	-	0,41	0,31	0,27	0,26
Pt/Pd	-	1,81	2,37	3,53	2,18
Pt/Ir	-	1,41	0,96	0,86	0,74
Pt/Rh	-	4,67	4,17	3,93	2,85
Pt/Ru	-	0,75	0,53	0,50	0,41
Pt/Au	-	12,08	-	-	-

L.d. : Limite de détection.



**Figure 58 :** Spectres des Au-EGP des péridotites altérées de Nyos normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

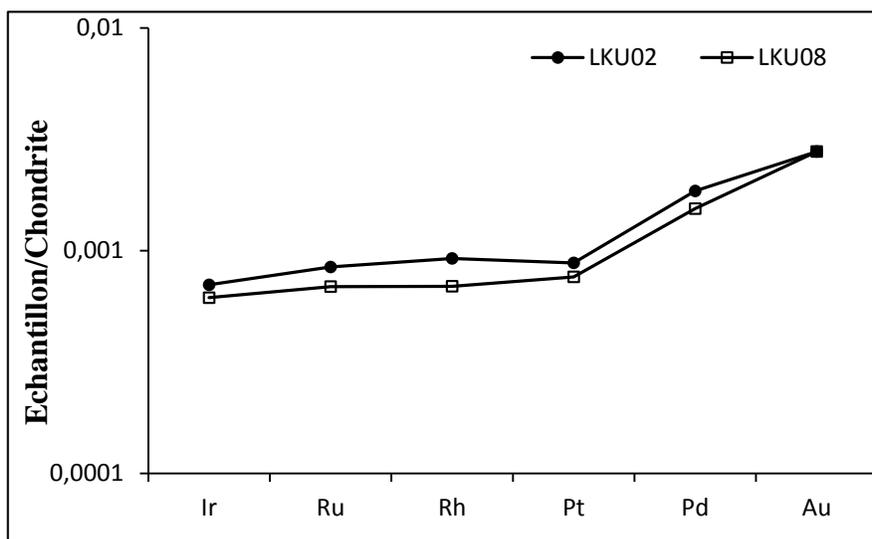
### III.2.2. Site de Kumba

Les teneurs en EGP sont plus faibles dans les péridotites altérées de Kumba que dans les péridotites saines. Le palladium est l'élément le plus représenté avec des teneurs de l'ordre de 1 ppb (tableau 25). Les teneurs en platine sont comprises entre 0,77 et 0,89 ppb et celles en ruthénium sont peu variables de 0,49 à 50 ppb (tableau 25). L'iridium et le rhodium ont teneurs encore plus faibles.

La somme des concentrations en EGP oscille entre 2 et 4 ppb. Contrairement aux péridotites non altérées, les EGPP ont des teneurs plus élevées que les EGPI (EGPI/EGPP = 0,38-0,49). La somme des concentrations en EGPI est comprise entre 0,77 et 0,92 ppb et celle en EGPP varie de 1,71 à 2,42 ppb. Le platine et le palladium représentent plus de 50% de la somme des teneurs en EGP (tableau 25).

Les rapports Pt/Ir, Pt/Rh, Pt/Ru et Pt/Au sont supérieurs à 1 (tableau 25). L'iridium, le rhodium, le ruthénium et l'or sont plus mobiles que le platine. Seul le rapport Pt/Pd est inférieur à 1 (tableau 25) ; le platine est plus mobile que le palladium.

Les spectres des EGP normalisés à la chondrite (McDonough et Sun, 1995) montre des spectres parallèles avec un enrichissement relatif en Pd et Au et des anomalies négatives en Pt (Fig. 59).



**Figure 59** : Spectres des Au-EGP des péridotites altérées de Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

**Tableau 25:** Distribution des Au-PGE (ppb) dans les péridotites altérées à Kumba.

Au-EGP	L.d.	Péridotites altérées de Kumba	
		LKU02	LKU08
Ir	0,01	0,32	0,28
Ru	0,08	0,60	0,49
Rh	0,02	0,12	0,09
Pt	0,17	0,89	0,77
Pd	0,12	1,02	0,85
Au	0,22	0,39	0,39
$\Sigma$ Au-EGP	-	2,95	2,87
$\Sigma$ EGP	-	3,34	2,48
EGPI	-	0,92	0,77
EGPP	-	2,42	1,71
EGPI/EGPP	-	0,38	0,49
Pd/ $\Sigma$ EGP	-	0,31	0,34
Pt/ $\Sigma$ EGP	-	0,27	0,31
Pd+Pt/ $\Sigma$ EGP	-	0,57	0,65
Pt/Pd	-	0,87	0,91
Pt/Ir	-	2,78	2,75
Pt/Rh	-	7,42	8,56
Pt/Ru	-	1,48	1,57
Pt/Au	-	2,28	1,97

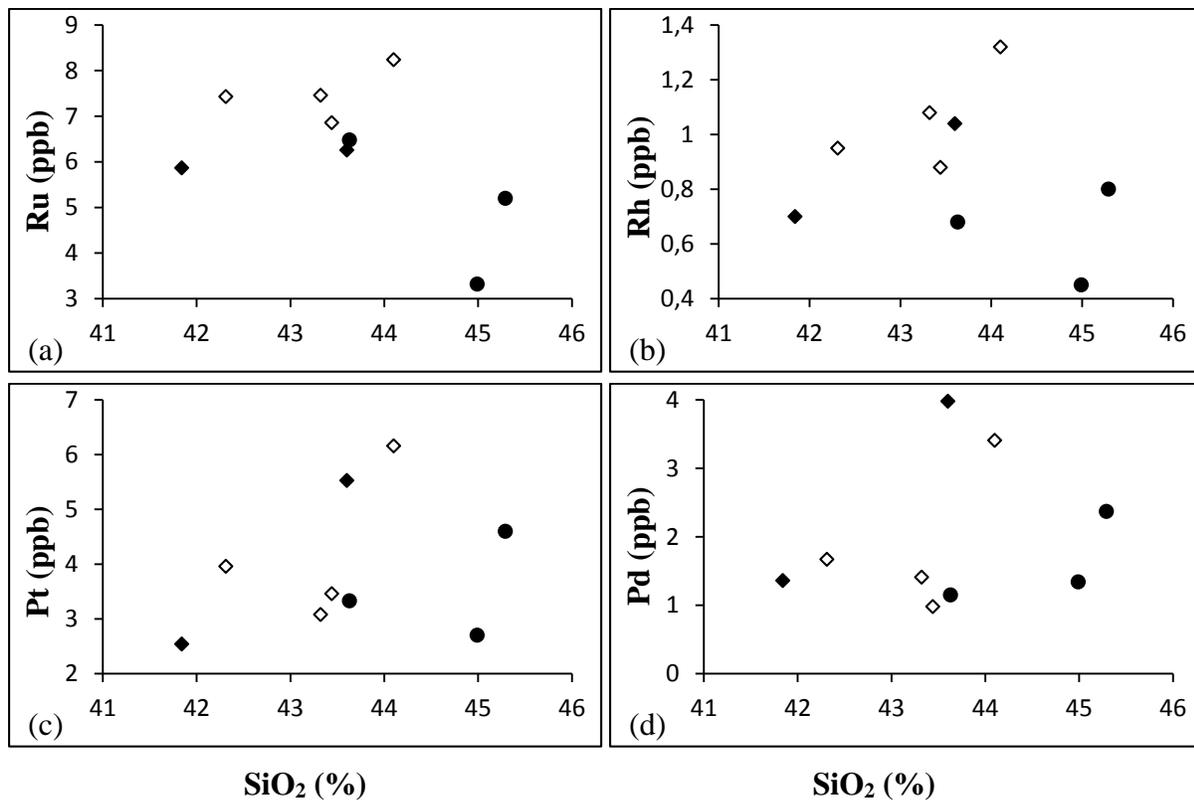
L.d. : Limite de détection.

### III.3. Diagrammes de corrélations

Les corrélations sont faites entre les éléments du groupe du platine, et avec les éléments majeurs et les éléments traces à teneurs les plus élevées. Pour ces corrélations les terres rares sont regroupées en HREE et LREE. Pour les EGP, on rappelle qu'il y a une forte affinité entre les EGPP (Rh, Pt et Pd) d'une part et les EGPI (Ir et Ru) d'autre part. Les données sur les péridotites altérées de Kumba ne sont pas prises en compte à cause de leurs teneurs très faibles en éléments du groupe du platine.

#### III.3.1. Corrélations entre le Silicium et quelques EGP

Seul le ruthénium possède des corrélations négatives avec le SiO<sub>2</sub> (Fig. 60a). Le rhodium et platine présentent des corrélations positives avec le SiO<sub>2</sub> (Fig. 60b et c). Le palladium ne possède aucune corrélation avec la silice (Fig. 60d).

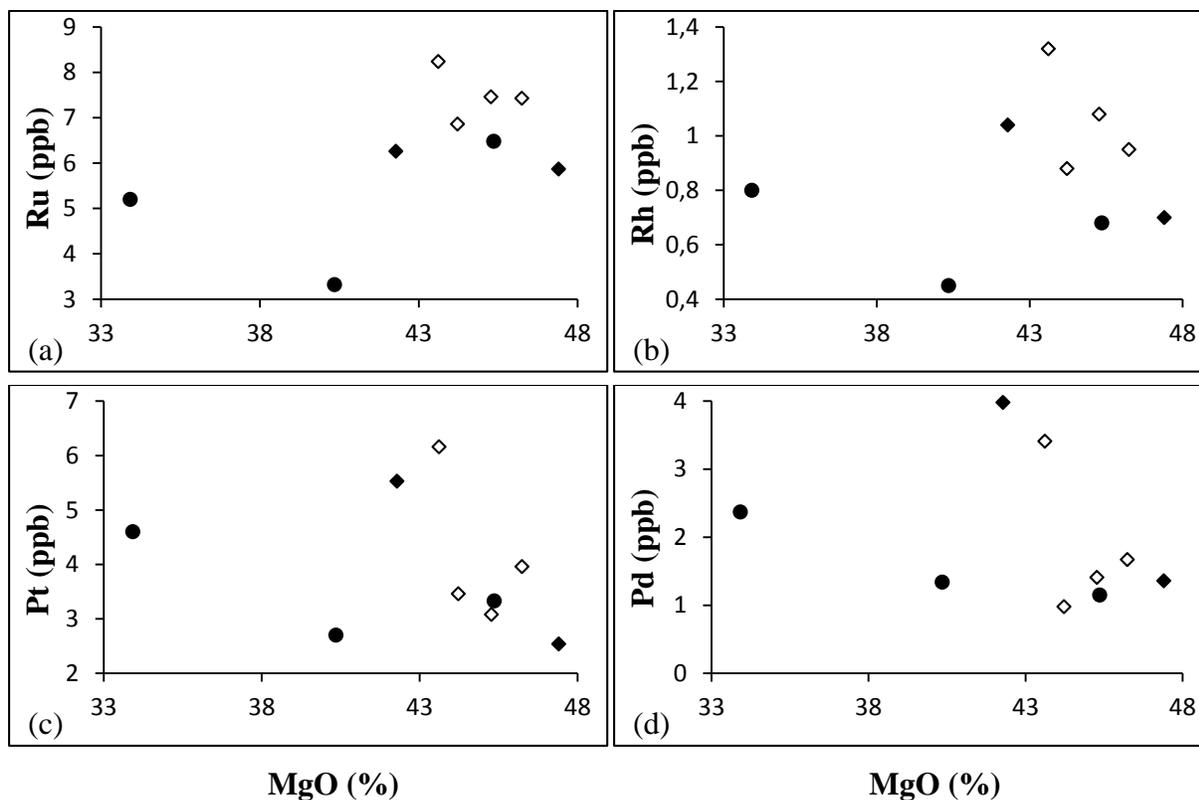


- Péridotites de Nyos.
- ◆ Péridotites de Kumba.
- Péridotites altérées de Nyos.

**Figure 60** : Diagrammes binaires illustrant le comportement de quelques EGP vis-à-vis du silicium.

### III.3.2. Corrélations entre le magnésium et quelques EGP

Le ruthenium et le rhodium présentent des corrélations positives avec le MgO (Fig. 61a et b) tandis que le platine et le palladium possèdent plutôt des corrélations négatives avec le MgO (Fig. 61c et d).

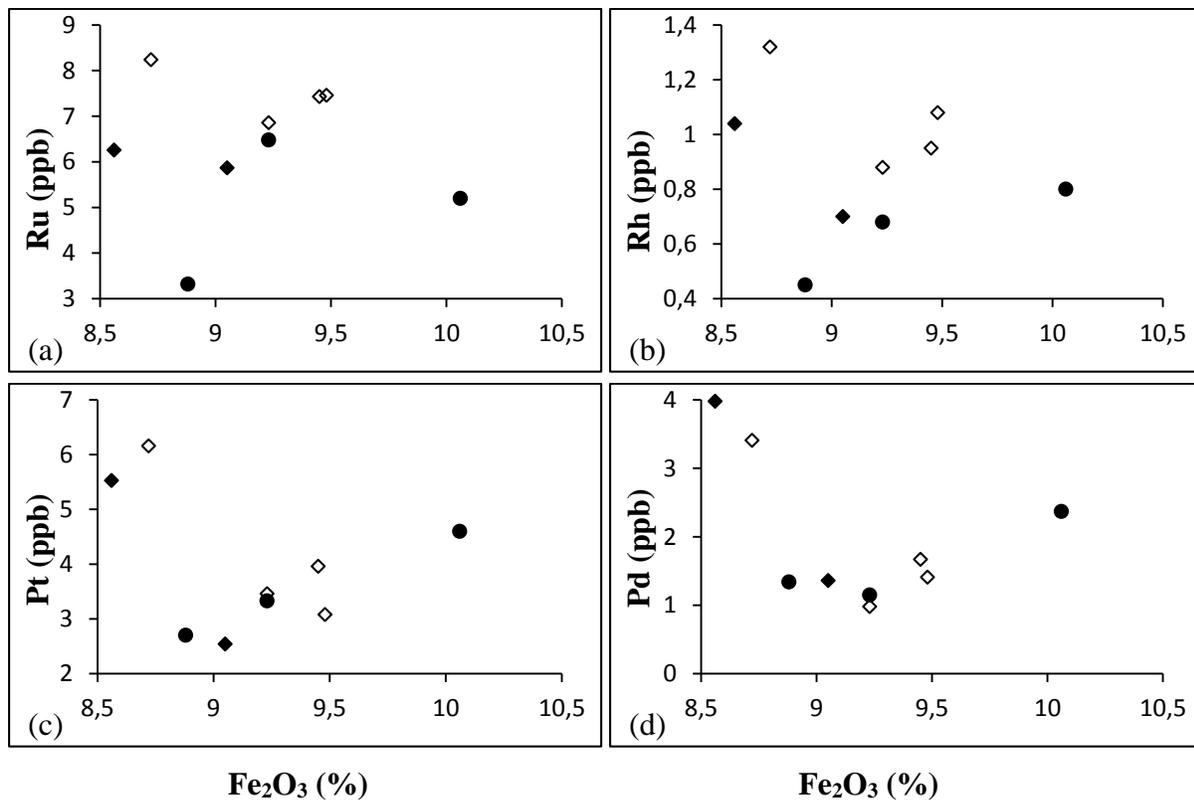


- Péridotites de Nyos.
- ◆ Péridotites de Kumba.
- Péridotites altérées de Nyos.

**Figure 61** : Diagrammes binaires illustrant le comportement de quelques EGP vis-à-vis du magnésium.

### III.3.3. Corrélations entre le fer et quelques EGP

Le ruthénium et le rhodium possèdent des corrélations négatives avec le fer (Fig. 62a et b). Par contre, le platine et le palladium sont corrélés positivement avec le fer (Fig. 62c et d).

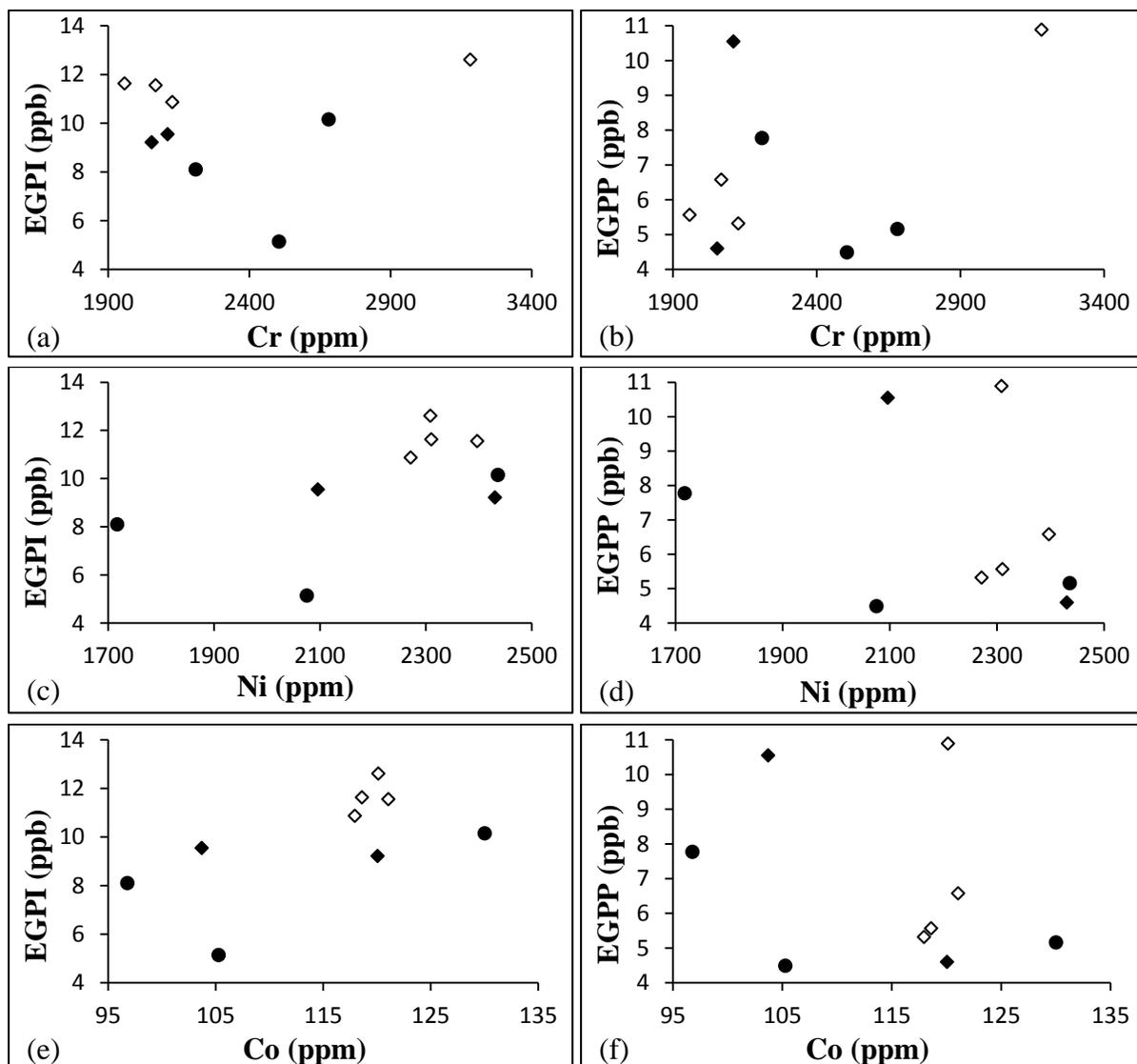


- Péridotites de Nyos.
- ◆ Péridotites de Kumba.
- Péridotites altérées de Nyos.

**Figure 62** : Diagrammes binaires illustrant le comportement de quelques EGP vis-à-vis du fer.

### III.3.4. Corrélation entre quelques éléments traces et les EGP

Les éléments du groupe du platine et de l'iridium (EGPI) possèdent des corrélations négatives avec le chrome (Fig. 63a) mais possèdent des corrélations positives avec le nickel et le cobalt (Fig. 63c et e). Par contre, les éléments du groupe du platine et du palladium (EGPP) possèdent des petites corrélations positives avec le chrome (Fig. 63b) mais ne possèdent aucune corrélation avec le nickel et le cobalt (Fig. 63d et f).



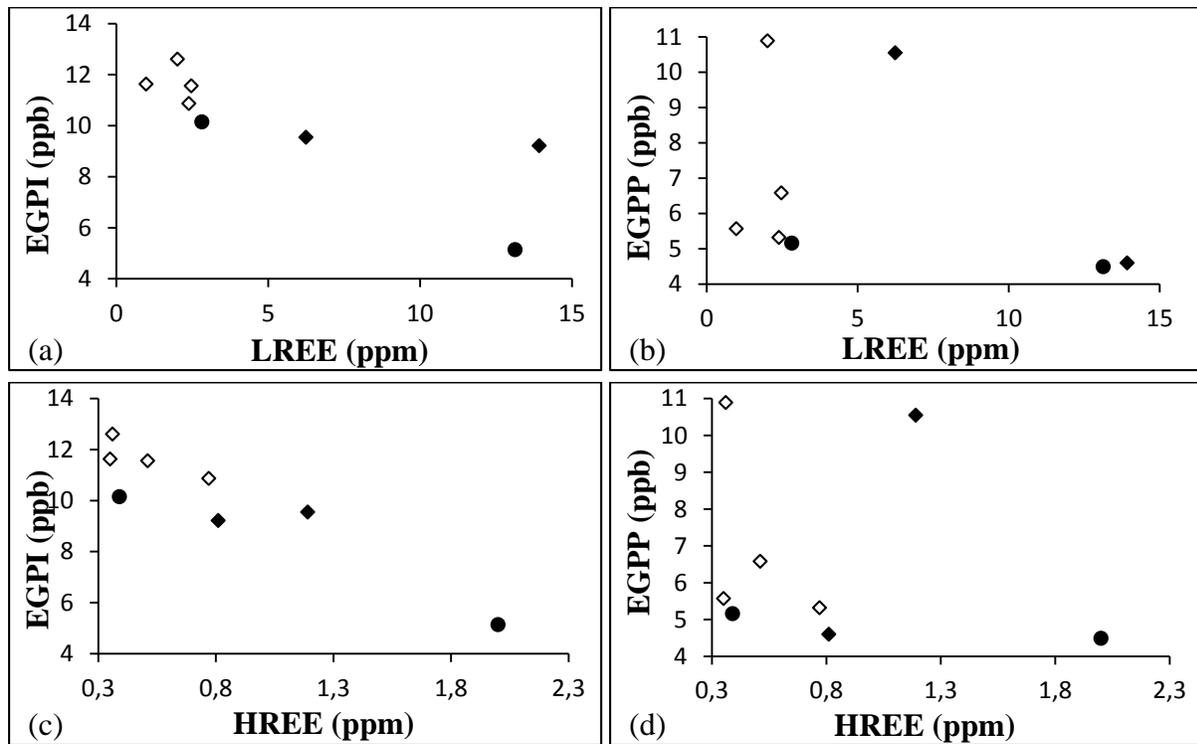
- Péridotites de Nyos.
- ◆ Péridotites de Kumba.
- Péridotites altérées de Nyos.

