

UNIVERSITÉ DE YAOUNDE I

FACULTÉ DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE ET
FORMATION DOCTORALE

SCIENCES – TECHNOLOGIE
ET GÉOSCIENCES



UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL

SCIENCES, TECHNOLOGY
AND GEOSCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

LABORATOIRE DE GEOSCIENCES DES FORMATIONS SUPERFICIELLES ET APPLICATIONS

LABORATORY OF GEOSCIENCES OF SUPERFICIAL FORMATIONS AND APPLICATIONS

**CARACTÉRISATION MINÉRALOGIQUE ET
GÉOCHIMIQUE DES SCORIES VOLCANIQUES DE
LA LIGNE DU CAMEROUN EN VUE DE LEUR
UTILISATION COMME MATIÈRE PREMIÈRE
DANS LA FABRICATION DU CIMENT**

**Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur/PhD
en Sciences de la Terre**

Spécialité : Géosciences des Formations superficielles

Option : Géologie Appliquée / Métallogénie

par

NGONO ONANA Estelle Huguette

Master en Sciences

Matricule : 05W198

Sous la co-direction de

NDJIGUI Paul-Désiré

Professeur

Université de Yaoundé I

MVONDO ONDOA Joseph[†]

Maitre de Conférences

Université de Yaoundé I

Année Académique 2022-2023



REPUBLIQUE DU CAMEROUN

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

CENTRE DE RECHERCHE ET
DE FORMATION DOCTORALE
EN SCIENCES TECHNOLOGIE
ET GÉOSCIENCES



REPUBLIC OF CAMEROON

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

POSTGRADUATE SCHOOL OF
SCIENCE, TECHNOLOGY
AND GEOSCIENCES

ATTESTATION DE CORRECTION DE THESE DE DOCTORAT/PhD

Spécialité : Géosciences des Formations Superficielles

Option : Géologie Appliquée/Métallogénie

Nom et Prénoms du candidat : **NGONO ONANA Estelle Huguette**

Matricule : **05W198**

Titre de la thèse : « **Caractérisation minéralogique et géochimique des scories volcaniques de la Ligne du Cameroun en vue de leur utilisation comme matière première dans la fabrication du ciment** »

Date de soutenance : **Mercredi, le 05 juillet 2023.**

Nous soussignés, membres du jury de soutenance de la thèse de Doctorat PhD, attestons que la candidate a effectué toutes les corrections, conformément aux observations formulées lors de la soutenance.

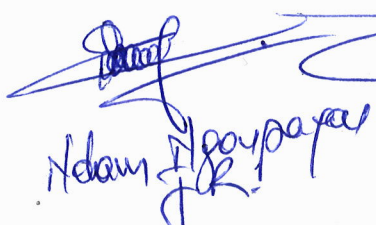
En foi de quoi, la présente **Attestation de correction** lui est délivrée, pour servir et valoir ce que de droit.

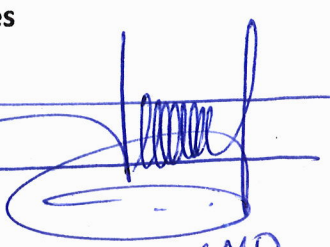
Fait à Yaoundé, le **28.07.2023**

Le Président du Jury


NZENTI Jean Paul
Professeur

Les Membres


Ndjam Ngapaya


S. GANNO

« L'intelligence c'est la capacité de s'adapter au changement. »

Stephen Hawking

À mes défunts parents ONANA POO Téléspore et
ANABA NGAH Marie

A vous l'honneur !

REMERCIEMENTS

Une période de dur labeur se solde généralement par une saison de récolte. Parvenu à la cueillette de ce fruit qu'est cette Thèse de Doctorat/PhD, j'aimerais exprimer ma gratitude à tous ceux qui ont, d'une quelconque façon, contribué à sa maturation.

Je rends grâce au Seigneur qui a permis l'aboutissement de ce travail et qui m'a toujours donné des solutions pendant les épreuves rencontrées tout au long de ce cheminement.

J'aimerais par cette occasion remercier particulièrement mes deux co-directeurs de thèse, monsieur Paul-Désiré Ndjigui, Chef du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, ainsi que le feu Joseph Mvondo Ondo (Maître de Conférences) de regretté mémoire. Chers encadreurs, vous avez été pour moi plus que des formateurs. De vous, j'ai appris l'endurance et la persévérance dans le travail scientifique. Merci cher maîtres pour avoir pris le temps de guider et accompagner mes recherches, votre patience et votre expertise ont été essentielles à la réalisation de ce travail. Merci infiniment pour vos conseils.

Mes remerciements vont à l'endroit de tous les enseignants du Département des Sciences de la Terre pour la formation continue depuis la première année tant sur le plan académique que social. Ces remerciements vont particulièrement au Dr Lucas Mouafo qui m'a apporté son aide au moment de l'initiation à la rédaction des publications scientifiques. Mes remerciements vont également à l'endroit des Professeurs Vincent Laurent Onana et Dieudonné Bisso qui ont très souvent consacré de leur précieux temps pour m'écouter et m'orienter dans le domaine de la recherche scientifique et même au-delà.

Ma reconnaissance va à l'endroit du Professeur Antoine Elimbi, Enseignant au Département de Chimie de l'Université de Yaoundé I, qui a contribué à l'acquisition des données de ce travail et qui m'a permis de réaliser des essais techniques dans son laboratoire.

Mes sincères remerciements vont à l'endroit de mes parents qui ont fait germer en moi la graine de la science, et dont les efforts ont fait de moi la personne que je suis. Mon cher papa, lors de nos dernières conversations avant ton départ, tu me disais toujours que ta plus grande joie serait de me voir au bout de ce tunnel et de m'appeler par ce titre de Docteur et, pour y parvenir, tu étais prêt à tout sacrifier, nous y sommes mais toi, tu es de l'autre côté du mur éternel. Chers parents, je vous serai éternellement reconnaissante.

Mes chers frères et sœurs, ce travail est aussi le fruit de vos efforts, je vous remercie pour la motivation et le soutien multiforme que vous m'avez apportés surtout au moment où j'avais été victime du vol de mes ordinateurs. J'ai compris que mes travaux vous tenaient à cœur. Merci aux Docteurs Aimé Mama et Achille Anaba pour leurs critiques constructives ; je vous assure que le « conseil de famille » a été un moyen de grande motivation.

Je remercie mes enfants qui ont toujours cru en moi et n'ont jamais cessé de me répéter que j'y arriverai. Mes chers enfants, ce moment de répit que vous m'avez toujours réclamé afin de prendre soin de moi et de vous est arrivé.

Je remercie également le Professeur Daniel Gouet pour sa contribution dans la réalisation de ce travail.

Un merci particulier à mes chefs hiérarchiques, le Professeur Roger Atsa Etoundi et le Docteur Amougou Ngoumou qui m'ont toujours encouragée et permis de répondre favorablement à certaines exigences du cycle de recherche malgré les sollicitations de service.

Je pense également à tous mes collègues de la Division du Système d'Information du Minesup avec qui les discussions et échanges ont toujours été enrichissants. Je remercie particulièrement mon collègue Steve Keudem que j'ai sans cesse sollicité et de qui j'ai bien évidemment appris.

Je remercie les aînés académiques du Département des Sciences de la Terre, notamment le Docteur André Mbabi Bitchong, pour l'acquisition des résultats de certaines analyses géochimiques et le Docteur Tessontsap Teutsong pour ses conseils et ses astuces pendant la rédaction des articles scientifiques.

J'aimerais particulièrement dire merci à un ami et un promotionnaire, le Docteur Joël Nyemb Bayamack, qui a été mon compagnon scientifique pendant tout ce cursus et avec qui les débats et les échanges ont permis de mener à bien ce travail. Merci Joël, pour les moments extra-académiques que nous avons partagés.

Je remercie de tout cœur mon camarade, le Docteur Tchuimegnie Ngongang Blaise, qui a toujours été à mon écoute et m'a apporté son soutien durant la réalisation de cette œuvre.

Je pense également au Docteur Jean Baenla qui, plus qu'un coach, a été un pair avec qui j'ai réalisé les essais pouzzolaniques.

Ma gratitude va à l'endroit de tous ceux qui m'ont aidée dans la réalisation des cartes, Flore Foky, Ernest Djou et Etienne Mandjeck.

Un merci particulier à cette deuxième mère que la vie m'a donnée et qui a toujours pris soin de mes enfants pendant les moments d'absence, merci MAMI.

Merci à tous les doctorants du Laboratoire de Géosciences des Formations Superficielles.

Je remercie également tous mes collègues du Lycée Bilingue d'Evodoula avec qui j'ai souvent passé des moments de détente pour évacuer le stress et la pression du travail.

Merci à tous.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	i
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	v
RÉSUMÉ	viii
ABSTRACT	ix
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES ABREVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I : MILIEU NATUREL	5
I.1. Présentation de la zone d'étude	6
I.1.1. Localisation géographique et administrative	6
I.1.2. Climat	6
I.1.3. Végétation	7
I.2. Contexte géomorphologique et géologique du secteur d'étude	8
I.2.1. Géomorphologie	8
I.2.2. Géologie	11
CHAPITRE II: REVUE DE LA LITTERATURE SUR LES SCORIES VOLCANIQUES ET LES CIMENTS	18
II.1 Travaux antérieurs sur la géologie du secteur d'étude	19
II.2. Travaux antérieurs sur les matériaux étudiés	20
II.2.1. Définition	20
II.2.2. Caractéristiques morphologiques des scories	21
II.2.3. Propriétés chimiques et industrielles des scories	22
II.2.4. Domaines d'application des scories volcaniques	22
II.3. Connaissances de base sur le ciment	24
II.3.1. Définition	24

IV.3.4. Corrélations.....	64
IV.3.5. Normalisation.....	74
IV.3.6. Evaluation du fractionnement des terres rares	75
CHAPITRE V: PARAMETRES DE VALORISATION DES SCORIES VOLCANIQUES.....	79
V.1. Granularite.....	80
V.2. Analyses thermiques	80
V.2.1. Analyse thermogravimétrique	80
V.2.2. Perméabilité des scories volcaniques	83
V.3. Données d'analyses chimico-techniques.....	84
V.3.1. Évaluation quantitative de la phase amorphe.....	84
V.3.2. Évaluation qualitative de la phase amorphe des scories étudiées	86
V.4. Réactivité des scories volcaniques de la LVC	90
V.4.1. Données de résistance à la compression uniaxiale.....	90
V.4.2. Indice d'activité pouzzolanique	92
CHAPITRE VI: INTERPRÉTATION - DISCUSSION.....	95
VI.1. Processus de formation des scories volcaniques.....	94
VI.1.1. Évaluation du processus de cristallisation fractionnée	94
VI.1.2. Nature de la source mantellique et fusion partielle.....	98
VI.1.3. Contamination par la croûte.....	99
VI.1.4. Effet de l'altération météorique	102
VI.2. Potentiel industriel des scories volcaniques.....	112
VI.2.1. Caractéristiques naturelles des scories volcaniques.....	112
VI.2.2. Evaluation de l'activité pouzzolanique sur les scories volcaniques	117
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	121
BIBLIOGRAPHIE.....	122
ANNEXES	122

RÉSUMÉ

L'étude a été réalisée sur les scories provenant de neuf localités de la partie continentale Sud de la Ligne Volcanique du Cameroun. Elle visait à évaluer leurs caractéristiques conformément aux exigences requises pour des applications dans l'industrie du ciment. L'étude des scories s'est faite à travers une démarche dont les éléments sont constitués depuis les sites de prélèvement jusqu'au laboratoire. Les investigations au laboratoire ont consisté en une caractérisation pétrographique, minéralogique et géochimique suivie d'une évaluation des paramètres physico-techniques. Les scories se composent de phénocristaux de pyroxène et olivine qui baignent dans une mésostase faite de microlites de plagioclase, ce qui leur confère une texture microlitique porphyrique. La mésostase est également composée de minéraux d'altération tels que la kaolinite, l'illite, la montmorillonite, l'ettringite, la portlandite et l'hématite. Les minéraux identifiés sont caractérisés par des groupes fonctionnels O-H, Si-O-Si, Al-O-Si qui attestent de la coexistence des phases cristalline et amorphe. La composition chimique des scories est dominée par trois oxydes majeurs (SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3). Le diagramme TAS a permis de classer ces scories en microbasalte, basalte, hawaïite et basanite. Ces roches sont riches en éléments lithophiles correspondant aux éléments traces les plus abondants. Les concentrations en éléments de transition indiquent que la fusion partielle du manteau serait à l'origine de la genèse des scories volcaniques. Le rapport LREE/HREE élevé indique une prédominance des terres rares légères. Les rapports élémentaires (La/Yb, Tb/Yb et La/Sm) montrent que ces matériaux proviennent d'une péridotite à grenat. L'effet de l'altération météorique est marqué par la présence de l'iddingsite, un indice d'altération mafique variant de 28 à 51%. L'illite et la montmorillonite indiquent que l'altération chimique aurait été modérée. L'analyse thermogravimétrique a montré un comportement thermique qui met en exergue la coexistence des phases cristalline et amorphe. Les teneurs élevées de la phase amorphe (10 - 70%) dans les scories correspondent à celles des matériaux aluminosilicatés. Les propriétés pouzzolaniques telles l'indice de pouzzolanité (65 à 90%) et la résistance à la compression (21-47 MPa) avec les valeurs comprises dans l'intervalle de celles des bétons courants attestent d'une activité pouzzolanique suffisante à très bonne pour les scories étudiées.

Mots clés : Ligne du Cameroun, scories, industrie du ciment, pétrologie, pouzzolanité.

ABSTRACT

The study was carried out on volcanic scoriae from nine localities on the southern mainland of the Cameroon Volcanic Line. It aimed to evaluate their characteristics in accordance with the requirements required for applications in the cement industry. The study of the volcanic scoriae was done through an approach whose elements are made up from the sampling sites to the laboratory. The laboratory investigations consisted of petrographic, mineralogical and geochemical characterization followed by an evaluation of physico-technical parameters. The volcanic scoriae consist of pyroxene and olivine phenocrystals that bathe in a mesostasis made of plagioclase microlites, which gives them a porphyric microlitic texture. The weathering minerals present in the mineralogical cortège are kaolinite, illite, montmorillonite, ettringite, portlandite and hematite. The minerals identified are characterized by O-H, Si-O-Si, Al-O-Si functional groups that attest to the coexistence of the crystalline and amorphous phases. The chemical composition of slag is dominated by three major oxides (SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃). The TAS diagram classified these volcanic scoriae into picrobasalt, basalt, hawaiite and basanite. These rocks are rich in lithophilic elements corresponding to the most abundant trace elements. The concentrations of transition elements indicate that the partial melting of the mantle would be at the origin of the genesis of volcanic scoriae. The high LREE/HREE ratio indicates a predominance of light rare earths. The elementary ratios (La/Yb, Tb/Yb and La/Sm) show that these materials come from garnet peridotite. The effect of meteoric alteration is marked by the presence of iddingsite, an index of mafic alteration varying from 28 to 51%. Illite and montmorillonite indicate that the chemical alteration would have been moderate. Thermogravimetric analysis showed a thermal behavior that highlights the coexistence of crystalline and amorphous phases. The high contents of the amorphous phase (10 - 70%) in the volcanic scoriae correspond to those of aluminosilicate materials. Pozzolanic properties such as pozzolanicity index (65 to 90%) and compressive strength (21-47 MPa) with values within the range of those of common concretes attest to sufficient to very good pozzolanic activity for the volcanic scoriae studied.

Keywords: Cameroon Volcanic Line, Scoriae, cement industry, Petrology, pozzolanicity.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Précipitations et températures moyennes mensuelles de la zone d'étude	9
Tableau 2: Domaines d'application des scories.....	24
Tableau 3: Spécifications des propriétés chimiques des pouzzolanes naturelles	24
Tableau 4: Types de ciment et leur composition.	28
Tableau 5: Coordonnées géographiques des points de prélèvement des scories.....	34
Tableau 6: Couleur des scories	47
Tableau 7: Composition minéralogique semi-quantitative des scories de la LVC.....	55
Tableau 8: Composition minéralogique normative.	58
Tableau 9: Composition en éléments majeurs dans les basaltes et hawaiiites	61
Tableau 10: Composition en éléments majeurs dans les microbasalte et basanite de la LVC.	62
Tableau 11: Sommes et rapports entre éléments majeurs dans les basaltes et hawaiiite.....	63
Tableau 12: Sommes et rapports entre éléments majeurs dans les basanites et microbasalte.	63
Tableau 13: Distribution des éléments traces dans les basaltes, hawaiiites et microbasaltes...	65
Tableau 14: Distribution des éléments traces dans les basanites	66
Tableau 15: Distribution des terres rares dans les basaltes, hawaiiites et microbasaltes	67
Tableau 16: Distribution des terres rares dans les basanites.....	68
Tableau 17 : Matrice de corrélation des éléments chimiques.....	73
Tableau 18: Données d'analyse granulométrique des scories de la LVC	81
Tableau 19: Valeurs d'humidité relative et de perte au feu des scories.	84
Tableau 20: Teneurs en phase amorphe dans les scories de la LVC.	85
Tableau 21: Valeurs de résistance à la compression.	90
Tableau 22: Valeurs de l'indice d'activité pouzzolanique des scories.....	92
Tableau 23 : Rapports élémentaires dans les basaltes, hawaiiites et microbasaltes.	95
Tableau 24: Rapports élémentaires dans les basanites	96

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte de localisation du secteur d'étude sur la Ligne Volcanique du Cameroun	7
Figure 2: Diagrammes ombrothermiques de Bagnouls et Gausсен	10
Figure 3: Carte des différentes unités géomorphologiques du secteur d'étude	13
Figure 4: Carte présentant le réseau hydrographique	14
Figure 5: Carte géologique	16
Figure 6: Localisation des scories en Afrique	21
Figure 7: Sites de prélèvement des scories volcaniques	32
Figure 8: Carte d'échantillonnage.....	33
Figure 9: Quelques types de scories.....	33
Figure 10: Appareillages de laboratoire utilisés	39
Figure 11: Photo d'illustration des matériels utilisés au laboratoire	42
Figure 12: Matériaux prélevés le long de la Ligne Volcanique du Cameroun	47
Figure 13: Microphotographies des scories	50
Figure 14 : Diffractogrammes des basaltes.....	52
Figure 15: Diffractogrammes des picrobasaltes et hawaiiites.....	53
Figure 16: Diffractogrammes des rayons X des basanites.....	54
Figure 17: Composition minéralogique quantitative des scories	56
Figure 18: Nomenclature des scories volcaniques	59
Figure 19: Spectres IR des scories de la LVC	60
Figure 20: Diagrammes binaires éléments majeurs et MgO.....	69
Figure 21 : Diagrammes binaires des éléments traces.....	71
Figure 22: Spectres de normalisation des terres rares par rapport à la chondrite	76
Figure 23: Spectres multiéléments des scories	77
Figure 24: Courbes d'analyse granulométrique.....	82
Figure 25: Courbes thermogravimétriques	83
Figure 26: Diagramme d'évaluation de la teneur en humidité relative	85
Figure 27: Diagramme d'évolution de la teneur en phase amorphe.....	86
Figure 28: Diffractogrammes de comparaison de minéralogie	89
Figure 29: Courbes d'évolution de la résistance avec le temps.....	91
Figure 30: Diagramme d'évolution de la résistance à la compression avec le temps.....	91
Figure 31: Diagramme de corrélation	97
Figure 32: Diagrammes binaires	98
Figure 33 : Diagrammes (Tb/Yb) _N vs. (La/Yb) _N et (Tb/Yb) _{MP} vs. (La/Sm) _{MP}	101

Figure 34: Diagrammes binaires a) Th/Yb vs. Nb/Yb ; b) Nb/U vs. Nb	104
Figure 35: Diagramme Nb/Y vs. Rb/Y	105
Figure 36: Diagramme d'évaluation du degré d'altération.....	106
Figure 37: Diagramme de mobilité entre éléments chimiques.	108
Figure 38: Diagramme CIW vs, CIA d'évaluation du degré d'altération.....	108
Figure 39: Diagramme A-CN-K.....	110
Figure 40: Diagramme binaire	111
Figure 41: Diagramme MIA (Mafic Index of Alteration) vs. Perte au Feu (PF).....	111
Figure 42: Diagramme SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃ des scories	115
Figure 43: Diagrammes ternaires	115
Figure 44: Diagramme de comparaison des teneurs en oxydes majeurs des scories.....	116

LISTE DES ABREVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACI:	<i>American concrete institute</i>
ASTM:	<i>American society for testing and materials</i>
AT G :	Analyse thermogravimétrique
CEM :	<i>Cement</i>
CIA:	<i>Chemical index of alteration</i>
CIW:	<i>Chemical index of weathering</i>
CQ :	Contrôle qualité
DRX :	Diffraction des rayons X
DUP :	Duplicata de laboratoire
FRX :	Fluorescence des rayons X
HREE:	<i>Heavy Rare Earth Element</i>
I :	Indice d'activité
IA :	Indice d'alcalinité
IR :	Infra Rouge
LREE:	<i>Light rare earth element</i>
LVC :	Ligne volcanique du Cameroun
Mg # :	Numéro magnésien
MIA:	<i>Mafic index of alteration</i>
MORB:	<i>Mid-ocean ridge basalt</i>
NC :	Norme camerounaise
NF :	Norme française
OIB:	<i>Ocean island basalt</i>
Ol id :	Olivine iddingsitisée
Ol :	Olivine
P :	Précipitations
PF :	Perte au feu
PIA:	<i>Pagioclase index of alteration</i>
σ :	Résistance à la compression uniaxiale
R_c :	Quantité de phase amorphe
T :	Température
TAS :	<i>Total alkali silica</i>
W :	Humidité relative

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les pyroclastites sont des blocs de laves solidifiés, éjectés lors de l'éruption d'un volcan. La présence des édifices volcaniques à la surface terrestre témoigne de la répartition de ces matériaux sur tous les continents. La classification des pyroclastites est fonction de la taille et de la forme ou de la lithologie. D'après la classification de Fisher (1966) en fonction du diamètre, on distingue les cendres (diamètre inférieur à 2 mm), les lapillis (diamètre compris entre 2 et 64 mm), les scories, les blocs et les bombes (diamètre supérieur à 64 mm). Les scories sont des fragments de lave solidifiés dans l'air lors d'éruptions volcaniques explosives. Ce sont des matériaux qui s'identifient par leur structure vésiculaire, leur couleur sombre et leurs propriétés caractéristiques de leur provenance andésitique ou basaltique. Leurs multiples propriétés naturelles justifient les divers domaines d'exploitation tant artisanale qu'industrielle. Les propriétés naturelles des scories volcaniques font d'elles des matériaux sollicités dans plusieurs domaines tels que le revêtement des routes, l'industrie du bâtiment, l'industrie céramique. Dans l'industrie du bâtiment, elles sont d'usages divers soit dans la constitution du béton, des granulats ou du ciment. Cependant, l'usage des scories volcaniques dans de telles applications est conditionné par des propriétés spécifiques dites « pouzzolaniques ». Ainsi, de tels matériaux sont communément appelés « pouzzolanes » en souvenir de la ville de Pouzzoles en Italie où ils ont été découverts. Les pouzzolanes sont des roches à granulométrie variable, elles peuvent être divisées en pouzzolanes naturelles et artificielles. Les pouzzolanes artificielles pourraient être considérées comme les premiers matériaux de cimentation utilisés pour la production de pierres artificielles, d'anciens mortiers et bétons, il y'a 3000 ans (Dedeloudis et al., 2018). Les pouzzolanes naturelles quant à elles regroupent celles dérivées des roches et des terres d'une part et celles dérivées de roches volcaniques (scories volcaniques, cendres, tufs, pierres ponce et obsidiennes) d'autre part. Au Cameroun, l'abondance des scories volcaniques n'est plus à démontrer de par la présence d'une multitude d'édifices volcaniques qui constituent la Ligne Volcanique du Cameroun (LVC). Cet alignement de Monts a fait l'objet de nombreuses études qui ont indiqué que l'activité magmatique ne s'y est développée que depuis la fin du Crétacé (Fosso et al., 2005) ; connue à travers des volcans actifs tels que Pico Santa Isabel et Pico Biao de l'île de Bioko, les cônes Monoun et Nyos, et le Mont Cameroun. Les matériaux issus de leur activité volcanique ont trouvé un intérêt dans la production des géopolymères et des constituants des bétons (Tchakouté et al., 2013, 2015 ; Tchamdjou et al., 2017 ; Lemougna et al., 2020 ; Mbowou et al., 2020 ; Djobo et al., 2020). Cependant, l'appréciation des scories dans l'industrie du ciment est conditionnée par des caractéristiques spécifiques similaires aux

propriétés de la matière première usuelle de cette industrie. Cette matière première est composée principalement du calcaire (80%) et de l'argile (20%) dont le mélange constitue le clinker. Le coût élevé du clinker, l'épuisement des ressources naturelles ainsi que l'augmentation des projets de construction constituent des problèmes à l'origine de la recrudescence des pénuries de ciment connues sur le marché camerounais. Ce qui explique la rareté des produits sur le marché de même qu'une augmentation des prix fixés. Toutes ces difficultés suscitent une pléthore d'interrogations dont la plus cruciale repose sur le rapport de l'offre par rapport à la demande. La possibilité d'une insatisfaction quantitative des ressources en la matière exige de se pencher sur la recherche de nouvelles matières premières afin de satisfaire la demande sans cesse croissante. Ce challenge se doit de tenir compte de toutes les exigences techniques requises dans le domaine du ciment. Ainsi donc, le dévolu est jeté sur les scories naturelles pour suppléer et diversifier les matériaux préalablement utilisés pour la production du ciment. Les scories permettraient de booster la production et de relever l'industrie du ciment dans la mesure où la fabrication des ciments pouzzolaniques présente de nombreux avantages. L'accessibilité de ces matériaux constitue le premier avantage de ce choix qui en faciliterait l'exploitation. La réduction des coûts de production, les avantages dans le domaine de la protection de l'environnement constituent des atouts naturels irréfutables dont disposent ces matériaux. Toutes fois, envisager une exploitation efficiente des scories naturelles nécessitent au préalable une parfaite maîtrise des caractéristiques de ces dernières, de leur condition de formation et de leur environnement de dépôt. C'est dans cette optique que s'inscrit cette étude dont la particularité est de jeter les bases d'une connaissance géologique des scories de la LVC en partant d'une prospection dans plusieurs sites. Le principal objectif étant donc de ressortir les caractères spécifiques des scories à valoriser dans chaque localité. Toutes les scories naturelles n'étant pas appropriées pour la production du ciment, il est primordial d'identifier les scories de la Ligne Volcanique du Cameroun qui sont dotées des caractéristiques pouzzolaniques. A cet effet, cette étude est d'une importance capitale pour ces industries qui y trouveront des orientations sur les critères de reconnaissance des scories pouzzolaniques ; ce qui leur permettra d'améliorer la qualité de la production, et d'adopter un traitement approprié à chaque type de matériau indiqué. Les objectifs spécifiques sont :

- de mener une caractérisation pétrographique ;
- de déterminer les processus de formation des scories de la LVC ;

- de déterminer le comportement mécano-thermique, et d'estimer l'indice de pouzzolanicité.

Pour atteindre ces objectifs, la thèse s'organise autour de six chapitres :

- le premier chapitre concerne le milieu naturel dans lequel sont prélevées les scories;
- le second chapitre présente des travaux antérieurs et des notions de base dans le domaine du ciment ;
- le troisième chapitre s'intéresse à la démarche méthodologique ;
- le quatrième chapitre est un consacré aux données de la pétrologie ;
- le cinquième chapitre porte sur les essais réalisés en vue de la valorisation des scories;
- le sixième chapitre discute et interprète l'ensemble des résultats obtenus.

Elle se termine par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I : MILIEU NATUREL

Introduction

L'étude des caractéristiques des scories de la Ligne Volcanique du Cameroun (LVC) nécessite une bonne connaissance de leurs conditions de formation et de leur environnement de dépôt. Les éléments du milieu naturel pouvant avoir un impact sur les matériaux étudiés sont le climat, la végétation, le relief et l'hydrographie.

I.1. Présentation de la zone d'étude

I.1.1. Localisation géographique et administrative

La zone d'étude s'étend entre les latitudes N04°00-N07°00 et longitudes E09°00E011°00 (Fig. 1). Ces coordonnées correspondent à la partie continentale sud de la LVC. Les différentes localités sélectionnées sur les sites d'étude sont : Limbé, Loum-Tombel, Yamba, Doupé, Njinkouo, Foubot, Galim, Manjo-Manengollé et Djoungo. Elles appartiennent aux régions administratives du Sud-Ouest, de l'Ouest et du Littoral.

I.1.2. Climat

La caractérisation du climat est faite à partir des données météorologiques des villes de Limbé, Foubot et Manjo sur une période allant de 1908 à 2020 disponibles sur le site www.weatherbase.com. Il en ressort que la moyenne annuelle des précipitations des villes citées est respectivement de 3070 ; 2052 et 2653 mm tandis que les températures moyennes annuelles varient de 21,6 à 24,4°C (Tab. 1).

Pour la ville de Limbé, les deux mois les plus chauds sont février et mars et les plus froids sont juillet et août. Le climat est marqué par une saison sèche allant de décembre à février et une saison de pluies de mars à novembre avec un pic de précipitations autour de juillet-août. La localité de Foubot connaît une période sèche de novembre en février avec février comme le mois le plus chaud; et une période pluvieuse de mars à octobre pendant laquelle les mois les plus arrosés sont ceux d'août et septembre. Le mois d'août constitue avec le mois de juillet et en même temps les plus pluvieux de l'année.

A Manjo, la saison de pluie dure environ huit mois et va de mars à octobre, de fortes précipitations étant enregistrées aux mois d'août et septembre. Les mois les plus chauds sont février et mars qui marquent la saison sèche.

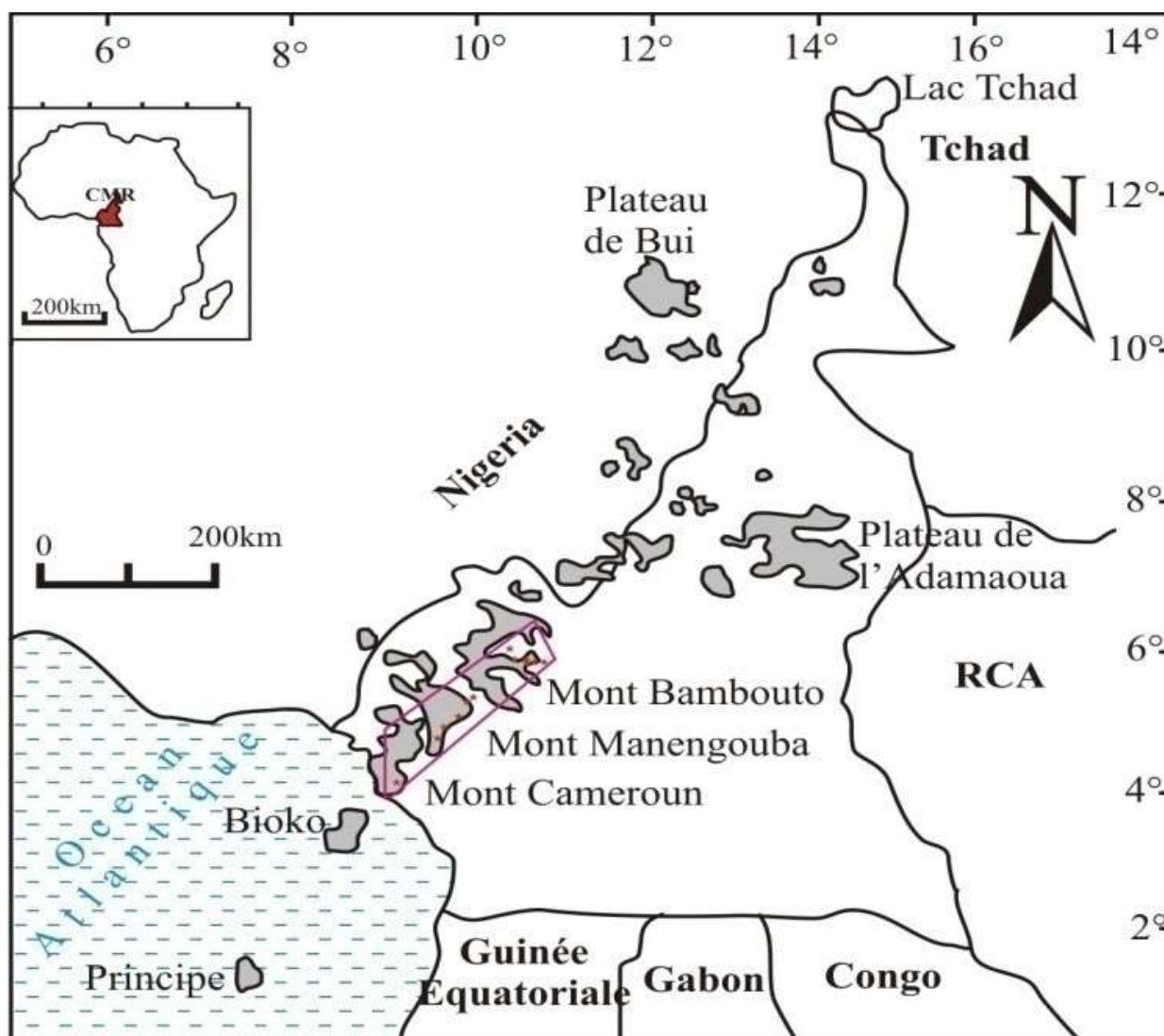


Figure 1: Carte de localisation du secteur d'étude sur la Ligne Volcanique du Cameroun

En définitive, en observant les données climatiques des secteurs sélectionnés dans la zone d'étude, il ressort que le climat est de type tropical humide caractérisé par deux saisons inégalement réparties. En cumulant les températures et les précipitations, il ressort que le secteur d'étude est marqué par une longue période pluvieuse allant de mars à octobre et une courte saison sèche de novembre à février (Fig. 2).

I.1.3. Végétation

Le couvert végétal dans le secteur d'étude est dense et diversifié. Les types de végétation sont : mangrove et végétation littorale, forêts marécageuses et inondées, forêts humides et basses plaines, forêts sub-montagnardes, forêts montagnardes et fourrés, savanes et prairies.

I.2. Contexte géomorphologique et géologique du secteur d'étude

I.2.1. Géomorphologie

La géomorphologie du secteur permet de mettre en exergue le relief et l'hydrographie de la zone.

Sur le plan orographique, les différents sites étudiés appartiennent à la dorsale de hautes terres qui se déploie de la baie de Bonny aux Monts Mandara en passant par le plateau de l'Adamaoua. Cette dorsale regorge les hauts plateaux de l'Ouest constituant un ensemble de plateaux étagés et de hauts reliefs volcaniques. On distingue :

- les plus hauts plateaux du pays, localisés au Nord de Bamenda, dont l'altitude moyenne est de 2200 m, le massif volcanique Oku y est le plus impressionnant ;
- le plateau Bamiléké (1400-1800 m), dominé par le mont Bamboutos (2740 m) est marqué à sa limite avec le plateau Bamoun par la plaine de Ndop ;
- le plateau Bamoun (1100-1200 m) auquel appartiennent les massifs du Mbam (2335 m), le Nkogam (2263 m) et le Mbapit (1989 m) (<https://www.camerecole.org>).

Dans ce secteur, s'illustre une série de hauts reliefs volcaniques : Mont Oku (3008 m), Mont Bambouto (2740 m), Mont Manengouba (2396 m) ; dont la boucle se situe sur la côte atlantique avec le Mont Cameroun (4095 m). Outre les hautes terres, le site d'étude révèle la présence de la plaine côtière aux abords du Mont Cameroun et dans sa partie sud qui repose sur les formations sédimentaires de Douala.

Tableau 2: Précipitations et températures moyennes mensuelles de la zone d'étude pour la période allant de 1908 à 2020 (source: www.weatherbase.com).

Localités	Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total	M/an
Limbé	P(m m)	31,3	63,2	154,0	205,0	254,0	353,0	523,0	538 ,0	450,0	341,0	126,0	32,2	3070	-
	T(°C)	25,0	25,7	25,5	25,2	24,8	24,0	23,0	22,9	23,4	23,8	24,4	24,7	-	24,4
Foumbot	P(m m)	6,1	20,0	115,2	166,3	181,0	206,4	322,0	354,4	357,0	264,5	53,0	6,5	2052	-
	T(°C)	22 ,0	23,1	23,2	23,0	21,9	21,0	20,3	20,5	20,5	21,1	21,4	21,4	-	21,6
Manjo	P(m m)	14,0	44 ,0	134,0	184,0	207,0	263,0	420,0	502,0	465,0	326,0	82,0	12,0	2653	-
	T(°C)	22,9	23,7	23,6	23,4	22,9	22,0	21,2	21,0	21,6	22,0	22,6	22,5	-	22,9

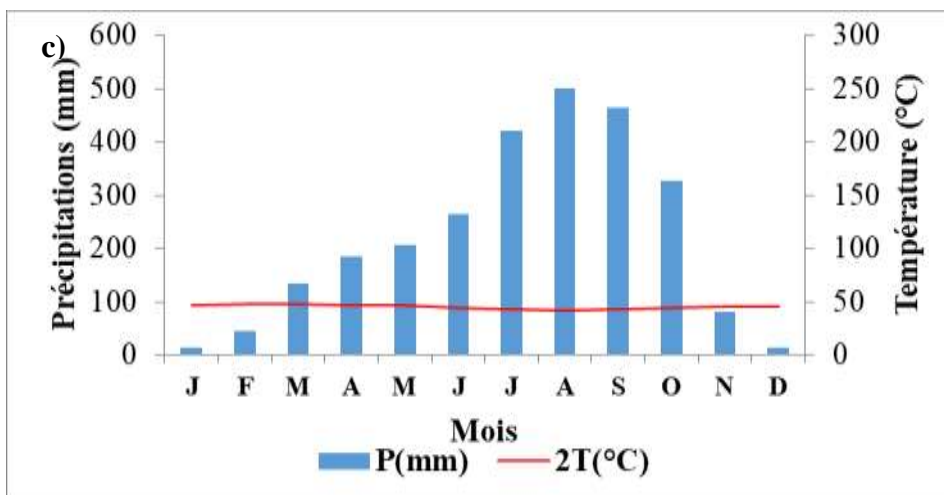
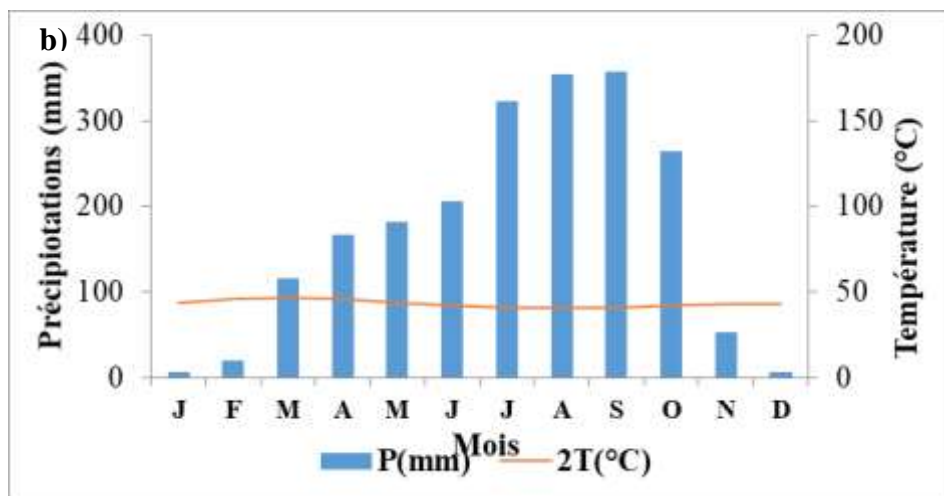
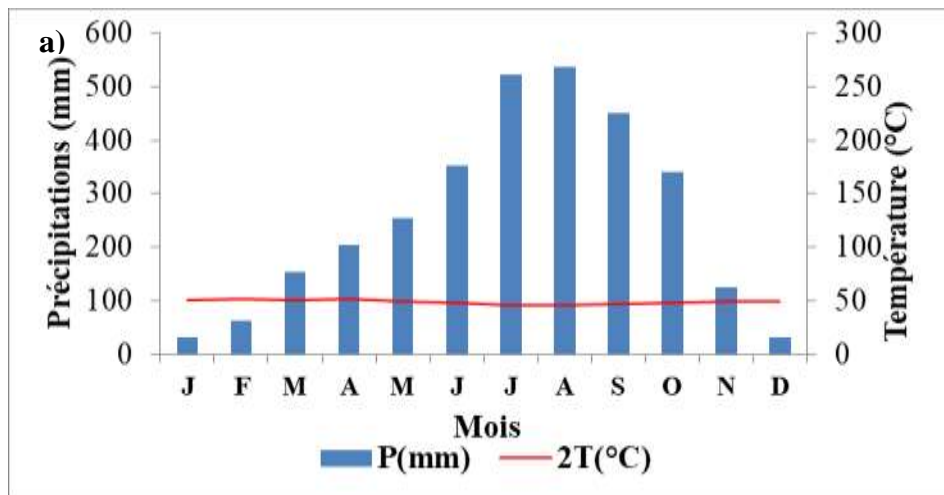


Figure 2: Diagrammes ombrothermiques de Bagnouls et Gausson (1957) appliqué aux données de la zone d'étude : (a) Limbé, (b) Fombot, (c) Manjo).

Ainsi, la portion de relief délimitée par ce site illustre quatre unités géomorphologiques (Fig. 3) délimitées en fonction des altitudes matérialisées par des différentes couleurs. Il s'agit de :

- l'unité géomorphologique I qui correspond aux basses terres dont les altitudes sont comprises entre 0 et 600 m, matérialisée par la couleur ocre, elle représente environ 45% du site d'étude ;
- l'unité géomorphologique II caractérisée par des altitudes moyennes (600-1200m), elle est représentée par le gris clair et occupe une proportion d'environ 30% du site ;
- l'unité géomorphologique III qui couvre les hautes terres dont les altitudes sont comprises entre 1200-2400 m, elle est estimée à environ 23% du secteur ;
- l'unité géomorphologique IV la moins représentée (2%), qui concerne les altitudes supérieures à 2400m.

Du point de vue hydrographique, les cours d'eau qui arrosent le secteur d'étude sont illustrés sur la figure 4. Celle-ci laisse apparaître des cours d'eau de différents ordres donc quelques principaux sont le Moungo, le Nkam et le Noun. A ces principaux collecteurs, se greffent des affluents dont l'ensemble illustre un réseau en branche d'arbres qualifié de réseau dendritique.

I.2.2. Géologie

I.2.2.1 Roches

Le secteur d'étude appartient à la ligne volcanique du Cameroun (LVC). La Ligne du Cameroun s'étend sur plus de 2000 km, de l'île de Pagalù au lac Tchad et peut être jusqu'au Tibesti (Vincent, 1970) ou même jusqu'au sud-est de la Lybie (Moreau et al., 1987). Cette ligne est marquée par un alignement frappant NE-SW de complexes volcaniques et subvolcaniques récents, apparaissant à la fois en Afrique Centrale et dans l'océan Atlantique (Moreau et al., 1987). La LVC, en Afrique Centrale, comprend huit champs volcaniques monogéniques d'une superficie totale estimée à près de 17000 km² (Schmidt et al., 2022). De par sa particularité d'appartenir à un environnement tectonique unique à la transition de la croûte océanique et celle continentale, elle représente un laboratoire naturel pour l'évaluation de l'évolution géochimique des magmas alcalins (Kamgang et al., 2008, 2010; Asaah et al., 2015 ; Schmidt et al., 2022). La LVC avec une orientation d'azimut magnétique général de 45° comprend les volcans du golfe de Guinée et du Cameroun continental (Wembenyui et al., 2020). Les volcans de la partie continentale sont Biu, Mandara, Ngaoundéré, les hauts plateaux de Bamenda, Sabga, Oku, les hauts plateaux de Babungo, Bamboutos, Manengouba, le Mount Cameroun et Etinde qui se superposent à un système de fractures appelé zone de

cisaillement centre camerounais (Ubangoh et al., 1988). Sur le plan structural, ce secteur continental sur lequel se hissent les Monts sus-cités est une succession de horsts et de grabens. Les structures de grabens partiellement remplies de coulées de laves basaltiques abritent des structures volcaniques monogéniques, notamment des cônes de scories, des anneaux de tuffs et des volcans maar (Njome et al., 2008; Pouclet et al., 2014 ; Schmidt et al., 2022). La partie océanique est entièrement volcanique et constituée des îles de Pagalù, São Tomé, Príncipe, et Bioko dans le golfe de Guinée.

Deux principales hypothèses se dégagent des travaux réalisés sur la LVC et tentent d'expliquer la mise en place de cette ligne. Il s'agit d'une part des mouvements verticaux qui ont créé soit une série de horsts et de grabens délimités par des failles normales SW-NE (Vincent, 1970; Gouhier et al., 1974; Deruelle, 1982) ; et d'autre part du rajeunissement d'une faille majeure supposée avoir existé avant l'ouverture de l'Océan Atlantique Sud, dans les prolongements de la faille de Pernambuco (Louis, 1978, Moreau et al., 1987).

Le socle de la Ligne du Cameroun est granito-gneissique (Nnange et al., 2001), reflétant une longue histoire de volcanisme associé au métamorphisme (Wembenyui et al., 2020). D'après Moreau et al., (1987), le socle est principalement constitué de formations de la chaîne panafricaine d'Afrique centrale ; le long de la Ligne du Cameroun se retrouvent des leucogranites alcalins syntectoniques.

Le Mont Cameroun est édifié sur un horst de socle de terrains métamorphiques et plutoniques précambriens (Deruelle et al., 2000). Le socle protérozoïque est constitué de granites et de gneiss qui ont été plissés selon une orientation NNE-SSW durant l'orogénèse panafricaine (Ngounouno et al., 2001). Les travaux de reconnaissance effectués sur les monts Bamenda indiquent la présence d'importants volumes de laves mafiques et felsiques, ainsi que l'existence de deux épisodes d'ignimbrites rhyolitiques séparés par des laves trachytiques (Kamgang et al., 2007 ; Dedzo et al., 2012). Les laves observées dans les Monts Bamenda sont pour l'essentiel des trachytes, avec quelques benmoréites moins riches en silice et quelques rhyolites, dont certaines sont très riches en silice (Kamgang et al., 2007).

Cet ensemble repose sur un socle granitique panafricain (Toteu et al., 2001). Les laves de la Ligne du Cameroun sont principalement basiques. Ces laves sont, en grande majorité, des basaltes alcalins typiques (Moundi et al., 2007). Le magmatisme de la Ligne du Cameroun concerne les complexes plutoniques composés principalement de granites ou syénites ; et les massifs volcaniques (Njonfang et al., 1992).

Le Mont Bangou, volcan daté le plus ancien (51,1 Ma) de la Ligne du Cameroun, présente des laves qui constituent deux séries dont la première va des basaltes à des mugéarites, et la seconde des basaltes jusqu'à des trachytes et des rhyolites (Fosso et al., 2005). Les enclaves de péridotites observées dans la partie Sud de la LVC (Kumba et Nyos) sont composées principalement d'olivine, de pyroxènes et de spinelle (Sababa et al., 2015).

Au centre du Cameroun, se localise le massif volcanique de l'Adamaoua. Ce dernier se situe dans la partie orientale de la LC avec des plateaux volcaniques dont le plateau de Ngaoundéré en est le principal. C'est un domaine magmato-tectonique délimité par la faille de l'Adamaoua au Nord et la faille de Djérem-Mbéré au Sud (Njombie Wagsong et al., 2021). Le volcanisme dans ce secteur est principalement constitué de coulées basaltiques qui produisent de grands plateaux de laves et sont souvent conservés sous forme de cônes et de cols volcaniques (Njombie Wagsong et al., 2021). Les études menées sur les roches et les laves de la région ont montré que les roches mafiques sont principalement des basanites et des basaltes sous-saturés en silice et sont assez uniformes en terme de composition en éléments majeurs et traces (Tiabou et al., 2018). Les laves y sont basaltiques (basaltes et hawaïtes), trachytiques et phonolitiques (Nkouandou et al., 2008). Dans le maar de Youkou, Njombie Wagsong et al., 2018, 2021, indiquent la présence de xénolithes de péridotites et de pyroxénites dans les basanites apparaissant sous forme de bombes à scories et de pyroclastiques. Le volcanisme du Kapsiki est marqué par des basaltes et hawaïtes comme laves mafiques, et avec des phonolites, trachytes et rhyolites comme laves felsiques (Ngounouno et al., 2000).

Outre les basaltes alcalins typiques observés sur la LVC, d'autres basaltes à caractère transitionnel ont été décrits au plateau Bamoun (Moundi et al., 1996, 2007), au mont Bangou (Fosso et al., 2005), aux monts Bambouto et au massif d'Okou (Marzoli et al., 2000), au complexe volcano-plutonique de Bana (Kuepou et al., 2006), aux plateaux de Biu et Jos au Nigeria (Rankenburg et al., 2005). La composition minéralogique de ces basaltes transitionnels est marquée par l'absence de l'olivine et de la néphéline, et par la présence de l'hypersthène (Moundi et al., 2007).

La carte géologique du secteur d'étude (Fig. 5), présente dans l'ensemble une diversité de formations géologiques qui relatent l'histoire géologique de la zone d'étude. Elle est marquée par des roches volcaniques telles que les basaltes et les trachytes ; les roches plutoniques à l'instar des granites et syénites ; les roches sédimentaires comme les grès,

sables et alluvions et les roches métamorphiques représentées par les quartzites, les micaschistes et les gneiss. Les sites de prélèvement sont dominés par la présence de roches magmatiques : basaltes récents, trachytes et granites. Le secteur est marqué par un métamorphisme confirmé par la présence des gneiss parfois migmatitiques et des quartzites.

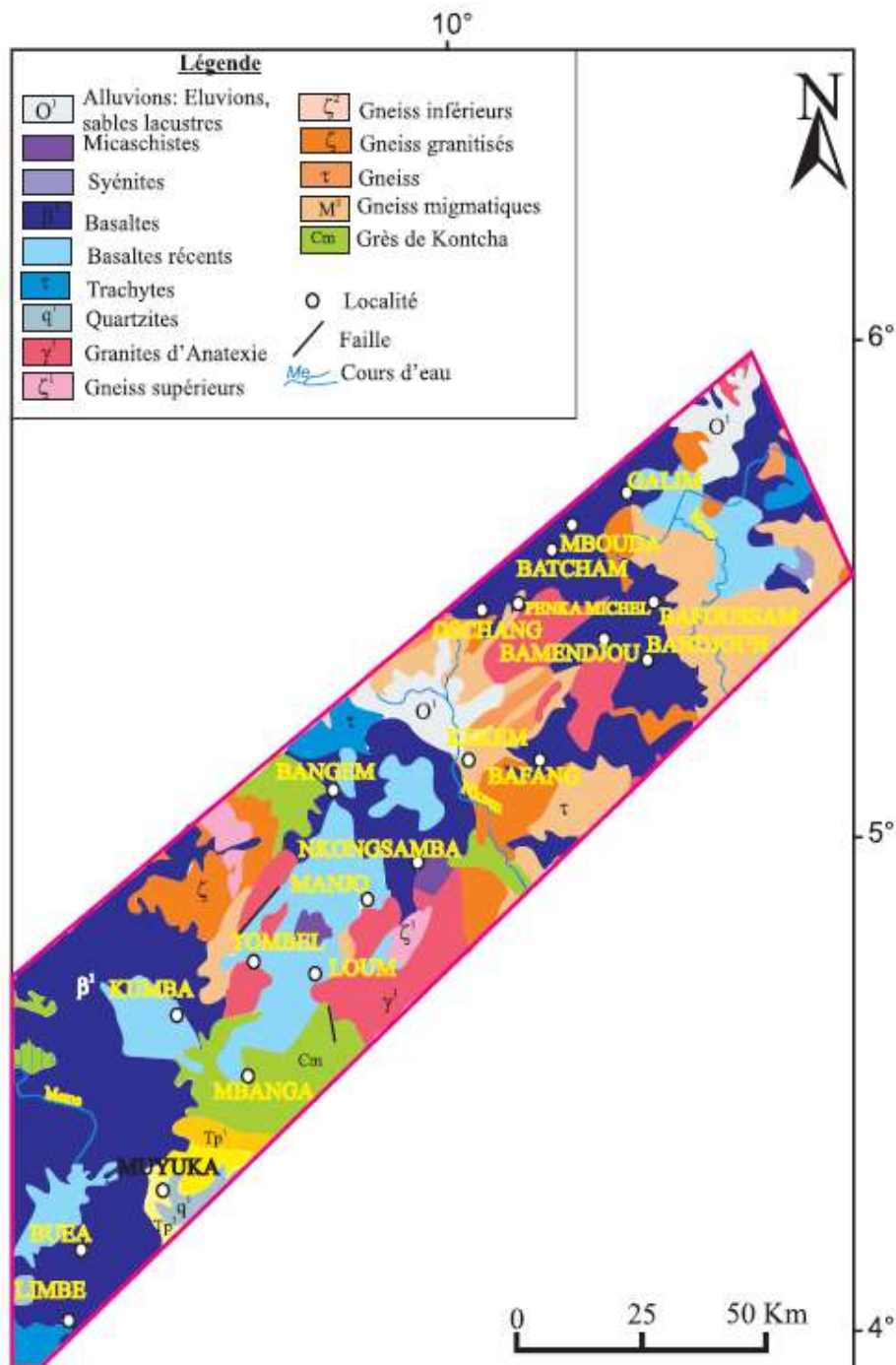


Figure 5: Carte géologique (Extrait de la carte géologique de Douala-Ouest au 1/500 000 ; Dumort, 1968)

I.2.2.2 Sols

Les sols formés en zone volcanique sont généralement des sols noirs développés sur matériaux pyroclastiques ou téphra provenant d'éruptions vulcaniennes et péléennes. Le téphra comme matériau à l'origine du sol a une forte influence sur les propriétés du sol. La LVC est caractérisée par une série de dépôts de téphra à dominante basaltique (Watanabe et al., 2023). Les sols observés sur la LVC du Cameroun sont des andosols localisés à des altitudes élevées et des ferrasols identifiés à des altitudes plus basses (Enang et al., 2021).

Dans le plateau Bamoun, il est le plus souvent observé des sols peu évolués, d'apport récent, très fertiles, développés sur roches volcaniques, sablo-limoneux, grumeleux et fins. Ces sols sont constitués d'un mélange d'argiles de type 1/1 ou 2/1, d'autres oxydes et d'hydroxydes d'alumine. Les sols de Tombel et Foubot, plus précisément sont composés de kaolinite, gibbsite et halloysite (Watanabe et al., 2023), et d'autres minéraux tels que l'allophane, l'imogolite et le ferrihydrite (Etame et al., 2009). Ces sols constituent avec ceux du Mont Cameroun la classe des sols jeunes de la LVC. Ils se caractérisent par de fortes teneurs en Al et Fe répondant ainsi aux critères des propriétés andiques (Delvaux et al., 1989, Proctor et al., 2007).

Les sols hydromorphes sont des sols des plaines et des zones marécageuses, caractérisés par de fortes accumulations de matières organiques. Dans le secteur du Mont Cameroun, les sols sont développés sur roches volcaniques et sont propices à l'agriculture, mais avec une faible capacité de rétention en eau présentant des risques élevés d'érosion et de glissement de terrain. Au pied du flanc Ouest du Mont Cameroun, s'identifient des andosols développés sur basaltes récents. Ces profils sont de faible épaisseur et caractérisés par des horizons très peu distincts, une teneur élevée en matière organique et une couleur foncée, une structure grumeleuse, une faible cohésion ainsi qu'un passage très brutal à la roche mère ; qui montre une lave vacuolaire à phénocristaux d'augite et d'olivine (Sieffermann, 1973). Dans le département du Moungo, les andosols et les sols bruns eutrophes tropicaux développés sur des produits pyroclastiques basaltiques du Quaternaire ont été décrits et présentent des caractéristiques identiques aux sols observés dans le secteur du Mont Cameroun.

Les sols de la LVC ont une composition élémentaire totale faible en silice et élevée en fer (Watanabe et al., 2023) par rapport aux compositions moyennes des basaltes. L'altération chimique y contribue plus que les conditions climatiques (Watanabe et al., 2023).

Conclusion

Le secteur d'étude, localisé dans la portion Sud de la partie continentale de la Ligne Volcanique du Cameroun est composé de neuf localités appartenant aux régions administratives du Sud-Ouest, de l'Ouest et du Littoral. Il appartient aux hautes terres du Cameroun où règne un climat tropical à deux saisons, une longue saison pluvieuse et une courte saison sèche. Le relief est composé essentiellement de hautes terres. Le réseau hydrographique est de type dendritique. Les sols développés sont des andosols et des sols hydromorphes. La géologie de la zone décrit un socle de terrains métamorphiques et plutoniques constitués de granites, de gneiss, de migmatites recouverts par les laves.

CHAPITRE II: REVUE DE LA LITTERATURE SUR LES SCORIES VOLCANIQUES ET LES CIMENTS

Introduction

Le présent chapitre présente l'état de l'art dans le domaine d'étude. Il est axé sur deux volets dont l'un traite des données d'investigation de divers auteurs sur le secteur d'étude. Le second volet est consacré aux travaux antérieurs portant sur les scories volcaniques.

II.1 Travaux antérieurs sur la géologie du secteur d'étude

D'après les travaux de Dunlop (1983) et de Moreau et al. (1987), les volcans de la LVC varient en âge du Miocène à l'Actuel. D'autres travaux précisent que les îles de Pagalù, Sao Tomé et Principe sont caractérisées par un volcanisme alcalin dominés par des trachytes et des phonolites (Cornen et Maury, 1980). L'activité volcanique le long de la LC débute au Crétacé supérieur, ou Paléogène inférieur, avec la mise en place de corps plutoniques dans les parties centrale et nord (Jacquemin et al., 1982; Fitton et Dunlop 1985 ; Schmidt et al., 2022). En général, les structures préexistantes telles que les zones de cisaillement et les failles néoprotérozoïques sont supposées jouer un rôle dans la distribution du volcanisme le long de la LVC (Deruelle et al., 1991). Les travaux de Moreau et al. (1987) démontrent que, quatre principales directions de linéament (N-S, N70E, N45W, E-W) y contrôlent l'ascension du magma. Les roches volcaniques les plus anciennes sont datées $51,8 \pm 1,2$ Ma (Moundi et al., 2007) et ont été trouvées à Fouban, au Mt Bamboutos. Les produits volcaniques du Mt Bamboutos sont stratifiés et présentent une composition bimodale (Dedzo et al., 2020), avec des laves allant de l'extrémité mafique (basanite, basalte) à l'extrémité felsique (trachytes et rhyolites avec ignimbrites).

Les formations lithologiques observées dans la zone d'étude sont diversifiées (Fig. 5) : les formations magmatiques (syénite, granites, trachytes, basaltes, basaltes récents), et les formations métamorphiques (gneiss). Les travaux réalisés sur la Ligne du Cameroun ont permis de déterminer les caractéristiques de ces différentes formations.

Les formations volcaniques recouvrent le socle Panafricain. Elles sont constituées de basaltes récents datés du Quaternaire et de basaltes anciens datés du Tertiaire (Nkoumbou, 1990). Les basaltes récents se composent de phénocristaux d'olivine, de pyroxène et de plagioclase. Les basaltes anciens sont constitués de phénocristaux d'olivine et de pyroxène, souvent prismés ou parfois stratifiés. Les trachytes sont composés de phénocristaux de feldspaths alcalins et/ou de pyroxènes.

Les formations de socle sont constituées de roches plutoniques et métamorphiques panafricaines (Tagne-Kamga, 2003). Les granites constituent la principale roche plutonique

observée dans la zone, identifiés par deux faciès ; les granites blanchâtres et les granites rosâtres (Nkoumbou, 1990).

Les formations métamorphiques d'âge précambrien sont marquées par deux événements tectoniques majeurs : une foliation mylonitique NE-SW rappelant une déformation ductile le long d'une faille de décrochement senestre ; un événement cassant plus jeune caractérisé par trois ensembles de failles (N140E–N150E, N120–N130, et N90E–N110E) qui tronquent la foliation ductile précédente (Njome et Suh, 2005). Les roches métamorphiques rencontrées sont des gneiss et des quartzites. Les gneiss sont rubanés ou ocellés et parfois associés à des mylonites. Ils affleurent de façon sporadique dans les projections du lac Barombi-Mbo. Ces gneiss mésocrates sont caractérisés par une alternance de lits clairs quartzo-feldspathiques et de lits sombres essentiellement riches en biotite. Les paillettes de biotite, pouvant inclure quelques grains de grenat, sont orientées préférentiellement et confèrent à la roche une schistosité.

Les laves des volcans de Barombi Koto sont composées des micro-basaltes, des basanites, des basaltes alcalins et des hawaiiites (Tamen et al., 2007). Les basanites caractéristiques des laves mafiques de Youkou sont marquées par un indice d'alcalinité élevé tel que défini par Pang et al. (2012) ; elles sont melanocrates à texture microporphyrrique et composées de plagioclase, olivine, pyroxène et magnétite avec la néphéline normative (Njombie et al., 2021).

II.2. Travaux antérieurs sur les matériaux étudiés

II.2.1. Définition

Parmi les matériaux pyroclastiques, les scories et les pumices sont les plus abondants (Alemayehu et Lennartz 2009), et sont également les plus sollicités dans les applications industrielles (Lemougna et al., 2018). Les scories sont des fragments de lave solidifiées dans l'air lors d'une éruption volcanique explosive. Les scories sont généralement d'une dizaine de centimètre de diamètre. Elles présentent un aspect irrégulier et poreux. Les poudres de scories sont souvent assimilées à des cendres volcaniques (Leonelli et al., 2007 ; Lemougna et al., 2011 ; Tchakouté et al., 2013) ; cendre volcanique dont la définition renvoie aux petits fragments de matériaux pyroclastiques dont la taille est inférieure à 2 mm (Dingwell et al., 2012). Les scories volcaniques proprement dites sont des lambeaux de lave vacuolaire, dont la taille se situe généralement entre 1 et 3 cm, mais dont les plus gros éléments peuvent atteindre la dizaine de centimètres.

De par leur provenance, les scories sont répandues dans plusieurs régions du monde incluant l'Europe (Italie, Turquie, Grèce et Espagne), l'Amérique Centrale, l'Asie (la Chine)

l'Afrique de l'Est (Eritré, Djibouti, Kenya, Éthiopie) et l'Afrique Centrale (Cameroun) (Fig. 6), Iran et Arabie Saoudite (Sabtan et Shehata, 2000 ; Hossain, 2005 ; Leonelli et al., 2007 ; Alemayehu et Lennartz, 2009; Zheng et al., 2009 ; Seyfi et al., 2015). En Afrique centrale, les scories volcaniques résultent du dynamisme de la Ligne Volcanique du Cameroun.

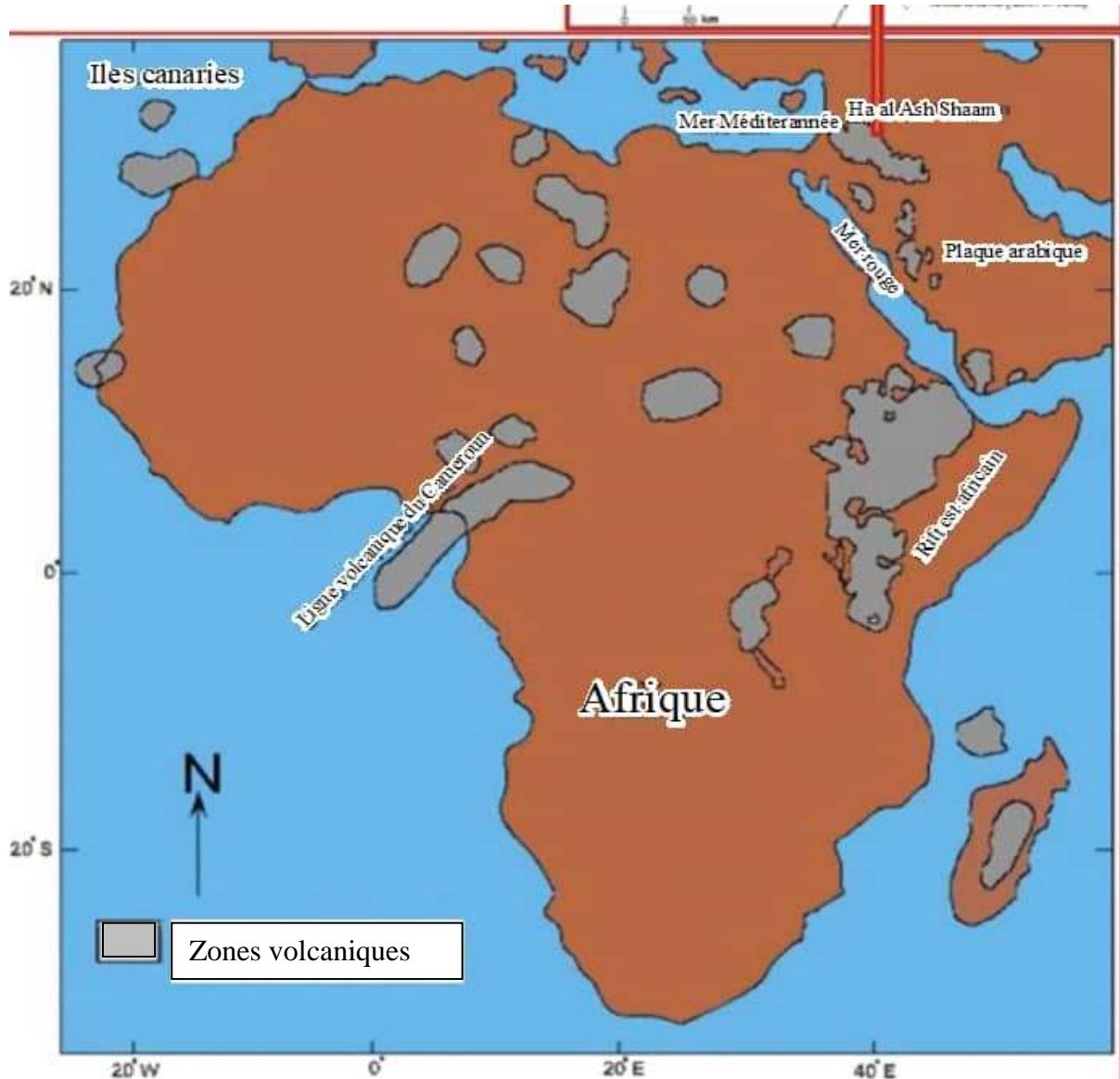


Figure 2: Localisation des scories en Afrique (Al-Swaidani, 2018).

II.2.2. Caractéristiques morphologiques des scories

Les scories volcaniques s'identifient par leur structure vacuolaire. Elles sont plus denses que les pumices et présentent des vésicules plus grosses. Leurs parois sont plus épaisses résultant de la faible viscosité et de la moindre explosivité du magma associé à leur formation (Lemougna et al., 2018). En raison de leur structure vésiculaire, les scories volcaniques présentent un plus grand intérêt pour les applications d'ingénierie (Alemayehu et Lennartz, 2009). Elles sont de couleur noire, rouge, brune avec des teintes intermédiaires.

Cette couleur est due à la présence des oxydes de fer qui peuvent être considérés comme « indicateurs colorés » des pouzzolanes.

II.2.3. Propriétés chimiques et industrielles des scories

La composition chimique et minéralogique des scories volcaniques dépend de la composition du magma qui est de nature mafique pour les scories volcaniques (Siddique, 2011). Les travaux réalisés sur ces matériaux (Leonelli et al., 2007; Djobo et al., 2016 ; Tchamdjou et al., 2017 ; Lemougna et al., 2018 ; Beleuk et al., 2021) ont révélé une composition chimique dominée par trois oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , et Fe_2O_3), associés aux faibles teneurs de MgO , Ca_2O et Na_2O et d'autres oxydes en faible pourcentage. Dans la plupart des cas, la silice prédomine avec des teneurs généralement comprises entre 40 et 52% dans le cas des scories volcaniques (Ohba et Nakagawa, 2002; Hossain, 2005; Leonelli et al., 2007; Demirdag et Gunduz, 2008; Siddique, 2011; Tchakouté et al., 2013 ; Takeda et al., 2014 ; Seyfi et al., 2015). Il en ressort également qu'en dehors de ces oxydes majeurs, les scories volcaniques contiennent d'importantes concentrations d'éléments en trace.

