

RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix-Travail-Patrie

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I

FACULTÉ DES SCIENCES

REPUBLIC OF CAMEROON

Peace-Work-Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE



CENTRE DE RECHERCHE ET DE FORMATION DOCTORALE EN SCIENCES, TECHNOLOGIES ET GÉOSCIENCES
POST GRADUATE SCHOOL OF SCIENCES, TECHNOLOGY AND GEOSCIENCES

DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

LABORATOIRE DE GÉOSCIENCES DES FORMATIONS PROFONDES ET APPLICATIONS
LABORATORY OF GEOSCIENCES OF DEEP FORMATIONS AND APPLICATIONS

**Géologie, étude morphostructurale et nouvelles
données pétrographiques et géochimiques du complexe
anorogénique de Nkogam (Ouest-Cameroun)**

Thèse présentée en vue de l'obtention du Diplôme de
Doctorat/Ph. D en Sciences de la Terre
Spécialité : Géosciences des Formations Profondes
Option : Pétrologie -Volcanologie

Par

KENZO Henri Apollinaire

Matricule : 01W225

DEA en Sciences de la Terre

Sous la co-direction de

et

TCHOUANKOUÉ Jean Pierre

Maître de Conférences
Université de Yaoundé I



NJONFANG Emmanuel

Professeur
Université de Yaoundé I

Année académique 2022-2023



DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

LABORATOIRE DE GÉOSCIENCES DES FORMATIONS PROFONDES ET APPLICATIONS
LABORATORY OF GEOSCIENCES OF DEEP FORMATIONS AND APPLICATIONS

ATTESTATION DE CORRECTION DE LA THESE DE DOCTORAT/Ph.D

Nom et prénoms du candidat : KENZO Henri Appolinaire

Matricule : 01W225

Titre de la thèse : « *Géologie, étude morphostructurale et nouvelles données pétrographiques et géochimiques du complexe anorogénique de Nkogam (Ouest-Cameroun)* ».

Date de soutenance : 06 décembre 2023

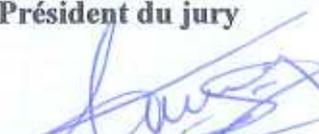
Mention : Très Honorable

Nous soussignés, membres du jury de soutenance de la thèse de Doctorat/Ph.D de Monsieur KENZO Henri Appolinaire, matricule 01W225, attestons qu'il a effectué toutes les corrections conformément aux observations formulées lors de la soutenance.

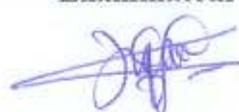
En foi de quoi, nous lui délivrons cette attestation de correction, pour servir et valoir ce que de droit.

Fait à Yaoundé le 11-01-2024

Président du jury


NKOUMBOU Charles
Professeur

Examineur


TCHAKOUNTE NUMBEM Jacqueline
Maître de Conférences

DEDICACE

A

Ma mère Martine Noumognig

REMERCIEMENTS

Rendu au terme de ce travail, je remercie très sincèrement toutes les personnes qui, par leur collaboration, leurs aides ou les suggestions ont contribué à l'aboutissement de la présente thèse. Je suis profondément reconnaissant à tous ceux qui m'ont aidé sur le terrain, au laboratoire et lors de la rédaction et sans lesquelles cette thèse n'existerait pas. Je remercie tout particulièrement :

Les Professeurs **Emmanuel Njonfang** et **Jean Pierre Tchouankoué** qui ont accepté de diriger cette thèse. Ils ont été pour moi comme des parents. J'ai appris avec eux, ce qu'était un échange scientifique. Je veux citer le Professeur **Pierre Kamgang** pour le thème de recherche, ses multiples critiques et sa rigueur scientifique.

Le Docteur **Victor Metang** pour un nouvel axe de travail : l'étude morphostructurale. Son dynamisme, son soutien et ses précieux avis sur les résultats et dans l'organisation de ce travail ont permis à plusieurs reprises de débloquer bon nombre de problèmes.

Le Docteur **Lucas Mouafo** pour son soutien inlassable, ses multiples critiques et corrections et la mise en forme du document.

Le Docteur **De Pesquidoux I Tchaptchet Tchato**, pour les données de datation U/Pb sur zircon et ses multiples critiques constructives.

Le Professeur **Paul-Désiré Ndjigui**, Chef du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, pour les facilitations administratives, le travail qu'il abat pour améliorer les conditions des étudiants.

Les Professeurs **Jean-Paul Nzenti, Yongue Rose Fouateu, Charles Nkoumbou, Jules Rémy Ndam Ngoupayou, Njilah Isaac Konfor, Vincent Onana, Emile Ekomane, Gabriel Ngueutchoua, Sylvestre Ganno, Amidou Moundi, Marie Louise Ngo Bidjeck, Jean Pierre Temga, Jacqueline Numbem Tchakounté** et Docteurs **Rose Noël Ngo Belnoun, Daniel Lamilen Billa, Dieudonné Minyem, Emmanuel Nomo Negue** pour les enseignements, l'esprit scientifique et le discernement.

Les membres du Laboratoire de Géosciences des Formations Profondes et Applications, notamment : les Docteurs **Nicaise Blaise Tchuimegnie Ngongang, Patrick Njombie, Nicole Simeni, Joëlle Tené**, pour les conseils et la documentation.

Mes cadets du Laboratoire, pour l'esprit de partage dont ils ont fait preuve durant la période de rédaction de la thèse.

Les enseignants d'Education Physique et Sportive du Lycée Bilingue d'Etoug-ébé et des Sciences de la vie et de la terre du collège privé moderne de l'Espérance, les familles Feudjio, Temgoua, Tingunzeu, Ngongang, Kouam, Djiomo, Wandja pour le soutien moral, les conseils et les encouragements. Merci et toutes mes excuses à toutes les autres personnes dont j'aurais, par inadvertance, omis de signaler le soutien.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
TABLE DES MATIERES	iii
RESUME.....	vi
ABSTRACT	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS	viii
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES TABLEAUX	xii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1. Problématique.....	2
2. Objectifs de l'étude	4
2.1. Objectif Principal	4
2.2. Objectifs Spécifiques.....	4
3. Structure de la thèse	4
CHAPITRE I : MILIEU NATUREL ET TRAVAUX ANTÉRIEURS.....	5
I.1. Milieu naturel.....	6
I.1.1. Localisation.....	6
I.1.2. Climat.....	6
I.1.3. Hydrographie	9
I.1.4. Sols, végétation et faune	9
I.1.5. Géographie humaine et économique.....	11
I.2. TRAVAUX ANTÉRIEURS	14
I.2.1. Synthèse sur la géologie du Cameroun.....	14
I.2.2. Chaîne Panafricaine	14
I.2.3. Ligne du Cameroun.....	16
I.2.4. Revue des complexes anorogéniques de la Ligne du Cameroun.	21
I.3. Etat des connaissances sur la géologie de la région du Noun.	28
I.3.1. Formation des massifs du Noun.....	28
I.3.2. Formations du socle	29
CHAPITRE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES	32
II.1. Travaux de terrain.....	33
II.2. Travaux de laboratoire	35
II.2.1. Télédétection.....	35

II.2.2. Confection et observation microscopique des lames minces.....	38
II.2.3. Analyse géochimique sur roche totale.....	39
II.2.4. Méthode de datation U/Pb sur zircon.....	39
II.3. Logiciels utilisés.....	40
CHAPITRE III : ÉTUDE MORPHOSTRUCTURALE	41
III.1. Cartographie des unités géomorphologiques.....	42
III.2. Cartographie des linéaments du massif de Nkogam.....	44
III.3. Analyse et signification des linéaments.....	49
CHAPITRE IV : ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE.....	53
IV.1. Roches métamorphiques.....	54
IV.1.1. Gneiss.....	54
IV.1.2. Amphibolites.....	61
IV.2. Roches volcaniques.....	63
IV.2.1. Basaltes.....	63
IV.2.2. Ignimbrites.....	77
IV.3. Roches plutoniques.....	87
IV.3.1. Gabbros.....	87
IV.3.2. Syénogranites.....	90
IV.3.3. Syénite à quartz.....	95
IV.3.4. Granites alcalins.....	98
IV.3.5. Granophyres.....	105
CHAPITRE V : ÉTUDE GÉOCHIMIQUE DES GRANITOÏDES DU MASSIF DE NKOGAM.....	109
V.1. Nomenclature.....	110
V.2. Granites alcalins.....	112
V.2.1. Éléments Majeurs.....	112
V.2.2. Éléments en traces.....	114
V.3. Syénogranites.....	116
V.3.1. Éléments Majeurs.....	116
V.3.2. Éléments en trace.....	119
V.4. Syénite à quartz.....	119
V.4.1. Éléments Majeurs.....	119
V.4.2. Éléments en trace.....	119
V.5.2. Comportement des éléments en trace au cours de la différenciation.....	122
V.5.3. Terres rares.....	129
V.5.4. Les spectres multi-éléments.....	131
V.5.5. Affinités magmatiques.....	131

CHAPITRE VI : ÉTUDE GÉOCHRONOLOGIQUE, GÉOTHERMOMÉTRIQUE ET GÉOBAROMETRIQUE DES GRANITOÏDES DU MASSIF.	134
VI.1. Étude géochronologique.....	135
VI.1.1. Datation U/Pb sur zircon des granitoïdes du massif du Nkogam.....	135
VI.1.2. Géochronologie des activités magmatiques sur la LC.	137
VI.2. Etude géothermométrie : conditions physiques de cristallisation	140
VI.3. Etude géobarométrique	141
CHAPITRE VII : INTERPRETATION ET DISCUSSION	144
VII.1. Morphostructurale.....	145
VII.1.1. Orientation des linéaments.....	145
VII.1.2. Influence de la lithologie sur la morphologie	145
VII.1.3. Contexte de mise en place du massif	146
VII.2. Pétrogenèse des roches plutoniques du massif de Nkogam.....	148
VII.2.1. Contexte géotectonique.....	148
VII.2.2. Source	150
VII.2.3. Differentiation magmatique	151
VII.4. Significations	155
VII.3.1. Signification des âges	155
VII.3.2. Signification des températures.....	157
VII.3.3. Signification des pressions.....	158
VII.3.4. Signification géodynamique	158
VII.4. Études comparées	159
VII.4.1. Morphologie du massif de Nkogam avec celles des autres complexes et massifs volcaniques de la LC.	159
VII.4.2. Granitoïdes de Nkogam, Bana, Sabongari dans la LC en comparaison avec ceux de Ririwai au Nigéria.....	159
VII.5. Intérêt Économique des Formations Géologiques	161
VII.5.1. Intérêt géotechnique.....	161
VII.5.2. Intérêt industriel des basaltes	161
VII.5.3. Intérêt industriel des ignimbrites	162
VII.5.4. Intérêt métallogénique et minier des granitoïdes	162
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	164
RÉFÉRENCES	167
ANNEXES	197

RESUME

Le complexe anorogénique de Nkogam (CAN) est l'un des complexes tertiaires de la Ligne du Cameroun (LC) mis en place dans un couloir orienté N30°E entre les massifs volcaniques du Mbam et de Mbépit dans la région de l'Ouest Cameroun. Les études morphostructurales, les nouvelles données pétrographiques, géochimiques et géochronologiques sont utilisées pour indiquer la forme du massif et les processus pétrogénétiques. Les données de l'étude morphostructurale proviennent des images SRTM et Landsat 8 OLI acquises par satellites le 29 décembre 2018. Les données de géochimie, géothermobarométrie et de géochronologie proviennent des analyses XRF, ICP-MS et U/Pb sur Zircon. Les résultats de pétrographie montrent qu'il s'agit de roches plutoniques (gabbro, syénite, syénogranite, granite et granophyre) et volcaniques (basalte et ignimbrite). La cartographie détaillée montre que le CAN est un complexe annulaire légèrement allongé NNE-SSW présentant des failles rectilignes et une forme en U, une dépression centrale ouverte vers le SW et trois chaînons dont deux sont grossièrement parallèles, orientées NNE-SSW et le troisième orienté NE-SW. Les linéaments du secteur correspondent sur le terrain à un réseau de fractures de directions majeures similaires à celles de la LC (NE-SW) et du Cisaillement Centre Camerounais (ENE-WSW). Les données géochimiques de cette étude montrent que les granitoïdes sont de type A, sodi-potassiques à légèrement potassiques, d'affinité alcaline, métalumineux à faiblement hyperalumineux et fortement ferreux. Le rapport $(La/Lu)_N$ (32,32 -56,05) indique que les terres rares sont faiblement à fortement fractionnées. L'enrichissement en LREE et les anomalies négatives en Eu ($Eu/Eu^* = 0,21-0,60$) indiquent un fractionnement du plagioclase. Les spectres multi-éléments normalisés par rapport au manteau primitif sont homogènes avec des anomalies négatives en Ba, Nb, Sr, Ta, Eu, P et Ti. Les teneurs sont élevées en LILE (Na, K, Rb, Ba), en HFSE (Zr, Hf, Th, U) et pauvres en Nb et Ta. Les spectres de terres rares normalisés aux chondrites montrent un enrichissement en LREE par rapport aux HREE ($(La/Yb)_{CN} = 8,06-14,89$ pour les granites alcalins et 9,52-14,89 pour les syénogranites). La somme des teneurs en terres rares est de 367,92 - 604,45 ppm pour les syénogranites et de 397,18-1184,18 ppm pour les granites alcalins. La plupart des granitoïdes de Nkogam qui cristallisent entre 882 et 980°C (Watson et Harrison), se situent dans le domaine A1 des diagrammes Yb/Ta vs Y/Nb et Ce/Nb vs Y/Nb, indiquant une source mantellique tandis que La/Nb (1,13-3,10) et La/Ta (20,12-49,4) indiquent une source lithosphérique. Ces granitoïdes proviennent du manteau lithosphérique mis en place dans un domaine intraplaque contexte tectonique d'extension. Les granitoïdes étudiés ont cristallisé à des pressions comprises entre 240 Mpa et 1212 Mpa. Les âges U/Pb sur zircon des syénogranites varient de $47,86 \pm 0,21$ Ma à $48 \pm 0,088$ Ma et correspondent à leur période de mise en place au sein du complexe anorogénique de Nkogam.

Mots Clés : Ligne du Cameroun, Complexe anorogénique tertiaire, Linéaments, Série alcaline, Type A, Manteau lithosphérique, Age U/Pb sur zircon, Nkogam.

ABSTRACT

The Nkogam anorogenic complex (NAC) is one of the Tertiary complexes of the Cameroon Line (CL) emplaced in a corridor oriented N30°E between the volcanic massifs of Mbam and Mbépit in the West region of Cameroon. Previous work focused on petrography, geochemistry and geochronology of Nkogam. The morphostructural study, new petrographic, geochemical and geochronological data help to know the shape and petrogenetic processes, and its integration in the CL complexes. Data for the morphostructural study are from SRTM and Landsat 8 OLI images acquired by satellites on December 29, 2018. Geochemistry, Geothermobarometry and geochronology data are from the XRF, IC-PMS and U/Pb Zircon analyses. The petrographic results show plutonic rocks (gabbro, syenite, syenogranite, granite and granophyre) and volcanic rocks (basalt and ignimbrite). Detailed mapping shows that the NAC is slightly elongated NNE-SSW with straight faults and a U-shape, central depression open to the SW. There are also three chains, two of which are roughly parallel, oriented NNE-SSW and the third oriented NE-SW. Lineament data show a network of fractures with major strikes similar to those of the Cameroon Line (NE-SW) and Central Cameroon Shear Zone (ENE-WSW). Geochemical data correspond to type A granitoids, sodi-potassic to slightly potassic, alkaline affinity, metaluminous to weakly hyperaluminous and strongly ferrous. The (La/Lu)_N ratio (32.32 -56.05) shows that the Rare Earths are weakly to strongly fractionated. Light rare earth element (LREE) enrichment and negative Eu anomalies (Eu/Eu* = 0.21-0.60) indicate plagioclase fractionation. Spider diagrams of the early mantle elements are homogeneous with negative Ba, Nb, Sr, Ta, Eu, P and Ti anomalies. The contents are high in LILE (Na, K, Rb, Ba) and HFSE (Zr, Hf, Th, U) and low in Nb and Ta. The patterns of rare earth element normalized to chondrites show an enrichment in LREE relative to HREE ((La/Yb)_{CN} = 8.06-14.89 for alkaline granites and 9.52-14.89 for syenogranites). The sum of the REE is 367.92-604.45 ppm for syenogranites and 397.18-1184.18 ppm for alkaline granites. Most Nkogam granitoids, which crystallized between 882 and 980°C, are located in the A1 domain of the Yb/Ta vs Y/Nb, Ce/Nb vs Y/Nb binary diagrams, indicating a mantle source while La/Nb (1.13-3.10) and La/Ta (20.12-49.4) indicate a lithospheric source. These granitoids are from the lithospheric mantle emplaced in an intraplate domain in an extensional tectonic context. The crystallisation pressures of Nkogam granitoids are between 240 and 1212 Mpa. The age of syenogranites, 47.88 - 48 ± 0.088 Ma, corresponds to the setting of the anorogenic complexes of the LC.

Keywords: Cameroon Line, Tertiary anorogenic complex, Lineaments, Alkaline series, Type A, Lithospheric mantle source, Zircon U/Pb age, Nkogam.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abréviations et symboles

ACF : Assimilation et Cristallisation fractionnée.

ACS: American Chemical Society.

ACM: Active Continental Margin

ASI: Alumina Saturation Index

CAN: Complexe Anorogénique de Nkogam

C.I.P.W: Cross, Iddings, Pirrson and Washington

CCC: Cisaillement Centre Camerounais

CF : Cristallisation Fractionnée

CL : Cathodoluminescence

CRFD : Centre de Recherche et de Formation Doctorale

ID : Indice de différenciation

GN : Granitoïdes de Nkogam

G.P.S: Global Positioning System

HFSE: High Field Strength Element

HIMU: High Mantle Uranium Source (Magma source à rapport $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ élevé)

HREE: Heavy Rare Earth Element (Terres Rares Lourdes)

ICP-AES : Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (Spectrométrie d'émission atomique à source d'ionisation par Plasma à Couplage Inductif)

ICP-MS : Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (Spectrométrie des masses à source d'ionisation par Plasma à Couplage Inductif)

IRGM : Institut de Recherches Géologiques et Minières

IUGS : International Union of Geological Sciences (Union Internationale des Sciences Géologiques)

LGFPA : Laboratoire de Géologie des Formations Profondes et Applications

LC : Ligne du Cameroun

LILE : Large Ion Lithophile Element (Éléments en trace à large rayon ionique)

LOI : Loss Of Ignition (Perte au feu)

LPA : Lumière Polarisée Analysée

LREE: Light Rare Earth Element (Terres rares légères)

LTM : Laboratoire de Traitement des Minerais

MC-ICP-MS : spectromètre de masse à source plasma à couplage inductif

MNT : Modèle Numérique de Terrain

REE : Rare Earth Element

TAS : Total Alkali versus Silica (Somme des alcalins en fonction de la silice)

USGS : United State Geological Survey (Institut géologique des Etats Unis)

URFD : Unité de Recherche et Formation Doctorale

VAG : Volcanic Arc Granitoid (Granitoïdes des Arcs Volcaniques)

WPG : Within Plate Granitoid (Granitoïdes intraplaque)

WPVZ : Within Plate Volcanic Zone

XRF : Fluorescence aux rayons X

Abréviations minérales selon Kretz (1983)

Amp : Amphibole

Ap : Apatite

Bt : Biotite

Cal : Calcite

Chl : Chlorite

Cpx : Clinopyroxène

Px : Pyroxène

Ep: Epidote

Kfs: Feldspath potassique

Ol: Olivine

Op : Opaque

Pl : Plagioclase

Qtz : Quartz

Ttn : Titanite (Sphène)

Zrn : Zircon

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte de localisation du complexe anorogénique de Nkogam	7
Figure 2. Diagramme ombrothermique du secteur d'étude.....	8
Figure 3. Carte du réseau hydrographique du secteur d'étude.....	10
Figure 4. Différents types de sols et potentialités économiques du secteur d'étude	12
Figure 5. Distribution des complexes anorogéniques le long de la L C.....	19
Figure 6. Modèle de fracturation de Riedel pour la partie continentale sud de la ligne du Cameroun.	28
Figure 7. Carte géologique montrant les trois grands massifs du Noun, coupure Douala-Est.....	30
Figure 8. Liste du matériel de terrain	34
Figure 9. Organigramme de traitement des données satellitaires.....	36
Figure 10. Carte des unités morphologiques du massif de Nkogam et de ses environs	43
Figure 11. Schéma fonctionnel (MNT) du massif de Nkogam et de ses environs	43
Figure 12. Images Landsat après filtrage de Sobel.....	45
Figure 13. Image satellite SRTM filtrée par les filtres directionnels de Sobel	46
Figure 14. Carte linéamentaire du massif de Nkogam et de ses environs.	47
Figure 15. Distribution des linéaments	47
Figure 16. Carte des pentes du Nkogam et ses environs extraite automatiquement de l'image SRTM.	48
Figure 17. Carte géologique du complexe de Nkogam extraite à partir des feuilles de Douala-Est	49
Figure 18. Affleurements	50
Figure 19. Morphostructures	51
Figure 20. Massif du Nkogam.....	52
Figure 21. Carte d'échantillonnage du secteur d'étude.....	55
Figure 22. Photographies et microphotographies des gneiss à amphibole.....	57
Figure 23. Photographies et microphotographies de gneiss à biotite et amphibole.....	60
Figure 24. Photographie et microphotographies de l'amphibolite	62
Figure 25. Photographies et microphotographies des basaltes de plateau.....	66
Figure 26. Microphotographie des basaltes de plateau.	67
Figure 27. Photographies et microphotographies des basaltes de massif.....	72
Figure 28. Photographies et microphotographies des filons de basaltes.	75
Figure 29. Microphotographie d'enclaves de socle.....	76
Figure 30. Observation macroscopique des ignimbrites de Koutaba et de Nkounden.	79
Figure 31. Microphotographie des ignimbrites de Koutaba en LPA.....	83
Figure 33. Microphotographie des ignimbrites de Nkounden en LPA.....	86
Figure 34. Microphotographies des gabbros du Nkogam.	89
Figure 35. Affleurements des syénogranites et des syénites à quartz du massif de Nkogam.....	93
Figure 36. Microphotographies des syénogranites de Nkogam.	94
Figure 37. Microphotographies des syénites à quartz du Nkogam.....	97
Figure 38 Photographies et microphotographies des granites à amphibole :	99

Figure 39. Affleurements de granites amphibole et biotite du Massif du Nkogam.....	101
Figure 40. Microphotographie des granites à biotite et amphibole en LPA.....	103
Figure 41. Microphotographie des granites à amphibole et biotite.....	104
Figure 42. Photographies et Microphotographies des granophyres.....	106
Figure 43. Position des granitoïdes de Nkogam dans le Diagramme normatif $Q'=f(ANOR)$	111
Figure 44. Classification des granitoïdes de Nkogam dans le diagramme TAS	111
Figure 45. a. Diagramme de variation A/NK vs. A/CNK	112
Figure 46. Diagrammes indiquant la nature alcaline des granitoïdes de Nkogam.....	112
Figure 47. Diagramme de variations des différents oxydes en fonction de SiO_2 des granites alcalins	115
Figure 48. Diagramme de variations des différents oxydes en fonction de SiO_2 des syénogranites...	118
Figure 49. Diagramme de Harker de quelques éléments compatibles des granites alcalins	123
Figure 50. Diagramme de Harker de quelques éléments en traces Co, Ni et Zn.....	124
Figure 51. Diagramme de Harker de quelques éléments compatibles des syénogranites.....	125
Figure 52. Diagramme de Harker de quelques éléments en traces Co, Ni et Zn.....	126
Figure 53. Spectres des terres rares de quelques échantillons représentatifs des granitoïdes étudiés, normalisés par rapport à la chondrite.....	130
Figure 54. Spectres multiélément normalisés par rapport au manteau primitif de McDonough et Sun (1989) des échantillons représentatifs des granitoïdes de Nkogam.....	132
Figure 55. Diagramme indiquant la nature alcaline des granitoïdes de Nkogam.....	133
Figure 56. Syénogranites à amphibole et biotite	136
Figure 57. Syénogranites à amphibole	137
Figure 58. Histogramme des activités magmatiques (fréquence) en fonction des âges	139
Figure 59. Diagrammes des températures :	141
Figure 60. Pression de cristallisation (MPa) en fonction de la teneur normative en Qtz	143
Figure 61. Bloc diagramme du massif de Nkogam montrant la chronologie des types lithologiques.	147
Figure 62. Diagramme de discrimination géotectonique des roches du massif de Nkogam:.....	148
Figure 63. Contexte géotectonique du complexe anorogénique de Nkogam	149
Figure 64. Diagrammes d'illustration de la source des granitoïdes de Nkogam.....	151
Figure 65. Diagramme d'illustration de la cristallisation fractionnée des Eu/Eu^* vs SiO_2	153
Figure 66. Les granitoïdes de Nkogam dans le diagramme Nb/Y contre Rb/Y	155
Figure 67. Distribution des âges des édifices volcaniques et plutoniques de la "Ligne du Cameroun" jusqu'au Sud du Tchad.....	156
Figure 68. Comparaison des spectres multiélément et REE normalisés par rapport au manteau primitif	160

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Distribution mensuelle des précipitations (P), des températures (T), et de l'indice d'aridité dans le bassin versant du Noun de 1990-2014	6
Tableau 2. Principales caractéristiques des bandes spectrales utilisées.	36
Tableau 3. Matrices de filtres sobel et gradient	38
Tableau 4. Synthèse des résultats du calcul, montrant l'orientation des linéaments.	48
Tableau 5. Proportion des constituants des ignimbrites de Koutaba et de Nkounden	80
Tableau 6. Elements Majeurs (%) et norme CIPW des granitoïdes de Nkogam	121
Tableau 7. Elements en traces et terre rares (ppm) des granitoïdes.	127
Tableau 8. Variation des teneurs en terres rares des différents éléments dans les types lithologiques du CAN	129
Tableau 9. Âges U/Pb sur zircons du syénogranite à amphibole et biotite	136
Tableau 10. Âges U/Pb sur zircons des syénogranite à amphibole.....	137
Tableau 11. Intervalles d'âges et des fréquences.	139
Tableau 12. Températures de saturation de zircon : $T (^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273$	140
Tableau 13. Calcul des pressions de cristallisation et estimation des profondeurs.....	142
Tableau 14. Caractéristiques géochimiques de Nkogam, Bana, Sabongari et Nigéria	161
Tableau 15. Comparaison des teneurs en certains éléments en traces des granitoïdes de Nkogam par rapport à leur Clarke et à ceux du Nigéria Ririwai.	162

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les complexes anorogéniques sont des formations géologiques qui se sont mises en place en dehors de la période orogénique. Ce sont des complexes constitués majoritairement de roches plutoniques et en faible proportion de roches volcaniques (Dumort, 1968). En Afrique, ces complexes occupent différents secteurs notamment les bordures des cratons, les rifts et la Ligne du Cameroun (Black et al., 1985). Ces complexes vont du Précambrien au Tertiaire. Les complexes précambriens sont situés autour ou dans le craton tandis que les complexes annulaires tertiaires sont situés le long des fractures. Au Cameroun, ces complexes sont généralement d'âge Tertiaire (Cantangrel et al., 1978 ; Lasserre, 1978) constitués de roches sous saturées (gabbros), intermédiaires (syénites) à sursaturées (granites). Leurs âges sont compris entre 73 et 30 Ma (Lasserre, 1978) et ils affleurent le long de la ligne du Cameroun en domaine continental, depuis le Mont Roumpi au Sud-Ouest jusqu'à Golda Zuelva et Waza au Nord-Est. Le complexe de Nkogam est l'un des complexes de cette megastructure tectonique, il est situé dans sa partie centrale entre deux massifs volcaniques. Les premiers travaux géologiques sur ce complexe étaient basés sur l'établissement de la carte géologique à l'échelle 1/500000 (Weeksteen, 1957). Ces travaux de reconnaissance ont permis d'identifier deux principaux ensembles lithologiques : plutoniques (microgranites et micro pegmatites) et volcaniques (basaltes de plateau et rhyolites). D'après Morin (1980) le massif de Nkogam est un horst de granites qui présente des failles dont certaines ont joué au Quaternaire. Ces travaux signalent sur ce complexe la présence des affleurements de roches plutoniques (microgranite) et de roches volcaniques (basaltes et rhyolites). Les travaux de Kamgang (1986) sur ce complexe signalent deux grands ensembles magmatiques à savoir : les roches volcaniques (basalte et ignimbrites) et les roches plutoniques (granites et granodiorites). Ce complexe qui culmine à 2268 m d'altitude est mis en place dans un encaissant granito-gneissique d'âge Panafricain. Son contexte morphostructural est peu connu. Pour mieux comprendre l'évolution lithotectonique de ce massif, il convient de déterminer sa morphostructure, déterminer les relations pétrographiques entre les roches, déterminer la source du magma, expliquer le contexte de mise en place des différents types lithologiques, leur nature chimique et leur âge. Ce qui justifie le sujet intitulé « **Géologie, étude morphostructurale et nouvelles données pétrographiques et géochimiques du complexe anorogénique de Nkogam (Ouest-Cameroun)** ».

1. Problématique

La distribution des complexes anorogéniques en Afrique montre que les complexes anorogéniques du Cameroun se sont mis en place dans un couloir de direction N30°E

(Noudiedie Kamgang, 2021). Plus d'une soixantaine de complexes anorogéniques occupent la Ligne du Cameroun (Moreau et al., 1987 ; Deruelle et al., 1991 ; Njonfang et al., 2013). Ils présentent des particularités sur le plan pétrologique et géochronologique. Les données pétrologiques montrent que les roches plutoniques définissent une série complète de type gabbro-diorite-monzonite-syenite-granite (Njonfang et al., 2013 ; Abolo et al., 2014), tandis que les roches volcaniques comprennent les laves mafiques (basanites, basaltes et hawaïtes), intermédiaires (mugarites et benmoreites) et felsiques (ignimbrites). Les travaux de géochronologie par les méthodes Rb/Sr, K/Ar et Ar/Ar sur les complexes anorogéniques de la Ligne du Cameroun indiquent qu'ils se sont mis en place entre 73 Ma et 30 Ma (Lasserre, 1978 ; Nguéné, 1982 ; Caen-vachette et al., 1987 ; Kuepouo et al., 2006 ; Abolo et al., 2015 ; Njonfang et al., 2018). Situé dans les hauts plateaux de l'Ouest précisément dans le Département du Noun, le complexe de Nkogam a une superficie moyenne de 140 km² et culmine à une altitude de 2268 m. Les travaux pionniers ont mis en évidence de roches volcaniques constituées des hawaïtes, des basaltes et des ignimbrites ; et des roches plutoniques formées de granodiorites et de granites (Kamgang, 1986 ; Caen-vachette et al., 1987). Les caractères géochimiques indiquent que les formations du massif de Nkogam sont alcalines et ont évolué par cristallisation fractionnée d'un liquide parental d'origine mantellique (isotopiquement hétérogène) dans une chambre magmatique peu profonde (Kamgang, 1986). La mise en place dudit massif aurait eu lieu pendant la transition Crétacé-Tertiaire, comme l'atteste les âges de 67 ± 7 Ma et de 66 ± 2 Ma obtenus respectivement sur les granophyres et les granites (âges Rb-Sr sur roche totale, Caen-vachette et al., 1987). Cette période a été marquée par d'importants phénomènes géologiques notamment la disparition des dinosaures, les régressions marines, les impacts massifs d'astéroïdes, les activités tectoniques responsables du volcanisme du Deccan (McDowell et Mauger, 1994). Les massifs formés à cette période offrent un cadre idéal pour l'étude de l'évolution géodynamique récente du globe terrestre. Les premières analyses géochimiques sur le complexe de Nkogam ont été réalisées par les méthodes quantométriques. L'âge du massif a été obtenu par la méthode Rb-Sr sur roche totale. Ces techniques analytiques ne permettant pas d'établir la pétrogenèse complète et précise, il devient judicieux de revisiter le massif de Nkogam à l'aide des outils analytiques modernes, afin de déterminer son contexte géodynamique. De plus, du fait de la nature alcaline des roches dudit massif, son potentiel métallogénique reste mal connu par comparaison au massif anorogénique de Mayo-Darlé célèbre par les minéralisations en étain (Nguéné, 1982). Le cadre morphostructurale du massif de Nkogam, les relations entre les différentes lithologies et la géomorphologie n'ont pas encore été investiguées, ce qui justifierait l'absence de la carte géologique détaillée du massif de Nkogam.

Pour contribuer davantage à la connaissance du massif de Nkogam, cette étude s'appuie sur les outils analytiques récentes (XRF, ICP-MS et U/Pb sur zircon) pour déterminer les caractères pétrogénétiques et géochronologiques des formations géologiques, et les images satellitaires pour les études morphostructurales.

2. Objectifs de l'étude

2.1. Objectif Principal

L'objectif principal de cette étude est de caractériser la morphostructure, déterminer la pétrogénèse et le contexte tectonique ainsi que l'âge de mise en place des formations du massif de Nkogam afin de le situer dans le contexte général de la Ligne du Cameroun.

2.2. Objectifs Spécifiques

Pour y parvenir, les objectifs spécifiques sont :

- ✓ de cartographier les linéaments majeurs et identifier les morphostructures du massif;
- ✓ de déceler la nature et la source du magmatisme responsable de la diversité des formations lithologiques;
- ✓ de déterminer la température et la pression de cristallisation du magma;
de déterminer l'âge des granitoïdes ;
- ✓ enfin, montrer l'importance économique des formations étudiées.

3. Structure de la thèse

Le présent mémoire se subdivise en sept (7) chapitres. Il débute par une introduction générale qui fait ressortir la problématique et les objectifs de la recherche. Ce travail se termine par une conclusion générale et des perspectives pour les travaux ultérieurs.

Le chapitre I présente le cadre naturel et les travaux antérieurs. Le chapitre II porte sur le matériel et les méthodes d'étude. Le chapitre III présente les résultats de l'étude morphostructurale du massif. Le chapitre IV est l'étude détaillée des types pétrographiques. Le chapitre V présente les résultats de la géochimie des roches plutoniques. Le chapitre VI présente les résultats de la géochronologie et de la géothermobarométrie des granitoïdes du complexe anorogénique de Nkogam. Le chapitre VII est l'interprétation et la discussion des principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I : MILIEU NATUREL ET TRAVAUX ANTÉRIEURS

Ce chapitre est consacré à la présentation des données géographiques du secteur d'étude sur les plans physique (localisation, climat, végétation), économique (population, activités agricoles) et les travaux antérieurs sur la Ligne du Cameroun en général et le complexe de Nkogam en particulier.

I.1. Milieu naturel

I.1.1. Localisation

Situé dans le plateau Bamoun, Département du Noun, Région de l'Ouest Cameroun, le secteur d'étude se trouve précisément entre 10°37'16" et 10°47'11" de longitude Est et 5°36'04" et 5°47'23" de latitude Nord (Fig. 1 a et b). La zone étudiée s'étend en partie sur trois arrondissements (Kouoptamo, Koutaba et Koupa Matapit) et couvre une superficie d'environ 400 km² (Fig. 1c). Le complexe anorogénique de Nkogam localisé entre les massifs volcaniques du Mbam au Nord et de Mbépit au Sud, constituent ensemble les plus hauts sommets de ce département (Fig. 1d). Ce massif, de par l'altitude élevée (2268 m) et sa position géographique se situe dans les Hautes Terres de l'Ouest et même de la Ligne du Cameroun.

I.1.2. Climat

Le climat de la zone d'étude est de type tropical humide de transition à deux saisons d'inégale répartition : une longue saison pluvieuse qui va d'avril à octobre (7 mois) avec un maximum de 259,9 mm de pluies en septembre. Une courte saison sèche qui va de décembre à février (3 mois) avec un minimum de 6,3 mm de précipitation en décembre (Tab 1). Les deux saisons sont entrecoupées par deux mois de transition : mars et novembre.

Tableau 1. Distribution mensuelle des précipitations (P), des températures (T), et de l'indice d'aridité dans le bassin versant du Noun de 1990-2014 (source station météorologique de Bafoussam et Nkoundja). (Ia = indice d'aridité)

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Total moy. Ann
Précipitation moyenne (mm)	8,1	18	82,8	141	166,2	170,9	219,1	243,3	259,9	220,5	58,1	6,3	
Température moyenne (°C)	22,3	23,1	23,6	22,4	21,6	21,3	20,8	20,5	20,6	20,9	21,3	21,4	21,6
Ia	14,4	19,4	52,1	85,5	102,3	106,3	136,4	152,4	161,4	136,6	42,7	13,5	85,3
	Sec	Sec	sub-sèche resse	humide	humide	humide	humide	humide	humide	humide	sub-sèche resse	Sec	

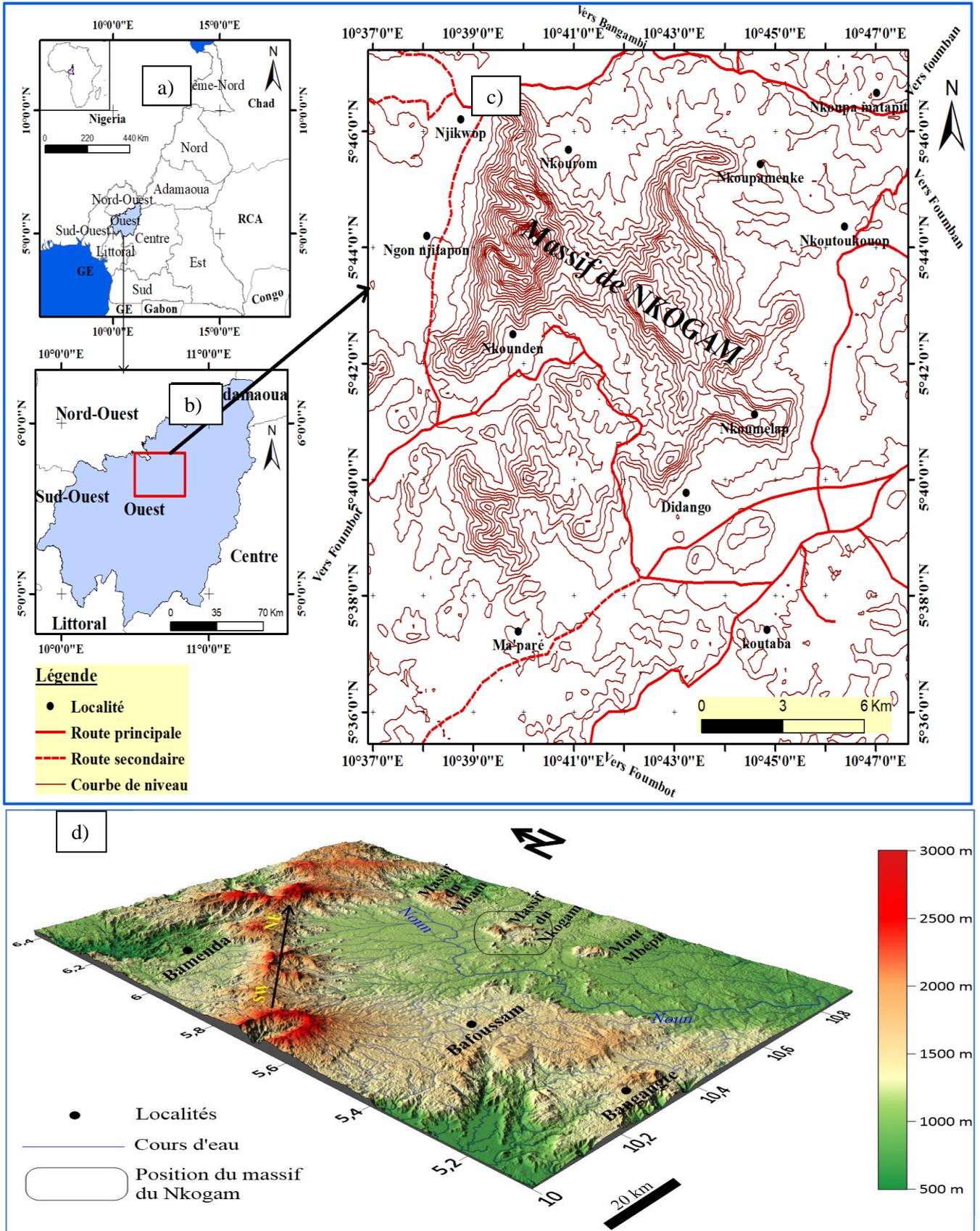


Figure 1. Carte de localisation du secteur d'étude : a) Région de l'Ouest dans la carte de division administrative du Cameroun ; b) secteur d'étude dans la région de l'Ouest ; c) Carte topographique du secteur d'étude ; d) Image 3D des massifs du Noun d'alignement N-S.

I.1.2.1. Diagramme ombrothermique

Le diagramme est obtenu à partir des données pluviométriques et thermiques d'une région donnée pendant une période bien définie. Elle permet de distinguer les mois écologiquement secs des mois écologiquement humides. Un mois sera dit sec si les précipitations du mois sont inférieures au double de la température du mois considéré ($P < 2T$). La figure 2 montre que sur le bassin versant du Noun on distingue deux saisons : une courte saison sèche (5 mois) et une longue saison pluvieuse (7 mois). Par ailleurs dans cette zone, les mois de décembre, janvier et février restent les mois propices aux travaux de terrain.

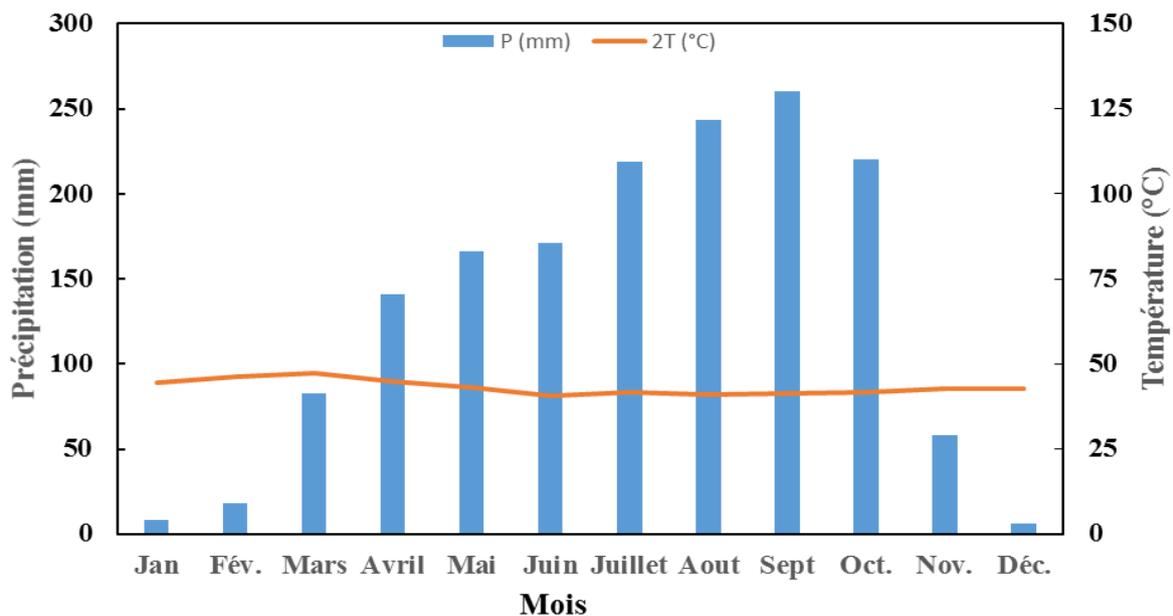


Figure 2. Diagramme ombrothermique du secteur d'étude. En rouge, la courbe de température et en bleu les bandes de précipitations.

I.1.2.2. Précipitations

Les précipitations annuelles dépassent parfois 1700 mm malgré les variations dues aux changements climatiques (Kpoumié, 2012). Les précipitations totales annuelles sont de l'ordre de 1594,2 mm. Les données pluviométriques sont enregistrées dans les stations météorologiques de Bafoussam et de Nkoundja sur la période allant de 1990 à 2014 (Tableau 1).

I.1.2.3. Température

La température moyenne annuelle est de 21,6°C. Les maxima sont observés aux mois de février (23,1°C) et de mars (23,6°C) alors que les minima sont enregistrés durant les mois d'août (20,5°C) et septembre (20,6°C) (Tableau 1). L'amplitude thermique annuelle est faible (de l'ordre de 3,1°C).

I.1.2.4. Indice d'aridité de De Martonne

L'indice d'aridité de De Martonne (1942), noté I_a est un paramètre qui permet de séparer les mois secs des mois humides pendant une période donnée. Sa valeur est donnée par la relation suivante : $I_a = 12 \times P_m / T_m + 10$ avec P_m = Précipitations moyennes mensuelles ; T_m = Température moyenne mensuelle ; I_a = Indice d'aridité de De Martonne. Si $I_a < 20$, le mois est dit sec ; si $20 < I_a < 50$, le mois est dit sub-sec ; si $I_a > 50$, le mois est dit humide.

Pour la période d'étude, les mois de décembre, janvier et février sont considérés comme secs, les mois de Mars et Novembre sont sub-sec tandis que les autres mois sont dits humides (Tableau 1)

I.1.3. Hydrographie

La zone d'étude appartient aux bassins versants du Noun et du Nchi tous tributaires du Mbam qui se jette dans la Sanaga, le plus important bassin entièrement camerounais (133 000 km²) (Olivry, 1986). Le réseau hydrographique de cette zone est dense et de type dendritique avec des cours d'eau à régime saisonnier ou permanent. On note la présence de quelques petits cours d'eau dans la zone étudiée : le Mfu, le Mou, le Mélap, le Chanké et le kouo'cha. Le massif de Nkogam est comme un véritable château d'eau, où plusieurs rivières prennent leurs sources. Ces cours d'eaux arrosent les villages environnants (Fig. 3).

I.1.4. Sols, végétation et faune

I.1.4.1. Sols

Les différentes formations rocheuses (basalte, granite et gneiss) et leurs altitudes confèrent une grande diversité et une originalité pédologique au massif du Nkogam (Fig. 4). L'on observe des sols peu évolués, des sols ferrallitiques et des sols hydromorphes (Segalen, 1967 ; Olivry, 1973 ; Leumbe-Leumbe, 2008) :

- Sols ferrallitiques

Ils se développent sur le socle granito-gneissique (PH = 5,5), sur des basaltes de plateau (couleur variant du rouge brique au rouge sombre) avec une forte teneur en argile (kaolinite, gibbsite, goethite, et hématite), sur des cuirasses ferro-alumineuses du plateau Bamoun et les basaltes de massif (Fig. 4a).

- Sols peu évolués

Les sols peu évolués dérivent essentiellement des roches volcaniques (cendres et lapillis). Ceux-ci sont propices à l'agriculture (Fig. 4b).

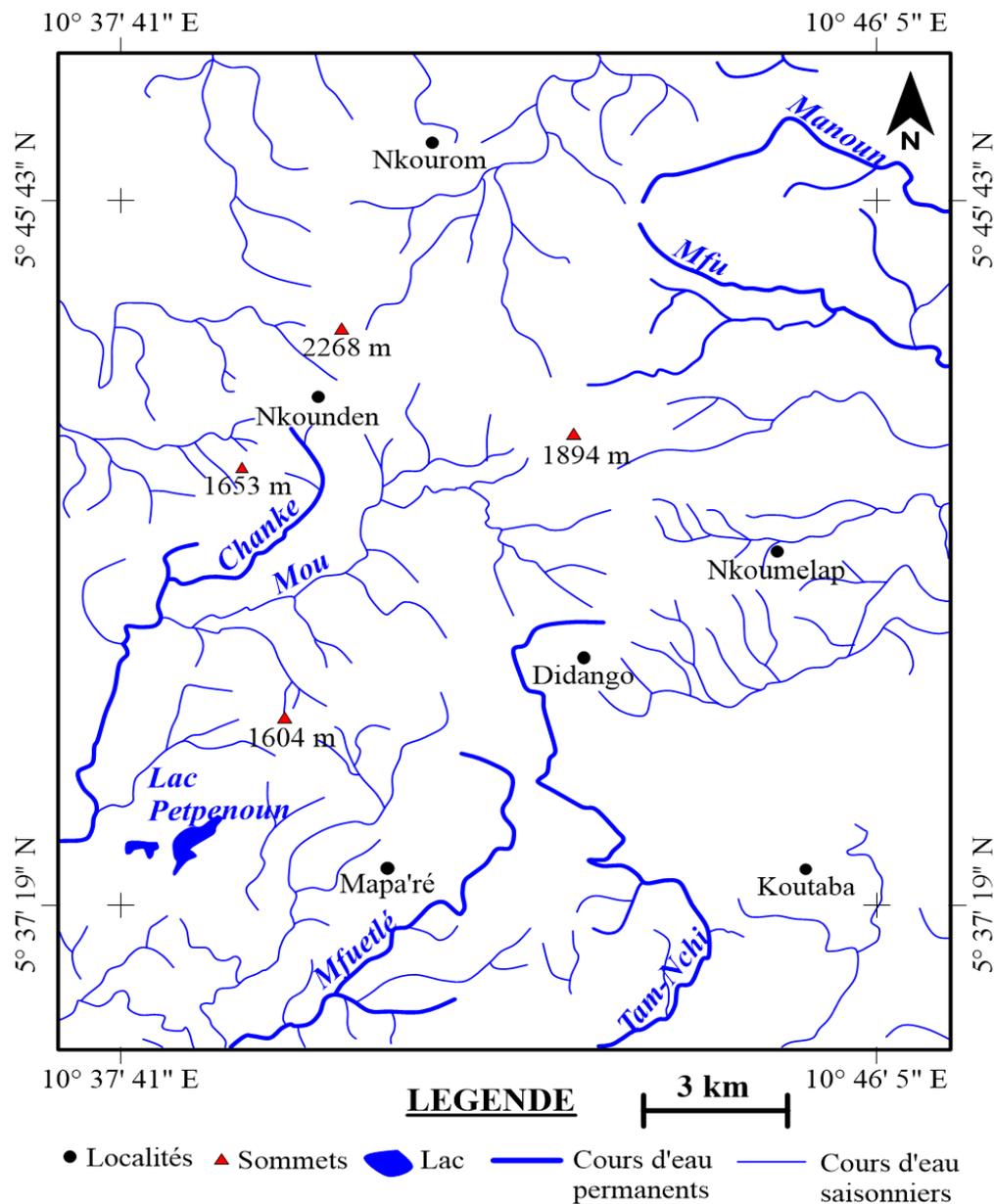


Figure 3. Carte du réseau hydrographique du secteur d'étude.

- Sols hydromorphes

Les sols hydromorphes présentent une couleur noire à grise et une matière organique estimée à environ 30 %. Ils sont dus, d'une part à la faiblesse de l'érosion sur le plateau, et d'autre part à l'obstruction des vallées périphériques par les coulées volcaniques. Ils occupent des petites superficies dans les bas-fonds.

I.1.4.2. Végétation

La végétation du secteur d'étude est la savane arborée périforestière. Elle tend vers la savane arbustive humide avec les arbustes à tronc noueux et à bois dur ; il y a la récurrence de conifères (sapins, pinus, pins etc.), des « Eucalyptus saligna », et des galeries forestières le long des cours d'eaux. La recherche effrénée du bois de chauffage, la poussée démographique, l'extension des terres et la production du charbon de bois causent sa

diminution. L'on note de nombreux arbres fruitiers, notamment les manguiers, safoutiers et arbres à fruits noirs. L'Eucalyptus et le Tali sont souvent utilisés comme bois d'œuvre (statuettes)

I.1.4.3. Faune

La zone d'étude abrite de nombreuses espèces d'animaux (sauvage et domestique), d'oiseaux et de poissons :

- la faune sauvage est constituée d'animaux comme les buffles, les antilopes, les singes de différentes espèces, les biches, les lièvres, les phacochères, les hylochères, les cobs de buffon, les pythons, les porcs-épics, les pangolins et de petits gibiers tels les aulacodes, et les rats de Gambie, les céphalopes, les hérissons et les oiseaux. Les ressources halieutiques sont abondantes (carpes, silures, tilapia) ;
- la faune domestique est représentée par des bovins, des ovins, des caprins, des porcins et des oiseaux de la basse-cour.

I.1.5. Géographie humaine et économique

I.1.5.1. Population

La zone d'étude regorge une multitude d'ethnies. Elle comptait en 2010 une population de 504 501 âmes constituée de 243 419 individus de sexe masculin et de 261 082 individus de sexe féminin (Bucrep: RADEC 2015). Cependant, le peuplement de Kouoptamo qui fait partie de la zone d'étude était constitué en 2012 de 9622 âmes dont 2515 hommes, 3766 femmes et 3561 enfants de moins de 16 ans. Ce peuplement est constitué de Bamoun originaire de Fouban ou Foubot (ethnie majoritaire et autochtone). Les autres ethnies présentes dans la localité sont les Bamilékés, les Bansa'o, les Bororos, les Gbayas, les Bamoukoumbi, les Haoussa et les Bomounbous

I.1.5.2. Division administrative

Sur le plan administratif, le secteur d'étude est à cheval entre trois arrondissements (Koutaba, Koupa matapit et Kouoptamo). Au sein d'eux se trouvent les villages : Nkounden, Njikwop, Njitapon, Njimon, Nkourom, Ma'pare, Koupamenké, Didango et Nkoumelap administrés par des chefs de 2^{ème} et 3^{ème} degré. Toutes ces circonscriptions villageoises ont à leur tête un chef de 1^{er} degré qui est le sultan roi des Bamouns.



Figure 4. Différents types de sols et potentialités économiques du secteur d'étude : a) Sol rouge ferrallitique peu évolué de Nkounden ; b) Sol peu évolué de Ma'Paré ; c) Agriculture pratiquée sur les flancs de collines ; d) Elevage des Bovins ; e) Lac Petponoun ; f) Vue panoramique d'un flanc du massif de Nkogam.

I.1.5.3. Voies de communications

En dehors de l'axe National N°20 (Foumbot-Foumban) bitumé, les tronçons Bankouop-Nkounja, Koutaba-Nkoupa Matapit, Nkoupa Matapit-Nkourom sont des routes en terre. Ces routes sont recouvertes de gravillons ou de latérite avec une forte teneur en nodules ferrugineux. En saison pluvieuse, elles deviennent boueuses, très glissantes et quasiment impraticables pour les véhicules. Dans les villages, les pistes sont dégradées et impraticables pendant la saison pluvieuse.

I.1.5.4. Electricité et Communication

Les villages situés autour du massif ne sont pas connectés au réseau électrique national (AES Sonel), d'où l'usage des lampes tempête, des torches, du feu de bois et des groupes électrogènes. Les réseaux téléphoniques, MTN et ORANGE Cameroun couvrent presque l'ensemble des villages. Les principales stations de radio captées dans le secteur sont Radio Bafoussam, Pouala FM, Radio Bonne nouvelle, Crtv poste nationale, Radio communautaire du Noun, RFI, BBC Afrique. Les lettres et les Balafons sont les autres moyens de communication. Il n'existe pas ici d'autres structures d'accueil ou des services internet.

I.1.5.5. Activités économiques

- **Agriculture**

L'économie du secteur d'étude porte principalement sur l'agriculture et les activités secondaires (commerce, élevage, la pêche). L'on distingue les cultures de rentes constituées des caféiers, cacaoyers, palmiers à huile, bananiers, ananas. Les cultures vivrières sont très diversifiées. L'on peut citer entre autres les céréales (maïs, mil, riz), les féculents (maniocs, ignames, taros) et les légumes tels que piment, ndole, tomate (Fig. 4c). Des produits agricoles sont exportés vers d'autres pays de l'Afrique Centrale.

- **Elevage**

L'élevage est traditionnel ou moderne. L'élevage traditionnel est l'activité de quelques populations locales, les pasteurs Bororo qui pratiquent la transhumance et élèvent les bovins (Fig. 4d), les caprins et la volaille. L'élevage moderne est l'œuvre de la station avicole de Nkounden dans l'arrondissement de kouoptamo. Le commerce d'animaux constitue une source importante de revenus pour les habitants.

- **Aspect touristique**

Cette zone présente des aspects variés : le géotourisme, l'écotourisme et l'artisanat. Le géo-tourisme est représenté par la chute d'eau sur les ignimbrites à Koutaba, l'éco-tourisme est représenté par les Lacs Petponoun (Fig. 4e) et la forme conique du massif du Nkogam (Fig. 4f). En artisanat les différents produits fabriqués sont : les masques, les nattes, les paniers à partir des bambous, du rotin et des lianes.

I.2. TRAVAUX ANTÉRIEURS

I.2.1. Synthèse sur la géologie du Cameroun

Le substratum géologique du Cameroun est subdivisé en deux parties : le socle Archéen et Paléoprotérozoïque constitué des complexes du Ntem et du Nyong et représentant la bordure NW du craton du Congo (Owona et al., 2021, Soh Tamehe et al., 2022 ; Toteu et al., 2022) et le domaine panafricain ou Chaîne Panafricaine d’Afrique Centrale (CPAC) qui couvre le reste du territoire national. Notre secteur d’étude appartient à la Ligne du Cameroun et corrélativement à la Chaîne Panafricaine d’Afrique Centrale.

I.2.2. Chaîne Panafricaine

La Chaîne Panafricaine d’Afrique Centrale (CPAC) résulte de l’orogénèse néoprotérozoïque qui a affecté le continent africain entre 560 Ma et 750 Ma. Au Cameroun, cette ceinture orogénique comprend trois principaux domaines lithotectoniques délimités par les grands couloirs de cisaillement (Nzenti et al., 1994, Toteu et al., 2004, 2022). Ces domaines comprennent, du nord au sud, le Domaine Nord, le Domaine Centre ou domaine Adamaoua-Yade et le Domaine Sud ou domaine méridional.

Le **Domaine Nord Cameroun** est représenté par le Groupe Poli au nord du Cameroun, et s’étend au Tchad avec le Groupe de Leré. Il constitue l’arc magmatique Néoprotérozoïque le mieux connu au nord du craton du Congo (Nzenti et al., 1992 ; Penaye et al., 2006; Bouyo Houketchang et al., 2016) et est délimité au sud par la zone de cisaillement Tcholliré-Banyo (CTB) (Toteu et al., 2004 ; Penaye et al., 2006; Bouyo Houketchang et al., 2015, 2016). Le Groupe de Poli-Léré est constitué de roches métavolcaniques et métavolcano-sédimentaires qui ont été affectées par un métamorphisme de faible à moyen degré. Ces roches sont mafiques (basaltes tholéïtiques) à felsiques (rhyolites) et ont été datées entre 823 ± 10 Ma et 778 ± 5 Ma (Toteu et al., 2022). De plus, les zircons détritiques du bassin de Poli donnent des âges variables, allant du Tonien au Cryogénien (920 - 630 Ma), ce qui indique une activité magmatique prolongée et le recyclage des roches plutoniques et volcaniques du début du Néoprotérozoïque dans des sédiments plus jeunes (Bouyo Houketchang et al., 2015 ; Toteu et al., 2022). Les granitoïdes du domaine Nord forment trois suites magmatiques pré-, syn- et post-tectoniques panafricaines (735-560Ma) composées de gabbros-diorites, de tonalites-trondhjémites-granodiorites et de monzodiorites, tous d’affinité calco-alkaline et hyperpotassique (Toteu et al., 1987, 2001 ; Bouyo Houketchang et al., 2016 ; Nomo Negue et al., 2017 ; Sep Nlomngan et al., 2021). Les études isotopiques préliminaires Sm-Nd et Lu-Hf des gneiss et des roches plutoniques ont donné des âges modèles Nd_{TDM} et Hf_{TDM} respectifs de 0,7 à 2,0 Ga et de 1,9 à 2,0 Ga (Toteu et al., 2001 ; Li et al., 2017). Des sédiments

molassiques (bassins de Mangbaï et de Balché) déposés vers 580 Ma reposent en discordance sur le Groupe de Poli-Léré. Le domaine Nord a subi un métamorphisme de haut degré ayant produit une migmatisation généralisée vers 600 Ma, associée à une déformation polyphasée (Bouyo Houketchang et al., 2009 ; Toteu et al., 2022).

Le **Domaine Adamaoua-Yade** est un vaste domaine compris entre le cisaillement de Ngoro-Belabo (CNB) au sud et le cisaillement de Tcholliré-Banyo (CTB) au nord (Toteu et al., 2022). Ce domaine se caractérise d'une part par l'abondance des granitoïdes calco-alcalins syn- à post-tectoniques, mises en place entre 660 Ma et 580 Ma, et d'autre part par des roches métavolcaniques et métasédimentaires de faible à moyen degré métamorphique (schistes à séricite et chlorite, quartzites) formant le bassin pull-apart du Lom (Soba et al., 1991 ; Ngako et al., 2003 ; Kankeu et al., 2009 ; Toteu et al., 2022). Le Domaine Centre est également caractérisé par de nombreuses zones de cisaillement panafricaines ayant favorisées la mise en place d'abondantes intrusions syn-cinématiques (Tchameni et al., 2006 ; Nzenti et al., 2006 ; Ganwa et al., 2016 ; Ngamy Kamwa et al., 2019 ; Youmen et al., 2022). Les datations U-Pb sur zircon des amphibolites, des gneiss et des roches métasédimentaires ont révélé des âges intercept supérieur Paléoproterozoïque à Archéen (Tanko Njiosseu et al., 2005 ; Ganwa et al., 2008 ; Tchakounté Numben et al., 2017). De plus, les âges modèles Sm-Nd_{TDM} et Hf_{TDM} de 1,8-2,7 Ga et 1,2-2,6 Ga, ont été obtenus respectivement sur les granitoïdes panafricains et les roches métasédimentaires. Ce résultat indique que les roches du domaine central proviennent du recyclage de la croûte ancienne (Néoarchéen à Paléoproterozoïque), avec localement un apport du matériel juvénile (Toteu et al., 2001 ; Ganwa et al., 2008 ; Kamguia Kamani et al., 2021 ; Azeuda Ndonfack et al., 2022 ; Youmen et al., 2022 ; Lemdjou et al., 2022).

Le **Domaine Sud Cameroun** est limité au sud par le Complexe du Ntem et se prolonge vers l'est en République Centrafricaine par les séries de Bolé et Gbaya (Nzenti et al., 1988 ; Toteu et al., 2022). Ce domaine est dominé par les formations métasédimentaires du groupe de Yaoundé qui ont été impliquées dans une tectonique en nappe à vergence Sud, en direction du craton du Congo vers 600 Ma. Ces roches métasédimentaires sont composées de choritoschistes et quartzites (séries d'Ayos-Mbalmayo-Bengbis et de Yokadouma), des micaschistes et gneiss grenatifères (près du craton) et des gneiss migmatitiques dans la région de Yaoundé (séries de Yaoundé, de Ntui-Betamba et de Bafia). Cette disposition des roches métamorphiques avec des formations de haut degré au-dessus de celles de bas degré, traduit un gradient métamorphique inverse dans le Groupe de Yaoundé (Nzenti et al., 1988). Le domaine sud comprend également des roches métagabbros/mafiques et felsiques (métapyroxénites, métapériodites, métagabbros, métadiorites et métagranodiorites,) intrudées dans les métasédiments (Nzenti, 1998 ; Toteu et al., 2006 ; Metang et al., 2022). Les

sédiments du Groupe de Yaoundé proviennent des roches sources mésoprotérozoïques, paléoprotérozoïques et archéennes et leur dépôt s'est produit entre le début du Tonien et 625 Ma (Ngnotue et al., 2012 ; Toteu et al., 2022). Les datations U-Pb sur zircon, monazite et rutile, ont révélé différents épisodes de métamorphisme et de déformation entre 650 Ma et 560 Ma, avec le pic métamorphique atteint dans le facies granulite entre 620 Ma et 600 Ma (Toteu et al., 2006 ; Owona et al., 2011 ; Ngnotue et al., 2012 ; Li et al., 2017 ; Betsi et al., 2020). Le chevauchement du groupe de Yaoundé sur le craton du Congo se serait produit autour de 580 Ma (Toteu et al., 2022).

I.2.3. Ligne du Cameroun

I.2.3.1. Définition

La Ligne du Cameroun est une méga-structure d'environ 100 km de large, orienté SW-NE (N030°E ; Tchoua, 1976), dont la longueur varie en fonction des auteurs : 1200 km (Tchoua, 1976), 1600 Km (Fitton, 1980) enfin 2000 km (Moreau et al., 1987 ; Déruelle et al., 2007).

I.2.3.2. Présentation de la Ligne du Cameroun

La LC est un accident tectonique ou un alignement tectono-magmatique faite d'édifices volcaniques et de complexes anorogéniques intraplaques (Déruelle et al., 2007) allant de l'île Pagalù dans le golfe de Guinée jusqu'au Lac Tchad (Fig. 5). Cette mégastructure se divise en deux branches (Fitton, 1983) : l'une garde la direction N 30°E vers les Monts Mandara et plateau Biu au Nigéria ; l'autre est orientée N70°E et marque la direction de l'Adamaoua.

Nombreuses hypothèses ont été proposées pour expliquer l'origine de cette structure et son mode de formation (Morgan, 1983 ; Freeth, 1978 ; Fitton, 1980 ; Fitton et Dunlop, 1985 ; Moreau et al., 1987 ; Déruelle et al., 1991, 2007 ; Lee et al., 1994 ; Meyers et al., 1998 ; Montigny et al., 2004 ; Nkono, 2008). L'explication structurale la plus largement acceptée est que (i) la « ligne » serait une succession de mégatension « en-échellons », résultant de la réactivation, au cours de l'Aptien-albien, de la zone de cisaillement N70°E, au début de l'ouverture de l'océan Atlantique central (Moreau et al., 1987). Un récent examen des données pétrologiques, géochimiques et isotopiques de la LC a été publié par Déruelle et al. (2007). Compte tenu de l'absence de progression d'âge le long de la ligne (Déruelle et al., 2007), la distribution des complexes magmatiques n'est pas compatible avec (ii) le modèle classique des points chauds, qui implique le déplacement progressif d'une plaque au-dessus d'un point chaud stationnaire (Morgan, 1983 ; Van Houten, 1983 ; Lee et al., 1994 ; Burke, 2001). D'autres modèles pour l'origine de la LC ont été proposés : (iii) les plumes multiples

(Ngako et al., 2006), (iv) l'écoulement de la plume de l'Afar canalisé par la lithosphère amincie sous l'Afrique centrale (Ebinger et Sleep, 1998), (v) la décompression-fusion sous zones de cisaillement lithosphérique réactivées (Fairhead, 1988 ; Freeth, 1979 ; Moreau et al., 1987 ; Fairhead et Binks, 1991), (vi) convection à petite échelle dans le manteau supérieur et qui pourrait éroder le manteau Lithosphérique (Meyers et al., 1998 ; King et Anderson, 1995, 1998 ; King et Ritsema, 2000 ; King, 2007), (vii) l'érosion basale lithosphérique (délamination) par l'écoulement asthénosphérique, responsable de la décompression-fusion (Fourel et al., 2013; Elsheikh et al., 2014 ; De plaen et al., 2014) et (viii) un écoulement latéral de panaches Asthénosphériques en dessous de la lithosphère continentale notablement amincie durant le rifting Mésozoïque, qui pourrait actuellement contribuer au volcanisme jeune le long de la LVC (Ebinger et Sleep, 1998). Nkono et al., 2014 et Noudiedie Kamgang et al. (2020) proposent deux modèles géodynamiques senestres successifs pour expliquer la distribution de l'activité magmatique du Cénozoïque à l'actuel. Le premier, pendant le paléogène, s'est développé autour de la direction N70°E tandis que le second (Néogène) est orienté autour de la direction N130°E. Une courte transition sépare les deux périodes. L'emplacement fait suite à la réactivation locale des failles préexistantes (Panafricaines) en relation à la collision entre les plaques afro-arabique et eurasiennne, durant l'histoire Alpine.

Cette ligne qui traverse à la fois la lithosphère continentale et la lithosphère océanique (Tsafack, 2009), est constituée de douze centres volcaniques principaux avec des âges variant de 51,8 Ma à l'Actuel (Fitton et Dunlop, 1985 ; Fosso et al., 2005 ; Moundi et al., 2007 ; Njonfang et al., 2011) et plus d'une soixantaine de complexes plutoniques ou plutono-volcaniques datés entre 65 et 30 Ma (Cantagrel et al., 1978 ; Lasserre, 1978 ; Lee et al., 1994 ; Njonfang et al., 2013). Plusieurs complexes anorogéniques ont déjà été étudiés. On compte une quinzaine environ : Hosseré Tchégui (Lasserre, 1978 ; Cantagrel et al., 1978), Mayo Darlé (Nguéné, 1982), Golda Zuelva (Cantagrel et al., 1978 ; Jacquemin et al., 1982), Mboutou (Jacquemin et al., 1982 ; Parsons et al., 1986), Nkogam (Kamgang, 1986 ; Caen-Vachette et al., 1987), Bana (Caen-Vachette et al., 1991, Nana, 1988, Kouepouo, 2004), Nlonako (Tchoua, 1974 ; Noudiedie Kamgang, 2021 ; Cantagrel et al., 1978 ; Abolo et al., 2015), Koupé (Lamilen, 1989 ; Lamilen et al., 1994), Rumpi (Nkoumbou, 1990), Ntumbaw (Ghogomu et al., 1989), Nda Ali (Njonfang et Moreau, 1996), Pandé (Njonfang et Moreau, 2000), Nana (Wokwenmendiam Nguet, 2018), Koukomi (Ngounouno et al., 2001 ; Montigny et al., 2004), Hossere Nigo ou Nigo (Kamdem et al., 2002), Sabongari (Njonfang et al., 2013) et Guenfalabo (Ngonge et al., 2014). Les roches volcaniques et plutoniques y sont très variées.

I.2.3.3. Secteur océanique de la Ligne du Cameroun

Quatre îles volcaniques dont Pagalù (Annobon), Sao Tomé, Principé et Bioko (Fernando po) (Déruelle et al., 2007) et deux guyots (Burke, 2001) marquent le secteur océanique de la Ligne du Cameroun. Ces îles sont formées de roches basaltiques et parfois surmontées par des phonolites et des trachytes (Fitton et Hughes, 1977 ; Halliday et al., 1988).

- **Pagalù**

Les roches les plus anciennes sont les brèches hyaloclastiques à mégacristaux de clinopyroxène, intrudées de dykes basaltiques. Des coulées de basanites, de trachytes et de basaltes à hypersthène normatif recouvrent ce faciès ancien (Cornen et Maury, 1980 ; Liotard et al., 1982). Les études géochronologiques indiquent pour les basaltes anciens 18,4 Ma (méthode K/Ar : Piper et Richardson, 1972) et $4,8 \pm 0,2$ à 1 Ma pour les basaltes récents (méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$: Lee et al., 1994).

- **Sao Tomé**

Le volcanisme est dominé par des laves mafiques. Elles donnent des roches évoluées qui constituent une série continue des basaltes aux trachytes et phonolites (Fitton, 1987). Les basaltes sont récents (Lee et al., 1994). Les trachytes donnent des âges variés : 15,7 Ma (Grunau et al., 1975) et 13 Ma (Fitton et Dunlop, 1985 ; Hedberg, 1968) par la méthode K/Ar.

- **Principé**

Trois unités pétrographiques s'y distinguent : une assise tholéiitique surmontée d'une unité de basalte transitionnel, et au sommet, des coulées de basanites (Dunlop et Fitton, 1979). Les basaltes alcalins (24 Ma) et les hawaïtes (19 Ma) sont anciens par rapport aux néphélinites (5,6 Ma) et aux basanites (3,5 Ma).

- **Bioko**

Dans cette île se trouve des laves basaltiques constituées des picrites, basaltes alcalins, hawaïtes et rarement de mugéarites à kaersutite. Elles sont très jeunes et n'excèdent pas 1,1Ma (Déruelle et al., 1991).

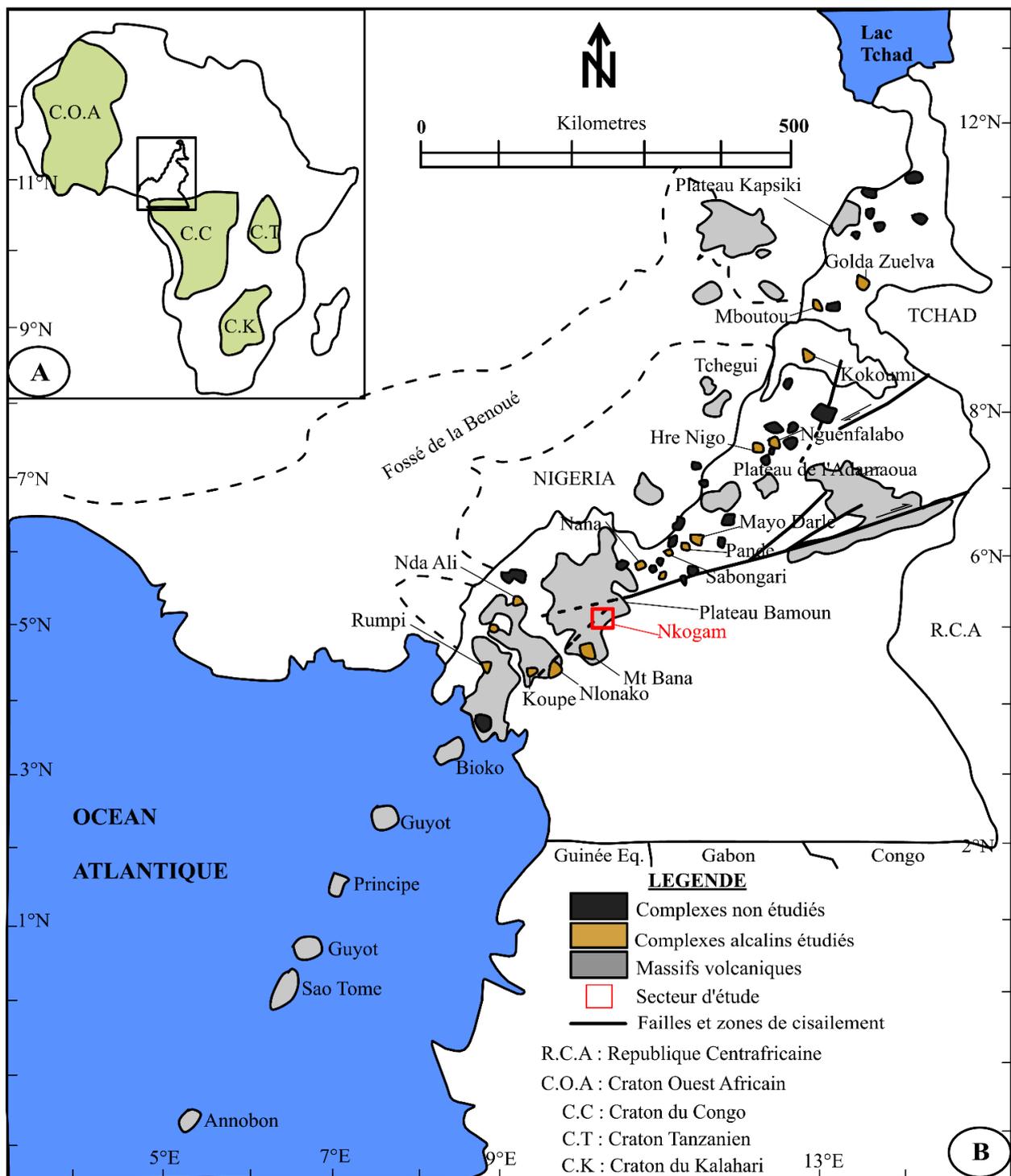


Figure 5. Carte de localisation : A) Encart montrant la localisation du Cameroun en Afrique. B) Distribution des complexes anorogéniques le long de la « Ligne du Cameroun » (Njonfang et al, 2011) et le secteur d'étude (carré rouge). La localisation des seamounts (guyots) est de Burke (2001).

I.2.3.4. Secteur continental de la Ligne du Cameroun

Le secteur continental, compte des massifs volcaniques tels que : Mont Cameroun (Déruelle et al., 1983,1991 ; Fitton, 1983 ; N'ni, 1984; Njome et al., 2009 ; Tsafack, 2009; Wantim et al., 2011), Mont Manengouba (Tchoua,1974 ; Kagou,1998 ; Chakam, 2006), Monts Bamenda (Kamgang, 2003 ; Kamgang et al, 2007, 2008, 2010 ; N'ni, 2004 ; Ayonghe et Ntasin, 2008, Gountié et al., 2011), Mont Bambouto (Tchoua, 1974 ; Youmen, 1994 ;

Marzoli et al., 2000 ; N'ni, 2004 ; Kagou Dongmo et al., 2006, 2010 ; Gountié et al., 2011), Mbam (Moundi, 2004) et Mont Oku (Marzoli et al., 2000, Njilah Konfor et al., 2007). L'on note aussi des volcans monogéniques dans les plaines du Noun (Tchoua, 1974 ; Wandji et al., 1994 ; Wandji, 1995 ; Moundi, 2004 ; Wotchoko et al., 2005), Kumba (Teitchou, 2007), Tombel (Nkouathio et al., 1997, 2006, 2008 ; Tamen et al., 2007), Mbo (Bandji, 1994).

De manière générale, la Ligne du Cameroun est une suite de horsts et de grabens (Gèze, 1943 ; Tchoua, 1974, 1976 ; Gouhier et al., 1974 ; Déruelle et al., 1983, 2007), constituée en majorité des roches à affinité alcaline (Déruelle et al., 1991, 2007 ; Ngounouno et al., 2000, 2003, 2005) et des roches à affinité transitionnelle (Moundi, 1993, 2004 ; Moundi et al., 1996, 2007 ; Fosso et al., 2005 ; Kuepouo et al., 2006 ; Marzoli et al., 2000 ; Rankenburg et al., 2005). Cette ligne constitue une zone à risques car, le siège de nombreuses catastrophes naturelles (Suh et al., 2003 ; Kagou et al., 2005). C'est le cas des éruptions du mont Cameroun en 1999 (Nkoumbou et al., 1999 ; Ghogomu et al., 1999) et en 2000 (Wandji et al., 2001), des émanations de gaz du lac Monoun en 1984 (Sigurdsson et al., 1987) et du lac Nyos en 1986 (Kling et al., 1987 ; Lockwood et al., 1988), les glissements de terrains dans les Bambouto (Ayonghe et Ntasin, 2008) et à Limbé (Ayonghe et al., 2002, 2004).

I.2.3.5. Données pétrologiques, géochimiques, structurales et sismiques de la LC.

Les données pétrologiques et géochimiques disponibles à ce jour montrent que les compositions des roches plutoniques définissent globalement une série complète de type gabbro-diorite-monzonite-syérite-granite, tandis que celles des roches volcaniques s'étendent des basanites aux trachytes, rhyolites et/ou phonolites dans un massif volcanique donné, excepté à la limite continent-océan (Bioko et Mont Cameroun) où l'on ne retrouve que des laves essentiellement basaltiques. Quelques massifs dont les monts Manengouba (Kagou Dongmo et al., 2001 ; Pouclet et al., 2014) et Bambouto-Bamenda (N'ni, 2004) affichent une gamme complète de composition allant des termes basiques aux termes felsiques, caractérisée par une grande abondance des laves mafiques et felsiques et la rareté des roches intermédiaires (mugéarites et benmoréites) (Marzoli et al., 1999, 2000 ; Itiga et al., 2004 ; Youmen et al., 2005 ; Kamgang et al., 2007, 2008, 2013 ; Njome et De Wit, 2014 ; Tchoume Ngongang et al., 2015).

Sur le plan structural, les observations de terrain, l'interprétation des photographies aériennes (Tchoua, 1974 ; Gouhier et al., 1974) et satellitaires (Cornachia et Dars, 1983 ; Déruelle et Regnault, 1983 ; Moreau et al., 1987) et les analyses d'auto-corrélation (Moreau et al., 1987) ont permis d'identifier quatre grandes directions de fracturation ou de linéaments majeurs: la direction N030°E qui correspond à la Ligne du Cameroun, la direction N070°E ou

direction de l'Adamaoua ou de la foliation panafricaine (n'appartenant pas à la LC), la direction N135°E ou direction de la haute Bénoué et la direction N170°E la direction Pan-Africaine transsaharienne. Les directions N70°E et N-S sont connues dans le socle Pan-Africain (foliations) contrairement aux directions N135°E et E-W déduites du modèle de Riedel, qui sont mieux exprimées dans les terrains sédimentaires et volcaniques (Moreau et al., 1987).

Sur le plan sismique, la partie centrale de la LC est active, avec deux volcans, le Mont Cameroun et l'île de Bioko. Les évènements enregistrés sont ressentis avec une intensité épacentrale maximale VII-VIII et de magnitude max 5 (Ateba et al., 2009 ; Medza et al., 2023). Toutefois, la partie centrale, présente un risque avec des séismes de magnitude faible à modérée (0,5-5) et d'intensité VIII dans l'échelle de Mercalli modifiée (Thierry et al., 2008).

I.2.4. Revue des complexes anorogéniques de la Ligne du Cameroun.

La Ligne du Cameroun, active depuis le Crétacé est constituée des complexes pluto-volcaniques (Fig 5). Ce sont des massifs de petite taille (souvent de 5 à 10 km de diamètre) et principalement composés de granites ou de syénites, parfois associés à des roches intermédiaires et mafiques (Kambou et al., 1989 ; Njonfang et Moreau, 2000 ; Njonfang et al., 1992 ; 2013). Sur ces complexes pluto-volcaniques les études ont porté sur les aspects pétrologique, géochimique, géochronologique et minéralogique.

- **Complexe pluto-volcanique de Nlonako**

La carte de reconnaissance géologique de Nlonako établie par Dumort (1968), montre que le pluton est constitué de syénites et de gabbros. Autour de celui-ci se trouve des roches volcaniques tel que : basaltes et andésites. Le massif de Nlonako a une forme circulaire.

Tchoua (1974) et Cantagrel et al. (1978) présentent le Mont Nlonako comme un ensemble pluto-volcanique constitué d'une séquence plutonique faite de syénites, de gabbros et accessoirement de granites ; et d'une séquence volcanique constituée de rhyolite. Les roches de ce massif sont de nature alcaline. Les âges obtenus sur les syénites par la méthode Rb/Sr donnent des valeurs de 43 à 46 ± 1 Ma.

Selon Kagou Dongmo et al. (1998), la séquence volcanique est formée par une rhyolite qui affleure sous forme de prismes et de filons au pied du Nlonako. Cette rhyolite a une texture microlitique porphyrique avec 5 à 7 % de phénocristaux de quartz automorphes auxquels s'associent des cristaux de feldspath alcalin, de clinopyroxène et de minéraux opaques.

Abolo et al. (2014, 2015) identifient au Nlonako des formations plutoniques (granites, syénites, monzonites, monzodiorites et gabbros) et volcaniques (rhyolites alcalines et mugéarites). Ces auteurs expliquent que la présence des gabbros et des microgabbros montre une source primaire du magma basaltique. La présence des feldspaths perthitiques indique que les roches sont issues d'un magma chaud et sec. Les datations Rb/Sr sur roche totale faites sur les syénites et les granites du complexe de Nlonako donnent respectivement les âges 44 et 49 Ma (Abolo et al., 2015).

Selon Noudiedie Kamgang (2021), l'analyse des images satellitaires met en évidence la forme annulaire du complexe de Nlonako. Les données linéamentaires et structurales de terrain montrent que le complexe de Nlonako est recoupé par un réseau de fractures de direction NE-SW correspondant à la direction de la faille de l'Adamaoua ou branche N70°E du CCC, des plans de cisaillement dextre et des grands décrochements. Les roches plutoniques du complexe de Nlonako sont mafiques (gabbro et microgabbro), intermédiaire (diorite) à felsique (syénite et granite). Les roches volcaniques sont les basaltes, les hawaïites et les rhyolites. Ces roches sont issues d'une source mantellique unique qui a évolué par cristallisation fractionnée.

- **Complexe pluto-volcanique de Roumpi**

Nkoumbou (1990), identifie sur le complexe de Roumpi des roches intrusives dans le socle Pan-Africain et deux séries volcaniques stratigraphiquement superposées. L'étude géochimique montre que la différenciation magmatique est contrôlée par la cristallisation fractionnée d'olivine, clinopyroxène, oxydes de fer-titane, plagioclase et apatite. La deuxième phase est marquée par le fractionnement du plagioclase, clinopyroxène et apatite. Les rapports $100 \times \text{Rb/Ba}$ entre 3,5 et 6,8 témoignent de leur origine mantellique (Frey et Prinz, 1978). La méthode K-Ar sur roche totale a été utilisée pour la géochronologie. Le substratum granitique date du Panafricain ($531 \pm 14 \text{Ma}$). Les gabbros de ce complexe ont des âges compris entre $145 \pm 4,5 \text{ Ma}$ et $9,32 \pm 0,7 \text{ Ma}$. Les roches volcaniques (basaltes et trachytes) sont récentes < 10 Ma (Nkoumbou, 1990).

- **Complexe pluto-volcanique de Nda Ali**

Dans le Complexe pluto-volcanique de Nda Ali, les roches plutoniques sont des gabbros, diorites, monzonites et syénites associées aux brèches magmatiques. Les roches volcaniques sont des dykes d'hawaïites et de trachytes. Les coulées de benmoréites et les dômes de phonolites et trachytes sont postérieurs aux dykes et probablement cogénétiques avec la même suite plutonique (Njonfang et al., 1996). Suivant la pétrographie, les gabbros

contiennent des plagioclases, des clinopyroxènes et des amphiboles. L'on distingue les syénites alcalines (grains moyens à grossiers) et les syénites quartzifères (à grains fins). Les études géochimiques menées sur les roches de ce complexe montrent une nature alcaline à hyperalcaline. Elles proviennent d'un magma sous saturé d'origine mantellique (Njonfang et Mareau, 1996).

- **Complexe pluto-volcanique de Kokoumi**

Il est constitué d'une suite de roches plutoniques (gabbros, syénites néphéliniques et monzosyénites néphéliniques). Ces roches sont recoupées par des dykes de lamprophyres (monchiquites et camptonites) et de trachytes (Ngounouno et al., 2001). Ces ensembles de roches recourent des grès du crétacé du fossé de Garoua (Montigny et al., 2004). L'étude géochimique suggère une cogénéité des roches. La datation K-Ar des gabbros et des syénites néphéliniques donnent $36,6 \pm 0,9$ Ma et $33,5 \pm 0,5$ Ma respectivement. Le complexe de kokoumi est entièrement sous-saturé.

- **Complexe pluto-volcanique du Koupé**

Le complexe de Koupé présente une forme elliptique. Il est constitué des roches plutoniques (gabbros, syénites et microsyténites, microgranites et diorites). Ces formations sont en intrusion dans un encaissant gneissique d'âge panafricain (Lamillen, 1989 ; Lamillen et al., 1994). Lasserre (1978) date les syénites du mont Koupé à 46 ± 1 Ma par la méthode Rb-Sr. Lamillen (1989) date les syénites à fayalites à 50 ± 1 Ma et les microsyténites à 53 ± 1 Ma par la méthode Rb-Sr. Lamillen et al. (1998) présentent le contrôle structural du socle dans la morphologie du massif anorogénique du Koupé. Ils identifient deux évènements tectoniques majeurs : la tectonique souple de direction N018-25°E et N110-130°E et la tectonique cassante de direction N30-40°E et N110-130°E.

- **Complexe pluto-volcanique de Bana**

Le complexe de Bana a une forme subcirculaire et une superficie de 59 km². Il culmine à une altitude de 2097 m (Nana, 1988). Le complexe de Bana présente une légère dépression qui s'ouvre au NE. Dans l'ensemble, orienté WNW-ESE suivant son axe principal, il est constitué d'une suite de roches basiques, intermédiaires et acides, regroupée en deux types volcanique et plutonique. Les roches volcaniques (basaltes, hawaiiites, benmoréites, rhyolites, trachytes et tufs rhyolitiques) se trouvent au centre et au nord du complexe, et les roches plutoniques (leucogabbros, syénodiorites et des granites) sont rencontrées au nord et au sud (Kuepouo, 2004). D'après les études géochimiques, les roches sont à caractères alcalin

à subalcalin, tholéiitique et transitionnel. Elles ont évolué par cristallisation fractionnée de deux magmas parentaux d'origine mantellique (manteau lithosphérique). La fusion partielle du manteau asthénosphérique enrichi (EM1 et EM2) et à faible profondeur a pu produire des basaltes tholéiitiques à transitionnels. La fusion partielle à faible degré et à grande profondeur du manteau asthénosphérique enrichi (EM2 et HIMU) a produit les basaltes alcalins (Kuepouo, 2004). Des âges relevés sont de 30 Ma (par la méthode Rb-Sr dans la biotite) sur les granites (Lasserre, 1978), $30,1 \pm 1,2$ Ma (dans les plagioclases) sur les basaltes transitionnels (Kuepouo et al., 2006), 38 à 40 Ma (par la méthode K-Ar) sur les benmoréites et 51 ± 1 Ma (isochrone $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sur roche totale) sur les granites de Lembo (Nana, 1988).