**Figure 63 :** Diagrammes binaires illustrant le comportement des EGP vis-à-vis de quelques éléments traces.

### III.3.5. Corrélations entre les terres rares et les EGP

Les éléments du groupe du platine et de l'iridium présentent des corrélations négatives avec les terres rares légères d'une part et les terres rares lourdes d'autre part (Fig. 64a et c). Par

contre, les éléments du groupes du platine et du palladium ne possèdent de corrélations ni avec les terres rares légères ni avec les terres rares lourdes (Fig. 64b et d).

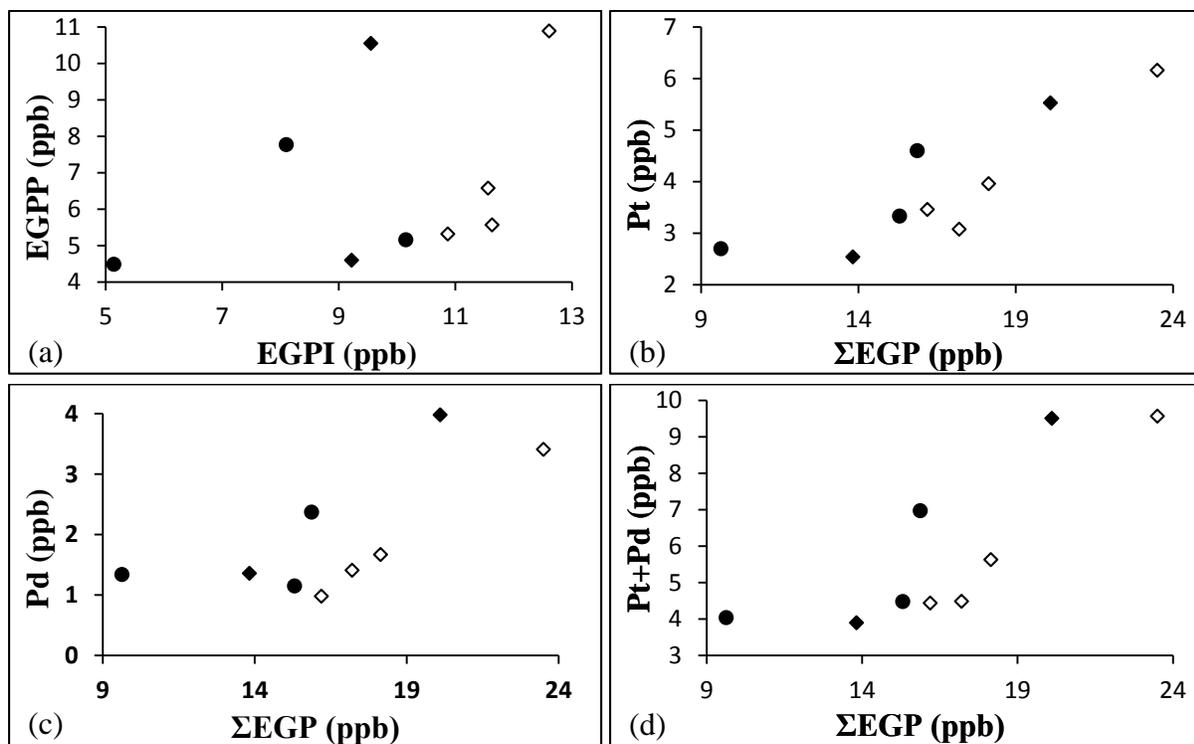


- Péridotites de Nyos.
- ◆ Péridotites de Kumba.
- Péridotites altérées de Nyos.

**Figure 64 :** Diagrammes binaires illustrant le comportement des EGP vis-à-vis des terres rares.

### III.3.6. Corrélations entre les éléments du groupe du platine

Les diagrammes de corrélation montrent que le platine, le palladium et Pt+Pd sont corrélés positivement avec la somme des éléments du groupe du platine (Fig. 65b, c et d). Les éléments du groupe du platine et du palladium (EGPP) présentent également des corrélations positives avec les éléments du groupe du platine et de l'iridium (EGPI) (Fig. 65a).



- Péridotites de Nyos.
- ◆ Péridotites de Kumba.
- Péridotites altérées de Nyos.

**Figure 65 :** Diagrammes binaires illustrant les corrélations entre les EGP.

#### IV. BILANS GEOCHIMIQUES

La méthode utilisée a été présentée au chapitre précédent. Il s'agit des bilans iso-cobalt. Les bilans géochimiques chiffrés qui ont servi à la réalisation des graphiques sont reportés à l'annexe (tableau 4-9).

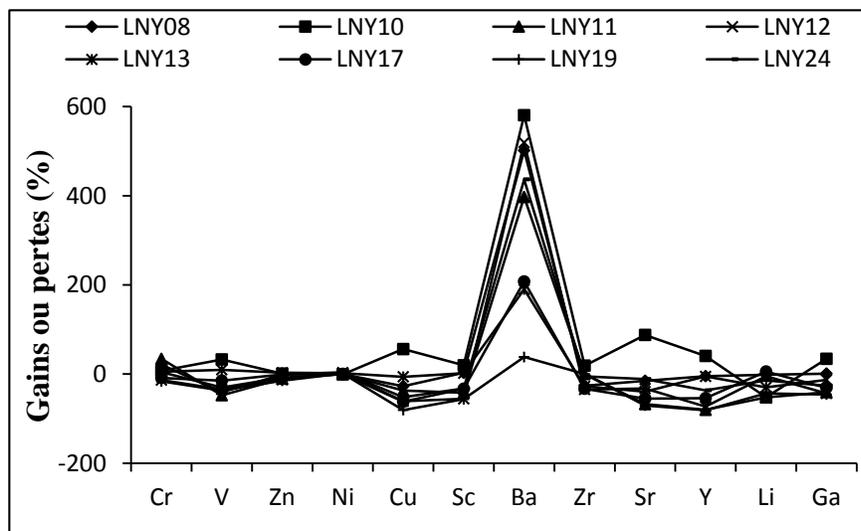
##### IV.1. Bilan géochimiques des éléments traces

###### IV.1.1. Site de Nyos

Les teneurs en éléments traces dans les péridotites altérées de Nyos sont faibles, souvent inférieures à la limite de détection. Le calcul des gains ou pertes a été fait pour les éléments traces à teneurs significatives. Ce sont : les métaux de la première série de transition (Cr, V, Ni,

Cu, Co, Sc), les métaux de la deuxième série de transition (Zr, Y, Nb), les métaux alcalins (Li), les métaux alcalino-terreux (Sr, Ba) et les autres métaux (Zn, Ga).

Le calcul des bilans montre que le baryum est fortement accumulé (Fig. 70). On a aussi des remobilisations remarquables dans certains échantillons en Cu, Sr, Y et Ga. Les autres éléments traces ont été soit légèrement concentrés (Cr et Ni) soit légèrement dispersés (Li, Zr, Sc, V, Zr et Zn) (Fig. 66).

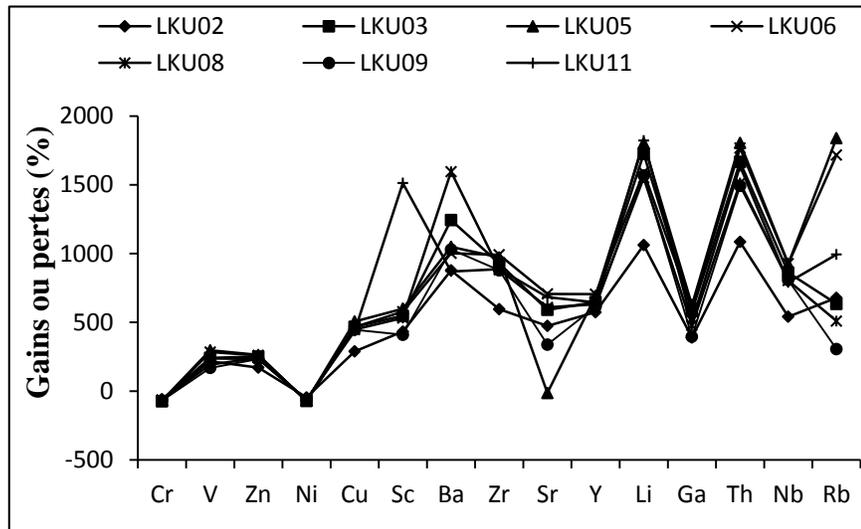


**Figure 66** : Représentation graphique du bilan géochimique des éléments traces dans les péridotites altérées à Nyos.

#### IV.1.2. Site de Kumba

Les éléments à concentrations élevées sont ceux considérés dans l'estimation des gains et des pertes au cours de l'altération.

Les bilans iso-cobalt montre que seuls le nickel et le chrome sont évacués des péridotites de Kumba. Il ressort également une petite évacuation en strontium dans l'échantillon LK05 (Fig. 67). Les éléments traces ont été fortement enrichis au cours de l'altération mais à des degrés variables. Les métaux de la première série de transition (V, Cu et Sc) et les autres métaux (Zn et Ga) sont les moins remobilisés. Le thorium, le lithium, le baryum et le rubidium sont fortement accumulés dans les matériaux d'altération des péridotites de Kumba (Fig. 67). Le rubidium est accumulé à des degrés très variables suivant les échantillons (Fig. 67).



**Figure 67** : Représentation graphique du bilan géochimique des éléments traces dans les péridotites altérées à Kumba.

## IV.2. Bilans géochimiques des terres rares

### IV.2.1. Site de Nyos

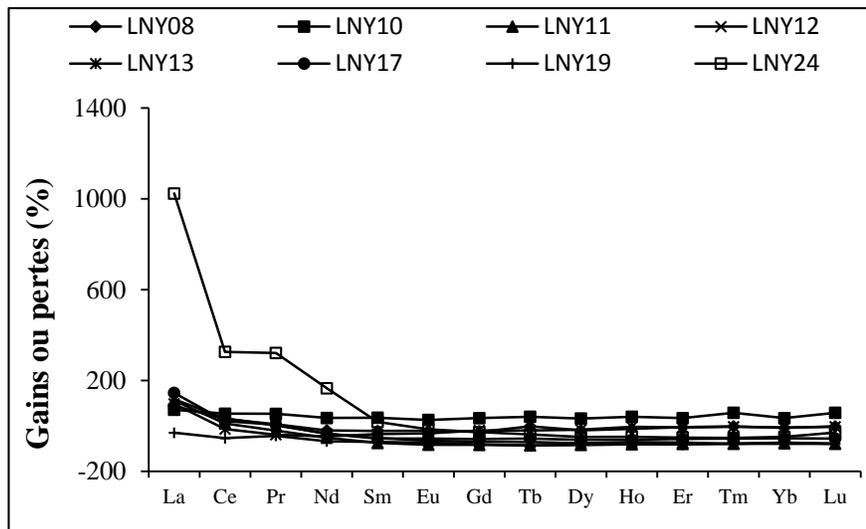
La redistribution des terres rares au cours de l'altération des péridotites de Nyos est fonction de l'échantillon (Fig. 68). Dans l'échantillon LNY10, il ressort une accumulation de toutes les terres rares tandis qu'elles sont toutes évacuées de l'échantillon LNY19. L'échantillon LNY24 a connu une concentration intense en terres rares légères (La, Ce, Pr, Nd et Sm) et des pertes, quoique petites, en terres rares lourdes (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, et Lu) (Fig. 68). Dans les autres échantillons, le lanthane et dans une moindre mesure le cérium et le praseodyme ont été accumulés pendant que les autres terres rares ont été évacuées (Fig. 68).

La représentation graphique du bilan géochimique des terres rares dans les péridotites altérées à Nyos montre des spectres sub-parallèles (Fig. 68).

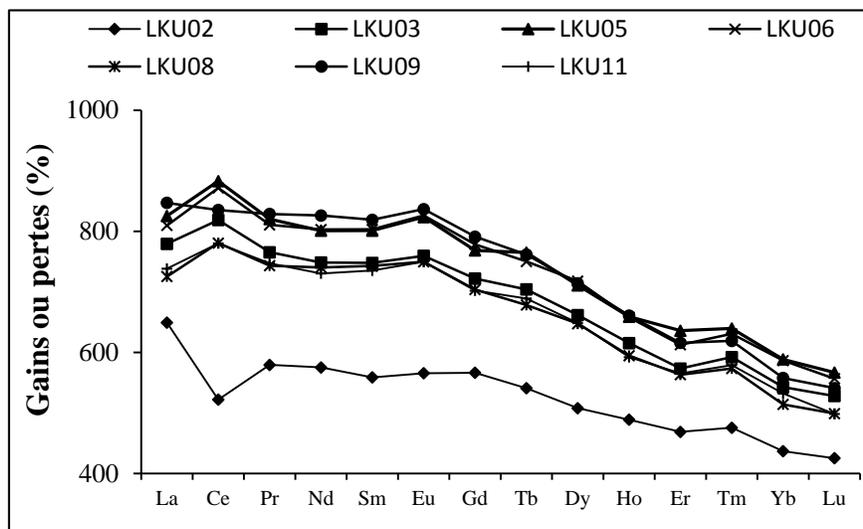
### IV.2.2. Site de Kumba

Le bilan géochimique des terres rares dans les péridotites altérées de Kumba montre qu'elles sont fortement accumulées au cours de l'altération supergène (Fig. 69). Le cérium, lanthane, et praseodyme ont connu les accumulations les plus fortes (Fig. 69).

Globalement, les terres rares légères se sont plus accumulées que les terres rares lourdes ; le taux d'accumulation décroît dans tous les échantillons du lanthane au lutétium. Comme pour les péridotites alérées de Nyos, la représentation graphique du bilan géochimique montre des spectres sub-parallèles (Fig. 69).



**Figure 68** : Représentation graphique du bilan géochimique des terres rares dans les péridotites altérées à Nyos.

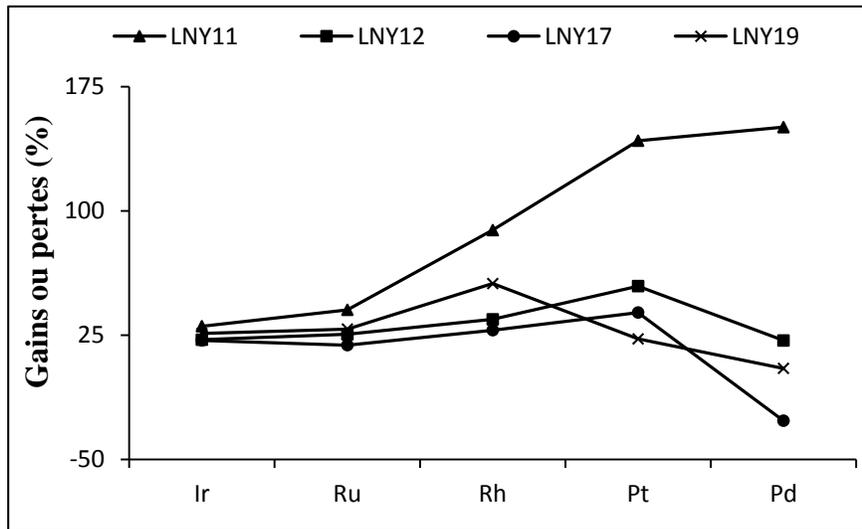


**Figure 69** : Représentation graphique du bilan géochimique des terres rares dans les péridotites altérées à Kumba.

### IV.3. Bilans géochimiques des éléments du groupe du platine

#### IV.3.1. Site de Nyos

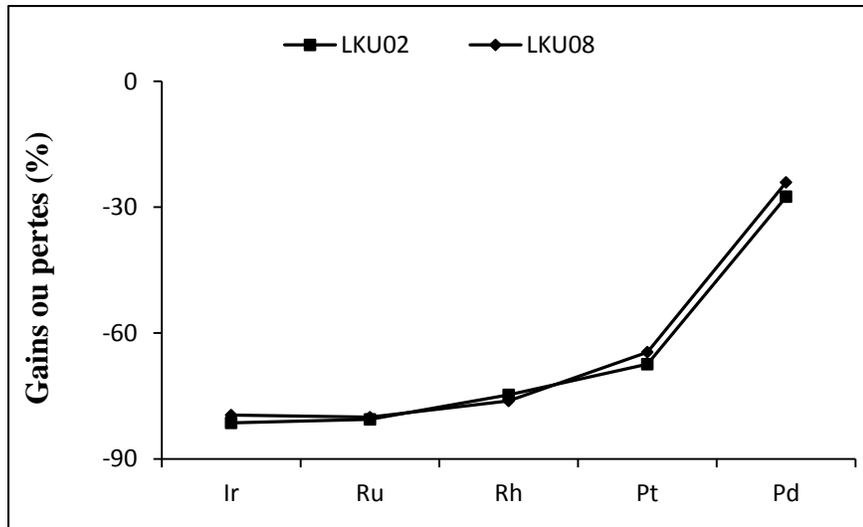
Les éléments du groupe du platine sont globalement accumulés au cours de l'altération des péridotites de Nyos. (Fig. 70). Le platine et le rhodium sont les plus accumulés. Le palladium est fortement accumulé dans l'échantillon LNY11 tandis qu'il est mobilisé dans l'échantillon LKU17 (Fig. 70). L'iridium et le ruthénium sont moyennement remobilisés (Fig. 70).



**Figure 70 :** Représentation graphique du bilan géochimique des EGP dans les péridotites altérées à Nyos.

#### IV.3.2. Site de Kumba

Les éléments du groupe du platine sont tous mobilisés au cours de l'altération supergène des péridotites de Kumba (Fig. 71). Les éléments du groupe du platine et du palladium sont les moins évacués. (Fig. 71).



**Figure 71** : Représentation graphique du bilan géochimique des EGP dans les péridotites altérées à Kumba.

## CONCLUSION

Dans les péridotites de Nyos et Kumba, seuls le nickel, Cr et Co ont des teneurs élevées. Les teneurs en terres rares quoique faibles, présentent un enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes. Les indices de fractionnement sont également faibles. Les éléments du groupe du platine ont des concentrations faibles.

Le degré d'altération croît de Nyos à Kumba. Les péridotites altérées de Nyos ont connu une forte accumulation en baryum. Les terres rares lourdes et les EGP sont légèrement accumulés. Par contre dans les péridotites de Kumba, seuls le nickel, Cr et EGP sont évacués. Les autres éléments chimiques sont fortement accumulés.

***CHAPITRE VI : DISCUSSION ET  
INTERPRETATION DES RESULTATS***

## **INTRODUCTION**

Plusieurs méthodes ont fourni un certain nombre de résultats sur les péridotites et leurs produits d'altération. Ce chapitre porte sur la discussion et l'interprétation des principaux résultats dont une synthèse sera d'abord présentée.

## **I. PRINCIPAUX RESULTATS**

### **I.1. Granites**

#### **I.1.1. Pétrographie**

Les enclaves de granites de Nyos sont denses, roses et présentent une texture grenue. La paragenèse minérale est constituée de quartz (45%), feldspaths (35%), biotite (15%) et accessoirement de pyroxène. Les feldspaths se transforment progressivement en séricite et en damourite.

#### **I.1.2. Géochimie**

Les granites sont silico-alumineux : 70 à 73% de  $\text{SiO}_2$  et 14 à 15% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Les teneurs en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  sont comprises entre 2 et 4%. Les autres oxydes ( $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  et  $\text{CaO}$ ) ont des concentrations faibles. Les rapports A/CNK sont compris entre 1,4 et 1,5. A l'exception des éléments de transition (Cr, Ni, Co, Cu et Sc), ils sont riches en éléments traces y compris les terres rares. Les spectres normalisés des éléments traces montrent des anomalies positives en Cu, Ba, Th et négatives en Ni, Co et Ga. La silice est corrélée positivement avec le baryum, Pb, U et LREE tandis que l'alumine est corrélée positivement avec le baryum seulement. Les rapports Ba/Sr sont élevés. La normalisation par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995) montre que les terres rares sont fractionnées dans les granites de Nyos. Le rapport LREE/HREE est élevé. La valeur de l'anomalie en cérium est incompatible avec le taux de fractionnement. On note également des anomalies négatives en europium et quelques anomalies positives en cérium. Les concentrations sont très faibles en Au-EGP dans les granites.

### **I.2. Péridotites**

#### **I.2.1. Pétrographie et minéralogie**

Les enclaves de péridotites de Nyos et de Kumba sont denses, friables et de couleur verte à vert-claire. Les enclaves sont à dominance de texture protogranulaire et quelques fois

porphyroclastique. La texture porphyroclastique est plus présente à Nyos. L'assemblage minéralogique est constitué d'olivine, pyroxènes, spinelles avec quelques traces de chlorites. Les spinelles sont représentés par la chromite et le hercynite chromifère à Kumba et la chromite uniquement à Nyos. Les orthopyroxènes sont plus abondants que les clinopyroxènes.

## **I.2.2. Géochimie**

### **a)- Eléments majeurs**

Parmi les éléments majeurs, seuls le  $\text{SiO}_2$  et le  $\text{MgO}$  ont des teneurs élevées. Le rapport  $\text{SiO}_2/\text{MgO}$  est de l'ordre de 1.  $\text{TiO}_2$  et  $\text{MnO}$  ont des teneurs faibles tandis que le  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a des teneurs proches de 10%. Les teneurs en alcalins ( $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{K}_2\text{O}$ ) sont très faibles. La valeur de la perte au feu est inférieure au seuil de détection dans les péridotites de Nyos.