La composition minéralogique dépend non seulement de la chimie du magma mais également des conditions d'éruption. Elle peut varier d'un matériau presque vitrifié à un matériau complètement cristallisé (Siddique, 2011; Lemougna et al., 2014 ; Serra et al., 2015 ; Zhang et Honaker, 2018).

Les scories sont marquées par la présence de quantités importantes de phases vitreuses pouvant être attribuées à la nature de ces matériaux qui résultent du refroidissement rapide des laves volcaniques (Leonelli et al., 2007). Les études menées sur les scories de Djoungo montrent que ces matériaux se composent de plagioclase, d'olivine et du pyroxène (Bidjocka et al., 1993 ; Leonelli et al., 2007). Les minéraux de roches formés à partir des magmas cristallisés sont principalement des minéraux silicatés auxquels sont associés l'ilménite et la magnétite (Lemougna et al., 2018). La plupart des scories sont composées des minéraux mafiques (pyroxène, olivine et plagioclase mafique), minéraux typiques des roches basaltiques (Leonelli et al., 2009 ; Zheng et al., 2009 ; Alemayehu et al., 2011). Les minéraux colorés des scories sont le pyroxène, l'amphibole, les micas et l'olivine ; les minéraux incolores sont le quartz, et les feldspaths. Les scories peuvent contenir des métaux (plomb, zinc, arsenic) et du soufre dont la source potentielle serait des sulfures (Zainoun, 2005)

II.2.4. Domaines d'application des scories volcaniques

Les propriétés naturelles des scories volcaniques justifient leur utilisation dans de nombreux domaines d'application. Les Romains sont les premiers à utiliser les

aluminosilicates naturels pour préparer des ciments hautement durables ; permettant ainsi de réaliser des monuments grandioses et très résistants. Actuellement, l'utilisation industrielle des scories volcaniques concerne le ciment et les bétons (Siddique, 2011; Celik et al., 2019 ; Djobo et al., 2020), les matériaux géopolymères (Tchakouté et al., 2013 ; Djobo et al., 2016 ; Baenla et al., 2019 ; Lemougna et al., 2019, 2020), les matériaux céramiques (Serra et al., 2015), les stimulants de sols lunaires et les adsorbants.

D'après Leonelli et al. (2007), les scories de Djoungo, Baignon, Gouogouo avec leurs teneurs en $(K_2O + Na_2O + CaO) < 12\%$ feraient un usage intéressant dans l'industrie céramique. A cette propriété naturelle, s'ajoute la nature amorphe de la silice. Meukam (2004), en étudiant les matériaux pouzzolaniques de Djoungo et Foubot, conclut que ces derniers permettent la production des briques de terre plus légères et de meilleures performances thermiques que celles communément produites. Une étude comparative des travaux de différents auteurs permet de déterminer le domaine d'application des scories volcaniques à partir de la composition chimique (Tab. 2).

Dans l'industrie du bâtiment, la pouzzolane est utilisée pour la fabrication des bétons légers, des blocs légers, des moellons, buses, murs et cloisons, planchers, toitures et terrasse, bordures de trottoirs et pavés autobloquants. Elle entre aussi dans la constitution de couches sous dalles et sous carrelage, dans le remplissage de planchers et de plafonds, ainsi que dans la production de bétons réfractaires. Elle est utilisée dans ce domaine tant pour des raisons d'ordre économique que technique. Du point de vue économique, l'utilisation de pouzzolane comme adjuvant dans la production du ciment permet de réduire la facture énergétique ainsi que l'émission de CO_2 et d'élargir la gamme de production. Sur le plan technique, elle permet de réduire la perméabilité, d'augmenter la résistance aux sulfates et environnements agressifs.

Tableau 3: Domaines d'application des scories en fonction de la composition chimique

	Leonelli et al. (2007)	Zheng et al. (2009)	Kaid et al. (2009)	Lemougna et al. (2014)	Serra et al. (2015)
SiO ₂	44-47	49,24	43-72	43-55	70,43
Al ₂ O ₃	14-16	15,8	9-20	15-16	15,03
CaO	8-10	7,25	1-15	6-11	1,45
MgO	3-7	8,72	0,5-7	3-7	0,64
Fe ₂ O ₃	10-14	11,47	1-12	8-14	3,52
Na ₂ O	3-4	3,08	0,5-11	4,1-5,3	5,43
K ₂ O	1-3	1,03	0,2-8	1,5-3	2,76
TiO ₂	2-4	1,91	-	1,8-3,3	0,5
P ₂ O ₅	0-0,7	0,3	-	0,8-0,9	-
MnO	0-0,5	0,14	-	0,16-0,2	-
Domaines d'application	Applications en céramique	Stimulant des sols lunaires	Fabrication des ciments et bétons	Production des Géopolymères	Applications en céramique

Tableau 5: Spécifications des propriétés chimiques des pouzzolanes naturelles (ASTM C18)

Exigences chimiques	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ : %	Min. 70
	Teneur en humidité	Max. 3
	Perte au feu	Max. 10

II.3. Connaissances de base sur le ciment

II.3.1. Définition

Le ciment est un liant hydraulique qui sert de base au béton. C'est une matière calcaire qui mélangée avec un liquide forme une pâte durcissant à l'air ou dans l'eau. Il est sollicité dans la confection des dalles, des parpaings, des enduits et des mortiers.

Dans la commercialisation, les ciments sont classés sous la dénomination « CEM », qui renvoie au terme anglais « cement » ; suivi d'un chiffre romain (I à V), suivi d'une lettre majuscule en fonction de leur teneur en clinker et d'autres composants.

Elle permet également d'améliorer la maniabilité ainsi que la qualité du produit fini. Elle fait aussi l'objet d'un usage apprécié dans la synthèse des géopolymères.

Les scories volcaniques, de par leur structure vitreuse, possèdent la capacité de fixer l'hydroxyde de calcium et durcir sous l'eau. Cette propriété des matériaux pyroclastiques est appelée pouzzolanité ou effet pouzzolanique. Les scories volcaniques peuvent être utilisées pour produire les éléments de maçonnerie en roche (ACI committee 232, 2001; Al-Swaidani, 2016). Les propriétés pouzzolaniques des scories volcaniques dépendent principalement de la composition chimique, de la teneur en silice réactive, de la surface spécifique et du degré de cristallinité (Lemougna et al., 2018). Pour des applications relevant du domaine du ciment, en plus de ces propriétés sur la composition chimique, les travaux de Pourkhorshidi et al. (2010) ont permis de définir des propriétés complémentaires requises pour des scories volcaniques utilisées à ces fins (Tab. 3). Ainsi, les matériaux intéressants pour de telles applications doivent avoir au préalable la somme des trois oxydes ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) $\geq 70\%$; en plus d'une valeur de perte au feu maximale de 10%, (ASTM C18). Au Cameroun, les travaux menés sur les applications industrielles des scories volcaniques ont été réalisés à partir des matériaux prélevés à Djoungo et Galim (Tchakouté et al., 2013 ; Tchamdjou et al., 2017). D'après Tchakouté et al. (2013), les scories volcaniques de Djoungo et Galim présentent des potentialités d'être appropriées comme matière première pour la synthèse des géopolymères. Les scories de la plaine de Tombel, du plateau Bamiléké et de la plaine du Noun possèdent des caractéristiques telles que l'indice d'activité, la quantité de phase amorphe qui leur confèrent des caractéristiques favorables pour une utilisation comme additif dans la production du ciment (Mbowou et al., 2020).

II.3.2. Constituants du ciment

Les constituants du ciment sont de deux ordres : les constituants principaux et les constituants secondaires.

II.3.2.1. Constituants principaux

Les constituants principaux sont des matières utilisées dans la composition d'un type de ciment. Il s'agit du clinker Portland, du laitier de haut fourneau, de la fumée de silice, des matériaux pouzzolaniques (pouzzolane naturelle et pouzzolane naturelle calcinée), des cendres volantes (cendres volantes siliceuses et cendres volantes calciques), schistes calcinés et du calcaire (calcaire normal et calcaire de haute qualité). Les propriétés des composants principaux des ciments sont définies à partir de leur nature :

- clinker Portland (K) obtenu d'un mélange précis de trois matières premières donc calcaire, marne et argile calciné à la température d'environ 1450°C ;

- laitier de haut fourneau (S) issu du refroidissement rapide d'un laitier fondu de composition appropriée et provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau ;
- fumée de silice (D) qui provient de la réduction d'un quartz de grande pureté par du charbon dans les fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium ;
- pouzzolane naturelle (P) qui sont des matériaux volcaniques ou sédimentaires de composition chimique et minéralogique appropriées ;
- pouzzolane naturelle calcinée (Q) qui peuvent être des matériaux volcaniques, des argiles, des schistes ou des roches sédimentaires activés thermiquement ;
- cendres volantes siliceuses (V) qui sont des poudres fines constituées de particules dotées de propriétés pouzzolaniques ;
- cendres volantes calciques (W) qui sont des poudres fines ayant des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques ;
- schistes calcinés (T), produit dans un four spécial à 800°C, c'est un schiste bitumeux calciné qui finement broyé présente des propriétés fortement hydrauliques et pouzzolaniques ;
- calcaire normal (L) qui constitue un ajout inerte dont la teneur en masse de carbone organique total est inférieure ou égale à 0,5% ;
- calcaire de haute qualité (LL) qui est une catégorie de calcaire dont la teneur en masse de carbone organique total est inférieure ou égale à 0,2%.

II.3.2.2. Constituants secondaires

Les matériaux secondaires concernent les minéraux dérivés du processus de fabrication du clinker et utilisés accessoirement. Il peut s'agir du sulfate de calcium qui ajouté en faible proportion aux autres constituants du ciment, assure la régulation de la prise. Il peut être utilisé sous forme de gypse, d'hémihydrate, d'anhydrite ou d'un mélange des formes citées.

II.3.2.3. Types de ciment

La classification des ciments dépend de la nature et des teneurs des éléments qui le constituent. Il existe une multitude de types de ciment dont les propriétés (composition, résistance, vitesse de prise et durcissement) varient en fonction des divers usages du béton dans les chantiers, les usines pour des réalisations des bâtiments et des structures du génie

civil. Ainsi, les types de ciments sont définis par les normes en la matière. Au préalable, il existe cinq types de ciments reconnus par la norme EN 197-1 à savoir :

- ciment Portland pur (CEM I) qui est composé du seul clinker, une de ses variantes (ciment blanc) permet de réaliser des produits et bétons esthétiques et décoratifs;
- ciment Portland composé (CEM II), qui se compose de clinker broyé avec des cendres volantes;
- ciment de haut fourneau (CEM III) encore appelé ciment métallurgique dont la composition intègre du clinker broyé avec du laitier granulé ;
- ciment pouzzolanique (CEM IV) ;
- ciment composé (CEM V) qui se constitue de clinker, des cendres volantes et du laitier de haut fourneau.

Le nombre de types de ciment évolue avec le temps, en 1994, l'évolution de la norme NF EN 197-1 en définissait dix ; il existe environ vingt-sept types de ciments courants d'après la norme EN 197-1 de 2001.

La norme camerounaise NC 234 de 2005 définit la composition des cinq principaux types de ciments (Tab. 4)

Tableau 7: Types de ciment et leur composition.

Notation des produits (types de ciment courant)		Composition (pourcentage en masse pour les constituants principaux et secondaires)									Constituants secondaires	
		Constituants principaux										
		Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pouzzolanes naturelles	Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire			
						siliceuse	calcique					
K	S	D	Z	V	W	T	L					
Ciment Portland	CEM I	95-100									0-5	
Ciment Portland composé	CEM II/A	80-94	6-20								0-5	
	CEM II/B	65-79	21-35									
	CP J 35	65-79	21-35								0-5	
Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65								0-5	
	CEM III/B	20-34	66-80									
	CEM III/C	5-19	81-95								0-5	
Ciment pouzzolanique	CEM IV/A	65-89	11-35								0-5	
	CEM IV/B		45-64	36-55								0-5
Ciment au laitier et aux cendres	CEM V/A	40-64	18-30		18-30						0-5	
	CEM V/B	20-38	31-50		31-50						0-5	

Conclusion

La recherche bibliographique a révélé dans le secteur d'étude la présence des formations du socle et des formations volcaniques parmi lesquelles les scories. Celles-ci sont morphologiquement identifiables par leur aspect déchiqueté et leur couleur rouge à grise. Leur composition chimique justifie leur sollicitation dans de nombreuses industries telles que celle du ciment. Dans ces différentes applications industrielles, les scories requises doivent avoir une composition proche de celle des pouzzolanes naturelles pour rentrer dans la composition des ciments pouzzolaniques. La détermination des caractéristiques des scories s'est faite à partir d'une démarche décrite dans la méthodologie.

CHAPITRE III: METHODOLOGIE

Introduction

La partie consacrée à la méthodologie concerne l'ensemble des méthodes utilisées pour réaliser cette étude. La démarche méthodologique adoptée est construite autour de trois principaux axes: la recherche bibliographique, les travaux de terrains et les travaux en laboratoire.

III.1. Recherche bibliographique

Les études bibliographiques ont consisté d'une part en l'exploitation des différentes cartes topographiques et géologiques. D'autres parts, elles ont été consacrées à la consultation des articles, thèses et ouvrages scientifiques, dédiés au thème d'étude. Elles ont abouti à la connaissance de l'état de l'art sur la thématique choisie, la délimitation du secteur d'étude, et l'élaboration d'un projet.

III.2. Travaux de terrain

Les travaux de terrain ont concerné les investigations menées sur les différents sites. Plusieurs campagnes de terrain ont été effectuées sur l'ensemble des sites (Fig. 7). Elles ont permis de répertorier les différentes formations lithologiques et de réaliser un échantillonnage représentatif. Le prélèvement d'échantillons s'est fait à l'aide de la pèle, du marteau et de la pioche et a nécessité des sacs et emballages plastiques pour le transport des matériaux. Le choix des échantillons était basé sur la couleur, la taille et la structure. Les scories ont été prélevées dans des carrières ou aux différents affleurements. Le prélèvement se fait en s'assurant au préalable que le lieu de prélèvement présente uniquement une seule variété de scorie. Après cette phase d'identification, intervient la récolte proprement dite du matériau. Cette étape peut dans certains cas nécessiter l'usage de la pioche. Il s'ensuit donc l'étape de prélèvement à la pèle qui se termine par l'emballage.

Ces travaux menés sur le secteur d'étude avaient permis précisément de :

- récolter et géo-référencier les échantillons;
- produire une carte d'échantillonnage ;
- décrire l'environnement géologique ;
- faire une description du relief, des roches et tous les détails possibles.

Au terme des travaux de terrain, une carte d'échantillonnage a été établie (Fig. 8) et les coordonnées des points de prélèvements sont consignés dans le tableau 5. Les scories ont également été classées en principaux types sur la base de la couleur (Fig. 9). Après une

description macroscopique, les échantillons ont été étiquetés et emballés pour les travaux de laboratoire.

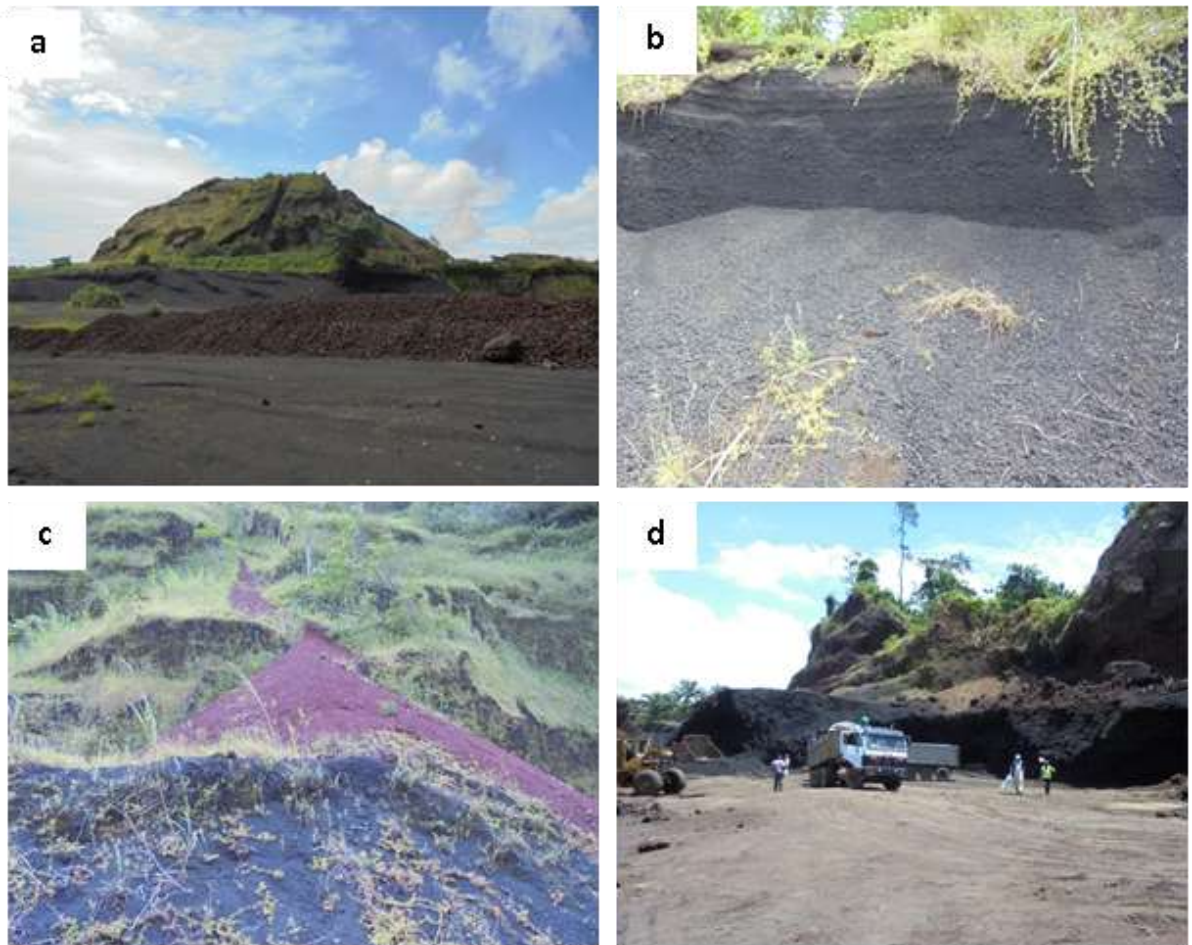


Figure 4: Sites de prélèvement des scories volcaniques : a) carrière de Limbé présentant les scories de tailles variables, b) scories noires de Galim, c) carrière de Djoungo présentant des scories rouges ; d) carrière de Limbé constituée de scories noires en cours d'exploitation.

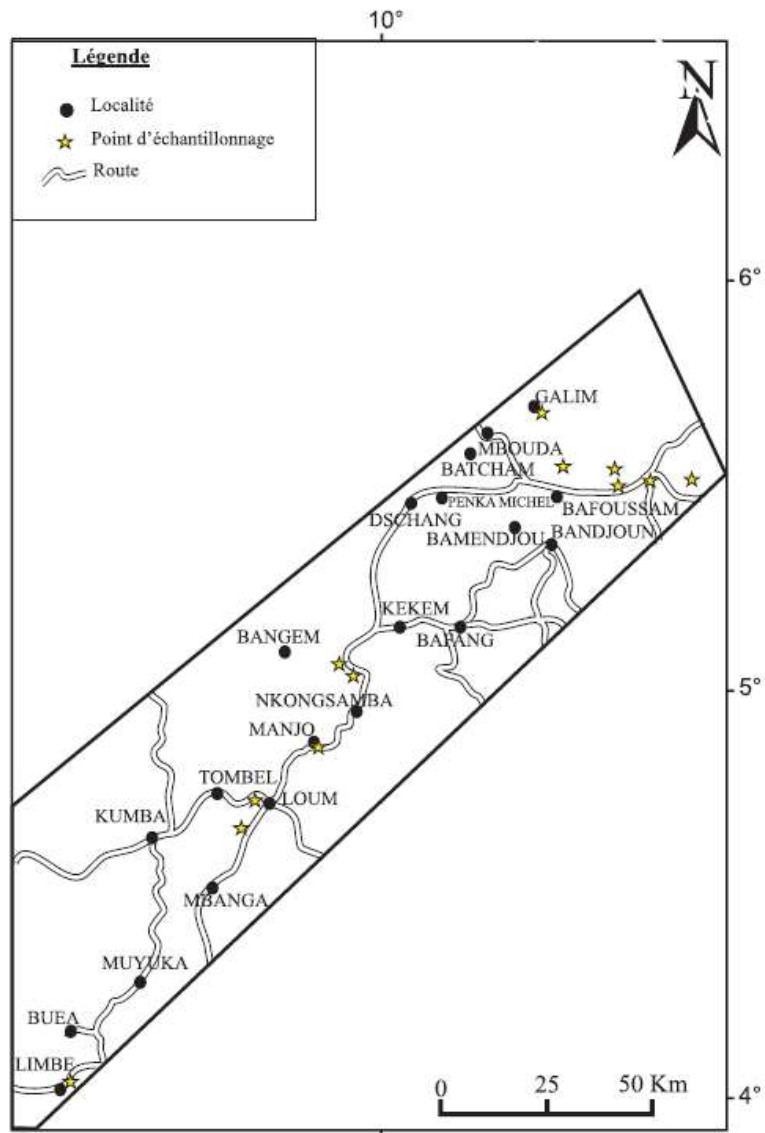


Figure 6: Carte d'échantillonnage.



Figure 9: Quelques types de scories : a) scories rouges b) scories noires.

Tableau 8: Coordonnées géographiques des points de prélèvement des scories de la partie continentale Sud de la Ligne Volcanique du Cameroun (LVC)

Sites	Code d'échantillons	Coordonnées géographiques
LIMBE	L1R L1N	N04°1'99,3'' E09°10'44,3''
	L2R L2N L2G	N04°1'39,5'' E09°10'44,4''
DJOUNGO	MDR	N04°35'03,2'' E09°37'44,5''
	MDN	N04°34'57,4'' E09°37'30,5''
LOUM-TOMBEL	LTN LTR	N04°43'21,5'' E09°41'26,0''
MANJO-MONENGOLLE	MANJ MANR	N04°51'42,1'' E09°50'18,7''
MELONG	MMR	N05°03'11,8''
	MMN	E09°53'44,3''
	MPR	N05°01'54,8'' E09°55'33,5''
DOUPE	DP1	N05°30'54'' E10°31'53''
	DP2	N05°30'58'' E10°31'46''
YAMBA	YMB1	N05°28'56'' E10°29'55''
	YMB2	N05°28'52'' E10°31'05''
FOUMBOT	MANG	N05°28'13'' E10°37'44''
	MANF	N05°29'05'' E10°37'26''
NJINKOUO	NJK1	N05°28'42''
	NJK2	E10°37'03''
GALIM	GAL	N05°39'01'' E10°24'25''

III.3. Travaux en laboratoire

Les échantillons récoltés ont été soumis aux analyses minéralogiques, pétrographiques et géochimiques nécessitant une préparation préalable, ou à la confection des lames minces.

III.3.1 Préparation des échantillons

Les échantillons prélevés sur le terrain ont été conditionnés après séchage au laboratoire du Département des Sciences de la Terre (Université de Yaoundé I). Après broyage à la pulvérisette, 15 à 30 grammes de poudre ont été emballés pour des analyses minéralogiques et géochimiques. Certains échantillons en bloc de taille centimétrique ont été sélectionnés pour la confection des lames minces.

III.3.2 Etude pétrographique

Le volet pétrographique de cette étude s'est fait à travers les lames minces. La confection des lames minces passe par trois étapes : le sciage de la roche, le collage d'un échantillon sur une lame de verre, la réalisation de la lame proprement dite. Cependant, du fait de la texture vésiculaire de ces matériaux les rendant friable, il était judicieux de les indurer à l'aide de la résine.

L'étape préalable est celle d'induration globale qui a été décrite par Gaine (1973). Elle consiste à chauffer jusqu'à 100 °C l'échantillon plongé dans le vernis dilué, pendant une durée d'une heure. Il est ensuite placé sur une plaque ou dans une étuve chauffée à 100 °C. Après solidification du vernis, l'échantillon peut être scié sans s'effriter.

Le sciage est réalisé à l'aide d'une scie circulaire diamantée. Elle est munie de deux coupes parallèles espacées d'environ 1 cm permettant de détacher une plaque de roche. De cette plaque de roche est enfin découpé un fragment ayant une taille d'un morceau de sucre d'environ 25 mm de large sur 40 mm de long. L'une des faces du « morceau de sucre » est aplanie à l'aide d'un tour à plateau horizontal par usure avec abrasif. Cette face après rectification est collée sur une plaque de verre par du « baume de canada ». Le fragment de roche collé sur la lame est à nouveau découpé à la scie diamantée pour réduire son épaisseur à 2 mm environ, aminci par usure sur le plateau. Après vérification, la préparation est recouverte par collage d'une lamelle protectrice. La confection ainsi achevée, la lame mince obtenue est destinée à l'étude pétrographique microscopique. L'observation de huit lames minces de roche ainsi confectionnées s'est faite au moyen d'un microscope polarisant binoculaire (Fig. 10. a), au Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I.

III.3.3 Analyses minéralogiques

La détermination de la composition minéralogique des scories de la Ligne du Cameroun s'est faite de façon analytique et de façon normative. L'approche normative est une estimation de la composition minéralogique idéalisée d'une roche par la méthode de calcul. Cette estimation est établie sur la base de l'analyse chimique quantitative selon les principes de la géochimie. L'usage de la Norme CIPW calculée a permis de déterminer les minéraux virtuels appelés « minéraux normatifs ». La méthode analytique s'est basée sur les techniques en laboratoire (DRX et IR). Cependant, il est fondamental d'établir une classification des matériaux étudiés afin d'expliquer leurs processus de formation.

III.3.3.1 Diffraction des rayons X

L'analyse minéralogique se fait à partir de la technique de Diffraction des Rayons X (DRX). La DRX constitue une technique des plus répandues pour l'identification des minéraux.

Cette analyse a été réalisée dans les laboratoires de Géosciences de "Ontario Geological Survey" à Sudbury (Canada). L'appareil utilisé est un diffractomètre (Fig. 10. b) du type PAN Analytical X'PERT PRO équipé d'un monochromateur. Les poudres des échantillons ont été pulvérisées avec un mortier et un pilon en agate (2 ou 3 g) et des montages de frottis ont été préparés sur des disques de silicium à faible bruit de fond pour analyse. Après exposition aux radiations $\text{CuK}\alpha$, les pics de $\text{K}\alpha_2$ sont représentés par des lignes en pointillés et n'ont pas d'indicateur en « V » en haut des fenêtres de modèle. Les pics $\text{K}\alpha_2$ ont été omis de la liste des pics pour faciliter l'interprétation des échantillons. Vingt-trois échantillons ont été analysés avec un rayonnement Co à 40 kV et 45 mA. Les paramètres suivants ont été utilisés dans le logiciel X'Pert High Score Plus pour l'identification des pics : Signification minimale : 1,00 ; Largeur minimale de la pointe ($^\circ 2\theta$) : 0,01 ; Largeur de pointe maximale ($^\circ 2\theta$) : 1,00 ; Pic de base à ($^\circ 2\theta$) : 2,00 ; Méthode : Sommet du pic lissé. Ces données ont été rapportées sous le numéro de certificat CRT-18-0421-01 du 28.01.2019.

L'analyse minéralogique semi-quantitative consiste en l'estimation des proportions des divers minéraux indexés sur les diffractogrammes. Ces proportions estimées en pourcentage en rapport à la fraction cristalline, sont déterminées à partir du calcul des aires occupées par les pics identifiés. Le calcul se fait à partir de la formule suivante :

$$\text{Minéral (\%)} = \frac{\text{Intensité x MIF}}{\sum \text{Intensité x MIF}} \times 100 \quad (4)$$

avec MIF = facteur d'intensité minérale.

III.3.3.2. Minéralogie normative

La minéralogie normative est déterminée à partir de la norme CIPW. Le calcul de la norme CIPW est basé sur les proportions en oxydes calculées en milieu anhydre. Elle permet de déterminer la composition minéralogique théorique des scories volcaniques. Encore appelée minéralogie normative, cette composition chimique donne l'ensemble des minéraux normatifs des matériaux étudiés à partir de l'analyse chimique.

III.3.3.3. Spectrométrie infrarouge

La spectroscopie Infrarouge est une technique de mesure pour l'acquisition de spectres infrarouges. Elle est indiquée dans l'étude de la cristallinité des minéraux. Son principe est basé sur l'absorption de la lumière par les molécules dans la région de l'infrarouge du spectre électromagnétique en la convertissant en vibration moléculaire. Elle repose sur le fait que les molécules possèdent des fréquences spécifiques pour lesquelles elles tournent ou vibrent en relation avec des niveaux d'énergie discrets. La fréquence des vibrations est déterminée à partir de la masse, des forces de liaisons ainsi que de leur arrangement dans la molécule ou dans le cristal. L'IR permet de caractériser un matériau de structure et de composition chimique connue à partir des différentes bandes d'absorption composant son spectre. Ainsi, la quantité d'énergie transmise permet de déterminer la quantité d'énergie absorbée à chaque longueur d'onde. A partir des abaques définis par certains auteurs, les absorptions relevées sont attribuées aux différents groupes chimiques présents dans le matériau. La spectrométrie des scories volcaniques a été effectuée au laboratoire de Chimie de l'Université de Yaoundé I en utilisant le spectromètre Bruker Optik Alpha (Fig. 10. c). La kaolinite bien cristallisée (KGa-1b) et l'étalon infrarouge Polystyrène ont été utilisés comme étalons internationaux. La kaolinite bien cristallisée a été obtenue auprès du « Source Clay Repertory de la Clay Minerals Society » de l'université de Purdue (West Lafayette, Indiana, USA). L'étalon infrarouge en polystyrène permet de comparer les spectres avec ceux de la base de données. Cette analyse utilise 0,2 gramme d'échantillon juste pour recouvrir la surface en diamant. Des poudres ont été pressées dans des pastilles de bromure de potassium (KBr) dont le choix est justifié par sa capacité à accueillir la molécule à analyser et par sa fenêtre de transparence aux infrarouges. Ce spectromètre a été utilisé

pour obtenir divers spectres de phases cristallines et leur comportement avec les fonctions C-H, O-H, N-H, C-O, Si-O-Si et Al-O-Al. Les spectres infrarouges ont été enregistrés dans la gamme de longueurs d'onde de 4000 à 400 cm^{-1} . L'absorbance et le tracé du nombre d'onde de ces scories volcaniques présentent des spectres plats sans aucune onde concernant les phases cristallines mono-limites alors que dans les phases cristallines di-limites (Si-O-Si et Al-O-Al) avec de faibles nombres d'onde, de nombreuses fluctuations se produisent suggérant que la phase amorphe de l'échantillon contenait des ions calcium qui entravent la consommation de calcium de l'ettringite, des feldspaths et du plagioclase qui sont présents dans les scories volcaniques.

III.3.4 Analyses géochimiques

Le but des analyses chimiques est de déterminer les pourcentages massiques des éléments chimiques, dosés sous forme de leurs oxydes les plus stables dans ces matériaux. Elles présentent un intérêt tant qualitatif que quantitatif en révélant la nature des différentes espèces chimiques se trouvant dans le matériau d'une part et en déterminant le titre des éléments majeurs d'autre part. La détermination des concentrations en éléments majeurs sur l'ensemble des échantillons prélevés a été effectuée à l'Institut géologique de l'Université de Lausanne (Suisse). La détermination de la composition chimique a nécessité au préalable la détermination de la perte au feu. La détermination de la perte au feu (LOI) s'est faite en deux étapes : à 105 °C sous azote afin d'éliminer l'eau adsorbée, et à 1000°C sous oxygène pour évacuer les volatils restants. Deux étalons internationaux (Sy-2 et NIM-N) ont été utilisés. A la suite de la perte au feu, les poudres sont fondues avec un flux de tétraborate de lithium avant d'être analysées. Une masse de 0,25 g a été utilisée pour l'analyse. L'instrument utilisé est un spectromètre à dispersion de longueur d'onde PANalytical PW2400 (Fig. 10. d) pour obtenir la teneur en SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , MnO , Na_2O , K_2O , Cr_2O_3 , NiO et P_2O_5 . Cette analyse est réalisée dans le respect des différents standards de référence (NIM-G, NIM-N, SY-2, JCH-1, BHVO).

La détermination des concentrations en éléments traces (y compris les éléments de terres rares) a été effectuée sur vingt trois échantillons à l'aide de la spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS). Les poudres (0,25 g) ont été digérées avec un mélange de deux acides ($\text{HCl} + \text{HClO}_4$) à 120°C dans des récipients en Téflon scellés pendant une semaine, puis rincées avec du HNO_3 dilué et séchées.



a) Microscope polarisant binoculaire



b) Diffractomètre



c) Spectromètre IR



d) Spectromètre à dispersion de longueur d'onde

Figure 10: Appareillages de laboratoire utilisés

Le résidu a été de nouveau dissous dans un mélange de trois acides (HNO_3 , HCl et HF) à 100°C . Deux types de matériaux de référence ont été utilisés : le matériau de référence interne (ISHT-18-25786, 18-25787 et 18-25788) avec le nom QC MRB-29 et le matériau de référence international (INTL-18-31560 (nom QC : GSP-2), 18-31561 et 18-31562) avec le nom QC GSP-2. Le matériel de référence du certificat de l'Ontario (CORM) a également été utilisé. Le contrôle qualité (CQ) a également utilisé le contrôle d'instrument (INST), le duplicata de laboratoire (DUP-18-45795, 18-45795, 18-45796 et 18-45797 ; le nom du CQ est DUP) et le blanc de laboratoire (BLANK -18-19493, 18-19494 et 18-19495).

III.3.5 Analyses thermiques

III.3.5.1 Teneur en humidité

La teneur en humidité correspond à la masse d'eau d'un échantillon ramenée à la masse sèche. Elle est exprimée en pourcent et s'obtient par séchage du matériau pendant 24h à l'étuve (Fig. 11. a) à une température de 105°C. Elle s'est faite sur douze échantillons de scories. La formule permettant d'évaluer la teneur en humidité est :

$$W = \frac{m_h - m_s}{m_s \times 100} \quad (1)$$

avec :

W = expression de la teneur en humidité (%)
; m_s = masse du matériau sec (g); m_h = masse
du matériau humide (g).

III.3.5.2 Analyse thermo gravimétrique (ATG)

L'analyse thermo gravimétrique est une technique d'analyse thermique qui consiste en la mesure de la variation de masse d'un échantillon en fonction du temps, pour une température donnée. Cette analyse est axée sur trois mesures : la masse, le temps et la température. La mesure peut se faire à température constante ou lors des cycles de température comme dans le cas de cette étude. L'évaluation du comportement thermique de dix échantillons de scories s'est faite au Laboratoire de Chimie Inorganique de l'Université de Yaoundé I à l'aide d'un analyseur thermique différentiel STA409PC TG/DTA (Fig. 11.b) conçu pour des mesures TG-DSC ou TG-DTA simultanées. Cet appareil se compose généralement d'une enceinte étanche dont le rôle est de maîtriser l'atmosphère de l'échantillon, d'un four permettant de contrôler la température, d'une microbalance, d'un thermocouple mesurant la température et d'un ordinateur fonctionnant comme un pilote et permettant d'enregistrer les données. L'analyseur thermique différentiel peut être utilisé pour la détermination des températures de cristallisation, des pertes au séchage, des transformations chimiques suite à l'oxydation. Dans le cas de ce travail, il a servi à la détermination des changements simultanés de masse (TG) et de réactions caloriques (DSC). La mesure a été effectuée dans l'air, à une vitesse de chauffe constante de 5°C minimum, de la température ambiante à 1000°C. De manière pratique, une quantité de poudre (20 mg) de scories volcaniques est déposée sur une nacelle en platine puis, la microbalance enregistre la variation de masse en fonction de la température sous une atmosphère contrôlée.

III.4. ANALYSES PHYSIQUES

III.4.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est une opération qui consiste à étudier la répartition des grains constituant un échantillon. Elle se base sur les caractéristiques telles que le poids et la taille pour fournir les proportions de grains de différents diamètres. Elle peut se faire soit par sédimentation soit par tamisage. Dans le cadre de ce travail, l'analyse granulométrique a été réalisée par tamisage au laboratoire de Géologie de l'Université de Yaoundé I et ceci sur la totalité des échantillons. Elle consiste à mesurer le poids de matière qui passe au travers des mailles calibrées d'une toile de tamis en dessous de laquelle est disposé un fond. Les tamis sont disposés en colonne (Fig. 11.c) de maille décroissante. Le matériau séché est versé au-dessus de la colonne de tamis. L'opération se fait à sec en faisant vibrer l'ensemble de la colonne de tamis. Le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient plus de 1 % entre deux séquences de variations de la tamiseuse. Ainsi, le refus du tamis de plus grande maille est pesé de même que celui du prochain tamis. La somme des de ces deux refus constitue le refus cumulé et l'opération est réalisée pour l'ensemble des tamis tout en respectant l'ordre décroissant des ouvertures de tamis. La somme des refus cumulés mesurés sur les différents tamis et du tamisât sur le fond doit correspondre avec la masse de l'échantillon. Les pertes de matériaux doivent être peu considérable (<2 % de la masse de départ), et à la fin, la mesure du poids de matière retenue sur chaque tamis est réalisée.

III.4.2. Quantification de la phase amorphe

L'estimation de la phase amorphe se fait à partir d'une analyse différentielle de la cinétique de dissolution en milieu alcalin (NaOH) et acide (HCl); mise au point par Ségalen (1967) et modifiée par Quantin et al., 1975. Cette analyse s'est faite au laboratoire de Chimie Inorganique de l'Université de Yaoundé I. Elle a été effectuée en deux étapes dont la première consiste à mélanger 1 g de chaque échantillon de poudre de scories volcaniques avec 30 ml de (8M) solution NaOH pendant 1 h à 80 °C.



a) Etuve



b) Analyseur thermique différentiel



c) Colonne de tamis



d) Centrifugeuse

Figure 11: Photo d'illustration des matériels utilisés au laboratoire

Au terme de cette phase, les particules insolubles sont séparées du mélange à l'aide d'une centrifugeuse (Fig. 11.d), rincées et réservées pour la suite de la manipulation.

La deuxième étape consiste à dissoudre dans 30 ml de HCl (1M) à 0 °C pendant 30 minutes, les oxydes précipités présents dans le résidu de la première étape.

Il s'ensuit un rinçage à l'eau distillée du résidu obtenu jusqu'à pH neutre. A la fin de la manipulation, ce résidu est séché à l'étuve à 105 °C dans le but d'obtenir une masse qui

permettra de déterminer la quantité de phase amorphe (Rc en % massique) selon l'équation ci-dessous :

$$\sigma = \frac{\text{Méchantillon} - \text{Mrésidums}}{\text{Méchantillon}} \times 100$$

avec :

Méchantillon = Masse de l'échantillon ;

Mrésidu = Masse du résidu.

III.5. Indice de pouzzolanité

L'indice de pouzzolanité est un essai défini par la norme ASTM C618. Encore appelée indice d'activité, cette mesure consiste à façonner des mortiers de ciments qui, après un certain nombre de jours de conservation (7, 14, 21 et 28 jours), sont soumis à la compression unie axiale afin d'évaluer leur résistance. Pour y parvenir, il est indispensable de disposer d'une quantité de ciment portland (CEM II), des poudres de scories volcaniques, du sable et de l'eau comme matières premières. L'essai se déroule en présence d'un mortier témoin qui contient 100 % de ciment, les autres mortiers étant réalisés en substituant 20 % de masse du ciment par la poudre de scories volcaniques. Les ratios massiques : sable/ciment et eau/ciment respectivement égaux à 3 et 0,5 ont été utilisés pour déterminer les quantités de sable et d'eau à utiliser pour le façonnage desdits mortiers. L'étape de façonnage consiste à mélanger les poudres de ciment et de scories volcaniques pendant 5 minutes et d'ajouter ensuite le sable pour obtenir un mélange de l'ensemble au bout de 5 minutes. Ce mélange est par la suite gâché avec de l'eau pendant 5 minutes pour terminer par un moulage du mélange humide qui en résulte dans des éprouvettes cylindriques de dimension 44 x 22 mm. Après 24 h, les mortiers durcis sont démoulés et conservés avant évaluations de la résistance à la compression.

L'indice d'activité est donné par le rapport entre la résistance à la compression d'un mortier avec 20 % d'ajout de poudre de scories volcaniques (R₂₀) et la résistance à la compression d'un mortier témoin avec 100% de ciment (R₁₀₀).

$$I = \frac{R_{20}}{R_{100}} \quad (3)$$

avec : I = indice d'activité ;

R_{20} = Résistance à la compression du mortier avec 20 % de scories volcaniques en masse de ciment ;

R_0 = Résistance à la compression du mortier témoin avec 100 % de ciment.

Conclusion

Le matériau d'étude est une scorie qui se présente sous forme de blocs anguleux de couleur rouge ou noire. Les échantillons ont été récoltés pendant des campagnes de terrain à l'aide d'un matériel composé de pioches, pelles, sacs et emballages plastiques. Les travaux de terrain, basés sur des techniques usuelles de prélèvement des échantillons en géologie ont abouti à l'élaboration d'une carte d'échantillonnage géo-référencée. Après la phase de terrain, les échantillons acheminés au laboratoire ont été séchés, écrasés, et conditionnés pour des analyses chimiques, minéralogiques et mécaniques dont les procédés ont été soigneusement décrits. Les principaux résultats obtenus sont présentés dans les prochains chapitres.

**CHAPITRE IV: CARACTERISATION
PETROLOGIQUE DES SCORIES VOLCANIQUES**

Introduction

Le présent chapitre est consacré à la présentation de l'ensemble des résultats en relation avec la genèse des scories de la Ligne Volcanique du Cameroun. Il s'agit des analyses pétrographiques, minéralogiques et géochimiques.

IV.1. Pétrographie des scories de la LVC

IV.1.1. Description macroscopique des scories de la LVC

IV.1.1.1. Caractères physiques

Les échantillons de scories récoltés sont constitués de blocs de taille variable pouvant atteindre quelques centimètres. Il est observé dans les sites de prélèvement un assemblage de fragments de scories de taille variable mais avec une particularité pour certains sites de présenter des fragments de plus grosse taille. Ces blocs sont de forme quelconque et présentent des contours irréguliers. Ils sont caractérisés par l'abondance de nombreuses vacuoles qui leur confèrent une structure alvéolaire. Cette structure fait des scories des matériaux très peu denses et très poreux.

IV.1.1.2. Couleur des scories

L'appréciation de la couleur se fait à l'échelle visuelle sur le terrain et à l'aide du code Munsell. A l'œil nu, la couleur des échantillons varie entre les teintes rouge, brun, jaune, rouille, gris et noir (Fig. 12). Les différentes couleurs obtenues à partir du code Munsell sont gris, noir, brun et rouge dont les différents codes sont consignés dans le tableau 6.

IV.1.2. Description microscopique des scories de la LVC

L'observation des lames minces a permis d'identifier les espèces minérales présentes dans les scories étudiées. Ces lames minces correspondent aux scories des localités de Limbé (Fig. 13. a, b, c, d et g), de Melong (Fig. 13. e et f) et de Manjo (Fig. 13. h)

Il apparaît à première vue que les scories de couleur noire se différencient de celles de couleur rouge. Cette différence pourrait relever des caractéristiques minéralogique et chimique. Il ressort également que la texture des scories est constituée d'un assemblage de phénocristaux et de microcristaux noyés dans une matrice vitreuse. Cet assemblage décrit pour l'ensemble des lames minces une texture microlitique porphyrique. Les phénocristaux sont principalement le pyroxène et l'olivine et les microcristaux sont dominés par des plagioclases. Cependant, il ressort également des cristaux de taille millimétrique et aux

formes bien définies (Fig. 13. a). Il est également identifié des minéraux opaques et des vides témoins de la structure alvéolaire des scories.

Les scories de Limbé présentent des phénocristaux (45 %), des microcristaux (35 %) et le verre volcanique (20 %).



Figure 7: Matériaux prélevés le long de la Ligne Volcanique du Cameroun : a) scories rouge brun de Loum-Tombel ; b) scories noires de Limbé ; c) Scories rouges de Melong;

d) scories grises de Yamba ; e) scories brunes de Manjo ; f) scories rouges de Limbé.

Tableau 6: Couleur des scories

Echantillon	couleur	Code couleur
DP2		
DP1	Brun jaunâtre foncé	10YR 4/6
MANG	Noir verdâtre	10Y 2,5/1
YMB1	Noir bleuté	10B 2,5/1
YMB2	Gris bleuâtre foncé	5PB 4/1
LTN	Gris verdâtre très foncé	10Y 3/1
LTR	Brun rougeâtre	2,5YR 4/4
MMN	Gris clair	10R 7/1
MMR	Brun rougeâtre	5YR 4/3
L1N	Noir	
L1R	Rouge faible	10R 4/4
L2G	Gris	5YR 5/1
L2R	Brun rougeâtre foncé	5YR 3/3
MPR	Brun rougeâtre	2,5YR 5/4
MANF	Brun grisâtre très foncé	10YR 3/2
MANJ	Gris rougeâtre foncé	10R 3/1
MANR	Rouge faible	2,5YR 5/2
NJK2	Brun rougeâtre foncé	5YR 3/3

Les phénocristaux sont représentés par les pyroxènes et l'olivine (Fig. 13. a et b) et forment deux groupes en fonction de leur taille. Le premier groupe est celui des cristaux dont la taille est supérieure au millimètre, notamment les pyroxènes et l'olivine (Fig. 13. a et b). Le second groupe concerne ceux dont la taille est de l'ordre d'un demi-millimètre.

Les microcristaux sont de taille micrométrique avec les caractéristiques (couleur, teinte et forme) similaires à celles des phénocristaux.

Sur l'ensemble des quatre lames minces réalisées sur les scories de Limbé, les cristaux sont observés dans diverses proportions.

Les pyroxènes (40 - 45 %) sont sous la forme de cristaux fins et de phénocristaux. Les cristaux de pyroxène les plus fins sont identifiables à travers la variation des teintes compte tenu de leur forme xénomorphe et leur taille plus réduite. Ils apparaissent ainsi soit sous forme de grains disséminés dans la roche, soit en petits amas. Ils se retrouvent souvent agglutinés à la périphérie des phénocristaux, et formant une sorte d'auréole (Fig. 13. b). Les cristaux de pyroxène de plus grande taille sont les plus visibles mais sont peu abondants. Leur taille est de l'ordre de plusieurs millimètres et de forme automorphe (Fig 13. a). Ils laissent apparaître de nombreuses fissures et cassures (Fig 13. b). Les cassures visibles sont de deux ordres, les cassures transversales qui en constituent les principales et les cassures secondaires. Les cassures principales sont subparallèles et moins représentées que les cassures secondaires. Ces dernières sont plus abondantes, moins apparentes et anarchiquement représentées. Au sein des gros cristaux de pyroxène se logent des inclusions. L'infiltration de l'eau dans les fissures transversales des cristaux de pyroxène induirait le processus d'altération. Par ailleurs, les cristaux de pyroxène au cœur résorbé (Fig. 13. a) indiquent une réaction métasomatique. La coexistence des phénocristaux et microcristaux de pyroxène au relief différent pourrait indiquer un processus de recharge magmatique.

Les minéraux opaques (15 - 20%) constituent une phase importante dans les scories du fait de la non-négligence de sa proportion. Ils se reconnaissent par des taches noires de diamètre variable. Ces minéraux opaques seraient responsables de la coloration brune à rouge de certaines scories.

L'olivine (5 - 10 %) est marquée par des phénocristaux. Elle est automorphe illustrant une forme sub-arrondie. Les cristaux d'olivine apparaissent imbriqués dans des cristaux de pyroxènes (Fig. 13. a).

Les microphotographies de la localité de Melong sont de couleur noire (Fig. 13. d) et de couleur rouge (Fig. 13. e, f et h). Celles de couleur noire sont caractérisées par une abondance de pyroxène représentés par un mélange de phéno- et micro-cristaux. Les phénocristaux sont marqués par une variation de teinte à leur périphérie décrivant une auréole. Ces scories présentent un aspect similaire à celles de la localité de Limbé mais qui diffèrent des scories de la localité de Melong qui sont de couleur rouge.

Elles sont marquées dans leur texture par une prédominance des microcristaux (45 -50 %) sur les phénocristaux (5-10 %), la matrice vitreuse y est plus abondante. Les microcristaux sont essentiellement représentés par des plagioclases. Ils sont sous forme de

baguettes fines dont la taille varie entre 0,5 et 1 mm. Ils sont généralement disposés suivant un alignement sub-parallèle et forment des amas tout autour des cristaux d'olivine (Fig. 13. e). Les phénocristaux sont principalement ceux d'olivine qui présente une forme particulière. L'olivine est ici marquée par des cristaux composés de couleurs dont celle du cœur diffère de celle de la bordure. Il s'agit d'une transformation en iddingsite qui constitue également une preuve de l'action du processus d'altération. Il apparaît à certains endroits de cette microphotographie des traces des cristaux d'olivine dont les extrémités sont confondues à la matrice. Ce fait pourrait indiquer une composition chimique à tendance ferromagnésienne dans ces scories.

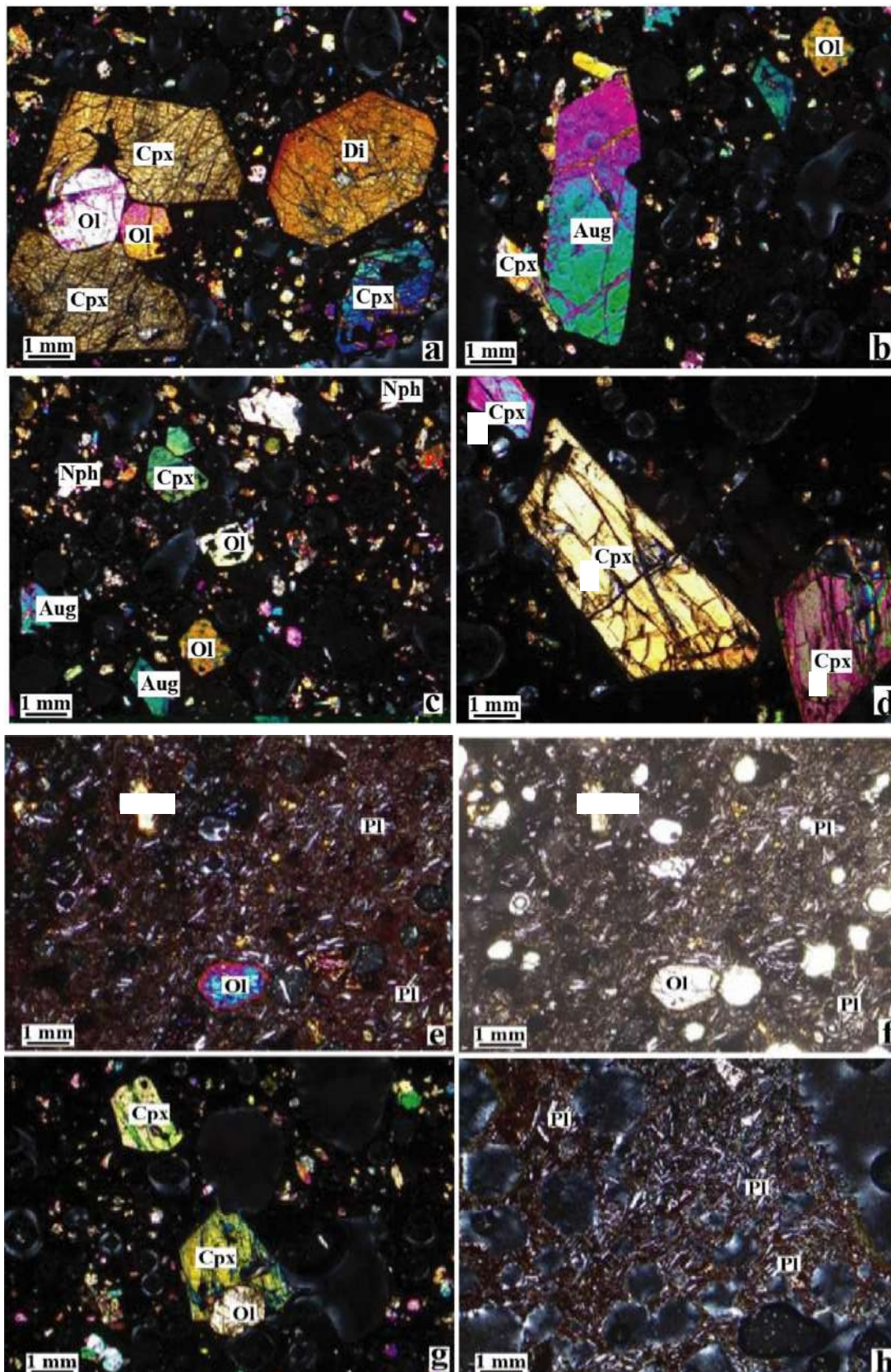


Figure 9: Microphotographies des scories de a), b), c) et g) Limbé (L2R) ; e), f) Melong (MMN) ; h) Manjo (MANR), (Ol: olivine, Cpx : clinopyroxène, Neph : népheline, Pl : plagioclase, Aug : augite).

IV.2. Minéralogie des scories de la LVC

IV.2.1. Minéralogiques par diffraction des rayons X

La minéralogie des scories volcaniques étudiées permet de déterminer et comprendre les différents processus qui ont conduit à la formation ainsi qu'à l'évolution de ces matériaux. Il est également possible à partir de la minéralogie de déterminer les caractéristiques chimiques du magma parent.

La composition minéralogique des scories volcaniques prélevées le long de la Ligne Volcanique du Cameroun est déterminée à partir des différents diffractogrammes (Fig. 14). Ces diffractogrammes sont marqués par la présence d'un halo de diffusion qui constitue un indicateur de la présence d'une phase amorphe (Villa et al., 2010 ; Maragkos et al., 2009 ; Pantias et al., 2007). La composition minéralogique est vappréciée en fonction des types de scories et des localités. Les basaltes sont représentés par les scories de Doupé (Fig. 14. a), et de Loum-Tombel (Fig. 14. b et c). De l'observation des diffractogrammes, il ressort que, les basaltes sont majoritairement composées d'olivine, de pyroxène et de feldspaths. Les pyroxènes sont l'augite, le diopside et l'enstatite (orthopyroxène). Les feldspaths sont dominés par les plagioclases. Il existe dans la composition de ces scories d'autres minéraux dits accessoires qui varient en fonction des localités et de la nature du matériau. Ainsi, dans les scories basaltiques de Doupé les minéraux accessoires sont le corindon, le spinelle et les minéraux secondaires (kaolinite et illite). Les scories de Loum-Tombel qui diffèrent par leur couleur laissent apparaitre une grande différence dans les minéraux accessoires. Les scories rouges (Fig. 14. b) contiennent de la biotite à la différence de celles noires dont les minéraux accessoires sont l'ettringite, la portlandite et la vermiculite (Fig. 14. c).

Picrobasalte et hawaiiite sont respectivement des localités de Doupé et Foubot. La composition minéralogique du picrobasalte est similaire à celle des scories basaltiques précédemment décrite. Cependant, il apparait une présence non négligeable des minéraux secondaires particulièrement la montmorillonite (Fig.15. a).

La composition minéralogique des hawaiiites présente les minéraux similaires à la différence que les pyroxènes sont représentés par de nombreux pics de diopside et orthopyroxène, l'augite étant absente. Il apparait également l'ilménite dans le groupe des minéraux accessoires (Fig.15. b).

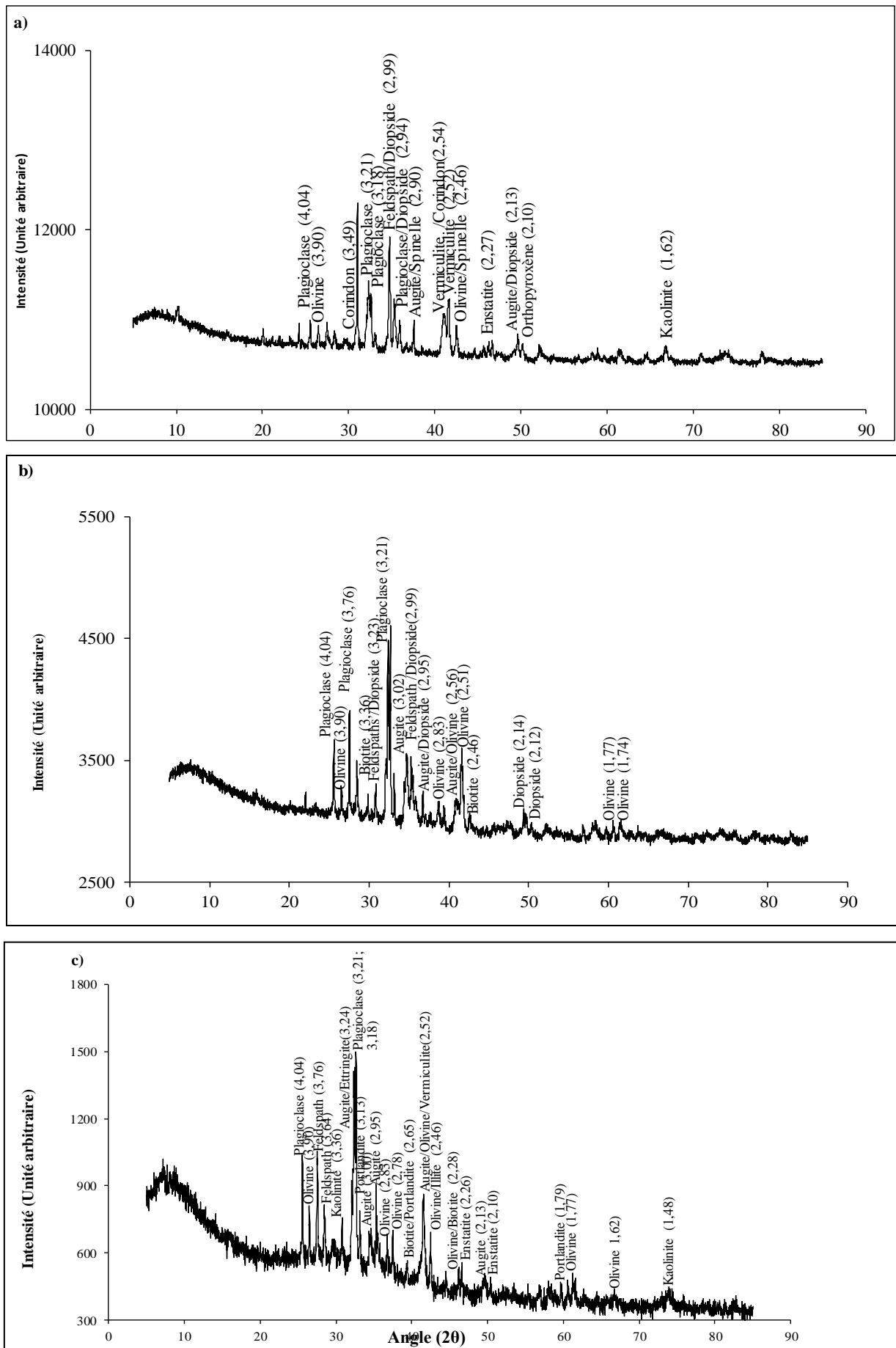


Figure 14 : Diffractogrammes des basaltes de a) Doupé (DP2), b) Loum-Tombel (LTR), c) Loum-Tombel (LTN)

Les basanites sont des scories de Melong (Fig.16. a) et de Manjo (Fig.16. b et c). En général, les basanites sont composées principalement de pyroxènes donc augite et diopside, d'olivine et de plagioclase. Les minéraux secondaires sont représentés par l'hématite et l'illite. Les scories de Manjo différenciées par la couleur présentent néanmoins de grandes similitudes notamment la présence des minéraux tels que la néphéline.

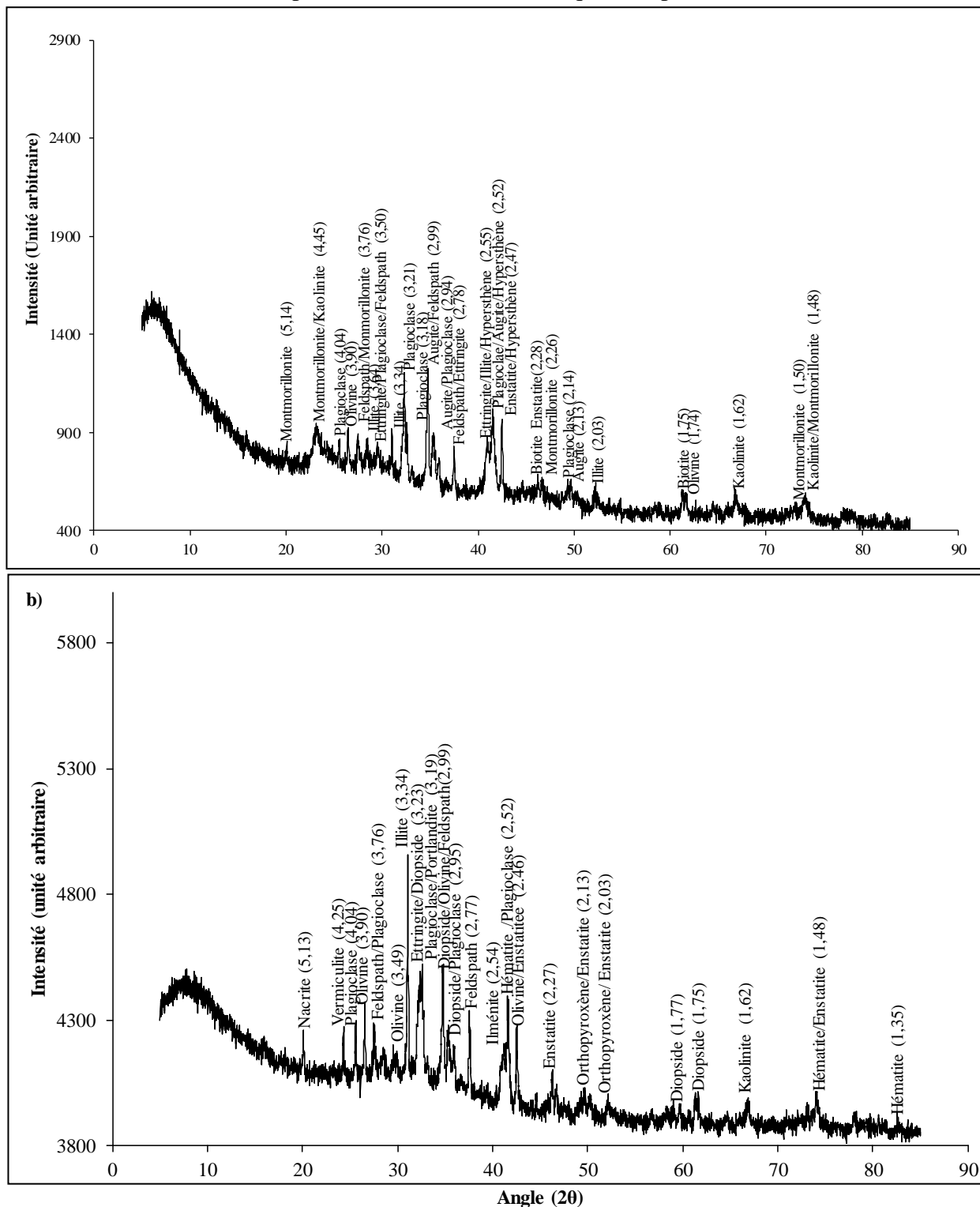


Figure 15: Diffractogrammes des microbasaltes et hawaiites de a) Doupé (DP1), b) Foubot (MANG)

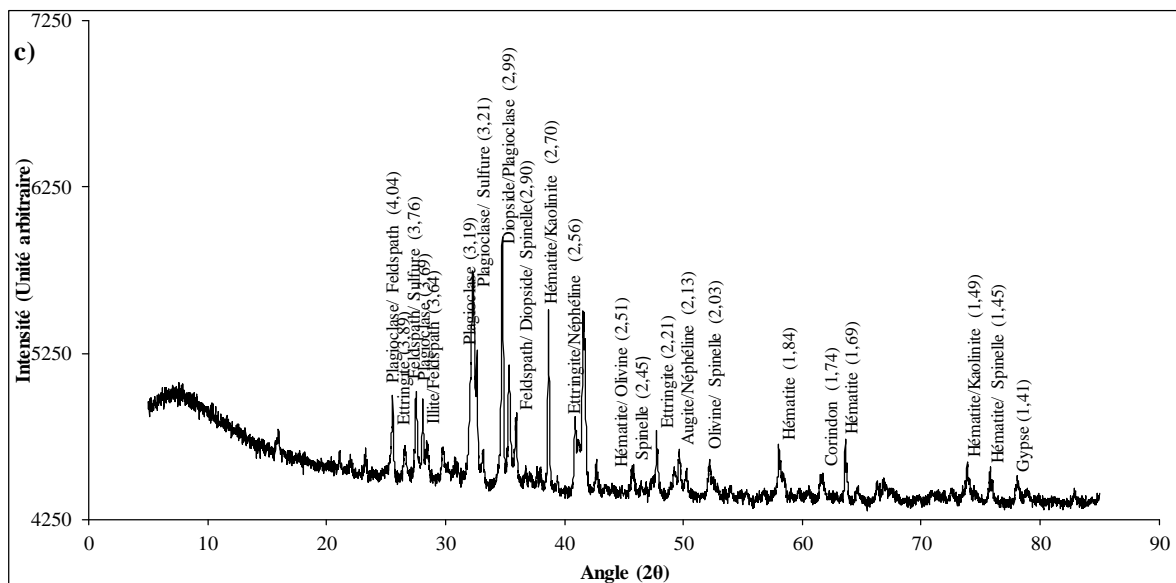
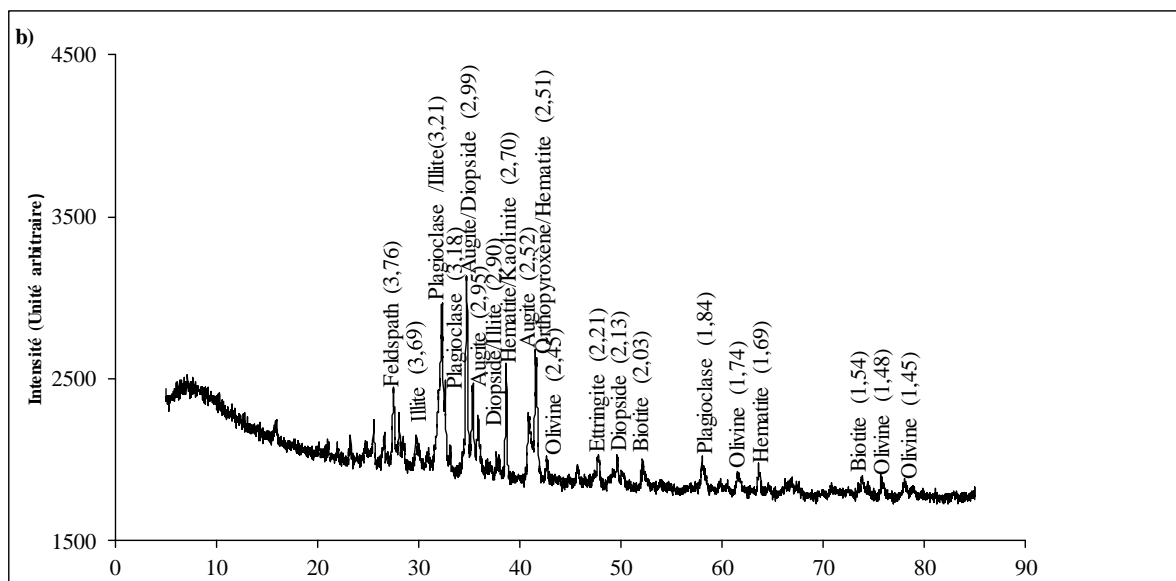
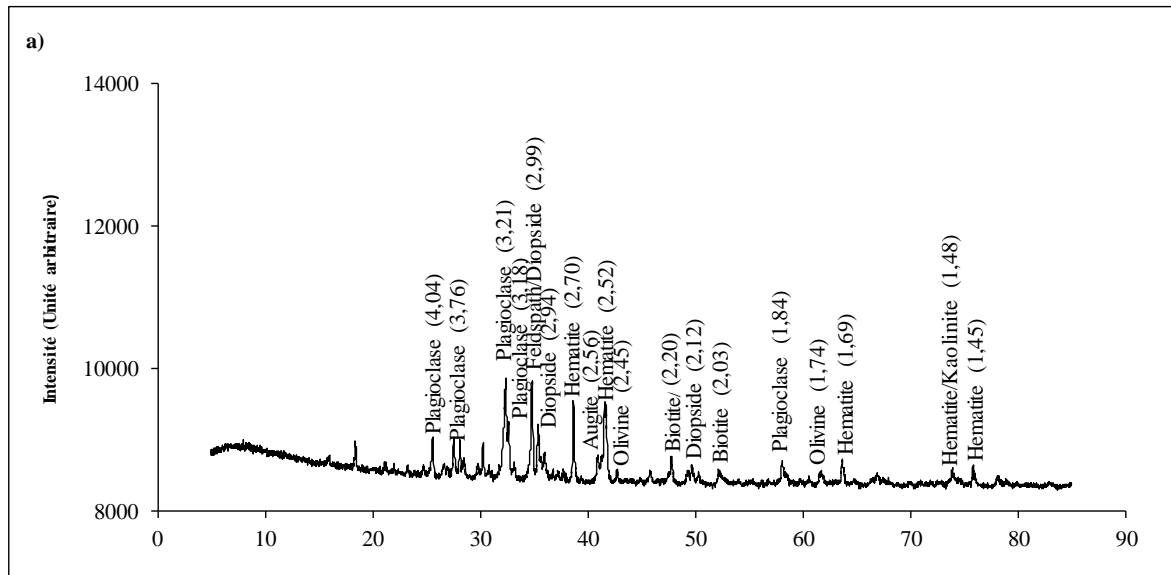


Figure 16: Diffractogrammes des rayons X des basanites des localités a) Melong (MMN), b) Manjo (MANJ), c) Manjo (MANR)

L'évaluation semi-quantitative permet de classer les minéraux en trois groupes selon les quantités relatives des minéraux. Il s'agit du groupe des minéraux en faible proportions (< 10 %) ; du groupe des minéraux de proportion moyenne (10 – 20 %), et du groupe des minéraux de proportion élevée (> 20 %). La répartition des minéraux dans les différents groupes est fonction du type de scorie (Tab. 7). Il apparaît que les minéraux en grande proportion dans l'ensemble des scories sont les pyroxènes et les plagioclases (Fig. 17). Cependant les plagioclases sont représentés par l'albite et l'anorthite. Dans les basaltes, les plagioclases sont les seuls minéraux dominants suivis de l'illite, des feldspaths des pyroxènes, de la vermiculite et de l'olivine comme minéraux secondaires. Le corindon y est indexé en minéraux accessoire (Fig. 17. a). Les basanites et picrobasaltes sont dominés par les plagioclases et les pyroxènes (Fig. 17. d et b). Les basanites présentent comme minéraux secondaires l'hématite contrairement au picrobasalte dans la composition duquel les minéraux argileux (illite, montmorillonite et kaolinite). Dans la composition des scories de type hawaïite, seul le pyroxène domine. Illite, plagioclase, feldspath et olivine sont secondaires. La présence de l'illite de même que la montmorillonite et l'hématite en proportion moyenne témoigne du processus d'altération. Ce qui constitue un élément justifiant les proportions de feldspaths moins importantes. Cependant, il est à préciser que ces proportions minéralogiques quantitatives sont évaluées exclusivement sur la fraction cristalline des matériaux.

