

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

FACULTE DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN
SCIENCES,
TECHNOLOGIE ET GEOSCIENCES



REPUBLIC OF CAMEROON

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL
OF SCIENCES, TECHNOLOGY
AND GEOSCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

UNITE DE FORMATION DE RECHERCHE DOCTORALE EN GEOSCIENCES ET
APPLICATIONS

LABORATOIRE DE GEOLOGIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES ET
APPLICATIONS

**MORPHOLOGIE, MINERALOGIE ET GEOCHIMIE DES
SEDIMENTS DU LAC MUNICIPAL D'EBOLWA (SUD –
CAMEROUN) : IMPLICATION SUR LA GENESE ET LA
POLLUTION ENVIRONNEMENTALE**

Thèse soutenue en vue d'obtention du Diplôme de Doctorat/PhD en Science de la Terre

Option : Géologie des Formations Superficielles et Applications

Spécialité : Géologie Minière et Ressources Pétrolières

Par

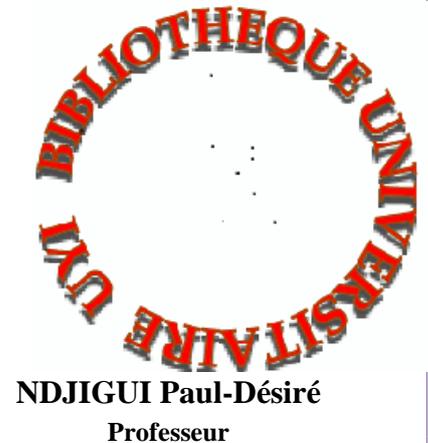
AKONO Daniel Florent

07X007

Master ès-Sciences

Sous la co-direction de

EKOMANE Emile
Maitre de Conférences



NDJIGUI Paul-Désiré
Professeur

Année Académique 2022 - 2023

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

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



REPUBLIC OF CAMEROON

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

POSTGRADUATE SCHOOL OF
SCIENCE, TECHNOLOGY
AND GEOSCIENCES

ATTESTATION DE CORRECTION DE THESE DE DOCTORAT/PhD

Options : **Géosciences des Formations Superficielles et Applications**

Spécialité : **Géologie Minière et Ressources Pétrolière**

Nom et Prénoms du candidat : **AKONO Daniel Florent**

Matricule : **07X007**

Titre de la thèse : **«Morphologie, minéralogie et géochimie des sédiments du lac municipal d'Ebolowa (Sud-Cameroun) : implications sur la genèse et la pollution environnementale»**

Date de soutenance : **Lundi, le 03 juillet 2023.**

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...**22/07/24**.....

Le Président du Jury

Les Membres

DEDICACE

A

Ma mère TANGON Sara Orchelle

REMERCIEMENTS

Au moment où s'achève ce travail, je tiens à remercier Dieu Tout Puissant pour tous ses bienfaits dans ma vie, mais aussi tous ceux qui de près ou de loin ont participé à sa réalisation. Mes remerciements sont spécialement adressés :

Je tiens à remercier mes encadreurs Messieurs NDJIGUI Paul-Désiré (Professeur) et EKOMANE Emile (Maître de Conférences), qui, malgré leurs multiples occupations ont bien voulu diriger cette thèse. Leur rigueur scientifique et leur amour constant du travail bien fait m'ont permis de l'améliorer ;

J'ai une reconnaissance particulière au personnel enseignant du Département des Sciences de la Terre, de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, pour leurs enseignements académiques et moraux, qui ont contribué à ma formation de géologue ;

Mes remerciements vont à l'égard du Dr NTSAMA ATANGANA Jacqueline, qui m'a initié aux études d'impact environnementales et sociales. Mais aussi au Dr SAMBA ASSOMO Phillipe, pour ses conseils et son soutien financier ;

Je remercie le Dr Zackarie MFONKA, qui malgré ses multiples occupations a accepté de m'accompagner sur le terrain ;

Je tiens à remercier les Docteurs BISSE Salomon Bertrand, NGO'O Ze Arnaud et BOKANDA EKOKO Eric, pour leurs conseils multiples tant sur l'utilisation des logiciels, que sur les astuces sur la rédaction des publications et de la thèse ;

Je tiens à dire merci au Dr EKO BESSA Armel, pour la réalisation de mes analyses minéralogiques par DRX et par MEB au Botswana International University of Technology ; Mais aussi M. ABENG OBAM Daniel, ami et camarade du lycée, qui a favorisé les analyses géochimiques par XRF et ICP-MS à l'Université de Cape Town en Afrique du Sud ;

Je remercie mes camarades de laboratoire BELINGA BELINGA Cédric, ASHUKEM Ethel, TONYE Marie Diane et NZEUSSEU NANDJOU Valentin, dont les discussions ont beaucoup contribué à l'amélioration de ce travail ;

Tous mes remerciements à l'égard de mes parents, feu AKONO OBAM Paul et TANGON Sara Orchel, pour leur amour inestimable, leur soutien financier, leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils ont sues m'inculquer. A mes frères et sœurs: BILOUNGA Huguette Danielle, NYANGON Jeanne Sylvie, AKONO Marie Nadine, AKONO Louis Fernandez, AKONO Paul Landry et AKONO Fernande Djessy, pour leur soutien moral et financier tout au long de la rédaction de cette thèse de Doctorat/PhD.

Je dis merci à NGONO TSANGA Augustine Rachelle, celle qui partage ma vie depuis maintenant plus de 5 ans, pour son amour et la patience dont elle a fait preuve au cours de ces

dernières années ; Mais aussi à ma fille AKONO TSANGA Léone Chrissy, pour l'ambiance bon enfant qu'elle a su mettre à la maison pendant la rédaction de ces travaux :

J'ai une reconnaissance particulière pour tout le personnel du club nautique du lac municipal d'Ebolowa, qui s'est mis à ma disposition pendant deux jours de suite, lors de ma campagne de prélèvement des échantillons lacustres ;

Je remercie mes amis de tous les jours ABOSSOLO NDONGO Julien, MENANGA TOKOUE ET Renaud, DEFFO Ferdinand, ONANA ENAMA Léandre, NDJEUGA NGOUNOU Franck et SONGUE Prisca, pour leurs soutiens multiformes tout au long de ce périple ;

A tous ceux dont les noms n'ont pas été cités et qui pourtant ont contribué, de près ou de loin, à l'édification de ce document, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIERES.....	v
LISTE DES TABLEAUX	xv
LISTE DES FIGURES.....	xvii
LISTE DES ABREVIATIONS	xx
RESUME.....	xxiii
ABSTRACT	xxv
INTRODUCTION GENERALE.....	
CHAPITRE I : MILIEU NATUREL	4
Introduction	5
I.1. Situation géographique et administrative.....	5
I.2. Milieu physique	5
I.2.1. Climat.....	5
I.2.2. Géomorphologie.....	8
I.2.2.1 Hydrographie	8
I.2.2.2. Orographie	8
I.2.3. Sols.....	11
I.2.4. Flore	11
I.2.5. Faune.....	12
I.3. Milieux socio-culturel et économique.....	12
I.3.1. Milieu socio-culturel	12
I.3.1.1. Population	12
I.3.1.2. Religion.....	12
I.3.2. Activités économiques	13
I.3.2.1. Commerce	13
I.3.2.2. Agriculture	13
I.3.2.3 Activités tertiaires	13
Conclusion.....	14

CHAPITRE II : REVUE DE LITTERATURE	15
Introduction	16
II.1. Généralités sur les lacs.....	16
II.1.1. Définitions	16
II.1.2. Fonctionnement d'un lac	16
II.1.3. Classification des lacs.....	18
II.1.4. Evolution d'un lac.....	19
II.1.5. Importances des lacs	21
II.2. Composition de la colonne d'eau	21
II.3. Sédiments lacustres.....	21
II.3.1. Origine des sédiments lacustres.....	21
II.3.2. Caractéristiques des sédiments lacustres	23
II.3.2.1. Composition des sédiments lacustres	23
II.3.2.1.1. Fraction organique	23
II.3.2.1.2. Fraction inorganique	24
II.3.2.1.2.1. Oxydes métalliques.....	24
II.3.2.1.2.2. Argiles.....	24
II.3.2.1.2.3. Silice	25
II.3.2.1.2.4. Aluminosilicates non argileux	25
II.3.2.1.2.5. Carbonates	25
II.3.2.1.2.6. Phosphates	25
II.3.2.1.2.7. Sulfures	26
II.3.2.1.2.8. Eléments traces	26
II.3.2.2. Granulométrie	26
II.3.3. Classification des éléments constitutifs des sédiments lacustres	27
II.4. Diagenèse précoce en domaine lacustre	29
II.4.1. Mécanismes de la diagenèse précoce.....	30
II.4.1.1. Minéralisation de la matière organique	30
II.4.1.1.1. Respiration.....	30

II.4.1.1.2. Dénitrification.....	31
II.4.1.1.3. Réduction des hydroxydes de fer et de manganèse	31
II.4.1.1.4. Réduction du sulfate	31
II.4.1.1.5. Fermentation méthanique	32
II.4.1.2. Sorption.....	32
II.4.1.2.1. Précipitation	32
II.4.1.2.2. Dissolution.....	33
II.4.1.2.3. Adsorption/désorption	33
II.4.1.2.4. Recristallisation	33
II.4.2. Facteurs de la diagenèse précoce.....	34
II.4.2.1. Paramètres physiques du milieu	34
II.4.2.1.1. Potentiel d'hydrogène	34
II.4.2.1.2. Conditions d'oxydoréduction	34
II.4.2.1.3. Température	35
II.4.2.2. Facteurs biologiques	35
II.4.2.3 Caractéristiques et composition des sédiments.....	35
II.5. Evaluation environnementale	37
II.5.1. Généralités	37
II.5.2. Définitions	37
II.5.3. Eléments traces métalliques.....	38
II.6. Caractérisation pétrographique et environnementale des sédiments aquatiques au Cameroun.....	39
II.6.1. Caractérisation pétrographique des sédiments aquatiques.....	39
II.6.2. Etudes sur la pollution	40
II.7. Contexte géologique de la zone d'étude.....	43
II.7.1. Complexe du Nyong	43
II.7.2. Complexe du Ntem.....	45
Conclusion.....	45
CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES	47
Introduction	48

III.1. Matériels.....	48
III.2. Travaux de terrain	48
III.2.1. Choix des points d'échantillonnage.....	48
III.2.2. Prélèvement des échantillons	49
III.2.2.1. Echantillonnage de l'eau	49
III.2.2.2. Echantillonnage des sédiments.....	49
III.2.2.2.1. Sédiments superficiels.....	49
III.2.2.2.2. Carotte de sédiments.....	49
III.3. Travaux en laboratoire.....	50
III.3.1. Description des échantillons.....	52
III.3.2. Analyses de l'eau.....	52
III.3.2.1. Analyse des nutriments dans l'eau	52
III.3.2.2. Analyse des éléments traces métalliques des eaux.....	53
III.3.2.2.1. Dosage du chrome	53
III.3.2.2.2. Dosage du cuivre	53
III.3.2.2.3. Dosage du plomb.....	53
III.3.2.2.4. Dosage du zinc	54
III.3.3. Paramètres physiques des sédiments	54
III.3.3.1. Teneur en eau et carbone organique total.....	55
III.3.3.2. Granulométrie.....	55
III.3.3.2.1. Méthode par voie humide.....	55
III.3.3.2.2. Méthode par voie sèche.....	57
III.3.3.2.3. Courbes et indices granulométriques.....	57
III.3.3.2.4. Indices sédimentologiques.....	57
III.3.3.2.4.1. Grains moyens.....	57
III.3.3.2.4.2. Sorting index	58
III.3.3.2.4.3. Skewness ou coefficient d'asymétrie	58
III.3.3.2.4.4. Coefficient d'uniformité.....	59
III.3.3.3. Température, potentiel redox, potentiel d'hydrogène et conductivité électrique	59

III.3.3.4. Morphoscopie.....	59
III.3.4. Minéralogie	60
III.3.4.1. Minéraux lourds	60
III.3.4.1.1. Préparation et tamisage.....	60
III.3.4.1.2. Séparation densimétrique	60
III.3.4.1.3. Montage.....	60
III.3.4.2. Diffractions des Rayons X.....	61
III.3.4.2.1. Principe.....	61
III.3.4.2.2. Préparation des échantillons	61
III.3.5. Géochimie des éléments majeurs, traces et terres rares.....	62
III.3.6. Evaluation du bilan géochimique du lac municipal d'Ebowa	63
III.3.7. Evaluation de la pollution.....	64
III.3.8. Méthodes d'analyses statistiques des données	64
III.3.8.1. Analyses de régressions.....	64
III.3.8.2. Analyse en composantes principales	66
III.3.8.3. Classification hiérarchique ascendante.....	68
Conclusion.....	68
CHAPITRE IV : RESULTATS	69
Introduction	70
IV.1. Localisation et description des points d'échantillonnage.....	70
IV.1.1. Localisation des points d'échantillonnage	70
IV.1.2. Description des points d'échantillonnage	70
IV.1.2.1. Lac Municipal d'Ebowa.....	70
IV.1.2.2. Cours d'eau Mfoumou et Bengo'o.....	70
IV.2. Pétrologies des sédiments	70
IV.2.1. Description macroscopiques des échantillons.....	70
IV.2.1.1. Sédiments superficiels du Lac Municipal et ses affluents.....	70
IV.2.1.2. Description des carottes des sédiments du Lac Municipal d'Ebowa	75
IV.2.1.2.1. Carotte Ca100.....	75

IV.2.1.2.2. Carotte Ca200.....	75
IV.2.1.2.3. Carotte Ca300.....	75
IV.2.2. Caractéristiques sédimentologiques des sédiments.....	79
IV.2.2.1. Granulométrie	79
IV.2.2.1.1. Histogrammes et textures	79
IV.2.2.1.1.1. Histogrammes et textures des sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa	79
IV.2.2.1.1.2. Histogrammes et textures des sédiments de la rivière Mfoumou.....	82
IV.2.2.1.1.3. Histogrammes et textures des sédiments de la rivière Bengo'o	82
IV.2.2.2. Courbes et indices sédimentologiques	82
IV.2.2.2.1. Courbes et indices sédimentologiques des sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa .	82
IV.2.2.2.2. Courbes et indices sédimentologiques des sédiments de la rivière Mfoumou	85
IV.2.2.2.3. Courbes et indices sédimentologiques des sédiments de la rivière Bengo'o	85
IV.2.2.3. Morphoscopie.....	85
IV.2.2.3.1. Morphoscopie des grains de quartz des sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa.....	85
IV.2.2.3.2. Morphoscopie des grains de quartz des sédiments de la rivière Mfoumou.....	85
IV.2.2.3.3. Morphoscopie des grains de quartz des sédiments de la rivière Bengo'o	85
IV.2.3. Minéralogie	89
IV.2.3.1. Minéraux lourds	89
IV.2.3.2. Minéralogie par diffraction aux rayons X	93
IV.2.3.2.1. Minéralogie par DRX des sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa.....	93
IV.2.3.2.2. Minéralogie par DRX des sédiments de la rivière Mfoumou.....	93
IV.2.3.2.3. Minéralogie par DRX des sédiments de la rivière Bengo'o.....	93
IV.2.3.3. Microscopie électronique à balayage	93
IV.2.4. Géochimie des sédiments	98
IV.2.4.1. Eléments majeurs	98
IV.2.4.1.1. Distribution des éléments majeurs dans les sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa	98
IV.2.4.1.2. Distribution des éléments majeurs dans les sédiments de la rivière Mfoumou.....	98
IV.2.4.1.3. Distribution des éléments majeurs dans les sédiments de la rivière Bengo'o	100
IV.2.4.2. Eléments traces.....	100

IV.2.4.2.1. Distribution des éléments traces dans les sédiments du Lac Municipal d’Ebolowa .	100
IV.2.4.2.2. Distribution des éléments traces dans les sédiments de la rivière Mfoumou	102
IV.2.4.2.3. Distribution des éléments traces dans les sédiments de la rivière Bengo’o	102
IV.2.4.3. Terres rares.....	104
IV.2.4.3.1. Distribution des terres rares dans les sédiments du Lac Municipal d’Ebolowa	104
IV.2.4.3.2. Distribution des terres rares dans les sédiments de la rivière Mfoumou	104
IV.2.4.3.3. Distribution des terres rares dans les sédiments de la rivière Bengo’o	106
IV.2.4.3.4. Normalisation des terres rares au PAAS et à la chondrite.....	106
IV.3. Caractéristiques environnementales.....	108
IV.3.1. Paramètres physicochimiques de la colonne d’eau et des sédiments.....	108
IV.3.1.1. Paramètres physicochimiques de la colonne d’eau	108
IV.3.1.1.1. Paramètres physicochimiques de la colonne d’eau du Lac Municipal d’Ebolowa ...	108
IV.3.1.1.2. Paramètres physicochimiques de la colonne d’eau de la rivière Mfoumou	108
IV.3.1.1.3. Paramètres physicochimiques de la colonne d’eau de la rivière Bengo’o	108
IV.3.1.2. Paramètres physicochimiques des sédiments.....	112
IV.3.1.2.1. Paramètres physicochimiques des sédiments du Lac Municipal d’Ebolowa	112
IV.3.1.2.2. Paramètres physicochimiques des sédiments dans la rivière Mfoumou	112
IV.3.1.2.3. Paramètres physicochimiques des sédiments dans la rivière Bengo’o.....	112
IV.3.2. Hydrochimie.....	114
IV.3.2.1. Distribution des ETM et des nutriments dans la colonne d’eau.....	114
IV.3.2.1.1. Distribution des ETM et des nutriments dans la colonne d’eau Lac Municipal d’Ebolowa	114
IV.3.2.1.2. Distribution des ETM et des nutriments dans la colonne d’eau de la rivière Mfoumou	114
IV.3.2.1.3. Distribution des ETM et des nutriments dans la colonne d’eau de la rivière Bengo’o	114
IV.3.2.2. Indice de pollution des métaux lourds dans l’eau	114
IV.3.3. Distribution des ETM dans les sédiments et indices de pollution.....	118
IV.3.3.1. Distribution des ETM.....	118
IV.3.3.1.1. Distribution des ETM dans les sédiments du Lac Municipal d’Ebolowa	118

IV.3.3.1.2. Distribution des ETM dans les sédiments de la rivière Mfoumou	118
IV.3.3.1.3. Distribution des ETM dans la rivière Bengo'o	118
IV.3.3.2. Indices de pollution	118
IV.3.3.2.1. Indices de pollution des sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa	121
IV.3.3.2.2. Indices de pollution des sédiments de la rivière Mfoumou	121
IV.3.3.2.3. Indices de pollution dans les sédiments de la rivière Bengo'o.....	121
IV.3.3.3. Indices de risques écologiques	123
IV.3.3.3.1. Indices de risques écologiques dans les sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa....	123
IV.3.3.3.2. Indices de risques écologiques dans les sédiments de la rivière Mfoumou.....	123
IV.3.3.3.3. Indices de risques écologiques dans les sédiments de la rivière Bengo'o.....	123
IV.4. Analyses statistiques	123
IV.4.1. Analyse en composantes principales.....	125
IV.4.1.1. Analyse en composantes principales des résultats des Sédiments	125
IV.4.1.2. Analyse en composantes principales des résultats de la colonne d'eau	125
IV.4.2. Classification hiérarchique ascendante (CHA)	125
IV.4.2.1. Classification hiérarchique ascendante des résultats des sédiments.....	125
IV.4.2.2. Classification hiérarchique ascendante des résultats de la colonne d'eau.....	129
IV.5. Identification des activités potentiellement sources de polluants	129
IV.5.1 Activités ménagères et rejet direct des déchets	129
IV.5.2. Lavage de voitures	129
IV.5.3. Agriculture	129
IV.5.4. Activités au marché.....	131
IV.5.5. Garage	131
IV.6. Evolution morphométrique du LME de 1962 à 2013.....	131
V.1. Roches sources des sédiments	136
V.2. Paléoclimat	140
V.3. Paléoenvironnement	143
V.4. Processus diagenétiques	147
V. 5. Qualité de l'eau et des sédiments	150

V.5.1. Qualité de l'eau.....	150
V.5.2. Qualités des sédiments	153
V.5.2.1. Distribution des ETM	153
IV.5.2.2. Pollution et risque écologique associés aux ETM dans le LME	159
V.5.3. Activités potentiellement sources de polluants	162
CONCLUSION GENERALE ETPERSPECTIVES	164
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	167

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Valeurs moyennes mensuelles des températures et précipitations de la station météorologique d'Ebolowa	7
Tableau 2. Sources probables des ETM provenant des activités anthropiques	41
Tableau 3. Formules et interprétations des indices de pollution et de risques écologiques	65
Tableau 4. Localisation des points d'échantillonnage dans le LME	72
Tableau 5. Localisation et escriptions des points d'échantillonnage dans les cours d'eau Bengo'o et Mfoumou.....	73
Tableau 6. Description des échantillons superficiels du LME, Mfoumou et Bengo'o.....	77
Tableau 7. Refus et indices sédimentologiques des sédiments du LME	84
Tableau 8. Refus et indices sédimentologiques des sédiments des cours d'eau Mfoumou et Bengo'o	86
Tableau 9. Proportions des différentes formes de grains de quartz dans le LME et dans les cours d'eau Mfoumou, et, Bengo'o	88
Tableau 10. Composition en minéraux lourds dans les sédiments étudiés.....	91
Tableau 11. Compositions minéralogiques des fractions globales des sédiments.....	95
Tableau 12. Données microchimiques pour les lames des sédiments du LME.....	97
Tableau 13. Distribution des éléments majeurs dans les sédiments	99
Tableau 14. Matrice de corrélation des éléments majeurs du LME	101
Tableau 15. Distribution des éléments traces dans les sédiments	103
Tableau 16. Distribution des terres rares e dans les sédiments	105
Tableau 17. Paramètres physiques de l'eau.....	111
Tableau 18. Paramètres physiques des sédiments du LME et des cours d'eau Mfoumou et Bengo'o	113
Tableau 19. Paramètres chimiques de l'eau	115
Tableau 20. Indice de pollution des métaux lourds dans les eaux.....	117
Tableau 21. Distribution des ETM en mg/kg dans les sédiments du LME	120
Tableau 22. Indices de pollution	122
Tableau 23. Indices d'évaluation du risque écologique	124
Tableau 24. Caractéristiques morphométriques du LME en 2021	133
Tableau 25. Matrice de corrélation de Pearson illustrant les relations entre les nutriments	149
Tableau 26. Matrice de corrélations de Pearson illustrant les relations entre les paramètres physiques et chimiques de la colonne d'eau	155
Tableau 27. Matrice de corrélation de Pearson illustrant les relations entre les ETM et les paramètres physiques des sédiments	157
Tableau 28. Comparaison des teneurs moyennes des ETM en mg/kg dans le LME et ceux des autres lacs urbains.....	160
Tableau 29. Matrice de corrélation de Pearson illustrant les relations entre les ETM, Fe et Al dans les sédiments.....	163

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation de la zone d'étude	6
Figure 2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussien.....	7
Figure 3. Carte géomorphologique de la zone d'étude	9
Figure 4. Image aérienne du Lac municipal d'Ebolowa en 2007.....	10
Figure 5. Représentation schématique des parties d'un lac	17
Figure 6. Etages d'un milieu lacustre.....	20
Figure 7. Classification de la texture des sédiments).....	28
Figure 8. Carte géologique de la partie SE Cameroun	44
Figure 9. Technique de prélèvements des carottes de sédiments dans les cours d'eau.....	51
Figure 10. Représentation de projections typiques de variables dans un plan factoriel.....	67
Figure 11. Carte d'échantillonnage	71
Figure 12. Couleurs des sédiments superficiels	74
Figure 13. Carottes	76
Figure 14. Représentation schématique des carottes du LME	78
Figure 15. Histogrammes des sédiments du LME	80
Figure 16. Histogrammes des sédiments des cours d'eau Mfoumou et Bengo'o	81
Figure 17. Texture des sédiments.....	83
Figure 18. Courbes sédimentologiques	87
Figure 19. Proportions moyennes des différentes formes de grains de quartz dans les trois milieux étudiés.....	89
Figure 20. Quelques minéraux lourds	92
Figure 21. Diffractogrammes des échantillons analysés.....	94
Figure 22. Microphotographies au MEB des échantillons représentatifs des trois sites.....	96
Figure 23. Représentation de l'ensemble des micro-analyses de MEB des sédiments du d'eau Mfoumou et Bengo'o dans le système 2R3 – MR3 – 3R2.....	96
Figure 24. Normalisation des terres rares.....	107
Figure 25. Distribution spatiale des paramètres physiques de la colonne d'eau dans le LME	109
Figure 26. Distribution des paramètres physiques dans les eaux	110
Figure 27. Distribution des ETM et des nutriments dans la colonne d'eau des cours d'eau Mfoumou et Bengo'o.....	116
Figure 28. Variation spatiale des ETM	119
Figure 29. Cercle de l'analyse en composantes principale des résultats des sédiments	126
Figure 30. ACP illustrant les relations entre différents paramètres e.....	127

Figure 31. Relations entre les éléments et les sites	128
Figure 32. Classification Hiérarchique Ascendante illustrant les relations entre les différents sites.....	130
Figure 33. Activités potentiellement sources de pollution	132
Figure 34. Diagramme binaire Al_2O_3 vs TiO_2 illustrant une origine granitique et ryolitique/granitique des sédiments du LME, Mfoumou et Bengo'o	138
Figure 35. Diagramme de provenance à partir des éléments traces	139
Figure 36. Altération des sédiments	141
Figure 37. Diagramme binaire de Cox et <i>al.</i> (1995)	146
Figure 38. Distribution des ETM et des nutriments dans la colonne d'eau du LME.....	156
Figure 39. Distribution spatiale des teneurs en ETM dans les sédiments du LME.....	158

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP : analyse en composantes principales

CHA : classification hiérarchique ascendante

CIA : *chemical index of alteration*

Corg : carbone organique

COT : carbone organique total

CRVL : ceinture de roches vertes

CE : conductivité électrique

CUE : Communauté urbaine d'Ebolowa

CUF : *Cameroon united forest*

Eh : potentiel d'oxydoréduction

Er : facteur de risque écologique potentiel

ETM : élément trace métallique

FC : facteur de concentration

FE : facteur d'enrichissement

GPS : *global positioning system*

HREE : *heavy rare earth element*

HYSACAM : hygiène et salubrité du Cameroun

ICP-MS : *Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry*

ICV : indice de variabilité compositionnelle

LME : lac municipal d'Ebolowa

LPA : lumière polarisée analysée

LPNA : lumière polarisée non analysée

LREE : *light rare earth element*

OD : oxygène dissous

OMS : organisation mondiale de la santé

PAAS : *post archean average shale*

PEC : effet probable de concentration

pH : potentiel d'Hydrogène

PIA : *plagioclase index of alteration*

PLI : indice de charge de pollution

Qi: Indice de variation

rd : référence détritique

REE : *rare earth elements*

RI : indice de risque écologique potentiel

Sal : salinité

SQGs : guide pour la qualité des sédiments

TE : teneur en eau

TEC : seuil de l'effet de concentration

TTG : tonalite-trondhjénite-granodiorite

Turb : turbidité

UCC : *upper continental crust*

RESUME

Dans le but d'étudier la genèse et le niveau de contamination en éléments traces métalliques (ETM) des sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa (LME), la présente a été effectuée. Pour ce faire, soixante-un échantillons (21 d'eau et 40 de sédiments) issus du lac et de ses deux affluents (Mfoumou et Bengo'o) ont été soumis aux analyses physiques, minéralogiques et chimiques. Les résultats obtenus montrent que les valeurs du pH dans les eaux du LME et ses affluents vont de 5,69 à 7,95. Celles du Eh varient de -45 à 95 mV. L'oxygène dissout et la conductivité électrique oscillent respectivement entre 2,3 et 8,9 mg/L, et, entre 47,3 et 217 μ Cs. Les teneurs en Turbidité sont supérieures à 1 NTU. Dans les sédiments, le pH est inférieur à 7 et Eh varie de -48 à 86,27 mV. La conductivité va de 184,6 à 369,33 μ Cs. Sur le plan sédimentologique, les sédiments du LME sont dominés par la fraction fine. Ceux des affluents sont dominés par la fraction grossière. Trois formes de courbes granulométriques sont observées : parabolique, hyperbolique et sigmoïdale. L'analyse morphoscopique révèle la prédominance des grains de quartz anguleux. Les minéraux lourds constitutifs sont : hornblende brune, tourmaline, zircon, biotite, grenat, staurotide et sillimanite. Par DRX et la projection des données du MEB, les sédiments sont constitués de quartz, kaolinite, goethite, gibbsite, sidérite. Les analyses chimiques de la colonne d'eau ont montré que, les teneurs en Cr (0,02 mg/L), Cu (0,11 mg/L), Zn (0,35 mg/L), PO_4^{3-} (1,05 mg/L) et NO_3^- (5,31 mg/L) sont conformes aux normes OMS, relative aux eaux de consommation. Celles des sédiments ont illustré que, les valeurs de SiO_2 et de Al_2O_3 sont comprises entre 60,44 et 89,47%, et, 6,55 et 18,17%, respectivement. Les valeurs des alcalins sont inférieures à 1. CIA et PIA ont des valeurs supérieures à 75. Celles de ICV sont inférieures à 0,85. Le rapport LREE/HREE oscille entre 16,86 et 32,85. Les valeurs du coefficient de concentration (Q_i) sont inférieures à 1 pour Si et supérieures à 1 pour les alcalins, Fe, Mn et P. Les sédiments présentent des valeurs du FE > 1,5 en Cr, Ni, Cd et Cu. Les valeurs de RI sont inférieures à 110. Ces sédiments proviennent des roches felsiques de nature magmatique et métamorphique. Celles-ci ont subi une altération chimique intense. Le LME dans lequel ils se déposent est un milieu relativement calme, hypereutrophe, qui a connu de faibles perturbations, et est le siège des processus diagenétiques, tels que la précipitation, l'absorption, la dissolution et la minéralisation de la matière organique. Ceux-ci favorisent l'enregistrement des ETM dans les sédiments. Lesquels présentent une contamination modérée en Cr, Ni, Cd et Cu. Ces ETM proviendraient en grande partie d'une source anthropique, liée aux activités domestiques. Toutefois, le risque écologique associé à ces éléments est faible.

Mots-clés : Sédiments, Genèse, diagenèse-précoce, Pollution, éléments-traces-métalliques, lac-municipal-d'Ebolowa

ABSTRACT

In order to study the genesis and the contamination level of metallic trace elements (TME) in the sediments of the Ebolowa Municipal Lake (EML), the current study was conducted. Sixty-one samples (21 water and 40 sediment) from the EML and its two tributaries (Mfoumou and Bengo'o) were subjected to physical, mineralogical and chemical analyses. The pH values in the waters of the LME and its tributaries range from 5.69 to 7.95. Eh values range from -45 to 95 mV. DO and Cs values range from 2.3 to 8.9 mg/L and from 47.3 to 217 μ Cs respectively. Turb contents are above 1 NTU. In the sediments, the pH is below 7 and Eh varies from -48 to 86.27 mV. Conductivity ranges from 184.6 to 369.33 μ Cs. Sedimentologically, the EML sediments are dominated by the fine fraction. Those of the tributaries are dominated by the coarse fraction. Three forms of granulometric curves are observed: parabolic, hyperbolic and sigmoid. Morphoscopic analysis reveals the predominance of angular quartz grains. The heavy minerals that make up these sediments are: brown hornblende, tourmaline, zircon, biotite, garnet, staurotide and sillimanite. By XRD and SEM data projection, the sediments are composed of quartz, kaolinite, illite, goethite, hematite, siderite. The chemical analyses of the water column showed that the contents of Cr (0.02 mg/L), Cu (0.11 mg/L), Zn (0.35 mg/L), PO₄³⁻ (1.05 mg/L) and NO₃⁻ (5.31 mg/L) comply with the WHO standards for drinking water. The sediment analyses showed that SiO₂ and Al₂O₃ values ranged from 60.44 to 89.47% and 6.55 to 18.17%, respectively. Alkali values are below 1. CIA and PIA have values above 75. ICV values are below 0.85. The LREE/HREE ratio varies between 16.86 and 32.85. The values of the concentration coefficient (Qi) are lower than 1 for Si and higher than 1 for the alkalis, Fe, Mn and P. The sediments have values of EF > 1.5 in Cr, Ni, Cd and Cu. The RI values are below 110. These results show that the sediments are derived from felsic rocks of magmatic and metamorphic nature. These rocks have undergone intense chemical alteration. The LME in which they are deposited is a relatively quiet, hypereutrophic environment, which has undergone little disturbance, and is the site of diagenesis processes, such as precipitation, absorption, dissolution and mineralization of organic matter. These processes favour the recording of TMEs in the sediments. The sediments are moderately contaminated with Cr, Ni, Cd and Cu. These TMEs would largely come from an anthropogenic source, linked to domestic activities. However, the ecological risk associated with these elements is low.

Keywords: Sediment, Genesis, Early-diagenesis, Pollution, Trace-metal-element, Ebolowa-municipal-lake

INTRODUCTION GENERALE

Les lacs sont des masses d'eau extrêmement diversifiées. Ils abritent une importante biodiversité et sont au cœur d'enjeux essentiels pour l'Homme (Montuelle, 2015). Ils occupent près de 1,8% de la surface du globe et représentent environ 0,19% du volume d'eau de l'hydrosphère (Balasubramanian, 2015). Les lacs intègrent les processus de leurs bassins versants et sont donc des lames d'eau très sensibles aux changements du paysage et par conséquent sont des archives de haute résolution des changements locaux et régionaux (Phartiyal et al., 2011 ; Choudhary et al., 2018). Leur étude permet ainsi de caractériser les sédiments qui s'y trouvent, de déterminer leurs roches sources, de faire des reconstitutions paléoenvironnementales des milieux de dépôt, et de suivre l'évolution des processus d'altération et des activités anthropiques (Das et al., 2006 ; Singh, 2009 ; Sahoo et al., 2015). Selon certains auteurs (Das et al., 2006 ; Sahoo et al., 2017 ; Ekoa et al., 2021). La composition des sédiments dépend de celle de leur roche source. Cependant, les processus tels que l'altération chimique, le transport, et les caractéristiques du milieu de dépôts peuvent fortement modifier cette composition (McLennan, 1989; Cox et al., 1995 ; Vinha et al., 2016 ; Mohammed et al., 2020). En effet, bien qu'ils paraissent calmes, les lacs sont en fait des systèmes très dynamiques dans lesquels se déroulent un certain nombre de processus (Touchart, 2000). Ces processus, qui sont contrôlés par les paramètres physiques et biologiques du milieu, peuvent modifier la composition des particules par le biais des réactions de sorption et de la minéralisation de la matière organique (Ogier, 1999). Aussi, du fait de l'urbanisation galopante et de la croissance démographique, ces milieux sont de plus en plus confrontés à la pression humaine avec pour corolaire la pollution (Liu et al., 2014 ; Xu et al., 2017 ; Zhao et al., 2017 ; Varol et al., 2020). La pollution des milieux lacustres est due à un apport excessif des substances organiques (pesticides) et inorganiques (métaux lourds et nutriments), d'origine naturelle et/ou anthropique (Lijklema, 1993 ; Jumbe et Nandini, 2009 ; Ji et al., 2015 ; Omwene et al., 2018).

Au Cameroun, comme partout en Afrique, les cartes géologiques sont réalisées à très grande échelle (1/50000, voire 1/100000). Cet état de chose ne permet pas d'avoir une idée précise sur les types pétrographiques qui couvrent ces régions. Les sédiments lacustres proviennent généralement des sources proximales (bassin versant). De ce fait, ils sont communément utilisés seuls ou associés à la pétrographie pour définir la nature des roches environnantes. La partie Sud du Cameroun est couverte par des formations d'âges archéennes de la bordure Nord-ouest du craton du Congo. Certains travaux (Tchameni, 1997 ; Akame et al., 2022) montrent que la région d'Ebolowa appartient au complexe du Ntem. Les principaux types pétrographiques qui lui sont associés sont les charnockites, les tonalites, les granitoïdes potassiques, les syénites, les dolerites et les gneiss, qui enclavent les roches vertes (Tchameni

et *al.*, 2001, 2010 ; Shang et *al.*, 2004 ; 2007). Ceux-ci sont magmatiques (charnockites, tonalites, syénite et dolerites), métamorphiques (gneiss), felsiques (charnockites, tonalites et gneiss) et mafiques (syénite et dolérite). Toteu et al. (2008) ont montré que le bassin du Lac Municipal d'Ebolowa (LME) est couvert par la suite magmatique charnockitique. Cependant, ces travaux se sont aussi réalisés à grande échelle. De ce fait, d'autres types pétrographiques décrites dans le complexe du Ntem pourraient être présentes ne se serait qu'à l'état d'enclaves. Ainsi, l'étude des sédiments du LME pourrait renseigner sur la nature des roches qui affleurent dans la région. Aussi, en tant archive de haute résolution des changements locaux et régionaux, l'étude des sédiments du LME pourrait renseigner sur les conditions paléoenvironnementales et paléoclimatiques qui régnaient au cours des paléoaltérations.

Le lac est alimenté par deux affluents, Mfoumou et Bengo'o, dont les caractéristiques physicochimiques sont à priori différentes des siennes. Du fait de ces caractéristiques, le LME serait le siège des processus de diagenèse précoce. Cependant, aucune étude n'a été menée dans le but de les identifier et de déduire leur influence sur la composition des particules qui sédimentent. Aussi, ce plan d'eau est situé au cœur d'une ville dépourvue de station d'épuration des eaux. Il représente donc le réceptacle des déchets issus des différentes activités qui sont menées dans le bassin versant. Le LME apparait ainsi comme un milieu vulnérable à la pollution. Cependant, les études menées pour évaluer son état restent embryonnaires, car elles se sont focalisées uniquement sur la colonne d'eau, particulièrement sur les paramètres physicochimiques (Madjiki et *al.*, 2013). Les principaux polluants issus des activités humaines que sont les éléments traces métalliques (ETM), d'une part, et les sédiments qui selon plusieurs auteurs (Dai et *al.*, 2017 ; Zhang et *al.*, 2020 ; Varol et *al.*, 2020) représentent le principal lieu de stockage des polluants qui arrivent dans les milieux aquatiques, d'autre part, n'ont pas été pris en compte.

Dans ce contexte, le présent travail se propose d'étudier la genèse de ces sédiments et d'évaluer leur degré de contamination en éléments traces métalliques, spécifiquement, il sera question de :

- déterminer la nature des roches sources des sédiments;
- définir le paléoclimat ;
- déterminer les processus diagenétiques qui ont cours dans ce lac ;
- donner les caractéristiques hydrodynamiques et redox du milieu de dépôt ;
- évaluer la qualité de l'eau et des sédiments ;
- identifier les activités potentiellement sources de polluants dans le bassin versant.

Hormis une introduction et une conclusion générales, ce mémoire est subdivisé en cinq (05) chapitres :

- le chapitre 1 présente le milieu naturel de la zone, c'est-à-dire les caractéristiques physiques et socio-économiques;
- le chapitre 2 est un résumé des travaux relatifs au sujet traité au Cameroun, en Afrique et dans le monde ;
- le chapitre 3 déroule le matériel et les méthodes mis en œuvre pour atteindre les objectifs suscités ;
- le chapitre 4 présente les résultats obtenus ;
- le chapitre 5 interprète et discute les principaux résultats obtenus au cours de ces travaux.

CHAPITRE I : MILIEU NATUREL

Introduction

Le présent chapitre vise à présenter le milieu naturel de la zone d'étude, c'est-à-dire le cadre administratif et géographique, climatologique, hydrographique, phytogéographique et socio-économique.

I.1. Situation géographique et administrative

La ville d'Ebolowa est localisée dans la Région du Sud-Cameroun, Département de la Mvila, Arrondissement d'Ebolowa 2°. Elle est située à environ 150 km de Yaoundé, capitale politique du Cameroun.

Le lac municipal d'Ebolowa (LME) est une vaste étendue d'eau coincée entre les quartiers Angalé, Nko'ovos et Ekombité. Il est limité à l'Ouest par le marché central d'Ebolowa, à l'Est par les services administratifs, au Nord par l'hôpital régional et au Sud les débits de boisson et les établissements hôteliers. Sur le plan géographique, il est compris entre 02°34'59'' et 02°57'59'' de latitude Nord et, 11°02'33'' et 11°14'33'' de Longitude Est. (Fig. 1).

I.2. Milieu physique

I.2.1. Climat

Les relevés pluviométriques et de température de la station météorologique d'Ebolowa, pour la période de 2008 à 2018 ont été mis à contribution pour caractériser le climat. Ces données indiquent que la pluviosité et la température moyenne annuelles sont respectivement de 1673 mm et 24,8°C (Tab 1). Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1957) appliqué à ces données montre une alternance de quatre saisons (Fig. 2) réparties comme suit :

- une grande saison sèche de mi-novembre à février,
- une petite saison de pluies de mars à mi-juin,
- une petite saison moins humide à tendance sèche, de mi-juin à août,
- une grande saison des pluies d'août à mi-novembre.

D'après Suchel (1987), ces caractéristiques correspondent à un climat sub-équatorial de type guinéen forestier.

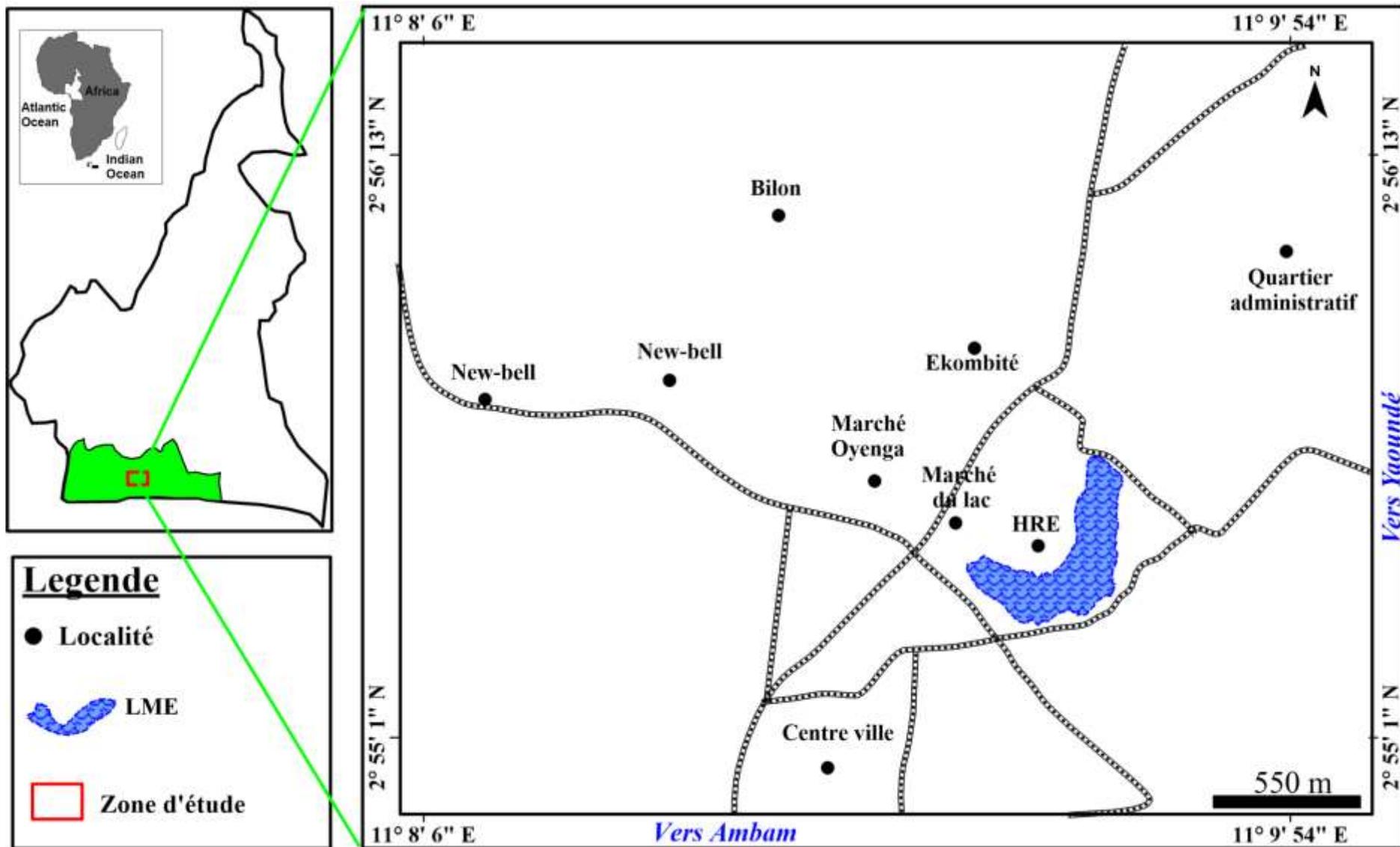


Figure 1. Localisation de la zone d'étude (a) Cameroun en Afrique, (b) Région du Sud (c) Zone d'étude

Tableau 1. Valeurs moyennes mensuelles des températures et précipitations de la station météorologique d’Ebolowa durant la période allant de 2008 à 2018

Mois	Jan.	Fev.	Mr.	Avr.	Mai	Jn.	Jul.	At.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Moy.	Total
P (mm)	15,5	83	158,3	175,6	188	132	54,5	103	256	323,8	121	60,1	146,4	1673
T (°C)	25,5	26,3	25,6	25,6	25	24,4	23,6	23,5	24,3	24,2	25	24,8	24,8	

P : Précipitation T : Température

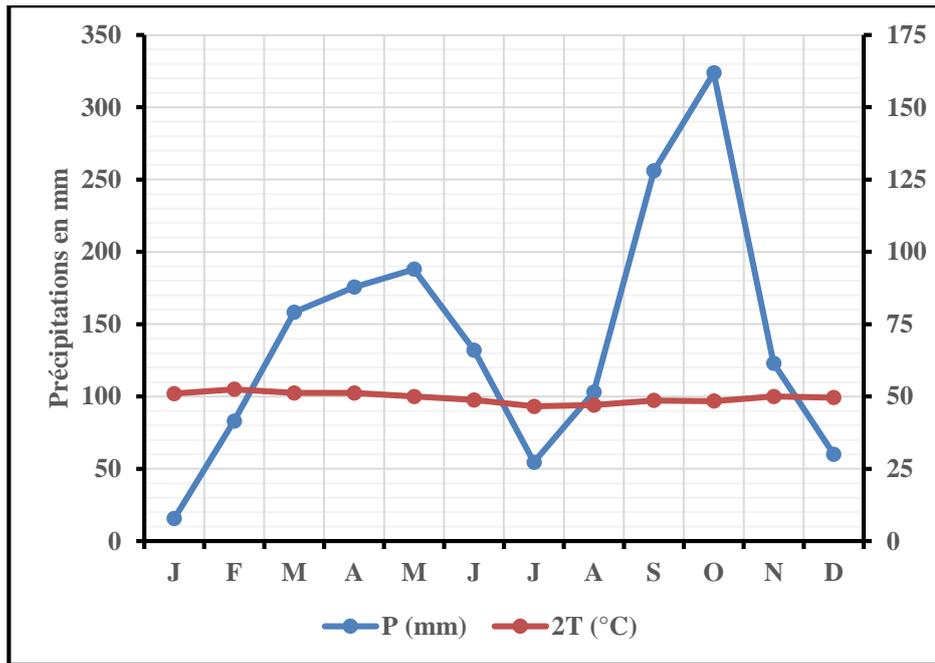


Figure 2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussien (1957) adapté aux données de la station météorologique d’Ebolowa pour la période allant de 2008 à 2018

I.2.2. Géomorphologie

I.2.2.1 Hydrographie

La partie Sud du Cameroun est drainée par deux grands bassins hydrographiques : le bassin des fleuves côtiers à l'Ouest et le bassin du Congo à l'Est (Olivry, 1985). La région d'Ebolowa est tributaire du bassin des fleuves côtiers. Le principal collecteur dudit bassin est le fleuve Ntem. Ce dernier est alimenté pendant toute l'année par un réseau dense, persillé et à guidage structural. Celui-ci empreinte en effet, des directions tectoniques méridiennes à subméridiennes. Néanmoins, on observe localement certains cours d'eau, qui suivent une direction perpendiculaire aux autres.

La zone d'étude appartient au sous bassin du Ntem. La rivière Mvila est le principal collecteur. Les principaux cours d'eau qu'on y observe sont : Loo, Mevimba et Mfiandé, tous affluents de Seng. Ces derniers coulent suivant deux directions perpendiculaires : NE-SW (Loo et Mfiandé) et NW-SE (Mevimba). Ils sont alimentés par un réseau dense, dendritique et subparallèle. Le LME est alimenté par deux cours d'eau : Bengo'o au Nord-est et Mfoumou à l'Ouest. La rivière Bengo'o prend sa source au lieu-dit « *Minkongo* ». Elle parcourt une distance d'environ quinze kilomètres et traverse les quartiers Mikongo, Bilon, Angalé et Ekombité avant de se jeter dans le lac. La rivière Bengo'o, prend sa source au quartier New-Bell. Elle traverse les quartiers New-Bell I, New-Bell II, New-Bell III, marché Oyenga, Ekombité et le marché central avant de se jeter dans le lac, après avoir parcouru une distance d'environ 5 km (Fig. 3).

Le Lac Municipal d'Ebolowa a une forme irrégulière en arc de cercle ou arqué (Fig. 4). Sa superficie et son périmètre sont respectivement de 13,25 ha et 2,13 km. Sa profondeur moyenne est estimée à environ 1,60 m. Son débit spécifique moyen est de 0,28 m³/s. Le temps de renouvellement de ses eaux est largement inférieur à un an (Madjiki et *al.*, 2013).

I.2.2.2. Orographie

Le Sud Cameroun est une vaste région, qui s'étend de la côte atlantique au bassin du Congo. Cette zone est constituée de pénéplaines plus ou moins arrosées (Tchameni, 1997). La zone d'Ebolowa se caractérise par un relief relativement plat. Ce relief est faiblement accidenté dans la partie Nord de la ville, où l'on note la présence des collines à pentes raides, dont les altitudes peuvent atteindre 1000 m (Segalen, 1994).