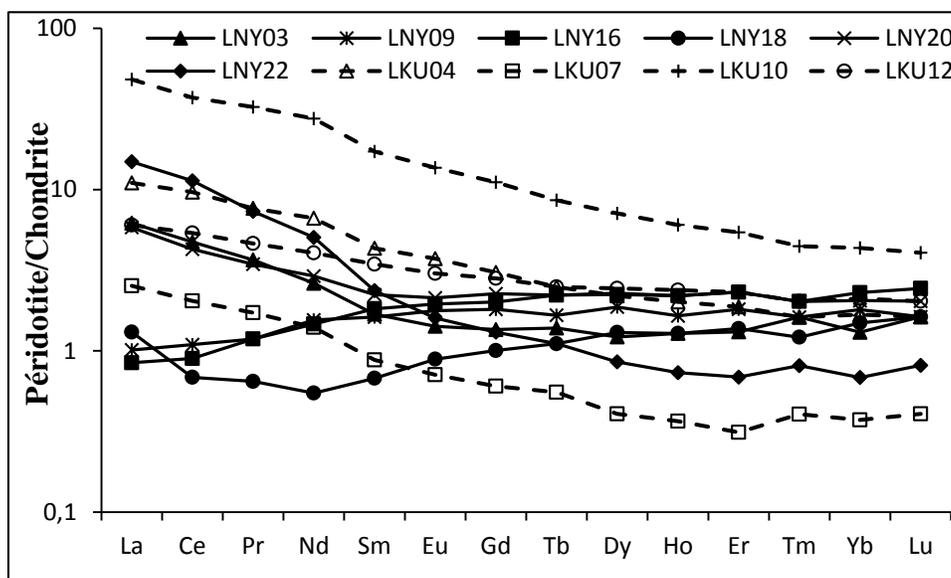
### **b)- Eléments traces**

Seuls le chrome, Ni et Co ont des teneurs élevées dans les péridotites. Elles sont de l'ordre de 100 ppm pour le cobalt et de plus de 2000 ppm pour le chrome et le nickel chacun. Les concentrations sont modérées en vanadium et zinc. Dans les péridotites de Kumba, les teneurs sont également considérables en Ba, Zr et Sr. Les autres éléments traces ont des teneurs faibles.

Les valeurs normalisées à la chondrite (McDonough et Sun, 1995) révèlent des anomalies positives en V, Sc, Zr, Y dans les péridotites de Nyos et en V et Ba dans les péridotites de Kumba. Dans les deux sites, on note des anomalies négatives en Cu et Ga. Les péridotites de Nyos présente en plus des anomalies négatives en Ba.

### **c)- Terres rares**

Les concentrations en terres rares sont faibles dans les péridotites de Nyos et Kumba. Elles sont très variables dans les péridotites de Kumba où on obtient les teneurs les plus élevées (60 ppm). L'enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes est plus marqué dans les péridotites de Kumba que dans celles de Nyos. Il y a parfois des enrichissements en terres rares lourdes par rapport aux terres rares légères dans les péridotites de Nyos. La normalisation des terres rares des péridotites par rapport à la chondrite révèle la présence des anomalies négatives en Ce dans les péridotites de Nyos. Les spectres des terres rares sont parallèles pour les péridotites de Kumba et certains échantillons de Nyos (Fig. 72). Le taux de fractionnement est très faible mais variable à Nyos.



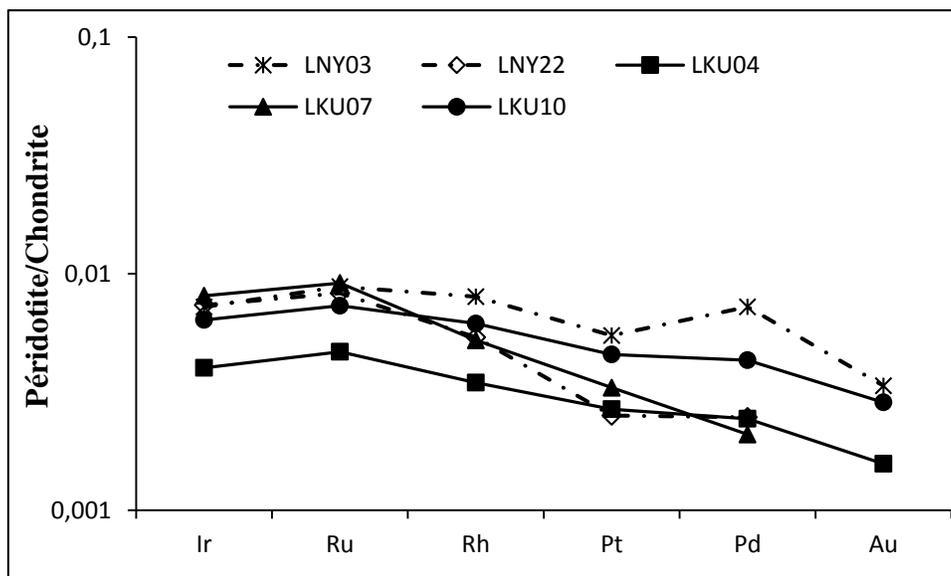
**Figure 72:** Spectres des terres rares des péridotites altérées de Nyo et Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

#### d)- Or et éléments du groupe du platine

Les Au-EGP ont des teneurs élevées dans les péridotites de Nyo ( $\Sigma Au-EGP = 13-20$ ) comparées à celles de Kumba ( $\Sigma Au-EGP = 9,85-16,27$ ). Le ruthénium et le platine présentent les teneurs les plus significatives. Les rapports EGPI/EGPP sont variables dans les péridotites de Nyo (0,91-2) tandis que ce rapport (1,04-1,97) indique un enrichissement en EGPI par rapport aux EGPP dans celles de Kumba. L'or a des teneurs proches de la limite de détection dans les deux sites.

L'étude de la mobilité des éléments montre que le rhodium et le palladium sont plus mobiles que le platine et ce dernier est plus mobile que le ruthénium. L'iridium présente un comportement controversé.

D'autre part, la normalisation des Au-EGP révèle des spectres semblables dans les deux sites. Les teneurs sont très faibles par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995) avec des petites anomalies négatives en platine et positives en ruthénium (Fig. 73).



**Figure 73:** Spectres des Au-EGP des péridotites de Nyos et Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

### I.3. Péridotites altérées

#### I.3.1. Morphologie et minéralogie

Les péridotites de Nyos sont très peu altérées. L'altération est centripète ; les blocs sont bruns sur les bordures avec des reliques de structure de péridotites vers le centre. Ils illustrent bien le processus d'altération des péridotites. La minéralogie est caractérisée par la présence de l'olivine, pyroxène, spinelles et chlorites.

Les péridotites de Kumba sont sombres, poreuses et plus altérées mais avec des amas d'olivine résiduelles. Le plus souvent, elles sont sous forme d'enclaves de forme irrégulière dans les matériaux d'altération de basaltes. L'assemblage minéralogique est dominé par l'olivine, pyroxènes, quartz, smectite, magnétite et muscovite.

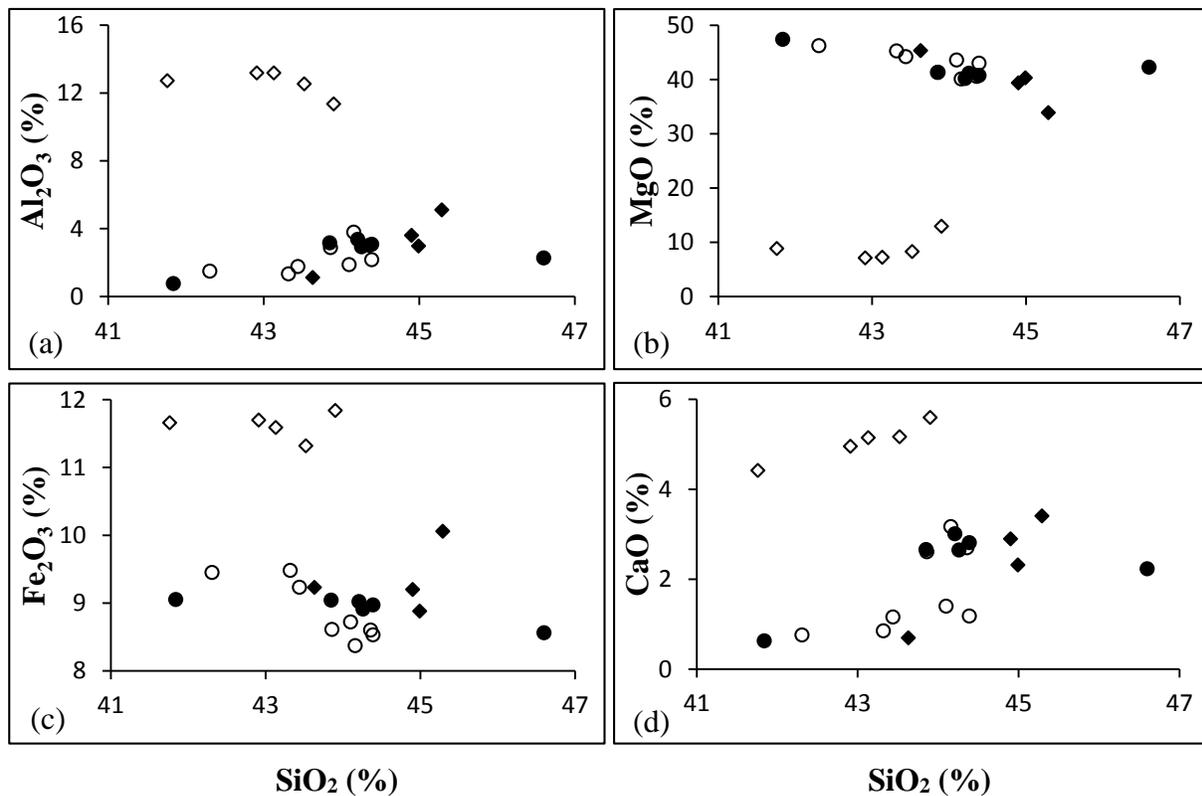
#### I.3.2. Géochimie

##### a)- Eléments majeurs

Le comportement des éléments majeurs dans les péridotites altérées est proche de celui des péridotites non altérées dans le site de Nyos. On relève juste de faibles pertes en  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  et  $\text{TiO}_2$ . Un seul échantillon (LNY10) a connu des petits gains en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  et  $\text{TiO}_2$ . Les autres éléments, y compris la perte au feu, ont gardé presque les mêmes concentrations.

Dans les péridotites altérées de Kumba, seul  $\text{SiO}_2$  a des teneurs élevées (30-45%). Les teneurs sont de l'ordre de 10% pour  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{MgO}$ . En dehors du  $\text{MgO}$ , tous les éléments majeurs ont été accumulés dans les péridotites altérées de Kumba. Si la perte au feu est la plus enrichie,  $\text{SiO}_2$  et  $\text{MnO}$  ont connu des faibles accumulations.

Les diagrammes de Harker des éléments majeurs des péridotites de Nyos et Kumba révèlent qu'en dehors des péridotites altérées de Kumba  $\text{SiO}_2$  est corrélé positivement avec  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{CaO}$  (Fig. 74a et d). Les corrélations sont négatives avec  $\text{MgO}$  (Fig. 74b). Ces diagrammes montrent un fort enrichissement en Al, Fe et Ca dans les péridotites altérées de Kumba et, à l'exception du  $\text{CaO}$  qui est corrélé positivement avec  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  possèdent des corrélations négatives avec la silice (Fig. 74a, c et d). Dans les mêmes péridotites altérées de Kumba, les teneurs sont faibles en  $\text{MgO}$  et présente des corrélations positives avec la silice (Fig. 74b).



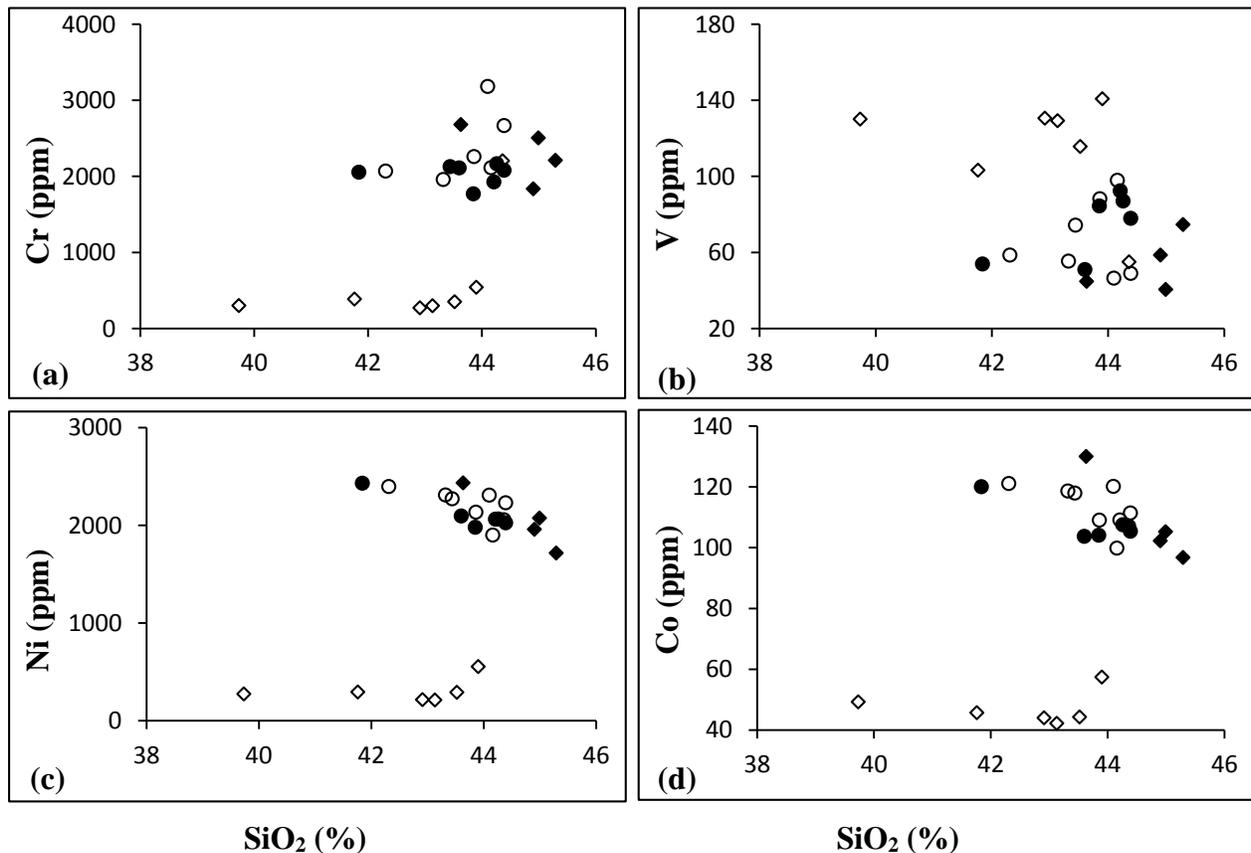
- Péridotites de Nyos.
- ◆ Péridotites de Kumba.
- Péridotites altérées de Nyos.
- ◇ Péridotites altérées de Kumba.

**Figure 74:** Diagrammes de Harker des éléments majeurs des péridotites de Nyos et Kumba.

### b)- Eléments traces

Dans les péridotites altérées de Nyos, les teneurs sont élevées en Cr (1958-3182 ppm), Ni (1900-2310 ppm) et Co (99-121 ppm). Les autres éléments traces ont des teneurs faibles. Par contre, les péridotites altérées de Kumba sont riches en une large gamme d'éléments traces. Il s'agit de Cr, Sr, Ba, Ni et Zn dont les concentrations sont supérieures à 100 ppm. Le cuivre, Co, Y et Nb ont des teneurs de l'ordre de plusieurs dizaines de ppm.

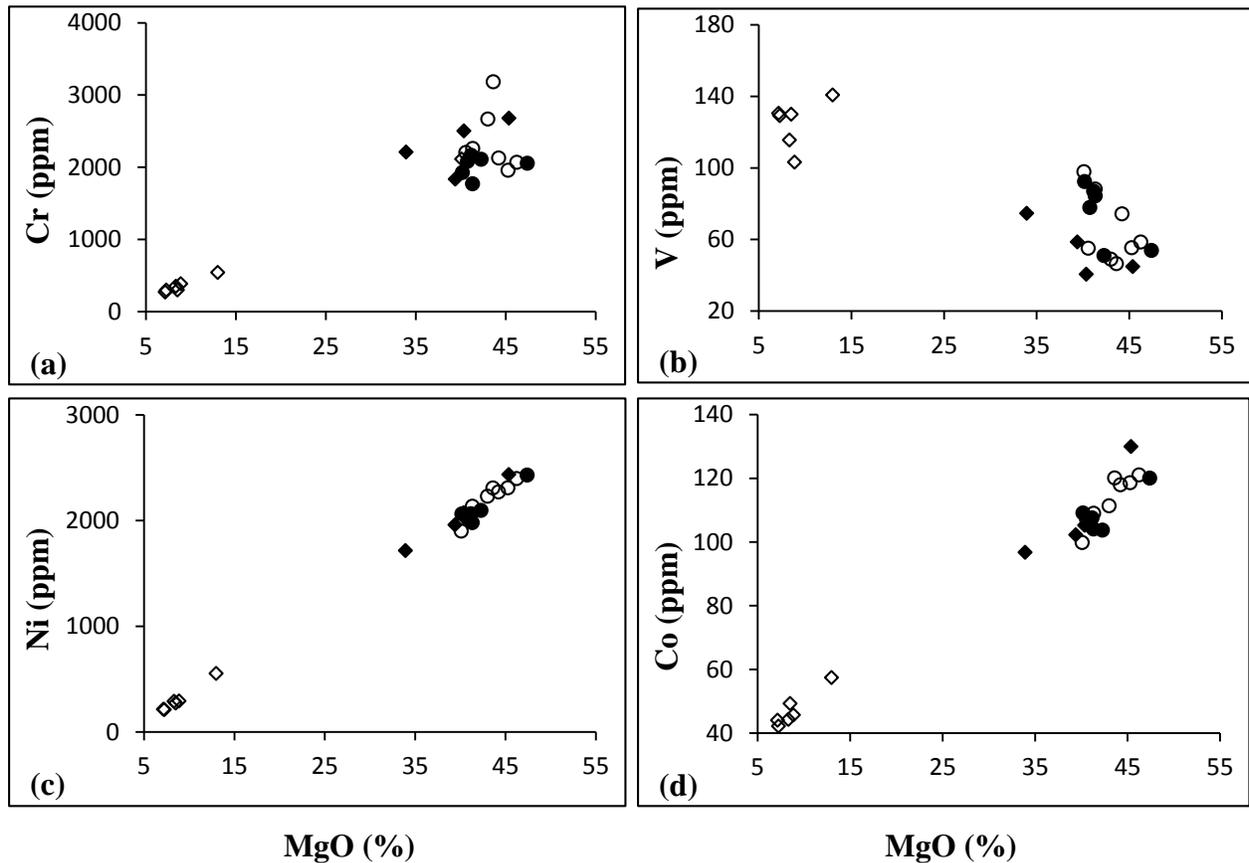
Les fortes corrélations positives sont obtenues entre les éléments traces les plus importants (Cr, Ni, Co, Zn, Nb, Zr, Cu, Li, Pb) dans les péridotites altérées. Les diagrammes binaires montrent que SiO<sub>2</sub> est positivement corrélé avec le chrome (Fig. 75a) mais négativement avec le vanadium, le nickel et le cobalt (Fig. 75b, c et d). Si on considère uniquement les péridotites altérées de Kumba, V, Ni et Co possèdent des corrélations positives avec la silice.



- Péridotites de Nyos.
- ◆ Péridotites de Kumba.
- Péridotites altérées de Nyos.
- ◇ Péridotites altérées de Kumba.

**Figure 75:** Corrélation entre certains éléments traces et le silicium dans les péridotites de Nyos et Kumba.

MgO possède des fortes corrélations positives avec le chrome, le nickel et le cobalt (Fig.76a, c et d) et des corrélations négatives avec le vanadium (Fig. 76b).



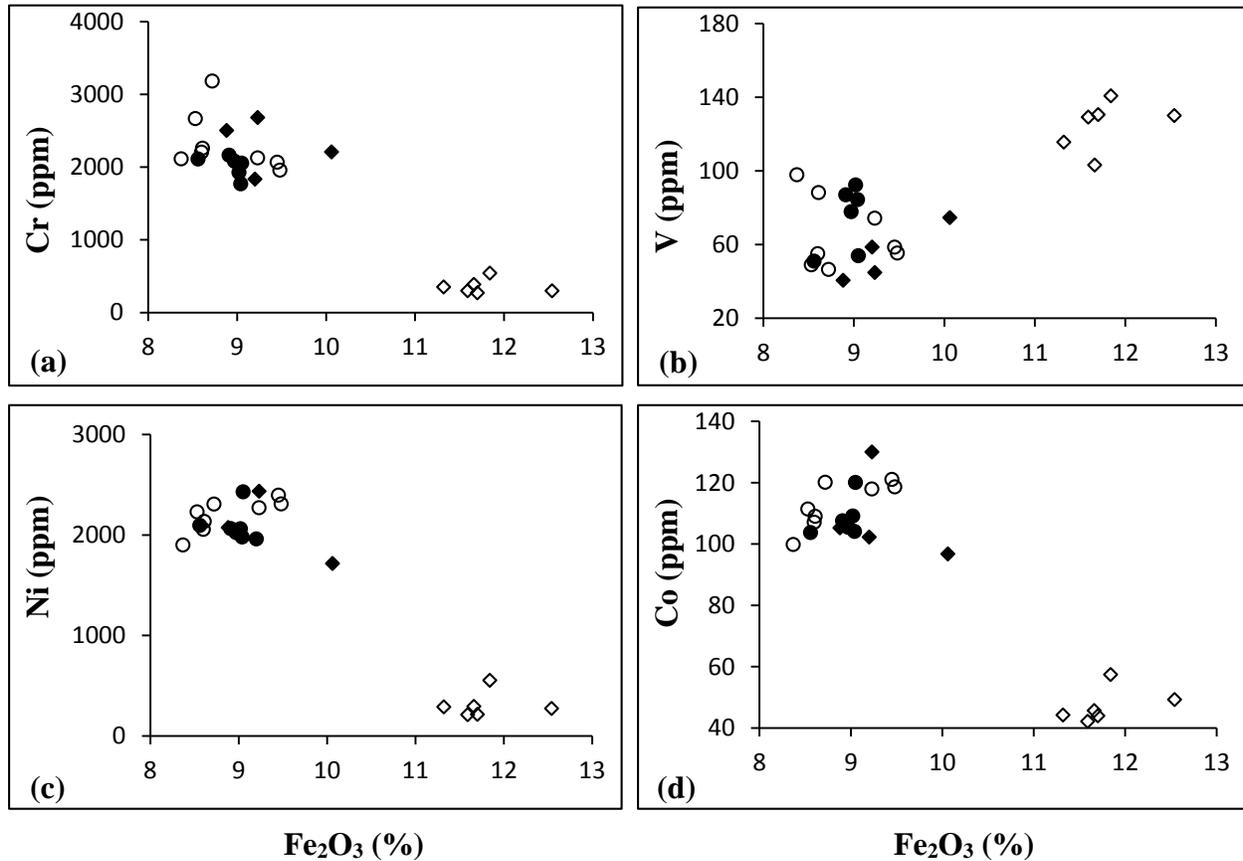
- Péridotites de Nyos.
- ◆ Péridotites de Kumba.
- Péridotites altérées de Nyos.
- ◇ Péridotites altérées de Kumba.