Tableau 7: Composition minéralogique semi-quantitative des scories de la LVC.

Minéraux	Basalte	Picrobasalte	Hawaïite	Basanite
Feldspath alcalin	17,42 %	11,23 %	13,00 %	6,30 %
Plagioclase	25,20 %	23,17 %	16,70 %	32,10 %
Olivine	10,40 %	5,4 %	12,75 %	7,09 %
Augite	6,62 %	13,17 %	-	9,32 %
Diopside	-	-	14,35 %	16,92 %
Hypersthène	1,85 %	11 %	7,11 %	-
Enstatite	3,90 %	6,31 %	-	-
Illite	18,30 %	9,70 %	17,90 %	-
Hématite	-	-	4,57 %	21,96 %
Montmorillonite	-	9,44 %	-	-
Kaolinite	-	4,55 %	-	-
Vermiculite	11,90 %	-	6,00 %	-
Portlandite	-	-	1,02 %	-
Ettringite	-	4,02 %	-	1,96 %
Biotite	-	-	-	4,45 %
Corindon	2,50 %	-	2,7 %	-
Ilménite	-	-	3,9 %	-
Nacrite	-	-	2,7 %	-

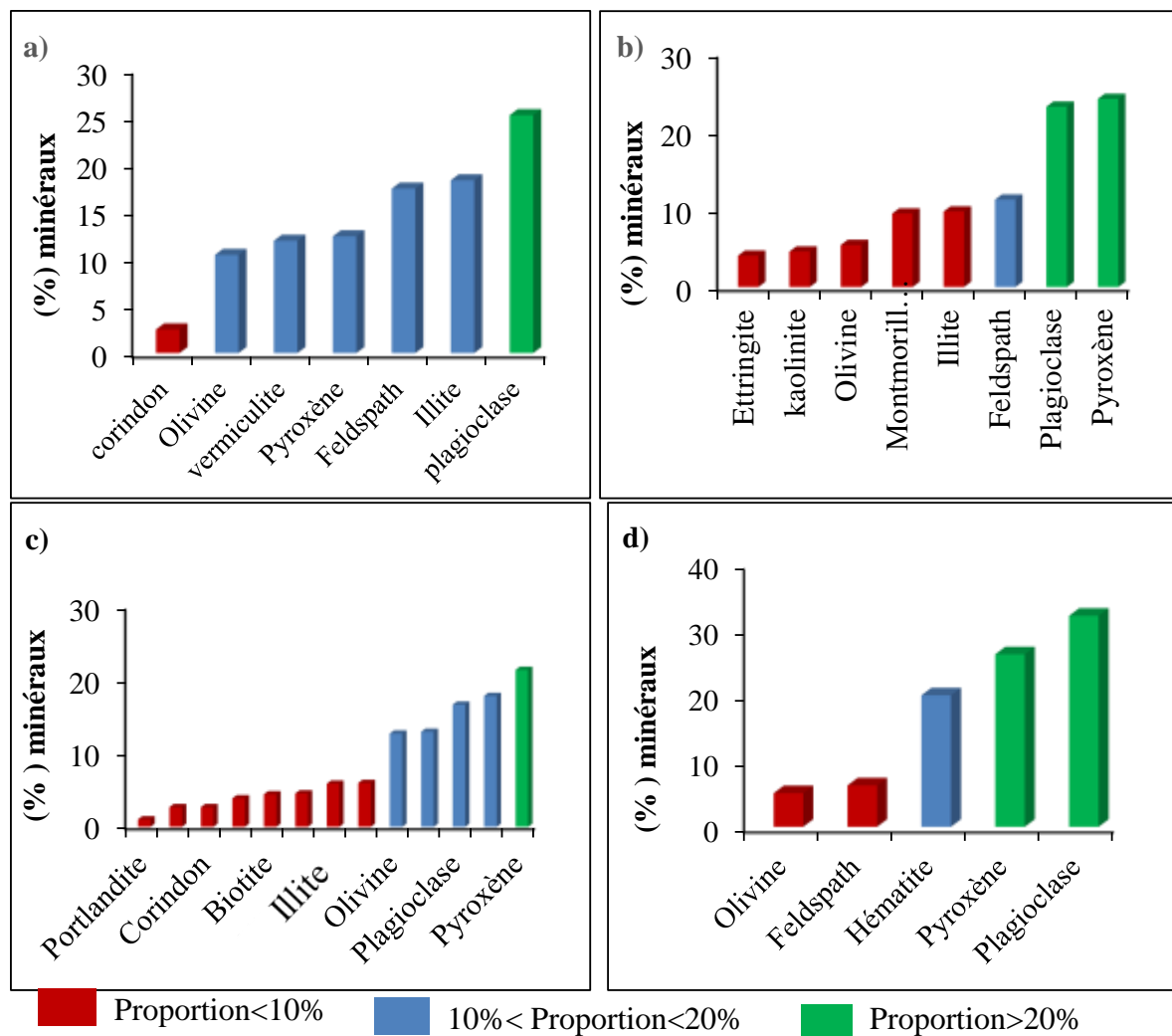


Figure 17: Composition minéralogique quantitative des scories, a) Basalte, b) Picrobasalte, c) Hawaiiite, d) Basanite.

IV.2.2. Norme CIPW

Les résultats du calcul de la norme CIPW (Tab.8) montrent que les feldspaths sont les minéraux les plus abondants. Ils sont représentés par les feldspaths alcalins (orthose) et les plagioclases (albite et anorthite). Les minéraux accessoires sont présents dans les proportions relativement faibles de l'ilménite à l'apatite en passant par la magnétite. A partir des proportions en minéraux fictifs, les scories peuvent être subdivisées en deux groupes. Le premier groupe est celui des matériaux dont les minéraux dominants sont l'olivine, l'anorthite, l'albite et le diopside. Ce groupe est marqué par la présence de la néphéline. Le second groupe est caractérisé par la présence de l'hyperstène, l'anorthite et l'albite comme minéraux normatifs dominants. Le corindon y est également présent.

La présence de la néphéline normative sur l'ensemble des matériaux à l'exception de certains échantillons, évoque la présence de basanite et conforte l'hypothèse d'une

appartenance majoritaire de ces scories à la série alcaline. La présence de corindon normatif sur deux échantillons indique une abondance d'alumine dans lesdits matériaux et renvoie aux roches magmatiques alumineuses. Lesdits échantillons s'identifient également par l'absence de diopside.

IV.2.3. Classification des scories volcaniques

La classification des roches se fait dans le but de regrouper les roches en famille, reconnaître et déterminer aisément la nature des roches, et de regrouper les roches ayant une origine voisine. Dans le cas des scories volcaniques, la classification est faite à partir du diagramme TAS. C'est une classification internationale dans laquelle les types de roches volcaniques sont classés en fonction de leurs taux d'oxydes alcalins (Na_2O et K_2O) en regard du taux moléculaire de silice (Fig. 18). Ce diagramme permet d'identifier dans des sites d'étude des basanites (onze échantillons) et des basaltes (dix échantillons) en grande majorité ainsi que quelques picrobasaltes (un échantillon) et hawaiiites (un échantillon).

Tableau 8: Composition minéralogique normative.

Ech.	Manf	L2g	L1n	Ltn	Ltr	Ym1	Ym2	Dp-2	Mdn	Gal	Mang	Dp-1	Manr	Manj	L1r	L2n	L2r	Njk-1	Njk-2	Mdr	Mmr	Mmn	Mpr
Qz.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Or.	6,65	2,67	7,73	5,49	6,46	9,00	8,60	8,60	7,98	5,0	9,89	1,93	5,23	9,09	7,32	6,7	4,89	9,68	10,31	9,09	7,52	4,46	13,19
Ab.	19,51	10,56	10,60	25,56	28,72	26,16	17,28	21,15	20,57	12,39	19,89	5,83	16,39	14,23	10,60	6,8	8,24	3,02	14,04	14,78	14,51	16,89	17,09
An.	28,17	18,22	19,43	25,76	23,36	21,18	16,83	20,46	21,84	31,47	17,94	22,64	27,15	25,6	19,43	19,43	18,59	12,54	15,95	16,79	20,50	19,76	10,59
Nph.	-	8,25	8,45	-	1,20	0,24	5,40	2,45	5,28	-	5,22	-	4,6	5,07	8,45	7,41	8,54	16,78	12,24	11,71	7,83	8,96	17,8
Di.	9,38	34,23	27,95	10,5	12,79	14,84	22,40	17,28	15,30	-	18,50	-	12,91	12,78	27,95	34,32	34,99	26,68	21,21	21,09	19,88	20,53	19,42
Hyp.	14,71	-	-	15,85	-	-	-	-	-	36,13	-	42,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ol.	13,05	17,38	16,25	8,05	18,54	20,01	21,27	21,77	19,79	1,62	19,36		22,95	22,53	15,33	16,38	15,77	21,91	17,10	17,56	18,98	18,52	11,72
Mag.	2,44	2,45	2,51	2,48	2,46	2,40	2,36	2,38	2,54	2,94	2,46	3,48	2,80	2,77	2,47	2,48	2,48	2,51	2,46	2,49	2,65	2,67	2,36
Ilm.	4,93	5,31	5,71	5,33	5,35	4,88	4,68	4,60	5,28	6,43	5,35	7,45	6,25	6,21	5,97	5,51	5,54	5,40	5,22	5,21	6,17	6,20	5,75
Crn.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,63	-	9,53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ap.	1,15	0,93	1,37	0,96	1,11	1,33	1,18	1,31	1,41	1,38	1,39	1,96	1,73	1,73	1,16	0,98	0,96	1,49	1,47	1,28	1,97	2,01	2,07
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
DI	26,16	21,48	26,78	31,06	36,38	35,38	31,28	32,21	33,83	17,39	35,00	12,70	26,22	28,38	29,47	20,91	21,67	29,48	36,59	35,58	29,86	30,31	48,09

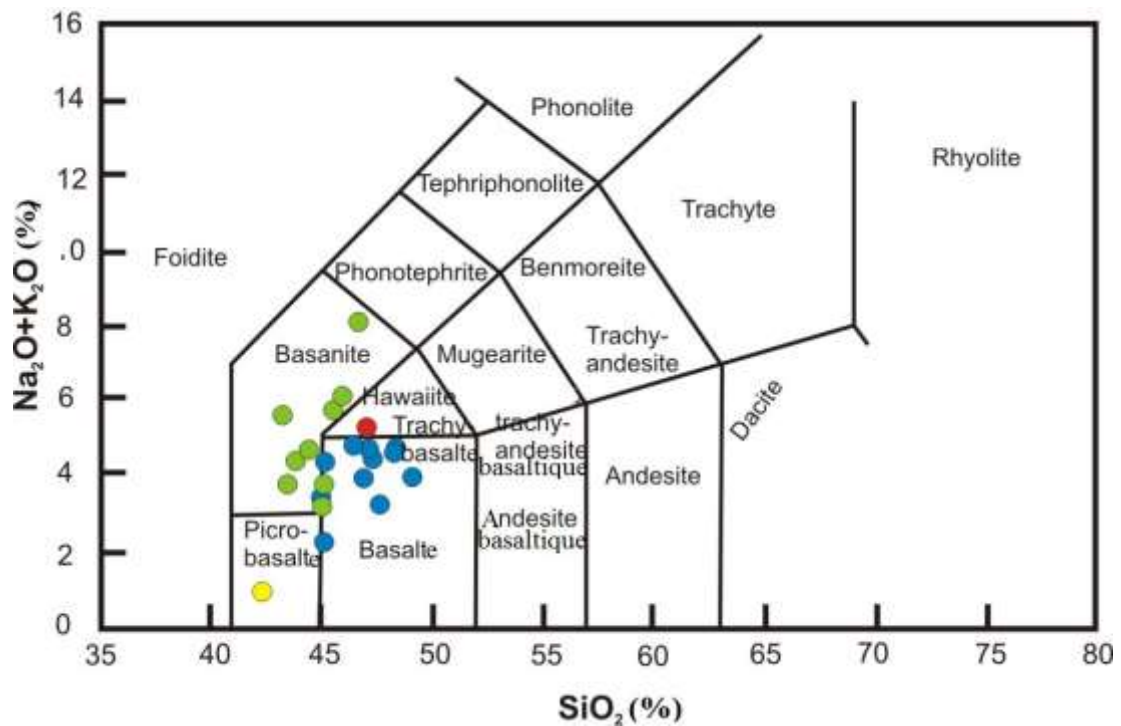


Figure 18: Nomenclature des scories volcaniques de la Ligne Volcanique du Cameroun dans le diagramme T.A.S. de Le Bas et al. (1986).

IV.2.4. Spectrométrie IR

La spectrométrie Infrarouge a été réalisée sur des poudres de scories. La figure 19 montre des spectres composés de deux parties dont la première représente un ensemble de segments quasi-horizontaux et subparallèles les uns les autres. La seconde partie est une continuité de la première avec la particularité de former des dômes superposés. Ces spectres laissent apparaître des pics pour des longueurs d'ondes précises.

Les plus caractéristiques s'identifient à partir de leur forme et s'observent à :

- 3300 cm^{-1} pics larges et petits ;
- 1700 cm^{-1} petits pics ;
- 1050 cm^{-1} pics moyens et fins ;
- 900 cm^{-1} pics petits et fins ;
- 800 cm^{-1} pics moyens ; □ 550 cm^{-1} pics fins.

En comparant la position des différentes vibrations obtenues à celles des tables existantes, il ressort que chaque pic observé correspond à une liaison, laquelle permet d'identifier un minéral. Ainsi donc, les pics moyens de longueur d'ondes 1050 cm^{-1} sont attribués à la vibration d'étirement Si-O, et ceux de 550 cm^{-1} correspondent aux liaisons Si-O-

Al (Paniás et al., 2007). Les liaisons Si-O obtenues sont assimilées à l'action de la silice amorphe (Madejová, 2003). La valeur 900 cm^{-1} est attribuée au groupe Al-O-H avec une moindre influence de la liaison d'hydrogène. Les vibrations notées à 550 cm^{-1} correspondent aux liaisons Al-O (Takamura et Koezuka, 1965). La bande d'adsorption qui s'étend de $3400\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ est liée à la présence de l'illite (Brindley et al., 1986). L'apparition d'un pic vers 1600 cm^{-1} renvoie à des aluminosilicates amorphes (Nzeukou, 2014).

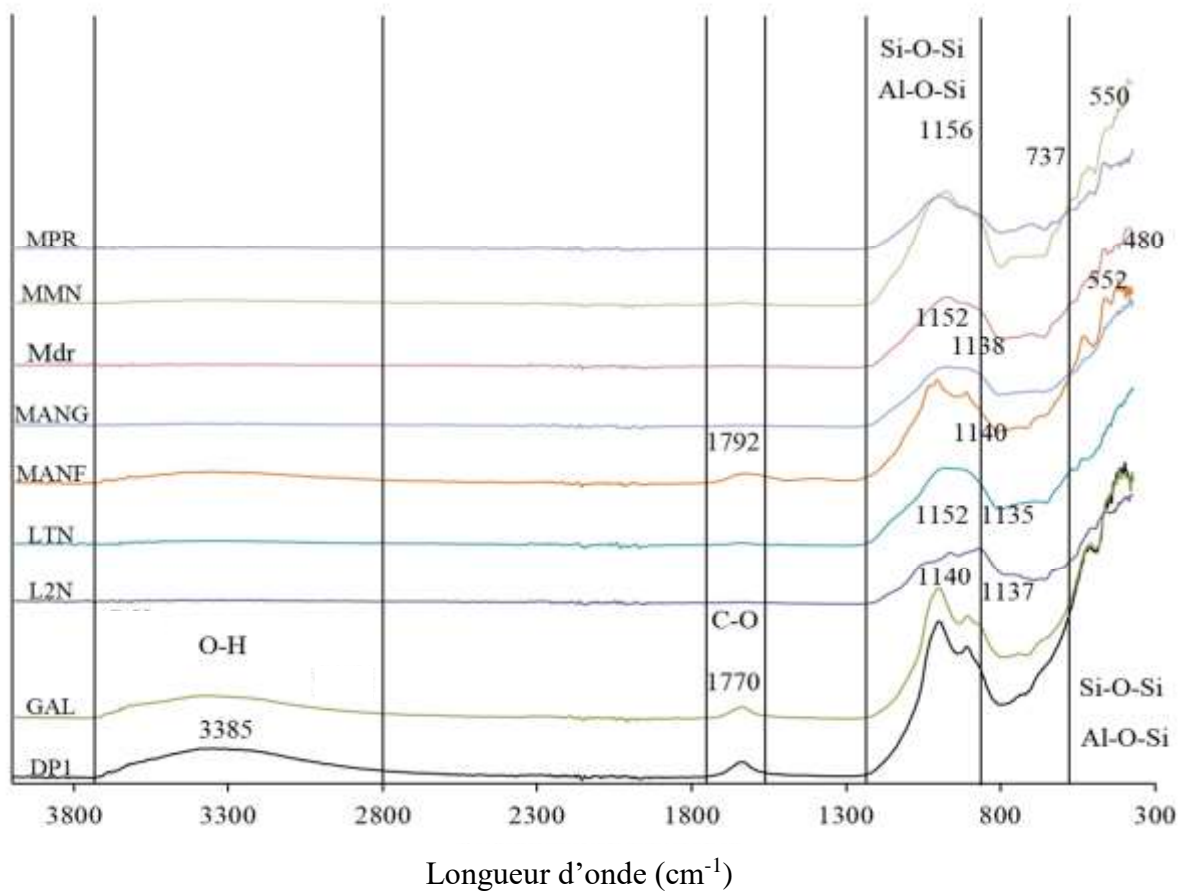


Figure 11: Spectres IR des scories de la LVC

IV.3. Géochimie des scories de la LVC

IV.3.1. Géochimie des éléments majeurs

Les données géochimiques montrent que SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 sont abondants dans les matériaux (Tab. 9 et 10). Leurs proportions cumulées varient entre 65 et 77% (Tab. 11). Il apparaît que la somme de ces trois éléments est élevée sur les basanites où elle varie de 68 à 77% (Tab. 12) comparativement aux basaltes (65-75 %, Tab. 11). Les teneurs en silice varient de 41 à 49% pour la majorité des échantillons à l'exception de DP1 (Tab. 10) et GAL (Tab. 9) dont les teneurs respectives sont de 35 et 39 %. Fe_2O_3 représente 11 à 13 % de la fraction globale avec un pic de 15 % sur DP1. La présence d'oxydes calcique (CaO) et alcalins (Na_2O et K_2O) indique la présence des plagioclases et des feldspaths alcalins dans les scories étudiées. Les concentrations en Na_2O varient entre 0,57 et 5,87 % ; celles en K_2O entre 0,27 et 1,7 % tandis que l'intervalle des teneurs en CaO est de 4,7-12 %. Les plus faibles concentrations en Na_2O (0,57 %), K_2O (0,27 %) et CaO (4,70 %) sont celles de DP1 correspondant à la teneur en alumine la plus importante (15,99 %). La somme des alcalins ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) est concentrée entre 2,02 et 5,92 % mais avec des valeurs extrêmes notées pour DP1 (0,84 %) et MPR (8,02 %). Les concentrations en alcalins sont plus importantes dans les basanites (3,63 - 8,09) que sur les basaltes (2,02 - 4,93). Les scories volcaniques présentent un indice d'alcalinité moyen de 2,34 (Tab. 11 et 12). Cet indice d'alcalinité élevé, compris dans l'intervalle +0,37 à +5,38 (Pang et al., 2012; Tchuimegnie, 2016) constitue une caractéristique des laves volcaniques.

Tableau 9: Composition en éléments majeurs dans les basaltes et hawaïites

Roches	Basalte											Haw.
	Manf	L2g	L1n	Ltn	Ltr	Ymb1	Ymb2	Dp2	Mdn	Gal	Moy. n=10	Mang
SiO₂	43,98	44,78	45,05	48,57	46,91	46,18	47,01	46,06	46,17	39,45	45,42	46,80
Al₂O₃	14,17	12,11	13,65	15,26	15,43	13,97	13,08	13,72	15,35	15,29	14,20	14,09
Fe₂O₃	11,78	12,72	13,13	12,81	12,59	11,99	12,37	12,14	13,26	13,41	12,62	12,78
MgO	8,11	10,18	8,34	6,67	6,48	7,54	10,17	9,06	7,51	7,13	8,12	8,22
K₂O	1,04	0,45	1,31	0,92	1,07	1,46	1,46	1,42	1,35	0,74	1,12	1,67
Na₂O	2,13	3,03	3,10	2,99	3,58	3,01	3,23	2,96	3,58	1,28	2,89	3,48
CaO	7,99	12,61	11,59	8,22	8,29	8,31	9,64	8,91	8,95	6,23	9,07	8,94
TiO₂	2,40	2,78	3,01	2,78	2,76	2,46	2,47	2,36	2,78	2,96	2,68	2,81
P₂O₅	0,46	0,40	0,59	0,41	0,47	0,55	0,51	0,55	0,61	0,52	0,51	0,60
MnO	0,18	0,20	0,20	0,17	0,17	0,20	0,19	0,20	0,20	0,22	0,19	0,19
LOI	7,53	0,63	-0,10	1,13	2,06	4,14	-0,33	2,34	0,14	12,53	3,01	0,23
Total	99,77	99,89	99,87	99,93	99,81	99,81	99,80	99,72	99,90	99,76	-	99,81
Mg#	43,35	47,07	41,38	36,66	36,39	41,14	47,75	45,34	38,63	37,14	41,48	41,68

Tableau 10: Composition en éléments majeurs dans les microbasalte et basanite de la LVC.

Roches	Picro.	Basanite											
		DP-1	MANR	MANJ	L1R	L2N	L2R	NJK-1	NJK-2	MDR	MMR	MMN	MPR
SiO ₂	34,94	41,24	41,00	45,97	44,67	44,46	43,10	44,61	45,51	43,96	43,44	46,33	44,03
Al ₂ O ₃	15,99	14,94	14,64	14,01	12,28	12,26	12,92	14,48	14,82	14,38	14,26	15,92	14,08
Fe ₂ O ₃	15,03	13,84	13,54	12,61	12,89	12,82	13,06	12,53	12,92	13,71	13,65	12,23	13,07
MgO	6,93	7,87	7,59	6,76	9,65	9,40	11,05	7,25	7,55	7,86	7,61	4,62	7,93
K ₂ O	0,27	0,84	1,44	1,21	1,13	0,82	1,63	1,70	1,53	1,26	0,74	2,22	1,32
Na ₂ O	0,57	2,79	2,61	2,65	2,41	2,81	4,00	4,22	4,28	3,39	3,87	5,87	3,54
CaO	4,70	9,13	8,69	10,57	12,91	12,82	9,95	9,02	9,24	10,03	9,95	7,97	10,02
TiO ₂	3,25	3,12	3,06	3,07	2,89	2,89	2,83	2,68	2,73	3,22	3,20	3,01	2,97
P ₂ O ₅	0,70	0,71	0,70	0,49	0,42	0,41	0,64	0,62	0,55	0,84	0,85	0,89	0,65
MnO	0,22	0,21	0,21	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,20	0,21	0,20
PF	16,99	5,31	6,41	2,28	0,38	0,84	0,41	2,59	0,45	1,08	2,01	0,64	2,04
Total	99,59	100	99,89	99,81	99,83	99,73	99,79	99,90	99,78	99,94	99,78	99,91	99,85
Mg#	33,88	38,72	38,38	37,33	45,41	44,9	48,46	39,14	39,37	38,92	38,26	29,57	39,86

Cet indice évolue dans le même sens que la somme des alcalins et pourrait confirmer l'appartenance de ces roches à la série alcaline. Les rapports Na₂O/K₂O et Ti/Y supérieurs à l'unité confirment la nature alcaline des matériaux étudiés (Asaah et al., 2015).

Les teneurs des autres éléments majeurs révèlent des valeurs considérables de MgO (6 à 10%), de faibles valeurs de MnO (0,1 à 0,2%), P₂O₅ (0,4 à 0,7%) et TiO₂ (2,4 à 3,2 %). Les valeurs de perte au feu varient des plus faibles (LOI<0) aux plus grandes (12 à 16,99%) en passant par les moyennes (LOI< 10%). Les teneurs en SiO₂ sont largement supérieures à celles en MgO (3<SiO₂/MgO<10). Les rapports MgO/Fe₂O₃ sont inférieurs à 1. La somme MgO+Fe₂O₃ varie entre 16 et 23% (Tab. 11 et 12) et est inférieure à la teneur en silice (SiO₂/MgO+Fe₂O₃>1).

IV.3.2. Géochimie des éléments traces

Les éléments traces sont subdivisés en trois groupes : les éléments à grand rayon ionique (*Large Ion Lithophile Element: LILE*), les éléments à grande valence ionique (*High Field Strength Element: HFSE*) et les éléments ferromagnésiens.

Les éléments lithophiles sont abondants dans les scories volcaniques (Tab. 13). Les teneurs en Sr sont élevées (305 à 1175 ppm.) suivies de celles en Ba dont les valeurs oscillent entre 280 à 860 ppm. Les teneurs moyennes croissantes en Ba suivent l'ordre de la série hawaïite-microbasalte-basalte-basanite ; tandis que les concentrations en Rb comprises entre 4,6 et 9,7 ppm, sont constantes dans l'ensemble des échantillons. Le lithium est présent à des concentrations peu variables et proches de la valeur moyenne (7,19 ppm). L'élément

lithophile le moins important est le Cs dont les teneurs n'atteignent pas 1,2 ppm. Les valeurs en ces éléments sont plus élevées sur les basaltes (Tab. 13) que sur les basanites (Tab. 14).

Le groupe des ferromagnésiens (Cr, V, Ni, Ni, Zn, Cu, Co, Sc) est dominé par le chrome et le vanadium dont les teneurs sont supérieures à 200 ppm ; et par Ni et Zn de teneurs moyennes respectives 128,42 et 117,57 ppm. Les valeurs de Cu varient entre 46 et 183 ppm ; et celles de Co entre 43 et 56 ppm. Les plus faibles teneurs obtenues sont de Sc (20 et 34,6 ppm). Les concentrations élevées en ces éléments ferromagnésiens sont obtenues sur l'hawaïite excepté pour le vanadium et le zinc (basanites). Les plus faibles teneurs sont notées sur le microbasalte à l'exception du vanadium (hawaïite) et du nickel (basanite).

Tableau 11: Sommes et rapports entre éléments majeurs dans les basaltes et hawaïite.

Ech.	Basalte										Haw.
	Manf	L2g	L1n	Ltn	Ltr	Ymb1	Ymb2	Dp-2	Mdn	Gal	Mang
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	70,02	69,18	71,35	72,05	69,08	73,25	71,62	74,48	69,84	69,54	65,96
K ₂ O+ CaO+ Na ₂ O	12,76	12,74	14,56	14,68	15,58	15,05	14,94	16,06	16,45	16,45	5,54
IA	2,8	3,31	2,97	2,81	4,11	3,4	3,84	5,38	1,44	1,61	2,34
Na ₂ O+K ₂ O	3,17	3,48	4,41	3,91	4,65	4,47	4,69	4,38	4,93	2,02	5,15
MgO+ Fe ₂ O ₃	19,89	22,9	21,47	19,48	19,07	19,53	22,54	21,2	20,77	20,54	21
SiO ₂ / MgO	5,42	4,4	5,4	7,28	7,24	6,12	4,62	5,08	6,15	5,53	5,69
MgO/ Fe ₂ O ₃	0,69	0,8	0,64	0,52	0,51	0,63	0,82	0,75	0,57	0,53	0,64
SiO ₂ / (MgO+Fe ₂ O ₃)	2,21	1,96	2,1	2,49	2,46	2,36	2,09	2,17	2,22	1,92	2,23
SiO ₂ -CaO	32,11	32,31	33,49	33,93	33,15	36,27	35,59	38,36	31,76	31,64	30,24
Al ₂ O ₃ / SiO ₂	0,36	0,36	0,33	0,33	0,3	0,33	0,32	0,34	0,27	0,28	0,46
CaO/ Al ₂ O ₃	0,61	0,59	0,7	0,7	0,77	0,62	0,62	0,5	1,05	1,05	0,29

Tableau 12: Sommes et rapports entre éléments majeurs dans les basanites et microbasalte.

Roches	Picro.	Basanite										
		Dp1	Manr	Manj	L1r	L2n	L2r	Njk1	Njk2	Mdr	Mmr	Mmn
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	69,93	69,61	71,83	72,59	76,64	74,93	72,14	72,46	71,92	74,78	68,15	73,67
K ₂ O+ CaO+Na ₂ O	11,16	16,09	16	14,43	12,13	12,94	12,78	14,33	13,29	13,88	8,25	14,09
IA	1,33	1,34	2,17	1,28	0,37	1,72	1,81	1,73	1,77	2,28	1,85	2,26
Na ₂ O+K ₂ O	0,84	3,63	4,05	3,86	3,54	3,63	5,63	5,92	5,81	4,65	4,61	8,09
MgO+ Fe ₂ O ₃	21,96	21,71	21,13	19,37	22,54	22,22	24,11	19,78	20,47	21,57	21,26	16,85
SiO ₂ / MgO	5,04	5,24	5,4	6,8	4,63	4,73	3,9	6,15	6,03	5,59	5,71	10,03
MgO/ Fe ₂ O ₃	0,46	0,57	0,56	0,54	0,75	0,73	0,85	0,58	0,58	0,57	0,56	0,38
SiO ₂ /(MgO+Fe ₂ O ₃)	1,59	1,9	1,94	2,37	1,98	2	1,79	2,26	2,22	2,04	2,04	2,75
SiO ₂ /CaO	35,99	32,17	33,46	35,4	40,35	38,62	37,87	37,37	37,15	37,22	33,22	37,86
Al ₂ O ₃ / SiO ₂	0,32	0,27	0,3	0,3	0,31	0,33	0,3	0,28	0,3	0,33	0,39	0,3
CaO/ Al ₂ O ₃	0,56	1,04	0,85	0,75	0,54	0,54	0,59	0,74	0,65	0,58	0,41	0,63

Les éléments à fort champ électrique (Th, U, Zr, Hf, Mo, W et Ta) présentent des teneurs moins importantes que les éléments lithophiles. La teneur en Zr est la plus importante avec des valeurs comprises entre 187 et 474 ppm pour une moyenne de 277,74 ppm. Le niobium est le second élément de ce groupe avec une concentration moyenne de 74,13 ppm ; suivi du thanium et d'hafnium donc les teneurs atteignent 6 ppm. Les concentrations inférieures à 5 ppm sont observées en Ta, Mo, U et W.

IV.3.3. Géochimie des terres rares

Les concentrations en terres rares dans l'ensemble des échantillons varient de 145 à 336 ppm (Tab. 15 et 16). Elles sont plus concentrées dans les basanites (220-381 ppm) comparativement aux basaltes (145-336 ppm) ; les teneurs des terres rares dans les picrobasaltes (294 ppm) et hawaïites (256 ppm) étant incluses entre ces deux premières roches. Les teneurs en terres rares légères (LREE) de même que celles en terres rares lourdes (HREE) suivent également le même ordre que l'ensemble des terres rares. La teneur la plus élevée en terres rares légères et lourdes est obtenue sur l'échantillon Gal pour ce qui est des basaltes et sur l'échantillon Mpr pour les basanites. Le rapport LREE/HREE obtenu à partir de ces éléments montre que les terres rares légères prédominent sur les terres rares lourdes. Les concentrations les plus élevées par éléments sont celles en cérium (53,28-160 ppm) suivies de celles en lanthane (24,8-82,4 ppm) et de celles en néodyme (34,26-73,4 ppm). Les autres terres rares présentent des teneurs moyennes inférieures à 10 ppm à l'exception du thulium et du lutétium dont les valeurs n'atteignent pas l'unité.

IV.3.4. Corrélations

La corrélation entre les différents éléments chimiques se fait à travers une matrice de corrélation et à partir des diagrammes de Harker. Les diagrammes binaires mettent un accent sur la relation entre tous les éléments chimiques et le MgO choisi comme discriminant.

Tableau 10: Distribution des éléments traces dans les basaltes, hawaïites et picrobasaltes.

Ech.	Basaltes										Haw.	Picro
	Manf	L2g	L1n	Ltn	Ltr	Ymb1	Ymb2	Dp-2	Mdn	Gal	Mang	Dp-1
Ba	554,7	305,9	433,9	280	334,3	610,6	561,8	707,2	449,6	859,7	561,5	778,1
Sr	621	686,2	897,1	530,8	576,9	773,9	744,9	824,2	732,3	654,1	774,8	355,5
Li	7,5	5,4	5,7	4,8	6,6	7	6,1	8,4	6,6	9,7	6,6	7
Rb	34,52	44,02	33,31	17,69	19,87	38,28	36,31	43,95	34,4	32,12	39,6	10,63
Cs	0,67	0,52	0,467	0,187	0,216	0,425	0,358	0,525	0,402	0,93	0,378	0,263
Th	10,4	4,88	6,7	2,34	2,71	6,87	5,65	10,68	4,95	9,71	5,85	6,22
Zr	237	239	320	187	206	278	219	273	272	284	263	301
Nb	63,59	60,41	80,46	38,59	43,58	78,98	64,63	86,5	65,2	107,38	76,49	90,49
U	1,51	1,277	1,778	0,632	0,746	1,464	1,137	1,829	1,263	2,118	1,395	1,478
Hf	5,52	5,59	7,13	4,69	5,02	6,14	4,93	5,84	6,17	6,22	5,92	6,58
Mo	1,78	1,88	3,43	1,39	1,53	3,16	2,21	2,4	2,55	1,03	2,61	0,56
W	0,72	0,55	1,03	0,39	0,46	0,95	0,74	0,98	0,84	0,96	0,89	0,85
Ta	3,61	3,829	4,926	2,32	2,651	4,499	3,722	4,906	3,954	6,157	4,421	5,03
Cr	274	498	288	168	140	223	339	249	144	192	192	257
V	208	302,2	300,8	196	197,4	197,1	211,6	218,7	225,6	201	219	198,4
Ni	148,8	179,8	125,3	106,4	90	127,5	185,7	161,5	107,4	107,8	125,4	138,6
Zn	97,5	105,5	117,1	120,4	118,3	116,8	103,3	117	125,8	109,8	112	129,1
Cu	50	130,4	91,5	46,8	57,3	49,8	46,1	54,8	50,9	56,8	52,5	68,9
Co	47,99	56,24	49,54	45,66	43,91	44,72	51,65	49,61	47,7	48,48	47,81	54,56
Sc	24,5	33,8	27,8	20	19,8	21,9	25,1	25,5	20,6	23,7	21,9	28,1
Y	26,3	22,92	29,54	26,79	27,95	30,06	24,18	31,25	28,76	30,21	28,35	30,62
Ga	19,63	17,45	20,49	20,1	20,06	19,68	17,13	19,55	21,11	20,13	19,33	22,32
Pb	6,95	2,4	3,78	1,63	2,98	4,42	3,26	4,6	3,07	5,52	3,36	3,13
Be	1,47	1,36	1,79	1,2	1,44	1,78	1,48	1,88	1,83	2,3	1,68	1,71
Cd	0,12	0,07	0,14	0,13	0,14	0,16	0,11	0,14	0,15	0,14	0,14	0,15
Sn	1,97	1,76	2,26	1,76	1,87	1,93	1,58	1,75	2,05	1,78	1,87	1,85

Tableau 11: Distribution des éléments traces dans les basanites

Ech.	Basanites										
	Manr	Manj	L1r	L2n	L2r	Njk-1	Njk-2	Mdr	Mmr	Mmn	Mpr
Ba	511	532,8	432,6	325,7	327,3	587,3	682,3	441,3	455,6	470,4	697
Sr	772,9	718,2	846,9	718,7	729	804,4	907,7	721,2	789,9	810,6	1175,9
Li	7,1	8,9	8,8	4,6	5,8	6,8	9,1	8,3	7,6	7,7	9,2
Rb	11,19	28,58	28,25	2730	34,76	40,3	46,12	42,87	33,15	52,69	62,39
Cs	1,1	0,3	0,43	0,355	0,59	0,462	0,493	0,513	0,319	0,615	0,724
Th	6,26	6,11	7,39	5,05	4,98	5,32	5,81	4,59	4,78	4,85	7,78
Zr	343	327	331	245	249	234	280	264	279	283	474
Nb	86,07	81,67	77,361	61,97	63,18	79	85,33	62,79	68,74	70,124	112,41
U	1,85	1,58	1,999	1,379	1,366	1,39	1,445	1,246	1,331	1,344	1,961
Hf	7,46	7,11	7,32	5,79	5,78	5,13	5,93	6,04	6,15	6,3	10
Mo	0,69	1,14	2,74	2,52	2,01	2,79	2,59	2,2	2,38	1,04	3,42
W	0,49	0,69	0,9	0,69	0,65	0,87	0,9	0,77	0,84	0,51	1,09
Ta	5,21	5,01	4,87	3,95	3,948	4,61	4,883	3,807	4,193	4,299	6,633
Cr	140	133	290	458	452	293	190	159	169	170	19
V	176,1	182,8	272,5	335,8	315,6	237,1	202,7	223,8	235,5	189,9	158,8
Ni	116,7	107,2	119,9	152,9	148,7	212,6	98,5	112,1	121,1	122,2	37,6
Zn	136,8	134,3	115,7	107	109,1	108,6	117,8	122,9	120,6	117,8	140,9
Cu	59,4	84,7	151,1	140,2	183,4	72,9	64,8	78,9	62,8	61,7	41,8
Co	51,71	48,57	47,24	53,92	53,81	55,07	43,45	47,77	48,12	47,8	33,84
Sc	22,1	20,9	26,6	34,6	34,5	23,9	21,2	21,2	24,5	24,5	14,7
Y	32,14	30,68	28,23	23,71	24	25,37	27,72	27,57	31,68	32,45	36,94
Ga	21,73	20,57	21,04	17,66	17,54	17,45	19,05	20,59	20,37	19,95	23,37
Pb	21,22	3,93	3,3	2,93	2,79	3,65	5,06	2,78	1,82	1,41	4,91
Be	2,2	1,84	1,66	1,37	1,38	1,55	1,75	1,79	1,97	1,84	2,73
Cd	0,26	0,28	0,11	0,1	0,09	0,11	0,21	0,11	0,06	0,07	0,15
Sn	4,14	2,31	2,165	1,95	1,93	1,73	1,76	1,85	2,25	2,09	1,54

Tableau 12: Distribution des terres rares dans les basaltes, hawaiïtes et microbasaltes

Roches	Basaltes										Haw.	Picro.
	Manf	L2g	L1n	Ltn	Ltr	Ymb1	Ymb2	Dp2	Mdn	Gal	Mang	Dp1
La	58,6	45,5	63,6	24,8	29,0	62,9	48,2	72,0	47,2	77,5	55,4	64,6
Ce	111,4	93,70	127,36	53,28	61,24	118,25	91,48	135,43	92,80	143,73	105,17	120,34
Pr	13,25	11,67	15,49	7,09	7,98	13,81	10,86	15,38	11,35	16,08	12,44	14,54
Nd	51,60	46,59	59,56	31,19	34,26	53,83	42,89	58,47	44,66	60,86	49,02	56,76
Sm	9,43	8,45	10,85	7,12	7,65	9,97	8,14	10,40	8,80	10,69	9,38	10,77
Eu	2,90	2,54	3,21	2,45	2,57	3,07	2,72	3,14	2,80	3,38	2,87	3,62
Gd	7,72	6,83	8,76	7,03	7,31	8,42	6,98	8,58	7,84	8,70	8,09	9,08
Tb	1,05	0,93	1,20	1,01	1,05	1,16	0,96	1,17	1,10	1,19	1,11	1,22
Dy	5,64	4,91	6,40	5,67	5,90	6,31	5,21	6,40	5,98	6,41	6,00	6,63
Ho	1,00	0,89	1,13	1,03	1,04	1,12	0,91	1,17	1,08	1,16	1,06	1,17
Er	2,55	2,26	2,89	2,59	2,67	2,87	2,31	3,01	2,80	2,94	2,71	2,97
Tm	0,32	0,29	0,37	0,34	0,35	0,37	0,29	0,39	0,35	0,39	0,35	0,37
Yb	1,93	1,75	2,23	2,02	2,06	2,29	1,76	2,44	2,16	2,40	2,14	2,27
Lu	0,27	0,25	0,31	0,28	0,29	0,32	0,25	0,35	0,30	0,34	0,30	0,32
ΣREE	267,66	226,56	303,36	145,9	163,37	284,69	222,96	318,33	229,22	335,77	256,04	294,66
LREE	247,18	208,45	280,07	125,93	142,7	261,83	204,29	294,82	207,61	312,24	234,28	270,63
HREE	20,48	18,11	23,29	19,97	20,67	22,86	18,67	23,51	21,61	23,53	21,76	24,03
LREE/ HREE	12,07	11,51	12,02	6,31	6,90	11,45	10,94	12,54	9,61	13,27	10,77	11,26
Ce/Ce*	0,97	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,97	0,99	0,97	0,95
Eu/Eu*	0,44	0,44	0,44	0,43	0,43	0,44	0,45	0,44	0,43	0,45	0,43	0,46

Tableau 13: Distribution des terres rares dans les basanites

Roches	Basanites										
	Manr	Manj	L1r	L2n	L2r	Njk1	Njk2	Mdr	Mmr	Mmn	Mpr
La	59,2	56,6	61,0	47,5	47,9	52,3	61,1	45,0	46,0	46,4	82,4
Ce	117,63	110,80	122,70	98,60	101,07	99,05	113,84	89,32	91,54	93,02	159,6
Pr	14,06	13,38	14,74	12,23	12,25	11,70	13,43	10,89	11,25	11,48	19,1
Nd	55,39	52,67	58,07	48,43	49,00	46,10	51,46	42,73	46,45	47,46	73,4
Sm	10,31	9,88	10,58	8,75	8,75	8,74	9,45	8,54	9,57	9,84	13,4
Eu	3,26	3,12	3,14	2,65	2,69	2,88	3,26	2,69	3,10	3,18	4,12
Gd	9,07	8,55	8,51	7,19	7,13	7,55	8,08	7,57	8,56	8,80	10,9
Tb	1,23	1,18	1,16	0,97	0,95	1,00	1,11	1,06	1,20	1,26	1,48
Dy	6,74	6,48	6,12	5,14	5,09	5,47	5,90	5,88	6,70	6,80	7,91
Ho	1,19	1,16	1,09	0,93	0,92	0,97	1,05	1,06	1,20	1,22	1,37
Er	3,06	2,95	2,80	2,34	2,35	2,42	2,63	2,70	3,11	3,15	3,42
Tm	0,39	0,38	0,35	0,30	0,30	0,30	0,34	0,34	0,40	0,42	0,44
Yb	2,36	2,29	2,12	1,82	1,87	1,80	2,08	2,07	2,45	2,48	2,67
Lu	0,33	0,32	0,30	0,25	0,26	0,25	0,29	0,29	0,34	0,35	0,37
ΣREE	284,22	269,76	292,68	237,1	240,53	240,53	274,02	220,14	231,87	235,86	380,7
LREE	259,85	246,45	270,23	218,16	221,66	220,77	252,54	199,17	207,91	211,38	352
HREE	24,37	23,31	22,45	18,94	18,87	19,76	21,48	20,97	23,96	24,48	28,7
LREE/ HREE	10,66	10,57	12,04	11,52	11,75	11,17	11,76	9,50	8,68	8,63	12,3
Ce/Ce*	0,99	0,97	0,99	0,99	1,01	0,97	0,96	0,98	0,97	0,98	0,97
Eu/Eu*	0,43	0,44	0,44	0,44	0,44	0,45	0,46	0,43	0,44	0,43	0,44

IV.3.4.1. Diagrammes binaires

IV.3.4.1.1. Diagrammes binaires entre oxydes majeurs

Les diagrammes binaires établis entre certains éléments majeurs viennent illustrer les différentes corrélations (Fig. 20). La silice n'étant pas un indicateur d'évolution dans les laves basaltiques (Fitton et al., 1991) ; le choix du discriminant s'est porté sur le MgO compte tenu de ses concentrations élevées dans les matériaux mafiques. A partir de ces diagrammes, il ressort une corrélation négative $Al_2O_3 - MgO$ et $P_2O_5 - MgO$; la seule corrélation positive étant obtenue entre CaO et MgO. Les autres oxydes majeurs ne présentent pas de corrélation appréciable avec le MgO.

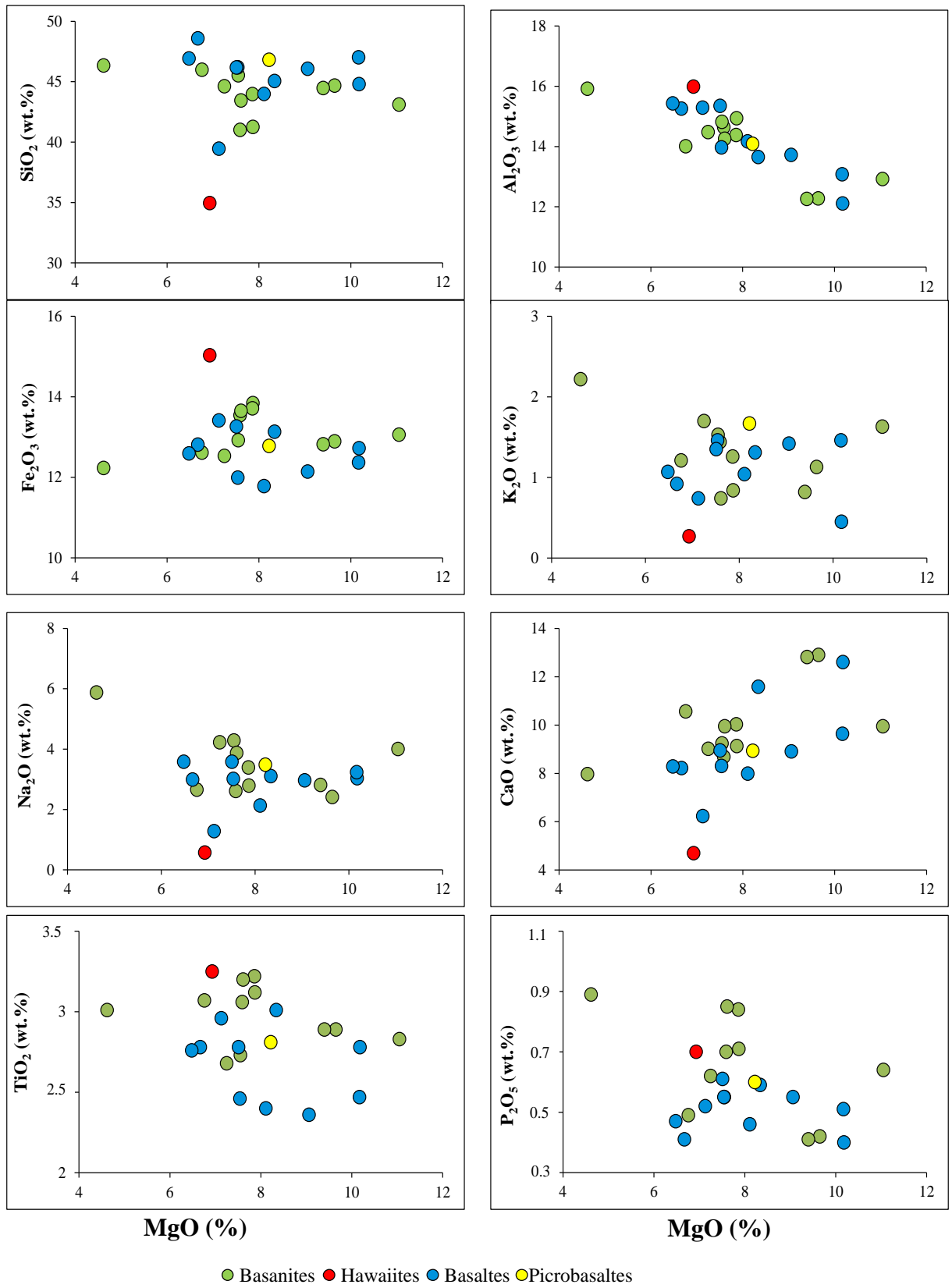


Figure 20: Diagrammes binaires éléments majeurs et MgO des scories de la LVC.

IV.3.4.1.2. Diagrammes binaires des terres rares et des éléments traces

Les éléments traces se divisent en éléments traces compatibles et incompatibles en fonction de leur comportement au cours de l'évolution du magma. Les éléments traces compatibles sont ceux qui présentent une affinité avec le solide et les éléments incompatibles ont une affinité avec le liquide. Les diagrammes binaires des éléments traces en fonction de MgO (Fig. 21) montre que Co, Cr et Ni se comportent en éléments traces compatibles ; les valeurs en ces éléments étant inférieures à celles du magma primaire. La diminution de ces éléments au cours de l'évolution du magma, montre qu'ils se sont concentrés dans les olivines, les clinopyroxènes et les minéraux ferrotitanés.

Les éléments traces présentant une corrélation négative avec MgO (Ba et Ta) sont considérés comme incompatibles. Ces derniers ne peuvent pas entrer dans la structure des minéraux précoces à cause de leur forte charge ionique, et/ou de leur large rayon. Ils seront par conséquent beaucoup plus concentrés dans les roches les plus différenciées. Ces éléments incompatibles ont des teneurs qui augmentent avec l'évolution du magma.

IV.3.4.2. Matrice de corrélation

IV.3.4.2.1. Corrélation entre éléments majeurs

La matrice de corrélation (Tab. 17) présente les corrélations entre les différents éléments chimiques. Les éléments majeurs présentent tant bien des corrélations positives que négatives. Les corrélations positives reflètent l'affinité existant entre les oxydes majeurs tandis que les négatives témoignent de l'incompatibilité entre ces derniers.

Il ressort une bonne corrélation positive entre Na_2O et K_2O qui évoque la présence des feldspaths sodiques (albite) et potassiques (orthose). La forte corrélation négative Al_2O_3 - CaO renforce cette hypothèse et implique l'absence des plagioclases du pôle calcique. Dans l'ensemble, Al_2O_3 présente de faibles valeurs de corrélation avec les éléments majeurs. Cependant, la meilleure corrélation de Al_2O_3 est obtenue avec P_2O_5 et LOI ; ce qui donne des indices sur les minéraux argileux et pourrait accorder un intérêt à la phase amorphe. La perte au feu présente une corrélation négative avec SiO_2 , CaO et Na_2O . Il apparaît donc clairement que les échantillons qui présentent les teneurs en PF les plus importantes (DP1 et GAL) présentent les plus faibles teneurs en SiO_2 , CaO et Na_2O .

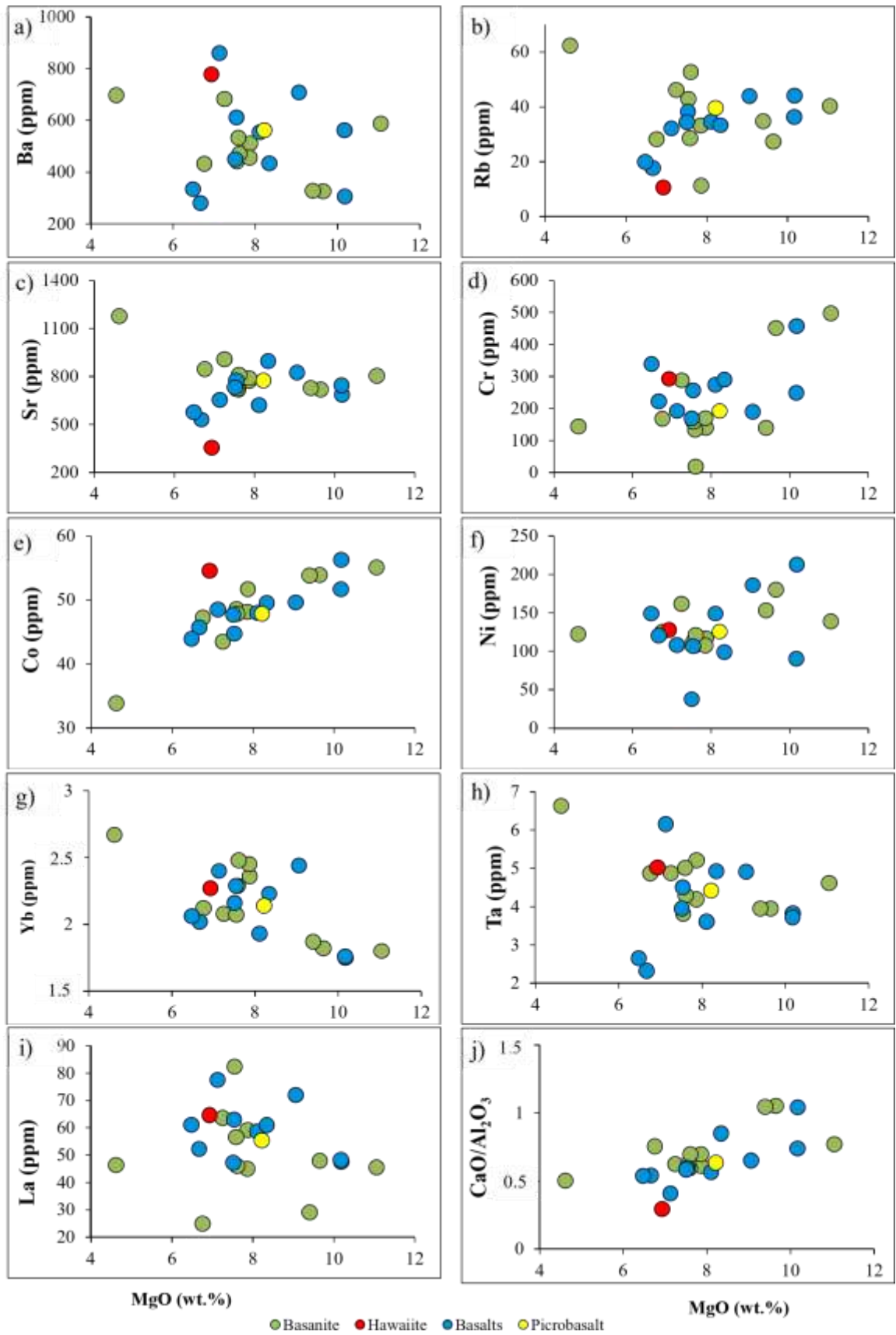


Figure 13 : Diagrammes binaires des éléments traces (a) Ba, b) Rb, c) Sr, d) Cr, e) Co, f) Ni, g) Yb, h) Ta, i) La, j) CaO/Al₂O₃ vs, MgO

Par contre, les valeurs de Fe_2O_3 les plus élevées observées pour les mêmes échantillons attestent d'une moyenne corrélation positive entre Fe_2O_3 et LOI. Ceci indique que SiO_2 , CaO et Na_2O résultent de la présence des minéraux primaires (pyroxènes, feldspaths) tandis que Fe_2O_3 et Al_2O_3 indiquent un degré d'altération météorique d'où la présence des minéraux secondaires tels que l'hématite et l'ilménite. La corrélation positive entre Fe_2O_3 et TiO_2 d'une part et MnO d'autre part témoigne de l'abondance dans les scories de ces oxydes. Ces différents oxydes constituent également des composants de la mésostase. Les corrélations positives entre SiO_2 et CaO ; SiO_2 et Na_2O sont modérée à bonne respectivement ; tandis que Na_2O et CaO présentent une faible corrélation positive. La corrélation positive CaO-MgO ; serait un indicateur de la présence de la biotite et du diopside.

IV.3.4.2.2. Corrélation entre terres rares

Il ressort du tableau 17 que les terres rares sont toutes positivement corrélées. Cependant, ces corrélations sont meilleures entre terres rares légères d'une part et entre terres rares lourdes d'autre part.

IV.3.4.2.3. Corrélation entre majeurs et terres rares

La corrélation entre les éléments majeurs et les terres rares laisse apparaître entre ces deux groupes d'éléments chimiques certaines affinités.

La corrélation entre le lanthane et les différents oxydes majeurs est négative excepté pour le MnO qui montre une corrélation positive avec toutes les terres rares légères. Ce qui pourrait traduire que le lanthane et l'oxyde de manganèse seraient portés par le même minéral. Par ailleurs, les terres rares lourdes sont positivement corrélées à l'alumine ainsi qu'à l'oxyde de phosphore.

Tableau 14 : Matrice de corrélation des éléments chimiques des scories de la LVC.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	LOI	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
SiO ₂	1																									
Al ₂ O ₃	-0,24	1																								
Fe ₂ O ₃	-0,76	0,32	1																							
MgO	0,02	-0,86	-0,08	1																						
K ₂ O	0,52	0,07	-0,52	-0,15	1																					
Na ₂ O	0,62	0,03	-0,42	-0,17	0,74	1																				
CaO	0,42	-0,83	-0,25	0,58	0,02	0,25	1																			
TiO ₂	-0,53	0,28	0,80	-0,30	-0,30	-0,11	-0,01	1																		
P ₂ O ₅	-0,31	0,47	0,43	-0,39	0,30	0,37	-0,31	0,55	1																	
MnO	-0,71	0,11	0,57	-0,02	-0,08	-0,19	-0,16	0,49	0,54	1																
LOI	-0,85	0,46	0,50	-0,28	-0,52	-0,74	-0,72	0,24	0,10	0,45	1															
La	-0,38	0,17	-0,04	-0,21	0,27	-0,07	-0,32	0,04	0,37	0,65	0,41	1														
Ce	-0,36	0,13	-0,04	-0,22	0,25	-0,05	-0,22	0,10	0,36	0,65	0,35	0,99	1													
Pr	-0,35	0,13	-0,01	-0,25	0,25	-0,03	-0,19	0,16	0,38	0,65	0,33	0,97	0,99	1												
Nd	-0,36	0,14	0,01	-0,28	0,23	-0,02	-0,17	0,22	0,42	0,65	0,33	0,96	0,98	1,00	1											
Sm	-0,35	0,34	0,11	-0,46	0,25	0,08	-0,28	0,35	0,61	0,63	0,32	0,89	0,92	0,94	0,96	1										
Eu	-0,46	0,50	0,25	-0,54	0,23	0,08	-0,47	0,41	0,72	0,65	0,44	0,83	0,83	0,85	0,87	0,94	1									
Gd	-0,33	0,56	0,23	-0,62	0,27	0,17	-0,43	0,45	0,78	0,57	0,32	0,75	0,76	0,79	0,82	0,94	0,95	1								
Tb	-0,26	0,64	0,24	-0,70	0,27	0,22	-0,46	0,46	0,81	0,49	0,28	0,64	0,65	0,68	0,72	0,87	0,90	0,98	1							
Dy	-0,25	0,70	0,27	-0,72	0,26	0,22	-0,52	0,45	0,82	0,45	0,28	0,56	0,56	0,59	0,62	0,80	0,85	0,95	0,99	1						
Ho	-0,26	0,70	0,29	-0,71	0,22	0,19	-0,51	0,45	0,81	0,47	0,29	0,55	0,55	0,57	0,61	0,78	0,83	0,94	0,98	0,99	1					
Er	-0,25	0,69	0,31	-0,70	0,19	0,17	-0,49	0,46	0,80	0,46	0,28	0,52	0,52	0,54	0,58	0,76	0,79	0,92	0,96	0,98	0,99	1				
Tm	-0,22	0,67	0,28	-0,70	0,16	0,17	-0,47	0,44	0,77	0,42	0,26	0,47	0,48	0,49	0,53	0,71	0,75	0,88	0,94	0,96	0,98	0,99	1			
Yb	-0,23	0,64	0,26	-0,67	0,17	0,14	-0,47	0,40	0,75	0,48	0,28	0,54	0,54	0,55	0,58	0,74	0,77	0,89	0,93	0,95	0,98	0,98	0,99	1		
Lu	-0,24	0,63	0,26	-0,65	0,14	0,11	-0,48	0,37	0,72	0,47	0,30	0,55	0,55	0,55	0,58	0,74	0,76	0,87	0,92	0,94	0,97	0,98	0,99	1,00	1	

IV.3.5. Normalisation

IV.3.5.1. Normalisation des terres rares par rapport à la chondrite

Les valeurs normalisées des terres rares par rapport à la chondrite décrivent des spectres à l'allure uniforme (Fig. 22). Ces spectres sont homogènes et strictement parallèles. La pente négative de ces courbes témoigne de la prédominance des terres rares légères sur les terres rares lourdes. L'inflexion observée sur les spectres révèle une anomalie négative en Eu ($Eu/Eu^* = 0,43-0,46$), ce qui pourrait s'expliquer par la cristallisation des feldspaths.

IV.3.5.2. Normalisation par rapport au manteau primitif

Les spectres multiéléments (Fig. 23) normalisés au manteau primitif (McDonough et Sun, 1995) exhibent dans l'ensemble des pics négatifs en K, Ce, Sr et positif en Nb-Ta. Les anomalies positives en Nb-Ta caractérisent les basaltes alcalins et traduisent vraisemblablement des teneurs élevées en Nb et Ta dans leur source magmatique (Mbowou et al., 2020). L'absence d'anomalie négative Nb-Ta dans le diagramme normalisé multiéléments témoigne de la faible contamination de la croûte. Les roches de la croûte continentale étant enrichies en SiO_2 et en LILE (Rb, Ba, K) mais appauvries en HFSE (Nb, Ta, Ti) (Rudnick et Gao, 2003) ; les teneurs sous saturées en silice des scories étudiées réconfortent l'hypothèse d'une contamination crustale peu significative.

Les faibles teneurs en K (anomalie négative en K) seraient liées à la présence des phases résiduelles riches en K ; ce qui est cohérent avec la présence de phases minérales hydratées telles que la phlogopite et/ou l'amphibole (Dedzo et al., 2019) dans la source magmatique comme proposé pour la genèse des basaltes du secteur continental (Fitton et Dunlop, 1985 ; Ngounouno et al., 2003 ; Suh et al., 2003 ; Rankenburg et al., 2005). La présence de phlogopite dans la source pourrait retenir non seulement K, mais aussi Rb et Ba (Sun et McDonough, 1989) et expliquerait ainsi les anomalies négatives observées en Rb et Ba. La présence de ces anomalies suggère aussi que le magma à l'origine de ces matériaux n'aurait pas subi de contamination crustale (Jung et al., 2019). La présence de ces phases minérales associée aux valeurs élevées des différents rapports K/Ba, K/Rb et Ba/Rb mettent en évidence l'effet du métasomatisme. Ce phénomène ayant déjà été évoqué à travers le processus d'iddingsitisation, Les rapports Ce/Pb (5 - 65) sont élevés, ce qui est typique des magmas dérivés des panaches (Tian et al., 2010).

IV.3.6. Evaluation du fractionnement des terres rares

L'évaluation quantitative du fractionnement des terres rares à partir du rapport (La_N/Yb_N) indique le degré de séparation entre les terres légères et lourdes. Ces valeurs variant de 8,34 à 21,94 pour les scories étudiées constituent un indicateur de fractionnement des terres rares. L'épuisement des terres rares lourdes par rapport aux terres rares légères renvoie à la présence du grenat dans la source (Rollinson, 1993). Il peut aussi trouver une explication dans les processus supergènes, les LREE étant piégés dans les minéraux secondaires. Le degré de fractionnement peut être apprécié qualitativement et quantitativement. De façon quantitative, en plus des rapports LREE/HREE, La_N/Yb_N , les valeurs des rapports La_N/Sm_N (2,18 - 4,53) et Gd_N/Yb_N (2,82 - 3,39) mettent en exergue le fractionnement des terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes. La visualisation qualitative se fait à partir d'une représentation graphique (Fig. 22) à partir des valeurs normalisées des terres rares par rapport à la chondrite. Il ressort dans l'ensemble, un parallélisme des spectres obtenus marqué par une perte entre Nd et Sm et une pente négative. La forme continue sans stries apparentes des spectres indique d'une part une évolution des différentes roches à partir d'une même source magmatique. Elle confirme d'autre part l'enrichissement des terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes. L'appréciation quantitative des anomalies révèle une absence d'anomalie en cérium d'une part ($Ce/Ce^* = 0,98$) et d'autre part une valeur négative d'anomalie en europium ($Eu/Eu^* = 0,44$) due à l'élimination des plagioclases par cristallisation fractionnée (Duzgoren Aydin et Aydin, 2009, Yusoff et al., 2013) ou au remplacement de Eu par Sr dans la structure des feldspaths.

