

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I
FACULTE DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE
ET FORMATION DOCTORALE
SCIENCES, TECHNOLOGIES
ET GÉOSCIENCES



THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I
FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL
OF SCIENCE, TECHNOLOGY
AND GEOSCIENCES

DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

Laboratoire de Géosciences des Formations Superficielles et Applications
Research Laboratory for Geosciences of Superficial Formations and Applications

**PÉTROLOGIE ET PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES DES SABLES
DU COURS INFÉRIEUR DE LA SANAGA, CAMEROUN**

Thèse présentée en vue de l'obtention du Doctorat/PhD en Sciences de la Terre

Option : Sols, Eau, Sciences Géotechniques
Spécialité : Sciences Géotechniques et Hydrotechniques

Par

Marie Thérèse NANGA BINELI
Matricule 08X0608
Master en Sciences de la Terre

Sous la co-direction de

Vincent Laurent ONANA
Professeur

Georges Emmanuel EKODECK
Professeur

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

Option : Sols, Eau, Sciences Géotechniques
Spécialité : Sciences Géotechniques et Hydrotechniques

Nom et Prénoms du candidat : NANGA BINELI Marie Thérèse

Matricule : 08X0608

Titre de la thèse : «PÉTROLOGIE ET PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES DES SABLES
DU COURS INFERIEUR DE LA SANAGA, CAMEROUN»

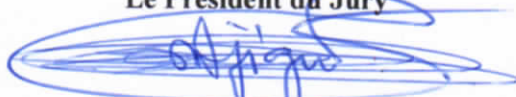
Date de soutenance : **Vendredi, le 26 mai 2023.**

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.

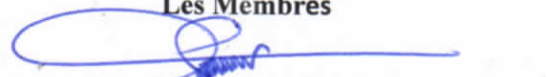
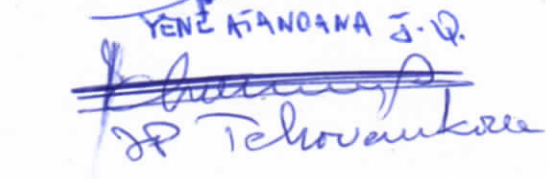
En foi de quoi, la présente **Attestation de correction** lui est délivrée, pour servir et valoir ce que de droit.

Fait à Yaoundé, le 13.06.2023

Le Président du Jury


Njigui Paul-Désiré
Professeur

Les Membres


YÉNÉ KANOANA J.-D.

JP Tchouankou

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I
FACULTE DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE
ET FORMATION DOCTORALE
SCIENCES, TECHNOLOGIES
ET GÉOSCIENCES



THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I
FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL
OF SCIENCE, TECHNOLOGY
AND GEOSCIENCES

DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

Laboratoire de Géosciences des Formations Superficielles et Applications
Research Laboratory for Geosciences of Superficial Formations and Applications

**PÉTROLOGIE ET PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES DES SABLES
DU COURS INFÉRIEUR DE LA SANAGA UTILISABLES
DANS LE BÂTIMENT ET LES TRAVAUX PUBLICS**

Thèse présentée en vue de l'obtention du Doctorat/PhD en Sciences de la Terre

Option : Sols, Eau, Sciences Géotechniques
Spécialité : Sciences Géotechniques et Hydrotechniques

Par

Marie Thérèse NANGA BINELI
Matricule 08X0608
Master en Sciences de la Terre

Sous la co-direction de

Vincent Laurent ONANA
Professeur

Georges Emmanuel EKODECK
Professeur

Année académique 2022–2023

A la mémoire de Marcelle Medili Ndi et Gallus Manga

L'Homme est un apprenti, la douleur est son maître, et nul ne se connaît tant qu'il n'a pas souffert.

Alfred De Musset

Remerciements

Bien qu'il me manque la force nécessaire à l'issue de cette épreuve ardue pour remercier les personnes et les institutions qui ont contribué à l'élaboration de ce travail, j'aimerais remercier le Bon Dieu pour sa protection, pour m'avoir donné les modestes moyens de financer cette thèse et pour toutes les grâces qu'Il m'a accordées durant tout ce parcours plein d'écueils.

Je remercie vivement le Professeur Georges Emmanuel Ekodeck, pour avoir accepté de diriger ces travaux. Ces quelques mots de gratitude ne suffiront pas à exprimer l'admiration et la déférence que je lui porte, ainsi que le plaisir et la chance, que j'ai eus à l'avoir comme enseignant, puis comme encadreur.

Je remercie mon co-directeur le Professeur Vincent Laurent Onana, ce grand-frère avec qui les relations ont été très difficiles au départ. Lorsque je commençais cette thèse, le Professeur Vincent Laurent Onana était très sceptique envers ma personne. Il m'avait soumis à plusieurs tests sur le plan académique. J'ai dû travailler tous les jours, pour espérer un jour, gagner sa confiance. Lorsque je me plantais face à un problème académique, il me réprimandait de la plus dure des manières. Le professeur Onana ne s'est pas limité à son rôle d'encadreur, il est devenu mon grand-frère. Je remercie le Bon Dieu de l'avoir mis sur mon chemin, parce que je lui dois beaucoup sur le plan académique et humain. Je le remercie pour sa disponibilité, sa rigueur et ses précieux conseils. Puisse ce modeste travail être à la hauteur de ses espérances.

J'adresse mes remerciements au Professeur Paul-Désiré Ndjigui, Chef du Département des Sciences de la Terre. Il m'a beaucoup encouragée dans le travail grâce à la seule et unique question qu'il me posait « Madame Nanga, vous déposez votre thèse quand ? ».

Mes remerciements vont également au Professeur Emile Ekomane avec qui j'ai beaucoup échangé sur les minéraux lourds et sur le transport des sédiments.

Je ne saurais clore ce volet académique sans remercier les enseignants du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, pour toutes les connaissances, à moi, transmises. Il s'agit des Professeurs Jean Paul Nzenti, Robert Roger Medjo Eko, Jules Rémy Ndam Ngoupayou, Rose Yongue-Fouateu, Joseph Mvondo Ondo, Joseph Quentin Yene Atangana, et du Docteur Daniel Lamilen Billa.

Je remercie les Docteurs Aloys Thierry Ndzié Mvindi, Arnaud Ngo'o Ze, Joël Fabrice Nyemb Bayamack et Hervé Nyassa Ohandja, qui sont des aînés académiques que l'Université m'a donnés. Ils ont toujours été disposés à m'aider et à m'écouter.

Mes chers parents, Henri Bineli Levoa et Thérèse Nanga, je vous dis sincèrement merci pour votre amour et votre soutien depuis ma naissance jusqu'à ce jour. J'espère mes chers et

tendres parents, et surtout toi mon petit papa, qui n'a jamais véritablement cru à l'éducation d'une fille, j'espère que ce travail te permettra de voir que tes efforts n'ont pas été vains et, qu'une fille, lorsqu'elle est bien encadrée peut réaliser de grandes œuvres.

Je remercie mes collègues du Lycée Bilingue de Ndikinimeki, notamment : Mesdames Rose Ebom, Gisèle Amatakana, Christine Ngono et Monsieur Ive Bokagne pour tous leurs précieux conseils.

Je remercie Monsieur Appolinaire Anouna pour m'avoir encadrée dans l'adolescence et pour m'avoir élevée comme sa fille. Sa rigueur a été très bénéfique pour moi. Ces remerciements vont également à Madame Bénédicte Anouna, pour ses secrets culinaires, à moi, transmis.

En Décembre 2018, pendant qu'on m'annonçait la mort de mon conjoint, je voyais le monde entier s'écrouler autour de moi. Il fallait trouver rapidement des solutions pour avoir un logement que je pouvais payer aisément, car je savais que toutes les charges me revenaient désormais. Monsieur Bernard Bitomo m'a offert un cadre idéal pour pouvoir élever mes enfants. Cet acte m'a profondément marqué, je lui en suis reconnaissante.

Je remercie mon seul et unique compagnon de terrain, Yves Robert Bikoy, qui m'a beaucoup aidé lors des différentes campagnes de terrain.

Mes remerciements vont également à mes camarades de promotion pour tous les moments passés au Laboratoire. Il s'agit de : Diane Ngono Mveng, Armel Eko et Donald Herman Fossi. Ces remerciements vont également à l'endroit de mes cadets de laboratoire que sont Ghislain Nguentchou Tchanfa, Willy Passy Mvindi Mvindi, Danielle Léa Mebouinz, Stella Ngono Mbenti, Carole Pierre Ongobassomben, Olivier Lebengue, Thérèse Raïssa Messina, Marthe Sandrine Akoumou, Carole Sandji et Justin Tsamnye, pour l'aide qu'ils m'ont apportée. Que le Bon Dieu leur accorde la grâce de terminer leurs travaux de thèse de Doctorat/PhD.

J'exprime ma profonde gratitude à ma fille Ingrid Marcelle Manga Medili et à mon fils Pagnol Divin Manga Tanga, pour leur sourire, leur joie de vivre et leur assistance physique de tous les instants. Puisse le Seigneur Jésus-Christ leur accorder la grâce d'être d'excellentes personnes.

Je ne saurais oublier trois membres de mon ancienne belle-famille, notamment : Simon Pierre Nga, Gothard Enama et Liliane Nga. Je leur dis un grand merci pour leur soutien moral et spirituel.

J'exprime ma profonde reconnaissance à mes amies Nadine Kenne Talom, Noela Nahnyonga et Agnes Pelagie Atebede Aloa, pour leur assistance et leurs encouragements.

À toi Merveille Bella Enama, ma chère sœur, la deuxième mère de mes enfants, toi avec qui j'ai traversé les moments les plus difficiles de ma vie, je te remercie infiniment pour ton aide et ton soutien inconditionnels.

Toute ma gratitude va également à mes frères et sœurs : Sidonie Nsegue Bineli, Mathieu Levoa Bineli, Dieudonné Olinga Bineli, Pauline Obele, Bernadette Nga Bineli, Françoise Mifoumou Enama, Hélène Balla Enama, Mathieu Levoa Enama et, en particulier, à mon petit frère, Arnaud Bineli Bineli, qui a mis des moyens financiers et un véhicule à ma disposition pour ma première campagne de terrain.

À mes belles sœurs Constance Abessolo, Sandrine Bilé Manga et Reine Bella, je vous remercie pour toute votre assistance durant les moments difficiles de ma vie.

Je dis un merci particulier à mon grand frère François Mvogo Minlo que la nature m'a donné.

Que tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse de Doctorat/PhD et dont les noms n'ont pas été mentionnés, trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude et la ferme assurance que leurs services ne seront jamais oubliés.

Marie Thérèse Nanga Bineli

Table des matières

| | |
|---|--------------|
| Dédicace | i |
| Citation | ii |
| Remerciements | iii |
| Table des matières | vi |
| Liste des figures | xi |
| Liste des tableaux | xiii |
| Liste des abréviations, sigles et acronymes | xv |
| Résumé | xvii |
| Abstract | xviii |
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I. Généralités | 6 |
| Introduction..... | 7 |
| I.1. Contexte naturel | 7 |
| I.1.1. Localisation du cours inférieur de la Sanaga..... | 7 |
| I.1.2. Géographie physique | 7 |
| I.1.2.1. Climatologie | 7 |
| I.1.2.2. Végétation | 7 |
| I.1.2.3. Géomorphologie | 9 |
| I.1.2.3.1. Orographie | 9 |
| I.1.2.3.2. Hydrographie | 9 |
| I.1.2.4. Populations et activités économiques | 11 |
| I.1.2.5. Géologie | 11 |
| I.1.2.5.1. Socle | 11 |
| I.1.2.5.2. Sols | 12 |
| I.2. Travaux antérieurs complémentaires | 14 |
| I.2.1. Généralités sur les sables | 14 |
| I.2.1.1. Définition | 14 |
| I.2.1.2. Typologie des sables | 14 |
| I.2.1.2.1. Sables de rivière | 14 |
| I.2.1.2.2. Sables de mer | 14 |
| I.2.1.2.3. Sables de plage | 15 |
| I.2.1.2.4. Sables de lagune | 15 |
| I.2.1.2.5. Sables de dune | 15 |
| I.2.1.2.6. Sables artificiels | 15 |
| I.2.1.3. Pétrologie des sables | 16 |
| I.2.1.4. Caractéristiques géotechniques des sables | 18 |
| I.2.1.4.1. Granularité | 18 |
| I.2.1.4.2. Texture | 19 |
| I.2.1.4.3. Couleur | 19 |
| I.2.1.5. Utilisation des sables dans le Génie civil | 19 |
| I.2.2. Caractéristiques chimico-minéralogiques et géotechniques des ciments au Cameroun | 21 |
| I.2.2.1. Caractéristiques chimiques | 21 |
| I.2.2.1.1. Module d'alumine | 21 |
| I.2.2.1.2. Module hydraulique | 21 |
| I.2.2.1.3. Facteur de saturation en chaux | 21 |

| | |
|---|-----------|
| I.2.2.2. Caractéristiques minéralogiques | 22 |
| I.2.2.3. Caractéristiques géotechniques | 22 |
| I.2.2.3.1. Teneur en eau | 22 |
| I.2.2.3.2. Poids volumique apparent | 22 |
| I.2.2.3.3. Surface spécifique | 22 |
| I.2.2.3.4. Résistances à la compression et à la flexion | 22 |
| I.2.3. Géologie et paramètres géotechniques des granulats | 23 |
| I.2.3.1. Géologie | 23 |
| I.2.3.2. Paramètres géotechniques | 23 |
| Conclusion | 24 |
| Chapitre II. Matériels et méthodes..... | 25 |
| Introduction | 26 |
| II.1. Enquêtes bibliographiques | 26 |
| II.2. Travaux de terrain | 26 |
| II.2.1. Matériels de terrain | 26 |
| II.2.2. Localisation des points de prélèvement | 26 |
| II.2.3. Identification des échantillons | 30 |
| II.3. Travaux de laboratoire | 30 |
| II.3.1. Analyses pétrologiques | 30 |
| II.3.1.1. Extraction des minéraux lourds | 30 |
| II.3.1.2. Observations microscopiques | 30 |
| II.3.1.3. Analyses minéralogiques et géochimiques | 30 |
| II.3.2. Essais géotechniques | 32 |
| II.3.2.1. Essais géotechniques sur les granulats fins | 33 |
| II.3.2.1.1. Poids volumique apparent | 33 |
| II.3.2.1.2. Poids volumique des grains solides | 33 |
| II.3.2.1.3. Essai d'analyse granulométrique | 33 |
| II.3.2.1.4. Module de finesse | 33 |
| II.3.2.1.5. Équivalent de sable | 34 |
| II.3.2.2. Essais géotechniques sur les granulats grossiers | 34 |
| II.3.2.2.1. Poids volumique apparent | 34 |
| II.3.2.2.2. Poids volumique des grains solides | 34 |
| II.3.2.2.3. Propreté superficielle | 34 |
| II.3.2.2.4. Essai Micro-Deval | 34 |
| II.3.2.2.5. Essai Los Angeles | 36 |
| II.3.2.3. Méthode de formulation des bétons | 36 |
| II.3.2.3.1. Choix de la méthode de formulation théorique : Méthode de Dreux-Gorisse | 38 |
| II.3.2.3.1.1. Détermination du rapport ciment/eau | 38 |
| II.3.2.3.1.2. Dosage en ciment et en eau | 38 |
| II.3.2.3.1.3. Détermination du mélange optimal | 38 |
| II.3.2.3.1.4. Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériau | 41 |
| II.3.2.3.1.5. Détermination de la compacité du béton | 41 |
| II.3.2.3.1.6. Détermination des poids de granulats | 44 |
| II.3.2.4. Essai mécanique : résistance à la compression uniaxiale | 46 |
| II.3.3. Exploitation des données | 46 |
| II.3.3.1. Exploitation des données de diffraction des rayons X | 46 |
| II.3.3.2. Exploitation des données géochimiques | 47 |
| II.3.3.2.1. Indices et diagrammes géochimiques | 47 |
| II.3.3.2.2. Exploitation des données géochimiques des éléments en traces | 49 |

| | |
|---|-----------|
| II.3.3.2.3. Exploitation des données géochimiques des Terres rares | 50 |
| II.3.3.3. Exploitation des données géotechniques | 50 |
| Conclusion | 50 |
| Chapitre III. Pérologie des roches sources probables des sables du bassin versant de la Sanaga | 51 |
| Introduction..... | 52 |
| III.1. Pérographie, minéralogie et géochimie des basaltes..... | 52 |
| III.1.1. Pérographie et minéralogie..... | 52 |
| III.1.2. Géochimie..... | 54 |
| III.2. Pérographie, minéralogie et géochimie des granites..... | 54 |
| III.2.1. Pérographie et minéralogie..... | 54 |
| III.2.2. Géochimie..... | 57 |
| III.3. Pérographie, minéralogie et géochimie des gneiss..... | 57 |
| III.3.1. Pérographie et minéralogie..... | 57 |
| III.3.2. Géochimie..... | 60 |
| III.4. Pérographie, minéralogie et géochimie des Chloritoschistes..... | 64 |
| III.4.1. Pérographie et minéralogie..... | 64 |
| III.4.2. Géochimie..... | 64 |
| III.5. Pérographie, minéralogie et géochimie des micaschistes..... | 64 |
| III.5.1. Pérographie et minéralogie..... | 64 |
| III.5.2. Géochimie..... | 68 |
| Conclusion..... | 68 |
| Chapitre IV. Pérologie des sables | 69 |
| Introduction..... | 70 |
| IV.1. Pérographie, | 70 |
| IV.2. Minéralogie | 70 |
| IV.3. Géochimie | 80 |
| IV.3.1. Eléments majeurs | 80 |
| IV.3.2. Eléments en traces | 80 |
| IV.3.3. Terres rares | 89 |
| Conclusion | 93 |
| Chapitre V. Paramètres géotechniques des matériaux et des bétons hydrauliques standards | 94 |
| Introduction | 95 |
| V.1. Paramètres physiques des sables | 95 |
| V.1.1. Poids volumique apparent | 95 |
| V.1.2. Poids volumique des grains solides | 95 |
| V.1.3. Équivalent de sable | 95 |
| V.1.4. Module de finesse | 95 |
| V.1.5. Granularité | 95 |
| V.2. Paramètres physico-mécaniques des granulats basaltiques et granitiques | 97 |
| V.2.1. Paramètres physiques | 97 |
| V.2.1.1. Poids volumique apparent | 97 |
| V.2.1.2. Poids volumique des grains solides | 97 |
| V.2.1.3. Propreté superficielle | 97 |
| V.2.2. Paramètres mécaniques | 97 |
| V.2.2.1. Micro-Deval | 97 |
| V.2.2.2. Los Angeles | 97 |
| V.2.2.3. Classification mécanique des granulats | 99 |

| | |
|---|------------|
| V.3. Paramètres physico-mécaniques et chimico-minéralogiques du ciment..... | 99 |
| V.4. Formulation des différents bétons | 99 |
| V.4.1. Granularité des agrégats | 99 |
| V.4.2. Compositions des différents bétons | 105 |
| V.4.3. Résistance à la compression uniaxiale des éprouvettes de béton | 105 |
| Conclusion | 105 |
| Chapitre VI. Exploitation et discussion des résultats | 106 |
| Introduction | 107 |
| VI.1. Maturité et recyclage des sables du cours inférieur de la Sanaga..... | 107 |
| VI.2. Intensité de l'altération | 107 |
| VI.3. Provenance des sables..... | 110 |
| VI.4. Influence de la composition minéralogique et géochimique des agrégats sur les valeurs de la résistance en compression uniaxiale des bétons | 114 |
| VI.5. Influence de la microtexture des granulats grossiers basaltiques et granitiques sur les valeurs de la résistance en compression uniaxiale des bétons | 120 |
| Conclusion | 120 |
| Conclusion générale et perspectives..... | 122 |
| Références | 125 |
| Annexes | |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure I.1. Carte de localisation de la zone d'étude | 8 |
| Figure I.2. Bloc diagramme géomorphologique du cours inférieur de la Sanaga..... | 10 |
| Figure I.3. Carte géologique de la zone d'étude | 13 |
| Figure II.4. Position des échantillons de sables le long du cours inférieur de la Sanaga | 29 |
| Figure II.5. Conditionnement des échantillons | 31 |
| Figure II.6. Abaque d'évaluation approximative du dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée | 39 |
| Figure II.7. Droite brisée OAB dite droite de référence | 40 |
| Figure II.8. Préparation des éprouvettes de bétons | 45 |
| Figure II.9. Diffractogramme illustratif permettant de déterminer la proportion d'un minéral X... | 48 |
| Figure III.10. Macrophotographie et microphotographies des agrégats basaltiques en lumière non analysée et en lumière polarisée analysée..... | 53 |
| Figure III.11. Macrophotographie et microphotographies des agrégats granitiques en lumière non analysée et en lumière polarisée analysée | 56 |
| Figure III.12. Macrophotographie et microphotographies des gneiss à biotite et à grenat en lumière non analysée et en lumière polarisée analysée | 59 |
| Figure III.13. Macrophotographie et microphotographies des chloritoschistes en lumière non analysée et en lumière polarisée analysée | 63 |
| Figure III.14. Macrophotographie et microphotographies des micaschistes à grenat en lumière non analysée et en lumière polarisée analysée | 66 |
| Figure IV.15a. Points de prélèvements des matériaux | 71 |
| Figure IV.15b. Point de prélèvement des échantillons sur les bancs de sable des berges de la Sanaga à l'estuaire (Yoyo)..... | 72 |
| Figure IV.16. Diffractogrammes des rayons X des sables du cours inférieur de la Sanaga | 74 |
| Figure IV.17. Diagrammes circulaires illustrant la répartition des minéraux lourds dans les échantillons de sable SA18 à SA21..... | 76 |
| Figure IV.18. Diagrammes circulaires illustrant la répartition des minéraux lourds dans les échantillons de sable SA22 à SA24..... | 77 |
| Figure IV.19. Diagrammes circulaires illustrant la répartition des minéraux lourds dans les échantillons de sable SA25 à SA29..... | 78 |
| Figure IV.20. Diagrammes circulaires illustrant la répartition des minéraux lourds dans les échantillons de sable SA30 à SA34..... | 79 |
| Figure IV.21. Spectres des éléments majeurs des sables étudiés normalisés par rapport aux Données de UCC | 82 |

| | |
|--|-----|
| Figure IV.22. Spectres des éléments traces des sables étudiés normalisés par rapport aux données de UCC | 85 |
| Figure IV.23. Spectres des terres rares des sables de la Sanaga normalisés par rapport aux données de la chondrite | 91 |
| Figure IV.24. Spectres des terres rares des sables de la Sanaga normalisés par rapport aux données de UCC | 92 |
| Figure V.25. Diffractogramme des rayons X de l'échantillon de ciment Dangote..... | 100 |
| Figure V.26. Courbes granulométriques des sables et des granulats basaltiques étudiés | 101 |
| Figure V.27. Courbes granulométriques des sables et des granulats granitiques étudiés | 102 |
| Figure. V.28. Evolution de la résistance à la compression uniaxiale du BB avec le temps de cure. | 104 |
| Figure. V.29. Evolution de la résistance à la compression uniaxiale du BG avec le temps de cure | 104 |
| Figure VI.30. Position des sables étudiés dans le diagramme illustrant le recyclage des sédiments | 108 |
| Figure VI.31. Position des sables étudiés dans le diagramme de caractérisation de la composition chimique de la roche source | 115 |
| Figure VI.32. Position des sables étudiés dans le diagramme de provenance | 115 |
| Figure VI.33. Comparaison des données de REE des sables étudiés normalisée à la chondrite ... avec celles des roches sources possibles de l'environnement d'étude..... | 117 |
| Figure VI.34. Diagramme comparatif d'évolution de la résistance en compression uniaxiale des bétons BB et BG en fonction du temps de cure | 119 |
| Figure VI.35. Evolution de la résistance en compression uniaxiale des bétons BB et BG en fonction du temps de cure | 119 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau II.1. Coordonnées géographiques des différents points de prélèvement des sables le long du lit majeur du cours inférieur de la Sanaga et des granulats basaltiques et granitiques..... | 27 |
| Tableau II.2. Domaines d'utilisation des sables en fonction de leur module de finesse..... | 34 |
| Tableau II.3. Valeurs recommandées pour l'équivalent de sable..... | 35 |
| Tableau II.4. Valeurs recommandées du coefficient micro-Deval..... | 37 |
| Tableau II.5. Valeurs recommandées du coefficient Los Angeles et différentes classes Granulaires..... | 37 |
| Tableau II.6. Coefficient granulaire G en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats | 39 |
| Tableau II.7. Valeurs de K, en fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment | 42 |
| Tableau II.8. Compacité du béton en fonction de Dmax, de la consistance et du serrage | 43 |
| Tableau III.9. Concentration des éléments majeurs (%) des basaltes..... | 55 |
| Tableau III.10. Concentration des éléments majeurs (%) des granites..... | 58 |
| Tableau III.11. Concentration des éléments majeurs (%) des gneiss..... | 61 |
| Tableau III.12. Concentration des éléments majeurs (%) des chloritoschistes..... | 65 |
| Tableau III.13. Concentration des éléments majeurs (%) des micaschistes | 67 |
| Tableau IV.14. Données texturales et composition minéralogique (%) des sables étudiés | 73 |
| Tableau IV.15. Concentration en minéraux lourds (%) dans les sables étudiés..... | 75 |
| Tableau IV.16. Concentrations en éléments majeurs (%) des sables étudiés | 81 |
| Tableau IV.17. Matrice de corrélation de Pearson entre éléments majeurs | 83 |
| Tableau IV.18. Concentrations en éléments traces (en ppm) des sables étudiés | 84 |
| Tableau IV.19a. Matrice de corrélation de Pearson entre éléments majeurs et LILE..... | 86 |
| Tableau IV.19b. Matrice de corrélation de Pearson entre éléments majeurs et HFSE | 87 |
| Tableau IV.19c. Matrice de corrélation de Pearson entre éléments majeurs et éléments Fe-Mg | 88 |
| Tableau IV.20. Concentrations des terres rares (en ppm) des sables étudiés..... | 90 |
| Tableau V.21. Données des paramètres physiques des sables étudiés..... | 96 |
| Tableau V.22. Données granulométriques des sables étudiés | 96 |
| Tableau V.23. Paramètres physiques des granulats basaltiques et granitiques..... | 98 |
| Tableau V.24. Paramètres mécaniques des granulats basaltiques et granitiques | 98 |
| Tableau V.25. Paramètres physiques et mécaniques du ciment Dangote | 100 |
| Tableau V.26. Composition chimique (%) du ciment Dangote et paramètres chimiques associés..... | 100 |
| Tableau V.27. Compositions des différents bétons | 103 |
| Tableau V.28. Valeurs de résistance à la compression uniaxiale des différents bétons | 103 |

| | |
|--|-----|
| Tableau VI.29. Ratios élémentaires des sables étudiés comparés aux ratios des fractions similaires dérivées de roches felsiques et mafiques | 112 |
| Tableau VI.30. Concentrations (ppm) représentatives en REE des roches sources possibles de la zone d'étude | 116 |

Liste des sigles et acronymes

AFNOR : Association française de normalisation

ASI: *Alumina saturation index*

ASTM: *American society for testing material*

BB : Béton avec granulats basaltiques

BG : Béton avec granulats granitiques

C/E : Rapport ciment/eau

CD : Ciment Dangote

CEM: *Cement*

CIA: *Chemical index of alteration*

CM : Ciment Medcem

CR : Ciment Robusta

EDC: *Electricity development Cameroon*

ES : Equivalent de sable

ESp : Equivalent de sable à piston

ESv : Equivalent de sable visuel

FSC : Facteur de saturation en chaux

GPS: *Global positioning system*

HFSE: *High Field Strength Element*

HREE: *Heavy Rare Earth Element*

ICP-MS: *Inductively coupled plasma-Mass spectrometry*

IHST: *InHouse reference material*

INTL: *International reference material*

K : Terme correcteur

LA: *Los Angeles*

LABOGENIE : Laboratoire National de Génie Civil

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

LILE: *Large Ion Lithophile Element*

LOI: *Loss On Ignition*

LREE: *Light Rare Earth Element*

LVC : Ligne Volcanique du Cameroun

MALI: *Modified Alkali-Lime Index*

MDE: *micro-Deval*

Mf : Module de finesse

MH : Module hydraulique

MIA: *Mafic Index of Alteration*

MS : Module de silice

NF : Norme française

PAAS: *Post - Archean Australian average Shales*

PF : Perte au feu

PIA: *Plagioclase Index of Alteration*

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement

REE: *Rare earth element*

UCC: *Upper Continental Crust*

XRF: *X-Ray Fluorescence*

Résumé

Le présent travail a pour but de caractériser les sables du cours inférieur de la Sanaga sur le plan pétrologique et d'évaluer leurs aptitudes géotechniques dans la confection des bétons hydrauliques. L'étude a été menée sur 19 échantillons de sables et sur des éprouvettes de béton hydraulique standard confectionnées à partir des sables étudiés et des granulats grossiers basaltiques et granitiques. Ces matériaux ont été soumis à des analyses pétrographiques par microscopie optique, minéralogiques par diffraction des rayons X, géochimiques par fluorescence aux rayons X et par spectrométrie de masse atomique, ainsi qu'aux essais géotechniques. Des tests statistiques ont été effectués sur les données géochimiques. Selon la méthode Dreux-Gorisse, deux types de formulations de bétons hydrauliques classiques ont été étudiés : les bétons à base de sables alluviaux et des granulats granitiques (BG) et les bétons à base de sables alluviaux et de granulats basaltiques (BB). Pour chaque famille de bétons, le rapport multiparamétrique ciment/eau a été maintenu constant et égal à $\sim 0,52$. Les analyses pétrologiques ont révélé que les sédiments étudiés sont principalement des sables grossiers. Ces sables sont constitués de quartz, de microcline, de plagioclases, de muscovite, d'ilménite, d'anatase, de magnétite, de minéraux opaques et d'épidote. Les valeurs de l'indice d'altération chimique (53 – 66 %), de l'indice d'altération des plagioclases (57 – 75 %) et de l'indice d'altération mafique (54 – 67 %) révèlent une intensité modérée de l'altération dans les sables étudiés. Les sables étudiés montrent un enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes et une anomalie négative en Eu ($Eu/Eu^* = 0,32 - 0,83$) et, proviennent de roches métamorphiques felsiques datées Néoprotérozoïque (1000 – 700 Ma) du domaine sud Cameroun. Les tests géotechniques montrent que les valeurs optimales de résistance à la compression uniaxiale sont atteintes après 7 jours de cure pour les bétons BG (28,9 MPa) et, après 28 jours, pour les bétons BB (29,6 MPa). La zone de transition entre la pâte de ciment et le granulats grossiers permet une prise plus rapide du mortier dans le béton BG dans lequel les granulats grossiers ont une texture grenue et une composition géochimique proche de celle des sables étudiés. Les valeurs de résistance à la compression uniaxiale du béton sont liées à la nature géologique des granulats et suivent une évolution logarithmique pour les granulats plutoniques acides et, linéaire pour les granulats volcaniques basiques. Sur la base de cette étude expérimentale, les bétons BG présentent les meilleures performances à des temps de durcissement courts de l'ordre de 14 jours.

Mots clés : Afrique Centrale ; Sanaga ; Sable ; Pétrologie ; Agrégats basaltiques et granitiques ; Béton hydraulique ; Résistance à la compression uniaxiale

Abstract

This work aims to characterize the sands of the lower Sanaga River from a petrological point of view and to evaluate their geotechnical aptitudes in making hydraulic concrete. The study was conducted on 19 sand samples and standard hydraulic concrete specimens made from the studied sands and coarse basaltic and granitic aggregates. These materials underwent to petrographic analyses by optical microscopy, mineralogical by X-ray diffraction, geochemical by X-ray fluorescence and by atomic mass spectrometry, as well as geotechnical tests. Statistical tests were performed on the geochemical data. Two types of conventional hydraulic concrete formulations were studied: concrete made with alluvial sand and granites (BG) and concrete made with alluvial sand and basalts (BB), according to Dreux-Gorisse method. For each concrete family, the multiparametric cement/water ratio was kept constant and equal to ~ 0.52 . The petrological analyses revealed that these sediments are mainly coarse-grained sands. These sands consist of quartz, microcline, plagioclases, muscovite, ilmenite, anatase, magnetite, opaque oxides and epidote. The Chemical Index of Alteration (53 – 66%), Plagioclase Index of Alteration (57 – 75%), and Mafic Index of Alteration (54 – 67%) values revealed a moderate intensity of weathering for these sediments. The studied sands show enrichment in light rare earth elements relative to heavy rare earth elements and a negative anomaly in Eu ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.32 - 0.83$). These sands were derived from felsic metamorphic rocks dated Neoproterozoic (1000 – 700 Ma) from south Cameroon domain. Th/U ratios (mean = 5.40; n = 19) reveal that these sands originating from felsic source rocks and are low to moderately recycled. The geotechnical tests showed that optimal compressive strength values are reached after 7 days of curing for BG concretes (28.9 MPa) and after 28 days for BB concretes (29.6 MPa). The transition zone between the cement paste and the coarse aggregate allows a faster setting of the mortar in BG concrete in which the coarse aggregate has a coarse-grainy texture and a geochemical composition close to that of the studied sands. The uniaxial compressive strength values of concrete are related to the geological nature of the aggregates and follow a logarithmic evolution for acidic plutonic aggregates and a linear one for basic volcanic aggregates. Based on this experimental study, BG concretes show the best performance at short curing times of about 14 days.

Keywords: Central Africa; Sanaga River; Sand; Petrology; Basaltic and granitic aggregates; Hydraulic concrete; Uniaxial compressive strength

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les fleuves sont des cours d'eau naturelle qui transportent des matériaux érodés des zones continentales vers les mers et les océans. Les matériaux qu'ils transportent et que l'on appelle 'sédiments', permettent de comprendre les processus d'évolution à l'interface continentale. En effet, les fleuves et les rivières couvrent une grande partie des surfaces continentales et constituent des archives géologiques et environnementales des zones tectoniques et des zones climatiques des bassins fluviaux (Silva *et al.*, 2016). Les modifications texturales et minéralogiques induites par les phénomènes d'altération et de fractionnement au cours des processus sédimentaires entraînent une hétérogénéité géochimique des sédiments fluviaux au cours de leur genèse, de leur transport et de leur dépôt, dans les bassins sédimentaires. Néanmoins, les données géochimiques des sédiments fluviaux sont indispensables à l'étude de la provenance, de l'altération, de l'évolution du climat et de la croûte continentale (Maharana *et al.*, 2018). L'Afrique centrale est une région du monde où le réseau hydrographique est fortement disséqué et présente de grands fleuves, tel le fleuve Sanaga au Cameroun dont les sédiments ont été l'objet de peu ou presque pas d'études. Ce fleuve dont la longueur est de 920 km coule le long d'une zone de cisaillement WSW-ENE matérialisée par une faille dite « Faille de la Sanaga » (Dumont, 1986), mise place au cours de l'orogénèse Précambrien (Toteu *et al.*, 2004 ; Ngako, 2006 ; Ndougsa-Mbarga *et al.*, 2012). En Afrique centrale, le bassin versant de la Sanaga est le plus grand bassin fluvial entièrement camerounais (Dzana *et al.*, 2010). Avec une superficie de 133 000 km², ce bassin fluvial couvre environ 25 % de la surface du Cameroun (Sangen *et al.*, 2010) et est drainé par le fleuve Sanaga qui, par son potentiel hydroélectrique, est le deuxième grand fleuve en Afrique Centrale après le fleuve Congo (4 700 km). Le fleuve Sanaga qui draine près du quart (65 000 km³/an) des ressources en eau (Dzana *et al.*, 2010) du Cameroun, est également l'objet d'une intense activité d'extraction de sables. Environ 600 000 m³ de sables sont extraits par an du lit de ce fleuve (Anonyme, 2015). Pendant des décennies, la provenance des sédiments et les mécanismes qui concourent à leur mise en place ont été l'objet de nombreuses études (Carranza *et al.*, 2001 ; Armstrong-Altrin *et al.*, 2004, 2012, 2015 ; Garzanti *et al.*, 2005, 2012 ; Servaraj et Arthur, 2006 ; Armstrong-Altrin, 2009 ; Singh, 2009 ; Bhuiyan *et al.*, 2011 ; Wu *et al.*, 2011 ; Mondal *et al.*, 2012 ; Bhaskar *et al.*, 2015 ; Askentov et Sattarova, 2016 ; Bah et Hiroaki, 2016 ; Garzanti et Resentini, 2016 ; Silva *et al.*, 2016 ; Maharana *et al.*, 2018). Ces études ont montré que les éléments immobiles et les terres rares sont généralement concentrés dans la fraction fine des sédiments, dans les minéraux primaires accessoires et dans certains minéraux secondaires (Bhuiyan *et al.*, 2011). Les teneurs en terres rares dans les sédiments sont fonction de la composition géochimique des roches sources. Cette composition peut être modifiée par

l'altération, le transport et les processus diagénétiques (Armstrong-Altrin, 2009). Les terres rares et les éléments en traces tels Y, Th, Zr, Hf, Nb, Sc, Co et Cr sont considérées comme de bons traceurs qui permettent d'identifier les sources des matériaux terrestres (Song et Choi, 2009 ; Armstrong-Altrin *et al.*, 2015). La taille des grains est le plus important de tous les autres facteurs de contrôle de la variabilité et de la composition des sédiments (Basu, 1976 in von Eynatten *et al.*, 2016 ; Garzanti *et al.*, 2011 ; Bloemsmma *et al.*, 2012). En Afrique centrale, de nombreuses études ont été réalisées sur les dépôts de sédiments fluviaux (Ndome *et al.*, 2014 ; Ndjigui *et al.*, 2014, 2015, 2018, 2019 ; Mbale *et al.*, 2019 ; Noa Tang *et al.*, 2020) et ont corroboré les résultats des travaux effectués dans d'autres zones géographiques du monde. Cependant, il existe très peu d'études (Silva *et al.*, 2016) sur les sédiments provenant des lits majeurs des fleuves en Afrique centrale. Il est donc important de les étudier, afin de comprendre les processus de contrôle de leurs compositions minéralogique et géochimique, dans le but de connaître les informations géologiques et environnementales que recèlent ces sédiments.

Les sables du fleuve Sanaga sont d'une grande importance économique au vu de l'intense activité d'exploitation que l'on observe tout le long de son lit majeur. Cependant, malgré les quantités importantes de ressources en sables dont regorge ce fleuve Sanaga, très peu d'études scientifiques ont été effectuées sur ces sables en vue de l'optimisation de leurs propriétés sur le plan géotechnique notamment, et en particulier dans l'industrie du bâtiment. La résistance à la compression (σ_c) du béton est fonction de nombreux paramètres tels le rapport ciment/eau, le rapport ciment/granulat, le degré de compactage, la liaison entre le mortier et le granulat, la granulométrie, la forme, la résistance et la taille du granulat (Elices et Rocco, 2008 ; Rocco et Elices, 2009 ; Abdullahi, 2012). Le béton est un matériau composite constitué de trois phases qui sont le mortier, l'interface mortier/granulat et les granulats grossiers. Les granulats grossiers d'un béton hydraulique conventionnel ($\sigma_c < 41$ MPa) proviennent de fragments de roches caractérisés par une résistance élevée. Les granulats représentent en général trois quarts environ du volume du béton. Les granulats grossiers représentent entre 50 et 60 % du mélange de béton, en fonction de la proportion de mélange utilisée (Waziri *et al.*, 2011 ; Ajamu et Ige, 2015). Le pourcentage élevé de granulats grossiers dans le béton hydraulique conventionnel devrait en principe faire que la résistance en compression du béton soit fonction des caractéristiques géologiques de ces granulats. Ses propriétés de ténacité, dureté, forme, taille, solidité, densité et poids volumique devraient influencer la résistance à la compression du béton. A ces propriétés, la minéralogie et l'agencement même des minéraux ou texture des agrégats devraient également influencer la résistance du béton. Cependant, de nombreuses études ont montré que les propriétés des

granulats grossiers limitent rarement la résistance dans le béton conventionnel, parce que ce type de mélange de béton correspond généralement à un rapport multiparamétrique ciment/eau (C/E) compris entre 1,43 et 2. Dans cet intervalle des valeurs de C/E, les composants les plus faibles du béton sont la pâte de ciment durcie et la zone de transition entre la pâte de ciment et le granulats grossiers, plutôt que le granulats grossiers lui-même (Mehta, 1986 ; Larrard et Belloc, 1992 ; Ahmad et Alghamdi, 2012). De même, lors de la conception de mélanges de béton conventionnel, la minéralogie du granulats grossiers est rarement une préoccupation, à moins que le granulats ne contienne des minéraux tels que l'opale, minéral de silice réactif qui a souvent un effet détériorant sur la durabilité du béton (Aitcin et Mehta, 1990). Pour un béton à haute résistance ($\sigma_c > 41$ MPa), la pâte de ciment durcie et la zone de transition ne sont plus des limites de résistance, mais plutôt la minéralogie et la résistance du granulats grossiers qui contrôlent la résistance ultime du béton (Baalbaki *et al.*, 1991 ; Giaccio *et al.*, 1992 ; Wu *et al.*, 2001 ; Beshr *et al.*, 2003 ; Sun *et al.*, 2017 ; Hemmati *et al.*, 2020). Les agrégats, principaux composants du béton, sont des matériaux dont les origines géologiques sont très diverses. La diversité des origines géologiques impliquent la diversité des propriétés de ces matériaux (Sun *et al.*, 2017 ; Atici et Comakli, 2019 ; Kamani et Ajalloeian, 2019 ; Diamantis *et al.*, 2021 ; Fereidooni, 2022). Or, les origines géologiques sont souvent définies de façon très sommaire par la plupart des Ingénieurs, la résistance restant la propriété la plus importante du béton en construction. Cependant, l'Ingénieur tient compte non seulement de la résistance du béton, mais du temps de cure le moins long qui permet un avancement rapide des travaux de construction de l'ouvrage. Or, la zone de transition entre la pâte de ciment et le granulats grossiers peut être influencée par la nature géologique du granulats.

Le présent travail a pour objectif principal de caractériser les sables du cours inférieur de la Sanaga sur le plan pétrologique et d'évaluer de manière comparative leurs aptitudes géotechniques dans la confection des bétons hydrauliques standards obtenus à partir des granulats grossiers basaltiques et des granulats grossiers granitiques, issus des roches les plus communément rencontrées dans le bassin versant de la Sanaga et dont les caractères pétrogénétiques sont "opposés".

Les objectifs spécifiques de l'étude sont :

- décrire les matériaux alluviaux étudiés ;
- préciser les caractéristiques minéralogiques et géochimiques des roches sources probables des sables étudiés ;

- déterminer les compositions minéralogique et géochimique des sables ;
- déterminer la texture et les compositions minéralogique et géochimique des granulats grossiers basaltiques et granitiques ;
- déterminer les paramètres physico-mécaniques des sables, du ciment et des granulats grossiers utilisés ;
- comparer les paramètres physico-mécaniques, des éprouvettes de bétons hydrauliques à partir des sables étudiés et des granulats grossiers basaltiques (BB) et granitiques (BG) ;
- préciser l'intérêt des bétons BB et BG dans l'industrie du bâtiment.

Le présent travail, après l'introduction générale, comprend six chapitres :

- le chapitre I, 'Généralités', porte sur le cadre naturel de la zone d'étude et les travaux antérieurs complémentaires ;
- le chapitre II, 'Matériels et méthodes', présente les travaux effectués sur le terrain et en laboratoire ainsi que les modes d'exploitation des résultats obtenus ;
- le chapitre III, 'Pétrologie des roches sources probables des sables du bassin versant de la Sanaga' décrit les types pétrographiques les plus représentatifs du bassin versant de la Sanaga puis présente leur minéralogie et leur géochimie ;
- le chapitre IV, 'Pétrologie des sables' se focalise sur la pétrographie, la minéralogie et la géochimie des matériaux alluviaux du cours inférieur de la Sanaga ;
- le chapitre V 'Paramètres géotechniques des matériaux et des bétons hydrauliques standards' présente sur les paramètres géotechniques des matériaux étudiés, intervenant dans la formulation des éprouvettes de bétons ;
- le chapitre VI 'Exploitation et Discussion des résultats', définit le mode d'évolution pétrogénétique des sables et précise leur intérêt dans l'industrie du bâtiment lorsqu'ils sont utilisés dans la confection des bétons hydrauliques conventionnels, selon que les granulats sont basiques ou acides, du point pétrologique.

La conclusion générale ressort les principaux résultats obtenus, ainsi que les principales perspectives.

CHAPITRE I.

GÉNÉRALITÉS

Introduction

Le présent chapitre définit le milieu naturel de la zone d'étude. Il localise l'espace géographique et présente les données climatologiques, phytogéographiques et géomorphologiques. Il s'achève par la présentation des travaux antérieurs complémentaires à ceux en cours de réalisation.

I.1. Contexte naturel

I.1.1. Localisation du cours inférieur de la Sanaga

Le cours inférieur de la Sanaga va de Nanga - Eboko à l'Océan Atlantique (Fig. I.1). Sur le plan administratif, cette zone intègre deux grandes régions du Cameroun, la région du Centre et la région du Littoral.

n

I.1.2. Géographie physique

I.1.2.1. Climatologie

Le climat du Cameroun, du fait de sa situation géographique, présente deux nuances prépondérantes : le domaine équatorial et le domaine tropical. Le bassin versant de la Sanaga est situé dans une zone climatique de transition (Santoir et Bopda, 1995). Ce bassin est couvert par cinq principales zones climatiques :

- la zone des plateaux de l'Adamaoua, où règne un climat tropical montagnoux. Elle est caractérisée par des précipitations assez abondantes ;
- la zone montagnouse de l'Ouest, dont le climat est de type tropical d'altitude, avec une influence océanique. Cette zone est caractérisée par des températures nettement plus basses que dans le reste du pays ;
- la zone des savanes du Centre, au climat équatorial à grande saison sèche ;
- la zone forestière du Sud, au climat équatorial ;
- les parties nord et sud de la zone côtière de part et d'autre de la Sanaga inférieure, soumises aux variantes océaniques du climat équatorial.

I.1.2.2. Végétation

La végétation est en relation étroite avec le climat qui varie avec la latitude mais également avec l'altitude. Près des 2/3 du bassin versant de la Sanaga sont constitués d'une végétation qui passe de la savane arbustive au Nord, à la forêt dense humide au Sud

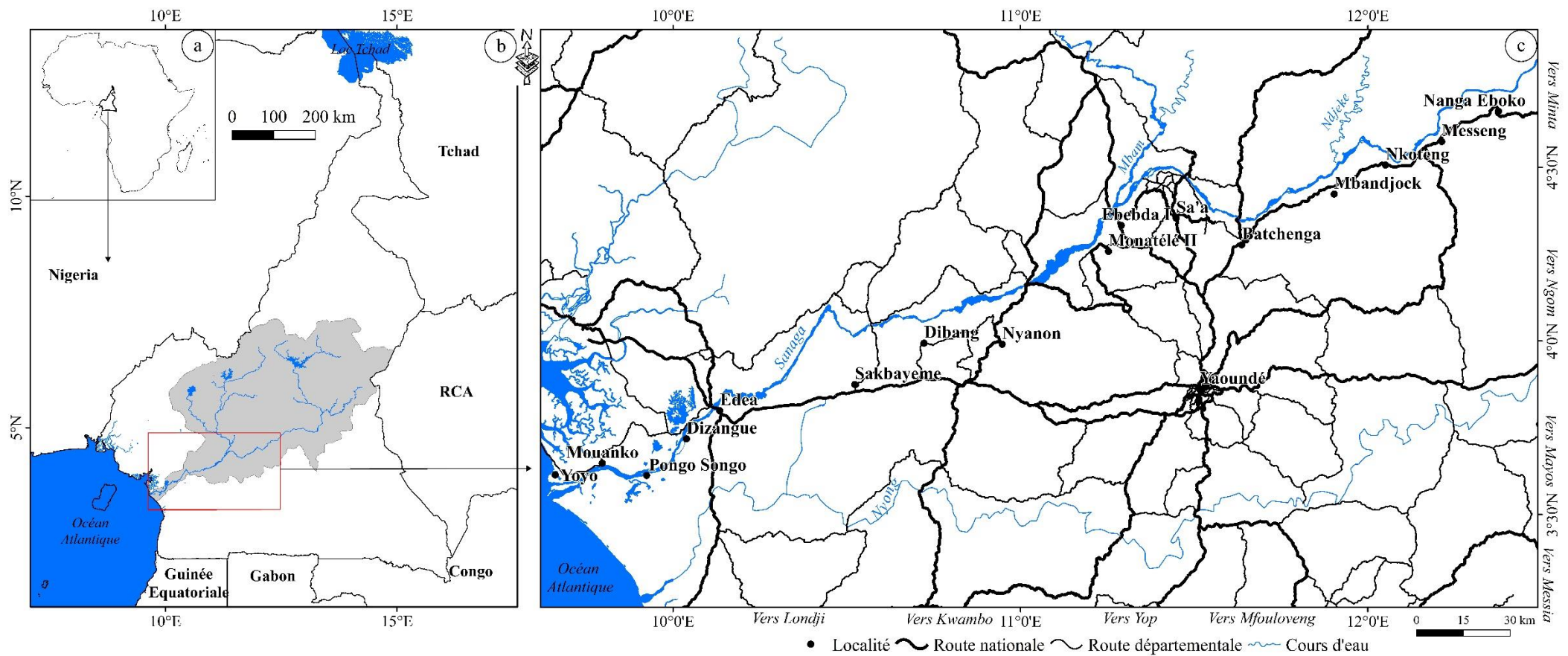


Figure I.1. Carte de localisation du cours inférieur de la Sanaga (D'après les cartes topographiques de Nanga-Eboko, Bafia, Monatélé et Edéa)

(Sighomnou *et al.*, 2007). Dans le plateau de l'Adamaoua, la végétation est caractérisée par des prairies afro-alpines, des savanes arbustives, des savanes boisées et des forêts claires sèches. Les "savanes soudano-guinéennes d'altitude" sont également rencontrées dans la partie supérieure du bassin (Achoundong, 2006). Les Régions du Centre et de l'Est sont couvertes par les savanes basses (Kpoumié *et al.*, 2012). Dans la zone côtière, la pluviométrie, abondante, favorise le développement de la forêt dense ombrophile. Toutefois, l'excès d'eau, dans certaines zones, telle la vallée du Noun, favorise la forêt dense marécageuse. En bordure de mer, l'eau et le sel, sont responsables de la mangrove, qui remonte tous les grands estuaires (Letouzey, 1986).

I.1.2.3. Géomorphologie

I.1.2.3.1. Orographie

Le relief du bassin versant de la Sanaga est fortement accidenté (Olivry, 1986). Ce bassin présente une diminution graduelle d'altitude d'amont en aval (Fig. I.2). Le bassin de la Sanaga draine une succession de plateaux limités au Nord par le plateau de l'Adamaoua (1100 m en moyenne), au Sud par le Plateau sud camerounais (600 – 900 m) et à l'Ouest, par la dorsale camerounaise. Cette dorsale se développe vers l'Est en de vastes plateaux surmontés de massifs volcaniques allant de 1200 à 1600 m (Kpoumié *et al.*, 2012). Dans sa partie supérieure, le bassin de la Sanaga est formé d'une succession de plateaux, à la limite desquels, se situe une série de chutes. Dans la moyenne Sanaga, il se creuse une dépression assez marquée avec une chute des altitudes à moins de 350 m, sur une distance de 140 km. Ces altitudes appartiennent à une ligne de relief qui impose à la Sanaga une direction Est – Ouest. Le passage du plateau à la plaine côtière s'effectue par une diminution d'altitude, marquée dans la Sanaga par des chutes et des rapides. Les chutes et les rapides sont de potentiels sites pour la production de l'énergie hydroélectrique. Dans l'ensemble, près de la moitié du bassin, à Edéa, se trouve entre les altitudes 600 et 900 m (46,9 %) et, un tiers, entre 900 et 1500 m (Olivry, 1986).

I.1.2.3.2. Hydrographie

La zone d'étude appartient au bassin versant de la Sanaga. Le principal et le plus important fleuve de ce bassin est le fleuve Sanaga. Le fleuve Sanaga a une longueur de 920 km (Sangen *et al.*, 2010). De l'amont en aval, la Sanaga présente trois principales subdivisions. Le cours supérieur a une distance de 270 km. Il est représenté par le Djerem et Lom

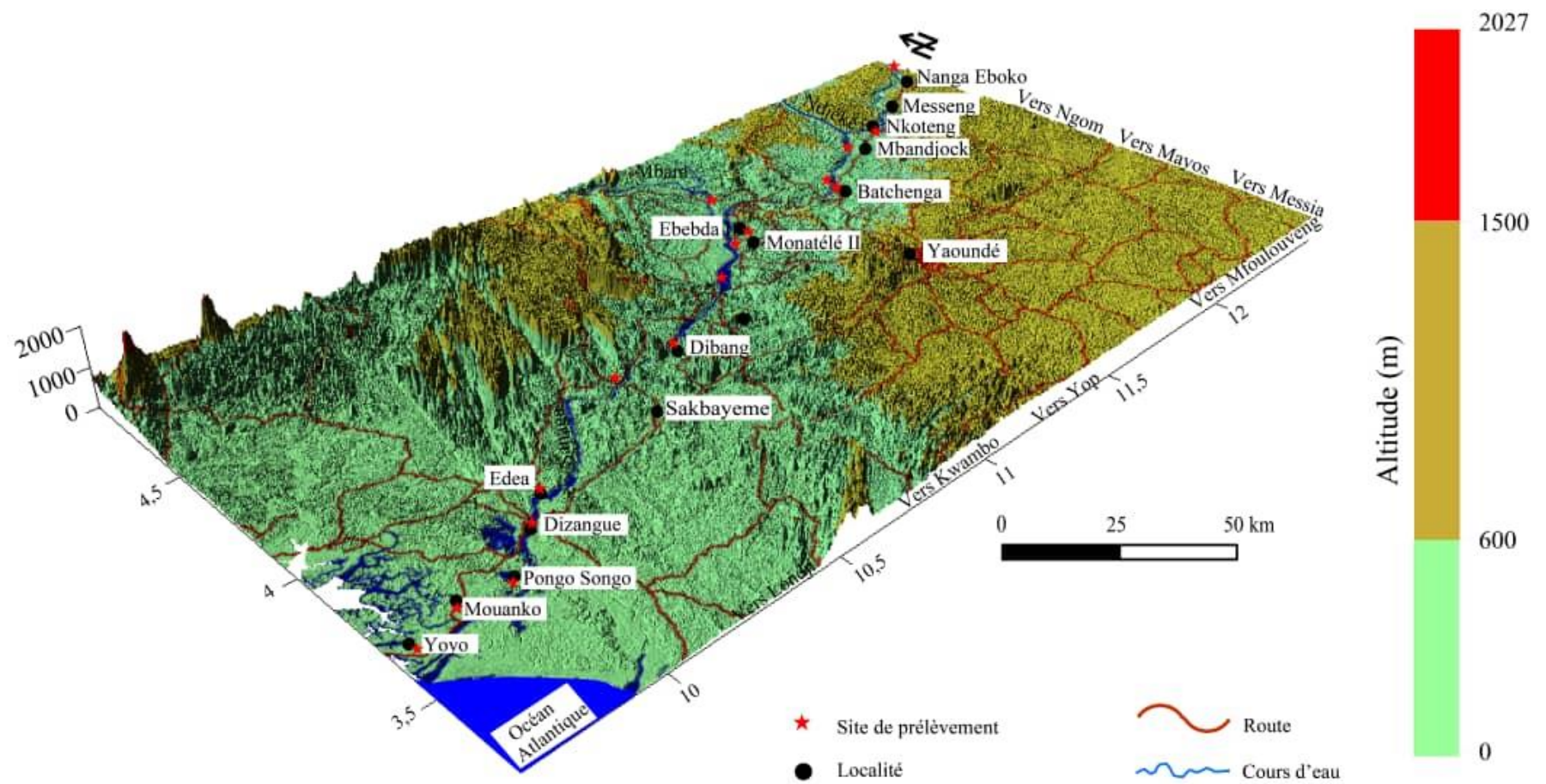


Figure I.2. Bloc diagramme géomorphologique du cours inférieur de la Sanaga (D'après les cartes topographiques de Nanga-Eboko, Bafia et Monatéle et Bafia)

La source de la Sanaga se situe dans le contrefort de l'Adamaoua vers 1150 m d'altitude (Nzeukou *et al.*, 2013). Le cours moyen du fleuve Sanaga débute dans la région de Goyoum, légèrement en aval du confluent du Lom et du Djérem et se termine à Edéa. Dans cette partie, le fleuve Sanaga s'écoule sur une distance de 583 km et reçoit un affluent important le Mbam. Le Mbam draine toute la partie Ouest du bassin avec le Noun comme affluent principal. Le Noun est le collecteur principal des cours d'eau Mifi-Sud, Nkoup, Ngam et Ndé, avant sa confluence avec le Mbam. Le Noun draine également, la Mapé, le Nchi et le Kim. Le régime d'écoulement du Mbam est sensiblement le même que celui du Lom et du Djérem. Une bonne partie de ce tronçon de rivière du côté de la Sanaga *s.s.*, 180 km environ, est obstruée par quelques chutes et rapides. Le cours inférieur de la Sanaga (67 km) est relativement court. Il s'étend du bas des chutes d'Edéa jusqu'à l'Océan Atlantique. Son lit à ce niveau est large de 600 m environ. Il est dominé par des îles et de bancs de sable à l'étiage, dans une mangrove qui absorbe progressivement la forêt (EDC, 2011).

I.1.2.4. Populations et activités économiques

Le bassin versant de la Sanaga a une densité moyenne de 27 habitants au km² (PNUD, 2012). Cette densité est inférieure à la densité de la population totale camerounaise qui est de 32,85 habitants au km². La densité des populations est variée. Certaines régions sont faiblement peuplées dans le centre du bassin, par exemple à Yoko. Les principales activités économiques rencontrées dans le bassin de la Sanaga sont : l'agriculture, l'élevage, l'exploitation minière, l'exploitation forestière et la pisciculture. L'importance du fleuve Sanaga sur le plan économique est considérable à cause de l'intense activité d'exploitation de sable tout le long de son lit. Le fleuve Sanaga dispose également d'un potentiel énergétique extraordinaire et produit près de 90 % de l'énergie hydroélectrique du pays. Malgré ce potentiel électrique, le pays traverse actuellement des crises énergétiques sérieuses qui entraînent des délestages réguliers qui ont des conséquences socio-économiques négatives importantes (Kpoumié *et al.*, 2012).

I.1.2.5. Géologie

I.1.2.5.1. Socle

Le bassin de la Sanaga est occupé en presque totalité par le socle Précambrien recouvert par endroit des formations de couverture qui sont d'assez faibles étendues et datent au plus du Crétacé (Sep-Nlomngan *et al.*, 2013 ; Mbola-Ndzana *et al.*, 2013 ; Ndema-Mbongue *et al.*, 2014). Ce socle Précambrien est formé du Complexe de Base considéré comme Précambrien inférieur, de la série du Lom et du Précambrien moyen ou supérieur. Le Complexe

de Base est constitué d'un grand ensemble de schistes cristallins constitués de gneiss et de migmatites. Les roches éruptives et intrusives anciennes sont représentées essentiellement par des granites syn- à post-tectoniques (Fig. I.3). La série du Lom est constituée d'un faciès phylliteux composé de séricitoschistes, de chloritoschistes, et de schistes et, d'un faciès siliceux, composé des quartzites, généralement interstratifiés dans les schistes. Les formations de couverture sont constituées de roches intrusives et effusives récentes et de formations sédimentaires. Pour le grand ensemble des roches intrusives et effusives récentes situées le long de la ligne volcanique du Cameroun, on distingue par ordre chronologique quatre grandes phases éruptives : la série ignimbrique initiale ou série blanche inférieure, la série noire inférieure composée de basaltes et d'andésites, la série blanche moyenne essentiellement composée de trachytes et phonolites et la série noire supérieure, exclusivement composée de roches à faciès basaltique (Tchoua, 1976). Les formations sédimentaires sont représentées par la série sédimentaire côtière où la Sanaga inférieure découpe une étroite bande dans le bassin sédimentaire côtier de Douala et par les formations localisées en dehors de la zone côtière (Njonfang *et al.*, 1998).

I.1.2.5.2. Sols

Dans le bassin versant de la Sanaga, plusieurs études ont permis de mettre en évidence trois principaux types de sols : les sols ferrallitiques, les sols hydromorphes et les sols peu évolués (Ekodeck et Kamgang, 2002). Les sols ferrallitiques regroupés en cinq principales classes, occupent la quasi-totalité du bassin (Olivry, 1986 ; Segalen, 1995). Ces sols se développent majoritairement sur un socle Précambrien constitué de roches magmatiques et métamorphiques. Les sols ferrallitiques du bassin de la Sanaga sont de couleur rouge ou jaune. Les horizons superficiels sont très minces, centimétriques et profonds, allant jusqu'à 10 m. Leurs épaisseurs peuvent ainsi varier jusqu'à 60 m (Segalen, 1995). Les sols hydromorphes sont de type organique et de type minéral. Les sols hydromorphes organiques sont localisés à proximité du lit des principales rivières et dans certains bas-fonds. Les sols hydromorphes minéraux occupent les petits talwegs entre les collines (Ngon Ngon, 2007). Les sols peu évolués se localisent sur les massifs montagneux et les talwegs à pentes fortes.

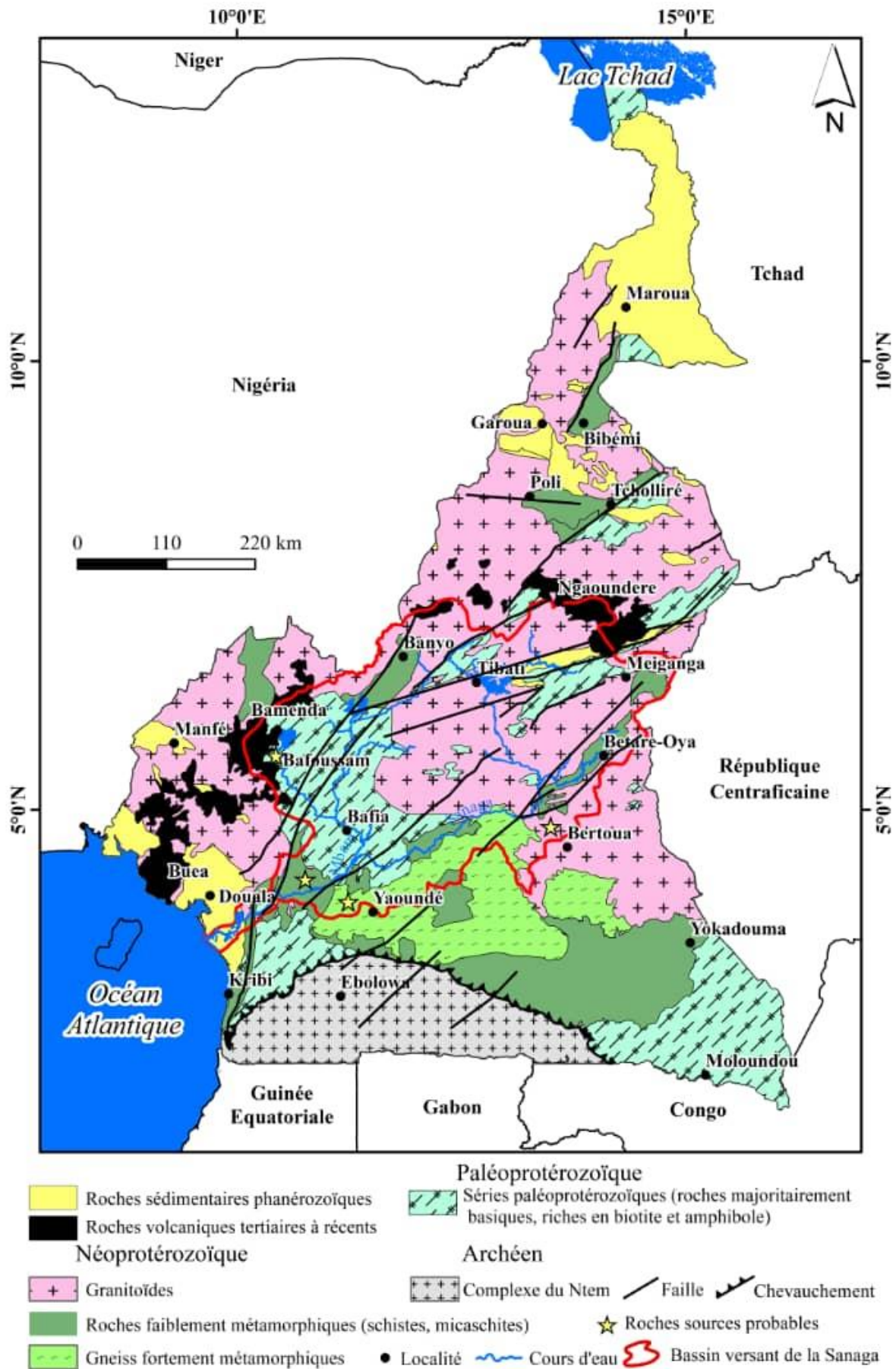


Figure I.3. Carte géologique de la zone d'étude (D'après Kankeu *et al.*, 2017)

I.2. Travaux antérieurs complémentaires

Plusieurs travaux ont été réalisés sur les sédiments en général et les sables en particulier dans le monde. Ces travaux ont porté sur la pétrologie, les mécanismes qui contrôlent leur mise en place et sur les différentes utilisations de ces matériaux.

I.2.1. Généralités sur les sables

I.2.1.1. Définition

Le sable est une roche sédimentaire d'origine détritique. C'est un matériau solide granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation de matériaux d'origine minérale ou organique (Bédard, 2014).

