REPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix-Travail-Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
FACULTE DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE ET FORMATION DOCTORALE SCIENCES, TECHNOLOGIES ET GEOSCIENCES

REPUBLIC OF CAMEROON
Peace -Work-Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I
FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL OF SCIENCES, TECHNOLOGY AND GEOSCIENCES

UNITE DE RECHERCHE ET DE FORMATION DOCTORALE

GEOSCIENCES ET APPLICATIONS

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

Laboratoire de Géosciences des Formations Superficielles et Applications

SÉDIMENTOLOGIE ET GÉOCHIMIE DES DÉPÔTS CLASTIQUES DE LA PARTIE SEPTENTRIONALE DE LA ZONE LITTORALE DU CAMEROUN

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

Spécialité: Géosciences des Formations Superficielles et Applications

Option: Géologie Minière et Ressources Pétrolières

Par:

KWEWOUO JANPOU Annick

Matricule : 12X0093

Master ès-Sciences

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE

Sous la direction de

NGUEUTCHOUA Gabriel
Maître de Conférences
Université de Yaoundé I

et

NJANKO Théophile
Maître de Conférences
Université de Dschang

Année académique 2023-2024

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
FACULTE DES SCIENCES
CENTRE DE RECHERCHE
ET FORMATION DOCTORALE
EN SCIENCES, TECHNOLOGIES
ET GEOSCIENCES

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I
FACULTY OF SCIENCE
POSTGRADUATE SCHOOL
IN SCIENCES, TECHNOLOGY
AND GEOSCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE DOCTORALE
EN GEOSCIENCES ET APPLICATIONS

ATTESTATION DE CORRECTION DE THESE DE DOCTORAT/PhD

Spécialité : Géosciences des Formations Superficielles
Option : Géologie Minière et Ressources Pétrolières

Nom et Prénoms du candidat : KWEWOUO JANPOU Annick

Matricule : 12X0093

Titre de la thèse : « Sédimentologie et géochimie des dépôts clastiques de la partie septentrionale de la zone littorale du Cameroun ».

Date de soutenance : Mercredi, 18 septembre 2024

Nous soussignés, membres du jury de soutenance de la thèse de Doctorat PhD, attestons que le candidat 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 30.10.2024

Le Président du Jury

NZENTI Jean Paul, *Professeur, UYI*

Les Membres

EKENGELE NGA Léopold,
Maître de Conférences, UN

NGOS III Simon,
Professeur, UYI

MBIDA YEM Lionel
Maître de Conférences, UYI

NGUEUTCHOUA Gabriel,
Maître de Conférences, UYI

NJANKO Théophile,
Maître de Conférences, UDS

REPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix-Travail-Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
FACULTE DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE ET FORMATION DOCTORALE SCIENCES, TECHNOLOGIES ET GEOSCIENCES

REPUBLIC OF CAMEROON
Peace -Work-Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I
FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL OF SCIENCES, TECHNOLOGY AND GEOSCIENCES

UNITE DE RECHERCHE ET DE FORMATION DOCTORALE GEOSCIENCES ET APPLICATIONS

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

Laboratoire de Géosciences des Formations Superficielles et Applications

SÉDIMENTOLOGIE ET GÉOCHIMIE DES DÉPÔTS CLASTIQUES DE LA PARTIE SEPTENTRIONALE DE LA ZONE LITTORALE DU CAMEROUN

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

Spécialité: Géosciences des Formations Superficielles et Applications

Option: Géologie Minière et Ressources Pétrolières

Par:

KWEWOUO JANPOU Annick

Matricule : 12X0093

Master ès-Sciences

Sous la direction de

NGUEUTCHOUA Gabriel
Maître de Conférences
Université de Yaoundé I

et

NJANKO Théophile
Maître de Conférences
Université de Dschang

Année académique 2023-2024

DÉDICACE

- A ma mère **Maman JANPOU née NDJAKBO Cathérine,** de regrettée mémoire ;

- A mon père **Papa JANPOU Daniel**.

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu Tout Puissant, pour la volonté, le courage, l'intelligence, l'inspiration, la santé physique et morale qu'il m'a donnés pendant toute la durée de préparation et de rédaction de cette thèse. Ces qualités m'ont permis de faire face à de nombreuses difficultés tout au long de mes travaux de recherche et de l'élaboration de ce document. Au terme de ce travail, il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation.

Je pense aux autorités administratives de l'Université de Yaoundé I, pour m'avoir accueilli dans leur institution et pour le tavail qu'ils abattent pour l'amélioration des conditions d'étude des étudiants.

Pr Ngueutchoua Gabriel, Maître de Conférences à l'Université de Yaoundé I, pour mon initiation à la recherche. Ses conseils et sa rigueur scientifique m'ont été très utiles. Il a su transformer les difficultés que j'ai rencontrées en une expérience enrichissante et passionnante. Sa disponibilité à orienter mes travaux de recherche sur le terrain et en laboratoire, et à relire et corriger mes manuscrits m'ont permis de réaliser ce travail dans des conditions idéales.

Pr Njanko Théophile, Maître de Conférences à l'Université de Dschang, pour ses conseils et son appui scientifique durant mes travaux de recherche. Sa rigueur scientifique, ses nombreuses critiques et suggestions constructives ont fortement influencé ce travail. J'ose croire que ce travail comblera toutes ses attentes. Qu'il trouve ici l'expression de ma parfaite reconnaissance.

Pr Ndjigui Paul-Désiré, Chef du Département des Sciences de la Terre à la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, pour son encadrement administratif et ses multiples remarques et critiques qui m'ont toujours été profitables.

Pr Ekomane Emile, Professeur à l'Université de Yaoundé I, pour ses multiples conseils et enseignements.

Toute ma gratitude va à l'endroit des enseignants du Département des Sciences de la Terre qui ont contribué à ma formation intellectuelle ainsi que sociale. Je pense aux Prs Ndam Ngoupayou Jules Rémy, Nkoumbou Charles, Yongue Fouateu Rose, Nzenti Jean Paul, Tchouankoué Jean Pierre, Temdjim Robert, Ganno Sylvestre, Yene Atangana Joseph Quentin, Bisso Dieudonné, Abossolo Angue Monique, Onana Vincent Laurent, Ngos III Simon,

Kamgang Pierre, Njilah Isaac Konfor, Numbem Tchakounté Jacqueline, Ngo Bidjeck Marie Louise, Temga Jean Pierre, Nyeck Bruno, Sababa Elisé, Mbida Yem Lionel, Mbesse Cécile Olive, Metang Victor, Eyong John Taken, Drs Ntsama Atangana Jacqueline, Mouafo Lucas, Tehna Nathanaël, Ngo Belnoun Rose, Bekoa Etienne, Lamilen Billa Daniel, Nomo Emmanuel, Anaba Achille, Feumba Roger, Tchaptchet Depesquidoux, Mbarga Nyobe Jules et Ngo'o Zé Arnaud.

Je tiens sincèrement à reconnaitre l'appui formidable du Dr Ekoa Bessa Armel Zacharie, qui a toujours été à l'écoute de mes nombreuses préoccupations tout au long de ce travail. Ses conseils et suggestions m'ont été très utiles dans la réalisation de ce travail. Merci Dr Ekoa Bessa Armel Zacharie pour tout.

Je remercie mes aînés académiques, notamment Dr Bisse Salomon Bertrant et Dr Bokanda Eric, et les doctorants Ngami Plastini Florentin, Djou Ernest et Onana Enama Léandre, pour leur esprit de solidarité.

Je remercie mes camarades : Dr Belinga Belinga Cédric, Dr Chougong Durane, Nzesseu Valentino, Djeukam Stella, Kankeu Romaric, Masso Ruth, Njike Njome Odilia, Ashukem Ethel, Ambassa Victorine, Tsanga Duviol, Evina Stéphane, Kwanang Kathy, Kouakam Cédric, Mbazoa Armelle, Tankou Gaël, Tjade Eone Kevin, Zobo Henri, Yonga Franck pour leur amitié et leurs contributions multiformes au cours de notre parcours académique.

Merci à mes frères et sœurs : Ngansop Janpou Stephanie Aimée, Tepdjip Janpou Eliane, Tchouankam Janpou Léo Gertrude, Njipgang Janpou Dany Aloys et Tangang Janpou Jacky Carline pour leur présence, leurs soutiens (moral et financier) sans conditions qu'ils m'ont apportés au cours de la réalisation de ce travail. Que ce document soit pour nous un symbole de la solidarité familiale.

Je tiens à remercier mon amie Fankam Sandrine, pour son soutien et ses encouragements.

Je dis un grand merci aux Chefs et à toutes les populations des localités de Bakinguili, Batoké, Limbola, Nguémé et Mile 8, pour leur hospitalité lors de mes campagnes de terrain.

Nombreux sont ceux ou celles dont les noms n'ont pas été mentionnés dans ce manuscrit, à qui j'exprime ma profonde gratitude.

TABLE DE MATIÈRES

DÉDICACE ..... **i**
REMERCIEMENTS ..... **ii**
TABLE DE MATIÈRES ..... **iv**
LISTE DES FIGURES ..... **vii**
LISTE DES TABLEAUX ..... **x**
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES ..... **xii**
RÉSUMÉ ..... **xiii**
ABSTRACT ..... **xiv**
INTRODUCTION GÉNÉRALE **1**
CHAPITRE I : MILIEU NATUREL **6**
I.1. Localisation et accessibilité de la zone d'étude 7
I.2. Climat 7
I.3. Végétation 9
I.4. Sols 10
I.5. Géomorphologie 11
I.5.1. Orographie 11
I.5.2. Hydrographie 12
I.6. Population et activités économiques 13
I.6.1. Population 13
I.6.2. Activités économiques 13
CHAPITRE II : REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LES SABLES ET CONTEXTE GÉOLOGIQUE DU SECTEUR D'ÉTUDE **15**
II.1. Processus de formation et origine des sables 16
II.1.1. Processus de formation des sables 16
II.1.2. Provenance des sables 17
II.2. Caractéristiques pétrographiques et structurales de la LVC 19
II.2.1. Caractéristiques pétrographiques de la LVC 19
II.2.2. Caractéristiques structurales de la LVC 20
II.2.3. Quelques massifs volcaniques de la LVC dans le secteur d'étude 21
II.2.3.1. Mont-Cameroun 21
II.2.3.2. Mont Etindé 21
II.2.4. Formations du socle 23
II.2.5. Géologie des successions sédimentaires du sous-bassin de Douala 23
II.2.5.1. Formations du sous-bassin de Douala 23
II.2.5.2. Evolution géodynamique du sous-bassin de Douala 26

CHAPITRE III : MATÉRIEL ET MÉTHODES 28
III.1. Matériel 29
III.2. Méthodologie 29
III.2.1. Travaux sur le terrain 29
III.2.1.1. Prospection et reconnaissance du terrain 29
III.2.1.2. Prélèvements des échantillons 31
III.2.2. Travaux en laboratoire 33
III.2.2.1. Analyse granulométrique 33
III.2.2.2. Analyse morphoscopique 37
III.2.2.3. Analyse des minéraux lourds 39
III.2.2.4. Analyse pétrographique 40
III.2.2.5. Analyse minéralogique 41
III.2.2.6. Analyse géochimique 43
III.2.2.7. Traitement des données géochimiques, indices et paramètres de la pollution 44
CHAPITRE IV : ÉTUDE SÉDIMENTOLOGIQUE DES DÉPÔTS CLASTIQUES 47
IV.1. Description lithologique des sédiments 48
IV.1.1. Description lithologique des sédiments de surface de Bakinguili 49
IV.1.2. Description lithologique des puits de Batoké 49
IV.1.2.1. Puits BTA 49
IV.1.2.2. Puits BTJ 50
IV.1.2.3. Puits BTG 51
IV.1.3. Description lithologique des puits de Limbola 52
IV.1.3.1. Puits BTL 52
IV.1.3.2. Puits BTE 52
IV.1.3.3. Puits BTP 53
IV.1.4. Description lithologique des sédiments de surface de Nguémé 54
IV.1.5. Description lithologique des sédiments de surface de Mile 8 54
IV.2. Granulométrie des sédiments 55
IV.2.1. Proportion des fractions et classifications granulométriques 55
IV.2.2. Courbes cumulatives 59
IV.2.3. Histogrammes et courbes de fréquences 60
IV.2.4. Présentation et calcul des paramètres granulométriques 65
IV.2.5. Analyse corrélative des paramètres granulométriques 68
IV.2.6. Mode de transport des sédiments 69
IV.3. Morphoscopie des dépôts clastiques 73
IV.4. Pétrographie des sables 77
IV.4.1. Description des lames minces de sables 77

IV.4.2. Etude des minéraux lourds 80
IV.4.2.1. Etude descriptive des différentes espèces minérales. 80
IV.4.2.2. Etude analytique des minéraux lourds 82
IV.5. Analyses modales 84
CHAPITRE V : MINÉRALOGIE ET GÉOCHIMIE DES DÉPÔTS CLASTIQUES ... 88
V.1. Minéralogie des dépôts clastiques 89
V.1.1. Compositions minéralogiques aux rayons X 89
V.1.2. Compositions chimiques des minéraux constitutifs 92
V.2. Géochimie des dépôts clastiques 101
V.2.1. Distribution des éléments majeurs 101
V.2.2. Distribution des éléments traces 107
V.2.3. Distribution des terres rares 116
V.2.4. Corrélation entre les éléments géochimiques 121
V.2.5. Estimation de la pollution des éléments traces métalliques 121
V.2.5.1. Analyses statistiques 121
V.2.5.2. Niveau d'enrichissement des éléments traces 123
V.2.5.3. Analyse en composante principale 126
CHAPITRE VI : INTERPRÉTATIONS ET DISCUSSION 129
VI.1. Lithologie des sédiments 130
VI.1.1. Formation saisonnière des niveaux de dépôts irréguliers et plus ou moins sombres 130
VI.1.2. Caractéristiques modales et sources des sédiments 130
VI.2. Texture, nature et maturité des sédiments 132
VI.3. Altération des sédiments et des zones sources 134
VI.4. Classification géochimique 137
VI.5. Provenance 138
VI.6. Environnements et conditions de dépôts des sédiments des plages de Limbé 146
VI.7. Paléoclimat 148
VI.8. Statut environnemental des plages de Limbé 149
VI.8.1. Distribution spatiale des métaux 150
VI.8.2. Contamination des sédiments 151
VI.9. Aspect économique et appui au developpement 152
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES 154
CONCLUSION GÉNÉRALE 155
PERSPECTIVES 157
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 158

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation de la zone d'étude 8
Figure 2. Courbe ombrothermique de la ville de Limbé 9
Figure 3. Vue partielle de la végétation de la zone de Limbé 10
Figure 4. Carte orographique de la zone d'étude 11
Figure 5. Carte du réseau hydrographique de la zone d'étude 12
Figure 6. Aperçu de la Ligne Volcanique du Cameroun..... 22
Figure 7. Carte géologique de la zone d'étude montrant les différentes zones sources compilés aux données géochimiques utilisées pour l'identification de la provenance 24
Figure 8. Colonne chrono-lithostratigraphique du sous-bassin de Douala 26
Figure 9. Carte d'échantillonnage de la zone d'étude. 30
Figure 10. Quelques photographies montrant les modes et les zones de prélèvement et conditionnement des sédiments de la plage de Limbé..... 32
Figure 11. Outils d'analyses granulométriques..... 34
Figure 12. Estimation des formes et la sphéricité des sables et graviers 38
Figure 13. Principe de diffraction des rayons X par le réseau cristallin 42
Figure 14. Coupe lithologique du puits BTA. 50
Figure 15. Coupe lithologique du puits BTJ. 51
Figure 16. Coupe Lithologique du puits BTG..... 51
Figure 17. Coupe lithologique du puits BTL. 52
Figure 18. Coupe lithologique du puits BTE. 53
Figure 19. Coupe lithologique du puits BTP..... 53
Figure 20. Courbes des pourcentages cumulés des sédiments des plages de Limbé 60
Figure 21. Histogrammes et courbes de fréquences des sédiments de la plage de Bakinguili 61
Figure 22. Histogrammes et courbes de fréquences des sédiments de la plage de Batoké..... 62
Figure 23. Histogrammes et courbes de fréquences des sédiments de la plage de Limbola.... 63
Figure 24. Histogrammes et courbes de fréquences des sédiments de la plage de Nguémé.... 64
Figure 25. Histogrammes et courbes de fréquences des sédiments de la plage de Mile 8..... 64
Figure 26. Diagrammes de dispersion granulométrique des sédiments des plages de Limbé . 68
Figure 27. Différents modes de transport des sédiments des plages de Limbé..... 71
Figure 28. Illustrations des formes de grains observées à la loupe binoculaire. 75
Figure 29. Histogrammes des formes d'usure des grains de sables des plages de Limbé 76
Figure 30. Minéraux observés en LPNA et LPA dans les lames minces des sédiments 79

Figure 31. Minéraux lourds répertoriés dans les sédiments des plages de Limbé 83
Figure 32. Diagrammes circulaires des assemblages de minéraux lourds des sédiments de plages de Limbé 86
Figure 33. Diffractogrammes aux rayons X des sédiments des plages de Limbé 91
Figure 34. Microphotographie d'une section des minéraux et spectres des sédiments de la plage de Bakinguili 93
Figure 35. Microphotographies d'une section des minéraux et spectres des minéraux de sédiments de la plage de Batoké 95
Figure 36. Microphotographies d'une section des minéraux et spectres des minéraux de sédiments de la plage de Limbola 97
Figure 37. Microphotographie d'une section des minéraux et spectres des minéraux de sédiments de la plage de Nguémé 99
Figure 38. Microphotographie d'une section des minéraux et spectres des minéraux de sédiments de la plage de Mile 8 100
Figure 39. Spectres des éléments majeurs des sédiments de plages de Limbé normalisés par rapport aux valeurs du PAAS et à l'UCC 104
Figure 40. Spectres des éléments traces des sédiments de plages de Limbé normalisés par rapport aux valeurs du PAAS et à l'UCC. 110
Figure 41. Spectres des terres rares des sédiments de plages de Limbé normalisées aux valeurs de l'UCC et de la Chondrite 119
Figure 42. Histogramme du facteur d'enrichissement des ETM des sédiments de plages de Limbé. 124
Figure 43. Histogramme du facteur de contamination des ETM des sédiments de plages de Limbé. 125
Figure 44. Histogramme de l'indice de géoaccumulation des ETM des sédiments de plage de Limbé. 126
Figure 45. Analyse en composante principale des sédiments de plage de Limbé 127
Figure 46. Diagrammes ternaires Qt-Ft-Lt et Qm-Ft-Lt des sédiments de plages de Limbé. 131
Figure 47. Diagramme ternaire de classification des sédiments des plages de Limbé 133
Figure 48. Diagramme d'immaturité compositionnelle des sédiments de plages de Limbé.. 134
Figure 49. Graphiques ternaires pour déduire l'intensité de l'altération des sédiments de plages de Limbé. 137
Figure 50. Diagramme de classification géochimique des sédiments de plages de Limbé.... 138
Figure 51. Diagrammes bivariés des sédiments de plages de Limbé 139

Figure 52. Diagramme bivarié Th/U *versus* Th 140
Figure 53. Diagrammes bivariés et ternaires des sédiments de plages de Limbé 142
Figure 54. Spectres des REE normalisés par rapport à la chondrite des roches mères probables des sédiments de plages de Limbé 144
Figure 55. Diagrammes des environnements de dépôt des sédiments de plages de Limbé. .. 147
Figure 56. Diagramme C-M indiquant les différents modes de transport des sédiments des plages de Limbé. 148
Figure 57. Diagramme discriminatif du paléoclimat des sédiments de plages de Limbé. 149

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Précipitations et températures moyennes mensuelles de Limbé allant de 2006 à 2021 9
Tableau 2. Localisation des échantillons dans la zone d'étude 31
Tableau 3. Interprétation de l'indice de Trask So 35
Tableau 4. Interprétation de l'écart type ou deviation standart 36
Tableau 5. Interprétation des valeurs du Kurtosis 37
Tableau 6. Classification du facteur d'enrichissement en fonction du niveau de contamination. 45
Tableau 7. Intensité de pollution à partir de l'I-géo 45
Tableau 8. Classification du facteur de contamination en fonction du niveau de contamination 46
Tableau 9. Description lithologique des sédiments de plage de Limbé 48
Tableau 10. Description macroscopique des sédiments de surface de Bakinguili 49
Tableau 11. Description lithologique des puits de Batoké 50
Tableau 12. Description lithologique des puits de Limbola 52
Tableau 13. Description macroscopique des sédiments de surface de Nguémé 54
Tableau 14. Description macroscopique des sédiments de surface de Mile 8 54
Tableau 15. Proportions des fractions granulométriques constitutives des sédiments des plages de Limbé 55
Tableau 16. Paramètres granulométriques des sédiments des plages de Limbé 65
Tableau 17. Pourcentages des différentes populations des sédiments des plages de Limbé 70
Tableau 18. Inventaire des formes de grains des sables des plages de Limbé. 74
Tableau 19. Pourcentage (%) des minéraux lourds des sédiments des plages de Limbé 85
Tableau 20. Proportions de quartz, feldspaths et fragments lithiques dans les sédiments des plages de Limbé 86
Tableau 21. Composition minéralogique (semi quantitative) des sédiments des plages de Limbé 90
Tableau 22. Composition chimique (%) des minéraux analysés par EPMA dans les sédiments de la plage de Bakinguili 92
Tableau 23. Composition chimique (%) des minéraux analysés par EPMA dans les sédiments de la plage de Batoké 94

Tableau 24. Composition chimique (%) des minéraux analysés par EPMA dans les sédiments de la plage de Limbola 96
Tableau 25. Composition chimique (%) des minéraux analysés par EPMA dans les sédiments de la plage de Nguémé 98
Tableau 26. Composition chimique (%) des minéraux analysés par EPMA dans les sédiments de la plage de Mile 8 100
Tableau 27. Pourcentage (%) des éléments majeurs dans les sables de plage de Limbé. 103
Tableau 28. Teneur (en ppm) des éléments traces dans les sables de plage de Limbé 109
Tableau 29. Teneur (en ppm) des terres rares dans les sables de plage de Limbé. 118
Tableau 30. Matrice de corrélation de certains éléments majeurs, traces et terres rares des sédiments des plages de Limbé 122
Tableau 31. Concentration (mg/kg) en éléments traces métalliques (ETM) 123
Tableau 32. Facteur d'enrichissement (FE), de contamination (FC) en ETM et indice de géoaccumulation (I-géo) des sédiments des plages de Limbé 124
Tableau 33. Matrice de corrélation de Pearson des ETM étudiés dans les sédiments des plages de Limbé. 126
Tableau 34. Concentrations des ETM dans divers travaux des sédiments de plages à travers le monde. 151

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES

AFNOR : Agence Française de la Normalisation

BUCREP : Bureau Central des Recensements et des études de la Population du Cameroun

CDC : Cameroon Development Corporation

CIA : Chemical Index of Alteration

CIW : Chemical Index of Weathering

CNIC : Chantier Naval et Industriel du Cameroun

CPAC : Chaine Panafricaine d'Afrique Centrale

DRX : Diffractométrie des Rayons X

EPMA: Electron Probe MicroAnalyser

ETM : Eléments Traces Métalliques

FC : Facteur de contamination

FE : Facteur d'enrichissement

GPS : Global Positioning System

HREE : Heavy Rare Earth Elements

ICP-MS : Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

ICV : Index of Compositional Variability

I-géo : Indice de géoaccumulation

L.d : Limite de détection

LOI : Loss On Ignition

LPA : Lumière Polarisée Analysée

LPNA : Lumière Polarisée Non Analysée

LREE : Light Rare Earth Elements

LVC : Ligne Volcanique du Cameroun

PAAS : Post Archean Australian Average Shales

PIA : Plagioclase Index of Alteration

REE : Rare Earth Elements

UCC : Upper Continental Crust.

RÉSUMÉ

Le segment côtier de la Ligne Volcanique du Cameroun (LVC), d'âge Tertiaire dans le Golfe de Guinée, est entouré par les granitoïdes Pan-Africains, les roches métamorphiques, les successions sédimentaires d'âge Crétacé, qui peuvent contribuer à la sédimentation littorale dans la ville voisine de Limbé. Pour mieux déterminer la provenance des sédiments, l'état d'altération des roches clastiques du littoral et des zones sources et le statut environnemental de cette zone côtière. Les analyses pétrographique, minéralogique et géochimique des sédiments ont été réalisées. Les diagrammes ternaires Qt-Ft-Lt et Qm-Ft-Lt indiquent à tort un environnement d'arc non disséqué, en raison de la proximité de la LVC. Les rapports Qt_{23}-Ft_5-Lt_{51} des plages de Limbé caractérisent des sédiments appartenant à la classe des litharénites. Les faibles valeurs du rapport SiO_2/Al_2O_3 et l'indice Zircon-Tourmaline-Rutile (ZTR), associé aux valeurs élevées de l'indice de variabilité compositionnel (ICV) indiquent des sédiments immatures. Ce résultat est soutenu par la présence des minéraux altérables, tels que l'olivine, le pyroxène et l'amphibole. Les diagrammes binaires de Th/Sc contre Zr/Sc et ternaires Al_2O_3-TiO_2-Zr suggèrent que les sables de la plage de Limbé ne sont pas recyclés. L'indice chimique d'altération (CIA), l'indice d'altération des plagioclases (PIA) et les diagrammes triangulaires A-CN-K et (A-K)-C-N montrent que les sédiments étudiés ont connu une altération modérée à intense (62,08 – 87,3 %). Plusieurs diagrammes de discrimination de provenance, basés sur les concentrations et les rapports de Al_2O_3, TiO_2, Zr, La/Sc, Th/Co, le diagramme ternaire V-Ni-Th*10 et la comparaison du spectre des terres rares (REE) des sédiments de Limbé avec les roches sources potentielles, suggèrent une roche parentale mafique correspondant à celle de la LVC. Ceci indique que les roches granitiques, métamorphiques et sédimentaires qui bordent la LVC ne contribuent pas de façon significative à la sédimentation de la plage. En plus, les résultats de cette étude montrent que les courants côtiers n'influencent pas la composition chimique des sédiments de la plage de Limbé. Le Facteur d'enrichissement (FE) montre un ordre d'enrichissement qui est comme suit : Co > Ni > Cu > Cd > Zn > Cr > Mn. L'indice de géo-accumulation (I-geo) indique une pollution en Co, Ni et Cu dans tous les sites. Le Facteur de contamination (FC) montre une succession décroissante dans l'ordre Co > Ni > Cu > Cd > Zn > Cr > Fe > Mn, ce qui est semblable au Facteur d'enrichissement et à l'indice de géo-accumulation.

Mots clés : Ligne Volcanique du Cameroun ; plage ; géochimie ; provenance ; altération.

ABSTRACT

The southern and coastal portion of the Tertiary Cameroon Volcanic Line (CVL), in the Gulf of Guinea, is bordered by Pan-African granitoids, metamorphic rocks, and Cretaceous sedimentary successions, which are prone to contribute to the nearby Limbe beach sedimentation. To better constrain the provenance of the above mentioned beach sediments, their petrographical, mineralogical and chemical studies were undertaken. Another aim of this work is to assess the weathering intensity in coastal areas close to CVL. The Qt-Ft-Lt and Qm-Ft-Ltternary diagrams indicate wrongly on undissected arc environment, due to the proximity of the CVL. The ratio Qt_{23}- Ft_5- Lt_{51} of the Limbé beach characterize of litharenite on petrographical classification. The low values of SiO_2/Al_2O_3 ratios and Zircon-Tourmaline-Rutile (ZTR) index, coupled to high Index of Compositional Variability (ICV) indicate compositionally immature sediments. This is further supported by the presence of rock forming minerals, such as olivine, pyroxene, and amphibole. The Th/Sc *versus* Zr/Sc binary plot and Al_2O_3-TiO_2-Zr ternary diagram suggest that the studied sediments have not experienced recycling. The Chemical Index of Alteration (CIA), Plagioclase Index of Alteration (PIA), and the A-CN-K and (A-K)-C-N triangular diagrams indicate that the Limbe beach sediments and their source have undergone moderate to intense weathering (62.08–87.3%). Several provenance discrimination diagrams, including the binary diagram of Al_2O_3 *versus* TiO_2, Zr *versus* TiO_2, La/Sc *versus* Th/Co, and the ternary plot of V-Ni-Th*10, and the comparison of chondrite normalized rare earth elements (REE) patterns of the studied sediments with potential source rocks suggest a source area composed of mafic rocks from CVL, indicating that the granitic, metamorphic, and sedimentary rocks close to this volcanic structure do not significantly contribute to the sedimentation of the studied beach. In addition, the longshore currents do not influence the chemical composition of the sediments or do not reach the study site. The enrichment factor (EF) shows decreasing succession of ETM in the order Co > Ni > Cu > Cd > Zn > Cr > Mn. the geo-accumulation index (I-geo) indicates pollution in Co, Ni and Cu in all the beaches. The contamination factor (CF) shows the following succession Co > Ni > Cu > Cd > Zn > Cr > Fe > Mn, which is similar to the enrichment factor and the geo-accumulation index.

Keywords: Cameroon Volcanic Line, beach sediments, geochemistry, provenance, weathering.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

« *Le temps et l'espace ne sont pas des conditions d'existence, le temps et l'espace sont un modèle de reflexion* ».

-Albert Einstein-

Contexte de l'étude

La sédimentologie et la géochimie des sédiments détritiques ont été largement utilisées aucours de la dernière décennie pour formuler des hypothèses et faire des inférences sur la composition des roches sources (McLennan *et al*., 1993 ; Armstrong-Altrin *et al*., 2015 ; Madhavaraju *et al*., 2016 ; Ngueutchoua *et al*., 2019a, b ; Tchouatcha *et al*., 2020, 2021 ; Kontchipe *et al*., 2021 ; Chougong *et al*., 2021 ; Ambassa Bela *et al*., 2022 ; Tsanga *et al*., 2023). Ces inférences sont basées sur le fait que plusieurs éléments, y compris les éléments traces de transition (Th, Sc et Hf) et les éléments de terres rares (REE), sont supposés insolubles et, en conséquence, leurs teneurs originales ne varient pas considérablement lors de l'altération et durant l'érosion et le transport des particules des roches parentales jusque dans les milieux de dépôt (Taylor *et al*., 1986 ; Kasanzu *et al*., 2008 ; Vosoughi Moradi *et al*., 2016 ; Mendieta-Lora *et al*., 2018). Plusieurs études se sont focalisées sur les sédiments de plage afin de reconstituer l'histoire des régions sources et déduire l'importance des courants côtiers dans la dynamique sédimentaire (Carranza-Edwards *et al*., 2001 ; Armstrong-Altrin, 2009 ; Kasper-Zubillaga *et al*., 2013 ; Mendieta-Lora *et al*., 2018 ; Mayla *et al*., 2019). Certaines de ces études sédimentologiques ont montré que la nature des sédiments apportés par les fleuves sur la côte est le facteur le plus important qui contrôle la composition des sédiments de plage (Armstrong-Altrin, 2009 ; Zaid, 2015). Armstrong-Altrin *et al*. (2015) et Mayla *et al*. (2019) ont illustré l'inefficacité des courants côtiers dans le remaniement et l'homogénéisation des sables de plage dans la partie ouest du golfe de Mexique. D'autres travaux se basant également sur la géochimie élémentaire des alluvions et des sédiments littoraux se sont surtout intéressés au statut environnemental des milieux côtiers (Azhar *et al*., 2009 ; Diaz-de-Alba *et al*., 2011 ; Guogang *et al*., 2013 ; Suresh *et al*., 2015 ; Safiur *et al*., 2019 ; Mohammad *et al*., 2019 ; Honling *et al*., 2019). Ces auteurs ont évalué l'état de contamination des sédiments en éléments traces métalliques (ETM), très souvent néfastes sur l'écosystème.

Les études géochimiques des sédiments et roches clastiques des terrains du Cameroun portent surtout sur les sédiments mésozoïques du sous-bassin côtier de Douala et du bassin intracratonique de Mamfé (Ngueutchoua *et al*., 2017 ; Bokanda *et al*., 2019 ; Ngueutchoua *et al*., 2019a, b ; Tchouatcha *et al*., 2021), dans la perspective de déterminer la provenance, la paléoaltération, le paléoclimat, les conditions paléoenvironnementales et les caractéristiques paléotectoniques du milieu de dépôt et des zones sources. Par ailleurs, peu d'attention a été accordée à la couverture sédimentaire quaternaire et aux alluvions récentes (Ndjigui *et al*., 2014, 2018 ; Ekoa Bessa *et al*., 2018 ; Nyobe *et al*., 2018 ; Bassanak Ongboye *et al*., 2019 ;

Mbale Ngama *et al*., 2019 ; N'nanga *et al*., 2019 ; Sonfack *et al*., 2021 ; Kontchipe *et al*., 2021 ; Nanga Bineli *et al*., 2021 ; Liyouck *et al*., 2023), tandis que les sédiments de plage ont rarement été documentés et n'ont pas été explorés du point de vue géochimique.

Problématique

La géologie de la zone côtière du Cameroun et ses environs, localisés au fond du golfe de Guinée est variée. Elle est principalement représentée par les roches plutoniques (granites, dolérites), les roches métamorphiques néoprotérozoïques (migmatite, gneiss migmatitique et gneiss), les roches sédimentaires mésozoïques et cénozoïques et les roches volcaniques cénozoïques et quaternaires (basaltes, trachytes). La contribution de ces roches volcaniques dans la sédimentation de la plage voisine de Limbé est évidente, mais l'influence des autres types pétrographiques n'est pas encore évaluée. En effet, les études de provenance de sables littoraux en rapport avec la présence d'un type particulier de roche n'ont pas encore été entreprises dans le golfe de Guinée. A cet égard, la contiguïté des sédiments de plage des secteurs Bakinguili, Batoké ; Limbola ; Nguémé et Mile 8 de la ville de Limbé et les terrains liés à la Ligne Volcanique du Cameroun (LVC) offre l'opportunité d'apprécier l'importance de cette structure volcanique dans la dynamique sédimentaire du littoral voisin et d'évaluer la contribution des types pétrographiques qui bordent la LVC dans la composition pétrographique et chimique des sédiments de la plage de Limbé. Par ailleurs, les courants côtiers responsables de la dérive littorale allant du sud vers le nord dans le golfe de Guinée sont théoriquement susceptibles de modifier la composition des détritus volcaniques de la plage de Limbé (Morin et Kuete, 1988 ; Ngueutchoua et Giresse 2010). Les données géochimiques collectées au cours d'une telle étude peuvent permettre d'apprécier les concentrations et l'enrichissement éventuel des éléments traces métalliques, afin d'effectuer une veille écologique dans un environnement touristique comme celui de la zone d'étude.

Objectifs de recherche

- **Objectif principal**

L'objectif principal de ce travail est de déterminer la provenance, l'état d'altération et le statut environnemental des sédiments de la plage de Limbé, ainsi que les conditions tectoniques des zones sources.

- **Objectifs spécifiques**

L'objectif principal ci-dessus énoncé sera atteint à travers les objectifs spécifiques ci-dessous. Ce sont :

- Présenter les caractéristiques texturales et granulométriques ; les compositions minéralogiques et chimiques des minéraux ; et géochimiques (majeurs, traces et terres rares) des sédiments de la plage de Limbé ;
- Déterminer les caractéristiques des roches sources ;
- Estimer l'état d'altération des sédiments ;
- Evaluer à base des données géochimiques, la pollution en métaux lourds des sédiments de la plage de Limbé.

Intérêt du travail

Cette étude contribuera à améliorer les connaissances sur les caractéristiques sédimentologiques des dépôts sableux de plage de la ville de Limbé, au fond du golfe de Guinée. Elle permettra également d'évaluer la contribution des roches de la LVC, du substratum rocheux de cette structure volcanique, des roches magmatiques, métamorphiques et sédimentaires qui jouxtent la LVC sur la sédimentation. En outre, l'influence des courants côtiers du Golfe de Guinée sur la dynamique sédimentaire des plages de Limbé sera appréciée. Par ailleurs, les données de la géochimie élémentaire permettront d'examiner l'état d'enrichissement en éléments traces métalliques afin d'évaluer le statut environnemental de cette zone touristique.

Structure de la thèse

La présente thèse comporte six chapitres, qui traitent des différents aspects de son titre et les objectifs de la recherche. Cette thèse a une introduction générale qui comprend le problème énoncé, les objectifs principaux et spécifiques et l'intérêt du travail.

- Le chapitre I présente le milieu naturel de la zone d'étude ;
- Le chapitre II est la revue de la littérature, centrée sur la synthèse des travaux sur les études de provenance. Il se concentre également sur un bref aperçu sur les caractéristiques pétrographiques et structurales de la Ligne Volcanique du Cameroun, et la géologie des successions sédimentaires du sous-bassin de Douala ;
- Le chapitre III porte sur les méthodes et matériels utilisés pour atteindre les objectifs;
- Le chapitre IV se concentre sur l'étude sédimentologique des dépôts clastiques des plages de Limbé ;

- Le chapitre V traite de la minéralogie et la géochimie des dépôts clastiques des plages de Limbé ;
- Le chapitre VI présente l'interprétation et la discussion sur la provenance, la maturité, l'état d'altération, l'environnement de dépôt, le paléoclimat et le statut environnemental.

A la fin de la thèse se trouve une conclusion générale qui fournit une synthèse des principaux résultats obtenus au cours de ce travail, ainsi que les perspectives.

CHAPITRE I : MILIEU NATUREL

« *L'art de la réussite consiste à savoir s'entourer des meilleurs*».

-John Kennedy-

Introduction

Le présent chapitre est consacré à la géographie de la partie nord de la zone littorale du Cameroun. Il fournit des informations sur le climat, les sols, la végétation, la géomorphologie, la population et les activités économiques.

I.1. Localisation et accessibilité de la zone d'étude

La zone d'étude est située à Limbé dans la Région du Sud-Ouest Cameroun, Chef-Lieu du Département du Fako (Figure 1) suivant les Latitudes 4°0'0'' et 4°12'0'' Nord, et les Longitudes 9°3'0'' et 9°12'0'' Est. Elle est bordée au Sud par l'Océan Atlantique, au Nord et Nord-Est par le Mont Etindé et le Mont-Cameroun. Limbé est accessible par trois routes nationales principales du territoire camerounais : de Bamenda à Limbé, Kumba à Limbé et Yaoundé à Limbé, en passant par Douala. Le secteur se trouve à environs 328 kilomètres de Bamenda, 95 kilomètres de Kumba et à 304 kilomètres de Yaoundé, capitale politique du Cameroun. Cette zone d'étude se trouve principalement sur le littoral camerounais avec certaines villes et localités du Département du Fako. Elle regroupe les localités de Bakinguili, Batoké, Limbola, Nguémé et Mile 8.

I.2. Climat

Le climat de la Région est de type tropical humide, caractérisé par des températures et des précipitations élevées (Ewanjike *et al*., 2007). Ce climat a deux saisons bien définies: une courte saison sèche et une longue saison pluvieuse modifiées par la déviation de la mousson et le relief des Monts Etindé et Cameroun (Suchel, 1972). La saison des pluies dure neuf mois (de mars à novembre), tandis que la saison sèche dure trois mois (décembre à février) comme le montre le Tableau 1 et la Figure 2. La température moyenne annuelle est de 25,3 °C et les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 3517 mm. Le mois le plus pluvieux est le mois de juillet (720 mm) et le moins pluvieux est le mois de janvier (48 mm). Le mois de mars est le plus chaud (26,4 °C) et ceux de juillet et août sont plus humides (24,1 °C).

La caractérisation globale du climat est généralement faite par l'indice d'aridité (Ia) de De Martonne (1942) dont la formule est donnée par : $Ia = \frac{P \times 12}{T+10}$ où P est la pluviométrie (mm) et T la température (°C). D'après cet indice, les mois secs sont ceux qui ont Ia < 20 et les mois humides ont Ia > 50 (Tableau 1).

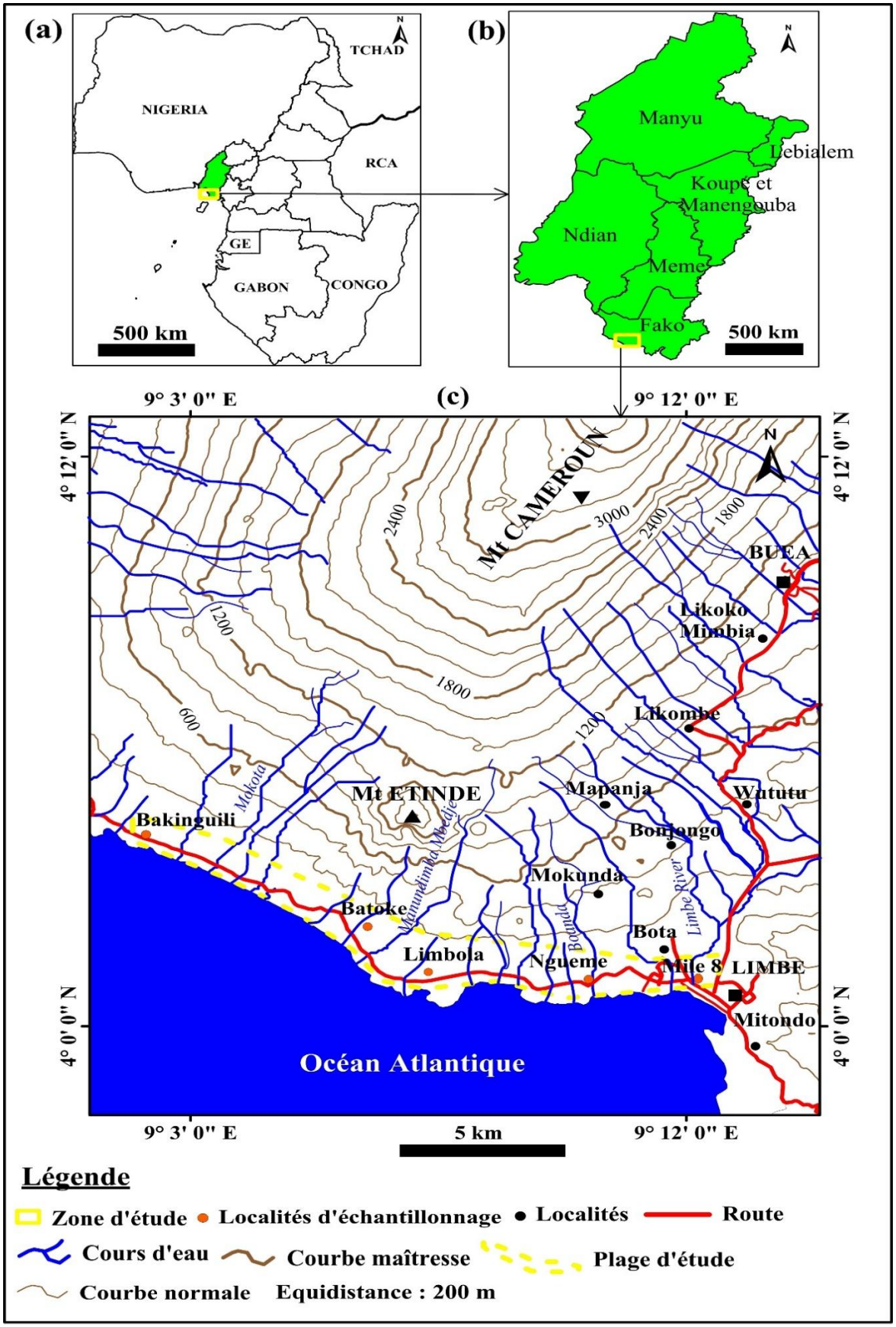


Figure 1. Localisation de la zone d'étude : a) dans le Cameroun ; b) Départements du Sud-Ouest ; c) carte topographique extraite de l'imagerie satellitaire SRTM de Buéa-Douala, Echelle : 1/200 000.

Tableau 1. Précipitations et températures moyennes mensuelles de Limbé allant de 2006 à 2021 (**Source. Climate-data.org/**station de Limbé consulté le 17/03/2021)

Mois	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Moy.	Total
P (mm)	48	83	176	219	341	452	720	608	408	252	153	57	-	3517
T (°C)	25,6	25,9	26,4	26,2	25,9	25,1	24,1	24,1	24,4	24,9	25,4	25,5	25,3	-
Indice d'aridité (Ia)	16	19	60	75	116	154	245	207	139	86	52	19	-	-

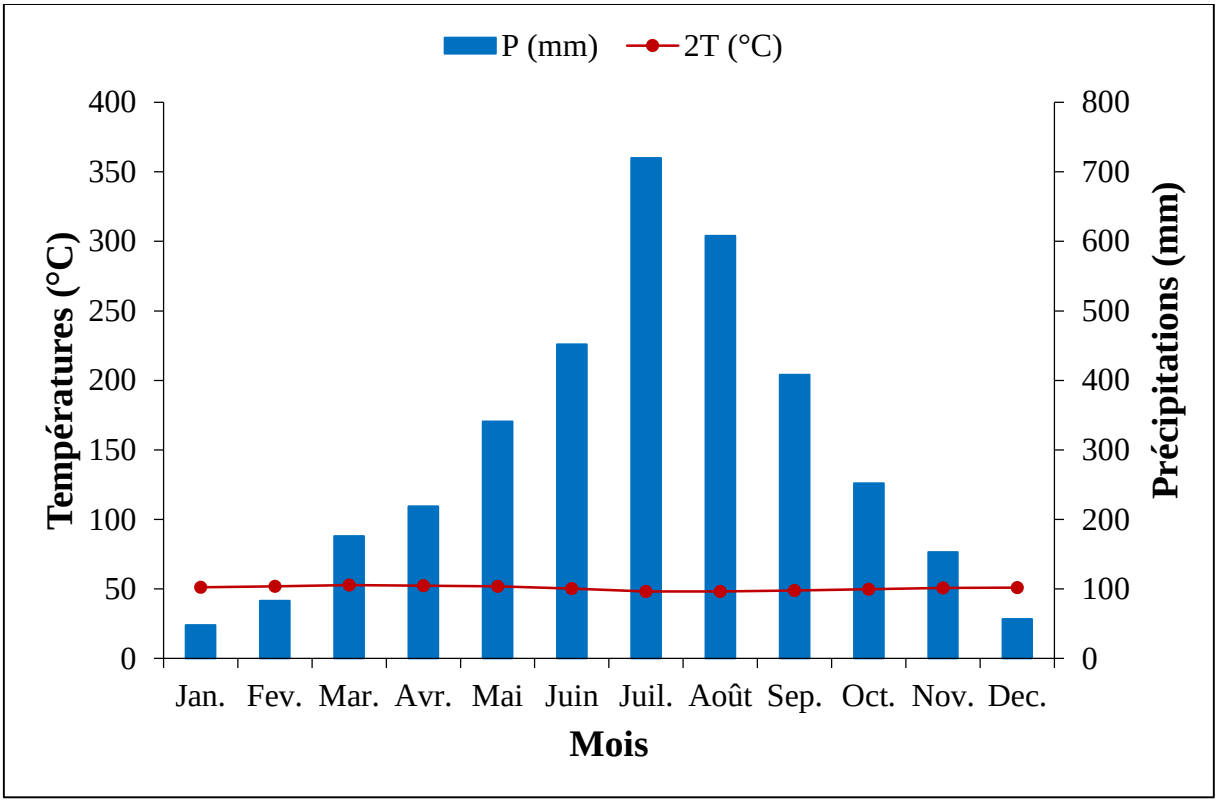


Figure 2. Courbe ombrothermique de la ville de Limbé (Bagnouls et Gaussen, 1957).

I.3. Végétation

La végétation de la zone d'étude est une forêt sempervirente biafréenne et littorale (Figure 3a), soumise aux activités anthropiques (Figure 3b). La dégradation de cette végétation côtière est anthropiquement remplacée par les cultures de rentes et vivrières pratiquées de façon anarchique : palmier à huile, noix de coco, manioc, macabo, maïs, banane, épinards, taro, patate, plantain, ignames, hévéa, thé. L'espèce végétale prédominante de la région est le palmier à huile (*Elaeis Guineensis)*. La forêt proprement dite est caractérisée par la présence d'arbres tels que *Celtic Africana* et *Maxi a Prunus* (Letouzey, 1985).

I.4. Sols

Les sols de Limbé sont jeunes et à profil homogène développés sur des roches volcaniques basiques. Ces sols sont généralement des andosols de couleur sombre due probablement à sa richesse en matière organique (Eghombi, 1999). Ils résultent de l'altération des roches basaltiques prépondérantes dans le secteur. L'altération de ces roches volcaniques conduit à la formation des andosols très propices à l'agriculture.

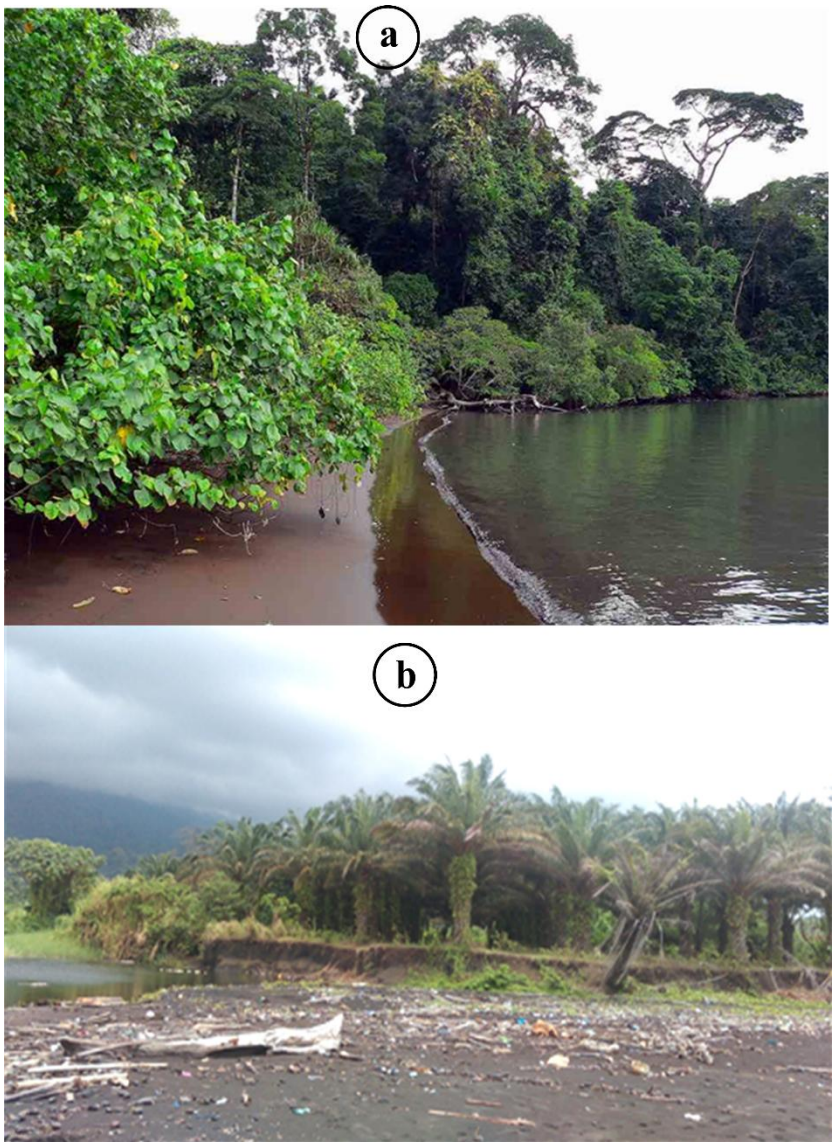


Figure 3. Vue partielle de la végétation de la zone de Limbé : a) forêt sempervirente biafréenne et littorale, b) végétation soumise aux activités anthropiques.

I.5. Géomorphologie

I.5.1. Orographie

Le relief de la zone d'étude repose sur une morphologie relativement pentue d'altitudes croissance de l'océan Atlantique vers l'intérieur du continent. Quelques modelés topographiques sont observés principalement : la plaine côtière, le plateau et les montagnes (Figure 4). La plaine côtière de faibles altitudes (0 – 500 m) est en légère dépression vers l'océan Atlantique. Le plateau d'altitudes comprises entre 500 et 1000 m, constitue les bas versants relativement ondulés du Mont Cameroun et par endroit les versants du Mont Etindé. Sa surface topographique est faite de petites collines très espacées et à pentes très faibles. Les montagnes (1000 – 3500 m) constituent les sommets pointus pour le Mont Etindé, les pentes fortes et les sommets arrondis du Mont-Cameroun. Sur les versants sud du Mont Etindé s'observent des ravines érodées (chénaux d'érosion) très remarquables pour la sédimentation détritique du secteur.

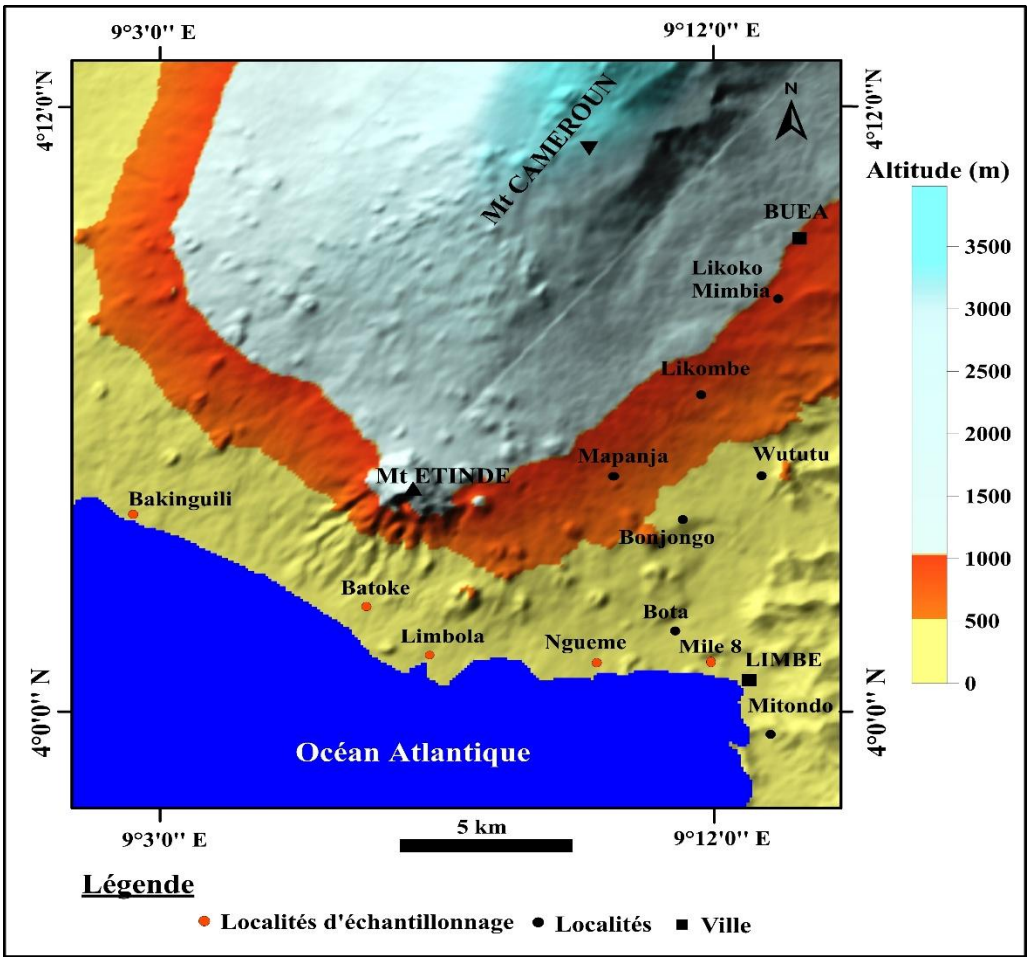


Figure 4. Carte orographique de la zone d'étude (source : d'après la carte topographique Buéa-Douala au 1/200 000).

I.5.2. Hydrographie

Le réseau hydrographique de la zone d'étude est dendritique et se jettent vers l'océan atlantique (Figure 5). Il est assuré par quelques rivières et torrents. Les cours d'eaux principaux importants du secteur sont : *Mokota*, *Manundimba Mbedje*, *Bouanda* et *Limbé River*. Le sens d'écoulement de ces eaux est NE-SW et NW-SE pour se déverser dans l'océan (Figure 5). Le drainage de ces eaux est permanent toute l'année et variable en fonction des intensités pluviométriques (Olivry, 1986).

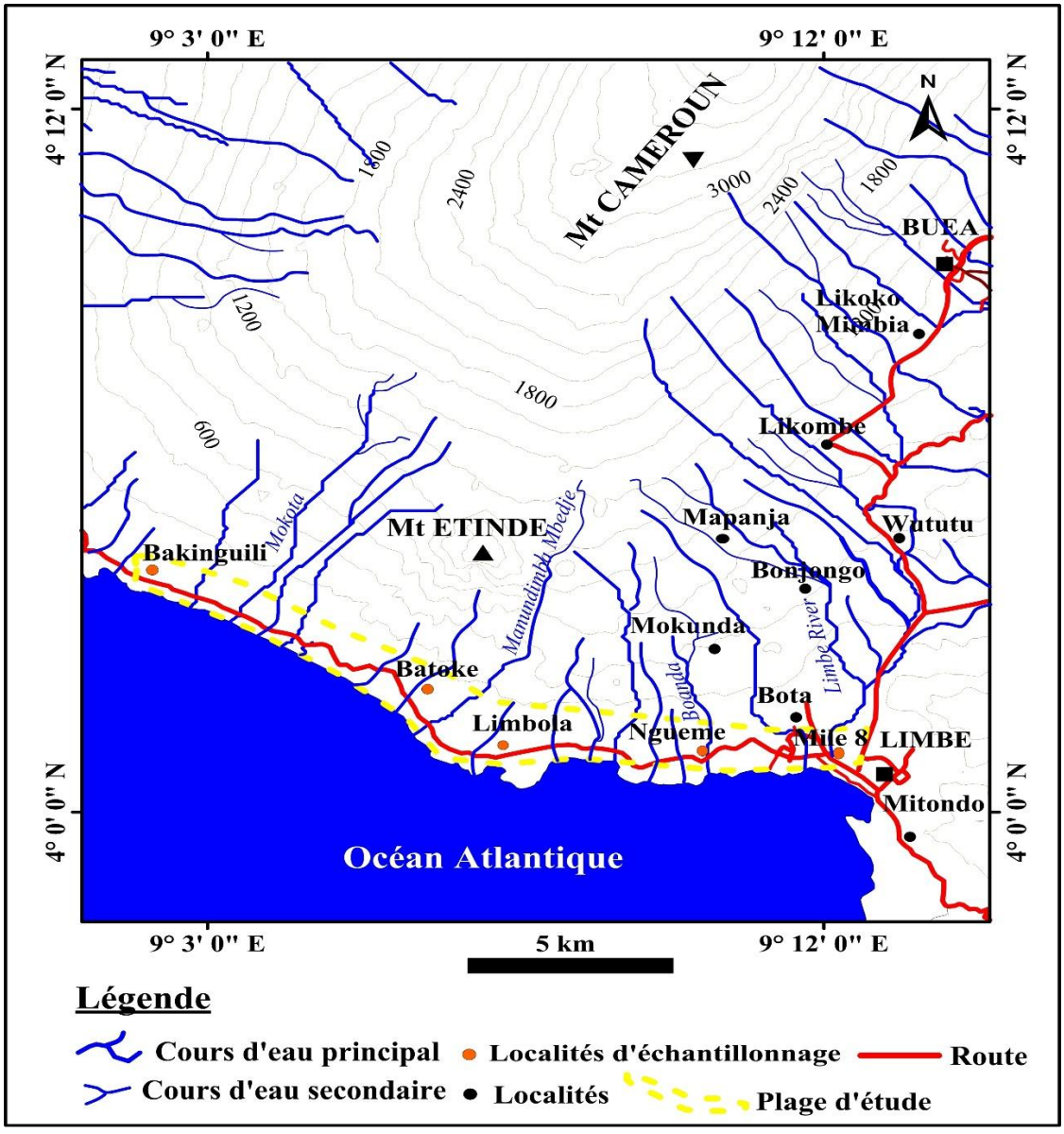


Figure 5. Carte du réseau hydrographique de la zone d'étude (source : d'après la carte topographique Buéa-Douala au 1/200 000).

I.6. Population et activités économiques

I.6.1. Population

La population de Limbé a connu depuis quelques decenies une forte croissance démographique (BUCREP, 2010). La ville comptait 26 988 habitants en 1976, puis 44 561 habitants en 1987 et environ 84 500 habitants en 2001. Lors du recensement démographique de 2005, les Arrondissements de Limbé 1er, 2ème et 3ème comptaient respectivement 93 255, 16 401 et 8 554 habitants, soit un total de 118 210 habitants pour la ville de Limbé. Le dernier recensement démographique de la ville en 2010 connait une augmentation de la population à environ 154 860 habitants (BUCREP, 2010).

La population est constituée des camerounais (Bakweris, Bantous et les peuples côtiers de la région du Littoral), ghanéens, maliens et nigérians. Les dialectes parlées sont diversifiées mais la langue officielle est l'anglais.

I.6.2. Activités économiques

Les activités économiques dans la région s'organisent autour de trois principaux secteurs :

- le secteur primaire regroupe les activités de gestion des ressources naturelles telles que l'agriculture, la pêche artisanale et l'élevage ;
- le secteur secondaire est défini par les activités industrielles ;
- le secteur tertiaire se caractérise par la production des services, tels que les transports et les opérations bancaires.

La population active de Limbé est composée d'agriculteurs, d'hommes d'affaires et de fonctionnaires. Une partie de cette population est employée dans les sociétés industrielles telles que la SONARA (Société Nationale de Raffinerie), la CDC (Cameroon Development Corporation), la CNIC (Chantier Naval et Industriel du Cameroun) et la Centrale Thermique à fuel lourd, et d'autres petites entreprises. Le reste de la population se consacre au commerce, à l'élevage de la volaille et à l'artisanat.

Conclusion

La zone d'étude est Limbé, située dans la Région du Sud-Ouest Cameroun. Elle est soumise à un climat tropical humide à deux saisons : une saison sèche qui dure trois mois et

une saison pluvieuse de neuf mois. La végétation rencontrée est une forêt sempervirente biafréenne et littorale. Le relief est constitué des unités géomorphologiques dominé par les plaines et les montagnes. Les sols sont des andosols d'une grande fertilité. Le réseau hydrographique est dendritique. La population est diversifiée et composée des expatriés et des autochtones avec pour langue principale l'anglais. Les activités économiques dans la région s'organisent autour de trois principaux secteurs : le secteur primaire caractérisé par les activités de gestion des ressources naturelles; le secteur secondaire est défini par les activités industrielles et le secteur tertiaire caractérisé par la production des services tels que les transports et les opérations bancaires.

CHAPITRE II : REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LES SABLES ET CONTEXTE GÉOLOGIQUE DU SECTEUR D'ÉTUDE

« *La plus grande erreur que vous puissez faire dans la vie, c'est d'avoir peur de faire des erreurs*».

-John Kennedy-

Introduction

Ce chapitre présente les processus de formation et l'origine des sables, les caractéristiques pétrographiques et structurales de la Ligne Volcanique du Cameroun, les caractéristiques géologiques des formations du socle et des successions sédimentaires du sous-bassin de Douala.

II.1. Processus de formation et origine des sables

II.1.1. Processus de formation des sables

Les sables dans un sens large, sont des matériaux meubles ayant des particules comprises dans une classe granulométrique bien définie (- 1 à 4 Φ ; Folk, 1980). Ces matériaux meubles peuvent être transportés par le vent, les eaux courantes, et sont classés, stratifiés, entrecroisés et granoclassés aussi bien latéralement que verticalement (Van Rijn, 1998). Les matériaux sableux qui correspondent à cette définition sont de diverses origines et de nature variée, à savoir : les sables quartzeux ou quartzo-feldspathiques, les sables verts riche en glauconie, les sables carbonatés et les sables noirs riches en minéraux ferromagnésiens.

La littérature sédimentologique distingue principalement quatre processus de formation des sables (Chamley et Deconinck, 2013) tels que :

- l'altération qui résulte des mécanismes physico-chimiques de désagrégation des roches sources ;
- le volcanisme explosif qui conduit aux produits pyroclastiques ;
- la pelletisation qui résulte des déjections fécales des organismes limivores en milieu marin ;
- la précipitation chimique ou biochimique à partir des solutions.

Les processus liés à l'altération sont dits épiclastiques. L'un de ces processus est la désagrégation mécanique (altération physique). Cette désagrégation qui se fait sous certaines conditions (variation de température, hydratation) fragilise la structure rocheuse et conduit à la libération des particules de moins en moins grosses conduisant à des sables résiduels (Chamley et Deconinck, 2013). L'autre processus est l'altération chimique qui génère de quantité considérable de sables quartzeux à partir des roches plutoniques riches en quartz (Chamley et Deconinck, 2013). En effet au terme de la décomposition chimique, les feldspaths sont transformés en argiles et particules très fines qui servent de matrice aux minéraux résistants tels que les quartz. Ces quartz sont ultérieurement concentrés sous une

texture sableuse préférentiellement par le mouvement des fluides (Garzanti *et al*., 2015). Les mouvements de la croûte terrestre peuvent conduire à des roches broyés conduisant aux sables, bien que la quantité de sables qui en découle ne soit pas considérable (Krumbein et Graybill, 1965), en revanche le broyage des roches dans les zones glacières (glaciers) produits des dépôts sableux remarquables (Van Dijck, 2014).

Les volcans explosifs produisent de grandes quantités de débris de texture sableuse (verre, fragment de cristaux et particule de lave). Les évènements pyroclastiques et cataclastiques, au regard de la production des sables, peuvent localement être importants, mais ils sont supplantés en général, d'après Prodger (2017) par les actions moins spectaculaires de l'altération physico-chimique.

Une proportion notable de sables est produite lors des phénomènes diagénétiques et par précipitation chimique ou biochimique. Ces sables dits endogénétiques se forment dans le milieu de sédimentation (McDonald et Surdam, 1984). A l'inverse des sables épiclastiques, les sables endogénétiques ne résultent pas de la désagrégation et de l'érosion des roches continentales. Certains de ces sables sont formés à partir des particules fines (argileuses) ingérées par les organismes benthiques qui produisent des pellets. La précipitation chimique et biochimique forment des sables carbonatées et oolitiques de volume parfois considérables (Gillet *et al*., 2000). Ces sables carbonatés ne sont pas soumis à la problématique des sables détritiques comme celle de la présente étude.

II.1.2. Provenance des sables

La problématique de la provenance des sables pose plusieurs questions, à savoir :

- De quel type de roche provient un corps sableux donné ?
- Quels étaient le climat et le relief des zones sources ?
- Quelle distance sépare le dépôt des régions sources ?
- Dans quelle direction se trouve la source des sédiments ?
- Quelle est l'étendue des terrains sources ?

Les éléments de réponse à ces questions permettent de faire la reconstitution paléogéographique, non seulement des zones de dépôts mais aussi des régions sources

(Zaid, 2015 ; Hernández-Hinojosa *et al*., 2018 ; Carranza-Edwards *et al*., 2019 ; Armstrong-Altrin *et al*., 2021 ; Madharavaju *et al*., 2021).

Par ailleurs, les éléments de réponses sur les caractéristiques et la nature des roches sources peuvent découler de la composition du dépôt sédimentaire lui-même. En effet, les sables plus que tous autres sédiments se prêtent à cette approche. Les constituants détritiques minéraux et les fragments de roches reflètent la nature des roches sources (Armstrong-Altrin *et al*., 2015 ; Nagarajan *et al*., 2017 ; Dayong, 2018). Certains minéraux, comme le disthène par exemple, sont indicatifs des roches sources métamorphiques. D'autres minéraux tels que le quartz sont ubiquistes, mais présentent des caractéristiques significatives de certaines roches sources (quartz volcanique par exemple). Ainsi les espèces minérales particulières ou certaines associations minérales permettent d'après Crook (1974) et Schwab (1975) de retracer avec succès les roches sources. Les fragments de roches présents dans certains sables sont très utiles dans les études de provenance (Krumbein et Graybill, 1965).

Le relief et le climat sont plus difficiles à déterminer à partir des sables. L'estimation des paléoclimats et des paléoreliefs dépend des connaissances sur la stabilité des minéraux notamment la résistance des minéraux à l'altération chimique. En effet, seules les espèces minérales stables peuvent survivre à l'altération chimique intense dans les régions chaudes et humides (McLennan *et al*., 1993 ; Weltje *et al*., 1998). La résolution de ce problème est complexe dans la mesure où les actions du relief et du climat évoluent en ordre inverse (dans des directions opposées). En effet, les reliefs escarpés conduisent à une érosion rapide et une libération des matériaux et particules, non complètement altérés, même sous des degrés d'altération intense (Hay, 1998).

En plus des indices fournis par l'analyse des particules de sédiments, d'autres marqueurs de la provenance des sables se trouvent dans les études de stratigraphie et l'analyse du faciès (Nichols, 2009). La connaissance de la géologie régionale (paléogéographie et évènements tectoniques) est utile dans les études de provenance. En fait, la question de la provenance est fortement liée au phénomène tectonique (Olugbenga *et al*., 2012 ; Oni *et al*., 2014). En général, les zones tectoniquement actives sont des domaines qui produisent des sédiments. Le volume et la texture des sédiments produits peuvent varier d'une période à l'autre. Il devient alors important de connaître non seulement la nature de la roche source mais aussi et surtout où se localise cette zone source. L'investigation scientifique peut aller plus loin et tenter d'estimer le volume du matériel sédimentaire provenant d'une localité particulière. L'étude des paléocourants permet de reconstituer la direction dans laquelle se

trouve cette localité source (Nichols, 2009). Notons que ce travail se fait avec plus de succès sur les alluvions que sur les sédiments de plage ou les sédiments marins. En somme, il est nécessaire d'élargir les connaissances au-delà de la minéralogie des sables pour mieux déterminer leur provenance.

L'une des difficultés à mener à bien les études de provenance vient de ce que certains sables sont récyclés, c'est-à-dire proviennent des dépôts sableux préexistants, qui eux mêmes dérivent d'une roche source antérieure et ont connus une histoire d'altération, de transport et de dépôt (Pettijohn *et al*., 1987). En plus, les zones sources peuvent être multiples et variés au cours du temps. La complexité est accentuée par la conjugaison des effets du climat et du relief, la relation compliquée entre la direction des zones sources et le dépôt, et la trajectoire de transport des sédiments.

II.2. Caractéristiques pétrographiques et structurales de la LVC

La Ligne Volcanique du Cameroun présente des caractéristiques structurales et pétrographiques particulières qu'on retrouve en partie dans la géologie du Mont-Cameroun et du Mont Etindé, proches de la zone de la présente étude.

II.2.1. Caractéristiques pétrographiques de la LVC

Le magmatisme le long de la LVC a débuté au Crétacé Supérieur (Maastrichtien) soit entre 68,8 et 62,1 Ma par la mise en place des basaltes et trachytes du complexe plutono-volcanique de Guenfalabo (Ngonge *et al*., 2014) et s'est poursuivit jusqu'aux éruptions de 1999-2000 du Mont-Cameroun (Suh *et al*., 2003).

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

Les laves mafiques sont en général présentes dans tous les centres volcaniques de la LVC. Le Mont Etindé est constitué de néphélinites, leucitites, et de haüynophytes (Nkoumbou *et al*., 1995). Au Mont Manengouba par contre, les laves forment une série continue des basaltes aux rhyolites (Tchoua, 1974, 1976) définissant une série typiquement alcaline, homogène et sans lacune de composition. Deux séquences volcaniques ont été distinguées dans ce massif par Kagou Dongmo *et al*. (2001) et Pouclet *et al*. (2014) : la première constituée de basaltes, hawaiites, mugéarites, benmoréites et trachytes ; et la deuxième formant la série basalte-mugéarite sous saturée à néphéline normative.

Dans les grabens de Tombel (Nkouathio *et al*., 2008) et Kumba (Tamen *et al*., 2007), les roches sont majoritairement basaltiques et appartiennent essentiellement à la série alcaline, comme la plupart des centres volcaniques de la LVC. Les plateaux de Ngaoundéré, qui forment les terminaisons continentales de la chaîne volcanique en forme de «Y» (Fitton, 1987), sont constitués de basaltes. L'activité récente est représentée par les cônes de cendres volcaniques, de scorie, et plusieurs dizaines de cratères d'explosion alignés (Tchoua, 1987). Toutes les venues magmatiques se sont mises en place dans le substratum Panafricain riche en granitoïdes calco-alcalins (Lassere, 1978 ; Njonfang *et al*., 2006) et parfois couvert par les formations volcano-sédimentaires d'âge Paléozoïque de type Mangbéi (Béa, 1987) ou par des formations sédimentaires crétacées de Mamfé et la Bénoué (Lassere, 1978). Les données géochimiques revues par Déruelle *et al*. (1991), complétées par de nombreux travaux de détail montrent le caractère alcalin des laves de la LVC.

II.2.2. Caractéristiques structurales de la LVC

La Ligne Volcanique du Cameroun (Figure 6), est une mégastructure tectono-magmatique linéaire d'orientation générale N030°E (Assah *et al*., 2015, 2021). Elle s'étend à la fois en domaine océanique (Océan Atlantique) et en domaine continental (Afrique), dans un contexte tectonique faillé (Déruelle *et al*., 2007). Le domaine océanique d'environ 700 km de long est constitué au large du Golfe de Guinée de nombreuses îles volcaniques (Annobon, Sao Tomé, Principe et Bioko) et de deux guyots (Monts sous-marins) découverts par Burke (2001). Ces deux guyots sont situés, l'un entre Sao Tomé et Principe et l'autre entre Principe et Bioko (Figure 6). Ces six édifices sont datés de l'Eocène Supérieur à l'Actuel (Déruelle *et al*., 1991). Le domaine continental (1000 km de long) comprend plusieurs massifs volcaniques datés de l'Eocène à l'Actuel (Gouhier *et al*., 1974 ; Fitton, 1987 ; Itiga *et al*., 2004). Ils sont séparés les uns des autres par des plaines. Il s'agit de la plaine de Tombel ou de celle de Wum. Le domaine continental compte une soixantaine de complexes anorogéniques

(Ghogomu *et al*., 1989 ; Ngako *et al*., 2006 ; Njonfang *et al*., 2013 ; Ngonge *et al*., 2014), des plaines d'effondrement telles que Kumba, Tombel, Mbo, Noun, Tikar, Bénoué (Nkouathio *et al*., 2006 ; 2008 ; Tamen *et al*., 2007), de nombreux massifs volcaniques dont les plus importants sont d'après Sato *et al.* (1990) : le Mont-Cameroun (4100 m), Le Mont Manengouba (2411 m), le Mont Bamboutos (2740 m), le Mont Bamenda (2621 m) et le Mont Oku (3011 m). Seul le Mont-Cameroun à la limite des domaines continental et océanique de la Ligne Volcanique du Cameroun est encore actif (Suh *et al.*, 2003; Njilah *et al*., 2004).

II.2.3. Quelques massifs volcaniques de la LVC dans le secteur d'étude

II.2.3.1. Mont-Cameroun

Le Mont-Cameroun est un strato-volcan constitué d'un amas de lave basaltique, des dépôts pyroclastiques et lahars (Hedberg, 1968). Il présente un dynamisme variable en fonction des variations de la fluidité du magma. Ces variations peuvent se rencontrer successivement dans un même édifice éruptif (Déruelle *et al*., 1983).

Les éruptions volcaniques connues sur le Mont-Cameroun sont données par Fitton (1983) et Déruelle *et al*. (1983, 1987). Sept éruptions volcaniques ont été signalées au XX^{e} siècle : en 1909 (flanc NW), en 1922 (flanc SW et sommet du Fako), en 1954 (sommet du Fako), en 1959 (flanc Est) et en 1982 (flanc SW). En 1999 et 2000, les éruptions ont également pris place au sommet et sur le flanc SW (Suh *et al*., 2003 ; Njilah *et al*., 2004). Les laves issues du Mont-Cameroun sont de la série alcaline (Déruelle *et al*., 1991; Nkoumbou *et al*., 1995).

II.2.3.2. Mont Etindé

Le Mont Etindé encore appelé « petit Mont-Cameroun » forme un important massif de 1713 m d'altitude à l'Ouest de la ville de Limbé, au bord de l'Océan Atlantique (Figure 6). Il se dresse, isolé au sud du Mont-Cameroun, sa pyramide aigue attire l'attention depuis la côte qu'il domine de toute sa hauteur (Gèze, 1943). C'est un volcan situé sur le versant SW du Mont-Cameroun, dont l'extension continentale est la plus méridionale de la LVC, c'est-à-dire, le volcan le plus proche de la zone d'étude (Figure 1). Le Mont Etindé est caractérisé par un volcanisme basique et est donc distinct des autres volcans du secteur continental de la LVC, qui présentent principalement des volcanites siliciques (Fitton et Dunlop, 1985 ; Marzoli *et al*., 1999, 2000). Il s'agit d'un strato-volcan constitué de tufs néphélinitiques stratifiés, de néphélinites, de néphélinites à hauynemélilites ou rouge grenat, de leucito-néphélinites à

aenigmatites et haunophyres (Mouafo, 1988 ; Nkoumbou *et al*., 1995 ; Etame *et al*., 2009). Nkoumbou *et al*. (1995) dataient les coulées de lave du Mont Etindé à 0,65 Ma. Sur les flancs NW, Sud et Est en particuliers, les pentes de ce Massif volcanique présentent une vallée en forme de V profondément incisée séparant des crêtes acérées. Les vallées sont généralement incisées en forme de ruisseaux saisonniers qui s'assèchent en saison sèche (Etame *et al*., 2009).

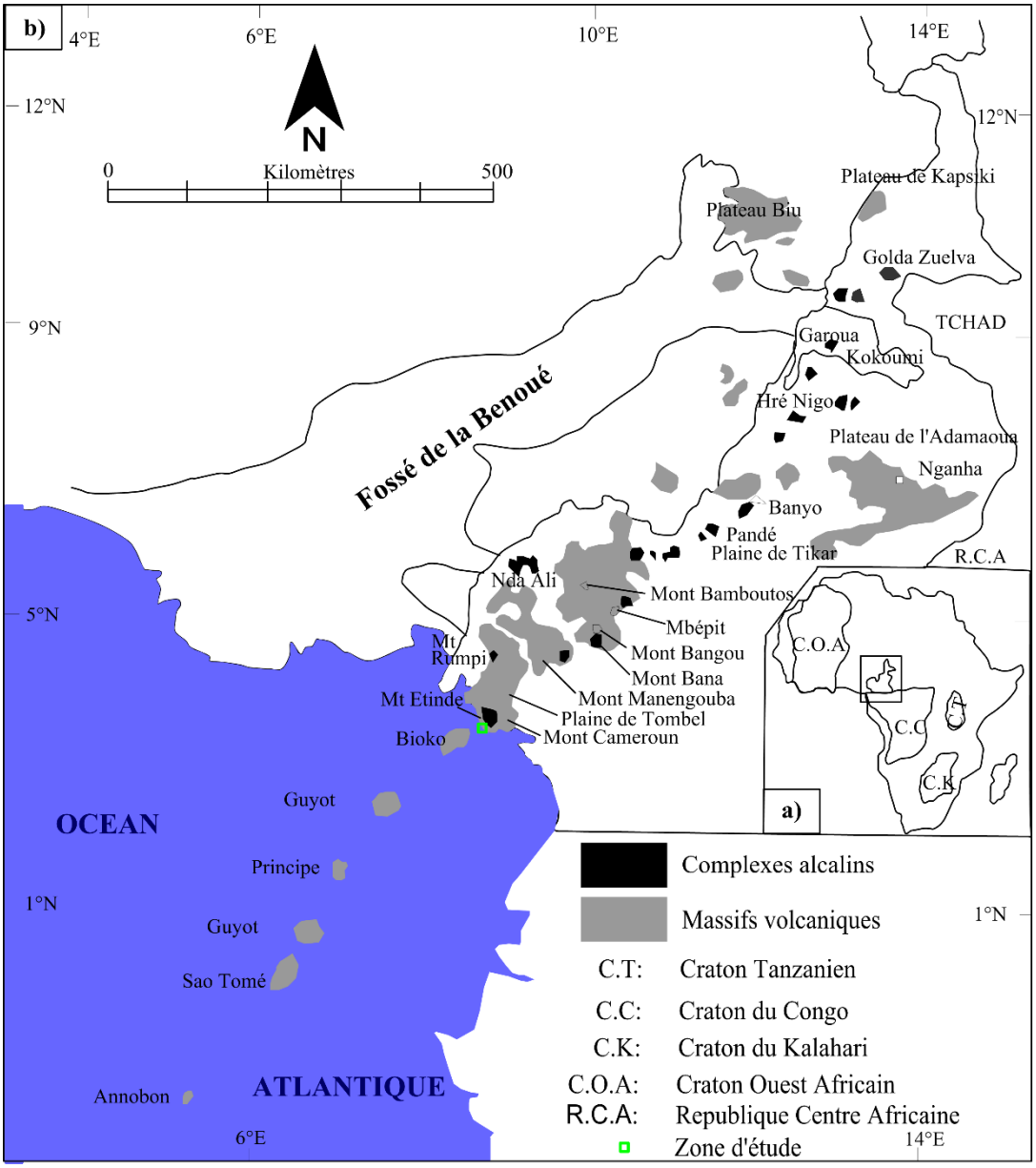


Figure 6. Aperçu de la Ligne Volcanique du Cameroun (Njonfang *et al*., 2011). a) Localisation du Cameroun en Afrique ; b) Principaux massifs volcaniques et complexes alcalins le long de la Ligne Volcanique du Cameroun.

II.2.4. Formations du socle

L'arrière pays de la zone d'étude est constitué des roches métamorphiques, plutoniques et volcaniques. Les roches métamorphiques sont d'âge Précambrien repris au Panafricain avec la mise en place des granitoïdes. Les roches plutoniques sont d'âge Panafricain et appartiennent à la Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale (CPAC) au Cameroun (Tagne Kamga, 1994). Les roches métamorphiques sont constituées de gneiss de nature très variée (Figure 7). Elles comportent des gneiss à grenat et biotite, des orthogneiss à biotite et amphibole, des gneiss migmatitiques et des migmatites (Nzenti *et al*., 1984, 1988 ; Penaye *et al*., 1989 ; Ngnotue *et al*., 2000 ; Nnange, 2001 ; Tagne Kamga, 2003 ; Nkombou *et al*., 2014). Les roches plutoniques sont les granitoïdes le plus souvent orthogneissifiés, mis en place en contexte de déformation. On y rencontre des granites, leucogranites, granodiorites, syenites, gabbros, diorites, charnokites et monzonites. Les roches volcaniques sont d'âge Tertiaire et recouvrent le socle granito-gneissique. Elles sont faites de basaltes, trachytes, cendres volcaniques et scories (Kagou Dongmo *et al*., 2001 ; Nkouathio *et al*., 2008 ; Pouclet *et al*., 2014).

II.2.5. Géologie des successions sédimentaires du sous-bassin de Douala

II.2.5.1. Formations du sous-bassin de Douala

Le sous-bassin de Douala appartient au bassin côtier camerounais de Douala-Kribi Campo. Sur la base des travaux de Regnoult (1986), Nguene *et al*. (1992), Meyers *et al*. (1996), Lawrence *et al*. (2002), Brownfield et Charpentier (2006), Ntamak-Nida *et al*. (2008 ; 2010), sept formations ont été reconnues dans ce sous-bassin. Elles sont présentées de la plus ancienne à la plus récente (Figure 8).

Formation de Mundeck

D'âge Apto-Cénomanien (Nguene *et al*., 1992), la Formation de Mundeck repose en discordance sur le socle précambrien. Elle est bien exposée dans la partie nord du sous-bassin de Douala, près de Mundeck, dans la vallée du Moungo. La Formation de Mundeck est constituée de dépôts continentaux et fluvio-deltaïques montrant quelques intercalations de faciès marins (Regnoult, 1986). Il s'agit d'une épaisse couche constituée de conglomérats à éléments du socle, de grès arkosiques moyens à grossiers, de grès fins micacés, charbonneux et carbonatés, de schistes noirs micacés, d'argilites, de calcaires et de marnes (Logar, 1983).

Cette Formation est aujourd'hui scindée en deux parties: le « Lower Mundeck formation » à la base et le « Upper Mundeck formation » au sommet.

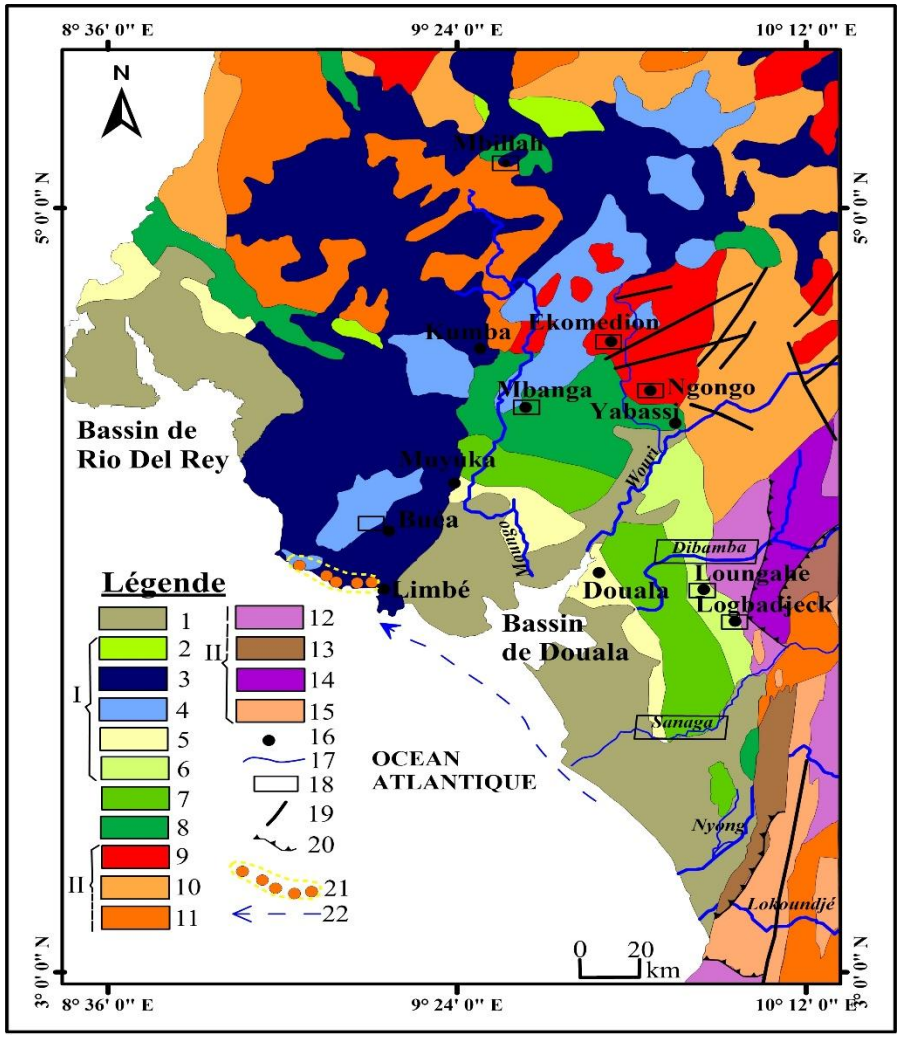


Figure 7. Carte géologique de la zone d'étude montrant les différentes zones sources compilés aux données géochimiques utilisées pour l'identification de la provenance (Carte modifiée par Toteu *et al*., 2008). (1) Alluvions récents, I (2) Roches volcaniques du Tertiaire (trachytes), I (3) Roches volcaniques du Tertiaire (trachytes et basaltes recents), I (4) Roches volcaniques du Tertiaire (basaltes), I (5) Tertiaire indifferencié (siltstones, grès, argiles litées, argilites et limons), I (6) Tertiaire (grès, limons, argilites, dolomites), (7) Paléocène (petits conglomerats, grès meuble, argilites et dolomites), (8) Crétacé (grès de base, argiles, sables, grès marneux et calcaires), II (9) Précambrien (granites post-tectonique), II (10) Précambrien (gneiss indifférencié), II (11) Précambrien (gneiss + migmatite indifférenciés), II (12) Précambrien (gneiss à biotite et amphibole, II (13) Précambrien (granites porphyroïdes à biotite et amphibole), II (14) Précambrien (gneiss granulitique), et II (15) Précambrien (gneiss + micashistes), (16) Localités, (17) Rivières, (18) Emplacement des données utilisées, (19) Faille, (20) Cisaillement, (21) Plage d'étude, (22) Courant côtier.

Formation de Logbajeck

La Formation de Logbajeck repose en concordance ou en discordance sur la Formation de Mundeck. En affleurement, cette formation est bien représentée dans la vallée du Moungo où elle représente les dépôts de la plate-forme externe du bassin. Cette Formation

montre également une sédimentation du type fluvio-deltaïque, principalement à la base, et est composée de micro-conglomérats, de sables, de grès moyens à grossiers, de rares intercalations de calcaires fossilifères, d'argiles sableuses, et des sables à intercalations marno-calcaires (Regnoult, 1986). La Formation de Logbajeck est datée du Cénomanien-Campanien (Njiké Ngaha, 2004 ; Tchouatcha *et al*., 2020).

Formation de Logbaba

Cette Formation montre une sédimentation du type marin, déposée en eaux profondes du Coniacien au Maestrichtien. La Formation de Logbaba est une épaisse couche sédimentaire dominée par des argilites fossilifères, composée des grès et des sables par endroit (Reyre, 1966 ; Regnoult, 1986).

Formation de N'kapa

D'âge Paléocène-Eocène inférieur, la Formation de N'kapa repose en discordance sur la Formation de Logbaba. En affleurement, elle est visible dans la vallée du Moungo (Belmonte, 1966), et est constituée de schistes argileux, d'argiles calcaires, grès arkosiques, grès friables fins à grossiers, silts, lentilles de sable et de dolomie (Dumort, 1968).

Formation de Souellaba

La Formation de Souellaba est le produit d'une subsidence et d'une reprise de sédimentation succédant à d'importantes phases de soulèvement et d'érosion responsable d'une lacune stratigraphique de l'Eocène supérieur. Elle repose en discordance sur la Formation de Nkapa (Reyre, 1966 ; Belmonte, 1966 ; Salard-Chebodaeff, 1981 ; Nguene *et al*., 1992) et est caractérisée par des marnes et des lentilles de sables inter-stratifiés (Regnoult, 1986). Nguene *et al*. (1992) date cette Formation de l'Oligocène supérieur au Miocène inférieur, et montre qu'elle est également constituée des grès et silts transgressifs qui dominent dans la partie inférieure.

Formation de Matanda

La Formation de Matanda est dominée par des faciès deltaïques inter-stratifiés et des tufs volcaniques (Regnoult, 1986). Cette Formation affleure à Tiko et dans la zone littorale du sous-bassin de Douala. Datée du Miocène supérieur au Pliocène, elle est constituée de sables grossiers à la base et fins au sommet, alternant avec des poches d'argiles bariolées, parfois inter-stratifiées avec des basaltes (Njiké Ngaha, 2004).

Formation du Wouri

La Formation du Wouri est azoïque, datée du Pliocène au Pléistocène, et repose en discordance sur toute la série antérieure qu'elle ravine. Elle est caractérisée par des graviers, des sables grossiers à matrice argileuse, des laves et des tufs volcaniques. Les sédiments du Wouri représentent la sédimentation estuarienne de l'embouchure du Wouri et de la Dibamba (Regnoult, 1986 ; Mbesse *et al*., 2020).

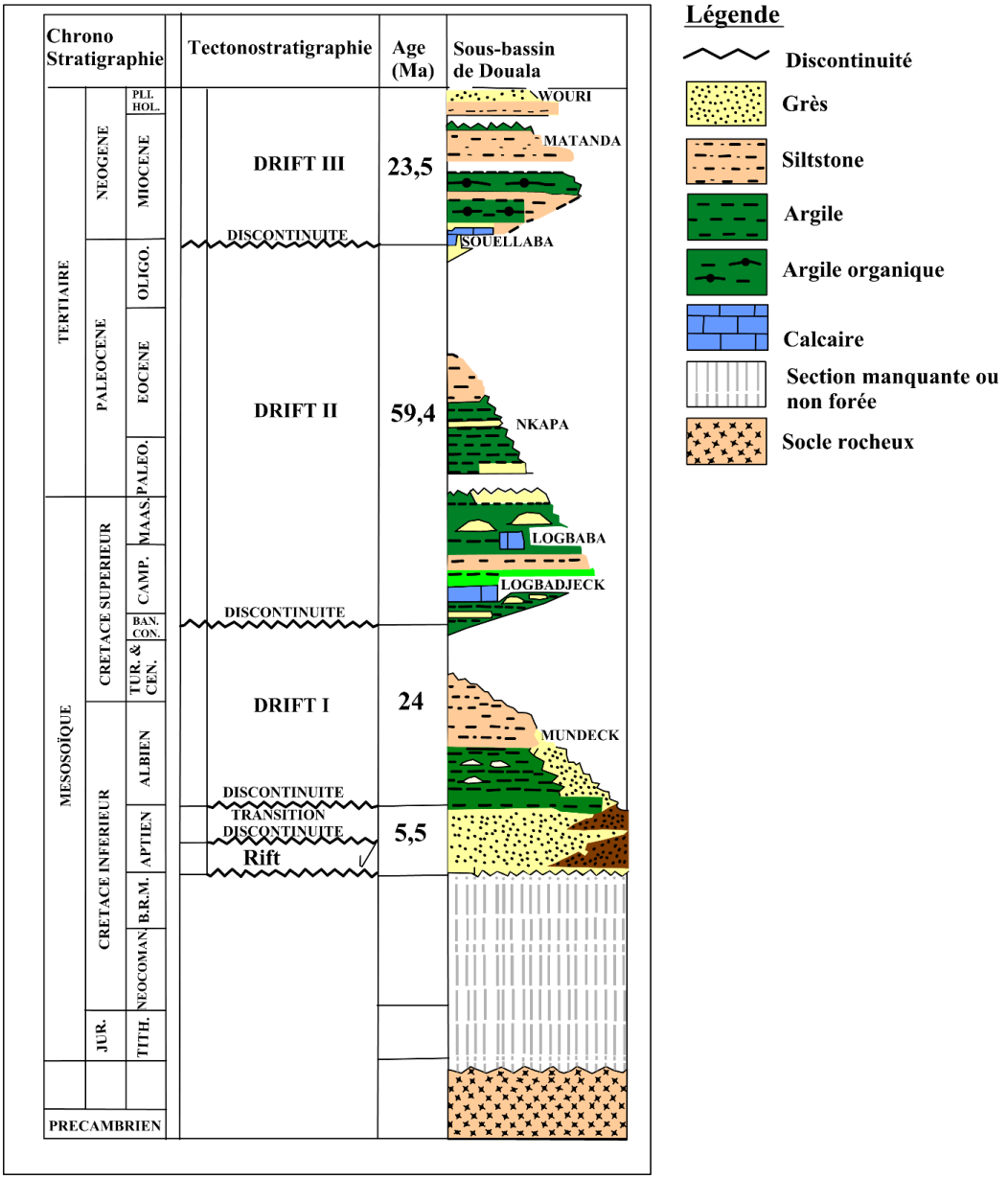


Figure 8. Colonne chrono-lithostratigraphique du sous-bassin de Douala (Lawrence *et al*., 2002).

II.2.5.2. Evolution géodynamique du sous-bassin de Douala

L'évolution géodynamique du sous-bassin de Douala se résume en trois phases majeures : syn-rift, transition et post-rift (Nguene *et al*., 1992).

La phase syn-rift qui va du Jurassique Terminal au Crétacé Inférieur sépare l'Afrique de l'Amérique du Sud (Buxton et Hall, 1989). Elle correspond à la mise en place des failles normales (Regnoult, 1986) de la Formation de Mundeck. C'est pendant cette phase qu'on a observé la mise en place des horsts, des sillons et des grabens.

La phase de transition qui date de l'Aptien au Crétacé supérieur correspond au basculement de la marge continentale africaine vers l'Ouest, et de l'ouverture initiale de l'Atlantique Sud. Pendant cette phase, le rifting se bloque mais les forces distensives restent actives. C'est à cette période qu'il y'a eu des dépôts de sédiments de types évaporitiques. La phase post-rift ou d'expansion du Crétacé supérieur à l'Actuel. Cette phase correspond à l'ouverture de l'Atlantique suite à la séparation des plaques africaine et Sud-américaine (Baker *et al*., 1972). Elle est attribuée aux cycles de transgressions, de régressions marines et des épisodes d'érosion du Paléogène. Cette phase post-rift correspond aussi au dépôt des sédiments détritiques sous forme de turbidites. Elle est à l'origine de la mise en place des formations de N'kapa, de Souellaba et du Wouri.

Conclusion

La synthèse des travaux antérieurs faite sur les processus de formation et l'origine des sables, révèle quatre processus conduisant à la formation des sables : (i) l'altération qui résulte des mécanismes physico-chimiques, (ii) le volcanisme explosif qui conduit aux produits pyroclastiques, (iii) la pelletisation qui résulte des déjections fécales, des organismes limivores en milieu marin et (iv) la précipitation chimique ou biochimique à partir des solutions. Sur le plan géologique, les roches du secteur sud de la LVC sont des basaltes et des trachytes à l'exception du Mont Etindé qui est constitué des néphélinites, leucitites et de haüynophytes. Les caractéristiques structurales montrent que la LVC s'étend à la fois en domaine océanique (Océan Atlantique) et en domaine continental (Afrique), dans un contexte tectonique faillé. Les massifs volcaniques proches de la zone d'étude sont le Mont-Cameroun et le Mont Etindé. Les formations du socle sont de nature métamorphique (gneiss) et plutonique (granitoïdes). De la côte littorale vers l'intérieur, le substratum comprend aussi des successions sédimentaires du sous-bassin de Douala avec sept formations : la formation de Mundeck, la formation de Logbadjeck, la formation de Logbaba, la formation de N'kapa, la formation de Souellaba, la formation de Matanda et la formation du Wouri. Ces formations sédimentaires se sont déposées sur place à des différentes épisodes géologiques du Crétacé à l'Actuel.

CHAPITRE III : MATÉRIEL ET MÉTHODES

«Le fondement de la théorie, c'est la pratique».

-Albert Einstein-

Introduction

Le présent chapitre décrit les matériels et les méthodes utilisés pour l'acquisition des données. Il débute par les matériels utilisés, ensuite suivront les détails de la collecte des échantillons sur le terrain. En outre, ce chapitre décrit les procédures analytiques réalisées dans cette étude telles que les analyses granulométriques, morphoscopiques, pétrographiques (minéraux lourds, lames minces de sables), minéralogiques (DRX et EPMA) et géochimiques.

III.1. Matériel

Le matériel utilisé pour acquérir les données de terrain et de laboratoire comprend :

- Les cartes topographiques 1/200 000 et géologiques présentées d'après Ateba *et al*. (2009) pour la localisation de la zone d'étude et des points d'échantillonnages ;
- un GPS (Global Positioning System) pour la prise des coordonnées géographiques de la zone d'étude et des différents points de prélèvement des échantillons ;
- des sacs à échantillons pour conditionner les échantillons prélevés sur le terrain ;
- le bromoforme de densité > 2,7g/m^3 pour la séparation des minéraux lourds et légers ;
- un microscope polarisant pour l'étude des lames minces de sables et de minéraux lourds ;
- la loupe binoculaire pour la morphoscopie des grains de sables ;
- les appareils de diffraction des rayons X sur poudre pour l'identification du cortège minéralogique.

III.2. Méthodologie

III.2.1. Travaux sur le terrain

III.2.1.1. Prospection et reconnaissance du terrain

Des campagnes de terrain ont été menées dans la partie nord de la zone littorale du Cameroun sur une période de trois ans. Une première campagne de terrain s'est faite en début mars 2017, une deuxième campagne de terrain en février 2021 et une troisième campagne de terrain en janvier 2023.

Sur le terrain, deux types de prélèvement ont été faits : le prélèvement vertical dans les puits et le prélèvement latéral superficiel. Dans le prélèvement vertical, les travaux ont consisté à creuser manuellement six puits (trois puits à Batoké et trois puits à Limbola). Ces

puits sont profonds d'environ 110 cm. Ensuite, les échantillons de sédiments ont été régulièrement prélevés le long des puits et en surface, décrits, empaquettés et numérotés à l'aide d'un marqueur indélibile. Le prélèvement latéral superficiel s'est fait à intervalle régulier (100 m environ) dans tous les sites. Il convient de noter que la couche superficielle (0 – 5 cm) a chaque fois été enlevée par la truelle pour éviter les contaminations. Les puits d'échantillonnages et les échantillons de sédiments de surface correspondent à chaque code de prélèvement des sédiments le long de la plage partant de Bakinguili à Mile 8 (Figure 9, Tableau 2). Ils sont indiqués par les abréviations en deux premières lettres mentionnant les noms de chaque plage visitée et une troisième lettre pour les distinguer.

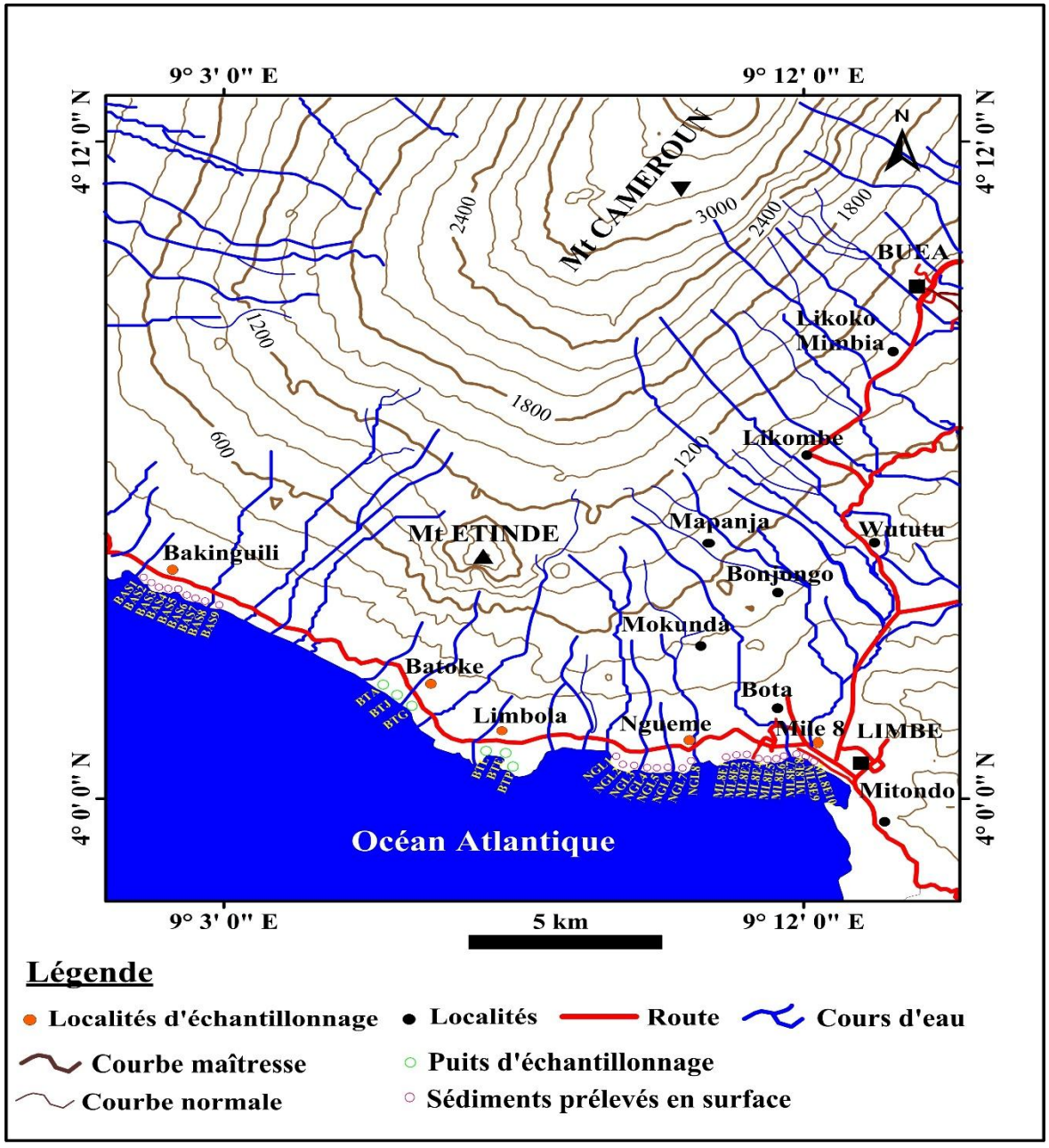


Figure 9. Carte d'échantillonnage de la zone d'étude.

III.2.1.2. Prélèvements des échantillons

Dans la zone d'étude, neuf échantillons de sédiments humides de surface ont été prélevés à Bakinguili, sept échantillons de sédiments humides ont été prélevés à Batoké, dont quatre échantillons dans trois puits et trois échantillons de surface, sept échantillons de sédiments humides ont été prélevés à Limbola, dont quatre échantillons dans trois puits et trois échantillons de surface, huit échantillons de sédiments humides de surface ont été prélevés à Nguémé, et dix échantillons de sédiments humides de surface ont été prélevés à Mile 8. Les échantillons prélevés pèsent environ 2 kg chacun à l'état humide. Ils ont été conditionnés dans les sachets plastiques puis labellisés avec précision à l'aide d'un marqueur indélébile. Ensuite, ces échantillons ont été acheminés au laboratoire pour diverses analyses (Figure 10).

Tableau 2. Localisation des échantillons dans la zone d'étude

Localisation	Echantillons	Latitude (N)	Longitude (E)	Altitude (m)
Bakinguili	BAS1, BAS2, BAS3, BAS4, BAS5, BAS6, BAS7, BAS8, BAS9	04°04'17''- 04°04'22,8"	09°02'28''- 09°02'35''	13 ± 3
Batoké	BTA1, BTA5, BTA10, BTG1, BTG11, BTJ1, BTJ12	04°02'09,6''- 04°02'13,3"	09°05'09,2''- 09°05'11''	13 ± 3
Limbola	BTL10, BTL1, BTL6, BTE1, BTE3, BTP3, BTP13	04°00'44'' - 04°00'46"	09°06'58'' - 09°07'09''	3 ± 2
Nguémé	NGL1, NGL2, NGL3, NGL4, NGL5, NGL6, NGL7, NGL8,	04°00'26,8'' - 04°00'28,1''	09°09'07,3'' - 09°09'13''	3 ± 2
Mile 8	ML8E1, ML8E2, ML8E3, ML8E4, ML8E5, ML8E6, ML8E7, ML8E8, ML8E9, ML8E10	04°00'40,36'' - 04°00'57,9"	09°06'31,9'' - 09°06'45,4''	3 ± 2



Figure 10. Quelques photographies montrant les modes et les zones de prélèvement et conditionnement des sédiments de la plage de Limbé. a) Excavation et prélèvements des échantillons ; b) Conditionnement des échantillons de sédiments dans des sacs plastiques ; c) Point d'échantillonnage ; d) Vue panoramique des plages Bakinguili, e) Batoké ; f) Limbola; g) Nguémé et h) Mile 8.

III.2.2. Travaux en laboratoire

En laboratoire, les échantillons de sédiments clastiques collectés sur le terrain ont été décrits macroscopiquement (couleur, texture). La couleur des échantillons a été déterminée par la charte des sols (Munsell, 2000). Les échantillons de sédiments ont ensuite été soumis aux analyses granulométriques, morphoscopiques, pétrographiques (minéraux lourds et lames minces de sables), minéralogiques (DRX et EPMA) et géochimiques.

III.2.2.1. Analyse granulométrique

Les analyses granulométriques ont été effectuées sur les échantillons au laboratoire de Génie civil de l'École Nationale Polytechnique de l'Université de Yaoundé I, suivant les méthodes préconisées par Pauwels *et al*. (1992), et le respect de la norme AFNOR (Agence Française de la Normalisation). Les étapes de ces analyses granulométriques sont : la préparation des échantillons, l'obtention des résultats, la construction des courbes cumulatives et des histogrammes et l'évaluation des paramètres granulométriques. Ces étapes sont ensuite présentées comme suit :

a) Préparation des échantillons

- **Séchage des échantillons**

Quarante-un échantillons représentatifs de sables prélevés sur le terrain ont été sélectionnés et placés à l'étuve (Figure 11a) pour le séchage. Le séchage se fait en vingt-quatre heures (24 heures) à 60°C.

- **Quartage des échantillons**

Une fois séchés, les échantillons ont subi les opérations de quartage qui consistent à diviser chaque échantillon en quatre parties puis à mélanger les portions diagonalement opposées. Cette opération est reconduite jusqu'à l'obtention de la quantité necessaire pour le tamisage.