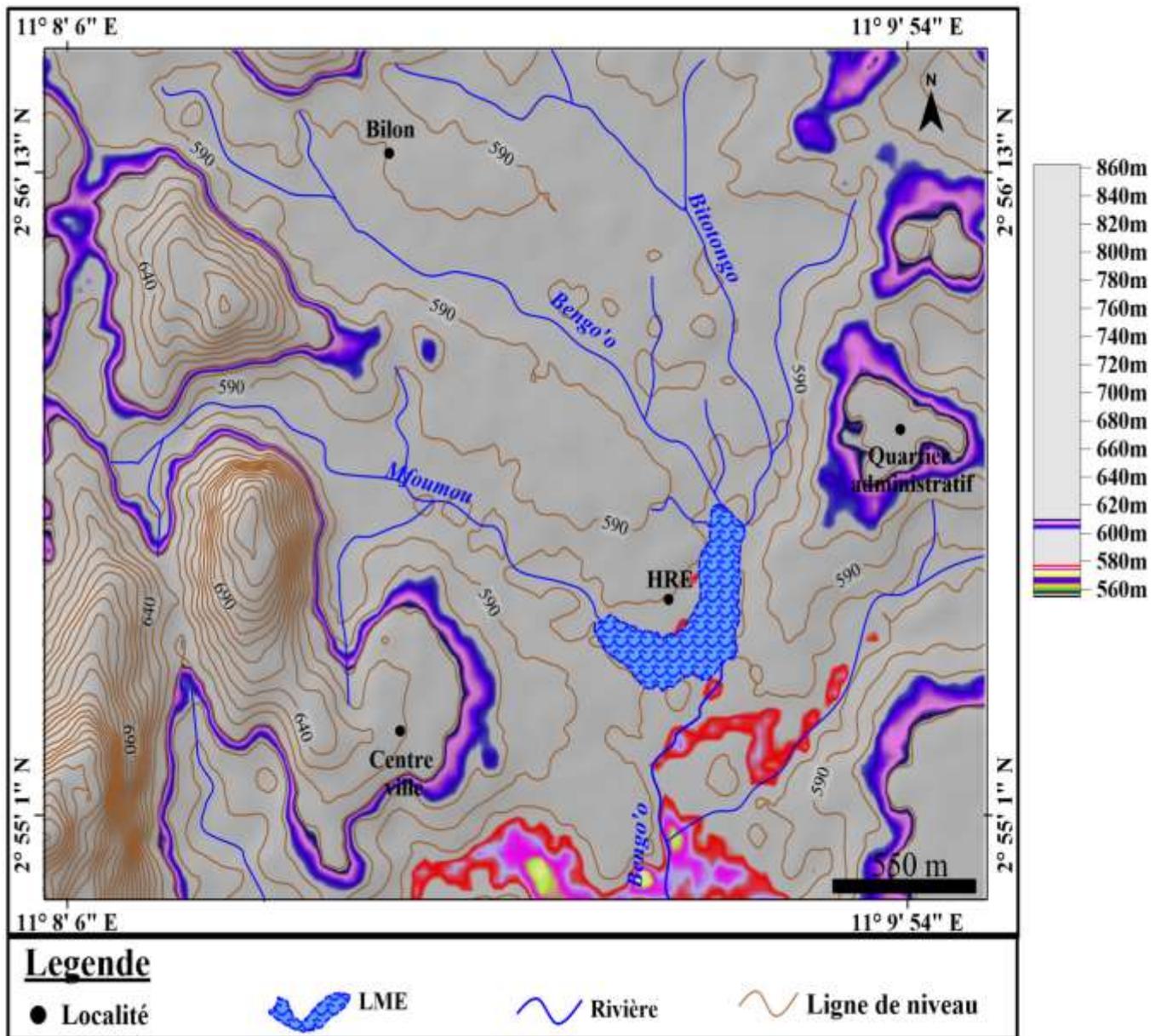


Figure 3. Carte géomorphologique de la zone d'étude (carte topographique d'Ebolowa à l'échelle 1/50000)



Figure 4. Image aérienne du Lac municipal d'Ebowa en 2007 (Google Earth, 28/05/2007 à 15h14)

L'image SRTM de ladite zone, traitée avec le logiciel Surfer 16, permet de distinguer trois unités orographiques (Fig. 3) :

- une unité d'altitude comprise entre 560 et 650 m, qui occupe plus de 94% de la zone ;
- une unité dont les altitudes varient de 650 à 820 m, qui représente environ 4% de la superficie ;
- une unité d'altitude comprise entre 820 et 1000 m qui représente la surface restante (2%). Comme la précédente, elle occupe la partie Nord de la zone d'étude.

I.2.3. Sols

Deux principales classes de sols se côtoient dans la région : les sols ferrallitiques et des sols hydromorphes (Bekoa, 1994). Les sols ferrallitiques représentent l'essentiel des sols rencontrés. Ils sont de deux types : les sols ferrallitiques rouges et les sols ferrallitiques jaunes. Les premiers proviennent des roches mères riches en éléments ferromagnésiens. Leur teneur en matières organiques est faible et leur pH acide. Les seconds se remarquent par des teneurs élevées en sables et argiles, faibles en matières organiques et insignifiantes en humus (Bekoa, 1994). Ces sols sont désaturés et marqués par la présence de rigolites plus ou moins indurées (Vallerie, 1995). Ils sont essentiellement constitués de kaolinite, hématite, goéthite, quartz, gibbsite et ilménite (Vallerie, 1995). Les sols hydromorphes totalité des horizons d'un sol, peu importe sa nature. Ils occupent généralement les bas-fonds mal drainés. Ces sols se caractérisent par des teneurs élevées en matière organique (environ 20%), et faibles en argiles avec des textures très variables (Bekoa, 1994). Ces textures sont de type sableux avec recouvrement limono-argileux, sablo-argileux, et argilo-sableux en profondeur (Vallerie, 1995). Les principaux minéraux qui les constituent sont : minéraux argileux et le quartz. A ceux-ci s'ajoute la kaolinite, en quantité croissante avec la profondeur (Valérie, 1995)

I.2.4. Flore

La végétation de la zone d'étude est une forêt dense semi décidue et ombrophile humide de type équatoriale (Letouzey, 1985). Elle est caractérisée par un manteau forestier infini. Ce domaine forestier est subdivisé en forêt primaire et en forêt secondaire. Le premier type se localise le long des cours d'eaux et des sommets de collines à sous-bois. Elle est facilement accessible. Les principales espèces qu'on y rencontre sont *Aucoumea klaineana*, *Milicia excelsa*, *Baillonella toxisperma*, etc. On note aussi la présence dans les bas-fonds des espèces comme le raphia. Le second type, en revanche apparaît suite à la dégradation du premier. Il se caractérise

par la présence de nombreuses clairières herbacées de type savane boisée. Compte tenu du niveau d'urbanisation de la zone d'étude, ce type de forêt occupe la plus grande surface.

I.2.5. Faune

Dans la région d'Ebolowa, les mammifères et les autres groupes zoologiques sont représentés. Il s'agit entre autre des antilopes, la famille des primates, les rongeurs et des prédateurs tels que le lynx et le léopard. Parmi les oiseaux, on distingue quelques espèces rares telles que : la picatharte, la grive, l'hirondelle et les rapaces tels que les éperviers. Il faut également souligner la présence des espèces vulnérables tels que le pangolin géant, le pangolin, le perroquet gris à queue rouge et de certains grands rapaces comme l'aigle couronné. A cette faune sauvage s'ajoute la faune domestique. Celle-ci est composée principalement de chèvres, de moutons, des porcs, des poules et des canards.

I.3. Milieux socio-culturel et économique

I.3.1. Milieu socio-culturel

I.3.1.1. Population

La ville d'Ebolowa est un centre urbain cosmopolite. Ce peuplement diversifié est composé principalement des Boulous (autochtones) du grand groupe Fang-béti. Les autres groupes ethniques viennent de toutes les régions du pays. On note aussi la présence de quelques expatriés dont certains sont en transit pour les pays frontaliers (Gabon et Guinée Equatoriale). C'est une population relativement jeune. En effet, le dernier recensement de la population, 2005 révèle que la tranche des moins de vingt-cinq (25) ans représente plus de 50% de la population.

I.3.1.2. Religion

La pratique religieuse épouse les contours historiques du Cameroun. Ainsi, le Sud forestier est à dominance chrétienne du fait de l'action des missionnaires précoloniaux, notamment le protestantisme et le catholicisme. Le grand Nord et l'Ouest, qui ont connu des vagues de migrants peuls, sont à dominance musulmane. Cette configuration se ressent davantage dans la ville d'Ebolowa du fait du cosmopolitisme. En effet, les vagues de migrants musulmans quittés de l'Ouest et de la partie septentrionale du Cameroun, à laquelle s'ajoutent les expatriés de nationalités et d'obédience religieuse diverses sont venus s'ajouter à une population jusque-là chrétienne. Ainsi, les différents groupes religieux, les protestants, les catholiques et les animistes, y sont présents.

I.3.2. Activités économiques

L'activité économique de la zone est influencée par la proximité du Gabon et la Guinée Equatoriale, deux pays dont l'économie ne repose que sur les revenus pétroliers. C'est ainsi qu'on va trouver la prédominance du commerce et de l'activité agricole.

I.3.2.1. Commerce

Le commerce est la principale activité menée dans la zone. Celui-ci se matérialise par la présence de nombreuses boutiques (électroménager, habillement, alimentation, etc). On note aussi la vente des produits vivriers tels que les tubercules et les céréales.

I.3.2.2. Agriculture

La pratique de l'agriculture demeure une réalité vivante dans la ville d'Ebolowa. Il s'agit particulièrement des produits maraîchers tels que le manioc, le macabo, l'arachide et le maïs. Ceux-ci sont cultivés dans des champs polycultureaux, sur les terres élevées. Dans les bas-fonds, on note la culture de la tomate et de nombreux autres légumes, qui nécessitent l'utilisation des intrants agricoles. Cette activité est pratiquée par une proportion non négligeable de la population. L'agriculture est le second mode de mise en valeur des terres par la population, juste après l'immobilier. Aux produits de la terre, il convient de joindre l'élevage particulièrement florissant dans la région. En effet, la ville d'Ebolowa est une zone d'escale pour de nombreux troupeaux provenant du Nord et de l'Ouest Cameroun en direction du Gabon et de la Guinée équatoriale. Cette activité concerne notamment le bovin (bœufs et moutons) et la volaille. La pratique consiste à rechercher les pâturages (bovin) à l'intérieur et dans les environs immédiats de la ville, pendant le jour. Les bêtes étant mises dans les enclos à la tombée de la nuit.

I.3.2.3 Activités tertiaires

Comparé à celui des autres capitales régionales du Cameroun, le secteur tertiaire de la ville d'Ebolowa apparaît moins florissant. Néanmoins, quelques domaines comme la finance, l'hôtellerie, la transformation du bois, la mécanique et la téléphonie mobile y sont observés. De nombreux édifices hôteliers sont présents, çà et là dans la ville. Notons cependant que ces édifices se localisent pour la plupart dans le bassin versant du lac municipal d'Ebolowa. La *Cameroon United Forest* (CUF) est la principale structure qui assure la transformation du bois. L'épanouissement du commerce, tout comme la présence de nombreux agents de l'Etat, des élèves et des étudiants, favorisent l'épanouissement des banques et des microfinances.

Conclusion

La zone d'étude est localisée dans l'Arrondissement d'Ebolowa 2^e, Département de la Mvila dans la Région du Sud. Son climat est de type équatorial continental. Elle appartient au sous bassin du Ntem. Les principaux cours qu'on y retrouve sont Mfiandé, Mevimba et Loo. Son relief est relativement plat. Cependant, quelques sommets d'altitudes supérieures ou égales à 1000 m y sont présents. Les sols ferrallitiques et les sols hydromorphes se côtoient dans ladite zone. La végétation est de type forêt dense semi décidue et ombrophile. La population est relativement jeune et cosmopolite. L'agriculture, l'élevage, et le commerces sont les activités les plus pratiquées dans la région.

CHAPITRE II : REVUE DE LITTERATURE

Introduction

Le présent chapitre résume les travaux relatifs à l'étude des lacs, en prenant en compte leur typologie, leur composition et les phénomènes qui s'y déroulent. Il aborde également quelques notions liées à l'évaluation environnementale et au contexte géologique de la zone d'étude.

II.1. Généralités sur les lacs

II.1.1. Définitions

D'après Cvijic (1901), un lac est une masse d'eau stagnante, située dans une dépression de sol, fermée de tous les côtés et n'ayant aucune communication directe avec la mer. Pour Montuelle (2015), c'est une cuvette naturelle ou artificielle, remplie d'eau avec le plus souvent un exutoire. Selon Touchart (2000), un lac est un plan d'eau continental, c'est-à-dire séparé de la mer, dominé par son bassin et développant une personnalité propre, dont la profondeur, la superficie ou le volume sont suffisants pour provoquer un étagement, une zonation ou une régionalisation des processus limniques. Les lacs se caractérisent, d'une part, par leur morphologie en forme de cuvette symétrique ou non et constitués d'une zone littorale et une zone profonde (Fig. 5) abritant chacune une faune et une flore variées et spécifiques, et d'autre part, par leur fonctionnement (Campy et Meybeck, 1995 ; Montuelle, 2015).

II.1.2. Fonctionnement d'un lac

En plus d'être des milieux physiques, les lacs sont des milieux vivants régis par un fonctionnement propre (Chamley, 1988 ; Ogier, 1999 ; Michard *et al.*, 1999). Ce fonctionnement, c'est-à-dire l'ensemble des processus qui modifient leur composition et leur biodiversité, dépend des facteurs biochimiques et des paramètres environnementaux (Chamley, 1988 ; Campy et Meybeck, 1995). Les premiers jouent un rôle important dans plusieurs processus biologiques et physico-chimiques, en occurrence la diagenèse précoce (Ogier, 1999). Les seconds que sont le climat, la hauteur des eaux et les particularités du bassin versant, jouent aussi des rôles importants dans ces milieux (Ogier, 1999). En effet, le climat agit sur les variations du niveau moyen des eaux, leur composition chimique, et la productivité organique. La hauteur de la colonne d'eau conditionne les courants et la stratification des masses d'eau. Les particularités du bassin versant quant à elles déterminent le flux de matières d'éléments figurés et en solution, qui y pénètrent (Chamley, 1988 ; Ogier, 1999).

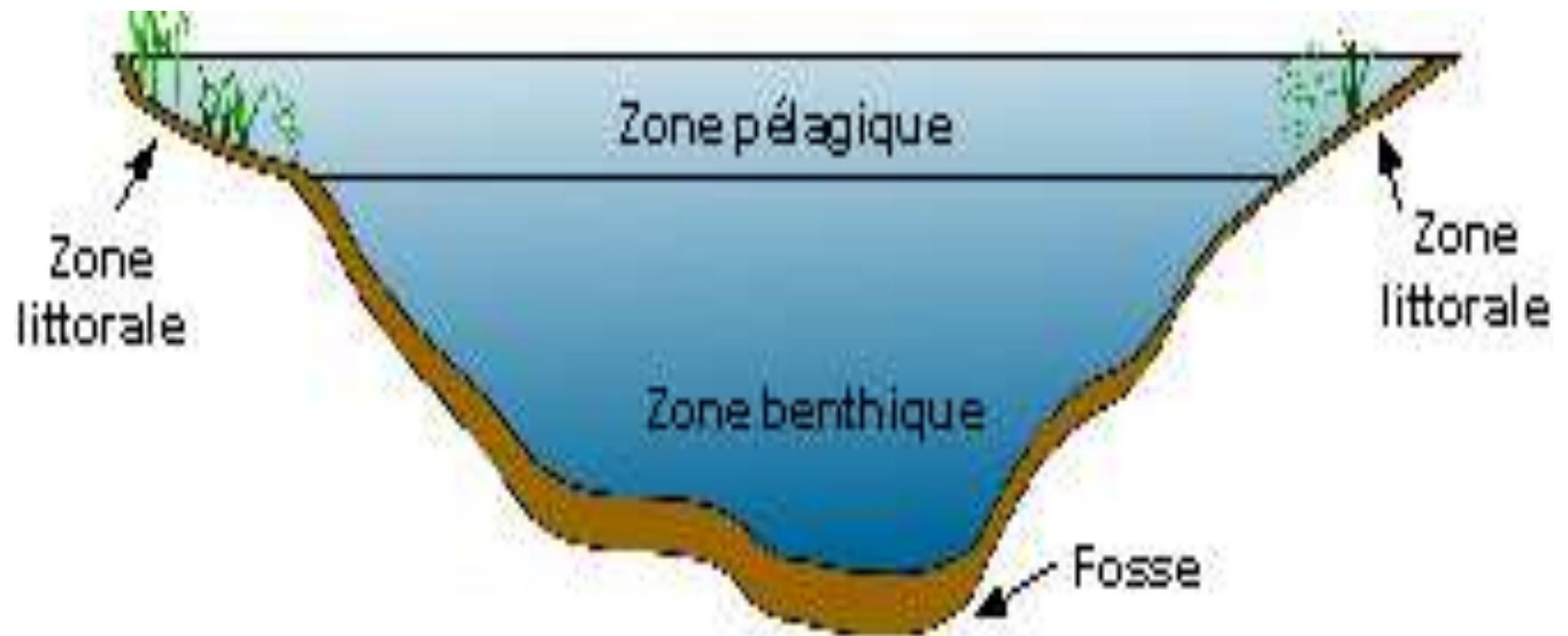


Figure 5. Représentation schématique des parties d'un lac (Chamley, 1988)

Le milieu lacustre est constitué de trois étages de vie (Fig. 6): l'épilimnion, le métalimnion et l'hypolimnion (Campy et Meybeck, 1995).

L'épilimnion se caractérise par des températures élevées et la présence de la lumière. Ce dernier est constitué d'algues microscopiques, dont la densité varie en fonction des apports riverains. Ce plancton abondant, favorise la synthèse chlorophyllienne (Campy et Meybeck, 1995 ; Ogier, 1999 ; Touchart, 2000 ; Balasubramanian, 2015).

Le métalimnion ou zone intermédiaire, se caractérise par une décadence rapide de la température avec la profondeur (Campy et Meybeck, 1995 ; Ogier, 1999 ; Touchart, 2000 ; Balasubramanian, 2015).

L'hypolimnion, est marqué par l'absence de la lumière, l'augmentation de la pression et une température constante. Le plancton y est moins abondant. Celui-ci est composé d'organismes chimiosynthétiseurs et minéralisateurs, qui consomment l'oxygène issu de l'épilimnion.

Ce nivellement du milieu lacustre en différentes étages de vie s'appelle la stratification thermique. Elle est due à la différence de température entre les eaux de surface plus chaudes et les eaux profondes plus froides (Chamley, 1988). Ce phénomène est relativement stable dans les lacs tropicaux profonds. Il connaît en revanche des changements saisonniers dans les lacs tempérés (Touchart, 2000 ; Balasubramanian, 2015).

II.1.3. Classification des lacs

Outre l'origine, la classification des lacs tient compte d'une part, des paramètres morphométriques et physicochimiques, et d'autre part du nombre d'épisodes de brassages annuels (Balasubramanian, 2015). Les paramètres morphométriques et physicochimiques les plus souvent utilisés pour la classification des lacs sont : la superficie, la profondeur et la salinité des eaux (Campy et Meybeck, 1995 et Balasubramanian, 2015). En fonction de ces paramètres, Balasubramanian (2015) différencie : les grands lacs des petits lacs, les lacs profonds des lacs peu profonds, les lacs salés des lacs d'eau douce. En fonction du nombre d'épisodes de brassages annuels, on distingue : les lacs amictiques, les lacs méromictiques et les lacs holomictiques (Balasubramanian, 2015). Les lacs amictiques se caractérisent par une absence systématique de brassage. Ils sont en effet couverts de glace pendant toute l'année. Ce qui empêche le vent, principal facteur de brassage des eaux d'y pénétrer. Ils se localisent dans les zones polaires et les zones de hautes altitudes (Chamley, 1988 ; Campy et Meybeck, 1995 ; Touchart, 2000). Les lacs méromictiques ne sont pas caractéristiques d'une aire géographique.

Leurs épisodes de brassage dépendent beaucoup plus des caractéristiques du bassin versant, que des conditions climatiques (Montuelle, 2015). Les lacs holomictiques représentent l'ensemble des lacs qui se mélangent complètement, au moins une fois par an. Ils sont subdivisés en lac monomictique, lac dimictique et lac polymictique. Les premiers se mélangent une seule fois. Ce sont des lacs de grande taille. Ils se localisent dans les zones semi-arides, marquées par la prépondérance de la saison sèche. Les lacs dimictiques se caractérisent par deux épisodes de brassage. Ils sont caractéristiques des zones tempérées. Les lacs polymictiques sont généralement de petite taille. Ils se localisent dans la zone intertropicale et se caractérisent par plusieurs épisodes de brassages annuels (Chamley, 1988 ; Campy et Meybeck, 1995 ; Touchart, 2000).

II.1.4. Evolution d'un lac

Le lac est un milieu vivant qui naît, grandit et meurt. Ainsi, en l'absence d'une intervention humaine, son évolution est assez bien établie. Elle s'écrit sur des millions d'années et passe successivement par les stades : oligotrophe, mésotrophe et eutrophe (Balasubramanian, 2015).

Le stade oligotrophe correspond au stade « jeune » du lac. A ce niveau, le lac se caractérise par des eaux pures (faiblement minéralisées), claires et peu nourricières. Celles-ci contiennent peu d'espèces végétales et animales. Ceci a pour conséquence une faible productivité de la matière organique et un brassage des eaux important (Campy et Meybeck, 1995).

Le stade mésotrophe se caractérise d'une part, par un enrichissement progressif en matières organiques et minérales des eaux ; d'autre part, par un développement du phytoplancton et du zooplancton. Ces facteurs entraînent une grande consommation d'oxygène, par conséquent l'appauvrissement des couches profondes du lac et la production de la matière minérale recyclée dans le milieu aquatique.

Avec le temps, les processus d'enrichissement et de développement s'accroissent. Ceci entraîne le ralentissement de la minéralisation et la fermeture progressive du lac : c'est le stade eutrophe. Ce phénomène naturel, qu'on appelle eutrophisation, est bien souvent accéléré par des apports artificiels de nitrates et de phosphates qui stimulent le développement des végétaux.

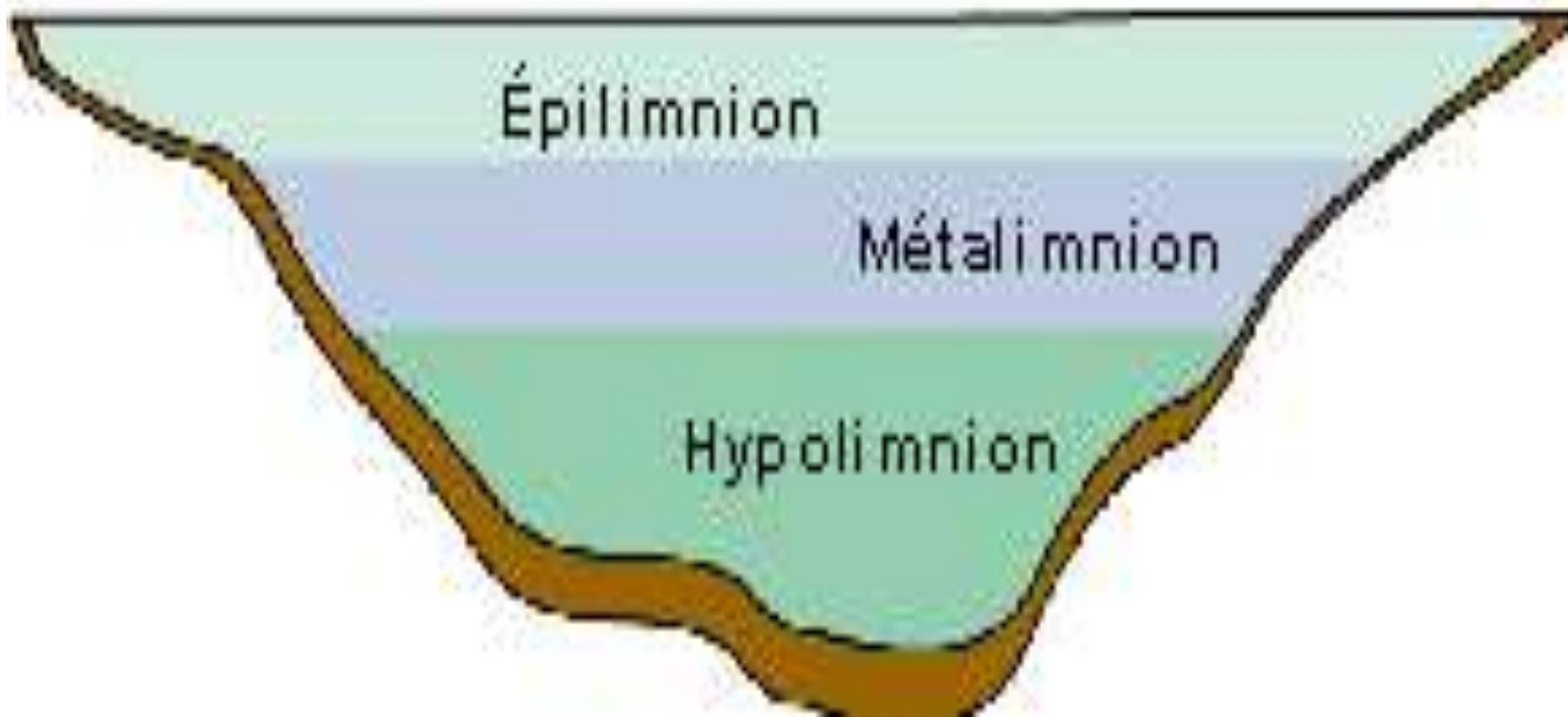


Figure 6. Etages d'un milieu lacustre (Chamley, 1988)

II.1.5. Importances des lacs

Les lacs ont toujours attiré les hommes et leurs sociétés, pour des raisons multiples. Ils représentent la ressource en eau la plus facilement mobilisable (Zhang *et al.*, 2020). Ces plans d'eau couvrent en effet des millions de km². Sur le plan environnemental, les lacs constituent un composant essentiel du cycle de l'eau à l'échelle globale (Pinel-alloul *et al.*, 1998). Par le biais des processus variés, tels que la production *in situ* de la matière organique, la sédimentation de la matière organique et la précipitation des carbonates et des évaporites, les lacs jouent un rôle important dans le cycle du carbone, de l'azote et du phosphore (Touchart, 2000). Les mollusques et les sédiments lacustres font partie des archives climatiques et des changements environnementaux. Le matériel accumulé dans ces derniers peut être utilisé pour déchiffrer l'évolution récente du climat dans différentes parties du globe, ceci avec un pouvoir seulement égalé par les carottes glaciaires. Il permet également d'enregistrer l'évolution de l'action anthropique sur l'environnement (Sahoo *et al.*, 2015).

II.2. Composition de la colonne d'eau

Les sédiments sont constitués d'une phase liquide ou eau interstitielle et d'une phase solide (Chamley, 1988). La première comprend des cations et des anions, à des proportions variables, notamment Ca²⁺, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻. A ceux-ci s'ajoutent de nombreux polluants minéraux et organiques (Chamley, 1988). La seconde est composée d'une fraction organique et d'une fraction inorganique (Campy et Meybeck, 1995 ; Ogier, 1999).

II.3. Sédiments lacustres

De manière générale, les sédiments peuvent se définir comme des dépôts continentaux ou marins constitués de particules provenant de l'altération des roches préexistantes et de la précipitation de matières en suspension qui transitent dans la colonne d'eau (Scordia, 2008). Ces dépôts sont transportés par les glaciers, l'eau et le vent. Ils se déposent dans des bassins de sédimentation, où ils formeront, si les conditions le permettent, des roches sédimentaires (Campy et Meybeck, 1995 et Ogier, 1999).

II.3.1. Origine des sédiments lacustres

Les sédiments lacustres proviennent de deux sources: une source autochtone et une source allochtone (Sahoo *et al.*, 2017). Dans le premier cas, ils sont liés à la composante

biologique et aux paramètres physiques du milieu, qui influencent les processus diagenétiques du milieu. Dans le second cas, ils sont liés aux caractéristiques du bassin versant, notamment la nature des formations lithologiques, le degré d'altération, et les activités menées dans ledit bassin (McLennan, 1989 ; Cox *et al.*, 1995 ; Babeesh *et al.*, 2018). En effet, outre les roches sédimentaires, les roches sont classées en deux grandes catégories en fonction de leur chimisme. Il s'agit des roches felsiques ou roche acides et les roches mafiques ou roches basiques (Taylor et McLennan, 1985 ; McLennan *et al.*, 2006). Plusieurs travaux (Taylor et McLennan, 1985 ; Hayashi *et al.*, 1997) ont montré que chacune de ces catégories de roches possède sur les plans pétrologiques des caractéristiques propres. Sur le plan minéralogique, l'olivine et la néphéline sont associées aux roches mafiques. Le quartz et les feldspaths en revanche, caractérisent les roches felsiques (Babeesh *et al.*, 2018). Sur le plan géochimique, les éléments traces peuvent être classés en trois groupes : les *Large Ions Lithophile Elements* (LILE), *High Field Strength Elements* (HFSE) et les *Traces Transition Elements* (TTE). Les roches felsiques se caractérisent par leurs teneurs élevées en HFSE, et, en Terres rares légères (LREE), et une anomalie négative en europium. Les roches mafiques par contre, se distinguent par leur forte teneur en éléments de transition et par l'absence d'anomalies en europium (McLennan, 1989 ; Singh, 2009 ; Vinha *et al.*, 2016). Cependant, la signature des roches sources est souvent modifiée par l'altération chimique (Babeesh *et al.*, 2018). Ce processus est contrôlé par le climat, l'activité biologique, la topographie et sa propre durée (Nesbitt et Young, 1984 ; Fedo *et al.*, 1995 ; Singh, 2009). Il favorise la transformation des minéraux primaires, tels l'olivine, les feldspaths et les micas, en minéraux secondaires, comme la kaolinite, la gibbsite, l'hématite et la goéthite (Nesbitt et Young, 1984 et McLennan, 1989). Ceci s'accompagne sur le plan chimique, du départ des éléments mobiles comme Ca, Na, K ou encore Sr, et la concentration d'autres éléments tels que Al, Ti, terres rares, considérés comme moins mobiles (Singh, 2009 ; Sahoo *et al.*, 2017). Dans certaines conditions (climat humide), on observe le fractionnement des terres rares. Celui-ci se traduit soit, par un enrichissement, soit par un appauvrissement en Sm ou en Nd (McLennan, 1989 ; Singh, 2009). Il existe ainsi plusieurs indices permettant d'évaluer le degré d'altération d'une roche. Il s'agit notamment : *Chemical Index of Alteration* (CIA) (Nesbitt et Young, 1984), le *Plagioclase Index of Alteration* (PIA) (Fedo *et al.*, 1995). D'après ces auteurs, les valeurs de CIA et PIA comprises entre 25 – 50, attestent d'une faible altération chimique, entre 50 – 75, une altération modérée, et > 75 une altération chimique intense.

II.3.2. Caractéristiques des sédiments lacustres

Les sédiments lacustres se caractérisent par leur composition et leur granulométrie (Chamley, 1988 ; Campy et Meybeck, 1995 ; Benoit, 2005).

II.3.2.1. Composition des sédiments lacustres

Les sédiments sont composés d'une fraction organique et d'une fraction inorganique (Campy et Meybeck, 1995 ; Ogier, 1999).

II.3.2.1.1. Fraction organique

La matière organique sédimentaire fait partie intégrante du cycle global du carbone organique (Corg). Elle représente 20 % du Corg de la lithosphère (Baize, 1997). La fraction organique est constituée d'un ensemble de minuscules particules de type macromoléculaire polymérisé et hétérogène. Ces particules proviennent, d'une part, de la microflore, de la faune et des racines (fraction organique vivante), d'autre part, des débris organiques d'origine animale ou végétale décomposés sous l'action des microorganismes (fraction organique morte) (Meyer et Ishiwatari, 1993 ; Baize, 1997). Elle peut être classée en fonction de sa composition et sa réactivité (Meyer et Ishiwatari, 1993), de la taille de ses éléments constitutifs (Baize et Tercé, 2002) et de sa solubilité dans les milieux acides et basiques (Audry et *al.*, 2006). En fonction de sa composition, on distingue les biopolymères ou substances humiques et les géopolymères ou substances non humiques (Meyer et Ishiwatari, 1993). Les premiers représentent environ 10 à 15% de la fraction organique totale du sédiment. Ils constituent l'ensemble des constituants organiques susceptibles d'être utilisés comme substrat par les micro-organismes pendant la sédimentation et la diagenèse précoce (Baize et Tercé, 2002). Il s'agit des éléments constitutifs des êtres vivants, ainsi que la lignine des plantes supérieures terrestres (lipides, glucides et protides). Les seconds, plus abondants (entre 85 et 90%), proviennent de l'évolution des matières fraîches à partir des processus chimiques et enzymatiques (Sposito, 1989). Contrairement aux biopolymères, les géopolymères résistent mieux aux processus de biodégradation (Baize et Tercé, 2002). En fonction de la taille des particules organiques, on distingue le carbone organique particulaire, le carbone organique colloïdal et le carbone organique dissout (Baize et Tercé, 2002). Pour ces auteurs, le carbone organique particulaire est composé d'éléments de taille supérieure à 0,22 μm . Ils sont compris entre 1kDa1 et 0,22 μm pour le carbone organique colloïdal, et inférieur à 1kDa pour le carbone dissous. Les travaux d'Audry et *al.* (2006) ont permis de classer les particules organiques en fonction de leur solubilité. Pour ces auteurs, on distingue les acides humiques, les acides fulviques et les humines. Les premiers sont solubles en milieu alcalin, mais restent insolubles en milieu acide.

Les seconds sont solubles dans les deux cas. Les derniers en revanche restent insolubles quel que soit le milieu.

II.3.2.1.2. Fraction inorganique

La phase inorganique des sédiments est composée des éléments majeurs et des éléments dits en traces. Les premiers regroupent : les oxydes métalliques, les argiles, la silice, les aluminosilicates non argileux, les phosphates, les carbonates, et les sulfures (Campy et Meybeck, 1995). Les éléments appartenant au second groupe sont pour la plupart considérés comme des polluants.

II.3.2.1.2.1. Oxydes métalliques

Les oxydes métalliques désignent les oxydes, les hydroxydes et les oxyhydroxydes présents dans les sédiments. Ceux-ci se forment par oxydation des cations Fe^{2+} , Mn^{2+} et Al^{3+} . Dans la majorité des sédiments, ils sont présents soit sous forme amorphe, soit sous forme cristalline. Les principaux oxydes métalliques présents dans les sédiments sont : les oxydes de fer, les oxydes de manganèse et les oxydes d'aluminium (Devalois, 2009). Les premiers, plus abondants, se forment à partir d'un hydroxyde précurseur commun ($\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$). Ce dernier se transforme rapidement dans la gamme de pH des eaux naturelles, en deux formes mal cristallisées (lépidocrocite et ferrihydrite). Ces éléments métastables évoluent à leur tour vers des espèces plus cristallisées, la goethite et l'hématite. La prédominance d'une de ces deux formes est fonction des conditions de pH. Néanmoins, dans les conditions des eaux naturelles, la goethite reste la forme prédominante (Audry, 2003 ; Tessier *et al.*, 1996). Les seconds sont constitués de l'hausmannite, la feitknechtite et une forme thermodynamiquement stable. Par vieillissement, ces formes évoluent vers la birnessite, la manganite amorphe, l'hollandite et la lithiophorite (Alloway, 1995 ; Tessier *et al.*, 1996). Les oxydes d'aluminium quant à eux sont principalement représentés par la gibbsite (Alloway, 1995).

II.3.2.1.2.2. Argiles

Les argiles comptent avec les oxydes métalliques parmi les particules les plus importantes dans les milieux aquatiques. Elles peuvent représenter jusqu'à 30% de la masse des sédiments (Campy et Meybeck, 1995). Cependant, il est important de distinguer les argiles « granulométriques » définies par leur taille, et les argiles « minéralogiques » définies par leur structure cristalline. Les argiles granulométriques sont des minéraux de diamètre inférieur à $2\mu\text{m}$. Les argiles minéralogiques, quant à elles résultent de l'altération des minéraux primaires

en particulier des feldspaths, des micas et des verres volcaniques (Das *et al.*, 2006) ; ce sont des aluminosilicates. Elles appartiennent à la famille des phyllosilicates hydratés et sont constituées d'une superposition de feuillets composés de couches tétraédriques de Si-O et de couches octaédriques composées de Al-OH ou Mg-OH, entre lesquelles se placent divers cations compensateurs, tels que K^+ et Ca^{2+} . Les plus simples sont la kaolinite de type 1/1, c'est à dire composée de feuillets élémentaires constitués d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique (T - O). Les illites et les smectites de type 2:1, sont composées de feuillets superposés de type tétraédrique-octaédrique-tétraédrique (T - O - T). L'abondance relative de chaque type est fonction de la nature de la roche mère et de celle du climat (Sigg *et al.*, 2001).

II.3.2.1.2.3. Silice

La silice est présente en abondance dans les milieux naturels à l'état cristallisé (quartz, opale, stishovite, cristobalite) ou amorphe. Dans les sédiments, elle se présente principalement sous forme de quartz (SiO_2) (Blanchard, 2000 ; Sigg *et al.*, 2001).

II.3.2.1.2.4. Aluminosilicates non argileux

Les aluminosilicates non argileux sont les éléments les plus importants dans la croûte terrestre (90% du poids). Dans les milieux aquatiques, ils sont présents soit à l'état cristallin, soit à l'état amorphe. Leur proportion dans ce milieu dépend, d'une part, de la nature de la roche source, et d'autre part de l'intensité de l'altération qui prévaut dans le bassin versant (Das *et al.*, 2006 ; Singh, 2009). Plusieurs travaux (Beauvais *et al.*, 2000 ; Das *et al.*, 2003) ont montré que l'altération mécanique préserve les teneurs élevées en ces éléments, tandis que l'altération chimique entraîne leur départ.

II.3.2.1.2.5. Carbonates

Les carbonates sont endogènes c'est-à-dire qu'ils se forment dans la colonne d'eau. Généralement, c'est l'aragonite qui évolue à long terme en calcite ($CaCO_3$). Dans le sédiment, les carbonates se présentent soit sous forme de sidérite ($FeCO_3$), de dolomite ($CaMg(CO_3)_2$) ou encore de rhodochrosite ($MnCO_3$) (Sigg *et al.*, 2001).

II.3.2.1.2.6. Phosphates

Les minéraux phosphatés se retrouvent dans tous les types de roches et sédiments. Ils se forment par les processus de précipitations au cours de la diagenèse précoce. Les plus abondants sont les phosphates de fer (vivianite) et la famille des apatites, plus spécifiquement des apatites

calciques ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$). Dans les sédiments, ce sont généralement des fluorapatites carbonatées et des hydroxyapatites ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) (Sigg *et al.*, 2001).

II.3.2.1.2.7. Sulfures

Les sédiments contiennent généralement entre 0,1 et 0,5 % de sulfures (Lions, 2004). Leur nature dépend de la présence ou non de l'oxygène. Dans les sédiments anoxiques, les sulfures majoritaires sont la greigite et la mackinawite. Ces formes amorphes évoluent vers une forme cristalline, la pyrite (FeS_2). Dans les sédiments oxiques en revanche, la majorité du soufre organique se trouve sous forme d'ion sulfate (SO_4^{2-}) (Sigg *et al.*, 2001).

II.3.2.1.2.8. Eléments traces

Ce sont des éléments inclus et absorbés respectivement dans les réseaux cristallins des minéraux primaires et secondaires. Il s'agit : des composés organiques non biodégradables (polychlorobiphényles ou PCB, DDT, etc.), des composés organiques biodégradables (hydrocarbures, détergents, certains produits phytosanitaires, etc.), des composés organométalliques (composés organostanniques, organomercuriels, etc.), des sels nutritifs (nitrates, phosphates, etc.) et des éléments traces métalliques (mercure, plomb, cadmium, cuivre, zinc, etc.) (Campy et Meybeck, 1995).

II.3.2.2. Granulométrie

La granulométrie est l'étude de la répartition des éléments d'un sédiment en fonction de leur taille (Folk et Ward, 1957). Elle permet, d'une part, de caractériser la distribution des particules d'un solide et, d'autre part, d'identifier les différentes familles, afin de les associer à une texture (Ramorason, 2008).

Les travaux de Wentworth (1922) ont permis de donner la classification et la nomenclature des sédiments en général et des sédiments détritiques en particulier. Selon cet auteur, trois classes de sédiments détritiques se distinguent : les rudites, les arénites et les lutites. En fonction de la proportion des différentes classes granulométriques dans un sédiment (sable, limons et argile), Folk (1966) a défini une grande variété de textures (Fig. 7). Celles-ci dépendent de la nature et la dynamique de l'agent de transport (Garzanti *et al.*, 2008; Babeesh *et al.*, 2018). En effet, le transport des sédiments est assuré par trois principaux agents : les glaciers, le vent et les cours d'eau (Cailleux, 1942 ; Garzanti *et al.*, 2008). Le transport par les glaciers s'observe dans les zones tempérées. Il favorise le déplacement des particules de très grande taille. Le transport éolien est caractéristique des zones désertiques et péri désertiques. Il

entraîne le déplacement des particules de taille très réduite. Le transport fluvial quant à lui est le mode de transport par excellence des sédiments lacustres (Das *et al.*, 2006 ; Sahoo *et al.*, 2017). Il assure le transport des particules de tailles variées. Selon Passega (1957), il en existe trois principaux modes : la suspension, la saltation et le roulement de fond. Pour cet auteur, la suspension assure le transport des particules fines (argiles et limons). La saltation est le moyen de déplacement des sables, et le roulement de fond est celui des particules les plus grossières. Ces différents modes de transport sont rendus possibles grâce à l'hydrodynamisme. Au fur et à mesure que celle-ci diminue, on assiste au dépôt progressif des particules, d'abord les plus grossières, puis les moyennes et enfin les plus petites (Folk et Ward, 1957 ; Mouldi et Chekiou, 2007). Outre la nature et la dynamique de l'agent de transport, la morphologie du lac joue un rôle non négligeable dans la distribution spatiale des tailles des éléments constitutifs des sédiments. Plusieurs auteurs (Garzanti *et al.*, 2008 ; Babeesh *et al.*, 2018 ; Mohammed *et al.*, 2020) montrent que les éléments grossiers se déposent généralement dans la zone photique non profonde, tandis que les particules fines se déposent de préférence dans les zones profondes. Cette répartition des particules sédimentaires en fonction de leur taille et de leur densité, joue un rôle important sur les caractéristiques pétrologiques du sédiment (McLennan, 1989 ; Cox *et al.*, 1995 ; Vinha *et al.*, 2016). En effet, les minéraux argileux riches en oligoéléments se concentrent dans la fraction fine. Inversement, les proportions les plus élevées en quartz et en minéraux lourds, principales phases porteuses de silice et de terres rares lourdes (HREE), se rencontrent dans la fraction grossière des sédiments (Cullers, 1994 ; Singh, 2009).

II.3.3. Classification des éléments constitutifs des sédiments lacustres

Les sédiments lacustres sont constitués de quatre groupes d'éléments : les éléments lithogènes, les éléments biogènes, les éléments hydrogènes et les éléments cosmiques (Campy et Meybeck, 1995 ; Sigg *et al.*, 2001).

Les éléments lithogènes ou particules terrigènes sont associés aux sources détritiques. Ils proviennent de l'érosion du bassin versant (Campy et Meybeck, 1995). L'apport majeur de ces particules se fait par les rivières dont le débit contrôle la granulométrie. Les éléments lithogènes rencontrés dans les sédiments sont : le quartz, les argiles, la calcite, les aluminosilicates et les oxydes métalliques (Das *et al.*, 2003 ; Sahoo *et al.*, 2015 ; Vinha *et al.*, 2016). Les principaux minéraux argileux sont l'illite, la chlorite, la kaolinite et les smectites (Campy et Meybeck, 1995).

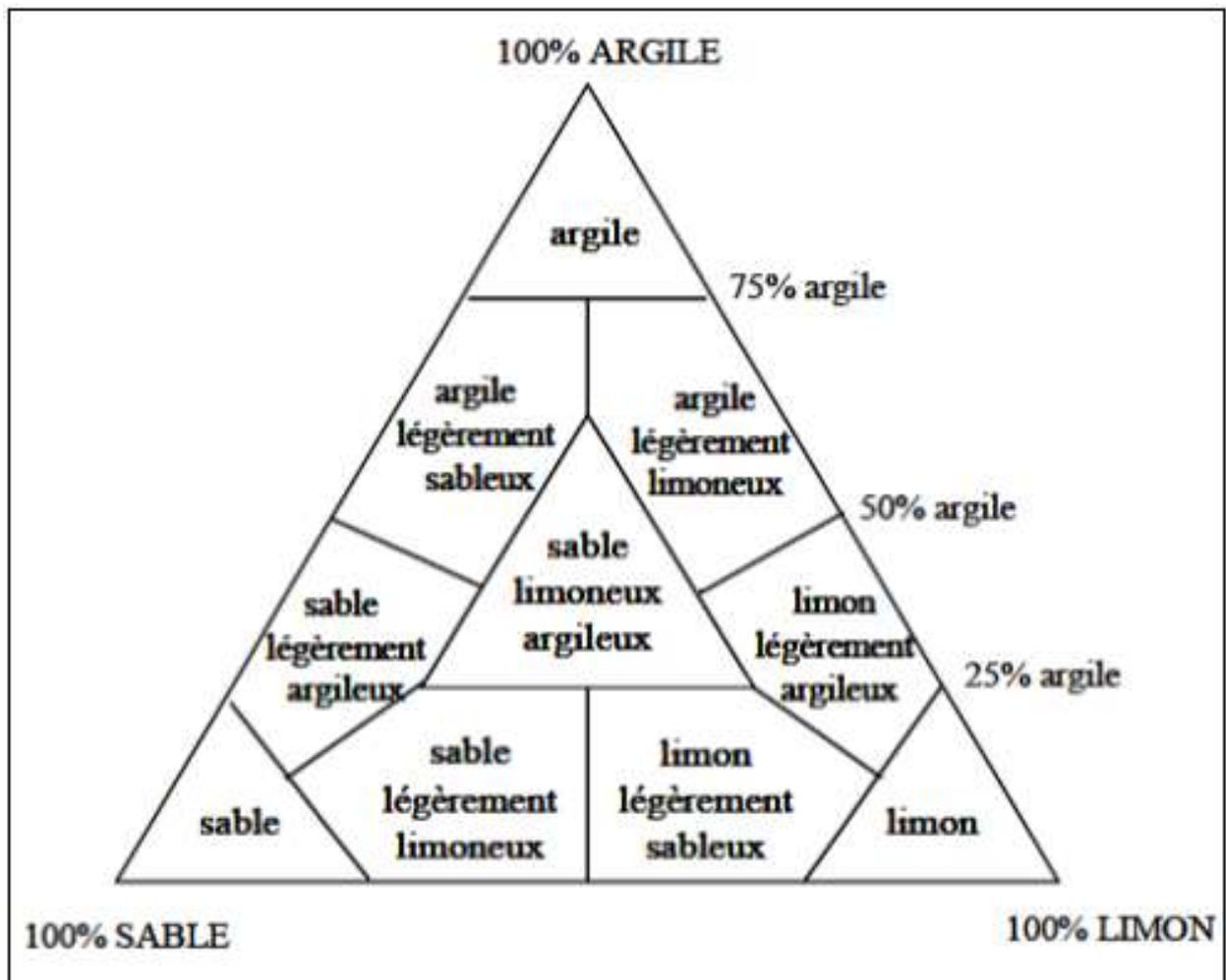


Figure 7. Classification de la texture des sédiments d'après Folk (1966)

Les éléments biogènes sont représentés par des fragments d'enveloppes d'organismes vivants (frustules des diatomées, coquillage des mollusques). Ces biominéraux traduisent la formation et l'évolution des formes de vie en réponse aux changements climatiques et environnementaux. L'accumulation de ces biominéraux dans les sédiments fait d'eux de bonnes archives archéologiques de l'évolution des espèces (Singh, 2009). Les biominéraux connus comme composantes majeures des sédiments sont des minéraux carbonatés (calcite, aragonite), sulfatés (barite et célestite) ou siliceux (opale) (Sahoo et *al.*, 2017). Les minéraux carbonatés, spécifiques de la structure des mollusques sont majoritairement des carbonates de calcium, sous forme cristalline (calcite) ou polymorphisme (aragonite, vaterite) avec divers degrés de substitution par des atomes de Sr, Mg, Ba (Singh, 2009). L'opale ou silice biogène est le minéral spécifique des planctons et de zooplanctons. Il constitue respectivement leur frustule externe et leur endosquelette (Campy et Meybeck, 1995). Contrairement aux éléments lithogènes, la proportion des éléments biogènes augmente avec la profondeur des eaux (Ogier, 1999). Les planctons bio-minéralisants (Ca et Si) dominant majoritairement dans les zones photiques, tandis que les mollusques calcaires ayant un mode de vie soit benthique, soit planctonique, font plutôt des sédiments profonds leurs habitats (Singh, 2009).

Les éléments hydrogènes et cosmiques constituent, une fraction mineure des sédiments. Les premiers comprennent les minéraux authigéniques, c'est-à-dire formés directement dans l'environnement aquatique. Ce sont des oxydes et hydroxydes de Fe/Mn et les minéraux argileux (Campy et Meybeck, 1995). Ces minéraux, notamment les oxyhydroxydes, sont surtout présents dans les eaux profondes (Chamley, 1988). Les seconds sont constitués des débris macroscopiques de météorites, sous forme de sphérules métalliques (Fe, Ni) ou silicatés (Campy et Meybeck, 1995).

II.4. Diagenèse précoce en domaine lacustre

Les sédiments des cours d'eau sont caractérisés par d'importants gradients bio-physico-chimiques. Ces gradients sont la conséquence des transformations physiques, chimiques et biologiques (Tribovillard et *al.*, 2006). Ils ont pour finalité la transformation du sédiment en roche cohérente : c'est la diagenèse sédimentaire (Devalois, 2009). Au cours de ces transformations, les sédiments se comportent comme des réacteurs biogéochimiques dans lesquels intervient une variété de mécanismes. Ces derniers sont regroupés sous le nom de « diagenèse précoce » (Campy et Meybeck, 1995 ; Ogier, 1999 ; Devalois, 2009). Ces processus sont contrôlés d'une part par les paramètres physicochimiques et biologiques du

milieu, d'autre part, par les caractéristiques des sédiments (Chamley, 1988 ; Ogier, 1999 ; Das et *al.*, 2006).

II.4.1. Mécanismes de la diagenèse précoce

La diagenèse précoce désigne l'ensemble des processus qui produisent des changements dans le sédiment, à la suite de leur dépôt dans l'eau jusqu'à leur incorporation dans la roche finale (Devallois, 2009). Elle se produit dans les premiers centimètres de la colonne sédimentaire saturée en eau, et pendant l'enfouissement sédimentaire. La diagenèse précoce comprend deux types de réactions : la minéralisation de la matière organique et les réactions de sorption (Froelich et *al.*, 1979).

II.4.1.1. Minéralisation de la matière organique

La minéralisation de la matière organique ou oxydation de la matière organique se produit en présence de bactéries opérant dans des conditions spécifiques de Eh et pH. Elle comporte une série de réaction d'oxydoréduction allant de la respiration à la fermentation méthanique, en passant par la dénitrification et la réduction des hydroxydes de fer et de manganèse (Lesven, 2008). Ces réactions s'accompagnent de la mise en solution de métabolites et de la réduction des accepteurs d'électrons (Froelich et *al.*, 1979). Elles s'opèrent suivant une séquence redox type, allant du potentiel le plus fort vers des potentiels redox de plus en plus faibles.

II.4.1.1.1. Respiration

L'oxygène est le premier oxydant à être activement consommé dès le dépôt des sédiments. Sa consommation favorise la dégradation de la matière organique, c'est la respiration aérobie. Elle est modélisée par la réaction suivante :



La profondeur de pénétration de l'oxygène est fonction de la quantité de matière organique présente (Gouzy, 2004). En effet, dans les sédiments pélagiques dits profonds et pauvres en matière organique, la consommation en oxygène est réduite. Elle se fait sur plusieurs centimètres. En revanche, pour des sédiments peu profonds riches en matière organique (rivières, zones côtières, lacs), l'oxygène est très vite consommé et disparaît souvent dès les premiers millimètres (Schulz et Zabel, 2000). L'énergie libérée lors de cette première phase de décomposition de la matière organique conduit à l'intervention d'un autre oxydant, le nitrate (Boust et *al.*, 1999).

II.4.1.1.2. Dénitrification

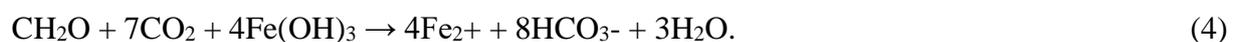
L'azote est apporté au sédiment principalement par le biais de la matière organique. Cet azote organique conduit, par hydrolyse, à la production de l'ion ammonium, qui à son tour est oxydé par les bactéries en nitrite, puis en nitrate. Si le milieu est réducteur, ce qui est généralement le cas dans les sédiments, le nitrate est réduit en azote gazeux par les bactéries dénitrifiantes. La réduction du nitrate s'accompagne d'une oxydation du carbone organique, selon la réaction type suivante (Froelich *et al.*, 1979) :



Dans les sédiments fluviaux et lacustres, la dénitrification est souvent limitée aux centimètres supérieurs. Le nitrate est complètement réduit dès les 2 à 3 premiers centimètres, étant donné le faible flux du nitrate de la colonne d'eau vers le sédiment (Gouzy, 2004). Dans les conditions des sédiments suboxiques, les nitrates subissent des processus diagenétiques (dégradation bactérienne de la matière organique) durant lesquels ils sont utilisés comme récepteurs d'électrons (Froelich *et al.*, 1979 ; Boust *et al.*, 1999).