- **Complexe pluto-volcanique de Nguenfalabo**

Le massif de Nguenfalabo est constitué de roches volcaniques (basanitoïdes, basaltes, trachytes, pantellerites et ignimbrites) et des roches plutoniques (gabbros, diorites, monzonites, syénites et granites). Les roches volcaniques sont entrecoupées par des granites et des microgranites tardifs (Ngonge, 1988). En termes de pétrographie et minéralogie pour les roches volcaniques on a : les basaltes (salites, olivine, plagioclases), les trachytes (katophorite, arfvedsonite-magnésien, riebeckite magnésien et aegyrine), les pantellerites (aegyrine et sanidine). Dans les roches plutoniques, précisément la diorite l'on observe la transformation de la salite en hornblende ; les syénites sont caractérisées par la présence de katophorite, arfvedsonite, aegyrine tandis que les granites contiennent du quartz, de l'amphibole et/ou de la biotite. Les formations de Nguenfalabo, de caractère alcalin, ont évolué par cristallisation fractionnée à partir du liquide magmatique d'origine mantellique. Au moment de la mise en place des premières formations (basanitoïdes, basaltes, rhyolites, trachytes, ignimbrites, granites, gabbros, diorites, syénites), la réaction du magma avec la croûte (contamination et assimilation) a produit des granites, microgranites tardifs, rhyolites et tufs. Les données structurales montrent une direction majeure NW-SE. Ce qui suggère que le mécanisme ayant présidé à la mise en place de ce massif est une subsidence en chaudron (Ngonge et al., 2014).

- **Complexe pluto-volcanique de Nkogam**

Le complexe anorogénique de Nkogam a une superficie moyenne de 140 km^2 et culmine à une altitude de 2268 m (Kamgang, 1986 ; Caen et al., 1987). L'on y distingue deux groupes de roches : volcaniques (les hawaïites, les basaltes et les ignimbrites) et plutoniques (les granodiorites et les granites). Ces formations sont en intrusion dans un socle migmatitique (Kamgang, 1986).

Les roches plutoniques sont à cristaux moyens à fins. Elles sont constituées de quartz, de feldspaths alcalins riches en perthite, de plagioclase, d'amphibole et de pyroxène.

L'apatite, le zircon, les oxydes métalliques, le rutile et le sphène y sont accessoires alors que la chlorite, la calcite et l'épidote forment la paragenèse secondaire. Ils présentent une texture grenue porphyroïde.

Les roches plus mafiques contiennent des olivines de composition (Fo₆₂₋₈₆) avec de fortes teneurs en CaO > 15 % qui pourraient témoigner d'une cristallisation à basse pression. Les clinopyroxènes sont calciques et titanifères ; leurs compositions sont typiques des laves alcalines.

Le caractère alcalin des formations du massif de Nkogam est conforté par la présence de la néphéline normative. Elles ont évolué par cristallisation fractionnée d'un liquide parental d'origine mantellique (isotopiquement hétérogène) dans une chambre magmatique peu profonde. Les ignimbrites prélevés sur ce complexe sont à origine palingénétique (produit de la fusion partielle du socle alcalin) (Kamgang, 1986). Ce massif est mis en place au Tertiaire ; les âges de 67 ± 7 Ma ont été obtenus sur les granophyres et de 66 ± 2 Ma sur les granites suivant la méthode Rb-Sr sur roche totale (Caen et al., 1987).

- **Complexe pluto-volcanique de Sabongari**

Le complexe alcalin de Sabongari dans la plaine Tikar est constitué de roches plutoniques (granites, syénites, microdiorites et monzodiorites) et volcaniques (basaltes, trachytes et rhyolites). Les roches plutoniques ont des textures grenues, microgrenues et granophyriques. Les roches volcaniques ont des textures vitreuses, microlitiques et microlitiques porphyriques (Njonfang et al., 2013). D'après ces auteurs, du point de vue structural, trois directions principales de fractures (NW-SE, E-W et N-S) sont identifiées dans la plaine Tikar. Ils ont également conclu que les structures tectoniques et géologiques, le réseau hydrographique et la topographie présentent des relations étroites. Sur ce massif, Lasserre (1978) date les granites entre 54 et 49 ± 2 Ma par la méthode Rb-Sr sur roche totale.

- **Complexe pluto-volcanique de Nana**

Le complexe alcalin de Nana de forme subcirculaire est situé à l'Est dans la plaine Tikar, à 45 km au NE de l'arrondissement de Magba et culmine à 1425 m. Il est caractérisé par des pentes abruptes qui définissent plusieurs falaises d'une part, et d'autre part un ravinement très important marqué par des gorges plus ou moins profondes et une grande vallée centrale entre ses deux principaux chainons (Est et Ouest). On y observe des roches plutoniques et volcaniques diverses. Ces roches comprennent des basaltes, trachyandésites basaltiques et laves felsiques (rhyolites) pour la séquence volcanique. Les granites, diorites et

gabbros composent la séquence plutonique. Les formations plutoniques (granites) donnent un âge U-Pb sur zircon de 53 Ma. Les compositions des éléments majeurs et traces montrent que les formations plutoniques du Nana se sont mises en place par cristallisation fractionnée. Le magmatisme anorogénique du Nana, par son caractère alcalin est proche de celui des autres formations anorogéniques de la LC (Wokwenmendam Nguet, 2018).

- **Complexe pluto-volcanique de Pandé**

Le complexe de Pandé est situé dans la plaine Tikar (Njonfang et Moreau, 2000). Il couvre une superficie d'environ 17 km² et culmine à une altitude de 1231 m. Il renferme aussi bien les roches plutoniques (syénite et syénogranite) que volcaniques (trachyte et trachyrhyolite). Deux séquences volcaniques (trachyte et trachyrhyolite) intercalent le plutonisme. Ces deux séquences ont des tendances hyperalcalines. Les trachytes et les trachyrhyolites sont plus abondants. L'aegirine est omniprésent ; l'arfvedsonite apparaît dans les syénites et les rhyolites. Là où ils coexistent, l'amphibole cristallise avant le pyroxène.

- **Complexe pluto-volcanique de Hosséré Nigo**

Le complexe de Hosséré Nigo est situé au Nord-Ouest de la région de l'Adamaoua. Ce complexe a une forme subcirculaire avec environ 7 km de diamètre et culmine à une altitude de 900 m. Le complexe de Nigo est en intrusion dans un socle Panafricain. Ce massif est constitué d'un anneau en gabbros avec au centre des intrusions (à hypersthène) allant des monzonites aux syénites. Dans ce complexe, les dykes trachytiques et basaltiques recoupent les formations plutoniques. Toutes ces roches ont un caractère alcalin à transitionnel en raison des données géochimiques, minéralogiques et la présence de l'hypersthène (Kamdem et al., 2002). L'âge de ce complexe obtenu sur des phlogopites par la méthode ⁴⁰Ar/³⁹Ar est de 65 ± 0,8 Ma (Kamdem et al., 2002).

- **Complexe pluto-volcanique de Tchégui**

Kambou et al. (1989) montrent que le complexe pluto-volcanique de Housséré Tchégui situé au Nord-Cameroun est composé d'une suite plutonique (gabbros à syénite) et de formations volcaniques (trachytes, brèches volcaniques). L'analyse des données géochimiques révèle l'existence de la népheline normative dans le grabbro, la diorite et la monzonite, ce qui indique un magma parental sous-saturé. Au Nord du massif, on note la présence de la népheline modale dans les monzonites. Les plus anciennes syénites de ce complexe datent de 43 ± 6 Ma (méthode Rb-Sr) (Lasserre, 1978). Les plus jeunes datent de 37 ± 1 à 33 ± 1 Ma (méthode K-Ar). Les gabbros ont des âges (méthode K-Ar) de 561 à 49 ± 2 Ma (Cantagrel et al., 1978).

- **Complexe pluto-volcanique de Mayo Darlé**

Le complexe pluto-volcanique de Mayo Darlé présente une forme elliptique. Ce complexe est en intrusion dans un socle panafricain. Il est constitué de syénites quartzifères, de granites à biotite et amphiboles et des granites porphyroïdes. Ces formations sont en intrusions dans un socle gneissique (gneiss à biotite, gneiss dioritique, gneiss à biotite et amphibole, gneiss à grenat). Les roches volcaniques sont essentiellement des rhyolites riches en enclaves de benmoréites (Nguéné, 1982). Mayo Darlé est le seul complexe de la Ligne du Cameroun qui porte des minéralisations d'étain. Couvrant une surface d'environ 4 km², ces minéralisations apparaissent sous forme de filon, le long des fractures conjuguées dans les granites à biotite. Les syénites quartzifères sont datées à 73 ± 6 Ma (méthode Rb-Sr) (Nguéné, 1982). Les granites ont des âges compris entre 55 Ma (méthode Rb-Sr) (Nguéné, 1982) et $48,5 \pm 2$ Ma (méthode K-Ar), (Cantagrel et al., 1978).

- **Complexe pluto-volcanique de Mboutou**

Le complexe de Mboutou a une forme subcirculaire avec un diamètre de 5,5 km. Les formations plutoniques sont constituées de roches gabbroïques (mélanogabbro et leucogabbro) associées aux syéno-diorites, syénites et granites. Ces roches plutoniques sont entrecoupées par des dykes constitués d'hawaiïtes (Jacquemin et al., 1982 ; Parsons et al., 1986). Sur le plan géochimique les roches de ce complexe ont un caractère subalcalin et sont issues d'un magma basaltique d'origine mantellique. Ce dernier a évolué par cristallisation fractionnée avec une contamination crustale lors des processus de différenciation. Pour dater les roches du complexe de Mboutou, la méthode Rb-Sr sur roche totale a été utilisée. Il en ressort que les âges varient entre 60 ± 2 Ma pour les syéno-diorites et 52 ± 2 Ma pour les granites (Jacquemin et al., 1982).

- **Complexe pluto-volcanique de Golda Zuelva**

Situé dans la région de l'extrême Nord et intrusif dans un socle Panafricain, ce massif est constitué de roches plutoniques variées (gabbros, monzodiorites, monzosyénites, et granites) et de roches volcaniques (hawaiïtes, mugéarites, benmoréites et rhyolites). La géochimie des roches montre qu'il forme une suite alcaline à hyperalcaline. Les rapports isotopiques du strontium des différents types pétrographiques suggèrent une origine mantellique des magmas et une très faible contamination crustale. Ces roches ont des âges compris entre 67 ± 2 et 56 ± 2 Ma d'après la méthode K-Ar sur roche totale et sur les feldspaths alcalins (Cantagrel et al., 1978).

I.3. Etat des connaissances sur la géologie de la région du Noun.

I.3.1. Formation des massifs du Noun

Le complexe anorogénique de Nkogam est en intrusion au sein d'un socle Précambrien dans le couloir de la zone du Cisaillement Centre Camerounais (CCC) de direction N070°E (Fig. 6) qui s'étend du Golfe de Guinée en Afrique centrale à la Mer Rouge (Simeni Wambo et al., 2017). D'après les reconstitutions palinspatiques, ce couloir est le prolongement en Afrique de la zone de cisaillement de Pernambuco au Nord-Est du Brésil, avant l'ouverture de l'océan Atlantique Sud au cours du Mésozoïque (Brito Neves et al., 2002 ; Van Schmus et al., 2008).

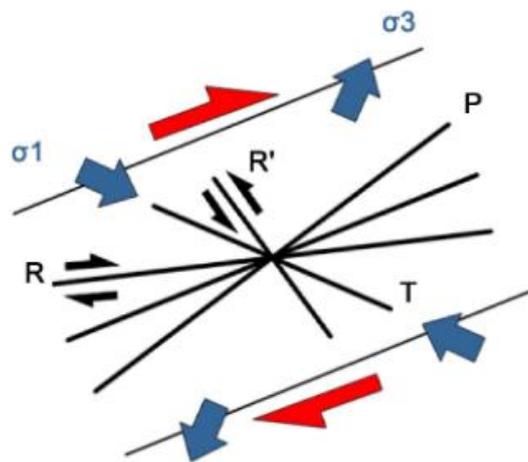


Figure 6. Modèle de fracturation de Riedel pour la partie continentale sud de la ligne du Cameroun. $T=N115^\circ$, $R'=N145^\circ$, $R=N85^\circ$; $\sigma_1=N135^\circ$, $\sigma_3=N45^\circ$, $P=N55^\circ$. T : failles de tension ; R et R' : failles de cisaillement conjuguées ; P : symétrique à R ; σ_3 et σ_1 : axes de contrainte de tension (Simeni Wambo et al., 2017).

Dans la partie continentale sud de la LC, les déformations fragiles révèlent des directions prédominantes : N070°E, N135°E, N030°E, N180°E et N090°E ; leur disposition spatiale est cohérente avec un modèle de fractures de Riedel provenant d'un mouvement de cisaillement dextre le long du CCC (Simeni Wambo et al., 2017). Dans une telle configuration, la direction NNE-SSW à NE-SW de la LC correspond à la direction de la contrainte minimale σ_3 (Fig. 6). Cet argument est compatible avec le modèle tectonique de Moreau et al. (1987), qui suggère que la LC correspond à des entailles de tension de direction N030°E le long des paléosutures panafricaines provenant de la réactivation de structures précambriennes.

Dans le département du Noun l'on distingue le plateau et la plaine. Sur le plateau Bamoun se trouve le massif volcanique de Mbam et le complexe de Nkogam. L'on y

mentionne la présence des basaltes fissuraux d'âge Éocène qui recouvrent le socle Panafricain. L'on note aussi la présence d'un troisième massif, le Mbépit dans la plaine du Noun. Celui-ci suit les deux premiers dans la direction Nord-Sud (Fig. 7). D'après Tchoua (1972), les formations latéritiques rouges qui entourent le Mbépit et les autres massifs, résulteraient de l'altération des basaltes et andésites anciens des plateaux.

Le **massif de Mbam** (2335 m d'altitude) est constitué d'une centaine de dômes de volcanites acides (rhyolites, rhyolites ignimbritiques et tuffacées, trachyrhyolites) et de quelques lambeaux de basaltes (Moundi et al., 2007). Ces laves reposent sur un substratum panafricain de granito-gneiss et de gabbros anorthositiques dépourvus d'olivine, affleurant dans sa partie sud (Weecksteen, 1957).

Le **massif de Nkogam** (2268 m d'altitude) est situé à 13 km au Nord du massif volcanique de Mbépit. Le complexe de Nkogam est constitué de roches plutoniques (granites, granophyres, granites micropegmatitiques) et volcaniques (ignimbrites hawaïites, Mugarites et basaltes) de nature alcaline. Le massif du Nkogam est un horst présentant de nombreuses fractures. Dans la région, se trouvent des filons de basalte de dimensions métriques.

Le **massif de Mbépit** (1998 m d'altitude), a été le siège d'une activité strombolienne et volcanienne au Quaternaire, qui a donné naissance aux coulées basaltiques, aux dômes rhyolitiques (plus abondants) et aux dépôts pyroclastiques (Wandji, 1985). D'après Tchoua (1972), le massif de Mbépit présente deux types d'activités : une hawaïenne et l'autre péléenne. Les formations volcaniques sont tuffacées (Tchoua, 1972), et contiennent de petites enclaves de basaltes de tailles du millimètre à plusieurs centimètres. Le socle est constitué de roches métamorphiques d'âge Panafricain (Wandji, 1995 ; Wotchoko et al., 2005).

I.3.2. Formations du socle

Le socle du secteur d'étude est constitué de roches métamorphiques. Elles affleurent à environ 10 % autour du massif et sont constitués des gneiss et des amphibolites. Ce socle affiche par endroit les amphibolites en enclaves dans la trame gneissique et en dykes. Les zones de fracture du socle située dans les zones de dépression abritent les lits de cours d'eaux. Par en droit le socle est recouvert des formations volcaniques basiques et acides.

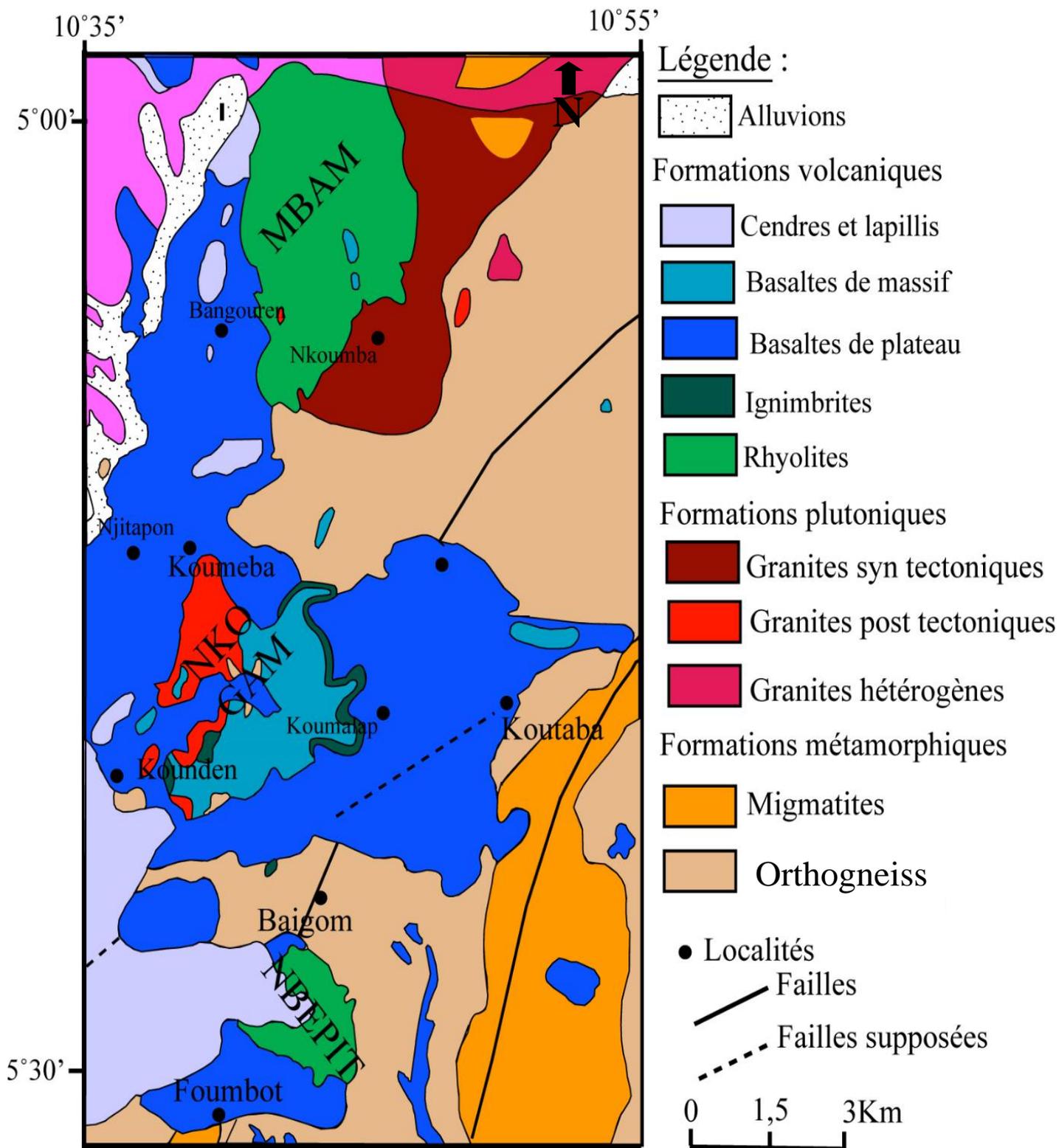


Figure 7. Carte géologique montrant les trois grands massifs du Noun, extrait de la coupure Douala-Est, Weecksteen, (1957).

Conclusion

La synthèse des travaux antérieurs menés par certains auteurs a permis d'apprécier les affinités pétrographiques entre les différents complexes anorogéniques le long de la ligne du Cameroun et les âges de mise en place de ces complexes. Ces complexes anorogéniques sont constitués dans la partie plutonique de gabbros, diorites, syénites et granites et dans la partie volcanique d'ignimbrites, rhyolites, hawaïites et basaltes. Les données géochimiques montrent que les formations pétrographiques sont de nature alcaline, avec des tendances hyperalcalines. Elles sont rarement transitionnelles telle que déterminé dans le complexe anorogénique de Mboutou. Ces données géochimiques indiquent une origine mantellique avec faible contamination. Ces complexes anorogéniques sont mis en place en contexte d'extension et dans un domaine intraplaque. Les différentes méthodes de datation utilisées donnent des âges compris entre 73 et 30 Ma. Cependant ces âges ne respectent aucune chronologie de migration lors de la mise en place. Les complexes anorogéniques de la LC présentent des formes diversifiées à l'instar des complexes de Nana, Nlonako et Mboutou qui présentent des formes subcirculaires sans dépression centrale. Les complexes de Nkogam présente une forme circulaire avec une dépression centrale ouverte au SW, tandis que celui de Bana de forme subcirculaire présente une légère dépression ouverte au NE. Les dépressions observées dans les complexes de Nkogam et de Bana sont recouvertes des basaltes de plateau. On peut noter des spécificités sur quelques complexes : le complexe de Tchégui caractérisé par l'existence de la népheline modale ; le complexe Mayo Darlé caractérisé par l'existence des minéralisations d'étain ; le massif de Bana caractérisé par la présence des laves transitionnelles.

Dans le prochain chapitre seront présentés, les différents matériels et méthodes qui ont été utilisés tant sur le terrain qu'au Laboratoire pour l'acquisition et le traitement des données morphostructurales, pétrographiques, géochimiques, géothermométriques, géobarométriques et géochronologiques.

CHAPITRE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES

Ce chapitre présente les outils, les méthodes et les techniques utilisés pour l'acquisition des données satellitaires, de géochimie et de géochronologie ainsi que le traitement d'images, et l'exploitation des ces données.

La présentation des méthodes d'étude va respecter le canevas de travail que nous nous sommes imposés à savoir : dans un premier temps, le nécessaire utilisé pour les travaux de terrain, par la suite les travaux en laboratoire, où nous ferons étalage du matériel ainsi que des différentes techniques analytiques, enfin la rédaction du mémoire qui a pour corollaire l'exploitation des données d'analyse où nous présenterons les différents programmes et logiciels utilisés.

II.1. Travaux de terrain

Les travaux de terrain ont consisté à :

- reconnaître et délimiter les contours des différents affleurements ;
- décrire l'environnement géologique ;
- récolter et géo-référencer les échantillons de roches nécessaires à la confection des cartes d'échantillonnage et géologique du secteur d'étude ;
- valider les différents linéaments générés à partir des images satellitaires ;
- photographier les flancs du massif et les types pétrographiques.

À cet effet, nous disposons le matériel de travail suivant : un marteau de géologue, une massette métallique de 5 kilogrammes, un appareil photo numérique, une loupe, une boussole, un décimètre, des cartes topographiques, d'un G.P.S, un bloc-notes, les crayons à billes et crayons ordinaires, des emballages en plastiques et des papiers presse, et un sac à dos. La plupart de ces outils est présenté à la figure 8.

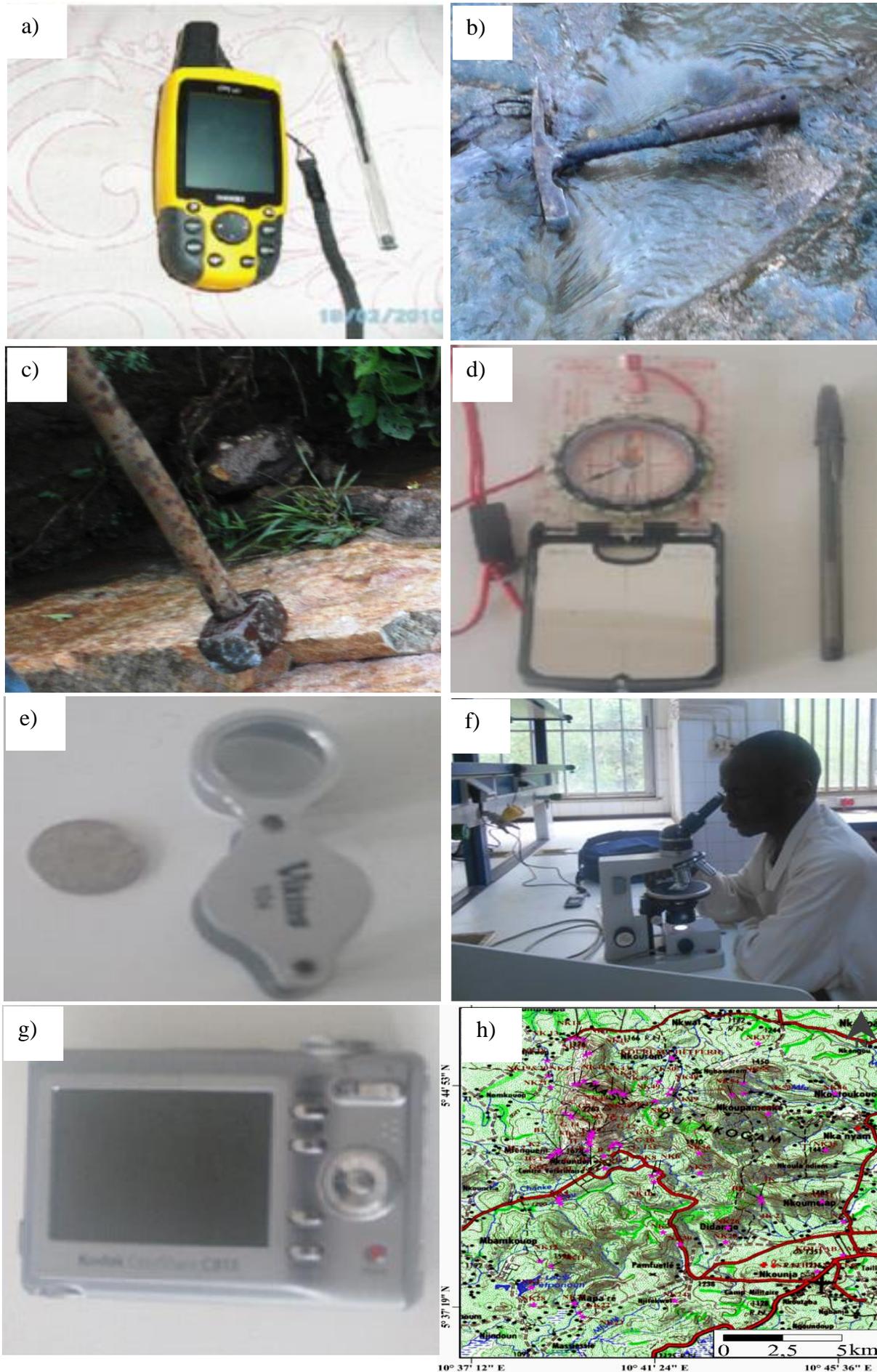


Figure 8. Matériels de terrain : a) G.P.S, b) Marteau piqueur du géologue, c) Massette de cinq kilogrammes, d) Boussole, e) Loupe, f) Microscope polarisant de type Leitz Wetzlar, g) Appareil photo numérique, h) Carte topographique extrait de la feuille de Bafoussam à l'échelle 1/200000.

II.2. Travaux de laboratoire

Les travaux de laboratoire ont été effectués en partie au Cameroun au Laboratoire de Traitement des Minerais (LTM) de Nkolbisson pour l'obtention des sucres de roche, au Laboratoire des Géosciences des Formations Profondes et Applications (LGFPA) de l'Université de Yaoundé I pour la préparation des roches aux diverses analyses. Une partie des ces échantillons a été envoyé en Inde au Laboratoire de cristallographie, pour la confection des lames minces et l'autre partie au laboratoire Bureau Veritas à Vancouver (Canada) pour les analyses géochimiques ; les datations géochronologiques ont été effectuées au laboratoire de Géosciences de l'Université de Floride aux Etats Unis d'Amérique sur deux échantillons. L'extraction des linéaments s'est faite à travers les images satellitaires par la technique de SIG (Système d'information Géographique). Les travaux se sont poursuivis au LGFPA par l'observation microscopique, l'interprétation des résultats issus des différentes analyses, la rédaction de la thèse et la mise en forme du texte.

II.2.1. Télédétection

La télédétection est une technique de cartographie moderne permettant l'acquisition des informations (principalement sous forme d'image) sur tout ou une partie de la surface de la Terre, sans aucun contact direct avec elle. Cette technique représente une excellente source d'information utile dans la cartographie lithostructurale et dans la détermination des accidents tectoniques d'une région, principalement visibles sous forme de linéaments. Les linéaments représentent soit des objets géologiques linéaires (des alignements d'objets géologiques suffisamment proches), soit des discontinuités topographiques ou des structures géomorphologiques héritées d'anciennes topographies (Yao et al., 2012).

II.2.1.1. Type et sources de données

Les données utilisées pour produire la carte des linéaments proviennent de la carte topographique Bafoussam à l'échelle 1/200000 dressée par l'Institut Géographique National du Cameroun en 1973 et publiée en 1974 ainsi que les images SRTM et Landsat 8 OLI. Cependant les images Landsat ont été acquises par les satellites le 29 décembre 2018. Ces images ont été téléchargées à partir du site : www.earthexplorer.usgs.gov et géoréférencées suivant le système de projection WGS 84_UTM_Zone 32N. Les images Landat 8 Oli sont présentées sous forme d'un ensemble de 11 bandes, et seules les bandes 1 à 7, toutes de 30 m de résolution, ont été utilisées. Les caractéristiques de ces 7 bandes sont présentées dans le Tableau 2. Ces 7 bandes spectrales ont été combinées à l'aide du logiciel Erdas Imagine et la portion correspondant à la zone d'étude a été extraite toujours à partir du même logiciel.

Tableau 2. Principales caractéristiques des bandes spectrales utilisées dans le cadre de cette étude.

N°	Bandes	Longueur d'onde (nm)	Résolution (m)
1	Coastal aerosol	433-453	30
2	Blue	450-515	30
3	Green	525-600	30
4	Red	630-680	30
5	NIR	845-885	30
6	SWIR1	1560-1660	30
7	SWIR2	2100-2300	30

II.2.1.2. Méthodologie de traitement des images

Il existe une grande variété de méthodes pour le traitement des images satellitaires. Le choix d'une méthode précise dépend essentiellement de son application et des données disponibles. La méthodologie utilisée afin de parvenir au rehaussement de la qualité des images et à l'extraction des linéaments se subdivise en deux étapes principales : le prétraitement et le traitement. La Figure 9 retrace sommairement l'ensemble de ces étapes, utilisées dans le cadre de cette étude.

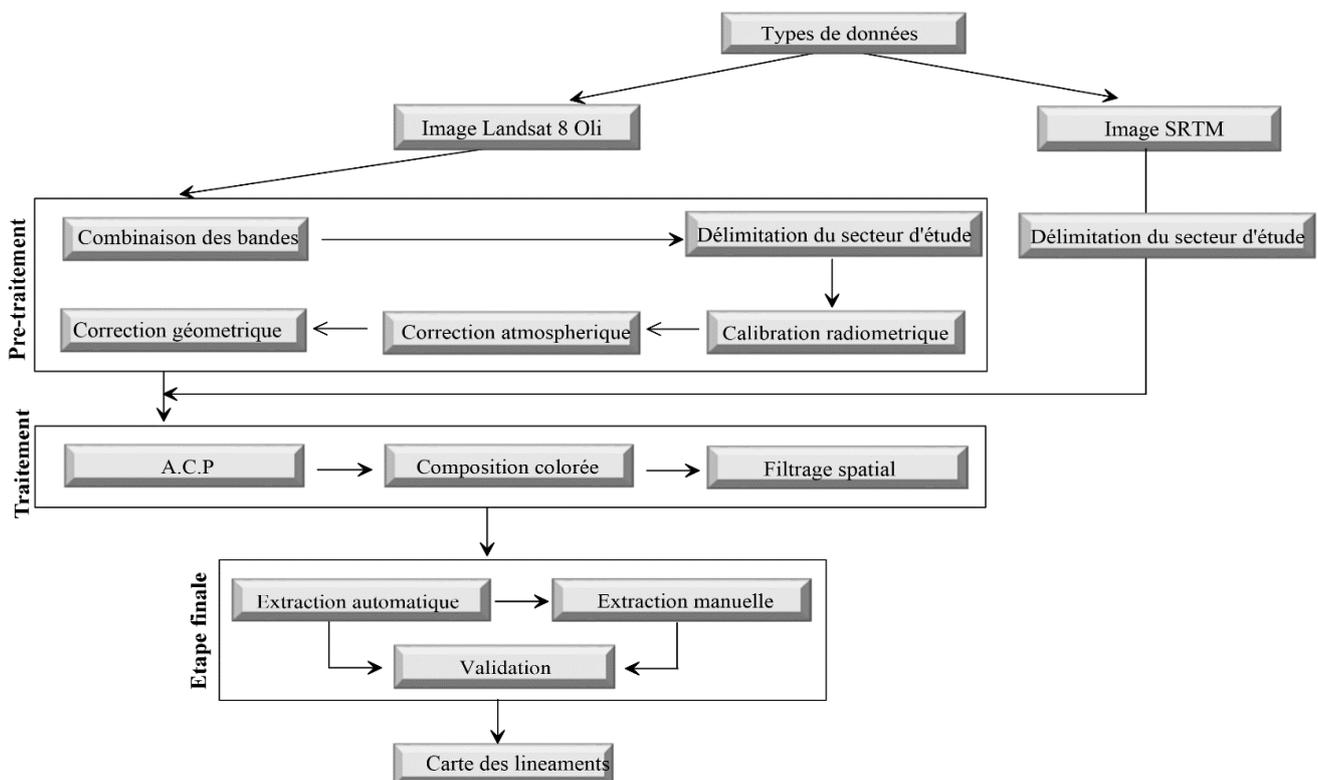


Figure 9. Organigramme de traitement des données satellitaires.

II.2.1.2.1. Prétraitement

Le prétraitement est un ensemble d'opérations, toutes importantes, qui vise à réduire ou à éliminer les bruits, les perturbations, ou même les effets atmosphériques présents sur une image lors de son acquisition par les satellites. Ces opérations consistent donc à appliquer les calibrations radiométriques, ainsi que des corrections atmosphériques et radiométriques, permettant de ce fait d'améliorer le contraste de l'image et de faciliter leur interprétation. Les calibrations radiométriques sont utilisées afin de calibrer l'image et d'améliorer sa radiance, sa réflectance et sa luminosité (Takoudjou et al., 2020). Cette phase de prétraitement a été rendue possible grâce au logiciel Erdas imagine 2014.

II.2.1.2.2. Traitement

Trois (03) techniques essentielles ont été utilisées dans cette partie : l'Analyse en Composante Principale, les Compositions Colorées et le Filtrage directionnel.

- Analyse en Composante Principale (ACP)

L'ACP est une technique de transformation linéaire, utilisée pour réduire les données multidimensionnelles (multispectrales) fortement corrélées pour une interprétation géologique efficace (Aouragh et al., 2012). L'utilisation de l'ACP permet de déterminer la meilleure combinaison de bandes indépendantes des images Landsat 8 OLI pour l'extraction des linéaments dans la zone étudiée.

- Composition colorée

Le but de cette technique est d'attribuer l'une des couleurs primaires à savoir le rouge (R), le vert (G) et le bleu (B) sur l'image initiale afin d'optimiser l'analyse visuelle. Cette propriété permet la discrimination claire entre les caractéristiques géologiques et la végétation, facilitant ainsi la distinction visuelle des linéaments (Takoudjou et al., 2016).

- Filtres directionnels

L'application des filtres directionnels de Sobel de type 7x7 (Tableau 3) aux images précédemment prétraitées permet de rehausser encore mieux les discontinuités images correspondant à des linéaments structuraux (Yao et al., 2011). L'usage desdits filtres a donné des résultats satisfaisants dans l'étude structurale de la région de Taiz (Abdullah et al., 2013), de Sangmelima (Akame et al., 2014) et de Wadai (Al-Djazoul et al., 2019) à l'Est du Tchad. Le tableau 3 présente les différents filtres utilisés au cours de cette étude. Les filtres de Sobel ont la particularité de mettre en évidence les linéaments perpendiculairement à leurs

directions de convolutions. Ces différentes techniques (ACP, Composition Colorée et filtrage directionnels) ont été réalisées à partir du logiciel Erdas Imagine 2014.

Tableau 3. Matrices de filtres sobel et gradient

0	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	0	1	1	1	2	1	1	1	-1	-1	-1	0	1	1	1
-1	0	2	2	2	3	1	1	3	2	2	2	0	-1	1	1	2	3	2	1	1	-1	-1	-3	0	2	1	1
-1	-2	0	3	4	2	1	1	2	4	2	0	-2	-1	1	2	3	4	3	2	1	-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-2	-3	0	3	2	1	1	2	3	0	-3	-2	-1	0	0	0	0	0	0	0	-2	-3	-4	0	4	3	2
-1	-2	-4	-3	0	2	1	1	2	0	-3	-4	-2	-1	-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1	-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-3	-2	-2	-2	0	1	1	0	-2	-2	-2	-3	-1	-1	-1	-2	-3	-2	-1	-1	-1	-1	-2	0	2	1	1
-2	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1
Filtre 7X7 NE-SW de SOBEL							Filtre 7X7 NW-SE de SOBEL							Filtre 7X7 N-S de SOBEL							Filtre 7X7 E-W de SOBEL						

II.2.1.2.3. Extraction des linéaments

L'extraction automatique des linéaments a été rendue possible via le logiciel Geomatica 2012. Après leur extraction, ces linéaments ont été superposés à la carte du réseau routier afin de supprimer les structures liées aux activités anthropiques. Les discontinuités et les changements brusques de tonalité observés sur les images sont représentés par des segments de droite. Les linéaments d'origine anthropique ayant été supprimés de l'ensemble, l'on obtient en définitive les linéaments traduisant les discontinuités géologiques.

II.2.2. Confection et observation microscopique des lames minces

Pour la confection des lames minces, soixante douze (72) échantillons de roche prélevés sur le terrain sont sciés à l'aide d'une scie diamantée, en sections d'environ 40 mm de longueur sur 25 mm de largeur et d'épaisseur 10 mm, appelées sucres. Ces sucres finement polis sur une face seront collés sur des lames porte-objet en verre, d'environ 50 mm sur 30 mm et d'épaisseur standard. Le couple lame-section de roche est placé sous presse une nuit complète pour libérer les bulles d'air. La section sera par la suite dégrossie, sur une rectifieuse qui va laisser environ 500 µm de matière sur la lame ; puis polie sur une rôdeuse de précision par frottement contre un plateau en fonte avec de l'abrasif et de l'eau, et amenée à 30 µm d'épaisseur, épaisseur à laquelle l'on observe le quartz blanc en LPA. La confection est ainsi achevée et la lame mince obtenue est destinée à l'étude pétrographique microscopique.

L'observation des lames minces de roche ainsi confectionnées s'est faite au moyen du microscope polarisant monoculaire de type Leitz wetzlar, pour identifier et caractériser au mieux les principaux minéraux au LGFPA du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I. Les photos numériques des minéraux et textures ont été réalisées

avec un appareil photographique Olympus Camedia C3030-ADL. Les minéraux des différentes lames minces ont été observés aux grossissements x 2,5, x10, x 25 et x 50.

II.2.3. Analyse géochimique sur roche totale

Quinze échantillons (15) de roches plutoniques (granitoïdes) ont été analysés pour les éléments majeurs, traces et terres rares au laboratoire Bureau Veritas de Vancouver (Canada), en utilisant la méthode de spectrométrie de masse à plasma inductif (ICP-MS). Les échantillons ont été pulvérisés pour les rendre homogènes, dont 0,5 g de pulpe de roche a été fusionnée dans un four après une digestion au métaborate/tétraborate de lithium et à l'acide nitrique. La perle refroidie a été dissoute dans de l'acide nitrique de qualité ACS (American Chemical Society) et analysée par ICP-MS. La perte au feu (LOI) a été déterminée en chauffant un échantillon divisé puis en mesurant la perte de poids. Le carbone et le soufre totaux ont été déterminés par la méthode Leco. Pour maintenir la qualité des données, des normes et inconnues ont été utilisées entre les analyses. Les incertitudes analytiques varient de 0,1 % à 0,04 % pour les éléments majeurs, de 0,1 à 0,5 % pour les éléments traces et de 0,01 à 0,5 ppm pour les terres rares (REE). La précision de l'analyse pour les REE est estimée à 5 % pour des concentrations >10 ppm et 10 % lorsqu'elle est inférieure.

II.2.4. Méthode de datation U/Pb sur zircon

Les données géochronologiques ont été déterminées en utilisant la méthode de datation U-Pb sur zircon par spectrométrie de masse à source plasma et à couplage inductif (MC-ICP-MS) au laboratoire des Géosciences de l'Université de Floride aux Etats Unis d'Amérique. Les grains de zircons de syénogranite à amphibole et de syénogranite à amphibole et biotite ont été séparés en utilisant les techniques de séparation magnétique et de densité standard (Foster et al., 2015). Les cristaux de zircon, ainsi que les étalons de zircon ont été montés dans une monture époxy, puis meulés et polis pour exposer les surfaces intérieures. Les grains polis ont été imagés en utilisant des électrons rétrodiffusés et la cathodoluminescence (CL) pour identifier les zones de croissance homogènes à l'intérieur des grains qui étaient exempts de défauts physiques et d'inclusions. Les analyses isotopiques U-Pb ont été effectuées sur un spectromètre de masse à source plasma à couplage inductif (MC-ICP-MS) à multi collecteur Nu Plasma avec un réseau de collecteurs optimisé pour les isotopes U et Pb. La procédure est la même que celle décrite dans Foster et al. (2015). Les grains de zircon ont été bombardés dans une atmosphère d'Hélium avec un laser ultraviolet de longueur d'onde 213 nm couplé au MC-ICP-MS (Mueller et al., 2008). Des mesures de fond en heures de pointe (20 s) ont été effectuées avant chaque analyse afin de définir le gaz porteur à blanc, y compris la contribution de ^{204}Hg . L'ablation a été réalisée en exactement 30

s. Les données isotopiques ont été acquises à l'aide du logiciel *Nu-Instruments Time Resolved Analysis*. L'étalonnage des données et les corrections de dérive ont été basés sur des ablations multiples de la norme FC-1 zircon (Duluth Gabbro - Forest Center, 1098 Ma ; Mattinson, 2010). Les âges ont été déterminés à l'aide d'une feuille de calcul Excel interne. Les erreurs d'âge représentatives sont basées sur la reproductibilité à long terme et sont de 2 % pour $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (2σ) et de 1 % pour $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (2σ). Seuls les grains présentant une discordance de 5 % sont pris en compte.

II.3. Logiciels utilisés

Les principaux programmes utilisés en dehors de l'outil Microsoft Office qui a servi pour le traitement des données d'analyses chimiques, la mise en forme de ce mémoire et la réalisation des diagrammes binaires sont :

- Microsoft Excel 2013 pour les diagrammes binaires ;
- Tridraw et GCDkit 2.3 pour les diagrammes triangulaires ;
- Mapinfo7.0 et Argis pour géo-référencier et positionner les points sur la carte ;
- Surfer 13 pour tracer les modèles numériques de terrain ;
- RockWorks 16 pour réaliser la carte des rosaces directionnelles des linéaments ;
- Geomatica 2012 pour extraire automatiquement les linéaments sur l'image
- Satellitaire après filtration directionnel de matrice 7x7 ;
- Adobe Illustrator CS et le logiciel Surfer 16 pour redessiner diverses cartes, figures et diagrammes ;
- Abaque de classification pour la détermination des compositions modales de roches.

Conclusion

Les différentes techniques de laboratoire aussi bien classiques (analyses des images satellitaires, microscopiques et géochimiques) que spécifique (détermination de l'âge de mise en place du massif par la méthode de datation U/Pb sur zircon) ont été présentées dans ce chapitre. L'ensemble du matériel utilisé sur le terrain et au laboratoire, couplé aux différentes méthodes analytiques, ont permis d'obtenir les résultats qui seront présentés dans les chapitres suivants.

CHAPITRE III : ÉTUDE MORPHOSTRUCTURALE

Le présent chapitre vise à comprendre l'agencement géomorphologique et structural des formes et types de reliefs du secteur d'étude. Il s'appuie sur l'étude du relief et de ses formes, des linéaments et des données structurales recueillies sur le terrain. Selon O'Leary (1976), les linéaments sont des fractures linéaires (simples ou complexes) décelées en surface. Ils reflètent généralement un phénomène engendré sous la surface terrestre. Cette partie traite des principales unités morphologiques du secteur d'étude, obtenues par l'application des filtres directionnels et extraction des linéaments ainsi que des relations existantes entre morphologie-linéaments et mise en place du massif.

III.1. Cartographie des unités géomorphologiques

La morphologie du plateau Bamoun présente des massifs, des plaines, des pénéplaines, des bassins et des vallées, façonnés par l'érosion et influencés par l'escarpement de la plaine du Noun. Les altitudes varient de 1000 à 2335 m, avec le massif du Mbam (2335 m) et le massif du Nkogam (2268 m) situés à l'est du plateau. Le massif du Nkogam présente trois chaînes de montagnes dont deux sont grossièrement parallèles, orientées NNE-SSW et une est orientée NE-SW (Fig. 10). La disposition de ces chaînes donne une morphologie complexe qui présente une forme annulaire et une corne courbe orientée vers le nord. Une grande dépression au centre du massif s'ouvre vers le SW. Le modèle numérique de terrain (MNT) révèle en altitude trois grandes unités morphologiques différentes (Fig. 11) :

- unité inférieure à 1300 m d'altitude : c'est le prolongement du plateau Bamoun constitué de plaines alluviales et de vallées en U et en V drainées par des cours d'eau. Leur collecteur principal est le fleuve Noun qui contribue aussi à l'évacuation des produits d'altération. Les roches de cette unité sont des basaltes de plateau à Nkounden et Koupamenké, et des gneiss à Nkourom et Didango.
- unité moyenne entre 1300 et 1750 m d'altitude : elle comprend des galeries forestières et des talwegs drainés ou non ; les roches de cette altitude sont des granites, des ignimbrites et des basaltes massifs à Nkounden, et les basaltes massifs de Koupamenké.
- unité supérieure de plus de 1750 m d'altitude : située dans une direction NNE-SSW, elle est constituée de sommets ou de collines arrondies ; les roches sont des granites et des syénogranites. Notons aussi la présence de deux pointements de basalte de massif.

En général, le massif du Nkogam commence au NNE à environ 1000 m d'altitude à Nkourom, s'élève jusqu'à un sommet de 2268 m à Gon-Njitapon.

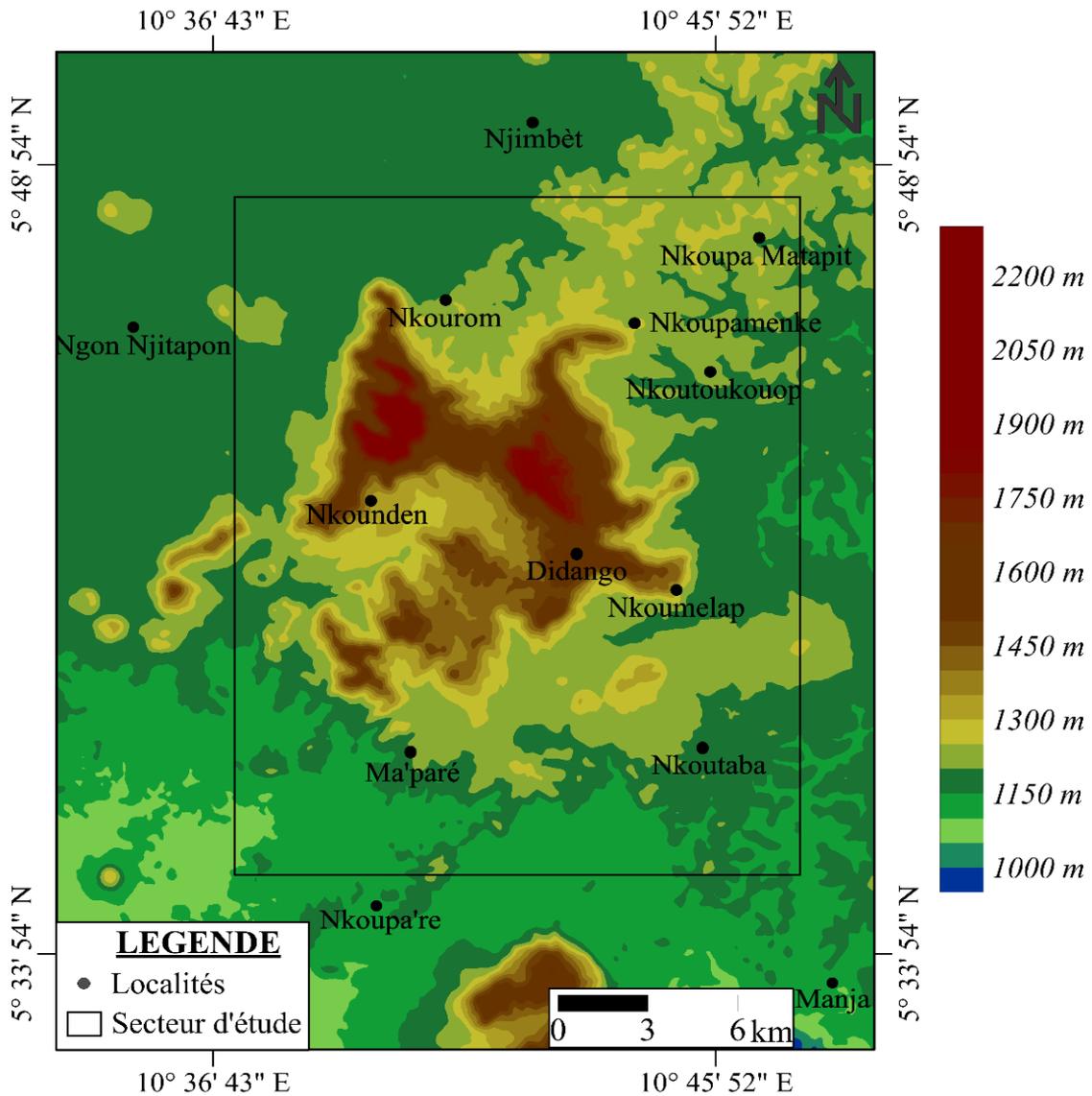


Figure 10. Carte des unités morphologiques du massif de Nkogam et de ses environs, basée sur l'image SRTM.

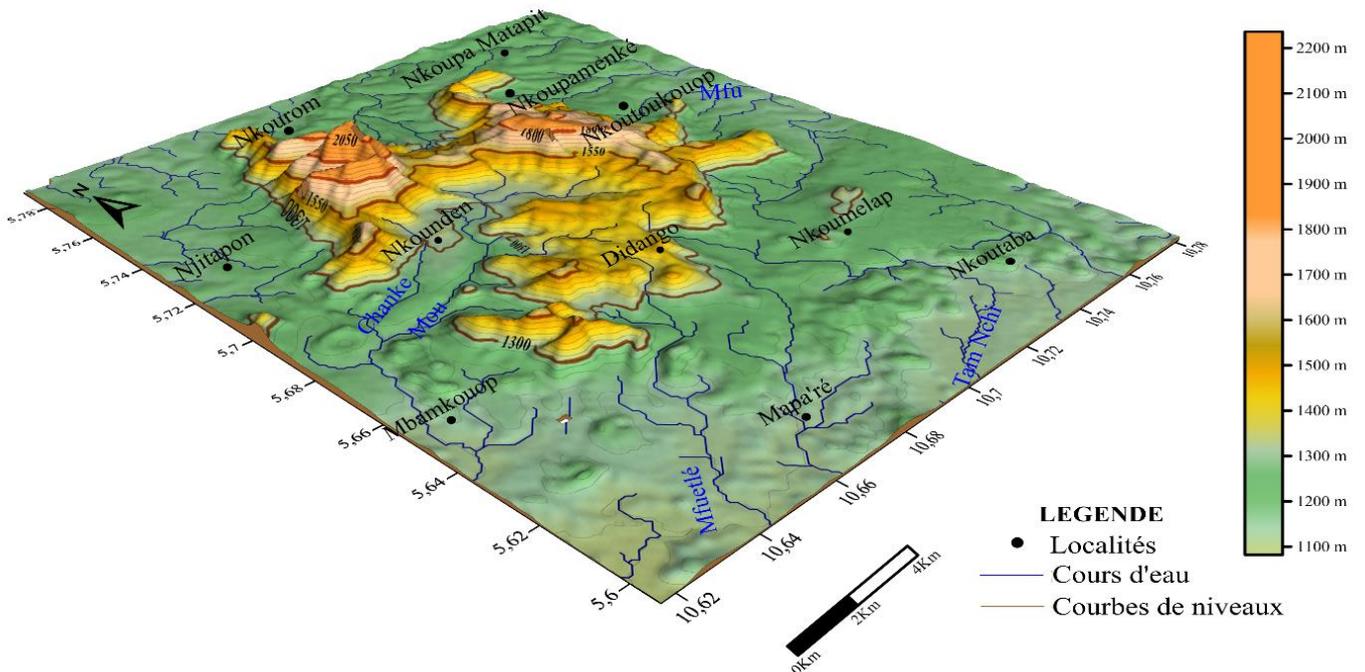


Figure 11. Schéma fonctionnel (MNT) du massif de Nkogam et de ses environs, basé sur l'image SRTM.

Il s'incline ensuite vers le SSW et atteint Nkounden à 1100 m. Des vallées en forme de U et de V sont disposées symétriquement par rapport à une direction majeure N-S. Comme les autres massifs de la région, les basaltes de plateau et le socle gneissique panafricain entourent le massif de Nkogam dont la lithologie est constituée d'intrusions de granites, de syénogranites, d'ignimbrites et des basaltes de massif.

III.2. Cartographie des linéaments du massif de Nkogam

Le traitement des images Landsat 8 OLI et SRTM a permis d'obtenir les images des figures 12 et 13 et les linéaments de la figure 14. Une analyse statistique des linéaments a permis d'identifier 268 caractéristiques linéaires multidirectionnelles sur la carte (Fig. 14). Leur longueur varie de 1,065 à 15,911 km. La somme totale de la longueur des linéaments cartographiés est de 1162,92 km. Ces tailles réparties en plusieurs ordres de grandeur indiquent l'hétérogénéité géologique des roches. Un linéament majeur orienté N-S (15,911 km de long) est observé à l'est de la région. Entre les localités de Njimbèt et Nkoupa're, les linéaments de direction majeure NNE-SSW sont sub-parallèles à la LC. L'histogramme (Fig. 15a) montre plus de 250 linéaments de longueurs inférieures à 7,00 km, 16 linéaments de longueurs comprise entre 7,00 et 11,457 km et enfin 2 linéaments ayant des longueurs au-dessus de 11,457 km, regroupés en 18 classes directionnelles de 10 degrés d'intervalle. Les directions principales sont N045° (NE-SW) et N065° (ENE-WSW) dans la rosace de direction (Fig. 15b). Les directions N005°, N030°, N075°, N095°, N115°, N165°, avec des fréquences inférieures à 6 %, sont moins significatives. Ces orientations reflètent un bruit de fond provenant de la variabilité de chaque famille et des accidents géologiques qui ressemblent à des lignes de dépression (talwegs). La synthèse des résultats est donnée dans le tableau 4. Les lignes de crête sont multidirectionnelles avec une direction principale NE-SW et une direction secondaire NW-SE (Fig. 16a et b). En outre, sur le complexe anorogénique de Nkogam les lignes de crête dessinent une courbe en dent de Scie présentant des pics (parties convexes) en alternance avec de zones de dépression (parties concaves). En général, le relief n'est pas homogène.

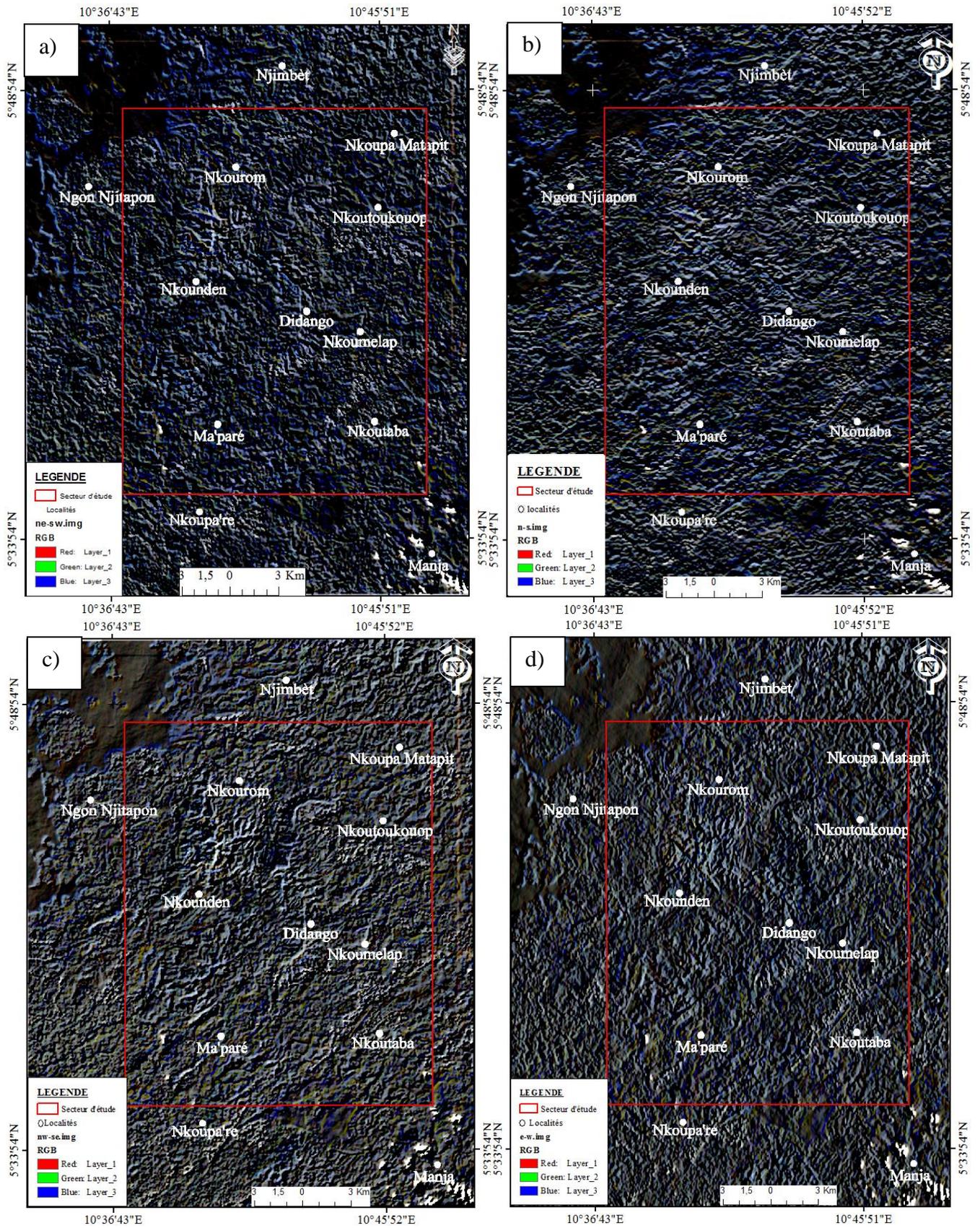


Figure 12. Images Landsat après filtrage de Sobel.

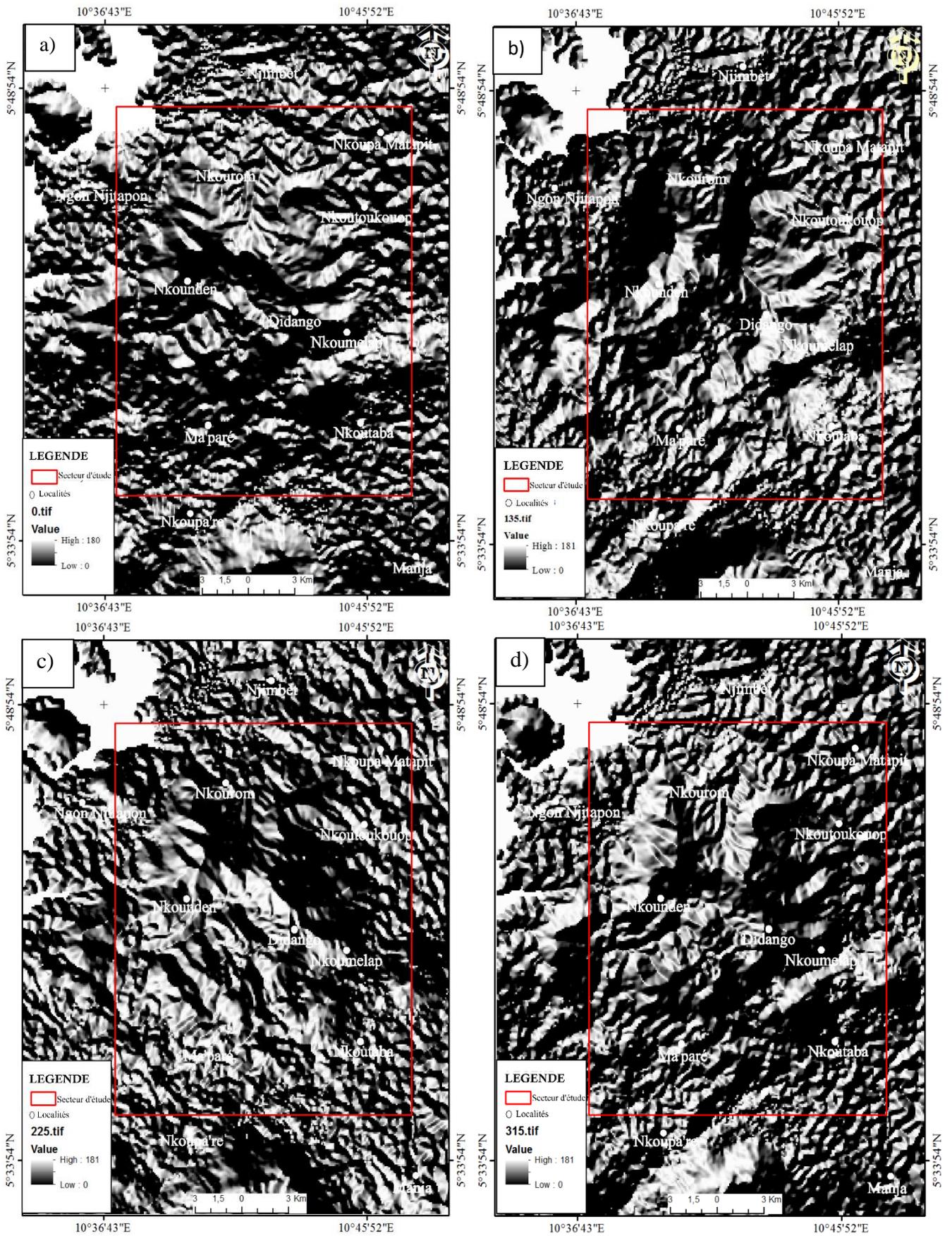


Figure 13. Image satellite SRTM filtrée par les filtres directionnels de Sobel : A) N0°, B) N135°, C) N225° et D) N315°.

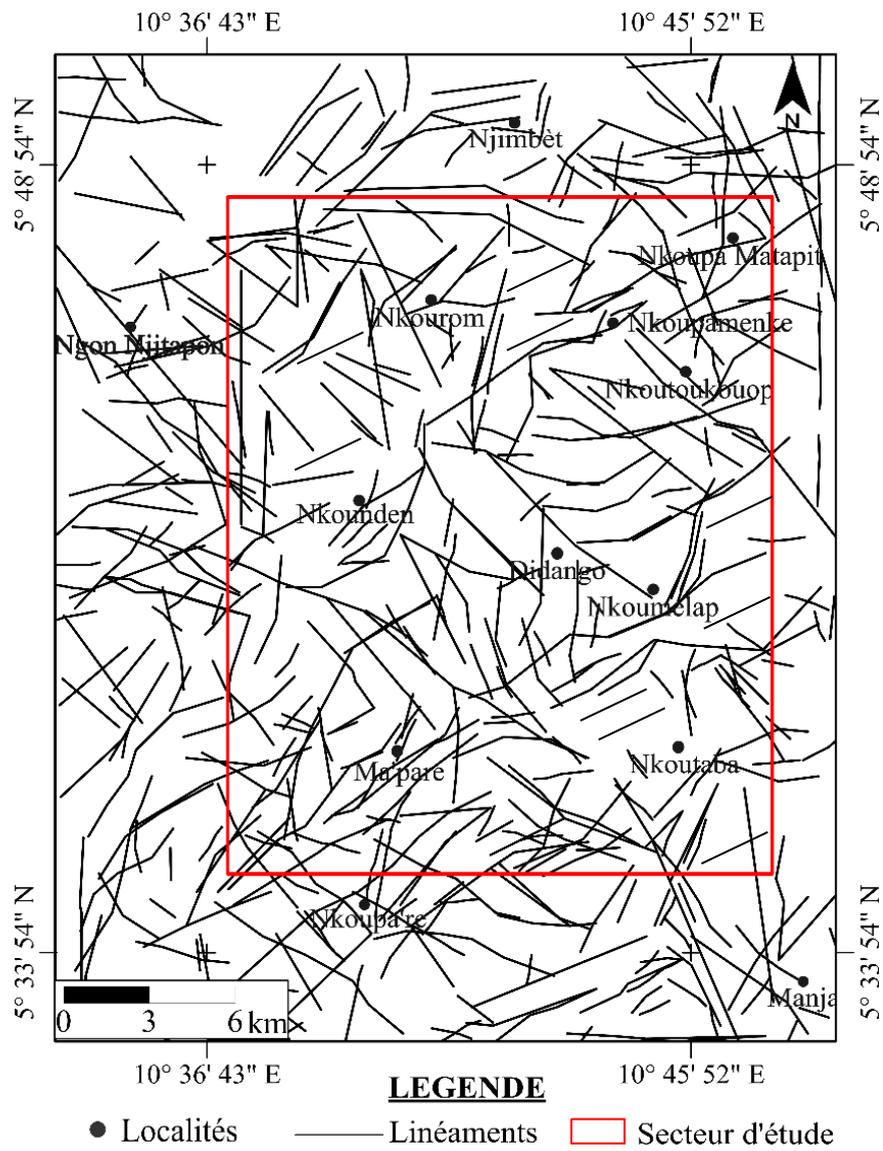


Figure 14. Carte linéamentaire du massif de Nkogam et de ses environs, extraite à partir des Images Satellitaires.

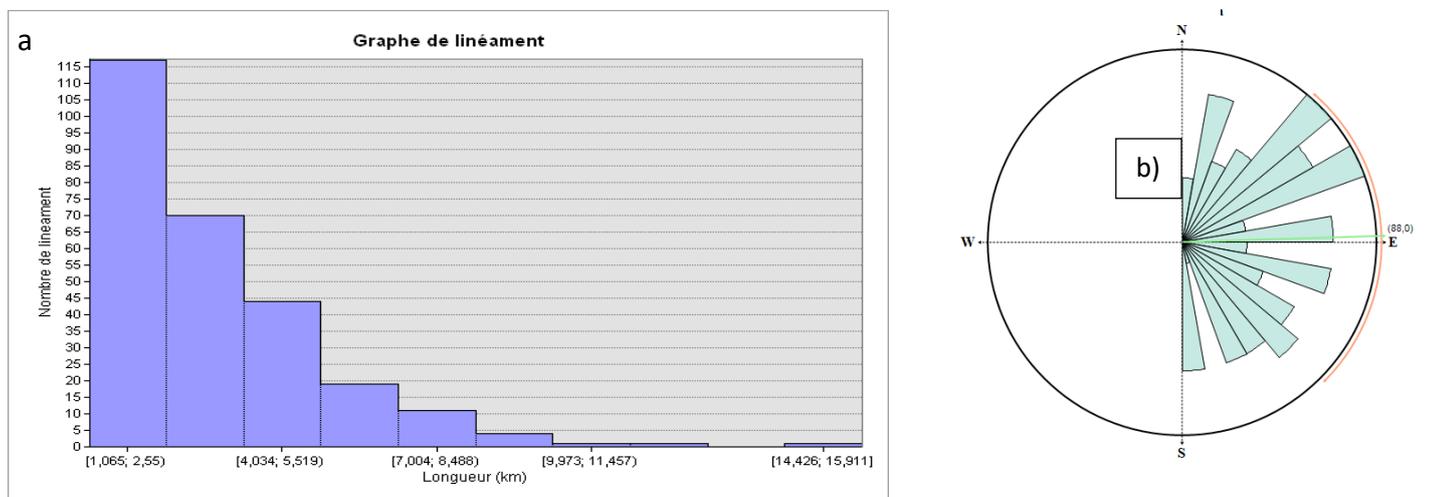


Figure 15. Distribution des linéaments : (a) Regroupements en classes ; (b) Rosace de directions.

Tableau 4. Synthèse des résultats du calcul, montrant la distribution de l'orientation des linéaments du secteur d'étude.

Notation	Direction angulaire(°)	Direction cardinale	Nombre de linéaments	Longueur minimale des linéaments (km)	Longueur maximale des linéaments (km)	%
1	00-30	NNE-SSW	39	1,09	7,21	14,55
2	30-60	NE-SW	56	1,08	11,56	20,89
3	60-90	ENE-WSW	49	1,06	7,96	18,28
4	90-120	ESE-WNW	37	1,07	15,91	13,80
5	120-150	SE-NW	52	1,08	7,20	19,40
6	150-180	SSE-NNW	35	1,12	8,89	13,05
Total			268			100

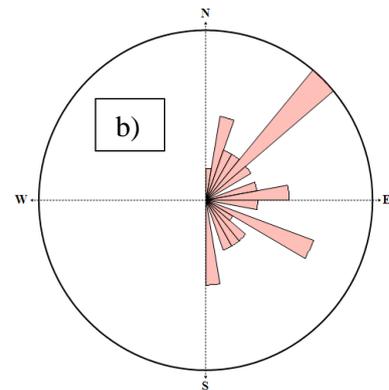
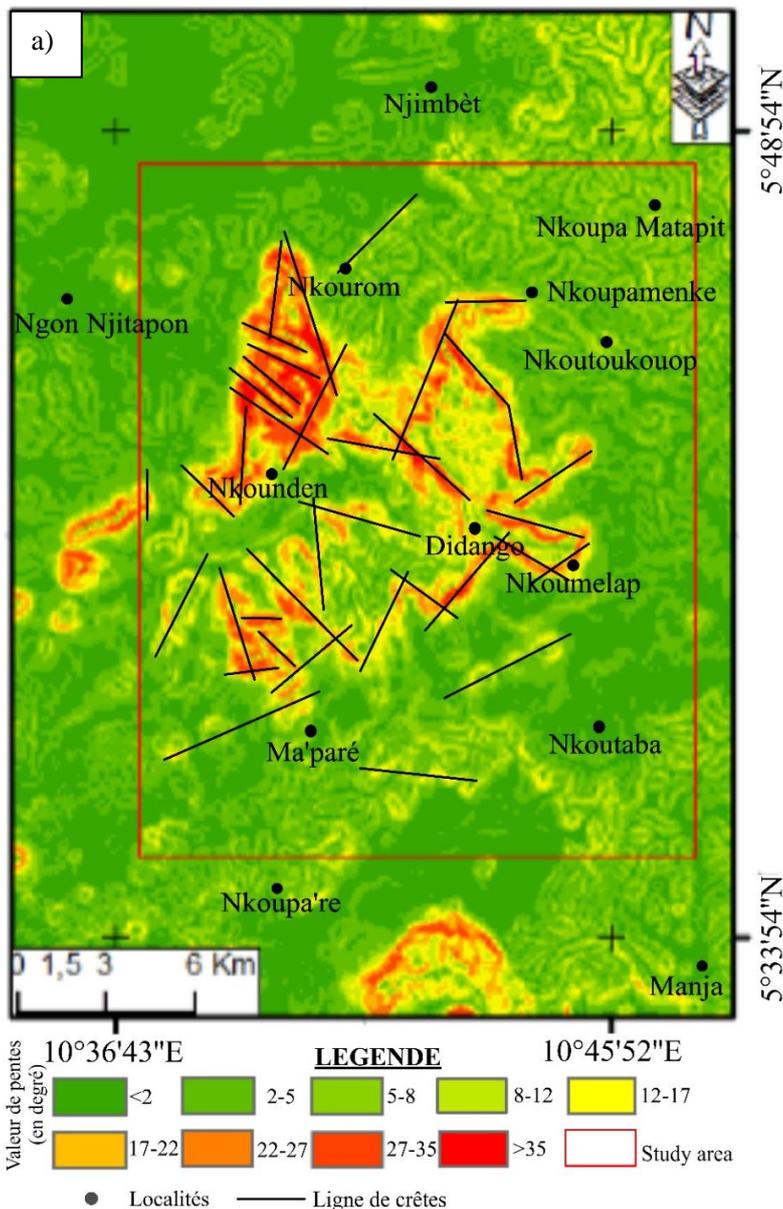


Figure 16. a) Carte des pentes du massif du Nkogam et de ses environs, extraite automatiquement de l'image SRTM. (b) Rosace de directions des lignes de crête.

III.3. Analyse et signification des linéaments

La plupart des linéaments identifiés par télédétection sont visibles sur le terrain. Ces linéaments sont majoritairement orientés NE-SW, ENE-WSW et correspondent à ceux mis en évidence sur les cartes géologiques (Fig. 17) extraites des travaux de Weecksteen (1957) et Dumort (1968).

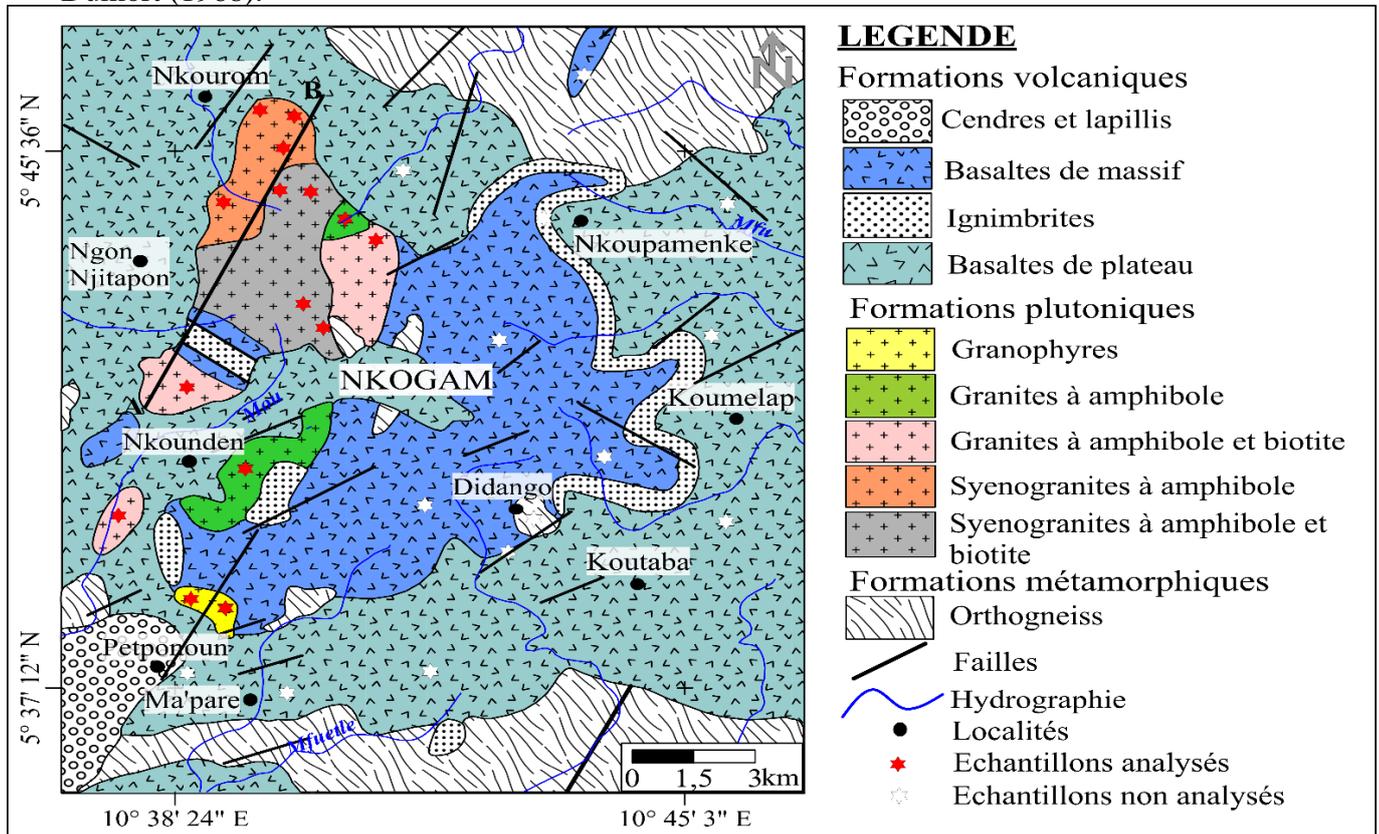


Figure 17. Carte géologique du complexe de Nkogam extraite à partir des feuilles de Douala-Est (Weecksteen, 1957) et Douala-Ouest (Dumort, 1968) de la carte géologique de reconnaissance du Cameroun. (modifiée)

D'après leur analyse, les linéaments correspondent à des filons, des diaclases, des failles, des lignes de crête et des lignes de dépression. Des fractures sèches ou diaclases (Fig. 18a) recoupent toutes les formations dans diverses directions, la direction principale étant NE-SW (Fig. 18b). Sur le versant ESE du chaînon à Nkounden, des stries (Fig. 19a) et des pseudotachylites (Fig. 19b) indiquent l'existence de failles dans les basaltes. A Nkounden, l'affleurement d'un dyke d'amphibolite prismé montre des fractures orientées N180°E-64E à N162°E-65ENE (Fig. 18c). Plus loin en aval de cet affleurement d'amphibolite, l'on trouve des basaltes de massif moins fracturés, présentant par endroits des fentes de tension. Ces fractures orientées approximativement N-S correspondraient aux linéaments N-S observés par traitement d'images satellites à Nkounden. Un couloir de faille orienté N170°E recoupe (Fig. 19c) les roches adjacentes (basaltes, granites et ignimbrites).

Par endroits, des fractures subverticales sur le flanc du massif, divisent les granites en fragments d'épaisseur métrique (Fig. 19d), indiquant la présence d'un couloir de faille. Il faut également noter que des filons de basalte recoupent le socle gneissique ; l'épaisseur du plus grand filon peut atteindre 80 cm (Fig. 19e). Les linéaments correspondant aux vallées en forme de V et créés par les eaux de ruissellement se trouvent principalement sur le flanc du massif (Fig. 19f). Les lignes de crête sont généralement courbes et irrégulières ; l'on note la présence d'une protuberance en forme en fer à cheval à Nkoupamenké. La rosace de direction des lignes de crête montre une orientation majeure N045°E (Fig. 16b) sécante à la direction N070°E de la zone de cisaillement du centre Cameroun. Le long de la ligne de crête du massif allant de Nkourom à Nkounden, s'observe une diversité lithologique constituée de syénogranites, de basaltes de massif, d'ignimbrites et de granites dans la direction NNE - SSW (Fig. 20a, b et c).

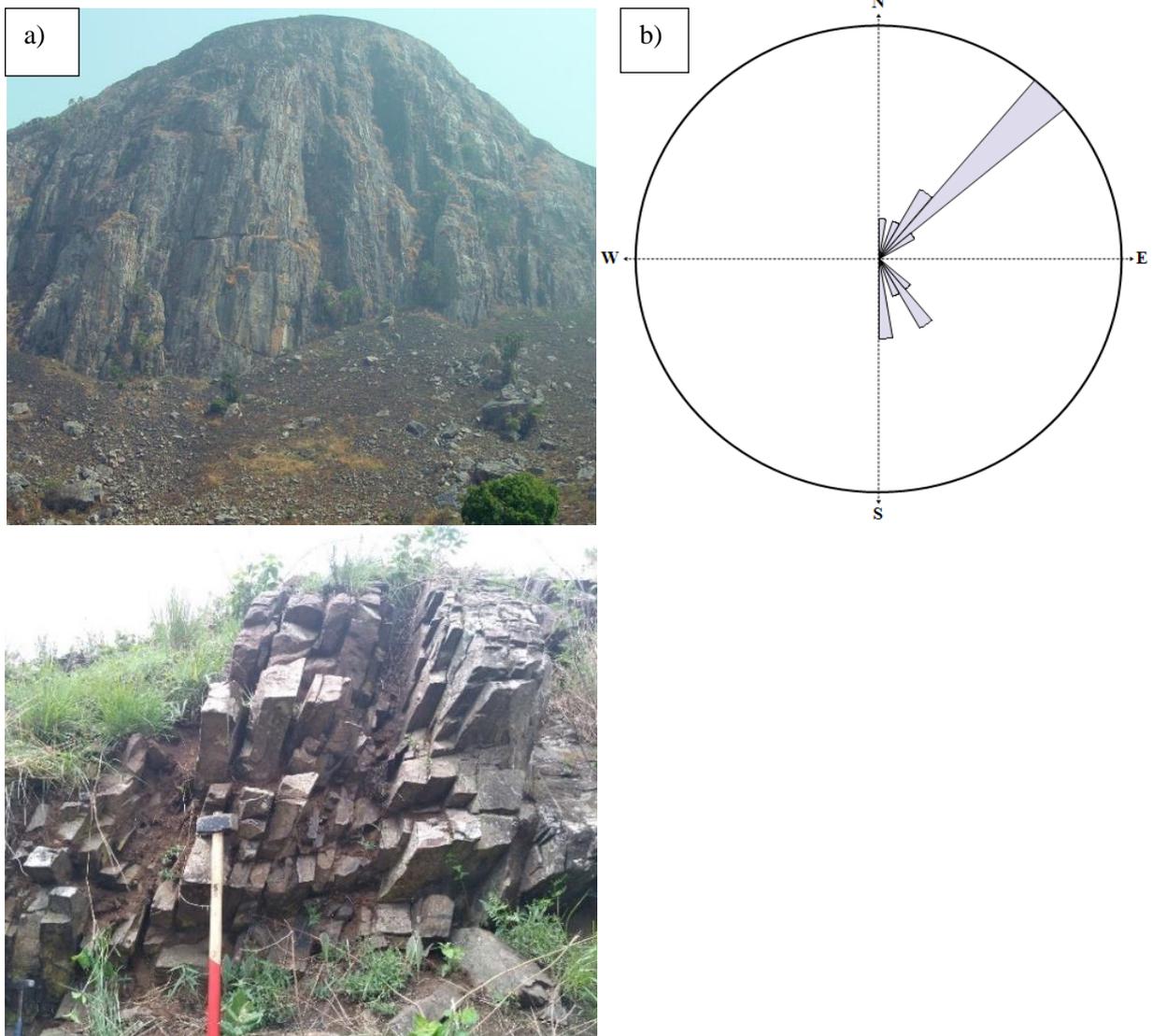


Figure 18. Affleurements : a) Dôme de syénogranites montrant des fractures multidirectionnelles à Nkounden. b) Rosace directionnelle de diaclases obtenue à partir des données de terrain. c) Dyke d'amphibolites montrant des prismes à quatre côtés.

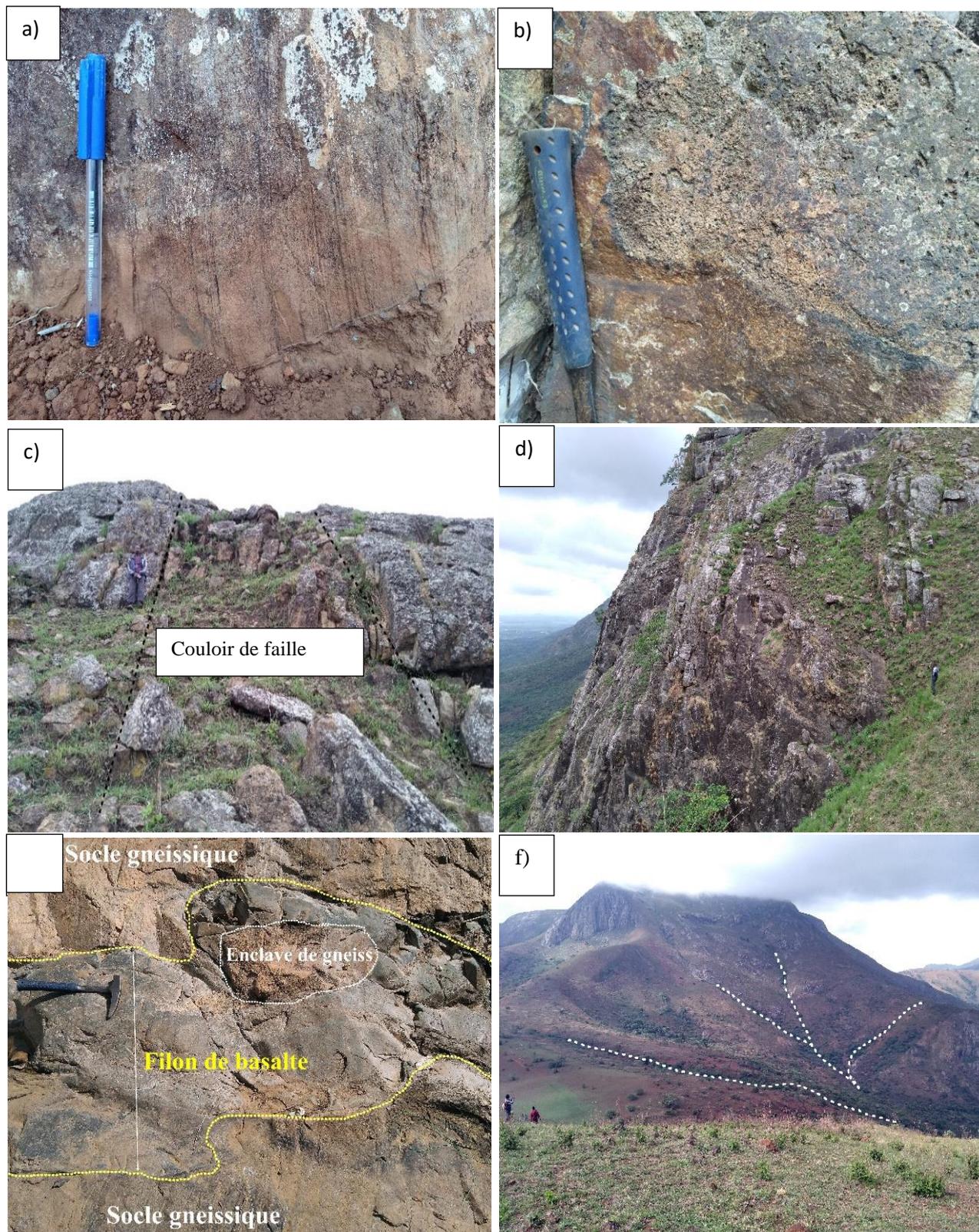


Figure 19. Morphostructures : a) Stries sur des basaltes massifs, b) Pseudotachylite montrant une fusion par friction à l'interface entre des plans de faille, c) Couloir de faille dans les granites de Nkounden, d) Diaclases dans un dôme granitique. e) Filon de basalte avec une enclave de gneiss. f) Vallée en forme de V à Nkounden.