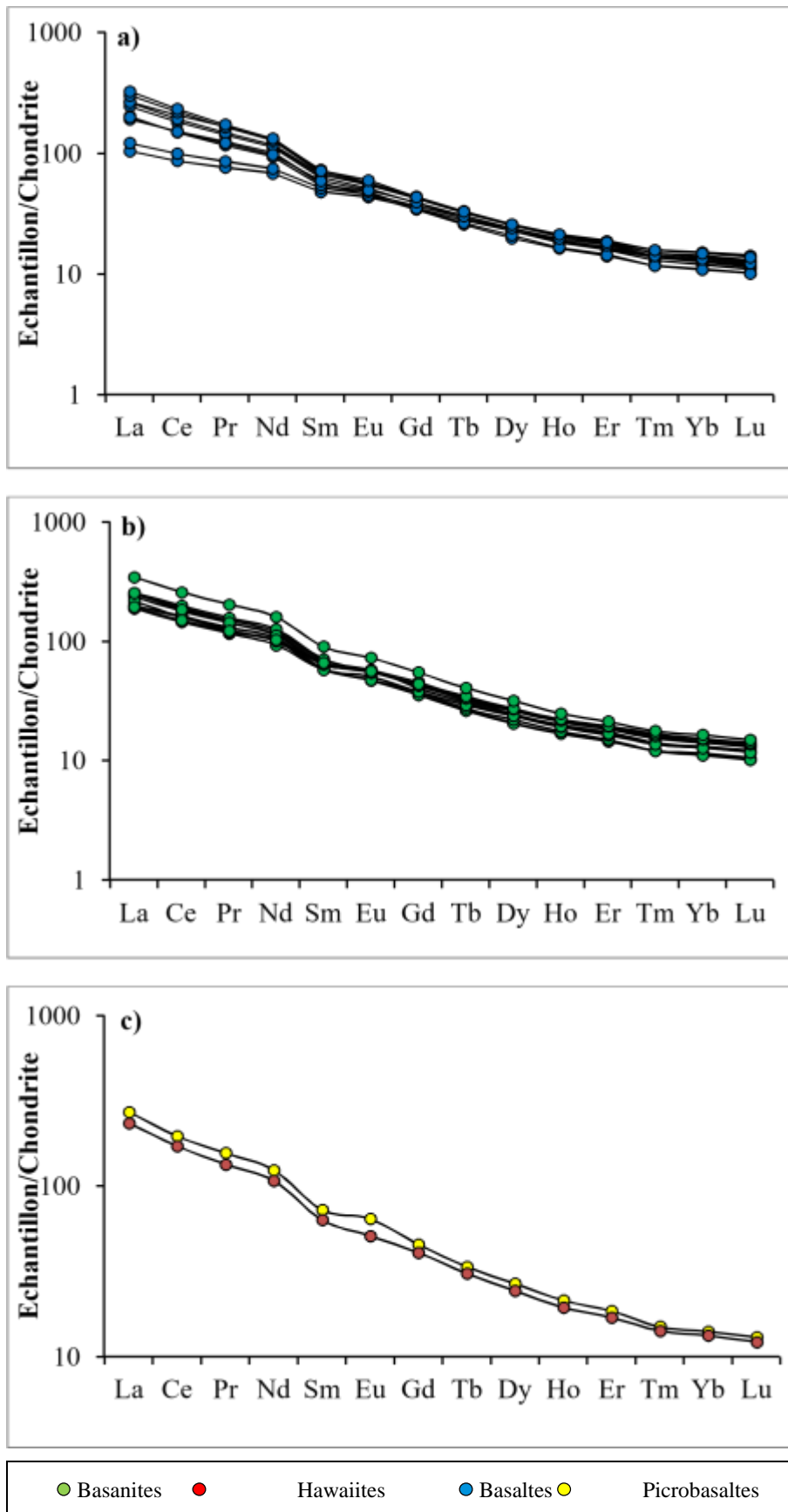


Figure 15: Spectres de normalisation des terres rares par rapport à la chondrite, a) basaltes, b) basanites, c) picrobasalte et hawaïite,

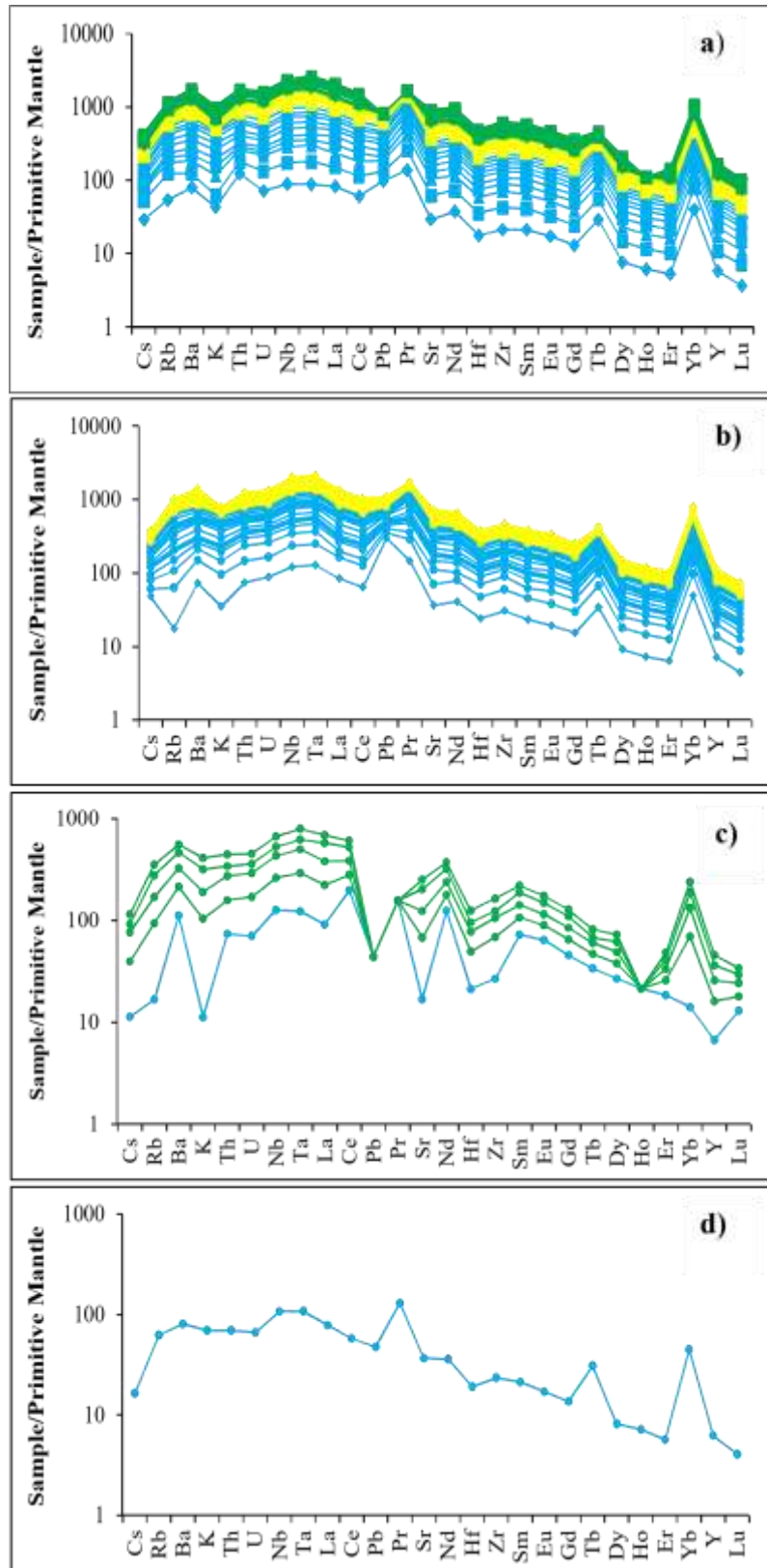


Figure 17: Spectres multiéléments des scories de la ligne volcanique du Cameroun (a) basaltes, b) basanites, c) hawaiiites, d) microbasaltes ; les données en vert sont celles de Yamgouot et al., (2016) ; celles en jaune sont de Mbowou et al., (2020) ; et celles en bleu sont de la présente étude).

Conclusion

Les données de la caractérisation pétrologique des scories de la Ligne Volcanique du Cameroun montrent qu'elles sont de taille et de couleur variables. Les observations en lames minces ont montré d'une part des phénocristaux de pyroxènes et d'olivines, d'autre part des microcristaux de feldspaths. La texture de ces roches est microlitique. La minéralogie normative a révélé une dominance des feldspaths alcalins et plagioclases. Les différents types de roches identifiés sont les basanites, les basaltes, les hawaiiites et les picrobasaltes. Les résultats de la minéralogie qualitative indiquent que les principales espèces minérales sont l'olivine, le pyroxène et les feldspaths. Les minéraux secondaires identifiés sont l'hématite, la kaolinite et l'ilménite. Les halos de diffusion illustrés par les spectres de diffractométrie des rayons X constituent des indicateurs de phase amorphe. La présence de groupements trivalents Si-O-Al et Si-O-Si confirme la coexistence des phases cristallines et amorphe. Les données de géochimie des éléments majeurs indiquent une prédominance de la silice, l'alumine et l'oxyde de fer. Les teneurs en éléments traces sont dominées par les éléments lithophiles. Les terres rares sont marquées par des terres légères plus abondantes que les terres rares lourdes. Elles sont toutes positivement corrélées entre elles et présentent une absence d'anomalie en cérium de même qu'une anomalie négative en europium.

CHAPITRE V: PARAMETRES DE VALORISATION DES SCORIES VOLCANIQUES

Introduction

Le présent chapitre est consacré à la présentation des résultats d'analyses en des essais permettant de valoriser les scories volcaniques dans l'industrie du ciment. Il a été démontré que la valorisation adéquate des scories volcaniques dépend de certains critères spécifiques. Dans le cadre de ce travail, la valorisation industrielle des scories prélevées est basée sur les propriétés chimiques, mécaniques et techniques. Il s'agit des résultats d'analyses granulométrique et thermique, de la quantification de la phase amorphe, de l'indice de pouzzolanité, et de l'activité pouzzolanique des matériaux d'étude.

V.1. Granularité

Les résultats de l'analyse granulométrique montrent une répartition des grains sur quatre classes granulométriques. Dans l'ensemble des matériaux, les proportions en cailloux varient entre 3 et 27%, les graviers sont compris entre 38 et 90%, les sables grossiers entre 4 et 24% et la fraction fine n'excède pas 17% (Tab. 18). La classe granulométrique la plus représentée est celle des graviers avec des valeurs moyennes de 70 %. La proportion la plus importante est observée sur les basaltes qui détiennent également le pourcentage le plus élevé de fraction fine. La somme des proportions en sables et fraction fine se rapproche de la moitié de celle en graviers dominants (Fig. 24). Ceci montre que les vides laissés par les grains de dimensions supérieures seraient comblés. Ainsi donc, le compactage de ces scories se ferait de façon aisée. La courbe granulométrique obtenue présente une inflexion traduisant une discontinuité dans la répartition des grains. Ces courbes granulométriques révèlent qu'en général, 50% de la masse des échantillons possède une granulométrie comprise entre 10 et 3,5 mm ($10 \leq D_{50} \leq 3,5$). Ce qui confirme la prédominance des graviers dans les scories volcaniques.

V.2. Analyses thermiques

V.2.1. Analyse thermogravimétrique

Les courbes d'analyses thermiques sont présentées à la figure 25, il s'agit de la courbe DSC illustrée en bleu et la courbe TG illustrée avec la couleur rouge. A partir de ces courbes ressortent des éléments tels que les pertes de masse et les températures caractéristiques de changement d'état. Les courbes obtenues après chauffage de l'échantillon MANG (Fig. 25. a) sont remarquables. La courbe DSC est restée constante tandis que celle TG n'a révélé aucune perte de masse. Ceci traduit une absence d'effets

thermiques indiquant qu'il s'agit d'un échantillon inerte. Cette inertie pourrait être attribuée à la dominance de la phase amorphe dont l'évaluation pourrait se faire de façon indirecte par la valeur de la différence SiO₂-CaO supérieure à 34%. Cette réaction traduit également une absence de cristallisation. La courbe DSC de l'échantillon LTN (Fig. 25. b) présente une allure quasi horizontale. Cependant, il est observé un pic endothermique à 151°C correspondant au départ de l'eau non adsorbée. Il s'ensuit une hausse de température progressive jusqu'à 975°C qui est le pic exothermique. Les courbes DP1 et GAL (Fig. 25. c et d) présentent la même allure ascendante. Elles sont caractérisées par deux pertes de masse visibles (-10,45 et -2,06 %; -8,44 et -2,5 % respectivement), une hausse de température jusqu'à l'atteinte du point de cristallisation situé entre 971 et 973°C. Les températures de fusion varient de 72 à 88 °C pour les deux échantillons. Le passage entre ces deux états est marqué par un pic endothermique de moindre étendue (442-455°C) qui pourrait correspondre à la phase de transition vitreuse. La présence de ces trois éléments sur la courbe démontre la coexistence des phases cristalline et amorphe dans les deux échantillons. Il en est de même pour l'échantillon DP2 (Fig. 25. e) marqué par un point de fusion à 81°C, une phase de transition vitreuse à 395°C et une cristallisation à 974°C. Il est néanmoins observé sur la courbe TG un gain de masse (+1,72%) à la température de fusion. Les courbes obtenues sur YMB2 (Fig. 25. f) présentent un point de fusion à 198°C et une cristallisation à 958°C.

Tableau 16: Données d'analyse granulométrique des scories de la LVC

Granularité	Statistiques	Basalte	Hawaïite	Picrobasalte	Basanite
Cailloux (%)	Minimum	0	-	-	7,0
	Moyenne	6,6	21,0	6,0	13,1
	Maximum	18,0	-	-	27,0
Graviers (%)	Minimum	38,0	-	-	58,0
	Moyenne	73,6	71,0	73,0	68,45
	Maximum	90,0	-	-	79,0
Sables (%)	Minimum	4,0	-	-	6,0
	Moyenne	10,3	8,0	14,0	13,82
	Maximum	18,0	-	-	24,0
Fines (%)	Minimum	1,0	-	-	0
	Moyenne	33,6	0	7,0	5,0
	Maximum	9,0	-	-	17,0

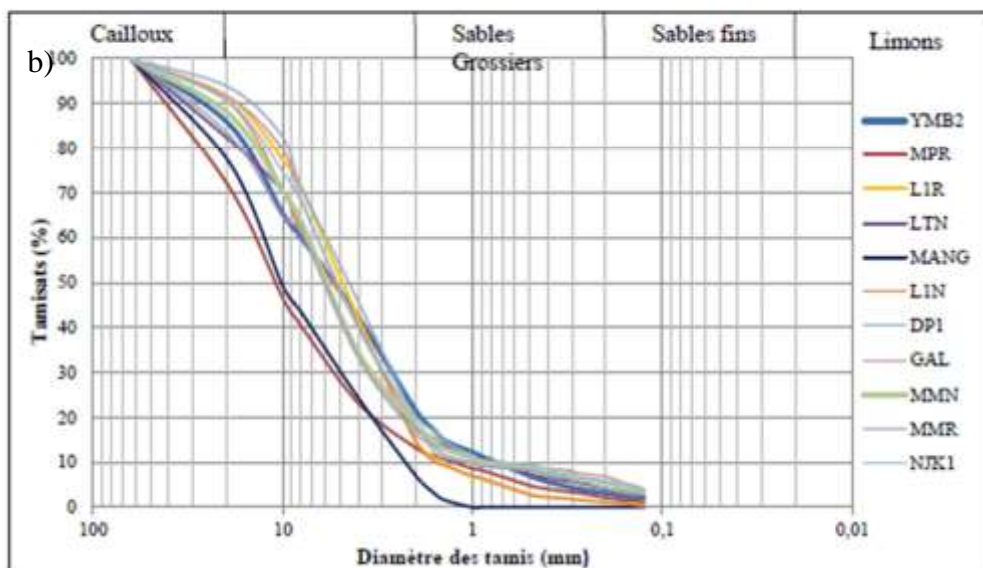
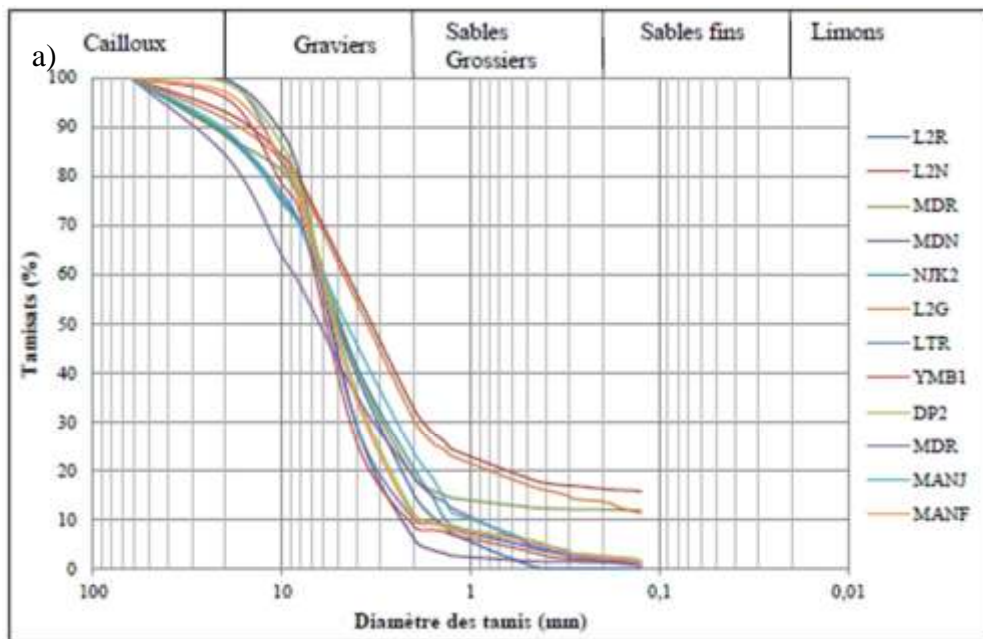


Figure 24: Courbes d'analyse granulométrique des scories volcaniques de la LVC

L'échantillon MPR, à l'inverse des autres, présente une cristallisation à 51°C et une fusion à 204°C. Un comportement similaire est observé pour MANJ (Fig. 25. g) dont la cristallisation (341°C) survient avant la fusion (699°C). La particularité des courbes MMN est sa tendance oblique du point de fusion (104°C) vers le point de cristallisation (974°C) pouvant indiquer une cristallisation rapide.

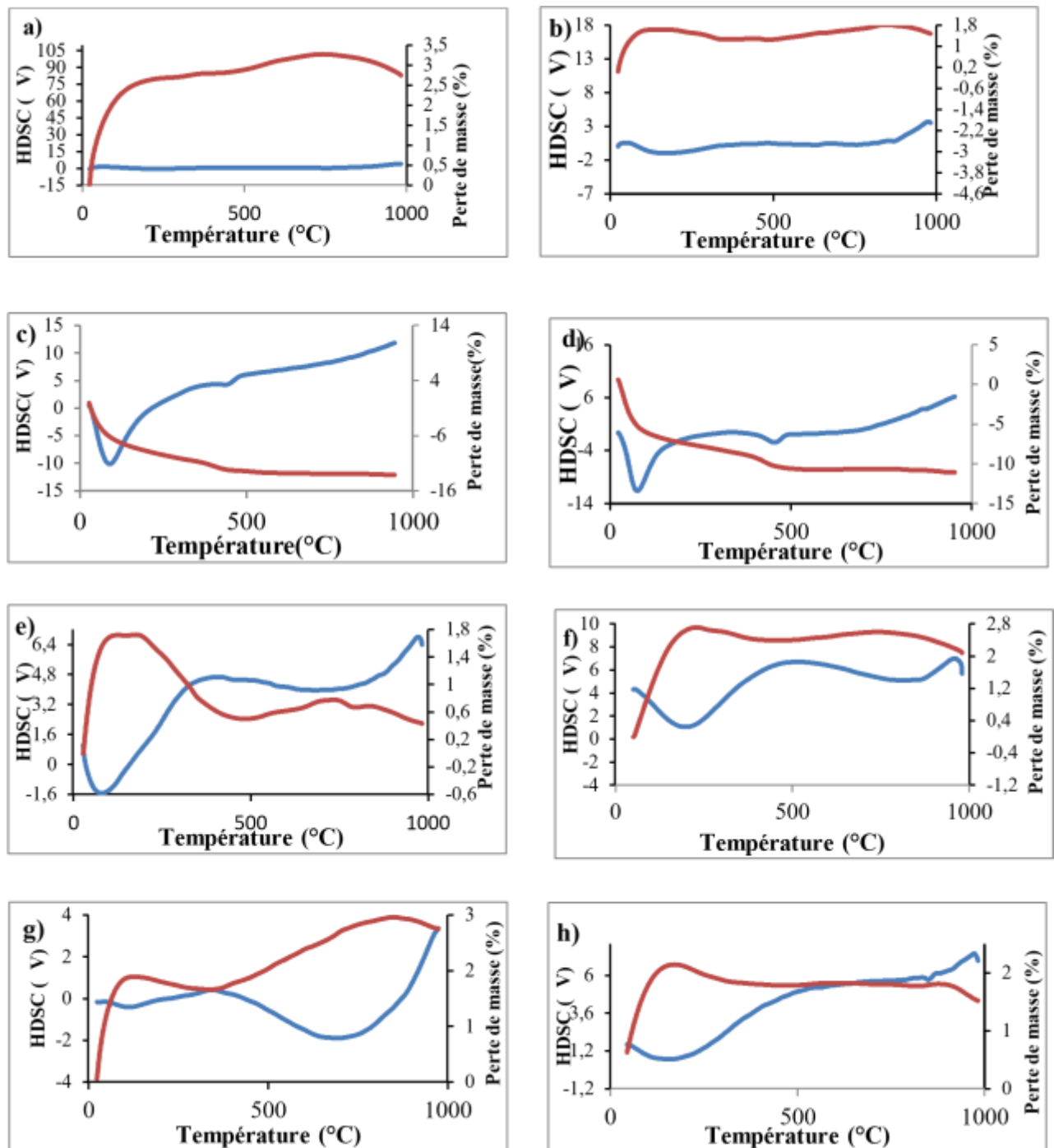


Figure 18: Courbes thermogravimétriques

V.2.2. Perméabilité des scories volcaniques

Les valeurs de la teneur d'humidité obtenues sont comprises entre 0,62 et 3,21% (Tab. 19). La grande majorité des échantillons présente une valeur inférieure à 3% (Fig. 26); qui est considérée comme la limite maximale pour des matériaux utilisés comme remplacement du ciment (Pourkhorshidi, 2010).

Le rapport massique Al_2O_3/SiO_2 permet d'établir un lien entre la perméabilité des scories étudiées et leur teneur en humidité. Ce rapport présente des valeurs comprises entre 0,27 et 0,46. Ces faibles valeurs indiquent une faible perméabilité des scories volcaniques. Ce qui est en accord avec les faibles valeurs d'humidité relative et de perte au feu.

Tableau 17: Valeurs d'humidité relative et de perte au feu des scories.

Ech.	MANR	MANJ	L1R	L2N	L2R	MDR	MMR	MMN	MPR	L2G	L1N	LTN	LTR	MDN
H.r.	3,20	3,21	2,04	1,15	1,08	0,71	1,47	1,25	0,62	0,88	1,00	1,68	1,37	0,95
LOI	0,75	0,76	0,49	0,28	0,26	0,17	0,35	0,30	0,15	0,21	0,24	0,40	0,33	0,23

Ech. : Échantillon ;

H.r. : Humidité relative ;

LOI : Loss on ignition.

V.3. Données d'analyses chimico-techniques

V.3.1. Évaluation quantitative de la phase amorphe

La phase amorphe représente la partie non cristallisée du matériau. Elle résulte du refroidissement rapide du magma. A l'inverse de la phase cristalline, la phase amorphe se compose d'atomes figés de façon désordonnée. Cette phase encore qualifiée de vitreuse présente un intérêt pour la valorisation de matériaux volcaniques dans l'industrie du ciment. Il a été démontré que le caractère pouzzolanique est corrélé à la teneur en phase non cristalline silicatée des matériaux. L'évaluation quantitative de la phase amorphe des scories de la LVC révèle des valeurs comprises entre 10 et 68 % (Tab.20). Les scories volcaniques à caractère pouzzolanique sont des matériaux composés principalement de silice et d'alumine. Ainsi, la teneur en phase amorphe est liée à la proportion en silice et oxyde de calcium (CaO). En effet, à partir d'une différence SiO_2-CaO supérieure à 34% il est possible d'obtenir une proportion en phase vitreuse appréciable (Vernet et Cadoret, 1991, Leonelli et al., 2007).

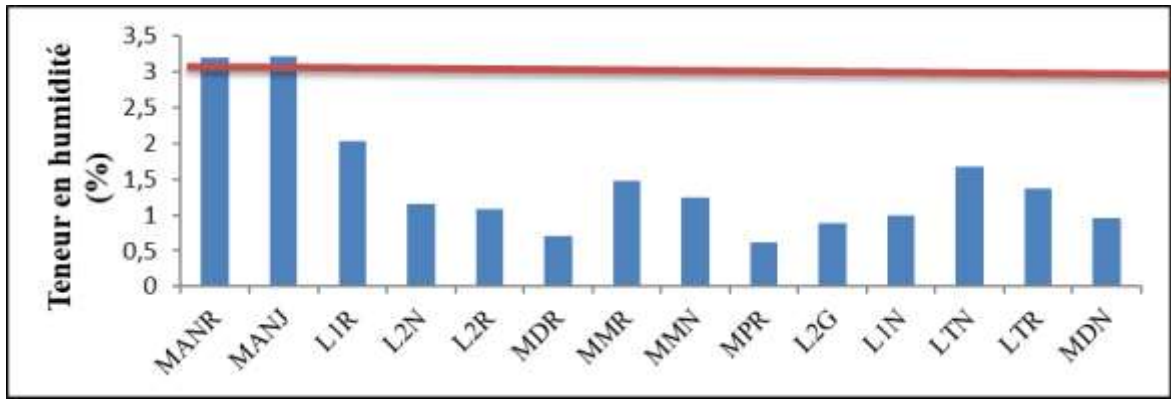


Figure 19: Diagramme d'évaluation de la teneur en humidité relative des scories de la LVC

Il ressort que les échantillons pour lesquels la différence $\text{SiO}_2\text{-CaO}$ est supérieure à 34 % ont une teneur en amorphe supérieure à 10%. Néanmoins, il apparaît à partir de la figure 27. a que la relation entre cette différence et la teneur en phase amorphe n'est pas toujours linéaire. Ce qui s'explique par une teneur en amorphe la plus élevée (67,9%) dans l'échantillon (DP1) dont la différence $\text{SiO}_2\text{-CaO}$ est la plus faible (30,24). Ce qui suscite de rechercher dans la composition chimique des scories l'élément ayant une influence sur la teneur de la phase amorphe.

A cet effet, il apparaît que, la relation entre la teneur en alumine et la phase amorphe est remarquable (Fig.27. b). Il en découle que la teneur en phase vitreuse est importante pour des teneurs croissantes en alumine, A l'inverse, la phase amorphe croit pour des valeurs $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ décroissantes (Fig. 27. c).

Tableau 20: Teneurs en phase amorphe dans les scories de la LVC.

Echantillons	L2N	L2R	L1N	L1R	DP2	LTN	YMB2	GAL	MANG	DP1
Proportions en Amorphe (%)	10,2	12,5	18,2	11,4	22	26,8	25,6	42,5	42,8	67,9
$\text{SiO}_2\text{-CaO}$	31,76	31,64	33,66	35,4	37,15	40,32	37,37	33,22	37,86	30,24

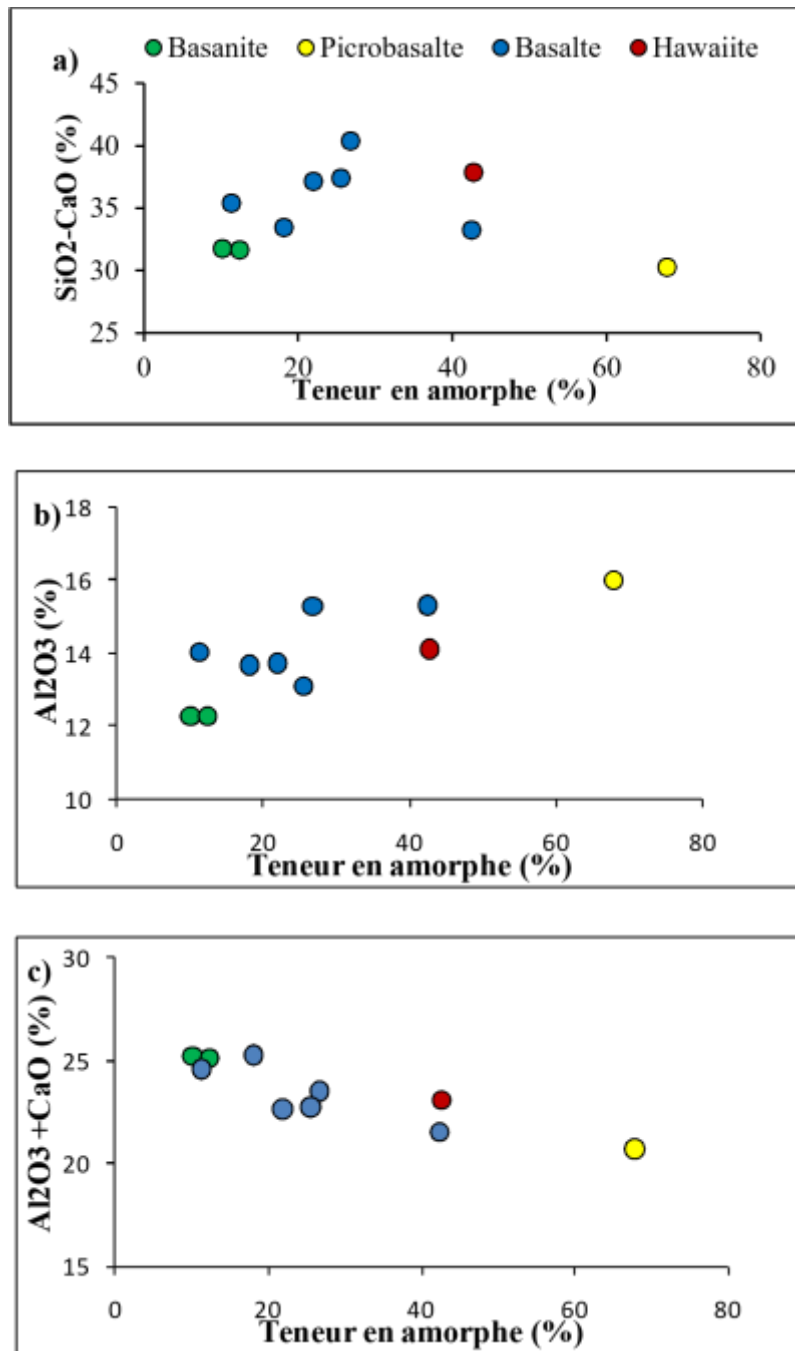


Figure 21: Diagramme d'évolution de la teneur en phase amorphe en fonction de, a) différence entre SiO₂ et CaO ; b) Al₂O₃ ; c) la somme Al₂O₃ + CaO.

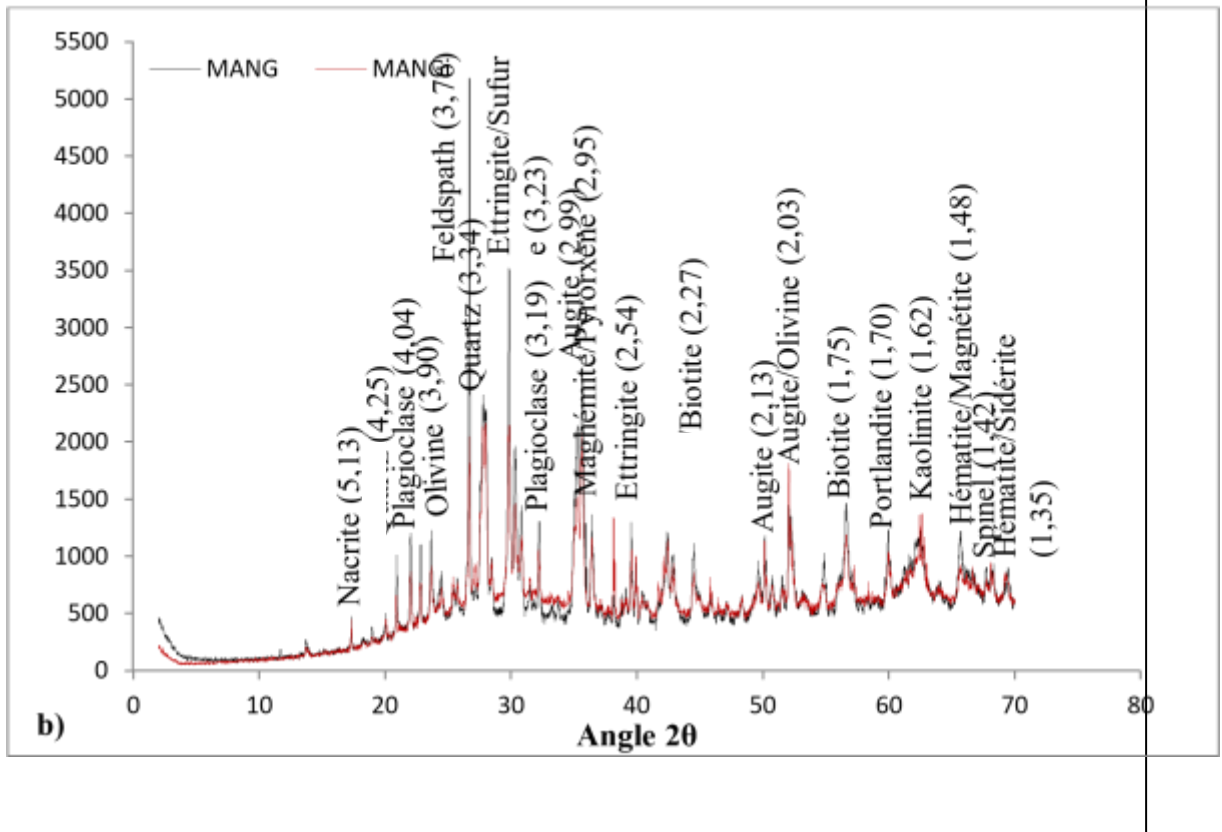
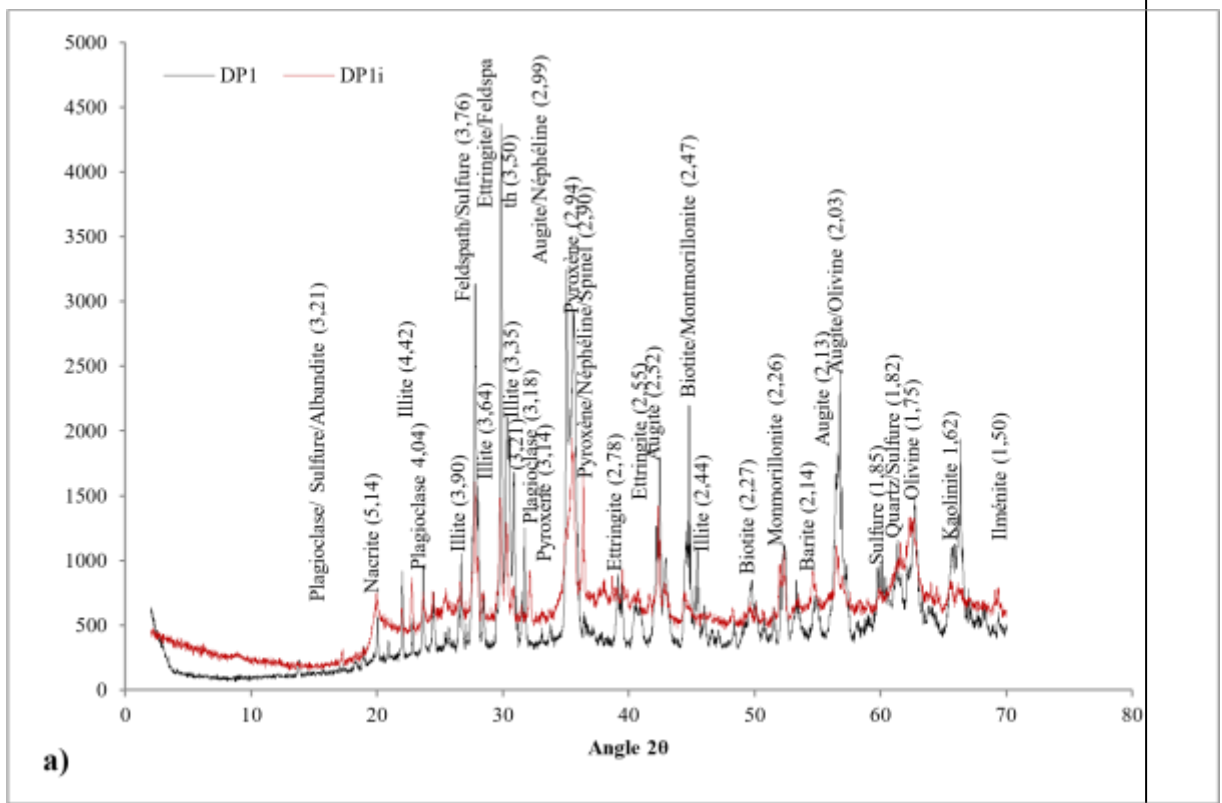
V.3.2. Évaluation qualitative de la phase amorphe des scories étudiées

L'évaluation qualitative de la phase amorphe est faite à partir des diffractogrammes réalisés sur les scories avant et après dissolution en milieu alcalin et acide (Fig. 28). La superposition des spectres montre une intensification des pics obtenus après détermination de la phase amorphe. Il apparait également pour certains matériaux un décalage à partir de la

base des spectres. Cette observation serait un indicateur des échantillons à phase amorphe considérable.

Ainsi, de la figure 28, il ressort que l'échantillon DP1 possède une teneur élevée en phase amorphe. A partir de la superposition des spectres obtenus avant et après détermination de la phase amorphe, il est également possible de détecter les espèces minérales constituant les deux phases. A cet effet, il est à noter que les minéraux identifiés sont subdivisés en deux groupes en fonction de leur comportement après dissolution. Certains minéraux voient leurs pics augmenter d'intensité après extraction de la phase amorphe. Il s'agit précisément de l'illite, des plagioclases, des feldspaths, l'augite, la biotite, la portlandite, le sulfure, l'olivine et de la kaolinite. Il existe un trio d'espèces minérales : feldspaths, biotite et kaolinite ; dont l'intensité des pics est triplée après dissolution. Ces minéraux sont les plus abondants dans la phase cristalline. Ceux dont les pics sont doublés sont l'illite et les plagioclases. Les autres minéraux présents dans la phase cristalline montrent des pics d'intensité peu croissante.

Par ailleurs, le second groupe de minéraux concerne ceux dont les pics diminuent en intensité après la phase de dissolution. Dans cette catégorie, se retrouvent la nacrite, les pyroxènes, l'ettringite, l'ilménite et l'hématite. Il ressort que ces minéraux sont principalement hydroxylés associés à quelques oxydes de fer. La diminution de l'intensité des pics après dissolution traduit que les éléments chimiques constituant ces minéraux sont plus abondants dans la phase amorphe. Ce qui confirme la corrélation entre le groupement OH et la phase amorphe. Par conséquent, les groupements bivalents O-H ont été décelés sur des échantillons dont la teneur en phase amorphe est élevée. La présence d'oxydes de fer dans ce groupe démontre que les éléments présents en teneur considérable dans la phase amorphe sont Si, Al et Fe. Ce qui indique clairement que les scories de ce secteur peuvent être utilisées dans l'industrie du ciment puisqu'elles remplissent les exigences chimiques (Pourkhorskidi et al., 2010) de la norme. Au regard de la composition chimique des différents minéraux appartenant à ce groupe, il apparaît des groupements trivalents Si-O-Si et Al-O-Si. Ainsi donc, tous les résultats du domaine chimique et les hypothèses émises concourent vers une phase amorphe marquée par des liaisons chimiques favorables aux propriétés pouzzolaniques.



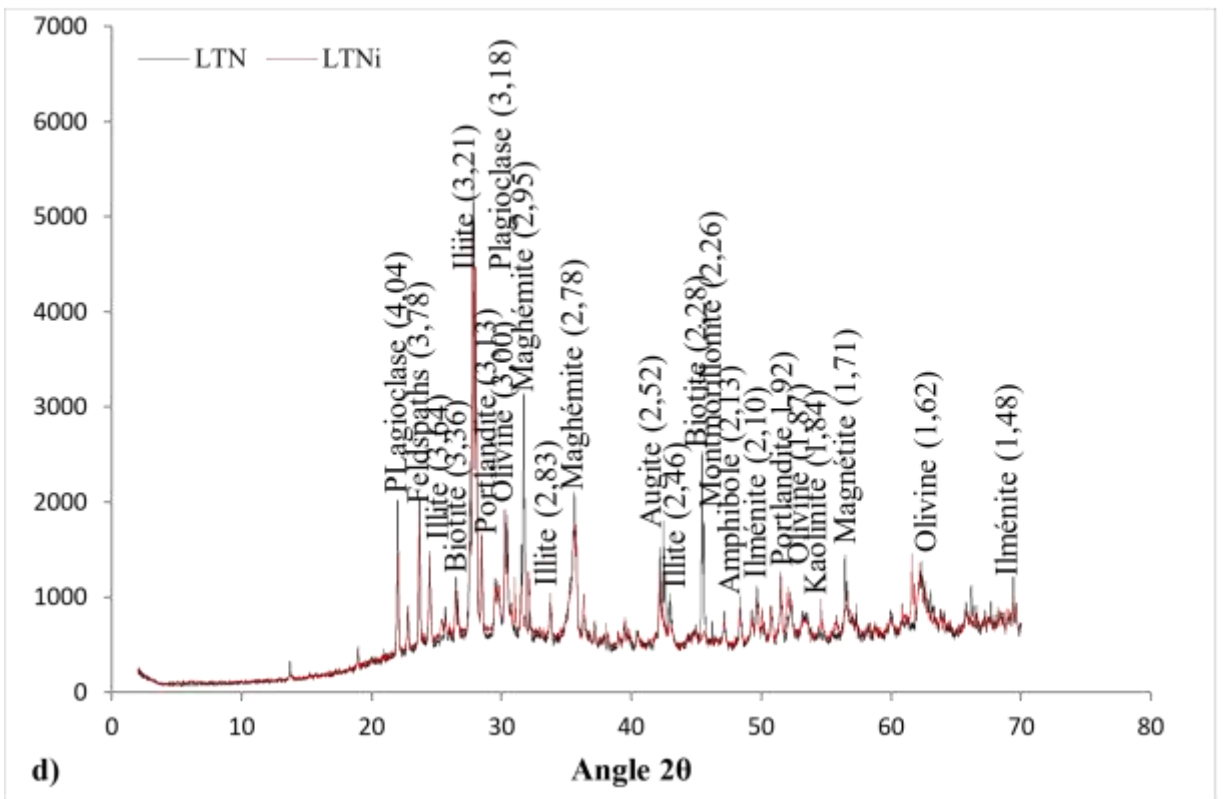
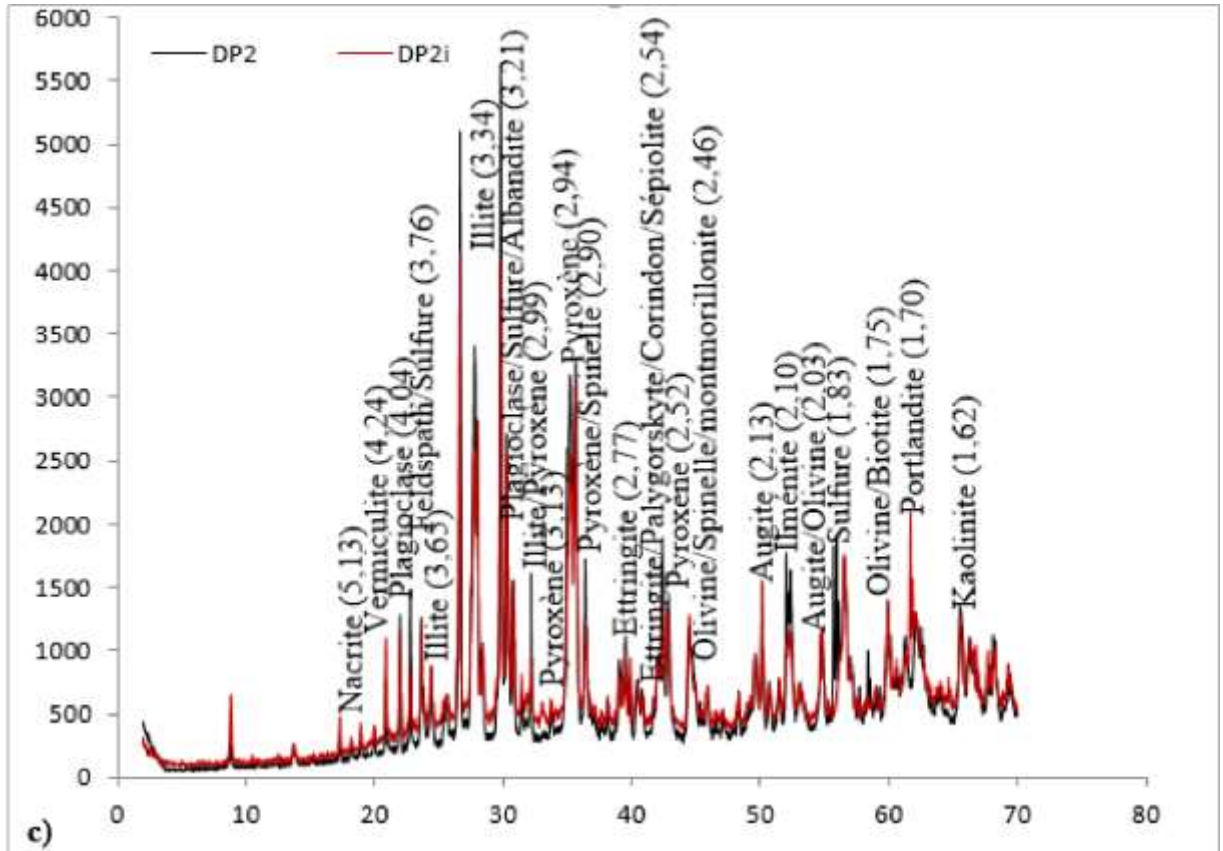


Figure 23: Diffractogrammes de comparaison de minéralogie

V.4. Réactivité des scories volcaniques de la LVC

V.4.1. Données de résistance à la compression uniaxiale

La résistance à la compression uniaxiale est une propriété essentielle pour évaluer la performance du béton. Elle peut être définie comme la capacité du béton à résister à l'action des intempéries, aux attaques chimiques et à l'abrasion. Cette résistance est en relation avec le rapport entre la quantité d'eau et de ciment, généralement comprise entre 0,45 et 0,65 pour les bétons traditionnels. Plus ce rapport est faible, plus la résistance est importante. Les valeurs de la résistance à la compression obtenues au bout d'une durée de 7, 14, 21, et 28 jours (Tab. 21) renseignent sur le comportement des scories volcaniques. Pour l'ensemble des échantillons, la résistance à la compression illustre une courbe croissante avec le temps (Fig. 29). Les valeurs finales sont comprises entre 27 et 41 MPa (Fig. 30), cet intervalle correspond à la fourchette de résistance des bétons courants (20 – 50 MPa). L'échantillon MMN est celui qui se rapproche plus du mortier avec une résistance supérieure à 40MPa.

Tableau 21: Valeurs de résistance à la compression.

	Jour 7	Jour 14	Jour 21	Jour 28
Mortier	28,88	30,69	36,11	45,13
MANR	18,05	24,37	27,08	28,88
MANJ	20,76	24,37	30,15	34,30
MANG	20,76	23,47	27,08	32,49
LTR	17,15	23,47	27,08	27,26
LTN	21,66	23,47	27,08	30,69
DP1	18,96	25,27	30,69	35,05
DP2	18,06	23,47	27,98	32,49
YMB2	18,05	19,86	24,38	30,69
MMN	19,86	27,08	35,2	40,62

Il ressort des résultats de ce paramètre que les scories de couleur noire sont celles dont la résistance à la compression est élevée. Ainsi, pour un ensemble d'échantillons appartenant à un même site de prélèvement, la résistance à la compression est plus élevée sur ceux de couleur noire et faible sur ceux de couleur rouge, les teintes grises, jaunes et brunes présentant des valeurs intermédiaires.

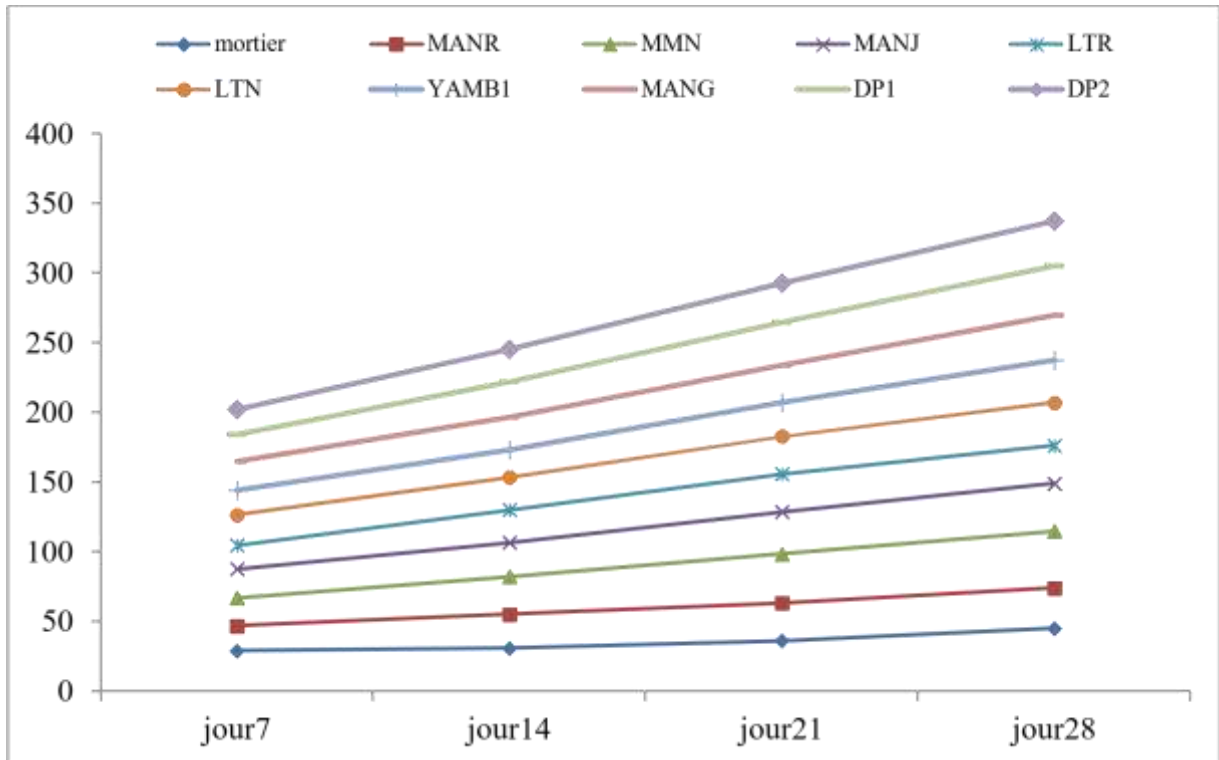


Figure 24: Courbes d'évolution de la résistance avec le temps.

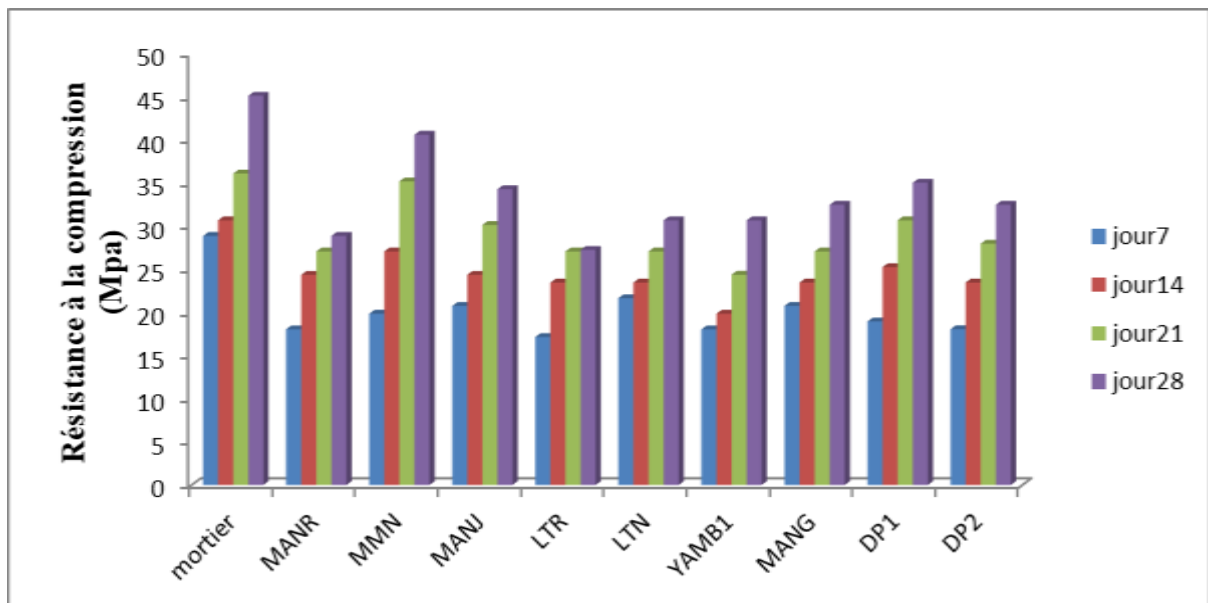


Figure 30: Diagramme d'évolution de la résistance à la compression avec le temps.

V.4.2. Indice d'activité pouzzolanique

L'indice d'activité pouzzolanique est un critère essentiel qui permet de déterminer si un matériau possède une capacité pouzzolanique. D'après la norme ASTM C618, un matériau est considéré comme pouzzolanique lorsque son indice d'activité est compris entre 67 et 100%. L'activité pouzzolanique a été appréciée au bout de 7 et 28 jours. Il ressort pour la majorité des échantillons que la pouzzolanité s'améliore avec le temps. A une durée de temps de 28 jours, les résultats obtenus varient entre 63 et 90% (Tab. 22). L'appréciation de ces résultats indique qu'il existe au Cameroun des scories dont l'activité pouzzolanique est suffisante (67 à 75%), bonne (75 à 90%) à très bonne (90 à 100%).

Tableau 22: Valeurs de l'indice d'activité pouzzolanique des scories.

	Jour 7	Jour 28	Activité pouzzolanique
MANR	62,5	63,99	insuffisante
MMN	68,77	90,00	Très bonne
MANJ	71,88	76,00	bonne
LTR	59,38	60,40	insuffisante
LTN	75,00	68,00	suffisante
YMB2	62,5	68	suffisante
MANG	71,8	71,99	suffisante
DP1	65,65	77,66	bonne
DP2	62,53	71,99	suffisante

Conclusion

La valorisation industrielle des scories naturelles a montré que ces dernières sont composées principalement des graviers et accessoirement d'une fraction fine. Le comportement de ces matériaux après chauffage marqué soit par une absence d'un effet thermique, soit par l'atteinte d'un point de cristallisation constitue des preuves de la coexistence des phases amorphe et cristalline. Les faibles valeurs de perméabilité et de d'humidité relative obtenues renseignent sur les capacités d'absorption des scories volcaniques. La proportion en phase amorphe élevée est observée sur des scories avec des teneurs en alumine élevée couplées à celles en oxydes de calcium faibles. La caractérisation industrielle a montré des valeurs de résistance à la compression appartenant à l'intervalle des résistances obtenu sur les bétons courants. Ces valeurs de résistance à la compression sont

plus élevées sur les scories de couleur noire que celles de couleur rouge. L'indice de pouzzolanité qui en découle au bout de 28 jours évolue des appréciations insuffisantes à très bonne, l'appréciation très bonne étant réservée à la couleur noire. Il s'en dégage comme pour la résistance à la compression que sur un même site, l'indice de pouzzolanité est élevé sur des matériaux de couleur noire. Ce qui permet de conclure que les scories de couleur noire possèdent des propriétés naturelles qui les rendent plus pouzzolaniques que les scories rouges.

CHAPITRE VI: INTERPRÉTATION - DISCUSSION

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'interprétation et la discussion des différents résultats. A cet effet, il sera structuré en deux parties dont la première réservée à la discussion des résultats relatifs aux processus géologiques de formation des scories volcaniques, et la seconde partie portera sur les propriétés industrielles de ces matériaux.

VI.1. Processus de formation des scories volcaniques

Les processus pétrologiques responsables de la formation des roches magmatiques sont la fusion partielle, la différenciation magmatique, et la contamination. La différenciation magmatique se produit à la suite de processus successifs de cristallisation fractionnée. La fusion partielle correspond à la fusion d'une partie des minéraux et est à l'origine des magmas primitifs. La contamination se fait soit par assimilation des roches encaissantes soit par mélange de magma.

VI.1.1. Évaluation du processus de cristallisation fractionnée

L'évaluation de la cristallisation fractionnée est basée sur le comportement des éléments chimiques. Les valeurs du numéro magnésien Mg# ($(\text{MgO}/(\text{MgO} + \text{FeO})) * 100$) varient entre 29,67 et 47,75. Ces valeurs sont significativement plus faibles en comparaison avec celles des magmas primaires [par exemple Mg# = 68 - 72 (Frey et al., 1978) ou 75 - 78 (Tamura et al., 2014) pour le basalte d'origine péridotitique]. Ces valeurs inférieures à 60 indiquent que les scories ont connu des modifications dans leur composition chimique depuis leur formation (Kelemen et al., 2007). Ce qui implique des effets de cristallisation fractionnée (Zhang et al., 2018).

L'utilisation de certains éléments résiduels incompatibles (Lanthane, ytterbium, cérium, zirconium, thorium et niobium) à travers des rapports géochimiques (La/Yb; Ce/Zr; Th/Nb) permettent également d'évaluer le processus de cristallisation fractionnée. Les valeurs de ces rapports connus du manteau primitif (La/Yb (14,8) ; Ce/Zr (0,16) ; et Th/Nb (0,12)) diffèrent de celles des scories volcaniques (La/Yb (12,28 - 31); Ce/Zr (0,16 - 0,60); et Th/Nb (0,06 - 0,16)) (Tab. 23 et 24). Le déroulement normal de la cristallisation fractionnée n'étant pas supposé avoir un impact sur ces rapports géochimiques, cette différence évoque donc l'intervention d'autres processus au cours de la formation des scories volcaniques.

Les diagrammes binaires Al_2O_3 et Na_2O en fonction de MgO (Fig. 20) traduisent le fractionnement de l'olivine et du clinopyroxène de même que la corrélation positive obtenue avec Ni, Cr et Co (Fig. 21).

Le fractionnement de l'olivine provoque un très faible enrichissement en terres rares lourdes. De même, la présence de spinelle dans les espèces minérales est un indicateur d'un important enrichissement en terres rares légères. La corrélation négative obtenue entre Fe_2O_3 , TiO_2 et MgO indique une étape de cristallisation des oxydes ferro-titanés au cours de l'évolution du magma. Ce qui est en accord avec la diminution des concentrations en P_2O_5 et Al_2O_3 impliquant ainsi la cristallisation du feldspath alcalin, des plagioclases, ainsi que de l'apatite (Zhang et al., 2018). La cristallisation fractionnée du plagioclase et de l'apatite est initiée par celle de la magnétite (Jemer et al., 2010) et se confirme avec des anomalies négatives en Eu et le rapport $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ compris entre 0,3 et 1,1.

Tableau 18 : Rapports élémentaires dans les basaltes, hawaïites et picrobasaltes.

Ech,	Basaltes										Hawa	Picro
	Manf	L2g	L1n	Ltn	Ltr	Ym1	Ym2	Dp-2	Mdn	Gal	Mang	Dp1
(La/Yb)N	20,6	17,66	19,37	8,34	9,56	18,66	18,6	20,05	14,84	21,94	17,59	19,3
La/Nd	1,07	0,98	1,05	1,13	1,19	1,17	1,12	1,23	1,06	1,27	1,13	1,14
La/Nb	0,69	0,79	0,76	1,36	1,40	0,80	0,75	0,83	0,72	0,72	0,72	0,71
La/Sm	6,21	5,43	5,77	5,98	6,47	6,31	5,92	6,92	5,36	7,25	5,91	6,00
Rb/Sr	0,06	0,06	0,04	0,03	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,05
Rb/Y	1,31	1,92	1,13	0,66	0,71	1,27	1,50	1,41	1,20	1,06	1,40	0,35
Rb/Nb	0,54	0,73	0,41	0,46	0,46	0,48	0,56	0,51	0,53	0,30	0,52	0,12
Th/Ta	2,88	1,28	1,36	1,01	1,02	1,53	1,52	2,18	1,25	1,58	1,32	1,23
Th/Nb	0,16	0,08	0,08	0,06	0,06	0,09	0,09	0,12	0,08	0,09	0,08	0,07
Th/La	0,10	0,11	0,04	0,04	0,11	0,12	0,15	0,10	0,13	0,10	0,11	0,10
Ce/Zr	0,47	0,41	0,38	0,53	0,55	0,43	0,42	0,50	0,34	0,51	0,40	0,40
Y/Nb	0,41	0,38	0,37	0,69	0,64	0,38	0,37	0,36	0,44	0,28	0,37	0,34
Sr/Ba	1,12	2,24	2,07	1,90	1,73	1,27	1,33	1,17	1,63	0,76	1,38	0,46
Tb/Yb	0,54	0,51	0,57	0,56	0,50	0,51	0,55	0,48	0,51	0,50	0,52	0,54
Zr/Nb	3,73	3,96	3,98	4,85	4,73	3,52	3,39	3,16	4,17	2,64	3,44	3,33
Ba/Nb	8,72	5,06	5,39	7,26	7,67	7,73	8,69	8,18	6,90	8,01	7,34	8,60
Nb/Y	2,42	2,64	2,72	1,44	1,56	2,63	2,67	2,77	2,27	3,55	2,70	2,96

Tableau 19: Rapports élémentaires dans les basanites

	Basanites										
Ech,	Manr	Manj	L1r	L2n	L2r	Njk1	Njk2	Mdr	Mmr	Mmn	Mpr
(La/Yb)_N	17,04	16,79	19,55	17,73	17,4	19,74	19,96	14,77	12,75	12,71	20,9
La/Nd	1,07	1,07	0,80	0,98	0,85	0,98	1,07	1,12	1,05	0,99	0,98
La/Nb	0,69	0,69	0,32	0,77	0,46	0,58	0,75	1,31	0,65	0,66	0,41
La/Sm	5,74	5,73	3,48	5,47	3,79	5,38	5,86	6,14	5,27	4,81	4,72
Rb/Sr	0,01	0,04	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,07	0,05
Rb/Y	0,35	0,93	1,00	1,15	1,45	1,59	1,66	1,55	1,05	1,62	1,69
Rb/Nb	0,13	0,35	0,37	0,44	0,55	0,51	0,54	0,68	0,48	0,75	0,56
Th/Ta	1,20	1,22	1,52	1,28	1,26	1,15	1,19	1,20	1,14	1,13	1,17
Th/Nb	0,07	0,07	0,10	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Th/La	0,11	0,11	0,30	0,11	0,17	0,12	0,09	0,06	0,11	0,11	0,17
Ce/Zr	0,34	0,34	0,16	0,41	0,25	0,40	0,45	0,60	0,32	0,32	0,20
Y/Nb	0,37	0,38	0,36	0,38	0,38	0,32	0,32	0,44	0,46	0,46	0,33
Sr/Ba	1,51	1,35	1,96	2,21	2,23	1,37	1,33	1,63	1,73	1,72	1,69
Tb/Yb	0,52	0,52	0,57	0,52	0,46	0,58	0,50	0,40	0,58	0,51	0,60
Zr/Nb	3,99	4,00	4,28	3,95	3,94	2,96	3,28	4,21	4,06	4,04	4,22
Ba/Nb	5,94	6,52	5,59	5,26	5,18	7,44	8,00	7,03	6,63	6,71	6,20
Nb/Y	2,68	2,66	2,74	2,61	2,63	3,11	3,08	2,28	2,17	2,16	3,04

D'après Dedzo et al. (2020), le fractionnement des minéraux tels que l'olivine, le clinopyroxène et l'apatite marque le premier stade de la différenciation magmatique. Le stade final est marqué par la cristallisation du feldspath alcalin dont la variation du rapport Ba/La (5,36 - 17,44) et le rapport Y/Nb (0,32 - 0,69) presque constant en constituent des preuves (Eby, 1990; Chazot et Bertrand, 1995; Kamgang et al., 2010; Dedzo et al., 2019).

Les valeurs importantes de CaO/Al₂O₃ (0,29 - 1,05) obtenues, les teneurs en Sc, Ca et Mg élevées indiquent une accumulation en Ca-Mg clinopyroxène (Grimmer et Greiling, 2012). Les diagrammes binaires Na₂O vs. MgO, Fe₂O₃ vs. MgO illustrent une tendance régulière compatible avec la cristallisation fractionnée du plagioclase et du pyroxène.

De plus, l'anomalie négative en Eu et la corrélation négative Eu/Eu* et SiO₂ reflètent un rôle important du fractionnement du plagioclase pendant la différenciation. Les éléments

hautement incompatibles (Ba, La) et ceux moyennement incompatibles (Sr, Eu) croissent avec l'augmentation des concentrations en Th (Fig. 31). La corrélation positive ainsi illustrée est cohérente avec un processus de cristallisation fractionnée du clinopyroxène et de l'olivine (Tchop et al., 2020). La formation des scories de la Ligne Volcanique du Cameroun est élucidée à partir des rapports des terres rares légères et terres rares lourdes (La/Sm et Tb/Yb). Ces derniers permettent d'émettre des hypothèses plausibles sur les processus concourant à la genèse de ces matériaux. A cet effet, le diagramme La/Sm vs. La (Fig. 32. a) illustre une corrélation positive dans le sens de la fusion partielle. Le diagramme Tb/Yb vs Yb (Fig. 32. b) est marqué par une pente négative bien que les points suivent plus ou moins le sens des processus de cristallisation et de fusion partielle. De cette figure, il ressort que la fusion partielle joue un rôle prépondérant sur la cristallisation fractionnée.

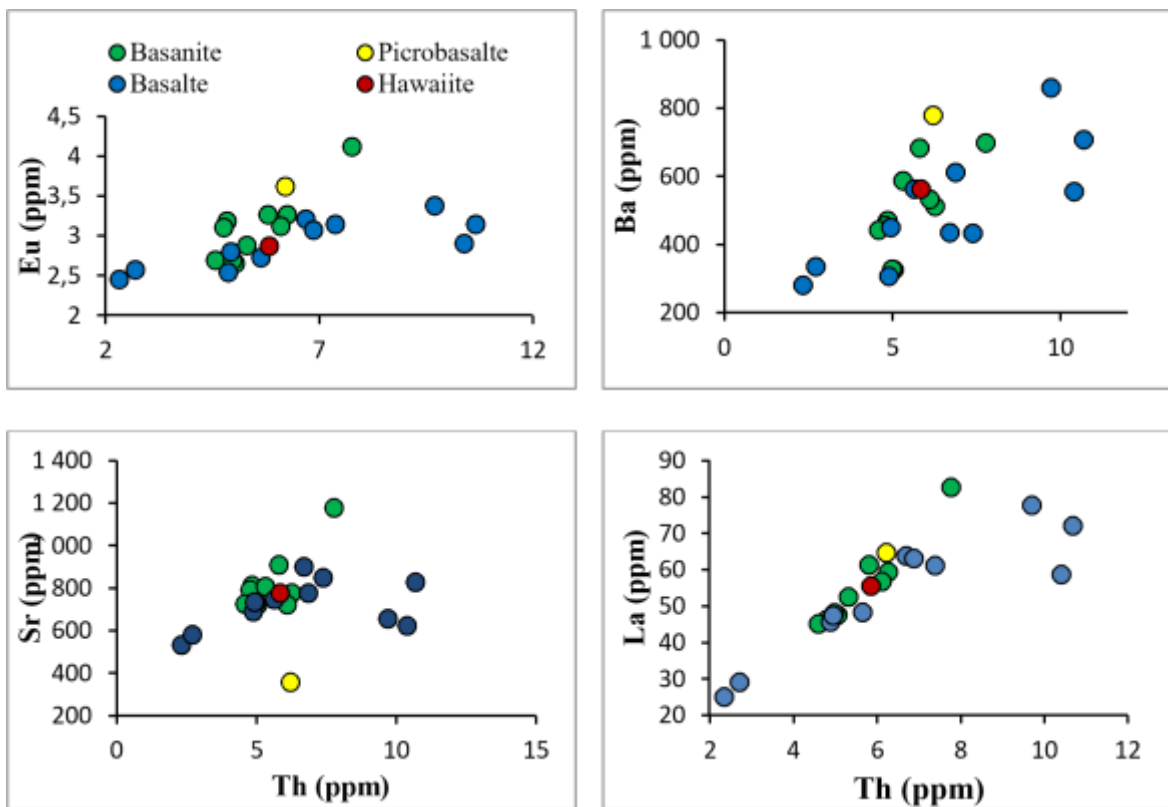


Figure 25: Diagramme de corrélation : a) Ba vs. Th, b) Eu vs. Th ; c) Sr vs. Th ; d) La vs. Th.