II.4.1.1.3. Réduction des hydroxydes de fer et de manganèse

Sous la zone de réduction du nitrate, les oxydes et les hydroxydes de fer et de manganèse sont les oxydants les plus puissants. Le fer et le manganèse sont présents dans le sédiment sous forme de minéraux composés d'un mélange complexe d'oxydes et d'hydroxydes. L'avancement de la décomposition de la matière organique induit un déséquilibre des oxydes de manganèse (III et IV) et de fer (III) (Froelich *et al.*, 1979). Ces derniers sont réduits sous forme d'ions libres Mn^{2+} et Fe^{2+} suivant les équations :



Il faut noter que les oxydes de fer, du fait de leur abondance dans le sédiment, jouent un rôle plus actif que celui joué par les oxydes de manganèse (Gouzy, 2004).

II.4.1.1.4. Réduction du sulfate

Mis à part la réduction à haute température dans les systèmes hydrothermaux, le sulfate est thermodynamiquement stable. Il n'y a donc pas, ou pratiquement pas, de réduction purement chimique du sulfate dans le sédiment (Gouzy, 2004). Cette réduction est très majoritairement

d'origine biologique, et contrôlée par les bactéries sulfato-réductrices (Boust *et al.*, 1999). Elle peut être formalisée par la réaction suivante :



La production de sulfure lors de la diagenèse précoce est souvent déterminante pour le devenir d'un certain nombre de métaux présents à l'état de traces, comme Fer, Manganèse, Plomb, Cadmium, Mercure, Cuivre, Arsenic et Zinc (Devalois, 2009).

II.4.1.1.5. Fermentation méthanique

Ce processus se développe uniquement qu'à la suite d'une catalyse biologique. Il consiste à la réduction du CO_2 en CH_4 . La fermentation méthanique est dominante dans les environnements d'eau douces, où le méthane est présent dans les eaux interstitielles sous l'interface oxygène/anoxique (Boust *et al.*, 1999). La fermentation peut être décrite de la manière suivante :



II.4.1.2. Sorption

La sorption est l'ensemble des processus qui traduisent le passage d'un élément d'une phase à une autre, sous l'effet des conditions du milieu (Sigg *et al.*, 2001). Pour Audry (2003), c'est l'ensemble des réactions faisant intervenir un ion en solution avec un groupe fonctionnel à la surface d'un solide. Il s'agit en domaine lacustre de la précipitation, la dissolution, la coprécipitation, l'adsorption, la désorption et la recristallisation (Ogier, 1999 ; Devalois, 2009).

II.4.1.2.1. Précipitation

La précipitation traduit le passage d'une phase liquide à une phase solide, de structure régulière et ordonnée. Ce processus affecte particulièrement les carbonates (calcite, dolomite) et les silicates argileux et ferrifères (sidérite, hématite et sulfures comme la pyrite) (Sposito, 1989). Les travaux de Sigg *et al.* (2001) montrent en effet que, la précipitation de la calcite et de la dolomite ou encore de la sidérite va influencer les teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} et Fe^{2+} . Pour Garnier-Laplace *et al.* (1997), la formation des sulfures métalliques dans les sédiments anoxiques se fait à partir des ions Fe^{2+} libérés par la minéralisation de la matière organique et par l'activité des bactéries sulfato-réductrices. La précipitation s'associe le plus souvent à la coprécipitation, qui est un phénomène d'incorporation (ou de combinaison) de composés solubles présents dans l'environnement d'un cristal en formation (Sposito, 1989).

II.4.1.2.2. Dissolution

La dissolution est le processus inverse de la précipitation. Il traduit le passage de l'état solide à l'état liquide. Ce dernier contribue largement à la recristallisation de nouvelles phases. Elle permet en effet, la croissance rapide de nouveaux minéraux, grâce au renouvellement des éléments en solution. Ce processus affecte le plus souvent les silicates (Sparks, 1999).

II.4.1.2.3. Adsorption/désorption

L'adsorption est définie comme l'accumulation d'une substance ou d'un matériau à l'interface d'une surface solide-liquide (Devallois, 2009). La désorption est le processus inverse (Sparks, 1999). L'adsorption conduit à la formation des molécules stables appelées complexes de surface. Il en existe deux types : le complexe de sphère externe et le complexe de sphère interne (Sparks, 1999). Dans le premier cas, une ou plusieurs molécules du solvant viennent s'interposer entre le groupe fonctionnel et l'ion. Il s'en suit la formation des liaisons de type faible ou covalente. Les éléments attachés à ce type de liaison sont plus facilement remis en solution et la désorption est très probable (Krauskopf et Bird, 1995). On parle ainsi d'adsorption physique ou de physisorption ou encore d'adsorption non spécifique. Ceci parce qu'elle est due à l'attraction électrostatique d'un soluté par une surface polarisée (Sparks, 1999). En contexte de complexe interne en revanche, aucune molécule d'eau ne s'interpose entre les groupes de surface et l'ion, ou la molécule adsorbée. On observe la mise en place des liaisons covalentes ou des liaisons électrostatiques, ou une combinaison des deux. Ces dernières sont plus stables que les liaisons électrostatiques de sphère externe (Krauskopf et Bird, 1995). Cela conduit à un complexe de surface monodenté ou bidenté. La complexation de sphère interne est une adsorption spécifique (Sposito, 1989). Les ions mis en jeu sont généralement considérés comme des ions spécifiques. Dans ce cas, on parle aussi d'adsorption chimique ou chimisorption (Sparks, 1999).

II.4.1.2.4. Recristallisation

La recristallisation est une modification cristallographique d'un composé, sans modification de la composition chimique (Krauskopf et Bird, 1995). Elle traduit une évolution d'un minéral vers une stabilité plus grande, donc une énergie libre plus faible. On définit alors les polymorphes. Ceux-ci correspondent aux minéraux de même composition chimique, mais ayant cristallisé dans les systèmes différents (Sparks, 1999). L'exemple le plus connu en

domaine lacustre est celui de la recristallisation de l'aragonite (orthorhombique) en calcite (rhomboédrique) (Krauskopf et Bird, 1995).

II.4.2. Facteurs de la diagenèse précoce

La diagenèse précoce est influencée par les paramètres physicochimiques du milieu, les facteurs biologiques et la composition des sédiments (Ogier, 1999 ; Devalois, 2009).

II.4.2.1. Paramètres physiques du milieu

Les paramètres physiques qui conditionnent les échanges solide-liquide sont : le potentiel d'hydrogène (pH), les conditions d'oxydoréduction (Eh), et la température (T) (Devalois, 2009).

II.4.2.1.1. Potentiel d'hydrogène

Le pH est un paramètre qui permet de mesurer le degré d'acidité ou de basicité d'un milieu. Il influence d'une part, la partition entre la phase dissoute et la phase particulaire, d'autre part tous les paramètres qui en dépendent, c'est à dire la mobilité, la réactivité, la biodisponibilité, la bioaccumulation et la toxicité (Young and Harvey, 1992 ; Lions, 2004). Dzombak et Morel (1990) ont montré que, l'augmentation du pH entraîne aussi celle du Complexe d'Echange Cationique (CEC) du milieu, et la formation de composés insolubles. En revanche, une diminution de pH entraîne la mise en solution des sels métalliques, la dissolution des phases de rétention, la désorption des cations et l'adsorption des anions. En effet, dans un milieu aqueux, les surfaces des oxydes s'hydratent et conduisent à la formation des sites OH amphotères. A pH acide, les ions H^+ sont majoritaires. Ceci entraîne le relargage des cations dans la phase liquide et l'adsorption des anions sur la fraction solide des sédiments. En revanche à pH basique, les H^+ sont minoritaires. On observe la fixation des cations sur les sites de surface OH. Ceci a pour conséquence l'augmentation de l'adsorption des cations et le relargage des anions (Blanchard, 2000).

II.4.2.1.2. Conditions d'oxydoréduction

Les conditions redox influencent d'une part, les quantités d'oxyhydroxydes et de sulfures et leur capacité d'adsorption, d'autre part la mobilité, la solubilité, la toxicité et la réactivité des particules dans les milieux aquatiques (Audry, 2003 ; Lions, 2004). En effet, les milieux réducteurs favorisent la solubilisation des espèces métalliques et par conséquent, la remobilisation des cations. Les milieux oxydants en revanche favorisent la diffusion de ces

éléments dans la colonne d'eau et la solubilisation des anions (Blanchard, 2000). C'est le cas par exemple de certains métaux, comme Fe, Mn et Cr qui sont plus mobiles sous leurs formes réduites.

II.4.2.1.3. Température

Compte tenu du caractère exothermique des réactions de sorption, une augmentation de la température induit une augmentation de la minéralisation de la matière organique (Serpaud *et al.*, 1994). Par ailleurs, en influençant l'activité des organismes susceptibles de catalyser différentes réactions redox, la température a un effet indirect sur les réactions de sorption via l'activité biologique (Serve *et al.*, 1999).

II.4.2.2. Facteurs biologiques

La bioturbation est le remaniement ou le brassage des sédiments par les organismes benthiques (Omari, 2018). Elle a généralement lieu dans les premiers centimètres de la colonne sédimentaire (Aller, 1994). Ce processus entraîne d'une part, des transferts directs des substances dissoutes entre les différentes couches du sédiment, d'autre part, des échanges entre l'eau de surface et les sédiments (Santschi *et al.*, 1990). En augmentant la surface d'échange eau-sédiments, ces échanges modifient les conditions de pH et de potentiel redox. Ceci entraîne une modification de la stabilité du sédiment et de certains processus comme la dendrification organique (Morse *et al.*, 1997). Ce remaniement favorise en effet l'introduction dans les sédiments d'une eau de fond relativement riche en oxygène (Petr, 1977).

II.4.2.3 Caractéristiques et composition des sédiments

La granulométrie contrôle la coprécipitation et l'adsorption de surface (El Ganaoui, 2002). Sigg *et al.* (2001) montrent que, le pouvoir d'absorption des particules est fonction de l'importance de leur surface spécifique. Les particules fines ($\leq 63\mu\text{m}$) sont très cohésives. Elles présentent par conséquent de très grandes surfaces spécifiques. Ce sont ces caractéristiques qui leur permettent de s'adsorber à la surface des particules argileuses et de complexer plusieurs éléments (Citeau, 2004).

Les particules organiques et notamment les substances humiques possèdent des surfaces spécifiques élevées (800 à 1900 m^2/g) et de nombreux groupements fonctionnels (amine, carboxyle, carbonyle, phénol, thiol, quinone...) (Sposito, 1989 ; Shen, 1999). Grâce à ces caractéristiques, elles ont des affinités avec des anions (pH~3-4) et des cations (pH~9-10). Cette

affinité dépend d'une part, de la nature de l'ion, et d'autre part des constantes de stabilité des complexes organométalliques formés avec ces éléments (Calace et al., 2001 ; Audry, 2003).

Les oxydes métalliques notamment le fer, le manganèse et l'aluminium sont considérés, avec la matière organique comme des facteurs dominant la biogéochimie des éléments traces dans les systèmes aquatiques (Tessier *et al.*, 1996). En effet, grâce à leurs surfaces spécifiques importantes (300 m²/g pour MnO₂ et 320 m²/g pour FeOOH) et leurs sites de surface généralement chargés négativement pour la gamme de pH des eaux de surface (5 < pH < 8), les oxydes métalliques peuvent adsorber les cations métalliques et les anions (ions phosphates, nitrates, etc.) (Sposito, 1989 ; Ogier, 1999). Ceci aboutit à la formation des complexes de sphères externes et des complexes de sphères internes. La nature de ces complexes dépend des propriétés de coordination de l'élément considéré (Tessier *et al.*, 1996). Dong *et al.* (2003) ont montré que les cations divalents (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) ont tendance à se lier directement aux groupes OH des oxydes, pour former des complexes de sphères internes. Les alcalino-terreux comme Ca et Mg conduisent généralement à la formation des complexes de sphères externes.

En plus de leur surface spécifique importante (700-800 m²/g), les minéraux argileux se caractérisent par la présence des charges négatives sur leur surface et des charges positives en bordure de leurs feuillets. Leur configuration fait aussi apparaître des groupements hydroxyles OH⁻ (Lions, 2004). Ces caractéristiques permettent aux argiles de jouer un rôle important dans les processus de sorption. Ils assurent la rétention de divers éléments métalliques (Citeau, 2004). Ils favorisent aussi la formation des complexes de sphères internes (groupement OH⁻) et les complexes de sphères externes (charges positives et négatives) (Blanchard, 2000 ; Audry, 2003).

La silice et les aluminosilicates non argileux possèdent après hydratation, des groupements hydroxyles sur leurs surfaces. Ces groupements jouent un rôle important dans les processus de fixation des cations métalliques (adsorption physique ou adsorption chimique). Néanmoins, à cause de leurs surfaces spécifiques nettement plus faibles que celles des argiles et des oxydes métalliques, leur rôle reste moins marqué dans ces processus (Blanchard, 2000).

A cause de leur caractère tampon, les carbonates peuvent réguler le pH du milieu. Ils imposent ainsi aux sédiments, une valeur de pH légèrement alcaline. De même, leur surface favorise également la rétention des ions métalliques. Il s'agit de la précipitation de la coprécipitation, de l'absorption et de la substitution isomorphe dans le réseau cristallin (Alloway, 1995).

Il a été mis en évidence que la précipitation des phosphates pouvait participer à l'immobilisation de certains éléments métalliques. Toutefois, l'immobilisation par les

phosphates de métaux tels que le zinc, le cadmium ou le cuivre est moins importante que celle occasionnée par les autres minéraux. De même, les mécanismes impliquant les phosphates dans leur immobilisation restent mal connus (Lions, 2004).

Dans les milieux anoxiques, les sulfures peuvent piéger certains métaux divalents (Cd, Zn, Ni, Cu, Pb). Le fer est la forme la plus répandue des sulfures métalliques. Lorsqu'il précipite avec les ions sulfures, il piège certains ETM (Co, Ni) par coprécipitation alors que d'autres métaux peuvent précipiter sous formes de sulfures métalliques (Alloway, 1995).

II.5. Evaluation environnementale

II.5.1. Généralités

Le concept d'environnement ne bénéficie pas d'une définition universelle. Dans le cadre de ce travail, le terme environnement sera pris tel que défini par la loi cadre N°96/12 du 05 Août 1996, relative à la gestion de l'environnement. Selon cette dernière, l'environnement est « l'ensemble des éléments naturels ou artificiels et des équilibres biogéochimiques auxquels ils participent, ainsi que des facteurs économiques, sociaux et culturels qui favorisent l'existence, la transformation et le développement du milieu, des organismes vivants et des activités humaines ». L'évaluation environnementale est un processus systématique qui consiste à évaluer et à documenter les possibilités, les capacités et les fonctions des ressources et des systèmes naturels, afin de faciliter la planification du développement durable et la prise des décisions en général, ainsi qu'à prévoir et à gérer les impacts négatifs et les conséquences de proposition d'aménagement.

II.5.2. Définitions

D'après Benoit (2005), la pollution désigne toute modification anthropogénique d'un écosystème se traduisant par un changement de concentration des constituants chimiques naturels ou de la diffusion directe ou indirecte de substances chimiques, artificielles, d'une perturbation du flux de l'énergie, de l'intensité des rayonnements, de la circulation de la matière ou encore de l'introduction d'espèces exotiques dans un milieu naturel. Pour cet auteur, un polluant désigne un élément étranger ou non à un milieu, susceptible de créer des effets néfastes à ce milieu et sur les êtres qui y vivent, à des concentrations plus ou moins variables. La pollution des milieux aquatiques est provoquée par une grande variété de substances rejetées directement ou indirectement dans l'eau ou dans tout le bassin versant. Il s'agit : des matières organiques, des micropolluants, des métaux et des nutriments (nitrates et phosphates).

La mobilité d'un élément est définie par son aptitude à passer d'un compartiment, où il est retenu avec une certaine énergie, à un autre où il est retenu avec une moindre énergie (Baize, 1997). Elle est provoquée par la modification des paramètres physicochimiques du milieu (Sigg *et al.*, 2001).

La spéciation d'un élément, correspond à la forme chimique (monoatomique ou moléculaire) sous laquelle se trouve cet élément dans un milieu donné (Defaye *et al.*, 1998). Dans les phases solides, le terme « spéciation » est appréhendé comme la distribution ou la répartition des éléments dans les différentes phases solides (Ferguson, 1990 ; Citeau, 2004).

La biodisponibilité définit l'aptitude d'un élément à passer dans un compartiment sédimentaire dans lequel il sera directement assimilable par un organisme vivant (Callender et Robbins, 1993). Pour Walker *et al.* (1996), ce terme caractérise l'aptitude d'un élément à s'incorporer à un organisme vivant, plus que le déroulement effectif du phénomène. Les fractions solubles et échangeables sont considérées comme étant directement biodisponibles. Les autres fractions ne peuvent libérer partiellement les polluants qu'elles contiennent uniquement dans le cas où les conditions de pH et redox changent (Omwene *et al.*, 2016).

La toxicité d'un élément en revanche est difficile à définir. Elle dépend en effet, outre de l'organisme et de son métabolisme, des paramètres extérieurs. Un contaminant pris isolément n'aura pas la même toxicité que dans un mélange de polluants (Defaye *et al.*, 1998). Les effets de synergie sont alors souvent observés (Fergusson, 1998).

II.5.3. Eléments traces métalliques

Les Eléments Traces Métalliques (ETM) désignent les métaux de numéro atomique élevé, de densité supérieure à 5 g/cm³ et dont la concentration en masse dans une phase solide est inférieure ou égale à 100 mg/kg, soit ≤ 100 ppm (Sposito, 1989 ; Alloway, 2013). Ils sont composés de métaux et de métalloïde ayant pour point commun leur effet toxique à des doses plus ou moins différentes. Il s'agit entre autres du Zn, Co, Se, Cr, Ni, As, Hg, Cd, Pb, V et Mn (Defaye *et al.*, 1998). Certains ETM comme Cu, Mn, Zn, Co, Mo, Se, Cr, Ni, V et As sont considérés à faibles doses comme essentiels, car ils favorisent un développement et une reproduction normale des organismes (Walker *et al.*, 1996 ; Wang *et al.*, 2019). D'autres comme Hg, Cd ou encore Pb n'ont que des effets néfastes sur les organismes (Walker *et al.*, 1996 ; Sigg *et al.*, 2001).

Les ETM proviennent des sources autochtones et des sources allochtones. Le relargage à partir des sédiments et de l'activité biologique constituent les principales sources internes d'ETM en milieu lacustre. Les éléments traces métalliques d'origine allochtone proviennent du

fond géochimique et des activités anthropiques (Baize, 1997; Alloway, 2013). Le fond géochimique représente la concentration naturelle d'une substance dans un milieu, résultant uniquement de l'évolution géologique (Callender, 2003). Sa valeur est fonction du type de roche, de la localisation géographique, de la proportion des différents composants des sédiments et du degré d'altération des roches (Varol *et al.*, 2011 ; Baize, 1997 ; Zhang *et al.*, 2018). En effet, les ETM sont inclus dans le réseau cristallin des minéraux (primaires ou secondaires), où ils remplacent certains éléments au cours des processus de diffusion et d'absorption (Sparks, 1995). Ils peuvent aussi être dissouts dans la phase liquide (Sposito, 1989 ; Alloway, 2013). D'après Omwene *et al.* (2016), les sources anthropiques de métaux sont nombreuses, surtout en milieu urbain. Il s'agit en général des émissions liées au trafic d'automobiles (combustion du carburant, corrosion de la carrosserie, abrasion des freins et des pneumatiques des voitures). Ils sont également industriels (usines thermiques, combustion d'essence de fuel, incinérateurs d'ordures ménagères, métallurgie), agricoles (usage de fertilisant, épandage de boues urbaines) et miniers (Ikenaka Nakayama *et al.*, 2010). En dehors des sources susmentionnées, les quantités croissantes de déchets domestiques constituent des sources anthropiques non négligeables (Tab 2) (Benoit, 2005).

II.6. Caractérisation pétrographique et environnementale des sédiments aquatiques au Cameroun

II.6.1. Caractérisation pétrographique des sédiments aquatiques

Au Cameroun, les sédiments aquatiques ont fait l'objet de plusieurs études (Ndjigui *et al.*, 2014, 2018). Ces travaux ont porté aussi bien sur leurs compositions, la distribution de leurs éléments constitutifs, leurs provenances, que sur les degrés d'altération des roches sources et leurs environnements de dépôts. Différents travaux (Ndjigui *et al.*, 2014, 2018) ont montré que les sédiments étudiés subissent généralement deux types d'altération chimique (intense et modérée). A cause de l'altération chimiques intense dominante, le cortège minéralogique est principalement constitué de quartz, kaolinite, goethite, hématite, gibbsite, rutile, interstatifiés (illite-micas) (Ngon Ngon *et al.*, 2012). Cependant, la présence de l'hématite et de la goethite est surtout liée au climat. Ndjigui *et al.* (2014) ont trouvé l'hématite dans les sédiments de Ngaye, région soumise à un climat légèrement aride. Tandis que Ndjigui *et al.* (2018), qui ont travaillé dans les zones plus humides, notent la présence de la goethite. La silice et l'oxyde d'aluminium sont généralement les éléments les plus abondants. La répartition des différentes classes granulométriques dans les sédiments est fonction de la dynamique du milieu de

prélèvement. Ainsi les sédiments des rivières Ngaye (Nord-Cameroun) et Mefou (Sud-Cameroun) sont dominés par la fraction grossière (Ndjigui *et al.*, 2014 ; Mbale *et al.*, 2019 ; Ongboye *et al.*, 2019), tandis que les sédiments prélevés dans la plaine alluviale sont dominés par la fraction fine (Ngon Ngon *et al.*, 2012 ; Ndjigui *et al.*, 2018). L'origine de ces sédiments est le plus souvent associée aux roches environnantes qui sont felsiques ou mafiques. Les roches felsiques sont souvent liées au craton et au panafricain, tandis que les roches mafiques proviennent des formations de la ligne volcanique du Cameroun.

II.6.2. Etudes sur la pollution

A cause du danger qu'ils représentent pour l'environnement et les organismes vivants, les métaux lourds font depuis plusieurs années l'objet de plusieurs travaux (Hakanson, 1980 ; Asaah *et al.*, 2005 ; Ekengele *et al.*, 2012 ; Defo *et al.*, 2015 ; Varol *et al.*, 2020). Au Cameroun, ces travaux portent sur différents compartiments de l'environnement : les sols, les sédiments et la colonne d'eau, et aussi sur les êtres vivants. Plusieurs auteurs (Asaah *et al.*, 2005 ; Ekengele *et al.*, 2012 ; Defo *et al.*, 2015) ont montré que la distribution de ces éléments dans les sols est le plus souvent liée à l'action anthropique. En effet, les travaux d'Asaah *et al.* (2005) sur les sols de la zone industrielle de Bassa (Douala), ont montré qu'ils sont modérément à pollués en Ag, Cu, Cr, Fe, Mn, Mo, Ni, Sb et Zn. Pour ces auteurs, les teneurs élevées sont associées à l'activité industrielle intense. Aussi, ces métaux lourds constituent un risque pour la population riveraine. Ekengele *et al.* (2012) ont montré l'influence de la brûlure des roues sur les sols de la ville de Ngaoundéré. Pour ces auteurs, cette activité est responsable de la pollution des sols en Cu, Zn, Pb et Cr.

Tableau 2. Sources probables des ETM provenant des activités anthropiques (Benoit, 2005)

Sources probables	Eléments
Métallurgie	Cr, Cu, Zn, Ni, V, Co
Engrais	Cd, V
Peintures, pigments	Cd, Co, Pb, Cu, V
Batteries, accumulateurs	Cd, Ni, Pb
Industrie électrique	Cu, Pb, Ag
Carburants	Pb
Munitions	Pb
Photographie, radiographie	Ag
Chimie (catalyseur)	Zn, Cd, Cr, Ni, V
Médecine	Zn et Cd (antiseptiques, collyres), Co (Vitamines B12 et rayonnement)

Les travaux de Kwon *et al.* (2012) sur le lac municipal de Yaoundé et son principal affluent Mingoa indiquent que les concentrations en Al, Fe, Mn, Cd et P sont supérieures, aux normes prescrites par l’OMS dans les eaux de consommation. Celles-ci pourraient ainsi représenter un risque pour la santé. Ceci a montré que, la rivière Mingoa est le principal collecteur des polluants issus des activités menées dans le bassin versant. A partir de l’étude statistique, ces auteurs ont observé une corrélation positive entre les différents éléments. L’analyse par la méthode « ACP » a permis d’inventorier trois sources pour ces éléments : les activités anthropiques (la plus importante), les processus lithologiques qui ont lieu pendant le processus d’altération, et au fond géochimique. Rakotondrabe *et al.* (2018) notent des concentrations anormales en Pb, Mn, Cr et Fe dans les eaux de surface du bassin versant de Mari à Bétaré Oya. Pour ces auteurs, quatre phénomènes sont responsables de la qualité des eaux : l’hydrolyse des minéraux silicatés, la végétation, le lessivage des sols et l’activité minière. Fonkou *et al.* (2005) notent des concentrations élevées en Cd, Cu, Zn et Pb dans les eaux de surface, les sédiments, les plantes et les animaux. Pour ces auteurs, ces concentrations sont plus élevées dans les plantes que dans les eaux de surface, et chez les organismes vivants que dans les plantes.

Les travaux sur les métaux lourds associés aux sédiments portent aussi bien sur les sédiments fluviaux (Ekengele *et al.*, 2008, 2012, 2017 ; Binam *et al.*, 2019) que sur les sédiments lacustres (Ekengele *et al.*, 2012, 2017; Oumar *et al.*, 2014 ; Ekoa *et al.*, 2018) et dans les milieux côtiers. Les travaux d’Ekengele *et al.* (2008) sur les sédiments de la rivière Mingoa, principal tributaire du lac municipal de Yaoundé, ont révélé que les concentrations en métaux (Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Al, Cr, Co, Cu, Cd, Ni, Pb, Zn, Sr, Ba et Si) trouvées dans les sédiments reflètent les apports anthropiques. Aussi, pour ces auteurs, la distribution de ces éléments est contrôlée par : la teneur en matière organique, la nature de la roche mère et les apports anthropiques. Binam *et al.* (2019), dans les bassins versant de la Kienke et Tchangué dans le district aurifère d’Abièté (Sud-Cameroun), ont montré que les sédiments du bassin de la Kienke sont pollués en Cu et Ni, tandis que ceux du bassin de Tchangué ne sont pollués qu’en Ni. Aussi, à partir des valeurs du EF et du Igeo, ces auteurs ont illustré que les sédiments étudiés sont modérément pollués à pollués en Ni et Cu. L’évaluation du risque écologique par le biais des paramètres tels que : indice de risque écologique (RI), facteur de risque écologique (Er), facteur de contamination (FC) et indice de charge de pollution (PLI), a montré que ces sédiments représentent un risque écologique significatif, à très élevé en Cu et Ni.

Les travaux d’Ekengele *et al.* (2012) sur les sédiments du lac municipal de Yaoundé montrent que les teneurs en Pb, Cu, Cr, Zn, Cd sont supérieures au NASC. L’indice de

geoaccumulation (Igeo) révèle que les sédiments étudiés sont pollués à très pollués en ces éléments. Pour ces auteurs, ces fortes concentrations sont associées aux activités menées dans la ville. Les travaux d'Ekengele *et al.* (2017) sur les sédiments du lac Lere dont le but était de déterminer le statut de ce dernier en As, Co, Cr, Cd, Cu, Ni, Pb, Sb, Sn, Zn et Fe, illustrent que les sédiments étudiés ne sont pas pollués en Sn, Co et Pb, mais sont modérément pollués en As, Cr, Cd, Cu, Ni, et très pollués en Sb, Cd, Cu et Cr. Ces fortes concentrations sont associées aux activités humaines, notamment : la décharge des ordures, l'usage des produits chimiques dans l'agriculture et l'exploitation de l'or. Aussi, Ni et Cr représentent un facteur de risque écologique.

II.7. Contexte géologique de la zone d'étude

Le Cameroun comprend quatre grands ensembles géologiques : la chaîne panafricaine, les bassins sédimentaires, la ligne volcanique du Cameroun et le craton. La partie Sud du Cameroun comprend le craton (Tchameni, 1997 ; Toteu *et al.*, 2008). La zone d'étude se situe sur le craton. Le craton affleure au Cameroun sous l'appellation du groupe du Ntem. Celui-ci constitue la bordure nord occidentale du craton du Congo. Il est constitué d'Ouest en Est par le complexe du Nyong et le Complexe du Ntem (Tchameni *et al.*, 2000 ; Owona *et al.*, 2012) (Fig. 9).

II.7.1. Complexe du Nyong

Le complexe du Nyong représente la partie camerounaise de la chaîne Ouest centre-africaine décrite par Feybesse *et al.* (1998). Elle correspond approximativement à la partie occidentale du complexe du Ntem remobilisée lors de l'orogénèse éburnéenne/transamazonienne (2400-1800 Ma), associée à la collision entre le craton du Congo et de Sao Francisco (Pénaye *et al.*, 2004 ; Feybesse *et al.*, 2008). Elle est séparée du complexe du Ntem par la ceinture de roches vertes (CRVL) (Nedelec *et al.*, 1990). Le complexe du Nyong est constitué de TTG, anorthosites, charnockites, gneiss, migmatite, éclosite, métagabbros, quartzite et BIF. Les migmatites sont d'origine archéenne. Ils ont été mis en place vers 2400-2100Ma (Tchameni *et al.*, 2001 ; Shang *et al.*, 2004 ; Lerouge *et al.*, 2006). Le complexe du Nyong a été affecté par une déformation polyphasée, associée à la réorientation SW-NE des structures et de la mise en place de la nappe du Nyong, transportée vers l'Est sur le craton du Congo (Pénaye *et al.*,

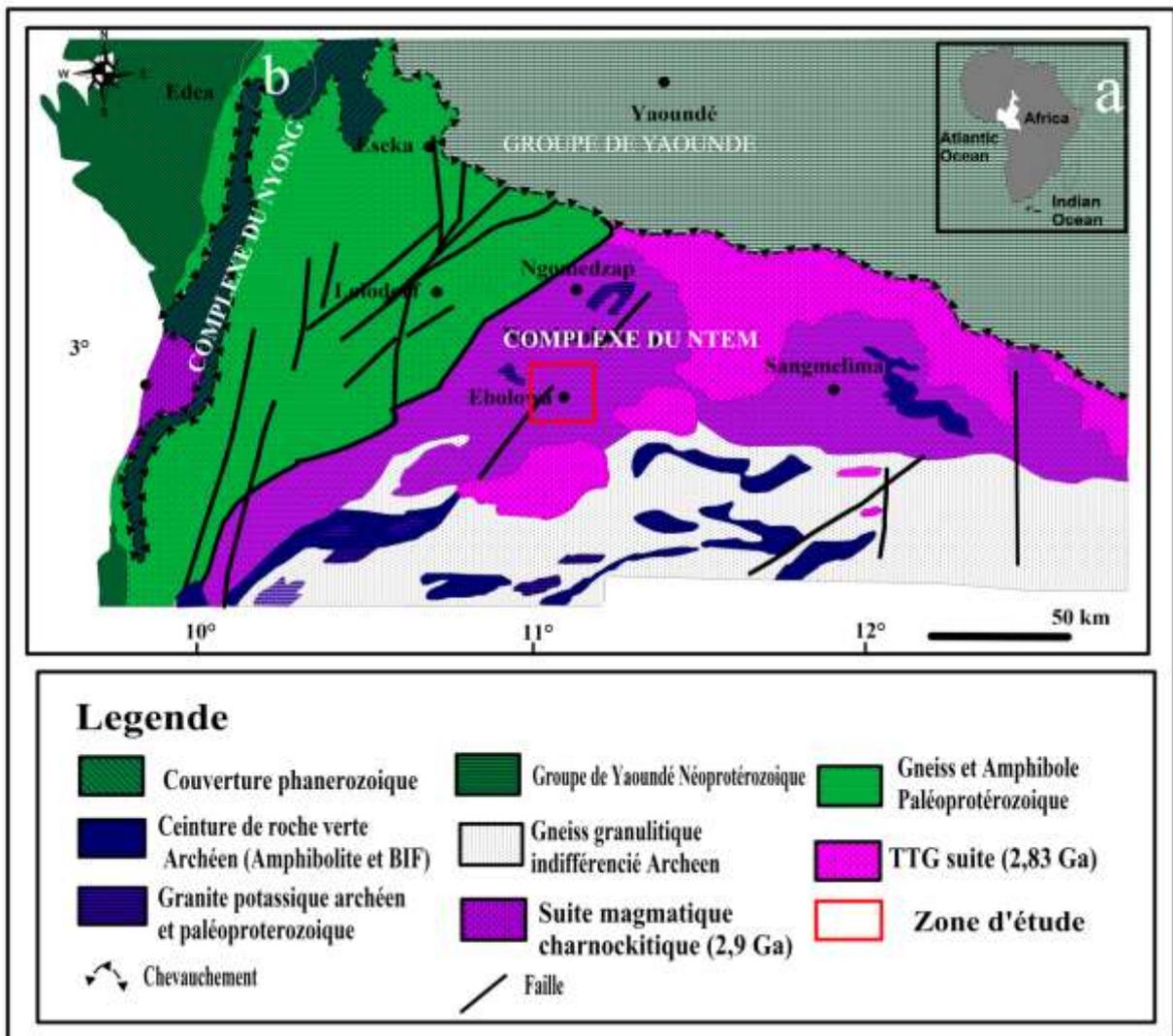


Figure 8. Carte géologique de la partie SW Cameroun d'après Toteu *et al.* (2008) : (a) localisation du Cameroun en Afrique : (b) carte géologique de la partie Sud-ouest du Cameroun

2004 ; Owona *et al.*, 2012). Elle a fait l'objet d'une fracturation post éburnéenne/transamazonienne réactivée durant l'orogénèse panafricaine (Penaye *et al.*, 2004).

II.7.2. Complexe du Ntem

Le Complexe du Ntem représente la partie Nord-ouest du craton du Congo. Il comprend principalement les charnockites, la suite tonalites, trondjénite et granodiorite (TTG), les granites potassiques, une quantité faible de roches supracrustales, et des roches mafiques qui instruisent les roches vertes (Shang *et al.*, 2010 ; Tchameni *et al.*, 2010 ; Akame *et al.*, 2020). Ces dernières incluent les syénites, les gabbros et les dykes doleritiques (Akame *et al.*, 2020). Les roches vertes et les granitoïdes ont été générés au cours de l'épisode tectonique avec la formation des syénites, puis intrusion doleritique (Tchameni, 1997). L'évolution archéenne (phase libérienne) est marquée par une déformation D1 polyphasée liée à trois générations de granitoïdes : les charnockites (2,9 Ga), les tonalites (2,83 Ga) et les granites potassiques (2,6 Ga). Les charnockites enclavent les roches vertes datant de 3,04 Ga. Ils sont issus du magmatisme tholéïtique océanique initial (Tchameni, 1997 ; Pouclet *et al.*, 2007). Avec les tonalites, ils ont une affinité calco-alcaline-sodique de type TTG. Ces roches ont une origine mantellique (Tchameni, 1997). Les granites alcalins intruisent les TTG et les roches vertes. Selon Tchameni (1997). Ils ont une origine crustale et proviennent de la fusion des TTG (Shang *et al.*, 2004 ; Nsifa, 2005 ; Pouclet *et al.*, 2007). L'évolution paléoprotérozoïque (phase éburnéenne) est caractérisée par deux épisodes magmatiques. Le premier, crustal est responsable de la mise en place des syénites (2,32 Ga). Le second, mantellique est lié à une extension avec mise en place des dolerites vers 2,1 Ga. Une tectonique transcurrente et un métamorphisme de faciès amphibolite affecte ces roches vers 2,05 Ga (Owona *et al.*, 2012). D'après les travaux de Toteu *et al.* (2008), le bassin du LME est couvert par la suite charnockitique magmatique (Fig. 8).

Conclusion

Les lacs sont des milieux dynamiques, qui naissent, grandissent et meurent. Il en existe plusieurs types, ceci en fonction de leur taille, leur profondeur et leurs nombres d'épisodes de brassage. Les sédiments lacustres constituent de véritables archives. Ils se caractérisent par leur composition et leur granulométrie. Ceux-ci sont majoritairement constitués de quartz, d'oxydes, et des minéraux argileux. Cette composition est influencée par les caractéristiques du bassin versant et celles du milieu lacustre. Ces dernières induisent la diagenèse précoce, qui regroupe la minéralisation de la matière organique et les mécanismes de sorption. Ces mécanismes sont

influencés par les paramètres physiques et la composante biologique du milieu. La pollution environnementale en ETM résulte surtout des activités anthropiques. Les études sur la caractérisation sédimentologique, minéralogique et géochimique ont fait l'objet de plusieurs études au Cameroun. Ces différents travaux ont documenté la variation de la composition des sédiments en fonction de la nature de la roche mère et celle de l'altération. Plusieurs ETM présentent un risque de santé publique pour la population. La zone d'étude se localise dans le groupe du Ntem, plus précisément dans le complexe du Ntem. Les principaux types pétrographiques qu'on y observe sont les TTG, les granitoïdes et les gneiss.

CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES

Introduction

Le présent chapitre est consacré à la description de toutes les étapes du protocole d'étude: du prélèvement des échantillons jusqu'aux méthodes analytiques. Cette description suit l'ordre chronologique de ce protocole avec dans un premier temps, les méthodes de prélèvement, puis l'échantillonnage, et enfin les différentes techniques d'analyses des échantillons prélevés.

III.1. Matériels

Le matériel utilisé au cours de cette étude associe les instruments de terrain et ceux de laboratoire. Il s'agit de :

- une carte topographique à l'échelle de 1/200 000 (feuillet d'Ebolowa), pour l'établissement des critères de prélèvement,
- un Global Positionning System (GPS), de marque Garmin, pour la géolocalisation,
- des bouteilles en polyéthylène de 1,5 l, pour le prélèvement des échantillons d'eau,
- des sacs en plastique, pour l'emballage des sédiments,
- un appareil multi-paramètres de marque HANNA H1929828/20, pour mesurer les paramètres physiques de l'eau (T, Eh, pH, Cs, OD, Turb et Sal),
- une glacière, pour le transport des échantillons jusqu'au laboratoire,
- un marqueur et des rouleaux de scotch, pour l'étiquetage des échantillons,
- un carnet de terrain, ainsi qu'un stylo à bille et d'un crayon, pour la prise des notes,
- un appareil photo de marque canon pour les prises d'images,
- un laptop menu des logiciels surfer 16, GlobaMapper 2018, Xlsat 2014, pour le traitement des cartes et des données.

III.2. Travaux de terrain

Les travaux de terrain ont porté sur le calage des stations d'échantillonnage, le prélèvement des échantillons et la mesures des paramètres physiques des eaux.

III.2.1. Choix des points d'échantillonnage

Huit campagnes de prospections ont été effectuées pendant la période allant de janvier 2017 à Août 2018. Celles-ci ont abouti au calage des différents points de prélèvements. Trois critères ont orienté le choix de ces points. Il s'agit de la répartition spatiale des différentes activités dans l'environnement, du potentiel de variation des paramètres physicochimiques des

eaux et l'accessibilité de différents points. Ainsi, trois stations ont été retenues dans le cours d'eaux Bengo'o, sept sur la rivière Mfoumou et dix sur le lac municipal d'Ebolowa.

III.2.2. Prélèvement des échantillons

Le prélèvement des échantillons a été effectué au cours du mois d'août 2018. Deux types d'échantillons ont été collectés : les échantillons d'eau et les échantillons de sédiments.

III.2.2.1. Echantillonnage de l'eau

L'échantillonnage d'eau a été réalisé avec des bouteilles en polyéthylène, préalablement lavées à l'acide chloridrique et rincées avec l'eau de chaque point de prélèvement. Au total vingt un échantillons ont été collectés : dix dans le lac, sept dans la rivière Mfoumou et quatre dans la rivière Bengo'o. Ces différents points coïncident avec des points d'échantillonnage des sédiments. Pour chaque station, le prélèvement a été fait de l'aval vers l'amont à une profondeur de 0,5 m. « *In situ* » les paramètres tels que : la conductivité (Cs), la salinité (Sal), la teneur en oxygène dissout (OD), la température (T), le potentiel d'hydrogène (pH), la turbidité (Turb) et le potentiel redox (Eh) ont été mesurés grâce à une sonde multi paramètres de marque HANNA H192982/20.

III.2.2.2. Echantillonnage des sédiments

Deux types d'échantillons solides ont été collectés. Il s'agit des sédiments superficiels et des carottes.

III.2.2.2.1. Sédiments superficiels

L'échantillonnage des sédiments superficiels a été effectué à l'aide d'une benne de type Eckman pour les sédiments du LME et une truelle pour les sédiments des rivières Bengo'o et Mfoumou. Ces instruments ont permis de recueillir les premiers centimètres superficiels de la couche active des sédiments. Pour chaque station, au moins trois prélèvements ont été effectués à des endroits espacés de quelques mètres. Ces échantillons ont été versés et brassés dans une bassine en plastique, jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène. Ceci dans le but d'avoir une bonne représentativité de chaque point de prélèvement. Puis, ils ont été emballés dans des sacs plastiques.

III.2.2.2.2. Carotte de sédiments

Les carottes ont été prélevées uniquement dans le lac, à l'aide d'un tuyau PVC, long de 2 m et de 63 cm de diamètre. Au total trois carottes ont été collectées. Celles-ci sont réparties

comme suit : deux à quelques mètres des points de confluences des cours d'eau Bengo'o-LME et Mfoumou-LME et une au centre du lac. La méthode utilisée pour le prélèvement de ces carottes est celle définie par Ternat (2007) (Fig. 9). Ce processus laisse entrevoir quatre étapes :

- le tuyau PVC vide est immergé et déposé à l'interface entre l'eau (en bleu) et le lit sédimentaire (en marron).
- la pénétration du tuyau dans le sédiment s'effectue en le poussant manuellement. Une fois en place, on ferme le dessus du tuyau avec un couvercle rigide et étanche.
- en soulevant doucement le tuyau, la colonne sédimentaire est prélevée par dépression. Une fois le tube extrait du lit sédimentaire, on ferme le dessous avec un autre capuchon.
- on s'assure de la qualité du prélèvement (l'interface doit être horizontale et peu perturbée). La carotte de sédiment est désormais isolée.

Les coordonnées des différentes stations ont été prises grâce à un GPS de marque Garmin. Les différents échantillons ont été codifiés comme suit : deux premières lettres représentent le nom du site et les chiffres font référence à l'ordre de prélèvement. Exemple un échantillon codifié Be1 fait allusion, au premier échantillon prélevé dans la rivière Bengo'o. Une fois conditionnés, les différents échantillons ont été transportés en laboratoires où ils ont été soumis à diverses analyses.

III.3. Travaux en laboratoire

Au laboratoire, les carottes ont été sous échantillonnées sur un pas de cinq centimètres. En effet, les interactions eau-sédiments se déroulent sur le cinq premiers centimètres de la couche active des sédiments. Tous les échantillons (sédiments superficiels et carottes) ont ensuite été décrits, puis soumis aux analyses : physiques, chimiques, minéralogiques, et géochimiques. Des analyses statistiques ont complété ladite étude. Les échantillons sélectionnés pour les analyses minéralogiques (DRX et MEB), géochimiques et des paramètres physiques des sédiments ont été broyés dans un mortier d'agate. Ceci afin d'obtenir une fraction $< 63 \mu\text{m}$.

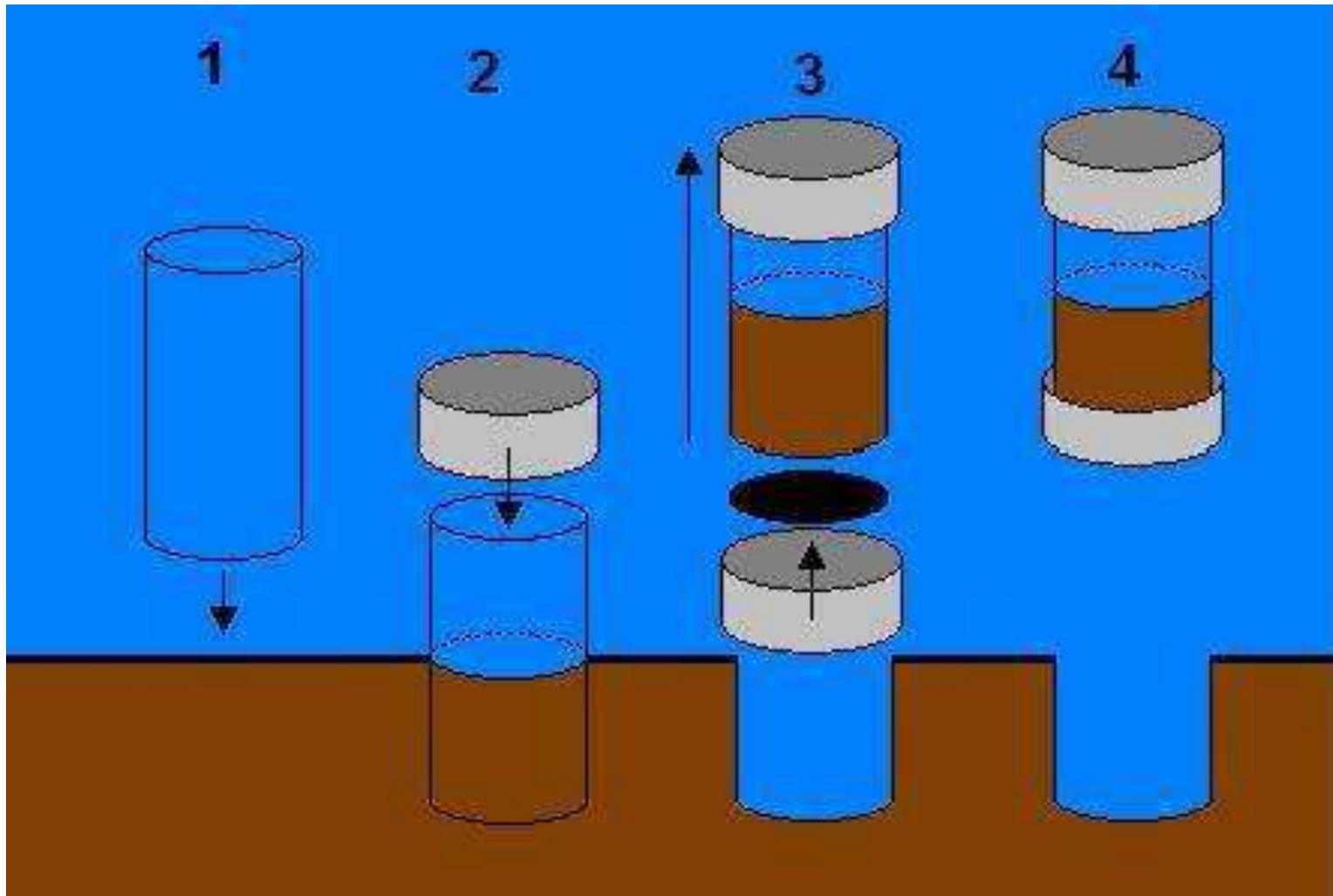


Figure 9. Technique de prélèvements des carottes de sédiments dans les cours d'eau (Ternat, 2007)

III.3.1. Description des échantillons

La description des sédiments superficiels dans cette étude a été faite à partir de trois critères : la couleur, la texture et le contenu en éléments détritiques. Celle des carottes s'est fondée sur trois critères : la couleur et la texture de chaque couche, l'épaisseur des couches et la nature de la limite entre différentes couches. La couleur des différents échantillons a été déterminée par comparaison au code Munsell sol color chart. La texture a été déterminée après analyse granulométrique grâce au diagramme de Folk et Ward (1957). La qualification des épaisseurs des couches a été faite selon la méthode préconisée par McKee et Weir (1953) et Schnurremberger et *al.* (2003). Celle-ci définit cinq types de couches :

- couche très épaisse > 100 cm,
- couche épaisse : entre 10 – 100 cm,
- couche moyennement épaisse 10 – 30 cm,
- couche mince 3 – 10 cm,
- couche très mince 1 – 3 cm.

Pour les couches d'épaisseur inférieure à 1cm, on parle de lamination.

Pour les limites des couches, on distingue :

- limite franche : épaisseur de la transition inférieure à 1 mm,
- limite diffuse entre 1mm et 1cm,
- limite indistincte supérieure à 1cm.

III.3.2. Analyses de l'eau

Outre les paramètres physiques qui ont été mesurés sur le terrain, deux types d'éléments ont été analysés dans les échantillons d'eau. Il s'agit des nutriments (nitrates et phosphates) et des éléments traces métalliques (Cr, Cu Zn et Pb). En effet, les concentrations de ces éléments sont affectées par les variations des conditions du milieu. Ils peuvent ainsi constituer des marqueurs des processus diagenétiques. Aussi, à des concentrations variables, ces éléments peuvent représenter un problème environnemental, d'où l'attention particulière qui leur est accordée.

III.3.2.1. Analyse des nutriments dans l'eau

L'analyse des ions nitrates a été faite par dosage colorimétrique à l'aide d'un spectrophotomètre de type WTW (Photolabspectral), d'une précision de 10%. Celle des ions phosphates a été réalisée par dosage colométrique et par chromatographie au Dionex DX-100 à l'ITTA (Nkolbison – Yaoundé).

III.3.2.2. Analyse des éléments traces métalliques des eaux

La minéralisation des échantillons s'est faite par ajout de 40 ml d'échantillon d'eau et 5 ml d'acide sulfurique (H_2SO_4) concentré à 95 %, dans des madras de minéralisation. Ce mélange a été ensuite incubé pendant environ 2h dans le minéralisateur Buchi de marque HACH. Il a été chauffé à température douce, puis à température croissante (jusqu'à un maximum de $180^\circ C$), jusqu'à éclaircissement du mélange. Le minéralisât ainsi obtenu (4-5 ml) est ramené à 70 ml dans une fiole jaugée avec de l'eau distillée.

III.3.2.2.1. Dosage du chrome

Le chrome hexavalent a été déterminé par la méthode 1,5-diphénylcarbo-hydrazide. Ceci grâce à une formulation du réactif en poudre unique appelé ChromaVer 3. Ce réactif contient un tampon avec le diphénylcarbazine. Celui-ci réagit pour donner une coloration violette en présence du chrome hexavalent. La méthode d'analyse est la suivante : remplir une cuvette colorimétrique avec 10 ml d'échantillon, ajouter le contenu d'une gélule de réactif ChromaVer 3 et dans une autre cuvette colorimétrique de 10 ml, ajouter 10 ml d'eau distillée (le blanc). Après 5 minutes de réaction, l'intensité de la coloration est mesurée en utilisant le spectrophotomètre de marque DR/3900 à la longueur d'onde 540 nm. Cette valeur s'exprime en mg/l de chrome hexavalent.

III.3.2.2.2. Dosage du cuivre

La teneur en cuivre a été évaluée par la méthode bicinchoninate (Pétard, 2013). Son principe est le suivant : Le cuivre présent dans l'échantillon réagit avec le sel de l'acide bicinchoninique contenu dans le réactif CuVer1 ou CuVer2, pour former un complexe de couleur violette proportionnelle à la concentration du cuivre. La méthode d'analyse est la suivante : 10 ml d'échantillon sont prélevés. Auxquels on ajoute le réactif du cuivre (CuVer1-cuivre). Après 2 minutes de réaction, il y a formation d'un complexe coloré dans l'échantillon, et l'intensité de la coloration est fonction de la teneur en cuivre dans l'échantillon. Cette teneur en cuivre est directement lue sur un écran à affichage digital du spectrophotomètre DR/3900 à la longueur d'onde 560 nm. Cette valeur est exprimée en mg/l de cuivre.