I.2.1.2. Typologie des sables

Plusieurs variétés de sable existent, chacune ayant des caractéristiques propres (Chevalier et Schrieck, 2011). On distingue : les sables de rivière, les sables de mer, les sables de plage, les sables extraits de sablières ou sables dunaires, les sables lagunaires et les sables artificiels.

I.2.1.2.1. Sables de rivière

Les sables de rivière sont des dépôts alluvionnaires actuels le long des rives des fleuves. Ces sables résultent de la dégradation des roches par les eaux de ruissellement. Leur nature dépend des formations géologiques : granites, quartzites, schistes, calcaires. que le réseau hydrographique de ces rivières traverse. Le long des rivières à caractère torrentiel, les sables des rivières sont peu étendus et mélangés à des galets plus ou moins grossiers (Chevalier et Schrieck, 2011).

I.2.1.2.2. Sables de mer

Les sables marins contiennent toujours un peu de sel et, dans certains cas, des résidus de coquillages moins résistants. De même que les sables se déposent dans le lit des rivières, ils se déposent également en grande quantité dans leurs estuaires et même bien au-delà, lorsque les courants marins prennent le relais des fleuves pour en porter les grains (Chevalier et Schrieck, 2011).

I.2.1.2.3. Sables de plage

Les sables de plage sont des dépôts actuels, le long des côtes d'un continent ou d'une île. Ces dépôts résultent soit de la dégradation par la mer des falaises et des récifs limitant des côtes, soit de produits alluvionnaires expulsés à l'embouchure d'une rivière voisine et transportés par les courants. Les sables de plage sont également des formations homogènes, bien classées, triées et de formes variées, anguleuses, subanguleuses, arrondies et subarrondies. Ils sont constitués de particules fines à moyennes et de minéraux lourds (Chevalier et Schrieck, 2011).

I.2.1.2.4. Sables de lagune

Les sables lagunaires ont une origine analogue à celle des sables de plage. Ils résultent de la dégradation de récifs coralliens. Les sables lagunaires constituent des dépôts en mer, le long de la côte, entre celle-ci et les récifs coralliens, dans les zones lagunaires ceinturant les îles tropicales. La nature de ces sables est donc principalement calcaire. Mais, des produits détritiques d'origine terrestre peuvent se mêler aux produits madréporiques. Les matériaux détritiques lagunaires ne contiennent pas uniquement des sables, leur granulométrie est très étalée. Ce sont très souvent des graves sableuses et parfois caillouteuses (Chevalier et Schrieck, 2011).

I.2.1.2.5. Sables de dune

Les sables de dune résultent de la dégradation actuelle des roches par l'action du vent. Les sables éoliens constituent des dunes dans les déserts ou le long des côtes. Les sables éoliens constituent des réserves importantes de sable. Les gisements de sables éoliens sont peu exploités en raison soit de leur situation désertique, soit de leur finesse et de leur régularité (Dhia, 1998).

I.2.1.2.6. Sables artificiels

Les sables peuvent également se fabriquer de façon industrielle par concassage. En effet, à chaque opération d'extraction de roche massive par explosion, puis par broyage en blocs et gravillons de plus en plus petits, il se crée une certaine quantité de sables (Bédard, 2014).

I.2.1.3. Pétrologie des sables

La plupart des recherches sur les sédiments réalisées par des approches minéralogiques associées aux données géochimiques fournissent plus d'informations que les techniques pétrographiques classiques (Liu *et al.*, 1993). Les données géochimiques des sédiments clastiques représentent une véritable archive pour l'étude de la provenance des sédiments et des conditions d'altération du milieu (Descourvieres *et al.*, 2011). Grâce à ces données, les calculs des indices géochimiques permettant de caractériser le milieu, le degré d'altération, la maturité et la composition des sédiments sont connus (Nesbitt et Young, 1982 ; Fedo *et al.*, 1995 ; Huifei *et al.*, 2013). Les analyses géochimiques et les diagrammes de discrimination précisent les sources possibles de provenance et l'intensité d'altération des sédiments (Nagarajan *et al.*, 2007 ; Descourvieres *et al.*, 2011). Les ratios des éléments immobiles majeurs et des éléments en traces, comme Ti, Fe, Al, Th, Sc, Co et Zr, sont des indicateurs de la source des sédiments ou des roches sédimentaires (Taylor et McLennan, 1985). Les rapports des éléments en traces dans les fractions fines apportent également des informations sur la provenance des matériaux sédimentaires et l'environnement tectonique (Cullers et Stone, 1991 ; Cullers et Berendsen, 1998). L'analyse des données géochimiques permet non seulement de donner des informations sur la provenance des sédiments, mais aussi sur les conditions d'altération qui règnent dans le milieu et l'environnement tectonique (McLennan *et al.*, 1993 ; Mondal *et al.*, 2012).

Les sables du fleuve Hemavati au Sud de l'Inde sont constitués en amont de quartz, plagioclases, feldspaths, biotite, pyroxènes et hornblende (Sensarma *et al.*, 2008). La cordiérite et la wollastonite sont occasionnellement présentes. En plus des minéraux primaires, le minéral argileux présent est la kaolinite. En aval, ces sables sont constitués de quartz, feldspaths, muscovite, augite, diopside et biotite. Les minéraux argileux observés sont l'illite, la chlorite et la kaolinite. En amont, les teneurs en SiO₂ sont comprises entre 68 et 90 %, soit une valeur moyenne de 76 %. Les teneurs en Al₂O₃ sont inférieures à 15,6 % tandis que celles en FeO n'excèdent pas 7,52 % et, celles en TiO₂, 1,2 %. En amont, les sables étudiés ont des teneurs en Cr comprises entre 83 et 325 ppm, celles en Ni oscillent entre 27 et 161 ppm. Ces résultats suggèrent une roche source mafique. En aval, les teneurs en SiO₂ sont comprises entre 68 et 84 %, soit une valeur moyenne de 74 %. En amont, la valeur moyenne de CIA est de 73 %. Ces valeurs sont inférieures à celles obtenues en aval. La valeur moyenne de CIA est de 61 %. En aval, les sables ont des teneurs en Cr comprises entre 59 et 298 ppm, soit une valeur moyenne de 164 ppm. Celles en Ni oscillent entre 3 et 90 ppm.

La valeur moyenne de Ni en amont est de 44 ppm. Les sables en aval proviennent de roches sources à compositions intermédiaire à mafique.

L'étude des sédiments du fleuve Catumbela en Angola (Silva *et al.*, 2016) révèle que les sédiments sont principalement des sables et des sables limoneux, mais on y observe également des limons sableux. Ces sédiments sont composés de quartz, de feldspaths, de phyllosilicates, de magnétite, d'ilménite et de carbonates lorsque la rivière traverse des calcaires et des marnes en aval. Le tri hydraulique provient de la magnétite, de l'ilménite et des placers minéraux riches en REE. La minéralogie des sédiments est contrôlée par les roches mères, et le degré d'altération chimique est inférieur à l'érosion. La texture est principalement contrôlée par la position topographique. Il y a un enrichissement en REE dans les sédiments à grains fins riches en minéraux argileux et en hydroxydes de Fe, par rapport aux sédiments à grains grossiers riches ainsi qu'un enrichissement en quartz et en feldspaths. Les sédiments à grains grossiers sont appauvris en REE par rapport à l'*Upper continental crust* (UCC ; Rudnick et Gao, 2003), tandis que les sédiments à grains fins ont des teneurs en REE similaires à celles de UCC. Les placers ont des teneurs en REE allant jusqu'à 959,59 ppm. La composition de la roche source est le facteur dominant contrôlant la géochimie des REE des sédiments étudiés car il n'y a pas de différence dans les rapports $(La/Yb)_N$, $(La/Sm)_N$ et $(Gd/Yb)_N$ dans les sédiments à grains grossiers et à grains fins. Le tri de la magnétite, de l'ilménite, du zircon, de la thorite, de la thorianite, du rutile et de la titanite explique l'enrichissement en REE dans les sédiments à grains grossiers.

Les études effectuées sur les sables du fleuve Taiwan en Asie confirment que les concentrations des éléments chimiques dans les sédiments terrigènes sont influencées par la minéralogie originelle des roches sources (Garzanti et Resentini, 2016). De plus, la géochimie des sédiments peut subir des modifications par divers processus pendant le transport, le dépôt, le recyclage, le tri hydraulique par taille, la densité ou forme, et/ou par dissolution chimique et précipitation pendant la diagenèse.

Dans le but de tracer la provenance des sédiments, le fleuve Irrawaddy, deuxième fleuve d'Indochine et, troisième dans le monde en termes de flux de sédiments a fait l'objet de nombreuses études (Garzanti et Resentini, 2016). Il ressort que les sables en amont du fleuve sont feldspatho-quartziques. Ces sables proviennent des roches métamorphiques et plutoniques de la croûte moyenne. Les sables en aval sont feldspatho-litho-quartziques et dérivent des roches sédimentaires. Ces sables présentent un enrichissement en LREE et une anomalie négative en europium. Cette anomalie reflète la présence de l'allanite qui provient des

granitoïdes. Les valeurs de CIA sont de 52 % en amont et 56 % en aval. Cependant la signature pétrographique et géochimique des sables du fleuve Irrawaddy révèle que les effets de l'altération sont significatifs mais pas assez considérables pour modifier la composition des sables vu le climat qui règne dans le bassin de Myanmar.

Les sables des fleuves Yangtze, Tongtian et Jinsha ont fait l'objet de nombreux travaux (Wu *et al.*, 2011). Il en ressort de faibles corrélations entre Na₂O, K₂O, CaO, Ba, Sr vs. SiO₂, LREE vs. Th, HREE vs. Hf et, entre Ta/La vs. Ti. Les valeurs de l'anomalie en Eu (Eu/Eu)_N varient entre 0,60 et 0,83. Ces valeurs indiquent que les sédiments dans ce fleuve n'ont pas subi un tri minéralogique important. L'illite et la chlorite sont les minéraux argileux prédominants. Le quartz, la calcite, la dolomite et les feldspaths sont les minéraux non argileux prédominants. Les caractéristiques de l'assemblage minéral indiquent un degré d'altération chimique relativement faible dans ce bassin fluvial. Les teneurs très élevées en Fe₂O₃, MgO, TiO₂, Sc, V, Cr, Co et Ni résultent principalement de la présence de la magnétite que l'on observe dans les gabbros. Les valeurs de CIA dans les sédiments étudiés varient entre 46,5 et 69,2 %, soit une moyenne de 60,5 % ; ce qui indique leur degré d'altération relativement faible.

I.2.1.4. Caractéristiques géotechniques des sables

I.2.1.4.1. Granularité

Du point de vue géotechnique, les sables désignent un mélange de grains meubles n'ayant aucune cohésion et dont la dimension des grains est généralement comprise entre 0,0625 et 5 mm (Bédard, 2014). Pour le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC, 1994), les sables sont des sols grenus dont plus de 50 % des éléments de dimensions supérieures à 0,080 mm, ont un diamètre inférieur à 2 mm. Le sable est une famille des granulats qui sont classés en catégories suivant leurs dimensions. D'après le système de classification de l'*American society for testing and materials* (ASTM, 2000) des sols en usage dans le domaine de la géotechnique et du Génie civil, on distingue trois plages de taille de grains :

- sable grossier fin : $2 \text{ mm} \leq \emptyset < 4,75 \text{ mm}$;
- sable moyen : $0,465 \text{ mm} \leq \emptyset < 2 \text{ mm}$;
- sable fin : $0,0625 \text{ mm} \leq \emptyset < 0,465 \text{ mm}$.

I.2.1.4.2. Texture

Le sable est un matériau pulvérulent et non plastique. Sa texture peut s'apprécier sur le terrain ou être déduite d'une analyse granulométrique en laboratoire. L'appréciation tactile de la texture du sable sur le terrain se fait en malaxant entre le pouce, l'index et le majeur, quelques grammes de sol. Le sable gratte entre les doigts. Si le sable domine, il se peut que l'on n'arrive pas à confectionner une boulette ou un boudin.

I.2.1.4.3. Couleur

La couleur du sable dépend généralement de celle de la roche mère. Le sable est d'autant plus clair que la teneur en silice est élevée. Le sable est rouge sombre s'il est situé dans un environnement oxydable ; c'est le cas des sables riches en fer. Le sable est sombre s'il contient des impuretés comme la matière organique.

I.2.1.5. Utilisation des sables dans le Génie civil

Il existe plusieurs utilisations possibles des sables dans le monde. Certains sables sont exploités pour les minéraux tels l'or, le diamant ou l'étain qu'ils contiennent, tandis que d'autres sont utilisés dans l'industrie du verre, de l'électronique et dans le processus de fracturation hydraulique. En construction civile, les sables entrent dans la composition de trois types de matériaux (Eynde, 1983). Le sable associé au mortier de ciment, constitue un conglomerat artificiel appelé béton. Le béton présente l'avantage de prendre toutes les formes géométriques désirables. Le sable combiné au mortier asphaltique est utilisé en technique routière sous forme d'enduit superficiel. Le sable, additionné à une quantité de liant (ciment, bitume), forme des assises de fondation telle les couches inférieures des routes. Selon leur origine, les sables ont des gammes d'utilisations spécifiques ou tout au moins privilégiées induites par leurs caractéristiques. Ainsi, à chaque type de sable ayant des caractéristiques données, correspond un emploi déterminé.

Les sables sont très souvent utilisés de manière empirique dans la construction des ouvrages de Génie civil. De façon accrue, ils sont des composants très importants pour les matériaux qui servent d'assises aux routes (bétons bitumineux et hydrocarbonés), aux bâtiments (bétons hydrauliques, tuiles, mortiers).

Pour confectionner le mortier, les sables fins donnent en général un mortier de qualité médiocre car ils nécessitent une grande quantité d'eau pour leur gâchage. Les sables mal gradués présentent beaucoup de vides, ils nécessitent un fort dosage pour une plasticité convenable et leur emploi n'est pas économique. Les sables conduisant au meilleur mortier sont

ceux qui présentent un minimum de vides et qui contiennent environ 2/3 de gros grains, 1/3 de grains fins et peu ou pas de grains moyens.

L'utilisation du béton est très importante dans le bâtiment et les Travaux publics. Le sable est utilisé dans la fabrication des chapes, de matériaux de constructions divers (tuyauteries, poutres, etc.) et dans des ouvrages de Génie civil (Chevalier et Schrieck, 2011). La confection du béton utilise souvent des sables courants contenant 15 à 25 % d'éléments fins et 40 à 60 % d'éléments grossiers. Mais dans tous les mélanges réalisés à partir du sable, le sable peut contenir jusqu'à 20 % de son volume d'eau. La méconnaissance de cet élément peut conduire à fabriquer des bétons trop liquides et de résistance faible. C'est pourquoi, il faut utiliser des sables dont le fuseau granulométrique est bien déterminé.

L'enrobé est le mélange le plus proche du béton. Outre le bitume, il est composé de fines, de sables et de graviers. Pour sa réalisation, on utilise de préférence des sables concassés, la forme de leurs grains donne plus d'adhérence au liant que les sables roulés de plage ou de rivière ; mais leur maniabilité diminue (Chevalier et Schrieck, 2011).

Le sable siliceux naturel est la principale matière première dans la fabrication du verre. La silice est en effet l'élément vitrifiant qui donne au verre sa structure. Si la silice vitrifie les autres composants du sable, les oxydes de fer et de manganèse sont des impuretés qui elles diminuent la transparence du verre. Le sable recherché doit être aussi pur que possible. Sa granulométrie doit être adaptée. Par exemple, la présence de fines n'est pas souhaitée car celles-ci génèrent des poussières. Les grains trop gros ralentissent le processus de fusion.

Les travaux effectués sur les bétons de sable montrent qu'ils présentent de nombreux avantages contrairement au béton traditionnel. Les bétons de sable présentent de bonnes valeurs de résistance à la compression uniaxiale qui varient généralement entre 20 et 40 MPa. Elles peuvent être améliorées par l'ajout de fines de différentes natures. Les bétons de sable sont caractérisés par une faible étendue granulométrique et une plus grande homogénéité. A ces deux caractéristiques, s'ajoute son excellente maniabilité, ce qui lui garantit un comportement vis-à-vis de la ségrégation meilleur que celui des bétons traditionnels. Les bétons de sable ont une bonne adhérence aux armatures. Ces bétons se caractérisent par une porosité plus importante que celles des bétons traditionnels. Cependant, les vides y sont plus petits, ce qui contribue à leur donner un bon comportement vis-à-vis des essais de durabilité (Beshr *et al.*, 2003).

I.2.2. Caractéristiques chimico-minéralogiques et géotechniques des ciments au Cameroun

Les travaux sur les ciments Portland utilisés au Cameroun montrent qu'il en existe quatre principaux types (Duna *et al.*, 2021). Ces différents types de ciment sont le ciment Dangote (CD), le ciment Robusta (CR), le ciment Cimencam et le ciment Medcem (CM). Ces différents ciments sont tous composés de 80 à 94 % de clinker, 6 à 20 % de pouzzolane naturelle et de 0 à 5 % de constituants secondaires. Les ciments Dangote, Robusta et Cimencam sont des ciments de classe CEM II/A-P 42,5R. Le ciment Medcem de classe CEM II/B-P 42,5R a la même composition que les trois premiers (Duna *et al.*, 2021).

I.2.2.1. Caractéristiques chimiques

Le ciment Medcem a la valeur du module de silice (MS) la plus élevée (3,57). Les valeurs MS des ciments Cimencam (3,38) et Dangote (3,29) sont comparables. La valeur MS du ciment Robusta est la plus faible. (2,83). Les valeurs MS de ces différents ciments sont supérieures aux valeurs standards (1,8 – 2,7 ; Duna *et al.*, 2021).

I.2.2.1.1. Module d'alumine

Les valeurs du module d'alumine (MA) des différents ciments sont de 1,34 – 1,03 – 0,91 et 0,80, respectivement pour les ciments Dangote, Robusta, Cimencam et Medcem. Dans les environnements humides, les valeurs élevées d'alumine permettent de réduire l'humidité dans la structure tandis que les valeurs élevées en fer causent la corrosion des armatures (Duna *et al.*, 2021).

I.2.2.1.2. Module hydraulique

Le ciment Dangote a la valeur de module hydraulique (MH = 2,48), supérieure aux valeurs de référence (1,70 – 2,30). La valeur de MH (1,40) du ciment Robusta est la plus faible. Les ciments Cimencam et Medcem ont la même valeur de MH (1,88 ; Duna *et al.*, 2021).

I.2.2.1.3. Facteur de saturation en chaux

Le ciment Dangote a des valeurs de facteur de saturation en chaux (FSC = 0,98) supérieures à celles des ciments Robusta (0,61), Cimencan (0,74) et Medcem (0,73).

La valeur de FSC du ciment Robusta est inférieure à la borne minimale des valeurs de référence (0,66 – 1,02 ; Duna *et al.*, 2021).

I.2.2.2. Caractéristiques minéralogiques

Les analyses minéralogiques des différents ciments Portland utilisés au Cameroun montrent qu'ils sont constitués d'alite, de bellite, de celite, de gypse, de gehlenite et de brownmillerite. Le gypse apparaît en très faible quantité dans tous les ciments. Le gypse joue un rôle important dans la dureté du ciment car sa présence permet d'améliorer le temps de prise du ciment (Duna *et al.*, 2021).

I.2.2.3. Caractéristiques géotechniques

I.2.2.3.1. Teneur en eau

Selon Duna *et al.* (2021), le ciment Dangote présente la valeur de teneur en eau la plus élevée (2,38 %) comparée à celle des ciments Robusta (1,74 %), Cimencam (1,80 %) et Medcem (1,56 %).

I.2.2.3.2. Poids volumique apparent

Les ciments Dangote, Robusta et Cimencam présentent les mêmes valeurs de poids volumique apparent (2,17 g/cm³). Le ciment Medcem a la plus faible valeur de poids volumique apparent (1,55 g/cm³ ; Duna *et al.*, 2021).

I.2.2.3.3. Surface spécifique

D'après les travaux réalisés par Duna *et al.* (2021) sur les ciments utilisés au Cameroun, le ciment Robusta présente la valeur de surface spécifique la plus élevée (1,51 g/m²). Cette valeur est de 1,44 g/m² pour le ciment Medcem et de 1,26 g/m² pour le ciment Dangote. La valeur de surface spécifique du ciment Cimencam qui est de 1,08 g/m² est la plus faible.

I.2.2.3.4. Résistances à la compression et à la flexion

Les ciments Dangote (43,9 MPa) et Medcem (43,8 MPa) présentent les valeurs de résistance à la compression uniaxiale σ_c les plus élevées après 28 jours de cure. Les valeurs de σ_c des ciments Robusta et Cimencam sont respectivement de 41,8 MPa et 41,8 MPa.

La valeur de résistance à la flexion σ_f , après 28 jours de cure, du ciment Medcem est la plus élevée (4,8 MPa). Ces valeurs de σ_f pour les ciments Dangote, Robusta et Cimencam sont de 4,2 MPa – 4,1 MPa et 4,7 MPa, respectivement (Duna *et al.*, 2021).

I.2.3. Géologie et paramètres géotechniques des granulats

I.2.3.1. Géologie

Les travaux de Ngako *et al.* (2019) indiquent que les granitoïdes sont composés d'un ensemble indifférencié de granites et de granodiorites. Ces granitoïdes montrent une hétérogénéité ou une variation en terme de lithologie témoignant ainsi de leur similarité avec un complexe d'anatexie. L'assemblage minéralogique est composé de clinopyroxène, biotite, amphibole, plagioclase, feldspath potassique et quartz. Les minéraux accessoires sont représentés par la tourmaline, l'apatite, zircon et la monazite. La variation des biotites et de l'amphibole et l'absence du clinopyroxène, par endroit, permet de distinguer les granites des granodiorites. Ces roches sont recoupées de filons ou leucosomes granitiques portant des minéraux comme les plagioclases, les clinopyroxènes, l'amphibole et la tourmaline.

Les travaux de Tchouankoue *et al.* (2012) et montrent que les basaltes de plateau se sont mis en place à la faveur de dykes. La mise en place de ces dykes s'est faite avec le développement de nombreuses apophyses et une fragmentation intense des roches précambriennes. Ces roches présentent une texture subophitique uniforme avec de grands phénocristaux d'olivine et de plagioclases représentant 25 % en volume de la roche. La matrice est composée de plagioclase, de micrograins d'olivine, d'augite et d'oxydes ferrotitanés. Les phénocristaux de plagioclase et d'olivine sont fréquemment altérés.

I.2.3.2. Paramètres géotechniques

Les propriétés mécaniques ayant été l'objet de déterminations courantes en laboratoire sont les coefficients micro-Deval (MDE) et Los Angeles (LA). Des travaux ont été réalisés sur les basaltes au Moyen-Orient, notamment en Turquie et en Arabie Saoudite. En Turquie, les basaltes présentent des valeurs moyennes de LA de 16,5 % (Altan, 2022 ; Korkanc et Tugrul, 2004), tandis qu'en Arabie Saoudite, la valeur moyenne de LA est de 37,8 % (Kilic *et al.*, 2008). En Océanie, des valeurs moyennes de LA de 19,3 % ont été obtenues sur basaltes (Mohajerani *et al.*, 2017). En Chine, ces roches ont des valeurs moyennes de LA d'environ 18 % (Pang *et al.*, 2010). En Afrique, les basaltes d'Ethiopie présentent des valeurs moyennes de LA de 16 % (Engidasew et Barbieri, 2014). Au Nigéria, les granites présentent des valeurs de LA comprises entre 23 % et 26 % (Afolagboye *et al.*, 2016 ; Ademila, 2019).

Des valeurs de MDE de 19 % sur basaltes (Gökalp *et al.*, 2016) et, de 10,3 % sur andésites, ont été obtenues en Iran (Kamani et Ajalloeian, 2022). En Europe, notamment en

France, au Portugal et en Italie, les basaltes présentent des valeurs LA comprises entre 18 % et 28 %, pour des valeurs de MDE correspondantes de 5 % et 25 %, respectivement (Baron et Olivier, 1996 ; Pereira *et al.*, 2009 ; Celauro et Praticò, 2018). Au Cameroun, dans la région de l'Ouest, les basaltes présentent des valeurs moyennes de LA comprises entre 7 % et 12 % pour des valeurs de MDE moyennes correspondantes de 5,7 % et 8,1 %, tandis que les granites de l'Est - Cameroun présentent des valeurs moyennes de LA de 37 % pour des valeurs de MDE de 14 %. La plupart de ces essais ont été réalisés sur la classe granulaire 14/14 (Anonyme, 2019).

Conclusion

La zone d'étude est située dans le bassin versant de la Sanaga. Elle s'étend entre Nanga-Eboko et l'Océan Atlantique. Cette zone est située dans une zone climatique de transition. Près des 2/3 du bassin versant sont constitués d'une végétation qui passe de la savane arbustive au nord, à la forêt dense humide au Sud. Le relief du bassin de la Sanaga est fortement accidenté. Ce relief présente une diminution graduelle d'altitudes d'amont en aval. Le principal et le plus important collecteur d'eau de ce bassin est la Sanaga. Le bassin de la Sanaga est occupé en presque totalité par le socle Précambrien, recouvert par endroits des formations de couverture qui sont d'assez faibles étendues et qui datent au plus du Crétacé. Trois principaux types de sols y sont rencontrés, les sols ferrallitiques, les sols hydromorphes et les sols peu évolués. Les valeurs du module de silice, du module d'alumine, du module hydraulique et celles du facteur de saturation à la chaux montrent le ciment Dangoté présente les meilleurs caractéristiques minéralogiques, géochimiques et mécaniques. La méthodologie utilisée afin de comprendre la pétrologie des sables du cours inférieur de la Sanaga et leur intérêt en Géotechnique est présentée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Introduction

Après les enquêtes bibliographiques, les travaux de terrain ont consisté en la localisation des points de prélèvements le long de la Sanaga, en la description des matériaux et au prélèvement des échantillons. Les travaux de laboratoire ont consisté en des analyses pétrographiques, minéralogiques, géochimiques ainsi qu'en des essais géotechniques sur les sables, granulats grossiers basaltiques et granitiques, et sur des éprouvettes de béton.

II.1. Enquêtes bibliographiques

Les enquêtes bibliographiques et la revue de littérature ont consisté en l'exploitation de cartes topographiques et de cartes géologiques et, en la lecture des articles et des ouvrages scientifiques, en relation avec le thème d'étude.

II.2. Travaux de terrain

II.2.1. Matériels de terrain

Le matériel utilisé comprend un récepteur *Global Positioning System* (GPS) de marque Garmin, un appareil photographique, des marqueurs, un carnet de terrain, un stylo à bille, des cartes topographiques et géologiques, des machettes, des pelles, des sacs à échantillonnage d'une contenance de 50 kg, pour le prélèvement des matériaux destinés aux essais géotechniques et, ceux d'une contenance de 1 kg, pour les échantillons de matériaux destinés aux analyses minéralogiques et géochimiques. La charte de teintes Munsell (2000) a été utilisée pour déterminer la couleur des matériaux étudiés.

II.2.2. Localisation des points de prélèvement

Le choix et la localisation des points de prélèvement ont été réalisés à l'aide d'un profil en long de la Sanaga. La longueur du cours inférieur du fleuve Sanaga est d'environ 429 km. Les différents points de prélèvement sont en moyenne distants de 25 km le long du fleuve. Dix-sept échantillons de sable ont été prélevés dans le lit du fleuve Sanaga entre Nanga - Eboko et l'Océan Atlantique (Tab. II.1). Deux autres échantillons ont été prélevés dans les plus grands affluents du fleuve Sanaga que sont le fleuve Mbam et la rivière Ndjéké, en zone de Plateau sud camerounais. Onze échantillons ont donc été prélevés en zone de Plateau sud camerounais et huit en zone de plaine côtière du littoral Cameroun (Fig. II.4). Un kilogramme d'échantillon de chaque roche source probable, basalte, granite, gneiss, chloritoschiste et micaschiste, a été prélevé ainsi qu'une centaine de kg de granulats grossiers basaltiques et granitiques.

Tableau II.1. Géolocalisation des points de prélèvement des sables le long du lit majeur du cours inférieur de la Sanaga et de leurs roches sources probables

| Localité | Code | Coordonnées <i>GPS</i> | | |
|-----------------------|------|------------------------|----------------|--------------|
| | | Longitude Nord | Latitude Est | Altitude (m) |
| Nanga - Eboko | SA18 | 04° 43' 202" | 12° 23' 266" | 579 |
| Nkoteng | SA19 | 04° 35' 533" | 12° 11' 206" | 574 |
| Mbandjock | SA20 | 04° 24' 563" | 11° 53' 417" | 566 |
| Ndjéké | ND | 04° 24' 563" | 11° 53' 417" | 566 |
| Batchenga | SA21 | 04° 21' 135" | 11° 37' 602" | 446 |
| Sa'a - Aloko | SA22 | 04° 28' 605" | 11° 28' 515" | 410 |
| Sa'a - Mp Lit | SA23 | 04° 28' 448" | 11° 25' 782" | 405 |
| Sa'a - Mp Berge | SA24 | 04° 28' 448" | 11° 25' 782" | 405 |
| Ebebda | SA25 | 04° 23' 467" | 11° 16' 952" | 385 |
| Mbam | MB | 04° 22' 448" | 11° 15' 691" | 380 |
| Monatélé | SA26 | 04° 16' 231" | 11° 11' 857" | 376 |
| Nyanon | SA27 | 04° 10' 193" | 11° 01' 282" | 325 |
| Dibang | SA28 | 03° 59' 631" | 10° 43' 164" | 318 |
| Sakbayémé | SA29 | 04° 02' 881" | 10° 34' 092" | 212 |
| Edéa | SA30 | 03° 48' 380" | 10° 06' 778" | 27 |
| Dizangue | SA31 | 03° 46' 510" | 10° 03' 386" | 14 |
| Pongo - Songo | SA32 | 03° 36' 623" | 09° 52' 813" | 9 |
| Mouanko | SA33 | 03° 38' 436" | 09° 47' 706" | 7 |
| Yoyo | SA34 | 03° 38' 700" | 09° 38' 854" | 0 |
| Roche source probable | | | | |
| Basalte | - | 05° 28' 009" | 10° 03' 185" | 1350 |
| Granite | - | 04° 34' 54,31" | 13° 49' 39,37" | 716 |
| Gneiss | - | 04° 15' 60" | 11° 39' 0,5" | 510 |
| Chloritoschiste | - | 03° 31' 00" | 11° 30' 04" | 335 |
| Micaschiste | - | 03° 31' 00" | 12° 31' 00" | 770 |

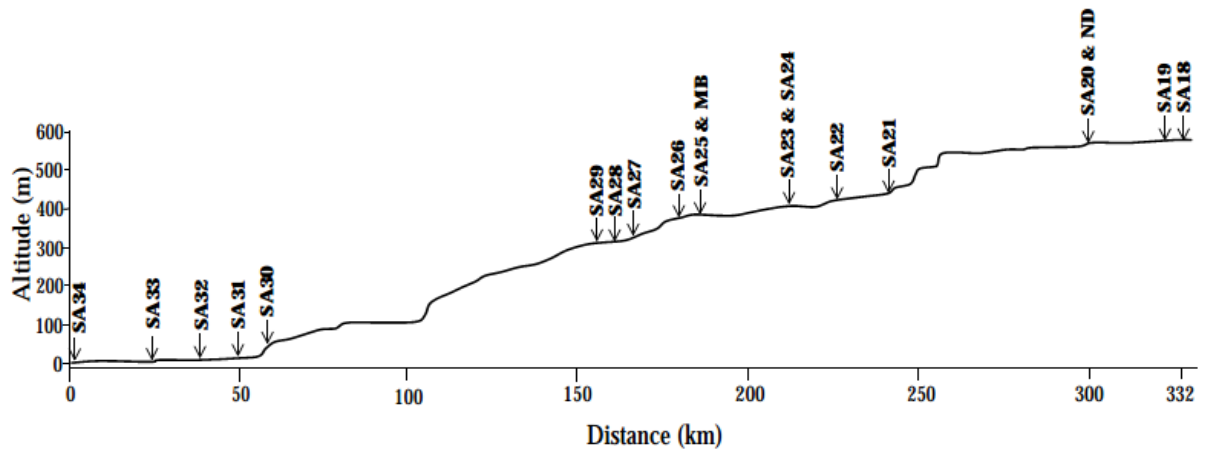


Figure II.4. Position des échantillons de sables le long du cours inférieur de la Sanaga

II.2.3. Identification des échantillons

L'encodage des échantillons a été effectué à l'aide d'un marqueur indélébile. La nomenclature adoptée comporte un préfixe constitué des deux premières lettres du nom du fleuve suivi du numéro de l'échantillon dans l'ordre chronologique de prélèvement. Pour les échantillons des affluents de la Sanaga, seules les deux premières lettres du nom du cours d'eau sont indiquées.

II.3. Travaux de laboratoire

II.3.1. Analyses pétrologiques

II.3.1.1. Extraction des minéraux lourds

L'extraction des minéraux lourds a été effectuée sur les échantillons de sables au Département des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I. Les minéraux lourds sont des minéraux de densité supérieure à 2,9, valeur de la densité du bromoforme. L'extraction des minéraux lourds a été réalisée suivant la méthode décrite par Duplaix (1958) et Parfenoff *et al.* (1970).

II.3.1.2. Observations microscopiques

L'observation microscopique des lames minces de minéraux lourds et celles des roches a été effectuée à l'aide d'un microscope optique polarisant de marque XP 201 muni d'une caméra Opticam. Les pourcentages de minéraux lourds ont été déterminés par comptage visuel. Toutes ces analyses ont été effectuées au Laboratoire de Géosciences des Formations Superficielles et Applications du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I.

II.3.1.3. Analyses minéralogiques et géochimiques

Les échantillons de sable, de ciment et des roches sélectionnés pour les analyses minéralogiques et géochimiques ont été séchés à l'étuve à une température de 70°C pendant 24 h (Fig. II.5a). Après séchage, les échantillons de sable ont été tamisés avec un tamiseur électrique de marque Fritsch (Fig. II.5b). La fraction de sable de diamètre inférieur à 2000 µm a été immergée dans de l'eau oxygénée (H₂O₂) pendant 24 heures afin d'en éliminer la matière organique (Fig. II.5c). Une fois la matière organique extraite, les échantillons de sables ont été remis à l'étuve pendant 24 heures (Fig. II.5d), avant d'être broyés dans une pulvérisette électrique



Figure II.5. Conditionnement des échantillons
a) Etuvage des échantillons ; b) Tamisage ; c) Oxygénation ; d) Etuvage après oxygénation ; e) Broyage ; f) Poudres

de marque Fritsch au Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et d'Altérologie du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I (Fig. II.5e). Les poudres de roche ($\emptyset < 80 \mu\text{m}$), sable et ciment (Fig. II.5f) ont par la suite été empaquetées et étiquetées pour la suite des analyses minéralogiques et géochimiques aux Laboratoires de Géosciences de l'*Ontario Geological Survey* à Sudbury au Canada. Les analyses minéralogiques des sables et du ciment ont été effectuées par diffraction de rayons X à partir d'un diffractomètre à rayon X utilisant une radiation de Co à 40 kV et 45 mA. La composition minéralogique semi-quantitative des sables a été obtenue suivant la méthode décrite par Yvon *et al.* (1982). Les proportions des minéraux ont été déterminées visuellement à l'aide d'un microscope optique de marque Opticam. La détermination des éléments majeurs des roches et des sables a été réalisée par fluorescence X (XRF - M01). Les poudres de matériaux ont d'abord été chauffées à 110°C pendant 6 h et fondues avec un flux de tétraborate de lithium avant d'être analysées à l'aide d'un PAN alytical AXIOS Advanced PW 4400. Le matériel de référence international (INTL) utilisé est SY-4 et le matériel interne standard (IHST) est QS-1. La valeur de l'erreur relative varie entre 0,2 et 2 %. Les concentrations des éléments traces des sables ont été déterminées par spectrométrie de masse à plasma inductif (ICP-MS de l'Anglais *Inductively coupled plasma-Mass spectrometry*) l'aide du Perkin Elmer Elan 9000 ICP-MS. Cette méthode nécessite la modification de trois ensembles d'éléments communément utilisés dans les échantillons pour incorporer ou enlever les éléments majeurs de la liste. L'analyse est réalisée suivant la méthode IMC-100. Le matériel de référence international (INTL) utilisé est GSP-2 et le matériel interne standard (IHST) est MRB-29. Les données de zirconium ont été déterminées par fluorescence X (XRF-M02) dans les échantillons SA22, SA25, SA30, SA33 et ND, car la concentration en Zr était supérieure à la limite de détection maximale (1450 ppm) en spectrométrie de masse. L'erreur relative pour la méthode ICP - MS varie entre 0,007 et 10 %. Les analyses chimiques des ciments ont été réalisées par diffraction de rayons X à partir d'un diffractomètre à rayon hXRF Niton XL3t980 équipé d'un tube à rayons X Ag-Anode 50 kV et d'un détecteur silicium. La détection est possible pour la plupart des éléments dont le numéro atomique varie de 12 (Magnésium) à 92 (Uranium).

II.3.2. Essais géotechniques

Les essais géotechniques ont été réalisés au Laboratoire National de Génie Civil (LABOGENIE) à Yaoundé et au Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et d'Altérologie de l'Université de Yaoundé I. Ces essais ont été réalisés sur les matériaux naturels et sur des éprouvettes de béton confectionnées à partir des granulats de nature pétrographique différente.

II.3.2.1. Essais géotechniques sur les granulats fins

II.3.2.1.1. Poids volumique apparent

Le poids volumique apparent est, par définition, le poids par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, en tenant compte des vides pouvant exister entre les grains. La méthode utilisée pour réaliser l'essai est celle décrite par la norme française NF P 94 – 054 (AFNOR, 1991)

II.3.2.1.2. Poids volumique des grains solides

Le poids volumique des grains solides (γ_s) est, par définition, le poids par unité de volume du matériau qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains. La méthode utilisée pour réaliser l'essai est celle du pycnomètre, décrite par la norme française NF P 94 – 054 (AFNOR, 1991).

II.3.2.1.3. Essai d'analyse granulométrique

L'essai d'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions de grains de différentes tailles ou la granularité d'un matériau. Cet essai s'effectue par tamisage sur des tamis à mailles carrées, selon le procédé décrit par Lanchon (1983), pour les grains de diamètre $> 80 \mu\text{m}$ et, par sédimentométrie, pour les grains les plus fins ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$). Dans la présente étude, seul l'essai d'analyse granulométrique par tamisage a été réalisé conformément à la norme française NF EN 933 – 2 (AFNOR, 1996).

II.3.2.1.4. Module de finesse

Le module de finesse (Mf), paramètre servant à évaluer la finesse des sables est la somme des refus cumulés ramenée à l'unité pour les tamis de modules 23, 26, 32, 35 et 38, dont les ouvertures respectives des mailles sont 0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 – 5 mm. Le calcul de ce paramètre a été réalisé suivant la formule suivante :

$$Mf = (\%R_5 + \%R_{2,5} + \%R_{0,125} + \%R_{0,63} + \%R_{0,315} + \%R_{0,160})/100 \dots\dots\dots (1)$$

Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins.

Le tableau II.2 présente les différents domaines d'utilisation des sables, en fonction de leur module de finesse.

Tableau II.2. Domaines d'utilisation des sables en fonction de leur module de finesse
(Lefeu et Franczy, 1999)

| Utilisation dans du béton | Nature du sable | Module de finesse | Observations |
|---------------------------|----------------------------|-------------------|--|
| Sables non autorisés | Sable trop fin | < 2,1 | Sable utilisable si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance. |
| | Sable un peu trop fin | 2,1 – 2,5 | |
| Sables admissibles | Sable moyen (préférentiel) | 2,5 – 3,1 | Sable qui convient pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités. |
| | Sable un peu trop grossier | 3,1 – 3,5 | Sables utilisables pour rechercher des résistances élevées, cependant mauvaise ouvrabilité et risque de ségrégation. |
| Sables non autorisés | Sable trop grossier | | |

II.3.2.1.5. Équivalent de sable

L'essai de détermination de l'équivalent de sable (ES) permet de mesurer la propreté d'un sable. De façon globale, cet essai rend compte de la quantité d'éléments fins contenus dans les matériaux, sans aucune distinction de nature. L'essai de détermination de l'équivalent de sable a été réalisé suivant la norme française NF EN 933 – 8 (AFNOR, 1999). Les valeurs recommandées pour l'équivalent de sable sont consignées dans le tableau II.3. Une valeur faible indique de fortes proportions d'éléments tendres ou friables, nuisibles à l'aspect des parements et à la durabilité des bétons.

II.3.2.2. Essais géotechniques sur les granulats grossiers

Les classes granulaires testées sont les classes 5/15 et 15/25. Trois essais, par classe granulaire, ont été effectués.

II.3.2.2.1. Poids volumique apparent

La méthode utilisée pour réaliser l'essai de détermination de poids volumique apparent est celle décrite par la norme française NF EN 1097 – 3 (AFNOR, 1998).

II.3.2.2.2. Poids volumique des grains solides

Le poids volumique des grains solides (γ_s) représente le poids de granulat sec rapporté au volume absolu de matière pleine. La détermination de γ_s est importante parce que les caractéristiques intrinsèques des matériaux dépendent de leurs poids volumiques absolus. Les informations relatives à la réalisation de l'essai sont présentées dans la norme française NF EN 1097 – 6 (AFNOR, 2001).

II.3.2.2.3. Propreté superficielle

L'essai de propreté superficielle permet d'évaluer la propreté des granulats. Cet essai rend compte globalement de la qualité et de la quantité des impuretés. Le pourcentage des impuretés ne doit pas excéder 5 %. Cet essai a été réalisé selon les prescriptions de la norme française NF P 18 – 591 (AFNOR, 1990).

II.3.2.2.4. Essai micro-Deval

L'essai micro-Deval a pour but la détermination de la résistance à l'usure par le frottement réciproque des granulats.

Tableau II.3. Valeurs recommandées pour l'équivalent de sable (Dreux, 1981)

| Equivalent de sable à piston (Esp, %) | Equivalent de sable visuel (ESv, %) | Nature du sable | Qualité du sable |
|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|--|
| $ESp < 60$ | $ESv < 65$ | Sable argileux | A rejeter pour la confection du béton ; Risque de retrait ou de gonflement |
| $60 \leq ESp < 70$ | $65 \leq ESv < 75$ | Sable légèrement argileux | Propriété admissible pour béton de qualité courant quand on ne craint pas particulièrement le retrait. |
| $70 \leq ESp < 80$ | $75 \leq ESv < 85$ | Sable propre | Faible pourcentage de fines argileuses. Convient pour béton de haute qualité. |
| $ESp \geq 80$ | $ESv \geq 85$ | Sable très propre | Absence presque totale de fines argileuses ; Risque d'entraîner un défaut de plasticité. |

Les valeurs du coefficient micro-Deval (MDE) par voie humide ont été déterminées conformément aux prescriptions de la norme NF EN 1097 – 1 (AFNOR, 2011). Le coefficient Micro-Deval est déterminé par la formule suivante :

$$MDE = 100 \times (M - M_1)/M \quad (2)$$

MDE = Coefficient micro-Deval (%) ;

M = 500 g = masse de l'échantillon avant l'essai (g) ;

M₁ = Masse des granulats après l'essai (g).

Les valeurs recommandées pour l'essai micro-Deval sont consignées dans le tableau II.4.

II.3.2.2.5. Essai Los Angeles

L'essai Los Angeles permet de déterminer les valeurs des résistances combinées aux chocs et à la détérioration progressive par frottements réciproques des granulats. Cet essai s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des chaussées et des bétons hydrauliques. L'essai Los Angeles a été réalisé suivant la norme NF EN 1097 – 2 (AFNOR, 2020). Le coefficient Los Angeles est déterminé par la formule suivante :

$$LA = 100 \times (M - M_1)/M \quad (3)$$

LA = coefficient Los Angeles (%) ;

M = 500 g = masse de l'échantillon avant l'essai (g) ;

M₁ = masse de l'échantillon au sorti de l'étuve (g).

Les valeurs recommandées pour l'essai Los Angeles sont consignées dans le tableau II.5.

II.3.2.3. Méthode de formulation des bétons

Face aux progrès techniques, à l'apparition de nouvelles gammes de bétons, à l'emploi fréquent des adjuvants et à l'utilisation des additions minérales telles que les fillers calcaires ou encore, à l'utilisation des fibres, on se trouve confronté à un nombre croissant de variables non maîtrisées par les méthodes de formulations classiques. Il apparaît donc nécessaire de recourir à des méthodes de formulation plus rationnelles, comme celle de Dreux - Gorisse (Dreux, 1981) qui répond le mieux au contexte des pays en voie de développement.

Tableau II.4. Valeurs recommandées du coefficient micro-Deval (AFNOR, 2011).

| MDE (%) | Usure du granulat | Qualité du granulat |
|---------|-------------------|---------------------|
| 20 | Très faible | Très bonne à bonne |
| 25 | Faible | Bonne à moyenne |
| 30 | Moyenne | Moyenne à faible |
| > 35 | Importante | Médiocre |

MDE : coefficient micro-Deval

Tableau II.5. Valeurs recommandées du coefficient Los Angeles et différentes classes granulaires (AFNOR, 2020).

| LA (%) | Qualité | Catégorie | LA + MDE |
|--------|---------------------|-----------|--------------------|
| 25 | Très bonne à bonne | B | LA + MDE \leq 35 |
| 30 | Bonne à moyenne | C | LA + MDE \leq 45 |
| 35 | Moyenne à faible | D | LA + MDE \leq 55 |
| > 40 | Médiocre à mauvaise | E | LA + MDE \leq 80 |

LA : coefficient Los Angeles

II.3.2.3.1. Choix de la méthode de formulation théorique : Méthode de Dreux-Gorisse

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse (Dreux, 1981) permet de déterminer les quantités optimales de matériaux : eau (E), ciment (C), sable (S), et gravier (G), nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique du béton par cette méthode.

II.3.2.3.1.1. Détermination du rapport multiparamétrique ciment/eau

L'eau utilisée pour la formulation des bétons provient du réseau de distribution d'eau domestique de la *Cameroon Water Corporation* (Camwater). Cette eau a une température de 27,2°C. Son pH et sa conductivité électrique sont respectivement de 6,83 et 69,5 $\mu\text{S/cm}$ tandis que sa salinité est nulle.

Le rapport multiparamétrique ciment/eau se détermine en partant de l'équation $f_c = G.F_{CE}(C/E - 0,5)$.

$$\text{On a donc : } C/E = (f_c/G.F_{CE}) + 0,5 \quad (4)$$

avec :

f_c = résistance moyenne visée à 28 jours d'âge (MPa) ;

F_{CE} = classe vraie du ciment (MPa) ;

C = dosage en ciment (kg/m^3) ;

E = dosage en eau sur matériau sec (l/m^3) ;

G = coefficient granulaire (Tab. II.6).

II.3.2.3.1.2. Dosage en ciment et en eau

Connaissant le rapport C/E, on peut déterminer à partir d'un abaque (Fig. II.6) qui est fonction de C/E et de l'ouvrabilité souhaitée, le dosage en ciment et, en déduire le dosage de l'eau.

II.3.2.3.1.3. Détermination du mélange optimal

Le mélange optimal permet de déterminer les pourcentages de sable et de gravier qui permettront la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Ces pourcentages sont obtenus à partir d'une courbe granulométrique théorique, schématisée par une droite brisée OAB dite droite de référence (Fig II. 7). Le point B, à l'ordonnée 100 %, correspond à la dimension D du plus gros granulat et, le point de brisure A, a des coordonnées définies ainsi, en abscisse à partir de la dimension D (tamis) :

Tableau II.6. Coefficient granulaire G en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats (D_{max})

| Qualité des granulats | Dimension D_{max} des granulats | | |
|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| | Fin $D_{max} < 12,5$ mm | Moyen $20 < D_{max} < 31,5$ mm | Gros $D_{max} > 50$ mm |
| Excellente | 0,55 | 0,60 | 0,65 |
| Bonne, courante | 0,45 | 0,50 | 0,55 |
| Passable | 0,35 | 0,40 | 0,45 |

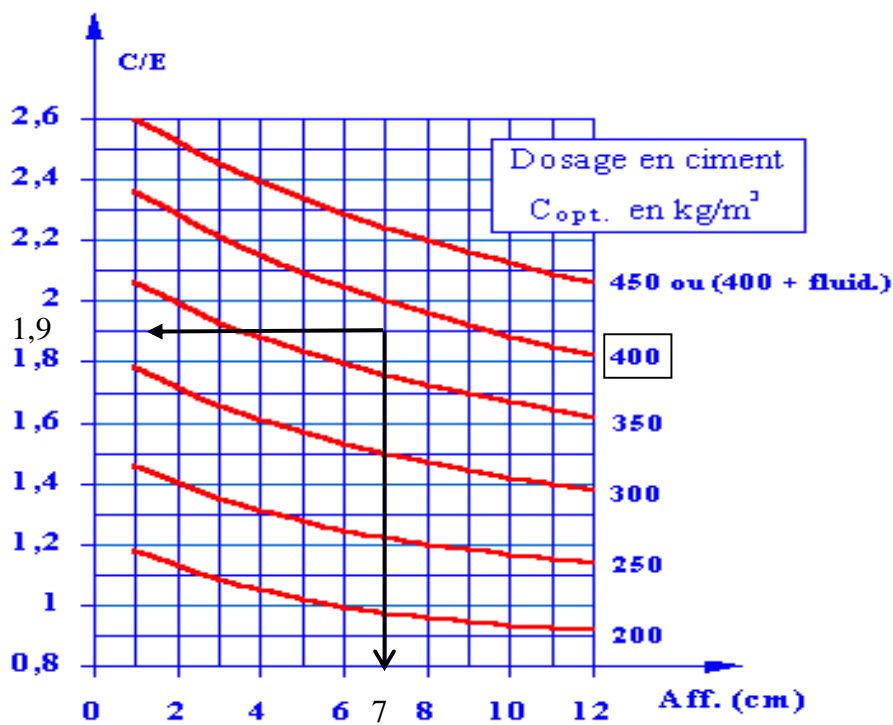


Figure II.6. Abaque d'évaluation approximative du dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (Dreux, 1981)

C/E : ratio ciment/eau ; C_{opt.} : teneur optimale en ciment (kg/m³) ; Aff. : affaissement (cm) ; fluid. : fluide

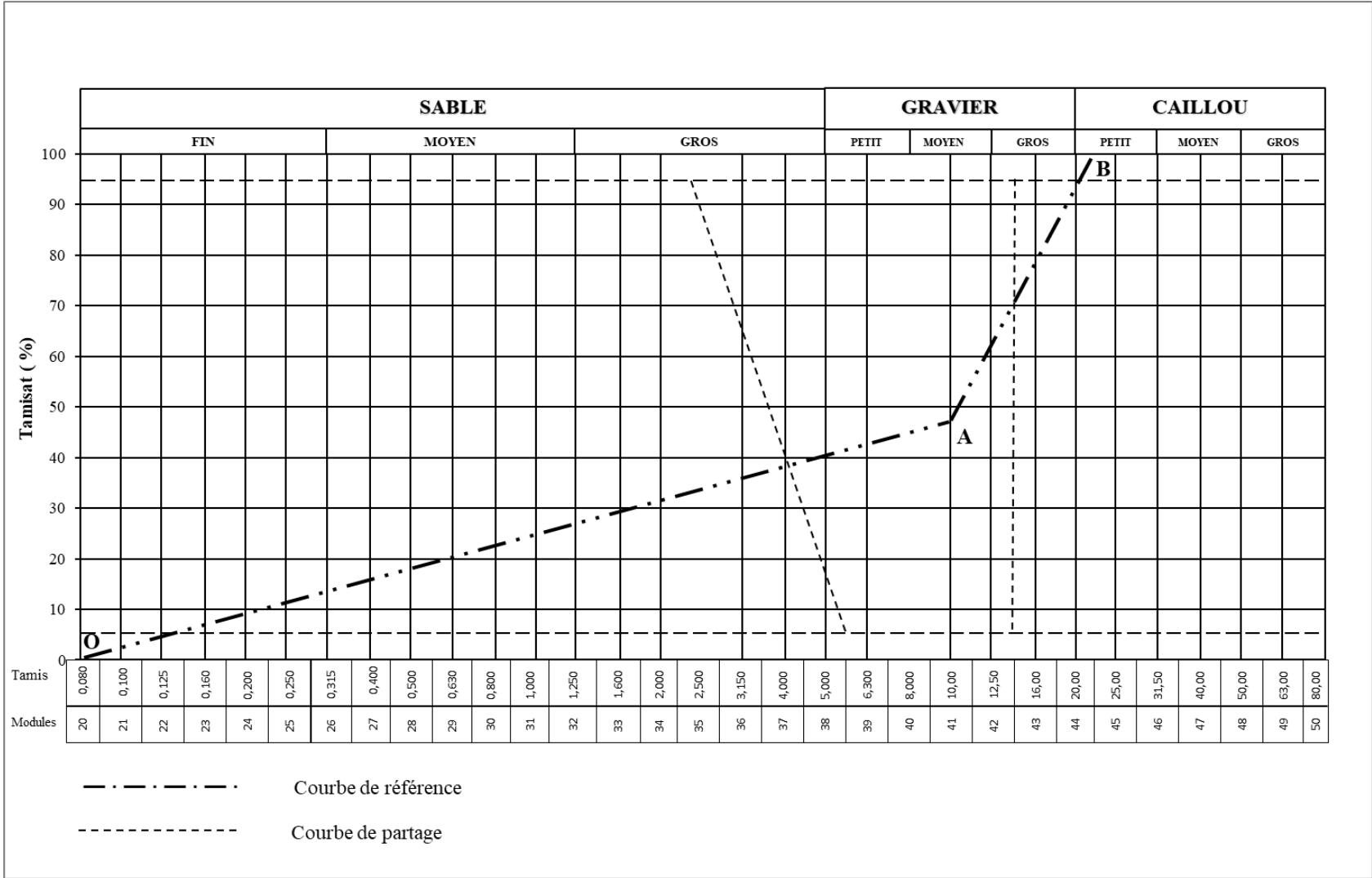


Figure II.7. Droite brisée OAB dite droite de référence (D'après Dreux, 1981)

- si $D \leq 20$ mm, l'abscisse est $D/2$ (5)

- si $D \geq 20$ mm, l'abscisse est donnée par l'équation suivante :

$$\text{Module (X)} = [\text{module (Dmax)} + 38]/2 \quad (6)$$

ou encore $X = [d_{5\text{mm}} - D_{25\text{mm}}]$

$$\text{En ordonnée : } Y = 50 - (D_{\text{max}})^{1/2} + K' \text{ où } K' = K + K_s \quad (7)$$

avec :

K = coefficient de Dreux (1981) donné par le tableau II.7 ;

K_s = coefficient supplémentaire fonction de la granularité du sable = $6M_f - 15$.

La droite AOB représente la courbe idéale d'un matériau à minimum de vides. La droite de Dreux (1981) a pour origine le point O, origine du graphe et, pour extrémité, le point D_{max} , caractéristique du plus gros grain

II.3.2.3.1.4. Détermination des pourcentages en volumes absolus des matériaux

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vides, il est nécessaire de tracer des droites reliant deux à deux, les courbes granulométriques des matériaux du mélange. Ces droites sont définies par 5 % de refus pour le matériau à faible granularité et, par 5 % de passant, pour le matériau à forte granularité. L'intersection des droites ainsi tracées avec la droite brisée de Dreux (1981) permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages en volumes absolus de chaque matériau. Ces pourcentages doivent permettre l'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la droite brisée de Dreux (1981). Si la courbe du mélange obtenue est trop éloignée de la courbe de Dreux, un ajustement de ces pourcentages peut s'avérer nécessaire.

II.3.2.3.1.5. Détermination de la compacité du béton

Pour déterminer les masses de granulats entrant dans la composition de béton, il est nécessaire de déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu en m^3 de solides contenu dans un mètre cube de béton : volumes absolus de ciment, de sable, de gravillons et de graviers. Cette valeur de base c_0 , est fonction de la taille des granulats, de la consistance du mélange et des moyens de vibration mis en œuvre (Tab. II.8). Des corrections c_1 , c_2 et c_3 , fonctions de la forme des granulats, de la masse volumique des granulats et du dosage en ciment, doivent être apportées (Tab. II.8).

Tableau II.7. Valeurs de K, en fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment (Dreux, 1981)

| Vibration | | Faible | | Normale | | Puissante | |
|--|-----------------|--------|----------|---------|----------|-----------|----------|
| Forme des granulats (du sable en particulier) | | Roulé | Concassé | Roulé | Concassé | Roulé | Concassé |
| Dosage en ciment | 400 + Fluide | - 2 | 0 | - 4 | - 2 | - 6 | - 4 |
| | 400 | 0 | + 2 | - 2 | 0 | - 4 | - 2 |
| | 350 | + 2 | + 4 | 0 | + 2 | - 2 | 0 |
| | 300 | + 4 | + 6 | + 2 | + 4 | 0 | + 2 |
| | 250 | + 6 | + 8 | + 4 | + 6 | + 2 | + 4 |
| | 200 | + 8 | + 10 | + 6 | + 8 | + 4 | + 6 |

Tableau II.8. Compacité du béton en fonction de Dmax, de la consistance et du serrage (Dreux, 1981)

| Consistance | Serrage | Compacité (c_0) | | | | | | |
|------------------|---------------------|---------------------|---------------|------------------|----------------|------------------|----------------|----------------|
| | | $D_{max} = 5$ | $D_{max} = 8$ | $D_{max} = 12,5$ | $D_{max} = 20$ | $D_{max} = 31,5$ | $D_{max} = 50$ | $D_{max} = 80$ |
| Molle (TP-FI) | Piquage | 0,750 | 0,780 | 0,795 | 0,805 | 0,810 | 0,815 | 0,820 |
| | Vibration faible | 0,755 | 0,785 | 0,800 | 0,810 | 0,815 | 0,820 | 0,825 |
| | Vibration normale | 0,760 | 0,790 | 0,805 | 0,815 | 0,820 | 0,825 | 0,830 |
| Plastique (P) | Piquage | 0,760 | 0,790 | 0,805 | 0,815 | 0,820 | 0,825 | 0,830 |
| | Vibration faible | 0,765 | 0,795 | 0,810 | 0,820 | 0,825 | 0,830 | 0,835 |
| | Vibration normale | 0,770 | 0,800 | 0,815 | 0,825 | 0,830 | 0,835 | 0,840 |
| | Vibration puissante | 0,775 | 0,805 | 0,820 | 0,830 | 0,835 | 0,840 | 0,845 |
| Ferme (F) | Vibration faible | 0,775 | 0,805 | 0,820 | 0,830 | 0,835 | 0,840 | 0,845 |
| | Vibration normale | 0,780 | 0,810 | 0,825 | 0,835 | 0,840 | 0,845 | 0,850 |
| | Vibration puissante | 0,785 | 0,815 | 0,830 | 0,840 | 0,845 | 0,850 | 0,855 |

Nota :

* Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés, sinon, il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

Sable roulé et gravier concassé ($c_1 = -0,01$),

Sable et gravier concassé ($c_1 = -0,03$).

* Pour les granulats légers, on pourra diminuer de 0,03 les valeurs de c : ($c_2 = -0,03$)

* Pour un dosage en ciment C # 350 kg/m³, on apportera le terme correctif suivant : ($c_3 = (C - 350)/5000$)

$$c = c_0 + c_1 + c_2 + c_3 \quad (8)$$

La valeur de la compacité c du béton permet de déterminer le volume total absolu (V) de granulats intervenant dans la formulation du béton.

$$V = (c - V_c) \quad (9)$$

où :

$$V_c \text{ est le volume de ciment défini par : } V_c = C/\rho_s(c), \quad (10)$$

avec $\rho_s(c)$ est la masse volumique absolue du ciment utilisé.

II.3.2.3.1.6. Détermination des poids des granulats

A partir du volume absolu du ciment (V_c) et des pourcentages en volume absolu de chaque granulat, on peut trouver le volume absolu des granulats ($V' = V - V_c$) et, en déduire leur poids à partir des relations suivantes :

$$\gamma_s = V' \times S\% \times \gamma_s(s), \quad S\% \text{ (pourcentage du sable)} ; \gamma_s(s) = \text{poids volumique des grains du sable}, \quad (11)$$

$$\gamma_g = V' \times g\% \times \gamma_s(g), \quad g\% \text{ (pourcentage du 5/12,5)} ; \gamma_s(g) = \text{poids volumique des grains du 5/12,5}, \quad (12)$$

$$\gamma_g = V' \times g\% \times \gamma_s(g), \quad g\% \text{ (pourcentage du 12,5/25)} ; \gamma_s(g) = \text{poids volumique des grains du 12,5/25} \quad (13).$$

La formulation théorique de béton recherchée est définie par les quantités d'eau E , de sable S , de gravillon g et de gravier G . Le poids total d'un mètre cube de béton courant est donné par la formule suivante :

$$\Delta_o = (E + C + S + g + G) \quad (14)$$

avec :

C = poids du ciment (N),

E = poids d'eau (N),

S = poids du sable (N),

g = poids du petit gravier (N),

G = poids du gros gravier (N).

Quelques étapes de la préparation des éprouvettes de bétons sont illustrées par la figure II.8.

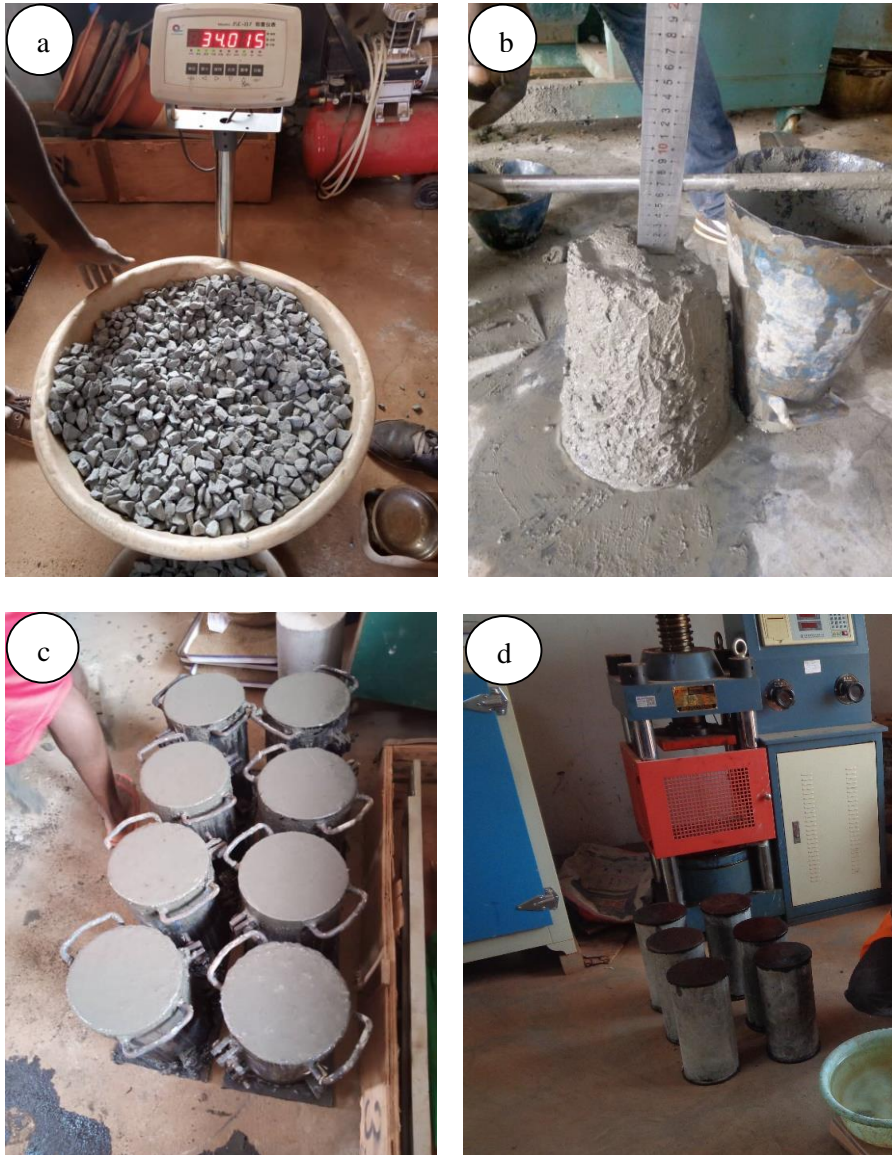


Figure II.8. Préparation des éprouvettes de bétons ; a) Pesée des granulats ; b) Slump test ; c) Moulage du béton ; d) Echantillons de béton pour essai de compression uniaxiale

II.3.2.4. Essai mécanique : résistance à la compression uniaxiale

L'étude de résistance mécanique consiste en la détermination des résistances à la compression des éprouvettes de béton confectionnées et démoulées à 24 h puis, conservées sous l'eau, jusqu'à la veille des essais. L'essai de détermination de la résistance à la compression, réalisé selon la norme française NF NE 12390 – 3 (AFNOR, 2003), a pour but de connaître la résistance à la compression uniaxiale des éprouvettes de béton. Les éprouvettes de béton de forme cylindrique (Fig. 8), préalablement immergées, sont sorties de l'eau puis asséchées. Leurs extrémités sont rendues planes en les surfaçant au moyen d'une pâte de ciment. Une fois rectifiées, elles sont alors centrées chacune sur une presse de chargement (Fig. 9). Chaque éprouvette est soumise à une charge croissante à la vitesse de 0,5 MPa/s. On note enfin la charge de rupture qui correspond à la moyenne des charges enregistrées sur les éprouvettes. Connaissant d'une part, la masse et le volume de l'éprouvette de béton et, d'autre part, sa section et la charge maximale qui provoque la rupture, la masse volumique et la résistance à la compression simple du béton peuvent être calculées aisément à l'aide des relations suivantes :

$$\rho = M/V \quad (15)$$

$$\sigma_{c28} = F/S \quad (16)$$

avec :

ρ (t/m³) : masse volumique du béton,

M (g) : masse de l'éprouvette,

V (m³) : volume de l'éprouvette,

σ_{c28} (MPa) : résistance à la compression uniaxiale du béton à 28 jours,

F (N) : charge de rupture.