- **Prélèvements, pesées et tamisages**

Le mélange d'une masse de 200g a été pesé et ensuite tamisé pendant 15 minutes à l'aide d'une colonne de tamis surmontée sur une tamiseuse électrique de laboratoire normalisés selon AFNOR, allant de 0,45 à < 0,050 mm (1,25 à < 4,25 Φ). La tamiseuse électrique utilisée fonctionnait à une fréquence de 60 vibrations par seconde (Figure 11b). Le refus de chaque tamis était récupéré et pesé au moyen d'une balance électrique de précision

de Marque Mettler AE 200 (Figure 11c). Chaque refus est alors ensaché, étiqueté, puis minutieusement conservé pour d'autres traitements.

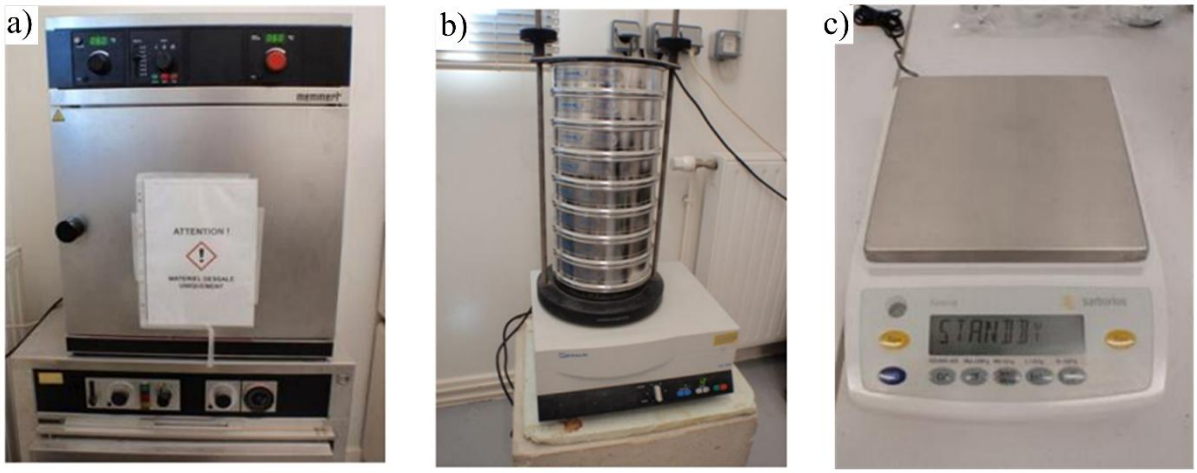


Figure 11. Outils d'analyses granulométriques. a) Etuve, b) Colonne de tamis sur un agitateur, c) Balance.

b) Obtention des résultats

Les résultats d'analyses granulométriques sont obtenus à partir des pesés des différentes fractions granulométriques constitutives des sédiments à la fin du tamisage. Les données sont donc reportées dans un tableau du fichier Microsoft Office Excel 2016 considéré comme le logiciel de traitements. Ces résultats obtenus servent ensuite à la construction des courbes cumulatives, histogrammes granulométriques et détermination des paramètres granulométriques.

c) Construction des courbes cumulatives et histogrammes

Les courbes cumulatives portent en abscisses les diamètres des mailles exprimés sur une échelle logarithmique et en ordonnées les pourcentages cumulés en masses de refus exprimés sur une échelle arithmétique. La cumulation employée ici est régressive car elle va des éléments moyens aux plus fins, donnant de ce fait une information sur les modes de dépôts des sédiments. Les éléments moyens se déposent en premier et ensuite les fins (Davis et Ehrlich, 1970).

La construction des histogrammes permet de donner des renseignements sur la taille moyenne des grains et sur la classe granulométrique la plus représentée (mode). Pour la construction des histogrammes, les diamètres des mailles de tamis sont portés en abscisses et les pourcentages simples équivalents aux masses de refus en ordonnées (Folk, 1966).

d) Paramètres granulométriques

Quatre principaux paramètres sont déterminés: les paramètres de position, de dispersion, d'asymétrie et d'acuité.

Paramètres de position

Dans les paramètres de position, trois variables sont mis en exergue : (i) La médiane (Md) ou Q50 qui est l'indice de position le plus fréquemment utilisé. Il donne, en intégrant toutes les classes granulométriques, une estimation de la grossièreté moyenne du sédiment. Ensuite vient (ii) le mode (Mo) qui correspond à la dimension du tamis où le refus est maximum et (iii) la Moyenne (Mz) qui reflète la distribution granulométrique du sédiment et l'énergie cinétique moyenne lors du dépôt des sédiments. La médiane et la Moyenne font référence à la taille des sédiments qui est fonction de l'énergie de dépôt du milieu. Ainsi lorsque l'énergie est forte, cela conduit aux sédiments grossiers, et dans le cas contraire on observe des sédiments fins. Les formules graphiques ci-dessous ont été appliquées :

- La moyenne Mz = $\frac{(\Phi 16+\Phi 50+\Phi 84)}{3}$
- La médiane Md = Q50

Paramètres de dispersion

Les paramètres de dispersion se subdivisent en deux indices, qui permettent de mieux apprécier le classement, la taille et le tri des grains. Il s'agit de : l'indice de Trask ou Sorting Index (So) et l'écart type ou deviation standart (σ).

L'indice de Trask ou Sorting Index (So) est le degré de classement des sédiments (Tableau 3). Il est défini par :

$$So = (Q_1 / Q_3)^{1/2}$$

Q_1 est le quartile à 25 % et Q_3 est le quartile à 75% (en mm).

Tableau 3. Interprétation de l'indice de Trask So (Folk et Ward, 1957)

So (mm)	Classement
1 – 1,17	Très bien classé
1,17 – 1,2	Bien classé
1,2 – 1,35	Assez bien classé
1,35 – 1,87	Moyennement classé
1,87 – 2,75	Mal classé
>2,75	Très mal classé

L'écart type ou deviation standart (σ) est un indice de dispersion de Folk et Ward (1957). Il permet de faire le classement et d'apprécier les actions de tri au cours du transport et du dépôt (Tableau 4). Il est défini par :

$$\sigma = \frac{(Q84\Phi - Q16\Phi)}{4} + \frac{(Q95\Phi - Q5\Phi)}{6,6}$$

Tableau 4. Interprétation de l'écart type ou deviation standart (Folk et Ward, 1957)

	Indice de classement	**Environnement de dépôt**
< 0,35 Φ	très bien classé	plage
0,35 – 0,50 Φ	bien classé	Plage
0,50 – 0,71 Φ	moyenne à bien classé	plage, rivière
0,71 – 1,00 Φ	moyennement classé	rivière, turbidité
1,00 – 2,00 Φ	mal classé	rivière, turbidité, cône alluvial
2,00 – 4,00 Φ	très mal classé	moraine glaciale, glissement de terrain

Paramètre d'asymétrie

Le paramètre d'asymétrie permet de mesurer l'allure de la distribution de part et d'autre de la médiane. Il est nécessaire à la bonne définition d'une courbe granulométrique. L'indice d'asymétrie utilisé est le Skewness (Sk). Il est défini par l'expression suivante :

$$Sk = \frac{(Q16\Phi + Q84\Phi - 2Q50\Phi}{2(Q84\Phi - Q16\Phi)} + \frac{(Q5\Phi + Q95\Phi - 2Q50\Phi)}{2(Q95\Phi - Q5\Phi)}$$

Sur l'histogramme de fréquence, trois cas de figure peuvent se présenter selon les valeurs de cet indice :

Sk = 0, le mode coïncide avec la médiane et la moyenne, les fractions fines et grossières sont classées symétriquement par rapport à la médiane ;

Sk > 0, la fraction grossière est plus importante donc mieux classée que la fraction fine. La médiane et le mode se situent à gauche de la moyenne ;

Sk < 0, la fraction fine est mieux classée que la fraction grossière. La médiane et le mode sont cette fois à droite de la moyenne.

La valeur intermédiaire de 0,3 est souvent utilisée pour le skewness. Par exemple, 0,1 < Sk < -0,3 = finement asymétrique ou - 0,1 < Sk < 0,3 = très finement asymétrique (Folk et Ward, 1957). Les Sk compris entre - 0,1 et 0,1 caractérisent les distributions dites symétriques.

Paramètre d'acuité (Coefficient d'acuité)

Le paramètre d'acuité est défini par l'indice d'acuité (ou Kurtosis). Il mesure la forme du pic de la courbe et est déterminé par la relation :

$$kg = \frac{Q95\Phi - Q5\Phi)}{2{,}44(Q75\Phi - Q25\Phi)} \text{ exprimé en } \Phi.$$

L'interprétation des valeurs du Kurtosis sont présentées dans le Tableau 5 ci-contre.

Tableau 5. Interprétation des valeurs du Kurtosis (Folk et Ward, 1957)

Kurtosis (kg) Φ	**Interprétation**
< 0,67	Très platykurtique
0,67 < kg< 0,90	Platykurtique
0,90 < kg< 1,11	Mésokurtique
1,11 < kg < 1,50	Leptokurtique
kg > 1,50	Très leptokurtique

III.2.2.2. Analyse morphoscopique

La morphoscopie est l'étude de l'aspect de surface des grains de quartz (Cailleux, 1942), pour déterminer les modes d'usure, l'agent de transport et la dynamique sédimentaire. Cette étude s'est faite sur l'observation à la loupe binoculaire des grains de quartz et de minéraux ferromagnésiens.

Les formes des grains de quartz et minéraux ferromagnésiens ont été observées à la loupe binoculaire au laboratoire de Géosciences des Formations Superficielles et Applications de l'Université de Yaoundé I. Deux fractions granulométriques ont été employées:

- la fraction moyenne] 0– 1,25 Φ] ;
- la fraction fine] 1,25– 2 Φ [.

Les grains de quartz ainsi choisis sont préalablement lavés à l'eau, pour éliminer les particules fines. Ils sont débarrassés, à l'aide de l'acide chlorhydrique dilué à 10 %, de la pellicule d'oxyde de fer recouvrant les grains. Ensuite, le sédiment obtenu est rincé à l'eau et mis à l'étuve à 60 °C jusqu'à ce qu'il sèche. Par la suite, 50 grains sont choisis de manière aléatoire puis séparés à la loupe binoculaire de marque Aus JENA TECHNIVAL 2 au grossissement 50 X, en fonction de leur forme et leur sphéricité (Figure 12) telles que proposées par Power (1953). A l'aide d'un aimant, les grains de ferromagnésiens ont été séparés des grains de quartz, puis comptés et déposés sur la platine de la loupe binoculaire afin d'être observés. La loupe binoculaire a servi à l'appréciation des formes des minéraux de ferromagnésiens.

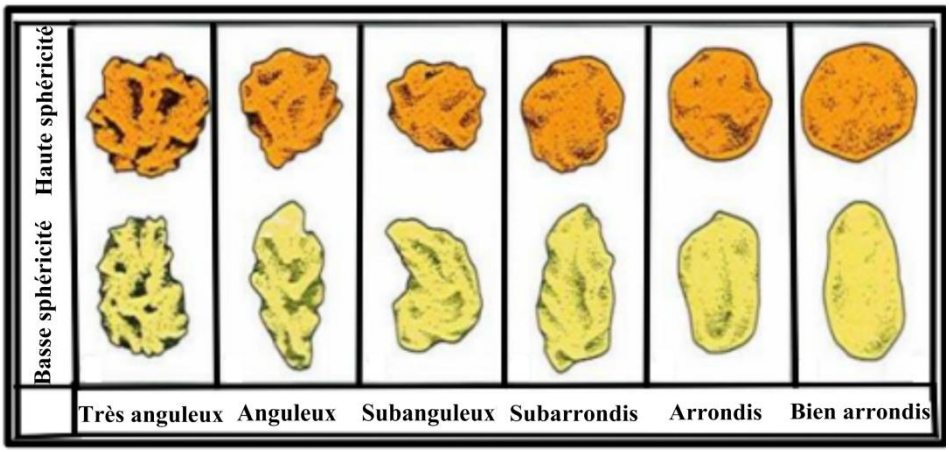


Figure 12. Estimation des formes et la sphéricité des sables et graviers (Power, 1953).

Dans l'ensemble, le classement des grains selon leur forme et aspect de surface a été proposé par Cailleux (1942) et Power (1953).

- **Les grains non-usés (NU)**

Les grains non-usés sont caractérisés par leurs formes anguleuses, que les cristaux soient automorphes ou non. Les arêtes ne présentent aucune trace de polissage ou d'arrondi. Leur aspect de champ peut être indifféremment mât ou luisant.

- **Les grains sub-émoussés luisants (SEL)**

Ces grains présentent des sommets et arêtes plus ou moins émoussés et luisants.

- **Les grains émoussés luisants (EL)**

Ils présentent une dominance d'arêtes arrondies et peuvent parfois acquérir la forme d'une sphère presque parfaite. Leur aspect de surface est toujours très poli, brillant, et luisant sous l'éclairage de la loupe binoculaire.

- **Les grains ronds mâts (RM)**

Les grains ronds mâts ont une morphologie générale sub-sphérique pouvant atteindre celle d'une sphère parfaite. Ils ont un aspect de surface, toujours poli et mât. Ils sont caractéristiques d'une évolution en milieu éolien et on les retrouve principalement sur les dunes littorales et dans certains environnements désertiques.

Les résultats de comptages des grains de quartz et de minéraux ferromagnésiens sont exprimés en pourcentages et vont servir à la réalisation des histogrammes des formes d'usure des grains de sables des plages de Limbé.

III.2.2.3. Analyse des minéraux lourds

L'analyse des minéraux lourds a été réalisée sur quinze échantillons de sables. Cette analyse a été effectuée au laboratoire de Géosciences des Formations Superficielles et Applications de l'Université de Yaoundé I. Les techniques de préparation, d'extraction et de montage de ces minéraux sur les frottis ont suivi le protocole de Duplaix (1958) et Parfenof *et al*. (1970).

- **Préparation des échantillons**

Après titrage, 10 g de chaque échantillon de sable prélevé ont été lavés sous un robinet à l'aide d'un tamis de 50 µm afin d'éliminer les particules fines. Ensuite ils ont été séchés à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures. Les sédiments secs ont été divisés en quatre parties, puis mélangés deux à deux pour avoir un échantillon représentatif. A l'issue de ce tamisage, trois classes granulométriques ont été retenues : 0,050 – 0,160 mm ; 0,160 – 0,250 mm ; 0,250 – 0,315 mm.

- **Séparation densimétrique**

Dans une ampoule à décanter remplie au ¾ du bromoforme. On ajoute dans la liqueur le sédiment à séparer veillant à ce que les grains de sables ne restent pas collés sur le goulot de l'ampoule. On place un petit bécher muni d'un papier filtre sous l'ampoule. Lorsque le sable s'est bien étendu en couche mince à la surface du bromoforme, on agite doucement à l'aide d'un agitateur de verre puis on ouvre le robinet. Les minéraux lourds tombent dans le papier filtre portant le numéro de l'échantillon et placé à la base de l'ampoule. On referme rapidement le robinet pour entrainer le moins possible de bromoforme. L'excès de sable est filtré et le bromoforme est recueilli dans un autre bécher. Le dispositif est ensuite rincé à l'eau puis remonté pour la prochaine manipulation.

- **Lavage à l'acide chlorhydrique**

Les minéraux lourds recueillis sont lavés à l'acide chlorhydrique dilué à 10 % et à chaud pendant 20 minutes. Ceci dans le but d'éliminer la pellicule d'oxyde de fer pouvant masquer certains minéraux. Ensuite, ces minéraux sont lavés à l'alcool, puis à l'eau. Une fois secs, ils sont prêts pour le montage des lames de minéraux lourds.

- **Montage des lames de minéraux lourds**

Les lames sont préalablement chauffées sur une plaque chauffante, puis imprégnées de baume de Canada. Dès que le baume prend la coloration jaune, on dispose d'une quantité

de minéraux lourds sur la lame porte-objet à l'aide d'un pinceau. La lame porte-objet est ensuite recouverte par une lamelle. Après refroidissement, le concentré de minéraux lourds obtenu est trempé dans un bain d'alcool afin d'éliminer le baume débordant la lame. Les minéraux lourds des lames confectionnées sont ensuite observés au microscope polarisant de marque Leitz Wetzelar HM-POL au laboratoire de Géosciences des Formations Superficielles et Applications de l'Université de Yaoundé I.

III.2.2.4. Analyse pétrographique

Les analyses pétrographiques ont été effectuées sur dix échantillons de sables. Les sédiments sableux ont été étudiés macroscopiquement au laboratoire de Géosciences des Formations Superficielles et Applications de l'Université de Yaoundé I. L'étude de ces sédiments sableux est basée sur la couleur, la texture, la structure et la taille des grains, en utilisant les paramètres de Folk (1966) et Nichols (2015). Les sédiments sableux étudiés ont été envoyés pour lame mince au Laboratoire du Département des Mines et Géologie de l'Ingénieur de l'Université Internationale des Sciences et de la Technologie au Botswana (BIUST). La technique utilisée est celle décrite par Crovisier (1979).

La confection des lames minces s'est faite à partir du protocole suivant :

- nettoyer la lame porte-objet à l'aide d'une poudre appelée carbure de silicium noir grains 800 ;
- mettre la lame porte-objet à chauffer sur une plaque chauffante, puis faire le mélange avec la colle araldite, qui est constituée de résine et du durcisseur ;
- mélanger les deux jusqu'à l'homogénéité ensuite imbiber le mélange sur la lame porte-objet ;
- étaler l'échantillon sur la colle de la lame porte-objet pendant 24 h ;
- ramener ensuite la lame à la rectifieuse et rectifiée jusqu'à 1,75 micron ;
- En fin faire polir la lame à la prépolicieuse tout en regardant au microscope jusqu'à ce que la lame soit observable à 0,3 micron.

Les lames minces de sables préparées ont été étudiées au microscope polarisant du laboratoire du Département des Mines et Géologie de l'Ingénieur de l'Université Internationale des Sciences et de la Technologie au Botswana (BIUST). Leur caractérisation était basée sur le cortège minéralogique, la forme du minéral, le relief et l'angle d'extinction suivant les principes de Mackenzie et Guilford (1984).

Les sables ont été classés selon le diagramme triangulaire Quartz-Feldspaths-Fragments lithiques (QFL) de Folk *et al*. (1968). Le pôle L comprend les fragments lithiques.

Tandis que le pôle F comprend les feldspaths, le pôle Q est constitué du quartz monocristallin (Qm) et du quartz polycristallin (Qp). Les compositions modales calculées de Qt-Ft-Lt et Qm-Ft-Lt ont permis de tracer les diagrammes triangulaires de Dickinson (1985) afin d'évaluer le cadre tectonique de formation des sédiments de plages étudiées.

III.2.2.5. Analyse minéralogique

Les analyses minéralogiques ont été réalisées selon deux méthodes pour les sédiments de la plage étudiée. Ce sont : (i) la diffraction des rayons X (DRX) et (ii) la microsonde électronique. Ces deux méthodes ont été réalisées sur les échantillons des cinq sites sélectionnés.

a) Diffraction des rayons X (DRX)

Les analyses minéralogiques ont été réalisées dans les laboratoires de Géologie et Environnement sédimentaire (GEs) de l'Université de Liège en Belgique et du Département des Mines et Géologie de l'Ingénieur à l'Université Internationale des Sciences et de la Technologie au Botswana (BIUST). Pour cette analyse treize échantillons de sédiments de la plage de Limbé ont été choisis (le choix a été fait en fonction de la couleur et de la texture). Les échantillons ont été préalablement pulvérisés à l'aide d'un mortier et d'un pilon en agate, puis ont été préparés dans de petits disques en silicone pour la diffraction aux rayons X (DRX). Le principe de cette analyse est décrit par Eslinger (1988).

- **Principe de la méthode**

Le principe de la méthode est basé sur la diffraction des rayons X par le réseau cristallin selon la loi de Bragg. Cette méthode consiste à bombarder l'échantillon avec des rayons X issus d'une anode métallique et lesquels sont premièrement collimatés par une fente de divergence afin de produire un faisceau subparallèle (Figure 13). Ce dernier est dirigé sur l'échantillon selon un angle θ (thêta) et est diffracté lorsque les conditions de la loi de Bragg exprimées par la relation suivante sont remplies :

$$\eta\lambda = 2d\sin\theta$$

η: l'ordre de réflexion (nombre entier) ; λ : longueur d'onde du rayonnement utilisé ; d : la distance inter-réticulaire entre les plans atomiques ; θ : l'angle de réflexion ou angle de Bragg.

Lorsqu'un faisceau de rayon X de longueur d'onde λ (lamda) connue est projeté sur un matériel cristallin selon un angle θ, le phénomène de diffraction apparaît seulement quand

la distance inter-réticulaire (d) est égale à un multiple entier η de la longueur d'onde. Cette loi impose aussi que l'angle entre le faisceau incident et le réseau cristallin soit égal à celui entre le réseau et le faisceau diffracté. Il faut donc, pour une rotation de θ° de la platine porte-échantillon, amener le système d'analyse à un angle double de 2θ°**.** C'est le goniomètre qui assure ce rôle. En faisant varier l'angle θ, les conditions de la loi de Bragg sont satisfaites pour différentes valeurs de (d) dans les matériaux polycristallins.

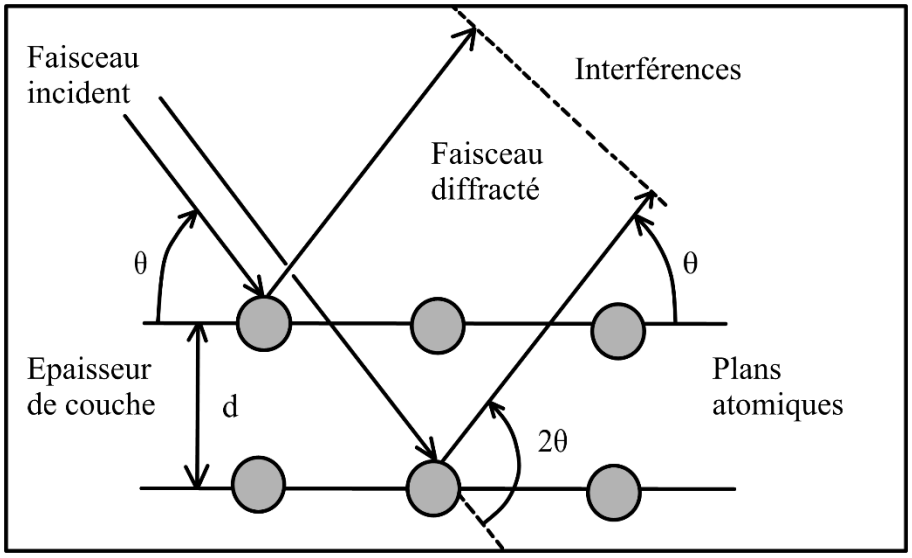


Figure 13. Principe de diffraction des rayons X par le réseau cristallin (Eslinger, 1988).

Après leur passage dans les différents réseaux de fentes, les rayons X diffractés sont reçus sur un détecteur. Le signal amplifié est reçu par le détecteur puis transmis à un ordinateur qui présente les résultats sous forme d'un graphe, le diffractogramme, représentant l'intensité des pics diffractés en fonction des positions angulaires (de l'angle de déviation 2θ du faisceau). Ce diffractogramme est caractéristique de l'échantillon analysé et l'intensité des pics (et/ou la surface selon les hauteurs) est fonction de la quantité de chaque phase du minéral présente dans cet échantillon.

- **Identification des phases minérales**

Pour l'identification des phases minérales, l'enregistrement des données a été effectué à l'aide d'un diffractomètre de type Bruker D8-Avance Eco, équipé d'un monochromateur utilisant le rayonnement Kα1 du cuivre (λ = 1,5418 Å). La vitesse de mesure du goniomètre est de 10 s/pas, vitesse de rotation 2°2θ/min, induisant un temps d'analyse de plusieurs minutes pour couvrir une gamme angulaire allant 2 à 70°2θ pour les poudres non orientés et 2 à 30°2θ pour les lames orientées. La tension d'accélération est de 40 KV, l'intensité de 30

mA. Le dépouillement des diffractogrammes obtenus est effectué à l'aide d'un logiciel « High Scores Plus » employé pour l'identification des phases cristallines et des données fournies par les fiches PDF (Powder Diffraction File) de Brindley et Brown (1980).

b) Micro-analyse par microsonde électronique (EPMA)

Sept échantillons représentatifs des sédiments de la plage de Limbé ont été sélectionnés pour cette micro-analyse. Les grains de quartz et les minéraux ferromagnésiens ont été triés à l'aide d'un microscope électronique à zoom et préparés pour les observations EPMA selon le protocole décrit par Trewin (1988). Les grains de quartz et les minéraux ferromagnésiens ont ensuite été pulvérisés avec une épaisseur de platine de 2 mm et examinés à différentes échelles à l'aide d'un micro-analyseur à sonde électronique JEOL JSM-7100F dans les laboratoires des micro-analyses du Département des Mines et Géologie de l'Ingénieur de l'Université internationale des sciences et de la technologie au Botswana (BIUST). La composition chimique des grains sélectionnés a été déterminée à l'aide du même microscope électronique équipé d'un système de spectrométrie. Les caractéristiques étaient les suivantes Tension d'accélération : 15 Kv ; courant de sonde : 20 nA ; taille du spot 0,0 µm ; temps de comptage : 10 s pic : 5 s en arrière-plan. Les normes utilisées étaient SiO_2 - Olivine ; Al_2O_3 - pyrope ; MgO - Olivine ; Na_2O - jadéite ; Cr_2O_3- Cr - diopside ; V_2O_3- V métal ; TiO_2 - rutile ; BaO- barytine ; P_2O_5 - apatite ; CaO - Cr- diopside ; NiO - skutterudite ; K_2O - orthose ; FeO - olivine ; MnO - rhodonite ; Cl - tugtupite ; ZrO_2 - Zr métal ; Nb2O5 - Nb métal ; SrO - celestite.

III.2.2.6. Analyse géochimique

L'analyse géochimique a été effectuée sur Vingt échantillons représentatifs, au Laboratoire de Minéralogie du bureau Veritas Ltd (Colombie - Britannique, au Canada). Elle repose sur la méthode par fluorescence aux rayons X (XRF) pour les éléments majeurs et par ICP-MS pour les éléments traces et les terres rares.

a) Eléments majeurs

L'analyse des éléments majeurs a été faite par fluorescence aux rayons X (XRF) après la perte au feu. Les teneurs en éléments majeurs ont été déterminées par décomposition des échantillons à partir du Lithium Métaborate / Lithium Tétraborate ($LiBO_2$ / Li B_4O_7) Fusion* (FUS-LI01). Un échantillon de 0,200 g est préparé et mélangé à une solution de Lithium Métaborate / Lithium Tétraborate de 0,90 g. Le mélange obtenu est bien mixé puis

placé dans une fournaise à 1000 °C. Le liquide obtenu est refroidit et dissous dans 100 ml d'acide nitrique à 4 % et d'acide chlorhydrique à 2 %. Cette solution est analysée par Fluorescence aux rayons X. La perte au feu (LOI) a été déterminée par différence de poids après allumage à 1000 °C. La détermination de la perte au feu (LOI) est essentielle dans l'analyse des éléments majeurs, qui tient compte des constituants H_2O, CO_2. Ces constituants ne peuvent pas être mesurés directement par fluorescence X. Ils sont éliminés lors de la formation du verre, donc nécessitant une correction dans la détermination des teneurs en éléments majeurs.

b) Eléments traces et terres rares

Les analyses des éléments traces et terres rares ont été déterminées par spectrométrie de masse ICP-MS sur poudres préablement préparées dans le but de déterminer les concentrations des éléments lithophiles par attaque triacide dans un récipient clos (Jarvis, 1988). Les poudres ont été traitées dans un mélange diacide (HCl + $HClO_4$) à 120 °C contenu dans un récipient clos pendant une semaine. Les échantillons obtenus après cette phase ont été dissous à nouveau dans les solutions acides (HNO_4+ HCl +HF) chauffés à 100 °C. Les échantillons dissous ont été analysés par plasma inductif couplé à un spectre de masse (ICP-MS).

III.2.2.7. Traitement des données géochimiques, indices et paramètres de la pollution

a) Facteur d'enrichissement

La détermination de la teneur métallique dans le milieu naturel peut être un indicateur de contamination. Le facteur d'enrichissement est apporté pour discriminer les apports anthropiques des sources naturelles et ainsi définir l'intensité de la contamination. Il fournit le nombre de fois qu'un élément est enrichi par rapport à l'abondance de cet élément dans le matériau de référence (Salvarredy, 2008).

Le fer peut être utilisé comme élément de normalisation géochimique du fait qu'il conserve, d'après Berner *et al*. (1983) ses propriétés lors des phénomènes de transport, dépôt et de la diagénèse. Il convient de noter que les métaux sont principalement associés aux particules fines (argile, oxydes et hydroxydes de fer) et il est donc nécessaire d'exprimer les concentrations des éléments traces métalliques en fonction d'un paramètre lié à la granulométrie des sédiments. Dans le cadre de cette étude, nous utiliserons le Fer comme élément de normalisation. L'équation utilisée est celle de Salati et Moore (2010) :

$$FE = \frac{[M]éch/[Fe]éch}{[M]MR/[Fe]MR}$$

FE : Facteur d'enrichissement ;
$(M)_{éch}$: Concentration en métal M dans l'échantillon ;
$(Fe)_{éch}$: Concentration de Fe dans l'échantillon ;
$(M)_{MR}$: Concentration du métal M dans le matériau de référence ;
$(Fe)_{MR}$: Concentration de Fe dans le matériau de référence.

Les valeurs du FE sont interprétées en fonction du niveau de contamination (Tableau 6).

Tableau 6. Classification du facteur d'enrichissement en fonction du niveau de contamination d'après Liaghati *et al*. (2003).

Facteur d'enrichissement	Niveau d'enrichissement
< 1	Pas d'enrichissement
1 – 3	Enrichissement faible
3 – 10	Enrichissement modéré
10 – 50	Fort enrichissement
> 50	Très fort enrichissement

b) Indice de géo-accumulation (I-géo)

L'indice de géo-accumulation (Muller, 1969), de caractère empirique compare une concentration donnée à une valeur considérée comme fond géochimique. En effet le coefficient 1,5 (facteur de correction) rend compte des variations dans les niveaux de back-ground pouvant être causé par des effets de lithologie. L'Igéo est calculé selon la formule suivante :

$$I\text{-géo} = \text{Log2}\ (Cn/1{,}5Bn)$$

Avec Log2 : Logarithme de base 2 ;
n : Elément considéré ;
C : Concentration mesuré dans l'échantillon ;
B : Fond géochimique ;
1,5 : Facteur d'exagération du fond géochimique donc la fonction est de prendre en compte les fluctuations naturelles du fond géochimique.

Muller (1969) a défini une échelle de valeur avec six classes en fonction de l'intensité de la pollution (Tableau 7).

Tableau 7. Intensité de pollution à partir de l'I-géo d'après Muller (1969).

Valeurs d'Igéo	Classes	Intensité de pollution
< 0	0	Pas de contamination
0 – 1	1	Très faible contamination
1 – 2	2	Faible contamination
2 – 3	3	Moyenne contamination
3 – 4	4	Forte contamination
4 – 5	5	Très forte contamination
> 5	6	Contamination extrême

c) Facteur de contamination

Le facteur de contamination (FC) est le rapport entre la concentration d'un élément métallique dans un échantillon par rapport à la concentration de ce même élément dans le fond géochimique du site (Hakanson, 1980). Il est utilisé pour exprimer le niveau de contamination par chaque métal dans l'échantillon (Tableau 8). L'équation utilisée est celle de Hakanson (1980) :

$$FC = CM/CB$$

CM : Concentration du métal ; CB : Concentration du fond géochimique (Background).

Le fond géochimique (background) du métal indique la concentration du métal dans les sédiments où il n'y a pas d'apport d'origine anthropique (Nadem *et al*., 2015). Selon les études de Hakanson (1980), l'interprétation du FC est résumée dans le Tableau 8.

Tableau 8. Classification du facteur de contamination en fonction du niveau de contamination d'après Hakanson (1980).

Facteur de contamination	Niveau de contamination
< 1	Faible
1 – 3	Modéré
3 – 6	Forte
> 6	Très forte

Conclusion

Des observations ont été effectuées sur le terrain et en laboratoire. Sur le terrain, quarante-un échantillons ont été prélevés dans la zone d'étude et ramenés au laboratoire pour les différentes analyses évoquées. Les travaux de laboratoire ont consisté à appliquer les méthodes analytiques comme la granulométrie avec détermination des paramètres granulométriques (Skewness, Sorting index, moyenne, écart type et Kurtosis) ; la morphoscopie (forme des grains de quartz et minéraux ferromagnésiens), l'étude des lames minces de minéraux lourds et de sables ; la minéralogie par DRX et EPMA ; la géochimie complète (détermination des concentrations en éléments majeurs, traces et terres rares) et le calcul des indices et paramètres de la pollution des sédiments. L'ensemble de ces analyses pratiquées donnent des résultats, qui seront présentés dans les chapitres IV et V.

CHAPITRE IV : ÉTUDE SÉDIMENTOLOGIQUE DES DÉPÔTS CLASTIQUES

« Un homme fait ce qu'il a à faire, malgré les conséquences sur sa vie, les obstacles, les dangers et la pression; c'est la base de toute morale humaine ».

-John Kennedy-

Introduction

Les études sédimentologiques des sédiments de plage de Limbé portent sur leurs descriptions lithologiques, les données granulométriques, morphoscopiques et leurs compositions en minéraux lourds et modales. Elles présentent des éléments constitutifs des modes de transport et la provenance des sédiments.

IV.1. Description lithologique des sédiments

La description lithologique des sédiments de plage du secteur d'étude concerne leur taille, leur forme, leur granoclassement et leur couleur. Elle s'est effectuée par l'observation visuelle au toucher manuel, à l'aide de la loupe binoculaire, du code Munsell (2000) sur la base des chartes conventionnelles (Barrett, 1980 ; Blatt, 1982 ; Chilinger, 1982). Cette description lithologique des sédiments de plage de Limbé partant de Bakinguili à Mile 8 met en évidence l'existence d'un faciès lithologique sableux dont la taille varie des sables moyens à très fins (Tableau 9). Ces sédiments de plage explorés et étudiés sont respectivement, de couleur gris très sombre (2,5YR 3/2) à gris rougeâtre foncé (5YR 4/2) à Bakinguili, gris rougeâtre foncé (5YR 4/2) à gris très foncé (5YR 3/1) à Batoké, gris très foncé (5YR 3/1) à brun rougeâtre foncé (5YR 3/4) à Limbola, gris rougeâtre foncé (5YR 4/2) à gris rougeâtre (10YR 5/2) à Nguémé, et gris très foncé (5YR 3/1) à gris (5YR 5/1) à Mile 8.

Tableau 9. Description lithologique des sédiments de plage de Limbé

Localités	Echantillons	Taille des sédiments	Formes des grains	Classement	Caractère	Couleurs et code Munsell
Bakinguili (n = 9)	BAS1	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris très foncé 5YR 3/1
	BAS2	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris foncé 5YR 4/1
	BAS3	Sables moyens	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris 7,5YR 6/1
	BAS4	Sables fins	Subanguleuses	Moy.classé	Meuble	Gris rougeâtre foncé 5YR 4/2
	BAS5	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris foncé 5YR 4/1
	BAS6	Sables fins	Anguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris sombre 5YR 5/2
	BAS7	Sables moyens	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris très foncé 5YR 3/1
	BAS8	Sables moyens	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris 7,5YR 5/1
	BAS9	Sables fins	Anguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris très sombre 2,5YR 3/2
Batoké (n = 7)	BTA1	Sables moyens	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris très foncé 5YR 3/1
	BTA5	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris foncé 5YR 4/1
	BTA10	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris rougeâtre foncé 5YR 4/2
	BTJ1	Sables moyens	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris très foncé 5YR 3/1
	BTJ12	Sables fins	Anguleuses	Bien classé	Meuble	Gris rougeâtre foncé 5YR 4/2
	BTG1	Sables moyens	Anguleuses	Bien classé	Meuble	Gris très foncé 5YR 3/1
	BTG11	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Brun rougeâtre foncé 5YR 3/2
Limbola (n = 7)	BTL10	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris rougeâtre foncé 5YR 4/2
	BTL1	Sables moyens	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris très foncé 5YR 3/1
	BTL6	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris foncé 5YR 4/1
	BTE1	Sables très fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Brun rougeâtre foncé 5YR 3/4
	BTE3	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris très foncé 5YR 3/1
	BTP3	Sables moyens	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris foncé 5YR 4/1
	BTP13	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris rougeâtre foncé 5YR 4/2

Nguémé (n = 8)	NGL1	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Brun rougeâtre 5YR 4/4
	NGL2	Sables moyens	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris rougeâtre 5YR 3/3
	NGL3	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris rougeâtre 5YR 5/3
	NGL4	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris rougeâtre foncé 5YR 4/2
	NGL5	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris rougeâtre 5YR 5/3
	NGL6	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris rougeâtre 10YR 5/2
	NGL7	Sables fins	Anguleuses	Moy. classé	Meuble	Rouge sombre 5YR 3/2
	NGL8	Sables moyens	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Brun rougeâtre foncé 5YR 3/4
Mile 8 (n = 10)	ML8E1	Sables moyens	Subanguleux	Moy. classé	Meuble	Gris très foncé 5YR 3/1
	ML8E2	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris foncé 5YR 4/1
	ML8E3	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris sombre 5YR 5/2
	ML8E4	Sables moyens	Anguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris 5YR 5/1
	ML8E5	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris foncé 5YR 4/1
	ML8E6	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris sombre 5YR 5/2
	ML8E7	Sables fins	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris très sombre 2,5YR 3/1
	ML8E8	Sables fins	Anguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris très foncé 5YR 3/1
	ML8E9	Sablesfins	Anguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris foncé 5YR 4/1
	ML8E10	Sables moyens	Subanguleuses	Moy. classé	Meuble	Gris foncé 5YR 4/1

Moy. Moyennement

IV.1.1. Description lithologique des sédiments de surface de Bakinguili

Les échantillons BAS1, BAS2, BAS3, BAS4, BAS5, BAS6, BAS7, BAS8 et BAS9 prélevés en surface sont distants de 100 m. Ils ont été prélevés manuellement à l'aide d'une truelle sur une profondeur d'environ 5 cm. La description macroscopique de la lithologie des sédiments meubles est consignée dans le Tableau 10 ci-dessous.

Tableau 10. Description macroscopique des sédiments de surface de Bakinguili

Echantillons	Taille des sédiments	Couleur (code)	Texture
BAS1	Sables fins	Gris très foncé (5YR 3/1)	Sableuse
BAS2	Sables fins	Gris foncé (5YR 4/1)	Sableuse
BAS3	Sables moyens	Gris (7,5YR 6/1)	Sableuse
BAS4	Sables fins	Gris rougeâtre foncé (5YR 4/2)	Sableuse
BAS5	Sables fins	Gris foncé (5YR 4/1)	Sableuse
BAS6	Sables fins	Gris sombre (5YR 5/2)	Sableuse
BAS7	Sables moyens	Gris très foncé (5YR 3/1)	Sableuse
BAS8	Sables moyens	Gris (7,5YR 5/1)	Sableuse
BAS9	Sables fins	Gris très sombre (2,5YR 3/2)	Sableuse

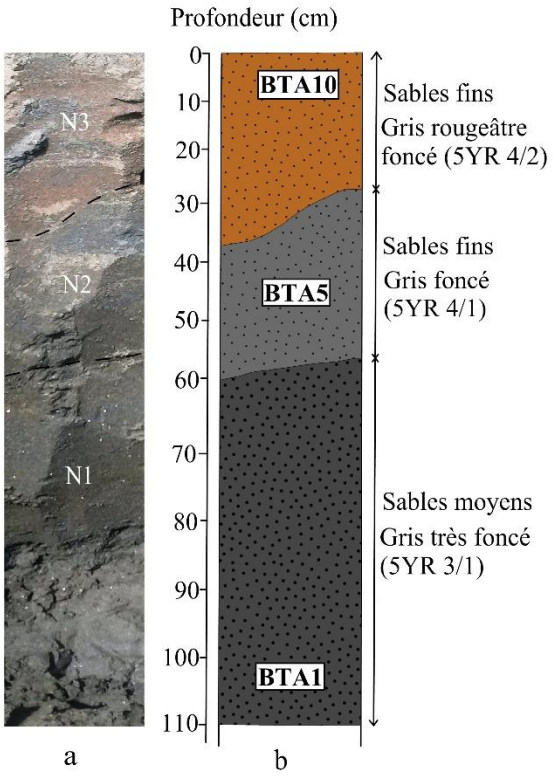
IV.1.2. Description lithologique des puits de Batoké

IV.1.2.1. Puits BTA

Le puits BTA a été réalisé sur une superficie d'un mètre carré et une profondeur d'environ 110 cm. La colonne lithologique est organisée en trois niveaux sableux à granoclassement positif qui se présentent ainsi qu'il suit du bas vers le haut (Tableau 11, Figure 14).

Tableau 11. Description lithologique des puits de Batoké

	Niveau d'appartenance	Profondeur (cm)	Taille des sédiments	Couleur (code)	Texture
	N1	110 - 60	Sables moyens	Gris très foncé (5YR 3/1)	Sableuse
Puits BTA	N2	60 - 30	Sables fins	Gris foncé (5YR 4/1)	Sableuse
	N3	30 - 0	Sables fins	Gris rougeâtre foncé (5YR 4/2)	Sableuse
	N1	110 - 80	Sables moyens	Gris très foncé (5YR 3/1)	Sableuse
Puits BTJ	N2	80 - 70	Sables fins	Gris rougeâtre foncé (5YR 4/2)	Sableuse
	N3	70 - 30	Sables fins	Gris foncé (5YR 4/1)	Sableuse
	N4	30 - 0	Sables fins	Gris rougeâtre foncé (5YR 4/2)	Sableuse
	N1	110 - 75	Sables moyens	Gris très foncé (5YR 3/1)	Sableuse
Puits BTG	N2	75 - 45	Sables fins	Gris foncé (5YR 4/1)	Sableuse
	N3	45 - 0	Sables fins	Brun rougeâtre foncé (5YR 3/2)	Sableuse



Légende

Points de prélèvement a : Photographie b : Illustration N1, N2 : Niveaux d'appartenance N3 lithologique

Figure 14. Coupe lithologique du puits BTA.

IV.1.2.2. Puits BTJ

Le puits BTJ est distant du puits BTA de 100 m. Il a été réalisé sur une surface d'un mètre carré et une profondeur de 110 cm environ. La colonne lithologique est divisée en quatre niveaux qui se présentent ainsi qu'il suit du bas vers le haut (Tableau 11, Figure 15).

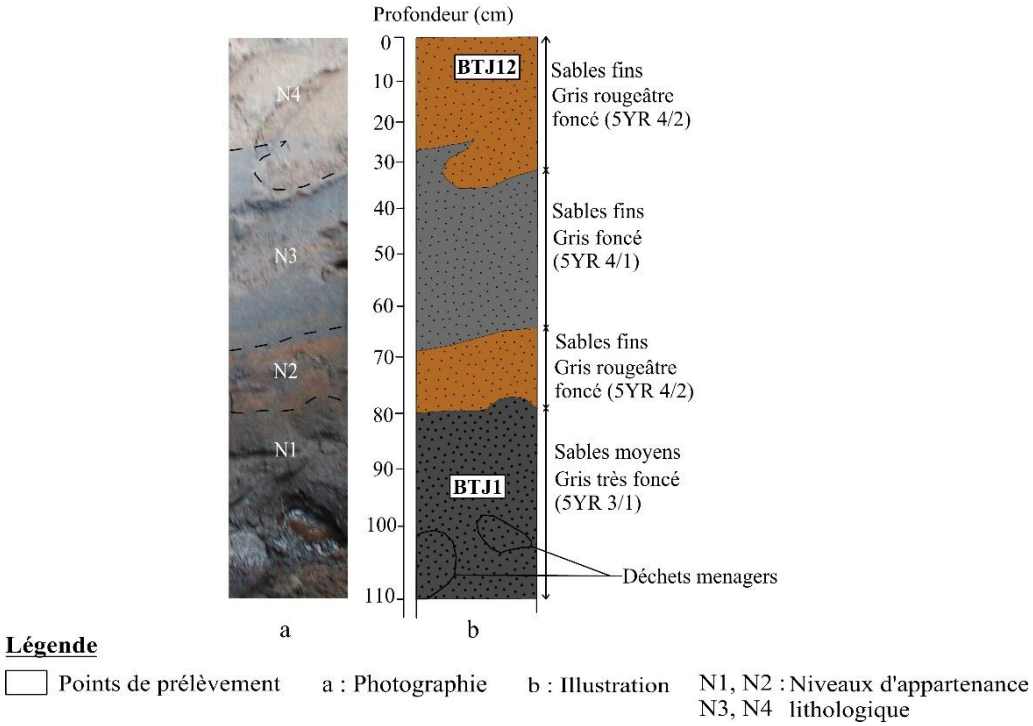


Figure 15. Coupe lithologique du puits BTJ.

IV.1.2.3. Puits BTG

Le puits BTG est également distant du puits précédent (BTJ) de 100 m. Ce puits est foré à une surface d'un mètre carré et une profondeur d'environ 110 cm. La colonne lithologique est structurée en trois niveaux qui se présentent ainsi qu'il suit du bas vers le haut (Tableau 11, Figure 16).

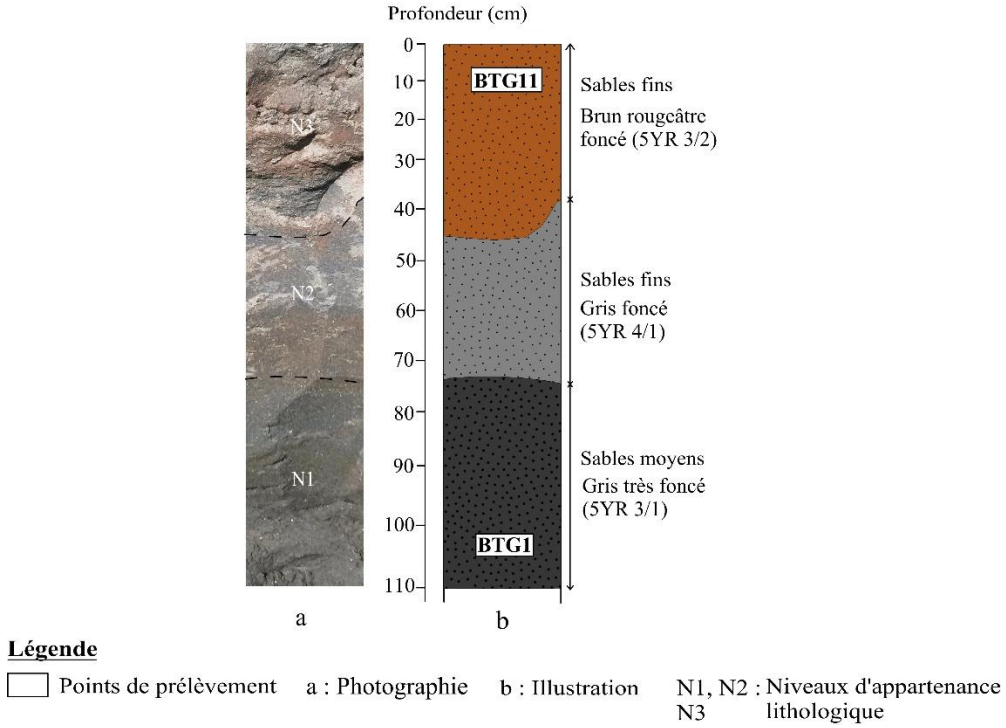


Figure 16. Coupe Lithologique du puits BTG.

IV.1.3. Description lithologique des puits de Limbola

IV.1.3.1. Puits BTL

Le puits BTL a été réalisé sur une superficie d'un mètre carré et 100 cm environ de profondeur. La colonne lithologique de ce puits est disposée en trois niveaux qui se présentent ainsi qu'il suit du bas vers le haut (Tableau 12, Figure 17).

Tableau 12. Description lithologique des puits de Limbola

	Niveau d'appartenance	Profondeur (cm)	Taille des sédiments	Couleur (code)	Texture
Puits BTL	N1	100 - 60	Sables moyens	Gris très foncé (5YR 3/1)	Sableuse
	N2	60 - 30	Sables fins	Gris foncé (5YR 4/1)	Sableuse
	N3	30 - 0	Sables fins	Gris rougeâtre foncé (5YR 4/2)	Sableuse
Puits BTE	N1	50 - 43	Sables très fins	Brun rougeâtre foncé (5YR 3/4)	Sableuse
	N2	43 - 20	Sables fins	Gris foncé (5YR 4/1)	Sableuse
	N3	20 - 0	Sables fins	Gris très foncé (5YR 3/1)	Sableuse
Puits BTP	N1	110 - 80	Sables moyens	Gris foncé (5YR 4/1)	Sableuse
	N2	75 - 45	Sables moyens	Gris foncé (5YR 4/1)	Sableuse
	N3	45 - 0	Sables fins	Gris rougeâtre foncé (5YR 4/2)	Sableuse

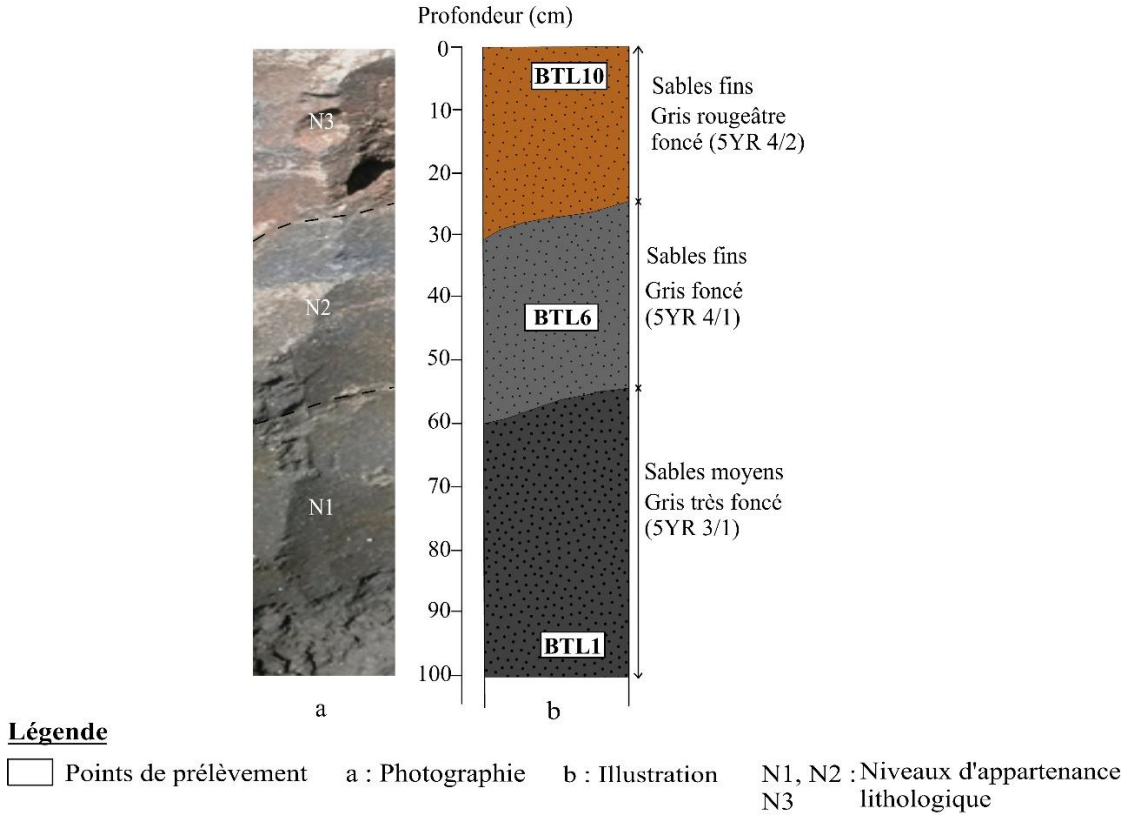


Figure 17. Coupe lithologique du puits BTL.

IV.1.3.2. Puits BTE

Le puit BTE est distant du puits précédent (BTL) de 100 m. Il a été réalisé sur un mètre carré de surface et une profondeur d'environ 50 cm. La colonne lithologique est divisée en trois niveaux qui se présentent ainsi qu'il suit du bas vers le haut (Tableau 12, Figure 18).

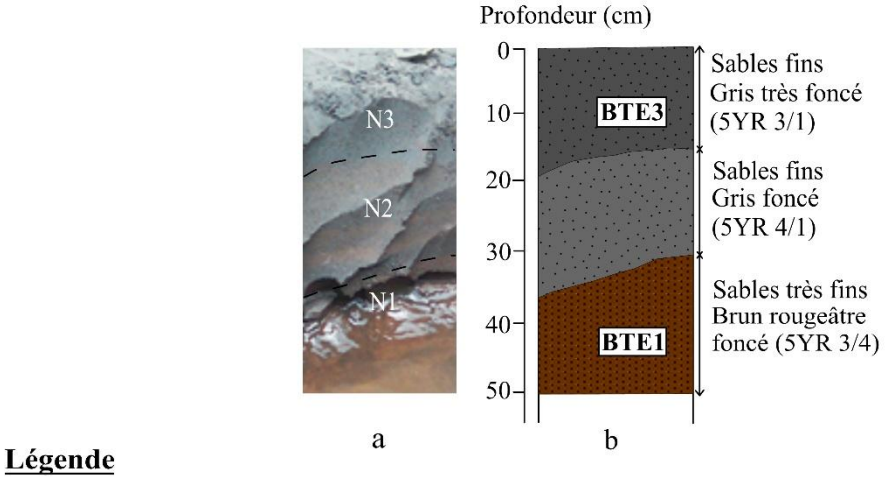


Figure 18. Coupe lithologique du puits BTE.

IV.1.3.3. Puits BTP

Le puits BTP est également distant du puits BTE de 100 m. Il a un mètre carré de surface et une profondeur d'environ 110 cm. La colonne lithologique est structurée en trois niveaux qui se présentent ainsi qu'il suit du bas vers le haut (Tableau 12, Figure 19).

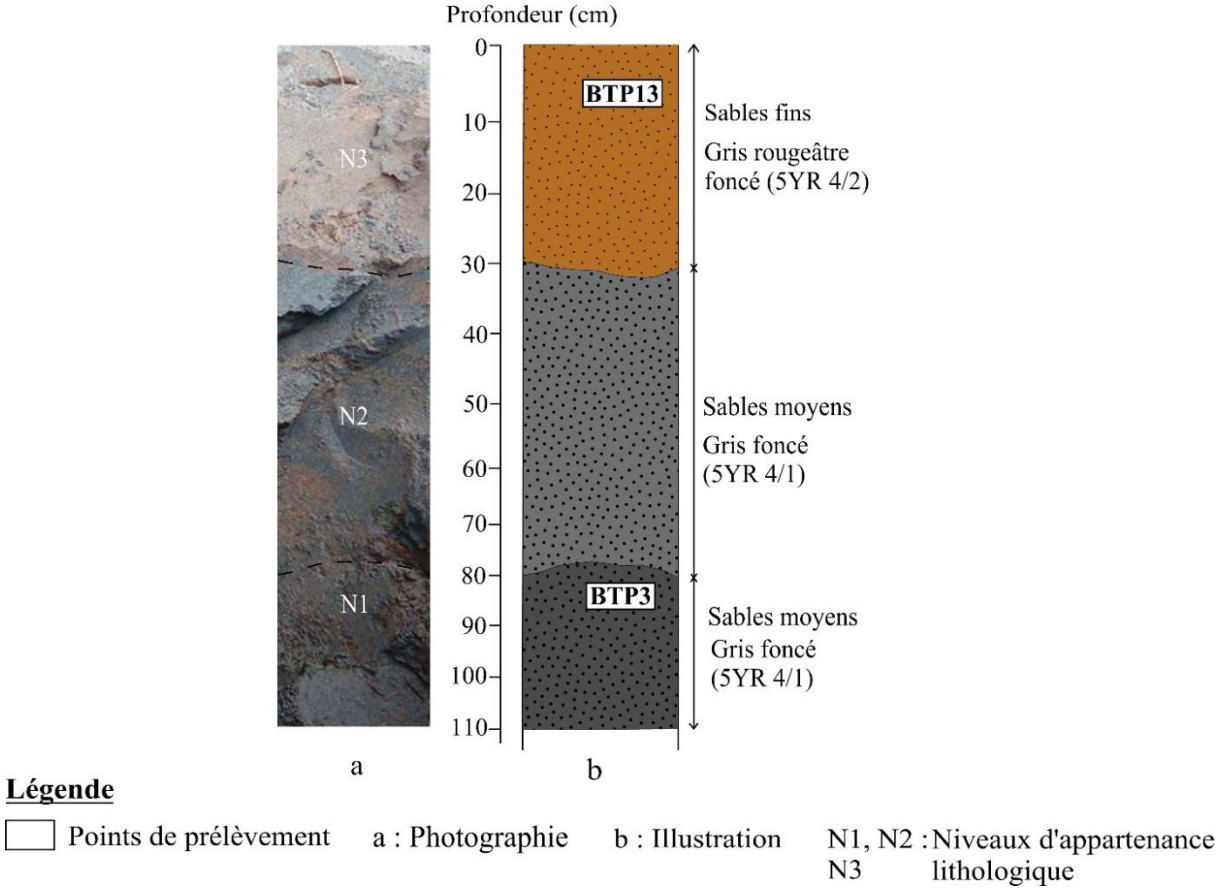


Figure 19. Coupe lithologique du puits BTP.

IV.1.4. Description lithologique des sédiments de surface de Nguémé

Les échantillons NGL1, NGL2, NGL3, NGL4, NGL5, NGL6, NGL7 et NGL8 prélevés en surface de la plage d'étude sont distants de 100 m. Les prélèvements des échantillons ont été effectués manuellement à l'aide d'une truelle sur une profondeur d'environ 5 cm. La description macroscopique de leur lithologie est rapportée dans le Tableau 13 ci-dessous. Ces échantillons sont des sédiments meubles à lithologie peu différente. Les sédiments sont des sables moyens à fins de couleur brun rougeâtre, gris rougeâtre et rouge sombre à texture sableuse.

Tableau 13. Description macroscopique des sédiments de surface de Nguémé

Echantillons	Taille des sédiments	Couleur (code)	Texture
NGL1	Sables fins	Brun rougeâtre (5YR 4/4)	Sableuse
NGL2	Sables moyens	Gris rougeâtre (5YR 3/3)	Sableuse
NGL3	Sables fins	Gris rougeâtre (5YR 5/3)	Sableuse
NGL4	Sables fins	Gris rougeâtre foncé (5YR 4/2)	Sableuse
NGL5	Sables fins	Gris rougeâtre (5YR 5/3)	Sableuse
NGL6	Sables fins	Gris rougeâtre (10YR 5/2)	Sableuse
NGL7	Sables fins	Rouge sombre (5YR 3/2)	Sableuse
NGL8	Sables moyens	Brun rougeâtre foncé (5YR 3/4)	Sableuse

IV.1.5. Description lithologique des sédiments de surface de Mile 8

Les échantillons ML8E1, ML8E2, ML8E3, ML8E4, ML8E5, ML8E6, ML8E7, ML8E8, ML8E9 et ML8E10 prélevés en surface sur la plage de Mile 8 sont également distants de 100 m. Leurs prélèvements ont été réalisés manuellement à l'aide d'une truelle sur une profondeur d'environ 5 cm. La description macroscopique de leur lithologie est restituée dans le Tableau 14 ci-dessous. Ce sont aussi des sédiments meubles, caractéristiques des sables moyens à fins de couleurs variables du gris très foncé à gris foncé ou sombre et gris avec une texture généralement sableuse.

Tableau 14. Description macroscopique des sédiments de surface de Mile 8

Echantillons	Taille des sédiments	Couleur (code)	Texture
ML8E1	Sables moyens	Gris très foncé (5YR 3/1)	Sableuse
ML8E2	Sables fins	Gris foncé (5YR 4/1)	Sableuse
ML8E3	Sables fins	Gris sombre (5YR 5/2)	Sableuse
ML8E4	Sables moyens	Gris (5YR 5/1)	Sableuse
ML8E5	Sables fins	Gris foncé (5YR 4/1)	Sableuse
ML8E6	Sables fins	Gris sombre (5YR 5/2)	Sableuse
ML8E7	Sables fins	Gris très sombre (2,5YR 3/1)	Sableuse
ML8E8	Sables fins	Gris très foncé (5YR 3/1)	Sableuse
ML8E9	Sables fins	Gris foncé (5YR 4/1)	Sableuse
ML8E10	Sables moyens	Gris foncé (5YR 4/1)	Sableuse

IV.2. Granulométrie des sédiments

IV.2.1. Proportion des fractions et classifications granulométriques

Le Tableau 15 présente les différentes fractions granulométriques obtenues par le tamisage des sables au laboratoire. Ces fractions peuvent être représentées par des courbes cumulatives, des histogrammes et des courbes de fréquences. Les courbes cumulatives dites sigmoïdes sur lesquelles on joint le mieux le maximum des points ont été choisies dans le cadre de cette étude parce qu'elles offrent l'opportunité de calculer plusieurs paramètres granulométriques. Les histogrammes et les courbes de fréquences apportent des précisions sur certaines caractéristiques texturales et modales des sédiments étudiés.

Tableau 15. Proportions des fractions granulométriques constitutives des sédiments des plages de Limbé

Localités	Echantillons/Classe	Sables moyens (1 – 2 Φ)	Sables fins (2 – 3 Φ)	Sables très fins (3 – 4,25 Φ)	Limons/Argiles (< 4,25 Φ)
	BAS1	13,97	80,88	5,15	0,00
	BAS2	18,97	69,08	11,71	0,24
	BAS3	26,35	59,88	13,52	0,25
	BAS4	28,87	62,00	8,90	0,23
Bakinguili	BAS5	14,51	72,69	12,55	0,25
(n = 9)	BAS6	12,90	73,37	13,47	0,26
	BAS7	33,97	57,90	7,90	0,23
	BAS8	28,67	58,72	12,38	0,23
	BAS9	21,58	73,79	4,64	0,00
	Moyenne	**22,20**	**67,59**	**10,02**	**0,19**
	BTA1	42,68	53,46	3,86	0,00
	BTA5	15,47	78,93	5,6	0,00
	BTA10	20,8	72,72	6,48	0,00
Batoké	BTJ1	19,34	74,55	6,1	0,00
(n = 7)	BTJ12	18,43	72,54	9,03	0,00
	BTG1	25,96	66,83	7,18	0,02
	BTG11	26,71	64,3	8,96	0,03
	Moyenne	**24,20**	**69,05**	**6,74**	**0,0007**
	BTL10	8,37	81,21	10,39	0,03
	BTL1	23,99	64,03	11,97	0,02
	BTL6	66,4	32,98	0,62	0,00
Limbola	BTE1	10,97	79,7	9,29	0,04
(n = 7)	BTE3	22,51	71,85	5,63	0,01
	BTP3	25,06	69,82	5,12	0,00
	BTP13	33,1	57,86	9,04	0,00
	Moyenne	**27,20**	**65,35**	**7,44**	**0,01**
	NGL1	25,03	69,28	5,69	0,00
	NGL2	32,61	58,36	9,03	0,00
	NGL3	23,01	72,28	4,70	0,007
	NGL4	23,95	64,07	11,97	0,01
Nguémé	NGL5	8,38	81,19	10,42	0,01
(n = 8)	NGL6	12,58	81,49	5,93	0,00
	NGL7	23,19	69,57	7,24	0,00
	NGL8	30,11	63,96	5,93	0,00
	Moyenne	**22,36**	**70,03**	**7,61**	**0,003**
	ML8E1	9,78	85,68	4,53	0,001
	ML8E2	21,85	74,69	3,46	0,00
	ML8E3	35,33	61,26	3,41	0,00
	ML8E4	34,63	61,44	3,93	0,00
	ML8E5	16,54	76,94	6,52	0,00
Mile 8	ML8E6	30,87	67,64	1,49	0,00
(n = 10)	ML8E7	26,07	70,58	3,35	0,005
	ML8E8	11,08	87,32	1,60	0,00
	ML8E9	23,38	70,06	6,56	0,005
	ML8E10	21,01	69,54	9,45	0,00
	Moyenne	**23,05**	**72,51**	**4,43**	**0,002**
	Moyenne Limbé	**23,80**	**68,91**	**7,25**	**0,04**

A Bakinguili, la fraction de diamètre supérieur à 4,25 Φ (argiles et limons) représente en moyenne de 99,81 % du sédiment. Dans cette fraction granulaire, on distingue les sables très fins (4,25 < Φ < 3 ; 10,02 %), les sables fins (3 < Φ < 2 ; 67,59 %) et les sables moyens (2 < Φ < 1 ; 22,20 %). Les limons et les argiles (< 4,25 Φ) montrent une proportion moyenne de 0,19 %. Leurs pourcentages varient entre 0,00 et 0,26 % entre les échantillons. On observe des proportions très faibles dans les échantillons BAS2, BAS3, BAS4, BAS5, BAS6, BAS7 et BAS8 : 0,24 ; 0,25 ; 0,23 ; 0,25 ; 0,26 ; 0,23 ; 0,23 %, respectivement prélevés dans cette localité. Les échantillons BAS1 et BAS9 ont des pourcentages nuls.

Les pourcentages des sables très fins (3 – 4,25 Φ) varient entre 4,64 et 13,52 % avec un pourcentage moyen de 10,02 %. Le pourcentage moyen est marqué par de faibles pourcentages dans les échantillons BAS9, BAS1, BAS7 et BAS4 : 4,64 ; 5,15 ; 7,90 et 8,90 %, respectivement.

Les sables fins (2 – 3 Φ) sont les plus abondants dans les échantillons. Leurs pourcentages varient entre 57,90 et 80,88 % avec une proportion moyenne de 67,59 %. Les pourcentages les plus élevés s'observent dans les échantillons BAS4, BAS2, BAS5, BAS6, BAS9 et BAS1 : 62,00 ; 69,08 ; 72,69 ; 73,37 ; 73,79 et 80,88 %, respectivement.

Les sables moyens (1 – 2 Φ) sont moyennement représentés. Ils occupent environ 22,20 % dans les sédiments. Les faibles pourcentages de sables moyens s'observent dans les échantillons BAS6, BAS1, BAS5 et BAS2 : 12,90 ; 13,97 ; 14,51 et 18,97 % respectivement, et les plus élevés dans les échantillons BAS9, BAS3, BAS8, BAS4 et BAS7 : 21,57 ; 26,35 ; 28,67 ; 28,87 et 33,97 %, respectivement.

A Batoké, la fraction de diamètre supérieur à 4,25 Φ (> 4,25 Φ) représente en moyenne de 99,99 % du sédiment. On note 6,74 % des sables très fins, 69,05 % des sables fins et 24,20 % des sables moyens.

Les limons et les argiles (< 4,25 Φ) sont très peu représentés dans les échantillons. Ils ont une proportion moyenne de 0,0007 % et leurs pourcentages varient entre 0 et 0,03 %. Les pourcentages les plus faibles s'observent dans les échantillons BTG1 et BTG11 : 0,02 et 0,03 % respectivement. Le reste des échantillons ont des pourcentages nuls.

Les sables très fins (3 – 4,25 Φ) sont peu abondants dans les échantillons. Leurs pourcentages varient entre 3,86 et 9,03 % avec une moyenne de 6,74 %. Ces pourcentages sont faibles par rapport aux pourcentages des sables très fins prélevés dans la localité de Bakinguili.

Les sables fins (2 – 3 Φ) sont plus abondants par rapport aux sables très fins et moyens. Leurs proportions varient entre 53,46 et 78,93 % pour une valeur moyenne de 69,05 %. Les pourcentages les plus élevés s'observent dans tous les échantillons prélevés dans la localité de Batoké.

Les sables moyens (1 – 2 Φ) sont moins abondants par rapport aux sables fins. Ils ont des pourcentages qui varient entre 15,47 et 42,68 % avec une proportion moyenne de 24,20 %. Le pourcentage des sables moyens le plus faible (15,47 %) s'observe dans l'échantillon BTA5 et le plus élevé (48,68 %) dans l'échantillon BTA1.

A Limbola, la fraction de diamètre supérieur à 4,25 Φ (> 4,25 Φ) représente en moyenne de 99,99 % du sédiment. Dans cette fraction, On note 7,44 % des sables très fins, 65,35 % des sables fins et 27,20 % des sables moyens.

Les limons et les argiles (< 4,25 Φ) sont moins représentés dans les échantillons. Ils occupent entre 0 et 0,04 % avec une proportion moyenne de 0,01 %. Les échantillons BTL10, BTL1, BTE1 et BTE3 ont des proportions très faibles. Les pourcentages nuls s'observent dans les échantillons BTL6, BTP3 et BTP13.

Les sables très fins (3 – 4,25 Φ) ont des pourcentages variant entre 0,62 et 11,97 % avec une proportion moyenne de 7,44 %. Le pourcentage le plus faible (0,62 %) des sables très fins s'observe dans l'échantillon BTL6 et le plus élevé (11,97 %) dans l'échantillon BTL1.

Les sables fins (2 – 3 Φ) sont très abondants dans les échantillons. La proportion moyenne des sables fins est de 65,35 %. Les faibles pourcentages de sables fins (32,98 %) s'observent dans l'échantillon BTL6 et le plus élevé (81,21 %) dans l'échantillon BTL10.

Les sables moyens (1 – 2 Φ) montrent une proportion moyenne de 27,2 %. Ils sont plus élevés par rapport aux sables très fins. Seuls les échantillons BTL10 et BTE1 : 8,37 et 10,97 % respectivement, présentent de faibles pourcentages.

A Nguémé, la fraction de diamètre supérieur à 4,25 Φ (> 4,25 Φ) représentent en moyenne de 99,99 % du sédiment. Dans cette fraction, On distingue 7,61 % des sables très fins, 70,03 % des sables fins et 22,36 % des sables moyens.

Les limons et les argiles (< 4,25 Φ) sont en très faible quantité dans les échantillons. Ils ont des proportions très faibles, voire même nulles dans certains échantillons. Les pourcentages très faibles s'observent dans les échantillons NGL3, NGL4 et NGL5 : 0,007 ; 0,01 et 0,01 %, respectivement. Le reste des échantillons sont de proportions nulles.

Les sables très fins (3 – 4,25 Φ) sont moins abondants par rapport aux sables fins et moyens. Leurs proportions varient entre 4,70 et 11,97 % avec une valeur moyenne de 7,61 %. Ils présentent des pourcentages faibles dans tous les échantillons prélevés dans cette localité (Nguémé).

Les sables fins (2 – 3 Φ) montrent des pourcentages qui varient entre 58,36 et 81,49 % avec une valeur moyenne de 70,03 %. Ils sont très abondants dans tous les échantillons prélevés à Nguémé.

Les sables moyens (1 – 2 Φ) sont moyennement représentés. Le pourcentage moyen des sables moyens est de 22,36 %. On observe une forte proportion des sables moyens (32,61 %) dans l'échantillon NGL2 et une faible proportion (8,38 %) dans l'échantillon NGL5.

A Mile 8, la fraction de diamètre supérieur à 4,25 Φ (> 4,25 Φ) représentent en moyenne de 99,99 % du sédiment. Cette fraction, contient 4,43 % des sables très fins, 72,51 % des sables fins et 23,05 % des sables moyens.

Les limons et les argiles (< 4,25 Φ) ont des pourcentages variant entre 0,00 et 0,005 % avec une proportion moyenne de 0,002 %. Les pourcentages nuls (0,00 %) s'observent dans la majorité des échantillons, excepté les échantillons ML8E1, ML8E7 et ML8E9 : 0,001 ; 0,005 et 0,005 %, respectivement.

Les sables très fins (3 – 4,25 Φ) présentent des faibles pourcentages dans tous les échantillons. La proportion moyenne des sables très fins est de 4,43 %.

Les sables fins (2 – 3 Φ) sont très abondants dans les échantillons. Ils ont des pourcentages qui varient entre 61,26 et 87,32 %, avec une proportion moyenne de 72,51 %. Le pourcentage le plus élevé (87,32 %) s'observe dans l'échantillon ML8E8 et le moins élevé (61,26 %) dans l'échantillon ML8E3.

Les sables moyens (1 – 2 Φ) présentent un pourcentage moyen de 23,05 %. Les faibles pourcentages des sables moyens (9,78 %) s'observent dans l'échantillon ML8E1 et le plus élevé dans les échantillons ML8E6, ML8E4 et ML8E3 : 30,87 ; 34,63 et 35,33 %, respectivement.

Ainsi, les sédiments de toutes les plages à Limbé montrent en moyenne 23,80 % de particules de diamètre variant entre 1 et 2 en unité phi Φ ; soit les sables moyens (250 µm < Φ < 500 µm), 68,91 % des particules de diamètre variant surtout entre 2 et 3 Φ (125 µm < Φ < 250 µm) indiquant des sables fins, 7,25 % de particules de diamètre variant généralement entre 3 et 4 Φ (63 µm < Φ < 125 µm) indiquant des sables très fins et moins de 1 % de particules avec un diamètre supérieur à 4 Φ (< 63 µm) correspondant aux limons et

argiles. Les pourcentages des sables moyens les plus élevés (27,20 %) s'observent à Limbola et les plus faibles (22,20 %) à Bakinguili. Les sables fins sont très abondants dans toutes les plages de Limbé. Les sables très fins présentent de faibles pourcentages dans toutes ces plages. Les limons et les argiles montrent de très faibles pourcentages (moins de 1 %) voire même nuls dans toutes les plages de Limbé.

IV.2.2. Courbes cumulatives

La Figure 20 présente des courbes cumulatives des sables de plages de Limbé. L'analyse de ces courbes semi-logarithmiques montre une forme générale sigmoïde (courbe en S). L'observation des courbes cumulatives a permis d'identifier les différents quartiles et de ressortir les indices granulométriques consignés dans le Tableau 16.

A Bakinguili, les courbes cumulatives semi-logarithmiques (Figure 20a) des sédiments sableux étudiés présentent de légères différences dans leurs allures. Tous les échantillons présentent des pentes fortes, traduisant probablement un bon classement hydraulique des sédiments. L'énergie hydraulique dans la zone serait assez efficace pour disperser les sédiments au point de bien les classer.

A Batoké, tous les échantillons de sédiments montrent une courbe cumulative semi-logarithmique (Figure 20b) à convexité tournée vers la gauche. Leur forme générale est également sigmoïde. Ils présentent des pentes fortes, traduisant ainsi un bon classement hydraulique des sédiments.

A Limbola, toutes les courbes cumulatives semi-logarithmiques (Figure 20c) montrent une forme en « S ». Ils présentent des pentes fortes, traduisant probablement un bon classement hydraulique des sédiments. Le dépôt des sédiments s'est fait grâce à une variation modérée du courant de transport. Les particules transportées en suspension homogène sont des sables fins.

A Nguémé, les courbes cumulatives semi-logarithmiques (Figure 20d) des sédiments sableux étudiés présentent une forme sigmoïde « S ». Tous les échantillons présentent des pentes fortes, traduisant un bon classement hydraulique des sédiments, en milieu plus ou moins agité et à forte énergie.

A Mile 8, toutes les courbes cumulatives semi-logarithmiques (Figure 20e) montrent une forme en « S ». Les échantillons présentent des pentes fortes, traduisant un bon classement hydraulique des sédiments.

A l'échelle de Limbé, tous les sédiments présentent des courbes cumulatives semi-logarithmiques en forme sigmoïde « S » avec des pentes fortes, traduisant ainsi, selon Mouldi et Chkiou (2007) un bon classement hydraulique des sédiments, en milieu plus ou moins agité et à forte énergie.

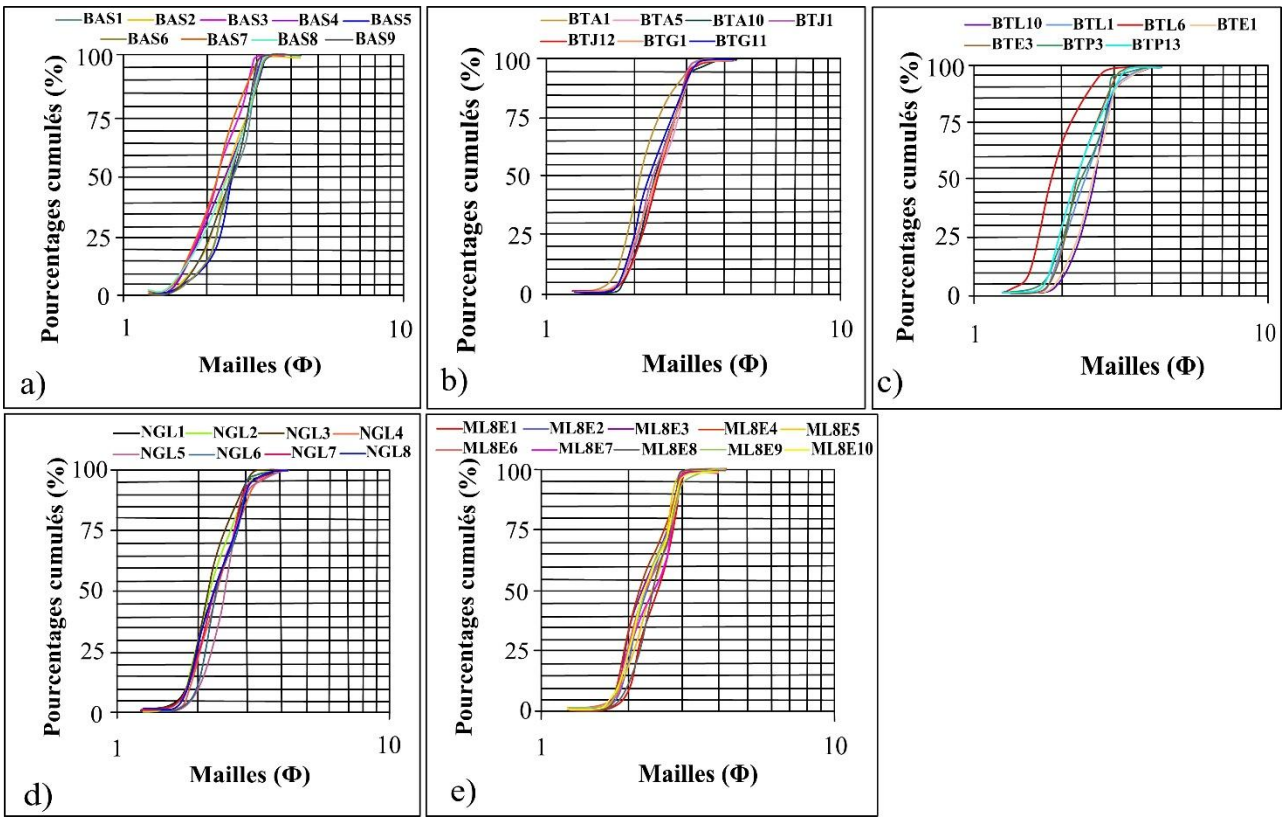


Figure 20. Courbes des pourcentages cumulés des sédiments des plages de Limbé. a) Bakinguili ; b) Batoké ; c) Limbola ; d) Nguémé ; e) Mile 8.

IV.2.3. Histogrammes et courbes de fréquences

Les Figures 21, 22, 23, 24 et 25 présentent les histogrammes et courbes de fréquences des sédiments de la plage de Limbé. La majorité des histogrammes et courbes de fréquences indiquent une répartition bimodale à plurimodale des sédiments. Les échantillons unimodaux sont observés à Bakinguili pour l'échantillon BAS9 ; Limbola pour les échantillons BTL10, BTL6 et BTE3 ; et Nguémé pour les échantillons NGL3 et NGL5. En théorie, le fait qu'une courbe soit bimodale ou plurimodale correspond à un dépôt par des

courants irréguliers, ou à un sédiment déposé près de la source et qui n'a pas connu un tri important. Les dépôts de provenance diverses (mélangés) donnent également des courbes bimodales à polymodales.

A Bakinguili, l'histogramme de l'échantillon BAS9 (Figure 21i) présente une allure unimodale. Le mode est 3 Φ. Les histogrammes des échantillons BAS1, BAS2, BAS3, BAS4, BAS5, BAS6, BAS7 et BAS8 sont bimodaux (Figure 21a-h). Leurs courbes de fréquences montrent deux culminations correspondant à deux modes. Les modes principaux de ces échantillons sont 2 Φ pour les échantillons BAS3, BAS4, BAS7 ; 2,25 Φ pour l échantillon BAS6 ; 2,5 Φ pour les échantillons BAS2, BAS5, BAS8 ; et 3 Φ pour l'échantillon BAS1. Les modes secondaires correspondent aux classes granulométriques 2,25 Φ pour l'échantillon BAS1 ; 2,5 Φ pour les échantillons BAS3, BAS7 ; et 3 Φ pour les échantillons BAS2, BAS4, BAS5, BAS6 et BAS8.

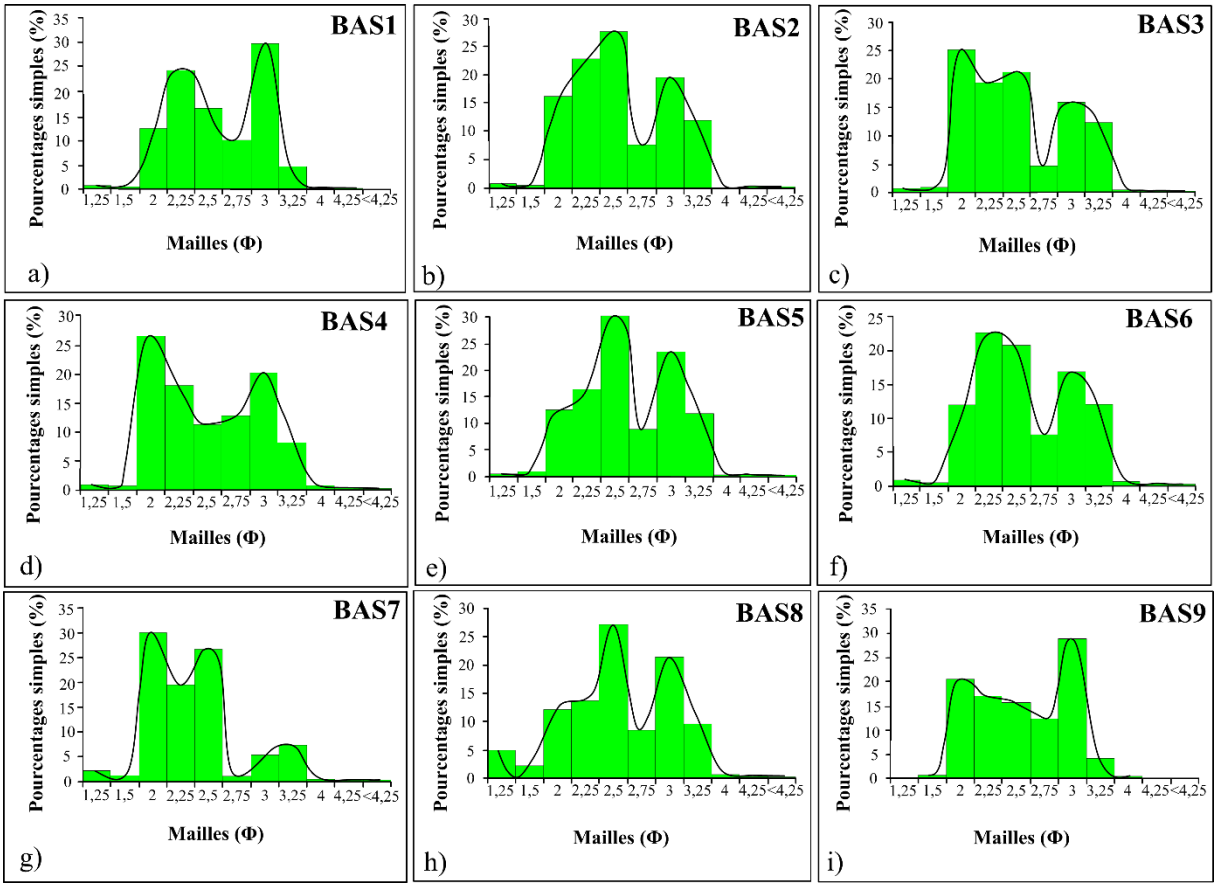


Figure 21. Histogrammes et courbes de fréquences des sédiments de la plage de Bakinguili (n = 9).

A Batoké, tous les histogrammes des échantillons (Figure 22a-g) sont bimodaux. Les courbes de fréquences de ces échantillons montrent deux culminations correspondant à deux modes. Les modes principaux de ces échantillons sont 2 Φ pour l'échantillon BTA1 ; 2,25 Φ

pour les échantillons BTA10, BTJ1, BTG11 ; et 3 Φ pour les échantillons BTA5, BTJ12 et BTG1. Les modes secondaires correspondent aux classes granulométriques 2,25 Φ pour les échantillons BTA1, BTA5, BTJ12 et BTG1 ; 3 Φ pour les échantillons BTA10, BTJ1 ; et 2 Φ pour l'échantillon BTG11. Les courbes de fréquences (Figure 22a-g) montrent une forme platykurtique, c'est-à-dire à pic plats.

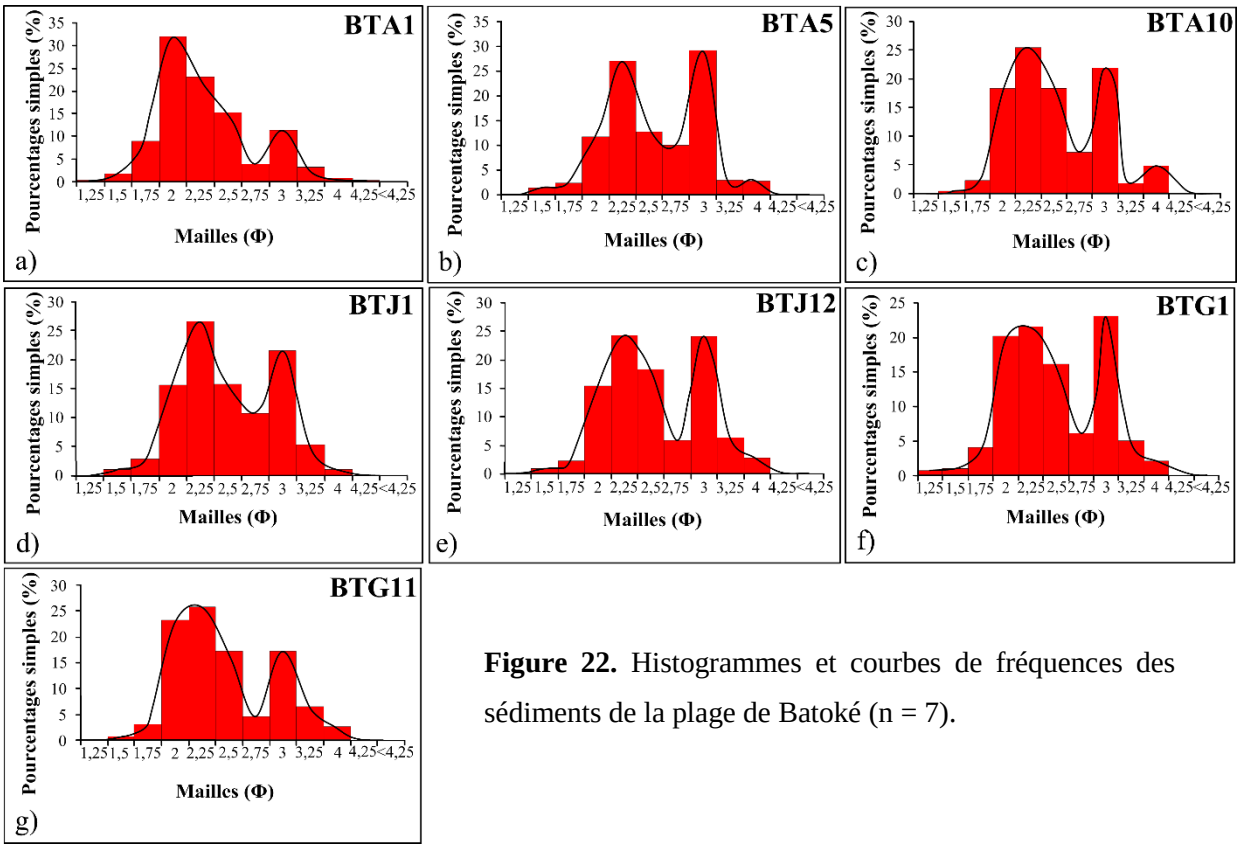


Figure 22. Histogrammes et courbes de fréquences des sédiments de la plage de Batoké (n = 7).

A Limbola, les histogrammes des échantillons BTL10, BTL6 et BTE3 sont unimodaux (Figure 23a, c, e). Les modes principaux sont 2,75 Φ pour l'échantillon BTL10 ; 1,75 Φ pour l'échantillon BTL6; et 2,25 Φ pour l'échantillon BTE3. Les échantillons BTL1, BTE1, BTP3 et BTP13 présentent des histogrammes bimodaux (Figure 23b, d, f, g). Les modes principaux de ces échantillons sont 2,5 Φ pour les échantillons BTL1 et BTE1 ; 2 Φ pour l'échantillon BTP13 ; et 3 Φ pour l'échantillon BTP3. Les modes secondaires correspondent aux classes granulométriques 2 Φ pour l'échantillon BTL1 ; 3 Φ pour l'échantillon BTE1 ; 2,25 Φ pour les échantillons BTP3 et BTP13. Les courbes de fréquences (Figure 23a-g) des échantillons sont de type platykurtique à leptokurtique. Cette évolution montre la présence des niveaux de sédiments à classement moyen à bon. Les sédiments BTL10 et BTL6 (Figure 23a, c) présentent des courbes de fréquences moins étalées et des pics plus ou moins aigus.

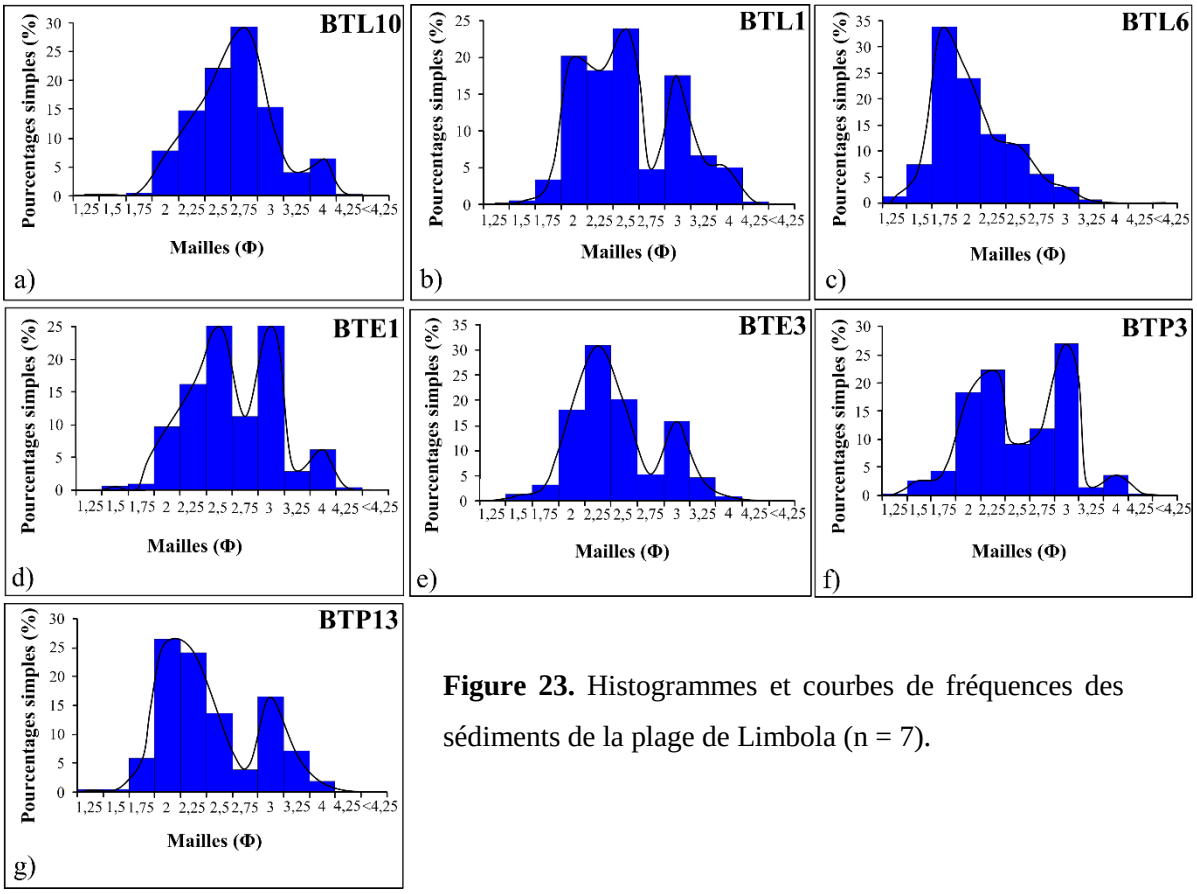


Figure 23. Histogrammes et courbes de fréquences des sédiments de la plage de Limbola (n = 7).

A Nguémé, à l'exception de l'échantillon NGL5 (Figure 24e), tous les autres échantillons sont bimodaux. Les modes principaux de ces échantillons sont 2 Φ pour les échantillons NGL2 et NGL8 ; 2,25 Φ pour les échantillons NGL3, NGL6 et NGL7 ; 2,5 Φ pour l'échantillon NGL4 et 3 Φ pour l'échantillon NGL1. Les modes secondaires correspondent aux classes granulométriques 2,25 Φ pour l'échantillon NGL1 et 3 Φ pour les échantillons NGL2, NGL3, NGL4, NGL6, NGL7 et NGL8. Les sédiments NGL1, NGL2, NGL3, NGL4, NGL6, NGL7 et NGL8 montrent des courbes de fréquences (Figure 24a-h) à pics plats. Seul l'échantillon NGL5, présente une caractéristique d'une courbe moins étalée et des pics plus ou moins aigus.

A Mile 8, tous les histogrammes des échantillons sont bimodaux (Figure 25a-j). Les modes principaux de ces échantillons sont 2 Φ pour les échantillons ML8E3 et ML8E4; 2,25 Φ pour les échantillons ML8E2, ML8E9, ML8E10 ; et 3 Φ pour les échantillons ML8E1, ML8E6, ML8E7 et ML8E8. Les modes secondaires correspondent aux classes granulométriques 2 Φ pour les échantillons ML8E6 et ML8E7 ; 2,25 Φ pour l'échantillon ML8E1 ; 2,5 Φ pour l'échantillon ML8E8; et 3 Φ pour les échantillons ML8E2, ML8E3, ML8E4, ML8E5, ML8E9 et ML8E10. Les courbes de fréquences des sédiments (Figure 25a-j) ont une forme platykurtique.

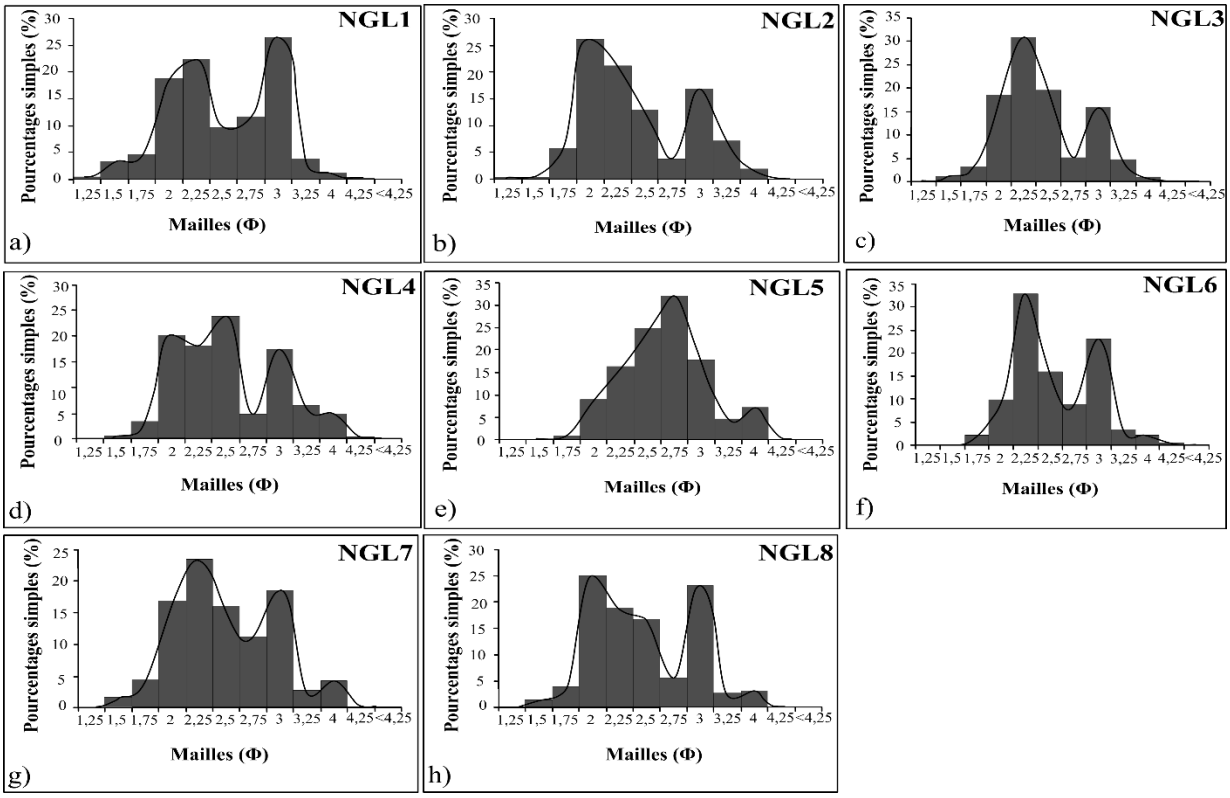


Figure 24. Histogrammes et courbes de fréquences des sédiments de la plage de Nguémé (n = 8).

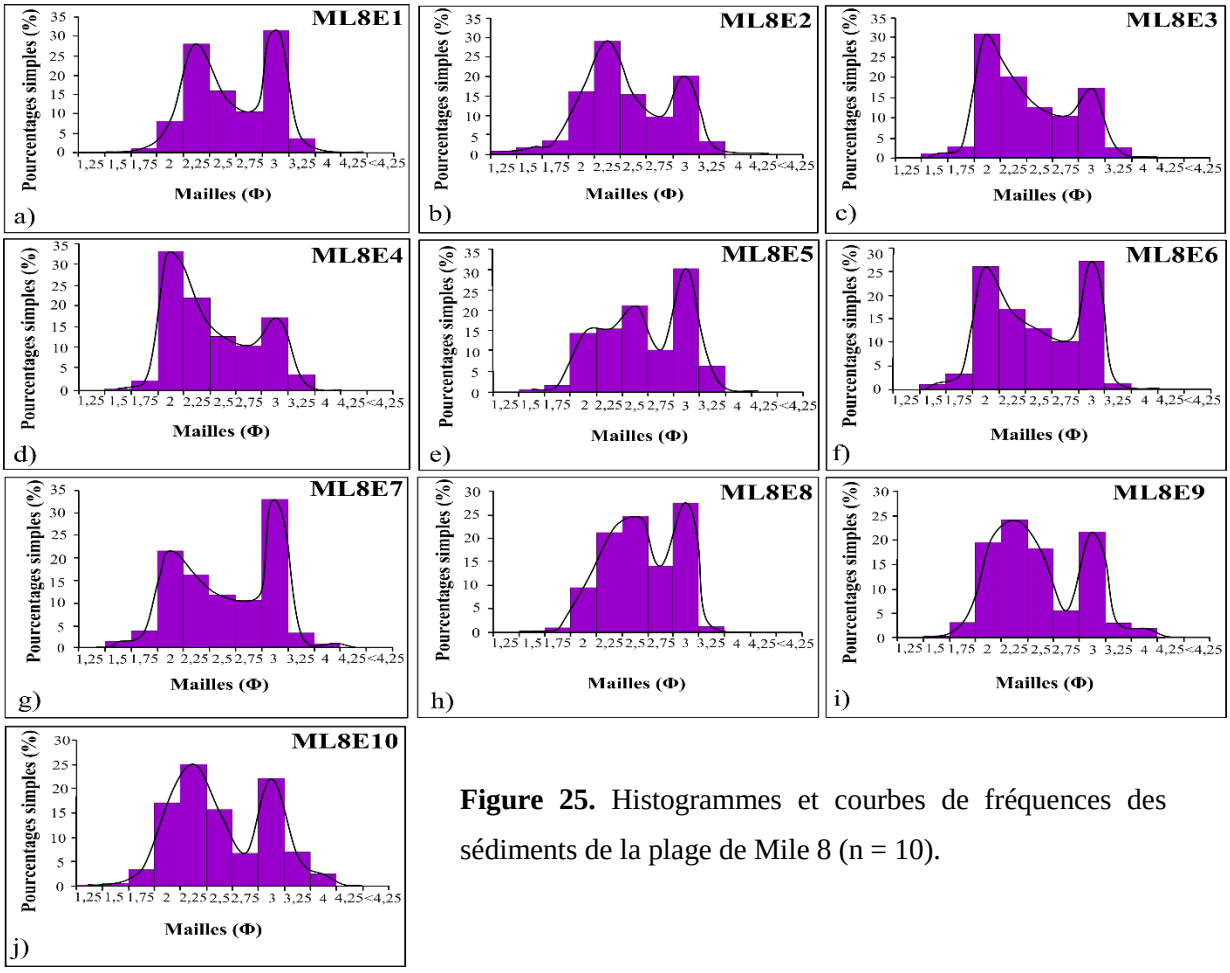


Figure 25. Histogrammes et courbes de fréquences des sédiments de la plage de Mile 8 (n = 10).

IV.2.4. Présentation et calcul des paramètres granulométriques

Le Tableau 16 présente les paramètres granulométriques des sédiments de la plage de Limbé calculés d'après les formules de Folk et Ward (1957). Il s'agit des paramètres de position dont (i) la moyenne (Mz), (ii) la médiane (Md) et (iii) le mode (Mo) ; les paramètres de dispersion dont le Sorting Index (indice de classement So) et la deviation standard (σ) ; du paramètre d'asymétrie, le skewness (Sk) et du paramètre d'acuité, le kurtosis (kg).

Tableau 16. Paramètres granulométriques des sédiments des plages de Limbé

		Paramètres de position			**Paramètres de dispersion**		**Paramètre d'asymétrie**	**Paramètre d'acuité**
Localités	**Echs.**	**Mz (Φ)**	**Md (Φ)**	**Mo (Φ)**	**So (mm)**	**σ (Φ)**	**Sk (Φ)**	**kg (Φ)**
	BAS1	2,46	2,40	3,00	1,17	0,39	0,09	0,89
	BAS2	2,36	2,30	2,50	1,16	0,46	0,17	0,82
	BAS3	2,33	2,30	2,00	1,21	0,52	0,11	0,81
Bakinguili	BAS4	2,30	2,30	2,00	1,29	0,51	0,07	0,57
(n = 9)	BAS5	2,47	2,40	2,50	1,11	0,45	0,06	0,76
	BAS6	2,47	2,40	2,25	1,17	0,40	0,16	0,76
	BAS7	2,20	2,20	2,00	1,21	0,47	0,10	1,02
	BAS8	2,33	2,30	2,50	1,27	0,50	0,08	0,68
	BAS9	2,37	2,30	3,00	1,22	0,44	0,14	0,76
	Moy.	2,36	2,32	2,42	1,20	0,46	0,11	0,79
	BTA1	2,20	2,10	2,00	1,19	0,42	0,36	1,07
	BTA5	2,43	2,40	2,00	1,20	0,41	0,06	0,61
	BTA10	2,37	2,30	2,25	1,15	0,43	0,18	0,70
Batoké	BTJ1	2,37	2,30	2,25	1,13	0,45	0,14	0,76
(n = 7)	BTJ12	2,37	2,30	3,00	1,14	0,46	0,17	0,72
	BTG1	2,30	2,20	3,00	1,24	0,47	0,25	0,67
	BTG11	2,33	2,20	2,25	1,20	0,46	0,34	0,72
	Moy.	2,34	2,26	2,39	1,18	0,44	0,21	0,75
	BTL10	2,43	2,20	2,75	1,05	0,39	0,79	1,15
	BTL1	2,37	2,30	2,50	1,25	0,46	0,24	0,64
	BTL6	1,93	1,80	1,75	1,22	0,41	0,54	1,15
Limbola	BTE1	2,53	2,50	2,50	1,12	0,47	0,18	0,94
(n = 7)	BTE3	2,33	2,20	2,25	1,15	0,43	0,37	0,82
	BTP3	2,33	2,30	3,00	1,27	0,47	0,08	0,59
	BTP13	2,30	2,20	2,00	1,28	0,47	0,25	0,59
	Moy.	2,32	2,21	2,39	1,19	0,44	0,35	0,84
	NGL1	2,33	2,30	3,00	1,21	0,46	0,13	0,61
	NGL2	2,27	2,20	2,00	1,22	0,45	0,29	0,66
	NGL3	2,30	2,20	2,25	1,18	0,41	0,33	0,81
Nguémé	NGL4	2,37	2,40	2,50	1,21	0,49	0,03	0,72
(n = 8)	NGL5	2,53	2,50	2,75	1,05	0,37	0,11	0,89
	NGL6	2,40	2,30	2,25	1,14	0,36	0,30	0,70
	NGL7	2,30	2,30	2,25	1,20	0,46	0,14	0,72
	NGL8	2,30	2,30	2,00	1,30	0,43	0,08	0,55
	Moy.	2,35	2,31	2,38	1,19	0,43	0,18	0,71
	ML8E1	2,43	2,40	3,00	1,14	0,36	0,07	0,82
	ML8E2	2,30	2,30	2,25	1,18	0,43	0,08	0,61
	ML8E3	2,27	2,20	2,00	1,28	0,42	0,24	0,56
	ML8E4	2,30	2,30	2,00	1,25	0,45	0,04	0,67
Mile 8	ML8E5	2,40	2,30	2,50	1,14	0,41	0,25	0,81
(n = 10)	ML8E6	2,33	2,30	3,00	1,28	0,46	0,13	0,55
	ML8E7	2,30	2,30	3,00	1,27	0,43	0,08	0,61
	ML8E8	2,47	2,40	3,00	1,11	0,37	0,17	0,75
	ML8E9	2,36	2,30	2,25	1,21	0,43	0,18	0,61
	ML8E10	2,37	2,30	2,25	1,25	0,45	0,22	0,76
	Moy.	2,35	2,31	2,53	1,21	0,42	0,15	0,68
Moy. Limbé		**2,35**	**2,29**	**2,43**	**1,20**	**0,44**	**0,19**	**0,75**

Echs : Echantillons ; Moy. Moyenne.

A Bakinguili, la moyenne (Mz) varie entre 2,20 et 2,47 Φ dans les échantillons. Ces valeurs s'expliquent d'après Folk et Ward (1957) par la prédominance des sables fins. La

médiane (Md) montre des valeurs comprises entre 2,20 et 2,40 Φ. Elle varie très peu entre les échantillons. Les valeurs du mode (Mo) varient entre 2,00 et 3,00 Φ. Les échantillons BAS3, BAS4 et BAS7 présentent le même mode (2,00 Φ), ainsi que les échantillons BAS2, BAS5 BAS8 (2,50 Φ) ; BAS1 et BAS9 (3,00 Φ). Ces modes correspondent aux classes granulométriques des sables fins. Le Sorting Index (So) varie entre 1,11 et 1,29 mm.

Les valeurs de la déviation standard ou écart type (σ) varient entre 0,39 et 0,52 Φ avec une moyenne de 0,46 Φ. Les valeurs du paramètre Skewness (Sk) varient entre 0,06 et 0,17 Φ. Tous les échantillons ont un Sk > 0. Les sédiments sont dominés par la fraction fine. Les valeurs du paramètre Kurtosis (kg) varient entre 0,57 et 1,02 Φ. La majorité des échantillons (BAS1, BAS2, BAS3, BAS4, BAS5, BAS6, BAS8 et BAS9) ont des valeurs de kg comprises entre 0,57 et 0,89 Φ, leurs courbes sont dites platykurtiques. Seul l'échantillon BAS7 présente un kg de 1,02 Φ, leur courbe est dite mésokurtique.

A Batoké, la moyenne (Mz) varie entre 2,20 et 2,40 Φ. La médiane (Md) varie très peu entre les échantillons. Ses valeurs sont comprises entre 2,10 et 2,40 Φ. Les valeurs du mode (Mo) sont comprises entre 2,00 et 3,00 Φ. Les échantillons BTA10, BTJ1 et BTG11 ont un même mode (2,25 Φ), ainsi que les échantillons BTA5, BTJ12 et BTG1 (3,00 Φ). Ces modes correspondent aux classes granulométriques des sables fins. Les valeurs du Sorting Index (So) sont comprises entre 1,13 et 1,24 mm.

La deviation standard (σ) ou écart type (σ) varie entre 0,41 et 0,47 Φ, avec une valeur moyenne de 0,44 Φ. Les valeurs du Skewness (Sk) varient entre 0,06 et 0,36 Φ. Tous les échantillons affichent un Sk > 0. Les valeurs du paramètre Kurtosis (kg) varient entre 0,61 et 1,07 Φ, caractéristiques des courbes platykurtique à mésokurtique.