III.3.2.2.3. Dosage du plomb

La méthode d'analyse du plomb est celle du dithizone (Pétard, 2013). Le principe est le suivant : les ions plomb (Pb^{2+}) en solution basique réagissent avec le dithizone pour former un

complexe rouge de dithizonate de Pb extrait avec du chloroforme. Dans une ampoule à décanter contenant 250 ml d'échantillon, on ajoute le contenu d'une solution tampon de citrate pour métaux lourds, puis 30 ml de la solution de dithizone. L'ampoule à décanter est inversée puis ouverte pour permettre le contact avec l'air. 5 ml de soude 5 N sont ajoutés au mélange, et l'ampoule à décanter est inversée et ouverte chaque fois après agitation. L'ajout des gouttes de soude se fait continuellement et la solution est homogénéisée jusqu'au virage de la coloration du bleu-vert à orange. A l'aide d'une spatule, on prélève 1 g de poudre de cyanure de potassium qu'on ajoute dans l'ampoule à décanter. Cette dernière, fermée et agitée de façon vigoureuse jusqu'à disparition de la couleur orangé. Un coton blanc est inséré à la sortie de chaque ampoule à décanter, et la solution est libérée dans les cellules spectrophotométriques de 25 ml. L'intensité de la coloration est mesurée en utilisant le spectrophotomètre DR/3900 à la longueur d'onde 515 nm avec pour blanc un volume de 25 ml de chloroforme. La valeur lue est exprimée en mg/l de Plomb.

III.3.2.2.4. Dosage du zinc

Les concentrations du zinc ont été déterminées par la méthode du ZincoVer (Pétard, 2013), selon le principe : le zinc est complexé dans l'échantillon par le cyanure. L'ajout du cyclohexanone provoque une libération sélective de zinc. Le zinc réagit ensuite avec le benzenecarboxy-2'-hydroxy-5'-sulfoformazyl (Zincon) qui est l'indicateur. La concentration en Zinc est proportionnelle à la coloration bleue. A cet effet, 50 ml d'échantillon sont prélevés, auquel on ajoute le contenu d'un sachet de réactif de ZincoVer. Le mélange est agité pour dissoudre complètement le réactif puis on introduit 25 ml de cet échantillon dans une cellule spectrophotométrique de 25 ml pour faire le blanc. Ensuite, 1 ml de cyclohexanone est ajouté à la solution restante. L'intensité de la coloration obtenue est mesurée en utilisant le spectrophotomètre DR/3900 à la longueur d'onde 620 nm. La valeur obtenue est exprimée en mg/l de Zinc.

III.3.3. Paramètres physiques des sédiments

Les paramètres physiques mesurés dans la présente étude sont : la teneur en eau (TE), le carbone organique total (COT), la granulométrie, la morphoscopie, le potentiel d'hydrogène (pH), le potentiel d'oxydoréduction (Eh), la conductivité électrique (Cs) et la température (T). Ces paramètres ont été mesurés uniquement sur les sédiments superficiels. En effet, leurs mesures se font dès l'arrivée au laboratoire, compte tenu de leurs variations très rapides. Les

carottes ayant été ouvertes un mois après, l'arrivée au laboratoire, ont de ce fait été éliminés de ces analyses.

III.3.3.1. Teneur en eau et carbone organique total

La teneur en eau a été déterminée dès l'arrivée de l'échantillon au laboratoire. Ceci afin de minimiser les risques d'évaporation (Robbe, 1981). Son principe est basé sur le séchage, d'une masse connue avec précision de sédiment mouillé et tamisé à un diamètre < 2mm, dans une étuve à 105 °C, jusqu'à ce que la masse soit constante. La teneur en eau (TE) des sédiments a été calculée par différences de masse selon la formule.

$$TE = m_0 - m_1 / m_0 \quad (7)$$

avec :

m_0 : la masse de l'échantillon (en gramme) avant séchage

m_1 : la masse de l'échantillon après séchage (en gramme).

Le carbone organique total a été évalué par la perte au feu (LOI). Son principe est basé sur le séchage d'une masse connue à une température de 550°C pendant 24h. La teneur en COT a été calculée selon la formule $m_0 - m_1 / m_0$.

III.3.3.2. Granulométrie

La granulométrie permet d'une part, de déterminer la répartition des différents éléments constitutifs d'un sédiment, d'autre part de renseigner sur la nature et la dynamique et l'agent de transport, ainsi que les conditions de dépôt. Deux types granulométriques ont été mises en œuvre au cours de ces travaux. Il s'agit de la granulométrie par voie humide et la granulométrie par voie sèche.

III.3.3.2.1. Méthode par voie humide

L'analyse granulométrique par voie humide a été réalisée par la méthode de la pipette de Robinson. Cette méthode a été utilisée pour l'analyse des échantillons du lac (sédiments de surface et carottes). Pour ce faire, l'ensemble des trente-neuf échantillons utilisés dans le cadre de ces travaux a subi cette analyse. Celle-ci est basée sur la différence des vitesses de sédimentation des particules. Les sables se déposent plus vite que les limons, eux même plus rapide que les argiles. Les différentes étapes de cette méthode sont les suivantes :

- pour chaque échantillon, 20 g ont été prélevés, puis introduits dans un bécher,

- 10 ml d'eau distillées et 10 ml d'eau de javel ont été ajoutées. Ceci dans le but de détruire la matière organique et les oxydes de fer et d'aluminium ;
- par la suite, 20 ml d'hexametaphosphate de sodium ont été ajoutés. Ceci dans le but de dissocier les différents composants minéraux ;
- la solution a été versée dans des bouteilles cassables, puis prolongé avec de l'eau distillée jusqu'au milieu des dites bouteilles ;
- l'ensemble a été agité grâce à un agitateur rotatif à 35tr/mn pendant 2h ;
- après agitation, l'ensemble a été versé dans une allonge, puis a été mélangée à l'eau distillée jusqu'au trait de jauge de 1000 ml ;
- l'ensemble a été fermé, puis secoué manuellement ;
- à une profondeur de 10 cm et à l'aide d'une pipette de Robinson, 20 ml de la solution ont été prélevées, puis versées dans les boites à pétris de masses préalablement mesurées à l'aide d'une balance électronique à précision. Ce processus a été répété pendant trois phases :
 - 46 s après la première agitation manuelle, la masse des argiles et limons (fins et grossiers) a été obtenue (P1) ;
 - 4 mn après la seconde agitation manuelle, la masse argiles + limons fins a été obtenue (P2) ;
 - 17h après la troisième phase d'agitation, la masse des argiles a été obtenue.
- le sable restant a été lavé à l'eau du robinet, jusqu'à l'obtention d'une solution claire. Ce sable a été ensuite mis dans les boites à pétris, puis séché à l'étuve pendant 24h. Une fois sec le sable a été passé dans un tamis de 0,2cm de maille.

Calcul des masses

$$\%S = \frac{Ms \times 100}{20} \quad (7)$$

$$\%(Ar + lf + lg) = 100 - \%S \quad (8)$$

$$P1 = Mar + Mlf + Mlg \quad (9)$$

$$P2 = Mar + Mlf \quad (10)$$

$$P3 = Mar \quad (11)$$

Avec

Ms : Masse sable en %

%S : pourcentage sable en %

Ar : argile en %

lf : Limons fins en gramme (g)

Ig : limons grossiers en gramme (g)

Mar : masse argile en gramme (g)

III.3.3.2.2. Méthode par voie sèche

Seuls les onze échantillons prélevés dans les rivières Mfoumou et Bengo'o ont été soumis à la dite analyse. Ceci à cause de leurs grandes proportions en éléments grossiers. Cette analyse a suivi les étapes suivantes :

- les échantillons ont été triturés, séchés à l'étude pendant 24h et à une température de 120°C. Ils ont ensuite été soumis au quartage ;
- pour chaque échantillon, 500g ont été prélevés et pesés à l'aide d'une balance électronique de précision de marque Mettler AE 200 ;
- les différents échantillons ont ensuite été tamisés sur une colonne de tamis AFNOR de mailles : 2, 1, 0,45, 0,315, 0,16, 0,125, 0,08 et 0,063 mm. Le refus de chaque tamis a été recueilli minutieusement, pesé, puis emballé et étiqueté.

III.3.3.2.3. Courbes et indices granulométriques

Pour chaque échantillon, une courbe granulométrique a été établie sur un diagramme semi-logarithmique. Dans ce dernier, l'abscisse représente le diamètre des tamis, tandis l'ordonnée, représente le pourcentage cumulé. Ici, l'utilisation des données décroissantes c'est-à-dire des particules les plus grossières aux plus fines a été privilégiée. D'après Berthois (1975), elle donne une image plus juste des dépôts des sédiments. En effet, les particules grossières se déposent avant les particules fines.

III.3.3.2.4. Indices sédimentologiques

Plusieurs indices sédimentologiques ont été calculés à partir des percentiles 5, 10, 16, 25, 50, 60, 75, 84 et 95, correspondant respectivement aux pourcentages cumulés des abscisses 5, 10, 16, 25, 50, 60, 75, 84 et 95. Il s'agit de la moyenne (Mz), le sorting index ou écart type (σ), le coefficient d'asymétrie ou Skewness (Ski), le coefficient d'uniformité (U)

III.3.3.2.4.1. Grains moyens

La moyenne permet, d'une part, de définir la taille moyenne des particules qui constituent un sédiment, et d'autre part d'évaluer l'énergie cinétique moyenne lors du dépôt des sédiments. Elle est définie par la formule suivante :

$$Mz = \frac{\emptyset_{16} + \emptyset_{50} + \emptyset_{84}}{3} \quad (12)$$

Avec $\emptyset = -\log_2 d$

d : diamètre des tamis

Elle permet d'individualiser les faciès suivants :

$Mz < 1\emptyset$: Sables grossiers et graviers ;

$1\emptyset < Mz < 2\emptyset$: Sables moyens ;

$2\emptyset < Mz < 3\emptyset$: Sables fins

$Mz > 4\emptyset$: silts et argiles.

III.3.3.2.4.2. Sorting index

C'est un indice qui permet de déterminer la nature du classement. Il est défini par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{\emptyset_{84} - \emptyset_{16}}{4,4} + \frac{\emptyset_{95} - \emptyset_5}{6,6} \quad (13)$$

Suivant sa valeur, on distingue différents types de classements :

- sable très bien classés : $\sigma < 0,35\emptyset$
- sables bien classés : $0,35\emptyset < \sigma < 0,5\emptyset$
- sables moyennement classés : $0,5\emptyset < \sigma < 1\emptyset$
- sables mal classés : $1\emptyset < \sigma < 2\emptyset$
- sables très mal classés : $2\emptyset < \sigma < 4\emptyset$.

III.3.3.2.4.3. Skewness ou coefficient d'asymétrie

Le Skewness permet de déterminer la courbe granulométrique par rapport à la courbe de Gauss. Il est défini par la relation suivante :

$$Ski = \frac{\emptyset_{16} + \emptyset_{84} - \emptyset_{50}}{2(\emptyset_{84} - \emptyset_{16})} + \frac{\emptyset_5 + \emptyset_{95} - \emptyset_{50}}{2(\emptyset_{95} - \emptyset_5)} \quad (14)$$

En fonction de sa valeur, on distingue :

- courbe très symétrique vers les grossiers : $-1\emptyset < Ski < -0,30\emptyset$
- courbe asymétrique vers les grossiers : $-0,30\emptyset < Ski < -0,10\emptyset$
- courbe asymétrique vers les fins : $-0,10\emptyset < Ski < 0,30\emptyset$

- courbe très symétrique vers les fins : $0,30\phi < Ski < 1\phi$.

III.3.3.2.4.4. Coefficient d'uniformité

Il permet de qualifier la granulométrie des grains. Il est défini par la relation :

$$U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (15)$$

Avec

D60 : taille des grains en mm correspondant à 60% du poids cumulé

D10 : taille des grains en mm correspondant à 10% du poids cumulé.

En fonction de sa valeur, on distingue :

- Granulométrie uniforme : $U < 2$
- Granulométrie variée : $U > 2$

III.3.3.3. Température, potentiel redox, potentiel d'hydrogène et conductivité électrique

Dans un bécher contenant 20 grammes de l'échantillon préalablement broyé, 100 ml d'eau distillée et un barreau aimanté ont été ajoutés. Le mélange a été agité grâce à un agitateur magnétique de marque Wileg electric pendant une durée de 20 minutes. Il a été laissé au repos pendant 10 minutes. Par la suite, le code HQ11d a été introduit sur un appareil multi paramètre de marque HACH. Ce dernier a été plongé dans la solution pour lire la valeur du pH, ainsi que celle du Eh. La sonde a par suite été rincé et le code HQ14d a été de nouveau introduit, puis plongé dans la solution. Ceci, afin de lire les valeurs de la température et de la conductivité électrique. Pour chaque paramètre mesuré, l'essai a été répété cinq fois. Ainsi, la valeur de chacun de ces paramètres correspond à la moyenne de ces cinq essais.

III.3.3.4. Morphoscopie

Deux fractions ont été utilisées pour la dite analyse. Il s'agit des fractions correspondant aux mailles 0,355 et 0,25 mm. Les résultats de cette analyse ont été obtenus après les étapes suivantes :

- lavage des échantillons à grande eau. Ceci afin d'éliminer la fraction argileuse. Puis à l'aide de l'acide chloridrique, pour éliminer les enduits ferrugineux.
- séchage à l'étuve pendant 24h à une température de 105°C ;
- après séchage 100 grains choisis au hasard dans les différentes fractions ont été observés sous la loupe binoculaire.

D'après Cailleux (1942), il existe trois (03) principales morphologies de grains de quartz :

- les grains non usés (NU), qui se définissent par leur forme anguleuse. Ils sont marqués par l'absence de trace d'arrondi au niveau des arrêtes. L'aspect de leur surface peut être mat ou luisant ;
- les grains sub-émoussés (SE), dont les arrêtes sont plus ou moins arrondis. Ils sont moyennement façonnés. Comme les précédents, leur aspect peut être mat ou luisant ;
- les grains arrondis, qui se caractérisent par les arrêtes arrondis. L'aspect de surface est très poli. Il est brillant sous l'éclairage de la loupe binoculaire pour les grains ronds luisants (RL). Les grains ronds mats (RM) ne présentent pas une brillance particulière.

III.3.4. Minéralogie

Les analyses minéralogiques ont permis de déterminer le cortège des minéraux lourds, d'une part, et les minéraux légers d'autre part.

III.3.4.1. Minéraux lourds

Les techniques de prélèvement, d'extraction et de montage de minéraux sur les lames utilisées dans le cadre de cette étude sont celles préconisées par Parfnoff *et al.* (1970). Les différentes étapes associées à cette analyse sont les suivantes : préparation des échantillons, tamisage, séparation densimétrique, lavage à l'acide chloridrique, montage et observation des lames.

III.3.4.1.1. Préparation et tamisage

Les fractions granulométriques 0,355 et 0,250 mm ont été retenues pour la récupération des minéraux lourds.

III.3.4.1.2. Séparation densimétrique

Les minéraux lourds recueillis ont été lavés à l'acide chloridrique à 10% et à chaud pendant 20 minutes. Ceci pour éliminer les pellicules d'oxyde de fer.

III.3.4.1.3. Montage

Les étapes du montage sont les suivantes :

- la lame et la lamelle sont placées sur une platine de MALASSEZ et chauffées ;
- puis imprégnées du baume de Canada ;

- dès que le baume prend la coloration jaune, on dispose une quantité de minéraux lourds sur la lame porte objet à l'aide d'un pinceau ;
- on recouvre le tout par la lamelle ;
- après refroidissement de la lame obtenue, on élimine le baume débordant de celle-ci avec l'acétone ;
- les minéraux de ces lames sont ensuite observés au microscope polarisant.

III.3.4.2. Diffractions des Rayons X

Les mesures qualitatives et semi-quantitatives de la fraction totale des sédiments ont été réalisées grâce à un diffractomètre de marque Brucker, D4 Endeavor à anticathode de cuivre. Les goniomètres sont pilotés par micro-ordinateur grâce au logiciel PC-APD et DIFFRAC Commander pour des angles optimum 2θ compris entre 3° et 32° . Les données brutes sont traitées sous MacDiff.

III.3.4.2.1. Principe

Lorsqu'un faisceau de rayon X incident atteint un réseau de plan cristallins, ceux-ci sont diffractés selon la loi de Bragg :

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (16)$$

Où

λ : longueur d'onde du faisceau ;

D : distance inter réticulaire du réseau de plans cristallins ;

θ : angle d'incidence du faisceau X sur le réseau.

Par rotation θ de l'échantillon autour d'un axe perpendiculaire au faisceau incident, il est possible de caractériser toutes les distances "d" caractéristiques des minéraux présents dans l'échantillon. L'examen des 3 diffractogrammes avec le logiciel Macdiff permet une étude qualitative et semi-quantitative des minéraux présents sur la lame. L'erreur de la méthode est estimée à 5% sur l'estimation du pourcentage de chaque argile dans l'échantillon

III.3.4.2.2. Préparation des échantillons

Quelques cm^3 d'échantillon sont mis dans de l'eau distillée, puis décarbonatés à l'acide chlorhydrique sous agitation magnétique. L'acidité de la solution confirme la décarbonatation totale. La défloculation du matériel argileux et l'élimination de l'excès d'acide sont réalisés par

des rinçages successifs à l'eau distillée entre chaque stade de décantation du matériel argileux. Après homogénéisation mécanique et un temps de décantation de 50 min, calculé d'après la loi de Stokes :

$$V = \frac{2}{9} \frac{(D_1 - D_2) \cdot g \cdot r^2}{\mu} \quad (17)$$

V : vitesse de chute de la particule

D1 : masse volumique de la particule

D2 : masse volumique du fluide

g : accélération de la pesanteur

r : rayon de la particule

μ : viscosité du fluide.

III.3.5. Géochimie des éléments majeurs, traces et terres rares

Les analyses géochimiques ont été réalisées au laboratoire ALS geochemistry (Endvale – Johannesburg). Les éléments majeurs ont été déterminés par fluorescence des rayons X (FRX). C'est une méthode d'analyse chimique utilisant une propriété physique de la matière. La détermination des concentrations des éléments consiste à bombarder des rayons X primaires sur une pastille de poudre de sol ou de roche pressée à 40 mm de diamètre. Le spectre de rayon X émis par la matière est caractéristique de la composition de la pastille. En analysant le spectre, on peut déduire la composition élémentaire, ou les concentrations massiques. Les éléments majeurs sont exprimés en pourcentage d'oxyde. L'appareil utilisé est le spectromètre de fluorescence X de type BRUKER S4 PIONEER à tube à anode au Rhodium (Rh). Lors de la mesure des sensibilités relatives, les limites de détection se situent à environ 0,01%.

Les éléments traces et terres rares ont été analysés par Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS). Cette méthode permet de détecter les métaux et plusieurs non métaux, à des concentrations très faibles. Les échantillons ont été minéralisés grâce à un mélange diacide (HCl + HClO₄) à 120 °C contenu dans un récipient clos pendant une semaine. Les échantillons obtenus après cette phase ont été dissouts à nouveau dans les solutions acides (HNO₃ + HCl) chauffés à 100 °C. Les échantillons dissouts ont été analysés à l'aide de l'ICP-MS de type Perkin Elmer Elan 9000. Dans un premier temps, l'analyse a été réalisée en utilisant une bande analytique IM 100 dans laquelle un poids moyen d'instrument répond pour trois matériaux de références certifiés et préparés de la même manière que le blanc pour chaque

élément. Les solutions standard ont été préparées pour 30 échantillons en commun avec un contrôle après le passage de 10 échantillons à chaque fois. Les données sont reportées pour une large gamme de métaux de transition. A cause de l'incertitude des concentrations en éléments dans les matériaux de référence certifiés très faibles, les limites de détection pour la bande IM100 sont plus élevées que les capacités maximales (limites supérieures) de l'instrument. Quand certaines concentrations ont été trouvées en deçà de la limite de détection pour la bande analytique IM100, les solutions ont été analysées de nouveau en utilisant un second groupe de quatre (04) solutions synthétiques d'égales concentrations contenant 14 terres rares. Les limites de détection obtenues ont été très faibles. La précision de cette méthode est estimée à 5%.

III.3.6. Evaluation du bilan géochimique du lac municipal d'Ebolowa

Le bilan géochimique du LME a été obtenu par comparaison des concentrations des éléments présents dans le LME avec ceux des cours d'eau Mfoumou et Bengo'o, pris comme références détritiques (rd). Cette comparaison a été obtenue en normalisant les concentrations des éléments par rapport à l'aluminium, qui est l'élément indicateur de l'allochtonie (Ogier, 1999). Pour chaque élément dosé dans les échantillons des sédiments, une teneur normalisée par rapport à Al a été calculée de la façon suivante :

$$E_{(i)}^* = (E_{(i)}/Al_L) * Al_{rd} \quad (18)$$

$E_{(i)}$: concentration de l'élément i considéré dans les sédiments du lac

Al_L : concentration en Al des sédiments du lac

$Al_{(rd)}$: concentration en Al des sédiments des cours d'eau Mfoumou et Bengo'o.

La concentration normalisée de l'élément i du sédiment rapportée à celle du même élément i dans les cours d'eau Mfoumou et Bengo'o permet alors de définir l'indice de variation Q_i spécifique à l'élément dosé (i) dans chaque échantillon :

$$Q_i = E_{(i)}^* / E_{rd} = (E_{(i)}/Al_L) / (E_{(rd)}/Al_{(rd)}) \quad (19)$$

avec

$$E_{(rd)} = (E_{Nf} + E_{Be})/2 \quad (20)$$

$$Al_{(rd)} = (Al_{Nf} + Al_{Be})/2 \quad (21)$$

où N_f et B_e représentent respectivement les concentrations moyennes de l'élément (i) dans les cours d'eau Mfoumou et Bengo'o

III.3.7. Evaluation de la pollution

La pollution des sédiments a été évaluée par les indices de pollution et les indices de risques écologiques (Tab 3). Les différents éléments ont été normalisés par rapport aux valeurs de l'Upper Continental Crust (UCC). Ceci à cause de son universalité d'une part, et à cause de nombreuses contraintes liées aux choix d'un fond géochimique local, d'autre part. L'aluminium (Al) a été choisi comme métal de référence. En effet, il a d'une part, une abondance naturelle élevée dans la croûte terrestre. En outre, il n'est pas couramment affecté par les apports anthropiques et il est représentatif de la quantité d'aluminosilicates, qui est la phase métallifère dominante pour un grand nombre de métaux traces dans les sédiments (Varol et *al.*, 2020). Aussi, à cause de l'absence des critères de régulation de la qualité des sédiments dans la zone d'étude, les valeurs du « Probable Effect Concentration » (PEC) et du « Threshold Effect Concentration » (TEC) ont été utilisés dans le cadre de cette étude.

III.3.8. Méthodes d'analyses statistiques des données

Le traitement statistique des données d'analyses chimiques a nécessité de nombreux calculs pour la détermination des valeurs de moyennes, écarts-types, coefficients de variation (CV) et coefficients de régression linéaire entre paramètres. Le logiciel XLstat version 2014.5.03 a permis un traitement de données en Composantes Principales (ACP), couplée à une analyse par Classification Hiérarchique Ascendante (CHA).

III.3.8.1. Analyses de régressions

L'analyse de régression est une méthode statistique utilisée pour la modélisation des relations entre différentes variables. Elle permet de décrire et d'analyser les relations entre les données. Cette analyse peut être utilisée pour faire des prédictions au moyen des équations liant 02 paramètres. Dans la présente étude, la validation d'une relation se fait par le biais du coefficient de corrélation (R). Une relation est forte, si la valeur de R est supérieure à 0,8, moyenne dans l'intervalle [0,50 – 0,80[, et faible dans l'intervalle [0,00 – 0,50[. Seules les relations dont la valeur de R est supérieure ou égale à 0,50 sont retenues.

Tableau 3. Formules et interprétations des indices de pollution et de risques écologiques

Indices	Equation	Classification	Références
FC	$FC=C_o/C_b$	CF <1 (faible FC)	Hakanson, 1980
		$1 \leq C F < 3$ (FC modéré)	
		$3 \leq C F < 6$ (FC considérable)	
		$CF \geq 6$	
PLI	$PLI = (FC_1 \times FC_2 \times \dots \times C_n)^{1/n}$	PLI=0 (perfection)	Tomilinson et al., 1980
		PLI=1 (baseline levels of polluants present)	
		PLI > 1 (détérioration progressive du site)	
FE	$FE=(M/R)_{\text{échantillon}}/(M/R)_{\text{Background}}$	EF : 2 – 5 (Enrichissement modéré)	Hakanso, 1980
		EF : 5 – 20 (Enrichissement significatif)	
		EF : 20 – 40 (Enrichissement très élevé)	
		EF > 40 (extremely high enrichment)	
Igeo	$I_{geo}=\log_2 C_n/1.5 \times B_n$	$I_{geo} < 0$ class 0 (non contaminé)	Muller, 2000 Muller, 1981
		$0 < I_{geo} < 1$ class 1 (non contaminé à modérément contaminé)	
		$1 < I_{geo} < 2$ class 2 (modérément contaminés)	
		$2 < I_{geo} < 3$ class 3 (modérément à très contaminé)	
		$3 < I_{geo} < 4$ class 4 (très contaminé)	
		$4 < I_{geo} < 5$ class 5 (très à extrêmement contaminé)	
		$I_{geo} \geq 5$ class 6 (extrêmement contaminé)	
RI	$RI = \sum E_i^r$	RI < 110 (risque faible)	Hakanson, 1980
		RI : 110 – 220 (risque modéré)	
		RI : 220 – 440 (risque élevé)	
		RI > 440 (risqué significativement élevé)	
	$E_r = T_i^r \times CF_i$	$E_i^r < 30$ (risque faible)	
		$E_i^r : 30 - 60$ (risque modéré)	
		$E_i^r : 60 - 120$ (risque considérable)	
		$E_i^r : 120 - 240$ (risque élevé)	
		$E_i^r > 240$ (risqué significativement élevé)	

III.3.8.2. Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) constitue une des techniques d'analyse statistique les plus communément employées. A partir d'un espace à n dimensions définies par p variables initiales, l'ACP a pour but de déterminer un sous-espace de dimension moindre, en recherchant de nouvelles variables linéairement indépendantes, expliquant au mieux l'ensemble des observations. Parmi ces variables initiales, certaines d'entre elles ne sont pas linéairement indépendantes, il existe donc des variables par lesquelles la projection de l'inertie du nuage de points (sa variance) est maximale. Le calcul de ces composantes se ramène à celui des valeurs propres et des vecteurs propres de la matrice de covariance ou de corrélation. L'intérêt de la méthode est de se limiter à quelques composantes expliquant une proportion satisfaisante de la variabilité totale des variables initiales, pour résumer une information décrite de façon redondante par l'ensemble des variables initiales. Les variables peuvent y être représentées par des vecteurs dont les composantes sont les coefficients de corrélation qu'elles ont vis à vis des facteurs. On obtient grâce à l'ACP un résumé descriptif, sous forme graphique, d'un ensemble de « n » observations effectuées sur « p » variables numériques continues. Les règles permettant d'interpréter la position des variables dans les plans factoriels (cercles de corrélation par exemple) sont celles-ci :

- dans un plan factoriel donné, une variable est d'autant mieux expliquée qu'elle est proche du bord du cercle (A, B) (Fig. 10) et d'autant moins bien expliquée qu'elle se situe à proximité du centre (O) ;
- deux variables bien expliquées dont les représentations sont proches l'une de l'autre sont en relation normale (B et C). Le coefficient de corrélation linéaire (r) entre deux variables tend vers 1) ;
- deux variables bien expliquées dont les représentations se déduisent l'une de l'autre, par une symétrie par rapport à l'axe vertical du cercle sont en relation inverse (B et D) (r tend vers -1) ;
- deux variables bien expliquées dont les représentations se déduisent l'une de l'autre par une rotation de 90° sont indépendantes (A et B) (r tend vers 0).

Les facteurs limitant de la méthode sont :

- un nombre maximal de composantes (dans un but de représentation graphique);
- un pourcentage minimal de variance totale expliquée (75 %) assurant la stabilité et l'interprétabilité des composantes.

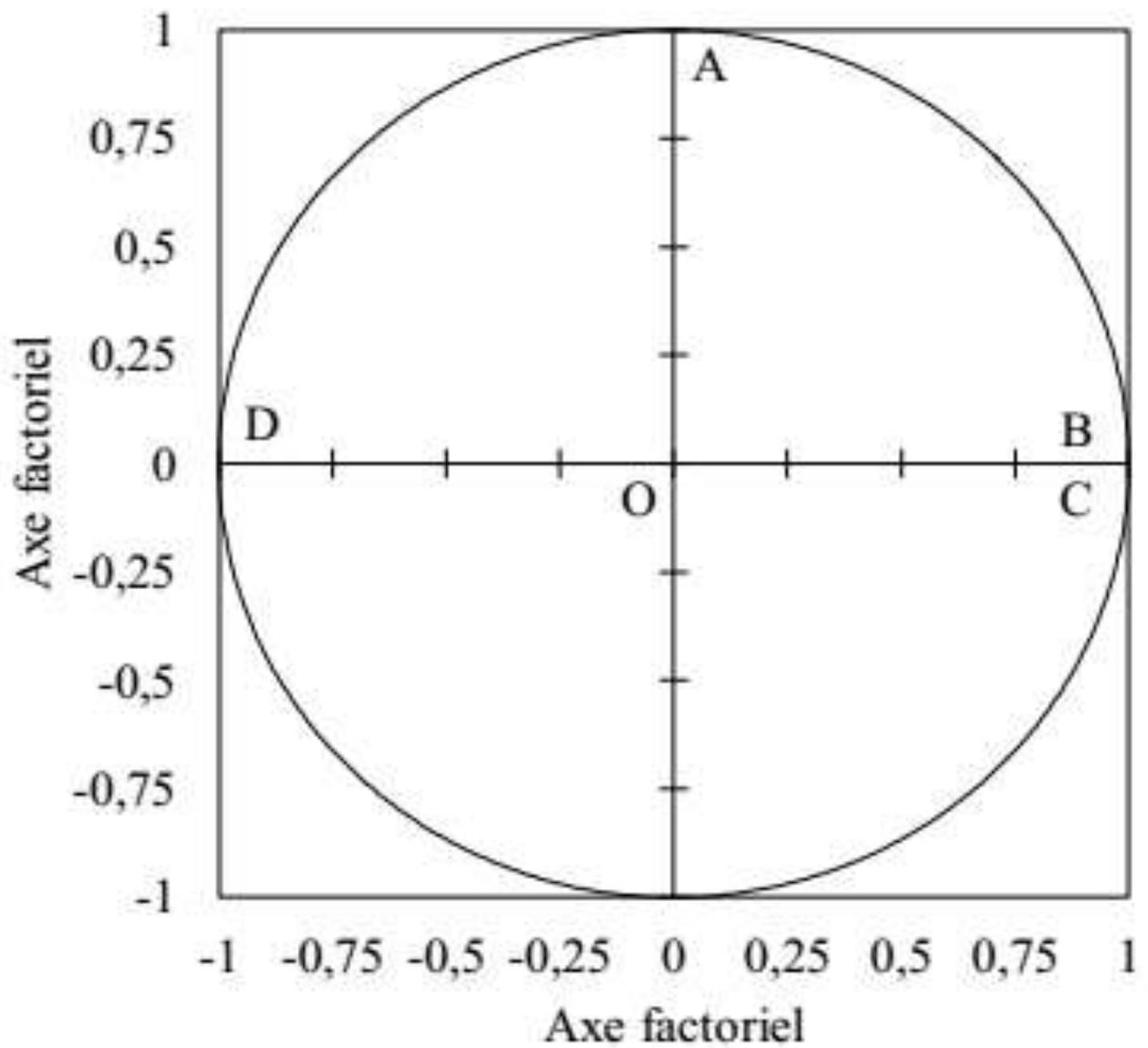


Figure 10. Représentation de projections typiques de variables dans un plan factoriel (De Lagarde, 1995)

III.3.8.3. Classification hiérarchique ascendante

La CHA est utilisée pour confirmer et compléter l'analyse en composantes principales. La classification hiérarchique ascendante est une technique de classification des données largement appliquée en sciences de la terre. Le résultat obtenu est exprimé sous forme de dendrogramme. Des objets sont groupés de telle sorte que les individus semblables se regroupent dans la même classe, et les individus dissemblables dans des classes différentes. La méthode de dissimilarité utilisée est la distance de Gosselin (1996) et celle d'agrégation (Kohonen, 1999).

Conclusion

Plusieurs matériels et méthodes ont été utilisés dans le cadre de cette étude, qui a été effectuée aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire. A partir du terrain, les échantillons d'eau et de sédiments ont été collectés. En laboratoire, les teneurs en nutriments et en éléments traces métalliques ont été mesurés sur la fraction liquide. Les analyses des paramètres physiques ont permis de mesurer le pH, le Eh, la température, la conductivité et la teneur en eau des sédiments. Les analyses sédimentologiques ont permis de tracer les courbes cumulatives et de calculer les indices sédimentologiques. L'extraction des minéraux lourds, la diffraction aux rayons X et la microscopie électronique à balayage ont permis d'évaluer le cortège minéralogique. La fluorescence aux rayons et la méthode ICP-MS ont permis de déterminer la composition géochimique des sédiments. L'évaluation de la pollution a été faite par le calcul des indices de pollution, de risques écologiques, et par comparaison avec les standards internationaux. Les méthodes statistiques ont été mises en œuvre pour observer les relations entre les différents polluants d'une part, et de déterminer leurs sources d'autre part.

CHAPITRE IV : RESULTATS

Introduction

Le présent chapitre rapporte les résultats obtenus dans le cadre de ce travail. Ces résultats portent sur les paramètres physicochimiques, la morphoscopie, la granulométrie, la minéralogie, la géochimie et l'hydrochimie.

IV.1. Localisation et description des points d'échantillonnage

IV.1.1. Localisation des points d'échantillonnage

Le Lac Municipal d'Ebolowa (objet de notre étude) est alimenté par deux cours d'eau Mfoumou et Bengo'o, tous les trois sont localisés dans l'Arrondissement d'Ebolowa 2^e. Dans ce lac, deux types d'échantillons ont été collectés, les échantillons solides (sédiments) et les échantillons liquides (eau) (Fig. 11).

IV.1.2. Description des points d'échantillonnage

IV.1.2.1. Lac Municipal d'Ebolowa

Les échantillons du LME ont été prélevés dans toute l'étendue du lac. Les descriptions de ces différents points sont résumées dans le tableau 4.

IV.1.2.2. Cours d'eau Mfoumou et Bengo'o

Les échantillonnages dans les cours d'eau Mfoumou et Bengo'o ont été effectués de la source jusqu'à leurs points de confluences avec le LME. La description de ces sites est présentée dans le tableau 5.

IV.2. Pétrologies des sédiments

IV.2.1. Description macroscopiques des échantillons

IV.2.1.1. Sédiments superficiels du Lac Municipal et ses affluents

Les couleurs, les textures au toucher et les contenus des sédiments superficiels étudiés sont résumés dans le tableau 6. Ces sédiments se caractérisent par deux principales couleurs : la couleur grise (Fig. 12a) et la couleur marron (Fig. 12b). La première concerne tous les échantillons des cours d'eau Mfoumou et Bengo'o, et ceux des parties Est et Sud du LME. La seconde caractérise ceux de la partie Ouest du LME, et l'échantillon NF7 du cours d'eau Mfoumou. Les textures sont grossières et fines. Les contenus de ces échantillons sont variés.

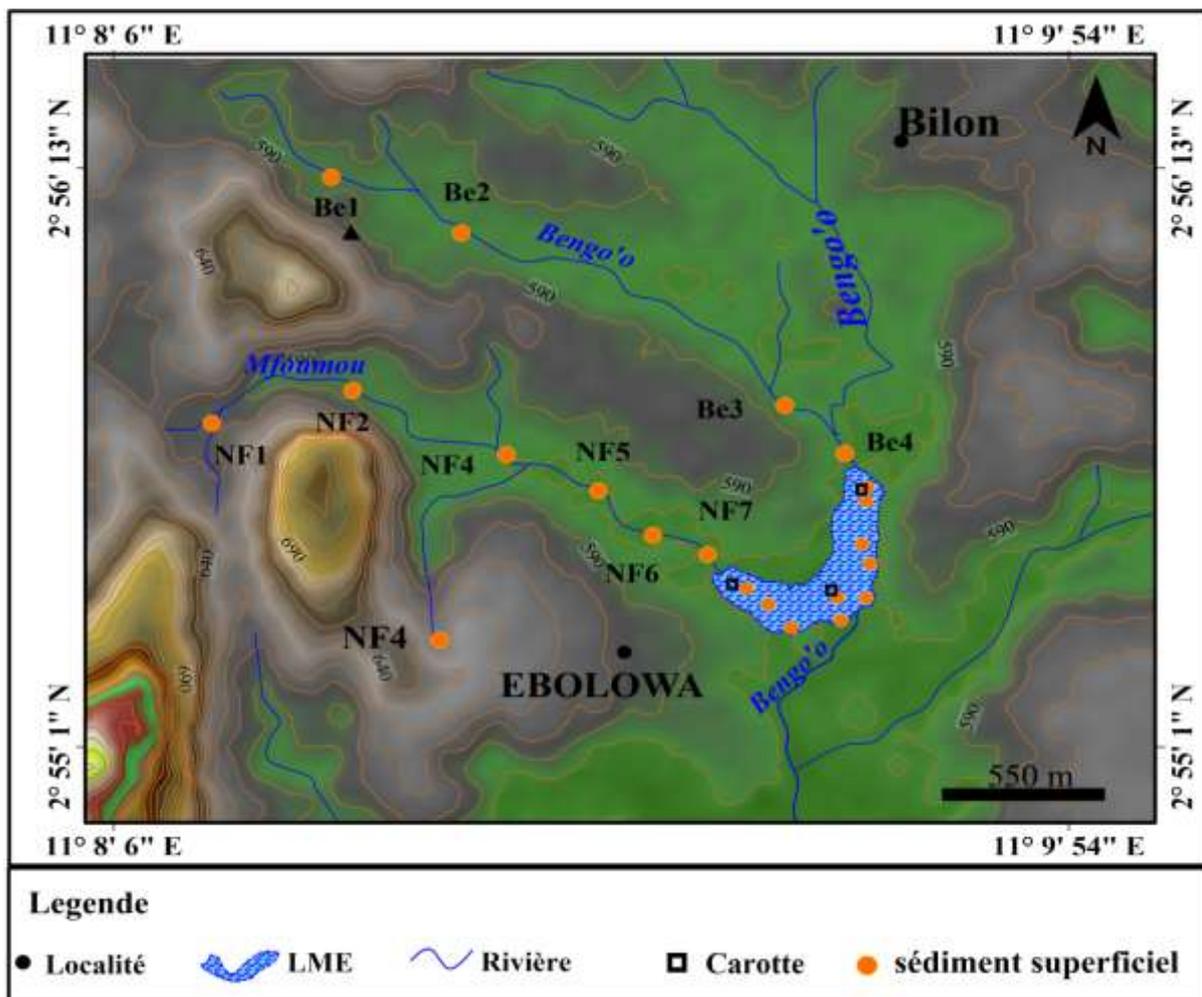


Figure 11. Carte d'échantillonnage

Tableau 4. Localisation des points d'échantillonnage dans le LME

Echantillon	Lieu de prélèvement	Prof (m)	Coordonnées
La01	A quelques mètres du point de confluence avec Bengo'o	0,80	N02°55'34.41''/ E11°09'35.70''
La02	Partie Est de l'hôpital Régional	1,2	N02°55'30.04''/ E11°09'34.09
La03	Partie Ouest de l'hôpital Régional	1,4	N02°55'27.08''/ E11°55'21.49''
La04	A quelques mètres de l'entrée des eaux provenant de la laverie	0,90	N02°55'21.49''/ E11°09'35.57''
La05	Centre du lac	3,5	N02°55'19.87''/ E11°09'32.87''
La06	A quelques mètres de la débouchée d'une canalisation	1,2	N02°55'14.70''/ E11°09'28.27''
La07	A quelques mètres de la confluence actuelle avec le cours d'eau Mfoumou	0,75	N02°55'14.80''/ E11°09'22.80
La08	Quelques mètres de l'ancienne confluence avec le cours d'eau Mfoumou	0,75	N02°55'11.07''/ E11°09'36.78''
La09	Exutoire du Lac	1,70	N02°55'15.71''/ E11°09'28.78''
La10	A quelques mètres du rivage où accostent les petites pirogues	1,50 m	N02°55'17.68''/ E11°09'32.77''

Tableau 5. Localisation et escriptions des points d'échantillonnage dans les cours d'eau Bengo'o et Mfoumou.

Echantillon	Lieu de prélèvement	Description	Localisation
Be1	Mikongo (Bilon)	Eau jaillissant de la roche, absence d'habitations et de plantations aux alentours	N02°56'03.60'' E11°09'26.20''
Be2	John Walk (Bilon)	Présence d'une scierie, de débit de boissons, de restaurants, d'une église et de nombreuses habitations	N02°55'50.10'' E11°08'49.87''
Be3	Mr Pierre (Ekombité)	Zone marécageuse, présence de plantations, de nombreuses habitations	N02°55'39.90'' E11°09'31.90''
Be4	Confluence avec le LME	Présence d'une laverie artisanale	N02°55'27.80'' E11°09'37.79''
NF1	Abang	Une des sources de Mfoumou. Présence d'un étang et des habitations	N02°55'20.08'' E11°08'45.58
NF2	Matignol (New bell III)	Quartier populaire, présence de porcherie, des latrines qui se déversent dans la rivière, plusieurs habitations	N02°55'35.03'' E11°08'47.60''
NF3	Carrefour Zambo (New Bell II)	Autre source du cours d'eau Bengo'o. exsurgence de l'eau du sol. Présence de quelques habitations aux alentours	N02°55'19.08'' E11°08'47.58
NF4	Pont de la gare routière (New bell I)	Présence de nombreux débits de boisson, de restaurants et de nombreuses habitations. Absence de latrine	N02°55'35.03'' E11°08'47.60''
NF5	Pont de New Bell II	Présence d'une laverie artisanale et de nombreuses habitations	N02°55'33.29'' E11°08'49.21''
NF6	Marché Oyenga (Bouanbé)	Présence d'un garage, d'une ferrallerie aux alentours du cours d'eau, déversement des ordures	N02°55'29.79'' E11°09'08.31''
NF7	Marché central : confluence du cours d'eau Bengo'o (Nko'ovos)	Déversement des ordures dans le cours d'eau, présence des champs de maïs aux alentours	N02°55'21.29'' E11°09'21.10''

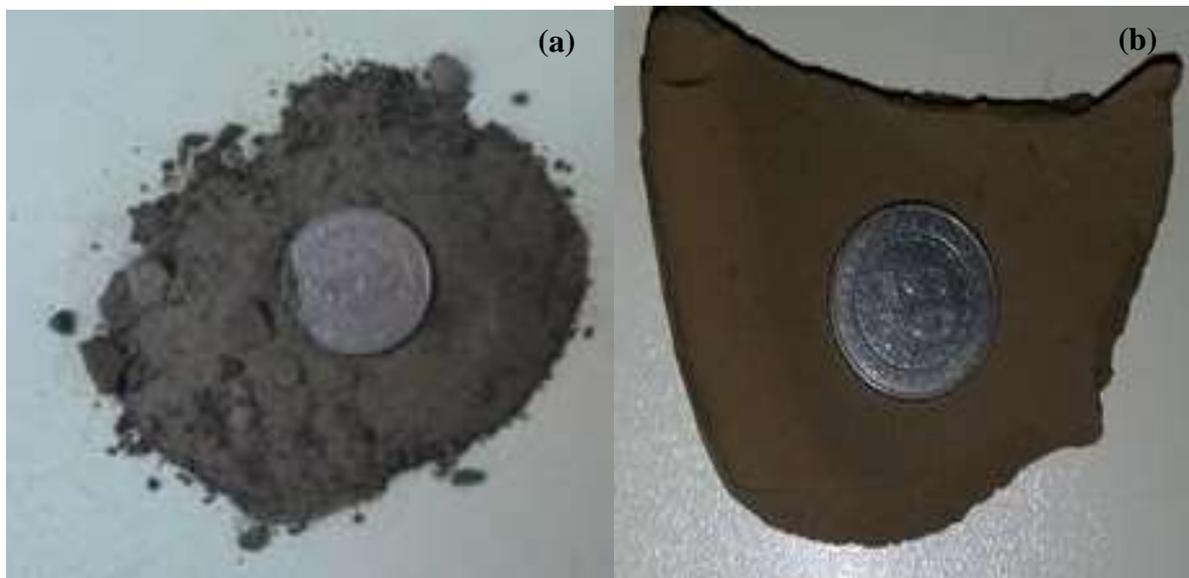


Figure 12. Couleurs des sédiments superficiels (a) couleur grise caractéristique des échantillons de Mfoumou, Bengo'o et les parties Est et Sud du LME, (b) Couleur marron, caractéristique des échantillons de la partie Ouest du LME

IV.2.1.2. Description des carottes des sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa

Les trois carottes analysées dans le cadre de la présente étude mesurent 21, 42 et 30 cm, respectivement pour les carottes Ca100, Ca200 et Ca300 (Fig. 13). En plus des critères utilisés pour la description des sédiments superficiels, la nature de la limite entre différents faciès a été ajoutée à la leur.

IV.2.1.2.1. Carotte Ca100

La colonne lithologique (Fig. 14a) de la carotte Ca100 est longue de 21 cm. Elle comprend deux faciès répartis :

- de 0 à 14cm, une couche épaisse de couleur marron (10YR7/3). Sa texture est sableuse. Elle est marquée par la présence de débris de coquilles de mollusques et de plusieurs débris de bois. Dans sa partie basale, on note la présence des fragments de cuirasse. Sa limite avec la couche sous-jacente est continue ;
- de 15 à 21 cm, est observé un niveau gris clair (10YR6/4). Comme pour le niveau sus-jacent, sa texture est sableuse. Il se caractérise aussi par la présence de débris de bois.

IV.2.1.2.2. Carotte Ca200

La colonne lithologique de la carotte Ca200 (Fig. 14b) prélevé au centre du lac a une longueur de 42 cm. Elle est subdivisée en deux faciès :

- de 0 à 35 cm, un niveau est très épais, et de couleur marron (10YR7/3). Il est caractérisé par une texture fine et la présence des débris organiques d'origine végétale. Sa limite avec le niveau sous-jacent est continue ;
- de 36 – 41 cm, le niveau est gris clair (10YR6/4). Sa texture est fine. Il est caractérisé par l'absence de débris organiques.

IV.2.1.2.3. Carotte Ca300

La colonne lithologique de la carotte Ca300 est longue de 30 cm (Fig. 14c). Elle est composée de 2 faciès.

- de 0 à 16 cm, le niveau est marron (10YR7/3). Au toucher, sa texture est fine. On y note la présence de plusieurs débris organiques. La limite avec le niveau inférieur est continue ;
- de 16 à 31 cm, le niveau est gris (10YR6/4). Il est caractérisé par une texture fine et la présence de fragments de bois.



Figure 13. Carottes (a) Ca100 (b) Ca200 (c) Ca300.

Tableau 6. Description des échantillons superficiels du LME, Mfoumou et Bengo'o

sites	Ech.	Textures	Couleurs	Contenus
Mfoumou	NF1	Grossière	2,5Y6/3 brun jaunâtre	Présence des débris de plantes
	NF2	Grossière	2,5Y6/3 brun jaunâtre	Présence des débris de plantes
	NF3	Grossière	2,5Y6/3 brun jaunâtre	Présence des débris de plantes
	NF4	Grossière	10YR6/4 brun jaunâtre	Présence des débris de plantes
	NF5	Grossière	10YR7/4 marron très pale	Présence des débris de plantes et de latérites
	NF6	Grossière	2,5Y6/3 brun jaunâtre	Présence des débris de plantes
	NF7	Grossière	10YR7/4 brun jaunâtre	Présence des débris de plantes
Bengo'o	Be1	Grossière	10YR4/1 gris foncé	Présence des débris de plantes
	Be2	Grossière	10YR7/3 marron très pale	Présence des débris de plantes
	Be3	Grossière	10YR7/3 marron très pale	Présence des débris de plantes
	Be4	Grossière	2,5Y6/3 brun jaunâtre	Présence des débris de plantes
LME	La01	Grossière	10YR4/1 gris foncé	Présence des débris de plantes et de coquilles
	La02	Grossière	10YR4/1 gris foncé	Présence des débris de plantes et de coquilles
	La03	Grossière	10YR4/1 gris foncé	Présence des débris de plantes et de coquilles
	La04	fine	10YR7/3 marron très pale	Présence des débris de plantes
	La05	fine	10YR7/3 marron très pale	Présence des débris de plantes
	La06	fine	10YR7/3 marron très pale	Présence des débris de plantes
	La07	fine	10YR7/3 marron très pale	Présence des débris de plantes
	La08	fine	10YR7/3 marron très pale	Présence des débris de plantes
	La09	Grossière	2,5Y6/3 brun jaunâtre	Présence des débris de plantes et de coquilles
	La10	Grossière	2,5Y6/3 brun jaunâtre	Présence des débris de plantes

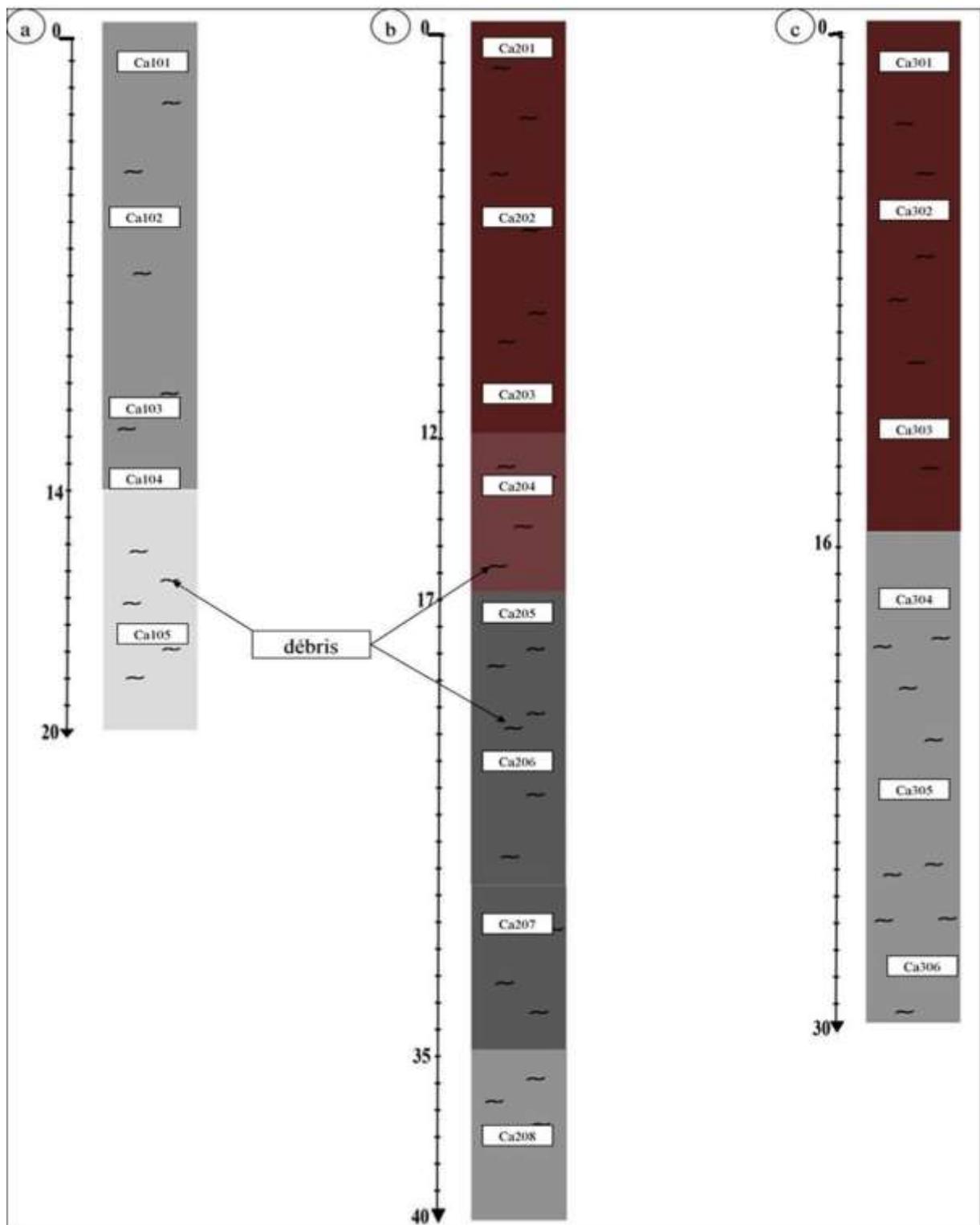


Figure 14. Représentation schématique des carottes du LME (a) carotte Ca100 (b) Carotte Ca200, (c) Carotte Ca300

IV.2.2. Caractéristiques sédimentologiques des sédiments

Les caractéristiques sédimentologiques des sédiments ont été déterminées grâce aux résultats des analyses granulométriques et morphoscopiques.