**Figure 76:** Corrélation entre certains éléments traces et MgO dans les péridotites de Nyos et Kumba.

Contrairement au MgO,  $Fe_2O_3$  possède des corrélations négatives avec le chrome, le nickel et le cobalt (Fig. 77a, c et d) et des corrélations positives avec le vanadium (Fig. 77b).

Au cours de l'altération des péridotites de Nyos, le baryum a été fortement accumulé et on note une évacuation du zirconium, Cu, Sr, Y et Ga dans certains échantillons. Dans les péridotites altérées de Kumba, excepté le nickel et le chrome, tous les autres éléments traces sont remobilisés au cours de l'altération supergène.

Les valeurs normalisées à la chondrite (McDonough et Sun, 1995) montrent que les péridotites altérées de Nyos présentent des anomalies négatives en Cu et Ga, celles de Kumba possèdent des anomalies positives en V, Ba et négatives en Ni, Co et Ga.



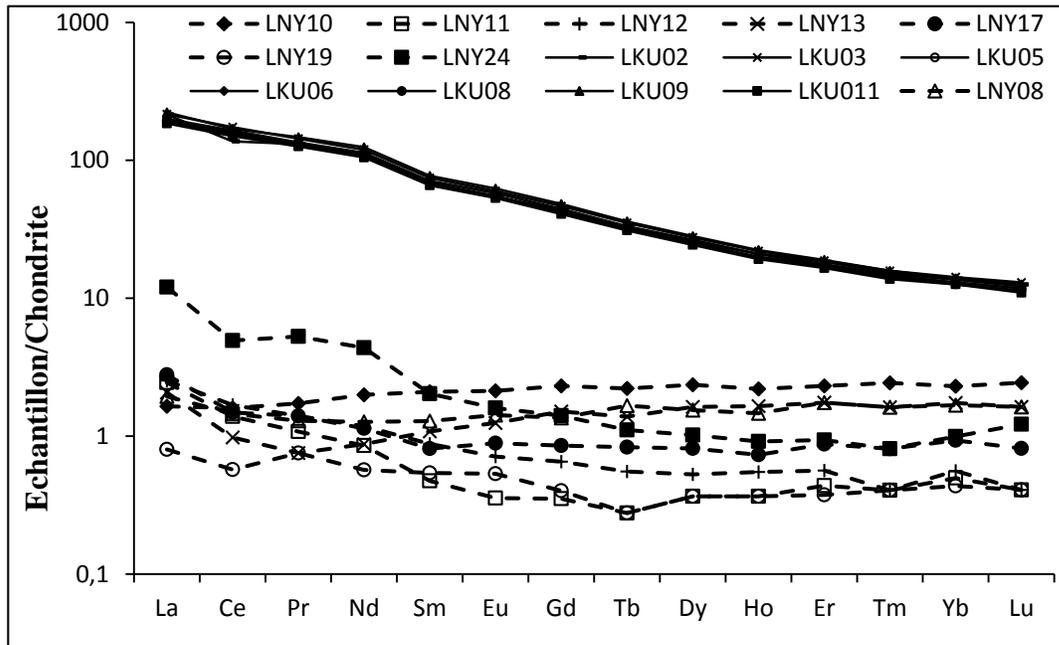
- Péridotites de Nyos.
- ◆ Péridotites de Kumba.
- Péridotites altérées de Nyos.
- ◇ Péridotites altérées de Kumba.

**Figure 77:** Corrélation entre certains éléments traces et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dans les péridotites de Nyos et Kumba.

### c)- Terres rares

Les péridotites altérées de Kumba sont plus riches en terres rares que celles de Nyos. Les rapports LREE/HREE sont très variables dans les péridotites altérées de Nyos. Ces rapports sont élevés dans les péridotites altérées de Kumba. Les rapports (La/Yb)<sub>N</sub> sont faibles à Nyos par rapport à Kumba. Les spectres des terres rares des péridotites altérées normalisés par rapport à la

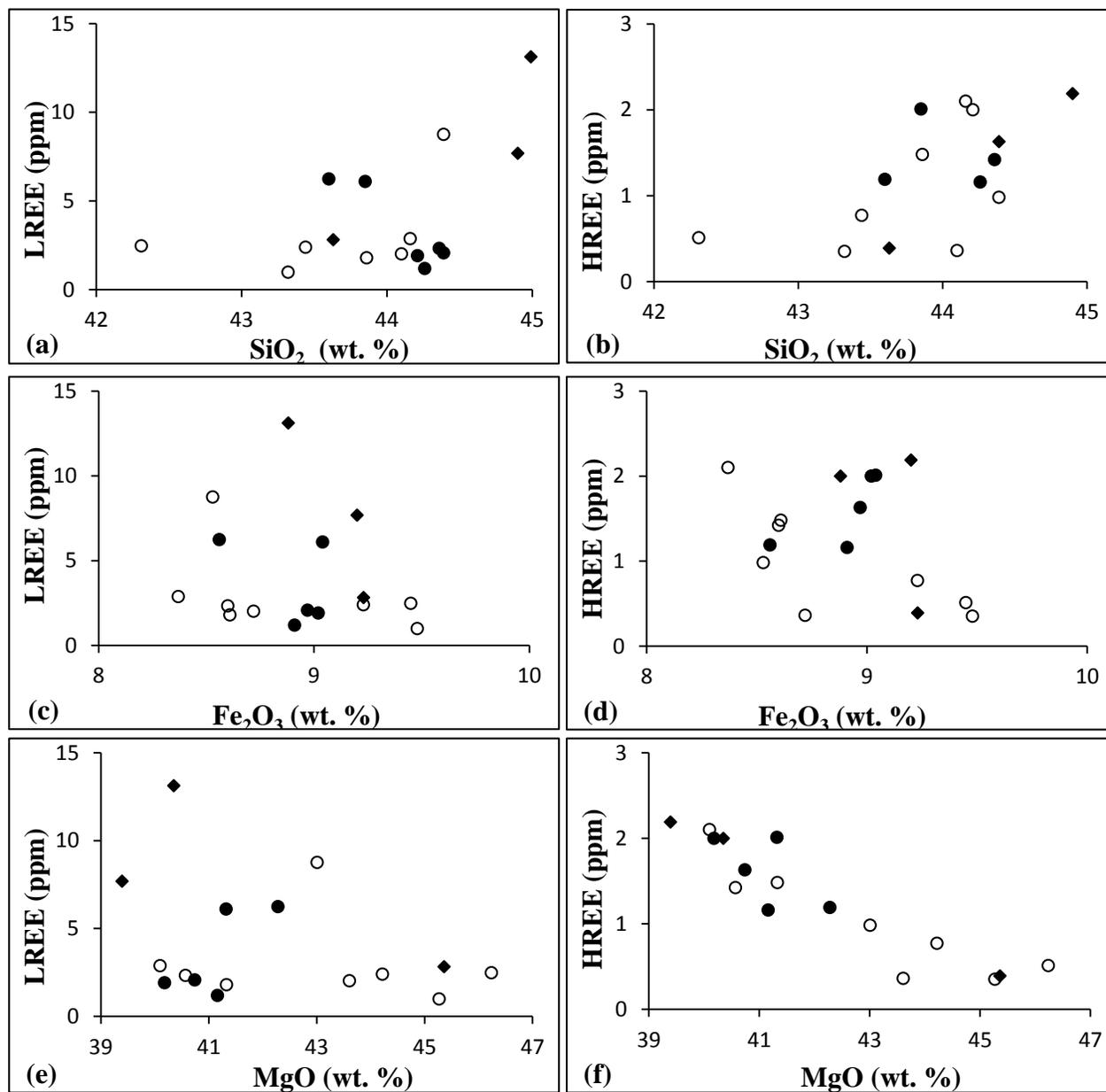
chondrite (McDonough et Sun, 1995) montre que les péridotites altérées de Kumba ont des teneurs très élevées en terres rares (Fig. 78). Les spectres sont quasi parallèles et se confondent à Kumba. Les matériaux altérés à Nyos possèdent de petites anomalies négatives en cérium (Fig. 78).



**Figure 78:** Spectres des terres rares des péridotites altérées de Nyos et Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

Le bilan géochimique montre qu’au cours de l’altération supergène des péridotites, les terres rares ont été fortement accumulées à Kumba. Les terres rares légères ont été plus accumulées que les terres rares lourdes. Dans les péridotites altérées de Nyos, les plus fortes accumulations sont en La, Ce et Pr. Certains échantillons ont connu des pertes en terres rares et d’autres des gains. Les terres rares lourdes sont plus évacuées que les terres rares légères.

Les terres rares légères d’une part et les terres rares lourdes d’autre part possèdent des corrélations positives avec SiO<sub>2</sub> (Fig. 79a et b) mais des corrélations négatives avec Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Fig. 79c et d). Les terres rares lourdes ont des fortes corrélations négatives avec MgO (Fig. 79f).



- Péridotites de Nyos.
- ◆ Péridotites de Kumba.
- Péridotites altérées de Nyos.

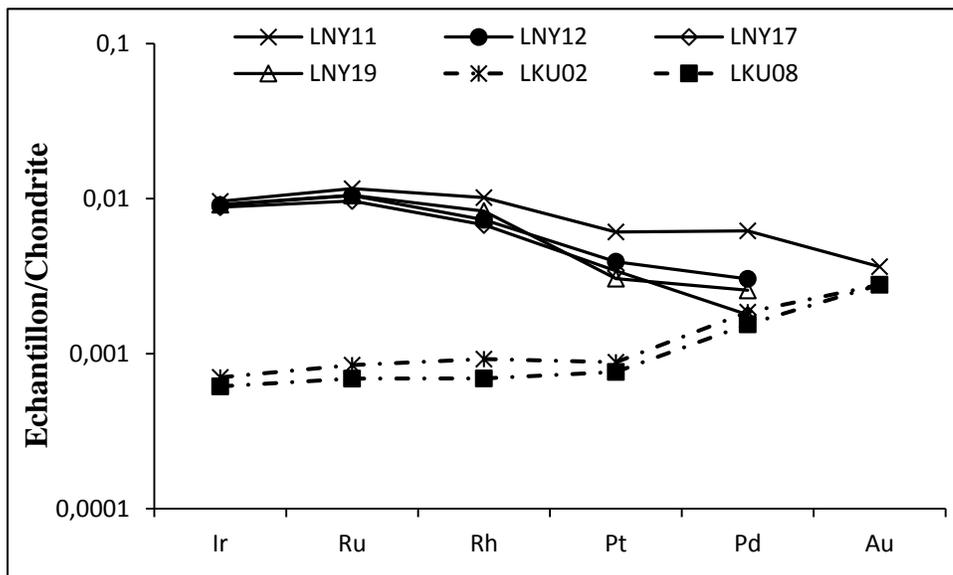
**Figure 79:** Corrélation entre les terres rares et certains éléments majeurs dans les péridotites de Nyos et Kumba.

#### d)- Or et éléments du groupe du platine

Les péridotites altérées de Kumba ont des teneurs en Au-EGP (2-4 ppb) très faibles comparées à celles de Nyos (16-24 ppb). Les concentrations les plus élevées sont en ruthénium dans les péridotites altérées de Nyos tandis que dans celles de Kumba, c'est plutôt le palladium et le platine. Les rapports EGPI/EGPP sont supérieurs à 1 à Nyos mais inférieurs à 1 à Kumba.

La normalisation des Au-EGP montre des teneurs très faibles surtout dans les échantillons de Kumba et révèle la présence des anomalies négatives en Pt plus marquées à Nyos (Fig. 80). Les Au-EGP les moins mobiles sont le platine et le ruthénium dans les péridotites altérées de Nyos tandis que le platine et le palladium sont plus stables dans les péridotites altérées de Kumba.

Les éléments du groupe du platine sont corrélés positivement entre-eux. Le platine et le rhodium possèdent des corrélations positives avec  $\text{SiO}_2$ . Le ruthénium et le rhodium présentent des corrélations négatives avec  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et positives avec  $\text{MgO}$ . Par contre, le platine et le palladium possèdent des corrélations positives avec  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et négatives avec  $\text{MgO}$ . Les éléments du groupe du platine et de l'iridium sont corrélés positivement avec le nickel et le cobalt mais négativement avec les terres rares (LREE et HREE).



**Figure 80:** Spectres des Au-EGP des péridotites altérées de Nyos et Kumba normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

Le bilan géochimique des éléments du groupe du platine montre que dans les péridotites altérées de Nyos, le palladium est légèrement évacué alors qu'il y a une accumulation des autres EGP. Les péridotites de Kumba ont connu une évacuation de tous les EGP lors de l'altération supergène bien que les EGPI soient les plus évacués.

## **II. DISCUSSION ET INTERPRETATION**

### **II. 1. Pétrologie des granites de Nyos**

#### **II.1.1. Pétrographie et éléments majeurs**

La couleur rose des granites de Nyos serait due aux oxydes de fer qui ont coloré les feldspaths alcalins et le quartz. Leur richesse en biotite montre qu'il s'agit des granites monzonitiques. L'altération hydrothermale a fortement destabilisé les feldspaths en séricite et en damourite.

Les teneurs élevées en SiO<sub>2</sub>, en aluminium et alcalins indique leur caractère acide et peralumineux. Les rapports A/CNK, largement supérieurs à 1,1 montrent qu'il s'agit des granites de type S c'est-à-dire de type sédimentaire (Chappell et White, 1974). Ils montrent des teneurs en SiO<sub>2</sub> inférieures à celles des granites panafricains du centre Cameroun (Nzenti et *al.*, 2006). Les granites monzonitiques de Nyos dériveraient de la fusion incongruente de la biotite d'une source métasédimentaire proche de la surface de la croûte (Vaillaros et *al.*, 2009). Les fortes destabilisations des feldspaths par l'altération supergène auraient conduit à l'enrichissement en éléments alcalins.

Les éléments comme le fer, magnésium, titane et manganèse se concentrent dans les minéraux ferromagnésiens tandis que le silicium se concentre préférentiellement dans les minéraux blancs, ce qui explique les corrélations négatives obtenues dans les diagrammes binaires.

#### **II.1.2. Eléments traces**

Les concentrations élevées en Zn, Ba, Zr, Sr, Pb, U et Rb résulteraient des processus de greisenisation et de l'albitisation (Vriend et *al.*, 1985) ou de la remobilisation durant la formation des minéraux secondaires (Sharma et Rajamani, 2000). Les rapports Ba/Sr élevés des granites peralumineux en enclaves dans les formations volcaniques de Nyos seraient liés à l'incorporation préférentielle du baryum dans la biotite (Albuquerque, 1978) et la prédominance des feldspaths

alcalins par rapport aux plagioclases (Njonfang, 1998). Les fortes teneurs en zirconium pourraient être interprétées comme le reflet de l'entraînement couplé des minéraux accessoires et les phases péritectiques à la fusion (Villaros et *al.*, 2009). Les teneurs en éléments traces des granites de type S croissent généralement avec la basicité et leur degré de variabilité augmente significativement avec le même paramètre (Villaros et *al.*, 2009).

Les faibles teneurs obtenues en certains éléments de transition (Cr, Ni, Co, Cu et Sc) sont en concordance avec les faibles proportions en minéraux ferromagnésiens. Le scandium est surtout concentré dans les roches ultrabasiques riches en pyroxènes (Stueber et Goles, 1967). Les faibles teneurs en éléments traces en dehors du baryum, zirconium et strontium indiquent qu'ils seraient portés par des minéraux accessoires (Fourcade et Allègre, 1981) qui auraient été dissouts par la fusion des fluides (Villaros et *al.*, 2009).

Les teneurs en éléments traces normalisées à la chondrite (McDonough et Sun, 1995) révèlent des anomalies positives en Cu, Ba, Th et négatives en Ni, Co et Ga caractéristiques des roches acides. Aussi, les diagrammes binaires montrent que l'uranium, Pb, Ba, Zn et Zr se concentrent dans les mêmes phases minérales que le silicium. De même, le baryum se concentre dans les mêmes phases minérales que l'aluminium. Ainsi, les anomalies positives en baryum corroborent avec les concentrations élevées en  $Al_2O_3$  obtenues dans les granites de Nyos.

### **II.1.3. Terres rares**

Les concentrations en terres rares dans les granites monzonitiques de Nyos sont élevées. Ces granites sont jusqu'à 20 fois plus riches en terres rares que les granites panafricains du centre Cameroun (Nzenti et *al.*, 2006). Ceci serait la conséquence d'une origine magmatique riche en REE associée à la stabilité de phases porteuses des terres rares lors de l'altération hydrothermale ou lors de la fusion partielle malgré la circulation des fluides hydrothermaux (Rolland et *al.*, 2003). On peut également évoquer une remobilisation des terres rares pendant les processus d'altération supergène (Sharma et Rajamani, 2000) qui ont affecté ces granites. Dans les granites, les minéraux accessoires contrôlent les concentrations des terres rares (Saleh, 2006) ; la monazite contrôle la plupart des LREE (Cocherie, 1978) et le zircon contrôle la plupart des HREE (Charoy, 1986).

Les spectres des terres rares des granites ont, à quelques exceptions près, des profils identiques, ce qui témoigne leur appartenance à une même source magmatique avec les mêmes

processus de mise en place. Ils révèlent la présence des anomalies négatives en europium contrairement aux granites panafricain du centre Cameroun (Nzenti et *al.*, 2006). Les granites du cisaillement de Fouban-Bankim présentent de très faibles anomalies en europium (Njonfang, 1998). Les anomalies en europium résulteraient d'un fractionnement élevé en plagioclase (Saleh, 2007) notamment dans les conditions de réduction (Neal et Taylor, 1989). Cette hypothèse confirme les observations pétrographiques montrant que les plagioclases présentent un début d'altération supergène. Les observations pétrographiques révèlent l'absence des minéraux accessoires tels que la monazite, l'apatite et le zircon. Les anomalies positives en Ce observées sont généralement associées à la présence du cérianite ( $\text{CeO}_2$ ), stable en milieu basique (Yuanming et Stauffer, 2000).

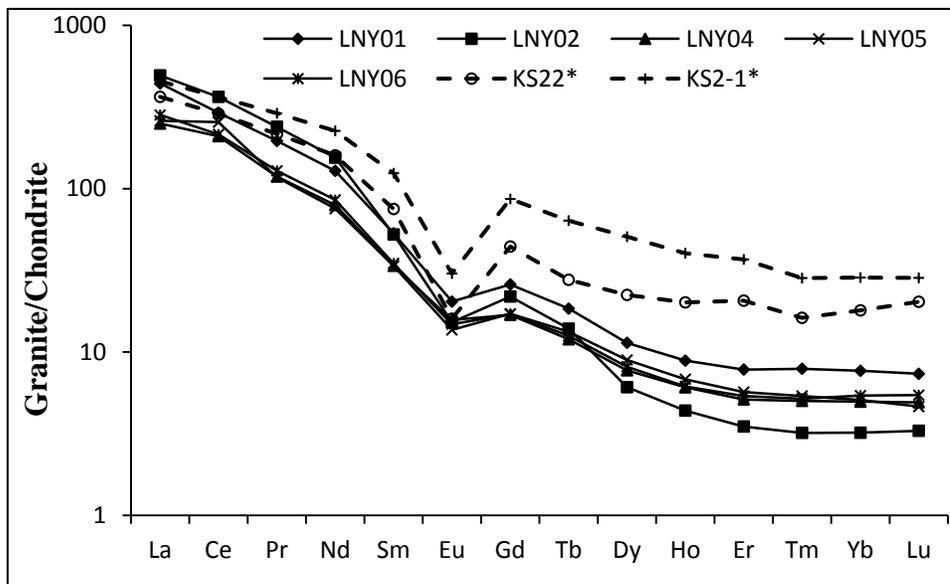
L'enrichissement en LREE suggère que les liquides mantelliques auraient été très enrichis en LREE par rapport aux terres rares lourdes (Nana, 2001). Il serait aussi la conséquence d'un faible taux de fusion partielle ou d'un processus d'évacuation sélective des HREE par rapport aux LREE au cours de l'altération hydrothermale et météorique. Les petites anomalies positives en cérium sont aussi attribuables aux mêmes processus qui ont conduit à l'enrichissement en terres rares légères.

Les rapports  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  résulteraient d'un fractionnement élevé des terres rares. En effet, le haut degré de fractionnement des terres rares est principalement causé par l'appauvrissement en HREE (Nédélec et *al.*, 1990 ; Shang et *al.*, 2004). Les enclaves de granites de Nyos montrent un appauvrissement très élevé en HREE comparativement aux granites panafricains du centre Cameroun (Nzenti et *al.*, 2006) et aux granodiorites du complexe du Ntem (Shang et *al.*, 2004).

Le diagramme de variation des anomalies en Ce par rapport aux taux de fractionnement des granites de Nyos montre une corrélation négative. Ceci montre que le fractionnement des terres rares est à l'origine de l'appauvrissement en cérium qui induit des anomalies négatives.

Les diagrammes binaires montrent que les terres rares légères, contrairement aux terres rares lourdes, se concentreraient dans les mêmes phases minérales que le silicium. L'aluminium n'a aucune affinité avec les terres rares dans les enclaves de granites de Nyos.

Les granites de Nyos sont peralumineux et de type S. Comparés aux granites de Kitongo (Kouske et *al.*, 2012) qui sont métaalumineux et de type I, ils montrent un enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes plus accentué. Les granites de Kitongo possèdent les plus fortes anomalies négatives en europium (Fig. 81). Ceci révèle que le fractionnement en terres rares n'est pas propre aux granites de type S.



\*Granites de Kitongo (Kouske et *al.*, 2012).

**Figure 81:** Spectres des terres rares des granites de Nyos et Kitongo normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995).