A Limbola, la moyenne (Mz) varie entre 1,93 et 2,53 Φ. Cette moyenne est élevée dans la majorité des échantillons, à l'exception de l'échantillon BTL6 (1,93 Φ). La médiane (Md) est comprise entre 1,80 et 2,50 Φ. La plus faible valeur (1,80 Φ) s'observe dans l'échantillon BTL6. Les valeurs élevées sont observées dans les échantillons BTE1, BTL10, BTL1, BTE3 BTP3 et BTP13 (2,50 Φ, 2,20 Φ, 2,30 Φ, 2,20 Φ, 2,30 Φ, 2,20 Φ respectivement). Le mode (Mo), varie entre 1,75 et 3,00 Φ. Il est faible dans l'échantillon BTL6. Les autres échantillons ont des modes compris entre 2,00 et 3,00 Φ. Ces modes correspondent aux classes granulométriques des sables fins. Pour ce qui est du paramètre de dispersion (So), les valeurs varient très peu dans tous les échantillons (1,05 et 1,28 mm).

La deviation standard (σ) varie entre 0,39 et 0,47 Φ, avec une valeur moyenne de 0,44 Φ. Les valeurs du paramètre Skewness (Sk) sont comprises entre 0,08 et 0,79 Φ. Tous les échantillons ont un Sk > 0. Le paramètre Kurtosis (kg) varie entre 0,59 et 1,15 Φ. Les échantillons BTL1, BTE1, BTE3, BTP3 et BTP13 ont des valeurs de kg comprises entre 0,59 et 0,94 Φ, caractérisant les formes platykurtiques des courbes. Seuls les échantillons BTL10 et BTL6 ont un kg égale à 1,15 Φ, correspondant à des courbes leptokurtiques.

A Nguémé, la moyenne (Mz) varie entre 2,30 et 2,53 Φ. La médiane (Md) varie entre 2,20 et 2,50 Φ. Les valeurs du mode (Mo) sont comprises entre 2,00 et 3,00 Φ. Les échantillons NGL2 et NGL8 présentent le même mode (2,00 Φ) ainsi que les échantillons NGL3, NGL6 et NGL7 (2,25Φ). Les autres échantillons (NGL1, NGL4 et NGL5) présentent des valeurs de 3,00 Φ, 2,50 Φ et 2,75 Φ respectivement. Ces modes correspondent aux classes granulométriques des sables fins. Les valeurs du Sorting Index (So) varient entre 1,05 et 1,30 mm.

La deviation standard (σ) varie entre 0,36 et 0,46 Φ, avec une valeur moyenne de 0,43 Φ. Les valeurs du Skewness (Sk) sont comprises entre 0,08 et 0,33 Φ. Tous les échantillons ont un Sk > 0. Le paramètre kurtosis (kg) varie entre 0,55 et 0,89 Φ, suggérant une forme platykurtique des courbes.

A Mile 8, la moyenne (Mz) varie entre 2,27 et 2,47 Φ. La médiane (Md) montre des valeurs comprises entre 2,20 et 2,40 Φ. Elle varie très peu dans les échantillons. La majorité des échantillons présentent une même médiane (2,30 Φ). Les valeurs du mode (Mo) varient entre 2,00 et 3,00 Φ. Les échantillons ML8E2, ML8E9 et ML8E10 présentent le même mode (2,25 Φ), ainsi que les échantillons ML8E3, ML8E4 (2,00 Φ), ML8E1, ML8E6, ML8E7 et ML8E8 (3,00 Φ). Ces modes correspondent aux classes granulométriques des sables fins. Les valeurs du Sorting Index (So) sont comprises entre 1,11 et 1,28 mm.

La deviation standard (σ) varie entre 0,36 et 0,46 Φ, avec une valeur moyenne de 0,42 Φ. Les valeurs du Skewness (Sk) varient entre 0,04 et 0,25 Φ. Tous les échantillons ont un Sk > 0. Les valeurs du Kurtosis (kg) varient entre 0,55 et 0,82 Φ, caractéristiques des courbes platykurtiques.

A l'échelle de la zone d'étude (Limbé), la taille moyenne des grains (Mz) des sédiments varie entre 1,93 et 2,53 Φ. La médiane (Md) montre des valeurs comprises entre 1,80 et 2,50 Φ dans les échantillons. Les valeurs du mode (Mo) varient entre 1,75 et 3,00 Φ, correspondant aux classes granulométriques des sables fins. Les valeurs des paramètres de

dispersion Sorting Index (So) varient entre 1,05 et 1,28 mm, et la deviation standart (σ) varient entre 0,36 et 0,52 Φ, de sorte que les sédiments sont classés comme bien triés. La valeur moyenne du paramètre skewness (Sk) est de 0,19 Φ. Les valeurs du paramètre kurtosis (kg) sont comprises entre 0,55 et 1,15 avec une valeur moyenne de 0,75.

IV.2.5. Analyse corrélative des paramètres granulométriques

La Figure 26 présente les diagrammes de dispersion granulométrique des sédiments de plages de Limbé.

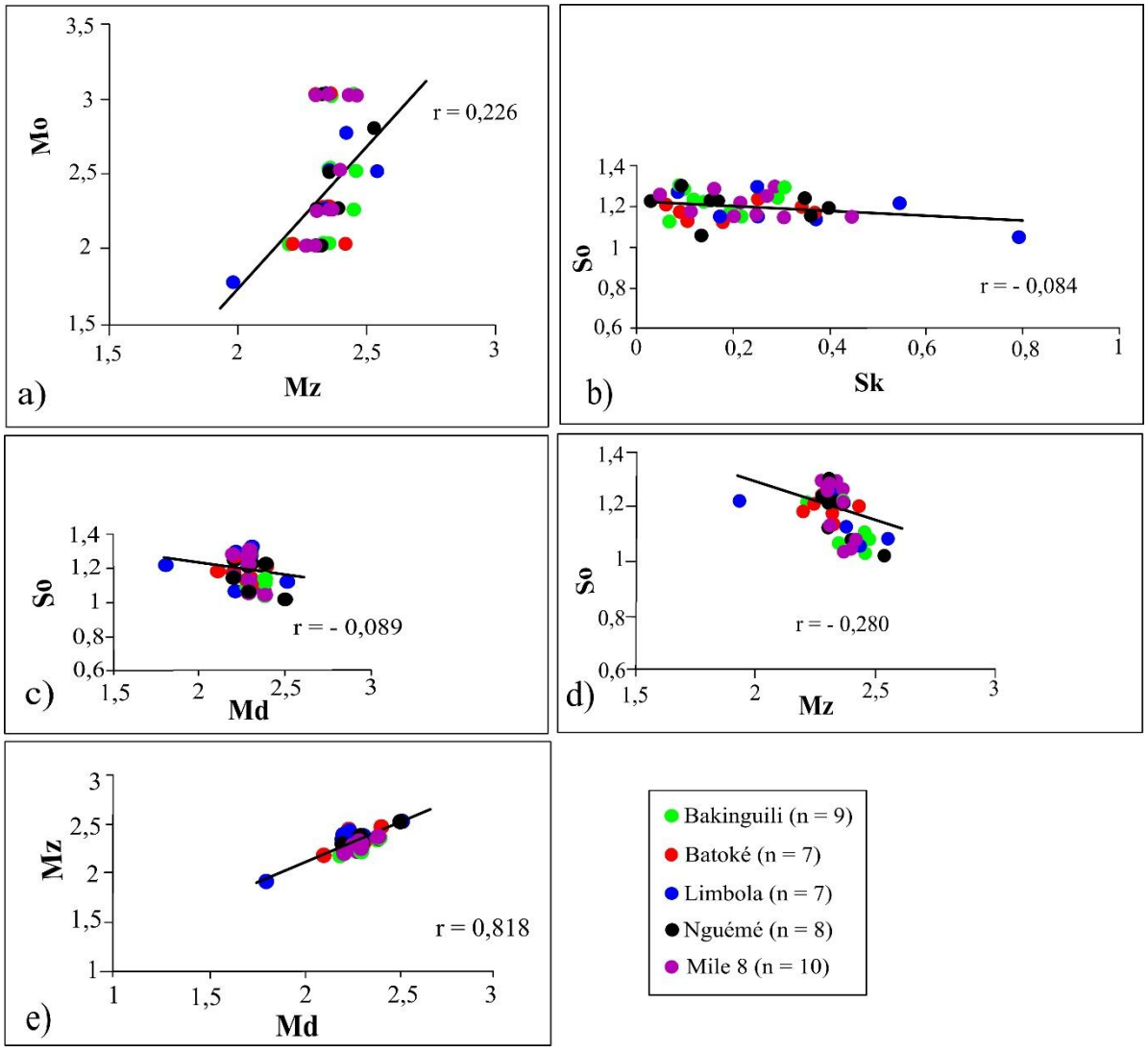


Figure 26. Diagrammes de dispersion granulométrique des sédiments des plages de Limbé. a) Mo = f (Mz) ; b) Sk = f (Mz) ; c) So = f (Sk) ; d) So = f (Md) ; e) Mz = f (Md) et f) = f (Mz).

Une corrélation linéaire positive est observée entre le mode et la moyenne (Figure 26a). Le coefficient de corrélation est r = 0,226, voisin de 0, ce qui indique une faible proportionnalité entre ces paramètres granulométriques. Ainsi le grain moyen des sables de

plages de Limbé appartient à la classe granulométrique la plus importante et présente une légère asymétrie vers les fins.

La corrélation linéaire négative et insignifiante est observée entre le So et Sk (-0,084) ; So et Md (- 0,089) ; et So et Mz (- 0,280) (Figure 26b, c, d). Au contraire, la corrélation linéaire entre Mz et Md (0,818) est positive et significative (Figure 26e). Ainsi le classement détermine très peu l'évolution de la symétrie du grain moyen et de la taille des sédiments.

IV.2.6. Mode de transport des sédiments

Le test de Visher (1969) a été appliqué pour déterminer le mode de transport des sédiments des plages de Limbé. Ce test permet de montrer la relation entre la granulométrie des sédiments et leur mode de transport. Ainsi, les sables des plages de Limbé sont transportés selon trois modes différents (Tableau17):

- la saltation (population A et A');
- la suspension (population B) ;
- le roulement (population C).

L'analyse du Tableau 17 et la Figure 27a des sédiments de la plage de Bakinguili montre que la saltation (population A et A') est plus importante. Elle varie entre 85,79 et 98,65 %. La suspension (population B) montre des valeurs comprises entre 0,1 et 2 % ; et le roulement (population C) varie entre 0,35 et 14,2 %. Cette analyse quantitative montre que la majorité des sédiments se déplacent par saltation. Une minorité des sédiments se déplacent par roulement et par suspension.

Par ailleurs, la caractérisation du type de transport dans les différentes classes granulométriques montre que :

Le mode de transport des sables fins (2 – 3 Φ) est la saltation (95,22 % en moyenne du matériel fin). Le transport en suspension est le mode de transport des sables très fins (1,1 % du matériel). Les sables moyens de taille comprise entre 1 et 2 Φ se déplacent essentiellement par saltation et par roulement (ils représentent 3,68 % du matériel moyen).

L'analyse du Tableau 17 et la Figure 27b des sédiments de la plage de Batoké indique que la saltation (population A et A') est également la plus nombreuse, elle varie entre 92,4 et 97,7 %. La suspension (population B) présente des valeurs comprises entre 0,5 et 3,8 % ; et le roulement (population C) varie entre 1,2 et 3,8 %. Cette analyse quantitative montre

que la majorité des sédiments se déplace par saltation. Les transports par roulement et par suspension sont moins marqués.

De même la caractérisation du type de transport dans les différentes classes granulométriques montre que :

Le mode de transport des sables fins (2 – 3 Φ) de la plage de Batoké est majoritairement la saltation (95 % en moyenne du matériel fin). Le transport en suspension est le mode de transport des sables très fins (2,56 % du matériel). Les sables moyens de taille comprise entre 1 et 2 Φ se déplacent essentiellement par roulement (ils représentent 2,44 % du matériel moyen).

Tableau 17. Pourcentages des différentes populations des sédiments des plages de Limbé

Secteur	**Bakinguili**									
Nature du transport	**Proportions granulométriques**									
Echantillons (n = 9)	BAS1	BAS2	BAS3	BAS4	BAS5	BAS6	BAS7	BAS8	BAS9	Moy.
Saltation (population A')	26,9	33	41,6	50,1	22,2	20,7	17,69	30,2	57	33,26
Saltation (population A)	67,8	65,65	54,2	46	74,8	75,8	68,1	66,1	39,2	61,96
Suspension (population B)	1,1	1	0,2	1,9	0,5	1,3	0,1	1,8	2	1,1
Roulement (population C)	4,2	0,35	4	2	2,5	2,2	14,2	1,9	1,8	3,68
Secteur	**Batoké**									
Nature du transport	**Proportions granulométriques**									
Echantillons (n = 7)	BTA1	BTA5	BTA10	BTJ1	BTJ12	BTG1	BTG11	Moy.		
Saltation (population A')	30,4	0	41,1	0	35,4	45,7	35	26,8		
Saltation (population A)	63,6	92,4	53,5	96,1	58	52	61,8	68,2		
Suspension (population B)	3,6	3,8	3,4	1,8	2,8	0,5	2	2,56		
Roulement (population C)	2,4	3,8	2	2,1	3,8	1,8	1,2	2,44		
Secteur	**Limbola**									
Nature du transport	**Proportions granulométriques**									
Echantillons (n = 7)	BTL10	BTL1	BTL6	BTE1	BTE3	BTP3	BTP13	Moy.		
Saltation (population A')	9,8	27	13,9	45,7	0	32,9	22	21,61		
Saltation (population A)	89,8	71	84,1	52,6	90,6	57,1	66	73,03		
Suspension (population B)	0,2	1	0,3	0,4	5,4	3,1	6	2,35		
Roulement (population C)	0,2	1	1,7	1,3	4	6,9	6	3,01		
Secteur	**Nguémé**									
Nature du transport	**Proportions granulométriques**									
Echantillons (n = 8)	NGL1	NGL2	NGL3	NGL4	NGL5	NGL6	NGL7	NGL8	Moy.	
Saltation (population A')	40	12,8	27,48	27,2	19,6	14,2	0	32	21,66	
Saltation (population A)	53,1	83,01	70,4	69,1	70,02	73,4	95,7	62,5	72,15	
Suspension (population B)	3,8	2,2	0,02	1,3	6,4	10,2	2,2	2	3,52	
Roulement (population C)	3,1	1,99	2,1	2,4	1,98	2,2	2	3,5	2,41	
Secteur	**Mile 8**									
Nature du transport	**Proportions granulométriques**									
Echantillons (n = 10)	ML8E1	ML8E2	ML8E3	ML8E4	ML8E5	ML8E6	ML8E7	ML8E8	ML8E9	ML8E10	Moy.
Saltation (population A')	11,3	32	43,4	22	10,5	34,2	31,6	37,7	15,5	29	26,72
Saltation (population A)	79,5	62	50,6	71,6	84,4	58,2	66,4	57,8	78	65,65	67,42
Suspension (population B)	8,2	2	4,2	4	3	3,8	0,4	0,5	3,5	3,5	3,31
Roulement (population C)	1	4	1,8	2,4	2,1	3,8	1,6	4	3	1,85	2,55

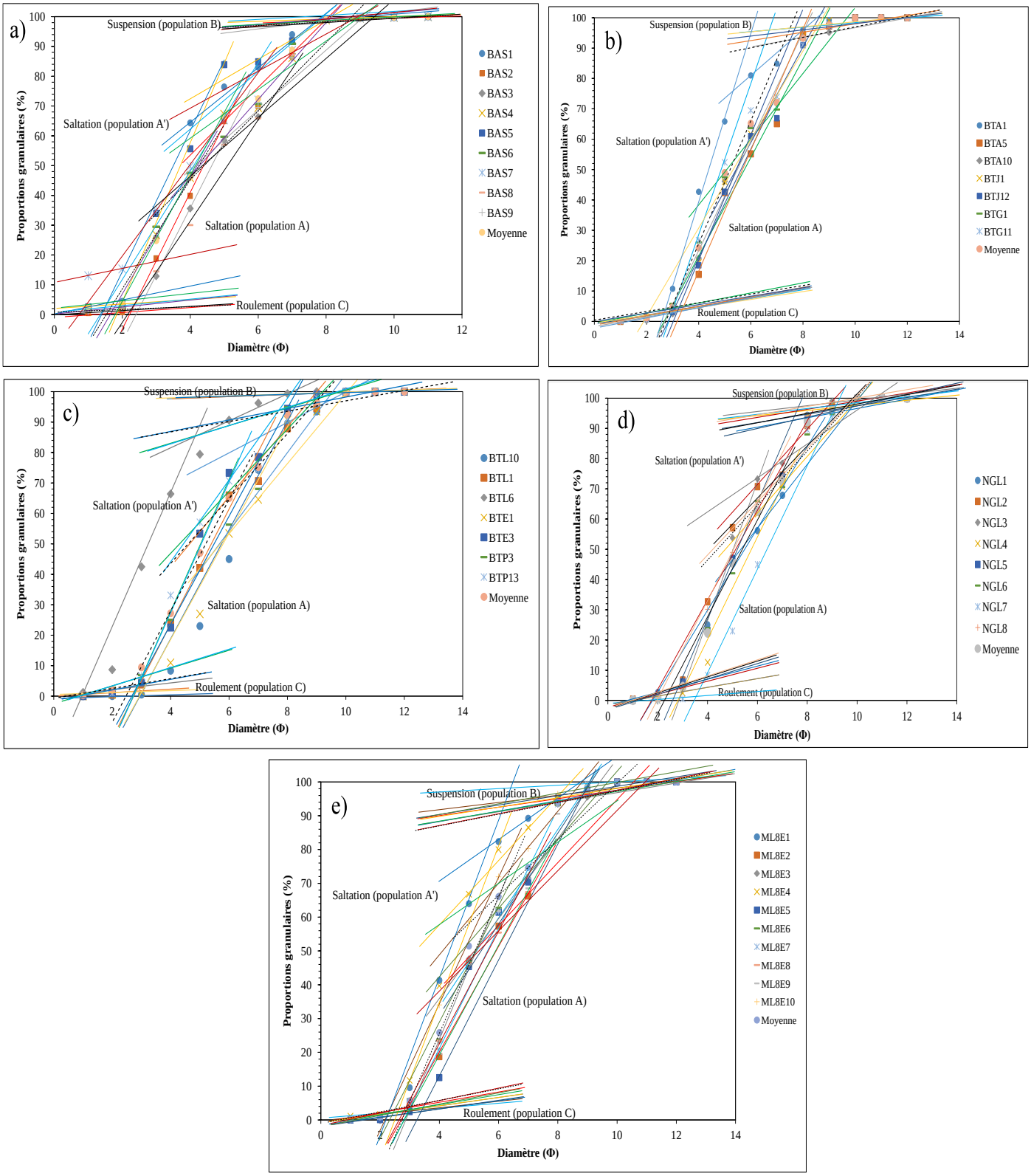


Figure 27. Différents modes de transport des sédiments des plages de Limbé. a) Bakinguili, b) Batoké, c) Limbola, d) Nguémé et e) Mile 8.

L'analyse du Tableau 17 et la Figure 27c des sédiments de la plage de Limbola montre que la saltation (population A et A') est prédominante. Elle présente des valeurs variant entre 88 et 99,6 %. La suspension (population B) varie entre 0,2 et 6 % ; et le roulement (population C) varie entre 0,2 et 6 %. Cette analyse quantitative montre également que la majorité des sédiments dans ce secteur se déplace par saltation. Toutefois, les transports par roulement et par suspension sont peu existants.

La caractérisation du type de transport dans les différentes classes granulométriques dans ce secteur montre que :

Le mode de transport des sables fins (2 – 3 Φ) est la saltation (94,64 % en moyenne du matériel fin). Le transport en suspension est le mode de transport des sables très fins (2,35 % en moyenne du matériel). Les sables moyens de taille comprise entre 1 et 2 Φ se déplacent essentiellement par roulement (ils représentent 3,01 % du matériel moyen).

L'analyse du Tableau 17 et la Figure 27d des sédiments de la plage de Nguémé montre que la saltation (population A et A') correspond au mode de transport le plus important, avec des proportions variant entre 89,62 et 97,88 %. La suspension (population B) présente des valeurs comprises entre 0,02 et 10,2 % ; et le roulement (population C) varie entre 1,98 et 3,5 %. Cette analyse quantitative montre que la majorité des sédiments dans ce secteur se déplace par saltation. Les transports par roulement et par suspension sont aussi peu existants dans ce secteur d'étude.

La caractérisation du type de transport dans les différentes classes granulométriques dans ce secteur montre que :

Le mode de transport des sables fins (2 – 3 Φ) est la saltation (93,81 % en moyenne du matériel fin). Le transport en suspension est le mode de transport des sables très fins (3,52 % du matériel). Les sables moyens de taille comprise entre 1 et 2 Φ se déplacent essentiellement par roulement (ils représentent 2,41 % du matériel moyen).

L'analyse du Tableau 17 et la Figure 27e des sédiments de la plage de Mile 8 montre que le transport fluviatile par saltation (population A et A') est très élevée dans ce secteur. Elle varie entre 90,8 et 98 %. La suspension (population B) varie entre 0,4 et 8,2 % et le roulement (population C) varie entre 1 et 4 %. Cette analyse quantitative montre que la majorité des sédiments se déplacent par saltation. Les transports par roulement et par suspension sont également présents.

La caractérisation du type de transport dans les différentes classes granulométriques dans ce secteur montre que :

Le mode de transport des sables fins (2 – 3 Φ) est la saltation (94,14 % en moyenne du matériel fin). Le transport en suspension est le mode de transport des sables très fins (3,31 % du matériel). Les sables moyens de taille comprise entre 1 et 2 Φ se déplacent essentiellement par roulement (ils représentent 2,55 % du matériel moyen).

IV.3. Morphoscopie des dépôts clastiques

Les différentes formes (Figure 28) des grains des sédiments des plages de Limbé ont été observées à la loupe binoculaire.

Le Tableau 18 présente les proportions des différentes formes des grains de sables des plages de Limbé. Cinquante (50) grains de sables ont été sélectionnés et observés pour chaque échantillon. Les grains appartenant aux mailles de tamis 0 à 1,25 Φ et 1,25 à 2 Φ ont été sélectionnés pour cette analyse.

L'analyse des histogrammes des proportions des différentes formes des grains de sables des plages de Limbé montre que :

A Bakinguili, les grains sub-anguleux et anguleux sont majoritaires dans les deux fractions (Figure 29a et b). On observe une prédominance des grains sub-anguleux aussi bien dans la fraction moyenne (0 à 1,25 Φ) que fine (1,25 à 2 Φ) dans tous les échantillons situés dans les zones proximales. Les grains anguleux sont très bien representés dans les échantillons BAS1 et BAS5 de la fraction fine. Les grains sub-arrondis et les grains arrondis sont en faible proportions dans tous les échantillons.

A Batoké, les grains sub-anguleux sont majoritaires dans les fractions 0 à 1,25 Φ (Figure 29c) et de 1,25 à 2 Φ (Figure 29d), suivis des anguleux. Les grains sub-arrondis sont peu représentés dans les deux fractions, excepté les échantillons BTJ1 et BTG11 dans lesquels ces grains sub-arrondis sont absents. Les grains arrondis, quant à eux, sont relativement mieux représentés que les grains sub-arrondis.

A Limbola, les grains sub-anguleux sont en grande proportion dans les deux fractions, suivis des grains anguleux donc la proportion est moyenne. Les grains sub-arrondis sont en très faibles quantités dans ce secteur (Figure 29e et f). Ces grains sont presque inexistants dans la majorité des échantillons aussi bien dans la fraction moyenne que fine. Les grains arrondis sont également en très faibles quantités et ne figurent que dans quelques échantillons.

Tableau 18. Inventaire des formes de grains des sables des plages de Limbé.

		Formes des grains					
Localités	**Echantillons**	**Fractions granulométriques (Φ)**	**Anguleuses**	**Sub-anguleuses**	**Sub-arrondies**	**Arrondies**	**Total**
	BAS1	0 à 1,25	14	28	6	2	50
		1,25 à 2	22	17	9	2	50
	BAS2	0 à 1,25	20	26	3	1	50
		1,25 à 2	19	27	4	0	50
	BAS3	0 à 1,25	16	31	2	1	50
		1,25 à 2	18	29	1	2	50
Bakinguili	BAS4	0 à 1,25	23	25	2	0	50
(n = 9)		1,25 à 2	19	30	0	1	50
	BAS5	0 à 1,25	12	24	10	4	50
		1,25 à 2	25	21	4	0	50
	BAS6	0 à 1,25	10	38	2	0	50
		1,25 à 2	15	31	3	1	50
	BAS7	0 à 1,25	12	28	8	2	50
		1,25 à 2	17	23	7	3	50
	BAS8	0 à 1,25	13	32	4	1	50
		1,25 à 2	11	34	5	0	50
	BAS9	0 à 1,25	21	27	0	2	50
		1,25 à 2	15	30	3	2	50
	BTA1	0 à 1,25	12	36	0	2	50
		1,25 à 2	15	34	1	0	50
	BTA5	0 à 1,25	16	26	4	4	50
		1,25 à 2	12	34	2	2	50
	BTA10	0 à 1,25	14	33	1	2	50
		1,25 à 2	15	35	0	0	50
Batoké	BTJ1	0 à 1,25	10	37	0	3	50
(n = 7)		1,25 à 2	16	33	0	1	50
	BTJ12	0 à 1,25	11	36	2	1	50
		1,25 à 2	23	21	1	5	50
	BTG1	0 à 1,25	11	34	1	4	50
		1,25 à 2	31	10	2	7	50
	BTG11	0 à 1,25	12	37	0	1	50
		1,25 à 2	10	38	0	2	50
	BTL10	0 à 1,25	13	32	2	3	50
		1,25 à 2	18	30	0	2	50
	BTL1	0 à 1,25	15	26	4	5	50
		1,25 à 2	18	28	2	2	50
	BTL6	0 à 1,25	14	33	1	2	50
		1,25 à 2	12	38	0	0	50
Limbola	BTE1	0 à 1,25	14	35	0	1	50
(n = 7)		1,25 à 2	16	31	1	2	50
	BTE3	0 à 1,25	20	30	0	0	50
		1,25 à 2	19	28	0	3	50
	BTP3	0 à 1,25	14	32	2	2	50
		1,25 à 2	13	34	1	2	50
	BTP13	0 à 1,25	12	36	0	2	50
		1,25 à 2	16	34	0	0	50
	NGL1	0 à 1,25	16	31	2	1	50
		1,25 à 2	14	35	1	0	50
	NGL2	0 à 1,25	17	29	3	1	50
		1,25 à 2	16	28	5	1	50
	NGL3	0 à 1,25	15	24	8	3	50
		1,25 à 2	13	32	2	3	50
Nguémé	NGL4	0 à 1,25	14	31	4	1	50
(n = 8)		1,25 à 2	12	37	1	0	50
	NGL5	0 à 1,25	18	28	3	1	50
		1,25 à 2	16	33	1	0	50
	NGL6	0 à 1,25	13	30	5	2	50
		1,25 à 2	21	27	0	2	50
	NGL7	0 à 1,25	12	37	1	0	50
		1,25 à 2	17	28	4	1	50
	NGL8	0 à 1,25	10	32	5	3	50
		1,25 à 2	23	27	0	0	50
	ML8E1	0 à 1,25	18	31	1	0	50
		1,25 à 2	16	34	0	0	50
	ML8E2	0 à 1,25	25	23	1	1	50
		1,25 à 2	17	28	3	2	50
	ML8E3	0 à 1,25	15	33	0	2	50
		1,25 à 2	22	25	2	1	50
	ML8E4	0 à 1,25	13	36	0	1	50
		1,25 à 2	14	30	4	2	50
Mile 8	ML8E5	0 à 1,25	16	31	2	1	50
(n = 10)		1,25 à 2	28	21	1	0	50
	ML8E6	0 à 1,25	18	30	0	2	50
		1,25 à 2	15	29	4	2	50
	ML8E7	0 à 1,25	12	35	2	1	50
		1,25 à 2	11	34	1	4	50
	ML8E8	0 à 1,25	14	32	3	1	50
		1,25 à 2	10	36	2	2	50
	ML8E9	0 à 1,25	17	26	5	2	50
		1,25 à 2	19	27	0	4	50
	ML8E10	0 à 1,25	13	33	3	1	50
		1,25 à 2	16	27	6	1	50

A Nguémé, on observe une prédominance des grains sub-anguleux dans la fraction moyenne et la fraction fine (Figure 29g et h), suivis des grains anguleux. Les grains sub-arrondis sont peu représentés dans la fraction moyenne (0 à 1,25 Φ), tandis qu'ils sont inexistants dans les échantillons NGL6 et NGL8 de la fraction fine (1,25 à 2 Φ). Les grains arrondis sont rarement représentés.

A Mile 8, les grains sub-anguleux ont un pourcentage importants dans la fraction moyenne et la fraction fine, suivis des grains anguleux. Les grains sub-arrondis sont en très faibles pourcentages et parfois inexistants dans les deux fractions de ce secteur (Figure 29i et j). Les grains arrondis sont aussi en très faibles pourcentages, et sont relativement moins représentés que les grains sub-arrondis dans ce secteur.

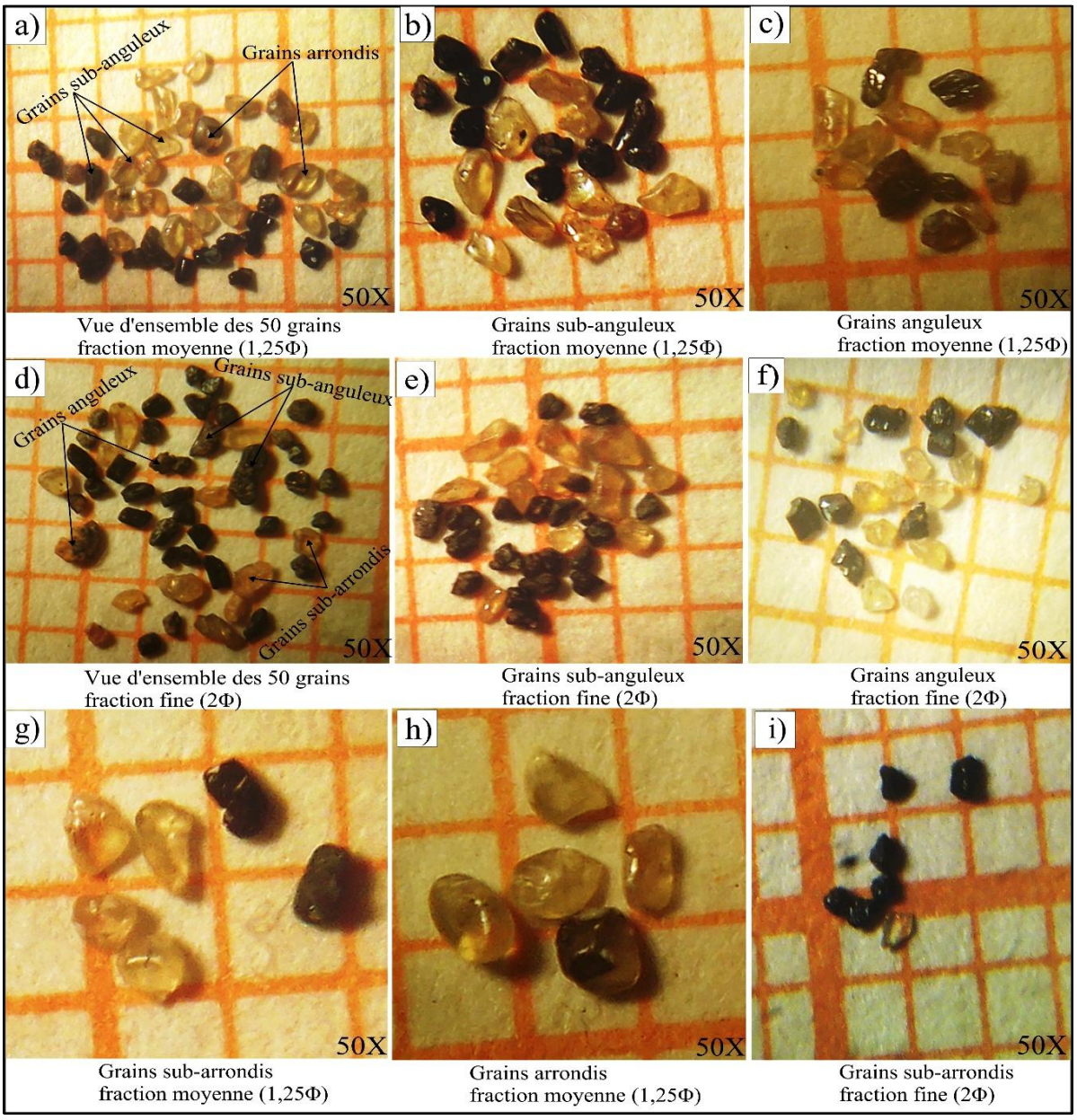


Figure 28. Illustrations des formes de grains observées à la loupe binoculaire.

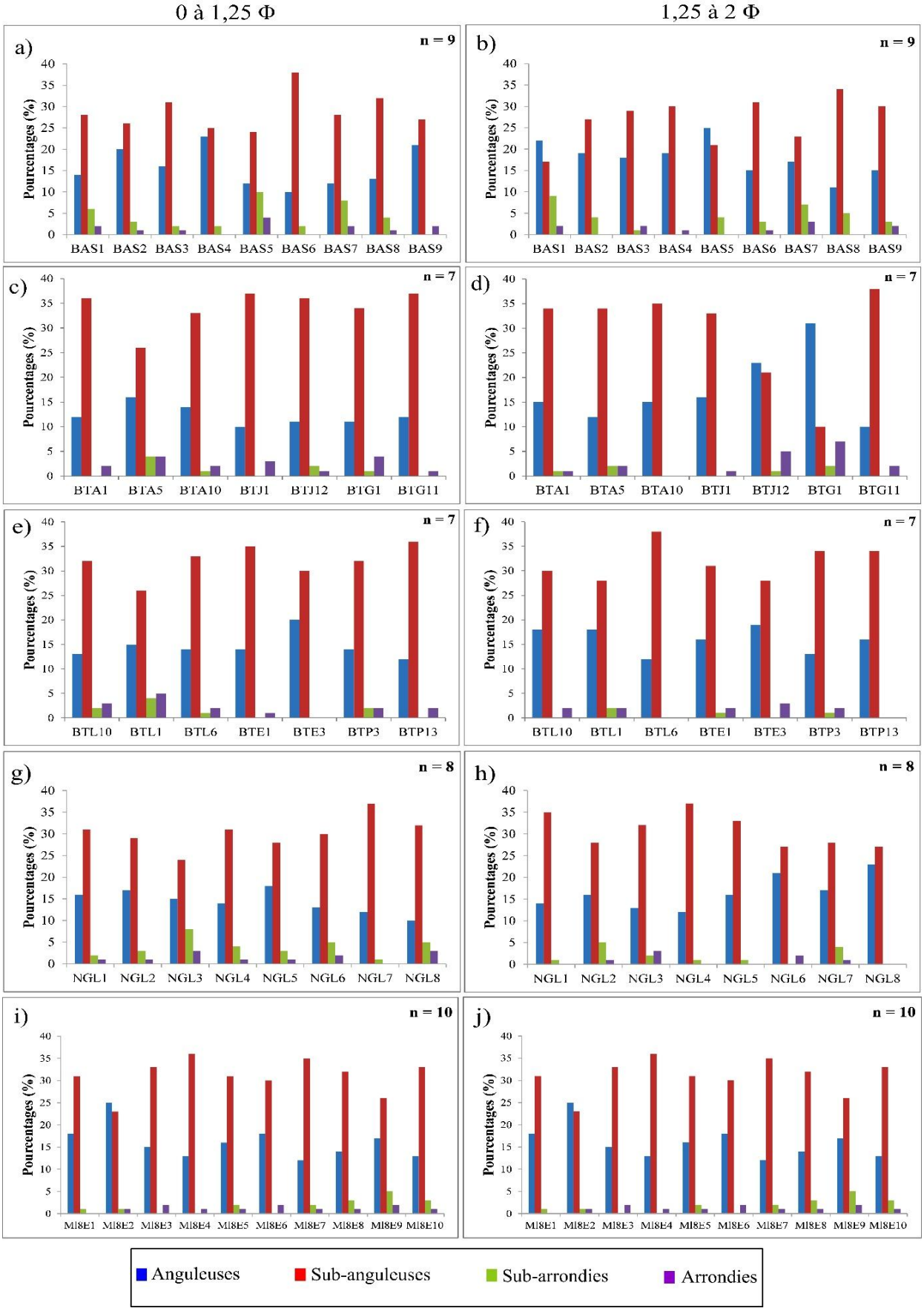


Figure 29. Histogrammes des formes d'usure des grains de sables des plages de Limbé. a) et b) Bakinguili ; c) et d) Batoké ; e) et f) Limbola ; g) et h) Nguémé ; i) et j) Mile 8.

IV.4. Pétrographie des sables

L'analyse de lames minces de sable et minéraux lourds des sédiments permet de déterminer à partir des minéraux caractéristiques leur source distributrice. Elle est basée sur l'observation microscopique des lames minces et la description détaillée des minéraux contenus dans les lames de différents échantillons. Parmi les minéraux observés au microscope optique, on distingue les minéraux tels que : le quartz poly et mono-crystallin, les feldspaths (feldspath potassique et plagioclase), les fragments lithiques notamment volcaniques, sédimentaires et plutoniques. Des minéraux lourds (translucides et opaques) ont été également observés.

IV.4.1. Description des lames minces de sables

L'observation des lames minces au microscope a permis d'identifier plusieurs minéraux tels que : le quartz (mono et polycristallin), les feldspaths (feldspath potassique et plagioclase), les fragments lithiques volcaniques, sédimentaires et plutoniques, les minéraux accessoires et opaques.

Quartz

Les grains de quartz sont les constituants détritiques les moins abondants des sédiments de la zone d'étude. Ceux monocristallins constitués, de grains uniques, sont relativement abondants : 15 à 25 % (Figure 30a-h). Les grains polycristallins constitués d'agrégats de cristaux, sont en très faible proportion : 1 à 3 % (Figure 30e, f). Les grains ont des formes anguleuses, sub-anguleuses, arrondies et sub-arrondies. Les cristaux de quartz montrent rarement les extinctions droites. La grande majorité des grains ont une extinction roulante.

Feldspaths

Les grains de feldspaths sont présents en moindre quantités (3 – 8 %) dans les sections minces. La plupart des grains de feldspaths sont des grains de feldspaths alcalins à macle simple de Carlsbad, représentant les grains d'orthose (Figure 30c, d). En LPNA, elle est incolore. En LPA, elle est faiblement colorée en rose ou jaune pâle, rose plus ou moins foncée, grise, verte. Les grains ont des formes plus ou moins arrondis. Les grains de plagioclase sont relativement moins abondants dans les sédiments observés (Figure 30g, h),

son caractère pétrographique distinctif habituel qui est la macle polysynthétique est reconnaissable.

Fragments lithiques

Les fragments lithiques les plus communs identifiés dans les sections minces sélectionnées des sables sont des fragments lithiques volcaniques (Figures 30a, b, g, h). Ils sont présents en quantité majoritaire comprise entre 43 et 54 % de la composition totale. Des fragments lithiques sédimentaires et plutoniques sont également identifiés dans les mêmes sections minces.

Minéraux accessoires et opaques

Les minéraux accessoires ont été identifiés dans les lames minces étudiées. Une quantité minoritaire (16 – 25 %) de ces minéraux accessoires comprennent des paillettes de biotite et muscovite, le zircon, l'épidote, la hornblende brune, le chloritoïde et les minéraux opaques

Les paillettes de biotite et de muscovite ont été identifiées grâce à leurs extinctions parallèles aux clivages et le pléochroïsme de la biotite (Figure 30a-f). La biotite se présente en paillette plus ou moins allongée présentant un débit lamellaire caractéristique. En LPA, la teinte apparaît sombre à brune parfois orangée et les contours sont peu nets. En LPNA, le minéral va du brun sombre au jaune lorsqu'on tourne la platine du microscope. Quelques inclusions non identifiées ont été observées. La biotite montre aussi parfois un pléochroïsme brun-vert. Les paillettes de muscovite montrent des teintes vives (bleu, vert et jaune) en LPA. Les paillettes de muscovite sont allongée et lamellaire comme les paillettes de biotite.

Le zircon montre des grains subarrondis à arrondis. Son relief est fort avec un pléochroïsme faible et une extinction droite.

Les grains d'épidote s'observent sous la forme subanguleuse à anguleuse, pléochroïque avec des teintes de polarisations incolore à vert jaunâtre.

La hornblende brune montre des formes anguleuses à subanguleuse. Elle présente des teintes de polarisation verte plus ou moins foncé à brune.

Le chloritoïde se rencontre en grains écailleux à contours arrondis, avec un pléochroïsme jaune verdâtre, bleu indigo, vert olive.

Les minéraux opaques sont dispersés dans la lame. Ils présentent des formes anguleuses, subarrondie à arrondie, avec une teinte de polarisation noire.

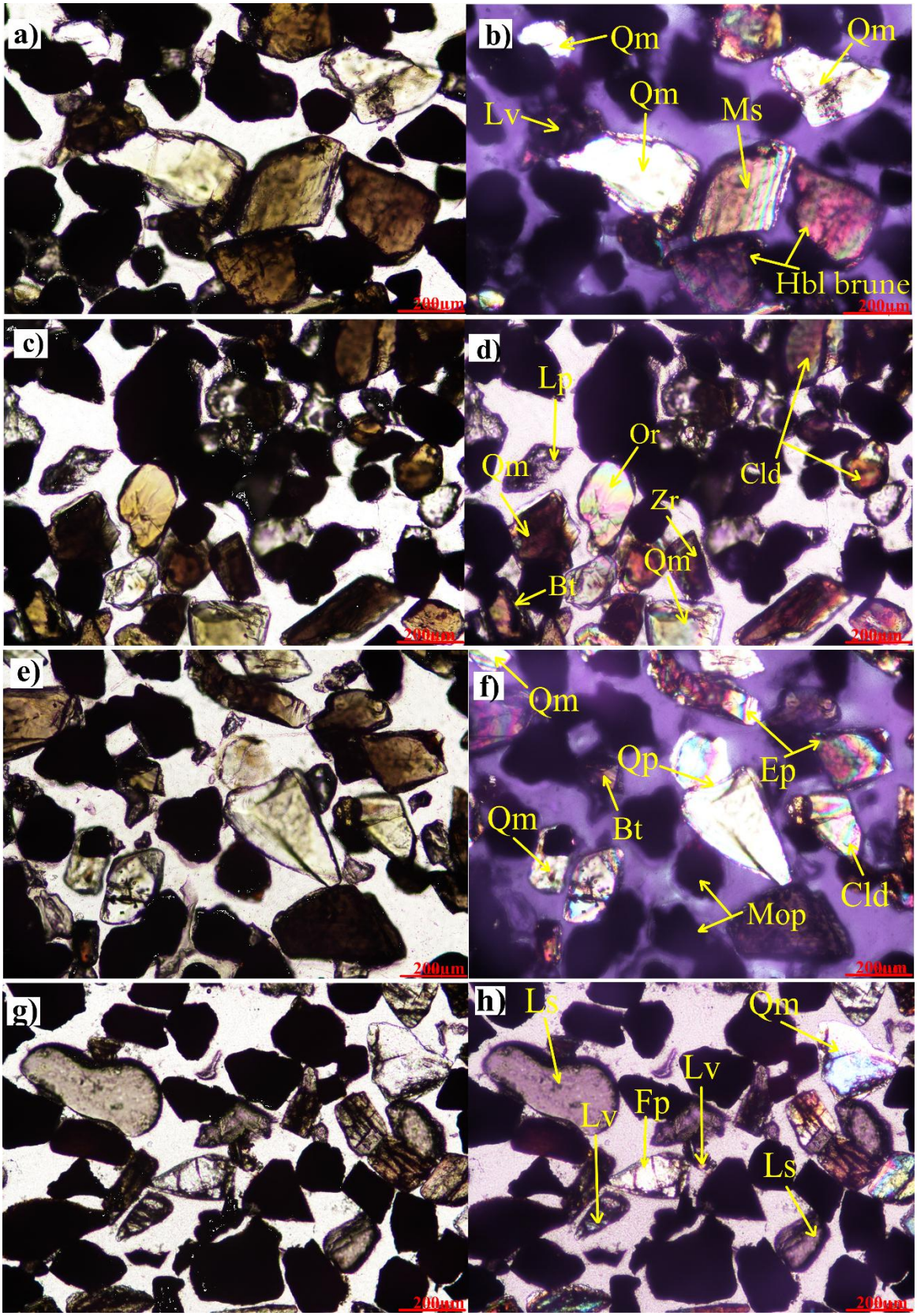


Figure 30. Minéraux observés en LPNA (a, c, e, g) et LPA (b, d, f, h) dans les lames minces des sédiments (Qm : quartz monocrristallin, Qp : quartz polycristallin, Ms : muscovite, Bt : biotite, Or : orthose, Fp : fedspath plagioclase, Lv : Lithique volcanique, Ls : Lithique sédimentaire, Lp : Lithique plutonique, Ep : épidote, Hbl Brune : hornblende brune, Cld : cloritoïde, Zr : zircon, Mop : minéraux opaques ; Whitney et Bernard, 2010).

IV.4.2. Etude des minéraux lourds

Cette étude est basée sur l'observation des lames minces au microscope et l'analyse des pourcentages des différentes espèces minérales. Elle permet d'identifier, à partir des minéraux caractéristiques, la source distributrice des sédiments.

IV.4.2.1. Etude descriptive des différentes espèces minérales.

L'observation des lames minces au microscope polarisant a mis en évidence l'existence des minéraux lourds dans les sédiments de plage, comme le diopside, l'enstatite, le zircon, l'actinote, le chloritoïde, l'augite, l'hypersthène, la muscovite, la biotite, l'épidote, les péridots, le sphène, la staurotide, l'apatite, la zoïsite, le rutile, la hornblende, et les minéraux opaques (Figure 31).

Le diopside (Clinopyroxène) apparaît sous forme anguleuse. En LPA (Figure 31a), il présente une extinction oblique. En LPNA, il est incolore à verdâtre avec un relief fort (Figure 31a').

L'enstatite (orthopyroxène) est majoritairement sous la forme anguleuse et rarement sub-anguleuse à sub-arrondie. En LPA, elle présente des couleurs variables allant du gris verdâtre au vert olive (Figure 31b). En LPNA, ce minéral lourd est incolore à brun (Figure 31b'). Il existe quelques craquelures visibles sur ce minéral.

Le zircon est généralement subanguleux à subarrondis dans leur section longitudinale. En LPA, il existe des couleurs verte et rose violacée autour du minéral, avec une extinction droite (Figure 31c). En LPNA, il apparaît incolore avec un relief fort (Figure 31c').

L'actinote se présente sous forme de prismes allongés dans leur section longitudinale. Elle est anguleuse à subanguleuse. En LPA, elle apparaît sous des couleurs vert brillant à vert jaunâtre (Figure 31d). En LPNA, elle est incolore, avec un relief moyen (Figure 31d').

Le chloritoïde apparaît sous formes de paillettes anguleuses. En LPA, elle est pléochroïque dans les couleurs bleu indigo, jaune verdâtre et vert olive, avec un relief fort (Figure 31e). Il apparaît rarement en cristaux aux contours arrondis dans certains échantillons étudiés. En LPNA, il est sombre avec un relief assez faible (Figure 31e').

L'augite se présente sous forme anguleuse très abondant. En LPA (Figure 31f) elle apparaît aux couleurs bruns, vert, avec un relief faible. En LPNA (Figure 31f'), ce minéral est sombre, avec un relief faible.

L’hypersthène s’observe en prisme anguleuse, son relief est fort. En LPA (Figure 31g), le minéral est de couleur jaune rougeâtre à fort relief. En LPNA (Figure 31g’), elle est de couleur sombre avec un relief faible.

La muscovite présente des formes anguleuses à très anguleuses, parfois pointues. En LPA (Figure 31h), elle est visible dans les colorations grises et brun, avec quelques bandes verdâtres. En LPNA (Figure 31h’), elle est incolore à fort relief.

La biotite se présente en cristaux sous forme de lamelles anguleuses à subanguleuses. En LPA (Figure 31i), elle apparaît en couleur vert foncé alternant aux colorations roses. En LPNA, elle est de couleur brun foncée, avec un relief moyen (Figure 31i’).

L’épidote s’observe sous la forme généralement ovoïde. En LPA (Figue 31j), elle est de couleur vert jaunâtre à jaune. En LPNA, elle est de couleur brune (Figure 31j’).

Les péridots se présentent sous forme allongé et applati dans leur section longitudinale. Ils sont généralement anguleux. En LPA, ils apparaîssent aux colorations jaune verdâtre à vert olive (Figure 31k). En LPNA, ils sont bruns, avec un relief assez fort (Figure 31k’).

Le sphène apparaît habituellement sous forme des grains allongés avec des macles et des contours sub-arrondis. En LPA, il présente une couleur jaune (Figure 31l). En LPNA, ce minéral est brun avec un relief fort (Figure 31l’).

La staurotide se présente sous forme de grains cassés et irréguler. Elle est généralement anguleuse. En LPA (Figure 31m), elle présente une couleur jaune pâle à fort relief. En LPNA (Figure 31m’), elle est faiblement brun avec un relief faible à moyen.

L’apatite est un minéral rare dans les sédiments étudiés. Elle se présente sous des formes cristallines généralement anguleuses. En LPA (Figure 31n), elle est faiblement jaune non pléochroïque, avec une extinction droite. En LPNA, elle est incolore, avec un relief faible (Figure 31n’).

La zoïsite est un minéral sous forme prismatique, plus ou moins allongé. Elle est un peu rare dans les sédiments étudiés. Elle s’observe sous forme sub-anguleuse. En LPA (Figure 31o), elle est brune à brun jaunâtre. En LPNA (Figure 31o’), elle est incolore à relief très faible.

Le rutile apparaît sous de diverses formes, soit en grains plus ou moins allongés, soit en grains arrondis à sub-arrondis, avec des macles en cœur. En LPA (Figure 31p), le minéral est brun rougeâtre à brun jaunâtre. En LPNA (Figure 31p’), il apparaît aux couleurs bruns rougeâtre très sombre, avec un relief très fort.

La hornblende est sous forme de prisme allongé. Elle est variablement sub-anguleuse à sub-arrondie. En LPA (Figure 31q), elle présente une couleur brune à brun verdâtre pléochroïque. En LPNA (Figure 31q'), elle est de couleur brun sombre, avec un relief moyen.

Les minéraux opaques sont de couleur noire non pléochroïque en LPA et LPNA (Figure 31r). Ils présentent des formes variables, anguleuses à sub-anguleuses, arrondies à sub-arrondis.

IV.4.2.2. Etude analytique des minéraux lourds

L'étude du cortège minéralogique des sédiments de la plage de Limbé a permis de distinguer plusieurs types de minéraux lourds. Les décomptes microscopiques et l'évaluation des concentrations ont mis en évidence leur abondance variable représentés dans le Tableau 19 et sous forme de diagrammes circulaires de la Figure 32. Dans tous les sédiments de plage étudiés, les minéraux opaques sont très abondants d'une proportion qui varie entre 17 et 65 %.

A Bakinguili, l'augite et l'enstatite présentent des proportions élevées dans les sédiments. Ces proportions varient entre 21 et 29 % pour l'augite, 13 et 15 % pour l'enstatite. Les péridots, l'actinote, le diopside, l'épidote, le chloritoïde et la hornblende sont en concentration variablement élevé (2 – 5 %). Les autres minéraux tels que la muscovite, la biotite, le zircon, la zoïsite, l'apatite, l'hypersthène, le sphène, le rutile se trouvent en faible concentration, voire en traces. Hubert (1962) montre que, lorsque le pourcentage des minéraux ultrastables Zircon-Tourmaline-Rutile (ZTR) est < 75 %, celà implique que les sédiments sont immatures à sub-matures, lorsque ce pourcentage est > 75 %, il indique des sédiments bien matures. Dans ce secteur, le ZTR varie entre 1,45 et 4,48 % indiquant que les sédiments de la plage de Bakinguili sont immatures.

Les sédiments des plages de Batoké présentent aussi de très fortes proportions en augite (39 – 47 %) et en enstatite (7 – 16 %). La hornblende brune et les péridots sont variablement élévées (1 – 4 %) dans la composition minéralogique de ces sédiments. Les autres minéraux lourds comme le diopside, le zircon, l'apatite et la staurotide sont en faibles teneurs comprises entre 1 et 3 %. La zoïsite, l'hypersthène, le sphène, l'actinote, la muscovite, la biotite, le rutile, l'épidote, le chloritoïde sont en très faibles proportions, et absents dans la majorité des échantillons. Le ZTR varie entre 1,25 et 3,28 % indiquant également des sédiments immatures.

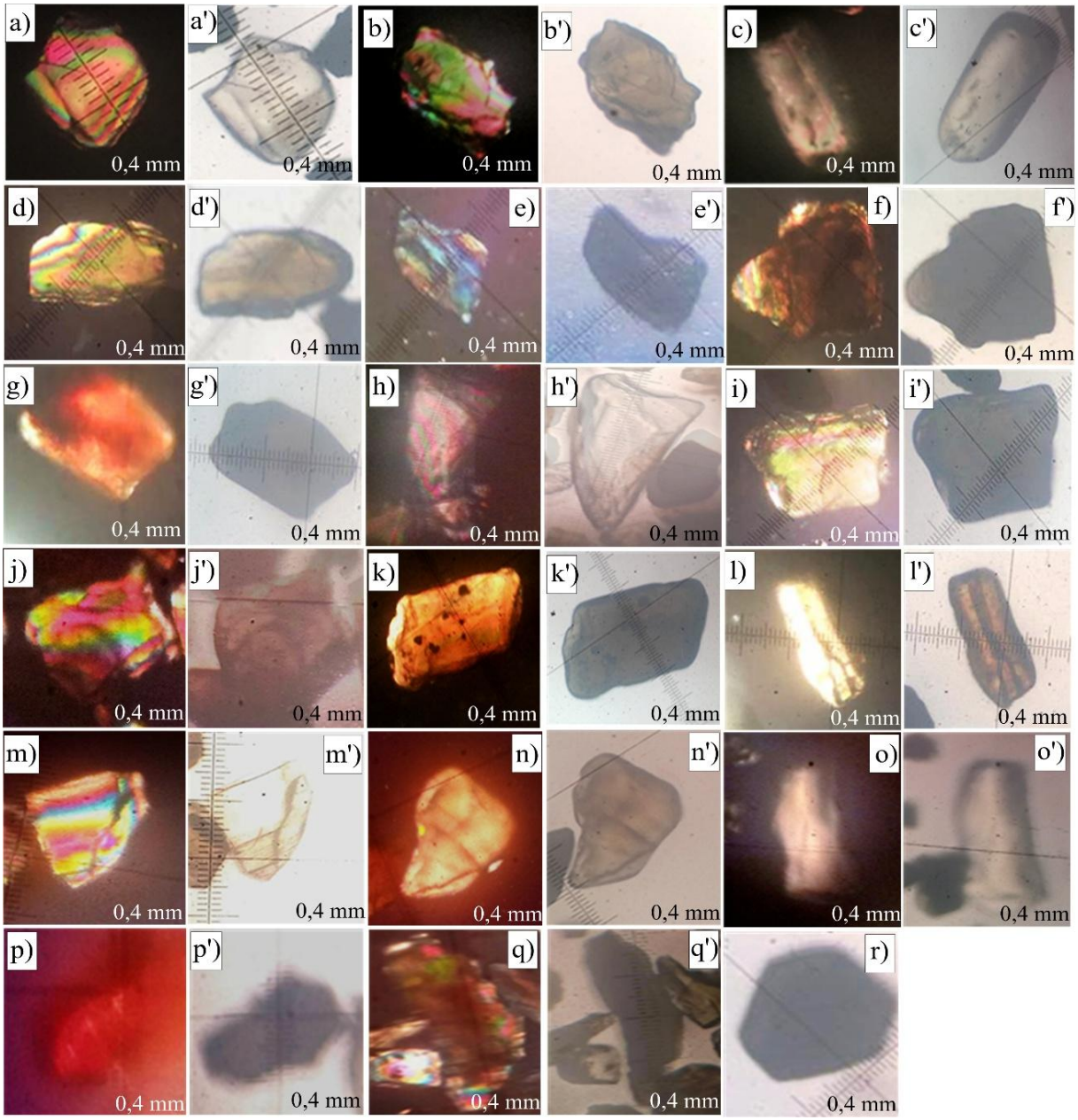


Figure 31. Minéraux lourds répertoriés dans les sédiments des plages de Limbé. a) diopside en LPA ; a') diopside en LPNA ; b) enstatite en LPA ; b') enstatite en LPNA ; c) zircon en LPA ; c') zircon en LPNA ; d) actinote en LPA ; d') actinote en LPNA ; e) chloritoïde en LPA ; e') chloritoïde en LPNA ; f) augite en LPA ; f') augite en LPNA ; g) hypersthène en LPA ; g') hypersthène en LPNA ; h) muscovite en LPA ; h') muscovite en LPNA ; i) biotite en LPA ; i') biotite en LPNA ; j) épidote en LPA ; j') épidote en LPNA ; k) péridots en LPA ; k') péridots en LPNA ; l) sphène en LPA ; l') sphène en LPNA ; m) staurotide en LPA ; m') staurotide en LPNA ; n) apatite en LPA ; n') apatite en LPNA ; o) zoïsite en LPA ; o') zoïsite en LPNA ; p) rutile en LPA ; p') rutile en LPNA ; q) hornblende en LPA ; q') hornblende en LPNA ; r) minéral opaque en LPA et LPNA.

Sur les plages de Limbola, les sédiments contiennent en abondance variablement élévée en enstatite (16 – 19 %). L'augite se trouve en concentration élévée dans les échantillons BTL1 (40 %) et BTL10 (32 %) par rapport à l'échantillon BTP13 (20 %), en teneur assez élevée. Les péridots, le diopside, le chloritoïde, la biotite, la muscovite, la hornblende brune en teneur variablement élévé compris entre 1 et 7 %. Les minéraux tels que l'apatite, le zircon, l'hypersthène, le sphène, la zoïsite, le rutile, l'actinote et l'épidote se trouvent en très faible concentrations. Le ZTR est compris entre 1,41 et 4 % indiquant aussi des sédiments immatures.

Les sédiments des plages de Nguémé possèdent de très fortes concentrations en augite (23 – 32 %) et en enstatite (14 – 18 %). Les péridots, la muscovite, la zoïsite sont en teneur assez élevée, respectivement compris entre 3 et 6 %, 1 et 2 %, 1 et 2 %. La hornblende brune, le zircon, l'hypersthène et le sphène sont absents dans tous les échantillons. Les autres minéraux comme la biotite, l'apatite, le diopside, la staurotide, le rutile, le chloritoïde, l'épidote et l'actinote apparaîssent en très faible téneur dans les échantillons. Le ZTR varie entre 1,54 et 1,69 %, ce qui traduit une immaturité des sédiments de la plage de Nguémé.

Les sédiments de plage de Mile 8, présentent de très faibles concentrations en enstatite, augite et péridots par rapport aux autres sites de plages. La biotite, la hornblende brune, la muscovite, le diopside, l'hypersthène, la staurotide et l'actinote sont en faibles teneurs variant entre 1 et 4 %. Les minéraux opaques sont très concentrés dans ces sédiments (45 – 65 %). L'apatite et le sphène, sont absents dans les échantillons étudiés. Le zircon, la zoïsite, le rutile, l'épidote et le chloritoïde sont en très faibles proportions, voire en traces. Le ZTR varie entre 1,82 et 5,71 %, ce qui indique également une immaturité des sédiments de la plage Mile 8.

IV.5. Analyses modales

Le Tableau 20 présente la nature et les proportions des éléments figurés des sédiments de la plage de Limbé. L'observation des lames minces au microscope optique a permis d'identifier des forts pourcentages en fragments de roches volcaniques (43 – 54 %), une répartition moyenne en quartz (18 – 28 %), une proportion des minéraux lourds comprisent entre 15 et 24,9 %, un faible pourcentage en feldspath alcalin et plagioclase et des traces de fragments de roches plutoniques, sédimentaires et surtout métamorphiques.

Tableau 19. Pourcentage (%) des minéraux lourds des sédiments des plages de Limbé

Secteurs	**Bakinguili (n = 2)**			**Batoké (n = 5)**						**Limbola (n = 3)**				**Nguémé (n = 3)**				**Mile 8 (n = 2)**		
Echs	**BAS1**	**BAS9**	**Moy.**	**BTA10**	**BTJ1**	**BTJ12**	**BTG1**	**BTG11**	**Moy.**	**BTL10**	**BTL1**	**BTP13**	**Moy.**	**NGL1**	**NGL5**	**NGL8**	**Moy.**	**ML8E1**	**ML8E10**	**Moy.**
Zoïsite	-	1	0,5	1	1	-	1	-	0,6	-	-	1	0,33	1	1	2	1,3	1	-	0,5
Augite	29	21	25	45	39	46	35	47	42,4	32	40	20	30,7	30	23	32	28,3	12	9	10,5
Diopside	3	2	2,5	1	2	1	1	1	1,2	1	-	4	1,7	-	1	1	0,7	1	2	1,5
Enstatite	13	15	14	14	10	16	7	13	12	19	17	16	17,3	14	18	15	15,7	9	6	7,5
Péridots	4	5	4,5	3	2	3	2	4	2,8	4	3	7	4,7	6	3	3	4	8	3	5,5
Apatite	1	2	1,5	2	1	1	-	1	1	-	2	-	0,7	-	1	-	0,3	-	-	-
Zircon	0	1	0,5	1	1	2	1	1	1,2	1	1	-	0,7	-	-	-	-	-	1	0,5
Hornblende	2	4	3	2	1	3	2	4	2,4	2	1	4	2,3	-	-	-	-	2	1	1,5
Actinote	1	2	1,5	1	-	-	-	-	0,2	-	-	2	0,7	-	1	2	1	3	1	2
Hypersthène	1	1	1	-	-	-	-	-	-	1	-	-	0,3	-	-	-	-	1	2	1,5
Muscovite	3	4	3,5	-	1	-	-	-	0,2	1	1	3	1,7	2	1	1	1,3	3	2	2,5
Biotite	2	1	1,5	1	-	1	-	1	0,6	1	2	3	2	1	-	-	0,3	4	1	2,5
Staurotide	1	-	0,5	-	1	1	3	1	1,2	-	1	1	0,7	1	1	1	1	2	1	1,5
Rutile	1	2	1,5	1	-	-	1	-	0,4	-	2	1	1	1	1	-	0,7	1	1	1
Epidote	3	-	1,5	-	-	-	-	1	0,2	1	-	1	0,7	2	-	-	0,7	1	-	0,5
Sphène	-	-	-	-	-	-	1	-	0,2	-	-	1	0,3	-	-	-	-	-	-	-
Chloritoïde	2	1	1,5	1	-	1	-	-	0,4	1	1	3	1,6	1	1	2	1,3	1	-	0,5
Minéraux opaques	31	33	32	20	35	17	39	20	26,2	34	25	29	29,3	35	41	36	37,3	45	65	55
Minéraux indéterminés	3	5	4	7	6	8	7	6	6,8	2	4	4	3,3	6	7	5	6	6	5	5,5
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
% ZTR	1,45	4,48	2,5	2,25	1,54	2,41	3,28	1,25	2,17	1,52	4	1,41	2,34	1,54	1,69	-	1,06	1,82	5,71	3,3

Moy. moyenne, n = nombre total des échantillons, Echs = Ehantillons, % ZTR (Zircon-Tourmaline-Rutile) = (Z + T + R)*100/total des minéraux non opaques.

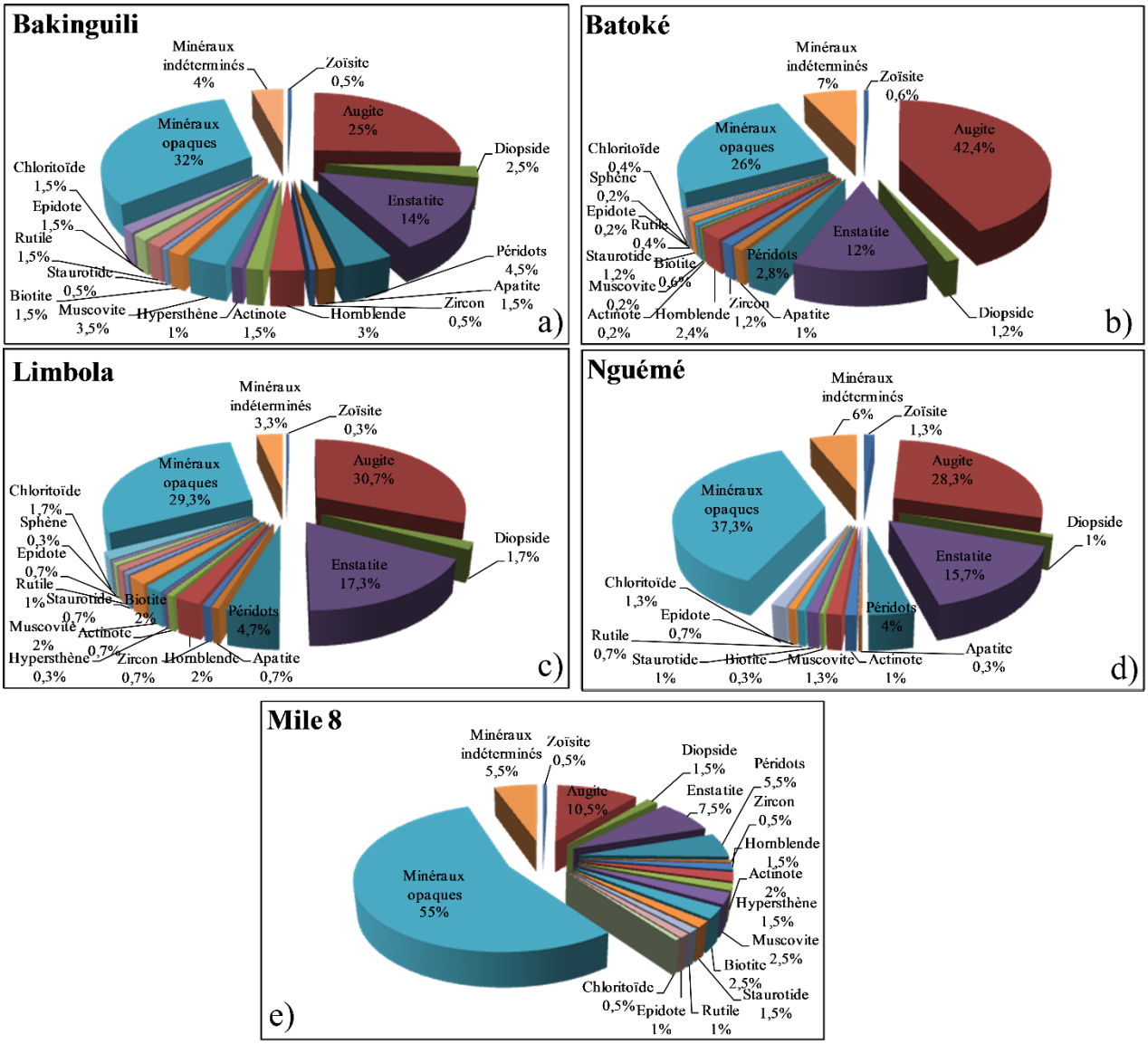


Figure 32. Diagrammes circulaires des assemblages de minéraux lourds des sédiments de plages de Limbé : Moyenne des échantillons de la plage de Bakinguili (a), plage de Batoké (b), plage de Limbola (c), .plage de Nguémé (d) et plage de Mile 8 (e).

Tableau 20. Proportions de quartz, feldspaths et fragments lithiques dans les sédiments des plages de Limbé

Secteurs	Bakinguili (n = 2)		Batoké (n = 2)		Limbola (n = 2)		Nguémé (n = 2)		Mile 8 (n = 2)	
Echs	**BAS1**	**BAS9**	**BTA10**	**BTJ1**	**BTL1**	**BTL10**	**NGL1**	**NGL8**	**ML8E1**	**ML8E10**
Qm	16	20	25	15	20	25	18	23	19	26
Qp	2	2	2	2	1	1	2	2	1	2
Qt	18	22	27	17	21	26	20	25	20	28
Fk	3	4	5	2	6	5	4	3	5	3
Fp	2	1	0	1	2	1	2	1	2	0
Ft	5	5	5	3	8	6	6	4	7	3
Lv	52	50	50	54	47	43	49	48	50	53
Ls	0,8	1	1,6	1	0,7	0,9	0,7	1,8	0,8	0,9
Lp	0,2	0,3	0,4	0,1	0,3	0,1	0,3	0,2	0,2	0,1
Lm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lt	53	51,3	52	55,1	48	44	50	50	51	54
Ml	24	21,7	16	24,9	23	24	24	21	22	15
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Qp/Ft+Lt	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,04	0,04	0,02	0,04
Qp+Qm/Ft+Lt	0,31	0,43	0,47	0,29	0,38	0,52	0,36	0,46	0,34	0,49

Qm : Quartz monocristallin ; Qp : Quartz polycristallin ; Qt : Total des Quartz ; Fk : Fedspath alcalin ; Fp : Feldspath plagioclase ; Ft : Total des Feldspaths ; Lv : Fragment de roche volcanique ; Ls : Fragment de roche sédimentaire ; Lp : Fragment de roche plutonique ; Lm : Fragment de roche métamorphique ; Lt : Total des fragments de roche ; Ml : Minéraux lourds.

Conclusion

Dans ce chapitre, il était question de décrire du point de vue lithologique les sédiments de plage de Limbé, et présenter leurs données granulométriques, morphoscopiques, compositions en minéraux lourds et modales. Il ressort que les sédiments étudiés sont des sables fins. Les analyses granulométriques ont révelé que la majorité des sédiments de la plage de Limbé sont bien triés et bien classés. Les courbes semi-logarithmiques montrent une forme générale en « S ». Les histogrammes et courbes de fréquences indiquent une répartition bimodale dans la majorité des sédiments. L'analyse corrélative des paramètres granulométriques a révelé une corrélation positive d'une part entre le mode et la moyenne (r = 0,226), la médiane et la moyenne (r = 0,818) et d'autre part, une corrélation négative entre le sorting index et le skewness (r = - 0,084), le sorting index et la médiane (r = -0,089), le sorting index et la moyenne (r = - 0,280). L'observation morphoscopique des grains de sables à la loupe binoculaire présente quatre formes de grains de sable : anguleuses, sub-anguleuses, sub-arrondies et arrondies. L'étude des lames minces de minéraux lourds a révelé la présence des minéraux tels que le diopside, l'enstatite, le zircon, l'actinote, le chloritoïde, l'augite, l'hypersthène, la muscovite, la biotite, l'épidote, les péridots, le sphène, la staurotide, l'apatite, la zoïsite, le rutile, la hornblende brune et les minéraux opaques. Les analyses modales montrent que les sédiments sont très concentrés en fragments de roches volcaniques (43 – 54 %), moyenne en quartz (18 – 28 %) et faible (15 – 24,9 %) en d'autres minéraux constitutifs.

CHAPITRE V : MINÉRALOGIE ET GÉOCHIMIE DES DÉPÔTS CLASTIQUES

« Une fois que nous acceptons nos limites, nous les dépassons ».

-Albert Einstein-

Introduction

Ce chapitre traite de la minéralogie des sédiments des plages de Limbé et de la chimie des minéraux constitutifs. Il présente aussi des concentrations et la répartition en éléments géochimiques contenus dans ces dépôts clastiques de plage d'étude et de leur impact environnemental.

V.1. Minéralogie des dépôts clastiques

Les analyses minéralogiques par diffraction aux rayons X (DRX) et par microsonde éléctronique (EPMA) ont abouti à la détermination des compositions minéralogiques DRX et chimiques des minéraux constitutifs des sédiments de plage de Limbé.

V.1.1. Compositions minéralogiques aux rayons X

A Bakinguili, l'analyse des diffractogrammes DRX (Figure 33a) des échantillons prélevés montre qu'ils sont composés des minéraux, comme le quartz, l'olivine, les feldspaths, l'augite, les autres pyroxènes, la muscovite, le rutile, la biotite, l'illite, la kaolinite, l'hématite et l'ilménite (Tableau 21). On observe une forte proportion en olivine (21,79 – 22,31 %), des pourcentages moyens en quartz (14,85 – 16,9 %), hématite (13,35 – 14,27 %), augite (9,52 – 11,22 %) et en autres pyroxènes (12,83 – 13,04 %). Les minéraux argileux, tels que la kaolinite et l'illite, sont représentés dans tous les échantillons. Leurs proportions varient entre 4,87 et 8,94 %. Tandis que le rutile, les feldspaths, la muscovite, la biotite et l'amphibole sont peu abondants avec des proportions comprises entre 1,2 et 3,02 %. L'Ilménite et la calcite sont en traces dans ces sédiments clastiques du secteur.

A Batoké, les résultats d'analyses minéralogiques par diffractométrie des rayons X effectuées sur les échantillons BTA10, BTJ1, BTG1 et BTG11 révèlent que l'olivine est très abondante dans tous les échantillons (Figure 33b, Tableau 21). Les proportions sont comprises entre 20,89 et 25,82 %. Les minéraux comme le quartz, l'hématite, le pyroxène et l'augite sont aussi abondants dans les mêmes échantillons. Les minéraux argileux (illite et kaolinite), quant-à eux sont représentés avec des proportions comprises entre (10,18 – 14,69 %) et (8,65 – 10,85 %), respectivement. Les feldspaths, la biotite, l'ilménite et l'amphibole sont peu abondants. Leurs proportions varient entre 1,34 et 4,89 %.

A Limbola, l'analyse minéralogique par diffractométrie des rayons X révèle que l'olivine a des fortes teneurs variant entre 22,75 et 26,59 % (Figure 33c, Tableau 21). Le quartz, l'hématite, le pyroxène et l'augite sont abondants sur le site avec des teneurs

comprises entre 7,40 et 17,46 % (Tableau 21). Les minéraux argileux présents sont la kaolinite (6,11 – 9,52 %) et l'illite (10,26 – 14,61 %). Les feldspaths, la muscovite, l'ilménite, la biotite, le rutile et l'amphibole apparaissent peu abondants. Ils représentent en moyenne 2,34 % ; 0,50 % ; 1,29 % ; 2,49 % ; 1,10 % et 1,49 % respectivement.

A Nguémé, les résultats d'analyses minéralogiques par diffractométrie des rayons X montrent une forte concentration en olivine dans les échantillons NGL1et NGL8 (21,65 – 22,25 %). Le quartz, l'hématite, le pyroxène et l'augite sont abondants dans ce secteur (Figure 33d, Tableau 21). Leurs concentrations varient entre 9,01 et 17,85 %. Les minéraux argileux sont présents (kaolinite : 2,85 – 3,05 % ; illite : 8,38 – 8,43 %). Les feldspaths, la muscovite, la biotite, l'ilménite, le rutile, l'amphibole et la calcite sont peu abondants. Leurs concentrations sont comprises entre 1,17 et 3,14 %.

A Mile 8, l'analyse par diffractométrie des rayons X des échantillons (Figure 33e ; Tableau 21) révèle également une très forte concentration en olivine (20,66 – 21,52 %), des concentations moyennes en quartz (16,41 – 17,75 %), hématite (12,64 – 13,25 %), pyroxène (12,05 – 12,48 %) et augite (11,63 – 12,23 %). Les minéraux argileux présents sont la kaolinite (2,11 – 4,1 %) et l'illite (9,2 – 11,04 %). Les feldspaths, la muscovite, la biotite, l'ilménite et l'amphibole présentent de faibles concentrations dans les échantillons. Leurs concentrations varient entre 1,05 et 3,49 %.

Tableau 21. Composition minéralogique (semi quantitative) des sédiments des plages de Limbé

Localisation	**Bakinguili (n = 2)**		**Batoké (n = 4)**				**Limbola (n =3)**			**Nguémé (n = 2)**		**Mile 8 (n = 2)**	
Echs	**BAS1**	**BAS9**	**BTA10**	**BTJ1**	**BTG1**	**BTG11**	**BTL10**	**BTL1**	**BTP13**	**NGL1**	**NGL8**	**ML8E1**	**ML8E10**
Quartz	16,9	14,85	15,39	16,35	15,97	14,39	17,24	16,27	17,46	17,85	15,75	17,75	16,41
Olivine	21,79	22,31	23,42	24,28	20,89	25,82	22,75	25,96	26,59	21,65	22,25	20,66	21,52
Pyroxène	12,83	13,04	9,06	7,73	9,14	7,48	8,89	7,62	7,4	9,43	10,12	12,48	12,05
Augite	9,52	11,22	8,8	6,97	10,31	6,81	8,06	8,75	9,02	12,97	14,72	11,63	12,23
Hématite	13,35	14,27	14,09	11,44	13,73	11,54	12,49	8,76	9,07	11,26	9,01	13,25	12,64
Illite	8,94	8,08	10,18	12,35	12,2	14,69	14,61	14,23	10,26	8,43	8,38	9,27	10,52
Kaolinite	5,07	4,87	9,14	9,62	10,85	8,65	6,11	9,47	9,52	2,85	3,05	4,1	2,11
K-Feldspaths	2,01	1,95	2,41	3,57	-	4,89	3,53	1,53	1,97	4,33	3,14	1,59	1,61
Plagioclase	-	-	-	-	-	-	1,79	-	-	1,67	1,38	-	-
Muscovite	2,45	1,39	-	-	-	-	-	-	1,51	2,01	3,14	2,33	3,49
Biotite	2,13	2,51	2,04	4,17	2,24	2,6	3,38	1,97	2,13	1,49	2,57	2,41	2,94
Rutile	1,25	1,34	-	-	-	-	-	2,05	1,26	1,17	1,29	1,12	1,05
Ilménite	1,12	1,15	4,11	1,88	2,8	1,34	-	2,2	1,67	1,7	1,61	1,07	1,15
Amphibole	2,64	3,02	1,36	1,63	1,87	1,89	1,15	1,19	2,14	1,84	2,38	2,34	2,28
Calcite	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,21	-	-

Ainsi, le cortège minéralogique présent dans les sédiments des plages de Limbé montre un enrichissement des minéraux ferromagnésiens. Dans l'ensemble, l'olivine est majoritaire (20,66 – 26,59 %), suivi du quartz (14,39 – 17,85 %), l'hématite (9,01 – 14,27 %), les pyroxènes (7,4 – à 13,04 %), l'augite (6,97 à 14,72 %) et des minéraux argileux (2,11 – 14,69 %). Les feldspaths, les micas, l'amphibole, la calcite et l'ilménite sont peu représentés.

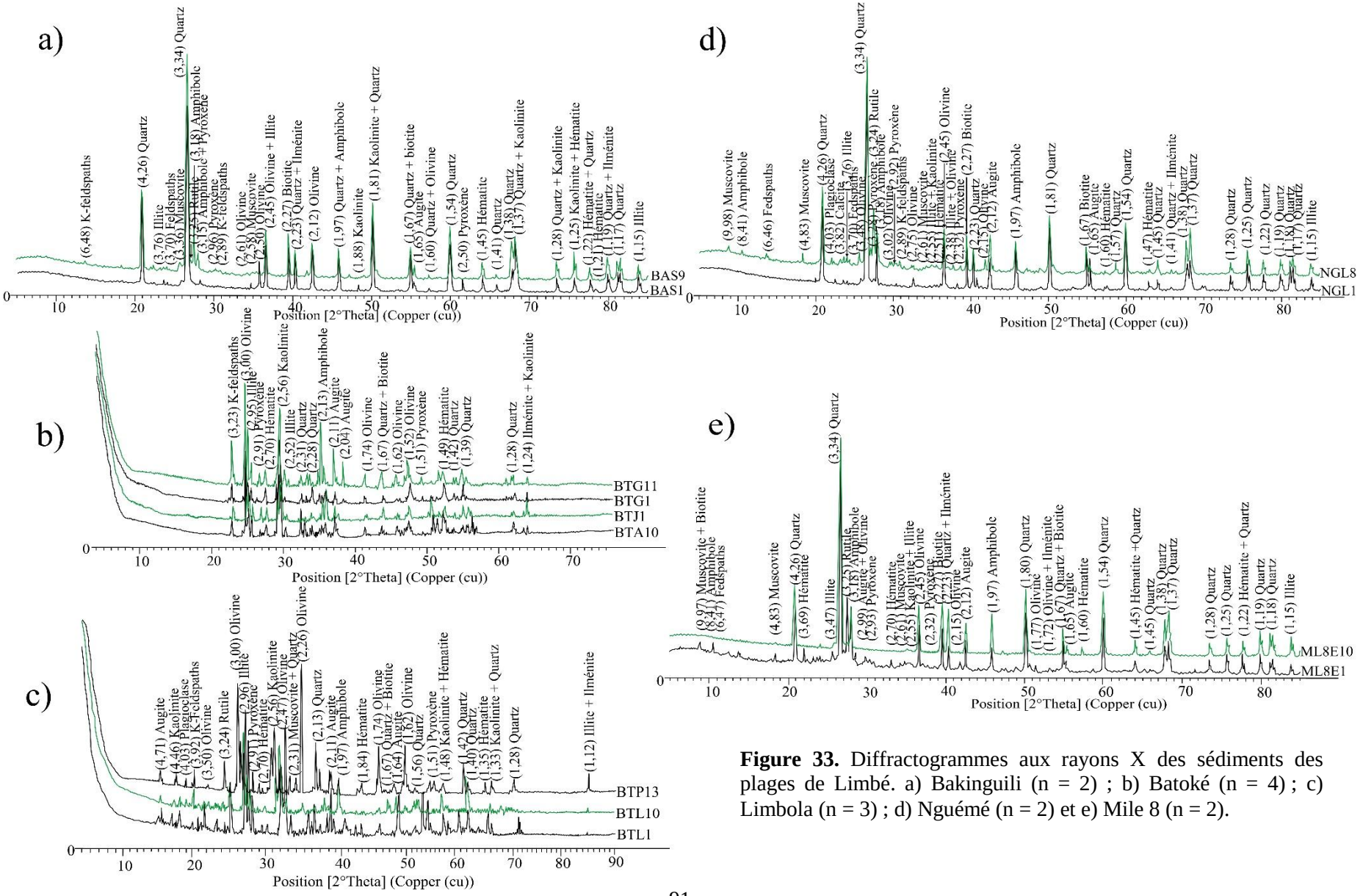


Figure 33. Diffractogrammes aux rayons X des sédiments des plages de Limbé. a) Bakinguili (n = 2) ; b) Batoké (n = 4) ; c) Limbola (n = 3) ; d) Nguémé (n = 2) et e) Mile 8 (n = 2).

V.1.2. Compositions chimiques des minéraux constitutifs

A Bakinguili, la composition chimique de quelques minéraux constitutifs des sédiments est présentée dans le Tableau 22 et la Figure 34. Ces minéraux contiennent des teneurs en silice comprises entre 27,37 et 50,53 %. Excepté pour la magnétite où la concentration en silice est en trace égale à 0,01 %. Les teneurs faibles en silice caractérisent aussi la présence des silicates ferromagnésiens (pyroxènes, olivine, augite, amphibole). Les teneurs élevées en Al_2O_3 aux valeurs comprises entre 10,82 et 29,84 % prouvent l'existence des argiles comme la kaolinite et l'illite dans les sédiments de plage. Les teneurs en MgO sont variables entre 0,11 et 44,08 % dans tous les minéraux constitutifs de ces sédiments de plage de la zone. Seule la magnétite contient des teneurs élevées en MgO, égale à 77,29 %. Les concentrations en FeO sont variables et comprises entre 5,47 et 77,29 %. Les teneurs élevées en MgO et FeO prouvent la présence des minéraux ferromagnésiens (olivine, pyroxènes, amphibole) dans les dépôts de plage de Bakinguili. Les concentrations en CaO élevées (20,24 – 21,81 %) associées au FeO confirment la présence du clinopyroxène (augite) et l'amphibole (actinote). Les concentrations en alcalins (Na_2O et K_2O) varient respectivement entre 0,40 et 3,59 % ; 0,01 et 0,27 % et caractérisent aussi la présence de la kaolinite et l'illite. L'ilménite confirme les teneurs considérables en TiO_2 dans les sédiments. Les teneurs très faibles en Cr_2O_3, MnO, P_2O_5 et les autres oxydes (BaO, NiO, ClO_2, ZrO_2, Nb_2O_5, V_2O_3, SrO) en traces sont peu présents dans tous les minéraux constitutifs des sédiments de Bakinguili.

Tableau 22. Composition chimique (%) des minéraux analysés par EPMA dans les sédiments de la plage de Bakinguili

Localisation	**Bakinguili (n = 1)**							
	Pyroxène	**Magnétite**	**Amphibole**	**Olivine**	**Kaolinite**	**Illite**	**Augite**	**Ilménite**
SiO_2	41,46	0,01	44,42	39,49	50,53	40,66	46,03	27,37
Al_2O_3	8,32	0,91	6,23	0,04	29,84	10,82	5,05	1,62
MgO	10,95	1,52	12,72	44,08	0,11	10,57	13,17	0,02
Na_2O	0,45	0,04	0,34	0,00	3,59	0,40	0,34	0,02
CaO	21,81	0,00	21,65	0,31	13,12	23,46	20,54	25,17
TiO_2	3,57	14,78	2,24	0,01	0,16	4,77	1,57	29,74
Cr_2O_3	0,01	0,03	0,04	0,04	0,00	0,02	0,16	0,00
MnO	0,12	1,80	0,03	0,24	0,04	0,06	0,12	0,04
FeO	6,69	77,29	5,47	14,45	0,90	7,18	6,14	1,16
P_2O_5	0,03	0,02	0,01	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00
BaO	0,00	0,10	0,02	0,00	0,01	0,00	0,03	0,19
NiO	0,00	0,00	0,01	0,09	0,00	0,02	0,03	0,00
K_2O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,01	0,00	0,00
ClO_2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
ZrO_2	0,02	0,05	0,03	0,00	0,03	0,08	0,00	0,18
Nb_2O_5	0,00	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,16
V_2O_3	0,19	1,01	0,12	0,01	0,02	0,29	0,12	1,29
SrO	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	93,62	97,56	93,36	98,80	98,65	98,34	93,31	87,02

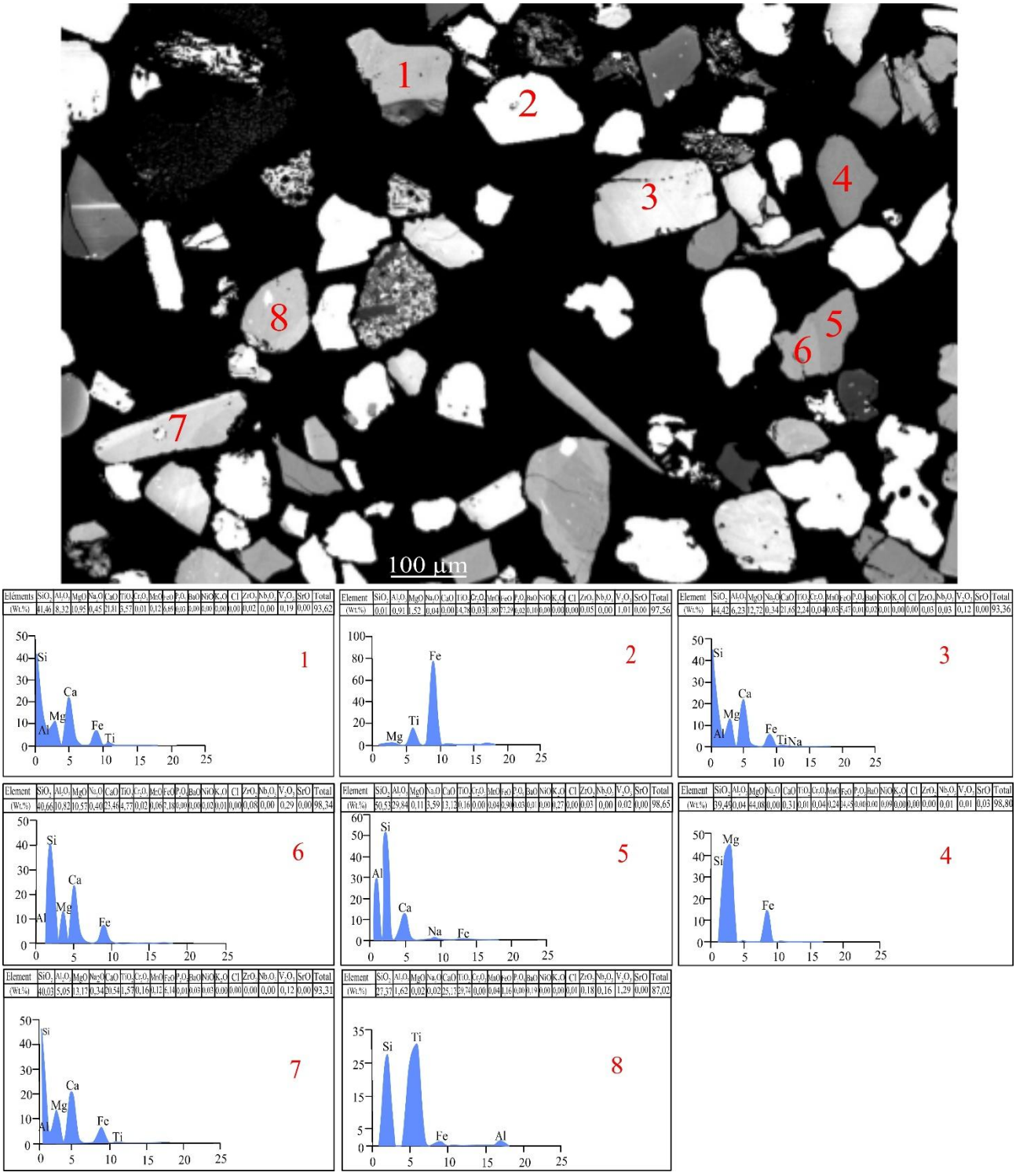


Figure 34. Microphotographie d'une section des minéraux et spectres des sédiments de la plage de Bakinguili.
1) Pyroxène ; 2) Magnétite ; 3) Amphibole ; 4) Olivine ; 5) Kaolinite ; 6) Illite ; 7) Augite et 8) Ilménite.

A Batoké, la composition chimique de quelques minéraux constitutifs des échantillons BTA1 et BTJ1 est présentée dans le Tableau 23 et la Figure 35a et b. Ces minéraux contiennent des teneurs en silice variant entre 37,03 et 50,59 %. Sauf la magnétite où la silice est en trace (0,03 – 0,05 %). Les pourcentages faibles en silice marquent la

présence des silicates ferromagnésiens (pyroxènes, olivine, augite, amphibole). Les teneurs en Al_2O_3 varient entre 8,89 et 29,27 % et sont élevées dans les argiles (kaolinite et illite) et silicates résiduelles (feldspaths). Les teneurs en MgO sont comprises entre 0,11 et 42,59 % dans tous les minéraux constitutifs. L'oxyde FeO présente des teneurs variables et comprises entre 2,18 et 79,16 %. La magnétite est présente avec les teneurs très élevées en FeO (72,07 – 79,16 %). Les concentrations élevées en MgO et FeO montrent aussi l'existence des minéraux ferromagnésiens (olivine, pyroxènes, amphibole) dans les sédiments. Tandis que, les teneurs élevées en CaO (21,54 – 23,45 %) associées à celles de FeO dans les minéraux constitutifs de sédiments de plage confirment toujours la présence du clinopyroxène (augite) et l'amphibole (actinote). Les teneurs faibles en alcalins (Na_2O et K_2O) respectivement de 2,04 à 4,29 % et de 0,31 à 4,33 % font remarquer l'existence des fedspaths alcalins, de la kaolinite et de l'illite. Les teneurs très faibles en Cr_2O_3, MnO, P_2O_5 et les traces en d'autres oxydes (BaO, NiO, ClO_2, ZrO_2, Nb_2O_5, V_2O_3, SrO) se confirment dans tous les minéraux constitutifs des sédiments de plage de Batoké.

Tableau 23. Composition chimique (%) des minéraux analysés par EPMA dans les sédiments de la plage de Batoké

Localisation	**Batoké (n = 2)**												
Echs	**BTA1**								**BTJ1**				
	Pyroxène	**Magnétite**	**Augite**	**Amphibole**	**Illite**	**Olivine**	**Feldspaths**	**Kaolinite**	**Olivine**	**Augite**	**Magnétite**	**Pyroxène**	**Amphibole**
SiO_2	40,54	0,03	46,56	44,63	44,03	37,03	40,88	50,59	38,37	40,31	0,05	38,39	42,94
Al_2O_3	9,92	1,14	4,77	5,84	15,94	0,04	8,89	29,27	0,05	9,95	5,28	9,97	5,73
MgO	10,5	0,82	12,14	13,17	0,33	42,59	9,47	0,11	42,28	9,08	5,8	9,93	12,75
Na_2O	0,37	0,06	0,49	0,35	4,29	0,01	2,04	3,68	0,01	0,93	0	0,54	0,42
CaO	23,45	0	21,54	21,92	2,5	0,27	13,54	13,73	0,3	22,24	0	23,18	22,55
TiO_2	4,22	14,2	2,45	2,05	0,8	0,03	2,14	0,15	0,02	3,97	13,44	4,57	1,98
Cr_2O_3	0	0,03	0	0,02	0	0,04	0,01	0	0,02	0	0,15	0	0,02
MnO	0,09	2,05	0,22	0,14	0,03	0,2	0,57	0,02	0,22	0,2	0,54	0,19	0,09
FeO	7,19	79,16	9,58	7,79	2,18	16,22	16,29	1,02	16,65	9,91	72,07	8,49	7,72
P_2O_5	0,03	0,02	0	0	0,16	0,04	0,01	0,02	0	0	0	0,02	0,01
BaO	0,08	0,11	0,02	0,03	0,07	0	0,03	0,04	0,03	0	0,13	0,06	0,03
NiO	0	0	0	0	0	0,13	0,01	0,01	0,13	0	0,02	0	0,02
K_2O	0,01	0	0,02	0	4,33	0,01	1,57	0,31	0,01	0,03	0	0,01	0,01
ClO_2	0,01	0	0	0,01	0,12	0,01	0,01	0	0,01	0	0	0,01	0,01
ZrO_2	0	0,03	0,02	0	0	0	0,06	0,01	0,04	0,11	0,04	0,06	0,05
Nb_2O_5	0,01	0	0	0,01	0	0	0	0,02	0,04	0	0	0	0
V_2O_3	0,27	1,07	0,2	0,13	0,06	0,03	0,16	0	0,03	0,25	0,81	0,31	0,18
SrO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	96,69	98,72	98,01	96,09	74,84	96,65	95,68	98,98	98,21	96,98	98,33	95,73	94,51

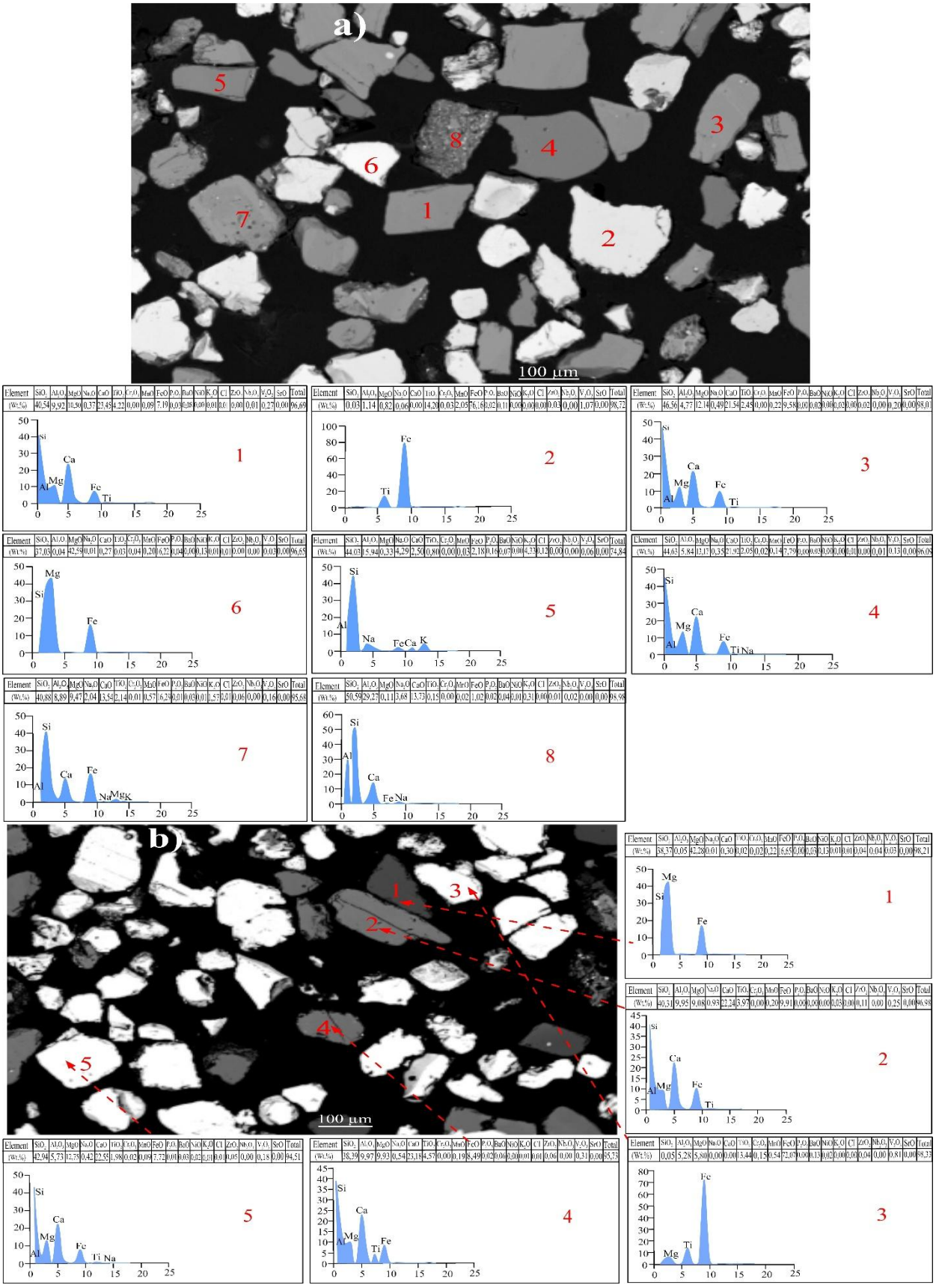


Figure 35. Microphotographies d'une section des minéraux et spectres des minéraux de sédiments de la plage de Batoké. a) échantillon BTA1 avec 1) Pyroxène ; 2) Magnétite ; 3) Augite ; 4) Amphibole ; 5) Illite ; 6) Olivine ; 7) Feldspaths et 8) Kaolinite ; b) échantillon BTJ1 avec 1) Olivine ; 2) Augite ; 3) Magnétite ; 4) Pyroxène ; 5) Amphibole.

A Limbola, la composition chimique des minéraux constitutifs des échantillons BTL1 et BTL10 obtenue par microsonde électronique à 100 µm est présentée dans le Tableau 24 et la Figure 36a et b. Les minéraux révèlent des faibles teneurs en silice qui varient entre 34,85 et 47,96 %. Sauf la magnétite où la concentration en silice est nulle dans l'échantillon BTL1 et en trace dans l'échantillon BTL10 (0,99 %). Les faibles concentrations en silice montrent la présence des silicates ferromagnésiens (pyroxènes, amphibole, olivine). Les teneurs en Al_2O_3 varient entre 1,88 et 8,59 %. Les concentrations en MgO sont comprises entre 5,54 et 42,81 % dans tous les minéraux constitutifs des sédiments de cette plage. La plus forte valeur (42,81 %) s'observe dans l'olivine et la plus faible valeur (5,54 %) est dans la magnétite. Les concentrations en FeO sont variables et comprises entre 5,64 et 63,6 %. La présence en magnétite se confirme avec de très fortes concentrations en FeO (57,48 – 63,60 %) dans la constitution minéralogique de ces sédiments. Les fortes teneurs en MgO et FeO révèlent aussi la présence des minéraux ferromagnésiens (olivine, pyroxènes, amphibole) dans ces sédiments de plage. Les concentrations élevées en CaO (18,26 – 23,46 %) liées à celles de FeO précisent l'existence du clinopyroxène (augite) et de l'amphibole (actinote). Les teneurs en alcalins (Na_2O et K_2O), respectivement de 0,4 à 2,39 % et 0,01 à 0,02 %, indiquent la présence de l'illite. Les teneurs très faibles en Cr_2O_3, MnO, P_2O_5 et les traces en d'autres oxydes (BaO, NiO, ClO_2, ZrO_2, Nb_2O_5, V_2O_3, SrO) sont remarquées dans les minéraux constitutifs des sédiments de plage de Limbola.

Tableau 24. Composition chimique (%) des minéraux analysés par EPMA dans les sédiments de la plage de Limbola

Localisation	**Limbola (n = 2)**											
Echs	**BTL1**						**BTL10**					
	Augite	**Olivine**	**Magnétite**	**Amphibole**	**Illite**	**Pyroxène**	**Pyroxène**	**Olivine**	**Augite**	**Amphibole**	**Illite**	**Magnétite**
SiO_2	37,29	34,85	0	34,76	47,96	42,01	41,01	37,72	45,85	43,34	43,16	0,99
Al_2O_3	8,33	0,01	5,02	9,53	1,88	6,89	6,86	0,04	5,99	7,95	8,59	8,95
MgO	10,34	37,8	5,54	9,11	7,66	10,54	11,18	42,81	13,02	11,95	11,63	8,43
Na_2O	0,43	0,03	0,02	0,42	2,39	0,56	0,43	0,02	0,34	0,38	0,4	0,02
CaO	19,52	0,25	0	18,26	18,89	23,25	20,76	0,24	23,35	23,46	22,92	0
TiO_2	2,81	0,04	12,07	3,4	0,51	3,19	3,02	0,01	2,73	3,36	3,43	13,99
Cr_2O_3	0,01	0	0	0,03	0,33	0	0	0,01	0	0,01	0	0,09
MnO	0,13	0,23	0,67	0,05	0,61	0,23	0,11	0,15	0,1	0,09	0,15	0,42
FeO	5,64	14,82	57,48	7,51	15,87	9,24	6,2	12,24	6,57	6,64	6,83	63,6
P_2O_5	0	0	0	0,04	0,01	0,02	0,01	0	0,01	0,01	0,02	0
BaO	0,03	0	0,07	0,07	0,03	0,04	0,02	0,04	0,01	0,03	0,03	0,12
NiO	0,03	0,08	0	0	0,02	0,02	0	0,16	0	0	0,02	0,03
K_2O	0	0	0	0,05	0,02	0,01	0	0	0,01	0	0,01	0,01
ClO_2	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0,01
ZrO_2	0,04	0,02	0,01	0	0,06	0,06	0	0	0,04	0	0,01	0,02
Nb_2O_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V_2O_3	0,22	0,01	0,82	0,24	0,09	0,21	0,17	0,17	0,15	0,21	0,21	0,88
SrO	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02
Total	84,84	88,16	81,7	83,48	96,34	96,28	89,77	93,61	98,17	97,43	97,41	97,58

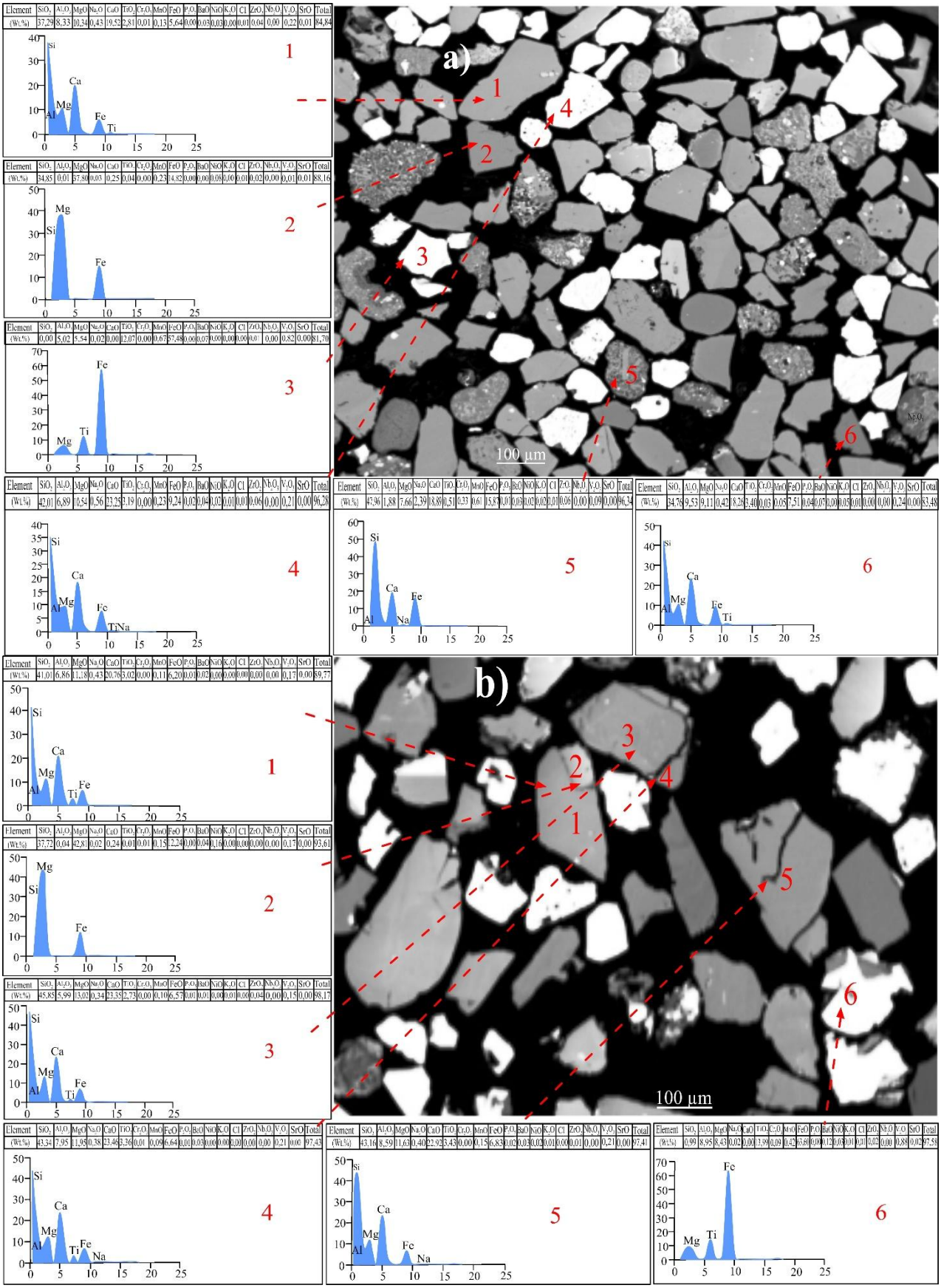


Figure 36. Microphotographies d'une section des minéraux et spectres des minéraux de sédiments de la plage de Limbola. a) échantillon BTL1 avec 1) Augite ; 2) Olivine ; 3) Magnétite ; 4) Amphibole ; 5) Illite et 6) Pyroxène ; b) échantillon BTL10 avec 1) pyroxène ; 2) Olivine ; 3) Augite ; 4) amphibole ; 5) illite et 6) Magnétite.

A Nguémé, la composition chimique des minéraux dans les sédiments est présentée dans le Tableau 25 et la Figure 37. Ces minéraux montrent des teneurs en silice variables entre 37,77 et 53,38 %. Excepté de la magnétite, la calcite et l'ilménite, où la silice se trouve en trace (0,03 – 0,89 %). Les faibles teneurs en silice témoignent la présence des silicates ferromagnésiens (pyroxènes, amphibole, olivine). Les teneurs en Al_2O_3 variables entre 11,44 et 26,30 % proviennent des argiles (kaolinite et illite). Les concentrations en MgO varient entre 0 et 43,68 % dans tous les minéraux constitutifs de cette plage. Les concentrations nulles en MgO s'observent dans la kaolinite, et en traces dans la calcite (0,14 %) et l'ilménite (0,41 %). Les teneurs en FeO sont comprises entre 0,27 et 73,40 %. La présence de la magnétite se confirme avec de fortes concentrations en FeO (73,40 %) dans les sédiments. Les fortes teneurs en MgO et FeO prouvent aussi la présence des minéraux ferromagnésiens (olivine, pyroxènes, amphibole). La calcite représente les teneurs très élevées en CaO (52,9 %) dans les sédiments. Les concentrations élevées en CaO (23,43 – 23,92 %) associées à celles de FeO dans les sédiments de plage témoignent aussi l'existence du clinopyroxène (augite) et de l'amphibole (actinote). Les concentrations en alcalins (Na_2O et K_2O) respectivement de 2,62 à 5,16 % et de 0,27 à 1,16 % montrent toujours la présence de la kaolinite et l'illite. Les teneurs considérables en TiO_2 (46,91 %) approuvent l'existence de l'ilménite dans les sédiments. Les teneurs très faibles en Cr_2O_3, MnO, P_2O_5 et les autres oxydes en traces (BaO, NiO, ClO_2, ZrO_2, Nb_2O_5, V_2O_3, SrO) sont moins représentés dans la constitution minéralogique des sédiments de plage de Nguémé.