IV.2.2.1. Granulométrie

L'analyse granulométrique a permis de tracer les histogrammes et de déterminer les textures des différents échantillons d'une part, de tracer les courbes et calculer les indices sédimentologiques d'autre part.

IV.2.2.1.1. Histogrammes et textures

Les histogrammes des sédiments du LME (sédiments superficiels et carottes) et ceux des cours d'eau Mfoumou et Bengo'o sont illustrés sur les figures 15 et 6. Les textures quant à elles sont présentées sur la figure 17.

IV.2.2.1.1.1. Histogrammes et textures des sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa

Les histogrammes des sédiments superficiels du LME se caractérisent par une allure unimodale (Fig. 15a). Quatre principaux modes y sont observés : 0,002 mm (La4), 0,063 mm (La5), 0,2 mm (La6, La7 et La8) et 2 mm (La1, La2, La3, La9 et La10). Leurs textures sont sableuses (La9 et L10), sablo-argileuses (La1), sablo-limoneuses (La2 et La3) et limono-argileuses (La4, La5, La6, La7, et La8).

L'ensemble des histogrammes des échantillons de la carotte Ca100 a une allure unimodale (Fig. 15b). Le mode est lu à 2 mm. Deux types de textures ont été identifiées : une texture sablo-argileuse et une texture sablo-limoneuse. La première est caractéristique des échantillons Ca101, Ca104 et Ca105, tandis que la seconde est associée aux échantillons Ca102 et Ca103.

Les échantillons issus de la carotte Ca200 se caractérisent par des histogrammes à allure unimodale. Ce mode unique, correspond à la fraction 0,002 mm. Ces sédiments sont argileux (Ca201), argilo-limoneux (Ca202, Ca203 et Ca204), limono-argileux (Ca206), limoneux (Ca205) et limono-sableux (Ca207 et Ca208 (Fig. 15b).

Les histogrammes de la carotte Ca300 ont une allure unimodale. Ils ont pour mode la fraction 0,063 mm. Les textures de ces échantillons sont limono – argileuses (Ca301, Ca302, et Ca304) et limoneuses (Ca303, Ca305 et Ca306) (Fig. 15b)

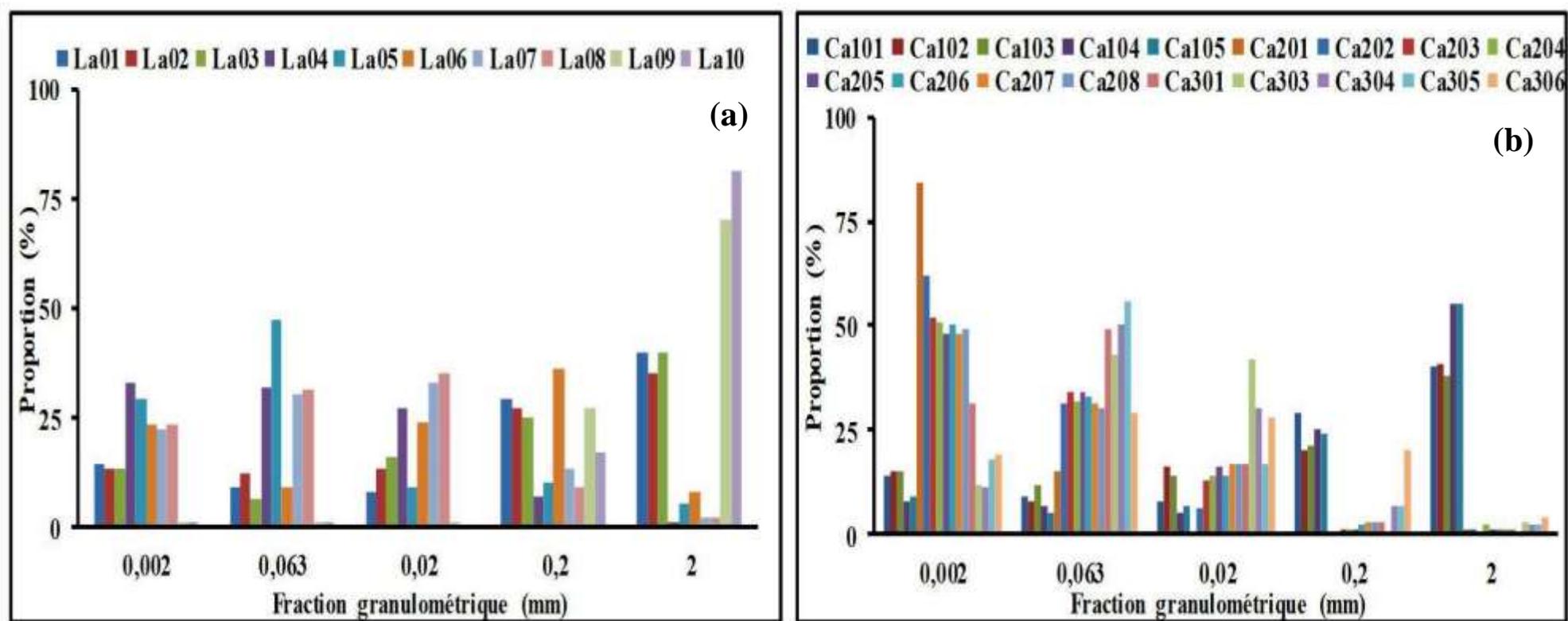


Figure 15. Histogrammes des sédiments du LME (a) sédiment superficiel (b) carotte

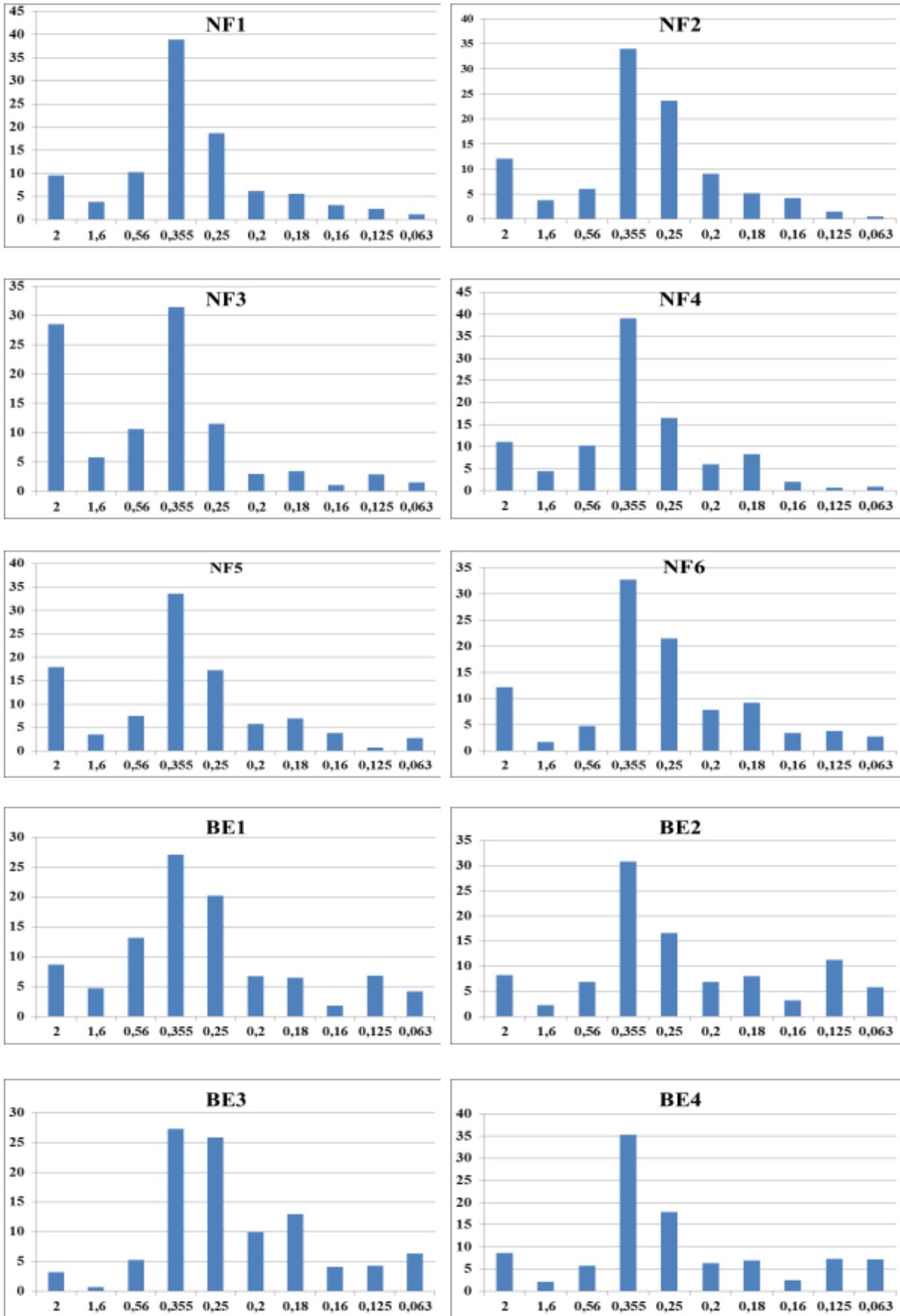


Figure 16. Histogrammes des sédiments des cours d'eau Mfoumou et Bengo'o

IV.2.2.1.1.2. Histogrammes et textures des sédiments de la rivière Mfoumou

Les histogrammes des échantillons prélevés dans le cours d'eau Mfoumou ont une allure unimodale (Fig. 16a). Ce mode correspond à 0,315 mm. Deux types de textures caractérisent ces sédiments: la texture sableuse et la texture limono-sableuse (Fig. 18). Les échantillons NF1, NF2, NF3, NF4, NF5 et NF6 ont une texture sableuse. NF7, quant à lui a une texture limono-sableuse.

IV.2.2.1.1.3. Histogrammes et textures des sédiments de la rivière Bengo'o

Les histogrammes des échantillons collectés dans la rivière Bengo'o sont unimodaux (Fig. 16b). Ce mode correspond à 0,315mm. Tous les échantillons ont une texture sableuse (Fig. 17).

IV.2.2.2. Courbes et indices sédimentologiques

IV.2.2.2.1. Courbes et indices sédimentologiques des sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa

Les sédiments superficiels du LME se caractérisent par trois faciès (Fig. 18a). Il s'agit des faciès sigmoïde, parabolique et hyperbolique. Le premier est présent dans la partie Ouest du lac, notamment au niveau des échantillons La6, La7 et La8. Le second est observé dans les parties centrales (La5) et Nord-est (La4). Le dernier caractérise les échantillons des parties Nord (La 3), Nord-est (La1 et La2) et Sud (La9 et La10).

Les valeurs des indices sédimentologiques de ces sédiments sont résumées dans le tableau 7. Ces résultats montrent que la moyenne (Mz) varie de $-0,67$ à $5,05\phi$. L'écart type oscille entre $0,69$ et $3,26\phi$. Les valeurs maximale et minimale du skewness sont respectivement de 1ϕ et $-0,13\phi$. Le coefficient d'uniformité pour l'ensemble des échantillons est compris entre $0,05$ et 1 .

Tous les sédiments prélevés sur la carotte Ca100 se caractérisent par des courbes paraboliques (Fig. 18b). Les indices sédimentologiques oscillent entre $0,69$ et $1,88\phi$; $2,67$ et $3,05\phi$; $-0,09$ et 1ϕ , et, $0,1$ et $0,75$ respectivement pour Mz , σ , Ski et U (Tab 7).

Les échantillons prélevés sur la carotte Ca200 présentent des courbes hyperboliques (Fig. 18c). Pour ces derniers, les valeurs de Mz varient de $5,65$ à $7,06\phi$. Celles de σ vont de $1,39$ à $2,27\phi$. Ski et U sont compris respectivement entre $-0,17$ et $0,67\phi$, et, $0,13$ et $0,31$.

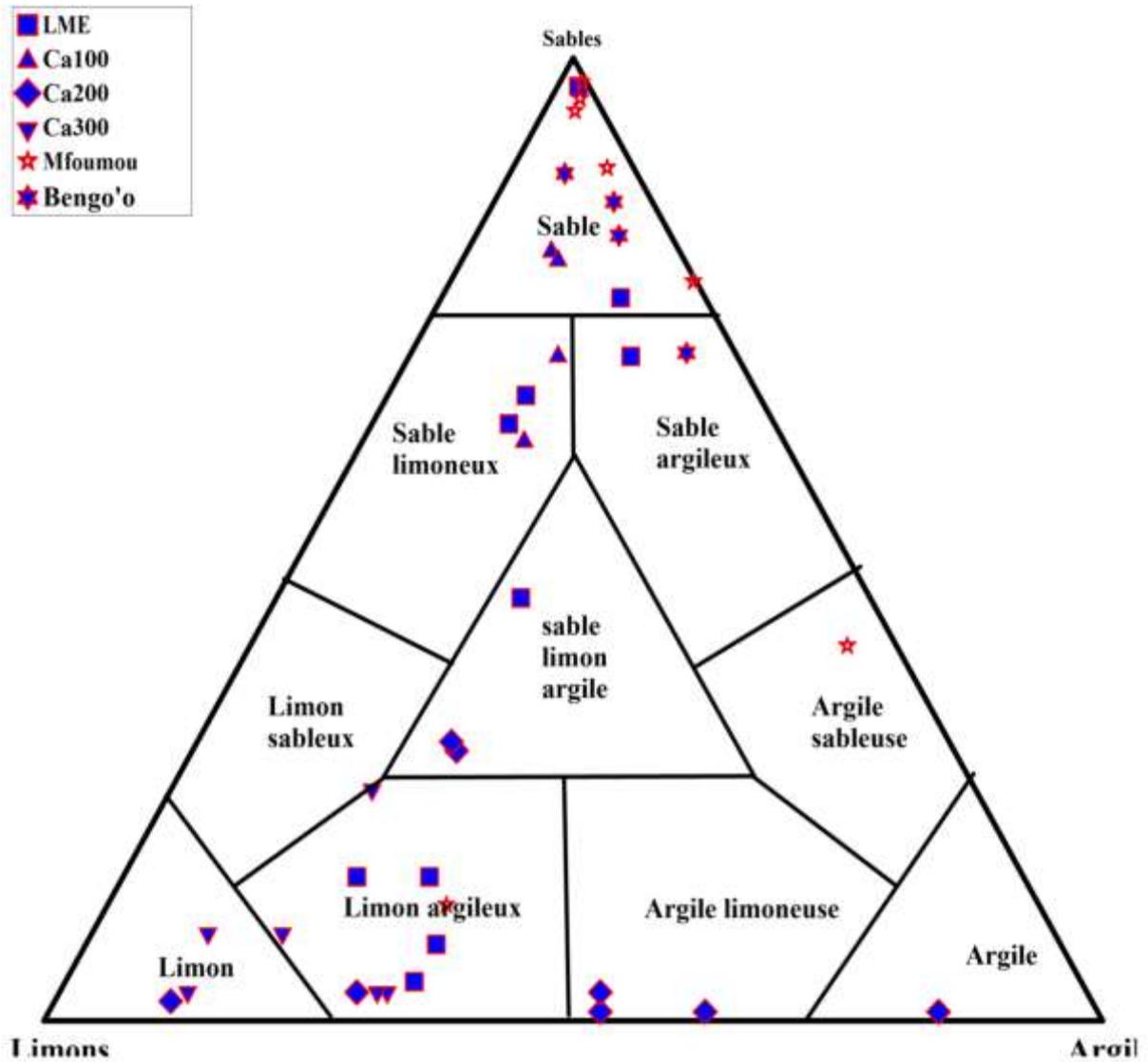


Figure 17. Position des sédiments dans le digramme ternaire de Folk

Tableau 7. Refus et indices sédimentologiques des sédiments du LME

Ech	Taille des particules					Indices sédimentologiques			
	0,002	0,063	0,02	0,2	2	Mz	So	Ski	U
La01	14	9	8	29	40	1,58	3	0,7	0,3
La02	13	12	13	27	35	1,66	2,85	0,48	0,11
La03	13	6	16	25	40	1,46	2,87	0,63	0,15
La04	33	32	27	7	1	5,05	2,42	0,08	0,14
La05	29	47	9	10	5	4,81	2,66	-0,13	0,05
La06	23	9	24	36	8	3,04	3,26	0,16	0,05
La07	22	30	33	13	2	4,39	2,39	0,13	0,1
La08	23	31	35	9	2	4,53	2,35	0,06	0,19
La09	1	1	1	27	70	-0,4	0,91	1	1
La10	1	1	0	17	81	-0,67	0,69	1	1
Ca101	14	9	8	29	40	1,87	2,65	-0,09	0,35
Ca102	15	8	16	20	41	1,88	3,05	0,48	0,1
Ca103	15	12	14	21	38	1,88	3,05	0,48	0,1
Ca104	8	7	5	25	55	0,24	2,64	1	0,6
Ca105	9	5	7	24	55	0,69	2,57	1	0,75
Ca201	84	15	0	0	1	7,06	1,34	-0,17	0,23
Ca202	62	31	6	0	1	6,17	1,65	0,19	0,31
Ca203	52	34	13	1	0	5,91	1,87	0,07	0,27
Ca204	51	32	14	1	2	6,53	1,39	0,67	1,05
Ca205	48	34	16	1	1	5,89	1,89	0,09	0,2
Ca206	50	33	14	2	1	5,85	1,94	0,06	0,17
Ca207	48	31	17	3	1	5,64	2,11	-0,02	0,13
Ca208	49	30	17	3	1	5,65	2,27	-0,09	0,13
	31	49	17	3	0	4,02	2,54	0,09	0,31
Ca303	12	43	42	0	3	4,13	1,39	0,11	0,3
Ca304	11	50	30	7	2	4,13	1,45	-0,18	0,2
Ca305	18	56	17	7	2	4,59	1,41	0,1	0,19
Ca306	19	29	28	20	4	3,63	2,69	-0,09	0,05

Ech. : Echantillon ; Mz : Grain moyen ; So : Sorting index ; Ski : coefficient d'assymetrie ; U : Coefficient d'uniformité

Les courbes sédimentologiques des échantillons de la carotte Ca300 présentent une allure sigmoïde (Fig. 18d). Le grain moyen oscille entre 1,58 et 5,24 ϕ . Les valeurs de l'écart type vont de 1,41 à 3 ϕ . Celles du Skweness sont comprises entre -0,18 et 0,31 ϕ . Le coefficient d'uniformité va de 0,05 à 0,31 (Tab 7).

IV.2.2.2.2. Courbes et indices sédimentologiques des sédiments de la rivière Mfoumou

Les courbes granulométriques des sédiments de la rivière Mfoumou sont de forme sigmoïdale à forte pente (Fig. 18e). Les valeurs du grain moyen varient de -0,78 à 4,05 ϕ . Celles de l'écart type se situent entre 0,37 et 3,21 ϕ . Le coefficient d'asymétrie évolue de -0,9 à 1,25 ϕ . Les valeurs du coefficient d'uniformité oscillent entre 0,12 et 1,12 (Tab 8).

IV.2.2.2.3. Courbes et indices sédimentologiques des sédiments de la rivière Bengo'o

Les courbes granulométriques des échantillons collectés dans la rivière Bengo'o ont une allure sigmoïdale, et se caractérisent par des pentes fortes (Fig. 18f). Les valeurs de Mz vont de -0,45 à -0,24 ϕ . Celles de l'écart type oscillent entre 0,37 et 0,47 ϕ . Le coefficient d'asymétrie et le coefficient d'uniformité sont respectivement compris entre 1,13 et 1,18 ϕ , et, 1,20 et 1,31 ϕ (Tab 8).

IV.2.2.3. Morphoscopie

Les résultats de l'analyse morphoscopique des grains de quartz des sédiments étudiés sont présentés dans le tableau 9 et sur la figure 19. Trois types de grains de quartz ont été identifiés : les grains anguleux (A), les sub-émoussés (SE) et les émoussés luisants (EL).

IV.2.2.3.1. Morphoscopie des grains de quartz des sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa

Dans le LME, les proportions des grains anguleux varient entre 76 et 82%. Celles des grains sub-émoussés vont de 18 à 26%. La proportion des grains émoussés luisants oscillent entre 0 et 4%.

IV.2.2.3.2. Morphoscopie des grains de quartz des sédiments de la rivière Mfoumou

Les proportions des grains anguleux (A), sub-émoussés (SE) et émoussés luisants (EL) sont respectivement de 64%, 25% et 10% dans le cours d'eau Mfoumou.

IV.2.2.3.3. Morphoscopie des grains de quartz des sédiments de la rivière Bengo'o

Dans le cours d'eau Bengo'o, les proportions sont de : 61% (grains anguleux), 38% (sub-émoussés) et 2% (émoussés).

Tableau 8. Refus et indices sédimentologiques des sédiments des cours d'eau Mfoumou et Bengo'o

Ech	Refus (en %)											Indices sédimentologiques			
	2	1,6	0,56	0,355	0,25	0,2	0,18	0,16	0,125	0,063	<0,063	Mz	So	Ski	U
NF1	8,41	3,33	9,04	34,05	16,4	5,43	4,94	2,75	2,08	1,04	12,56	-0,78	0,41	1	1,1
NF2	9,88	3,1	4,94	27,76	19,3	7,41	4,24	3,4	1,19	0,38	18,4	-0,14	0,38	1,01	1,12
NF3	27,7	5,65	10,36	30,53	11,2	2,89	3,38	1,07	2,85	1,54	2,79	-0,67	0,47	1,06	1,01
NF4	8,68	3,5	8	30,49	12,9	4,67	6,45	1,54	0,54	0,32	22,91	-0,25	0,49	1,21	0,98
NF5	13,8	2,74	5,76	25,86	13,3	4,48	5,33	2,94	0,6	2,14	23,1	-0,68	0,37	1,24	0,89
NF6	11,1	1,55	4,38	29,83	19,6	7,19	8,35	3,18	3,45	2,53	8,91	-0,24	0,36	1,25	1
Be1	7,68	4,22	11,69	23,98	18	6,02	5,74	1,61	6,1	3,73	11,28	-0,45	0,42	1,23	1,2
Be2	7,12	1,99	5,95	26,63	14,4	5,97	6,98	2,76	9,71	5,03	13,51	-0,24	0,47	1,14	1,24
Be3	2,36	0,5	3,93	20,2	19,1	7,41	9,62	3,04	3,2	4,68	25,94	-0,54	0,46	1,13	1,25
Be4	8,17	2,07	5,39	33,43	16,9	6,07	6,62	2,35	6,93	6,85	5,18	-0,25	0,37	1,18	1,31

Ech. : Echantillon ; Mz : Grain moyen ; So : Sorting index ; Ski : coefficient d'assymetrie ; U : Coefficient d'uniformité

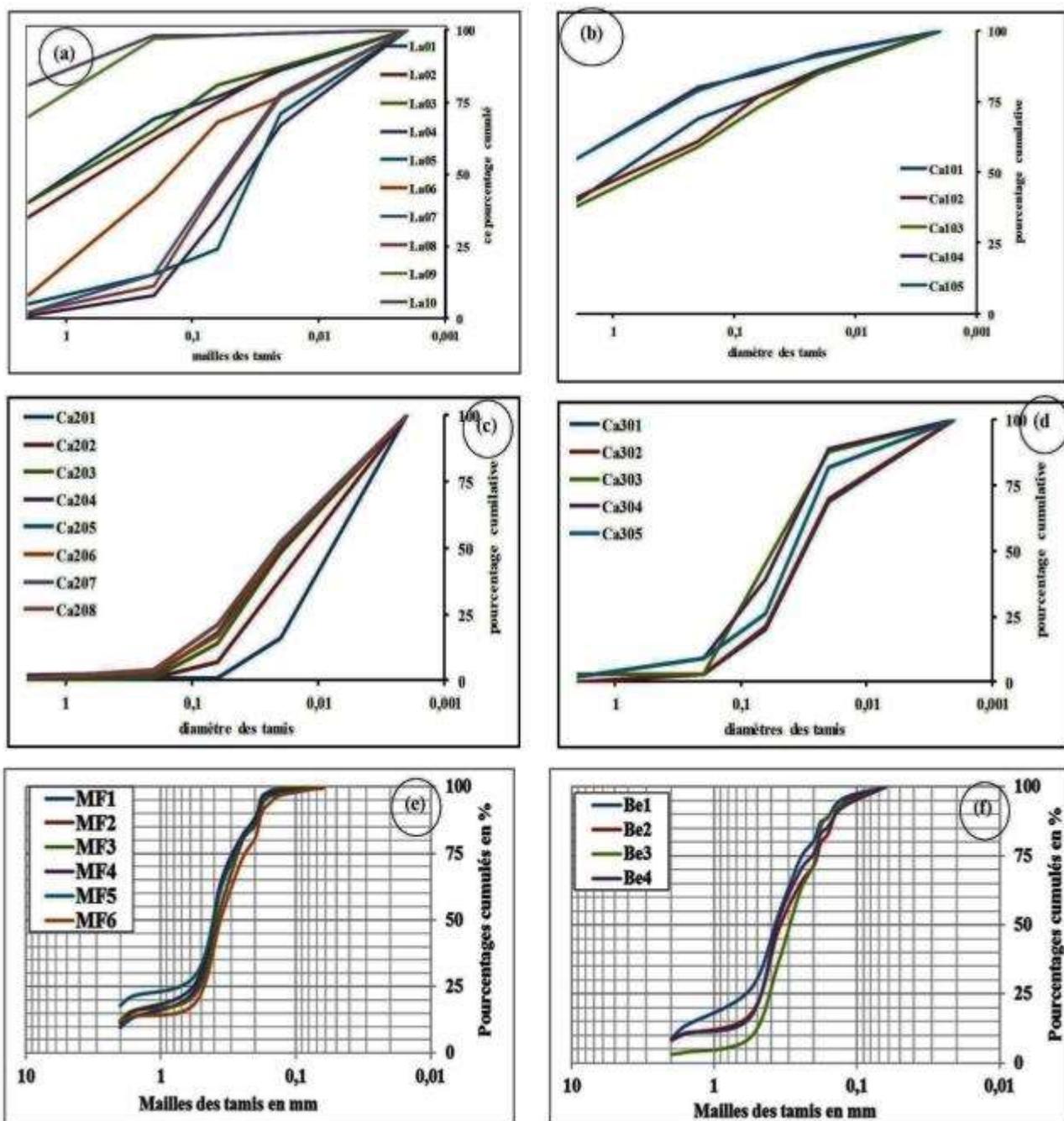


Figure 18. Courbes sédimentologiques (a) Sédiments superficiels, (b) Carotte Ca100, (c) Carotte Ca200, (d) Carotte Ca300, (e) Mfoumou, (f) Bengo'o.

Tableau 9. Proportions des différentes formes de grains de quartz dans le LME et dans les cours d'eau Mfoumou, et, Bengo'o

Sites	Echantillons	Forme des grains		
		A	SE	EL
LME	La01	82	18	0
	La03	78	22	0
	La08	70	26	4
	La10	76	24	0
	Moy	77	23	1
Mfoumou	NF1	62	36	2
	NF2	42	0	54
	NF3	68	26	6
	NF4	92	8	0
	NF5	62	36	2
	NF6	78	22	0
	NF7	44	48	8
	Moy	64	25	10
Bengo'o	Be1	52	48	0
	Be2	44	48	8
	Be3	54	46	0
	Be4	92	8	0
	Moy	61	38	2

Moy. : Moyenne ; A : Anguleux ; SE : Subémoussé ; EL : Emoussé luisant

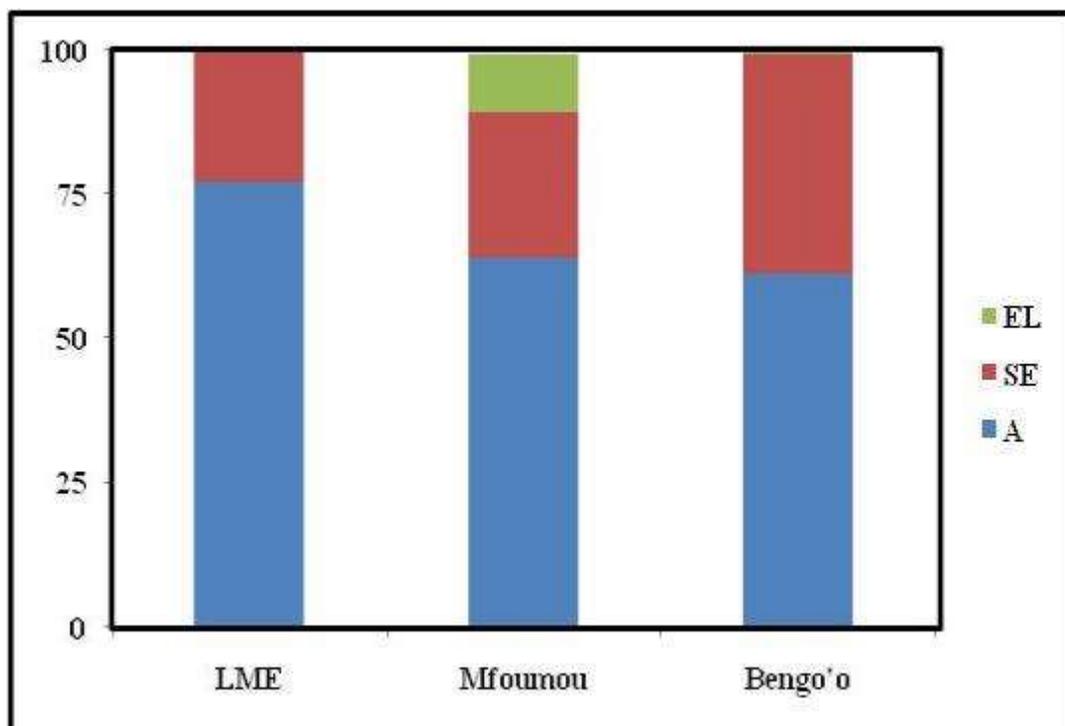


Figure 19. Proportions moyennes des différentes formes de grains de quartz dans les trois milieux étudiés

IV.2.3. Minéralogie

IV.2.3.1. Minéraux lourds

Les minéraux lourds identifiés et leurs proportions sont résumés dans le tableau 10 et sur la figure 20. Ces résultats montrent que les sédiments du LME et ceux de ses affluents présentent un assemblage de minéraux lourds constitué de : l'andalousite, la biotite, le diopside, la sillimanite, le grenat, le disthène, la hornblende brune, la muscovite, les minéraux opaques, la staurotide et le zircon.

La biotite est de forme anguleuse à sub-anguleuse et de couleur brune claire à brune foncé. Elle constitue 4% de l'assemblage des minéraux lourds (Fig. 20a). Le diopside représente 3% des minéraux lourds. Ses grains sont sub-angulaires à sub-arrondis. Ces derniers apparaissent verdâtres en lumière réfléchiée et incolores en lumière polarisée (Fig. 20b). Le disthène se présente sous une forme sub-arrondie, incolore et rougeâtre. Ce dernier représente 7% des minéraux identifiés (Fig. 20c). Le grenat est noirâtre. Il a un contour sub-angulaire à sub-arrondi. Sa proportion est estimée à 11% des minéraux lourds identifiés (Fig. 20d). La hornblende brune constitue 2% de l'assemblage de minéraux lourds. Elle est de couleur pâle et de forme très anguleuse (Fig. 20e). Les minéraux opaques sont les plus abondants (54%). Ce sont des minéraux, de couleur noire, qui restent en extinction lorsque l'analyseur est en place. De nombreuses formes sont sub-angulaires, angulaires et parfois sub-arrondies (Fig. 20f). La muscovite est de couleur variable (du vert pâle au brun pâle). Elle a des contours sub-anguleux à anguleux. Ce minéral constitue 2% des minéraux lourds (Fig. 20g). La sillimanite est anguleuse à sub-arrondie, et représente 2% de l'assemblage de minéraux lourds. Elle se caractérise par une couleur grise avec une tache jaune clair au centre (Fig. 24h). La staurotide est de forme anguleuse, de couleur jaune à brun (Fig. 20i). Elle est présente dans tous les échantillons et représente 6% de l'assemblage minéral. Le zircon constitue 4% des minéraux lourds. Ce minéral est facilement identifiable grâce à son ordre d'interface à haut relief. Il a une forme pyramidale, et sub-arrondie à anguleuse. Ce dernier est incolore à rose clair (Fig. 20j). La tourmaline est pléochroïque, prismatique, de couleur vert pâle à grisâtre. Elle représente environ 5% du total des minéraux lourds. Ce minéral est principalement anguleux (Fig. 20k).

Tableau 10. Composition en minéraux lourds dans les sédiments étudiés

Sites	SS	Ca100	Ca200	Ca300	Mfoumou	Bengo'o	Moy.
Minéraux	(n = 10)	(n = 6)	(n = 8)	(n = 6)	(n = 7)	(n=4)	
Biotite	6	3	2	4	2	3	3
Zircon	4	3	5	4	3	3	4
grenat	8	12	9	12	9	3	10
tourmaline	4	8	5	5	5	2	5
disthène	8	6	5	7	6	3	6
staurotide	8	5	5	4	6	3	5
hornblende	5	3	3	2	2	1	3
Diopside	3	3	3	3	3	2	3
Muscovite	2	2	2	2	2	3	2
Epidote	2	2	2	1	1	1	1
MO	52	54	60	57	61	75	59

SS : sédiments superficiels ; Moy : Moyenne

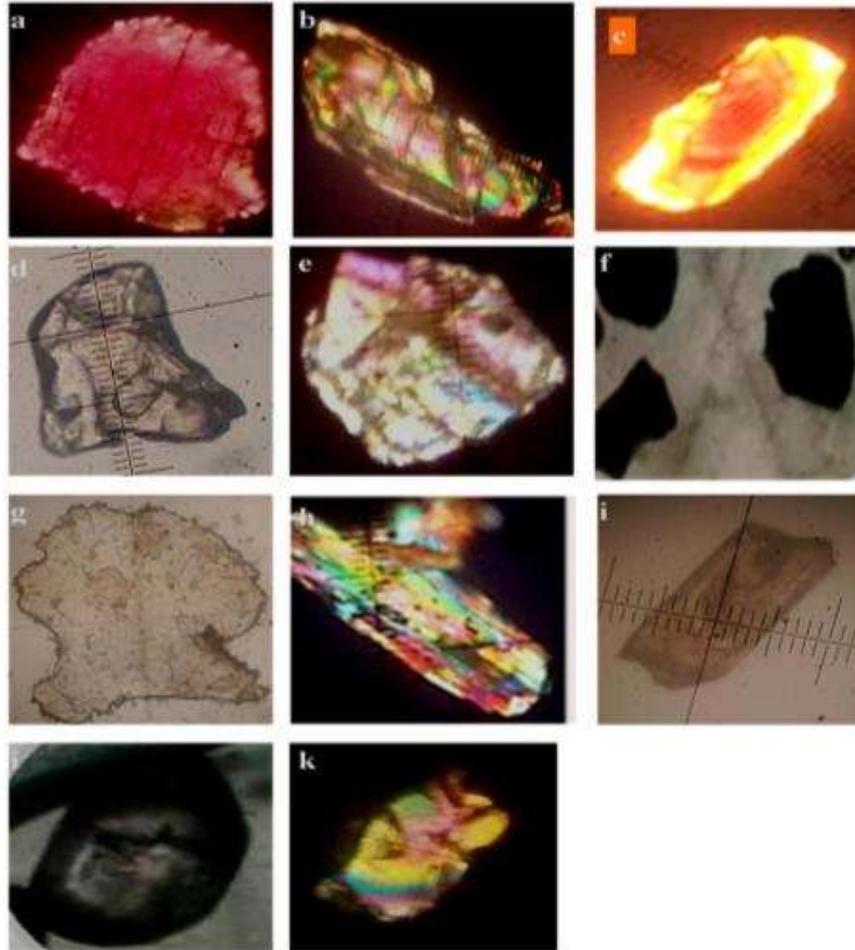


Figure 20. Quelques minéraux lourds : (a) biotite (b) diopside (c) kyanite (d) grenat (e) hornblende (f) minéraux opaques (g) muscovite (h) sillimanite (i) staurotide (j) zircon (k) tourmaline

IV.2.3.2. Minéralogie par diffraction aux rayons X

Les résultats des DRX sont résumés dans le tableau 11. Les diffractogrammes issus de cette analyse sont illustrés sur la figure 21.

IV.2.3.2.1. Minéralogie par DRX des sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa

Le cortège minéralogique des sédiments du LME est constitué de quartz, la kaolinite, la gibbsite, les feldspaths, la goethite, la sidérite, et la gibbsite (Fig. 21a).

IV.2.3.2.2. Minéralogie par DRX des sédiments de la rivière Mfoumou

Le quartz, la kaolinite, la gibbsite, les feldspaths, la goethite, et la gibbsite sont les minéraux constitutifs des sédiments de la rivière Mfoumou. (Fig. 21b)

IV.2.3.2.3. Minéralogie par DRX des sédiments de la rivière Bengo'o

Le cortège minéralogique des échantillons est constitué du Le quartz, la kaolinite, la gibbsite, les feldspaths, la goethite, et la gibbsite (Fig. 21b).

IV.2.3.3. Microscopie électronique à balayage

Les résultats du MEB ont permis d'affiner l'identification minéralogique. L'ensemble des résultats des lames (Fig. 22) sont présentés dans le tableau 12 et sur le diagramme triangulaire établi dans le système MR3-3R2-2R3 (Fig 23). Ces résultats confirment la présence de la kaolinite/halloysite, et des argiles intermédiaires (Illite, smectite, etc).

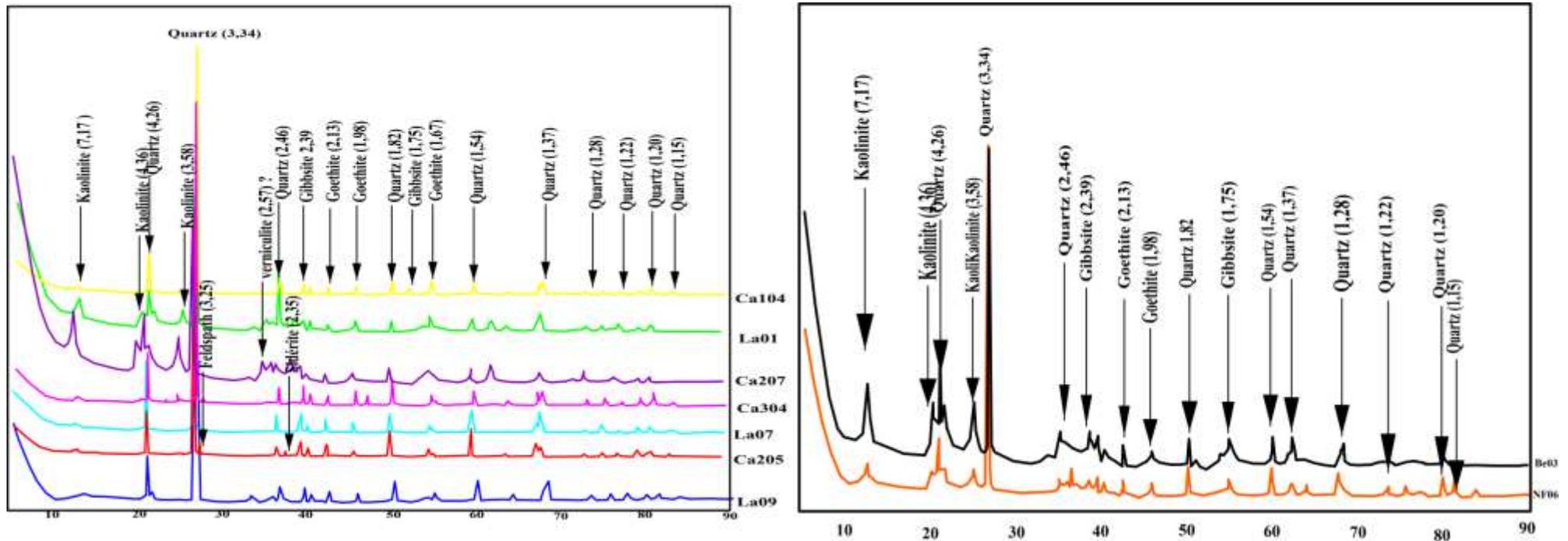


Tableau 11. Compositions minéralogiques des fractions globales des sédiments

Sites	LME								Mfoumou	Bengo'o
	La01	La04	La07	La09	Ca104	Ca205	Ca207	Ca304	Be 4	NF7
Quartz	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++
Kaolinite	+++	+++	+++	-	-	+++	+++	+++	+	+++
Feldspaths	+	+	+	-	-	+	-	-	-	+
Goethite	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
Sidérite	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-
Gibbsite	++	++	++	-	++	++	++	++	++	++

++++ Très abondant +++ abondant ++ représenté + faiblement représenté - non identifié

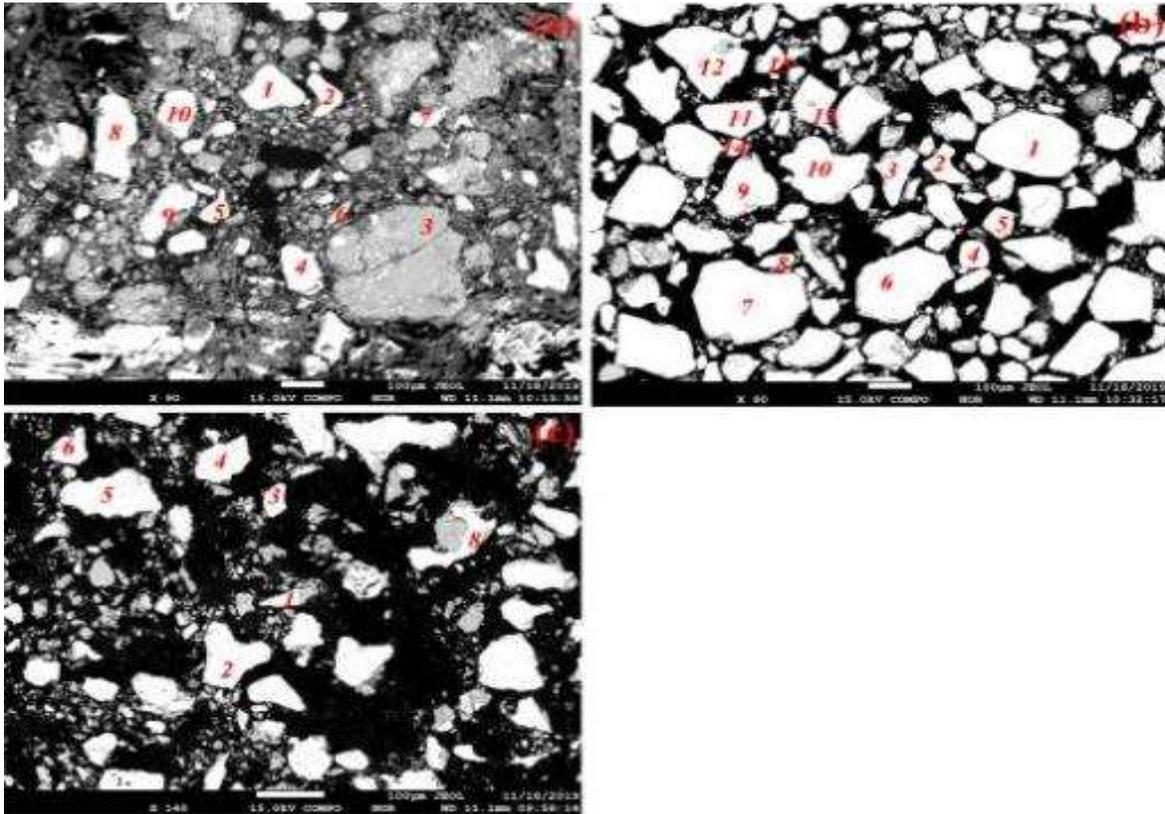


Figure 22. Microphotographies au MEB des échantillons représentatifs des trois sites(a) La05 (b) La01 (c) La07

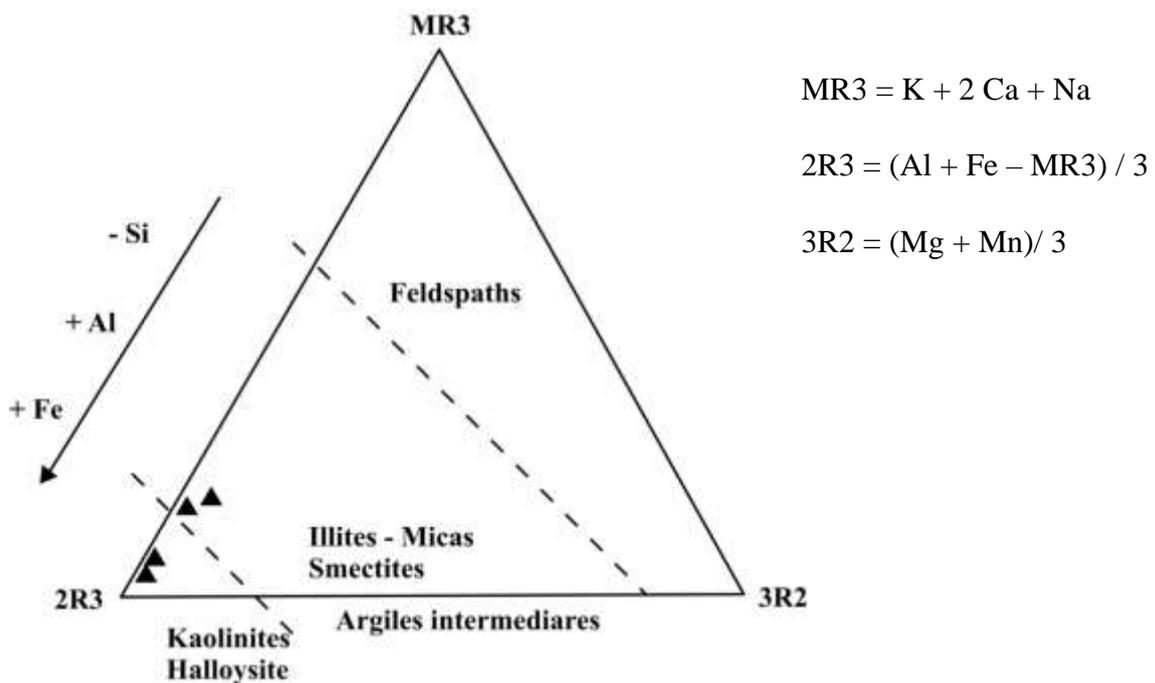


Figure 23. Représentation de l'ensemble des micro-analyses de MEB des sédiments du d'eau Mfoumou et Bengo'o dans le système 2R3 - MR3 - 3R2

Tableau 12. Données microchimiques (en %) pour les lames des sédiments du LME

No.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	K ₂ O	FeO	MnO	Total	
La01	1	99,73	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,02	0,06	0,07	0,00	99,92
	2	99,66	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,18	0,00	99,87
	3	99,72	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,08	0,00	99,85
	4	99,80	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,12	0,00	99,95
	5	99,61	0,00	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02	0,02	0,21	0,00	99,91
	6	99,59	0,02	0,00	0,02	0,01	0,02	0,03	0,00	0,08	0,00	99,78
	7	99,72	0,00	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	99,86
	8	99,65	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,02	0,02	0,11	0,02	99,86
	9	99,81	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,09	0,03	99,96
	10	99,50	0,09	0,03	0,03	0,00	0,01	0,02	0,00	0,11	0,00	99,79
	11	99,64	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,17	0,01	99,84
	12	97,69	0,02	0,00	0,01	0,73	0,01	0,03	0,03	1,28	0,03	99,82
	13	99,38	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,04	0,02	0,29	0,01	99,79
	14	24,57	20,04	1,44	0,03	0,08	0,64	0,14	5,07	47,52	0,01	99,53
	15	21,85	23,24	0,07	0,10	1,08	0,17	0,28	0,24	52,56	0,10	99,70
La05	1	99,67	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,04	0,14	0,00	99,87	
	2	99,63	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,04	0,11	0,00	99,83
	3	47,68	36,05	0,26	0,06	1,07	0,22	0,43	0,71	13,07	0,07	99,62
	4	99,75	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	0,03	0,11	0,01	99,93
	5	99,70	0,00	0,02	0,02	0,00	0,01	0,00	0,05	0,09	0,01	99,91
	6	99,71	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,05	0,19	0,00	99,99
	7	99,58	0,03	0,01	0,06	0,01	0,00	0,00	0,06	0,23	0,01	99,98
	8	99,62	0,02	0,00	0,07	0,00	0,03	0,02	0,08	0,11	0,00	99,94
	9	99,75	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,04	0,13	0,00	99,97
	10	99,58	0,03	0,02	0,02	0,03	0,00	0,01	0,06	0,14	0,00	99,89
La07	1	47,86	36,18	0,26	0,06	1,08	0,22	0,43	0,72	13,12	0,07	100,00
	2	99,82	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	0,03	0,11	0,01	100,00
	3	99,79	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,05	0,09	0,01	100,00
	4	99,72	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,05	0,19	0,00	100,00
	5	99,60	0,03	0,01	0,06	0,01	0,00	0,00	0,06	0,23	0,01	100,00
	6	99,68	0,02	0,00	0,07	0,00	0,03	0,02	0,08	0,11	0,00	100,00
	7	99,79	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,04	0,13	0,00	100,00

IV.2.4. Géochimie des sédiments

La géochimie des sédiments a permis de déterminer leurs teneurs en éléments majeurs, traces et en terres rares.

IV.2.4.1. Eléments majeurs

IV.2.4.1.1. Distribution des éléments majeurs dans les sédiments du Lac Municipal d'Ebologa

Les concentrations des éléments majeurs, leurs rapports et les indices calculés à partir de ces derniers sont présentés dans le tableau 13. Les teneurs en SiO_2 oscillent entre 60,44 et 89,57%. Celles de Al_2O_3 vont de 6,55 à 18,17%. Le Fe_2O_3 varie de 1,15% à 6,21. Les valeurs de K_2O appartiennent à l'intervalle 0,99 – 2,34. Celles du TiO_2 , CaO , Na_2O , MnO , MgO et P_2O_5 sont inférieures à l'unité. La perte au feu (LOI) oscille entre 2,08 et 11,04 %.

Les valeurs du rapport $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ varient de 5,44 à 8,44. Celles de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oscillent entre 3,33 et 5,83. Le rapport $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ a des valeurs qui vont de 33,85 à 59,07.