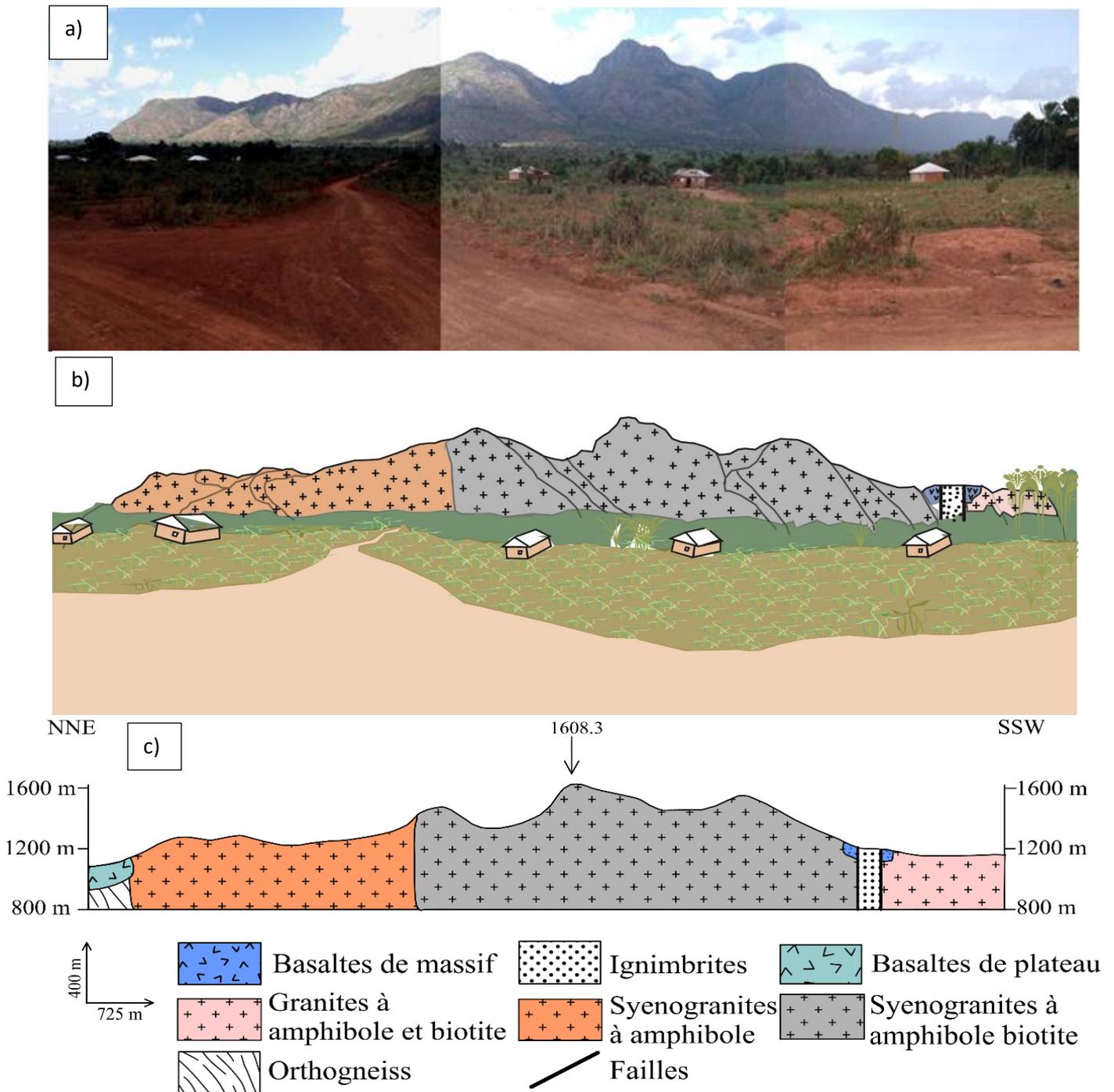


Figure 20. Massif du Nkogam : a) Vue du versant occidental depuis Ngon Njitapon ; b) Croquis photographique du versant occidental montrant les limites des intrusions ; c) Coupe géologique A-B orientée NNE-SSW à partir de la figure 17.

Conclusion

L'étude morphostructurale du complexe anorogénique de Nkogam offre différentes morphostructures : diaclases, failles, lignes de crête et lignes de dépression. Les directions majeures sont : NE-SW et ENE-WSW. Les directions secondaires sont : NNE-SSW, E-W, WNW-ESE, NW-SE. Le complexe anorogénique de Nkogam présente une morphologie en U avec une dépression centrale ouverte vers le SW.

CHAPITRE IV : ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE

L'étude pétrographique est basée à la fois sur l'observation macroscopique de plus de soixante douze échantillons et la description microscopique de soixante dix lames minces de roches (Fig. 21). Ce chapitre offre une description détaillée des roches issues du socle Pan-Africain et des formations tertiaires (plutoniques et volcaniques). Les formations tertiaires sont en intrusion dans un socle constitué de roches métamorphiques qui affleurent par endroits dans le secteur d'étude. Par ordre d'extension spatiale décroissante, il s'agit des roches volcaniques, plutoniques et métamorphiques.

Pour les descriptions pétrographiques, il est important de noter que, les termes texture et structure font respectivement référence à la taille des cristaux et à l'organisation interne de la roche. La définition des textures et de la taille des minéraux dans les volcanites obéissent aux critères de Bryan (1979) à savoir : microcristaux < 0,2 mm ≤ microphénocristaux < 0,5 mm ≤ phénocristaux < 2 mm ≤ megacristaux. Les compositions modales ont été dans l'ensemble estimées visuellement à l'aide d'abaques selon Uytendogaardt et Burke (1971).

IV.1. Roches métamorphiques

L'encaissant du secteur d'étude est constitué de roches métamorphiques : les gneiss et les amphibolites.

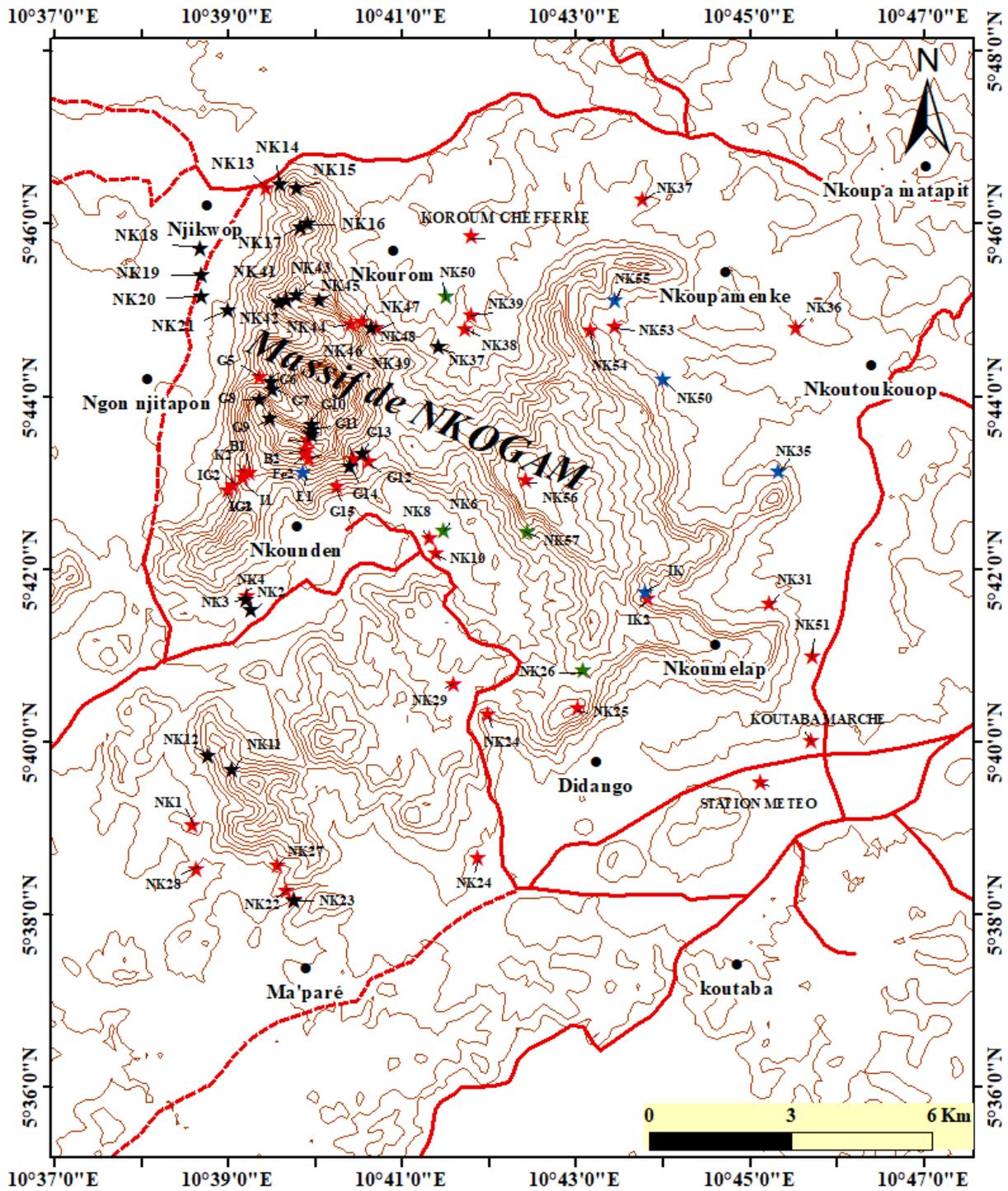
IV.1.1. Gneiss

Les gneiss du secteur d'étude affleurent dans les bas-fonds en forme de dalle au Sud du massif, en dôme à l'Est du massif et également en dalles à l'Ouest de la ville de Koutaba. Sur la base de la composition minéralogique deux types pétrographiques ont été distingués : les gneiss à amphibole et les gneiss à biotite et amphibole.

IV.1.1.1. Gneiss à amphibole

IV.1.1.1.1. Extension et caractères macroscopiques

Les gneiss à amphibole affleurent en dalles derrière le Lycée Bilingue de Nkourom (Fig. 22a) et en blocs sur la rive droite du fleuve Mou à Nkounden. En fonction de la couleur l'on distingue : les gneiss sombres (NK6) et les gneiss clairs (NK50). Les gneiss de couleur sombre sont à cristaux de taille variant du millimètre au centimètre (Fig. 22b). Les phénoblastes de quartz et de feldspath sont dispersés. Dans ces gneiss, l'on observe une orientation préférentielle des minéraux qui définit la schistosité. Les gneiss de couleur claire sont à cristaux de taille variant entre 1 mm et 6 mm. Les minéraux blancs sont constitués de quartz et de feldspath. Le quartz se présente sous forme de cristaux d'halite à éclat vitreux de taille pouvant atteindre 2 mm. Les cristaux de feldspaths sont distinguables par leur couleur blanc laiteux. Ces roches contiennent de l'amphibole, mais en proportions faible.



Légende

- localité
- Courbes de niveau
- Route principale
- - - Route secondaire

Point d'échantillonnage

- ★ Laves ignimbritiques
- ★ Laves basaltiques
- ★ Granitoides
- ★ Roches métamorphiques

Figure 21. Carte d'échantillonnage du secteur d'étude.

IV.1.1.1.2. Étude microscopique

Au microscope les gneiss à amphiboles sont constitués des minéraux tels que : quartz, feldspath alcalin, plagioclase, amphibole, zircon, apatite et minéraux opaques. La texture de ces roches est granoblastique hétérogranulaire.

- **Quartz**

Le quartz (35-40 %) se présente en cristal xénomorphe. Ces cristaux présentent des dimensions variables de 0,3 x 0,2 mm à 0,7 x 0,6 mm. Les sections de quartz sont à extinction roulante. Ils se retrouvent parfois en inclusion dans les plagioclases et les feldspaths alcalins. Les microcristaux forment soit des granulations de bordure autour des plages de feldspaths alcalins (Fig. 22c), ou se rencontrent dans les interstices entre les gros cristaux de plagioclase et de feldspath alcalin, parfois ils forment des amas dans la matrice.

- **Feldspaths alcalins**

Les feldspaths alcalins (20-25 %) sont représentés par l'orthose autour duquel, s'observe une granulation de bordure à quartz (Fig. 22c). Ces cristaux de feldspath sont souvent déformés. Des sigmoïdes de feldspath observées forment parfois des associations fréquentes avec le quartz. La taille des cristaux varie de 0,5 x 0,3 mm à 1 x 1,5 mm. Dans certains cristaux de feldspaths, les inclusions de quartz, de plagioclase et de minéraux opaques sont fréquentes.

- **Plagioclase**

Le plagioclase (15-35 %) se trouve sous forme de plages ayant des tailles variant de 0,3 x 0,2 mm à 0,9 x 0,8 mm. La plupart des phénoblastes présentent des zones de déstabilisation en damourite, d'autre en muscovite. Ces plages forment parfois une association avec le quartz et la hornblende (Fig. 22d).

- **Amphibole**

L'amphibole (5-10 %) est pléochroïque dans les teintes brunes, verte ou bleue, avec d'importants clivages, la taille des cristaux varie entre 0,2 x 0,1 mm et 0,5 x 0,2 mm. L'amphibole se retrouve en interstice entre les phénoblastes de plagioclases et de feldspaths (Fig. 22d). D'autres forment localement une association avec les cristaux de quartz et de feldspath alcalin (Fig. 22e). Notons la présence d'un cristal en cours de transformation en chlorite dans l'échantillon Nk6 (Fig. 22f). Les phénoblastes sont à inclusion de quartz, tandis que certains microblastés sont associés aux feldspaths.

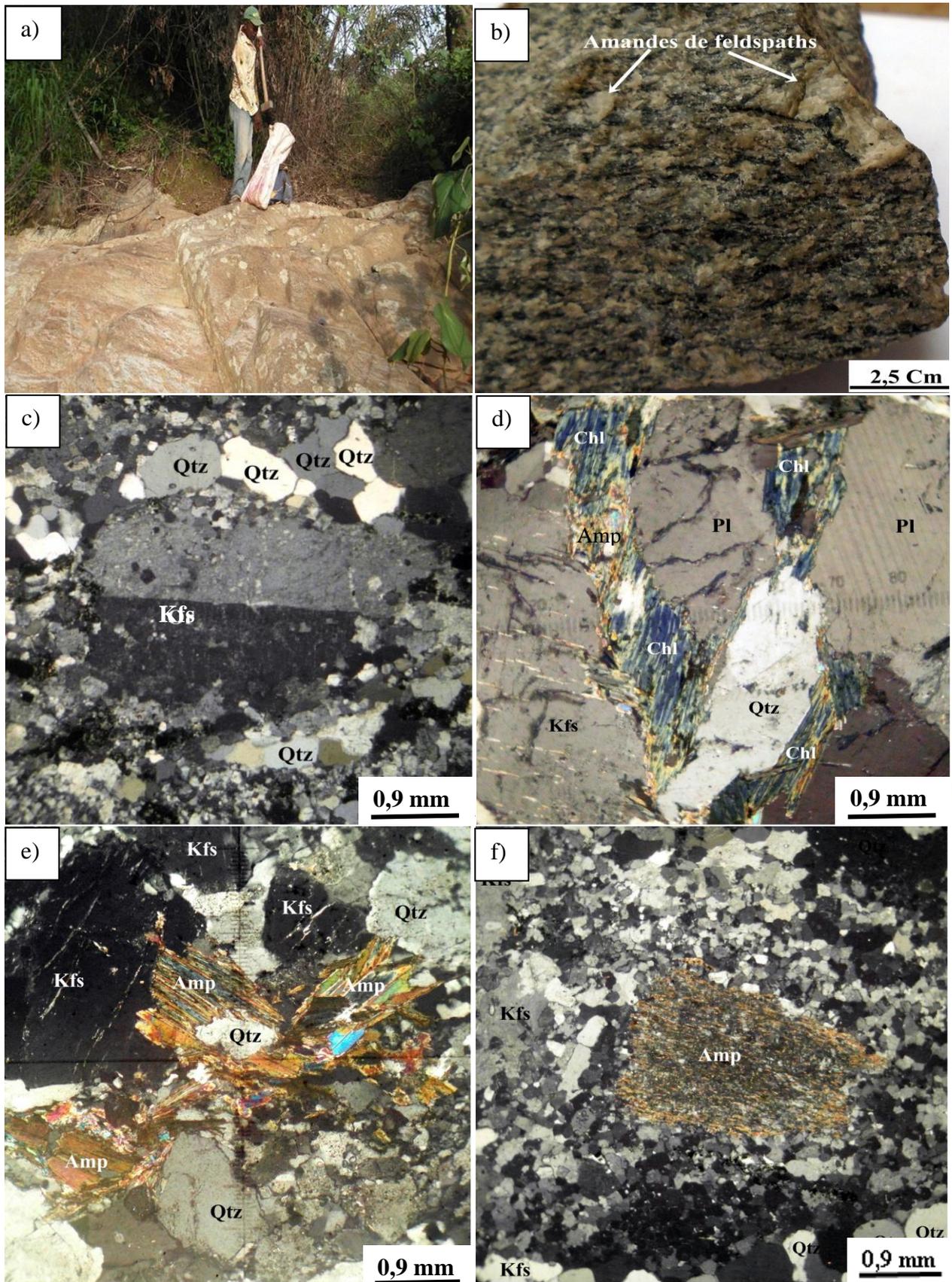


Figure 22. Photographies et microphotographies des gneiss à amphibole. **a)** Affleurement en dalle à Nkourom. **b)** Echantillon de gneiss à schistosité fruste. **c)** Granulation de quartz autour de l'orthose ; **d)** Association plagioclase-quartz et amphibole en cours d'altération en chlorite. **e)** Association des cristaux d'amphibole avec du quartz en inclusion et des plages de feldspath. **f)** Cristal d'amphibole en cours d'altération dans une matrice riche en cristaux de quartz et de feldspath.

- **Minéraux accessoires**

Zircon : le zircon est souvent en inclusion dans l'amphibole. Ce cristal présente parfois une couronne. L'on le trouve parfois inséré entre un feldspath et un quartz accolé.

Apatite : l'apatite se trouve en inclusion dans les minéraux.

Minéraux Opaques : ils constituent des granules ou microcristaux xénomorphes et généralement en inclusion dans la plupart des minéraux.

- **Minéraux secondaires**

Chlorite : c'est le minéral secondaire présent dans la roche, issu de la transformation de l'amphibole. Elle se trouve en interstice entre les plages de plagioclase (fig. 22d).

IV.1.1.2. Gneiss à biotite et amphibole

IV.1.1.2.1. Extension et caractères macroscopiques

Les gneiss à biotite et amphibole affleurent en dalles à Nkounden (Fig. 23a) dans le canton bororos en bordure du cours d'eau Mou. Ce faciès pétrographique affleure aussi en dalle à Didango (NK26x) derrière l'école publique dans le lit du cours d'eau Tam-Nchi. Dans les gneiss à biotite et amphibole s'observe des sigmoïdes de feldspath avec des extrémités étirés (Fig. 23b). Une orientation préférentielle des feldspaths et d'autres minéraux marquent la schistosité. Les gneiss à biotite et amphibole présentent des lits sombres (ferromagnésiens) et clairs avec des amandes de feldspaths et de quartz donnant à la roche une structure foliée.

IV.1.1.2.2. Étude microscopique

Au microscope, l'on observe une matrice riche en cristaux de quartz, des porphyroclastes de feldspaths, de petites sections riches en amphibole et biotite puis les minéraux opaques. Ce type lithologique présente une texture granoblastique hétérogranulaire.

- **Quartz**

Le quartz (25-30 %) se trouve sous forme d'individus polycristallins. Les phénocristaux sont rares comparés aux microcristaux très nombreux formant une matrice dans laquelle baignent les grands cristaux de feldspaths. Ces cristaux de quartz sont à extinction roulante. Leurs dimensions varient entre 0,3 x 0,2 mm et 0,8 x 0,6 mm. Les microcristaux de quartz forment des granulations de bordure autour des cristaux de feldspath alcalin. Certains cristaux de quartz s'associent à ceux d'amphibole pour former un lit à grain grossier entouré par les cristaux de même nature (Fig. 23c). Ce lit est en majorité constitué des cristaux de

quartz recristallisés. Ces cristaux forment une association avec les feldspaths alcalins. Les petits grains définissent un litage net qui confère à la roche un aspect lité.

- **Feldspaths alcalins**

Les feldspaths alcalins (30-35 %) sont représentés par l'orthose et le microcline. Les cristaux de feldspath sont xénomorphes pour la plupart. Ces feldspaths présentent deux aspects : de cristaux très développés (sigmoïdes) ou peu développés en association avec le quartz et la hornblende. Les sigmoïdes de feldspaths sont accolés aux cristaux de quartz. Certains présentent des macles mécaniques. Autour des phénocristaux se forme une granulation de bordure (Fig. 23d). Les tailles des cristaux atteignent parfois 1,7 x 0,9 mm pour les microclines (Fig. 23e) et 1,2 x 0,4 mm pour l'orthose. La taille moyenne des micrograins se situe autour de 0,2 x 0,1 mm. Dans certains cristaux, les inclusions de quartz, de plagioclase et de minéraux opaques sont fréquentes.

- **Amphibole**

L'amphibole (20-25 %) observé, est constituée de phénocristaux montrant des clivages, pléochroïque dans les tons brun-rougeâtre en cours de destabilisation (Fig. 23f). Elle se présente en sections xénomorphes de dimensions pouvant atteindre 0,4 x 0,2 mm (Fig. 23c). Ces cristaux forment des associations avec le quartz et les feldspath alcalins. De nombreux cristaux d'amphibole montrent des transformations en chlorite et en oxydes (Fig. 23g).

- **Biotite**

La biotite (5-10 %) est le minéral ferromagnésien le moins abondant. Elle se présente en lamelles ou en paillettes souvent déchiquetées (Fig. 23h) de dimensions variant de 0,5 x 0,2 mm à 0,2 x 0,2 mm. Ces lamelles sont moulées par des cristaux broyés de quartz et feldspath alcalin. Dans la matrice la biotite se transforme en chlorites et en oxydes.

- **Minéraux accessoires**

Zircon : il se présente en forme de cristaux à auréole généralement pléochroïque (Fig. 23d) et se trouve en inclusion dans les lamelles de biotite.

Minéraux opaques : Ce sont des granules ou microcristaux xénomorphes et généralement en inclusion dans la plupart des minéraux.

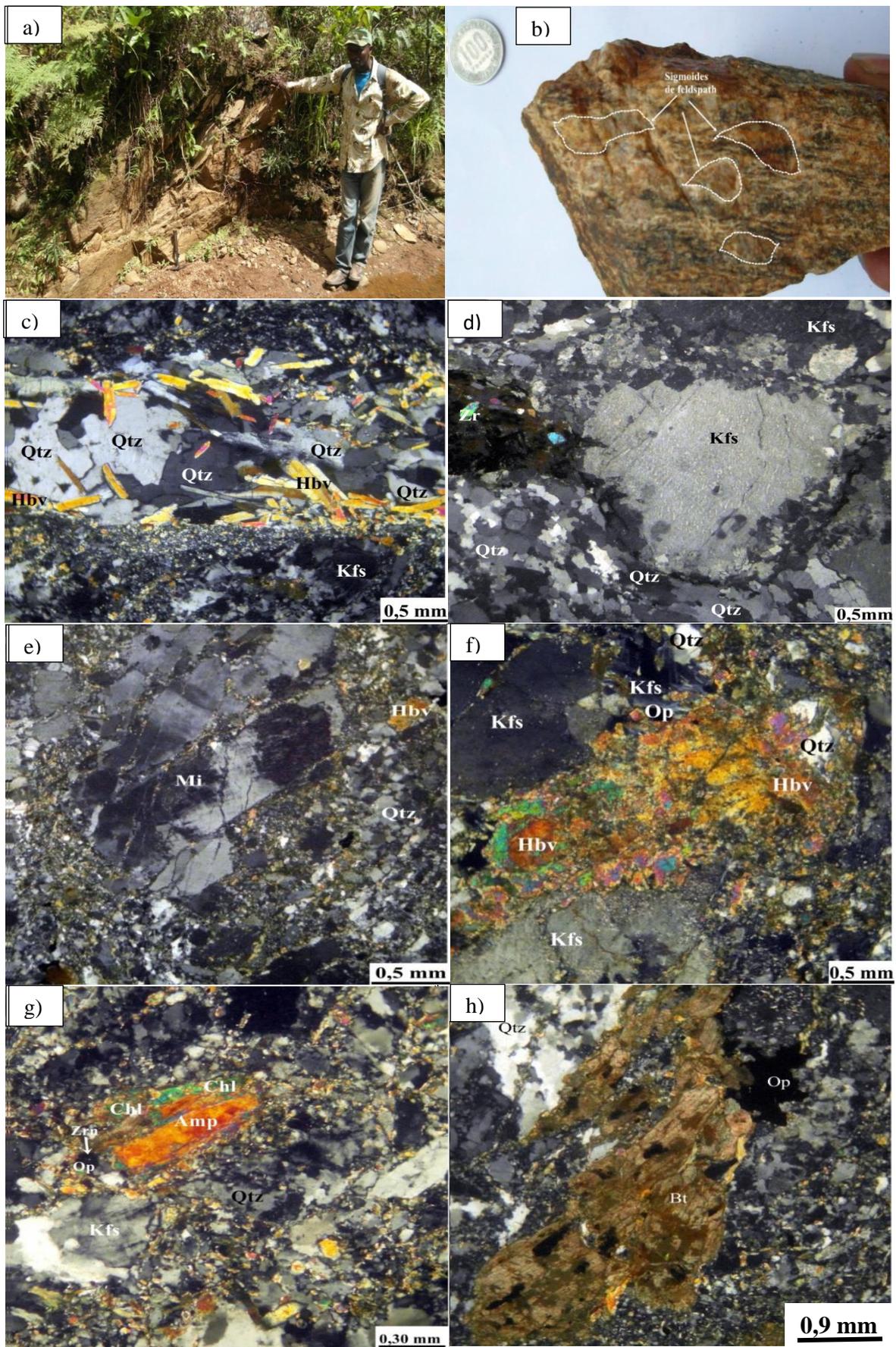


Figure 23. Photographies et microphotographies de gneiss à biotite et amphibole. **a)** Affleurement en dôme à Nkounden. **b)** Litage compositionnel et sigmoïdes. **c)** Association de cristaux de quartz en filon mêlée à des lamelles d'amphibole. **d)** Granulations de bordure autour d'un cristal de feldspath. **e)** Microcline déformé et fracturé. **f)** Association de hornblende broyé et de feldspath alcalin fissuré. **g)** Cristal d'amphibole en cours de chloritisation montrant un oxyde au sein duquel un zircon. **h)** Inclusions d'oxydes dans la biotite.

- **Minéraux secondaires**

Chlorite : elle se forme aux dépens de la biotite en cours d'altération par le processus de chloritisation.

IV.1.2. Amphibolites

IV.1.2.1. Extension et caractères macroscopiques

Les amphibolites affleurent en poches dans les gneiss à biotite et amphibole près du lit d'un ruisseau derrière le Lycée Bilingue de Nkourom. Ces enclaves sont de forme subarrondie et de taille d'environ 1,5 m de diamètre. Les amphibolites sont des roches de couleur gris verdâtre (Fig. 24a).

IV.1.2.2. Étude microscopique

Au microscope, l'on observe des amandes polycristallines de feldspaths isolés dans une trame à cristaux d'amphibole dominante. La texture de la roche est granolépido-nematoblastique. Elle est composée des minéraux tels que : quartz, feldspath alcalin, amphibole, biotite, plagioclase, zircon et minéraux opaques.

❖ Amphibole

L'amphibole (43 %) est le minéral ferromagnésien le plus abondant dans la roche. Elle se présente sous forme de prismes xénomorphes avec des tailles variant de 0,7 x 0,5 mm pour les grands cristaux à 0,2 x 0,1 mm pour les microcristaux. Les cristaux allongés d'amphiboles sont disposés les uns sur les autres montrant un enchevetrement (Fig. 24b). Ces cristaux sont allongés, éparpillés dans la roche et s'associent à la biotite pour former des lits ferromagnésiens discontinus. Les sections basales d'amphibole forment des associations avec la biotite, le plagioclase et le feldspath alcalin.

- **Biotite**

La biotite (25 %) est le second minéral ferromagnésien de la roche. Elle se présente sous forme de paillettes (Figs. 24b et c). Les dimensions varient de 0,5 x 0,2 mm à 0,2 x 0,1 mm. Certaines paillettes de biotite renferment des inclusions de zircons. L'on trouve dans la roche de nombreuses lamelles en cours de transformation en chlorite. Les porphyroblastes de quartz et de feldspath alcalin sont moulés par les lamelles de biotite.

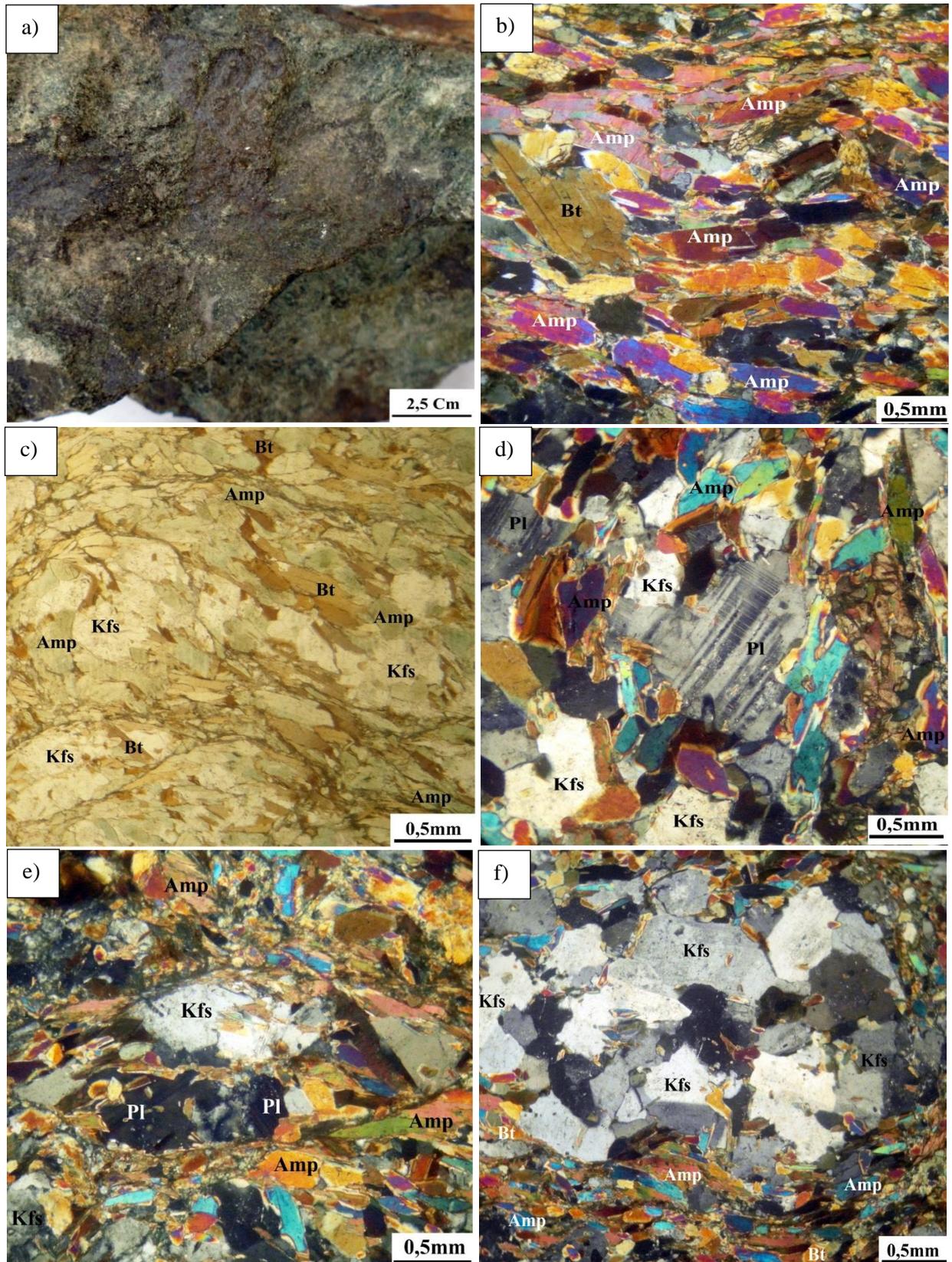


Figure 24. Photographie et microphotographies de l'amphibolite : **a)** Echantillon sain d'amphibolite. **b)** Paillette de biotite insérée entre les lamelles d'amphiboles montrant une orientation préférentielle. **c)** Association de cristaux de feldspaths avec les lamelles d'amphibole et de biotite vue en L P. **d)** Microporphyroblaste de plagioclase dans une trame à amphibole dominant **e)** Amande de feldspath associée aux lamelles d'amphibole. **f)** Amandes polycristallins de feldspath potassique isolées dans une trame fine à amphibole dominant.

- **Plagioclase**

Le plagioclase (20 %) se présente sous forme de cristaux xénomorphes dont les dimensions varient de 0,8 x 0,6 mm à 0,3 x 0,2 mm. Certains cristaux montrent une altération le long des clivages et sont moulés par la matrice (Fig. 24d). Sur certaines sections, se développent des bourgeons et sur d'autres des inclusions de feldspath et de minéraux opaques.

- **Feldspath alcalin**

Le feldspath alcalin (< 5 %) est l'orthose. Il apparaît sous forme de plages par endroits microfissurées. Les dimensions varient de 1,3 x 0,5 mm pour les plus développés à 0,2 x 0,1 mm pour les moins développés. Ces cristaux renferment des inclusions de quartz, de plagioclase, de biotite, de hornblende verte et de minéraux opaques. Dans la lame mince de roche, on observe de rares amandes de feldspath en association avec le plagioclase et la hornblende (Fig. 24e). Notons aussi la présence de l'association de porphyroblastes de feldspath alcalin avec du quartz dans une matrice riche en amphibole et biotite (Fig. 24f).

- **Quartz**

Le quartz (4 %) se présente sous forme de cristaux arrondis à subarrondis et épars dans la roche, de dimensions 1 x 0,6 mm à 0,3 x 0,2 mm, à extinction roulante. Les cristaux de quartz occupent généralement les interstices entre les minéraux ferromagnésiens de la roche et se retrouvent quelques fois en inclusion dans les paillettes de biotite et les prismes d'amphibole

Les minéraux opaques (<1%) sont associés aux minéraux primaires présents dans la roche.

Chlorite : elle se forme aux dépens de la biotite en cours d'altération.

IV.2. Roches volcaniques

IV.2.1. Basaltes

L'étude pétrographique des basaltes du secteur d'étude indique la présence des basaltes de plateau, des basaltes de massif et des basaltes filoniens. Les basaltes de Nkogam sont des laves gris-sombre à noires, massives et compactes présentant plusieurs modes d'affleurement en fonction du site d'observation.

IV.2.1.1. Basaltes de plateau

IV.2.1.1.1. Extension et caractères macroscopiques

Les basaltes de plateau du secteur d'étude affleurent en blocs à l'Ouest de la ville de Koutaba (Fig. 25a) et dans la carrière de Koumelap exploitée par la société libanaise "Gravexo". Dans cette carrière, nous distinguons la présence des blocs prismatiques de basaltes. Une dalle de basalte affleure dans le lit de la rivière Mou à Nkounden. Des blocs de basalte sont aussi identifiés à Koupamenke (Fig. 25b). Ces basaltes contiennent par endroits des enclaves de socle. Les affleurements en boules riches en phénocristaux de plagioclase sont observés à Nkoutoukouop (Fig. 25c) proche du lit du cours d'eau Mfù (NK36). De couleur gris foncé, ces basaltes ont des minéraux dont la taille varie de 0,1 x 0,5 mm pour les microcristaux et 0,5 x 2 mm pour les phénocristaux de plagioclases. Certains cristaux de plagioclase sont recoupés par des filonnets remplis de produits bruns. En fonction de la taille des minéraux, on distingue les basaltes porphyriques et les basaltes aphyriques

IV.2.1.1.2. Étude microscopique

Au microscope, l'observation des échantillons de laves basaltiques de plateau, a permis de distinguer deux types de basaltes : Les basaltes à phénocristaux d'olivine et de clinopyroxène, les basaltes à phénocristaux de plagioclase. Leur composition minéralogique est homogène : clinopyroxène, olivine, plagioclase et minéraux opaques. La mésostase est en majorité constituée des microlites de plagioclases ; on y trouve aussi de microcristaux d'olivine, de clinopyroxène et du verre. Ce sont des roches à texture microlitique porphyrique.

IV.2.1.1.2.1. Basaltes à olivine et clinopyroxène

On peut les subdiviser en deux en fonction de la composition minéralogique : les basaltes porphyriques à olivine et clinopyroxène et les basaltes aphyriques.

❖ Basaltes porphyriques à olivine et clinopyroxène

Les phénocristaux sont surtout ceux d'olivine et de clinopyroxène, avec parfois de rare plagioclase. Les microcristaux de plagioclase, clinopyroxène et olivine prédominent dans la mésostase. Cette mésostase de teinte grisâtre est souvent finement cristallisée. La mésostase contient aussi des cristaux d'oxydes opaques.

- **Olivine**

Les phénocristaux d'olivine (4-6 %) sont subautomorphes, craquelés (Fig. 25d) et de taille d'environ 0,3 x 0,4 mm. Un phénocristal d'olivine est isolé dans la mésostase. D'autres microphénocristaux sont moulés par un cristal subautomorphe de clinopyroxène (Fig. 25e).

Des cristaux d'olivine et de minéraux opaques sont en inclusions dans le clinopyroxène. L'altération de l'olivine en iddingsite se fait des bordures vers le cœur et suivant les craquelures. Lorsque cette destabilisation n'est pas complète, elle laisse souvent en place une structure altérée contenant une relique d'olivine. Les microcristaux d'olivine (0,04 - 0,06 mm de diamètre) se trouvent souvent en inclusion dans le plagioclase.

- **Clinopyroxène**

Les phénocristaux de clinopyroxène (6-10 %) sont en sections généralement subautomorphes et grossièrement rectangulaires mesurant au plus 0,6 x 0,4 mm. De nombreux phénocristaux sont altérés. Des phénocristaux de clinopyroxène en cours d'altération intercalent un cristal sain. Ce cristal sain de clinopyroxène est zoné et présente une macle en sablier (Fig. 26a). Par ailleurs certains phénocristaux de clinopyroxène zoné à cœur très épais sont intenses resorbés par la mésostase (Fig. 26b). D'autres cristaux sont zonés avec un cœur riche en inclusion de produit brun rougeâtre (Fig. 26c). Les minéraux opaques en inclusions dans les clinopyroxènes s'observent par endroits. Cette disposition minéralogique (Fig. 25e) montre que les cristaux d'olivine ont cristallisé en premier, suivie du clinopyroxène.

- **Plagioclase**

Les phénocristaux de plagioclase (2-5 %) sont subautomorphes (Fig. 25d et e) avec des tailles comprises entre 0,2 x 0,3 et 0,6 x 0,7 mm. Notons la présence d'un phénocristal de plagioclase montrant la macle polysynthétique dans la mésostase (Fig. 25d). Beaucoup de cristaux de plagioclase sont légèrement zonés. Ces cristaux de plagioclase sont résorbés et même noyés dans la mésostase.

- **Mésostase**

La mésostase (78 %), microcristalline est la fraction la plus abondante des basaltes porphyriques. Elle contient les mêmes minéraux que la phase phénocristalline.

Les plagioclases sont abondants (54 %). Les microlites mesurent 0,20 x 0,05 mm. Ils moulent les phénocristaux de ferromagnésiens et soulignent parfois la fluidalité magmatique.

L'olivine (6,8 %) est sous forme de granules d'environ 0,2 mm de diamètre, dispersés dans la mésostase.

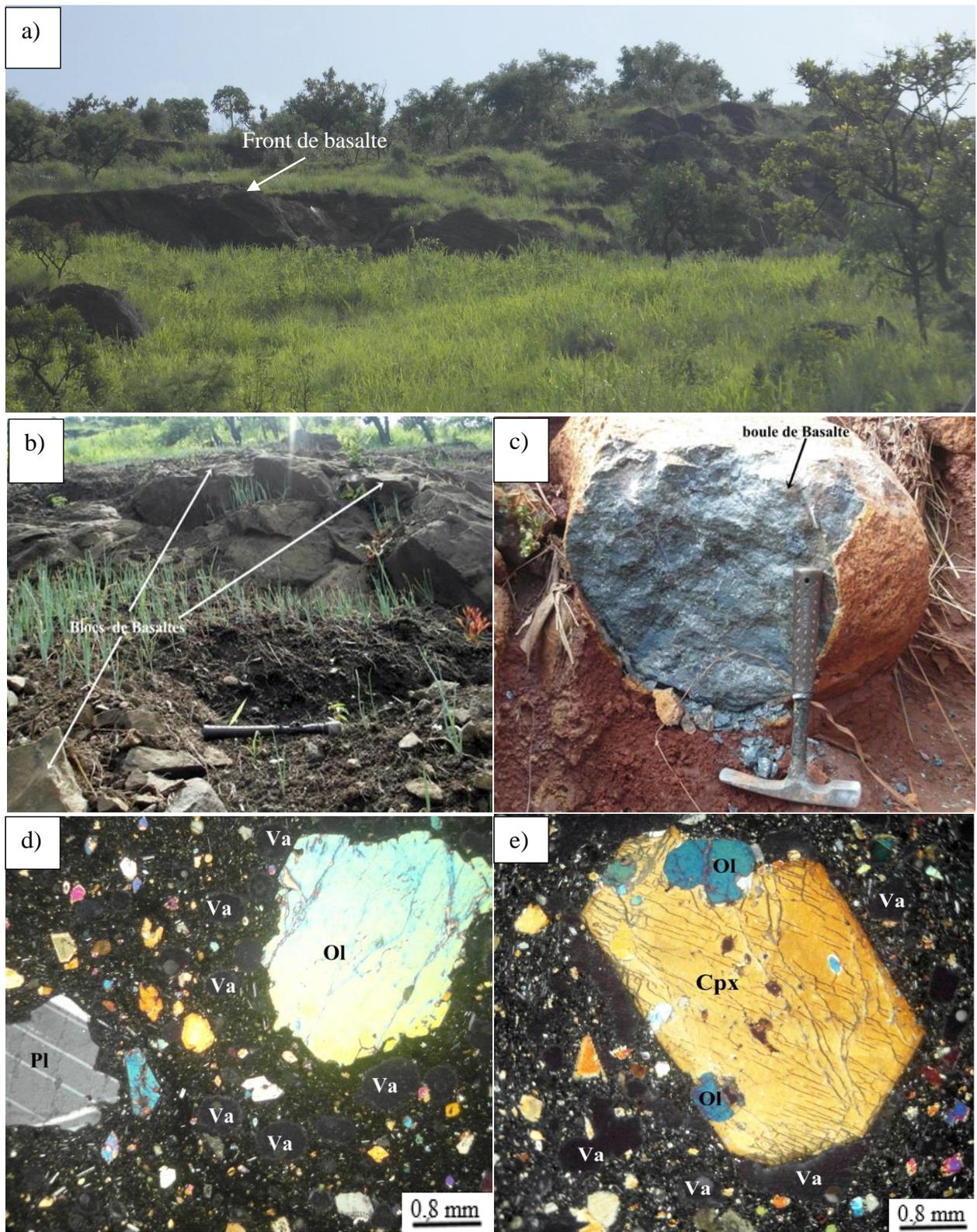


Figure 25. Photographies et microphotographies des basaltes de plateau. **a)** Vue panoramique d'une coulée de basalte à Koutaba. **b)** Blocs à Koupamenke. **c)** Boules à Nkoutoukoup. **d)** Phénocristaux d'olivine et de plagioclase dans une mésostase riche en verre (éch. Nk 28). **e)** Cristal de clinopyroxène montrant des cristaux d'olivine moulés (éch. Nk 1).

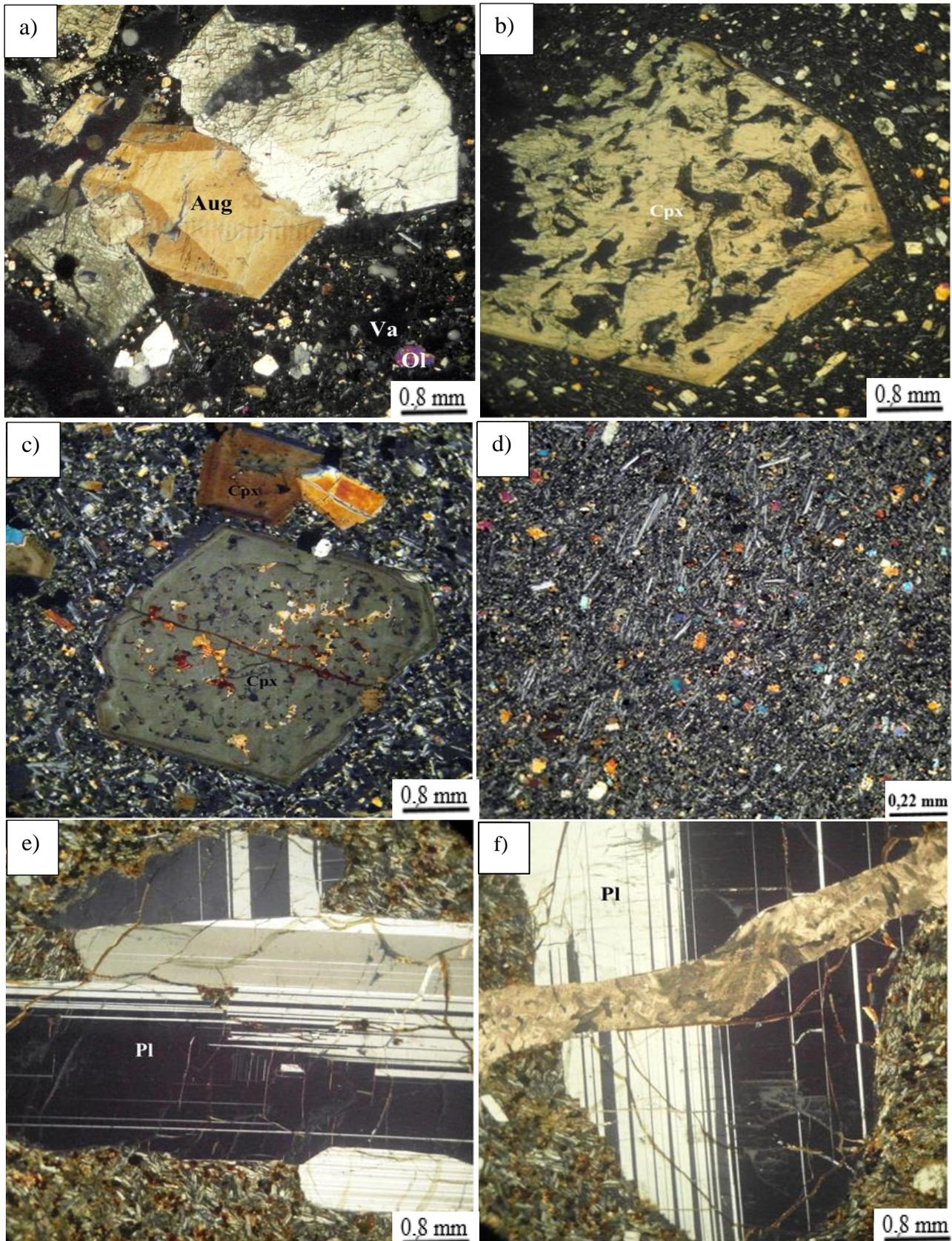


Figure 26. Microphotographies des basaltes de plateau. **a)** Cristal de clinopyroxène sain a macle en sablier intercalant deux cristaux altérés. **b)** phénocristal de clinopyroxène zoné à cœur très épais et intensesment resorbé par la mésostase (éch. Nk27). **c)** phénocristal de clinopyroxène zoné à cœur riche en inclusions (éch. Nk 22). **d)** Texture microlitique aphyrique. **e)** Plagioclase craquelé accolé à leur congénère formant une association des macles perpendiculaires. **f)** Phénocristal de plagioclase recoupé par une microfracture remplie par un produit brun et à multiples craquelures.

Le clinopyroxène (3,5 %) se présente sous forme de microcristaux de 0,04 à 0,2 mm de long ou en petits grains ($\leq 0,2$ mm) souvent difficiles à distinguer de l'olivine.

Les minéraux opaques (1 à 3 %) sont disséminés dans la mésostase et en inclusions dans les autres minéraux (olivine, clinopyroxène et plagioclase). Les sections sont automorphes dans quelques cas, mais elles se présentent aussi en grains amiboïdes ou arrondis dans la mésostase. Les dimensions atteignent 0,4 mm pour les plus développés. Le verre (5 %) est de couleur brun-clair à brun sombre formant de petites plages.

❖ **Basaltes aphyriques à olivine et clinopyroxène**

Les basaltes aphyriques (Fig. 26d) représentent environ 57 % des basaltes de plateau étudiés. Les phénocristaux sont ceux de plagioclase. Les microlites de plagioclase, clinopyroxène, olivine prédominent dans la mésostase. La mésostase contient aussi des cristaux de minéraux opaques et du verre volcanique.

- **Plagioclase (52-60 %)**

Dans la roche l'on note la présence de rares phénocristaux de plagioclases zonés. Ces phénocristaux de plagioclase sont contenus dans une mésostase de couleur brun-grisâtre. Les microlites présentant la macle d'albite sont disséminés dans du verre volcanique. Ces microlites sont de fins cristaux allongés avec des tailles de l'ordre de 0,20 x 0,05 mm.

- **Clinopyroxène (8-10 %)**

Dans la mésostase l'on observe des microcristaux de clinopyroxène disséminés entre les microlites de plagioclases. Leur taille est comprise entre 0,05 et 0,02 mm.

- **Olivine (6-8 %)**

Les microcristaux d'olivine sont aussi disséminés entre les microlites de plagioclase. Leur taille est comprise entre 0,05 et 0,02 mm. Ils s'altèrent en produit brun.

Minéraux opaques (1-2 %)

Les microcristaux d'oxydes sont disséminés dans la mésostase, tandis que d'autres sont en inclusion dans les cristaux de clinopyroxène.

- **Verre (19-22 %)**

Le verre est abondant, de couleur brun clair à sombre. Dans cette masse vitreuse s'y retrouve parfois des enclaves de socles montrant une couronne de séparation entre elles et la mésostase.

L'observation microscopique des minéraux des basaltes à olivine et clinopyroxène suggère deux phases de cristallisation : une première phase caractérisée par l'apparition des phénocristaux d'olivine, de clinopyroxène et de plagioclase ; une deuxième phase représentée par les microcristaux d'olivine, de clinopyroxène, de plagioclase et des minéraux opaques.

IV.2.1.1.2.2. Basaltes à phénocristaux de plagioclases

Les basaltes à phénocristaux de plagioclases représentent environ 7 % des basaltes de plateau. Ils ont une structure fluidale, soulignée par l'orientation des microlites de plagioclase suivant la fluidalité linéaire. Le plagioclase est noyé dans du verre volcanique.

- **Olivine (1 %)**

Les phénocristaux d'olivine (1 %) sont subautomorphes, craquelés et de taille moyenne d'environ 1 x 0,5 mm. Ils renferment des inclusions des minéraux opaques. L'altération de l'olivine se fait des bordures vers le cœur et parfois, suivant les craquelures.

- **Plagioclases (13 %)**

Les phénocristaux (5,5 x 2,5 mm) de plagioclases sont subautomorphes. Ils montrent des bordures accolées à leurs congénères. Ces cristaux présentent des macles polysynthétiques et des craquelures irrégulières (Fig. 26e). L'on rencontre des cristaux de plagioclase recoupés par des microfissures d'épaisseur d'environ 0,1 mm remplies par la mésostase (Fig. 26f). Le microfilon qui recoupe ce phénocristal de plagioclase montre un déplacement des macles. Il s'agit d'une microfaille.

- **Mésostase (76 %)**

La mésostase microcristalline contient en plus des minéraux opaques, les mêmes minéraux que la phase phénocristalline.

Les microlites de plagioclase (58 %) occupent l'essentiel de la mésostase. Leur taille est d'environ 0,20 x 0,05 mm. Ces microlites de plagioclase sont souvent allongés suivant une fluidalité directionnelle vraisemblablement en rapport avec le sens d'écoulement de la lave.

L'olivine (6 %) est dispersée dans la mésostase sous forme de cristaux arrondis d'environ 0,2 mm de diamètre.

Le clinopyroxène (2 %) se présente sous forme de microcristaux de 0,2 mm de long ou en petits grains ($\leq 0,2$ mm).

Les oxydes (1 à 2 %) sont disséminés dans la mésostase et en inclusions dans certains cristaux (olivine, clinopyroxène et plagioclase). Les plus développés atteignent 0,4 mm.

Le verre (14 %) de couleur brun-clair à brun sombre moule l'ensemble de microlites et microcristaux.

IV.2.1.2. Basaltes de massif

IV.2.1.2.1. Extension et caractères macroscopiques

Les basaltes de massif affleurent dans les localités de Nkounden, Ngbawarem, Didango et Nkoupamenké. À Nkounden ils affleurent en dômes (Fig. 27a) dans le quartier Bororos dans les granites à amphibole et biotite derrière l'École d'Agriculture et d'Élevage de cette localité. À Ngbawarem, l'on note la présence d'un dôme de basalte qui surmonte une dalle d'ignimbrite (Fig. 27b). À Didango et Nkoupamenké, ces basaltes forment un chaînon continu en dômes avec une extrémité courbe (Fig. 27c). Au sommet de ce massif, les parties érodées affichent des fentes de tension (Fig. 27d). Ce sont des roches noires et denses constituées de cristaux allongés de taille variée. De nombreux blocs de basalte affleurent au champ de Tir à Nkoumelap (BK).

IV.2.1.2.2. Etude microscopique

Au microscope, les phénocristaux sont constitués de clinopyroxène, d'olivine, de plagioclase et de minéraux opaques. La mésostase est finement cristallisée et constituée de microlites de plagioclase, de microcristaux d'olivine et de minéraux opaques. Ces roches pour la plupart ont une structure fluidale marquée par l'orientation préférentielle de microlites. En dehors des échantillons B2 et NK25 qui présentent une texture aphyrique, d'autres présentent la texture microlitique porphyrique avec des cristaux de taille comprise entre 1x1mm et 2 x 3 mm.

❖ Basaltes porphyriques

Les basaltes porphyriques examinés présentent des phénocristaux qui représentent environ 17 % des roches étudiées. Les phénocristaux sont ceux de plagioclase et de clinopyroxène. Les microlites de plagioclase et clinopyroxène prédominent dans la matrice.

- **Plagioclase (8-10 %)**

Les phénocristaux de plagioclase sont isolés les uns des autres. Subautomorphes et de taille moyenne d'environ 1 x 3 mm (Fig. 27e), ils sont facilement reconnaissables grâce à leurs macles polysynthétiques fines et régulières. Ces phénocristaux de plagioclase sont noyés dans la mésostase. Ils renferment en inclusion des cristaux d'oxydes. Notons la présence des microcristaux de clinopyroxène en inclusion dans une baguette de plagioclase. Le plagioclase s'altère en damourite et séricite.

- **Clinopyroxène (3-6 %)**

Le clinopyroxène se présente en phénocristaux subautomorphes disséminés dans la roche. Il se trouve en sections losangiques et hexagonales de taille d'environ 0,8 x 0,5 mm dans la mésostase (Fig. 27f). Le phénocristal de clinopyroxène baigne dans une mésostase riche en microlites de plagioclase.

- **Minéraux opaques (1-2 %)**

Les minéraux opaques sont disséminés dans la mésostase. D'autres sont en inclusion dans les cristaux de plagioclase et de clinopyroxène.

Mésostase (88 %)

La mésostase contient presque les mêmes minéraux que la phase phénocristalline. Les microlites de plagioclase d'environ 0,01 x 0,2 mm sont plus abondant (60,2 %). Ils moulent les autres phénocristaux et se disposent dans le sens de l'écoulement de la lave (Fig. 27g). Le clinopyroxène (3 %) est en cristaux de taille d'environ 0,04 x 0,02 mm et les oxydes (1,8 %) sont disséminés dans la mésostase. Le verre (15 %) de couleur brun-clair à brun sombre forme de petites plages.

❖ Basaltes aphyriques

Les basaltes aphyriques représentent environ 83 % des roches étudiées.

- **Plagioclases (66-68 %)**

Les microlites de plagioclase sont superposés les uns sur les autres. Ils sont maclés albite et disséminés dans du verre volcanique.

- **Clinopyroxène (12-14 %)**

Les microcristaux de clinopyroxène sont de petite taille (0,05 mm) disséminés dans la roche.

- **Olivine (2-4 %)**

L'olivine se présente en microcristaux arrondis d'environ 0,02 mm de diamètre. L'on trouve certains microcristaux en inclusion dans des baguettes de plagioclase. Ces observations sont faites dans l'échantillon (Nk 54).

- **Autres minéraux**

Les minéraux opaques (1,8 %)

Les minéraux opaques (1,8 %) sont disséminés dans la roche et parfois en inclusion dans le plagioclase.

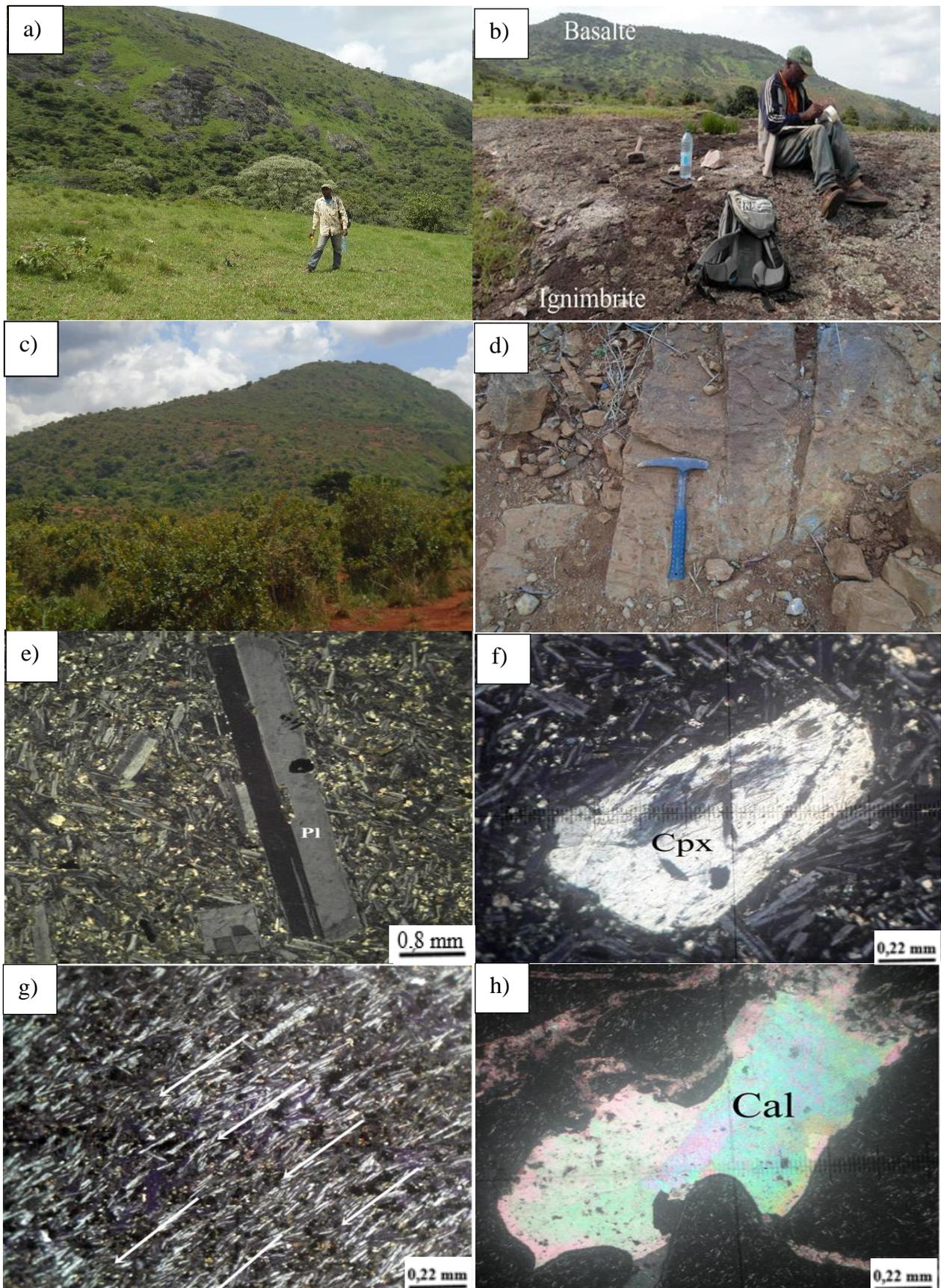


Figure 27. Photographies et microphotographies des basaltes de massif. **a)** affleurement en dôme à Nkounden. **b)** Affleurement en dôme de basalte montrant un contact avec une dalle d'ignimbrites à Ngbawarem. **c)** Affleurement en dôme de basalte en forme de courbe à Nkoupamenké. **d)** fentes de tension sur les basaltes au sommet du massif. **e)** Latte de plagioclase baignant dans la mésostase B2. **f)** phénocrystal de clinopyroxène baignant dans une matrice riche en microlites de plagioclase. **g)** texture microlitique aphyrique et fluidale présentant des microlites de plagioclases orientés et de micrograins de clinopyroxènes dans une mésostase (les flèches indiquent la direction de la fluidalité) (éch. Nk 37). **h)** Plage de calcite dans une mésostase riche en microlite de plagioclase.

La calcite (1-2 %) est secondaire et résulte de la transformation des microlites de plagioclase (Fig. 27h) dans la mésostase.

Le verre (19-22%) est interstitiel, de couleur brun clair à sombre.

Les basaltes de massif en lame mince offrent deux phases de cristallisation : la première phase est caractérisée par l'apparition des phénocristaux de clinopyroxène et de plagioclase ; la deuxième phase représentée par les microcristaux de pyroxènes et de nombreux microlites de plagioclases.

IV.2.1.3. Basaltes filoniens

IV.2.1.3.1. Extension et caractères macroscopiques

Les filons de basalte d'épaisseurs centimétriques à métriques se trouvent en intrusion dans le socle gneissique à Didango près de l'école publique (Fig. 28a et b). L'on observe des filons de basalte qui recoupent une bande d'ignimbrites à Nkoupamenké (Fig. 28c). Ces filons forment des contacts francs avec leurs encaissants. La différence entre les types pétrographiques se fait à travers la couleur et le mode d'agencement des minéraux. À l'œil nu, les filons observés sont des roches de couleur grise à noire avec des cristaux de plagioclase, de pyroxène et même d'oxyde.

IV.2.1.3.2. Étude microscopique

Les filons de basaltes présentent une texture à tendance subophitique (Fig. 28d) car les cristaux de clinopyroxène sont moulés par des cristaux de plagioclase. Les phénocristaux sont de rares baguettes plus ou moins jointives de plagioclases et de clinopyroxènes. Ils sont noyés dans une mésostase composée de microlites de plagioclase et microcristaux de clinopyroxène, de minéraux opaques et de verre.

- **Plagioclase**

Les phénocristaux (0,4 x 2,5 mm) occupent 12 % de la roche et se présentent en sections xénomorphes et renferment parfois de minéraux opaques. Certains cristaux de plagioclase présentent un aspect broyé (Fig. 28e). Dans la mésostase, les plagioclases sont en petites baguettes de dimensions inférieures à 0,06 x 0,1 mm.

- **Clinopyroxène**

Les clinopyroxènes apparaissent sous forme de microphénocristaux et microcristaux. Ces cristaux de clinopyroxène sont xénomorphes à subautomorphes, et riches en inclusions d'oxydes. Leurs tailles varient de 0,2 x 0,1 mm à 0,5 x 0,8 mm. Notons la présence des

cristaux de clinopyroxène allongé moulés par des cristaux de plagioclase (Fig. 28f). Ils sont souvent maclés albite et craquelés. Certains cristaux de clinopyroxène se transforment en amphibole (ouralitisation) et d'autres en minéraux opaques.

- **Mésostase**

Dans la mésostase, les microlites de plagioclase abondent (30 %) en baguettes fines et présentent les macles de l'albite. D'autres de dimension d'environ 0,1 x 0,03 mm montrent des orientations diverses. Les cristaux de clinopyroxène (25 %), ont des diamètres inférieurs à 0,3 mm. Les minéraux opaques (1,2 %) sont en granules disséminés dans la mésostase et en inclusion dans le plagioclase.

IV.2.1.5. Enclaves

Les enclaves observées dans les basaltes sont en majorité celles des roches plutoniques. Elles sont arrondies (Fig. 29a) et sont constituées de cristaux fins à moyens leur conférant ainsi une texture microgrenue. Ce pendant l'on note la présence des enclaves énallogènes (fragments arrachés au socle) qui sont des fragments millimétriques à centimétriques du socle panafricain, des xénoclastes de quartz et d'orthose.

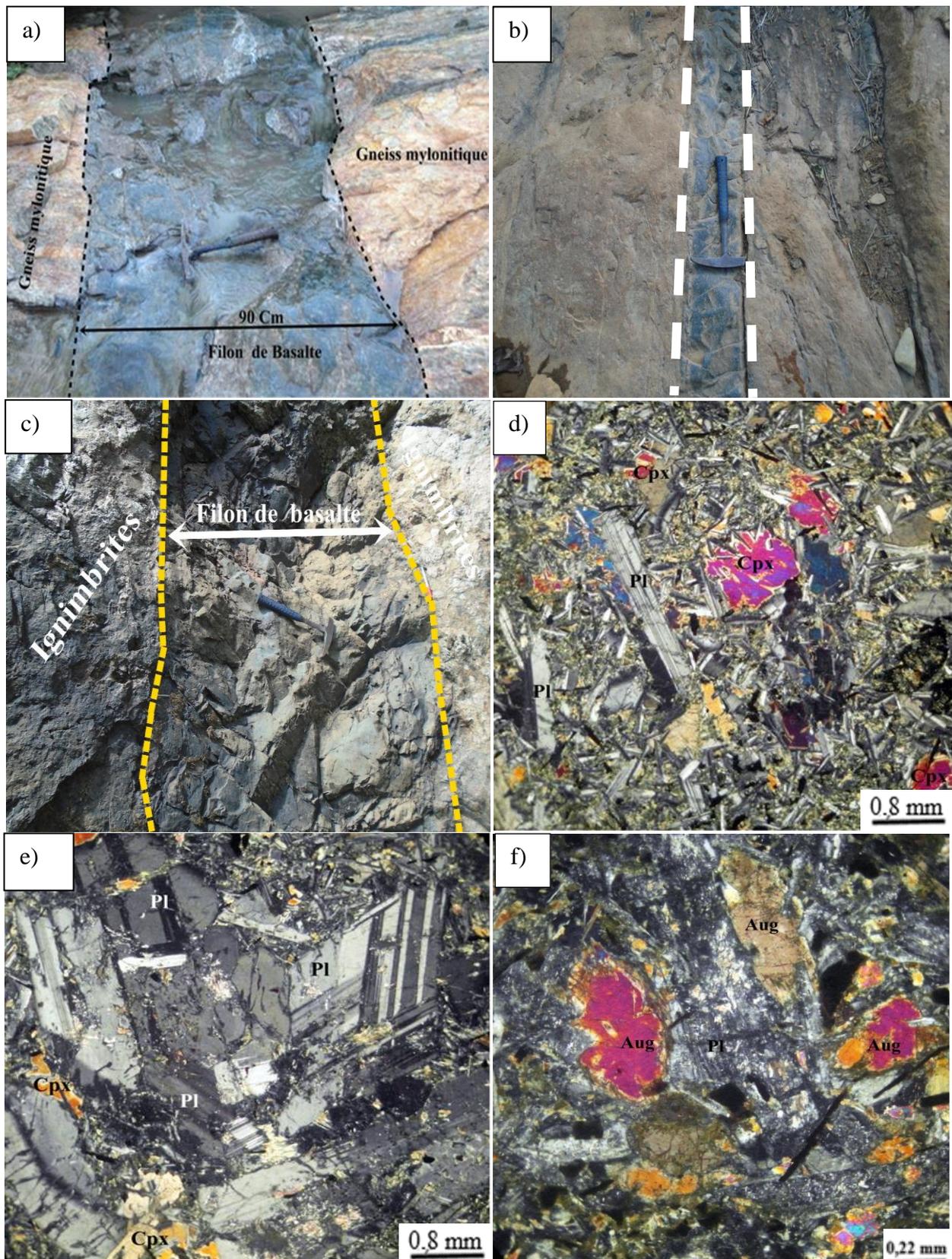


Figure 28. Photographies et microphotographies des filons de basaltes. **a-b)** filons de basalte recoupant le socle gneissique à Didango. **c)** filon de basalte recoupant les ignimbrites à Nkoupamenké. **d)** Texture sub ophitique montrant de cristaux de clinopyroxène moulé par des cristaux de plagioclase (éch. Nk 25). **e)** Association de cristaux de plagioclase et de clinopyroxène souvent broyés. **f)** poches de clinopyroxène dans des plages de plagioclase (éch. Nk26).

IV.2.1.5.1. Enclaves de granites

Ces enclaves ont une forme ovoïde, présente dans les basaltes aphyriques, nettement observable au microscope dans les basaltes de plateau (Fig. 29a). Elles présentent une texture grenue porphyroïde avec une association minéralogique constituée de : quartz, plagioclase, orthose, clinopyroxène et accessoirement d'oxydes. Le plagioclase, le clinopyroxène et le feldspath alcalin forment un amas glomérporphyrique entouré d'un liseré brun (Fig. 29b).

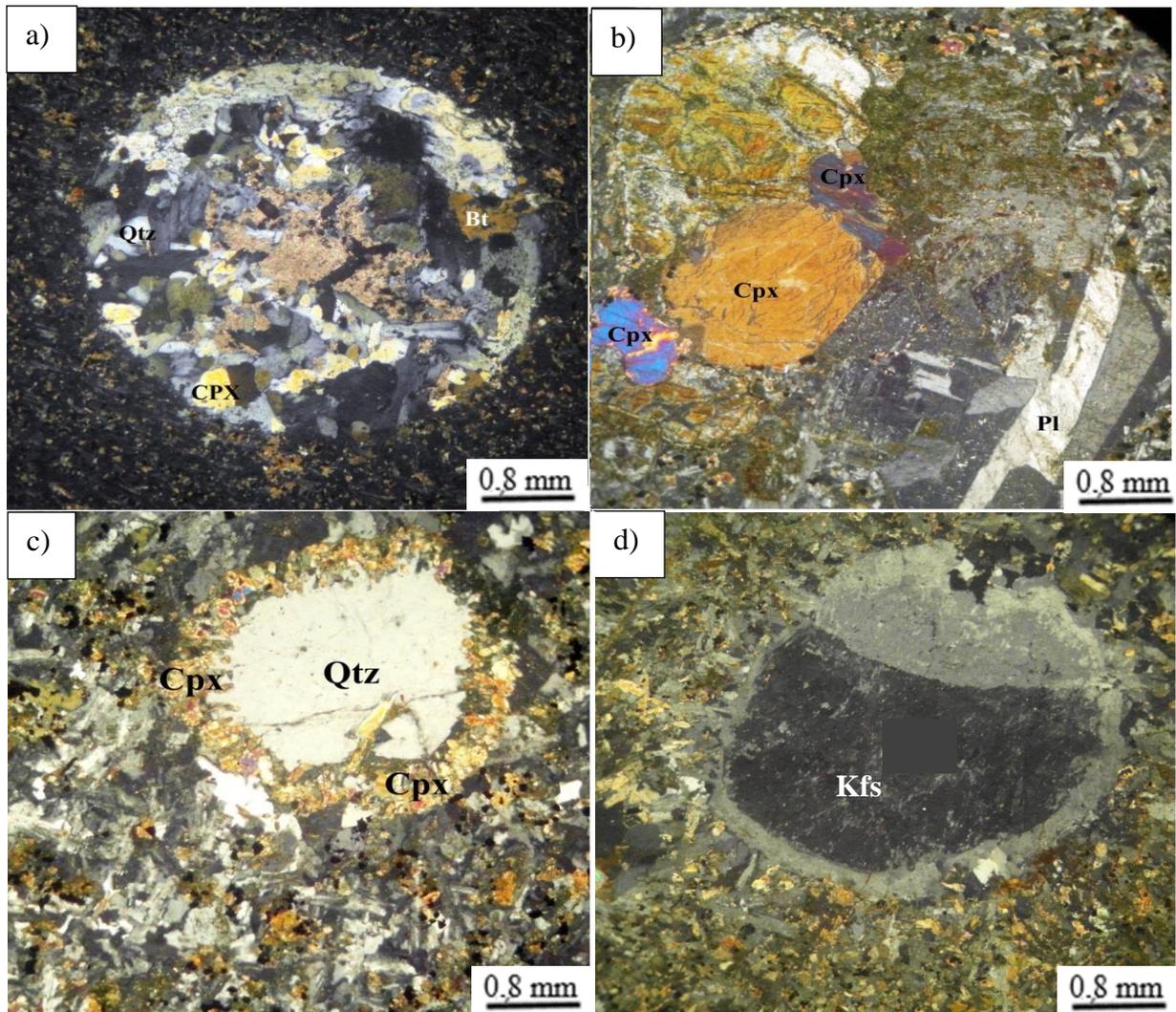


Figure 29. Microphotographie d'enclaves de socle. **a)** Enclave de granite dans un basalte aphyrique (éch. Nk 40). **b)** Association glomérporphyrique de clinopyroxène de plagioclase et feldspaths alcalins montrant un liseré brunâtre. **c)** Xénocrystal de quartz à couronne de clinopyroxène dans un basalte aphyrique (éch. Nk 8). **d)** Xénoclaste de feldspath à couronne grisâtre (éch. Fe).

IV.2.1.5.2. Xénoclastes de quartz

Ce sont des cristaux arrondis, fissurés et à extinction ondulante de diamètre 0,8 mm autour duquel se trouve une couronne réactionnelle de clinopyroxène (Fig. 29c).

IV.2.1.5.3. Xénoclastes d'orthose

Les xénoclastes d'orthose se présentent en cristaux sub arrondis et maclés carlsbad. Ce cristal est entouré d'une couronne grise. Leurs dimensions peuvent atteindre environ 0,8 mm de diamètre (Fig. 29d).

IV.2.2. Ignimbrites

Les ignimbrites (pluie de feu ; du latin ignis : feu et imber : pluie) sont des variétés de roches formées par un écoulement de sable pyroclastique d'après Marshall (1935) qui fut le premier à travailler sur ces roches. Elles désignent selon Marshall (1935), Macdonald (1972), Sparks et al. (1973), Cas et Wright (1987), des dépôts de tufs consolidés englobant tous les produits déposés suite à un courant de densité pyroclastique et de matériau juvénile véhiculé sans restriction de volume ou de compaction. Le terme ignimbrite est utilisé de nos jours pour décrire un mélange pyroclastique peu ou mal classé de ponces, cendres et de fragments lithiques divers pris dans une matrice constituée d'échardes de verre et de cristaux en général fragmentés (Branney et Kokelaar, 2002). Les ignimbrites occupent environ 5 % du secteur d'étude et diffèrent généralement d'une localité à une autre en fonction de la proportion des fragments lithiques, de la densité, de la couleur et du degré de soudure. Les faciès ignimbritiques du secteur d'étude montrent quatre composantes essentielles : les débris minéraux, les fiammes ponceuses, la masse fondamentale ou matrice et les enclaves.

IV.2.2.1. Extension et caractères macroscopiques

Au sein du complexe étudié les ignimbrites affleurent à Koutaba et à Nkounden.

IV.2.2.1.1. Ignimbrites de Koutaba

Les ignimbrites de Koutaba affleurent à l'ouest de la ville dans les localités de Koumelap au champ de tir (IK), Nkoupamenke (NK52), Nka'nyam (NK35) et Ngbawarem (NK55). À Koumelap, une unité supérieure gris sombre présente des prismations et se débite en blocs (Fig. 30a et b). À Koupamenke, elles affleurent en dalle sur le flanc de la colline et se débitent aussi en blocs (Fig. 30c et d). À Nka'nyam, les ignimbrites surmontent une bande d'environ 3 x 5 m (Fig. 30e) ; et enfin elles affleurent en dalle, surmonté par un dôme de basalte (Fig. 30f) à Ngbawarem. Les ignimbrites de Koutaba sont gris-cendré à gris sombre, massives, à cassure franche, très dense et reposent sur un socle métamorphique. Dans toutes les localités, les ignimbrites présentent des enclaves de tailles variées. À Koupamenke, en plus des fragments lithiques, il existe des cristaux de feldspaths. La mésostase est gris clair. La périphérie des affleurements est très altérée avec quelques fragments relictuels (20 à 25 %) de tailles variant de 0,3 x 0,4 cm à 2,4 x 3,4 cm.

IV.2.2.1.2. Ignimbrites de Nkounden

À Nkounden, les ignimbrites affleurent au sommet du chaînon Est (I1) et au pied (E1) du massif de Nkogam à une distance d'environ 1500 m derrière la station zootechnique, en boules (Fig. 30g) et en blocs, à une altitude de 1680 m. Elles sont de couleur gris clair. Les fragments de taille 0,4 x 0,2 cm à 1,2 x 1,8 cm, sont tous enrobés dans la mésostase : ce sont des scories, brèches et cendres, noyés dans une mésostase riche en verre (Fig. 30h).

IV.2.2.2. Étude microscopique

IV.2.2.2.1. Ignimbrites de Koutaba

Les ignimbrites de Koutaba présentent des textures eutaxitiques et/ou vitroclastiques caractérisées par l'existence de débris minéraux, des fiammes constituées pour la plupart d'un canal axial. En l'absence du canal axial, les fibres feldspathiques de dévitrification ont une disposition sphérolitique et forment une sorte d'étoiles ou gerbes étoilées. La composition minéralogique est constante : feldspath alcalin, plagioclase, quartz, pyroxène, biotite et oxydes (Tableau 5)

IV.2.2.2.1.1. Minéraux contenu dans la matrice

- **Feldspaths**

Le feldspath alcalin (10-15 %) serait de la sanidine en phénocristaux (Fig. 31a) fortement corrodée par la mésostase. Les cristaux (3,5 x 2 mm) surtout isolés ou en association et fréquemment craquelés, renferment parfois les inclusions de minéraux opaques. Ils présentent les macles de Carlsbad et sont parfois un début d'altération. Dans la mésostase, une couronne réactionnelle se forme souvent autour des cristaux de feldspath (0,5 %). L'on note aussi la présence de certains feldspaths alcalins qui présentent la macle de Baveno (Fig. 31b).



Figure 30. Observation macroscopique des ignimbrites de Koutaba et de Nkounden. **a)** et **b)** Ignimbrites de Koutaba avec un affleurement à Koumelap montrant son unité supérieure gris sombre ; cette unité présente des prismes et se débite en blocs. **c)** Affleurement en nappe des ignimbrites sur le flanc de la colline à Koupamenke. **d)** Bloc d'ignimbrite à matrice cendreuse. **e)** Tranchée d'ignimbrite observé à Nka'nyam. **f)** Affleurement en dalle des ignimbrites de Ngbawarem montrant un contact avec les basaltes. **g)** et **h)** Affleurement en boules des ignimbrites au sommet du chaînon sud du massif de Nkogam à Nkounden ; sa matrice cendreuse est constituée de nombreuses enclaves de scories.

Tableau 5. Proportion des constituants des ignimbrites de Koutaba et de Nkounden. Les proportions des minéraux correspondent aux cristaux libres dans la matrice. Les proportions de dévitrification de la matrice sont aussi évaluées. Dévi.: Dévitrification

Localité		Verre	Dévi.	Minéralogie		Fragments lithiques	
Koutaba	Koumelap	60-65 %	30-60 %	30-60 %	10-15 % Fd alc, 10 % Qtz, 2 % pl, 2 % Ox, 2 % Bt, 1 % Cpx.	10-15 %	5-10 % trachyte, 4 % gneiss, 3-5 % vitrophyre
	Nkoupamenké	60-75 %	40-45 %	20-25 %	10-15 % Fd alc, 15 % Qtz, 2 % pl, 2 % Ox, 2 % Bt, 1 % Cpx	10-15 %	10-15 % gneiss, 2 % granite, 2-3 % vitrophyre
	Nka'nyam	30-35 %	10-15 %	20-35 %	10-15 % Fd alc, 10 % Qtz, 2 % pl, 2 % Bt, 1 % Cpx	10-15 %	5-10 % gneiss, 2-3 % vitrophyre
	Ngbawarem	50-60 %	30-40 %	15-25 %	5-15 % Fd alc, 10 % Qtz, 3 % pl, 1 % Ox, 1 % Bt, 1 % Cpx	10 %	5 % gneiss, 5 % vitrophyre
Nkounden	Sommet du Chañon Est	60-70 %	30-45 %	10 %	5 % Fd alc, 8 % Qtz, 1 % pl, 1 % Bt, 2 % Ox	10-20 %	5-7 % trachyte, 4 % granite, 2-5 % vitrophyre
	Pied du Massif	65-80 %	40 %	17 %	5 % Fd alc, 5 % Qtz, 1 % pl, 1 % Bt, 5 % Ox,	10 %	1 % trachyte, 4 % granite, 5 % vitrophyre

- **Plagioclase**

Les plagioclases sont très faiblement représentés (environ 3 % de la roche). Les sections sont subautomorphes et légèrement résorbés dans certains cas et renferment des inclusions de quartz et de minéraux opaques (Fig. 31c). La taille des cristaux n'excède pas 1,2 x 2,2 mm. Dans la mésostase, le plagioclase est sous forme de petites baguettes de dimensions inférieures à 0,06 x 0,1 mm.

- **Quartz**

Le quartz est tantôt limpide, tantôt sombre dû à une pigmentation de couleur variable. De nombreux cristaux de quartz présentent des portions éteintes (Fig. 31 c-d). Le quartz (10 - 15 %) est généralement fragmenté et très régulièrement corrodé par la mésostase (Fig. 31d), certains individus sont à extinction souvent roulante. L'on observe aussi des cristaux de quartz à microfractures interne (Fig. 31c). La taille des cristaux varie de 0,2 x 0,4 mm à 0,9 x 1,4 mm. Certains cristaux présentent des lignes sinueuses.

- **Biotite**

La biotite (0,5 - 1 %) se présente sous forme de cristaux allongés mesurant 0,3 x 0,6 mm à 0,1 x 0,3 mm. Les sections sont subautomorphes à xénomorphes et généralement en voie d'altération ou totalement chloritisées. Les portions encore saines montrent un pléochroïsme intense dans le brun foncé. Dans certains cristaux, on décrit la présence des inclusions de minéraux opaques.

- **Pyroxène**

Le pyroxène (1 %) est automorphe, de taille pouvant atteindre 0,3 x 0,8 mm. Il est parfois résorbé par la mésostase et renferme des inclusions de minéraux opaques (Fig. 31e).

- **Minéraux opaques**

Les minéraux opaques représentent 1 à 2 % du volume de la roche. Les sections sont fréquemment sous formes de grains amiboïdes ou arrondis dans la mésostase. Les dimensions atteignent 0, 2 à 0, 4 mm de diamètre pour les individus les plus développés.

IV.2.2.2.1.2. Fiammes ponceuses

Les fiammes (10 à 15 %) sont en majorité des ponces dont la dévitrification est totale. Cette dévitrification consiste en de fibres de feldspaths prédominant sur les cristaux de quartz. Les fiammes (0,6 x 0,5 mm) sont généralement aplaties et allongées en fuseaux suggérant une fluidalité ou pseudo-fluidalité à la roche.

IV.2.2.2.1.3. Matrice

Tous les éléments décrits précédemment baignent dans une masse vitreuse qui constitue la partie essentielle des laves à faciès d'ignimbrites. Ce verre est généralement brun clair à brun sombre, souvent oxydé et devenant rouge plus ou moins sombre (Fig. 31f). La matrice fibreuse présente des traces d'écoulement nettes. On l'observe parfois contournant les obstacles que constituent des cristaux et surtout les enclaves de roches. Cette mésostase a toujours subi une dévitrification plus ou moins poussée.

IV.2.2.2.1.4. Enclaves

Les enclaves dans les ignimbrites sont constituées du matériel juvénile (directement liée au magma), représenté par les enclaves ou les ponces et les cristaux de roche ; et des fragments lithiques dérivés des parois du conduit ou arrachés au substratum lors de l'éruption.

IV.2.2.2.1.4.1. Enclaves de fragments juvéniles

Les fiammes sont des fragments juvéniles les plus abondants des ignimbrites étudiées. Dans la mésostase, l'on observe des enclaves de petites tailles sous forme de fragments libres dont la nature et la composition sont caractéristiques des types lithologiques du massif. À Koutaba les fiammes forment des gerbes étoilées appelées sphérolites (Fig. 32a).

IV.2.2.2.1.4.2. Enclaves de fragments lithiques

Deux types de fragments ont été observés : les lithiques cogénétiques qui incluent les fragments juvéniles dérivés d'une partie du magma éruptif cristallisé (vitrophyres, fragments de trachyte, de rhyolite et de granite) et les lithiques énallogènes qui proviennent de roches encaissantes incluant aussi des éléments précédemment arrachés lors des explosions. Les lithiques énallogènes sont constitués de gneiss et de granites.

- Enclaves de rhyolite

Dans les ignimbrites de Koumelap, elles ont une texture microlitique porphyrique avec des cristaux mesurant environ 0,4 x 0,6 mm. Elles sont constituées de feldspaths alcalins et de quartz avec une portion de verre assez importante dans la matrice (Fig. 32b).

- Enclaves de trachyte

Les textures sont aphyriques à porphyriques avec des cristaux de taille atteignant 0,1 x 0,3 mm (Fig. 32c) dans une matrice vitreuse. Dans ces enclaves l'on observe des microlites de feldspaths alcalins dispersés sans direction privilégiés et des produits bruns en association.

- Enclaves de vitrophyre

Le verre est abondant (60-75 %) de couleur brune à Koumelap et Nbagwarem (Fig. 32c). Les cristaux de feldspaths alcalins sont présents dans les vitrophyres de Koumelap.

- Enclaves de granite

Les enclaves de granite sont caractérisées par l'association des cristaux de quartz, de feldspath et de biotite (Fig. 32d). Ils ont une texture grenue et la taille des minéraux se situe entre 0,1 x 0,2 mm et 0,3 x 0,4 mm.

Enclaves de gneiss

Les enclaves de gneiss ont une texture granoblastique, avec une association minéralogique peu marquée. Les cristaux y sont déformés. Notons aussi la présence du quartz à extinction roulante et d'une plage de plagioclase montrant une fissure (Fig. 31f). Les bordures de cette enclave forment une limite sinueuse avec la mésostase.

IV.2.2.2.2. Ignimbrites de Nkounden

À Nkounden, la texture est vitroclastique à tendance fluidale ; le feldspath alcalin et les pyroxènes sont absents ; le verre volcanique est noir. Ces roches sont plus riches en enclaves. Faisant référence aux ignimbrites de Dschang, les ignimbrites étudiées auraient une nature rhyolitique.