Tableau 25. Composition chimique (%) des minéraux analysés par EPMA dans les sédiments de la plage de Nguémé

Localisation	**Nguémé (n = 1)**								
	Pyroxène	**Amphibole**	**Olivine**	**Magnétite**	**Illite**	**Augite**	**calcite**	**kaolinite**	**Ilménite**
SiO_2	42,40	41,76	38,13	0,03	37,77	39,48	0,29	53,38	0,89
Al_2O_3	6,22	7,17	0,01	5,25	11,44	8,15	0,00	26,30	0,47
MgO	11,02	12,31	43,68	5,51	8,87	11,11	0,14	0,00	0,41
Na_2O	0,55	0,29	0,00	0,00	2,62	0,42	0,13	5,16	0,66
CaO	23,43	23,92	0,29	0,00	11,58	23,92	52,9	8,37	35,88
TiO_2	3,03	2,89	0,01	13,41	4,26	3,76	0,01	0,06	46,91
Cr_2O_3	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MnO	0,28	0,09	0,24	0,99	0,32	0,17	0,05	0,00	0,02
FeO	9,12	6,98	15,98	73,40	18,08	8,01	0,27	0,27	2,00
P_2O_5	0,03	0,03	0,01	0,00	0,02	0,03	11,9	0,00	0,05
BaO	0,05	0,00	0,03	0,15	0,13	0,02	0,00	0,04	0,35
NiO	0,03	0,01	0,09	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
K_2O	0,00	0,01	0,01	0,00	1,16	0,00	0,00	0,27	0,01
ClO_2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,01	0,19	0,00	0,00
ZrO_2	0,08	0,03	0,00	0,04	0,02	0,00	0,00	0,02	0,00
Nb_2O_5	0,00	0,03	0,00	0,00	0,03	0,00	0,04	0,08	0,76
V_2O_3	0,20	0,18	0,00	0,96	0,23	0,23	0,00	0,01	1,99
SrO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	96,44	95,70	98,48	99,79	96,57	95,31	65,92	93,97	90,40

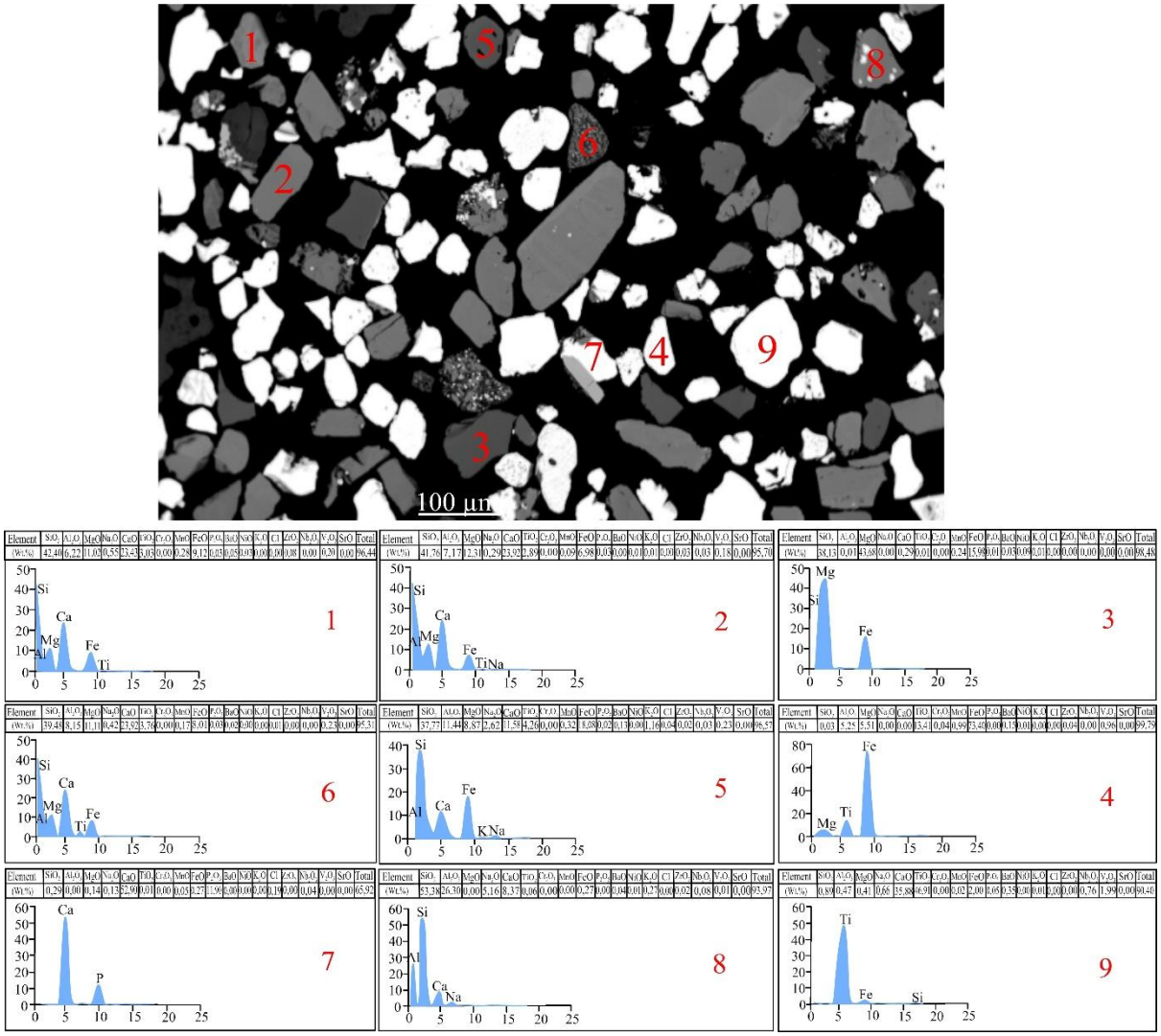


Figure 37. Microphotographie d'une section des minéraux et spectres des minéraux de sédiments de la plage de Nguémé. 1) Pyroxène ; 2) Amphibole ; 3) Olivine ; 4) Magnétite ; 5) Illite ; 6) Augite ; 7) Calcite ; 8) Kaolinite et 9) Ilménite.

A Mile 8, la composition chimique des minéraux dans les sédiments est présentée dans le Tableau 26 et la Figure 38. Ces minéraux présentent des teneurs en silice qui varient entre 40,18 et 50,58 %. Excepté de la magnétite, où la silice est en trace (0,09 %). Les faibles teneurs en silice marquent la présence des silicates ferromagnésiens (pyroxènes, amphibole, olivine). Les teneurs en Al_2O_3 varient entre 0,02 et 29,61 %. Les teneurs en MgO s'étalent entre 0,12 et 54,64 % dans tous les minéraux constitutifs de cette plage. La plus faible concentration en MgO (0,12 %) s'observe dans la kaolinite, et celle plus forte se remarque dans l'olivine (54,64 %). Les teneurs en FeO sont variables et comprises entre 0,87 et 73,19 %. La magnétite présente de très fortes teneurs en FeO, soit 73,19 % dans la constitution minéralogique des sédiments. Les fortes concentrations en MgO et FeO confirment aussi la présence des minéraux ferromagnésiens (olivine, pyroxènes, amphibole) dans les sédiments. Les concentrations élevées en CaO (21,45 – 23,22 %) liées à celles de FeO dans les sédiments

de plage précisent l'existence du clinopyroxène (augite) et de l'amphibole (actinote). Les teneurs en alcalins (Na_2O et K_2O), respectivement de 1,29 à 3,73 % et de 0,02 à 0,26 %, montrent la présence de la kaolinite et l'illite. Les teneurs très faibles en Cr_2O_3, MnO, P_2O_5 et les autres oxydes en traces (BaO, NiO, ClO_2, ZrO_2, Nb_2O_5, V_2O_3, SrO) sont moins représentés dans tous les minéraux constitutifs des sédiments de plage de Mile 8.

Tableau 26. Composition chimique (%) des minéraux analysés par EPMA dans les sédiments de la plage de Mile 8

Localisation	**Mile 8 (n = 1)**						
	Kaolinite	**Pyroxène**	**Augite**	**Olivine**	**Illite**	**Magnétite**	**Amphibole**
SiO_2	50,58	41,79	46,87	40,18	47,03	0,09	43,23
Al_2O_3	29,61	7,27	3,79	0,02	3,83	0,97	6,74
MgO	0,12	11,26	13,77	54,64	10,59	5,36	12,08
Na_2O	3,73	0,48	0,39	0,01	1,29	0,02	0,41
CaO	12,73	21,45	21,66	0,15	21,53	0,08	23,22
TiO_2	0,12	3,33	1,64	0,04	1,63	9,37	3,13
Cr_2O_3	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	2,99	0,01
MnO	0,00	0,15	0,13	0,20	0,36	0,23	0,09
FeO	0,87	7,02	8,38	2,35	10,22	73,19	7,96
P_2O_5	0,01	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,05
BaO	0,06	0,06	0,00	0,00	0,00	0,07	0,04
NiO	0,01	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,00
K_2O	0,26	0,00	0,02	0,01	0,02	0,00	0,01
Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
ZrO_2	0,00	0,12	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00
Nb_2O_5	0,03	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
V_2O_3	0,03	0,18	0,13	0,01	0,12	0,52	0,19
SrO	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
Total	98,16	93,16	96,78	97,80	96,71	92,89	97,17

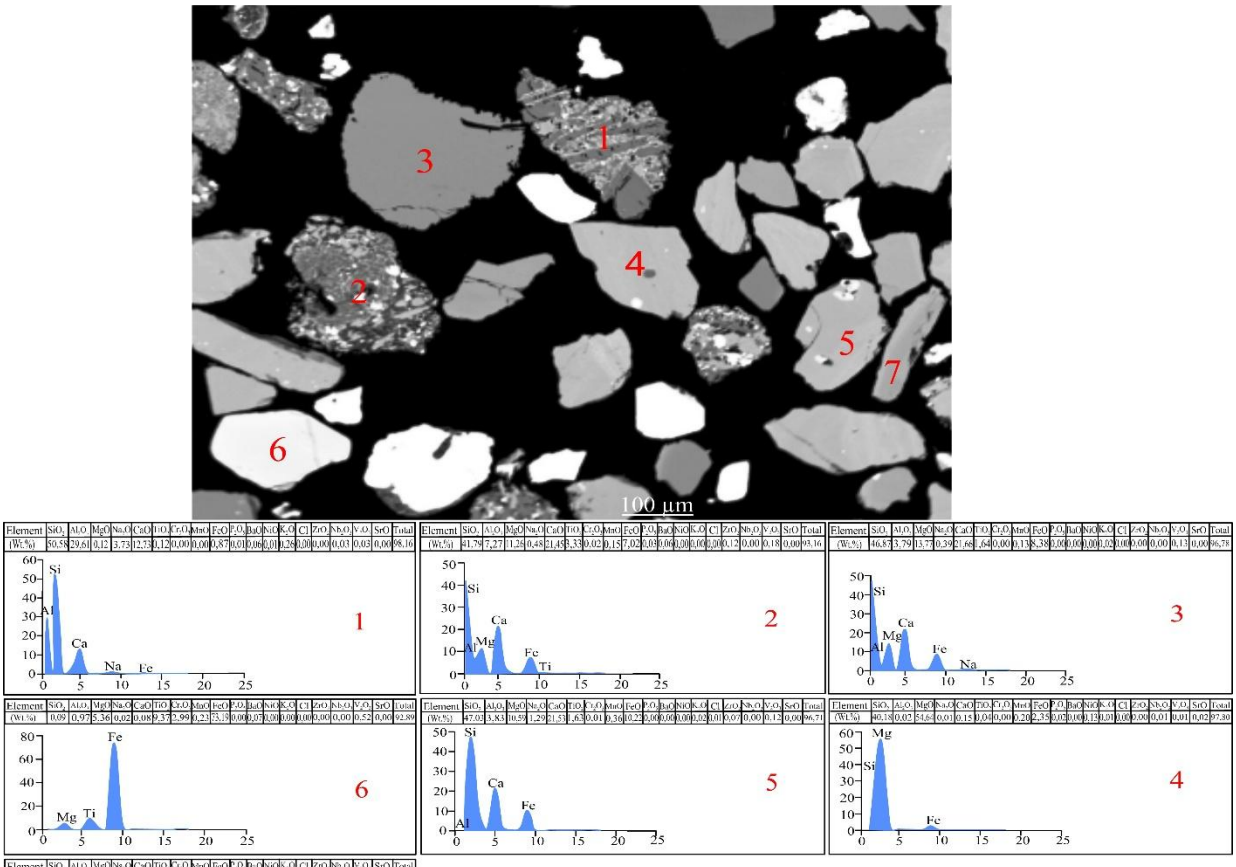


Figure 38. Microphotographie d'une section des minéraux et spectres des minéraux de sédiments de la plage de Mile 8. 1) Kaolinite ; 2) Pyroxène ; 3) Augite ; 4) Olivine ; 5) Illite 6) Magnétite et 7) Amphibole.

V.2. Géochimie des dépôts clastiques

V.2.1. Distribution des éléments majeurs

La distribution des concentrations (en %) en éléments majeurs constitutifs des sables de plage de Limbé est présentée dans le Tableau 27.

A Bakinguili, les échantillons présentent des teneurs faibles en SiO_2, comprises entre 24,58 et 28,47 % avec une proportion moyenne de 26,38 %. Tous les échantillons ont une teneur en SiO_2 inférieure à celle de l'UCC (66 %) et du PAAS (62,8 %). La concentration en TiO_2 varie considérablement entre 8,96 et 11,08 % dans les échantillons. Les concentrations en Al_2O_3 varient entre 6,99 et 7,42 % avec une teneur moyenne de 7,19 %. Cette teneur moyenne est inférieure à celle du PAAS (18,9 %) et à celle de l'UCC (15,2 %). L'échantillon BAS5 a une concentration très élevée en Fe_2O_3 (33,58 %) par rapport aux autres échantillons dont les teneurs varient entre 28,64 et 31,82 %. Les proportions en MnO sont comprises entre 0,54 et 0,63 % avec une teneur moyenne de 0,58 %. Cette teneur moyenne est supérieure à celle du PAAS (0,11%) et l'UCC (0,1 %). Les concentrations en MgO (11,84 % à 12,85 %) et CaO (10,09 à 11,26 %) sont très élevées comparés à celles du PAAS (2,2 et 1,3 %, respectivement) et l'UCC (2,2 et 4,2 %, respectivement). Les teneurs en Na_2O (0,43 à 0,65 %) et K_2O (0,12 à 0,15 %) sont toutes inférieures à celles du PAAS et l'UCC. Les teneurs en P_2O_5 varient entre 0,25 et 0,41 % avec une proportion moyenne de 0,33 %. Le rapport SiO_2/Al_2O_3 présente des teneurs comprises entre 3,31 et 3,98. La plus faible valeur (3,31) s'observe dans l'échantillon BAS5 et la plus grande valeur (3,98) dans l'échantillon BAS1. Les rapports K_2O/Na_2O, K_2O/Al_2O_3 et Na_2O/Al_2O_3 sont toutes inférieures à 1 %. Le rapport Fe_2O_3/K_2O est compris entre 190,33 et 265,16 dans tous les échantillons montrant ainsi un enrichissement en fer des roches sources. Les valeurs des paramètres d'altérations (CIA, PIA, CIW) sont variables ($\pm$ 1 σ : 3,13 et 3,16), respectivement comprises entre 75,65 et 81,9 % ; 76,57 et 82,9 % ; 76,97 et 83,17 % pour tous les sédiments de Bakinguili. L'indice de variation compositionel (ICV) est compris entre 8,74 et 9,36 avec une teneur moyenne de 9,02. Les standards PAAS et UCC ont été utilisés pour normaliser les éléments majeurs (Taylor et McLennan, 1985). Cette normalisation permet de comparer les évolutions des éléments majeurs par rapport au PAAS et l'UCC. Le spectre de normalisation des éléments majeurs par rapport au PAAS et à l'UCC dans ce secteur montre des allures à peu près similaires (Figure 39a et b).

A Batoké, les teneurs en SiO_2, varient entre 19 et 34 %. Ces teneurs sont toutes inférieures à celle de l'UCC (66 %) et du PAAS (62,8 %). La teneur en TiO_2 est élevée dans les échantillons et varie entre 6,27 et 10,53 %. La concentration moyenne en TiO_2 (8,36 %) est supérieure à celle de l'UCC (0,5 %) et du PAAS (1 %). Les concentrations en Al_2O_3 varient entre 6,69 et 8,01 %. La concentration moyenne en Al_2O_3 (7,24 %) est inférieure à celle de l'UCC (15,2 %) et du PAAS (18,9 %). La teneur la plus élevée (43,89 %) en Fe_2O_3 s'observe dans l'échantillon BTG1. Cette teneur est supérieure à celle de l'UCC (4,5 %) et PAAS (6,5 %). Les autres échantillons montrent des teneurs également supérieures à celles de l'UCC et du PAAS. Les teneurs en MnO sont faibles et sont presque identiques à celle de la plage de Bakinguili. Elles varient entre 0,35 et 0,63 % avec une teneur moyenne de 0,48 %). Cette teneur moyenne est supérieure à celle du PAAS (0,11 %) et l'UCC (0,1 %). Les concentrations en MgO et CaO (10,94 à 13,09 % ; 8,24 à 13,72 % respectivement) sont très élevées par rapport à celles du PAAS et de l'UCC. Les teneurs en Na_2O (0,43 à 0,8 %) et K_2O (0,11 à 0,27 %) sont inférieures à celles du PAAS et l'UCC. Les concentrations en P_2O_5 sont comprises entre 0,19 et 0,39 % avec une proportion moyenne de 0,27 %. Le rapport SiO_2/Al_2O_3 présente des teneurs comprises entre 2,8 et 4,3 tandis que les rapports K_2O/Na_2O, K_2O/Al_2O_3 et Na_2O/Al_2O_3 présentent des teneurs très faibles comprises entre 0,25 et 0,34 ; 0,02 et 0,03 ; 0,06 et 0,1 respectivement (Tableau 27). Les valeurs du rapport Fe_2O_3/K_2O sont très élevées dans tous les échantillons de ce secteur d'étude. Ces valeurs varient entre 97,9 et 399. Les valeurs des paramètres d'altérations (CIA, PIA, CIW) sont respectivement comprises entre 81,1 et 87,3 % ; 82,9 et 88,4 % ; 83,4 et 88,6 %. L'indice de variation compositionelle (ICV) des sédiments étudiés a des valeurs comprises entre 7,25 et 10,97. Les standards PAAS et UCC ont été utilisés pour normaliser les éléments majeurs (Taylor et McLennan, 1985). Le spectre de normalisation des éléments majeurs par rapport au PAAS et à l'UCC montre des allures à peu près similaires (Figure 39c et d).

A Limbola, les teneurs en SiO_2 dans ce secteur varient entre 22,5 et 38,5 % avec une moyenne de 31,9 %. Cette teneur moyenne est faible par rapport à l'UCC (66 %) et au PAAS (62,8 %). Les teneurs en TiO_2 varient entre 3,21 et 10,51 % avec une moyenne de 5,22 %, inférieure à celle des sédiments de la plage de Batoké (8,36 %), supérieure au PAAS et l'UCC. La concentration moyenne en Al_2O_3 est de 8,94 %. Elle est inférieure à celle du PAAS (18,9 %) et de l'UCC (15,2 %). La plus faible valeur (5,56 %) en Al_2O_3 s'observe dans l'échantillon BTE3 et la plus grande valeur (12,54 %) s'observe dans l'échantillon BTL1.

Tableau 27. Pourcentage (%) des éléments majeurs dans les sables de plage de Limbé.

Localisation		**Bakinguili (n = 3)**					**Batoké (n = 5)**							**Limbola (n = 5)**						
Echs	l.d	BAS1	BAS5	BAS9	Moy.	± 1σ	BTA10	BTJ1	BTJ12	BTG1	BTG11	Moy.	± 1σ	BTL10	BTL1	BTE3	BTP13	BTP3	Moy.	± 1σ
SiO_2 (adj)	0,01	28 ,73	24,71	25,69	26,38	2,1	27,6	22,5	33,8	19	31,3	26,8	6,1	36,5	28,9	22,7	40,1	38,7	33,4	7,3
SiO_2	0,01	28,47	24,58	25,35	26,13	2,06	27,4	22,4	34	19	30,8	26,7	6,1	36,4	30,2	22,5	38,5	31,6	31,9	6,2
Al_2O_3	0,04	7,15	7,42	6,99	7,19	0,22	6,69	6,85	7,97	6,69	8,01	7,24	0,69	10,31	12,54	5,56	6,88	7,41	8,94	2,41
$Fe_2O_3^t$	0,01	28,64	33,58	31,82	31,35	2,5	31,44	38,48	23,75	43,89	26,43	32,8	8,36	16,54	31,21	40,55	20,56	14,21	24,61	11,04
MgO	0,01	12,85	11,84	11,91	12,2	0,56	12,38	10,94	13,09	10,22	12,02	11,73	1,15	11,05	10,54	10,28	12,46	10,54	10,97	0,88
CaO	0,01	11,26	10,96	10,09	10,77	0,61	12,01	9,67	13,72	8,24	2,29	11,19	2,2	13,01	12,05	12,54	12,21	11,54	12,27	0,55
Na_2O	0,01	0,65	0,59	0,43	0,56	0,11	0,43	0,55	0,71	0,43	0,8	0,58	0,17	1,21	2,01	0,8	1,12	1,47	1,32	0,45
K_2O	0,01	0,15	0,14	0,12	0,14	0,01	0,11	0,14	0,23	0,11	0,27	0,17	0,07	0,41	0,13	0,12	0,34	0,16	0,23	0,13
TiO_2	0,01	8,96	9,43	11,08	9,82	1,11	8,18	9,7	6,27	10,53	7,1	8,36	1,77	10,51	4,61	3,81	3,21	3,95	5,22	3
P_2O_5	0,01	0,41	0,34	0,25	0,33	0,08	0,25	0,23	0,31	0,19	0,39	0,27	0,08	0,18	0,49	0,51	0,45	0,43	0,41	0,13
MnO	0,01	0,54	0,58	0,63	0,58	0,05	0,46	0,57	0,35	0,63	0,39	0,48	0,12	0,23	0,61	0,21	0,26	0,41	0,34	0,17
Cr_2O_3	0,02	0,11	0,12	0,14	0,12	0,02	0,12	0,14	0,09	0,15	0,1	0,12	0,03	0,06	0,1	0,05	0,06	0,02	0,06	0,03
LOI	5,1	0,6	0,4	0,9	0,63	0,25	0,2	0,4	1,2	0,9	0,7	0,7	0,4	3,2	3,1	5	0,7	0,9	2,2	2,3
Total	-	99,79	99,98	99,71	99,83	0,14	99,3	99,2	99,3	99,2	99,3	99,3	0,1	103	108	104	96,8	80,9	98,5	10,6
SiO_2/Al_2O_3	-	3,98	3,31	3,63	3,64	0,33	4,1	3,3	4,3	2,8	3,9	3,7	0,6	3,5	2,4	3	5,6	4,3	3,8	1,2
K_2O/Na_2O	-	0,23	0,24	0,28	0,25	0,03	0,26	0,25	0,32	0,26	0,34	0,29	0,04	0,34	0,06	0,15	0,3	0,11	0,19	0,12
K_2O/Al_2O_3	-	0,02	0,02	0,02	0,02	0,001	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0,04	0,01	0,02	0,05	0,02	0,03	0,02
Na_2O/Al_2O_3	-	0,09	0,08	0,06	0,08	0,01	0,06	0,08	0,09	0,06	0,1	0,08	0,02	0,12	0,16	0,11	0,16	0,2	0,15	0,04
Al_2O_3/TiO_2	-	0,8	0,79	0,63	0,74	0,09	0,82	0,71	1,27	0,64	1,13	0,91	0,27	0,98	2,72	1,98	2,14	1,88	1,94	0,6
Fe_2O_3/K_2O	-	190,93	239,86	265,16	231,98	37,74	286	275	103	399	97,9	232	130	40,34	240	338	60,47	88,81	154	130
CIA (%)	-	75,65	78	81,9	78,52	3,16	87,3	84,7	82,9	87,3	81,1	84,6	2,7	78,5	75,1	81,5	72,7	70,5	75,7	4,4
PIA (%)	-	76,57	78,92	82,9	79,46	3,2	88,4	85,9	84,5	88,4	82,9	86	2,4	80,4	75,5	82,3	74,5	71,2	76,8	4,5
ICV	-	8,74	8,97	9,36	9,02	0,31	9,65	10,14	7,25	10,97	7,35	9	1,69	5,11	4,83	9,01	7,25	5,65	6,37	1,75
CIW	-	76,97	79,26	83,17	79,8	3,13	88,6	86,2	84,9	88,6	83,4	86,3	2,3	81	75,7	82,5	75,4	71,6	77,2	4,5

Localisation		**Nguémé (n = 3)**					**Mile 8 (n = 4)**						**Limbé (n = 20)**			
Echs	l.d	NGL1	NGL5	NGL8	Moy.	± 1σ	ML8E1	ML8E4	ML8E7	ML8E10	Moy.	± 1σ	Moy.	± 1σ	UCC	PAAS
SiO_2 (adj)	0,01	38,43	41,24	40,06	39,91	1,41	36,45	39,05	39,3	36,35	37,79	1,61	32,55	7,03	-	-
SiO_2	0,01	37,5	38,45	38,41	38,12	0,54	34,56	36,09	34,86	35,31	35,21	0,67	31,32	6,07	66	62,8
Al_2O_3	0,04	11,52	12,53	11,05	11,7	0,76	12,26	13,12	15,84	12,64	13,47	1,62	9,57	2,85	15,2	18,9
$Fe_2O_3^t$	0,01	15,26	13,98	14,23	14,49	0,68	16,25	15,08	14,22	16,29	15,46	1	24,32	9,99	4,5	6,5
MgO	0,01	12,02	9,34	12,38	11,25	1,66	13,11	11,29	7,42	13,09	11,23	2,68	11,44	1,44	2,2	2,2
CaO	0,01	12,29	11,92	12,95	12,39	0,52	11,25	10,66	9,59	11,57	10,77	0,87	11,49	1,33	4,2	1,3
Na_2O	0,01	0,81	1,06	0,97	0,95	0,13	1,96	1,58	1,67	1,21	1,61	0,31	1,02	0,5	3,9	1,2
K_2O	0,01	0,24	0,77	0,56	0,52	0,27	0,96	0,75	0,82	0,51	0,76	0,19	0,35	0,28	3,4	3,7
TiO_2	0,01	6,98	4,26	4,56	5,27	1,49	3,96	3,28	3,68	5,96	4,22	1,19	6,5	2,75	0,5	1
P_2O_5	0,01	0,56	0,59	0,48	0,54	0,06	0,32	0,38	0,44	0,39	0,38	0,05	0,38	0,12	0,17	0,16
MnO	0,01	0,39	0,33	0,28	0,33	0,05	0,19	0,18	0,17	0,16	0,18	0,01	0,38	0,17	0,1	0,11
Cr_2O_3	0,02	0,12	0,1	0,09	0,1	0,02	0,11	0,06	0,08	0,07	0,08	0,02	0,09	0,03	-	-
LOI	5,1	0,7	6,1	3,1	3,3	2,71	4,1	6,2	10,9	2,2	5,85	3,74	2,58	2,75	-	-
Total	-	98,39	99,43	99,06	98,96	0,52	99,03	98,67	99,69	99,41	99,2	0,44	99,09	4,89	100	97,87
SiO_2/Al_2O_3	-	3,25	3,07	3,48	3,27	0,2	2,82	2,75	2,2	2,79	2,64	0,29	3,42	0,78	4,4	3,3
K_2O/Na_2O	-	0,3	0,73	0,58	0,53	0,22	0,49	0,47	0,49	0,42	0,47	0,03	0,33	0,16	0,87	3,08
K_2O/Al_2O_3	-	0,02	0,06	0,05	0,04	0,02	0,08	0,06	0,05	0,04	0,06	0,02	0,03	0,02	0,22	0,2
Na_2O/Al_2O_3	-	0,07	0,08	0,09	0,08	0,01	0,16	0,12	0,1	0,09	0,12	0,03	0,1	0,04	0,26	0,06
Al_2O_3/TiO_2	-	1,65	2,94	2,42	2,34	0,65	3,09	4	4,3	2,12	3,38	0,98	1,85	1,12	30,04	18,9
Fe_2O_3/K_2O	-	63,58	18,16	25,41	35,72	24,4	16,93	20,1	17,34	31,94	21,58	7,05	140,89	124,81	1,3	1,8
CIA (%)	-	79,75	74,36	74,42	76,18	3,09	62,08	68,58	71,28	73,6	68,89	4,98	77,06	6,47	0,3	
PIA (%)	-	80,86	77,03	76,59	78,16	2,35	63,5	70,3	73,13	75,22	70,54	5,11	78,45	6,36	56,9	
ICV	-	4,13	3,29	4,13	3,85	0,48	3,87	3,25	2,36	3,84	3,33	0,71	6,46	2,71	53,3	
CIW	-	81,21	78,23	77,59	79,01	1,93	65,53	71,62	74,25	76,04	71,86	4,6	79,09	5,99	0,7	

LOI: Perte au feu ; l.d : Limite de détection
CIA (%) = $[Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)]\times100$ d'après Nesbitt et Young (1982)
PIA (%) = $[Al_2O_3 - K_2O/(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O)] \times 100$ d'après Nesbitt et Young (1982) et Fedo *et al.* (1995)
CIW= $(Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O)]x\ 100$ d'après Harnois (1988)
ICV= $(Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + Mn + TiO_2)/Al_2O_3$ d'après Cox *et al.* (1995)
Les valeurs de l'UCC et du PAAS sont d'après Taylor et McLennan (1985) et McLennan (2001) ; (SiO_2)adj. SiO_2 recalculé sans la perte au feu et rapporté à 100% ; PAAS: Post-Archean Average Australian Shale (Taylor et McLennan, 1985); UCC: Upper Continental Crust (Taylor et McLennan, 1985) ; Moy. = moyenne. 1σ = déviation.standart. Fe_2O_3t = Fe total exprimé sous forme Fe_2O_3. n = nombre total des échantillons, Echs. Echantillons.

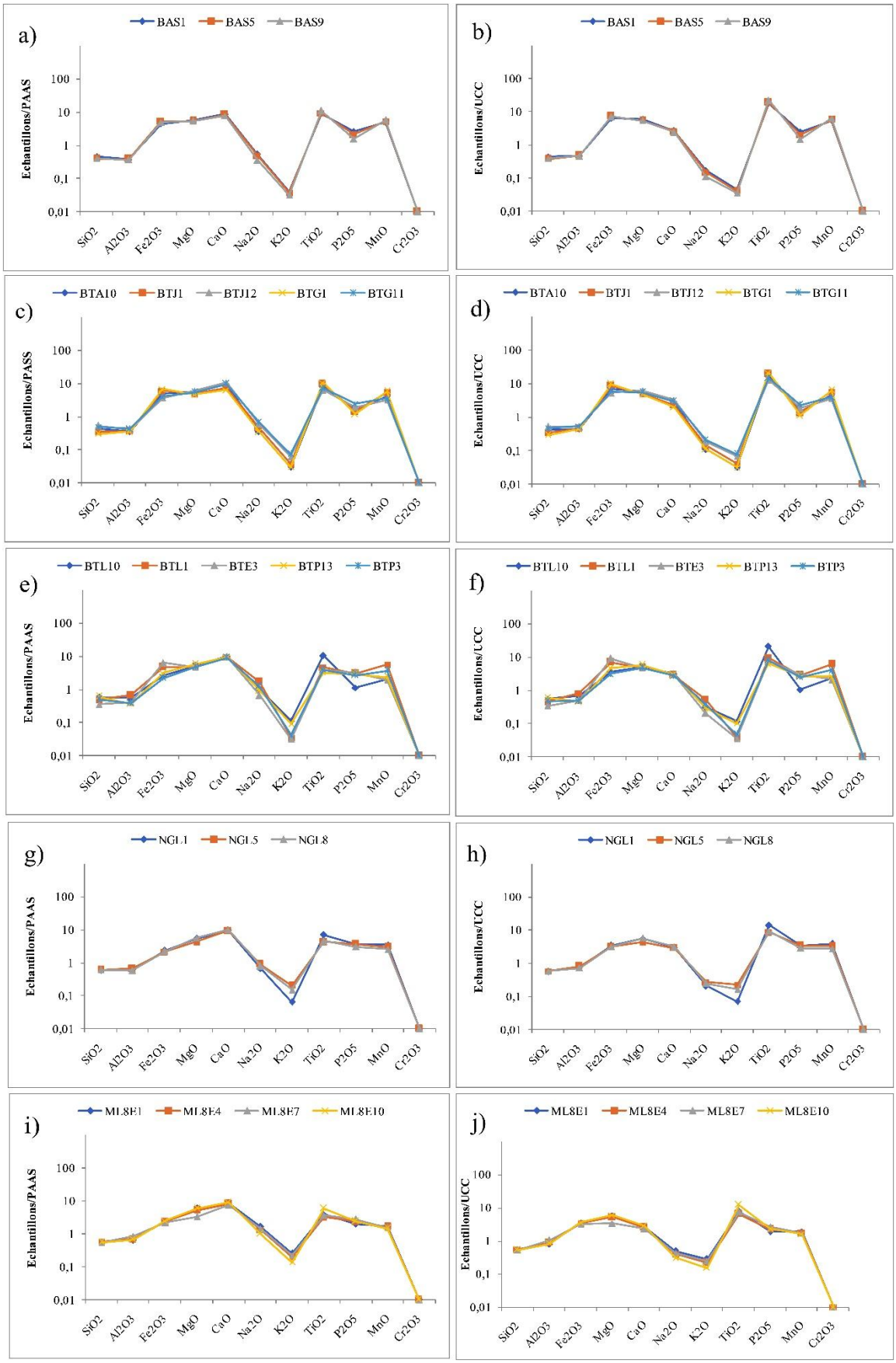


Figure 39. Spectres des éléments majeurs des sédiments de plages de Limbé normalisés par rapport aux valeurs du PAAS (a, c, e, g et i) et à l'UCC (b, d, f, h et j) d'après Taylor et McLennan (1985).

Le Fe_2O_3 montre des teneurs élevées dans tous les échantillons avec une concentration moyenne de 24,61 %. Cette concentration moyenne est supérieure à celle de l'UCC (4,5 %) et au PAAS (6,5 %). Les proportions en MnO varient entre 0,21 et 0,61 % avec une moyenne de 0,34 %. Cette teneur moyenne est faible comme celles des plages Bakinguili, Batoké, PAAS et UCC. Les teneurs en MgO et CaO (10,28 à 12,46 % ; 11,54 à 13,01 % respectivement) sont très élevées par rapport au PAAS et à l'UCC. Les concentrations en Na_2O (0,8 à 2,01 %) et K_2O (0,12 à 0,41 %) évoluent inversement. Les teneurs en K_2O sont toutes inférieures aux PAAS (1,2 %) et à l'UCC (3,4 %), tandis que les teneurs de Na_2O sont toutes inférieures à l'UCC (3,4 %) et supérieures au PAAS (1,2 %), excepté dans les échantillons BTE3 et BTP13. Les teneurs en P_2O_5 sont inférieures à 1 %. Les valeurs du rapport SiO_2/Al_2O_3 sont faibles. La moyenne de ce rapport est 3,8 %, elle est presque identique à celles des plages Bakinguili et Batoké. Les valeurs des rapports K_2O/Na_2O, K_2O/Al_2O_3 et Na_2O/Al_2O_3 sont inférieures à 1 %. Tous les échantillons montrent de fortes valeurs (40,34 à 338) du rapport Fe_2O_3/K_2O. L'évaluation des paramètres d'altérations (CIA, PIA, CIW) sont respectivement comprises entre 70,5 et 81,5 % ; 71,2 et 82,3 % ; 71,6 et 82,5 %. L'ICV est compris entre 4,83 et 9,01. Les standards PAAS et UCC ont été utilisés pour normaliser les éléments majeurs (Taylor et McLennan, 1985). La Figure 39e et f illustre le spectre de normalisation des éléments majeurs par rapport au PAAS et à l'UCC. Ce spectre montre des allures à peu près similaires.

A Nguémé, les proportions en SiO_2 sont comprises entre 37,5 et 38,45 % avec une teneur moyenne de 38,12 % (Tableau 27). Cette teneur moyenne est nettement inférieure au PAAS et à l'UCC. Les teneurs en TiO_2 varient entre 4,26 et 6,98 % avec une moyenne de 5,27 %. La moyenne en TiO_2 est supérieure à celle du PAAS (1 %) et l'UCC (0,5 %). Les concentrations en Al_2O_3 varient entre 11,05 et 12,53 % avec une teneur moyenne de 11,7 %. Cette teneur est inférieure au PAAS (18,9 %) et à l'UCC (15,2 %). Les fortes teneurs en Fe_2O_3 dans tous les échantillons (18,16 à 63,58 %) montrent une valeur moyenne de 35,72 %, qui est nettement supérieure au PAAS (6,5 %) et à l'UCC (4,5 %). Les teneurs en MnO (0,28 à 0,39 %) et P_2O_5 (0,48 à 0,59 %) sont supérieures au PAAS (0,11 et 0,16 % respectivement) et à l'UCC (0,1 et 0,17 % respectivement). Les concentrations en MgO (9,34 à 12,38 %) et CaO (11,92 à 12,95 %) sont élevées et toutes supérieures au PAAS et à l'UCC. Les concentrations en Na_2O (0,81 à 1,06 %) et K_2O (0,24 à 0,77 %) sont toutes inférieures au PAAS (1,2 ; 3,7 %) et à l'UCC (3,4 ; 3,9 %). Les valeurs du rapport SiO_2/Al_2O_3 sont faibles (3,07 à 3,48 %). La moyenne de ce rapport est 3,27 %. Cette moyenne est presque identique à

celles des plages Bakinguili, Batoké et Limbola. Les rapports K_2O/Na_2O, K_2O/Al_2O_3 et Na_2O/Al_2O_3 présentent des valeurs très faibles, inférieures à 1 %. Le rapport Fe_2O_3/K_2O des échantillons montre des valeurs très élevées (18,96 à 63,58 %). Les valeurs des paramètres d'altérations (CIA, PIA, CIW) sont respectivement comprises entre 74,36 et 79,75 % ; 76,59 et 80,86 % ; 77,59 et 81,21 % pour tous les sédiments dans ce secteur. L'ICV montre des valeurs comprises entre 3,29 et 4,13. Les standarts PAAS et UCC ont été utilisés pour normaliser les éléments majeurs (Taylor et McLennan, 1985). Les spectres des éléments majeurs normalisés par rapport au PAAS et à l'UCC présentent des allures à peu près similaires (Figure 39g et h).

A Mile 8, les teneurs en SiO_2 varient entre 34,56 et 36,09 % avec une moyenne de 35,21 % (Tableau 27). Cette moyenne est inférieure au PAAS (62,8 %) et à l'UCC (66 %). La plus forte teneur (36,09 %) s'observe dans l'échantillon ML8E4. Les teneurs en TiO_2 sont comprises entre 3,28 et 5,96 % avec une moyenne de 4,22 %. Cette teneur moyenne en TiO_2 est supérieure à celle de l'UCC (0,5 %) et du PAAS (1 %). Les concentrations en Al_2O_3 varient entre 13,12 et 15,84 %. La moyenne de cet oxyde est de 13,47 %, largement inférieure à celle du PAAS (18,9 %) et de l'UCC (15,2 %). Le Fe_2O_3 montre des teneurs élevées dans tous les échantillons avec une concentration moyenne (15,46 %), supérieure à celle de l'UCC (4,5 %) et du PAAS (6,5 %). Les teneurs en MnO (0,16 à 0,19 %) et P_2O_5 (0,32 à 0,44 %) sont supérieures au PAAS (0,11 et 0,16 % respectivement) et à l'UCC (0,1 et 0,17 % respectivement). Les concentrations en MgO (7,42 à 13,11 %) et CaO (9,59 à 11,57 %) sont très élevées par rapport aux valeurs du PAAS et de l'UCC. Les concentrations en Na_2O (1,21 à 1,96 %) et K_2O (0,51 à 0,96 %) évoluent inversement. Les teneurs en K_2O sont toutes inférieures au PAAS (3,7 %) et à l'UCC (3,4 %). Tandis que les teneurs en Na_2O sont toutes supérieures au PAAS (1,2 %) et inférieures à l'UCC (3,9 %). Le rapport SiO_2/Al_2O_3 est faible. Il varie entre 2,2 et 2,82 avec une moyenne de 2,64 %. . Les rapports K_2O/Na_2O, K_2O/Al_2O_3 et Na_2O/Al_2O_3 sont toutes inférieures à 1 %. Le rapport Fe_2O_3/K_2O présente des valeurs élevées, comprises entre 16,93 et 31,94. L'évaluation des paramètres d'altérations (CIA, PIA, CIW) sont respectivement comprises entre 62,08 et 73,6 % ; 63,5 et 75,22 % ; 65,53 et 76,04 %. L'ICV varie entre 2,36 et 3,87 avec une teneur moyenne de 3,33. Les standards PAAS et UCC ont été utilisés pour normaliser les éléments majeurs (Taylor et McLennan, 1985). La Figure 39i et j illustre le spectre de normalisation des éléments majeurs dans ce secteur par rapport au PAAS et à l'UCC. Les spectres présentent des allures à peu près similaires.

A l'échelle de Limbé, on constate que tous les échantillons de sédiments prélevés à Bakinguili, Batoké, Limbola, Nguémé et Mile 8 ont des faibles teneurs en SiO_2 (26,13 ± 2,06 %, n = 3 ; 26,7 ± 6,1 %, n = 5 ; 31,9 ± 6,2 %, n = 5 ; 38,12 ± 0,54 %, n = 3 ; 35,21 ± 0,67 %, n = 4 ; respectivement). Les variations importantes sont observées dans les concentrations d'Al_2O_3, Fe_2O_3 et TiO_2 (5,56 – 15,84 %, 14,21 – 43,89 %, 3,21 – 11,08 %, respectivement) pour toutes les plages. Les teneurs en MnO, K_2O et Na_2O varient peu, comparés à l'UCC (0,1 ; 3,4 ; 3,9 %, respectivement). Les teneurs en SiO_2 et Al_2O_3 sont faibles, alors que celles de TiO_2, Fe_2O_3, CaO et P_2O_5 sont élevées comparés au PAAS (0,11 ; 3,7 ; 1,2 %, respectivement). L'enrichissement en Fe_2O_3 suggère des roches sources riches en fer. Les faibles valeurs du rapport K_2O/Na_2O pourraient refléter l'abondance des plagioclases par rapport aux feldspaths potassiques.

V.2.2. Distribution des éléments traces

La concentration des éléments traces (en ppm) des sédiments des plages de Bakinguili, Batoké, Limbola, Nguémé et Mile 8 et leurs valeurs moyenne par secteur sont présentées dans le Tableau 28. La Figure 40 montre par secteur, les spectres des valeurs des éléments traces normalisés par rapport à l'UCC et au PAAS (Taylor et McLennan, 1985).

Les éléments traces sont subdivisés en cinq groupes : les métaux de transition (V, Zr, Y, Nb, Hf, Ta, Co, Ni), les métaux alcalins (Rb), les métaux alcalino-terreux (Sr, Ba), les actinides (Th, U) et les autres métaux (Ga, Sn). Le Tableau 28 présente la concentration des éléments traces (en ppm) des sédiments de la plage de Bakinguili.

Groupe des métaux de transition

Le Vanadium (V) est l'élément le plus abondant. Il présente des valeurs très élevées dans tous les échantillons. La teneur la plus élevée est 1124 ppm observée, dans l'échantillon BAS9 et la plus petite teneur est 1036 ppm observée dans l'échantillon BAS1. La teneur moyenne en Vanadium est de 1071,33 ppm. Cette teneur est supérieure à celle du PAAS (150 ppm) et l'UCC (107 ppm). Les teneurs en Zirconium (Zr) sont comprises entre 325,9 et 395,3 ppm. Ces teneurs sont élevées dans tous les échantillons. Les concentrations en Yttrium (Y) sont supérieures à 20 ppm. La teneur moyenne en Niobium (Nb) est de 155,4 ppm. Cette teneur moyenne est supérieure à celle du PAAS (19 ppm) et de l'UCC (12 ppm). Les teneurs en Nb sont élevées dans tous les échantillons (150,6 – 161,2 ppm). Les concentrations en Hafnium (Hf) sont inférieures à 10 ppm. Les teneurs en Tantane (Ta) n'excèdent pas 14,5 ppm. Les concentrations en Nickel (Ni) sont comprises entre 246 et 251 ppm avec une teneur

moyenne de 248,33 ppm. Cette teneur moyenne est très élevée ; elle est supérieure au PAAS (55 ppm) et à l'UCC (44 ppm). Les teneurs en Cobalt (Co) varient entre 131,1 et 142,6 ppm avec une concentration moyenne de 136,3 ppm.

Groupe des métaux alcalins

La teneur en Rubidium varie entre 2,9 et 3,3 ppm avec une teneur moyenne de 3,1 ppm. La plus faible teneur (2,9 ppm) s'observe dans l'échantillon BAS9 et la plus grande teneur (3,3 ppm) dans l'échantillon BAS5.Cette teneur moyenne est très faible par rapport au PAAS (160 ppm) et à l'UCC (112 ppm).

Groupe des métaux alcalino-terreux

Les métaux alcalino-terreux dans ce secteur ont des teneurs en Strontium (Sr) très élevées. Elles varient entre 401,8 et 451,5 ppm pour une teneur moyenne de 426,2 ppm. La teneur maximale (451,5 ppm) s'observe dans l'échantillon BAS1 et la teneur minimale (401,8) ppm) dans l'échantillon BAS9. Elle est supérieure au PAAS (200 ppm) et à l'UCC (350 ppm). La concentration en Baryum (Ba) est élevée dans tous les échantillons. Elle varie entre 148 et 159 ppm, avec une concentration moyenne de 153 ppm. Cette concentration moyenne est faible comparée à celle du PAAS (650 ppm) et de l'UCC (550 ppm).

Groupe des actinides

Les teneurs en Thorium (Th) sont comprises entre 20,5 et 20,8 ppm. La teneur la plus faible est de 20,5 ppm et s'observe dans l'échantillon BAS1 et la plus élevée est de 20,8 ppm ets'observe dans l'échantillon BAS9. Les concentrations en Uranium (U) sont très faibles. Elles varient entre 2,6 et 2,8 ppm avec une teneur moyenne de 2,7 ppm.

Groupe des autres métaux

Les concentrations en Galium (Ga) varient entre 25,4 et 27,3 ppm avec une teneur moyenne de 26,47 ppm. Cette teneur moyenne est supérieure à celle du PAAS (20 ppm) et à l'UCC (17 ppm). L'étain (Sn) possède des teneurs très faibles qui ne varient pas (3 ppm).

Le rapport Zr/Hf présente des valeurs comprises entre 34,67 et 41,49 ppm. Les rapports Rb/Sr, U/Th, Th/Co et Th/Sc sont inférieures à 1 ppm. Les valeurs du rapport Ni/Co varient entre 1,74 et 1,91 ppm. Celle du Th/U est comprise entre 7,43 et 7,88 ppm tandis que Sr/Ba varie entre 2,53 et 2,97 ppm.

Tableau 28. Teneur (en ppm) des éléments traces dans les sables de plage de Limbé

Localisation		Bakinguili (n = 3)					Batoké (n = 5)							Limbola (n = 5)						
Echs	l.d	BAS1	BAS5	BAS9	Moy	± 1σ	BTA10	BTJ1	BTJ12	BTG1	BTG11	Moy.	± 1σ	BTL10	BTL1	BTE3	BTP13	BTP3	Moy.	± 1σ
Ba	1	148	152	159	153	5,57	139	162	185	165	219	174	30	246	294	451	169	221	276	108
Ni	20	246	248	251	248,33	2,52	262	253	248	257	236	251	10	201	156	247	229	207	208	34
Sc	1	31	29	28	29,33	1,53	33	28	37	25	33	31	5	31	38	27	34	25	31	5
Co	0,2	135,2	142,6	131,1	136,3	5,83	123	146	97,1	166	104	127	29	54,1	60,7	108	51,4	61,9	67,2	23
Ga	0,5	26,7	27,3	25,4	26,47	0,97	27,7	31,3	22,2	33	24,2	27,7	4,6	17,5	17,8	19,4	23,1	20,5	19,7	2,3
Hf	0,1	9,8	8,6	9,4	9,27	0,61	9,7	8,2	10,9	7,3	9,8	9,2	1,4	9,5	11,4	10,5	11,1	11	10,7	0,74
Nb	0,1	150,6	154,4	161,2	155,4	5,37	146	154	118	165	165	150	20	14,51	116	122	146	140	108	53,5
Rb	0,1	3,1	3,3	2,9	3,1	0,2	2,6	3,2	5,1	2,7	5,3	3,8	1,3	8,7	9,4	14,6	5,3	8,4	9,28	3,36
Sn	1	3	3	3	3	0	3	3	3	3	3	3	0	3	3	3	3	3	3	0
Sr	0,5	425,3	451,5	401,8	426,2	24,86	502	452	584	402	651	518	100	846	726	748	104	947	674	331
Ta	0,1	14,5	13,5	14,2	14,07	0,51	11,8	11,5	9,6	14,1	13	12	1,69	8,4	7,7	7,9	9,4	9,9	8,66	0,96
Th	0,2	20,5	20,6	20,8	20,63	0,15	20,2	20,6	14,2	20,6	21,7	19,46	2,99	12,1	12	11,4	11,6	14,6	12,34	1,3
U	0,1	2,6	2,7	2,8	2,7	0,1	2,6	2,7	1,7	2,8	2,9	2,54	0,48	2,7	3,8	3,8	2,8	2,9	3,2	0,55
V	8	1036	1054	1124	1071,33	46,49	864	1072	631	1227	720	903	246	341	386	746	840	859	634	252
Zr	0,1	395,3	356,8	325,9	359,33	34,77	394	356	449	316	412	385	51,3	464	482	413	483	472	463	29
Y	0,1	22,8	21,6	22,6	22,33	0,64	27,8	25,3	28	21,9	30,4	26,7	3,2	31,6	33,6	36	30,1	32,7	32,8	2,21
Zr/Hf	-	40,34	41,49	34,67	38,83	3,65	40,6	43,5	41,2	43,2	42	42	1,25	49	42	39	44	43	43	4
Th/U	-	7,88	7,63	7,43	7,65	0,23	7,77	7,63	8,35	7,36	7,48	7,72	0;39	4,48	3,16	3	4,14	5,03	3,96	0,87
Th/Sc	-	0,66	0,71	0,74	0,7	0,04	0,61	0,74	0,38	0,82	0,66	0,64	0,17	0,39	0,32	0,42	0,34	0,58	0,41	0,1
U/Th	-	0,13	0,13	0,13	0,13	0,004	0,13	0,13	0,12	0,14	0,13	0,13	0,01	0,22	0,32	0,33	0,24	0,2	0,26	0,06
Th/Co	-	0,15	0,14	0,16	0,15	0,01	0,16	0,14	0,15	0,12	0,21	0,16	0,03	0,22	0,2	0,11	0,23	0,24	0,2	0,05
Ni/Co	-	1,82	1,74	1,91	1,82	0,09	2,13	1,73	2,55	1,54	2,26	2,04	0,41	3,72	2,57	2,3	4,46	3,34	3,28	0,87
Rb/Sr	-	0,01	0,01	0,01	0,01	4,81	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0,02	0,05	0,01	0,01	0,02
Sr/Ba	-	2,87	2,97	2,53	2,79	0,23	3,61	2,79	3,16	2,44	2,97	2,99	0,43	3,44	2,47	1,66	0,62	4,29	2,45	1,44

Localisation		Nguémé (n = 3)					Mile 8 (n = 4)						Limbé (n = 20)		UCC	PAAS
Echs	l.d	NGL1	NGL5	NGL8	Moy	± 1σ	ML8E1	ML8E4	ML8E7	ML8E10	Moy.	± 1σ	Moy.	± 1σ		
Ba	1	356	425	396	392,33	34,65	406	186	194	185	242,75	108,91	242,9	104,75	550	650
Ni	20	146	140	189	158,33	26,73	157	89	83	91	105	34,83	196,8	61,44	44	55
Sc	1	29	28	31	29,33	1,53	35	27	23	26	27,75	5,12	29,9	4,12	13,6	16
Co	0,2	60,3	51,3	62,5	58,03	5,93	34,2	41,5	35,9	46,8	39,6	5,72	85,68	42,62	17	23
Ga	0,5	18,5	19,2	17,8	18,5	0,7	18,7	20,2	21,8	23	20,93	1,88	22,77	4,56	17	20
Hf	0,1	11,1	10,6	11,2	10,97	0,32	10,2	10,9	11,5	10,5	10,78	0,56	10,16	1,13	5,8	5
Nb	0,1	124,6	131,8	120,5	125,63	5,72	201,6	198,2	206,7	201,8	202,08	3,5	146,89	42,67	12	19
Rb	0,1	13,9	14,1	12,5	13,5	0,87	14,2	13,3	15,2	13,9	14,15	0,79	8,59	4,92	112	160
Sn	1	2	2	2	2	0	3	3	3	3	3	0	2,85	0,37	5,5	-
Sr	0,5	869,2	906,4	796	887,2	56,17	569,1	624,8	676,6	599,7	617,55	45,48	614,12	210,06	350	200
Ta	0,1	9,8	9,2	8,9	9,3	0,46	10,2	9,2	10,5	10,1	10	0,56	10,67	2,15	1	1,8
Th	0,2	13,5	12,1	13,2	12,93	0,74	14,6	15,2	16,7	14,9	15,35	0,93	16,06	3,75	10,7	14,6
U	0,1	1,8	2,1	1,9	1,93	0,15	3,2	3,7	4,5	3,9	3,83	0,54	2,89	0,74	2,8	3,1
V	8	385	326	346	352,33	30,01	245	258	249	301	263,25	25,75	650,5	341,9	11	150
Zr	0,1	482,1	492,7	429,1	467,97	34,07	512,6	498,3	512,3	529,7	513,23	12,85	438,79	64,84	190	210
Y	0,1	33,8	36,4	33,4	34,53	1,63	42,6	41,8	42,7	39,5	41,65	1,49	31,73	6,84	22	27
Zr/Hf	-	43,43	46,48	38,31	42,74	4,13	50,25	45,72	44,55	50,45	47,74	3,05	43,16	3,93	33	42
Th/U	-	7,5	5,76	6,95	6,74	0,89	4,56	4,11	3,71	3,82	4,05	0,38	5,89	1,86	3,8	4,71
Th/Sc	-	0,47	0,43	0,43	0,44	0,02	0,42	0,56	0,73	0,57	0,57	0,13	0,55	0,15	0,8	0,91
U/Th	-	0,13	0,17	0,14	0,15	0,02	0,22	0,24	0,27	0,26	0,25	0,02	0,19	0,07	0,26	0,21
Th/Co	-	0,22	0,24	0,21	0,22	0,01	0,43	0,37	0,47	0,32	0,39	0,06	0,22	0,09	0,63	0,63
Ni/Co	-	2,42	2,73	3,02	2,72	0,3	4,59	2,14	2,31	1,94	2,75	1,24	2,56	0,87	2,59	2,39
Rb/Sr	-	0,02	0,02	0,02	0,02	0,0002	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,002	0,02	0,01	0,32	0,8
Sr/Ba	-	2,44	2,13	2,01	2,19	0,22	1,4	3,36	3,49	3,24	2,87	0,99	2,69	0,85	0,64	0,31

l.d : limite de détection, PAAS : Post-Archean Average Australian Shale (Taylor et McLennan, 1985); UCC : Upper Continental Crust (Taylor et McLennan, 1985). Moy. = moyenne, 1σ = déviation standart, n = nombre total des échantillons, Echs. Echantillons

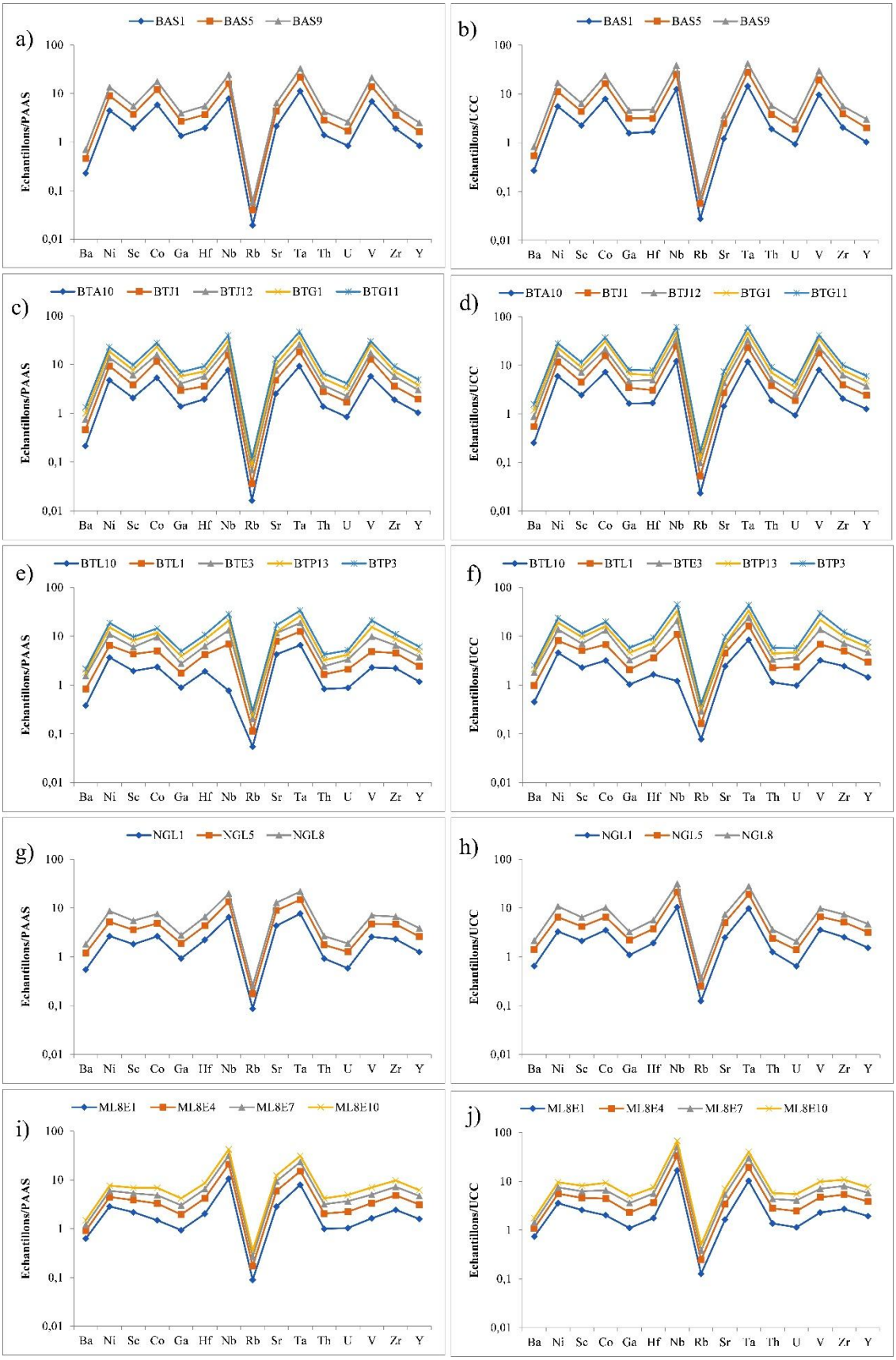


Figure 40. Spectres des éléments traces des sédiments de plages de Limbé normalisés par rapport aux valeurs du PAAS (a, c, e, g et i) et à l'UCC (b, d, f, h et j) d'après Taylor et McLennan (1985).

A Batoké, le Tableau 28 présente les teneurs des éléments traces (en ppm) des sédiments de plage dans ce secteur. On y rencontre :

Groupe des métaux de transition

Les teneurs en Vanadium (V) sont très élevées dans tous les échantillons. Elles varient entre 631 et 1227 ppm.La moyenne de cet élément est de 903 ppm. Cette teneur moyenne est également supérieure au PAAS et à l'UCC. Le Zirconium (Zr) présente une teneur moyenne de 385 ppm. Les concentrations maximales (412 ppm et 449 ppm) s'observent respectivement dans les échantillons BTG11et BTJ12. La concentration minimale (316 ppm) se trouve dans l'échantillon BTG1. Les teneurs en Yttrium (Y) sont supérieures à 20 ppm. Les concentrations en Niobium (Nb) sont comprises entre 118 et 165 ppm. Le Tantale (Ta) a des teneurs qui varient entre 9,6 et 14,1 ppm. Les teneurs en Hafnium sont comprises entre 7,3 et 10,9 ppm avec une concentration moyenne de 9,2 ppm. La plus faible concentration en Hafnium (7,3 ppm) s'observe dans l'échantillon BTG1 et la plus élevée (10,9 ppm) s'observe dans l'échantillon BTJ12. Les teneurs en Nickel (Ni) sont élevées. Elles varient entre 236 et 262 ppm, avec une teneur moyenne de 251 ppm. La teneur moyenne en Cobalt (Co) pour tous les échantillons est de 127 ppm. Cette teneur moyenne est supérieure à celle du PAAS (23 ppm) et l'UCC (17 ppm).

Groupe des métaux alcalins

Les concentrations en Rubidium varient entre 2,6 et 5,3 ppm avec une teneur moyenne de 3,8 ppm. Cette teneur moyenne est inférieure à 10 ppm. Elle est très faible par rapport au PAAS (160 ppm) et à l'UCC (112 ppm).

Groupe des métaux alcalino-terreux

La concentration en Strontium (Sr) est très élevée.Elle varie entre 402 et 651 ppm, avec une concentration moyenne de 518 ppm. La proportion maximale (651 ppm) de cet élément s'observe dans l'échantillon BTG11. La teneur en Sr est très élevée par rapport au PAAS (200 ppm) et à l'UCC (350 ppm).

Les teneurs en Baryum (Ba) varient entre 139 et 219 ppm avec une concentration moyenne de 174 ppm. Cette concentration moyenne est inférieure à celle du PAAS (650 ppm) et l'UCC (550 ppm).

Groupe des actinides

Le Thorium (Th) possède une teneur élevée (21,7 ppm) dans l'échantillon BTG11 et une valeur faible (14,2 ppm) dans l'échantillon BTJ12. La concentration moyenne dans tous les échantillons est de 19,46 ppm.

Les concentrations en Uranium (U) sont très faibles. Elles varient entre 1,7 et 2,9 ppm pour une teneur moyenne de 2,54 ppm. Cette teneur moyenne est inférieure à celle du PAAS (3,1 ppm) et à celle de l'UCC (2,8 ppm).

Groupe des autres métaux

Les concentrations en Galium (Ga) varient entre 22, 2 et 33 ppm, avec une teneur moyenne de 27,7 ppm. Cette teneur moyenne est supérieure à celle du PAAS (20 ppm) et de l'UCC (17 ppm). La teneur en étain (Sn) ne varie pas. Elle est de l'ordre de 3 ppm.

Les valeurs du rapport Zr/Hf sont comprises entre 40,6 et 43,2 ppm. Les rapports Rb/Sr, U/Th, Th/Co et Th/Sc n'excèdent pas 1 ppm. Les valeurs du rapport Ni/Co, Sr/Ba et Th/U sont comprises entre (1,54 et 2,26 ppm) ; (2,44 et 3,61 ppm) et (7,36 et 8,35 ppm) respectivement.

A Limbola, les concentrations des éléments traces (en ppm) dans ce secteur sont consignées dans le Tableau 28. Les éléments traces sont subdivisés en cinq groupes.

Groupe des métaux de transition

Les teneurs en vanadium (V) varient entre 341 et 859 ppm. Elles sont très élevées dans les échantillons BTE3 (746 ppm) ; BTP13 (840 ppm) et BTP3 (859 ppm). Le zirconium (Zr) montre de très fortes teneurs dans tous les échantillons. Les teneurs sont comprises entre 413 et 483 ppm. Les concentrations en yttrium (Y) sont supérieures à 20 ppm. Les teneurs en niobium varient entre 14,51 et 146 ppm. La teneur maximale (146 ppm) est observée dans l'échantillon BTP13 et minimale (14,51 ppm) dans l'échantillon BTL10. La teneur moyenne en hafnium est de 10,7 ppm, supérieure à celle du PAAS (5 ppm) et de l'UCC (5,8 ppm). Les concentrations du tantale (Ta) varient entre 7,7 et 9,9 ppm. La plus forte concentration (108 ppm) en cobalt (Co) s'observe dans l'échantillon BTE3 et la plus faible (51,4 ppm) dans l'échantillon BTP13. La teneur en nickel (Ni) varie entre 156 et 247 ppm, avec une moyenne très élevée par rapport au PAAS (55 ppm) et l'UCC (44 ppm).

Groupe des métaux alcalins

Les concentrations en rubidium (Rb) varient entre 5,3 et 14,6 ppm. La concentration maximale (14,6 ppm) s'observe dans l'échantillon BTE3 et minimale (5,3 ppm) dans l'échantillon BTP13. La teneur moyenne en Rb est de 9,28 ppm, ce qui est très faible par rapport au PAAS (160 ppm) et à l'UCC (112 ppm).

Groupe des métaux alcalino-terreux

Le baryum (Ba) présente des valeurs élevées dans tous les échantillons. La teneur maximale (451 ppm) est observée dans l'échantillon BTE3 et minimale (169 ppm) dans l'échantillon BTP13. La teneur moyenne en baryum (Ba) est de 276 ppm. Cette teneur moyenne est inférieure à celle du PAAS (650 ppm) et l'UCC (550 ppm).

Le strontium (Sr) présente des teneurs très élevées. Ces teneurs varient entre 104 et 947 ppm. La teneur moyenne en Sr observée est de 674 ppm. Par rapport au PAAS (200 ppm) et l'UCC (350 ppm), la teneur moyenne en Sr est très élevée.

Groupe des actinides

Le thorium (Th) a des valeurs comprises entre 11,4 et 14,6 ppm. Sa teneur moyenne est de 12,34 ppm. Les concentrations en uranium (U) sont très faibles. La valeur minimale (2,7 ppm) s'observe dans l'échantillon BTL10 et maximale (3,8 ppm) dans les échantillons BTL1et BTE3.

Groupe des autres métaux

Le galium (Ga) possède des teneurs modérées, qui varient entre 17,5 ppm dans l'échantillon BTL10 et 23,1 ppm dans l'échantillon BTP13. Les teneurs en étain (Sn) sont très faibles et ne varient pas. Elles sont de l'ordre de 3 ppm dans tous les échantillons.

La teneur moyenne du rapport Zr/Hf (43 ppm) est élevée. Cette teneur est presque identique à celle de la plage Batoké (42 ppm). Les teneurs des rapports Rb/Sr, U/Th, Th/Co et Th/Sc sont inférieures à 1 ppm. Les valeurs des rapports Ni/Co (2,3 et 4,46 ppm);Sr/Ba (0,62 et 4,29 ppm) et Th/U (3 et 5,03 ppm) sont inférieures à 10 ppm.

A Nguémé, les concentrations des éléments traces (en ppm) dans ce secteur sont présentées dans le Tableau 28. On note :

Groupe des métaux de transition

Le vanadium (V) présente des valeurs élevées. La teneur minimale (326 ppm) est observée dans l'échantillon NGL5 et maximale (385 ppm) dans l'échantillon NGL1. La teneur moyenne en V est 352,33 ppm. Le zirconium est le plus abondant avec des valeurs comprises entre 429,1 et 492,7 ppm. La teneur moyenne en Zr est de 467,97 ppm. Cette teneur moyenne est presque égale à celle de la plage Limbola (463 ppm). L'yttrium présente des teneurs supérieures à 20 ppm. Les teneurs en Niobium sont comprises entre 120,5 et 131,8 ppm avec une teneur moyenne de 125,63 ppm.

Le tantale montre des valeurs comprises entre 8,9 et 9,8 ppm avec une teneur moyenne de 9,3 ppm. Cette teneur moyenne est presque égale à celle de la plage Limbola (8,66 ppm) et supérieure à celle du PAAS (1,28 ppm) et l'UCC (1 ppm). Le hafnium présente des teneurs faibles. La teneur minimale (10,6 ppm) est observée dans l'échantillon NGL5 et la teneur maximale (11,2 ppm) dans l'échantillon NGL8. Les teneurs en Ni varient entre 140 et 189 ppm. La concentration moyenne en Co (58,03 ppm) est très élevée par rapport à celle du PAAS (23 ppm) et l'UCC (17 ppm).

Groupe des métaux alcalins

Le rubidium (Rb) montre des valeurs comprises entre 12,5 et 14,1 ppm. Ces valeurs sont relativement très faibles par rapport au PAAS (160 ppm) et à l'UCC (112 ppm).

Groupe des métaux alcalino-terreux

Le strontium présente des teneurs très élevées dans tous les échantillons (796 – 906,4 ppm). La concentration moyenne est de 887,2 ppm. Cette concentration moyenne est supérieure à celle du PAAS (200 ppm) et l'UCC (350 ppm). Les teneurs en baryum varient entre 356 et 425 ppm. Ces teneurs sont très élevées, elles sont inférieures à celles du PAAS (650 ppm) et l'UCC (550 ppm).

Groupe des actinides

La teneur moyenne en thorium (Th) est de 12,93 ppm. Cette concentration moyenne est légèrement supérieure à l'UCC (10,7 ppm) et inférieure au PAAS (14,6 ppm). Les teneurs en uranium (U) sont très faibles dans tous les échantillons. La teneur moyenne en U est de 1,93 ppm. Cette teneur moyenne est sensiblement égale à celle du PAAS (3,1 ppm) et supérieure à celle de l'UCC (2,8 ppm).

Groupe des autres métaux

Les concentrations en galium (Ga) sont modérées, elles varient entre 17,8 et 19,2 ppm. Les teneurs en étain (Sn) sont très faibles (2 ppm) et ne varient pas dans tous les échantillons.

Les valeurs du rapport Zr/Hf sont élevées. Elles sont comprises entre 38,31 et 46,48 ppm. Les rapports Rb/Sr, U/Th, Th/Co et Th/Sc ont des concentrations inférieures à 1 ppm. Les teneurs des rapports Ni/Co, Sr/Ba et Th/U sont inférieures à 10 ppm. Elles varient entre (2,42 – 3,02 ppm) ; (2,13 – 2,44 ppm) et (5,76 – 7,5 ppm) respectivement.

A Mile 8, les concentrations des éléments traces (en ppm) dans ce secteur sont consignées dans le Tableau 28. Les éléments traces rencontrées sont subdivisés en cinq groupes.

Groupe des métaux de transition

Les teneurs en V sont très élevées. Elles varient entre 245 et 301 ppm, avec une teneur moyenne de 263,25 ppm. Cette teneur moyenne est faible contrairement à celle des échantillons des plages Bakinguili, Batoké, Limbola et Nguémé. Par contre la teneur moyenne en V dans ce secteur est élevée par rapport au PAAS (150 ppm) et à l'UCC (107 ppm). Les éléments comme le zirconium (498,3 – 529,7), le nickel (83 – 157), le niobium (198,2 – 206,7 ppm) et le cobalt (34,2 – 46,8 ppm) ont de fortes concentrations dans tous les échantillons. Les concentrations en yttrium (Y) sont supérieures à 20 ppm. Les teneurs en Hf varient entre 10,2 et 11,5 ppm, avec une teneur moyenne de 10,78 ppm. Le tantale montre des valeurs comprises entre 9,2 et 10,5 ppm, avec une teneur moyenne de 10 ppm.

Groupe des métaux alcalins

Le rubidium (Rb) se trouve en faible proportion dans les échantillons. La valeur maximale (15,2 ppm) est observée dans l'échantillon ML8E7 et la valeur minimale (13,3 ppm) est observée dans l'échantillon ML8E4.

Groupe des métaux alcalino-terreux

La concentration en Sr varie entre 569,1 et 676,6 ppm. La teneur moyenne est de 617,55 ppm. Cette teneur moyenne est très élevée par rapport au PAAS (200 ppm) et l'UCC (350 ppm). La teneur en baryum (Ba) est élevée dans tous les échantillons. Elle varie entre

185 et 406 ppm, mais sa concentration moyenne est faible (242,75 ppm) comparée à celle du PAAS (650 ppm) et l'UCC (550 ppm).

Groupe des actinides

Les teneurs en thorium (Th) montrent des proportions comprises entre 14,6 et 16,7 ppm. Les concentrations en uranium (U) sont très faibles et varient entre 3,2 et 4,5 ppm. La teneur moyenne en U est de 3,83 ppm.

Groupe des autres métaux

Les concentrations en galium (Ga) sont modérées. Elles sont comprises entre 18,7 et 23 ppm avec une moyenne de 20,93 ppm. Les teneurs en étain (Sn) sont de l'ordre de 3 ppm dans tous les échantillons.

Le rapport Zr/Hf présente des valeurs comprises entre 44,55 et 50,45 ppm. Ce rapport est élevé dans tous les échantillons. Les rapports Rb/Sr, U/Th, Th/Co et Th/Sc présentent des concentrations inférieures à 1 ppm. Les valeurs en Ni/Co (1,94 – 4,59 ppm), Sr/Ba (1,4 – 3,49 ppm) et Th/U (3,71 – 4,56 ppm) sont inférieures à 10 ppm.

V.2.3. Distribution des terres rares

Les concentrations des REE contenues dans les différents échantillons des plages de Limbé sont consignées dans le Tableau 29.

A Bakinguili, les concentrations en REE sont connues et présentées dans le Tableau 29 et illustrée par les Figures 41a et b. La teneur du Lanthane (La) varie entre 173,9 et 176,8 ppm avec une moyenne de 174,97 ppm. Cette moyenne est supérieure à celle de la Chondrite (0,237 ppm) et à l'UCC (30 ppm). Le Cérium (Ce) présente des concentrations très élevées dans tous les échantillons. Les proportions en Cérium sont comprises entre 347,3 et 359,2 ppm. Le Praséodyme (Pr) montre des proportions modérées (40,8 – 42,68 ppm). Le Samarium (Sm) et le Gadolinium (Gd) ont des concentrations qui varient entre (13,12 – 18,88 ppm) et (11,28 – 12,01 ppm), respectivement. Les variations des teneurs en Samarium (Sm) et Gadolinium (Gd) s'observent dans tous les échantillons. Les concentrations en Néodyme (Nd) varient entre 144,5 et 151,2 ppm pour tous les échantillons. La moyenne est de 147,63 ppm. L'Europium (Eu) et le Dysprosium (Dy) ont des teneurs relativement faibles. Ces teneurs varient entre (4,79 – 5,18 ppm) et (6,41 – 6,58 ppm), respectivement. L'Erbium (Er), l'Ytterbium (Yb) s'illustrent par des proportions comprises respectivement entre 2,36 et 2,44

ppm) et (1,71 et 1,85 ppm). Le Terbium (Tb), l'Hofmium (Ho), le Thulium (Tm) et le Lutétium (Lu) ont des teneurs légèrement supérieures à 1 ppm respectivement dans les échantillons BAS5 et BAS9 pour le Terbium et l'Hofmium, et des teneurs strictement inférieures à 1 ppm dans tous les échantillons pour le Thulium. Les teneurs en Lutétium varient entre 0,25 et 2,25 ppm. La somme des terres rares dans les échantillons varie entre 764,49 et 775,29 ppm. Le rapport LREE/HREE compris entre 41,23 et 56,35 ppm montre un enrichissement en terres rares lègères par rapport aux terres rares lourdes.

Les teneurs en terres rares à Batoké sont rapportées dans le Tableau 29 et les spectres sont illustrés pour les Figures 41c et d. La concentration du Lanthane est très élevée (180 ppm) dans l'échantillon BTG11 et faible (138 ppm) dans l'échantillon BTJ12. La teneur moyenne (169 ppm) est sensiblement égale à la plage de Bakinguili (174,9 ppm) et supérieure à celle de l'UCC (30 ppm) et de la Chondrite. Le Cérium est l'élément le plus enrichi (290 – 382 ppm) dans tous les échantillons, suivis du Néodyme (Nd). La teneur en Nd est comprise entre 122 et 159 ppm avec une concentration moyenne de 146 ppm. Cette concentration est supérieure à l'UCC (26 ppm) et la chondrite (0,47 ppm). Le Praséodyme présente des teneurs modérées (33,23 à 43,08 ppm). Le Samarium (17,91 à 21,03 ppm), le Gadolinium (11,45 à 13,75 ppm) et le Dysprosium (6,04 à 7,7 ppm) ont des teneurs considérables. Ces teneurs sont supérieures à l'UCC et à la Chondrite. Les teneurs les plus faibles sont enregistrées pour le Lutétium, le Thulium, l'Hofnium, le Terbium, l'Ytterbium, l'Erbium et l'Europium, dont les valeurs varient entre 0,21 et 5,43 ppm (Tableau 29). La somme des terres rares varie entre 633,41 et 822,15 ppm dans les échantillons, qui caractérise un enrichissement en terres rares légères (LREE) par rapport aux terres rares lourdes (LREE/HREE ont des valeurs de 39,66 à 59,76 ppm).

A Limbola, les concentrations des REE dans les échantillons sont consignées dans le Tableau 29 et illustrés par la Figure 41e et f. Les teneurs en La et Ce sont très élevées. Elles sont respetivement comprises entre (116 et 184 ppm) et (227 et 288 ppm). Les valeurs du Nd sont comprises entre 105 et 115 ppm avec une moyenne de 108 ppm.Celles du Pr varient entre 27,01 et 41,51 ppm. Les valeurs du Sm (14,08 à 16,41 ppm), le Gd (11,06 à 12,81 ppm) et le Dy (7,14 à 7,56 ppm) sont considérables. Les éléments comme l'Hofmium (1,33 à 1,51 ppm), Erbium (3,21 à 3,58 ppm, Terbium (1,54 à 1,68 ppm) et l'Ytterbium (2,41 à 4,01 ppm) ont des teneurs faibles, supérieures à l'UCC et à la Chondrite. Les autres éléments (Tm et Lu) ont des teneurs très faibles (0,24 à 0,56 ppm).

Tableau 29. Teneur (en ppm) des terres rares dans les sables de plage de Limbé.

Localisation		**Bakinguili (n = 3)**					**Batoké (n = 5)**							**Limbola (n = 5)**						
Echs	l.d	BAS1	BAS5	BAS9	Moy.	± 1σ	BTA10	BTJ1	BTJ12	BTG1	BTG11	Moy.	± 1σ	BTL10	BTL1	BTE3	BTP13	BTP3	Moy.	± 1σ
La	0,1	174,2	176,8	173,9	174,97	1,59	178	178	138	171	180	169	17,8	171	184	179	116	118	154	34
Ce	0,1	359,2	347,3	356,4	354,3	6,22	375	370	290	356	382	355	37	227	238	288	229	254	247	25
Pr	0,02	40,8	42,68	41,02	41,5	1,03	42,75	41,29	33,23	40,27	43,08	40,12	4,02	41,51	28,51	27,01	27,61	27,41	30,41	6,23
Nd	0,3	147,2	151,2	144,5	147,63	3,37	154	148	122	146	159	146	14	105	108	107	105	115	108	4
Sm	0,05	18,69	13,12	18,88	18,9	0,22	20,23	19,21	17,91	8,28	21,03	19,33	1,31	16,41	14,08	16,12	16,14	15,31	15,61	0,95
Eu	0,02	4,83	4,79	5,18	4,93	0,21	5,19	4,79	4,65	4,66	5,43	4,94	0,35	4,53	4,43	3,9	4,21	4,51	4,32	0,26
Gd	0,05	12,01	11,65	11,28	11,65	0,37	13,08	11,61	12,24	11,45	13,75	12,43	0,98	11,67	12,81	11,41	11,06	11,67	11,72	0,66
Tb	0,01	4,38	1,43	1,33	2,38	1,73	1,58	1,43	1,5	1,34	1,72	1,51	0,15	1,54	1,59	1,72	1,62	1,68	1,63	0,07
Dy	0,05	6,36	6,58	6,41	6,45	0,12	6,5	6,54	7,3	6,04	7,7	6,82	0,67	7,16	7,18	7,14	7,54	7,56	7,32	0,21
Ho	0,02	0,96	1,11	0,98	1,02	0,08	1,1	1,01	1,11	0,95	1,24	1,08	0,11	1,41	1,51	1,28	1,43	1,33	1,39	0,09
Er	0,03	2,38	2,44	2,36	2,39	0,04	2,58	2,39	2,78	2,08	3,16	2,6	0,41	3,41	3,21	3,54	3,58	3,36	3,42	0,15
Tm	0,01	0,31	0,29	0,33	0,31	0,02	0,34	0,3	0,36	0,28	0,4	0,34	0,05	0,44	0,46	0,43	0,54	0,56	0,49	0,06
Yb	0,05	1,75	1,85	1,71	1,77	0,07	2,12	1,86	2,23	1,61	2,32	2,03	0,29	2,7	2,69	2,41	2,79	4,01	2,92	0,63
Lu	0,01	2,22	2,25	0,21	1,56	1,17	0,3	0,24	0,3	0,21	0,32	0,27	0,05	0,38	0,41	0,38	0,47	0,24	0,38	0,08
REE	-	775,29	769,49	764,49	769,76	5,4	802	788	633	760	822	761	75	594	608	649	527	564	588	46
LREE	-	756,93	753,54	751,16	753,88	2,89	774	762	606	736	792	734	74	565	578	621	498	534	559	47
HREE		18,36	15,95	13,33	15,88	2,51	27,6	25,38	27,82	23,96	30,61	27,07	2,5	28,71	29,86	28,31	29,03	30,41	29,26	0,86
LREE/HREE	-	41,23	47,24	56,35	48,27	7,61	28	30	22	31	26	27	4	20	19	22	17	18	19	2
Ce/Ce*	-	1,03	0,97	1,02	1,01	0,03	1,04	1,05	1,04	1,04	1,05	1,04	0,01	0,65	0,8	1	0,98	1,08	0,9	0,17
Eu/Eu*	-	1,23	0,99	0,98	1,06	0,14	0,98	0,98	0,96	0,99	0,98	0,98	0,01	1	1,01	0,88	0,97	1,03	0,98	0,06
La/Th	-	8,5	8,58	8,36	8,48	0,11	8,79	8,66	9,7	8,3	8,3	8,75	0,57	14,15	15,34	15,74	10,02	8, 1	12,67	3,42
La/Sc	-	5,62	6,1	6,21	5,98	0,31	5,38	6,37	3,72	6,84	5,46	5,55	1,2	5,52	4,84	6,64	3,42	4,73	5,03	1,18
$(La/Yb)_{cn}$	-	67,62	64,92	69,08	67,21	2,11	56,88	65,12	41,98	72,15	52,76	57,78	11,58	43,07	46,49	50,57	28,29	20,02	37,69	12,97
$(La/Sm)_{cn}$	-	5,82	5,77	5,75	5,78	0,03	5,48	5,8	4,8	5,84	5,35	5,45	0,42	6,51	8,17	6,95	4,5	4,82	6,19	1,53
$(Gd/Yb)_{cn}$	-	5,55	5,09	5,34	5,33	0,22	4,99	5,05	4,44	5,75	4,79	5	0,48	3,5	3,85	3,83	3,21	2,35	3,35	0,62

Localisation		**Nguémé (n = 3)**					**Mile 8 (n = 4)**						**Limbé (n = 20)**		**UCC**	**Chondrite**
Echs	l.d	NGL1	NGL5	NGL8	Moy.	± 1σ	ML8E1	ML8E4	ML8E7	ML8E10	Moy.	± 1σ	Moy.	± 1σ		
La	0,1	119,8	118,2	112,2	116,73	4,01	148,3	136,7	150,3	139,1	143,6	6,7	153,13	26,16	30	0,237
Ce	0,1	238,1	247,3	238	241,13	5,34	241,5	232,7	238,9	261,8	243,65	12,69	288,5	59,33	64	0,613
Pr	0,02	26,81	27,85	28,09	27,58	0,68	30,22	28,32	30,25	33,23	30,51	2,03	34,1	6,6	7,1	0,093
Nd	0,3	103,6	102,8	104,6	103,67	0,9	112,3	98,9	110,2	112,4	108,45	6,45	122,84	21,2	26	0,457
Sm	0,05	16,98	15,58	16,03	16,2	0,71	17,85	14,76	16,89	17,93	16,86	1,48	17,37	1,85	4,5	0,148
Eu	0,02	3,98	4,65	4,44	4,36	0,34	5,26	4,77	4,65	4,66	4,84	0,29	4,68	0,39	0,88	0,056
Gd	0,05	12,96	11,93	12,07	12,32	0,56	12,98	11,18	13,37	12,42	12,49	0,95	12,13	0,79	3,8	0,199
Tb	0,01	1,55	1,52	1,53	1,53	0,02	1,89	1,74	1,82	1,76	1,8	0,07	1,73	0,64	0,64	0,036
Dy	0,05	8,03	7,99	7,67	7,9	0,2	8,22	7,96	8,29	9,34	8,45	0,61	7,38	0,82	3,5	0,246
Ho	0,02	1,32	1,41	1,39	1,37	0,05	1,76	1,74	1,76	1,69	1,74	0,03	1,32	0,27	0,8	0,055
Er	0,03	3,56	3,54	3,38	3,49	0,1	4,56	4,87	3,98	4,24	4,41	0,39	3,27	0,77	2,3	0,16
Tm	0,01	0,44	0,48	0,43	0,45	0,03	0,63	0,68	0,63	0,59	0,63	0,04	0,45	0,12	0,33	0,025
Yb	0,05	2,76	2,78	2,73	2,76	0,03	3,81	2,95	3,12	3,32	3,3	0,37	2,58	0,67	2,2	0,161
Lu	0,01	0,41	0,44	0,41	0,42	0,02	0,54	0,46	0,51	0,49	0,5	0,03	0,56	0,58	0,32	0,025
REE	-	540,3	546,47	532,97	539,91	6,76	589,82	547,43	584,67	602,97	581,22	23,81	650,05	105,56	146	2,51
LREE	-	522,23	528,31	515,43	521,99	6,44	568,41	527,03	564,56	581,54	560,39	23,39	626,56	105,58	136	1,8
HREE		18,07	18,16	17,54	17,92	0,34	21,41	20,4	20,11	21,43	20,84	0,68	23,32	5,47	10,09	0,71
LREE/HREE	-	28,9	29,09	29,39	29,13	0,24	26,55	25,83	28,07	27,14	26,9	0,95	28,64	9,75	14	2,55
Ce/Ce*	-	1,02	1,04	1,03	1,03	0,01	0,87	0,9	0,86	0,93	0,89	0,03	0,97	0,11		
Eu/Eu*	-	1,09	0,82	1,05	0,98	0,14	0,98	1,06	1,14	0,95	1,03	0,09	1	0,09		
La/Th	-	8,87	9,77	8,5	9,05	0,65	10,16	8,99	9	9,34	9,37	0,55	9,86	2,34		
La/Sc	-	4,13	4,22	3,62	3,99	0,32	4,24	5,06	6,53	5,35	5,3	0,95	5,2	1,06		
$(La/Yb)_{cn}$	-	29,49	28,88	27,92	28,76	0,79	26,44	31,48	32,73	28,46	29,78	2,85	44,22	17,03		
$(La/Sm)_{cn}$	-	4,41	4,74	4,37	4,5	0,2	5,19	5,78	5,56	4,84	5,34	0,41	5,52	0,93		
$(Gd/Yb)_{cn}$	-	3,8	3,47	3,58	3,62	0,17	2,76	3,07	3,47	3,03	3,08	0,29	4,05	1		

LREE = La, Ce, Pr, Nd, Sm, et Eu; HREE = Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, et Lu

Ce/Ce* cn = (Ceéchantillon/CeChondrite) / (Laéchantillon/LaChondrite)$^{1/2}$ (Préchantillon/PrChondrite)$^{1/2}$

Eu/Eu* cn = (Euéchantillon/EuChondrite) / (Sméchantillon/SmChondrite)$^{1/2}$ (Gdéchantillon/GdChondrite)$^{1/2}$

(La/Yb) cn = (Laéchantillon/LaChondrite) / (Ybéchantillon/YbChondrite)

(La/Sm) cn = (Laéchantillon/LaChondrite) / (Sméchantillon/SmChondrite)

(Gd/Yb) cn = (Gdéchantillon/GdChondrite) / (Ybéchantillon/YbChondrite)

Les valeurs de l'UC et de la Chondrite citées d'après Taylor et McLennan (1985) et McDonough et Sun (1995). cn. Revoir à la suscription de la Chondrite normalisée,

Moy. = moyenne, 1σ = déviation standart, n = nombre total des échantillons.

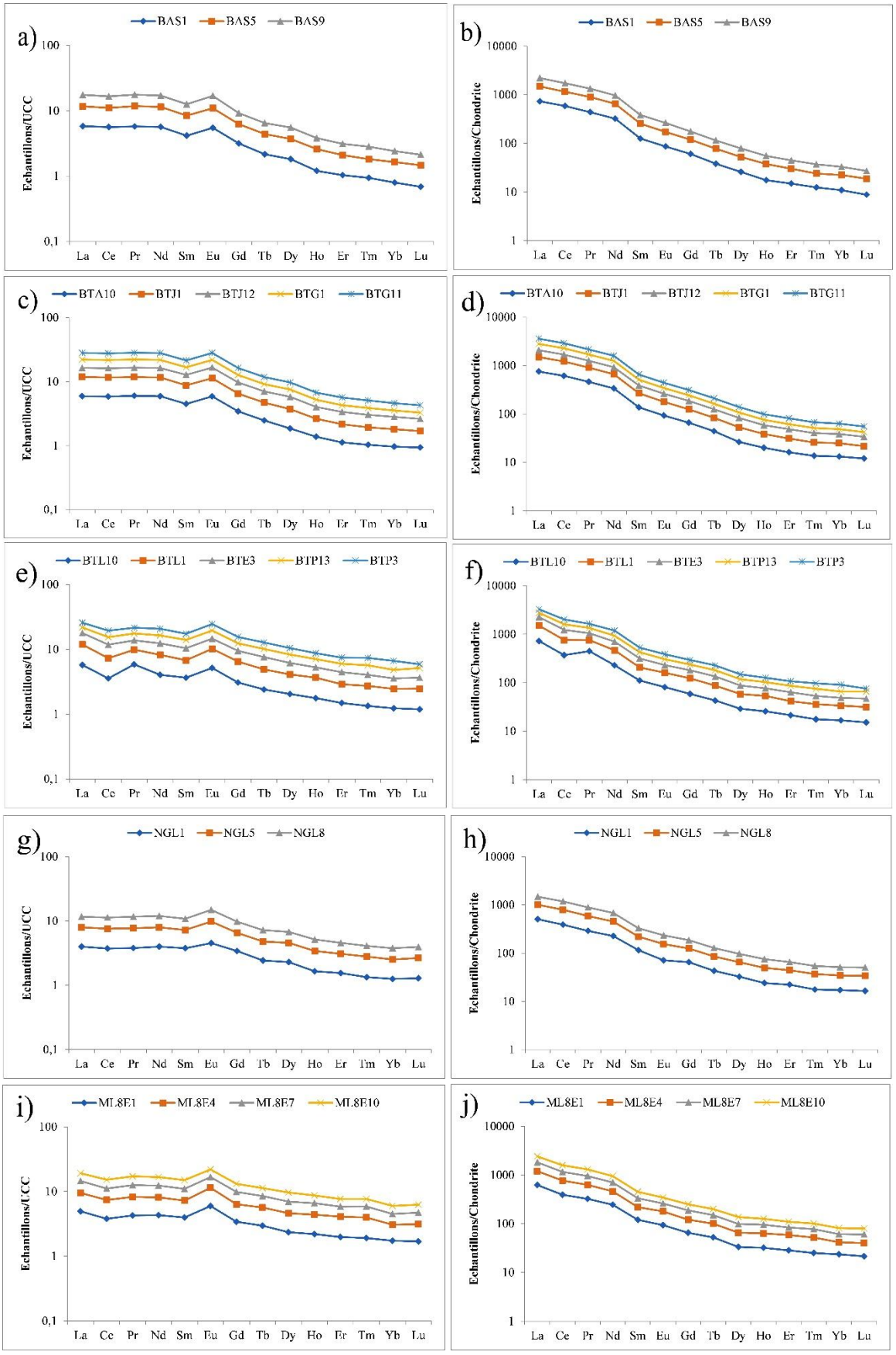


Figure 41. Spectres des terres rares des sédiments de plages de Limbé normalisées aux valeurs de l'UCC (a, c, e, g et i) d'après Taylor et McLennan (1985) et de la Chondrite (b, d, f, h et j) de McDonough et Sun (1995).

La somme des REE dans les échantillons de sédiments de Limbola varie entre 527 et 649 ppm (Tableau 29). Le rapport LREE/HREE compris entre 17 et 22 ppm montre un enrichissement en terres rares lègères par rapport aux terres rares lourdes.

A Nguémé, les concentrations en terres rares dans les échantillons sont présentées dans le Tableau 29 et illustrés par la Figure 41g et h. Le Lanthane et le Cérium ont des teneurs très élevées. Elles sont comprises entre (112,2 – 119,8 ppm) pour le Lanthane et (238 – 247 ppm) pour le Cérium. Les teneurs en Néodyme varient entre 102,8 et 104,6 ppm avec une concentration moyenne de 103,67 ppm. Cette concentration moyenne est supérieure à celle de l'UCC (26 ppm) et la Chondrite (0,457 ppm). Les valeurs du Praséodyme sont comprises entre 26,81 et 28,09 ppm. La plus forte teneur (28,09 ppm) se trouve dans l'échantillon NGL8 et la plus faible teneur (26,81 ppm) dans l'échantillon NGL1. Le Samarium (15,58 à 16,98 ppm) ; Gadolinium (11,93 – 12,96 ppm) ; Dysprosium (7,67 – 8,03 ppm) ont des teneurs considérables. Les concentrations en Europium (3,98 – 4,65 ppm) ; Terbium (1,52 – 1,55 ppm) et Erbium (3,38 – 3,56 ppm) sont faibles. Thulium et Lutétium montrent des teneurs très faibles, inférieures à 1 ppm dans tous les échantillons. La somme des REE dans les échantillons varie entre 540,3 et 546,47 ppm avec une moyenne de 539,91 ppm. Le rapport LREE/HREE compris entre 28,9 et 29,39 ppm, ce qui montre un enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes.

A Mile 8, les concentrations de REE contenues dans les différents échantillons sont consignées dans le Tableau 29 et illusrés par la Figure 41i et j. Les fortes teneurs sont observées en Cérium (232,7 à 261,8 ppm) ; Lanthane (136,7 – 150,3 ppm) et Néodyme (98,9 – 112,4 ppm). Ces teneurs sont toutes supérieures à l'UCC et la Chondrite. Le Praséodyme montre des concentrations comprises entre 28,32 et 33,23 ppm. Le Samarium (14,76 – 17,93 ppm) ; le Gadolinium (11,18 – 13,37 ppm) et Dysprosium (7,96 – 9,34 ppm) présentent des concentrations considérables. Les concentrations les plus faibles sont enregistrées pour le Lutétium, le Thulium, l'Hofmium, le Terbium, l'Ytterbium, l'Erbium et l'Europium dont les valeurs varient entre 0,46 et 5,26 ppm. La somme des REE dans les échantillons varie entre 547,43 et 602,97 ppm. Le rapport LREE/HREE est compris entre 26,55 et 28,07 ppm, caractérise un enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes.

V.2.4. Corrélation entre les éléments géochimiques

Le Tableau 30 présente la matrice de corrélation des éléments géochimiques des sables de plages de Limbé. Les corrélations entre SiO_2 *vs* Na_2O et K_2O (r = 0,53 et r = 0,66, n = 20 respectivement) indiquent d'après Xie et Chi (2016) une mobilité modérée du Na et de K pendant l'altération et la néoformation des minéraux argileux. Une corrélation positive et significative est observée entre le Zr et Hf (r = 0,79, n = 20 ; Tableau 30). Cette corrélation indique que l'Hafnium est en partie contrôlé par le zircon. La corrélation entre Zr et Th est statistiquement significative (r = -0,71, n = 20), alors qu'elle n'est pas significative pour Th *vs* Al_2O_3 (r = -0,46, n = 20 ; Tableau 30), suggérant d'après Armstrong-Altrin *et al*. (2015, 2019) que la distribution du Th n'est pas surveillée par les phyllosilicates. De faibles corrélations positives sont observées entre Ba et Sr par rapport à Al_2O_3 (r = 0,39 et r = 0,48, respectivement), suggérant qu'ils ne sont pas principalement encaissés par des minéraux argileux. Les éléments de transition tels que Co (r = -0,79), Ni (r = -0,95) et V (r = -0,90) montrent une corrélation notable avec le Al_2O_3 (Tableau 30), indiquant que ces éléments sont partiellement associés aux phyllosilicates (Armstrong-Altrin *et al*., 2015). La corrélation entre les éléments terres rares et le Al_2O_3 est faible et négative à Batoké (r = - 0,38, n =5) et à Mile 8 (r = - 0,07, n = 4), alors qu'il est faible et positif dans les secteurs des plages Bakinguili (r = 0,33, n = 3), Limbola (r = 0,35, n = 5) et Nguémé (r = 0,97, n= 3). Le résultat obtenu indique que, sur tous les sites, les terres rares résident principalement dans les minéraux lourds (c'est-à-dire zircon, monazite, allanite, etc.), comme le documente McLennan (1989). Les concentrations de TiO_2 montrent une corrélation significative avec les terres rares à Bakinguili et à Mile 8 (r = - 0,94, n = 3 et r = 0,77, n = 4, respectivement), indiquant l'abondance relative des minéraux contenant du Ti (c'est-à-dire le rutile) sur ces deux sites.

V.2.5. Estimation de la pollution des éléments traces métalliques

V.2.5.1. Analyses statistiques

Le Tableau 31 présente les concentrations et les paramètres statistiques des éléments traces métalliques (ETM ; Fe, Mn, Zn, Cd, Co, Cr, Cu, et Ni) dans les sédiments de la plage de Limbé, ainsi que certaines valeurs de référence internationale (EU, 2002 ; CSQGD, 2007 ; Turekin et Wedepohl, 1961).

Tableau 30. Matrice de corrélation de certains éléments majeurs, traces et terres rares des sédiments des plages de Limbé

	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	Zr	Hf	Th	Sr	Ba	Co	Ni	V	ΣREE
SiO_2	1													
Al_2O_3	0,63	1												
Na_2O	**0,53**	**0,74**	1											
K_2O	**0,66**	**0,79**	**0,63**	1										
TiO_2	-0,57	**-0,53**	**-0,69**	**-0,56**	1									
Zr	0,83	0,77	0,80	0,69	-0,76	1								
Hf	**0,75**	0,58	0,62	0,41	-0,81	**0,79**	1							
Th	-0,63	-0,46	-0,57	-0,37	0,67	**-0,71**	**-0,70**	1						
Sr	0,36	0,48	0,36	0,24	-0,29	0,42	0,42	-0,46	1					
Ba	0,32	**0,39**	**0,34**	**0,39**	-0,49	0,37	0,40	-0,65	**0,61**	1				
Co	**-0,87**	**-0,79**	**-0,82**	-0,75	**0,75**	**-0,95**	**-0,80**	0,75	**-0,46**	**-0,44**	1			
Ni	-0,64	**-0,95**	**-0,73**	**-0,76**	0,57	**-0,81**	-0,59	0,45	**-0,43**	**-0,28**	**0,81**	1		
V	**-0,79**	**-0,90**	-0,73	-0,77	0,62	-0,87	**-0,70**	**0,67**	**-0,58**	**-0,54**	**0,90**	**0,84**	1	
ΣREE	**-0,79**	**-0,64**	**-0,66**	**-0,59**	**0,73**	-0,81	-0,75	**0,89**	-0,45	-0,52	**0,88**	0,68	**0,74**	1

A Bakinguili, les concentrations en Fe sont très élevées variant entre 18276,18 et 20038,75 mg/kg. Les teneurs en Mn varient entre 263,31 et 418,2 mg/kg et sont élevés dans les échantillons BAS1 et BAS5. Le Zn montre de fortes concentrations dans les échantillons BAS5 (121,1 mg/kg) et BAS9 (119,8 mg/kg). Les concentrations de Co sont comprises entre 91,9 et 176,3 mg/kg. Le Ni présente des concentrations élevées dans tous les échantillons. Le Cr et Cu montrent des concentrations moyennes dans tous les échantillons. Les concentrations en Cd sont très faibles (inférieures à 1 mg/kg).

A Batoké, la concentration en Fe varie entre 16611,53 mg/kg et 30698 mg/kg. Cette concentration est plus importante dans l'échantillon BTJ1. Les concentrations en Mn, Co, Ni et Cu sont élevées dans tous les échantillons. Le Zn et le Cr montrent des concentrations moyennes. Leurs concentrations varient entre 69,6 et 91,7 mg/kg pour le Zn et entre 62,26 et 103,31 mg/kg pour Cr. Les teneurs en Cd sont inférieures à 1 mg/kg dans tous les échantillons.

A Limbola, les concentrations importantes du Fe sont notées dans les échantillons BTE3, BTL1, BTP3 et BTL10. Les teneurs en Mn, Zn, Co, Cu et Ni montrent des concentrations élevées dans la majorité des échantillons (Tableau 39). Les valeurs les plus élevées sont observées dans les échantillons BTP3, BTE3 et BTL1, tandis que les plus faibles valeurs sont visibles pour les échantillons BTP13 et BTL10. Les concentrations en Cr sont notables. Elles varient entre 15,73 et 69,1 mg/kg. Le Cd présente des valeurs variant entre 0,38 et 1,2 mg/kg.

A Nguémé, les concentrations en Fe sont très élevées et varient entre 10547,44 et 10652,36 mg/kg. Les concentrations en Mn, Ni, Zn et Cu, et sont élevées dans tous les échantillons. Le Co montre des valeurs comprises entre 34,2 et 62,8 mg/kg ; et le Cr présente des valeurs variant entre 13,68 et 41,73 mg/kg. Les teneurs en Cd sont très faibles (inférieures à 1 mg/kg).

A Mile 8, les teneurs en Fe varient entre 8889,79 et 23060,3 mg/kg. La teneur la plus élevée s'observe dans l'échantillon ML8E7 tandis que la plus faible teneur s'observe dans l'échantillon ML8E4. Les concentrations en Mn, Zn, Ni et Co sont élevées dans tous les échantillons. Le Cr présente des valeurs comprises entre 13,68 et 83,47 mg/kg. Les teneurs en Cd sont très faibles. Elles sont inférieures ou égales à 1 mg/kg.

Tableau 31. Concentration (mg/kg) en éléments traces métalliques (ETM)

	Echs	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Bakinguili	BAS1	0,08	176,3	109,47	123,6	19668,05	418,2	257	111,6
(n = 3)	BAS5	0,08	114,8	75,26	132,8	18276,18	325,27	236	121,1
	BAS9	0,08	91,9	34,21	98,9	20038,75	263,31	140	119,8
Batoké	BTA10	0,08	123,2	79,36	124,8	21990,17	356,25	262	81,2
(n = 5)	BTG1	0,05	145,9	97,15	84,5	26914,18	441,44	253	69,6
	BTG11	0,12	97,1	62,26	99,6	16611,53	271,05	248	84,2
	BTJ1	0,09	166,4	103,31	114,1	30698,11	487,9	257	70,6
	BTJ12	0,18	104,2	68,42	132	18486,01	302,03	236	91,7
Limbola	BTL10	1,2	54,1	41,73	88,4	11568,62	178,12	201	112,1
(n = 5)	BTL1	0,92	60,7	69,1	87,7	21829,3	472,41	156	152
	BTE3	0,9	107,5	32,15	97,9	28362	162,63	247	161,4
	BTP3	0,38	51,4	39,68	99,4	14380,34	201,35	229	121,6
	BTP13	1,01	61,9	15,73	89,9	9938,94	317,52	207	114,6
Nguémé	NGL1	0,87	62,8	41,05	128,3	10631,38	178,12	204	92
(n = 3)	NGL5	0,68	51	41,73	96,5	10547,44	147,14	179	96,7
	NGL8	0,78	34,2	13,68	110,5	10652,36	131,65	83	96,2
Mile 8	ML8E1	1,01	133,1	83,47	82,7	21668,43	224,59	267	101,2
(n = 4)	ML8E4	0,69	160,9	43,78	94	8889,79	240,08	255	90,6
	ML8E7	0,78	134,2	59,52	72,7	23060,3	363,99	243	92,1
	ML8E10	1,41	145,8	13,68	92,8	22193	209,1	198	104,3
	Max. Limbé (n = 20)	1,41	176,3	109,47	132,8	30698,11	487,9	267	161,4
	Min. Limbé (n = 20)	0,05	34,2	13,68	72,7	8889,79	131,65	83	69,6
	Moy. Limbé (n = 20)	0,57	103,87	56,24	102,56	18320,24	284,61	217,9	104,23
	Ecart type (n = 20)	0,45	43,89	29,14	17,82	6524,05	110,55	48,01	23,66
	EU (2002)	3	11,6	150	140	-	-	-	300
	CSQGD (2007)	1,4	40	64	-	-	-	50	-
	Moyenne Shale	0,3	19	90	45	42200	850	68	95

EU Europen Union Standard (2000), CSQGD Canadian soil quality guidelines for protection of environmental and human health document (2007), Moyenne shale, d'après Turekian et Wedepow (1961).

V.2.5.2. Niveau d'enrichissement des éléments traces

a) Calcul du Facteur d'enrichissement

Le Tableau 32 présente les valeurs du facteur d'enrichissement (FE) qui sont en outre schématisés par la Figure 42. L'enrichissement désigne une augmentation des teneurs totaux des métaux suite à des apports anthropiques sans préjugé d'une évolution négative de la qualité du milieu (Chassin, 1996). Le FE renseigne sur l'augmentation de la concentration d'un élément chimique dans un sédiment par rapport à une référence. L'élément de

normalisation retenu pour cette étude est le Fer. Les concentrations en éléments traces métalliques dans la croûte continentale ont été choisies comme fond géochimique (Wedepohl, 1995).

Tableau 32. Facteur d'enrichissement (FE), de contamination (FC) en ETM et indice de géoaccumulation (I-géo) des sédiments des plages de Limbé

	Eléments	Fe	Mn	Zn	Cd	Co	Cr	Cu	Ni
	Bakinguili (n = 3)	1	1,03	2,65	0,59	15,65	2,01	6,08	7,69
	Batoké (n= 5)	1	0,9	1,72	0,69	13,79	1,88	5,08	7,6
FE	Limbola (n = 5)	1	0,86	3,82	8,04	9,69	1,21	5,65	8,39
	Nguémé (n = 3)	1	0,87	4,42	8,24	12,53	1,68	11,64	10,94
	Mile 8 (n = 4)	1	0,97	2,56	8,49	18,68	1,7	5,18	8,36
	Bakinguili (n = 3)	0,44	0,45	1,16	0,26	6,88	0,88	2,67	3,38
	Batoké (n = 5)	0,49	0,44	0,84	0,33	6,7	0,91	2,47	3,69
FC	Limbola (n = 5)	0,36	0,31	1,39	2,93	3,53	0,44	2,06	3,06
	Nguémé (n = 3)	0,22	0,19	0,96	1,8	2,73	0,37	2,54	2,39
	Mile 8 (n = 4)	0,41	0,39	1,04	3,47	7,63	0,69	2,11	3,41
	Bakinguili (n = 3)	-0,53	-0,52	-0,11	-0,76	0,66	-0,23	0,25	0,35
	Batoké (n= 5)	-0,49	-0,54	-0,25	-0,65	0,65	-0,22	0,22	0,39
I-géo	Limbola (n = 5)	-0,61	-0,68	-0,03	0,29	0,37	-0,53	0,14	0,31
	Nguémé (n = 3)	-0,84	-0,9	-0,19	0,08	0,26	-0,61	0,23	0,2
	Mile 8 (n = 4)	-0,56	-0,58	-0,16	0,36	0,71	-0,34	0,15	0,36

Dans ce Tableau 32, Le Co montre le facteur d'enrichissement le plus élevé (Figure 42). Tous les sédiments des plages de Bakinguili, Batoké, Limbola, Nguémé et Mile 8 présentent un enrichissement modéré en Ni, Cu et Zn. On ne note pas d'enrichissement en Mn dans tous les sédiments étudiés. Le Cd montre un enrichissement modéré pour les sédiments des plages de Limbola, Nguémé et Mile 8 ; tandis qu'on ne note pas d'enrichissement en Cd pour les plages de Bakinguili et Batoké.