II.3.3. Exploitation des données

II.3.3.1. Exploitation des données de diffraction des rayons X

Le dépouillement des données contenues dans les diffractogrammes des rayons X des matériaux a été effectué sur les plans qualitatifs et quantitatifs. La méthode qualitative consiste à rechercher les minéraux présents dans le matériau étudié à partir des pics principaux identifiés à l'aide des abaques de Brindley et Brown (1980). La méthode quantitative consiste à indexer tous les pics des minéraux déterminés qualitativement. L'aire de chaque pic est ensuite rapportée à la somme des aires des pics du diffractogramme.

Le résultat obtenu correspond à la proportion du minéral dans l'échantillon de matériau. Lorsqu'un pic est représentatif de plusieurs minéraux, son aire est rapportée au nombre de minéraux qu'il porte (Fig. II.9). La proportion du minéral *i* dans le matériau est donnée par la relation :

$$P_i = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^n \frac{A_p}{N_i} \quad (17)$$

avec :

P_i = proportion du minéral *i*,

A = aire totale du diffractogramme,

A_p = aire du pic *p*,

N_i = nombre de minéraux sur un pic *p*.

Pour un minéral *X* quelconque du diffractogramme illustratif de la figure II.9, on a :

$$P_X = [(A_{p1}/2) + A_{p2} + A_{p3} + (A_{p6}/2)]/A \quad (18).$$

II.3.3.2. Exploitation des données géochimiques

II.3.3.2.1. Indices et diagrammes géochimiques

Plusieurs indices d'altération chimique ont été calculés à partir des données d'analyses géochimiques. Les indices utilisés pour quantifier l'intensité de l'altération sont l'indice d'altération chimique (CIA ; Nesbitt et Young, 1982), l'indice d'altération des plagioclases (PIA ; Fedo *et al.*, 1995) et l'indice d'altération mafique (MIA ; Babechuk *et al.*, 2014).

Les formules de ces indices d'altération sont les suivantes :

$$CIA = 100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O) \quad (19)$$

$$PIA = 100 \times (Al_2O_3 - K_2O) / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O) \quad (20)$$

$$MIA = 100 \times [(Al_2O_3 + Fe_2O_3) / (Al_2O_3 + Fe_2O_3 + MgO + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \quad (21).$$

Les indices CIA, MIA et PIA sont calculés à partir des teneurs molaires des principaux éléments majeurs. Pour la valeur de CaO^* , si la fraction molaire de $CaO \leq Na_2O$, alors la valeur de $CaO^* = CaO$. Si la fraction molaire de $CaO > Na_2O$, alors $CaO^* = Na_2O$ (McLennan *et al.*, 1993). Les valeurs de CIA, MIA et PIA varient entre 0 et 100 %.

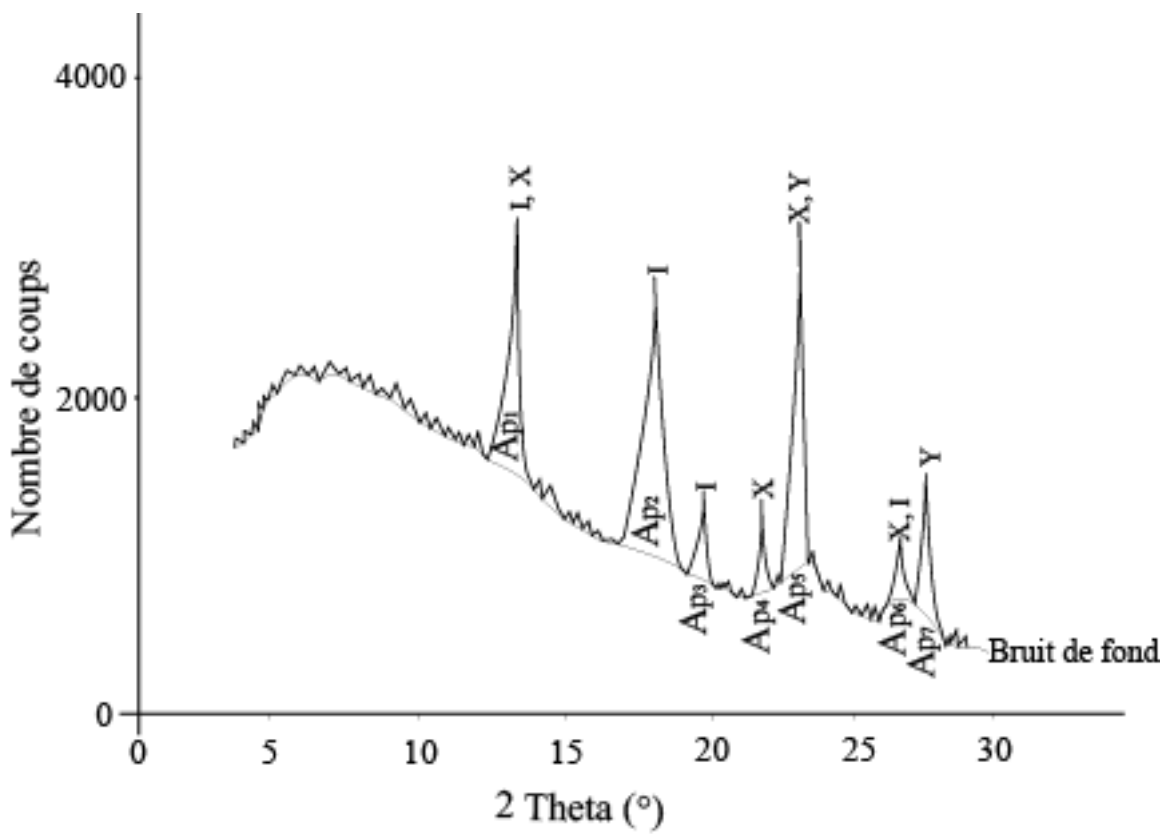


Figure II.9. Diffractogramme illustratif de détermination de la proportion d'un minéral X, Y ou Z

Les valeurs de silice ajustée $(\text{SiO}_2)_{\text{adj}}$ ont été obtenues par la relation suivante :

$$(\text{SiO}_2)_{\text{adj}} = [\text{SiO}_2 / (\sum \text{éléments majeurs} - \text{LOI})] \times 100 \quad (22).$$

Pour déterminer les caractéristiques chimiques du ciment, les paramètres utilisés d'après Newman et Ban (2003) sont : le module de silice (MS), le module d'alumine (MA), le module hydraulique (MH) et le facteur de saturation en chaux (FSC).

La formule du ratio MS est : $\text{MS} = \text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ (23).

Les valeurs de référence de MS sont comprises entre 1,8 et 2,7 pour les ciments de bonne qualité.

Le module MA est le rapport entre l'alumine et la phase ferrite dans un ciment Portland ordinaire. Ces bornes oscillent entre 1,0 et 1,7. La formule de ce ratio est :

$$\text{MA} = \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3 \quad (24).$$

Le module MH a des valeurs limites comprises entre 1,70 et 2,30. La formule de MH

est : $\text{MH} = \text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ (25).

Le facteur de saturation en chaux FSC permet de déterminer la quantité de chaux maximale avec laquelle on peut combiner les différents oxydes présents dans le ciment. Ce paramètre permet également de contrôler le rapport entre l'alite et la belite. Les valeurs limites de ce paramètre varient entre 0,66 et 1,02. Sa formule est donnée par la relation :

$$\text{FSC} = \text{CaO} - 0,7\text{SO}_2 / (2,8\text{SiO}_2 + 1,2\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65\text{Fe}_2\text{O}_3) \quad (26).$$

La provenance des sédiments a été réalisée grâce au diagramme de Armstrong-Altrin (2009).

II.3.3.2.2. Exploitation des données géochimiques des éléments en traces

Les différents ratios permettant de déterminer les sources de provenance des sédiments ont été calculés : La/Sc, La/Co, Th/Sc et Cr/Th. Le diagramme de Cullers (2002) a permis de déterminer la composition chimique des roches sources. Le recyclage des sédiments a été illustré à l'aide du diagramme de McLennan *et al.* (1993).

II.3.3.2.3. Exploitation des données géochimiques des Terres rares

Les différents ratios permettant de quantifier la distribution et la répartition des Terres rares (REE de l'Anglais *Rare earth element*) ont été calculés : Σ REE, *Light* REE (LREE), *Heavy* REE (HREE), LREE/HREE, La/Yb, Ce/Ce* et Eu/Eu*.

Les diagrammes de normalisation des spectres des REE des sables étudiés ont été réalisés par rapport aux données de REE de la chondrite de McDonough et Sun (1995) et par rapport à celles de UCC (*Upper continental crust*; Rudnick et Gao, 2003).

II.3.3.3. Exploitation des données géotechniques

La droite de Dreux-Gorisse (Dreux, 1981), les abaques et les graphiques associés ont permis de déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un béton à minimum de vide.

Conclusion

Les travaux de terrain ont consisté aux enquêtes bibliographiques, en la revue de littérature, en la localisation des points de prélèvement, en la description et au prélèvement des échantillons de sable et leur encodage. En laboratoire, les travaux ont porté sur les études pétrologiques notamment la pétrographie, la minéralogie et géochimie, aux essais géotechniques, notamment les essais d'identification et les essais mécaniques. Les résultats obtenus de ces travaux sont consignés dans le prochain chapitre.

CHAPITRE III.

PÉTROLOGIE DES ROCHES SOURCES PROBABLES DES SABLES DU BASSIN VERSANT DE LA SANAGA

Introduction

Les travaux effectués sur le terrain et en laboratoire ont abouti à des résultats qui sont consignés dans le présent chapitre. Ces résultats portent sur la pétrographie, la minéralogie et la géochimie des probables roches sources du bassin versant de la Sanaga.

III.1. Pétrographie et géochimie des basaltes

III.1.1. Pétrographie

Les basaltes étudiés sont d'aspect gris très sombre (Fig. III.10a) et présentent une texture microlitique aphyrique (Fig. III.10b). Ils sont constitués de plagioclases, de clinopyroxènes, d'olivines et d'opagues (Fig. III.10c).

Plagioclases (25 – 30%)

Les plagioclases constituent en général la fraction minéralogique la plus importante de la mésostase et ne présentent pas de traces d'altération. Ils apparaissent régulièrement sous forme de baguettes microlitiques allongées, orientées dans toutes les directions. Ces baguettes sont automorphes et noyées dans une mésostase abondante. Elles sont associées aux opagues.

Clinopyroxènes (10 %)

Les clinopyroxènes sont éparpillés dans toute la roche et sont généralement subautomorphes. Certains cristaux montrent des traces d'altération. D'autres sont envahis par la mésostase et présentent parfois, en inclusions, des opagues.

Olivines (5 %)

Les olivines sont très craquelées et subarrondies. Elles apparaissent de façon sporadique dans la roche. Les quelques cristaux observés par endroits sont envahis par la mésostase.

Minéraux opaques (5 – 10 %)

Les minéraux opaques sont arrondis et apparaissent dans toute la roche. Ils sont associés à tous les autres minéraux et sont observables en inclusions dans les olivines et les clinopyroxènes.

Mésostase (45 %)

La mésostase est essentiellement constituée des baguettes microlitiques de plagioclases. Dans cette mésostase, on observe aussi les petits cristaux de pyroxènes, d'opagues, d'olivines, du verre volcanique et quelques produits d'altération.

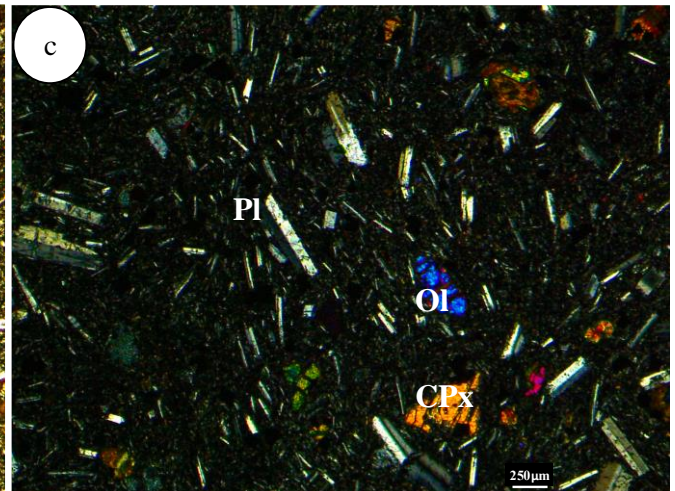


Figure III.10. Macrophotographie (a) et microphotographies des granulats basaltiques en lumière polarisé non analysée (b) et en lumière polarisée et analysée (c) ; Pl: Plagioclases ; Ol: Olivine ; CPx : Clinopyroxene

III.1.2. Géochimie

Les basaltes étudiés présentent des teneurs modérées en SiO₂ (38,56 % ; Tab. III.9), modérées en Al₂O₃ (16,05 %), Fe₂O₃ (7,95 %) et CaO (6,22 %). Les valeurs de PF sont relativement élevées 7,81 %. Celles en TiO₂, MgO et P₂O₅ sont relativement faibles et, inférieures à 4 %. Les autres oxydes, MnO, Na₂O, P₂O₅ et K₂O, ont des teneurs inférieures à 3 %.

III.2. Pétrographie et géochimie des granites

III.2.1. Pétrographie

Les granites utilisés sont gris clair (Fig. III.11a) et ont une texture grenue (Fig. III.11b). Ils sont constitués de quartz, biotite, feldspaths alcalins (microcline et orthose), opaques, plagioclases et amphibole (Fig. III.11c).

Quartz (50 %)

Les cristaux de quartz sont subautomorphes et associés aux biotites, plagioclases et feldspaths alcalins. Certains cristaux sont en inclusions vermiculées dans les plagioclases (myrmekites) et, d'autres, sont en inclusions dans la biotite. Quelques cristaux présentent des microfractures remplies par des minéraux secondaires.

Microcline et orthose (20 %)

Les feldspaths alcalins sont subautomorphes. Ils sont associés aux cristaux de quartz et plagioclases. Certains cristaux sont en inclusion dans le quartz.

Plagioclases (10 %)

Certains cristaux de plagioclases sont xénomorphes, parfois prismatiques et de tailles variables. Quelques cristaux ont en inclusions des opaques. Les plagioclases sont associés au quartz et à la biotite.

Biotite (10 %)

La biotite se présente sous forme de paillettes xénomorphe. Elle occupe les interstices laissés par les autres minéraux. Certains cristaux se présentent en reliques envahies par les autres minéraux. Quelques cristaux sont en voie de chloritisation.

Amphibole (5 %)

L'amphibole est représentée par la hornblende verte. Les cristaux d'amphibole sont xénomorphes, déchiquetées ou envahies par les cristaux de quartz, de biotite et d'opaques.

Tableau III.9. Concentration des éléments majeurs (%) des basaltes

| | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | PF | Total |
|----------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|-------|
| Basaltes | 38,56 | 3,39 | 16,05 | 7,95 | 0,27 | 3,99 | 6,22 | 2,69 | 1,37 | 3,11 | 7,81 | 91,41 |

PF : Perte au feu

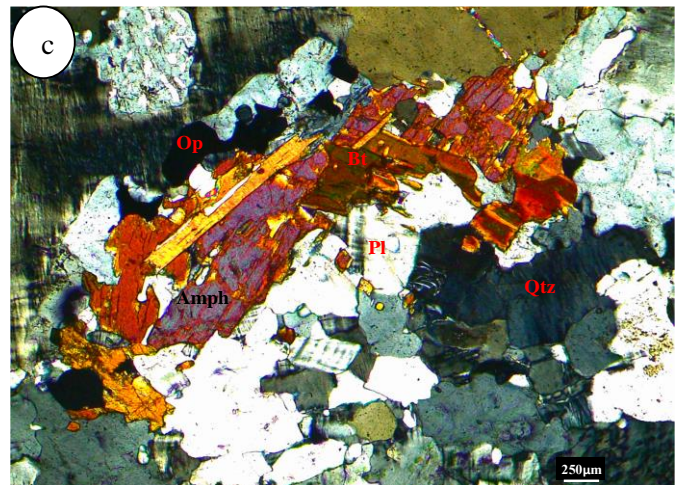
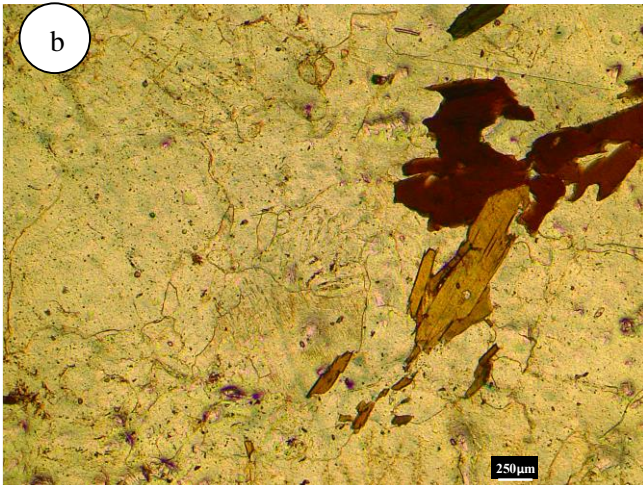


Figure III.11. Macrophotographie (a) et microphotographies des granules granitiques en lumière non analysée (b) et en lumière polarisée et analysée (c) ; Amph : Amphibole; Bt : Biotite ; Pl : Plagioclases; Op : Minéraux opaques ; Qtz : Quartz

Minéraux opaques (5 %)

Les minéraux opaques occupent les interstices laissés par les autres minéraux. Ils sont en inclusions dans les amphiboles et les plagioclases.

III.2.2. Géochimie

Les granites étudiés présentent des teneurs élevées en SiO_2 (76,25 % ; Tab. III.10) modérées en Al_2O_3 (11,47 %) et, faibles en Fe_2O_3 (2,73 %). Les valeurs de PF sont très faibles 0,55 %. Les teneurs en TiO_2 sont faibles (<1 %). MgO , MnO , Na_2O , CaO , P_2O_5 et K_2O ont des teneurs inférieures à 4 %.

III.3. Pétrographie et géochimie des gneiss

III.3.1. Pétrographie

Les gneiss étudiés ont une couleur d'ensemble grise (Fig. III.12a) avec un litage marqué par une alternance de lits clairs quartzo-feldspathiques et de lits sombres ferromagnésiens. Les minéraux observables à l'échelle macroscopique sont le quartz, les feldspaths, la muscovite, la biotite et le grenat. Au microscope, la roche présente une texture granoblastique hétérogranulaire (Fig. III.12b) et est constituée de quartz, biotite, orthose, microcline, plagioclases, amphibole, pyroxène, grenat et opaques (Fig. III.12c).

Quartz (40 – 45 %)

Le quartz est le minéral le plus abondant de la roche. Il se présente sous forme de cristaux subautomorphes à xénomorphes. Certains cristaux de quartz sont en inclusions dans la biotite et les porphyroblastes de grenat. Le quartz est en association fréquente avec l'amphibole.

Feldspaths (15 – 20 %)

Les Feldspaths sont représentés dans la roche par les plagioclases, on note aussi la présence du microcline et de l'orthose. Les feldspaths sont subautomorphes à xénomorphes. L'association minérale orthose, quartz, biotite, amphibole et pyroxène est fréquente. L'orthose et le quartz forment des lits discontinus perturbés principalement par la biotite.

Biotite (10 – 15 %)

La biotite est le minéral ferromagnésien le plus abondant dans la roche. Elle se présente sous forme de lamelles subautomorphes allongées. Ces lamelles sont enchevêtrées

Tableau III.10. Concentrations des éléments majeurs (%) des granites

| | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | PF | Total |
|----------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|-------|
| Granites | 76,25 | 0,43 | 11,47 | 2,73 | 0,04 | 1,01 | 2,27 | 3,14 | 1,47 | 0,01 | 0,55 | 99,37 |

PF : Perte au feu

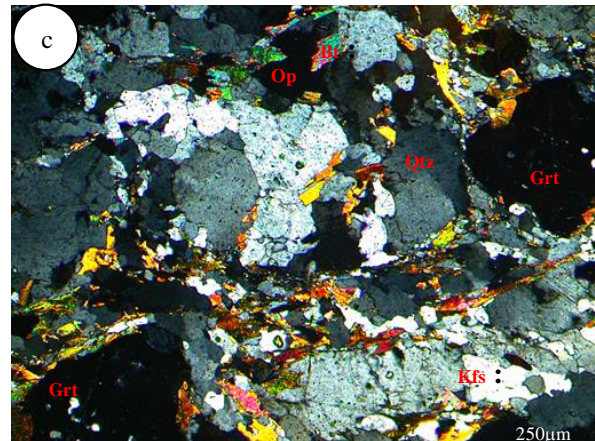
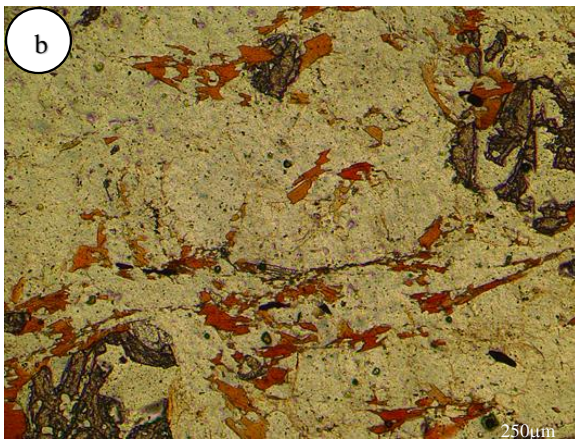


Figure III.12. Macrophotographie (a) et microphotographies des gneiss à biotite et à grenat en lumière polarisée non analysée (b) et en lumière polarisée et analysée (c)
 Qtz : Quartz ; Kfs : Feldspaths potassiques ; Bt : Biotite ; Grt : Grenat ; Op :
 Minéraux opaques

entre elles et s'associent à la hornblende et au pyroxène pour former de fins lits ferromagnésiens. Certains cristaux de biotite sont en inclusions dans les porphyroblastes de grenat. D'autres, par contre, forment des granulations autour de ces mêmes porphyroblastes. La biotite est associée à l'amphibole, au pyroxène, au quartz et au grenat.

Amphibole (2 – 3 %)

L'amphibole est représentée par la hornblende verte. Les cristaux de hornblende verte sont automorphes à subautomorphes et sont en association avec la biotite, le pyroxène et le quartz.

Grenat (10 – 12%)

Le grenat se présente sous forme de porphyroblastes xénomorphes de dimensions variables. Certains cristaux de grenat présentent de nombreuses craquelures et renferment des inclusions de quartz, d'orthose, de biotite et d'opacques. L'association minérale grenat, biotite, quartz et orthose est fréquente.

Pyroxène (2 – 4 %)

Le pyroxène est représenté dans la roche par le clinopyroxène. Il se présente sous forme de cristaux automorphes de dimensions variables pouvant atteindre 2 mm et, renferme quelques inclusions de quartz et de biotite.

Minéraux opaques (1%)

Les minéraux opaques représentent la phase minérale accessoire de la roche. Ils sont automorphes à xénomorphes et dérivent généralement de l'altération de la biotite.

III.3.2. Géochimie

Les résultats d'analyse géochimique du gneiss à biotite (Tab. III.11) indiquent des teneurs élevées en SiO₂ (64,17 %), modérées en Al₂O₃ (16,16 %) et, faibles en Fe₂O₃ (8,58 %). Les teneurs en MgO, K₂O, Na₂O et CaO sont comprises entre 1,69 et 2,75 %. Les autres oxydes ont des teneurs inférieures à 1 %. La teneur en alcalins Na₂O + K₂O (4,72 %) est faible. La somme MgO + FeO (8,87 %) montre que la roche a une teneur modérée en ferromagnésiens.

Tableau III.11. Concentrations des éléments majeurs (%) des gneiss

| | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | PF | Total |
|----------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|-------|
| PF : Gneiss | 64,17 | 0,97 | 16,16 | 8,58 | 0,21 | 2,75 | 1,69 | 2,07 | 2,65 | 0,16 | 0,48 | 99,21 |

Perte au feu

III.4. Pétrographie et géochimie des chloritoschistes

III.4.1. Pétrographie

Les chloritoschistes étudiés sont de couleur gris verdâtre, lustrée en surface et feuilletée (Fig. III.13a). Au microscope, les chloritoschistes présentent une texture lépidonématoblastique (Fig. III.13b) et sont constitués de chlorite, plagioclases, quartz et épidote (Fig. III.13c)

Chlorite (70 – 75 %)

La chlorite est allongée et fusiforme, constituée de blastes dont les tailles sont inférieures au centimètre. Elle forme avec la muscovite des paillettes mixtes et moule la calcite. Les minéraux opaques la corrodent par endroits.

Plagioclases (5 – 10 %)

Les plagioclases sont subautomorphes et possèdent une taille moyenne de 0,4 mm.

Muscovite (3 – 5 %)

La muscovite présente des cristaux de taille millimétrique à plurimillimétrique. Elle est allongée et flexueuse dans les feuillets sombres. Certains phénoblastes sont sigmoïdes et montrent par endroits des golfes de corrosion occupés par le quartz et les minéraux opaques. Les cristaux sont fréquemment en amas avec la chlorite dans les lits sombres.

Quartz (2 – 3 %)

Le quartz est en inclusion dans la chlorite et la muscovite. Il se présente sous forme de phénoblastes plurimillimétriques allongés suivant la schistosité et sous forme de microblastes isogranulaires.

Calcite (1 – 2 %)

La calcite est subautomorphe et de taille millimétrique. Les cristaux de calcite se singularisent dans les lits clairs par leur allongement conforme à la schistosité de la roche. Ces cristaux sont souvent moulés par des paillettes de muscovite et de chlorite.

Opaques (1 %)

Les minéraux opaques sont automorphes et de taille millimétrique. Ils sont soit allongés le long des clivages de la muscovite ou en inclusions dans la calcite et la chlorite. D'autres corrodent le quartz, la calcite et les plagioclases

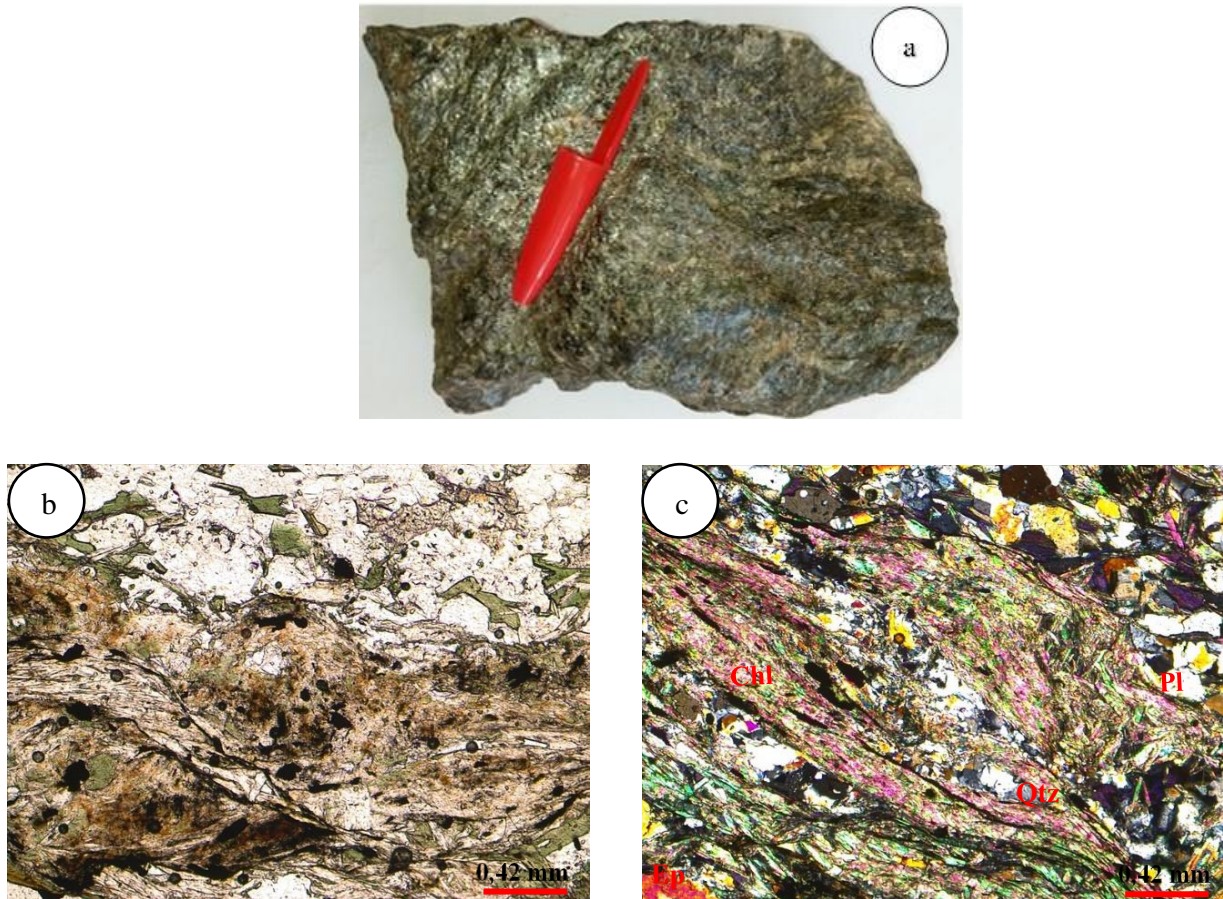


Figure III.13. Macrophotographie (a) et microphotographies des chloritoschistes en lumière non analysée (b) et en lumière polarisée et analysée (c) Qtz : Quartz ; Pl : Plagioclases ; Chl : Chlorite ; Cc: calcite ; Ep : Epidote ; Op : Minéraux paques

III.4.2. Géochimie

Les résultats d'analyse géochimique des chloritoschistes (Tab. III.12) indiquent des teneurs élevées en SiO₂ (64,65 %), modérées en Al₂O₃ (13,95 %) et, faibles en Fe₂O₃ (6,88 %) et K₂O (6,63 %). Les teneurs en MgO, Na₂O et CaO sont comprises entre 1,72 et 2,52 %. Les autres oxydes ont des teneurs inférieures à 1 %. Les valeurs de PF sont faibles (3,86 %).

III.5. Pétrographie et géochimie des micaschistes

III.5.1. Pétrographie

Les micaschistes ont une couleur gris-clair (Fig. III.14a) et leur texture est lépidonématoblastique (Fig. III.14b). Ces roches sont constituées de quartz, muscovite, biotite, grenat, plagioclase, feldspath alcalin, amphibole, disthène, chlorite et minéraux accessoires (Fig. III.14c).

Muscovite (30 – 35 %)

La muscovite se présente sous forme de lamelles étirées fortement plissées suivant la schistosité. Cette muscovite est généralement entourée par des porphyroblastes de quartz et de grenat. Des poches de paillettes de muscovite et des cristaux de quartz sont parfois dispersés, et entourés de porphyroblastes de muscovite et de biotite.

Biotite (30 – 35 %)

Les lamelles de biotite présentent des inclusions de zircon. On observe des cristaux de biotite qui s'altèrent en muscovite et des minéraux opaques qui se concentrent le long des clivages de biotite. De petites lamelles de biotite recristallisent à l'ombre de pression de cristaux comme le grenat et les lentilles sigmoïdes de cristaux de quartz.

Quartz (15 – 20 %)

Les grains de quartz sont disposés en bandes suivant la direction de schistosité. Ces grains de quartz sont en association avec la muscovite, la biotite et les minéraux opaques. Par endroit, des lentilles sigmoïdes d'exsudats de quartz sont entourées par des lamelles de biotite et de muscovite.

Plagioclases (10 – 15 %)

Les plagioclases sont rares et présentent des inclusions de biotite.

Tableau III.12. Concentrations des éléments majeurs (%) des chloritoschistes

| | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | PF | Total |
|-----------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|-------|
| Chloritoschiste | 64,55 | 0,79 | 13,95 | 6,88 | 00,12 | 2,40 | 2,52 | 1,72 | 6,63 | 0,17 | 3,86 | 99,26 |

PF : Perte au feu

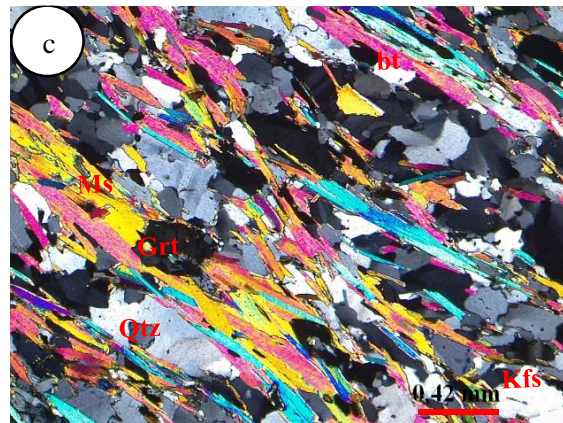
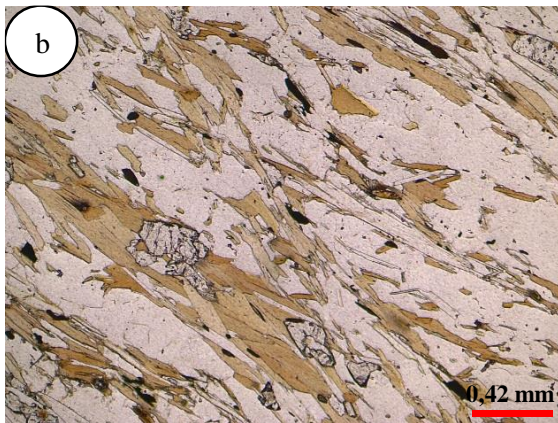


Figure III.14. Macrophotographie (a) et microphotographies des micaschistes à grenat en lumière non analysée (b) et en lumière polarisée et analysée (c) Qtz : Quartz ; Kfs : Feldspaths potassiques ; Bt : Biotite ; Ms : Muscovite ; Grt : Grenat ; Op : Minéraux opaques.

Tableau III.13. Concentrations des éléments majeurs (%) des micaschistes

| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MnO | Fe ₂ O ₃ | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | PF | Total |
|-------------|------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|------|-------|
| Micaschiste | 62,41 | 14,17 | 0,26 | 11,39 | 0,26 | 2,40 | 1,35 | 2,52 | 0,88 | 0,17 | 0,82 | 96,63 |

PF : Perte au feu

Feldspaths alcalins (5 – 10 %)

Les porphyroblastes de feldspaths alcalins ne dépassent pas 1 mm et présentent des inclusions de biotite et de muscovite.

Grenat (2 – 5 %)

Le grenat présente parfois une couronne irrégulière composée de quartz, de feldspaths alcalins et de biotite. De nombreux cristaux présentent une marque d'altération brunâtre le long des fissures.

Minéraux accessoires

Les minéraux accessoires comprennent le sphène, le zircon et les minéraux opaques.

III.5.2. Géochimie

Les micaschistes étudiés (Tab. III.13) possèdent des teneurs élevées en SiO_2 (62,41 %), modérées en Al_2O_3 (14,17 %) et Fe_2O_3 (11,39 %). Les teneurs en K_2O (2,52 %) et CaO (2,40 %) sont faibles. Les teneurs des autres oxydes MgO , Na_2O , MnO , TiO_2 , P_2O_5 , et PF sont comprises entre 0,17 et 0,88 %.

Conclusion

Les roches sources probables des sables du bassin versant de la Sanaga sont majoritairement des granitoïdes, de roches majoritairement basiques, de roches fortement métamorphiques et de roches faiblement métamorphiques. Les granites ont une texture grenue et sont constitués de quartz, biotite, feldspaths alcalins, opaques, plagioclases et amphiboles. Les basaltes de texture microlitique aphyrique sont composés de plagioclases, de clinopyroxènes, d'olivine et de minéraux opaques. Les gneiss texture granoblastique hétérogranulaire comprennent le quartz, les feldspaths, la muscovite, la biotite et le grenat. Les chloritoschistes présentent une texture lépidoblastique et se composent de chlorite, plagioclases, quartz et épidote. Les micaschistes, de texture granoblastique à lépidonématoblastique, sont constitués de quartz, muscovite, biotite, grenat, plagioclase, feldspath alcalin, amphibole, disthène, chlorite et de minéraux accessoires. Sur le plan géochimique, les granites, les gneiss, les chloritoschistes et les micaschistes sont felsiques tandis que les basaltes sont mafiques. La pétrologie des matériaux alluviaux issus de l'altération de ces roches est l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE IV.

PÉTROLOGIE DES SABLES

Introduction

Les travaux effectués sur le terrain et en laboratoire ont abouti à des résultats qui sont consignés dans le présent chapitre. Ces résultats portent sur la pétrographie, la minéralogie et la géochimie des matériaux alluviaux de la Sanaga, des granulats grossiers retenus pour la confection des éprouvettes de béton et, sur la minéralogie et la géochimie du ciment utilisé.

IV.1. Pétrographie

Les matériaux alluviaux prélevés le long du fleuve Sanaga ont en général une couleur qui varie du brun brunâtre (10YR 5/6) au jaune brunâtre (10YR 6/8) ; leurs formes sont subarrondies à arrondies (Fig. IV.15).

La taille moyenne des matériaux alluviaux étudiés est comprise entre $-0,85$ et $2,12 \phi$. Soixante-quatorze pourcent de ces matériaux sont des sables à grains grossiers ($-0,85 - 0,74 \phi$), 16 % représentent des sables à grains moyens ($1,03 - 1,32 \phi$) et 10 % sont des sables à grains fins ($2,06$ et $2,12 \phi$). Ces résultats montrent que les sables étudiés sont moyens à grossiers (Tab. IV.14).

IV.2. Minéralogie

Les sables moyens à grossiers étudiés sont constitués de quartz, de microcline, de plagioclases, de muscovite, d'ilménite, d'anatase et de magnétite (Tab. IV.14 ; Fig. IV.16). Les teneurs en quartz (69 – 87 %) sont élevées, celles en microcline (9 – 15 %) sont modérées tandis que celles en plagioclases (~4 %), muscovite (~3 %), ilménite (~2 %), anatase et magnétite (~1 %) sont faibles à très faibles.

L'analyse des lames minces permet de différencier trois catégories de minéraux lourds :

- les minéraux caractéristiques du métamorphisme et ou de l'hydrothermalisme : andalousite, disthène, sillimanite, épidote, staurotide et tourmaline ;
- les minéraux du magmatisme : augite et péridot ;
- les minéraux ubiquistes : apatite, grenat, hornblende, minéraux opaques et zircon.

Certains de ces minéraux mixtes tels les minéraux opaques sont très abondants dans les sables étudiés. Les minéraux lourds observables dans les sables étudiés (Tab. IV.15 ; Fig. IV.17 ; IV.18 ; IV.19 ; IV.20) sont majoritairement les minéraux opaques (~50 %) et l'épidote (~20 %).



Figure IV.15a. Points de prélèvement des matériaux
 a) Nanga-Eboko ; b) Ebebda ; c) Monatélé



Figure IV.15b. Point de prélèvement des sables sur les berges de la Sanaga à l'estuaire (Yoyo)

Tableau IV.14. Données texturales et composition minéralogique (%) des sables étudiés

| Zone | Nanga-Eboko - Batchenga | | | | | Sa'a | | | Ebebda - Sakbayémé | | | | | | Edéa - Yoyo | | | | | |
|-------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| Code | SA18 | SA19 | SA20 | ND | SA21 | SA22 | SA23 | SA24 | SA25 | MB | SA26 | SA27 | SA28 | SA29 | SA30 | SA31 | SA32 | SA33 | SA34 | Moy (n = 19) |
| Graviers | 14,60 | 3,75 | 17,00 | 21,45 | 0,85 | 23,15 | 17,80 | 0,45 | 6,55 | 0,35 | 0,05 | 4,20 | 5,50 | 0,80 | 17,50 | 10,45 | 0,60 | 15,30 | 1,85 | 10,90 |
| Sables | 85,39 | 96,09 | 82,68 | 78,50 | 99,12 | 76,53 | 82,06 | 97,26 | 93,45 | 99,65 | 99,95 | 95,63 | 94,39 | 98,63 | 81,97 | 89,55 | 99,40 | 69,25 | 78,18 | 89,08 |
| Fines | 0,01 | 0,16 | 0,32 | 0,05 | 0,03 | 0,32 | 0,14 | 2,29 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | 0,11 | 0,57 | 0,53 | 0,00 | 0,00 | 15,45 | 19,97 | 0,02 |
| Tm | -0,85 | 0,43 | -0,33 | -0,29 | 0,51 | -0,41 | -0,25 | 1,32 | 0,51 | 2,12 | 2,06 | 0,15 | 0,06 | 0,69 | -0,26 | 0,30 | 0,74 | 1,12 | 1,03 | 0,46 |
| Quartz | 70 | 77 | 76 | 75 | 85 | 81 | 80 | 82 | 77 | 75 | 78 | 69 | 77 | 73 | 75 | 84 | 83 | 83 | 87 | 78 |
| Microcline | 8 | 11 | 11 | 11 | 8 | 9 | 9 | 8 | 10 | 12 | 11 | 15 | 12 | 13 | 14 | 10 | 3 | 9 | 3 | 10 |
| Plagioclase | 5 | 4 | 5 | 6 | 2 | 4 | 4 | 1 | 5 | 4 | 2 | 6 | 3 | 5 | 3 | 2 | 9 | 3 | 8 | 4 |
| Muscovite | 2 | 4 | 1 | 1 | 2 | | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 4 | 1 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| Ilmenite | 3 | 4 | 3 | 5 | 1 | 3 | 3 | 4 | 3 | 1 | 3 | 3 | 4 | 2 | 4 | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 |
| Anatase | 4 | 1 | 0 | - | 1 | 2 | 2 | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - | 1 | - | - | 1 |
| Magnetite | - | ~ | ~ | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 1 | - | - | - | - | - | - | 1 |
| | | 0,52 | 0,41 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Total | 92 | 100 | 97 | 99 | 99 | 98 | 99 | 97 | 97 | 95 | 99 | 98 | 99 | 96 | 97 | 99 | 99 | 100 | 100 | 98 |

Tm : taille moyenne des grains (en ϕ unité) ; Graviers (4 – 2 mm) ; Sables (2 – 0,0625 mm) ; Fines (<0,0625 mm) (d'après Wentworth, 1922) ; Moy : moyenne

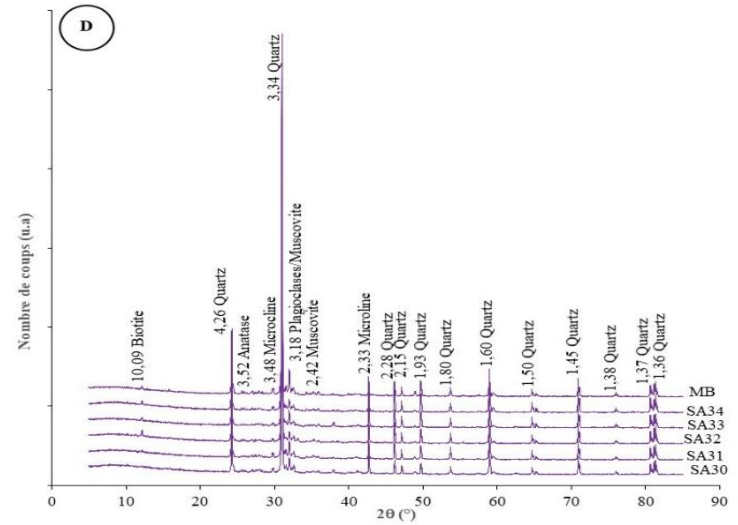
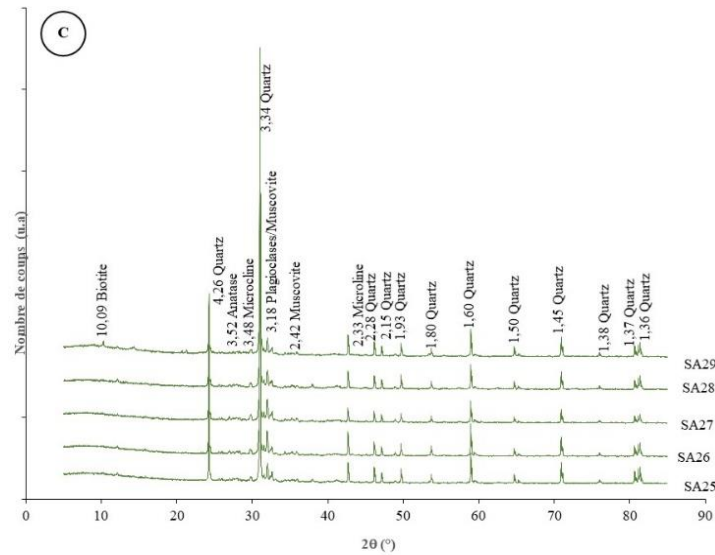
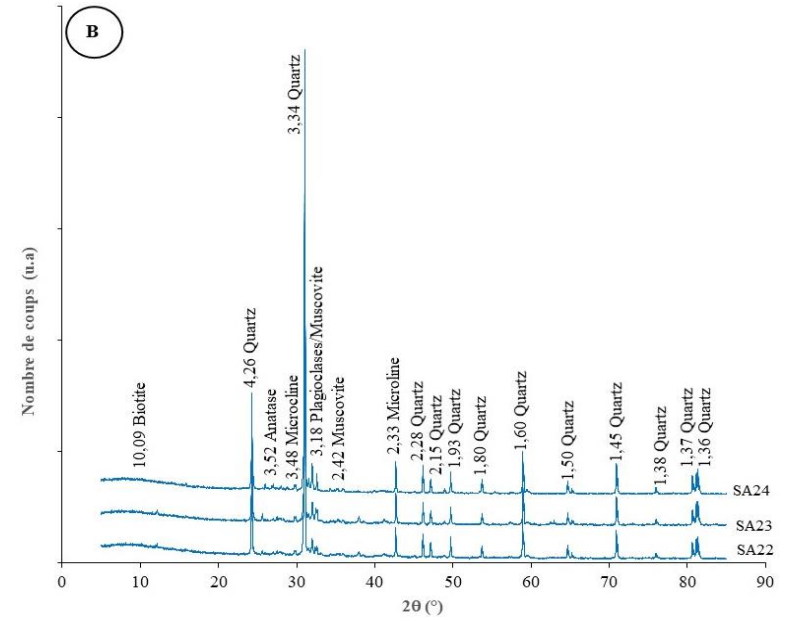
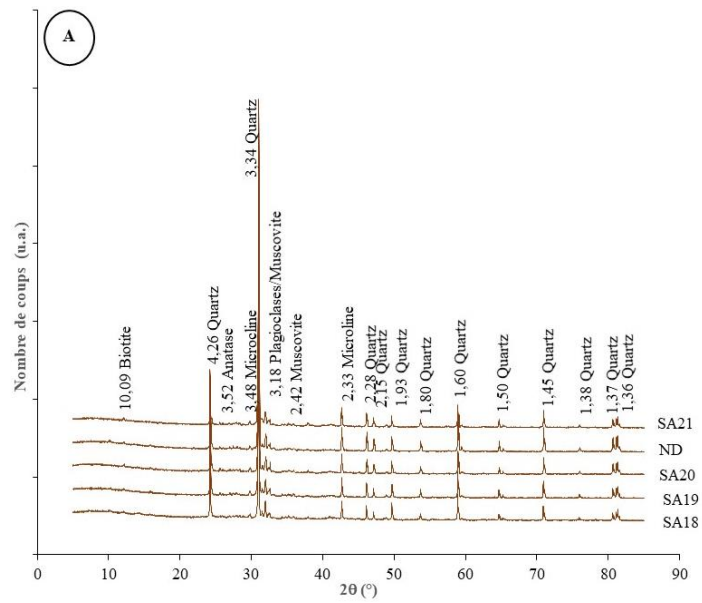


Figure IV.16. Diffractogrammes des rayons X des sables du cours inférieur de la Sanaga

A : Zone Nanga-Eboko - Batchenga ; B : Zone Sa'a ; C : Zone Eebda - Sakbayémé ; D : Zone Edéa – Yoyo

Tableau IV.15. Concentration en minéraux lourds (%) dans les sables étudiés

| Zone | Nanga-Eboko - Batchenga | | | | | Sa'a | | | Ebebda - Sakbayémé | | | | | | Edéa - Yoyo | | | | | |
|--------------|-------------------------|------|------|----|------|------|------|------|--------------------|----|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|-----------------|
| Code | SA18 | SA19 | SA20 | ND | SA21 | SA22 | SA23 | SA24 | SA25 | MB | SA26 | SA27 | SA28 | SA29 | SA30 | SA31 | SA32 | SA33 | SA34 | Moy (n = 19) |
| Opagues | 55 | 55 | 53 | 50 | 43 | 51 | 51 | 52 | 43 | 42 | 72 | 32 | 39 | 57 | 51 | 50 | 47 | 48 | 50 | 50 |
| Zircon | 1 | 4 | 6 | - | 2 | 5 | 6 | 5 | 6 | 3 | 3 | 5 | 6 | 3 | 12 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 |
| Zoïsite | - | 1 | - | - | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 5 | 3 | 2 | 2 |
| Épidote | 4 | 22 | 24 | 20 | 44 | 25 | 18 | 15 | 2 | 40 | 2 | 33 | 18 | 12 | 10 | 25 | 20 | 18 | 20 | 20 |
| Clinozoïsite | - | 0 | - | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 |
| Grenat | 3 | 5 | 4 | - | - | 4 | 2 | 4 | - | 2 | 2 | 3 | 5 | 4 | 8 | 2 | 4 | 10 | 8 | 4 |
| Anatase | 4 | 1 | 0 | - | - | 1 | 2 | 2 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | 1 | - | - | 2 |
| Disthène | 15 | 2 | 2 | 10 | - | 4 | 10 | 9 | 41 | 5 | 15 | 15 | 17 | 8 | 9 | 6 | 5 | 11 | 10 | 11 |
| Sillimanite | 3 | 1 | 2 | 5 | 2 | 3 | 3 | 3 | - | 1 | - | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 4 | 1 | - | 2 |
| Andalousite | 1 | 0 | - | - | - | - | 1 | 1 | 1 | - | - | - | 1 | 1 | - | 1 | 2 | - | 1 | 1 |
| Augite | 8 | 2 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | 1 | 1 | - | - | 1 | - | - | 2 |
| Diopside | - | 0 | - | 2 | - | - | 1 | 1 | - | - | 1 | 1 | 1 | - | - | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Tourmaline | - | 3 | 3 | 1 | - | 1 | 1 | 1 | 1 | - | - | 1 | 4 | 4 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 |
| Apatite | 1 | 0 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 |
| Staurotide | 1 | 0 | - | 1 | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - | - | 1 | - | 1 | - | - | 1 |
| Péridot | 2 | 0 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 |
| Hornblende | 1 | 1 | - | - | - | - | - | 1 | - | 1 | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | 1 |
| Indéterminé | 5 | 4 | 5 | 5 | - | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 6 | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 | 4 | 5 | 5 |

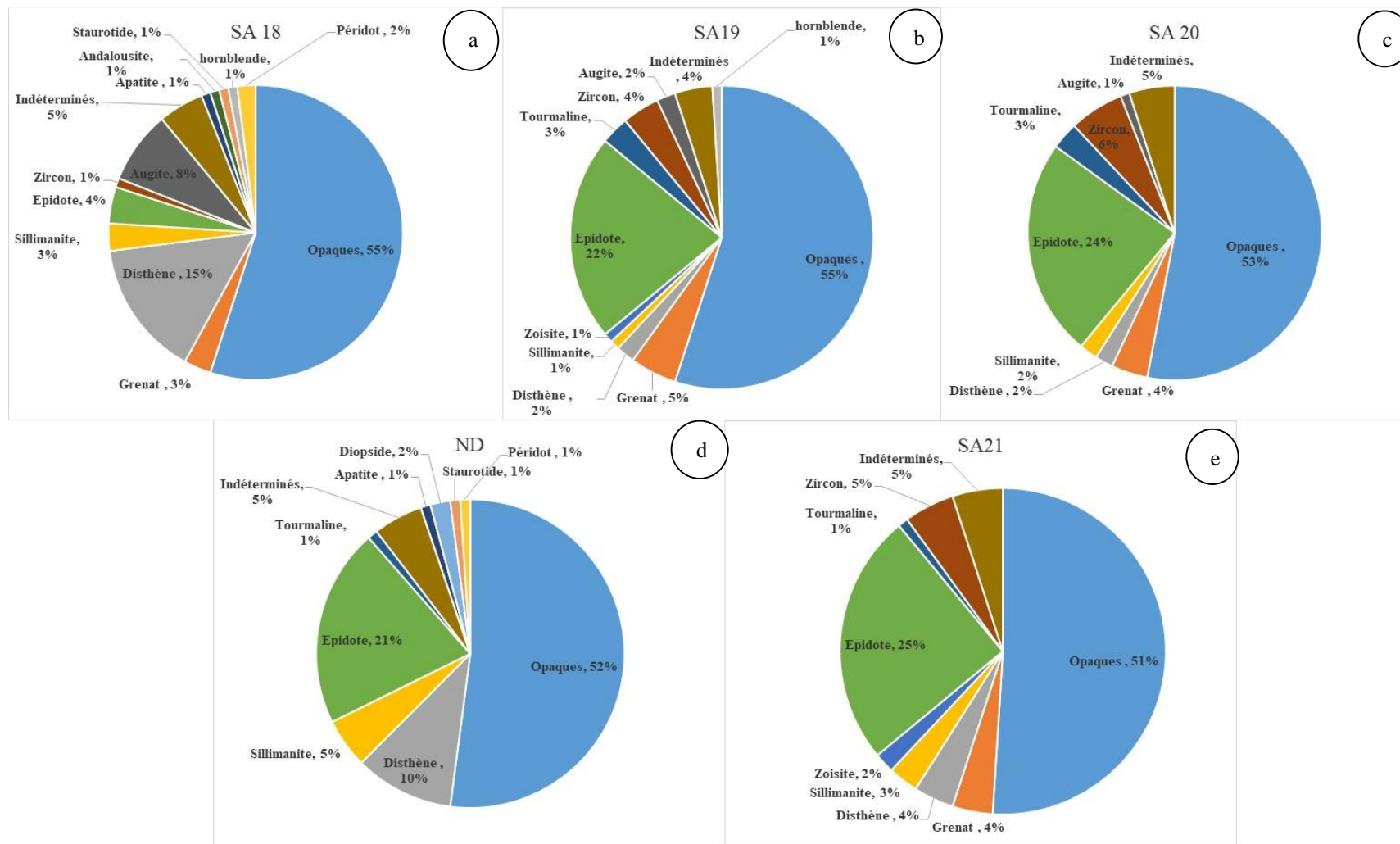


Figure IV.17. Diagrammes circulaires illustrant la répartition des minéraux lourds dans les échantillons de sable entre Nanga-Eboko et Batchenga (Zone A) a) Nanga-Eboko ; b) Nkoteng ; c) Mbandjock ; d) Ndjéké ; e) Batchenga

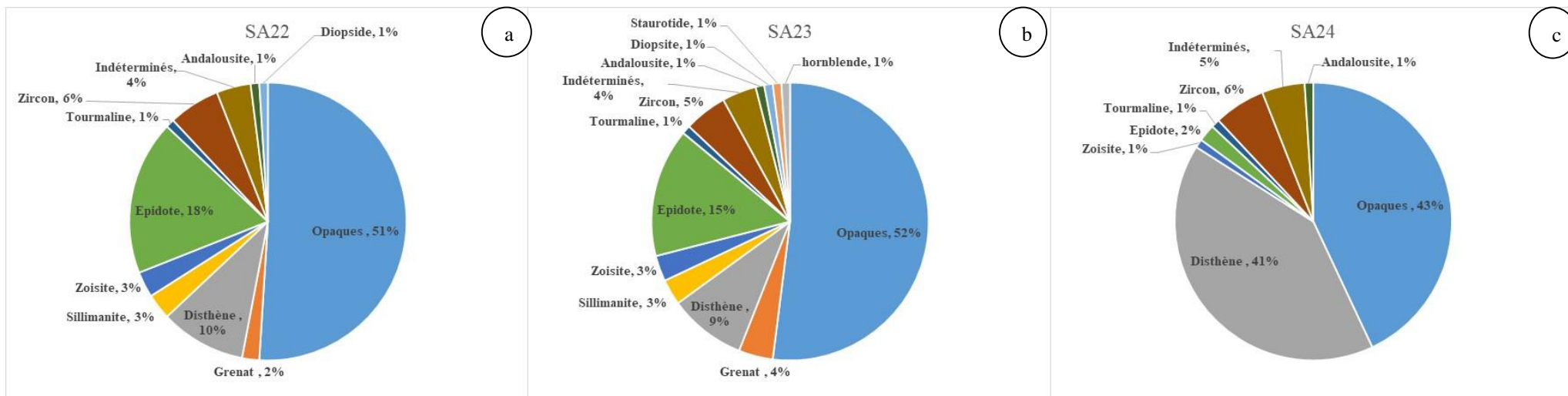


Figure IV.18. Diagrammes circulaires illustrant la répartition des minéraux lourds dans les échantillons de sable dans la zone B (Sa'a)
 a) Sa'a - Aloko ; Sa'a - Mp Lit ; Sa'a - Mp Berge

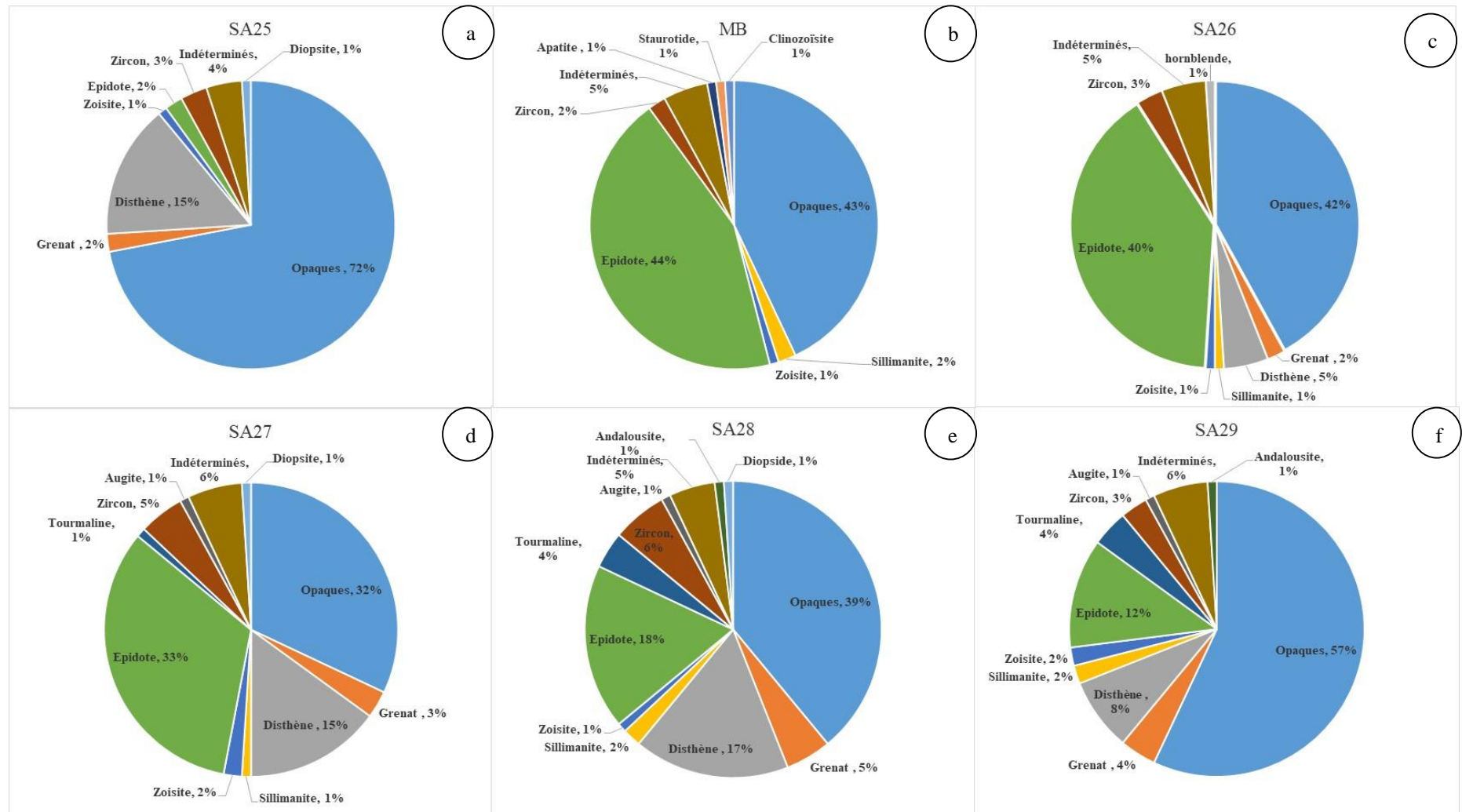


Figure IV.19. Diagrammes circulaires illustrant la répartition des minéraux lourds dans les échantillons de sable entre Ebebda et Sakbayémé (Zone C)
a) Ebebda ; b) Mbam ; c) Monatéfé ; d) Nyanon ; e) Dibang ; f) Sakbayémé

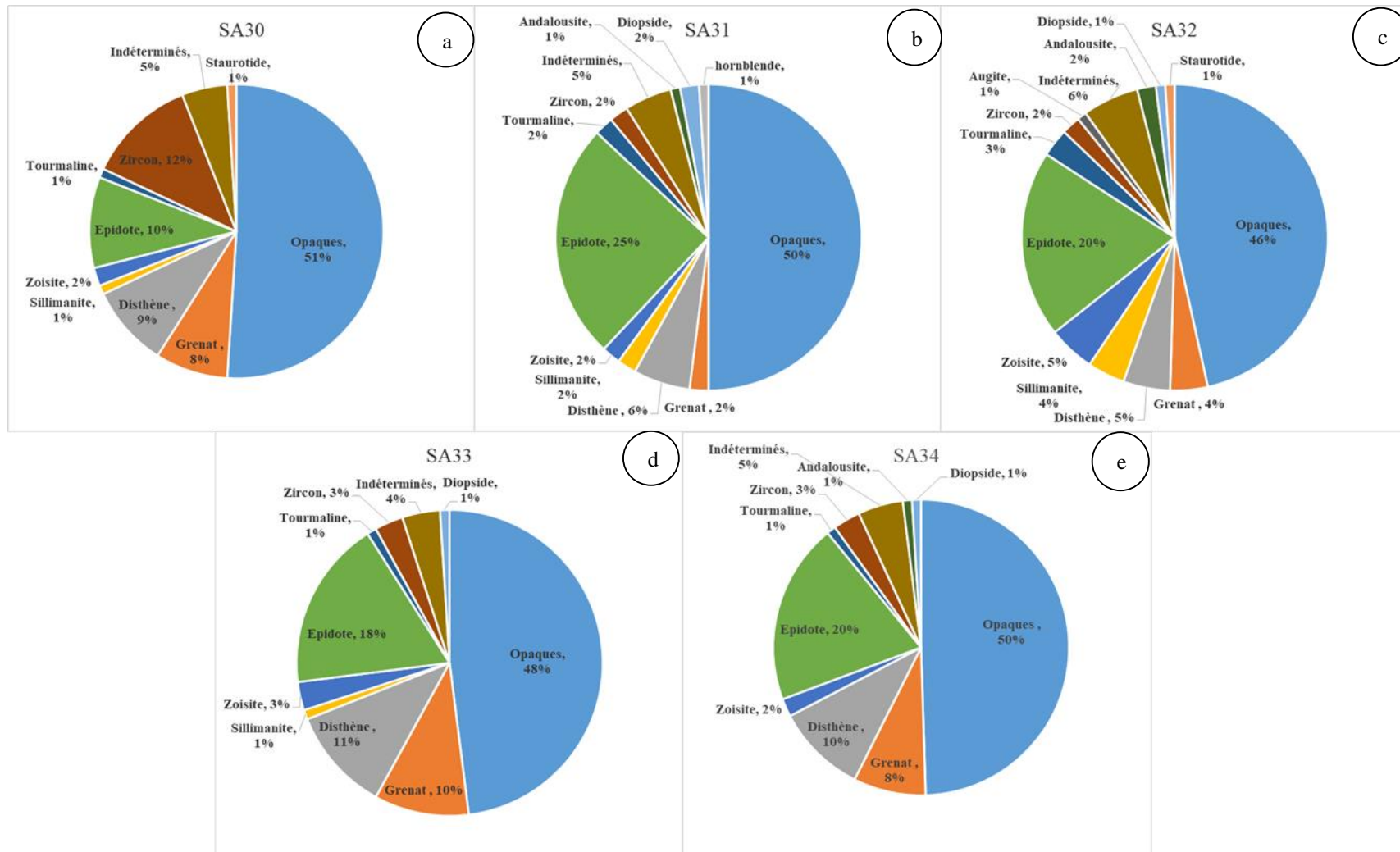


Figure IV.20. Diagrammes circulaires illustrant la répartition des minéraux lourds dans les échantillons de sable entre Edéa et Yoyo (Zone D)
a) Edéa ; b) Dizangue ; c) Pongo – Songo ; d) Mouanko ; e) Yoyo

Le grenat, le disthène, la sillimanite, la zoïsite, la tourmaline, le zircon et l'augite sont présents en faibles quantités (2 – 10 %), tandis que l'apatite, l'andalousite, le diopside, le staurotide, la hornblende, le péridot et la clinozoïsite apparaissent en quantités très faibles (~1 %).