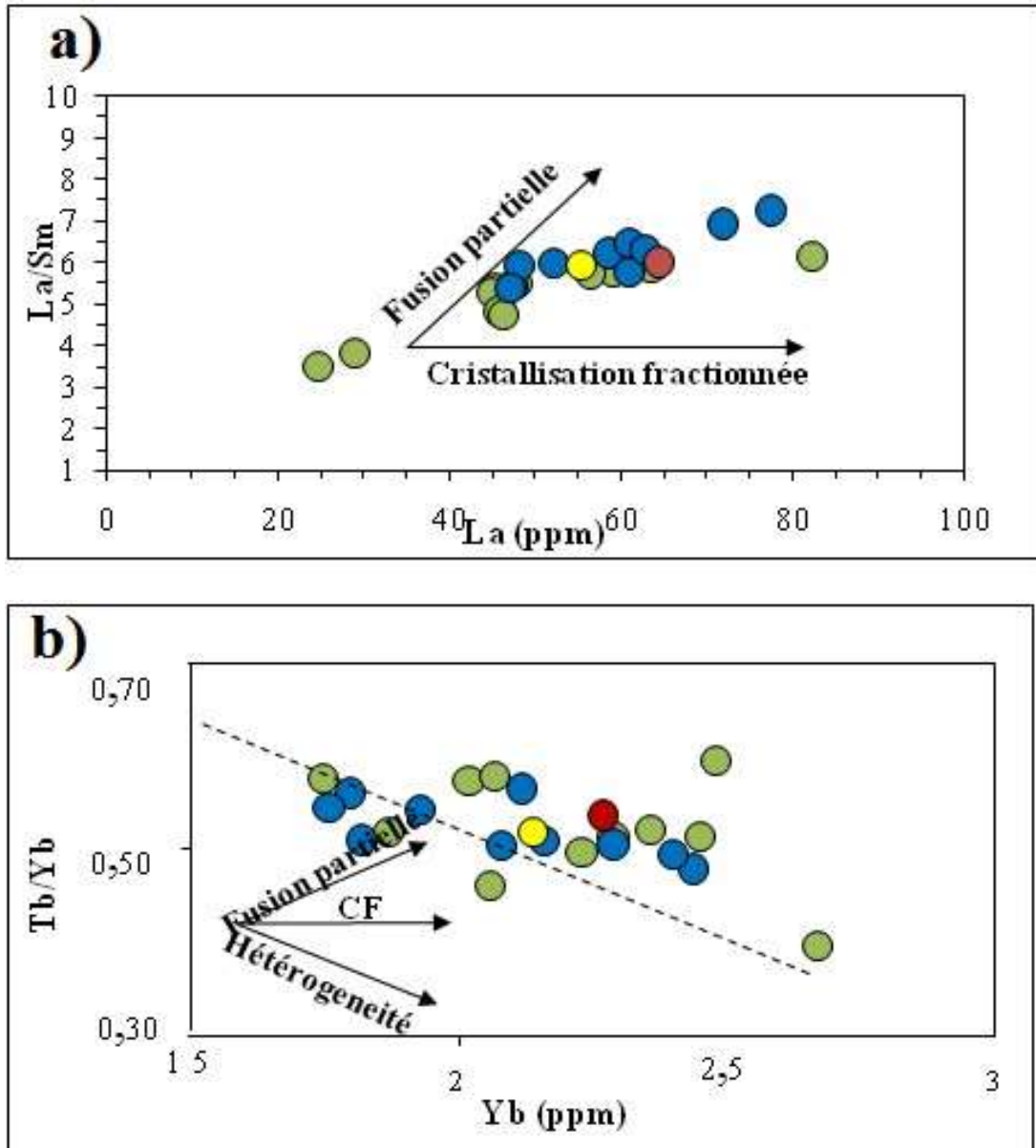


Figure 27: Diagrammes binaires : a) La/Sm vs. La (Blein et al., 2001) ; et b) Tb/Yb vs. Yb illustrant les processus de cristallisation fractionnée et fusion partielle.

VI.1.2. Nature de la source mantellique et fusion partielle

La source du magma à l'origine des scories volcaniques de la Ligne du Cameroun peut être déterminée à partir de la composition chimique. L'usage des teneurs en certains éléments chimiques et des rapports associés permet d'apprécier l'effet et évaluer l'intensité des processus à l'origine de la formation des scories volcaniques. Les concentrations en éléments de transition appartenant aux intervalles définis par Villemant et Treuil (1983) indiquent que les scories volcaniques proviendraient de la fusion partielle du manteau péridotitique (Fig. 33). Les valeurs élevées du rapport LREE/HREE suggèrent que le liquide

transmis par le manteau était enrichi en terres rares légères. Les rapports $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (0,50 - 1,05), La/Yb (0,83 - 21,93), Zr/Y (6,98 - 12,83) élevés, ainsi que les teneurs presque constantes de Y et Yb sont des indicateurs d'un magma issu des péridotites à grenat dominant (Frey et al., 1978 ; Jung et al., 1998). L'utilisation des valeurs du rapport $(\text{La}/\text{Yb})_N$ permet de classer les matériaux en deux groupes : pour $\text{La}/\text{Yb} \leq 5$ le magma source est à spinelle dominante et à grenat dominant lorsque $\text{La}/\text{Yb} \geq 5$ (Farmer, 2003). Les travaux de Wang et al., (2002) et Farmer (2003) permettent de circonscrire le domaine des péridotites à grenat à partir de $(\text{Tb}/\text{Yb})_N > 1,9$.

Le diagramme binaire $(\text{Tb}/\text{Yb})_N$ vs. (La/Yb) illustre la dominance de lherzolite à grenat (Fig. 33. a). La présence du grenat peut être attestée de façon implicite à partir de certains marqueurs de fusion partielle. L'utilisation des éléments majeurs permettant d'évaluer le processus de fusion partielle, certains rapports tels que $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ sont fortement affectés par les conditions de fusion. Ainsi, les valeurs de ce rapport égale à 1 constituent un indicateur de la présence non significative du grenat dans la source (Verma et al., 2017). Les valeurs du rapport $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1$ obtenues pour la plupart des scories volcaniques étudiées, confirment la nature grenatifère de la source des scories. Le grenat renseigne également sur les conditions qui ont régné dans l'environnement de formation desdits matériaux. A cet effet, à partir de la présence du grenat dans le magma source, plusieurs informations se dégagent : il en ressort que la fusion partielle s'est produite sous des conditions de pression supérieures à 3 GPa (Robinson et Wood, 1998). Une telle pression correspond à une profondeur autour de 90km (Fig. 33. b). Ces conditions sont favorables à la formation des magmas alcalins enrichis en terres rares légères. L'abondance relative des terres rares légères, les concentrations élevées en TiO_2 et P_2O_5 ainsi que les valeurs élevées des rapports (La/Sm) et (Sm/Yb) similaires à ceux de Bioko (Yamgouot et al., 2016) indiquent un faible degré de fusion partielle.

Les rapports (Y/Nb) et (Yb/Ta) ne sont pas significativement affectés par les processus de différenciation et peuvent par conséquent être utilisés comme indicateurs des sources du magma (Cadoux et al., 2005 ; Eby, 1990). Les valeurs des rapports (Y/Nb) et (Yb/Ta) sont toutes inférieures à 1,2 ce qui suggère que ces matériaux proviennent de sources chimiquement proches de celles du basalte des îles océaniques.

VI.1.3. Contamination par la croûte

La contamination par la croûte démontre son influence sur le chimisme du magma pendant sa montée vers la surface. Ce processus peut être apprécié à partir des concentrations

en éléments chimiques ou à travers l'utilisation de certains rapports. Le caractère mafique de ces matériaux, les concentrations en MgO élevées et les teneurs en Cr, Ni, et Co proches du magma primitif témoignent d'une ascension rapide du magma vers la surface (Brenna et al., 2010). Cette hypothèse est confortée par une corrélation positive entre les éléments de transition (Co, Ni, Cr) et MgO ainsi qu'une corrélation négative entre Al_2O_3 et Na_2O et MgO.

Les teneurs en silice des scories volcaniques étudiées de l'ordre de 44% se rapprochant de celles du manteau primitif (44,7%) suggèrent qu'elles n'ont pas assimilé de quantités significatives de matériaux riches en silice au cours de leur ascension. De la comparaison de ces matériaux avec la croûte continentale, il en ressort un appauvrissement en Rb (84 ppm pour la croûte et 34,45 pour les scories) et un enrichissement en Nb (12 ppm pour la croûte et 74,13 pour les scories) et Ta (0,9 ppm pour la croûte et 4,41 ppm pour les scories). Les valeurs de Th (2,33-10,68 ppm) sont pour la plupart inférieures à celles obtenues au niveau de la croûte continentale (Th = 10,5 ppm, Rudnick et Gao, 2003). Les faibles teneurs en Th et Rb, ainsi que les anomalies positives en Nb et Ta constituent des preuves d'un effet non significatif de la contamination par la croûte.

Le processus est également mis en évidence par des éléments incompatibles tels que Ce et Pb. Les rapports (Ce/Pb) et (Nb/U) sont relativement supérieurs à ceux obtenus sur les basaltes des rides médio-océaniques (MORB) et les basaltes d'île océanique (OIB) (25 ± 5 et 47 ± 10 respectivement ; Hofmann et al., 1986). Ces valeurs sont largement au-dessus de la croûte continentale ($\approx 3,9$ et $\approx 6,2$; Rudnick et Gao, 2003). Ce qui indiquerait une faible influence du processus de contamination du magma par la croûte. Par ailleurs, les valeurs obtenues du rapport (Ce/Pb) normalisée par rapport au manteau primitif pour la plupart supérieure à 1 sont en faveur de la cristallisation fractionnée des basaltes (Marsh et al., 2000).

La contamination par la croûte peut également être évaluée à partir des rapports (La/Nb) et (La/Ta); (Nb/Yb) et (Th/Yb). Les magmas sujets à une assimilation crustale en traversant l'épaisse couche de la croûte ont des rapports (La/Nb) $> 1,5$ (Hart et al., 1989) ainsi que des valeurs (La/Ta) supérieures à 30 (Thompson et al., 1984). Les rapports (La/Nb) et (La/Ta) obtenus sur les scories volcaniques éloignent davantage l'effet de la croûte continentale des processus de genèse. Par ailleurs, les magmas ascendants contaminés par la croûte devraient aussi avoir une composition en Nb/Yb et Th/Yb qui s'écarte de celle des basaltes de la dorsale médio-océanique (MORB) ou OIBs (Pearce et al., 1995 ; Pearce, 2008, Mbowou et al., 2020).

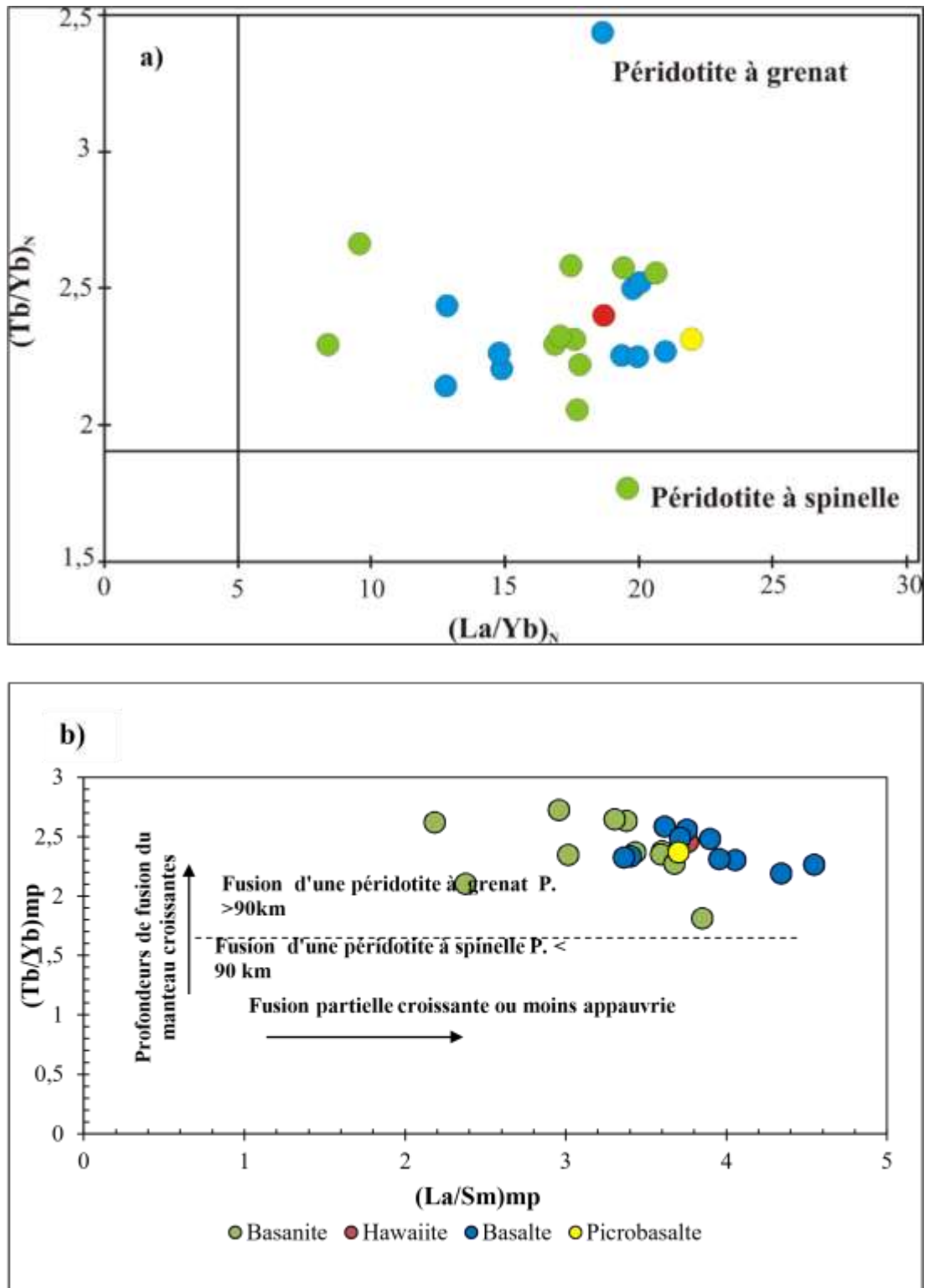


Figure 29 : Diagrammes $(Tb/Yb)_N$ vs. $(La/Yb)_N$ et $(Tb/Yb)_{MP}$ vs. $(La/Sm)_{MP}$ montrant le manteau source des scories volcaniques de la LVC.

L'utilisation des diagrammes $Th/Yb - Nb/Yb$ et $Nb/U - Nb$ (Fig. 34) illustre l'appartenance de ces matériaux au domaine des OIBs. Ce qui est confirmé par certains rapports en éléments incompatibles tels que Zr/Nb (2,64 - 4,84) et Ba/Nb (5,18 - 8,7) dont les

valeurs correspondent à celles des OIBs (Weaver 1991 ; Sun et McDonough, 1989). En définitive, il ressort de l'exploitation des données géochimiques que, la contamination par la croûte est un processus négligeable dans la formation du magma à l'origine des scories volcaniques de la partie Sud continentale de la Ligne du Cameroun. L'effet peu considérable de la contamination par la croûte est d'autant plus relevé que la relation entre les rapports Rb/Y et Nb/Y illustre une tendance préférentielle vers le processus de cristallisation fractionnée (Fig. 35).

VI.1.4. Effet de l'altération météorique

Le processus d'altération des scories volcaniques est mis en évidence à partir de la composition chimique, de certains critères minéralogiques et des valeurs des indices d'altération.

Les scories volcaniques, bien qu'étant des matériaux issus des processus magmatiques sont exposés à l'action de l'altération météorique. Les empreintes visibles laissées par l'altération sur ces matériaux sont perceptibles à diverses échelles. Sur le plan pétrographique, la présence des olivines iddingsitisées en constitue une preuve de l'impact de l'altération. Cette iddingsitisation est favorable aux teneurs en oxydes de fer élevées obtenues dans la composition chimique des scories de cette portion de la Ligne Volcanique du Cameroun. Par ailleurs, les couronnes affectant les bordures des pyroxènes impliquent également des phénomènes d'altération. Sur le plan minéralogique, la présence des minéraux argileux tels que la kaolinite, l'illite et la montmorillonite relève de l'altération des minéraux primaires (feldspaths, olivine, pyroxène). La présence de la kaolinite indique que les scories volcaniques auraient subi une hydrolyse partielle avec évacuation totale des bases encore désignée par monosiallisation. Les conditions climatiques régnant dans le secteur d'étude sont favorables à un tel processus d'altération chimique. La présence de l'illite serait liée à une transformation par dégradation ou à une hydrolyse partielle encore appelée bisiallisation. C'est également le même processus qui conduit à la formation de la montmorillonite. Les différentes couleurs des scories volcaniques sont liées à l'oxydation des minéraux ferromagnésiens. La présence de ces minéraux argileux est d'autant plus avérée que des liaisons O-H sont identifiées dans les groupes d'atomes des scories volcaniques. Tout ceci démontre que les scories volcaniques sont exposées à l'action de l'altération. Ainsi, il est primordial d'évaluer l'intensité de ce processus et d'en dégager les effets sur leurs caractéristiques naturelles.

Les valeurs de perte au feu constituent un indicateur de l'intensité de l'altération sur les matériaux. D'après Babechuk et al. (2014), les valeurs de perte au feu sur des basaltes sont généralement inférieures à 3%. Ainsi, les scories volcaniques seront classées en trois groupes (Fig. 36) : peu altérées (PF < 3%), moyennement altérées (PF < 10%) et très altérées (PF > 10%). Les valeurs très élevées de la perte au feu observée sur certains échantillons indiquent la quantité de gaz dissous dans la phase vitreuse. La présence de l'eau en une certaine quantité indique généralement la présence de minéraux argileux, tandis que le CO₂ peut être présent sous forme de molécules de carbonate ou de CO₂ piégés dans la phase vitreuse. Une partie de la teneur en eau pourrait aussi être le fluide juvénile des roches piégé dans des inclusions souvent observées dans les feldspaths ou dans le verre volcanique (Cadoux et al., 2005). Ainsi, la diminution de Na₂O avec les valeurs croissantes de PF (Fig. 37) est donc en relation avec le processus de différenciation magmatique. La même tendance obtenue avec K₂O traduit que les matériaux ont subi une altération.

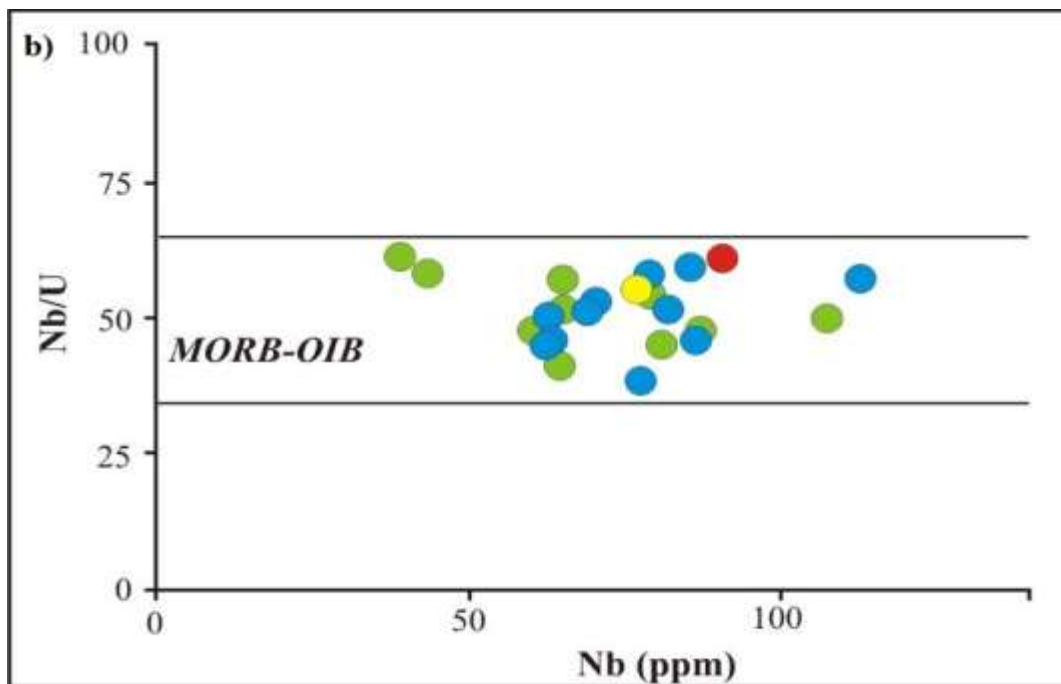
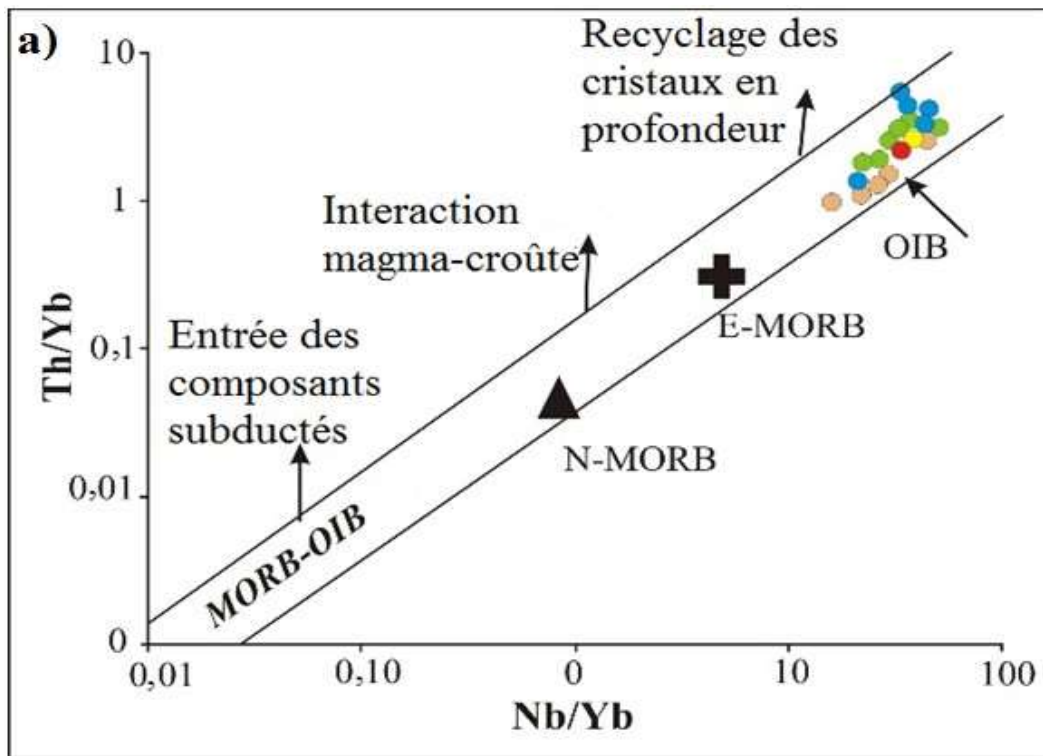


Figure 31: Diagrammes binaires a) Th/Yb vs. Nb/Yb ; b) Nb/U vs. Nb montrant l'effet négligeable de la contamination crustale dans la formation des scories de la LVC.

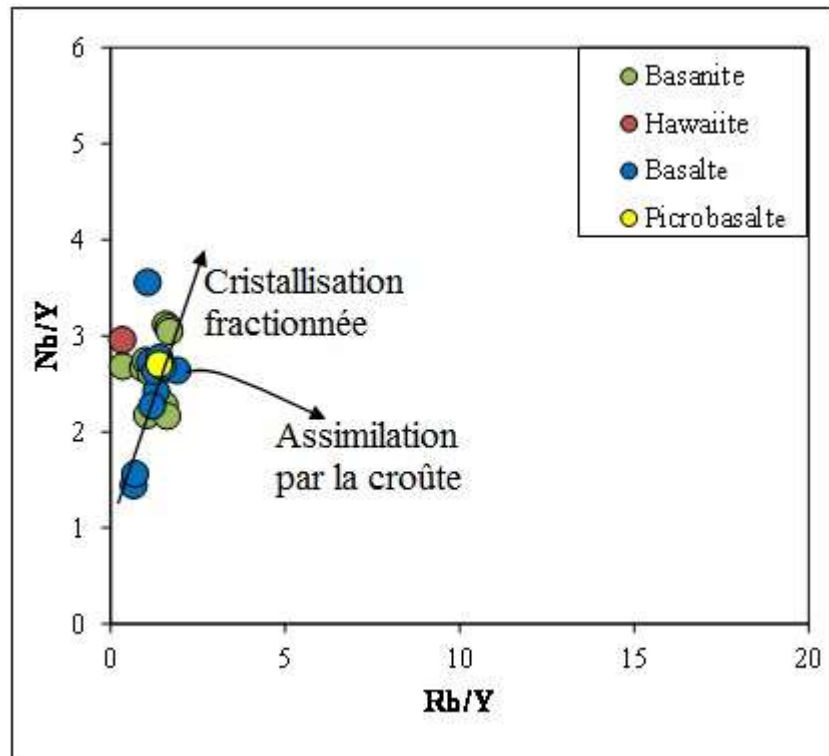


Figure 33: Diagramme Nb/Y vs. Rb/Y de Cox et Hawkesworth (1985).

La corrélation négative entre la somme des oxydes (FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O) et Al_2O_3 prouve que ces oxydes sont plus mobiles que l'alumine. Ce qui trouve une explication au fait que les échantillons Gal et DP1 ayant la teneur la plus élevée en alumine correspondent à ceux dont les teneurs en CaO et Na_2O sont les plus faibles. La teneur élevée en Al_2O_3 serait corrélable au degré d'altération des scories volcaniques de même que les changements de couleur qui seraient liés à l'oxydation du fer. Il est également observé une corrélation entre les éléments majeurs et traces considérés comme les plus mobiles (Ca, K, Na, P, Rb, Ba, Eu et Sm) et la Perte au Feu (LOI). La corrélation négative observée avec Na_2O , K_2O et CaO témoigne de la mobilité de ces éléments. Il ressort aussi un léger départ de Sm, Eu, Rb et P_2O_5 . Tout ceci prouve que l'altération a joué un rôle non négligeable sur la composition chimique des scories volcaniques.

L'altération des roches basaltiques typiques évolue selon l'ordre suivant verre volcanique, olivine, plagioclase, pyroxène et oxydes Fe-Ti (Babechuk et al., 2014 ; Nesbitt et Wilson, 1992). Au cours des premiers stades de l'altération du basalte, des phyllosilicates de type 2 : 1 se forment généralement et une hydratation importante se produit entraînant une perte nette des éléments mobiles tels que Mg, Ca, Na, $\pm\text{K}$ (Nesbitt et Young, 1982) d'une part et une rétention des éléments tels que Al, Fe et Si.

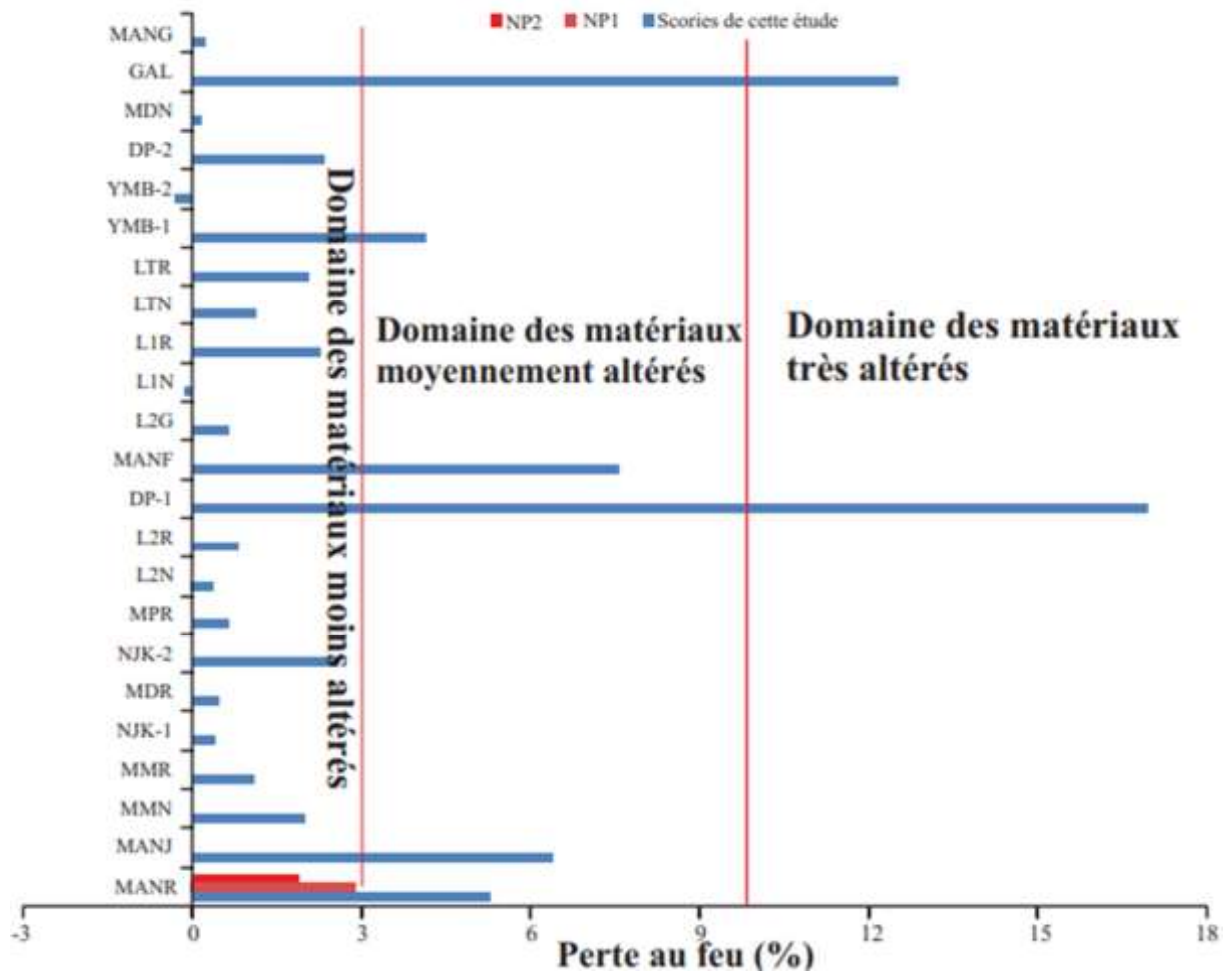
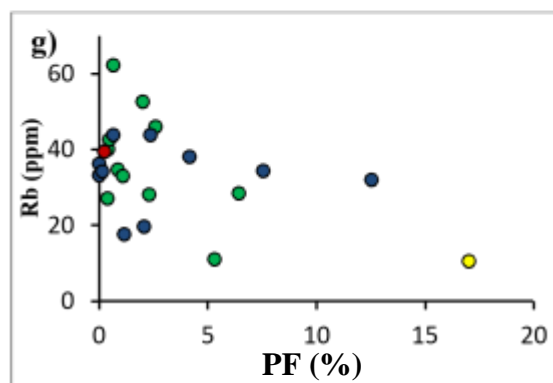
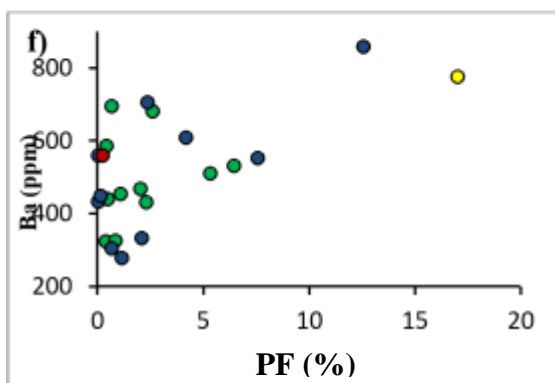
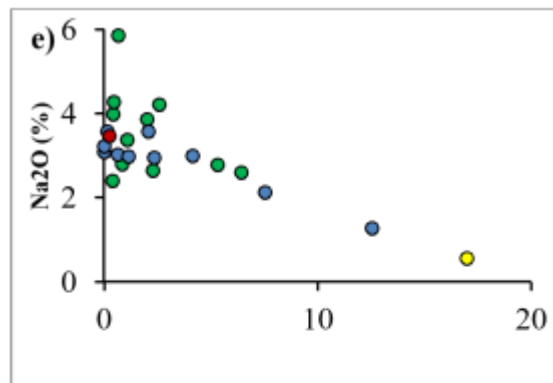
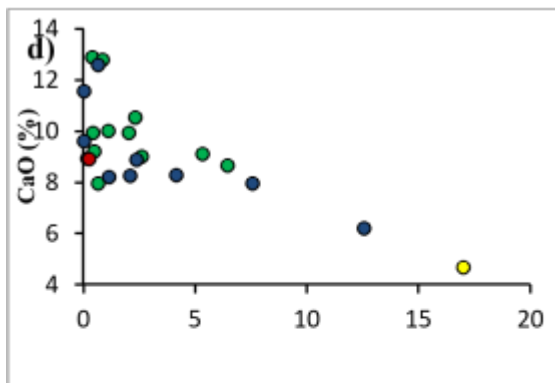
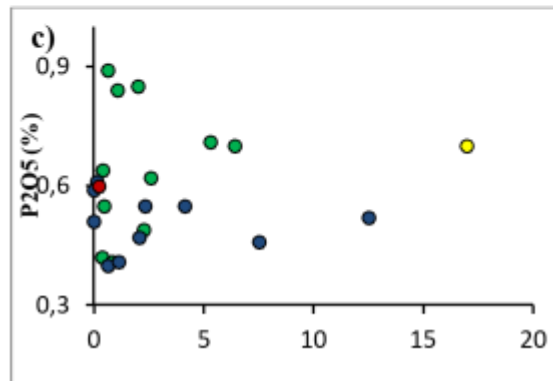
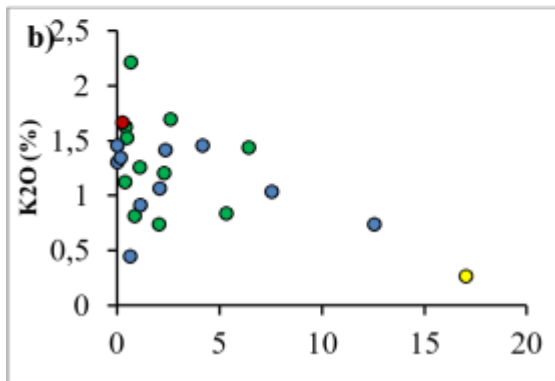
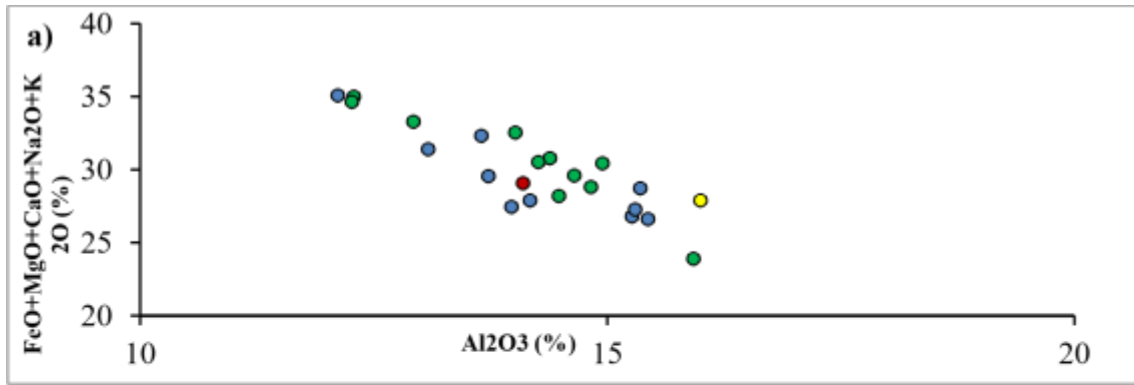


Figure 35: Diagramme d'évaluation du degré d'altération à partir des valeurs de perte au feu (NP1 et NP2 correspondent aux pouzzolanes naturelles définies par Pourkhorshidi *et al.*, 2010).



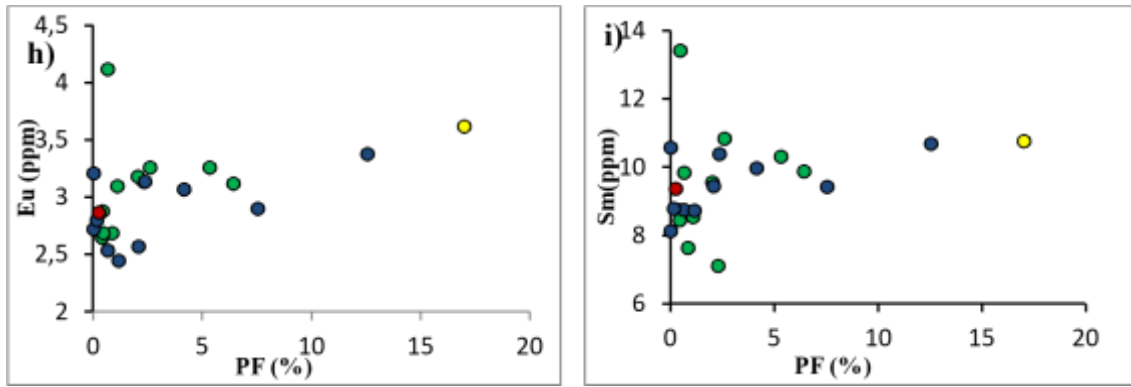


Figure 37: Diagramme de mobilité entre éléments chimiques.

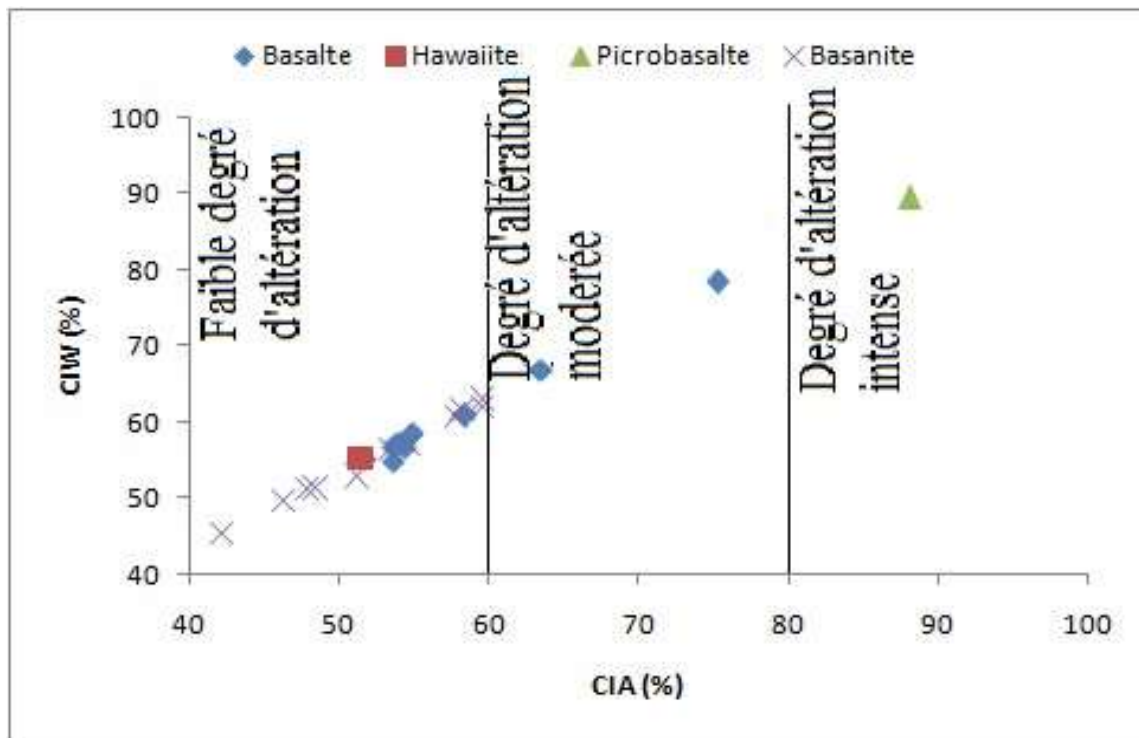


Figure 38: Diagramme CIW vs, CIA d'évaluation du degré d'altération dans les scories de la LVC,

Les stades intermédiaires et avancés de l'altération sont caractérisés par l'apparition des argiles de type 1 :1 tels que kaolinite et halloysite. Les indices d'altération choisis sont le CIA, le CIW, le MIA et le PIA.

Le Chemical Index of Alteration (CIA) de Nesbit et Young (1982) dont les valeurs varient entre 42 et 88% est le critère le plus utilisé. Il est à noter que ces valeurs sont plus élevées dans les basaltes (51-75%) que dans les basanites (42 - 60%); la valeur la plus importante étant obtenue sur le picrobasalte (88%) de même que pour la PF ($\approx 17\%$). Ceci

implique également sa plus grande valeur de CIW (90%). CIW évolue dans le même ordre que CIA, ce qui atteste que l'altération est plus poussée sur les basaltes que dans les basanites, le niveau de grande intensité étant celui du picrobasalte (Fig. 38). Les valeurs croissantes de l'indice d'altération sont dues à la perte d'éléments mobiles par rapport à un élément supposé immobile. Ainsi, le CIA suit donc principalement la dissolution du feldspath et la libération concomitante de Ca, Na et K par rapport à Al (Babechuk et al., 2014). Les valeurs de CIA sont en conformité avec la composition minéralogique. Ainsi, les minéraux secondaires (illite, montmorillonite, kaolinite et hématite) sont abondants et variés dans les scories à CIA élevé. Les basaltes sont caractérisés par la présence de l'illite et la kaolinite comme minéraux secondaires, avec des pics d'olivine bien plus nombreux que dans les picrobasaltes. Dans les basanites, les pics d'olivine sont plus représentés au détriment de l'illite. Il en ressort donc que plus les valeurs de CIA sont élevées, plus les minéraux secondaires sont abondants et moins certains minéraux primaires sont présents.

La figure 39 illustrant le diagramme ternaire ACNK montre que la majorité des échantillons de scories volcaniques appartient au domaine modéré d'altération dont les valeurs de CIA sont comprises entre 50 et 70%. Ce domaine de niveau d'altération moyen, est marqué par la présence des plagioclases approuvant ainsi les résultats de l'analyse minéralogique. Cependant, le diagramme ressort deux échantillons appartenant au domaine d'altération modérée à intense. Les valeurs de CIA indicatrices d'une telle altération, oscillent entre 70 et 90%, les minéraux secondaires tels que smectite et illite en constituent des témoins. Les scories volcaniques étudiées n'ont pas atteint le stade de « kaolinitisation » complète et peuvent encore retenir des quantités importantes d'éléments labiles (Ca, Na, K), ce qui pourrait être dû à la présence de minéraux zéolites (Bhattacharyya et al., 1999). Une autre utilité du diagramme ACNK est d'identifier et de démêler les effets de l'enrichissement en potassium (Fedo et al., 1995). L'absence d'une tendance à l'écart du vecteur d'altération vers l'apex K traduit un appauvrissement de K tel qu'observé sur les spectres multiélémentaires. Cette perte en potassium s'observe notamment au cours de la formation de l'illite à partir de l'orthose, et s'intensifie avec la formation des smectites.

L'indice d'altération mafique (MIA) est utilisé pour étendre l'équation de l'indice chimique d'altération en tenant compte des éléments mafiques tels que Mg et Fe. La mobilité de ces éléments sera donc estimée en fonction de la nature du milieu. Dans un environnement d'altération oxydant où Fe est retenu, le Fe total est considéré comme un élément immobile de même que l'aluminium. Lorsque le milieu devient réducteur et Fe est lessivé avec Mg

alors le Fe total est considéré comme un élément mobile de même que Mg, Ca, Na et K. MIA(o) varie entre 28 et 51% et évolue dans le même sens que CIA et CIW c'est-à-dire que le picrobasalte (51%) présente la plus grande valeur suivie des basaltes (31 - 47%) et des basanites (28 - 40%) qui affichent la plus faible valeur. En comparant MIA et CIA, il ressort que ces deux indices sont découplés car l'évolution croissante du CIA s'observe jusqu'à une valeur de 90 tandis que MIA (o) ne connaît pas une évolution après la valeur 50 (Fig. 40). Un tel découplage serait probablement lié à une intense altération des minéraux ferromagnésiens. Les valeurs de MIA évolue dans le sens de l'augmentation de la perte au feu (Fig. 41). Ainsi, les échantillons à plus grande valeur de perte au feu possèdent également un indice d'altération supérieur.

L'indice d'altération du plagioclase (PIA) est utilisé comme alternative au CIW. Cette modification de l'équation du CIA ne change pas la tendance des valeurs, c'est ainsi qu'il ressort des intervalles de valeurs identiques à celles de CIA. Les valeurs de PIA varient entre 41 et 90%. Les valeurs autour de 50 renvoient aux minéraux primaires tandis que celles proche de 100 indiquent une altération chimique poussée conduisant à la formation des minéraux argileux tels que la gibbsite (Fedó et al., 1995).

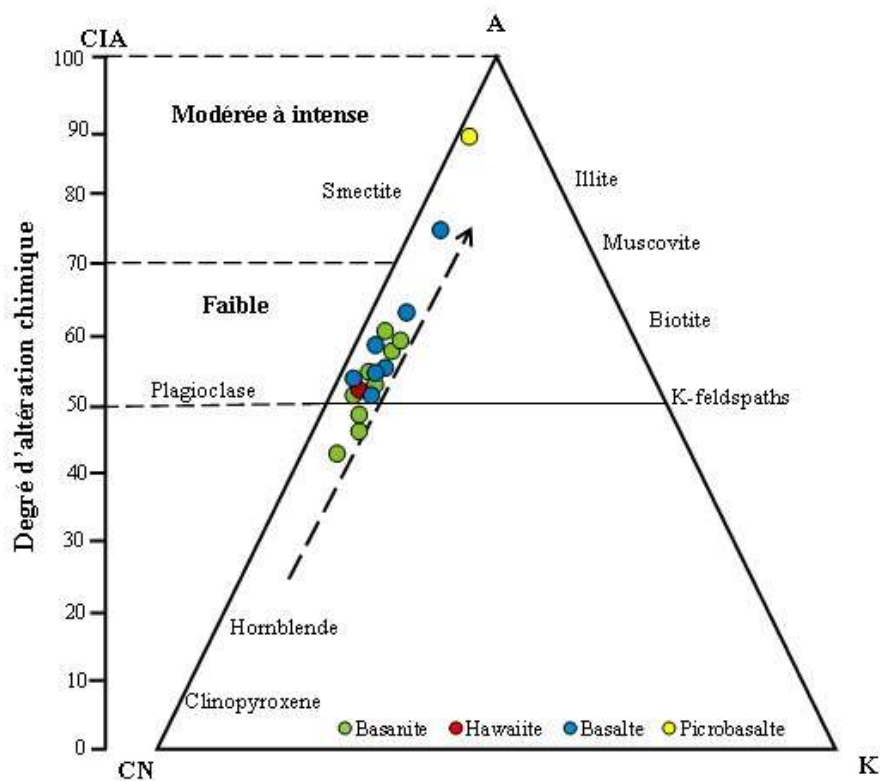


Figure 40: Diagramme A-CN-K (Nesbitt et Young, 1982) des scories de la LVC

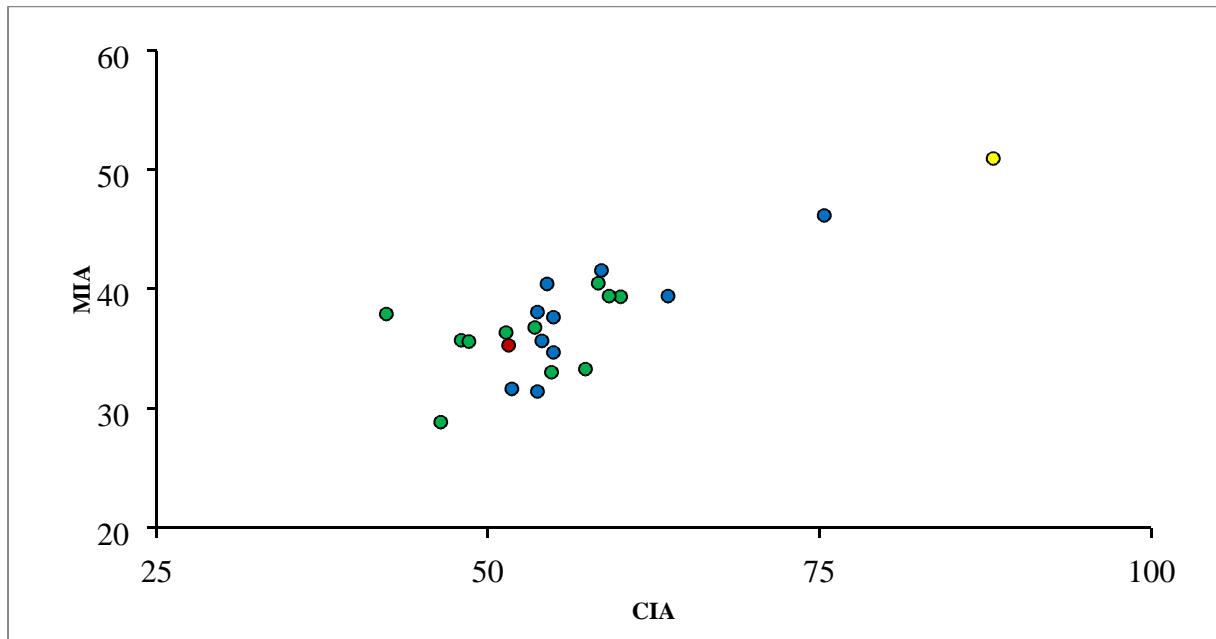


Figure 40: Diagramme binaire MIA (Mafic Index of Alteration) vs. CIA (Chemical Index of Alteration).

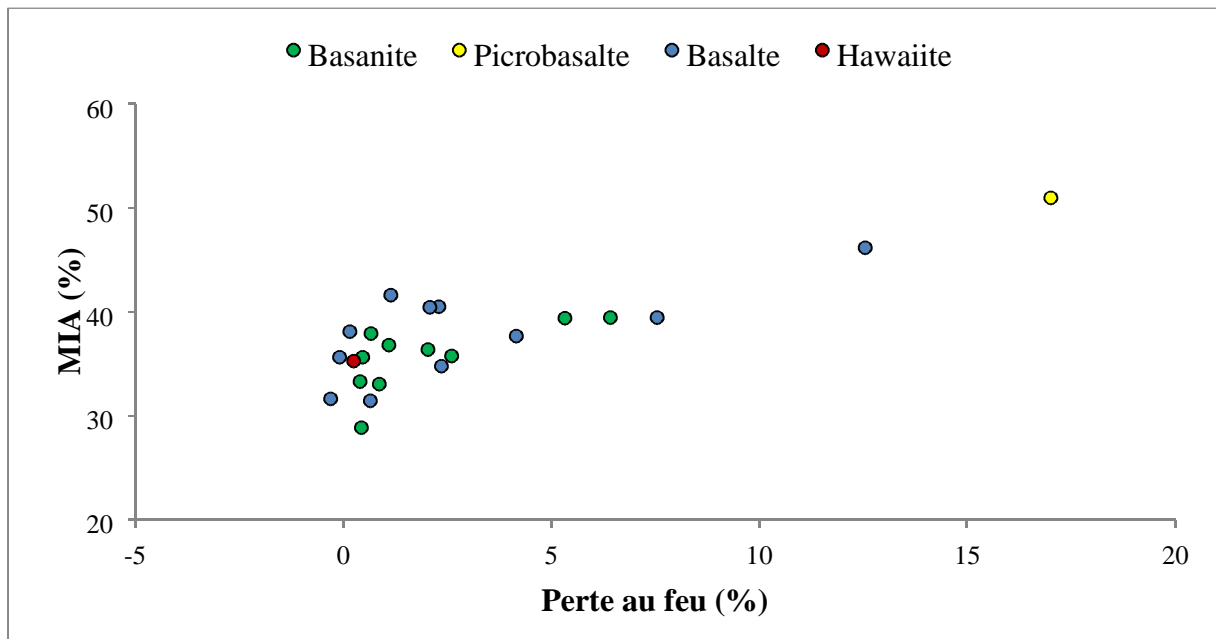


Figure 41: Diagramme MIA (Mafic Index of Alteration) vs. Perte au Feu (PF).

Les scories sont des matériaux volcaniques dont l'origine est attribuée aux processus magmatiques. Cependant, ces matériaux arrivés en surface ne restent pas inertes et sont sujets à des processus supergènes. Ces processus de surface concernent principalement l'altération qui dépend des conditions du milieu et de la composition des scories. En comparant les

teneurs en Fe_2O_3 des scories volcaniques (11,78 - 15,03) avec celles d'autres travaux tels Leonelli et al. (2007), Alemayehu et Lennartz (2009), Kaid et al. (2009), Zheng et al. (2009), Tchakouté et al. (2013), Celik et al. (2014), Djobo et al. (2016), Djon Li Ndjock et al. (2017), Baenla et al. (2019), Djobo et al. (2020), Djon Li Ndjock et al. (2020), Lemougna et al. (2020), Pougnon et al. (2022) ; il ressort que ces scories sont plus riches en oxydes de fer. La libération de grandes quantités de fer résulterait d'un processus d'oxydation. L'iddingsitisation constitue donc une preuve de l'altération des scories volcaniques. Ce processus apprécié en microscopie s'accompagne de libération de silice amorphe et de magnésite et est responsable d'une coloration rouge. Il est donc possible de déterminer à partir des espèces minéralogiques les processus de surface affectant les scories volcaniques. Les minéraux argileux tels que la kaolinite, l'illite et la montmorillonite indiquent le déroulement d'une altération par hydrolyse.

VI.2. Potentiel industriel des scories volcaniques

VI.2.1. Caractéristiques naturelles des scories volcaniques

Les scories sont des matériaux naturels dont les caractéristiques constituent des critères justifiant leur sollicitation dans des domaines industriels. Ces caractéristiques leur confèrent des propriétés qui dépendent principalement des processus géologiques à l'origine de leur genèse. L'évaluation de l'application industrielle des scories se concentre sur la composition chimique et minéralogique, les propriétés géochimiques et les caractéristiques mécaniques.

VI.2.1.1. Influence de la granularité sur la phase amorphe des scories de la LVC

Le résultat de l'analyse granulométrique évoque les fractions grossière et fine. La finesse constitue l'une des propriétés pour lesquelles les différentes fines minérales sont employées dans les matrices cimentaires (Cyr, 1999). L'intérêt porté sur la finesse des matériaux se justifie par le fait de la fragilité du verre et de la microstructure des volcanites (Pichon, 1996). Ce qui favorise donc la concentration de la matière amorphe, considérée comme la phase réactive, dans les fractions fines et ultrafines. Cependant, il a été démontré que la proportion élevée en fine dans des matériaux contribue en la surestimation de la phase amorphe. Il est donc recommandé de disposer d'échantillon de proportions granulométriques variables. La présence d'une faible proportion de fine (<20%) dans l'ensemble implique une estimation optimale de la phase amorphe. Elle constitue un atout pour les scories dans la mesure où les proportions importantes en phase fine contribuent à la surestimation de la phase amorphe. La phase fine minimale indique donc avec objectivité les proportions réelles

de phase amorphe. Ainsi, les poudres de scories obtenues présentent une réaction de dissolution reflétant les propriétés naturelles réelles des scories. En rapprochant les résultats de l'analyse granulométrique à ceux de la phase amorphe, il en ressort des teneurs en phase réactive constantes pour des scories aux plus faibles proportions en fraction fine.

VI.2.1.2. Influence de la composition chimique des scories de la LVC sur les applications industrielles

La composition chimique est le premier critère qui oriente vers une application industrielle des matériaux géologiques. Les éléments majeurs sont dominés par trois oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) dont la somme est comprise entre 65 et 77 %. Il a été démontré qu'un matériau est qualifié de « pouzzolane » lorsqu'il possède des propriétés chimiques spécifiques. En général, la composition chimique des pouzzolanes varie entre les limites suivantes : 45-65 % SiO_2 , 15-30 % $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, et environ 15 % $\text{CaO} + \text{MgO} +$ les alcalins (Dron et Brivot, 1977). En comparant la composition chimique des scories volcaniques étudiées à celle des matériaux dits pouzzolaniques, il apparaît d'après la norme ASTM C618, une subdivision en deux groupes : celui dont la somme des principaux oxydes est inférieure à 70% (DP1 et GAL) ; et celui dont cette somme est supérieure à 70 %. Ce dernier groupe concerne la grande majorité des échantillons et constitue celui-là donc l'intérêt est orienté vers l'industrie du ciment. Les teneurs en ces trois oxydes dans les scories étudiées se rapprochent de celles obtenues sur des matériaux dont la pouzzolanité a été démontrée (Fig, 42). Les teneurs élevées en CaO (8 -13 %) indiquent des propriétés hydrauliques latentes élevées. Ce qui atteste que ces scories pourraient disposer d'un potentiel naturel d'hydraulicité et nécessiteraient juste la présence d'activateurs dans un mélange à l'eau pour former des substances analogues aux hydrates du ciment. Cette réaction réalisée à température ambiante permet donc de déterminer des matériaux dotés d'une capacité pouzzolanique.

L'évaluation des critères sus-présentés montre que les sommes $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ et $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ varient respectivement entre 12-27 % et 24-31 %. Ces critères permettent de définir les scories volcaniques étudiées comme étant des pouzzolanes. La composition chimique des scories volcaniques est similaire à celle des pouzzolanes de Gouogouo, Foubot et Djoungo qui ont été appréciées favorablement pour la production des géopolymères (Ndigui et al., 2013). La valorisation des scories des localités de Limbé et Galim ont permis de montrer que les matériaux dont la somme SAI est supérieure à 70 % sont appréciés dans les réactions de production du ciment car possédant une réactivité

pouzzolanique (Djon Li Ndjock et al., 2017). Les pouzzolanes sont des matériaux siliceux finement broyés composés essentiellement de la silice (SiO_2) et de l'alumine (Al_2O_3). Ces derniers sont caractérisés par une importante phase vitreuse qui constitue un autre critère primordial dont dépend la caractérisation des matériaux. En général, la phase vitreuse est fonction de la teneur en SiO_2 et CaO (Millet et al., 1977). Les pouzzolanes les plus acides qui contiennent de la silice et peu de chaux (CaO) présentent une phase vitreuse plus considérable. Il est possible d'estimer de façon théorique la proportion de cette phase vitreuse à partir de la composition chimique. Ainsi, la valeur obtenue de la différence $\text{SiO}_2 - \text{CaO}$ supérieure à 34% indique une teneur en verre appréciable.

Cette phase vitreuse constitue un critère important dans les applications tant dans le domaine des ciments que de la céramique. L'appréciation théorique de ce critère montre qu'une majorité d'échantillons (MDR, NJK2, MPR, MANF, L1R, LTN, LTR, YMB1, YMB2, MDN, MANG) répond favorablement à cette exigence. Il en ressort que les scories de la Ligne Volcanique du Cameroun sont constituées d'une phase amorphe. La phase amorphe joue un rôle primordial dans la réactivité des scories en présence de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et d'eau pour former des liants pouzzolaniques ou en présence de NaOH ou KOH et d'eau pour former des géopolymères (Ndigui et al., 2013). Ces scories peuvent être classées dans le type aluminosilicates définis par Wong et al., (2020). La forte teneur en Al_2O_3 pourrait être responsable de la grande réactivité qui les caractérise (Poon et al., 2001). L'abondance de l'alumine, a un impact sur les propriétés physico-chimiques des scories. La figure 41 illustre également que les scories volcaniques du secteur d'étude appartiennent à un même champ de teneurs des oxydes de base que les scories d'autres localités de la LVC (Ndigui et al., 2013 ; Djobo et al., 2014 ; Tchakouté et al., 2015 ; Juimo et al., 2016, Tchamdjou et al., 2017), de Madagascar (Rajaonarison et al., 2017) et d'Arabie Saoudite (Khan et al., 2011 ; Celik et al., 2014 ; Bakhsh, 2017). Ces oxydes de base sont SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 auxquels sont associés CaO (Fig. 43. a) et MgO (Fig. 43. b). La comparaison de la composition chimique des scories volcaniques à celles des pouzzolanes propices à la production du ciment définies par Pourkhorshidi et al, (2010) montre des teneurs sensiblement égales en certains oxydes (Fig. 44). Au regard de cet aspect, il se dégage que les scories de la LVC, du point de vue chimique sont des aluminosilicates identifiables aux pouzzolanes.

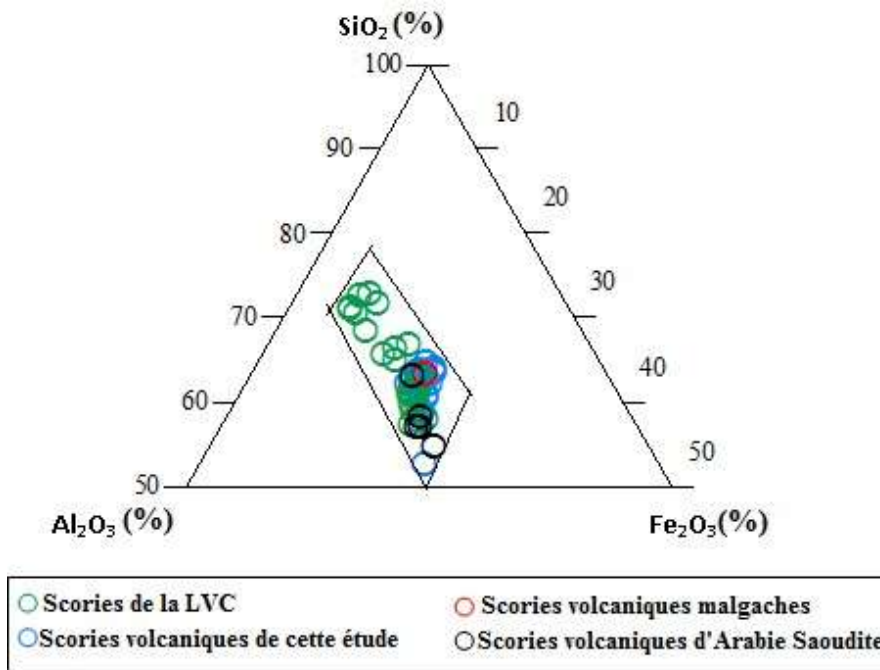


Figure 42: Diagramme SiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃ des scories volcaniques de la LVC.

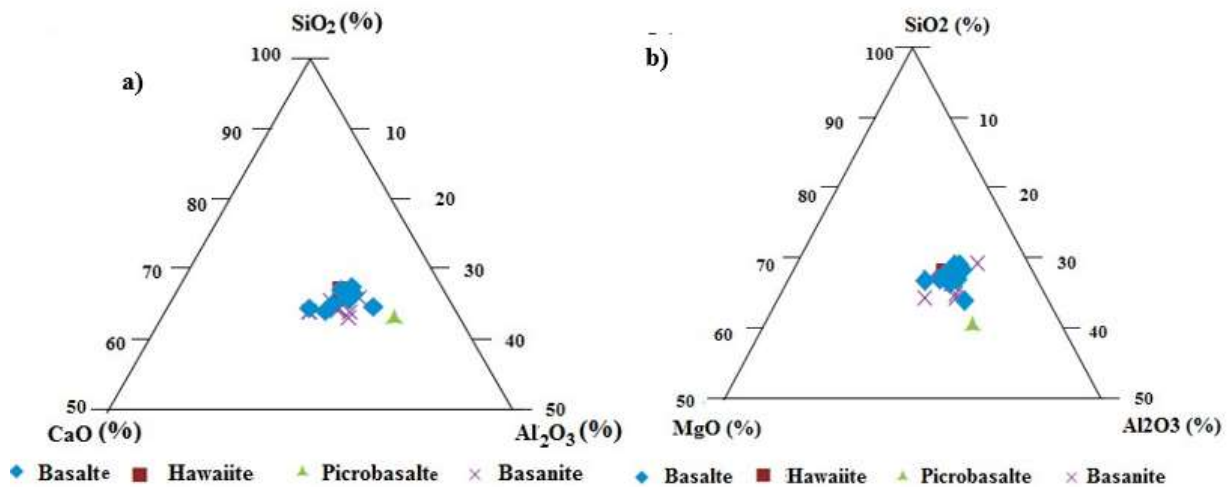


Figure 42: Diagrammes ternaires : a) CaO-SiO₂-Al₂O₃ ; b) MgO-SiO₂-Al₂O₃.

Les spectres obtenus à partir de la spectrométrie infrarouge donne également des indications sur la structure des scories volcaniques. Ainsi, l'identification des liaisons Si-O-Si renseigne sur la nature siliceuse du verre (Hiet et Revenaugh, 2010). Les alcalins et les alcalino-terreux étant responsable des ruptures des dites liaisons, ce qui traduit que la dépolymérisation du réseau dans la structure des scories volcaniques n'est pas effective. La présence des liaisons Al-O-Si témoigne de l'action de l'aluminium dans le réseau qui pourrait soit contribuer à sa formation, soit le modifier. Ces liaisons, énergétiquement plus favorables

que les liaisons Si-O-Si, confirme le rôle modificateur de l'aluminium dans la structure du réseau des scories.