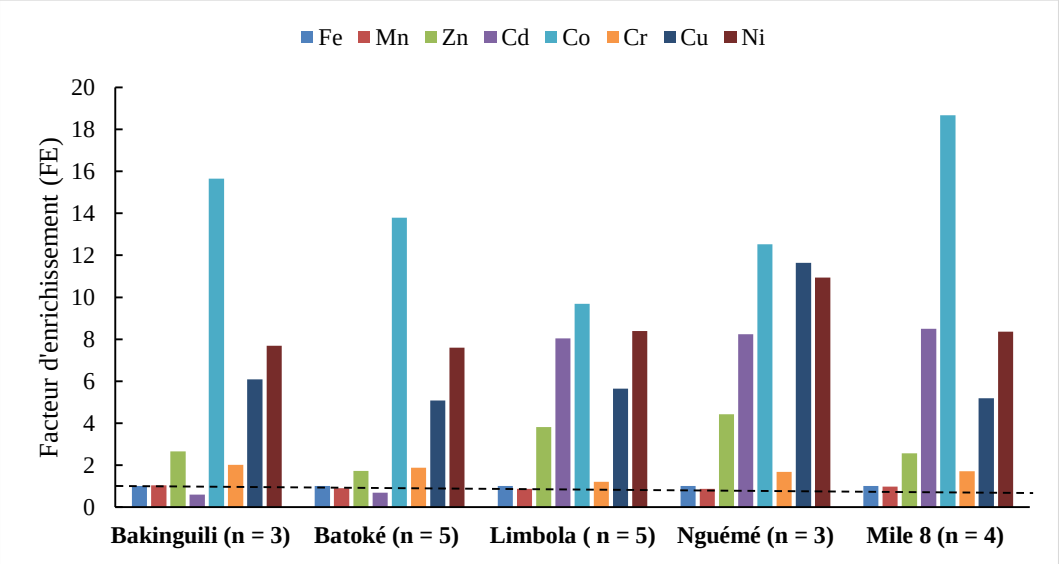


Figure 42. Histogramme du facteur d'enrichissement des ETM des sédiments de plages de Limbé.

b) Calcul du facteur de contamination

Le facteur de contamination est le rapport entre la concentration d'un élément métallique dans un échantillon par rapport à la concentration de ce même élément dans le fond géochimique du site (Hakanson, 1980). Il est utilisé pour exprimer le niveau de contamination par chaque métal dans l'échantillon. Le Tableau 32 présente les résultats du facteur de contamination dans la zone d'étude.

Les fortes contaminations en Co sont observées pour les sédiments des plages de Bakinguili, Batoké et Mile 8 (Figure 43). Les contaminations considérables et modérées sont visibles pour le Ni, Cu, Cd et Zn dans toutes les plages étudiées, excepté le Cd qui montre des contaminations modérées pour les plages de Limbola, Nguémé et Mile 8. Le Cr, Fe et Mn présentent des faibles contaminations dans tous les sédiments des plages étudiées.

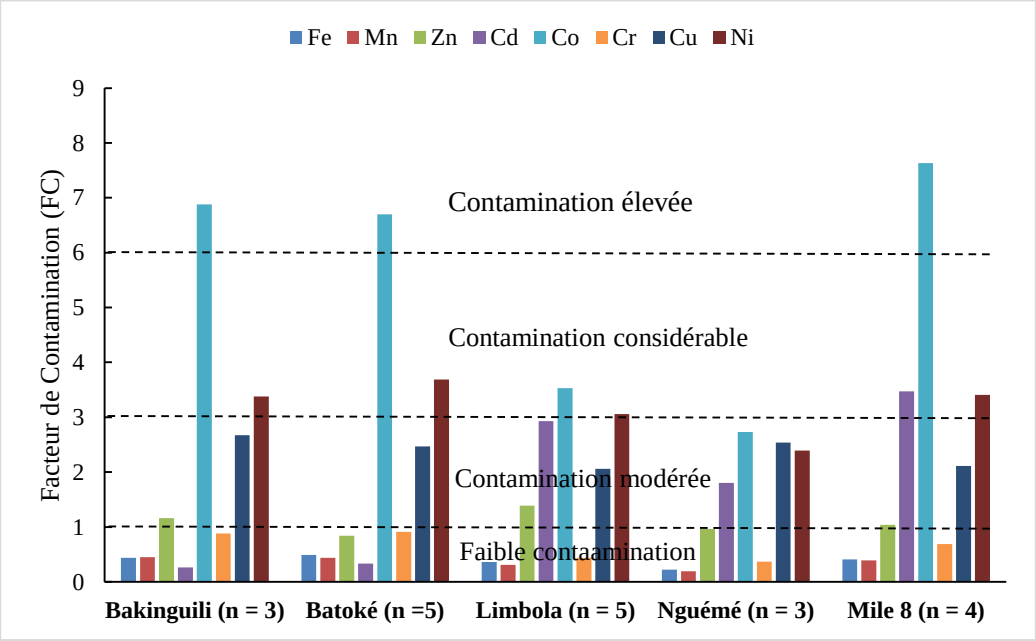


Figure 43. Histogramme du facteur de contamination des ETM des sédiments de plages de Limbé.

c) Indice de géoaccumulation

L'indice de géoaccumulation (I-geo) permet de déterminer l'intensité de la pollution. La pollution est l'accumulation d'un composé en quantité tels qu'il peut induire un danger pour les organismes vivants ou compromettre l'usage qui est habituellement fait du milieu récepteur (Chassin, 1996). Le Tableau 32 présente les valeurs de l'I-geo calculé dans la zone d'étude. Ce tableau montre que l'I-géo des éléments tels que le Co, Ni et Cu des sédiments des plages Bakinguili, Batoké, Limbola, Nguémé et Mile 8 sont comprises entre 0 et 1, suggérant ainsi des sédiments modèrement pollués (Müller, 1969). On observe une pollution

en Cd à Limbola, Nguémé et Mile 8. Les autres métaux (Zn, Cr, Fe et Mn) indiquent une absence de pollution (Figure 44).

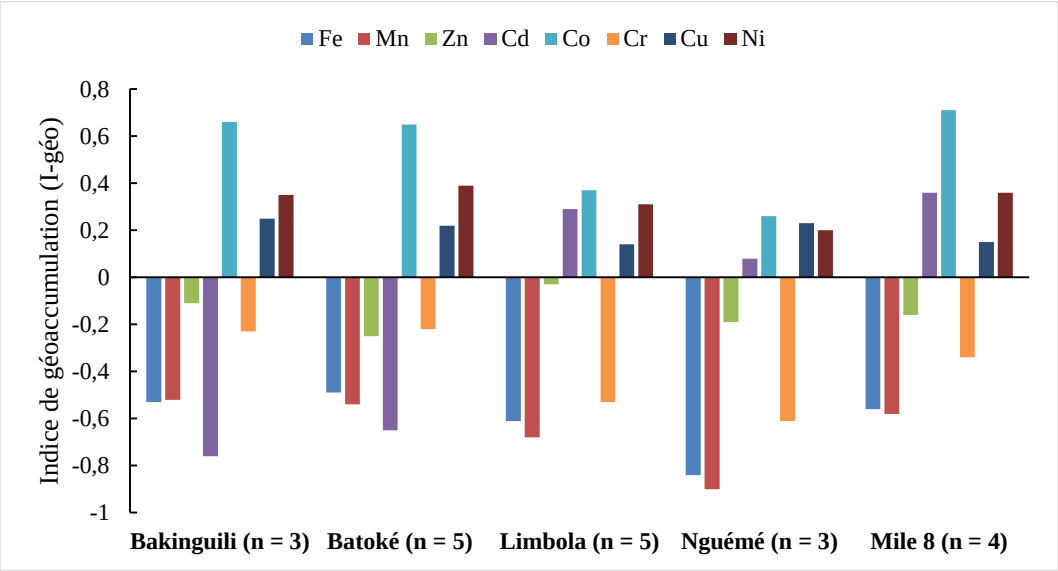


Figure 44. Histogramme de l'indice de géoaccumulation des ETM des sédiments de plage de Limbé.

V.2.5.3. Analyse en composante principale

Afin de déterminer les relations entre les éléments traces métalliques, une matrice de corrélation a été faite (Tableau 33).

La corrélation de Pearson indique que la concentration de Fe est significativement positive ($p < 0,01$), avec Co (0,588), Cr (0,544) et Mn (0,574). Cependant, plusieurs éléments tels que Co *vs* Cr (0,609), Co *vs* Ni (0,688) Cr *vs* Ni (0,608) et Mn *vs* Cr (0,745) avec des corrélations positives significatives ($p < 0,01$). Les éléments Fe *vs* Ni et Mn *vs* Co montrent de manière significative des corrélations positives et le Cd *vs* Cr et Cu *vs* Cd présentent une corrélation significativement négative ($p < 0,05$). Les relations entre ces métaux lourds indiqueraient une source commune dans la région.

Tableau 33. Matrice de corrélation de Pearson des ETM étudiés dans les sédiments des plages de Limbé.

Métaux	Fe	Mn	Cu	Zn	Cd	Co	Cr	Ni
Fe	1							
Mn	0,574**	1						
Cu	-0,073	0,046	1					
Zn	0,027	-0,183	-0,130	1				
Cd	-0,286	-0,490	-0,508*	0,349	1			
Co	0,588**	0,522*	0,045	-0,340	-0,319	1		
Cr	0,544**	0,745**	0,240	-0,331	-0,625*	0,609**	1	
Ni	0,396*	0,355	0,060	-0,267	-0,297	0,688**	0,608**	1

* La correlation est significative pour $p < 0,05$; ** La correlation est significative pour $p < 0,01$.

L'analyse en composante principale (ACP) a été appliquée. C'est une technique qui construit la variable théorique en réduisant la somme totale des carrés après avoir tracé une ligne droite aux données pour chaque site. L'ACP se fait en choisissant les meilleures valeurs pour le site (Jongman *et al*. 1995). Les échantillons de sédiments de Bakinguili et Batoké (surtout en Cu), sont regroupés dans le côté positif des deux CPs et plus proche des variables Cu, Cr qui présentent les concentrations les plus élevées dans tous les échantillons de cette zone. Les échantillons de sédiments de la zone Mile 8 sont regroupés dans le côté positif de CP1, et se composent principalement des variables (Cd, Co, Fe, Zn et Ni) (Figure 45) qui montrent les concentrations maximales dans ces échantillons. Cependant, les échantillons de sédiments de la région de Limbola sont regroupés dans le côté positif CP2, et se composent principalement des variables Cd et Zn (Figure 45) qui montrent les concentrations maximales dans ces échantillons. Des échantillons de sédiments de la région de Nguémé, avec les plus faibles teneurs en métaux lourds, sont regroupés dans le côté négatif des deux CPs, révélant leur faible impact sur les échantillons de sédiments dans ce site.

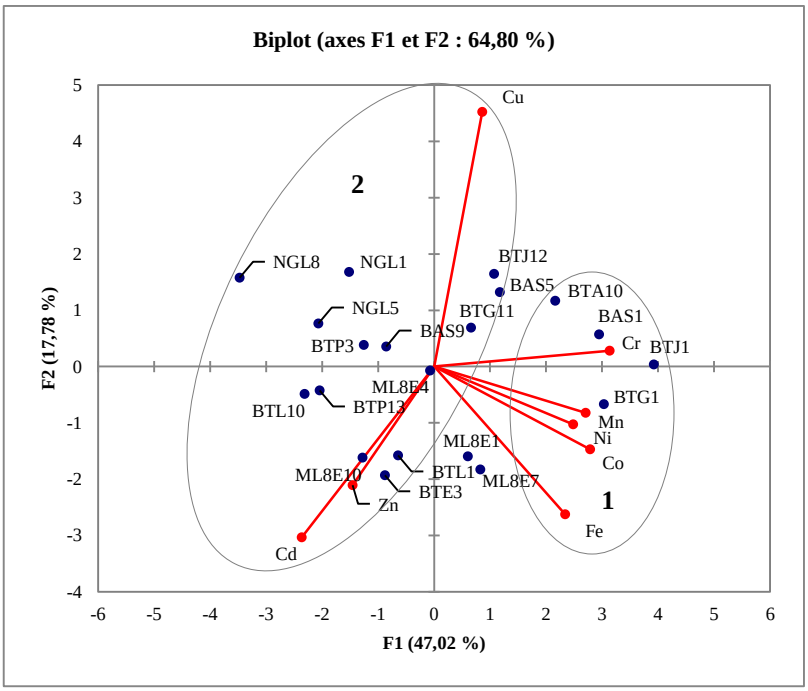


Figure 45. Analyse en composante principale des sédiments de plage de Limbé.

Conclusion

Parvenu au terme de ce chapitre, il était question de présenter les différents résultats d'analyses minéralogiques et géochimiques, il ressort que les analyses minéralogiques ont permis de mettre en évidence plusieurs espèces minérales dans les lames minces de sables, ce sont : le quartz, les feldspaths, les micas, les fragments de roches, la hornblende brune, les

chloritoïdes, le zircon et l'épidote. La minéralogie par diffractométrie des rayons X a révèlé la présence du quartz, de l'olivine, des pyroxènes, de l'augite, des feldspaths, de la biotite, de la muscovite, de l'illite, de la kaolinite, de l'hématite et de l'ilménite dans les sédiments des plages de Limbé. Des micro-analyses par microsonde électronique ont indiqué la présence des minéraux semblables aux minéraux lourds et DRX. Les analyses géochimiques effectuées sur les sédiments de la plage de Limbé montrent des teneurs fortes en oxyde ferrique (Fe_2O_3), vanadium, zirconium, strontium, baryum, nickel, niobium et cobalt. Les sédiments possèdent des teneurs modérées en gallium, yttrium, thorium, tantale, hafnium et des teneurs faibles pour les autres éléments traces (Rb, U, Cs, W). Les éléments majeurs et traces ont été normalisés par rapport au PAAS et à l'UCC. Ces normalisations ont permis de comparer l'évolution des différents éléments majeurs et traces par rapport aux standards PAAS et UCC. La normalisation des terres rares par rapport à l'UCC montre des anomalies positives en Eu ; et par rapport à la chondrite, les spectres montrent un enrichissement en terres rares légères (LREE) par rapport aux terres rares lourdes (HREE). Les analyses statistiques ont révélé que tous les sites étudiés de la zone côtière de Limbé sont modèrement pollués par les métaux lourds (Fe, Mn, Zn, Cd, Co, Cr, Cu et Ni).

CHAPITRE VI : INTERPRÉTATIONS ET DISCUSSION

« Ce qui reste éternellement incompréhensible dans la nature, c'est qu'on puisse la comprendre ».

-Albert Einstein-

Introduction

Ce chapitre vise à déterminer la lithologie des sédiments, la texture, la nature et la maturité des sédiments, le dégré d'altération des sédiments et des zones sources, la classification des sédiments, la provenance, l'environnement de dépôt, le paléoclimat et le statut environnemental des sédiments des plages de Limbé.

VI.1. Lithologie des sédiments

VI.1.1. Formation saisonnière des niveaux de dépôts irréguliers et plus ou moins sombres

La forme irrégulière et discontinue des successions sédimentaires observées dans les puits indique des dynamiques de dépôt locales dues probablement aux vagues. Les niveaux sombres « sables noirs » résultent de l'extraction du sable de quartz par l'action des vagues. Selon, Pohl (2005) et Ridley (2013) les minéraux noirs restent et se concentrent au fur et à mesure que les minéraux légers sont séparés par les vagues. La concentration des sables noirs de la plage devrait varier avec les variations saisonnières de hauteur et direction des vagues, entraînant des variations rythmiques de minéraux légers et lourds. Ainsi, vents forts, vagues et courants marins peuvent changer la « noirceur » et donc les concentrations de minéraux lourds du sable de la plage de Limbé.

De telles couches sombres riches en minéraux lourds ont été trouvées sur la plage de Serifos en Grèce, mais ils n'ont pas d'importance économique car leur potentiel en terres rares (REE) est limité. En revanche, sur les plages de Mykonos et Naxos en Grèce, Papadopoulos (2018) a trouvé d'importantes concentrations en REE et d'autres éléments ont été trouvés dans les couches enrichies en minéraux lourds.

VI.1.2. Caractéristiques modales et sources des sédiments

Les diagrammes ternaires Qt-Ft-Lt et Qm- Ft- Lt de Dickinson (1985) utilisant des données de comptages des grains ont été appliqué sur les sédiments de plages de Limbé. Dans ces diagrammes, tous les échantillons des sédiments tombent entièrement dans le domaine de l'arc non disséqué (Figure 46a), et en partie dans le champ du lithique récyclé (Figure 46b). La valeur modale des moyennes Qt_{20}-Ft_5-Lt_{52} ; Qt_{22}-Ft_4-Lt_{54} ; Qt_{24}-Ft_7-Lt_{46} ; Qt_{23}-Ft_5-Lt_{50} et Qt_{24}-Ft_5-Lt_{53}, respectivement pour les plages de Bakinguili, Batoké, Limbola, Nguémé et Mile 8, indique un sédiment de type litharénite (Figure 46c ; Folk, 1968). L'abondance des fragments

lithiques volcaniques dans les cinq sites le long de la côte de Limbé est probablement due aux processus sédimentologiques. Celà indique des zones sources volcaniques à fort reliefs qui produisent des sables noirs ou ferrifères résultant des roches volcaniques associées aux sables silicatés issus des des substratums granito-gneissiques et des couvertures sédimentaires (grès, shales, calcaires) recyclés. Ces comportement lithologiques sont comparables à ceux démontrées sur les sables de plages du Golfe de Mexique (Armstrong-Altrin *et al*., 2014) et des côtes Sud-Ouest de la Grèce (Papadopoulos et al., 2021).

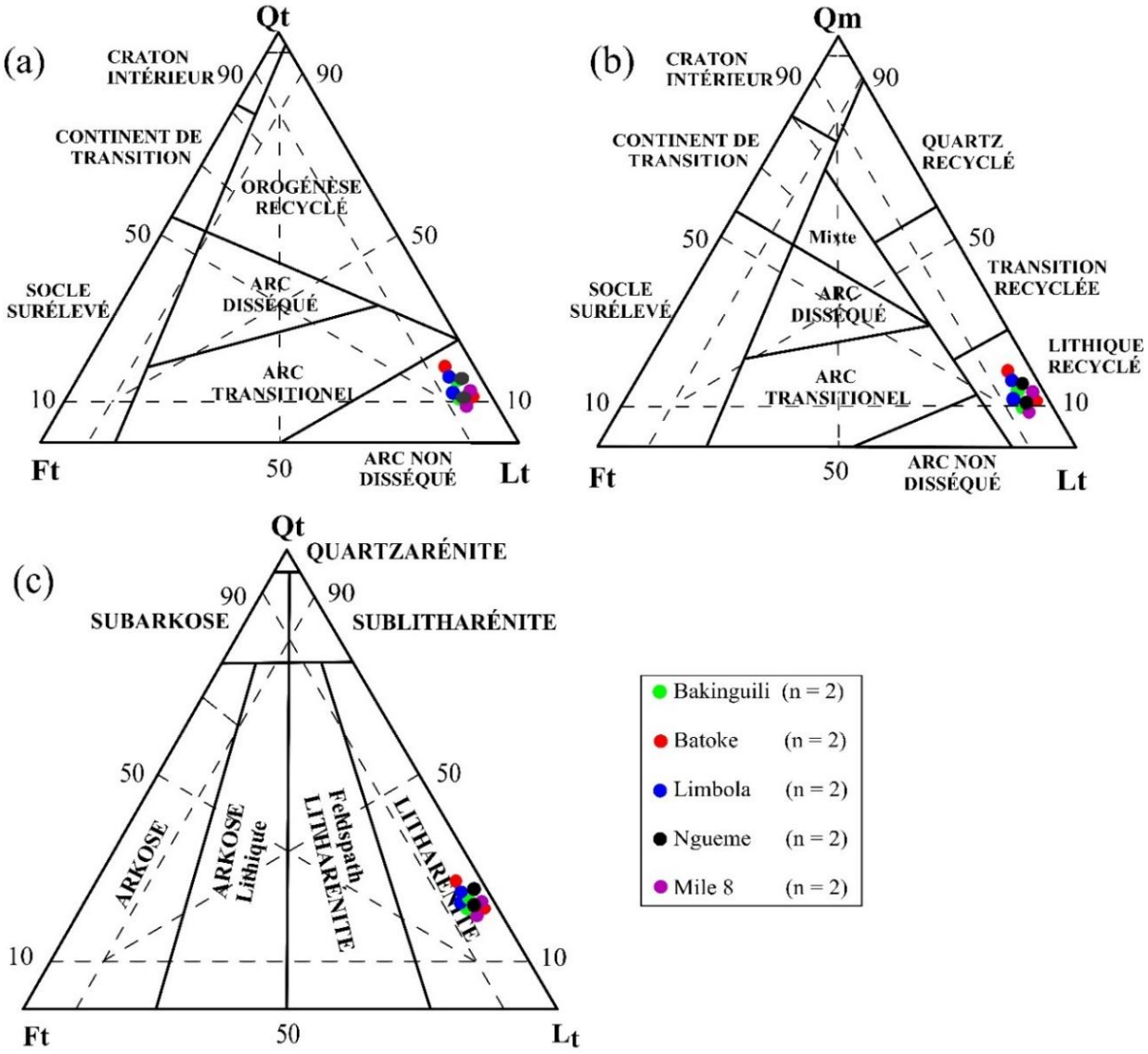


Figure 46. Diagrammes ternaires Qt-Ft-Lt et Qm-Ft-Lt (Dickinson, 1985 ; Folk, 1968) des sédiments de plages de Limbé.

VI.2. Texture, nature et maturité des sédiments

La granulométrie et la composition chimique des roches clastiques peuvent permettre d'évaluer l'influence du transport fluviatile et la maturité compositionnelle et texturale du sédiment. Les sédiments de la plage de Limbé montrent 65,35 à 72,51 % de sables fins de diamètre appartenant à l'intervalle 2 – 3 Φ (Folk, 1980). Toutefois, la présence des sables moyens (3 – 4 Φ) représentant 22,20 à 27,20 % et des sables très fins (3 – 4 Φ) indique un classement moyen qui pourrait refléter la proximité de la zone source. La déviation standart (σ Φ) varie entre 0,36 et 0,52 ainsi le sédiment peut être classifié comme étant bien trié. Les très faibles proportions (moins de 1 %, voire nulles) des argiles et des limons dans tous les échantillons suggèrent que cette classe de particules a été soustraite du sédiment et transporté en suspension au large, dans l'Océan Atlantique, par les courants côtiers ou les vagues générées par le vent. Morin et Kuete (1988) rapportent que ces vagues affectent les petites falaises qui bordent souvent la ligne de rivage. Dans le diagramme de classification triangulaire de Folk (1980) basé sur les proportions de sable, limon et argile, tous les échantillons sont dans le domaine des sables (Figure 47a et b), en raison de la très faible proportion des particules (< 63 µm). La texture de tous les échantillons étudiés est sableuse (Tableau 9). Ils présentent un caractère meuble.

En général, le sédiment est immature au point de vue textural. Cette immaturité texturale reflète probablement la composition minéralogique et géochimique des sables étudiés. L'immaturité compositionnelle de ces sédiments est illustrée par les valeurs du rapport SiO_2/Al_2O_3. Il est bien connu que les valeurs élevées de ce rapport modifient les sédiments matures du point de vue compositionnel. Selon Roser *et al*. (1996), les roches magmatiques basiques ont un rapport de SiO_2/Al_2O_3 de 3, tandis que ce rapport est d'environ 5 pour les roches magmatiques acides, il en résulte que les valeurs supérieures à 5 dans les sédiments clastiques suggèrent un sédiment mature. Les résultats de cette étude montrent que les valeurs moyennes du rapport SiO_2/Al_2O_3 sont inférieures à 5 pour les sédiments de Bakinguili (3,64 ± 0,33 ; n = 3), Batoké (3,7 ± 0,6 ; n = 5), Limbola (3,8 ± 1,2; n = 5), Nguémé (3,27 ± 0,2 ; n = 3), et Mile 8 (2,64 ± 0,29 ; n = 4). Les sédiments étudiés sont donc immatures du point de vue compositionnel.

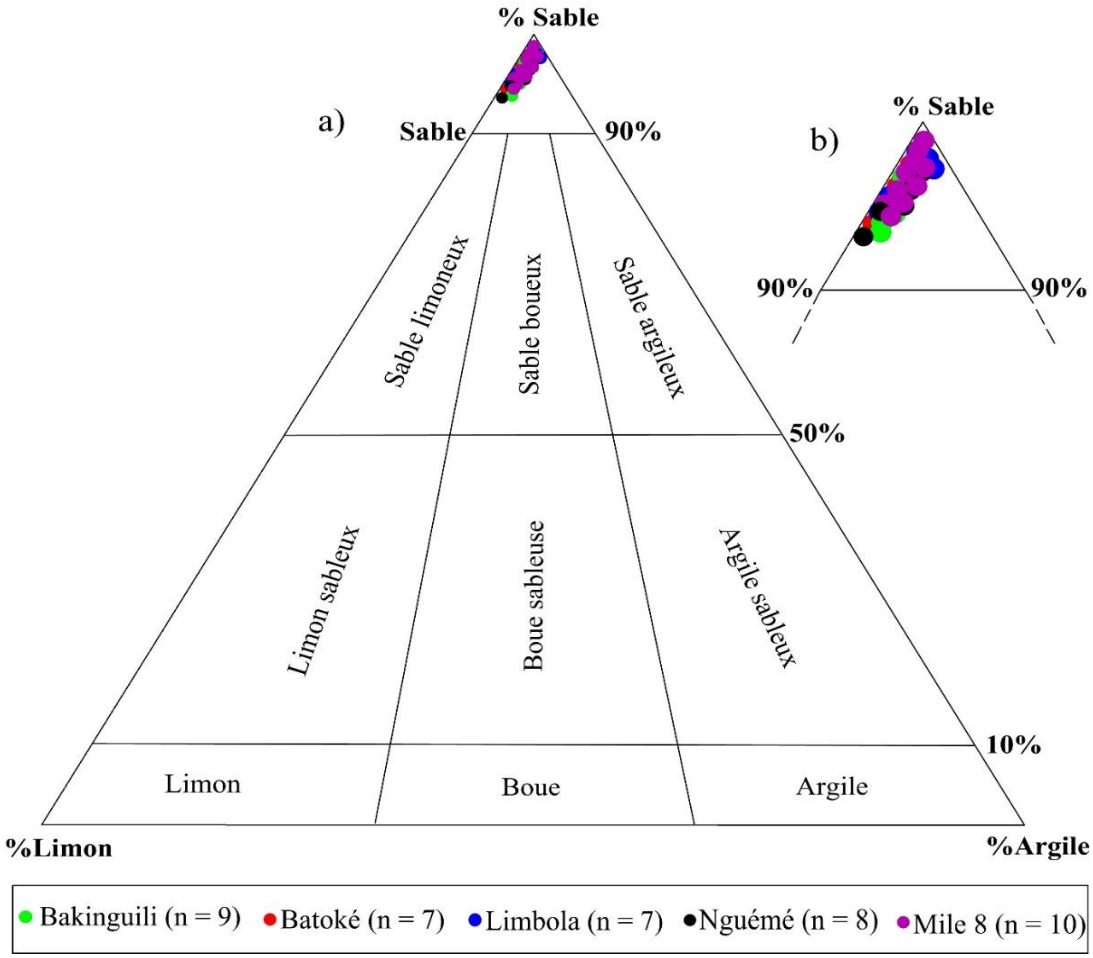


Figure 47. Diagramme ternaire de classification des sédiments des plages de Limbé. a) Diagramme ternaire basé sur les proportions de sable, limon et argile (Folk, 1980), b) Zoom des données des sédiments des plages de Limbé.

L'immaturité compositionnelle des sédiments de Limbé s'observe sur le diagramme ternaire Al_2O_3-TiO_2-Zr de Garcia *et al*. (1994) et sur le diagramme binaire Th/Sc *versus* Zr/Sc de McLennan (1993). En effet**,** la présence des phases minérales résistantes comme le zircon en grande quantité peut entrainer des variations chimiques irrégulières. Dans le diagramme Al_2O_3-TiO_2-Zr, les échantillons plotés ne montrent pas une tendance qui pourrait être due à un changement notable dans le rapport Al_2O_3/Zr (Figure 48a), indiquant ainsi aucun enrichissement en Zr et donc aucun recyclage des sédiments. En effet, les sédiments recyclés montrent une proportion élevée en Zr. L'absence de l'enrichissement en Zr est également documentée dans le diagramme Th/Sc *versus* Zr/Sc dans lequel le rapport Zr/Sc n'augmente pas plus rapidement que celui de Th/Sc (Figure 48b), indiquant ainsi l'immaturité des sédiments. Cette immaturité est une fois de plus illustrée par les faibles valeurs de l'indice ZTR (< 10 % : Hubert, 1962). Ces résultats pourraient globalement indiquer que la texture et

la composition chimique de tous les échantillons prélevés sur les plages de Limbé ne varient pas de façon significative.

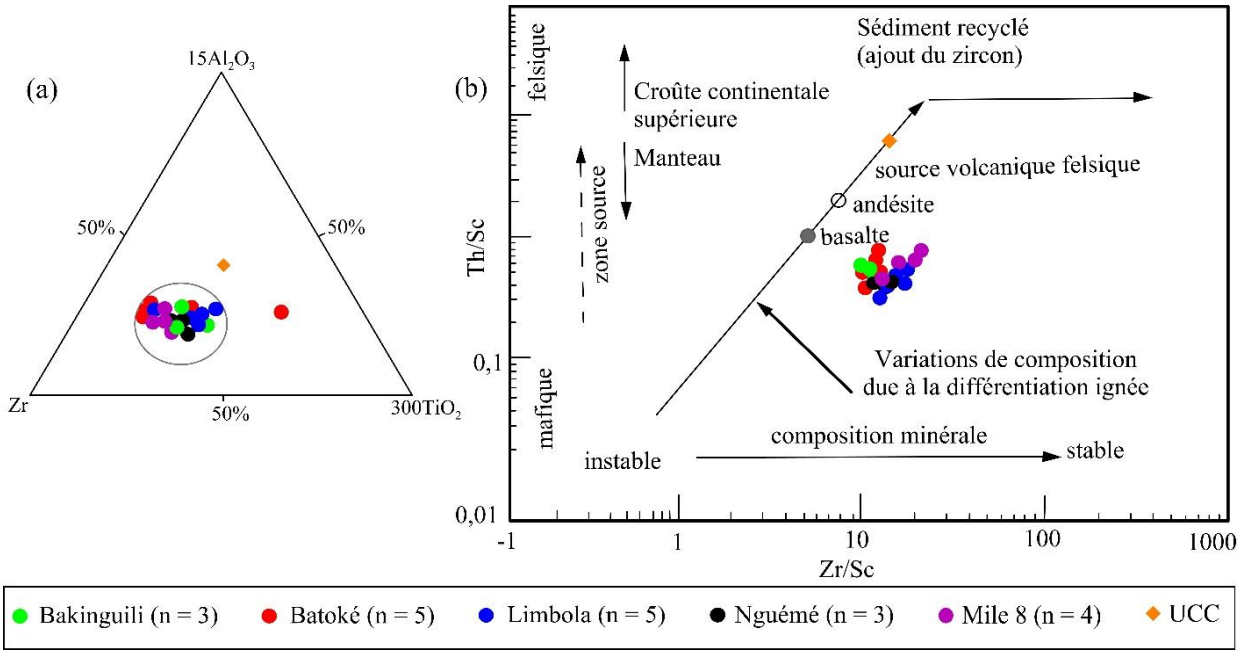


Figure 48. Diagramme d'immaturité compositionnelle des sédiments de plages de Limbé. (a) Diagramme ternaire Al_2O_3-TiO_2-Zr (d'après Garcia *et al.*, 1994) et (b) diagramme bivarié Th/Sc versus Zr/Sc d'après McLennan *et al.* (1993).

VI.3. Altération des sédiments et des zones sources

Des valeurs des rapports Na_2O/Al_2O_3 et K_2O/Al_2O_3 sont supposées rendre compte du lessivage de Na^+ et K^+ (cations solubles) et de la concentration de Al^{2+} (constituant résiduel stable) durant l'altération chimique des roches sources (Fedo *et al.*, 1995). Les valeurs des rapports Na_2O/Al_2O_3 de tous les échantillons de sédiments sont faibles, comparées à l'UCC (0,25). De même, les faibles valeurs de K_2O/Al_2O_3, comparées à l'UCC, sont enregistrées indiquant le lessivage de Na^+ et K^+ durant l'altération.

Le degré d'altération des sédiments de la plage de Limbé a été évalué en utilisant plusieurs indices d'altération (Nesbitt et Young, 1982 ; Hanois, 1988) tels que le PIA, le CIW et l'ICV. Ces indices ont été utilisés par plusieurs auteurs à travers le monde (Kasanzu *et al.*, 2008 ; Sun *et al.*, 2012 ; Perri, 2014 ; Madhavaraju, 2015 ; Ramachandran *et al.*, 2016 ; Mitra *et al.*, 2018 ; Chougong *et al.*, 2021 ; Ambassa Bela *et al.*, 2022 ; Tsanga *et al.*, 2023 ; Liyouck *et al.*, 2023). Nesbitt et Young (1982) ont défini le CIA, en proportion molaire comme suit $(Al_2O_3/(Al_2O_3 + Na_2O + CaO^* + K_2O))*100$, où le CaO* est la concentration de CaO incorporé dans les silicates. Dans cette étude, le CaO a été corrigé pour le Ca venant de

l'apatite selon l'équation suivante : $CaO^* = CaO - 10(P_2O_5)/3$. Dans la mesure où le CaO est toujours plus abondant que le Na_2O, ce dernier a été considéré à la place de CaO^* tel que recommandé par McLennan (1993). En fonction de leur concentration élevée dans les sédiments, il a été considéré que le Ca des sédiments (CaO variant entre 11,01 et 12,27 %) ne provient pas seulement du carbone inorganique. La correction de Ca dans l'apatite est due au fait que cet élément peut venir de certaines roches magmatiques et sédimentaires qui peuvent servir de roche source des sédiments de la plage de Limbé. Pour les interprétations, il est intéressant de noter que les valeurs élevées de CIA (76–100) dans les roches clastiques suggèrent une altération chimique intense dans les zones sources (Gallet *et al*., 1998 ; Roddaz *et al*., 2006 ; Kontchipe *et al*., 2021 ; Sonfack *et al*., 2021; Ambassa Bela *et al*., 2022), tandis que les valeurs faibles (< 50) indiquent une faible altération chimique (Fedo *et al*., 1995). Les sédiments de Limbé montrent des valeurs de CIA variant comme suit : Bakinguili (75,65 – 81,9 ; n = 3), Batoké (81–87 ; n = 5), Limbola (70–81 ; n = 5), Nguémé (74,36 – 79,75 ; n = 3), et Mile 8 (62,08 – 73,6 ; n = 4). Ce résultat indique une altération chimique modérée à intense des régions sources. Les valeurs de CIA des échantillons de sédiments et l'UCC sont plotés dans le diagramme ternaire Al_2O_3-(CaO + Na_2O)-K_2O (A-CN-K) (Nesbitt et Young, 1984 ; Fedo *et al*., 1995 ; Figure 49a), basé sur les proportions molaires de Al_2O_3, CaO, Na_2O, et K_2O. Ce diagramme est utilisé pour apprécier les variations compositionnelles qui peuvent être attribuées soit à l'altération chimique, soit à la composition de la roche source. Théoriquement, les premières étapes de l'altération sont marquées par le déficit de CaO, Na_2O, et K_2O le long d'une ligne droite sub-parallèle au segment (CaO+Na_2O)-Al_2O_3. Lors des étapes avancés et terminales de l'altération, on observe un déficit en K_2O au fur et à mesure que la composition de la roche altérée approche celle de la kaolinite et/ou de la gibbsite (Nesbitt et Young, 1984). Dans le diagramme A-CN-K, tous les échantillons de sédiments sont disposés selon une ligne (la tendance de l'altération) parallèle et proche de l'axe A-CN (Figure 49a) et au-dessus du joint des plagioclases, vers l'apex A. Les échantillons proches de l'apex A indiquent une altération chimique intense. Ce résultat est en accord avec les résultats des expérimentations en laboratoire qui montrent l'altération des feldspaths par les eaux chargées de CO_2. Ces expérimentations révèlent que Na, K et Ca extraits des feldspaths obéissent à la loi linéaire (Nesbitt et Young, 1984). Par ailleurs, le fait que tous les échantillons de tous les sites, plotent le long de la même ligne, selon la même tendance à l'altération, suggèrent que ces sédiments proviennent de la même source, probablement les basaltes. Ceci est cohérent avec la géologie environnementale du site d'étude. Les paramètres d'altération, PIA [(Al_2O_3-K_2O)/(Al_2O_3 + Na_2O + CaO^* +

K_2O)*100)] et CIW [(Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO∗ + Na_2O)) x 100] montrent les mêmes tendances de valeurs que le CIA, au regard de l'altération chimique. Selon Fedo *et al*. (1995), les valeurs de PIA élevées comme c'est généralement le cas dans cette étude, indiquent que la majorité des plagioclases a été convertie en minéraux argileux. Au contraire, les valeurs relativement faibles de PIA sont probablement liées à l'abondance des restes de ce minéral dans le sédiment, tel que le révèle les résultats de DRX. L'altération différentielle peut également s'observer sur ce diagramme ternaire (Al_2O_3-K_2O)-CaO-Na_2O ((A-K)-C-N) (Figure 49b ; Nesbitt et Young, 1984 ; Fedo *et al*., 1995). Dans le diagramme (A-K)-C-N, les échantillons montrent une tendance linéaire vers le sommet A-K, indiquant un degré d'altération allant de modéré à élevé, avec un enrichissement en Al_2O_3 qui dépend à la fois de CaO et de Na_2O. Ce diagramme permet en outre de constater l'absence des phénomènes diagénétiques, comme le métasomatisme potassique, dans les sédiments de Limbé. Le CIW, proche de 50, suggère une absence d'altération chimique. Les valeurs variant entre 60 et 80 sont indicatives d'altérations modérées et les valeurs supérieures à 80 suggèrent des altérations de forte intensité. Les valeurs calculées de CIW pour les échantillons de sédiments étudiés indiquent des degrés d'altération modérées à élevées. L'Indice de Variabilité compositionel (ICV) représente les composantes non quartzeuses des sables. Cet indice se calcule selon la formule suivante : ICV = (Fe_2O_3 +K_2O + Na_2O + CaO + MgO + MnO + TiO_2)/Al_2O_3. Les valeurs de cet indice > 0,84 indiquent une abondance relative des particules détritiques mal altérées ou des minéraux de roches saines comme les feldspaths potassiques, les plagioclases, les amphiboles, et les pyroxènes. Les valeurs < 0,84 suggèrent une altération intense (Cox *et al*., 1995 ; Culler, 2000), et même des produits recyclés (Madhavaraju *et al*., 2016). Ce raisonnement est basé sur le fait que la conversion des minéraux primaires en minéraux de néoformation riche en aluminium et en argile alumineuse conduisent à la diminution des valeurs de l'ICV, faisant de cet indice un outil important pour déterminer, à la fois, la variation dans la composition des roches sources et les différences dans les processus d'altération, tel que documenté par Cox *et al*. (1995). L'indice de Variabilité compositionel (ICV) dans les sédiments de Bakinguili (9,02 ± 0,31 ; n = 3), Batoké (9 ± 1,69 ; n = 5), Limbola (6,37 ± 1,75 ; n = 5), Nguémé (3,85 ± 0,48 ; n = 3), et Mile 8 (3,33 ± 0,71 ; n = 4) sont tous très élevés, supérieurs à 0,84. Ce résultat suggère que tous les sédiments sont des dépôts du premier cycle. Ceci implique également que l'environnement de dépôt est proche des zones sources, ce qui n'a pas permis l'achèvement de l'altération des particules lors des processus de transport fluviatile.

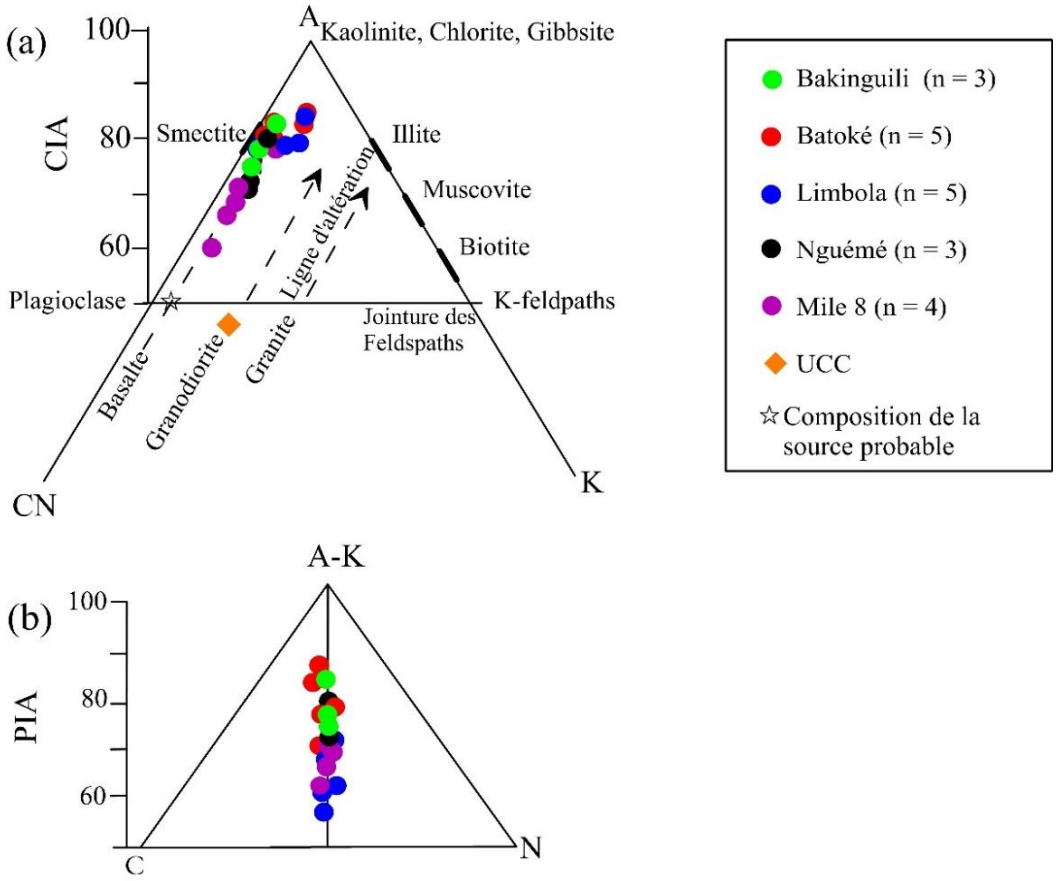


Figure 49. Graphiques ternaires pour déduire l'intensité de l'altération des sédiments de plages de Limbé. (a) Graphique ternaire (Al_2O_3) – CN (CaO* + Na_2O) – K (K_2O), (b) graphique ternaire de (A–K) (Al_2O_3– K_2O) – C (CaO ∗) – N(Na_2O) (Nesbitt et Young, 1984 ; Cox *et al*., 1995).

VI.4. Classification géochimique

Sur le diagramme binaire de Log (SiO_2/AL_2O_3) en fonction de Log (Fe_2O_3/K_2O) (Herron, 1988), les sédiments des plages de Limbé appartiennent au domaine des argiles et des sables ferrifères (Figure 50). Il semble étrange que la majorité des échantillons de sables sont dans le domaine des argiles ferrifères. En fait, dans la classification chimique de Herron (1988), la distinction entre les argiles et les sables est basée sur la concentration de Al comparée à Si. Cette classification suppose que Al est normalement plus abondant dans les argiles. Au contraire, dans cette étude où les sédiments montrent de faibles proportions d'argiles, les concentrations élevées de Al, pouvant justifier la classe des argiles ferrifères, peut être attribuée à la fois aux faibles concentrations de Si dans les sédiments et probablement dans leurs roches sources (des détritus de roches volcaniques mafiques provenant des tufs néphéliniques, des néphélinites à hauyne mélilites, des leucito-néphélinites à aénigmatites haunophytes) et l'abondance des minéraux riches en aluminium (feldspaths) de

la taille des sables. Ainsi, la classification géochimique semble raisonnablement différente de la classification texturale qui indique majoritairement les particules de la classe des sables.

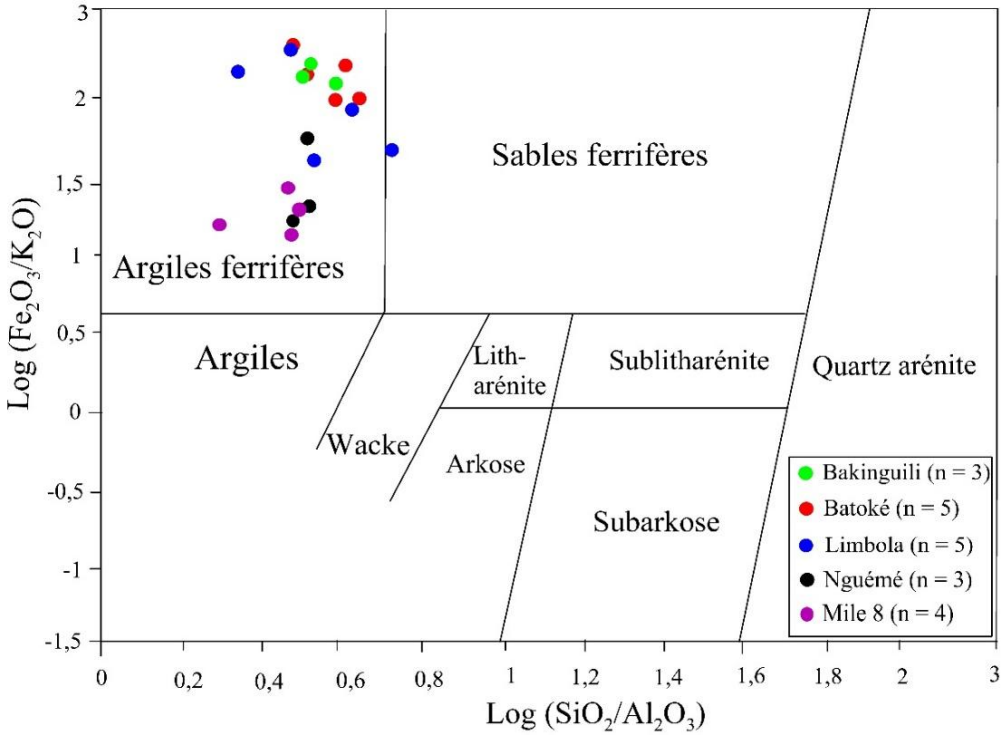


Figure 50. Diagramme de classification géochimique des sédiments de plages de Limbé ; utilisant [log (SiO_2/Al_2O_3) *versus* log (Fe_2O_3/K_2O)] de Herron (1988).

VI.5. Provenance

Les marqueurs de la provenance tels que les rapports Al_2O_3/ TiO_2, K_2O/ Na_2O, Th/Sc et Th/U, les diagrammes binaires La/Sc *versus* Th/Co (Cullers, 2002), (Ce)cn *versus* (La/Yb)cn (Rao *et al*., 2011), et Hf *versus* La/Th (Floyd et Leveridge, 1987), les diagrammes ternaires V-Ni-Th*10 (Bracciali *et al*., 2007) et les diagrammes de fonction discriminante de Roser et Korsch (1988) ont été utilisés pour déterminer la composition des roches sources.

Selon Taylor et McLennan (1985), les oxydes Al_2O_3 et TiO_2 sont enrichis lors de l'altération dans les profils pédologiques et deviennent immobiles durant le transport et la diagénèse. En conséquence, les éléments sont supposés refléter la composition des roches sources (Spalletti *et al*., 2012, Zaid, 2012; Odoma *et al*., 2015; Madhavaraju *et al*., 2016). Les valeurs du rapport $Al_2O_3/TiO_2 < 8$ indiquent des roches sources magmatiques mafiques, les valeurs variant entre 8 et 21 suggèrent des roches magmatiques intermédiaires, tandis que les valeurs entre 21 et 70 sont indicatives des roches magmatiques felsiques. Les moyennes des valeurs de Al_2O_3/TiO_2 à Bakinguili (0,74 ± 0,09 ; n = 3), Batoké (0,891 ± 0,27; n = 5), Limbola (1,94 ± 0,6; n = 5), Nguémé (2,34 ± 0,65 ; n = 3), et Mile 8 (3,38 ± 0,98 ; n = 4) sont

toutes inférieures à 8, indiquant des roches magmatiques sources de nature mafique. Ce résultat est illustré dans le diagramme binaire de Al_2O_3 *versus* TiO_2 où tous les échantillons se retrouvent dans la zone des basaltes (Figure 51a). En général, les résultats similaires sont obtenus dans le diagramme de Zr *versus* TiO_2 (Hayashi *et al*., 1997), où tous les échantillons tombent dans les domaines de roches intermédiaires à mafiques (Figure 52b). Potter (1978) et Ngueutchoua *et al.* (2019) ont utilisé le rapport K_2O/ Na_2O comme un traceur simplifié de la roche source. Les faibles valeurs de ce rapport reflètent une source composée de roche basique plutôt que les granites et les roches magmatiques felsiques. Les valeurs faibles de K_2O/Na_2O dans tous les échantillons indiquent que la zone source est marquée par des roches riches en plagioclase qui n'ont pas beaucoup évolué lors des processus magmatiques (à l'exemple des basaltes et autres roches mafiques). Ces roches mafiques supposées sont en accord avec la minéralogie et les observations pétrographiques des sédiments de la plage de Limbé, montrant une prédominance des minéraux mafiques (augite, pyroxènes, olivine) démontrées par les résultats de microsonde électronique et les compositions chimiques de ces minéraux constitutifs. De faibles valeurs de l'indice ZTR évoquent les mêmes origines des sédiments (généralement < 10; Tableau 19 ; Garzanti et Ando, 2007).

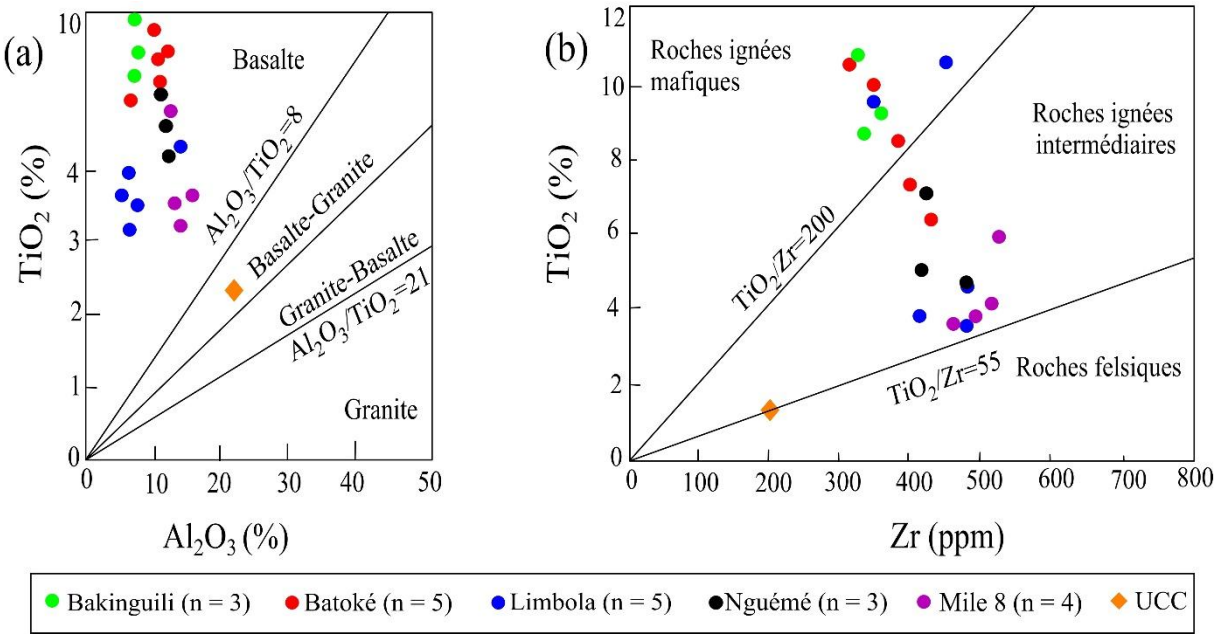


Figure 51. Diagrammes bivariés des sédiments de plages de Limbé. (a) Al_2O_3 *versus* TiO_2 d'après Vosoughi Moradi *et al*. (2016), (b) Zr *Versus* TiO_2 d'après Hayashi *et al*. (1997).

Les rapports Th/Sc et Th/U sont supposés être utile dans la détermination des caractérisques de la roche source (McLennan et Hemming, 1992, 1994; Cullers, 2000). Le rapport Th/Sc varie de 0,84 à 20,5 dans les roches magmatiques felsiques et de 0,05 à 0,22 dans les roches magmatiques mafiques (Cullers, 1994, 2000 ; Cullers et Podkovyrov, 2000 ;

Armstrong-altrin *et al*., 2016). Le rapport Th/Sc de cette étude varie entre 0,32 et 0,82, ce qui est plus petit que la valeur de la croûte supérieure (UCC) et de la moyenne des shales qui est 1,0 (Taylor et McLennan, 1985). Ces faibles valeurs suggèrent des sources peu différenciées, indiquant globalement des roches sources mafiques. La distribution du couple Thorium-Uranium est complexe dans les sédiments de Limbé. A Bakinguili, Batoké et Nguémé, on observe des valeurs relativement élevées de Th/U de 7,65 ± 0,23, 7,72 ± 0,39 et 6,74 ± 0,89, respectivement (et une abondance de Th). Au contraire, Limbola (3,96 ± 0,87) et Mile 8 (4,05 ± 0,38) montrent des valeurs similaires à la valeur de l'UCC qui est de 3,8. Ce résultat est probablement lié aux processus sédimentologiques conduisant à l'extraction de l'uranium pendant l'altération chimique (Taylor et McLennan, 1985). Il est important de noter que le diagramme Th/U *versus* Th montre un alignement des échantilons selon une ligne qui intercepte la zone des faibles valeurs de Th/U et Th, correspondant à la zone du manteau supérieur (Figure 52). Ceci indique que la roche source peut avoir une composition chimique semblable à celle du manteau supérieur. Ce résultat est en accord avec la géologie des zones volcaniques voisines (Mont Etindé et Mont-Cameroun) qui sont probablement des régions sources des sédiments côtiers de Limbé.

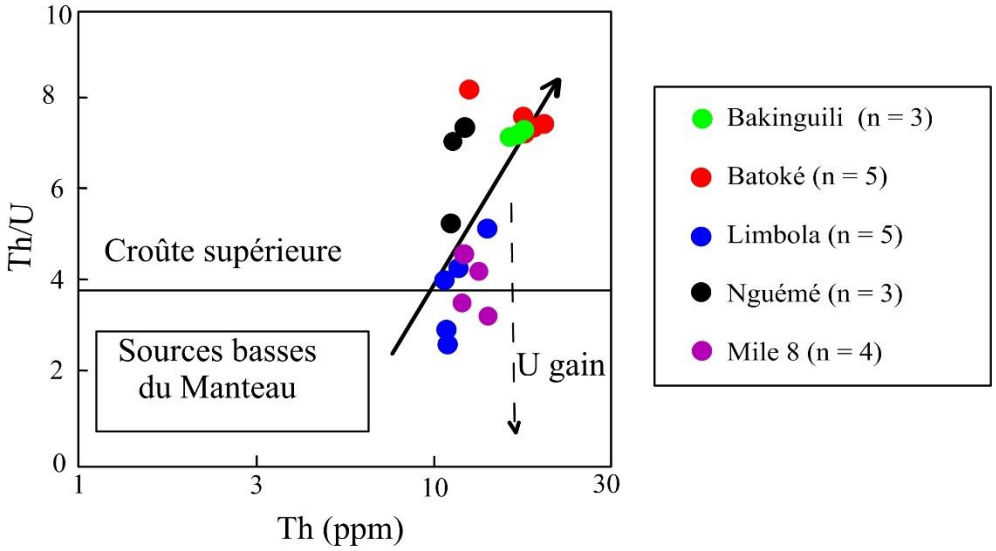


Figure 52. Diagramme bivarié Th/U *versus* Th (McLennan *et al*., 1993).

La et Th sont des éléments immobiles qui sont plus abondants dans les roches felsiques que dans les roches mafiques, tandis que Sc et Co sont des éléments traces ferromagnésiens dont les concentrations élevées sont caractéristiques des roches mafiques. En conséquence, les valeurs de La/Sc et Th/Co permettent de distinguer les roches magmatiques felsiques des roches mafiques. Les valeurs des rapports La/Sc et Th/Co varient entre 2,50 et 16,3 et entre 0,67 et 19,4, respectivement dans les roches felsiques et de 0,43 à 0,86 et de 0,04

à 1,4, respectivement dans les roches mafiques (Cullers, 1994, 2000; Cullers et Podkovyrov, 2000). Les valeurs moyennes de La/Sc et Th/Co dans la présente étude sont comme suit : Bakinguili (5,98 ± 0,31, et 0,15 ± 0,01; n = 3, respectivement), Batoké (5,55 ± 1,2, et 0,16 ± 0,03 ; n = 5, respectivement), Limbola (5,03 ± 1,18, et 0,20 ± 0,05 ; n = 5, respectivement), Nguémé (3,99 ± 0,32, et 0,22 ± 0,01 ; n = 3, respectivement), et Mile 8 (5,3 ± 0,95, et 0,39 ± 0,06 ; n = 4, respectivement). Les valeurs moyennes de La/Sc sont légèrement élevées mais proche de celle de l'UCC. Tandis que toutes les valeurs de Th/Co sont plus faibles que celles de l'UCC (0,63; Taylor et McLennan, 1985). Ces valeurs relativement faibles, indiquent dans l'ensemble, des roches sources mafiques, comme illustrée par le diagramme bivarié La/Sc *versus* Th/Co (Cullers, 2002; Figure 53a). Des résultats similaires indiquant des roches sources mafiques sont obtenus en plottant les échantillons de sédiment dans le diagramme ternaire V-Ni-Th*10 (Bracciali *et al*., 2007; Figure 53b). Le diagramme $(Ce)_{Cn}$ *versus* $(La/Yb)_{Cn}$ (Rao *et al*., 2011; Figure 53c), et le diagramme de fonction discriminante de Roser et Korsch (1988; Figure 53d) indiquent aussi des roches sources mafiques pour les sédiments des plages de Limbé.

Les REE sont comme des traceurs de provenance dans la mesure où ils sont supposés été transférés sans être fractionné dans le sédiment, comme documenté par Taylor et McLennan (1985). En conséquence, ils reflètent la composition moyenne des REE des roches parentales (McLennan, 1989). Les roches sources felsiques sont caractérisées par les valeurs élevées du rapport LREE/HREE et une anomalie négative en Europium, tandis que les roches sources mafiques montrent de faibles valeurs du rapport LREE/HREE et de faibles anomalies en Europium ou pas d'anomalies (Cullers, 1994). Selon El-Bialy (2013), les roches provenant de la croûte continentale supérieure montrent toujours des valeurs élevées de (La/Yb)cn et un enrichissement en LREE, tandis que les roches mafiques montrent une faible différenciation des REE et des anomalies en Europium nulles ou positives. Les valeurs du rapport (La/Sm)cn varient comme suit : Bakinguili (5,75 – 5,82 ; n = 3), Batoké (4,8 – 5,84 ; n = 5), Limbola (4,5 – 8.17 ; n = 5), Nguémé (4,37 – 4,74 ; n = 3), et Mile 8 (4,84 – 5,78 ; n = 4). Les HREE sont relativement plats, avec des valeurs du rapport (Gd/Yb)cn variant comme suit : Bakinguili (5,09 – 5,55 ; n = 3), Batoké (4,44 – 5,75 ; n = 5), Limbola (2,35 – 3,85 ; n = 5), Nguémé (3,47 – 3,8 ; n = 3), et Mile 8 (2,76 – 3,47 ; n = 4). Ces valeurs se trouvent dans le domaine des roches mafiques (McLennan, 1989). Des valeurs faibles et négatives à positives de l'anomalie en Europium (Eu/Eu* variant entre 0,82 et 1,23) indiquent que les différenciations intracrustales, impliquant la séparation des plagioclases, n'a pas affecté les roches sources.

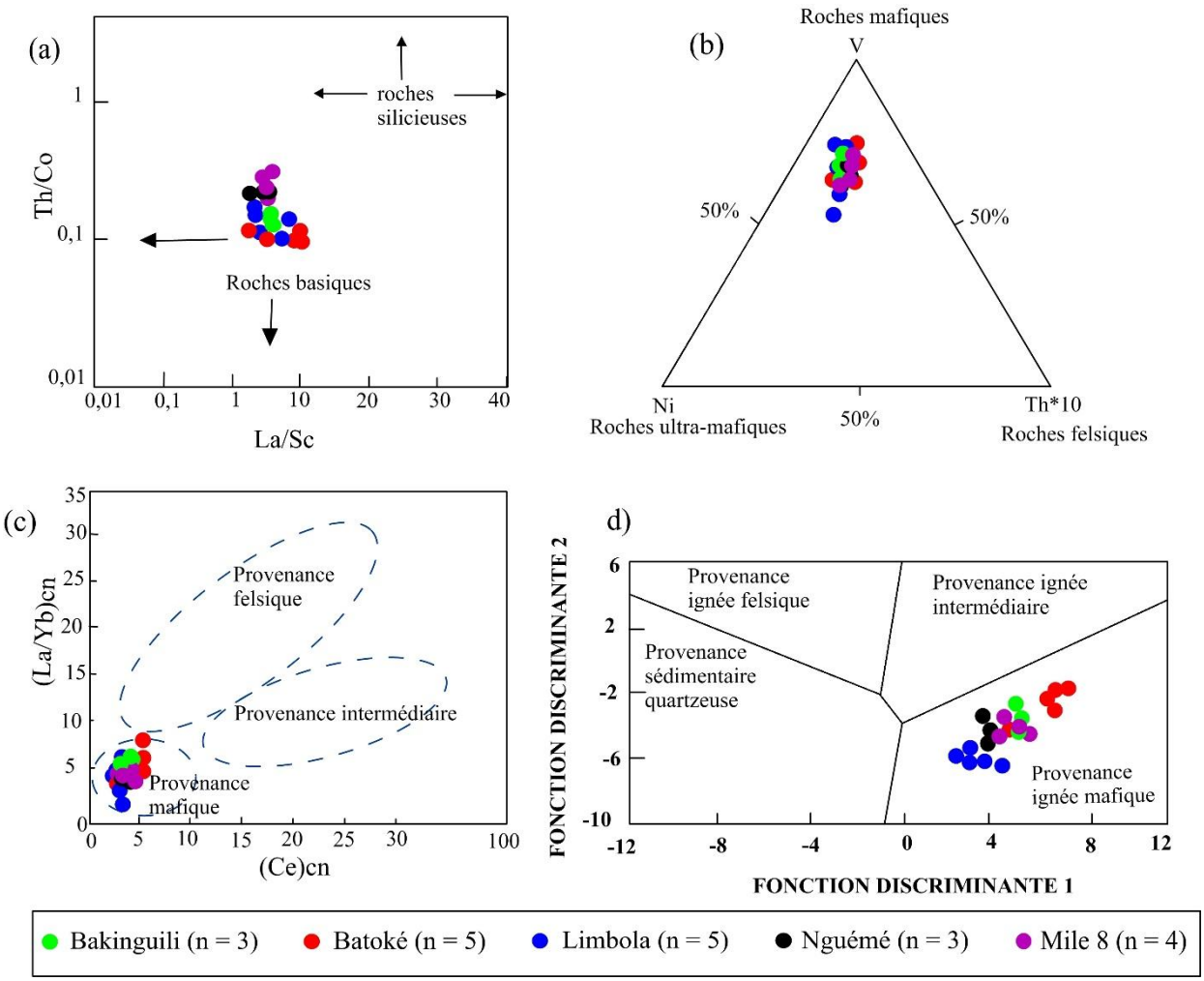


Figure 53. Diagrammes bivariés et ternaires des sédiments de plages de Limbé. (a) Th/Co *vs* La/Sc (Cullers, 2002), b) V-Ni-Tn*10 (Bracciali *et al.* 2007), c) (Ce)cn *vs* (La/Yb)cn (Rao *et al.*, 2011), d) graphique de la fonction discriminante de Roser et Korsch (1988). Les fonctions discriminantes sont les suivantes : fonction discriminante 1 = (− 1.773*TiO_2) + (0.607*Al_2O_3) + (0.760*Fe_2O_3) + (− 1.500*MgO) + (0.616*CaO) + (0.509*Na_2O) + (− 1.224*K_2O) + (− 9.090); discriminant function 2 = (0.445*TiO_2) + (0.070*Al_2O_3) + (0.250*Fe_2O_3) + (− 1.142*MgO) + (0.438*CaO) + (1.475*Na_2O) + (− 1.426*K_2O) + (− 6.861).

Par ailleurs, ces faibles anomalies en Europium sont caractéristiques des matériaux crustaux juvéniles (post archéens) de source locale. Cette interprétation est cohérente avec l'âge du matériel volcanique du Mont-Cameroun et du Mont Etindé situés près de la zone d'étude et supposé d'âge Tertiaire. Ce matériel n'a pas été entièrement décomposé du fait qu'il n'a subi qu'un très court transport de la zone source jusqu'au lieu de dépôt (Condie *et al.*, 1970 ; Gao et Wedepohl, 1995). Pour résumer, malgré la variation des valeurs de REE, les spectres de normalisation des REE par rapport à l'UCC et à la chondrite sont semblables dans presque tous les échantillons. En général, on observe dans les rapports (La/Sm)cn et (Gd/Yb)cn des faibles valeurs ou des valeurs nulles de l'anomalie en Europium, ce qui est typique des sédiments clastiques provenant des roches magmatiques mafiques.

Les données de REE des sédiments de plage de Limbé sont comparées à celles des roches volcaniques voisines et des roches plutoniques et sédimentaires affleurant aux abords de la Ligne Volcanique du Cameroun près des Monts-Cameroun et Etindé ou près du site d'étude, pour déterminer précisément la nature des roches sources (Figure 54a, b et c). Les alluvions des cours d'eaux qui ont pu contribuer à la sédimentation sur la zone d'étude, au moyen des courants côtiers, ont également été utilisées pour la comparaison. Ces courants côtiers entre l'île de Bioko et les plages près du Mont-Cameroun ont été documentés par Morin et Kuete (1988) et Ngueutchoua et Giresse (2010). Les roches utilisées pour la comparaison comportent les roches volcaniques tertiaires (basalte et trachyte), les alluvions sableuses, les granites à grains grossiers (CGG), les granites à grains fins (FGG), les roches mafiques à felsiques (MFR), les granites riches en biotite, les granites porphyriques, les granites à deux micas (Tagne-Kamga, 2003; Mosoh Bambi *et al*., 2013 ; Ngueutchoua *et al*., 2019 ; Wenjeh Wembenyui *et al*., 2020 ; Nanga Bineli *et al*., 2021 ; Sonfack *et al*., 2021). Le spectre des REE et l'anomalie en Europium des sédiments de Limbé sont similaires à ceux des roches volcaniques tertiaire (basaltes), ce qui suggère que ces sédiments proviennent du complexe Mont Cameroun-Mont Etindé, sans la contribution ni des granitoïdes panafricains proches, ni des successions sédimentaires crétacés du sous bassin de Douala. En plus, les résultats obtenus sont utiles pour caractériser les courants côtiers entre la partie méridionale des côtes camerounaises, près des embouchures de la Sanaga et de la baie de Douala et les plages de Limbé. Ngueutchoua et Giresse (2010) ont documenté le fait que le plateau continental du Cameroun au large des plages de Limbé est une zone d'accumulation des particules en suspension transportées par la Sanaga lors des périodes d'inondations. Ce résultat implique un courant côtier orienté N à NW de l'embouchure de la Sanaga jusqu'au large de Limbé. Cette dérive littorale est caractérisée au large de l'embouchure de la Sanaga par une nuée de forte concentration de particules en suspension oriente l'embouchure de la Sanaga vers le N et NW du plateau continental camerounais (Ngueutchoua et Giresse, 2010). La Sanaga étant considérée comme le fleuve le plus important des côtes camerounaises, et probablement celui qui apporte le plus de detritus dans l'Océan Atlantique avec un débit de 65,3 x 10^9 m^3/an et un bassin versant d'environ 135 000 km^2 (Nouvellot, 1972 ; Olivry, 1977). Toutefois les différences entre la composition des sédiments mafiques de Limbé, d'après les résultats de cette étude, et la nature relativement felsique des alluvions de la Sanaga et de la Dibamba (Nanga Bineli *et al*., 2021 ; Sonfack *et al*., 2021) suggèrent que la dérive littorale induite par les courants côtiers n'est assez significative pour remanier et harmoniser les sables des plages de Limbé. Ce résultat pourrait aussi indiquer que les courants

côtiers n'influencent pas la composition chimique des sédiments étudiés. Cette interprétation et le fait qu'il n'existe aucun cours d'eau important près de la zone d'étude impliquent que la sédimentation sableuse est essentiellement due aux rivières saisonnières qui drainent les flancs des montagnes qui sont asséchés pendant la saison sèche. Ces cours d'eaux se trouvent dans les vallées enfoncées en U que l'on observe sur le flancs du Mont-Cameroun et du Mont Etindé (Etame *et al*., 2009).

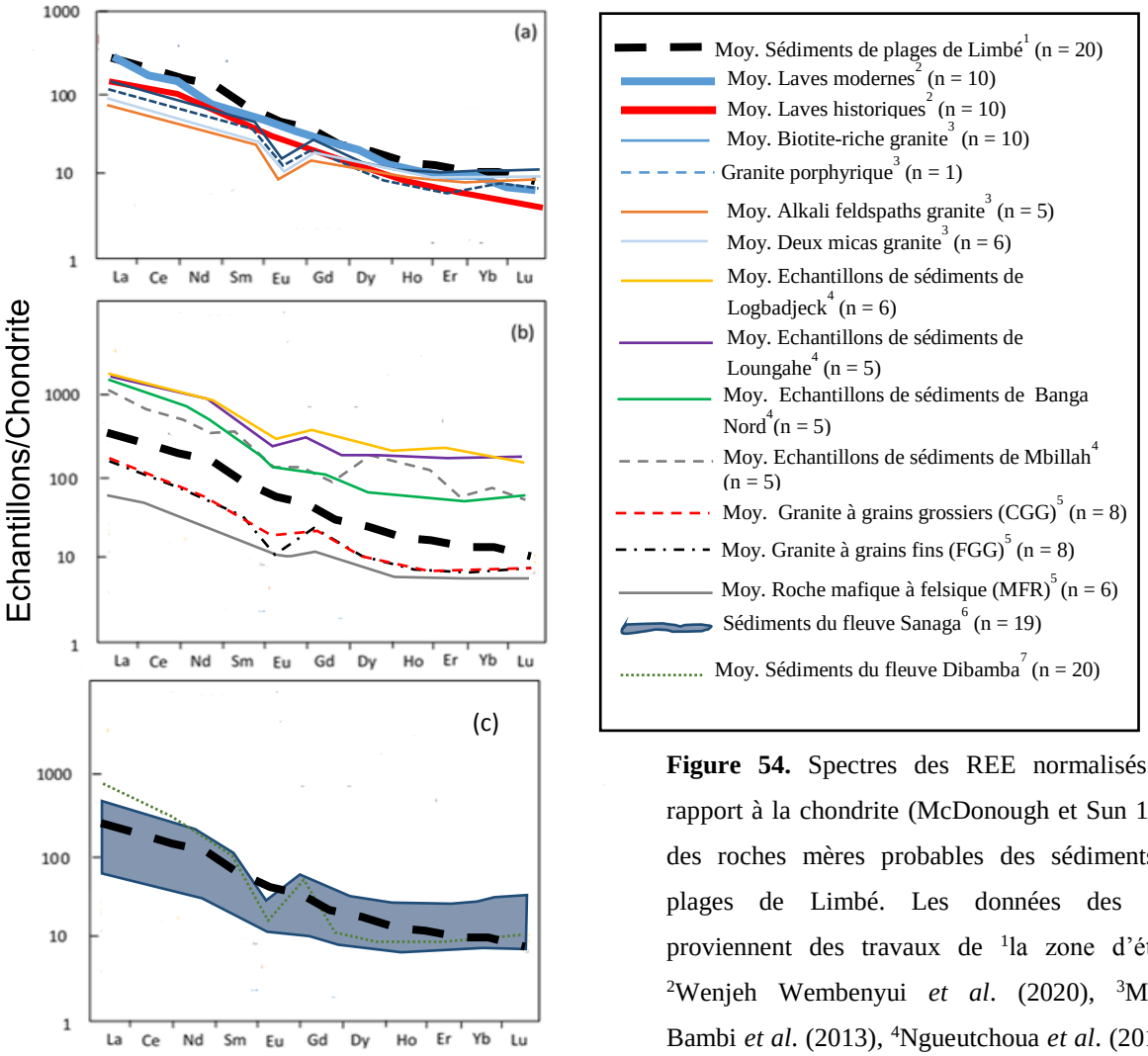


Figure 54. Spectres des REE normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun 1995) des roches mères probables des sédiments de plages de Limbé. Les données des REE proviennent des travaux de [1]la zone d'étude, [2]Wenjeh Wembenyui *et al*. (2020), [3]Mosoh Bambi *et al*. (2013), [4]Ngueutchoua *et al*. (2019a),

En résumé, l'explication possible du fait que les courants de dérive littorale du golfe de Guinée n'influencent pas la composition chimique des sédiments de plage de Limbé est la suivante : ces courants de dérive littorale orientés N dans la partie méridionale des côtes camerounaises jusqu'au niveau de la latitude de l'embouchure de la Sanaga dévient NW au niveau des bouches du Cameroun (baie de Douala) et deviennent de plus en plus proches de l'île de Bioko et légèrement distants des plages de Limbé. Ainsi, ces courants deviennent inaptes à générer au niveau de Limbé d'importants transports de sédiments; et ne peuvent

redistribuer les particules de la taille des sables. Une autre raison plausible est que l'influence potentielle des courants littoraux sur le transport des sables diminuerait progressivement vers le nord tel que documentée par Ngueutchoua et Giresse (2010).

Des études de provenances similaires ont été conduites sur des sables de plage du golfe de Californie et du Mexique (Madhavaraju *et al*., 2016) et le golfe du Mexique (Armstrong-Altrin *et al*., 2012). Les résultats obtenus sont comparés à ceux de la présente étude. Dans le golfe de Californie, les roches volcaniques (andésites et rhyolite d'âge Paléocène) et plutoniques (granitoïdes permo-triasique et granites et granodiorites mésozoïques) affleurent le long des côtes et dans l'arrière-pays de la localité de Sonora. Sur les plages de Sonora, le site de Puerto Penasco reçoit essentiellement les sédiments venant des granitoïdes permo-triasique, tandis que les sites de Desemboque et Bahia-Kino sont dominés par des détritus venant des granites et granodiorites mésozoïques. Des fleuves importants tels que Sonyota et Sonora contribuent à la sédimentation des plages de Puerto Penasco et Bahia Kino, respectivement. On note également que, les courants côtiers proches de ces plages génèrent un transport des sédiments.

Dans le golfe du Mexique, la chimie des sables provenant de plusieurs plages (Playa Azul, Tecolutla et Nautla) est liée à la pétrographie des zones sources. Les roches volcaniques (basaltes et andésines basaltiques) venant de la partie Est de la ceinture volcanique Mexicaine (« Mexican Volcanic Belt ») contribue à la sédimentation de la plage de Nautla. L'abondance des fragments de roches volcaniques dans les sables de la plage de Nautla est interprétée comme étant dû à la résistance de ces fragments lithiques volcaniques à l'abrasion et à la distance de transport courte entre les zones sources et les plages (Armstrong-Altrin *et al*., 2012). Les sables de Playa Azul et Tecolutla proviennent de la partie Est de la zone alcaline (« Eastern Alkaline Province »). Cette zone est constituée de basaltes, d'andésines basaltiques, d'andésines et de dacites. Des rivières majeures telles que Cazones, Tecolutla et Nautla qui transportent les sédiments sur les plages du golfe de Mexique. Sur ces plages, le rôle des courants côtiers n'est pas significatif.

Dans le golfe de Guinée, les sables des plages de Limbé proviennent exclusivement des laves du Mont-Cameroun et du Mont Etindé. Ce sont des roches volcaniques mafiques contenant de faibles pourcentages de silice (nephelinites, nephelinites à hauyne et melilites) et beaucoup de minéraux ferromagnésiens (amphiboles, pyroxènes et olivines). Les sables étudiés sont immatures comparés à ceux des golfes de Californie et Mexique (Armstrong-Altrin *et al*., 2012 ; Madhavaraju *et al*., 2016). L'immaturité compositionnelle des sables des plages de Limbé est essentiellement due à la pétrographie de leurs roches parentales mais

aussi, dans une certaine mesure, au fait que les plages sont proches des zones sources et qu'elles ne sont drainées par un aucun système fluviatile important. En plus, le transport des sédiments varie en fonction des rivières saisonnières. Ces rivières drainent les flancs du Mont-Cameroun et du Mont Etinde à travers des vallées presque perpendiculaires à la côte, dans une direction similaire à celle de la Ligne Volcanique du Cameroun. Ainsi, les sédiments ne font pas l'objet de long processus de transport fluviatile qui pourrait permettre l'altération complète des minéraux instables.

En résumé, les différences dans la composition chimique des sables des plages des golfes de Californie, de Mexique et de Guinée permettent de déterminer des roches sources mafiques, intermédiaires et felsiques pour les golfes de Californie et Mexique et des roches sources mafiques pour les sables du golfe de Guinée. Ces inférences sont en accord avec la pétrographie des différentes roches parentales. Ceci implique que la nature des roches sources est un facteur important dans le contrôle de la composition géochimique des sables de plage. Toutefois, le rôle du système fluviatile et la distance entre les zones sources et les zones de dépôts peuvent, d'une façon ou d'une autre, influencer la composition chimique des sables de plage. Les courants côtiers contrôlent la sédimentation de la plage dans le golfe de Californie tandis qu'il joue un rôle peu significatif à la fois dans les golfes de Mexique et de Guinée.

VI.6. Environnements et conditions de dépôts des sédiments des plages de Limbé

Les analyses des courbes cumulatives mettent en évidence tous les sédiments ayant des formes sigmoïdes ou en « S » avec des pentes fortes traduisant un bon classement hydraulique des sédiments dans un milieu plus ou moins agité et à forte énergie (Mouldi et Ckiou, 2007). L'agitation sédimentaire du milieu associée à la forte énergie seraient liées à celles des conditions pluviométriques (pluviométrie plus ou moins abondante : 2500 – 3600 mm/an). Les fortes pluviométries remarquées dans la zone de Limbé induisent le caractère hydrodynamique turbulent des eaux transporteurs des bassins fluviaux à l'intérieur du continent. Autrement dit l'agitation élevée des transports fluviatiles serait liée à la décroissance des altitudes topographiques (3500 m à 0 m) (Figure 4) du continent vers la plage de dépôt (Armstrong-Altrin, 2009).

Les diagrammes Md et So, ainsi que les diagrammes Sk-σ de l'évolution des paramètres granulométrique des sables de plages de Limbé permettent de déterminer leurs milieux de dépôts. Les diagramme Md-So (Figure 55a) présentent la dispersion des points (Moiola *et al*., 1968). Elle se fait entièrement dans le domaine de plage. Le diagramme Sk-Md

(Figure 55b) montre une légère répartition qui se fait entre les domaines de dune continentale et de dune côtière, avec une signature de zone côtière plus accentuée dans cette zone. De plus les diagrammes Sk-σ (Figure 55c et d) permettent également déterminer l'environnement de dépôt (Moiola *et al*., 1968 ; Friedman, 1967 ; Folk et Ward, 1957). Dans les diagrammes (σ-Sk) de Friedman (1967), tous les échantillons tombent dans le domaine des plages.

L'application du diagramme C-M de Passega (1964), Passega et Byramjee (1969) et Ludwikowska-Kedzia (2000) (Figure 56) permet de déterminer les conditions de dépôt et de transport des sédiments. Ce diagramme C-M a été largement utilisé pour interpréter les processus de transport et de dépôt des sédiments sur plusieurs plages (Ludwikowska-Kedzia, 2000 ; Ramamohanarao *et al*., 2003 ; Szmanda, 2007 ; Ostrowska *et al*., 2003 ; Bartholdy *et al*., 2007 ; Opreanu *et al*., 2007 ; Mycielska-Dowgiao et Ludwikowska-Kedzia, 2011 ; Farhat, 2010 ; Srivastava *et al*., 2012). Dans ce diagramme, les sédiments des plages Bakinguili, Batoké, Limbola, Nguémé et Mile 8 tombent préférentiellement dans le domaine du transport par saltation et suspension graduée.

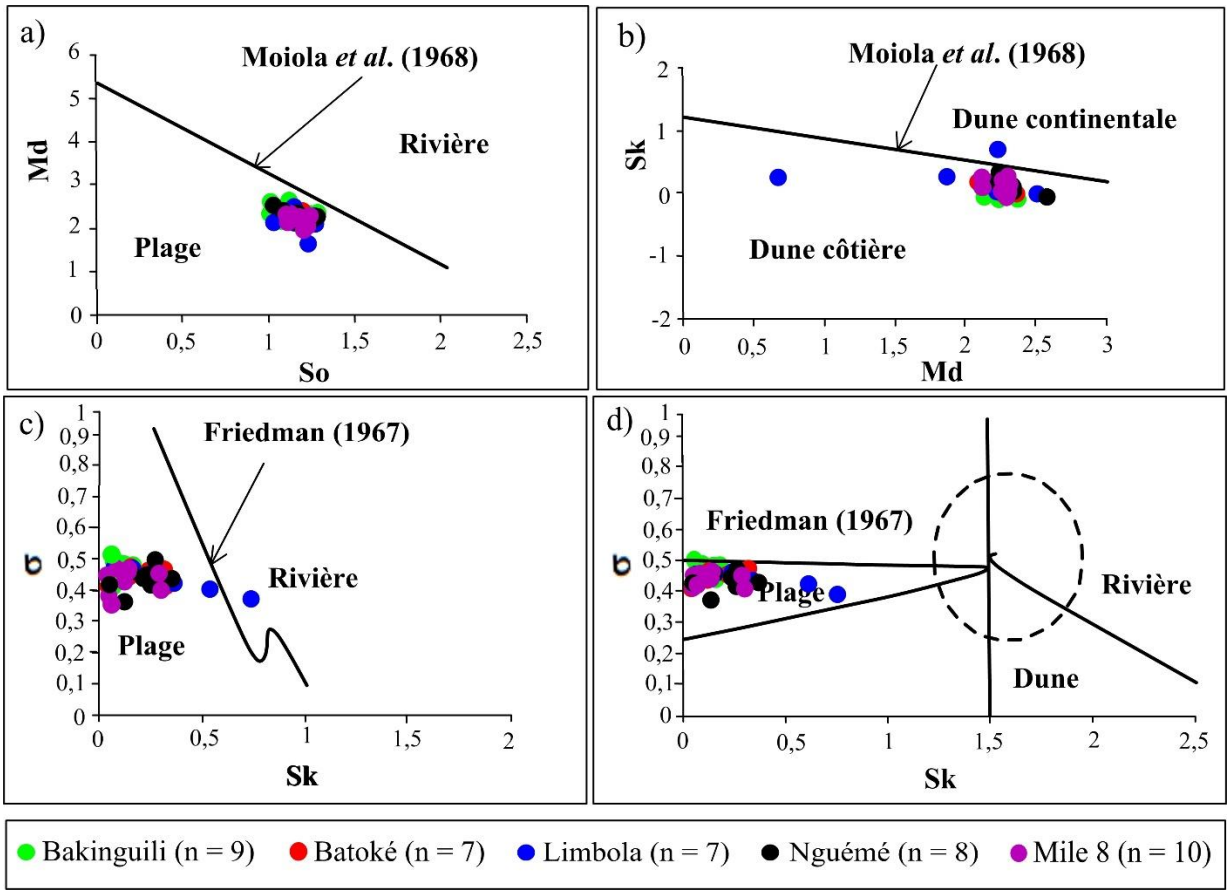


Figure 55. Diagrammes des environnements de dépôt des sédiments de plages de Limbé. a) Md et So (Moiola *et al*., 1968) ; b) Sk-Md (Moiola *et al*., 1968) ; c) σ-Sk (Friedman, 1967) et d) σ-Sk (Friedman, 1967).

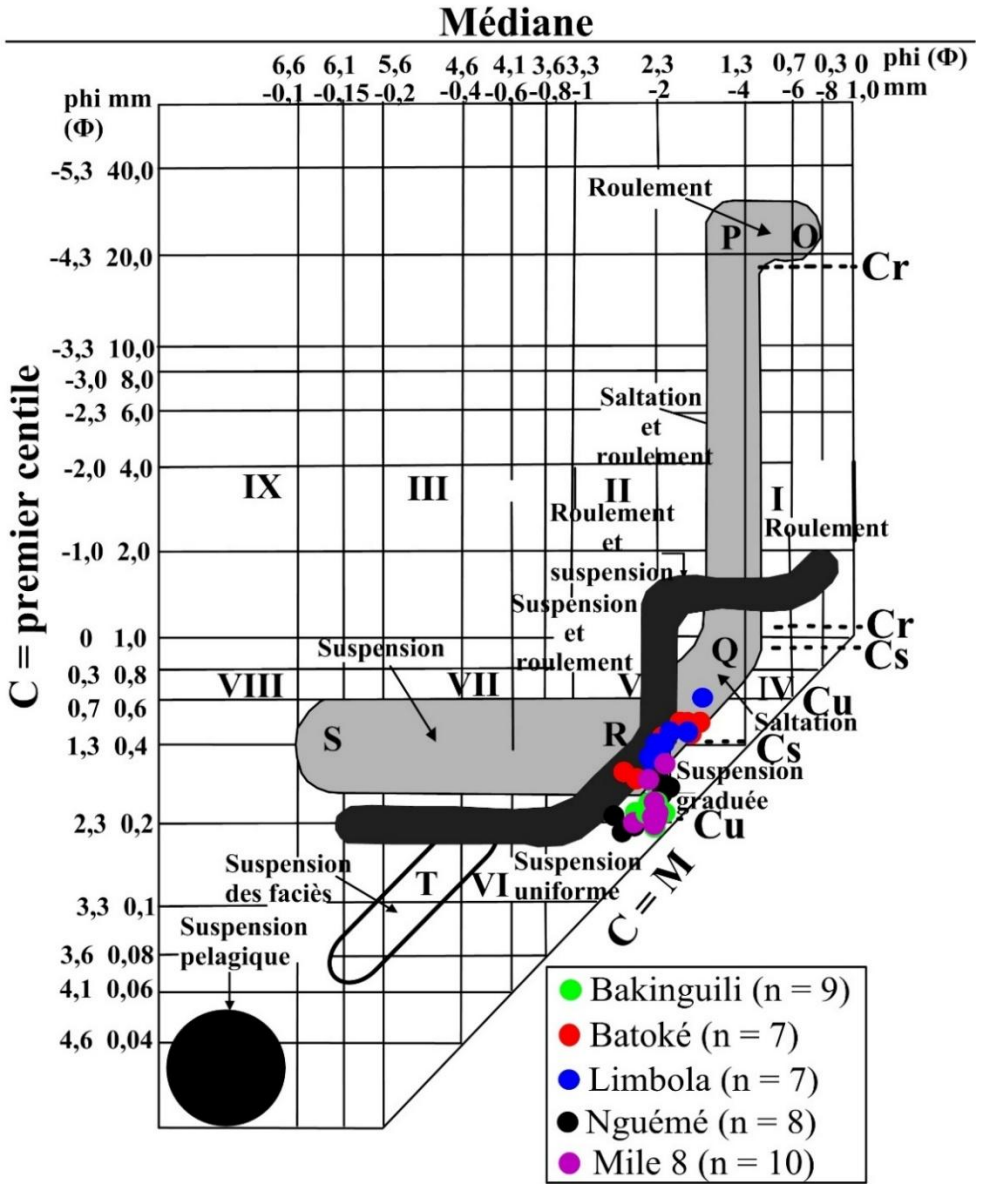


Figure 56. Diagramme C-M indiquant les différents modes de transport des sédiments des plages de Limbé.

VI.7. Paléoclimat

Le diagramme logarithmique bivarié basé sur les rapports Qp/Ft+Lt et Qp+Qm /Ft +Lt (Figure 57) de Suttner et Dutta (1986) indique les conditions climatiques des régions sources des sédiments des plages de Limbé. Dans ce diagramme, les sédiments des plages de Bakinguili, Batoké, Limbola, Nguémé et Mile 8 tombent dans le domaine du climat semi-humide. Ceci est cohérent avec le climat actuel qui est chaud et humide.

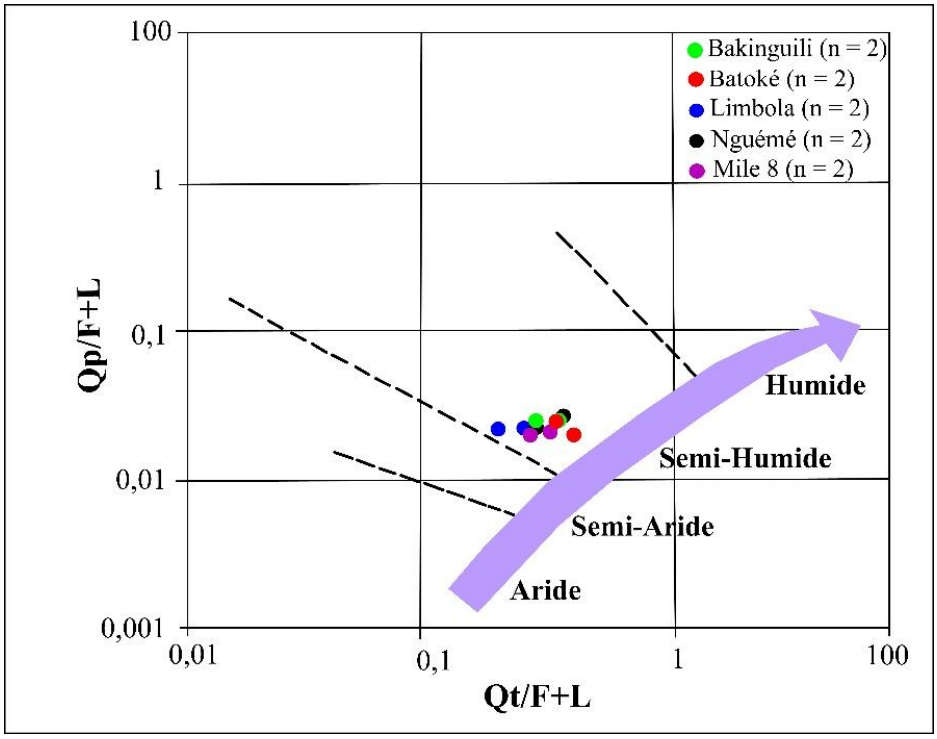


Figure 57. Diagramme discriminatif du paléoclimat des sédiments de plages de Limbé.

VI.8. Statut environnemental des plages de Limbé

Les milieux côtiers sont très souvent pollués par les activités industrielles (Castillo *et al*., 2013 ; Zhang *et al.*, 2019) telles que les rejets urbains d'eaux usées, les activités de pêche, la combustion des combustibles fossiles et le déversement de déchets solides (Bastami *et al.*, 2015). Les rejets maritimes d'eaux usées peuvent également polluer les côtes et nuire à l'environnement et aux personnes en contaminant les fruits de mer, en transmettant des maladies aux utilisateurs d'eaux et en créant des conditions inadaptées à la vie dans la mer et sur le rivage. En plus des activités humaines suscitées, les métaux lourds polluants trouvés dans un environnement donné peuvent provenir aussi des processus naturels (éruptions volcaniques, altération des roches, érosion, dépôts atmosphériques, dépôts de poussières) et activités humaines (Sundararajan *et al*., 2017; Mondal *et al*., 2018; Jha *et al*., 2019). Les métaux tels que Zn, Cd, Cr, Cu et Ni peuvent principalement être mobilisés à travers les activités humaines tandis que les autres métaux tels que Fe, Mn et Co proviennent de l'altération des roches (Serrano *et al*., 2011 ; Ekoa Bessa *et al*., 2018 ; Hossain *et al*., 2019 ; Tehna *et al*., 2019).

L'activité volcanique des Monts-Cameroun et Etindé, les rejets urbains de la ville touristique de Limbé ainsi que les activités de pêche et les rejets marins pourraient influencer le statut environnemental des plages de Limbé. Ce statut a été évalué au moyen de plusieurs

indices sur la contamination des éléments traces métalliques tels que Fe, Ni, Pb, Cu et Co. Parmi les indices utilisés, on peut citer le facteur d'enrichissement (FE), l'indice de géo-accumulation (I-geo) et le facteur de contamination (FC). Les équations de ces indices et les interprétations sont décrits dans le chapitre III. Le Fe a été choisi comme élément de référence pour calculer le facteur d'enrichissement. Cet élément est naturellement présent dans les sédiments de la zone d'étude et régulièrement utilisé dans la littérature (Ekoa Bessa *et al*., 2021).

VI.8.1. Distribution spatiale des métaux

Cette étude révèle que les concentrations (mg/kg) des métaux lourds sur les plages de Limbé se présentent ainsi qu'il suit par ordre décroissant : Fe (8889,79 – 30698,11) > Mn (131,61 – 627,31) > Ni (83 – 274) > Cu (72,7 – 133,9) > Co (34,2 – 176,3) > Zn (69,6 – 162,4) > Cr (13,68 – 109,47) > Cd (0,05 – 1,41) (Tableau 32). Toutefois, presque tous les métaux ont des concentrations inférieures à celles trouvées dans les argiles standarts (Average Shale ; Turekian et Wedepohl, 1961) excepté Fe, Mn, et Co. Tous les éléments ont des concentrations inférieures au niveau standard indiqué pour l'environnement, à l'exception de Co qui pourrait être lié à la présence des oxyhydroxydes de fer et manganèse dans les sables côtiers (Eu, 2002 ; CSQGD, 2007). Les fortes concentrations de Co proviendraient probablement du ruissellement des terres agricoles, de l'exposition de l'Océan Atlantique aux rejets importants de polluants provenant des processus industriels et aux eaux usées domestiques non traitées provenant des zones résidentielles.

Le cobalt peut être considéré comme un élément à faible mobilité et a généralement une forte affinité avec les oxyhydroxydes de fer et manganèse. Il peut également être lié au terminal pétrolier situé à proximité de plages étudiées. L'incinération des roues de voitures, des déchets plastiques, des raffineries de pétrole et des restes d'usine pourraient être à l'origine de la présence notable de Cr dans la zone côtière de Limbé.

La principale source du cadmium dispersé dans les sédiments étudiés serait liée à de nombreuses activités industrielles telles que la pêche, le terminal pétrolier, le raffinage du site d'étude et l'utilisation des fertilisants phosphates impliquant cet élément. Les fortes concentrations de Ni dans les plages de Bakinguili et Batoké pourraient être attribuées aux éruptions volcaniques et à l'altération des roches sources. Les valeurs relativement élevées dans les autres sites pourraient être attribuées aux terminaux pétroliers, à la pêche et aux peintures, bien que réalisés par des artisants à proximité de la zone d'étude.

Les fortes concentrations de Cu et Zn dans tous les sites seraient liées aux activités anthropogéniques relatives à la proximité de l'océan, des garages de raffineries et des ateliers de transformation des métaux. Les teneurs élevées en Fe peuvent être attribuées aux processus naturels (éruptions volcaniques et lessivage des roches sources). Il a été rapporté que le manganèse est présent dans une large gamme de concentration en tant qu'oligo-élément naturel dans les pétroles bruts utilisés pour améliorer la combustion (Long *et al*., 1998). Dans le cadre de cette étude, la combustion de divers combustibles hydrocarbonés peut être la source du manganèse des sédiments étudiés. Les concentrations des métaux étudiés dans le cadre de cette étude sont comparées à celles des mêmes éléments sur d'autres plages à travers le monde (Tableau 34). On observe que les concentrations en Cd (0,57 mg/kg) sont plus faibles que celles obtenues dans la plupart des plages à l'exception de la mer de Chine (Chun-gang *et al*., 2004) et la mer méditerranée en Egypte (El-Sikaily *et al*., 2004). Les concentrations en Zn sont plus élevées que celles de toutes les plages et mers sélectionnés pour la comparaison, à l'exception des plages de Karachi, de la mer d'Arabie (Siddique *et al*., 2009) et de la plage de Kerala, en Inde (Suresh *et al*., 2015). Le Fe et le Cu sont plus elévés à Limbé que partout ailleurs, à l'exception de la baie d'Algeciras, au sud de l'Espagne (Díaz-de Alba *et al*., 2011) et des plages Yoyo, Mouanko et Mbiako (Ekoa Bessa *et al*., 2021).

Tableau 34. Concentrations des ETM dans divers travaux des sédiments de plages à travers le monde.

	Fe	**Mn**	**Zn**	**Cd**	**Co**	**Cr**	**Cu**	**Ni**
Plage Kerala, Inde[1]	N/A	N/A	127,6	3,58	N/A	80,94	76,73	35,13
Baie Algeriras, sud Espagne[2]	25457,8	282,9	60,8	0,28	13,6	219,7	22,8	106,2
Plage Karachi, mer d'Arabie[3]	7,8	1835,5	502,8	0,8	25,49	361,5	115,2	73,8
Shandong Peninsule, Mer jaune[4]	N/A	N/A	74,7	N/A	N/A	57,8	20	31,2
Aqaba, Mer rouge en Jordanie[5]	N/A	N/A	0,42	5,25	N/A	1,12	0,03	0,43
Mer Mediterranée, Egypte[6]	142,68	7,95	14,14	0,34	1,51	N/A	8,83	2,85
Mer rouge, Egypte[7]	45,83	4,81	17,39	0,7	2,18	N/A	5,95	3,33
Mer Est de Chine[8]	N/A	106,65	35,92	0,18	2,49	90,38	14,59	14,55
Fleuve Dibamba[9]	44831,54	N/A	63	N/A	12,8	218	17,2	30
Plage Yoyo, Mouanko, Mbiako[10]	18379,65	285,6	N/A	N/A	4,8	37,34	N/A	18,63
Plage Limbé[11] (zone d'étude)	18320,24	284,61	104,23	0,57	103,87	56,24	102,56	217,9

N/A : Non analysé, [1]Suresh *et al*. (2015), [2]Diaz-de Alba *et al*. (2011), [3]Siddique *et al*. (2009), [4]Lee *et al*. (2013), [5]Al-Najjar *et al*. (2011), [6]El-Sikaily *et al*. (2004), [7]El-Sikaily *et al*. (2004), [8]Shung-gang *et al*. (2004), [9]Sonfack *et al*. (2021), [10]Ekoa Bessa *et al*. (2021).

VI.8.2. Contamination des sédiments

Le facteur d'enrichissement (FE) est un outil efficace pour évaluer le niveau d'enrichissement d'un métal et estimer l'état de contamination de différents environnements. L'ordre d'enrichissement par ordre décroissent est le suivant : Co (9,69 – 18,68) > Ni (7,6 – 10,94) > Cu (5,08 – 11,64) > Cd (0,59 – 8.49) > Zn (1,72 – 3,82) > Cr (1,21 – 2,01) > Mn (0,86 – 1,03). Le Co montre le facteur d'enrichissement le plus élevé. Dans l'ensemble le FE

est voisin de 1,5, à l'exception de Mn pour tous les sites et Cd à Limbola, Nguémé et Mile 8. Ceci pourrait indiquer une intense influence anthropogénique conduisant à la libération dans l'environnement de ces métaux lourds. Ces contaminations peuvent être liées aux activités humaines à partir des industries locales, les activités de pêche et des déversements de déchets solides par les bateaux.

L'indice de géoaccumulation montre que la moyenne du degré de contamination des plages de Limbé se présente comme suit : Co > Ni > Cu > Cd > Zn > Cr > Fe > Mn. Cet ordre est similaire à FE. L'I-geo de Co, Ni et Cu sont supérieures à 1 (classe 1), indiquant des sédiments pollués dans tous les sites. On observe une pollution de Cd à Limbola, Nguémé et Mile 8 et une absence de pollution en Cd à Bakinguili et Batoké. Les autres métaux (Zn, Cr, Fer et Mn) indiquent clairement une absence de pollution.

Le facteur de contamination (FC) pour le Fe et Mn est inférieur à 1, indiquant une faible contamination pour toutes les plages. Une faible contamination est également notée à Batoké et Nguémé pour le Zn et à Bakinguili et Batoké pour le Cd. Le FC montre une contamination modérée (1 < FC < 3) pour le Cu. Le Facteur de contamination (FC) est supérieur à 3 pour Co et Ni pour toutes les plages excepté Nguémé. La contamination est élevée partout et modérée à Nguémé. Le FC se présente par ordre décroissant ainsi qu'il suit : Co > Ni > Cu > Cd > Zn > Cr > Fe > Mn, ce qui est semblable au FE et à l'Igeo.

VI.9. Aspect économique et appui au developpement

En général, une bonne partie des résultats de nos travaux (pétrographiques et géochimiques) constituent une banque de données indispensables aux travaux de prospection minière. En effet les études géochimiques permettent de définir la notion de gisement qui correspond à l'augmentation dans une formation encaissante de la teneur d'un minéral utile.

Les sables noirs des plages de Limbé sont riches en minéraux ferromagnésiens favorables à la fertilisation des sols. Cette fertilisation semble favorable à *l'Eleais guineensis,* l'espèce végétale prédominante dans cette zone. De plus, les sables noirs de plages ont des valeurs cosmétiques. Ils sont utilisés comme gommage de la peau.

Conclusion

Les sédiments des plages de Limbé sont bien triés et bien à moyennement classés. Le dépôt à lieu dans un milieu plus ou moins agité. Tous les sédiments sont classés d'argiles et sables ferrifères. Les échantillons de sédiments étudiés sont immatures et proviennent des

roches sources modèrement à intensément altérés. Les sédiments ont une origine mafique. La valeur modale des moyennes Qt_{20}-Ft_{5}-Lt_{52} ; Qt_{22}-Ft_{4}-Lt_{54} ; Qt_{24}-Ft_{7}-Lt_{46} ; Qt_{23}-Ft_{5}-Lt_{50} et Qt_{24}-Ft_{5}-Lt_{53}, respectivement pour les plages de Bakinguili, Batoké, Limbola, Nguémé et Mile 8, indique un sédiment de type litharénite et pour environnement de dépôt la plage. Sur le plan environnemental, cette partie de la côte atlantique est modèrement polluée en métaux lourds (Fe, Mn, Zn, Cd, Co, Cr, Cu et Ni), pouvant être attribué aux activités humaines.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

« La persistence est la force la plus puissante sur terre, elle peut déplacer des montagnes ».

-Albert Einstein-

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le secteur de Limbé, situé dans la Région du Sud-Ouest Cameroun est constitué d'une plage sédimentaire très enrichie en sédiments sableux, dont le processus, la nature, la provenance sédimentologiques et les indices de leur pollution demeurent encore peu connues dans la littérature scientifique. C'est ainsi que sur la base des études granulométriques, minéralogiques (DRX et Microsonde électronique), pétrographiques (lithologiques) et géochimiques des sédiments des plages de Limbé, proche de la Ligne Volcanique du Cameroun dans le Golfe de Guinée ont conduit aux résultats suivants :

Sur le plan cartographique et lithologique, les sédiments de la plage de Limbé s'allonge le long de la côte interdidale d'altitude variable entre 0 et 500 m prouvant une dépression en pente douce vers l'océan atlantique.

Les études granulométriques ont prouvé que les sédiments des plages de Limbé sont généralement des sables moyens à fins, bien classés à caractère meuble, de couleur variable au gris très foncé à gris rougeâtre et brun rougeâtre. Au sein de ces sédiments, les argiles et les limons sont peu représentés. L'analyse des courbes cumulatives indique que les échantillons présentent des pentes fortes dans un milieu peu agité et à forte énergie. Dans l'ensemble, ces sédiments résultent d'un transport par saltation très court. Les valeurs des paramètres granulométriques montrent que les sédiments sont asymétriques vers les fins tout au long de la côte littorale. Leur environnement de dépôt est réellement les plages appartenant aux dunes côtières.

Les analyses morphoscopiques indiquent une prédominance des formes subanguleuses à anguleuses par rapport à celles arrondies à subarrondies. Ce qui suggère la proximité des zones sources.

Les analyses modales ont montré que les valeurs moyennes du rapport Quartz-Feldspaths-Fragments lithiques (Qt-Ft-Lt) sont de Qt_{20}-Ft_{5}-Lt_{52} ; Qt_{22}-Ft_{4}-Lt_{54} ; Qt_{24}-Ft_{7}-Lt_{46} ; Qt_{23}-Ft_{5}-Lt_{50} et Qt_{24}-Ft_{5}-Lt_{53}, respectivement pour les plages de Bakinguili, Batoké, Limbola, Nguémé et Mile 8, ce qui indiquent un sédiment de type litharénite. Les Diagrammes Ternaires Qt-Ft-Lt et Qm-Ft-Lt montrent que les sables de Limbé sont dominés par les détritus volcaniques.

Les analyses minéralogiques par diffraction des rayons X ont montré que les sédiments se constituent en proportion variable de quartz, olivine, pyroxène, augite, hématite, kaolinite, feldspaths potassiques, plagioclase, muscovite, biotite, ilménite, calcite et amphibole. La forte présence des minéraux ferromagnésiens (pyroxènes, olivine) associé au

quartz prouve que ces sédiments dériveraient des sources volcaniques de la partie continentale du secteur d'étude.

Les résultats des micro-analyses appuyés aux compositions chimiques des minéraux (pyroxènes, hématite, amphibole, kaolinite, illite, augite, ilménite) dont l'abondance en SiO_2, MgO, CaO et FeO montrent que les sédiments des plages de Limbé dériveraient des composantes appartenant aux roches magmatiques (volcanique et plutonique).

Sur le plan géochimique, les valeurs des rapports de SiO_2/Al_2O_3, ICV, l'indice ZTR revèlent que presque tous les échantillons de sédiments sont immatures, du point de vue de leur texture et de leur composition. Des marqueurs géochimiques élémentaires, le diagramme Th/Sc *versus* Zr/Sc et le diagramme ternaire Al_2O_3-TiO_2-Zr, en outre suggèrent des détritus de premier cycle et que le matériel sédimentaire n'a pas été récyclé.

Les sédiments des plages de Limbé ont fait l'objet d'une altération modérée à intense, comme l'indique le CIA, le PIA et les diagrammes ternaires A-CN-K et (A-K)-C-N. L'altération des minéraux primaires n'a pas été achevée lors des processus de transport, probablement en raison de ce que l'environnement de dépôt est assez proche des zones sources.

Les sables de plages étudiés semblent provenir exclusivement des roches magmatiques mafiques correspondant au segment continental le plus méridional de la Ligne Volcanique du Cameroun. Les résultats obtenus suggèrent en outre que les granites, les roches métamorphiques, et sédimentaires qui bordent la LVC ne contribuent pas à la sédimentation sur les plages de Limbé. En plus, les courants côtiers documentés dans le golfe de Guinée, ne modifient pas la composition chimique des sables de cette plage.

Des indices de pollution tels que le FE, l'I-geo et le FC ont révélé que tous les sites de la zone côtière de Limbé sont modérément pollués par les métaux étudiés. Selon les résultats obtenus par le FE, l'I-geo et le FC, deux des cinq sites étudiés (plages Bakinguili et Batoké) n'étaient pas pollués par le Cd. Cependant, toute la zone d'étude n'est pas polluée par le Mn. Les valeurs en Fe, Mn et Co ont montré des teneurs les plus élevées dépassant les valeurs moyennes. Des analyses de corrélation matricielle, en composantes principales ont été appliquées pour confirmer la similitude entre les métaux et d'étudier l'influence des activités anthropiques sur la qualité des sédiments. Les sources possibles du Cd peuvent être à la fois les raffineries de pétrole et l'éruption volcanique du Mont-Cameroun. Par conséquent, d'autres métaux peuvent provenir des sources anthropiques telles que l'agriculture, les garages, les décharges, la pêche, les raffineries pétroliers et les transformations métalliques.

PERSPECTIVES

- Conduire des études de provenance sur les sédiments marins au large de la zone d'étude afin d'apprecier la dynamique sédimentaire de la côte et du plateau continental camerounais ;
- Etudier la contribution de la Ligne Volcanique du Cameroun sur les dépôts centres fluviatiles ou lacustres jouxtant cette structure volcanique sur toute sa longueur au Cameroun ;
- Densifier la base de données pétrographique, géochimique et géochronologique sur un périmètre plus vaste autour du Mont-Cameroun et du Mont Etindé.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ambassa Bela, V., Ekoa Bessa, A.Z., Ngueutchoua, G., Aonsi Kamani, F., Abioui, M., Kwewouo Janpou, A., Ngueudong, Z.M.L., Tsanga, A.D., Armstrong-Altrin, J.S., 2022. Petrography and geochemistry of beach sediments along the central coast of Cameroon: constraints on paleoweathering, provenance, and tectonic setting. *Arabian Journal of Geosciences,* 1–25. https://doi.org/10.1007/s12517-022-10114-5

Armstrong-Altrin, J.S., 2009. Provenance of sands from Cazones, Acapulco, and Bahía Kino beaches, Mexíco. *Revista Mexicana de CienciasGeológicas*, 26 (3), 764–782.