IV.3. Géochimie

IV.3.1. Éléments majeurs

Les teneurs des éléments majeurs, les valeurs des ratios associés et celles des indices d'altération sont consignées dans le tableau IV.16. Les sables étudiés sont caractérisés par des teneurs élevées en SiO₂ (72,88 – 87,24 %). Les teneurs en Al₂O₃ (4,85 – 10,35 %) et Fe₂O₃ (1,01 – 7,05 %) sont faibles à modérées. Les teneurs en K₂O (1,64 – 3,38 %), TiO₂ (0,75 – 6,35 %) et les valeurs de perte au feu (PF ; 0,74 – 4,4 %) sont relativement faibles tandis que les teneurs en MgO, CaO, Na₂O, MnO sont très faibles (< 1,00 %). Les teneurs en SiO₂ et, K₂O sont similaires à celles de UCC (*Upper Continental Crust* ; Rudnick et Gao, 2003) tandis que celles en Fe₂O₃ sont légèrement différentes (Rudnick et Gao, 2003 ; Fig. IV.21). Les sables étudiés sont enrichis en TiO₂ et MnO par rapport à UCC et appauvris en Al₂O₃, MgO, CaO, Na₂O et P₂O₅. Les corrélations statistiquement significatives existent entre SiO₂ vs Al₂O₃ (r = -0,66) et, entre SiO₂ vs PF (-0,71 ; Tab. IV.17).

IV.3.2. Éléments en traces

Les teneurs des éléments en traces sont consignées dans le tableau IV.18. Les spectres des éléments en traces normalisés par rapport à UCC (Rudnick et Gao, 2003 ; Fig. IV.22) montrent un enrichissement en Ba, Nb, Ta, Th, U et Zr et, un appauvrissement en Co, Cr, Cs, Cu, Ni, Pb, Rb, Sc, Sr, Li et Mo. Certains éléments tels W, V et Y sont tantôt enrichis tantôt appauvris dans les sables étudiés. Des corrélations entre éléments majeurs et éléments en traces sont consignées dans le tableau IV.19. K₂O est fortement lié à Ba et Rb (r = 0,77, 0,95 respectivement, n = 19) dans le microcline. TiO₂ et Fe₂O₃ sont fortement liés à Th (r = 0,85, 0,62 ; n = 19), U (r = 0,93, 0,80), Nb (r = 0,98, 0,78), Ta (r = 0,95, 0,71), Zr (r = 0,95, 0,70), Mo (r = 0,83, 0,88), et W (r = 0,93, 0,88), respectivement. Certains de ces éléments en traces comme U (r = 0,72 ; n = 19), Nb (r = 0,71) et Mo (r = 0,83) présentent des corrélations avec P₂O₅.

Tableau IV.16. Concentrations en éléments majeurs (%) des sables étudiés

| Zone | Nanga-Eboko - Batchenga | | | | | Sa'a | | | Ebebda - Sakbayémé | | | | | | Edéa - Yoyo | | | | | |
|--|-------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|--------|--------|-----------------|
| Code | SA18 | SA19 | SA20 | ND | SA21 | SA22 | SA23 | SA24 | SA25 | MB | SA26 | SA27 | SA28 | SA29 | SA30 | SA31 | SA32 | SA33 | SA34 | Moy (n = 19) |
| (SiO ₂) _{adj} | 75,96 | 83,22 | 78,86 | 79,25 | 86,43 | 79,62 | 76,09 | 87,84 | 80,75 | 84,22 | 85,28 | 76,75 | 75,90 | 78,80 | 80,39 | 84,67 | 83,76 | 82,26 | 87,64 | 81,46 |
| SiO ₂ | 72,88 | 81,63 | 74,50 | 77,83 | 86,07 | 78,60 | 74,86 | 86,32 | 80,20 | 83,82 | 84,90 | 74,13 | 74,19 | 75,57 | 79,24 | 84,45 | 83,64 | 81,99 | 87,24 | 80,11 |
| TiO ₂ | 3,46 | 1,70 | 2,50 | 4,00 | 1,46 | 4,37 | 6,35 | 1,53 | 3,74 | 0,86 | 0,75 | 1,84 | 4,32 | 1,61 | 3,52 | 1,15 | 1,31 | 3,97 | 1,40 | 2,62 |
| Al ₂ O ₃ | 7,98 | 6,83 | 8,24 | 6,26 | 5,44 | 6,09 | 6,37 | 5,75 | 6,42 | 7,38 | 6,91 | 10,35 | 7,83 | 9,72 | 6,48 | 6,85 | 6,99 | 5,43 | 4,85 | 6,96 |
| Fe ₂ O ₃ | 7,05 | 3,32 | 4,61 | 5,67 | 2,68 | 5,78 | 6,64 | 1,01 | 4,50 | 2,09 | 1,93 | 4,32 | 6,28 | 4,34 | 5,01 | 2,62 | 3,23 | 4,58 | 2,34 | 4,11 |
| MnO | 0,16 | 0,09 | 0,13 | 0,15 | 0,07 | 0,18 | 0,20 | 0,03 | 0,12 | 0,05 | 0,04 | 0,09 | 0,15 | 0,07 | 0,13 | 0,05 | 0,07 | 0,13 | 0,06 | 0,10 |
| MgO | 0,49 | 0,45 | 0,43 | 0,52 | 0,38 | 0,45 | 0,46 | 0,06 | 0,44 | 0,47 | 0,45 | 0,59 | 0,59 | 0,70 | 0,36 | 0,39 | 0,77 | 0,39 | 0,46 | 0,47 |
| CaO | 0,77 | 0,73 | 0,79 | 0,88 | 0,73 | 0,82 | 0,87 | 0,12 | 0,85 | 0,79 | 0,74 | 0,81 | 0,92 | 0,66 | 0,61 | 0,71 | 1,22 | 0,69 | 0,71 | 0,76 |
| Na ₂ O | 0,70 | 0,81 | 0,78 | 0,78 | 0,75 | 0,71 | 0,76 | 0,35 | 0,85 | 0,84 | 0,82 | 1,00 | 0,83 | 0,71 | 0,76 | 0,85 | 0,73 | 0,63 | 0,67 | 0,75 |
| K ₂ O | 2,34 | 2,47 | 2,40 | 2,02 | 1,94 | 1,64 | 1,77 | 3,07 | 2,11 | 3,18 | 2,97 | 3,38 | 2,54 | 2,45 | 2,37 | 2,62 | 1,83 | 1,80 | 1,77 | 2,35 |
| P ₂ O ₅ | 0,11 | 0,06 | 0,10 | 0,09 | 0,06 | 0,09 | 0,11 | 0,04 | 0,09 | 0,04 | 0,05 | 0,08 | 0,104 | 0,077 | 0,085 | 0,054 | 0,067 | 0,065 | 0,045 | 0,07 |
| PF | 4,15 | 2,58 | 5,41 | 2,19 | 1,1 | 1,4 | 1,4 | 1,77 | 1,06 | 1,34 | 1,13 | 3,86 | 2,41 | 4,78 | 1,47 | 1,18 | 1,28 | 0,74 | 0,89 | 2,11 |
| Total | 100,09 | 100,67 | 99,88 | 100,40 | 100,68 | 100,13 | 99,79 | 100,04 | 100,38 | 100,86 | 100,69 | 100,45 | 100,16 | 100,68 | 100,04 | 100,92 | 101,14 | 100,41 | 100,44 | 100,41 |
| CIA (%) | 62 | 56 | 61 | 57 | 54 | 60 | 59 | 58 | 56 | 54 | 54 | 60 | 59 | 66 | 57 | 55 | 61 | 57 | 54 | 58 |
| PIA (%) | 70 | 61 | 69 | 61 | 58 | 65 | 64 | 75 | 60 | 59 | 58 | 68 | 65 | 75 | 62 | 60 | 68 | 63 | 57 | 64 |
| MIA (%) | 67 | 58 | 64 | 62 | 56 | 65 | 66 | 60 | 60 | 54 | 54 | 61 | 63 | 65 | 62 | 57 | 59 | 63 | 55 | 61 |
| SiO ₂ /Al ₂ O ₃ | 9,13 | 11,95 | 9,04 | 12,43 | 15,82 | 12,91 | 11,75 | 15,01 | 12,49 | 11,36 | 12,29 | 7,16 | 9,48 | 7,77 | 12,23 | 12,33 | 11,97 | 15,10 | 17,99 | 12,01 |
| Al ₂ O ₃ /TiO ₂ | 2,31 | 4,02 | 3,30 | 1,57 | 3,73 | 1,39 | 1,00 | 3,76 | 1,72 | 8,58 | 9,21 | 5,63 | 1,81 | 6,04 | 1,84 | 5,96 | 5,34 | 1,37 | 3,46 | 3,79 |
| Log(SiO ₂ /Al ₂ O ₃) | 0,96 | 1,08 | 0,96 | 1,09 | 1,20 | 1,11 | 1,07 | 1,18 | 1,10 | 1,06 | 1,09 | 0,86 | 0,98 | 0,89 | 1,09 | 1,09 | 1,08 | 1,18 | 1,25 | 1,07 |
| Log(Fe ₂ O ₃ /K ₂ O) | 0,48 | 0,13 | 0,28 | 0,45 | 0,14 | 0,55 | 0,57 | -0,48 | 0,33 | -0,18 | -0,19 | 0,11 | 0,39 | 0,25 | 0,33 | 0,00 | 0,25 | 0,41 | 0,12 | 0,21 |

(SiO₂)_{adj} = [SiO₂/(∑éléments majeurs - LOI)] × 100 ; ND (Ndjeké) et MB (Mbam) : échantillons des principaux affluents de la Sanaga ; PF : Perte au feu ; Moy : Moyenne ; CIA : Indice d'altération chimique ; PIA : Indice d'altération des plagioclases ; MIA : Indice d'altération mafique.

CIA = 100 × Al₂O₃/(Al₂O₃ + CaO* + Na₂O + K₂O) ; MIA = 100 × [(Al₂O₃ + Fe₂O₃)/(Al₂O₃ + Fe₂O₃ + MgO + CaO* + Na₂O + K₂O)] ; PIA = 100 × (Al₂O₃ - K₂O)/(Al₂O₃ + CaO* + Na₂O - K₂O).

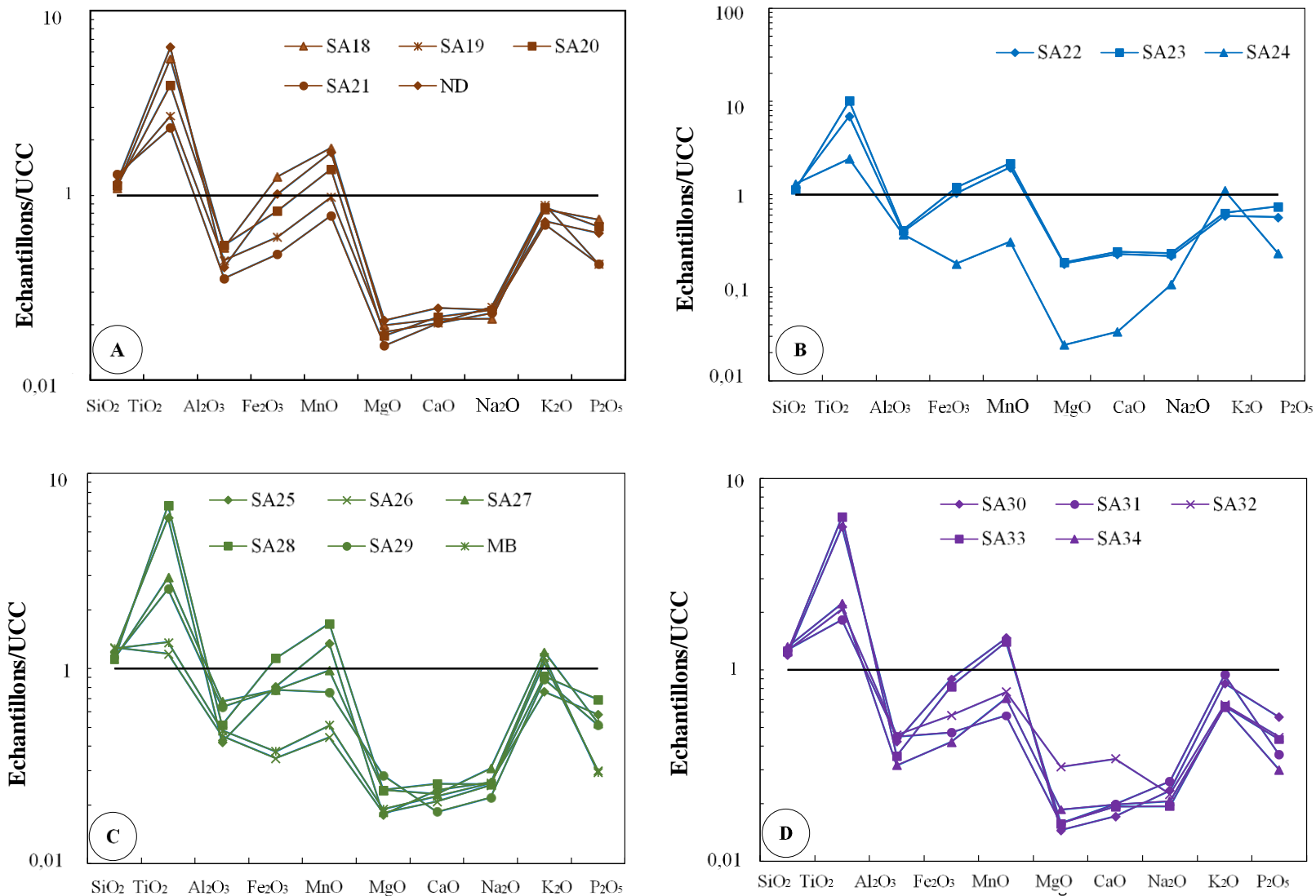


Figure IV.21. Spectres des éléments majeurs des sables du cours inférieur de la Sanaga normalisés par rapport aux données de UCC de Rudnick et Gao (2003)

A : Zone Nanga-Eboko - Batchenga ; B : Zone Sa'a ; C : Zone Ebebda - Sakbayémé ; D : Zone Edéa - Yoyo

Tableau IV.17. Matrice de corrélation de Pearson (1905) appliquée aux données des éléments majeurs

| | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | PF |
|--------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|-------------------------------|-------------|
| SiO ₂ | 1,00 | | | | | | | | | | |
| TiO ₂ | -0,60 | 1,00 | | | | | | N = 19 | | | |
| Al ₂ O ₃ | -0,66 | -0,15 | 1,00 | | | | | | | | |
| Fe ₂ O ₃ | -0,86 | 0,85 | 0,24 | 1,00 | | | | | | | |
| MnO | -0,72 | 0,94 | -0,01 | 0,95 | 1,00 | | | | | | |
| MgO | -0,41 | 0,00 | 0,54 | 0,35 | 0,16 | 1,00 | | | | | |
| CaO | -0,29 | 0,21 | 0,19 | 0,41 | 0,36 | 0,82 | 1,00 | | | | |
| Na ₂ O | -0,35 | -0,01 | 0,49 | 0,24 | 0,14 | 0,55 | 0,63 | 1,00 | | | |
| K ₂ O | -0,02 | -0,52 | 0,56 | -0,40 | -0,53 | -0,17 | -0,38 | 0,21 | 1,00 | | |
| P ₂ O ₅ | -0,89 | 0,78 | 0,33 | 0,95 | 0,89 | 0,35 | 0,43 | 0,30 | -0,34 | 1,00 | |
| PF | -0,71 | -0,03 | 0,79 | 0,34 | 0,15 | 0,29 | -0,02 | 0,15 | 0,30 | 0,47 | 1,00 |

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha = 0,05

Tableau IV.18. Concentrations en éléments en traces (en ppm) des sables étudiés

| Zone | Nanga-Eboko - Batchenga | | | | | Sa'a | | | Ebebda - Sakbayémé | | | | | | Edéa - Yoyo | | | | | |
|-------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|---------|--------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|--------|--------|-----------------|
| Code | SA18 | SA19 | SA20 | ND | SA21 | SA22 | SA23 | SA24 | SA25 | MB | SA26 | SA27 | SA28 | SA29 | SA30 | SA31 | SA32 | SA33 | SA34 | Moy (n = 19) |
| LILE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ba | 928,5 | 972,1 | 982,2 | 805,8 | 758,4 | 655,6 | 710,2 | 644 | 816 | 1110,6 | 1047,1 | 1210,9 | 939 | 866,3 | 856,9 | 935,7 | 678,8 | 648 | 639 | 852,90 |
| Sr | 214,1 | 208,5 | 209,1 | 184,1 | 195,3 | 168,5 | 183 | 56,8 | 200,6 | 227,8 | 218,9 | 252,3 | 203 | 166,3 | 184,9 | 206,7 | 182,3 | 151 | 150,3 | 187,55 |
| Rb | 55,13 | 56,8 | 57,16 | 44,85 | 43,06 | 34,33 | 37,74 | 60,81 | 44,87 | 68,44 | 66,28 | 84,85 | 55,81 | 65,16 | 51,49 | 55 | 39,7 | 37,67 | 36,07 | 52,38 |
| Li | 7,4 | 5,5 | 7,7 | 6,3 | 4,3 | 4,8 | 5,2 | 2,5 | 5,2 | 3,3 | 3,4 | 7,5 | 5,1 | 9,1 | 4,0 | 3,7 | 5,1 | 3,6 | 3,9 | 5,14 |
| Cs | 1,168 | 0,94 | 1,259 | 0,739 | 0,541 | 0,497 | 0,573 | 0,257 | 0,63 | 0,785 | 0,741 | 1,581 | 0,796 | 1,641 | 0,614 | 0,616 | 0,483 | 0,444 | 0,368 | 0,77 |
| HFSE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Th | 10,665 | 11,887 | 19,934 | 30,597 | 12,314 | 33,2 | 66,234 | 12,747 | 41,605 | 6,883 | 7,1 | 18,552 | 48,198 | 11,738 | 68,366 | 9,066 | 6,93 | 51,14 | 11,323 | 25,18 |
| U | 6,307 | 2,705 | 4,137 | 5,318 | 2,413 | 5,377 | 7,74 | 3,969 | 5,89 | 1,809 | 1,659 | 3,263 | 7,034 | 2,526 | 6,834 | 2,001 | 1,762 | 6,741 | 2,561 | 4,21 |
| Nb | 46,941 | 27,884 | 39,105 | 54,843 | 23,972 | 72,51 | 106,413 | 33,349 | 60,495 | 17,677 | 18,878 | 32,573 | 70,083 | 33,521 | 52,055 | 22,052 | 26,914 | 65,525 | 25,605 | 43,71 |
| Ta | 2,273 | 2,039 | 2,902 | 3,835 | 1,704 | 5,691 | 8,402 | 2,168 | 3,968 | 1,322 | 1,506 | 2,36 | 4,951 | 2,368 | 3,753 | 1,519 | 1,858 | 4,729 | 1,77 | 3,11 |
| Ti | 18047 | 8943 | 13375 | 20290 | 7505 | 23661 | >25000 | 7831 | 19876 | 4446 | 3961 | 9768 | 23176 | 8452 | 18811 | 6054 | 6863 | 20801 | 7143 | 12722 |
| Zr | 1425 | 784 | 983 | 3438 | 755 | 3516 | 5330 | 1284 | 3879 | 231 | 171 | 618 | 4165 | 546 | 3707 | 478 | 214 | 3846 | 422 | 1883 |
| Hf | >29 | 19,51 | 25,3 | >29 | 18,88 | >29 | >29 | >29 | >29 | 6,19 | 4,58 | 16,62 | >29 | 13,83 | >29 | 11,97 | 5,53 | >29 | 11,15 | 13,36 |
| Mo | 0,98 | 0,53 | 0,65 | 0,72 | 0,38 | 0,88 | 1,13 | 0,53 | 0,67 | 0,43 | 0,45 | 0,65 | 0,79 | 0,77 | 0,6 | 0,39 | 0,5 | 0,62 | 0,38 | 0,63 |
| W | 1,46 | 1,07 | 1,45 | 1,58 | 0,82 | 3,01 | 4,21 | 1,27 | 2,5 | 0,57 | 0,68 | 1,1 | 2,25 | 1,24 | 1,61 | 0,7 | 0,83 | 1,88 | 0,86 | 1,53 |
| Pb | 23,69 | 16,39 | 18,43 | 18,90 | 13,26 | 16,68 | 16,90 | 20,14 | 15,69 | 17,97 | 17,19 | 22,75 | 19,06 | 33,66 | 17,97 | 15,58 | 15,09 | 15,26 | 11,55 | 18,22 |
| Y | 29,36 | 13,92 | 21,34 | 29,6 | 13,06 | 25,2 | 33,9 | 24,39 | 27,19 | 10,59 | 7,67 | 17,640 | 30,310 | 15,590 | 27,670 | 9,840 | 12,670 | 25,020 | 10,130 | 20,33 |
| Fe-Mg | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cr | 87 | 49 | 58 | 66 | 38 | 68 | 88 | 35 | 64 | 45 | 40 | 64 | 96 | 69 | 78 | 50 | 68 | 69 | 46 | 62,00 |
| V | 114,3 | 52,5 | 75,1 | 89,9 | 43,5 | 103,4 | 143 | 40,2 | 87,4 | 33,4 | 31,8 | 62,4 | 99,4 | 73 | 78,4 | 39,8 | 56 | 80 | 40,1 | 70,72 |
| Ni | 15 | 11,7 | 12,7 | 10,9 | 8,3 | 9,9 | 12,1 | 3,5 | 8,9 | 9,1 | 8,4 | 15,6 | 14 | 18 | 9,9 | 8,5 | 12,5 | 8,4 | 6,9 | 10,75 |
| Cu | 17,4 | 7,3 | 9,9 | 9,3 | 6,9 | 10,9 | 9,5 | 8,1 | 6,6 | 4,8 | 5,2 | 12,2 | 9,1 | 20,5 | 8,7 | 8,8 | 8,1 | 8,5 | 4,2 | 9,26 |
| Co | 11,08 | 7,87 | 9,58 | 10,57 | 6 | 12,65 | 10,53 | 2,47 | 8,11 | 4,58 | 4,49 | 9,14 | 10,33 | 8,72 | 8,64 | 5,11 | 6,77 | 6,6 | 6,87 | 7,90 |
| Sc | 5,1 | 4,9 | 6,8 | 7,1 | 4,2 | 7,2 | 8,7 | 3,3 | 6,2 | 4,3 | 3,8 | 6 | 7 | 7,3 | 5,5 | 4,1 | 6,9 | 5,5 | 4,2 | 5,69 |

LILE: Large ion lithophile element; HFSE: High field strength element; Fe-Mg: Ferromagnesian trace element

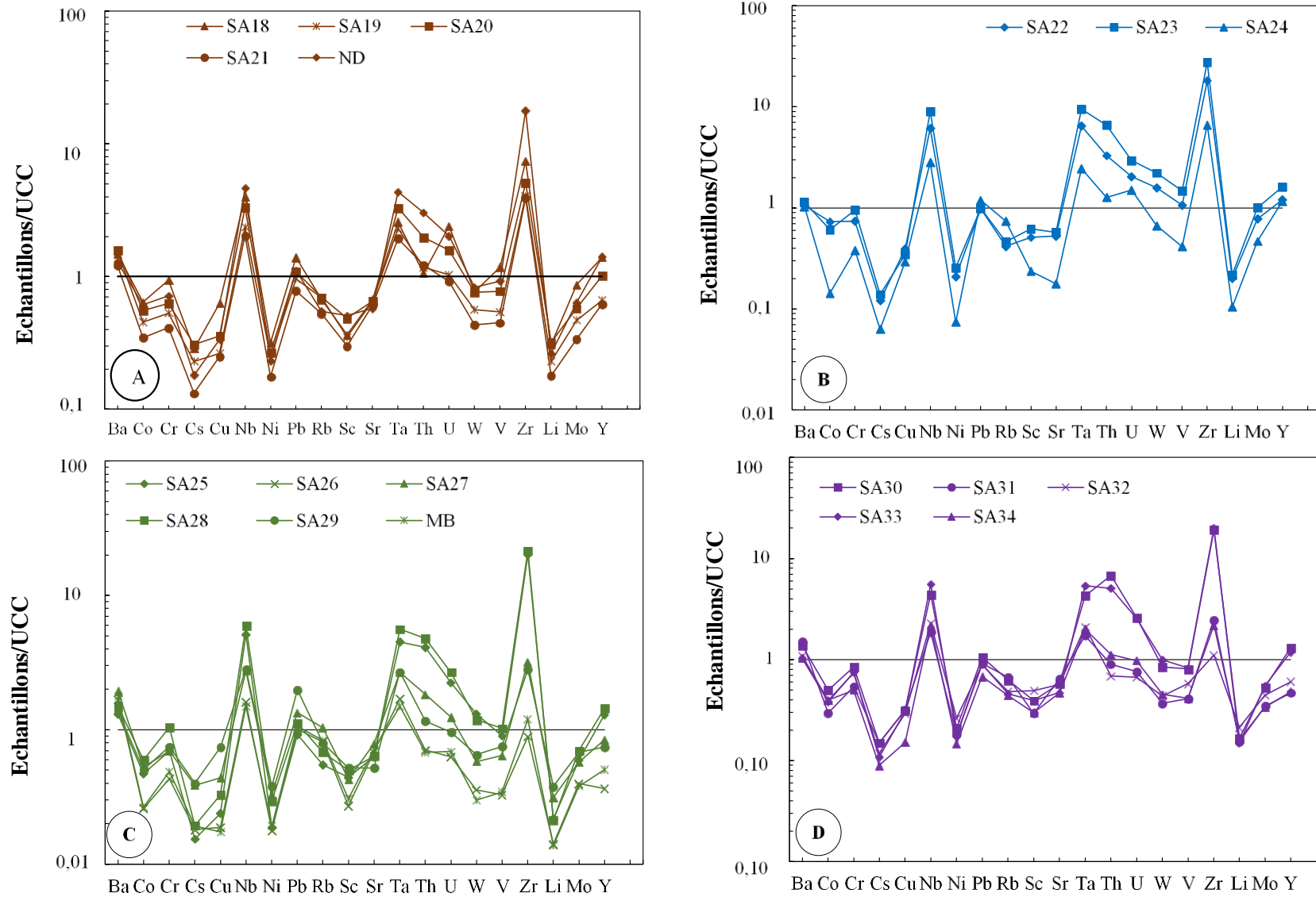


Figure IV.22. Spectres des éléments en trace des sables du cours inférieur de la Sanaga normalisés par rapport aux données de UCC de Rudnick et Gao (2003) ; A : Zone Nanga-Eboko - Batchenga ; B : Zone Sa'a ; C : Zone Ebebda - Sakbayémé ; D : Zone Edéa - Yoyo

Tableau IV.19a. Matrice de corrélation de Pearson (1905) appliquée aux données des éléments majeurs et LILE

| | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | PF | Ba | Sr | Rb | Li | Cs |
|--------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| SiO ₂ | 1,00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| TiO ₂ | -0,60 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | | |
| Al ₂ O ₃ | -0,66 | -0,15 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | |
| Fe ₂ O ₃ | -0,86 | 0,85 | 0,24 | 1,00 | | | | | | | | | | | | |
| MnO | -0,72 | 0,94 | -0,01 | 0,95 | 1,00 | | | | | | | | | | | |
| MgO | -0,41 | 0,00 | 0,54 | 0,35 | 0,16 | 1,00 | | | | | | | | | | |
| CaO | -0,29 | 0,21 | 0,19 | 0,41 | 0,36 | 0,82 | 1,00 | | | | | | | | | |
| Na ₂ O | -0,35 | -0,01 | 0,49 | 0,24 | 0,14 | 0,55 | 0,63 | 1,00 | | | | | | | | |
| K ₂ O | -0,02 | -0,52 | 0,56 | -0,40 | -0,53 | -0,17 | -0,38 | 0,21 | 1,00 | | | | | | | |
| P ₂ O ₅ | -0,89 | 0,78 | 0,33 | 0,95 | 0,89 | 0,35 | 0,43 | 0,30 | -0,34 | 1,00 | | | | | | |
| PF | -0,71 | -0,03 | 0,79 | 0,34 | 0,15 | 0,29 | -0,02 | 0,15 | 0,30 | 0,47 | 1,00 | | | | | |
| Ba | -0,33 | -0,33 | 0,73 | -0,03 | -0,19 | 0,23 | 0,12 | 0,71 | 0,77 | 0,05 | 0,46 | 1,00 | | | | |
| Sr | -0,38 | -0,06 | 0,52 | 0,27 | 0,15 | 0,53 | 0,62 | 0,94 | 0,24 | 0,33 | 0,25 | 0,78 | 1,00 | | | |
| Rb | -0,21 | -0,48 | 0,76 | -0,25 | -0,44 | 0,05 | -0,25 | 0,34 | 0,95 | -0,18 | 0,52 | 0,85 | 0,37 | 1,00 | | |
| Li | -0,78 | 0,15 | 0,75 | 0,55 | 0,34 | 0,60 | 0,31 | 0,34 | -0,01 | 0,64 | 0,87 | 0,32 | 0,37 | 0,27 | 1,00 | |
| Cs | -0,68 | -0,13 | 0,93 | 0,29 | 0,05 | 0,50 | 0,13 | 0,49 | 0,43 | 0,37 | 0,88 | 0,70 | 0,54 | 0,68 | 0,86 | 1,00 |

N = 19

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha = 0,05

Tableau IV.19b. Matrice de corrélation de Pearson (1905) appliquée aux données des éléments majeurs et HFSE

| | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | PF | Th | U | Nb | Ta | Zr | Mo | W | |
|--------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|-------------------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
| SiO ₂ | 1,00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TiO ₂ | -0,60 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Al ₂ O ₃ | -0,66 | -0,15 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fe ₂ O ₃ | -0,86 | 0,85 | 0,24 | 1,00 | | | | | | | N = 19 | | | | | | | | |
| MnO | -0,72 | 0,94 | -0,01 | 0,95 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | | |
| MgO | -0,41 | 0,00 | 0,54 | 0,35 | 0,16 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | |
| CaO | -0,29 | 0,21 | 0,19 | 0,41 | 0,36 | 0,82 | 1,00 | | | | | | | | | | | | |
| Na ₂ O | -0,35 | -0,01 | 0,49 | 0,24 | 0,14 | 0,55 | 0,63 | 1,00 | | | | | | | | | | | |
| K ₂ O | -0,02 | -0,52 | 0,56 | -0,40 | -0,53 | -0,17 | -0,38 | 0,21 | 1,00 | | | | | | | | | | |
| P ₂ O ₅ | -0,89 | 0,78 | 0,33 | 0,95 | 0,89 | 0,35 | 0,43 | 0,30 | -0,34 | 1,00 | | | | | | | | | |
| PF | -0,71 | -0,03 | 0,79 | 0,34 | 0,15 | 0,29 | -0,02 | 0,15 | 0,30 | 0,47 | 1,00 | | | | | | | | |
| Th | -0,39 | 0,85 | -0,20 | 0,62 | 0,72 | -0,11 | 0,07 | 0,03 | -0,37 | 0,55 | -0,22 | 1,00 | | | | | | | |
| U | -0,58 | 0,93 | -0,14 | 0,80 | 0,86 | -0,16 | 0,01 | -0,12 | -0,37 | 0,72 | 0,00 | 0,87 | 1,00 | | | | | | |
| Nb | -0,55 | 0,98 | -0,15 | 0,78 | 0,88 | -0,01 | 0,18 | -0,05 | -0,50 | 0,71 | -0,08 | 0,85 | 0,90 | 1,00 | | | | | |
| Ta | -0,50 | 0,95 | -0,16 | 0,71 | 0,83 | 0,00 | 0,19 | -0,02 | -0,49 | 0,64 | -0,13 | 0,85 | 0,83 | 0,98 | 1,00 | | | | |
| Zr | -0,42 | 0,95 | -0,28 | 0,70 | 0,82 | -0,12 | 0,10 | -0,04 | -0,46 | 0,62 | -0,23 | 0,93 | 0,92 | 0,94 | 0,92 | 1,00 | | | |
| Mo | -0,82 | 0,83 | 0,27 | 0,88 | 0,84 | 0,20 | 0,19 | 0,00 | -0,28 | 0,83 | 0,36 | 0,53 | 0,75 | 0,83 | 0,78 | 0,66 | 1,00 | | |
| W | -0,51 | 0,93 | -0,14 | 0,70 | 0,82 | -0,04 | 0,15 | -0,05 | -0,48 | 0,66 | -0,08 | 0,77 | 0,80 | 0,97 | 0,97 | 0,88 | 0,82 | 1,00 | |

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha = 0,05$

Tableau IV.19c. Matrice de corrélation de Pearson (1905) appliquée aux données des éléments majeurs et éléments Fe-Mg
(ou éléments traces de transition)

| | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | PF | Cr | V | Ni | Cu | Co | Sc |
|--------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| SiO ₂ | 1,00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TiO ₂ | -0,60 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Al ₂ O ₃ | -0,66 | -0,15 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | | |
| Fe ₂ O ₃ | -0,86 | 0,85 | 0,24 | 1,00 | | | | | | | | | | | | | |
| MnO | -0,72 | 0,94 | -0,01 | 0,95 | 1,00 | | | | | | | | | | | | |
| MgO | -0,41 | 0,00 | 0,54 | 0,35 | 0,16 | 1,00 | | | | | | | | | | | |
| CaO | -0,29 | 0,21 | 0,19 | 0,41 | 0,36 | 0,82 | 1,00 | | | | | | | | | | |
| Na ₂ O | -0,35 | -0,01 | 0,49 | 0,24 | 0,14 | 0,55 | 0,63 | 1,00 | | | | | | | | | |
| K ₂ O | -0,02 | -0,52 | 0,56 | -0,40 | -0,53 | -0,17 | -0,38 | 0,21 | 1,00 | | | | | | | | |
| P ₂ O ₅ | -0,89 | 0,78 | 0,33 | 0,95 | 0,89 | 0,35 | 0,43 | 0,30 | -0,34 | 1,00 | | | | | | | |
| PF | -0,71 | -0,03 | 0,79 | 0,34 | 0,15 | 0,29 | -0,02 | 0,15 | 0,30 | 0,47 | 1,00 | | | | | | |
| Cr | -0,80 | 0,77 | 0,30 | 0,91 | 0,81 | 0,45 | 0,44 | 0,20 | -0,31 | 0,85 | 0,25 | 1,00 | | | | | |
| V | -0,77 | 0,94 | 0,10 | 0,94 | 0,95 | 0,20 | 0,30 | 0,05 | -0,47 | 0,90 | 0,22 | 0,86 | 1,00 | | | | |
| Ni | -0,81 | 0,19 | 0,82 | 0,61 | 0,37 | 0,78 | 0,49 | 0,49 | 0,05 | 0,65 | 0,73 | 0,63 | 0,46 | 1,00 | | | |
| Cu | -0,69 | 0,20 | 0,65 | 0,53 | 0,30 | 0,36 | -0,03 | -0,03 | 0,02 | 0,50 | 0,73 | 0,50 | 0,46 | 0,75 | 1,00 | | |
| Co | -0,82 | 0,72 | 0,28 | 0,92 | 0,88 | 0,44 | 0,47 | 0,32 | -0,44 | 0,89 | 0,41 | 0,77 | 0,83 | 0,64 | 0,50 | 1,00 | |
| Sc | -0,72 | 0,70 | 0,31 | 0,76 | 0,73 | 0,57 | 0,57 | 0,25 | -0,45 | 0,79 | 0,31 | 0,75 | 0,79 | 0,63 | 0,42 | 0,78 | 1,00 |

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha = 0,05$

Des éléments traces ferromagnésiens ou éléments traces de transition tels Cr, V, Co et Sc, sont étroitement liés à TiO_2 ($r = 0,77, 0,94, 0,72, 0,70$, respectivement, $n = 19$), à Fe_2O_3 ($r = 0,91, 0,94, 0,92, 0,76$, respectivement, $n = 19$), et à P_2O_5 ($r = 0,85, 0,90, 0,89, 0,79$, respectivement, $n = 19$).

IV.3.3. Terres rares

Les teneurs en terres rares (REE) des sables étudiés sont consignées dans le tableau IV.20. Ces teneurs en REE sont comprises entre 69 et 558 ppm dans les sables étudiés. Ces sables sont caractérisés par un enrichissement en LREE (61 – 528 ppm) par rapport aux HREE (5 – 28 ppm). Les teneurs moyennes respectives en LREE et HREE de ces sables sont respectivement de 203 ppm et 16 ppm. Le rapport LREE/HREE a des valeurs comprises entre 6,77 et 20,64. Les valeurs du rapport $(\text{La/Yb})_N$ varient entre 5,05 et 26,68. La normalisation des valeurs de REE par rapport à celles de la chondrite de McDonough et Sun (1995) montre des anomalies négatives en Eu ($\text{Eu/Eu}^* = 0,32 - 0,83$; Fig. IV.23). Ces anomalies négatives sont également observées dans les spectres de REE normalisés par rapport aux valeurs de UCC (Rudnick et Gao 2003 ; Fig. IV.24). Les teneurs en REE des sables étudiés permettent d'identifier deux principaux groupes de sable. Les sables enrichis en REE avec des anomalies relativement fortes en Eu (0,32 – 0,42) et, les sables appauvris en REE, avec des anomalies faibles à modérées en Eu (0,53 – 0,83). Les sables enrichis en REE ($\sum\text{REE} : 161 - 556 \text{ ppm}$; ND) ont des teneurs élevées en TiO_2 (1,84 – 6,35 %). Les teneurs moyennes en TiO_2 , Fe_2O_3 et Zr sont 3,81, 5,44 % et 3090 ppm, respectivement. Les sables appauvris en REE (SA19, SA21, SA22, SA24, SA26, SA29, SA31, SA32, SA34 et MB) ont des teneurs faibles en TiO_2 (0,75 – 1,70 %), Fe_2O_3 (1,01 – 4,34 %) et Zr (171 – 784 ppm), excepté SA24, qui a une teneur en Zr (1224 ppm) relativement élevée. Les teneurs moyennes en TiO_2 , Fe_2O_3 et Zr sont 1,34 %, 2,62 % et 536 ppm, respectivement. Les matériaux enrichis en REE ont cependant des concentrations élevées en TiO_2 , Fe_2O_3 et Zr. Les valeurs du rapport $(\text{La/Yb})_N$ indiquent que le fractionnement entre LREE et HREE est relativement plus important en zone côtière (15,27) qu'en zone de Plateau sud camerounais (8,73). Les valeurs moyennes des rapports $(\text{La/Sm})_N$ et $(\text{Gd/Yb})_N$ en zone de Plateau sud camerounais (3,27 et 4,77, respectivement) et en zone de plaine côtière (1,15 et 1,88, respectivement) sont similaires.

Tableau IV.20. Concentrations des terres rares (en ppm) des sables étudiés

| Zone | Nanga-Eboko - Batchenga | | | | | Sa'a | | | Ebebda - Sakbayémé | | | | | | Zone Edéa - Yoyo | | | | | |
|----------------------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|--------|--------|--------|--------|-----------------|
| Code | SA18 | SA19 | SA20 | ND | SA21 | SA22 | SA23 | SA24 | SA25 | MB | SA26 | SA27 | SA28 | SA29 | SA30 | SA31 | SA32 | SA33 | SA34 | Moy (n = 19) |
| La | 31,1 | 19,2 | 36,5 | 46,0 | 19,4 | 60,5 | 123 | 26,4 | 91,6 | 13,5 | 14,5 | 36,8 | 85,8 | 28,8 | 126 | 17,2 | 15,8 | 86,5 | 22,1 | 47,4 |
| Ce | 70,81 | 41,34 | 76,46 | 97,19 | 42,54 | 133,54 | 251,84 | 51,84 | 185,95 | 29,56 | 30,71 | 76,24 | 173,1 | 62,66 | 243,9 | 36,27 | 35,24 | 168,54 | 46,07 | 97,57 |
| Pr | 7,353 | 4,682 | 8,540 | 10,973 | 4,742 | 13,789 | 28,949 | 5,682 | 21,17 | 3,362 | 3,472 | 8,492 | 19,398 | 6,655 | 26,955 | 4,023 | 4,11 | 19,468 | 5,300 | 10,901 |
| Nd | 27,55 | 17,57 | 31,14 | 40,71 | 17,88 | 52,11 | 106,68 | 20,75 | 77,82 | 12,50 | 13,11 | 31,26 | 71,22 | 25,04 | 96,86 | 14,9 | 15,83 | 71,14 | 19,84 | 40,21 |
| Sm | 5,22 | 3,239 | 5,672 | 7,287 | 3,316 | 9,387 | 17,663 | 3,843 | 13,303 | 2,376 | 2,344 | 5,404 | 12,075 | 4,326 | 15,667 | 2,624 | 2,96 | 11,619 | 3,425 | 6,934 |
| Eu | 0,8696 | 0,6299 | 0,8605 | 0,8932 | 0,6070 | 1,0471 | 1,4484 | 0,6273 | 1,0886 | 0,5355 | 0,5514 | 0,9284 | 1,1997 | 0,8707 | 1,3041 | 0,5418 | 0,7005 | 1,0707 | 0,5525 | 0,8593 |
| Gd | 4,572 | 2,679 | 4,390 | 5,828 | 2,651 | 6,265 | 10,927 | 3,456 | 8,276 | 1,921 | 1,769 | 3,978 | 8,261 | 3,405 | 9,823 | 2,006 | 2,548 | 7,664 | 2,616 | 4,897 |
| Tb | 0,7181 | 0,3889 | 0,6271 | 0,8215 | 0,3787 | 0,8033 | 1,2396 | 0,5551 | 0,9833 | 0,2949 | 0,2507 | 0,5334 | 1,0562 | 0,4628 | 1,1533 | 0,2911 | 0,3690 | 0,9260 | 0,3526 | 0,6424 |
| Dy | 4,695 | 2,398 | 3,761 | 5,132 | 2,291 | 4,621 | 6,332 | 3,816 | 5,136 | 1,813 | 1,536 | 3,239 | 5,701 | 2,855 | 5,724 | 1,790 | 2,303 | 4,810 | 1,826 | 3,673 |
| Ho | 1,0172 | 0,5110 | 0,7773 | 1,0758 | 0,4908 | 0,9102 | 1,2119 | 0,8569 | 0,9960 | 0,3814 | 0,2933 | 0,6618 | 1,0941 | 0,5585 | 0,9985 | 0,3600 | 0,4677 | 0,9259 | 0,3617 | 0,7342 |
| Er | 3,276 | 1,598 | 2,403 | 3,358 | 1,515 | 2,842 | 3,650 | 2,759 | 3,069 | 1,175 | 0,858 | 1,950 | 3,285 | 1,707 | 2,820 | 1,120 | 1,382 | 2,816 | 1,091 | 2,246 |
| Tm | 0,5146 | 0,2546 | 0,3773 | 0,5309 | 0,2351 | 0,4481 | 0,5644 | 0,4743 | 0,4764 | 0,1835 | 0,1393 | 0,2977 | 0,5038 | 0,2575 | 0,4310 | 0,1753 | 0,2087 | 0,4431 | 0,1754 | 0,3522 |
| Yb | 3,819 | 1,884 | 2,812 | 3,862 | 1,811 | 3,401 | 4,226 | 3,553 | 3,598 | 1,285 | 0,937 | 2,107 | 3,788 | 1,825 | 3,208 | 1,269 | 1,416 | 3,439 | 1,239 | 2,604 |
| Lu | 0,617 | 0,307 | 0,446 | 0,631 | 0,280 | 0,541 | 0,690 | 0,561 | 0,561 | 0,190 | 0,138 | 0,318 | 0,592 | 0,277 | 0,517 | 0,195 | 0,204 | 0,562 | 0,197 | 0,412 |
| ΣREE | 162,13 | 96,68 | 174,77 | 224,29 | 98,14 | 290,20 | 558,42 | 125,17 | 414,03 | 69,08 | 70,61 | 172,21 | 387,07 | 139,70 | 535,36 | 82,77 | 83,54 | 379,92 | 105,15 | 218,84 |
| LREE | 142,03 | 86,03 | 158,31 | 202,16 | 87,88 | 269,33 | 528,13 | 108,52 | 389,84 | 61,30 | 64,14 | 158,20 | 361,59 | 127,48 | 509,38 | 75,02 | 73,94 | 357,27 | 96,74 | 203,01 |
| HREE | 19,23 | 10,02 | 15,59 | 21,24 | 9,65 | 19,83 | 28,84 | 16,03 | 23,10 | 7,24 | 5,92 | 13,08 | 24,28 | 11,35 | 24,67 | 7,21 | 8,90 | 21,59 | 7,86 | 15,56 |
| LREE/HREE | 7,39 | 8,59 | 10,15 | 9,52 | 9,10 | 13,58 | 18,31 | 6,77 | 16,88 | 8,46 | 10,83 | 12,09 | 14,89 | 11,23 | 20,64 | 10,41 | 8,31 | 16,55 | 12,31 | 11,90 |
| (La/Yb) _N | 5,53 | 6,92 | 8,82 | 8,09 | 7,28 | 12,08 | 19,77 | 5,05 | 17,29 | 7,14 | 10,51 | 11,86 | 15,39 | 10,72 | 26,68 | 9,21 | 7,58 | 17,09 | 12,12 | 11,53 |
| (La/Sm) _N | 6,24 | 3,70 | 4,02 | 3,94 | 3,65 | 4,02 | 4,35 | 4,29 | 4,30 | 3,55 | 3,86 | 4,25 | 4,44 | 4,16 | 5,02 | 4,09 | 3,33 | 4,65 | 4,03 | 4,07 |
| (Gd/Yb) _N | 0,97 | 1,15 | 1,26 | 1,22 | 1,18 | 1,49 | 2,09 | 0,79 | 1,86 | 1,21 | 1,53 | 1,53 | 1,76 | 1,51 | 2,48 | 1,28 | 1,46 | 1,80 | 1,71 | 1,49 |
| Eu/Eu*(1) | 0,71 | 0,66 | 0,53 | 0,42 | 0,63 | 0,42 | 0,32 | 0,53 | 0,32 | 0,77 | 0,83 | 0,61 | 0,37 | 0,70 | 0,32 | 0,72 | 0,78 | 0,35 | 0,57 | 0,55 |
| Eu/Eu*(2) | 0,76 | 0,91 | 0,73 | 0,58 | 0,87 | 0,58 | 0,44 | 0,73 | 0,44 | 1,07 | 1,15 | 0,85 | 0,51 | 0,97 | 0,45 | 1,01 | 1,09 | 0,48 | 0,79 | 0,76 |

$(La/Yb)_N = (La_{\text{échantillon}}/La_{\text{chondrite}})/(Yb_{\text{échantillon}}/Yb_{\text{chondrite}})$; $(La/Sm)_N = (La_{\text{échantillon}}/La_{\text{chondrite}})/(Sm_{\text{échantillon}}/Sm_{\text{chondrite}})$; $(Gd/Yb)_N = (Gd_{\text{échantillon}}/Gd_{\text{chondrite}})/(Yb_{\text{échantillon}}/Yb_{\text{chondrite}})$;
 $Eu/Eu^*(1) = (Eu_{\text{échantillon}}/Eu_{\text{chondrite}})/(Sm_{\text{échantillon}}/Sm_{\text{chondrite}})^{1/2}(Gd_{\text{échantillon}}/Gd_{\text{chondrite}})^{1/2}$; $Eu/Eu^*(2) = (Eu_{\text{échantillon}}/Eu_{\text{UCC}})/(Sm_{\text{échantillon}}/Sm_{\text{UCC}})^{1/2}(Gd_{\text{échantillon}}/Gd_{\text{UCC}})^{1/2}$

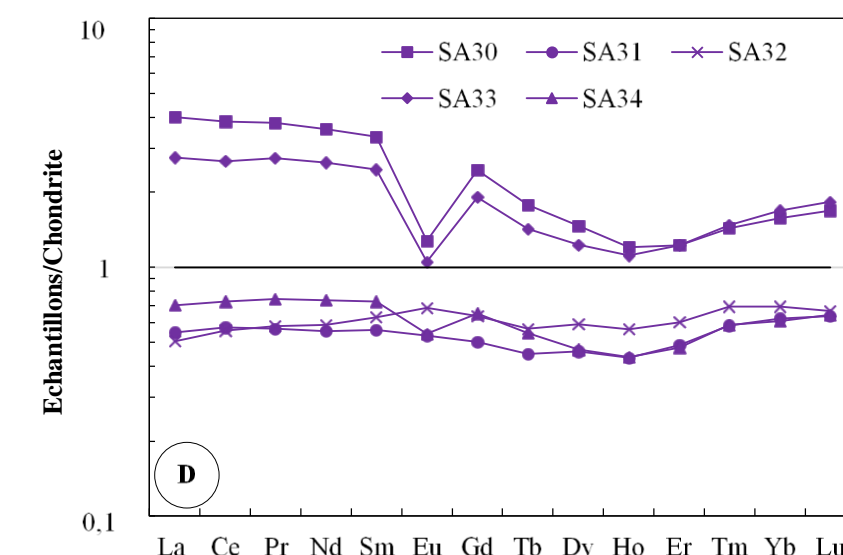
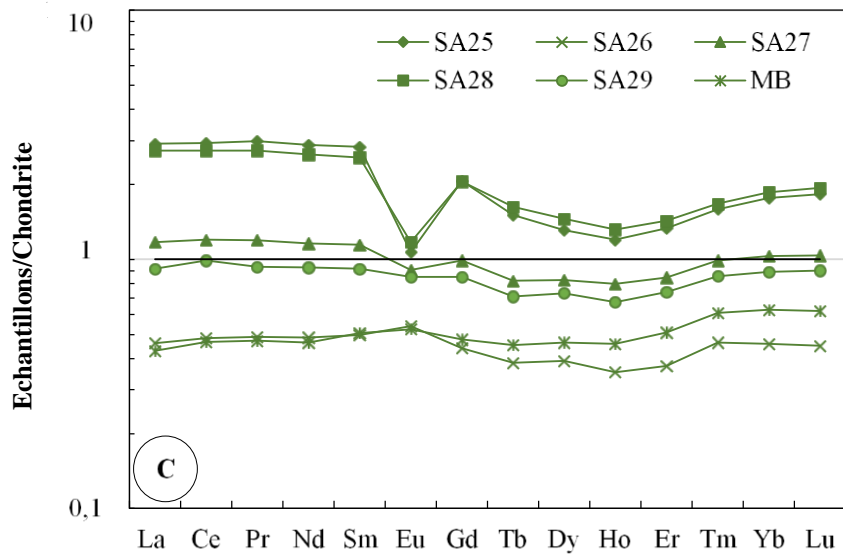
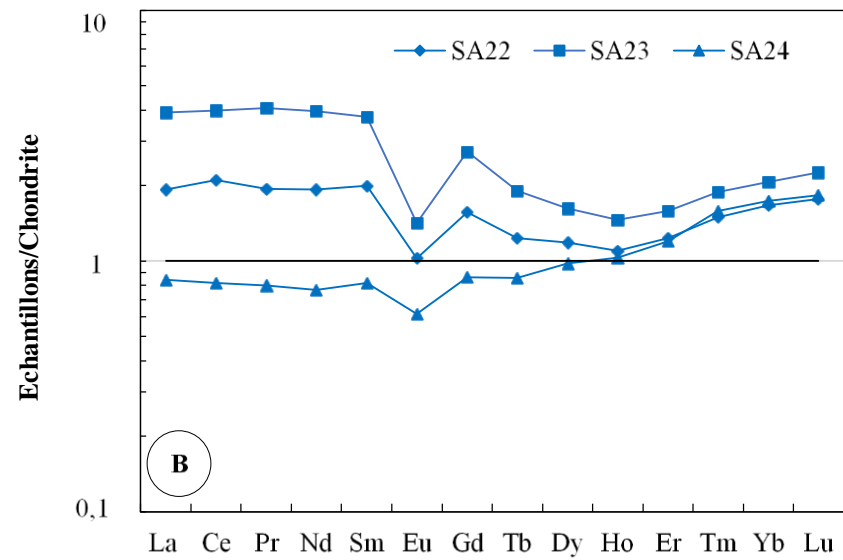
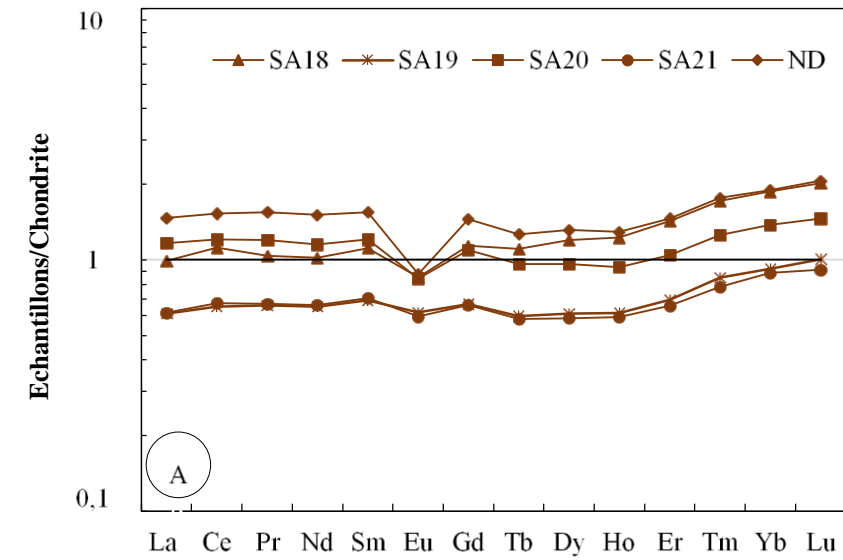


Figure IV.23. Spectres des terres rares des sables du cours inférieur de la Sanaga normalisés par rapport aux données de la chondrite de McDonough et Sun (1995)
 A : Zone Nanga-Eboko - Batchenga ; B : Zone Sa'a ; C : Zone Ebebda - Sakbayémé ; Zone D : Edéa - Yoyo

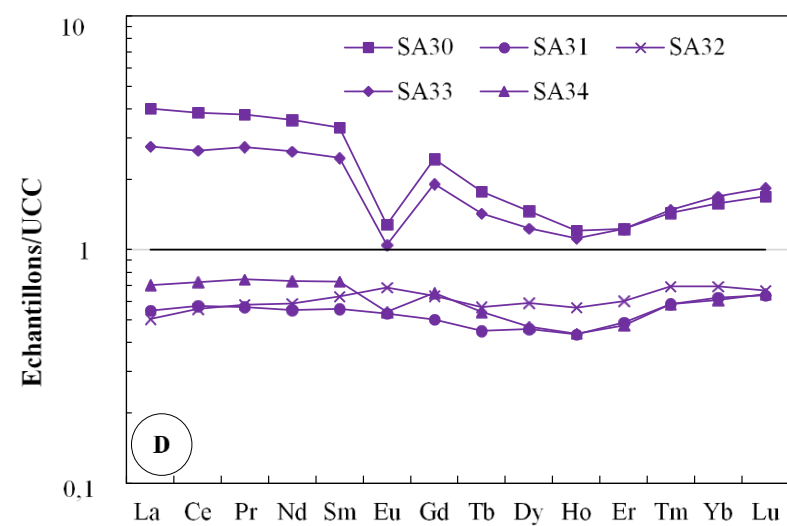
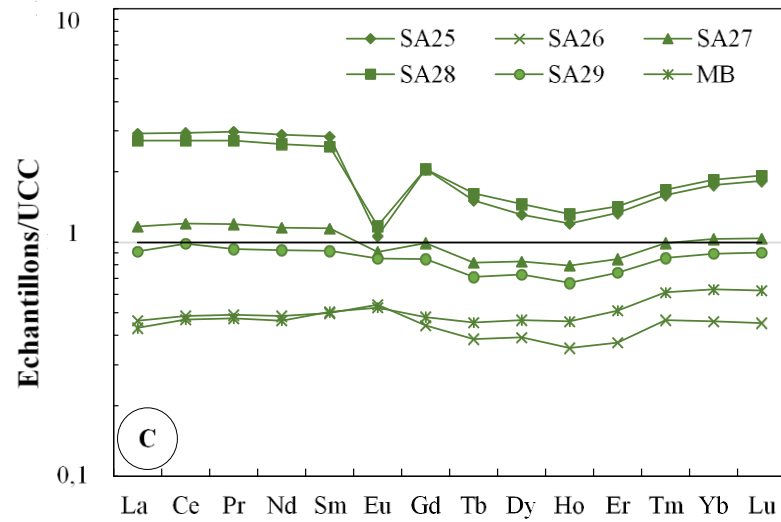
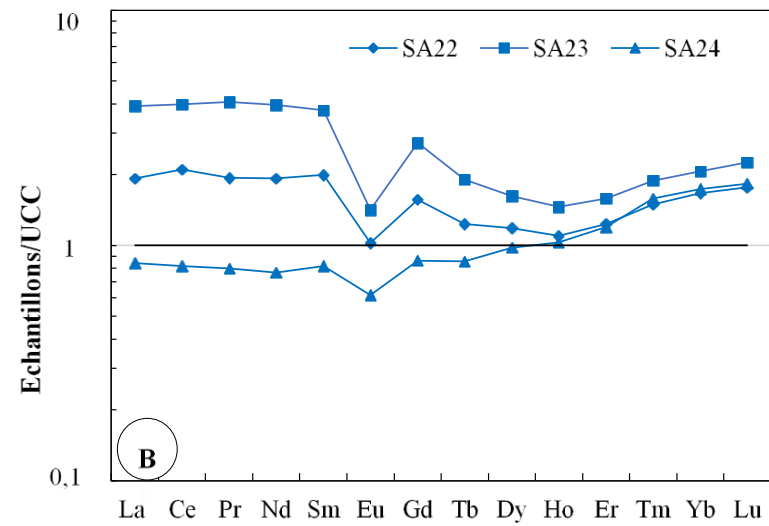
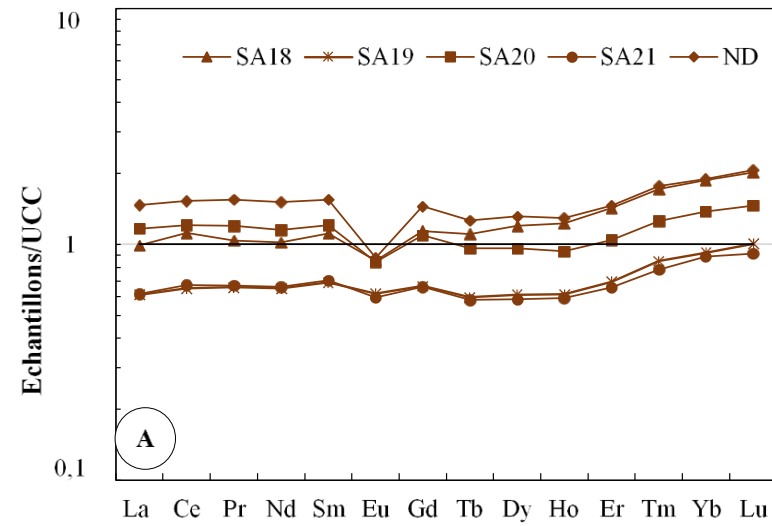


Figure IV.24. Spectres des terres rares des sables du cours inférieur de la Sanaga normalisés par rapport aux données de UCC de Rudnick et Gao (2003)

A : Zone Nanga-Eboko – Batchenga ; B : Zone Sa'a ; C : Zone Ebedda - Sakbayémé ; D : Zone Edéa - Yoyo

Conclusion

Les sables étudiés ont des grains fins, moyens et grossiers. Ils sont constitués de quartz, de microcline, de plagioclases, de muscovite, d'ilménite, d'anatase et de magnétite. Leurs teneurs sont élevées en quartz, modérées en microcline, faibles à très faibles en plagioclases, muscovite, ilménite, anatase et magnétite. Ces matériaux fluviatiles se composent également des minéraux du métamorphisme (andalousite, disthène, sillimanite, épidote, staurotide, et tourmaline), des minéraux du magmatisme (augite et péridot) et des minéraux mixtes (apatite, grenat, hornblende, minéraux opaques et zircon). Ils sont enrichis en TiO_2 , MnO , Ba, Nb, Ta, Th, U et Zr par rapport à UCC et, appauvris en Al_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , P_2O_5 , Co, Cr, Cs, Cu, Ni, Pb, Rb, Sc, Sr, Li et Mo. TiO_2 et Fe_2O_3 sont fortement liés aux HFSE. TiO_2 est fortement lié aux HFSE dans l'anatase tandis que Fe_2O_3 est lié à ces éléments dans la magnétite. K_2O est fortement lié à Ba et Rb dans le microcline. Certains HFSE tels U, Nb et Mo sont liés à P_2O_5 dans l'apatite. Les éléments traces ferromagnésiens tels Cr, V, Co et Sc, sont étroitement liés à TiO_2 dans l'anatase et, à P_2O_5 , dans l'apatite. Les sables étudiés se caractérisent également par un enrichissement en LREE par rapport aux HREE et par des anomalies négatives en Eu. Le prochain chapitre se focalise sur l'évaluation des paramètres géotechniques de ces matériaux fluviatiles du cours inférieur de la Sanaga.

CHAPITRE V.

PARAMÈTRES GÉOTECHNIQUES DES MATÉRIAUX ET DES BÉTONS HYDRAULIQUES STANDARDS

Introduction

Le présent chapitre se focalise sur les paramètres physiques des sables étudiés qui sont des granulats fins et les paramètres physico-mécaniques des granulats grossiers basaltiques et granitiques. Il présente également les caractéristiques minéralogiques, chimiques et physico-mécaniques du ciment Dangote qui a été utilisé pour la formulation des différents bétons.

V.1. Paramètres physiques des sables

V.1.1. Poids volumique apparent

Les sables étudiés ont des valeurs de poids volumique apparent (γ) qui varient entre 1,17 kN/m³ et 1,59 kN/m³. La valeur moyenne de γ dans ces matériaux est de 1,45 kN/m³ (Tab. V.21).

V.1.2. Poids volumique des grains solides

Les valeurs de poids volumique des grains solides (γ_s) des sables cours inférieur de la Sanaga varient entre 2,43 et 2,66 kN/m³, soit une valeur moyenne de 2,59 kN/m³ (Tab. V.21).

V.1.3. Équivalent de sable

Les valeurs moyennes de l'équivalent de sable visuel (ESv), de l'équivalent de sable au piston (ESp) et, celles de l'équivalent de sable moyen des (ESm) sont consignées dans le tableau V.18. Les valeurs de ESv varient entre 87,0 % et 98,8 %, celles de ESp oscillent entre 76,5 % et 93,4 % et, celles de ESM, entre 81,8 % et 94,9 %.

V.1.4. Module de finesse

Les données de module de finesse sont consignées dans le tableau V.21. Les sables étudiés ont des valeurs de module de finesse (Mf) comprises entre 1,02 et 2,97. La valeur moyenne de ce paramètre est de 2,10. Les sables du principal affluent, le Mbam, présentent la plus petite valeur de Mf (1,20) et les sables de Nanga Eboko (SA18) présentent la valeur la plus élevée (Mf = 2,97).

V.1.5. Granularité

Les sables étudiés sont constitués de trois principales fractions (Tab. V.22). La proportion des sables grossiers est de 47,17 % en moyenne. La proportion moyenne des sables moyens est de 28,13 % tandis que celles des sables fins est de 12,68 %.

Tableau V.21. Données des paramètres physiques des sables étudiés

| | SA18 | SA19 | SA20 | SA21 | SA22 | SA23 | SA24 | SA25 | SA26 | ND | MB | SA27 | SA28 | SA29 | SA30 | SA31 | SA32 | SA33 | SA34 | Moy (n = 19) |
|---------------------------------|------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-----------------|
| γ (kN/m ³) | 1,59 | 1,42 | 1,56 | 1,46 | 1,54 | 1,52 | 1,52 | 1,48 | 1,2 | 1,28 | 1,17 | 1,42 | 1,44 | 1,37 | 1,53 | 1,53 | 1,41 | 1,51 | 1,51 | 1,45 |
| γ_s (kN/m ³) | 2,63 | 2,61 | 2,62 | 2,59 | 2,6 | 2,65 | 2,66 | 2,66 | 2,59 | 2,45 | 2,43 | 2,59 | 2,53 | 2,55 | 2,63 | 2,59 | 2,61 | 2,57 | 2,65 | 2,59 |
| ESp (%) | 90,5 | 91,2 | 89,5 | 90,3 | 90,3 | 92,8 | 76,5 | 88,3 | 90,4 | 88,3 | 90,2 | 91,5 | 89,8 | 90,3 | 92,9 | 89,6 | 91,3 | 89 | 93,4 | 89,79 |
| ESv (%) | 96,1 | 98,7 | 96,9 | 96,4 | 96,4 | 95,5 | 87 | 97,4 | 98,2 | 90,3 | 97,4 | 98,3 | 97,3 | 96,4 | 96,4 | 97,2 | 97,7 | 96,4 | 96,8 | 96,15 |
| ESm (%) | 93,3 | 94,5 | 93,2 | 93,35 | 93,6 | 94,15 | 81,75 | 92,85 | 94,3 | 94,4 | 93,8 | 94,9 | 93,55 | 93,35 | 94,65 | 93,4 | 94,5 | 92,7 | 95,1 | 93,23 |
| Mf | 2,97 | 2,21 | 2,66 | 2,11 | 2,62 | 2,60 | 1,34 | 2,09 | 1,09 | 2,43 | 1,02 | 2,14 | 2,05 | 2,02 | 2,62 | 2,18 | 1,97 | 2,28 | 1,43 | 2,10 |

γ : Poids volumique apparent ; γ_s : Poids volumique des grains solides ; Esp : Equivalent de sable au piston ; ESv : Equivalent de sable visuel ; ESm : Equivalent de sable moyen ; Mf : Module de finesse ; Moy : Moyenne

Tableau V.22. Données granulométriques des sables étudiés

S : échantillon total de sable ; Sg : Sable grossier ; Sm : Sable moyen ; Sf : Sable fin

| | SA18 | SA19 | SA20 | SA21 | SA22 | SA23 | SA24 | SA25 | SA26 | ND | MB | SA27 | SA28 | SA29 | SA30 | SA31 | SA32 | SA33 | SA34 | Moy (n = 19) |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| S (%) | 65,35 | 96,05 | 82,50 | 99,05 | 76,40 | 82,05 | 93,75 | 93,25 | 99,55 | 78,20 | 99,20 | 95,50 | 94,20 | 98,40 | 81,95 | 89,25 | 99,25 | 69,20 | 78,05 | 87,96 |
| Sg (%) | 49,40 | 62,25 | 65,00 | 64,65 | 51,85 | 59,20 | 30,55 | 51,45 | 2,95 | 32,55 | 0,65 | 59,80 | 51,50 | 59,20 | 60,50 | 49,55 | 56,40 | 53,70 | 35,15 | 47,17 |
| Sm (%) | 13,50 | 33,00 | 16,50 | 32,50 | 22,70 | 21,20 | 31,00 | 33,50 | 31,00 | 34,00 | 29,00 | 32,50 | 34,00 | 37,80 | 20,50 | 29,00 | 38,00 | 14,75 | 30,00 | 28,13 |
| Sf (%) | 2,45 | 0,80 | 1,00 | 1,90 | 1,85 | 1,65 | 32,20 | 8,30 | 65,60 | 11,65 | 69,55 | 3,20 | 8,70 | 1,40 | 0,95 | 10,70 | 4,85 | 0,75 | 12,90 | 12,65 |

Les granules représentent en moyenne 6,84 % des matériaux alluviaux du cours inférieur de la Sanaga.