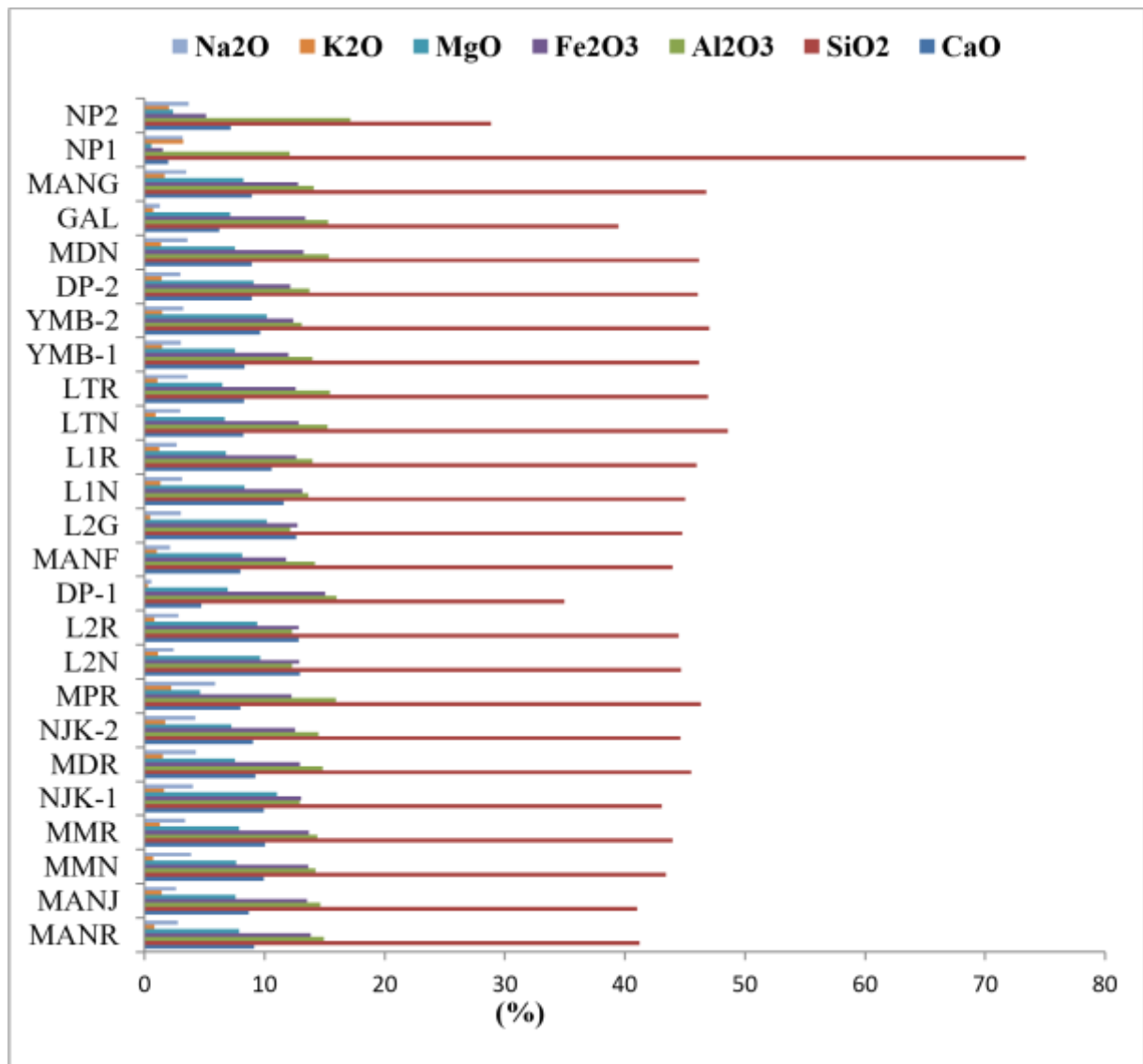


Figure 44: Diagramme de comparaison des teneurs en oxydes majeurs des scories volcaniques aux pouzzolanes NP1 et NP2 (Pourkhorshidi et al., 2010).

VI.2.1.3. Influence de la composition minéralogique des scories volcaniques sur les applications industrielles

La composition minéralogique des scories volcaniques a un impact sur leur usage industriel. Certains minéraux spécifiques sont favorables à des comportements particuliers et constituent des indicateurs de choix. La sélection des scories naturelles adéquates pour l'industrie du ciment tient compte des éléments présents dans la phase amorphe. D'après Massazza (1993), la réaction pouzzolanique ne se produit que lorsque la silice et l'alumine

sont constitutives de phases vitreuses. L'absence de quartz dans certaines pouzzolanes naturelles est due au fait que la silice totale est en déficit dans la phase sialique comparativement à la composition des feldspaths (Dron et Brivot, 1977). En comparant les diffractogrammes réalisés avant et après quantification de la phase amorphe, il apparaît que les pics de certains minéraux augmentent d'intensité tandis que d'autres diminuent. Les pics qui triplent d'intensité sont ceux des minéraux tels que l'augite et l'orthose, ce qui est en rapport avec les teneurs élevées d'alumine tant dans la phase cristalline qu'amorphe. La superposition des spectres DRX de chaque échantillon (Fig. 28) permet d'apprécier non seulement l'évolution des pics mais aussi d'estimer de façon relative la proportion d'amorphe dans les scories. Les spectres présentant un halo de diffusion prononcé (DP1 et MANG) sont ceux dont la proportion en amorphe est la plus importante. Ainsi, plus le halo de diffusion est prononcé, plus la teneur en phase vitreuse est élevée. Ces derniers s'identifient également à partir d'une augmentation accentuée de l'intensité des pics sur les spectres après dissolution.

Il ressort pour certains échantillons une superposition décalée entre la base des spectres caractérisant la proportion de verre. Ainsi, plus la superposition est nette plus la phase vitreuse est moins élevée. Les scories, avec une grande proportion de verre (DP1 et MANG), présentent une superposition peu concordante. La multiplication de l'intensité des pics de plagioclase, d'illite, d'orthose et de néphéline confirme l'abondance des oxydes alcalins dans la phase cristalline. Ces oxydes constituent un indicateur de la présence des feldspaths alcalins qui pourrait également orienter les scories vers le domaine des céramiques. La présence de verres feldspathiques composés des oxydes d'aluminium et de silicium en combinaison avec le potassium, le sodium ou le calcium indiquerait une utilisation dans les céramiques de restauration.

VI.2.2. Evaluation de l'activité pouzzolanique sur les scories volcaniques

La pouzzolanité est l'aptitude d'un matériau à fixer l'hydroxyde de calcium et durcir sous l'eau à des températures ordinaires et en un temps raisonnable. Cette propriété se caractérise par la quantité totale d'hydroxyde de calcium pouvant être fixée d'une part, et par la rapidité de fixation de cet hydroxyde d'autre part. La pouzzolanité est conditionnée par des paramètres tels que la composition chimique, le degré de vitrosité et la finesse des scories volcaniques naturelles. L'évaluation de la réactivité pouzzolanique des scories de la LVC revient donc à effectuer des tests afin de savoir si celles-ci pourraient réagir avec la chaux.

Dans le cadre de ce travail, le degré de réaction est évalué à partir de l'indice de pouzzolanité.

VI.2.2.1. Influence des critères chimiques sur l'indice de pouzzolanité des scories de la LVC

L'indice d'activité pouzzolanique constitue d'après la norme ASTM C618 le critère qui associé à la composition chimique vérifiée ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$) permet d'attester que le matériau présente une réactivité pouzzolanique. Sur les scories étudiées, 87 % vérifient la composition chimique prescrite et 77% présentent un indice d'activité pouzzolanique supérieur à la recommandation de la norme. Il en découle que dans la partie continentale de la LVC, il existe des scories naturelles aux propriétés pouzzolaniques. Cependant, cette pouzzolanité peut être en corrélation avec les caractéristiques pétrologiques.

VI.2.2.2. Relation entre couleur et Indice d'activité pouzzolanique

La plus grande valeur d'indice d'activité est obtenue sur l'échantillon MMN de couleur noire. Il apparait à partir de ces résultats que sur un même site, l'activité pouzzolanique est plus élevée sur les échantillons de couleur noire que ceux de couleur rouge. Ce qui est en conformité avec les teneurs en oxydes de fer. Il se dégage également de ces résultats que, les échantillons de couleur jaune ont des teneurs en oxyde de fer inférieures aux rouges et sont par conséquent plus réactifs que ces derniers. Ce fait est observé dans la localité de Manjo où l'indice d'activité de MANJ (76%) est supérieur à celui de MANR (63,99%). Il apparait donc que la couleur constitue un critère de choix des scories dans l'industrie du ciment. Ainsi, en présence de plusieurs variétés, la sélection judicieuse devrait favoriser les teintes sombres et de préférence le noir.

VI.2.2.3. Relation entre composition chimique et Indice d'activité pouzzolanique

Les éléments de la composition chimique en rapport avec l'indice d'activité pouzzolanique sont les teneurs en oxydes majeurs, Les résultats obtenus dans l'ensemble montrent une affinité avec les teneurs en CaO. Ainsi, pour un site précis, l'effet pouzzolanique augmente avec les teneurs décroissantes d'oxyde de calcium. Dans la localité de Loum-Tombel, l'échantillon LTN (8,22) dont la concentration en Cao est inférieure à celle de LTR (8,29), présente l'indice de pouzzolanité le plus élevé (68%). De même, les échantillons DP1 (4,70% CaO) et DP2 (8,91% CaO) du site de Doupé ont des valeurs de taux de pouzzolanité respectives de 77,66% et 71,99%. Ces observations définies au sein d'un site précis permettent de tirer la conclusion selon laquelle la faible teneur en CaO des scories volcaniques est un critère favorable à une réactivité pouzzolanique élevée et par conséquent propice aux applications en cimenterie.

VI.2.2.4. Relation entre composition minéralogique et Indice d'activité pouzzolanique

La relation entre l'indice d'activité pouzzolanique et la composition minéralogique des scories volcaniques est établie à partir des microphotographies d'une part et des spectres IR et DRX d'autre part. Sur le plan pétrographique, les observations des lames minces des échantillons caractérisés par un taux de réactivité élevé s'identifient par une coloration sombre. Ceux dont la réactivité est faible présentent un aspect rouille. La différence persiste avec la taille et la forme des cristaux. Ainsi, lames minces réalisées sur MMN présentent des phénocristaux de pyroxène et des olivines associés aux feldspaths peu abondants et de taille plus fine. Ces feldspaths (plagioclases) s'identifient en abondance dans la micro-structure de l'échantillon MANR dans laquelle s'observe abondamment des olivines en dégradation. Il en ressort donc que l'abondance des plagioclases n'est pas favorable à la réactivité des scories volcaniques ; et constitue par conséquent un critère de disqualification dans les productions de ciment. Ce qui constitue une confirmation de l'hypothèse selon laquelle les teneurs élevées de CaO contribuent à diminuer les valeurs de résistance à la compression de même que l'activité pouzzolanique.

Les spectres IR obtenus sur les échantillons DP1, MMN, MANG et LTN montrent que l'indice d'activité pouzzolanique y est relatif à l'intensité des pics de liaisons trivalentes Si-O-Si et Al-O-Si qui caractérisent les aluminosilicates amorphes, DP1, MMN et MANG pour lesquels ces pics sont plus intenses se démarquent par leur taux de réactivité plus élevé. Cependant, la valeur la plus importante de ce paramètre est de MMN pour lequel le pic obtenu à 1156 est moins intense que celui de DP1 dans la même gamme de longueur d'ondes. Le bouleversement observé sur DP1 et MMN dans la logique établie s'explique d'abord par le fait que le pic de MMN est plus étendu que celui de DP1 qui est plus allongé. En plus, DP1 possède également des liaisons bivalentes C-H, O-H et N-H absentes sur MMN. Les groupements O-H renvoient aux minéraux hydroxylés. L'absence des liaisons O-H sur MMN joue en faveur d'une réactivité pouzzolanique plus importante que dans l'échantillon DP1.

Sur le plan de la minéralogie, les spectres de DRX des deux échantillons de plus grand indice pouzzolanique présentent des différences justifiant le fait que la pouzzolanité est plus élevée sur MMN que DP1. Il s'agit premièrement du halo de diffusion, indicateur de la phase amorphe qui est bien matérialisé sur le spectre DRX de MMN par rapport à DP1. Le second fait marquant est la présence des minéraux hydroxylés comme la montmorillonite dans le matériau DP1. La présence des minéraux au groupement OH contribue à réduire l'indice d'activité pouzzolanique des scories volcaniques. Enfin, les pics de grande intensité

portés par les minéraux exempts des groupements OH et de Ca à l'instar de l'enstatite, l'augite et l'hématite observés sur MMN sont propices à un effet pouzzolanique élevé.

Conclusion

Les résultats géochimiques et les rapports y afférents montrent que les scories de la Ligne Volcanique du Cameroun se sont formées à partir d'un processus de fusion partielle prédominant sur le processus de cristallisation fractionnée. Les indices chimiques d'un magma à grenat dominant dans la source mantellique ont été relevés. L'identification du grenat indique des conditions de pression > 3 GPa et une profondeur autour de 90 km propices à la formation des magmas alcalins enrichis en terres rares légères. Les rapports de certaines terres rares établissent un rapprochement chimique de la source de ces matériaux à celle des basaltes des îles océaniques. La composition chimique des scories présente des éléments témoignant d'un processus de contamination par la croûte peu significative et ne nécessitant pas un intérêt comme processus à l'origine de la genèse des scories volcaniques. Les résultats de la perte au feu variant de la valeur moyennement notée sur les basaltes à des teneurs plus élevées montrent une action du processus d'altération supergène. Les caractères pétrographiques tels l'iddingsitisation, les teneurs élevées en oxydes de fer et la présence des minéraux argileux confirment l'effet de cette altération dont l'intensité modérée à intense est évaluée à partir des indices d'altération chimique. Leur composition chimique dominée SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 fait d'elles des aluminosilicates dont la phase amorphe significative reflète la granulométrie grossière. Ces scories sont caractérisées par des propriétés chimiques semblables à celles des pouzzolanes naturelles faisant usage dans l'industrie du ciment et dotées d'une activité pouzzolanique satisfaisante. Cette activité pouzzolanique est plus élevée sur des scories de couleur noire que celles de couleur rouge. Il se dégage donc que l'activité pouzzolanique est croissante pour les teneurs décroissantes de Fe_2O_3 ainsi que des faibles teneurs de CaO. La présence de groupement OH ainsi que des minéraux hydroxylés contribuent en la diminution de la pouzzolanicité. Par ailleurs, son intensification relève de la présence des groupements Si-O-Si et Al-O-Si dans la structure des scories volcaniques.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Tout au long de cette étude portant sur la valorisation des scories de la Ligne Volcanique du Cameroun, il a été question de mener une investigation dont l'objectif principal était de proposer une solution efficace au problème de diversification de matière première dans l'industrie du ciment afin de réduire les pénuries. L'autre objectif était d'établir une relation entre les propriétés spécifiques des scories volcaniques et les processus géologiques de formation. La démarche élaborée pour atteindre ces objectifs s'est organisée à partir d'une approche pluridisciplinaire dont les principaux axes sont la minéralogie, la géochimie et la détermination des propriétés exploitables dans l'industrie du ciment.

Sur le plan pétrographique, les scories volcaniques s'identifient macroscopiquement à partir de leur couleur, leur taille et leur aspect vésiculaire. Leur structure microscopique permet d'identifier un assemblage de phénocristaux d'olivine et de pyroxène, et de microcristaux de feldspaths. Cet ensemble décrit une texture microlitique. L'aspect minéralogique a confirmé les observations en lames minces en révélant un cortège minéralogique constitué principalement de l'olivine, du pyroxène et des feldspaths ; et accessoirement de l'hématite, de la kaolinite et de l'ilménite. Les minéraux hydroxylés indexés dans les scories sont détenteurs des groupements bivalents O-H identifiés, des groupements trivalents Si-O-Al et Si-O-Si témoignant quant à eux de la présence d'aluminosilicates amorphes. La géochimie des éléments majeurs a montré dans les scories la prédominance de SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 . De ces données, il en ressort quatre types de roches : les basanites, hawaiiites, picrobasaltes et basaltes. La géochimie des terres rares a indiqué un enrichissement des terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes, une corrélation positive entre les différentes terres rares, de même des anomalies négatives en europium. La reconstitution de toutes les caractéristiques pétrologiques montre que le processus à l'origine de la formation est la fusion partielle à laquelle se greffe la cristallisation fractionnée. Ces matériaux proviennent d'une péridotite à grenat dominant dont les conditions de pression > 3 GPa et une profondeur autour de 90 km sont propices à la formation des magmas alcalins enrichis en terres rares légères. Les scories volcaniques connaissent des modifications de leurs caractéristiques depuis les processus de formation jusqu'à la surface à travers les différents agents de l'altération. Les marques visibles sur la micro texture sont les fissures observées sur les cristaux de pyroxène et les olivines iddingsitiseés. La présence des minéraux secondaires de même que les indices d'altération ont évalué l'altération d'une intensité faible à modérée.

Sur le plan industriel, les caractères physiques ont défini une granulométrie grossière dominée par les graviers et les sables grossiers, la fraction fine apparente étant constituée exclusivement de sables fins. Par conséquent, les valeurs de perméabilité et d'humidité relative obtenues sur les scories sont faibles. Le comportement thermique des scories confirme la coexistence des phases amorphe et cristalline et constitue un critère additif de sollicitation dans l'industrie du ciment. Les propriétés déterminantes pour une certitude sur la possibilité de l'utilisation de ces matériaux dans ce domaine sont la résistance à la compression dont les valeurs cadrent avec celles obtenues sur les bétons courants ; et l'indice de pouzzolanité dont les valeurs renseignent sur des scories de pouzzolanité suffisante à très bonne. Les scories de couleur noire sont susceptibles d'être plus pouzzolaniques que celles d'autres couleurs. Il se dégage donc que l'activité pouzzolanique est croissante pour les teneurs décroissantes de Fe_2O_3 ainsi que des faibles teneurs de CaO .

Les matériaux sollicités dans l'industrie du ciment doivent satisfaire des exigences sur le plan de leur composition chimique ce qui est le cas des scories de la Ligne Volcanique du Cameroun dont la somme des principaux oxydes est conforme à la norme. De même, ces scories présentent une activité pouzzolanique et peuvent donc faire l'objet d'une exploitation satisfaisante.

En guise de perspectives, il est recommandé de :

- réaliser une étude quantitative afin de faire une estimation des scories volcaniques disponibles dans les divers sites et de prévoir la durée d'exploitation et si possible les quantités de production ;
- étendre l'étude sur l'ensemble de la Ligne Volcanique du Cameroun afin de constituer une base de données sur les propriétés qualitative et quantitative des scories volcaniques au Cameroun ;
- élargir le champ de valorisation des scories volcaniques précisément pour celles qui ne pourraient pas satisfaire aux exigences de l'industrie du ciment.

BIBLIOGRAPHIE

- ACI 232.1R-12, Report on the Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete, American Concrete Institute.
- Alemayehu, E., Lennartz, B., 2009. Virgin volcanic rocks: kinetics and equilibrium studies for the adsorption of cadmium from water. *Journal of Hazardous Materials* 169, 395–401.
- Al-Swaidani, A.M., 2016. Prediction of compressive strength and some permeability-related properties of concretes containing volcanic scoria as cement replacement. *Romanian Journal of Materials* 46 (4), 505–514.
- Al-Swaidani, A.M., 2018. Volcanic Scoria as Cement Replacement. Chapter 10 in ‘‘Volcanoes geological and geophysical setting, theoretical aspects and numerical modeling, applications to industry and their impact on the human health’’. Gemma A. (Editor), 211–237.
- Asaah, A.N.E., Yokoyama, T., Aka, F.T., Usui, T., Wirmvem, M.J., Tchamabe, C.B., Ohba, T., Tanyileke, G., Hell, J.V., 2015. A comparative review of petrogenetic processes beneath the Cameroon Volcanic Line: Geochemical constraints. *Geoscience Frontiers* 6 (4), 557–570.
- ASTM C 618-15, 2015. Standard specifications for coal fly ash and Raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C 618, 1993. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. Philadelphia, USA: Annual Book of ASTM Standards.
- Babechuk, M.G., Widdowson, M., Kamber, B.S., 2014. Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India. *Chemical Geology* 363, 56–75.
- Baenla, J., Bike Mbah, J.B., Djon Li Ndjock, B.I., Elimbi, A., 2019. Partial replacement of low reactive volcanic ash by cassava peel ash in the synthesis of volcanic ash based geopolymer. *Construction Building Materials* 227:116689.
- Bakhsh, R.A., 2017. The Harrat Al-Birk basalts in southwest Saudi Arabia: Characteristic alkali mafic magmatism related to Red Sea rifting. *Acta Geochimica* 36(1), 74–88.
- Bhattacharyya, T., Pal, D.K., Srivastava, 1999. Role of zeolites in persistence of high altitude ferruginous alfisols of the humid tropical Western Ghats, India. *Geoderma* 90 (3-4), 263–276.
- Beleuk, M.M.L., Lemougna, N.P., Kaze, C.R., Mohamed, H., Nemaleu, D.G.J., Ndigui, B., Kamseu, E., Mvondo-Ze, D.A., Kenfack, T.I., (2022). Synthesis of volcanic ash-based porous inorganic polymers using biomass as pore inducing agent: Phase evolution and descriptive microstructure. *Silicon* 14 (6), 2595–2608.

- Bijocka C., Tusset J., Messi A., Perra J., 1993. Etude et évaluation de l'activité pouzzolanique des pouzzolanes de Djoungo (Cameroun). *Annales de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé*, 133–145.
- Blein, O., Lapierre, H., Schweickert, R.A., 2001. A permian island arc with a continental basement: the black dyke formation (Nevada), north American cordillera. *Chemical Geology* 175, 543–566.
- Brenna, M., Cronin S.J., Smith, I.E.M., Sohn, Y.K., Né-meth, K., 2010. Mechanism driving polymagmatic activity at a monogenetic volcano, Udo, Jeju Island, South Korea. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 160, 931–950.
- Brindley, G.W., Kao, C.-C., Harrison, J.L., Lipsicas, M., Raythatha, R., 1986. Relation between structural disorder and other characteristics of kaolinites and dickites. *Clays and Clay Minerals* 34, 239–249.
- Cadoux, A., Pinti, L.D., Aznar, C., Chiesa, S., Gillot, P.-Y., 2005. New chronological and geochemical constraints on the genesis and geological evolution of Ponza and Palmarola volcanic islands (Tyrrhenian Sea, Italy). *Lithos* 81 (1-4), 121–151.
- Celik, K., Rotana, H., Craig, W.H., Juhyuk, M., 2019. Effect of volcanic ash pozzolan or limestone replacement on hydration of Portland cement. *Construction and Building Materials* 197, 803–812.
- Celik, K., Meral C., Mancio, M., Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M., 2014. A comparative study of self-consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan or high-volume fly ash. *Construction and Building Materials* 67, 14–19.
- Chazot, G., Bertrand, H., 1995. Genesis of silicic magmas during Tertiary continental rifting in Yemen. *Lithos* 36 (2), 69–83.
- Cornen, G. and Maury, R.C., 1980. Petrology of the volcanic island of Annobon, Gulf of Guinea. *Mar. Geol.*, 36:253-267.
- Cox, K.G., Hawkesworth, C.J., 1985. Geochemical stratigraphy of the Deccan Traps at Mahabaleshwar, Western Ghats, India, with implications for open system magmatic processes. *Journal of Petrology* 26, 355–377.
- Cyr, M., 1999. Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires. *Matériaux*. INSA de Toulouse; Thèse Doctorat/PhD, Université de Sherbrooke, 273p.
- Cyr, M., Carles-Gibergues A., Tagnit-Hamou, A., 1999. « Titanium fume and ilmenite fines characterization for their use in cement based materials », soumis à *Cement and Concrete Research*.

- Dedeloudis, C., Zervaki, M., Sideris, K., Juenger, M., Alderete, N., Kamali-Bernard, S., Villagrán, Y., Snellings, R., 2018. Natural pozzolans. De Belie N. et al., editors. In: *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials*, 181–231. Dedzo, G.M., Asaah, A.N.E., Fozing, E.M., Tchamabe, B.C., Zangmo, T.G., Dagwai, N., Seuwei, T.D., Kamgang, P., Aka, F.T., Ohba, T., 2019. Petrology and geochemistry of lavas from Gawar, Minawao and Zamay volcanoes of the northern segment of the Cameroon Volcanic Line (Central Africa): constraints on mantle source and geochemical evolution. *Journal of African Earth Sciences* 153, 31–41.
- Dedzo, G. M., Njonfang, E., Kamgang, P., Nono, A., Zangmo Tefogoum, G., Kagou Dongmo, A., Nkouathio, D.G., 2012. Dynamic and evolution of the Mounts Bambouto and Bamenda calderas by study of ignimbritic deposits (West-Cameroon, Cameroon Line). *Syllabus Review* 3, 11-23.
- Dedzo, G.M., Hamadjoda, D.D., Fozing, E.M., Tchamabe, B.C., Mendoza-Rosas, T.A., Asaah, E.N.K., Tefogoum, Z.G., Kamgang, P., Ohba, T., 2020. Petrology and geochemistry of ignimbrites and associated enclaves from Mount Bambouto, West-Cameroon, Cameroon Volcanic Line. *Geochemical* 80 (4), 125663.
- Delisle J.P., Alou F., 1978. *Matériaux de construction 1*. Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Delvaux, B., Herbillon, A.J., Vielvoye, L., 1989. Characterization of a weathering sequence of soils derived from volcanic ash in Cameroon-taxonomic, mineralogical and agronomic implications. *Geoderma* 45 (3–4), 375–388.
- Demirdag, S., Gunduz, L., 2008. Strength properties of volcanic slag aggregate lightweight concrete for high performance masonry units. *Construction and Building Materials* 22 (3), 135–142.
- Deruelle, B., 1982. Petrology of the Plio-quadernary volcanism of the south-central and meridional Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal research* 14 (1-2), 77-124.
- Deruelle, B., Moreau, C., Nkoumbou, C., Kambou, R., Lissom, J., Njofang, E., Ghogomu, R.T., Nono, A., (1991). The Cameroon Line: a review. In: Kampunzu, A. B. and Lubala, R. T. (eds) *Magmatism in Extensional Tectonic Structural Settings*. Berlin: Springer, pp. 274–327.
- Déruelle, B., Bardintzeff, J.-M., Cheminee, J.-L., Ngounouno, I., Lissom, J., Nkoumbou, C., Etame, J., Hell, J. V., Tanyileke, G., N'ni, J., Ateba, B., Ntepe, N., Nono, A., Wandji, P., Fosso, J., Nkouathio, D. G., 2000. Eruptions simultanées de basalte alcalin et de hawaiiite au mont Cameroun (28 mars–17 avril 1999). *Comptes Rendus Académie des Sciences* 331, 525–531.

- Déruelle, B., Ngounouno, I., Demaiffe, D., 2007. The 'Cameroon Hot Line' (CHL): An unique example of active alkaline intraplate structure in both oceanic and continental lithospheres. *Concise Review Geoscience* 339 (9), 589–600.
- Dingwell, D.B., Lavallée, Y., Kueppers, U., 2012. Volcanic ash: A primary agent in the Earth system. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 45, 2-4.
- Djobo J.N.Y., Tchadjie L.N., Tchakoute H.K., Kenne B.B.D., Elimbi A., 2014. Synthesis of geopolymer composites from a mixture of volcanic scoria and metakaolin. *Journal of Asian Ceramics Societies* 2 (4), 387–398.
- Djobo, J.N.Y., Elimbi, A., Tchakouté, H.K., Kumar, S., 2016. Reactivity of volcanic ash in alkaline medium, microstructural and strength characteristics of resulting geopolymers under different synthesis conditions. *Journal of Materials Sciences* 51 (22), 10301–10317.
- Djobo, J. N. Y., Stephan, D., Elimbi, A. 2020. Setting and hardening behavior of volcanic ash phosphate cement. *Journal of Building Engineering* 31, 101427.
- Djon Li Ndjock, I.B., Baenla, J., Mbah, B.J.B., Elimbi, A., Cyr, M., 2020. Amorphous phase of volcanic and microstructure of cement product obtained from phosphoric acid activation. *Applied Sciences* 2 (4), 1–10.
- Djon Li Ndjock, B.I., Elimbi, A., Cyr, M., 2017. Rational utilization of volcanic ashes based on factors affecting their alkaline activation. *Journal of Non-Crystalline Solids* 463, 31–39.
- Djouka-Fonkwé, M.L., Schulz, B., Schüssler, U., Tchouankoué, J.-P., Nzolang, C., 2007. Geochemistry of the Bafoussam Pan-African I-and S-type granitoids in western Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 50, 148–167.
- Dron, R., Brivot, F., 1977. Bases minéralogiques de sélection des pouzzolanes. *Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées* 93, 61–65.
- Dumort, J.C., 1968. Cartes géologiques de reconnaissance à l'échelle de 1/500 000. République Fédérale du Cameroun, Douala-Ouest, BRGM, Direction des Mines et de la Géologie, 68 p.
- 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 Edinburgh, 347 pp.
- Duzgoren-Aydin, N.S., Aydin, A., 2009. Distribution of rare earth elements and oxyhydroxides phases within a weathered felsic igneous profile in Hong Kong. *Journal of Asian Earth Sciences* 34, 1–9.
- Eby, N.G., 1990. The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos* 26 (1-2), 115–134.

- Enang, R.K., Mees, F., Yerima, B.P.K., Van Ranst, E., 2021. Iddingsitisation of olivine and kaolinitisation of biotite in two contrasting tephra-derived soils along the Cameroon Volcanic Line (CVL). *Soil Research* 59 (3), 276–286.
- Etame, J., Gerard, M., Suh, C.E., Bilong, P., 2009. Halloysite neoformation during the weathering of nephelinitic rocks under humid tropical conditions at Mt Etinde, Cameroon. *Geoderma* 154 (1–2), 59–68.
- Farmer, G.L., 2003. Continental basaltic rocks. In: Rudnick, R.L., Editors: Holland, D., Turekian, K.K. (Eds.), *Treatise on Geochemistry*, 3. 659, 85–121.
- Fedo, M.C., Eriksson, A.K., Blenkinsop, G.T., 1995. Geologic history of the Archean Buhwa Greenstone Belt and surrounding granite-gneiss terrane, Zimbabwe, with implications for the evolution of the Limpopo Belt. *Canadian Journal of Earth Sciences* 32 (11), 1977–1990.
- Fisher, R.V., 1966. Rocks composed of volcanic fragments and their classification. *Earth Science Review*, vol. 1, pp.287-298.
- 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.
- Fitton, J, G., James, D., Leeman, W.S., 1991. Basic Magmatism associated with late Cenozoic extension in the western United States: Compositional variation in space and time. *Journal of Geophysical Research* 96, 13693–13711.
- 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.
- Frey, F.A., Green, D.H., Roy, S.D., 1978. Integrated models of basalt petrogenesis: a study of quartz tholeiites to olivine melilitites from southeastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological techniques. *Journal of Petrology* 19, 463–513.
- Gainé, M., 1973. Une méthode d'induration des échantillons du sol à l'aide de vernis. *Cahiers-ORSTOM, Pédologie* 11, 265-267.
- Gazel, J., 1956. Carte géologique du Cameroun, deux feuilles au 1/1 000 000. Bulletin n° 2 de la Direction Minière et Géologique du Cameroun, Imprimerie Nationale, Paris.
- Giraldo, C., Tobón, J.I., Restrepo Baena, O.J., 2012. Ultramarine blue pigment: A non-conventional pozzolan. *Construction and Building Materials* 36, 305–310.
- Grimmer C.J., Greiling, O. R., 2012. Serpentinites and low-K island arc meta-volcanic rocks in the Lower Köli Nappe of the central Scandinavian Caledonides: Late Cambrian-early Ordovician serpentinite mud. *Tectonophysics* 541, 19–30.

- Gouhier, J., Nougier, J., Nougier, D., 1974. Contribution à l'étude volcanique du Cameroun ("ligne du Cameroun-Adamaoua"). *Annales de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé, Cameroun*, 17: 3-48.
- Hart, W.K., Wolde, G.C., Walter, R.C., Mertzman, S.A., 1989. Basaltic volcanism in Ethiopia: constraints on continental rifting and mantle interactions. *Journal of Geophysical Research* 94 (B6), 7731–7748.
- Hiet, M.S., Revenaugh, J., 2010. Relationship between the viscosity and topography of the ultralow-velocity zone near the core-mantle boundary. *Earth and Planetary Science Letters* 299 (3-4), 382–386.
- Hofmann, A.W., Jochum, K.P., Seufert, M., White, W.M., 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution. *Earth and Planetary Science Letters* 79 (1-2), 33-45.
- Hossain, K.M.A., 2005. Volcanic ash and pumice as cement additives: pozzolanic, alkali-silica reaction and autoclave expansion characteristics. *Cement and Concrete Research* 35 (6), 1141–1144.
- 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 Maboutou anorogenic complexes, North Cameroon; mantle origin with evidence for crustal contamination. *Earth Planetary Science Letters* 61: 97-112.
- Juimo, W.T., Cherrad L.A., Oliveira L., 2016. Characterisation of natural pozzolan of Djoungo (Cameroon) as lightweight aggregate for lightweight concrete. *International Journal of Geomatic*; 11 (27), 2782–2789.
- Jung, S., Masberg, P., 1998. Major and trace element systematics and isotope geochemistry of Cenozoic mafic volcanic from the Vogelsberg (Central Germany): constraints on the origin of continental alkaline and tholeiitic basalts and their mantle sources. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 86, 151–177.
- 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* 333, 155–162.
- Kaid, N., Cyr, M., Julien, S., Khelafi, H., 2009. Durability of concrete containing a natural pozzolan as defined by a performance-based approach. *Construction and Building Materials* 23 (12), 3457–3467.

- 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., Njonfang, E., Chazot, G., Tchoua, F., 2007. Geochemistry and geochronology of mafic rocks from Bamenda Mountains (Cameroon): source composition and crustal contamination along the Cameroon Volcanic Line. *Comptes Rendus Geoscience* 340 (12), 850-857.
- Kamgang, P., Njonfang, E., Nono, A., Dedzo, M.G., 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., Tchoumeignie, N.N.B., Tchoua, F., 2013. Mantle sources and magma evolution beneath the Cameroon Volcanic Line: geochemistry of mafic rocks from the Bamenda Mountains (NW Cameroon). *Gondwana Research* 24, 727–741.
- Kelemen, P.B., Kikawa, E., Miller, D.J., 2007. Leg 209 summary: processes in a 20 km thick conductive boundary layer beneath the Mid-Atlantic Ridge, 14-16N, Proceedings of the Ocean Drilling Program. *Scientific Results* 209, 1–33.
- Khan, M.I., Alhozaimy, A.M., 2011. Properties of natural pozzolan and its potential utilization in environmental friendly concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering* 38 (1), 71–78.
- Koch, W.F., Douglas, W.A., Nyblade, A.A., Shore, J.P., Tibi, R., Ateba, B., Tabod, C.T., Nnange, J.M., 2012. Upper-Mantle anisotropy beneath the Cameroon Volcanic Line and Congo Craton from shear wave splitting measurements. *Geophysical Journal International* 190 (1), 75–86.
- Koshino, M., 2001. Fertilizers with new functions. *Environmental Conservation and Innovative Fertilization Technologies*, p. 116.
- 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.
- Langmann, B., Zakšek, K., Hort, M., Duggen, S., 2010. Volcanic ash as fertiliser for the surface ocean. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10 (8), 3891–3899.
- Lasserre, M., 1966. Confirmation de l'existence de granites Tertiaires au Cameroun (Afrique équatoriale). *Bulletin du Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, 3, 141-148.
- Lea, F.M., 1970. The chemistry of cement and concrete, Ed, Arnold, 3th Ed. Glasgow, pp. 414–453.

- Lee, D.C., Halliday, A.N., Davies, G.R., Essene, E.J., Fitton, G.J., Temdjim, R., 1996. Melt enrichment of shallow depleted mantle: a detailed petrological, trace element and isotopic study of mantle-derived xenoliths and megacrysts from the Cameroon Line. *Journal of Petrology* 37, 415–441.
- Lemdjou, B.Y., Zhang, D., Tchouankoue, J.P., Hu, J., Tchuimegnie, N.B.N., Soh, T.L., Yuan, Y., 2020. Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic compositions, and K-Ar ages of transitional and alkaline plateau basalts from the eastern edge of the West Cameroon Highlands (Cameroon Volcanic Line). *Lithos* 358, 105414.
- Lemougna, P.N., MacKenzie, K.J., Melo, U.C., 2011. Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash. *Ceramics Internationals* 37 (8), 3011–3018.
- Lemougna, P.N., Melo, U.C., Delplancke, M.-P., Rahier, H., 2014. Influence of the chemical and mineralogical composition on the reactivity of volcanic ashes during alkali activation. *Ceramics Internationals* 40 (1), 811–820.
- Lemougna, P.N., Wanga, K.T., Tanga, Q., Nzeukou, A.N., Ndigui, B., Melo, C.U.F., Xue-Mina, C., 2018. Review on the use of volcanic ashes for engineering applications. *Resources, Conservation and Recycling* 137, 177–190.
- Lemougna, P.N., Yliniemi, J., Ismailov, A., Levanen, E., Tanskanen, P., Kinnunen, P., Roning, J., Illikainen, M., 2019. Recycling lithium mine tailings in the production of low temperature (700-900 C) ceramics: Effect of ladle slag and sodium compounds on the processing and final properties. *Minerals Engineering* 141, 105843.
- Lemougna, P.N., Adediran, A., Yliniemi, J., Ismailov, A., Levanen, E., Tanskanen, P., Kinnunen, P., Roning, J., Illikainen, M., 2020. Thermal stability of one-part metakaolin geopolymer composites containing high volume of spodumene tailings and glass wool. *Cement and Concrete Composites* 114, 103792.
- Leonelli, C., Kamseu E., Boccaccini D. N., Melo, U. C., Rizzuti A., Billong, N., Miselli, P., 2007. Volcanic ash as alternative raw materials for traditional vitrified ceramic products. *Advances in Applied Ceramics* 106 (3), 135–141.
- Lerouge, C., Cocherie, A., Toteu, S. F., Penaye, J., Milési, J. P., Tchameni, R., Nsifa, E. N., Fanning, M. C., Deloule, E., (2006). Shrimp U-Pb zircon age evidence for Paleoproterozoic sedimentation and 2,05 Ga syntectonic plutonism in the Nyong Group, South Western Cameroon: consequences for the Eburnean-Transamazonian belt of NE Brazil and Central Africa. *Journal of African Earth Sciences* 44, 413–427.
- Louis. P., 1978. Gravimetrie et géologie en Afrique occidentale et centrale. Mem. B.R.G.M., 91: 53-61.

- Madejová, J. 2003. FTIR techniques in clay mineral studies. *Vibrational Spectroscopy* 31,1–10
- Maragkos, I., Giannopoulou, I.P., Panias, D., 2009. Synthesis of ferronikel slag-based geopolymers. *Minerals Engineering* 22, 196–203.
- Marzoli, A., Piccirillo, E. M., Renne, P. R., Bellieni, G., Iacumin, M., Nyobe, J. B., Tongwa, A. T., 2000. The Cameroon Volcanic Line Revisited: Petrogenesis of continental basaltic magmas from lithospheric and asthenospheric mantle Sources. *Journal of Petrology* 41, 87–1096.
- Massazza, F., 1993. Pozzolanic cements. *Cement and Concrete composites* 15 (4), 185-214.
- Mbowou, N.I.F., Owona, S., Tchamabe, C.B., Lissom, J., Lanson, B., Ekodeck, G.E., 2020. Mineralogy and geochemistry of pozzolans from the Tombel Plain, Bamileke Plateau, and Noun Plain monogenetic volcanoes in the central part of the Cameroon Volcanic Line. *Acta Geochimica* 39 (6), 830–861.
- Mendoza, O., Tobón, J.I., 2013. An alternative thermal method for identification of pozzolanic activity in Ca(OH)₂/pozzolan pastes. *Journal of Thermal Analysis Calorimetry* 114 (2), 589–596.
- Meukam P., 2004. Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments. Thèse 3^e cycle, Université de Yaoundé I, 140 p.
- Millet, R., Hommey, Brivot, F., 1977. Dosage de la phase vitreuse dans les matériaux pouzzolaniques. *Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées* 92, 101–104.
- Moreau, C., Regnault, J.-M., Deruelle, B., Robineau, B., 1987. A new tectonic model for the Cameroon Line, Central Africa. *Tectonophysics*, 141 (4), 317-334.
- Moundi, A., Wandji, P., Bardintzeff, J.-M., Menard, J.-J., Okomo, A.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 Géoscience* 339, 396–406.
- 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* 322, 831–837.
- Murat, M., Bachiorrini, A., 1982. Corrélation entre l'état d'amorphisme et et l'hydraulicité du MétaKaolin. *Bulletin de Minéralogie* 105, 543–555.
- Ndigui, B., Melo, C. U., Njopwouo, D., Louvet, F., Bonnet, J.P., 2013. Physicochemical characteristics of some Cameroonian pozzolans for use in sustainable cement like materials. *Scientific Research Publishing* 4, 14–21.

- Nesbitt, H.W., Wilson, R.E., 1992. Recent chemical weathering of basalts. *American Journal of Science* 292 (10), 740–777.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299, 715–717.
- 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., 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, 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.
- Njombie Wagsong, P.M., Temdjim, R., Tchoume, N. N. B., Foley, S.F., Mebara, O. F.X., 2021. Pyroxenite in the mantle source of basanites at the Youkou maar, Adamawa Volcanic Massif (Cameroon Volcanic Line, West Africa). *Chemical Geology* 583, 120478.
- Njombie Wagsong, P.M., Temdjim, R., Foley, S.F., 2018. Petrology of spinel lherzolite xenoliths from Youkou volcano, Adamawa Massif, Cameroon Volcanic Line: mineralogical and geochemical fingerprints of sub-rift mantle processes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 173 (2), 1–20.
- Njome, M.S., Suh, C.E., 2005. Tectonic evolution of the Tombel graben basement, southwestern Cameroon. *Episodes* 28 (1), 31–41.
- Njome, M.S., Suh, C.E., Sparks, J.S.R., Ayonghe, N.S., Fitton, G.J., 2008. The Mount Cameroon 1959 compound lava flow field: morphology, petrography and geochemistry. *Swiss Journal of Geosciences* 101, 85–98.
- Njonfang, E., Kamgang, P., Ghogomu, T.R., Tchoua, F.M., 1992. The geochemical characteristics of some plutonic volcanic complexes along the southern part of the Cameroon Line. *Journal of African Earth Sciences* 14, 255–266.
- 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.
- Nkouandou, O. F., Ngounouno, I., Déruelle, B., Ohnenstetter, D., Montigny, R., Demaiffe, D., 2008. Petrology of the Mio-Pliocene volcanism to the north and east of Ngaoundéré (Adamawa, Cameroon). *Comptes Rendus Geoscience* 340, 28–37.

- Nkouandou, O.F., Temdjim, R., 2011. Petrology of spinel lherzolite xenoliths and host basaltic lava from Ngao voglar volcano, Adamawa Massif (Cameroon volcanic line, West Africa): equilibrium conditions and mantle characteristics. *Journal of Geoscience* 56, 375–387,
- Nkouathio, D.G., Wandji P., Bardintzeff J.-M., Tematio P., Kagou Dongmo A., Tchoua F., 2008. Utilisation des roches volcaniques pour la reminéralisation des sols ferrallitiques des régions tropicales, Cas des pyroclastites basaltiques du graben de Tombel (Ligne volcanique du Cameroun). *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles* 91,1, 1–14.
- 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, 355p.
- Nnange, J.M., Djomani P.Y.H., Fairhead, J.D., Ebinger, C., 2001. Determination of the isostatic compensation mechanism of the region of the Adamawa dome, West Central Africa using the admittance technique of gravity data. *African Journal of Science and Technology* 1(4).
- Nzenti, J.P., Badibanga, K.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.
- Nzeukou N.A., 2014. Minéralogie, géochimie et propriétés céramiques des argiles alluviales de la Sanaga entre Nanga-Eboko et Ebebda (region du Centre-Cameroun). Thèse Doctorat/PhD, Univ. Yaoundé I, 156p.
- Ohba, T., Nakagawa, M., 2002. Minerals in volcanic ash 2: non-magmatic minerals. *Glob Environ. Res.-Engl. Edit.* 6 (2), 53–60.
- Pang, H., Ma, Y., Li G., Chen, J., Zhang, J., Zheng, H., Du, W., 2012. Facile synthesis of porous ZnO-NiO composite micropolyhedrons and their application for high power supercapacitor electrode materials. *Dalton transactions* 41 (43), 13284-13291.
- Panias D., Giannopoulou I., Perraki T., 2007. Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based géopolymères. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 301 (1-3), 246–254.
- Pearce, J.A., 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos* 100, 14–48.
- Pearce, J.A., Baker, E.P., Harvey, K.P., Luff, W.I., 1995. Geochemical evidence for subduction fluxes, mantle melting and fractional crystallization beneath the South Sandwich island arc. *Journal of Petrology* 36 (4), 1073–1109.
- Pichon H., Gaudon P., Benhassaine A., Eterradosi O., 1996. Caractérisation et quantification

de la fraction réactive dans les pouzzolanes volcaniques. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 201, pp.29-38.

- Polat, A., Hofmann, A.W., Rosing, M.T., 2002. Bioninite-like volcanic rocks in the 3,7-3,8 Ga Isua greenstone belt, West Greenland: geochemical evidence for intraoceanic subduction zone processes in the early Earth. *Chemical Geology* 184, 231–254.
- Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., Wong, Y.L., Wong, R., 2001. Rate of pozzolanic reaction of Metakaolin in High-Performance cement pastes. *Cement and Concrete Research* 31, 1301– 1306.
- Poucllet, A., Dongmo, K.A., Bardintzeff, J.-M., Wandji, P., Tagheu, C.P., 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.
- Pougong, E.T., Belibi, B.D.P., Baenla, J., Thamer, A., Tiffo, E., Elimbi, A., 2022. Effects of chemical composition of amorphous phase on the reactivity of phosphoric acid activation of volcanic ashes. *Journal of Non-Crystalline Solids* 575, 121213.
- Pourkhorshidi, A.R., Najimi, M., Parhizkar, F., Jafarpour, B., Hillemeier, B., 2010. Applicability of the standard specifications of ASTM C618 for evaluation of natural pozzolans. *Cement and Concrete Composites* 32 (10), 794–800.
- Proctor, J., Edwards, I.D., Payton, R.W., Nagy, L., 2007. Zonation of forest vegetation and soils of Mount Cameroon, West Africa. *Plant Ecology* 192 (2), 251–269.
- Rasmussen, C., Matsuyama, N., Dahlgren, R.A., Southard, R.J., Brauer, N., 2007. Soil Science Society of America journal 71 (1), 225-223.
- Quantin, P., Badaut, D., Weber, F., 1975. Mise en évidence de minéraux secondaires, argiles et hydroxydes, dans les andosols des Nouvelles-Hébrides, après la déferrification par la méthode de Endredy. *Bulletin du Groupe français des Argiles* 27 (1), 51-67.
- Querol, X., Umaña, J.C., Plana, F., Alastuey, A., Lopez-Soler, A., Medinaceli, A., Domingo, M.J., Garcia-Rojo, E., 2001. Synthesis of zeolites from fly ash at pilot plant scale, Examples of potential applications. *Fuel* 80 (6), 857–865.
- Rajaonarison, E.F., Gacoin, A., Randrianja, R., Ranaivoniarivo, V.G., Bam Haja Nirina Razafindrabe B.H.N., 2017. Effect of scoria on various specific aspects of lightweight concrete, *International Journal of Concrete Structures and Materials* 11(3), 541–555.
- 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.

- Robinson, J.A.C., Wood, B.J., 1998. The depth of the spinel to garnet transition at the peridotites solidus. *Earth Planetary Science Letters* 164, 277–284,
- Rocher, P., 1992. Mémento roches et minéraux industriels, Argiles nobles pour produits céramiques. Rapport BRGM 35743, 48.
- Rollinson, H.R., 1993. Using geochemical data: evolution, presentation, interpretation, Geochemistry series, Longman scientific and technical, New York, p. 352.
- Rudnick, R.L., Gao, S., 2003. Composition of the continental crust. In: Holland H.D. and K.K. Turekian, (eds), *Treatise on Geochemistry* 301, 1–63.
- Sababa, E., Ndjigui, P.-D., Ebah, A.A.E., Bilong, P., 2015. Geochemistry of peridotite xenoliths from the Kumba and Nyos areas (southern part of the Cameroon Volcanic Line): Implications for Au-PGE exploration. *Journal of Geochemical Exploration* 152, 75–90.
- Sabtan, A.A., Shehata, W.M., 2000. Evaluation of engineering properties of scoria in central Harrat Rahat, Saudi Arabia. *Environ. Geol. Eng. Bull.* 59 (3), 219–225.
- Schmidt, C., Laag C., Whitehead, M., Profe, J., Aka, T.F., Hasegawa, T., Kereszturi, G., 2022. The complexities of assessing volcanic hazards along the Cameroon Volcanic Line using spatial distribution of monogenetic volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 427, 107558.
- Segalen, P., 1967. Les sols et la géomorphologie du Cameroun. *Cah. Orstom, sér, Pédol.*, V, 4, 254–277.
- Serra, M.F., Conconi, M.S., Suarez, G., Aglietti, E.F., Rendtorff, N.M., 2015. Volcanic ash as flux in clay based triaxial ceramic materials, effect of the firing temperature in phases and mechanical properties. *Ceramics International* 41 (5), 6169–6177.
- Seyfi, S., Azadmehr, A.R., Gharabaghi, M., Maghsoudi, A., 2015. Usage of Iranian scoria for copper and cadmium removal from aqueous solutions. *J. Cent. South. Univ.* 22 (10), 3760–3769.
- Siddique, R., 2011. Effect of volcanic ash on the properties of cement paste and mortar. *Resour. Conserv. Recycl.* 56 (1), 66–70.
- Sieffermann, G., 1973. Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun : variations pédologiques et minéralogiques du milieu équatorial au milieu tropical. Thèse de Doctorat Université de Strasbourg, 290p.
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, In: Saunders, A.D., Norry, M.J., (Eds.), *Magmatism in Ocean Basins*, Geological Society of London, Special Publications 42, 313–345.

- Suh, C.E., Ayonghe, S.N., Sparks, R.S.J., Annen, C., Fitton, J.G., Nana, R., Luckman, A., 2003. The 1999 and 2000 eruptions of Mount Cameroon: eruption behaviour and petrochemistry of lava. *Bulletin of Volcanology* 65 (4), 267–281.
- Tagne-Kamga, G., 2003. Petrogenesis of the Neoproterozoic Ngondo plutonic complex (Cameroon, west central Africa): a case of late-collisional ferro-potassic magmatism. *Journal of Africa Earth Sciences* 36, 149–171.
- Takamura, T., Koezuka, J. 1965. Infrared evidence of grinding effect on the hydrargillite single crystals. *Nature* 207 (5000), 965-966.
- Takeda, H., Hashimoto, S., Kanie, H., Honda, S., Iwamoto, Y., 2014. Fabrication and characterization of hardened bodies from Japanese volcanic ash using geopolymerization. *Ceramics International* 40 (3), 4071–4076.
- 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.
- Tamura, Y., Ishizuka, O., Stern, R.J., Nichols, A.R.L., Kawabata, H., Hirahara, Y., Chang, Q., Miyazaki, T., Kimura, J.-I., Embley, R.W., Tatsumi, Y., 2014. Mission immiscible: distinct subduction components generate two primary magmas at Pagan volcano, Mariana arc. *Journal of Petrology* 55, 63–101.
- Tchakoute, K.H., 2013. Elaboration et caractérisation de ciments géopolymères à base de scories volcaniques. Thèse Univ. Yaoundé I, 135p.
- Tchakouté, K.H., Elimbi, A., Yanne, E., Djangang, C.N., 2013. Utilisation of volcanic ashes for the production of cements cured at ambient temperature. *Cem Concr Composites* 38, 75–813.
- Tchakouté, K.H., Kong, S., Djobo, Y.J.N., Tchadjie, N.L., Njopwouo, D., 2015. A comparative study of two methods to produce geopolymer composites from volcanic scoria and the role of structural water contained in the volcanic scoria on its reactivity. *Ceramics International* 41, 12568–12577.
- Tchamdjou, J.W.H., Abidi, M.L., Cherradi, T., Pereira de Oliveira, L.A., 2017. Effect of the color of natural pozzolan from volcanic scoria on the rheological properties of Portland cement pastes. *Energy Procedia* 139, 703–709.
- Tchop, L.G., Wokwenmendang, N.P., Ntieche, B., Metang, V., Rake, D.J., Teitchou, M.I., Auwera, V.J., Ekodeck, G.E., Nkoumbou, C., 2020. New data on the genesis and evolution of the primitive magmas of Mount Cameroon: contribution of melt inclusions. *Journal of Geological Research* 2 (4).
- Thompson, R.N., Morrison, M.A., Hendry, G.L., Parry, S.J., 1984. An assessment of the relative roles of crust and mantle in magma genesis: an elemental approach.

Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences 310 (1514), 549–590.

- Tiabou, F.A., Temdjim, R., Wandji, P., Bardintzeff, J.-M., Che, B.V., Tibang, B.E.E., Ngwa, N.C., Mebara, O.X.F., 2018. Baossi-Warack monogenetic volcanoes, Adamawa Plateau, Cameroon: petrography, mineralogy and geochemistry. *Acta Geochimica* 38, 40-67.
- Tchuimegnie, N.N.B., Kamgang, P., Chazot, G., Agranier, A., Bellon, H., Nonnotte, P., 2015. Age, geochemical characteristics and petrogenesis of Cenozoic intraplate alkaline volcanic rocks in the Bafang region, West Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 102, 218–232.
- Toteu, S.F., Schmus V.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 (1-2), 45–73.
- Tchuimegnie, N.N.B., 2016. Pétrologie, géochimie et géochronologie des laves basaltiques de Bafang et ses environs. Thèse Doctorat/PhD, Université de Yaoundé I, 191p.
- Tempier, P., Lasserre, M., 1980. Géochimie des massifs ultimes du Cameroun: rapports entre l'évolution magmatique, l'âge et la position géographique. Comparaison avec les Younger Granites du Nigeria. *Bulléin de la Société de Géologie de France* 2, 203–211.
- Thompson, R.N., Morrison, M.A., Hendry, G.L., Parry, S.J., 1984. An assessment of the relative roles of crust and mantle in magma genesis: an elemental approach. *Philosophical Transactions of the Royal society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences* 310 (1514), 549–590.
- Toteu, S.F., Schmus, V.R.W., 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 (1-2), 45-73.
- Tsalefac, M., Ngoufo, R., Nkwambi, W., Tatsangue, D.E., Lengue, F.B., 2003. Fréquences et quantités des précipitations journalières sur le territoire camerounais. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, Vol, 15. 359-367.
- Ubangoh, R.U., Pacca, I.G., Nyobe, J.B., 1988. Palaeomagnetism of the continental sector of the Cameroon line, West Africa. *Geophys. J. Int.* 135 (2), 362–374.
- Verma, K.S., Oliveira, P.E., Silva, M.P., Moreno, A.J., Amaral, S.W., 2017. Geochemistry of komatiites and basalts from the Rio das Velhas and Pitangui greenstone belts, Sao Francisco Craton, Brazil: Implications for the origin, evolution, and tectonic setting. *Lithos* 284, 560577.
- Vernet, C., Cadoret, G., 1991. Compte-rendus du Colloque « Voies Nouvelles du Béton », Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des bétons à hautes performances pendant les premiers jours. Cachan, France, pp.17.

- Villa, C., Pecina, E.T., Torres, R., Gomez, L., 2010. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. *Construction and Building Materials* 24, 2084-2090.
- Villemant, B., Treuil, M., 1983. Comportement des éléments traces et majeurs dans la série alcaline du Velay; comparaison avec la Chaîne des Puys (Massif Central, France). *Bulletin Minéralogique* 106 (4), 465–486.
- Vincent, P.M., 1970. The evolution of the Tibesti volcanic province, Eastern Sahara. In: Clifford T.M. and Gass L.G. (Editors), *African Magmatism and Tectonics*, Oliver and Boyd, Edinburgh, pp. 301-309.
- Wang, K., Plank, T., Walker, J.D., Smith, E.I., 2002. A mantle melting profile across the basin and range, SW USA. *Journal of Geophysical Research* 107, 1–21.
- Watanabe, T., Ueda, S., Nakao, A., Mvondo Ze, A., Dahlgren, A.R., Funakawa, S., 2023. Disentangling the pedogenic factors controlling active Al and Fe concentrations in soils of the Cameroon volcanic line. *Geoderma*, 430, 116289.
- Weaver, L.B., 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letters* 104 (2-4), 381–397.
- Wembenyui, E.W., Collerson, K.D., Zhao, J.-X., 2020. Evolution of Mount Cameroon volcanism: Geochemistry, mineral chemistry and radiogenic isotopes (Pb, Sr, Nd). *Geoscience Frontiers* 11, 2157–2168.
- 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). *Rev. Bulg. Geol. Soc.* 66, 97–105.
- Wong, H.K.J., Kok, T.S., Wong Y.S., 2020. Cementitious, pozzolanic and filler materials for DSM binders. *Civil Engineering Journal* 6, 402–417.
- Yamgouot, F.N., Deruelle, B., Mbowou, I.B.G., Ngounouno, I., Demaiffe, D., 2016. Geochemistry of the volcanic rocks from Bioko Island (“Cameroon Hot Line”): evidence for plume-lithosphere interaction. *Geoscience Frontiers* 7(5), 743–757.
- Yusoff, Z.M., Ngwenya, B.T., Parsons, I., 2013. Mobility and fractionation of REEs during deep weathering of geochemically contrasting granites in a tropical setting, Malaysia. *Chemical Geology* 349, 71–86.
- Zainoun K., 2005. Caractérisation pétrographique, chimique et minéralogique de scories pyro-métallurgiques (Haute Silésie, Pologne); étude de la mobilisation du zinc et du plomb lors de l’altération supergène. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 249 p.
- Zhang, W., Honaker, R.Q., 2018. Rare earth elements recovery using staged precipitation from a leachate generated from coarse coal refuse. *Int. J. Coal. Geol.* 195, 189–199.

- Zheng, Y., Wang, S., Ouyang, Z., Zou, Y., Liu, J., Li, C., Li, X., Feng, J., 2009. CAS-1 lunar soil simulant. *Adv. Space Res.* 43 (3), 448–454.
- Ziem à Bidias, L.A., Chazot, G., Moundi, A., Nonnotte, P., 2018. Extreme source heterogeneity and complex contamination patterns along the Cameroon Volcanic Line: New geochemical data from the Bamoun plateau. *Comptes Rendus Geoscience* 350, 100–109.

ANNEXES



Research article

Petrological features of volcanic scoriae from the southern part of the Cameroon Volcanic Line and their supplementary cementations application



Estelle Huguette Ngono Onana, Fuh C, Gentry, Paul-Desire Ndjigui*

Department of Earth Sciences, University of Yaounde I, P.O, Box 812, Yaounde, Cameroon

ARTICLE INFO

Keywords:

Scoriae
Mineralogy
Geochemistry
Weathering
Cameroon Volcanic Line

ABSTRACT

Volcanic scoriae from the southern part of the Cameroon Volcanic Line (Limbe, Loum-Tombel, Yamba, Doupe, Njinkouo, Foubot, Manjo-manengolle, Galim and Djoungo) were investigated in order to determine their chemical and mineralogical composition, to deduce their origin and to identify their natural characteristics which may be useful to the cement industry. The mineralogical composition was determined by X-ray Diffractometer (XRD); X-ray Fluorescence (XRF) and Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) instruments provided geochemical data. In order to establish the relationship between the natural characteristics of volcanic scoriae and the properties of cements, the amount of amorphous phases was determined by dissolution using sodium hydroxide solution and the pozzolanic activity by thermogravimetric analysis. Field observations show that these rocks are basalts, basanites, hawaiites and picobasalts. Their mineralogical composition includes augite, olivine, plagioclase, enstatite, feldspars, ettringite, portlandite and Fe-Ti minerals. Overall, they are characterized by high MgO, Fe₂O₃, CaO, and TiO₂ contents. The behavior of major and trace elements suggests that volcanic scoriae have an evolution dominated by partial melting. Besides, high chondrite normalized La/Yb (8 ± 2), Tb/Yb (>1,9) and Dy/Yb (>2) values suggest that the melting corresponds to the garnet lherzolite stability field. The scoriae exhibit good pozzolanic reactivity after 28 days according to their considerable amount of amorphous phases, low CaO contents and their large specific surface area. According to ASTM C618 standard, the sum of SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃ (SAI $\frac{1}{4}$ 65,96–76,34 wt,%); LOI (-0,1–16,99 wt,%), and of CaO, Fe₂O₃ and MgO (CIM $\frac{1}{4}$ 23,43–34,06 wt,%) suggest that those less weathered materials seem appropriate as an additive in cement manufacture. The suitable use of volcanic scoriae in the cement industry closely depends on the petrological features of amorphous phases.

1, Introduction

Pyroclasts, commonly known as tephra, are principally volcanic debris generated by cooling magma after explosive volcanic eruptions (Lemougna et al., 2018). Pyroclastic materials have a wide range of physical qualities and can range in their variable size (Brown and Calder, 2005). These materials proliferate in the world due to the activity of volcanic edifices. Scoriae overflow in Cameroon are found along the “Cameroon Volcanic Line (CVL)”, where they are already the object of artisanal and industrial uses. Many studies have been carried out on the scoriae from CVL. Some of these studies aimed at determining their formation processes in specific locality. Those used in this study come from nine localities: Limbe, Loum-Tombel, Yamba, Doupe, Njinkouo, Foubot, Manjo-Manengolle, Galim and Djoungo on the southern mainland of the Cameroon Volcanic Line (Figure 1), Galim and Djoungo scoriae have already been investigated (Djobo et al., 2014; Tchamdjou et al., 2017). Thus, it is known that the alkaline lavas, along the CVL differentiated into

* Corresponding author.

E-mail address: ndjigui@yahoo.fr (P.-D. Ndjigui).<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08684>

basalts and basanites, show similarities with Ocean Island Basalts (e.g., Tchumegnie et al., 2015; Mbowou et al., 2020; Tchop et al., 2020). In the same vein, the geochemical features of rocks relate them to a mantle source (e.g., Tchamabe et al., 2014; Marzoli et al., 2015; Asaah et al., 2015; Ngwa et al., 2017; Dedzo et al., 2019, 2020; Tiabou et al., 2019). Other studies on scoriae from the Cameroon Volcanic Line have been devoted to the industrial use of scoriae from a specific locality or two at most. This is precisely the case for Galim and Djoungo scoriae whose applications in the production of geopolymers are common (e.g., Ndigui et al., 2013; Djobo et al., 2014; Tchamdjou et al., 2017; Djon Li Ndjock et al., 2020). From the field observations, it emerges that the collected samples have various physical properties (color, shape and granulometry). However, the surface

differentiation of volcanic scoriae originating from the same magma though relationship between their chemical composition and the possible uses in different in colors and facies raises the debate on supergene processes, This cement industry, study aims to determine the origin of volcanic scoriae in order to establish a

Received 26 April 2021; Received in revised form 22 September 2021; Accepted 23 December 2021

2405-8440/© 2021 The Author(s), Published by Elsevier Ltd, This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>),

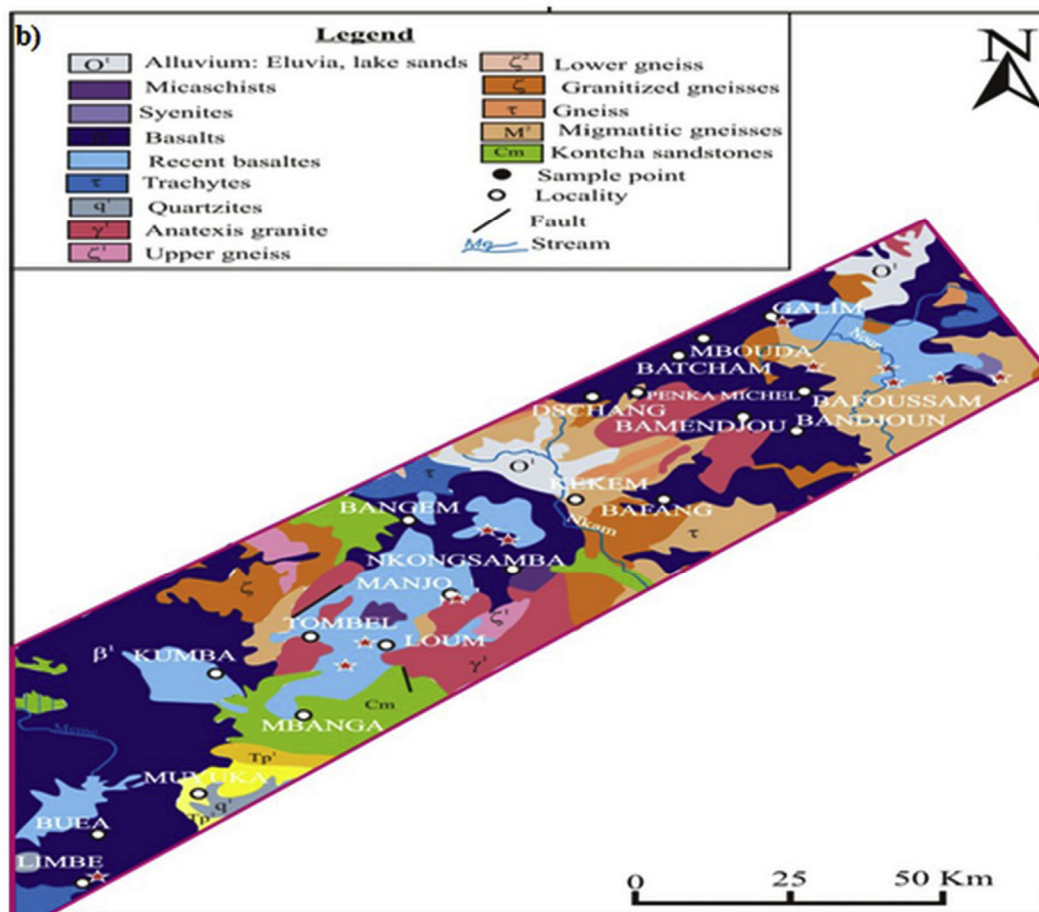
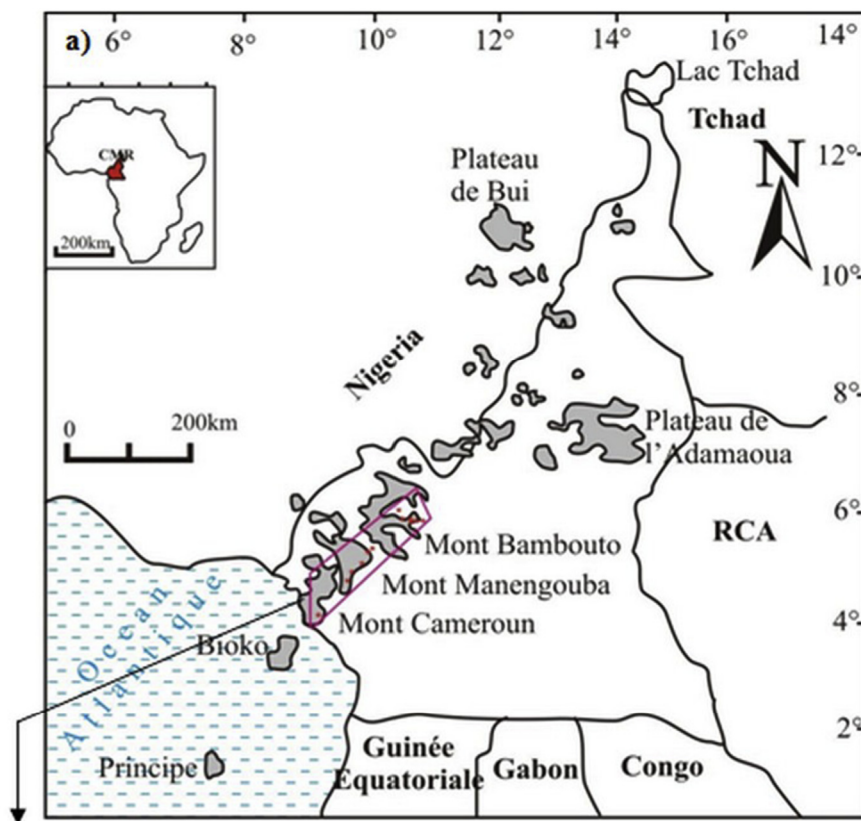


Figure 1, Location of: (a) the study area on the Cameroon Volcanic Line; (b) the sampling points on the Southern part of the Cameroon Volcanic Line (Dumort, 1968),

2. Geological setting

The Cameroon Volcanic Line (CVL) is a N30E alignment of oceanic and continental volcanic mountains, and anorogenic plutonic complexes, extending from Pagalu Island to Lake Chad (Deruelle et al., 2007). It is one of the few magmatic entities across oceanic and continental plates (Sato et al., 1990). The continental sector consists of a succession of large polygenetic volcanoes separated by monogenetic volcanic fields, where Hawaiian, Strombolian and moderate Vulcanian explosive phreatomagmatic eruptions engendered several short lava flows, pyroclastic cones and maar volcanoes (Sato et al., 1990; Nkouathio et al., 2008). These lavas range from basalts and basanites to more evolved felsic such as phonolites, rhyolites and trachytes (Sato et al., 1990; Marzoli et al., 2000; Kamgang et al., 2013; Asaah et al., 2015). The northern part of the CVL comprises the Mandara Mountains and large volcanic plateaus including Bui, Kapsiki and Ngaoundere made of alkaline basanites and basalts below phonolitic and trachytic flows (Marzoli et al., 1999; Nkouandou and Temdjim, 2011; Tiabou et al., 2019; Dedzo et al., 2019). Its southern continental part is marked by a succession of volcanic massifs (Mount Cameroon, Mount Rumpi, Mounts Manengouba, Mounts Bambouto and Mount Oku) (Figure 1a),

The study area is limited by the longitudes 0900 and 1100 east and the latitudes 0400 and 0700 north (Figure 1b), in the Pan-African sector made up of syntectonic granitoids. According to Tamen et al. (2007), Mount Cameroon is one of the horsts of the Kumba. It is made up of basanitic, basaltic and hawaiitic lava flows, and cinder cones (Deruelle et al., 1991). This graben concentrates most of the monogenetic volcanoes along the CVL, and includes more than 100 Quaternary scoria cones with associated lava flows (Nkouathio et al., 2008). In the Bamoun plateau, lavas resting on the old Pan-African basement (granites, gneisses and gabbros) include basaltic and siliceous lavas (trachy-rhyolites, rhyolites and ignimbrites) (Moundi et al., 2007). All the rocks of the study area are predominantly basalts (recent basalts), trachytes and surrounding gneissic formations,

3. Materials and analytical procedures

3.1. Materials

Twenty three samples (MANR, MANJ, MANG, MANF, MMN, MMR, MDR, MDN, MPR, GAL YMB1, YMB2, DP1, DP2, NJK1, NJK2, LTN, LTR, L1N, L1R, L2N, L2R and L2G) were collected from nine localities of the CVL (Figure 1). These samples are composed of angular grains made up of vesicles and their colors are black, gray, brown, yellow, or red,

3.2. Analytical procedures

Samples were powdered at the University of Yaounde I (Cameroon). The mineralogy, using X-Ray Diffractometer (XRD), was done at the Geoscience Laboratories (Sudbury, Canada). The rocks were powdered with an agate mortar and pestle. The analytical instrument (PANalytical X'PERT PRO diffractometer) was equipped with a monochromator, and samples were analyzed with Co radiation at 40 kV and 45 mA. The X'Pert HighScore Plus software was used for the peak identification,

Major element concentrations were determined by X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) using a PANalytical PW2400 spectrometer at the Geological Institute (ISTE) of the University of Lausanne (Switzerland). Major elements were obtained on fused lithium tetraborate glass discs after heating the samples to 1050 C in an oven in order to calculate the Loss On Ignition (LOI). The procedure for obtaining oxide weight percentages is described by

Mbabi et al. (2020). Mg-number was obtained using the formulae $(Mg\# \frac{1}{100} * MgO / (MgO + FeO))$,

Trace element analyses of scoriae were performed using an ICP-MS instrument (Element, Finnigan MAT) at the Geoscience Laboratories (Sudbury, Canada). Powders were digested by acid attack in closed beakers for Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) analysis for lithophile trace element concentrations. The analysis was carried out following the procedure of Doum et al. (2020).