L'Indice de Variation Compositionnelle (ICV) oscille entre 0,40 et 0,59. Les valeurs du CIA vont de 82,44 à 90,93%. Celles du PIA varient de 96,04 à 97,91%. Le coefficient de concentration (Q_i) oscille entre 1 et 1,70. Il est de 1,70 ; 1,12 ; 1,14 ; 1,12 ; 1,5 et, 1,5 respectivement pour Fe, Mn, Mg, K, Na et P ; sensiblement égal à 1 pour Ti, Mg et Ca. La valeur de Q_i pour Si est égale à 0,91.

La matrice de corrélation entre ces différents éléments (Tab 14) illustre des fortes corrélations négatives entre SiO_2 et les autres oxydes (TiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO , MnO , Fe_2O_3 ($R > 0,70$). Al_2O_3 a une très bonne corrélation positive avec tous les éléments ($> 0,75$), sauf avec Na_2O où elle est de 0,51. Fe_2O_3 corrèle de façon significative avec MnO ($R = 0,89$) et P_2O_5 ($R = 0,92$). Les alcalins et les alcalino-terreux ont de bonnes corrélations positives entre eux notamment CaO et K_2O ($R = 0,70$), K_2O et Na_2O ($R = 0,76$), MgO et K_2O ($R = 0,84$).

IV.2.4.1.2. Distribution des éléments majeurs dans les sédiments de la rivière Mfoumou

Les teneurs des éléments majeurs des sédiments de la rivière Mfoumou sont présentées dans le tableau 14. La teneur en SiO_2 varie de 69 à 82,32%. Les concentrations en Al_2O_3 vont de 7,51 à 11,58%. Les valeurs de Fe_2O_3 et K_2O oscillent respectivement entre 2,38% et 5,30%, et, 1,22 à 2,12%. Les teneurs en TiO_2 , CaO , Na_2O , MnO , MgO et P_2O_5 n'excèdent pas 0,5 %. La perte au feu varie de 3,68 à 10,42 %.

Tableau 13. Distribution des éléments majeurs (en %) dans les sédiments

	LME												Mfoumou								Bengo'o				
	La01	La02	La03	La04	La05	La06	La07	La08	La09	La10	Moy.	Qi	NF1	NF2	NF3	NF4	NF5	NF6	NF7	Moy.	Be1	Be2	Be3	Be4	Moy.
SiO ₂	70,21	71,44	70,54	66	60,44	65,17	64	64,25	81,07	83,57	70,61	0,9	75,58	75,21	77,06	76,69	80,5	82,3	68	76,6	75,24	74,4	74	74,1	75,16
TiO ₂	0,34	0,32	0,31	0,38	0,54	0,28	0,29	0,31	0,21	0,19	0,32	1	0,11	0,2	0,18	0,19	0,21	0,22	0,4	0,22	0,26	0,24	0,27	0,28	0,26
Al ₂ O ₃	12,27	12,24	12,11	14,23	18,17	16,43	15,84	15,91	9,21	6,55	13,3	1	10,11	9,78	9,21	8,83	9,06	7,51	11,58	9,53	10,16	10,7	10	10,9	10,42
Fe ₂ O ₃	4,26	4,73	3,02	5,23	5,83	5,91	6,21	5,21	2,37	1,15	4,5	1,7	2,38	3,31	4,61	4,61	3,83	4	5,3	4,01	4,03	3,7	4,4	4,05	4,05
MnO	0,1	0,11	0,1	0,17	0,19	0,21	0,24	0,24	0,05	0,04	0,15	1,1	0,08	0,12	0,1	0,07	0,09	0,1	0,24	0,11	0,05	0,06	0,08	0,09	0,07
MgO	0,18	0,16	0,17	0,15	0,2	0,21	0,17	0,19	0,09	0,1	0,16	1,1	0,11	0,14	0,15	0,1	0,21	0,1	0,18	0,14	0,09	0,11	0,1	0,14	0,11
CaO	0,09	0,09	0,1	0,12	0,13	0,13	0,16	0,19	0,05	0,04	0,11	1	0,17	0,1	0,1	0,12	0,07	0,15	0,11	0,12	0,11	0,09	0,06	0,09	0,09
K ₂ O	2,25	1,62	1,25	1,14	2,27	2,22	1,97	2,34	1,14	0,99	1,72	1,1	1,49	1,22	2,12	1,54	1,92	1,19	1,99	1,59	1,23	1,09	1,71	2,27	1,58
Na ₂ O	0,27	0,35	0,17	0,16	0,27	0,28	0,29	0,29	0,16	0,18	0,24	1,5	0,18	0,14	0,41	0,34	0,24	0,19	0,34	0,27	0,28	0,19	0,24	0,35	0,27
P ₂ O ₅	0,18	0,19	0,15	0,22	0,31	0,25	0,2	0,25	0,08	0,05	0,19	1,5	0,08	0,18	0,12	0,12	0,09	0,13	0,16	0,12	0,09	0,09	0,11	0,12	0,1
LOI	9,5	7,3	10,46	12,65	10,01	8,45	8,1	9,71	2,63	2,08	8,37	-	7,08	8,98	4,69	6,06	4,01	3,6	10,42	7,07	7,01	8,21	7,07	7,9	7,85
Total	100,3	98,54	98,88	101	99,03	100,1	98,02	99,14	98,8	97,23	99,1	-	98,08	100	98,5	99	98,7	100	98,99	99,1	98,8	99	98,1	100	99,03
K ₂ O/Na ₂ O	8,33	4,66	7,41	7,13	8,44	7,96	6,79	8,08	7,13	5,44	7,14	-	8,17	8,71	5,17	4,5	7,96	6,26	5,85	5,97	4,36	5,68	7,04	6,49	5,9
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	5,72	5,83	5,82	4,57	3,33	3,97	4,17	4,04	9,06	13,67	6,02	-	7,58	7,69	8,42	8,69	8,89	11	5,96	8,04	7,4	7,05	7,59	6,83	7,21
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	36,03	38,44	39,32	37,45	33,85	59,07	54,72	51,34	43,86	34,21	42,83	-	90,64	48,9	51,17	46,05	42,88	34,1	28,24	42,7	38,65	43,9	36,6	38,7	39,35
ICV	0,6	0,59	0,5	0,5	0,51	0,55	0,57	0,54	0,44	0,4	0,52	-	0,44	0,52	0,82	0,78	0,72	0,78	0,72	0,67	0,59	0,51	0,68	0,66	0,61
CIA	82,4	85,6	88,9	90,9	87,2	86,2	86,8	84,9	87,2	84,4	86,5	-	84,56	87,01	77,79	81,47	80,22	83,1	82,6	82,9	86,19	88,6	83,2	80	84,35
PIA	96,5	96	97,6	97,9	97,6	97,1	96,9	96,5	97,5	96,2	97	-	96,05	97,27	93,29	94,01	95,81	94,9	95,52	95,4	95,77	97,1	96,5	95,1	96,14

Le rapport K_2O/Na_2O varie de 4,50 à 8,71. Les valeurs des rapports SiO_2/Al_2O_3 et Al_2O_3/TiO_2 vont respectivement de 5,96 à 10,96, et, 28,27 à 90,64. ICV est compris entre 0,44 et 0,78. Les valeurs de CIA et PIA varient respectivement entre 77,79 et 87,01%, et, 94,01 et 97,27%.

IV.2.4.1.3. Distribution des éléments majeurs dans les sédiments de la rivière Bengo'o

Les concentrations en pourcentage d'oxydes des éléments majeurs des sédiments de la rivière Bengo'o sont résumées dans le tableau 13. Ces résultats illustrent que les valeurs de SiO_2 vont de 74,11 à 75,94%. Celles de Al_2O_3 oscillent entre 10,00 à 10,85 %. Les teneurs de Fe_2O_3 et K_2O sont comprises respectivement entre 3,70 et 4,40, et 1,09 et 2,27%. Celles de TiO_2 , CaO , Na_2O , MnO , MgO et P_2O_5 sont inférieures à 0,5 %. Les valeurs de LOI oscillent entre 7,07 et 8,21 %.

Le rapport K_2O/Na_2O est compris entre 4,36 et 7,04. Les valeurs des rapports SiO_2/Al_2O_3 et Al_2O_3/TiO_2 vont respectivement de 6,83 à 7,40, et, de 36,59 à 43,92. L'ICV varie de 0,51 à 0,68. CIA et PIA sont respectivement comprises entre 80,00 et 88,5%, et, 95,12 et 97,13%.

IV.2.4.2. Eléments traces

Les éléments traces ont été divisés en trois groupes les LILEs (Ba, Rb, Sr, Th et U), HFSE (Zr, Hf, Y et Nb) et TTE (Cr, V, Co, Ni, Zn, Cu et Sc). Les teneurs en ces éléments sont présentées dans le tableau 16, respectivement pour le LME et les rivières Mfoumou et Bengo'o.

IV.2.4.2.1. Distribution des éléments traces dans les sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa

La somme des LILE varie de 816 à 1049 ppm. Les valeurs du Ba oscillent entre 745 et 978 ppm. Celles du Th vont de 15 à 35 ppm. Les concentrations en U sont comprises entre 2 et 4 ppm. Les valeurs de Rb et Sr sont respectivement comprises entre 8 et 18 ppm, et, 18 et 36 ppm (Tab 15).

La somme des HFSE varie de 200 à 304 ppm. Les teneurs en Zr vont de 161 à 296 ppm. Celles de Nb oscillent entre 16 et 31 ppm. Hf et Y sont compris respectivement entre 1 et 3 ppm, et, 9 et 26 ppm.

Tableau 14. Matrice de corrélation des éléments majeurs du LME

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
SiO ₂	1,00										
TiO ₂	-0,76	1,00									
Al ₂ O ₃	-0,96	0,72	1,00								
Fe ₂ O ₃	-0,96	0,63	0,95	1,00							
MnO	-0,84	0,43	0,90	0,89	1,00						
MgO	-0,89	0,62	0,87	0,85	0,75	1,00					
CaO	-0,84	0,43	0,86	0,84	0,97	0,76	1,00				
K ₂ O	-0,70	0,47	0,76	0,70	0,70	0,84	0,70	1,00			
Na ₂ O	-0,48	0,26	0,51	0,57	0,51	0,62	0,49	0,76	1,00		
P ₂ O ₅	-0,96	0,80	0,97	0,92	0,84	0,88	0,81	0,77	0,56	1,00	
LOI	-0,90	0,75	0,77	0,79	0,64	0,77	0,71	0,46	0,26	0,81	1,00

Gras : valeurs significative à $p < 0,05$

La somme des TTE oscille entre 291,61 et 490,78 ppm. Les teneurs en Cr, Ni, Co, Zn, Pb, et Cu appartiennent respectivement aux intervalles [59 – 113 ppm], [47 – 65 ppm], [13 – 18 ppm], [31 – 64 ppm], [4 – 20 ppm] et [35 – 84]. Les valeurs du rapport Th/U sont comprises entre 7 et 12. Celles du rapport Rb/Sr vont de 1 à 2. Les rapports V/Cr et Cr/Th oscillent respectivement entre 1,07 et 1,28, et, 2,61 et 6,34 (Tab 15).

IV.2.4.2.2. Distribution des éléments traces dans les sédiments de la rivière Mfoumou

Les teneurs en LILE dans la rivière Mfoumou vont de 841 à 1073 ppm. Les valeurs de Ba oscillent entre 785 et 987 ppm. Celles du Th varient de 22 à 34 ppm. Les concentrations en U sont comprises dans l'intervalle [2 – 4 ppm]. Les valeurs de Rb et Sr sont respectivement comprises entre 8 et 21 ppm, et, 17 et 36 ppm (Tab 15).

La somme des HSFE oscillent entre 240 et 345 ppm. Les teneurs en Zr vont de 190 à 300 ppm. Celles de Nb varient de 18,04 à 31,14 ppm. Hf et Y sont respectivement compris entre 1 – 3 ppm, et, 11 – 41 ppm (Tab 15).

La somme des TTE va de 275 à 384 ppm. Les teneurs en Cr vont de 12 à 108 ppm. Celles du Ni varient de 49 à 54 ppm. Co et Zn sont respectivement compris entre les intervalles [12 – 21 ppm] et [53 – 63 ppm]. Les valeurs du Pb oscillent entre 5 et 7 ppm. Celles du Cu varient de 21,05 à 34,25 ppm (Tab 15).

Le rapport Th/U oscille entre 8,2 et 12,93. Rb/Sr varie de 1,75 à 2,08. Les valeurs des rapports Th/Cr et V/Cr oscillent respectivement entre 0,21 et 2,65, et, 0,81 et 8,42 (Tab 15).

IV.2.4.2.3. Distribution des éléments traces dans les sédiments de la rivière Bengo'o

Les teneurs des éléments traces des sédiments collectés dans la rivière Bengo'o sont présentées dans le tableau 15. La somme des LILE varie de 764 à 935 ppm. Le baryum a des concentrations qui oscillent entre 698 et 854 ppm. Celles du Th varient entre 22 et 38 ppm. Les teneurs en U sont comprises entre 3 et 4 ppm. Les valeurs de Rb et Sr vont respectivement de 11 à 15 ppm, et, 23 à 31 ppm.

La somme des HFSE oscille entre 327 et 354 ppm. Les concentrations du Zr vont de 296 à 301 ppm. Celles du Nb varient entre 17 et 33 ppm. Les valeurs d'Hf et Y sont respectivement comprises entre 1,91 et 2,36 ppm, et, 7 et 17 ppm.

La valeur de la somme des TTE varie de 337 à 342 ppm dans les échantillons des sédiments du cours d'eau Bengo'o. Les teneurs en Cr vont de 93 à 99 ppm. Celles du Ni oscillent entre 46 et 48 ppm. Les valeurs du Co et Zn sont respectivement comprises

Tableau 15. Distribution des éléments traces (en ppm) dans les sédiments

Eléments	LME											Mfoumou								Bengo'o				
	La01	La02	La03	La04	La05	La06	La07	La08	La09	La10	Moy	NF1	NF2	NF3	NF4	NF5	NF6	NF7	Moy	Be1	Be2	Be3	Be4	Moy
Ba	852	849	856	953	978	969	954	945	779	745	888	790	987	874	790	875	786	875	854	785	785	698	854	781
Sr	116	11	19	12	14	12	13	17	8	11	23	13	15	8	9	10	21	11	12	11	12	11	15	12
Rb	32	25	37	26	28	25	25	35	19	30	28	26	29	17	19	19	36	22	24	23	25	23	31	26
Th	15	27	35	29	26	31	33	29	21	28	27	34	38	32	22	24	26	29	30	35	22	29	31	29
U	4	4	3	4	3	4	4	3	2	3	3	4	4	3	2	4	3	4	3	3	3	4	4	3
Hf	2	2	3	2	4	4	3	4	2	2	3	1	3	3	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2
Zr	269	244	290	224	221	184	165	161	290	296	234	290	266	300	281	293	301	191	274	296	302	301	299	299
Nb	24	24	16	21	31	31	26	20	24	27	24	23	19	27	24	18	31	29	25	28	33	17	27	26
Y	9	16	14	11	13	11	15	16	27	16	15	31	12	26	21	11	41	19	23	9	17	8	11	11
Cr	96	94	93	110	113	111	108	107	74	59	96	13	100	107	107	109	77	110	89	94	99	96	93	95
Ni	54	53	55	62	66	61	54	53	47	47	55	49	52	54	52	54	47	54	52	48	48	46	47	47
Co	16	16	17	17	18	18	16	16	14	13	16	12	17	17	22	16	12	22	17	11	13	14	13	13
Zn	53	53	53	61	63	64	65	64	51	32	56	53	57	62	64	62	51	65	59	53	54	62	59	57
Sc	8	8	7	6	8	6	7	7	8	8	7	7	8	7	8	7	7	7	7	8	7	6	9	7
Pb	9	7	6	11	11	16	17	20	6	4	11	7	5	6	7	8	9	5	6	4	6	7	7	6
V	119	121	117	134	136	134	132	126	79	93	119	109	119	95	86	93	99	93	99	100	86	79	78	86
Cu	70	69	70	80	82	82	84	84	65	36	72	26	28	34	32	31	21	28	29	25	28	29	31	28
LILE	1019	916	950	1024	1049	1040	1029	1029	829	816	970	867	1074	934	842	932	872	941	923	859	846	765	935	851
HFSE	304	285	323	257	269	230	209	201	343	341	276	346	300	357	327	326	375	240	324	336	355	327	339	339
TTE	426	421	418	480	498	491	483	477	344	292	433	275	385	382	378	379	323	382	358	342	342	339	337	340
U/Th	0,27	0,13	0,08	0,15	0,12	0,12	0,11	0,09	0,1	0,09	0,13	0,11	0,11	0,08	0,08	0,17	0,1	0,12	0,11	0,09	0,12	0,13	0,12	0,12
Th/U	3,67	7,54	11,86	6,62	8,05	8,17	8,94	11,05	9,84	10,73	8,65	8,7	9,36	12,28	12,93	5,75	9,84	8,2	9,58	11,22	8,13	7,42	8,07	8,71
Rb/Sr	2,04	2,22	1,96	2,13	2,04	2,04	1,92	2,04	2,27	2,78	2,13	2,04	2	2,08	2,04	1,92	1,75	2	1,96	2	2,04	2,17	2,08	2,08
V/Cr	1,23	1,28	1,27	1,22	1,2	1,21	1,22	1,17	1,07	1,58	1,25	8,42	1,18	0,88	0,81	0,86	1,29	0,84	2,04	1,06	0,87	0,83	0,84	0,9

entre les intervalles [11 – 14 ppm] et [52 – 61 ppm]. Celles du Pb oscillent entre 4 et 7 ppm. Celles du Cu varient de 24 à 31 ppm (Tab 15).

Le rapport Th/U oscille entre 7,42 et 11,22. Rb/Sr varie de 2,00 à 2,17. Les valeurs des rapports Th/Cr et V/Cr oscillent respectivement entre 0,22 et 0,38, et, 0,31 et 0,90.

IV.2.4.3. Terres rares

Les terres rares ont été subdivisées en deux groupes : les terres rares légères (LREE) et les terres rares lourdes (HREE). Les premiers regroupent La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, et Gd. Les seconds en revanche comprennent : Tb ; Dy, Ho, Er, Tm, Yb et Lu. Les concentrations en terres rares du LME et des cours d'eau Mfoumou et Bengo'o sont présentées dans le tableau 16.

IV.2.4.3.1. Distribution des terres rares dans les sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa

La somme des terres rares légères dans le LME varie de 158 à 256 ppm. Les teneurs en Lanthane (La) vont de 44 à 89 ppm. Celles du Cérium (Ce) et Europium (Eu) oscillent respectivement entre 106 et 179 ppm, et, 0,58 et 1,27 ppm. Les valeurs des anomalies en Ce (Ce/Ce^*) par rapport à la chondrite et au PAAS vont respectivement de 0,90 à 1,23, et, 0,76 et 1,05. Celles de l'anomalie en Eu (Eu/Eu^*) par rapport à la chondrite oscillent entre 0,31 et 0,68. Par rapport au PAAS, ces valeurs vont de 0,54 à 1,10. Les valeurs de l'indice de fractionnement, qui est le rapport $(La/Y)_N$ varient de 1,79 à 2,44 (Tab 16).

La somme des HREE varie de 7 à 12 ppm. Les concentrations en Dy vont de 3 à 5 ppm. Celles de Er oscillent entre 2 et 3 ppm. Yb a des valeurs comprises entre 2 et 3 ppm. Les valeurs de l'indice de fractionnement des terres rares lourdes, $(Gd/Yd)_N$, oscillent entre 0,79 et 1,17 (Tab 16).

IV.2.4.3.2. Distribution des terres rares dans les sédiments de la rivière Mfoumou

La somme des terres rares légères dans le cours d'eau Mfoumou va de 210,00 à 236,40 ppm. Les teneurs en La oscillent entre 63 et 105 ppm. Celles du Ce et Eu sont respectivement comprises entre 151 et 205 ppm, et, 105 et 135 ppm. Les valeurs des anomalies en Ce (Ce/Ce^*) par rapport à la chondrite et au PAAS vont respectivement de 0,99 à 1,19, et, 0,76 à 1,05. Celles de l'anomalie en Eu (Eu/Eu^*) par rapport à la chondrite oscillent entre 0,50 et 1,10. Le rapport $(La/Y)_N$ va de 1,79 à 2,44 (Tab 16). La somme des HREE dans les sédiments de la rivière Mfoumou est comprise entre 8 et 10 ppm. Les valeurs du Dy varient de 4 à 7 ppm. Celles du Er vont de 3 à 4 ppm. Les

Tableau 16. Distribution des terres rares en (ppm) dans les sédiments

Eléments	LME											Mfoumou								Bengo'o				
	La01	La02	La03	La04	La05	La06	La07	La08	La09	La10	Moy	NF1	NF2	NF3	NF4	NF5	NF6	NF7	Moy	Be1	Be2	Be3	Be4	Moy
La	44,0	48,0	55,0	49,0	58,0	65,1	59,9	74,9	87,6	89,1	63,2	63,5	66,6	74,9	68,9	86,1	105,1	102,5	81,1	65,8	66,6	75,2	98,6	76,6
Ce	106,2	116,8	132,0	117,8	138,6	155,7	143,3	179,1	107,5	106,3	130,3	151,7	159,3	179,1	164,7	205,9	129,0	122,3	158,9	124,4	130,7	135,1	105,8	124,0
Pr	12,2	13,4	15,2	13,6	15,9	17,9	16,5	20,6	11,8	11,8	14,9	17,5	18,3	20,6	18,9	23,7	14,2	13,5	18,1	14,3	15,0	15,5	11,6	14,1
Nd	39,2	43,1	48,7	43,5	51,1	57,4	52,8	66,0	51,5	53,1	50,6	56,0	58,8	66,0	60,8	76,0	61,8	61,1	62,9	45,9	48,2	49,8	50,7	48,7
Sm	5,9	6,4	7,3	6,5	7,7	8,6	7,9	9,9	8,8	8,6	7,8	8,4	8,8	9,9	9,1	11,4	10,6	9,9	9,7	6,9	7,2	7,5	8,7	7,6
Eu	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	1,3	1,3	1,3	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7	1,6	1,5	1,0	0,8	0,6	0,6	1,1	0,8
Gd	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,7	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,2	4,1	4,1	3,3	3,3	3,3	3,8	3,4
Tb	0,5	0,6	0,7	0,6	0,7	0,8	0,7	0,9	0,9	0,9	0,7	0,8	0,8	0,9	0,8	1,1	1,1	1,0	0,9	0,6	0,7	0,7	0,9	0,7
Dy	3,1	3,4	3,9	3,5	4,1	4,6	4,2	5,3	5,4	5,5	4,3	4,5	4,7	5,3	4,8	6,0	6,5	6,3	5,4	3,7	3,8	4,0	5,4	4,2
Ho	0,7	0,8	0,9	0,8	0,9	1,1	1,0	1,2	0,9	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,1	1,4	1,1	1,1	1,1	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9
Er	1,9	2,0	2,3	2,1	2,4	2,7	2,5	3,1	2,4	2,5	2,4	2,6	2,8	3,1	2,9	3,6	2,9	2,9	3,0	2,2	2,3	2,4	2,4	2,3
Tm	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5	0,3	0,3	0,3	0,5	0,4
Yb	1,8	2,0	2,3	2,0	2,4	2,7	2,5	3,1	2,7	2,7	2,4	2,6	2,7	3,1	2,8	3,5	3,2	3,1	3,0	2,1	2,3	2,3	2,6	2,3
Lu	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7	0,7	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,8	0,9	0,6	0,3	0,3	0,4	0,7	0,4
REE	168,0	265,5	241,5	194,8	172,7	186,7	163,5	189,9	250,2	250,2	208,3	246,4	223,3	223,7	220,5	235,4	223,7	226,6	228,5	235,1	230,1	236,3	213,3	228,7
LREE	158,6	256,6	230,7	183,7	165,3	178,9	154,3	183,3	239,7	238,5	199,0	236,4	213,2	214,6	210,0	226,7	212,8	216,2	218,6	225,9	219,0	225,4	207,0	219,3
HREE	9,4	8,9	10,8	11,1	7,4	7,8	9,3	6,6	10,4	11,7	9,3	10,0	10,1	9,1	10,5	8,7	10,9	10,4	10,0	9,2	11,1	10,8	6,3	9,4
LREE/HREE	16,9	28,9	21,4	16,6	22,3	23,0	16,6	27,8	23,0	20,4	21,7	23,8	21,1	23,6	20,1	25,9	19,5	20,7	22,1	24,5	19,8	20,8	32,9	24,5
Ce/Ce*	0,9	1,1	1,2	1,1	1,1	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,0	1,1	1,2	1,1	1,1	1,2	1,1
Eu/Eu*	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	0,7	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	0,7	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,4
Ce/Ce*	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	0,8	0,8	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	0,8	0,8	1,0	0,9	1,0	0,9	0,7	0,9
Eu/Eu*	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	1,1	1,1	0,7	0,8	0,6	0,5	0,5	0,5	1,1	1,1	0,7	0,8	0,6	0,5	0,9	0,7
(La/Yb) _N	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	2,4	2,4	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	2,4	2,4	2,0	2,3	2,2	2,4	2,8	2,4
(Gd/Yb) _N	1,2	1,1	0,9	1,1	0,9	0,8	0,9	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

$$Ce/Ce^* (1) = (Ce_{\text{échantillon}}/Ce_{\text{chondrite}})/(La_{\text{échantillon}}/La_{\text{chondrite}})^{1/2}(Pr_{\text{échantillon}}/Pr_{\text{chondrite}})^{1/2}. Eu/Eu^* (1) = (Eu_{\text{échantillon}}/Eu_{\text{chondrite}})/(Sm_{\text{échantillon}}/Sm_{\text{chondrite}})^{1/2}(Gd_{\text{échantillon}}/Gd_{\text{chondrite}})^{1/2}. Ce/Ce^* (2) = (Ce_{\text{échantillon}}/Ce_{\text{PAAS}})/(La_{\text{échantillon}}/La_{\text{PAAS}})^{1/2}(Pr_{\text{échantillon}}/Pr_{\text{PAAS}})^{1/2}.$$

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

concentrations du Yb oscillent entre 2 et 3 ppm. La valeur du rapport (Gd/Yd)_N varie de 0,69 à 0,94 (Tab 16).

IV.2.4.3.3. Distribution des terres rares dans les sédiments de la rivière Bengo'o

Les concentrations en LREE vont de 207 à 225 ppm dans la rivière Bengo'o. Les concentrations du La varient entre 66 et 99 ppm. Celles du Cérium et l'euporium oscillent respectivement entre 105,75 et 135,08 ppm, et, 0,57 et 1,05 ppm. Les valeurs des anomalies en Ce (Ce/Ce*) oscillent entre 1,06 et 1,15, et, 0,72 et 0,95, respectivement par rapport à la chondrite et au PAAS. Celles de l'anomalie en Eu (Eu/Eu*) par rapport à la chondrite vont en moyenne de 0,54 à 0,86. Les valeurs du rapport (La/Y)_N sont comprises entre 2,19 et 2,76 (Tab 16).

La somme des HREE dans la rivière Bengo'o va de 6 à 11 ppm. La concentration du Dy dans ces sédiments oscille entre 3,65 et 5,35 ppm. Celles de Er et Yd varient respectivement de 2,17 et 2,40, et, 2,14 et 2,61 ppm. Les valeurs du rapport (Gd/Yd)_N sont comprises entre 0,86 et 0,94 ppm (Tab 16).

IV.2.4.3.4. Normalisation des terres rares au PAAS et à la chondrite

Les données des Terres Rares de chaque échantillon ont été normalisées suivant les standards chondrite et PAAS. Les spectres obtenus se caractérisent par une anomalie négative en Eu (Eu/Eu* < 0,90) et une absence d'anomalie en Ce (Ce/Ce* = 1,06 en moyenne). Comme pour la chondrite, les spectres des différents échantillons normalisés au PAAS présentent une anomalie négative en Eu (Eu/Eu* < 0,90) (Fig. 24).

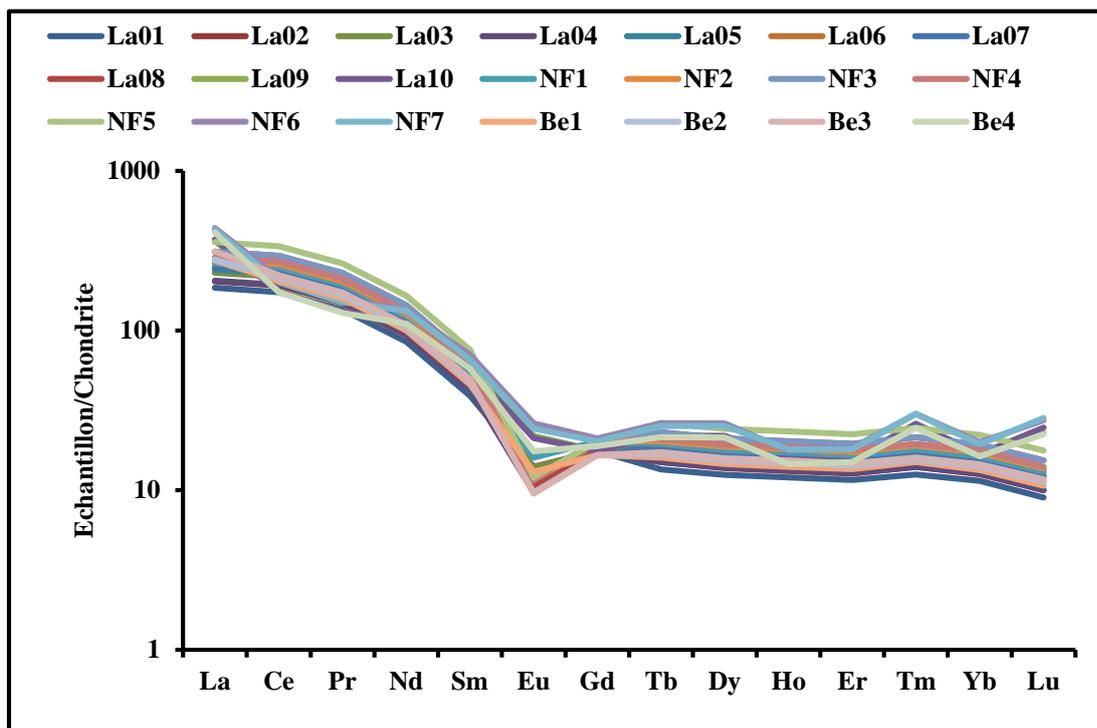
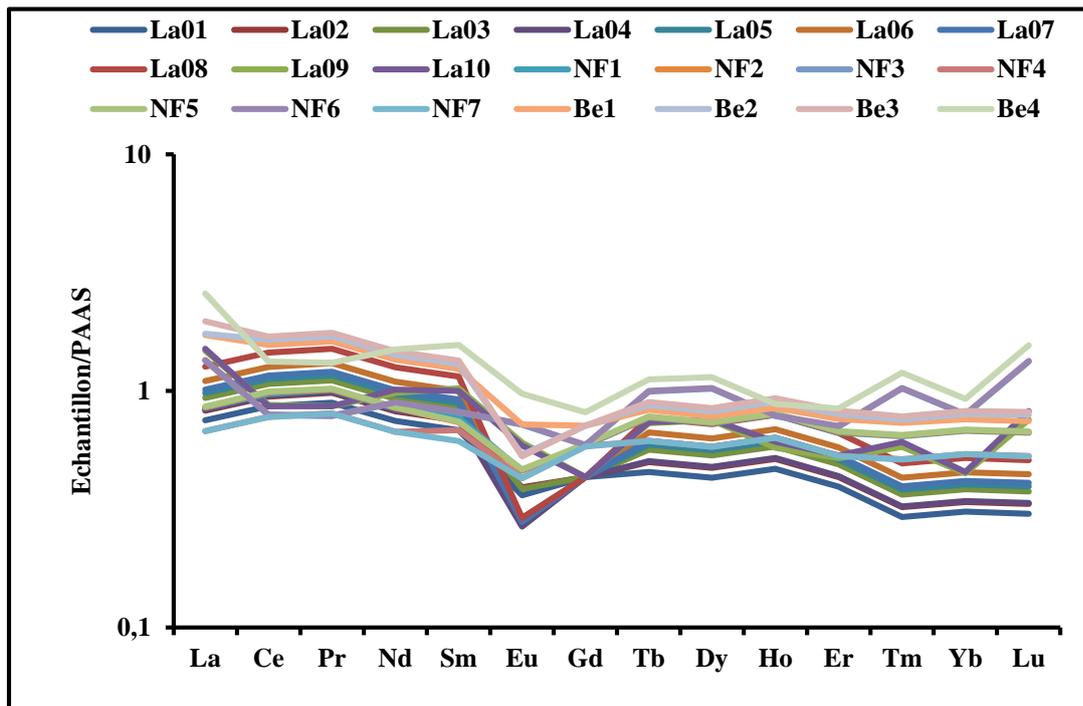


Figure 24. Normalisation des terres rares (a) à la chondrite ; (b) au PAAS

IV.3. Caractéristiques environnementales

IV.3.1. Paramètres physicochimiques de la colonne d'eau et des sédiments

IV.3.1.1. Paramètres physicochimiques de la colonne d'eau

Les paramètres physiques des eaux mesurés dans le cadre de cette étude sont : potentiels d'hydrogène (pH), potentiel d'oxydoréduction (Eh), Température (T), Conductivité (Cs), teneur en oxygène dissout (OD), la turbidité (Turb) et la salinité (Sal). Les résultats obtenus de ces paramètres sont résumés dans le tableau 17.

IV.3.1.1.1. Paramètres physicochimiques de la colonne d'eau du Lac Municipal d'Ebologa

Les valeurs du pH oscillent entre 7,57 et 8,14. Celles du Eh vont de -51 à -13 mV. La température varie entre 25,00 et 28,00°C. La conductivité oscille entre 85,3 et 114,80 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les valeurs de la turbidité sont comprises entre 20,73 et 62,0 NTU. Celles de l'oxygène dissout vont de 2,3 à 4,34 mg/L). La valeur de la salinité pour l'ensemble des échantillons de ce site est égale à 0,01 mg/L (Fig. 25).

IV.3.1.1.2. Paramètres physicochimiques de la colonne d'eau de la rivière Mfoumou

Les valeurs du pH varient de 5,69 à 7,7. Celles du Eh oscillent entre -10 et 91 mV. La température est comprise entre 24,60 et 27,00°C. La conductivité va de 115,2 à 217 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La turbidité varie de 6,75 à 28,78 NTU. Les teneurs en oxygène dissout sont comprises entre 2,4 et 3,4 %. La valeur de la salinité reste égale à 0,01 mg/L (Fig. 26a).

IV.3.1.1.3. Paramètres physicochimiques de la colonne d'eau de la rivière Bengo'o

Les valeurs du pH vont de 7,10 à 7,42. Celles du Eh varient entre -10,00 et 17,00 mV. La température est comprise entre 24,3 et 25,2°C. La conductivité oscille entre 47,3 et 87 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La turbidité varie entre 12,71 et 14 NTU. Les valeurs de la teneur en oxygène dissout vont de 3 à 8,9 mg/L. Celles de la salinité restent aussi constantes pour l'ensemble des échantillons (0,01 mg/L) (Fig. 26b).

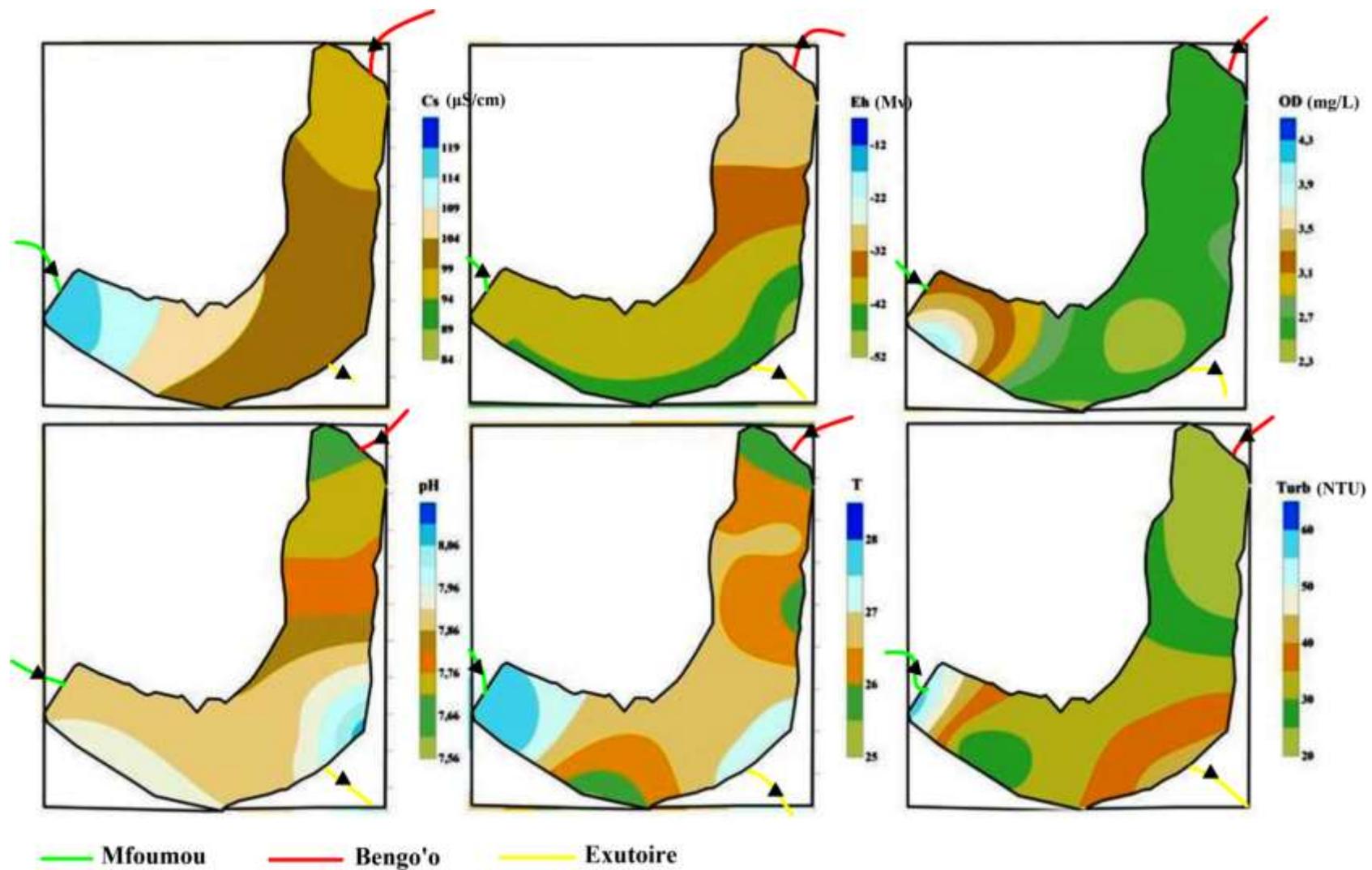


Figure 25. Distribution spatiale des paramètres physiques de la colonne d'eau dans le LME

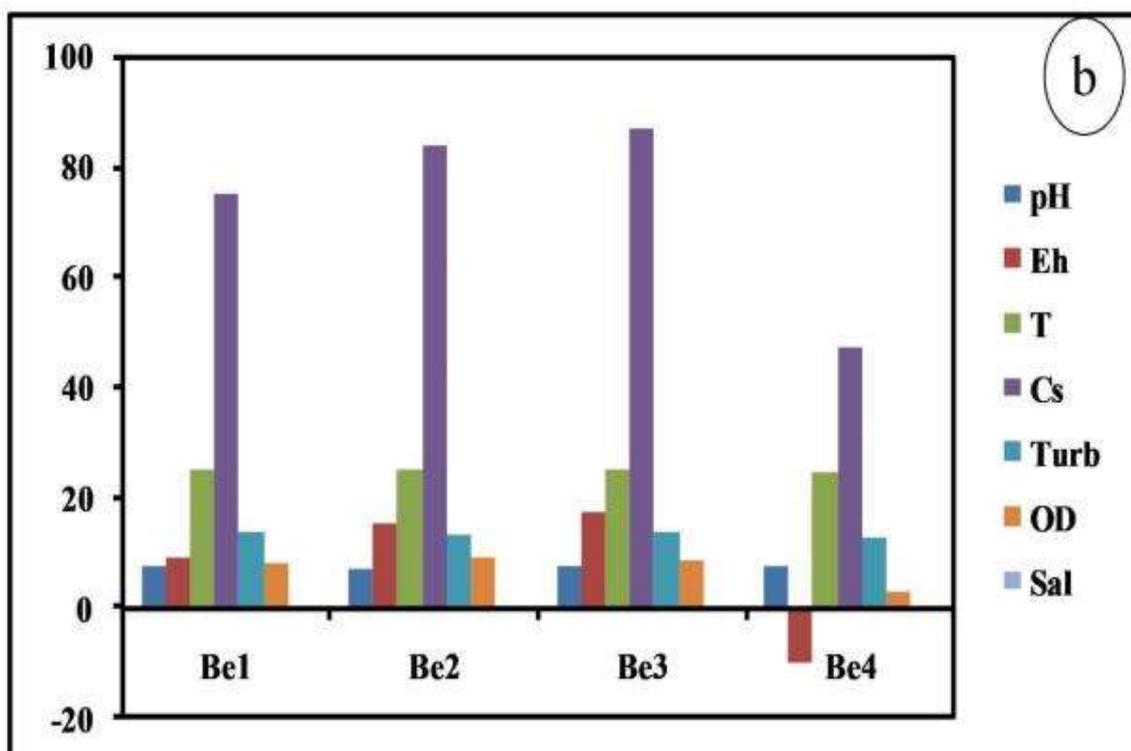
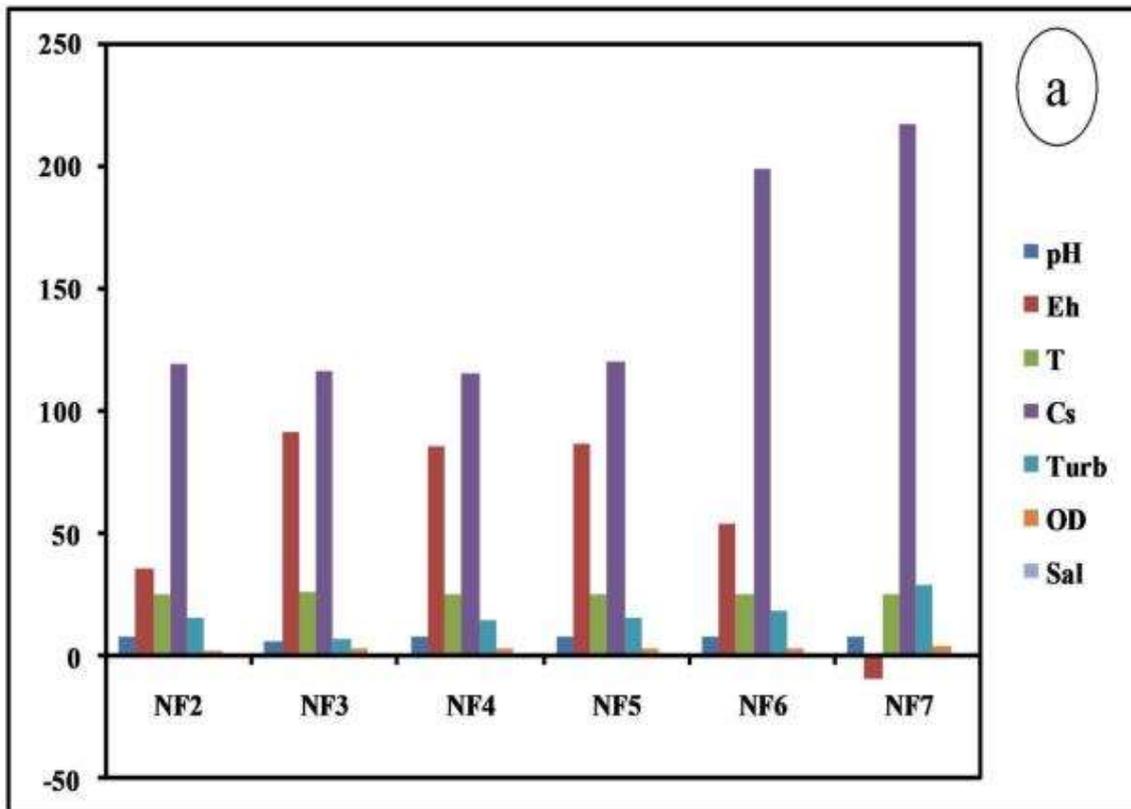


Figure 26. Distribution des paramètres physiques dans les eaux (a) Mfoumou (b) Bengo'o

Tableau 17. Paramètres physiques de l'eau

Sites	Paramètres	pH	Eh	T	Cs	Turb	OD	Sal
	Unités		(mV)	°C	(µS/cm)	(NTU)	(mg/L)	(mg/L)
	OMS (2011)	6,5 - 8,5		25	1500	? 1		
LME	La1	7,57	-13	26,2	85,3	20,73	2,6	0,01
	La2	7,74	-30	25	94,9	21,72	2,6	0,01
	La3	7,77	-31	26,7	96,7	20,64	2,6	0,01
	La4	7,86	-36	25,4	102,2	26,63	2,8	0,01
	La5	7,88	-38	26,7	102,9	36,08	2,3	0,01
	La6	7,95	-43	25	102,2	31,51	2,4	0,01
	La7	7,95	-42	28	114,8	26,25	4,34	0,01
	La8	7,89	-39	27,4	118,9	62	2,7	0,01
	La9	8,14	-51	27,3	103	40,38	2,7	0,01
	La10	7,9	-45	27,2	102	44,1	2,6	0,01
		Moy	7,87	-36,8	26,49	102,29	33	2,76
	Madjiki et al. 2013	6,88	-	24,69	410	92	31	-
Mfoumou	NF2	7,77	36	24,6	118,9	15,47	2,4	0,01
	NF3	5,69	91	25,6	116,5	6,75	2,8	0,01
	NF4	7,45	86	25,4	115,2	14,25	2,6	0,01
	NF5	7,62	87	24,9	120,27	15,27	2,7	0,01
	NF6	7,74	54	25,2	198,7	17,8	2,8	0,01
	NF7	7,54	-10	25,3	217	28,78	3,4	0,01
		Moy	7,19	45,22	25,54	147,33	16,81	2,82
Bergo'o	Be2	7,1	15	25,2	84	13,2	8,9	0,01
	Be3	7,2	17	25,1	87	13,8	8,5	0,01
	Be4	7,42	-10	24,3	47,3	12,71	3	0,01
		Moy	7,18	8,75	24,78	74,93	13,53	7,78

pH : potentiel d'hydrogène ; Eh : potentiel rédox ; Cs : conductivité ; T : Température ; OD : Teneur en oxygène dissout ; Sal ; Salinité

IV.3.1.2. Paramètres physicochimiques des sédiments

Les paramètres physiques des sédiments mesurés dans la présente étude sont : la teneur en eau (TE), le carbone organique totale (COT), le potentiel d'hydrogène (pH), le potentiel redox (Eh), la conductivité (Cs) et la température (T). Les valeurs de ces paramètres sont présentées dans le tableau 18.

IV.3.1.2.1. Paramètres physicochimiques des sédiments du Lac Municipal d'Ebowa

Dans le LME, la teneur en eau oscille entre 12 et 75%. Les proportions du COT vont de 2,08 à 12,65%. Celles du pH varient entre 5,14 et 6,95. Le potentiel redox est compris entre -48 et -5 mV. La conductivité varie de 85,30 à 318,9 μ Cs. Les valeurs de la température évoluent de 25 à 27,4 °C.

IV.3.1.2.2. Paramètres physicochimiques des sédiments dans la rivière Mfoumou

Les valeurs de TE, COT, pH, Eh, Cs et T sont respectivement comprises entre 18 et 57%, 3,68 et 10,82%, 5,35 et 7,5, -25,53 et 98 mV, 63, 37 et 369,33 μ Cs et, 26,96 et 28,7 dans le cours d'eau Mfoumou.

IV.3.1.2.3. Paramètres physicochimiques des sédiments dans la rivière Bengo'o

Dans la rivière Bengo'o, les valeurs de la teneur en eau vont de 16 à 67%. Celles du COT sont comprises entre 7,07 et 8,21%. Les valeurs du pH de ces sédiments varient entre 5,67 et 7,74. Le potentiel redox oscille entre -39,66 et 86,27 mV. Les valeurs de la conductivité vont de 47,20 à 84,60 μ Cs. Celles de la température oscillent entre 27,46 et 28,20°C.

Tableau 18. Paramètres physiques des sédiments du LME et des cours d'eau Mfoumou et Bengo'o

Sites	Ech	TE(%)	pH	Eh (mV)	Cs (µS/cm)	T (°C)	COT (%)
LME	La01	0,34	5,57	-18,00	85,30	26,20	9,25
	La02	0,43	6,74	-35,00	91,90	25,00	8,32
	La03	0,42	5,77	-30,00	86,70	26,70	10,46
	La04	0,75	6,86	-29,00	202,20	25,40	12,65
	La05	0,65	6,88	-43,00	202,90	26,70	11,04
	La06	0,60	6,95	-48,00	202,20	25,00	8,35
	La07	0,67	6,95	-42,00	314,80	28,00	8,10
	La08	0,75	6,89	-39,00	318,90	27,40	10,80
	La09	0,14	5,14	-10,00	303,00	27,30	2,63
	La10	0,12	5,90	-5,00	347,00	27,20	2,08
	Moy	0,49	6,37	-29,90	215,49	26,49	8,37
Mfoumou	NF1	0,50	7,50	-25,53	369,33	27,53	8,18
	NF2	0,43	5,43	94,23	83,16	28,40	8,98
	NF3	0,36	6,98	3,60	152,56	26,90	5,69
	NF4	0,21	5,44	93,43	37,00	27,46	7,06
	NF5	0,19	6,83	13,33	55,80	26,96	4,31
	NF6	0,18	6,20	49,77	76,36	28,70	3,68
	NF7	0,57	5,35	98,63	181,50	27,46	10,42
	Moy	0,35	6,25	46,78	136,53	27,63	6,90
Bengo'o	Be1	0,29	5,67	86,27	84,60	28,20	8,21
	Be2	0,16	7,22	7,10	73,56	27,73	8,21
	Be3	0,67	5,77	74,60	47,20	28,36	7,07
	Be4	0,17	7,74	-39,66	75,30	27,63	7,90
	Moy	0,32	6,60	32,08	70,17	27,98	7,85

TE : Teneur en eau ; COT : Carbone Organique Total

IV.3.2. Hydrochimie

IV.3.2.1. Distribution des ETM et des nutriments dans la colonne d'eau

Les paramètres chimiques mesurés dans la colonne d'eau sont les nutriments (NO_3^- et PO_4^{2-}) et les ETM (Cu, Zn, Cr et Pb). Les résultats des analyses de ces éléments sont présentés dans le tableau 19.

IV.3.2.1.1. Distribution des ETM et des nutriments dans la colonne d'eau Lac Municipal d'Ebolowa

Les concentrations du Cu vont de 0,11 à 0,15 mg/L. Celles du Zn oscillent entre 0,36 et 0,4 mg/L. Les moyennes en ces éléments sont respectivement de 0,125 et 0,378 mg/L. Les valeurs de Cr et du Pb sont comprises respectivement entre 0,02 et 0,0245 mg/L, et, 0,007 et 0,01 mg/L. Elles sont en moyenne de 0,0219 mg/L pour Cr et 0,0009 mg/L pour Pb. L'anion NO_3^- a une concentration moyenne égale à 5,87 mg/L. Ses valeurs oscillent entre 5,3 et 6,2 mg/L. Celles du PO_4^{2-} sont comprises entre 0,98 et 1,3 mg/L, pour une moyenne de 1,12 mg/L (Tab 19).