V.2. Paramètres physico-mécaniques des granulats basaltiques et granitiques

V.2.1. Paramètres physiques

V.2.1.1. Poids volumique apparent

Les données de poids volumique apparent ρ sont consignées dans le tableau V.23. La valeur de γ est de 1,59 kN/m³ pour la classe granulaire 5/15 et de 1,64 kN/m³ pour la classe granulaire 15/25 dans les granulats basaltiques. Ces valeurs de γ sont de 1,43 kN/m³ (5/15) et 1,44 kN/m³ (15/25) pour les granulats granitiques.

V.2.1.2. Poids volumique des grains solides

Les données de poids volumique des grains solides γ_s sont consignées dans le tableau V.23. Les différentes classes granulaires présentent des valeurs de ρ_s sont comprises entre 2,90 kN/m³ (5/15) et 2,91 kN/m³ (15/25) pour les granulats basaltiques. Ces valeurs de γ_s dans les granulats granitiques sont comprises entre 2,65 kN/m³ (5/15) et 2,66 kN/m³ (15/25).

V.2.1.3. Propreté superficielle

Les données de propriété superficielle (Tab. V.23) indiquent les valeurs de ce paramètre oscillent entre 0,70 (15/25) et 1,30 (5/15) dans les granulats basaltiques. Ces valeurs sont comprises entre 0,17 (5/15) et 0,19 (15/25) dans les granulats granitiques.

V.2.2. Paramètres mécaniques

V.2.2.1. Micro-Deval

Les données de l'essai micro-Deval sont présentées dans le tableau V.24. La valeur du coefficient micro-Deval (MDE) des granulats granitiques est moyenne de 7 %. Cette valeur de MDE est relativement supérieure à celle des granulats basaltiques qui est de 5 %.

V.2.2.2. Los Angeles

La valeur moyenne du coefficient Los Angeles (LA) des granulats granitiques est de 32 %. Cette valeur moyenne de LA est de 6 % dans les granulats basaltiques (Tab. V.24).

Tableau V.23. Paramètres physiques des granulats basaltiques et granitiques

| | γ (kN/m ³) | γ_s (kN/m ³) | Propreté superficielle |
|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Basaltes (n = 5) | | | |
| Gravier 5/15 | 1,59 | 2,91 | 1,30 |
| Gravier 15/25 | 1,64 | 2,90 | 0,70 |
| Granites (n = 5) | | | |
| Gravier 5/15 | 1,43 | 2,65 | 0,17 |
| Gravier 15/25 | 1,44 | 2,66 | 0,19 |

γ : Poids volumique apparent ; γ_s : Poids volumique des grains solides

Tableau V.24. Paramètres mécaniques des granulats basaltiques et granitiques

| | Granites (n = 5) | Basaltes (n = 5) |
|--------------|---------------------|---------------------|
| MDE (%) | 7 | 5 |
| LA (%) | 32 | 6 |
| LA + MDE (%) | 39 | 11 |
| Classe | C | B |

V.2.2.3. Classification mécanique des granulats

Les valeurs des résistances combinées à la fragmentation (LA) et à l'usure par frottement (MDE) montrent que les granulats granitiques sont de classe C tandis que les granulats basaltiques sont de classe B (Tab. V.24), selon les spécifications de la norme NF P 18 – 545 (AFNOR, 2011).

V.3. Paramètres physico-mécaniques et chimico-minéralogiques du ciment

La valeur de γ du ciment Dangote est de $0,91 \text{ kN/m}^3$ et, celle de γ_s de $2,98 \text{ kN/m}^3$ (Tab. V.25). Ce ciment a une valeur de surface spécifique de $3353 \text{ cm}^2/\text{g}$. Les valeurs de résistance à la compression à 2, 7 et 28 jours sont de 24, 37 et 44 MPa, respectivement.

L'exploitation du diffractogramme des rayons X de l'échantillon de ciment analysé (Fig. V.25) montre qu'il est composé d'alite, de bélite, de gypse, de gehlénite et de brownmillerite. Le gypse est présent en très faibles quantités. Le gypse joue un rôle très important dans la dureté du ciment. La présence du gypse parmi les éléments constitutifs du ciment améliore son temps de prise.

Les données d'analyses chimiques du ciment utilisé sont consignées dans le tableau V.26. Ces données chimiques montrent que le module de silice est égal à 3,21. Le module d'alumine et le module hydraulique ont des valeurs respectives de 1,30 et 2,46. La valeur du module de saturation à la chaux est de 0,94.

V.4. Formulation des différents bétons

V.4.1. Granularité des agrégats

Les courbes d'analyses granulométriques des différents agrégats et les différentes proportions des matériaux utilisés sont représentées par les figures V.26 et V.27. Les proportions des agrégats utilisés sont de : 29 % de gravier 15/25, 33 % de gravier 5/15 et 38 % de sable pour les éprouvettes de béton confectionnées à partir des granulats basaltiques (BB). Pour les éprouvettes de béton confectionnées à partir des granulats granitiques (BG), les proportions des agrégats sont de : 44 % de gravier 15/25, 20 % de gravier 5/15 et 36 % de sable du cours inférieur de la Sanaga.

Tableau V.25. Paramètres physiques et mécaniques du ciment Dangote

| Propriétés physiques | | | | Propriétés mécaniques | | | | |
|----------------------|----------------------------------|------------------------------------|---|-----------------------|-------|--|---------|----------|
| Refus (0,08 mm) | γ (kN/m ³) | γ_s (kN/m ³) | Surface spécifique (cm ² /g) | Expansion (mm) | | Résistance à la compression uniaxiale (MPa) | | |
| | | | | Froid | Chaud | 2 jours | 7 jours | 28 jours |
| 0,59 | 0,91 | 2,98 | 3353 | 0 | 0 | 24 | 37 | 44 |

γ : Poids volumique apparent ; γ_s : Poids volumique des grains solides

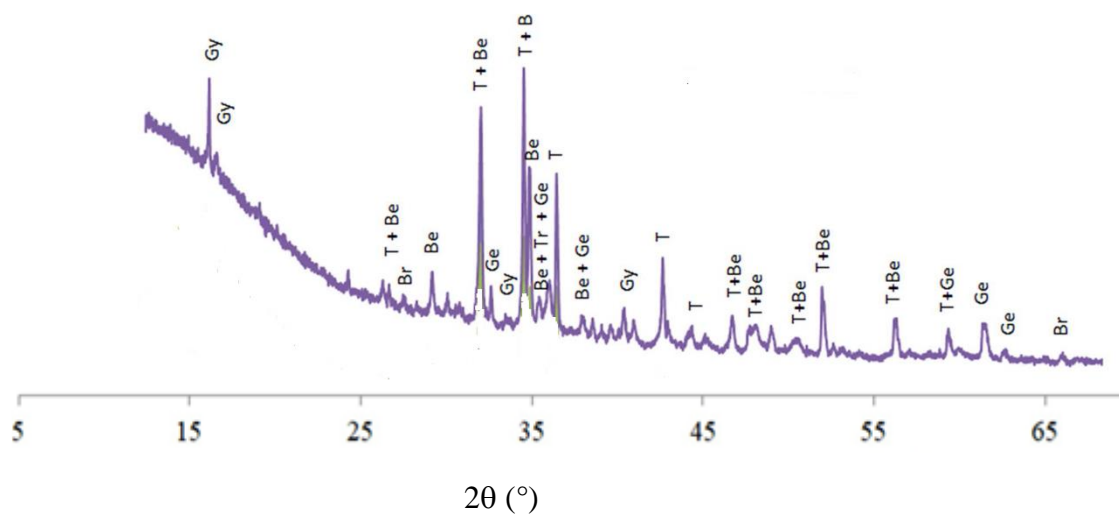


Figure V.25. Diffractogramme des rayons X de l'échantillon de ciment Dangote

T : Silicate tricalcique $\text{SiO}_2, 3\text{CaO}$ ou C_3S ; Tr : Aluminat tricalcique $\text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{CaO}$ ou C_3A ;
 Ge : Gehlénite $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$; Gy : Gypse $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$; Be : Béhlite ; Br : Brownmillerite

Tableau V.26. Composition chimique (%) du ciment Dangote et paramètres chimiques associés

| | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | CaO | K ₂ O | P ₂ O ₅ | Cr ₂ O ₃ | NiO | BaO | ZrO ₂ | SO ₂ | PF | Total | MS | MA | MH | FSC |
|----|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|------|------|------------------|-----------------|------|-------|------|------|------|------|
| CD | 19,23 | 0,31 | 3,38 | 2,60 | 0,00 | 62,20 | 0,98 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,07 | 5,01 | 2,53 | 96,36 | 3,21 | 1,30 | 2,46 | 0,94 |

CD : ciment Dangote ; PF : Perte au feu ; MS : Module de silice ; MA : Module d'alumine ; MH : Module hydraulique ; FSC : Facteur de saturation à la chaux

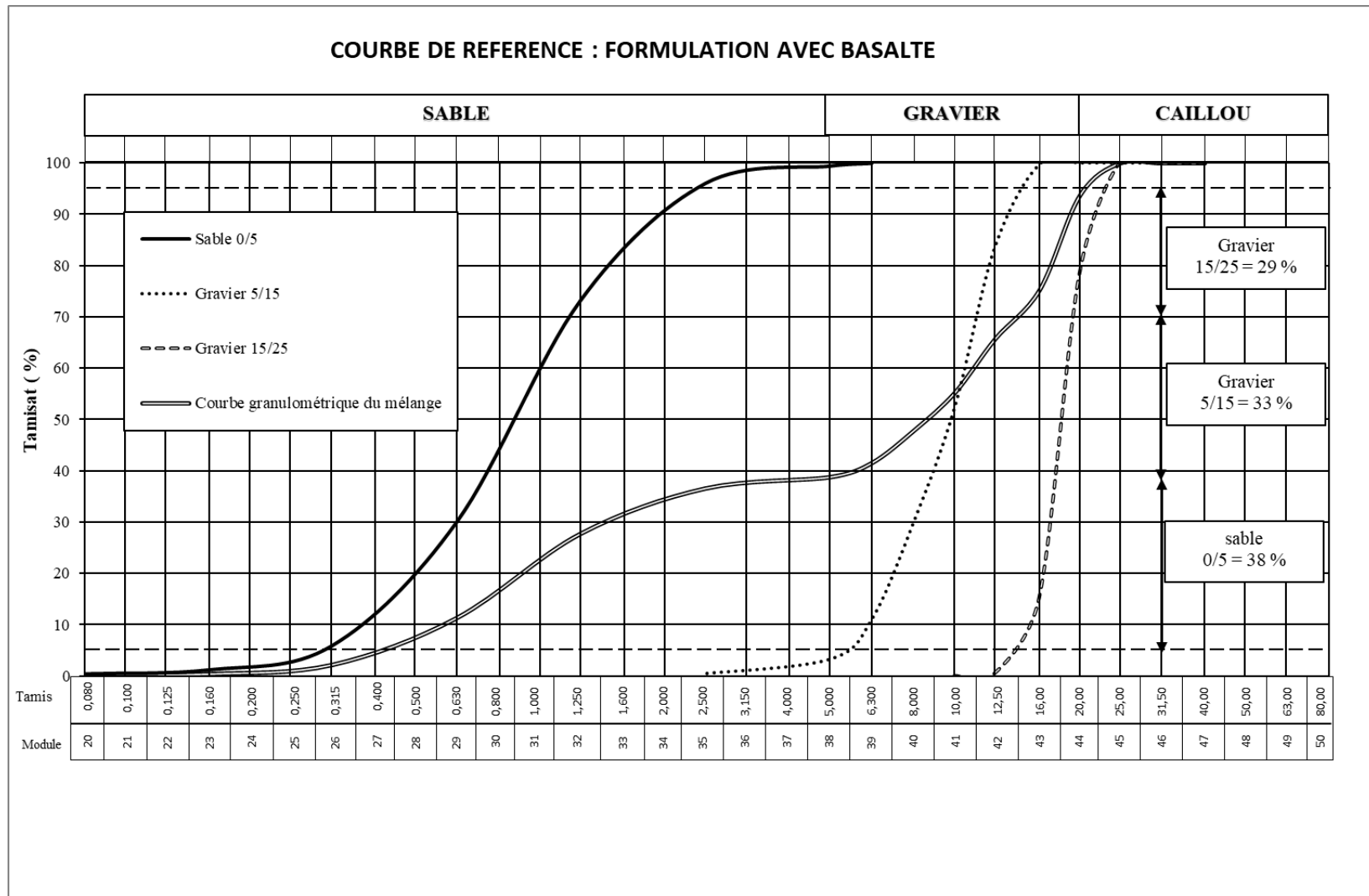


Figure V.26. Courbes granulométriques des sables et des granulats basaltiques étudiés dans le diagramme de Dreux (1981)

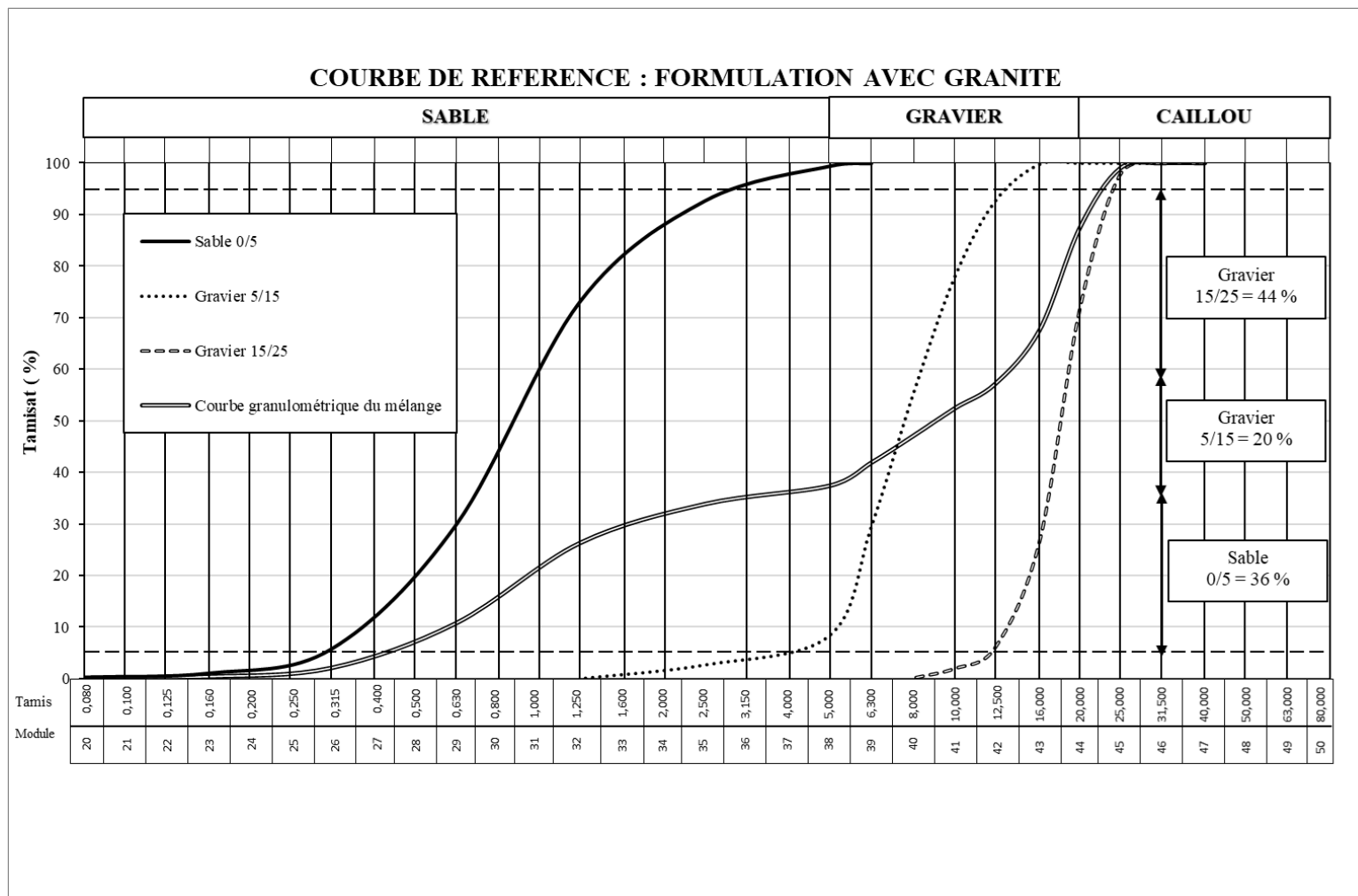


Figure V.27. Courbes granulométriques des sables et des granulats granitiques étudiés dans le diagramme de Dreux (1981)

Tableau V.27. Compositions des différents bétons

| Masse des composants (kg/m ³) | | | | | | | | Ratio |
|---|--------|---------|---------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|
| Type de béton | Ciment | Eau (l) | Sable 0/5 (g) | Gravier 5/15 (g) | Gravier 15/25 (g) | Densité théorique | Affaissement (cm) | C/E |
| BB | 400 | 209,3 | 689,6 | 670,2 | 588,2 | 2,56 | 7 | 1,92 |
| BG | 400 | 210 | 647,7 | 357,2 | 788,7 | 2,40 | 7 | 1,89 |

C/E : ratio ciment/eau ; BB : béton avec des granulats basaltiques ; BG : béton avec granulats granitiques

Tableau V.28. Valeurs de résistance à la compression uniaxiale des différents bétons

| Temps de cure (Jours) | 3 | 7 | 28 |
|-----------------------|------|------|------|
| σ_{cBB} (MPa) | 18,1 | 20,5 | 29,6 |
| σ_{cBG} (MPa) | 23,9 | 28,3 | 30,5 |

σ_{cBB} : Résistance à la compression uniaxiale du béton avec des granulats basaltiques ;

σ_{cBG} : Résistance à la compression uniaxiale du béton avec granulats granitiques.

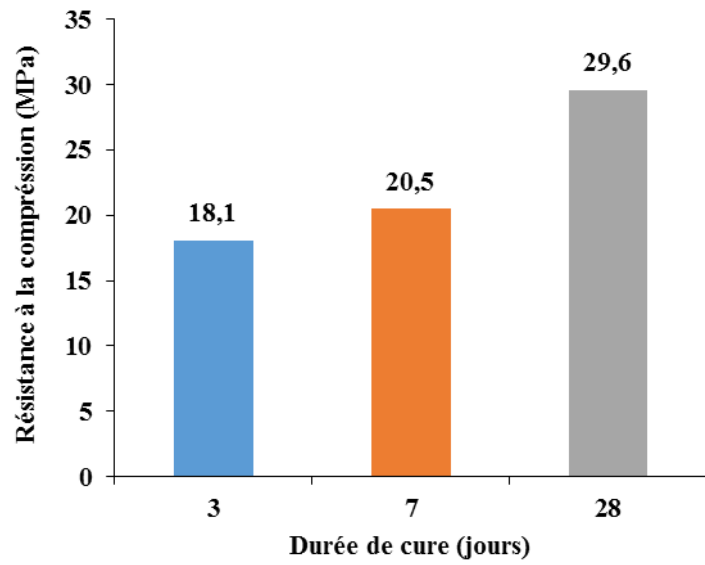


Figure. V.28. Evolution de la résistance à la compression uniaxiale du BB avec le temps de cure

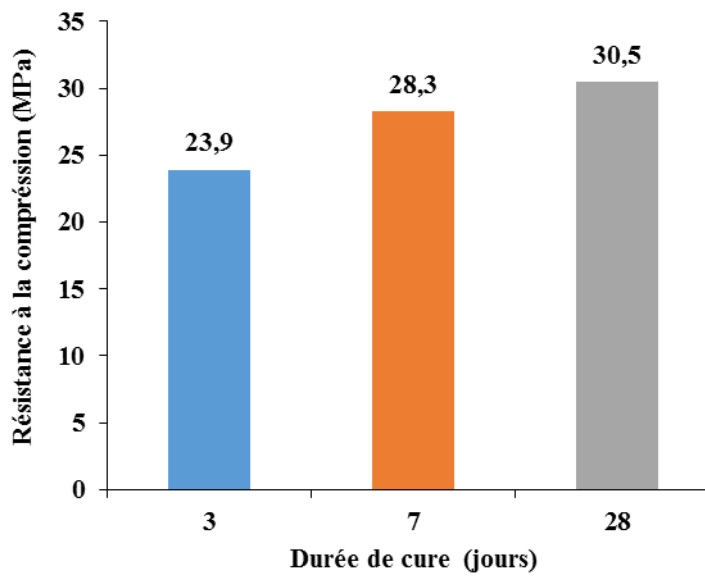


Figure. V.29. Evolution de la résistance à la compression uniaxiale du BG avec le temps de cure

V.4.2. Compositions des différents bétons

Les données de composition du béton sont consignées dans le tableau V.27. Il ressort de ce tableau que, la valeur du rapport ciment/eau (C/E) du BB (1,92) est similaire à celle du BG (1,89). Ce rapport C/E est donc constant. La densité théorique du BB (2,56) est supérieure à celle du BG (2,40). Les éprouvettes de BB ont des proportions de sable plus élevées (689,6 kg/m³) que celles de BG (647,7 kg/m³). Pour le BB, les proportions de graviers 5/15 sont supérieures (670,2 kg/m³) à celles du BG (357,2 kg/m³). Par contre, pour les graviers 15/25, les proportions pour le BG sont supérieures (788,7 kg/m³) à celles du BB (588,2 kg/m³).

V.4.3. Résistance à la compression uniaxiale des éprouvettes de béton

Les données de l'essai de résistance à la compression uniaxiale des éprouvettes de béton sont consignées dans le tableau V.28 et illustrées par les figures V.28 et V.29.

Les valeurs de résistance à la compression uniaxiale du béton avec granulats basaltiques σ_{cBB} à 2 – 7 et 28 jours sont de 18,1 – 20,5 et 29,6 MPa, respectivement. Celles du béton avec granulats granitiques σ_{cBG} pour les mêmes durées sont de 23,9 – 28,3 et 30,5 MPa.

Conclusion

Les sables étudiés sont constitués de trois principales fractions grossière, moyenne et fine. La fraction grossière est la plus représentative. Ces sables sont utilisables dans la confection des bétons. Les granulats granitiques sont plus propres que les granulats basaltiques. La valeur des coefficients micro-Deval et Los Angeles des granulats basaltiques sont faibles comparées à celles des granulats granitiques. Les granulats granitiques sont de classe C tandis que les granulats basaltiques sont de classe B. Les valeurs de résistance à la compression uniaxiale à 3 – 7 et 28 jours de cure des bétons confectionnés à partir des granulats granitiques sont supérieures à celles des bétons obtenus à partir des granulats basaltiques aux mêmes temps de cure. Les principaux faits d'observation ainsi que les résultats des études pétrologique et géotechnique des matériaux étudiés sont discutés dans le prochain chapitre.

CHAPITRE VI.

EXPLOITATION ET DISCUSSION

DES RÉSULTATS

Introduction

Le présent chapitre interprète et discute les résultats obtenus à la suite des travaux de terrain et ceux de laboratoire. Les données pétrologiques permettent de définir le degré d'altération, la provenance des sables étudiés ainsi que l'environnement tectonique des roches sources des sables du cours inférieur de la Sanaga. Les données géologiques et géotechniques des granulats basaltiques et celles des granulats granitiques couplées à celles des sables étudiés et à celles du ciment Dangote précisent l'intérêt des sables étudiés dans le domaine du Bâtiment et des Travaux publics.

VI.1. Maturité et recyclage des sables du cours inférieur de la Sanaga

Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est largement utilisé pour déterminer la maturité texturale des sédiments (Armstrong-Altrin *et al.*, 2012, 2015 ; Madhavaraju, 2015 ; Guo *et al.*, 2018). La valeur moyenne de ce rapport est 3 dans les roches ignées basiques et, 5 dans les roches ignées acides. Les valeurs de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ supérieures à 5 dans les sédiments clastiques indiquent des sédiments matures (Roser et Korsch, 1986). Les sables étudiés ont des valeurs du rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ qui varient entre 7 et 18. La valeur moyenne du rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est de 12. Cette valeur est trois fois supérieure à la valeur moyenne UCC qui est égale à ~ 4 (Armstrong-Altrin *et al.*, 2015). Les sables étudiés ont une maturité texturale élevée (Nanga Bineli *et al.*, 2020).

Les concentrations élevées en TiO_2 relatives à celles de UCC corroborent la présence de l'anatase et de l'ilménite ($r_{\text{TiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3} = 0,85$, $n = 19$). Statistiquement les corrélations entre SiO_2 , Al_2O_3 et PF indiquent que la plus grande partie de SiO_2 est contenue dans le quartz et non dans la muscovite et les feldspaths. Les HFSE sont associés à Fe_2O_3 dans l'ilménite et/ou la magnétite. Certains de ces HFSE sont contenus dans l'apatite. Ceci s'explique par les fortes corrélations entre P_2O_5 et U, Nb, Mo. Le chrome, V, Co et Sc sont liés à TiO_2 dans l'anatase, à Fe_2O_3 dans l'ilménite et/ou la magnétite et, à P_2O_5 , dans l'apatite. Ces sables contiennent les minéraux primaires des roches sources comme l'indique leur minéralogie et n'ont donc pas subi un long transport. Les sables étudiés ont subi un recyclage faible à modéré (Fig. VI.30 ; Armstrong-Altrin *et al.*, 2015, 2017 ; Nagarajan *et al.*, 2017 ; Anaya-Gregorio *et al.*, 2018 ; Nanga Bineli *et al.*, 2020).

VI.2. Intensité de l'altération

De nombreux indices d'altération ont été proposés afin d'évaluer la mobilité des

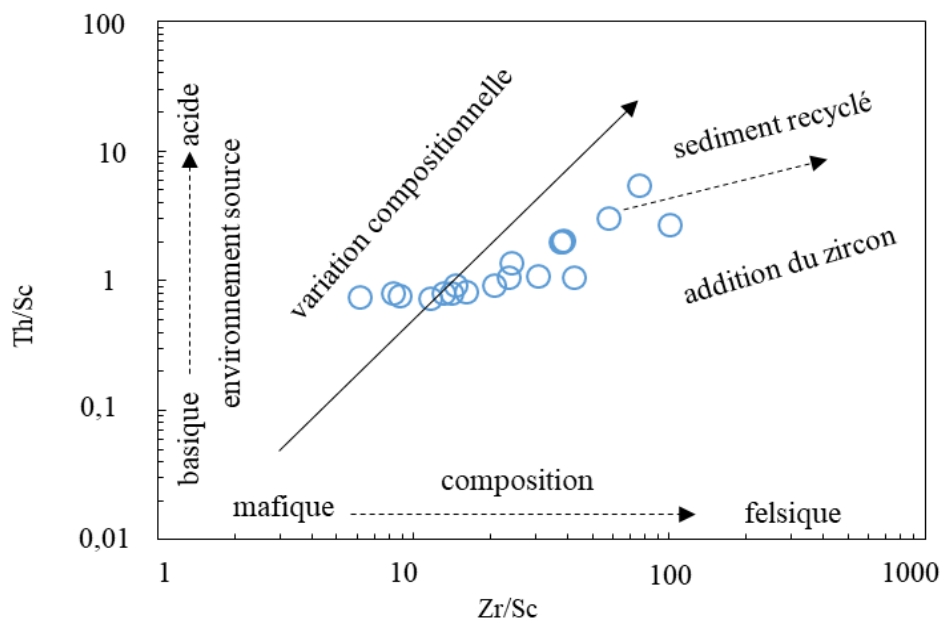


Figure VI.30. Position des sables étudiés dans le diagramme illustrant le recyclage des sédiments de McLennan *et al.* (1993)

éléments durant l'altération chimique (Nesbitt et Young, 1982 ; Fedo *et al.*, 1995 ; Babechuk *et al.*, 2014). Ces indices d'altération sont communément utilisés afin de déterminer l'intensité de l'altération (Armstrong-Altrin *et al.*, 2012, 2015, 2018 ; Schneider *et al.*, 2015 ; Maharana *et al.*, 2018 ; Ndjigui *et al.*, 2018, 2019 ; Ngueutchoua *et al.*, 2019 ; Noa Tang *et al.*, 2020). En général, les indices d'altération comparent la concentration d'un élément immobile par rapport aux éléments mobiles (Garzanti *et al.*, 2014). De tous les indices, l'indice d'altération chimique CIA de Nesbitt et Young (1982), bien que son utilisation soit contestée par quelques rares auteurs (Garzanti et Resentini, 2016 ; Guo *et al.*, 2018), demeure l'indice le plus utilisé et, il permet de déterminer de manière quantitative le degré d'altération d'un matériau. Cet indice évalue l'hydrolyse progressive des feldspaths en minéraux argileux (Bhaskar *et al.*, 2015).

Les valeurs de CIA comprises entre 50 et 60 % indiquent un faible degré d'altération chimique tandis que, celles comprises entre 60 et 80 %, indiquent une altération chimique modérée. Lorsque les valeurs de CIA sont supérieures à 80 %, l'altération chimique est extrême. Le paramètre CIA permet aussi de se faire une idée sur le paléoclimat dans l'environnement source (Nesbitt et Young, 1982). En effet, l'abondance des minéraux argileux alumineux indique une intense altération chimique sous climat tropical ou équatorial. Les valeurs de CIA des matériaux d'altération sous climat tropical ou équatorial, varient entre 80 et 100 %. Par contre, en milieu glacial, où la désagrégation mécanique domine l'altération chimique, les valeurs de CIA oscillent autour de 50 % (Nesbitt et Young, 1982). Les sables étudiés ont des valeurs de CIA comprises entre 53 et 66 %, soit une moyenne de 58 % (n = 19). Cette valeur de 58 %, comparable à celle de UCC (50 %), indique une altération chimique faible. Cependant certains sables (SA18, SA20, SA27, SA29 et SA32) ont des valeurs de CIA supérieures à 60 %. Ces matériaux ont subi une altération modérée. Le degré d'altération des sables du cours inférieur de la Sanaga est donc faible à modéré (Nanga Bineli *et al.*, 2020). Les valeurs de l'indice d'altération des plagioclases (PIA) sont généralement utilisées pour quantifier le degré d'altération de la roche source (Bhaskar *et al.*, 2015). La valeur minimale de ce paramètre est ~50 %. La valeur maximale de PIA est égale à 100 % et elle indique une altération complète des plagioclases avec la formation de la kaolinite et de la gibbsite. Les valeurs de PIA autour de 50 % traduisent une altération très faible des plagioclases (Bhaskar *et al.*, 2015). La valeur de PIA du *Post - Archean Australian Shales* (PAAS ; Bah et Hiroaki, 2016) est de 79 %. Les sédiments étudiés ont des valeurs de PIA comprises entre 57 et 75 %, soit une moyenne de 64 % (n = 19). Cette valeur confirme une altération modérée des sables du cours inférieur de la Sanaga.

L'indice d'altération mafique de l'anglais *Mafic Index of Alteration* (MIA ; Babechuk *et al.*, 2014) est une extension de l'équation de CIA qui inclut les oxydes ferromagnésiens (Fe_2O_3 et MgO). Beaucoup de minéraux mafiques, pyroxènes et olivine, sont sensibles à l'altération chimique résultant de la perte de Mg et du devenir de Fe selon que le milieu est oxydant ou réducteur. Dans un environnement réducteur l'ion ferreux Fe^{2+} peut être mobile et lessivé avec Mg^{2+} durant l'altération des minéraux mafiques. Dans un environnement d'altération oxydant, le fer est constamment retenu par la formation de Fe^{3+} , fortement insoluble. Quand le milieu d'altération est oxydant, et le fer est retenu, le fer total est considéré comme un élément immobile comme l'alumine Al_2O_3 . L'augmentation de MIA représente progressivement une roche de plus en plus altérée comme dans le cas de CIA. Une valeur de 100 % indique une élimination complète des éléments mobiles contenus dans les feldspaths et les minéraux ferromagnésiens. Les valeurs de MIA des sables étudiés sont comprises entre 54 et 67 %, soit une moyenne de 61 % ($n = 19$). Ces valeurs indiquent également une altération modérée.

Les valeurs de CIA, PIA et MIA révèlent donc un degré d'altération modéré. Ce résultat est en accord avec l'abondance du quartz, des feldspaths et de certains minéraux ferromagnésiens dans les sables étudiés tels le grenat et l'épidote. Cependant le fleuve Sanaga traverse deux zones climatiques différentes, tropicale et équatoriale, où le phénomène d'altération est intense. Le degré modéré d'altération dans les matériaux étudiés serait lié à la proximité des roches sources (Nanga Bineli *et al.*, 2020).

VI.3. Provenance des sables

Les données d'analyses géochimiques et les diagrammes de discrimination précisent les sources possibles de provenance des sédiments (Nagarajan *et al.*, 2007 ; Descourvieres *et al.*, 2011; Schneider *et al.*, 2015; Armstrong-Altrin *et al.*, 2012, 2015 ; Maharana *et al.*, 2018). Les éléments traces tels Y, Cr, Th, Hf, Nb et Ti sont des indicateurs parmi les plus fiables de la source de provenance des sédiments (Cullers, 2000). Les éléments immobiles comme La et Th, enrichis dans les roches siliciques et, Cr et Co, enrichis dans les roches basiques, sont également utilisés pour déterminer la source de provenance, felsique ou mafique, des sédiments (Armstrong-Altrin *et al.*, 2017 ; Madhavaraju *et al.*, 2018 ; Velmurugan *et al.*, 2019). Les concentrations en REE sont également utilisées pour déduire la provenance des sédiments (Asiedu *et al.*, 2000). Les sédiments qui dérivent de la croûte continentale supérieure sont caractérisés par un enrichissement en LREE. Les roches mafiques ont un faible rapport LREE/HREE, excepté pour les basaltes alcalins, et ne présentent pas d'anomalies en Eu. Par

contre, les roches felsiques présentent généralement un rapport LREE/HREE élevé et une anomalie négative en Eu (Taylor et McLennan, 1985 ; Roddaz *et al.*, 2006). La comparaison des spectres de REE des roches sédimentaires à ceux des autres roches aide également à déterminer la nature des roches sources (Taylor et McLennan, 1985). Les sables du cours inférieur de la Sanaga présentent un enrichissement en LREE par rapport au HREE et une anomalie négative en Eu ($Eu/Eu^* = 0,32 - 0,83$). Ces sables proviennent probablement de roches sources felsiques.

Les valeurs des ratios des éléments traces tels La/Sc, La/Co, Th/Sc et Cr/Th sont différents dans les roches felsiques et dans les roches mafiques (Tab. VI.29). Ces ratios peuvent être utilisés pour estimer la composition moyenne de la provenance (Guo *et al.*, 2018 ; Maharana *et al.*, 2018). Les ratios des sables étudiés ont été comparés à ceux des sédiments qui dérivent de roches sources felsiques et à ceux des sédiments qui proviennent de roches sources mafiques (Tab. VI.29). Les ratios des éléments traces (La/Sc, La/Co, Th/Sc) des sables étudiés sont similaires à ceux des sédiments provenant de roches sources felsiques (Cullers, 2000 ; Armstrong-Altrin *et al.*, 2004).

Les concentrations élevées en éléments traces ferromagnésiens tels Cr, Ni et V dans les sédiments révèlent que les sédiments ont une provenance mafique (Armstrong-Altrin *et al.*, 2012, 2015). Les concentrations élevées en Cr ($Cr > 150$ ppm) et Ni ($Ni > 100$ ppm) indiquent que la roche source est ultramafique (Garver *et al.*, 1996). Les sables étudiés ont des faibles concentrations en Cr (35 – 96 ppm) et Ni (3 – 18 ppm). Ces résultats indiquent l'absence de roches ultramafiques dans l'environnement source.

Le rapport Th/U est très utilisé dans la détermination des caractéristiques comme l'altération et le recyclage des roches sédimentaires (Roddaz *et al.*, 2006). Dans les roches sédimentaires, les valeurs du rapport Th/U supérieures à 4 indiquent une altération intense dans l'environnement source ou des sédiments recyclés (Bhuiyan *et al.*, 2011). Les valeurs du rapport Th/U dans la plupart des roches de la croûte supérieure sont généralement comprises entre 3,5 et 4 (McLennan *et al.*, 1993). Les sables étudiés ont un rapport Th/U dont les valeurs sont comprises entre 1,69 et 10,00, soit une valeur moyenne de 5,40 ($n = 19$). Ce résultat suggère que les sables étudiés dérivent de roches qui se sont formées à partir du recyclage de la croûte supérieure (Bhuiyan *et al.*, 2011).

Le diagramme géochimique Th/Co vs. La/Sc (Cullers, 2002) qui permet de caractériser la composition géochimique de la roche source révèle que les sables étudiés

Tableau VI.29. Ratios élémentaires des sables étudiés comparés aux ratios des fractions similaires dérivées de roches felsiques et mafiques

| | Sables Sanaga ^a | Sources felsiques ^b | Sources mafiques ^b |
|-------|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| La/Sc | 2,29 – 15,73 | 2,50 – 16,3 | 0,43 – 0,86 |
| La/Co | 2,33 – 14,58 | 1,80 – 13,8 | 0,14 – 0,38 |
| Th/Sc | 1,00 – 12,43 | 0,84 – 20,5 | 0,05 – 0,22 |
| Cr/Th | 1,33 – 9,81 | Moy – 15 | 25 – 100 |

^aPrésente étude ; ^bCullers (2000) ; Armstrong-Altrin *et al.* (2004) ; Moy : moyenne

dérivent de roches sources siliciques (Fig. VI.31). Ce résultat est en accord avec les teneurs en SiO_2 élevées (72,88 – 87,24 %) des sédiments étudiés. Ce résultat corrobore celui de la figure VI.32 qui montre que les sables étudiés proviennent de roches sources felsiques. À l'exception du zircon dont la provenance est liée aux roches acides, les autres minéraux lourds sont liés aux roches métamorphiques : l'andalousite est un minéral caractéristique du métamorphisme de contact qui est présent dans le bassin versant de la Sanaga, notamment dans la série du Lom. L'épidote, l'anatase et les silicates alumineux sont généralement présents dans le groupe de Yaoundé. Ce groupe apparaît comme le fournisseur majeur des minéraux lourds et donc des sédiments issus des granitoïdes syn- à post-tectoniques (600 – 500 Ma), des orthogneiss pré- à syn-tectoniques (660 – 600 Ma) et des métasédiments d'âge Meso à Néoprotérozoïque (700 – 1000 Ma ; Tchakounté et *al.* 2017), qui affleurent le long du fleuve Sanaga (Tab. VI.30 ; Fig. VI.33).

Dans le détail, les teneurs en TiO_2 sont variables d'un site de prélèvement à un autre (Cf. Tab. IV.16). Elles sont élevées dans la zone A, probablement à cause de la nature granitique des roches. Ces valeurs restent élevées dans la zone B mais baissent légèrement dans la zone de confluence de confluence avec le Mbam. Cela serait probablement lié à la composition des roches volcaniques comme roches sources à partir de l'un des principaux affluents de la Sanaga, le Mbam, lui-même tributaire du Noun. Les teneurs en TiO_2 deviennent très faibles dans la zone D, probablement à cause de la morphologie de la région et de la nature des roches sources qui sont essentiellement sédimentaires et dont les données géochimiques n'ont pas pu être obtenues. TiO_2 est généralement abondant dans le rutile qui est un minéral lourd résistant à l'altération chimique. Le comportement de Fe_2O_3 est calqué sur celui de TiO_2 . Les fortes teneurs en Fe_2O_3 seraient dues aux fortes proportions en grenat et en d'autres minéraux ferromagnésiens. Dans les probables roches sources des différentes zones, Fe_2O_3 présente des teneurs élevées dans la zone A, teneurs qui diminuent très peu vers l'estuaire. La forte proportion de quartz, corrélable à la forte teneur en SiO_2 , montre qu'il subsisterait quelques minéraux aluminosilicatés dans les fractions sableuses du fleuve Sanaga. Ceci se matérialise par des fortes valeurs du ratio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Cf. Tab. IV.16).

Les fortes concentrations en Ba sont corrélables à la nature des roches sources dans la partie amont du bassin versant de la Sanaga. Le strontium dont les valeurs varient entre 56 et 252 ppm, pour une concentration moyenne de 187 ppm, se démarque également des autres LILE, dans le bassin versant. Ces concentrations élevées en Ba et Sr dans la zone A indiquent que les granitoïdes seraient probablement les roches sources les plus abondantes. Les teneurs

en HFSE sont élevées et variables. Parmi les HFSE, les teneurs en Zr sont très élevées (214 – 5330 ppm). Le zirconium possède une teneur moyenne de 1883 ppm dans le cours inférieur du bassin versant de la Sanaga. Ces fortes valeurs corroborent l'idée de la prédominance des roches sources d'origine granitique. L'hafnium apparaît aussi comme un élément à fortes teneurs, plus d'une dizaine de sites possèdent des concentrations en Hf, largement supérieures à la valeur maximale détectable par l'instrument d'analyse (29 ppm). Les concentrations en Th (7 – 68 ppm) et en Nb (18 – 106 ppm) sont élevées. Ces concentrations élevées en Zr – Hf – Th – Nb indiquent que certains affluents de la Sanaga arroseraient une zone à forte minéralisation en ces éléments traces. Les teneurs en éléments traces ferromagnésiens sont faibles et synonymes de l'absence ou de la faible influence des roches sources de nature basique ou ultrabasique.

VI.4. Influence de la composition minéralogique et géochimique des agrégats sur les valeurs de la résistance en compression uniaxiale des bétons

Les teneurs en alcalins ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) vs. SiO_2 classent les agrégats granitiques étudiés dans la série sub-alkaline (Irvine et Barragar, 1971). En calculant l'indice alcalin - chaux modifié (MALI: *Modified Alkali - Lime Index*) reflétant l'abondance de sodium et du potassium par rapport au calcium dans l'équation ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO} = 2,34 \%$; Frost et Frost, 2008 ; Frost *et al.*, 2001), les agrégats granitiques étudiés appartiennent à la série calcique. En utilisant l'indice Fe qui permet de distinguer les roches magnésiennes des roches ferrifères sur la base du fer total dans la roche selon la formule $Fe\text{-Index} = [(\text{Fe}_2\text{O}_3 / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})) = 0,038$; Frost et Frost, 2008 ; Frost *et al.*, 2001], les agrégats granitiques étudiés sont des roches magnésiennes. La discrimination géochimique basée sur l'indice de saturation en aluminium (ASI) [$\text{Al} / (\text{Ca} - 1,67\text{P} + \text{Na} + \text{K}) = 0,25$; Frost and Frost, 2008 ; Frost *et al.*, 2001 ; Zen, 1988], montre que ces agrégats granitiques sont métalumineux. Les agrégats basaltiques ont une affinité alcaline (Irvine et Barragar, 1971). La valeur de l'indice d'alcalinité [$((\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - (0,37 \times \text{SiO}_2 - 14,43)) = 2,24$; Pang *et al.*, 2012] et la somme des alcalins ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 4,85 \%$) sont élevées. La valeur élevée du rapport $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 2$ montre que ces agrégats basaltiques appartiennent à la série sodique (Middelmost, 1975). Les valeurs de résistance à la compression uniaxiale σ_{cBG} des bétons confectionnés à partir des granulats granitiques (BG) sont plus élevées que celles σ_{cBB} des bétons obtenus à partir des granulats

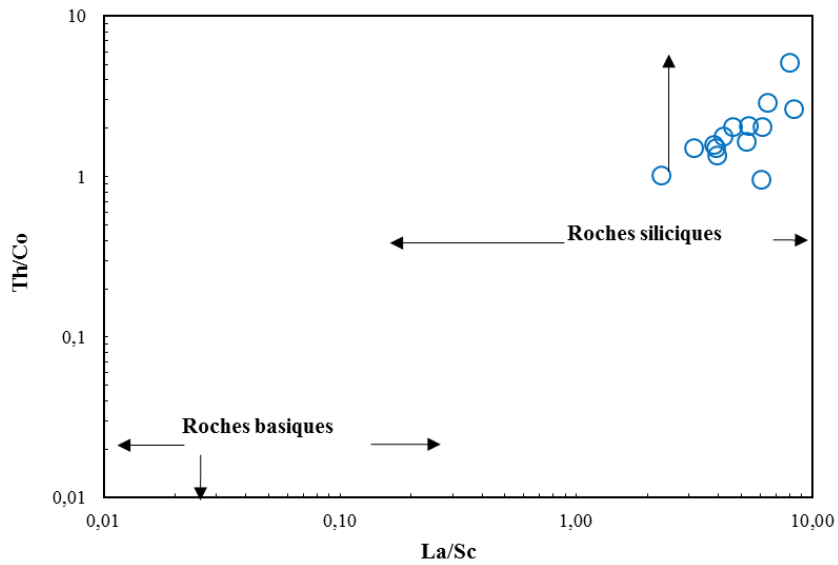


Figure VI.31. Position des sables étudiés dans le diagramme de caractérisation de la composition chimique de la roche source de Cullers (2002)

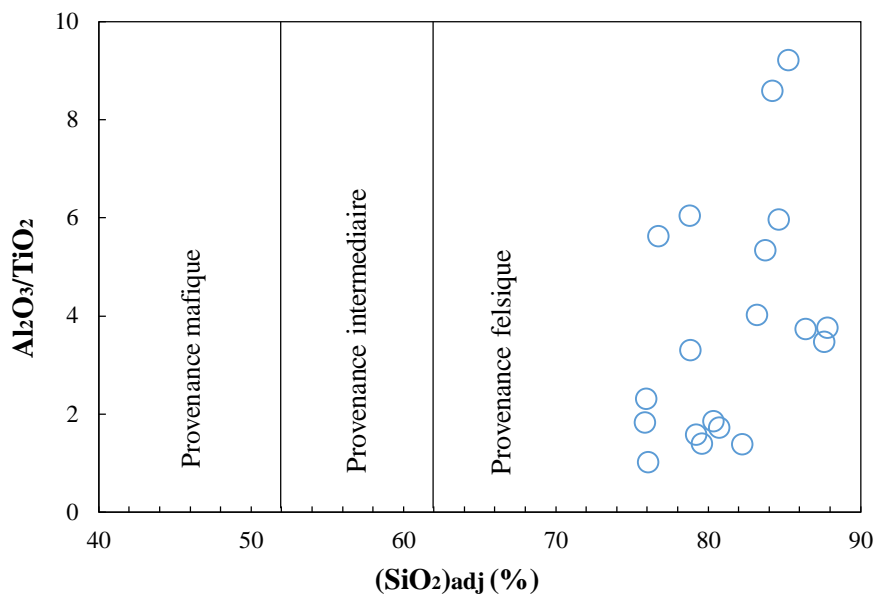


Figure VI.32. Position des sables étudiés dans le diagramme de provenance de Armstrong- Altrin (2009)

Tableau VI.30. Concentrations (ppm) représentatives en REE des roches sources probables des sédiments étudiés

| REE (ppm) | Roches sources possibles | | | | | | | |
|----------------------|--------------------------|---------|----------------|-----------------|-----------------|--------------------|------------------|--------------------|
| | Basalte | Granite | *GB (N = 6) | *GBM (N = 9) | *GBH (N = 9) | *Gneiss (N = 4) | Chlor (N = 5) | Micasch (N = 4) |
| La | 38,71 | 49,760 | 86,7 | 127,5 | 38,9 | 44,2 | 41,980 | 25,925 |
| Ce | 79,01 | 99,150 | 165,92 | 257,00 | 80,67 | 99,34 | 77,160 | 64,75 |
| Pr | 9,32 | 11,760 | 17,600 | 29,490 | 9,900 | 12,500 | 9,240 | 5,9475 |
| Nd | 38,58 | 41,870 | 59,71 | 99,02 | 38,96 | 52,60 | 35,660 | 22,425 |
| Sm | 7,98 | 6,840 | 10,620 | 13,850 | 7,240 | 9,920 | 7,060 | 4,825 |
| Eu | 2,62 | 0,910 | 0,9040 | 1,1100 | 1,9100 | 2,2407 | 1,510 | 1,28 |
| Gd | 7,70 | 4,920 | 7,910 | 6,610 | 5,520 | 7,449 | 6,650 | 5,7725 |
| Tb | 1,11 | 0,640 | 1,1670 | 0,7700 | 0,7560 | 0,9727 | 0,980 | 1,0725 |
| Dy | 6,26 | 2,740 | 6,530 | 3,150 | 4,050 | 5,204 | 5,950 | 7,23 |
| Ho | 1,14 | 0,450 | 1,2190 | 0,4500 | 0,7290 | 0,9377 | 1,170 | 1,435 |
| Er | 2,85 | 1,130 | 3,532 | 1,110 | 1,978 | 2,489 | 3,280 | 4,2 |
| Tm | 0,38 | 0,180 | 0,544 | 0,130 | 0,283 | 0,330 | 0,450 | 0,6475 |
| Yb | 2,31 | 0,980 | 3,645 | 0,760 | 1,846 | 2,119 | 2,850 | 4,0725 |
| Lu | 0,33 | 0,150 | 0,546 | 0,110 | 0,284 | 0,308 | 0,410 | 0,6225 |
| ∑REE | 198,30 | 221,48 | 366,59 | 541,06 | 193,00 | 240,61 | 194,35 | 150,20 |
| LREE/HREE | 7,98 | 18,79 | 13,57 | 40,25 | 11,37 | 11,03 | 7,93 | 4,99 |
| (La/Yb) _N | 11,40 | 34,49 | 16,17 | 113,97 | 14,30 | 14,17 | 10,01 | 4,32 |
| (La/Sm) _N | 3,03 | 4,54 | 5,10 | 5,75 | 3,35 | 2,78 | 3,71 | 3,36 |
| (Gd/Yb) _N | 2,70 | 4,06 | 1,76 | 7,04 | 2,42 | 2,84 | 1,08 | 1,15 |
| Eu/Eu* | 1,03 | 0,48 | 0,30 | 0,36 | 0,93 | 0,80 | 0,67 | 0,74 |

GB :
Gneiss

à biotite ; GBM : Gneiss à biotite et à muscovite ; GBH : Gneiss à biotite et à horblende ; Chlor : Chloitoschiste ; Micasch : Micaschiste. D'après les données de Onana *et al.* (2009), Nyeck *et al.* (2019) et Metang *et al.* (2022).

$$(La/Yb)_N = (La_{échan}/La_{chondrite})/(Yb_{échan}/Yb_{chondrite}) ; (La/Sm)_N = (La_{échan}/La_{chondrite})/(Sm_{échan}/Sm_{chondrite}) ;$$

$$(Gd/Yb)_N = (Gd_{échan}/Gd_{chondrite})/(Yb_{échan}/Yb_{chondrite}) ;$$

$$Eu/Eu^* = (Eu_{échan}/Eu_{chondrite})/(Sm_{échan}/Sm_{chondrite})^{1/2}(Gd_{échan}/Gd_{chondrite})^{1/2}$$

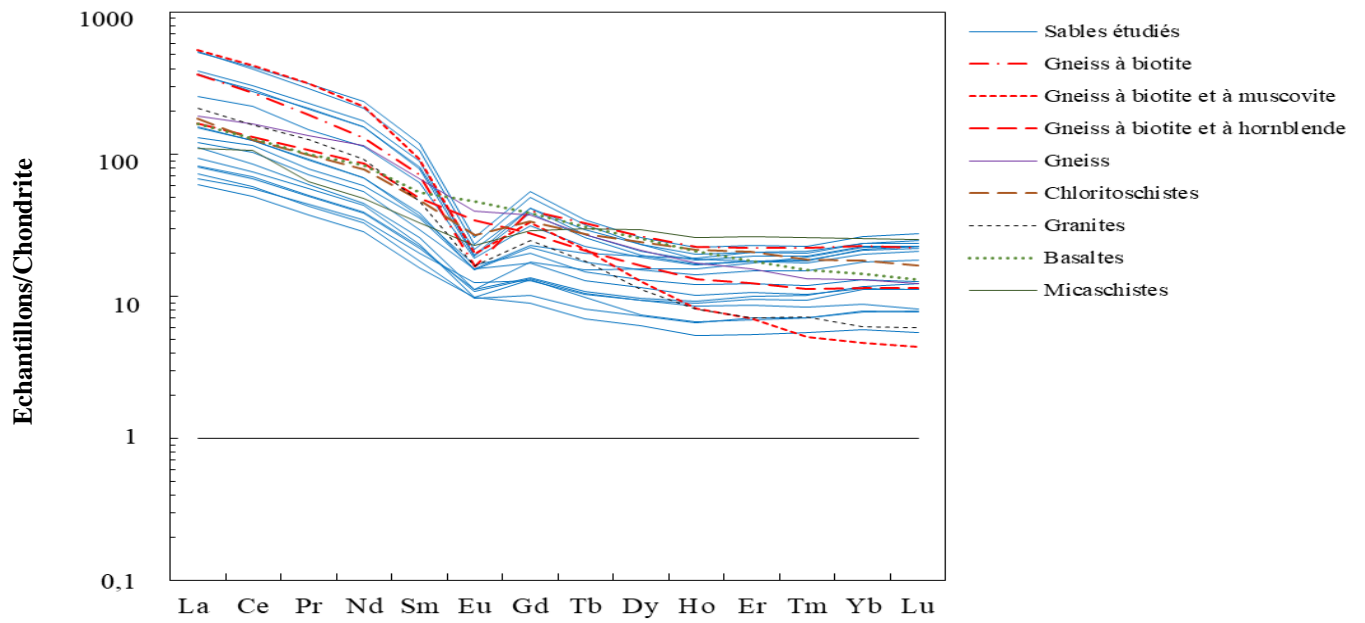


Figure VI.33. Comparaison des données de REE des sables étudiés normalisée à la chondrite avec celles des roches sources probables de l'environnement d'étude

basaltiques (BB), après 3 et 7 jours de cure. Ces valeurs de σ_c des bétons BG sont 32 % et 38 % plus élevées que celles des bétons BB à 3 et 7 jours, respectivement. A 28 jours de cure les éprouvettes de bétons BG et BB présentent des valeurs de σ_c comparables (Fig. VI.34 et VI.35) ; celles des bétons BG étant de 3 % plus élevées que celles des bétons BB. On distingue 4 types de granulats : les granulats courants, les granulats lourds, les granulats légers et les granulats très durs (Dreux, 1981 ; Dreux et Festa, 1998). Les granites et les basaltes étudiés appartiennent à la famille des granulats courants. La différence entre les deux types d'agrégats grossiers étudiés est que, les agrégats grossiers granitiques étudiés sont composés à 50 % de quartz, minéral de dureté 7, tandis que les agrégats grossiers basaltiques n'en possèdent pas. Les sables alluvionnaires de la Sanaga utilisés pour la confection des bétons BG et BB sont des matériaux quartzeux dont la teneur en quartz est de ~ 78 %. La teneur en quartz, granulat très dur, est donc plus élevée dans les éprouvettes de béton BG ($1,08 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$) que dans les éprouvettes BB ($0,54 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$), si l'on considère la proportion des agrégats fins et grossiers des bétons étudiés. Les valeurs de σ_{cBG} , à 3 et 7 jours, s'expliquent principalement par les teneurs élevées en quartz et donc de SiO_2 cristallisé dans la composition des agrégats (Nanga Bineli *et al.*, 2022). Subsidièrement à cette influence majeure de la minéralogie et de la chimie des agrégats, on pourrait évoquer la propreté superficielle élevée des agrégats granitiques (0,09 – 0,17) par rapport à celle des agrégats basaltiques (0,7 – 1,3), car pour les agrégats grossiers, il convient d'éviter la présence de la gangue argileuse ou de poussières qui risque de compromettre l'adhérence du mortier sur les graviers (Dreux, 1981). L'influence des minéraux tels que la biotite qui diminue la résistance à la compression uniaxiale des bétons (Tchapga *et al.*, 2020) est amoindri du fait de sa teneur relativement faible (~ 10 %) dans les éprouvettes de béton BG par rapport aux teneurs élevées en quartz, minéral dont la dureté est supérieure à celle de tous les autres minéraux rencontrés dans les bétons BB. A 28 jours de cure, les valeurs de σ_{cBG} (30,5 MPa) et σ_{cBB} (29,6 MPa) sont comparables. Ce phénomène s'explique par l'adhérence élevée du ciment sur les agrégats grossiers basaltiques plus anguleux, avec la l'augmentation du temps de cure ; les bétons BG ayant atteint leur résistance maximale. Ce phénomène est donc attribuable aux propriétés du ciment et n'est pas dépendant de la nature pétrographique des granulats étudiés (Nanga Bineli *et al.*, 2022).

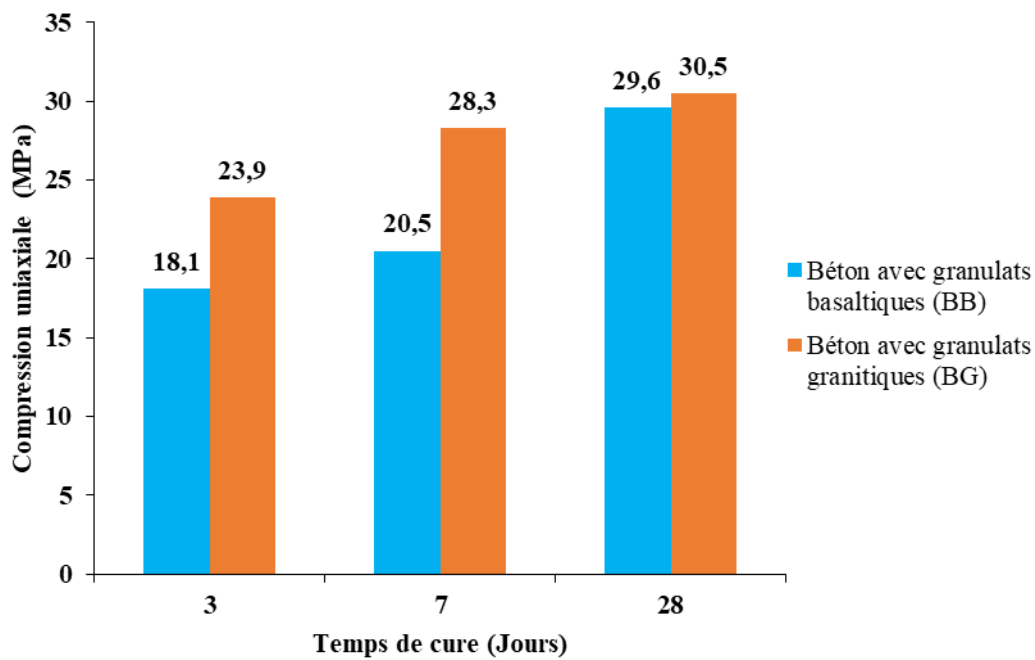


Figure VI.34. Diagramme comparatif d'évolution de la résistance en compression uniaxiale des bétons BB et BG en fonction du temps de cure

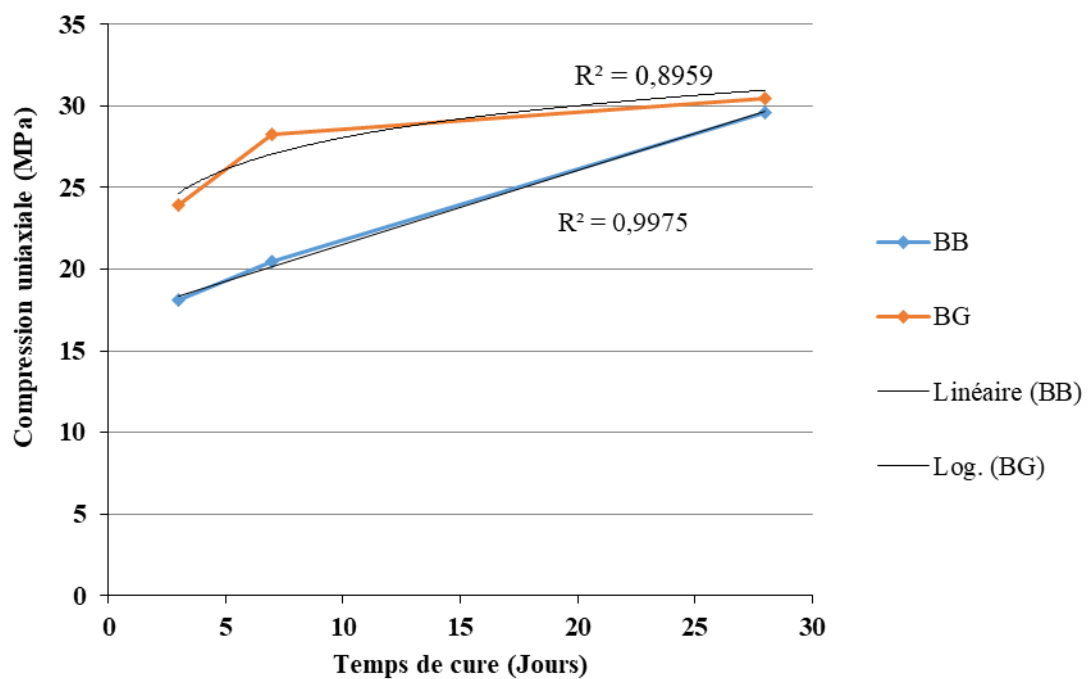


Figure VI.35. Evolution de la résistance en compression uniaxiale des bétons BB et BG en fonction du temps de cure

VI.5. Influence de la microtexture des granulats grossiers basaltiques et granitiques sur les valeurs de la résistance en compression uniaxiale des bétons

La texture d'une roche se définit comme le mode d'agencement des minéraux d'une roche entre eux à l'échelle de l'échantillon (macroscopique), de la lame mince (microscopique) ou même, à une échelle plus fine (Dercourt et Paquet, 1998). On distingue principalement 03 groupes de textures : holocristallines, hypocristallines et hyalines (Dercourt et Paquet, 1998). Les granulats granitiques utilisés possèdent une texture grenue donc, holocristalline, tandis que les granulats basaltiques ont une texture microlitique aphyrique donc, hypocristalline. Les minéraux constitutifs des granulats granitiques résultant du refroidissement lent du magma en profondeur sont bien cristallisés et visibles à l'œil nu. Par contre, ceux composant les granulats basaltiques ne sont identifiables qu'à l'aide d'un microscope optique. Les minéraux des granulats granitiques présentent donc des tailles plus grandes que ceux des granulats basaltiques. De plus, les minéraux dans les granulats granitiques sont engrenés, laissant très peu d'espaces entre eux tandis que dans les granulats basaltiques, les minéraux se présentent sous forme de baguettes allongées, certes jointives, mais laissant des espaces entre elles, ce qui contribue à diminuer la résistance à la compression uniaxiale aux sollicitations mécaniques. C'est la mésostase (45 %) constituée de microcristaux en baguettes mal cristallisés et de verre volcanique, peu poreuse, qui augmente donc les valeurs de σ_c des agrégats grossiers basaltiques et donc, du béton BB. La texture grenue des agrégats grossiers constitutifs des bétons BG, associée à la dureté des minéraux de quartz, majoritaires dans ces agrégats, sont à l'origine des valeurs de σ_c plus élevées par rapport à celles des bétons BB, entre 3 et 7 jours de cure. La valeur de σ_c des bétons BB (29,6 MPa) comparable à celle dans les bétons BG (30,5 MPa) après 28 jours de cure, est due à la forte adhérence du ciment sur les agrégats basaltiques anguleux, les bétons BG ayant atteint leur valeur maximale de résistance à la compression.

Au total, les différences de caractéristiques minéralogiques, géochimiques et texturales des granulats grossiers basaltiques et granitiques sont à l'origine de l'évolution différente des valeurs de σ_c dans les bétons BB et BG. En effet, les valeurs de σ_c du béton BG suivent une évolution logarithmique alors que celles du béton BB montrent une évolution linéaire (Fig. V.34 ; (Nanga Bineli *et al.*, 2022).