Specific surface area, amount of reactive phase and pozzolanic activity were carried out exclusively on scoriae from Limbe and Galim sites by Djon Li Ndjock et al. (2017). The specific surface areas of powders were calculated from the Blaine model. The pozzolanic activity of volcanic ash was determined through DTG, analysis of dried slips was obtained from mixtures of Ca(OH)₂ and volcanic ash during 7 and 28 days (Mendoza and Tobon, 2013 ; Djon Li Ndjock et al., 2017). The amorphous phase content was determined by dissolution of sodium hydroxide solution according to ASTM C289-94 and French XP P18-594 standards (Djon Li Ndjock et al., 2017),

4. Results

4.1. Mineralogy and nomenclature

The mineralogical composition of the volcanic scoriae comprises orthoclase, plagioclase, augite, enstatite, ilmenite, maghemite, portlandite, ettringite, illite, hematite, kaolinite and accessory olivine, calcite, biotite and amphibole (Figure 2). Data plotted on Na₂O + K₂O vs. SiO₂ diagram reveal the alkaline affinity (Figure 3). Their mineralogical compositions range from basanites (>10% normative olivine), microbasalts and basalts to hawaiites,

4.2. Geochemistry

4.2.1. Major elements

The distribution of major elements is reported in Table 1. The sum of three main oxides (SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃) arise 76 wt.%, The scoriae are characterized by low SiO₂ content (av. 44,35 wt.%), The high Al₂O₃ content is 15,99 wt.% followed by Fe₂O₃ (15,03 wt.%) in microbasalts (Table 1), CaO content oscillates between 6 and 12,91 wt.%, These low CaO values are related to high Al₂O₃ contents (Table 1). The average content of MgO is 7,98 wt.%, TiO₂ contents are constant, about 2,84 wt.%. The Loss On Ignition (LOI) varies and is sometimes below the detection limit due to the presence of oxidized minerals or their amorphous phases; but the LOI attains 16,99 wt.% in DPI sample. The alkali (Na₂O + K₂O) contents range between 0,94 and 8,09 wt.%, The Na₂O/ K₂O > 1 reveals the abundance of Na₂O, Figure 4 highlights a positive slope for SiO₂, CaO, and MgO, and negative one for Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, MnO and P₂O₅. According to several works carried out along the Cameroon Volcanic Line (Yamgouot et al., 2016; Mbowou et al., 2020; Tchop et al., 2020), the sum of SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃ is up to 67,50 wt.% and the alkali contents attain 4,62 wt.% (Table 2). The average contents of major elements are similar along the Cameroon Volcanic Line (Table 2),

4.2.2. Trace elements

Large ion lithophile elements (Sr, Ba and Rb) are the most abundant trace elements in volcanic scoriae, although Rb remains low in all samples (<65 ppm, Table 2). Strontium contents are higher in basanites than in basalts (Table 3) reflecting the cumulative character of plagioclase. Inversely, barium contents are low in basanites (av. 497 ppm) and high in basalts (av. 510 ppm). The least abundant LILE is Cesium, below 1,2 ppm (Table 3),

High field strength elements (Th, U, Zr, Hf, Mo, W and Ta) are lower than LILE, The most abundant elements are Zr (187–474 ppm) and Nb (38–112 ppm), The average contents of hafnium, Ta, Th, Mo, and U are below 10 ppm (Table 3),

The ferromagnesian trace elements (Cr, V, Ni, Zn, Cu, Co and Sc) contents are higher than those of HFSE and lower than LILE, The highest

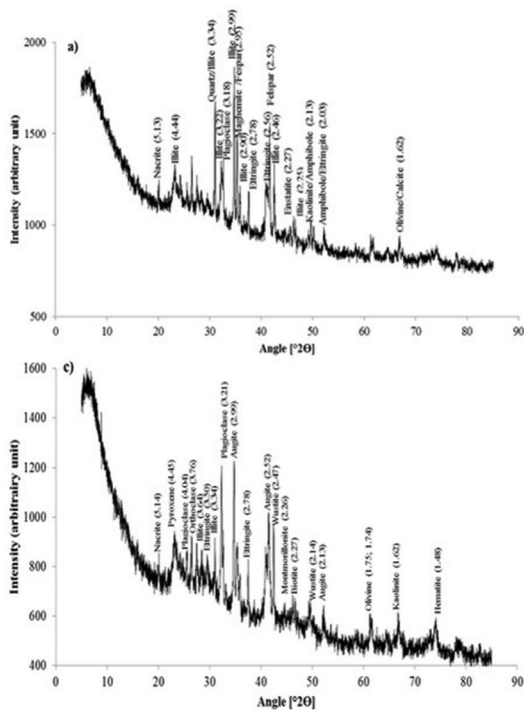
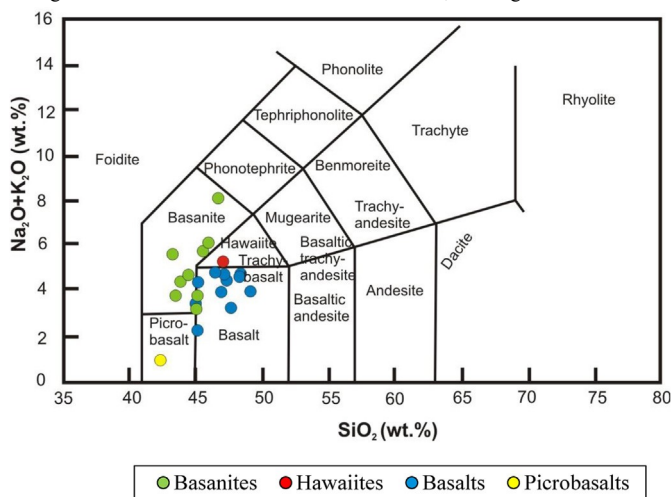


Figure 2, Mineralogical composition of: a) basalts; b) basanites; c) hawaiites; d) picrobasalts,

Figure 3, Scoriae from the Cameroon Volcanic Line in the T,A,S (Total alkali vs, silica), classification diagram (Le Bas et al., 1986),

Cr, V, Ni and Zn values are 293, 336, 213 and 141 ppm, respectively (Table 3), The low Ni and Cr contents suggest their basic nature, The Cu contents range between 46 and 183 ppm, while Co oscillates between 43 and 56 ppm, The Sc contents are below 50 ppm (Table 3),

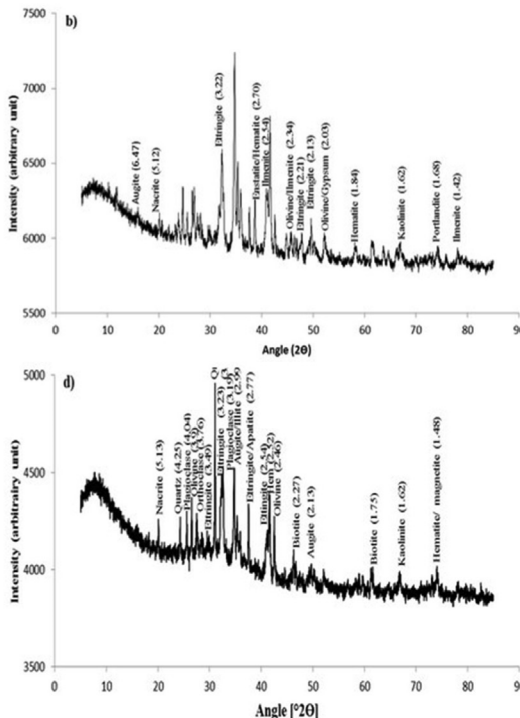
The comparative evaluation of the different elemental groups shows high LILE/HFSE exhibits by Ba/Nb ratio (5–8,72) and low HFSE/HFSE highlights

by Zr/Nb ratio (2,64–4,85), The average contents of several trace elements are variable probably due to the nature of magma or the large number of samples (Tables 2 and 3),

4.2,3, Rare earth elements

The Rare Earth Elements (REE) content ranges between 145,9 and 380,7 ppm (Table 4), with abundant LREE (LREE/HREE ¼ 6,30–13,27), Basanites are more enriched in REE than basalts (Table 4), Quantitative expressions of REE fractionation typically use (La/Yb)_N ratio (Aubert et al., 2001; Yusoff et al., 2013), However, the depletion of HREE relative to LREE most likely indicates the presence of garnet in the source materials (Rollinson, 1993), The (La/Yb)_N ratio varies between 8,34 and 21,93 and highlights the high REE fractionation particularly in basanites (Table 4), It might be due to presence of olivine, orthopyroxene and clinopyroxene, The Th/Ba, Th/Rb and Th/U data are similar to those obtained on oceanic basalts (Lee et al., 1994; Yamgouot et al., 2016), The LREE/HFSE ratio (e.g., La/Nb: 0,32–1,40) is high while that of LILE/LREE (e.g., Ba/La ¼ 5,35–17,44) is low (Table 5),

Normalized REE with roughly subparallel patterns show (i) a decreasing slope from LREE to HREE; (ii) no Ce-anomaly (Ce/Ce* ~ 0,98); and (iii) negative Eu anomaly (Eu/Eu* ~ 0,44) (Table 4, Figure 5), The negative Eu anomaly might be due to the removal of feldspars through fractional crystallization (Duzgoren-Aydin and Aydin, 2009; Yusoff et al., 2013) or to the



498 ppm) and Co (33–57 ppm) in scoriae, They slightly overlap with those of primary magmas; Ni (300–400 ppm), Cr (300–500 ppm) and Co (50–70 ppm) (Frey et al., 1978), The Mg# values (29,67–47,75) are significantly lower than those of primary magmas (e.g, Mg# ¼ 68–72 for whole rock (Frey et al., 1978); Mg# ¼ 75–78 for peridotitic basalts (Tamura et al., 2014), Mg# values below 60 indicate an evolution of the materials since their source formation (Kelemen et al., 2007), thus suggesting its fractional crystallization (Zhang and Honaker, 2018), The

Table 1. Major element composition and element ratios of scoriae from the CVL.

	Basalts										Hawaiites	Picrobasalts	Basanites										Av. n	
	MANF	L2G	L1N	LTN	LTR	YMB1	YMB2	DP-2	MDN	GAL	MANG	DP-1	MANR	MANJ	L1R	L2N	L2R	NJK-1	NJK-2	MDR	MMR	MMN	MPR	24
SiO ₂	43,98	44,78	45,05	48,57	46,91	46,18	47,01	46,06	46,17	39,69	46,80	35,43	41,24	41,00	45,97	44,67	44,46	43,10	44,61	45,51	43,96	43,44	46,33	44,35
Al ₂ O ₃	14,17	12,11	13,65	15,26	15,43	13,97	13,08	13,72	15,35	15,29	14,09	15,99	14,94	14,64	14,01	12,28	12,26	12,92	14,48	14,82	14,38	14,26	15,92	14,22
Fe ₂ O ₃	11,78	12,72	13,13	12,81	12,59	11,99	12,37	12,14	13,26	13,41	12,78	15,03	13,84	13,54	12,61	12,89	12,82	13,06	12,53	12,92	13,71	13,65	12,23	12,95
MgO	8,11	10,18	8,34	6,67	6,48	7,54	10,17	9,06	7,51	7,13	8,22	6,93	7,87	7,59	6,76	9,65	9,40	11,05	7,25	7,55	7,86	7,61	4,62	7,98
K ₂ O	1,04	0,45	1,31	0,92	1,07	1,46	1,46	1,42	1,35	0,74	1,67	0,27	0,84	1,44	1,21	1,13	0,82	1,63	1,70	1,53	1,26	0,74	2,22	1,20
Na ₂ O	2,13	3,03	3,10	2,99	3,58	3,01	3,23	2,96	3,58	1,28	3,48	0,57	2,79	2,61	2,65	2,41	2,81	4,00	4,22	4,28	3,39	3,87	5,87	3,12
CaO	7,99	12,61	11,59	8,22	8,29	8,31	9,64	8,91	8,95	6,23	8,94	4,70	9,13	8,69	10,57	12,91	12,82	9,95	9,02	9,24	10,03	9,95	7,97	9,33
TiO ₂	2,40	2,78	3,01	2,78	2,76	2,46	2,47	2,36	2,78	2,96	2,81	3,25	3,12	3,06	3,07	2,89	2,89	2,83	2,68	2,73	3,22	3,20	3,01	2,85
P ₂ O ₅	0,46	0,40	0,59	0,41	0,47	0,55	0,51	0,55	0,61	0,52	0,60	0,70	0,71	0,70	0,49	0,42	0,41	0,64	0,62	0,55	0,84	0,85	0,89	0,59
MnO	0,18	0,20	0,20	0,17	0,17	0,20	0,19	0,20	0,20	0,22	0,19	0,22	0,21	0,21	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,20	0,21	0,20
LOI	7,53	0,63	-0,10	1,13	2,06	4,14	-0,33	2,34	0,14	12,53	0,23	16,99	5,31	6,41	2,28	0,38	0,84	0,41	2,59	0,45	1,08	2,01	0,64	3,03
Total	99,77	99,89	99,87	99,93	99,81	99,81	99,80	99,72	99,90	100	99,81	100	100	99,89	99,81	99,83	99,73	99,79	99,90	99,78	99,94	99,78	99,91	99,82
Mg#	43,35	47,07	41,38	36,66	36,39	41,14	47,75	45,34	38,63	37,14	41,68	33,88	38,72	38,38	37,33	45,41	44,9	48,46	39,14	39,37	38,92	38,26	29,57	40,39
(i)	3,17	3,48	4,41	3,91	4,65	4,47	4,69	4,38	4,83	2,02	5,15	0,94	3,63	4,05	3,86	3,54	3,63	5,63	5,92	5,81	4,65	4,61	8,09	4,32
(ii)	66,26	69,61	71,83	76,64	72,14	72,46	71,92	74,78	68,39	73,67	66,45	64,21	69,18	72,59	69,84	69,54	68,18	71,62	73,25	72,05	71,55	74,48	71,48	71,52
(iii)	27,88	35,51	33,06	27,70	27,36	27,84	32,18	30,11	29,72	26,77	35,81	35,72	30,84	29,82	29,94	35,45	35,04	34,04	28,78	29,71	31,60	31,21	24,82	30,26

(iv)	0,56	1,04	0,85	0,54	0,54	0,59	0,74	0,65	0,58	0,41	0,63	0,29	0,61	0,59	0,75	1,05	1,04	0,77	0,62	0,62	0,70	0,70	0,50	0,66
CIA	63,52	53,66	54,01	58,47	54,39	54,87	51,72	54,88	53,62	75,30	51,51	88,06	59,68	59,63	58,27	57,89	54,74	46,39	47,93	48,49	53,45	51,30	42,29	-
CIW	66,91	54,84	57,23	60,80	56,71	58,52	55,17	58,48	56,58	78,40	55,17	89,50	61,94	63,03	61,64	60,67	57,01	49,54	51,05	51,28	56,32	52,83	45,18	-

Av.: average; (i): Na₂O þ K₂O; (ii): SiO₂ þ Al₂O₃ þ Fe₂O₃ (SAI); (iii): CaO þ Fe₂O₃ þ MgO (CIM); (iv): CaO/Al₂O₃,

CIA (%) $\frac{1}{4}$ [Al₂O₃/(Al₂O₃ þ CaO þ Na₂O þ K₂O)] * 100 from [Nesbitt and Young \(1984\)](#), CIW (%):

[Al₂O₃/(Al₂O₃ þ CaO þ Na₂O)] from [Harmois \(1988\)](#),

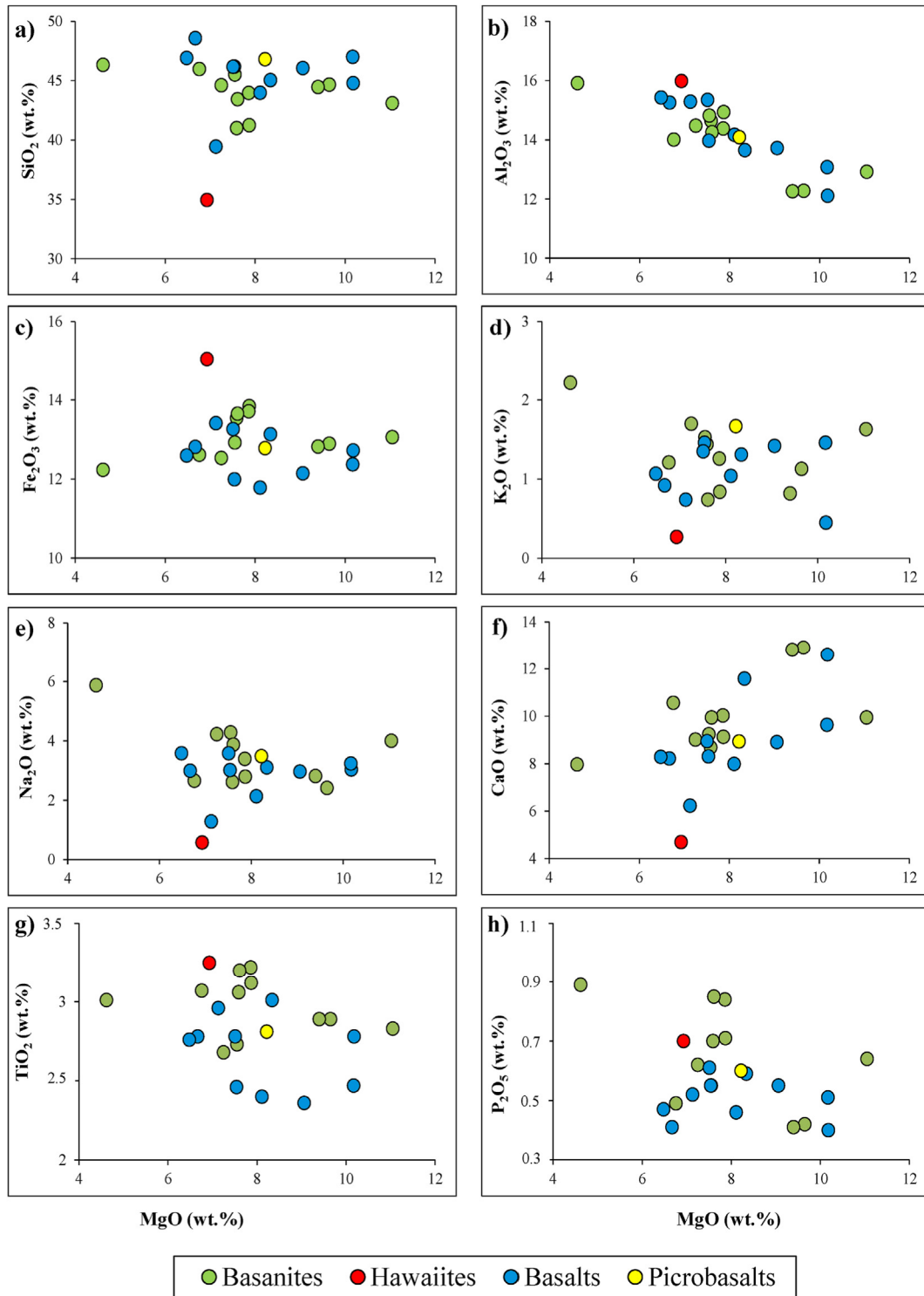


Figure 4, Binary diagrams of MgO vs, selected major elements: a) MgO (wt,%) vs, SiO₂ (wt,%) ; b) MgO (wt,%) vs, Al₂O₃ (wt,%) ; c) MgO (wt,%) vs, Fe₂O₃ (wt,%) ; d) MgO (wt,%) vs, K₂O (wt,%) ; e) MgO (wt,%) vs, Na₂O (wt,%) ; f) MgO (wt,%) vs, CaO (wt,%) ; g) MgO (wt,%) vs, TiO₂ (wt,%) ; h) MgO (wt,%) vs, P₂O₅ (wt,%)

differentiation process can be demonstrated by the variable ratios of some incompatible residual elements (e.g., La/Yb \approx 1,28⁻31; Ce/Zr \approx 0,16₋0,60; and Th/Nb \approx 0,06₋0,16; Table 5) as these ratios are supposed to remain unchanged during fractional crystallization (e.g., Kamgang et al., 2010; Asaah et al., 2015),

The diagrams Al₂O₃ and Na₂O vs, MgO highlight the fractionation of olivine (Figure 4) and clinopyroxene as well as the positive trends of selected trace elements (Ni, Cr and Co) vs, MgO (Figure 6). The behavior of Fe₂O₃, TiO₂ and MgO confirms the crystallization of Fe⁻Ti minerals during the evolution of the magma, Rubidium is the LILE which slightly varies with increasing MgO while Ba, Yb, Ta and La exhibit a negative correlation (Figure 6). Moreover, the

constant decrease in V, Ti, Zr and P_2O_5 along the fractionation index reveals that the separation of Fe-minerals, Ti-minerals, zircon and apatite might control the variation of V, Ti, Zr and P (Ziem et al., 2018). The fractionation of apatite and Fe-Mg minerals such as olivine and clinopyroxene constitute the first stage of

6
E.H, Ngono Onana et al.

Table 2. Average contents of scoriae from Cameroon Volcanic Line.

SiO ₂	43,97	45,46	44,38	44,35
Al ₂ O ₃	12,93	14,1	14,02	14,22
Fe ₂ O ₃	12,85	7,95	13,31	12,95
MgO	8,96	8,74	11,19	7,98
K ₂ O	1,51	1,26	1,52	1,20
	3,07	3,02	3,1	3,12
Na ₂ O				
CaO	10,02	10,06	11,24	9,33
	3,15	3,01	3,28	2,85
TiO ₂				
	0,88	0,56	0,71	0,59
P ₂ O ₅				
MnO	0,19	0,19	0,2	0,20
LOI	-	-	-	3,03
Total	97,53	94,35	102,95	99,82
(i)	4,58	4,28	4,62	4,32
(ii)	69,75	67,51	71,71	71,52
(iii)	31,83	26,75	35,74	30,26
(iv)	0,79	0,71	0,8	0,66
Ba	576,38	487,98	501,7	517,42
Sr	951,31	768,42	1171,8	746,4
Rb	35	28,25	45,28	34,45
Cs	0,43	0,32	0,61	0,49
Th	6,25	5,11	8,06	6,08
Zr	324,15	250,47	430,29	278
Nb	74,08	69,59	114,01	74,13
U	1,59	1,31	2,37	1,46
Hf	6,66	5,75	9,12	6,21
Ta	5,29	4,17	6,42	4,41
Cr	395	234,9	412,9	236,39
V	242,77	239	-	226,37

(a) (n ¼ 13) (b) (n ¼ 15) (c) (n ¼ 10) (d) (n ¼ 20)

(a): Yamgouot et al, (2016); (b): Mbowou et al, (2020),
(c): Tchop et al, (2020); (d): This study; (e): LREE/HREE,
(i): Na₂O þ K₂O; (ii): SiO₂ þ Al₂O₃ þ Fe₂O₃ (SAI),
(iii): CaO þ Fe₂O₃ þ MgO (CIM); (iv): CaO/Al₂O₃,

Ce/Ce*: (C_{sample}/C_{chondrite})/(L_{sample}/L_{chondrite})^{1/2}(Pr_{sample}/Pr_{chondrite})^{1/2},

Eu/Eu*: (E_{sample}/E_{chondrite})/(Sm_{sample}/Sm_{chondrite})^{1/2}(Gd_{sample}/Gd_{chondrite})^{1/2},

Heliyon 8 (2022) e08684

differentiation, The values of Ba/La (6,72–12,04, Table 5) associated to those of Y/Nb (0,28–0,69) indicate the last stage of the differentiation process also marked by alkali feldspar crystallization,

The gradual increase in Al₂O₃ during nearly all the differentiation indicates other phases and not only plagioclase during fractional crystallization processes, Moreover, Sr/Ba and Rb/Sr ratios increase with SiO₂, ruling out the fractionation of plagioclase and K-feldspars, The positive correlation between CaO and MgO confirms the presence of high amounts of amorphous phases,

According to Langmuir et al, (1978), the diagrams of the ratio between two strongly incompatible elements vs. the amount of an element or the ratio of two other incompatible elements reveal the processes that affect the petrogenesis of igneous rocks, To assess the mantle source properties of volcanic scoriae, elemental ratios of REE such as La/Sm and Tb/Yb were used, Fractional crystallization and crustal contamination processes have little effect on REE, The correlation of La/Sm vs. La and Tb/Yb vs. Yb (Figure 7a, b) indicate the role of partial melting during fractional crystallization, Moreover, these diagrams underline the probability of source heterogeneity in the genesis of volcanic scoriae,

5.2, Crustal contamination

During the ascension of magma toward the earth's surface several processes occur such as crustal contamination which can affect its composition, Crustal contamination was highlighted on several materials from the Cameroon Volcanic Line (e.g., Marzoli et al., 1999; Kamgang et al., 2013; Tchoumégnie et al., 2015; Ziem et al., 2018; Mbowou et al., 2020), Major and trace elements were used to evaluate the assimilation of the crust, There is enrichment in SiO₂ and LILE (i.e., Rb, Ba and K) and depletion in HFSE (i.e., Nb, Ta and Ti) in continental crustal rocks (Rudnick and Gao, 2003), The studied scoriae are basalts, picobasalts, hawaiites and basanites, whose SiO₂ values range from 39 to 49 wt.%, as well as other volcanic materials from the CVL (43,97–45,46; Table 2), Their mafic character indicates that they were not or less contaminated by siliceous materials during the magma ascent, Niobium is highly depleted in all continental crust rocks (Taylor and McLennan, 1985) and the La/Nb ratio was often used as an indicator of crustal contamination (Ziem et al., 2018), The magmas which have crossed the continental crust are identified by La/Nb > 1,5 and La/Ta > 22, These samples present La/Nb varying between 0,32 and 1,4, and La/Ta between 10,69 and 16,23 (Table 5), and suggest no contamination by the continental crust, The La/Ta value (>30) shows witness of a very low crustal contamination, Moreover, the Nb/Yb and Th/Yb ratios reveal that these materials derived from mid-ocean ridge basalts (MORB), The values of Zr/Nb (2,64–4,85) and Ba/Nb (5,06–8,72, Table 5) ratios are similar to those of Ocean Island Basalts (OIB, Sun and McDonough, 1989), The plot of samples in the MORB-OIB domain (Figure 8) also confirms the absence of crustal contamination, Rollinson (1993) considered the Th-enrichment and Nb-depletion as indicators of crustal contamination; this is not evident in volcanic

scoriae patterns (Figure 9) which also reveal the absence of negative Nb–Ta spike, The positive Ba anomaly and negative K, Sr and Rb anomalies (Figure 9) might be linked to the presence of phlogopite and amphibole, These minerals being unstable at high temperatures in the upper mantle, the high K/Ba, K/Rb and Ba/Rb values indicate the effect of metasomatism, The Nb/Y vs. Rb/Y diagram (Figure 10) allows to appreciate the effect of crustal assimilation compared to fractional crystallization, The high values of Rb/Y and Nb/Y along the fractional crystallization trend reflect the low impact of crustal contamination (Dedzo et al., 2020) which is also explained by Th/La and La/Nb ratios (0,04–0,30 and 0,32–1,40, respectively) lower than continental crust (Th/La ¼ 0,3; La/Nb ¼ 1,5),

5.3, Mantle source and melting

In general, poorly evolved alkaline basalts show relatively constant concentrations of transition elements of the first series (Co ¼ 60–100)

Ba	554,7	305,9	433,9	280	334,3	610,6	561,8	707,2	449,6	859,7	561,5	778,1	511	532,8	432,6	325,7	327,3	587,3	682,3	441,3	455,6	470,4	697	517,42
Sr	621	686,2	897,1	530,8	576,9	773,9	744,9	824,2	732,3	654,1	774,8	355,5	772,9	718,2	846,9	718,7	729	804,4	907,7	721,2	789,9	810,6	1175,9	746,40
Li	7,5	5,4	5,7	4,8	6,6	7,0	6,1	8,4	6,6	9,7	6,6	7,0	7,1	8,9	8,8	4,6	5,8	6,8	9,1	8,3	7,6	7,7	9,2	7,19
Rb	34,52	44,02	33,31	17,69	19,87	38,28	36,31	43,95	34,40	32,12	39,60	10,63	11,19	28,58	28,25	27,3	34,76	40,3	46,12	42,87	33,15	52,69	62,39	34,45
Cs	0,67	0,52	0,47	0,19	0,22	0,43	0,36	0,53	0,4	0,930	0,38	0,26	1,1	0,3	0,43	0,36	0,59	0,462	0,493	0,51	0,32	0,62	0,72	0,49
Th	10,4	4,88	6,70	2,34	2,71	6,87	5,65	10,68	4,95	9,71	5,85	6,22	6,26	6,11	7,39	5,05	4,98	5,32	5,81	4,59	4,78	4,85	7,78	6,08
Zr	237	239	320	187	206	278	219	273	272	284	263	301	343	327	331	245	249	234	280	264	279	283	474	278
Nb	63,59	60,41	80,46	38,59	43,58	78,98	64,63	86,50	65,2	107,38	76,49	90,49	86,07	81,67	77,36	61,97	63,18	78,8	85,33	62,79	68,74	70,12	112,41	74,13
U	1,51	1,28	1,78	0,63	0,75	1,46	1,14	1,83	1,26	2,12	1,4	1,48	1,85	1,58	2	1,38	1,37	1,39	1,45	1,25	1,33	1,34	1,96	1,46
Hf	5,52	5,59	7,13	4,69	5,02	6,14	4,93	5,84	6,17	6,22	5,92	6,58	7,46	7,11	7,32	5,79	5,78	5,13	5,93	6,04	6,15	6,3	10	6,21

Mo	1,78	1,88	3,43	1,39	1,53	3,16	2,21	2,40	2,55	1,03	2,61	0,56	0,69	1,14	2,74	2,52	2,01	2,79	2,59	2,20	2,38	1,04	3,42	2,09
W	0,72	0,55	1,03	0,39	0,46	0,95	0,74	0,98	0,84	0,96	0,89	0,85	0,49	0,69	0,9	0,69	0,65	0,87	0,9	0,77	0,84	0,51	1,09	0,77
Ta	3,61	3,83	4,93	2,32	2,651	4,5	3,72	4,91	3,95	6,16	4,42	5,03	5,21	5,01	4,87	3,95	3,95	4,61	4,88	3,81	4,19	4,3	6,63	4,41
Cr	274	498	288	168	140	223	339	249	144	192	192	257	140	133	290	458	452	293	190	159	169	170	19	236,39
V	208	302	301	196	197	197	212	219	226	201	219	198	176	183	273	336	316	237	203	224	236	190	159	226
Ni	149	180	125	106	90	126	186	162	107	108	125	139	117	107	120	153	149	213	99	112	121	122	38	128
Zn	98	106	117	120	118	117	103	117	126	110	112	129	137	134	116	107	109	109	118	123	121	118	141	117,57
Cu	50,0	130,4	91,5	46,8	57,3	49,8	46,1	54,8	50,9	56,8	52,5	68,9	59,4	84,7	151,1	140,2	183,4	72,9	64,8	78,9	62,8	61,7	41,8	76,41
Co	47,99	56,24	49,54	45,66	43,91	44,72	51,65	49,61	47,7	48,48	47,81	54,56	51,71	48,57	47,24	53,92	53,81	55,07	43,45	47,77	48,12	47,80	33,84	48,66
Sc	24,5	33,8	27,8	20	19,8	21,9	25,1	25,5	20,6	23,7	21,9	28,1	22,1	20,9	26,6	34,6	34,5	23,9	21,2	21,2	24,5	24,5	14,7	24,41

Table 3. Trace element concentrations and element ratios of volcanic scoriae.

	Basalts										Hawaiites	Picrobasalts	Basanites										Av. n	
	MANF	L2G	L1N	LTN	LTR	YMB-1	YMB-2	DP-2	MDN	GAL	MANG	DP-1	MANR	MANJ	L1R	L2N	L2R	NJK-1	NJK-2	MDR	MMR	MMN	MPR	23
	Basalts										Hawaiites	Picrobasalts	Basanites										Av. n	
Y	26,30	22,92	29,54	26,79	27,95	30,06	24,18	31,25	28,76	30,21	28,35	30,62	32,14	30,68	28,23	23,71	24,00	25,37	27,72	27,57	31,68	32,45	36,94	28,58
Ga	19,63	17,45	20,49	20,1	20,06	19,68	17,13	19,55	21,11	20,13	19,33	22,32	21,73	20,57	21,04	17,66	17,54	17,45	19,05	20,59	20,37	19,95	23,37	19,84
Pb	6,95	2,4	3,78	1,63	2,98	4,42	3,26	4,60	3,07	5,52	3,36	3,13	21,22	3,93	3,30	2,93	2,79	3,65	5,06	2,78	1,82	1,41	4,91	4,3
Bc	1,47	1,36	1,79	1,20	1,44	1,78	1,48	1,88	1,83	2,3	1,68	1,71	2,20	1,84	1,66	1,37	1,38	1,55	1,75	1,79	1,97	1,84	2,73	1,74
Cd	0,12	0,07	0,14	0,13	0,14	0,16	0,11	0,14	0,15	0,14	0,14	0,15	0,26	0,28	0,11	0,1	0,09	0,11	0,21	0,11	0,06	0,07	0,15	0,14
Sn	1,97	1,76	2,26	1,76	1,87	1,93	1,58	1,75	2,05	1,78	1,87	1,85	4,14	2,31	2,165	1,95	1,93	1,73	1,76	1,85	2,25	2,09	1,54	2,01
Zr/Nb	3,73	3,96	3,98	4,85	4,73	3,52	3,39	3,16	4,17	2,64	3,44	3,33	3,99	4,00	4,28	3,95	3,94	2,96	3,28	4,21	4,06	4,04	4,22	3,82
Ba/Nb	8,72	5,06	5,39	7,26	7,67	7,73	8,69	8,18	6,90	8,01	7,34	8,60	5,94	6,52	5,59	5,26	5,18	7,44	8,00	7,03	6,63	6,71	6,20	6,96
Av.: average,																								
	MANF	L2G	L1N	LTN	LTR	YMB-1	YMB-2	DP-2	MDN	GAL	MANG	DP-1	MANR	MANJ	L1R	L2N	L2R	NJK-1	NJK-2	MDR	MMR	MMN	MPR	
La	58,6	45,5	63,6	24,8	29,0	62,9	48,2	72,0	47,2	77,5	55,4	64,6	59,2	56,6	61,0	47,5	47,9	52,3	61,1	45	46	46,4	82,4	54,5
Ce	111,40	93,70	127,36	53,28	61,24	118,25	91,48	135,43	92,80	143,73	105,17	120,34	117,63	110,80	122,70	98,60	101,07	99,05	113,84	89,32	91,54	93,02	159,6	106,58

Pr	13,25	11,67	15,49	7,09	7,98	13,81	10,86	15,38	11,35	16,08	12,44	14,54	14,06	13,38	14,74	12,23	12,25	11,70	13,43	10,89	11,25	11,48	19,1	12,80
Nd	51,60	46,59	59,56	31,19	34,26	53,83	42,89	58,47	44,66	60,86	49,02	56,76	55,39	52,67	58,07	48,43	49,00	46,10	51,46	42,73	46,45	47,46	73,4	50,47
Sm	9,43	8,45	10,85	7,12	7,65	9,97	8,14	10,40	8,80	10,69	9,38	10,77	10,31	9,88	10,58	8,75	8,75	8,74	9,45	8,54	9,57	9,84	13,4	9,54
Eu	2,90	2,54	3,21	2,45	2,57	3,07	2,72	3,14	2,80	3,38	2,87	3,62	3,26	3,12	3,14	2,65	2,69	2,88	3,26	2,69	3,10	3,18	4,12	3,02
Gd	7,72	6,83	8,76	7,03	7,31	8,42	6,98	8,58	7,84	8,70	8,09	9,08	9,07	8,55	8,51	7,19	7,13	7,55	8,08	7,57	8,56	8,80	10,9	8,15
Tb	1,05	0,93	1,20	1,01	1,05	1,16	0,96	1,17	1,10	1,19	1,11	1,22	1,23	1,18	1,16	0,97	0,95	1,00	1,11	1,06	1,20	1,26	1,48	1,12
Dy	5,64	4,91	6,40	5,67	5,90	6,31	5,21	6,40	5,98	6,41	6,00	6,63	6,74	6,48	6,12	5,14	5,09	5,47	5,90	5,88	6,70	6,80	7,91	6,02
Ho	1,00	0,89	1,13	1,03	1,04	1,12	0,91	1,17	1,08	1,16	1,06	1,17	1,19	1,16	1,09	0,93	0,92	0,97	1,05	1,06	1,20	1,22	1,37	1,09
Er	2,55	2,26	2,89	2,59	2,67	2,87	2,31	3,01	2,80	2,94	2,71	2,97	3,06	2,95	2,80	2,34	2,35	2,42	2,63	2,70	3,11	3,15	3,42	2,76
Tm	0,32	0,29	0,37	0,34	0,35	0,37	0,29	0,39	0,35	0,39	0,35	0,37	0,39	0,38	0,35	0,30	0,30	0,30	0,34	0,34	0,40	0,42	0,44	0,35

Yb	1,93	1,75	2,23	2,02	2,06	2,29	1,76	2,44	2,16	2,40	2,14	2,27	2,36	2,29	2,12	1,82	1,87	1,80	2,08	2,07	2,45	2,48	2,67	2,15
Lu	0,27	0,25	0,31	0,28	0,29	0,32	0,25	0,35	0,30	0,34	0,30	0,32	0,33	0,32	0,30	0,25	0,26	0,25	0,29	0,29	0,34	0,35	0,37	0,3
REE	267,66	226,56	303,36	145,9	163,37	284,69	222,96	318,33	229,22	335,77	256,04	294,66	284,22	269,76	292,68	237,1	240,53	240,53	274,02	220,14	231,87	235,86	380,7	258,95
LREE	247,18	208,45	280,07	125,93	142,7	261,83	204,29	294,82	207,61	312,24	234,28	270,63	259,85	246,45	270,23	218,16	221,66	220,77	252,54	199,17	207,91	211,38	352	236,96
HREE	20,48	18,11	23,29	19,97	20,67	22,86	18,67	23,51	21,61	23,53	21,76	24,03	24,37	23,31	22,45	18,94	18,87	19,76	21,48	20,97	23,96	24,48	28,7	21,99
a	12,07	11,51	12,02	6,31	6,90	11,45	10,94	12,54	9,61	13,27	10,77	11,26	10,66	10,57	12,04	11,52	11,75	11,17	11,76	9,50	8,68	8,63	12,3	10,75
b	0,97	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,98	0,97	0,99	0,97	0,95	0,99	0,97	0,99	0,99	1,01	0,97	0,96	0,98	0,98	0,97	0,98	0,97	0,98
c	0,44	0,44	0,44	0,43	0,43	0,44	0,45	0,44	0,43	0,45	0,43	0,46	0,43	0,44	0,44	0,44	0,44	0,45	0,46	0,43	0,44	0,43	0,44	0,44
(La/Yb)N	20,63	17,66	19,37	8,34	9,56	18,66	18,6	20,05	14,84	21,94	17,59	19,33	17,04	16,79	19,55	17,73	17,4	19,74	19,96	14,77	12,75	12,71	20,9	17,22
La/Nd	1,07	0,98	1,05	1,13	1,19	1,17	1,12	1,23	1,06	1,27	1,13	1,14	1,07	1,07	0,80	0,98	0,85	0,98	1,07	1,12	1,05	0,99	0,98	1,07

a: LREE/HREE,

b: $Ce/Ce^*: (Ce_{sample}/Ce_{chondrite})/(La_{sample}/La_{chondrite})^{1/2}(Pr_{sample}/Pr_{chondrite})^{1/2}$, c: Eu/Eu^* :

$(Eu_{sample}/Eu_{chondrite})/(Sm_{sample}/Sm_{chondrite})^{1/2}(Gd_{sample}/Gd_{chondrite})^{1/2}$,

Table 5. Some geochemical ratios of volcanic scoriae from the CVL.

	Basalts										Hawaiites	Picrobasalts	Basanites											Av. n ¼ 23	
	MANF	L2G	L1N	L1N	L1R	YMB-1	YMB-2	DP-2	MDN	GAL	MANG	DP-1	MANR	MANJ	L1R	L2N	L2R	NJK-1	NJK-2	MDR	MMR	MMN	MPR		
(La/Yb) _N : (L _{sample} /L _{chondrite})/(Y _{sample} /Y _{chondrite}), Av: average,																									
La/Nb	0,69	0,79	0,76	1,36	1,40	0,80	0,75	0,83	0,72	0,72	0,72	0,71	0,69	0,69	0,32	0,77	0,46	0,58	0,75	1,31	0,65	0,66	0,41	0,77	
La/Sm	6,21	5,43	5,77	5,98	6,47	6,31	5,92	6,92	5,36	7,25	5,91	6,00	5,74	5,73	3,48	5,47	3,79	5,38	5,86	6,14	5,27	4,81	4,72	5,65	
Rb/Sr	0,06	0,06	0,04	0,03	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,05	0,01	0,04	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,07	0,05	0,05	
Rb/Y	1,31	1,92	1,13	0,66	0,71	1,27	1,50	1,41	1,20	1,06	1,40	0,35	0,35	0,93	1,00	1,15	1,45	1,59	1,66	1,55	1,05	1,62	1,69	1,22	
Zr/Nb	3,73	3,96	3,98	4,85	4,73	3,52	3,39	3,16	4,17	2,64	3,44	3,33	3,99	4	4,28	3,95	3,94	2,97	3,28	4,2	4,06	4,04	4,22	3,75	
Ba/Nb	8,72	5,06	5,39	7,26	7,67	7,73	7,69	8,18	6,9	8,01	7,34	8,6	5,94	6,52	5,59	5,26	5,18	7,45	8	7,03	6,63	6,71	6,2	6,98	
Ba/La	9,47	6,72	6,82	11,29	11,53	9,71	11,66	9,82	9,53	11,09	10,14	12,04	8,63	9,41	7,09	6,86	6,83	11,23	11,17	9,81	9,9	10,14	8,46	9,49	
La/Ta	16,2	11,88	12,9	10,69	10,94	13,98	12,96	14,66	11,95	12,58	12,51	12,84	11,36	11,3	12,53	12,03	12,13	11,34	12,52	11,81	10,98	10,79	12,43	12,36	

Th/La	0,10	0,11	0,04	0,04	0,11	0,12	0,15	0,10	0,13	0,10	0,11	0,10	0,11	0,11	0,30	0,11	0,17	0,12	0,09	0,06	0,11	0,11	0,17	0,11
Ce/Zr	0,47	0,41	0,38	0,53	0,55	0,43	0,42	0,50	0,34	0,51	0,40	0,40	0,34	0,34	0,16	0,41	0,25	0,40	0,45	0,60	0,32	0,32	0,20	0,38
Y/Nb	0,41	0,38	0,37	0,69	0,64	0,38	0,37	0,36	0,44	0,28	0,37	0,34	0,37	0,38	0,36	0,38	0,38	0,32	0,32	0,44	0,46	0,46	0,33	0,40
Sr/Ba	1,12	2,24	2,07	1,90	1,73	1,27	1,33	1,17	1,63	0,76	1,38	0,46	1,51	1,35	1,96	2,21	2,23	1,37	1,33	1,63	1,73	1,72	1,69	1,56
Tb/Yb	0,54	0,51	0,57	0,56	0,50	0,51	0,55	0,48	0,51	0,50	0,52	0,54	0,52	0,52	0,57	0,52	0,46	0,58	0,50	0,40	0,58	0,51	0,60	0,52
Zr/Y	9,01	10,43	10,83	6,98	7,37	9,25	9,06	8,74	9,46	9,4	9,28	9,83	10,67	10,66	11,73	10,33	10,38	9,22	101	9,58	8,81	8,72	12,83	9,73
La/Yb	16,2	11,88	12,9	10,69	10,94	13,98	12,96	14,66	11,95	12,58	12,53	12,84	11,36	11,3	12,53	12,03	12,13	11,34	12,52	11,81	10,98	12,43	12,36	
Nb/Y	2,42	2,64	2,72	1,44	1,56	2,63	2,67	2,77	2,27	3,55	2,70	2,96	2,68	2,66	2,74	2,61	2,63	3,11	3,08	2,28	2,17	2,16	3,04	2,59

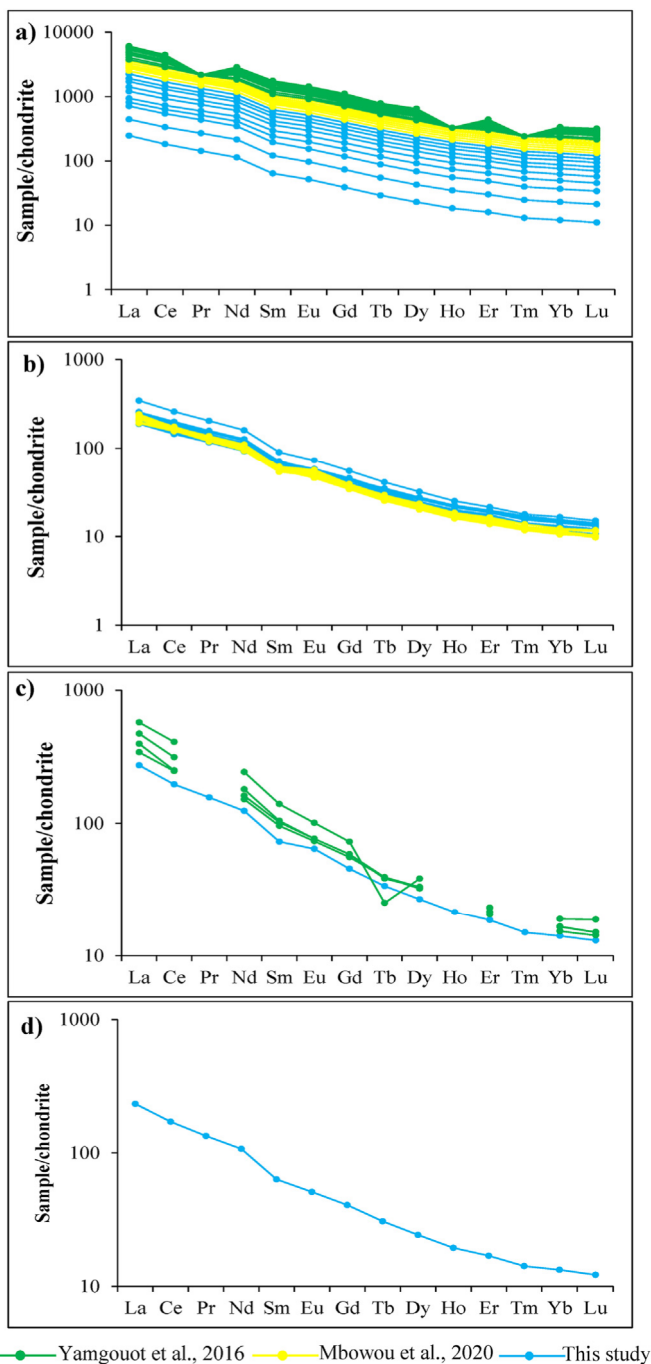


Figure 5. Chondrite-normalized REE distribution patterns (normalizing data from Sun and McDonough, 1989) of: a) basalts; b) basanites; c) hawaiites; d) picobasalts.

ppm; Ni \approx 350–150 ppm; Villemant and Treuil, 1983). These concentrations result from partial melting of a peridotitic mantle source (Kamgang et al., 2013). The trace element modeling indicates (Figure 7b) that partial melting was the main differentiation process compared to fractional crystallization and crustal contamination.

The low values of Rb/Sr (0.01–0.07) could be reached by partial melting involving the typical granulite crustal rocks (Taylor and McLennan, 1985) confirming the Pan-African basement of the southern part of the CVL, Halliday et al. (1990) suggested that the partial melting of granulite rocks would produce magmas with very low Rb/Sr values (Table 5). The low ratio values of

incompatible elements, particularly LILE/HFSE (Rb/Nb \approx 0.12–0.75; Rb/Zr \approx 0.03–0.19; Th/Ta \approx 1.01–2.88; Ba/Nb \approx 5.06–8.72), compared with the high values of the same ratios in the Pan-African basement rocks (Rb/Nb \approx 1.66–6.31; Rb/Zr \approx 0.30–1.02; Th/Ta \approx 22.98–69.08; Ba/Nb \approx 63.13–138.77; Kwékam et al., 2015) confirm the limited possibility that melting occurred in a crustal level. The high LREE/HREE values suggest the mantle-borne liquid might have been enriched in LREE. The major and trace elements help to highlight the origin of alkali basaltic magmas. This suggests that they derive from a garnet-bearing mantle source (Frey et al., 1978; Jung and Masberg, 1998). The high (La/Yb)_N values might result from the high REE-fractionation (Nedelec et al., 1990; Shang et al., 2004). The (La/Yb)_N ratio can state if partial melting occurred in garnet or spinel stability field. Farmer (2003) suggested that lavas with (La/Yb)_N $>$ 5 and (La/Yb)_N $<$ 5 derived from melting in spinel and a garnet lherzolite stability zone, respectively. High (La/Yb)_N of the studied scoriae define a dominantly garnet-bearing mantle zone as the starting point of partial melting of their parent magmas (Figure 11a). High CaO/Al₂O₃ and Zr/Y ratios (0.29–1.05 and 6.98–12.83, respectively, Tables 1 and 5) confirm these features. The presence of garnet would attest that partial melting occurred at a high pressure, above 3 Ga (Robinson and Wood, 1998) and at about 70–80 km depth (Tehuimegnie et al., 2015). The use of Tb/Yb vs La/Sm diagram (Figure 11b) confirms its specific depths beyond 90 km (Fan et al., 2004; Pearce, 2008). According to Wang et al. (2002), garnet-bearing mantle zone is delimited by (Tb/Yb)_N $>$ 1.9, in addition to (La/Yb)_N (Figure 11a).

5.4. Weathering process

The weathering indexes (CIW, CIA and A[−]CN[−]K) have been used by several authors (e.g., Okewale and Coop, 2017, 2018, 2020; Okewale, 2020) to quantify chemical weathering of volcanic materials. In this study, the CIW values (49–90%) are higher than the CIA values (42–88%), indicating the effects of chemical weathering. The CIA values reveal that the weathering is more extensive on basalts (51–75%) than on basanites (42–60%) and highest in hawaiites (88%, Table 1). The high La/Yb ratio also supports the degree of chemical weathering. Therefore, the samples still retain a detectable amount of the labile elements (Ca, Na, and minor K). The CIA predominantly tracks the feldspar dissolution and the concomitant release of Ca, Na and K relative to Aluminum, since Aluminum is typically retained within clay minerals or gibbsite (Babechuk et al., 2014). Gal and DP1 samples with the highest Al₂O₃ content show the lowest NaO and CaO contents; inversely, the highest CaO contents (L2G, L2R and L2N samples) correspond to the lowest Al₂O₃ contents (CaO/Al₂O₃ \approx 0.66; Table 1). The high values of index of alteration (CIA and CIW) confirm the intensity of weathering of feldspars, probably due to the mountain's tropical humid season and the former of slopes. This is favorable to the formation of clay minerals. The A[−]CN[−]K ternary diagram (Nesbitt and Young, 1989) allows to consider the mafic mineral component in weathered rocks. Most samples plot in the CNK domain (Figure 12) and suggest a greater relative mobility and more extensive leaching of Ca, Na and K compared to Mg (Babechuk et al., 2014). In the same diagram, samples plot near the A-CN edge, indicating an expected weathering trend. The volcanic scoriae are slightly weathered into clay minerals and Fe-minerals. On the ternary diagram, samples are closer to A apex which is the ideal field of clay minerals. The imprint of weathering processes on these materials guides various industrial demands,

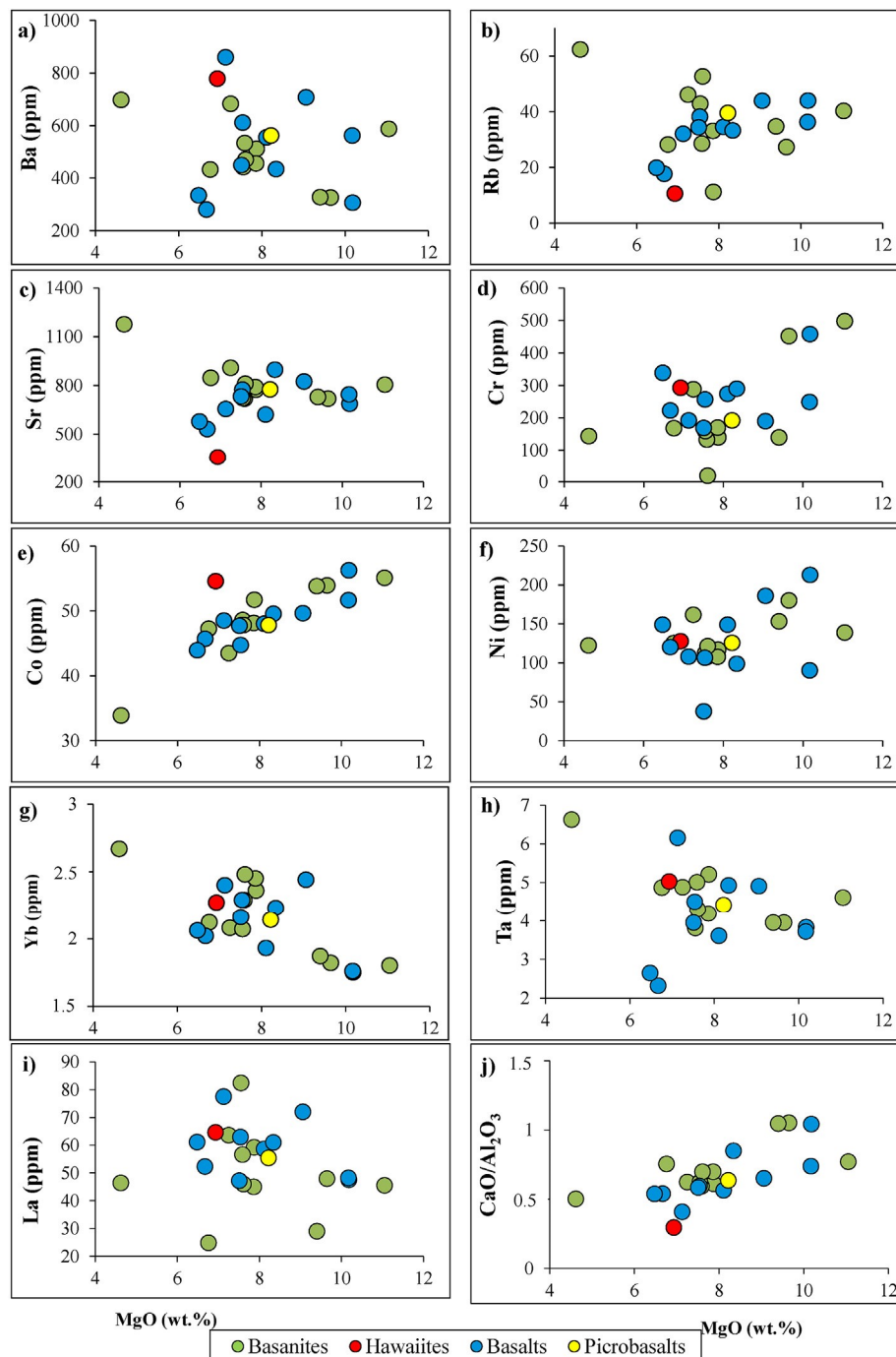


Figure 6, Binary diagrams of MgO vs, selected trace elements (including REE) and CaO/Al₂O₃ ratio: a) MgO (wt,%) vs, Ba (ppm); b) MgO (wt,%) vs, Rb (ppm); c) MgO (wt,%) vs, Sr (ppm); d) MgO (wt,%) vs, Cr (ppm); e) MgO (wt,%) vs, Co (ppm); f) MgO (wt,%) vs, Ni (ppm); g) MgO (wt,%) vs, Yb (ppm); h) MgO (wt,%) vs, Ta (ppm); i) MgO (wt,%) vs, La (ppm); j) MgO (wt,%) vs, CaO/Al₂O₃,

recovery of the studied materials, It relates to the petrological features depending on their formation processes,

5,5, Industrial recovery of volcanic scoriae: influence of chemical composition

The use of materials containing reactive silica such as pozzolans in cement industry is linked to many economic, ecological and performance-related benefits, The accessibility and abundance of volcanic scoriae in CVL justify their uses in several domains, These materials show natural chemical properties favorable for artisanal uses, In the cement industry, they are requested for their pozzolanicity and the reduction of production costs as well as energy expenditure, Pozzolanic activity is an important parameter for the industrial

5,5,1, Interest of chemical composition in cement production

The chemical composition is the first criterion that can orient the usefulness of volcanic scoriae in the cement industry, The chemical composition of pozzolans fluctuates between 45 and 65 wt, % for SiO₂, 15 and 30 wt, % for Al₂O₃ þ Fe₂O₃ and reach 15 wt, % for CaO þ MgO þ alkali (Dron and Brivot, 1977). ASTM C618 (1993) recommends the following compositions for thermally activated or natural pozzolans used as additive in cement (class N): SiO₂ þ Al₂O₃ þ Fe₂O₃: 70 % minimum;

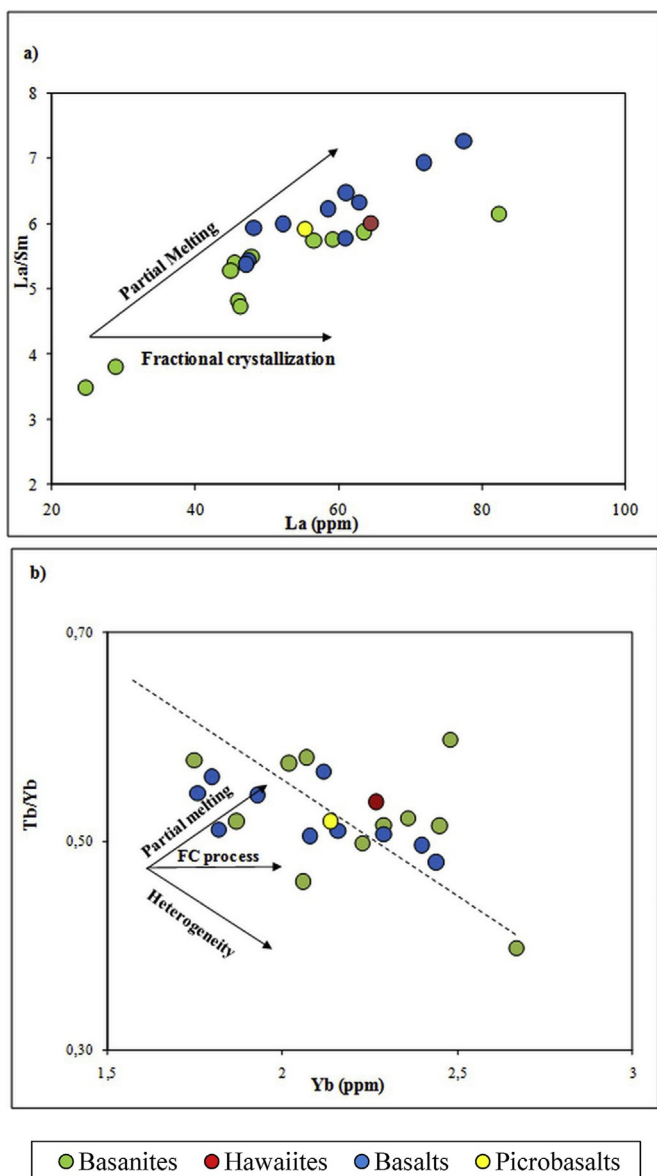


Figure 7. Scoriae from the Cameroon Volcanic Line in: (a) La vs. La/Sm (Blein et al., 2001) and (b) Tb/Yb vs. Yb diagrams (Fan et al., 2004),

Loss On Ignition: 10% maximum, The results show that volcanic ashes from Limbe and Galim areas (Table 6) present similar chemical composition to that of this study, this complies with the specifications of ASTM C 618, According to Djon Li Ndjock et al. (2017), scoriae can be used for geopolymer synthesis or as filler, Ndigui et al. (2013) demonstrate that pozzolans from Djoungo and Foubot areas are suitable for geopolymer due to their high alkali content (Table 6), which is significantly lower than that observed in the present study,

5.5.2. Interest of mineralogical composition in cement production

All scoriae from the CVL have alkali oxides (Na_2O þ K_2O , 4,28–4,58 wt,%) in their chemical make-up, indicating the existence of alkali feldspars. Due to the abundance of scoria cones in many places of the world, various investigations of volcanic scoriae as a cement replacement have been conducted. In addition to the amorphous phases, plagioclase, olivine, clinopyroxene, illite, hematite and kaolinite are found in these materials (Khan and Alhozaimy, 2011; Rajaonarison et al., 2017), This

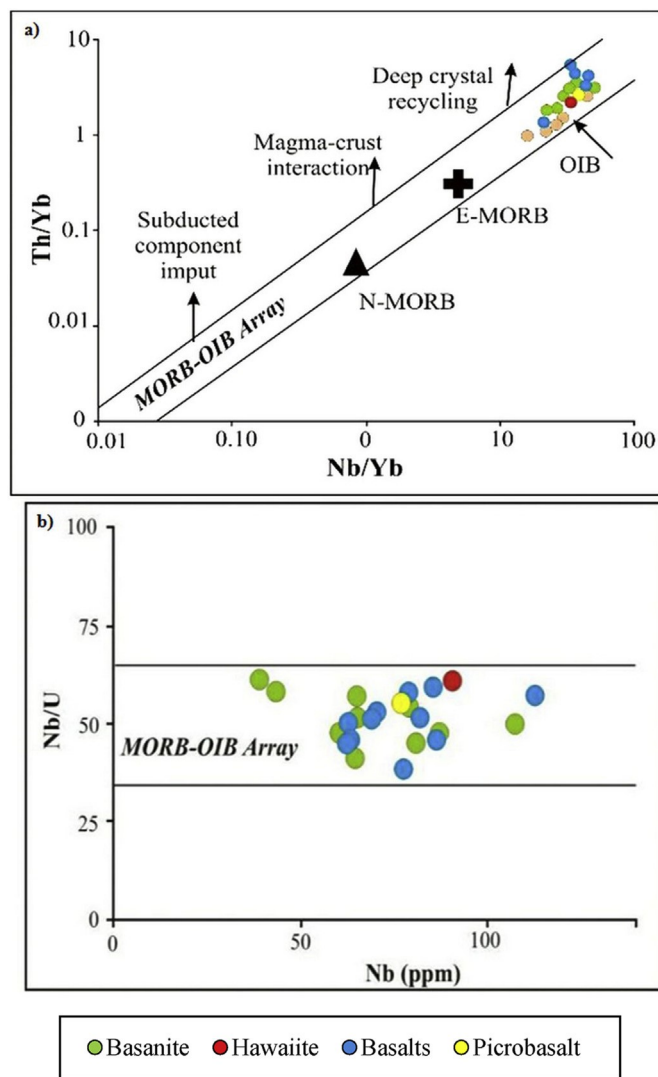


Figure 8. Scoriae from the Cameroon Volcanic Line in Th/Yb vs. Nb/Yb (a) and Nb/U vs. Nb (b) diagrams showing the affinity of volcanic scoriae with OIB,

mineralogical assemblage is similar to that of volcanic scoriae from Tombel Plain, Bamileke Plateau and Noun Plain (Mbowou et al., 2020). The high contents of alkali oxides (Na_2O þ K_2O) in the scoriae from CVL indicate the presence of alkali-feldspars. As reported by Djon Li Ndjock et al. (2017), the XRD patterns of volcanic scoriae from Limbe and Galim areas indicated the presence of a significant amount of amorphous phases,

5.5.3. Relation between amorphous phases and chemical composition

The glassy phase is a factor on which the reactivity of volcanic scoriae depends as well as the chemical composition. The glassy phase content of natural pozzolans is related to the content of SiO_2 and CaO in samples (Millet et al., 1977). The amorphous phases are more important when the difference between SiO_2 and CaO is greater than 34%. When the difference between SiO_2 and CaO content is below 34%, pozzolans would not be included in the glassy phase. The glassy phase was found to have a substantial role in the reactivity of the scoria sample (Ndigui et al., 2013). Volcanic scoriae have a glassy/amorphous structure with low SiO_2 and high Al_2O_3 concentrations that react with lime or cement (Swamy, 1997). It is conceivable to assimilate scoriae from the CVL in the aluminosilicate materials (Wong et al., 2020). The Al_2O_3 contents could influence the