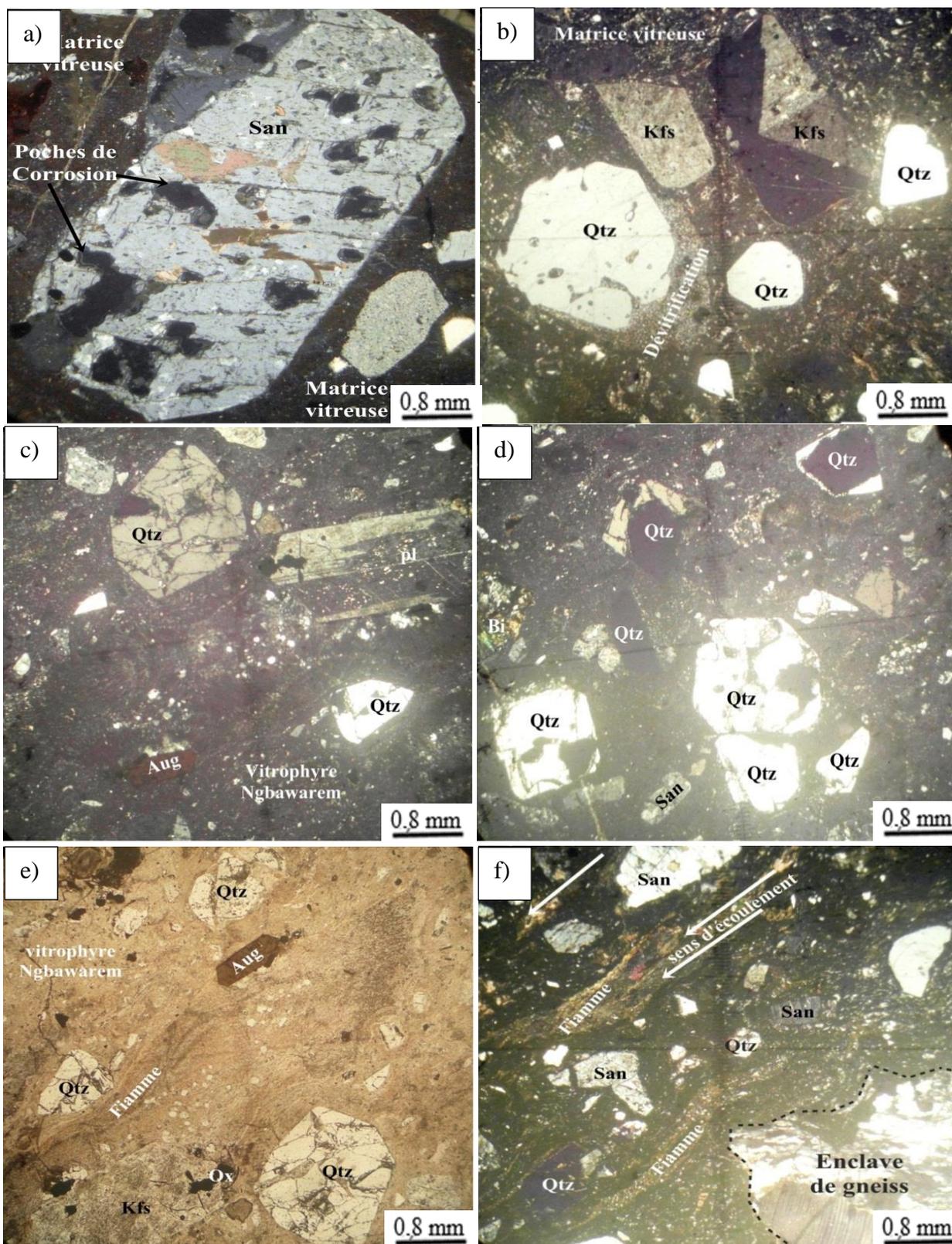


Figure 31. Microphotographie des ignimbrites de Koutaba en LPA1. **a)** Phénocristal de sanidine indiquant des poches de corrosion et baignant dans la matrice (Nk 55). **b)** Matrice vitreuse indiquant un feldspath ayant la macle de Baveno et du quartz corrodé à Koumelap (IK). **c)** Phénocristal de quartz automorphe à microfracture interne (Nk55). **d)** Matrice vitreuse indiquant un phénocristal de quartz demantelé et des fragments chocqué ayant des sections éteintes et des sections claires à Nka'nyam (Nk35). **e)** Vitrophyre de Ngbawarem moulant le quartz et le pyroxène en LP (Nk55). **f)** Fiammes étirées dévitrifiées préférentiellement orientées dans le sens d'écoulement (Nk52).

IV.2.2.2.1. Minéraux contenu dans la matrice

- Quartz

Le quartz (5-8 %) : tous les échantillons examinés renferment des individus à extinction souvent roulante, corrodé par la mésostase. Leurs tailles varient de 0,2 x 0,1 mm à 0,3 x 0,4 mm. Il est tantôt limpide, tantôt sali par une pigmentation de couleur variable (Fig. 33a).

- Feldspaths alcalins

Le feldspath alcalin (10-15 %) est pour la plupart en cours d'altération et renferme parfois des inclusions d'oxydes. Il existe aussi des fantômes de feldspath alcalin qui traduisent le phénomène d'altération (Fig. 33a). Notons la présence de débris de petite taille moulés dans la pâte vitreuse.

- Plagioclase

Les cristaux de plagioclase (1 %) sont de petite taille, en moyenne de 0,2 x 0,3 mm, automorphes, noyés dans la mésostase.

- Biotite

La biotite (1 %) de petites paillettes de biotites sont observées dans la lame mince de roche. Leurs tailles mesurent environ 0,1 x 0,2 mm. De nombreuses paillettes observées présentent une transformation en chlorite.

- Minéraux opaques

Les oxydes (2-5 %) sont fréquemment sous formes de cristaux amiboïdes ou arrondis dans la mésostase. Les dimensions atteignent 0,2 x 0,1 mm pour les plus développés.

IV.2.2.2.2. Fiammes ponceuses

De nombreux fragments de ponces apparaissent dans la matrice. Ces fiammes ponceuses sont de dimensions très variables. Elles sont généralement aplaties et allongées en fuseaux. Les fiammes sont souvent multiformes et parfois entièrement dévitrifiées. Les fiammes, par leur allongement donnent une fluidalité ou pseudo-fluidalité à la roche. Les fiammes des ignimbrites du massif étudiés se subdivisent en deux classes principales : les ponces fibreuses aphyriques ayant des vésicules très allongées et celles présentant des vésicules sphériques, riches en cristaux. La première classe témoigne d'un épisode de cisaillement au cours de leur remontée, tandis que la deuxième classe de ponces est la conséquence de fortes surpressions (Marti et al., 1999).

IV.2.2.2.3. Matrice

Les minéraux décrits baignent dans une masse vitreuse qui constitue la partie essentielle des laves à faciès ignimbritique. Ce verre est généralement brun clair à brun sombre, souvent oxydé et devenant rouge plus ou moins sombre. Dans la roche, la matrice fibreuse d'une part moule les cristaux et surtout les enclaves ; et d'autre part elle les contourne. Cette matrice reste dans de rares cas, entièrement à l'état vitreuse. Elle a toujours subi une dévitrification plus ou moins poussée. La matrice vitreuse présente des traces d'écoulement nettes.

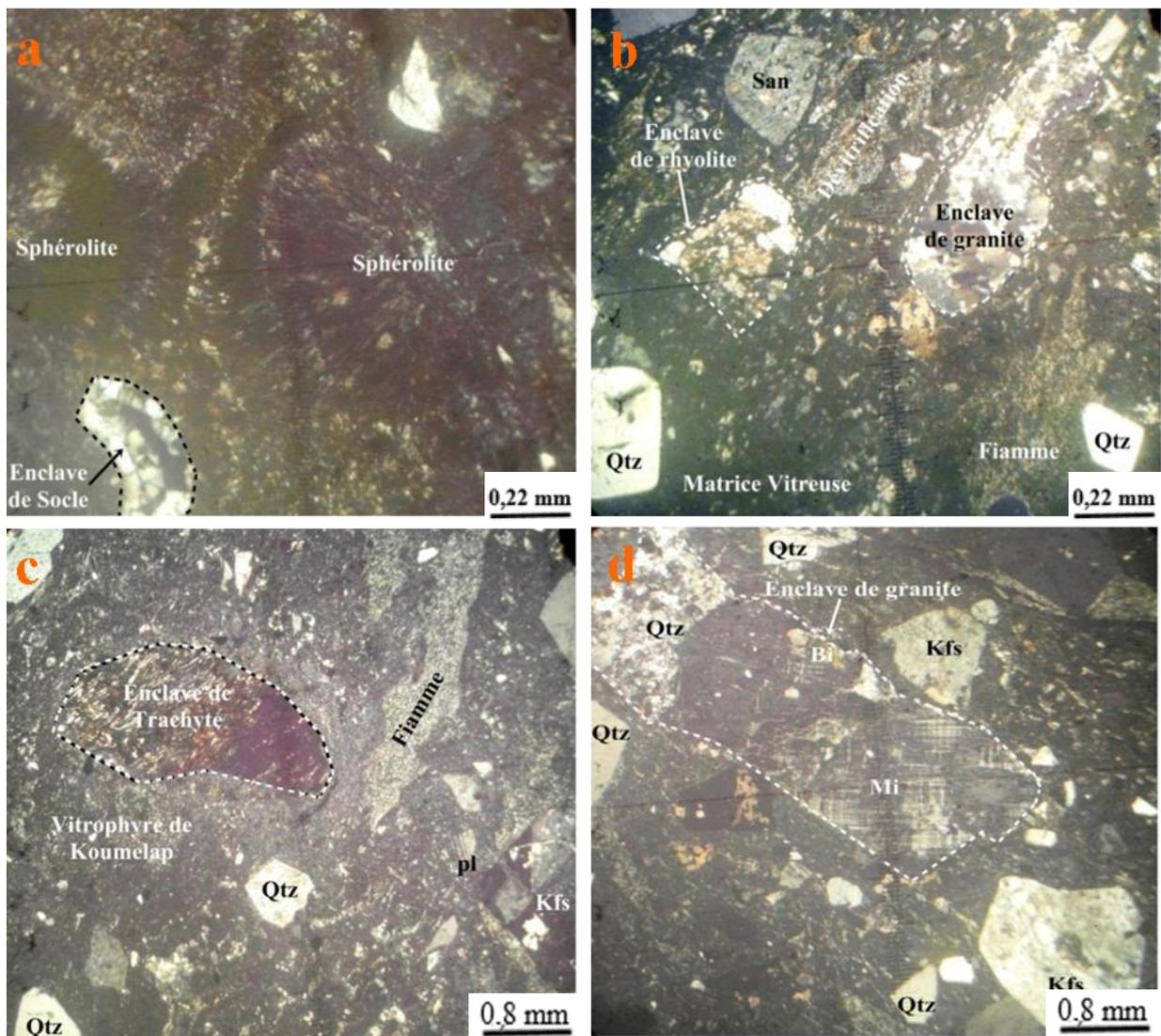


Figure 32. Microphotographie des ignimbrites de Koutaba en LPA. **a)** Fiamme dévitrifiée présentant des gerbes étoilées à Ngbawarem (Nk55). **b et c)** Enclaves de rhyolite et de trachyte étirée à Koumelap (IK). **d)** Enclave de granite présentant une latte de microcline.

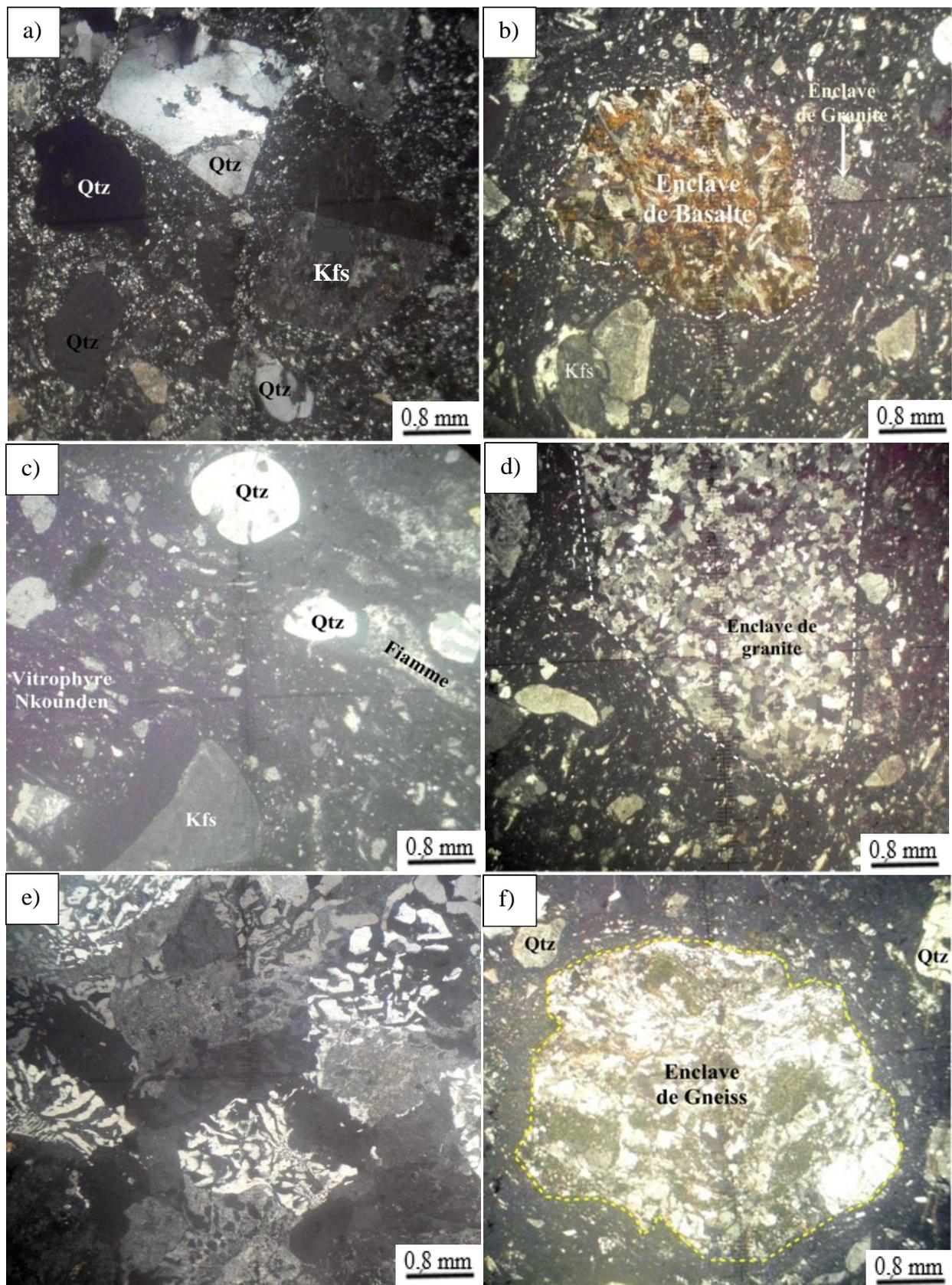


Figure 33. Microphotographie des ignimbrites de Nkounden en LPA. **a)** Fiamme dévitrifiée présentant du quartz corrodé par la mésostase. **b)** Enclaves de basalte présentant des microlites de plagioclases et des produits bruns à Nkounden. **c)** Matrice vitreuse montrant des enclaves de ponces constituées d'une association d'échardes de verre de formes variées. **d)** et **e)** Enclaves de granite à texture grenue et granophytique à Nkounden. **f)** Enclave de socle gneissique à Nka'nyam (Nk52).

IV.2.2.2.4. Enclaves associées aux ignimbrites de Nkounden

Les ignimbrites de Nkounden constituent un matériel juvénile directement lié au magma. Elles renferment aussi des fragments lithiques dérivés des parois du conduit ou arrachés au substratum lors de l'éruption. Il existe dans ce type pétrographique la présence des enclaves de basalte, de ponce, de granite et de gneiss.

IV.2.2.2.4.1. Enclave de basalte

Les textures sont microlitiques aphyriques à porphyriques avec des cristaux pouvant atteindre 0,2 x 0,3 mm (Fig. 33b) dans une matrice vitreuse. Les microlites de plagioclase ne sont pas orientés. Dans l'enclave de basalte présent se trouve des produits bruns.

IV.2.2.2.4.2. Enclave de ponce

Les enclaves de ponce sont caractérisées par un abondant verre (65 et 80 %). La matrice est majoritairement constituée du verre de couleur sombre à Nkounden (Fig. 33c). Il s'agit des ponces porphyriques qui en plus du verre contiennent beaucoup de minéraux à l'instar du quartz et du feldspath alcalin.

IV.2.2.2.4.3. Enclaves de granite et de gneiss

Dans les ignimbrites de Nkounden, les enclaves de granites se présentent sous formes allongées ou arrondies (Fig. 33d). Elles ont une texture grenue et des minéraux de taille variables entre 0,1 x 0,2 mm et 0,4 x 0,5 mm. Ces minéraux sont : biotite, orthose, microcline, plagioclase et oxyde. Certaines enclaves de granite présentent aussi une texture granophyrique (Fig. 33e). Il y a aussi la présence des enclaves de gneiss de forme subcirculaire dans la matrice vitreuse (Fig. 33f).

IV.3. Roches plutoniques

Les études menées sur les granitoïdes (environ 35 %) du massif de Nkogam ont permis de distinguer quatre types pétrographiques : les gabbros, les syénogranites (syénogranites à amphibole, syénogranite à biotite et amphibole), les syénites à quartz et les granites alcalins (granophyres, granites à amphibole, granite à biotite et amphibole).

IV.3.1. Gabbros

IV.3.1.1. Observations de terrain et caractères macroscopiques

Les Gabbros affleurent en boules ovoïdes à l'Est du village Nomkouop et dans le lit du cours d'eau kouonche à Njikwop. Ce sont des roches de couleur gris sombre. Ils sont

constitués de minéraux ferromagnésiens (amphiboles, clinopyroxènes) et de feldspaths de taille variable.

IV.3.1.2. Étude microscopique

À l'échelle microscopique les minéraux constitutifs observés sont : plagioclase, orthose, amphibole, clinopyroxène, apatite et oxydes. Ces roches présentent une texture grenue porphyroïde

- **Plagioclase**

Le plagioclase est la phase minérale la plus abondante (65-75 %). Les cristaux sont subautomorphes à xénomorphes et leur taille varie entre 0,3 x 0,2 mm et 5,7 x 2,5 mm. Certains cristaux craquelés, se trouvent entre les cristaux de clinopyroxène et ceux de feldspaths alcalins. Dans la roche, un phénocrystal de plagioclase moule les cristaux de clinopyroxène (fig. 34a). Certains phénocristaux sont zonés. La figure 34b montre un phénocrystal en plaquette zonée concentriquement avec un cœur resorbé. Les autres cristaux allongés en baguettes, généralement craquelés, sont maclés albite et carlsbad (Fig. 34c). Ils moulent les cristaux de clinopyroxène ou se trouvent coincés entre les cristaux de clinopyroxène et de feldspath alcalin. Quelques uns sont affectés par des microfractures perpendiculaires à leur allongement. De nombreux phénocristaux de plagioclase présentent la macle du roc-tourné avec des jointures constituées de produits bruns (Fig. 34d).

- **Clinopyroxène**

Le clinopyroxène (10-15 %) est xénomorphe de taille moyenne proche du millimètre. Il présente par endroit la macle simple. Les individus sont groupés. L'association des cristaux de clinopyroxène avec ceux de plagioclase laisse apparaître un contour sinueux (Fig. 34e). De la périphérie vers le centre, le clinopyroxène se transforme progressivement en amphibole avec des teintes de polarisation vives : c'est l'ouralitisation. Il existe des microfilons qui recoupent des cristaux de clinopyroxène qui ont moulés ceux de plagioclase (Fig. 34 e).

- **Amphibole**

L'amphibole (5-7 %) est xénomorphe avec des tailles varient de 0,1 x 0,4 mm à 0,6 x 1,2 mm. L'amphibole est en association avec les cristaux de plagioclase (Fig. 34f). Le phénocrystal d'amphibole observé contient des inclusions d'oxydes. Des cristaux d'amphibole se trouvent coincé entre les cristaux de feldspath. De nombreux cristaux d'amphibole se transforment en chlorite.

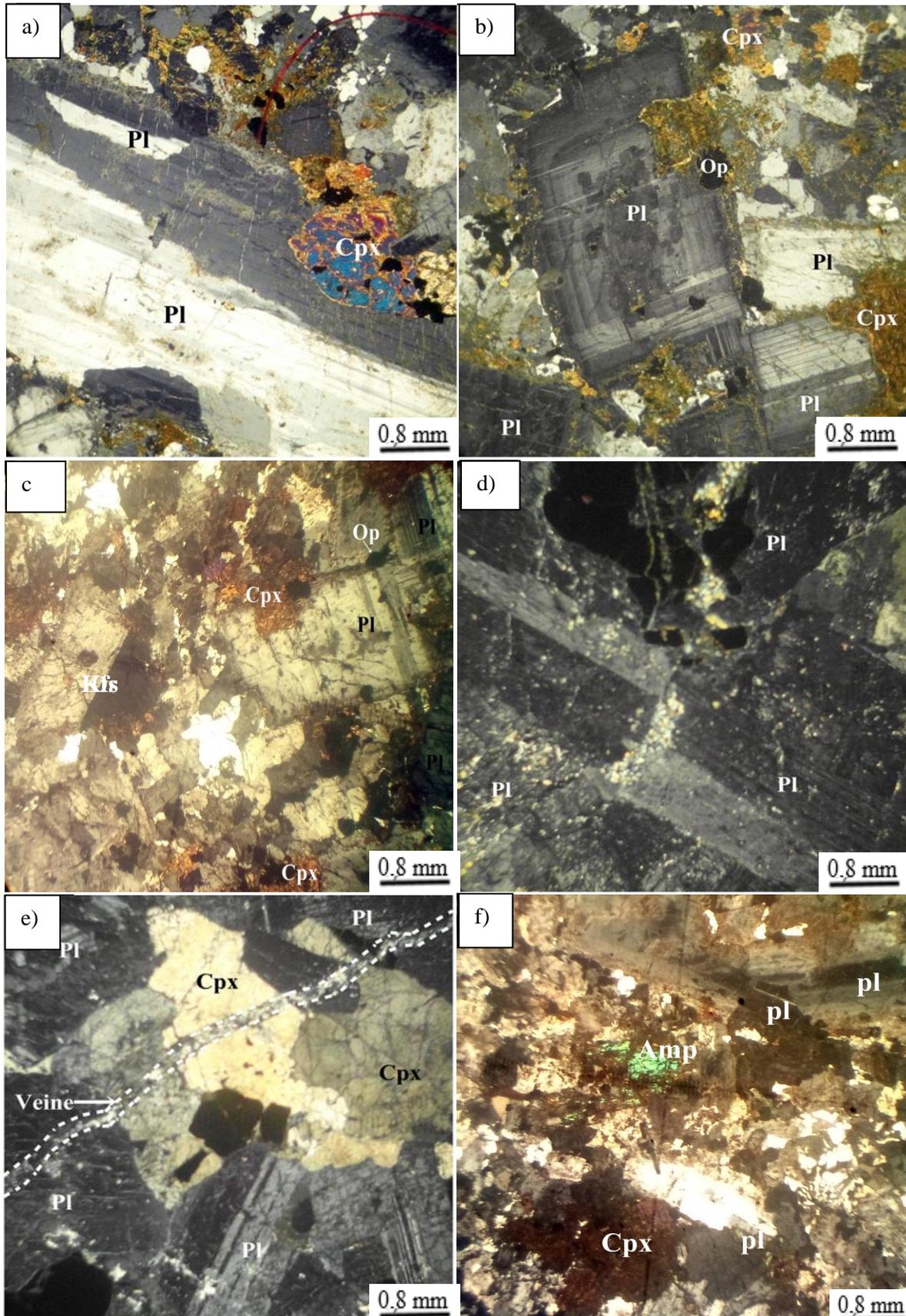


Figure 34. Microphotographies des gabbros du Nkogam. **a)** Phénocrystal de plagioclase montrant du clinopyroxène moulé en son sein (NK18). **b)** Cristal de plagioclase zoné à cœur resorbé et contenant en inclusions des minéraux Opaques (NK18). **c)** Cristal de plagioclase montrant la macle d'albite à bordure délavée. **d)** Phénocrystal de plagioclase à microfracture perpendiculaire à son allongement et remplie par les produits d'altérations (NK21). **e)** Cristaux de clinopyroxène aux contours sinueux associés aux lattes de plagioclase recoupé par un microfilon rempli de produit d'altération. **f)** Cristal d'amphibole montrant des bordures en cours de transformation en chlorite.

- **Minéraux opaques**

Les minéraux opaques sont peu abondants (3 %). Ils sont en inclusion dans les cristaux de feldspath, de plagioclase et de clinopyroxène. Notons la présence d'un cristal subautomorphe de minéraux opaques moulé par un cristal de plagioclase zoné (Fig. 34b). D'autres cristaux sont disséminés entre les minéraux. Certains cristaux résultent de la déstabilisation du clinopyroxène.

- **Minéraux accessoires**

L'apatite (2 %) en cristaux trapus ou aciculaires, est en inclusions dans les principales phases minérales. Leurs dimensions peuvent atteindre environ 0,1 x 0,3 mm.

Le zircon (0,2 %) se trouve en inclusion dans de cristaux de feldspath alcalin, ce cristal présente une couronne d'oxyde.

L'olivine (1 %) apparaît en micrograins subautomorphes, de dimensions d'environ 0,2 x 0,3 mm. Ces micrograins sont globuleux et fortement craquelés.

- **Minéraux Secondaires**

La chlorite et la séricite sont des minéraux secondaires, car proviennent de la déstabilisation des minéraux primaires qui respectivement l'amphibole et le plagioclase.

IV.3.2. Syénogranites

Les syénogranites sont des roches felsiques avec prédominance des plagioclases sur les feldspaths alcalins. En fonction de la présence des minéraux ferromagnésiens, l'on distingue les syénogranites à amphibole et les syénogranites à amphibole et biotite.

IV.3.2.1. Extension et caractères macroscopiques

Les syénogranites à amphibole affleurent en blocs au sommet du chaînon sud du massif à Nkounden (Fig. 35a) et à Njitapon (Fig. 35b). Les syénogranites à biotite et amphibole affleurent en blocs et en dalles sur la ligne de crête et sur les flancs du chaînon Sud du même massif à Nkourom (Fig. 35c). Sur le complexe de Nkogam il existe un dôme de syénogranite montrant une dépression en forme de V à Njikwop (Fig. 35d). Les syénogranites (syénogranites amphiboles-biotites (éch. 35 i) et syénogranites amphiboles (éch. 35 ii)) sont constitués de feldspaths, du quartz et des ferromagnésiens. Ils sont de couleur gris clair à sombre. L'étude macroscopique des échantillons nous a permis, de les subdiviser en deux types pétrographiques en fonction de leurs textures, leurs couleurs et leurs phases minérales.

Les syénogranites à amphiboles contiennent des microfilons riches en ferromagnésiens. Les syénogranites ont une texture grenue.

IV.3.2.2. Étude microscopique

À l'échelle microscopique, les syénogranites à amphibole et biotite présentent une composition minéralogique constituée de : quartz, plagioclase, orthose, biotite, amphibole, zircon, apatite et oxydes.

- **Quartz**

Le quartz (20-25 %) se présente en grains polycristallins, subautomorphes de taille variant de 0,1 x 0,2 mm à 0,6 x 0,7 mm. De nombreux cristaux en forme d'amandes montrent des extinctions ondulantes. Ils sont parfois coincés entre les plages de plagioclase et d'orthose. Les cristaux dessinent parfois des microstructures qui forment des intercroissances entre le quartz et le feldspath alcalin (Fig. 36a). Le quartz forme une association granophyrique avec le feldspath alcalin.

- **Plagioclase**

Le plagioclase occupe 45 à 50 % de la roche. Il apparaît en plaquettes automorphes à subautomorphes, de dimensions variant de 0,2 x 0,3 mm à 2 x 2,1 mm et atteignant parfois 1,5 x 3 mm. De nombreux phénocristaux forment une association avec des cristaux d'oxydes, de feldspaths et d'amphibole (Fig. 36b). Les cristaux de plagioclase présentent des zones de déstabilisation en damourite et en séricite des bordures vers le coeur. Autour de ces produits d'altération se trouvent des amandes de quartz. Les lattes de plagioclase forment des associations avec des cristaux de feldspaths alcalins et de quartz.

- **Orthose**

L'orthose (20-25 %) est le feldspath alcalin rencontré en cristaux de dimensions variés pouvant atteindre 0,6 x 0,7 mm. Les cristaux sont automorphes et parfois fissurés. Certains cristaux présentent la macle simple, qui est la macle de carlsbad (Fig. 36c). Les cristaux de feldspaths forment des relations étroites avec ceux de quartz, de plagioclase et de minéraux opaques. Certains cristaux d'orthose renferment de petites inclusions de quartz, d'apatite et de minéraux opaques.

- **Amphibole**

L'amphibole occupe 5 à 10 % de la roche. Elle est xénomorphe et parfois fragmentées de dimensions variant entre 0,1 x 0,2 mm et 1 x 2 mm. On identifie dans une portion de lame mince, la présence d'un phénocristal d'amphibole montrant des cristaux de zircon et d'oxyde

en inclusion (Fig. 36d). Ce cristal d'amphibole forme aussi une association avec les cristaux de feldspaths. Les phénocristaux d'amphibole s'altèrent en de produit brun verdâtre et noirs : ce sont les chlorites et les oxydes. Le sphène et la calcite s'y trouvent parfois en inclusions. L'amphibole est associée à l'orthose qui a moulé des cristaux primaires d'oxyde (Fig. 36e).

- **Biotite**

La biotite (2-4 %) est absente dans les échantillons NK12 et G01. Elle se présente en lamelles enchevêtrées ou parallèles. Leurs dimensions atteignent parfois 0,2 x 0,3 mm. Elles sont subautomorphes à xénomorphes et renferment en inclusions du zircon et des minéraux opaques (Fig. 36f). La biotite forme une association minérale avec les cristaux de quartz, d'oxyde et de feldspath. De nombreuses lamelles de biotites s'altèrent, en produit brun verdâtre : c'est la chlorite.

- **Minéraux accessoires**

L'apatite (0,4 %), en cristaux trapus ou aciculaires, est en inclusions dans les principales phases minérales.

Le zircon (0,2 %) se trouve en inclusion dans des cristaux d'amphibole, ce cristal présente une couronne d'oxyde (Fig. 36d) ; un autre cristal se trouve en inclusion dans le cristal d'oxyde qui se trouve en inclusion dans un phénocristal de feldspath (Fig. 36f).

Le sphène (0,2 %) de forme losangique, se trouve en inclusion dans un cristal de minéral opaque moulé dans une amphibole (Fig. 36d)

Les minéraux opaques (1,4 %) sont primaires. Ils sont squelettiques, arrondis ou anguleux et de dimension variable. Les oxydes sont en cristaux isolés dans la roche. Certains minéraux opaques se développent à l'intérieur des minéraux préexistants.

- **Minéraux secondaires**

Les minéraux secondaires sont la séricite, la chlorite, qui proviennent respectivement de l'altération des minéraux primaires comme le plagioclase et l'amphibole.



Figure 35. Affleurements des syénogranites et des syénites à quartz du massif de Nkogam. **a** et **b**) Affleurement en blocs de syénogranites au sommet du massif à Nkounden et sur une pente douce à Njikwop. **c**) Blocs de syénogranite sur le chaînon Ouest à Kourom. **d**) Massif de syénogranite avec dépression en forme de V à Njikwop. **e**) Boules de syénites à quartz montrant une altération en lambeau à Ma'pare. Echantillon de : **i**) Syénogranites à amphibole ; **ii**) Syénogranites à biotite et amphibole ; **iii**) Granophyre ; **iv**) Syénite.

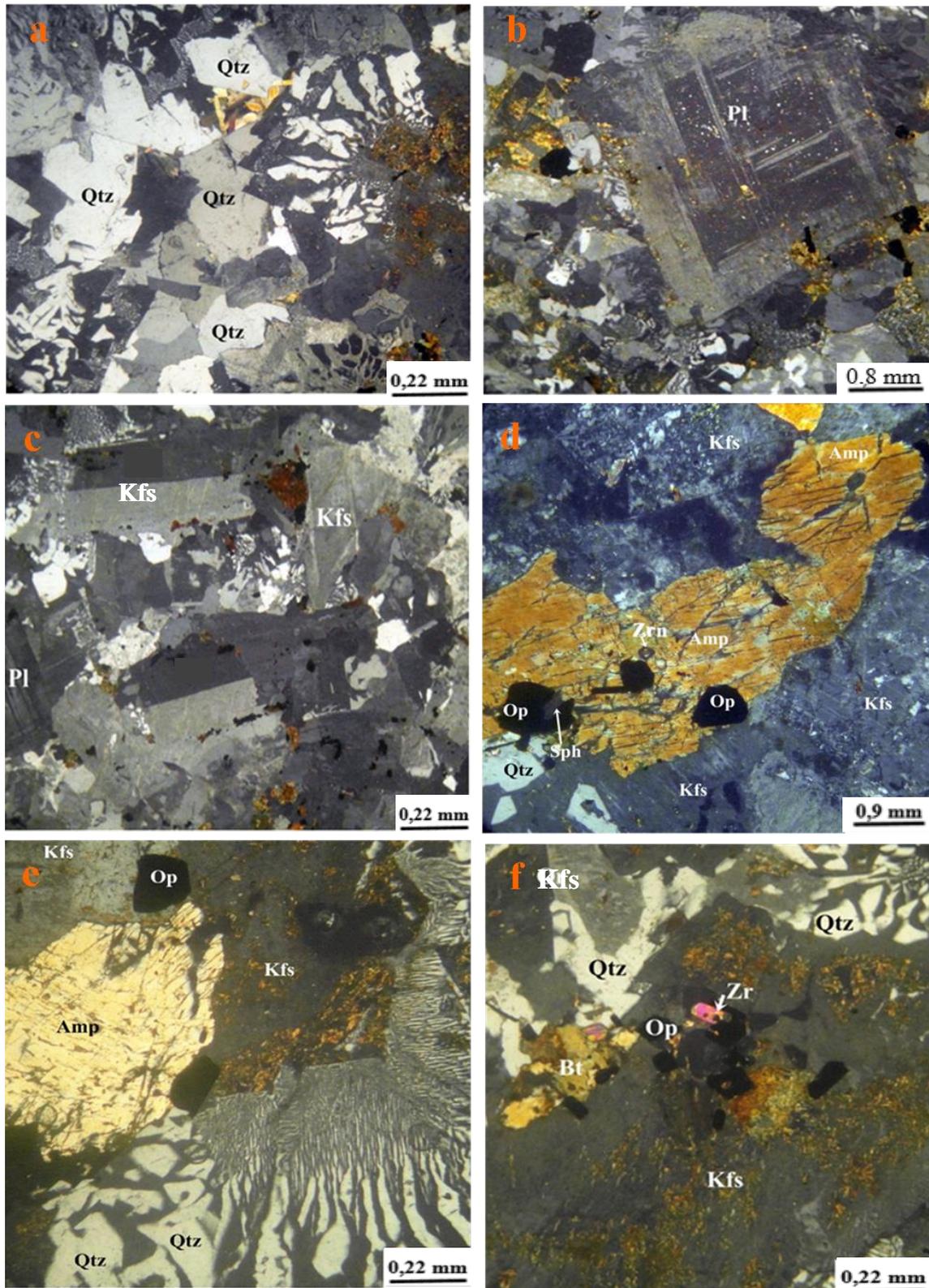


Figure 36. Microphotographies des syénogranites de Nkogam. **a)** Microstructure micropegmatitique et association granophyrique. **b)** Phénocristal en plaquette de plagioclase isolé dans une trame à grain fin (G01). **c)** Association des cristaux d'orthose et de plagioclase (G01). **d)** Oxyde primaire moulant le sphène, le tout moulé par le phénocristal d'amphibole (NK44). **e)** Minéral opaque primaire moulé par un cristal de feldspath associé à un cristal d'amphibole, l'ensemble lié à une microstructure granophyrique (NK44). **f)** Lamelle de biotite en association avec un cristal de feldspath affichant en inclusions des cristaux d'oxyde et de zircon.

IV.3.3. Syénite à quartz

IV.3.3.1. Extension et caractères macroscopiques

La syénite à quartz est observée dans la localité de Ma'pare, derrière l'école publique. Elle affleure en boules (Fig. 35e). Leur taille varie de 0,2 m à 0,4 m sur un flanc de colline. La syénite à quartz est de couleur vert-foncée à sombre. Elle est constituée des grains fins à grossier (NK23). À l'œil nu l'on distingue au sein de cette roche des cristaux de feldspath, de quartz et de ferromagnésiens (amphibole et biotite). Leur taille varie de 0,2 mm à 2 mm. Dans notre échantillon de syénite à quartz, l'on observe des veines quartzo-feldspathiques. Cet échantillon présente un mode d'altération en écailles.

IV.3.3.2. Étude microscopique

La syénite à quartz présente une texture grenue porphyroïde. Elle est constituée des minéraux : quartz, plagioclase, orthose, biotite, clinopyroxène, amphibole. On observe aussi des minéraux accessoires (zircon, apatite, sphène et oxydes).

- **Quartz**

Le quartz (10 %) se présente en grains xénomorphes. Ces cristaux ont des dimensions qui varient de 0,2 x 0,4 mm à 1,2 x 2 mm. L'on note un microphénocristal de quartz coincé entre un cristal de feldspath alcalin et de biotite. Les phénocristaux forment une association avec les feldspaths alcalins et une bande constituée d'amphibole et de biotite (Fig. 37a).

- **Plagioclase**

Le plagioclase (8 %) se trouve en forme de cristaux automorphes à subautomorphes (Fig. 37a). Les cristaux de plagioclase ont des dimensions qui varient de 0,1 x 0,2 mm à 0,5 x 0,7 mm. Ces plaquettes de plagioclase forment une association avec de petits cristaux d'amphibole et de biotite. L'on observe dans les cristaux de plagioclase des inclusions d'oxydes. Certains cristaux se déstabilisent en séricite.

- **Orthose**

L'orthose est le feldspath alcalin (60 %) de la roche (NK23). Elle se trouve en phénocristaux de taille millimétrique atteignant parfois 1 x 0,9 mm. Les phénocristaux de feldspaths alcalins sont xénomorphes et renferment des inclusions de biotite et d'oxydes. Certains cristaux montrent de microstructure en feuillet : ce sont des perthites "string perthite" (Fig. 37c).

- **Biotite**

La biotite (8 %) se présente en lamelles, avec des dimensions variant de 0,1 x 0,2 mm à 0,4 x 0,7 mm. Elle est subautomorphe à xénomorphe et renferme en inclusions les oxydes (Fig. 37b) et le zircon. Un cristal de biotite interstitiel entre les cristaux de feldspath (Fig. 37c). Le long des clivages on observe quelquefois des minéraux opaques. La biotite s'altère en produit brun verdâtre : c'est la chloritisation.

- **Clinopyroxène**

Les cristaux de clinopyroxène (5%) sont automorphes à subautomorphes généralement accolés les uns aux autres et de taille variant entre 0,5 et 0,7 mm (Fig. 37d). Les cristaux de clinopyroxène s'observent aussi en association avec l'orthose tandis que d'autres se trouvent en inclusions. Ils présentent une déstabilisation en amphibole et en minéraux opaques.

- **Amphibole**

L'amphibole (4 %) est subautomorphe à xénomorphe, de taille variable entre 0,1 x 0,2 mm et 0,2 x 0,4 mm. Ces cristaux contiennent en inclusions des microcristaux de biotite, d'apatite et d'oxyde opaque. Il existe de nombreux cristaux moulés dans du feldspath (Fig. 37d). Les phénocristaux d'amphibole offrent un début d'altération à partir des stries observées sur ces minéraux. De nombreux cristaux d'amphibole sont transformés en chlorite (Fig. 37e)

- **Minéraux opaques**

Les minéraux opaques (2 à 3 %) sont peu abondants dans la roche. Ils sont losangiques, rectangulaires ou globuleux généralement accolés au clinopyroxène et de taille atteignant parfois 0,5 mm. Ils se trouvent aussi en inclusion dans le feldspath alcalin et la biotite (Fig. 37b). Les minéraux opaques se trouvent également entre les cristaux de feldspaths alcalins et de plagioclase

- **Minéraux accessoires**

L'apatite (0,4 %) en cristaux trapus est en inclusion dans les principales phases minérales.

Le zircon (0,2 %) est accolé aux cristaux de feldspaths (Fig. 37f), amphibole et aux minéraux opaques. Il se trouve également en inclusion dans des cristaux de feldspath.

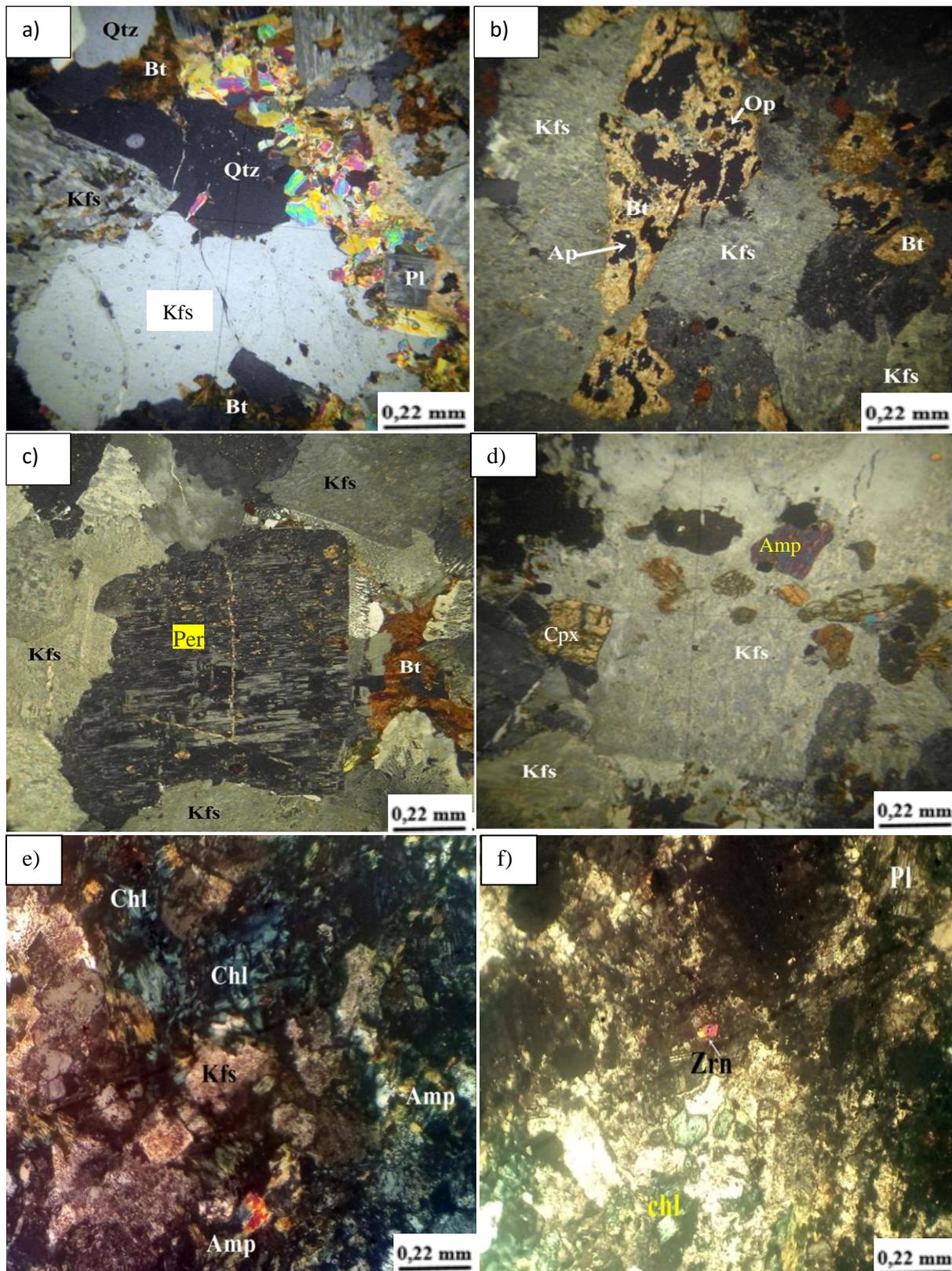


Figure 37. Microphotographies des syénites à quartz du Nkogam. **a)** Contact sinueux entre quartz un cristal de feldspath perthitique. **b)** Lamelle de biotite en cours d'oxydation avec en inclusion d'apatite en associé au feldspath potassique (NK23). **c)** cristal de "string perthite". **d)** Cristaux d'amphibole moulé par phénocristal de feldspath alcalin. **e)** cristaux d'amphibole en cours de transformation en chlorite. **f)** cristal de zircon en inclusion dans une plage de feldspath.

IV.3.4. Granites alcalins

Les granites alcalins sont subdivisés sur la base de leur composition minéralogique, en granites à amphibole, granites à amphibole et biotite et en granophyre.

IV.3.4.1. Granites à amphibole

IV.3.4.1.1. Extension et caractères macroscopiques

Les granites à amphibole (Fig. 38 a) affleurent en blocs prismatiques sur le flanc Sud du chaînon Ouest jusqu'à 600 m derrière la station zootechnique de Nkounden. Ils affleurent en dôme dans la localité de Njitapon (Fig. 38 b). Les granites à amphibole sont diversifiés et la taille des cristaux varie de l'ordre du millimètre. Des blocs de granites à amphibole affleurent près du lit de la rivière Mou dans la même localité. La principale phase minérale est constituée des cristaux de quartz, de feldspath et de ferromagnésiens. Les cristaux de quartz sont de forme subarrondie avec un diamètre maximal d'environ 1,5 mm.

IV.3.4.1.2. Étude microscopique

Les granites à amphibole de Nkogam sont constitués des minéraux de quartz, orthose, plagioclase, amphibole, sphène, zircon, apatite et oxydes. L'observation microscopique de ces granites à amphibole révèle la présence d'une texture grenue.

- **Quartz**

Le quartz (25-30 %) se présente sous forme de phénocristaux, sub automorphes à xénomorphes isolés ou en amas noyés dans la masse grenue. La taille des cristaux varie de 0,2 x 0,3 mm à 0,6 x 0,9 mm. Cependant l'on note quelques phénocristaux de taille d'environ (0,9 x 1,5 mm). Sous des formes plus ou moins étirées à aspect squelettiques. Sous des formes graphiques c'est-à-dire en veinules et vermicules qui alternent avec celles d'orthose formant des symplectites aux tailles variables et entourant les phénocristaux d'orthose (Fig.38c).

- **Orthose**

L'orthose (45-50 %) est le feldspath alcalin abondant dans la roche. L'orthose apparaît en phénocristaux automorphes à sub automorphes et microcristaux. Certains cristaux sont entourés de symplectites quartzo-feldspathiques (Fig. 38c). D'autres sont accolés à leur congénère (Fig. 38d). Leur taille varie de 0,3 x 0,2 mm à 1,5 x 4,5 mm. Ils sont parfois maclés carlsbad. Certains cristaux de feldspath alcalin sont perthitiques et forment une association avec les amas de quartz (Fig. 39a). Les cristaux d'orthose contiennent des inclusions automorphes de plagioclase, d'oxyde, d'amphibole et d'apatite.

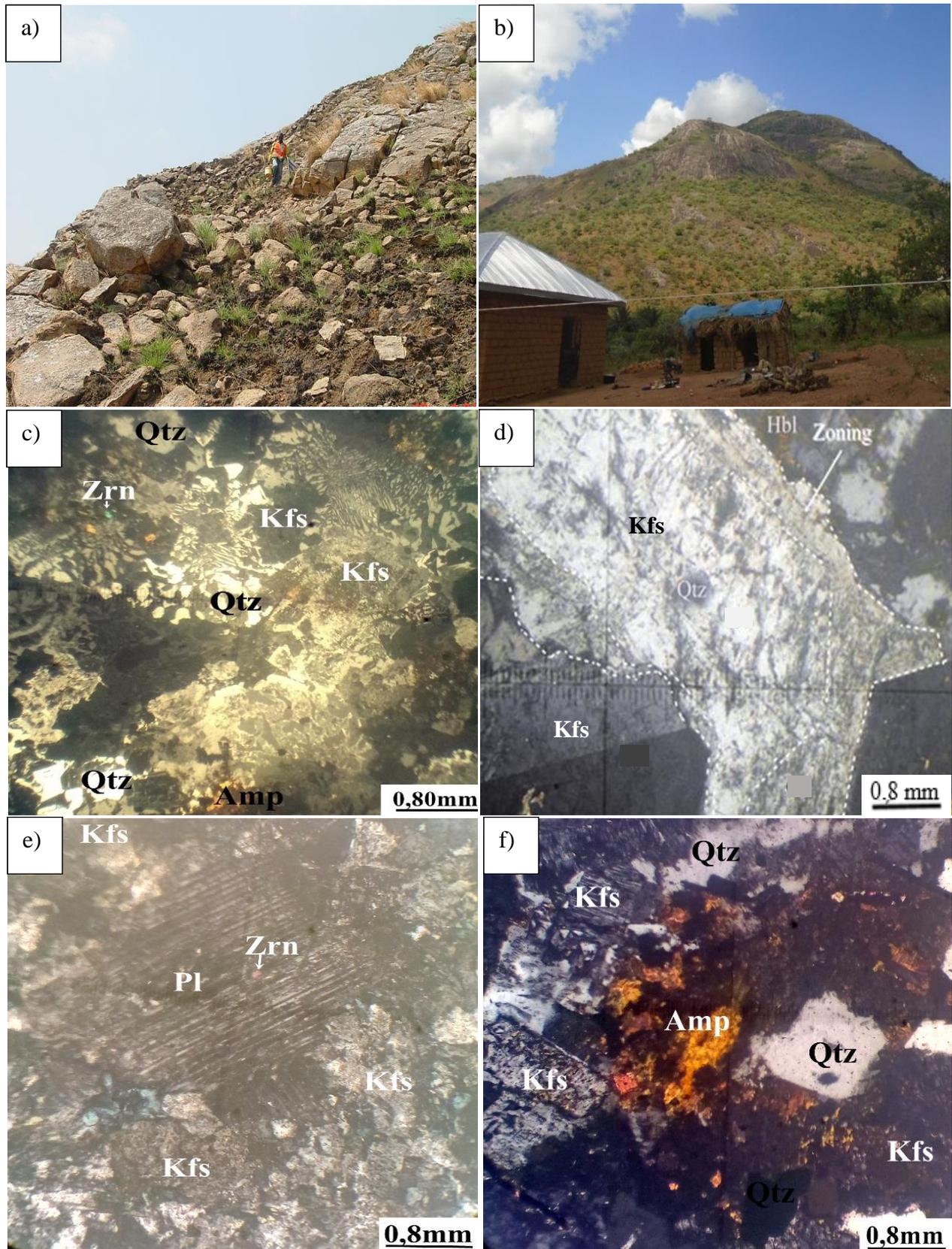


Figure 38 : Photographies et microphotographies des granites à amphibole : **a)** Blocs prismatiques de granite à amphibole démantelé en sur le flanc du massif. **b)** affleurement en dôme des granites à amphiboles à Njitapon. **c)** association granophyrique de quartz et d'orthose dans le granite à amphibole (Nk47). **d)** Cristal de feldspath alcalin en cours de transformation associé à son congénère encore sain (NK3). **e)** phénocristal de plagioclase dans une masse grenue riche feldspath alcalin. **f)** cristal d'amphibole qui moule un cristal de quartz.

- **Plagioclase**

Le plagioclase (5 à 7 %) se présente en microphénocristaux et phénocristaux xénomorphes avec des tailles variant de 0,2 x 0,3 mm à 0,8 x 2,2 mm. Des cristaux de plagioclase présentent une macle simple d'albite et d'autre une macle polysynthétique (Fig. 38e). Un cristal de plagioclase s'altère en sériticite. De nombreux cristaux de même type offrent une transformation du centre vers les bordures. De petits fragments de plagioclase forment des associations avec les minéraux tels que le quartz, l'orthose et l'amphibole.

- **Amphibole**

L'amphibole occupe environ (10-12 %) du volume de la roche. Elle apparaît en cristaux xénomorphes et interstitielles entre les phénocristaux de feldspath alcalin et de quartz. La taille des cristaux varie 0,2 x 0,1 à 0,5 x 1,1 mm. Notons la transformation de certains cristaux en chlorite. Des cristaux de feldspath alcalin forment un contact franc avec l'amphibole. Certains phénocristaux d'amphibole moulent des cristaux de quartz et contiennent en inclusion des cristaux primaires d'oxydes opaques (Fig. 38f).

- **Minéraux accessoires**

Les oxydes (1-2 %) sont rarement primaires. Ils sont isolés dans la roche, leur diamètre dépasse souvent 0,3 mm. Certains cristaux se développent à l'intérieur des minéraux préexistants. L'apatite (1 %) en microcristaux trapus ou aciculaires, se trouve libre ou en inclusions dans les minéraux. Le zircon (0,2 %) se présente en inclusions à auréole pléochroïque dans les cristaux de feldspath alcalin et de plagioclase (Fig. 38e).

IV.3.4.2. Granites à amphibole et biotite

IV.3.4.2.1. Extension et caractères macroscopiques

Les granites à biotite et amphibole affleurent principalement en dôme (Fig. 39a) à une altitude de 2010 m dans la localité de Nkounden. Sur ce dôme on observe des fractures qui facilitent son démantèlement en blocs (Fig. 39b). Un pic de granite à amphibole et biotite fragmenté et contenant des enclaves mafiques affleure derrière l'école d'agriculture et d'élevage (Fig. 39c). On y trouve aussi de boules montrant la fracture en V (Fig. 39e). Dans l'ensemble, l'homogénéité lithologique est rompue à l'affleurement par la présence des intrusions basiques. La principale phase minérale est constituée des cristaux de quartz, de feldspath et de ferromagnésiens. Les granites à amphibole et biotite présentent dans l'ensemble une couleur gris clair à sombre. Les cristaux de quartz sont aussi subarrondis avec des diamètres pouvant atteindre 2 mm.



Figure 39. Affleurements de granites à amphibole et biotite du Massif du Nkogam. **a)** En dôme montrant un démantèlement en prisme ; **b)** Bloc métrique issu du dôme ; **c)** Pic de granite à amphibole et biotite fragmenté avec enclaves mafiques ; **d)** Boule de granite à amphibole et biotite montrant une mécanique de fracture en V à Nkounden.

IV.3.4.2.2. Étude microscopique

Les granites à amphibole et biotite du complexe de Nkogam présentent des minéraux faits de quartz, plagioclase, orthose, biotite, amphibole, sphène, zircon, apatite et oxydes.

- **Quartz**

Le quartz (20-30 %) se présente en polycristaux, subautomorphes à xénomorphes de tailles variées. La taille des cristaux varie de 0,2 x 0,3 mm à 0,6 x 0,7 mm. Cependant l'on note quelques macrocristaux de taille d'environ (0,9 x 1,5 mm). Un phénocristal de Quartz interstitiel moule les cristaux de feldspath alcalin (Fig. 40a). Par endroits, l'on observe dans la lame des microstructures granophyriques, qui se développent au détriment de l'orthose. L'on note des associations de microstructures granophyriques et micrographiques (Fig. 40b) formée par les cristaux de quartz et feldspath. Les cristaux de quartz présentent une orientation formant ainsi un graphisme (Fig. 40c).

- **Orthose**

L'orthose (45-50 %) est le feldspath alcalin le plus abondant dans la roche en microcristaux qu'en phénocristaux automorphes et se trouve parfois accolée à leur congénère. Ces cristaux de feldspath alcalin ont des dimensions comprises entre 0,3 x 0,2 mm et 0,4 x 0,7 mm. L'on observe des cristaux perthitiques formant une association avec les amas de quartz (Fig.40a). De nombreux cristaux montrent une macle simple recourbée en arc de cercle (Fig. 41a). Un phénomène particulier est observé, il s'agit de l'inclusion des paillettes de biotites dans des sections du feldspath, au point où certains cristaux de feldspath sont partiellement pseudomorphosés par la biotite (Fig. 41a). Les cristaux d'orthose contiennent des inclusions automorphes de plagioclase, d'oxyde, d'amphibole et d'apatite.

- **Plagioclase**

Le plagioclase (3 à 5 %) se présente en microphénocristaux et phénocristaux automorphes de tailles variant de 0,2 x 0,3 mm à 0,8 x 0,9 mm. Les cristaux présentent une macle simple d'albite ou une macle polysynthétique (Fig. 40d). Un cristal de plagioclase s'altère en séricitite brun-rose (Fig. 40e), en kaolinite alors d'autres se transforment en produit rougeâtre : c'est une pseudomorphose (Fig. 40f). L'on note la transformation des plagioclases en séricitite du centre vers les bordures. De petits fragments de plagioclase forment des associations avec les minéraux tels que le quartz, l'orthose et l'amphibole.

- **Amphibole**

L'amphibole (environ 8-10 %) du volume de la roche, elle est subautomorphe et parfois fragmentée. L'amphibole se présente soit sous forme de petits cristaux de taille variant entre 0,2 x 0,1 et 0,4 x 0,5 mm. Ces cristaux se trouvent en interstice entre les cristaux de quartz et de feldspath alcalin. Notons la transformation de certains cristaux en chlorite (Fig. 41b). Certains phénocristaux d'amphibole moulent des cristaux primaires d'oxydes opaques.

- **Biotite**

La biotite (5-7 %) se présente en cristaux subautomorphes. Ce sont des cristaux de taille d'environ 0,2 x 0,6 mm. De nombreux cristaux de biotite sont associés aux cristaux de quartz, de feldspaths et de calcite (Fig. 41c). Quelquefois, l'on retrouve des oxydes qui se développent suivant les plans de clivage. Par endroits, l'on observe dans la lame des microstructures granophyriques, qui se développent au détriment de l'orthose. L'on note des associations de microstructures granophyriques et micrographiques (Fig. 40b) formée par les cristaux de quartz et feldspath. Les cristaux de quartz présentent une orientation formant ainsi un graphisme (Fig. 40c).

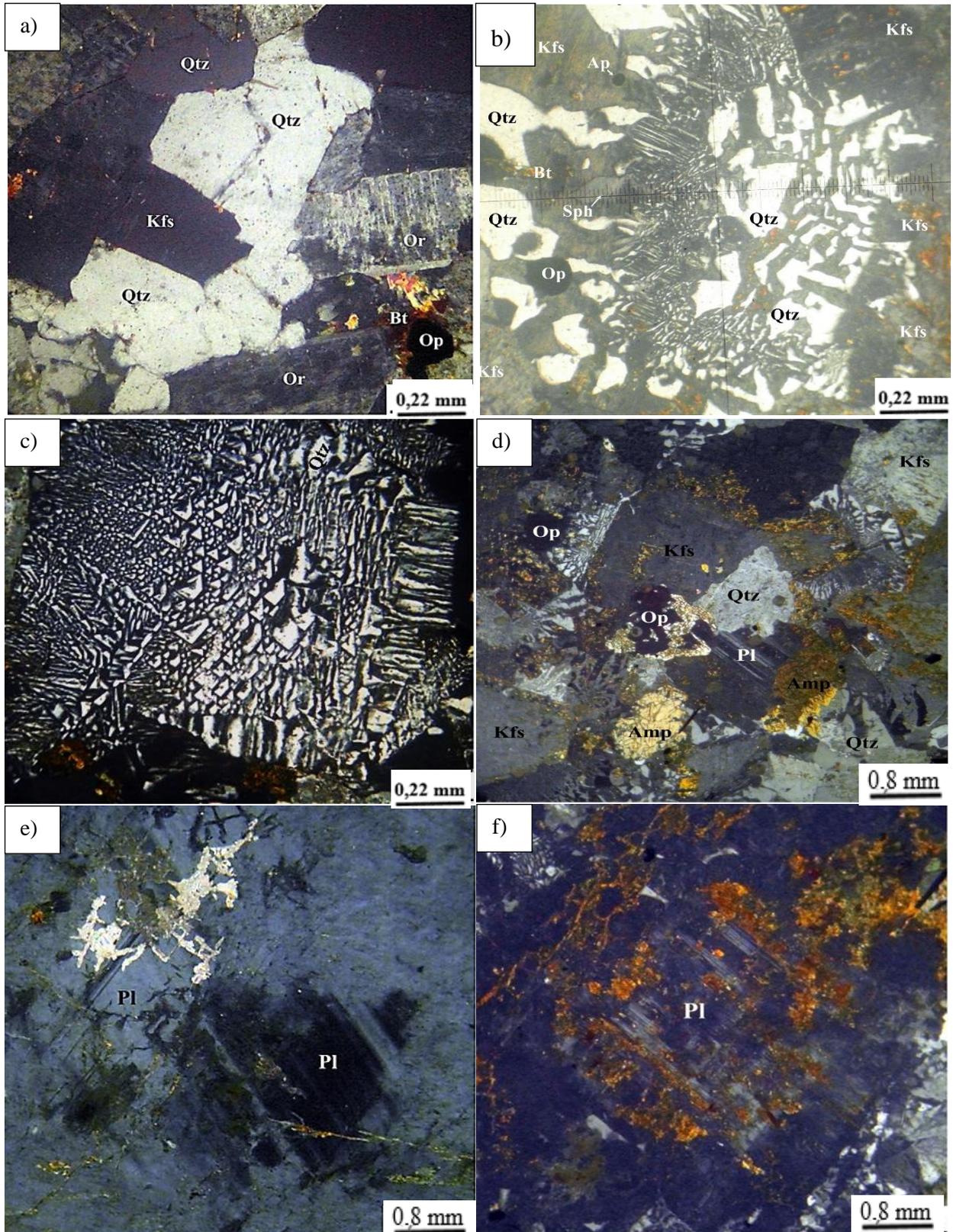


Figure 40. Microphotographies des granites à biotite et amphibole en LPA. **a)** Quartz interstitiel moulant les cristaux de feldspath alcalin (NK3). **b)** Association des microstructures granophyriques et micrographiques. **c)** Association granophyrique de quartz et d'orthose : noter les plages de quartz de forme hébraïque de même orientation disposés en inclusion dans le feldspath alcalin (Nk14). **d)** Cristal de plagioclase associé à l'amphibole et au quartz. **e)** Déstabilisation en séricite du plagioclase. **f)** Transformation d'un phénocristal de plagioclase en produit rougeatre.

- **Minéraux accessoires**

Les oxydes (1-2 %) sont rarement primaires. Ils sont isolés dans la roche, leur diamètre dépasse parfois 0,3 mm. Certains cristaux se développent à l'intérieur des minéraux préexistants. L'apatite (1 %) en microcristaux trapus ou aciculaires, se trouve libre ou en inclusions dans les minéraux. Le zircon (0,2 %) se présente en inclusions à auréole pléochroïque dans la biotite.

- **Minéraux secondaires**

La chlorite et certains minéraux opaques proviennent de l'altération de la biotite et de l'amphibole. La séricite se présente en aiguilles dans les baguettes de plagioclase et les fentes des feldspaths. La calcite (Fig. 41c) est interstitielle entre les cristaux de feldspaths.

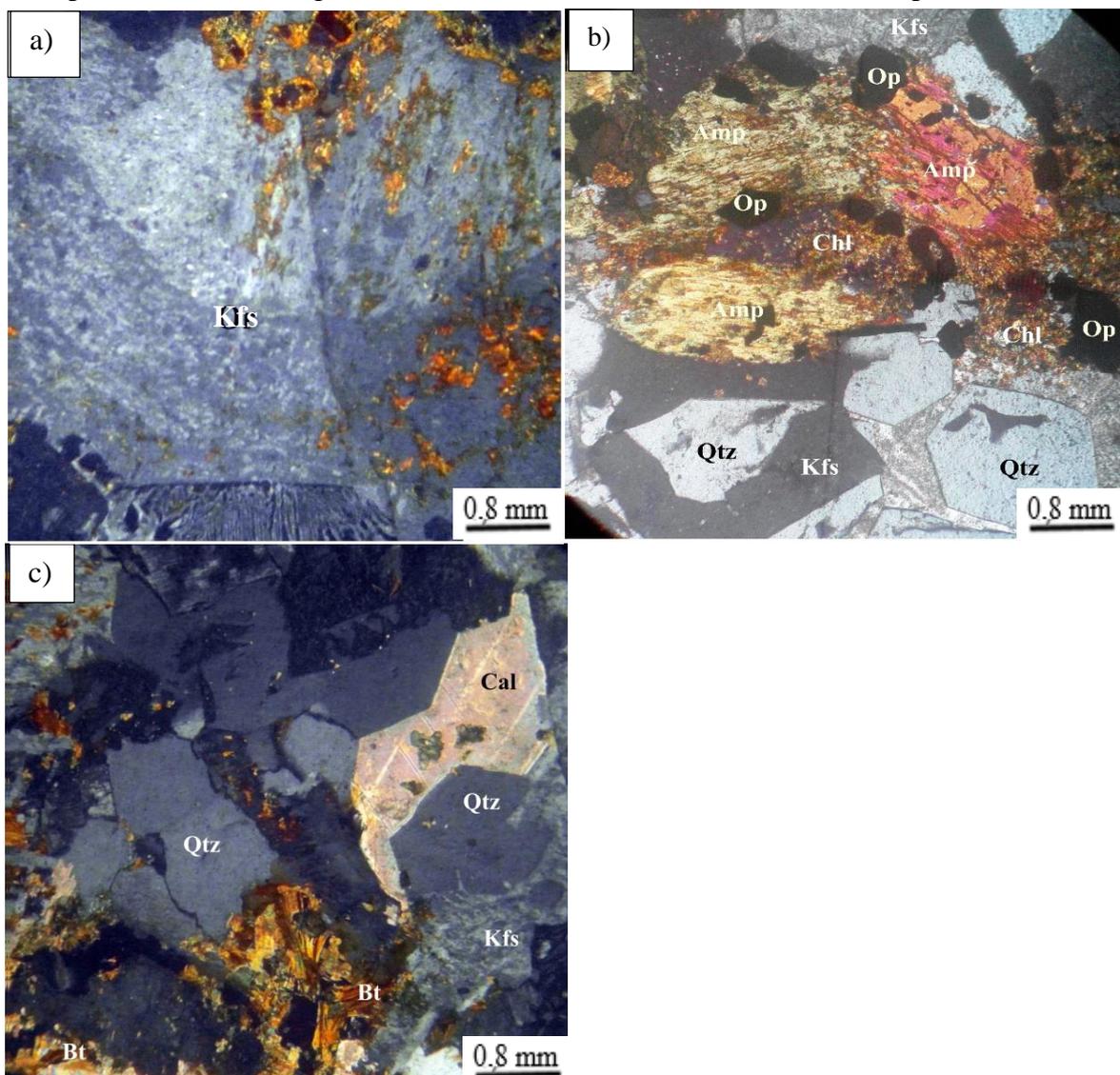


Figure 41. Microphotographies des granites à amphibole et biotite. **a)** Orthose flexueuse contenant un produit brun-rougeâtre traduisant la pseudomorphose du feldspath par les paillettes de biotite. **b)** Cristal d'amphibole en cours de chloritisation moulant des cristaux d'oxydes, associé aux cristaux de K-feldspath et de quartz. **c)** Biotite associée au quartz et à la Calcite (G15x).

IV.3.5. Granophyres

IV.3.5.1. Extension et aspect macroscopique

Les granophyres affleurent en blocs (Fig. 42 a), au Sud-Ouest du secteur d'étude, dans un canton Bororos à 1500 m au Nord du lac Petponoun (éch. NK11). Ces roches sont de couleur blanchâtre, de texture grenue porphyroïde et très pauvres en minéraux ferromagnésiens. L'échantillon sain de granophyre (Fig. 42b) est constitué des cristaux de la taille du millimètre. Dans ce type pétrographique, on observe des minéraux blancs tels que le quartz et les feldspaths pour la phase principale et accessoirement de rare ferromagnésiens.

IV.3.5.2. Étude microscopique

À l'échelle microscopique, les échantillons de granophyre du complexe anorogénique montrent une microstructure granophyrique (Fig.42c). Les granophyres forment une association minéralogique constituée des cristaux de quartz, plagioclase, orthose, zircon, apatite et oxydes.

- **Feldspath alcalin**

Le feldspath alcalin (48-50 %) est l'orthose. Il existe en phénocristaux de taille millimétrique atteignant 0,4 x 0,6 mm. Quelques sections de dimensions moyennes de l'ordre de 0,4 x 0,3 mm sont associées aux amas de cristaux de quartz. Les cristaux d'orthose sont xenomorphes. L'on trouve de nombreuses petites sections de quartz en inclusion dans l'orthose.

- **Quartz**

Le quartz (27- 32 %) se présente en forme de cristaux xénomorphes. Les dimensions des cristaux de quartz varient de 0,1 x 0,2 mm à 0,2 x 0,5 mm. Certains cristaux présentent une extinction ondulante. Les microcristaux remplissent les interstices se trouvant entre les phénocristaux d'orthose. Notons des associations de quartz avec le feldspath alcalin donnant ainsi une structure granophyrique (Fig. 42d)

- **Plagioclase**

Le plagioclase (5-8 %) se présente en plaquettes automorphes à subautomorphes. Les dimensions des cristaux sont variables et atteignent parfois 0,2 x 0,4 mm. On rencontre souvent des plaquettes de plagioclase maclé albite et manebach (Fig. 42e). Les cristaux de plagioclase sont en associations avec des cristaux de quartz, d'orthose et les minéraux opaques.

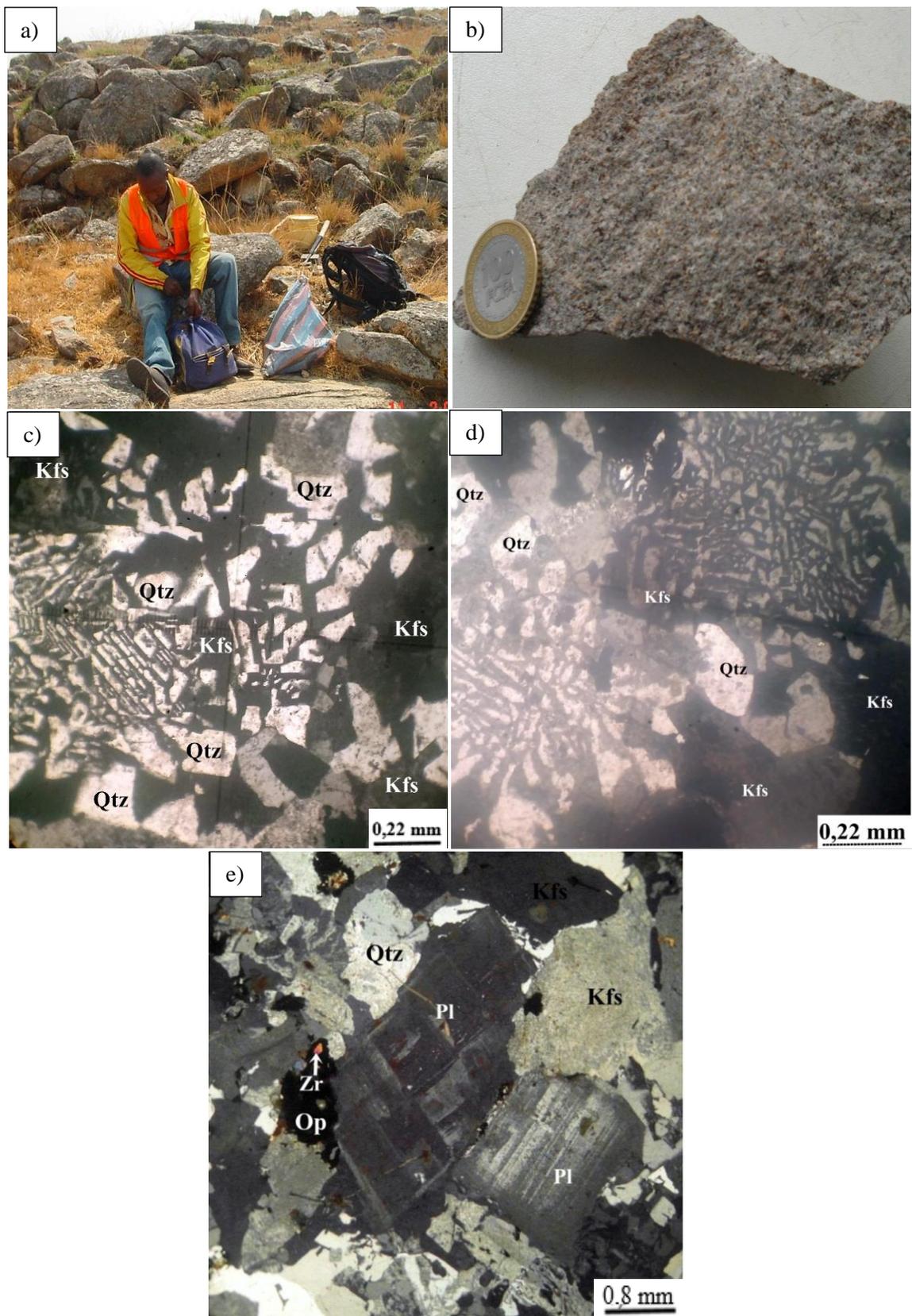


Figure 42. Photographies et Microphotographies des granophyres. **a)** Blocs centimétriques à décimétriques de granophyre. **b)** Echantillon sain de granophyre **c)** microstructures granophyriques dans un granophyre (NK11). **d)** Symplectites de quartz et feldspath entourant un minéral de feldspath **e)** Plagioclases montrant les macles polysynthétique et manebach dans un granophyre.

- **Minéraux accessoires**

L'apatite (0, 2 %) en cristaux trapus ou aciculaires, relativement abondante, est en inclusions dans les principales phases minérales.

La biotite (0, 5 %) en petites lamelles dispersées, présente des taches noires dues à l'oxydation.

Le zircon (0, 2 %) se présente en microcristaux automorphes incolores ou de teinte bleue. Il est généralement associé aux oxydes ou en inclusion dans les lamelles de biotite en cours de transformation en oxyde (Fig. 42e).

Les minéraux opaques représentent 1 à 2 % du volume de la roche. Ils sont dispersés dans celle-ci et en inclusion dans les autres minéraux.

- **Minéraux secondaires**

La séricite se présente en très faible proportion environ 0,1% dans la roche, de taille d'environ 0,02 mm. Elle provient de la transformation des cristaux de plagioclase.

Conclusion de l'étude pétrographique

Les données pétrographiques du secteur d'étude révèlent la présence de roches métamorphiques (gneiss et amphibolites) constituant du socle et des roches volcaniques (basaltes et ignimbrites) et plutoniques (gabbros, syénites, syénogranites et granites alcalins) constituant du massif.

Les roches métamorphiques sont subdivisées en deux types : les gneiss et les amphibolites. Les gneiss du secteur d'étude offrent une foliation peu marquée et des sigmoïdes de feldspath. Ces types sont constitués principalement des minéraux tels que : quartz, feldspath alcalin, biotite, amphibole et minéraux opaques et accessoirement du zircon et du sphène. Enfin la phase secondaire est constituée de chlorite. La texture de ces roches est granoblastique hétérogranulaire. Ces roches sont marquées par un phénomène accentué de recristallisation des minéraux. Les amphibolites sont des roches sombres à grain fin. Elles présentent une texture granolépido-nematoblastique.

La couverture volcanique du secteur d'étude, présente des coulées de lave mafiques à felsiques. Les laves mafiques se subdivisent en trois types en fonction de leur mode de mise en place. L'on distingue les basaltes de plateaux, les basaltes de massif et les filons de basalte. Les basaltes de plateau représentent les anciennes coulées de lave caractérisées par des textures microlitiques porphyriques et microlitiques aphyriques. L'association minéralogique est faite de plagioclase, de clinopyroxène, d'olivine et d'oxydes opaques. Ce dernier se distingue des basaltes de massif par le mode de mise en place, la rareté des cristaux d'olivine.

Seuls les basaltes aphyriques sont pourvus d'enclaves qui sont des fragments de socle arrachés sur les parois de la cheminée lors de la montée du magma. Les basaltes en filon sont caractérisés par une texture subophitique car l'on note la présence des clinopyroxènes moulés par des cristaux de plagioclase. Les ignimbrites constituent les laves felsiques de la zone étudiée. Elles sont toutes non soudées et renferment des enclaves de trachytes, basaltes, granites et gneiss. Les pyroclastites de Koutaba sont gris clair à gris sombre alors que ceux de Nkounden sont gris sombre à noir avec des yeux de feldspaths.

Les roches plutoniques de Nkogam sont : granites alcalins (granite à amphibole, granite à amphibole et biotite, granophyre), syénogranites (syénogranite à amphibole, syénogranite à amphibole et biotite), syénite à quartz et gabbro. Les granites présentent des modes d'affleurements variés. Leurs types pétrographiques sont distingués en fonction de l'abondance des minéraux ferromagnésiens (biotite et l'amphibole). Les syénogranites sont plus riches en feldspaths alcalins qu'en plagioclase et ferromagnésiens. Les granophyres sont riches en minéraux blancs, pauvres en minéraux ferromagnésiens et enchevêtrés. Les gabbros possèdent beaucoup de plagioclases et de clinopyroxène.

**CHAPITRE V : ÉTUDE GÉOCHIMIQUE DES GRANITOÏDES DU MASSIF DE
NKOGAM**

Cette étude est basée sur les analyses des éléments majeurs, traces et terres rares des échantillons représentatifs des roches du massif de Nkogam. Elle vise à classer ces roches, déceler leurs caractéristiques géochimiques, caractériser leur source magmatique et définir les processus pétrogénétiques ayant affecté le magma parent, de la source à la mise en place. Quinze (15) échantillons de roches plutoniques ont été analysés au laboratoire d'analyse géochimique 'Bureau Véritas' au Canada.

V.1. Nomenclature

Dans le diagramme Q'-ANOR (Fig. 43) de Streckeisen et Le Maître (1979), les roches plutoniques du Nkogam occupent les domaines des granites alcalins (granophyre, granite à amphibole, granite à amphibole et biotite), des syénogranites (syénogranite à amphiboles et syénogranites à biotite et amphibole) et de syénites à quartz. D'après Middlemost (1994) dans le diagramme $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ vs SiO_2 (Fig. 44) les échantillons sont dans les champs des granites et de la monzonite. Les différences notables avec la classification précédente est l'absence de la syénite à quartz et des syénogranites respectivement de compositions de monzonite et de granite. Dans la suite du travail, la nomenclature retenue pour la classification des différents types pétrographiques étudiés est celle de Streckeisen et Le Maître (1979). C'est elle qui spécifie mieux les différents types lithologiques tel que observé sur le terrain.

L'indice de différenciation (ID) varie de 87,68 à 92,71 pour les granites alcalins, 85,22 à 89,85 pour les syénogranites et est de 68,10 pour la syénite à quartz (tableau 6). Les roches plutoniques felsiques du massif de Nkogam occupent le domaine metalumineux à faiblement hyperalumineux du diagramme A/NK-A/CNK de Maniar et Piccoli (1989) et Chappell et White (1992). Le massif de Nkogam est formé en majorité des granitoïdes de type I ($A/CNK < 1,1$; Fig. 45a). Seuls deux échantillons (NK 38 ; GO1) de granites alcalins sont de type S ($A/CNK > 1,1$) avec des teneurs constantes en Na_2O soit 3,91 %. Les syénogranites sont dans l'ensemble de type I. Les roches plutoniques felsiques du complexe de Nkogam ont des valeurs $\text{FeOt}/(\text{FeOt}+\text{MgO})$ comprises entre 0,93 et 0,99 (Fig. 45b) ; elles sont qualifiées de ferreuses d'après Frost et Frost (2008). Les roches plutoniques felsiques du complexe de Nkogam sont de nature alcaline (Fig. 46a ; Sylvester, 1989) à alcaline calcique (Fig. 46b ; Frost et al., 2001).

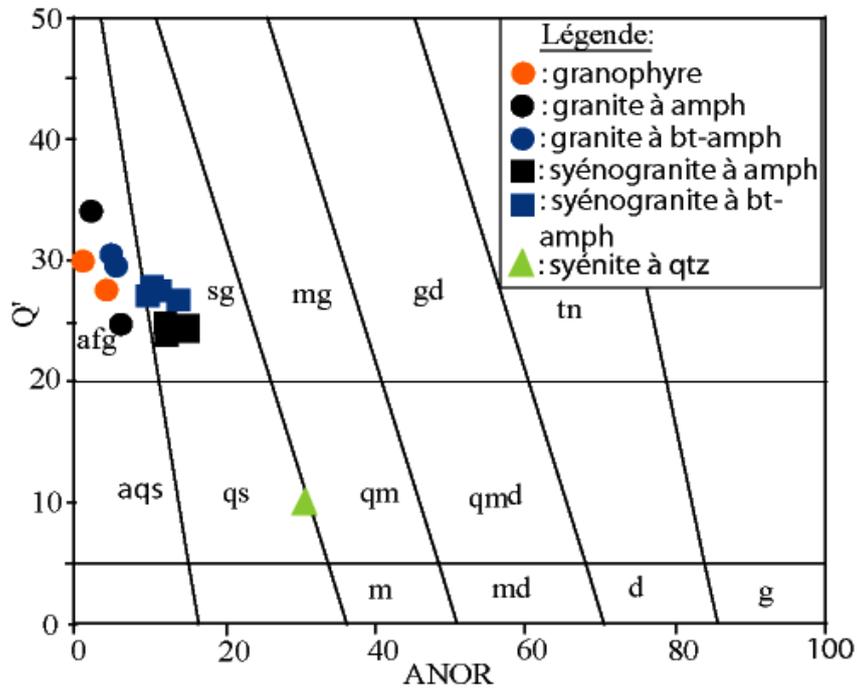


Figure 43. Position des granitoïdes de Nkogam dans le Diagramme normatif $Q'=f(ANOR)$ de Streckeisen et Le Maître (1979). $Q'=100Q/(Q+Or+Ab+An)$, $ANOR=100An/(An+Or)$. afg=granite à feldspaths alcalins; sg=syénogranite; mg=monzogranite; gd=granodiorite; tn=tonalite; aqs=syénite alcaline à quartz; qs=syénite à quartz; qm=monzonite à quartz; m=monzonite; qmd=monzodiorite à quartz; md=monzodiorite; d=diorite; g=gabbro.

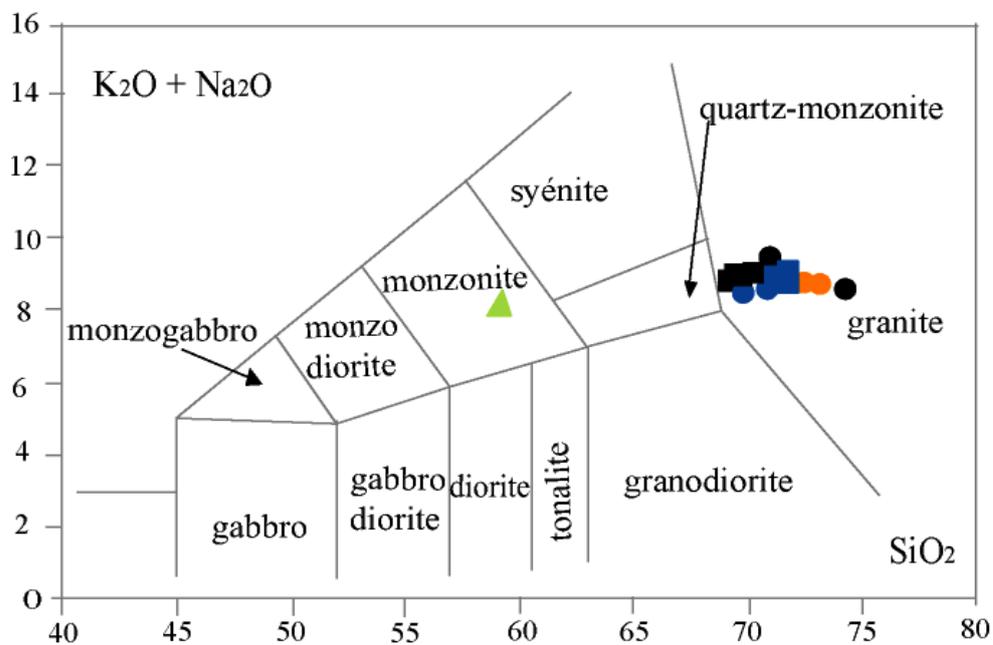


Figure 44. Classification des granitoïdes de Nkogam dans le diagramme TAS de Middlemost (1994).

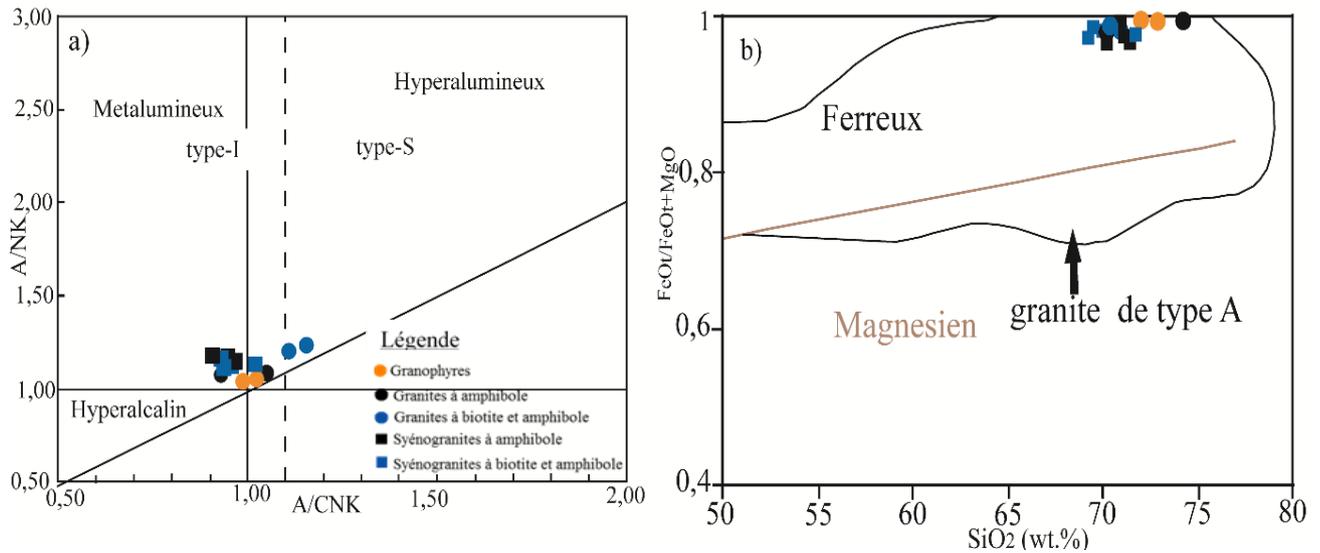


Figure 45. a. Diagramme de variation $A/NK = Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O)$ vs. $A/CNK = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$ de Maniar et Piccoli (1989) montrant la position des roches plutoniques de Nkogam. La limite entre les granites I- et S-type est de Chappell et White (1992). b) $FeOt / (FeOt + MgO)$ versus SiO_2 (Frost et Frost, 2008) champ de granite A-type selon Frost et al. (2001).

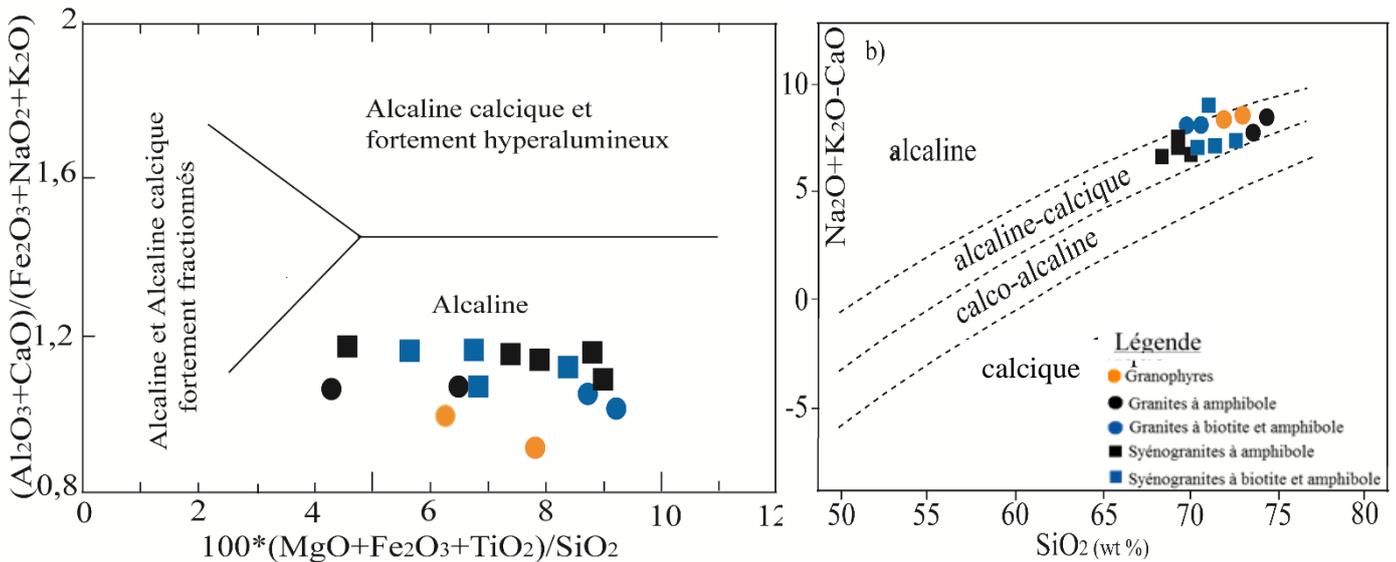


Figure 46. Diagrammes indiquant la nature alcaline des granitoïdes de Nkogam. a) $100 * (MgO + Fe_2O_3 + TiO_2) / SiO_2$ vs $(Al_2O_3 + CaO) / (Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O)$ (Sylvester, 1989); b) $Na_2O + K_2O - CaO$ versus SiO_2 (Frost et al., 2001).

V.2. Granites alcalins

Ce sont les granophyres, les granites à amphibole et les granites à biotite et amphibole.

V.2.1. Éléments Majeurs

Les intervalles de variation des teneurs en éléments majeurs sont les suivants : SiO_2 (69,85 - 74,41 %), TiO_2 (0,16 - 0,38 %), Al_2O_3 (12,39 - 13,91 %), $Fe_2O_3^t$ (3,02 - 5,18 %), MnO (0,05 - 0,07 %), MgO (0,01 - 0,13 %), CaO (0,08 - 0,81 %), Na_2O (3,69 - 5,03 %), K_2O (3,79 - 5,07 %) et P_2O_5 (0,02 - 0,07 %). La Perte au Feu (LOI) varie de 0,4 à 1,4 ; ces valeurs sont $< 3\%$ pour l'ensemble des granites alcalins du complexe.