#### II.1.4. Eléments du groupe du platine

Les teneurs en EGP sont pour la plupart en dessous de la limite de détection. Elles sont comparables à celles des granites de Bahia au Brésil (Maier et Barner, 1999). La présence des éléments du groupe du platine, bien qu'en quantité faible indique que le magma parental aurait été contaminé par les composés du manteau supérieur (Zhou et *al.*, 2004). Les traces des EGP indiqueraient également des enrichissements par la fusion des silicates basiques ou ultrabasiques.

## II.2. Péridotites

### II.2.1. Pétrographie et minéralogie

Les enclaves de péridotites remontées par les laves basaltiques sont des témoins du manteau supérieur qui étaient situés entre les zones sources des magmas porteurs et le Moho (Wilshire, 1987). Elles ont été arrachées accidentellement par les magmas lors de leur ascension vers la surface (Teitchou, 2008).

Les péridotites de Nyos et Kumba sont définies par une paragenèse minérale assez homogène (olivine+pyroxène+spinelles). Les minéraux hydroxylés sont représentés par les

chlorites. Ces derniers seraient des chlorites métamorphiques ou d'altération hydrothermale (Ngo Bidjeck, 2004). La texture porphyroclastique, prédominante dans les péridotites de Nyos, est une texture de tectonites qui se développe à partir des roches protogranulaires par déformation et recristallisation croissante (Witt et Seck, 1987).

### **II.2.2. Eléments majeurs**

Les teneurs en éléments majeurs, hormis celles en SiO<sub>2</sub> et MgO, sont faibles. Elles sont caractéristiques des roches ultrabasiqes sujette à une fusion partielle. La fusion partielle change la composition originelle des minéraux. Les éléments magmatophiles comme le fer, l'aluminium, le titane et les alcalins quittent les péridotites et se concentrent dans le liquide de fusion ; ce qui diminue leur concentration dans les minéraux au cours de la fusion. Sous l'action de la fusion partielle par exemple, l'olivine s'enrichit en magnésium et s'appauvrit en fer alors que les pyroxènes et les spinelles perdent une partie de leur aluminium (Nana, 2001).

Les teneurs en SiO<sub>2</sub>+MgO sont supérieures à 80% du poids pondéral. Elles sont supérieures à celles des enclaves de péridotites de la ceinture de roches vertes de l'unité du Bas Nyong (SW Cameroun) (Ngo Bidjeck 2004). Les teneurs en fer sont comparables à celles des péridotites du Sud-Ouest Cameroun. Les enclaves de roches ultrabasiqes et basiques du Cameroun seraient donc issues de plusieurs sources mantelliques. Les teneurs en silice et en fer sont semblables à celles des péridotites du rif marocain (Gueddari et *al.*, 1994) mais le MgO reste nettement plus abondant dans ces dernières.

### **II.2.3. Eléments traces**

Les teneurs très élevées en Ni, Cr, Co sont caractéristiques des roches ultrabasiqes (Trescases 1975 ; Nicolini 1990). Les teneurs faibles en éléments traces s'expliqueraient par le caractère incompatible de ces éléments vis-à-vis des minéraux observés dans les péridotites (Mc Kenzie et O'Nions, 1991). Les teneurs en Ni s'expliquent par son affinité pour l'olivine très abondante dans ces roches. Le liquide d'enrichissement serait aussi riche en Ni. Et les spinelles et les clinopyroxènes justifient la teneur en Co et Zn. Au cours de la fusion partielle, le chrome reste dans le résidu solide ce qui explique sa forte concentration (Nana, 2001). Ces teneurs élevées en Cr corroborent également avec la présence de la chromite.

Les péridotites de Nyos comparativement à celles de Kumba sont pauvres en éléments traces. Cet appauvrissement serait relatif à la circulation des fluides metasomatiques dans le manteau supérieur (Temdjim *et al.*, 2004).

Les valeurs normalisées à la chondrite (McDonough et Sun, 1995) sont conformes à celles des roches ultrabasiques.

#### **II.2.4. Terres rares**

Les faibles teneurs en terres rares seraient dues à une faible proportion des minéraux porteurs des terres rares (allanite, monazite, xenotime et apatite par exemple) dans ces péridotites (Braun *et al.*, 1998). L'hétérogénéité dans la distribution des terres rares des péridotites montre qu'elles n'ont pas subi les mêmes processus d'enrichissement ou d'appauvrissement. Les formes semblables des spectres des terres rares des péridotites de Kumba normalisées à la chondrite (McDonough *et al.*, 1995) montrent qu'elles ont une origine commune avec des enrichissements variables.

Le faible enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes dans les péridotites de Kumba milite en faveur d'un faible taux de fusion partielle de ces péridotites pendant les processus magmatiques qui les ont portées vers la surface. La fusion partielle se traduit par un appauvrissement systématique en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes (Shaw, 1970 ; Bodinier, 1988). Ce processus de fusion partielle est difficile à élucider dans les péridotites de Nyos. Les rapports LREE/HREE variables dans les roches seraient dus : (i) soit à l'hétérogénéité du taux de fusion partielle d'un point à un autre ; (ii) soit d'autres phénomènes plus récents à la fusion partielle ont conduit aux enrichissements en terres rares lourdes de certaines enclaves ; (iii) soit certaines péridotites proviennent du liquide de fusion. De manière générale, le taux de fusion partielle des péridotites est plus élevé à Nyos qu'à Kumba (Teitchou, 2008).

Par contre, ces péridotites ont des valeurs du rapport  $(La/Yb)_N$  très faible mais variable à Nyos ; ce qui est incompatible avec une fusion partielle simple car quelle que soit son degré, la fusion partielle conduit à une diminution de la valeur  $(La/Yb)_N$  avec l'augmentation de la fusion partielle (Nana, 2001). Ce caractère serait causé par des processus d'enrichissement plus récents que les phénomènes de fusion partielle. Le haut degré de fractionnement des terres rares observé à Kumba est principalement causé par l'appauvrissement en HREE (Nedelec *et al.*, 1990 ; Shang

et *al.*, 2004). Aussi, plus les concentrations en terres rares sont élevées plus ce rapport est très élevé.

### II.2.5. Or et éléments du groupe du platine

Les péridotites de Nyos et Kumba ont des teneurs en EGP proches de celles des serpentinites de Lomié (Ndjigui, 2012). Ces dernières montrent un enrichissement plus fort en EGPI par rapport aux EGPP (tableau 26). Par contre les pyroxénites de Lolodorf (Ebah Abeng et *al.*, 2012) possèdent des teneurs en Au-EGP supérieures à celles des péridotites de Nyos et Kumba (tableau 26). La figure 82 montre que les pyroxénites de Lolodorf sont riches Pt et Pd mais pauvres en Ir et Ru contrairement aux péridotites de Nyos et Kumba et aux serpentinites de Lomié. L'appauvrissement en EGP pourrait être attribué à la circulation du liquide métasomatique ou la fusion partielle (Bilong et *al.*, 2011).

**Tableau 26:** Teneurs moyennes en Au-EGP (ppb) dans quelques roches ultrabasiques du Cameroun.

<b>Au-EGP</b>	<b>Péridotites de Nyos</b>	<b>Péridotites Kumba</b>	<b>Serpentinites de Lomié</b>	<b>Pyroxénites de Lolodorf</b>
Ir	3,32	2,80	3,80	0,37
Ru	6,07	5,00	6,58	1,35
Rh	0,87	0,64	1,32	1,07
Pt	4,04	3,54	2,44	12,34
Pd	2,67	1,62	0,75	13,62
Au	0,47	0,21	-	6,23
Au-EGP	17,43	13,81	14,89	34,98
ΣEGP	16,96	13,60	14,89	28,75
EGPI	9,39	7,80	10,38	1,72
EGPP	7,58	5,81	4,51	27,03
EGPI/EGPP	1,24	1,34	2,30	0,06

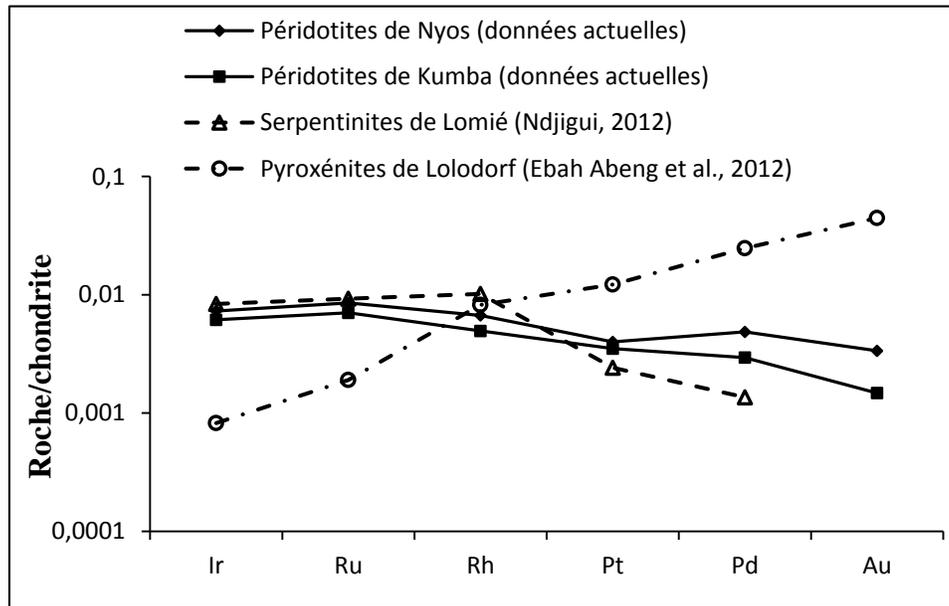
Péridotites de Nyos et Kumba (données actuelles).

Serpentinites de Lomié (Ndjigui, 2012).

Pyroxénites de Lolodorf (Ebah Abeng et *al.*, 2012).

Les teneurs en EGP dans les péridotites de Nyos et Kumba sont faibles. Ceci serait dû à une faible proportion des minéraux porteurs (minéraux du groupe du platine) tels que la pentlantite, la pyrrotite, la chalcopyrite (Godel et *al.*, 2007). Les teneurs relativement élevées en Ir seraient liées à la fusion partielle subie par les péridotites. Pendant que certains éléments sont

mobilisés et évacués par le liquide de fusion, l'iridium reste dans le résidu solide du manteau (Rao et al., 2013). Le rapport Pt/Ir très variable serait le résultat d'un degré de fusion partielle non homogène subi par les péridotites. Les rapports Pt/Au sont élevés tandis que les rapports Pt/Ru sont faibles ; l'or et le ruthénium n'ont pas beaucoup d'affinité avec le platine. Les rapports Pt/Pd et Pt/Ir montrent des affinités significatives du palladium et de l'iridium vis-à-vis du platine dans les péridotites (Godel et Barnes, 2007).



**Figure 82:** Spectres des Au-PGE de quelques roches ultrabasiques du Cameroun normalisés par rapport aux valeurs chondritiques (McDonough et Sun, 1995).

Les teneurs en or sont très faibles. L'or et les éléments du groupe du platine ne se concentreraient pas dans les mêmes phases minérales dans les péridotites de Nyos et de Kumba. Le comportement de l'or dans ces roches serait lié à l'absence ou à la faible proportion des minéraux sulfurés (Maier et Barnes, 1999). Cette pauvreté en minéraux sulfurés serait plus accentuée dans les péridotites prélevées au contact des formations sédimentaires où l'or a une teneur inférieure à la limite de détection.

Les teneurs en Pd et Ru des péridotites de Nyos et de Kumba sont proches de celles des péridotites du rif marocain (Gueddari et al., 1994). Les conditions de mise en place des enclaves de péridotites de Nyos seraient vraisemblablement identiques à celles des péridotites du rif

marocain. Gueddari et *al.* (1994) émettent l'hypothèse d'une extraction précoce du Pd par élimination d'un liquide sulfuré. La fusion partielle déclencherait le départ des sulfures et des PGE chalcophiles qui leur sont liés.

Dans les roches, les teneurs et les comportements des EGP sont à relier à leur fractionnement lors de la fusion partielle dépourvue de fluides susceptibles de les remobiliser sous forme de complexes. Ainsi, Rh, Pt et Pd (EGPP) sont réputés libérés et concentrés dans le liquide magmatique pendant que l'osmium, Ir et Ru (EGPI) sont au contraire retenus dans leur source (Gueddari et *al.*, 1994 ; Ahmed et *al.*, 2009 ; Ismail et *al.*, 2010). Les anomalies positives en ruthénium et négatives en platine seraient donc liées au processus de fusion partielle plutôt qu'au fractionnement magmatique. Les anomalies négatives en Pt sont caractéristiques du manteau résiduel et montrent que les péridotites de Nyos ont connu un taux de fusion partiel plus élevé (Krishnakanta et *al.*, 2013). L'augmentation de la température conjuguée à la baisse brutale de la pression a conduit à une fusion partielle des péridotites. Ce phénomène de fusion partielle a été également mis en évidence par Teitchou (2008) et les péridotites seraient les résidus de fusion. Les concentrations relativement élevées en Ru et Ir en témoignent à suffisance.

### **II.3. Péridotites altérées**

#### **II.3.1. Morphologie et minéralogie**

La prédominance des minéraux primaires par rapport aux minéraux secondaires dans les prouits d'altération des péridotites résulte d'un faible degré d'altération. Les minéraux argileux sont rares avec du quartz, muscovite, smectite et hématite observés dans des faibles proportions Kumba.

L'olivine est toujours le premier minéral altéré. Son hydrolyse est rapide, et se traduit par la lixiviation presque intégrale du magnésium libéré. Le résidu silice-ferrugineux de cette altération est amorphe; il se désilicifie ensuite progressivement à la faveur des saisons les plus humides pendant que le fer cristallise en goethite (Trescases, 1975). L'olivine et les pyroxènes se transforment directement par pseudomorphose en smectites lors de l'altération des péridotites. Les smectites sont plus tard dissoutes et le fer qui en résulte est reprécipité sous la forme de goethite tandis que la silice forme des cristaux de quartz et le manganèse, des oxyhydroxydes (Ngo Bidjeck, 2004). Ce processus est plus évident dans les péridotites de Kumba.

Ainsi, le processus d'altération qui a donné naissance aux matériaux d'altération des péridotites de Kumba est l'hydratation et la dissolution. Néanmoins, à cause des minéraux argileux tels la smectite, quoique faibles et mal cristallisés, on peut mentionner la bissialitisation.

### II.3.2. Eléments majeurs

Par rapport aux péridotites saines, les péridotites altérées de Kumba ont connu une perte en silice et une perte encore plus notable en MgO. Il y a eu des gains en ce qui concerne les oxydes d'aluminium et de fer ;  $Al_2O_3$  s'est plus accumulé que  $Fe_2O_3$ . L'enrichissement relatif en alumine accompagné d'une perte en silice correspond à la formation de la smectite (Ngo Bidjeck, 2004). L'enrichissement en fer est lié à la précipitation progressive des hydroxydes de fer. L'appauvrissement en Mg est causé par l'hydrolyse de l'olivine.

Les éléments majeurs ont des teneurs similaires dans les péridotites non altérées et les péridotites altérées à Nyos. Il y a juste des petites évacuations des éléments alcalins. C'est le résultat d'un faible taux d'altération qui met en relief la grande mobilité des éléments alcalins au cours de l'altération supergène. Les études ont montré que le lessivage et la mobilité des éléments tels que le calcium et le sodium sont proportionnels au taux d'altération (Wronkiewicz et Condie, 1987 ; Harnois, 1988). Le degré de lessivage de la roche en ces éléments augmente avec le degré d'altération (Zobir et Laraba, 2009).

$SiO_2$  est corrélée négativement avec le  $Fe_2O_3$  et MnO au cours de l'altération. Ceci montre que ces éléments ne se concentrent pas dans les mêmes phases minérales. Aussi, pendant l'altération, le Fe et Mn sont remobilisés dans les minéraux secondaires et les oxyhydroxydes pendant que la silice est lessivée même comme une petite partie reste dans les phases minérales primaires. Dans les matériaux sains ou très peu altérés, la silice est associée à l'alumine pendant que les minéraux secondaires qui piègent l'alumine sont refractaires à la silice. Lorsque le degré d'altération augmente, les affinités se créent entre  $SiO_2$  et MgO. Les ferromagnésiens ne cohabitent pas dans les mêmes phases minérales que l'alumine et les alcalins.

Les fortes évacuations du MgO sont dues à une déstabilisation précoce des minéraux ferromagnésiens. L'accumulation de l'aluminium, fer, potassium, calcium, sodium, titane et manganèse montre que ces derniers sont stables sous forme d'oxydes ou dans les minéraux néoformés (Ndjigui et *al.*, 2013).  $Al_2O_3$  est corrélé négativement avec les éléments ferromagnésiens, en particulier MgO qui est fortement évacué au cours de l'altération.

### II.3.3. Eléments traces

Les métaux utiles (Ni, Co et Cr) se rencontrent préférentiellement au sein des argiles (Ni), des spinelles (Cr), des concrétions manganésifères (Co) et des goethites (Ni, Co, Cr) (Ngo Bidjeck, 2004). Les fortes concentrations sont obtenues à la base des profils, dans la saprolite grossière, par le jeu conjugué de l'accumulation relative et de l'accumulation absolue. Les péridotites de Nyos sont très peu altérées. Hormis le baryum qui est accumulé, la géochimie reste encore globalement très proche de celle des péridotites saines.

Les péridotites de Kumba, contrairement à celles de Nyos, sont plus altérées mais en enclaves très peu étendues. Leurs matériaux d'altération sont très influencés par l'encaissant basaltique qui s'altère en même temps que elles. C'est ainsi qu'on obtient par rapport aux péridotites saines une évacuation du nickel et du chrome dans les péridotites altérées. Le cobalt, quoique un peu évacué, est l'élément le plus stable. Les matériaux sont très poreux ; une porosité due au phénomène de dissolution qui laisse des vides dans lesquels les solutions percolent et favorisent la formation des minéraux secondaires pouvant piéger des métaux utiles. Une infime quantité du nickel et de chrome peut être incorporée ou piégée sous forme d'oxyhydroxyde cryptocristallin dans les cavités. Une partie du nickel peut aussi être associée aux oxyhydroxydes ferriques et aux oxydes manganico-cobaltifères qui colmatent les fissures (Pelletier, 1983 ; Ngo Bidjeck, 2004). Les autres éléments traces sont fortement accumulés dans les péridotites altérées de Kumba. Ceci pourrait s'expliquer par le fait qu'il y a eu comme une sorte d'homogénéisation géochimique entre les matériaux d'altération provenant des péridotites et celles provenant des basaltes qui se côtoient intimement. Ces gains d'éléments sont dus à l'incorporation ou l'absorption dans les minéraux secondaires pendant l'altération supergène. Cela se confirme par l'absence de corrélation entre les métaux utiles (Ni, Co, Cr), préalablement abondants dans les péridotites saines et évacués lors de l'altération, et les éléments traces fortement accumulés pendant l'altération supergène.

Les fortes corrélations positives entre les éléments traces les plus importants (Cr, Ni, Co, Zn, Nb, Zr, Cu, Li, Pb) dans les péridotites altérées montrent qu'ils forment des associations d'une part dans les phyllosilicates et d'autre part dans les oxyhydroxydes de fer (Ngo Bidjeck, 2004). Le chrome et le nickel sont incompatibles avec le plomb. Les éléments qui ont été fortement accumulés (V, Zn, Cu) dans les péridotites altérées présentent des corrélations négatives avec la silice. Pendant que la silice est lessivée, ces éléments sont plutôt remobilisés dans les minéraux secondaires et les oxydes. Le comportement des éléments traces vis-à-vis du

fer et du magnésium sont antagonistes. Le nickel et le Co sont incompatibles avec la silice mais s'associent dans les mêmes phases minérales que le MgO dans les péridotites saines et les péridotites légèrement altérées.

Dans les péridotites altérées de Kumba, le chrome, Ni et Co sont évacués avec le MgO au cours de l'altération alors que le vanadium, le zinc et le cuivre s'accumulent de concert avec le Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

#### **II.3.4. Terres rares**

Les terres rares sont mobiles lors de la pédogénèse mais ne migrent pas en solution sur des grandes distances (Sharma and Rajamani, 2000).

Les péridotites altérées de Kumba ont connu une forte accumulation en terres rares, particulièrement en terres rares légères. Ceci serait dû aux changements rapides des conditions de Eh et de pH qui conduisent à un enrichissement en terres rares par absorption ou précipitation dans les argiles et les hydroxydes (Singh et Rajamani, 2001). Les petites anomalies positives en cérium peuvent être attribuées à l'oxydation de ce dernier favorisée par les acides organiques, qui, ensuite forme un complexe stable avec les ligands organiques.

Dans les péridotites de Nyos, certains échantillons sont enrichis en terres rares pendant que d'autres sont appauvris avec des petites anomalies négatives en Eu. Ceci serait dû à un degré d'altération variable jointe à la topographie qui favorise le lessivage. Les anomalies négatives en Ce sont généralement associées à l'absence du cérianite (CeO<sub>2</sub>) (Morey et Setterholm, 1997 ; Bandyayera, 1997). Le cérium trivalent interprété comme étant successivement soluble et en partie oxydé en tétravalent, est préférentiellement précipité dans les phases secondaires d'altération par rapport aux autres terres rares trivalents (REE<sup>3+</sup>) (Tanaka et *al.*, 2010).

Généralement, les produits d'altération montrent un enrichissement en terres rares légères et un appauvrissement en terres rares lourdes (Balashov et *al.*, 1964 ; Ronov et *al.*, 1967). Les terres rares lourdes sont moins mobiles car elles forment, avec les ligands organiques et minéraux, des complexes plus stables en solution que les terres rares légères (Wood, 1990 ; Elderfield et *al.*, 1990 ; Wood et *al.*, 2006). Dans les enclaves de péridotites altérées de Kumba, cette mobilité seule ne saurait justifier le comportement des terres rares dans ces matériaux. Il faut aussi prendre en compte les transferts de matière avec l'encaissant qui contient des teneurs élevées en terres rares (Teitchou, 2008).

Cependant, les terres rares lourdes, même si ce n'est pas avec la même ampleur que les terres rares légères, ont néanmoins connu une accumulation surtout dans les matériaux de Kumba. Nesbitt (1979) a observé les mêmes enrichissements en terres rares lourdes dans les zones peu et moyennement altérées d'une diorite en Australie. Il a attribué cet enrichissement à la différence de stabilité des minéraux porteurs des terres rares. Les phases primaires concentrant plus de terres rares lourdes pourraient être plus stables que celles enrichies en terres rares légères. Dans les produits kaolinitiques des zones de diaclases entre les boules de roche altérée, où il n'y a pas de minéraux porteurs primaires, Nesbitt (1979) a noté un appauvrissement global en terres rares.