Conclusion

Les sables du lit de la Sanaga entre Nanga Eboko et l'Océan Atlantique sont majoritairement à grains grossiers composés de quartz, microcline, plagioclases, muscovite, ilménite, anatase, magnétite, minéraux opaques et épidote. Ces sables sont principalement des

litharénites moyennement altérés, d'âge Néoprotérozoïque (1000 – 500 Ma) provenant de granitoïdes, d'orthogneiss et de métasédiments. L'enrichissement de ces sables de la Sanaga en REE et les fortes anomalies en Eu observées seraient liés aux fortes teneurs en anatase, ilménite et zircon. Les valeurs de résistance à la compression uniaxiale sont plus élevées dans les bétons confectionnés à partir des granulats granitiques BG que dans les bétons obtenus à partir des granulats basaltiques BB, après 3 et 7 jours de cure. Les valeurs optimales de résistance à la compression uniaxiale sont atteintes après 7 jours de cure pour les bétons BG et, après 28 jours, pour les bétons BB.

CONCLUSION GÉNÉRALE
ET PERSPECTIVES

Le présent travail a pour objectif principal de caractériser les sables du cours inférieur de la Sanaga sur le plan pétrologique et d'évaluer leurs aptitudes géotechniques dans la confection des bétons hydrauliques obtenus à partir des granulats grossiers basaltiques et des granulats grossiers granitiques. La zone d'étude est située dans le bassin versant de la Sanaga. Elle s'étend entre Nanga - Eboko et l'Océan Atlantique. Elle appartient à une zone climatique de transition. Près des 2/3 du bassin versant sont constitués d'une végétation qui passe de la savane arbustive au Nord, à la forêt dense humide au Sud. Le relief dans le bassin de la Sanaga est fortement accidenté. Ce relief présente une diminution graduelle d'altitudes d'amont en aval. Le principal et le plus important fleuve de ce bassin est la Sanaga. Le bassin de la Sanaga est occupé en presque totalité par les formations précambriennes recouvertes par endroits de formations de couverture qui sont d'assez faible étendue et qui datent au plus du Crétacé. Le fleuve Sanaga qui draine près du quart des ressources en eau du Cameroun, est l'objet d'une intense activité d'extraction de sables. La méthodologie a consisté aux enquêtes bibliographiques, en l'acquisition des données de terrain et des données de laboratoire et, en l'exploitation des données analytiques. Deux types de formulation de bétons hydrauliques conventionnels ont été étudiés : les bétons à base des sables de la Sanaga et des granulats granitiques (BG) et ceux à base des sables de la Sanaga et des granulats basaltiques (BB), selon la méthode Dreux-Gorisse. Pour chaque type de béton, le rapport multiparamétrique eau/ciment a été maintenu constant et égal à $\sim 0,52$. Au plan pétrologique, les résultats obtenus montrent que les sables étudiés sont majoritairement à grains grossiers composés de quartz, microcline, plagioclases, muscovite, ilménite, anatase, magnétite, minéraux opaques et épidote. Ces sables moyennement altérés, d'âge Néoprotérozoïque (1000 – 700 Ma) provenant de granitoïdes et d'orthogneiss. L'enrichissement de ces sables de la Sanaga en REE et les fortes anomalies en Eu observées seraient liés aux fortes teneurs en anatase, ilménite et zircon. Au plan géotechnique, les valeurs optimales de résistance à la compression uniaxiale sont atteintes après 7 jours de cure pour les bétons BG (28,9 MPa) et après 28 jours pour les bétons BB (29,6 MPa). La zone de transition entre la pâte de ciment et le granulats grossier permet une prise plus rapide du mortier dans les bétons BG dans lesquels le granulats grossier a une texture grenue. Les valeurs de résistance à la compression uniaxiale du béton sont liées à la nature géologique des granulats et suivent une évolution logarithmique pour les granulats plutoniques acides et linéaire pour les granulats volcaniques basiques. D'après cette étude expérimentale sur la formulation des bétons à partir des sables acides du cours inférieur de la Sanaga, les bétons formulés à partir des granulats grossiers acides à texture grenue montrent

de meilleures performances à des temps de cure courts (7 jours) par rapport à ceux obtenus à partir des granulats grossiers basiques à texture microlitique.

En guise de perspectives, il serait judicieux de (1) caractériser les sables du cours supérieur de la Sanaga sur les plans pétrologique et géotechnique, (2) dater ces matériaux alluvionnaires afin de confirmer le contexte de mise en place de leurs roches sources, (3) réaliser plusieurs types de formulation des bétons avec ces sables en faisant varier les types pétrographiques, et (4) réaliser une étude visant à améliorer les propriétés géotechniques des sols argilo-sableux dans cette zone, en vue de leur utilisation efficiente en construction routière, vu la rareté des graveleux latéritiques en zone côtière où d'abondantes quantités de sable sont observées, (5) réaliser une étude sur l'alcali -réaction.

RÉFÉRENCES

- Abdullahi M, 2012. Effect of aggregates type on compressive strength of concrete. *International Journal of Civil and Structural Engineering* 2(3), 791–800
- Achoundong G, 2006. Végétation du Cameroun. In: Yahmed, D.B. (Ed.): *Atlas du Cameroun*. Les Editions Jeune Afrique, Paris, pp. 64–65
- Ademila O, 2019. Engineering geological evaluation of some rocks from Akure, Southwestern Nigeria as aggregates for concrete and pavement construction. *Geology, Geophysics and Environment* 45(1), 31–43
- AFNOR, 1990. NF P18 – 591 : Granulats - Détermination de la propreté superficielle. 0335–3931
- AFNOR, 1991. NF P94 – 054 : Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau. Association Française de Normalisation, Paris
- AFNOR, 1996. French Standard EN 933–2: Tests to determine the geometrical characteristics of aggregates. Part 2: Determination of granularity - test sieves, nominal dimensions of openings
- AFNOR, 1998. French Standard EN 1097 – 3: Tests for determining the mechanical and physical characteristics of aggregates. Part 3: Determination of Apparent Density
- AFNOR, 1999. French Standard EN 933 – 8: Tests for determining the geometric characteristics of aggregates. Part 8: Evaluation of fine - sand equivalent
- AFNOR, 2001. French Standard EN 1097 – 6: Tests to determine the mechanical and physical characteristics of aggregates. Part 6: Determination of the real density and the water absorption coefficient
- AFNOR, 2003. European Standard NF EN 12390 – 3: Test for hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens
- AFNOR, 2011. NF EN 1097 – 1: Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 1: Determination of the resistance to wear (Micro-Deval), Category: 91.100.15
- AFNOR, 2020. NF EN 1097 – 2: Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 2: Determination of resistance to fragmentation (Los Angeles)
- Afolagboye LO, Talabi AO, Akinola OO, 2016. Evaluation of selected basement complex rocks from Ado-Ekiti, SW Nigeria, as source of road construction aggregates. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 75(2), 853–865
- Ahmad S, Alghamdi AS, 2012. A study on effect of coarse aggregate type on concrete performance. *Arabian Journal for Science and Engineering* (37), 1777–1786

- Aitcin PC, Mehta PK, 1990. Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high strength concrete. *American Concrete Institute Materials Journal* 87(2), 103–7
- Ajamu SO, Ige JA, 2015. Effect of coarse aggregate size on the compressive strength and the flexural strength of concrete beam. *International Journal of Engineering Research and Applications* 5(4), 2248–9622
- Altan Y, 2022. Engineering properties of basalt aggregates in terms of use in granular layers of flexible pavements. *Case Studies in Construction Materials* 17, e01182
- Anaya-Gregorio A, Armstrong-Altrin JS, Machain-Castillo ML, Montiel-Garcia PC, Ramos Vazquez MA, 2018. Textural and geochemical characteristics of late Pleistocene to Holocene fine-grained deep-sea sediment cores (GM6 and GM7), recovered from southwestern Gulf of Mexico. *Journal of Palaeogeography* 7(3), 253–271
- Anonyme, 2015. Sediment transport and morphology of Sanaga River (Cameroon) close to Nachtigal dam site. 4 p
- Anonyme, 2019. Rapport d'études du Laboratoire National de Génie civil du Cameroun. 150 p.
- Armstrong-Altrin JS, 2009. Provenance of sands from Cazonas, Acapulco, and Bahía Kino beaches. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 26(3), 764–782
- Armstrong-Altrin JS, Botello AV, Villanueva SF, Soto LA, 2019. Geochemistry of surface sediments from the northwestern Gulf of Mexico: implications for provenance and heavy metal contamination. *Geological Quarterly* 63(3), 000–000. [https://doi: 10.7306/gq.1484](https://doi.org/10.7306/gq.1484)
- Armstrong-Altrin JS, Lee YI, Kasper-Zubillaga JJ, Trejo-Ramírez E, 2017. Mineralogy and geochemistry of sands along the Manzanillo and El Carrizal beach areas, southern Mexico: implications for palaeoweathering, provenance, and tectonic setting. *Geological Journal* 52(4), 559–582
- Armstrong-Altrin JS, Lee YI, Verma SP, Ramasamy S, 2004. Geochemistry of sandstones from the upper Miocene Kudankulam Formation Southern India: implications for provenance, weathering and tectonic setting. *Journal of Sedimentary Research* 74, 285–297
- Armstrong-Altrin JS, Ramasamy N, Balaram V, Olmedo NP, 2015. Petrography and geochemistry of sands from the Chachalacas and Veracruz beach areas, western Gulf of Mexico. Constraints on provenance and tectonic setting. *Journal of South American Earth Sciences* 64, 199–216

- Armstrong-Altrin JS, Ramos-Vázquez MA, Zavala-León AC, Montiel-García PC, 2018. Provenance discrimination between Atasta and Alvarado beach sands, western Gulf of Mexico, Mexico: constraints from detrital zircon chemistry and U-Pb geochronology. *Geology Journal* 53, 2824–2848
- Armstrong-Altrin JS, Yong II, Kasper-Zubillaga JJ, Carranza-Edwards A, Garcia D, Eby GN, Balram V, Cruz-Ortiz NL, 2012. Geochemistry of beach sands along the western Gulf of Mexico, Mexico: Implication for provenance. *Chemie der Erde-Geochemistry* 72, 345–362
- Asiedu DK, Suzuki SM, Hanson GN, 2000. Geochemistry of lower cretaceous sediments, inner zone of southwest Japan: Constraints on provenance and tectonic environment. *Journal of Geochemistry* 34, 155–173
- Askentov KI, Sattarova VV, 2016. Geochemistry of rare earth elements in the modern sediments of Amur Bay (the Japan/East Sea). *Russian Geology and Geophysics* 57, 1040–1047
- ASTM, 2000. Standard D2487 - Standard practice for classification of soils for engineering purposes. ASTM international, West Conshohocken, PA
- Atici U, Comakli R, 2019. Evaluation of the physico-mechanical properties of plutonic rocks based on texture coefficient. *Journal-South African Institute of Mining and Metallurgy* 119(1), 63–69
- Baalbaki W, Benmokrane B, Challal O, Aitcin PC, 1991. Influence of coarse aggregate on elastic properties of high performance concrete. *ACI Materials Journal* 88(5), 499–503
- Babechuk MG, Widdowson M, Kamber BS, 2014. Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India. *Chemical Geology* 363, 56–75
- Bah MLM, Hiroaki I, 2016. Geochemical classification and determination of maturity source weathering in beach sands of Eastern San in Coast, Tango Peninsula and Wakasa Bay, Japan. *Earth Science Research* 5, 542–550
- Baron J, Olivier J, 1996. La durabilité des bétons, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 458 p.
- Bédard P, 2014. Clef d'identification visuelle des grains de sable version 1.0. 11 p.
- Beshr H, Almusallam AA, Maslehuddin M, 2003. Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials* 17(2), 97–103

- Bhaskar JS, Satya RG, Borthakur R, Indu BR, Rashmi RB, 2015. Spectroscopic characterization and quantitative estimation of natural weathering of silicates in sediments of Dikrong River. India. *Journal of Modern Physics* 6, 1631–1641
- Bhuiyan MAH, Rahman MJJ, Dampare SB, Suzuki S, 2011. Provenance, tectonics and source weathering of modern fluvial sediments of the Brahmaputra - Jamuna River, Bangladesh: Inference from geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration* 111, 113–137
- Bloemsma MR, Zabel M, Stuut JBW, Tjallingii R, Collins JA, Weltje GJ, 2012. Modelling the joint variability of grain size and chemical composition in sediments. *Sedimentary Geology* 280, 135–148
- Brindley GW, Brown G, 1980. Crystal structures of clay minerals and their X - ray identification. Mineralogical Society London. 495 p.
- Carranza-Edwards A, Centeno-García E, Rosales-Hoz L, Cruz RL-S, 2001. Provenance of beach gray sands from western Mexico. *Journal of South American Earth Sciences* 14, 291–305
- Celauro C, Praticò FG, 2018. Asphalt mixtures modified with basalt fibers for surface courses. *Construction and Building Materials* 170, 245–253
- Chevalier Ph, Schrieck VDJC, 2011. Le sable naturel en région Wallonne : impact socio-économique de l'extraction en Brabant Wallon. 45 p.
- Cullers RL, 2000. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian - Permian age, Colorado, USA: Implications for provenance and metamorphic studies. *Lithos* 51, 18–1203
- Cullers RL, 2002. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chemical Geology* 191, 305–327
- Cullers RL, Berendsen P, 1998. The provenance and chemical variation of sandstones associated with the midcontinent rift system, USA. *European Journal of Mineralogy* 10, 987–1002
- Cullers RL, Stone J, 1991. Chemical and mineralogical comparison of the Pennsylvanian Fountain Formation, Colorado, USA an uplifted continental block to sedimentary rocks from other tectonic environments. *Lithos* 27, 115–131
- Dercourt J, Paquet J, 1998. Géologie : objets et méthodes. Edition Dunod 10, 457 p.

- Descourvieres C, Grant D, Leyland L, Hartog N, Henning P, 2011. Geochemical reconstruction of the provenance, weathering and deposition of detrital dominated sediments in the Perth basin: The cretaceous Leedewille formation, south - west Australia. *Sedimentary Geology* 236, 62–76
- Dhia MHB, 1998. Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées* 213, 33–42
- Diamantis K, Fereidooni D, Khajevand R, Migiros G, 2021. Effect of textural characteristics on engineering properties of some sedimentary rocks. *Journal of Central South University* 28, 926–938
- Dreux G, 1981. Nouveau guide du béton. Edition Eryolles 3, 311 p.
- Dreux G, Festa J, 1998. Nouveau guide du béton et de ses constituants. Eyrolles Ed. 8, 409 p.
- Dumont, JF, 1986. Identification par télédétection de la faille de la Sanaga (Cameroun). *Géodynamique*, 19 p.
- Duna LL, Nguimeya NGA, Tchamba AB, Ndigui B, Kamseu E, Qoku E, ·Alomayri TS, Bier TA, 2021. Engineering and mineralogical properties of Portland cement used for building and road construction in Cameroon. *International Journal of Pavement Research and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00055-9>
- Duplaix S, 1958. Détermination microscopique des minéraux des sables, 2^{ème} édition révisée, Librairie Polytechnique ch. Beranger, Paris et Liège
- Dzana JG, Ndam Ngoupayou JR, Tchawa P, 2010. The Sanaga discharge at the Edea catchment outlet (Cameroon): an example of hydrologic responses of a tropical rained river system to changes in precipitation and groundwater inputs and to flow regulation. *River Research Apply* 3, 100
- EDC, 2011. Electricity Development Cameroon - Etude d'impact environnemental cumulatif du projet hydroélectrique de Lom - Pangar. République du Cameroun, 312 p.
- Ekodeck GE, Kamgang KBV, 2002. L'altérologie normative et ses applications : Une expression particulière de la pétrologie des roches aluminosilicatées du point de vue de leur évolution supergène. Press Univ. Yaoundé, Collect. Connaissances, 202 p.
- Elices M, Rocco CG, 2008. Effect of aggregate size on the fracture and mechanical properties of a simple concrete. *Engineering Fracture Mechanics* 75(13), 3839–3851
- Engidasew AT, Barbieri G, 2014. Geo-engineering evaluation of Termaber basalt rock mass for crushed stone aggregate and building stone from Central Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences* 99(2), 581–594

- Etemad-Saeed N, Hosseini-Barzi M, Adabi MH, Sadeghi A, Houshmandzadeh A, 2015. Provenance of Neoproterozoic sedimentary basement of northern Iran, Kahar Formation. *Journal of African Earth Sciences* 111, 54–75
- Eynde Ph V, 1983. Caractéristiques géologiques et mécaniques des granulats. 125 p.
- Fedo CM, Nesbitt HW, Young GM, 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary soils and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology* 23, 921–24
- Fereidooni D, 2022. Importance of the mineralogical and textural characteristics in the mechanical properties of rocks. *Arabian Journal of Geosciences* 15, 637.
- Frost BR, Barnes CG, Collins WJ, Arculus RJ, Ellis DJ, Frost CD, 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology* 42, 2033–2048
- Frost BR, Frost CD, 2008. A geochemical classification for feldspathic igneous rocks. *Journal of Petrology* 49, 1955–1969
- Garver JI, Royce PR, Smick TA, 1996. Chromium and nickel in shale of the Taconic Foreland: a case study for the provenance of fine-grained sediments with an ultramafic source. *Journal of Sedimentary Research* 66, 100–106
- Garzanti E, Andò S, France-Lanord C, Galy V, Censi P, Vignola P, 2011. Mineralogical and chemical variability of fluvial sediments 2. Suspended-load silt (Ganga-Brahmaputra, Bangladesh). *Earth and Planetary Science Letters* 302, 107–120
- Garzanti E, Andò S, Vezzoli G, Lustrino M, Boni M, Vermeesch P, 2012. Petrology of the Namib Delta. *Earth Science Reviews* 11, 173–189
- Garzanti E, Padoan M, Setti M, López-Galindo A, Villa IM, 2014. Provenance versus weathering control on the composition of tropical river mud (Southern Africa).
- Garzanti E, Resentini A, 2016. Provenance control on chemical indices of weathering (Taiwan river sands). *Sedimentary Geology* 336, 81–95 *Chemical Geology* 366, 61–74
- Garzanti E, Vezzoli G, Andò S, Paparella P, Clift PD, 2005. Petrology of Indus River sands: a key to interpret erosion history of the Western Himalayan Syntaxis. *Earth and Planetary Science Letters* 229, 287–302
- Giaccio G, Rocco C, Violini D, Zappitelli J, Zerbino R, 1992. HSC incorporating different coarse aggregates. *America Concrete Institute Materials Journal* 89(3), 242–6
- Gökalp I, Emre Uz V, Saltan M, 2016. Testing the abrasion resistance of aggregates including by-products by using Micro Deval apparatus with different standard test methods. *Construction and Building Materials* 123, 1–7

- Guo Y, Yang S, Su N, Li C, Yin P, Wang Z, 2018. Revisiting the effects of 28 hydrodynamic sorting and sedimentary recycling on chemical weathering indices. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 227, 48–63
- Hemmati A, Ghafoori M, Moomivand H, Lashkaripour GR, 2020. The 19 effect of mineralogy and textural characteristics on the strength of crystalline igneous rocks using image-based textural quantification. *Engineering Geology* 266, 105467
- Huifei T, Qingchen W, Xiaofa Y, Lin Jiang, 2013. Provenance and tectonic setting of Late Carboniferous clastic rocks in West Junggar, Xinjiang, China. A case from the Hala-alat Mountains. *Journal of Asian Earth Sciences* 64, 210–222
- Irvine TN, Baragar WRA, 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8, 523–548
- Kamani M, Ajalloeian R, 2019. Evaluation of engineering properties of some carbonate rocks through corrected texture coefficient. *Geotechnical and Geological Engineering* 37(2), 599–614
- Kamani M, Ajalloeian R, 2020. Investigation of the changes in aggregate morphology during different aggregate abrasion/degradation tests using image analysis. *Construction and Building Materials* 314, 125614
- Kankeu B, Greiling RO, Nzenti JP, Ganno S, Danguene PYE, Bassahak J, Hell JV, 2017. Contrasting Pan-African structural styles at the NW margin of the Congo shield in Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 146, 28–47
- Kılıc A, Atis CD, Teymen A, Karahan O, Zcan FO, Bilim C, Zdemir MO, 2008. The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. *Cement & Concrete Composites* 30, 290–296
- Korkanc M, Tugrul A, 2004. Evaluation of selected basalts from Nigde, Turkey, as source of concrete aggregate. *Engineering Geology* 75, 291–307
- Kpoumié A, Ndam Ngoupayou JR, Rusu E, Sfica L, Ichim P, Ekodeck, GE, 2012. Spatio-temporal evolution of rainfall regimes in the Sanaga basin-Cameroon in a deficit context. *Present Environment and Sustainable Development Journal* 6(2), 55–68
- Lanchon R., 1983. Cours de laboratoire de laboratoire : granulats, bétons, sols. Desforge Ed. 135 p.
- Larrard F, Belloc A, 1992. Are small aggregates really better for making high-strength concrete? *Cement Concrete Aggregates* 14(1), 62–6
- LCPC, 1994. Conception et dimensionnement des chaussées - Guide technique

- Lefeu B, Francy O, 1999. Module de finesse d'un sable - Fiche technique de CERIB 10 p.
- Letouzey R, 1986. Etude phytogéographique du Cameroun. Ed. Lechevalier, Paris, 280 p.
- Liu CQ, Masuda A, Okada A, Yabuki S, Zhang J, Fan ZL, 1993. A geochemical study of loess and desert sand in northern China: Implications for continental crust weathering and composition. *Chemical Geology* 106, 359–374
- Madhavaraju J, 2015. Geochemistry of late Cretaceous sedimentary rocks of the Cauvery Basin, south India: constraints on paleoweathering, provenance, and end Cretaceous environments. *Chemostratigraphy* 185–214
- Madhavaraju J, Saucedo-Samaniego JC, Loser H, Espinoza-Maldonado IG, Solari L, Monreal R, Grijalva-Noriega FJ, Jaques-Ayala C, 2018. Detrital zircon record of Mesozoic volcanic arcs in the Lower Cretaceous Mural Limestone, North western Mexico. *Geology Journal* 1–25
- Maharana C, Srivastava D, Tripathi JK, 2018. Geochemistry of sediments of the Peninsular rivers of the Ganga basin and its implication to weathering, sedimentary processes and provenance. *Chemical Geology* 483, 1–20
- Mbale NE, Sababa E, Bayiga C, Ekoa BZA, Ndjigui PD, 2019. Mineralogical and geochemical characterization of the unconsolidated sands from the Mefou River terrace Yaoundé area, Southern Cameroun. *Journal of African Earth Sciences* 159, 1–14
- Mbola-Ndzana S P, Mvondo-Ondoa J, Owona S, Sep-Nlongang JP, Olinga JB, Bilong P, 2013. Evidence of the ~NE-SW extension in the Sa'a - Monatélé Region as in the Bafia and Yaoundé groups within the Central African Fold belt (Cameroon): Implication for the southern Cameroon Neoproterozoic extension. *Sciences, Technologies and Developpement Journal* 15, 10–23
- McDonough WF, Sun S-S, 1995. Composition of the earth. *Chemical Geology* 120, 223–253
- McLennan SM, Hemming SR, McDaniel DK, Hanson GN, 1993. Geochemical approaches to sedimentation provenance, and tectonics. *Geological Society of America* 284, 21–40
- Mehta PK, 1986. Concrete: structure, properties and materials. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 36–40
- Metang V, Tassongwa B, Ngo Belnoun R, Kenzo HA, Tawo Toussi M, Nkamga DM Mbakam, Tene Kengne LG, Tchop LJ, Mouafo L, Tchouankoue JP, 2022. Petrography and geochemistry of metasedimentary rocks from the southwestern portion of the Yaoundé Group in Cameroon: provenance and tectonic implications. *Advances in Materials* (11)5, 232–249

- Middlemost E, 1975. The basalt clan. *Earth-Science Reviews* 11, 337–564
- Mohajerani A, Thach Nguyen B, Tanriverdi Y, Chandrawanka K, 2017. A new practical method for determining the LA abrasion value for aggregates. *Soils and Foundations* 57, 840–848
- Mondal MEA, Wani H, Bulbul M, 2012. Geochemical signature of provenance, tectonics and chemical weathering in the Quaternary flood plain sediments of the Hindon River, Gangetic plain, India. *Tectonophysics* 67, 87–94
- Moussango IAP, Mvondo Owono F, Njom BSP, Mbog Bassong JP, Sep Nlomngan, Owona S, Ekodeck GE, 2018. Sanaga Fault: Evidence of neotectonics and landscape evolution in Edéa Region (Cameroon, Centre - Africa). *Journal of Geography and Geology* 10(3), 57–79. <http://dx.doi.org/10.5539/jgg.v10n3p57>
- Munsell Color, 2000. Charts. Macbeth Division of Kollmorge Corporation, 2441 North Calvert Street Baltimore, Maryland, 21218
- Nagarajan R, Armstrong-Altrin JS, Kessler FL, Jong J, 2017. Petrological and geochemical constraints on provenance, paleo-weathering and tectonic setting of clastic sediments from the Neogene Lambir and Sibuti Formations, northwest Borneo. In: Mazumder, R. (Ed.), *Sediment Provenance*. Elsevier Amsterdam Netherlands, Chapter 7, 123–153
- Nagarajan R, Madhavaraju J, Nagendra R, Armstrong-Altrin JS, Moutte J, 2007. Geochemistry of Neoproterozoic shales of the Rabanpalli Formation, Bhima Basin, Northern Karnataka, southern India: Implications for provenance and paleoredox conditions. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 24(2), 150–160
- Nanga Bineli MT, Ndzié Mvindi AT, Ndome Effoudou-Priso E, Bikoy YR, Nyassa Ohandja H, Onana VL, Ekodeck GE, 2022. Mineralogy, geochemistry and physic-mechanical characterization of basalts, granites, and sands from Sanaga River (Cameroon): Potential use as construction materials. *Arabian Journal of Geosciences*. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10589-2>
- Nanga Bineli MT, Onana VL, Noa Tang SD, Bikoy YR, Ekodeck GE, 2020. Mineralogy and geochemistry of sands of the lower course of the Sanaga River, Cameroon: implications for weathering, provenance, and tectonic setting. *Acta Geochimica*. <https://doi.org/10.1007/s11631-020-00437-z>
- Ndema-Mbongue, JL, Ngnotue T, Ngo-Nlend CD, Nzenti JP, Cheo-Suh E, 2014. Origin and evolution of the formation of the Cameroon Nyong Series in the western border of the Congo Craton. *Journal of Geosciences and Geomatics* 2(2), 62–75

- Ndjigui PD, Bayiga EC, Onana VL, Djenabou-Fadil S, Ngonon GSA, 2019. Mineralogy and geochemistry of recent alluvial sediments from the Ngaye River water shed, northern Cameroon: implications for the surface processes and Au-PGE distribution. *Journal of African Earth Sciences* 150, 136–157
- Ndjigui PD, Beauvais A, Fadil-Djenabou S, Ambrosi JP, 2014. Origin and evolution of Ngaye River alluvial sediments, Northern Cameroon: geochemical constraints. *Journal of African Earth Sciences* 100, 164–178
- Ndjigui PD, Ebah Abeng SA, Ekomane E, Nzeukou NA, Ngo Mandeng FS, Lindjeck MM, 2015. Mineralogy and geochemistry of pseudogley soils and recent alluvial clastic sediments in the Ngog-Lituba region, Southern Cameroon: an implication to their genesis. *Journal of African Earth Sciences* 108, 1–14
- Ndjigui PD, Onana VL, Sababa E, Bayiga EC, 2018. Mineralogy and geochemistry of the Lokoundje alluvial clays from the Kribi deposits, Cameroonian Atlantic coast: Implications for their origin and depositional environment. *Journal of African Earth Sciences* 143, 102–117
- Ndome EPE, Onana VL, Boubakar L, Kamgang KBV, Ekodeck GE, 2014. Relationships between major and trace elements during weathering processes in a sedimentary context: Implications for the nature of source rocks in Douala, Littoral Cameroon. *Chemie der Erder-Geochemistry* 74, 765–781
- Ndougasa-Mbarga T, Gouet DH, Bisso V, Meying A, Manguelle-Dicoum E, 2012. Imaging the subsurface in the Cameroon centre region using the audio-magnetotellurics (AMT) soundings for the monitoring of the Monatele-Sa'a Earthquake Area. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering* 3(4), 107–123
- Nesbitt HW, Young GM, 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299, 715–717
- Newman J, Ban SC, 2003. Advanced concrete technology, constituent materials. Burlington: Elsevier
- Ngako V, 2006. Carte de Géologie, ressources minières. In: Yahmed, D.B. (Ed.): Atlas du Cameroun. Jeun Afrique, Ed Paris, 60–61
- Ngako V, Makitie H, Couëffé R, Baptiste J, Bernard J, Cagnard F, Duron J, Houketchang B M, Itiga Z, Martelet G, Moussango IPA, Prognon F, Sep Nlomngan JP, Tchokona Seuwei D, Vic G, Wongolo Djombol MH, 2019. Carte géologique du Cameroun au 1/200 000

- Feuille Bertoua (NB-33-II). Notice explicative, 89. 1^{ère} édition. Ministère des Mines, de l'Industrie et du Développement technologique du Cameroun, Yaoundé.
- Ngon Ngon GF, 2007. Étude morphologique, minéralogique, géochimique et Cristallographique des argiles latéritiques et des argiles hydromorphes de la région de Yaoundé en zone tropicale humide. Essai industriel et évaluation de leur potentialité comme matériaux de construction. Thèse Doctorat/PhD. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I. 200 p.
- Ngueutchoua G, Ekoa BAZ, Eyong TJ, Demanou DZ, Baba DH, Tchami NF, 2019. Geochemistry of cretaceous fine-grained siliciclastic rocks from Upper Mundeck and Logbadjeck Formations, Douala sub-basin, SW Cameroon: Implications for weathering intensity, provenance, paleoclimate, redox condition, and tectonic setting. *Journal of African Earth Sciences* 152, 215–236
- Njonfang E, Moreau C, Tchoua F M, 1998. La bande mylonitique Foumban-Bankim, Ouest-Cameroun. Une zone de cisaillement haute température. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 327, 735–741
- Noa Tang SD, Ntsama Atangana J, Onana VL, 2020. Mineralogy and geochemistry of alluvial sediments from the Kadey plain, eastern Cameroon: Implications for provenance, weathering, and tectonic setting. *Journal of African Earth Sciences* 163.103763. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103763>
- Nyeck B, Ngimbaus RV, Ndjigui PD, 2019. Petrology of saprolite developed on gneisses in the Matomb region, South Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 150, 107–122
- Nzeukou NA, Fagel N, Njoya A, Beyala Kamgang V, Eko Medjo R, Melo Chinje U, 2013. Mineralogy and physico-chemical properties of alluvial clays from Sanaga valley (Center Cameroon): suitability for ceramic application. *Applied Clay Science* 83–84, 238–243
- Olivry JC, 1986. Fleuves et rivières du Cameroun. Collection “Mono. Hydro.” 9^{ème} Edition MESRES – ORSTOM, Paris, 733 p.
- Onana VL, Kamgang Kabeyene Beyala V, Ndome Effoudou Priso E, Ekodeck GE, 2009. Essai préliminaire de corrélations entre paramètres altérologiques normatifs et caractéristiques physico-mécaniques des roches et des produits d'altération de la série de Mbalmayo-Bengbis (Sud Cameroun), à l'usage du génie civil. *Journal of the Cameroon academy of Sciences* 8(2), 89–99

- Pang K-N, Chung S-L, Zarrinkoub MH, Mohammadi SS, Yang H-M, Chu C-H, Lee H-Y, Lo C-H, 2012. Age, geochemical characteristics and petrogenesis of Late Cenozoic intraplate alkali basalts in the Lut-Sistan region, eastern Iran. *Chemical Geology* 306–307, 40–53
- Pang L, Wu S, Zhu J, Wan L, 2010. Relationship between petrographic and physical properties of aggregates. *Journal of Wuhan University of Technology-Material. Science Ed.* 25(4), 678–681
- Parfenoff A, Pomerol C, Tourenq J, 1970. Les minéraux en grains méthodes d'études et détermination. Masson et Cie Ed.
- Pearson K, 1905. On the general theory of skew correlation and non-linear regression. London: Dulau & Co
- Pereira CG, Castro-Gomes J, Pereira de Oliveira L, 2009. Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete. *Construction and Building Materials*, 602–608
- PNUD, 2012. Programme des Nations Unies pour le développement. Rapport sur le développement humain en Afrique vers une sécurité alimentaire durable. New York.
- Ramos-Vázquez MA, Armstrong-Altrin JS, Machain-Castillo ML, Gío-Argáez FR, 2018. Foraminiferal assemblages, 14C ages, and compositional variations in two sediment cores in the western Gulf of Mexico. *Journal of South America Earth Sciences* 88, 480–496
- Rivera-Gómez MA, Armstrong-Altrin JS, Verma SP, Díaz-González L 2020. APMdisc. An online computer program for the geochemical discrimination of siliciclastic sediments from active and passive margins. *Turkish Journal of Earth Sciences* 29:550-578. <https://doi.org/10.3906/yer-1908-15>
- Rocco CG, Elices M, 2009. Effect of aggregate shape on the mechanical properties of a simple concrete. *Engineering Fracture Mechanics* 76(2), 286–298
- Roddaz M, Viers J, Brusset S, Baby P, Boucayrand C, Hérail G, 2006. Controls on weathering and provenance in the Amazonian foreland basin: Insights from major and trace element geochemistry of Neogene Amazonian sediments. *Chemical Geology* 226, 31–65
- Roser BP, Korsch RJ, 1986. Determination of tectonic setting of sandstones-mudstones suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *Journal of Geology* 94, 635–650
- Rudnick RL, Gao S, 2003. The composition of the continental crust. In *The Crust* (ed. RL Rudnick). Elsevier-Pergamon, Oxford. 1–64

- Sangen M, Eisenberg J, Kankeu B, Runge J, Tchindjang M, 2010. Preliminary results on palaeoenvironmental research carried out in the framework of the second phase of the resako-project in the upper catchments areas of the Nyong and Sanaga Rivers in Cameroon. *Palaeoecology of Africa* 30, 165–188
- Santoir C, Bopda A, 1995. Atlas régional Sud - Cameroun. Ed. ORSTOM, 53 p.
- Schneider S, Hornung J, Hinderer M, Garzanti E, 2015. Petrography and geochemistry of modern river sediments in an equatorial environment (Rwenzori Mountains and Albertine rift, Uganda) - Implications for weathering and provenance. *Sedimentary Geology* 336, 106–119
- Segalen P, 1995. Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique. Les sols ferrallitiques en Afrique et en Extrême-Orient, Australie et Océanie : conclusions générales. Paris. Edition Orstom, tome III, 201 p.
- Sensarma S, Rajamani V, Jayant K, Tripathi, 2008. Petrography and geochemical characteristics of the sediments of the small River Hemavati, Southern India: Implications for provenance and weathering processes. *Sedimentary Geology* 205, 11–125
- Sep-Nlomngan JP, Mbola-Ndzana SP, Nguet-Pountougnigni P, Nguemhe FS, Penaye J, 2013. The influence of breaking tectonics on the structural guidance of stream flows in the northern-equatorial Pan-African chain: the case of the Makénéne Region. *Asian research publishing network RPN Journal of Earth Sciences*, 2(1), 1–8
- Servaraj K, Arthur CC, 2006. Moderate chemical weathering of subtropical Taiwan: Constrains from solid - phase geochemistry of sediments and sedimentary rocks. *Journal of Geology* 114, 101–116
- Sighomnou D, Sigha-Nkamdjou L, Lienou G, Dezetter A, Mahé G, Servat E, Paturel JE, Olivry JC, Tchoua F, Ekodeck GE, 2007. Impacts des fluctuations climatiques sur le régime des écoulements du fleuve Sanaga au Cameroun, perspectives pour le XXIème siècle. *In: Mahé, G. (Ed.), Climatic and Anthropogenic Impacts on the Variability of Water Resources, Technical Document in Hydrology 80, UNESCO, Paris, 173–182*
- Silva MMVG, Cabral Pinto MMS, Carvalho PCS, 2016. Major, trace and REE geochemistry of recent sediments from lower Catumbela River (Angola). *Journal of African Earth Sciences* 115, 203–217
- Singh P, 2009. Major, trace, REE geochemistry of the Ganga River sediments: Influence of provenance and sedimentary processes. *Chemical Geology* 266, 243 – 255

- Song YH, Choi MS, 2009. REE geochemistry of fine-grained sediments from major rivers around the Yellow Sea. *Chemical. Geology* 266, 328–342
- Sun W, Wang L, Wang Y, 2017. Mechanical properties of rock materials with related to mineralogical characteristics and grain size through experimental investigation: a comprehensive review. *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 11(3), 322–328
- Taylor S, McLennan S, 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell Scientific, Oxford/London/Edinburgh/Boston/Palo Alto/Melbourne 312 p.
- Tchakounté J, Eglinger A, Toteu SF, Zeh A, Nkoumbou C, Mvondo Ondo J, Penaye J, de Wit M, Barbey P, 2017. The Adamawa-Yadé domain, a piece of Archaean crust in the Neoproterozoic Central African Orogenic belt (Bafia area, Cameroon). *Precambrian Research* 299, 210–229
- Tchapga GMG, Mambou GLL, Foguieng WM, Ndjaka BMJ, 2020. Microstructure analysis of hydraulic concrete using crushed basalt, crushed gneiss and alluvial sand as fine aggregate. *Journal of Mechanical Science and Technology Advances* 2, 25–35
- Tchoua F, 1976. A propos de J. Gouhier et D. Nougier, intitulée “Contribution à l’étude volcanologique du Cameroun, Ligne du Cameroun”. *Annales Fac. Sci. Univ. Cameroun*, 47–88.
- Tchouankoue JP, Simeni Wambo NA, Kagou Dongmo A, Wörner G, 2012. Petrology, Geochemistry, and Geodynamic Implications of Basaltic Dyke Swarms from the Southern Continental Part of the Cameroon Volcanic Line, Central Africa. *The Open Geology Journal* 6, 72–84
- Toteu SF, Penaye J, Djomani YP, 2004. Geodynamic evolution of the Pan-African belt in central Africa with special reference to Cameroon. *Canadian Journal of Earth Sciences* 41, 73–85
- Velmurugan K, Madhavaraju J, Balaram V, Ramasamy S, Ramachandran A, Ramirez-Montoya E, Saucedo-Sama-Niego JC, 2019. Provenance and tectonic setting of the clastic rocks of the Kerur Formation, Badami Group, Mohare area, Karnataka, India. In: *Precambrian Crustal Evolution of India: Geological Evolution of the Precambrian Indian Shield* (ed. M.E.A. Mondal), Society of Earth Scientist Series by Springer - Verlag, 1st Edition, 239–269
- von Eynatten H, Tolosana-Delgado R, Karius V, Bachmann K, Caracciolo L, 2016. Sediment generation in humid Mediterranean setting: Grain-size and source-rock control on

- sediment geochemistry and mineralogy (Sila Massif, Calabria). *Sedimentary Geology* 336, 68–80
- Waziri BS, Bukar AG, Gaji YZA, 2011. Applicability of quarry sand as a fine aggregate in the production of medium grade concrete. *Continental Journal of Engineering Science* 6(2), 1–6
- Wentworth CK, 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology* 30(5), 377–392
- Wu K-R, Chen B, Yao W, Zhang D, 2001. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research* 31, 1421–1425
- Wu W, Xu S, Lu H, Yang J, Yin H, Liu W, 2011. Mineralogy, major and trace element geochemistry of river bed sediments in the headwaters of the Yangtze, Tongtian Rivers and Jinsha River. *Journal of Asian Earth Sciences* 40, 611–621
- Yvon J, Garin P, Delon JF, Cases JM, 1982. Valorisation des argiles kaolinitiques des Charentes dans le caoutchouc naturel. *Bulletin de Minéralogie* 105, 535–541
- Zen EA, 1988. Phase relations of peraluminous granitic rocks and their petrogenetic implications. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 16, 21–51

ANNEXES

ANNEXE I. PUBLICATION

Nanga Bineli MT, Onana VL, Noa Tang SD, Bikoy YR, Ekodeck GE, 2020. Mineralogy and geochemistry of sands of the lower course of the Sanaga River, Cameroon: implications for weathering, provenance, and tectonic setting. *Acta Geochimica*. <https://doi.org/10.1007/s11631-020-00437-z>



Mineralogy and geochemistry of sands of the lower course of the Sanaga River, Cameroon: implications for weathering, provenance, and tectonic setting

Marie Thérèse Nanga Bineli¹ · Vincent Laurent Onana¹ · Sylvie Désirée Noa Tang² · Yves Robert Bikoy¹ · Georges Emmanuel Ekodeck¹

Received: 22 April 2020 / Revised: 24 July 2020 / Accepted: 23 September 2020

© Science Press and Institute of Geochemistry, CAS and Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2020

Abstract This study focuses on the mineralogy and bulk chemical composition of 19 sediment samples, collected from the Sanaga River bed, between Nanga-Eboko and the Atlantic Ocean in Cameroon, to infer provenance, weathering, and tectonic setting. The textural analysis revealed that these sediments are mainly coarse-grained sands. X-ray diffraction and heavy mineral analyses show that these sands are made of quartz, microcline, plagioclase, muscovite, ilmenite, anatase, magnetite, opaques, and epidote. The Index of Chemical Variability values (1.07–2.68) indicates that the sands are immature. The Chemical Index of Alteration (53–66 %), Plagioclase Index of Alteration (PIA; 57–75 %), and Mafic Index of Alteration (54–67 %) values revealed a moderate intensity of weathering for these sediments. According to the compositional maturity diagram, the sands are mainly litharenites. The studied sands show enrichment in light rare earth elements relative to heavy rare earth elements and a negative anomaly in Eu ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.32\text{--}0.83$). These sands were derived from felsic metamorphic rocks dated Meso to Neoproterozoic from the Pan-African (700–1000 Ma) domain of south Cameroon. Th/U ratios (mean = 5.40; $n = 19$) reveal that these sands originating from felsic source rocks and are low to moderately recycled. On the tectonic discrimination diagrams, all the samples are plotted in the

rift and passive margin domains, which is consistent with the tectonic history of Pan African in southern Cameroon.

Keywords Central Africa · Sanaga River sediments · Heavy minerals · Major and trace elements · Source rocks · Rift and passive setting

1 Introduction

Rivers are natural flowing watercourses that carry eroded materials from continental areas to oceans and seas. The sediments they transport make it possible to understand evolution processes at the continental interface. Rivers cover large parts of continental surfaces and constitute geological and environmental records of the tectonic and climatic conditions in a river basin. The textural and mineralogical changes induced by weathering and fractionation phenomena during sedimentary processes lead to geochemical heterogeneity of river sediments during their genesis, transport, and deposition within sedimentary basins. However, geochemical data of river sediments are of high importance for the study of provenance, weathering, climate change, and continental crust (Maharana et al. 2018). For decades, the origin of the sediments and the mechanisms that contribute to their deposition has been the subject of numerous works (Bhuiyan et al. 2011; Armstrong-Altrin et al. 2015; Bhaskar et al. 2015; Garzanti and Resentini 2016; Silva et al. 2016; Maharana et al. 2018). The above mentioned have demonstrated that immobile and rare earth elements are generally concentrated in the fine fraction of sediments, in primary accessory minerals (e.g. apatite, zircon) and some secondary minerals like kaolinite (Bhuiyan et al. 2011). Rare-earth element concentrations in sediments depend on the geochemical

✉ Vincent Laurent Onana
onana.vl@gmail.com

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

² Department of Geology, Higher Teacher's Training College, The University of Yaoundé I, P.O. Box 47, Yaoundé, Cameroon

composition of the source rocks. Trace elements such as Y, Th, Zr, Hf, Nb, Sc, Co, and Cr are considered to be good tracers for identifying the provenance of sediments (Armstrong-Altrin et al. 2015; Hernández-Hinojosa et al. 2018; Ramoz-Vásquez and Armstrong-Altrin 2019). Grain size is the most important factor for controlling variability and sediment composition (Garzanti et al. 2011; Basu 1976 in von Eynatten et al. 2016). In Central Africa, studies have been carried out on river sediment deposits and corroborated the key results obtained in other geographical areas in the world (Ndome et al. 2014; Ndjigui et al. 2014, 2015, 2018; Mbale et al. 2019). Central Africa is a region of the world where the hydrographical network is dense and highly dissected, and where large rivers are observed, like the Sanaga River in Cameroon. The sediments of this river have been the subject of little study. This river, which is 920 km long, runs along an E-W shear zone materialized by a fault called “Sanaga Fault; SF”. In Central Africa, the Sanaga watershed is the largest fully Cameroonian river basin (Dzana et al. 2010). With an area of 133 000 km², this river basin covers about 25 % of Cameroon’s surface area (Sangen et al. 2010) and is drained by the Sanaga River which, due to its hydroelectric potential, is the second important river after the Congo River (4700 km), in Central Africa. The Sanaga River which drains almost a quarter (65,000 km³/year) of water resources (Dzana et al. 2010) of Cameroon undergoes an intense sand extraction activity. Approximately 600,000 m³ of sand is extracted each year from the bed of this river (Dzana et al. 2010). Nevertheless, studies on sediments from river beds in Central Africa are scarce (Silva et al. 2016). These studies will also help to understand the processes that control their composition, to know the geological and environmental information they have archived. This study aims to determine the origin, degree of weathering, and tectonic environment of the Sanaga River sediments, from mineralogical data, as well as major and trace element concentrations.

1.1 Study area

The study area is located in the Sanaga watershed, and it corresponds to the Sanaga River bed, between Nanga-Eboko and the Atlantic Ocean (Fig. 1). The current climate is of tropical type with two seasons in the upper course of the Sanaga River and of equatorial type in its lower course. The rainfall in this watershed is between 1400 and 4000 mm (Ndam Ngoupayou et al. 2016). The studied sediments are bed sands of the Sanaga River that flows along the SF. This SSW-NNE-oriented fault occurred in the Proterozoic during the Pan-African orogeny (Ndougsa-Mbarga et al. 2012; Regard et al., 2016; Ngapna et al., 2018; Messanga et al. 2019) and is subject to post-Pan-

African reactivations (Moussango et al. 2018). It is one of the main mega-structures in Central Africa that strongly influences the evolution of coastal sedimentary basins in Cameroon (Djomeni et al. 2011). The Sanaga River is 920 km long and has three subdivisions from upstream to downstream (Sangen et al. 2010). In its upper course, 270 km long, Sanaga River is called Djerem. Its source is in the Adamawa plateau, between 1000 and 1200 m above the Atlantic Ocean (Nzeukou et al. 2013). The middle course of Sanaga River begins in the Goyoum region, slightly downstream of the confluence of Lom and Djerem Rivers and extends to Edea. In this part, the Sanaga River flows over a distance of 583 km and its major tributary is the Mbam River. The Mbam River drains all the western part of the basin and its major tributary is the Noun River. The lower branch of the Sanaga River is relatively short (67 km) and extends from the bottom of the Edea Falls to the Atlantic Ocean. The Sanaga River drains a succession of plateaus limited to the west by the Cameroonian ridge and, to the north, by the Adamawa plateaus. The transition from the plateau area to the coastal plain is materialized by a series of falls and rapids interspersed with low-slope areas. The Sanaga watershed rests entirely on the Precambrian basement, covered in its upper borders by Cretaceous volcanic and towards the Atlantic coast by sediments of the Douala Basin. The Phanerozoic formations of the Douala Basin cap Neoproterozoic gneisses and granitoids (Ngon Ngon et al. 2016) which are basement formations of the Sanaga River basin. Panafrican metamorphic include low-grade metamorphics (phyllites, shales, and siliceous facies represented by quartzites generally interbedded in shales) of the Lom series at the northeastern extremity of the Sanaga River basin and the medium to high-grade gneissic rocks of the Yaounde group. Granitic gneisses are most typical of the Panafrican basement of West Cameroon and Adamawa parts of the Sanaga river basin.

2 Materials and methods

The length of the lower course Sanaga River for this study is about 429 km between Nanga-Eboko and the Atlantic Ocean. The different sampling points are 25 km apart along the river. Seventeen sand samples were collected in the Sanaga River (Fig. 2). Nine samples are located in the South Cameroonian Plateau domain and eight in the coastal plain area. Two samples were collected in the major tributaries of the Sanaga River, which are Mbam and Ndjéké Rivers, in the South Cameroonian Plateau (Fig. 2). All the studied samples were collected in the active channel of rivers using a sampler to prevent the fine fraction from being lost in the collection. These samples were

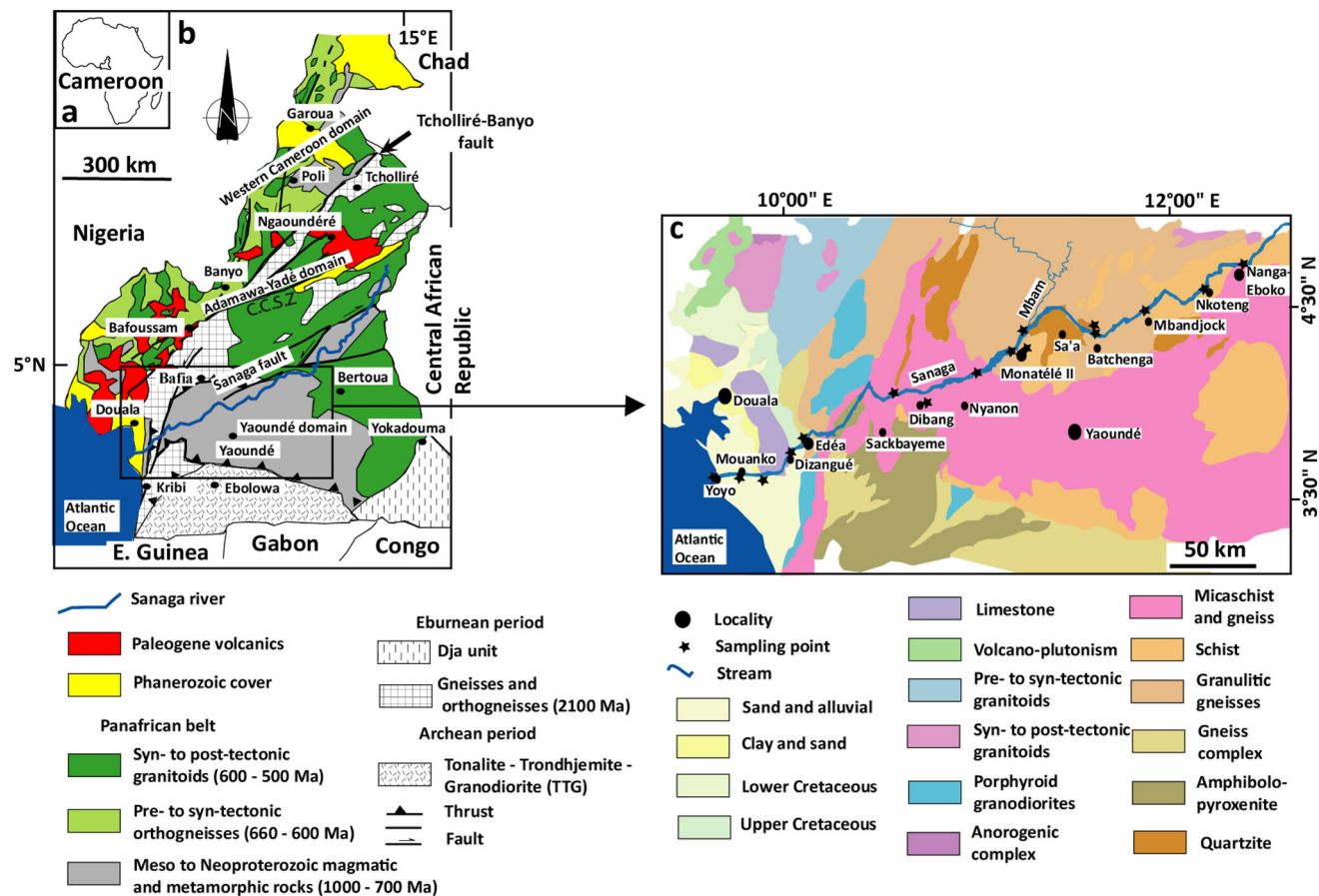
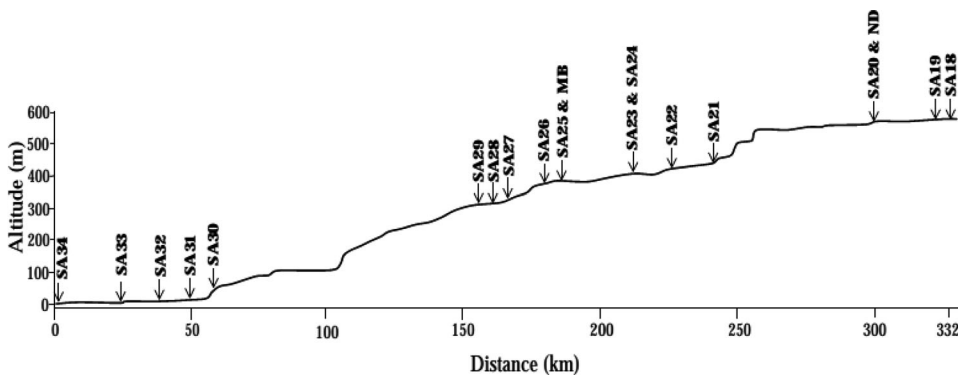


Fig. 1 Geology map of study area showing sample location (after Tchakounté et al. 2017)

Fig. 2 Longitudinal profile of the Sanaga River



dried in an oven at a temperature of 70 °C for 24 h at the Engineering Geology Laboratory of the University of Yaoundé I. After drying, the bulk samples were homogenized and subjected to a grain size analysis according to NF P94-068 standard (AFNOR 1998) at the National Laboratory of Civil Engineering (LABOGENIE) and to mineralogical and geochemical analyses. Samples selected for mineralogical and geochemical analyses were sieved and only the fraction of sand $\phi < 2000 \mu\text{m}$ in diameter was

immersed in hydrogen peroxide (H_2O_2) for 24 h to eliminate the organic matter.

The organic matter extracted, samples were parboiled again for 24 h before being crushed at the Engineering Geology Laboratory of the University of Yaoundé I. The powders obtained with a diameter $< 80 \mu\text{m}$, were subjected to mineralogical analyses at the Geosciences Laboratories of the Ontario Geological Survey in Sudbury, Canada. Mineralogical analyses were performed by X-ray diffraction using Co radiation X-ray diffractometer at 40 kV and

45 mA. Semi-quantitative analyses were carried out according to the method described by Yvon et al. (1982). The extraction of heavy minerals was performed on the 200–125 μm fraction according to the method described by Duplaix (1958) and Parfenoff et al. (1970). Major element concentrations were determined by X-ray fluorescence (XRF-M01) at the Geosciences Laboratories of the Ontario Geological Survey in Sudbury (Canada). Samples were first heated at 110 °C for 6 h and melted with lithium tetraborate before being analyzed using analytical PAN AXIOS Advanced PW 4400. The International Reference Material (INTL) used is SY-4 and the in-house standard (IHST) is QS-1. The relative error varies between 0.2 and 2 %. Concentrations of trace elements were determined by mass spectrometry using Perkin Elmer Elan 9000 ICP-MS. The analysis was carried out according to the IMC-100 method. The INTL used was GSP-2 and the IHST was MRB-29. Zirconium data were determined by X-ray fluorescence (XRF-M02) in some samples (SA22, SA23, SA25, SA28, SA30, SA33, and ND) because its concentrations were higher than the detection limit (1450 ppm) in the ICP-MS analysis. The relative error varies between 0.007 and 10 %.

3 Results

3.1 Texture and mineralogy

The mean grain size (M_z) values range from -0.85 to 2.12ϕ . Seventy-four percent of the studied sediments are coarse-grained sands (-0.85 to 0.74ϕ), 16 % represent medium-grained (1.03 to 1.32ϕ) sands, and 10 % are fine-grained sands (2.06 to 2.12ϕ ; Table 1).

These sands consist of quartz, microcline, plagioclases, muscovite, ilmenite, anatase, and magnetite (Table 1). The proportions are high in quartz (69–87 wt.%), moderate in microcline (9–15 wt.%), and low in plagioclases (~ 4 wt.%), muscovite (~ 3 wt.%), ilmenite (~ 2 wt.%), anatase, and magnetite (~ 1 wt.%). Heavy minerals (Table 2) are mainly opaques (~ 50 wt.%) and epidote (~ 20 wt.%). Garnet, kyanite, sillimanite, zoisite, tourmaline, zircon, and augite are in low proportions (2–10 wt.%), while proportions in apatite, andalusite, diopside, staurolite hornblende, peridot, and clinozoisite are very low (~ 1 wt.%).

3.2 Geochemistry

3.2.1 Major element concentrations

Major element concentrations are listed in Table 3. The studied sands are characterized by high SiO_2 concentrations (72.88–87.24 wt.%). The concentrations of Al_2O_3

(4.85–10.35 wt.%) and Fe_2O_{3t} (1.01–7.05 wt.%) are low to moderate. K_2O (1.64–3.38 wt.%), TiO_2 (0.75–6.35 wt.%), and LOI (0.74–4.4 wt.%) concentrations are relatively low while those in MgO , CaO , Na_2O , and MnO are also very low (<1.00 wt.%). SiO_2 and K_2O concentrations are similar to those of UCC while Fe_2O_3 concentrations are highly variable and different (Rudnick and Gao 2003; Fig. 3). The studied sands are enriched in TiO_2 and MnO with respect to UCC and depleted in Al_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , and P_2O_5 . According to the compositional maturity diagram of Herron (1988), the studied sands are classified as litharenites (Fig. 4)

3.3 Trace element concentrations

Trace element concentrations are shown in Table 4. Trace element patterns normalized with respect to UCC (Rudnick and Gao 2003; Fig. 5) show enrichment in Ba, Nb, Ta, Th, U, and Zr, and depletion in Co, Cr, Cs, Cu, Ni, Pb, Rb, Sc, Sr, Li, and Mo. Some trace elements such as W, V, and Y exhibit a contrasting behaviour; some materials are enriched in these elements while others are depleted. TiO_2 and Fe_2O_3 are strongly linked ($r = 0.85$, $n = 19$). Strong statistical correlations exist between P_2O_5 and U, Nb, Mo ($r = 0.72$, 0.71 , 0.83 , respectively, $n = 19$). Some transition metals such as Cr, V, Co, and Sc are closely related to TiO_2 ($r = 0.77$, 0.94 , 0.72 , 0.70 , respectively, $n = 19$) and Fe_2O_3 ($r = 0.91$, 0.94 , 0.92 , 0.76 , respectively, $n = 19$) as well as with P_2O_5 ($r = 0.85$, 0.90 , 0.89 , 0.79 , respectively, $n = 19$).

3.3.1 Rare earth element (REE) concentrations

REE concentrations are shown in Table 5. REE concentrations range between 69 and 558 ppm. LREE/HREE ratios range between 6.77 and 20.64. $(\text{La}/\text{Yb})_N$ values oscillate between 5.05 and 26.68. REE patterns normalized with respect to chondrite show negative Eu anomalies ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.32$ – 0.83 ; Fig. 6a). These Eu anomalies are also observed in REE patterns normalized with respect to UCC (Rudnick and Gao 2003; Fig. 6b). REE patterns (Figs. 7, 8) also indicate the existence of 02 groups of sands, the REE-enriched sands with relatively strong Eu anomalies ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.32$ – 0.42) and the REE-depleted sands with medium to weak Eu anomalies ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.53$ – 0.83). REE-enriched sands ($\sum\text{REE}$: 161–556 ppm; SA 18, SA 20, SA 22, SA 23, SA 25, SA 27, SA 28, SA 30, SA 33, and ND) have the highest TiO_2 (1.84–6.35 wt.%), Fe_2O_{3t} (4.32–7.05 wt.%), and Zr (618–5330 ppm) contents. The average TiO_2 , Fe_2O_{3t} , and Zr contents in these sands are 3.81, 5.44 wt.%, and 3090 ppm, respectively. REE-depleted sands ($\sum\text{REE}$: 68–138 ppm; SA 19, SA 21, SA 24, SA 26, SA 29, SA 31, SA 32, SA 34, and MB) have lower TiO_2 (0.75–1.70 wt.%), Fe_2O_{3t} (1.01–4.34 wt.%), and Zr

Table 1 Mineralogical composition (%) and grain size data of bed sands for the Sanaga River between Nanga-Eboko and Atlantic Ocean

| | SA18 | SA19 | SA20 | SA21 | SA22 | SA23 | SA24 | SA25 | SA26 | ND | MB | SA27 | SA28 | SA29 | SA30 | SA31 | SA32 | SA33 | SA34 | Mean (n = 19) |
|-------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|------------------|
| Quartz | 70 | 77 | 76 | 85 | 81 | 80 | 82 | 77 | 78 | 75 | 75 | 69 | 77 | 73 | 75 | 84 | 83 | 83 | 87 | 78 |
| Microcline | 8 | 11 | 11 | 8 | 9 | 9 | 8 | 10 | 11 | 11 | 12 | 15 | 12 | 13 | 14 | 10 | 3 | 9 | 3 | 10 |
| Plagioclase | 5 | 4 | 5 | 2 | 4 | 4 | 1 | 5 | 2 | 6 | 4 | 6 | 3 | 5 | 3 | 2 | 9 | 3 | 8 | 4 |
| Muscovite | 2 | 4 | 1 | 2 | | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 | 2 | 4 | 1 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| Ilmenite | 3 | 4 | 3 | 1 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 5 | 1 | 3 | 4 | 2 | 4 | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 |
| Anatase | 4 | 1 | 0 | 1 | 2 | 2 | - | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | 1 | - | - | 1 |
| Magnetite | - | ~ 0.52 | ~ 0.41 | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 1 | - | - | - | - | - | - | 1 |
| Total | 92 | 100 | 97 | 99 | 98 | 99 | 97 | 97 | 99 | 99 | 95 | 98 | 99 | 96 | 97 | 99 | 99 | 100 | 100 | 98 |
| Gravel | 14.60 | 3.75 | 17.00 | 0.85 | 23.15 | 17.80 | 0.45 | 6.55 | 0.05 | 21.45 | 0.35 | 4.20 | 5.50 | 0.80 | 17.50 | 10.45 | 0.60 | 15.30 | 1.85 | 10.90 |
| Sand | 85.39 | 96.09 | 82.68 | 99.12 | 76.53 | 82.06 | 97.26 | 93.45 | 99.95 | 78.50 | 99.65 | 95.63 | 94.39 | 98.63 | 81.97 | 89.55 | 99.40 | 69.25 | 78.18 | 89.08 |
| Fines | 0.01 | 0.16 | 0.32 | 0.03 | 0.32 | 0.14 | 2.29 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.17 | 0.11 | 0.57 | 0.53 | 0.00 | 0.00 | 15.45 | 19.97 | 0.02 |
| Mz | - 0.85 | 0.43 | - 0.33 | 0.51 | - 0.41 | - 0.25 | 1.32 | 0.51 | 2.06 | - 0.29 | 2.12 | 0.15 | 0.06 | 0.69 | - 0.26 | 0.30 | 0.74 | 1.12 | 1.03 | 0.46 |

Gravel (4–2 mm), Sand (2–0.0625 mm), Fines (< 0.0625 mm), after Wentworth (1922); Mz: mean grain size (in ϕ units)

(171–784 ppm) contents, except for sample SA 24 which has a relatively high Zr content (1224 ppm). The average TiO_2 , Fe_2O_{3t} , and Zr contents in these sands are 1.31 wt.%, 2.62 wt.%, and 536 ppm, respectively. REE-enriched materials have, therefore, the highest TiO_2 , Fe_2O_{3t} , and Zr contents.

4 Discussion

4.1 Sediment maturity and recycling

The index of compositional variability (ICV = $[(\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{Fe}_2\text{O}_{3t} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2)/\text{Al}_2\text{O}_3]$; Cox et al., 1995) has been extensively used in many works to assess the sediment composition or to estimate the original composition of sediments (Armstrong-Altrin et al. 2015; Rosales-Hoz et al. 2017; Tawfik et al. 2017; Armstrong-Altrin et al. 2018; Maharana et al. 2018; Ndjigui et al. 2018, 2019). The ICV values above 0.85 (Post-Archean Australian Shale value) indicate immature sediments, while values below 0.85 characterize mature sediments (Purevjav and Roser 2013). Similarly, ICV values below 1 indicate the presence of clay minerals, while values greater than 1 indicate the presence of feldspars, amphiboles, and pyroxenes in rocks (Cox et al. 1995). The studied sands have ICV values between 1.07 and 2.68 (Table 3a). These high ICV and CIA values indicate that these sands are immature (Fig. 7). The high TiO_2 concentrations relative to UCC corroborate the presence of anatase and ilmenite ($r_{\text{TiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3} = 0.85$, $n = 19$). Statistically, correlations between SiO_2 , Al_2O_3 , and LOI indicate that most of SiO_2 is concentrated in quartz and not in feldspars and muscovite. The HFSEs are associated with Fe_2O_3 in ilmenite. Some of these trace elements are present in apatite as indicated by the strong correlations between P_2O_5 and U, Nb, Mo. Chromium, V, Co, and Sc are closely related to TiO_2 and Fe_2O_3 in anatase and ilmenite as well as with P_2O_5 in apatite. These sands still contain minerals from source rocks as indicated by their mineralogy and therefore have undergone low to moderate recycling (Fig. 8; Armstrong-Altrin et al. 2015, 2017; Nagarajan et al. 2017; Anaya-Gregorio et al. 2018).