La somme des alcalins ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) varie de 8,45 % dans un échantillon de granite à biotite et amphibole (G01) à 9,53 % dans le granite à amphibole (NK47).

Les granites alcalins du complexe anorogénique de Nkogam ont des valeurs $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O} < 2$ et les rapports $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ entre 0,75 et 1,34. La différence $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O} < 2$ nous conduit à qualifier les granites alcalins étudiés de sodi-potassiques à potassique selon Le bas et al. (1986).

Pour ce type pétrographique, l'ID varie de 87,68 dans les granites à amphibole et biotite (GOI) à 93,61 pour les granites à amphibole (NK3). La composition normative de ce type pétrographique se trouve dans le tableau (6) et est marquée par la présence du quartz normatif avec des teneurs de 22,36 % (NK47) à 32,43 % (NK3). Le corindon normatif (0,03-2,09) est présent dans tous les granites alcalins excepté l'échantillon NK47. Dans les diagrammes illustrant la variation des teneurs en différents oxydes en fonction des teneurs des oxydes en SiO_2 (Fig 47), on peut noter :

Le diagramme de variation de TiO_2 en fonction de SiO_2 (Fig. 47a) montre une forte corrélation négative des granites à amphibole et biotite aux granites à amphibole en passant par les granophyres, son coefficient de corrélation est de $R^2= 0,77$.

Dans le diagramme de variation de Al_2O_3 en fonction de SiO_2 (Fig. 47b), il existe une forte corrélation négative des granites à amphibole et biotite aux granites à amphibole en passant par les granophyres, son coefficient de corrélation est de $R^2= 0,94$.

Le diagramme de variation de Fe_2O_3^t en fonction de SiO_2 (Fig. 47c) montre une forte corrélation négative des granites à amphibole et biotite aux granites à amphibole en passant par les granophyres, avec pour coefficient de corrélation $R^2= 0,71$.

Les échantillons de granites alcalins présentent dans le diagramme de variation de MgO en fonction de SiO_2 (Fig. 47d) une corrélation négative des granites à amphibole et biotite aux granites à amphibole en passant par les granophyres, avec comme coefficient de corrélation $R^2= 0,71$.

Le diagramme de variation de CaO en fonction de SiO_2 (Fig. 47e) montre une faible corrélation négative du granite à amphibole au granite à amphibole en passant par les granites à amphibole et biotite et les granophyres, avec pour coefficient de corrélation $R^2= 0,48$.

Le diagramme de variation de MnO en fonction de SiO₂ (Fig. 47f) montre une faible corrélation négative des granites à amphibole et biotite aux granites à amphibole en passant par les granophyres, avec comme coefficient de corrélation qui est de $R^2 = 0,36$.

Dans le diagramme de variation de K₂O en fonction de SiO₂ (Fig. 47g) il y a une faible corrélation qui présente une courbe concave qui va du granite à amphibole et biotite au granite à amphibole en passant par les granophyres. Leur coefficient de corrélation est de $R^2 = 0,36$

Le diagramme de variation de Na₂O en fonction de SiO₂ (Fig. 47h) présente une courbe convexe. Elle présente une corrélation positive des granites à amphibole et biotite aux granophyres et une corrélation négative des granophyres au granite à amphibole. Le coefficient de corrélation est de $R^2 = 0,85$.

Une corrélation négative est observée dans le diagramme de variation de P₂O₅ en fonction de SiO₂ (Fig. 47i). Elle va des granites à amphibole et biotite aux granites à amphibole en passant par les granophyres, avec pour un coefficient de corrélation $R^2 = 0,69$.

V.2.2. Eléments en traces

Les teneurs en éléments traces des granites alcalins de Nkogam sont reportées dans le tableau 7. Les teneurs en Sr varient de 28,7 ppm dans le granite à amphibole (NK 3) à 70,1 dans le granophyre (NK11) puis oscillent entre 124,2 et 128,1ppm dans les granites à amphibole et biotite (NK38-GO1). Celles en Y varient aussi de 63,6 ppm (NK 38) à 119,1 ppm (NK 12) et de faibles concentrations qui varient de 5,1 ppm (NK38) à 9,3 ppm (NK 12). L'uranium et le tantale ont des teneurs faibles, variant respectivement de 2,3 ppm (NK11) pour les granophyres à 3,8 ppm pour les granites à amphibole puis de 2,6 ppm (NK38) pour le granite à amphibole et biotite à 5,3 ppm (NK12) pour le granophyre ; alors que les teneurs en Ba varient de 424 ppm (NK3) à 978 ppm (NK47) dans les granites à amphibole et de 1057 à 1157 ppm des échantillons NK38 et GO1. Le Rb varie de 85,5 ppm (NK12) à 90,1 ppm (NK11) dans les granophyres, de 117,2 ppm dans le granite à amphibole et Biotite (GO1) à 168,7 ppm dans un granite à amphibole (NK3). Les échantillons de granite à amphibole et biotite (NK38) indiquent de fortes teneurs en Sr (128,1 ppm) et en Rb (148,4 ppm). La teneur en Zr varie de 392,8 ppm des granites à amphibole (Nk3) à 931,6 ppm dans les granophyres. La concentration en Nb varie de 45,2 ppm du granite à amphibole et biotite (NK38) à 81,6 ppm dans le granophyre (NK12).

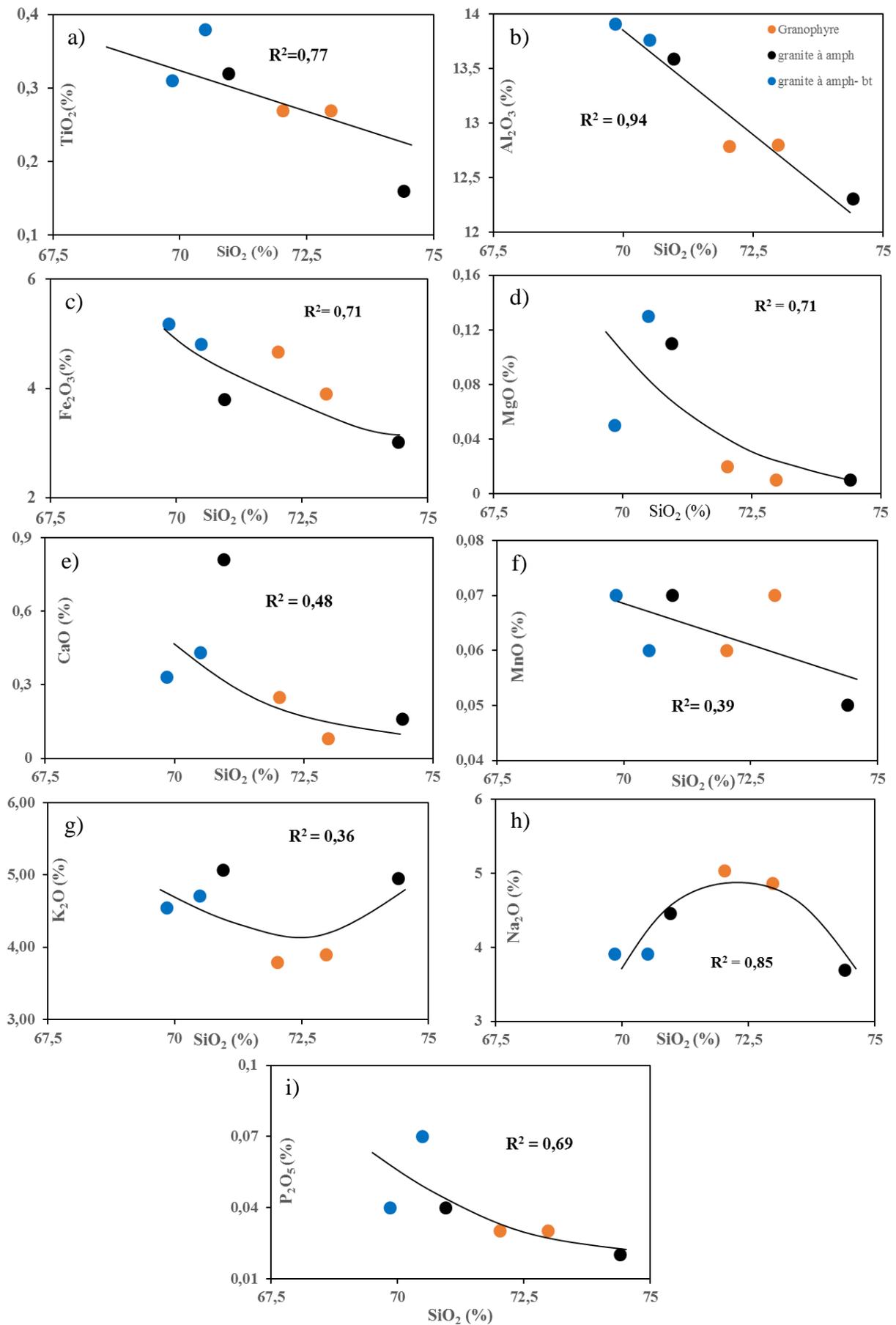


Figure 47. Diagramme de variations des différents oxydes en fonction de SiO₂ des granites alcalins.

En somme, les granites alcalins du complexe anorogénique de Nkogam sont riches en LILE (Rb, Ba, Th, Sr). Les teneurs en Sn sont comprises entre 4 et 7 ppm. Les teneurs en Cu sont comprises entre 1,7 et 7,1 ppm. Les valeurs de Co varient de 0,5 à 1,4 ppm.

V.3. Syénogranites

V.3.1. Éléments Majeurs

Les syénogranites du Massif du Nkogam sont caractérisés par des teneurs variables en SiO_2 (69,05 à 71,49 %). Leur teneur en Al_2O_3 est comprise entre 13,09 et 13,72 %. Celle de Fe_2O_3 est comprise entre 3,44 et 4,86 %. Les teneurs en MnO varient de 0,06 à 0,11 %. Les teneurs en MgO varient entre 0,05 et 0,07, puis avec quelques qui des teneurs égales à 0,12 %. Ces roches possèdent des teneurs en CaO comprises entre 0,62 et 1,68 %, en Na_2O comprises entre 3,95 et 4,28 %, et des teneurs élevées en K_2O (4,47 - 4,88 %). TiO_2 (0,24 et 0,37 %) et P_2O_5 (0,04 - 0,06 %) ont des teneurs faibles. La Perte au Feu (0,5 à 1,3 %) de tous les échantillons de syénogranites du massif de Nkogam est < 3 %. Preuve que ces roches sont non altérées.

La somme des alcalins ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) varie de 8,7 dans un échantillon de syénogranite à biotite et amphibole (NK44) à 9,03 % dans le syénogranite à amphibole (NK41).

L'ID présente des valeurs comprises entre 85,22 et 89,85. La composition normative des syénogranites du complexe de Nkogam se trouve dans le tableau 6 et est marquée par la présence du quartz normatif avec des teneurs qui varient de 21,80 % (NK14) à 26,17 % (G15x). Le diopside normatif est présent dans tous les syénogranites avec des valeurs allant de 0,79 (NK15) à 268 (NK14) exception faite de G13. Le corindon normatif est absent dans tous les syénogranites exception faite de G13 (0,44).

Dans les diagrammes illustrant la variation des teneurs en différents oxydes en fonction des teneurs des oxydes en SiO_2 (Fig 48), on peut noter :

Le diagramme de variation de TiO_2 en fonction de SiO_2 (Fig. 48a) montre une forte corrélation négative des syénogranites à amphibole aux syénogranites à amphibole et biotite, son coefficient de corrélation est de $R^2= 0,60$.

Dans le diagramme de variation de Al_2O_3 en fonction de SiO_2 (Fig. 48b), il apparaît une forte corrélation négative des syénogranites à amphibole aux syénogranites à amphibole et biotite avec comme coefficient de corrélation $R^2= 0,81$.

Le diagramme de variation de Fe_2O_3^t en fonction de SiO_2 (Fig. 48c) montre une forte corrélation négative des syénogranites à amphibole aux syénogranites à amphibole et biotite avec pour coefficient de corrélation $R^2 = 0,78$.

Les échantillons de syénogranites présentent dans le diagramme de variation de MgO en fonction de SiO_2 (Fig. 48d) une dispersion de points. Ce nuage de points traduit une mauvaise corrélation observée. Dans l'ensemble, les syénogranites à amphibole et les syénogranites à amphibole et biotite affichent un coefficient de corrélation de $R^2 = 0,22$.

Le diagramme de variation de CaO en fonction de SiO_2 (Fig. 48e) montre une faible corrélation négative des syénogranites à amphibole aux syénogranites à amphibole et biotite, avec pour coefficient de corrélation $R^2 = 0,48$.

Le diagramme de variation de MnO en fonction de SiO_2 (Fig. 48f) montre une forte corrélation négative des syénogranites à amphibole aux syénogranites à amphibole et biotite, avec comme coefficient de corrélation $R^2 = 0,71$.

Dans le diagramme de variation de K_2O en fonction de SiO_2 (Fig. 48g) il y a deux tendances de corrélation. L'une négative des syénogranites à amphibole aux syénogranites à amphibole et biotite et l'autre positive du syénogranite à amphibole aux syénogranites à amphibole et biotite. Leur coefficient de corrélation est de $R^2 = 0,50$.

Dans le diagramme de variation de Na_2O en fonction de SiO_2 (Fig. 48h) l'on observe une courbe à faible concavité. Ce diagramme présente une faible corrélation négative des syénogranites à amphibole aux syénogranites à amphibole et biotite. Le coefficient de corrélation est de $R^2 = 0,48$.

Un nuage de points est observé dans le diagramme de variation de P_2O_5 en fonction de SiO_2 (Fig. 48i). Le coefficient de corrélation dans ce cas est mauvais car il est de $R^2 = 0,27$.

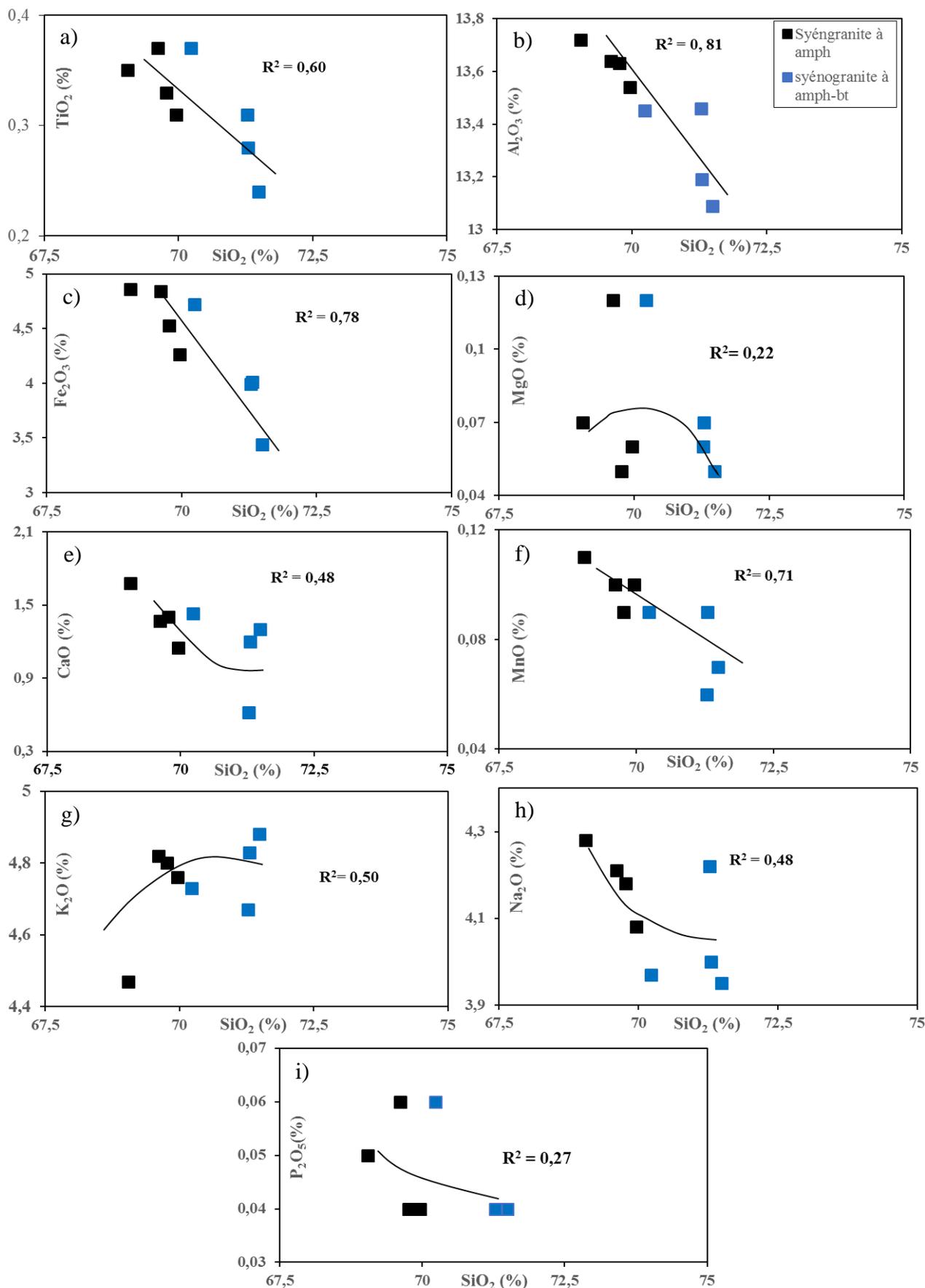


Figure 48. Diagramme de variations des différents oxydes en fonction de SiO₂ des syénogranites.

V.3.2. Éléments en trace

Les éléments en trace des syénogranites du complexe de Nkogam sont caractérisés par des concentrations faibles à élevées en Sr (104,3 -172,6 ppm), Y (60,0-138,8 ppm) et Yb (5,0-8,9 ppm) (Tableau.7). L'U et le Ta ont des teneurs faibles, variant respectivement de 2,8 ppm (NK14) pour les syénogranites à amphibole à 4,3 ppm pour les syénogranites à amphibole et biotite et de 2,9 ppm (G7) à 3,9 ppm (NK17) ; le Ba a des teneurs qui varient de 690 ppm (G15x) à 915 ppm (NK44) dans les syénogranites à amphibole et biotite, de 1075 ppm (NK41) à 1245 ppm (NK15) pour les syénogranites à amphibole. Le Rb varie de 125,8 à 160,7 ppm dans les syénogranites à amphibole (NK14) et de 155,5 à 176,7 ppm dans un syénogranite à amphibole et biotite (G7). L'échantillon de syénogranite à amphibole (NK14) qui a la plus forte teneur en Sr a la plus faible concentration en Rb. Les teneurs en Zr (459,7 - 691,9 ppm) et Nb (46,5 - 60,4 ppm) sont assez élevées dans les syénogranites. En somme, les syénogranites du complexe de Nkogam sont aussi riches en LILE (Rb, Ba, Sr). Cependant les teneurs en ces éléments sont plus élevées dans les granites alcalins que dans les syénogranites. Les teneurs en Sn sont comprises entre 3 et 6 ppm. Les teneurs en Cu sont comprises entre 1,8 et 4,6 ppm. Les teneurs de Co varient de 0,6 à 1,2 ppm.

V.4. Syénite à quartz

V.4.1. Éléments Majeurs

La syénite à quartz du massif présente une teneur en SiO₂ (59,29 %), TiO₂ (0,85 %), Al₂O₃ (15,14 %), Fe₂O₃^t (7,95 %), MnO (0,32 %), MgO (0,57 %), CaO (4,07 %), Na₂O (3,78 %), K₂O (4,36 %) et P₂O₅ (0,12 %). La perte au feu de cet échantillon de syénite à quartz est de 2,80 %. Cependant aussi inférieure à 3 %, ce qui stipule que cette roche est non altérée.

La somme des alcalins (Na₂O+K₂O) vaut 8,14 %. Le rapport K₂O/Na₂O equivaut à 1,15. L'échantillon représentatif affiche une valeur Na₂O-K₂O < 2, et par conséquence peut être qualifié de sodi-potassique selon Le bas et al. (1986).

L'ID de la syénite à quartz présente une valeur égale à 68,10. La composition normative de la syénite se trouve dans le tableau 6. L'on y note la présence du quartz normatif avec une teneur égale à 8,29 %. Le diopside normatif de la syénite à quartz présente une teneur égale à 7,20. Le corindon normatif est absent dans cette roche.

V.4.2. Éléments en trace

La concentration en Sr dans cette syénite à quartz est élevée (213,16 ppm) par rapport à celle des granites alcalins (Sr=168,7ppm) et des syénogranites (Sr = 172,6). La

concentration en Y (55,6 ppm) est inférieure aux concentrations de cet élément dans les granites alcalins et les syénogranites. La teneur en Yb (6,74 ppm) est circonscrite dans la fourchette des teneurs de syénogranites (5 à 8,9 ppm). La teneur en U (1,4 ppm) est inférieure à celles des syénogranites (2,8 - 4,3 ppm). La teneur en Ta (2,7 ppm) est faible et se situe dans la fourchette des teneurs en Ta (2,6-5,3) des granites alcalins. La concentration en Ba (303 ppm) est faible par rapport à celles des syénogranites (690-1245 ppm) et des granites alcalins (424-1157 ppm). La teneur en Rb (73,9 ppm) est inférieure à celle des syénogranites (125,8 ppm à 176,7 ppm) et des granites alcalins (85,5 - 168,7 ppm). La teneur en Zr (1743,5 ppm) est très élevée dans la syénite par rapport à celles des syénogranites (459,7 - 691,9 ppm) et des granites alcalins (392,8 - 931,6 ppm). La concentration en Nb (57,9 ppm) de la syénite à quartz est située dans la fourchette de concentration en Nb des granites alcalins (45,2 ppm à 81,6 ppm). En somme, l'on peut dire que la syénite du massif de Nkogam est aussi riche en LILE (Sr et Zr). La teneur en Sn est de 1 ppm. La teneur en Cu est de 17,1 ppm. La valeur de Co est de 5,7 ppm.

Tableau 6. Elements Majeurs (%) et norme CIPW des granitoïdes de Nkogam

Roches	Syénite	Syéno granites								Granites alcalins					
Types	Syénite à Qtz	Syenogranite –Amp				Syenogranite-bt-Amp				Granophyre		Granite Amp		Granite bt Amp	
Echan.	NK23	NK14	NK15	NK17	NK41	NK44	G15x	G7	G13	NK11	NK12	NK3	NK47	NK38	GO1
SiO₂	59,29	69,05	69,96	69,77	69,61	70,23	71,49	71,3	71,28	72,98	72,03	74,41	70,96	70,5	69,85
TiO₂	0,85	0,35	0,31	0,33	0,37	0,37	0,24	0,28	0,31	0,27	0,27	0,16	0,32	0,38	0,31
Al₂O₃	15,14	13,72	13,54	13,63	13,64	13,45	13,09	13,2	13,46	12,8	12,79	12,31	13,59	13,76	13,91
Fe₂O₃	7,95	4,86	4,26	4,53	4,84	4,72	3,44	4,01	3,99	3,9	4,67	3,02	3,79	4,81	5,18
MnO	0,32	0,11	0,1	0,09	0,1	0,09	0,07	0,09	0,06	0,07	0,06	0,05	0,07	0,06	0,07
MgO	0,57	0,07	0,06	0,05	0,12	0,12	0,05	0,07	0,06	0,01	0,02	0,01	0,11	0,13	0,05
CaO	4,07	1,68	1,15	1,4	1,37	1,43	1,3	1,2	0,62	0,08	0,25	0,16	0,81	0,43	0,33
Na₂O	3,78	4,28	4,08	4,18	4,21	3,97	3,95	4	4,22	4,86	5,03	3,69	4,46	3,91	3,91
K₂O	4,36	4,47	4,76	4,8	4,82	4,73	4,88	4,83	4,67	3,9	3,79	4,95	5,07	4,71	4,54
P₂O₅	0,12	0,05	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,04	0,07	0,04
Loi	2,8	1	1,3	0,8	0,5	0,5	1,2	0,7	1	0,8	0,6	0,9	0,4	0,9	1,4
Total	99,33	99,76	99,72	99,77	99,77	99,78	99,81	99,8	99,77	99,75	99,68	99,71	99,77	99,78	99,73
Na₂O	8,14	8,75	8,84	8,98	9,03	8,7	8,83	8,83	8,89	8,76	8,82	8,64	9,53	8,62	8,45
+K₂O															
Mg#	10,20	2,23	2,18	1,72	3,78	3,87	2,25	2,69	2,33	0,40	0,67	0,52	4,40	4,11	1,51
A/CNK	0,83	0,92	0,97	0,93	0,93	0,94	0,93	0,94	1,03	1,04	1,00	1,05	0,93	1,12	1,16
A/NK	1,38	1,15	1,14	1,13	1,12	1,15	1,11	1,12	1,12	1,05	1,03	1,08	1,12	1,19	1,23
ANOR	30,79	15,97	13,98	13,03	12,54	14,94	11,02	11,67	9,25	0,86	4,45	2,22	6,51	5,68	4,88
Q'	10,36	24,14	25,89	24,65	24,11	26,42	28,17	27,62	27,80	30,01	27,69	34,40	24,14	29,59	30,01
NORME CIPW															
Qtz	8,29	21,80	23,87	22,48	21,83	24,03	26,17	25,48	25,77	27,89	25,52	32,43	22,36	26,61	26,74
Or	26,68	26,75	28,60	28,67	28,70	28,15	29,24	28,80	27,93	23,28	22,61	29,59	30,17	28,15	27,29
Ab	33,12	36,67	35,10	35,75	33,89	33,84	33,89	34,15	36,14	41,54	42,97	31,59	38,00	33,46	33,65
An	11,87	5,09	4,65	4,30	4,11	4,94	3,62	3,80	2,85	0,20	1,05	0,67	2,10	1,69	1,40
Di	7,20	2,68	0,79	2,19	2,07	1,60	2,35	1,72	-	-	-	-	1,48	-	-
Hy	9,28	4,53	4,82	4,31	4,88	4,96	2,97	4,03	4,80	4,63	5,61	3,67	3,87	5,89	6,33
Mag	1,58	1,69	1,48	1,57	1,67	1,63	1,19	1,39	1,38	1,35	1,61	1,05	1,31	1,67	1,80
Ilm	1,67	0,67	0,60	0,63	0,71	0,71	0,46	0,54	0,60	0,52	0,52	0,31	0,61	0,73	0,60
Co	-	-	-	-	-	-	-	-	0,44	0,51	0,03	0,65	-	1,63	2,09
Ap	0,28	0,12	0,09	0,09	0,14	0,14	0,09	0,09	0,09	0,07	0,07	0,05	0,09	0,16	0,09
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
DI	68,10	85,22	87,57	86,91	86,42	86,03	89,30	88,43	89,85	92,71	91,10	93,61	90,54	88,22	87,68

V.5.2. Comportement des éléments en trace au cours de la différenciation

Le comportement des éléments en trace dans les diagrammes binaires est variable d'une roche à une autre.

V.5.2.1. Comportement des éléments en trace des granites alcalins

V.5.2.1.1. Comportement du Ba, Zr, Rb et Sr

Les teneurs en Ba varient de 798 ppm du granophyre (Nk11) à 1157 ppm dans le granite à amphibole et biotite (GO1), avec un échantillon qui sort du lot pour une valeur de 424 ppm. Le diagramme (Fig. 49a) montre une corrélation négative allant des granites à amphibole et biotite aux granites à amphibole en passant par les granophyres. Leur coefficient de corrélation est $R^2 = 0,8$.

Le zirconium (Zr) : varie de 515,9 ppm des granites à amphibole et biotite à 931,6 ppm dans le granophyre (Nk12), avec l'échantillon (NK3) qui a une faible teneur (392,8 ppm). Le diagramme de Zr en fonction de SiO_2 montre une mauvaise corrélation (Fig 49b) car son coefficient est $R^2 = 0,42$.

Les teneurs en Rb varient de 85,5 du granophyre (Nk12) à 168,7 ppm dans le granite à amphibole (NK3). La distribution de Rb en fonction de SiO_2 présente dans l'ensemble une mauvaise corrélation avec un coefficient $R^2 = 0,39$ (Fig. 49c).

La teneur en Sr est comprise entre 62,3 ppm de l'échantillon Nk47 et 128,1 ppm de l'échantillon Nk38. L'on note la présence d'un échantillon Nk3 avec une teneur faible (28,7 ppm) par rapport aux autres échantillons du même groupe. Le diagramme de Sr en fonction de SiO_2 montre un appauvrissement des granites à amphibole et biotite aux granites à amphibole (Fig 49d). Son coefficient de corrélation est $R^2 = 0,79$.

V.5.2.1.2. Comportement du Co, V, Zn et Ni

Les granites alcalins du complexe anorogénique de Nkogam présentent des teneurs en Co qui varient de 0,5 ppm du granite à amphibole (Nk3) à 1,4 ppm dans le granite à amphibole et biotite (NK 38). Le diagramme de Co en fonction de SiO_2 montre un appauvrissement continu des granites à amphibole et biotite aux granites à amphibole (Fig 50a) en passant par les granophyres. Cette corrélation négative avait été aussi observée dans les roches plutoniques du complexe anorogénique du Nlonako (Noudiedie Kamgang, 2021).

Le vanadium (V) a des teneurs constantes 8 ppm dans tous les granites alcalins. Pour cet élément, il n'existe pas de corrélation.

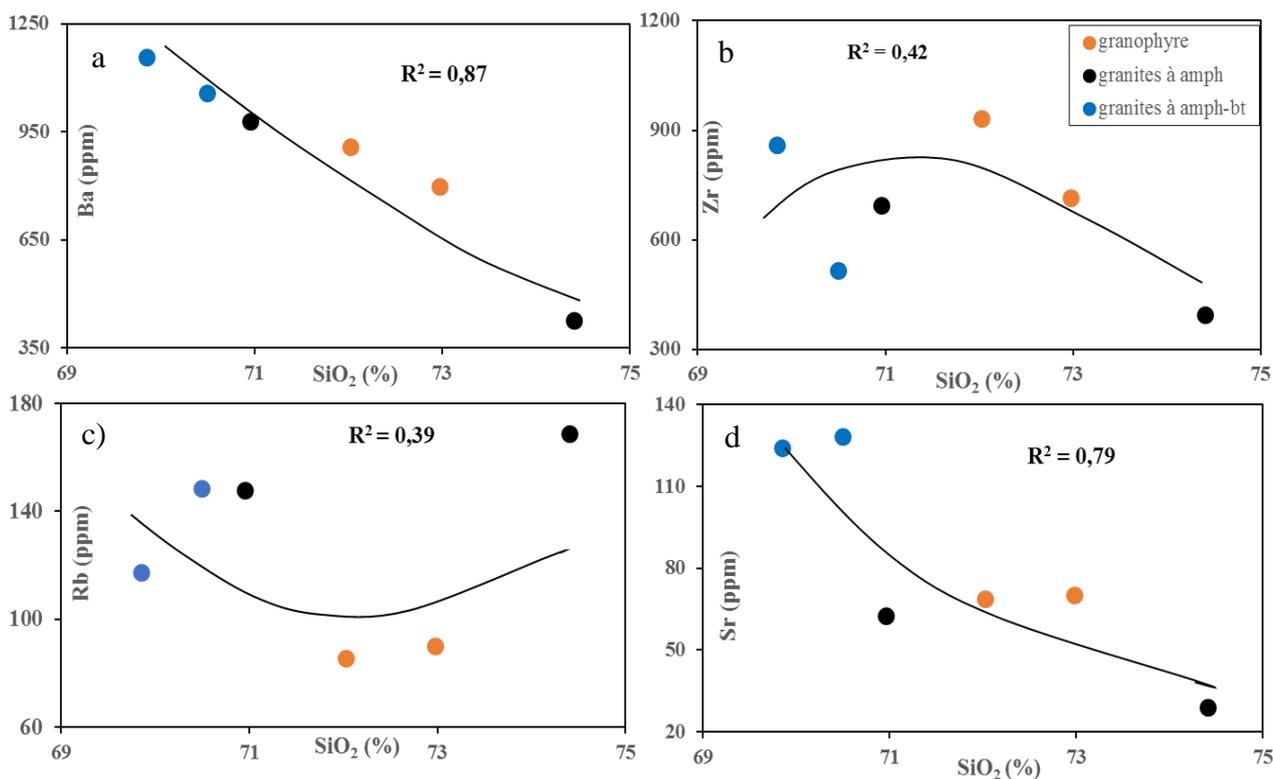


Figure 49. Diagramme de Harker de quelques éléments compatibles (Ba, Rb, Zr et Sr) des granites alcalins

Le Nickel (Ni) : dans les granites alcalins de Nkogam, les teneurs varient de 0,4 ppm des granites à amphibole (Nk47) à 1,1 ppm dans les granophyres (Nk12). Dans l'ensemble le Ni montre une dispersion de point pour les granites alcalins. Il affiche un mauvais coefficient de corrélation (Fig 50b), qui est de $R^2 = 0,02$

Le zinc (Zn) : les teneurs en Zn varient de 74 ppm dans le granite à amphibole et biotite (GO1) à 183ppm dans le granophyre (NK11) avec un échantillon (NK12) ayant une forte concentration (245 ppm). Le diagramme de Zn en fonction de SiO₂ montre une corrélation positive avec pour coefficient $R^2 = 0,73$ (Fig 50c). On note une courbe en forme de parabole.

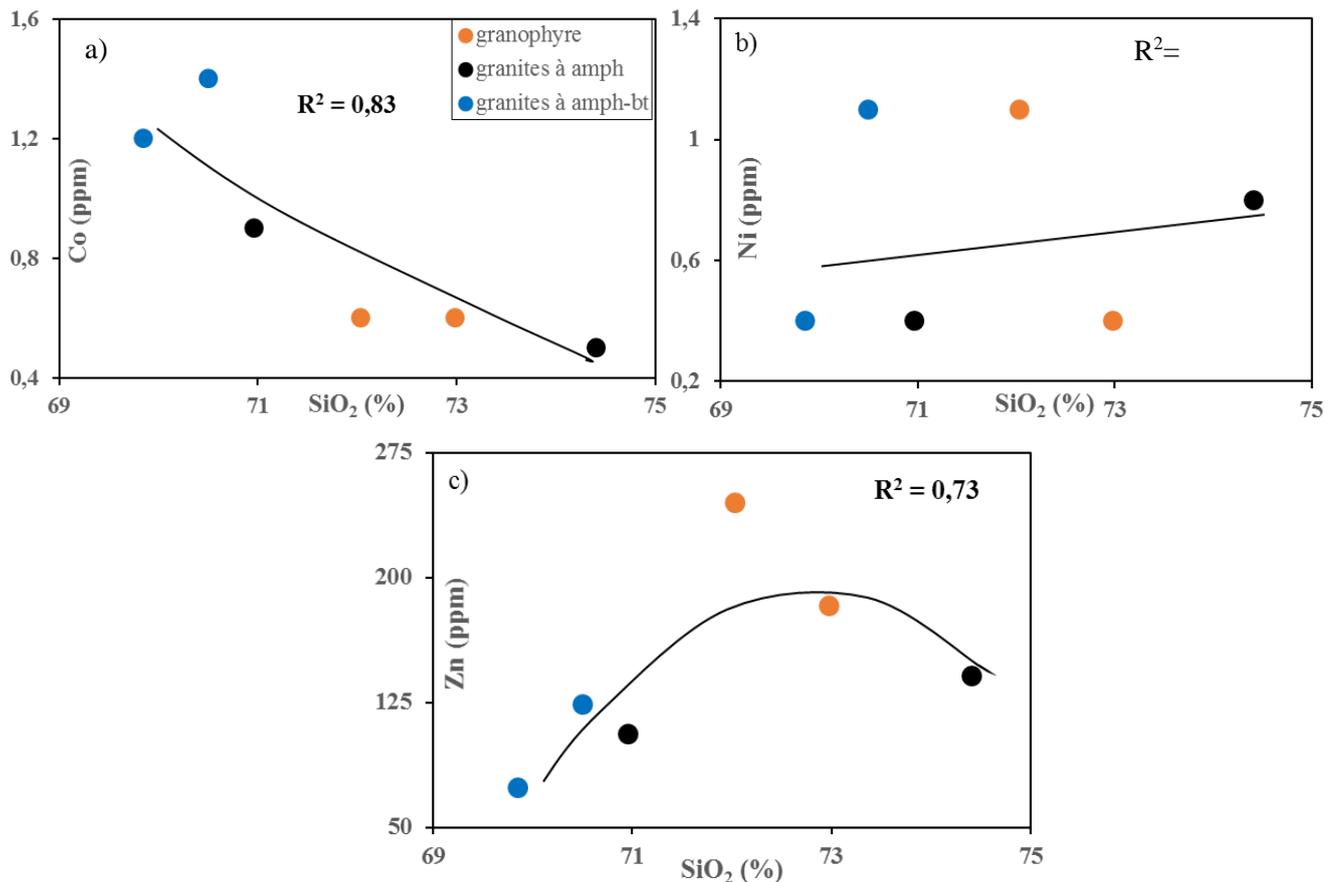


Figure 50. Diagramme de Harker de quelques éléments en trace (Co, Ni et Zn)

V.5.2.2. Comportement des éléments en trace des syénogranites

V.5.2.2.1. Comportement du Ba, Zr, Rb et Sr

Les teneurs Ba des syénogranites du complexe de Nkogam varient entre 690 ppm des syénogranites à amphibole et biotite (G15X) et 1086 ppm dans la syénogranite à amphibole (Nk14). Cependant, un échantillon du même type pétrographique (Nk15) présente une forte teneur, soit 1245 ppm. Le diagramme (Fig. 51a) montre une corrélation négative allant des syénogranites à amphibole aux syénogranites à amphibole et biotite. Cette corrélation négative est bonne car on a un coefficient de corrélation $R^2 = 0,73$. Cette évolution rappelle celle des formations des complexes de Nda Ali (Njonfang, 1986) et de Golda Zuelva (Jacquemin, 1981) respectivement au Sud-Ouest et au Nord du Cameroun.

Le zirconium (Zr) : varie de 459,7 ppm du syénogranite à amphibole et biotite (G15X) à 691,9 dans la syénogranite à amphibole (Nk15). Le diagramme de Zr en fonction de SiO₂ montre une bonne corrélation négative des syénogranites à amphibole aux syénogranites à amphibole et biotite (Fig 51b). Le coefficient de corrélation obtenu est $R^2 = 0,68$.

Les teneurs en Rb varient de 125,8 ppm des syénogranites à amphibole (Nk14) à 176,7 ppm dans les syénogranites à amphibole et biotite (G7). La distribution de Rb en fonction de SiO₂ présente dans l'ensemble une corrélation positive (Fig. 51c). Leur coefficient de corrélation est $R^2 = 0,69$.

La teneur en Sr est comprise entre 120,2 ppm des syénogranites à amphibole et biotite (G7) et 172,6 ppm dans la syénogranite à amphibole et biotite (Nk41). L'échantillon de syénogranite à amphibole et biotite (G15X) indique une faible teneur en Sr soit 104,3 ppm. Le diagramme de Sr en fonction de SiO₂ montre une corrélation négative. Cette corrélation très bonne est de $R^2 = 0,91$ (Fig 51d).

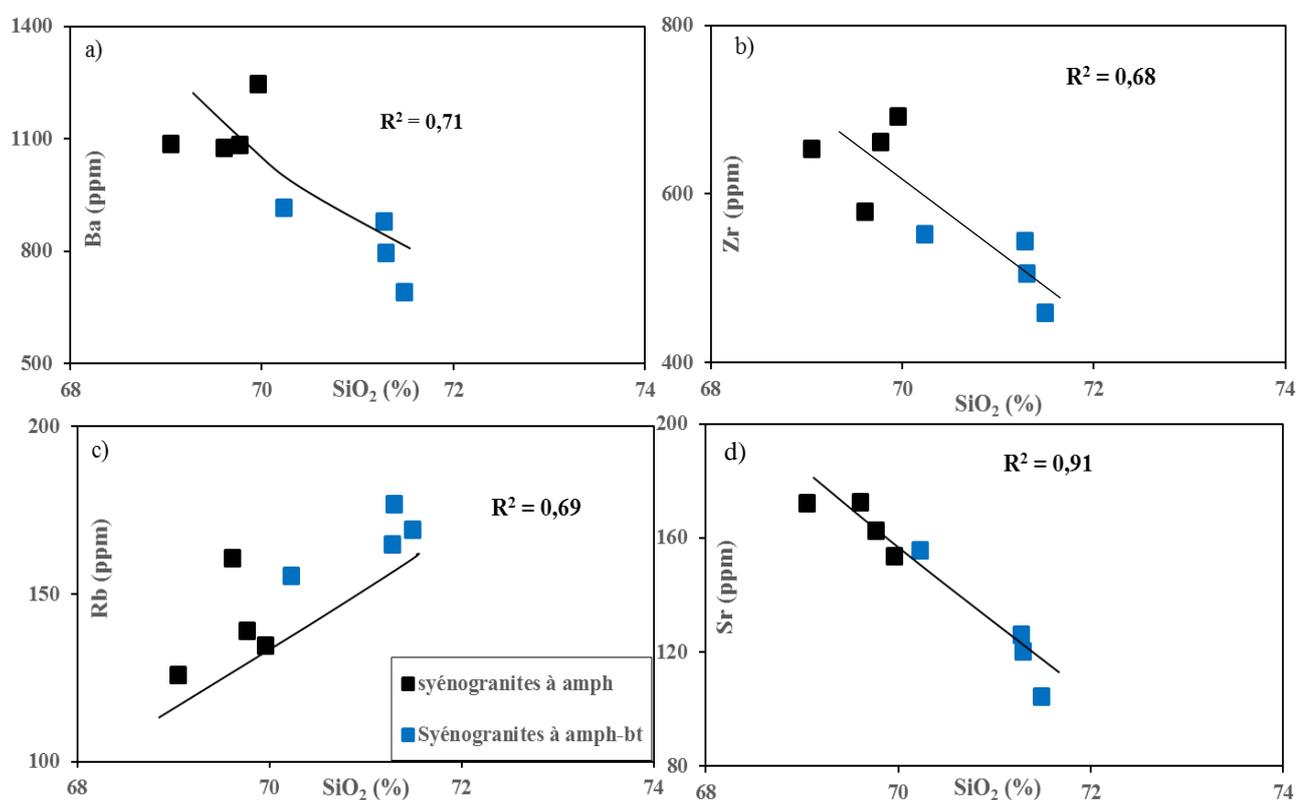


Figure 51. Diagramme de Harker de quelques éléments compatibles (Ba, Rb, Zr et Sr) des syénogranites.

V.5.2.2.2. Comportement du Co, V, Zn et Ni

Les syénogranites du complexe anorogénique de Nkogam présentent des teneurs en Co qui varient de 0,6 ppm du syénogranite à amphibole et biotite (G15X) à 1,2 ppm dans le syénogranite à amphibole (NK41). Le diagramme de Co en fonction de SiO₂ montre une dispersion des points (Fig 52a). La corrélation observée est mauvaise car son coefficient est de $R^2 = 0,30$.

Le vanadium (V) présente des valeurs constantes 8 ppm dans tous les syénogranites du complexe étudié.

Le Nickel (Ni) des syénogranites de Nkogam présente des teneurs qui varient de 0,3 ppm à 0,6 ppm respectivement dans les échantillons (G15X) et (NK41). Dans l'ensemble le Ni montre une dispersion de points avec une mauvaise corrélation (Fig 52b). Son coefficient de corrélation est de $R^2 = 0,22$.

Le zinc (Zn) : les teneurs en Zn varient de 107 à 124 ppm dans les syénogranite à amphibole et biotite avec un échantillon (G13) qui a une forte concentration 171 ppm. Dans les syénogranites à amphibole ces valeurs varient de 133 à 175 ppm. L'on note une faible teneur en cet élément (95 ppm ; Nk41). Le diagramme de Zn en fonction de SiO_2 montre également une dispersion de point avec pour coefficient de corrélation $R^2 = 0,01$ (Fig 52c). On note une courbe en forme de parabole.

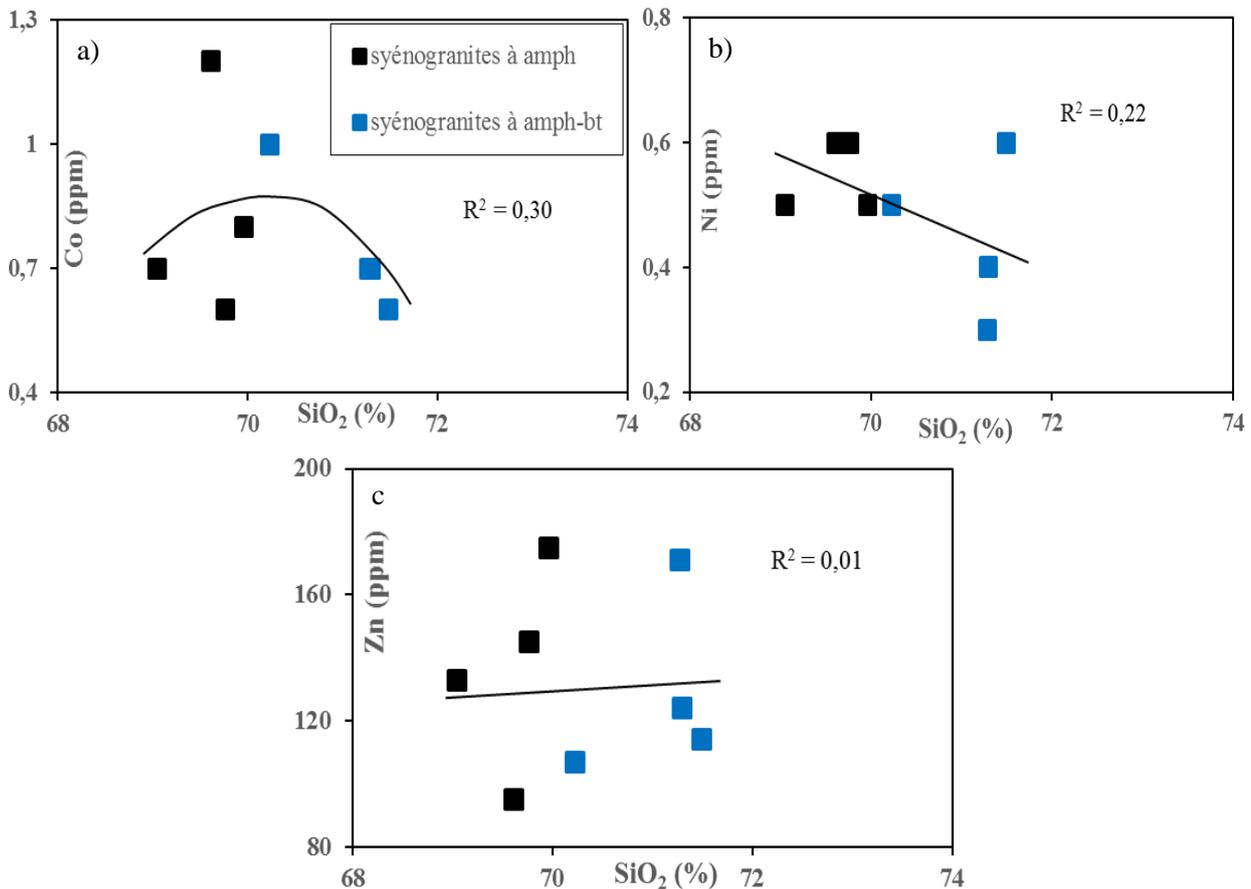


Figure 52. Diagramme de Harker de quelques éléments en trace (Co, Ni et Zn).

Le comportement des éléments en trace des granites alcalins et des syénogranites de Nkogam sont de façon générale compatible avec une différenciation magmatique par cristallisation fractionnée. Ce sont le Ba, Sr et le Co pour les granites alcalins ; le Ba, Zr et Sr pour les syénogranites.

Tableau 7. Elements en traces et terre rares (ppm) des granitoïdes.

Roches	syénite	Syenogranite								Granite alcalin					
		Syenogranite Amp				syenogranite-Amp-bt				Granophyre		Granite à Amp		Granite - Amp-bt	
Types	Syénite à Qtz														
Samples	NK23	NK14	NK15	NK17	NK41	NK44	G15x	G7	G13	NK11	NK12	NK3	NK47	NK38	GO1
Rb	73,9	125,8	134,5	138,9	160,7	155,5	169,2	176,7	164,9	90,1	85,5	168,7	147,7	148,4	117,2
Ba	303	1086	1245	1083	1075	915	690	795	878	798	908	424	978	1057	1157
Th	20,4	14,4	15,3	14,0	19,9	21,1	19,4	20,0	18,4	8,3	10,5	21,1	17,2	19,2	11,2
U	1,4	2,8	3,2	2,7	3,3	4,0	4,1	3,7	4,3	2,3	3,0	3,8	3,2	3,5	2,5
Nb	57,9	60,4	60,4	60,2	49,7	46,6	46,5	47,0	50,9	70,4	81,6	49,3	56,9	45,2	75,4
Ta	2,7	3,3	3,9	3,9	3,2	3,0	3,2	2,9	3,4	4,3	5,3	3,1	3,4	2,6	4,5
Sr	213,6	172,3	153,7	162,6	172,6	155,7	104,3	120,2	125,9	70,1	68,6	28,7	62,3	128,1	124,2
Zr	1743,5	653,4	691,9	661,2	579,5	552,2	459,7	505,7	544,7	714,0	931,6	392,8	692,8	515,9	859,2
Hf	27,7	16,0	16,2	16,2	14,3	13,2	13,0	13,5	14,3	16,6	23,6	12,3	17,0	13,3	21,2
Y	55,8	63,7	138,8	64,0	64,6	60,0	62,3	61,4	78,7	98,2	119,1	82,3	70,4	63,6	89,1
Ho	2,8	2,3	4,5	2,4	2,4	2,2	2,4	2,3	2,9	3,6	4,4	3,0	2,5	2,4	3,4
Ni	4,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,4	0,3	0,4	1,1	0,8	0,4	1,1	0,4
Sc	6	6,0	5,0	5,0	6,0	6,0	3,0	4,0	5,0	2,0	2,0	2,0	3,0	7,0	4,0
Be	3	2,0	1,0	5,0	5,0	6,0	1,0	5,0	1,0	5,0	10,0	10,0	5,0	5,0	2,0
Cs	1,2	2,6	1,4	4,5	1,1	0,9	1,6	2,9	2,9	0,5	0,4	2,6	0,7	0,6	0,4
Ga	22,2	26,6	26,6	27,4	27,1	26,1	28,2	27,7	27,9	27,2	30,1	25,8	28,9	26,9	31,0
Co	5,7	0,7	0,8	0,6	1,2	1,0	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,9	1,4	1,2
W	1	2,1	1,1	1,0	0,5	1,9	1,4	1,7	1,3	1,4	5,2	1,6	1,2	1,6	0,9
Mo	5,2	2,9	4,0	3,6	2,8	1,8	2,7	2,7	3,2	2,7	1,4	2,5	2,2	1,6	1,9
Cu	17,1	3,1	3,7	4,6	3,0	2,8	1,9	2,1	1,8	1,7	7,1	5,3	2,0	6,3	1,7
Pb	4,3	16,2	15,8	12,9	11,8	17,3	16,9	23,1	19,7	2,9	33,5	42,7	9,6	17,6	6,0
Zn	134	133	175	145	95	107	114	124	171	183	245	141	106	124	74
Sn	1	3,0	6,0	3,0	6,0	5,0	4,0	6,0	6,0	5,0	7,0	5,0	4,0	5,0	7,0
V	51	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Cd	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,3	0,1	0,3	0,2	0,3	0,9	0,2	-	0,2	-
Au	-	-	-	-	-	-	-	1,6	-	-	-	1,2	-	-	-
REEs															

La	750	78,4	140,4	78,5	84,6	85,3	75,5	80,5	93,8	141,3	121,3	153,2	93,0	86,2	95,1
Ce	1295,1	157,2	209,0	152,4	163,4	161,7	149,9	159,8	174,7	139,4	231,2	787,1	172,1	156,1	188,5
Pr	135,5	17,9	29,0	18,0	19,2	18,8	17,1	18,1	20,9	28,8	29,6	34,1	20,9	18,2	22,5
Nd	476	69,4	117,4	68,6	73,1	72,0	66,9	68,9	81,3	118,2	122,5	125,7	82,4	72,4	89,8
Sm	50,94	14,3	23,1	14,5	15,1	14,1	13,8	14,4	16,8	23,2	26,4	22,6	16,5	15,1	18,6
Eu	3,77	2,7	3,8	2,7	2,8	2,4	1,8	2,2	2,8	4,4	4,5	1,5	2,8	2,9	3,7
Gd	30,08	13,5	25,7	13,7	14,2	13,2	12,9	13,9	17,1	24,3	26,9	19,7	16,0	15,3	18,8
Tb	2,92	2,1	3,9	2,2	2,2	2,0	2,1	2,1	2,6	3,5	4,2	2,9	2,4	2,3	2,9
Dy	13,01	12,2	23,5	12,4	12,7	11,2	12,0	11,7	15,2	19,2	23,7	16,3	13,1	12,9	17,0
Ho	2,18	2,3	4,5	2,4	2,4	2,2	2,4	2,3	2,9	3,6	4,4	3,0	2,5	2,4	3,4
Er	6,04	6,7	12,5	6,9	6,8	6,1	6,5	6,5	8,1	9,7	11,4	8,5	7,1	6,7	9,4
Tm	0,89	1,0	1,6	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	1,1	1,3	1,6	1,2	1,0	0,9	1,3
Yb	6,74	5,9	8,9	5,9	5,5	5,0	5,4	5,2	6,4	7,4	9,3	7,4	6,0	5,1	8,5
Lu	1,17	0,9	1,3	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,9	1,1	1,3	1,1	0,9	0,7	1,2
Y/Nb	0,96	1,05	2,30	1,06	1,30	1,29	1,34	1,31	1,55	1,39	1,46	1,67	1,24	1,41	1,18
(La/Yb) _N	75,86	9,00	10,74	9,06	10,56	11,54	9,59	10,49	10,02	12,95	8,91	14,15	10,53	11,48	
K/Rb	524,34	294,84	293,66	286,75	248,88	252,40	239,32	226,82	235,00	359,18	367,82	243,48	284,84	263,36	
Sm/Eu	13,51	5,30	6,12	5,34	5,48	5,91	7,59	6,45	6,03	531	5,90	5,95	15,19	5,31	
Rb/Sr	0,35	0,73	0,88	0,85	0,93	1,00	1,62	1,47	1,31	1,29	1,25	5,88	2,37	1,16	
Ce/Yb	192,15	26,46	23,46	25,79	29,93	32,08	28,66	25,05	32,53	18,74	24,91	28,59	106,65	30,49	22,28
Zr/Nb	30,11	10,82	11,46	10,98	11,66	11,85	9,89	10,76	10,70	10,14	11,42	7,97	12,18	11,41	11,40
La/Sm	14,72	5,50	6,08	5,43	5,61	6,04	5,46	5,60	5,60	6,09	4,59	6,77	5,64	5,69	5,11
Zr/Rb	23,59	5,19	5,14	4,76	3,61	3,55	2,72	2,86	3,30	7,92	10,90	2,33	4,69	3,48	7,33
Zr/Nb	30,11	10,82	11,46	10,98	11,66	11,85	9,89	10,76	10,70	10,14	11,42	7,97	12,18	11,41	11,40
Th/Hf	0,74	0,90	0,94	0,86	1,39	1,60	1,49	1,48	1,29	0,50	0,44	1,72	1,01	1,44	0,53
Th/Ta	7,56	4,36	3,92	3,59	6,22	7,03	6,06	6,90	5,41	1,93	1,98	6,81	5,06	7,38	2,49
Th/Yb	3,03	2,42	1,72	2,37	3,64	4,19	3,71	3,13	3,43	1,12	1,13	2,86	2,86	3,75	1,32
Ta/Yb	0,40	0,56	0,44	0,66	0,59	0,60	0,61	0,45	0,63	0,58	0,57	0,42	0,56	0,51	0,53
Ta/Hf	0,10	0,21	0,24	0,24	0,22	0,23	0,25	0,21	0,24	0,26	0,22	0,25	0,20	0,20	0,21
La/Ta	277,77	23,75	36	20,12	26,43	33,33	23,59	27,75	27,58	32,86	22,88	49,41	27,35	33,15	21,13
Sr/Ba	0,70	0,16	0,12	0,15	0,16	0,17	0,15	0,15	0,14	0,09	0,08	0,07	0,06	0,12	0,11
Rb/Ba	0,24	0,12	0,11	0,13	0,15	0,17	0,25	0,22	0,19	0,11	0,09	0,40	0,15	0,14	0,10
∑REE	2774,29	384,5	604,5	379,8	403,6	395,6	367,9	387,3	444,3	525,9	618,1	1184,2	436	397,18	480,7
Eu/Eu*	0,30	0,59	0,47	0,59	0,58	0,54	0,47	0,48	0,50	0,56	0,51	0,21	0,52	0,57	0,60

V.5.3. Terres rares

Les terres rares (REE) sont un groupe d'éléments traces ayant les mêmes propriétés chimiques mais qui présentent des variations entre les éléments les plus légers (gros rayon atomique-exemple : Lanthane) et les plus lourds (petit rayon atomique-exemple : Lutécium). Les intervalles de variations des teneurs en terres rares des granitoïdes du Nkogam se trouvent dans le tableau 8.

Tableau 8. Variations des teneurs en terres rares dans les différents types lithologiques du CAN

Eléments terres rares	Types lithologiques					
	Syénite	Syénogranites		Granites alcalins		
		Syénogranite à Amp et Bt	Syénogranite à Amp	Granite à Amp et Bt	Granite à Amp	Granophyre
La	750	75,5 - 93,8	78,4 -140,4	86,2 - 95,1	93 - 153,2	121,3- 141,3
Ce	1295,1	149,9-174,7	152,4 -209	156,1 -188,5	172,1- 787,1	139,4 - 231,2
Pr	135,5	17,1 - 20,9	17,9 - 29,0	18,2 - 22,5	20,9-34,1	28,8 - 29,6
Nd	476	66,9-81,3	68,6 - 117,4	72,4 - 89,8	82,4-125,7	118,2-122,5
Sm	50,94	13,8 - 16,8	14,3 - 23,1	15,1 - 18,6	16,5-22,6	23,2-26,4
Eu	3,77	1,8 - 2,8	2,7 - 3,8	2,9 - 3,7	1,5 -2,8	4,4-4,5
Gd	30,08	12,9 - 17,1	13,5-25,7	15,3-18,8	16 -19,7	24,3-26,9
Tb	2,92	2,0 - 2,6	2,1 - 3,9	2,3 - 2,9	2,4 - 2,9	3,5-4,2
Dy	13,01	11,2 - 15,2	12,2 - 23,5	12,9 - 17,0	13,1-16,3	19,2-23,7
Ho	2,18	2,2 -2,9	2,3 - 4,5	2,4 - 3,4	2,5 - 3,0	3,6-4,4
Er	6,04	6,1 - 8,1	6,7 -12,5	6,7- 9,4	7,1-8,5	9,7 -11,4
Tm	0,89	0,8 -1,1	0,9 -1,6	0,9 -1,3	1,0 - 1,2	1,3-1,6
Yb	6,74	5 - 6,4	5,5 - 8,9	5,1 - 8,5	6,0 - 7,4	7,4-9,3

La somme des REE (Σ REE) des différents échantillons est comprise entre 367,92 ppm (Syénogranite à amphibole et biotite G15x) et 2774, 29 ppm (Syénite à quartz NK23). Dans les granites alcalins, elle va de 397,18 ppm dans l'échantillon de granite à amphibole et biotite (NK38) à 1184,18 ppm dans l'échantillon de granite à amphibole (NK3). Dans les syénogranites, elle va de 367,92 ppm (G15x) à 604,45 ppm (NK15). La Σ LREE varie de (348,31 ppm) dans la syénogranite (NK17) à 2741,34 ppm dans la syénite à quartz (NK23) et Σ HREE varie de (28,02 ppm) pour la syénogranite à amphibole à 55,77 ppm dans le granite à amphibole (NK12).

Les granites alcalins montrent un enrichissement en terres rares légères et un appauvrissement en terres rares lourdes (Fig. 53a). Le granophyre (Nk11) présente une anomalie négative en Ce, ce qui traduit le fractionnement de la monazite et de l'apatite. On note une anomalie positive en Ce et une anomalie négative en Eu très prononcée dans l'échantillon Nk 47. Les granites à amphibole Nk3, le granophyre (NK12) et le granite à amphibole et biotite (Nk3) montrent des spectres parallèles entre eux, avec une légère anomalie négative en Eu ($Eu/Eu^* = 0,21 - 0,60$).

Les syénogranites montrent un enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes (Fig 53b). Tous ces spectres sont parallèles entre eux, mais cependant un échantillon se détache du lot (NK17). Tous ces spectres présentent une anomalie négative en Eu.

La syénite à quartz (Fig. 53c) est plus riche en terres rares légères en comparaison avec les granites alcalins et les syénogranites. Elle est plus appauvrie en terres rares lourdes

L'enrichissement en terre rares est marqué par le rapport $(La/Yb)_N$ (10,02 - 75,9) élevé [granites alcalins (11,47 - 14,15), syénogranite (10,02 - 11,54), syénite à quartz (75,87) où N indique les valeurs normalisées par rapport à la chondrites de Sun et McDonough (1989)]. L'appauvrissement en terres rares lourdes est marqué respectivement par le rapport $(Gd/Yb)_N=(1,83 - 2,70)$ faibles [granite alcalins (1,83- 2,70), syénogranite (1,88 - 2,34) et pour la syénite à quartz on a $(Gd/Yb)_N=3,63$].

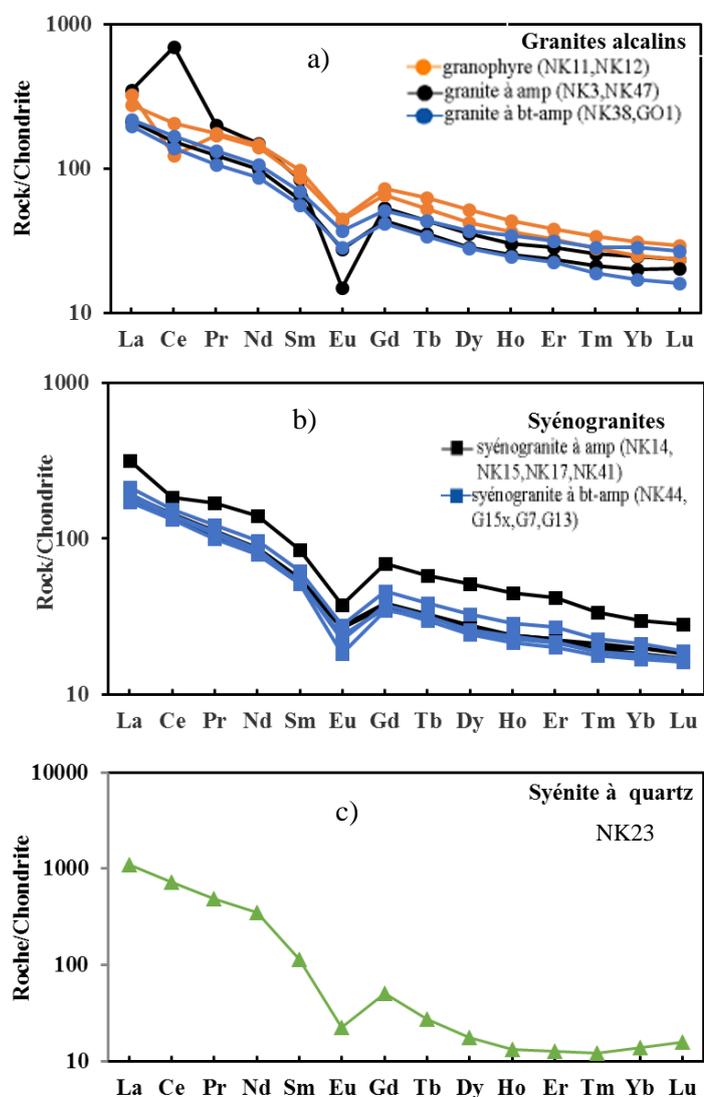


Figure 53. Spectres des terres rares de quelques échantillons représentatifs des granitoïdes étudiés, normalisés par rapport à la chondrite de McDonough et Sun (1989).

V.5.4. Spectres multi-éléments

Les spectres multi-éléments sont normalisés par rapport au manteau primitif de McDonough et Sun (1989)

- Spectres multi-éléments des granites alcalins

Sur les spectres multi-éléments des granites alcalins (Fig. 54a), les granophyres (NK11 et NK12) montrent une anomalie positive en Pb et une anomalie négative en Sr, P, Eu et Ti. Les granites à amphibole montrent une anomalie positive en Pb, de faibles anomalies négatives en Ba, Nb et Ta et une anomalie négative prononcée en Sr, P, Eu et Ti. Enfin les granites à amphibole et biotite (NK38 ; GO1) montrent une anomalie positive en Pb, de légères anomalies négatives en Ba, Nb et Ta et de fortes anomalies négatives en Sr, P, Eu et Ti.

- Spectres multi-éléments des syénogranites

Les spectres multi-éléments (Fig. 54b) des syénogranites à amphibole et des syénogranites à amphibole et biotite se superposent. Ces spectres laissent observer une anomalie positive en Pb, de faible anomalie négative en Ba, Nb et Ta et des anomalies négatives prononcées en Sr, p, Eu et Ti. Cette superposition traduit l'appartenance à un même groupe.

- Spectre multi-éléments de la syénite à quartz

Le spectre multi-éléments (Fig. 54c) de la syénite à quartz montre une anomalie positive en Th, La, Ce, Pb et Pr et une anomalie négative en Sr, P, Eu et Ti.

Le comportement des spectres des terres rares des granitoïdes du complexe de Nkogam montre un enrichissement en terres légères et un appauvrissement en terres rares lourdes. Cependant on note aussi une anomalie négative en europium pour les différents types lithologiques du massif. Seul un échantillon de granite à amphibole présente une anomalie positive en cerium. Les spectres multi-éléments montrent une anomalie positive en Pb, de faible anomalie négative en Ba, Nb et Ta et des anomalies négatives prononcées en Sr, p, Eu et Ti pour les granites alcalins et les syénogranites. La syénite à quartz montre une anomalie positive en Th, La, Ce, Pb et Pr et une anomalie négative en Sr, P, Eu et Ti.

V.5.5. Affinités magmatiques

L'ensemble magmatique du secteur d'étude est constitué de granites métalumineux à faiblement hyperalumineux I, avec une affinité liée aux série alcaline (Fig. 55) et de nature ferreux, sodi-potassique à légèrement potassique

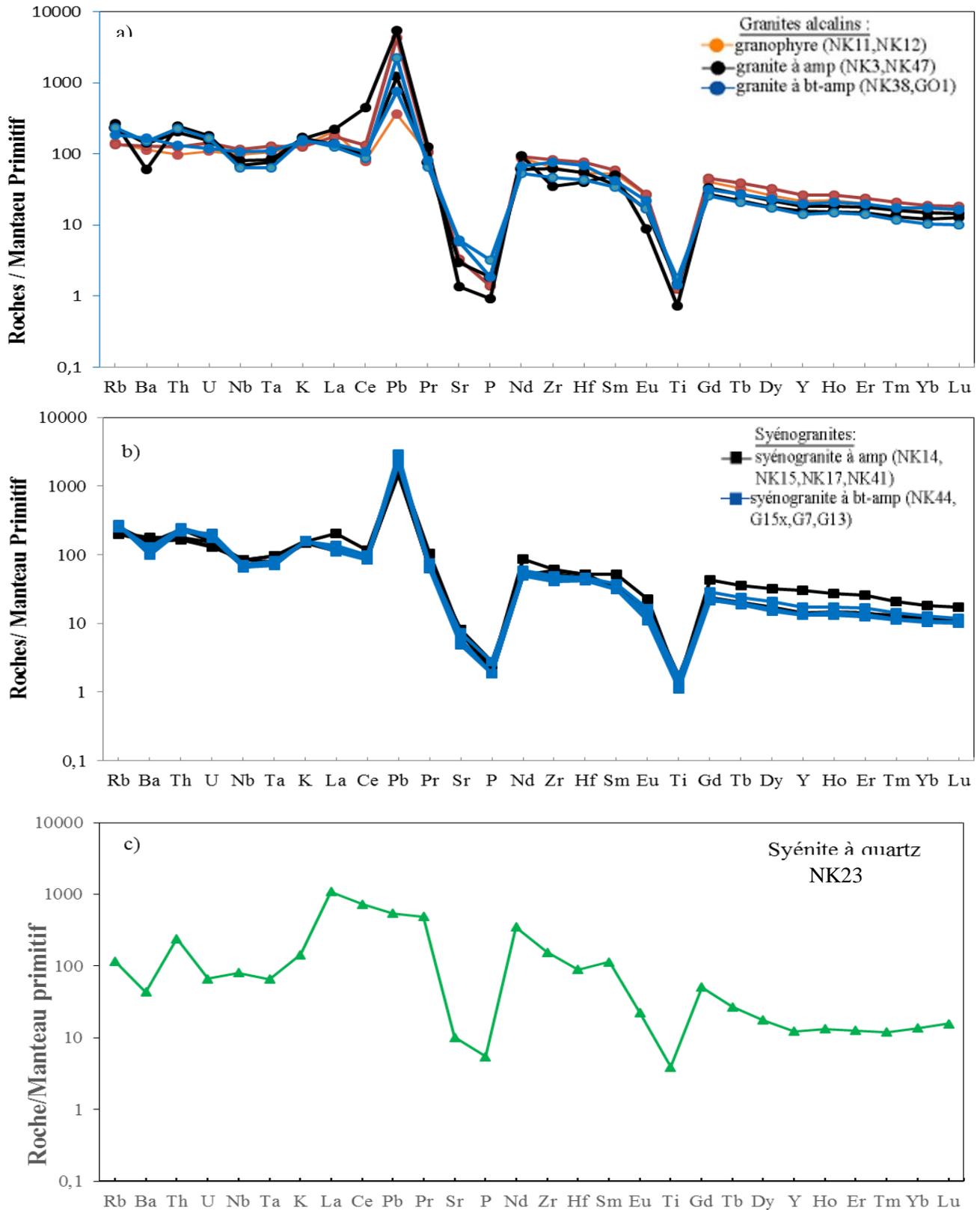


Figure 54. Spectres multi-éléments normalisés par rapport au manteau primitif de McDonough et Sun (1989) des échantillons représentatifs des granitoïdes de Nkogam.

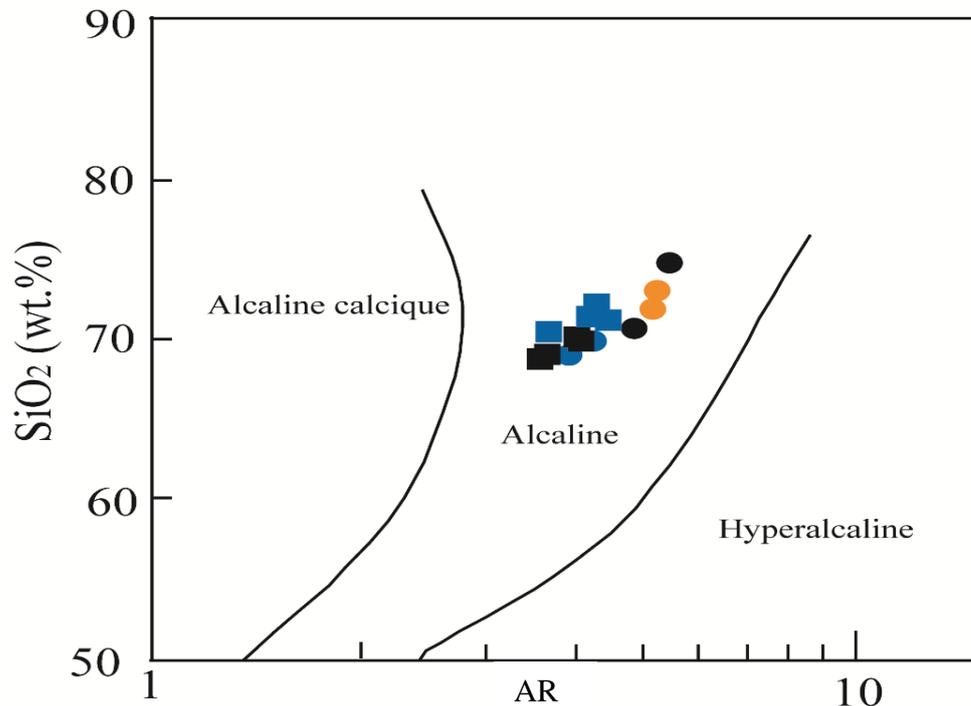


Figure 55. Diagramme indiquant la nature alcaline des granitoïdes de Nkogam : AR vs SiO₂ (Wright, 1969), où AR (Rapport d'alcalinité) = $[Al_2O_3 + CaO + (Na_2O + K_2O)]/[Al_2O_3 + CaO - (Na_2O + K_2O)]$. Même légende que la figure 43.

Conclusion

Les roches plutoniques du complexe anorogénique de Nkogam sont intermédiaires (syénite) à felsiques (syénogranites et granites). La syénite à quartz présente un indice de différenciation (ID) de 68,10. Le DI des syénogranites varie de 85,22 à 89,85 ; de 87,68 à 93,61 pour les granites alcalins. Ces données indiquent que les granitoïdes du complexe sont très différenciés. Ces différents types lithologiques sont metalumineuses à l'exception de deux granites à biotite et amphibole qui sont hyperalumineux. Les granitoïdes du complexe anorogénique de Nkogam sont des roches alcalines, mise en place dans un domaine intraplaque suite à un contexte tectonique d'extension.

**CHAPITRE VI : ÉTUDE GÉOCHRONOLOGIQUE,
GÉOTHERMOMETRIQUE ET GÉOBAROMETRIQUE DES
GRANITOÏDES DU MASSIF.**

Ce chapitre est basé sur les études géochronologique des granitoïdes du complexe anorogénique de Nkogam pour leurs âges, géothermométrie pour leurs températures de cristallisation d'après la méthode de Watson et Harrison et enfin géobarométrique pour l'estimation de la pression et la profondeur de cristallisation des différents types lithologiques étudié selon la méthode empirique de Yang.

VI.1. Étude géochronologique

Il existe depuis les années 1970, des âges radiométriques de mise en place des différents complexes alcalins et autres massifs le long de la Ligne du Cameroun, obtenus par les méthodes de datations K/Ar, Ar/Ar et Rb/Sr sur roche totale (...). Les nouvelles données géochronologiques acquises par la méthode U/Pb sur zircon dans cette étude apportent de nouvelles informations dans les syénogranites du massif. Pour mieux comprendre l'évolution spatio-temporelle des différentes activités magmatiques le long de la LC, l'on a récapitulé les âges des différents massifs étudiés. Les âges des différents massifs de la LC sont collectés des travaux de thèse et des articles publiés (Annexe 1 et 2).

VI.1.1. Datation U/Pb sur zircon des granitoïdes du massif du Nkogam.

La méthode de datation U/Pb sur zircon a été utilisée pour la première fois dans ce travail sur les roches plutoniques felsiques du complexe anorogénique de Nkogam. Cette méthode radiochronologique vise à déterminer l'âge exact de mise en place du massif granitique de Nkogam. Deux échantillons de roche ont été collectés dans ce massif. Il s'agit d'un échantillon de syénogranite à biotite et amphibole (G7) prélevé à Nkounden et d'un échantillon de syénogranite à amphibole (NK17) prélevé à Nkourom.

***Syénogranite à biotite et amphibole (G7)**

Neuf grains de zircon extraits de l'échantillon G7 de syénogranite à biotite et amphibole ont fait l'objet de neuf analyses. Ces neuf grains de zircon ont donné des âges cohérents. Les âges $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ de ces neuf grains analysés varient entre 47 et 49 Ma avec 2 à 47 Ma, 5 à 48 Ma et 2 à 49 Ma (Tableau 9). Ces analyses sont concordantes aux marges d'erreur près et fournissent un âge Concordia $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ de $48,004 \pm 0,088$ Ma (MSWD = 1, 6, 2σ) (Fig. 56 a et b).

Tableau 9. Âges U/Pb sur zircons du syénogranite à amphibole et biotite (échantillon G7).

Numéro d'analyse	Rapport						Age (Ma)					
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1s	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	*1s	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1s	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2s	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2s	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2s
G7_10	0,04764	0,00036	0,0483	0,00045	0,00736	0,00004	82	36	48	1	47	1
G7_15	0,04798	0,00052	0,0493	0,00060	0,00746	0,00004	98	51	49	1	48	1
G7_16	0,04691	0,00036	0,0490	0,00046	0,00757	0,00004	45	37	49	1	49	1
G7_17	0,04724	0,00057	0,0491	0,00065	0,00753	0,00004	61	57	49	1	48	1
G7_20	0,04735	0,00025	0,0491	0,00037	0,00752	0,00004	67	25	49	1	48	1
G7_21	0,04681	0,00036	0,0491	0,00046	0,00761	0,00004	40	37	49	1	49	1
G7_22	0,04667	0,00045	0,0478	0,00054	0,00742	0,00004	33	47	47	1	48	1
G7_24	0,04658	0,00050	0,0477	0,00058	0,00743	0,00004	28	52	47	1	48	1
G7_32	0,04675	0,00038	0,0469	0,00048	0,00728	0,00005	37	39	47	1	47	1

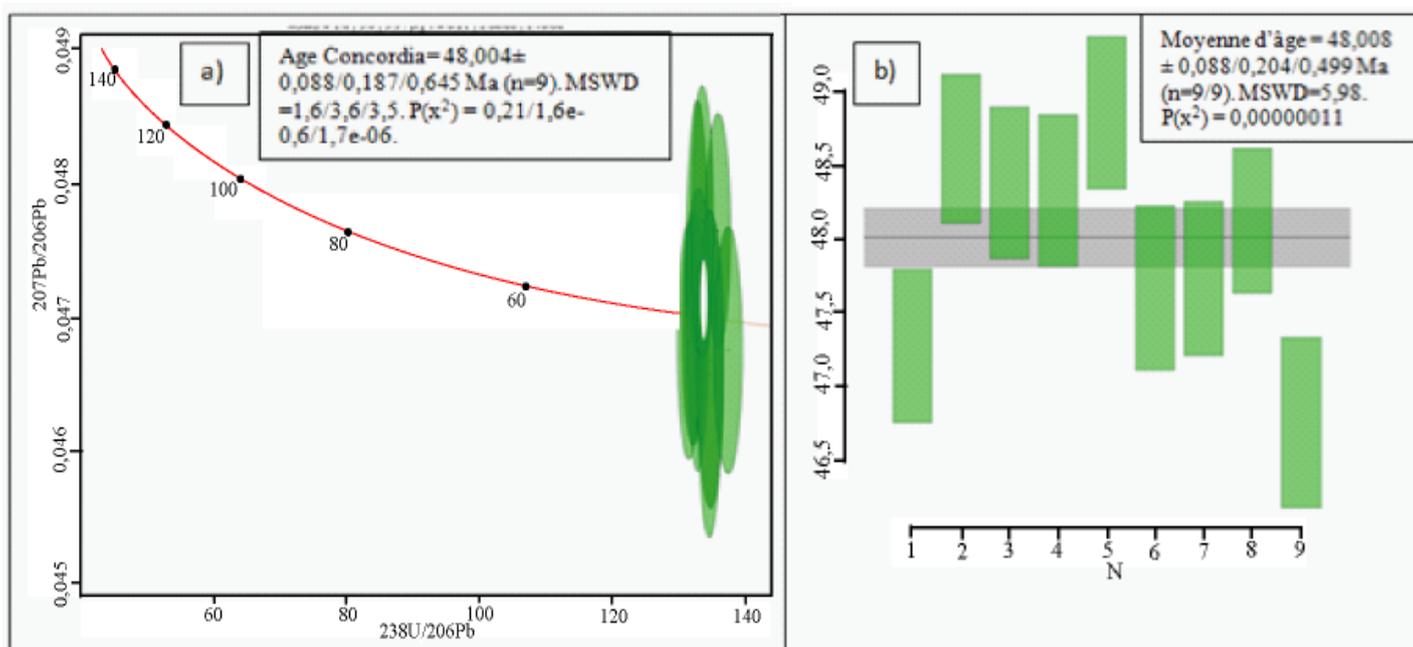


Figure 56. Syénogranites à amphibole et biotite : a) Diagramme Concordia ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$) ; b) "weighthood mean" des âges.

*Syénogranite à amphibole (NK17)

Onze grains de zircon extraits de l'échantillon NK17 de syénogranite à amphibole ont fait l'objet de onze analyses. Ces onze grains de zircon ont donné des âges cohérents. Les âges $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ des onze grains analysés varient entre 47 et 50 Ma avec 1 à 47 Ma, 3 à 48 Ma, 6 à 49 Ma et 1 à 50 Ma (Tableau 10). Ces analyses sont concordantes aux marges d'erreur près et fournissent un âge Concordia $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ de $47,89 \pm 0,39$ Ma (MSWD = 1,7, 2σ) (Fig. 57 a et b).

Tableau 10. Âges U/Pb sur zircons des syénogranite à amphibole (échantillon Nk17). Les chiffres après le numéro de code représentent les numéros d'analyse.

N° analyse	Rapport						Age (Ma)					
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1s	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	*1s	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1s	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2s	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2s	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2s
NK17_05c'	0,06985	0,00129	0,0738	0,00176	0,00767	0,00012	924	76	72	3	49	1
NK17_06c'	0,07589	0,00252	0,0782	0,00286	0,00747	0,00011	1092	133	76	5	48	1
NK17_15c'	0,05632	0,00063	0,0595	0,00110	0,00766	0,00011	465	50	59	2	49	1
NK17_18c'	0,05798	0,00081	0,0610	0,00123	0,00763	0,00011	529	61	60	2	49	1
NK17_22c'	0,05295	0,00082	0,0558	0,00120	0,00765	0,00011	327	71	55	2	49	1
NK17_29c'	0,05754	0,00082	0,0601	0,00124	0,00758	0,00011	512	63	59	2	49	1
NK17_31c'	0,05924	0,00064	0,0642	0,00117	0,00786	0,00012	576	47	63	2	50	1
NK17_32c'	0,05105	0,00060	0,0522	0,00098	0,00741	0,00011	243	54	52	2	48	1
NK17_33c'	0,06568	0,00138	0,0687	0,00177	0,00758	0,00011	796	88	67	3	49	1
NK17_34c'	0,05287	0,00108	0,0548	0,00139	0,00751	0,00011	323	93	54	3	48	1
NK17_36c'	0,06127	0,00119	0,0624	0,00153	0,00739	0,00011	649	83	61	3	47	1

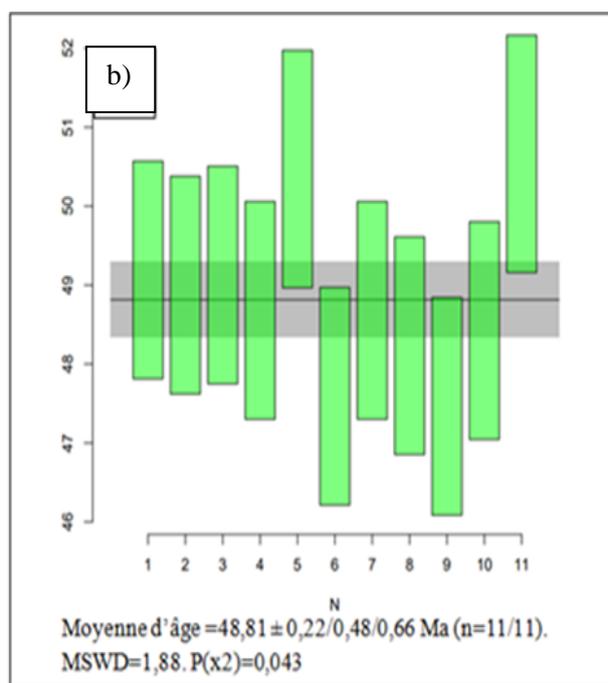
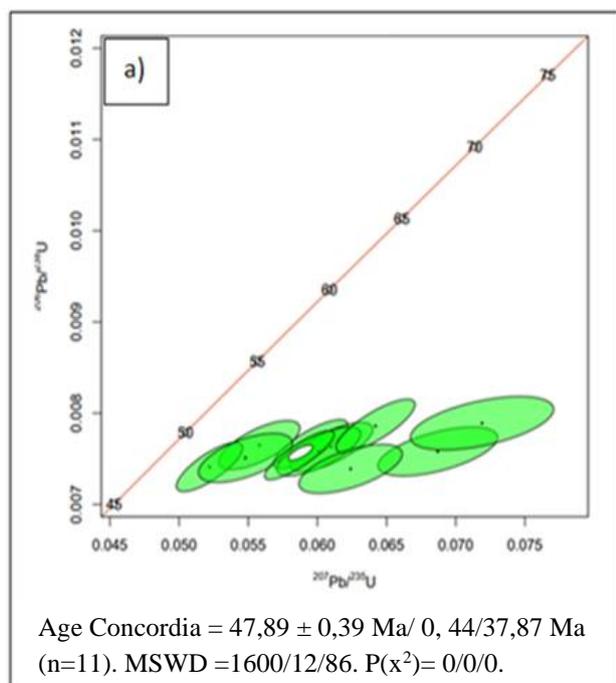


Figure 57. Syénogranites à amphibole : a) Diagramme Concordia de zircon ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ vs $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$) ; b) "weighthood mean" des âges.

VI.1.2. Géochronologie des activités magmatiques sur la LC.

La synthèse des résultats géochronologiques des roches volcaniques et plutoniques le long de la LC des différents auteurs (Cantagrel et al., 1978 ; Kuepouo et al., 2006 ; Ngonje et al., 2014 ; Njonfang et al., 2018) sont consignés dans les annexes 1 et 2. Ces âges ont été obtenus par des méthodes de datation diversifiées, K/Ar, Ar/Ar, Rb/Sr, U/Pb sur roche totale. Après un dépouillement systématique des données, les tableaux de fréquence des âges en

fonction de la nature des roches ont été établis (tableau 11. a, b, c et d). Les ages s'étalent entre 0 et 75 Ma, avec une amplitude de 5 Ma. Ces données ont permis de construire l'histogramme des activités magmatiques sur la LC.

Les bandes bleues de la figure 58, montrent que le nombre d'activités volcaniques décroît avec l'âge pour les laves alcalines. Cette figure présente trois séquences magmatiques : la première de 75 à 55 Ma marquée par une faible activité volcanique ; la deuxième de 55 à 25 Ma marquée par des activités volcaniques qui atteignent un pic maximal indiquant son paroxysme entre 40 et 35 Ma, puis décroît jusqu'à 25 Ma ; enfin une troisième séquence qui va de 25 Ma à l'actuel marquée par une intense activité volcanique. De même, les laves transitionnelles ont été produites entre 55 - 30 Ma aux périodes Oligocène-Eocène. La fréquence des activités volcaniques est élevée (28,37 %) au Quaternaire.

Les bandes noires (figure 58) traduisent deux grandes périodes d'activités volcaniques pour les laves transitionnelles entrecoupées par un hiatus.

La figure 58 à travers les bandes vertes montre deux grandes périodes d'activités volcaniques des laves acides entrecoupées par un hiatus. La première période est connue entre 55 et 75 Ma suivie d'un calme pour la période comprise entre 65 et 50 Ma ; ensuite elle reprend entre 50 et 30 Ma avec un faible pic.

Les bandes rouges (figure 58) quant à elles montrent deux grandes périodes d'activités plutoniques. La première, intense entre 75 et 30 Ma, la deuxième moins fréquente entre 35 à 20 Ma avec un hiatus entre 30-25 Ma. De 20 Ma jusqu'à nos jours, l'on note l'absence des activités caractéristiques du plutonisme.

L'histogramme groupé du nombre d'activités magmatiques par intervalles de cinq ans le long de la Ligne du Cameroun jusqu'au lac Tchad montre :

- une période de volcanisme acide qui va du Crétacé supérieur (70 Ma) au Miocène (20 Ma) entrecoupée par deux hiatus : le premier au Paléocène (65-50 Ma) et le deuxième à la fin Miocène- début oligocène (25-20 Ma) ;
- une période de volcanisme mafique de l'Éocène (52 Ma) à l'actuel avec une intensification d'activités au Miocène-Pliocène (10 Ma à l'actuel) ;
- une période d'activité plutonique du Crétacé supérieur à l'Oligocène (70 - 30 Ma) avec une fréquence de mise en place élevée des plutonites à l'Éocène (50 Ma).