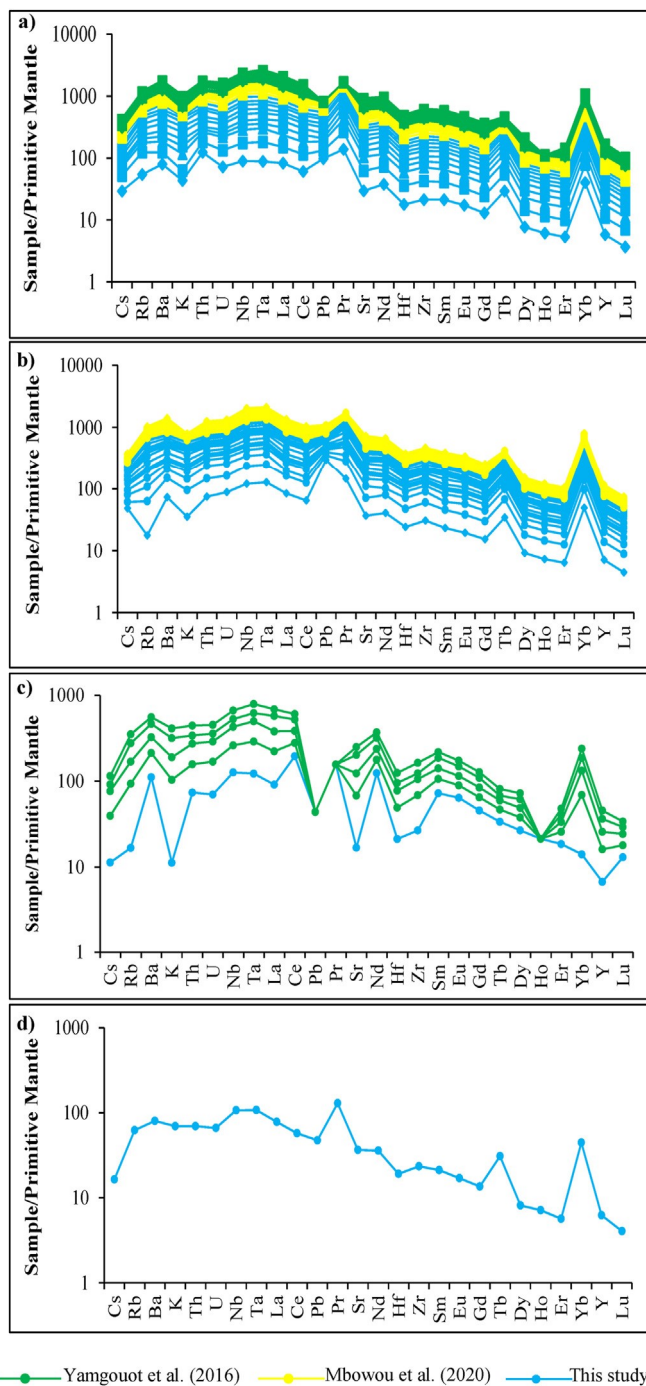


Figure 9, Primitive mantle-normalized multi-element patterns of scoriae from the CVL (normalizing data from McDonough et al., 1992): a) basalts; b) basanites; c) hawaiites; d) picrobasalts,

high reactivity of those materials (Poon et al., 2001). Another factor that affects the reactivity of pozzolans is their particular surface area. As a result, volcanic scoriae from the CVL have high specific surface area values (Table 6) which could impact the pozzolanic activity,

5,5,4, Pozzolanic activity

The pozzolanic activity of the volcanic scoriae from Limbe and Galim were reported by Djon Li Ndjock et al. (2017). From this work, the formation of saponite 16 A-ferroan, calcium silicate hydrate and stratlingite are evidenced using XRD on samples age of 28 days (Djon Li Ndjock et al.,

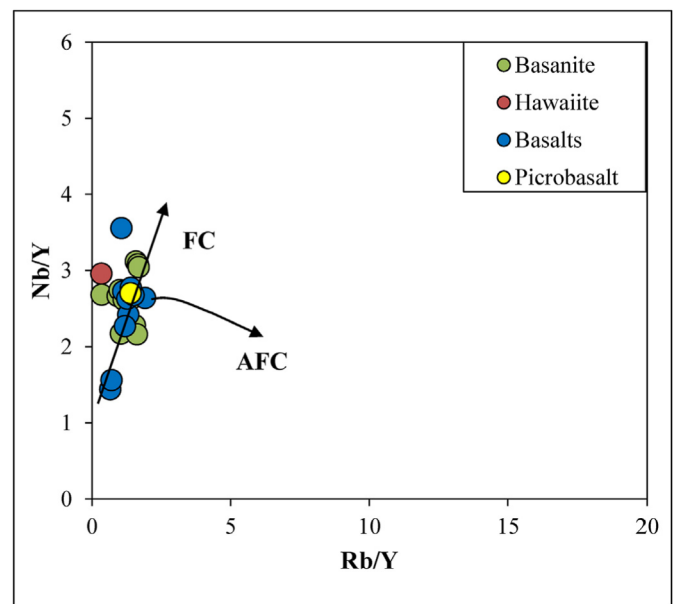


Figure 10, Nb/Y vs. Rb/Y diagram from Cox and Hawkesworth (1985),

2017). According to Djon Li Ndjock et al. (2017), stratlingite is found only in sample which has higher content of amorphous alumina and the largest specific surface area but lower content of SiO₂ and CaO. Their thermogravimetric data (TGA) exhibits a mass loss around 100 C, associated to sulfur gases loss due to C-S-H functions and the mass loss associated to sulfur gases from C-A-S-H occur around 180–240 C. This could be explained by the fact that the amorphous phase in the sample contained calcium ions that hinder the consumption of calcium from portlandite, Ettringite, feldspars and plagioclase which are found in some of the scoriae investigated would have similar impact. As a result, the presence of a substantial proportion of portlandite in the mineral assemblage indicates that volcanic scoriae consume less Ca(OH)₂. For the slips of sample with a lower glassy phase content, there was a significant decrease in the amount of Ca(OH)₂ (mass loss around 500 C) with age. It has a lower proportion of amorphous phases, a large specific surface area and high SiO₂ and CaO values. The minimum sum of 70% of SAI oxides (SiO₂ þ Al₂O₃ þ Fe₂O₃) is a key criterion of ASTM C618 (1993) that is typically adopted as the minimum requirement by other specifications (Lemougna et al., 2018). Saudi Arabian scoriae, for example, have SiO₂ values ranging from 41,14 to 46,5 wt.%; Al₂O₃ and Fe₂O₃ contents vary from 14,74 to 17,2 wt.% and 12,2 to 17,25 wt.%, respectively (Celik et al., 2014; Khan and Alhozaimey, 2011). Madagascar related materials have similar content (Rajaonarison et al., 2017). Similar findings were made on scoriae from the Cameroon Volcanic Line (Figure 13). The SAI oxide values for volcanic scoriae appropriate for the cement industry range from 68 to 79 wt.% (e.g., Tchamdjou et al., 2020; Mbowou et al., 2020; Djon Li Ndjock et al., 2020). The SAI oxide contents for the present study vary from 65,96 to 76,64 wt.%; most of them are up to 70 wt.%. However, the CIM (CaO þ Fe₂O₃ þ MgO) contents vary between 26,75 to 35,74 wt.% (Table 2). According to Mbowou et al. (2020), samples with CIM above 29% are more prone to develop an amorphous phase that governs the reactivity of scoriae and seems appropriate as an additive in cement manufacture. Another criterion defined by the ASTM C618 (1993) standard is the LOI value. According to Al-Swaidani (2018), the average values of LOI from different countries range from 3,9 to 5,8 in Algeria, 0,9 to 4,9 in Saudi Arabia, and are 1,8 in Yemen and <9,3 in Cameroon. Dp1 and Gal samples with LOI >10, SAI <70 and CIM <29 would not be used as supplementary cementitious material. All these three criteria are favorable for MANR, MANJ, MANG, MDR, MDN, L2N,

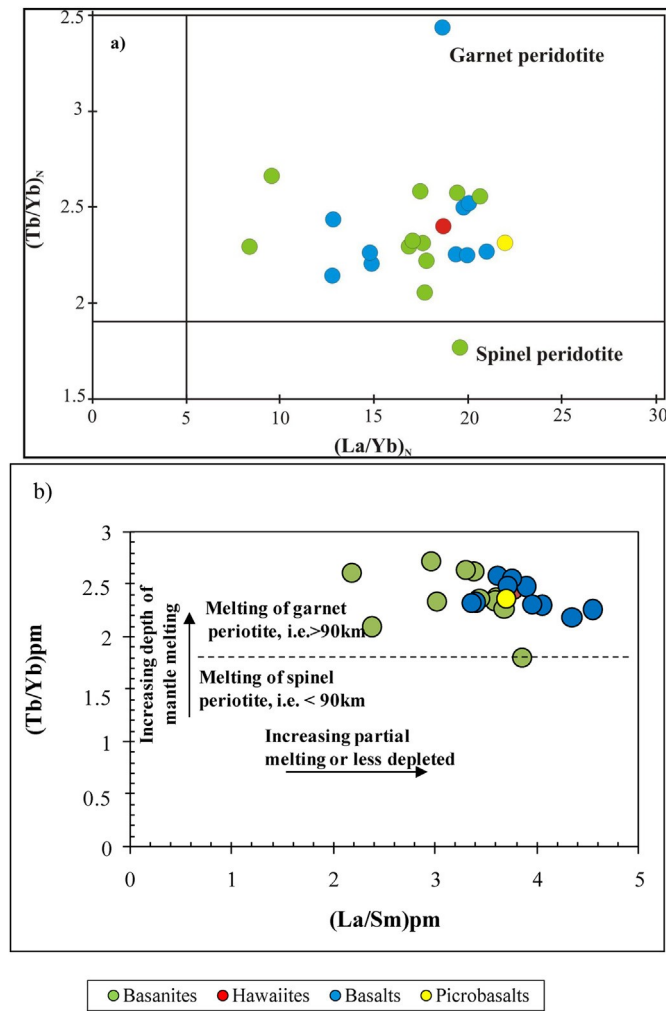


Figure 11, a) Tb/Yb vs. $(La/Yb)_N$ diagram showing mantle source of scoriae from the CVL, Chondrite values from Sun and McDonough (1989), and the horizontal line according to Wang et al. (2002); b) $(Tb/Yb)_N$ vs. $(La/Sm)_N$ diagram for volcanic scoriae, Ratios are normalized to primitive mantle values from McDonough and Sun (1995), The discrimination dashed line separates two fields for melting of garnet-bearing peridotite and of spinel-bearing peridotite (Wang et al., 2002),

L2R, YMB2 and NJK1 samples; other samples, meeting only two criteria could be processed in order to improve their CIM content or else find other applications,

6, Conclusion

In order to determine their petrological features and prospective industrial uses, petrological investigations on the scoriae from the southern continental region of CVL were carried out,

The studied samples are alkaline basalts, basanites, hawaiites and picrobasalts, and are characterized by their high MgO contents and affinity with OIB, which testify that the processes that contributed to the formation of rocks are fractional crystallization, metasomatism, and nearly inexistent crustal contamination, The geochemical features reveal that partial melting is the main process in the genesis of studied volcanic scoriae, The light REE abundance relative to heavy REE suggests melting in a garnet-bearing mantle,

The high values of SAI associated with those of alkali oxides and the high proportion of amorphous phases reveal that volcanic scoriae are suitable for geopolymer and pozzolanic binder,

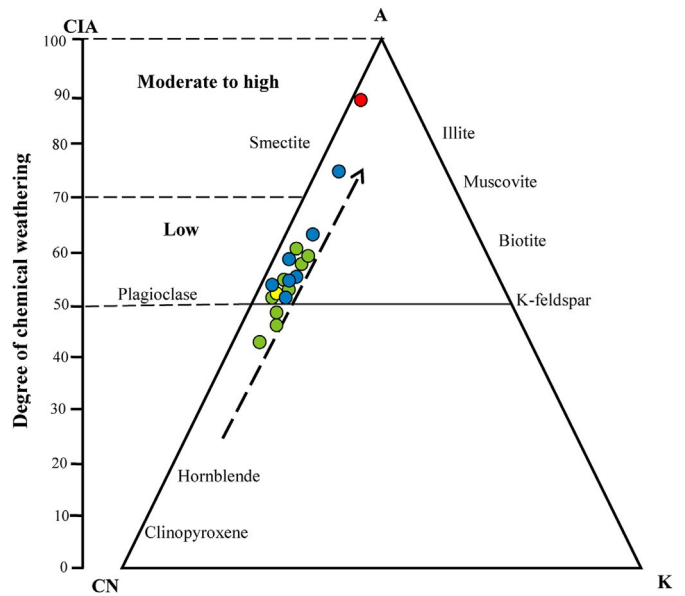


Figure 12, A⁻CN⁻K diagram (Nesbitt and Young, 1984) of scoriae from the CVL,

Sample	Surface specific area	Amount of amorphous phases		Ca(OH) ₂ fixed (%mass)		
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	7 days	28 days	
P1	7319	42,5	10,8	5,8	38	40
P2	2632	18,2	9,11	3,5	16	20
P3	2647	10,2	3,3	1,3	45	54
P4	3180	12,5	6,0	1,8	37	47
P5	2614	11,4	3,9	1,7	52	56

Table 6, Pozzolanic activity, amount of amorphous phase and specific surface area of scoriae (after Djon Li Ndjock et al., 2017),

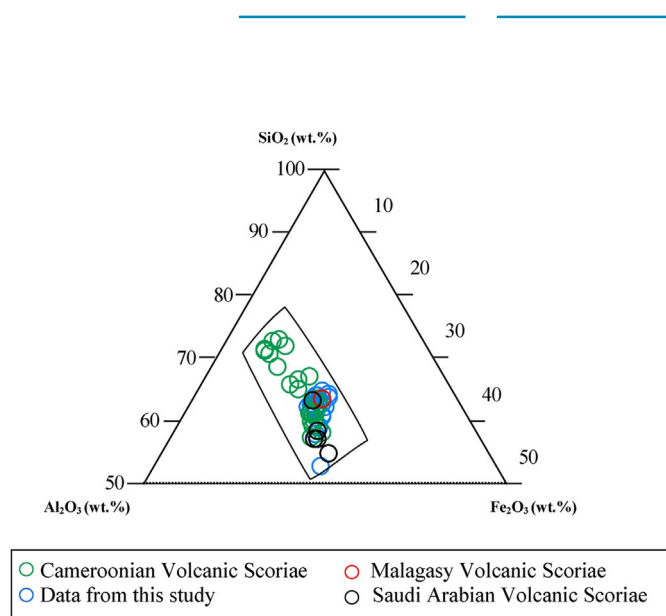


Figure 13, Plotting of scoriae from three areas in the $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ diagram,

The intensity of the chemical weathering is variable (moderate to high) along the Cameroon Volcanic Line. The less weathered samples can be used as supplementary cementitious materials,

Feldspars, plagioclase and pyroxene influence the reactivity in a solution with $\text{Ca}(\text{OH})_2$. This reaction also depends on the high specific surface area,

Declarations

Author contribution statement

Estelle Huguette Ngono Onana & Ndjigui Paul-Desire: Conceived and designed the experiments; Performed the experiments; Analyzed and interpreted the data; Contributed reagents, materials, analysis tools or data; Wrote the paper,

Fuh C, Gentry: Performed the experiments; Contributed reagents, materials, analysis tools or data; Wrote the paper,

Funding statement

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors,

Data availability statement

No data was used for the research described in the article,

Declaration of interests statement

The authors declare no conflict of interest,

Additional information

No additional information is available for this paper,

Acknowledgements

This paper is an integral part of the first author's PhD thesis at the University of Yaounde I (Cameroon). The authors are grateful to the staff of the Applied Geology of the Department of Earth Sciences (University of Yaounde I) for sample preparation and packaging; Geoscience Laboratories (Sudbury, Canada) for XRD and ICP-MS analyses and the laboratories of the University of Lausanne (Switzerland) for XRF analyses. At last, we thank Andrew Hursthouse (Section Editor) and two anonymous reviewers for constructive comments that improved the final version of manuscript, **References**

- Al-Swaidani, A.M., 2018, Volcanic scoria as cement replacement, Chapter 10, In: Gemma, A. (Ed.), *Volcanoes-geological and Geophysical Setting, Theoretical Aspects and Numerical Modeling, Applications to Industry and Their Impact on the Human Health*, pp. 211–237,
- Asaah, A.N.E., Yokoyama, T., Aka, F.T., Usui, T., Wirmvem, M.J., Tchamabe, C.B., Ohba, T., Tanyileke, G., Hell, J.V., 2015, A comparative review of petrogenetic processes beneath the Cameroon Volcanic Line: geochemical constraints, *Geosci. Front.* 6 (4), 557–570,
- ASTM C289-94, Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method), *Book of Standards 04.02*,
- ASTM C618, 1993, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a mineral Admixture in concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, Philadelphia, USA,
- Aubert, D., Stille, P., Probst, A., 2001, REE fractionation during granite weathering and removal by waters and suspended loads: Sr and Nd isotopic evidence, *Geochem. Cosmochim. Acta* 65, 387–406,
- Babechuk, M.G., Widdowson, M., Kamber, B.S., 2014, Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India, *Chem. Geol.* 363, 56–75,
- Blein, O., Lapiere, H., Schweickert, R.A., 2001, A permian island arc with a continental basement: the black dyke formation (Nevada), north American cordillera, *Chem. Geol.* 175, 543–566,
- Brown, R.J., Calder, E.S., 2005, *Pyroclastics*, *Encycl. Geol.* 386–397,
- Celik, K., Jackson, D.M., Mancio, M., Meral, C., Emwas, A.-H., Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M., 2014, High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for Portland cement in self-compacting and sustainable concrete, *Cement Concr. Compos.* 45, 136–147,
- Cox, K.G., Hawkesworth, C.J., 1985, Geochemical stratigraphy of the Deccan Traps at Mahabaleshwar, Western Ghats, India, with implications for open system magmatic processes, *J. Petrol.* 26, 355–377,
- Dezdo, G.M., Asaah, A.N.E., Fozing, E.M., Tchamabe, B.C., Zangmo, T.G., Dagwai, N., Seuwui, T.D., Kamgang, P., Aka, F.T., Ohba, T., 2019, Petrology and geochemistry of lavas from Gawar, Minawao and Zamay volcanoes of the northern segment of the Cameroon Volcanic Line (Central Africa): constraints on mantle source and geochemical evolution, *J. Afr. Earth Sci.* 153, 31–41,
- Dezdo, G.M., Hamadjoda, D.D., Fozing, E.M., Tchamabe, B.C., Mendoza-Rosas, T.A., Asaah, E.N.K., Tefogoum, Z.G., Kamgang, P., Ohba, T., 2020, Petrology and geochemistry of ignimbrites and associated enclaves from mount Bambouto, west Cameroon, Cameroon volcanic line, *Geochem. (Tokyo)* 80 (4), 125663,
- Deruelle, B., Moreau, C., Nkoubou, C., Kambou, R., Lissom, J., Njonfang, E., Ghogomu, R.T., Nono, A., 1991, The Cameroon Line: a review, In: Kampuzu, A.B., Lubala, R.T. (Eds.), *Magmatism in Extensional Structural Settings: the Phanerozoic African Plate*, Springer-Verlag, pp. 274–327,
- Deruelle, B., Ngounouno, I., Demaiffe, D., 2007, The 'Cameroon Hot Line' (CHL): an unique example of active alkaline intraplate structure in both oceanic and continental lithospheres, *C. R. Geoscience* 339 (9), 589–600,
- Djobo, Y.J.N., Tchadjie, L.N., Tchakoute, T.H.K., Kenne, D.B.B., Elimbi, A., Njopwouo, D., 2014, Synthesis of geopolymer composites from a mixture of volcanic scoria and metakaolin, *J. Asian Ceram. Soc.* 2, 387–398,
- Djon Li Ndjock, B.I., Elimbi, A., Cyr, M., 2017, Rational utilization of volcanic ashes based on factors affecting their alkaline activation, *J. Non-Cryst. Solids* 463, 31–39,
- Djon Li Ndjock, I.B., Baenla, J., Mbah, B.J.B., Elimbi, A., Cyr, M., 2020, Amorphous phase of volcanic and microstructure of cement product obtained from phosphoric acid activation, *SN Appl. Sci.* 2 (4), 1–10,
- Doum, M.J., Fuh, G.C., Fadil-Djenabou, S., Onana, V.L., Ndjigui, P.-D., Armstrong-Altrin, J.S., 2020, Characterization and potential application of gleysols and ferrasols for ceramic industry: a case study from Dimako (Eastern Cameroon), *Arabian J. Geosci.* 1–21,
- Dron, R., Brivot, F., 1977, Bases mineralogiques de selection des pouzzolanes, *Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussees* 93, 61–65,
- Dumort, J.C., 1968, *Cartes geologiques de reconnaissance a l'echelle de 1/500000*, Republique Federale du Cameroun, Douala-Ouest, BRGM, Dir. Mines Geol., p. 68
- Duzgoren-Aydin, N.S., Aydin, A., 2009, Distribution of rare earth elements and oxyhydroxide phases within a weathered felsic igneous profile in Hong Kong, *J. Asian Earth Sci.* 34, 1–9,

- Fan, W.M., Guo, F., Wang, Y.J., Zhang, M., 2004. Late Mesozoic volcanism in the northern Huaiyang tectono-magmatic belt, central China: partial melts from a lithospheric mantle with subducted continental crust relicts beneath the Dabie orogen, *Chem. Geol.* 209, 27–48.
- Farmer, G.L., 2003. Continental basaltic rocks, In: Rudnick, R.L., Editors, Ex., Holland, H.D., Turekian, K.K. (Eds.), *Treatise on Geochemistry*, 3, Elsevier, p. 659, 85–121.
- Frey, F.A., Green, D.H., Roy, S.D., 1978. Integrated models of basalts petrogenesis: a study of quartz tholeiites to olivine melilitites from South Eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data, *J. Petrol.* 19, 463–513.
- Halliday, A.N., Davidson, J.P., Holden, P., De Wolf, C., Lee, D.C., Fitton, J.G., 1990. Trace element fractionation in plumes and the origin of HIMU mantle beneath the Cameroon line, *Nature* 347, 523–528.
- Harmois, L., 1988. The CIW index: a new chemical index of weathering, *Sediment. Geol.* 55, 319–322.
- Jung, S., Masberg, P., 1998. Major and trace element systematics and isotope geochemistry of Cenozoic mafic volcanic from the Vogelsberg (Central Germany): constraints on the origin of continental alkaline and tholeiitic basalts and their mantle sources, *J. Volcanol. Geoth. Res.* 86, 151–177.
- Kamgang, P., Njonfang, E., Nono, A., Dedzo, M.G., Tchoua, F.M., 2010. Petrogenesis of a silicic magma system: geochemical evidence from Bamenda Mountains, NW Cameroon, *Cameroon Volcanic Line, J. Afr. Earth Sci.* 58, 285–304.
- Kamgang, P., Chazot, G., Njonfang, E., Tchuiemegnie, N.N.B., Tchoua, F., 2013. Mantle sources and magma evolution beneath the Cameroon Volcanic Line: geochemistry of mafic rocks from the Bamenda Mountains (NW Cameroon), *Gondwana Res.* 24, 727–741.
- Kelemen, P.B., Kikawa, E., Miller, D.J., 2007. Leg 209 summary: processes in a 20 km-thick conductive boundary layer beneath the Mid-Atlantic Ridge, 14–16N, *Proc. Ocean Drill. Progr. Sci. Results* 209, 1–33.
- Khan, M.I., Alhozaimy, A.M., 2011. Properties of natural pozzolan and its potential utilization in environmental friendly concrete, *Can. J. Civ. Eng.* 38 (1), 71–78.
- Kwekam, M., Hartmann, G., Njanko, T., Tcheumenak, K.J., Fozing, E.M., Njonfang, E., 2015. Geochemical and isotope Sr-Nd character of Dschang biotite granite: implications for the Pan-African continental crust evolution in West-Cameroon (Central Africa), *Earth Sci. Res.* 4, 88–102.
- Langmuir, C.H., Vocke, R.D., Hanson, G.N., Harth, S.R., 1978. A general mixing equation with applications to Icelandic basalts, *Earth Planet Sci. Lett.* 37, 380–392.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanetti, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram, *J. Petrol.* 27, 745–750.
- Lee, D.C., Halliday, A.N., Fitton, J.G., Poli, G., 1994. Isotopic variations with distance and time in the volcanic island of the Cameroon Line, evidence for a mantle plume origin, *Earth Planet Sci. Lett.* 123, 119–138.
- Lemounga, P.N., Wanga, K.T., Tanga, Q., Nzeukou, A.N., Ndigui, B., Melo, C.U.F., XueMina, C., 2018. Review on the use of volcanic ashes for engineering applications, *Resour. Conserv. Recycl.* 137, 177–190.
- Marzoli, A., Renne, P.R., Piccirillo, E.M., Castorina, F., Bellieni, G., Melfi, A.R., Nyobe, J.B., N'ni, J., 1999. Silicic magmas from the continental Cameroon Volcanic Line (Oku, Bambouto and Ngoundere): ^{40}Ar - ^{39}Ar dates, petrology, Sr-Nd-O isotopes and their petrogenetic significances, *Contrib. Mineral. Petrol.* 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 magmas from lithospheric and asthenospheric mantle sources, *J. Petrol.* 41, 87–109.
- Marzoli, A., Aka, F.T., Merle, R., Callegaro, S., N'ni, J., 2015. Deep to shallow crustal differentiation of within-plate alkaline magmatism at the Mt. Bambouto volcano, Cameroon Line, *Lithos* 220, 272–288.
- Mbabi, B.A., Adatte, T., Ngon Ngon, G.-F., Ngos III, S., Bilong, P., 2020. Palynology, mineralogy and geochemistry of sediments in Tonde locality, northern part of Douala sub-basin, Cameroon, Central Africa: implication on paleoenvironment, *Geosci. J.* 299–319.
- Mbowou, N.I.F., Owona, S., Tchamabe, C.B., Lissom, J., Lanson, B., Ekodeck, G.E., 2020. Mineralogy and geochemistry of pozzolans from the Tombel Plain, Bamileke Plateau, and Noun Plain monogenetic volcanoes in the central part of the Cameroon volcanic line, *Acta Geochim* 1–32.
- McDonough, W.F., Sun, S.-S., 1995. The composition of the Earth, *Chem. Geol.* 120, 223–253.
- McDonough, W.F., Sun, S.-S., Ringwood, A.E., Jagoutz, E., Hofmann, A.W., 1992. Potassium, rubidium and cesium in the Earth and Moon and the evolution of the mantle of the Earth, *Geochem. Cosmochim. Acta* 56, 1001–1012.
- Mendoza, O., Tobon, J.J., 2013. An alternative thermal method for identification of pozzolanic activity in Ca(OH)₂/pozzolan pastes, *J. Therm. Anal. Calorim.* 114, 589–596.
- Millet, R., Hommey, Brivot, F., 1977. Dosage de la phase vitreuse dans les matériaux pouzzolaniques, *Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées* 92, 101–104.
- Moundi, A., Wandji, P., Bardintzeff, J.M., Menard, J.J., Okomo, A.L.C., Mouchero, O.F., Reusser, E., Bellon, H., Tchoua, F.M., 2007. Les basaltes eocènes à affinité transitionnelle du plateau Bamoun, témoins d'un réservoir mantellique enrichi sous la Ligne Volcanique du Cameroun, *C. R. Geoscience* 339, 396–406.
- Ndigui, B., Melo, C.U., Njopwou, D., Louvet, F., Bonnet, J.P., 2013. Physicochemical characteristics of some Cameroonian pozzolans for use in sustainable cement like materials, *Scientific Research Publishing* 4, 14–21.
- Nedelec, A., Nsifa, E.N., Martin, H., 1990. Major and trace element geochemistry of the Archaean Ntem plutonic complex (South Cameroon): petrogenesis and crustal evolution, *Precambrian Res.* 47, 35–50.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations, *Geochem. Cosmochim. Acta* 48, 1523–1534.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles, *J. Geol.* 97, 129–147.
- Ngwa, C.N., Hansteen, T.H., Devey, C., Van der Zwan, W., Froukje, M., Suh, C.E., 2017. Origin and evolution of primitive melts from the Debunsha Maar, Cameroon: consequences for mantle source heterogeneity within the Cameroon Volcanic Line, *Lithos* 288, 326–337.
- Nkouandou, O.F., Temdjim, R., 2011. Petrology of spinel lherzolite xenoliths and host basaltic lavas from Ngao Volgar Volcano, Adamawa Massif (Cameroon Volcanic Line, West Africa): equilibrium conditions and mantle characteristics, *J. Geosci.* 56, 375–387.
- Nkouathio, D.G., Kagou, D.A., Bardintzeff, J.M., Wandji, P., Bellon, H., Poulet, A., 2008. Evolution of volcanism of graben and horst structures along the Cenozoic Cameroon Line (Africa): implications for tectonic evolution and mantle source composition, *Contrib. Mineral. Petrol.* 94, 287–303.
- Okewale, I.A., 2020. Applicability of chemical indices to characterize weathering degrees in decomposed volcanic rocks, *Catena* 189, 104475.
- Okewale, I.A., Coop, M.R., 2017. A study of effects of weathering on soils derived from decomposed volcanic rocks, *Eng. Geol.* 222, 53–71.
- Okewale, I.A., Coop, M.R., 2018. Suitability of different approaches for analyzing and predicting the behavior of decomposed volcanic rocks, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 144 (9).
- Okewale, I.A., Coop, M.R., 2020. A study of completely decomposed volcanic rock with a transitional mode of behaviour, *Bull. Eng. Geol. Environ.* 79 (3).
- Pearce, J.A., 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust, *Lithos* 100, 14–48.
- Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., Wong, Y.L., Wong, R., 2001. Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes, *Cement Concr. Res.* 31, 1301–1306.
- Rajaonarison, E.F., Gacoin, A., Randrianja, R., Ranaivoniarivo, V.G., Razafindrabe, B.H.N., 2017. Effect of scoria on various specific aspects of light weight concrete, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 11 (3), 541–555.
- Robinson, J.A.C., Wood, B.J., 1998. The depth of the spinel to garnet transition at the peridotites solidus, *Earth Planet Sci. Lett.* 164, 277–284.
- Rollinson, H.R., 1993. Using Geochemical Data: Evolution, Presentation, Interpretation, In: *Geochemistry Series*, Longman scientific and technical, New York, p. 352.
- Rudnick, R.L., Gao, S., 2003. Composition of the continental crust, In: Holland, H.D., Turekian, K.K. (Eds.), *Treatise on Geochemistry*, 301, Elsevier, pp. 1–63.
- Sato, H., Aramaki, S., Kusakabe, M., Hirabayashi, J.I., Sano, Y., Nojiri, Y., Tchoua, F.M., 1990. Geochemical difference of basalts between polygenetic and monogenetic volcanoes in the Central part of the Cameroon volcanic line, *Geochem. J.* 24, 357–370.
- Shang, C.K., Satir, M., Siebel, W., Nsifa, E.N., Aubald, H., Liegeois, J.P., Tchoua, F.M., 2004. TTG magmatism in the Congo Craton: a view from major and trace element geochemistry, Rb-Sr and Sm-Nd systematics: case of the Sangmelima region, Ntem complex, Southern Cameroon, *J. Afr. Earth Sci.* 40 (1–2), 61–79.
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*, 42, Geol. Soc. Spec. Publ., pp. 313–345.
- Swamy, R.N., 1997. Design for durability and strength through the use of fly ash and slag inconcrete, *ACI Special Publication*, pp. 1–72, 171.
- Tamen, J., Nkoumbou, C., Mouafo, L., Reusser, E., Tchoua, F.M., 2007. Petrography and geochemistry of monogenetic volcanoes of the Barombi Koto volcanic field (Kumba graben, Cameroon Volcanic Line): implications for the mantle source characteristics, *C. R. Geoscience* 339, 799–809.
- Tamura, Y., Ishizuka, O., Stern, R.J., Nichols, A.R.L., Kawabata, H., Hirahara, Y., Chang, Q., Miyazaki, T., Kimura, J.-I., Embley, R.W., Tatsumi, Y., 2014. Mission immiscible: distinct subduction components generate two primary magmas at Pagan volcano, Mariana arc, *J. Petrol.* 55, 63–101.

- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985, *The continental Crust: its Composition and Evolution*, Blackwell Scientific publications, Oxford, p. 312,
- Tchamabe, C.B., Ohba, T., Ooki, S., Youmen, D., Owona, S., Tanyileke, G., Hell, J.V., 2014, Temporal evolution of the barombi mbo maar, a polygenetic maar diatreme volcano of the Cameroon volcanic line, *Int. J. Geosci.* 5 (11), 13–15,
- Tchamdjou, J.W.H., Abidi, M.L., Cherradi, T., Pereira de Oliveira, L.A., 2017, Effect of the color of natural pozzolan from volcanic scoria on the rheological properties of Portland cement pastes, *Energy Proc.* 139, 703–709,
- Tchop, L.G., Wokwenmendang, N.P., Ntieche, B., Metang, V., Rake, D.J., Teitchou, M.I., Auwera, V.J., Ekodeck, G.E., Nkombou, C., 2020, New data on the genesis and evolution of the primitive magmas of Mount Cameroon: contribution of melt inclusions, *J. Geol. Res.*
- Tehuimegnie, N.N.B., Kamgang, P., Chazot, G., Agranier, A., Bellon, H., Nonnotte, P., 2015, Age, geochemical characteristics and petrogenesis of cenozoic intraplate alkaline volcanic rocks in the Bafang region, West Cameroon, *J. Afr. Earth Sci.* 102, 218–232,
- Tiabou, A.F., Temdjim, R., Wandji, P., Bardintzeff, J.-M., Bih, C.V.B., Tibang, B.E.E., 2019, Baossi-warack monogenetic volcanoes, Adamawa Plateau, Cameroon: petrography, mineralogy and geochemistry, *Acta Geochim* 38 (1), 40–67,
- Villemant, B., Treuil, M., 1983, Comportement des elements traces et majeurs dans la serie alcaline du Velay; comparaison avec la Chaîne des Puys (Massif Central, France), *Bull. Miner.* 106 (4), 465–486,
- Wang, K., Plank, T., Walker, J.D., Smith, E.L., 2002, A mantle melting profile across the basin and range, SW USA, *J. Geophys. Res.* 107, 1–21,
- Wong, H.K.J., Kok, T.S., Wong, Y.S., 2020, Cementitious, pozzolanic and filler materials for DSM binders, *Civ. Eng. J* 6, 402–417,
- XP P18-594, Norme NFP18-594, methode d essai de reactivite aux alcalins,
- Yamgouot, F.N., Deruelle, B., Mbowou, I.B.G., Ngounouno, I., Demaiffe, D., 2016, Geochemistry of the volcanic rocks from Bioko Island (“Cameroon Hot Line”): evidence for plume-lithosphere interaction, *Geosci. Front.* 7 (5), 743–757,
- Yusoff, Z.M., Ngwenya, B.T., Parsons, I., 2013, Mobility and fractionation of REEs during deep weathering of geochemically contrasting granites in a tropical setting, Malaysia, *Chem. Geol.* 349, 71–86,
- Zhang, W., Honaker, R.Q., 2018, Rare earth elements recovery using staged precipitation from a leachate generated from coarse coal refuse, *Int. J. Coal Geol.* 195, 189–199,
- Ziem, A.B.L.A., Chazot, G., Moundi, A., Nonnotte, P., 2018, Extreme source heterogeneity and complex contamination patterns along the Cameroon Volcanic Line: new geochemical data from the Bamoun plateau, *C.R. Geosci.* 350, 100–109,



Contents lists available at ScienceDirect

Data in Brief

journal homepage: www.elsevier.com/locate/db



Data Article

Petrology and geochemistry dataset of the volcanic scoriae from southern part of the continental Cameroon Volcanic Line



Paul-Desire Ndjigui , Estelle Huguette O, Ngono

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

article

info

abstract

Article history:

Received 18 July 2022

Revised 9 September 2022

Accepted 14 September 2022 Available
online 20 September 2022

Keywords:

Scoriae

Cameroon volcanic line

Petrological characterization

Valorization

Cement manufacture

Petrological and geochemical data of scoriae from the southern part of the continental Cameroon Volcanic Line were obtained through field and laboratory investigations. Field observations were done at nine localities (Limbe, Djoungo, Loum-Tombel, Manjo-Monengolle, Melong, Doupe, Yamba, Foumbot, Njinkouo, and Galim) under forest and savanna cover during the dry season in order to facilitate the collection of samples. This was based on some criteria such as the size (centimeter to metric) and the color (gray, brown, red, or black) of samples. During the same field works, samples were also collected. Microscopic observations were done using a Leica DM 750P optic microscope. Mineralogical assemblages of crystalline phases without the amorphous phases were obtained by X-ray diffraction (XRD) instrument. Geo-chemical data of major elements were acquired using the X-ray fluorescence spectrometry (XRF). The contents of some major elements and the evaluation of the chemical weathering intensity of scoriae are presented together in the ternary diagrams. The evaluation of intensity of chemical weathering was done using bivariate diagram CIW (Chemical Index of Weathering) versus CIA (Chemical Index of Alteration). Chemical bonds were observed using infrared spectra. These data provide chemical conditions of volcanic scoriae that must have to be used in civil applications such cement man-

DOI of original article: [10.1016/j.heliyon.2021.e08684](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08684) 

Corresponding author,

E-mail address: desire.ndjigui@facscesciences-uy1.cm (P.-D. Ndjigui),<https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108624>

2352-3409/© 2022 The Author(s), Published by Elsevier Inc, This is an open access article under the CC BY license

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ufacture, Data of this paper are further presented and discussed in Ngono Onana et al. [1],

© 2022 The Author(s), Published by Elsevier Inc,
This is an open access article under the CC BY license
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Specifications Table

Subject	Earth Sciences
Specific subject area	Petrology, mineralogy and geochemistry
Type of data	Table, figures, graph and pictures
How the data were acquired	Field investigations: GPS map (Garmin 62S); sampling: Microscopic mineralogy: a Leica DM 750P microscope (University of Yaoundé 1); Mineral phases: X-ray powder diffraction (Geoscience Laboratories (Sudbury, Canada)); Major elements: X-ray Fluorescence (Geological Institute (ISTE) of the University of Lausanne (Switzerland) and Amorphous phases: Infrared (IR) spectrometry (University of Yaoundé I); binary and ternary diagrams,
Data format	Raw and analysed,
Description of data collection	The choice was made on samples of centimeter to metric size, Sampling was carried out based on the color (or facies) of the fresh rocks were selected for rock thin section-preparation and representative samples for whole rock analysis, The removal of the scoriae was done using a peel, a hammer and pickaxe, Larger samples were also collected, The samples were packed, Each sample was identified by a code indicating the locality of sampling and its color,
Data source location	The Southern part of the continental Cameroon Volcanic Line (CVL) as reported in [1], These data were collected in four regions of Cameroon (Central Africa): Littoral, South West, West, and North West), Data concerning source location (latitude and longitude using GPS) were also presented in Table 1,
Data accessibility	Data are available in: Mendeley; Cameroon Volcanic Scoriae data; DOI: 10.17632/5jefdc2yhs.1; URL: https://data.mendeley.com/datasets/5jefdc2yhs/1
Related research article	Estelle Huguette Ngono Onana, Fuh Calistus Gentry, Paul-Desire Ndjigui, Petrological features of volcanic scoriae from the southern part of the Cameroon Volcanic Line and their supplementary cementations application, <i>Heliyon</i> 8, e08684 [1],

Value of the Data

- Chemical data contribute to highlight an exploitation of these materials in the cement industry as raw materials,
- Data help to define some criteria of scoriae from Cameroon Volcanic Line as raw materials in the cement manufacture,
- Dataset contributes to establish a link between the chemical composition and the technical properties of scoriae in the cement industry,
- Data provide additional knowledge on the petrological features of the Cameroon Volcanic Line products,

- Mineralogy data highlight the reactive phase and the mineral assemblage of the crystalline phase,
- Data enable to recognition of suitable and no suitable scoriae in the cement manufacture,

1. Data Description

The data presented are those of volcanic materials collected in tropical environment (West Cameroon) during the dry season, This paper provides information on the volcanic scoriae in the field and mineral assemblages (Figs, 1-2), crystalline and amorphous phases (Figs, 3-4 and

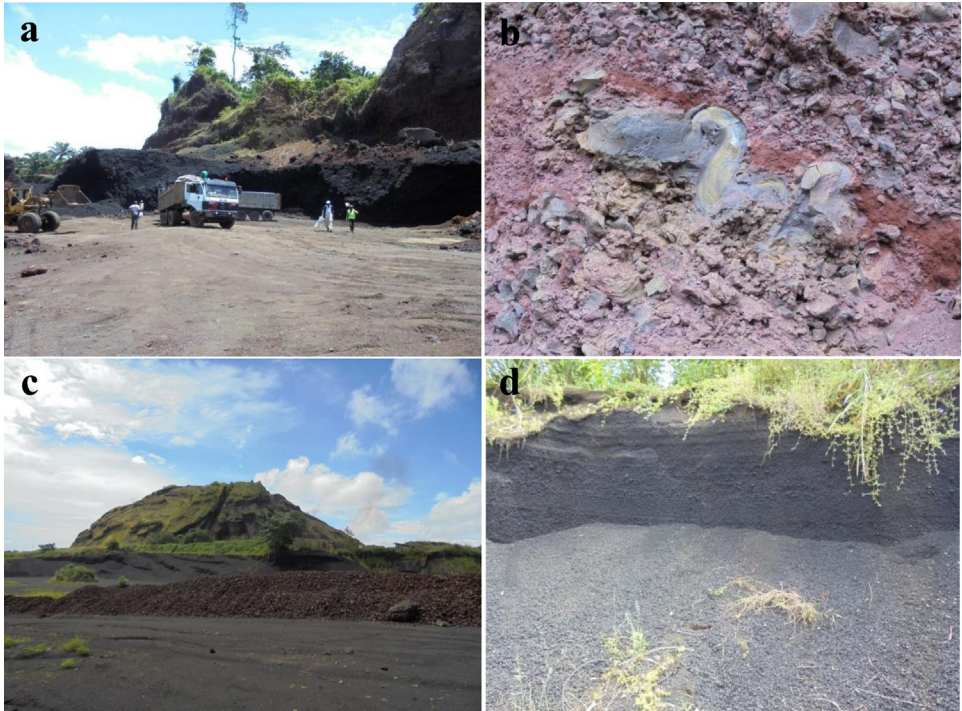


Fig. 1. Macroscopic observations of scoriae from the Cameroon Volcanic Line: a) Limbe quarry with black type, the presence of transport and collect appliances for volcanic scoriae indicates their valorization in the civil application works; b) Red scoriae with different sizes in the Limbe quarry; c) Djoungo quarry with the red facies; d) Galim black scoriae with loose texture,

supplementary material files: Tables i and ii), and their geochemical nature (Figs, 5-7 and supplementary material files: Tables iii and iv), Furthermore this article displays that the volcanic scoriae can be used during civil application works (see Fig. 1 a) and also as cement replacement owing to their chemical compositions (Figs, 3-7), The sampling points referenced from geographic coordinates are reported in Table 1 ,

2. Experimental Design, Materials and Methods

Scoria was sampled in accessible quarries and outcrops along the southern continental part of Cameroon Volcanic Line, Several field works were conducted to collect samples during the dry season (March 2016) in order

to facilitate the accessibility to different study sites, During the field works, samples were described, packed and identified by a code indicating the sampling point and the color of each sample, This sampling protocol is very simple and similar for all mining investigations on loose geological materials, Samples were collected from the southern part of the continental Cameroon Volcanic Line, in nine localities (**Table 1**),

The selected samples were used to the manufacture of rock thin sections, The manufacture of these thin sections comprises six steps after the consolidation using the Canada balsam glue: sawing or slab cutting, initial lapping of the slab, addition of glass slide, sawing of the pre- pared slab, final lapping, cleaning of the thin sections, The detail descriptions are available on <https://elearn.univ-tlemcen.dz> or <https://LakeheadUniversity.com> , Observations of the rock thin sections under the microscope allow documenting mineral occurrence and textural features such

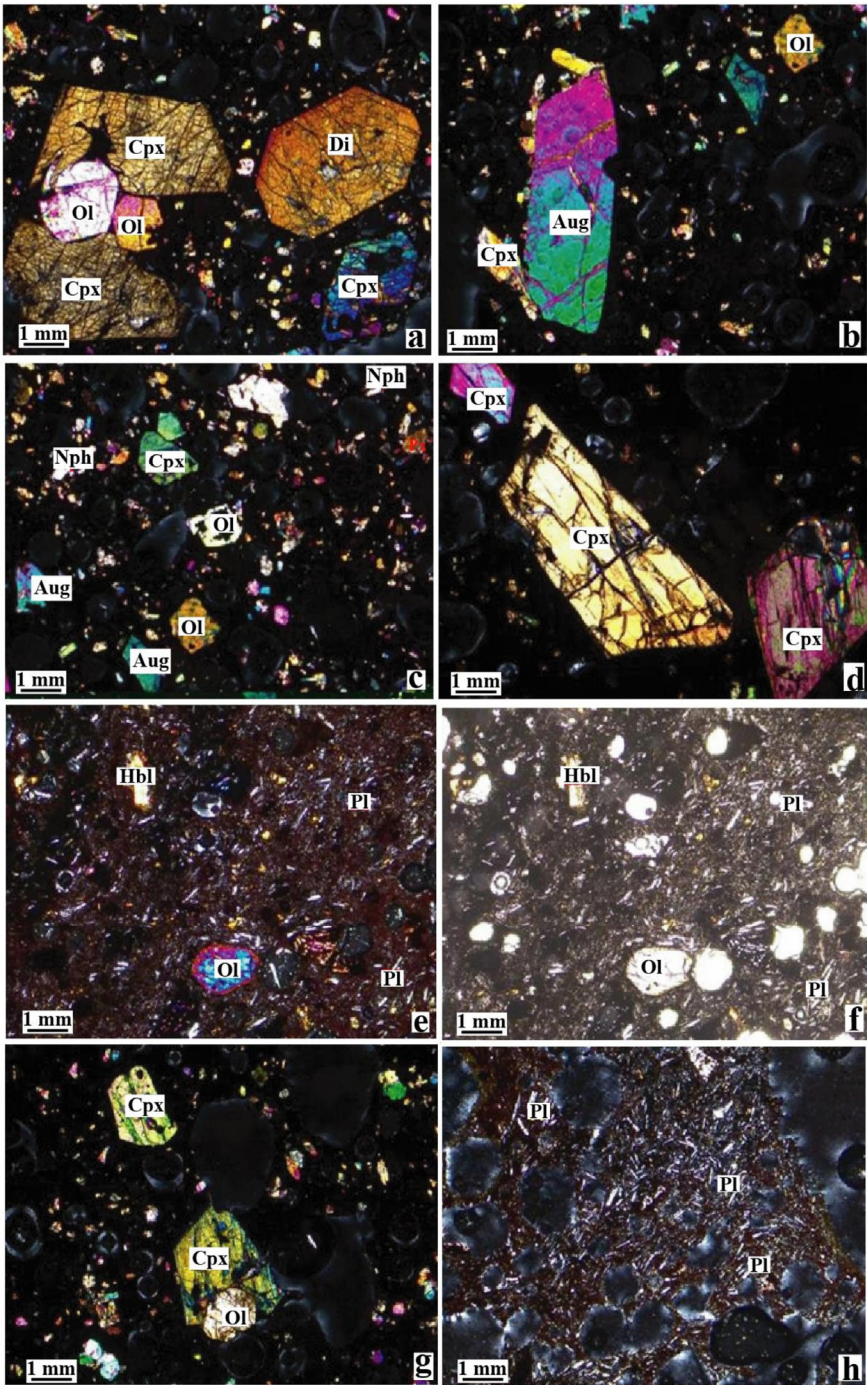


Fig. 2. Photomicrographs showing some mineral assemblages of basanite (a – d) and basalt (e – h): Ol = olivine; Cpx = clinopyroxene; Di = diopside; Aug = augite; Nph = Nepheline; Hbl = hornblende; Pl = plagioclase, **Figs. 2 (a –c)** showing the phenocrysts of clinopyroxene and olivine; **Fig. 2 d** showing the amphibole growth after clinopyroxene; **Fig. 2 e** presents the aureole of the weathering of olivine into iddingsite (a-c) and (g-h) in XPL; f in PL,

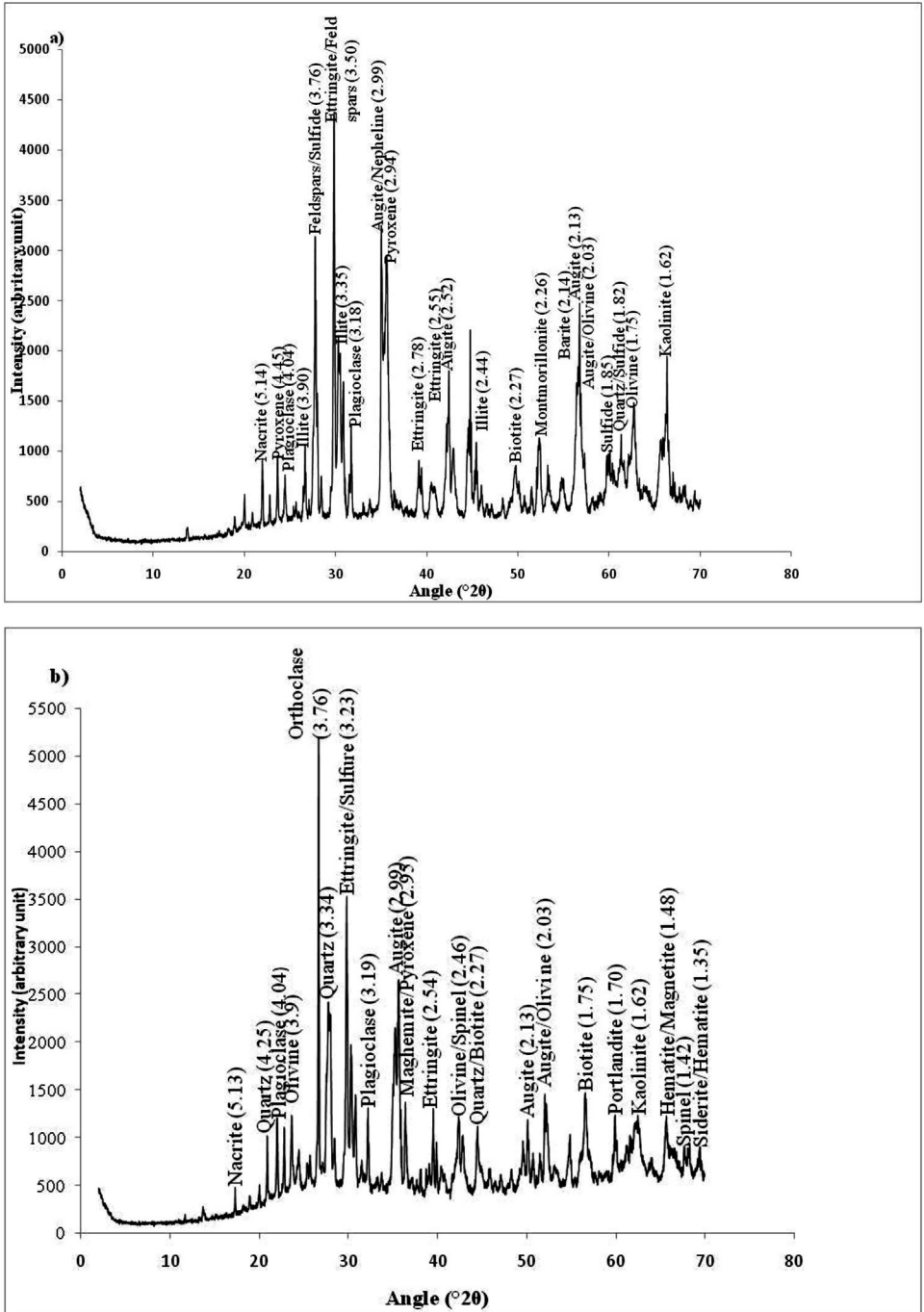


Fig. 3, X-ray Diffraction (XRD) spectra of crystalline phases without the amorphous phases,

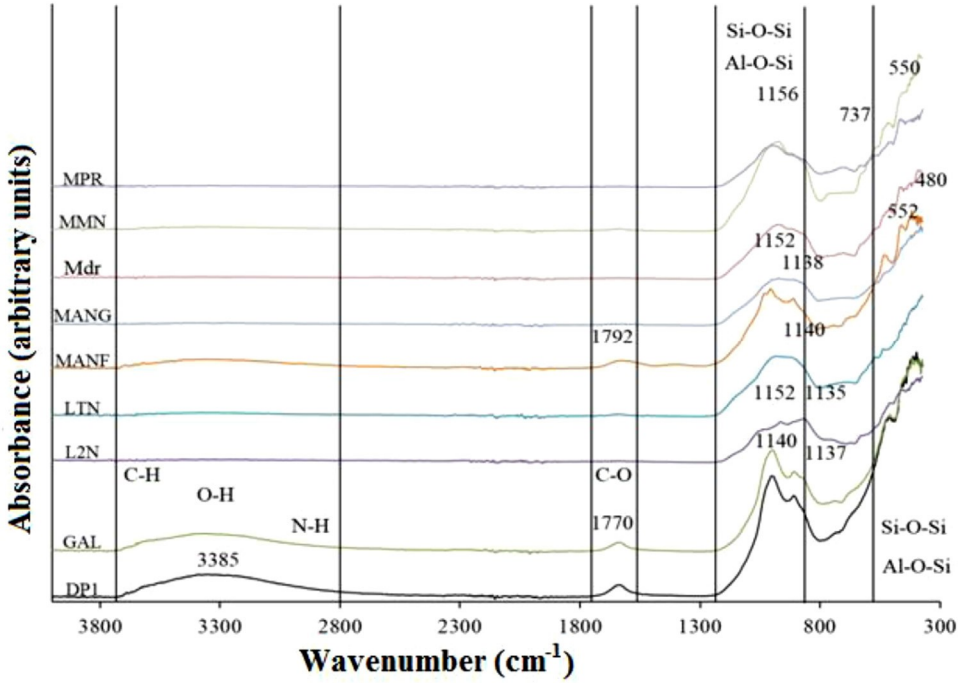


Fig. 4, Fourier transform infrared (FT-IR) spectra showing various bonds of crystalline phases,

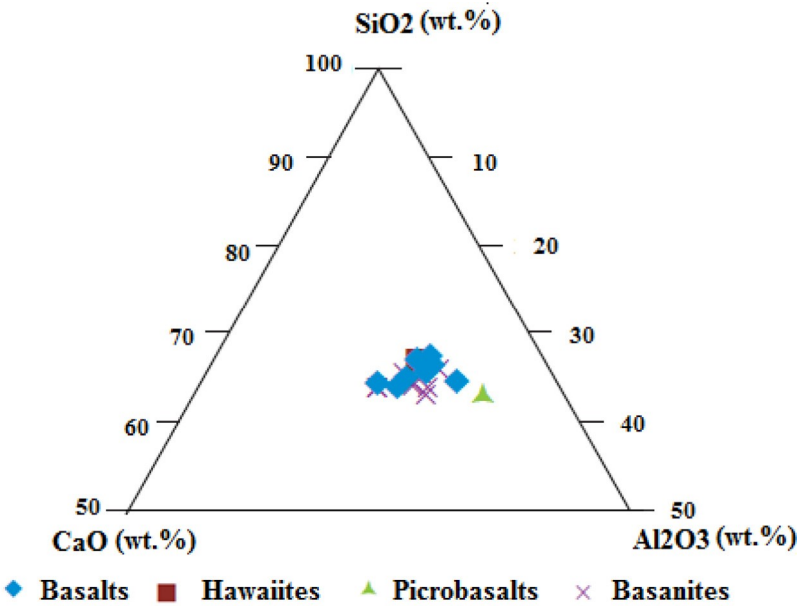


Fig. 5, Plotting of scoriae from the Cameroon Volcanic Line in the CaO-SiO₂-Al₂O₃ diagram,

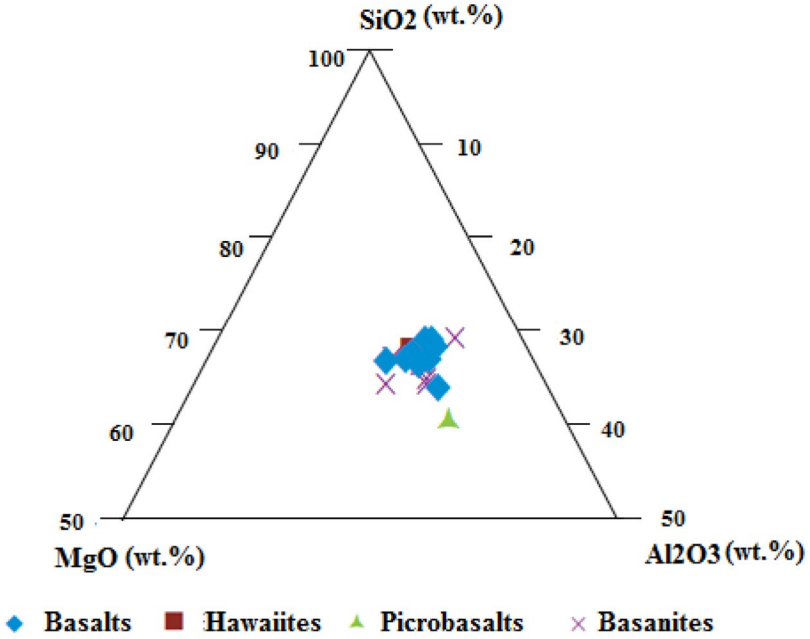


Fig. 6, Plotting of scoriae from the Cameroon Volcanic Line in the MgO-SiO₂-Al₂O₃ diagram,

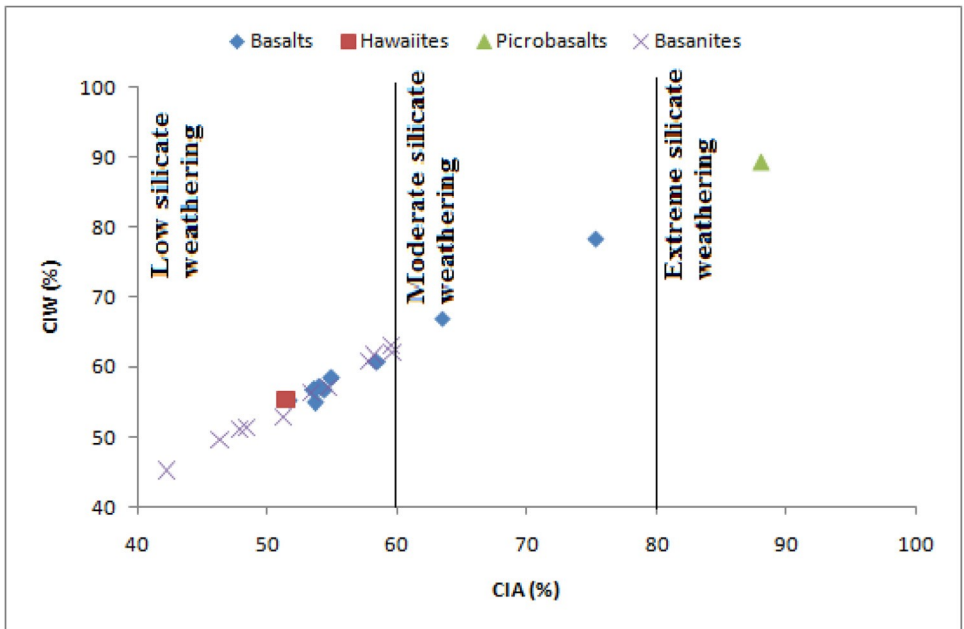


Fig. 7, Variation of the intensity of weathering in the Chemical Index of Alteration (CIA) versus Chemical Index of Weathering (CIW) diagram,

Table 1

Geographical coordinates of volcanic scoriae from the southern part of the Cameroon Volcanic Line,

Sites	Sample code	Geographical coordinates
LIMBE	L1R	N04 °1'99.3"
	L1N	E09 °10' '44.3"
	L2R	
	L2N	N04 °1'39.5"
	L2G	E09 ° 10'44.4"
DJOUNGO	MDR	N04 ° 37'44.5' 35'03.2" E09 °
	MDN	N04 ° 37'30.5' 34'57.4" E09 °
LOUM-TOMBEL	LTN	N04 °43'21.5"
	LTR	E09 °41'26.0"
MANJO-MONENGOLLE	MANJ	N04 °51'42.1"
	MANR	E09 °50'18.7"
MELONG	MMR	N05 ° '11.8' ,
	MMN	E09 ° 44.3"
	MPR	N05 ° E09 ° '54.8" 33.5' ,
DOUPE	DP1	N05 ° '54'' 53'' E10 °31'
	DP2	N05 ° '58'' 46'' E10 °31'
YAMBA	YMB1	N05 ° '56'' 55'' E10 °29'
	YMB2	N05 ° '52'' 05'' E10 °31'

FOUMBOT	MANG	N05 °	'13''		
			44''		
		E10 °37'			
	MANF	N05 °	'05''		
			26''		
		E10 °37'			
NJINKOUO	NJK1	N05 °28'	42''	NJK2	E10 °37' 03''
GALJM	GAL				N05°39 01''
					E10°24 25''

as mineral reactions (amphibole after clinopyroxene), The volcanic scoriae have basanitic, hawai- itic and basaltic compositions, exhibit glassy texture and are essentially composed of plagioclase, olivine, clinopyroxene, \pm hornblende, while nepheline is noticed as secondary mineral,

Samples were air-dried crushed and finely ground with a grinder to a required fine powdered sample (2 mm sieve), For mineralogical, geochemical and Fourier transform infrared IR spectrometry (FT-IR) analyses, samples were sieved at 250 μ m,

Mineralogical and geochemical analyses (trace elements) were carried out at the Geoscience Laboratories (Sudbury, Canada), The mineralogical composition was determined using the PAN Analytical X'PERT PRO diffractometer equipped with a monochromator, Sample powders were pulverized with an agate mortar and pestle (2 or 3 g) and smear mounts were prepared on low background silicon disks for analysis, K α_2 peaks shown as dashed lines and do not have a "V-shaped" indicator at the top of the pattern windows, K α_2 peaks have been omitted from the peak list to facilitate the interpretation of the samples, Samples were analysed with Co radiation at 40 kV and 45 mA, The following parameters were used in the X'Pert High Score Plus software for the peak identification: Minimum significance: 1,00; Minimum tip width (2θ):0,01; Maximum tip width (2θ): 1,00; Peak base with (2θ): 2,00; Method: Top of smoothed peak, These data were reported under the certificate number CRT-18-0421-01 of 28,01,2019, All raw data and QC certificate are available as supplementary material files (Tables v and vi), This spectrometer was used to determine a set crystalline phases (feldspar/sulfide, quartz, augite/olivine, ettringite/feldspars, augite/nepheline, olivine, kaolinite, sulfide, illite, plagioclase, augite and pyroxene) on samples,

The determination of major elements concentrations was done at the Geological Institute (ISTE) of the University of Lausanne (Switzerland), Powders (2 or 3 g) were analyzed by X-Ray Fluorescence Spectrometry using a PANalytical PW2400 wavelength dispersive spectrometer to obtain the composition of SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃, MgO, MnO, Na₂O, K₂O, Cr₂O₃, NiO and P₂O₅, A two-step loss on ignition (LOI) determination was employed: 105 °C under nitrogen to drive off adsorbed water; 1000 °C under oxygen to drive remaining volatiles and oxidize Fe, The LOI measurement was done before the determination of major element concentrations using XRF instrument, Two international standards (Sy-2 and NIM-N) were used (supplementary material file: Table vii),

The determination of trace elements (including rare earth elements) was done using an Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) instrument, Powders (0,25 g) were digested with a mixture of two acids (HCl + HClO₄) at 120 °C in sealed Teflon containers during one week, after, rinsed with dilute HNO₃ and dried, The residue was again dissolved in a mixture of three acids (HNO₃, HCl, and HF) at 100 °C, Two types of reference materials were used: the InHouse Reference Material (ISHT-18-25,786, 18-25,787, and 18-25,788) with the QC Name MRB-29 and the International Reference Material (INTL-18-31,560 (QC Name: GSP-2), 18-31,561, and 18-31,562) with the QC Name GSP-2, The Certificate Ontario Reference Material (CORM) was also used, The Quality Control (QC) used also the Instrument Control (INST), the Laboratory Duplicate (DUP-18-45,795, 18-45,795, 18-

45,796, and 18–45,797; the QC Name is DUP) and the Laboratory Blank (BLANK-18–19,493, 18–19,494, and 18–19,495), The raw data of QC are reported in supplementary material file (Table viii),

The Fourier transform infrared IR spectrometry (FT-IR) analyses were used for the measurement of the vibrations of atoms and the determination of the functional groups, The Fourier transform infrared (FT-IR) spectrometry data were obtained at the Inorganic Laboratory of the University of Yaoundé I (Cameroon) using the BURKER OPTIK ALPHA spectrometer, The well crystallized kaolinite (KGa-1b) and the Polystyrene infrared standard were used as International Standards, Well crystallized kaolinite was obtained from the Source Clay Repertory of the Clay Minerals Society (Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA), Polystyrene infrared standard helps to compare the spectra with those of the data base, For this analysis, we used 0,2 g of sample just to cover the diamond, This spectrometer was used to obtain various spectra of crystalline phases and their behavior with C-H, O-H, N-H, C-O, Si-O-Si and Al-O-Al functions, The infra-red spectra were recorded in the wavelength range from 4000 to 400 cm^{-1} , Absorbance and wave number plot of these volcanic scoriae exhibits flat spectra without any wave concerning mono-boundary crystalline phases whereas into di-boundary crystalline phases (Si-O-Si and Al-O-Al) with low wave numbers, many fluctuations occur suggesting that the amorphous phase in the sample contained calcium ions that hinder the consumption of calcium from ettringite, feldspars and plagioclase which are present in the volcanic scoriae,

Basanites and hawaiite are low silicate weathering, basalts are low to moderate silicate weathering while microbasalt is extreme silicate weathering, However, The Chemical Index of Alteration (CIA) and Chemical Index of Weathering (CIW) values highlight the low intensity of chemical weathering [2, 3], Thus, these volcanic scoriae are amorphous phase and k-feldspar high content suggesting their possible use as cement replacement during civil applications, This trend is confirmed by SiO_2 - CaO - Al_2O_3 and SiO_2 - MgO - Al_2O_3 diagrams where SiO_2 , CaO , MgO and Al_2O_3 vary between 60–70%, 30–40%, 30–40% and 30–40%, respectively, All these indicate that volcanic scoriae from the southern continental part of the Cameroon volcanic line can serve as cement replacement during civil applications,

3, Geology

The volcanic scoriae studied are located at the southern part of Cameroon Volcanic Line which represents SSW to NNE trending, This Cameroon volcanic line is made up of oceanic and continental volcanic mountains and orogenic plutonic complexes, The studied area belongs to the continental part, The Cameroon Volcanic Line might be the result of a SW–NE linear mantle upwelling, or ‘hotline’, possibly developed along lithospheric discontinuities during reactivation of Pan-African lineaments between the cratonic blocks [4],

Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interests, The authors agree with the information provided in this manuscript and the Data in Brief policy,

Data Availability

[Petrology and geochemistry dataset of the volcanic scoriae from southern part of the continental Cameroon Volcanic Line \(Original data\)](#) (Earth/Chem),

CRediT Author Statement

Paul-Desire Ndjigui: Conceptualization, Project administration, Resources, Supervision, Data curation, Formal analysis, Visualization, Writing – review & editing, Validation; **Estelle Huguet O, Ngono:** Methodology, Data curation, Formal analysis, Investigation, Writing – original draft, Writing – review & editing,

Acknowledgments

This paper is a partial part of the second author's PhD thesis at the University of Yaoundé I (Cameroon), The authors are grateful to the staff of the Department of Earth Sciences (University of Yaoundé I) for sample preparation and packaging; Geoscience Laboratories of the University of Liege (Belgium) for XRD and the laboratories of the University of Lausanne (Switzerland) for XRF analyses,

References

- [1] E.H, Ngono Onana , C.G, Fuh , P,-,D, Ndjigui , Petrological features of volcanic scoriae from the southern part of the Cameroon Volcanic Line and their supplementary cementations applications, *Heliyon* 8 (2022) e08684 ,
- [2] I, Harnois , The CIW index: a new chemical index of weathering, *Sediment, Geol*, 55 (1988) 319–322 ,
- [3] H,W, Nesbitt , G,M, Young , Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermody- namic and kinetic considerations, *Geochim, Cosmochim, Acta* 48 (1984) 1523–1534 ,
- [4] L, Milelli , L, Fourel , C, Jaupart , A lithospheric instability origin for the cameroon volcanic line, *Earth Planetary Sci, Let*, 335–336 (2012) 80–87 ,