Les spectres normalisés par rapport à la chondrite sont parallèles et presque confondus pour les péridotites altérées de Kumba. Cela résulte du fait que les péridotites ont subi les mêmes transformations en milieu supergène. Les péridotites altérées de Kumba ont fait l'objet d'une forte contamination par l'encaissant. Cette contamination justifierait en grande partie l'enrichissement en terres rares dans leur globalité.

La formation et la distribution des minéraux secondaires ont un impact sur la distribution des terres rares (Harlavan et al., 2009). Les diagrammes de corrélation montrent que les terres rares sont compatibles avec le  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  et incompatibles avec le  $\text{MgO}$  dans les péridotites de Kumba. Le comportement des terres rares par rapport à la silice est fonction du degré d'altération. Dans les péridotites peu ou non altérées, elles sont corrélées positivement. Pendant l'altération, la silice est lessivée et les terres rares se concentrent dans les minéraux néoformés résultants. Par contre, dans les péridotites de Nyos, les terres rares sont associées dans les mêmes phases minérales que le  $\text{SiO}_2$  mais sont incompatible avec  $\text{MgO}$ . La proportion des reliques des minéraux primaires et les minéraux secondaires contrôlent en grande partie la distribution des éléments majeurs et traces (Ndjigui et al., 2013).

### **II.3.5. Or et les éléments du groupe du platine**

Le comportement des EGP au cours de l'altération de péridotites n'est pas le même à Nyos et Kumba. À Kumba, les teneurs en EGP dans les péridotites altérées sont plus faibles que celles des péridotites saines.

Les éléments du groupe du platine comme les autres éléments traces peuvent être piégés par les oxydes et les hydroxydes de fer (Wimpenny et al., 2007). Le comportement des éléments

du groupe du platine serait dû soit à une néoformation tardive des minéraux porteurs ou à leur dissolution. Les péridotites altérées de Kumba sont plus altérées que celles de Nyos ; le processus supergène dominant est la dissolution. Il faut également compter avec la taille des enclaves qui ne permet pas une concentration absolue des éléments. L'évacuation des EGP serait due à leur extraction précoce par des ligands organiques ou sous forme de complexe (Barnes et *al.*, 2011; Hanley, 2005). Les faibles teneurs dans les échantillons altérés seraient aussi dus à l'altération rapide des phases primaires porteuses des EGP (Ebah Abeng et *al.*, 2012).

Les rapports EGPI/EGPP indiquent que dans les péridotites altérées tous les éléments du groupe du platine n'ont pas les mêmes comportements au cours de l'altération. Les EGPI sont plus solubles que les EGPP dans les péridotites altérées de Kumba. La prédominance du Pd et dans une moindre mesure du Pt sur les autres EGP indique leur comportement incompatible par rapport au EGPI pendant l'altération. Contrairement aux travaux de Ndjigui et Bilong (2010), c'est plutôt les EGPP qui sont plus solubles que les EGPI dans les péridotites altérées de Nyos. Ceci serait dû à leur faible degré d'altération et à la stabilité des minéraux porteurs des EGPI pendant les premières phases d'altérations.

Les rapports Pt/Pd sont inférieurs à 1 alors que les rapports Pt/Ir, Pt/Rh, Pt/Ru et Pt/Au sont supérieurs à 1. Le palladium est moins mobile que le platine qui est moins mobile que les autres EGP dans les péridotites altérées de Kumba. La faible mobilité du palladium peut être liée à la présence des alliages Pd-Fe stables dans les minéraux secondaires (Salpéteur et *al.*, 1995 ; Suarez et *al.*, 2010). L'accumulation de Pd et le lessivage de Pt confirment que le platine est plus mobile que le palladium (Traoré et *al.*, 2008). Azaroual et *al.* (2001) ont montré l'importance des complexes hydroxylés dans le transport du platine dans les systèmes aqueux de surface et de subsurface avec 90% du platine transporté sous forme de  $\text{PtOH}^+$ , 9,7% sous forme de  $\text{Pt}(\text{OH})_2(\text{aq})$ , 0,2% sous forme de  $\text{PtCl}_4^{2-}$ , et 0,1% sous forme de  $\text{PtCl}_3^-$ . Aussi, la dissolution réductrice des oxyhydroxydes de fer et de manganèse évacue intensément les EGP (Ndjigui, 2012). Par contre dans les péridotites de Nyos, où les EGP sont accumulés à l'exception du palladium dans certains échantillons, c'est le ruthénium et l'iridium qui sont moins mobiles.

Par rapport aux EGP, l'or paraît beaucoup plus stable dans les péridotites altérées de Kumba. L'or et le palladium ont pratiquement le même comportement (Ebah Abeng et *al.*, 2012). Ceci serait dû à la faible mobilité de l'or et à sa résistance à la dissolution par rapport aux minéraux ferromagnésiens.

Les diagrammes de corrélation montrent que les éléments du groupe du platine possèdent de grandes affinités entre-eux. Par rapport aux éléments majeurs, le platine et le palladium sont associés à  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  tandis le ruthénium et le rhodium sont liés à  $\text{MgO}$ . Les éléments du groupe du platine et de l'iridium se concentrent dans les mêmes phases minérales que le nickel et le cobalt alors qu'ils sont réfractaires aux terres rares.

Deux arguments peuvent être énoncés pour expliquer la pauvreté en éléments du groupe du platine dans les péridotites altérées. Premièrement une pauvreté probable en minéraux rélictuels ((sperrylite ( $\text{PtAs}_2$ ), cooperite ( $\text{PtS}$ ), braggite (( $\text{Pt, PdS}$ ), alliages ( $\text{Pt}_3\text{Fe}$ )) à cause du lessivage intense (Ndjigui, 2012). Et deuxièmement la faible proportion des minéraux secondaires et oxydes comme les smectites et les oxyhydroxydes de fer qui peuvent fixer les EGP sur leurs interfaces (Oberthur et Melcher, 2005).

## CONCLUSION

Les granites de Nyos sont silico-alumineux et de type S. Hormis les éléments de transition, les éléments traces y compris les terres rares ont des teneurs élevées. L'altération des feldspaths est à l'origine des anomalies négatives en europium. Les teneurs en Au-EGP ne présentent aucun intérêt métallogénique.

Les péridotites étudiées proviennent du manteau supérieur. Elles ont subi une fusion partielle plus poussée à Nyos qu'à Kumba. Les conditions d'altération sont plus favorables à Kumba qu'à Nyos. Les péridotites altérées de Kumba, contrairement à celles de Nyos très peu altérées, sont enrichies en éléments traces y compris les terres rares à l'exception du nickel et du chrome. Les platnoïdes ont été évacués à Kumba tandis qu'ils sont légèrement accumulés à Nyos.

***CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES***

## I. CONCLUSION GENERALE

La région montagneuse de Nyos et la plaine de Kumba appartiennent à la partie sud de la Ligne Volcanique du Cameroun qui s'étend depuis l'île de Pagalù jusqu'au lac Tchad. Le climat est équatorial de type camerounien à Nyos et de type guinéen à Kumba. Ce climat plus humide à Kumba a donné naissance à une végétation de forêt tandis que la région de Nyos est dominée par la savane. Le substratum dans ces régions est granito-gneissique surmontée par des coulées basaltiques au sein desquelles les péridotites et les granites sont en enclaves. Le but de ce travail était de mener une étude pétrologique des péridotites et de granites et de leurs produits d'altération. Son aspect métallgénique porte sur la prospection géochimique de l'or des éléments du groupe du platine dans ces formations.

Les granites de la région de Nyos, de texture grenue, sont composés de quartz, de feldspaths (microcline, plagioclases et orthose) et de biotite comme phase majeure. Ce sont des granites monzonitiques de couleur rose fortement affectés par l'altération hydrothermale.

Les péridotites de Nyos et de Kumba sont des roches ultrabasiques, friables et de texture protogranulaire à porphyroclastique. Elles sont principalement composées d'olivine, orthopyroxènes, clinopyroxènes et spinelles.

Les granites de Nyos sont silico-alumineux avec des teneurs significatives en  $K_2O$ ,  $Na_2O$  et  $Fe_2O_3$  et faibles en  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $MnO$ ,  $P_2O_5$  et  $TiO_2$ . Ce sont des granites de composition peralumineuse appartenant aux granitoides de type S. Les teneurs sont élevées en Ba, Rb, Zr, Sr et modérées en Zn, Li, Pb, Th, Ga et Nb. La silice possède des corrélations positives avec l'uranium, Pb, Ba, Zn. Les terres rares ont des teneurs élevées avec un enrichissement en terres rares légères. Les spectres des terres rares des granites révèlent des anomalies négatives en Eu. Les terres rares (LREE, HREE) montrent des corrélations positives avec la silice. Par ailleurs, les concentrations en or et éléments du groupe du platine sont très faibles ; en majorité inférieures à la limite de détection.

Les péridotites de Nyos et de Kumba ont des compositions chimiques similaires. Elles ont des teneurs élevées en  $SiO_2$  et  $MgO$  avec des rapports  $SiO_2/MgO$  proches de 1. Les concentrations sont significatives en  $Fe_2O_3$  et faibles en  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $MnO$ ,  $K_2O$ ,  $P_2O_5$  et  $TiO_2$ . Hormis le nickel, Cr et Co qui ont des teneurs élevées, les péridotites ont des teneurs faibles en éléments traces avec des anomalies positives en V, Sc, Zr, Y dans les péridotites de Nyos et en V et Ba dans les péridotites de Kumba. Quoique les teneurs en terres rares soient aussi faibles, on relève un enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares

lourdes plus marqué dans les péridotites de Kumba. La normalisation des terres rares des péridotites montre des petites anomalies négatives en Ce à Nyos avec un taux de fractionnement variable. Les spectres des terres rares des péridotites de Kumba sont sub-parallèles. Par ailleurs, l'or et les éléments du groupe du platine ont des teneurs plus élevées dans les péridotites de Nyos par rapport à celles de Kumba. Parmi les Au-EGP, le ruthénium et le platine ont les teneurs les plus élevées alors que l'or a des teneurs proches de la limite de détection. Les rapports EGPI/EGPP sont variables dans les péridotites de Nyos tandis que ces rapports indiquent des enrichissements en EGPI par rapport aux EGPP dans les péridotites de Kumba. Les spectres des Au-EGP montrent des petites anomalies négatives en Pt dans les deux sites et des petites anomalies positives en Ru à Kumba.

L'altération est plus intense à Kumba qu'à Nyos. Les péridotites altérées de Nyos n'ont pas les mêmes caractéristiques que celles de Kumba. Ces dernières ont été très influencées par leur encaissant basaltique.

Les péridotites de Nyos présentent une altération centripède. Elles sont composées d'olivine, pyroxènes et chlorite. Leur géochimie est proche de celles des péridotites saines. La silice possède des corrélations négatives avec  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  et positives avec  $\text{TiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Les ferromagnésiens sont incompatibles avec l'alumine et les alcalins. Comme dans les péridotites saines, les concentrations sont seulement élevées en Cr, Ni et Co parmi les éléments traces. Le baryum est fortement accumulé dans les péridotites altérées de Nyos tandis la normalisation révèle des anomalies négatives en Cu et Ga. Le nickel et le cobalt possèdent des corrélations négatives avec  $\text{SiO}_2$  et positives avec  $\text{MgO}$ . Le vanadium, Cu, Zn et Cr sont associé avec la silice et le Co et le Ni sont associés avec le fer. Les péridotites altérées de Nyos possèdent des petites anomalies positives en Eu et elles ont connu des accumulations en La, Ce et Pr. Le néodyme est positivement corrélé avec la silice alors que les terres rares lourdes sont négativement corrélées avec  $\text{MgO}$ . Par rapport aux péridotites saines, les EGP en dehors du palladium ont été accumulés au cours de l'altération supergène. Les EGP les moins mobiles sont le platine et le ruthénium dans les péridotites altérées de Nyos.

Les péridotites altérées de Kumba sont poreuses et contiennent des amas d'olivines résiduelles. La composition minéralogique est faite d'olivine, pyroxène, quartz, smectite, magnétite et muscovite. Seul  $\text{SiO}_2$  a des teneurs élevées et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{MgO}$  ont des teneurs de l'ordre de 10%. Par rapport aux péridotites saines, la perte au feu a des valeurs très fortes. Hormis  $\text{MgO}$ , les autres éléments exprimés sous forme d'oxydes ont été accumulés dans les

péridotites altérées de Kumba. La silice est corrélée négativement avec  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Les ferromagnésiens possèdent des corrélations négatives avec l'alumine et les alcalins. Les péridotites de Kumba possèdent des teneurs élevées en une large gamme d'éléments traces (Cr, Sr, Ba, Ni, Zn, Cu, Co, Y, Nb) y compris les terres rares. Exceptés le nickel et le chrome, les éléments traces sont accumulés au cours de l'altération. Le vanadium et le cuivre possèdent des corrélations négatives avec la silice et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  possèdent des corrélations négatives avec le Co et le Ni, négatives avec le chrome, V, Zn et Cu. Le chrome, Ni et Co sont positivement corrélés avec MgO. Les teneurs en terres rares sont élevées avec des rapports LREE/HREE supérieurs à 1 et des taux de fractionnement élevés. Toutes les terres rares sont fortement accumulées pendant l'altération supergène. Les terres rares sont corrélées positivement avec le  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  mais négativement avec MgO. Les éléments du groupe du platine ont des teneurs très faibles, ils ont été évacués lors de l'altération supergène. Néanmoins, le platine et le palladium sont les éléments du groupe du platine les plus stables dans les péridotites altérées de Kumba.

Les éléments du groupe du platine dans les péridotites de Nyos et de Kumba sont corrélés positivement entre-eux. Le ruthénium et le rhodium contrairement au platine et palladium, présentent des corrélations négatives avec  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et positives avec MgO. Les éléments du groupe du platine et de l'iridium sont corrélés positivement avec le nickel et le cobalt et négativement avec les terres rares.

Sur le plan métallogénique, les données analytiques montrent que les teneurs en Au-EGP sont faibles tant dans les roches que dans les matériaux altérés. Ainsi, ces matériaux ne sauraient constituer un indice potentiel pour la prospection d'un gisement en or et éléments du groupe du platine.

## **II. PERSPECTIVES**

Ce travail a porté sur la partie sud de la Ligne Volcanique du Cameroun avec deux sites choisis : Nyos et Kumba. Il conviendra de le poursuivre dans sa partie septentrionale. Des observations au microscope électronique à balayage (MEB) pourront apporter de plus amples informations sur la distribution des éléments du groupe du platine à l'échelle du minéral porteur. Il sera également possible de faire un bilan géochimique à l'échelle du minéral.

***BIBLIOGRAPHIE***

- Ahmed, H.A., Shoji, A., Yaser, M. A.-A., Moha, I., Abdellatif, R., 2009.** Platinum-group elements distribution and spinel composition in podiform chromitites and associated rocks from the upper mantle section of the Neoproterozoic Bou Azzerophiolite, Anti-Atlas, Morocco. *Journal of African Earth Sciences* **55**, 92-104.
- Albuquerque, C.A.R. (DE), 1973.** Geochemistry of biotites from granitic rocks, Northern Portugal. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **37**, 1779-1802.
- Aye, A.B., 2010.** Contribution to petrologic studies of amphibolites in the greenstone belt of the Nyong unit at Nyabitandé (Akom II, South Cameroun): geochemical survey of gold and platinum group elements. Master, Univ. de Yaoundé I, 97p.
- Azaroual, M., Romand, B., Freyssinet, P., Disnar, J., 2001.** Solubility of platinum in aqueous solutions at 25°C and pHs 4 to 10 under oxidizing conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **65**, 4453-4466.
- Bagnouls, F., Gaussen, H., 1957.** Les climats biologiques et leurs classifications. *Am. Géog.* XXVI, 193-220.
- Balashov, Y.A., Ronov, A.B., Migdisov, A.A., Turanskaya, N.V., 1964.** The effect of climate and facies environment on the fractionation of the rare earths during sedimentation. *Geochemica International* **10**, 951-969.
- Bandyayera, A., 1997.** Formation des latérites nickélicifères et mode de distribution des éléments du groupe du platine dans les profils latéritiques du complexe de Musongati, Burundi. Thèse, Univ. Québec à Chicoutimi, 440 p.
- Barnes, S.-J., Francis, D., 1995.** The distribution of Platinum-Group Element, Nickel, Copper, and Gold in the Muskox Layered Intrusion, Northwest Territories, Canada. *Economic Geology* **90**, 135-154.
- Barnes, S.-J., Liu, W., 2011.** Pt and Pd mobility in hydrothermal fluids: evidence from komatiites and from thermodynamic modelling. *Ore Geology Reviews* **44**, 49-58.
- Barnes, S.-J., Zientek, M.L., Sevrerson, M.J., 1997.** Ni, Cu, Au, and platinum-group element contents of sulphides associated with intraplate magmatism: a synthesis. *Revue canadienne des Sciences de la Terre* **34**, 337-351.
- Beauvais, A., 1991.** Paléoclimats et dynamique d'un paysage cuirassé du Centrafrique : Morphologie, Pétrologie et Géochimie. Thèse, Univ. Poitiers, 297p.
- Bessoles B., Tompette R. 1980.** Géologie de l'Afrique. La chaîne panafricaine : zone mobile d'Afrique centrale (partie sud) et zone mobile soudanaise. Mémoire du BRGM 92, 396 p.

- Bilong, P., Ndjigui, P.-D., Temdjim, R., Sababa, E., 2011.** Geochemistry of peridotite and granite xenoliths under the early stages of weathering in the Nyos volcanic region (NW Cameroon): implications for PGE exploration. *Chemie der Erde-Geochemistry* **71**, 77-86.
- Bodinier, J.L., 1988.** Geochemistry and petrogenesis of the lanzo peridotite body, Western Alps. *Tectonophysics* **149**, 67-88.
- Bowles, J.F.W., 1986.** The development of platinum group minerals in laterites. *Economic Geology* **81**, 1278-1285.
- Bowles, J.F.W., 1990.** Platinum-iron alloys, their structural and magnetic characteristics in relation to hydrothermal and low-temperature genesis. *Mineral Petrology* **43**, 37-47.
- Bowles, J.F.W., 1995.** The development of platinum-group minerals (PGM) in the laterites: Mineral morphology. *Chronique de la Recherche Minière* **520**, 55-63.
- Boyle, R.W., 1979.** The geochemistry of gold and its deposits. Geological Survey. Canadian Bulletin, 280 p.
- Braun, J.-J., Pagel, M., Herbillon, A., Rosin, C., 1993.** Mobilisation and distribution of REEs and thorium in syenitic lateritic profile: a masse balance study. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **57**, 4419-4434.
- Braun, J.-J., Viers, J., Dupre, B., Polve, M., Ndam, J., Muller, J.-P., 1998.** Solid/liquid REE fractionation in the lateritic system of Goyom, East Cameroun: the implicarion for the present dynamics of the soil covers of the humid tropical region. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **62**, 273-299.
- Brimhall, G.H., Dietrich, W.E., 1986.** Constitutive mass-balance relation between chemical composition, volume, density, porosity and strain in metasomatic hydrochemical systems: results on weathering and pedogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **51**, 567-587.
- Burke, K., 2001.** Origin of the Cameroon line of volcano-capped swells, *Journal of Geology* **109**, 349-362.
- Burnham, O. M., Schweyer, J., 2004.** Trace element analysis of geological samples by inductivity Coupled Plasma Mass Spectrometry at the Geoscience Laboratories: revised capabilities due to improvements to instrumentation. Summary of Field Work and other Activities 2004, Ontario Geological Survey, Open file report 6145 **54**, 1-20.
- Chappell, B.W., White, A.J.R., 1974.** Two contrasting granite types. *Pacific Geology* **8**, 173-174.

- Charoy, B., 1986.** The genesis of the Comubian batholith (South-West England): the example of the Cammenellis pluton. *Journal of Petrology* **27**, 571-604.
- Chu, H., Chi, G., Bosman, S., Card, C., 2014.** Diagenetic and geochemical studies of sandstones from drill core DV10-001 in the Athabasca basin, Canada, and implications for uranium mineralization. *Journal of Geochemical Exploration*, doi: 10.1016/j.gexplo.2014.10.002.
- Clark Thomas, 2001.** Distribution et potentiel des éléments du groupe du platine au Québec. *Géologie du Québec* **07**, 17p.
- Cocherie, A., 1978.** Géochimie des terres rares dans les granitoïdes. These, Univ. Rennes, 116 p.
- Colin, F., 1992.** L'or, traceur de l'histoire chimique et physique de l'altérosphère latéritique sous forêt équatoriale. HDR, Univ. de Droit, d'Econo. et de Sci. d'Aix-Marseille, 171p.
- Colin, F., Nahon, D., Trescases, J.J., Melfi, A., 1990.** Lateritic Weathering of Pyroxenites at Niquelandia, Goias, Brail: The supergene behavior of nickel. *Economic Geology* **85**, 1010-1023.
- Colin, F., Veillard, P., Ambrosi, J.-P., 1993.** Quantitative approach to physical and chemical gold mobility in equatorial rainforest lateritic environment. *Earth and Planetary Science Letters* **114**, 269-285.
- Cornu, S.J., Lucas, Y., Lebon, E., Ambrosi, J.-P., Luizão, F. Rouiller, J., Bonnay, M., Neal, C., 1999.** Evidence of titanium mobility in soil profiles, Manaus, Central Amazonia. *Geoderma* **91**, 281-295.
- Craver, R.N., Chenoveth, L.M., Mazzuchelli, R.H., Oates, C.J. and Robbins, T.W., 1987.** "Lag" a geochemical sampling medium for arid region. In: Govett R.G. (Editor), *Geochemical Exploration 1985. Journal of Geochemical Exploration* **28**, 183-199.
- Dautria, J. M. et Girod, M., 1986.** Les enclaves de lherzolites à spinelle et plagioclase du volcan Dibi (Adamaoua, Cameroun) : des témoins d'un manteau supérieur anormal. *Bulletin de Minéralogie* **109**, 275-288.
- Déruelle, B., Bardintzeff, J.-M., Cheminée, J.-L., Ngounouno, I., Lissom, J., Nkoumbou, C., Etame, J., Hell, J.-V., Tanyileke, G., N'ni J., Ateba, B., Ntepe, N., Nono, A., Wandji, P., Fosso, J., Nkouathio, D.G., 2000.** Eruptions simultanées de basalte alcalin et de hawaiiite au Mont Cameroun (28 mars- 17avril 1999). *C. R. Acad. Sci. Paris, Science Terre et Planètes* **331**, 525-531.