Tableau 11. Intervalles d'âges et des fréquences. a) roches mafiques alcalines, b) roches mafiques transitionnelles, c) roches acides, d) roches plutoniques

Laves mafiques alcalines		a)
Intervalles d'âges (5Ma)	Nombre d'activités	Fréquences
[0-5[	21	28,37 %
[5-10[	15	20,27 %
[10-15[	09	12,16 %
[15-20[	04	5,40 %
[20-25[	04	5,40 %
[25-30[	03	4,05 %
[30-35[	04	5,40 %
[35-40[	06	8,10%
[40-45[	02	2,70 %
[45-50[	04	5,40 %
[50-55[	02	2,70 %

Laves mafiques transitionnelles		b)
Intervalles d'âges (5Ma)	Nombre d'activités	Fréquences
[0-5[	00	0 %
[5-10[	00	0 %
[10-15[	00	0 %
[15-20[	00	0 %
[20-25[	00	0 %
[25-30[	00	0 %
[30-35[	01	16,66 %
[35-40[	01	16,66%
[40-45[	02	33,33 %
[45-50[	00	0 %
[50-55[	02	33,33 %

Laves acides		c)
Intervalles d'âges (5Ma)	Nombre d'activités	Fréquences
[15-20[	01	7,69 %
[20-25[	00	00 %
[25-30[	01	7,69 %
[30-35[	03	23,07 %
[35-40[	01	7,69 %
[40-45[	03	23,07 %
[45-50[	01	7,69 %
[50-55[	00	00 %
[55-60[	00	00 %
[60-65 [	00	00 %
[65-70[	02	15,38 %
[70-75[	01	7,69 %

Roches plutoniques		d)
Intervalles d'âges (5Ma)	Nombre d'activités	Fréquences
[20-25[	01	4,16 %
[25-30[	00	00 %
[30-35[	02	8,33 %
[35-40[	02	8,33 %
[40-45[	01	4,16 %
[45-50[	03	12,5 %
[50-55[	05	20,83 %
[55-60[	03	12,5 %
[60-65[	02	8,33 %
[65-70[	04	16,66 %
[70-75[	01	4,16 %

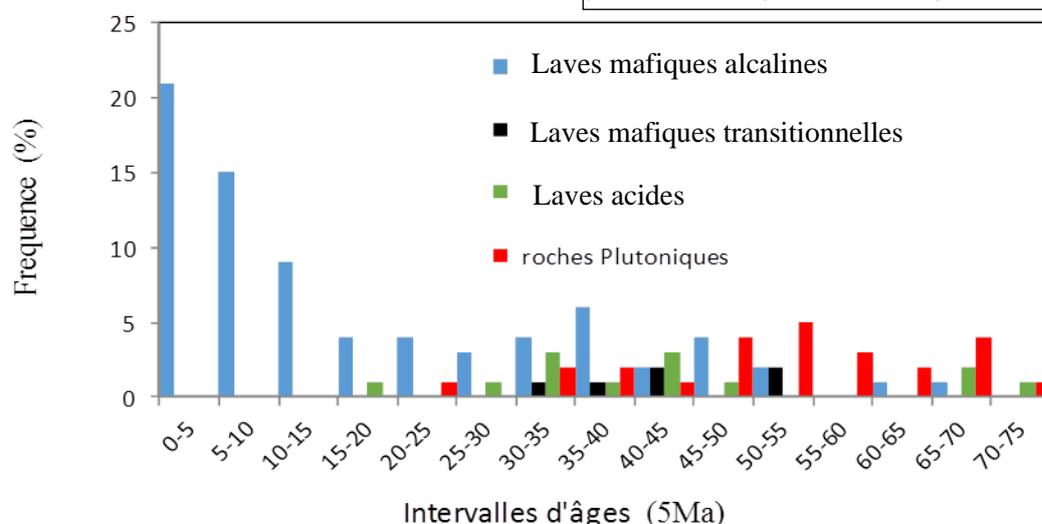


Figure 58. Histogramme des activités magmatiques (fréquence) en fonction des âges (roches alcalines, transitionnelles, acides et roches plutoniques).

VI.2. Etude géothermométrique : conditions physiques de cristallisation

Les études antérieures (Kuepouo, 2004 ; Nzina et al., 2010 ; Gao et al., 2017 ; Jin et al., 2018 ; Girei et al., 2019) indiquent que la composition chimique des zircons dans les granitoïdes est contrôlée par les conditions de refroidissement et de cristallisation du magma. Ces conditions sont la fugacité de l'oxygène, les concentrations en éléments volatiles, la température et la pression. Ainsi, le zircon est un bon indicateur des conditions physiques et chimiques du milieu ayant dominées durant le refroidissement et la cristallisation du magma. Pour mieux cerner les conditions de température de mise en place du massif de Nkogam, le géothermomètre de Watson et Harrison (1983) a été utilisé. La méthode de calcul utilise la formule suivante : $T_{Zr} (^{\circ}C) = 129\,000/[2,95 + 0,85 M + \ln(497\,657/Zr \text{ fondu})] - 273$, $Zr \text{ fondu} \approx Zr \text{ de la roche}$. En supposant que le nombre ionique est $Si+Al+Fe+Mg +Ca+Na+K+P = 1$, ainsi $M = (Na+K+2Ca) / (Si \times Al)$. Les résultats indiquent des températures de 888 à 980 °C pour les granites alcalins et de 870 à 919 °C pour les syénogranites (Tableau 12). De plus, l'approche obtenue sur le diagramme (M vs Zr) utilisée donne des températures comprises entre 850°C et 1000°C (Fig. 59 a-b), corroborant les résultats obtenus avec le géothermomètre de Watson et Harrison (1983). Ces données indiquent la cristallisation des granophyres entre 952 et 974 °C, des granites à amphibole entre 888 et 923 °C, des granites à amphibole et biotite entre 915 et 980 °C, des syénogranites à amphibole entre 890 et 919 °C et des syénogranites à amphibole et biotite entre 870 et 910 °C.

Tableau 12. Températures de saturation de zircon : $T (^{\circ}C) = T(K) - 273$

Echantillon	M	Zr	DZr	lnDZr	T(K)	T(°C)
Granite alcalin						
NK11	1,22	714	696,98	6,55	1224,77	952
NK12	1,31	931,6	534,18	6,28	1246,95	974
NK3	1,19	392,8	1266,91	7,14	1161,25	888
NK47	1,48	692,8	718,31	6,58	1195,80	923
NK38	1,22	515,9	964,61	6,87	1188,44	915
GO1	1,15	859,2	579,19	6,36	1253,37	980
Syénogranite						
NK14	1,71	653,4	761,62	6,64	1168,60	896
NK15	1,52	691,9	719,24	6,58	1192,15	919
NK17	1,63	661,2	752,64	6,62	1177,27	904
NK41	1,63	579,5	858,75	6,76	1162,92	890
NK44	1,62	552,2	901,20	6,80	1159,22	886
G7	1,56	505,7	984,07	6,89	1155,11	882
G13	1,34	544,7	913,61	6,82	1182,64	910
G15x	1,60	459,7	1082,54	6,99	1142,29	870

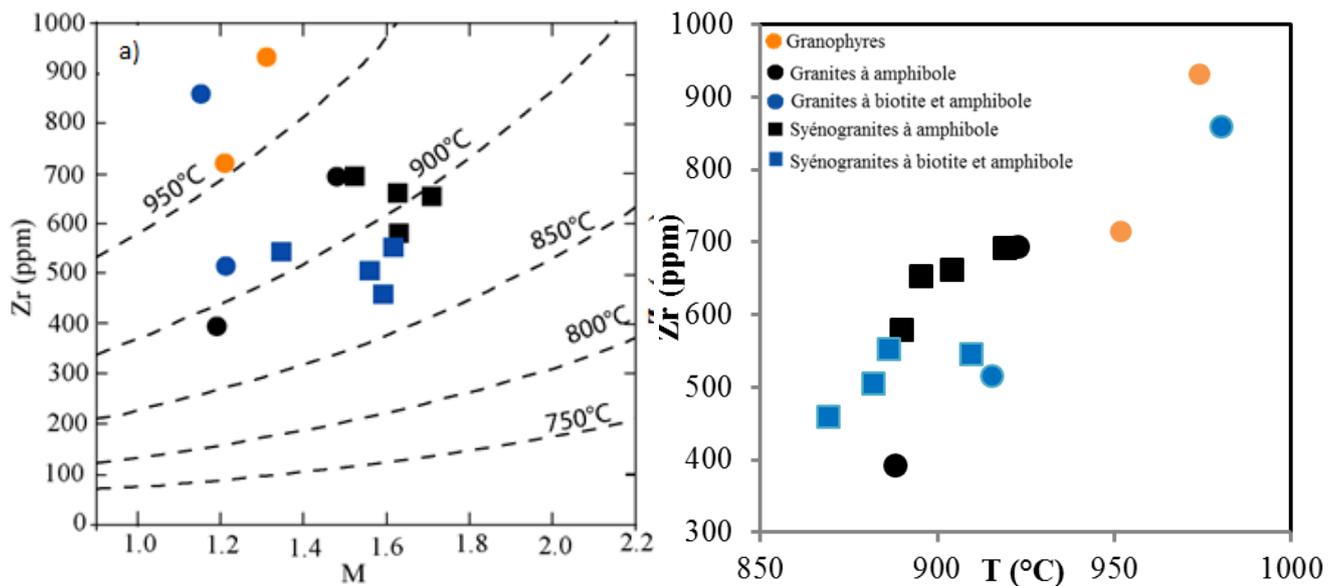


Figure 59. Diagrammes des températures : a) Températures de saturation de Zircon avec $M = (Na + K + 2Ca) / (Al \times Si)$ du massif de Nkogam. b) Températures de cristallisation des différents types pétrographiques, calculés grâce au géothermomètre de Watson et Harrison (1983).

VI.3. Etude géobarométrique

- Estimation de la pression de cristallisation

Yang (2017) a proposé une méthode empirique pour l'estimation des pressions de cristallisation des granitoïdes. D'après cet auteur, la pression est corrélée avec la teneur normative en quartz (Qtz), en albite (Ab) et en orthose (Or) et peut être estimée à partir des équations suivantes :

$$P = -0,2426 (Qtz)^3 + 26,392(Qtz)^2 - 980,74(Qtz) + 12563 \quad (1)$$

$$P = 0,2426 x (Ab+Or)^3 - 46,397 x (Ab+Or)^2 + 2981,3 x (Ab+Or) - 64224 \quad (2)$$

$$(R^2 = 9943)$$

Avec P la pression en MPa et R le coefficient de corrélation. Il convient de noter que la procédure de normalisation de la somme par la Norme CIPW (quartz, albite et orthose) à 100 % est nécessaire avant d'utiliser ces équations. L'application de l'équation (1) aux données minéralogiques normatives des granitoïdes de Nkogam a permis d'obtenir les résultats du Tableau 13. D'après ces résultats la pression de cristallisation des granitoïdes étudiés varie de 1097 à 1212 MPa avec cependant un échantillon (Nk15) à 891 Mpa pour les syénogranites à amphibole, 623 à 695 MPa avec un échantillon (NK44) à 869 Mpa dans les syénogranites à amphibole et biotite, dans les granophyres 476 et 691 MPa, pour les granites à amphibole 240 et 1116 MPa et enfin 571 et 583 MPa pour les granites à amphibole et biotite. Par ailleurs, les données de la pression ont permis de tracer la courbe de variation des pressions en fonction du

quartz normatif (Fig. 60). Cette Figure 60 montre une décroissance de la pression (Mpa) avec l'augmentation quartz normatif, d'où une corrélation fortement négative de ($R^2= 0,9597$).

- **Estimation de la profondeur de cristallisation**

Gualda et Ghiorso (2013) ont proposé que la profondeur de mise en place des granitoïdes est étroitement liée à la pression avec laquelle le magma à cristallisé. En supposant que la densité de la croûte continentale est de $2,7 \text{ g/cm}^3$ et que la pression s'exerce sur la croûte est entièrement lithostatique. La relation entre la pression et la profondeur est $1 \text{ Kb} = 2,7 \text{ Km}$. L'application de cette relation aux données des pressions de cristallisation des granitoïdes de Nkogam obtenues en utilisant le géobaromètre de Yang (2017) donne des profondeurs de mise en place comprise entre 6,48 et 32,71 Km (Tableau 13). Les syénogranites à amphibole se sont mise en place entre 29,61 et 32,71 Km avec un échantillon à 24,05 Km. Ces profondeurs varient de 16,83 à 18,77 Km avec un échantillon à 23,45 Km dans les syénogranites à amphibole et biotite, les échantillons de granophyres cristallisent à des profondeurs de 12,86 et 18,65 Km, ceux de granites à amphibole à des profondeurs comprise entre 6,48 et 30,13 Km, enfin ceux des granites à amphibole et biotite à des profondeurs de 15,41 et 15,73 Km.

Tableau 13. Calcul des pressions de cristallisation et estimation des profondeurs.

Echantillons	Qtz (%) de la Norme CIPW	P°Qtz (MPa)	P°Qtz (Kb)	Profondeur en Km (Qtz %)	Profondeur Moyenne (Km)
Syénogranites					
NK14	25,58	1212	12,12	32,71	29,73
NK15	27,26	891	8,91	24,05	
NK17	25,87	1097	10,97	29,61	
NK41	25,26	1207	12,07	32,58	
NK44	27,94	869	8,69	23,45	19,24
G15X	29,31	623	6,23	16,83	
G7	28,81	695	6,95	18,77	
G13	28,69	664	6,64	17,93	
Granite alcalins					
NK11	30,10	476	4,76	12,86	15,75
NK12	28,01	691	6,91	18,65	
NK3	34,64	240	2,40	6,48	18,30
NK47	24,70	1116	11,16	30,13	
NK38	30,16	583	5,83	15,73	15,57
GO1	30,49	571	5,71	15,41	

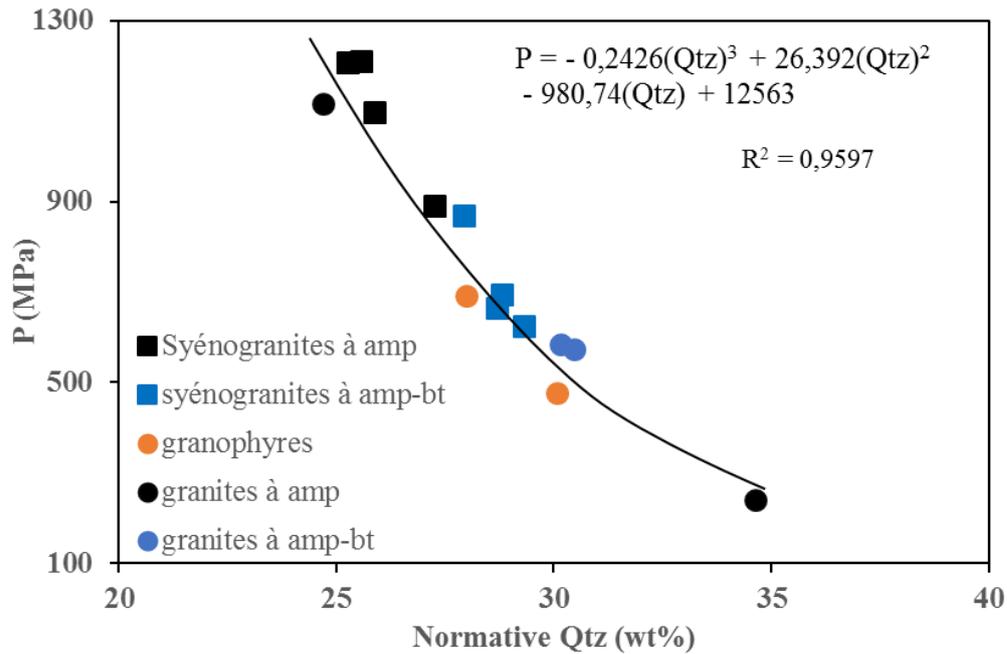


Figure 60. Pression de cristallisation (MPa) en fonction de la teneur normative en Qtz (% en poids) (Rollinson, 1993).

Conclusion

Les syénogranites du complexe anorogénique de Nkogam se sont mises en place entre $47,87 \pm 0,39$ Ma et $48 \pm 0,08$ Ma, âge obtenu par la méthode de datation U/Pb sur zircon. Cette période de formation correspond à l'Éocène. Les syénogranites du massif de Nkogam ont cristallisé à des températures comprises entre 882 et 919°C. Les granites alcalins du dit massif ont cristallisé à des températures comprises entre 888 et 980°C. Les pressions de cristallisation des syénogranites s'étalent entre 623 et 1212 Mpa pour un interval de profondeur comprise entre 16,83 et 32,71Km tandis que celles des granites alcalins se situent entre 240 et 691 MPa pour un interval de profondeur comprise entre 6,48 et 18,61 Km. Cependant un échantillon de granite alcalin (NK47) présente un comportement totalement différent des autres échantillons avec une pression de 1116 MPa pour une profondeur de 30,13 Km.

CHAPITRE VII : INTERPRETATION ET DISCUSSION

Ce chapitre traite de l'interprétation des résultats des études morphostructurale, pétrographique des roches volcaniques (basiques et acides) et des roches plutoniques du massif de Nkogam, et l'étude géochimique des granitoïdes en faisant ressortir le contexte géotectonique de leur mise en place, enfin les données géochronologiques, géothermométriques et géobarométriques du massif. Ces résultats sont ensuite comparés aux données des autres travaux similaires à travers le Cameroun et le monde. Il permettra de comprendre au mieux les différents processus structuraux et magmatiques ayant conduit à la formation et l'évolution du complexe anorogénique de Nkogam.

VII.1. Morphostructurale

VII.1.1. Orientation des linéaments

L'analyse statistique et l'observation de la carte des linéaments comparée aux données de terrain confirment l'existence de structures (failles, diaclases). Les deux orientations majeures sont NE-SW et ENE-WSW. L'orientation majeure N045°E obtenue dans la rosace de direction des diaclases (Fig. 18b) est subparallèle à la direction NE-SW de la LC, et la direction N60-70E est parallèle à la direction ENE-WSW du CCC (Njonfang et al., 1998) également connu sous le nom de Zone de Cisaillement Centre Camerounais (Ngako, 1999). Ces résultats sont similaires à ceux de Morin (1980) avec une direction de fracture majeure N55-N60E. Ziem et al. (2017) ont mis en évidence la même direction de fracture majeure à Koutaba-Nkoumelap. Njonfang et al. (2018) ont observé des directions de fractures similaires ENE-WSW dans le complexe de Nana dans la plaine de Tikar. Les principales fractures orientées NE-SW dans le complexe igné tertiaire de Bana (Kuepouo et al., 2009) sont cohérentes avec la direction des diaclases de Nkogam. Sur la carte, les linéaments sont distribués de manière irrégulière. La forme subcirculaire et la distribution des lignes de dépression et des lignes de crête expliquent la morphologie du massif. Les écoulements des cours d'eau dans le secteur d'étude sont guidés par les morphostructures du terrain traversé comme démontré dans les travaux de Messi et al. (2014) sur le complexe du Nyong au SW cameroun.

VII.1.2. Influence de la lithologie sur la morphologie

L'étude lithologique consiste en une description macroscopique des différents affleurements rencontrés sur le terrain et à dégager les relations spatiales et chronologiques entre les différents faciès (Dabo, 2011). La carte géologique (Figure. 17) montre les formations du socle métamorphique, des roches plutoniques et volcaniques en imbrication. Le relief du massif affiche une succession entre les formations plutoniques qui ont intrudé le socle d'une part et les

formations volcaniques qui le recouvrent d'autre part. En référence aux unités morphologiques citées, l'unité d'altitude inférieure à 1300 m représente le niveau bas du massif dans le secteur d'étude. Sur le plan pétrographique, cette unité est constituée à la base des gneiss qui forment le socle et les basaltes des plateaux qui recouvrent par endroit ce dernier. Les basaltes des plateaux limitent cette morphostructure. Par endroit on observe des ruptures de plateau. Les blocs, galets et débris de roche arraché en amont du massif et déposé dans cette unité, contribuent ainsi à la modification de la morphologie. Cette unité est constituée des plaines, plateaux, cuvettes, vallées, marécages et lits de cours d'eau. C'est dans cette unité que se trouve la base de la dépression centrale du massif. L'unité d'altitude comprise entre 1300 m et 1750 m est constituée par endroit d'ignimbrites, des granites alcalins, des syénogranites et des basaltes de massif. Elle est caractérisée par des pentes abruptes dans la localité de Njitapon et convexe à Nkouroum sur les granites alcalins et les syénogranites. Par endroit à Nkounden, l'on observe des ruptures de pente causées par les diaclases. Des pentes douces sont observées sur les basaltes de massif à Nkoutoukoup. Dans cette unité, le démantèlement des blocs et les érosions contribuent à la modification de la morphologie du massif. L'agriculture intense pratiquée sur les pentes participe aussi fortement à la modification de la forme du relief. L'unité d'altitude supérieure à 1750 m est caractérisée par des sommets subarrondis des syénogranites et un cône de granite à amphibole et biotite qui culmine à 2268 m. Cette unité morphologique est recouverte d'herbes par endroit et présente un pic nu. On relève par endroit des chapeaux de basaltes de massif érodés.

L'analyse du MNT montre un processus d'incision se limitant aux versants à forte pente (Fig. 11). Les tracés des cours d'eau ne suivent pas une direction uniforme ; ils sont guidés par les morphostructures des terrains traversés (Kenzo et al., 2022). Le système de fracturation sus-évoqué est bien marqué par leur tracé et influence le réseau hydrographique du bassin. Avec la progression de l'érosion, les blocs de gneiss, de syénogranite et granites chutent et dévalent les flancs des collines à Nkounden (Fig. 35d). Par contre sur certains versants, l'on assiste au glissement de terrain comme le démontre Owona et al. (2012) sur l'étude des unités morphologiques du Ntem. L'altération différentielle et l'érosion ont contribué à mettre en place des plaines là où la roche est tendre et les collines là où les roches sont dures (Owona et al., 2003). Ainsi, l'on peut dire que la tectonique cassante, l'altération différentielle et l'érosion ont conduit au modelage du relief actuel du secteur d'étude et ses environs.

VII.1.3. Contexte de mise en place du massif

Le massif de Nkogam est tertiaire (Caen-vachette et al., 1987) comme les massifs de Guenfalabo (Ngonge et al., 2014), Bana (Kuepouo et al., 2006), Sabongari (Njonfang et al., 2013) et Nana (Njonfang et al., 2018). Le magmatisme anorogénique comprend des unités

plutoniques et volcaniques qui se distinguent des autres séries par la richesse en alcalins, la teneur en eau réduite et le contexte intraplaque de mise en place (Scaillet, 2006). Le magmatisme anorogénique est bien décrit au Cameroun (Njonfang et al., 2011), au Nigéria (Girei et al., 2019) et au Maroc (Boushaba, 1990). Dans le complexe anorogénique de Nkogam il existe plusieurs types pétrographiques : basaltes, ignimbrites, gabbro, granites et syénogranites. La disposition géométrique de ces types pétrographiques a conduit à une chronologie relative sans ambiguïté dans cet ordre : socle gneissique panafricain plus ancien, car contenant les filons de basaltes de plateau. Les basaltes de plateau recouvrent le socle gneissique ou se trouve souvent comme débris dans les ignimbrites, puis granites et syénogranites en intrusion dans le socle gneissique et les basaltes de plateau principalement dans la partie occidentale du massif, ignimbrites avec enclaves et débris de toutes les autres roches sauf les basaltes de massif, enfin l'éruption des basaltes de massif donnant des filons qui recoupent les ignimbrites. Toute cette disposition géométrique des différentes roches est représentée dans un bloc diagramme (Fig. 61). Cette diversité pétrographique sur le même massif traduit une hétérogénéité géochimique. Celle des zones sources impliquées, et des paramètres prévalant lors de la mise en place du magma (Scaillet, 2006). Scaillet (2006) suggère également la mise en place des roches par séquence magmatique dans des chambres très proches (granitoïdes et basaltes). L'imbrication de roches mafiques (basaltes) et felsiques (granites et ignimbrites) couplée à un âge tertiaire militent en faveur de la mise en place du complexe de Nkogam dans un contexte anorogénique.

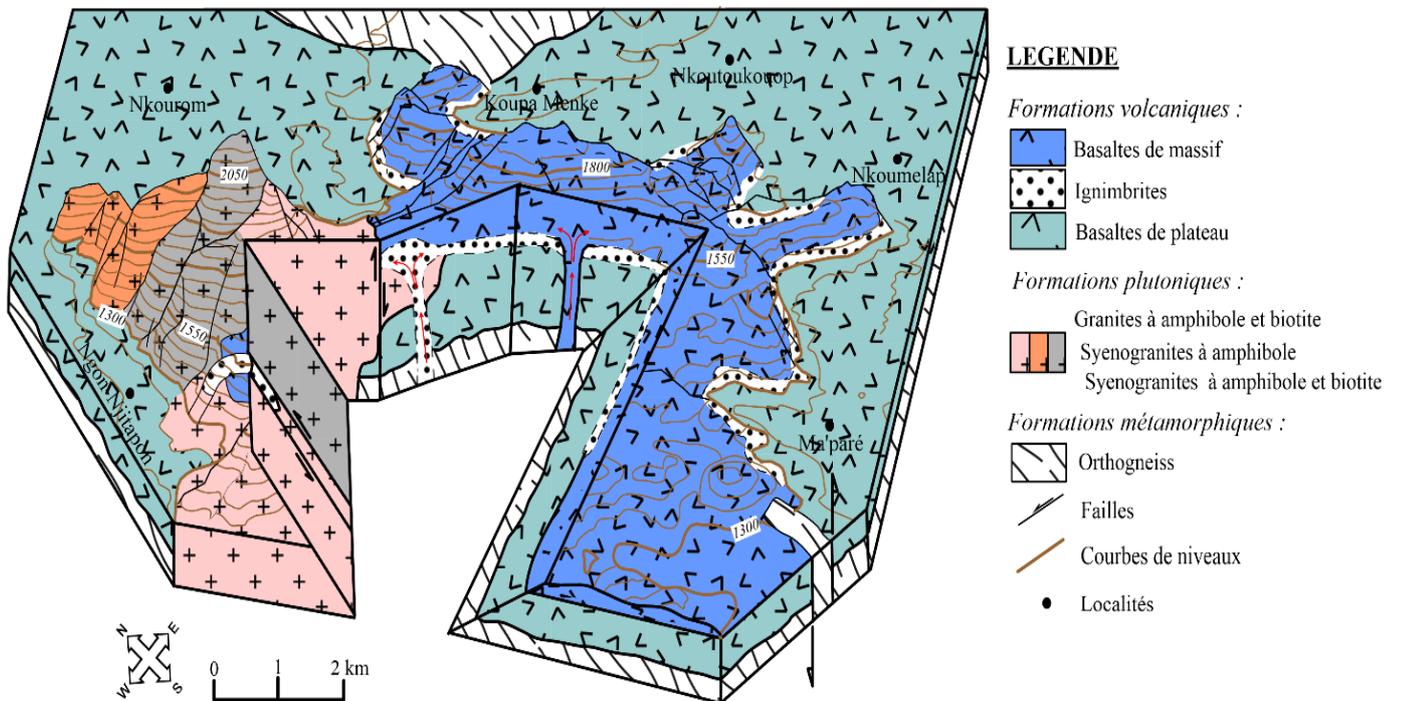


Figure 61. Bloc diagramme du massif de Nkogam montrant la chronologie relative des différents types lithologiques.

VII.2. Pétrogenèse des roches plutoniques du massif de Nkogam

VII.2.1. Contexte géotectonique

La mise en place des granitoïdes de Nkogam suivrait des évènements de la transition Crétacé-Tertiaire. Mais jusqu'ici, il est difficile de se prononcer avec précision sur leurs phases. Le contexte géotectonique des différents types pétrographiques a été évalué par leurs caractéristiques géochimiques en particulier, leurs teneurs en certains éléments en traces. Les traceurs (éléments majeurs et traces) mettent en évidence les contextes tectoniques des roches felsiques. Dans les diagrammes de discrimination de Whalen et al. (1987) (Fig. 62a et b), les granitoïdes du Nkogam sont de type A. L'enrichissement en HFSE dans le domaine des granites intraplaques (WPG) du diagramme de discrimination tectonique Y vs. Nb de Pearce et al. (1984) (Fig. 62c), indique un contexte intraplaque, tout comme dans d'autres complexes. Eby (1992) divise les granitoïdes de type A en deux sous-groupes chimiques A₁ et A₂. A₁ présente les caractéristiques des basaltes des îles océaniques (OIB) provenant du manteau (magmas anorogéniques ou zones de rift). Tandis que A₂ présente les caractéristiques de roches originelles de la croûte continentale ou d'arcs insulaires formés sur les marges de plaques convergentes.

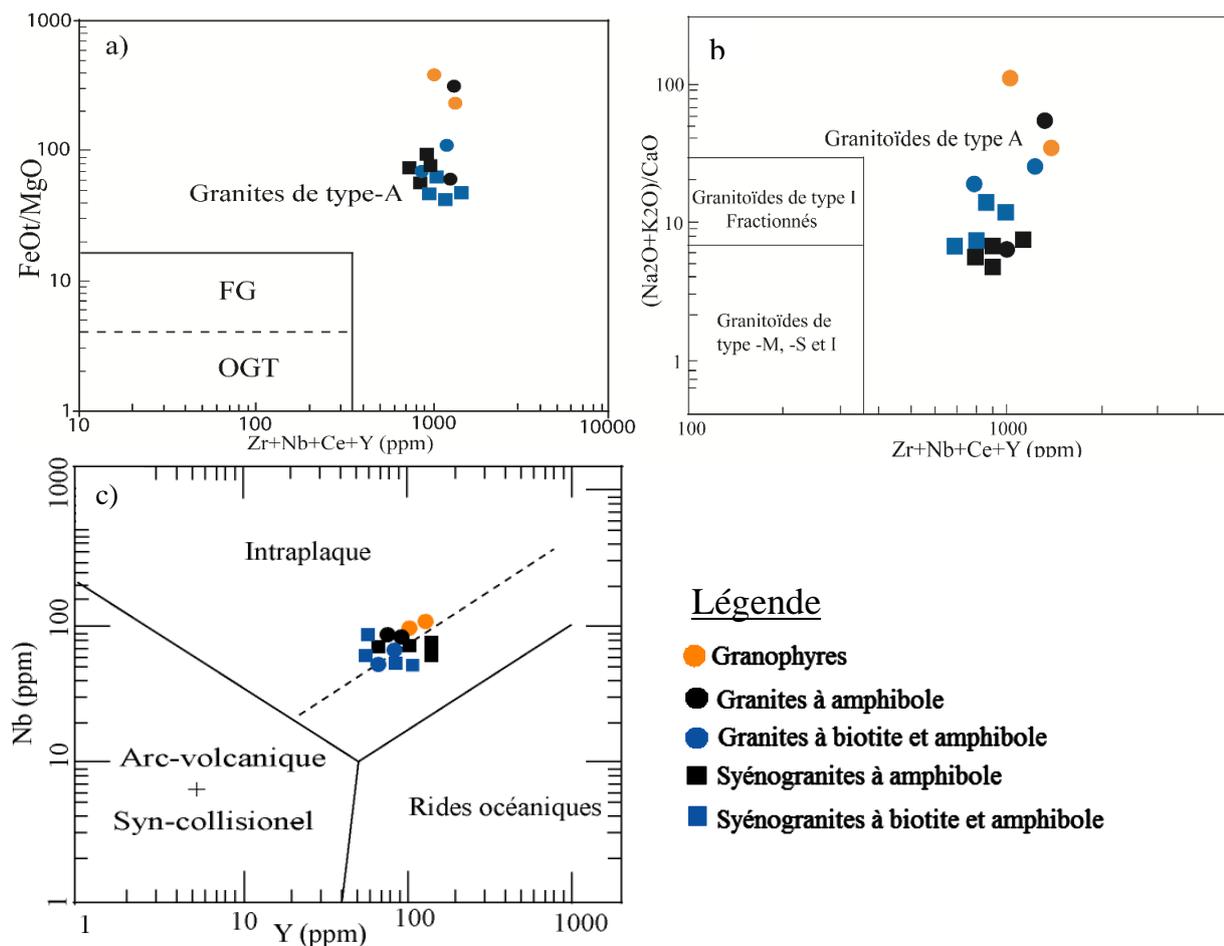


Figure 62. Diagramme de discrimination géotectonique des roches du massif de Nkogam : (a-b) (Zr+Nb+Ce+Y) vs. FeOt/MgO et (Na₂O+K₂O)/CaO d'après Whalen et al. (1987) ; (c) Y vs. Nb) d'après Pearce et al. (1984).

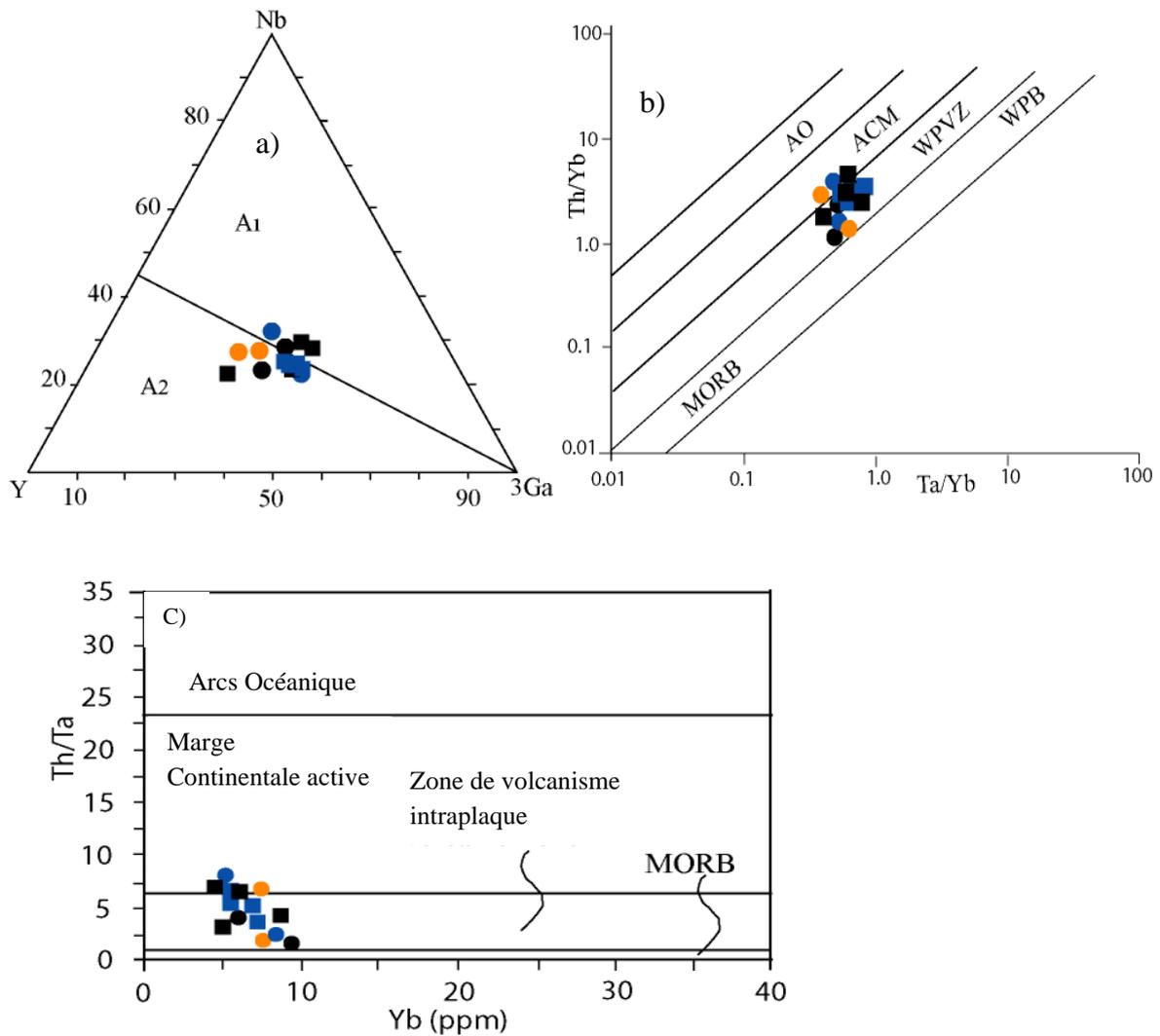


Figure 63. Contexte géotectonique du complexe anorogénique de Nkogam : (a) Diagramme discriminant 3Ga-Y-Nb d'après Eby (1992) : A1=champ des roches provenant du manteau, A2=champ des roches provenant de la croûte continentale ; (b) Diagramme Th/Yb vs. Ta/Yb des différents domaines d'après Pearce (1982, 1983). OA = Arcs Océanique, ACM = Marge Continentale Active, WPVZ = Zone de volcanisme intraplaque, WPB = basalte intraplaque, MORB = Basalte des rides medio Océaniques ; (c) Diagramme Yb vs. Th/Ta : lignes de discrimination (Gorton et Schandl, 2000).

Dans le diagramme de discrimination « A-type » des roches felsiques (Eby, 1992) les granites alcalins et les syénogranites du complexe de Nkogam occupent le champ A2 à l'exception de quatre échantillons qui se logent dans le champ A1 (Fig. 63a).

Les résultats obtenus avec les diagrammes Yb vs Th/Ta et Ta/Yb vs Th/Yb sont similaires, le plus grand nombre d'échantillons se retrouvent dans le champ WPVZ (Fig. 63b et c), et une petite partie se trouvent dans le domaine de la Marge Continentale Active/ Active Continental Margins, ACM ».

Ces affinités géotectoniques de la majorité des roches sont compatibles avec l'évolution du magmatisme le long de la LC par des impulsions de magma alcalin à caractère intraplaque,

favorisé par des zones de faiblesses au sein des roches cristallines panafricaines, comme l'ont démontré plusieurs auteurs tel Njonfang et al. (2013). Les granitoïdes de Nkogam résulteraient de la réactivation de failles préexistantes de l'Adamaoua et de la Sanaga, comme la fosse de la Benoué au Nigéria (Maluski et al., 1995).

VII.2.2. Source

Trois modèles pétrogénétiques expliquent la formation des magmas granitiques de type A (Eby, 1990 ; 1992) : (i) fractionnement des magmas mantelliques (Loiselle et Wones, 1979 ; Frost et Frost, 1997 ; Bonin, 2007), (ii) réaction des magmas mantelliques avec les roches crustales (Poitrasson et al., 1995), et (iii) fusion partielle de la croûte continentale (Abdel Rahman, 2006 ; Konopelko et al., 2007). Néanmoins, une réaction d'un magma dérivé du manteau avec des roches crustales et la fusion de la croûte continentale profonde expliquent mieux la présence de granites de type A (Rämö et Haapala, 1995 ; Bonin, 1996); mais sur la base des éléments traces, l'on propose également le mélange de magmas dérivés du manteau avec des composants crustaux, suivi d'une cristallisation fractionnée (Jahn et al., 2000 a; b ; Wormald et al., 2004 ; Kemp et al., 2005 ; Whalen et al., 2006 ; Shellnutt et al., 2009). De plus, les rapports Ba/Rb, Th/Ta, Th/Ce, Y/Nb peuvent aider à identifier les régions sources. Le rapport Ba/Rb, marqueur de l'interaction croûte-manteau, est ≈ 11 (Hofmann et White, 1983) dans les roches du manteau, et $\approx 6,7$ (Rudnick et Fountain, 1995) dans la croûte. Ce rapport est de 2,51 à 10,62 dans les roches du Nkogam. Un autre marqueur important, le rapport Th/Ta (Shellnutt et al., 2009), est ≈ 2 dans les roches du manteau, $\approx 7,9$ dans la croûte inférieure et $\approx 6,9$ dans la croûte supérieure (Shellnutt et al., 2009). À Nkogam, ce rapport varie de 1,93-7,38 (moyenne = 4,93) indiquant l'interaction magmas du manteau-croûte. En outre, la croûte continentale montre le rapport Th/Ce $\approx 0,15$ et des anomalies négatives en Eu (Taylor et McLennan, 1985) et inférieur d'environ 0,02-0,05 (Sun et McDonough, 1989) dans les roches du manteau. À Nkogam, il est faible (0,03-0,13) avec une moyenne de 0,09, indiquant l'influence de la croûte inférieure et du manteau dans la genèse des roches. Ces deux résultats obtenus sur le même massif indiqueraient une source mixte. Par ailleurs, pour Barbarin (1999), les granitoïdes de type I, métalumineux à modérément hyperalumineux ($A/CNK = 0,83-1,05$) sont de source magmatique mixte impliquant la contribution de la croûte continentale inférieure et du manteau. La présence des minéraux hydratés comme l'amphibole suggèrent une contribution du manteau (Nomo et al., 2015). Les spectres multi-éléments normalisés par rapport au manteau primitif (McDonough et Sun, 1989) montrent des similitudes qui existent entre les granites alcalins et les syénogranites, avec des anomalies négatives en Ba, Sr, p, Eu et Ti (Fig. 54a et b). De plus, l'enrichissement en Ce est prononcé dans les granites à amphibole. Des valeurs élevées de Rb,

Th, U et La et une anomalie de Pb fortement positive, reflètent une source enrichie (Li et al., 2014). Le comportement similaire des spectres multi-éléments et REE dans l'évolution magmatique du complexe anorogénique de Nkogam (Tempier et al., 1980) suggèrent une même origine magmatique. De plus, les diagrammes $Yb/Ta \approx Ce/Nb$ vs. Y/Nb d'Eby (1990) placent les roches plutoniques du Nkogam dans le domaine A1 et recouvrent le champ OIB (Fig 64 a et b), ce qui indique une source mantellique associée à une faille et/ou un rifting (Barbarin, 1999 ; Yang et al., 2017). Selon De Paolo et Daley (2000), le rapport $La/Nb \approx 0,7$, est indicatif d'une source asthénosphérique alors que le rapport $La/Nb > 1$, suggère une source lithosphérique. Ainsi, les rapports La/Nb obtenu des granitoïdes de Nkogam (1,13-3,10) permettent de penser qu'ils proviendraient d'une source lithosphérique. Thomson et Morrison (1988) suggèrent que pour le magma ayant une origine l'asthénosphérique, les rapports La/Ta sont d'environ 10. Dans les granitoïdes de Nkogam, les valeurs de ce rapport sont très élevées (20,12 - 49,41), ce qui confirme une origine lithosphérique et non une origine asthénosphérique.

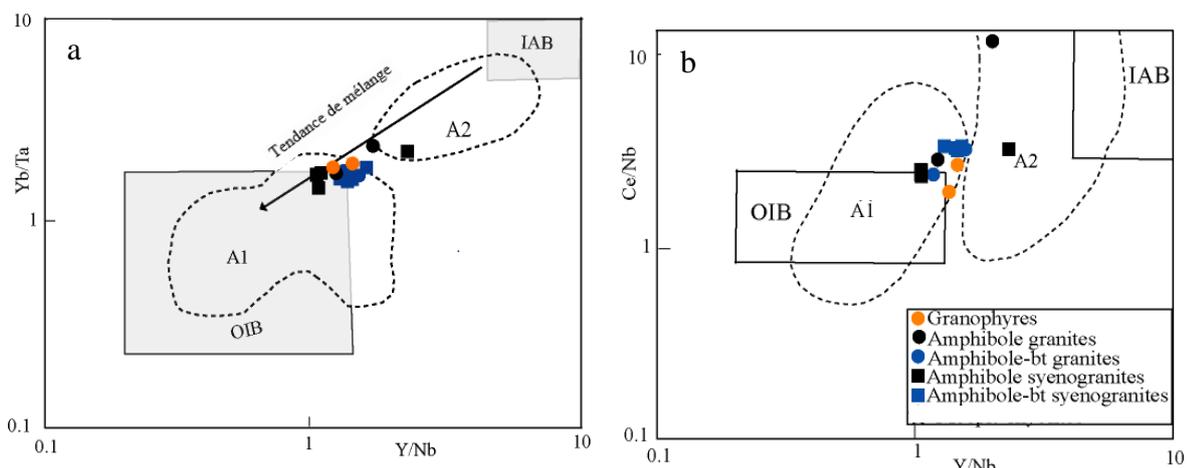


Figure 64. Diagrammes d'illustration de la source des granitoïdes de Nkogam : (a-b) (Y/Nb) vs. Yb/Ta et Ce/Nb d'après Eby (1992). OIB= Basaltes des îles océaniques, IAB= Basaltes des îles atlantiques, A1= Source mantellique, A2=Source crustale.

VII.2.3. Differentiation magmatique

Les observations de terrain, les différents assemblages minéralogiques et la composition en éléments majeurs et traces des granitoïdes tertiaires de Nkogam suggèrent que leur variabilité observée semble avoir été contrôlée par deux processus notamment : la cristallisation fractionnée et la contamination crustale.

VII.2.3.1. Cristallisation fractionnée

Certaines variations de la composition chimique des granitoïdes de Nkogam sont compatibles avec le partage des éléments entre une masse fondue silicique et un minéral

cristallisant dans la masse fondue (par exemple, fractionnement du plagioclase, du feldspath alcalin et des ferromagnésiens). Dans les diagrammes de Harker (Figs. 47 et 48), la cristallisation fractionnée est le principal mécanisme de différenciation. La diminution de Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , et P_2O_5 avec l'augmentation de SiO_2 (Fig. 47) indique le fractionnement des cristaux de plagioclase, amphibole et biotite pour les granites alcalins. De même la diminution de Fe_2O_3 , TiO_2 , et P_2O_5 avec l'augmentation de SiO_2 (Fig. 48) indique le fractionnement des cristaux de plagioclase, amphibole et biotite pour les syénogranites. La corrélation négative entre MgO et CaO explique la cristallisation du clinopyroxène. La corrélation négative entre CaO et SiO_2 , et la diminution des teneurs en Al_2O_3 et Sr indiquent le fractionnement du plagioclase. Des anomalies négatives en Ba et Eu indiquent une cristallisation limitée du plagioclase. De même, la diminution de Eu/Eu^* et Sr et l'augmentation de SiO_2 dans les granitoïdes de Nkogam (Figs. 49d et 66) et les anomalies négatives de Eu (Fig. 53 a et b), suggèrent la cristallisation fractionnée de plagioclase (Bonin et Moyen, 2011). Les anomalies négatives de Ba , Sr , P , Eu et Ti (Figs. 54a et b) suggèrent la cristallisation fractionnée de feldspaths et d'apatite pendant la formation du magma (Dahlquist et al., 2010 ; Yang et al., 2017). L'augmentation de Ba , Sr et Eu indique le rôle du fractionnement des feldspaths dans l'évolution du magma (Dahlquist et al., 2010). De même, la grande variation du rapport Ba/La (2,77-13,85) et le faible rapport Y/Nb (1,05-2,30) sont contrôlés par le fractionnement des feldspaths alcalins à la fin du processus de différenciation (Eby, 1990 ; Chazot et Bertrand, 1995). L'anomalie négative en Ce dans le granophyre (Nk11) reflète le fractionnement de l'apatite (Fig. 53a). Les terres rares sont fortement fractionnés avec $(\text{La}/\text{Lu})_N = 32,32-56,05$ dans les granites alcalins. Les syénogranites montrent des spectres fortement fractionnés $((\text{La}/\text{Lu})_N = 33,29-49,35)$. Le fractionnement des feldspaths est plus marqué dans les granites que dans les syénogranites. La diminution de Na_2O , CaO et Fe_2O_3 avec l'augmentation de SiO_2 (Fig. 47) reflète un fractionnement important des feldspaths couplé à celui des amphiboles. La forme concave des spectres de terres rares (Fig. 53) indique la cristallisation des amphiboles (Aysal et al., 2012). Les rapports La/Yb (7,66-14,15) et Ho/Yb (1,18-1,51) suggèrent que l'amphibole était une phase résiduelle pendant la fusion partielle (Yang et al., 2012) avec un fractionnement marqué dans les syénogranites. La corrélation négative de P_2O_5 reflète le fractionnement de l'apatite. Les anomalies négatives en P et Ti (Figs. 54a et b) indiquent également le fractionnement de l'apatite (Yan et al., 2010) et de la biotite (Aysal et al., 2012) respectivement. La diminution du TiO_2 et du Fe_2O_3 montre un fractionnement continu de la titanomagnétite, de l'amphibole et de la biotite. Ainsi, le fractionnement des cristaux a joué un rôle important dans la formation des granitoïdes de Nkogam ; mais ce n'est pas le seul mécanisme pouvant expliquer leur évolution (Fig. 65).

Le comportement des roches montre deux filiations magmatiques : l'une pour les granites alcalins et l'autre pour les syénogranites. La cristallisation fractionnée est le principal processus de différenciation magmatique ayant joué un rôle important dans la formation de ces différents types pétrographiques.

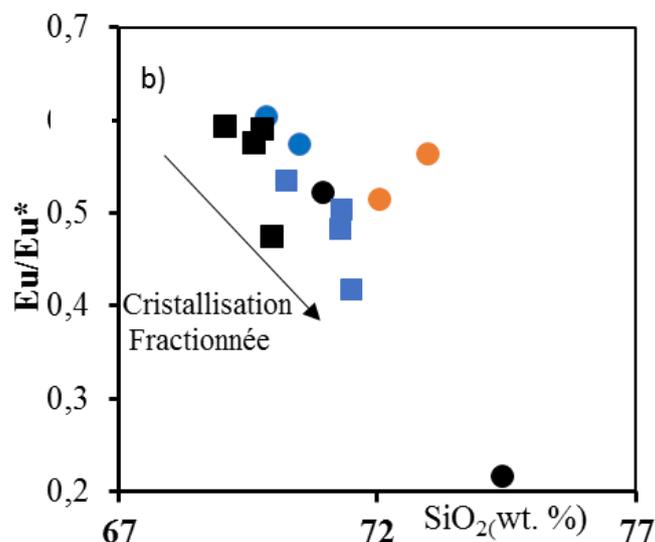


Figure 65. Diagramme d'illustration de la cristallisation fractionnée des Eu/Eu^* en fonction des teneurs en SiO_2 des granitoïdes de Nkogam. Mêmes symboles que dans la figure 33.

VII.2.3.2. Contamination crustale

La contamination crustale repose sur les données à la fois de terrain, géochimiques et isotopiques. Mais dans ce travail compte tenu du manque de données isotopiques, seules les données de terrain et géochimiques permettront de discuter de la contamination crustale. Sur le terrain, les contacts entre les enclaves et l'encaissant ne sont pas francs, cela indique une contamination limitée de l'enclave par l'hôte et réciproquement (Nédélec et Bouchez, 2011). Les éléments en traces peuvent également être utilisés pour expliquer la contamination crustale dans les granitoïdes du complexe du Nkogam. Le diagramme de variation de Nb/Y en fonction de Rb/Y de Cox et Hawkesworth (1985) et Leeman et Hawkesworth (1986, Fig. 66) montre que les échantillons peuvent être divisés en deux groupes : un groupe de roches non contaminées (pente positive plus ou moins raide) et un autre groupe de roches contaminées (tendance à rapports Nb/Y plus élevés pour des valeurs Nb/Y relativement faibles). Dans ce diagramme, les roches plutoniques de Nkogam occupent l'espace entre le champ de sous-groupe non contaminé définies par Kamgang et al. (2010) et celui des roches du précambrien des monts Bamenda de Nzolang (2005). Ce qui nous amène à conclure que ces roches seraient relativement contaminées, celle disposée à l'intérieur du champ des roches de Bamenda étant la plus affectée. Toujours dans l'optique d'évaluer le rôle possible de la contamination crustale dans la pétrogenèse du complexe d'étude, quelques rapports tels $HFSE/LREE$ et $LREE/LILE$ et

LREE/HFSE tels que Th/La, Ce/Pb et La/Nb respectivement, ont été comparés avec ceux obtenus dans les magmas intraplaques et les croûtes continentales.

Taylor et McLennan (1985), Plank et Langmuir (1998) et Plank (2005) ont démontré que : le continent et la croûte supérieure ont un rapport Th/La = 0,3 alors que les magmas intraplaques ont un rapport Th/La = 0,1 ; les croûtes supérieures et inférieures sont connues pour avoir de faibles rapports de Ce/Pb ($Ce/Pb < 5$) et des rapports relativement élevés de La/Nb (La/Nb = 1,5 et 4,5 respectivement).

Dans les granitoïdes de Nkogam, les rapports Th/La vont de 0,06 à 0,22 dans 6 échantillons de granites alcalins, de 0,11 à 0,26 dans 8 échantillons de syénogranites et de 0,03 dans un échantillon de syénite à quartz (NK23). Les rapports Ce/Pb vont de 6,90 à 48,07 dans 6 échantillons de granites alcalins, de 6,92 à 13,85 dans 8 échantillons de syénogranites et de 301,19 dans un échantillon de syénite à quartz (NK23). Les rapports La/Nb vont de 1,26 à 3,11 dans 6 échantillons de granites alcalins, de 1,30 à 2,32 dans 8 échantillons de syénogranites et de 12,95 dans un échantillon de syénite à quartz (NK23).

La figure 66 montre un étalage des différents types pétrographiques allant du champ des roches non contaminées à celui des roches contaminées. Dans ce diagramme, les roches sont disposées de celles faiblement contaminées à celles fortement contaminées par le socle. Ce comportement est différent dans le massif de Nana car en plus des roches faiblement à fortement contaminées, on y retrouve des roches non contaminées.

Des résultats semblables ont été obtenus par Noudiedie Kamgang (2021), Wokwenmendang Nguet (2018) et Njonfang et al. (2013) respectivement dans les complexes de Nlonako, de Nana et de Sabongari, Kamgang et al. (2010) sur les roches felsiques des monts Bamenda.

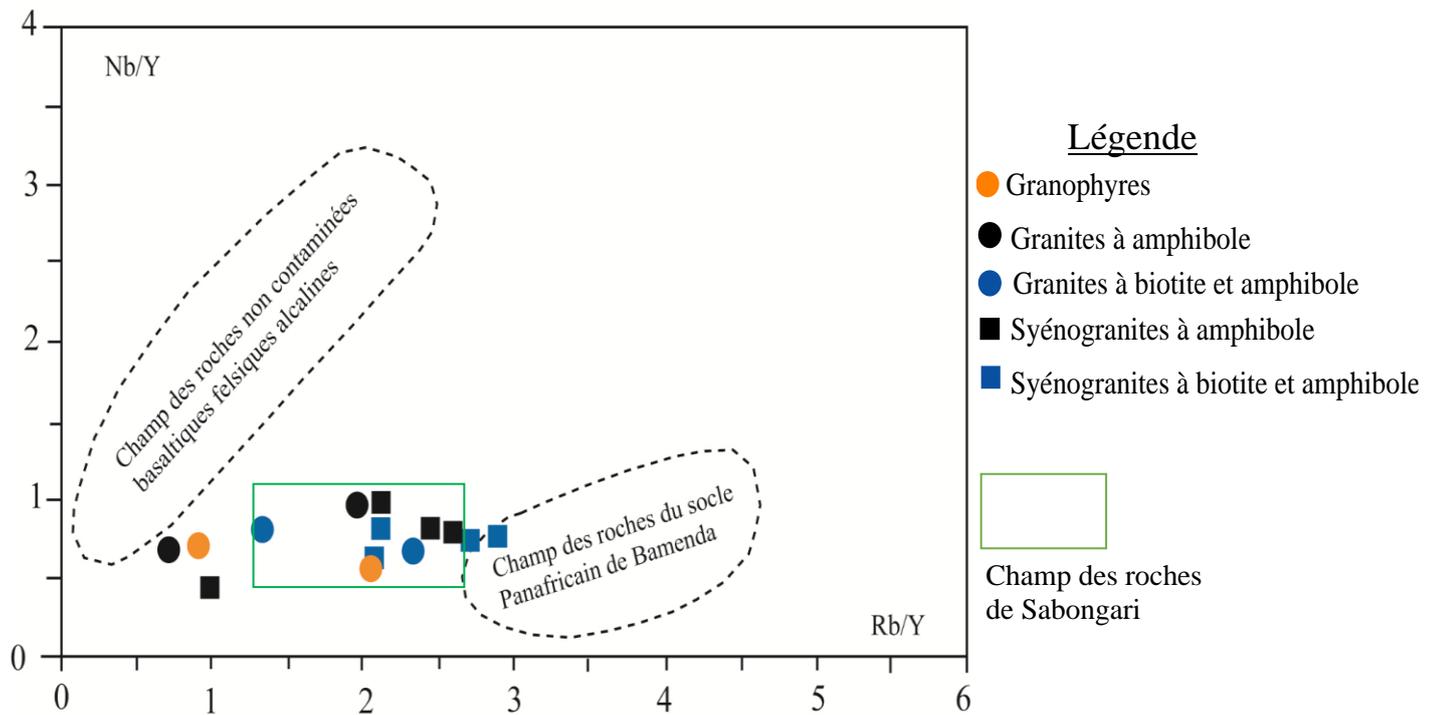


Figure 66. Les granitoïdes de Nkogam dans le diagramme Nb/Y contre Rb/Y (d'après Cox et Hawkesworth, 1985 et Leeman et Hawkesworth, 1986). Champs de laves alcalines basaltiques à felsiques non contaminées (d'après Kamgang et al., 2010) et du socle de Bamenda (Nzolang, 2005).

VII.4. Significations

VII.3.1. Signification des âges

Pour la première fois sur les roches plutoniques du complexe anorogénique de Nkogam, la méthode de datation U/Pb sur zircon a été utilisée et a donné des âges de $47,17 - 48 \pm 0,088$ Ma sur les syénogranites, plus précis que ceux (66 - 67 Ma) de Caen-vachette et al. (1987) obtenus par la méthode Rb/Sr respectivement sur les granites et les granophyres. L'on l'interprète comme l'âge de mise en place du plutonisme du complexe anorogénique de Nkogam. Il intègre la fourchette d'âges des activités volcaniques de la région 46 Ma pour les roches alcalines et 51,8 Ma pour les roches transitionnelles (Moundi et al., 2007). Ceci traduirait la présence des activités magmatiques simultanées dans le plateau Bamoun. L'âge des granitoïdes de Nkogam ($48 \pm 0,08$ Ma) est proche de celui obtenu sur les granites de Nana, $51,28 \pm 1$ Ma (Wokwenmendang Nguet, 2018) obtenu par la méthode de datation U/Pb sur zircon ; de Mayo Darlé, $48,5 \pm 2$ Ma (Cantagrel et al., 1978 ; K/Ar); de Bana, 51 ± 1 Ma (Caen-vachette et al., 1991 ; Rb/Sr) ; de Koupé, ($50-53 \pm 1$ Ma) Lamilen et al. (1994) par la méthode Rb/Sr. Ces âges caractérisent le magmatisme des complexes anorogéniques de la LC qui se situent dans la fourchette 73-30 Ma (Lasserre, 1978). La compilation des âges obtenus des

roches plutoniques et volcaniques le long de la LC indique une période d'activités magmatiques allant du Crétacé supérieur à l'actuel. La période d'activités volcaniques majeure se situe dans l'intervalle 0-55 Ma tandis que celle d'activités plutoniques majeure se trouve dans l'intervalle 30-70 Ma. Une corrélation faite sur les activités volcaniques et plutoniques de la LC suggère que les activités volcaniques se sont manifestées de 51,8 Ma à l'actuel. De la limite Crétacé supérieure à l'éocène, l'on assiste à une intense activité plutonique, qui se caractérise par la formation de plusieurs complexes anorogéniques : C'est le cas des complexes de Nana, Nlonako, Bana, Mayo Darlé et Nkogam.

De même, l'utilisation du diagramme Latitude (N)-Ages (Ma) (Fig. 67) corrobore la prédominance des activités plutoniques du secteur continental de la LC à l'Eocène. Les éruptions les plus récentes ont été observées au Mont Cameroun, respectivement, en 1923 et 2000. Plusieurs travaux montrent que les éruptions volcaniques ont commencé à la terminaison NE de la Ligne volcanique, dans le bassin du lac Tchad, au Crétacé inférieur (Vicat et al., 2002 ; Mbowou et al., 2012 ; Shellnutt et al., 2016).

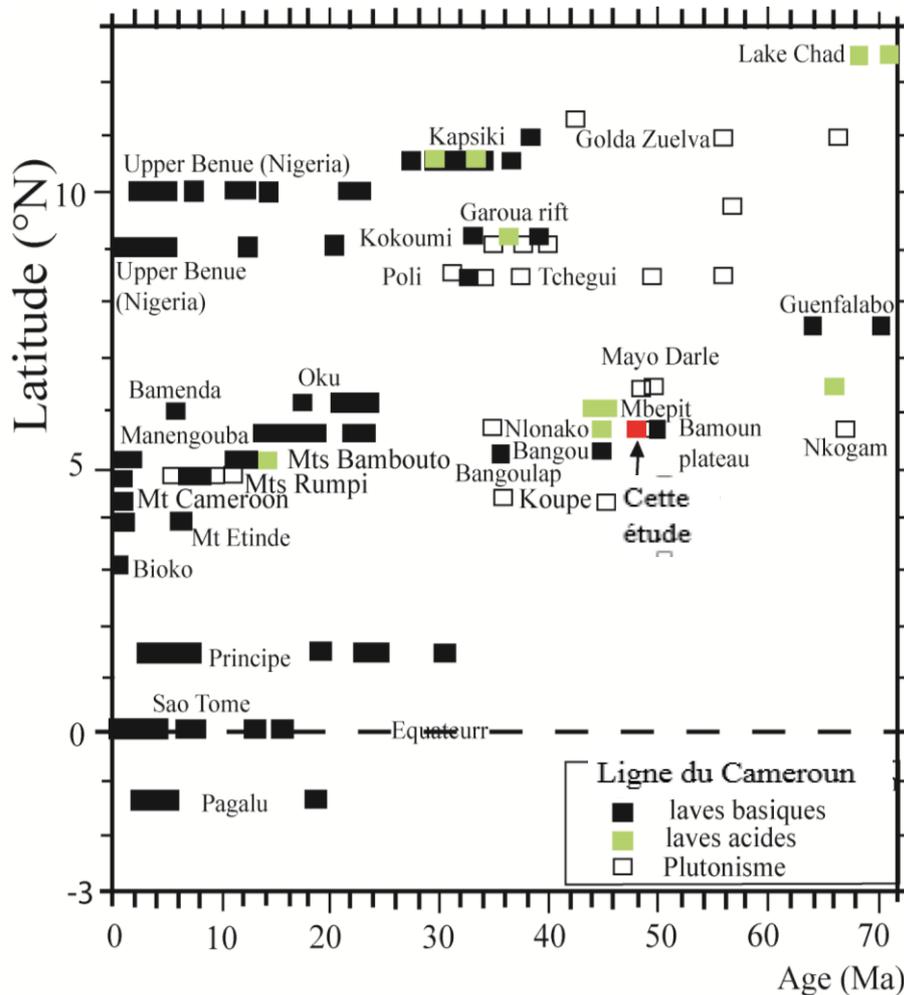


Figure 67. Distribution des âges des édifices volcaniques et plutoniques de la "Ligne du Cameroun" jusqu'au Sud du Tchad (données de Mbowou et al., 2012), complétée.

Cette étude par la méthode de datation U/Pb sur zircon précise l'âge de mise en place des syénogranites du Nkogam entre 47,88 et 48 Ma. Sur le même massif ont été daté les granites et granophyres respectivement à 66 et 67 Ma par la méthode de datation Rb/Sr sur roche totale (Kamgang, 1986 ; Caen-vachette et al., 1987). Vu la disposition des différents types pétrographiques sur le terrain et leurs âges, on peut penser à différentes des périodes de mise en place. Cette intense activité magmatique serait contrôlée par des fractures lithosphériques (Déruelle et al., 2007). Ainsi le magmatisme de la LC serait lié à la zone du cisaillement centre Camerounais et à la zone de faille de l'Afrique centrale qui est développée du Cameroun au Tchad, de la République Centrafricaine jusqu'au Soudan (Nkouathio et al., 2008).

VII.3.2. Signification des températures

Le thermomètre de Watson et Harrison (1983) a été appliqué aux roches plutoniques de Nkogam pour estimer la température maximale de cristallisation des magmas. Les valeurs obtenues se situent entre 870 et 980°C. Ces températures sont proches de celles obtenues dans les granitoïdes de Bana (839-892°C ; Kuepouo, 2004), du Nigéria ririwai granite (842-1000°C ; Girei et al., 2019) par la méthode de saturation du zircon. Des températures semblables sont relevées dans le complexe de Tamazeght au Maroc (~820 et 1000 °C ; Marks et al., 2008). Les températures de saturation élevées (tableau 11) ayant favorisé la mise en place des types pétrographiques du massif seraient liées au panache (> 800°C : Zhang et al., 2007 ; Liu et al., 2014). Les températures de cristallisations des différents types pétrographiques étudiés croient en fonction de la teneur en zirconium. Dans le complexe anorogénique de Nkogam la moyenne de température de cristallisation des différents types pétrographiques est de 963°C pour les granophyres, 906°C pour les granites à amphibole, 948°C pour les granites à amphibole et biotite, 902°C pour les syénogranites à amphibole et 887°C pour les syénogranites à amphibole et biotite. Du point de vue de l'ordre normal de cristallisation des différents types de roche sur le massif, l'on a en premier lieu les granophyres (963°C), granites à amphibole (906°C), granites à amphibole et biotite (948°C), syénogranites à amphibole (902°C) et syénogranites à amphibole et biotite (887°C). Au vu du mode de cristallisation des minéraux contenus dans les différentes roches, cet ordre de refroidissement des différents types pétrographiques est inversé. Car l'ordre normale de mise en place par degré de température croissant devrait être le suivant : granophyre, syénogranite à amphibole-biotite et enfin granite à amphibole pour les granites alcalins. En suite : syénogranites à amphibole et biotite et syénogranites à amphibole pour les syénogranites. Toutes ces roches sont issues d'une même source qui est le manteau lithosphérique. Elles auraient donc subi des processus pétrogénétiques variés lors de leur mise en place. Ces fortes

températures de cristallisation obtenues pour les roches plutoniques du massif, traduisent leur provenance d'une source mantellique (Lui et al., 2014).

VII.3.3. Signification des pressions

Les résultats géobarométriques des granitoïdes de Nkogam permettent, en combinaison avec leur composition chimique, de mieux apprécier l'évolution du magma source. En effet, les profondeurs de cristallisation indiquent que les syénogranites à amphibole représentent les termes les moins évolués, suivie des syénogranites à amphibole et biotite avec des profondeurs moyennes de mise en place de 29,73 et 19,24 km respectivement. Pour ce qui est des granites alcalins, les granophyres et les granites à amphibole et biotite ont cristallisé sensiblement à la profondeur ($\approx 15,5$ km), tandis que les granites à amphibole représentent les termes les plus évolués avec une profondeur de 6,48 km. Dans l'ensemble, les syénogranites ont cristallisé à forte pression tandis que les granites alcalins ont cristallisé à faible pression. Cet ordre de cristallisation des roches du massif est normal bien que les différents types pétrographiques soient issus d'une source commune. Il faut cependant noter que l'échantillon NK47 de granite à amphibole de cristallisation à 30,13 km. Le spectre des terres rares de cet échantillon présente une anomalie positive en Ce et une forte anomalie négative en Eu. L'anomalie positive en Ce peut être attribuée soit à la cristallisation du magma en condition, soit à un enrichissement en cerianite. Dans ce massif, il existe un contraste entre la température et la pression de cristallisation des granitoïdes

VII.3.4. Signification géodynamique

Pour discuter de la signification géodynamique des granitoïdes du complexe anorogénique de Nkogam, il est mieux de voir quelques similitudes ou des dissemblances avec les autres granitoïdes déjà étudiés le long de la LC et ailleurs. Les granitoïdes du complexe anorogénique de Nkogam sont ferreux et d'affinité alcaline comme ceux de Bana (Kuepouo, 2004) et de Sabongari (Njonfang et al., 2013). Les granitoïdes du complexe anorogénique du Ririwai aux Nigéria (Girei et al., 2019) sont ferreux, d'affinité alcaline à alcaline calcique (Girei et al., 2019). Ils occupent sensiblement les mêmes domaines géodynamiques que certains granitoïdes des complexes de la LC et d'ailleurs, notamment ceux de Guenfalabo (Ngongé et al., 2014), Bana (Kuepouo, 2004) et de Tamazeght (Marks et al., 2008).

Le mode de mise en place de la majorité des granitoïdes des complexes de la LC serait lié à la réactivation des failles Panafricaines préexistantes de l'Adamaoua et de la Sanaga (Maluski et al., 1995, Montigny et al., 2004). Les granitoïdes du complexe anorogénique de Nkogam en font partie et se trouvent dans le domaine des granitoïdes intraplaques (WPG). Les granitoïdes

des complexes anorogéniques de Nkogam, Sabongari et Bana présentent de fortes anomalies positives en Pb ce qui traduit un enrichissement de la source (Li et al., 2014). Cette signature géochimique de type intraplaque que présentent les granitoïdes de Nkogam serait probablement héritée de leurs roches mère, mis en place au cours de la réactivation ayant conduit à sa mise en place. De manière générale, les granitoïdes alcalins ferreux, sodi-potassique à potassiques apparaissent en domaine intraplaque lié à un contexte tectonique d'extension.

VII.4. Études comparées

VII.4.1. Morphologie du massif de Nkogam avec celles des autres complexes et massifs volcaniques de la LC.

Une étude comparée sur la morphologie du massif montre que, le complexe de Bana est de forme ovale et couvre une superficie de 59 km², avec une altitude de 2097 m (Nana, 1988) ; le complexe de Koupé est de forme elliptique et couvre une superficie de 80 Km², avec une altitude de 2061 m (Lamilen et al., 1994) ; le complexe de Pandé est subcirculaire et couvre une superficie d'environ 17 km², d'altitude de 1231 m (Njonfang et Moreau, 2000) ; le complexe de Nkogam est subcirculaire et couvre une superficie de 140 km², avec une altitude de 2268 m (Caen-vachette et al., 1987). Tous ces massifs sont en intrusion dans un socle granitogneissique d'âge panafricain. En général, le long de la LC, les complexes anorogéniques sont circulaires, arrondis à subarrondis (Njonfang et al., 2011) et corroborent la morphologie subcirculaire du massif de Nkogam. La dépression centrale observée dans le Nkogam est absente dans les massifs de Bana, Sabongari, Nana et Guenfalabo. Au Nigéria, le complexe de Ririwai est elliptique, couvre une superficie de 180 km² et culmine à 1320 m d'altitude (Girei et al., 2019).

VII.4.2. Granitoïdes de Nkogam, Bana, Sabongari dans la LC en comparaison avec ceux de Ririwai au Nigéria.

Dans le souci de mieux apprécier la source, la série magmatique et le contexte tectonique de mise en place, les données géochimiques et géochronologiques du Nkogam ont été comparées à d'autres le long de la LC et au Nigéria (Tableau 14). L'âge de mise en place des syénogranites de Nkogam (47,17- 48,01 ± 0,1 Ma) obtenu par cette étude, est proche de celui de Bana (51 ± 1 Ma, Caen-vachette et al., 1991). Les températures de mise en place des granitoïdes de Nkogam sont comprises entre 870-980 °C, proche de celles de cristallisation des granitoïdes de Bana sont comprises entre 839 et 892 °C, également proche de celles du Nigéria comprises entre 842 et 1000 °C avec un échantillon de granite qui cristallise à 1207 °C. Les spectres multi-éléments obtenue des différents massifs superposés entre eux ainsi que ceux des terres rares affichent le même comportement. Ainsi l'on note des anomalies positives prononcées en Th, U, Nb, Ta, Pb,

Zr, Hf et Dy-Lu (Fig. 68a et b) au Nigéria. L'on y note aussi un enrichissement plus accentué en HREE qu'en LREE. L'enrichissement en Ce est plus prononcé dans les granites à amphiboles de Nkogam (NK47). Des teneurs très élevées en Rb, Ba, Th, U et La et une anomalie fortement positive en Pb indiquent une source enrichie (Li et al., 2014).

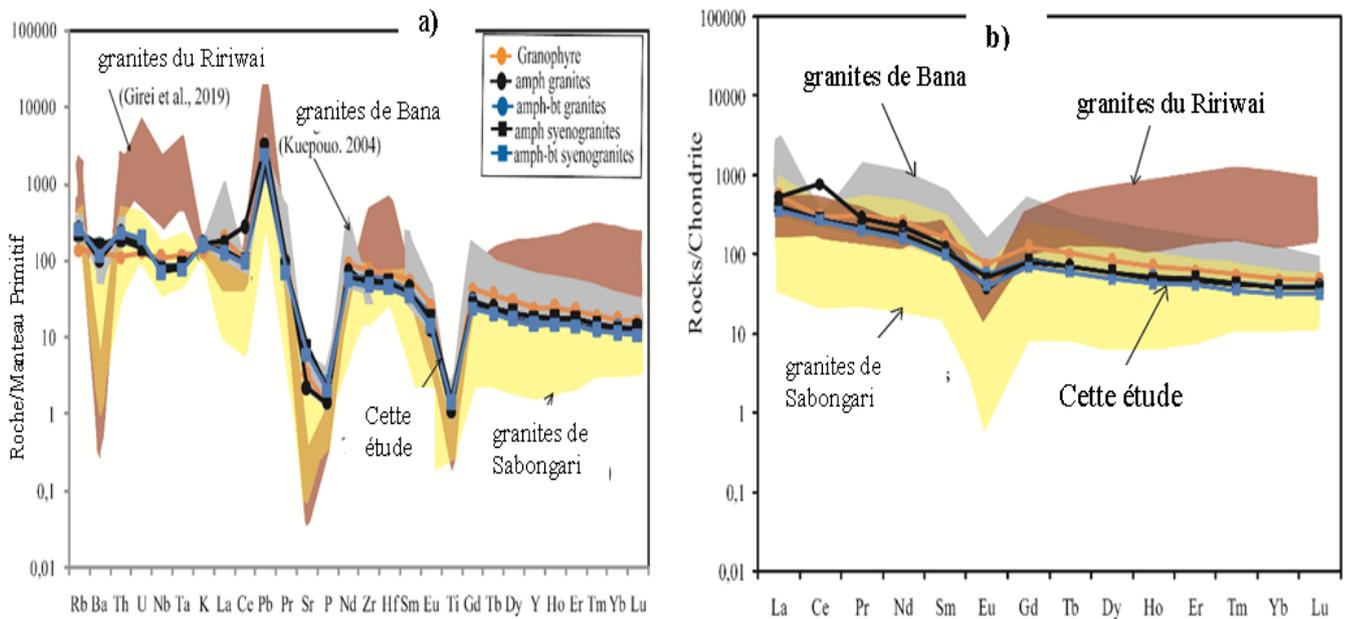


Figure 68. Comparaison des spectres multiélément et REE normalisés par rapport au manteau primitif de (McDonough et Sun, 1989) du Complexe de Nkogam avec ceux de Bana et Sabongari et du Nigéria.

Les températures de cristallisation élevées des granitoïdes du complexe de Ririwai et du complexe de Bana sont comparables avec celles obtenues sur les granitoïdes du complexe de Nkogam. La température de saturation du zircon dans les granitoïdes de Nkogam est également similaire à celle des granites de type A de l'extrême sud du Sinaï (841-985°C ; El-Bialy et Streck, 2009). La température élevée des granites de type A peut favoriser l'enrichissement en REE (Wu et al., 2007). Le complexe de Nkogam, Bana et Sabongari dans la LC et le complexe de Ririwai au Nigéria montrent de grandes similitudes chimiques (Tableau 14) marquées par l'aspect subparallèle des spectres multi-éléments et terres rares comparés. Ainsi, l'on constate que les complexes anorogéniques des deux pays sont mis en place dans un domaine intraplaque, dans un contexte tectonique d'extension et à partir d'une source mantellique.

Tableau 14. Caractéristiques géochimiques des complexes : Nkogam, Bana, Sabongari et Nigéria

Noms	Granitoïdes de Nkogam	Granitoïdes de Bana	Granitoïdes de Sabongari	Granitoïdes de Ririwai
Age	47-48 Ma (Eocène ; U/Pb)	51 Ma (Eocène ; K /Ar)	57,70 Ma (pléocène ; Ar/Ar)	169,6-176 Ma ; (Jurassic ; U/Pb)
ASI	Métalumineux à faiblement hyper alumineux	Métalumineux à faiblement hyper alumineux	Métalumineux à faiblement hyper alumineux	Métalumineux à faiblement hyper alumineux
Type de roche	Granite à feldspath alcalin ; syénogranite	Granite à biotite et amphibole ; Granite à amphibole	Granite à biotite et amphibole, Granite à clinopyroxène-amphibole	Granite à albite et arfvedsonite, Granite à arfvedsonite et aegirine, granite à biotite
Série	Alcaline	Alcaline à hyperalcaline	Alcaline	Alcaline à alcali-calcic
Affinité	Type A	Type A	Type A	Type A
Domaine	Intraplaque (WPG)	Intraplaque (WPG)	Intraplaque (WPVZ)	Intraplaque (WPG)
Contexte tectonique	Extension	Extension	Extension	Extension
Source	Mantellique	Mantellique	Mantellique	Mantellique
Température	870-980°C	839-892°C	//	842-1000°C
Localités	LC	LC	LC	Nigéria
Références	Ce travail	Caen-Vachette et al. (1991), Kuepouo, 2004	al. Njonfang et al. (2013), (2018).	Girei et al. (2019)

VII.5. Intérêt Économique des Formations Géologiques

VII.5.1. Intérêt géotechnique

Les différents types pétrographiques qui affleurent dans le plateau Bamoun et précisément à Nkogam, sont exploités localement pour des travaux du génie civil notamment le revêtement des plates formes et leurs ornements. D'autres sont utilisés pour la construction des habitations et des routes. Enfin, ces types pétrographiques variés sont utilisés pour la décoration des édifices religieux des villes de Kouoptamo, Koutaba, Foumbot et Fouban.

VII.5.2. Intérêt industriel des basaltes

Les basaltes du plateau Bamoun, peuvent être exploités en industrie notamment le domaine de la métallurgie et sous forme de fibre. Dans le domaine de la métallurgie, les basaltes fondus constituent un excellent matériau de constructions hydrauliques. La fibre de basalte est un matériau similaire à la fibre de carbone ou à la fibre de verre, elle est utilisée comme matériau résistant au feu dans l'industrie spatiale et automobile. Celle-ci possède de meilleures propriétés physico-mécaniques que la fibre de verre. Elle peut être aussi utilisée dans la fabrication des panneaux de carrosserie lorsqu'elle est mêlée à de la fibre de carbone (Mbassa, 2015). Cependant, des études complémentaires de métallogénie, doivent être faites au préalable, afin de se prononcer sur l'exploitabilité des dites ressources minérales.

VII.5.3. Intérêt industriel des ignimbrites

Les ignimbrites se présentent comme du béton armé, interviennent dans le génie civil pour la construction des bâtiments, le revêtement des carnavaux et la réalisation des décorations. Elles sont fortement utilisées pour l'enrichissement des sols en agriculture.

VII.5.4. Intérêt métallogénique et minier des granitoïdes

Les roches plutoniques felsiques sont souvent le siège d'importantes concentrations minérales : c'est ce sur quoi nous portons notre attention. Autrement dit, il est question dans ce travail de savoir si les granitoïdes du massif de Nkogam regorgent des indices de minéralisation susceptibles d'être exploités. Les granitoïdes de Nkogam sont riches en éléments chalcophiles (Cu, Ag, Zn, Ga...) et lithophiles (Sn, W, U, Nb, Ta, Be et Li). La comparaison des teneurs des granitoïdes étudiés en quelques-uns de ces éléments d'intérêt métallogénique par rapport à leur clark (abondance naturelle dans la croûte) tel que présentée au tableau 15 révèle qu'ils possèdent des indices de minéralisation intéressants. De même une comparaison en terme d'indices faite avec les granitoïdes du Ririwai au Nigéria (Girei et al., 2019) montre un enrichissement plus prononcé au Nigéria qu'au Cameroun. Cependant, il ne s'agit ici que d'indices chimiques, certes intéressants, mais qui au demeurant sont insuffisants pour se prononcer sur l'exploitabilité desdites ressources minérales.

Spécifiquement, la syénite à quartz (NK23) est plus riche en Cu (17 ppm) et Hf (27,7 ppm) et pauvre en Sn (1 ppm), en U (1,4 ppm). Les autres éléments en traces dans la syénite à quartz se trouvent en proportion similaires à celles des granitoïdes.

Tableau 15. Comparaison des teneurs en certains éléments en traces des granitoïdes de Nkogam par rapport à leur Clarke et à ceux du Nigéria Ririwai. Les données des clarkes sont extraites de Wedepohl (1995).

Eléments	Croûte continentale (ppm)	Granitoïdes de Nkogam (ppm).	Taux d'enrichissement	Granitoïdes du Nigéria (ppm) (Girei et al., 2019)
Cuivre (Cu)	25	1,7- 7,1 (NK12)	/	/
Etain (Sn)	2	3 - 7 (GO1)	2 à 3 fois	15-182
Niobium (Nb)	19	45,2 - 81,6 (NK3)	2 à 5 fois	128-1915
Plomb (Pb)	15	2,9 - 42,2 (NK3)	2 à 3 fois	79,8-1021
Tantale (Ta)	1	2,6 -5,3 (NK3)	2 à 5 fois	12,8-211
Thorium (Th)	9	8,3 -21,1 (NK3)	2 fois	22-1100
Uranium (U)	2	2,3 - 4,3 (G13)	2 fois	7,3-190
Zinc (Zn)	65	74 -245 (NK12)	2 à 4 fois	/

VII.5.5. Utilisation de quelques minéralisations d'intérêts économiques

Le Tantale (Ta) est utilisé dans la production des composantes électroniques, notamment les capacitanceurs ; la fabrication des moteurs d'avion. Le Ta métal, par ses qualités anti-corrosives et sa résistance à la chaleur, sert de scellant dans les usines chimiques et nucléaires.

Le niobium (Nb) est un bon conducteur d'électricité et de chaleur qui résiste à l'attaque chimique. Les alliages de Fe-Ni-Nb sont utilisés dans l'industrie aérospatiale, la construction des turbines génératrices à gaz et les moteurs des fusées.

Le thorium (Th) est un métal lourd, mou et très ductile. L'alliage nitrate de Th sert à la confection d'électrodes de soudure et de cathodes de magnétrons dans le système de radar pour le contrôle aérien, la météo et les fours à micro-ondes. Il entre également dans la fabrication de tubes émetteurs d'électrons, d'ampoules électriques et les détecteurs des radiations.

Le zinc (Zn) est utilisé pour la galvanisation, la fabrication du laiton et du bronze. Le zinc laminé est utilisé pour la couverture (toiture) dans les bâtiments du fait de sa résistance à la corrosion. On l'emploie aussi dans la construction des accessoires d'évacuation des eaux de pluies et les gouttières.

Conclusion

Les activités anthropiques, les érosions et les facteurs climatiques ont contribué à l'obtention de la morphologie actuelle du massif. Le complexe anorogénique de Nkogam présente une forme subcirculaire avec une dépression centrale. De nombreuses variations lithologiques sont observées sur le massif à travers les différentes unités géomorphologiques. Le massif de Nkogam est mis en place en contexte d'extension dans un domaine intraplaque. Les granitoïdes de Nkogam sont de nature alcaline et ferreux issu d'une source mantelique, avec comme processus de différenciation la cristallisation fractionnée et la contamination. Les températures de cristallisation varient de 870 à 980 °C pour un interval de pressions situées entre 240 et 1212 Mpa. Les granitoïdes du massif de Nkogam ont cristallisés à des profondeurs comprises entre 6,48 et 32,72 km. Les syénogranites du massif ce sont mis en place entre 47,89 et 48,01 Ma. Les granitoïdes de Nkogam dont l'importance économique n'est plus à démontrer sont jusqu'ici exploités dans le domaine du génie civil. Ils possèdent des indices d'enrichissement chimique en certains éléments utiles qui méritent une attention particulière.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

En conclusion, les travaux de recherche menés sur le massif de Nkogam et ses environs ont permis l'obtention de nouvelles données qui permettent de mieux connaître sa morphostructure, son magmatisme, sa pétrogénèse et son contexte géotectonique. Les linéaments tel que les diaclases, failles, lignes de crête et lignes de dépression ont été observés par le traitement d'images satellitaires et validés par des travaux de terrain. L'analyse de la rosace directionnelle et de l'histogramme des linéaments indique deux grandes familles de linéaments orientées respectivement NE-SW et ENE-WSW proches de la direction N030°E de la Ligne du Cameroun et de la direction N070°E de l'Adamawa respectivement. Les types pétrographiques s'enchevêtrent et présentent une morphologie en U avec une dépression centrale ouverte vers le SW, cette forme étant liée à la proximité de roches plutoniques et de roches volcaniques dans deux fractures orientées NNE-SSW à NE-SW dans le couloir de la ligne du Cameroun.

Les formations récentes sont de roches volcaniques mafiques. Ce sont les basaltes de plateau et les basaltes de massif, auxquelles s'ajoutent des basaltes filoniens. Les roches volcaniques acides qui affleurent sont les ignimbrites. Toutes ces roches volcaniques seraient formées à des épisodes magmatiques différentes. Elles forment une série alcaline bimodale mise en place au cours de trois dynamismes éruptifs : fissural, extrusif et explosif.

L'étude pétrographique révèle des textures microlitiques aphyriques ou porphyriques, eutaxitiques et/ou vitroclastiques. Dans les laves, la phase phénocristalline est composée de plagioclase, olivine, clinopyroxène et minéraux opaques ; l'on a en plus de la sanidine et du quartz dans les ignimbrites. La mésostase presque constituée des mêmes minéraux souligne parfois une fluidalité magmatique. Ainsi les laves mafiques portent des enclaves des roches du manteau et du socle, et les laves acides des fiammes. La présence des enclaves mantelliques indique une source mantellique. Des xénocristaux du socle, dans quelques échantillons, témoignent de la traversée de celui-ci par la lave durant son ascension, suggérant l'hypothèse d'une contamination crustale. Le feldspath alcalin, le plagioclase, le quartz, l'amphibole, le pyroxène et la biotite sont les principaux minéraux, organisés en textures micropegmatitiques et granophyriques : la texture granophyrique montre des croissances intermédiaires de quartz et de feldspath alcalin formées pendant la cristallisation ; la texture micropegmatitique montre des croissances intermédiaires de quartz et de feldspath alcalin, pendant la cristallisation.

L'étude géochimique des différents types pétrographiques montre que les basaltes dépourvus d'olivine sont transitionnels tandis que ceux qui en contiennent sont alcalins. Les formations plutoniques du massif de Nkogam forment une suite discontinue des granites alcalins, des syénogranites, de syénites à quartz et de gabbros. La somme en alcalins varie entre 8,45 et 9,53% et des rapports K_2O/Na_2O (0,75-1,34). Les granitoides du complexe de Nkogam sont de type A, surtout de type I ($A/CNK=0,83-1,58$), métalumineuses à faiblement hyperalumineuses ($ASI=0,91-1,03$), fortement ferreuse, sodi-potassique à légèrement potassique et à affinité alcaline. La géothermométrie de saturation du zircon indique leur cristallisation à

haute température (870 - 980°C) en présence de volatiles (fluor et chlore). Le géobaromètre indique la pression de cristallisation entre 2,4 et 11,16 Kbar pour les granites alcalins, 6,23 et 12,16 Kbar pour les syénogranites. Les rapports $(La/Lu)_N$ (32,32 - 56,05) montrent que les REE sont faiblement à fortement fractionnés. L'enrichissement en LREE et les anomalies négatives en Eu ($Eu/Eu^* = 0,21-0,60$) indiquent un fractionnement en plagioclase. Les profils normalisés des éléments du manteau précoce sont homogènes avec des anomalies négatives de Ba, Nb, Sr, Ta, Eu, P et Ti. Il apparaît des concentrations élevées de LILE (Na, K, Rb, Ba) et de HFSE (Zr, Hf, Th, U), et un léger appauvrissement en Nb et Ta. Le diagramme des terres rares normalisé par rapport aux chondrites montre un enrichissement en LREE par rapport aux HREE ($(La/Yb)_{CN} = 8,06-14,89$ pour les granites alcalins et 9,52-14,89 pour les syénogranites). La somme des concentrations en REE est de 367,92 - 604,45 ppm pour les syénogranites et de 397,18-1184,18 ppm pour les granites alcalins. Les rapports Zr/Ba (0,48 - 1,02), La/Nb (1,13 - 3,10) et les anomalies négatives de Nb, Ta, Ti et une anomalie positive très prononcée de Pb attestent d'un apport dans la source. La plupart des granitoïdes de Nkogam se situent dans le domaine A₁ des diagrammes Yb/Ta, Ce/Nb Vs Y/Nb, indiquant une source mantellique. De plus, les rapports La/Nb (1,13 - 3,10) et La/Ta (20,12 - 49,4) indiquent une source lithosphérique. Ainsi, les granitoïdes de Nkogam proviennent du manteau lithosphérique mis en place dans un domaine intraplaque en contexte tectonique d'extension.