Armstrong-Altrin, J.S., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J., Carranza-Edwards, A., Garcia, D., Eby, N., Balaram, V., Cruz-Ortiz, N.L., 2012. Geochemistry of beach sands along the Western Gulf of Mexico, Mexico: Implication for provenance. *Chemie der Erde*, 72, 345–362.

Armstrong-Altrin, J.S., Nagarajan, R., Lee, I.Y., Kasper-Zubillaga, J.J., Córdoba Saldaña, L.P., 2014. Geochemistry of sands along the San Nicolás and San Carlos beaches, Gulf of California, Mexico: implications for provenance and tectonic setting. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 23, 533–558. https://doi.org/10.3906/yer-1309-21.

Armstrong-Altrin, J.S., Nagarajan, R., Balaram, V., Natalhy-Pineda, O., 2015. Petrography and geochemistry of sands from the Chachalacas and Veracruz beach areas, western Gulf of Mexico, Mexico: constraints on provenance and tectonic setting. *Journal of South American Earth Sciences*, 64, 199–216.

Armstrong-Altrin, J.S., Machain-Castillo, M.L., 2016. Mineralogy, geochemistry, and radiocarbon ages of deep sea sediments from the Gulf of Mexico, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 71, 182–200.

Armstrong-Altrin, J.S., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J., Trejo-Ramírez, E., 2016. 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, 559–582.

Armstrong-Altrin, J.S., Alfonso, V., Botello, A.V., Villanueva, S.F, Soto, L.A., 2019. Geochemistry of surface sediments from the northwestern Gulf of Mexico: implications for provenance and heavy metal contamination. *Geological Quarterly*, 63 (3), 522–538.

Armstrong-Altrin, J.S., Madhavaraju, J., Vega-Bautista, F., Ramos-Vazquez, M.A., Perez Alvarado, B.Y., Kasper-Zubillaga, J.J., Ekoa Bessa, A.Z., 2021. Mineralogy and geochemistry of Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments, SW Gulf of Mexico. *Applied Geochemistry*, 134, 105103.

Asaah, A.N.E.,Yokoyama, T., Aka, F.T., Usui, T., Kuritani, T., Wirmvem, M. J., Iwamori, H.,

Fozing, E.M., Tamen, J., Mofor, G. Z., Ohba, T., Tanyileke, G., Hell, J.V., 2015. Geochemistry of lavas from maar-bearing volcanoes in the Oku Volcanic Group of the Cameroon Volcanic Line. *Chemical. Geology*, 406, 55–69.

Asaah, A.N.E.,Yokoyama, T., Iwamori, H., Aka, F.T., Kuritani, T., Usui, T., Tamen, J., Gountié Dedzo, M., Chako-Tchamabé, B., Hasegawa, T., Nche, L.A., Ohba, T., 2021. High-μ signature in lavas of Mt. Oku: Implications for lithospheric and asthenospheric contributions to the magmatism of the Cameroon volcanic line (West Africa). *Lithos*, (400–401), 1–15.

Ateba, B., Dorbath, C., Dorbath, L., Ntepe, N., Frogneux, M., Aka, F.T., Hell, J.V., Delmond, J.C., Manguelle, D., 2009. Eruptive and Earthquake activities related to the 2000 eruption of Mount Cameroon volcano (West Africa). *Journal of volcanology and Geothermal Research*, 179, (3–4), 206–216.

Azhar, S., Majid, M., Nayyer, A.Z., Khalil, A., Sumayya, S., Erum, Z., Haider, A.K., 2009. Heavy metal toxicity levels in the coastal sediments of the Arabian sea along the urban Karachi (Pakistan) region. *Journal of marine pollution bulletin*. 58, 1406–1419.

Bagnouls, F., Gaussen., 1957. Les climats biologiques et leur classification. *Annexe Géographie*. XXVI, 193–220.

Baker, B.H., Morh, P.A., Williams, L.A.J., 1972. The geology of the Eastern rift system of Africa. *American Geology Society*, 136p.

Barrett, P.J., 1980. The shape of rock particles, a critical review. *Sedimentology*, 27, 291–304.

Bartholdy, J., Christiansen, C., Pederson, J.B., 2007. Comparing spatial grain-size trends inferred from textural parameters using percentile statistical parameters and those based on the loghyperbolic method. *Sedimentology Geology*, 202, 436–452.

Bassanak Ongboye, P.R., Sababa, E., Ndong Bidzang, F., Ndjigui, P.-D., 2019. Geochemical characterization of surface sediments from Tongo Gandima (Eastern Cameroon): implications for gold exploration. *Arabian Journal of Geosciences*. https://doi.org/ 10.1007/s1257-019-4812-3.

Bastami, K.D., Neyst-ani, M.R., shamirani, F., Soltani, F., Sarah, Akbari, A., 2015. Heavy metal pollution assessment in relation to sediment in relation to sediment properties in the coastal sediments of the southern caspain Sea. *Marine Pollution Bullettin*, 92 (2), 343–373.

Béa, A., 1987. Grabens et volcanisme tholeiitique continental associé d'âge Ordovicien-Dévonien probable dans la région de Garoua au Nord Cameroun. Thèse Doctorat 3e cycle, Université Aix-Marseille III, 165p.

Belmonte, Y.C., 1966. Stratigraphie du bassin sédimentaire du Cameroun. Proceeding 2nd W. African Micropalynology Colloquium Ibada, 1, 7–24.

Berner R.A., Lasaga A.C., Garrels R.M., 1983. The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years. *American Journal of Science*, 283 (7), 641–683.

Blatt, H., 1982. Sedimentary petrology. *W.H. Freedman*, San Francisco.

Bokanda, E.E., Fralick, P., Ekomane, E., Njilah, I.K., Bisse, S.B., Akono, D.F., Ekoa Bessa, A.Z., 2019. Geochemical characteristics of shales in the Mamfe Basin, South West Cameroon: implication for depositional environment and oxidation conditions. *Journal of African Earth Sciences*, 149, 131–142.

Bracciali, L., Marroni, M., Pandolfi L., Rocchi, S., 2007. Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): from source area to configuration of margins. *Geological Society of America Special Paper*, 420, 73–93.

Brindley, G.W., Brown, G., 1980. Quantitative X-ray mineral analysis of clays. *Crystal structures of clays minerals and their X-ray identifications*, 5, 411–438.

Brownfield, M.E., Charpentier, R.R., 2006. Geology and Total Petroleum systems of the West Central Coastal Province,West Africa, U,S, *Geology Survey Bulletin*, 52p.

Burke, K., 2001. Origin of the Cameroon line of volcano-capped swells. *Journal of geology*, 109, 349–362.

Buxton, l., Hall, P.B., 1989. Geochemical summary report for six wells and 4 oils from Douala basin: The geochemical evaluation of the offshore Douala basin. *Republic of Cameroon*, 1–39.

Cailleux, A., 1942. Distinction des sables marins et fluviatiles. *Bullellin de la Société Géologique de France*, 125–138.

Carranza-Edwards, A., Centeno-García, E., Rosales-Hoz, L., Cruz, R.L.-S., 2001. Provenance of beach gray sands from western México. *Journal of American Earth Sciences*, 14 (3), 291–305.

Carranza-Edwards, A., Kasper-Zubillaga, J.J., Martínez-Serrano, R.G., Cabrera-Ramírez, M., Rosales Hoz, L., Alatorre Mendieta, M.A., Márquez-García, A.Z., Lozano-Santa Cruz, R., 2019. Provenance inferred through modern beach sands from the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Geological Journal*, 54, 552–563.

Castillo, M.L., Trujillo, I.S., Alonso, E.V., de Torres, A.G, Pavon, J.C., 2013. Bioavailability of heavy metals in water and sediments from a typical Mediterranean Bay (Malaga Bay, Region of Andalucia, Southern Spain). *Marine Pollution Bullettin*, 76, 427–434.

Chamley, H., Deconinck, J.-F., 2013. Bases de sédimentologie, 3eEdition Dunod, Paris, 461p.

Chassin, P., Baize, D., Cambier, P., Sterkman, T., 1996. Les elements traces métalliques et la qualité des sols. Impact à moyen et à long terme. Etude et gestion des sols, 3 (4), 298–306.

Chilinger, G.V., 1982. Graph of determining the size of sedimentary particles. *America geological Institute,* AGI Data sheet, 16p.

Chougong Tchatchouang, D., Ekoa Bessa, A.Z., Ngueutchoua, G., Yongue Fouateu, R., Ntyam, S.C., Armstrong-Altrin, J.S, 2021. Mineralogy and geochemistry of Lobé River sediments, SW Cameroon: implications for provenance and weathering. *Journal of African Earth Sciences*. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104320.

Chun-Gang, Y., Jian-bo, S., Bin, H., Jing-fu, L., Li-Na, L., Gui-bin, J., 2004. Speciation of heavy metals in marine sediments from the East China Sea by ICP-MS with sequential extraction. *Environment International*, 30, 769–783. https://doi.org/10.1016/j.envin.2004.01.001.

Condie, K.C, Mackie, J.E., Reimer, T.O., 1970. Petrology and geochemistry of Early Precambrian greywackes from the Fig Tree Group, South Africa. *Geological Society of America Bulletin*, 81, 2759–2776.

Cox, R., Low, D.R., Culler, R.L., 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimimica et Cosmochimica Acta,* 59, 219–2940.

Crook, K.A.W., 1974. Lithogenesis and geotectonics: the significance of compositional variation in flysch arenites (graywackes).*Society of Economical, Paleontological and Mineralogical Special Publications*, 19, 304–310.

Crovisier, J.L., 1979. Technique d'induration superficielle pour la réalisation de lames minces dans les matériaux poreux. *Cahier ORSTOM, Pédologie,* 17, 229–231.

Cullers, R.L., 1994. The chemical signature of source rocks in size fractions of Holocene stream sediment derived from metamorphic rocks in the W et Mountains region, Colorado, USA. *Chemical Geology*, 113, 327–343.

Cullers, R.L., 2000. The geochemistry of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: implications for provenance and metamorphic studies. *Lithos*, 51, 181–203.

Cullers, R.L., Podkovyrov, V.N., 2000. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: implications for mineralogical and provenance control, and recycling. *Precambrian Research*, 104 (1-2), 77–93.

Cullers, R.L., 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.

Davis, M.W., Ehrlich, R., 1970. Relationship between measures of sediment-size- frequency distributions and nature of sediments. *Geological Society of Bulletin*, 81, 3537–3548.

Dayong, V.A., 2018. Geochemistry and Mineralogy of Clastic Sediments of Tukau Formation: Implications on Provenance and Tectonic Setting, Thesis of the Degree of Master of Philosophy (Geology) of Curtin University, 142p.

Diaz-de-alba, M., Galindo-riano, M.D., Casanueva-Marenco, M.J., Garcia-Vargas, M., Kosore, C.M., 2011. Assessment of the metal pollution, potential toxicity and speciation of sediment from Algeciras bay (south of Spain) using chemometric tools. *Journal of hazardous materials*. 190, 177–187.

Dickinson, W.R., 1985. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. In: Zuffa, G.G. (Eds), Provenance of Arenites. *Reidel Publishing Company, Reidel*, 231–247.

De Martonne, E., 1942. Nouvelle carte mondiale de l'aridité. *Annales de Géographie*, 241–250.

Déruelle, B., Moreau, C., Nkonguin, N.E., 1983. Sur la récente éruption du Mont Cameroun (16 octobre – 12 novembre, 1982). *Comptes Rendus Académie Sciences, Paris*, 296, 807–812.

Déruelle, B., N'ni, J., Kambou, R., 1987. Mount Cameroon: an active volcano of the Cameroon Line. *Journal of African Earth Sciences*, 6, 187–214.

Déruelle, B., Moreau, C., Nkoumbou, C., Kambou, R., Lissom, J., Njonfang, E., Ghogomu, R.T, Nono, A., 1991. The Cameroon Line: A review, in Kampunzu, A.B., Lubala, R.T.,

(Eds.), Magmatism in Extensional Structural Settings: The Phanerozoic African Plate. *Berlin, Springer*, 274–327.

Déruelle, B., Ngounouno, I., Demaiffe, D., 2007. The "Cameroon Hot Line" (CHL): aunique example of active alkaline intraplate structure in both oceanic and continental lithospheres. *Comptes Rendus Géoscience*, 339, 589–600.

Dumort, J.C., 1968. Carte géologique de reconnaissance du Cameroun à l'échelle 1/500 000. Note explicative sur la feuille Douala-Ouest. République fédérale du Cameroun, Direction des Mines et de la Géologie du Cameroun, 69p.

Duplaix, S., 1958. Détermination microscopique des minéraux des sables, 2e édition révisée, Librairie polytechnique Béranger, Paris et Liège., 96p.

Eghombi, G., 1999. The sedimentology of upper cretaceous to tertiary rock in the bombe area. Thesis, University of Buea, 109p.

Ekoa Bessa, A.Z., Ngueutchoua, G., Ndjigui, P.-D., 2018. Mineralogy and geochemistry of sediments from Simbock Lake, Yaounde area (southern Cameroon): provenance and environmental implications. *Arabian Journal of Geosciences*, 11 (22), 710. https://doi.org/10.1007/s12517-018-4061-x.

Ekoa Bessa, A.Z., Ambassa Bela, V., Ngueutchoua, G., El-Amier, Y.A., Aonsi Kamani, F., Ngueudong, Z.L., Kamguem Fotso, C.A., Njimanu Njong, V., Kemgang Ghomsi, F.E., Mohammad, V., Armstrong-Altrin, J.S., 2021. Characteristics and Source Identifcation of Environmental Trace Metals in Beach Sediments Along the Littoral Zone of Cameroon. *Earth Systems and Environment*. https://doi.org/10.1007/s41748-021-00279-6.

El-Bialy, M.Z., 2013. Geochemistry of the Neoproterozoic metasediments of Malhaq and Um Zariq Formations, Kid metamorphic complex, Sinai, Egypt: implications for source-area weathering, provenance, recycling, and depositional tectonic setting. *Lithos*, 175, 68–85.

El-Sikaily, A., Khaled, A., El Nemr, A., 2004. Heavy metals monitoring using bivalves from Mediterranean Sea and Red Sea. Environnemental Monitoring and Assessment, 98, 41–58.

Eslinger, P., 1988. Clay minerals for petroleum geologists and engineers, SEPM short course. *Social Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, USA*, 22, 133–174.

Etame, J., Gerard, M., Bilong, P., Suh, C.E., 2009. Behaviour of elements in soils developed from nephelinites at Mount Etinde (Cameroon): impact of hydrothermal versus weathering processes. *Journal of African Earth Sciences*, 54, 37–47.

Ewanjike, R, Fobang, R, Tali, A, Ngulle, A., 2007. A Concise Geography of Fako and Meme Division. *The Geography Journal of Southwest Association of Geography Teachers, Buea, Cameroon*, 1–10.

Farhat, H.I., 2010. Grain-size distribution and geochemical studies on the recent sediments of Damietta and Rosetta Nile branches. Ph.d. thesis, Benha University, Caire, Egypt, 266p.

Fedo, C.M., Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1995. Unravelling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23, 921–924.

Fitton, J.G., 1983. Active versus passive continental riftting: Evidence from the West Africa rift system. *Tectonophysics*, 94, 473–481.

Fitton, J.G., 1987. The Cameroon Line: West Africa: A comparison between oceanic and continental alkaline volcanism, in Fitton, J.G., Upton, B.G.J., (Eds.), Alkaline Igneous Rocks. *Geological Society of London Special Publication*, 30, 273–291.

Fitton, J.G., Dunlop, H.M., 1985. The Cameroon Line, West Africa, and its bearing on the origin of oceanic and continental alkali basalt. *Earth and Planetary Science letters*, 72, 23–38.

Floyd, P.A., Leveridge, B.E., 1987. Tectonic environments of the Devonian Gramscatho Basin. South Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbidite sandstones. *Journal of Geological Society of London*, 144, 531–542.

Folk, R.L., 1966. A review of grain-size parameters. *Sedimentology*, 6 (2), 73–93. https://doi.org/10.1111 /j.1365-3091.1966.tb01572.x.

Folk, R.L., 1968. Petrology of Sedimentary Rocks. *Austin, Hemphill Publishing*, Co., USA. 170p.

Folk, R.L., 1980. Petrology of sedimentary rocks. *Austin, Hemphill Publishing, Texas*, 184 p.

Folk, R.L., Ward, W.C., 1957. Brazos River bar: a studyin the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3–26.

Friedman, G.M., 1967. Dynamic processes and statiscal parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands. *Journal of sedimentary petrology*, 37, 327–354.

Gallet, S., Jahn, B., Van Vlierlanoe, B., Dia, A., Rosslio, E., 1998. Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust. *Earth and Planetary Science letters*, 156, 157–172.

Gao, S., Wedepohl, K.H., 1995. The negative Eu anomaly in Archean sedimentary rocks: implications for decomposition, age and importance of their granitic sources. *Earth and Planetary Science letters*, 133, 81–94.

Garcia, D., Fonteilles, M., Moutte, J., 1994. Sedimentary fractionations between Al, Ti, and Zr, and the genesis of stronlyperaluminous granites. *The Journal of Geology*, 102, 411–422.

Garzanti, E., Ando, S., 2007. Heavy mineral concentration in modern sands: implications for provenance interpretation. *Development in Sedimentology*, 58, 517–545.

Garzanti, E., Resentini, A., Ando, S., Vezzoli, G., Pereira, A., Vermeesch, P., 2015. Physical controls on sand composition and relative durability of detrital minerals during ultra-long distance littoral an aeolian transport (Namibia and southern Angola). *Sedimentology*, 62 (4), 971– 996.

Geze, B., 1943.Géographie physique et géologie du Cameroun Occidental. Mémoire Musée National Histoire. Naturelle, tome 17, fascicule unique, 273p.

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

Gillet, P., Barrat, J.A., Heulin, T., Achouak, W., Lesourd, M., Guyot, F., Benzerara, K., 2000. Bacteria in the Tatahouine meteorite: nanometricscale life in rocks. *Earth planet Sciences Letters*, 175 (3-4), 161–167.

Gouhier, J., Nougier J., Nougier D., 1974. Contribution à l'étude volcanologique du Cameroun («ligne du Cameroun» - Adamaoua). *Annales Faculté Sciences*, Université Yaoundé, Cameroun, 17, 3–48.

Guogang, L., Bangqi, H., Jianqiang, B., Qinuan, L., Chunqiao, X., Zhongcheng, Y., 2013. Heavy metals distribution and contamination in surface sediments of the coastal Shandong peninsula (yellow sea). *Journal of marine pollution bulletin*, 76, 420–426.

Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. *A sedimentological approaches Water Research*, 14, 975–1001.

Harnois, L., 1988. The CIW index: a new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology*, 55, 319–322.

Hay, W.W., 1998. Detrital sediment fluxes from continents to oceans. *Chemical Geology*, 145, 287–323.

Hayashi, K.I., Fujisawa, H., Holland, H.D., Ohmoto, H., 1997. Geochemistry of~ 1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 4115–4137.

Hedberg, J.D., 1968. A geological analysis of the Cameroon trend. PhD. Thesis, Princeton University Princeton.

Hernández-Hinojosa, V., Montiel-García, P.C., Armstrong-Altrin, J.S., Nagarajan, R., Kasper-Zubillaga, J.J., 2018. Textural and geochemical characteristics of beach sands along the western Gulf of Mexico, Mexico. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 13, 1, 161–174.

Herron, M.M., 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of SedimentaryPetrology*, 58, 820–829.

Honling, Z., Tony, R.W., Emily, D., Guofeng, M., 2019. Ecological risk assement of metals in small craft harbor sediment in Nova Scotia, Canada. *Journal of marine pollution bulletin*, 146,466–475.

Hossain, M.B., Shanta, T.B., Ahmed, A.S., Hossain, M.K., Semme, S.A., 2019. Baseline study of heavy metal contamination in the Sangu River estuary, Chattogram, Bangladesh. *Marine Pollution Bullettin*, 140, 255–261.

Hubert, J.F., 1962. A zircon-tourmaline-rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the gross composition and texture of sandstone. *Journal of Sedimentary Petrology*, 32, 440–450.

Itiga, Z., Chakam Tagheu, P.J., Wotchoko, P., Wandji, P., Bardintzeff, J.-M., Bellon, H., 2004. La Ligne du Cameroun: Volcanologie et Géochronologie de trois régions (Mont Manengouba, Plaine du Noun et Tchabal Gangdaba). *Géochronique*, 91, 13–16.

Jarvis, K.E., 1988. Inductively Coupled Plasma mass spectrometry: a new technique for the rapid or ultra-trace level determination of the rare earth elements in geological materials. *Geological Society of America Bulletin*, 87, 725–737.

Jha, D.K., Ratnam, K., Rajaguru, S., Dharani, G., Devi, M.P., Kirubagaran, R., 2019. Evaluation of trace metals in seawater, sediments, and bivalves of Nellore, southeast coast of India, by using multivariate and ecological tool. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 1–10.

Jongman, B., Ward, P.J., Aerts, J.C., 2012. Global exposure to river and coastal flooding: long term trends and changes.*Global Environmental Changes*, 22 (3), 383–390.

Kagou Dongmo, A., Wandji, P., Pouclet, A., Vicat, J.P., Cheilletz, A., Nkouathio, D.G., Alexandrov, P., Tchoua, F.M., 2001. Evolution volcanologique du mont Manengouba (Ligne du Cameroun), nouvelles données pétrographiques, géochimiques et géochronologiques. *Comptes Rendus Académie des Sciences Paris*, 333, 155–162.

Kamgang, P., Chazot, G., Njonfang, E., Ngongang Tchuimegnie, N.B., Tchoua, F., 2013. Mantle sources and magma evolution beneath the Cameroon Volcanic Line: Geochemistry of mafic rocks from Bamenda Mountains (NW Cameroon). *Gondwana Research*, 24, 727–741.

Kasanzu, C., Makenya, A.H., Maboko, Manya, S., 2008. Geochemistry of fine-grained clastic sedimentary rocks of the Neoproterozoic Ikorongo Group, NE Tanzania: implications for provenance and source rock weathering. *Precambrian Research*, 164, 201–213.

Kasper-Zubillaga, J.J., Armstrong-Altrin, J.S., Carranza-Edwards, A., Morton-Bermea, O., Lozano-Santa-Cruz, R., 2013. Control in beach and dune sands of the Gulf of Mexico and the role of nearby rivers. *International Journal Geosciences*, 4, 1157–1174.

Kontchipe Ngagoum, Y.S., Temgo Sopie, F., Ngueutchoua, G., Sonfack, N.A., Nkouathio, D.G., Tchatchueng, R., Nguemo Kenfack, G.R., Njanko, T., 2021. Mineralogy and geochemistry study of the Nyong River sediments, SW Cameroon: implications for provenance, weathering, and tectonic setting. *Arabian Journal of Geosciences*. https://doi.org/10.1007/s12517-021-07145-9.

Krumbein, W.C, Graybill, F.A., 1965. An introduction to statistical models in geology. *New York : McGraw-Hill*, 475p.

Lasserre, M., 1978. Mise au point sur les granitoïdes dits «ultimes» du Cameroun : gisements, pétrographie et géochronologie. *Bulletin du Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, 2, 143–156.

Lawrence, S.R., Munday, S., Bray, R., 2002. Regional Geology and Geophysics of the Eastern Gulf of Guinea (Niger Delta to Rio Muni). *The Leading Edge*, 1112–1117.

Letouzey, R., 1985. Notice explicative de la carte phytogéographique du Cameroun à l'échelle 1/500 000. Institut de la carte de végétation, Toulouse, 240p.

Liaghati, T., Preda, M., Cox, M., 2003. Heavy metal distribution and contolling factors within coastal plain sediments, Bells creek catchment, southeast Queensland Australia. *Environnement International*, 29, 935–948.

Liyouck, P.R., Ngueutchoua, G., Armstrong-Altrin, J.S., Sonfack, A.N., Kontchipe Ngagoum, Y.S., Ekoa Bessa, A.Z., Ambassa Bela, V., Tsanga, D.A., Wouatong, A.S.L., 2023. Petrography and geochemistry of the Sanaga river sediments, central Cameroon:

Constraints on weathering, provenance, and tectonic setting. *Journal of African Earth Sciences*, 104840. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.104840.

Logar, J.F., 1983. WEC Afrique de l'Ouest, Well Evaluation conference. *Schlumberger, Paris*, 205p.

Long, E.R., Field, L.J, Macdonald, D.D., 1998. Predicting toxicity in marine sediments with numerical sediment quality guidelines. *Environment Toxicology Chemical*, 17, 714–727.

Ludwikowska-Kedzia, M., 2000. Evolution of the middle segment of the Belnianka river valley in the lake Glacial and Holocene. *Dialog Press, Warsaw*, 180p.

Mackenzie, W.S., Guilford, C., 1984. Atlas of sedimentary rocks under the microscope. *Longman Scientific and Technical*. 1stEds, 104p.

Madhavaraju, J., 2015. Geochemistry of Late Cretaceous sedimentary rocks of the Cauvery Basin, south India: constraints on paleoweathering, provenance, and end Cretaceous environment. *Chemostratigraphy*, 185–214. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-419968-2.00008-X.

Madhavaraju, J., Ramírez-Montoya, E., Monreal, R., González-León, C.M., Pi-Puig, T., Espinoza-Maldonado, I.G., Grijalva-Noriega, F.J., 2016. Paleoclimate, paleoweathering and paleoredox conditions of Lower Cretaceous shales from the Mural Limestone, Tuape section, northern Sonora, Mexico: constraints from clay mineralogy and geochemistry. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33 (1), 34–48.

Madhavaraju, J., Armstrong-Altrin, J.S., Arthur James., R., Hussain, S.M., 2021. Palaeoenvironment and provenance signatures inferred from quartz grain surface features: A case study from Huatabampo and Altata beaches, Gulf of California, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 1–11. https//doi.org/10.1016/j.james 2021.103441.

Marzoli, A., Renne, P.R., Piccirillo, E.M, Francesca, C., Bellieni, G., Melfi, A.J., Nyobe, J.B., N'ni, J., 1999. Silicic magmas from the continental Cameroon Volcanic Line (Oku, Bambouto, and Ngaoundere): ^{40}Ar-^{39}Ar dates, petrology, Sr-Nd-O isotopes and their petrogenetic significance. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 135, 133–150.

Marzoli, A., Piccirillo, E.M, Renne, P.R., Bellieni, G., Iacumin, M., Nyobe, J.B., Tongwa, A.T., 2000. The Cameroon Volcanic Line revisited: petrogenesis of continental basaltic magmas from lithospheric and asthenospheric mantle sources. *Journal of Petrology*, 41, 87–109.

Mayla, A., Ramos-Vázquez, Armstrong-Altrin, J.S., 2019. Sediment chemistry and detrital zircon record in the Bosque and Paseo del Mar coastal areas from the southwestern Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 110, 650–675. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.07.032.

Mbale Ngama, E., Sababa, E., Bayiga, E.C., Ekoa Bessa, A.Z., Ndjigui, P.-D., Bilong, P., 2019. Mineralogical and geochemical characterization of the unconsolidated sands from the Mefou River terrace, Yaoundé area, Southern Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 159, 103570. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.07.103570.

Mbesse, C.O., Bessong, M., Ntamak-Nida M.J., Gerrienne, P., Mvondo Owono, F., Ekoa Bessa A.Z., Djomeni Nitcheu, A., Belinga, R., Helenes, J., 2020. Palynology and palynofacies analyses in the Douala sub-basin: Implications on palaeoenvironment evolution of the Souellaba Formation/ west Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 172, 1–15.

McDonald, D.A., Surdam, R.C., 1984. Clastic diagenesis. *American Association of Petroleum Geologists*, 434p.

McDonough, W.F., Sun, S.S., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 223–253.

McLennan, S.M., 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: influences of provenance and sedimentary processes. *Review Mineral*, 21, 169–200.

McLennan S.M., 1993. Weat Yaoundé I hering and global denudation. *Journal of Geology*, 101, 295–303.

McLennan, S.M., 2001. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry, Geophysics, Geo-systems*, 2.2000GC000109.

McLennan, S.M., Hemming, S., 1992. Samarium/Neodymium elemental and isotopic systematic in sedimentary rock. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56, 887–898.

McLennan, S.M., Hemming, S., McDaniel, D.K., Hanson, G.N., 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. *Geological Society of America*, Special paper, 284, 21–40.

McLennan, S.M., Hemming, S.R, Taylor, S.R., Eriksson, K.A., 1994. Geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 1153–1177.

Mendieta-Lora, M., Mejía-Ledesma R.O., Kasper-Zubillaga J.J., Arellano-Torres, E., Álvarez Sánchez, L.F., 2018. Mineralogy and geochemical implications of weathering rates in coastal dunes and beach sands close to a volcanic rock source in the western Gulf of Mexico, Mexico. *Chemie der Erde*. https://doi.org/10.1016/j.chemer.2018.06.004.

Meyers, J.B., Rosendahl, B.R., Groschel, H., Austin, J., 1996. Deeppenetrating MCS imaging of the rift-to-drift transition, offshore Douala and North Gabon basins, West Africa. *Marine and Petroleum Geology*, 13, 791–835.

Mitra, R., Chakrabarti, G., Shome, D., 2018. Geochemistry of the Palaeo-Mesoproterozoic Tadpatri shales, Cuddapah basin, India: implications on provenance, paleoweathering, and paleoredox conditions. *Acta Geochimica*, 37 (5), 715–733. https://doi.org/10.1007/s11631-017-0254-3.

Mohammad, B.B., Trisha, B.S., Shafiuddin, A.S., Kamal, H., Sanjida, A.S., 2019. Baseline study of heavy metal contamination in the sangu river estuary, chattogram, Bangladesh. *Journal of marine pollution bulletin*, 140, 255–261.

Moiola, R.J., Welser, D., 1968. Textural parameters: an evolution. *Journal of Sedimentary Petrology*, 38, 45–53.

Mondal, P., de Alcântara., Mendes, R., Jonathan, M.P., Biswas, J.K., Murugan, K., Sarkar, S.K., 2018. Seasonal assessment of trace element contamination in intertidal sediments of the meso-macrotidal Hooghly (Ganges) River Estuary with a note on mercury speciation. *Marine Pollution Bullettin*, 127, 117–130

Morin, S., Kuété, M., 1988. Le littoral Camerounais: problèmes morphologiques. Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée, 11, 5–52. https://doi.org/10.3406/tlgpa.1988.900.

Mosoh Bambi, C.K., Frimmel, H.E., Zeh, A., Suh, C.E., 2013. Age and origin of Pan-African granites and associated U-Mo mineralization at Ekomédion, southwestern Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 88, 15–37.

Mouafo, L., 1988. Volcanologie et pétrologie du Mont Etinde. Thèse de Doctorat 3ème cycle Université de Yaoundé I, Cameroun, 134p.

Mouldi, B., Chkiou, A., 2007. Répartition granulométrique et minéralogiques des sédiments de surface dans le golfe de Tunis. *Bullettin Institut National des Sciences et Technologies Mer de Salammbô*, 34, 9p.

Muller, G., 1969. Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River. *Geology Journal*, 3, 109–118.

Munsell Color., 2000. Munsell Soil Color Charts. U.S. Department of Agriculture Handbook 18-*Soil Survey Manual*.

Mycielska-Dowgiao., Ludwikowska-Kedzia., 2011. Alternative interpretation of grain-size data from quaternary deposits. *Geologos*, 17 (4), 189–203.

Nadem, S., El Baghdadi, M., Rais, J., Barakat, A., 2015. Evaluation of heavy metal contamination of sediment of the estuary of the Bouregreg (Atlantic coast Moroco). *Journal Materials Sciences*, 6 (11), 3338–3345.

Nagarajan, R., Armstrong-Altrin, J.S., Kessler, F.L., Jong, J., 2017. Petrological and geochemical constraints on provenance, paleoweathering and tectonic setting of clastic sediments from the Neogene Lambir and Sibuti formations, northwestern Borneo. In Sediment Provenance. Chapter 7, (Eds.) Rajat Mazumder, 123–153.

Nanga Bineli, M.T., Onana, V.L., Noa Tang, S.D., Bikoy, Y.R., Ekodeck, G.E., 2021. Mineralogy and geochemistry of sands of the lower course of the Sanaga River, Cameroon: implications for weathering, provenance, and tectonic setting. *Acta Geochemica*, https://doi.org/101007/s11631-020-00437-z.

Ndjigui, P.-D., Beauvais, A., Fadil-Djenabou, S., Ambrosi, J.-P., 2014. Origin and evolution of Ngaye River alluvial sediments, Northern Cameroon: geochemical constraints. *Journal of African Earth Sciences*, 100, 164–178.

Ndjigui, P.-D., Onana, V.L., Sababa, E., Bayiga, E.C., 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.

Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715–717.

Nesbitt, H.W., Young G.M., 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic consideration. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 1523–1534.

Ngako, V., Njonfang, E., Aka Tongwa, F., Affaton, P., Nnange Metuk, J., 2006. The north-south Paleozoic to Quaternary trend of alkaline magmatism from Niger Nigeria to Cameroon: Complex interaction between hotspots and Precambrian faults. *Journal of African Earth Sciences*, 45, 241–256.

Ngnotue, T., Nzenti, J.P., Tchoua, F.M., 2000. The Ntui-Betamba high-grade gneisses a northward extension of Pan-African Yaoundé gneisses in Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 2, 369–381.

Ngonge, E.D., Hollanda, M.H.B.M., Nkonguin Nsifa, E., Tchoua, F.M., 2014. Petrology of the Guenfalabo ring-complex: An example of a complete series along the Cameroon Volcanic Line (CVL), Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 96, 139–154.

Nguene, F.R., Tamfu, S., Loule, J.P., Ngassa, C., 1992. Paléoenvironnements of the Douala and Kribi/Campo sub-basins in Cameroon, West Africa, Recueil des presentations du colloque sur les basins Ouest Africain, 129–139.

Ngueutchoua, G., Giresse, P., 2010. Sand bodies and incised valleys within the late quaternary Sanaga-Nyong delta complex on the middle continental shelf of Cameroon. *Marine and Petroleum Geology*, 27, 2173–2188.

Ngueutchoua, G., Ngantchu, L.D., Youbi, M., Ngos III, S., Beyala, V.K.K., Yifomju, K.P., Tchamgoué, J.C., 2017. Geochemistry of Cretaceous mudrocks and sandstones from Douala sub-Basin, Kumba area, South West Cameroon: constraints on provenance, source rock weathering, paleo-oxidation conditions and tectonic environment. *International Journal of Geosciences*, 8, 393–424. https://doi.org/10.4236/ijg.2017.84021.

Ngueutchoua, G., Eyong, T.J., Ekoa Bessa, A.Z., Azanji Agheenwi, Z.B., Emane Maschouer, A., Sobdjou Kemteu, C., Lontchi Dzoti, Y., Touda Hamadou, Ongbassouek Baboule, B.-M., Kenfack Nguemo, G.R., 2019. Provenance and depositional history of Mesozoic sediments from the Mamfe basin and Douala sub-basin (SW Cameroon) unraveled by geochemical analysis. *Journal of African Earth Sciences*. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103550.

Ngueutchoua, G., Ekoa Bessa, A.Z., Eyong, T.J., Demanou, Z.D., Baba Djaoro, H., Tchami, N.L., 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.

Nichols, G., 2015. Terrigenous clastic sediments. *Blackwell Science, Oxford*, 1–14.

Njike Ngaha, P.R., 2004. Palyno-stratigraphie et reconstitution des paléoenvironnements du Crétacé de l'Est du bassin sédimentaire de Douala. Thèse d'Etat, Université de Yaoundé I, 251p.

Njilah, I. K., Ajonina, H.N., Kamgang, K.V., Tchindjang, M., Tessi, V., 2004. K-Ar ages, mineralogy, major and trace element geochemistry of the Tertiary-Quaternary lavas

from the Ndu Volcanic Ridge N.W. Cameroon. *African Journal of Science and Technology*, 5, 47–56.

Njonfang, E., Ngako, V., Kwekam, M., Affaton, P., 2006. Les orthogneiss calcoalcalins de Foumban-Bankim: Témoins d'une zone interne de marge active panafricaine en cisaillement. *Comptes Rendus Géoscience*, 338, 606–616.

Njonfang, E., Tchuente Tchoneng, G., Cozzupoli, D., Lucci, F., 2013. Petrogenesis of the Sabongari alkaline complex, Cameroon line (central Africa): Preliminary petrological and geochemical constraints. *Journal of African Earth Sciences*, 83, 25–54.

Nkouathio, D.G., Kagou Dongmo, A., Wandji, P., Bardintzeff, J.-M., Tchoua, F.M., 2006. Evolution and tectonic control of volcanism along the CameroonVolcanic Line: case study of graben and horst volcanoes. Implication on the nature of volcanic hazards. Garavolcan, *300th International Conference commemorating the 1706 Arenas Negras Eruption, Garachico, Tenerife, Canary Islands*, May 22 to 27.

Nkouathio, D.G., Kagou Dongmo, A., Bardintzeff, J.M., Wandji, P., Bellon, H., Pouclet, A., 2008. Evolution of volcanism in graben and horst structures along the Cenozoic Cameroon Line (Africa): implications for tectonic evolution and mantle source composition. *Mineralogy and Petrology*, 94, 287–303.

Nkoumbou, C., Deruelle, B., Velde, D., 1995. Petrology of Mount Etindé nephelinites series. *Journal of Petrology*, 36 (2), 373–395.

Nkoumbou, C., Barbey, P., Yonta-Ngouné, C., Paquette, J.L., Villieras, F., 2014. Pre-collisional geodynamic context of southern margin of the Pan-African fold belt in Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 99, 245–260.

N'nanga, A., Ngos III, S., Ngueutchoua, G., 2019. The late Pleistocene-Holocene paleoclimate reconstruction in the Adamawa plateau (Central Cameroon) inferred of the Lake Fonjak sediments. *Journal of African Earth Sciences,* 150, 23–36.

Nnange, J.M., PoudjomDjomani, Y.H., Fairhead, J.D., Ebinger, C.J., 2001. Determination of the isostatic compensation mechanism of the region of the Adamawa dome, West Central Africa using the Admittance technique of gravity data. *Journal of Sciences and Technology, Science and Engineering Series*, 1 (4), 29–35.

N'ni, J., 2004. Magmatogénèse du versant Sud-ouest des monts Bambouto-Bamenda (Ligne du Cameroun: Géologie, volcanologie et pétrogenèse. Thèse Doctorat d'Etat, Université de Yaoundé I, Cameroun, 207p.

Nouvelot, J.F., 1972. Le régime des transports solides dans divers cours d'eau du Cameroun de 1969 à 1971. Cahier office Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Sér. Hydrologie, IX (1), 4773.

Ntamak-Nida, M.J., Baudin, F., Schnyder, J., Makong, J.-C., Komguem, P.B., Abolo, G.M., 2008. Depositional environments and characterization of the organic matter of the Lower Mundeck Formation (Barremian?‑Aptian) of the Kribi-Campo sub-Basin (South Cameroon): implications for petroleum exploration. *Journal of African Earth Sciences*, 51, 207–219.

Ntamak-Nida, M.J., Bourquin, S., Makong, J.-C., Baudin, F., Mpesse, J.E., Itjoko Ngouem, C., Komguem, P.B., Abolo, G.M., 2010. Sedimentology and sequence stratigraphy from outcrops of Kribi-campo sub-basin: lower Mundeck Formation (Lower Cretaceous, southern Cameroon). *Journal of African Earth Sciences*, 58, 1–18.

Nyobe, J.M., Sababa, E., Bayiga, E.C., Ndjigui, P.-D., 2018. Mineralogical and geochemical features of alluvial sediments from the Lobo watershed (Southern Cameroon): implications for rutile exploration. *Comptes Rendus Geosciences*, 350, 119–129.

Nzenti, J.P., Barbey, P., Jegouzo, P., Moreau, C., 1984. Un nouvel exemple de ceinture granulitique dans une chaine protérozoïque de collision: les migmatites de Yaoundé au Cameroun. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 299, 1197–1199.

Nzenti, J.P., Barbey, P., Macaudière, J., Soba, D., 1988. Origin and evolution of late Precambrian high-grade Yaoundé gneisses (Cameroon). *Precambrian Research*, 38, 91–109.

Odoma, A.N., Obaje, N.G., Omada, J.I., Idakwo, S.O., Erbacher, J., 2015. Mineralogical, chemical composition and distribution of rare earth elements in clay-rich sediments from southeastern Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, 102, 50–60.

Olivry, J.C., 1977. Transports solides en suspension au Cameroun. *International Association of Hydrological Sciences*, 122, 134–141.

Olivry, J.C., 1986. Fleuves et rivières du Cameroun. Collection Monographies. Hydrologiques ORSTOM, 9, Paris, 733p.

Olugbenga, A., Okunlola., Olubunmi, I., 2012. The geochemistry of claystone-shale deposits from the maastritchian Patti formation, Southern Bida basin, Nigeria. *Earth Sciences Research*, 16 (2), 57–67.

Oni, S.O., Olatunji, A.S., Ehinola, O.A., 2014. Determination of provenance and tectonic settings of Niger delta clastic facies using well-Y, onshore delta state, Nigeria. *Journal of Geochemistry*, 1–13.

Opreanu, G., Oaie, G., Paun, F., 2007. The dynamic significance of the grain size of sediments transported and deposited by the Danube. Geo-Eco-Marina coastal zone processes and management. *Environment Legislation*, 13, 111–119.

Ostrowska, A., Oswiecimska-piasko, Z., Smolska, E., 2003. Sedimentological indice of channel-facies deposits with the upper czarna haneza river valley (Suwaki Lakeland) as an exemple (Textural indice of slope and fluvial deposits). *Prace studia Geografiezne (Warszawa)*, 33, 59–70.

Papadopoulos, A., 2018. Geochemistry and REE content of beach sands along the Atticocycladic coastal zone, Greece. *Geoscience Journal*. http://dx.doi.org/10.1007/s12303-018-0004-5.

Papadopoulos, A., Lazaridis, S., Kipourou-Panagiotou, A., Kantiranis, N., Koroneos, A., Almpanakis, K., 2021. Mineralogy, Geochemistry and Provenance of Coastal Sands from Greece: New Insights on the REE Content of Black Coastal Sands from Aggelochori Area, N.-Greece. *Minerals*, 11, 693. https://doi.org/10.3390/min11070693.

Parfenoff, A., Pomerol, C., Tourenq, J., 1970. Les minéraux en grains méthodes d'études et détermination, Masson et Cie, Paris, 571p.

Passega, R., 1964. Grain-size representation by CM patterns as a geological tool. *Journal of Sedimentary Petrology*, 34, 830– 847.

Passega, R., Byramjee, R., 1969.Grain-size image of clastic deposits. *Sedimentology* 13, 233–252.

Pauwels, J.M., Ranst, E.V., Verlo, M., Mvondo, Z.A., 1992. Manuel de laboratoire de pédologie, méthodes d'analyses des sols et des plantes, équipements, gestion des stocks et des produits chimiques. *Publications agricoles*, 26, 265p.

Penaye, J., Toteu, S.F., Michard, A., Bertrand, J.M., Dautel, D., 1989. Reliques granulitiques d'âge Protérozoïque inférieur dans la zone mobile Panafricaine d'Afrique Centrale au Cameroun. Géochronologie U-Pb sur zircons. *Comptes Rendus Académie Sciences Paris*, 309, 315–318.

Perri, F., 2014. Composition, provenance and source weathering of Mesozoic sandstone from western-central Mediterranean Alpine Chains. *Journal of African Earth Sciences*, 91, 32–43.

Pettijohn, F.J., Potter, P.E., Siever, R., 1987. Sand and Sandstones.*Springer, New York*, 553p.

Pohl, W., 2005. Economic Geology: Principles and Practice. *Wiley- Blackwell, Chichester*, 663p.

Potter, P.E., 1978. Petrology and chemistry of big river sands. *The Journal of Geology*, 86, 423–449.

Pouclet, A., Kagou Dongmo, A.K., Bardintzeff, J.-M., Wandji, P., Tagheu, P.C., Nkouathio, D., Bellon, H., Ruffet, G., 2014. The Mount Manengouba, a complex volcano of the Cameroon line: volcanic history, petrological and geochemical features. *Journal of African Earth Sciences*, 97, 297–321.

Powers, M.C., 1953. A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of sedimentary Research*, 23 (2), 117–119.

Prodger, S., 2017. Spatial and temporal variability of sandy beach sediment grain size and sorting. Thesis of Doctor, Plymouth University, 434p.

Ramachandran, A., Madhavaraju, J., Ramasamy, S., Lee, Y.I., Rao, S., Chawngthu, D.L., Velmurugan, K., 2016. Geochemistry of Proterozoic clastic rocks of the Kerur Formation of Kaladgi-Badami Basin, North Karnataka, South India: implications for paleoweathering and provenance. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 25, 126–144.

Ramamohanarao, T., Sairam, K., Venkateswararao, Y., Nagamalleswararao, B., Viswanath, K., 2003. Sedimentological characteristics and depositional environment of upper Gondwana rocks in the Chintalapudi sud-basin of the Godavari valley, Andhra Pradesh, India, *Journal of Asian Earth Sciences*, 21, 691–703.

Rao, W., Tan, H., Jiang, S., Chen J., 2011. Trace element and REE geochemistry of fine- and coarse-grained sands in the Ordos deserts and links with sediments in surrounding areas. *Chemie der Erde*, 71, 155–170.

Regnoult, R.A., 1986. Geological Synthesis of Cameroon. *Directorate of Mines and Geology*, Yaoundé, Cameroon, 118p.

Reyre, D., 1966. Histoire géologique du bassin de Douala, Symposium, bassins sédimentaires côtiers post-Cambrien de l'Afrique de l'Ouest. 22ème Colloque International de Géologie, Congo, NewDelhi, Association, Servey, Géologique Africains, 143–161.

Ridley, J., 2013. Ore Deposit Geology. *Cambridge University Press.* New York, 409p.

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, B.P., Cooper, R.A., Nathan, S., Tulloch, A.J., 1996. Reconnaissance sandstone geochemistry, provenance, and tectonic setting of the Lower Paleozoic terranes of the

West Coast and Nelson, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 37, 1, 1–16. https://doi.org/10.1080/00288306.1996.9514690.

Roser, B.P., Korsch, R.J., 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant functgion analysis of major-element data. *Chemical Geology*, 67, 119–139.

Safiur, M.R., Belal, M.H., Omar, S.M., Moshiur, R., Shafiuddin, A., Jolly, Y.N., Tchoudhury, T.R., Begun, B.A., Kabir, J., Akter, k., 2019. Source of metal contamination in sediment, their ecological risk, and phytoremediation ability of the studied mangrove plants in ship breaking area, Bangladesh. *Journal of marine pollution bulletin*. 141, 137–146.

Salard-Chebodaeff, M., 1981. Palynologie Maestrichtienne et Tertiaire du Cameroun. Résultats Botaniques. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 32, 401–439.

Salati, S., Moore, F., 2010. Assessment of heavy metal concentration in the Khoshk River water and sediment, Shiraz, Southwest Iran. *Environment Monitory Assess*, 164, 677–689.

Salvarredy, A.M., 2008. Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sediments du val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers, approches géochimique, mineralogique et hydrochimique. Thèse de Doctorat / Phd, Université de Toulouse, 377p.

Sato, H., Aramaki, S., Kusakabe, M., Hirabayashi, J.I., Yuji, Y., Tchoua, F., 1990. Difference of basalts between polygenetic and monogenetic volcanoe. In the central part of the Cameroon volcanic Line. *Geochemical Journal Japan*, 24, 357–370.

Schwab, F.L., 1975. Framework mineralogy and chemical composition of continental margin-type sandstone, *Geology*, 3, 487–490.

Serrano, O., Mateo, M.A., Dueñas-Bohórquez, A., Renom, P., LópezSáez, J.A., Cortizas, A.M., 2011. The Posidonia oceanica marine sedimentary record: a Holocene archive of heavy metal pollution. *Sciences Total Environment*, 409, 4831–4840.

Siddique, A., Mumtaz, M., Zaigham, N.A., Mallick, K.A., Saied, S., Zahir, E., Khwaja, H.A., 2009. Heavy metal toxicity levels in the coastal sediments of the Arabian Sea along the urban Karachi (Pakistan) region. *Marine Pollution Bullettin*, 58, 1406–1419.

Spalletti, L.A., Limarino, C.O., Piñol, F.C., 2012. Petrology and geochemistry of Carboniferous siliciclastics from the Argentine Frontal Cordillera: a test of methods for interpreting provenance and tectonic setting. *Journal of South America Earth Sciences*, 36, 32–54.

Sonfack, N.A., Ngueutchoua, G., Kontchipe Ngagoum, Y.S., Temgo Sopie, F., Nkouathio, D.G., Wouatong, A.S.L., Tchatchueng, R., Nguemo Kenfack, G.R., Njanko, T., 2021. Mineralogical and geochemical signatures of surface stream sediments from Dibamba River basin, SW Cameroon: Implications for provenance, weathering, and tectonic setting. *Journal of African Earth Sciences*. https:/doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104251.

Srivastava, A.K., Ingle, P.S., Khare, N., 2012. Grain-size characteristics of deposits derived from different glacigenic environment of the schirmacher Oasis, Est Antarctica. *Geologos*, 18 (4), 251–266.

Suchel, J.B., 1972. La répartition des pluies et les régimes pluviométriques au Cameroun. *Travaux et documents de géographie tropicale no 5 CEGET CNRS Talence*, 287p.

Suh, C.E., Sparks, R.S.J., Fitton, J.G., Ayonghe, S.N., Annen, C., Nana, R., Luckmen, A., 2003. The 1999 and 2000 eruptions of Mount Cameroon: Eruption behaviour and petrochemistry of lava. *Bulletin of Volcanology*, 65, 267–281.

Sun, Q., Liu, D., Liu, T., Di, B., Wu, F., 2012. Temporal and spatial distribution of trace metals in sediments from the northern Yellow Sea coast, China: implications for regional anthropogenic processes. *Environmental Earth Sciences*, 66, 697–705.

Sundararajan, S., Khadanga, M.K., Kumar, J.P.P.J., Raghumaran, S., Vijaya, R., Jena, B.K., 2017. Ecological risk assessment of trace metal accumulation in sediments of Veraval Harbor, Gujarat, Arabian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 114, 592–601.

Suresh, G., Ramasamy, V., Sundarrajan, M., Paramasivan, K., 2015.Spatial and vertical distribution of heavy metal and their potential toxicity levels in various beach sediments from high-background-radiation area, Kerala, India. *Marine pollution bulletin*, 91, 389–400.

Suttner, L.J., Dutta, P.K., 1986. Alluvial sandstones and paleoclimate framework mineralogy. *Journal of Sedimentary Research*, 56, 329–445.

Szmanda, J., 2007. Grain-transport condition: an interpretative comparaison on the analysis of C/M diagrams and cumulative curve diagrams, with the overbank deposits of the Vistulariver, Torun, as example. *Warszawa*, 367–376.

Tagne Kamga G., 1994.Le complexe plutonique panafricain de Ngongo (Ouest-Cameroun). Structure et pétrogenèse. The University Franche-Comté, 236p.

Tagne-Kamga, G., 2003. Petrogenesis of the Neoproterozoic Ngondo plutonic complex (Cameroon, West Central Africa): a case of late-collisional ferro-potassic magmatism. *Journal of African Earth Sciences*, 36, 149–171.

Tamen, J., Nkoumbou, C., Mouafo, L., Reusser, E., Tchoua, M.F., 2007. Petrology and geochemistry of monogenic volcanoes of Barombi Koto volcanic field (Kumba graben, Cameroon volcanic line): Implications for mantle source characteristics. *Comptes Rendus Geoscience*, 339, 799–809.

Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. The continental crust: its composition and evolution. *Blackwell Scientific, Oxford*, 312p.

Taylor, S.R., Rudnick, R.L., McLennan, S.M., Eriksson, K.A., 1986. REE patterns in Archean high-grade metasediments and their tectonic signifiance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50, 2267–2279.

Tchoua, F.M., 1974. Contribution à l'étude géologique et pétrographique de quelques volcans de la Ligne du Cameroun (Monts Manengouba et Bambouto). Thèse d'Etat, Université de Clermont-Ferrand U.E.R. Sciences exactes et naturelles, 337p.

Tchoua, F.M., 1976. A propos de la note de J. Gouhier et D. Nougier intitulée: «Contribution à l'étude volcanique du Cameroun». Annale de la Faculté des Sciences, Université de Yaoundé Cameroun, 21 (22), 47–88.

Tchoua, F.M., 1987. Les explosions phréato-magmatiques dans le volcanisme du Cameroun (Afrique centrale). In: Matheis, G., Schandelmier, H. (Eds). In *African Earth Science*, Balkema, Rotterdam, 271–275.

Tchouatcha, M.S., Tamfuh, P.A., Kemteu Sobdjou, C., Mbesse, C.O., Ngnotue, T., 2020. Provenance, palaeoweathering and depositional environment of the cretaceous deposits from the Babouri-Figuil and Mayo Oulo-Lere Basins (North-Cameroon) during the Southern Atlantic opening: Geochemical constraints. *Journal of African Earth Sciences*, 174, 104052. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.104052.

Tchouatcha, M.S., Kouske, A.P., Said Deaf, A., Mioumnde, A.P., 2021. Geochemical, mineralogical and sedimentological analyses of reworked sediments (new) in the syn-to post-rift Middle Cretaceous-Quaternary detrital deposits from western Atlantic margin of Cameroon: evidence from sedimentation-erosion alternation in the context of passive margin evolution. *Acta Geochemical*. https://doi.org/10.1007/s11631-021-00455-5.

Tchuimegnie Ngongang, N.B., Kamgang, P., Chazot, G., Agranier, A., Bellon, H., Nonnotte, P., 2015. Age, geochemical characteristics and petrogenesis of Cenozoic intraplate alkaline basalts in the Bafang region, West Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 102, 218–232.

Tehna, N., Sababa, E., Ekoa Bessa, A.Z., Etame, J., 2019. Mine waste and heavy metal pollution in Betare-Oya Mining Area (Eastern Cameroon). *Environment Earth Sciences Research Journal*, 6 (4), 167–176.

Toteu, R.F., Penaye, J., Deschamps, Y., Maldan, F., Nyama Atibagoua, B., Bouyo Houketchang, M., Sep Nlomgou, J.P., Mbola Dzana, S.P., 2008. Géologie et ressources minérales du Cameroun, 33rd International Geological Congress, Oslo, Norway, 6 – 14.

Trewin, N., 1988. Use of the scanning electron microscope in sedimentology. *Techniques in sedimentology*, 229–273.

Tsanga, D.A., Ekoa Bessa, A.Z., Ngueutchoua, G., Ngokam, S.G., Same Moutongo, J.-D., Ambassa Bela, V., Kwewouo Janpou, A., Mohamed, A., Armstrong-Altrin, J.S., 2023. Evaluation of provenance and weathering of beach sediments in the lower part of the Cameroonian coast. *Journal of African Earth Sciences*, 104822. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104822.

Turekian, K.K., Wedepohl, K.H., 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bullettin*, 72 (2), 175–192.

Van Dijck, T., 2014. Mineralogy and geochemistry of north Patagonian river sediments: Influence of provenance and weathering processes, Thesis of Doctor, Gent University, 95p.

Van Rijn, L.C., 1998. Principles of coastal morphology. *Aqua Publications*, 730p.

Visher, G.S., 1969. Grain size distribution and depositional processes. *Journal of sedimentary petrology*, 39, 1074–1106.

Vosoughi Moradi, A., Sari, A., Akkaya, P., 2016. Geochemistry of the Miocene oil shale (Hançilli Formation) in the Çankiri-Çorum Basin, Central Turkey: implications for paleoclimate conditions, source-area weathering, provenance, and tectonic setting. *Sedimentary Geology*, 78, 136–150.

Wedepohl, K.L., 1995. The composition of continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (7), 1217–1232.

Weltje, G.J., Meijer, X.D., de Boer, P.L., 1998. Stratigraphic inversion of siliciclastic basin fills: a note on the distinction between supply signals resulting from tectonic and climatic forcing. *Basin Research*, 10, 129–153.

Wenjeh Wembenyui, E., Kenneth, D.C., Zhao, J-X., 2020. Evolution of Mount Cameroon volcanism: Geochemistry, mineral chemistry and radiogenic isotopes (Pb, Sr, Nd). *Geosciences Frontiers*, 11 (6), 2157–2168. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.03.015.

Whiney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185–187.

Xie, Y., Chi, Y., 2016. Geochemical investigation of dry- and wet-deposited dust during the same dust-storm event in Harbin, China: constraint on provenance and implications for formation of aeolian loess. *Journal of Asian Earth Sciences*, 120, 43–61.

Youmen, D., Schmincke, H.-U., Lissom, J., Etame, J., 2005. Données géochronologiques: mise en évidence des différentes phases volcaniques au Miocène dans les Monts Bambouto (Ligne du Cameroun*). Science Technologique Développement*, 11 (1), 49–57.

Zaid, S.M., 2012. Provenance, diagenesis, tectonic setting and geochemistry of Rudies sandstone (Lower Miocene), Warda Field, Gulf of Suez, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 66 (67), 56–71.

Zaid, S.M., 2015. Geochemistry of sands along the Ain Soukhna and Ras Gharib beaches, Gulf of Suez, Egypt: Implications for provenance and tectonic setting. *Arabian Journal Geosciences*, 8, 10481–10496.

Zhang, L., Qin, X., Liu, J., Sun, C., Mu, Y., Gao, J., Guo, W., An, S., Lu, C., 2016. Geochemistry of sediments from the Huaibei Plain (east China: Implications for provenance, weathering, and invasion of the Yellow River into the Huaihe River. *Journal of Asian Earth Sciences*, 121, 72–83.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Jour. Geol. Soc. India (2024) 100:99-114
https://doi.org/10.17491/jgsi/2024/172987

ORIGINAL ARTICLE

Provenance of Beach Sands in the Northern Gulf of Guinea, SW Cameroon

Annick Kwewouo Janpou[1], Armel Zacharie Ekoa Bessa[2,3*], Roger Firmin Donald Ntouala[3], Tebogo Kelepile[4], Gabriel Ngueutchoua[1], John S. Armstrong-Altrin[5,6]

[1]Department of Earth Sciences, University of Yaoundé 1, P.O. Box 812, Yaoundé, Cameroon
[2]Institute of Earth Sciences (ISTE), University of Lausanne, 1015 Lausanne, Switzerland
[3]Department of Earth Sciences and Environment, Higher Teacher Training College, University of Bertoua, P.O. Box 652, Bertoua, Cameroon
[4]Department of Earth and Enviromental Science, Botswana International University of Science and Technology, Private Bag 16, Palapye, Botswana
[5]Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad de Procesos Oceánicos y Costeros, Circuito exterior s/n, 04510 Mexico City, Mexico
[6]Department of Marine Sciences, Bharathidasan University, Tiruchirapalli - 620 024, India
[*]***E-mail:*** *armelekoa@yahoo.fr; armelzacharie.ekoabessa@unil.ch*

Received: 5 April 2023 / Revised form Accepted: 27 June 2023
© 2024 Geological Society of India, Bengaluru, India

ABSTRACT

Petrographical, mineralogical and geochemical studies were carried out on the beach sands of Limbe (South-West Cameroon) to highlight their provenance, source rocks alteration and the tectonic framework. The Limbe beach sediments were classified as sandy litharenite type. The sediments were derived from mafic and andesite source rocks. The sediments are composed of quartz, olivine, augite, amphibole, pyroxene, plagioclase, potassium feldspar, muscovite and biotite, indicating the primary phases of magmatic source rocks; kaolinite and illite in the secondary phase; and rutile in their residual composition. The presence of ferromagnesian minerals indicates that they were derived from the mafic rocks, which are the basalts of the Cameroon Volcanic Line (CVL). However, the presence of quartz associated with plagioclase and feldspars suggests that alkaline granites played a minor role in the sedimentation of the Limbe beaches. Total Quartz - Total Feldspar - Total Lithic Fragments (Qt-Ft-Lt) mineralogical relationships demonstrate that these beach sediments would be formed in an undissected arc tectonic context, typical of volcanic sources with high relief producing black sands or sands enriched in iron oxides. Their microscopic characteristics of angular to subangular shapes suggest that the magmatic sources are proximal to the shoreline deposits. The characteristics of microporosity, iron oxide inclusions, conchoidal fracture, heavy mineral grains, and opaque minerals support this proximal source. The conchoidal fractures defining the angularity of these beach sediments would suggest its derivation from crystalline rocks. The predominance of heavy minerals suggests that the rocks proximal to the beach have been altered. The abundance of primary minerals associated with these secondary heavy minerals justifies the existence of unweathered lithic grains in the source rocks and an alteration that occurred under a tropical monsoon climate that ranged from semi-humid to humid. The use of the multi-element tectonic discrimination diagram implies an arc framework that is compatible with the geology of the study area.

INTRODUCTION

Petrography, mineralogy, and geochemistry of clastic sediments are the basis for recognizing the nature of rocks, tectonic activity and weathering (Roser and Korch, 1986; Armstrong-Altrin et al., 2015; Ngueutchoua et al., 2019a, b; Tsanga et al., 2023). Petrography and mineralogy of clastic sediments are commonly used for provenance identification in sedimentary basins (Ingersoll and Suczek, 1979; Dickinson, 1985; Ramos-Vázquez and Armstrong-Altrin, 2021; Ambassa Bela et al., 2022; Tsanga et al., 2023; Liyouck et al., 2023). Modal compositions of sands and the nature of quartz grains and lithic fragments can be used to infer the type and nature of source rocks in the sedimentation (Blatt et al., 1980; Pettijohn et al., 1987) and the tectonic setting (Dickinson and Suczek, 1979; Dickinson, 1985; Basu, 2003). Other sedimentological characteristics, such as shape, lithology, and order of deposition influence the sediment provenance (Chamley and Deconinck, 2013). The presence of lithic rock fragments and heavy minerals (olivine, epidote, rutile) in detrital sedimentation are excellent indicators of source rocks (Boggs, 2009). However, interpreting the provenance of beach sediments can involve a number of sedimentological issues. These issues are exacerbated by lithological and/or compositional similarities in source rock facies, as well as an anomalous distribution of detrital material in sedimentary basins. The mineralogical composition and chemistry of the constituent minerals of the sediments have been used to study their provenance, the weathering of the source rocks and the tectonic setting of the source area (Chaudhuri et al., 2020; Al-Kaaby and Albadran, 2020; Karlik et al., 2021). Chemical mineralogy has also been exploited to study sediment provenance (Armstrong-Altrin et al., 2014; Ramos-Vázquez and Armstrong-Altrin, 2021; Hossain et al., 2022). It has been ignored in recent studies of the shapes, microstructures and surface microtextures of sand grains in order to understand the geological and spatial evolution of their sedimentation (Rajmohan et al., 2015; Madhavaraju et al., 2021). For these authors, sand grain morphology and surface microtextures have served as evidence of several sedimentological events. In other words, electron probe microanalyser

can be used to obtain clear evidence for determining the origin of sediments in a given sedimentary basin (Madharavaju et al., 2021).

Many studies have shown that micro-petrography and mineralogy are useful for determining the continental provenance of beach sediments (Kasper-Zubillaga et al., 2005; Armstrong-Altrin et al., 2015; 2021; Madhavaraju et al., 2021). However, beaches in the northern Gulf of Guinea have received little attention. The present work aims to (i) evoke the provenance of the Limbe littoral sediments, (ii) identify the nature of the contributing source rocks, and (iii) the tectonic aspects.

STUDY AREA AND GEOLOGICAL SETTING

The study area is located in the north-eastern part of the Gulf of Guinea (3°59"-4°04" N and 9°01"-9°13" E). It is bordered to the south by the Atlantic Ocean and to the north and north-east by Mount Etindé and Mount Cameroon (Fig. 1). The climate is tropical and humid with two distinct seasons (a short dry season and a long rainy season). The average annual rainfall is 8000 mm, with the majority of the rain falling between June and October (Olivry, 1986). The vegetation is a Biafran and Atlantic coastal forest exposed to human activities (Letouzey, 1985). The soils are recent and not very evolved, with homogeneous profiles developed on volcanic rocks (Eghombi, 1999). The geomorphology of the study area has low (0-500 m), intermediate (500-1000 m) and high (1000-3800 m) altitudes.

The lithology of the area near the beach consists of volcanic rocks surrounded by sedimentary and metamorphic rocks. The Cameroon Volcanic Line (CVL) is a 1600 km long Cenozoic-Quaternary linear volcanic and subvolcanic chain with regional variations in petrography, mineralogy and geochemistry (Fitton and Dunlop, 1985; Marzoli et al., 2000). According to these authors, the CVL follows the African-South Atlantic Oceanic boundary, extending from the Gulf of Guinea to the interior of the African continent. It is marked near the Limbe beaches by the volcanism of Mount Cameroon and Mount Etindé. Mount Etindé is located on the south-eastern slope of Mount Cameroon, which extends into the southern part of the CVL. This volcanic massif is closer to the coastal beach studied. It is characterised by basic volcanism in the continental sector of the CVL and consists primarily of silicic rocks or volcanics (Fitton and Dunlop, 1985; Marzoli et al., 2000). It is a stratovolcano composed of layered nephelinite tuffs, nephelinites, garnet-red or hauynemelite nephelinites, aenigmatite leucito-nephelinites and haunophyres (Nkoumbou et al., 1995; Etame et al., 2009). The lava flows of this orogenic mountain are of equal age (0.65 Ma) (Nkoumbou et al., 1995). The NW, S and E flanks of this volcanic massif present V-shaped valleys deeply incised by active erosion separating sharp ridges. These valleys are commonly associated with seasonal streams that dry up during the dry season (Etame et al., 2009). The sedimentary deposits bordering the volcanic rocks include conglomerates, conglomeratic sandstones, arkosic sandstones, organic-rich dark marls (Barremian-Aptian), sandstones, shales, marls and carbonates (Albian-Cenomanian), siltstones, sandstones, bedded clays, mudstones (undifferentiated Tertiary) and Quaternary alluvium (Ntamak-Nida et al., 2010; Ngueutchoua et al., 2019a and b). Metamorphic rocks are migmatite, migmatitic gneiss and Neoproterozoic gneiss (Tagne-Kamga, 2003). Nnange et al. (2001) reported that the basement geology of the CVL is granite-gneissic, reflecting magmatism (volcanism) and metamorphism in the past (Wenjeh Wembenyui et al. 2020). This basement also includes Cretaceous sedimentary rocks and more recent sediments towards the Limbe coast (Fig. 2).

SAMPLING AND ANALYTICAL TECHNIQUES

Samples Collections

Ten beach sand samples were selected, two from each site (i.e. Bakinguili: BTU4, BTR10, n=2; Batoke: BTA10, BTJ1, n=2; Limbola: BTL1, BTL10, n=2; Ngueme: BTP1, BTP9, n=2; Mile 8: BM8A3, BM8C1, n=2 samples) (Fig. 1). A hand trowel was used to collect samples from the intertidal zone over an area of approximately 1 m^2, with an average depth of 110 cm. To avoid contamination, the top

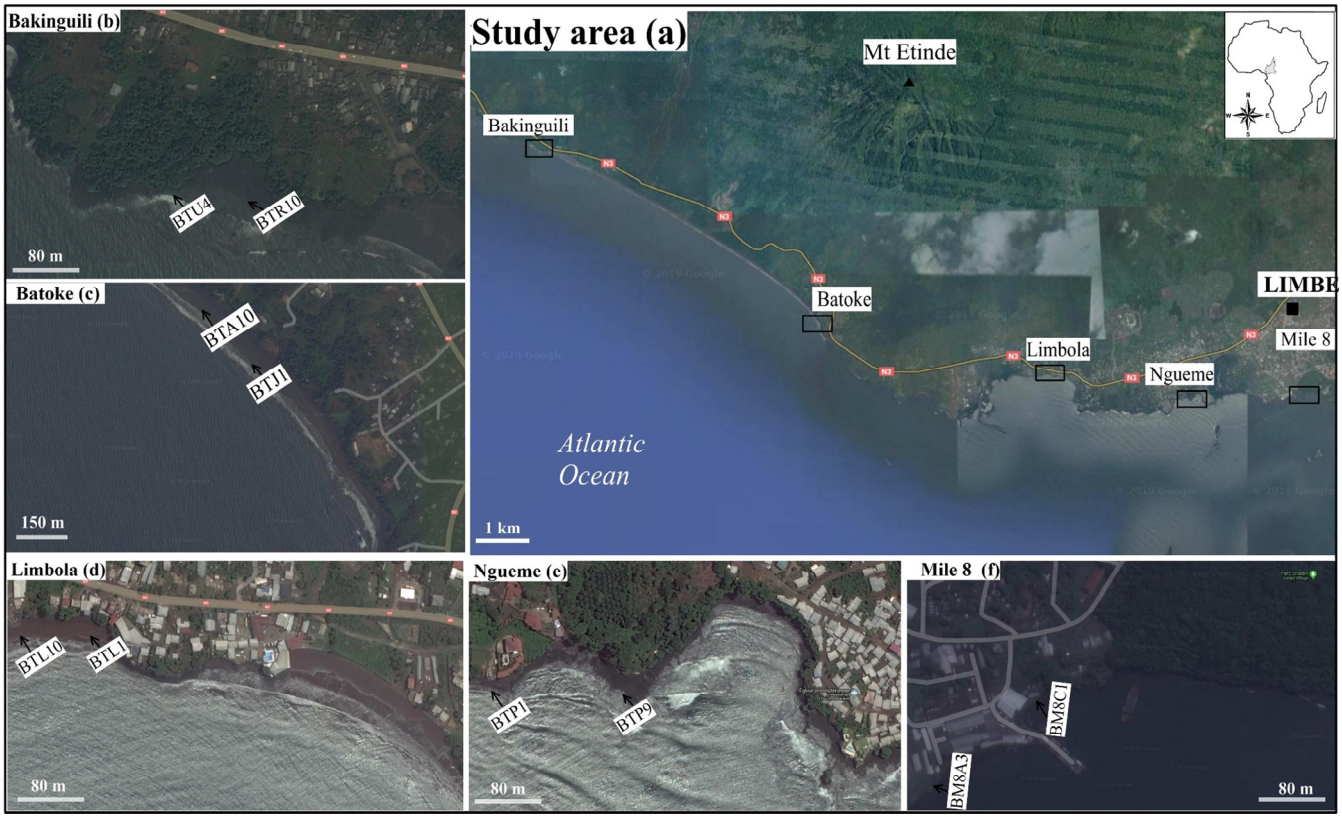


Fig. 1. **(a)** Studied sites and sample locations of sediments from **(b)** Bakinguili **(c)** Batoke **(d)** Limbola, **(e)** Ngueme, and **(f)** Mile 8 beaches.

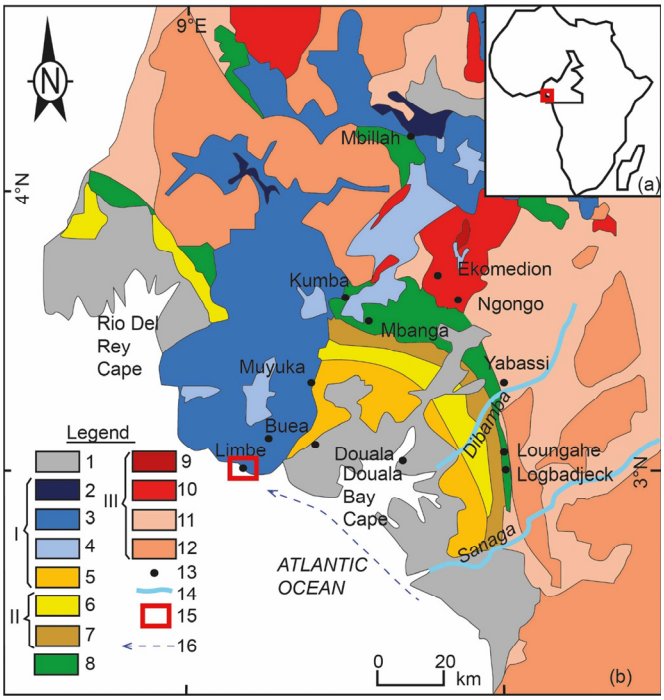


Fig. 2. (a) Location of the study site and **(b)** Geological map of the study area (map modified from Hourcq (1955); Dumort (1968), and Salard-Chebodaeff (1981)). (1) Recent alluvium ; I (2) Tertiary volcanic rocks (trachytes), I (3) Tertiary volcanic rocks (trachytes and recent basalts), I (4) Tertiary volcanic rocks (basalts), I (5) Undifferenciated Tertiary (siltstones, sandstones, bedded clays, claystones, and silts), II (6) Paleocene (sandstones, silts, claystones, dolomites), II (7) Paleocene (small conglomerates, loose sandstones, claystones, and dolomites), (8) Cretaceous (Basal sandstone, clays, sands, sandstones, marly and calcareous limestones), III (9) Precambrian basement (post-tectonic granites), III (10) Precambrian basement (syn-tectonic granites), III (11) Precambrian basement (undifferentiated gneisses), and III (12) Precambrian basement (gneisses + undifferentiated migmatite), (13) Locality, (14) River, (15) study area, and (16) Longshore current.

layer (1 cm thick) was removed, and 500 g of material was taken and packed in plastic bags. After that, the samples were taken to the Surface Formation Geosciences and Applications Laboratory at the University of Yaoundé 1 (Cameroon) for three days of air drying at a variable ambient temperature of 24 to 26.5 °C. The mass contents of about 200 g of these samples were then crushed using a mortar and an agate pestle and then powdered to about 400 µm using a "FRISCH" brand pulveriser. X-ray Diffraction (XRD) analyses were performed on beach sediment powders obtained at the University of Liège (Belgium). Seven representative samples of these sediments (BTU4, BTA10, BTJ1, BTL1, BTL10, BTP1 and BM8C1) were selected for the chemistry of the different mineral phases.

Petrography and XRD Mineralogy

Thin sections of the sediments were prepared at the Geosciences Laboratory of the International University of Science and Technology in Botswana (BIUST), then observed and described using a Leitzwetzelar HM-POL optical microscope at 200 ìm magnification at the Surface Formation Geosciences and Applications Laboratory of the University of Yaoundé 1. The aim of these analyses was to determine the constituent minerals of these beach sediments using Nichols' analytical principles (Nichols, 2015).

The observation and modal analysis of thin sections i.e., grain counting (n = 100 grains) was done according to the method of Dickinson (1985). The results of these observation and counting analyses were used to calculate the modal composition and the ternary diagrams of the Qt-Ft-Lt and Qm-Ft-Lt mineralogical relationships (Folk, 1968; Dickinson, 1985). The main mineral grains counted are total quartz (Qt = Qm + Qp), total feldspars [Ft = K (potassium feldspar) + P (plagioclase)], total lithic fragments [Lt = volcanic (Lv) + sedimentary (Ls) + metamorphic (Lm) + plutonic (Lp)], and heavy minerals (ML).

A "Panalytical Empyrean Diffractometer" with a Pixel detector and fixed slits with iron (Fe) filtered CoKá radiation was used to perform mineralogical X-ray Diffraction Analysis on the sediment powders. The mineral phases present in the sediments were identified using the X'Pert High Score Plus software at the University of Liège's Geology and Sedimentary Environments Laboratory (GsE).

Electron Probe MicroAnalyser (EPMA)

Quartz grains and ferromagnesian minerals were sorted using a zoom electron microscope and prepared for EPMA observations according to the protocol described by Trewin (1988). The quartz grains and ferromagnesian minerals were then sputtered with 2 mm thick platinum and examined at various scales using a JEOL JSM-7100F electron probe microanalyser at the Botswana International University of Science and Technology (BIUST) Laboratories. The chemical composition of the selected grains was acquired using the same electron microscope equipped with the Energy Dispersive Spectrometer system. The characteriztics were Acceleration voltage: 15 kV-, probe current: 20nA; spot size 0.0 µm; counting times: 10 s peak: 5 s backgounds. The standards used were SiO_2 – Olivine; Al_2O_3 – pyrope; MgO – Olivine; Na_2O – jadeite; Cr_2O^{3-} Cr – diopside; V_2O^{3-} V metal; TiO_2 – rutile; BaO- barite; P_2O_5 – apatite; CaO - Cr- diopside; NiO – skutterudite; K_2O – orthoclase; FeO – olivine; MnO – rhodonite; Cl – tugtupite; ZrO_2 - Zr metal; Nb_2O_5 - Nb metal; SrO – celestite.

RESULTS

Morphology of Sand Grains and Heavy Minerals

Microphotographs of the selected thin sections are given in figures 3a-3f. The sand grains from Limbé Beach have angular, sub-angular, sub-rounded, and rounded shapes (Figs. 3a-f). The majority of the sand grains (50–85%) are sub-angular to angular. Sub-rounded sand grains account for only 8–11% of the total, with rounded grains accounting for 2–4%. Quartz, epidote, brown hornblende, rutile, zircon, anatase, chloritoid, and some unidentified opaque minerals are among the heavy minerals found in these beach sediments (Fig. 3a-f). Quartz grains are colourless and have shapes such as sub-angular, angular, rounded and sub-rounded. Some quartz grains have iron oxide mottling and micropore inclusions (Fig. 3d). Conchoidal fractures can be seen in some quartz grains (Fig. 3e). The proportion of quartz grains in the total composition ranges between 15% and 25%. Epidote grains range in shape from sub-angular to angular (Fig. 3a-f), with low proportions (2–5%). Brown hornblende occurs in angular to sub-angular forms and accounts for 2%–5% of the total. Rutile has rounded grain shapes and accounts for less than 5% of the total, whereas zircon has sub-rounded and accounts for less than 5%. Anatase occurs as an inclusion of heavy minerals in a quartz grain (Fig. 3a, b). Chloritoid occurs as scaly grains with rounded contours, its percentage varies between 2% and 5%. The opaque, black coloured, angular, sub-rounded to rounded mineral grains have proportions of 40%–60%.

Petrography and Mineralogy

Thin section Petrography

The beach sediments consist of quartz (mono and polycrystalline), feldspars (potassic feldspar (K) and plagioclase), volcanic, sedimentary,

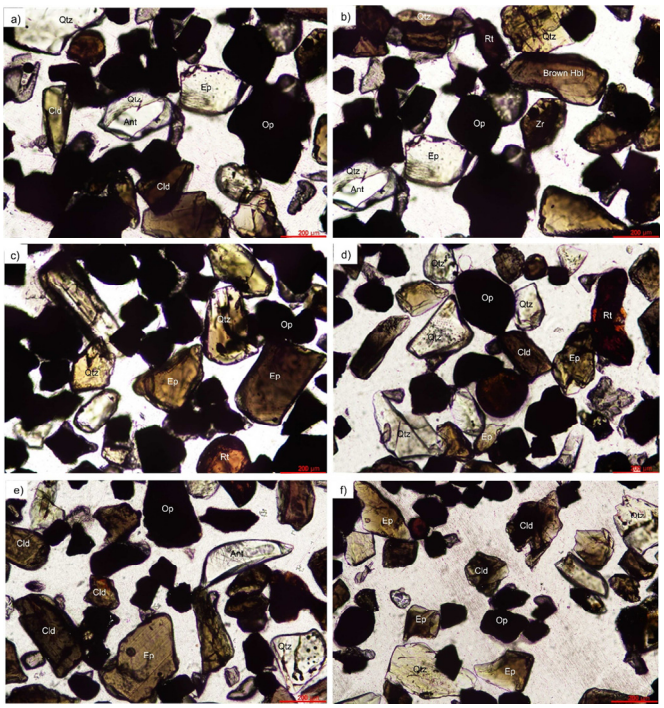


Fig. 3. Photomicrographs of selected thin-sections of the beach sand samples: (**a and b**) Bakinguili beach sample BTU4, **(c)** Batoke beach (BTA10 and BTJ1 sample), **(d)** Limbola beach (BTL1 and BTL10) sample), **(e)** Ngueme (BTP9 sample) and **(f)** Mile 8 (BM8A3 sample). Qtz : Quartz, Ant : Anatase, Cld :Cloritoïde, Rt : Rutile, Zr : Zircon, Ep : Epidote, Brown Hbl : Brown Hornblende, Op : Opaque minerals (Whitney and Evans, 2010).

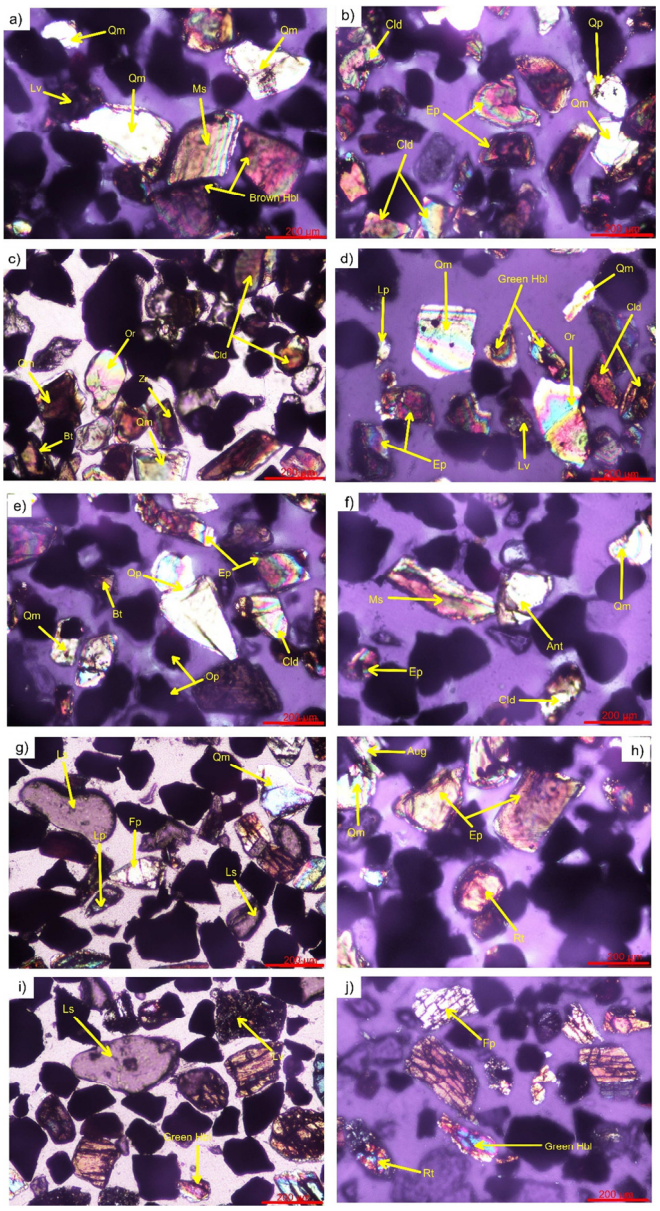


Fig. 4. Thin sections showing detrital modal compositions. **(a)** and **(b)** Bakinguili beach; **(c)** and **(d)** Batoke beach, **(e)** and **(f)** Limbola beach, **(g)** and **(h)** Ngueme, **(i)** and **(j)** Mile 8. Quartz grain (Qm; Qp), and lithic (Lv, Ls, and Lp) and heavy mineral [Ms (Muscovite), Bt (Biotite), Zr (Zircon), Cld (Cloritoïd), Hbd (Hornblende), Ant (Anatase), Ep (Epidote)] grains (Whitney and Evans, 2010).

plutonic, and metamorphic lithic fragments, and opaque and non-opaque heavy minerals (Fig. 4). Quartz is the most common and least abundant mineral in the total composition, at about 16%–27%. Both polycrystalline and monocrystalline quartz types are identified in sediments. Single-crystal quartz is very abundant, at 15%–25% (Fig. 4a-g). The monocrystalline variety of quartz shows a rolling extinction. Polycrystalline quartz, consisting of aggregates of crystals, has a very low proportion: 1-3% (Fig. 4b, e). Feldspars represented by plagioclase and orthoclase are present in low percentages (3%-8%) in the mineralogical compositions of the beach sediments (Fig. 4c, d). Some polysynthetic feldspars representative of plagioclases (Fig. 4g, j) are also identified. The lithic fragments identified in the beach sand samples are predominantly of volcanic origin and represent between 43% and 54% of the total composition (Fig. 4a, i). Fragments of sedimentary and plutonic origin are in the minority (16%–25%). Other accessory minerals include biotite, muscovite, zircon, epidote, green hornblende, anatase, chloritoid, and opaque minerals (hematite, magnetite, and ilmenite). The ternary diagrams of Dickinson (1985) are used to discriminate the tectonic context and provenance of the Limbe Beach sands. The data represented on the Qt-Ft-Lt diagram suggest an undissected arc and a provenance from the high relief volcanic zones of the beach sediments, while the Qm-Ft-Lt graph shows all samples are from recycled lithics (Fig. 5a, b; Dickinson, 1985).

Mineralogy (XRD)

The XRD mineralogical results of the beach sediments studied indicate average percentages of quartz (15.12–18.28 %). All studied sites have high concentrations of olivine (19.60–25.96 %), pyroxenes (7.57–13.27%) and augite (6.97–17.94%), indicating a mafic source rock. On all beaches, hematite, kaolinite, and illite are relatively abundant. The concentrations of these minerals range from 4.92 to 14.61%. Other minerals found in small amounts include plagioclase, potassium feldspar, muscovite, biotite, amphibole, ilmenite, and rutile (Table 2, Fig. 6). The distribution of these minerals is irregular and does not follows any trend. Overall, the obtained mineralogical compositions point to mafic source rocks.

Chemical-Mineralogy (EPMA)

The EPMA analysis shows that sediments from the Limbe beaches contain varying amount of silicon oxide, high levels of magnesium oxides, and medium level of iron oxide (Table 3). The other oxides are found in low concentrations. The silica content in the beach sand ranges from 0 to 53.38%. Except in the case of hematite, where silica levels range from zero to trace (0–0.99%). The presence of residual (feldspar and ferromagnesian) and neoformed (kaolinite and illite) silicates is indicated by the high silica content. Magnesium oxide is found in all beach minerals in concentrations ranging from 0 to 54.64%. Iron oxide is present in varying concentrations (0.90–79.16%). The

Table 1. Modal analysis data for the Limbe beach sediments

Location	Bakinguili (n = 2)		Batoke (n = 2)		Limbola (n = 2)		Ngueme (n = 2)		Mile 8 (n = 2)	
Ref code	BTU4	BTR10	BTA10	BTJ1	BTL1	BTL10	BTP1	BTP9	BM8A3	BM8C1
Qm	18	25	25	15	20	25	19	22	19	15
Qp	2	2	2	2	1	1	1	3	1	1
Qt	20	27	27	17	21	26	20	25	20	16
Fk	3	4	5	2	6	5	5	4	3	5
Fp	2	1	0	1	2	1	1	2	2	1
Ft	5	5	5	3	8	6	6	6	5	6
Lv	51	45	50	54	47	43	48	43	51	54
Ls	0.9	0.8	1.6	1	0.7	0.9	1.7	0.9	0.8	0.8
Lp	0.1	0.2	0.4	0.1	0.3	0.1	0.3	0.1	0.2	0.2
Lm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lt	52	46	52	55.1	48	44	50	44	52	55
HM	23	22	16	24.9	23	24	24	25	23	23
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

n = total number of samples

extremely high FeO concentrations (63.60–79.16%) indicate the presence of oxides (hematite) and ferromagnesian minerals (olivine, pyroxene, and amphibole) in the mineralogical constitution of the sediments (Table 3). The presence of ferromagnesian minerals (olivine, augite, and pyroxene) in the beach sediments is demonstrated by the high MgO and FeO contents. On the other hand, the high CaO content (18.26–52.90%) associated with FeO in some beach sediment samples confirms the existence of pyroxenes, amphiboles, and calcite. Low alkali concentrations (Na_2O and K_2O) of 0–5.16% and 0–4.33%, respectively, indicate the presence of alkali feldspar, kaolinite, and illite. The high TiO_2 content confirms the existence of ilmenite in the residual phases of the sediments. The very low contents of chromium, manganese, phosphorus, and other trace elements are almost present in all the minerals of the beach sediments. The presence of these minerals corresponds to the chemical element proportions shown by the EPMA images (Fig. 7a-g).

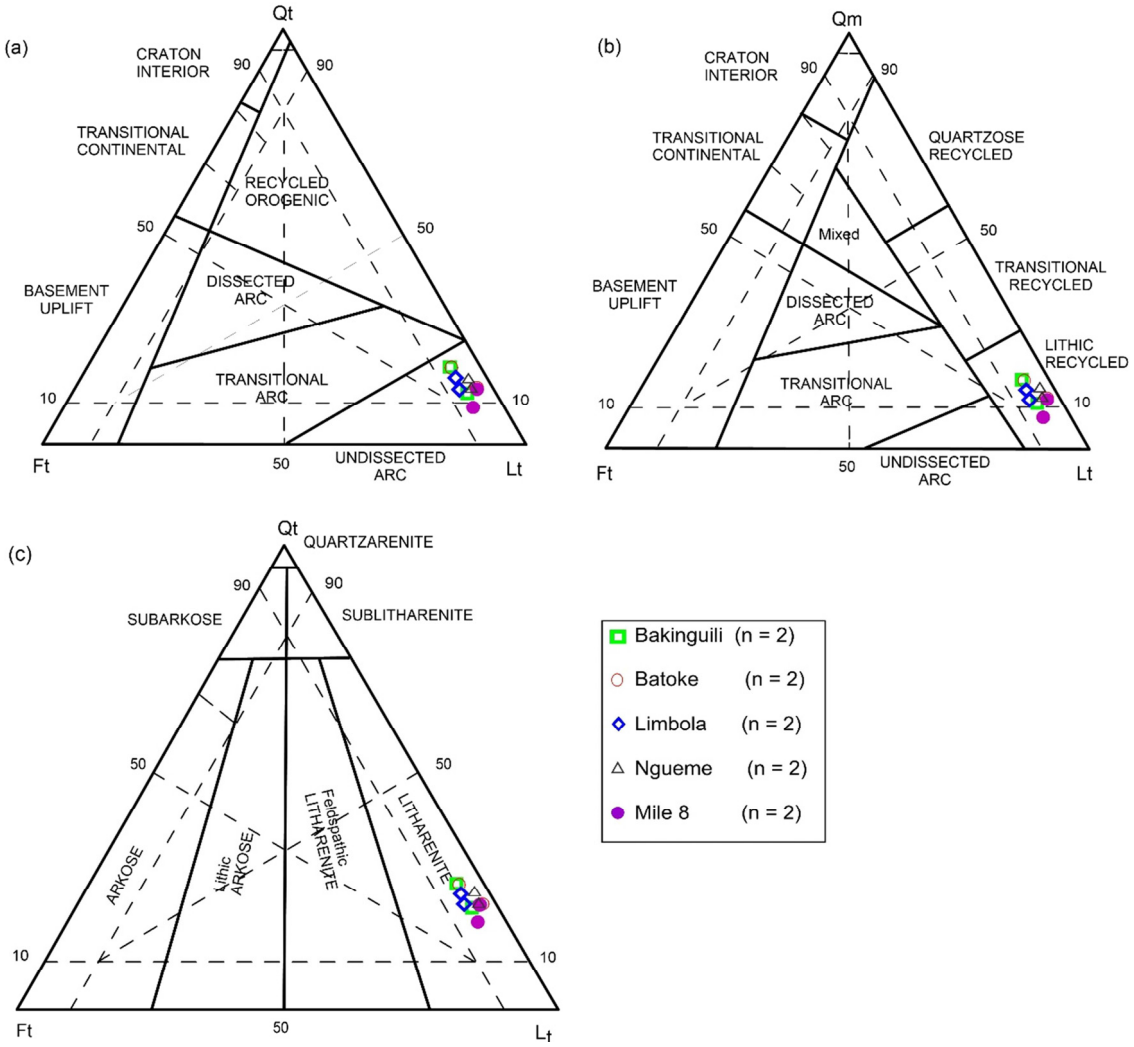


Fig. 5. (a) Qt-Ft-Lt and **(b)** Qm-Ft-Lt ternary diagrams showing source regions delivering sediments to the Limbe beach (Dickinson, 1985) and **(c)** Qt-Ft-Lt ternary diagram classification for the Limbe beach sands (Folk et al., 1968).

Table 2. Semi-quantitative mineralogical composition of sediments from Limbe beach

Location	Bakinguili (n = 2)		Batoke (n = 2)		Limbola (n = 2)		Ngueme (n = 2)		Mile 8 (n = 2)	
Ref code	BTU4	BTR10	BTA10	BTJ1	BTL1	BTL10	BTP1	BTP9	BM8A3	BM8C1
Quartz	15.12	15.83	15.39	16.35	16.27	17.24	17.39	18.28	16.71	15.51
Olivine	21.62	22.03	23.42	24.28	25.96	22.75	21.87	22.68	19.60	21.34
Pyroxene	13.27	12.32	9.06	7.73	7.62	8.89	7.57	8.18	11.23	11.06
Augite	11.33	12.21	8.80	6.97	8.75	8.06	8.59	17.94	13.31	10.75
Hematite	14.35	13.12	14.09	11.44	8.76	12.49	10.24	9.09	11.05	12.17
Illite	7.54	7.14	10.18	12.35	14.23	14.61	11.66	9.96	9.75	10.60
Kaolinite	6.01	7.05	9.14	9.62	9.47	6.11	9.65	4.92	7.24	10.12
K-Feldspar	1.25	1.11	2.41	3.57	1.53	3.53	3.34	4.36	2.52	1.94
Plagioclase	0	0	0	0	0	1.79	1.75	0	0	0
Muscovite	2.32	1.85	0	0	0	0	1.09	1.23	1.42	2.04
Biotite	2.43	2.61	2.04	4.17	1.97	3.38	2.81	2.31	5.05	2.09
Rutile	2.21	2.43	0	0	2.05	0	0	0	0	0
Ilmenite	1.41	1.09	4.11	1.88	2.20	0	3.74	1.05	0	1.04
Amphibole	1.14	1.21	1.36	1.63	1.19	1.15	0	0	2.12	1.34
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

n = total number of samples

DISCUSSION

Modal Composition

The Qt-Ft-Lt ternary diagram is used to differentiate among the three major provenance categories: continental blocks, magmatic arcs, and recycled orogeny (Dickinson, 1985). On this plot, the Limbé Beach sands are entirely in the undissected arc field (Fig. 5a) and partly in the recycled lithic field (Fig. 5b). The modal values of the averages Qt_{24}-Ft_5-Lt_{49}, Qt_{22}-Ft_4-Lt_{54}, Qt_{24}-Ft_7-Lt_{46}, Qt_{23}-Ft_6-Lt_{47} and Qt_{18}-Ft_6-Lt_{54} for the Bakinguili, Batoke, Limbola, Ngueme, and Mile 8 beaches, respectively, indicate litharenite-type sediments (Fig. 5c; Folk, 1968). The abundance of volcanic lithic fragments in five sites along the Limbe coast is probably due to sedimentological processes. This indicates high-relief volcanic source areas that produce black or iron-bearing sands resulting from volcanic rocks associated with silicate sands from recycled granite-gneissic bedrock and sedimentary covers (sandstones, shales, limestones). These lithological behaviours are comparable to those observed on the beach sands of the Gulf of Mexico (Armstrong-Altrin et al., 2014) and the south-western coast of Greece (Papadopoulos et al., 2021). The analysis of the chemical data of the Limbe Beach sediments highlights the implications of the lithological characteristics of their formation. The high concentrations of FeO,

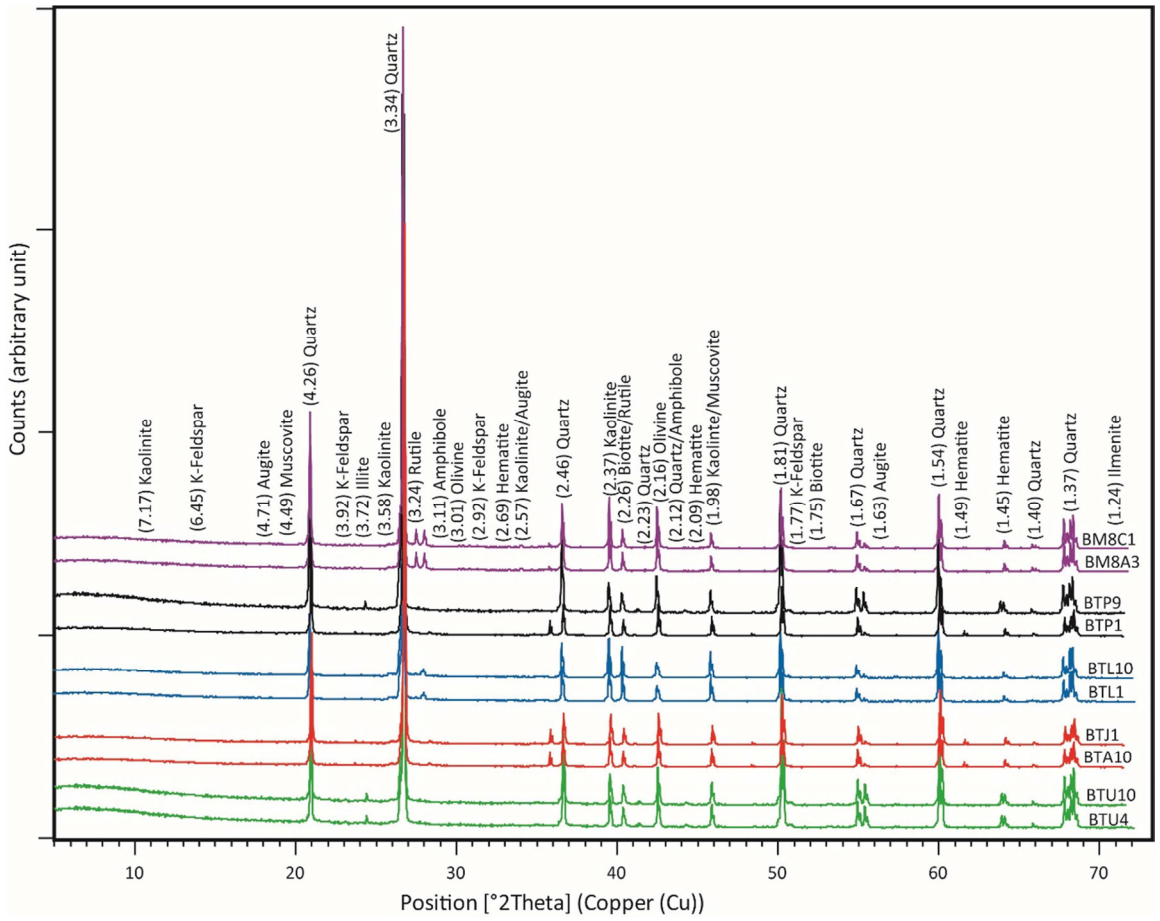


Fig. 6. X-ray diffraction spectra of the Limbe beach sediments.

Table 3. Chemical composition (wt. % of each element) of mineral phases shown in figure 7 based on semi quantitative EPMA analyses in sediments from the Limbe beach. Numbers indicate points in figure 7

Location	**Balinguili (n = 8)**							
Ref code	Pt1	Pt2	Pt3	Pt4	Pt5	Pt6	Pt7	Pt8
SiO_2	41.46	0.01	44.42	39.49	50.53	40.66	46.03	27.37
Al_2O_3	8.32	0.91	6.23	0.04	29.84	10.82	5.05	1.62
MgO	10.95	1.52	12.72	44.08	0.11	10.57	13.17	0.02
Na_2O	0.45	0.04	0.34	0.00	3.59	0.40	0.34	0.02
CaO	21.81	0.00	21.65	0.31	13.12	23.46	20.54	25.17
TiO_2	3.57	14.78	2.24	0.01	0.16	4.77	1.57	29.74
Cr_2O_3	0.01	0.03	0.04	0.04	0.00	0.02	0.16	0.00
MnO	0.12	1.80	0.03	0.24	0.04	0.06	0.12	0.04
K_2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.01	0.00	0.00
FeO	6.69	77.29	5.47	14.45	0.90	7.18	6.14	1.16
P_2O_5	0.03	0.02	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00
BaO	0.00	0.10	0.02	0.00	0.01	0.00	0.03	0.19
NiO	0.00	0.00	0.01	0.09	0.00	0.02	0.03	0.00
Cl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
ZrO_2	0.02	0.05	0.03	0.00	0.03	0.08	0.00	0.18
Nb_2O_5	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.16
V_2O_3	0.19	1.01	0.12	0.01	0.02	0.29	0.12	1.29
SrO	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	**93.62**	**97.56**	**93.36**	**98.80**	**98.65**	**98.34**	**93.31**	**87.02**

Location	**Batoke (n = 13)**												
Ref code	Pt1	Pt2	Pt3	Pt4	Pt5	Pt6	Pt7	Pt8	Pt9	Pt10	Pt11	Pt12	Pt13
SiO_2	40.54	0.03	46.56	44.63	44.03	37.03	40.88	50.59	38.37	40.31	0.05	38.39	42.94
Al_2O_3	9.92	1.14	4.77	5.84	15.94	0.04	8.89	29.27	0.05	9.95	5.28	9.97	5.73
MgO	10.5	0.82	12.14	13.17	0.33	42.59	9.47	0.11	42.28	9.08	5.80	9.93	12.75
Na_2O	0.37	0.06	0.49	0.35	4.29	0.01	2.04	3.68	0.01	0.93	0.00	0.54	0.42
CaO	23.45	0.00	21.54	21.92	2.50	0.27	13.54	13.73	0.30	22.24	0.00	23.18	22.55
TiO_2	4.22	14.20	2.45	2.05	0.80	0.03	2.14	0.15	0.02	3.97	13.44	4.57	1.98
Cr_2O_3	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.04	0.01	0.00	0.02	0.00	0.15	0.00	0.02
MnO	0.09	2.05	0.22	0.14	0.03	0.20	0.57	0.02	0.22	0.02	0.54	0.19	0.09
K_2O	0.01	0.00	0.02	0.00	4.33	0.01	1.57	0.31	0.01	0.03	0.00	0.01	0.01
FeO	7.19	79.16	9.58	7.79	2.18	16.22	16.29	1.02	16.65	9.91	72.07	8.49	7.72
P_2O_5	0.03	0.02	0.00	0.00	0.16	0.04	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
BaO	0.08	0.11	0.02	0.03	0.07	0.00	0.03	0.04	0.03	0.00	0.13	0.06	0.03
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.01	0.01	0.13	0.00	0.02	0.00	0.02
Cl	0.01	0.00	0.00	0.01	0.12	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
ZrO_2	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.06	0.01	0.04	0.11	0.04	0.06	0.05
Nb_2O_5	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
V_2O_3	0.27	1.07	0.20	0.13	0.06	0.03	0.16	0.00	0.03	0.25	0.81	0.31	0.18
SrO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	**96.69**	**98.72**	**98.01**	**96.09**	**74.84**	**96.65**	**95.68**	**98.98**	**98.21**	**96.98**	**98.33**	**95.73**	**94.51**

Location	**Limbola (n = 12)**											
Ref code	Pt 1	Pt 2	Pt 3	Pt 4	Pt5	Pt6	Pt7	Pt8	Pt9	Pt10	Pt11	Pt12
SiO_2	37.29	34.85	0.00	34.76	47.96	42.01	41.01	37.72	45.85	43.34	43.16	0.99
Al_2O_3	8.33	0.01	5.02	9.53	1.88	6.89	6.86	0.04	5.99	7.95	8.59	8.95
MgO	10.34	37.80	5.54	9.11	7.66	10.54	11.18	42.81	13.02	11.95	11.63	8.43
Na_2O	0.43	0.03	0.02	0.42	2.39	0.56	0.43	0.02	0.34	0.38	0.40	0.02
CaO	19.52	0.25	0.00	18.26	18.89	23.25	20.76	0.24	23.35	23.46	22.92	0.00
TiO_2	2.81	0.04	12.07	3.40	0.51	3.19	3.02	0.01	2.73	3.36	3.43	13.99
Cr_2O_3	0.01	0.00	0.00	0.03	0.33	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.09
MnO	0.13	0.23	0.67	0.05	0.61	0.23	0.11	0.15	0.10	0.09	0.15	0.42
K_2O	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
FeO	5.64	14.82	57.48	7.51	15.87	9.24	6.2	12.24	6.57	6.64	6.83	63.60
P_2O_5	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00
BaO	0.03	0.00	0.07	0.07	0.03	0.04	0.02	0.04	0.01	0.03	0.03	0.12
NiO	0.03	0.08	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.16	0.00	0.00	0.02	0.00
Cl	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
ZrO_2	0.04	0.02	0.01	0.00	0.06	0.06	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.02
Nb_2O_5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
V_2O_3	0.22	0.01	0.82	0.24	0.09	0.21	0.17	0.17	0.15	0.21	0.21	0.88
SrO	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
Total	**84.84**	**88.16**	**81.70**	**83.48**	**96.34**	**96.34**	**89.77**	**93.61**	**98.17**	**97.43**	**97.41**	**97.58**

Table 3. Contd...

Location	**Ngueme (n = 9)**								
Ref code	Pt1	Pt2	Pt3	Pt4	Pt5	Pt6	Pt7	Pt8	Pt9
SiO_2	42.40	41.76	38.13	0.03	37.77	39.48	0.29	53.38	0.89
Al_2O_3	6.22	7.17	0.01	5.25	11.44	8.15	0.00	26.30	0.47
MgO	11.02	12.31	43.68	5.51	8.87	11.11	0.14	0.00	0.41
Na_2O	0.55	0.29	0.00	0.00	2.62	0.42	0.13	5.16	0.66
CaO	23.43	23.92	0.29	0.00	11.58	23.92	52.90	8.37	35.88
TiO_2	3.03	2.89	0.01	13.41	4.26	3.76	0.01	0.06	46.91
Cr_2O_3	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.28	0.09	0.24	0.99	0.32	0.17	0.05	0.00	0.02
K_2O	0.00	0.01	0.01	0.00	1.16	0.00	0.00	0.27	0.01
FeO	9.12	6.98	15.98	73.40	18.08	8.01	0.27	0.27	2.00
P_2O_5	0.03	0.03	0.01	0.00	0.02	0.03	11.90	0.00	0.05
BaO	0.05	0.00	0.03	0.15	0.13	0.02	0.00	0.04	0.35
NiO	0.03	0.01	0.09	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Cl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.19	0.00	0.00
ZrO_2	0.08	0.03	0.00	0.04	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00
Nb_2O_5	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03	0.00	0.04	0.08	0.76
V_2O_3	0.20	0.18	0.00	0.96	0.23	0.23	0.00	0.01	1.99
SrO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	**96.44**	**95.70**	**98.48**	**99.79**	**96.57**	**95.31**	**65.92**	**93.97**	**90.40**

Location	**Mile 8 (n = 7)**						
Ref code	Pt1	Pt2	Pt3	Pt4	Pt5	Pt6	Pt7
SiO_2	50.58	41.79	46.87	40.18	47.03	0.09	43.23
Al_2O_3	29.61	7.27	3.79	0.02	3.83	0.97	6.74
MgO	0.12	11.26	13.77	54.64	10.59	5.36	12.08
Na_2O	3.73	0.48	0.39	0.01	1.29	0.02	0.41
CaO	12.73	21.45	21.66	0.15	21.53	0.08	23.22
TiO_2	0.12	3.33	1.64	0.04	1.63	9.37	3.13
Cr_2O_3	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	2.99	0.01
MnO	0.00	0.15	0.13	0.20	0.36	0.23	0.09
K_2O	0.26	0.00	0.02	0.01	0.02	0.00	0.01
FeO	0.87	7.02	8.38	2.35	10.22	73.19	7.96
P_2O_5	0.01	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.05
BaO	0.06	0.06	0.00	0.00	0.00	0.07	0.04
NiO	0.01	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00
Cl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
ZrO_2	0.00	0.12	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00
Nb_2O_5	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
V_2O_3	0.03	0.18	0.13	0.01	0.12	0.52	0.19
SrO	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
Total	**98.16**	**93.16**	**96.78**	**97.80**	**96.71**	**92.89**	**97.17**

n = numbers indicate points in Fig.7.

referring to the existence of hematite (Fe_2O_3), indicate the impact of the alteration of ferromagnesian minerals in the source rocks in an oxic environment of the tropical domain. These high concentrations associated with those of MgO reflect the impact of source rocks in detrital sedimentation and the existence of ferromagnesian minerals. This characteristic behaviour of beach sediments in the Limbe area is similar to that of the beach sands of the Gulf of Mexico (Armstrong-Altrin et al., 2014; Kasper Zubillaga et al., 2016). The high SiO_2 contents associated with those of Al_2O_3 and considerable alkalis are related to the presence of feldspars and clay minerals (kaolinite, illite). These concentrations show that the beach sediments are proximal to the source and indicate the crystalline nature of the source rocks. The influence of sedimentary (carbonate) rocks in the formation of beach sediments in the area is explained by the presence of calcite. The high TiO_2 content with residual minerals (ilmenite) characterises the influence of magmatic rocks in the distribution of beach sediments with a non-ferrous character (Haider et al., 2020).