- Déruelle, B., Moreau, C., Nkoumbou, C., Kambou, R., Lissom, Njonfang, E., Ghogomu R.T., Nono A., 1991.** The Cameroon line: a review. In *Magmatism in extensional structural settings. The Phanerozoic African Plate*. Kampuzi, A.B. and Lubala, R.T. (eds), Heidelberg, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 274-327.
- Déruelle, B., Ngounouno, I., Demaiffe, D., 2007.** The 'Cameroon Hot Line' (CHL): A unique example of active alkaline intraplate structure in both oceanic and continental lithospheres. *C. R. Geoscience* **339**, 589-600.
- Dumort, J.C., 1968.** Notice explicative sur la feuille Douala-Ouest et carte géologique de reconnaissance au 1:500000, Bull. BRGM.
- Ebah Abeng, S. A., Ndjigui, P.-D., Aye Anehumbu, B., Tessontsap, T., Bilong, P. 2012.** Geochemistry of pyroxenites, amphibolites and their weathered products in the Nyong unit, SW Cameroon (NW border of Congo craton): Implications for Au-PGE exploration. *Journal of Geochemical Exploration* **114**, 1-19.
- Edou-Minko, A., Colin, F., Trescases, J.J., Lecomte, P. 1995.** Les mécanismes de dispersion et d'accumulation d'or. *Journal afro de géologie*, 322-326.
- Elderfield, H., Upstill-Godard, R. and Sholkovitz, E.R., 1990.** The rare earth elements in rivers, estuaries and coastal seas and their significance to the composition of ocean waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **54**, 971-991.
- Fourcade, S., Allègre, C.S., 1981.** Trace elements behavior in granite genesis: a case study the calc-alkaline plutonic association from the Querigut complex (Pyrénées, France). *Contributions to Mineralogy and Petrology* **76**, 177-195.
- Ghogomu, R.T., Njilah, I.K., Ayonghe, S.N., Njumbe, E.S., Eno Belinga, S., 1999.** The 1999 eruption of Mount Cameroon. In *Géologie et Environnements au Cameroun*, Vicat J.P. et Bilong P. éd., Collect. Géocam, 2/1999, Presses Universitaires Yaoundé, 363-366.
- Godel, B., Barnes, S.-J., 2007.** Platinum-group elements in sulfide minerals and the whole rocks of the J-M Reef (Stillwater complex): Implication for the formation of the reef. *Chemical geology* **248**, 272-294.
- Godel, B., Barnes, S.-J., Maier, W.D., 2007.** Platinum-group elements in sulphide minerals, platinum-group minerals, and whole-rocks of the Merensky reef (Bushveld complex, South Africa): implications for the formation of the reef. *Journal of Petrology* **48** (8), 1569-1604.
- Grant, J.A., 2005.** Isocon analysis: A brief review of the method and applications. *Physics and Chemistry of the Earth* **30**, 997-1004.

- Gueddari, K., Piboule, M., Amosse, J., 1994.** Comportement des éléments du groupe du platine (PGE) dans les ultrabasites des Beni Bousera (Rif, Maroc) : données préliminaires. *C.R. Acad. Sci. Paris, t.318, Série II*, 79-86.
- Halliday, A.N., Davidson, J.P., Holden, P., Dewolf, C., Lee, D.-C., Fitton, J.G., 1990.** Trace-element fractionation in plumes and the origin of HIMU mantle beneath the Cameroon line. *Nature* **347**, 523-528.
- Hamlyn, P.R., Keays, R.R., 1986.** Sulfur saturation and second-stage melts: application to the Bushveld platinum metal deposits. *Economic Geology* **81**, 1431-1445.
- Hamlyn, P.R., Keays, R.R., Cameron, W.E., Crawford, A.J., Waldron, H.M., 1985.** Precious metals in magnesian low-Ti lavas: Implications for metallogenesis and sulfur saturation in primary magmas. *Geochimica Cosmochimica Acta* **49**, 1797-1811.
- Hanley, J.J., 2005.** The aqueous geochemistry of the platinum-group elements (PGE) in surficial, low-T-hydrothermal and high-T magmatic-hydrothermal environments. In: Mungall, J.E. (Ed.), Exploration for Platinum-group element deposits, 35. Mineralogical Association of Canada Short Course, Oulu, Finland, 35-36.
- Harlavan, Y., Erel, Y., Blum, J.D., 2009.** Coupled release of REE and Pb to the soil labile platinum-group minerals and dispersion of platinum-group elements during progressive weathering of the Aguablanca Ni–Cu deposit, SW Spain. *Mineralium Deposita* **45** (4), 331-350.
- Harnois, L., 1988.** The CIW Index: A new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology* **55**, 319-322.
- Ismail, S.A., Mirza, T.M., Carr, P.F., 2010.** Platinum-group elements geochemistry in podiform chromitites and associated peridotites of the Mawatophiolite, north eastern Iraq. *Journal of Asian Earth Sciences* **37** (1), 31-41.
- Kagou, A., Wandji, P., Pouclet, A., Vicat, J.-P., Chelleit, A., Nkouathio, D.G., Alexandrov, P., Tchoua, F.M., 2001.** Evolution volcanologique du mont Manengouba (ligne du Cameroun); nouvelles données pétrographiques, géochimiques et géochronologiques, *C.R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* **333**, 155-162.
- Kah, E.F., 2004.** The role of local communities in conserving the protected areas in the former Menchum division of the North-West province of Cameroon. Mém. DEA, Univ. Yaoundé I, 108p.

- Keays, R.R., 1982.** Palladium and iridium in komatiites and associated rocks: application to petrogenetic problems. In : Komatiites, N.T. Arndt et E.G. Nisbet, éditeurs. George Allen and Unwin (Publishers) Ltd., London.
- Kling, G.W., Clark, M.A., Compton, H.R., Devine, J.D., Evans, W.C., Humphrey, A.M., Koengsberg, E.J., Lookwood, J.P., Tuttle, M.L., Wagner, G.N., 1987.** The 1986 lake Nyos gas disaster in Cameroon. *West African Science* **236**, 125-232.
- Koch, F.W., Wiens, D.A., Nyblade, A.A., Shore, P.J., Tibi, R., Ateba, B., Tabod, C.T., Nnange, J. M., 2012.** Upper-mantle anisotropy beneath the Cameroon Volcanic Line and Congo Craton from shear wave splitting measurements. *Geophysical Journal International* **190**, 75-86.
- Krishnakanta, S.A., Debala, D.L., Ibotomba, S.N., Subramanyam, K.S.V., Bikramaditya, S.R.K., Satyanarayanan., 2013.** Platinum-group elements and gold distribution in peridotites and associated podiform chromitites of the Manipur Ophiolitic Complex, Indo-Myanmar Orogenic Belt, Northeast India. *Chemie der Erde-Geochemistry* **73**, 147-161.
- Kouske, A.P., Suh, C.E., Ghogomu, R.T., Ngako, V., 2012.** Na-Metasomatism and Uranium Mineralization during a Two-Stage Albitization at Kitongo, Northern Cameroon: Structural and Geochemical Evidence Na-Metasomatism and Uranium Mineralization during a Two-Stage Albitization at Kitongo, Northern Cameroon: Structural and Geochemical Evidence. *International Journal of Geosciences* **3**, 258-279.
- Lassere, M., 1978.** Mise au point sur les granitoides dits ultimes du Cameroun. Gisements, pétrographie et géochronologie. *Bulletin du Bureau de Recherches Géologiques et Minières* **2** (4), 143-159.
- Le Count Evans, D., 1980.** Lateritization as a possible contribution to gold places. *Engine and Mining Journal*, 86-96.
- Leblanc, M., Nicolas, A., 1992.** Ophiolitic chromites. *International Geology Reviews* **34**, 653-686.
- Lee, D.C., Halliday, A.N., Davies, G.R., Essene, E.J., Fiton, J.G. Temdjim, R., 1996.** Melt Enrichment of Shallow Depleted Mantle: a Detailed Petrological, Trace Element and Isotopic Study of Mantle-Derived Xenoliths and Megacrysts from the Cameroon Line. *Journal of Petrology* **37**, 415-441.

- Lee, D.-C., Halliday, A.N., Fitton, J.G., Poli, G., 1994.** Isotopic variations with distance and time in the volcanic islands of the Cameroun Line: evidence for a mantle plume origin. *Journal of Earth Planetary Science letters* **123**, 119-138.
- Li, Y.Q., Li, Z.L., Sun, Y.L., Santosh, M., Langmuir, C.H., Chen, H.L., Yang, S.F., Chen, Z.X., Yu, X., 2012.** Platinum-group elements and geochemical characteristics of the Permian continental flood basalts in the Tarim Basin, northwest China: implications for the evolution of the Tarim Large Igneous Province. *Chemical Geology* **328**, 278-289.
- Lorand, J.P., Alard, O., 2001.** Platinum-group abundances in the upper mantle: new constraints from in situ and whole rock analyses of massive central xenoliths (France). *Geochimica et Cosmochimica Acta* **65**, 2789-2806.
- Luguet, A., Shirey, S.B., Lorand, J.-P., Horan, M.F., Carlson, R.W., 2007.** Residual platinum-group minerals from highly depleted harzburgites of Lherz massif (France) and their role in HSE fractionation of mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **71**, 3082-3097.
- Maier, W.D. and Barnes, S.-J., 1999.** The origin of the sulphide deposits in the Curaca Valley, Bahia, Brazil: evidence from Cu, Ni, Sc and Platinum-Group Element concentration. *Bulletin of the society of economic geologists* **94** (2), 165-183.
- Maier, W.D., Roelofse, F., Barnes, S.-J., 2003.** The concentration of Platinum Group elements in South African komatiites: implications for mantle sources, melting regime and PGE fractionation during crystallization. *Journal of Petrology* **44**, 1787-1803.
- Marker, A., Friedrich, G., Carvalho, A., Melfi, A., 1991.** Control of the distribution of Mn, Co, Zn, Zr, Ti and REEs during the evolution of lateritic covers above ultramafic complexes. *Journal of Geochemical Exploration* **40** (1-3), 361-383.
- Marzoli, A., Piccirillo, E.M., Renne, P.R., Bellieni, G., Iacumin, M., Nyobe, J.B., Tongwa, A.T., 2000.** The Cameroon Volcanic Line revisited: petrogenesis of continental basaltic magmas from lithospheric and asthenospheric mantle sources. *Journal of Petrology* **41** (1), 87-109.
- Mattheys J., 2004.** Platine. JMB OVERVIEW, 11p.
- McDonough, W.F. and Sun, S., 1995.** The composition of the Earth. *Chemical Geology* **120**, 223-253.
- McKenzie, D.P., O’Nions, R.K., 1991.** Partial melting distributions from inversion of Rare Earth Element Concentration. *Journal of Petrology* **32**, 1021-1091.

- McKie, R., 2000.** The World most deadly bubble an enphosium of lethal gas from a Cameroon lake killed 1700 people. Scientists are racing to prevent a worse disaster. Reports Robin McKie, August 20, 2000 in Yahoo mail: [http://search.yahoo.com/search?p=McKie %2C + lac + Nyos &fr = yf](http://search.yahoo.com/search?p=McKie%2C+lac+Nyos&fr=yf), 3p.
- Millot, G. et Bonifas, M., 1995.** Tranformations isovolumétriques dans les phénomènes de latérisation et de bauxitisation. Bull. Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine 8, 3-10.
- Minyemeck, E.A., 2006.** Les amphibolites et talcschistes du secteur de Pouth-Kéllé (plaine côtière du Cameroun) : pétrographie, minéralogie, géochimie et prospection géochimique du platine, palladium et or. DEA, Univ. Yaoundé I, 85p.
- Morey, G. B., and Setterholm, D. R., 1997.** Rare earth elements in weathering profiles and sediments of Minnesota: Implications for provenance studies. *Journal of Sedimentary Research* **67**,105-115.
- Moroni, M., Girardi, V.A.V., Ferrario, A., 2001.** The Serra Peláda Au-PGE deposit, Serra dos Carajás (Para state, Brazil): geological and geochemical indications for a composite mineralising process. *Mineralium Deposita* **36**, 768-785.
- Mulutakwi, G.T., 2006.** Proximal phreatomagmatic tephra at lake Barombi-Mbo : characteristics and implications for eruption dynamics and hasard assessment. DEA, Univ. Yaoundé I, 49p.
- Mungall, J. E., Martin, R. F., 1994.** Severe leaching of trachytic glass without devitrification, Terceira, Azores. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **58**, 75-83.
- Nana, R., 1991.** Contribution à l'étude volcanologique et pétrologique des lacs de la région de Wum (Province du Nord-Ouest, Cameroun). Thèse Doct. 3<sup>ème</sup> Cycle, Univ. Yaoundé, 155p.
- Nana, R., 2001.** Pétrologie des péridotites en enclaves dans les basaltes alcalins récents de Nyos : apport à la connaissance du manteau supérieur de la ligne du Cameroun. Thèse Doct. d'Etat, Univ. Yaoundé I, 220 p.
- Nana, R., Nkoumbou, C., Tchouankoue, J.P., Tabod, C. et Tchoua, F., 1998.** Pétrologie des nodules de péridotites des volcans de Nyos (Cameroun). Implication sur l'évolution des risques volcaniques. In "Géosciences au Cameroun", Vicat J.P et Bilong P. éd., collect. Geocam, 1/1998, Presses Universitaires de Yaoundé, 225-228.
- Ndjigui, P.-D., 2012.** Comportement des elements du groupe du platine dans les laterites du Sud Cameroun. HDR, Univ. de Lorraine, 126p.

- Ndjigui, P.-D., 2008.** Behaviour of palladium in three lateritic profiles developed on serpentinite in the Lomié ultramafic complex (South-East Cameroon). *Journal of the Cameroon Academy of Sciences* 7 (3), 166-181.
- Ndjigui, P.-D., Badinane, M. F. B., Nyeck, B., Nandjip, H. P. K., Bilong, P., 2013.** Mineralogical and geochemical features of the coarse saprolite developed on orthogneiss in the SW of Yaoundé, South Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 79, 125-142.
- Ndjigui, P.-D., Bilong, P., 2010.** Platinum-group elements in the serpentinite lateritic mantles of the Kongo-Nkamouna ultramafic massif (Lomié region, South-East Cameroon). *Journal of Geochemical Exploration* 107, 63-76.
- Ndjigui, P.-D., Bilong, P., Bitom, D., Dia, A., 2008.** Mobilisation and redistribution of major and trace elements in two weathering profiles developed on serpentinites in the Lomié ultramafic complex, South-East Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 50, 305-328.
- Ndjigui, P.-D., Yongué-Fouateu, R., Bilong, P., Bayiga, E.C., Oumarou, M., 2009.** Geochemical survey of Pt, Pd and Au in talcschists, hornblendites and their weathered equivalents at Pouth-Kellé, Southern Cameroon. *Journal of the Cameroon Academy of Sciences* 8, 107-120.
- Neal, C.R., Taylor, L.A., 1989.** A negative Ce anomaly in a peridotite xenolith: evidence for crustal recycling into the mantle or mantle metasomatism. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53, 1035-1040.
- Nédélec, A., Nsifa, E.N., Martin, H., 1990.** Major and trace element geochemistry of the Archaean Ntem plutonic complex (South Cameroon): petrogenesis and crustal evolution. *Precambrian Resources* 47, 35-50.
- Nesbitt, H.W., 1979.** Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. *Nature* 279, 206-210.
- Nesbitt, H.W., Wilson, R.E., 1992.** Recent chemical weathering of basalts. *American Journal of Sciences* 292, 740-777.
- Nforba, M.T., 2013.** Geochemistry and mineralogy of regolith derived from itabirite and hematite ore at Mbalam in Southeastern Cameroon. PhD thesis, Univ. of Yaounde I, 132p.
- Ngako, V., Njonfang, E., Tongwa Aka, F., Affaton, P., Metuk Nnange, J., 2006.** The North-South Paleozoic to Quaternary trend of alkaline magmatism from Niger-Nigeria to Cameroun: complex interaction between hotspots and Precambrian faults. *Journal of Africa Earth Sciences* 45, 241-256.

- Ngo Bidjeck, M.L., 2004.** L'altération des roches basiques et ultrabasiques du Sud-Ouest Cameroun et ses implications métallogéniques. Cas du complexe d'Abiété-Yenjok. Thèse, Univ. Yaoundé I, 267p.
- Ngounouno, I., 1998.** Chronologie, pétrologie et cadre géographique du magmatisme cénozoïque de la ligne du Cameroun. In "Géosciences au Cameroun", Vicat J.P et Bilong P. éd., Collect. Géocam, 1/1998, Presses Universitaires de Yaoundé, 169-184.
- Nicolini, P., 1990.** Gîtologie et exploration minière. Technique et Documentation. Lavoisier. 589p.
- Njilah, I.K., 1991.** Geochemistry and petrogenesis of Tertiary-Quaternary volcanic rocks from Oku-Ndu area, NW Cameroon. PhD thesis, Univ. of Leeds, 345p.
- Njilah, I.K., Ndikontar, M.K., Eno Belinga, S., 1999.** The Cameroon line volcanoes. "Géologie et Environnements au Cameroun", Vicat J.P. et Bilong P. éd., Collection Géocam, 2/1999, Presses Universitaires de Yaoundé, 295-303.
- Njome, M.S., Suh, C.E., 2005.** Tectonic evolution of the Tombel graben basement, southwestern Cameroun. *Episodes* **28** (1), 37-41.
- Njonfang, E., 1998.** Contribution à l'étude de la relation entre la ligne du Cameroun et la direction de l'Adamaoua: 1. Pétrologie, géochimie et structure des granitoïdes panafricains de la zone de cisaillement Fouban-Bankim (Ouest-Cameroun et Adamaoua); 2. Pétrologie et géochimie des formations magmatiques tertiaires associées. Thèse de Doct. d'Etat, Univ. de Yaoundé I, 392p.
- Nkoumbou, C., 1990.** 1. Etude Géologique des Monts Rumpi: un ensemble plutonique et volcanique de la «Ligne du Cameroun». 2. Données pétrologiques sur les néphélines du Mont Étinde (Cameroun). Unpublished Ph.D. thesis, University of Nancy I, Nancy, France, 355p.
- Nkoumbou, C., Deruelle, B., Velde, D., 1995.** Petrology of Mt Etinde Nephelinite Series, *Journal of Petrology* **36** (2), 373-395.
- Nkoumbou, C, Nana, R., Eno Belinga, S.M et Vicat, J.P., 1999.** Les éruptions du Mont Cameroun de 1999: étude volcanique. In Géologie et Environnements au Cameroun. Vicat J.P. et Bilong P. éd., Collection Géocam, 2/1999, Presse Universitaire de Yaoundé, 347-352.
- Nnange, J.M., 1991.** The crustal structure of the Cameroon Volcanique Line and the Fouban Shear zone based on gravity and aeromagnetic data. PhD. Thesis, Univ. Leeds, 312p.

- Nzenti, J. P., Kapajika, B., Wörner, G., Lubala, T.R., 2006.** Synkinematic emplacement of granitoids in a Pan-African shear zone in Central Cameroun. *Journal of African Earth Sciences* **45**, 74-86.
- Nzenti, J.P., 1987.** Pétrogenèse des migmatites de Yaoundé (Cameroun) : éléments pour un modèle géodynamique de la chaîne panafricaine nord-équatoriale. Thèse, Univ. Nancy I, 147p.
- Oberthur, T., Melcher, F., 2005.** PGE and PGM in the supergene environment: a case study of persistence and redistribution in the main sulphide zone on the Great Dyke, Zimbabwe. In “Exploration for platinum-group element deposits”. Mineralogical Association of Canada. *Short Course Serie* **35**, 97-111.
- Olivry, J.C., 1986.** Fleuves et rivières du Cameroun. MESRES-YAOUNDE-ORSTOM-PARIS, 733p.
- Oumarou, M., Minyemeck, E.A., Ndjigui, P.D., Temgoua, E., Bilong, P., Yongué-Fouateu, R., 2005.** Geochemical survey of Pt, Pd and Au in the Talcschists and the Amphibolites, and their weathering products at Pouth-Kelle (coastal plain, Cameroon) *In Tormanen T.O and Alafieti T.T (eds): extended abstracts of the 10th International platinum symposium, 7-11th August 2005, Oulu (Finland), 516-519.*
- Pelletier, B., 1983.** Localisation du nickel dans les minerais « ganiéritiques » de Nouvelle-Calédonie. *Sciences Géologiques* **73**, 173-183.
- Peronne Y. 1969.** Notice explicative sur la feuille Wum-Banyo. Carte géologique de reconnaissance au 1/500000. Direction des Mines, Yaoundé, 49p.
- Rao, C.N.V., Lehmann, B., Balaram, V., 2013.** Platinum-group element (PGE) geochemistry of Deccan orangeites, Bastar craton, central India: Implication for a non-terrestrial origin for iridium enrichment at the K–Pg boundary. *Journal of Asian Earth Sciences* **84**, 24-33.
- Reusch, A.M., Nyblade, A.A., Wiens, D.A., Shore, P.J., Ateba, B., Tabod, C.T., Nnange, J.M., 2010.** Upper mantle structure beneath Cameroon from body wave tomography and the origin of the Cameroon Volcanic Line. *Geochemistry, Geophysics and Geosystems* **11**, Q10W07, doi: 10.1029/2010GC003200.
- Richardson, T., Burnham, O.M., 2002.** Precious metal analysis at the Geoscience Laboratories: results from the new low-level analytical facility. Summary of Field Work and Other Activities 2002, Ontario Geological Survey, Open File Report 6100 **35**, 1-5.