La datation géochronologique par la méthode U/Pb sur zircon des syénogranites donne un âge d'environ $48 \pm 0,088$ Ma. Cet âge est interprété comme étant l'âge de mise en place des syénogranites du massif de Nkogam à l'éocène entre 30 -73 Ma des complexes anorogéniques le long de la LC.

Une étude approfondie sur la pétrologie du Nkogam devrait porter sur :

- l'analyse à la microsonde électronique des enclaves de roches et les isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène pour clarifier l'origine et les relations entre les transformations métasomatiques développées aux dépens des granitoïdes ;
- les analyses géochimiques pour déterminer avec précision la nature et la source des magmas à l'origine des basaltes et des ignimbrites, et mieux comprendre leurs petrogenèses et les contextes géotectoniques de mise en place ;
- les analyses géochronologiques par la méthode Ar/Ar des roches volcaniques, pour connaître l'âge exact de mise en place des laves du CAN;
- autant que possible, déterminer les âges des massifs anorogéniques de la Ligne du Cameroun par la méthode U/Pb sur zircon plus précise et pouvant donner des informations nouvelles quant à la chronologie des roches volcaniques et plutoniques au sein des complexes, mais aussi sur le problème de polarité des âges le long de la Ligne du Cameroun.

RÉFÉRENCES

- Abdel Rahman, A.M., 2006.** Petrogenesis of anorogenic peralkaline granitic complexes from Eastern Egypt. *Mineralogical Magazine* 70, 2-50.
- Abdullah, A., Shawki, N., Ghaleeb, A., 2013.** Remote Sensing and Geographic Information System for Fault Segments Mapping a Study from Taiz Area, Yemen. *Journal of Geological Research*, 16p.
- Abolo, M.G., Lamillen, D., Ngounouno, L., Bitom, D., 2014.** Petrography and mineralogy of the Nlonako anorogenic complex rocks, Central Africa: petrogenetic implications. *Sciences, Technologies et Développement* 12, 33-42.
- Abolo, M.G., Lamillen, D., Ngounouno, L., Bitom, D., 2015.** Geochemistry and Geochronology of the Nlonako Alkaline Complex, Central Africa. *Journal of the Cameroon Academy of Sciences* 12, 33-44.
- Adams, A.N., Wiens, D.A., Nyblade, A.A., Euler, G.G., Shore, P.J., Tibi, R., 2015.** Lithospheric instability and the source of the Cameroon Volcanic Line: Evidence from Rayleigh wave phase velocity tomography. *Journal of Geophysical Research Solid Earth* 120, 1708-1727.
- Aka, F.T., Nagao, K., Kusakabe, M., Sumino, H., Tanyileke, G., Ateba, B., Hell, J., 2004.** Symmetrical helium isotope distribution on the Cameroon Volcanic Line, West Africa. *Chemical Geology* 203, 205-223.
- Akame, J.M., Mvondo Ondo, J., Assatse Teikeu, W., Owona, S., Olinga, J.B., Messi Ottou, E.J., Ntomba, S., 2014.** Apport des Images Landsat-7 Etm+ à L'étude Structurale du Socle Archeen de Sangmelima (Sud Cameroun). *Revue Francaise de Photogrammetrie et de Teledetection*, 1-14p
- Al-Djazouli, O.M., Elmorabiti, K., Zoheir, B., Rahimi, A., Amellah, O., 2019.** Use of Landsat-8 OLI data for delineating fracture systems in subsoil regions: implications for groundwater prospection in the Waddai area, eastern Chad. *Arabian Journal of Geosciences* 12, 241.
- Aouragh, M.H., Essahlaoui, A., Abdelhadi, E.L.O., Abdellah, E.L.H., Kamel, S., 2012.** Lineaments Frequencies from Landsat ETM + of the Middle Atlas Plateau (Morocco). *Research Journal of Earth Sciences* 4, 23-29.
- Ateba, B., Dorbath, C., Dorbath, L., Ntepe, N., Frogneux, M., Aka, F.T., Hell, J.V., Elmond, J.C., Manguelle, D., 2009.** Eruptive and earthquake activities related to the 2000 eruption of Mount Cameroon volcano (West Africa). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 179, 206-216.

- Ayonghe, S.N., Ntasin E.B., 2008.** The geological control and triggering mechanism of landslides of the 20th July 2003 within the Bamboutos Caldera, Cameroon. *Journal of Cameroon Academic Sciences* 7(3), 191-203.
- Ayonghe, S.N., Suh, C.E., Ntasin, E.B., Samalang, P., Fantong, W., 2002.** Hydrologically, seismically and tectonically triggered landslides along the Cameroon Volcanic Line, Cameroon. *Africa Geoscience Review* 9, 4, 325-335.
- Ayonghe, S.N., Ntasin, E.B., Samalang, P., Suh, C.E., 2004.** The June 27, 2001 landslide on volcanic cones in Limbe, Mount Cameroon, West Africa. *Journal of African Earth Sciences* 39, 435-43.
- Aysal, N., Ustaömer, T., Öngen, S., Keskin, M., Köksal, S., Peytcheva, I., Fanning, M., 2012.** Origin of the Early-Middle Devonian magmatism in the Sakarya Zone, NW Turkey: Geochronology, geochemistry and isotope systematics. *Journal of Asian Earth Sciences* 45, 201-222.
- Azeuda, A.K.I., Xie, Y., Zhong, R., Yomeun, B.S., Cui, K., Shan, X., 2022.** Tectonic evolution of Neoproterozoic rocks, eastern Cameroon: Implication for gold mineralization in the Bétaré Oya and Woumbou–Colomine–Kette districts. *Precambrian Research* 368: 106475
- Bahajroy, M., Taki, S., 2014.** Study of the mineralization potential of the intrusives around Valis (Tarom-Iran). *Earth Science Research Journal* 18, 123-129.
- Barbarin, B., 1999.** A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos* 46, 605-626.
- Benkhelil, J., 1982.** Benue Trough and Benue Chain. *Geological Magazine* 119, 155-168.
- Benkhelil, J., 1986.** Structure et évolution géodynamique du bassin intercontinental de la Bénoué (Nigéria). Thèse Doctorat, Université de Nice, 275 p.
- Betsi, T.B., Ngo Bidjeck Bondje, L.M., Mvondo, H., Yannick Mama Nga, L.N., Molotouala, C.A., McFarlane, C., 2020.** Rutile LA-ICP-MS U–Pb geochronology and implications for tectono-metamorphic evolution in the Yaoundé Group of the Neoproterozoic Central African Orogeny. *Journal of African Earth Sciences* 171:103939.
- Black, R., Lameyre, J., Bonin, B., 1985.** The structural setting of alkaline complexes. *Journal of African Earth Sciences* 3, 5-16.
- Bonatti, E., Harrison, C.G.A., 1976.** Hot line in the Earth's mantle, *Nature* 26, 402-404.
- Bonin, B., 1982.** Les granites des complexes annulaires. Manuel et methodes, n°4, B.R.G.M. Orleans, 183 p.

- Bonin, B., 1996.** A-type granite ring complexes: mantle origin through crustal filters and the anorthosite-rapakivi magmatism connection. In: Demaiffe, D. (Ed.), *Petrology and Geochemistry of Magmatic Suites of Rocks in the Continental and Oceanic Crusts*. A volume dedicated to Professor J. Michot, ULB-MRAC, Bruxelles, 201-217.
- Bonin, B., 2007.** A-type granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos* 97, 1-29.
- Bonin, B., Moyen, J.F., 2011.** *Magmatisme et roches magmatiques*. 3^e édition, Dunod Paris, 313 p.
- Boushaba, A., 1990.** Evolution géochimique et contexte de mise en place du complexe granitique du_Ment (Massif central marocain). *Bulletin Institut des Sciences, Rabat* 14, 1-17.
- Bouyo Houketchang, M., Toteu, S.F., Deloule, E., Penaye, J., Van Schmus, W.R., 2009.** U-Pb and Sm-Nd dating of high-pressure granulites from Tcholliré and Banyo regions: Evidence for a Pan-African granulite facies metamorphism in north central Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 54, 144–154.
- Bouyo Houketchang, M., Zhao, Y., Penaye, J., Zhang, S.H., Njel, U.O., 2015.** Neoproterozoic subduction-related metavolcanic and metasedimentary rocks from the Rey Bouba Greenstone Belt of north-central Cameroon in the Central African Fold Belt: new insights into a continental arc geodynamic setting. *Precambrian Research* 261, 40–53.
- Bouyo Houketchang, M., Penaye, J., Njel, U.O., Moussango, I.A.P., Sep, N.J.P., Nyama, A.B., Wassouo, W.J., Abaté, E.J.M., Yaya, F., Mahamat, A., Ye, H., Wu, F., 2016.** Geochronological, geochemical and mineralogical constraints of emplacement depth of TTG suite from the Sinassi Batholith in the central African Fold belt (CAFB) of northern Cameroon: implications for tectonomagmatic evolution. *Journal of African Earth Sciences* 116, 9–41.
- Bryan, W.B., 1979.** Regional variation and petrogenesis of basalts glaces from the famous area Mid-Atlantic Ridge. *Journal of Petrology* 20, 293- 325.
- Burke, K., 2001.** Origin of the Cameroon Line of volcano-capped swells. *Journal of Geology* 109, 349-362.
- Caen-Vachette, M., Tempier, P., Kamgang, P., 1987.** Le massif tertiaire du Nkogam (Ouest Cameroun): caractéristiques principales et géochronologie Rb/Sr sur roches totales. *Journal of African Earth Sciences* 6(4), 521-524.
- Caen-Vachette, M., Tempier, P., Nana, J.M., 1991.** Le granite de Lembo (partie du complexe volcano-plutonique de Bana), témoin du magmatisme tertiaire du Cameroun. *Géochronologie. Bulletin de la Société Géologique de France* 3, 497-501.

- Cantagrel, J.M., Jamond, C., Lassere, M., 1978.** Le magmatisme alcalin de la Ligne du Cameroun au Tertiaire Inférieur : données géochronologiques K/Ar. Comptes Rendus Sommaire Société Géologique France 6 : 300-303.
- Cas, R.F.A., Wright, J.V., 1987.** Volcanic Successions, modern and ancient; a geological approach to processes, products and successions. Chapman et Hall (Eds), London, 528.
- Chakam Tagheu, P.J., 2006.** Le volcanisme quaternaire des régions du strato-volcano Manengouba (Ligne du Cameroun). Thèse doctorat 3^{ème} cycle Université de Yaoundé I, Cameroon, 155 p.
- Chappell, B.W., White, A.J.R., 1992.** I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. Transactions of the Royal Society of Edinburgh-Earth Sciences 83, 1-26.
- Chazot, G., Bertrand, H., 1995.** Genesis of silicic magmas during Tertiary continental rifting in Yemen. Lithos 36, 69-83.
- Clemens, J.D., Holloway, J.R., White, A.J.R., 1986.** Origin of A-type granite: experimental constraints. American Mineralogist 71, 317-324.
- Condie., 2003.** Incompatible element ratios in oceanic basalts and komatiites; tracking deep mantle sources and continental growth rates with time: Geochemistry Geophysics Geosystems 4, 1005.
- Cornachia, M., Dars, R., 1983.** Un trait structural majeur du continent africain. Les linéaments centrafricains du Cameroun au golfe d'Aden. Bulletin de la Société Géologique de France, 101-109.
- Cornen, G., Maury, R.C., 1980.** Petrology of the volcanic island of Annobon, Gulf of Guinea. Martinic Geology. 36, 253-267.
- Coulon, C., Vidal, P., Dupuy, C., Baudin, P., Popoff, M., Maluski, H., Hermitte, D., 1996.** The Mesozoic to early Cenozoic magmatism of the Benue Trough (Nigeria); geochemical evidence for the involvement of the St. Helena plume. Journal of Petrology 37, 1341-1358.
- Cox, K.G., Hawkesworth, C.J., 1985.** Geochemical stratigraphy of Deccan traps at Mahabaleshar, Western Ghats, India, with implications for open system magmatic processes. Journal of petrology, 26, 355-377.
- Dabo, M., 2011.** Tectonique et minéralisations aurifères dans les formations birimiennes de Frandi-Boboti, boutonnière de Kédougou-Kéniéba, Sénégal. Tectonique. Université Rennes 1, France. 207 p
- Dahlquist, J.A., Alasino, P.H., Eby, G.N., Galindo, C., Casquet, C., 2010.** Fault controlled Carboniferous A-type magmatism in the proto-Andean foreland (Sierras Pampeanas, Argentina): geochemical constraints and petrogenesis. Lithos 115, 65-81.

- De Martonne, E., 1942.** Nouvelle carte mondiale de l'aridité. *Annuaire de Géographie*, 241-250.
- De Paolo, D.J., Daley, E.E., 2000.** Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension. *Chemical Geology* 169, 157-185.
- De Plaen, R.S. M., Bastow, I.D., Chambers, E.L., Keir, D., Gallacher, R.J., Keane, J., 2014.** The development of magmatism along the Cameroon Volcanic Line: Evidence from seismicity and seismic anisotropy. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth* 119, 4233-4252.
- Déruelle, B., 1994.** Le magmatisme de la "Ligne du Cameroun": le bilan positif des deux dernières décennies de coopération franco-camerounaise. *Pangéa* 20, 30-36.
- Déruelle, B., Regnault, J.M., 1983.** Carte télé-interprétative des linéaments de la République du Cameroun, au Nord du 4^e parallèle (1/100000). Ministère des mines et de l'énergie, Direction des mines et de la géologie du Cameroun. *Geological Review* 122, 103530.
- Déruelle, B., Moreau, C., Nkoumbou, C., Kambou, R., Lissom, J., Njonfang, E., Ghogomu, R.T, Nono, A., 1991.** The Cameroon Line: A review, in Kampunzu, A.B., and Lubala, R.T., eds., *Magmatism in Extensional Structural Settings: The Phanerozoic African Plate*. Berlin, Springer, 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. *Comptes Rendus Géoscience* 339, 589-600.
- Dumont, J.F., 1986.** Identification par télédétection de l'accident de la Sanaga (Cameroun). Sa position dans le contexte des grands accidents d'Afrique Centrale et de la limite nord du craton congolais. *Géodynamique* 1, 13 - 19.
- Dumort, J.C., 1968.** Cartes géologiques de reconnaissance à l'échelle de 1/50000. République Fédérale du Cameroun, Douala-Ouest. *Bulletin de Recherches Géologiques et Minières*, Direction des mines et de la géologie du Cameroun, et une notice explicative, 68 p.
- Duncan, A.R., 1981.** Hot spot in the Southern Ocean an absolute frame of references for motion of the Gondwana continent. *Tectonophysics* 74, 29-42.
- Dunlop, H.M., 1983.** Strontium isotope geochemistry and Potassium-argon studies on volcanic rocks from the Cameroon line, West Africa. Ph.D. Thesis, University of Edinburg, 357 p.
- Dunlop, H.M., Fitton, J.G., 1979.** A K/Ar and Sr isotope study of the volcanic rocks of the island of Principe, West Africa. Evidence for mantle heterogeneity beneath the Gulf of Guinea. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 71, 125-131.

- Ebinger, C.J., Sleep, N.H., 1998.** Cenozoic magmatism throughout east Africa resulting from impact of a single plume. *Nature* 395: 788-791.
- Eby, G.N., 1990.** The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos* 26, 115-134.
- Eby, G.N., 1992.** Chemical subdivision of A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology* 20, 641-644.
- El-Bialy, M.Z., Streck, M.J., 2009.** Late Neoproterozoic alkaline magmatism in the Arabian-Nubian Shield: the post collisional A-type granite of Sahara-Umm Adawi pluton, Sinai, Egypt. *Arabian Journal of Geoscience* 2, 151-174.
- Elsheikh, A. A., Gao, S. S., Liu, K. H., 2014.** Formation of the Cameroon Volcanic Line by lithospheric basal erosion: Insight from mantle seismic anisotropy. *Journal of African Earth Sciences* 100, 96-108.
- Fairhead, J.D., 1988.** Mesozoic plate tectonic reconstructions of the central and South Atlantic Ocean: the role of the West and Central African rift system. *Tectonophysics* 155: 181-191.
- Fairhead, J.D., Binks, R.M., 1991.** Differential opening of the Central and South Atlantic Oceans and opening of the West African rift system. *Tectonophysics* 187: 191-203.
- Fitton, J.G., 1980.** The Benue trough and the Cameroon Line. A migrating rift system in West Africa. *Earth and Planetary Science Letters* 51, 132-138.
- Fitton, J.G., 1983.** Active versus passive continental rifting: Evidence from the West Africa rift system. *Tectonophysics* 94, 473-481.
- Fitton, J.G., 1987.** The Cameroon Line: West Africa: A comparison between oceanic and continental alkaline volcanism, in Fitton, J.G., and Upton, B.G.J., eds., *Alkaline Igneous Rocks*. Geological Society of London Special Publication 30, 273-291.
- Fitton, J.G., Hughes, D.J., 1977.** Petrochemistry of the volcanic rocks of island of Principe, Gulf of Guinea. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 64, 257-272.
- Fitton, J.G., Dunlop, H.M., 1985.** The Cameroon Line. West Africa and its bearing on the origin of oceanic and continental alkali basalt. *Earth and Planetary Science Letters* 72, 23-38.
- Fosso, J., 1999.** Volcanologie, pétrographie et géochimie d'un stratovolcan des hauts plateaux de l'Ouest-Cameroun : le mont Bangou. Thèse 3^{ème} cycle Université de Yaoundé I, 220 p.
- Fosso, J., Menard, J.J., Bardintzeff, J.M., Wandji, P., Tchoua, F.M., Bellon, H., 2005.** Les laves du mont Bangou : Une première manifestation volcanique éocène, à affinité transitionnelle, de la Ligne du Cameroun. *Comptes Rendus Géoscience* 337, 315-325.
- Foster, D.A., Goscombe, B.D., Newstead, B., Mapani, B., Mueller, P.A., Gregory, L.C., Muvangua, E., 2015.** U-Pb age and Lu-Hf isotopic data of detrital zircons from the

Neoproterozoic Damara Sequence: Implications for Congo and Kalahari before Gondwana. *Gondwana Research* 28,179-190.

Fourel, L., Milelli, L., Jaupart, C., Limare, A., 2013. Generation of continental rifts, basins, and swells by lithosphere instabilities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 118, 3080-3100.

Freeth, S. J., 1978. Tectonic activity in West- Africa and Gulf of Guinea since Jurassic times explanation based on membrane tectonics. *Earth and planetary Science Letters*. 38: 298-300.

Freeth, S. J., 1979. Deformation of the plate as a consequence of membrane stress domains generated by Post-Jurassic rift. *Earth and planetary Science Letters*, 45 (1): 93-104.

Frey, F.A., Prinz, M., 1978. Ultramafic inclusions from San Carlos, Arizona: petrogenesis and geochemical data bearing on their petrogenesis. *Earth. Planet. Sciences Lett.* 38, pp 129-1976.

Frost, C.D., Frost, B.R., 1997. High-K, iron-enriched Rapakivi-type granites: the tholeiite connection. *Geology* 25, 647-650.

Frost, B.R., Frost, C.D., 2008. A Geochemical classification for Feldspathic Igneous Rocks. *Journal of Petrology* 49 (11), 1955-1969.

Frost, B.R., Barnes, C.G., Collins, W.J., Arculus, R.J., Ellis, D.J., Frost, C.D., 2001. A geochemical classification of granitic rocks. *Journal of Petrology* 42 (11), 2033-2048.

Ganwa, A.A., Frisch, W., Siebel, W., Shang, C.K., Mvondo Ondo, J., Satir, M., Tchakounté Numbem, J., 2008. Zircon $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ evaporation ages of Panafrican metasedimentary rocks in the Kombé-II area (Bafia Group, Cameroon): Constraints on protolith age and provenance. *Journal of African Earth Sciences* 51, 77–88.

Ganwa, A.A., Klötzli, U.S., Hauzenberger, C., 2016. Evidence for Archean inheritance in the pre-Panafrican crust of Central Cameroon: Insight from zircon internal structure and LA-MC-ICP-MS UPb ages. *Journal of African Earth Sciences* 120, 12–22.

Gao, P., Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., 2017. Triassic granites in South China: A geochemical perspective on their characteristics, petrogenesis, and tectonic significance. *Earth-Science Reviews*, 173. 266-294.

Geze, B., 1943. Géographie physique et géologie du Cameroun occidental. *Mémoire du Muséum National d'Histoire Naturelle*. Nlle série, t. XVII, fascicule unique, 273 p.

Ghogomu, R.T., Moreau, C., Brown, W., Rocci, G., 1989. The Ntumbaw Complex, NW Cameroon: An atypical anorogenic ring-complex of intermediate composition. *Journal of African Earth Sciences* 8, 1-9.

- Ghogomu, R.T., Njilah, I.K., Ayonghe, S.N., Njumbe, E.S., Eno Belinga, S.M., 1999.** The 1999 Eruption of Mount Cameroon. In J.P. Vicat, and P. Bilong (editors) *Géologie et Environnements au Cameroun*. Collection Géocam 2 /1999.
- Girei, M.B., Li, H., Algeo, T.J., Bonin, B., Ogunleye, O.P., Bute, S.I., Ahmed, H.A., 2019.** Petrogenesis of A-type granites associated with Sn-Nb-Zn mineralization in Ririwai complex, north-Central Nigeria: Constraints from whole-rock Sm-Nd and zircon Lu-Hf isotope systematics. *Lithos* 340-341, 49-70.
- Gorton, M.P., Schandl, E.S., 2000.** From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. *Canadian Mineralogist* 38, 1065-1073.
- Gouhier, J., Nougier J., Nougier D., 1974.** Contribution à l'étude volcanologique du Cameroun (« Ligne du Cameroun » - Adamaoua). *Annales Faculté Sciences, Université Yaoundé, Cameroun* 17, 3-48.
- Gountié Dedzo, M., Nédélec, A., Nono, A., Njanko, T., Font, E., Kamgang, P., Njonfang, E., Launeau, P., 2011.** Magnetic fabrics of the Miocene ignimbrites from West-Cameroon: implications for pyroclastic flow source and sedimentation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 203: 113-132.
- Gruneau, H.R., Lehner, P., Cleintuar, M.R., Allenbach, P., Bakker, L., 1975.** New radiometric ages and seismic data from Fuerteventura (Canary Islands); Maio (Cape Verde Islands) and Sao Tomé (Gulf of Guinea). In: Borradaile, G.J., Ritsemena, A.R., Rondel, H.E. O.J. (Eds), North-Holland, Amsterdam. *Progress in Geodynamics*, 90-118.
- Gualda, G.A.R., Ghiorso, M.S., 2014.** Phase-equilibrium geobarometers for silicic rocks based on rhyolite-MELTS. Part 1: principles, procedures, and evaluation of the method. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 168, 1033.
- Halliday, A.N., Dickin, A.P., Fallick, A.E., Fitton, J.G., 1988.** Mantle Dynamics: A Nd, Sr, Pb and O isotopic study of the Cameroon Line volcanic chain. *Journal of Petrology* 29, 181-211.
- Hedberg, J.D., 1968.** A Geological Analysis of the Cameroon Trend. PhD Thesis, University of Princeton, USA. 414 p.
- Hieronimus, C.F., Berkovici, D., 2000.** Non-hotspot formation of volcanic chains: Control of tectonic and flexural stresses on magma transport; *Earth and Planetary Science Letters*, 181, 539-554
- Hofmann, A.W., White, W.M., 1983.** Ba, Rb and Cs in the Earth's mantle. *Z. Natureforsch*, 38a: 256-266.

- Itiga, Z., Chakam Tagheu, P. J., Wotchoko, P., Wandji, P., Bardintzeff, J.-M., Bellon, H., 2004.** La Ligne du Cameroun : Volcanologie et Géochronologie de trois régions (Mont Manengouba, Plaine du Noun et Tchabal Gangdaba). *Géochronique* 91, 13-16.
- Jacquemin, H., Sheppard, S.M.F., Vidal, P., 1982.** Isotopic geochemistry (O, Sr, Pb) of the Golda Zuelva and Mboutou anorogenic complexes, North Cameroon: mantle origin with evidence for crustal contamination. *Earth Planete. Sciences. Lett.* 61, 97-111.
- Jahn, B.M., Wu, F.Y., Chen, B., 2000a.** Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences* 91, 181-193.
- Jahn, B.M., Wu, F.Y., Hong, D.W., 2000b.** Important crustal growth in the Phanerozoic, isotopic evidence of granitoids from East-Central Asia. *Proceeding of Indian Academy of Sciences (Earth Planetary Science)* 109, 5-20.
- Javhar, A., Chen, X., Bao, A., Jamshed, A., Yunus, M., Jovid, A., Latipa, T., 2019.** Comparison of Multi-Resolution Optical Landsat-8, Sentinel-2 and Radar Sentinel-1 Data for Automatic Lineament Extraction: A Case Study of Alichur Area, SE Pamir. *Remote Sens* 11: 778
- Jin, H., Shitao, Z., Guangzheng, Z., Siyu, T., Ying, Z., 2018.** Geochemistry and Tectonic Setting of the Eshan Granites in the Southwestern Margin of the Yangtze Plate, Yunnan. *Journal of African Earth Sciences* 29, 130-143
- Kagou Dongmo, A., 1998.** Etude volcanologique, pétrographique et géochimique d'un volcan polygénique de la Ligne du Cameroun : le Mont Manengouba. Thèse de doctorat 3ème cycle, Université. Yaoundé I, 197 p.
- Kagou Dongmo, A., Wandji, P., Leger, J.-M., Pouclet, A., Tchoua, F.M., Vicat, J.-P., Nkouathio, D.G., 1998.** Successions volcaniques et évolution géochimique d'un stratovolcan de la Ligne du Cameroun : le mont Manengouba. In *Géosciences au Cameroun*, (ed.) collection GEOCAM, 1/1998, Press. Université de Yaoundé I, 235-246.
- Kagou Dongmo, A., Wandji, P., Pouclet, A., Vicat, J.P., Cheilletz, A., Nkouathio, D. G., Alexandrov, P., Tchoua, F. M., 2001.** Evolution volcanologique du mont Manengouba (Ligne du Cameroun), nouvelles données pétrographiques, géochimiques et géochronologiques. *Comptes Rendus Académie des Sciences Paris* 333, 155-162.
- Kagou Dongmo, A., Wandji, P., Pouclet, A., Nkouathio, D.G., Tchoua, F. M., 2005.** Le mont Manengouba (Ligne du Cameroun), Un volcan bénéfique, mais potentiellement dangereux, typologie des aléas et évaluation des risques naturels associés. *Africa Geosciences Review* 12 (2) : 97-109.

- Kagou Dongmo, A., Nkouathio, D., Nono, A., Kwekam, M., Tematio, P., Wandji, P., Tchoua, F., Pouclet, A., Bourdier, J.L., 2006.** Discovery of strombolian cone at Totap-Tapsetsa, north-east slope of Mount Bambouto: implications in the petrogenesis and the volcanic activity of Bambouto volcano (Cameroon line). Abstract. Cities on volcanoes, 4: 23-27.
- Kagou Dongmo, A., Nkouathio, D.G., Pouclet, A., Bardintzeff, J.M., Wandji, P., Nono, A., Guillou, H., 2010.** The discovery of late Quaternary basalt on Mount Bambouto: Implications for recent widespread volcanic activity in the southern Cameroon Line. Journal of African Earth Sciences 57, 96-108.
- Kambou, R., Nzenti, J-P., Soba, D., 1989.** Apport à la connaissance des complexes anorogéniques d'âge tertiaire de la ligne du Cameroun : le massif pluto-volcanique de Tchégui (Nord-Cameroun). Comptes rendus Académie des sciences 308, 1257-1260.
- Kamdem, J.B., Kraml, M., Keller, J., Henjes-Kurst, F., 2002.** Cameroon Line magmatism: Conventional K/Ar and single-crystal laser $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of rocks and minerals from Hossere Nigo anorogenic complex, Cameroon. Journal of African Earth Sciences 35, 99-105.
- Kamgang, P., 1986.** Contribution à l'étude géochimique et pétrologique du massif du Nkogam (Pays Bamoun, Ouest Cameroun). Thèse Doctorat 3^{ème} Cycle, Université Yaoundé, 205 p.
- Kamgang, P., 2003.** Pétrologie et géochimie d'un secteur clé de la Ligne du Cameroun: les Monts Bamenda, implications sur la genèse et l'évolution des magmas. Thèse Doctorat d'Etat, Université de Yaoundé I, Cameroun, 373 p.
- Kamgang, P., Njonfang, E., Chazot, G., Tchoua, F., 2007.** Géochimie et géochronologie des laves felsiques des Monts Bamenda (ligne volcanique du Cameroun). Comptes Rendus Geoscience 339, 659-666.
- Kamgang, P., Chazot, G., Njonfang, E., Tchoua, F., 2008.** Geochemistry and geochronology of mafic rocks from Bamenda Mountains (Cameroon): Source composition and crustal contamination along the Cameroon volcanic line. Comptes Rendus Geoscience 340, 850-857.
- Kamgang, P., Njonfang, E., Nono, A., Gountie Dedzo, M., Tchoua, F.M., 2010.** Petrogenesis of a silicic magma system: geochemical evidence from Bamenda Mountains, NW Cameroon, Cameroon Volcanic Line. Journal of African Earth Sciences 58, 285-304.
- Kamgang, P., Chazot, G., Njonfang, E., Ngongang Tchoumeignie, N. B., Tchoua, F., 2013.** Mantle sources and magma evolution beneath the Cameroon Volcanic Line: Geochemistry of mafic rocks from Bamenda Mountains (NW Cameroon). Gondwana Research 24, 727-741.

- Kampunzu, A. B., Popoff, M., 1991.** Distribution of the main Phanerozoic African rifts and associated magmatism: introductory notes, in: Kampunzu, A.B., Lubala, R.T. (Eds.), *Magmatism in Extensional Structural Settings. The Phanerozoic African Plate.* Springer-Verlag, Berlin, 2-10.
- Kemp, A.I.S., Wormald, R.J., Whitehouse, M.J., Price, R.C., 2005.** Hf isotopes in zircon reveal contrasting sources and crystallization histories for alkaline to peralkaline granites of Temora, Southeastern Australia. *Geology* 33, 797-800.
- Kamguia Kamani, M.S., Wang, W., Tchouankoue, J.P., Huang, S.F., Yomeun, B., Xue, E.K., Lu, G.M., 2021.** Neoproterozoic syn-collision magmatism in the Nkondjock region at the northern border of the Congo craton in Cameroon: geodynamic implications for the Central African orogenic belt. *Precambrian Research* 106015.
- Kankeu, B., Greiling, R.O., Nzenti, J.P., 2009.** Pan-African strike-slip tectonics in eastern Cameroon magnetic fabrics (AMS) and structures in the Lom basin and its gneissic basement. *Precambrian Research* 174, 258–272.
- Kenzo, H.A., Metang, V., Segue, W.S., Tchop, L.J., Mouafo, L., Nkamga Mbakam, D.M., Tchouankoué, J.P., Njonfang, E., Kamgang, P., 2022.** Relations between structural geomorphology and lithology in the Nkogam plutovolcanic complex (Cameroon Line). *Arabian Journal of Geosciences* 15, 872.
- King, S.D., 2007.** Hotspots and edge-driven convection. *Geology* 35: 223-226.
- King, S.D., Anderson, D.L., 1995.** An alternative mechanism of flood basalt formation. *Earth and Planetary Science Letters*, 160: 289-296.
- King, S.D., Anderson, D.L., 1998.** Edge-driven convection. *Earth and Planetary Science Letters*, 160: 289-296.
- King, S.D., Ritsema, J., 2000.** African hot spot volcanism: small-scale convection in the upper mantle beneath Cratons. *Science* 290: 1137-1140.
- Konopelko, D., Biske, G., Seltmann, R., Eklund, O., Belyatsky, B., 2007.** Hercynian postcollisional A-type granites of the Kokshaal Range, Southern Tien Shan, Kyrgyzstan. *Lithos* 97, 140-160.
- Kouankap Nono, G.D., Nzenti, J.P., Suh, C.E., Ganno, S., 2010.** Geochemistry of ferriferous, High-K calc-alkaline granitoids from Banefo- Mvoutsaha Massif (NE Bafoussam), Central Domain of the Pan-African Fold Belt, Cameroon. *The Open Geology Journal* 4, 21-34.
- Kpoumié, A., Ndam Ngoupayou, J.R., Rusu, E., Sfičá L., Ichim, P., Ekodeck, E.G., 2012.** Evolution spatiotemporelle des régimes de précipitations dans le bassin de la Sanaga-Cameroun dans un contexte de déficit. *Present Environment and Sustainable Development* 6 (2), 56-67

- Kretz, R., 1983.** Symbols for rock-forming minerals. *American mineralogist* 68, 277-279.
- Kuepouo, G., 2004.** Geology, Petrology and Geochemistry of the Tertiary Bana Volcano-Plutonic Complex, Cameroon Line, Central Africa. Ph.D. Thesis, Kobe University, Japan, 301 p.
- Kuepouo, G., Tchouankoue, J.P., Nagao, T., Sato, H., 2006.** Transitional tholeiitic basalts in the Tertiary Bana volcano-plutonic complex, Cameroon Line. *Journal of African Earth Sciences* 45, 318-332.
- Kuepouo, G., Sato, H., Tchouankoué, J.P., Murata, M., 2009.** FeO*-Al₂O₃-TiO₂-Rich Rocks of the Tertiary Bana Igneous Complex, West Cameroun. *Resource Geology* 59, 1, 69-86.
- Kurum, S., Tanyildizi, O., 2017.** Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of Upper Crataceous (calc-alkaline) and Miocene (alkaline) volcanic rocks: Elazig, Eastern Taurides, Turkey. *Journal of African Earth Sciences* 134, 332-344.
- Lamilen, B.D., 1989.** Contribution à l'étude du complexe anorogénique du mont Koupé: un exemple de série alcaline incomplète. Thèse Doctorat 3^{ème} Cycle, Université Yaoundé, 183 p.
- Lamilen, B.D., Ghogomu, R.T., Njom, B., Tchoua, F.M., 1994.** The Koupé anorogenic Complex: Whole rock Rb/Sr Studies. *Annale de la Faculté des Sciences* 3, 199-205.
- Lamilen, B.D., Moundi, A., Moupou, M., Minyem, D., 1998.** Contrôle structural du socle dans la morphologie du massif anorogénique du Koupé. In *Géosciences au Cameroun*, ed., collection GEOCAM, 1/1998, Press. Université de Yaoundé I, 191-196.
- Lasserre, M., 1978.** Mise au point sur les granitoïdes dits « ultimes » du Cameroun : gisements, pétrographie et géochronologie. *Bulletin du Bureau de Recherches Géologiques et Minières* 2, 143-156.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streickeisen, A., Zanettin, B., 1986.** A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology* 27, 745-750.
- Le Marechal, A., Vincent, P.M., 1972.** Le fossé crétaqué du Sud-Adamaoua, Cameroun. In: Dessauvage, T.F.J., Whiteman, A.J. (Eds.), *African Geology*, Ibadan 1970. University of Ibadan, Ibadan, 229-249.
- Lee, D.C., Halliday, A.N., Davies, G.R., Essene, E.J., Fitton, J.G., Temdjini, 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* 17, 415-441.

- Lee, D.C., Halliday, A.N., Fitton, G.J., Poli, G., 1994.** Isotopic variations with distance and time in the volcanic islands of the Cameroon Line: evidence of the mantle plume origin. *Earth and Planetary Science Letters* 123, 119-138.
- Leeman, W.P., Hawkesworth, C.J., 1986.** Open magma systems: trace element and isotopic constraints. *Journal of geophysical research* 91, 5901-5912.
- Lemdjou, Y.B., Li, H., Whattam, S.A., Azeuda Ndonfack, K.I., Tchaptchet Tchato, D.I., Ketchaya, Y.B., Quaye, J.A., Nguimatsia Dongmo, F.W., 2022.** Petrogenesis, tectonic setting and geodynamic implications of Ouaden, Doumba Bello, and Ngoura granitic plutons (Eastern Cameroon): Constraints from elemental and Sr-Nd-Hf isotopic data and zircon U-Pb ages. *Lithos* 418-419, 106682.
- Leumbe Leumbe, O., 2008.** Evaluation et Cartographie au moyen d'un système d'informatique géographique des zones à risques d'érosion et de glissement de terrain en région de montagnes tropical humide (Mont Bamboutos-Ouest Cameroun). Doctorat Ph.D., Université. Yaoundé I, 151 p.
- Li, H., Ling, M.X., Ding, X., Zhang, H., Li, C.Y., Liu, Y.D., Sun, W.D., 2014.** The geochemical characteristics of Haiyang A-type granite complex in Shandong, eastern China; *Lithos* 200-201, 142-156.
- Li, X.-H., Chen, Y., Tchouankoue, J.P., Liu, C.-Z., Li, J., Ling, X.-X., Tang, G.-Q., Liu, Y., 2017.** Improving geochronological framework of the Pan-African orogeny in Cameroon: New SIMS zircon and monazite U-Pb age constraints. *Precambrian Research* 294, 307–321.
- 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, 2.78-89.
- Liotard, J.M., Dupuy, C., Dostal, J., Cornen, G., 1982.** Geochemistry of the volcanic Island of Annobon, Gulf of Guinea. *Chemical Geology* 35, 115-128.
- Liu, H.Q., Xu, Y.G., Tian, W., Zhong, Y.T., Mundil, R., Li, X.H., Yang, Y.H., Luo, Z.Y., Shangguan, S.M., 2014.** Origin of two types of rhyolites in Tarim Large Igneous Province: consequences of incubation and melting of mantle plume. *Lithos* 204, 59-72.
- Lockwood, J.P., Costa, J.E., Tuttle, M.L., N'ni, J., Tegor, S.G., 1988.** The potential for catastrophic dam failure at Lake Nyos maar, Cameroon, *Bulltin of Volcanology* 50, 340-349.
- Loiselle, M.C., Wones, D.R., 1979.** Characteristics and origin of anorogenic granites. Abstracts of papers to be presented at the Annual Meetings of the Geological Society of America and Associated Societies, San Diego, California, November 5-8, 11, 468 p.

- Macdonald, G.A., 1972.** Volcanoes. Englewoods Cliffs, New Jersey, 510 p.
- Maluski, H., Coulon, C., Popoff, M., Baudin, P., 1995.** $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology, petrology and geodynamic setting of Mesozoic to Early Cenozoic magmatism from the Benue trough, Nigeria, *Journal of Geological Society, London* 152, 311-326.
- Maniar, P.D., Piccoli, P.M., 1989.** Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of American Bulletin* 101, 635-643.
- Marks, M. A.W., Schilling, J., Coulson, I. M., Wenzel, T., Markl, G., 2008.** The Alkaline-Peralkaline Tamazeght Complex, High Atlas Mountains, Morocco: Mineral Chemistry and Petrological Constraints for Derivation from a compositionally heterogeneous mantle source. *Journal of Petrology* 49, 1097-1131.
- Marshall, P., 1935.** Acid rocks of the Taupo-Rotorua volcanic district. *Transaction of the Royal Society of New Zealand* 64, 323-366.
- Marti, J., Soriano, C., Dingwell, D.B., 1999.** Tube pumice as strain markers of the ductile brittle transition during magma fragmentation. *Nature*, 402: 650-653.
- Marzoli, A., Renne, P.R., Peccirillo, E.M., Castorina, F., Bellieni, G., Melfi, A.G., Nyobe, J.B., N'ni, J., 1999.** Silicic magmas from the continental Cameroon Volcanic Line (Oku, Bambouto and Ngaoundere): ^{40}Ar - ^{39}Ar dates, petrology, Sr-Nd-O isotopes and their petrogenetic significance. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 135, 133-150.
- 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 magma from lithospheric and asthenospheric mantle Source. *Journal of Petrology* 41, 87-1096.
- Masclé, P., 1976.** Le Golfe de Guinée (Atlantique Sud): un exemple d'évolution des marges Atlantiques en cisaillement. *Mémoire Société Géologique de France* 128, 104 p.
- Mattinson, J.M., 2010.** Analysis of the relative decay constants of ^{235}U and ^{238}U by multi-step CA-TIMS measurements of closed system natural zircon samples. *Chemical Geology* 275, 186-198.
- Mbowou, G.I.B., Lagmet, C., Nomade, S., Ngounouno, I., Déruelle, B., Ohnestetter, D., 2012.** Petrology of the late cretaceous peralkaline rhyolites (pantellerite and comendite) from Lake Chad, central Africa. *Journal of Geosciences* 57, 127-141.
- McDonough, W.F., 2003.** Compositional model for the Earth's core. In: Carlson, R.W. (Ed.), *the Mantle and Core*, vol. 2. Holland, H.D., Turekian, K.K. (Eds.), *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, Pergamon, Oxford, 547-568.

- McDowell, F.W., Mauger, R., 1994.** K/Ar and U/Pb zircons chronology of Late Cretaceous and Tertiary magmatism in Central Chihuahua State, Mexico. *Geological Society of America Bulletin* 106 (1), 118-132.
- Medza Ekodo, J.M., Mbida Yem, L., Yene Atangana, J.Q., Koah, S.P., Ekodeck, G.E., 2023.** Characteristics of the Mount Cameroon seismicity for the 2005–2015 period (Cameroon, West-Central Africa). *Journal of Seismology*. 1-20.
- Messi Ottou, E.J., Ntomba, S.M., Ndong Bidzang, F., Akame, J.M., Owona, S., Mvondo Ondo, J., 2014.** Géomorphologie structurale et risque naturel dans une portion de zone mobile du complexe du Nyong au SW Cameroun : cas de la région Lolodorf-Mvengue. *Afrique Science* 10 (4) 288-298.
- Metang, V., Nomo Negue, E., Ganno, S., Takodjou Wambo, J.D., Ewolo Teme, M.A., Teda Soh, A.C., Fossi, D. H., Mbakam Nkamga, M.D., Nkoumbou C., Nzenti, J.P., 2022.** Anatexis of metadiorite from the Yaoundé area, Central African Orogenic Belt in Cameroon: implications on the genesis of in-source granodiorite leucosomes. *Arabian Journal of Geosciences* 15, 359.
- Meyers, J.B., Rosendahl, B.R., Harrison, C.G.A., Ding, Z.A., 1998.** Deep imaging seismic and gravity result from the ooshore Cameroon Volcanic Line, and speculation of African hotlines. *Tectonophysics* 284, 31-63.
- Middlemost, E.A.K., 1994.** Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Review* 37, 215-224.
- Milelli, L., Fourel, L., Jaupart, C., 2012.** A lithospheric instability origin for the Cameroon Volcanic Line. *Earth and Planetary Science Letters* 335-336, 80-87.
- Montigny, R., Ngounouno, I., Déruelle, B., 2004.** Âges K-Ar des roches magmatiques du fossé de Garoua (Cameroun): Leur place dans le cadre de la “Ligne du Cameroun”. *Comptes Rendus Geoscience* 336, 1463-1471.
- Moreau, C., Regnault, J.M., Déruelle, B., Robineau, B., 1987.** A new tectonic model for the Cameroon Line, Central Africa. *Tectonophysics* 141, 317-334.
- Moreau, C., Demaiffe, D., Bellion, Y., Boullier, B., 1994.** A tectonic model for location of Palaeozoic ring complexes in Aïr (Niger, West Africa). *Tectonophysics* 234, 129-146.
- Morgan, W.J., 1981.** Hot spot tracks and the opening of the Atlantic and Indian Ocean, in: the sea. Wiley Interscience, New York 7, 443-488.
- Morgan, W.J., 1983.** Hotspot tracks and the early rifting of the Atlantic. *Tectonophysics* 94 : 123-139.

- Morin, S., 1980.** Apport des images landsats à la connaissance de la structure des hautes terres de l'Ouest-Cameroun. *Review de Géographie*. Université de Yaoundé, 1, 2, 181-196.
- Morin, S., 2000.** *Geomorphologie. Atlas de la province extrême-nord Cameroun*, 16 p.
- Moundi, A., 2004.** Les basaltes des plateaux du plateau Bamoun : Pétrologie - géochimie et géochronologie- Implications sur les sources des magmas, leurs contextes et évolutions géodynamiques, Thèse d'Etat, Université de Yaoundé-I, Cameroun, 259 p.
- Moundi, A., Menard, J.J., Reusser, E., Tchoua, M.F., Dietrich, V.J., 1996.** Découverte de basaltes transitionnels dans le secteur continental de la Ligne du Cameroun (massif du Mbam, Ouest-Cameroun). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris* 322, 831-837.
- Moundi, A., Wandji, P., Bardintzeff, J. - M., Menard, J.J., Okomo Atouba, L.C., Reusser, E., Bellon, H., Tchoua, M.F., 2007.** Les basaltes éocènes à affinité transitionnelle du plateau Bamoun, témoins d'un réservoir mantellique enrichi sous la ligne volcanique du Cameroun. *Comptes Rendus Géosciences* 339, 396-406.
- Mucke, G.K., Clarke, D.B., 1981.** Geochimical evolution of south mountain batholith, Nova Scotia: Rare earth evidence. *Canadian Mineralogist* 19, 133-145.
- Mueller, P., Kamenov, G., Heatherington, A., Richards, J., 2008.** Crustal evolution in the southern Appalachian orogen: evidence from Hf isotopes in detrital zircons. *Journal of Geology* 116, 414-422.
- N'ni, J., 1984.** Le volcan actif du mont Cameroun (Ligne du Cameroun): Géologie et pétrologie du volcan. Thèse doctorat 3^{ème} cycle, Université Paris Sud (Orsay), 260 p.
- N'ni, J., 2004.** Magmatogénèse du versant Sud-ouest des monts Bambouto-Bamenda (Ligne du Cameroun : géologie, volcanologie et pétrogenèse. Thèse Doctorat d'Etat, Université de Yaoundé I, Cameroun, 207 p.
- N'ni, J., Bonin, B., Brousse, R., 1986.** Migration de l'activité magmatique de la Ligne du Cameroun : réactivation de segments de failles anciennes du socle panafricain. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris* 302, 453-456.
- Nana, J.M., 1988.** Le complexe volcano-plutonique de Bana (Ouest-Cameroun) : géologie et pétrologie. Thèse Doctorat. Université. Paris-Sud. Orsay, 131 p.
- 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 Doctorat d'Etat, Université de Yaoundé I, Cameroun, 170 p.
- Nédélec, A., Bouchez, J.L., 2011.** Pétrologie des granites, structure, cadre géologique. *Collection Interaction*, Vuibert. 320 p.

- Ngako, V., 1986.** Évolution métamorphique et structurale de la bordure Sud-Ouest de la “série de Poli” (segment camerounais de la chaîne panafricaine). Mémoires et documents du Centre armoricain d'étude structurale des socles 5, 185 p.
- Ngako, V., 1999.** Les déformations continentales panafricaines en Afrique centrale. Résultat d'un poinçonnement de type himalayen. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Yaoundé I, 241p.
- Ngako, V., Jégouzo, P., Nzenti, J.P., 1991.** Le Cisaillement Centre Camerounais : rôle structural et géodynamique dans l'orogénèse panafricaine. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris 313, 457- 463.
- Ngako, V., Affaton, P., Nnange, J.M., Njanko, T., 2003.** Pan-African tectonic evolution in central and southern Cameroon: transpression and transtension during sinistral shear movements. *Journal of African Earth Sciences* 36, 207-214.
- Ngako, V., Njonfang, E., Aka Tongwa, F., Affaton, P., Nnange Metuk, J., 2006.** The north-south Paleozoic to Quaternary trend of alkaline magmatism from Niger-Nigeria to Cameroon: Complex interaction between hotspots and Precambrian faults. *Journal of African Earth Sciences* 45, 241-256.
- Ngako, V., Affaton, P., Njonfang, E., 2008.** Pan-African tectonics in northwestern Cameroon: Implication for the history of Western Gondwana. *Gondwana Research* 14, 509-522.
- Ngamy Kanwa, A., Tchakounte, N.J., Nkoumbou, C., Owona, S., Tchouankoue, J.P., Mvondo Ondo, J., 2019.** Petrology and geochemistry of the Yoro-Yangben Pan-African granitoid intrusion in the Archaean Adamawa-Yade crust (SW-Bafia, Cameroon). *Journal of African Earth Sciences* 150, 401-414.
- Ngnotué, T., Ganno, S., Nzenti, J.P., Schulz, B., Tchaptchet Tchato, D., Suh, C.E., 2012.** Geochemistry and geochronology of peraluminous high-K granitic leucosomes of Yaoundé Series (Cameroon): Evidence for a unique Pan-African magmatism and melting event in North Equatorial Fold Belt. *International Journal of Geosciences* 3, 525-548.
- Ngonge, E.D., Hollanda, M.H.B.M., Nkonguin Nsifa, E., Tchoua, F.M., 2014.** Petrology of the Guenfalabo ring-complex: An example of a complete series along the Cameroon Volcanic Line (CVL), Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 96, 139-154.
- Ngounouno, I., Déruelle, B., Demaiffe, D., 2000.** Petrology of the bimodal Cenozoic volcanism of the Kapsiki Plateau (northernmost Cameroon, Central Africa). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 102, 21-44.
- Ngounouno, I., Moreau, C., Déruelle, B., Demaiffe, D., Montigny, R., 2001.** Pétrologie du complexe alcalin sous-saturé de Kokoumi (Cameroun). *Bulletin de la Société Géologique de France* 172, 675-686.

- Ngounouno, I., Déruelle, D., Demaiffe, D., Montigny, R., 2003.** Petrology of the bimodal Cenozoic volcanism of the Upper Benue valley, northern Cameroon (Central Africa). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 145, 87-106.
- Ngounouno, I., Déruelle, B., Montigny, R., Demaiffe, D., 2005.** Petrology and Géochemistry of monchiquites from Tchircotche (Garoua rift, north Cameroon, central Africa). *Mineralogy and petrology* 83, 167-190.
- Nguéné, F.R., 1982.** Geology and Geochemistry of the Mayo Darlé Tin Deposit, West-Central Cameroon. PhD Thesis, New Mexico Institute, 188 p.
- Njilah Konfor, I., Temdjim, R., Nzolang, C., Tchuitchou, R., Ajonina, H., 2007.** Geochemistry of Tertiary-Quaternary lavas of Mt. Oku, Northwest Cameroon, Revisita facultad de ingenieria Univeridad de Antioquia, Junio, pp. 59 - 75.
- Njome, S.M., De Wit, J.M., 2014.** The Cameroon Line: Analysis of an intraplate magmatic province transecting both oceanic and continental lithospheres: Constraints, controversies and models. *Earth-Science Reviews* 139, 168-194.
- Njome, S.M., Suh, C.E., Sparks, R.S.J., Ayonghe, S.N., Fitton, J.G., 2008.** The Mount Cameroon 1959 compound lava flow field: morphology, petrography and geochemistry. *Swiss Journal of Geosciences* 101, 85-98.
- Njonfang, E., Moreau, C., 1996.** The mineralogy and geochemistry of a subvolcanic alkaline complex from the Cameroon Line: The Nda Ali massif, southwest Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 22, 113-132.
- Njonfang, E., Moreau, C., 2000.** The mafic mineralogy of the Pandé massif, Tikar Plain, Cameroon: Implications for a peralkaline affinity and emplacement from highly evolved alkaline magma. *Mineralogical Magazine* 64, 525-537.
- Njonfang, E., Moreau, C., Tchoua, F.M., 1996.** Caractères pétrographiques et géochimiques des petites coulées basaltiques au nord de Fouban (Plateau Bamoun, Ouest Cameroun). *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Paris* 322 : 277-283.
- Njonfang, E., Moreau, C., Tchoua, F.M., 1998.** La bande mylonitique Fouban-Bankim, Ouest-Cameroun : Une zone de cisaillement de haute température. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Paris, Serie. IIa*, 327.
- Njonfang, E., Nono, A., Kamgang, P., Ngako, V., Tchoua, F.M., 2011.** Cameroon Line alkaline magmatism (central Africa): A reappraisal. In Beccaluva, L., Bianchini, G., and Wilson, M., eds., *Volcanism and the evolution of the African Lithosphere*. Geological Society of America special paper 478, 173-197.

- Njonfang, E., Tchuenté Tchoneng, G., Cozzupoli, D., Lucci, F., 2013.** Petrogenesis of the Sabongari alkaline complex, Cameroon Line (Central Africa): Preliminary petrological and geochemical constraints. *Journal of African Earth Sciences* 83, 25-54.
- Njonfang, E., Laurenzi, A.M., Wokwenmendang Nguet, P., Cozzupoli, D., 2018.** ^{40}Ar - ^{39}Ar ages from the Sabongari and Nana igneous complexes within the central part of the Cameroon Line (Central Africa). *Journal of African Earth Sciences* 147, 20-27.
- Nkono, C., 2008.** Analyse multi-échelle et interprétation géodynamique des données morphostructurales associées au volcano-plutonisme phanérozoïque d'Afrique équatoriale (Ligne du Cameroun et régions voisines). Unpublish. Thesis Université Libre de Bruxelles (ULB), 356pp.
- Nkono, C., Féménias, O., Demaiffe, D., 2014.** Geodynamic model for the development of the Cameroon Hot Line (Equatorial Africa). *Journal of African Earth Sciences* 100 : 626-633.
- Nkouathio, D.G., 1997.** Le volcanisme récent du graben de Tombel (Provinces du littoral et du Sud-ouest, Cameroun). *Volcanologie, Géochimie pétrologie et valeurs agricoles*, thèse Doctorat 3^{ème} Cycle. Université de Yaoundé I, 179 p+1carte HT.
- Nkouathio, D.G., Kagou Dongmo, A., Wandji, P., Bardintzeff, J.M., Tchoua, F.M., 2006.** Evolution and tectonic control of volcanism along the Cameroon Volcanic Line: case study of graben and horst volcanoes. Implication on the nature of volcanic hazards. *Garavolcan*, 300 th International Conference commemorating the 1706 Arenas Negras Eruption, Garachico, Tenerife, Canary Islands, May 22-27.
- Nkouathio, D.G., Kagou Dongmo, A., Bardintzeff, J.M., Wandji, P., Bellon, H., Pouclet, A., 2008.** Evolution of volcanism in graben and horst structures along the Cenozoic Cameroon Line (Africa): implications for tectonic evolution and mantle source composition. *Mineralogy and Petrology* 94, 287-303.
- Nkoumbou, C., 1990.** 1- Etude géologique des monts Roumpi : un exemple plutonique et volcanique de la « Ligne du Cameroun ». 2- Données pétrologiques sur les néphélinites du mont Etindé (Cameroun). Thèse Doctorat, Université de Nancy I, 355 p.
- Nkoumbou, C., Nana, R., Eno Belinga, S. M., Vicat, J. P., 1999.** Les éruptions du Mont Cameroun de 1999 : étude volcanologique. *Géologie et environnements au Cameroun*, VICAT J.P. et BILONG P ; éd., collect. GEOCAM 2, press. Univ. Yaoundé, pp.347-352.
- Nomo Negue, E., Tchameni, R., Vanderhaeghe, O., Barbey, P., Fosso Tchuenta, P.M., Takojou Wambo, J.D., Lemdjou, Y.B., Saha Fouotsa, A.N., 2015.** Petrography and Geochemistry of the Mbip granitic Massif, SW Tcholliré (Central North Cameroun): petrogenetic and Geodynamic Implication. *International Journal of Geosciences* 6, 761-775.

- Nomo Negue, E., Tchameni, R., Vanderhaeghe, O., Sun, F., Barbey, P., Tekoum, L., Saha Fouotsa, N. A., 2017.** Structure and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of syntectonic plutons emplaced in the Pan-African Banyo- Tchollire shear zone (central north Cameroon). *Journal of African Earth Sciences* 131, 251-271.
- Nono, A., Likeng, J.D.H., Wabo, H., Tabue Youmbi, G., Biaya, S., 2009.** Influence de la nature lithologique et des structures géologiques sur la qualité et la dynamique des eaux souterraines dans les hauts plateaux de l'Ouest-Cameroun. *International journal of biological and Chemical Sciences* 3(2), 218-239.
- Noudiedie Kamgang, J.A., Tcheumenak Kouemo, J., Kagou Dongmo, A., Fozing, E. M., Choumélé Kana, S.C., Efon Awoum. J., Kenfack Nguemo, G.R., 2020.** Emplacement and Evolution of the Nlonako Ring complex in the Southern Domain of the Cameroun Line. *European Journal of environment and Earth Sciences*.
- Noudiedie Kamgang, J.A., 2021.** Cartographie et caractérisation morpho-structurale du complexe anorogénique de Nlonako (Littoral-Cameroun): Approche par images satellitaires. Thèse de Doctorat/PhD. Université de Dschang. 143 p.
- Ntieche, B., 2017.** Geology of the Magba zone (west Cameroon Central Africa): Geochemistry and Major Associated mineralizations. Ph.D /thesis, the University of Yaoundé I, 145 p.
- Nzenti, J.P., 1998.** Neoproterozoic alkaline meta-igneous rocks from the Pan-African North Equatorial Fold Belt (Yaounde, Cameroon): biotitites and magnetite rich pyroxenites. *Journal of African Earth Sciences* 26, 37–47.
- Nzenti, J.P., Barbey, P., Macaudiere, J., Soba, D., 1988.** Origin and evolution of the late Precambrian high-grade Yaounde Gneisses (Cameroon). *Precambrian Research* 38, 91–109.
- Nzenti, J. P., Ngako, V., Kambou, R., Penaye, J., Bassahak, J., Njel, O.V., 1992.** Structures régionales de la chaîne panafricaine du Nord Cameroun. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, tome 315, série II, 209 – 215.
- Nzenti, J.P., Bertrand, S.M., Macaudière, J., 1994.** La chaîne panafricaine au Cameroun : cherchons suture et modèle. 15e Réunion des Sciences de la Terre. Nancy, France.
- Nzenti, J.P., Badibanga Kapajika, G., Wörner Toto, R.L., 2006.** Synkinematic emplacement of granitoids in a Pan-African shear zone in Central Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 45, 74-86.
- Nzolang, C., 2005.** Crustal evolution of the Precambrian basement in West Cameroon: inference from geochemistry. Sr-Nd isotopes and experimental investigation of some granitoids and metamorphic rocks. Ph.D. thesis Niigata University, Japan, 207 p.
- O'leary, D.W., Friedman, J.D., Pohn, H.A., 1976.** Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin* 87, 1463.

- Okomo Atouba, L.C., Chazot, G., Moundi, A., Agranier, A., Bellon, H., Nonnette, P., Kankeu, B., 2016.** Mantle sources beneath the Cameroon volcanic line: geochemistry and geochronology of the Bamoun plateau mafic rocks. *Arabian Journal of Geosciences*. 9, 270.
- Olivry, J.C., 1973.** Régimes hydrologiques en pays Bamiléké (Cameroun). Cahier. ORSTOM, Série, Hydrologie, XIII, 1, 1976, 71 p.
- Olivry, J.C., 1986.** Fleuves et Rivières du Cameroun. Mesres-Orstom-ISBN2-7099-0844-2, 733 p.
- Owona, S., Mvondo Ondo, J., Njom, B., Tjomb, B., Enama, M.M., 2003.** Géomorphologie et cartographie de 2 faciès paradérivés et 1 faciès orthodérivé de la région de Yaoundé. *J.STD., Université de Douala* 10 (1), 81-91.
- Owona, S., Schulz, B., Ratschbacher, L., Ondo, J.M., Ekodeck, G.E., Tchoua, F.M., Affaton, P., 2011.** Pan-African metamorphic evolution in the southern Yaounde Group (Oubanguide Complex, Cameroon) as revealed by EMP-monazite dating and thermobarometry of garnet metapelites. *Journal of African Earth Sciences* 59, 125-139.
- Owona, S., Mbola Ndzana, S.P., Mvondo Ondo, J., Nsangou Ngapna, M., Nkabsaah, C., Ratschbacher, L., Ekodeck, G.E., 2012.** Geological control of geomorphologic units in the Southwest (SW) Cameroon (Central Africa). *Journal of Geology and Mining Research* Vol. 4. 152-167.
- Owona, S., Ratschbacher, L., Nsangou Ngapna, M., Azfal, M.G., Mvondo Ondo, J., Ekodeck, G.E., 2021.** How diverse is the source Age, provenance, reworking, and overprint of Precambrian meta-sedimentary rocks of West Gondwana, Cameroon, from zircon U-Pb geochronology. *Precambrian Research* 359, 106220.
- Parsons, I., Brown, W.L., Jacquemin, H., 1986.** Mineral chemistry and crystallization at the Mboutou layered gabbro-syenite-granite complex, North Cameroon. *Journal of Petrology* 27, 1305-1329.
- Pearce, J.A., 1982.** Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe, R.S. (Ed.), *Andesite: Orogenic Andesites and related Rocks*. John Wiley, Chichester, 525-548.
- Pearce, J.A., 1983.** Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth, C.J., Norry, M.J. *Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins*. In: Hawkesworth, C.J., Norry, M.J. (Ed.), *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Shiva, Nantwich, 230-249.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G., 1984.** Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology* 25, 956-983.

- Piper, J.D.A., Richardson, A., 1972.** The paleomagnetism of the Gulf of Guinea volcanic province, West Africa. *Geophysical Journal Research Astronomical Society* 29, 147-171.
- Plank, T., 2005.** Constraints from Thorium/Lanthanum on sediment recycling at subduction zones and the evolution of the continents. *Journal of Petrology*, 46, 1-24.
- Poitrasson, F., Duthou, J.L., Pin, C., 1995.** The Relationship between Petrology and Nd Isotopes as Evidence for Contrasting Anorogenic Granite Genesis: Example of the Corsican Province (SE France). *Journal of Petrology* 36(5), 1251-1274.
- Pouclet, A., Kagou Dongmo, A.K., Bardintzeff, J.-M., Wandji, P., Tagheu, P.C., Nkouathio, D., Bellon, H., Ruffet, G., 2014.** The Mount Manengouba, a complex volcano of the Cameroon line: volcanic history, petrological and geochemical features. *Journal of African Earth Sciences* 97, 297-321.
- Rämö, O.T., Haapala, I., 1995.** One hundred years of Rapakivi Granite. *Mineralogy and Petrology* 52, 129-185.
- Rankenburg, K., Lassister, J.C., Brey, G., 2005.** The role of continental crust and lithospheric mantle in the genesis of Cameroon volcanic line lavas: Constraints from isotopic variations in lavas and megacrysts from the Bui and Jos Plateaux. *Journal of Petrology* 46, 169-190.
- Reusch, A., Nyblade, A., Tibi, R., Wiens, D., Shore, P., Bekoa, A., Tabod, C., Nnange, J., 2011.** Mantle transition zone thickness beneath Cameroon: Evidence for an upper mantle origin for the Cameroon Volcanic Line. *International Journal of Geophysical* 187, 1146-1150.
- Rollinson, H.R., 1993.** Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Scientific & Technical, London.
- Rudnick, R.L., Fountain, D.M., 1995.** Nature and composition of the Continental-Crust a Lower Crust perspective. *Review of Geophysics* 33(3), 267-309.
- Scaillet, B., 2006.** Mémoire présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches. Géologie appliquée. Université d'Orléans, 130 p.
- Segalen, P., 1967.** Les sols de la vallée du Noun, Cah.O.R.S.T.O.M, série pédologique. Vol. 5. N°3 Paris P 287-349. 1 cart. Hautes terres au 1/200000.
- Sep Nlomngan, J., Owona, S., Penaye, J., Tchameni, R., Moussango Ibohn, P.A., Nsifa Nkonguin, E., Toteu, S.F., 2021.** Tectonics and LA-ICP-MS U–Pb zircon geochronology of the Boula Ibi Region (Northern Cameroon Pan-African Orogenic Belt). *Arabian Journal of Geosciences* 14, 1643.

- Shellnutt, J.G., Zhou, M.F., Zellmer, G.F., 2009.** The role of Fe-Ti oxide crystallization in the formation of A-type granitoids with implications for the Daly gap: an example from the Permian Baima igneous complex, SW China. *Chemical Geology* 259, 204-217.
- Shellnutt, J.G., Lee, T.Y., Torng, P.K., Yang, C.C., Lee, Y.H., 2016.** Late Cretaceous intraplate silicic volcanic rocks from the Lake Chad region: An extension of the Cameroon volcanic line? *Geochemistry, Geophysics, geosystems* 17, 2803-2824.
- Sibuet, J.C., Mascle, J., 1978.** Plate kinetic implications of Atlantic equatorial fracture zone trends. *Journal of Geophysical Research* 83, 3401-3421.
- Sigurdsson, H., Devine, J.D., Tchoua, F.M., Presser, T.S., Pringle, M.K.W., Evans, W.C., 1987.** Origin of the lethal gas burst from Lake Monoun, Cameroun. *Journal of Geothermometer and Volcanology Research* 31, 1-16.
- Simeni Wambo, N.A., Tchaptchet Tchato, D., Ngo Belnoun, R.N., Tchouankoue, J.P., Ganwa, A.A., 2017.** Structural relationship between brittle deformation and Palaeozoic to Mesozoic basalt dykes in the Precambrian basement of the southern continental part of the Cameroon Volcanic Line. *International Journal of Geosciences* 8, 318-331.
- Soba, D., 1989.** La série de Lom : Etude géologique et géochronologique d'un bassin volcano-sédimentaire de la chaîne panafricaine de l'Est du Cameroun. Thèse Doctorat d'Etat, Université de Paris VI, France, 198 p.
- Soba, D., Michard, A., Toteu, S.F., Norman, D.I., Penaye, J., Ngako, V., Nzenti, J.P., Dautel, D., 1991.** Données géochronologiques nouvelles (Rb-Sr, U-Pb et Sm-Nd) sur la zone mobile panafricaine de l'Est Cameroun : âge Protérozoïque supérieur de la série du Lom. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris* 312, 1453-1458.
- Soh Tamehe, L., Wei, C.T., Ganno, S., Rosière, C.A., Li, H., Brando Soares, M., Nzenti, J.P., Santos, J.O.S., Bekker, A., 2022.** Provenance of metasiliciclastic rocks at the East Gabonian Block: Implications for deposition of BIFs and crustal evolution in southwestern Cameroon. *Precambrian Research* 376, 106677.
- Sparks, R.P.J., Self, S., Walker, G.P.L., 1973.** Products of ignimbrite eruptions. *Geology* 1, 115-118.
- Streckeisen, A., Le Maitre, R.W., 1979.** A chemical approximation to the modal QAPF classification of igneous rocks. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abteilung* 136, 169-206.
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989.** Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implications for mantle composition and processes. In: Norry, M.J., Saunders, A.D. (Eds.), *Magmatism in the ocean basins*. Special Publication, Geological Society, London 42, 313-345.

- Suh, C.E., Sparks, R.S.J., Fitton, J.G., Ayonghe, S.N., Annen, C., Nana, R., Luckmen, A., 2003.** The 1999 and 2000 eruptions of Mount Cameroon: Eruption behaviour and petrochemistry of lava. *Bulletin of Volcanology* 65, 267-281.
- Syke, L.R., 1978.** Intraplaque seismicity, reactivation of preexisting zones of weakness, alkaline magmatism and other tectonism postdating continental fragmentation. *Review Space Physics* 16, 621-688.
- Sylvester, P.J., 1989.** Post-collisional alkaline granites. *Journal of Geology* 97, 261-280.
- Takodjou Wambo, J.D., Ganno, S., Afahnwie, N.A., Nomo, N.E., Mvondo, O.J., Nzenti, J.P., 2016.** Use of Landsat 7 ETM+ Data for the geological structure interpretation: case study of the Ngoura-Colomines area, Eastern Cameroon. *Journal of Geosciences. And Geomatics* 4 (3), 61-72.
- Takodjou Wambo, J.D., Pour, A.B., Ganno, S., Asimow, P.D., Zoheir, B., Dos Reis Salles, R., Paul Nzenti, J., Pradhan, B., Muslim, A.M., 2020.** Identifying high potential zones of gold mineralization in a sub-tropical region using Landsat-8 and ASTER remote sensing data: a case study of the Ngoura-Colomines goldfield, Eastern Cameroon. *Ore Geology Reviews* 122, 103-530.
- Tamen, J., Nkoumbou, C., Mouafo, L., Reusser, E., Tchoua, M.F., 2007.** Petrology and geochemistry of monogenic volcanoes of Barombi Koto volcanic field (Kumba graben, Cameroon volcanic line): Implications for mantle source characteristics. *Comptes Rendus Geoscience* 339, 799-809.
- Tanko Njiosseu, E.L., Nzenti, J.-P., Njanko, T., Kapajika, B., Nédélec, A., 2005.** New UPb zircon ages from Tonga (Cameroon): coexisting Eburnean–Transamazonian (2.1 Ga) and Pan-African (0.6 Ga) imprints. *Comptes Rendus Géosciences* 337, 551–562.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985.** *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*, Blackwell, Scientific Publications, Oxford, 312 p.
- Tchakounté, J., Eglinger, A., Toteu, S.F., Zeh, A., Nkoumbou, C., Mvondo-Ondoa, J., Penaye, J., de Wit, M., Barbey, P., 2017.** The Adamawa-Yadé domain, a piece of Archaean crust in the Neoproterozoic Central African Orogenic belt (Bafia area, Cameroon). *Precambrian Research* 299, 210-229.
- Tchaméni, R., Pouclet, A., Penaye, J., Ganwa, A.A., Toteu, S.F., 2006.** Petrography and geochemistry of the Ngaoundéré Pan-African granitoids in Central North Cameroon: Implications for sources and geological setting. *Journal of African Earth Sciences* 44, 511–529.
- Tchoua, F.M., 1972.** Le massif volcanique de Mbépit (pays Bamoun). *Annale de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé Cameroun* 9, 45-71.

- Tchoua, F.M., 1974.** Contribution à l'étude géologique et pétrographique de quelques volcans de la Ligne du Cameroun (Monts Manengouba et Bambouto). Thèse d'Etat, Université de Clermont-Ferrand U.E.R. Sciences exactes et naturelles, 337 p.
- Tchoua, F., 1976.** A propos de la note de J. Gouhier et D. Nougier intitulée : « Contribution à l'étude volcanique du Cameroun ». Annale de la Faculté des Sciences, Université de Yaoundé Cameroun, 21/22 : 47-88.
- Tchuimegnie Ngongang, N.B., 2016.** Pétrologie, géochimie et géochronologie des laves basaltiques de Bafang et ses environs. Thèse de Doctorat Ph.D, Université de Yaoundé I, 160p.
- Tchuimegnie Ngongang, N.B., Kamgang, P., Chazot, G., Agranier, A., Bellon, H., Nonnotte, P., 2015.** Age, geochemical characteristics and petrogenesis of Cenozoic intraplate alkaline basalts in the Bafang region, West Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 102, 218-232.
- Teitchou, M.I., 2007.** Volcanologie, Pétrologie et géochimie comparées de quelques plaines continentales (Kumba, Tombel, Nyos) de la Ligne volcanique du Cameroun. Thèse de Doctorat Ph.D, Université de Yaoundé I, 206 p.
- Tempier, P., Lasserre, M., 1980.** Géochimie des massifs "Ultime" du Cameroun : rapports entre l'évolution magmatique. Comparaisons avec les "Younger Granites" du Nigéria. *Bulletin de la société géologique de France* (7), 203-211.
- Thierry, P., Stieltjes, L., Kouakam, E., Nguéya, P., Salley, P.M., 2008.** Multi-hazard risk mapping and assessment on an active volcano: The GRINP Project at Mount Cameroon. *Natural Hazards* 45, 429-456.
- Thompson, R.N., Morrison, M.A., 1988.** Asthenospheric and lower lithospheric mantle contribution to continental extensional magmatism: an example from the British Tertiary Province. *Chemical Geology* 68, 1-15.
- Toteu, S.F., Michard, A., Bertrand, J.M., Rocci, G., 1987.** U/Pb dating of Precambrian rocks from Northern Cameroon, orogenic evolution and chronology of the Pan-African belt of Central Africa. *Precambrian Research* 37, 71-87.
- Toteu, S.F., Van Schmus, W.R., Penaye, J., Michard, A., 2001.** New U/Pb and Sm/Nd data from North-Central Cameroon and its bearing on the pre-pan African history of Central Africa. *Precambrian Research* 108, 45-73.
- Toteu, S.F., Penaye, J., Poudjom Djomani, Y., 2004.** Geodynamic evolution of the Pan-African belt in central Africa with special reference to Cameroon. *Canadian Journal of Earth Sciences* 41, 73-85.

- Toteu, S.F., Penaye, J., Deloule, E., Van Schmus, W.R., Tchameni, R., 2006.** Diachronous evolution of volcano-sedimentary basins north of the Congo craton: Insights from U–Pb ion microprobe dating of zircons from the Poli, Lom and Yaoundé Groups (Cameroon). *Journal of African Earth Sciences* 44, 428-442.
- Toteu, S.F., Wit M.D., Penaye, J., Drost, K., Tait, A.J., Bouyo Houketchang, M., Van Schmus, W.R., Jelsma, H., Moloto-A-Kenguemba, G.R., Filho, A.F.S., Lerouge, C., Doucouré, M. 2022.** Geochronology and correlations in the Central African Fold Belt along the northern edge of the Congo craton: New insights from U-Pb dating of zircons from Cameroon, Central African Republic, and south-western Chad. *Gondwana Research* 107, 296–324.
- Tsafack, J.P.F., Wandji, P., Bardintzeff, J.M., Bellon, H., Guillou, H., 2009.** The Mount Cameroon stratovolcano (Cameroon Volcanic Line, Central Africa): petrology, geochemistry, isotope and age data. *Geochemistry, Mineralogy and Petrology* 47, 65-78.
- Uytenbogaardt, W., Burke, E.A.J., 1971.** Tables for microscopic identification of Ore Minerals. Elsevier, 430 p.
- Van Houten, F.B., 1983.** Sirte basin, north-central Libya: cretaceous rifting above a fixed mantle hospot. *Geology* 11,115-118.
- Van Schmus, W.R., Oliveira, E.P., Da Silva Filho, A., Toteu, S.F., Penaye, J., Guimarães, I.P., 2008.** Proterozoic Links between the Borborema Province, NE Brazil, and the Central African Fold Belt. *Geological Society London Special Publications* 294, 69-99.
- Vicat, J.P., 1998.** Bilan des connaissances acquises sur les séries de Dja (Cameroun), Nola (Centrafrique) et Sembé-Ouessou (Congo). In : Vicat, J.-P., Bilong, P. (Eds.), *Géosciences au Cameroun*, Collection GEOCAM, Presse, Université Yaoundé I, 1, 369-383.
- Vicat, J.P., Pouclet, A., Bellion, Y., Doumnang, J.C., 2002.** Les rhyolites hyperalcalines (pantellérites) du lac Tchad. Composition et signification tectonomagmatique. *Comptes Rendus Geoscience* 334,885-891.
- Vincent, P.M., 1968.** Attribution au créacé de conglomérats métamorphiques de l’Adamawa (Cameroun). *Annale de la Faculté des Sciences, Université de Yaoundé Cameroun* 1, 69-76.
- Vincent, P.M., 1970.** The evolution of the Tibesti volcanic province, Eastern Sahara. In Clifford, T.M., Gass; I.G. *African magmatism and tectonics*. Oliver and Boyd eds, Edingburgh, 301-309.
- Wandji, P., 1995.** Le volcanisme récent de la plaine du Noun (Ouest Cameroun). *Volcanologie, pétrologie, géochimie et pouzzolanité*. Thèse Doctorat d’Etat, Université de Yaoundé I, Cameroun, 295 p.

- Wandji, P., Menard, J.J., Tchoua, F.M., 1994.** L'activité hydromagmatique récente dans la plaine du Noun (Ouest Cameroun) et les aléas volcaniques associés. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris* 319, 417- 422.
- Wandji, P., Bardintzeff, J.M., Tchoua, F.M., Déruelle, B., Nkouathio, D.G., Kagou Dongmo, A., Itiga, Z., Wotchoko, P., Chakam Tagheu, P.J., 2001.** Mont Cameroun (ligne du Cameroun) : un laboratoire naturel d'étude des risques et des bienfaits du volcanisme. *GSAf 12: Geo-environnemental catastrophes in Africa. Journal of Geosciences Society Cameroon* 1(1A), 1341- 35.
- Wantim, M.N., 2011.** Mapping and modeling lava flow dynamics and hazards at Mount Cameroon Volcano. PhD thesis, Ghent University, 209 p
- Watson, E.B., Harrison, T.M., 1983.** Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition effects in a Variety of Crustal Magma Types. *Earth and Planetary Science Letters* 64, 295-304.
- Wederpohl, K.H., 1995.** The composition of the continental crust. *Geochemica and Cosmochimica Acta* 59, 1217-1232.
- Weecksteen, G., 1957.** Carte géologique du Cameroun à l'échelle du 1/500000 (coupure Douala-Ouest) avec notice explicative. Imprimerie Nationale. Yaoundé, 35 p.
- Whalen, J.B., Currie, K.L., Chappell, B.W., 1987.** A-type granites : geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 95, 407-419.
- Whalen, J.B., McNicoll, V.J., Staal, C.R., Lissenberg, C.J., Longstaffe, F.J., Jenner, G.A., Breeman, O., 2006.** Spatial, temporal and geochemical characteristics of Silurian collision-zone magmatism, Newfoundland Appalachians, an example of a rapidly evolving magmatic system related to slab break-off. *Lithos* 89, 377-404.
- Wilson, M., Guiraud, R., 1992.** Mesozoic-Cenozoic magmatism associated with the West and Central African Rift system. In P.A. Zegler (Ed), *Geodynamics of Rifting, Volume II. Case History Studies on Rifts: North and South America and Africa. Tectonophysics*, 213 : 203-225.
- Wokwenmendiam Nguet, P., 2018.** Pétrographie, géochimie et géochronologie du complexe de Nana (plaine Tikar) : Implications Géodynamiques et Métallogéniques. Thèse de Doctorat Ph.D, Université de Yaoundé I. Cameroun, 209 p + Annexes.
- Wokwenmendiam Nguet, P., Njonfang, E., Moundi, A., Cozzoli, D., Tchoua, F.M., 2016.** Données nouvelles sur le complexe alcalin de Nana : pétrologie et géochimie des laves associées (Plaine Tikar, Ouest Cameroun). *Syllabus Review* 6, 13-32.

- Wormald, R.J., Price, R.C., Kemp, A.I.S., 2004.** Geochemistry and Rb-Sr geochronology of the alkaline-peralkaline Narraburra Complex, Central Southern New South Wales; tectonic significance of the Late Devonian granitic magmatism in the Lachlan Fold Belt. *Australian Journal of Earth Sciences* 51, 369-384.
- Wotchoko, P., Wandji, P., Bardintzeff, J.M., Bellon, H., 2005.** Données pétrologiques et géochronologiques nouvelles sur le volcanisme alcalin néogène à récent de la rive Ouest du Noun (plaine du Noun, Ligne du Cameroun). *Bulgarian Geological Society*, 66: 97-105.
- Wu, F.Y., Li, X.H., Yang, J.H., 2007.** Discussion on the Petrogenesis of Granites. *Acta Petrologica Sinica* 23, 1217-1238.
- Yan, Q.S., Shi, X.F., Liu, H.L., Wang, K.S., Bu, W., 2010.** Petrology and geochemistry of Mesozoic granitic rocks from the Nanshamicro-block, the South China Sea: Constraints on the basement nature. *Journal of Asian Earth Sciences* 37, 130-139.
- Yang, P.T., Liu, S.W., Li, Q.G., Wang, Z.Q., Wang, R.T., Wang, W., 2012.** Geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopic systematics of the Ningshan granitoid batholith, middle segment of the South Qinling belt, Central China: constraints on petrogenesis and geodynamic processes. *Journal of Asian Earth Sciences* 61, 166-186.
- Yang, X.M., 2017.** Estimation of crystallization pressure of granite intrusions. *Lithos* 286, 324–329.
- Yang, Z.Y., Wang, Y., Ye, R.S., Li, Q.S., He, F.J., Wolfgang, S., Chen F., 2017.** Petrology and geochemistry of Early Cretaceous A-type granitoids and late Mesozoic mafic dikes and their relationship to adakitic intrusions in the lower Yangtze River belt, Southeast China, *International geology Review* 59, 1,62-79.
- Yao, K.T., Fouché-Grobla, O., Yéi, O.M., Assoma, T.V., 2012.** Extraction of structural lineaments from satellite images, and estimation of induced estimation biases, in a metamorphosed Precambrian basement. *Remote Sensing Review* 10, 161-178.
- Yomeun, B.S., Wang, W., Tchouankoue, J.P., Kamguia Kamani, M.S., Azeuda Ndonfack, K.I. Huang, S.-F., Afanga Basua, E.A. Lu, G.-M. Xue, E.-K. 2022.** Petrogenesis and tectonic implication of Neoproterozoic I-Type Granitoids and orthogneisses in the Goa-Mandja area, Central African Fold Belt (Cameroon). *Lithos* 420–421, 106700.
- Youmen, D., 1994.** Evolution Volcanologique, Pétrologique et Temporelle de la Caldera des Monts Bambouto (Cameroun). [Ph.D. thesis]: Kiel, Germany, Université de Kiel, 294 p.
- Youmen, D., Schmincke, H.-U., Lissom, J., Etame, J., 2005.** Données géochronologiques : mise en évidence des différentes phases volcaniques au Miocène dans les Monts Bambouto (Ligne du Cameroun). *Journal des Sciences Technologiques et Développement* (1), 11 : 49-57.

- Zangmo Tefogoum, G., Kagou Dongmo, A., Nkouathio, D.G., Wandji, P., Dedzo Gountié, M., 2014.** Geomorphological features of the Manengouba Volcano (Cameroon Line): assets for potential geopark development. *Geoheritage* 6, 225-239.
- Zhang, L.F., Ai, Y.L., Li, X.P., Rubatto, D., Song, B., Williams, S., Song, S.G., Ellis, D., Liou, J.G., 2007.** Triassic Collision of western Tianshan orogenic belt, China: Evidence from SHRIMP U-Pb dating zircon from HP/UHP eclogitic rocks. *Lithos* 96, 266-280.
- Ziem à Bidias, L.A., Moundi, A., Takodjou Wambo, J.D., 2017.** “Transitional Basalts and Eruptive Dynamisms around Nkoumelap locality (West of the Bamoun Plateau, Cameroon Volcanic Line): Petrography and Volcanic Risks’Evaluation”. *Journal of Geosciences and Geomatics* 5, 65-77.

ANNEXES

Annexe 1. Compilation des âges des massifs volcaniques de la ligne volcanique du Cameroun LVC

Lieu	Roches	Âges (Ma)	Méthodes	Références
Bafang	Basanites	10.46 ± 0.25 - 9.57±0.23	K/Ar	Tchuimegnie Ngongang et al.,2015
	Alkali basalts	6.45± 0.18 - 6.27 ± 0.17		
	Mugearites	8.47± 0.26 - 6.89 ± 0.18		
	Alkali basalts	6.5 ± 3	K/Ar	Nana, 1988
Bana	Transitionnal basalts	30.1 ± 1.2	K/Ar	Kuepouo et al., 2006
	Alkali Basalt	6.5 ± 3 Ma	K/Ar	Nana, 1988
	Benmoreites	38 ± 8 - 42 ± 8	K/Ar	Nana, 1988 ; Cantagrel et al., 1978
Bangou	Basanite	43.90	K/Ar	Fosso, 1999
	alkali basalt	4.39 ± 0.11	K/Ar	Fosso et al., 2005
	Transitional Basalt	44.7 - 43.1 ± 1	K/Ar	Fosso et al., 2005
Bambouto	Basalt(Bambouto south)	14.3 ± 0.3 (postcaldéira)	K/Ar	Dunlop, 1983
	Alkali basaltes	6.05±0.05 (intracaldéira)	K/Ar	Youmen, 1994
	Mugearite	20.83 ± 0.11	Ar/Ar	Marzoli et al., 2000
	Trachyte	16.23 ± 0.006	Ar/Ar	Marzoli et al., 1999
	Rhyolite	15.41 ± 0.07	Ar/Ar	Yomen et al., 2005
	Basanite	14.08 ± 0.34	K/Ar	Kagou Dongmo et al., 2010
	Basalt	14.33 ± 1.2	Ar/Ar	Fitton and Dunlop, 1985
Bamenda	Hawaiite	15.08 ± 0.09	Ar/Ar	Marzoli et al., 2000
	Trachyte	12.7 - 27.4	K/Ar	Kamgang et al., 2007
	Hawaiite	17.6	K/Ar	Kamgang et al., 2008
	Basalt	25 - 15	K/Ar	Fitton and Dunlop, 1985
Bandjoun	Basanite	0.4 - 8.3 ± 0.3	K/Ar	Kamgang et al., 2013
Mbam	Alkali basalt	32 - 38	K/Ar	Tchoua, 1974
Foumban	Tansitional basalt	51.8 ± 1.2	K/Ar	Moundi et al., 2007
Mamevouo	Alkali basalt	46.7 ± 1.1		
Mamevouo	Ankaramites	0.82 ± 0.05		
Nkogam	Ignimbrite	91± 12	Rb/Sr	Caen-Vachette et al.,1987)
Mbepit	Rhyolite (South)	44.0 ± 1.0	K/Ar	Wandji et al., 2008
	Rhyolite (North)	45.5 ± 1.		
	Basalt (South)	0.57 ± 0.07		
Pouolom	Basalt	0.24 ± 0.08		
Ngaouderé	Trachyte	11.39 ± 0.03	Ar/Ar	Marzoli et al., 1999
	Trachyte (Nghanha)	49.8 ± 0.2	K/Ar	Gouhier et al., 1974
	Mugearite (Wakwa)	0.91 ± 0.06	K/Ar	Temdjim, 1986
	Hawaiite (Biskedje)	6.50 ± 0.20	K/Ar	Temdjim, 1986
	Basalt (Anloa)	10.61 ± 0.70	K/Ar	Oustrière, 1984
	Basanite	<11	Ar/Ar	Marzoli et al., 2000
Mayo Darle	Rhyolite	67 ± 7	Rb/Sr	Nguene, 1982
Biu Plateau	Basalt and Basanite	5 ± 35 - 0 ± 84	K/Ar	Grant et al., 1972
Sabongari	Trachyte	56.75 ± 0.28	Ar/Ar	Njonfang et al., 2018
Nana	Trachyandesite	49.31 ± 0.40	Ar /Ar	Njonfang et al., 2018
Kokoumi (Fossé Garoua)	Basalts	39.7± 0.9 - 34.8 ± 0.8	K/Ar	Moreau et al., 1987
	Trachyte	37.6 ± 0.6		

Lieu	Roches	Âges (Ma)	Méthodes	Références
	Rhyolite	36.8 ± 0.9		
Benue valley	Basalt	39.7± 0.9-34.8± 0.8	K/Ar	Montigny et al., 2004.
Guenfalabo	Trachyte	68 ± 1.7	K/Ar	Ngonge et al., 2014
	Basalt	62 ± 2	K/Ar	
Nlonako	Rhyodacite	43.3 ± 0.3	Rb/Sr	Lassere, 1978
Roumpi	Trachy-basalts	9.37 ± 0.7	K/Ar	Nkoumbou, 1990
Kapsiki	Rhyolite	29 - 32 ± 0.25	K/Ar	Dunlop, 1983
	Trachyte	35.31 ± 2.39		
	Basalt	33.21 ± 1.33		
	Trachyte	29.60 ± 0.60		Vincent and Armstrong,1973
	Basalt	27.40 ± 0.50		Vincent and Armstrong,1973
Tchabal Gangdaba	Picrobasaltand Basanite	25.1 - 29.2 ± 0.7	K/Ar	Itiga et al., 2013
	Rhyolite	32.6 - 34.4 ± 0.80		
Oku	Mugearite	23	Ar/Ar	Marzoli et al., 1999
Sabga	Rhyolite	23,3 ± 0,5	U/Pb	Tibang et al., 2017.
Mt Cameroun	Basalts	Récent	K/Ar	Ngounouno et al., 2006
Bioko	Basalts	Récent	K/Ar	Caen-Vachette et al., 1987
Principe	Basalts	31	K/Ar	Lee et al., 1994
São Tomé	Trachyte	13	K/Ar	
Pagalu	Basalt	4.8	Ar/Ar	
Tchanda Bororo	Alkali Basalt	0.40 ± 0.06	K/Ar	Wotchoko et al., 2005
Manengouba	Hawaiite	9.37 ± 0.05	K/Ar	Poulet et al., 2014
Baré	Basalt	30	K/Ar	Tchoua, 1974
Nkongsamba	Basalt	1.55 ± 0.1	K/Ar	Gouhier et al.,1974
Njinjo	Basanite	0.40 ± 0.04	K/Ar	Fitton et Dunlop, 1985
Ndoungué	Basalt	0.94 ± 0.06 - 0.48 ± 0.29	K/Ar	Fitton et Dunlop, 1985
Ekoum-Nkam	basalt	0	K/Ar	Kagou et al., 2001
Elengoum	trachyte	0.7 ± 0.1		
Nkongsamba	hawaiite	0.2 ± 0.1		
Mbouroukou	mugearite	0		
Eboga		0		
Kirawa	Trachyte	51.18 ± 2.5	Rb/Sr	Okeke, 1980
Kirawa	Rhyolitic ignimbrite	45.5 ± 1.65	Rb/Sr	Dunlop, 1983
Tcheboa Murkimou	Trachyte	37.5 ± 0.6	K/Ar	Ngounouno et al., 2003
Hadjer el Kham (Chad)	Rhyolite	74.46 ± 13	U/Pb	Shellnutt et al., 2016
South lake of Chad	Rhyolite	69 ± 1,4	K/Ar	Vicat et al.,2002
Lake Chad	Peralkaline rhyolite	68.9 ± 1.4	K/Ar	Schroeter and Gear, 1973
	Peralkaline rhyolite	69.4 ± 0.4	Ar-Ar	Mbowou et al., 2012

Annexe 2. Compilation des âges de quelques complexes anorogéniques de la Ligne du Cameroun.