4.2 Weathering

The ICV values (1.07–2.68) of the studied sands indicate that the weathering degree is low to moderate. Numerous weathering indices have been proposed to evaluate the mobility of elements during chemical weathering (Babchuk et al. 2014). These weathering indices are commonly used to determine the intensity of weathering (Armstrong-

Table 2 Concentration of heavy minerals (%) of bed sands for the Sanaga River between Nanga-Eboko and Atlantic Ocean

| | SA18 | SA19 | SA20 | SA21 | SA22 | SA23 | SA24 | SA25 | SA26 | ND | MB | SA27 | SA28 | SA29 | SA30 | SA31 | SA32 | SA33 | SA34 | Mean (n = 19) |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------|
| Opagues | 55 | 55 | 53 | 43 | 51 | 51 | 52 | 43 | 72 | 50 | 42 | 32 | 39 | 57 | 51 | 50 | 47 | 48 | 50 | 50 |
| Zircon | 1 | 4 | 6 | 2 | 5 | 6 | 5 | 6 | 3 | - | 3 | 5 | 6 | 3 | 12 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 |
| Zoisite | - | 1 | - | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | - | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 5 | 3 | 2 | 2 |
| Epidote | 4 | 22 | 24 | 44 | 25 | 18 | 15 | 2 | 2 | 20 | 40 | 33 | 18 | 12 | 10 | 25 | 20 | 18 | 20 | 20 |
| Clinozoisite | - | 0 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 |
| Garnet | 3 | 5 | 4 | - | 4 | 2 | 4 | - | 2 | - | 2 | 3 | 5 | 4 | 8 | 2 | 4 | 10 | 8 | 4 |
| Anatase | 4 | 1 | 0 | - | 1 | 2 | 2 | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - | 1 | - | - | 2 |
| Disthene | 15 | 2 | 2 | - | 4 | 10 | 9 | 41 | 15 | 10 | 5 | 15 | 17 | 8 | 9 | 6 | 5 | 11 | 10 | 11 |
| Sillimanite | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | - | - | 5 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 4 | 1 | - | 2 |
| Andalusite | 1 | 0 | - | - | - | 1 | 1 | 1 | - | - | - | - | 1 | 1 | - | 1 | 2 | - | 1 | 1 |
| Augite | 8 | 2 | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | 1 | 1 | - | - | 1 | - | - | 2 |
| Diopside | - | 0 | - | - | - | 1 | 1 | - | 1 | 2 | - | 1 | 1 | - | - | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Tourmaline | - | 3 | 3 | - | 1 | 1 | 1 | 1 | - | 1 | - | 1 | 4 | 4 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 | 2 |
| Apatite | 1 | 0 | - | - | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 |
| Staurotide | 1 | 0 | - | - | - | - | 1 | - | - | 1 | - | - | - | - | 1 | - | 1 | - | - | 1 |
| Peridot | 2 | 0 | - | - | - | - | - | - | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 |
| Hornblende | 1 | 1 | - | - | - | - | 1 | - | - | - | 1 | - | - | - | - | 1 | - | - | - | 1 |
| Undetermined | 5 | 4 | 5 | - | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 6 | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 | 4 | 5 | 5 |

Table 3 Major element concentrations (wt.%) of bed sands for the Sanaga River between Nanga-Eboko and Atlantic Ocean

| Oxides (%) | SA18 | SA19 | SA20 | SA21 | SA22 | SA23 | SA24 | SA25 | SA26 | ND |
|--|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|---------------|
| Oxides (%) | | | | | | | | | | |
| (SiO ₂) _{adj} | 75.96 | 83.22 | 78.86 | 86.43 | 79.62 | 76.09 | 87.84 | 80.75 | 85.28 | 79.25 |
| SiO ₂ | 72.88 | 81.63 | 74.50 | 86.07 | 78.60 | 74.86 | 86.32 | 80.20 | 84.90 | 77.83 |
| TiO ₂ | 3.46 | 1.70 | 2.50 | 1.46 | 4.37 | 6.35 | 1.53 | 3.74 | 0.75 | 4.00 |
| Al ₂ O ₃ | 7.98 | 6.83 | 8.24 | 5.44 | 6.09 | 6.37 | 5.75 | 6.42 | 6.91 | 6.26 |
| Fe ₂ O _{3t} | 7.05 | 3.32 | 4.61 | 2.68 | 5.78 | 6.64 | 1.01 | 4.50 | 1.93 | 5.67 |
| MnO | 0.163 | 0.088 | 0.125 | 0.070 | 0.176 | 0.196 | 0.028 | 0.121 | 0.040 | 0.154 |
| MgO | 0.49 | 0.45 | 0.43 | 0.38 | 0.45 | 0.46 | 0.06 | 0.44 | 0.45 | 0.52 |
| CaO | 0.77 | 0.73 | 0.79 | 0.73 | 0.82 | 0.87 | 0.12 | 0.85 | 0.74 | 0.88 |
| Na ₂ O | 0.70 | 0.81 | 0.78 | 0.75 | 0.71 | 0.76 | 0.35 | 0.85 | 0.82 | 0.78 |
| K ₂ O | 2.34 | 2.47 | 2.40 | 1.94 | 1.64 | 1.77 | 3.07 | 2.11 | 2.97 | 2.02 |
| P ₂ O ₅ | 0.11 | 0.06 | 0.10 | 0.06 | 0.09 | 0.11 | 0.04 | 0.09 | 0.05 | 0.09 |
| LOI | 4.15 | 2.58 | 5.41 | 1.1 | 1.4 | 1.4 | 1.77 | 1.06 | 1.13 | 2.19 |
| Total | 100.09 | 100.67 | 99.88 | 100.68 | 100.13 | 99.79 | 100.04 | 100.38 | 100.69 | 100.40 |
| CIA (%) | 62 | 56 | 61 | 54 | 60 | 59 | 58 | 56 | 54 | 57 |
| PIA (%) | 70 | 61 | 69 | 58 | 65 | 64 | 75 | 60 | 58 | 61 |
| MIA (%) | 67 | 58 | 64 | 56 | 65 | 66 | 60 | 60 | 54 | 62 |
| ICV | 1.88 | 1.40 | 1.41 | 1.47 | 2.29 | 2.68 | 1.07 | 1.96 | 1.11 | 2.24 |
| SiO ₂ /Al ₂ O ₃ | 9.13 | 11.95 | 9.04 | 15.82 | 12.91 | 11.75 | 15.01 | 12.49 | 12.29 | 12.43 |
| Al ₂ O ₃ /TiO ₂ | 2.31 | 4.02 | 3.30 | 3.73 | 1.39 | 1.00 | 3.76 | 1.72 | 9.21 | 1.57 |
| Log(SiO ₂ /Al ₂ O ₃) | 0.96 | 1.08 | 0.96 | 1.20 | 1.11 | 1.07 | 1.18 | 1.10 | 1.09 | 1.09 |
| Log(Fe ₂ O ₃ /K ₂ O) | 0.48 | 0.13 | 0.28 | 0.14 | 0.55 | 0.57 | - 0.48 | 0.33 | - 0.19 | 0.45 |
| Oxides (%) | | | | | | | | | | |
| Oxides (%) | | | | | | | | | | |
| (SiO ₂) _{adj} | 84.22 | 76.75 | 75.90 | 78.80 | 80.39 | 84.67 | 83.76 | 82.26 | 87.64 | 81.46 |
| SiO ₂ | 83.82 | 74.13 | 74.19 | 75.57 | 79.24 | 84.45 | 83.64 | 81.99 | 87.24 | 80.11 |
| TiO ₂ | 0.86 | 1.84 | 4.32 | 1.61 | 3.52 | 1.15 | 1.31 | 3.97 | 1.40 | 2.62 |
| Al ₂ O ₃ | 7.38 | 10.35 | 7.83 | 9.72 | 6.48 | 6.85 | 6.99 | 5.43 | 4.85 | 6.96 |
| Fe ₂ O _{3t} | 2.09 | 4.32 | 6.28 | 4.34 | 5.01 | 2.62 | 3.23 | 4.58 | 2.34 | 4.11 |
| MnO | 0.046 | 0.088 | 0.153 | 0.068 | 0.132 | 0.052 | 0.069 | 0.126 | 0.064 | 0.10 |
| MgO | 0.47 | 0.59 | 0.59 | 0.70 | 0.36 | 0.39 | 0.77 | 0.39 | 0.46 | 0.47 |
| CaO | 0.79 | 0.81 | 0.92 | 0.66 | 0.61 | 0.71 | 1.22 | 0.69 | 0.71 | 0.76 |
| Na ₂ O | 0.84 | 1.00 | 0.83 | 0.71 | 0.76 | 0.85 | 0.73 | 0.63 | 0.67 | 0.75 |
| MB | | SA27 | SA28 | SA29 | SA30 | SA31 | SA32 | SA33 | SA34 | Mean (n = 19) |

Table 3 continued

| Oxides (%) | MB | SA27 | SA28 | SA29 | SA30 | SA31 | SA32 | SA33 | SA34 | Mean (n = 19) |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| K ₂ O | 3.18 | 3.38 | 2.54 | 2.45 | 2.37 | 2.62 | 1.83 | 1.80 | 1.77 | 2.35 |
| P ₂ O ₅ | 0.04 | 0.08 | 0.104 | 0.077 | 0.085 | 0.054 | 0.067 | 0.065 | 0.045 | 0.07 |
| LOI | 1.34 | 3.86 | 2.41 | 4.78 | 1.47 | 1.18 | 1.28 | 0.74 | 0.89 | 2.11 |
| Total | 100.86 | 100.45 | 100.16 | 100.68 | 100.04 | 100.92 | 101.14 | 100.41 | 100.44 | 100.41 |
| CIA (%) | 54 | 60 | 59 | 66 | 57 | 55 | 61 | 57 | 54 | 58 |
| PIA (%) | 59 | 68 | 65 | 75 | 62 | 60 | 68 | 63 | 57 | 64 |
| MIA (%) | 54 | 61 | 63 | 65 | 62 | 57 | 59 | 63 | 55 | 61 |
| ICV | 1.12 | 1.16 | 2.00 | 1.08 | 1.97 | 1.22 | 1.31 | 2.24 | 1.53 | 1.64 |
| SiO ₂ /Al ₂ O ₃ | 11.36 | 7.16 | 9.48 | 7.77 | 12.23 | 12.33 | 11.97 | 15.10 | 17.99 | 12.01 |
| Al ₂ O ₃ /TiO ₂ | 8.58 | 5.63 | 1.81 | 6.04 | 1.84 | 5.96 | 5.34 | 1.37 | 3.46 | 3.79 |
| Log(SiO ₂ /Al ₂ O ₃) | 1.06 | 0.86 | 0.98 | 0.89 | 1.09 | 1.09 | 1.08 | 1.18 | 1.25 | 1.07 |
| Log(Fe ₂ O ₃ /K ₂ O) | -0.18 | 0.11 | 0.39 | 0.25 | 0.33 | 0.00 | 0.25 | 0.41 | 0.12 | 0.21 |

(SiO₂)_{adj} = major-element data were recalculated to anhydrous (LOI-free) basis and adjusted to 100 %; ND and MB are tributary samples

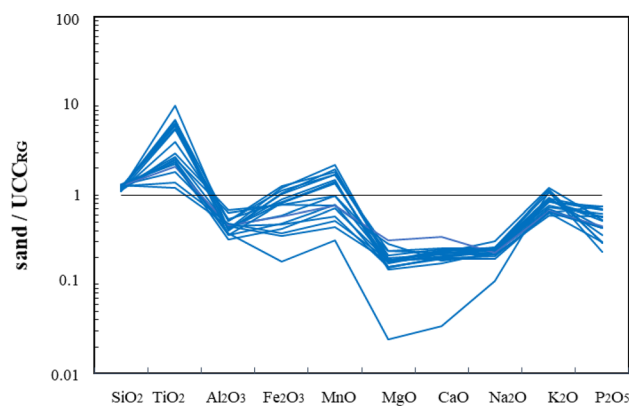


Fig. 3 Multi-element diagram for major element concentrations for the Sanaga River bed sands between Nanga-Eboko and Atlantic Ocean normalized against UCC (after Rudnick and Gao 2003)

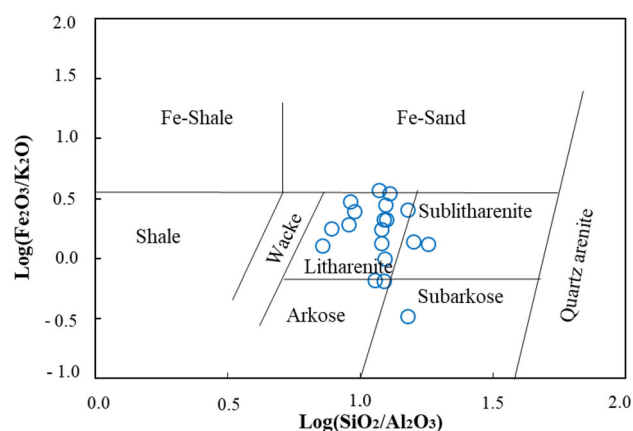


Fig. 4 Geochemical classification for the Sanaga River bed sands using log(SiO₂/Al₂O₃)-log(Fe₂O₃/K₂O) diagram (after Herron 1988)

Altrin et al. 2015, 2018; Schneider et al. 2015; Garzanti and Resentini 2016; Maharana et al. 2018; Ndjigui et al. 2018, 2019; Ngueutchoua et al. 2019). In general, weathering indices compare the concentration of an immobile element relative to that of mobile elements (Garzanti and Resentini 2016). The chemical index of alteration (CIA; Nesbitt and Young 1982), which allows a quantitative determination of weathering degree of a material, is the most commonly used. This index evaluates the progressive hydrolysis of feldspars to clay minerals (Bhaskar et al. 2015). CIA values vary between 40 and 100 % and its formula (in molar proportions) is as follows:

$$\text{CIA} = \left[\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})} \right] \times 100 \quad (1)$$

where, CaO* represents the amount CaO in silicates.

For CaO* calculation, if the mole fraction of CaO \leq Na₂O, then the value of CaO* is equal to CaO, but if CaO $>$ Na₂O, then the value of CaO* is equal to Na₂O (McLennan et al. 1993; Bock et al. 1998).

Table 4 Trace element concentrations (ppm) of bed sands for the Sanaga River between Nanga-Eboko and Atlantic Ocean

| | SA18 | SA19 | SA20 | SA21 | SA22 | SA23 | SA24 | SA25 | SA26 | ND |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------------|
| LILE | | | | | | | | | | |
| Ba | 928.5 | 972.1 | 982.2 | 758.4 | 655.6 | 710.2 | 644 | 816 | 1047.1 | 805.8 |
| Sr | 214.1 | 208.5 | 209.1 | 195.3 | 168.5 | 183 | 56.8 | 200.6 | 218.9 | 184.1 |
| Rb | 55.13 | 56.8 | 57.16 | 43.06 | 34.33 | 37.74 | 60.81 | 44.87 | 66.28 | 44.85 |
| Li | 7.4 | 5.5 | 7.7 | 4.3 | 4.8 | 5.2 | 2.5 | 5.2 | 3.4 | 6.3 |
| Cs | 1.168 | 0.94 | 1.259 | 0.541 | 0.497 | 0.573 | 0.257 | 0.63 | 0.741 | 0.739 |
| HFSE | | | | | | | | | | |
| Th | 10.665 | 11.887 | 19.934 | 12.314 | 33.2 | 66.234 | 12.747 | 41.605 | 7.1 | 30.597 |
| U | 6.307 | 2.705 | 4.137 | 2.413 | 5.377 | 7.74 | 3.969 | 5.89 | 1.659 | 5.318 |
| Nb | 46.941 | 27.884 | 39.105 | 23.972 | 72.51 | 106.413 | 33.349 | 60.495 | 18.878 | 54.843 |
| Ta | 2.273 | 2.039 | 2.902 | 1.704 | 5.691 | 8.402 | 2.168 | 3.968 | 1.506 | 3.835 |
| Zr | 1425 | 784 | 983 | 755 | 3516 | 5330 | 1284 | 3879 | 171 | 3438 |
| Hf | > 29 | 19.51 | 25.3 | 18.88 | > 29 | > 29 | > 29 | > 29 | 4.58 | > 29 |
| Mo | 0.98 | 0.53 | 0.65 | 0.38 | 0.88 | 1.13 | 0.53 | 0.67 | 0.45 | 0.72 |
| W | 1.46 | 1.07 | 1.45 | 0.82 | 3.01 | 4.21 | 1.27 | 2.5 | 0.68 | 1.58 |
| Pb | 23.69 | 16.39 | 18.43 | 13.26 | 16.68 | 16.90 | 20.14 | 15.69 | 17.19 | 18.90 |
| Y | 29.36 | 13.92 | 21.34 | 13.06 | 25.2 | 33.9 | 24.39 | 27.19 | 7.67 | 29.6 |
| Th/ U | 1.69 | 4.39 | 4.82 | 5.10 | 6.17 | 8.56 | 3.21 | 7.06 | 4.28 | 5.75 |
| Transition metals | | | | | | | | | | |
| Cr | 87 | 49 | 58 | 38 | 68 | 88 | 35 | 64 | 40 | 66 |
| V | 114.3 | 52.5 | 75.1 | 43.5 | 103.4 | 143 | 40.2 | 87.4 | 31.8 | 89.9 |
| Ni | 15 | 11.7 | 12.7 | 8.3 | 9.9 | 12.1 | 3.5 | 8.9 | 8.4 | 10.9 |
| Cu | 17.4 | 7.3 | 9.9 | 6.9 | 10.9 | 9.5 | 8.1 | 6.6 | 5.2 | 9.3 |
| Co | 11.08 | 7.87 | 9.58 | 6 | 12.65 | 10.53 | 2.47 | 8.11 | 4.49 | 10.57 |
| Sc | 5.1 | 4.9 | 6.8 | 4.2 | 7.2 | 8.7 | 3.3 | 6.2 | 3.8 | 7.1 |
| | MB | SA27 | SA28 | SA29 | SA30 | SA31 | SA32 | SA33 | SA34 | Mean (n = 19) |
| LILE | | | | | | | | | | |
| Ba | 1110.6 | 1210.9 | 939 | 866.3 | 856.9 | 935.7 | 678.8 | 648 | 639 | 852.90 |
| Sr | 227.8 | 252.3 | 203 | 166.3 | 184.9 | 206.7 | 182.3 | 151 | 150.3 | 187.55 |
| Rb | 68.44 | 84.85 | 55.81 | 65.16 | 51.49 | 55 | 39.7 | 37.67 | 36.07 | 52.38 |
| Li | 3.3 | 7.5 | 5.1 | 9.1 | 4.0 | 3.7 | 5.1 | 3.6 | 3.9 | 5.14 |
| Cs | 0.785 | 1.581 | 0.796 | 1.641 | 0.614 | 0.616 | 0.483 | 0.444 | 0.368 | 0.77 |
| HFSE | | | | | | | | | | |
| Th | 6.883 | 18.552 | 48.198 | 11.738 | 68.366 | 9.066 | 6.93 | 51.14 | 11.323 | 25.18 |
| U | 1.809 | 3.263 | 7.034 | 2.526 | 6.834 | 2.001 | 1.762 | 6.741 | 2.561 | 4.21 |
| Nb | 17.677 | 32.573 | 70.083 | 33.521 | 52.055 | 22.052 | 26.914 | 65.525 | 25.605 | 43.71 |
| Ta | 1.322 | 2.36 | 4.951 | 2.368 | 3.753 | 1.519 | 1.858 | 4.729 | 1.77 | 3.11 |
| Zr | 231 | 618 | 4165 | 546 | 3707 | 478 | 214 | 3846 | 422 | 1883 |
| Hf | 6.19 | 16.62 | > 29 | 13.83 | > 29 | 11.97 | 5.53 | > 29 | 11.15 | 13.36 |
| Mo | 0.43 | 0.65 | 0.79 | 0.77 | 0.6 | 0.39 | 0.5 | 0.62 | 0.38 | 0.63 |
| W | 0.57 | 1.1 | 2.25 | 1.24 | 1.61 | 0.7 | 0.83 | 1.88 | 0.86 | 1.53 |
| Pb | 17.97 | 22.75 | 19.06 | 33.66 | 17.97 | 15.58 | 15.09 | 15.26 | 11.55 | 18.22 |
| Y | 10.59 | 17.640 | 30.310 | 15.590 | 27.670 | 9.840 | 12.670 | 25.020 | 10.130 | 20.33 |
| Th/ U | 3.80 | 5.69 | 6.85 | 4.65 | 10.00 | 4.53 | 3.93 | 7.59 | 4.42 | 5.73 |
| Transition metals | | | | | | | | | | |
| Cr | 45 | 64 | 96 | 69 | 78 | 50 | 68 | 69 | 46 | 62.00 |
| V | 33.4 | 62.4 | 99.4 | 73 | 78.4 | 39.8 | 56 | 80 | 40.1 | 70.72 |
| Ni | 9.1 | 15.6 | 14 | 18 | 9.9 | 8.5 | 12.5 | 8.4 | 6.9 | 10.75 |

Table 4 continued

| | MB | SA27 | SA28 | SA29 | SA30 | SA31 | SA32 | SA33 | SA34 | Mean (n = 19) |
|----|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|---------------|
| Cu | 4.8 | 12.2 | 9.1 | 20.5 | 8.7 | 8.8 | 8.1 | 8.5 | 4.2 | 9.26 |
| Co | 4.58 | 9.14 | 10.33 | 8.72 | 8.64 | 5.11 | 6.77 | 6.6 | 6.87 | 7.90 |
| Sc | 4.3 | 6 | 7 | 7.3 | 5.5 | 4.1 | 6.9 | 5.5 | 4.2 | 5.69 |

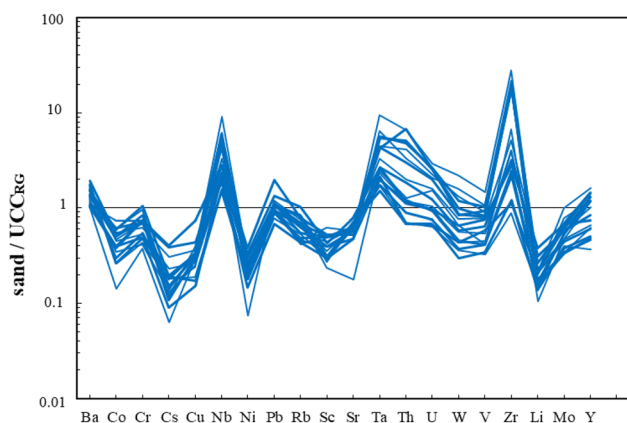


Fig. 5 Multi-element diagram for trace element concentrations for the Sanaga River bed sands between Nanga-Eboko and Atlantic Ocean normalized against UCC (after Rudnick and Gao 2003)

CIA values between 50 and 60 % indicate a low degree of weathering, while those between 60 and 80 % indicate a moderate degree of weathering. CIA values above 80 % indicate extreme weathering degree. The CIA parameter also gives an idea of the paleoclimate in the source environment (Nesbitt and Young 1982). The abundance of aluminous clay minerals indicates an intense chemical weathering in tropical or equatorial climates. CIA values of weathering materials in tropical or equatorial climates vary between 80 and 100 %. In glacial environments, where mechanical disaggregation predominates, CIA values are ~50 % (Nesbitt and Young 1982). The studied sands have CIA values between 53 and 66 %, with an average of 58 % (n = 19). This average value, close to that of UCC (50 %; Bhuiyan et al. 2011), indicates a low weathering degree of the studied sands. However, few samples (SA18 and SA20, SA27, SA29, and SA32) have CIA values greater than 60 % indicating moderate weathering. These materials have undergone moderate weathering. Their parent rocks are thus low to moderately weathered.

Plagioclase index of alteration (PIA) is generally used to measure the degree of alteration of the source rock (Bhaskar et al. 2015). PIA values can be determined using the relationship proposed by Fedo et al. (1995):

$$\text{PIA} = 100 \times (\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}) \quad (2)$$

The minimum value of this parameter is ~50 %. The maximum value of PIA is equal to 100 % and indicates complete plagioclase hydrolysis with the formation of kaolinite and gibbsite. PIA values around 50 % indicate very low plagioclase hydrolysis (Bhaskar et al. 2015). The PIA value of Post-Archean Australian Shale (PAAS) is 79 % (Bah and Hiroaki, 2016). The studied sands have PIA values between 57 and 75 %, with an average of 64 % (n = 19). This value indicates a moderate weathering degree.

The Mafic Index of Alteration (MIA) is a chemical weathering proxy proposed by Babechuk et al. (2014) that extends the equation of CIA to take into account the mafic elements Mg and Fe, based on the fact that mafic minerals (e.g. garnet, pyroxene, olivine, epidote) are also susceptible to chemical weathering.

The MIA formula (in molar proportions) is as follows:

$$\text{MIA}_{(O)} = 100 \times [(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_{3(t)}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_{3(t)} + \text{MgO} + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \quad (3)$$

MIA increasing index values indicate progressively more altered rock, as it is the case with CIA. A value of 100 indicates complete removal of the mobile elements contained in feldspars and ferromagnesian minerals. MIA values range between 54 and 67 %, with an average of 61 % (n = 19), thus indicating a moderate weathering degree of ferromagnesian minerals.

CIA, PIA, and MIA values indicate a moderate weathering degree. This result is corroborated by the abundance of quartz, feldspars, and some ferromagnesian minerals (e.g. garnet and epidote) in the studied sands. However, the Sanaga River flows in the tropical and equatorial zones in which the weathering phenomenon is intense. The moderate weathering degree of the studied materials is probably related to the predominance of sands from nearby source rocks.

Table 5 Rare earth element concentrations (ppm) of bed sands for the Sanaga River between Nanga-Eboko and Atlantic Ocean

| | SA18 | SA19 | SA20 | SA21 | SA22 | SA23 | SA24 | SA25 | SA26 | ND |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|
| La | 31.1 | 19.2 | 36.5 | 19.4 | 60.5 | 123 | 26.4 | 91.6 | 14.5 | 46.0 |
| Ce | 70.81 | 41.34 | 76.46 | 42.54 | 133.54 | 251.84 | 51.84 | 185.95 | 30.71 | 97.19 |
| Pr | 7.353 | 4.682 | 8.540 | 4.742 | 13.789 | 28.949 | 5.682 | 21.17 | 3.472 | 10.973 |
| Nd | 27.55 | 17.57 | 31.14 | 17.88 | 52.11 | 106.68 | 20.75 | 77.82 | 13.11 | 40.71 |
| Sm | 5.22 | 3.239 | 5.672 | 3.316 | 9.387 | 17.663 | 3.843 | 13.303 | 2.344 | 7.287 |
| Eu | 0.8696 | 0.6299 | 0.8605 | 0.6070 | 1.0471 | 1.4484 | 0.6273 | 1.0886 | 0.5514 | 0.8932 |
| Gd | 4.572 | 2.679 | 4.390 | 2.651 | 6.265 | 10.927 | 3.456 | 8.276 | 1.769 | 5.828 |
| Tb | 0.7181 | 0.3889 | 0.6271 | 0.3787 | 0.8033 | 1.2396 | 0.5551 | 0.9833 | 0.2507 | 0.8215 |
| Dy | 4.695 | 2.398 | 3.761 | 2.291 | 4.621 | 6.332 | 3.816 | 5.136 | 1.536 | 5.132 |
| Ho | 1.0172 | 0.5110 | 0.7773 | 0.4908 | 0.9102 | 1.2119 | 0.8569 | 0.9960 | 0.2933 | 1.0758 |
| Er | 3.276 | 1.598 | 2.403 | 1.515 | 2.842 | 3.650 | 2.759 | 3.069 | 0.858 | 3.358 |
| Tm | 0.5146 | 0.2546 | 0.3773 | 0.2351 | 0.4481 | 0.5644 | 0.4743 | 0.4764 | 0.1393 | 0.5309 |
| Yb | 3.819 | 1.884 | 2.812 | 1.811 | 3.401 | 4.226 | 3.553 | 3.598 | 0.937 | 3.862 |
| Lu | 0.617 | 0.307 | 0.446 | 0.280 | 0.541 | 0.690 | 0.561 | 0.561 | 0.138 | 0.631 |
| LREE | 142.03 | 86.03 | 158.31 | 87.88 | 269.33 | 528.13 | 108.52 | 389.84 | 64.14 | 202.16 |
| HREE | 19.23 | 10.02 | 15.59 | 9.65 | 19.83 | 28.84 | 16.03 | 23.10 | 5.92 | 21.24 |
| ∑REE | 162.13 | 96.68 | 174.77 | 98.14 | 290.20 | 558.42 | 125.17 | 414.03 | 70.61 | 224.29 |
| LREE/HREE | 7.39 | 8.59 | 10.15 | 9.10 | 13.58 | 18.31 | 6.77 | 16.88 | 10.83 | 9.52 |
| (La/Yb) _N | 5.53 | 6.92 | 8.82 | 7.28 | 12.08 | 19.77 | 5.05 | 17.29 | 10.51 | 8.09 |
| (La/Sm) _N | 6.24 | 3.70 | 4.02 | 3.65 | 4.02 | 4.35 | 4.29 | 4.30 | 3.86 | 3.94 |
| (Gd/Yb) _N | 0.97 | 1.15 | 1.26 | 1.18 | 1.49 | 2.09 | 0.79 | 1.86 | 1.53 | 1.22 |
| Eu/Eu* ₍₁₎ | 0.71 | 0.66 | 0.53 | 0.63 | 0.42 | 0.32 | 0.53 | 0.32 | 0.83 | 0.42 |
| Eu/Eu* ₍₂₎ | 0.76 | 0.91 | 0.73 | 0.87 | 0.58 | 0.44 | 0.73 | 0.44 | 1.15 | 0.58 |
| | MB | SA27 | SA28 | SA29 | SA30 | SA31 | SA32 | SA33 | SA34 | Mean (n = 19) |
| La | 13.5 | 36.8 | 85.8 | 28.8 | 126 | 17.2 | 15.8 | 86.5 | 22.1 | 47.4 |
| Ce | 29.56 | 76.24 | 173.1 | 62.66 | 243.9 | 36.27 | 35.24 | 168.54 | 46.07 | 97.57 |
| Pr | 3.362 | 8.492 | 19.398 | 6.655 | 26.955 | 4.023 | 4.11 | 19.468 | 5.300 | 10.901 |
| Nd | 12.50 | 31.26 | 71.22 | 25.04 | 96.86 | 14.9 | 15.83 | 71.14 | 19.84 | 40.21 |
| Sm | 2.376 | 5.404 | 12.075 | 4.326 | 15.667 | 2.624 | 2.96 | 11.619 | 3.425 | 6.934 |
| Eu | 0.5355 | 0.9284 | 1.1997 | 0.8707 | 1.3041 | 0.5418 | 0.7005 | 1.0707 | 0.5525 | 0.8593 |
| Gd | 1.921 | 3.978 | 8.261 | 3.405 | 9.823 | 2.006 | 2.548 | 7.664 | 2.616 | 4.897 |
| Tb | 0.2949 | 0.5334 | 1.0562 | 0.4628 | 1.1533 | 0.2911 | 0.3690 | 0.9260 | 0.3526 | 0.6424 |
| Dy | 1.813 | 3.239 | 5.701 | 2.855 | 5.724 | 1.790 | 2.303 | 4.810 | 1.826 | 3.673 |
| Ho | 0.3814 | 0.6618 | 1.0941 | 0.5585 | 0.9985 | 0.3600 | 0.4677 | 0.9259 | 0.3617 | 0.7342 |
| Er | 1.175 | 1.950 | 3.285 | 1.707 | 2.820 | 1.120 | 1.382 | 2.816 | 1.091 | 2.246 |
| Tm | 0.1835 | 0.2977 | 0.5038 | 0.2575 | 0.4310 | 0.1753 | 0.2087 | 0.4431 | 0.1754 | 0.3522 |
| Yb | 1.285 | 2.107 | 3.788 | 1.825 | 3.208 | 1.269 | 1.416 | 3.439 | 1.239 | 2.604 |
| Lu | 0.190 | 0.318 | 0.592 | 0.277 | 0.517 | 0.195 | 0.204 | 0.562 | 0.197 | 0.412 |
| LREE | 61.30 | 158.20 | 361.59 | 127.48 | 509.38 | 75.02 | 73.94 | 357.27 | 96.74 | 203.01 |
| HREE | 7.24 | 13.08 | 24.28 | 11.35 | 24.67 | 7.21 | 8.90 | 21.59 | 7.86 | 15.56 |
| ∑REE | 69.08 | 172.21 | 387.07 | 139.70 | 535.36 | 82.77 | 83.54 | 379.92 | 105.15 | 218.84 |
| LREE/HREE | 8.46 | 12.09 | 14.89 | 11.23 | 20.64 | 10.41 | 8.31 | 16.55 | 12.31 | 11.90 |
| (La/Yb) _N | 7.14 | 11.86 | 15.39 | 10.72 | 26.68 | 9.21 | 7.58 | 17.09 | 12.12 | 11.53 |
| (La/Sm) _N | 3.55 | 4.25 | 4.44 | 4.16 | 5.02 | 4.09 | 3.33 | 4.65 | 4.03 | 4.07 |
| (Gd/Yb) _N | 1.21 | 1.53 | 1.76 | 1.51 | 2.48 | 1.28 | 1.46 | 1.80 | 1.71 | 1.49 |
| Eu/Eu* ₍₁₎ | 0.77 | 0.61 | 0.37 | 0.70 | 0.32 | 0.72 | 0.78 | 0.35 | 0.57 | 0.55 |

Table 5 continued

| | MB | SA27 | SA28 | SA29 | SA30 | SA31 | SA32 | SA33 | SA34 | Mean (n = 19) |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------|
| Eu/Eu* ₍₂₎ | 1.07 | 0.85 | 0.51 | 0.97 | 0.45 | 1.01 | 1.09 | 0.48 | 0.79 | 0.76 |

$(La/Yb)_N = (La_{sample}/La_{chondrite})/(Yb_{sample}/Yb_{chondrite})$; $(La/Sm)_N = (La_{sample}/La_{chondrite})/(Sm_{sample}/Sm_{chondrite})$; $(Gd/Yb)_N = (Gd_{sample}/Gd_{chondrite})/(Yb_{sample}/Yb_{chondrite})$

$Eu/Eu^*_{(1)} = (Eu_{sample}/Eu_{chondrite})/(Sm_{sample}/Sm_{chondrite})^{1/2}(Gd_{sample}/Gd_{chondrite})^{1/2}$; $Eu/Eu^*_{(2)} = (Eu_{sample}/Eu_{UCC})/(Sm_{sample}/Sm_{UCC})^{1/2}(Gd_{sample}/Gd_{UCC})^{1/2}$

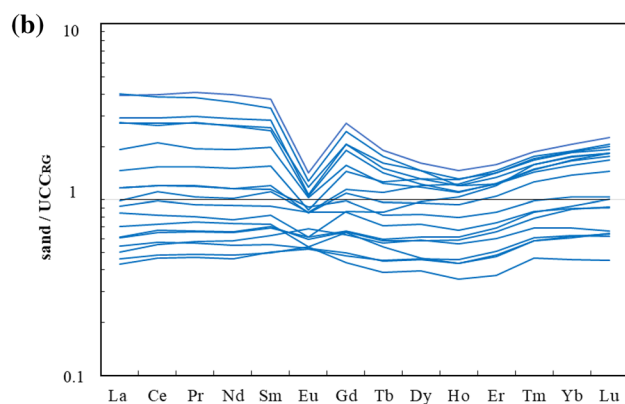
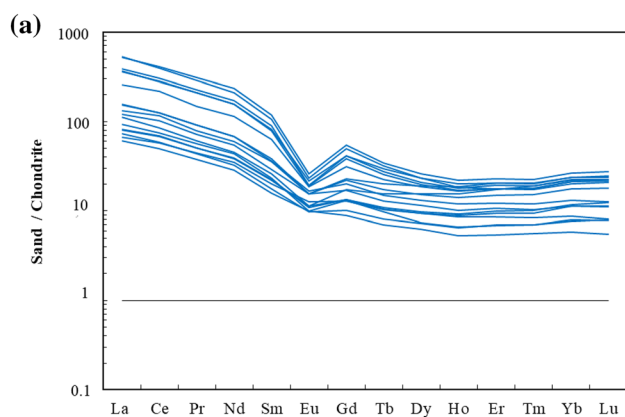


Fig. 6 Chondrite-normalized REE distribution patterns (after McDonough and Sun 1995) **a** and UCC-normalized REE distribution patterns (after Rudnick and Gao 2003) for the lower course of Sanaga River bed sands between Nanga-Eboko and Atlantic Ocean

4.3 Provenance

Geochemical analysis data and discrimination diagrams permit to identify possible source rock provenance (Schneider et al. 2015; Armstrong-Altrin et al. 2017, 2018, 2019; Maharana et al. 2018). Trace elements such as Y, Cr, Th, Hf, Nb, and Ti are among the most reliable indicators of the source rock provenance (Cullers 2000). The distribution of immobile elements such as La and Th, enriched

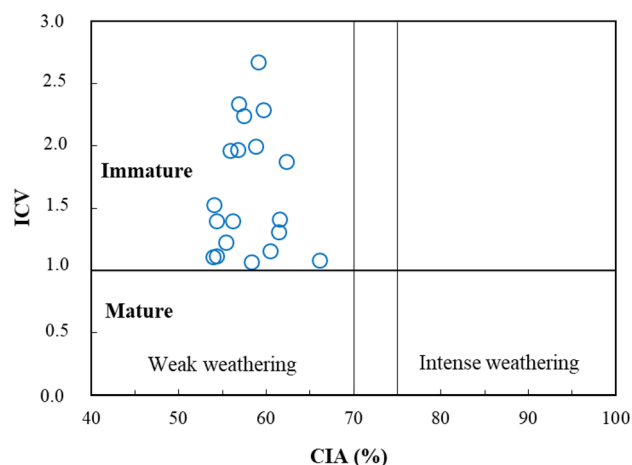


Fig. 7 ICV versus CIA diagram for the Sanaga River bed sands (after Nesbitt and Young 1984; Cox et al. 1995)

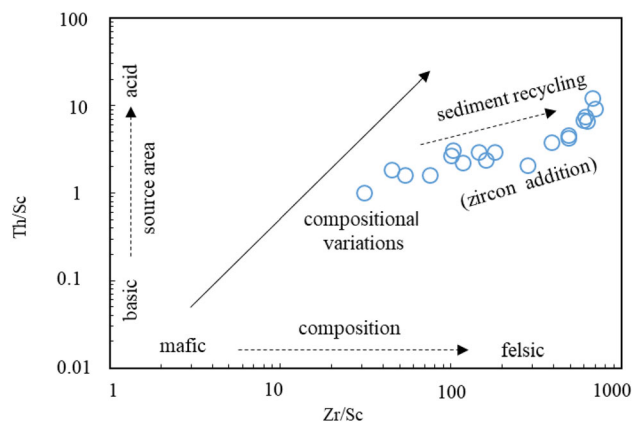


Fig. 8 Zr/Sc versus Th/Sc bivariate diagram illustrating sediment recycling (McLennan et al. 1993)

in silicic rocks, and Co and Cr, enriched in basic rocks, are also extensively used to determine the felsic or mafic source of sediments (Armstrong-Altrin et al. 2017; Madhavaraju et al. 2018; Velmurugan et al. 2019). REE concentrations are also used to derive the source of sediments (Cullers et al. 1988). Sediments derived from the Upper

continental crust are characterized by LREE enrichment. Mafic rocks have a low LREE/HREE ratio, except for alkaline basalts, and show no Eu anomalies. By contrast, felsic rocks generally have a high LREE/HREE ratio and a negative Eu anomaly (Cullers et al. 1988). Comparisons of the REE spectra of sedimentary rocks with those of source rocks also help determine the nature of source rocks (Taylor and McLennan 1985). The studied sands show enrichment in LREE relative to HREE and a negative anomaly in Eu ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.32\text{--}0.83$). These sands probably derive from felsic source rocks. This result agrees with the low Cr (35–96 ppm) and Ni (3–18 ppm) concentrations in the studied sediments. La/Sc, La/Co, Th/Sc, and Cr/Th ratios are different in felsic and mafic rocks (Table 6). These ratios can be used to estimate the average composition of the provenance (Cullers et al. 1988; Guo et al. 2018; Maharana et al. 2018).

Th/U ratio is also widely used in the determination of weathering degree and recycling of sedimentary rocks (Roddaz et al. 2006). In sedimentary rocks, Th/U values greater than 4 indicate intense weathering in the source environment or recycled sediments (Bhuiyan et al. 2011). Th/U values in Upper continental crust rocks are generally between 3.5 and 4 (McLennan et al. 1993). Th/U ratios of the studied sands are between 1.69 and 10.00, for an average of 5.40 ($n = 19$). This result confirms that the studied sediments have undergone low to moderate recycling (Bhuiyan et al. 2011).

Th/Co vs. La/Sc diagram which characterizes the geochemical composition of the source rock reveals that the studied sands derive from silicic source rocks. This result corroborates high SiO_2 concentrations (72.88–87.24 wt.%) in the studied sediments (Fig. 9). The discrimination diagram of Roser and Korsch (1988) indicates four sources of possible sources of sediments: mafic, felsic, intermediate, and quartzose. According to this diagram, the studied sands are of quartzose sedimentary origin (Fig. 10). This result corroborates that of Fig. 11 which shows that the studied sands derive from felsic source rocks. At the exception of zircons (Table 2) whose provenance is just linked to acidic rocks, other heavy minerals are consistent with metamorphic rocks: Andalousite is typical of contact metamorphism which, within the Sanaga watershed, is found in the Lom

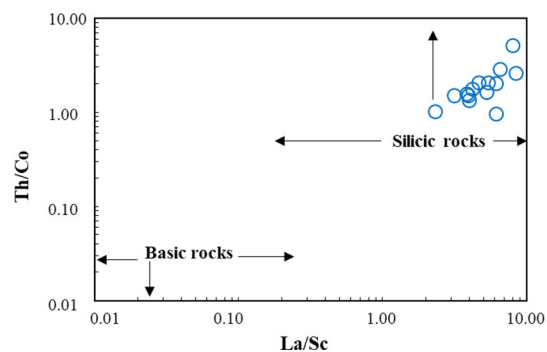


Fig. 9 Th/Co versus La/Sc diagram of geochemical characterization of rock sources (after Cullers 2002)

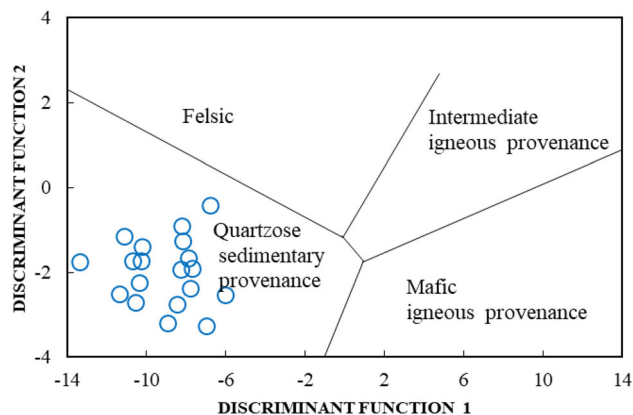


Fig. 10 Classification plot of discriminant functions F1 and F2 for the Sanaga River bed sands between Nanga-Eboko and Atlantic Ocean. Provenance fields are from Roser and Korsch (1988). $F1 = (-1.73 \times \text{TiO}_2) + (0.607 \times \text{Al}_2\text{O}_3) + (0.760 \times \text{Fe}_2\text{O}_{3t}) + (-1.500 \times \text{MgO}) + (0.616 \times \text{CaO}) + (0.509 \times \text{Na}_2\text{O}) + (-1.224 \times \text{K}_2\text{O}) - 9.090$; $F2 = (0.445 \times \text{TiO}_2) + (0.070 \times \text{Al}_2\text{O}_3) + (-0.250 \times \text{Fe}_2\text{O}_{3t}) + (-1.142 \times \text{MgO}) + (0.438 \times \text{CaO}) + (1.475 \times \text{Na}_2\text{O}) + (1.426 \times \text{K}_2\text{O}) - 6.861$

series. Epidotes, garnet, anatase, alumina silicates are common minerals of the Yaounde group. It appears that the major provider of heavy minerals and thus sediments are syn- to post-tectonic granitoids (600–500 Ma), pre- to syn-tectonic orthogneisses (660–600 Ma), and Meso to Neoproterozoic metasediments (700–1000 Ma; Tchakounté et al. 2017), which outcrop along the Sanaga River (Table 7; Fig. 12).

Table 6 Range of elemental ratios of Sanaga River sands in this study compared to elemental ratios in similar fractions derived from felsic and mafic rocks

| Elemental ratio | Sanaga sands ^a | Sediments from felsic sources ^b | Sediments from mafic sources ^b |
|-----------------|---------------------------|--|---|
| La/Sc | 2.29–15.73 | 2.50–16.3 | 0.43–0.86 |
| La/Co | 2.33–14.58 | 1.80–13.8 | 0.14–0.38 |
| Th/Sc | 1.00–12.43 | 0.84–20.5 | 0.05–0.22 |
| Cr/Th | 1.3–9.81 | avr-15 | 25–100 |

^aThis study

^bCullers (2000); avr: average

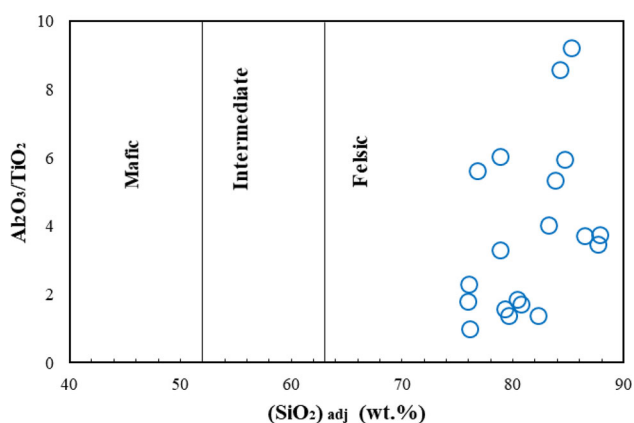


Fig. 11 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ vs. $(\text{SiO}_2)_{\text{adj}}$ plot of the Sanaga River bed sands (after Armstrong-Altrin 2009)

4.4 Tectonic setting

Geochemical data of clastic sediments represent a veritable archive that allows determining not only the degree of weathering and provenance of their source rocks but also the geotectonic environment in which these rocks have

been formed (Armstrong-Altrin et al. 2015; Etemad-Saeed et al. 2015; Ramos-Vazquez et al. 2018; Rivera-Gómez et al. 2020). To better understand the geotectonic environment in which source rocks have been formed, Verma and Armstrong-Altrin (2013) propose two discriminant functions depending on whether the sediments have high SiO_2 [$(\text{SiO}_2)_{\text{adj}} = 63\text{--}95$ wt.%] or low SiO_2 concentrations [$(\text{SiO}_2)_{\text{adj}} = 35\text{--}63$ wt.%]. Verma and Armstrong-Altrin (2013) discrimination functional diagrams based solely on major element data define three main types of tectonic environments: island arc, rift, and collision zones (Fig. 13). Identically, Verma and Armstrong Altrin (2016) discrimination diagrams enable the discrimination of sediments derived from passive and active margin settings from the major element (Fig. 14a) and the combination of major and trace element data (Fig. 14b). In these diagrams, the active margin field represents the sediments derived from arc and collision setting, and the passive margin represents a rift setting. All the studied sediments have high SiO_2 concentrations (> 63 %). On the tectonic discrimination diagrams, all the samples are plotted in the rift and passive margin domains (Figs. 13, 14), which is consistent with the

Table 7 Representative REE concentrations (ppm) of possible source rocks from the study area

| REE (ppm) | Possible source rocks ^a | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|-------------|-------------|------------------|
| | BG (N = 6) | BMG (N = 9) | HBG (N = 9) | Gneisses (N = 4) |
| La | 86.7 | 127.5 | 38.9 | 44.2 |
| Ce | 165.92 | 257.00 | 80.67 | 99.34 |
| Pr | 17.600 | 29.490 | 9.900 | 12.500 |
| Nd | 59.71 | 99.02 | 38.96 | 52.60 |
| Sm | 10.620 | 13.850 | 7.240 | 9.920 |
| Eu | 0.9040 | 1.1100 | 1.9100 | 2.2407 |
| Gd | 7.910 | 6.610 | 5.520 | 7.449 |
| Tb | 1.1670 | 0.7700 | 0.7560 | 0.9727 |
| Dy | 6.530 | 3.150 | 4.050 | 5.204 |
| Ho | 1.2190 | 0.4500 | 0.7290 | 0.9377 |
| Er | 3.532 | 1.110 | 1.978 | 2.489 |
| Tm | 0.544 | 0.130 | 0.283 | 0.330 |
| Yb | 3.645 | 0.760 | 1.846 | 2.119 |
| Lu | 0.546 | 0.110 | 0.284 | 0.308 |
| $\sum\text{REE}$ | 366.59 | 541.06 | 193.00 | 240.61 |
| LREE/HREE | 13.57 | 40.25 | 11.37 | 11.03 |
| $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ | 16.17 | 113.97 | 14.30 | 14.17 |
| $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ | 5.10 | 5.75 | 3.35 | 2.78 |
| $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ | 1.76 | 7.04 | 2.42 | 2.84 |
| Eu/Eu* | 0.30 | 0.36 | 0.93 | 0.80 |

BG: Biotite granitoids; BMG: Biotite muscovite granitoids; HBG: Hornblende biotite granitoids ^a data from Tchameni et al. (2006) and Nyeck et al. (2019)

$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = (\text{La}_{\text{sample}}/\text{La}_{\text{chondrite}})/(\text{Yb}_{\text{sample}}/\text{Yb}_{\text{chondrite}})$; $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = (\text{La}_{\text{sample}}/\text{La}_{\text{chondrite}})/(\text{Sm}_{\text{sample}}/\text{Sm}_{\text{chondrite}})$; $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = (\text{Gd}_{\text{sample}}/\text{Gd}_{\text{chondrite}})/(\text{Yb}_{\text{sample}}/\text{Yb}_{\text{chondrite}})$

$\text{Eu}/\text{Eu}^* = (\text{Eu}_{\text{sample}}/\text{Eu}_{\text{chondrite}})/(\text{Sm}_{\text{sample}}/\text{Sm}_{\text{chondrite}})^{1/2}(\text{Gd}_{\text{sample}}/\text{Gd}_{\text{chondrite}})^{1/2}$

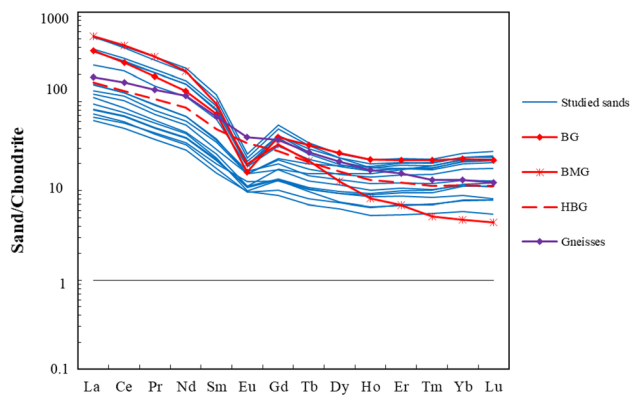


Fig. 12 Comparison of the chondrite-normalized REE patterns of the Sanaga River bed sands with those of possible source rocks from the study area

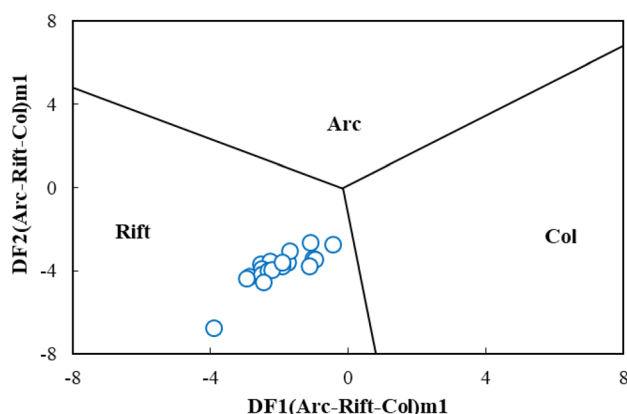


Fig. 13 Discriminant-function multi-dimensional diagram for high-siliclastic sediments of the Sanaga River bed sands (after Verma and Armstrong-Altrin 2013). The subscript m_1 in DF1 and DF2 represents the high-silica diagram based on \log_e -ratios of major-elements. The discriminant function equations are: $DF1_{(Arc-Rift-Col)m1} = (-0.263 \times \ln(TiO_2/SiO_2)_{adj}) + (0.604 \times \ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj}) + (-1.725 \times \ln(Fe_2O_3/SiO_2)_{adj}) + (0.660 \times \ln(MnO/SiO_2)_{adj}) + (2.191 \times \ln(MgO/SiO_2)_{adj}) + (0.144 \times \ln(CaO/SiO_2)_{adj}) + (-1.304 \times \ln(Na_2O/SiO_2)_{adj}) + (0.054 \times \ln(K_2O/SiO_2)_{adj}) + (-0.330 \times \ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj}) + 1.588$; $DF2_{(Arc-Rift-Col)m1} = (-1.196 \times \ln(TiO_2/SiO_2)_{adj}) + (1.604 \times \ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj}) + (0.303 \times \ln(Fe_2O_3/SiO_2)_{adj}) + (0.436 \times \ln(MnO/SiO_2)_{adj}) + (0.838 \times \ln(MgO/SiO_2)_{adj}) + (-0.407 \times \ln(CaO/SiO_2)_{adj}) + (1.021 \times \ln(Na_2O/SiO_2)_{adj}) + (-1.706 \times \ln(K_2O/SiO_2)_{adj}) + (-0.126 \times \ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj}) - 1.068$

tectonic history of Pan African in Southern Cameroon (Moussango et al. 2018). On the geodynamic point of view Pan-African domain of south Cameroon prolongs to the East the passive Atlantic margin of the Africa continent. The Sanaga River basin which flows following an ENE-WSW direction to the Atlantic Ocean straddles three different domains of the Pan-African belt of Cameroon: the southern domain represented by metamorphic formations of the Yaoundé group; the Adamawa and the West Cameroon domains composed of granitoids and gneisses. The SF which corresponds to a linear N70°E oriented

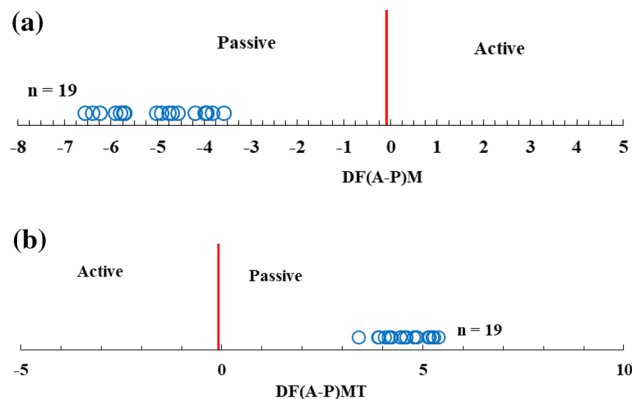


Fig. 14 Evaluation of the new multidimensional discriminant function diagrams for the discrimination of active (A) and passive (P) margin settings from sediments of the Sanaga River bed sands. **a** Major element (M) based diagram; $DF_{(A-P)M} = (3.0005 \times ilr1_{Tim}) + (2.8243 \times ilr2_{Alm}) + (-1.596 \times ilr3_{FeM}) + (-0.7056 \times ilr4_{MnM}) + (-0.3044 \times ilr5_{MgM}) + (0.6277 \times ilr6_{CaM}) + (-1.1838 \times ilr7_{NaM}) + (1.5915 \times ilr8_{KM}) + (0.1526 \times ilr9_{PM}) - 5.9948$; **(b)** Combined major and trace element (MT) based diagram $DF_{(A-P)MT} = (3.2683 \times ilr1_{TiMT}) + (5.3873 \times ilr2_{AlMT}) + (1.5546 \times ilr3_{FeMT}) + (3.2166 \times ilr4_{MnMT}) + (4.7542 \times ilr5_{MgMT}) + (2.0390 \times ilr6_{CaMT}) + (4.0490 \times ilr7_{NaMT}) + (3.1505 \times ilr8_{KM}) + (2.3688 \times ilr9_{PMT}) + (2.8354 \times ilr10_{CrMT}) + (0.9011 \times ilr11_{NbMT}) + (1.9128 \times ilr12_{NiMT}) + (2.9094 \times ilr13_{VM}) + (4.1507 \times ilr14_{YMT}) + (3.4871 \times ilr15_{ZrMT}) - 3.2088$ (after Verma and Armstrong-Altrin 2016)

segment of the Sanaga River (Ngapna et al. 2018) certainly played as a good facilitator in the driven of sands of Pan-African age (1000–500 Ma; Tchakounté et al. 2017).

5 Conclusions

The mineralogical and geochemical study of bed sediments of the lower course of Sanaga River between Nanga-Eboko and the Atlantic Ocean shows that: (1) the sediments are mainly coarse-grained sands composed of quartz, microcline, plagioclase, muscovite, ilmenite, anatase, magnetite, opaques, and epidote; (2) these immature sands derive from moderately weathered rocks; (3) and are mainly litharenites originating from Pan-African age (1000–500 Ma) granitoids, orthogneisses, and metasediments from south Cameroon emplaced in a passive margin. Isotope data are needed to confirm this; and (4) the REE enrichment and the relatively strong Eu anomalies observed in these sediments are due to the high anatase, ilmenite, and zircon contents in these sands.

Acknowledgements We express our gratitude to the GeoLabs (Sudbury-Canada) for mineralogical and geochemical analyses. We also thank anonymous reviewers who have greatly improved the quality of this paper.

Data availability material All data are available upon request.

Compliance with ethical standards

Conflict of interest There is no conflict of interest.

Code availability Not applicable.