The sand grain shapes identified in the Limbe beach sediments are predominantly angular and sub-angular, sub-rounded, and rounded. The predominance of the angular and sub-angular form reflects a proximal source of the Limbe beach deposits. The material underwent a short transport to the sediment deposits in the beach areas. The sedimentological behaviours of Limbe Beach are similar to those discussed by Armstrong-Altrin et al. (2015) in the Gulf of Mexico and Madhavaraju et al. (2021) in the Gulf of California.

Provenance Signatures

The petrographic characteristics of the Limbe Beach sands suggest that they are dominated by single-crystal quartz (Fig. 4a-h). The abundance of monocrystalline quartz justifies the contributions of crystalline rocks from continental basement, such as granites, granodiorites, and sandstones (Mosoh Bambi et al., 2013; Eyong Taken et al., 2019; Ngueutchoua et al., 2019a, b). The abundant presence of lithic fragments in the mineralogical analysis (Table 1) indicates that the source rocks of the studied sediments are volcanic in nature with a basic composition. The Cameroon Volcanic Line is thought to have a basaltic and trachytic origin. These volcanic formations are widespread in the continental part (Fig. 2). These basic rocks, along with lithic fragments, may be the source of the Limbe Beach sands. Given the proximity of the CVL, the result is consistent with the local geology (Mount Etindé and Mount Cameroon), which is most likely a source area for the investigated sediments (Kwewouo Janpou et al., 2022).

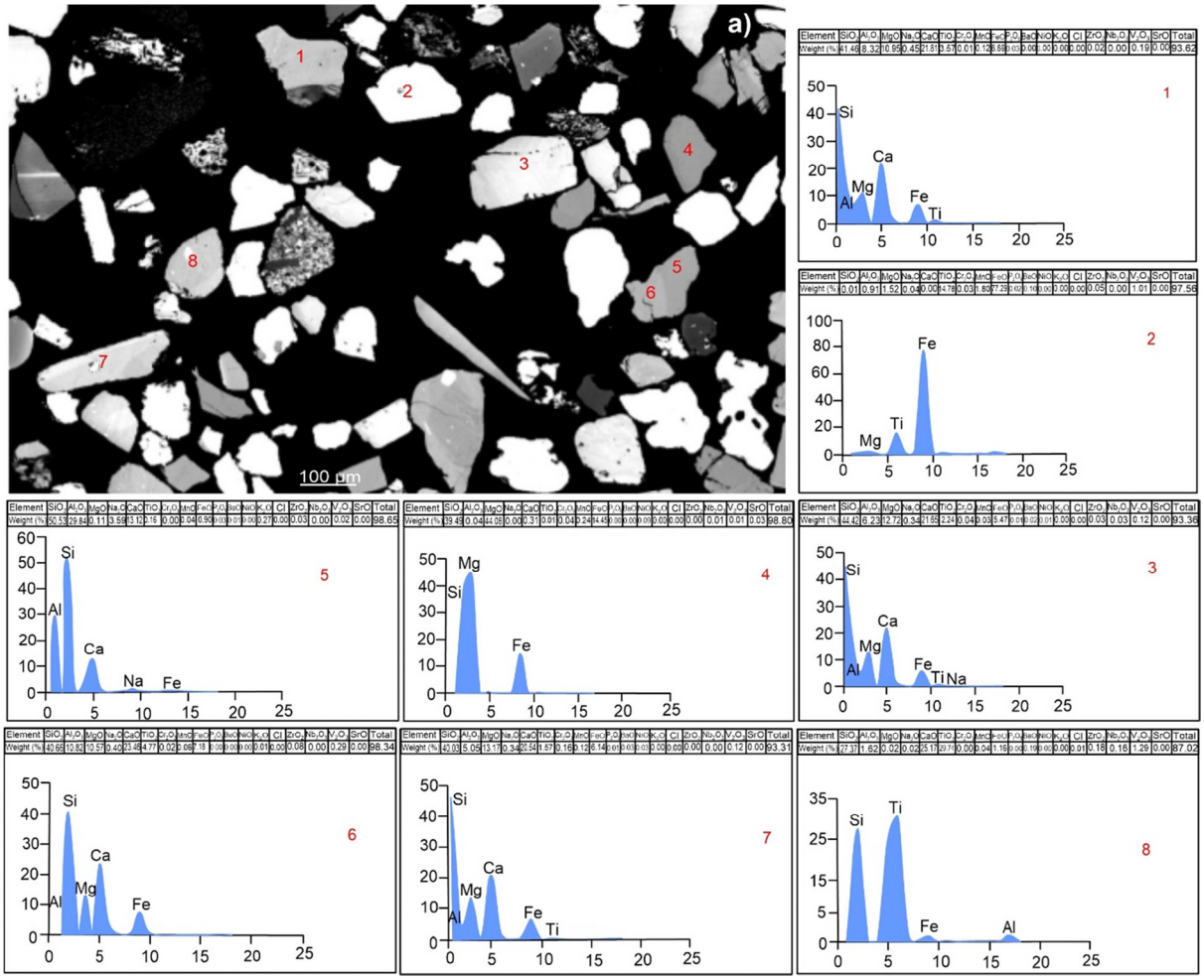


Fig. 7. Backscatter images and SEM-EDS spectra of the Limbe beach sediments. (a) Bakinguili: 1) Px, 2) Hem, 3) Amp, 4) Ol, 5) Kln, 6) Ilt, 7) Aug, 8) Ilm;

The basic and ultrabasic provenance with magmatic lithologies found in the area is different from the felsic provenance with sedimentary and metamorphic lithologies south of the study area obtained by Ambassa Bela et al. (2022) and Tsanga et al. (2023).

The chemical composition of the minerals obtained through EPMA analysis also demonstrated the presence of magmatic (volcanic and plutonic), metamorphic, and sedimentary sources of detrital deposits (sands) in the study area. The presence of silicates (olivine, amphibole, pyroxenes, and feldspars) in the Bakinguili, Batoke, Limbola, Ngueme and Mile 8 sediments indicates the presence of basic (basalts, trachytes; Che et al., 2012; Kwewouo Janpou et al., 2022) and ultrabasic (peridotites; Sababa et al., 2015) rocks. This is supported by a significant abundance of chemical elements such as Si, Mg, Ca, and Fe in the residual mineralogical suite (olivine, amphibole, pyroxenes, and feldspars) compared to the altered suite (hematite, kaolinite, and illite). As a result, the detrital sedimentation of the Limbe Beaches appears to be residual with proximal magmatic sources. The presence of silicate (kaolinite, and illite) and ferric (hematite) phases indicates that the sediments studied were formed by hydrothermal alteration processes of feldspars and oxidation of ferromagnesian minerals (pyroxenes, augite, amphibole, and olivine). The presence of kaolinite and illite in these sediments would be greatly enhanced by hydrothermal alteration of feldspars from magmatic sources. However, the oxidation of ferromagnesian minerals produced trace amounts of hematite, which is linked to sediments leaching during transport. Because of the low silica content, leaching or mineralogical dissolution processes were used to intervene in the fluvial transport of sediments from the continental zone to the studied beach area. High FeO accumulations would be influenced by the thermal conditions of a Limbé Beach. In addition, low K_2O and Na_2O values in all samples indicate that the source area is marked by plagioclase-enriched rocks that have not been fully dissolved from the source to beach deposits, such as basalts and other mafic rocks. The chemical composition of these mafic rocks is consistent with the mineralogy and petrographic observations of the Limbe Beach sediments indicating a predominance of mafic minerals (amphibole, pyroxene, augite, and olivine).

The TiO_2 vs. Al_2O_3 diagram of Vosoughi Moradi et al. (2016) indicates that basalts and granites are likely to be source rocks for the formation of the Limbé beach sediments (Fig. 8). According to Ambassa Bela et al. (2022) and Tsanga et al. (2023), the rock nature of the study area differs little from the sedimentary and metamorphic sources south of the study beach.

Weathering Conditions

The grain shape, mineralogy, and chemical composition of the constituent minerals of clastic sediments provide information on the weathering conditions of the source areas (Armstrong-Altrin et al., 2016; Ekoa Bessa et al., 2021a, b; Kwewouo Janpou et al., 2022; Tsanga et al., 2023). EPMA mineralogy of beach sediments in the northern part of the Gulf of Guinea revealed the presence of source rock indicator minerals, such as olivine, quartz, pyroxenes, augite, amphibole, feldspars, ilmenite, hematite, kaolinite, and illite. These minerals indicate that the beach sediments studied are the result of proximal alteration of magmatic rocks. The presence of kaolinite, illite, and hematite suggests that the alteration is essentially chemical. This chemical alteration may be the hydrolysis of feldspars and the oxidation

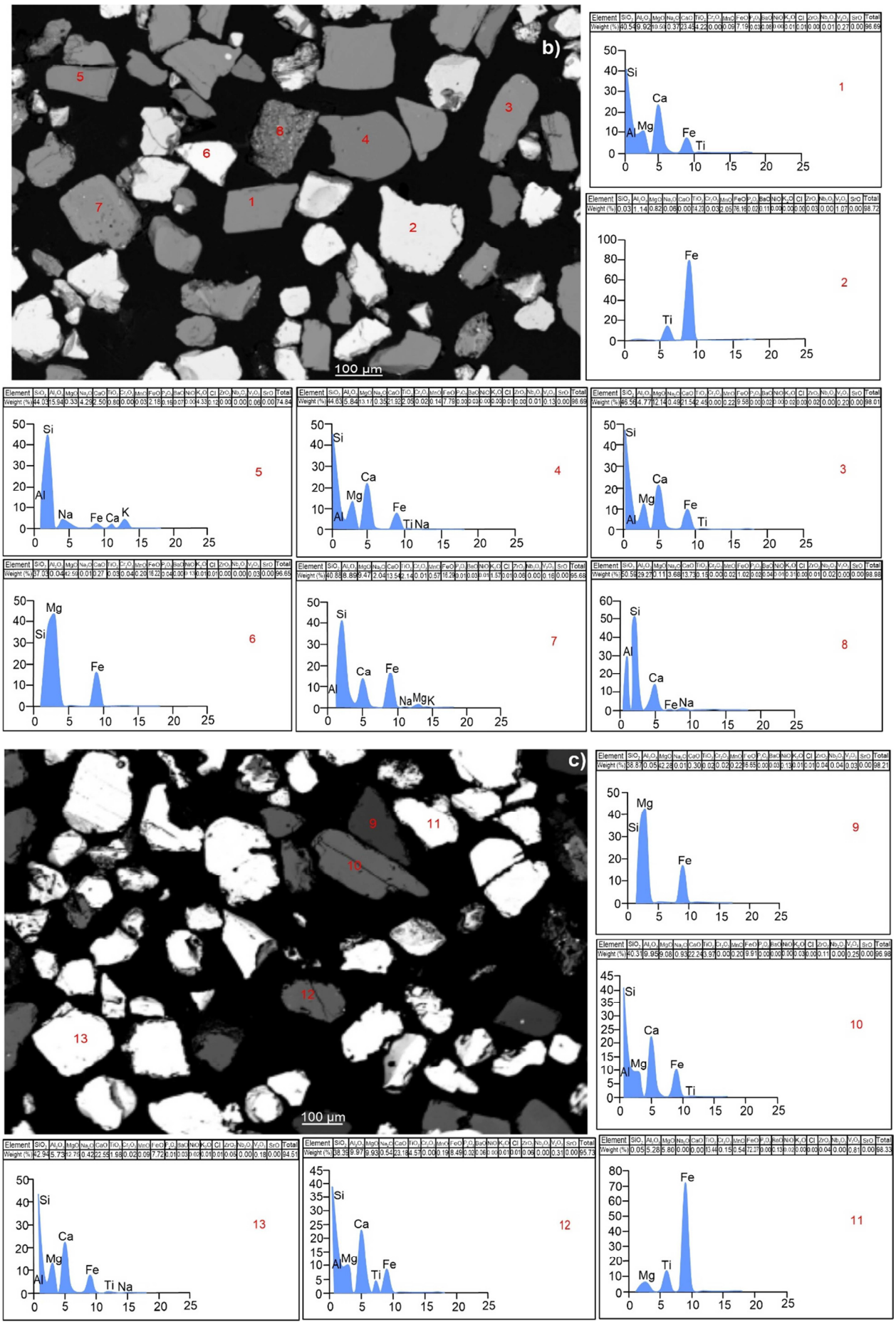


Fig.7 Contd.. **(b and c)** Batoke: (1) Px, (2) Hem, (3) Aug, (4) Amp, (5) Ilt, (6) Ol, (7) Kfs, (8) Kln, (9) Ol, (10) Aug, (11) Hem, (12) Px, (13) Amp;

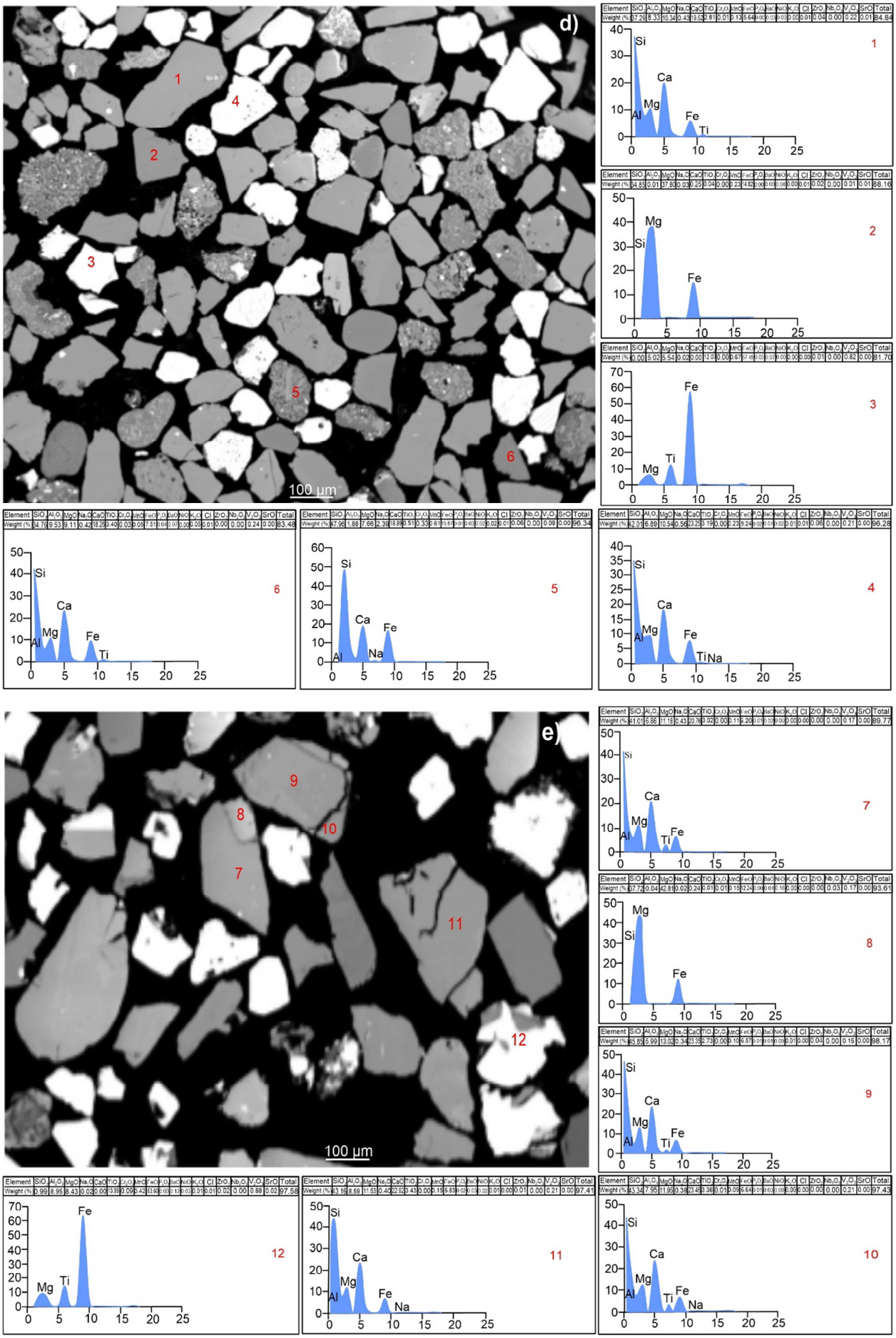


***Fig.7 Contd.*.. (d and e)** Limbola: (1) Aug, (2) Ol, (3) Hem, (4) Amp, (5) Ilt, (6) Px, (7) Px, (8) Ol, (9) Aug, (10) Amp, (11) Ilt, (12) Hem;

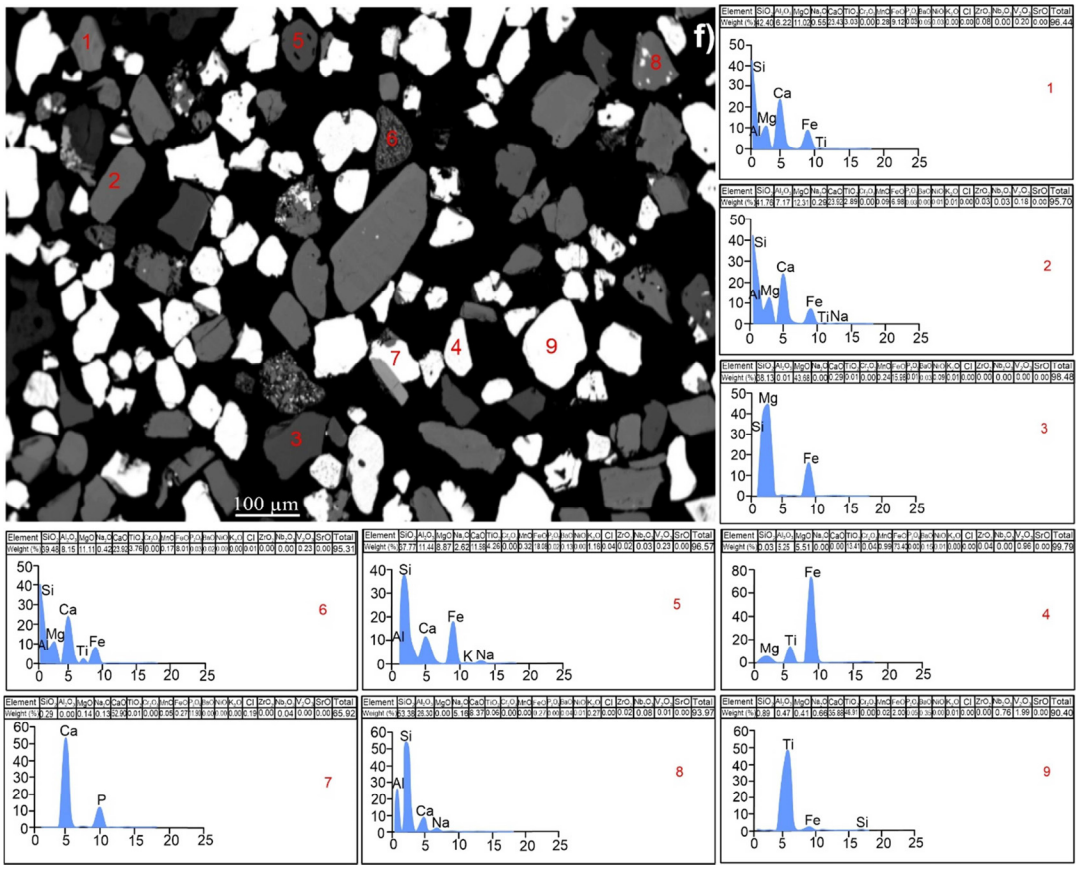


Fig.7 Contd.. **(f)** Ngueme: (1) Px, (2) Amp, (3) Ol, (4) Hem, (5) Ilt, (6) Aug, (7) Cal, (8) Kln, (9) Ilm;

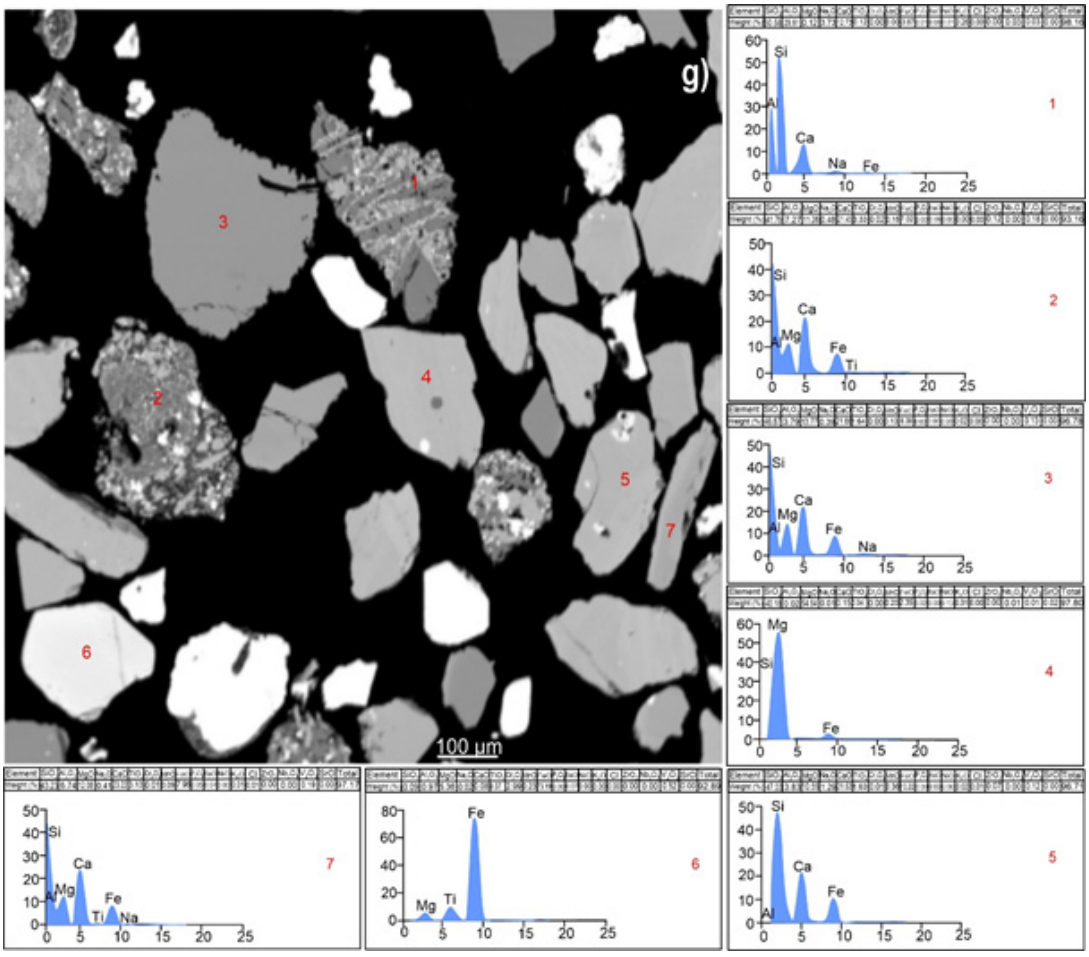


Fig.7 Contd.. **(g)** Mile8: (1) Kln, (2) Px, (3) Aug, (4) Ol, (5) Ilt, (6) Hem, (7) Amp (Whitney and Evans 2010).

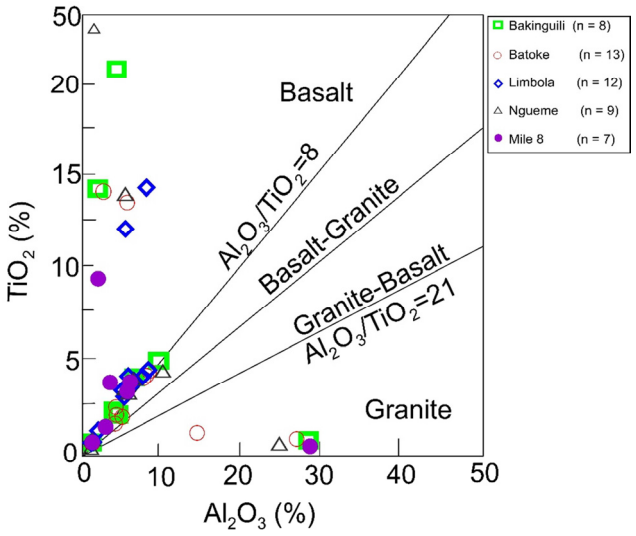


Fig. 8. Al_2O_3 vs TiO_2 bivariate plot of Limbe beach sediments (Vosoughi Moradi et al., 2016).

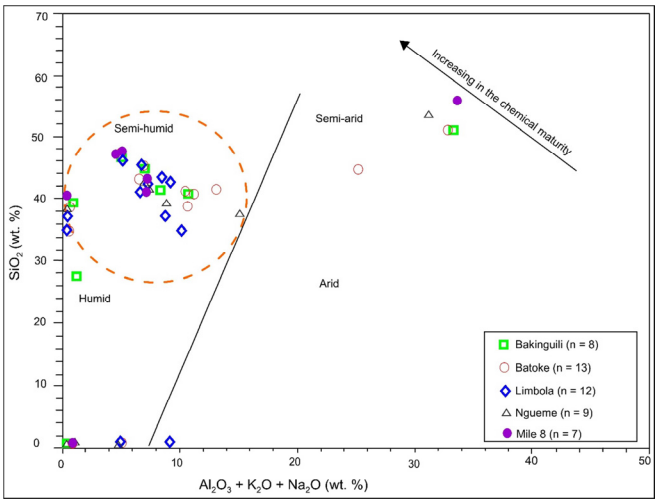


Fig. 9. Chemical maturity and climate during deposition of the sediments of Limbe beaches expressed by bivariate plot of SiO_2 vs Al_2O_3 +K_2O +Na_2O (after Suttner and Dutta, 1986).

of ferromagnesian minerals (pyroxenes, amphiboles, and olivine) presented as constituent minerals of the source zone magmatic rocks (Baiyegunhi et al., 2021).

The mineralogical results obtained show a variable dissolution of ferromagnesian minerals, notably olivine, amphibole, and pyroxene, with the oxidation of iron II (hematite) in the secondary phases. This chemical alteration behaviour of ferromagnesian minerals to iron oxides is similarly demonstrated by Morton and Hallsworth (1994). In other words, the variable abundance of heavy mineral assemblages (epidote, brown hornblende, choritoid, rutile, zircon, anatase, and opaque minerals) can be modified by chemical alteration of Limbe Beach source rocks and during sediment transport. This abundance of heavy minerals depends on the chemical composition of the source rocks. However, the abundant occurrence of primary minerals (pyroxenes, amphiboles, and feldspars) associated with epidote, garnet, staurotide, and opaque oxides in variable small amounts indicates either the presence of unweathered grains in the source rocks or chemical weathering under a tropical monsoon climate (Garzanti et al., 2002). Thus, the primary minerals concentrated in the Limbe beach sediments show that they contain unweathered lithic grains from the source rocks. The richness of hornblende, olivine, pyroxenes, and epidote suggests alteration of magmatic rocks proximal to the shoreline deposits (Garzanti et al., 2002).

The presence of secondary clay minerals (kaolinite and illite) and oxides (hematite) indicates that chemical alteration by hydrolysis and ferric oxidation occurred. According to Suttner and Dutta (1986) discrimination diagram, the sediments formed in the area under semi-humid to humid climatic conditions (Fig. 9). These semi-humid to humid climatic conditions are primarily responsible for the immature characteristics of the investigated sediments. The predominance of the angular to subangular form (50–85%) demonstrates the immaturity of the beach sediments.

Tectonic Setting

Petrographic modal analyses, as well as Qt-Ft-Lt and Qm-Ft-Lt triangular diagrams (Folk, 1968; Dickinson, 1985) (Figs. 5a, b; Table 1), confirm that the sediments were derived from an undissected arc setting. The Qt-Ft-Lt diagram shows that all quartz grains are litharenite (Fig. 5c), originating from continental weathering with a short transport mechanism in detrital beach sedimentation. The sediments of the studied beach are mostly recycled lithics from the undissected arc domain (Fig. 5a, b). This tectonic feature of sediment formation would be justified by the presence of fine- and medium-grained mixtures from sedimentary recycling (Anani et al. 2019). The tectonic influence of the undissected arc contributes to the detrital sedimentation of the mostly angular to sub-angular shapes of the sand grains (Fig. 3). These features suggest that the source is proximal to the Limbé Beach deposits.

Clastic sediment chemistry can be used to infer the tectonic setting of source areas (Bhatia, 1983; Verma and Armstrong-Altrin, 2013; Tobia and Aswad, 2015). Verma and Armstrong-Altrin (2013) successfully proposed two major element discriminant function diagrams (high silica and low silica) to differentiate arc, rift, and collisional settings. The high-silica diagram denotes sediments with $(SiO_2)_{adj}$ values ranging from 63 to 95%, whereas the low-silica diagram denotes sediments with $(SiO_2)_{adj}$ values ranging from 35 to 63%. The $_{adj}$ index denotes that the chemical data was adjusted to 100% on an anhydrous basis before any calculations were performed. The silica-poor diagram was used for the sediments of the Limbe beaches. The majority of the beach sediments were derived from the mafic sources and are characteristic of an arc setting (Fig. 10). This is similar to the study documented by Lee et al. (2019) on beach sediments from the King George Island Peninsula (West Antarctica).

CONCLUSION

The sediments of the Limbe Beaches in the northern part of the Gulf of Guinea are litharenites, resembling magmatic sources. These sediments are tectonically formed in an undissected arc zone, known as the high-relief volcanic source. They show a strong affinity for the provenance of recycled lithics. Petrographic data reveal that these sediments contain a mixture of sands and volcanic detritus from continental sources proximal to the shoreline deposits. The presence of lithic fragments and abundant ferromagnesian minerals indicates that the majority of these beach sediments were derived from mafic igneous source rocks, rich in pyroxenes, olivine, and amphibole. The chemistry of minerals formed in the study area's beach sediments from magmatic (basalts, trachytes, and granites) and sedimentary (sandstones and limestones) rocks supported the presence of lithic and ferromagnesian fragments in detrital sedimentation. Similarly, the mineralogical record suggests that higher influence of mafic source rocks (basalts) than felsic source rocks (granites). Dissolution of ferromagnesian minerals (olivine, amphibole, and pyroxene) and ferric oxidation (hematite) support the existence of chemical alteration in a tropical monsoon climate. The presence of primary minerals in beach sediments indicate the presence of unweathered lithic grains from the source rocks in the beach sediments. These weathering conditions

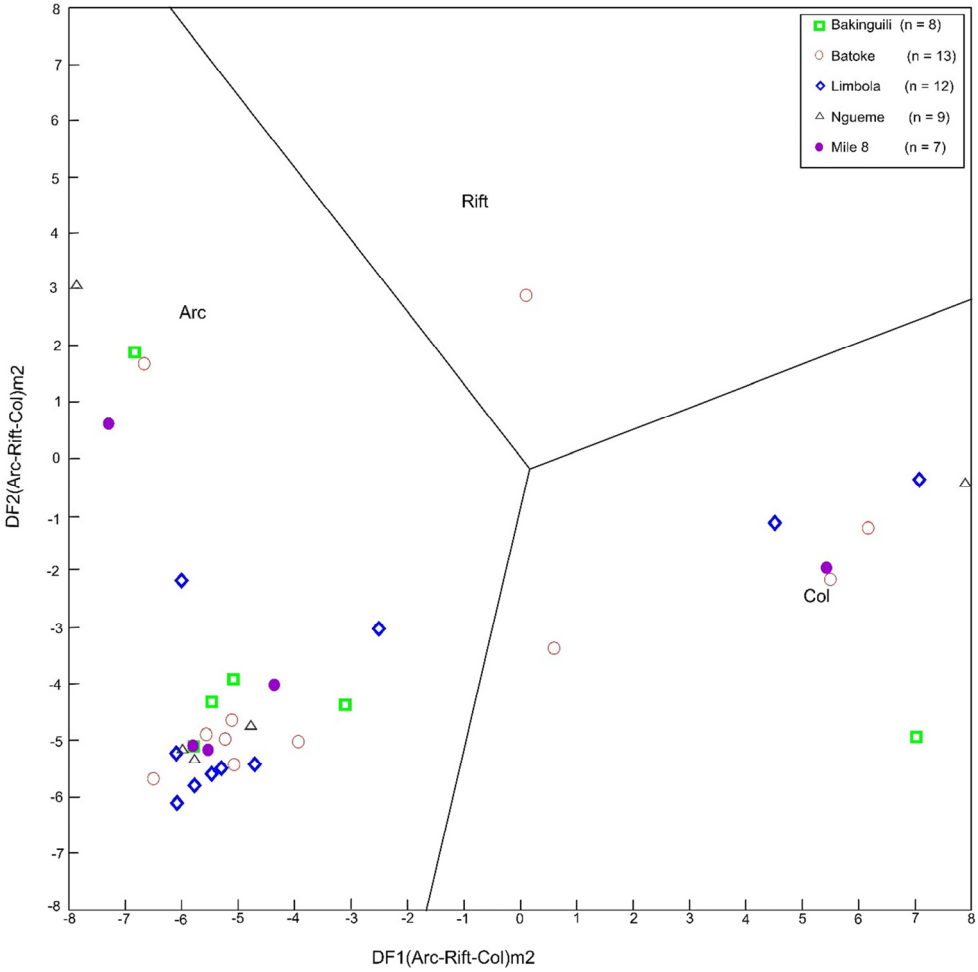


Fig. 10. Tectonic diagrams for the samples from Limbe beach sediments (Bakinguili, Batoke, Limbola, Ngueme and Mile 8). Discriminant-function multi-dimensional diagram for low-silica clastic sediments (Verma and Armstrong-Altrin, 2013). The subscript m1 in DF1 and DF2 represents the low-silica diagram based on loge-ratios of major-elements. The discriminant function equation are:

DF1 (Arc-Rift-Col)m2 = (0.608 × ln(TiO_2/SiO_2)$_{adj}$) + (- 1.854 × ln(Al_2O_3/SiO_2)$_{adj}$) + (0.299 × ln (Fe_2O_3t/SiO_2)$_{adj}$) + (- 0.550 × ln(MnO/SiO_2)$_{adj}$) + (0.1120 × ln(MgO/SiO_2)$_{adj}$) + (0.194 × ln(CaO/SiO_2)$_{adj}$) + (- 1.510 × ln(Na_2O/SiO_2)$_{adj}$) + (1.941 × ln (K_2O/SiO_2)$_{adj}$) + (0.003 × ln(P_2O_5/SiO_2)$_{adj}$) - 0.294.

DF2 (Arc-Rift-Col)m2 = (- 0.554 × ln(TiO_2/SiO_2)$_{adj}$) + (- 0.995 × ln(Al_2O_3/SiO_2)$_{adj}$) + (1.765 × ln ($Fe_2O_3^t/SiO_2$)$_{adj}$) + (- 1.391 × ln(MnO/SiO_2)$_{adj}$) + (- 1.034 × ln(MgO/SiO_2)$_{adj}$) + (0.225 × ln(CaO/SiO_2)$_{adj}$) + (0.713 × ln(Na_2O/SiO_2)$_{adj}$) + (0.330 × ln (K_2O/SiO_2)$_{adj}$) + (0.637 × ln(P_2O_5/SiO_2)$_{adj}$) - 3.631.

suggest that the littoral deposits are proximal to the weathering of continental rocks. The geochemistry data of the Limbe beach sediments indicates an arc setting, which is linked to the opening of the Atlantic.

References

Al-Kaaby, L.F. and Albadran, B.N. (2020) Minerals and sedimentary characteristics of Quaternary sediments of different regions in Southern Iraq. Iraqi Geol. Jour., v.53(1A), pp.68–89. doi:10.46717/igj.53.1a.R5.2020.01.27

Ambassa Bela, V., Ekoa Bessa, A.Z, Ngueutchoua, G., Aonsi Kamani, F., Abioui, M., Kwewouo Janpou, A., Ngueudong, Z.M.L., Tsanga, A.D. and Armstrong-Altrin, J.S. (2022) Petrography and geochemistry of beach sediments along the central coast of Cameroon: constraints on paleoweathering, provenance, and tectonic setting. Arab. Jour. Geosci., pp.1–25. doi:10.1007/s12517-022-10114-5

Anani, C.Y., Anim, R.O., Arma, B.N., Atichogbe, J.F., Sakyi, P.A., Mahu, E. and Asiedu, D.K. (2019) Petrography of detrital zircons from sandstones of the Lower Devonian Accraian Formation, SE Ghana: Implications on provenance. Geol. Jour., pp.1–16. doi:10.1002/gj.3633

Armstrong-Altrin, J.S., Nagarajan, R., Madhavaraju, J., Rosalez-Hoz, L., Lee, Y.I., Balaram, V., Cruz-Martinez, A. and Avila-Ramirez, G. (2013) Geochemistry of Jurassic and Upper Cretaceous shales from the Molango Region, Hildago, eastern Mexico: implications for source-area weathering, provenance, and tectonic setting. ComptesRendus Geosciences, v.345(4), pp.185–202. doi:10.1016/jcrt.2013.03.004

Armstrong-Altrin, J.S., Nagarajan, R., Lee, I.Y., Kasper-Zubillaga, J.J. and Córdoba Saldaña, L.P. (2014) Geochemistry of sands along the San Nicolás and San Carlos beaches, Gulf of California, Mexico: implications for provenance and tectonic setting. Turkish Jour. Earth Sci., v.23, pp.533–558. doi:10.3906/yer-1309-21

Armstrong-Altrin, J.S., Nagarajan, R., Balaram, V. and Natalhy-Pineda, O. (2015) Petrography and geochemistry of sands from the Chachalacas and Veracruz beach areas, western Gulf of Mexico, Mexico: constraints on provenance and tectonic setting. Jour. South Amer. Earth Sci., v.64, pp.199–216. doi:10.1016/j.jsames.2015.10.012

Armstrong-Altrin, J.S., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J. and Trejo-Ramírez, E. (2016) Mineralogy and geochemistry of sands along the Manzanillo and El Carrizal beach areas southern Mexico: implications for palaeoweathering, provenance and tectonic setting. Geol. Jour., v.52, pp.559–582. doi:10.1002/gj.2792

Armstrong-Altrin, J.S., Madhavaraju, J., Vega-Bautista, F., Ramos-Vazquez, M.A., Perez Alvarado, B.Y., Kasper-Zubillaga, J.J. and Ekoa Bessa, A.Z. (2021) Mineralogy and geochemistry of Tecolutla and Coatzacoalcos beach sediments, SW Gulf of Mexico. Appl. Geochem., v.134, 105103. doi:10.1016/j.apgeochem.2021.105103

Baiyegunhi, T.L., Kuiwu, L., Oswald, G., Baiyegunhi, C. and Maropene, R. (2021) Geochemistry of the mudrocks and sandstones from the Bredasdorp Basin, offshore South Africa: Implications for tectonic provenance and paleoweathering. Geosci., v.13, pp.1187–1225. doi:10.1515/geo -2020 -0260

Basu, A. (2003) A perspective on quantitative provenance analysis. In Valloni, R. and Basu, A. (Eds.), Quantitative provenance studies in Italy. Memorie Descrittive Della Carta Geologicadell'Italia Roma: Istitutopoligrafico e ZeccadelloStato, v.61, pp.11–22.

Bhatia, M.R. (1983) Plate tectonics and geochemical composition of sandstone. Jour. Geol., v.91, pp.611–627.

Blatt, H., Middleton, G. and Murray, R. (1980) Origin of sedimentary rocks. New Jersey: Prentice Hall, 768p.

Boggs, S. (2009) Petrology of sedimentary rocks. New York: Cambridge University Press, 612p.

Chamley, H. and Deconinck, J.-F. (2013) Bases de sédimentologie, 3eEdition Dunod, Paris, 461p.

Chaudhuri, A., Banerjee, S., Prabhakar, N. and Das, A. (2020) The use of heavy mineral chemistry in reconstructing provenance: A case study from Mesozoic sandstones of Kutch Basin, India. Geol. Jour., v.55(12), pp.1–11. doi:10.1002/gj.3922

Che, V.B., Kervyn, M., Suh, C.E., Fontijn, K., Ernst, G.G.J., Del Marmol, M.-A., Trefois, P. and Jacobs, P. (2012) Landslide susceptibility assessment in Limbe (SW Cameroon): A field calibrated seed cell and informationvalue method. Catena, v. 92, pp. 83–98. doi:10.1016/j.catena.2011.11.014

Dickinson, W.R. and Suczek, C.A. (1979) Plate tectonics and sandstone compositions. AAPG Bull., v.63, pp.2164–2182. doi:0149-1423/79/B012-0003$03.00/0

Dickinson, W.R. (1985) Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. *In:* Zuffa, G.G. (Ed.), Provenance of Arenites. D. Reidel, Boston, pp.333–361.

Dumort, J.C. (1968) Geological map of Cameroon at scale 1/500 000, west Douala sheet + explanatory note. Mines and Geology Branch 23.

Eghombi, G. (1999) The sedimentology of Upper Cretaceous to Tertiary rock in the bombe area. Thesis, University of Buea, 109p.

Ekoa Bessa, A.Z., Ndjigui, P.-D., Fuh, G.C., Armstrong-Altrin, J.S. and Bineli Betsi, T. (2021a) Mineralogy and geochemistry of the Ossa lake Complex sediments, Southern Cameroon: Implications for paleoweatheringand provenance. Arab. Jour. Geosci., v. 14, pp. 1–17. doi:10.1007/s12517-021-06939-1

Ekoa Bessa, A.Z., Armstrong-Altrin, J.S., Fuh, G.C., Bineli Betsi, T., Kelepile, T. and Ndjigui, P.-D. (2021b) Mineralogy and geochemistry of the Ngaoundaba Crater Lake sediments, northern Cameroon: implications for provenance and trace metals status. Acta Geochimica, pp.1–31. doi:10.1007/s11631-021-00463-5

Etame, J., Gerard, M., Bilong, P. and Suh, C.E. (2009) Behaviour of elements in soils developed from nephelinites at Mount Etinde (Cameroon): impact of hydrothermal versus weathering processes. Jour. African Earth Sci., v.54, pp.37–47. doi:10.1016/j.jafrearsci.2009.02.002

Eyong, J.T., Ngueutchoua, G., Bessong, M., Hell, J.V., Bokanda, E.E., Wignall, P. and Best, J. (2019) Sedimentologic and palaeoenvironmental evolution of the Mamfe Cretaceous Basin (SW Cameroon): evidence from lithofacies analysis, tectonics and evaporate minerals suite. Jour. African Earth Sci., v.149, pp.19–41. doi:10.1016/j.jafrearsci.2018.07.022

Fitton, J.G. and Dunlop, H.M. (1985) The Cameroon Line, West Africa, and its bearing on the origin of oceanic and continental alkali basalt. Earth Planet. Sci. Lett., v.72, pp.23–38. doi:10.1016/0012-821X(85)90114-1

Folk, R.L. (1968) Petrology of Sedimentary Rocks. Austin. Hemphill Publishing Co., USA, pp.170.

Garzanti, E., Canclini, S., Moretti Foggia, F. and Putrella, N. (2002) Unraveling magmatic and orogenic provenance in modern sands: the back arc side of the Apennine thrust belt, Italy. Jour. Sediment. Res., v.72 (1), pp.2–17. doi:1527-1404/02/072-2/$03.00

Haider, S.W., Mahmood, T. and Siddiqui, S. (2020) Major, Minor and Trace Elements Existence in Surface Sediments from Gwadar to Jiwani Coastal Areas of Pakistan. Econ. Environ. Geol., v.11(2), pp.37–45.

Hossain, H.M.Z., Atsushi, K. and Daisuke, A. (2022) Geochemical characteristics of shoreline sediments from the Bay of Bengal, Bangladesh: Implications for provenance and source -rock weathering. Geol. Jour., pp.1–16. doi:10.1002/gj.4484

Hourcq, V. (1955) Les Recherches Françaises de Pétrole en Afrique Noire (Cameroun, Afrique Equatoriale Française, Madagascar). I.F.P, Centre d'Etudes Supérieures de Prospection et d'Exploitation des Gisements.

Ingersoll, R.V. and Suczek, C.A. (1979) Petrology and provenance of Neogene sand from Nicobar and Bengal Fans, DSDP Sites 211 and 218. Jour. Sediment. Petrol., v.49(4), pp.1217–1228. doi:10.1306/212F78F1-2B24-11D7-8648000102C1865D

Kasper-Zubillaga, J.J., Dickinson, W.W., Carranza-Edwards, A. and Hornelas-Orozco, Y. (2005) Petrography of quartz grains in beach and dune sands of Northland, North Island, New Zealand. New Zealand Jour. Geol. Geophys., v.48, pp.649–660. doi:10.1080/00288306.2005.9515139

Kasper-Zubillaga, J.J., Linares López, C., Adela Espino De La Fuente. and Muñoz, C. (2016) Provenance of opaque minerals in coastal sands, western Gulf of Mexico, Mexico. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v.68(2), pp.323–328.

Karlik, M., Gyollai, I., Vancsik, A., Fintor, K., Szalai, Z., Mîndrescu, M., Grădinaru, I., Vágási, S., Bozsó, G., Polgári, M. and Pál-Molnár, E. (2021) High resolution mineralogical characterization of sediments-Lake Bolătău-Feredeu (Romania). Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, v.16(1), pp.199–210. doi:10.26471/cjees/2021/016/167

Kwewouo Janpou, A., Ngueutchoua, G., Ekoa Bessa, A.Z., Armstrong-Altrin, J.S., Kankeu Kayou, U.R., Njike Njome, M.N.O.-A., Njanko, T., Ambassa Bela, V., Kanouo Tiotsop, M. and Tankou, G.J. (2022) Composition, weathering, and provenance of beach sands adjacent to volcanic rocks in the northern Gulf of Guinea, SW Cameroon. Jour. African Earth Sci., v.188, 104473. doi:10.1016/j.jafrearsci.2022.104473

Lee, I.Y., Taejin, C. and Hyoun, L.L. (2019) Petrological and geochemical compositions of beach sands of the Barton and Weaver peninsulas of King George Island, West Antarctica: implications for provenance and depositional history. IUGS, v.42(2), pp.149–164. doi:10.18814/epiiugs/2019/019012

Letouzey, R. (1985) Notices et cartes phytogeographiques au 1/500 000. IRA/Institut de la carte internationale de la végétation. Toulouse, Fasc (1–5), pp.240.

Liyouck, P.R., Ngueutchoua, G., Armstrong-Altrin, J.S., Sonfack, A.N., Kontchipe Ngagoum, Y.S., Ekoa Bessa, A.Z., Ambassa Bela, V., Tsanga, D.A. and Wouatong, A.S.L (2023) Petrography and geochemistry of the Sanaga river sediments, central Cameroon: Constraints on weathering, provenance, and tectonic setting. Jour. African Earth Sci., 104840. doi:10.1016/j.jafrearsci.2023.104840

Madhavaraju, J., Armstrong-Altrin, J.S., Arthur James, R. and Hussain, S.M. (2021) Palaeoenvironment and provenance signatures inferred from quartz grain surface features: A case study from Huatabampo and Altata beaches, Gulf of California, Mexico. Jour. South Amer. Earth Sci., v. 111, 103441. doi:10.1016/j.jsames.2021.103441

Mclennan, S.M. (1993) Weathering and global denudation. Jour. Geol., v.101, pp.295–303.

Marzoli, A., Piccirillo, E.M., Renne, P.R., Bellieni, G., Iacumin, M., Nyobe, J.B. and Tongwa, A.T. (2000) The Cameroon Volcanic Line revisited: petrogenesis of continental basaltic magmas from lithospheric and asthenospheric mantle sources. Jour. Petrol., v.41, pp.87–109. doi.:10.1093/petrology/41.1.87

Mosoh Bambi, C.K., Frimmel, H.E. Zeh, A. and Suh, C.E. (2013) Age and origin of Pan-African granites and associated U-Mo mineralization at Ekomédion, southwestern Cameroon. Jour. African Earth Sci., v. 88, pp.15–37. doi:10.1016/j.jafrearsci.2013.08.005

Ngueutchoua, G., Ekoa Bessa, A.Z., Eyong, T.J., Demanou, Z.D., Baba Djaoro, H. and Tchami, N.L. (2019a). 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. Jour. African Earth Sci., v.152, pp.215–236. doi:10.1016/j.jafrearsci.2019.02.021

Ngueutchoua, G., Eyong, T.J., Ekoa Bessa, A.Z., Azanji Agheenwi, Z.B., Emane Maschouer, A., Sobdjou Kemteu, C., Lontchi Dzoti, Y., Hamadou, T., Ongbassouek Baboule, B.-M. and Kenfack Nguemo, G.R. (2019b) Provenance and depositional history of Mesozoic sediments from the Mamfe basin and Douala sub-basin (SW Cameroon) unraveled by geochemical analysis. Jour.African Earth Sci., v.158, 103550. doi:10.1016/j.jafrearsci.2019.103550

Nichols, G. (2015) Terrigenous clastic sediments. Blackwell Science, Oxford, pp.1–14.

Nkoumbou, C., Deruelle, B. and Velde, D. (1995) Petrology of Mount Etinde nephelinites series. Jour. Petrol., v.36(2), pp.373–395. doi:10.1093/petrology/36.2.373

Nnange, J.M., Poudjom Djomani, Y.H., Fairhead, J.D. and Ebinger, C.J. (2001)

Determination of the isostatic compensation mechanism of the region of the Adamawa dome, West Central Africa using the Admittance technique of gravity data. Jour. Sci. Tech., Sci. Eng. Series, v.1(4), pp.29–35.
Ntamak-Nida, M.J., Bourquin, S., Makong, J.-C., Baudin, F., Mpesse, J.E., Itjoko Ngouem, C., Komguem, PB. and Abolo, G.M. (2010) Sedimentology and sequence stratigraphy from outcrops of Kribi-campo sub basin: lower Mundeck Formation (Lower Cretaceous, southern Cameroon). Jour. African Earth Sci. v.58(1), pp.1–18. doi:10.1016/j.jafrearsci.2010.01.004
Olivry, J.C. (1986) Fleuves et rivières du Cameroun. Collection Monographies. Hydrologiques ORSTOM No 9, Paris, 733p.
Papadopoulos, A., Lazaridis, S., Kipourou-Panagiotou, A., Kantiranis, N., Koroneos, A. and Almpanakis, K. (2021) Mineralogy, Geochemistry and Provenance of Coastal Sandsfrom Greece: New Insights on the REE Content of Black Coastal Sands from Aggelochori Area, N.-Greece. Minerals, v.11, 693. doi:10.3390/min11070693
Pettijohn, F.J., Potter, P.E. and Siever, R. (1987) Sand and sandstone (second edition). New York: Springer Verlag, 553p.
Rajmohan, R., Singarasubramanian, S.R., Sundararajan, M.K., Suganraj, K. and Venkatesan, S. (2015) Micromorphology of surface quartz grains between Vellar river and Ponnaiyar river along the east coast of Tamilnadu, India. Internat. Jour. Modern Res. Rev., v.3(9), pp.784–794.
Ramos-Vázquez, M.A. and Armstrong-Altrin, J.S. (2021) Provenance of sediments from Barra del Tordo and Tesoro beaches, Tamaulipas State, northwestern Gulf of Mexico. Jour. Paleograp., v.10, pp.1–17. doi:10.1186/s42501-021-00101-4
Roser, B.P. and Korsch, R.J. (1986) Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using content and ratio. Jour. Geol., v.94(5), pp.635–650. doi:10.1016/0009-2541(88)90010-1
Sababa, E., Ndjigui, P.-D., Ebah Abeng, S.A. and Bilong, P. (2015) Geochemistry of peridotite xenoliths from the Kumba and Nyos areas (Southern part of the Cameroon Volcanic line). Implication for Au-PGE exploration. Jour. Geochem. Explor., v.152, pp.75–90. doi:10.1016/j.gexplo.2015.02.003
Salard-Chebodaeff, M. (1981) Palynologie Maestrichtienne et Tertiaire du Cameroun. Résultats Botaniques. Rev. Palaeobot. Palynol., v.32, pp. 401–439. doi:10.1016/0034-6667(81)90021-X
Spalletti, L.A., Limarino, C.O. and Piñol, F.C. (2012) Petrology and geochemistry of Carboniferous siliciclastics from the Argentine Frontal Cordillera: A test of methods for interpreting provenance and tectonic setting. Jour. South Amer. Earth Sci., v.36, pp.32–54. doi:10.1016/j.jsames.2011.11.002
Suttner, L.J. and Dutta, P.K. (1986) Alluvial sandstone composition and palaeoclimate: I. Framework mineralogy. Jour. Sediment. Petrol., v.56 (3), pp.329–345. doi:10.1306/212F8909-2B24-11D7-8648000102C1865D
Tagne-Kamga, G. (2003) Petrogenesis of the Neoproterozoic Ngondo plutonic complex (Cameroon, West Central Africa): a case of late-collisional ferro-potassic magmatism. Jour. African Earth Sci., v.36, pp.149–171. doi:10.1016/S0899-5362(03)00043-5
Tobia, F.H. and Aswad, K.J. (2015) Petrography and geochemistry of Jurassic sandstones, western desert, Iraq: implications on provenance and tectonic setting. Arab. Jour. Geosci., v.8, pp.2771–2784. doi:10.1007/s12517-014-1392-0
Tsanga, D.A., Ekoa Bessa, A.Z., Ngueutchoua, G., Ngokam, S.G., Same Moutongo, J.-D., Ambassa Bela, V., Kwewouo Janpou, A., Mohamed, A. and Armstrong-Altrin, J.S. (2023) Evaluation of provenance and weathering of beach sediments in the lower part of the Cameroonian coast. Jour. African Earth Sci., 104822. doi:10.1016/j.jafrearsci.2022.104822
Trewin, N. (1988) Use of the scanning electron microscope in sedimentology. Techni. Sedimentol., pp.229–273.
Verma, S.P. and Armstrong-Altrin, J.S. (2013) New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Pre-Cambrian basins. Chem. Geol., v.355, pp.117–133. doi:10.1016/j.chemgeo.2013.07.014
Vosoughi Moradi, A., Sari, A. and Akkaya, P. (2016) Geochemistry of the Miocene oil shale (Hançilli Formation) in the Çankiri-Çorum Basin, Central Turkey: implications for paleoclimate conditions, source-area weathering, provenance, and tectonic setting. Sediment. Geol., v.78, pp.136–150. doi:10.1016/j.sedgeo.2016.05.002
Wenjeh Wembenyui, E., Kenneth, D.C. and Zhao, J.-X. (2020) Evolution of Mount Cameroon volcanism: geochemistry, mineral chemistry and radiogenic isotopes (Pb, Sr, Nd). Geosci. Front., v.11(6), pp.2157–2168. doi:10.1016/j.gsf.2020.03.015
Whiney, D.L. and Evans, B.W. (2010) Abreviations for names of rock-forming minerals. Amer. Mineral., v. 95, pp. 185–187. doi:10.2138/am.2010.3371



Annick Kwewouo Janpou is a finishing PhD student at the University of Yaoundé 1, Cameroon. Her research focuses on provenance of beach sediments. Her contribution is towards data synthesis, writing the first draft, review and editing the manuscript.



Armel Ekoa is a postdoctoral researcher working on lacustrine, fluvial and marine sediments for paleoenvironmental reconstructions and environmental pollution using multiproxy approaches. He conceived the project, realized laboratory analysis, data synthesis, wrote the first draft, reviewed and edited the manuscript.



Roger Firmin Donald Ntouala is a geologist specialized on weathering materials. His research focuses on the geotechnical applications of weathering materials in construction though mineralogical, geochemical, physical, and mechanical features. He wrote the first draft, reviewed and edited the manuscript.



Tebogo Kelepile is an economic geologist working on the genesis of sediment-hosted copper deposits, radiogenic isotope geochemistry and sediment provenance. His contribution is primarily towards laboratory analysis and data synthesis, as well as reviewing and editing of the manuscript.



Ngueutchoua Gabriel, Graduat in Geology, currently works at the Department of Earth Sciences, University of Yaoundé I, Cameroon. His research team works on sedimentology and sedimentary geochemistry. He contributed by supervising, writing-review and editing of the manuscript.



John S. Armstrong-Altrin is a Professor at UNAM, Mexico. His research focuses on geochemistry, sediment provenance, environmental pollution, and geochronology. He contributed to data revision, review and editing of the manuscript.

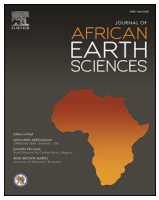
Journal of African Earth Sciences 188 (2022) 104473



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of African Earth Sciences

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





Composition, weathering, and provenance of beach sands adjacent to volcanic rocks in the northern Gulf of Guinea, SW Cameroon

Annick Kwewouo Janpou [a], Gabriel Ngueutchoua [a,*], Armel Zacharie Ekoa Bessa [a], John S. Armstrong-Altrin [c], Ulrich Romaric Kankeu Kayou [a], Odilia-Alexandra Njike Njome Mbella Nguetnga [a], Théophile Njanko [b], Victorine Ambassa Bela [a], Myriam Solange Kanouo Tiotsop [a], Joseph Gael Tankou [a]

[a] Department of Earth Sciences, University of Yaoundé 1, P.O. Box 812, Yaoundé, Cameroon
[b] Department of Earth Sciences, University of Dschang, P.O. Box: 67, Dschang, Cameroon
[c] Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Instituto de Ciencias Del Mar y Limnología, Unidad de Procesos Oceanicos y Costeros, Circuito Exterior s/n, 04510, D.F., Mexico

ARTICLE INFO

Keywords:
Cameroon Volcanic line
Beach sediments
Geochemistry
Provenance
Weathering

ABSTRACT

The southern coastal portion of the Tertiary Cameroon Volcanic Line (CVL), in the Gulf of Guinea, is bordered by Pan-African granitoids, metamorphic rocks, and Cretaceous sedimentary successions, which are prone to contribute sediments to the nearby Limbe beach. To better constrain the weathering intensity and provenance of the beach sediments, the mineralogy and chemical composition of these sediments were analyzed. The low values of SiO_2/Al_2O_3 ratios and Zircon-Tourmaline-Rutile (ZTR) index, coupled with high Index of Compositional Variability (ICV) indicate compositionally immature sediments. This is further supported by the presence of rock forming minerals such as olivine, pyroxene, and amphibole. The Th/Sc versus Zr/Sc binary and Al_2O_3–TiO_2–Zr ternary diagrams suggest that the studied sediments have not experienced recycling. The Chemical Index of Alteration (CIA), Plagioclase Index of Alteration (PIA), the A–CN–K and (A-K)-C-N triangular diagrams indicate that the Limbe beach sediments were undergone moderate to intense weathering. Several provenance discrimination diagrams based on Al_2O_3, TiO_2, Zr, TiO_2, La/Sc, and Th/Co, and the ternary plot of V–Ni–Th*10, and the comparison of chondrite normalized rare earth elements (REE) patterns of the studied sediments with potential source rocks suggest that the source area is composed of mafic rocks of CVL. This indicates that the granitic, metamorphic, and sedimentary rocks close to the volcanic structure do not significantly contribute to the sedimentation of the studied beach. In addition, the results of this study indicate that longshore currents do not influence the chemical composition of the sediments.

1. Introduction

Mineralogy and geochemistry of detrital sediments have been widely used for making inferences on source rock compositions (e.g., McLennan et al., 1993; Osae et al., 2006; Lee, 2009; Bhuiyan et al., 2011; Rao et al., 2011; Long et al., 2012; Armstrong-Altrin et al., 2015; Zhang et al., 2016; Armstrong-Altrin and Machain-Castillo, 2016; Madhavaraju et al., 2016a,b; Ngueutchoua et al., 2017, 2019a and b; Tchouatcha et al., 2020, 2021; Sonfack et al., 2021; Kontchipe et al., 2021; Chougong Tchatchouang et al., 2021). These inferences are based on the fact that many elements, including transitional trace elements (i.e., Th, Sc, and Hf) and rare earth elements (REE), are relatively insoluble and as a result their original composition does not vary during weathering, erosion, and transportation from the parent rocks to the depositional environment (Taylor et al., 1986; Kasanzu et al., 2008; Vosoughi Moradi et al., 2016; Mendieta-Lora et al., 2018). Numerous studies have been devoted to beach sediments to establish the source region history and deduce the importance of longshore currents in distributing sediments (e.g., Carranza-Edwards et al., 2001; Okazaki et al., 2001; Armstrong-Altrin, 2009, 2012; Kasper-Zubillaga et al., 2013; Armstrong-Altrin and Natalhy-Pineda, 2014; Madhavaraju et al., 2016a; Mendieta-Lora et al., 2018; Ramos-Vázquez and Armstrong-Altrin, 2021; Armstrong-Altrin

* Corresponding author. Department of Earth Sciences, University of Yaoundé 1, Address: P.O. Box 812, Yaoundé, Cameroon.
E-mail address: ngueutchoua2@yahoo.fr (G. Ngueutchoua).

https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104473
Received 24 October 2021; Received in revised form 26 December 2021; Accepted 18 January 2022
Available online 21 January 2022
1464-343X/© 2022 Elsevier Ltd. All rights reserved.

et al., 2021). Some of these studies showed that the kind of sediments delivered by the rivers to the beach is the most important factor in controlling the composition of the coastal sediments (Armstrong-Altrin, 2009, 2020). Armstrong-Altrin et al. (2015) and Ramos-Vázquez and Armstrong-Altrin (2019) illustrated the relative inefficiency of coastal currents in the mixing and homogenization of beach sands from the western Gulf of Mexico.

Geochemical studies of sediments and clastic rocks from the Cameroonian terranes to date have mainly concentrated on Mesozoic sediments of the Douala coastal sub basin and Mamfe intracratonic basin (Ngueutchoua et al., 2017; Bokanda et al., 2019; Ngueutchoua et al., 2019a and b; Tchouatcha et al., 2020, 2021), in the context of deciphering the provenance, paleoweathering, paleoclimate, paleoenvironmental conditions, and paleotectonic settings. On the other hand, few attention has be concentrated on the Quaternary sedimentary covers, and recent alluviums (Ndjigui et al., 2014, 2018; Ekoa Bessa et al., 2018; Nyobe et al., 2018; Bassanak Ongboye et al., 2019; Mbale Ngama, 2019; N'nanga et al., 2019; Sonfack et al., 2021; Kontchipe et al., 2021; Nanga Bineli et al., 2021), whereas beach sediments have received little or no attention (Morin and Kuété, 1988; Ekoa Bessa et al., 2020).

The geology of the Cameroonian coastal area located in the Gulf of Guinea is diverse, consisting mainly of Neoproterozoic metamorphic rocks (dolerite, granite, migmatite, migmatitic gneiss, and gneiss), Mesozoic and Cenozoic sedimentary rocks, and Cenozoic volcanic rocks. Provenance studies, associated with the composition of beach sands with specific source rocks have not yet been reported. In this regard, the beach sediments close to the volcanic terrain of Limbe area, offer the opportunity to evaluate the provenance of the coastal sediments in the Gulf of Guinea. This study also estimate the role of longshore currents in mixing and homogenization of the beach sediments.

In this study, the mineralogy and geochemistry (major, trace, and rare earth elements) of bulk sediments from five sites of Limbe beach, located in the northwestern Gulf of Guinea close to volcanic rocks linked to the Cameroon volcanic Line (CVL) were investigated. The objective was to: (1) identify the source terrane that contributed sediments to the study area, (2) deduce the potential variation in source area weathering, and (3) determine the geochemical variation among sands collected from different sites and deduce the importance of coastal currents in distributing sediments in the northwestern Gulf of Guinea.

2. Geologic setting of the study area

The study area is located between two estuarine complexes with mangrove (i.e., Rio del Rey and Douala bay) in the northwestern part of the Gulf of Guinea (3°59′-4°04′ N and 9°01′-9°13′ E) (Fig. 1). The coastline in this area is made of small cliffs swashed by waves (Morin and Kuété, 1988). The climate is tropical humid with two distinct seasons (i.e., dry and wet seasons). An average annual rainfall up to 8000 mm is recorded and most of the rainfall occurs during the June–October season (Olivry, 1986). The lithology of the region near the beach area consists of volcanic rock units, surrounded by sedimentary and metamorphic rocks. These volcanic units belong to the intraplate CVL, a 1600 km long linear Cenozoic-Quaternary volcanic and subvolcanic chain exhibiting regional variation in petrography, mineralogy and chemistry (Fitton and Dunlop, 1985; Marzoli et al., 1999, 2000). The CVL straddles the African-South Atlantic-continent-ocean boundary, extending from the Gulf of Guinea to the interior of the African continent (Fitton and Dunlop, 1985; Marzoli et al., 1999, 2000). It is marked near the study site by the volcanism of Mount (Mt) Cameroon and Mt Etinde. The latter, which is situated on the southwesterly side of the Mt Cameroun, is the continental southernmost extension of the CVL, i.e., the volcano most close to the area studied (Fig. 2a). Mt Etinde is characterized by a basic volcanism and thus is distinctive from other volcanoes of the continental sector of CVL, which mainly exhibit silicic volcanic rocks (Fitton and Dunlop, 1985; Marzoli et al., 1999, 2000). It is a stratovolcano consisting of layered nephelinitic tuffs, nephelinites,

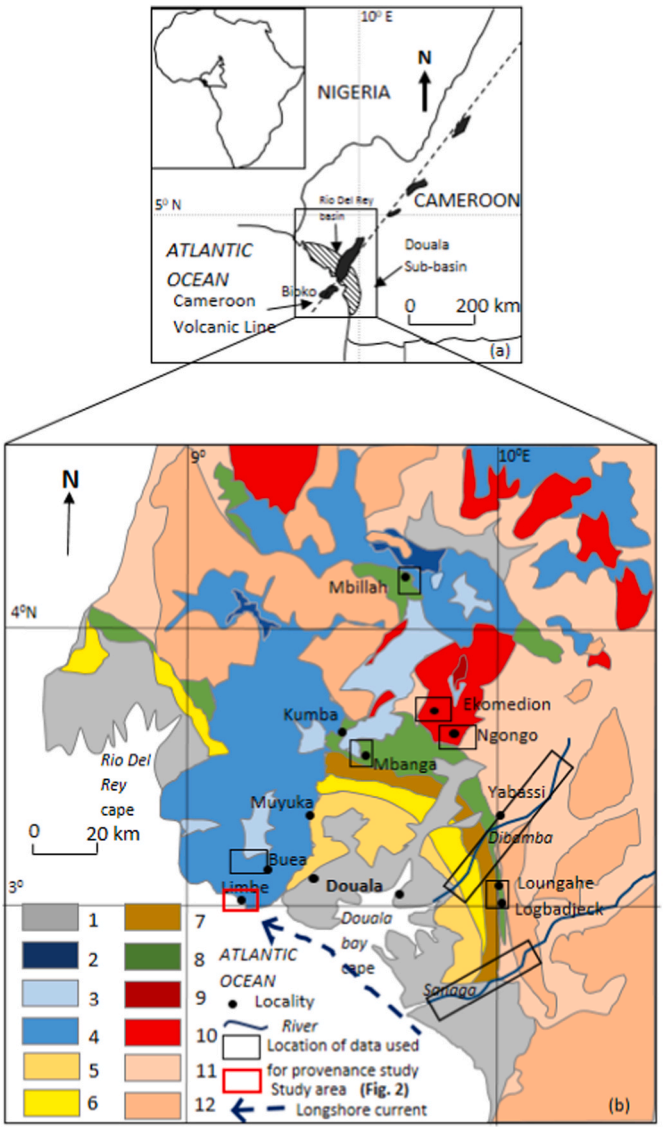


Fig. 1. (a) Location of the study site and (b) geological map of this site showing source areas of compiled geochemical data used for provenance identification (map modified from Hourcq, 1955; Dumort, 1968, and Salard-Chebodaeff, 1981). (1) Recent alluvium, (2) Tertiary volcanic rocks (trachytes), (3) Tertiary volcanic rocks (trachytes and recent basalts), (4) Tertiary volcanic rocks (basalts), (5) Undifferenciated Tertiary (siltstones, sandstones, bedded clays, claystones, and silts), (6) Paleocene (sandstones, silts, claystones, dolomites), (7) Paleocene (small conglomerates, loose sandstones, claystones, and dolomites), (8) Cretaceous (Basal sandstone, clays, sands, sandstones, marly and calcareous limestones), (9) Precambrian basement (post-tectonic granites), (10) Precambrian basement (syn-tectonic granites), (11) Precambrian basement (undifferentiated gneisses), and (12) Precambrian basement (gneisses + undifferentiated migmatite).

nephelinites to hauyne melilites or garnet-red, leucito-nephelinites to aenigmatites and haunophyres (Mouafo, 1988; Nkoumbou et al., 1995; Etame et al., 2009). Nkoumbou et al. (1995) dated lava flows of Mt Etinde at 0.65 Ma. On the northwestern, southern, and eastern flanks especially, the slopes of this Mount have deeply incised V-shape valley separating sharp crests. These valleys commonly have seasonal streams that run dry in dry season (Etame et al., 2009). No major river drains near the study area. Rivers transported materials from Douala bay and other river estuaries (i.e., Sanaga River) are re-worked by coastal and longshore currents from SE to NW as far as cape Debundscha (near the Limbe locality) and toward East in the study area (Morin and Kuété,

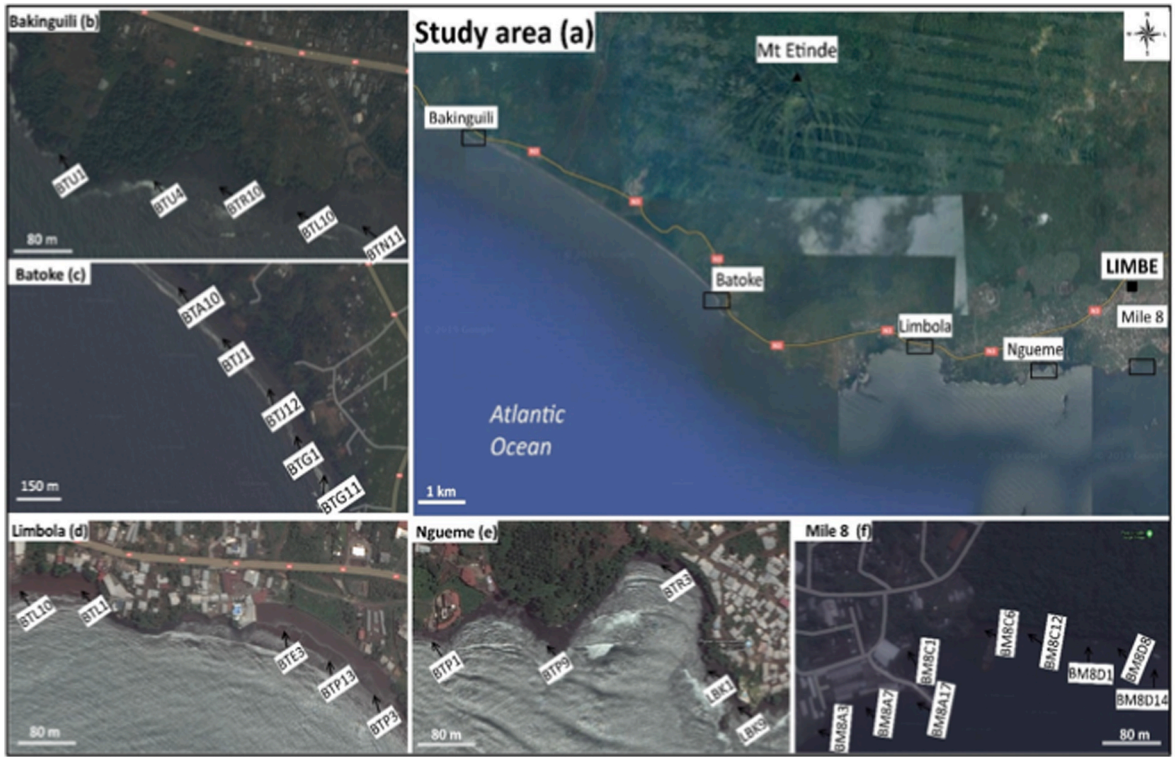


Fig. 2. (a) Detailed characteristics of the study sites and the sample locations of sediments from: (b) Bakinguili (c) Batoke (d) Limbola, (e) Ngueme, and (f) Mile 8 beaches.

1988). As a result of these coastal and longshore currents, muds (<50 μm) delivered from Sanaga River mouth and transported in suspension accumulate specifically in the continental shelf off the Limbe beach (Ngueutchoua and Giresse, 2010). It is reported that, off the Sanaga River mouth, a plume with high concentrations of suspended matter extends out from the mouth trending to join western and northern zone of the shelf off Cameroon (i.e., off the Limbe beach). Sedimentary deposits bordering volcanic rocks consist of conglomerates, conglomeratic sandstones, arkosic sandstones, organic matter-rich dark marls (Barremian-Aptian), sandstones, shales, marls, and carbonates (Albian-Cenomanian), siltstones, sandstones, bedded clays, claystones, silts (undifferentiated Tertiary), and Quaternary alluvial deposits (Regnoult, 1986; Lawrence et al., 2002; Ntamak-Nida et al., 2008, 2010; Ngueutchoua et al., 2017, 2019a and b). Metamorphic rocks are migmatite, migmatitic gneisses, and gneisses of Neoproterozoic age (Tagne-Kamga, 2003). Nnange et al. (2001) reported that the basement geology of the CVL is granitic and gneissic, reflecting a protracted history of volcanism and metamorphism (Wenjeh Wembenyui et al., 2020). This basement is probably made up of Cretaceous sedimentary rocks toward the coast, as illustrated by the geologic map (Fig. 1).

3. Sampling and methods

Twenty-nine surface Limbe beach sand samples from five sites (i.e., Bakinguili, number of samples n = 5, Batoke = 5, Limbola = 5, Ngueme = 5, and Mile 8 = 9 samples) were collected from the intertidal zone, where the waves end (about 500 g for each sample), on a wide area of about 3 km (to identify the compositional difference in sediments) (Fig. 2a–f). The samples and their locations are listed in Table 1. To ensure no contamination, the 1 cm thick top layer were chipped off before sampling and all samples were stored in plastic bags. Samples were quartered in two sub-samples. One sub-sample was used for granulometric analysis. The other sub-samples were prepared for the XRD mineralogical and chemical analysis.

Grain size of all samples and heavy mineral analysis of some samples (i.e., Bakinguili = 5, Batoke = 5, and Mile 8 = 9 samples) were done at the University of Yaoundé I (UYI). Sand was separated by wet sieving and the size fractions above 0.063 mm were determined by dry sieving with a Ro-Tap sieve shaker using American Society for Testing and Material (ASTM) sieves ranging from ~1.5φ to 4.5 φ at 0.5 φ intervals for 20 min (Folk, 1966, 1980). Heavy minerals were separated following

Table 1
Sampling locations of the Limbe beach sediments, with corresponding sample ID and their physical feature (color and texture).

Location	Sample Id	Latitude (N)	Longitude (E)	Altitude (m)	Color	Texture
Bakinguili	BTU1, BTU4, BTR10, BTL10, BTN11	04°02′24″-04°02′28,1″	09°04′43,9″-09°04′52,7″	13 ± 3	Dark red (5 YR 3/2) - Reddish gray (5 YR 5/1)	Fine sand
Batoke	BTA10, BTG1, BTG11, BTJ1, BTJ12	04°02′09,6″-04°02′13,3′′	09°05′09,2″-09°05′11,′′	13 ± 3	Dark reddish gray (5 YR 4/2) - Very dark gray (5 YR 3/1)	Fine sand
Limbola	BTL10, BTL1, BTE3, BTP3, BTP13	04°00′44′′ – 04°00′46″	09°06′58′′ –09°07′09"	3 ± 2	Very dark gray (5 YR 3/1) - Dark reddish brown (5 YR ¾)	Fine sand
Ngueme	BTP1, BTP9, BTR3, LBK1, LBK9	04°00′28,5′′ - 04°0028,9″	09°09′09′′ - 09°10′11,5″	3 ± 2	Very dark gray (5 YR 3/1) - Dark reddish brown (5 YR ¾)	Fine sand
Mile 8	BM8A3, BM8A7, BM8A17, BM8C1, BM8C6, BM8C12, BM8D1, BM8D8, BM8D14	04°01′42,6′′ - 04°01′49,4″	09°05′37,1′′ - 09°05′44,1″	3 ± 2	Very dark gray (5 YR 3/1) - Dark reddish gray (5 YR 4/2)	Fine sand

standard and conventional methods using heavy liquid (i.e., bromoform; specific gravity = 2.89) and identified under a binocular microscope.

Mineralogical studies were carried out on ten representative samples of the whole rock (i.e., two per site), using standard X-ray diffraction (XRD) technique, by reflection on random powders (i.e., with a Panalytical Empyrean diffractometer with Pixel detector and fixed slits with Fe filtered Co-Kα radiation). The mineralogical phases present in the sediments were identified using X'Pert High score plus software at Laboratory of AGEs, University of Liège, Belgium.

All the 29 sediment samples were air-dried at 40 °C, crushed to ~0.075 mm, using an agate mortar, blended at the UYI, and were analyzed for major and trace elements, including REE, at the Bureau Veritas Mineral Laboratories Ltd. (British Columbia, Canada), using international and laboratory working standards. Major elements were analyzed by a conventional X-Ray fluorescence (XRF) spectrometry. The concentrations of trace elements and REE were measured using and inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS) (see Jarvis, 1988). The samples were mixed with lithium metaborate/tetraborate and nitric solutions (i.e., HNO_3) during preparation. To determine LOI (loss on ignition), powdered samples were burnt at 1000 °C. The analytical uncertainties vary from ±0.1 to ±0.04% for major elements, and ±0.1 to ±0.5% for trace elements. The detection limits were 0.01 ppm for REE. Major element contents were recalculated to an anhydrous (LOI-free) basis and adjusted to 100% before interpretation. Central tendency (mean), dispersion (standard deviation), and Pearson's correlation coefficients of grain size, major and trace element contents were computed from the statistical methodology based on the XLSTAT software. A database for source rock geochemistry was constructed from several publications (see Fig. 1 for locations) and was used for provenance identification. This database consists of average REE concentrations of some potential parental rocks (Supplementary Table 1).

For the discussion of trace element and REE concentrations, we used the Upper Continental Crust (UCC) and the chondrite normalization values listed in Taylor and McLennan (1985, 1995) and McLennan (2001). The weathering intensity of all the beach sediments studied were evaluated using different weathering indices such as the Chemical Index of alteration (CIA), the Plagioclase Index of Alteration (PIA), the Chemical Index of Weathering (CIW), and the Index of Compositional Variability (ICV) (Nesbitt and Young, 1982; Harnois, 1988). Nesbitt and Young (1982) defined the CIA in molecular proportion as $(Al_2O_3/(Al_2O_3 + Na_2O + CaO^* + K_2O))^*100$, where CaO* is the content of CaO incorporated in silicates. In the current study, CaO concentrations were corrected for Ca in apatite according to the following equation: $CaO^* = CaO - 10(P_2O_5)/3$. Since all the CaO contents are higher than those of Na_2O, the latter has been considered as CaO*, as recommended by McLennan (1993). Due to their high contents in the studied samples, it is considered that Ca in sediments (CaO contents varying between 11.01 and 12.27 wt%) are not only sourced from inorganic carbon. The correction for Ca in apatite is due to the fact that it can be sourced from certain igneous and sedimentary rocks which are likely parent rocks of the studied beach sediments.

The PIA, ICV, and CIW were calculated by the formulas: $PIA = [(Al_2O_3–K_2O)/(Al_2O_3 + Na_2O + CaO^* + K_2O)^*100)]$, $CIW = [(Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O))$ x 100], and $ICV = (Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + Mn + TiO_2)/Al_2O_3$.

Provenance proxies including Al_2O_3/TiO_2, K_2O/Na_2O, Th/Sc, and Th/U ratios, La/Sc versus Th/Co (Cullers, 2002), $(Ce)_{cn}$ versus $(La/Yb)_{cn}$ (e.g., Rao et al., 2011), and Hf versus La/Th (Floyd and Leveridge, 1987) bivariate plots, triangular relationship of V–Ni–Th*10 (e.g., Bracciali et al., 2007), and discriminant function plot of Roser and Korsch (1988) have been be used to infer the source rock composition.

4. Results

4.1. Granulometric characterization

Grain-size distribution of the Limbe beach sediments and their parameters (Folk and Ward, 1957; Folk, 1980) do not vary basically. Color of the studied beach sands varies from very dark gray to dark gray according to the Münsell (1975) color chart (Fig. 3; Table 1). The sediments from all the localities exhibit, on average, 23% of particles with diameter ranging mostly between 1 and 2 in the phi scale (Φ) (i.e., medium-grained sand), 69% of particles ranging between 2 and 3Φ, indicating fine sand-sized particles, 8% of particles ranging mostly between 3 and 4Φ, indicating very fine-grained sand particles, and less than 1% of particles with more than 4Φ (i.e., silts and clays). Hence, the beach sands studied consist predominantly of fine sand size particles (on average 68.59%) with very little silt and clay (Table 2). They are classified as sands in the sand-silt-clays diagram of Folk (1980).

All the sampling sites exhibit almost similar cumulative curves (Fig. 4). The mean grain size (Mz) of the sediments ranges between 2.32 and 2.39 Φ, suggesting that these grains are fine-grained in size. The Trask's Sorting Coefficient (So) varies from 1.17 mm to 1.21 mm and the standard deviation (σ; graphical method) in the phi scale (sΦ) varies from 0.44 to 0.53. Hence, the sediments are classified as moderately well sorted, indicating the effect of wind-generated waves on the beach deposits. The graphic kurtosis (K_G) average value is 0.8, suggesting flat-peaked curves (platykurtic curves). The Skewness (Ski) average value is 0.2, indicating positive fine-skewed sediments.

4.2. Mineralogical characterization

Heavy mineral analyses indicate that opaque minerals (26–59%) are dominant in the Bakinguili, Batoke, and Mile 8 beach sands (Fig. 5). Most of the non-opaque suites are enriched in well-preserved augite (up to 42% at Batoke), diopside (up to 12% at Mile 8), and zoisite. Euhedral zircon, brown hornblende, and rare sharp euhedral tourmaline are observed. Anatase, glaucophane, hypersthene, and peridot are also rare. Other species occurring infrequently include actinote, garnet, hornblende, epidote, andalusite, and kyanite. Of the mica group, muscovite is identified as most common. Biotite was occasionally found in the Mile 8 sand samples (Supplementary Table 2). For most stable heavy minerals, the original grain shapes seem to have not been modified during sedimentation processes, since euhedral or prismatic forms are common. The intensity of grinding cannot have been severe. Relatively abundant basic heavy minerals suggest a volcanic source.

The XRD results of the beach sediments studied indicate that the proportions of quartz do not vary noticeably among all beach samples (Supplementary Table 3). Olivine and augite are well represented in all the studied sites, indicating probably a mafic source rock. Hematite, goethite, serpentine, and amphibole are relatively abundant at Bakinguiki and Batoke. The other minerals such as kaolinite, plagioclase, K-feldspar, muscovite, biotite, amphibole, pyroxene, illite, and rutile are found in minor amount (Fig. 6). The distribution of these minerals is irregularly and does not follows any trend. Overall, the XRD results present mineral suites supporting ferromagnesian and mafic parental rocks.

4.3. Major element geochemistry

All the samples from Bakinguili, Batoke, Limbola, Ngueme, and Mile 8 beaches show lower concentrations of SiO_2 (mean = 28.9 ± 1.8 wt%, n = 5; 26.7 ± 6.1 wt%, n = 5; 31.9 ± 6.2 wt%, n = 5; 38.2 ± 1.9 wt%, n = 5; 31.3 ± 6.2 wt%, n = 9, respectively). Large variations are observed in the Al_2O_3, Fe_2O_3 and TiO_2 contents (5.88–17.73 wt%, 12.71–40.55 wt %, 3.15–10.53 wt%, respectively) for all the beaches. Small variations are observed in MnO, K_2O, and Na_2O contents (Supplementary Table 4). Compared with the UCC, the Limbe sediments are lower in SiO_2, Al_2O_3,



Fig. 3. Physical features of Limbe beaches: (a) Bakinguili beach where samples BTU1 and BTU4 were taken, (b) Shoreline near the Batoke beach, (c) Location of Limbola beach where sample BTP13 was taken, and d) site of Mile 8 beach where samples BM8C6 and BM8C12 were taken.

Table 2
Grain size distribution (wt.%) and textural parameters (Folk and Ward, 1957) of the Limbe beach sediments.

Localities	Av Bakinguili (n = 5)	Av Batoke (n = 5)	Av Limbola (n = 5)	Av Ngueme (n = 5)	Av Mile 8 (n = 9)	Av	±1 σ
Medium sand %	23.01	22.25	22.61	22.60	24.89	23.07	1.05
Fine sand %	66.13	70.19	68.95	68.83	68.88	68.59	1.49
Very fine sand %	10.56	7.55	8.43	8.56	6.23	8.27	1.58
Silt/Clay %	0.24	0.01	0.01	0.01	0	0.06	0.11
Sorting (So)	1.21	1.17	1.2	1.2	1.21	1.20	0.02
Skweness (Ski)	0.09	0.22	0.34	0.18	0.15	0.2	0.09
Mz(Φ)	2.33	2.34	2.35	2.39	2.32	2.35	0.03
σ (sΦ)	0.53	0.45	0.44	0.44	0.46	0.46	0.02
Kurtosis (K_G)	0.91	0.71	0.76	0.77	0.85	0.80	0.08
Texture	Fsd	Fsd	Fsd	Fsd	Fsd	–	–

Mz (Φ): Mean grain size in phi scale; σ(sΦ): Standard deviation in phi scale; Av: average; Fsd: Fine sand; clays: **Ø<**2 μm; Silts: 2 μm**<Ø <**63 μm; Very fine sand: 63 μm**<Ø <**125 μm; Fine sand: 125 μm**<Ø <**250 μm; Medium sand: 250 μm**<Ø <**500 μm. From Folk (1980). n = total number of samples.

and higher in TiO_2, Fe_2O_3, CaO, and P_2O_5 (Supplementary Figs. 1a–e), indicating probably that the source rock is not a differentiated upper crust (Taylor and McLennan, 1985). The enrichment of Fe_2O_3 suggests the derivation of sediments from Fe-rich source rocks, such as basalt or nephelinite. The lower K_2O/Na_2O, in all sites, could reflect the enrichment of plagioclase, compared to k-feldspar. This indicates possibly a source rock linked to a less evolved magma (Taylor and McLennan, 1985). The correlation between SiO_2 versus Na_2O and K_2O (r = 0.52 and 0.60, n = 29, respectively; Table 3) indicates the moderate Na and K mobility during weathering and neoformation of clay minerals (e.g., Xie and Chi, 2016).

4.4. Trace element geochemistry

Trace element compositions of Bakinguili, Batoke, Limbola, Ngueme, and Mile 8 beach sediments and their mean concentrations per sector do not show noticeable differences (Supplementary Table 5). The UCC normalized trace element patterns of these sediments are almost comparable (Taylor and McLennan, 1985; Supplementary Fig. 2). All the high field strength elements (HFSE), such as Zr (316–567 ppm), Hf (7.3–11.8 ppm), Ta (6.5–14.6), and Y (21.9–42.9 ppm), are higher than the average UCC value (190 ppm, 5.8 ppm, 1 ppm, and 22 ppm, respectively), indicating that the composition of source rock is not similar to that of the upper continental crust (Taylor and McLennan, 1985). Zr and Hf show significantly positive correlation (r = 0.61, n = 29; Table 3). This correlation indicates that Hf is partly controlled by zircon. The correlation between Zr and Th is statistically significant (r = −0.55, n = 29), while it is not significant for Th versus Al_2O_3 (r = −0.14, n = 29; Table 3), suggesting that the distribution of Th is not monitored by phyllosilicates (Armstrong-Altrin et al., 2015, 2019). The large ion lithophile elements (LILE) such as Ba (138–483 ppm), Rb (2.6–15.3 ppm), and Sr (350–1070 ppm) show wider variations, but, except Sr, their average contents are lower than the UCC (550, 112, and 350, respectively). Low positive correlations are observed between Ba and Sr versus Al_2O_3 (r = 0.59 and r = 0.43, respectively), suggesting that they are not mainly hosted by clay minerals.

The concentrations of transitional trace elements (TTE), such as Co, Ni, Sc, V, and Cr are greater than the UCC. TTE such as Co (r = −0.61), Ni (r = −070) and V (r = −059) show noticeable correlation with Al_2O_3 (Table 3), indicating that these elements are partially associated with phyllosilicates (Armstrong-Altrin et al., 2015).

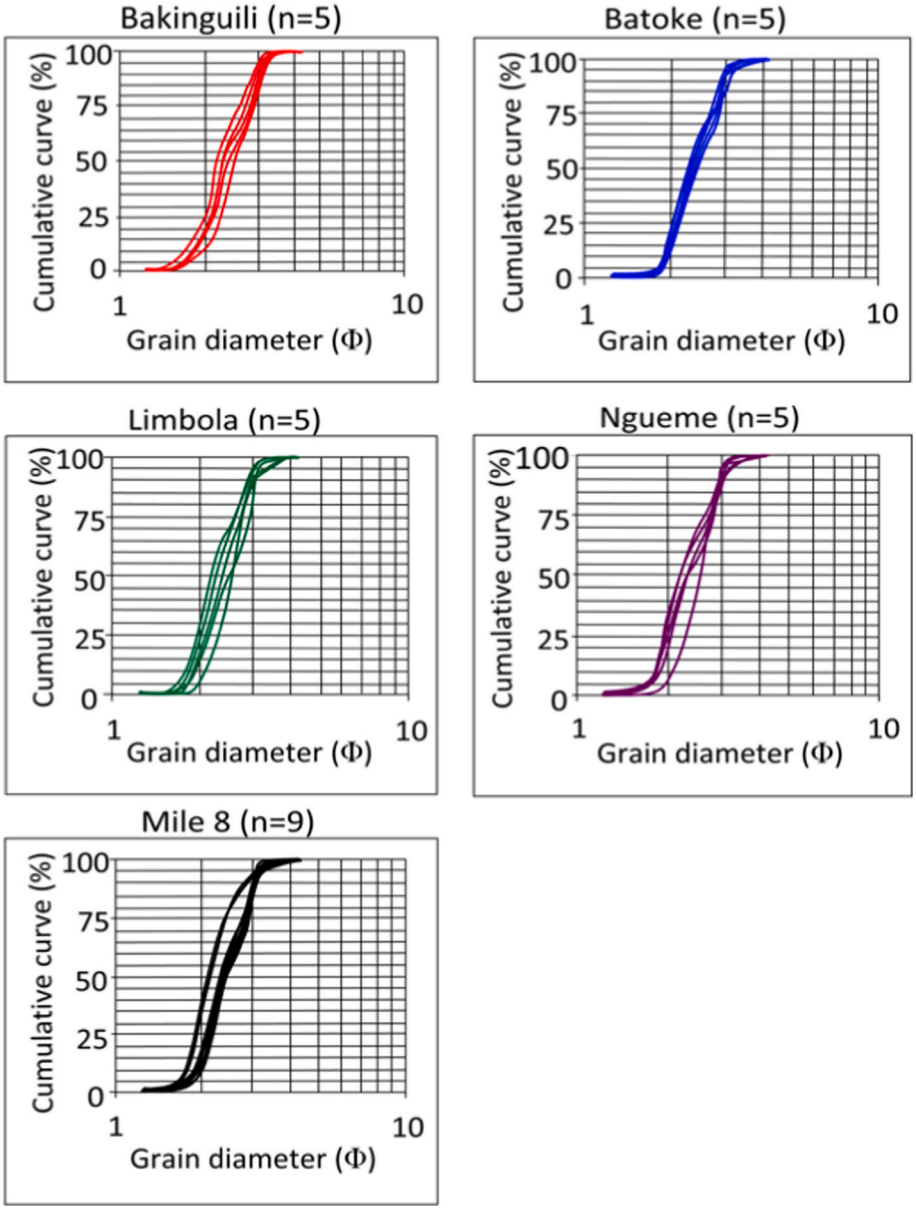


Fig. 4. Cumulative curves of Limbe beach sediments.

4.5. Rare earth elements

The average ∑REE concentrations do not vary widely between Bakinguili (781 ± 37 ppm, n = 5), Batoke (761 ± 75 ppm, n = 5), Limbola (588 ± 46 ppm, n = 5), Ngueme (530 ± 76 ppm, n = 5), and Mile 8 (702 ± 83 ppm, n = 9) beach sectors (Supplementary Table 6). The ∑REE contents are always higher than those UCC (146.37 ppm). UCC and chondrite-normalized REE patterns (Supplementary Figs. 3a–j) are similar for all the samples with slightly enriched light REE (LREE; La, Ce, Pr, Nd, and Sm) relative to heavy REE (HREE; Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, and Lu). On the UCC-normalized REE patterns, slight positive Eu anomalies are observed for all the samples, whereas in the chondrite-normalized REE patterns Eu anomalies are not noticeable (Eu/Eu* = 0.83–1.19; Supplementary Figs. 3a–e), reflecting a mafic source rock provenance (Cullers, 1994). The $(La/Sm)_{cn}$ and $(Gd/Yb)_{cn}$ (4.24–8.17 and 2.35–5.75, respectively) show that LREE are slightly more fractionated than HREE (where the subscript $_{cn}$ refers to chondrite-normalized values).

The correlation ($p = 0.05$; Table 3) between the REE and Al_2O_3 is low and negative at Bakinguili (r = −0.46, n = 5), Batoke (r = −0.38, n = 5), and Mile 8 (r = −049, n = 9), whereas it is low and positive at Limbola (r = 0.35, n = 5) and Ngueme (r = 0.41, n = 5) beach sectors. These low correlation coefficient values indicate that, at all sites, the REEs are mainly reside in heavy minerals (i.e., zircon, monazite, allanite etc.), as documented by McLennan (1989). TiO_2 concentrations show significant correlation with ∑REE at Bakinguili and Mile 8 (r = 0.97, n = 5 and r = 0.61, n = 9, respectively), indicating relative abundance of Ti-bearing minerals (i.e., rutile) at these sites.

5. Discussion

5.1. Controls on texture and sediment maturity

The granulometric features and chemical composition of clastic rocks can help to evaluate the influence of hydraulic sorting and the textural and compositional maturity of sediments (Folk, 1980; Cox et al., 1995; Chougong Tchatchouang et al., 2021; Kontchipe et al., 2021; Sonfack et al., 2021). The Limbe beach sediments have 66.13–70.19% of

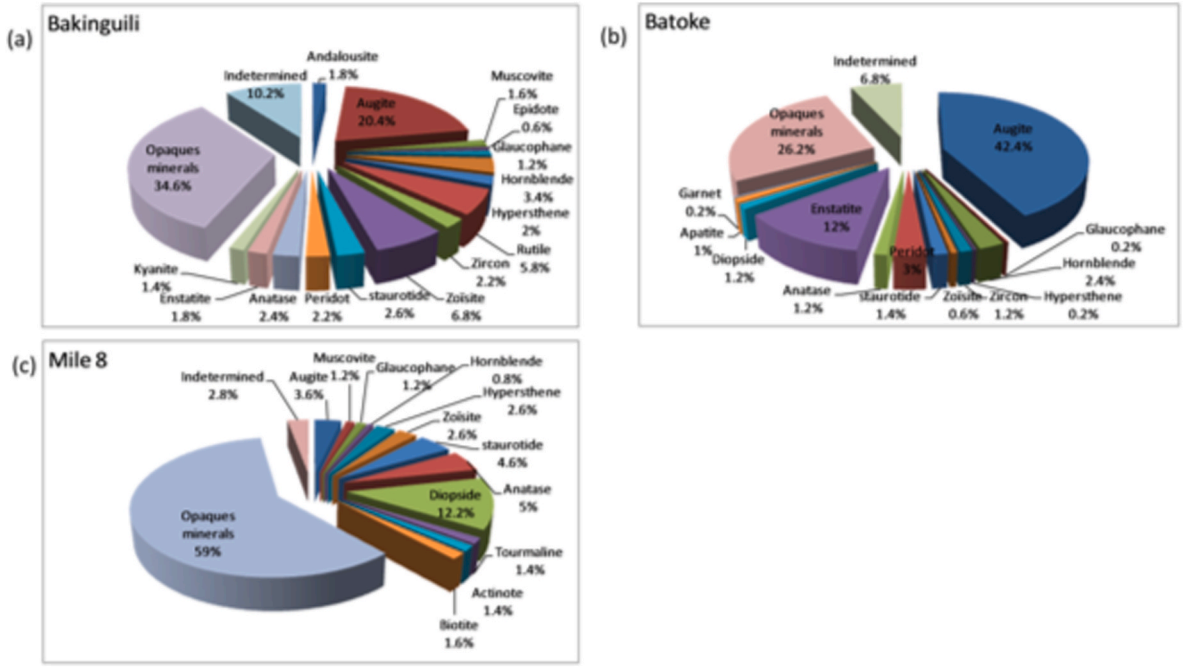


Fig. 5. The Heavy mineral assemblages from selected studied beach sediments illustrated as pie charts: average sample from a) Bakinguili, (b) Batoke, and (c) Mile 8 beaches.

fine-grained sand (ranging between 2 and 3Φ; Folk, 1980). However, the presence of medium-grained (1-2Φ; representing 22.25–24.89%), and very fine-grained sands (3-4Φ; 8.27%) reflects probably a deposit fairly close to the source region. The standard deviation (σ Φ) values vary from 1.71 to 1.79, so the sediments are classified as moderately sorted. Less clay/silt contents observed in all sediment samples suggest that this size particle was taken away, during suspension by river water and transported to the Atlantic sea, by coastal currents or wind-generated waves. Overall, the sediment is texturally immature. This textural immaturity is likely reflected in the chemical and mineralogical compositions of the studied sediments. The compositional maturity of these sediments has been inferred using the ratio values of SiO_2/Al_2O_3. It is well known that the high value of this ratio indicates compositionally matured sediments. According to Roser et al. (1996), basic igneous rocks have SiO_2/Al_2O_3 of 3, while this ratio is about 5 for the acid igneous rocks, thus the values more than 5 in clastic sediments suggest sediment maturity. In this study, the average value of SiO_2/Al_2O_3 indicates a low compositional maturity (Supplementary Table 4).

The low compositional variation of the sediments studied is identifiable on the ternary Al_2O_3– TiO_2–Zr diagram (Garcia et al., 1994) and the binary Th/Sc versus Zr/Sc diagram (McLennan, 1993), since the presence of weathering-resistant phases such as zircon may produce irregular chemical variations. On the Al_2O_3–TiO_2–Zr diagram, samples plotted do not show any mixing trend which could be due the change in Al_2O_3/Zr ratio (Fig. 7a), indicating no Zr enrichment, and thus no recycling effect, as it is generally the case for the first cycle deposits. The lack of Zr enrichment is also documented on the Th/Sc versus Zr/Sc plot, in which the Zr/Sc ratios do not increase more rapidly than the Th/Sc (Fig. 7b), indicating the immaturity of the considered sediments. This immaturity is also documented by the low ZTR index (<10%; Table 3; Hubert, 1962). These results may, overall, indicate that the texture and the chemical composition of all the investigated beach sediments do not vary significantly.

5.2. Source area weathering

The value of Na_2O/Al_2O_3 and K_2O/Al_2O_3 ratios are thought to reflect the removing of Na^+ and K^+ (labile cations) and the concentration Al^{2+} (stable residual constituent) during chemical weathering of source rocks (Fedo et al., 1995). The Na_2O/Al_2O_3 of all the sediment samples are low and below compared to UCC (0.25). Similarly, low values of K_2O/Al_2O_3, compared to UCC, are recorded, indicating removal of Na^+ and K^+ during the weathering processes.

CIA, PIA, CIW, and ICV have been commonly used by many workers around the world (e.g., Kasanzu et al., 2008; Bhuiyan et al., 2011; Perri et al., 2011; Perri, 2014; Mitra et al., 2018; Sun et al., 2012; Madhavaraju, 2015; Ramachandran et al., 2016; Ayala-Pérez et al., 2021; Chougong Tchatchouang et al., 2021, Kontchipe et al., 2021, Sonfack et al., 2021).

For interpretation, it is worth noting that the higher values of CIA (76–100) in clastic rocks suggest intense degree of chemical weathering in the source region (e.g., Gallet et al., 1998; Roddaz et al., 2006; Kontchipe et al., 2021, Sonfack et al., 2021), whereas low values, i.e., <50, indicate the near absence of chemical weathering (Fedo et al., 1995). The CIA values of the beach sediments are indicating moderate to high intensity of chemical weathering in the source region. The CIA values of the studied sediments and the average UCC value are plotted in the ternary Al_2O_3-(CaO + Na_2O)–K_2O (A–CN–K) diagram (Nesbitt and Young, 1984; Fedo et al., 1995, Fig. 8a), which is based on the molecular proportions of Al_2O_3, CaO, Na_2O, and K_2O. This diagram is used to appreciate the variation in compositional change which could be attributed, either to the chemical weathering or to source rock composition. In theory, the early stages of weathering are marked by depletion in CaO, Na_2O, and K_2O along a straight line sub-parallel to the (CaO + Na_2O)–Al_2O_3 join. The advance or late stage of weathering is characterized the depletion in K_2O as the composition of the leached rocks approaches that of kaolinite and/or gibbsite (Nesbitt and Young, 1984). On the A–CN–K diagram, all the sediment samples studied are plotted along a line (weathering trend) parallel and close to the A-CN axis (Fig. 8a), and above the plagioclase join, toward the A apex. Samples plotting close to this apex indicate high chemical weathering. This result is consistent with the findings of experimental studies of feldspar leaching by CO_2-charged water, revealing that Na, K, and Ca extracted from feldspars obey a linear rate law (Nesbitt and Young, 1984). On the other hand, the fact that all the group of samples plot along the same weathering trend suggest their derivation from a common source, i.e.,

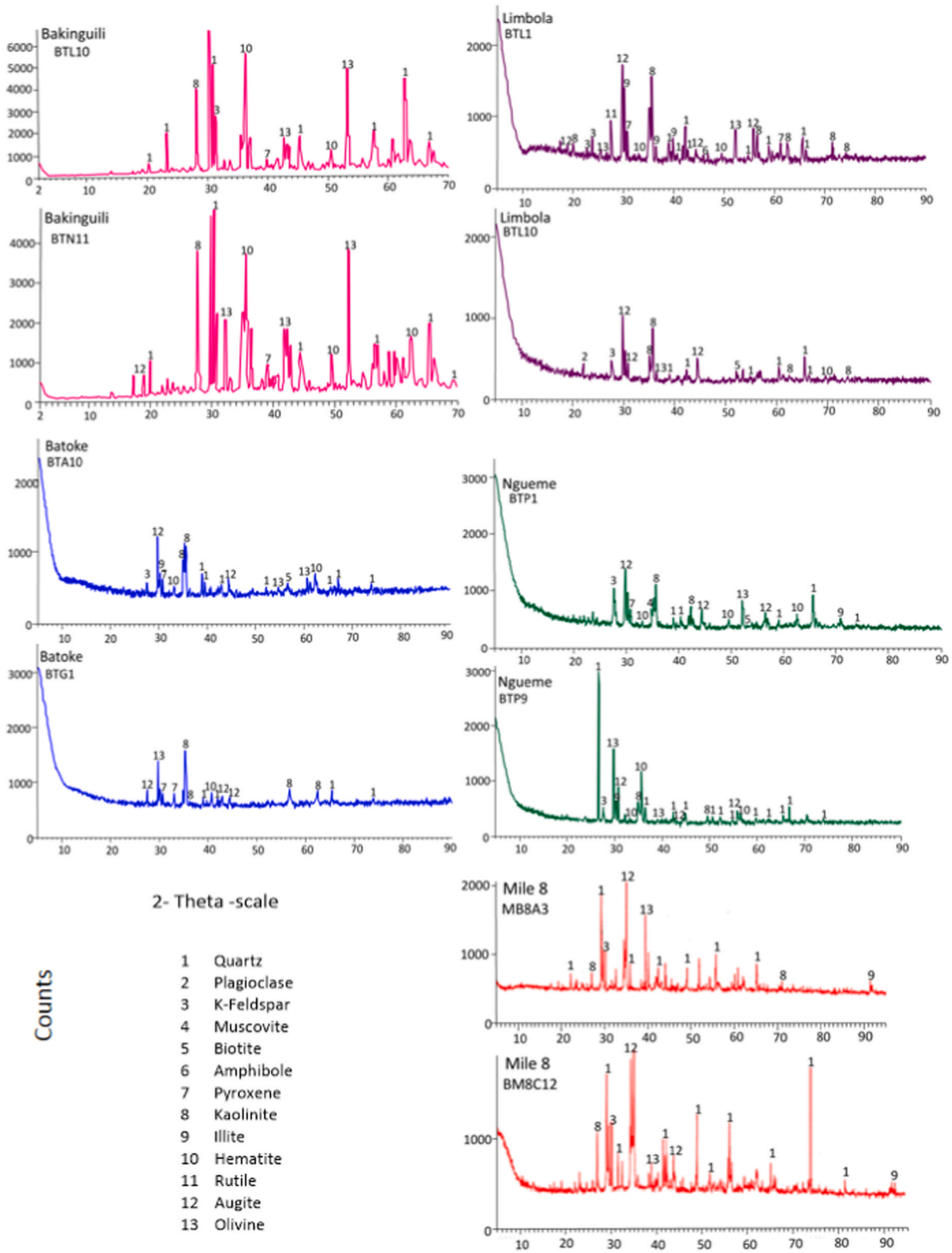


Fig. 6. X-ray diffraction spectra of the Limbe beach sediments.

the basalt. This is coherent with the geology of the nearby area. The PIA and CIW show similar trend as CIA, regarding chemical weathering. According to Fedo et al. (1995), the high PIA, as it is often the case in the current study, indicate that most of the plagioclases has been converted to clay minerals. In contrast, the relative low PIA values are probably linked to the abundant remnants of this mineral in the sediments, as revealed by the XRD analysis. The differentiated weathering features can be seen in the (Al_2O_3–K_2O)–CaO–Na_2O ((A-K)-C-N) ternary diagram (Fig. 8b; Nesbitt and Young, 1984; Fedo et al., 1995). On the (A-K)-C-N ternary plot, the samples display a linear trend towards the A-K apex, indicating a degree of chemical weathering varying from moderate to high, with enrichment in Al_2O_3 at the expense of both CaO and Na_2O. This diagram further ascertains the low or null diagenetic effect, such as k-metasomatism, on the beach sediments studied. The CIW near 50

Table 3
Correlation matrix of geochemical data from the Limbe beach sediments. Pearson's correlation coefficients calculated using the XLSTAT software (level of statistical significance: $p < 0.05$). Significant values are in bold.

Ref code	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	Zr	Hf	Th	Sr	Ba	Co	Ni	V	ΣREE
SiO_2	1													
Al_2O_3	0.48	1												
Na_2O_3	**0.52**	**0.79**	1											
K_2O	**0.60**	**0.74**	**0.73**	1										
TiO_2	−0.42	**−0.53**	**−0.72**	**−0.59**	1									
Zr	0.33	0.33	0.39	0.31	−0.45	1								
Hf	**0.56**	0.17	0.25	0.09	−0.42	**0.61**	1							
Th	−0.44	−0.14	−0.22	−0.12	0.27	**−0.55**	**−0.65**	1						
Sr	0.46	0.43	0.40	0.38	−0.24	0.32	0.49	−0.42	1					
Ba	0.33	**0.59**	**0.52**	**0.57**	−0.49	0.47	0.42	−0.36	**0.70**	1				
Co	**−0.55**	**−0.61**	**−0.67**	−0.49	**0.55**	**−0.53**	**−0.55**	0.46	**−0.50**	**−0.54**	1			
Ni	−0.44	**−0.70**	**0.64**	**−0.64**	0.45	**0.64**	−0.43	0.29	**−0.59**	**−0.78**	**0.67**	1		
V	**−0.53**	**−0.59**	−0.44	−0.37	0.37	−0.48	**−0.52**	**0.54**	**−0.62**	**−0.51**	**0.77**	**0.58**	1	
ΣREE	**−0.58**	**−0.53**	**−0.65**	**−0.54**	**0.69**	−0.41	−0.41	**0.57**	−0.38	−0.38	**0.71**	0.48	**0.66**	1

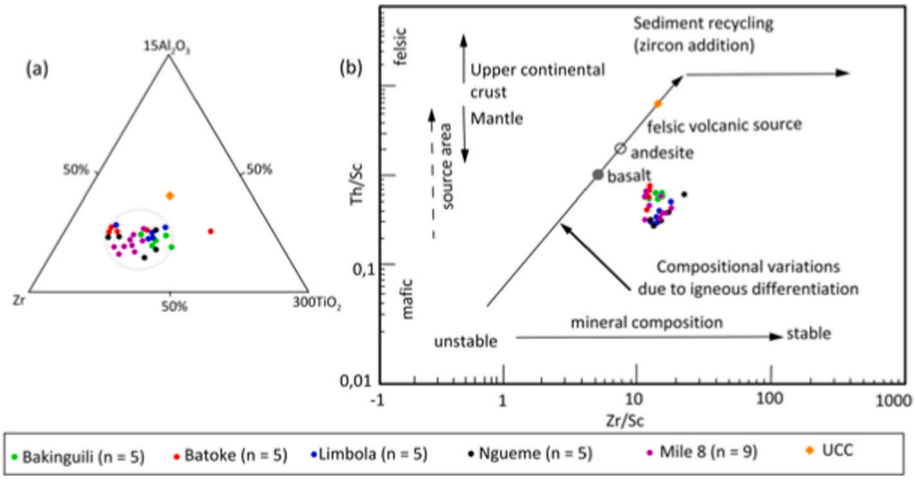


Fig. 7. (a) Ternary plot of Al_2O_3–TiO_2–Zr (after Garcia et al., 1994) and (b) Th/Sc versus Zr/Sc bivariate plot (after McLennan et al., 1993) for the Limbe beach sediments, showing no recycling effect.

suggest no weathering, the values varying between 60 and 80 are indicative of moderate weathering, and the values more than 80 are suggestive of high intensity of weathering. The calculated CIW for the studied samples indicate moderate to high intensity of weathering. The ICV represents the non-quartz component of the sand. The values of this index >0.84 indicate abundant relatively unweathered detrital minerals or rock forming minerals such as k-feldspars, plagioclases, amphiboles, and pyroxenes. ICV values < 084 suggest intense weathered detrital minerals (Cox et al., 1995; Cullers, 2000), and even recycled products (e.g., Madhavaraju et al., 2016b). This reasoning is based on the fact that the conversion of primary minerals to Al-bearing clay lead to decrease the value of ICV, making this index useful to infer both variation in source rock composition and difference in weathering processes, as documented by Cox et al. (1995). The ICV of the Limbe beach sediments are all greatly more than 0.84 (Supplementary Table 4). This result suggests that all the sediments are of first-cycle deposits. It also implies that the depositional environments are too close to the source area to enable the complete weathering of rock forming minerals during transport processes.