Locations	Nature	Âges (Ma)	Méthodes	Références
	Gabbro	20± 0,5	Rb/Sr	
Kokoumi	Syenite	39 ± 0,5	Rb/Sr	Ngounouno (2013)
Bana	Biotite granite	30	Rb/Sr	Lasserre (1978)
	Afvedsonite granite	51 ± 1	Rb/Sr	Caen-Vachette et al (1991)
	Gabbro	49 ± 2	Rb/Sr	
Tchegui	Syenite	37 ± 1	Rb/Sr	Lasserre (1978)
	Monzonite	33 ± 1	Rb/Sr	
Nana	Microdiorite	52,32 ± 0,56	⁴⁰ Ar / ³⁹ Ar	
	Trachyandesite	49,31 ± 0,40	⁴⁰ Ar / ³⁹ Ar	Njonfang et al (2018)
Koupe	Syenites	53-50 ± 1	Rb/Sr	Lamilen et al (1994)
Sabongari	Granite	49±2 ; 54±2	Rb/Sr	Lasserre (1978)
	Peralkaline granite	57,70 ± 0,44	Ar/Ar	Njonfang et al (2018)
Boutou	Monzonite	60 ± 2	K/A	Jacquemin et al (1982)
	Granite	52 ± 2	K/Ar	Parson et al (1986)
	Granophyres	67 ± 7	Rb/Sr	Kamgang, (1986)
Nkogam	Granites	66 ± 2	Rb/Sr	Caen-Vachette et al (1987)
	Syenogranites	47,88-48	U-Pb/zircon	This study
Golda-Zuelva	Granite	56±2 ; 67±2	K/Ar	Cantagrel et al (1978)
Nigo	Phlogopites	68±0,8	⁴⁰ Ar / ³⁹ Ar	Kamdem et al (2002)
Mayo-Darle	Syenite	73 ± 6	Rb/Sr	Nguene (1982)
	Granite	55	Rb/Sr	Nguene (1982)
	Granite	48,5 ± 2	K/Ar	Cantagrel et al (1978)
Roumpi	Gabbro	145 ± 4,5	K/Ar	Nkoumbou (1990)

Annexe 3.

Communications et article scientifiques tiré de ce travail

- Communications scientifiques

1- **Kenzo, H.A., Tchouankoué, J.P., Njonfang, E., Kamgang P., Tchaptchet Tchato, D.P., Mouafo, L., 2019.** Température de cristallisation des roches plutoniques felsiques du massif de Nkogam (Ouest-Cameroun) : Données préliminaires sur leur chronologie de mise en place. Geoscience colloquium University of Yaoundé I, Cameroun 04-07 Décembre

2- **Kenzo, H.A., Metang, V., Segue, W.S., Tchop, L.J., Mouafo, L., Tchouankoué, J.P., Njonfang, E., Kamgang P., 2021.** Relations between structural geomorphology and lithology in the Nkogam plutovolcanic complex (Cameroon Line). 3^{ème}CAG, Dschang, Cameroun 8-11 Decembre.

- Article scientifique

1- **Kenzo, H.A., Metang, V., Segue, W.S., Tchop, L.J., Mouafo, L., Nkamga Mbakam, D.M., Tchouankoué, J.P., Njonfang, E., Kamgang P., 2022.** Relations between structural geomorphology and lithology in the Nkogam plutovolcanic complex (Cameroon Line). Arabian Journal of Geosciences 15, 872.



Relations between structural geomorphology and lithology in the Nkogam plutovolcanic complex (Cameroon Line)

Henri Appolinaire Kenzo¹ · Victor Metang¹ · Willy Stephane Segue¹ · Legrand Joseph Tchop² · Lucas Mouafo¹ · Diane Marilyn Nkamga Mbakam¹ · Jean Pierre Tchouankoué¹ · Emmanuel Njonfang³ · Pierre Kamgang¹

Received: 29 November 2021 / Accepted: 20 April 2022
© Saudi Society for Geosciences 2022

Abstract

Brittle deformation and geomorphological studies were carried out to better understand the morphostructure and spatial distribution of rocks of the Nkogam anorogenic complex, located between 5° 35' 52" and 5° 47' 20" N and 10° 37' 16" and 10° 48' 37" E. The objective of this study is to correlate the distribution of the main petrographic units with the orientations of major regional fractures and understand the shape of the Nkogam massif. The methodology used to enhance the quality of the images and the extraction of lineaments are pre-processing and processing, performed with Erdas Images 2014. The data used are SRTM and Landsat 8 OLI images acquired by satellites on December 29, 2018. The results highlight a U-shaped form and a central depression that opens to the SW. Major lineaments directions are NE-SW and ENE-WSW which are respectively similar to that of the Cameroon Line and Central Cameroon Shear Zone. However, a fault corridor oriented N170°E cuts across massive basalts, ignimbrites, and granites. The emplacement of all the rocks in the field indicates the following relative chronology: older Pan-African gneissic basement, plateau basalts, granites, syenogranites, ignimbrites, and massive basalts. Granites and syenogranites, then ignimbrites and basalts, cut through the Pan-African basement in three mountain ranges among which two are roughly parallel, one oriented NNE-SSW and the other oriented NE-SW. All these directions locally represent the N070°E-trending Adamawa shear zone on a regional scale. Volcanites overlap plutonites at the northeastern end of the Nkogam anorogenic complex giving the U-shaped form to the massif. This study helps to understand the subcircular shape of the Nkogam massif bearing a central depression and the major directions of the lineaments in order to compare them to similar massifs along the Cameroon Line and elsewhere.

Keywords Volcanic and plutonic morphology · Nkogam massif · Cameroon Line

Introduction

Geomorphology describes and attempts to explain the forms of the earth's relief. Tectonics and erosion are mainly responsible for the morphology of the relief. The erosion speed depends on the lithology and climate. The

morphology of most massifs shows interactions between tectonics, erosion, lithology, and climate, according to the volume and arrangement of materials. The drainage network of rivers is not left out. The mapping and analysis of structural lineaments are an important component to understand regional tectonics (Akame et al. 2014). Lineaments are linear or curvilinear structures often associated with geomorphologic features and/or various tectonic structures (El Hadani 1997; Abou'ou ango et al. 2021). The Cameroon Line (CL), about 1600 km long and 100 km wide (Tchoua 1974), is a succession of horsts and grabens stretching from Pagalu Island in the Atlantic Ocean to Lake Chad (Fig. 1a). It is a unique geological structure on earth that extends on the oceanic and continental crusts (Déruelle et al. 2007). The continental part includes both plutonic complexes and volcanic massifs; the oceanic part is entirely volcanic, made up of four islands (Bioko, Principe, São Tomé, and Pagalu)

Responsible Editor: Stefan Grab

✉ Victor Metang
metangvictor@yahoo.fr

¹ Department of Earth Sciences, Faculty of Science, University of Yaoundé I, P.O. Box. 812, Yaoundé, Cameroon

² Institute for Geological and Mining Research, P.O. Box. 370, Buea, Cameroon

³ Laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure, Université de Yaoundé I, B.P. 47, Yaoundé, Cameroon

and two seamounts, one between Bioko and Principe and the other between Principe and São Tomé (Burke 2001). Plutonic complexes are mainly granites or syenites, and at times intermediate and basic rocks (Njonfang et al. 1992, 2011). Volcanic rocks are mainly alkaline to transitional basalts associated with plutonic rocks. There are more than 60 plutovolcanic complexes along the CL, but only few have been studied (Kuepouo et al. 2006). The spatial arrangement of most magmatic manifestations remains controversial due to the morphology, relative chronology, and geometric relationships between the different petrographic units. The Nkogam massif (Fig. 1b) is a Tertiary massif (Caen-Vachette et al. 1987), emplaced in the Bamoun Plateau precisely in the south of the Fouban-Bankim high-temperature shear zone, about 10° 48'–11° 36' east and 5° 30'–6° 30' north (Njonfang et al. 1998). Geomorphologically, the massif displays a general U-shaped form (in view-plan) that opens to the SW, inconsistent with the reworking of Pan-African structures during the Phanerozoic (Moreau et al. 1987; Njonfang et al. 2011). The aim of this paper is to correlate the spatial distribution of the petrographic units to the orientations of major regional fractures, to better understand the shape of the Nkogam massif. In order to achieve this objective, the main work is to (i) generate from satellite images all the lineaments of the Nkogam massif, (ii) validate the different lineaments generated with field observations, (iii) identify the main petrographic units and establish their relative chronology, and (iv) ascertain the U-shaped morphology of the massif.

Geological context

Besides pioneer works (Fig. 1b) of Weecksteen (1957) and Dumort (1968) who drew the geological map at the scale of 1/500 000, Caen-Vachette et al. (1987) also studied the Nkogam massif. This study area is located between latitudes 5° 35' 52" and 5° 47' 20" North and longitudes 10° 37' 16" and 10°48' 37" East on the Bamoun plateau. Petrologically, Caen-Vachette et al. (1987) described the Nkogam massif as an alkaline plutonic complex (granites, granophyres, and granodiorites) and volcanic rocks (ignimbrites and basalts), and dated the granites and granophyres at 66 and 67 Ma (Rb/Sr age) respectively. These ages indicate the Cretaceous-Tertiary boundary that probably corresponds to the last plutonic events preceding the first fully alkaline volcanic activity of the CL dated at ca. 51 Ma (Moundi et al. 2007).

The Nkogam anorogenic complex cut through the Precambrian basement in the corridor of the N070°E striking Central Cameroon Shear Zone (CCSZ) (Fig. 1a) that extends from the Gulf of Guinea in Central Africa to the Red Sea. From Palinspatic reconstitutions, this zone is the prolongation into Africa of the Pernambuco Shear Zone of North East Brazil, before the opening of the South Atlantic Ocean during the Mesozoic (Brito Neves et al. 2002; Van Schmus et al. 2008). Brittle deformation in the southern continental part of the CL reveals N070°E, N135°E N030°E, N180°S and N090°E are the main directions of

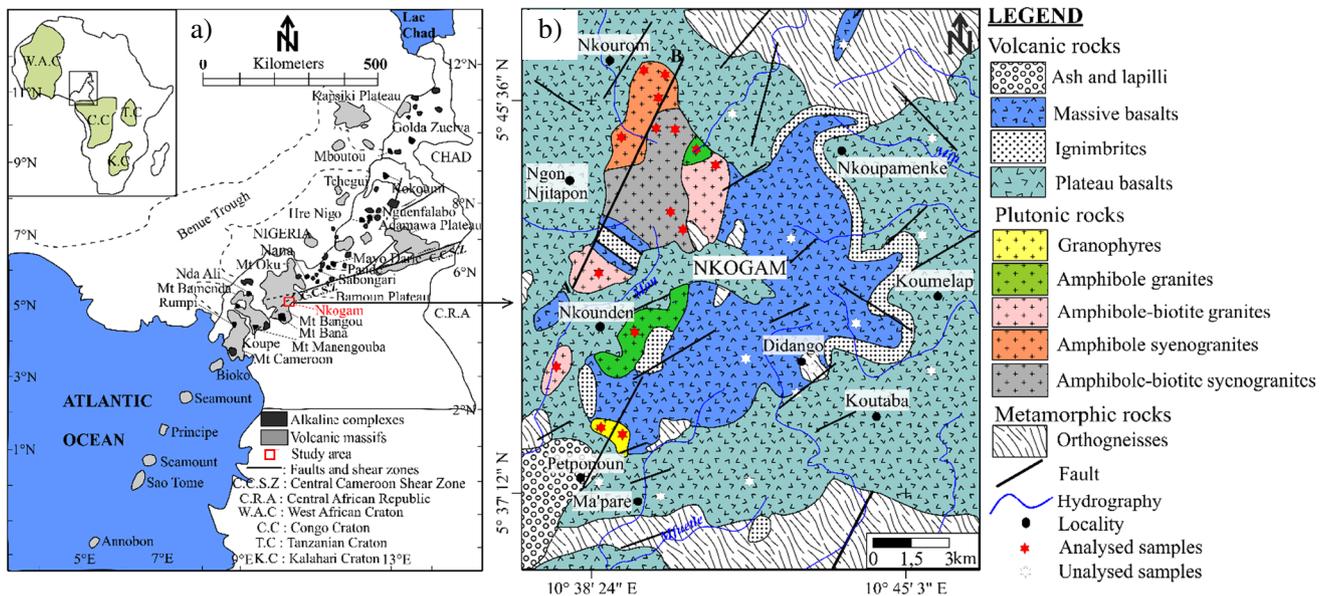


Fig. 1 Location and geology of the Nkogam anorogenic complex. **a** Location of the Nkogam complex in the Cameroon Line (Njonfang et al. 2011) and location of Cameroon in Africa and Africa Cratons as inset. **b** Geological map of the Nkogam complex extracted and modi-

fied from the Douala East (Weecksteen 1957), Douala West sheets (Dumort 1968) of the reconnaissance geology map of Cameroon and the Central Cameroon Shear Zone (CCSZ)

major lineaments; their spatial arrangement is consistent with a Riedel fractures model originating from dextral shearing movement along the CCSZ (Simeni et al. 2017). In such a configuration, the NNE-SSW to NE-SW direction of the CL corresponds to σ_3 stretching direction (Fig. 2). This argument is compatible with the tectonic model of Moreau et al. (1987), which suggests that the CL corresponds to a N030°E trending tension gashes along Pan-African paleosutures originating from the reactivation of Precambrian structures.

Methodology

This work permits to establish the lineament map of the study area in two main phases: first in the laboratory and then in the field.

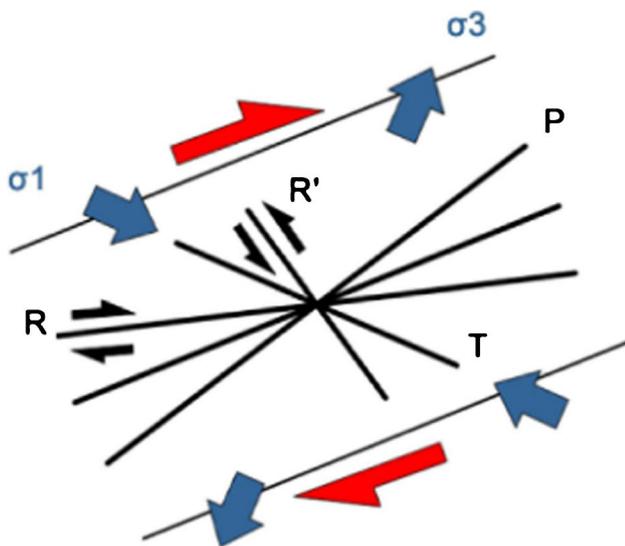


Fig. 2 Riedel fracturation model for the southern continental part of the Cameroon Line. T=N115°, R'=N145°, R=N85°; σ_1 =N135°, σ_3 =N45°, P=N55°. T, tension gashes; R and R', conjugate shear faults; P, symmetrical to R; σ_3 and σ_1 , tensional stress axes (Simeni et al. 2017)

In the laboratory

The data used to produce the lineament map come from the Bafoussam 4a topographic map (scale 1/50000) from the National Geographic Institute of Cameroon of 1973 and published in 1974. SRTM and Landsat 8 OLI images also used were acquired by the satellites on December 29, 2018, and downloaded from: www.earthexplorer.usgs.gov. They were georeferenced to the WGS 84_UTM_Zone 32 N projection system and only the bands with 30-m resolution were used. The methodology used to enhance the quality of the images and the extraction of lineaments are pre-processing and processing, both performed with Erdas Images 2014.

Pre-processing

Pre-processing aims at reducing or eliminating noises, disturbances, or even atmospheric effects present in an image during its acquisition by satellites (Javhar et al. 2019). This method improves the contrast of those images and facilitates their interpretations.

Processing

During the processing phase, three techniques were used: principal component analysis (PCA), color compositions and directional filtering (CCDF). PCA is a linear transformation technique used to reduce highly correlated multidimensional (multispectral) data for effective geological interpretations (Aouragh et al. 2012). It gives the best combination of independent bands from Landsat 8 OLI images for lineament extraction. The color composition technique assigns red (R), green (G), and blue (B) on the initial image to optimize visual analysis. The CCDF plainly discriminates between geological features and vegetation, facilitating visual distinction of lineaments (Takodjou et al. 2016).

The application of Sobel's 7x7 directional filters (Table 1) of the pre-processed images better enhances the discontinuities corresponding to structural lineaments (Yao

Table 1 Sobel filter matrices

0	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	0	1	1	1	2	1	1	1	-1	-1	-1	0	1	1	1
-1	0	2	2	2	3	1	1	3	2	2	2	0	-1	1	1	2	3	2	1	1	-1	-1	-3	0	2	1	1
-1	-2	0	3	4	2	1	1	2	4	2	0	-2	-1	1	2	3	4	3	2	1	-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-2	-3	0	3	2	1	1	2	3	0	-3	-2	-1	0	0	0	0	0	0	0	-2	-3	-4	0	4	3	2
-1	-2	-4	-3	0	2	1	1	2	0	-3	-4	-2	-1	-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1	-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-3	-2	-2	-2	0	1	1	0	-2	-2	-2	-3	-1	-1	-1	-2	-3	-2	-1	-1	-1	-1	-2	0	2	1	1
-2	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1
Filtre 7X7 NE-SW de SOBEL							Filtre 7X7 NW-SE de SOBEL							Filtre 7X7 N-S de SOBEL							Filtre 7X7 E-W de SOBEL						

et al. 2012). These filters highlight the lineaments perpendicular to their convolution directions.

Lineament extraction

The Geomatica 2012 software was used for the automatic extraction of lineaments. Then, the lineaments were overlaid on the road network map to extract anthropogenic related lineaments. Line segments represent discontinuities and abrupt tonal changes. After extracting anthropogenic related lineaments, the final lineaments reflect the geological discontinuities. A simplified pattern of this methodology is given in Fig. 3.

On the field

Field investigations in the Nkogam massif focused on the detailed lithostructural analysis of outcrops. Petrographic observations enlightened the lithology. The structural measurements collected during field campaigns led to the interpretation and validation of the geological structures (lineation and fractures) mapped using satellite imagery.

Results

The overall processing on the Landsat 8 OLI image improved the contrast of the image, highlighted the linear structures, and eased photo-interpretations. The identified lineaments are sporadically interrupted. Fieldworks highlighted outstanding features in the Nkogam massif and the gneissic basement.

Nkogam geomorphological units

The morphology of the Bamoun plateau shows massifs, plains, peneplains, basins, and valleys, shaped by the erosion and influenced by the escarpment of the Noun plain. The altitudes range from 1000 to 2335 m, with the Mbam massif (2335 m) and the Nkogam massif (2268 m) located east of the plateau. The Nkogam massif presents three mountain ranges, among which two are roughly parallel, one oriented NNE-SSW and the other oriented NE-SW (Fig. 4). The disposition of these ranges gives a complex morphology with an annular shape (horseshoe shape) northward; the Mou River springs in the Nkogam complex and flows on basalts. A large depression in the center of the massif opens to the SW. From the altitudes, the digital terrain model (DTM) reveals three different major morphological units (Fig. 5):

- Unit below 1300 m high: that is the extension of the Bamoun plateau made up of alluvial plains and drained valleys whose main collector is the Noun River, which carries weathering products. The rocks of this unit are plateau basalts at Nkounden and Koupamenké, and gneisses at Nkourom and Didango.
- Unit between 1300 and 1750 m high includes forest galleries and drained or undrained talwegs; the rocks are granites, ignimbrites, and massive basalts at Nkounden, and massive basalts at Koupamenké.
- Unit above 1750 m high located in a NNE-SSW direction: the unit consists of rounded summits or hills; the rocks are granites, syenogranites, and a massive basalt cap.

Fig. 3 Simplified pattern of the methodology

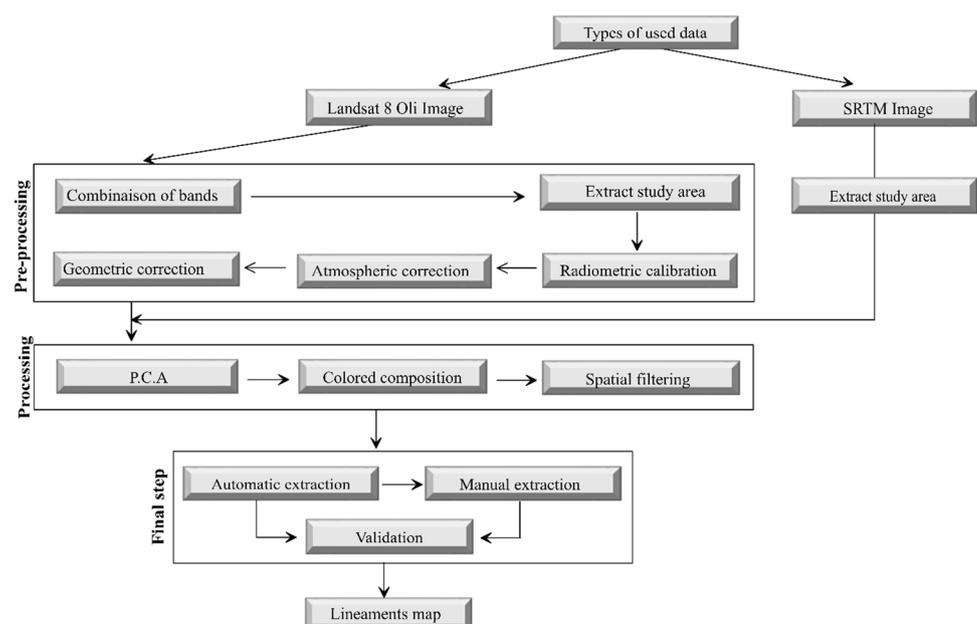


Fig. 4 Map of morphological units of the Nkogam Massif and its surroundings based on the SRTM image

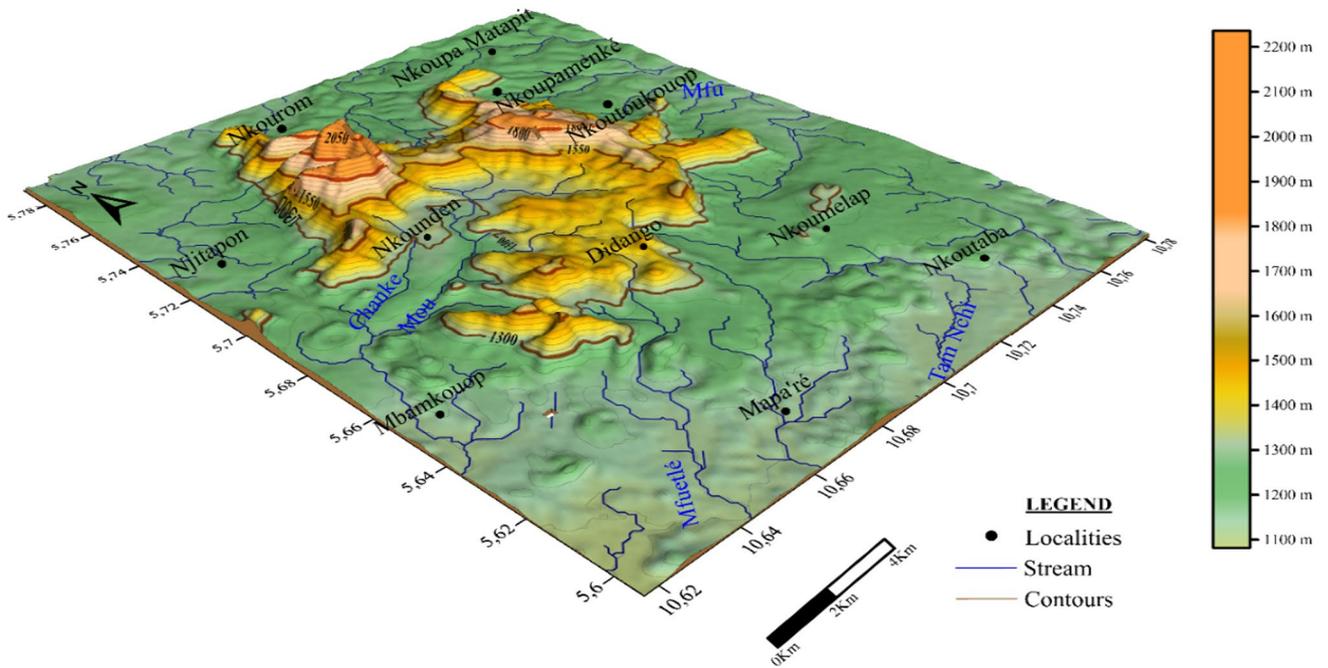
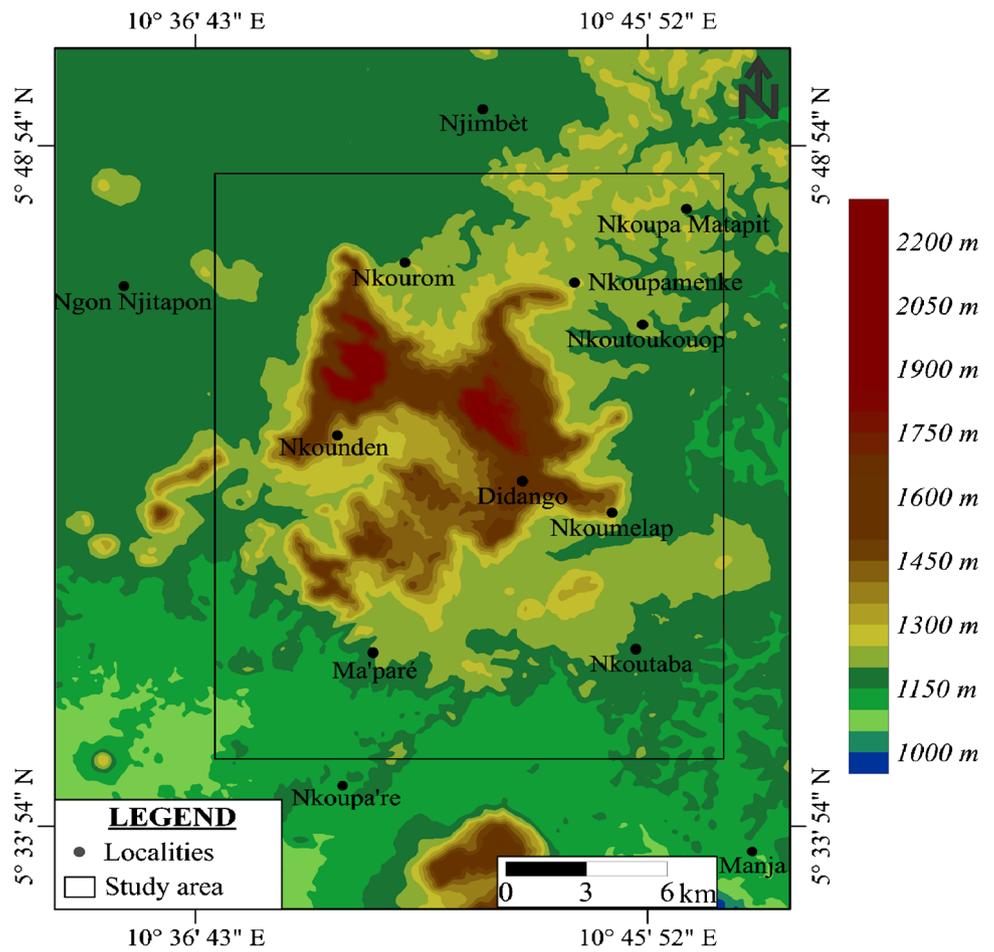


Fig. 5 Block diagram (DTM) of the Nkogam massif and its surroundings based on the SRTM image

In general, the Nkogam massif begins in the NNE at about 1000 m high at Nkourom and rises to a peak at 2268 m at Gon-Njitapon. It then declines to the SSW and reaches Nkounden at 1100 m. U- and V-shaped valleys are arranged symmetrically in relation to a major N-S direction. Like other massifs in the area, plateau basalts and the Pan-African gneissic basement surround granite and syenogranite intrusions, ignimbrites, and massive basalts.

Nkogam lineaments

The processing of Landsat 8 OLI and SRTM images resulted in the images in Figs. 6 and 7 and the lineaments in Fig. 8. A statistical analysis of the lineaments identified 268 multidirectional linear features on the map (Fig. 8). The length of lineaments varies from 1.065 to 15.911 km with an average of 3.26 km. The total length of mapped lineaments is 1162.92 km. These sizes spread in many orders of magnitude indicating the geological heterogeneity of rocks. A major lineament oriented N-S (15.911 km in length) is observed in the east of the area. Between the Njimbèt and Nkoupa're localities, the lineaments with

Fig. 6 Landsat Images after Sobel filtering

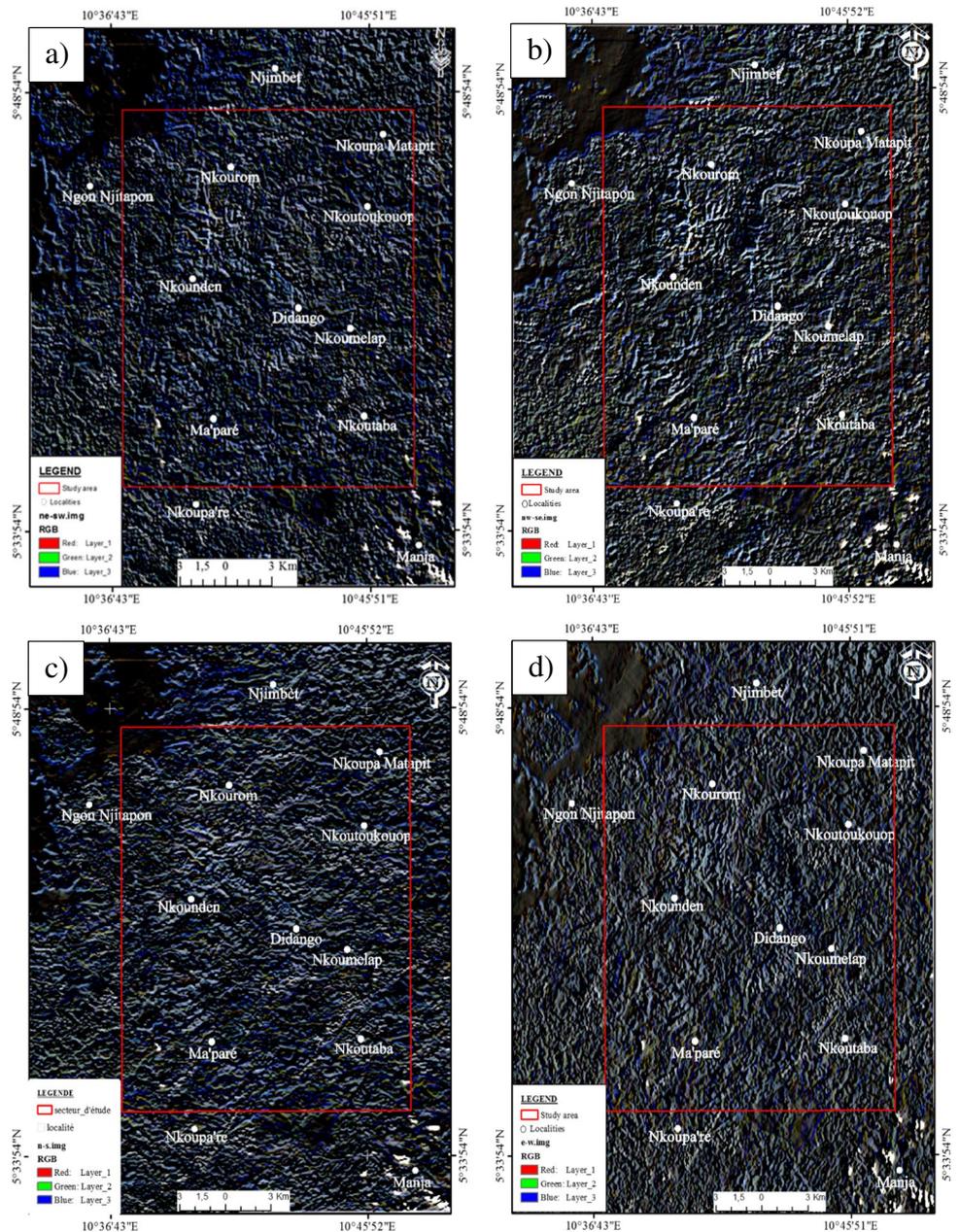
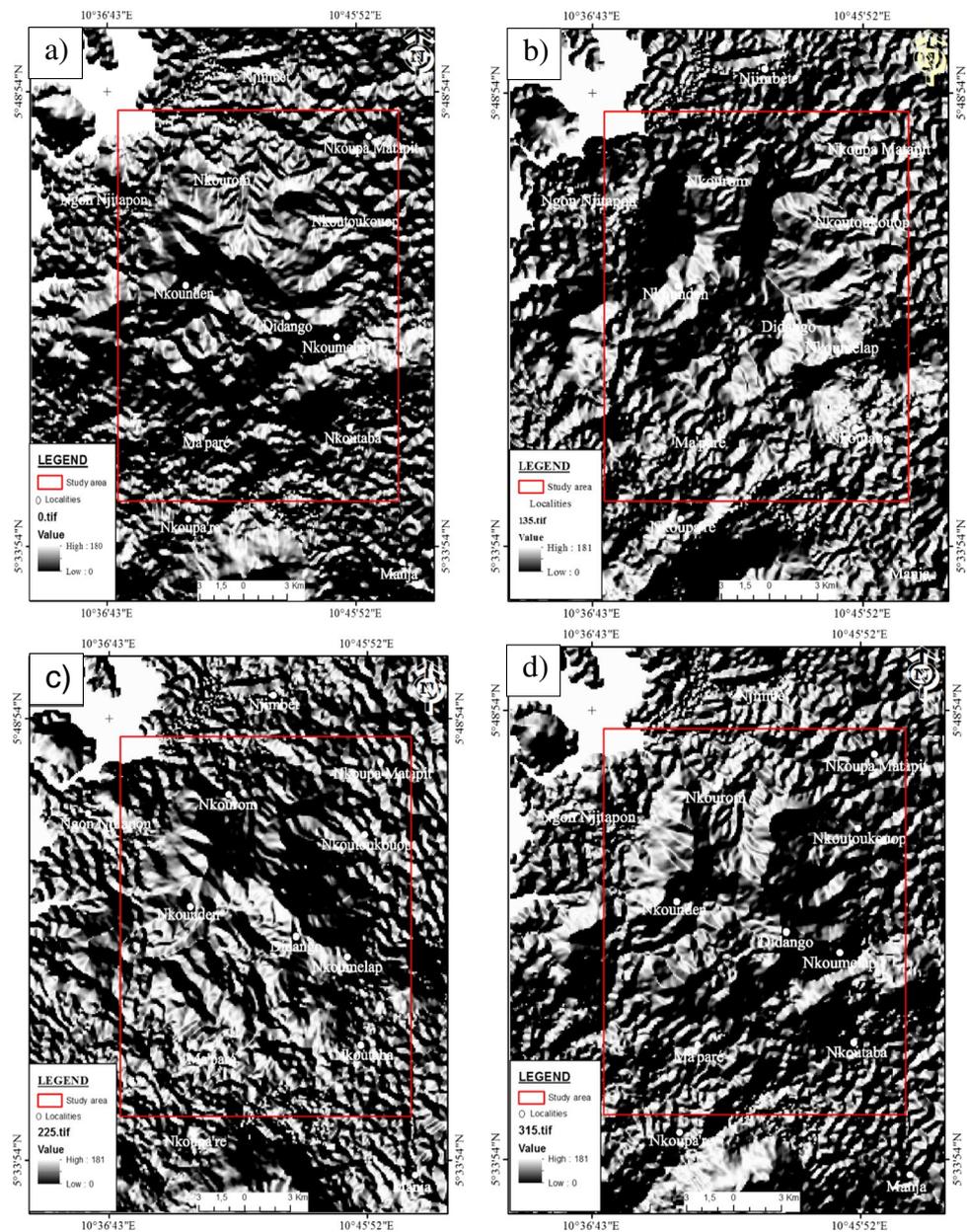


Fig. 7 SRTM satellite image filtered by the Sobel method along the directions **a** N0°, **b** N135°, **c** N225°, and **d** N315°



a major NNE-SSW direction are sub-parallel to the CL. The histogram (Fig. 9a) shows more than 250 lineaments below 7 km long, 16 between 7 and 11.457 km and 2 above 11.457 km, grouped into 18 directional classes of 10° intervals. The major directions are N045°E and N065°E in the rose diagram (Fig. 9b). The N005°E, N030°E, N075°E, N095°E, N115°E, N165°E directions, with frequencies below 6%, are less significant. These orientations reflect a background noise from the variability of each family and geological accidents that look like depression lines (talwegs). The synthesis of the above results is given in Table 2. The crest lines are multidirectional and the two main directions are NE-SW and NW-SE (Fig. 10a and b). Besides, there are peaks with curved ridgelines

with concavity facing west. In general, the relief is not homogeneous.

Petrography of Nkogam massif

The Nkogam complex consists of volcanic (basalts and ignimbrites) and plutonic rocks (syenogranites and granites) that cut through a gneissic basement of the Pan-African age. Caen-Vachette et al. (1987) presented the petrography of these rocks. Nevertheless, to better understand the relationship between the different types of rocks studied, it is necessary to give their brief description.

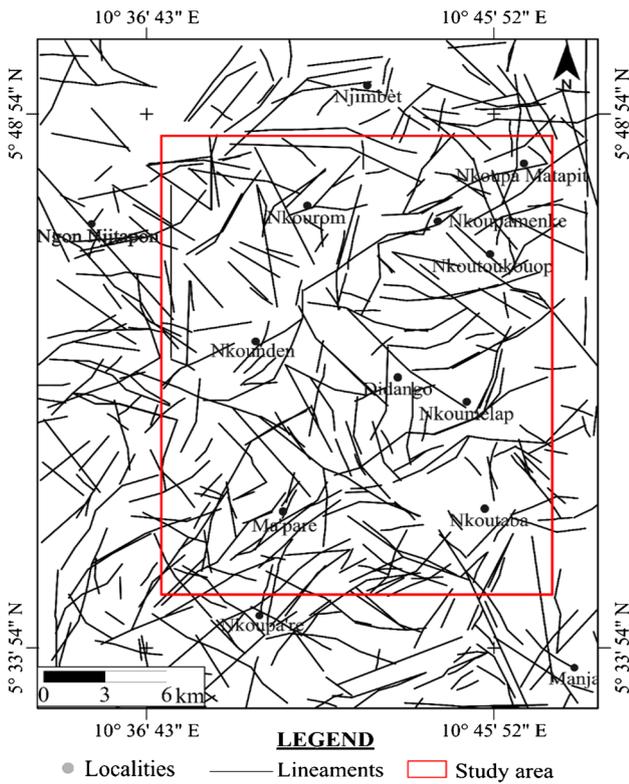


Fig. 8 Linear map of the Nkogam massif and its surroundings

Volcanic rocks

The Nkogam volcanic rocks are ignimbrites and basalts. Ignimbrites outcrop in balls along trenches at Nkoupamenké, Kounelap (Fig. 11a), Nkounden, and the eastern

and northern edges of the massif. Lithic fragments (plateau basalts, granites, and gneisses), in ignimbrites, are derived from the walls of the conduit or the bedrock during the eruption (Fig. 11b and c). Ignimbrites are the first volcanic manifestations displayed in the NE-SW and located at the eastern part of the complex. They are under massive basalts that outcrop in domes at Nkounelap and as veins in ignimbrites (Fig. 11d) at Nkoupamenké. Plateau basalts surround the rocks but they do not belong to the Nkogam complex.

Plutonic rocks

The plutonic rocks are alkaline granites and syenogranites. These granites (amphibole granites, amphibole, and biotite granites) outcrop at Petponoun and Nkounden. Biotite and amphibole granites outcrop in plutons (Fig. 12a) and amphibole granites in blocks. Syenogranites outcrop in blocks at Njitapon, and in blocks and slabs at Nkourom (Fig. 12b).

Basement rocks

The basement rocks are mainly gneisses and amphibolites. Gneisses outcrop in slabs in the Bororos Township at Nkounden and Didango (Fig. 13a) much more localized along streams on the slopes of the Nkogam massif. The largest outcrop is up to 100 m and the smallest, up to 10 m, all in the direction of flow. The structural feature of these gneisses is a vertical foliation intersected by diacalse planes in several directions. The sample shows quartz, feldspar, and ferromagnesian minerals. The amphibolites outcrop in prisms (Fig. 13b) or in blocks in metric to decametric thick fracture corridors oriented NE-SW to E-W.

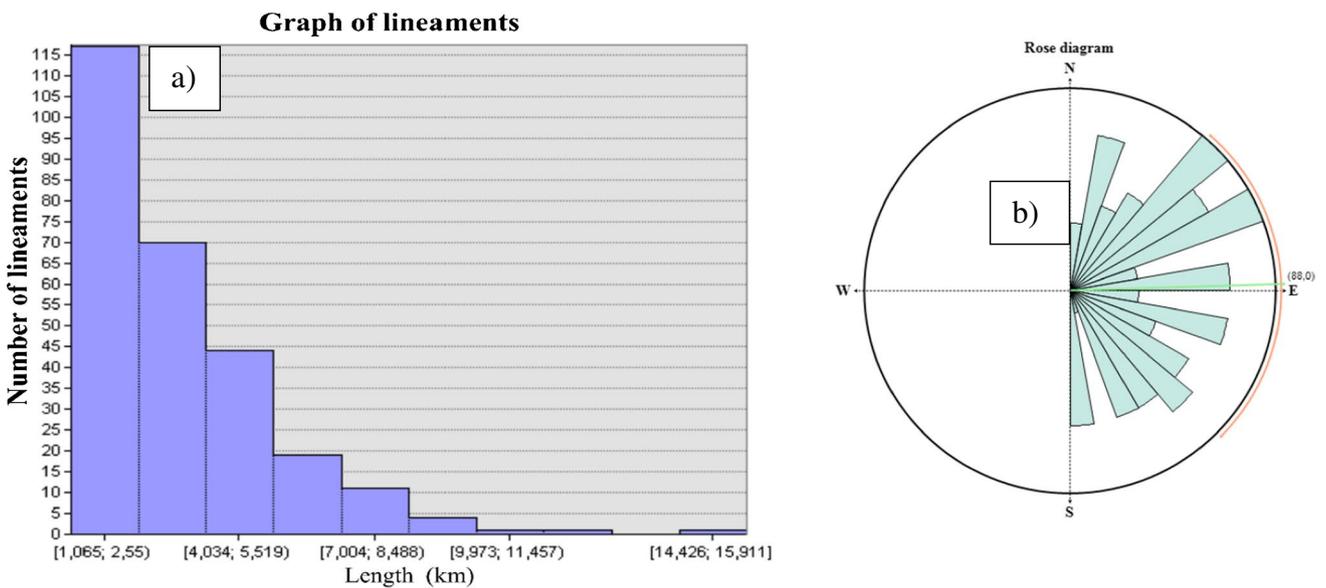


Fig. 9 a Histograms of distribution and lineaments grouped in classes; b Rosette of lineament directions extracted from satellite images

Table 2 Summary of the calculation results showing the orientation distribution of the lineaments in the study area

Notation	Angle (°)	Direction	Number of lineaments	Length min OF lineaments (km)	Length max of lineaments (km)	%
1	00–30	NNE-SSW	39	1.09	7.21	14.55
2	30–60	NE-SW	56	1.08	11.56	20.89
3	60–90	ENE-WSW	49	1.06	7.96	18.28
4	90–120	ESE-WNW	37	1.07	15.91	13.80
5	120–150	SE-NW	52	1.08	7.20	19.40
6	150–180	SSE-NNW	35	1.12	8.89	13.05
Total			268			100

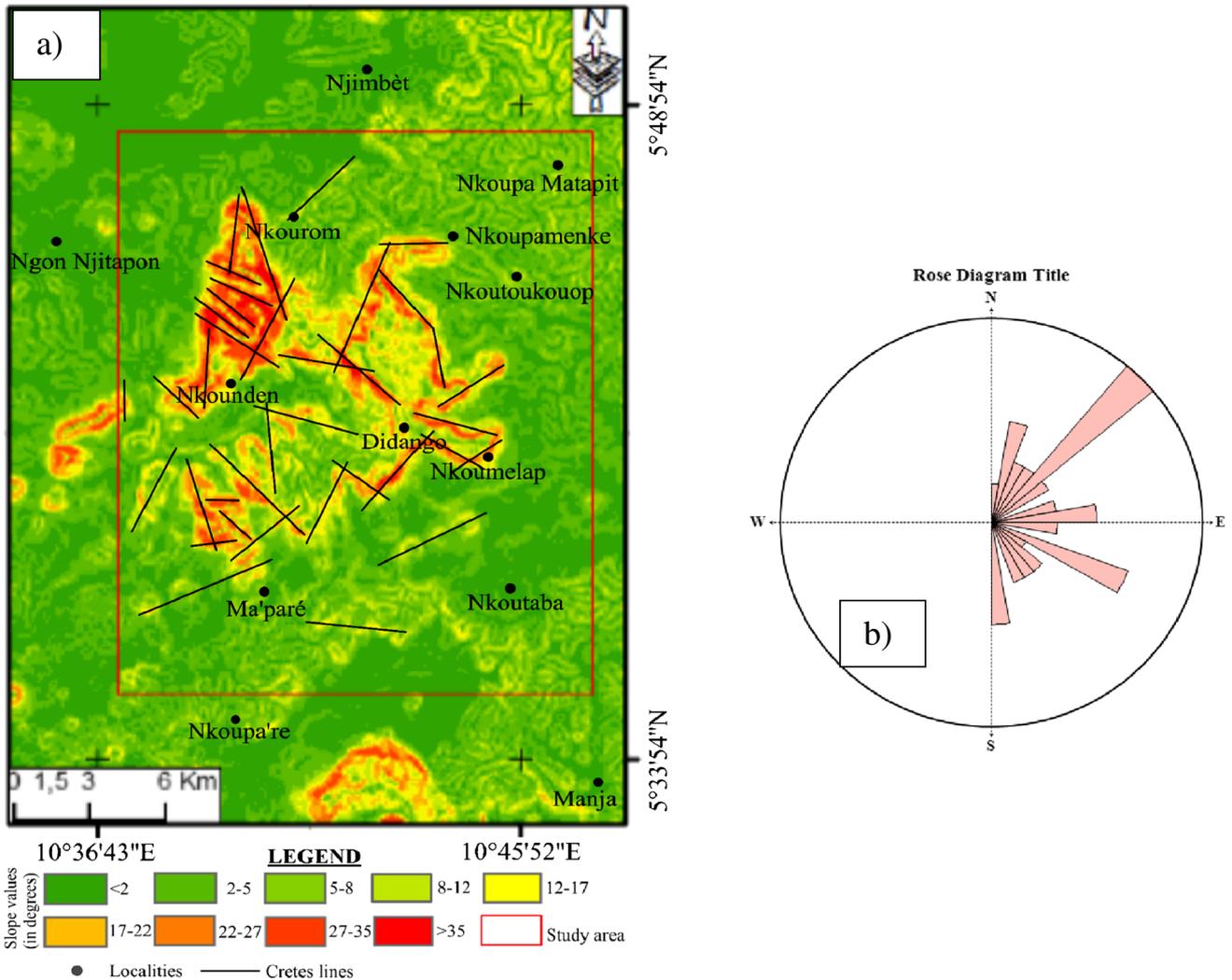


Fig. 10 Map of the slopes of the Nkogam massif and its surroundings extracted automatically from the SRTM image

Analysis and significance of lineaments

Most lineaments identified by remote sensing are visible in the field. Those oriented NE-SW and ENE-WSW are consistent with those highlighted on geological maps (Fig. 1b). From their analysis, lineaments are seams, diaclases, faults,

ridgelines, and erosion depression lines. Dry fractures or diaclases cut through all the formations in various directions, the major direction being NE-SW (Fig. 12c). On the ESE slope of the Nkounden hill, striations (Fig. 14a) and pseudotachylites (Fig. 14b) indicate the presence of faults in basalts. At Nkounden, the amphibolite outcrop

Fig. 11 Outcrops and micro-photographs of ignimbrites: **a** Trench at Koumelap. **b** Enclaves with microliths and brown products. **c** Granite enclaves. **d** Veins in ignimbrites at Nkoupamenke

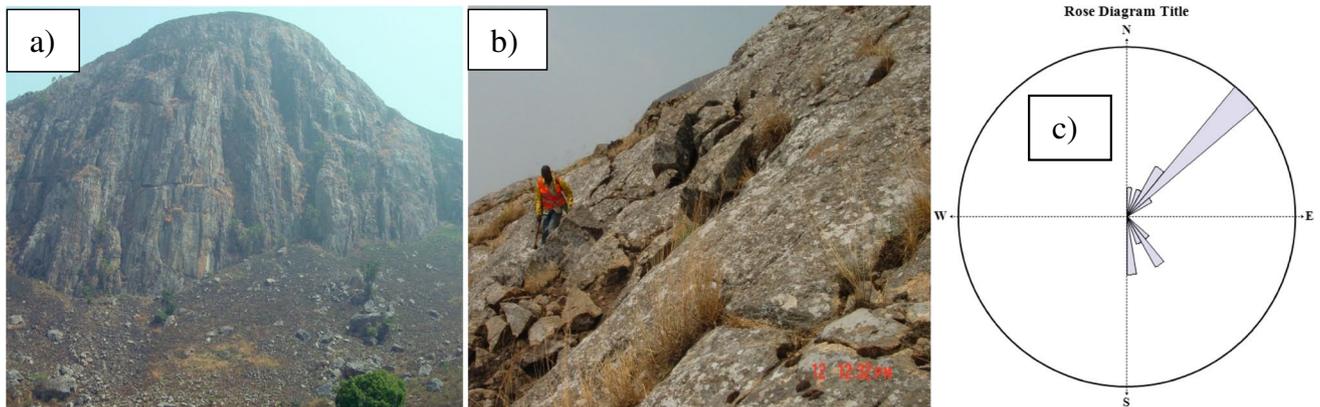
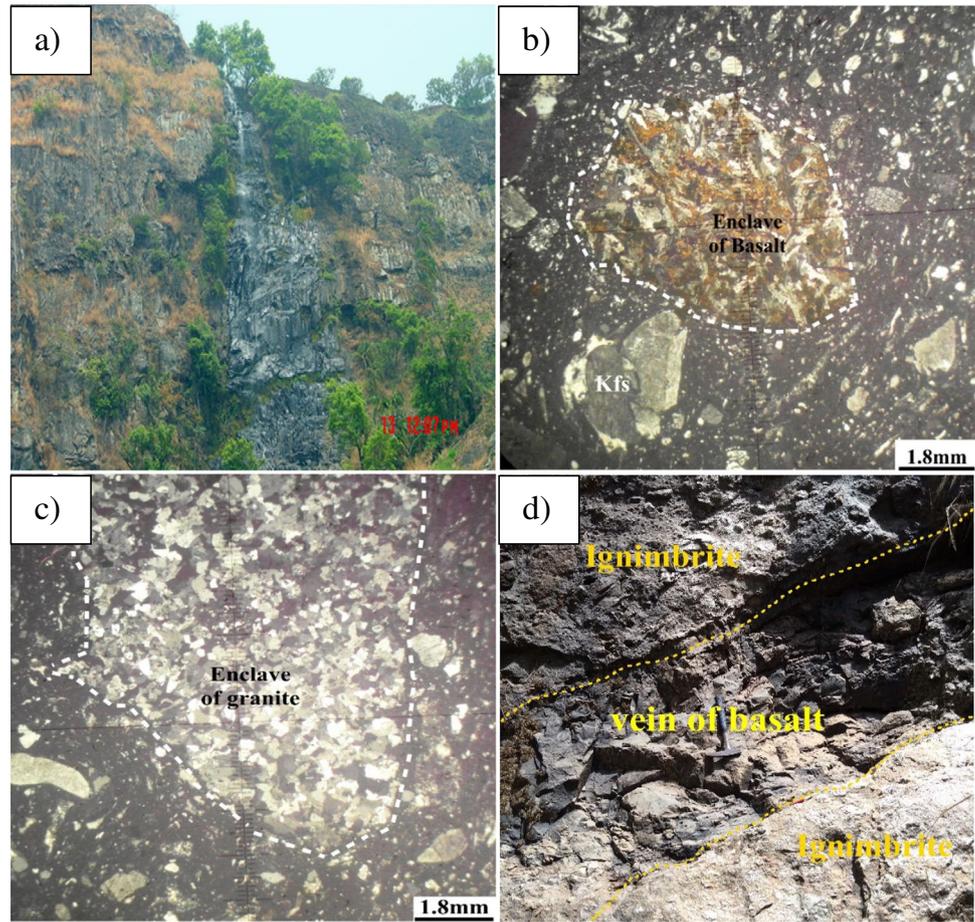


Fig. 12 Outcrops of alkaline granites and syenogranites: **a** Dome; **b** Syenogranite blocks at Nkounden and Nkourom. **c** Directional rosette of diaclasses obtained from the field data

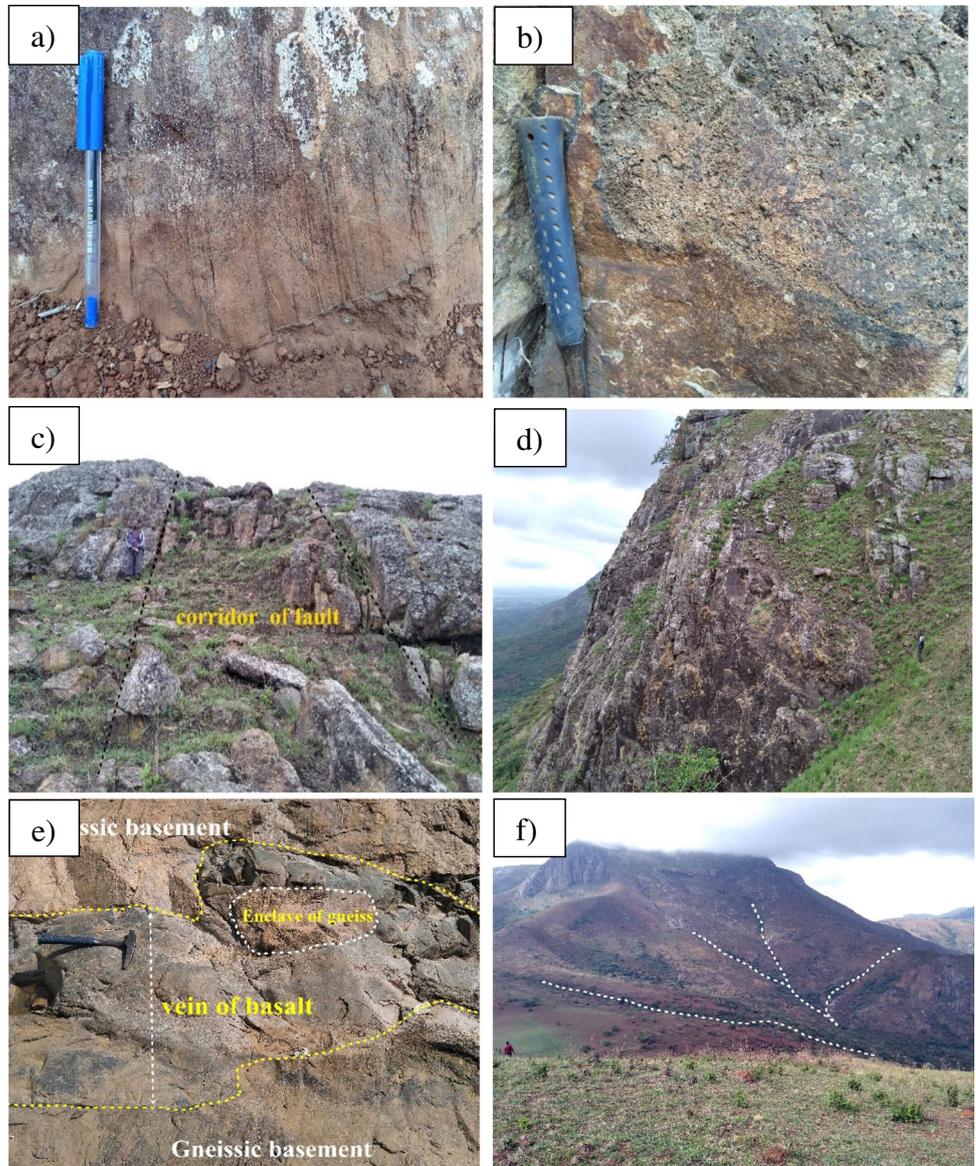
shows fractures oriented N180°E 64E to N162°E 65 ENE (Fig. 13b). Further downhill of this amphibolite outcrop, massive basalts are less fractured, indicating a deformation coupled with metamorphism towards more fractured amphibolites. This roughly N-S trending fracture pattern would correspond to the N-S lineaments observed by satellite

image processing at Nkounden. These N170°E-trending subvertical fault corridors cut through (Fig. 14c) adjacent rocks (basalts, granites, and ignimbrites). The minerals of granites remain unchanged, whereas in basalts, recrystallizations probably accompanied by intense fracturing led to the formation of amphibolites.

Fig. 13 Outcrops of gneiss and amphibolites. **a** Foliated gneiss slab at Didango. **b** Amphibolite prisms



Fig. 14 **a** Striations on massive basalts, **b** Pseudotachylite showing frictional melting at the interface between fault planes, **c** Fault corridor in Nkounden granites, **d** Diaclases in a granitic dome. **e** Basalt vein with a gneiss enclave. **f** V-shaped valley at Nkounden

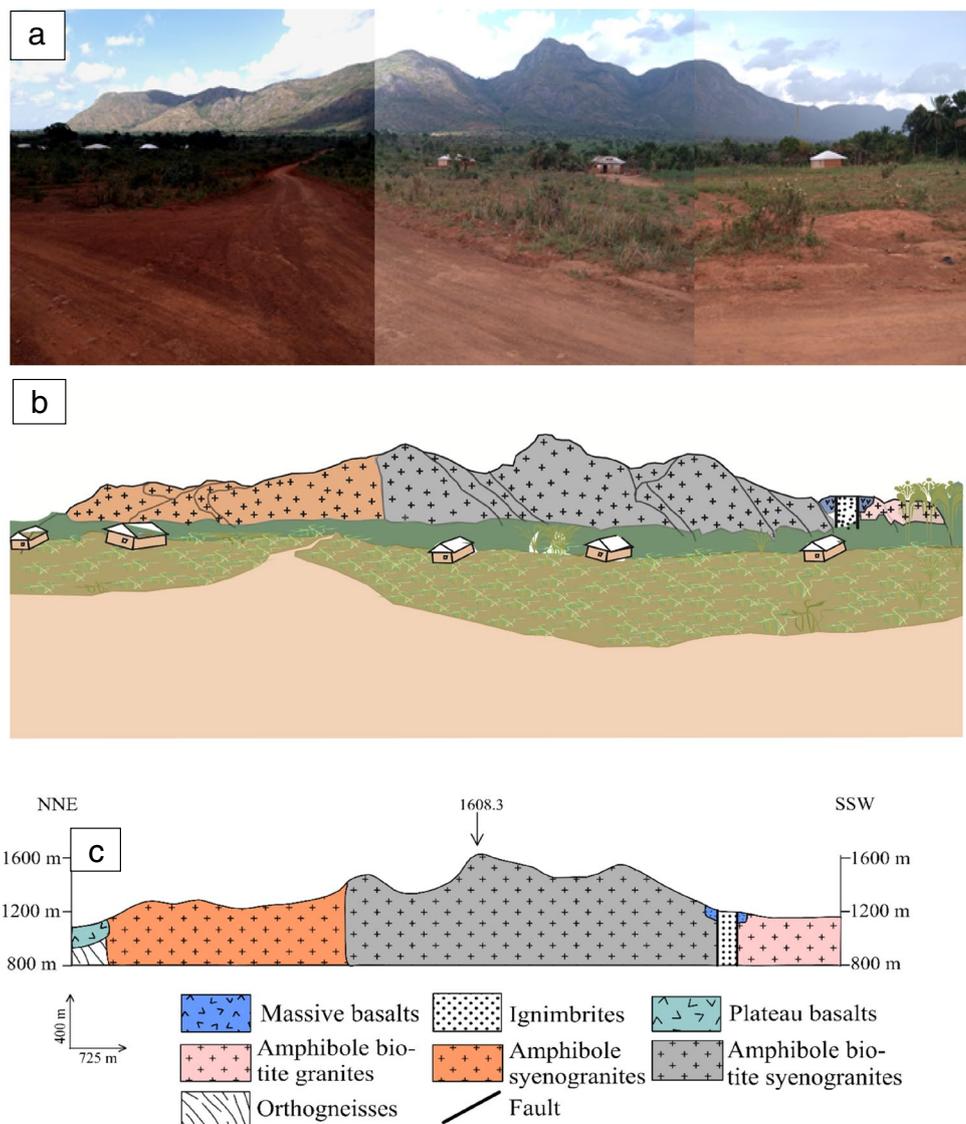


In places, subvertical diaclases on the hill flank, divide granites into metric-thick fragments (Fig. 14d), indicating the presence of a fault corridor. Also noteworthy, veins of plateau basalts cut through the gneissic basement; and the thickness of the largest vein can reach 80 cm (Fig. 14e). Lineaments, consistent with V-shaped valleys and created by runoff water, are mostly found on the hill flank (Fig. 14f). Crest lines are generally curved and irregular, in the case of the horseshoe shape at Nkoupamenké. The rose diagram of crest lines shows a major orientation N045°E (Fig. 10b) secant to the N070°E direction of the Central Cameroon Shear Zone. Along the Nkourom-Nkounden hillcrest line, syenogranites, massive basalts, ignimbrites, and granites outcrop successively from NNE-SSW to NNW-SSE-trending (Fig. 15a–c).

Geometry and relative chronology of petrographic types

The N142°E 42 SW major attitude and decimetric to metric thick basalt veins outcrop in ignimbrites at Nkoupamenké (Fig. 14e). Gneissic basement, granites, syenogranites, and debris of plateau basalts are enclaves in ignimbrites (Fig. 11b and c). Subvertical veins of plateau basalts cut through the Pan-African gneissic basement of foliation N032°E 70 ESE (Fig. 13a) in a preferential N100°E direction. Gneissic basement is also in enclaves in decimetric to metric thick basalt veins (Fig. 14e). This geometrical arrangement of all the Nkogam rocks in the field suggests the following relative chronology: older Pan-African gneissic basement with veins of plateau basalts, plateau basalts above the gneissic basement or often as debris in ignimbrites, then granites and syenogranites

Fig. 15 Nkogam massif: **a** Photograph of the western slope view from Ngon Njitapon; **b** Sketch photograph of the western slope showing limits of intrusions; **c** NNE-SSW geological section



intruding the gneissic basement and plateau basalts mainly in the western part of the massif, ignimbrites with enclaves and debris of all the other rocks except the massive basalts, and finally massive basalts whose veins cut through ignimbrites (Fig. 11d). A block diagram portrays this geometric disposition of rocks (Fig. 16a).

Discussion

The main results obtained in this study through remote sensing data, petrographic analysis, and structural interpretations of field observations provide new insights into the Nkogam Massif, which can be compared with previous works.

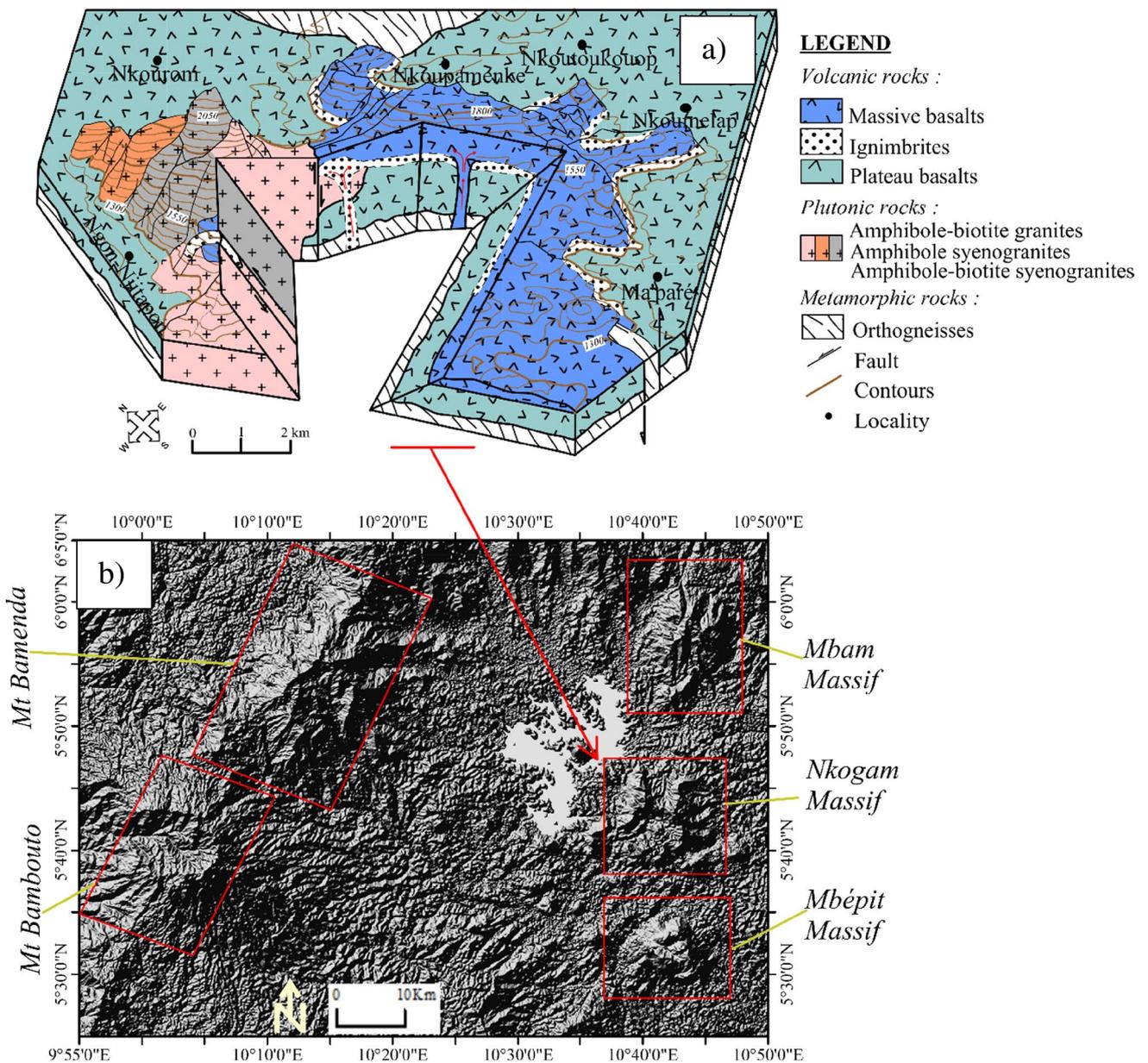


Fig. 16 **a** Block diagram showing the emplacement history of the Nkogam massif, **b** Digital terrain model showing the Bamounda and Bamenda mountains on the one hand and the Mbam, Nkogam, and Mbépit massifs on the other

Orientation of lineaments

Statistical analysis and observations of the lineament map compared with field data confirm the existence of structural elements (faults, diaclasses). The two major directions are NE-SW and ENE-WSW. The N045°E major orientation in the rose diagram of diaclasses (Fig. 12c) is subparallel to the NE-SW direction of the CL, and the N60°–70°E direction is parallel to the ENE-WSW direction of the CCSZ (Njonfang et al. 1998; Ngako 1991). These results are similar to those of Morin (1980) with a N55°–N60°E major fracture direction. Ziem et al. (2017) highlighted the same major fracture direction at Koutaba-Nkoumelap. Njonfang et al. (2018) observed similar ENE-WSW and N-S fracture directions in the Nana complex in the Tikar plain. The major NE-SW trending fractures in the Tertiary Bana igneous complex (Kuepouo et al. 2009) are consistent with the direction of the Nkogam diaclasses. Figure 16b shows the alignment of the Mbam, Mbépit, and Nkogam massifs is slightly oblique to the Mount Cameroon-Mount Bamenda axis. This alignment also indicates that the Nkogam massif belongs to the CL. The lineaments are irregularly distributed on the map. The sub-circular and distribution of depression lines and ridgelines explain the morphology of the massif. Morphostructures of the terrain guided stream alignments (Messi et al. 2014; Owona et al. 2012).

Emplacement context of the Nkogam massif

The Nkogam massif is Tertiary (Caen-vachette et al. 1987) as the Guenfalabo (Ngonge et al. 2014), Bana (Kuepouo et al. 2006), Sabongari (Njonfang et al. 2013) and Nana (Njonfang et al. 2018) massifs. Anorogenic magmatism includes plutonic and volcanic units that differ from other series by the alkaline richness, less water content, and setting context (Scaillet 2006). The anorogenic magmatism is well described in Cameroon (Njonfang et al. 2018), Nigeria (Girei et al. 2019) and Morocco (Boushaba 1990). The main rocks of these anorogenic complexes are basalts, ignimbrites, granites, and syenogranites. This geochemical and petrographic diversity reflects that of the source zones involved, and the parameters prevailing during the emplacement of the magma (Scaillet 2006). This author also suggests the emplacement of rocks by magmatic sequence in very near chambers (granitoids and basalts). Interlocking basic (basalts) and felsic (granites and ignimbrites) rocks coupled with a Tertiary age favor the anorogenic emplacement context of the Nkogam massif.

Influence of lithology on morphology

The lithological study consists of a macroscopic description of the various outcrops on the field and the spatial and

chronological relations between the various rock types (Dabo 2011). The geological map (Fig. 1b) shows the overlapping of the basement, plutonic and volcanic formations. The relief straddles the plutonic formations that intruded the basement and the volcanic formations that cut through the same basement. Certain circular structures of the CL translate the later organization of anorogenic complexes starting from the Cretaceous between 65 and 30 Ma, related to Younger Granites in Nigeria (Morin 2000). The Guenfalabo (Ngonge et al. 2014) and Ririwai (Girei et al. 2019) complexes show elliptic forms while the Sabongari complex (Njonfang et al. 2013) is ovoid. From the spatial relationship of rocks, Njonfang et al. (2013) stated that the volcanic rocks were emplaced after the plutonic rocks. Basalts cut through plutonic rocks at Nkounden and basement rocks at Didango. Gneisses outcrop in hollows, at foothills, in plains and resist more or less weathering. Syenogranites and granites outcrop along the NNE-SSW axis which goes from Nkourom to Nkounden passing through Njitapon. Basalts and ignimbrites outcrop in the East. The analysis of the digital model of terrain (DMT) and field observations show the influence of lithology on morphology through a process of incision limited to steep slopes (Fig. 5). The layouts of rivers do not follow a uniform direction, but are guided by the morphostructures of the crossed formations. The system of fracturation is well marked by their layout and it influences the hydrographic network of the basin (Owona et al. 2012). Differential alteration and erosion contributed to the generation of plains in tender rocks such as basalts and other volcanic products, and intense fracturing and hills in hard rocks, granites, and syenogranites (Owona et al. 2003). Thus, breakable tectonics, differential alteration, and erosion modeled the current relief of the area and its surroundings.

Comparative studies between the Nkogam geomorphological units with similar landforms in Cameroon and abroad

The Nkogam massif is located between the Mbam and Mbépit massifs, about 40 km east of the Bamenda and Bam-bouto mountains (Fig. 16b). The ages of alkaline complexes range from 73 to 30 Ma (Lasserre 1978; Caen-Vachette et al. 1991; Njonfang et al. 2018; Cantagrel et al. 1978). Caen-Vachette et al. (1987) dated the Nkogam massif at 66 to 67 ± 2 Ma. The Guenfalabo (Ngonge et al. 2014), Bana (Kuepouo et al. 2006), Sabonbari (Njonfang et al. 2013) and Nana (Wokwenmendiam Nguet et al. 2016) massifs consist of plutonic (granites, syenogranites, syenites, and monzodiorites) and volcanic (basalts, rhyolites, trachyandesites, trachytes, and benmoreites) rocks.

Other features, the Bana complex is oval in shape and covers an area of 59 km², with an altitude of 2097 m (Nana 1988); the Koupé complex is elliptic in shape and covers

an area of 80 km², with an altitude of 2061 m (Lamilen et al. 1994); the Pandé complex is subcircular and covers an area of about 17 km², with an altitude of 1231 m (Njonfang and Moreau 2000); the Nkogam complex is subcircular and covers an area of 140 km², with an altitude of 2268 m (Caen-vachette et al. 1987). All these massifs intruded a granitogneissic basement of the Pan-African age. In general, along the CL, anorogenic complexes are circular, rounded to subrounded (Njonfang et al. 2011) and corroborate the subcircular morphology of the Nkogam massif. The central depression observed in the Nkogam is absent in the Bana, Sabongari, Nana, and Guenfalabo massifs. In Nigeria, the Ririwai complex is elliptic, with an area of 180 km² and culminates at 1320 m high (Girei et al. 2019).

Mount Bamboutos and the Nkogam are voluminous massifs located on the continent along the CL. Both are voluminous with altitudes 2744 m and 2268 m respectively. Mount Bamboutos (Zangmo et al. 2019) is mainly volcanic (basalts, trachytes, ignimbrites, and phonolites) with a huge sub-elliptic caldera (16 × 8 km). On the other hand, the Nkogam massif is an anorogenic complex made up of granites, syenites, syenogranites, basalts, and ignimbrites, without a caldera but with plutonic domes. Mount Manengouba (2411 m) is recent (< 1.5 Ma), a volcanic complex with two interlocking subcircular calderas with crater lakes and pyroclastic cones (Zangmo et al., 2014). There are two volcanoes, one called Eboga volcano (2391 m) with a caldera (4 × 5 km), lakes (Female, Male, and Child), and cinder cones (Zangmo et al. 2020). The Mbepit massif is mainly volcanic, consisting of rhyolitic domes and bearing a maar (Ziem et al. 2020), unlike the Nkogam massif.

Conclusion

The Nkogam massif comprises various lineaments: diaclases, faults, stream lineaments, ridgelines and depression lines. Some lineaments, especially with sufficiently large widths, were generated by satellite image processing and validated by fieldwork. The analysis of the directional rosette and the histogram indicates two major families of lineaments oriented NE-SW and ENE-WSW respectively. These directions are close to the N030°E direction of the CL and the N070°E direction of the Adamawa, respectively.

The lithological study of the massif reveals various types of rocks: massive basalts, plateau basalts, ignimbrites, granites, and syenogranites. Corridors of amphibolite prisms cross massive basalts. Pan-African gneisses are the basement rocks.

The analysis of the internal structure through a NNE-SSW geological section and a block diagram clearly show the geometrical arrangement and relative chronology of

all the Nkogam rocks. The Pan-African gneissic basement of the massif contains lenses of plateau basalts in which it is also an enclave. Plateau basalts overlie the basement and have been intruded by granites and syenogranites, then ignimbrites with enclaves of basement, granite, and plateau basalt debris overlie the eastern and northern part of the massif under massive basalts. Recent rocks are probably massive basalts in veins cutting through ignimbrites. All these rocks are interlocking, showing a U-shaped morphology with a central depression open to the SW, this shape being linked to the juxtaposition of plutonic rocks and volcanic rocks in two fractures oriented NNE-SSW to NE-SW in the corridor of the Cameroon Line.

Declarations

Competing interests The authors declare that they have no competing interests.

References

- Abou'ouAngo T, Njom B, EkoaBessa AZ, Onana JB, Bafon GT, Olinga JB, MvondoOndoa J (2021) Correlations between morpho-tectonic parameters and Precambrian tectonic structures in the Nyong Group greenstone belts: example of the Kopongo area (NW of the Congo Craton, Southwestern Cameroon). *J Afr Earth Sci* 182:104272
- Akame JM, Mvondo Ondoa J, Assatse Teikeu W, Owona S, Olinga JB, Messi Ottou, EJ, Ntomba S (2014) Apport des Images Landsat-7 Etm+ à L'étude Structurale du Socle Archeen de Sangmelima (Sud Cameroun). *Revue Francaise de Photogrammetrie et de Teledetection*; 1–24p.
- Aouragh MH, Essahlaoui A, Abdelhadi ELO, Abdellah ELH, Kamel S (2012) Lineaments frequencies from Landsat ETM + of the Middle Atlas Plateau (Morocco). *Res J Earth Sci* 4:23–29
- Boushaba A (1990) Evolution géochimique et contexte de mise en place du complexe granitique du Ment (Massif central marocain). *Bull. Inst. Sci. Rabat*, No 14:1–17
- Brito Neves BB, Van Schmus WR, Fetter A (2002) North-Western Africa-North Eastern Brazil: major tectonic links and correlation problems. *J Afr Earth Sc* 34:275–278
- Burke K (2001) Origin of the Cameroon Line of volcano-capped swells. *J Geol* 109:349–362
- Caen-Vachette M, Tempier P, Kamgang P (1987) Le massif tertiaire du Nkogam (Ouest Cameroun): caractéristiques principales et géochronologiques Rb/Sr sur roche totale. *J Afr Earth Sc* 6(4):521–524
- Caen-Vachette M, Tempier P, Nana JM (1991) Le granite de Lembo (partie du complexe volcano-plutonique de Bana), témoin du magmatisme tertiaire du Cameroun. *Géochronologie. Bulletin De La Société Géologique De France* 3:497–501
- Cantagrel JM, Jamond C, Lasserre M (1978) Le magmatisme alcalin de la Ligne du Cameroun au Tertiaire Inférieur : données géochronologiques K/Ar. *Comptes Rendus Sommaire Société Géologique France* 6:300–303

- Dabo M (2011) Tectonique et minéralisations aurifères dans les formations birimiennes de Erandi-Boboti, boutonnière-Kéniéba, Sénégal. Tectonique. Université Rennes 1, France. 207 p
- 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. *Comptes Rendus Géosci* 339:589–600
- Dumort JC (1968) Cartes géologiques de reconnaissance à l'échelle de 1/50 000. République Fédérale du Cameroun, Douala-Ouest. Bulletin de Recherches Géologiques et Minières, Direction des mines et de la géologie du Cameroun, et une notice explicative. 68 p.
- El Hadani D (1997) Télédétection et systèmes d'Information Géographique pour la gestion et la recherche de l'eau. *Géo-Observateur. Les Rapport Thématiques* 1, 28 p
- Girei MB, Li H, Algeo TJ, Bonin B, Ogunleye OP, Bute SI, Ahmed HA (2019) Petrogenesis of A-type granites associated with Sn-Nb-Zn mineralization in Ririwai complex, North-Central Nigeria. *Lithos* 340:49–70
- Javhar A, Chen X, Bao A, Jamshed A, Yunus M, Jovid A, Latipa T (2019) Comparison of multi-resolution optical Landsat-8, Sentinel-2 and radar Sentinel-1 data for automatic lineament extraction: a case study of Alichur Area. *SE Pamir Remote Sens* 11:778
- Kuepou G, Tchouankoue JP, Nagao T, Sato H (2006) Transitional tholeiitic basalts in the Tertiary Bana volcano-plutonic complex Cameroon Line. *J Afr Earth Sci* 45:318–332
- Kuepou G, Sato H, Tchouankoué JP, Murata M (2009) FeO*-Al₂O₃-TiO₂-rich rocks of the Tertiary Bana igneous complex West Cameroon. *Resour Geol* 59(1):69–86
- Lamilen BD, Ghogomu RT, Njom B, Tchoua FM (1994) The Koupé anorogenic complex: whole rock Rb/Sr studies. *Annales De La Faculté Des Sciences* 3:199–205
- Lasserre M (1978) Mise au point sur les granitoïdes dits « ultimes » du Cameroun: gisements, pétrographie et géochronologie. *Bull Bur Rech Geol Min III* 2:143–156
- Messi Ottou EJ, Ntomba SM, Ndong Bidzang F, Akame JM, Owona S, Mvondo Ondo J (2014) Géomorphologie structurale et risque naturel dans une portion de zone mobile du complexe du Nyong au SW Cameroun : cas de la région Lolodorf-Mvengue. *J Afrique Sci* 10(4):288–298
- Moreau C, Regnault JM, Déruelle B, Robineau B (1987) A new tectonic model for the Cameroon Line, Central Africa. *Tectonophysics* 141:317–334
- Morin S (1980) Apport des images Landsats à la connaissance de la structure des hautes terres de l'Ouest-Cameroun. *Rev. Géogr. Univ. Yaoundé*, pp 181–196
- Morin S (2000) Géomorphologie. Atlas de la province extrême-nord Cameroun. 16 p
- Moundi A, Wandji P, Bardintzeff J-M, Menard JJ, Okomo Atouba LC, Reusser E, Bellon H, Tchoua MF (2007) Les basaltes éocènes à affinité transitionnelle du plateau Bamoun, témoins d'un réservoir mantellique enrichi sous la ligne volcanique du Cameroun. *Comptes Rendus Géoscience* 339:396–406
- Nana JM (1988) Le complexe volcano-plutonique de Bana (Ouest Cameroun). Université de Paris XI, France, Géologie et pétrologie. Thèse de Doctorat
- Ngako V (1991) Les déformations continentales panafricaines en Afrique centrale. Université de Yaoundé I, Résultat d'un poinçonnement de type himalayen. Thèse Doctorat d'Etat, p 241
- Ngonge ED, Hollanda MHB, Nkonguin Nsifa E, Tchoua FM (2014) Petrology of the Guenfalabo ring-complex: an example of a complete series along the Cameroon volcanic line (C.V.L) Cameroon. *J Afr Earth Sci* 96:139–154
- Njonfang E, Moreau C (2000) The mafic mineralogy of the Pande massif, Tikar plain, Cameroon: implications for a peralkaline affinity and emplacement from highly evolved alkaline magma. *Mineral Mag* 64(3):525–537
- Njonfang E, Kamgang P, Ghogomu TR, Tchoua FM (1992) The geochemical characteristics of some plutonic-volcanic complexes along the southern part of the Cameroon Line. *J Afr Earth Sci* 14:255–266
- Njonfang E, Nono A, Kamgang P, Ngako V, Tchoua FM (2011) Cameroon Line alkaline magmatism (central Africa): a reappraisal, the Geological Society of America. *Special Paper* 478:173–191
- Njonfang E, Tchuenté Tchoung G, Cozzupoli D, Lucci F (2013) Petrogenesis of the Sabongari alkaline complex, Cameroon Line (Central Africa): preliminary petrological and geochemical constraints. *J Afr Earth Sci* 83:25–54
- Njonfang E, Laurenzi AM, Wokwenmendang Nguet P, Cozzupoli D (2018) ⁴⁰Ar-³⁹Ar ages from the Sabongari and Nana igneous complexes within the central part of the Cameroon Line (Central Africa). *J Afr Earth Sci* 147:20–27
- Njonfang E, Moreau C, Tchoua FM (1998) La bande mylonitique Fouban-Bankim, Ouest-Cameroun : Une zone de cisaillement de haute température. *Comptes Rendus Académie des Sciences Paris, Série. IIA* 327.
- Owona S, Mbola Ndzana SP, Mvondo Ondo J, Nsangou Ngapna M, Nkabsah C, Ratschbacher L, Ekodeck GE (2012) Geological control of geomorphologic units in the Southwest (SW) Cameroon (Central Africa). *J Geol Mining Res* 4(7):152–167
- Owona S, Mvondo Ondo J, Njom B, Tjomb B, Enama MM (2003) Géomorphologie et cartographie de 2 faciès paradérivés et 1 orthodérivé de la région de Yaoundé. *J.STD., Université de Douala* 10(1):81–91
- Scaillet B (2006) Mémoire présenté en vue de l'obtention de l'habilitation à diriger des Recherches. Géologie appliquée. Université d'Orléans 130 p.
- Simeni WNA, Tchaptchet Tchato D, Ngo Belnoun RN, Tchouankoue JP, Ganwa AA (2017) Structural relationship between brittle deformation and Palaeozoic to Mesozoic basalt dykes in the Precambrian basement of the southern continental part of the Cameroon volcanic line. *Int J Geosci* 8:318–331
- Takodjou Wambo JD, Ganno S, Afahnie NA, Nomo NE, Mvondo OJ, Nzenti JP (2016) Use of Landsat 7ETM + Data for the geological structure interpretation: case study of the Ngoura-Colomines area, Eastern Cameroon. *J Geosci Geomat* 4(3):61–72
- Tchoua FM (1974) Contribution à l'étude géologique et pétrographique de quelques volcans de la Ligne du Cameroun (Monts Manengouba et Bambouto). Thèse d'Etat, Université de Clermont-Ferrand U.E.R. Sciences exactes et naturelles, 337 p.
- Van Schmus WR, Oliveira EP, Da Silva FA, Toteu SF, Penaye J, Guimarães IP (2008) Proterozoic Links between the Borborema Province, NE Brazil, and the Central African Fold Belt. *Geological Society London Special Publications* 294:69–99
- Weecksteen G (1957) Carte géologique du Cameroun à l'échelle de 1/500000 (coupure Douala-Ouest) avec notice explicative. *Imp Nat Yaoundé*, 35 p.
- Wokwenmendang Nguet P, Njonfang E, Moundi A, Cozzupoli D, Tchoua MF (2016) Données nouvelles sur le complexe alcalin de Nana: pétrologie et géochimie des laves associées (Plaine Tikar, Ouest Cameroun). *Syllabus Review. Science Series* 6:13–32
- Yao KT, Fouché-Grobla O, Yéi OM, Assoma TV (2012) Extraction of structural lineaments from satellite images, and estimation of induced estimation biases, in a metamorphosed Precambrian basement. *Remote Sens Rev* 10:161–178
- Zangmo Tefougoum G, Kagou Dongmo A, Nkouathio DG, Wandji P, Dedzo Gountié M (2014) Geomorphological features of the Manengouba Volcano (Cameroon Line): asset for potential geopark development. *Geohéritage* 6(3):225–239

- Zangmo Tefogoum G, Nkouathio DG, Kagou Dongmo A, Dedzo Gountié M (2019) Typology of geotouristic assets along the south continental branch of the Cameroon volcanic line: case of the mount Bamboutos caldera. *International Journal of Geoheritage and Parks* 7:111–128
- Zangmo Tefogoum G, Quesada Román A, Pérez Umana D (2020) Geomorphosites inventory in the Eboga Volcano (Cameroon): contribution for geotourism Promotion. *Géomorphologie* 26:19–33
- Ziem à Bidias LA, Moundi A, TakodjouWambo JD (2017) Transitional basalts and eruptive dynamisms around Nkoumelap locality (West of the Bamoun Plateau, Cameroon volcanic line): petrography and volcanic risks' evaluation. *Journal of Geosciences and Geomatics* 5:65–77
- Ziem à Bidias LA, Isidorellouga DC, Moundi A, Nsangou A (2020) Inventory and assessment of the Mbépit massif geomorphosites (Cameroon volcanic line): assets for the Development of Local Geotourism. *Geoheritage* 12:49