IV.3.2.1.2. Distribution des ETM et des nutriments dans la colonne d'eau de la rivière Mfoumou

Dans le cours d'eau Mfoumou, les concentrations du NO_3^- vont de 4,54 à 5,23 mg/L. Celles de PO_4^{2-} varient de 0,71 à 0,96 mg/L. Les concentrations en Cu, Zn, Cr et Pb appartiennent respectivement aux intervalles [0,05 – 0,09 mg/L], [0,18 – 0,39 mg/L], [0,01 – 0,02 mg/L] et [0,001 – 0,003 mg/L] (Tab 19).

IV.3.2.1.3. Distribution des ETM et des nutriments dans la colonne d'eau de la rivière Bengo'o

Les teneurs en nitrates vont de 0,34 à 1,52 mg/L. Celles des ions phosphates oscillent de 0,01 à 0,13 mg/L. Les concentrations en Cu et en Zn appartiennent respectivement aux intervalles [0,05 – 0,07 mg/L] et [0,08 – 0,09 mg/L]. Celles du Pb et Cr sont respectivement de 0 mg/L et 0,01 mg/L (Tab 19).

IV.3.2.2. Indice de pollution des métaux lourds dans l'eau

L'indice de pollution des métaux lourds (HPI) a été calculé aussi bien dans les eaux du LME que pour ses affluents. Les valeurs de ce paramètre sont présentées dans le tableau 20. Ce tableau montre que les valeurs de cet indice sont de 10,08, 6,47 et 2,30, respectivement pour le LME, le cours d'eau Mfoumou et le cours d'eau Bengo'o.

Tableau 19. Paramètres chimiques de l'eau

Sites	Paramètres	Cu	Zn	Cr	Pb	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻
LME	Unité	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	OMS (2011)	2	3	0,05	0,1	5	50
	La1	0,09	0,31	0,02	0	0,77	4,08
	La2	0,09	0,32	0,02	0	0,67	4,08
	La3	0,1	0,4	0,02	0	0,98	5,3
	La4	0,14	0,37	0,02	0	1,2	5,73
	La5	0,11	0,38	0,02	0	1,2	6
	La6	0,12	0,36	0,03	0	1,3	6,2
	La7	0,12	0,38	0,03	0	1,2	5,67
	La8	0,12	0,37	0,02	0	1,2	6,1
	La9	0,08	0,26	0,02	0	0,98	4,96
	La10	0,09	0,33	0,02	0	0,98	4,96
	Moy.	0,11	0,35	0,02	0	1,05	5,31
	Madjiki et al. (2013)	-	-	-	-	0,04	0,21
Mfoumou	NF1	0,08	0,18	0,01	0	0,71	5,23
	NF2	0,09	0,19	0,01	0	0,82	4,56
	NF3	0,09	0,24	0,01	0	0,91	4,54
	NF4	0,08	0,27	0,01	0	0,92	5,56
	NF5	0,06	0,32	0,01	0	0,94	5,13
	NF6	0,05	0,24	0,01	0	0,96	5,03
	NF7	0,08	0,39	0,02	0	0,94	5,3
	Moy.	0,07	0,26	0,01	0	0,87	5,05
Bengo'o	Be1	0,07	0,09	0,01	0	0,01	0,34
	Be2	0,05	0,08	0,01	0	0,08	0,56
	Be3	0,06	0,09	0,01	0	0,13	1,32
	Be4	0,07	0,09	0,01	0	0,12	1,52
	Moy.	0,06	0,09	0,01	0	0,09	0,94

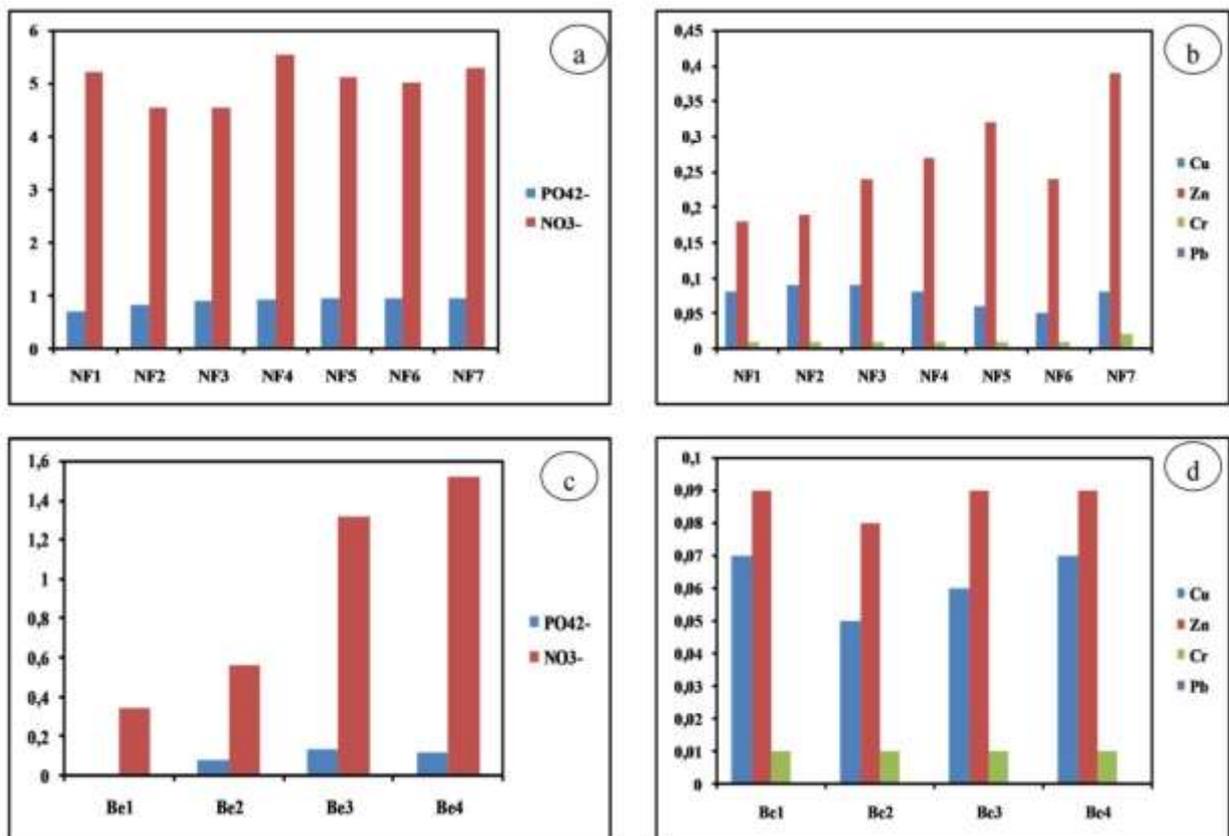


Figure 27. Distribution des ETM et des nutriments dans la colonne d'eau des cours d'eau Mfoumou et Bengo'o (a) distribution des nutriments dans le cours d'eau Mfoumou (b) distribution des ETM dans le cours d'eau Mfoumou (c) distribution des nutriments dans le cours d'eau Bengo'o (d) distribution des ETM dans le cours d'eau Bengo

Tableau 20. Indice de pollution des métaux lourds dans les eaux

Localisations	ETM (µg/L)	Vi	Si	Wi	Qi	Wi × Qi	S WiQi	Swi	HPI
LME	Cu	140	2000	0	7	0	1,22	0,12	10,08
	Zn	400	3000	0	13,33	0			
	Cr	30	50	0,02	60	1,2			
	Pb	0,01	10	0,1	0,1	0,01			
Mfoumou	Cu	72	2000	0	3,6	0	0,78	0,12	6,47
	Zn	25,6	3000	0	0,85	0			
	Cr	12	50	0,02	24	0,48			
	Pb	0,3	10	0,1	3	0,3			
Bengo'o	Cu	59,75	2000	0	2,99	0	0,28	0,12	2,30
	Zn	86	3000	0	2,87	0			
	Cr	6,4	50	0,02	12,8	0,26			
	Pb	0,02	10	0,1	0,2	0,02			

IV.3.3. Distribution des ETM dans les sédiments et indices de pollution

IV.3.3.1. Distribution des ETM

IV.3.3.1.1. Distribution des ETM dans les sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa

Les teneurs en ETM des sédiments du LME sont présentées dans le tableau 21. Les concentrations du Cr varient de 58,69 à 113,43 mg/kg. Celles du Ni oscillent entre 19,08 et 36,24 mg/kg. Les concentrations du Zn vont de 31,67 à 64,68 mg/kg. Celles du Co appartiennent à l'intervalle [12,98 – 18,44 mg/kg]. Les valeurs du Pb sont comprises entre 3,92 et 19,50 mg/kg. Celles du Cd varient de 0,07 à 0,19 mg/kg. Les teneurs en Mo et Cu appartiennent respectivement aux intervalles [0,05 – 0,94 mg/kg], et, [12,12 – 51,22 mg/kg].

IV.3.3.1.2. Distribution des ETM dans les sédiments de la rivière Mfoumou

Le tableau 21 et la figure 28a représentent les concentrations des ETM dans les sédiments de la rivière Mfoumou. Les teneurs en Cr appartiennent à l'intervalle 12,92 – 109,93 mg/kg. Les concentrations du Ni oscillent entre 31,25 et 36,47 mg/kg. Celles du Co et Zn appartiennent respectivement aux intervalles 12,16 – 18,74 mg/kg et 51,05 – 64,58 mg/kg. Les teneurs de Cd oscillent entre 0,11 et 0,23 mg/kg. Les concentrations en Mo et Cu sont comprises entre 0,11 et 0,74 mg/kg, et, 21,05 et 34,25 mg/kg.

IV.3.3.1.3. Distribution des ETM dans la rivière Bengo'o

Dans la rivière Bengo'o, les teneurs en Cr vont de 65,55 à 68,02 mg/kg. Celles de Ni oscillent entre 65,55 et 68,02 mg/kg. Les concentrations du Co et Zn sont comprises respectivement entre 11,44 à 14,18 mg/kg, et, 52,69 à 61,76 mg/kg. Celles du Cd varient de 0,06 à 0,07 mg/kg. Les teneurs en Mo et Cu sont respectivement comprises entre 0,09 et 0,2 mg/kg, et, 13,24 et 19,87 mg/kg (Tab 21 et Fig. 28b).

IV.3.3.2. Indices de pollution

Les indices utilisés pour évaluer la pollution sont : le Facteur de Contamination (FC), le Facteur d'Enrichissement (FE), l'Indice de Géoaccumulation (Igeo), et l'Indice de Charge de Pollution (PLI).

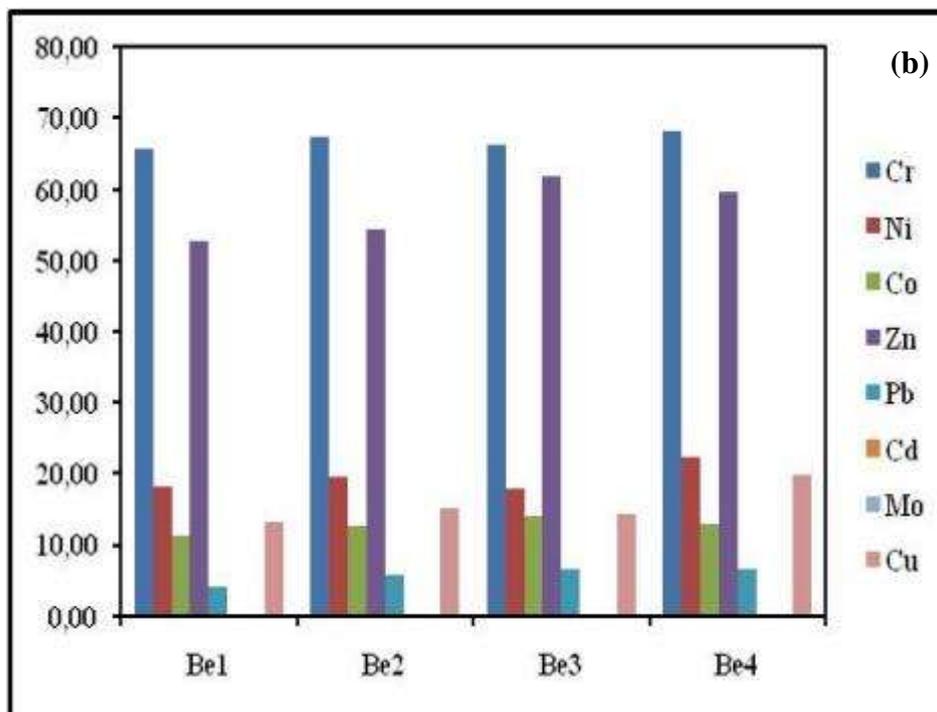
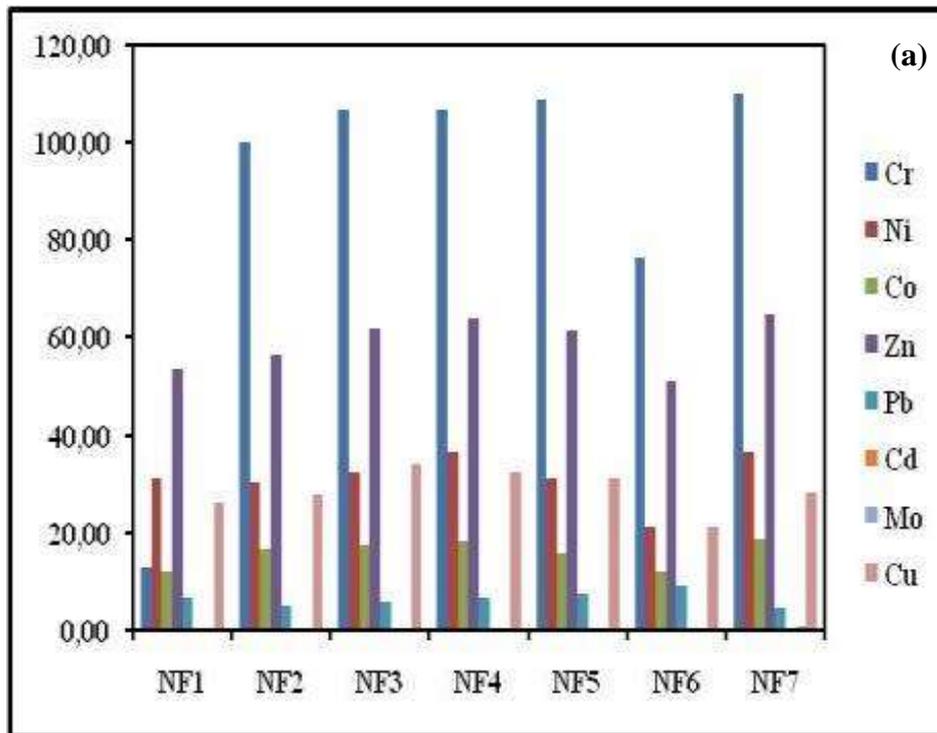


Figure 28. Variation spatiale des ETM (a) Mfoumou (b) Bengo'o

Tableau 21. Distribution des ETM en mg/kg dans les sédiments du LME

Site		Cr	Ni	Co	Zn	Pb	Cd	Mo	Cu
LME	La01	96,16	29,87	16,2	53,42	9	0,1	0,74	31,11
	La02	94,27	30,21	15,75	53,24	6,75	0,11	0,65	28,35
	La03	92,59	30,28	16,51	53,27	6	0,08	0,41	28,98
	La04	109,67	35,25	16,76	60,92	11,25	0,18	0,94	51,22
	La05	113,43	36,24	18,44	63,18	11,25	0,19	0,85	42,24
	La06	110,5	35,21	17,6	63,91	15,75	0,18	0,79	42,36
	La07	108,17	34,25	16,42	64,68	16,5	0,19	0,83	44,25
	La08	107,43	36,24	16,31	63,95	19,5	0,18	0,78	43,21
	La09	73,69	21,02	14,43	51,19	5,9	0,08	0,06	15,25
	La10	58,69	19,08	12,98	31,67	3,92	0,07	0,05	13,12
	Moy	96,46	30,77	16,14	55,94	10,58	0,14	0,61	34,01
Mfoumou	NF1	12,92	31,25	12,19	53,44	6,53	0,14	0,18	26,22
	NF2	100,16	30,21	16,5	56,52	4,88	0,11	0,18	27,94
	NF3	106,91	32,24	17,26	61,92	5,85	0,16	0,11	34,25
	NF4	106,51	36,54	18,21	63,84	6,75	0,11	0,65	32,21
	NF5	108,91	31,02	15,98	61,66	7,5	0,16	0,72	31,02
	NF6	76,52	21,05	12,16	51,05	9	0,17	0,41	21,05
	NF7	109,93	36,47	18,74	64,58	4,65	0,23	0,74	28,25
	Moy.	88,83	31,25	15,86	59	6,45	0,15	0,43	28,71
Bengo'o	Be1	65,55	18,24	11,44	52,69	4,05	0,06	0,09	13,24
	Be2	67,28	19,72	12,59	54,44	5,85	0,08	0,16	15,24
	Be3	66,27	17,89	14,18	61,76	6,68	0,07	0,18	14,45
	Be4	68,02	22,23	13,08	59,46	6,75	0,06	0,2	19,87
	Moy.	66,78	19,52	12,82	57,09	5,83	0,07	0,16	15,7
	UCC	35	20	10	71	20	0,098	1,5	25
	TEC	37,3	18	nd	123	35	0,596	nd	37,7
	PEC	90	36	nd	315	91,3	3,53	nd	197

IV.3.3.2.1. Indices de pollution des sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa

Les valeurs des indices de pollutions sont présentées dans le tableau 22. Les valeurs du Facteur de Concentration appartiennent aux intervalles suivants : [1,68 – 3,24] pour Cr, [0,95 – 1,81] pour Ni, [1,30 – 1,84] pour Co, [0,45 – 0,91] pour Zn, [0,20 – 0,98] pour Pb, [0,71 – 1,94] pour Cd, [0,03 – 0,63] pour Mo et [0,52 – 2,05] pour Cu. Celles du facteur d'enrichissement sont les suivantes : [3,47 – 4,24], [1,51 – 2,39], [1,53 – 3,03], [0,74 – 1,24], [0,42 – 1,28], [1,15 – 2,64], [0,07 – 0,85] et [1,01 – 2,77], respectivement pour Cr, Ni, Co, Zn, Pb, Cd, Mo et Cu. Les valeurs de Igeo du Cr, Ni, Co, Zn, Pb, Cd, Mo et Cu sont respectivement comprises dans les intervalles suivants : [0,11 – 0,13], [0,14 – 0,17], [0,25 – 0,28], [0,05 – 0,06], [0,07 – 0,14], [-24,78 – -16,30], [-1,92 – -0,04] et [0,10 – 0,15]. L'indice de charge de pollution (PLI) est compris entre 0,68 et 1,59.

IV.3.3.2.2. Indices de pollution des sédiments de la rivière Mfoumou

Les valeurs du FC appartiennent aux intervalles suivants : [0,37 – 3,05], [1,05 – 1,83], [1,22 – 1,82], [0,72 – 0,91], [0,23 – 0,45], [1,12 – 2,35], [0,07 – 0,49] et [0,84 – 1,37], respectivement pour Cr, Ni, Co, Zn, Pb, Cd, Mo et Cu. Celles du facteur d'enrichissement sont comprises entre les intervalles suivants : [0,48 – 5,48] pour Cr, [1,66 – 2,88] pour Ni, [1,59 – 2,98] pour Co, [0,98 – 1,53] pour Zn, [0,30 – 0,71] pour Pb, [1,74 – 3,08] pour Cd, [0,13 – 0,84] pour Mo et [1,33 – 2,36] pour Cu. Les valeurs de Igeo du Cr, Ni, Co, Zn, Pb, Cd, Mo et Cu sont respectivement comprises dans les intervalles suivants : [0,07 – 0,13], [0,15 – 0,17], [0,24 – 0,28], [0,05 – 0,06], [0,07 – 0,11], [-21,66 – -14,42], [-1,42 – -0,19] et [0,12 – 0,14]. Les valeurs de PLI oscillent entre 0,83 et 1,26 (Tab 22).

IV.3.3.2.3. Indices de pollution dans les sédiments de la rivière Bengo'o

Les valeurs des indices de pollution dans la rivière Bengo'o sont présentées dans le tableau 21. Les valeurs du Facteur de Concentration appartiennent aux intervalles suivants : [1,87 – 1,94] pour Cr, [0,89 – 1,11] pour Ni, [1,14 – 1,42] pour Co, [0,74 – 0,87] pour Zn, [0,20 – 0,34] pour Pb, [0,61 – 0,82] pour Cd, [0,06 – 0,13] pour Mo et [0,53 – 0,79] pour Cu. Celles du facteur d'enrichissement sont les suivantes : [2,27 – 2,99], [1,11 – 1,71], [1,39 – 2,01]

Tableau 22. Indices de pollution

Indice		FC								FE								Igeo								PLI
Site	Ech	Cr	Ni	Co	Zn	Pb	Cd	Mo	Cu	Cr	Ni	Co	Zn	Pb	Cd	Mo	Cu	Cr	Ni	Co	Zn	Pb	Cd	Mo	Cu	
LME	La01	2,75	1,49	1,62	0,75	0,45	1,02	0,49	1,24	4,07	2,21	2,4	1,11	0,67	1,51	0,73	1,84	0,13	0,16	0,27	0,05	0,11	-22,6	-0,19	0,13	1,16
	La02	2,69	1,51	1,58	0,75	0,34	1,12	0,43	1,13	4,09	2,29	2,39	1,14	0,51	1,7	0,66	1,72	0,12	0,16	0,27	0,05	0,09	-21,7	-0,28	0,13	1,11
	La03	2,65	1,51	1,65	0,75	0,3	0,82	0,27	1,16	3,72	2,13	2,32	1,06	0,42	1,15	0,38	1,63	0,12	0,16	0,27	0,05	0,09	-24,8	-0,57	0,13	1,05
	La04	3,13	1,76	1,68	0,86	0,56	1,84	0,63	2,05	4,24	2,38	2,27	1,16	0,76	2,48	0,85	2,77	0,13	0,17	0,27	0,06	0,12	-16,8	-0,04	0,15	1,50
	La05	3,24	1,81	1,84	0,89	0,56	1,94	0,57	1,69	2,69	1,51	1,53	0,74	0,47	1,61	0,47	1,4	0,13	0,17	0,28	0,06	0,12	-16,3	-0,1	0,14	1,51
	La06	3,16	1,76	1,76	0,9	0,79	1,84	0,53	1,69	3,63	2,02	2,02	1,03	0,9	2,11	0,61	1,95	0,13	0,17	0,28	0,06	0,13	-16,8	-0,15	0,14	1,55
	La07	3,09	1,71	1,64	0,91	0,83	1,94	0,55	1,77	4,21	2,34	2,24	1,24	1,12	2,64	0,75	2,41	0,13	0,17	0,27	0,06	0,13	-16,3	-0,12	0,15	1,56
	La08	3,07	1,81	1,63	0,9	0,98	1,84	0,52	1,73	4,04	2,39	2,15	1,19	1,28	2,42	0,68	2,28	0,13	0,17	0,27	0,06	0,14	-16,8	-0,16	0,14	1,59
	La09	2,11	1,05	1,44	0,72	0,3	0,82	0,04	0,61	3,47	1,73	2,38	1,19	0,49	1,35	0,07	1,01	0,12	0,15	0,26	0,05	0,09	-24,8	-1,8	0,1	0,86
	La10	1,68	0,95	1,3	0,45	0,2	0,71	0,03	0,52	3,92	2,23	3,03	1,04	0,46	1,67	0,08	1,23	0,11	0,14	0,25	0,05	0,07	-26,1	-1,92	0,1	0,68
Moy	2,76	1,54	1,61	0,79	0,53	1,43	0,41	1,36	3,73	2,08	2,19	1,07	0,72	1,93	0,55	1,84	0,13	0,16	0,27	0,05	0,11	-19,3	-0,32	0,14	1,28	
Mfoumou	NF1	0,37	1,56	1,22	0,75	0,33	1,43	0,12	1,05	0,48	2,04	1,59	0,98	0,43	1,87	0,16	1,37	0,07	0,17	0,24	0,05	0,09	-19,3	-1,1	0,13	0,83
	NF2	2,86	1,51	1,65	0,8	0,24	1,12	0,12	1,12	4,44	2,35	2,56	1,24	0,38	1,74	0,19	1,74	0,13	0,16	0,27	0,05	0,08	-21,7	-1,1	0,13	1,08
	NF3	3,05	1,61	1,73	0,87	0,29	1,63	0,07	1,37	5,27	2,78	2,98	1,5	0,5	2,81	0,13	2,36	0,13	0,17	0,27	0,06	0,08	-18	-1,42	0,14	1,25
	NF4	3,04	1,83	1,82	0,9	0,34	1,12	0,43	1,29	4,79	2,88	2,87	1,42	0,53	1,77	0,68	2,03	0,13	0,17	0,28	0,06	0,09	-21,7	-0,28	0,13	1,24
	NF5	3,11	1,55	1,6	0,87	0,38	1,63	0,48	1,24	5,48	2,73	2,81	1,53	0,66	2,87	0,84	2,18	0,13	0,17	0,27	0,06	0,1	-18	-0,21	0,13	1,26
	NF6	2,19	1,05	1,22	0,72	0,45	1,73	0,27	0,84	3,45	1,66	1,92	1,14	0,71	2,74	0,43	1,33	0,12	0,15	0,24	0,05	0,11	-17,4	-0,57	0,12	1,04
	NF7	3,14	1,82	1,87	0,91	0,23	2,35	0,49	1,13	4,12	2,39	2,46	1,19	0,3	3,08	0,65	1,48	0,13	0,17	0,28	0,06	0,07	-14,4	-0,19	0,13	1,29
	Moy	2,54	1,56	1,59	0,83	0,32	1,53	0,29	1,15	3,87	2,38	2,42	1,27	0,49	2,34	0,44	1,75	0,12	0,17	0,27	0,06	0,09	-18,6	-0,54	0,13	1,17
Bengo'o	Be1	1,87	0,91	1,14	0,74	0,2	0,61	0,06	0,53	2,27	1,11	1,39	0,9	0,25	0,74	0,07	0,64	0,11	0,14	0,23	0,05	0,07	-27,6	-1,54	0,1	0,71
	Be2	1,92	0,99	1,26	0,77	0,29	0,82	0,11	0,61	2,46	1,26	1,61	0,98	0,37	1,04	0,14	0,78	0,12	0,14	0,24	0,05	0,08	-24,8	-1,18	0,1	0,83
	Be3	1,89	0,89	1,42	0,87	0,33	0,71	0,12	0,58	2,59	1,23	1,94	1,19	0,46	0,98	0,16	0,79	0,12	0,14	0,26	0,06	0,09	-26,1	-1,1	0,1	0,83
	Be4	1,94	1,11	1,31	0,84	0,34	0,61	0,13	0,79	2,99	1,71	2,01	1,29	0,52	0,94	0,21	1,22	0,12	0,15	0,25	0,06	0,09	-27,6	-1,03	0,12	0,87
	Moy	1,91	0,98	1,28	0,8	0,29	0,71	0,11	0,63	2,56	1,31	1,72	1,08	0,39	0,96	0,14	0,84	0,12	0,14	0,25	0,05	0,08	-26,1	-1,18	0,11	0,82

2,01], [0,90 – 1,29], [0,25 – 0,52], [0,74 – 1,04], [0,07 – 0,21] et [0,64 – 1,22], respectivement pour Cr, Ni, Co, Zn, Pb, Cd, Mo et Cu. Les valeurs de Igeo du Cr, Ni, Co, Zn, Pb, Cd, Mo et Cu sont respectivement comprises dans les intervalles suivants : [0,11 – 0,12], [0,14 – 0,15], [0,23 – 0,25], [0,05 – 0,06], [0,07 – 0,09], [-27,61 – -24,79], [-1,54 – -1,03] et [0,10 – 0,12]. L'indice de charge de pollution (PLI) est compris entre 0,71 et 0,87 (Tab 22).

IV.3.3.3. Indices de risques écologiques

Les indices d'évaluation du risque écologiques calculés dans la présente étude sont le facteur de risque écologique potentiel (Er) et l'indice de risque écologique potentiel (RI).

IV.3.3.3.1. Indices de risques écologiques dans les sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa

Les valeurs de Er et RI sont résumées dans le tableau 24. Le facteur de risque écologique potentiel est compris entre 3,35 et 6,48 pour Cr, 4,77 et 9,06 pour Ni, 0,45 et 0,91 pour Zn, 0,98 et 4,13 pour Pb, 20,66 et 58,16 pour Cd, et, 2,62 et 10,24 pour Cu. Les valeurs de l'indice de risque écologique potentiel vont de 32,84 à 85,86 (Tab 23).

IV.3.3.3.2. Indices de risques écologiques dans les sédiments de la rivière Mfoumou

Les valeurs de Er pour Cr, Ni, Zn, Pb, Cd et Cu appartiennent respectivement aux intervalles [0,74 – 6,28], [7,55 – 9,14], [0,72 – 0,91], [1,22 – 1,88], [32,14 – 71,17] et [4,21 – 6,85] dans le cours d'eau Mfoumou. Celles du RI sont comprises entre 55,32 et 94,29 (Tab 23).

IV.3.3.3.3. Indices de risques écologiques dans les sédiments de la rivière Bengo'o

Les valeurs du risque écologique dans les sédiments du cours d'eau Bengo'o sont présentées dans le tableau 24. Ces résultats montrent que la variation des valeurs de Er est la suivante : 3,75 et 3,84, 4,47 et 5,56, 0,74 et 0,87, 1,01 et 1,69, 18,37 et 24,49, et, 2,65 et 3,97, respectivement pour Cr, Ni, Pb, Cd et Cu. Celles de RI oscillent entre 31,08 et 38,54.

IV.4. Analyses statistiques

Outre les matrices de corrélations, l'Analyse en Composante Principale (ACP) et la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) ont été utilisées dans la présente étude. Ces dernières ont permis de déterminer les relations entre les différents éléments, d'une part, et entre les différents sites d'autre part.

Tableau 23. Indices d'évaluation du risque écologique

Site	Echantillons	Er						RI
		Cr	Ni	Zn	Pb	Cd	Cu	
LME	La01	5,49	7,47	0,75	2,25	30,61	6,22	52,80
	La02	5,39	7,55	0,75	1,69	33,67	5,67	54,72
	La03	5,29	7,57	0,75	1,50	24,49	5,80	45,40
	La04	6,27	8,81	0,86	2,81	55,10	10,24	84,10
	La05	6,48	9,06	0,89	2,81	58,16	8,45	85,86
	La06	6,31	8,80	0,90	3,94	55,10	8,47	83,53
	La07	6,18	8,56	0,91	4,13	58,16	8,85	86,79
	La08	6,14	9,06	0,90	4,88	55,10	8,64	84,72
	La09	4,21	5,26	0,72	1,48	24,49	3,05	39,20
	La10	3,35	4,77	0,45	0,98	21,43	2,62	33,60
	Moy.	5,51	7,69	0,79	2,65	42,86	6,80	66,30
Mfoumou	NF1	0,74	7,81	0,75	1,63	42,86	5,24	59,04
	NF2	5,72	7,55	0,80	1,22	33,67	5,59	54,55
	NF3	6,11	8,06	0,87	1,46	48,98	6,85	72,33
	NF4	6,09	9,14	0,90	1,69	33,67	6,44	57,92
	NF5	6,22	7,76	0,87	1,88	48,98	6,20	71,91
	NF6	4,37	5,26	0,72	2,25	52,04	4,21	68,85
	NF7	6,28	9,12	0,91	1,16	70,41	5,65	93,53
	Moy.	5,08	7,81	0,83	1,61	45,92	5,74	66,99
Bengo'o	Be1	3,75	4,56	0,74	1,01	18,37	2,65	31,08
	Be2	3,84	4,93	0,77	1,46	24,49	3,05	38,54
	Be3	3,79	4,47	0,87	1,67	21,43	2,89	35,12
	Be4	3,89	5,56	0,84	1,69	18,37	3,97	34,31
	Moy.	3,82	4,88	0,80	1,46	21,43	3,14	35,53

IV.4.1. Analyse en composantes principales

IV.4.1.1. Analyse en composantes principales des résultats des Sédiments

Les résultats de l'ACP sont résumés sur la figure 29. Ce cercle de corrélation comprend deux valeurs propres PC1 et PC2. Ces dernières représentent ensemble 80,63% des variables. PC1 (70,30 %) regroupe Cr, Ni, Co, Cd, Zn, Cu et Mo. PC2 (10,33 %) est représenté par Pb.

IV.4.1.2. Analyse en composantes principales des résultats de la colonne d'eau

Les résultats de l'ACP de la colonne eaux des trois milieux sont résumés sur les figures 30a et 30b. La figure 30a est marquée par deux valeurs propres PC1 et PC2 qui représentent ensemble 90,86 % des valeurs. PC1 représente 75,17 %. Il inclut Cu, Cr et Zn. PC2 (15,69 %) comprend uniquement Pb. La figure 30b se caractérise par deux vecteurs propres (73,76 %), dont le premier (PC1) explique 51,46 % des variables, et le second (PC2) valorise 22,30 % de ces dernières. PC1 inclut PO_4^{2-} (R = 0.90), NO_3^- (R = 0.90), pH (R = 0.70), T (R = 0.70), Turb (R = 0.78) et OD (R = -0.73). PC2 comprend Eh et Cs dont les coefficients de corrélation respectifs sont de R = 0,75 et R = 0,65.

IV.4.2. Classification hiérarchique ascendante (CHA)

IV.4.2.1. Classification hiérarchique ascendante des résultats des sédiments

Les dendrogrammes représentant les relations entre les différents éléments et les relations entre les différents sites sont représentés aux figures 31a et 31b. Le premier (Fig. 31a) comprend deux branches (1 et 2). La branche 1 comprend uniquement Cr. La seconde a deux sous-groupes. Le premier sous-groupe est composé de : Cd, Mo, Co et Pb. Le second sous-groupe comprend : Zn, Ni et Cu.

La Figure 31b représente les relations entre différents sites. Ce dendrogramme comprend aussi deux branches. La première comprend deux sous-groupes. Le sous-groupe 1, qui englobe les échantillons La4, La5, La6, La7 et La8. Le second quant à lui comprend les échantillons La1, La2, La3, NF2, NF3, NF5 et NF7. La deuxième branche est composée aussi de deux sous-groupes. Le premier comprend uniquement l'échantillon NF1, tandis que le second regroupe les échantillons La9, La10, NF6, Be1, Be2, Be3 et Be4.

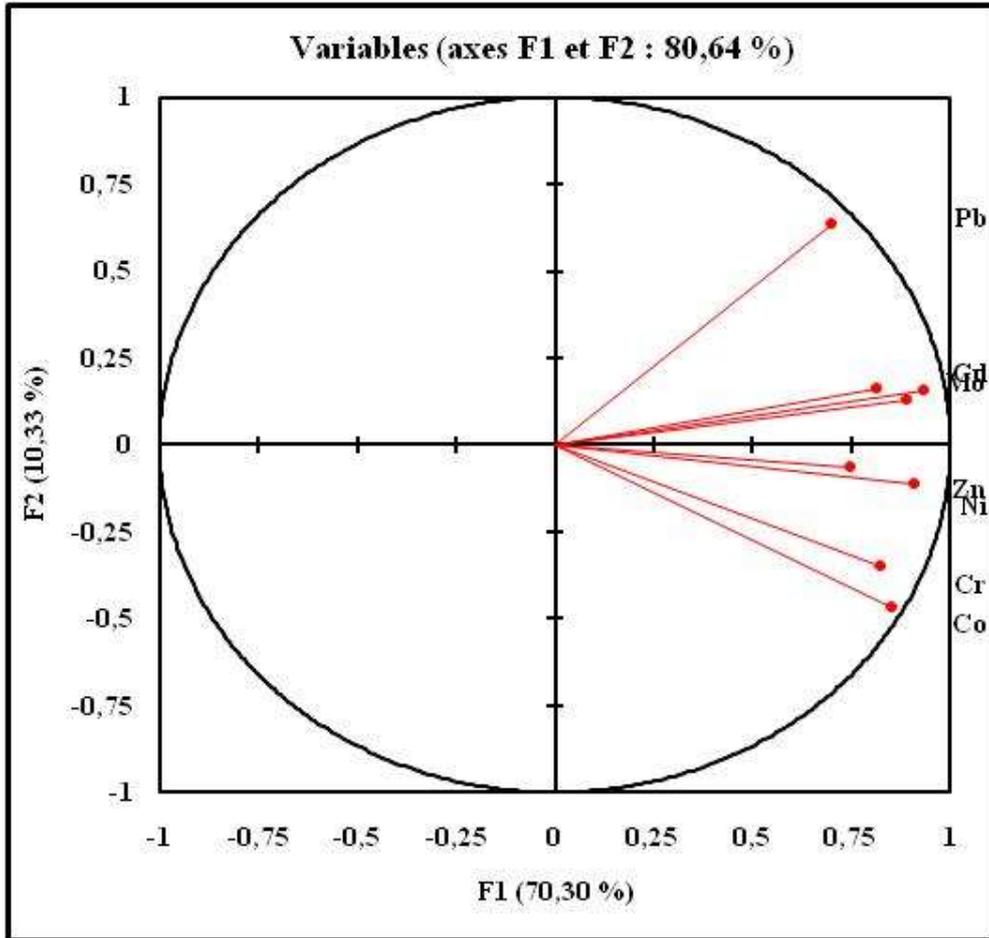


Figure 29. Cercle de l'analyse en composantes principale des résultats des sédiments

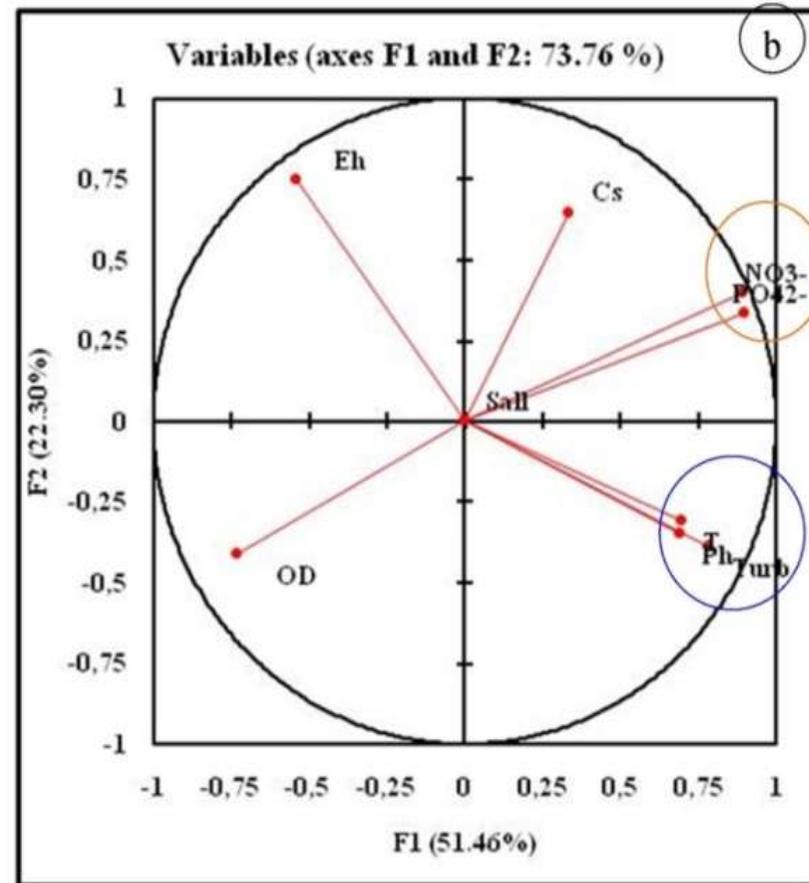
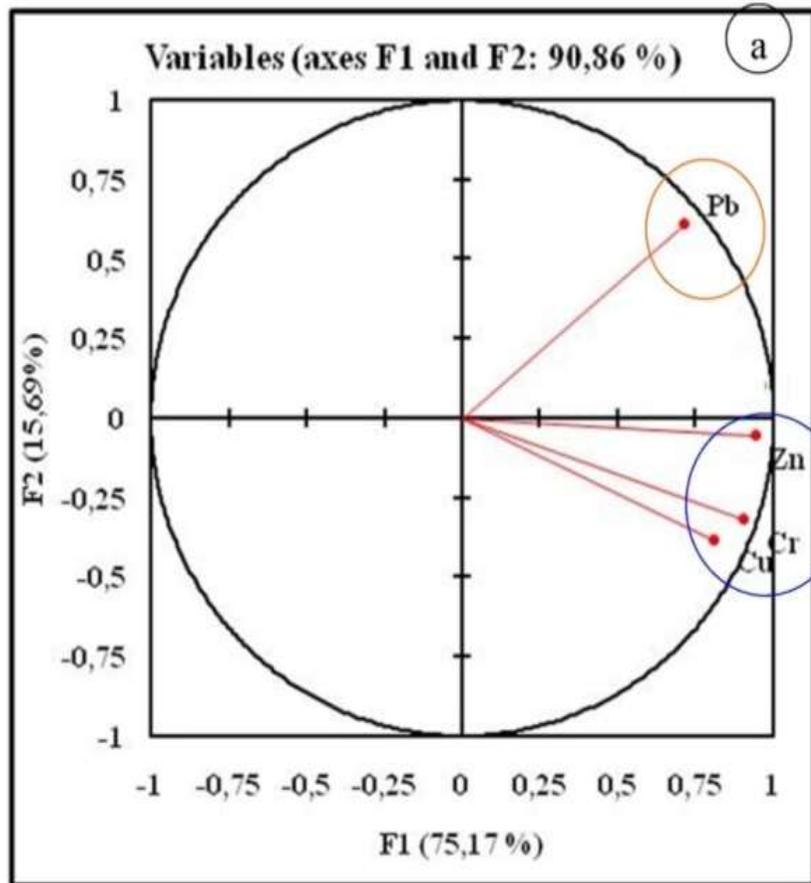


Figure 30. ACP illustrant les relations entre différents paramètres : (a) ETM ;(b) paramètres physique

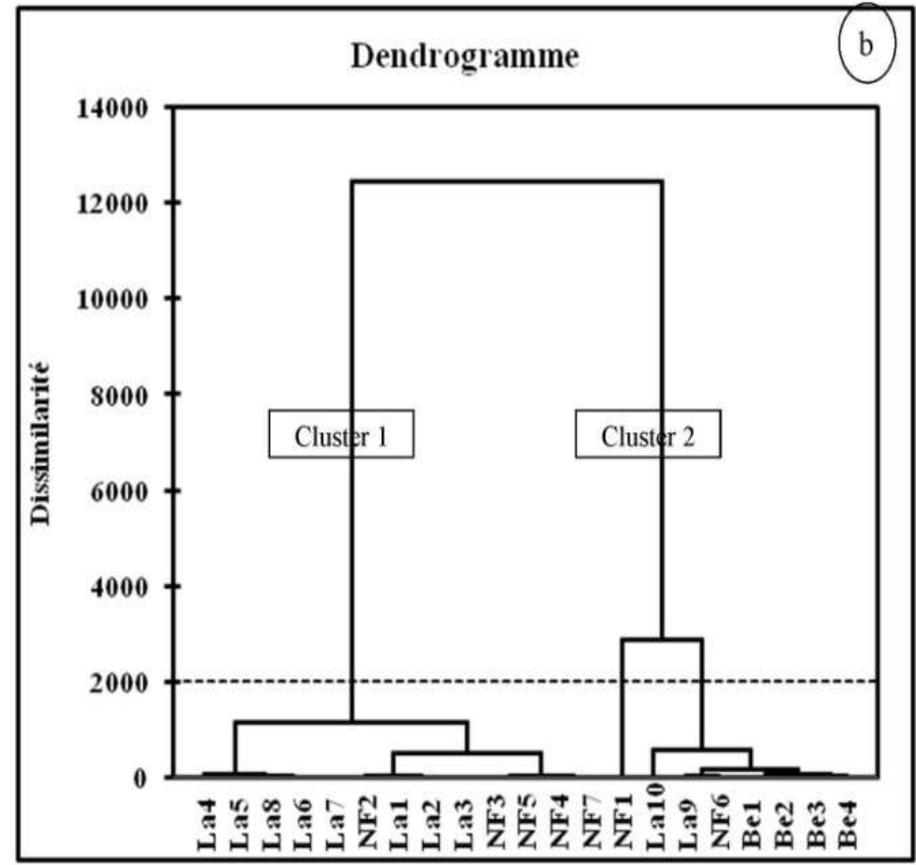
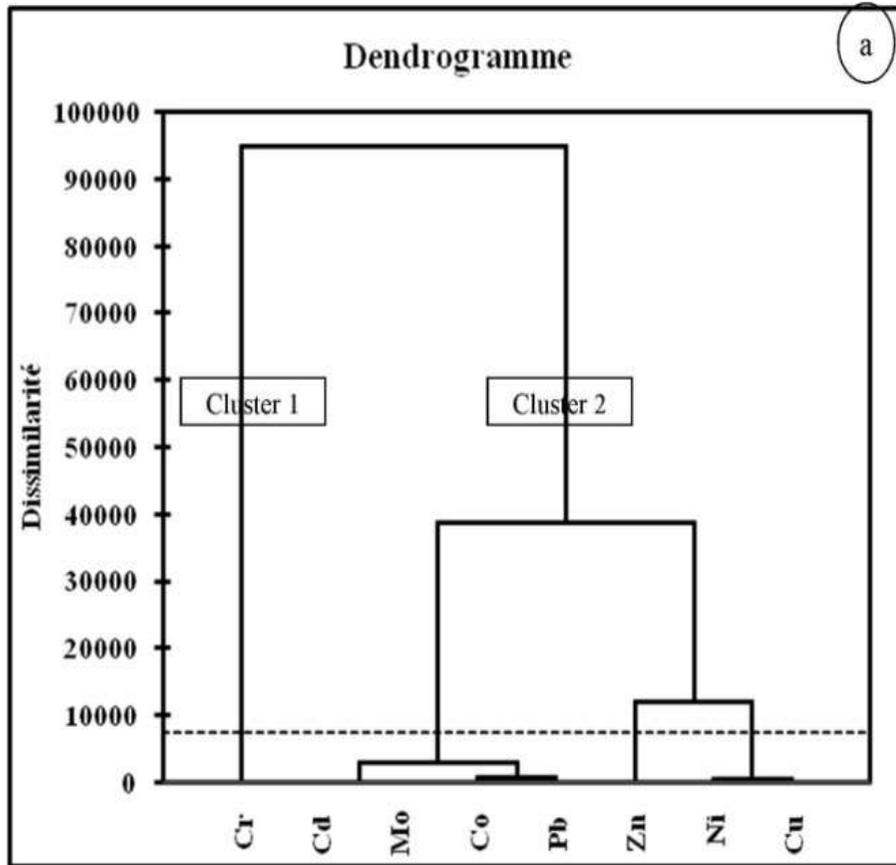


Figure 31. Relations entre les éléments et les sites (a) relation entre les éléments (b) relations entre les sites

IV.4.2.2. Classification hiérarchique ascendante des résultats de la colonne d'eau

Le dendrogramme représentatif de la Classification Hiérarchique Ascendante (Fig 32) est composé de deux branches. La première regroupe uniquement les échantillons du cours d'eau Bengo'o. La deuxième est constituée de trois sous-groupes. Le premier de ces sous-groupes englobe les échantillons La1, La2, NF2 et NF3. Le second regroupe les échantillons La4, La5, La6, La7 et La8. Le dernier comprend NF5, NF6, La9, La10, NF1, NF4, La3 et NF7.

IV.5. Identification des activités potentiellement sources de polluants

Les activités potentiellement sources de polluants identifiées dans le bassin versant du LME sont : l'agriculture, l'élevage, le déversement direct et indirecte des déchets ménagers, les garages, les ateliers de soudure, les garages, la circulation automobile, les activités du marché, la pêche, le tourisme, lavage des voitures (Fig. 33).

IV.5.1 Activités ménagères et rejet direct des déchets

Les activités ménagères et le rejet direct se traduisent par la production des déchets de natures diverses. Ces derniers se retrouvent dans les cours d'eaux, puis dans le LME. Il s'agit : des déchets plastiques, déchets liquides issus de la vaisselle, de la lessive, déchets organiques (fèces, reste de nourritures), des débris de bouteilles et autres débris électroménagers. Certains de ces déchets sont biodégradables. D'autres par contre restent permanents dans l'environnement et occupent de l'espace dans l'eau. On observe ainsi des déchets divers qui flottent sur l'eau.

IV.5.2. Lavage de voitures

Le lavage des voitures se fait avec des lessives le plus souvent emballé dans les sacs plastiques. L'apport de ces emballages entraîne leur mise en suspension dans l'eau. Aussi, ces lessives contiennent des éléments chimiques.

IV.5.3. Agriculture

Les fruits et les légumes sont des denrées produites dans le bassin versant. Leur culture s'accompagne généralement de l'usage des intrants agricoles, reconnus pour leurs teneurs élevées en phosphates et nitrates.

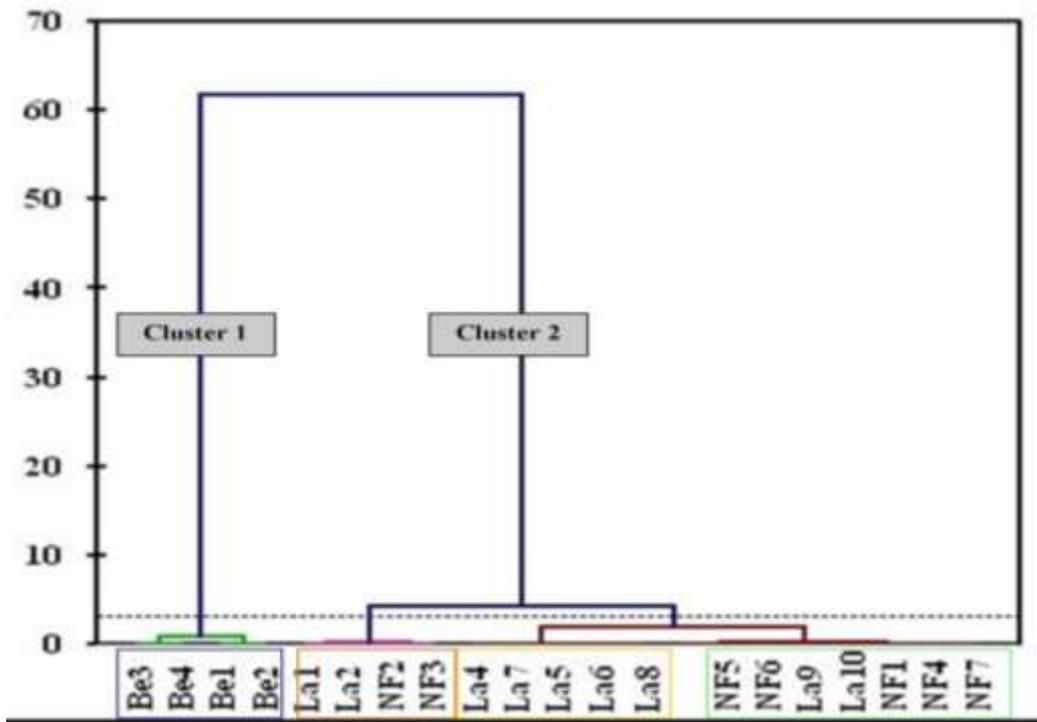


Figure 32. Classification Hiérarchique Ascendante illustrant les relations entre les différents sites

IV.5.4. Activités au marché

Les activités du marché s'accompagnent de la production des déchets similaires à ceux issus des activités ménagères et des rejets directs. Certains de ces déchets sont biodégradables. D'autres par contre restent permanent dans l'environnement et occupent de l'espace dans l'eau.

IV.5.5. Garage

Les activités des garages s'accompagnent des déversements des huiles (hydrocarbures dans les eaux du lac et ses affluents).