References

- AFNOR (1998) NF P 94–068 Sols: reconnaissance et essai. Mesure de la capacité d'absorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux. AFNOR, Paris
- Anaya-Gregorio A, Armstrong-Altrin JS, Machain-Castillo ML, Montiel-García PC, Ramos Vazquez MA (2018) Textural and geochemical characteristics of Late Pleistocene to Holocene fine-grained deep-sea sediment cores (GM6 and GM7), recovered from southwestern Gulf of Mexico. *J Palaeogeogr* 7(3):253–271
- Armstrong-Altrin JS (2009) Provenance of sands from Cazonas, Acapulco, and Bahía Kino beaches. *Rev Mex Cien Geol* 26(3):764–782
- Armstrong-Altrin JS, Ramasamy N, Balaram V, Olmedo NP (2015) Petrography and geochemistry of sands from the Chachalacas and Veracruz beach areas, western Gulf of Mexico: constraints on provenance and tectonic setting. *J S Am Earth Sci* 64:199–216
- Armstrong-Altrin JS, Lee YI, Kasper-Zubillaga JJ, Trejo-Ramírez E (2017) Mineralogy and geochemistry of sands along the Manzanillo and El Carrizal beach areas, southern Mexico: implications for palaeoweathering, provenance, and tectonic setting. *Geol J* 52(4):559–582
- Armstrong-Altrin JS, Ramos-Vázquez MA, Zavala-León AC, Montiel-García PC (2018) Provenance discrimination between Atasta and Alvarado beach sands, western Gulf of Mexico, Mexico: constraints from detrital zircon chemistry and U-Pb geochronology. *Geol J* 53:2824–2848
- Babechuk MG, Widdowson M, Kamber BS (2014) Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India. *Chem Geol* 363:56–75
- Bah MLM, Hiroaki I (2016) Geochemical classification and determination of maturity source weathering in Beach Sands of Eastern San' in Coast, Tango Peninsula, and Wakasa Bay, Japan. *Earth Sci Res* 5:542–550
- Bhaskar JS, Satya RG, Borthakur R, Indu BR, Rashmi RB (2015) Spectroscopic characterization and quantitative estimation of natural weathering of silicates in sediments of Dikrong River, India. *J Modern Phys* 6:1631–1641
- Bhuiyan MAH, Rahman MJJ, Dampare SB, Suzuki S (2011) Provenance, tectonics and source weathering of modern fluvial sediments of the Brahmaputra-Jamuna River, Bangladesh: inference from geochemistry. *J Geochem Explor* 111:113–137
- Bock B, McLennan SM, Hanson GN (1998) Geochemistry and provenance of the Middle Ordovician Austin Glen Member (Normanskill Formation) and the Taconian Orogeny in New England. *Sedimentology* 45:635–655
- Cox RN, Lowe DR, Cullers RL (1995) The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of Mudrock chemistry in the South-Western United States. *Geochim Cosmochim Acta* 59(14):2919–2940
- Cullers RL (2000) The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: implications for provenance and metamorphic studies. *Lithos* 51:18–1203
- Cullers RL (2002) Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chem Geol* 191:305–327
- Cullers RL, Basu A, Suttner L (1988) Geochemical signature of provenance in sand-size material in soils and stream sediments near the Tobacco Root batholith, Montana, USA. *Chem Geol* 70:335–348
- Djomeni AL, Ntamak-Nida MJ, Mvondo Owono F, Fowe Kwetche AL, Iboum Kissaaka JB, Mooh-Enougui E (2011) Soft-sediment deformation structures in Mid-Cretaceous to Mid-Tertiary deposits, Centre East of the Douala sub-basin, Cameroon: preliminary results of the tectonic control. *Syllabus Rev* 2(3):92–105
- Duplaix S (1958) Détermination microscopique des minéraux des sables, 2ème édition révisée, Librairie polytechnique ch. Béranger, Paris et Liège
- Dzana JG, Ndam Ngoupayou JR, Tchawa P (2010) The Sanaga discharge at the Edea catchment outlet (Cameroon): an example of hydrologic responses of a tropical rainfed river system to changes in precipitation and groundwater inputs and to flow regulation. *River Res Appl* 3:100. <https://doi.org/10.1002/rra.1392>
- Etemad-Saeed N, Hosseini-Barzi M, Adabi MH, Sadeghi A, Houshmandzadeh A (2015) Provenance of Neoproterozoic sedimentary basement of northern Iran, Kahar Formation. *J Afr Earth Sci* 111:54–75
- Fedo CM, Nesbitt HW, Young GM (1995) Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary soils and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology* 23:921–924
- Garzanti E, Resentini A (2016) Provenance control on chemical indices of weathering (Taiwan river sands). *Sediment Geol* 336:81–95
- Garzanti E, Andò S, France-Lanord C, Galy V, Censi P, Vignola P (2011) Mineralogical and chemical variability of fluvial sediments. 2. Suspended-load silt (Ganga-Brahmaputra, Bangladesh). *Earth Planet Sci Lett* 302:107–120
- Guo Y, Yang S, Su N, Li C, Yin P, Wang Z (2018) Revisiting the effects of 28 hydrodynamic sorting and sedimentary recycling on chemical weathering indices. *Geochim Cosmochim Acta* 227:48–63. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.02.015>
- Hernández-Hinojosa V, Montiel-García PC, Armstrong-Altrin JS, Nagarajan R, Kasper-Zubillaga JJ (2018) Textural and geochemical characteristics of beach sands along the Western Gulf Of Mexico, Mexico. *Carpath J Earth Environ* 13(1):161–174. <https://doi.org/10.26471/cjees/2018/013/015>
- Herron MM (1988) Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *J Sediment Petrol* 58:820–829
- Madhavaraju J, Saucedo-Samaniego JC, Loser H, Espinoza-Maldonado IG, Solari L, Monreal R, Grijalva-Noriega FJ, Jaques-Ayala C (2018) Detrital zircon record of Mesozoic volcanic arcs in the Lower Cretaceous Mural Limestone, North western Mexico. *Geol J*. <https://doi.org/10.1002/gj.3315>
- Maharana C, Srivastava D, Tripathi JK (2018) Geochemistry of sediments of the Peninsular rivers of the Ganga basin and its implication to weathering, sedimentary processes and provenance. *Chem Geol* 483:1–20
- Mbale NE, Sababa E, Bayiga C, Ekoa BZA, Ndjigui P-D (2019) Mineralogical and geochemical characterization of the unconsolidated sands from the Mefou River terrace Yaoundé area, Southern Cameroun. *J Afr Earth Sci* 159:1–14
- McDonough WF, Sun S-S (1995) Composition of the earth. *Chem Geol* 120:223–253
- McLennan SM, Hemming SR, McDaniel DK, Hanson GN (1993) Geochemical approaches to sedimentation provenance and tectonics. *Geol Soc Am Spec Pap* 284:21–40

- Messanga PA, Efon B, Ntamack D, Tatietsé TT (2019) Multicriterial analysis and choice of hydrological models in tropical zone: application to the Sanaga Watershed in Cameroon. *Int J Civil Eng Technol* 10:505–520
- Moussango IAP, Mvondo Owono F, Njom BSP, Mbog Bassong JP, Nlomngan Sep, Owona S, Ekodeck GE (2018) Sanaga fault: evidence of Neotectonics and Landscape Evolution in Edéa Region (Cameroon, Centre-Africa). *J Geogr Geol* 10(3):57–79. <https://doi.org/10.5539/jgg.v10n3p57>
- Nagarajan R, Armstrong-Altrin JS, Kessler FL, Jong J (2017) Petrological and geochemical constraints on provenance, paleo-weathering and tectonic setting of clastic sediments from the Neogene Lambir and Sibuti Formations, northwest Borneo. In: Mazumder R (ed) *Sediment provenance*. Elsevier, Amsterdam, pp 123–153
- Ndam Ngoupayou JR, Dzana JG, Kpoumie A, Tanwi Ghogomu R, Fouepe Takounjou A, Braun JJ, Ekodeck GE (2016) Present-day sediment dynamics of the Sanaga catchment (Cameroon): from the total suspended sediment (TSS) to erosion balance. *Hydrol Sci J*. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.968572>
- Ndjigui P-D, Beauvais A, Fadil-Djenabou S, Ambrosi JP (2014) Origin and evolution of Ngaye River alluvial sediments, Northern Cameroon: geochemical constraints. *J Afr Earth Sci* 100:164–178
- Ndjigui P-D, Ebah Abeng SA, Ekomane E, Nzeukou NA, Ngo Mandeng FS, Lindjeck MM (2015) Mineralogy and geochemistry of pseudogley soils and recent alluvial clastic sediments in the Ngog-Lituba region, Southern Cameroon: an implication to their genesis. *J Afr Earth Sci* 108:1–14
- Ndjigui P-D, Onana VL, Sababa E, Bayiga EC (2018) Mineralogy and geochemistry of the Lokoundje alluvial clays from the Kribi deposits, Cameroonian Atlantic coast: Implications for their origin and depositional environment. *J Afr Earth Sci* 143:102–117
- Ndjigui P-D, Bayiga EC, Onana VL, Djenabou-Fadil S, Ngono GSA (2019) Mineralogy and geochemistry of recent alluvial sediments from the Ngaye River water shed, northern Cameroon: implications for the surface processes and Au-PGE distribution. *J Afr Earth Sci* 150:136–157
- Ndome EPE, Onana VL, Boubakar L, Kamgang KBV, Ekodeck GE (2014) Relationships between major and trace elements during weathering processes in a sedimentary context: implications for the nature of source rocks in Douala, Littoral Cameroon. *Chem Erde-Geochem* 74:765–781
- Ndougsa-Mbarga T, Gouet DH, Bisso V, Meying A, Manguel-Dicoum E (2012) Imaging the subsurface in the Cameroon centre region using the audio-magnetotellurics (AMT) soundings for the monitoring of the Monatélé-Sa'a Earthquake Area. *J Earth Sci Geotechn Eng* 3(4):107–123
- Nesbitt HW, Young GM (1982) Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299:715–717
- Nesbitt HW, Young GM (1984) Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic-rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochim Cosmochim Acta* 48(7):1523–1534
- Ngapna MN, Owona S, Owono FM, Mpesse JE, Youmen D, Lissom J, Ondoa JM, Ekodeck GE (2018) Tectonics, lithology and climate controls of morphometric parameters of the Edea-Eseka region (SW Cameroon, Central Africa): implications on equatorial rivers and landforms. *J Afr Earth Sci* 138:219–232
- Ngon Ngon GF, Etame J, Ntamak-Nida MJ, Mbesse CO, Mbai JS, Bayiga EC, Gerard M (2016) Geochemical and palaeoenvironmental characteristics of Missole I iron duricrusts of the Douala sub-basin (Western Cameroon). *CR Geosci* 348(2):127–137
- Ngueutchoua G, Ekoa BAZ, Eyong TJ, Demanou DZ, Baba DH, Tchami NF (2019) Geochemistry of cretaceous fine-grained siliciclastic rocks from Upper Mundek and Logbadjeck Formations, Douala sub-basin, SW Cameroon: implications for weathering intensity, provenance, paleoclimate, redox condition, and tectonic setting. *J Afr Earth Sci* 152:215–236
- Nyeck B, Ngimbous RV, Ndjigui PD (2019) Petrology of saprolite-developed on gneisses in the Matomb region, South Cameroon. *J Afr Earth Sci* 150:107–122
- Nzeukou NA, Fagel N, Njoya A, Beyala Kamgang V, Eko Medjo R, Melo Chinje U (2013) Mineralogy and physico-chemical properties of alluvial clays from Sanaga valley (Center Cameroon): suitability for ceramic application. *Appl Clay Sci* 83–84:238–243
- Parfenoff A, Pomerol C, Tourenq J (1970) *Les minéraux en grains méthodes d'études et détermination*. Masson et Cie, Paris
- Purevjav N, Roser B (2013) Geochemistry of Silurian- Carboniferous sedimentary rocks of the Ulaanbaatar terrane, Hangay-Hentey belt, central Mongolia Provenance, paleoweathering, tectonic setting, and relationship with the neighboring Tsetserleg terrane. *Chem Erde-Geochem* 73:481–493
- Ramos-Vázquez MA, Armstrong-Altrin JS, Machain-Castillo ML, Gío-Argáez FR (2018) Foraminiferal assemblages, ¹⁴C ages, and compositional variations in two sediment cores in the western Gulf of Mexico. *J S Am Earth Sci* 88:480–496
- Ramos-Vázquez MA, Armstrong-Altrin JS (2019) Sediment chemistry and detrital zircon record in the Bosque and Paseo del Mar coastal areas from the southwestern Gulf of Mexico. *Mar Petrol Geol* 110:650–675. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.07.032>
- Regard V, Carretier S, Boeglin J-L, Ngoupayou J-RN, Dzana J-G, Bedimo J-P, Riotte J, Braun J-J (2016) Denudation rates on cratonic landscapes: comparison between suspended and dissolved fluxes, and ¹⁰Be analysis in the Nyong and Sanaga River basins, south Cameroon. *Earth Surf Process Landf* 41:1671–1683
- Rivera-Gómez MA, Armstrong-Altrin JS, Verma SP, Díaz-González L (2020) APMdisc: an online computer program for the geochemical discrimination of siliciclastic sediments from active and passive margins. *Turk J Earth Sci* 29:550–578. <https://doi.org/10.3906/yer-1908-15>
- Roddaz M, Viers J, Brusset S, Baby P, Boucayrand C, Héraïl G (2006) Controls on weathering and provenance in the Amazonian foreland basin: insights from major and trace element geochemistry of Neogene Amazonian sediments. *Chem Geol* 226:31–65
- Rosales-Hoz L, Machain-Castillo ML, Carranza-Edwards A (2017) Geochemistry of deep-sea sediments in two cores retrieved at the mouth of the Coatzacoalcos River delta, western Gulf of Mexico. *Mexico Arab J Geosci* 10(6):148. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2934-z>
- Roser BP, Korsch RJ (1988) Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discrimination function analysis of major-element data. *Chem Geol* 67:119–139
- Rudnick RL, Gao S (2003) The composition of the continental crust. In: Rudnick RL (ed) *The crust*. Elsevier-Pergamon, Oxford, pp 1–64
- Sangen M, Eisenberg J, Kankeu B, Runge J, Tchindjang M (2010) Preliminary results on palaeoenvironmental research carried out in the framework of the second phase of the resako-project in the upper catchments areas of the Nyong and Sanaga Rivers in Cameroon. *Palaeoecol Afr* 30:165–188
- Schneider S, Hornung J, Hinderer M, Garzanti E (2015) Petrography and geochemistry of modern river sediments in an equatorial environment (Rwenzori Mountains and Albertine rift, Uganda)—implications for weathering and provenance. *Sediment Geol* 336:106–119


- Silva MMVG, Cabral Pinto MMS, Carvalho PCS (2016) Major, trace and REE geochemistry of recent sediments from lower Catumbela River (Angola). *J Afr Earth Sci* 115:203–217
- Tawfik HA, Salah MK, Maejima W, Armstrong-Altrin JS, Abdel-Hameed A-MT, El Ghandour MM (2017) Petrography and geochemistry of the Lower Miocene Moghra sandstones, Qattara Depression, north Western Desert, Egypt. *Geol J*. <https://doi.org/10.1002/gj.3025>
- Taylor S, McLennan S (1985) *The continental crust: its composition and evolution*. Blackwell Scientific, Oxford, p 312
- Tchakounté J, Eglinger A, Toteu SF, Zeh A, Nkoumbou C, Mvondo Ondo J, Penaye J, de Wit M, Barbey P (2017) The Adamawa-Yadé domain, a piece of Archaean crust in the Neoproterozoic Central African Orogenic belt (Bafia area, Cameroon). *Precambrian Res* 299:210–229
- Tchameni R, Pouclet A, Penaye J, Ganwa AA, Toteu SF (2006) Petrography and geochemistry of the Ngaoundéré Pan-African granitoids in Central North Cameroon: implications for their sources and geological setting. *J Afr Earth Sci* 44:511–529. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.11.017>
- Velmurugan K, Madhavaraju J, Balaram V, Ramasamy S, Ramachandran A, Ramirez-Montoya E, Saucedo-Sama-Niego JC (2019) Provenance and tectonic setting of the clastic rocks of the Kerur Formation, Badami Group, Mohare area, Karnataka, India. In: Mondal MEA (ed) *Precambrian crustal evolution of India: geological evolution of the precambrian indian shield*, 1st edn. Society of earth scientist series. Springer, Berlin, pp 239–269
- Verma SP, Armstrong-Altrin JS (2013) New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins. *Chem Geol* 355:117–133
- Verma SP, Armstrong-Altrin JS (2016) Geochemical discrimination of siliciclastic sediments from active and passive margin settings. *Sediment Geol* 332:1–12
- von Eynatten H, Tolosana-Delgado R, Karius V, Bachmann K, Caracciolo L (2016) Sediment generation in humid Mediterranean setting: grain-size and source-rock control on sediment geochemistry and mineralogy (Sila Massif, Calabria). *Sediment Geol* 336:68–80
- Wentworth CK (1922) A scale of grade and class terms for clastic sediments. *J Geol* 30(5):377–392
- Yvon J, Garin P, Delon JF, Cases JM (1982) Valorisation des argiles kaolinitiques des Charentes dans le caoutchouc naturel. *Bull Minér* 105:535–541

ANNEXE II. PUBLICATION

Nanga Bineli MT, Ndzié Mvindi AT, Ndome Effoudou-Priso E, Bikoy YR, Nyassa Ohandja H , Onana VL, Ekodeck GE, 2022. Mineralogy, geochemistry and physic-mechanical characterization of basalts, granites, and sands from Sanaga River (Cameroon): Potential use as construction materials. *Arabian Journal of Geosciences*.
<https://doi.org/10.1007/s12517-022-10589-2>



Mineralogy, geochemistry, and physico-mechanical characterization of basalts, granites, and alluvial sands from Sanaga River (Cameroon): Potential use as construction materials

Marie Thérèse Nanga Bineli¹ · Aloys Thierry Ndzié Mvindi^{1,2} · Estelle Ndome Effoudou-Priso³ · Yves Robert Bikoy¹ · Hervé Nyassa Ohandja¹ · Vincent Laurent Onana¹  · Georges Emmanuel Ekodeck¹

Received: 11 January 2022 / Accepted: 6 July 2022
© Saudi Society for Geosciences 2022

Abstract

This paper aims to evaluate the influence of the geological characteristics of coarse basaltic and granitic aggregates on the uniaxial compressive strength of conventional hydraulic concrete made from acidic alluvial sands. Mineralogical, geochemical, and geotechnical analyses were performed on aggregates. Two types of conventional hydraulic concrete formulations were studied: concrete made with alluvial sand and granites (CG) and concrete made with alluvial sand and basalts (CB), according to Dreux-Gorisse method. For each concrete family, the water/cement ratio was kept constant and equal to ~0.52. The results obtained showed that optimal uniaxial compressive strength values are reached after 7 days of curing for CG concretes (28.9 MPa) and after 28 days for CB concretes (29.6 MPa). The transition zone between the cement paste and the coarse aggregate allows a faster setting of the mortar in CG concrete in which the coarse aggregate has a coarse-grainy texture. The uniaxial compressive strength values of concrete are related to the geological nature of the aggregates and follow a logarithmic evolution for acidic plutonic aggregates and linear for basic volcanic aggregates. Based on this experimental study, CG concretes show the best performance at short curing times.

Keywords Alluvial sand · Granitic aggregates · Basaltic aggregates · Texture · Hydraulic concrete · Uniaxial compressive strength

Introduction

The uniaxial compressive strength (σ_c) of concrete depends on many parameters such as the water/cement ratio, cement/aggregate ratio, degree of compaction, bond between mortar and aggregate, shape, strength, and size of the aggregate (Elices and Rocco 2008; Rocco and Elices 2009; Abdullahi

2012). Concrete is a composite material consisting of three phases which are mortar, mortar/aggregate interface, and coarse aggregates. The coarse aggregates of conventional hydraulic concrete ($\sigma_c < 41$ MPa) come from rock fragments characterized by high strength. Aggregates typically represent about three-quarters of the volume of the concrete. Coarse aggregates represent between 50 and 60% of the concrete mix, depending on the mix ratio used (Waziri et al. 2011; Ajamu and Ige 2015). The high percentage of coarse aggregates in conventional hydraulic concrete should in principle make the uniaxial compressive strength of the concrete a function of the geological characteristics of these aggregates. These properties of toughness, hardness, shape, size, strength, density, and specific gravity should influence the uniaxial compressive strength of concrete. To these properties, the mineralogy and the very arrangement of the minerals or texture of the aggregates should also influence the strength of the concrete. However, many studies have shown that coarse aggregate properties rarely limit strength in

Responsible Editor: Domenico M. Doronzo

✉ Vincent Laurent Onana
onana.vl@gmail.com

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

² National Civil Engineering Laboratory of Cameroon (LABOGENIE), P.O. Box 349, Yaoundé, Cameroon

³ Department of Geology, Higher Teacher's Training College, The University of Yaoundé I, P.O. Box 47, Yaoundé, Cameroon

conventional concrete, because this type of concrete mix generally corresponds to a water/cement (w/c) ratio between 0.5 and 0.7. Within this range of w/c values, the weakest components of the concrete are the hardened cement paste and the transition zone between the cement paste and the coarse aggregate, rather than the coarse aggregate itself (Mehta 1986; Larrard and Belloc 1992; Ahmad and Alghamdi 2012). Similarly, when designing conventional concrete mixtures, the mineralogy of the coarse aggregate is rarely a concern unless the aggregate contains minerals such as opal, a reactive silica mineral that often has a deteriorating effect on concrete durability (Aitcin and Mehta 1990). For high-strength concrete ($\sigma_c > 41$ MPa), the hardened cement paste and transition zone are no longer strength limits, but rather the mineralogy and strength of the coarse aggregate control the ultimate strength of the concrete (Baalbaki et al. 1991; Giaccio et al. 1992; Wu et al. 2001; Beshr et al. 2003; Sun et al. 2017; Hemmati et al. 2020). Aggregates, the main components of concrete, are materials whose geological origins are very diverse. The diversity of geological origins implies the diversity of geotechnical properties of these materials (Sun et al. 2017; Atici and Comakli 2019; Kamani and Ajalloeian 2019; Diamantis et al. 2021; Fereidooni 2022). However, geological origins are often defined in a very general way by most engineers, strength being the most important property of construction concrete. The engineers must take into account not only the strength of the concrete, but also the shortest curing time which allows rapid progress of the construction work of the structure. However, the transition zone between the cement paste and the coarse aggregate can be influenced by the geological nature of the aggregate. The present study is focused on the mineralogical, geochemical, and physico-mechanical study of alluvial sands and coarse aggregates from basalts and granites, basic volcanic rocks, and acidic plutonic rocks, respectively. These magmatic rocks, which are opposed by their texture, mineralogy, and chemistry, are the most commonly encountered in the world. This study aims to assess the influence of the mineralogy and texture of coarse aggregates from basalts and granites in the formulation of conventional hydraulic concretes made from acidic alluvial sands.

Materials and methods

Materials

The cement used for the formulation of the concretes is Dangote CEMII/B-LL 42.5R. The physical and mechanical properties of this cement are listed in Table 1.

The water used for the formulation of the concretes comes from the Cameroon Water Corporation (Camwater) domestic water distribution network. This water has a temperature of 27.2°C. Its pH and electrical conductivity are respectively 6.83 and 69.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ while its salinity is zero.

The average sand sample used for the formulation of the various concretes was obtained from the mixing of 19 sand samples collected along the bed of the Sanaga River over a distance of approximately 429 km (Fig. 1). The choice of these sands was made based on, mineralogical, and geochemical studies. The granular fraction (0/5) of sand was used for carrying out the various tests on the CB and CG concretes.

Depending on their abundance in nature, aggregates from the granites and those from the basalts (Fig. 1) were chosen for the formulation of the concretes. The basement of Bertoua is made up of undifferentiated granitoids (Fig. 1c; Ngako et al. 2019). The close observation displays three main rock types such as diorite, granite, and granodiorite that have recorded high metamorphism grade. Granites are syn- to post-tectonic (600–500 Ma). Mount Bambouto, which is one of the multiple mounts of the Cameroon Volcanic Line (CVL), consists of mainly basic lava flows covering the plains around the main edifice and the southern part of Dschang area (Fig. 1d). The magmatic rocks at Mt. Bambouto range from strongly alkaline to sub-alkaline. They cover a wide range of compositions spanning from ultrabasic-basic to strongly evolved trachytic-rhyolitic lava flows. The basement of Dschang area is mainly composed of alkali basalts. This volcanic basement reposes on granitoids and rare dioritic basement of Pan-African age (ca. 600 Ma; Kwékam et al. 2013). The main granitic and basaltic granular fractions used are 5/15 and 15/25.

Table 1 Physical and mechanical properties of Dangote cement

| Physical properties | | | | | Mechanical properties | | | | |
|--------------------------|---|---|---|----------------|-----------------------|----------------------------|--------|---------|--|
| Retaining on sieves (mm) | Apparent density (g/cm^3) | Specific density (g/cm^3) | Specific surface (cm^2/g) | Expansion (mm) | | Compressive strength (MPa) | | | |
| | | | | Cold | Heat | 2 days | 7 days | 28 days | |
| 0.59 | 0.91 | 2.98 | 3353 | 0 | 0 | 24 | 37 | 44 | |

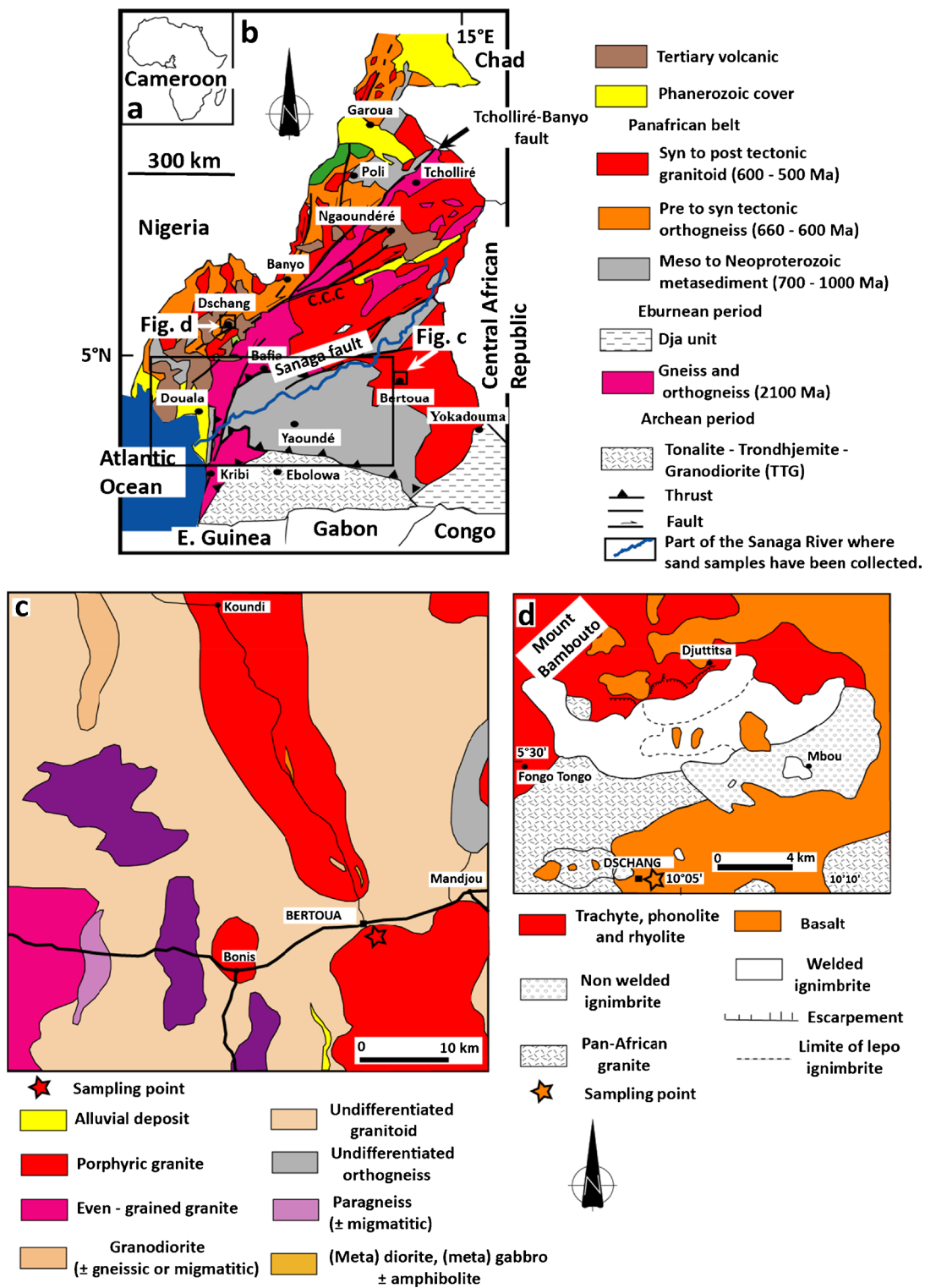


Fig. 1. Geology map of study area showing sample location (after Nkoumbou et al. 2014)

Methods

X-ray diffraction and X-ray fluorescence on fine aggregates

The mineralogy of the sands was determined by X-ray diffractometry. The analysis was performed on powders of particle size <80µm, using a PAnalytical X'PERT PRO equipped with a monochromator using CoKα radiation of

wavelength $\lambda = 1.7854 \text{ \AA}$, over a range of 2.5° to 35° 2θ and a step of 0.05° $2\theta/\text{min}$, at 40 kV and 45 mA. Semi-quantitative determinations of mineral proportions were made using the surface method. The geochemical composition of the sands was determined by X-ray fluorescence. The sand powders were first ignited and then melted with a lithium tetraborate flux before being analyzed with a Rigaku RIX-3000 wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometer. The international reference material used was BIR-1-1243. Mineralogical and geochemical analyses were performed at the Ontario Geological Survey Geosciences Laboratories in Sudbury, Canada.

Mineralogy by thin section and X-ray fluorescence on coarse aggregates

Two types of magmatic rock were chosen for the production of the aggregates used in the formulation of the concrete. To show the difference between the two types of rocks, mineralogical and geochemical analyses were performed. The thin sections of the studied rocks were made and observed at the Laboratory of Petrography of the Department of Earth Sciences of the University of Yaoundé I (Cameroon). The determination of the minerals was carried out using an XP 201 polarizing optical microscope equipped with an Opticam camera. Major element chemistry was also determined by X-ray fluorescence at the Geo Labs of the Ontario Geological Survey in Sudbury, Canada. The powders of one basalt sample and that of one granite sample were first ignited and then melted with a lithium tetraborate flux before being analyzed with a Rigaku RIX-3000 wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometer. The international reference material used was BIR-1-1243.

Physical and mechanical properties of aggregates

The determination of the apparent and specific densities of the fine aggregates was carried out according to the standard NF P 94–054 (AFNOR 1991). The sand equivalent tests were carried out in accordance with standard NF EN 933–8 (AFNOR 1999). The determination of the apparent and specific densities of coarse aggregates was carried out according to NF EN 1097–3 (AFNOR 1998) and NF EN 1097–6 (AFNOR 2001) standards. The surface cleanliness of the aggregates was determined according to the NF P 18–591 standard (AFNOR 1990). The grain size analysis was conducted according to NF P94–056 standard (AFNOR 1996).

The Los Angeles test is used to determine the values of the combined resistance to fragmentation and frictional wear of aggregates. The values of the Los Angeles coefficient (LA) were determined according to NF EN 1097-2 standard (AFNOR 2020). The Micro Deval test is used to determine the wear resistance by the reciprocal friction of

the aggregates. The values of the Micro Deval coefficient (MDE) were determined in accordance with NF EN 1097-1 standard (AFNOR 2011a).

Specimen preparation

The Dreux-Gorisse formulation method is the most suitable for the formulation of an ordinary concrete without admixture. Two types of concretes were formulated according to this method (Fig. 2); concretes made from granitic coarse aggregates (CG) and those made from basaltic coarse aggregates (CB). The particle size analysis of the coarse aggregates (Fig. 3) was carried out according to the NF EN 933–2 standard (AFNOR 1996). The same water-cement ratio was used for both types of concrete (Table 2). In order to obtain a constant workability of 7 cm, a water adjustment was performed on the CB and CG concretes. The specimens were made in cylindrical tubes of dimensions $\varnothing 16 \times 32$ cm.

Results and discussion

Mineralogy and geochemistry of aggregates

Mineralogy and geochemistry of fine aggregates

X-ray diffractograms (Fig. 4) indicate that the alluvial sands that represent the fine aggregates used to make the hydraulic concrete consist of quartz, microcline, plagioclase, muscovite, anatase, and opaque minerals. Quartz contents (Table 3) are high (78%) while those of microcline are moderate (10%). Plagioclase (4%) and opaque minerals (4%) show low contents while those of muscovite (2%) and anatase (2%) are very low.

Major element concentrations of the studied alluvial sands are presented in Table 4.

These fine aggregates have high SiO_2 (80.11 wt%) concentrations. Al_2O_3 (6.96 wt%) and Fe_2O_3 (4.11 wt%) concentrations are moderate. K_2O (2.35 wt%), TiO_2 (2.62 wt%), and LOI (2.11 wt%) concentrations are low while those of MnO, MgO, CaO, Na_2O , and P_2O_5 are very low (<1.00 wt%). The studied alluvial sands are quartzose.

The alkali values ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) as a function of SiO_2 classified the studied granite aggregates in the sub-alkaline series (Irvine and Baragar 1971). Calculating the Modified Alkali - Lime Index (MALI) reflecting the wt% abundance of sodium and potassium relative to calcium in the equation ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO} = 2.34$ wt%; Frost and Frost 2008; Frost et al. 2001), the studied granite aggregates belong to calcium series. Using the Fe-index to distinguish magnesian versus ferroan rocks on the basis of total iron in the rock calculated as wt% Fe-index = $[(\text{Fe}_2\text{O}_3)/(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})] = 0.038$; Frost and Frost 2008, Frost et al. 2001],

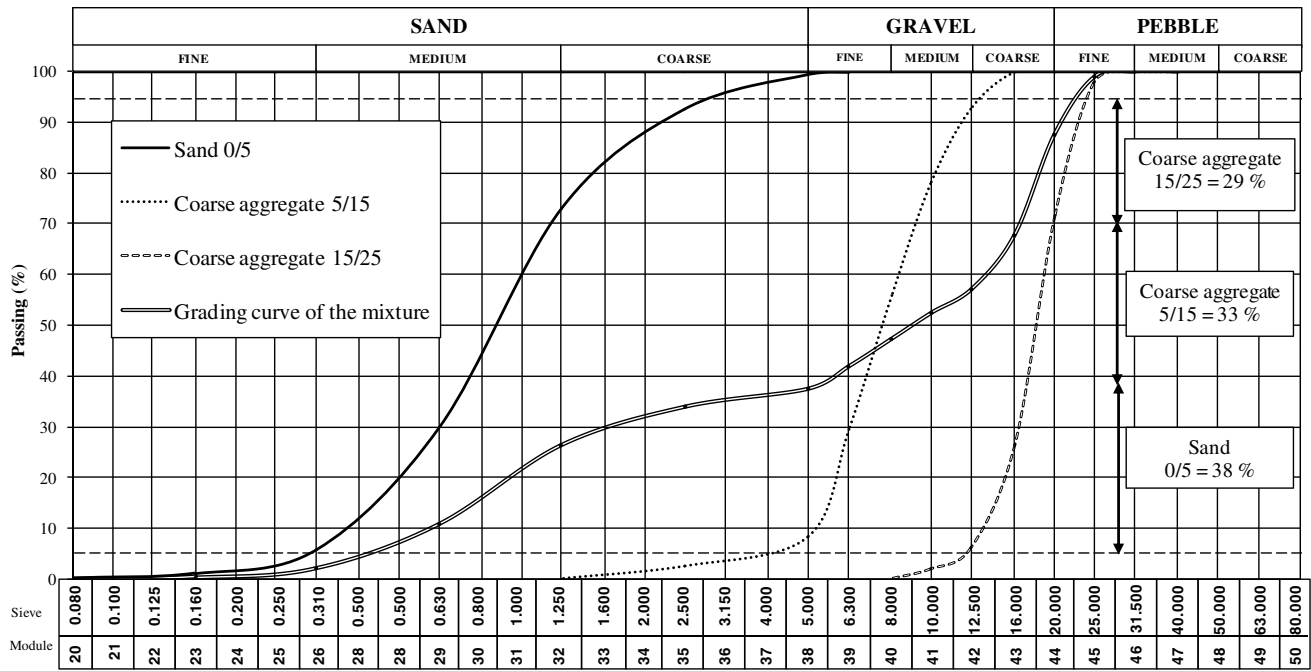
Fig. 2. Sample preparation: **a** weighing of aggregates; **b** slump test; **c** manufactured concrete specimens; **d** Surfaced specimens for uniaxial compressive strength test



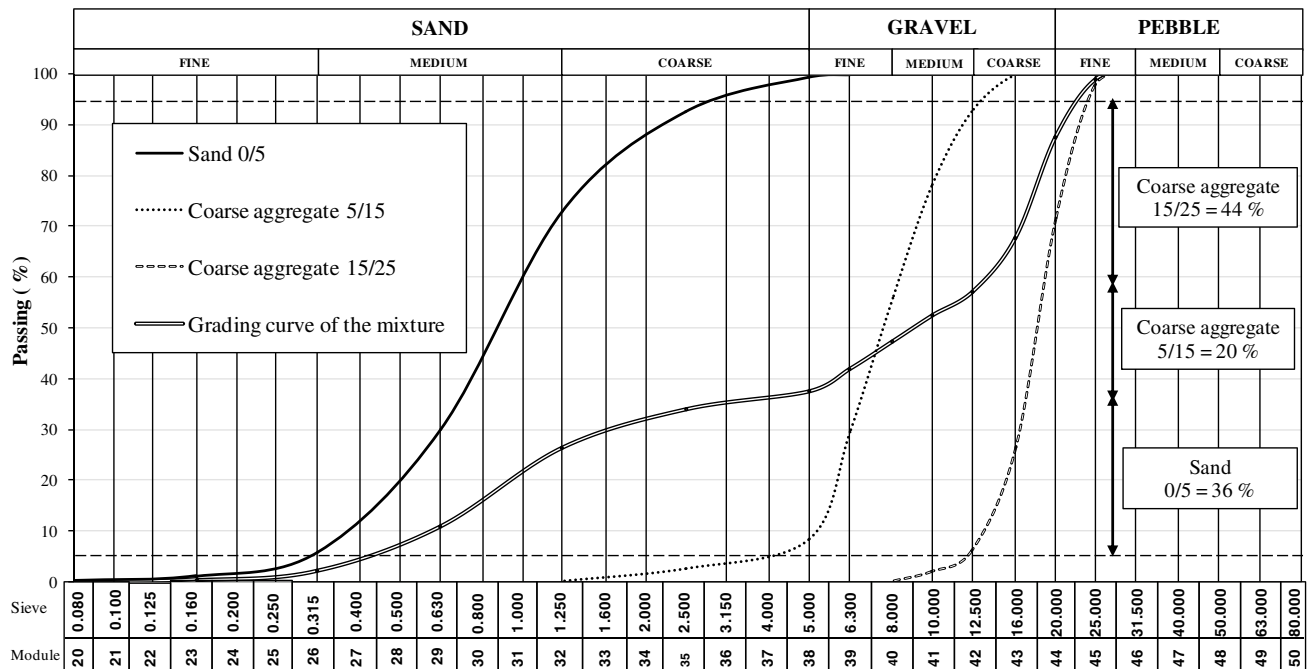
the studied granite aggregates are magnesian rocks. Geochemical discrimination based on the Aluminum Saturation Index (ASI) [$Al/(Ca - 1.67P + Na + K) = 0.25$; Frost and Frost 2008; Frost et al. 2001; Zen 1988], shows that these granite aggregates are metaluminous. The studied basalt is alkaline in affinity (Irvine and Baragar 1971). The values of alkalinity index [$((Na_2O + K_2O) - (0.37 \times SiO_2 - 14.43)) = 2.24$; Pang et al. 2012] and the sum of alkali ($Na_2O + K_2O = 4.85$ wt%) are high. The high ratio of $Na_2O/K_2O (> 2)$ shows that these basalt aggregates are of the sodic series (Middlemost 1975).

Mineralogy and geochemistry of coarse aggregates

Basaltic aggregates show an aphyric microlitic texture (Fig. 5). They consist of plagioclases (30%), clinopyroxenes (10%), olivine (5%), and opaque minerals (10%). Plagioclases are the most important mineralogical fraction of the mesostasis and show no evidence of alteration. The well-crystallized minerals represent 55% of the mineralogical composition of basaltic aggregates. Mesostasis (45%), a glassy or very finely crystalline material that fills the spaces between minerals in volcanic rocks, consists mainly of microlites of plagioclase. In this mesostasis, pyroxenes, opaque



(a)



(b)

Fig. 3. Sieve analysis for coarse aggregates and alluvial sands: **a** basalt coarse aggregates; **b** granite coarse aggregates

minerals, olivine, volcanic glass, and some alteration products are observed.

Granite aggregates have a grainy texture (Fig. 6). These aggregates consist of quartz (50%), biotite (10%), microcline (10%), opaque minerals (5%), plagioclase (20%), and

amphibole (5%). Quartz crystals are subautomorphic and associated with biotite, plagioclases and microcline.

Table 2 Compositions of the different concretes

| Types of concrete | Mass of components (kg/m ³) | | | | | Ratio | |
|-------------------|---|-------|----------|-------------|--------------|---------------------|------|
| | Cement | Water | Sand 0/5 | Gravel 5/15 | Gravel 15/25 | Theoretical density | w/c |
| CG | 400 | 210 | 647.7 | 357.2 | 788.7 | 2.404 | 0.53 |
| CB | 400 | 209.3 | 689.6 | 670.2 | 588.2 | 2.557 | 0.52 |

w/c: water/cement, CG: concrete made with granites, CB: concrete made with basalts

Fig. 4. XRD pattern of the mean sample of the studied alluvial sands

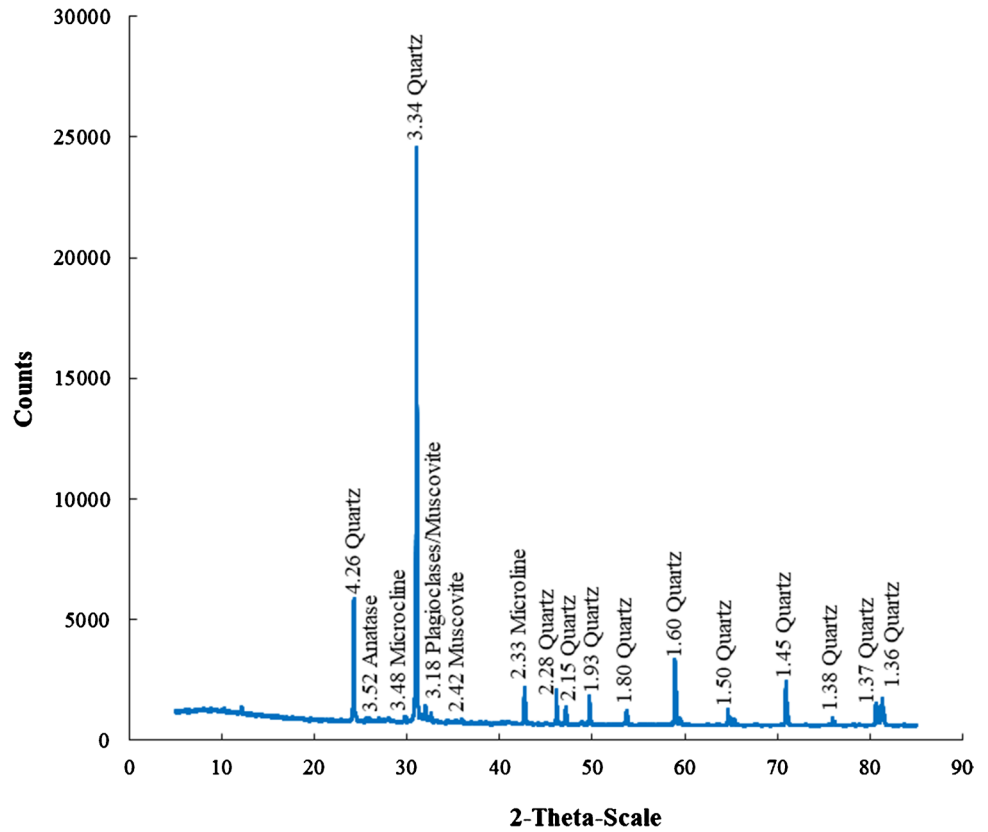


Table 3 Mineralogical composition (%) of the studied granites, basalts, and alluvial sand aggregates

| | | | | | | | |
|----------|-------------|---------------|-------------|-----------|-----------|---------|-----|
| Granites | Quartz | Plagioclase | Microcline | Biotite | Amphibole | Opaques | Sum |
| | 50 | 20 | 10 | 10 | 5 | 5 | 100 |
| Basalts | Plagioclase | Clinopyroxene | Olivine | Opaques | Mesostase | – | |
| | 30 | 10 | 5 | 10 | 45 | | 100 |
| Sand | Quartz | Microcline | Plagioclase | Muscovite | Anatase | Opaques | |
| | 78 | 10 | 5 | 2 | 1 | 4 | 100 |

Table 4 Major element concentrations (wt%) of granite and basalt aggregates

| Oxydes (%) | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | LOI | Total |
|------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|--------|
| Granites | 76.25 | 0.43 | 11.47 | 2.73 | 0.04 | 1.01 | 2.27 | 3.14 | 1.47 | 0.01 | 0.55 | 99.37 |
| Basalts | 38.56 | 3.39 | 16.05 | 7.95 | 0.27 | 3.99 | 6.22 | 2.69 | 1.37 | 3.11 | 7.81 | 91.41 |
| Sand | 80.11 | 2.62 | 6.96 | 4.11 | 0.10 | 0.47 | 0.76 | 0.75 | 2.35 | 0.07 | 2.11 | 100.41 |

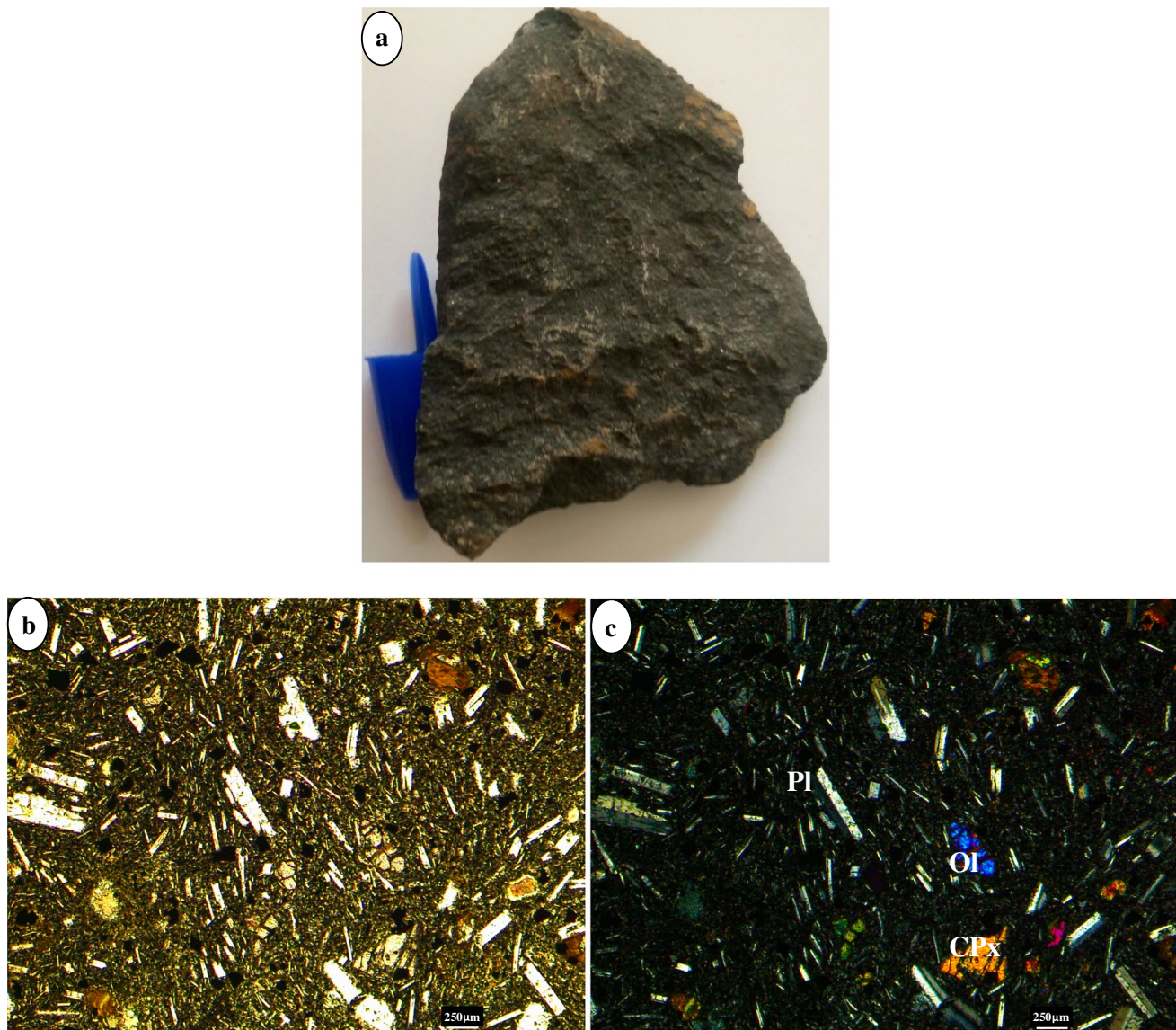


Fig. 5. Macrophotograph (a) and microphotographs of basalt coarse aggregates in plane-polarized (b) and cross-polarized (c) lights; Pl: plagioclase; Ol: olivine; CPx: clinopyroxene

Geotechnical characteristics of the aggregates

The geotechnical data for the alluvial sands are presented in Table 5. The apparent density value of the fine aggregates is 1.45 g/cm^3 . The value of the specific density is 2.59 g/cm^3 . The percentage of fines (0.03%) is very low in the studied sands. The fineness modulus value is 2.1. The values for visual sand equivalent and piston sand equivalent are 96.15% and 89.79%, respectively.

The basaltic aggregates are angular. The apparent density ($\sim 1.59\text{--}1.64 \text{ g/cm}^3$; Table 6) and specific density ($\sim 2.91 \text{ g/cm}^3$) values are similar for 5/15 and 15/25 aggregates. The surface cleanliness of these basaltic aggregates varies between 1.3 (5/15) and 0.7 (15/25).

The granitic aggregates are relatively less angular than basaltic ones. The apparent density ($\sim 1.44 \text{ g/cm}^3$; Table 6) and specific density ($\sim 2.66 \text{ g/cm}^3$) values are identical for 5/15 and 15/25 aggregates. The surface cleanliness of these granitic aggregates varies between 0.09 (5/15) and 0.17 (15/25).

The combined resistance to fragmentation and frictional wear of granite aggregates (LA = 32%; Table 7) is average, while that of the basaltic aggregates (LA = 7%) is very good. Conversely, these aggregates have very good frictional wear resistance (MDE $\sim 7\%$; Table 7). LA and MDE values indicate that granite aggregates are of class C (Table 7), while basaltic aggregates are of class B (AFNOR 2011b). These aggregates are therefore suitable

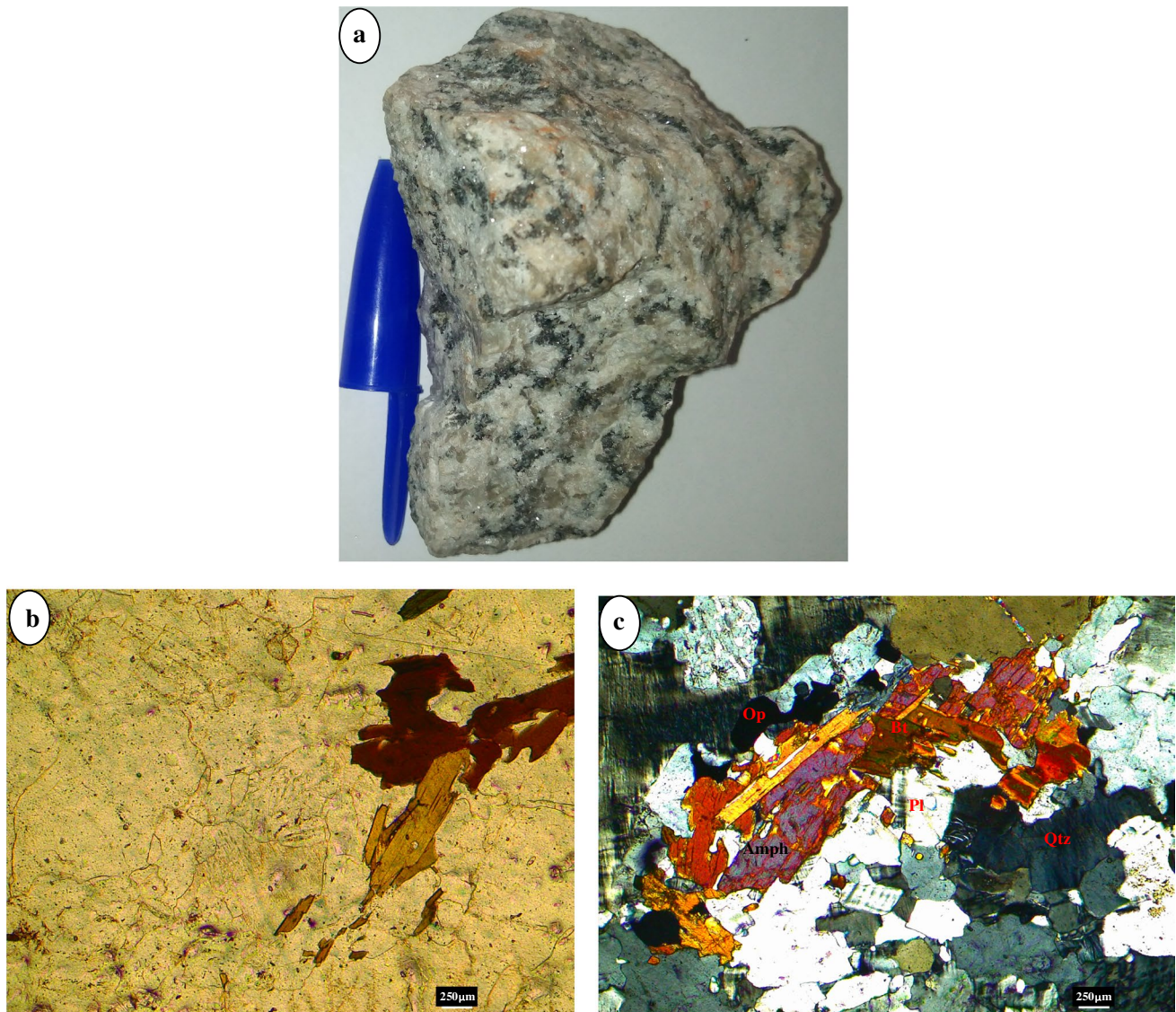


Fig. 6. Macrophotograph (a) and microphotographs of granite coarse aggregates in plane-polarized (b) and cross-polarized (c) lights; Amph: amphibole; Pl: plagioclase; Op: opaque mineral; Qtz: quartz

Table 5 Physical characteristics of alluvial sands

| | Apparent density (g/cm ³) | Specific density (g/cm ³) | Percentage of fine aggregate (<80 μm) | Fineness modulus | Piston sand equivalent (%) | Visual sand equivalent (%) |
|---------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|----------------------------|----------------------------|
| Alluvial sand | 1.45 | 2.59 | 0.03 | 2.1 | 89.79 | 96.15 |

for standard hydraulic concretes making. The difference in LA values is due to the difference in texture between these aggregates. Granitic aggregate minerals have larger sizes. These larger-sized minerals are more prone to fragmentation than the smaller ones observed in basaltic aggregates.

Uniaxial compressive strength values of concretes

The uniaxial compressive strength values σ_c of concrete specimens made from basaltic aggregates are given in Table 8. These values are 18.1 MPa, 20.5 MPa, and 29.6 MPa, respectively at 3, 7, and 28 days.

Table 6 Physical properties of coarse aggregates 5/15 and 15/25

| Physical properties | | | |
|---------------------|--|--|-------------------------|
| | Apparent density (g/cm ³) | Specific density (g/cm ³) | Superficial property |
| Granites | | | |
| Gravel 5/15 | 1.43 | 2.65 | 0.09 |
| Gravel 15/25 | 1.44 | 2.66 | 0.17 |
| Basalts | | | |
| Gravel 5/15 | 1.59 | 2.91 | 1.3 |
| Gravel 15/25 | 1.64 | 2.90 | 0.7 |

w/c: water/cement; CG: concrete made with granitic coarse aggregates; CB: concrete made with basaltic coarse aggregates

Table 7 Mechanical properties of coarse aggregates 10/14

| | Granites | Basalts |
|--------------|----------|---------|
| LA (%) | 32 | 7 |
| MDE (%) | 7 | 6 |
| LA + MDE (%) | 39 | 13 |
| Class | C | B |

LA: Los Angeles coefficient; MDE: Micro Deval coefficient

Table 8 Compressive strength values of CG and CB concretes

| Curing time (days) | 3 | 7 | 28 |
|--------------------|------|------|------|
| CG (MPa) | 23.9 | 28.3 | 30.5 |
| CB (MPa) | 18.1 | 20.5 | 29.6 |

The uniaxial compressive strength values σ_c of the concrete specimens made from the granitic aggregates are recorded in Table 7. These values are 23.9 MPa (3 days), 28.3 MPa (7 days), and 30.5 MPa (28 days).

Influence of mineralogical and geochemical compositions of aggregates on uniaxial compressive strength values of concretes

The uniaxial compressive strength values of CG concretes are higher than those of CB concretes, after 3 and 7 days of curing. These σ_c values for CG concretes are 32% and 38% higher than those for CB concretes at 3 and 7 days, respectively. At 28 days of curing, CG and CB concrete specimens show comparable σ_c values; those of CG concrete being 3% higher than those of CB concrete. Four types of aggregates are distinguished: common aggregates, heavy aggregates, light aggregates, and very hard aggregates (Dreux 1981).

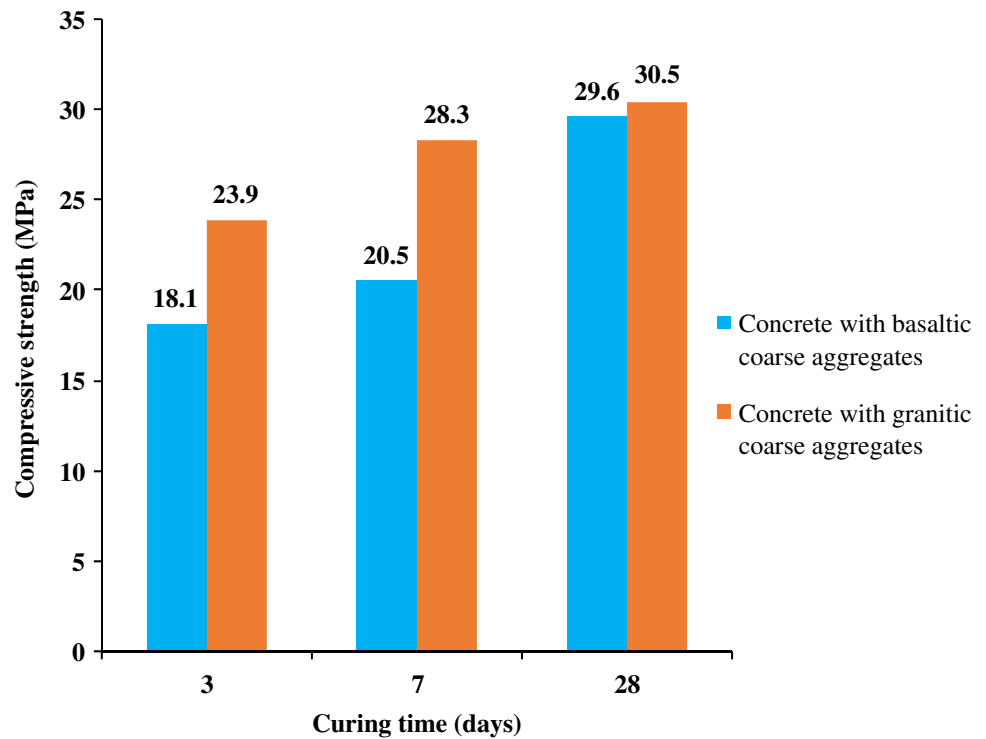
The studied granitic and basaltic aggregates are common. The main difference between the studied two types of coarse aggregates is that granitic coarse aggregates are made up of 50% quartz, a very hard mineral, while basaltic ones do not. The alluvial sands of the Sanaga River used to make CG and CB concretes are quartzose materials with a quartz content of 78%. The content of quartz, a very hard aggregate, is higher in CG concrete specimens ($1.08 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) than in CB specimens ($0.54 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$), considering the proportion of fine and coarse aggregates in the studied concretes. The uniaxial compressive strength values in the CG concrete specimens, at 3 and 7 days, are mainly explained by the high contents of quartz and thus of SiO_2 in the geochemical composition of the aggregates.

Subsidiary to this major influence of the mineralogy and chemistry of the aggregates, one could mention the high surface cleanliness of granitic aggregates (0.09–0.17) as compared to that of basaltic ones (0.7–1.3); because for coarse aggregates, it is necessary to avoid the presence of the clay gangue or dust that may compromise the adhesion of the mortar on the gravel (Dreux and Festa 1998). The influence of minerals such as biotite, which decreases the uniaxial compressive strength of concrete (Tchapga et al. 2020), is lessened because of its relatively low content (~10%) in CG concrete specimens as compared to the high content of quartz, a mineral whose hardness is higher than that of all other minerals found in CB and CG concretes. At 28 days of curing, σ_c values of CG (30.5 MPa) and CB (29.6 MPa) concrete specimens are comparable (Fig. 7). This is due to the high adhesion of the cement to the more angular basaltic aggregates; CG concrete specimens having reached their maximum uniaxial compressive strength. This phenomenon is therefore attributable to the properties of the cement and is not dependent on the geological nature of the studied coarse aggregates.

Influence of texture on uniaxial compressive strength values of concretes

Rock texture is defined as the mode of arrangement of minerals between them at the scale of the sample (macroscopic), of the thin section (microscopic) or even, at a finer scale. There are mainly 03 groups of textures: holocrystalline, hypocrySTALLINE, and hyaline (Dercourt and Paquet 1998). The granites used have a grainy or holocrystalline texture, while basalts have a microlitic aphyric texture or hypocrySTALLINE texture. The constituent minerals of granites resulting from the slow cooling of magma at depth are well crystallized and visible to the naked eye. By contrast, the minerals that composed the basalts can only be identified with an optical microscope. Granite minerals are therefore larger in size than those of basalts. In addition, granite minerals are contiguous (e.g., Fig. 6), leaving very few spaces

Fig. 7. Compressive strength of concretes

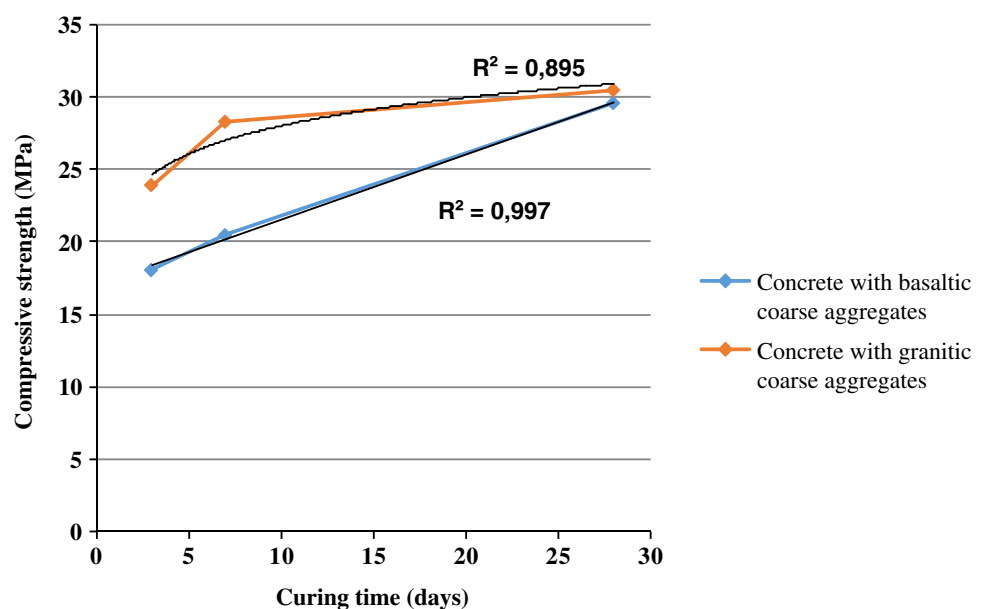


between them, whereas, in basalts, the minerals are elongated, not contiguous, and with spaces between them. This contributes to a decrease in uniaxial compressive strength under mechanical stress. It is the mesostasis (45%), not very porous, with poorly crystallized microcrystals and volcanic glass, which increases the σ_c values of the coarse basaltic aggregates and thus, that of the CB concrete. The grainy texture of the coarse aggregates used in CG concretes, associated with the hardness of the quartz minerals, which are

the main constituents of these aggregates, are at the origin of the higher σ_c values compared to those of CB concretes, between 3 and 7 days of cure. The σ_c values of CB concrete (29.6 MPa) comparable to that of CG concrete (30.5 MPa), after 28 days of curing, is due to the strong adhesion of cement on angular basaltic aggregates, CG concrete having reached their maximum uniaxial compressive strength value.

Altogether, the differences in mineralogical, geochemical and textural characteristics of basaltic and granitic coarse

Fig. 8. Evolution of compressive strength values of concrete



aggregates are at the origin of the different evolution of σ_c values in CB and CG concretes. Indeed, σ_c values of CG concrete follow a logarithmic evolution while those of CB concrete show a linear evolution (Fig. 8).

Conclusions

The present study, which focuses on the evaluation of the influence of mineralogical and geochemical compositions and texture of basaltic and granitic coarse aggregates on uniaxial compressive strength of concrete, led to the following conclusions.

- (1) Uniaxial compressive strength values are higher in CG concrete than in CB concrete after 3 and 7 days of curing.
- (2) The optimum uniaxial compressive strength values are reached after 7 days of curing for CG concrete and after 28 days for CB concrete.
- (3) The setting time of cement on concrete made of basic volcanic coarse aggregates is longer than that of acidic plutonic coarse aggregates.
- (4) The transition zone between the cement paste and the coarse aggregate allows the mortar to set more quickly in CG concrete in which the coarse aggregates have a grainy texture.
- (5) The uniaxial compressive strength values of concrete are related to the geological nature of the aggregates and follow a logarithmic evolution for acidic plutonic aggregates and linear for basic volcanic aggregates.

Acknowledgments The authors express their gratitude to the Geo Labs, Sudbury (Canada) for mineralogical and geochemical analyses. They also thank the reviewers who have greatly improved the quality of this paper.

Funding Not applicable

Declarations

Conflict of interest The authors declare no competing interests.

References

Abdullahi M (2012) Effect of aggregates type on compressive strength of concrete International Journal of Civil Engineering and Structural. Engineering 2(3):791–800
 AFNOR (1990) NF P18–591: Granulats-Détermination de la propreté superficielle. 0335-3931

AFNOR (1991) NF P94–054: Sols: reconnaissance et essais-Détermination de la masse volumique des particules solides des sols-Méthode du pycnomètre à eau. Association Française de Normalisation, Paris
 AFNOR (1996) NF EN 933–2: Tests to determine the geometrical characteristics of aggregates, Part 2: Determination of granularity - Test sieves, nominal dimensions of openings
 AFNOR (1998) NF EN 1097–3: Tests for determining the mechanical and physical characteristics of aggregates - Part 3: Determination of apparent density
 AFNOR (1999) NF EN 933–8: Tests for determining the geometric characteristics of aggregates - Part 8: Evaluation of fine - sand equivalent
 AFNOR (2001) NF EN 1097–6: Tests to determine the mechanical and physical characteristics of aggregates. Part 6: Determination of the real density and the water absorption coefficient
 AFNOR (2011a) NF P 18–545: Codification des granulats - Spécification d'usage relative aux granulats
 AFNOR (2011b) NF EN 1097–1: Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 1: Determination of the resistance to wear (Micro-Deval), Category: 91.100.15
 AFNOR (2020) NF EN 1097–2: Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 2: Determination of resistance to fragmentation (Los Angeles)
 Ahmad S, Alghamdi AS (2012) A study on effect of coarse aggregate type on concrete performance. Arab J Sci Eng 37:1777–1786
 Aitcin PC, Mehta PK (1990) Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high strength concrete. ACI Mater J 87(2):7–103
 Ajamu SO, Ige JA (2015) Effect of coarse aggregate size on the compressive strength and the flexural strength of concrete beam. J Eng Res Appl 5(4):2248–9622
 Atici U, Comakli R (2019) Evaluation of the physico-mechanical properties of plutonic rocks based on texture coefficient. J-South African Institute Mining Metall 119(1):63–69
 Baalbaki W, Benmokrane B, Challal O, Aitcin PC (1991) Influence of coarse aggregate on elastic properties of high performance concrete. ACI Mater J 88(5):499–503
 Beshr H, Almusallam AA, Maslehuddin M (2003) Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. Constr Build Mater 17(2):97–103
 Dercourt J, Paquet J (1998) Géologie, objets et méthodes. Dunod Edition, 457 p
 Diamantis K, Fereidooni D, Khajevand R, Migiros G (2021) Effect of textural characteristics on engineering properties of some sedimentary rocks. J Cent South Univ 28:926–938
 Dreux G (1981) Nouveau guide du béton. Edition Eryolles 3, 311 p
 Dreux G, Festa J (1998) Nouveau guide du béton et de ses constituants. Eyrolles Edition 8, 409 p
 Elices M, Rocco CG (2008) Effect of aggregate size on the fracture and mechanical properties of a simple concrete. Eng Fract Mech 75(13):3839–3851
 Fereidooni D (2022) Importance of the mineralogical and textural characteristics in the mechanical properties of rocks. Arab J Geosci 15:637. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09929-z>
 Frost BR, Frost CD (2008) A geochemical classification for feldspathic igneous rocks. J Petrol 49:1955–1969
 Frost BR, Barnes CG, Collins WJ, Arculus RJ, Ellis DJ, Frost CD (2001) A geochemical classification for granitic rocks. J Petrol 42:2033–2048
 Giaccio G, Rocco C, Violini D, Zappitelli J, Zerbino R (1992) HSC incorporating different coarse aggregates. ACI Mater J 89(3):6–242
 Hemmati A, Ghafoori M, Moomivand H, Lashkaripour GR (2020) The effect of mineralogy and textural characteristics on the

- strength of crystalline igneous rocks using image-based textural quantification. *Eng Geol* 266:105467
- Irvine TN, Baragar WRA (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can J Earth Sci* 8:523–548
- Kamani M, Ajalloeian R (2019) Evaluation of engineering properties of some carbonate rocks through corrected texture coefficient. *Geotech Geol Eng* 37(2):599–614
- Kwékam M, Affaton P, Bruguier O, Liégeois J-P, Hartmann G, Njonfang E (2013) The Pan-African Kekemgabbro-norite (West Cameroon), U–Pb zircon age, geochemistry and Sr–Nd isotopes: geodynamical implication for the evolution of the Central African fold belt. *J Afr Earth Sci* 84:70–88
- Larrard F, Belloc A (1992) Are small aggregates really better for making high-strength concrete? *Cement Concrete Aggregates* 14(1):6–62
- Mehta PK (1986) *Concrete: structure, properties and materials*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, pp 36–40
- Middlemost E (1975) The basalt clan. *Earth Sci Rev* 11:337–564
- Ngako V, Makitie H, Sep Nlomngan JP, Couëffé R, Moussango Ibohn P, Houketchang Bouyo M, Vic G, Itiga Z, Ntomba SM, Wongolo Djombol MH, Tchokona Seuwei D (2019) Carte géologique à 1/200 000 de la République du Cameroun - Feuille Bertoua NB-33-II. Ministère des Mines, de l'Industrie et du Développement Technologique du Cameroun, Yaoundé Ed
- Nkoumbou C, Barbey P, Yonta-Ngouné C, Paquette J, Villiéras F (2014) Pre-collisional geodynamic context of the southern margin of the Pan-African fold belt in Cameroon. *J Afr Earth Sci* 99:245–260
- Pang K-N, Chung S-L, Zarrinkoub MH, Mohammadi SS, Yang H-M, Chu C-H, Lee H-Y, Lo C-H (2012) Age, geochemical characteristics and petrogenesis of Late Cenozoic intraplate alkali basalts in the Lut-Sistan region, eastern Iran. *Chem Geol* 306–307:40–53
- Rocco CG, Elices M (2009) Effect of aggregate shape on the mechanical properties of a simple concrete. *Eng Fract Mech* 76(2):286–298
- Roser BP, Korsch RJ (1988) Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discrimination function analysis of major-element data. *Chem Geol* 67:119–139
- Sun W, Wang L, Wang Y (2017) Mechanical properties of rock materials with related to mineralogical characteristics and grain size through experimental investigation: a comprehensive review. *Front Struct Civ Eng* 11(3):322–328
- Tchappa GMG, Mambou GLL, Foguieng WM, Ndjaka BMJ (2020) Microstructure analysis of hydraulic concrete using crushed basalt, crushed gneiss and alluvial sand as fine aggregate. *J Mech Sci Technol Adv* 2:25–35
- Waziri BS, Bukar AG, Gaji YZA (2011) Applicability of quarry sand as a fine aggregate in the production of medium grade concrete. *Cont J Eng Sci* 6(2):1–6
- Wu K-R, Chen B, Yao W, Zhang D (2001) Effect of Coarse Aggregate Type on Mechanical Properties of High-Performance Concrete. *Cem Concr Res* 31:1421–1425
- Zen EA (1988) Phase relations of peraluminous granitic rocks and their petrogenetic implications. *Annu Rev Earth Planet Sci* 16:21–51