- Rolland, Y., Cox, S., Boullier, A.M., Pennacchioni, G., Mancktelow, N., 2003.** Rare earth and trace element mobility in mid-crustal shear zones: insights from the Mont Blanc Massif (Western Alps). *Journal of Earth Planetary Science Letters* **214**, 203-219.
- Ronov, A. B., Balashov, Y. A., Migdisov, A., 1967.** Geochemistry of the rare earths in the sedimentary cycle. *Geochemica International* **4**, 1-17.
- Sababa, E., 2008.** Géochimie des enclaves de péridotites et de granites dans les formations volcaniques de Nyos (NW Cameroun) : recherche des indices des éléments du groupe du platine. DEA, Université de Yaoundé I, 61p.
- Saleh, G.M., 2006.** Uranium mineralization in the muscovite-rich granites of the Shalatin region, Southeastern Desert, Egypt. *Chinese Journal of Geochemistry* **25**, 1-15.
- Saleh, G.M., 2007.** Geology and rare-earth element geochemistry of highly evolved, molybdenite-bearing granitic plutons, Southeastern Desert, Egypt. *Chinese Journal of Geochemistry* **26** (4), 333-344.
- Salpéteur, I., Martel-Jantin, B., Rakotomanana, D., 1995.** Pt and Pd mobility in ferrallitic soils of the West Andriamena area (Madagascar). Evidence of a supergene origin of some Pt and Pd minerals. *Chronique de la Recherche Minière* **520**, 27-45.
- Sato, H., Aramaki, S., Kusakabe, M., Hirabayashi, J.-I., Sano, Y., Nojiri, Y., Tchoua, F.M., 1999.** Geochemical difference of basalts between polygenetic and monogenetic volcanoes in the central part of the Cameroon volcanic line. *Journal of Geochemical Society* **24**, 357-370.
- Shang, C.K., Satir, M., Siebel, W., Nsifa, E.N., Taubald, H., Liégeois, J.P., Tchoua, F.M., 2004.** TTG magmatism in the Congo craton; a view from major and trace element geochemistry, Rb-Sr and Sm-Nd systematics: case of the Sangmelima region, Ntem complex, southern Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* **40**, 61-79.
- Sharma, A., Rajamani, V., 2000.** Major element, REE, and other trace element behavior in amphibolite weathering under semiarid conditions in Southern India. *Journal of Geology* **108**, 487-496.
- Shaw, D.M., 1970.** Trace element fractionation during anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **34**, 237-243.
- Sighomnou, D., 2004.** Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspective d'évolution des ressources en eau. Thèse Doct. d'Etat, Univ. Yaoundé I, 290p.

- Sigurdson, H., Devine, J.D., Tchoua, F.M., Pringle, M.K.W., Evans, W. C., 1987.** Origin of the lethal gas burst from lake Moanoun, Cameroon. *Journal of Volcanology and Geothermic Ressources* **31**, 1-16.
- Singh, B., Rajamani, V., 2001.** REE geochemistry of recent clastic sediments from the Kaveri floodplains, southern India: Implication to source area weathering and sedimentary processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **65** (18), 3093-3108.
- Singh, B., Sherman, D.M., Gilkes R.J., Wells M.A., Mosselmans J.F.W., 2002.** Incorporation of Cr, Mn and Ni in synthetic hematites as determined by extended X-ray absorption fine structure spectroscopy. *Clay Minerals* **37**, 636-649.
- Stueber, A.M., Goles, G.G., 1967.** Abundances of Na, Mn, Cr, Sc and Co in ultrabasic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **31**, 75-93.
- Suarez, S., Prichard, H.M., Valasco, F., Fisher, P.C., McDonald, I., 2010.** Alteration of platinum-group minerals and dispersion of platinum-group elements during progressive weathering of the Aguablanca Ni–Cu deposit, SW Spain. *Mineralium Deposita* **45** (4), 331-350.
- Suchel, J. B., 1972.** La répartition des pluies et les régimes pluviométriques au Cameroun. Contribution à l'étude des climats de l'Afrique centrale. Centre d'études de géographie tropicale. Univ. Fédérale du Cameroun. Collection 2/5, 260p.
- Tabot, C.T., Fairhead J.D., Stuard G.W., Ateba B., Ntep N., 1992.** Seismicity of the Cameroon Volcanique Line. *Tectonophysics* **212**, 302-320.
- Tagne-Kamga, G., 2003.** Petrogenesis of the Neoproterozoic Ngondo plutonic complex (Cameroon, west central Africa): a case of late-collisional ferro-potassic magmatism. *Journal of Africa Earth Sciences* **36**, 149-171.
- Tamen, J., 1998.** Contribution à l'étude géologique du plateau Kapsiki (Extrême-Nord, Cameroun): volcanologie, pétrologie et géochimie. Thèse Doct. 3ème cycle, Univ. Ydé I. 172p.
- Tamen, J., Nkoumbou, C., Mouafo, L., Reusser, E., Tchoua, F.M., 2007.** Petrology and geochemistry of monogenetic volcanoes of the Barombi Koto volcanic field (Kumba graben, Cameroun volcanic line): Implication for mantle source characteristics. *C.R. Geoscience* **339**, 799-809.
- Tanaka, K., Tani, Y., Takahashi, Y., Tanimizu, M., Suzuki, Y., Kozai, N., Ohnuki, T., 2010.** A specific Ce oxidation process during sorption of rare earth elements on biogenic Mn

- oxide produced by *Acremonium* sp. strain KR21-2. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **74**, 5463-5477.
- Tchindjang, M., Njilah, I. K., 2001.** Risque d'inondation dans la région de Nyos. *Journal of African Science and Technology* **2** (2), 50-62.
- Tchoua, F.M., 1974.** Contribution à l'étude géologique et pétrologique de quelques volcans de la ligne du Cameroun (monts Manengouba et Bambouto). Thèse d'Etat, Université de Clermont-Ferrand, France (unpublished).
- Teitchou, M.I., 2008.** Volcanologie, pétrologie et géochimie comparées de quelques plaines continentales (Kumba, Tombel, Noun, Nyos) de la ligne du Cameroun. Thèse, Univ. Yaoundé I, 251p.
- Teitchou, M.I., Gregoire, M., Dantas, C., Tchoua, F.M., 2007.** Le manteau supérieur à l'aplomb de la plaine de Kumba (ligne du Cameroun), d'après les enclaves de péridotites à spinelles dans les laves basaltiques. *C.R. Geoscience* **339**, 101-109.
- Temdjim, R., 2005.** Contribution à la connaissance du manteau supérieur du Cameroun au travers de l'étude des enclaves ultrabasiques et basiques remontées par les volcans de Youkou (Adamaoua) et de Nyos (Ligne du Cameroun). Thèse Doct. d'Etat, Univ. Yaoundé I, 339p.
- Temdjim, R., Boivin, P., Chazot, G., Robin, C., Rouleau, E., 2004.** L'hétérogénéité du manteau supérieur à l'aplomb du volcan de Nyos (Cameroun) révélée par les enclaves ultrabasiques. *C.R. Géoscience* **336**, 1239-1244.
- Temdjim, R., Tchoua, F.M., 1991.** Carte géologique de la région du lac Nyos. *Revue de Géographie du Cameroun* **10** (1), 32-38.
- Traoré, D., 2005.** Serpentinisation hydrothermale et alteration latéritique des roches ultrabasiques en milieu tropical: Evolution géochimique et minéralogique de la minéralisation en platine de la Rivière des Pirogues (Nouvelle-Calédonie). Thèse, Université de Nouvelle-Calédonie, 191p.
- Traoré, D., Beauvais, A., Andé, T., Chabaux, F., Peiffert, C., Parisot, J. C., Ambrosi, J. P., Colin, F., 2008.** Chemical and physical transferts in an ultramafic rock weathering profile: Part 1. Supergene dissolution of Pt-bearing chromite. *American Mineralogist* **93**, 22-30.
- Travis, G.A., Keays, R.R., Davidson, R.M., 1976.** Palladium and iridium in the evaluation of nickel gossans in Western Australia. *Economic Geology* **71**, 1229-1243.

- Trescases, J.J., 1975.** L'évolution supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale. Mém. ORSTOM, 78-259 n° 78, 259p.
- Vallerie, M., 1971.** Carte pédologique du Cameroun occidental. Notice explicative 45, 48 p.
- Varajão, C.A.C., Colin, F., Vieillard, P., Melfi, A.J., Nahon, D., 1999.** Early weathering of palladium gold under lateritic condition, Maquiné Mine, Minas Gerais, Brazil. *Applied Geochemistry* **15** (2), 257-275.
- Villaros, A., Stevens, G., Moyon, J.-F., Buick, I.S., 2009.** The trace element compositions of S-type granites: evidence for the disequilibrium melting and accessory phase entrainment in the source. *Contributions to Mineralogy and Petrology* **158**, 543-561.
- Vriend, S.P., Oosteron, M.G., Bussink, R.W., Jansen, J.B.H., 1985.** Trace element behavior in the W-Sn granite of Regoufe, Portugal. *Journal of Geochemical Exploration* **23**, 13-25.
- Wandji, P., Wotchoko, P., Itiga, Z., Chakam Tagheu, P. J., Bardintzeff, J.-M., Tchoua, F. M., Nkouathio, D. G., Kagou Dongmo, A., 2001.** Au travers de l'éruption du 28 mai au 23 juillet 2000 du Mont Cameroun : premières données générales. Premier forum général sur le Mont Cameroun, 191-194.
- Wilshire, H.G., 1987.** A model of mantle metasomatism. *Geology Society of America* **215**, 47-60.
- Wimpenny, J., Gannoun, A., Burton, K.W., Widdowson, M., James, R.H., Gislason, S.R., 2007.** Rhutenium and osmium isotope and elemental behaviour accompanying laterite formation in the Deccan region of India. *Earth and Planetary Science Letters* **261**, 239-258.
- Witt, T.L., Seck H.A., 1987.** Temperature history of sheared mantle xenoliths from the west Eifel, West Germany: evidence for mantle diapirism beneath the Rhenish Massif. *Journal of Petrology* **28**, 475-483.
- Wood, S. A., 1990.** The aqueous geochemistry of the rare earth elements and yttrium. 1. Review of available low-temperature data for inorganic complexes and the inorganic REE speciation of natural waters. *Chemical Geology* **82**, 159-186.
- Wood, S.A., 1996.** The role of humic substances in the transport and fixation of metals of economic interest (Au, Pt, Pd, U, V). *Ore Geology Reviews* **11**, 1-31.
- Wood, S.A., Gammons, C.H., Parker, S.R., 2006.** The behaviour of rare earth elements in naturally and anthropogenically acidified waters. *Journal of alloys and compounds* **418**, 161-165.

- Wronkiewicz, D.J., Condie, K.C., 1987.** Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: source-area weathering and provenance. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **51**, 2401-2416.
- Yuanming, P., Stauffer, M. R., 2000.** Cerium anomaly and Th/U fractionation in the 1.85 Ga Flin Flon Paleosol: Clues from REE- and U-rich accessory minerals and implications for paleoatmospheric reconstruction. *American Mineralogist* **85**, 898-911.
- Zhou, M.F., Lesher, C.M., Yang, Z.L.J., Sun, M., 2004.** Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the 597 Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwest China: implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt. *Chemical Geology* **209** (3-4), 233-257.
- Zobir, S.H., Laraba, A., 2009.** Altération météoriques et hydrothermales des micaschistes du massif de l'Edough (Annaba, Nord-Est Algérien). *European Journal of Scientific Research* **27** (4), 554-564.

*ANNEXES*

**Tableau 1 :** Analyse de l'altération par la méthode de l'isocone (concentrations des oxydes en % et éléments traces en ppm).

	<b>C<sub>Si</sub> (LNY22)</b>	<b>C<sub>Ai</sub> (LNY12)</b>	<b>C<sub>Ai</sub>/C<sub>Si</sub></b>	<b>ΔC<sub>i</sub>=C<sub>Si</sub>-C<sub>Ai</sub></b>	<b>ΔC<sub>i</sub> /C<sub>Si</sub></b>
<b>Pallier a</b>					
SiO <sub>2</sub>	41,84	42,31	1,01	0,47	0,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,75	1,48	1,97	0,73	0,97
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,05	9,45	1,04	0,40	0,04
TiO <sub>2</sub>	0,02	0,04	2	0,02	1
Cr	2054	2068	1,01	14,00	0,01
V	53,9	58,6	1,09	4,70	0,09
Zn	50	46	0,92	-4,00	-0,08
Ni	2430,3	2396,9	0,99	-33,40	-0,01
Co	120,05	121,06	1,01	1,01	0,01
Zr	9	6	0,67	-3,00	-0,33
Sr	5,7	7,3	1,28	1,6	0,28
Y	1,08	0,76	0,7	-0,32	-0,30
Nb	0,94	0,61	0,65	-0,33	-0,35
Th	0,08	0,07	0,88	-0,01	-0,13
<b>Pallier b</b>					
	<b>C<sub>Si</sub> (LNY22)</b>	<b>C<sub>Ai</sub> (LNY12)</b>	<b>Echelle</b>	<b>C<sub>Si</sub></b>	<b>C<sub>Ai</sub></b>
SiO <sub>2</sub>	41,84	42,31	1	41,84	42,31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,75	1,48	20	15	29,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,05	9,45	2	18,1	18,9
TiO <sub>2</sub>	0,02	0,04	300	6	12
Cr	2054	2068	0,02	41,08	41,36
V	53,9	58,6	0,8	43,12	46,88
Zn	50	46	1	50	46
Ni	2430,3	2396,9	0,02	48,61	47,94
Co	120,05	121,06	0,3	36,02	36,31
Zr	9	6	3	27	18
Sr	5,7	7,3	5	28,5	36,5
Y	1,08	0,76	15	16,2	11,4
Nb	0,94	0,61	40	37,6	24,4
Th	0,08	0,07	400	32	28

C<sub>Si</sub> : Concentrations des éléments dans la roche saine.

C<sub>Ai</sub>: Concentrations des éléments dans la roche altérée.

Pallier a: Calcul des rapports C<sub>Ai</sub>/C<sub>Si</sub> et des gains ou pertes.

Pallier b: Données multipliées par l'échelle pour la construction de la figure 30.

**Tableau 2 : Bilan iso-Co des éléments majeurs dans les péridotites altérées à Nyos.**

Eléments majeurs	Péridotites altérées de Nyos							
	LNY08	LNY10	LNY11	LNY12	LNY13	LNY17	LNY19	LNY24
SiO <sub>2</sub>	-1,62	5,05	-12,83	-17,01	-4,48	-12,54	-13,26	-5,36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-3,47	30,02	-46,55	-58,02	-9,63	-48,76	-61,79	-33,41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-5,61	-1,46	-14,70	-8,27	-7,21	-8,03	-6,07	-10,00
MgO	-1,96	3,94	-6,07	-1,17	-1,93	-2,99	-1,24	-0,09
Na <sub>2</sub> O	-6,73	33,39	-	-	-3,33	-85,89	-85,97	-70,11
CaO	-5,40	19,13	-56,28	-76,45	-10,21	-63,10	-73,12	-60,26
TiO <sub>2</sub>	-31,84	21,85	-86,50	-73,21	-40,51	-65,62	-79,49	-49,04

**Tableau 3 : Bilan iso-Co des éléments majeurs dans les péridotites altérées à Kumba.**

Eléments majeurs	Péridotites altérées de Kumba						
	LKU02	LKU03	LKU05	LKU06	LKU08	LKU09	LKU11
SiO <sub>2</sub>	63,23	72,17	118,24	118,24	95,18	58,34	109,88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	274,04	430,42	491,10	491,10	426,92	479,84	435,99
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	98,20	144,65	164,03	164,03	145,35	181,66	145,77
MgO	-35,61	-50,82	-51,02	-51,02	-44,71	-61,78	-46,49
K <sub>2</sub> O	511,56	612,76	780,51	780,51	278,80	73,03	704,69
Na <sub>2</sub> O	304,71	378,01	458,15	458,15	289,22	39,19	379,11
CaO	176,55	205,05	246,11	246,11	174,38	-5,40	231,15
TiO <sub>2</sub>	539,35	831,44	921,57	921,57	804,12	916,94	803,28
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	366,93	542,33	472,93	472,93	438,82	264,26	505,61
MnO	79,63	122,44	144,45	144,45	125,79	173,97	118,42

**Tableau 4 : Bilan iso-Co des éléments traces dans les péridotites altérées à Nyos.**

Eléments traces	Péridotites altérées de Nyos							
	LNY08	LNY10	LNY11	LNY12	LNY13	LNY17	LNY19	LNY24
Cr	4,32	7,28	34,24	-13,43	4,99	-8,60	-16,33	21,35
V	-30,36	32,71	-47,62	-34,50	9,45	-14,75	-36,79	-40,47
Zn	-7,97	1,01	-10,35	-12,93	2,98	-0,91	-14,99	-1,25
Ni	-0,03	-0,89	0,03	3,06	1,92	0,24	1,38	4,24
Cu	-27,26	56,04	-37,14	-61,01	-6,21	-61,98	-80,77	-51,97
Sc	2,84	19,74	-42,02	-55,69	1,85	-32,97	-56,35	-32,40
Ba	501,64	580,53	397,23	519,18	190,01	207,85	38,26	436,29
Zr	-26,16	18,80	-	-34,70	-27,50	-32,97	-	-5,36
Sr	-15,17	87,61	-67,33	-32,38	-39,32	-55,31	-70,69	-11,40
Y	-4,77	40,51	-80,30	-72,99	-5,30	-54,04	-81,14	-36,65
Li	-1,55	-52,00	-52,14	-5,01	-29,69	5,63	-43,44	-13,96
Ga	0,91	34,11	-40,77	-43,40	-13,00	-30,73	-45,78	-26,18

**Tableau 5 : Bilan iso-Co des éléments traces dans les péridotites altérées à Kumba.**

Eléments traces	Péridotites altérées de Kumba						
	LKU02	LKU03	LKU05	LKU06	LKU08	LKU09	LKU11
Cr	-58,62	-73,27	-68,99	-72,96	-62,93	-68,43	-65,21
V	217,41	241,83	296,68	284,12	192,72	169,07	238,30
Zn	171,31	251,65	262,86	260,07	241,04	233,37	233,69
Ni	-45,59	-68,58	-71,55	-72,31	-63,66	-63,12	-63,03
Cu	289,03	467,69	506,29	465,95	447,96	446,20	437,75
Sc	433,27	547,69	598,98	577,42	531,51	409,98	1513,00
Ba	877,96	1243,26	1048,75	1002,44	1595,43	1029,86	869,95
Zr	595,33	928,83	971,94	991,44	883,29	878,19	886,39
Sr	474,12	591,22	-13,61	706,84	608,68	338,19	683,59
Y	574,44	647,76	691,64	705,04	630,95	614,58	644,77
Li	1061,97	1725,30	1802,14	1591,73	1551,10	1567,36	1822,06
Ga	389,84	581,43	625,72	604,60	477,48	396,32	505,05
Th	1084,61	1666,42	1804,51	1767,49	1513,15	1492,17	1636,03
Nb	541,09	861,62	924,45	926,61	803,54	807,50	790,46
Rb	678,11	634,28	1839,34	1716,15	509,51	305,58	993,72

**Tableau 6 : Bilan iso-Co des terres rares dans les péridotites altérées à Nyos.**

Terres rares	Péridotites altérées de Nyos							
	LNY08	LNY10	LNY11	LNY12	LNY13	LNY17	LNY19	LNY24
La	88,70	71,60	112,05	117,68	97,37	145,78	-29,64	1023,85
Ce	30,78	54,46	11,32	33,86	-13,43	21,39	-53,57	326,59
Pr	7,40	53,60	-20,23	2,90	-38,48	5,63	-43,44	321,58
Nd	-19,58	35,35	-51,80	-33,78	-45,54	-34,54	-67,45	166,59
Sm	-22,06	36,40	-74,41	-52,84	-35,55	-55,31	-70,37	18,30
Eu	-21,24	26,72	-82,45	-65,17	-32,33	-55,31	-73,34	-14,82
Gd	-26,16	34,93	-82,94	-68,56	-19,44	-57,79	-80,25	-26,39
Tb	-1,55	40,80	-85,38	-70,98	-19,44	-55,31	-85,19	-36,91
Dy	-18,67	33,15	-82,83	-75,39	-15,94	-61,14	-82,61	-48,57
Ho	-12,49	40,80	-80,50	-70,98	-3,33	-60,28	-80,25	-47,42
Er	-4,95	34,73	-78,82	-72,98	-6,66	-56,85	-81,61	-51,05
Tm	-1,55	58,40	-78,06	-78,23	-3,33	-55,31	-77,78	-52,68
Yb	-8,34	34,73	-75,79	-72,98	-6,66	-53,77	-78,55	-47,78
Lu	-1,55	58,40	-78,06	-78,23	-3,33	-55,31	-77,78	-29,02

**Tableau 7 : Bilan iso-Co des terres rares dans les péridotites altérées à Kumba.**

Terres rares	Péridotites altérées de Kumba						
	LKU02	LKU03	LKU05	LKU06	LKU08	LKU09	LKU11
La	649,27	779,43	825,31	809,73	725,44	847,10	738,34
Ce	522,10	818,65	882,86	871,73	780,71	835,24	779,99
Pr	579,40	765,40	820,26	810,62	743,28	828,66	747,26
Nd	575,21	748,58	801,06	803,01	740,34	826,20	730,36
Sm	558,88	747,80	801,15	803,34	742,90	819,01	735,20
Eu	565,73	759,50	823,54	826,26	749,74	836,66	749,84
Gd	566,52	721,93	768,47	778,42	703,90	791,18	702,21
Tb	541,01	704,07	764,95	750,28	678,44	761,68	689,11
Dy	507,98	661,63	710,88	717,74	647,53	714,16	648,60
Ho	488,89	615,49	659,05	658,14	594,69	660,89	592,31
Er	468,89	573,40	635,99	612,74	563,26	615,87	565,29
Tm	475,62	592,29	639,61	630,85	573,53	619,17	579,07
Yb	436,96	542,64	588,50	586,58	514,17	557,82	532,16
Lu	425,41	528,06	566,90	556,77	499,05	541,09	498,46

**Tableau 8 : Bilan iso-Co des EGP dans les péridotites altérées à Nyos.**

EGP	Péridotites altérées de Nyos			
	LNY11	LNY12	LNY17	LNY19
Ir	30,36	22,26	21,84	26,00
Ru	40,28	25,52	18,96	28,64
Rh	88,45	34,58	27,96	56,17
Pt	142,36	54,60	38,66	22,74
Pd	150,57	21,77	-26,65	4,94

**Tableau 9 : Bilan iso-Co des EGP dans les péridotites altérées à Kumba.**

EGP	Péridotites altérées de Kumba	
	LKU02	LKU08
Ir	-81,42	-79,56
Ru	-80,57	-80,05
Rh	-74,74	-76,19
Pt	-67,42	-64,57
Pd	-27,52	-24,08