5.3. Provenance

According to Taylor and McLennan (1985), the Al_2O_3 and TiO_2 oxides are enriched during weathering in the soil profile and remain immobile during transportation and diagenesis. As a result of this characteristic, these elements are thought to reflect provenance composition (e.g., Spalletti et al., 2012; Zaid, 2012; Odoma et al., 2015; Madhavaraju et al., 2016a). The values of Al_2O_3/TiO_2 ratios <8 indicate mafic source terrain. Values varying between 8 and 21 suggest intermediate igneous rock, whereas values between 21 and 70 are indicative of felsic igneous rocks. The average Al_2O_3/TiO_2 ratios of Limbe beach sand samples are all constantly less than 8, indicating mafic igneous source rocks for the beach sediments (Supplementary Table 4). This result is illustrated on the binary diagram of Al_2O_3 versus TiO_2, where all the samples are plotted in the field of basalt (Fig. 9a).

Grossly similar result is obtained on the plot of Zr versus TiO_2, where all the samples plotted in the field of intermediate and mafic rocks (Hayashi et al., 1997, Fig. 9b). The K_2O/Na_2O ratio has been used as a simplified chemical indicator of source rocks (Potter, 1978; Ngueutchoua et al., 2019). Low values of this ratio reflect derivation from basic rocks rather than for granite or felsic igneous rocks. The low K_2O/Na_2O ratio value in all the beach sediment samples indicates that the source region was marked by less evolved plagioclase rich rocks, i.e., basalts or mafic rocks. These inferred basic rocks are consistent with mineralogy and petrographic observations, showing predominance of mafic minerals (i.e., augite, pyroxene, olivine) and low ZRT index (mostly <10; Supplementary Table 2; Garzanti and Ando, 2007).

The Th/Sc and Th/U ratios are thought to give reliable clue regarding the source rock characteristics (McLennan and Hemming, 1992, 1994; Cullers, 2000). The Th/Sc ratios vary from 0.84 to 20.5 in felsic igneous rock and from 0.05 to 0.22 in mafic igneous rocks (Cullers, 1994, 2000; Cullers and Podkovyrov, 2000; Armstrong-Altrin et al.,

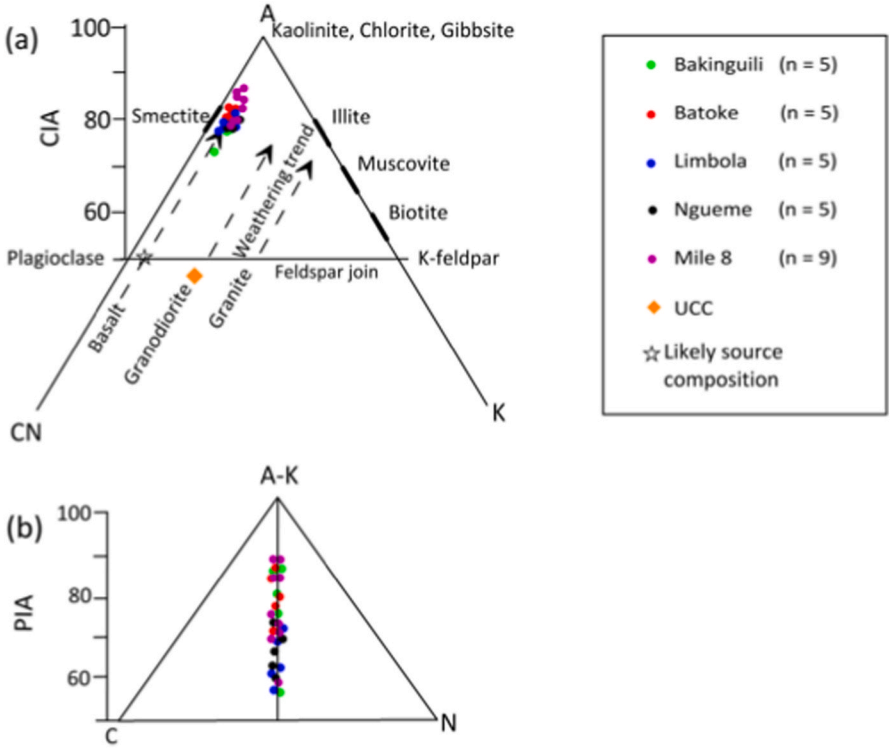


Fig. 8. (a) Ternary plot of A (Al_2O_3)–CN (CaO* + Na_2O)–K (K_2O) and (b) ternary plot of (A–K) (Al_2O_3–K_2O)–C(CaO*)–N(Na_2O) (Nesbitt and Young, 1984; Cox et al., 1995) to infer the intensity of weathering for the Limbe beach sediments.

2017). The Th/Sc ratios of this study vary from 0.30 to 0.78, which is lower than the upper crustal and average shale value of 1.0 (Taylor and McLennan, 1985). These low values are suggestive of less differentiated sources, indicating overall, a mafic source rock. The thorium-uranium elemental systematics of the beach sediments studied are complex. Bakinguili, Batoke, and Mile 8 samples have high values of Th/U, compared to UCC (Supplementary Table 5). Whereas, Limbola and Ngueme show values similar to the upper crustal value of 3.8. This result is probably related to sedimentological processes leading to the removing of U during the chemical weathering (Taylor and McLennan, 1985). It is worth noting that there is a trend of Th/U versus Th abundances (Fig. 9c) that essentially intersects the field of low Th/U and Th, and possibly, corresponding to the depleted mantle source area. This indicates that the source area may have composition similar to that of a depleted mantle. The result obtained is consistent with the geology of the nearby volcanic region (Mt Etinde and Mt Cameroon), which is likely the source domain of the studied sediments.

La and Th are immobile elements that are more abundant in felsic than in basic rocks, whereas Sc and Co are ferromagnesian trace elements whose high concentrations are characteristic of mafic rocks. Therefore, the values of La/Sc and Th/Co ratios allow a distinction between felsic and mafic igneous rocks. The La/Sc and Th/Co ratios vary from 2.50 to 16.3, and 0.67 to19.4, respectively in felsic rocks and from 0.43 to 0.86, and 0.04 to 1.4, respectively in mafic rocks (Cullers, 1994, 2000; Cullers and Podkovyrov, 2000). The average La/Sc ratios are slightly high, but close to the UCC, while all Th/Co are lower than the UCC (0.63; Taylor and McLennan, 1985; Supplementary Table 6). These relative low values indicate, overall, a mafic source rock, as illustrated by the bivariate La/Sc versus Th/Co plot (Cullers, 2002, Fig. 9d). Similar result, inferring mafic source rocks, is obtained by plotting the sediment samples on the triangular diagram of V–Ni–Th*10 (e.g., Bracciali et al., 2007, Fig. 9e). The $(Ce)_{cn}$ versus $(La/Yb)_{cn}$ plot (after Rao et al., 2011, Fig. 9f), the Hf versus La/Th plot (Floyd and Leveridge, 1987, Fig. 9g), and the discriminant function plot (Roser and Korsch, 1988, Fig. 9h) also indicate a mafic source rock for the beach sediments.

The REE are thought to represent reliable provenance indicators, since they are considered to be transferred unfractionated into the sediments (Taylor and McLennan, 1985). Therefore, they reflect the average REE composition of the parental rocks (McLennan, 1989). Felsic source rocks are characterized by higher LREE/HREE and negative Eu anomaly, while mafic source rocks exhibit lower LREE/HREE and little Eu anomaly or no Eu/Eu* (Cullers, 1994). According to El-Bialy (2013), rocks derived from upper crust always show high $(La/Yb)_{cn}$ ratios and LREE enrichment, whereas mafic rocks have low REE differentiation and no Eu to positive Eu anomalies. The HREE are relatively flat and values of $(La/Sm)_{cn}$ ratio fall within the range of mafic rocks (Supplementary Table 6; McLennan, 1989). The low negative to positive Eu-anomaly (Eu/Eu* varying between 0.83 and 1.28) indicates that intracrustal differentiation, involving separation of plagioclase, had not affected the provenance rocks. On the other hand, Low Eu anomalies are characteristic of juvenile (post Archean) crustal material, from local sources. This interpretation is coherent with the age of volcanic material from the Mt Cameroon and Mt Etinde located near studied beach areas, which is thought to be of Tertiary age. This material has been only slightly decomposed, having undergone little transport until final deposition (e.g., Condie et al., 1970; Gao and Wedepohl, 1995). To sum up, although absolute contents in REE are variable, the chondrite and UCC-normalized patterns are similar for the different samples, having practically low $(La/Sm)_{cn}$ and $(Gd/Yb)_{cn}$ ratios and little or no Eu anomaly, typical for clastic sediments derived from mafic igneous rocks.

The REE data of the Limbe beach sediments are compared with those of nearby volcanic rocks and various plutonic and sedimentary rocks outcropping along the coastal and interior part of Limbe locality, near the Mt Cameroun and Mt Etinde or close to the study area to infer the source rocks (Fig. 10a–c). The stream sediments, which may have contributed, to a certain extent, to the beach sediments by longshore currents in the Guinea Gulf, are also used for comparison. These longshore currents between the Bioko Island and the beaches near the Mt Cameroun are documented by Morin and Kuété (1988) and Ngueutchoua and Giresse (2010). The above-mentioned rocks include Tertiary

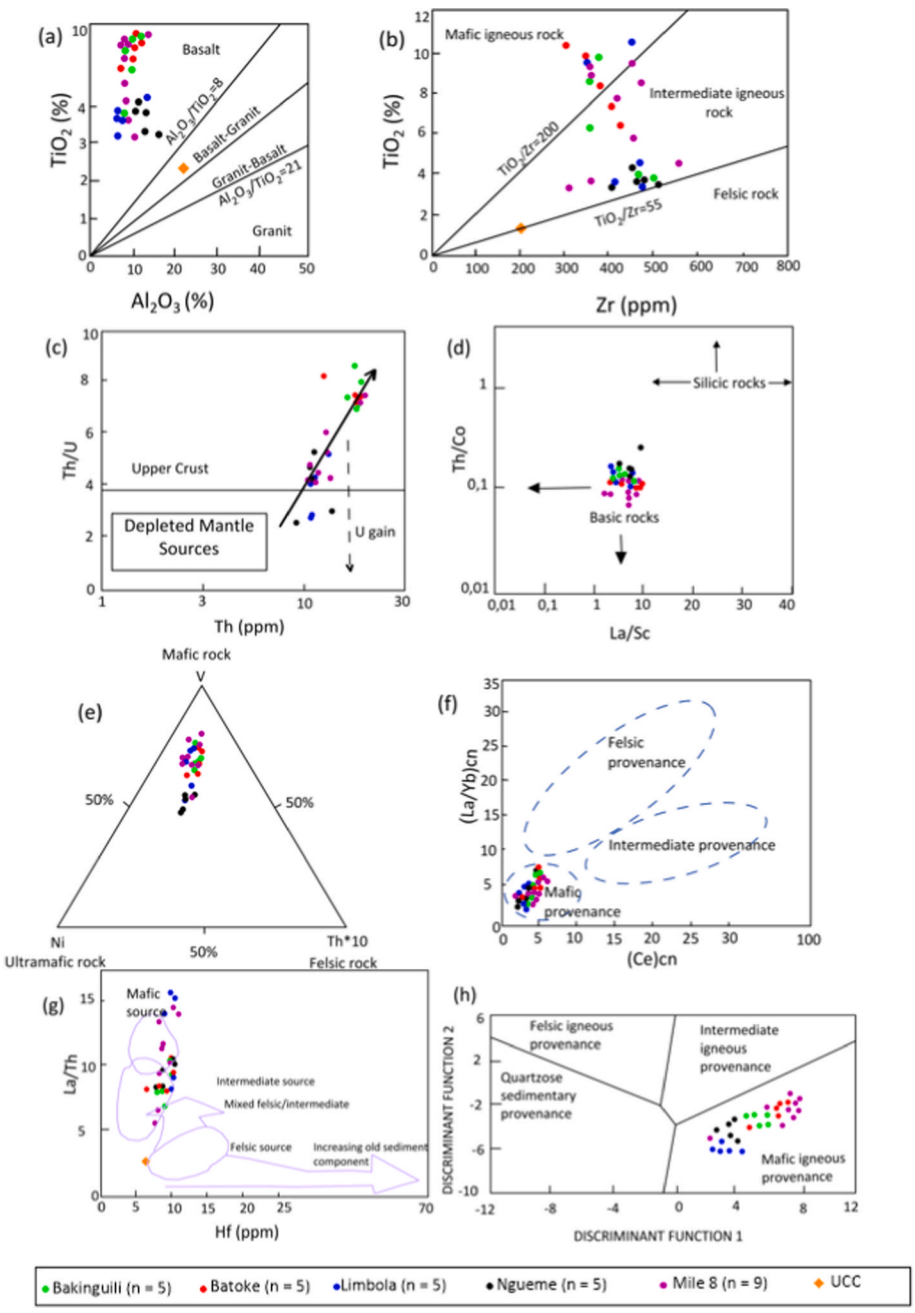


Fig. 9. Bivariate and ternary plots of the Limbe beach sediments, inferring possible source rocks: (a) Al_2O_3 versus TiO_2 (after Vosoughi Moradi et al., 2016) (b) Zr vs.TiO_2 (after Hayashi et al., 1997), (c) Th/U versus Th (after McLennan et al., 1993), (d) Th/Co vs. La/Sc (after Cullers, 2002), (e) V–Ni–Th*10 (after Bracciali et al., 2007), (f) (Ce)cn versus (La/Yb)cn (after Rao et al., 2011), (g) La/Th vs. Hf (after Floyd and Leveridge, 1987), and (h) Discriminant function plot of Roser and Korsch (1988). The discriminant functions are: Discriminant Function 1 = $(-1.773*TiO_2) + (0.607*Al_2O_3) + (0.760*Fe_2O_3) + (-1.500*MgO) + (0.616*CaO) + (0.509*Na_2O) + (-1.224*K_2O) + (-9.090)$; Discriminant Function 2 = $(0.445*TiO_2) + (0.070*Al_2O_3) + (0.250*Fe_2O_3) + (-1.142*MgO) + (0.438*CaO) + (1.475*Na_2O) + (-1.426*K_2O) + (-6.861)$.

volcanic rocks (basalt and trachyte), sandy stream sediments, coarse-grained granite (CGG), fine-grained granite (FGG), mafic to felsic rock (MFR), biotite-rich granite, porphyritic granite, two mica granite (Tagne-Kamga, 2003; Mosoh Bambi et al., 2013; Ngueutchoua et al., 2019; Wenjeh Wembenyui et al., 2020; Nanga Bineli et al., 2021; Sonfack et al., 2021).

The REE patterns and Eu anomalies of Limbe beach sediments are similar to the Tertiary volcanic rocks (i.e., basalt), which suggests that these sediments were derived from the Mt Cameroun and Mt Etinde complex, without the contribution neither of the nearby Pan-African granitoid nor by the Cretaceous sedimentary succession of the Douala sub-basin. In addition, the result obtained is useful to characterize the longshore sediment transport between the southern part of the Cameroon beach, near the Sanaga River and Douala bay, and the Limbe beach. Ngueutchoua and Giresse (2010) documented that the Cameroon continental shelf off the Limbe beach is the specific zone of accumulation of sediments deposited from suspension and delivered from the mouth of Sanaga River during flood events. This finding implies a longshore current oriented N to NW from the Sanaga River mouth to the Limbe beach. This longshore current is further supported off the Sanaga River mouth by a plume with high concentrations of suspended matter extending out from the mouth trending to join western and northern zone of the shelf off Cameroon (Ngueutchoua and Giresse, 2010). The Sanaga is the main river, and probably the main clastic sediment contributor, along the Cameroonian coast and its continental shelf, with an annual discharge of 65.3×10^9 m^3 yr^{-1} and a large basin covering about 135,000 km^2 (Nouvelot, 1972; Olivry, 1977). However, the compositional differences between the mafic Limbe beach sediments, according to the result obtained in this study, and the relative felsic stream sediments from the Sanaga River sediments (Nanga Bineli et al., 2021) suggest that longshore currents are not significant in the mixing and homogenization of sands, or do not influence the Limbe

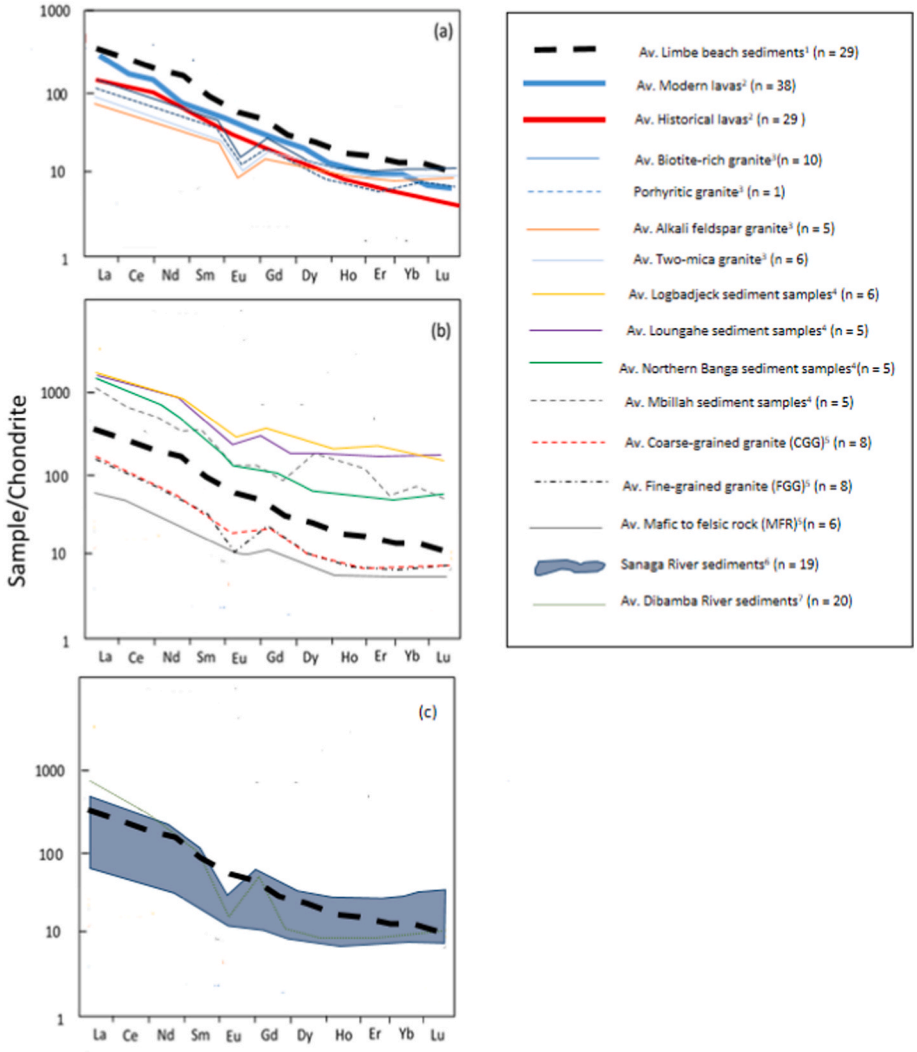


Fig. 10. Chondrite normalized REE pattern (McDonough and Sun, 1995) of the probable source rocks of the Limbe beach sediments. REE data are from [1] this study, [2]Wenjeh Wembenyui et al. (2020), [3] Mosoh Bambi et al. (2013), [4] Ngueutchoua et al. (2019), [5]Tagne-Kamga (2003), [6]Nanga Bracciali et al. (2007), and [7]Sonfack et al. (2021). Av. = average. Refer to Fig. 1 for location of the source area.

beach. This interpretation and the fact that no major river drains near the studied beaches imply that the sand sedimentation is mainly due to seasonal streams that run dry in dry season. These streams are found in deeply incised V-shape valley observed on the flanks of Mt Etinde and Mt Cameroon (Etame et al., 2009).

Similar provenance studies have been conducted on beach sediments from Gulf of California (Madhavaraju et al., 2016b) and Gulf of Mexico (Armstrong-Altrin et al., 2012). The results obtained is compared to those of the current study. In the Gulf of California, volcanic rocks (andesite and rhyolite of Paleocene age) and plutonic rocks (Permo--Triassic granitoids, Mesozoic granite and granodiorite) are exposed along the coastal and interior parts of the Sonora locality. On the Sonora beach, the site of Puerto Peñasco receive sediment mainly from the Permo-Triassic granitoids, while the sites of Desemboque and Bahia Kino are dominated by detritus derived from Mesozoic granite and granodiorite. Major rivers such as Sonyota and Sonora rivers contribute to the sedimentation into the Puerto Peñasco and Bahia Kino, respectively. Also, the longshore current that flow nearby to the said beaches generate sediment transport.

In the Gulf of Mexico, the chemistry of sands from several beaches (e.g., Playa Azul, Tecolutla, and Nautla) is linked to the petrography of the source region. The volcanic rocks (basalt and basaltic andesine) from the eastern Mexican Volcanic Belt (MVB) contribute to the sedimentation of Nautla beach. The enrichment of volcanic lithic fragment in the Nautla beach sands is interpreted to be due to the resistant nature of volcanic lithic fragment to abrasion and the short transport distance from source rocks to the beach (Armstrong-Altrin et al., 2012). The Playa Azul and Tecolutla sands were derived from Eastern Alkaline Province, consisting of basalt, basalt andesine, andesine, and dacite. Major rivers like Cazones, Tecolutla, and Nautla rivers feed sediments to the Gulf of Mexico beaches. The role of longshore currents is not significant in these beaches.

In the Gulf of Guinea, the Limbe beach sands derived solely from the lavas of Mounts Cameroon and Etinde, which are mafic volcanic rocks containing lesser amount of silica (nephelinites, nephelinites to hauyne melilites) and many ferromagnesian minerals (amphibole, pyroxene, and olivine). They are immature, compared to those from the Gulfs of California and Mexico (Armstrong-Altrin et al., 2012; Madhavaraju et al., 2016b). The compositional immaturity of the Limbe beach sands is due mainly to the petrography of their parental rocks, but also, to a certain extent, to the fact that the beach is proximal to the source domain and it is not drained by any important fluvial system. Furthermore, sediment transport also vary due to seasonal streams. These streams drain the slope of Mounts Cameroon and Etinde through valley almost perpendicular to the coast, in a direction similar to that of CVL (Fig. 1). So, the sediment did not experience long fluvial transport

processes which could have enable the complete weathering of unstable minerals.

To sum up, the compositional differences of beach sands from Gulfs of California, Mexico and Guinea allow to infer mafic, intermediate, and felsic source rocks for Gulfs of California and Mexico beach sands, and mafic source rocks for the Gulf of Guinea beach sands. These inference are coherent with the petrography the various parental rocks. This implies that the nature of the source rock is the important factor in controlling the geochemical composition of beach sands. However, the role of fluvial system and the distance from source to sink may be somehow significant. The longshore currents control the sedimentation at the Gulf of California beaches, while they play a less significant role at both the Gulfs of Mexico and Guinea beaches.

6. Conclusion

Based on the mineralogy and geochemistry of beach sands close to volcanic rocks from the CVL, northern Gulf of Guinea, the following conclusions are reached.

1. The values of SiO_2/Al_2O_3 ratios, ICV, ZTR index, and the DRX results reveal that almost all the sediment samples are compositionally immature. Elemental proxies, the Th/Sc versus Zr/Sc plot, and Al_2O_3– TiO_2–Zr diagram further suggest a first cycle detritus without any contribution of recycled materials.
2. The Limbe beach sediments have undergone moderate to intense weathering, as indicated by CIA, PIA, and the A–CN–K and (A-K)-C-N ternary diagrams. The weathering of rock forming minerals was not completed during transport processes, probably due to the fact that the depositional environments were enough close to the source rocks.
3. The beach sediments appear to have been derived almost exclusively from mafic igneous rocks, corresponding to the continental southernmost extension of the Tertiary CVL. This result further suggests that the granitic, metamorphic and sedimentary rocks close to the CVL do not contribute to the sedimentation of the studied beach. In addition, the longshore currents, documented in the Guinea Gulf, do not modify the chemical composition of the beach sediments.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

This article is a part of the first author's on-going doctoral research. We thank the Bureau Veritas Mineral Laboratories Ltd. (Canada) for the XRF and ICP-MS analyses and the University of Liege (Belgium) for XRD. We also express our gratitude to the anonymous reviewers for their comment and suggestion on the manuscript.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104473.

References

Armstrong-Altrin, J.S., 2009. Provenance of sands from Cazones, acapulco, and bahía Kino beaches, mexíco. Rev. Mex. Ciencias Geol. 26 (3), 764–782.
Armstrong-Altrin, J.S., 2020. Detrital zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Riachuelos and Palma Sola beach sediments, Veracruz State, Gulf of Mexico: a new insight on palaeoenvironment. J. Palaeogeogr. 9 (4), 28.
Armstrong-Altrin, J.S., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J., Carranza-Edwards, A., Garcia, D., Eby, N., Balaram, V., Cruz-Ortiz, N.L., 2012. Geochemistry of Beach Sands along the Western Gulf of Mexico, 72. Implication for provenance, Mexico, pp. 345–362. Chemie der Erde.
Armstrong-Altrin, J.S., Natalhy-Pineda, O., 2014. Microtextures of detrital sand grains from the Tecolutla, Nautla, and Veracruz beaches, western Gulf of Mexico, Mexico: implications for depositional environment and palaeoclimate. Arabian J. Geosci. 7, 4321–4333.
Armstrong-Altrin, J.S., Nagarajan, R., Balaram, V., Natalhy-Pineda, O., 2015. Petrography and Geochemistry of Sands from the Chachalacas and Veracruz Beach Areas, Western Gulf of Mexico, 64. constraints on provenance and tectonic setting, Mexico, pp. 199–216. Journal of South American Earth Sciences.
Armstrong-Altrin, J.S., Machain-Castillo, M.L., 2016. Mineralogy, geochemistry, and radiocarbon ages of deep sea sediments from the Gulf of Mexico, Mexico. J. S. Am. Earth Sci. 71, 182–200.
Armstrong-Altrin, J.S., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J., 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, J.S., Alfonso, V., Botello, A.V., Villanueva, S.F., Soto, L.A., 2019. Geochemistry of surface sediments from the northwestern Gulf of Mexico: implications for provenance and heavy metal contamination. Geol. Q. 63 (3), 522–538.
Armstrong-Altrin, J.S., Madhavaraju, J., Vega-Bautista, F., Ramos-Vázquez, M.A., Pérez-Alvarado, B.Y., Kasper-Zubillaga, J.J., Ekoa Bessa, A.Z., 2021. Mineralogy and geochemistry of Tecolutla and coatzacoalcos beach sediments, SW Gulf of Mexico. Appl. Geochem. 134, 105103.
Ayala-Pérez, M.P., Armstrong-Altrin, J.S., Machain-Castillo, M.L., 2021. Heavy metal contamination and provenance of sediments recovered at the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico. J. Earth Syst. Sci. 130, 88.
Bassanak Ongboye, P.R., Sababa, E., Ndong Bidzang, F., Ndjigui, P.-D., 2019. Geochemical characterization of surface sediments from Tongo Gandima (Eastern Cameroon): implications for gold exploration. Arabian J. Geosci. https://doi.org/10.1007/s1257-019-4812-3.
Bhuiyan, M.A.H., Rahman, J.J., Dampare, S.B., Suzuki, S., 2011. Provenance, tectonics and source weathering of modern fluvial sediments of the Brahmaputra-Jamuna River, Bangladesh: inference from geochemistry. Geochemical Exploration 111, 113–137.
Bokanda, E.E., Fralick, P., Ekomane, E., Njilah, I.K., Bisse, S.B., Akono, D.F., Ekoa Bessa, A.Z., 2019. Geochemical characteristics of shales in the Mamfe Basin, South West Cameroon: implication for depositional environment and oxidation conditions. J. Afr. Earth Sci. 149, 131–142.
Bracciali, L., Marroni, M., Pandolfi, L., Rocchi, S., 2007. Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): from source area to configuration of margins. Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 420, 73–93.
Carranza-Edwards, A., Centeno-García, E., Rosales-Hoz, L., Cruz, R.L.-S., 2001. Provenance of beach gray sands from western México. Journal of American Earth Sciences 14 (3), 291–305.
Chougong Tchatchouang, D., Ekoa Bessa, A.Z., Ngueutchoua, G., Yongue Fouateu, R., Ntyam, S.C., Armstrong-Altrin, J.S., 2021. Mineralogy and geochemistry of Lobé River sediments, SW Cameroon: implications for provenance and weathering. J. Afr. Earth Sci. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104320.
Condie, K.C., Mackie, J.E., Reimer, T.O., 1970. Petrology and geochemistry of early precambrian greywackes from the fig tree group, South Africa. Geol. Soc. Am. Bull. 81, 2759–2776.
Cox, R., Low, D.R., Culler, R.L., 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. Geochimimica et Cosmochimica Acta 59, 219–2940.
Cullers, R.L., 1994. The chemical signature of source rocks in size fractions of Holocene stream sediment derived from metamorphic rocks in the Wet Mountains region, Colorado, USA. Chem. Geol. 113, 327–343.
Cullers, R.L., 2000. The geochemistry of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: implications for provenance and metamorphic studies. Lithos 51, 181–203.
Cullers, R.L., Podkovyrov, V.N., 2000. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: implications for mineralogical and provenance control, and recycling. Precambrian Res. 104, 1–2, 77-93.
Cullers, R.L., 2002. Implications of elemental of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. Chem. Geol. 191, 305–327.
Dumort, J.C., 1968. Geological map of Cameroon at scale 1/500 000, west Douala sheet + explanatory note. Mines and Geology Branch 23.
Ekoa Bessa, A.Z., Ngueutchoua, G., Kwewouo Janpou, A., El-Amier, Y.A., Njike Njome, M.N.O.-A., Kankeu Kayou, U.R., Bisse, S.B., Ngo Mapuna, E.C., Armstrong-Altrin, J.S., 2020. Heavy metal contamination and its ecological risks in the beach sediments along the Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes, Cameroon). Earth Systems and Environment 1–12.
Ekoa Bessa, A.Z., Ngueutchoua, G., Ndjigui, P.-D., 2018. Mineralogy and geochemistry of sediments from Simbock Lake, Yaounde area (southern Cameroon): provenance and environmental implications. Arabian J. Geosci. 11 (22), 710. https://doi.org/10.1007/s12517-018-4061-x.
El-Bialy, M.Z., 2013. Geochemistry of the Neoproterozoic metasediments of Malhaq and Um Zariq Formations, Kid metamorphic complex, Sinai, Egypt: implications for source-area weathering, provenance, recycling, and depositional tectonic setting. Lithos 175, 68–85.
Etame, J., Gerard, M., Bilong, P., Suh, C.E., 2009. Behaviour of elements in soils developed from nephelinites at Mount Etinde (Cameroon): impact of hydrothermal versus weathering processes. J. Afr. Earth Sci. 54, 37–47.

Fedo, C.M., Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1995. Unravelling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. Geology 23, 921–924.
Fitton, J.G., Dunlop, H.M., 1985. The Cameroon Line, West Africa, and its bearing on the origin of oceanic and continental alkali basalt. Earth Planet Sci. Lett. 72, 23–38.
Floyd, P.A., Leveridge, B.E., 1987. Tectonic environments of the Devonian Gramscatho Basin. South Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbidite sandstones. Journal of Geological Society of London 144, 531–542.
Folk, R.L., 1966. A review of grain-size parameters. Sedimentology 6 (2), 73–93. https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1966.tb01572.x.
Folk, R.L., 1980. Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing. Texas, Austin.
Folk, R.L., Ward, W.C., 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. J. Sediment. Petrol. 27, 3–26.
Gallet, S., Jahn, B., Van Vlierlanoe, B., Dia, A., Rosslio, E., 1998. Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust. Earth Planet Sci. Lett. 156, 157–172.
Gao, S., Wedepohl, K.H., 1995. The negative Eu anomaly in Archean sedimentary rocks: implications for decomposition, age and importance of their granitic sources. Earth Planet Sci. Lett. 133, 81–94.
Garcia, D., Fonteilles, M., Moutte, J., 1994. Sedimentary fractionations between Al, Ti, and Zr, and the genesis of strongly peraluminous granites. J. Geol. 102, 411–422.
Garzanti, E., Ando, S., 2007. Heavy mineral concentration in modern sands: implications for provenance interpretation. Dev. Sedimentol. 58, 517–545.
Harnois, L., 1988. The CIW index: a new chemical index of weathering. Sediment. Geol. 55, 319–322.
Hayashi, K.I., Fujisawa, H., Holland, H.D., Ohmoto, H., 1997. Geochemistry of- 1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. Geochem. Cosmochim. Acta 61, 4115–4137.
Hourcq, V., 1955. Les Recherches Françaises de Pétrole en Afrique Noire (Cameroun, Afrique Equatoriale Française, Madagascar). I.F.P., Centre d'Etudes Supérieures de Prospection et d'Exploitation des Gisements.
Hubert, J.F., 1962. A zircon-tourmaline–rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the gross composition and texture of sandstone. J. Sediment. Petrol. 32, 440–450.
Jarvis, K.E., 1988. Inductively Coupled Plasma mass spectrometry: a new technique for the rapid or ultra-trace level determination of the rare earth elements in geological materials. Geol. Soc. Am. Bull. 87, 725–737.
Kasanzu, C., Makenya, A.H., Maboko Manya, S., 2008. Geochemistry of fine-grained clastic sedimentary rocks of the Neoproterozoic Ikorongo Group, NE Tanzania: implications for provenance and source rock weathering. Precambrian Res. 164, 201–213.
Kasper-Zubillaga, J.J., Armstrong-Altrin, J.S., Carranza-Edwards, A., Morton-Bermea, O., Lozano-Santa-Cruz, R., 2013. Control in beach and dune sands of the Gulf of Mexico and the role of nearby rivers. Int. J. Geosci. 4, 1157–1174.
Kontchipe, Ngagoum, Y.S., Temgo Sopie, F., Ngueutchoua, G., Sonfack, N.A., Nkouathio, D.G., Tchatchueng, R., Nguemo Kenfack, G.R., Njanko, T., 2021. Mineralogy and geochemistry study of the Nyong River sediments, SW Cameroon: implications for provenance, weathering, and tectonic setting. Arabian J. Geosci. https://doi.org/10.1007/s12517-021-07145-9.
Lawrence, S.R., Munday, S., Bray, R., 2002. Regional geology and geophysics of the eastern Gulf of Guinea (Niger delta to Rio muni). Lead. Edge 1117.
Lee, Y.I., 2009. Geochemistry of shales of the Upper Cretaceous Hayang Group, SE Korea: implications for provenance and source weathering at an active continental margin. Sediment. Geol. 215 (1–4), 1–12.
Long, X., Yuan, C., Sun, M., Xiao, W., Wang, Y., Cai, K., Jiang, Y., 2012. Geochemistry and Nd isotopic composition of the Early Paleozoic flysch sequence in the Chinese Altai, central Asia: evidence for a northward-derived mafic source and insight into Nd model ages in accretionary orogen. Gondwana Res. 22, 554–566.
Madhavaraju, J., 2015. Geochemistry of Late Cretaceous sedimentary rocks of the Cauvery Basin, south India: constraints on paleoweathering, provenance, and End Cretaceous environment. Chemostratigraphy 185–214. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-419968-2.00008-X.
Madhavaraju, J., Ramírez-Montoya, E., Monreal, R., González-León, C.M., Pi-Puig, T., Espinoza-Maldonado, I.G., Grijalva-Noriega, F.J., 2016a. Paleoclimate, paleoweathering and paleoredox conditions of Lower Cretaceous shales from the Mural Limestone, Tuape section, northern Sonora, Mexico: constraints from clay mineralogy and geochemistry. Rev. Mex. Ciencias Geol. 33 (1), 34–48.
Madhavaraju, J., Tom, Milu, Il Lee, Yong, Balaram, V., Ramasamy, S., Carranza-Edwards, A., Ramachandran, A., 2016b. Provenance and tectonic setting of sands from Puerto Peñasco Desemboque and Bahia Kino beaches, Gulf of California, Sonora, méxico. J. S. Am. Earth Sci. 71, 262–275.
Marzoli, A., Renne, P.R., Piccirillo, E.M., Francesca, C., Bellieni, G., Melfi, A.J., Nyobe, J. B., N'ni, J., 1999. Silicic magmas from the continental Cameroon Volcanic Line (Oku, Bambouto, and Ngaoundere): ^{40}Ar-^{39}Ar dates, petrology, Sr-Nd-O isotopes and their petrogenetic significance. Contrib. Mineral. Petrol. 135, 133–150.
Marzoli, A., Piccirillo, E.M., Renne, P.R., Bellieni, G., Iacumin, M., Nyobe, J.B., Tongwa, A.T., 2000. The Cameroon Volcanic Line revisited: petrogenesis of continental basaltic magmas from lithospheric and asthenospheric mantle sources. J. Petrol. 41, 87–109.
Mbale Ngama, E., Sababa, E., Bayiga, E.C., Ekoa Bessa, A.Z., Ndjigui, P.-D., Bilong, P., 2019. Mineralogical and geochemical characterization of the unconsolidated sands from the Mefou River terrace, Yaoundé area, Southern Cameroon. J. Afr. Earth Sci. 159, 103570 https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.07.103570.
McDonough, W.F., Sun, S.S., 1995. The composition of the earth. Chem. Geol. 120, 223–253.
McLennan, S.M., 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: influences of provenance and sedimentary processes. Rev. Miner. 21, 169–200.
McLennan, S.M., 1993. Weathering and global denudation. J. Geol. 101, 295–303.
McLennan, S.M., 2001. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. G-cubed, 2.2000GC000109.
McLennan, S.M., Hemming, S., 1992. Samarium/neodymium elemental and isotopic systematic in sedimentary rock. Geochem. Cosmochim. Acta 56, 887–898.
McLennan, S.M., Hemming, S., McDaniel, D.K., Hanson, G.N., 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. Geological Society of America. Special paper 284, 21–40.
McLennan, S.M., Hemming, S.R., Taylor, S.R., Eriksson, K.A., 1994. Geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America. Geochem. Cosmochim. Acta 59, 1153–1177.
Mendieta-Lora, M., Mejía-Ledesma, R.O., Kasper-Zubillaga, J.J., Arellano-Torres, E., Álvarez Sánchez, L.F., 2018. Mineralogy and Geochemical Implications of Weathering Rates in Coastal Dunes and Beach Sands Close to a Volcanic Rock Source in the Western Gulf of Mexico. Chemie der Erde, Mexico. https://doi.org/10.1016/j.chemer.2018.06.004.
Mitra, R., Chakrabarti, G., Shome, D., 2018. Geochemistry of the Palaeo-Mesoproterozoic Tadpatri shales, Cuddapah basin, India: implications on provenance, paleoweathering, and paleoredox conditions. Acta Geochimica 37 (5), 715–733. https://doi.org/10.1007/s11631-017-0254-3.
Morin, S., Kuété, M., 1988. Le littoral Camerounais: problèmes morphologiques. Trav. Lab. Geograph. Phys. Appl. 11, 5–52. https://doi.org/10.3406/tlgpa.1988.900.
Mosoh Bambi, C.K., Frimmel, H.E., Zeh, A., Suh, C.E., 2013. Age and origin of Pan-African granites and associated U-Mo mineralization at Ekomédion, southwestern Cameroon. J. Afr. Earth Sci. 88, 15–37.
Mouafo, L., 1988. Volcanologie et pétrologie du Mont Etinde. Thèse de doctorat, p. 134, 3eme cycle Université de Yaoundé, Cameroun.
Münsell, 1975. Münsell Soil Color Charts. Baltimore MD USA: Münsell Color Company Inc., Mcbeth Division of Kollmorgen Corporation.
Nanga Bineli, M.T., Onana, V.L., Noa Tang, S.D., Bikoy, Y.R., Ekodeck, G.E., 2021. Mineralogy and geochemistry of sands of the lower course of the Sanaga River, Cameroon: implications for weathering, provenance, and tectonic setting. Acta Geochimica, 101007/s11631-020-00437-z.
Ndjigui, P.-D., Beauvais, A., Fadil-Djenabou, S., Ambrosi, J.-P., 2014. Origin and evolution of Ngaye River alluvial sediments, Northern Cameroon: geochemical constraints. J. Afr. Earth Sci. 100, 164–178.
Ndjigui, P.-D., Onana, V.L., Sababa, E., Bayiga, E.C., 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.
Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. Nature 299, 715–717.
Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic consideration. Geochem. Cosmochim. Acta 48, 1523–1534.
Ngueutchoua, G., Giresse, P., 2010. Sand bodies and incised valleys within the late quaternary Sanaga-Nyong delta complex on the middle continental shelf of Cameroon. Mar. Petrol. Geol. 27, 2173–2188.
Ngueutchoua, G., Ngantchu, L.D., Youbi, M., Ngos III, S., Beyala, V.K.K., Yifomju, K.P., Tchamgoué, J.C., 2017. Geochemistry of Cretaceous mudrocks and sandstones from Douala sub-Basin, Kumba area, South West Cameroon: constraints on provenance, source rock weathering, paleo-oxidation conditions and tectonic environment. Int. J. Geosci. 8, 393–424. https://doi.org/10.4236/ijg.2017.84021.
Ngueutchoua, G., Eyong, T.J., Ekoa Bessa, A.Z., Azanji Agheenwi, Z.B., Emane Maschouer, A., Sobdjou Kemteu, C., Lontchi Dzoti, Y., Touda, Hamadou, Ongbassouek, Baboule, Kenfack, B.-M., Nguemo, G.R., 2019. Provenance and depositional history of Mesozoic sediments from the Mamfe basin and Douala sub-basin (SW Cameroon) unraveled by geochemical analysis. J. Afr. Earth Sci. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103550.
Ngueutchoua, G., Ekoa Bessa, A.Z., Eyong, T.J., Demanou, Z.D., Baba Djaoro, H., Tchami, N.L., 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. J. Afr. Earth Sci. 152, 215–236.
Nkoumbou, C., Deruelle, B., Velde, D., 1995. Petrology of Mount Etinde nephelinites series. J. Petrol. 36 (2), 373–395.
N'nanga, A., Ngos III, S., Ngueutchoua, G., 2019. The Late Pleistocene-Holocene paleoclimate reconstruction in the Adamawa plateau (Central Cameroon) inferred from the Lake Fonjak sediments. J. Afr. Earth Sci. 150, 23–36.
Nnange, J.M., Poudjom Djomani, Y.H., Fairhead, J.D., Ebinger, C.J., 2001. Determination of the isostatic compensation mechanism of the region of the Adamawa dome, West Central Africa using the Admittance technique of gravity data. Journal of Sciences and Technology. Science and Engineering Series 1 (4), 29–35.
Nouvelot, J.F., 1972. Le régime des transports solides dans divers cours d'eau du Cameroun de 1969 à 1971. Cahier office Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Sér. Hydrologie IX (1), 4773.
Ntamak-Nida, M.J., Baudin, F., Schnyder, J., Makong, J.-C., Komguem, P.B., Abolo, G.M., 2008. Depositional environments and characterization of the organic matter of the Lower Mundeck Formation (Barremian?–Aptian) of the Kribi-Campo sub-Basin (South Cameroon): implications for petroleum exploration. J. Afr. Earth Sci. 51, 207–219.
Ntamak-Nida, M.J., Bourquin, S., Makong, J.-C., Baudin, F., Mpesse, J.E., Itjoko Ngouem, C., Komguem, P.B., Abolo, G.M., 2010. Sedimentology and sequence

stratigraphy from outcrops of Kribi-campo sub-basin: lower Mundeck Formation (Lower Cretaceous, southern Cameroon). J. Afr. Earth Sci. 58, 1–18.
Nyobe, J.M., Sababa, E., Bayiga, E.C., Ndjigui, P.-D., 2018. Mineralogical and geochemical features of alluvial sediments from the Lobo watershed (Southern Cameroon): implications for rutile exploration. Compt. Rendus Geosci. 350, 119–129.
Odoma, A.N., Obaje, N.G., Omada, J.I., Idakwo, S.O., Erbacher, J., 2015. Mineralogical, chemical composition and distribution of rare earth elements in clay-rich sediments from southeastern Nigeria. J. Afr. Earth Sci. 102, 50–60.
Okazaki, H., Stanley, J.-D., Wright, E.E., 2001. Tecolutla and Nautla Deltas, Veracruz, Mexico: texture to evaluate sediment entrapment on deltaic plains and bypassing onto Gulf of Mexico Margin. J. Coast Res. 17 (3), 755–761.
Olivry, J.C., 1977. Transports solides en suspension au Cameroun. International Association of Hydrological Sciences 122, 134–141.
Olivry, J.C., 1986. Fleuves et rivières du Cameroun. Collection Monographies. Hydrologiques ORSTOM No 9, Paris, p. 733.
Osae, S., Asiedu, D.K., Banoeng-Yakubo, B., Koeberl, C., Dampare, S.B., 2006. Provenance and tectonic setting of Late Proterozoic Buem sandstones of southeastern Ghana: evidence from geochemistry and detrital modes. J. Afr. Earth Sci. 44, 85–96.
Perri, F., Critelli, S., Mongelli, G., Cullers, R.L., 2011. Sedimentary evolution of the Mesozoic continental redbeds using geochemical and mineralogical tools: the case of Upper Triassic to Lowermost Jurassic Monte di Gioiosa mudrocks (Sicily, southern Italy). Int. J. Earth Sci. 100, 1569–1587.
Perri, F., 2014. Composition, provenance and source weathering of Mesozoic sandstone from western-central Mediterranean Alpine Chains. J. Afr. Earth Sci. 91, 32–43.
Potter, P.E., 1978. Petrology and chemistry of big river sands. J. Geol. 86, 423–449.
Ramachandran, A., Madhavaraju, J., Ramasamy, S., Lee, Y.I., Rao, S., Chawngthu, D.L., Velmurugan, K., 2016. Geochemistry of proterozoic clastic rocks of the kerur formation of kaladgi-badami basin, north Karnataka, south India: implications for paleoweathering and provenance. Turk. J. Earth Sci. 25, 126–144.
Ramos-Vázquez, M.A., Armstrong-Altrin, J.S., 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.
Ramos-Vázquez, M.A., Armstrong-Altrin, J.S., 2021. Provenance of sediments from Barra del Tordo and Tesoro beaches, Tamaulipas State, northwestern Gulf of Mexico. J. Palaeogeogr. 10 (20), 1–17.
Rao, W., Tan, H., Jiang, S., Chen, J., 2011. Trace element and REE geochemistry of fine- and coarse-grained sands in the Ordos deserts and links with sediments in surrounding areas. Chem. Erde 71, 155–170.
Regnoult, R.A., 1986. Geological synthesis of Cameroon. Directorate of Mines and Geology, Yaoundé, Cameroon 118.
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. Chem. Geol. 226, 31–65.
Roser, B.P., Cooper, R.A., Nathan, S., Tulloch, A.J., 1996. Reconnaissance sandstone geochemistry, provenance, and tectonic setting of the Lower Paleozoic terranes of the West Coast and Nelson, New Zealand. N. Z. J. Geol. Geophys. 37 (1), 1–16. https://doi.org/10.1080/00288306.1996.9514690.
Roser, B.P., Korsch, R.J., 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. Chem. Geol. 67, 119–139.
Salard-Chebodaeff, M., 1981. Palynologie Maestrichtienne et Tertiaire du Cameroun. Résultats Botaniques. Review of. Palaeobotany and Palynology 32, 401–439.
Spalletti, L.A., Limarino, C.O., Piñol, F.C., 2012. Petrology and geochemistry of Carboniferous siliciclastics from the Argentine Frontal Cordillera: a test of methods for interpreting provenance and tectonic setting. J. S. Am. Earth Sci. 36, 32–54.
Sonfack, N.A., Ngueutchoua, G., Kontchipe Ngagoum, Y.S., Temgo Sopie, F., Nkouathio, D.G., Wouatong, A.S.L., Tchatchueng, R., Nguemo Kenfack, G.R., Njanko, T., 2021. Mineralogical and geochemical signatures of surface stream sediments from Dibamba River basin, SW Cameroon: implications for provenance, weathering, and tectonic setting. J. Afr. Earth Sci. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104251.
Sun, Q., Liu, D., Liu, T., Di, B., Wu, F., 2012. Temporal and spatial distribution of trace metals in sediments from the northern Yellow Sea coast, China: implications for regional anthropogenic processes. Environ. Earth Sci. 66, 697–705.
Tagne-Kamga, G., 2003. Petrogenesis of the Neoproterozoic Ngondo plutonic complex (Cameroon, West Central Africa): a case of late-collisional ferro-potassic magmatism. J. Afr. Earth Sci. 36, 149–171.
Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. The continental crust: its composition and evolution. Blackwell Scientific, Oxford 312.
Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1995. The geochemical evaluation of the continental crust. Rev. Geophys. 33, 241–265.
Taylor, S.R., Rudnick, R.L., McLennan, S.M., Eriksson, K.A., 1986. REE patterns in Archean high-grade metasediments and their tectonic significance. Geochimimica et Cosmochimica Acta 50, 2267–2279.
Tchouatcha, M.S., Tamfuh, P.A., Kemteu Sobdjou, C., Mbesse, C.O., Ngnotue, T., 2020. Provenance, palaeoweathering and depositional environment of the cretaceous deposits from the babouri-figuil and mayo oulo-lere basins (north-Cameroon) during the southern atlantic opening: geochemical constraints. J. Afr. Earth Sci. 174 (2021), 104052 https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.104052.
Tchouatcha, M.S., Kouske, A.P., Said Deaf, A., Mioumnde, A.P., 2021. Geochemical, mineralogical and sedimentological analyses of reworked sediments (new) in the syn-to post-rift Middle Cretaceous-Quaternary detrital deposits from western Atlantic margin of Cameroon: evidence from sedimentation-erosion alternation in the context of passive margin evolution. Acta Geochemical. https://doi.org/10.1007/s11631-021-00455-5.
Vosoughi Moradi, A., Sari, A., Akkaya, P., 2016. Geochemistry of the Miocene oil shale (Hançilli Formation) in the Çankiri-Çorum Basin, Central Turkey: implications for paleoclimate conditions, source-area weathering, provenance, and tectonic setting. Sediment. Geol. 78, 136–150.
Wenjeh Wembenyui, E., Kenneth, D.C., Zhao, J.-X., 2020. Evolution of Mount Cameroon volcanism: geochemistry, mineral chemistry and radiogenic isotopes (Pb, Sr, Nd). Geosci. Front. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.03.015.
Xie, Y., Chi, Y., 2016. Geochemical investigation of dry- and wet-deposited dust during the same dust-storm event in Harbin, China: constraint on provenance and implications for formation of aeolian loess. J. Asian Earth Sci. 120, 43–61.
Zaid, S.M., 2012. Provenance, diagenesis, tectonic setting and geochemistry of rudies sandstone (lower miocene), warda field, Gulf of suez, Egypt. J. Afr. Earth Sci. 66/67, 56–71.
Zhang, L., Qin, X., Liu, J., Sun, C., Mu, Y., Gao, J., Guo, W., An, S., Lu, C., 2016. Geochemistry of sediments from the huaibei plain (east China: implications for provenance, weathering, and invasion of the yellow river into the huaihe river. J. Asian Earth Sci. 121, 72–83.

Earth Systems and Environment
https://doi.org/10.1007/s41748-020-00167-5

ORIGINAL ARTICLE

Heavy metal contamination and its ecological risks in the beach sediments along the Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes, Cameroon)

Armel Zacharie Ekoa Bessa[1,2] · Gabriel Ngueutchoua[1] · Annick Kwewouo Janpou[1] · Yasser A. El-Amier[3] · Odilia-Alexandra Njike Njome Mbella Nguetnga[1] · Ulrich Romaric Kankeu Kayou[1] · Salomon Bertrant Bisse[1] · Elise Colette Ngo Mapuna[1] · John S. Armstrong-Altrin[4]

Received: 20 December 2019 / Accepted: 3 July 2020
© King Abdulaziz University and Springer Nature Switzerland AG 2020

Abstract

Beach sediments collected along Atlantic Ocean of Cameroon were geochemically analysed using ICP–MS techniques to determine their contamination of heavy metal and related ecological risks. In this study, the selected metals displayed a declining trend of Fe > Mn > Ni > Cu > Co > Zn > Cr > Cd. Indices of pollution, such as factor of enrichment (EF) which values are generally more than 1.5, except for Mn; index of geo-accumulation (I-geo), where values of Co, Ni and Cu in sediments of the studied area were > 0, and other metals (Zn, Cr, Fe and Mn) were < 0; factor of contamination (CF) which values of all selected elements are between 1 and 3 except for Co and Ni which are up to 3; and load index of pollution (PLI), where values in all sampling sites are greater than 1, except one site. These results advocate a moderate contamination of the study sediments by metal with the exception of Mn. The potential ecological risk assessment (E_r^i and RI) indicates that this coast is a low-to-moderate-risk zone. PCA, cluster and correlation matrix indicate that heavy metals maintained fairly similar trends with both anthropogenic and natural sources. This study explained that this coastal area is not highly concentrated by heavy metals and revealed that the Atlantic coast of Limbe, Cameroon are moderately polluted by studied metals with is a low-to-moderate risk.

Keywords Heavy metals · Contamination · Pollution indices · Ecological risks · Beach sediments · Atlantic Ocean

1 Introduction

Environments along the sea coast related to land are mostly contaminated by pollution resulting from industrial activities (Castillo et al. 2013; Zhang et al. 2019) such as urban sewage discharge, fishing activities and burning of fossil fuel by solid waste dumping (Bastami et al. 2015).

Heavy metals in an environment may be derived from natural processes (e.g., volcanic eruptions, rock weathering, erosion, atmospheric deposition, conversely and deposition of dust) and activities influenced by anthropogenic activities (e.g., agriculture, industry, urban development, and change in lacustrine environments) (Sundararajan et al. 2017; Mondal et al. 2018; Jha et al. 2019). Metals such as Zn, Cd, Cr, Cu, and Ni can be principally mobilized through activities of human, while others, such as Fe, Mn, and Co may be derive from rock weathering (Serrano et al. 2011; Ekoa Bessa et al. 2018; Hossain et al. 2019; Tehna et al. 2019). Sediments are considered to be one of the chief storages of heavy metals as they are used as an efficient means to appraise the level

Electronic supplementary material The online version of this article (https://doi.org/10.1007/s41748-020-00167-5) contains supplementary material, which is available to authorized users.

✉ Armel Zacharie Ekoa Bessa
armelekoa@yahoo.fr; abessa@uy1.uninet.cm

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

2 Department of Mining and Geological Engineering, Botswana International University of Sciences and Technology, Private Bag 16, Palapye, Botswana

3 Botany Department, Faculty of Science, Mansoura University, Mansoura, Egypt

4 Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del mar y Limnología, Unidad de Procesos Oceánicos y Costeros, Circuito exterior s/n, 04510 Mexico City, Mexico

Published online: 16 July 2020

of contamination marine environments (Ke et al. 2017; Gao et al. 2019; Mandeng et al. 2019).

The origin of the metals in the sediment can be both anthropogenic and natural (geochemical). Metals pose a risk to sediment, aquatic ecosystems, but also for humans due to their pronounced tendency for incorporation into sediment, persistence, toxicity and bioaccumulation capacity. Metals having a geochemical origin, they are usually found in less accessible or quite inaccessible forms. On the other hand, metals that have reached the sediment from anthropogenic sources; more commonly found in forms that are relatively more readily bioavailable (Gleyzes et al. 2002; Ekoa Bessa et al. 2018; Tehna et al. 2019).

No published work has tried to determine the contamination of heavy metal along the Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes, Cameroon). The aim of this work is to (i) investigate the distribution of heavy metal content along the Atlantic coastal sediments; (ii) to determine the possible sources of pollutants; and (iii) calculate the indices of contamination to therefore evaluate the level of pollution.

2 Materials and methods

2.1 Study area

Limbe is found along the coast of the Atlantic Ocean, situated between latitudes of North 3°59′–4°04′ N and longitudes of East 9°01–9°13′ E, in the SW region of Cameroon. It is bordered by the Atlantic Ocean to the south and numerous volcanic cones of Mounts Etinde and Cameroon to the north and northeast (Fig. 1). Limbe lies on a metamorphic substratum of pan-African age. The latter is covered by Quaternary age sediments. This locality also contains volcanic formations. These are the lower dark series of Tertiary ages on the one hand, which are feldspathoid rocks of Mt. Etindé namely: leucitites and nephelinites with leucites and haüyne. They derive from a magma of the alkaline series. All the rocks of this series are altered. The upper dark series on the other hand are of quaternary to recent ages. They are pyroclastic products. They are vesicular to scoriaceous. The lavas encountered in the Mt. Cameroon region are compact augite and olivine basalts and rarely contain porphyritic plagioclases (Ateba et al. 2009). Clayey materials developed on volcanic cones, appear as lenses of unconsolidated materials which alternates with lava flows (Ayonghe et al. 2004; Yokoyama et al. 2007). The study area enclosed activities

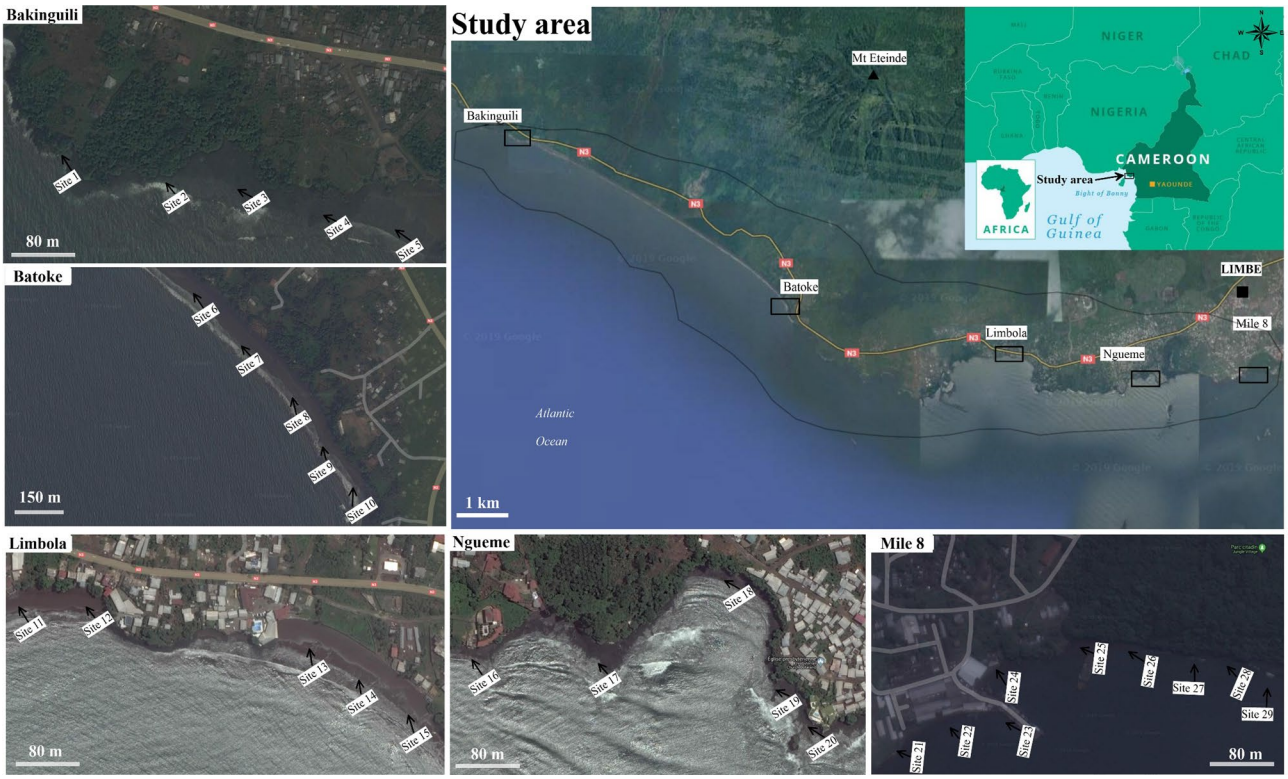


Fig. 1 Sampling area and stations along the Atlantic coast SW, Cameroon

such as combustion of fossil fuel, paints, activities of fishing, leisure and popular touristic areas. This coastline is also affected by activities such as agriculture and industries.

For 49 km between Limbe and Idenau, the coastline follows the oblong shape of the massif and forms a large lobe convex towards the sea, a coastline devoid of high cliffs along which two types of landscape follow one another. Rocky coastlines line the fronts or lobes of basalt flows, eaten away by small cliffs with a very complicated layout in detail. Elsewhere, narrow barrier beaches block the outlets of small streams that flow down from the mountains, or protect sandy or pebble beaches that show the beginnings of shoreline regulation. The rocky sectors meet between Limbe Mile 8 and Ngueme; Limbola and Batoke, then between Bakingili and Idenau, with the exception of Bimbia-Mabeta the large continental slopes end in beautiful rias.

2.2 Sampling and analysis of sediments

Five stations composed of 29 sampling sites were chosen based on location, population and rock type distribution from west to east along the Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes, Cameroon), including Bakinguili (Sites 1–5), Batoke (Sites 6–10), Limbola (Sites 11–15), Ngueme (Sites 16–20), and Mile 8 (Sites 21–29) (Fig. 1). The selected beaches are located in the gaps left free between the rocky capes.

The samples were collected (January 2018), from the designated sites using a polytetrafluorethylene (PTFE) spatula. A spatula is used to remove the top 2–3 cm layer of the sediments to avoid contamination. A polyethylene bag was used to carry the samples to the laboratory. The samples were air dried and crushed, sieved with a 0.080 mm sieve. 0.2 g of the powdered samples was mixed with 1.5 g $LiBO_2$. The mixture was dissolved in 100 ml 5% HNO_3. The intensity of metal concentration of Cu, Cd, Fe, Mn, Zn, Co, Cr, and Ni was resolved into air/acetylene fire utilizing the Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry (ICP–MS) using the pulp at ALS (Australian Laboratory Services), Vancouver (Canada). Analytical doubts vary from 0.1 to 0.5% for traces of metal.

2.3 Pollution indices and ecological risk assessment approach

The pollution indices and ecological risk assessment of the contents of selected metals in beach sediments were determined. The selected heavy metals (08) were based on spatial concentrations and toxicity, and other multiple used by different authors (Müller 1969; Håkanson 1980; Tomlinson et al. 1980; Ahmed et al. 2018). The following indices of pollution and risk assessment methods were used and the pollution classification levels are seen in Table 1. Background concentrations of Co, Cr, Cu, Ni, Mn, Zn, Cd, and Fe, were used to calculate the factor of enrichment (EF), factor of contamination (CF), index of geo-accumulation (Igeo), factor of potential ecological risk (E_r^i) and potential ecological risk index (RI).

2.3.1 Enrichment Factor (EF)

Enrichment factor (EF) is usually used as a suitable means to discriminate between natural and anthropogenic sources on metal concentration in the sediment using the equation of Salati and Moore (2010):

$$\mathrm{FE} = \frac{[\mathrm{M}]\mathrm{Sample}/[\mathrm{Fe}]\mathrm{sample}}{[\mathrm{M}]\mathrm{Background}/[\mathrm{Fe}]\mathrm{background}}, \quad (1)$$

where $[M]_{sample}/[Fe]_{sample}$ is the sample concentration of metals in the analysed sediment samples and $[M]_{Background}/[Fe]_{Background}$ refers to the background value of the metal and iron. Iron (Fe) is considered as the normalizing metals for the following reasons: Fe is associated with fine to medium solid elements; its geochemistry is comparable to that of many heavy metals; and its natural concentration in the study area tends to be uniform (Bhuiyan et al. 2010; Rahman et al. 2019).

2.3.2 Geo-accumulation index (Igeo)

The I-geo relies on the chemical data to evaluate the level of pollution. Geo-accumulation values are considered using the following equation (Müller 1969):

$$\mathrm{Igeo} = Log2(\mathrm{Cn}/1.5\mathrm{Bn}), \quad (2)$$

Cn is the considered contents (mg/kg) of metal in the sample sediment, Bn represents chemical background concentration (mg/kg) of the element in the background sample and the factor 1.5 is initiated to reduce the effects of probable dissimilarities in the background values which may be accredited to lithogenic effects. The index of geo-accumulation values is deduced in Table 1 with background data from Turekian and Wedepohl (1961).

2.3.3 Contamination factor (CF) and pollution load index (PLI)

The CF is the ratio calculated from the equation of Tomlinson et al. (1980),

$$\mathrm{CF} = \left(\frac{C_{\mathrm{metal}}}{C_{\mathrm{background}}}\right), \quad (3)$$

C_{metal} represents the pollutant concentration in the sediment and $C_{background}$ refers to metal background values. We have

Table 1 Classes of pollution indices and contamination levels used in the study

Index	Classes	Sediment quality	Ecological risk	References
EF	EF < 1.5 = natural, EF > 1.5 = anthropogenic			
	EF < 1	No enrichment		
	EF = 1–3	Minor enrichment		Håkanson (1980)
	EF = 3–5	Moderate enrichment		Soltani et al. (2015)
	EF = 5–25	Moderately severe enrichment		
	EF = 25–50	Very severe enrichment		
	EF > 50	Extremely severe enrichment		
CF	CF < 1	Low contamination		
	CF = 1–3	Moderate contamination		Tomlinson et al. (1980)
	CF = 3–6	Considerable contamination		Mmolawa et al. (2011)
	CF > 6	High contamination		
PLI	PLI < 1	No pollution		Håkanson (1980)
	PLI > 1	Polluted		Suresh et al. (2011)
Igeo	Igeo ≤ 0; 0	Unpolluted		
	Igeo = 0–1; 1	Unpolluted to moderately polluted		
	Igeo = 1–2; 2	Moderately polluted		Müller (1969)
	Igeo = 2–3; 3	Moderately to strongly polluted		Dai et al. (2018)
	Igeo = 3–4; 4	Strongly polluted		
	Igeo = 4–5; 5	Strongly to very strongly polluted		
E_r^i	$E_r^i < 40$		Low potential ecological risk	
	$E_r^i = 40–80$		Moderate potential ecological risk	
	$E_r^i = 80–160$		Signifiant potential ecological risk	Håkanson (1980)
	$E_r^i = 160–320$		High potential ecological risk	Suresh et al. (2011)
	$E_r^i > 320$		Very high potential ecological risk	
RI	RI < 150		Low ecological risk	
	RI = 150–300		Moderate ecological risk	Håkanson (1980)
	RI = 300–600		Signifiant ecological risk	
	RI > 600		High ecological risk	

EF the enrichment factor, *Igeo* the geoacumulation index, E_r^i the potential ecological risk factor of single metal, *RI* the potential ecological risk index, *CF* the contamination factor, *PLI* the pollution load index

classified CF into four groups (Table 1) to measure the level of contamination.

The index pollution load (PLI) is calculated using an equation from Tomlinson et al. (1980).

$$\mathrm{PLI} = \sqrt[n]{(\mathrm{CF1} \times \mathrm{CF2} \times \mathrm{CF3} \times \cdots \times \mathrm{CF}n}, \tag{4}$$

n is the number of metals, while CF denotes the factor of contamination. The index pollution load was interpreted by Tomlinson et al. (1980) and Suresh et al. (2011). PLI values are categorised into three ranks, as shown in Table 1.

2.3.4 Ecological risk assessment

The estimation of the ecological risk was carried out by a potential ecological risk factor (E_r^i) and potential ecological risk index (RI) for the present investigation. The method of Håkanson (1980) is used to establish the ecological risk potential. The RI was introduced to determine the extent of trace metal contamination in sediments with respect to their toxicity and their response to the environment:

$$E_r^i = \mathrm{Tr} \times \mathrm{CF} \tag{5}$$

$$\mathrm{RI} = \sum_{1}^{n} E_r^i. \tag{6}$$

RI symbolizes the summing up of all risk factors for trace metals in sediments, (E_r^i) represents the monomial environmental risk potential factor suggested by Håkanson (1980) and Suresh et al. (2011); Tr is the toxic response factor projected by Håkanson (1980) for six metals Mn (1), Zn (1), Cd (30), Cr (2), Cu (5) and Ni (5), and CF is the contamination factor calculated using the Eq. (3). The expressions

Published in partnership with CECCR at King Abdulaziz University

and values used for the interpretation of the ecological risk assessment are reported in Table 1.

2.4 Statistical analysis

Statistical analysis were execute using Microsoft Excel version 16, while Surfer 16 was used for map plotting. The sediment metals for each habitat were subjected to one-way ANOVA with equal replication at the 0.05 probability level (Duncan's test) using COSTAT 6.3 program. In the present study, a multivariate statistical analysis was performed using Pearson correlation, cluster and principal component analysis (PCA).

3 Results and discussion

3.1 Spatial distribution of metals

The basic explanatory statistical values and spatial distributional outlines of studied trace metals (mg/kg) are obtainable in Fig. 2 and Table 2. This study reveals that the mean concentrations (mg/kg) of heavy metals were found in an order decreasing as Fe (8889.79–30,698.11) > Mn (131.61–627.31) > Ni (83–274) > Cu (72.7–133.9) > Co (34.2–176.3) > Zn (69.6–162.4) > Cr (13.68–109.47) > Cd (0.05–1.41) (Fig. 2; Table 2). However, almost all metals are under the Average Shales values (Turekian and Wedepohl 1961) except Fe, Mn and Co. These elements are all inferior than the suggested levels of standard guidelines in the environment, except Co which could be linked to the presence of iron and manganese oxyhydroxides in Atlantic coast

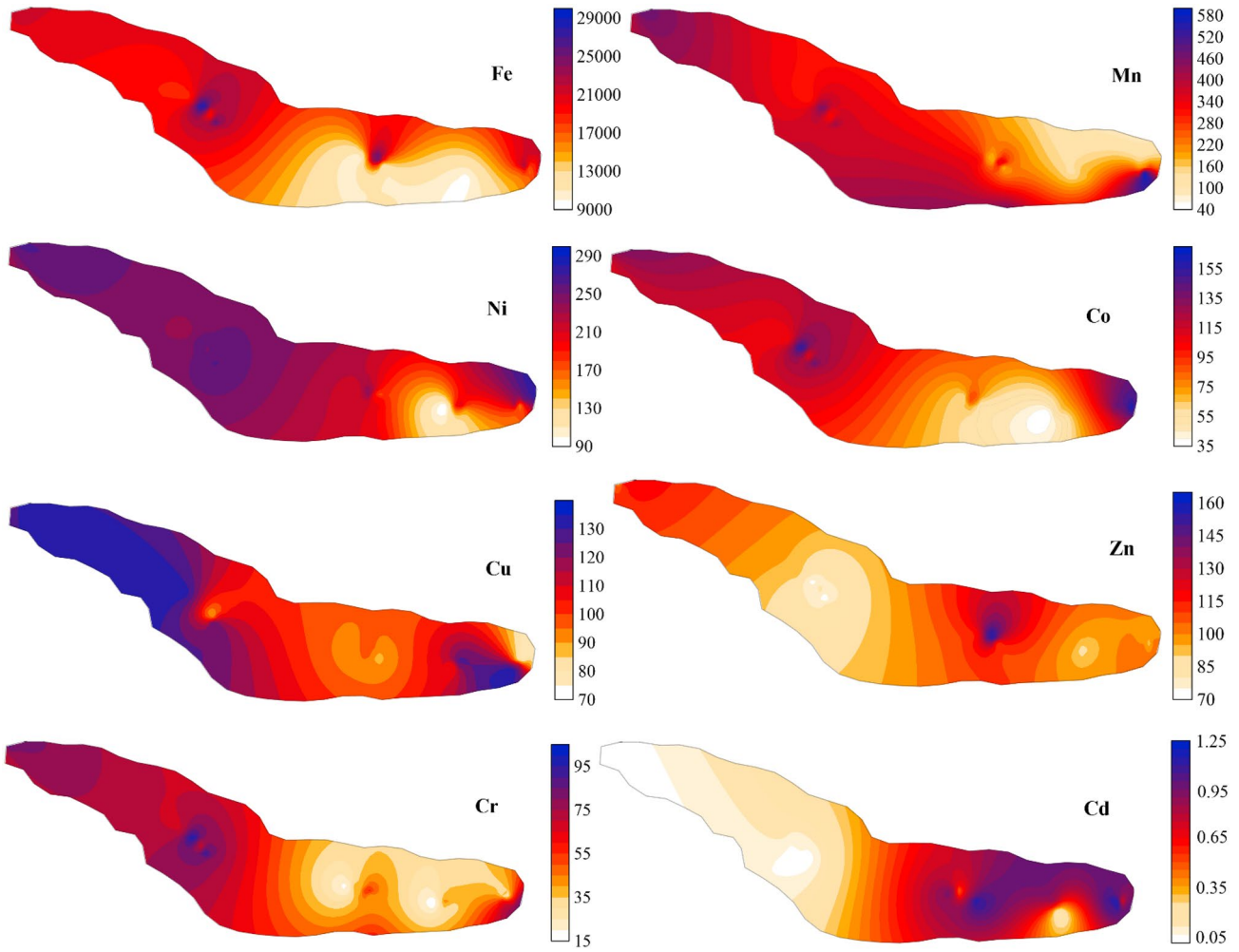


Fig. 2 Spatial distribution of heavy metal concentrations (Fe, Mn, Zn, Cd, Co, Cr, Cu, and Ni in mg/kg) of beach sediments along the Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes, Cameroon)

Table 2 Measured concentrations (mg/kg) of metals in Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes, Cameroon) beach sediments of various locations and some standard guidelines

Sites	Metals							
	Fe	Mn	Zn	Cd	Co	Cr	Cu	Ni
Bakinguili ($n=5$)								
Range	18,276.18–24,417.2	263.31– 480.16	80.2–120.3	0.06–0.08	91.9–176.3	34.21–109.47	98.9–133.9	140–262
Mean	20,736.78	384.13	110.6	0.08	130.64	79.36	120.14	229.6
SE	1037.51	39.31	7.79	0.01	15.82	12.73	6.66	22.82
Batoke ($n=5$)								
Range	16,611.53–30,698.11	271.05−487.9	69.6–91.7	0.05–0.18	97.1–166.4	62.26–103.31	84.5–132	236–262
Mean	22,940	371.73	79.46	0.104	127.36	82.1	111	251.2
SE	2615.07	40.98	4.19	0.02	12.92	7.95	8.58	4.44
Limbola ($n=5$)								
Range	9938.94–28,362	162.63–472.41	112.1–162.4	0.38–1.2	51.4–107.5	15.73–69.1	87.7–99.4	156−247
Mean	17,215.84	266.41	132.34	0.88	67.12	39.68	92.66	208
SE	3452.57	58.24	10.18	0.14	10.29	8.66	2.48	15.36
Ngueme ($n=5$)								
Range	9617.2–10,652.36	131.65–178.12	81.2–96.7	0.09–0.87	34.2–62.8	13.68–41.73	96.5–128.3	83–206
Mean	10,305.44	161.08	91.64	0.54	51.96	33.11	114.38	162.4
SE	201.27	9.29	2.79	0.15	5.04	5.29	5.29	23.14
Mile 8 ($n=9$)								
Range	8889.79–23,060.3	209.1–627.31	90.6–114	0.69–1.41	121.7–167.7	13.68–95.1	72.7–131.8	145–274
Mean	19,280.26	335.59	99.21	1.04	145.01	62.41	95.14	232.11
SE	1473.83	43.31	2.72	0.07	5.18	7.87	6.52	14.25
p value	0.0116*	0.0063**	0.0001***	0.0000***	0.0000***	0.0037**	0.0455*	0.0187*
$LSD_{0.05}$	6839.9	120	18.61	0.32	32.1	28.3	20.9	51.46
EU (2002)	–	–	300	3	11.6	150	140	–
CSQGD (2007)	–	–	–	1.4	40	64	–	50
US soils (2011)	–	550	60	0.01 – 41	9.1	54	25	19
Average Shale	47,200	850	95	0.30	19	90	45	68

EU European Union Standard (2002), *CSQGD* Canadian soil quality guidelines for protection of environmental and human health document (2007), *US* United State (Kabata-Pendias and Pendias 2011); Average shale, after Turekian and Wedepohl (1961)

*Values are significant at $p<0.05$

**Values are significant at $p<0.01$

***Values are significant at $p<0.001$

sediments. The concentration of these metals in that coastal area may have been augmented by activities such as agricultural land runoff, the exposure of the Atlantic Ocean to heavy discharges of pollutants from industrial processes and untreated domestic sewage wastes from residential areas. Natural processes such as volcanic eruptions, rock weathering and erosion from Mount Cameroon are also the result of high content of metals in this area.

Cobalt may be judge to be a low mobility element and generally has a high affinity with iron and manganese oxyhydroxide, it can also be link to the petroleum terminal located near the studied beaches. The incineration of car wheels, plastic waste, oil refineries and plant remains could be the of the considerable presence of Cr in the Limbe coastal fringes. The main sources of cadmium dispersion in the studied sediments would be related to the numerous industrial activities such as fishing, petroleum terminals, oil refineries and the spreading of phosphate fertilizers involving this element. The highest concentrations of Ni at the Batoke and Bakinguili beaches could be attributed to volcanic eruptions and leaching of source rock, the relatively high values in the other stations could be attributed to paints, fishing and petroleum terminals although carried out by craftsmen in the vicinity of this locality. The high Cu and Zn content in samples from the stations suggesting an anthropogenic contribution due to the proximity of the ocean to garages, oil refineries and metallic transformation. The high concentration of Fe may mostly be attributed to natural processes such as volcanic eruptions and leaching of source rocks. Manganese has been reported to occur over a wide range

of concentrations as a natural trace element in crude oils use in improving fuel oil combustion (Long et al. 1998). In this study, combustion of various hydrocarbon fuels can be linked as the source of manganese in these beaches.

A judgment of the selected metal concentrations in sediment samples of the present study and the results stated along some other beaches in the world are presented in Table 3. It has been observed that the values of Cd (0.53 mg/kg) obtained in this study were lower than those in almost all selected beaches, except those of the East China Sea (Chun-gang et al. 2004) and the Mediterranean Sea in Egypt (El-Sikaily et al. 2004). Concentrations in this study were higher than values obtained in Aqaba, Red Sea in Jordan (Al-Najjar et al. 2011) and in Shandong peninsula, Yellow Sea (Li et al. 2013a). Among all coastal areas chosen for comparison, the average content of Zn for the Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes, Cameroon) was higher than that of the selected areas, except those of the Karachi beach, Arabian Sea (Siddique et al. 2009) and the Kerala beach, India (Suresh et al. 2015). Iron and Cu are also higher in the studied beach than in other beaches except for the Algeciras Bay, South of Spain (Díaz-de Alba et al. 2011) and the Karachi beach, Arabian Sea (Siddique et al. 2009). Till date Mn, Co and Ni contents are higher than those reported in all selected beaches sediments.

3.2 Assessment of sediment contamination

Enrichment factor (EF) is a easy tool for evaluating enrichment level and measuring the contamination of diverse environmental biota. Figure 3a shows the enrichment factors of studied metals in sediments. Cobalt shows highest average values (9.69–18.68) in the overall EF of all studied metals. The order of average metal EF is Co (9.69–18.68) > Ni (7.6–10.94) > Cu (5.08–11.64) > Cd (0.59–8.49) > Zn (1.72–3.82) > Cr (1.21–2.01) > Mn (0.86–1.03) in the study area. The EF in the study beaches is generally more than 1.5, except for Mn in all stations and Cd in Limbola, Ngueme and Mile 8 beaches, and shows that the sediments of this coastal area might have one of the highest anthropogenic inflow of most of the heavy metals. This contamination can be link to human activities through industrial processes such as fishering and solid waste dumping by boats.

The geo-accumulation index values for the study sites are presented in Fig. 3b. The average contamination degree of selected metals decreasing in the following order: Co > Ni > Cu > Cd > Zn > Cr > Fe > Mn, is close that observed from EF values. I-geo values of Co, Ni and Cu in sediments of the studied area were > 0 (class 1), representing the category 'Polluted' at all sites. In this study, Cd is considered as 'Polluted' in Limbola, Ngueme and Mile 8 beaches and 'Unpolluted' in Bakinguili and Batoke stations. The other metals (Zn, Cr, Fe and Mn) were restrictively, characterizing the sediments as 'Unpolluted'.

The contamination factor was determined using Eq. (3) as presented in Fig. 3c. It was indicating that the CF value for Fe and Mn was less than 1, representing low contamination rate in all stations of the Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes, Cameroon). The same contamination level is found at the Batoke and Ngueme stations for Zn and at Bakinguili and Batoke for Cd. Pertaining to Cu, the range values of the CF were moderate (1 < CF < 3), which indicated a moderate contamination of sediments in this part of the Cameroon coast. Considerable Co and Ni contamination of sediments were observed (CF > 3) in almost all stations, except at Ngueme, where there has a moderate contamination level. Nevertheless, the CF values of selected metals were found in the decreasing order, Co > Ni > Cu > Cd > Zn > Cr > Fe > Mn, which is closer to what has been observed from EF and Igeo values.

Table 3 Comparison of mean heavy metals with some studies in beaches in mg/kg

Elements	Kerala beach, India (Suresh et al. 2015)	Algeciras Bay, South of Spain (Díaz-de Alba et al. 2011)	Karachi, Arabian Sea (Siddique et al. 2009)	Shandong Peninsula, Yellow Sea (Li et al. 2013b)	Aqaba, Red Sea in Jordan (Al-Najjar et al. 2011)	Mediterranean Sea, Egypt (El-Sikaily et al. 2004)	Red Sea, Egypt (El-Sikaily et al. 2004)	East China Sea (Chun-gang et al. 2004)	Atlantic coast, South West of Cameroon (This study)
Fe	N/A	25,457.8	7.8	N/A	N/A	142.68	45.83	N/A	18,095.66
Mn	N/A	282.9	1835.5	N/A	N/A	7.95	4.81	106.65	303.79
Zn	127.6	60.8	502.8	74.7	0.42	14.14	17.39	35.92	102.65
Cd	3.58	0.28	0.8	N/A	5.25	0.34	0.7	0.18	0.53
Co	N/A	13.6	25.49	N/A	N/A	1.51	2.18	2.49	104.42
Cr	80.94	219.7	361.5	57.8	1.12	N/A	N/A	90.38	59.33
Cu	76.73	22.8	115.2	20	0.03	8.83	5.95	14.59	106.66
Ni	35.13	106.2	73.8	31.2	0.43	2.85	3.33	14.55	216.66

N/A non-analyzed

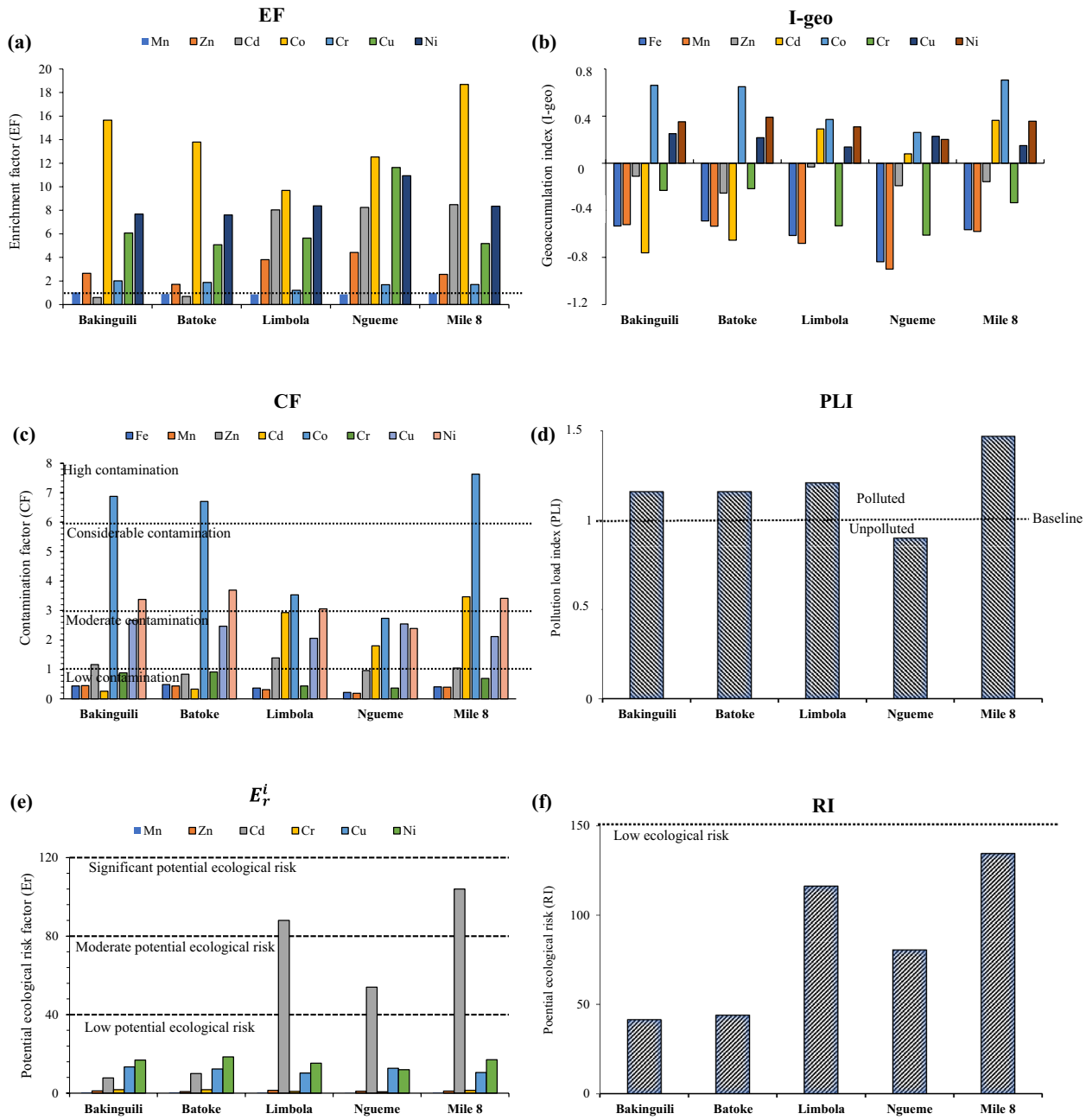


Fig. 3 Calculation indices of: **a** enrichment factor (EF); **b** geo-accumulation index (Igeo); **c** contamination factor (CF); **d** pollution load index (PLI); **e** potential ecological factor (E_r^i); and **f** potential ecological index (RI) in beach sediments from sampling sites along the Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes, Cameroon)

PLI was calculated from Eq. (4) for sample sediments of this study, and their spatial distribution is shown in Fig. 3d. Table S1 is giving a summary of the calculated values of selected analysed metals. The PLI values in all sampling sites are greater than 1, except at Ngueme site which sampling that 80% of the sites are metal contaminated to an extent (Fig. 3d).

3.3 Assessment of potential ecological risk

In the marine environment, heavy metals occur naturally and are significant for many biological processes. Some metals may be present at very low levels, causing very low to low ecological risk, while others may have comparatively high toxicity even at low levels (Long et al. 1998; Zhang

et al. 2019). Evaluation of ecological assessment of metals is mandatory to understand the potential harmful impacts beyond the assessment of heavy metal concentrations. The results of potential ecological risk factor (E_r^i) and the RI of the investigated area are presented in Fig. 3e, f. The value of the potential ecological risk factor in sediments along the Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes, Cameroon) was > 40 which represents 'low potential ecological risk' level, suggesting a low risk condition in the study area. Nonetheless, in the sediment samples of the Ngueme site, values of Cd pointed to 'moderate ecological risk' ($40 < E_r^i < 80$) and 'significant ecological risk' in Limbola and Mile 8 sample sediments ($80 < E_r^i < 160$). The RI for a single parameter index for the Atlantic coast showed 'low ecological risk' for all analysed metals. The potential ecological assessment (E_r^i and RI) of trace metals in sediments of this part of the Atlantic coast trends as Cd > Ni > Cu > Cr > Zn > Mn. According to the ecological risk assessment, the study area is a low-to-moderate-risk zone, which could be attributed to anthropogenic activities.

3.4 Statistical analysis

A multivariate statistical analysis for heavy metals sampling sites was used to evaluate the links and interrelianced amongst the sample sediment features because of its value as a tool for reducing and organizing large data sets into groups with similar features without losing information. In this study, a multivariate statistical analysis (Pearson correlation, cluster and PCA) was used to identify linked among some variables. The estimated metal concentrations, calculated indexes and sediment features of the surface sediment were used in this multivariate analysis.

A Pearson correlation analysis was realised using COSTAT 6.3 software. The values of the correlation coefficients of this study are presented in Table 4. Pearson correlation indicates that the Fe concentration was significantly positive, correlated ($p < 0.01$) with Co (0.625), Cr (0.618) and Mn (0.546). However, several elements such as Co vs Cr (0.648), Co vs Ni (0.64), Cr vs Ni (0.631) and Mn vs Cr (0.674) with significant positive correlations ($p < 0.01$). Two pairs element (Fe vs Ni and Mn vs Co) showed significantly positive and two pairs element (Cd vs Cr, and Cu vs Cd) exhibited significantly negative correlation ($p < 0.05$). The relationship among selected heavy metals indicated a common source in the area.

The purpose of Agglomerative Hierarchical Clustering (AHC) is to measure the most similarity between each of the variables (heavy metals in the present study) in the study, and then group the sites close to each other (Šulc and Řezanková 2019). In the present study, the cluster analysis of the studied sites according to metals maintained fairly similar trends, exhibiting five distinct clusters (A–E), each composed of similar studied sites distributed within these five stations of the study area. The pattern of clusters indicated that the similarity index of sampling sites in groups as following: A to E (Fig. 4). Group A representing the most sites of Bakinguili and Batoke, whereas groups B and C occupy all the sites of Limbola and Ngueme. Groups D and E represent all sites of Mile 8. We observed that the similarity index between sites and stations follows the same trend as stations on the coast (Bakinguili to Mile 8). Within both groups A and B, the sites have more than 35% similarity, groups C and D have 25% similarity, and group E has 15% similarity.

PCA can be considered as a technique that build the theoretical variable that reduces the total sum of the remaining squares after fitting a straight line to the data for each site. PCA does so by choosing the best values for the site (Jongman et al. 1995). Sediment samples from Bakinguili and Batoke area (especially Cu), are grouped in the positive side of the two PCs and closer to the variables Cu, Cr which present the highest concentrations in all samples from this area (Table S2). Sediment samples from Mile 8 area are grouped in the positive side of PC1, and mainly consist of the most variable (Cd, Co, Fe, Zn and Ni) (Fig. 5) which show the maximum concentrations in these samples. However, sediment samples from Limbola area are grouped in the positive side of PC2, and mainly consist of the variable Cd and Zn (Fig. 5) which show the maximum concentrations in these

Table 4 Pearson correlation matrix of studied metals of metals in Limbe coastal fringes, Cameroon beach sediments of various locations

Metals	Fe	Mn	Cu	Zn	Cd	Co	Cr	Ni
Fe	1							
Mn	0.546**	1						
Cu	−0.15	0.164	1					
Zn	0.066	−0.085	−0.083	1				
Cd	−0.137	−0.144	−0.444*	0.297	1			
Co	0.625**	0.491*	−0.123	−0.253	0.023	1		
Cr	0.618**	0.674**	0.099	−0.272	−0.373*	0.648**	1	
Ni	0.461*	0.213	−0.099	−0.192	−0.192	0.640**	0.631**	1

**Correlation is significant at $p < 0.01$; *Correlation is significant at $p < 0.05$

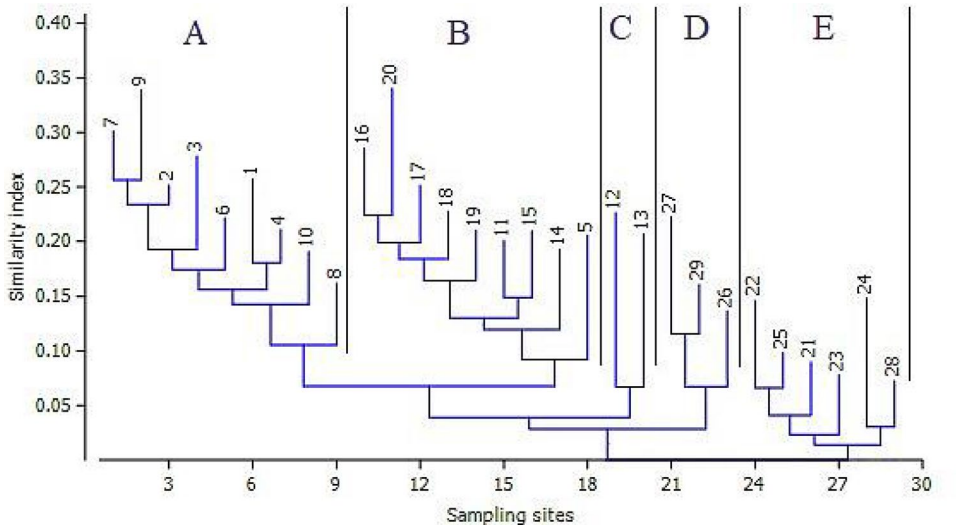


Fig. 4 Similarity dendrogram of sampling sites plotted according to heavy metals analysis of sediment samples ($n=29$) along the Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes, Cameroon)

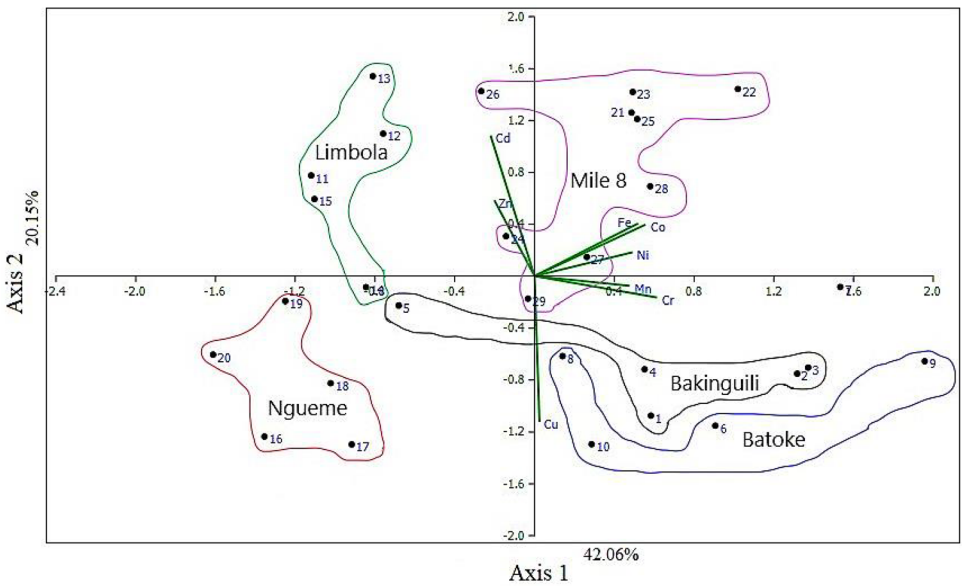


Fig. 5 Principal component analysis of studied metals from sampling sites along the Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes, Cameroon)

samples. Sediment samples from the Ngueme area, with the lowest content of heavy metals, are grouped in the negative side of the two PCs, revealing their low impact on the sediment sample at this station. Based on these considerations, it is not eliminating any variables from sediment samples (62.21% of PCs variance, Fig. 6), because they all affect sediment quality.

4 Conclusion

The present study represented the concentration of some heavy metals in the sediments of the Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes, Cameroon), their sources and their contamination level in the environment which has been revealed for the first time. This study explained that this coastal area is not highly concentrated by heavy metals except Fe, Mn and Co which showed the highest contents exceeding the average values. Results from numerous pollution indices (EF, Igeo, CF and PLI) revealed that all the sites in the Atlantic coast of Limbe, Cameroon are moderately polluted by studied metals, except one. According to EF, Igeo and CF values two of the five studied sites were unpolluted by Cd. However, the entire study area is not polluted by Mn due to the presence of the petroleum terminals. The pollution ecological risk assessment indicates that this part of the Atlantic coast is a low-to-moderate-risk zone though moderately to significantly contaminated by Cd at 3 stations. Matrix correlation, principal component and cluster analyses were applied to confirm the similarity between metals and to study the

Published in partnership with CECCR at King Abdulaziz University

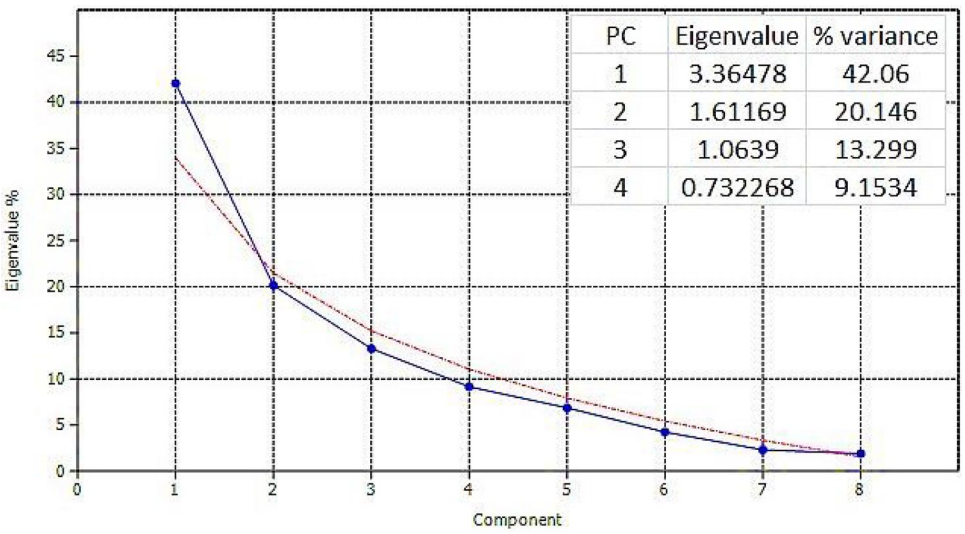


Fig. 6 Scree plot, eigenvalue and % variance of the first four PCs for 29 sites in the study area (heavy metals are variables used in PCA1-sediment model)

influence of anthropogenic activities on the sediment's quality. The possible sources of Cd may be both oil refineries and volcanic eruption of Mount Cameroon. Therefore, other metals may come from anthropogenic sources such as agriculture, garages, discharges, fishing, petroleum terminals, oil refineries and metallic transformation. In general, this study can be considered as a baseline study which first presents the current contamination and risk status of the Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes, Cameroon) for future researchers.

Acknowledgements This research was partly supported by the Department of Earth Sciences, Faculty of Sciences, University of Yaoundé I, through an on-going internal project. We thank Flora Nelly Kouadio, Leopold Darlus Ngantchu and Eric Bokanda Ekoko, for their help in field work and the manuscript.

Compliance with ethical standards

Conflict of interest On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest.

References

Ahmed I, Mostefa B, Bernard A, Olivier R (2018) Levels and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of fishing grounds along Algerian coast. Mar Pollut Bull 136:322–333

Al-Najjar T, Rasheed M, Ababneh Z, Ababneh A, Al-Omarey H (2011) Heavy metals pollution in sediment cores from the Gulf of Aqaba, Red Sea. Nat Sci 3:775

Ateba B, Dorbath C, Dorbath L, Ntepe N, Frogneux M, Aka FT, Manguelle D (2009) Eruptive and earthquake activities related to the 2000 eruption of Mount Cameroon volcano (West Africa). J Volcanol Geotherm Resour 179:206–216

Ayonghe SN, Ntasin EB, Samalang P, Suh CE (2004) The June 27, landslide on volcanic cones in Limbe, Mount Cameroon, West Africa. J Afr Earth Sci 39:435–439

Bastami KD, Neyestani MR, Shemirani F, Soltani F, Sarah H, Akbari A (2015) Heavy metal pollution assessment in relation to sediment properties in the coastal sediments of the southern Caspain Sea. Mar Pollut Bull 92:237–243

Bhuiyan MAH, Parvez L, Islam MA, Dampare SB, Suzuki S (2010) Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh. J Hazard Mater 173:384–392

Castillo ML, Trujillo IS, Alonso EV, de Torres AG, Pavon JC (2013) Bioavailability of heavy metals in water and sediments from a typical Mediterranean Bay (Malaga Bay, Region of Andalucia, Southern Spain). Mar Pollut Bull 76:427–434

Chun-Gang Y, Jian-bo S, Bin H, Jing-fu L, Li-Na L, Gui-bin J (2004) Speciation of heavy metals in marine sediments from the East China Sea by ICP-MS with sequential extraction. Environ Int 30:769–783. https://doi.org/10.1016/j.envin.2004.01.001

Dai L, Wang L, Liang T, Zhang Y, Ma C, Xing B (2018) Multivariate geostatistical analysis and source identification of heavy metals in the sediment of Poyang lake in China. Sci Total Environ 621:1433–1444

Díaz-de Alba M, Galindo-Riano MD, Casanueva-Marenco MJ, García-Vargas M, Kosore CM (2011) Assessment of the metal pollution, potential toxicity and speciation of sediment from Algeciras Bay (South of Spain) using chemometric tools. J Hazard Mater 190:177–187

Ekoa Bessa AZ, El-Amier YA, Doumo EPE, Ngueutchoua G (2018) Assessment of Sediments Pollution by Trace Metals in the Moloundou Swamp, Southeast Cameroon. Annu Res Revue Biol 30:1–13

El-Sikaily A, Khaled A, El Nemr A (2004) Heavy metals monitoring using bivalves from Mediterranean Sea and Red Sea. Environnemental Monitoring and Assessment. 98:41–58

Gao Q, Xu J, Bu XH (2019) Recent advances about metal–organic frameworks in the removal of pollutants from wastewater. Coord Chem Rev 378:17–31

Gleyzes C, Tellier S, Astruc M (2002) Fractionation studies of trace elements in contaminated soils and sediments: a review of sequential extraction procedures. TrAC Trends Anal Chem 21(6–7):451–467

Håkanson L (1980) An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. Water Res 14:975–1001

Hossain MB, Shanta TB, Ahmed AS, Hossain MK, Semme SA (2019) Baseline study of heavy metal contamination in the Sangu River estuary, Chattogram, Bangladesh. Mar Pollut Bull 140:255–261

Jha DK, Ratnam K, Rajaguru S, Dharani G, Devi MP, Kirubagaran R (2019) Evaluation of trace metals in seawater, sediments, and

bivalves of Nellore, southeast coast of India, by using multivariate and ecological tool. Mar Pollut Bull 146:1–10

Jongman RHG, Braak CJF, Van Tongeren OF (1995) Data analysis in community and landscape ecology. Cambridge University Press, Cambridge, pp 116–125

Kabata-Pendias A, Pendias H (2011) Trace elements in soils and plants, vol 5

Ke X, Gui SF, Huang H, Zhang HJ, Wang CY, Guo W (2017) Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China. Chemosphere 175:473–481

Li F, Huang J, Zeng G, Yuan X, Li X, Liang J, Wang X, Tang X, Bai B (2013a) Spatial risk assessment and sources identification of heavy metals in surface sediments from the Dongting Lake, Middle China. J Geochem Explor 132:75–83

Li G, Hu B, Bi J, Leng Q, Xiao C, Yang Z (2013b) Heavy metals distribution and contamination in surface sediments of the coastal Shandong Peninsula (Yellow Sea). Mar Pollut Bull 76:420–426

Long ER, Field LJ, Macdonald DD (1998) Predicting toxicity in marine sediments with numerical sediment quality guidelines. Environ Toxicol Chem 17:714–727

Mandeng EPB, Bidjeck LMB, Bessa AZE, Ntomb YD, Wadjou JW, Doumo EPE, Dieudonné LB (2019) Contamination and risk assessment of heavy metals, and uranium of sediments in two watersheds in Abiete-Toko gold district, Southern Cameroon. Heliyon. 5(10):e02591

Mmolawa KB, Likuku AS, Gaboutloeloe GK (2011) Assessment of heavy metal pollution in soils along major roadside areas in Botswana. Afr J Environ Sci Technol 5:186–196

Mondal P, de Alcântara Mendes R, Jonathan MP, Biswas JK, Murugan K, Sarkar SK (2018) Seasonal assessment of trace element contamination in intertidal sediments of the meso-macrotidal Hooghly (Ganges) River Estuary with a note on mercury speciation. Mar Pollut Bull 127:117–130

Müller G (1969) Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River. Geol J 3:109–118

Rahman MS, Khan MDH, Jolly YN, Kabir J, Akter S, Salam A (2019) Assessing risk to human health for heavy metal contamination through street dust in the Southeast Asian Megacity: Dhaka, Bangladesh. Sci Total Environ 660:1610–1622

Salati S, Moore F (2010) Assessment of heavy metal concentration in the Khoshk River water and sediment, Shiraz, Southwest Iran. Environ Monit Assess 164:677–689

Serrano O, Mateo MA, Dueñas-Bohórquez A, Renom P, López-Sáez JA, Cortizas AM (2011) The Posidonia oceanica marine sedimentary record: a Holocene archive of heavy metal pollution. Sci Total Environ 409:4831–4840

Siddique A, Mumtaz M, Zaigham NA, Mallick KA, Saied S, Zahir E, Khwaja HA (2009) Heavy metal toxicity levels in the coastal sediments of the Arabian Sea along the urban Karachi (Pakistan) region. Mar Pollut Bull 58:1406–1419

Soltani N, Keshavarzi B, Moore F, Tavakol T, Lahijanzadeh AR, Jaafarzadeh N, Kermani M (2015) Ecological and human health hazards of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Isfahan metropolis, Iran. Sci Total Environ 505:712–723

Standards (2002) National recommended water quality criteria, 822-R-02-047. Environmental Protection Agency, USA

Šulc Z, Řezanková H (2019) Comparison of similarity measures for categorical data in hierarchical clustering. J Classif 36:58–72

Sundararajan S, Khadanga MK, Kumar JPPJ, Raghumaran S, Vijaya R, Jena BK (2017) Ecological risk assessment of trace metal accumulation in sediments of Veraval Harbor, Gujarat, Arabian Sea. Mar Pollut Bull 114:592–601

Suresh G, Ramasamy V, Meenakshisundaram V, Venkatachalapathy R, Ponnusamy V (2011) Influence of mineralogical and heavy metal composition on natural radionuclide concentrations in the river sediments. Appl Radiat Isot 69:1466–1474

Suresh G, Ramasamy V, Sundarrajan M, Paramasivam K (2015) Spatial and vertical distributions of heavy metals and their potential toxicity levels in various beach sediments from high-background radiation area, Kerala, India. Mar Pollut Bull 91:389–400

Tehna N, Sababa E, Ekoa Bessa AZ, Etame J (2019) Mine waste and heavy metal pollution in Betare-Oya Mining Area (Eastern Cameroon). Environ Earth Sci Res J 6(4):167–176

Tomlinson D, Wilson J, Harris C, Jeffrey D (1980) Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. Helgoländer Meeresuntersuchungen 33:566–575

Turekian KK, Wedepohl KH (1961) Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. Geol Soc Am Bull 72(2):175–192

Yokoyama T, Aka FT, Kusakabe M, Nakamura E (2007) Plume–lithosphere interaction beneath Mt. Cameroon volcano, West Africa: constraints from 238U–230Th–226Ra and Sr–Nd–Pb isotope systematics. Geochim Cosmochim Acta. 71:1835–1854

Zhang H, Walker TR, Davis E, Ma G (2019) Spatiotemporal characterization of metals in small craft harbor sediments in Nova Scotia, Canada. Mar Pollut Bull 140:493–502