IV.6. Evolution morphométrique du LME de 1962 à 2013

Le LME a une forme irrégulière en arc de cercle (Fig. 34). Ses caractéristiques morphologiques trouvées dans le cadre de cette étude, grâce au logiciel GlobalMapper, sont présentées dans le tableau 28. Ce lac a une circonférence de 1,96 km. Sa surface et sa profondeur maximale sont respectivement de 12,86 ha et 5,1 m (Tab 24).

L'évolution morphométrique du LME montre que son taux d'envahissement était d'environ 300 m²/An pour la période allant de sa création en 1962 à 2007. Puis, il était de 400 m²/An entre 2007 et 2013 (Fig. 34).

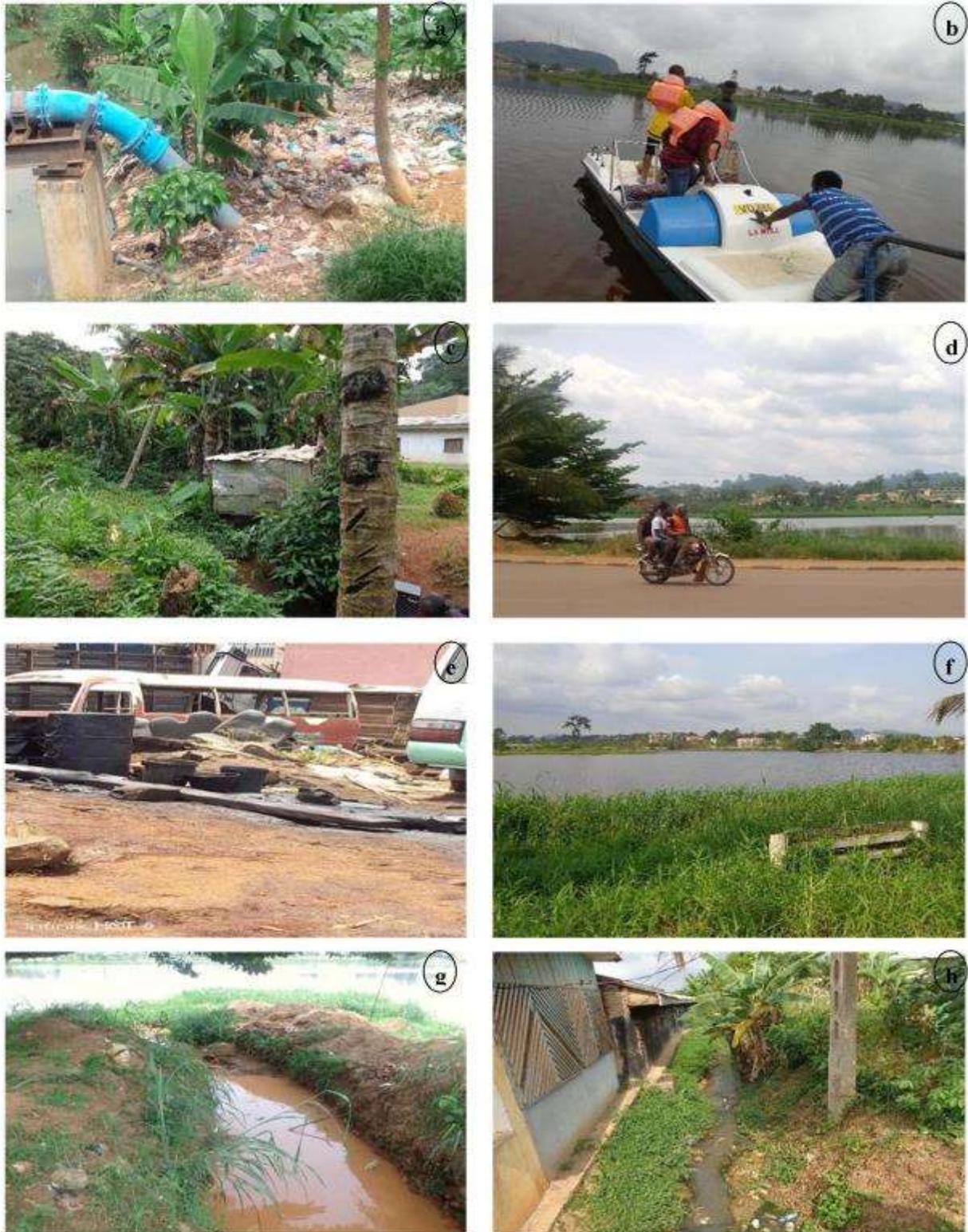


Figure 33. Activités potentiellement sources de pollution : (a) entreposage d’ordures près du cours d’eau Mfoumou ; (b) tourisme ; (c) porcherie ; (d) circulation automobile ; (e) garage ; (f) vue actuelle du LME ; (g) canalisation débouchant dans le lac ; (h) cours d’eau Mfoumou au quartier New-bell II

Tableau 24. Caractéristiques morphométriques du LME en 2021

Paramètres	Valeurs
Périmètre (km)	1,96
Surface (ha)	12,86
Profondeur minimale (m)	0,2
Profondeur maximale (m)	5,1



Figure 34. Evolution morphométrique du LME (a) (27 mai 2007 à 12h37) (b) (23 octobre 2013 à 17h20)

Conclusion

Le présent chapitre avait pour objectif de présenter les résultats obtenus dans le cadre de cette étude. Les sédiments étudiés se caractérisent par des textures qui varient en fonction des sites de prélèvement. Ceux-ci sont surtout sableux dans les cours d'eau Mfoumou et Bengo'o. Dans le LME en revanche, les sédiments sont de textures argileuses, limoneuses, limono-argileuse et limono-sableuses. Le cortège minéralogique est constitué en majorité du quartz et des minéraux d'altération. L'analyse géochimique a montré des sédiments riches en quartz, oxydes d'alumine et de fer, en HSFÉ et en terres rares légères. Certains éléments traces métalliques ont des concentrations supérieures à celles de l'UCC. Les indices de pollution et de risque écologiques sont variables. Plusieurs activités sont observées dans le bassin versant du LME.

CHAPITRE V : INTERPRETATION ET DISCUSSION

Introduction

Le présent chapitre porte sur l'interprétation et la discussion des résultats obtenus dans le cadre de cette étude. C'est le lieu où les questions posées à l'introduction générale trouveront des réponses.

V.1. Roches sources des sédiments

Les éléments majeurs, les éléments traces et les terres rares, tout comme la minéralogie sont des outils importants pour étudier la nature des roches sources (Taylor et McLennan, 1985; Wronkiewicz et Condie, 1990; Cox *et al.*, 1995 ; McLennan *et al.*, 2006). En effet, les éléments majeurs sont les plus abondants dans les roches. Ils constituent de bons indicateurs de leurs compositions. Selon Hayashi *et al.* (1997) et Babeesh *et al.* (2018), l'aluminium (Al) présente des teneurs importantes dans les roches felsiques, tandis que le titane (Ti) est présent en grande proportion dans les roches mafiques. Ainsi, le rapport Al_2O_3/TiO_2 sera d'autant plus important que la roche sera acide (Hayashi *et al.*, 1997). Il est compris entre 2 et 8 dans les roches mafiques, 8 et 21 dans les roches intermédiaires et supérieur à 21 dans les roches felsiques. Ce rapport est en moyenne de 45,05 dans le LME, 47,71 dans le cours d'eau Mfoumou et 44,02 dans la rivière Bengo'o. Ces résultats illustrent que la roche source de ces sédiments serait felsique. Ceci est aussi confirmé par le diagramme binaire Al_2O_3 vs TiO_2 (Amajor, 1987), où tous les échantillons plotés appartiennent aux domaines du granite et celui de la rhyolite/granite (Fig 34).

Les éléments traces et terres rares sont également de bons indicateurs de provenance. En effet, ils ont un faible temps de résidence dans la colonne d'eau. Par conséquent, ils sont rapidement transférés dans la colonne sédimentaire. Ces derniers conservent ainsi la signature de leur roche source (Wronkiewicz et Condie, 1990; Cox *et al.*, 1995). D'après Garvers *et al.* (1996), le chrome (Cr) et le nickel (Ni) sont plus abondants dans les roches mafiques et ultramafiques que dans les roches felsiques. Ainsi, les teneurs en $Cr > 150$ ppm et $Ni > 100$ ppm illustrent une source ultramafique. Celles inférieures à ces valeurs caractérisent les roches felsiques. Dans la présente étude, les teneurs moyennes en ces éléments sont respectivement de 128 et 73 ppm dans le LME, 118 et 63 ppm dans Mfoumou, et, 127 et 63 ppm dans Bengo'o, témoignant ainsi de l'absence d'une source ultramafique. Dans le diagramme Ni vs Cr (Fig. 35a) tous les échantillons plotés tombent dans le domaine felsique. De même, le diagramme binaire Cr/V vs Y/Ni (Hiscott, 1984 ; McLennan *et al.*, 2006) montre que tous les échantillons appartiennent au domaine felsique (Fig. 35b), confirmant ainsi l'absence d'une source ultramafique.

Les éléments compatibles (La, Th) et incompatibles (Cr, Co, Sc) sont moins mobiles pendant les processus d'altération et de transport (Das *et al.*, 2003 ; Babeesh *et al.*, 2018). Leurs rapports mutuels, notamment La/Sc, Th/Sc, Cr/Th et Th/Co constituent de bons indicateurs de la nature de la roche source (Taylor et McLennan, 1985 ; Cullers, 1994, 2000 ; Cullers et Podkovyrov, 2000). Dans la présente étude, ces rapports ont été comparés à ceux des sédiments dérivant des roches felsiques, mafiques et de l'UCC. Les rapports La/Sc sont compris entre 0,43 et 0,86 dans les roches mafique, 2,5 et 16,3 dans les roches felsiques (Cullers et Podkovyrov, 2000). Ces rapports sont en moyenne de 5,67, 9,66 et 9,82, respectivement pour le LME, Mfoumou et Bengo'o. Le rapport Th/Cr est compris entre 0,018 et 0,046 dans les roches mafiques. Il est compris entre 0,13 et 2,7 dans les roches felsiques (Taylor et McLennan, 1985 ; Cullers, 1994). Celui-ci est en moyenne de 0,29 dans le LME, 0,41 dans Mfoumou et 0,42 dans Bengo'o. Le rapport Th/Sc est compris entre 0,05 et 0,22 dans les roches mafique. Il appartient à l'intervalle [0,84 – 20,5] dans les roches felsiques. Celui-ci est en moyenne de 0,38 (LME), 0,51 (Mfoumou) et 0,48 (Bengo'o). Tous ces résultats confirment l'hypothèse d'une source felsique.

Les terres rares (REE) sont presque entièrement transportés par la fraction détritique des sédiments (Taylor et McLennan, 1985 ; Wronkiewicz et Condie, 1990). Ces éléments sont ainsi utilisés pour différencier les sources felsiques, des sources mafiques. Normalisés à la chondrite, les roches mafiques se caractérisent par un faible fractionnement et par l'absence d'une anomalie en Eu. Les roches felsiques en revanche sont très fractionnées et présentent une anomalie négative en Eu (Taylor et McLennan, 1985). Dans la présente étude, les spectres des REE des trois sites de prélèvement présentent une allure similaire. Cette similarité suggère d'une part que, ces sédiments seraient issus de la même source, d'autre part, que ces éléments n'ont pas été affectés par le processus fluvial de triage et/ou d'altération. De même, l'homogénéisation de leurs phases porteuses se serait produite avant leurs dépôt dans le LME (Taylor et McLennan *et al.*, 1985 ; Singh, 2009). Aussi, tous les échantillons sont bien fractionnés ($(La/Yb)_N > 1$). Ils sont aussi marqués par une anomalie négative en Eu ($Eu/Eu^* < 1$) et par un enrichissement des LREE par rapport aux HREE. Ceci suggère une roche mère felsique. D'après Singh *et al.* (2009), les anomalies négatives par rapport au PAAS dénotent une source plus silicique, probablement un granitoïde.

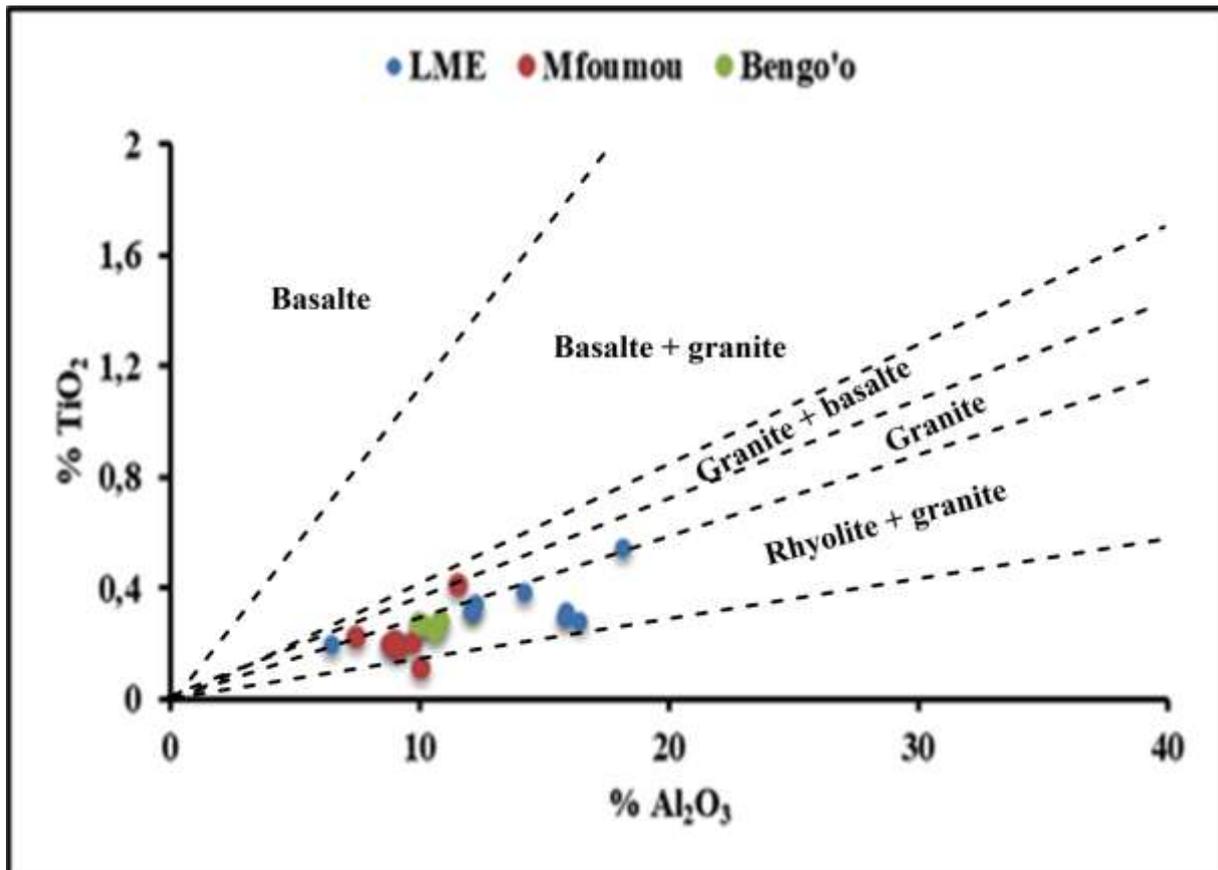


Figure 34. Diagramme binaire Al_2O_3 vs TiO_2 illustrant une origine granitique et rhyolitique/granitique des sédiments du LME, Mfoumou et Bengo'o (d'après Amajor, 1987)

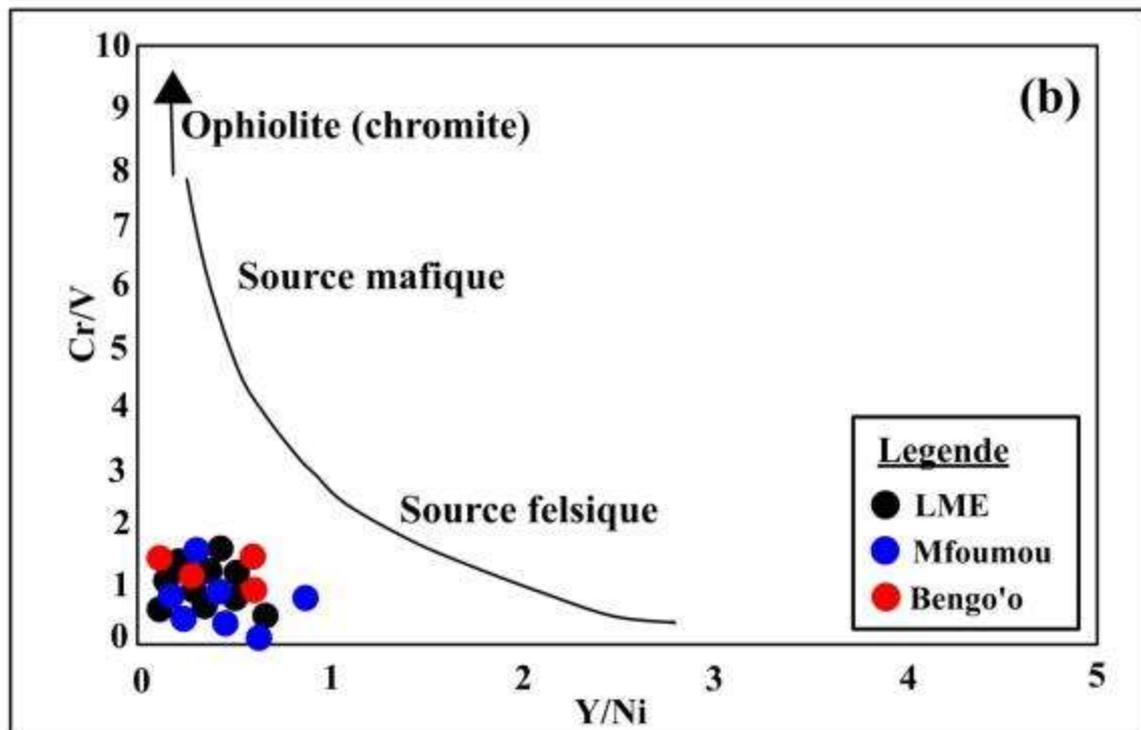
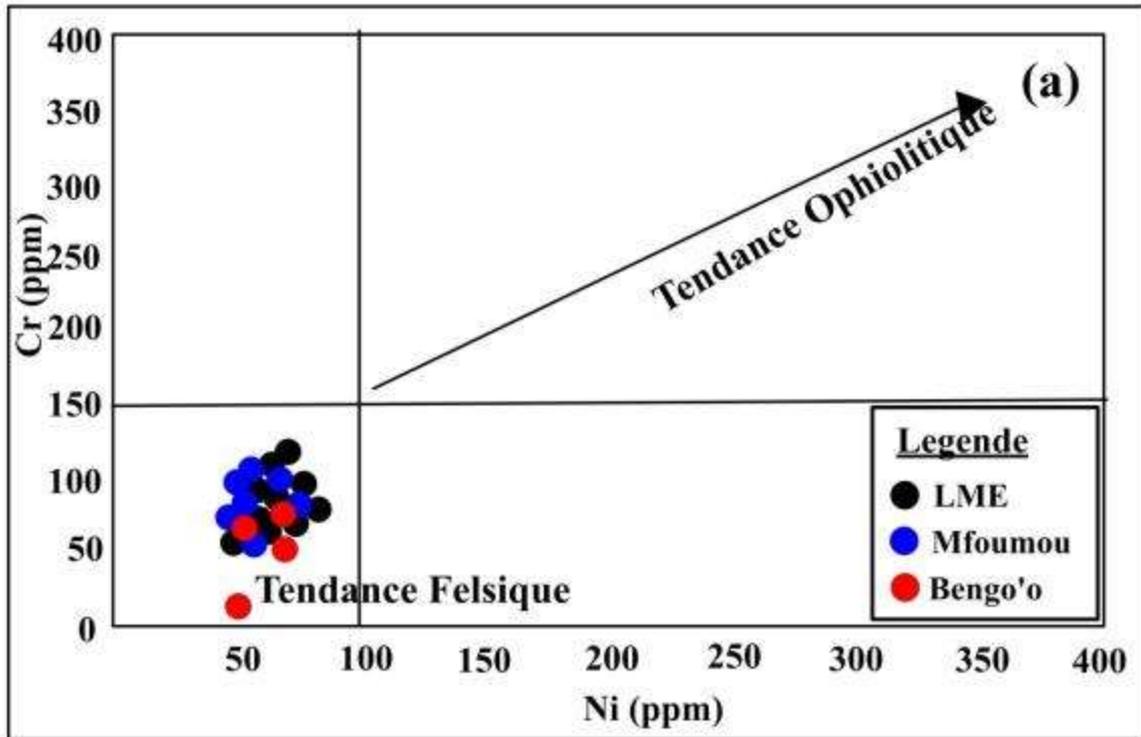


Figure 35. Diagramme de provenance à partir des éléments traces : (a) diagramme de discrimination entre Ni et Cr des sédiments du LME, Mfoumou et Bengo'o (Garvers et al., 1996) ; (b) diagramme de discrimination entre Y/Ni et Cr/V des sédiments du LME, Mfoumou et Bengo'o (McLennan et al., 2010)

Selon McLennan et *al.* (2006), le quartz tout comme les feldspaths sont des minéraux détritiques, typique des roches acides. La présence de ces minéraux à des proportions élevées, notamment le quartz, confirme que les sédiments étudiés proviendraient de roches acides. De même, à cause de leur résistance face aux processus d'altération et de transport, les minéraux lourds préservent les informations de la roche mère. Plus que les éléments chimiques, ils permettent de déterminer le type pétrographique source des sédiments (Morton, 1985; Datta et Subramanian, 1997; Cardona et *al.*, 2004; Tchatchouang et *al.*, 2016 ; Adamu et *al.*, 2020). L'andalousite, la biotite, le diopside, la sillimanite, le grenat, le disthène, la hornblende, la muscovite, les minéraux opaques, la staurotide et le zircon constituent l'assemblage des minéraux lourds. Selon Ghosal et *al.* (2017), ce cortège reflète deux sources de sédiments : une source magmatique et une autre métamorphique. Pour ces auteurs, la source ignée est caractérisée par la suite hornblende-zircon-biotite. Quant à la source métamorphique, elle est décrite par la séquence grenat-staurotide-sillimanite. Les autres minéraux sont ubiquistes. Selon Datta et Subramanian (1997), la couleur rose clair du zircon illustre son non recyclage, et donc son origine granitique. Pour Adamu et *al.* (2020), les minéraux opaques sont caractéristiques des argiles, oxydes et hydroxydes formés lors de l'altération des roches magmatiques. Pour Ghosal et *al.* (2017), la présence de grenat en forte proportion est indicatrice d'un protholithe de type granitoïde. Selon Adamu et *al.* (2020), la présence d'une suite de staurotide-sillimanite démontre l'existence d'un métamorphisme de moyen degré. Ces résultats illustrent que la roche source de sédiments serait un granitoïde/et ou un gneiss. En effet, ces roches font partie des types pétrographiques dont la présence est signalée dans la zone par les travaux Shang et *al.* (2001, 2004), Toteu et *al.* (2008) et Tchameni et *al.* (2010).

V.2. Paléoclimat

L'altération des roches résulte du départ des alcalins tels que Na^+ , K^+ et Ca^{2+} et l'enrichissement préférentiel de Al_2O_3 (Nesbit et Young, 1984). Elle entraîne aussi le départ sélectif de certains éléments traces (Cox et *al.*, 1995). Dès lors, l'intensité et la durée du processus d'altération peuvent être évaluées en utilisant les rapports entre ces différents éléments. Dans la présente étude, les valeurs de CIA appartiennent aux intervalles (82,44 – 90,93) ; (77,79 – 87,01) et (80 – 88,57), respectivement dans le LME, Mfoumou et Bengo'o. Celles de PIA oscillent entre 96,04 et 96,66 dans le LME, entre 93,29 et 97,27 dans Mfoumou, et entre 95,40 et 97,13 dans Bengo'o. Ces résultats montrent que les roches sources des sédiments étudiés auraient subi une altération chimique intense. Le diagramme ternaire A – CN – K (Nesbit et Young, 1984) qui montre la tendance de l'altération des

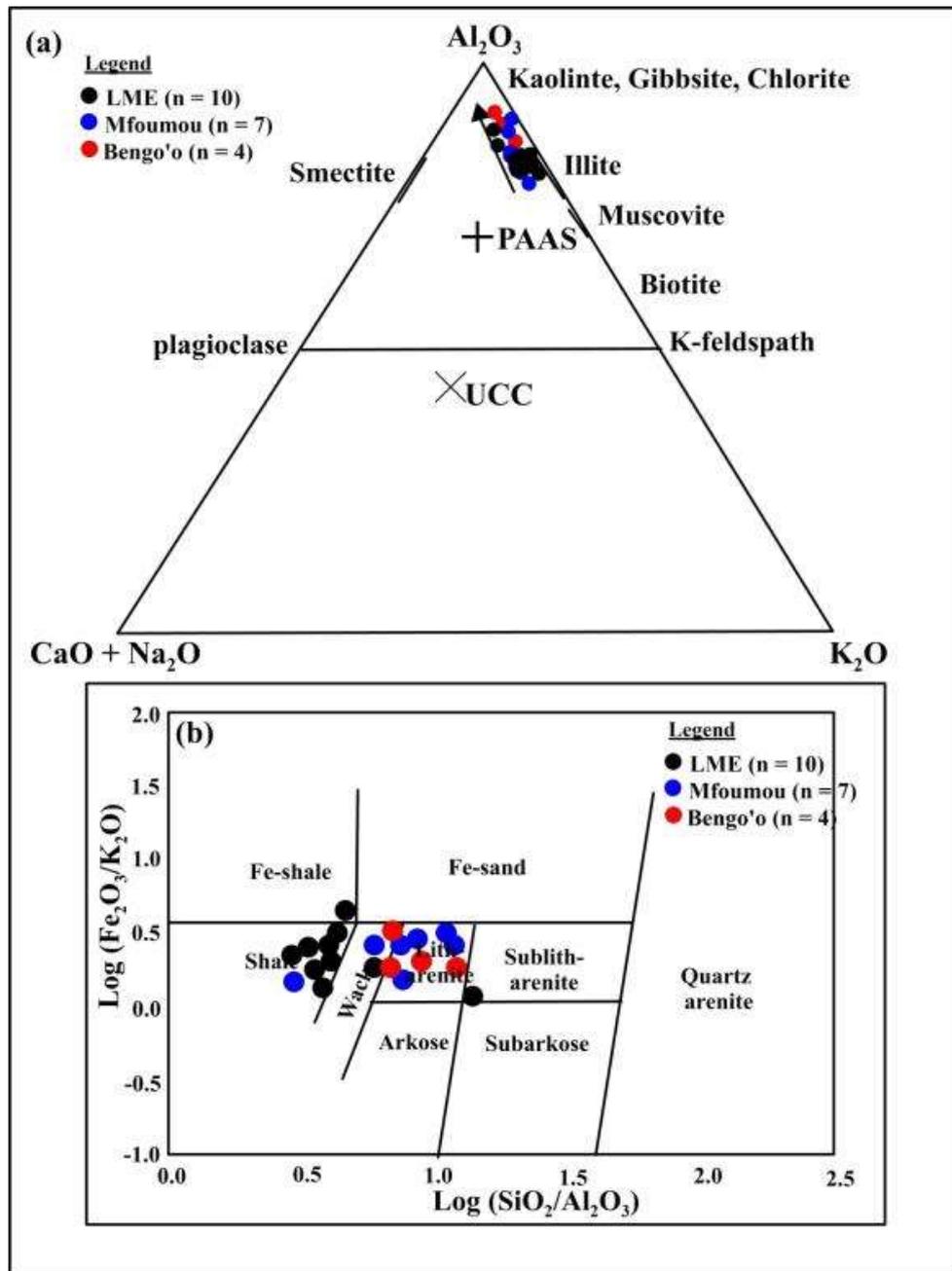


Figure 36. Altération des sédiments (a) diagramme A-CN-K illustrant l'altération intense des sédiments étudiés d'après (Nesbit, 1982) (b) digramme de Herron (1988) montrant les sédiments qui plotent dans les domaines des wackes, litharenite et des shales

sédiments, semble corroborer cette hypothèse. Dans ce diagramme, les sédiments du LME et de ses affluents tombent au-dessus de l'UCC et du PAAS (Fig. 36a). Le diagramme de Herron (1988) permet de classer les sédiments. Plotés dans ce dernier, les sédiments du LME plotent dans les domaines des shales et des wackes. Ceux des cours d'eau Mfoumou et Bengo'o sont dans le domaine des litharénites (Fig 36b), confirmant ainsi l'intense altération de leurs roches sources. Le processus d'altération s'accompagne aussi du départ de Rb^+ et Sr^{2+} . Cependant, compte tenu de son rayon plus important, Rb^+ est mieux retenu dans les sites échangeables des minéraux argileux, tandis que Sr^{2+} est facilement évacué du fait de son rayon plus faible (McLennan, 1989). Le rapport Rb/Sr sera donc d'autant plus élevé que l'altération sera intense. Les valeurs supérieures à 1 de ce rapport illustrent une altération intense. Tandis que les valeurs inférieures à 1 caractérisent une altération moins poussée (Taylor et McLennan, 1985 ; Sahoo *et al.*, 2016). Dans la présente étude, les valeurs de ce rapport sont en moyenne de 2,13 dans le LME, 1,96 dans Mfoumou et 2,08 dans Bengo'o, confirmant ainsi l'hypothèse d'une altération chimique intense des roches sources de ces sédiments. Th et U sont deux éléments qui se comportent différemment pendant les processus d'altération. Au cours de ce processus, Th est immobile, tandis que U est plus mobile (Taylor et McLennan, 1985). Ainsi, du fait du départ des ions U^{6+} , le rapport Th/U va croître avec l'intensité de l'altération. D'après McLennan *et al.* (2006), ce rapport est compris entre 3,5 et 4 pour la croûte terrestre. Il est supérieur à 4 dans les roches sédimentaires. Les résultats obtenus dans le cadre de ces travaux montrent des valeurs supérieures à ces standards. Ils sont en moyenne de 8,65 ; 9,58 et 8,71, respectivement dans le LME, Mfoumou et Bengo'o. Ces résultats confirment l'hypothèse d'une altération chimique intense des roches sources. L'altération chimique s'accompagne de la transformation progressive des minéraux primaires tels que les feldspaths, les amphiboles, les micas en minéraux secondaires, comme les argiles, les oxydes et les hydroxydes (Beauvais *et al.*, 2000). La prépondérance des minéraux argileux, notamment la kaolinite, les smectites, et l'halloysite, sur les minéraux primaires semblent confirmer l'hypothèse d'une altération chimique intense des roches sources (Das *et al.*, 2006). Les valeurs de CIA et de PIA, tout comme celles de Rb, Sr, Th et U et les proportions des minéraux argileux démontrent que les roches sources des sédiments étudiés auraient subi une altération chimique intense. Ces conditions caractérisent les zones marquées par un climat humide de type climat équatorial, où les précipitations sont abondantes (Das *et al.*, 2003).

Ces conditions d'altération seraient amplifiées par le contexte de marge passive de la zone, qui est plus favorable à l'altération des roches, que celui de marge active (Babeesh *et al.*, 2018).

La maturité des sédiments est le plus souvent évaluée par l'indice de variabilité compositionnelle (ICV), les valeurs du CIA et les rapports $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ et $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ (Cox et *al.*, 1995 ; Das et *al.*, 2007). D'après Cox et *al.* (1995), ICV mesure l'abondance relative de Al_2O_3 par rapport aux autres éléments majeurs de la roche. Pour ces auteurs, les valeurs de ICV > 1 illustrent l'abondance des feldspaths, des amphiboles et des pyroxènes, tandis que ICV < 1 illustrent l'abondance des argiles. De même, les valeurs de ICV $< 0,85$ caractérisent les sédiments matures, alors que ICV $> 0,85$ caractérisent les sédiments immatures. Dans la présente étude, les valeurs de ICV sont en moyenne de 0,61 ; 0,65 et 0,61, respectivement pour LME, Mfoumou et Bengo'o. Ces résultats illustrent d'une part l'abondance des minéraux argileux par rapport aux feldspaths, amphiboles et pyroxènes. D'autre part, que les sédiments étudiés sont matures. De même, les valeurs du CIA dans les trois milieux sont toutes supérieures à celles du PAAS, qui est de 69. Ces résultats suggèrent d'après Das et *al.* (2003) que ces sédiments sont matures. Le diagramme binaire CIA vs ICV (Cox et *al.*, 1995) permet non seulement d'évaluer le degré d'altération des roches sources des sédiments, mais aussi la maturité de ces derniers. La position des sédiments étudiés (Fig. 37) confirme l'altération intense des roches sources et la maturité des sédiments. D'après Cox et *al.* (1995), les valeurs des rapports $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 6$ et $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O} > 5$ illustrent des sédiments matures. Dans la présente étude, le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ appartient aux intervalles [13,67 – 33,33], [5,96 – 10,96] et [6,83 – 7,40], respectivement pour LME, Mfoumou et Bengo'o. Les intervalles respectifs du rapport $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ dans LME, Mfoumou et Bengo'o sont [34,39 – 67,30], [25,97 – 69,86] et [31 – 56,21]. Ces résultats prouvent que les sédiments étudiés seraient matures. Cette maturité des sédiments confirme les conditions d'altération en climat humide.

V.3. Paléoenvironnement

Selon plusieurs auteurs (Folk et Ward, 1957 ; Adamu et *al.*, 2020 ; Mohammad et *al.*, 2020), les courbes et les indices granulométriques sont de bons indicateurs des caractéristiques hydrodynamiques du milieu de dépôt. Dans la présente étude, trois principaux types de courbes granulométriques ont été obtenues. Il s'agit des courbes sigmoïde, parabolique et hyperbolique. La présence de ces caractéristiques multiples montre que l'énergie de dépôt ne serait pas la même dans toute l'étendue de la masse d'eau. Cependant, la présence de caractéristiques identiques le long des carottes suggère selon Vilaplana et Bordonau (1989) que les processus régissant le dépôt des sédiments seraient restés les mêmes sur la période correspondant aux longueurs des carottes. Selon Mouldi et Chekiou (2007), les courbes sigmoïdes reflètent des sédiments homogènes, déposés dans un environnement faiblement perturbé. Les courbes

paraboliques indiquent un dépôt causé par une diminution de l'énergie de l'agent de transport. Les courbes hyperboliques illustrent un dépôt par décantation dans un milieu calme. L'ensemble de ces courbes caractérisent deux types d'énergie de dépôt : une énergie élevée et une énergie faible. La première est caractérisée par des courbes paraboliques. La seconde, en revanche, comprend des courbes sigmoïdales et hyperboliques. Selon Ghosal *et al.* (2017), la profondeur est le principal paramètre qui affecte l'hydrodynamisme d'un milieu aquatique. Pour cet auteur, plus la profondeur est importante, plus l'hydrodynamisme est faible. Ainsi, les caractéristiques d'un hydrodynamisme élevé (particules grossières) observées dans les parties nord-est et sud du lac seraient liées à la faible profondeur de ces points d'échantillonnages (< 2 m). De même, la profondeur importante (> 2m) expliquerait le faible hydrodynamisme observé dans la partie centrale du lac. Cependant, la partie ouest du lac, peu profonde et donc a priori un milieu à hydrodynamisme élevé, se caractérise par des courbes reflétant une faible énergie. Ceci serait lié à la présence d'une ceinture de végétation dans cette partie du lac. En effet, les travaux de Kouakou *et al.* (2007) ont montré que la présence de la végétation réduit la vitesse des courants, favorisant ainsi le dépôt des particules fines.

Tout comme les courbes granulométriques, l'écart-type est un indicateur de l'énergétique du milieu de dépôt (Roy et Biwas, 1975). Pour ce paramètre, tous les sédiments de surface seraient mal triés ($2 < \sigma < 4$), à l'exception des échantillons La09 et La10. L'échantillon La09 serait moyennement trié ($0,71 < \sigma < 1$), tandis que l'échantillon La10 serait assez bien trié ($0,5 < \sigma < 0,71$). Pour plusieurs auteurs (Folk et Ward, 1957 ; Mohammad *et al.*, 2020), le mauvais tri des sédiments est le reflet des dépôts effectués par des courants d'intensités irrégulières. Les sédiments bien triés en revanche, résultent du dépôt par des courants réguliers. La prédominance du premier type de tri serait donc associée aux ondulations provoquées par les vagues du lac. En effet, les ondulations ne sont pas propices au tri des particules, car favorisent régulièrement leurs mises en suspension (Adamu *et al.*, 2020). Le bon tri observé au niveau des stations La9 et La10 quant à lui serait lié au fait que ces derniers se situent vers l'exutoire, milieu où l'action des vagues serait faible. Dans l'ensemble des carottes, les sédiments se caractérisent par un mauvais tri. Cette dualité de types de tris observée (surface et carottes) illustrent que leur dépôt se ferait par deux types de courants : un courant multidirectionnel (La1, La2, La3, La4, La5, La6, La7, La8 et les carottes), et un courant unidirectionnel (La9 et La10).

La taille moyenne des particules reflète la structure granulaire des échantillons dans son ensemble, ce qui peut donner un aperçu de la granulométrie dominante (Mohammed *et al.*, 2020). Le grain moyen varie de $-0,6$ à $5,05\phi$ dans les sédiments de surface. Selon Folk et Ward

(1957), ils vont des sables grossiers aux argiles. Les sables grossiers, moyens, fins, les limons et les argiles représentent respectivement 20, 30, 10 et 40%. Les sables grossiers ($-1\phi < Mz < 1\phi$) bordent les parties Sud et Sud-est du lac. Les sables moyens et fins ($1\phi < Mz < 4\phi$) recouvrent les parties Nord-est et Nord du lac. Les parties centrale et occidentale de celac sont occupées par des particules fines ($Mz < 4\phi$). Dans la carotte Ca100, les sables grossiers sont présents à la base ($0\phi < Mz < 1\phi$) (Ca104 et Ca105). La partie supérieure est constituée de sables moyens ($1\phi < Mz < 2\phi$). La carotte Ca200 est constituée exclusivement de limons et d'argiles ($Mz < 4\phi$). La carotte Ca300 présente du sable fin dans la partie inférieure ($Mz = 3,63\phi$) et des particules fines dans la partie supérieure ($4,02$ à $5,24\phi$). La prédominance de la fraction fine sur la fraction sableuse, tant dans les sédiments de surface que dans les carottes du LME, serait liée à la décomposition de la matière organique. En effet, le LME est artificiel, et a été créé dans un marécage envahi par une végétation assez dense. Il faut noter que ce lac n'a pas été déboisé avant sa mise en eau. La dégradation de cette végétation, dont la preuve visible est les bois morts recouvrant son fond, jouerait un rôle significatif dans cette abondance. De même, la bathymétrie et l'hydrodynamisme semblent jouer un rôle déterminant dans la répartition spatiale de ces classes granulométriques. Ces résultats sont en accord avec ceux de Garzanti et *al.* (2008) et de Vinha et *al.* (2016). En effet, ces auteurs ont montré que la variation spatiale du grain moyen est associée à la morphologie, qui conditionne aussi l'hydrodynamisme du milieu. Pour ces auteurs, les sédiments grossiers se déposent de préférence dans les zones peu profondes à fort hydrodynamisme. En revanche, les sédiments fins se déposent dans les zones plus profondes où la vitesse de l'eau est plus faible. Aussi, plusieurs auteurs (Vilaplana et Bordonau, 1989 ; Choudhary et *al.* 2016) ont montré que la variation de la taille moyenne des grains le long d'une carotte est liée à un changement des conditions environnementales. Le passage d'un milieu marécageux à un milieu lacustre expliquerait ainsi la variation de la taille observée entre les parties inférieure et supérieure, des carottes de Ca100 et Ca300. Ces légers changements environnementaux sont confirmés par les valeurs du skewness. Ce paramètre illustre que les sédiments de surface, notamment les échantillons La04 et La08 présentent des courbes presque symétriques ($-0,1\phi < ski < 0,1\phi$). Les autres échantillons présentent des courbes asymétriques vers les éléments fins ($0,1\phi < ski < 1\phi$). L'échantillon Ca101 de la carotte Ca100 a une courbe très asymétrique vers les éléments très grossiers ($-1\phi < ski < 0,3\phi$), alors que les autres échantillons de ladite ont des courbes asymétriques vers les éléments fins. Ca200 présente des courbes presque symétriques à la base (Ca205, Ca206, Ca207, Ca208), puis une asymétrie vers les éléments fins (Ca204 et Ca202) et une asymétrie vers les éléments grossiers (Ca201) vers le sommet ($-0,3\phi < ski < -0,1\phi$). Les sédiments de la carotte Ca300

présentent des courbes asymétriques vers les éléments fins au-dessus (Ca301, Ca302 et Ca303), et presque symétriques en dessous. Ces légères variations d'asymétries seraient liées selon aux changements d'énergies (Chappell, 1967 ; Friedman, 1967).

Plusieurs éléments sont utilisés pour comprendre les conditions paléo-environnementales du milieu de dépôt. D'après Manning et Jones (1994), le rapport U/Th, permet de connaître les conditions paléo-redox de l'environnement de dépôt. Les valeurs de ce rapport supérieures à 1,25 illustrent un milieu anoxique, tandis que pour $U/Th < 0,75$ suggèrent un milieu oxique. De même, $V/Cr > 4,5$ illustre des conditions anoxiques et, $V/Cr < 2$ montre des conditions oxiques. Dans la présente étude, les valeurs de U/Th oscillent entre 0,08 et 0,27. Celles de V/Cr vont de 1,07 à 1,27. Ces résultats illustrent que ces sédiments se seraient déposés dans un milieu oxique. Aussi, les teneurs en OD de la colonne d'eau sont supérieures à 0, illustrant que les dépôts des sédiments se font toujours dans des conditions oxiques.

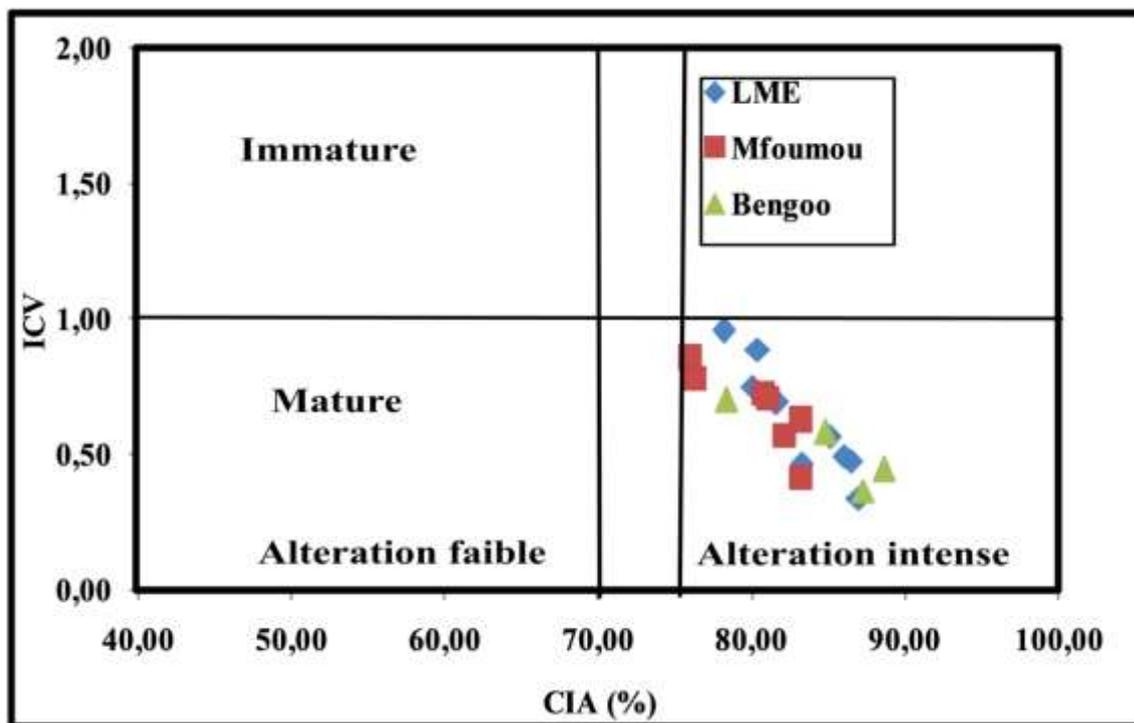


Figure 37. Position des sédiments du LME dans le diagramme binaire de Cox et al. (1995) montrant des sédiments matures ayant subis une altération chimique intense

V.4. Processus diagenétiques

Les processus de dépôt associés à la diagenèse précoce sont liés à l'activité biologique qui se développe dans la colonne d'eau, et aux propriétés physicochimiques du milieu. Elles se manifestent par la variation des concentrations des éléments liés à la productivité du lac, des alcalins et des éléments sensibles aux conditions redox, ainsi que les éléments associés à leurs cycles pouvant aboutir à la formation des nouveaux minéraux (Ogier, 1999 ; Sahoo *et al.*, 2017). L'enrichissement ou l'appauvrissement en un élément a été évalué grâce au coefficient d'accumulation (Q_i). D'après Ogier (1999) $Q_i < 1$ illustre un appauvrissement, $Q_i = 1$ pas de variation, et $Q_i > 1$ un enrichissement. La valeur du Q_i du phosphore est supérieure à 1. Ce résultat montre que cet élément connaît un enrichissement dans le milieu. Cet enrichissement serait lié soit à un apport important de cet élément dans le LME, soit à la productivité du lac. En effet, plusieurs auteurs (Lijklema, 1993 ; Dymond *et al.*, 1992 ; Tribovillard *et al.*, 2006) ont montré que le phosphore présent dans les milieux aquatiques est à plus de 90% issu des sources détritiques. Dans la présente étude, le phosphore a des corrélations significatives avec les autres éléments caractéristiques de l'érosion du continent, que sont les alcalins et l'aluminium. Ce résultat suggère que P serait issu des sources détritiques. Cependant, sa concentration dans le LME est plus importante que dans ses affluents (Mfoumou et Bengo'o), principales sources d'apports détritiques. Ce qui illustre que l'enrichissement observé ne serait uniquement pas lié aux apports détritiques. Le phosphore, le baryum et dans une moindre mesure le cuivre, le nickel, le zinc et le cadmium jouent le rôle de nutriments, et peuvent être utilisés par les microorganismes vivants avant d'être sédimentés de façon biogénique (Dymond *et al.*, 1992 ; Algeo et Maynard, 2004 ; Boding *et al.*, 2006). Pour ces auteurs, ces éléments sont caractéristiques de la production primaire d'un milieu. Les corrélations significatives entre le phosphore et ces éléments illustrées par le tableau 25 ($R_{P-Ba} = 0,94$; $R_{P-Zn} = 0,90$; $R_{P-Ni} = 0,95$; $R_{P-Cu} = 0,88$; $R_{P-Cd} = 0,87$) semblent confirmer sa source biogénique. Le LME serait le siège d'une production primaire importante. Laquelle expliquerait le développement accéléré de la végétation qui y est observé depuis des années.

La silice a une valeur de Q_i égale à 0,91, ceci prouve que, malgré la présence de la silice biogène associée à la présence des éléments cosmiques, il subit un appauvrissement dans ce milieu. Cet appauvrissement serait lié à la prédominance de la fraction fine dans ce milieu. Il serait surtout associé au processus de remplacement (désilicification) de la silice par d'autres éléments comme le Fe_2O_3 et Al_2O_3 observé sur les lames de la figure 24, et dont les fortes corrélations négatives entre la silice et le reste des éléments (Tab 16) en sont une manifestation.

Aussi, la présence en proportions importantes des minéraux argileux (kaolinite, halloysite, ..) et des carbonates de fer, notamment la sidérite qui n'est que présente dans le lac, semble conforter cette hypothèse.

La valeur de Q_i de Ca est sensiblement égale à 1 (1,01). Ceci illustre que celui ne connaît ni appauvrissement, ni enrichissement dans le LME. De même il est présent en faible proportion dans les sédiments. Ces faibles concentrations seraient liées à la nature felsique des roches sources, mais aussi à un pH assez faible. En effet, d'après Philippe (1989), la précipitation du calcium est observée à partir d'une valeur du pH de l'eau $> 8,2$. Les valeurs de ce paramètre sont inférieures à ce seuil dans les trois milieux, ce qui expliquerait que sa concentration reste presque constante dans le LME et ses affluents.

Les éléments K et Mg montrent des valeurs de Q_i , respectivement égales à 1,12 et 1,4, supérieures à 1. Selon Campy et Meybeck (1995), K et Mg sont le plus souvent liés à la phase détritique des sédiments. La corrélation positive ($R_{Mg-K} = 0,84$) entre ces deux éléments montre un comportement similaire, d'où la faible variation de la composition minéralogique entre les sédiments du LME et ceux des rivières Mfoumou et Bengo'o. Aussi, K et Mg ont de bonnes corrélations positives avec le COT, soit respectivement $R_{Mg-COT} = 0,71$ et $R_{K-COT} = 0,66$. Ceci suggère que leur enrichissement dans le LME serait vraisemblablement lié à l'abondance de la matière organique dans le milieu. En effet, de nombreux auteurs (Michard et *al.*, 1998, 2001) ont montré que ces éléments pouvaient être associés à la matière organique lors de la salification des groupements fonctionnels.

D'après Certains auteurs (Campy et Meybeck, 1995 ; Michard et *al.*, 2001), le Fe et Mn sont les éléments les plus sensibles aux conditions redox. Ceux-ci affectent au cours de leurs cycles les concentrations d'autres éléments notamment le phosphore, le chrome et cobalt. Dans la présente étude, les valeurs de Q_i de Fe et Mn sont supérieures à 1, soit respectivement 1,7 et 1,12. Ces valeurs seraient associées au caractère réducteur de ses eaux ($Eh = -36,8$). Les travaux de Michard et *al.* (1998) ont en effet montré que le passage d'un milieu oxydant, comme le sont les rivières Mfoumou et Bengo'o à un milieu réducteur (LME) favorise la précipitation de Fe et Mn présents dans l'eau. Cet enrichissement serait aussi associé à l'abondance de la MO dans ces milieux. Ceci expliquerait leur bonne corrélation avec la COT, soit $R_{Fe-COT} = 0,79$ et $R_{Mn-COT} = 0,64$. Ces derniers jouent en effet un rôle important dans le processus de minéralisation de la MO. Selon plusieurs auteurs (Campy et Meybeck, 1995 ; Ogier, 1999 ; Michard et *al.*, 2001), les oxyhydroxydes de fer et de manganèse présents dans le milieu sont réduits pour oxyder la matière organique. Aussi, le taux d'accumulation plus important de Fe par rapport à Mn s'expliquerait par leur différence de comportement redox. En effet, les travaux de Davison

et De Vitre (1992) ont montré que dans un lac soumis aux conditions réductrices, les taux d'accumulation du fer sont plus importants que ceux du manganèse. Le fer n'étant que peu relargué du sédiment, contrairement au manganèse qui y est rapidement réduit dès son incorporation. L'abondance du fer serait ainsi à l'origine de la formation des oxydes de fer. Selon Beauvais (2000), ces minéraux proviennent de l'oxydation (hématite) et de l'hydratation du fer (goethite). Les très bonnes corrélations mises en évidence entre Fe et les métaux lourds suggèrent l'adsorption de ces derniers sur les particules de fer authigènes dans la colonne d'eau. Ce phénomène est souligné par Ogier (1999) dans le lac d'Aydat en France. La très bonne corrélation positive entre P et Fe dans le LME ($R_{Fe-P} = 0,97$) illustre leur association. Celle-ci serait liée, soit à l'absorption du phosphore dissout sur les particules d'hydroxydes de fer dans la colonne d'eau, puis leur dépôt dans le sédiments de fond, en dépit des conditions réductrices, comme dans le lac Bret (De Vitre et *al.*, 1988) et le lac Aydat (Ogier, 1999) ; soit P peut réagir avec Fe pour former des hydrates de ferrophosphate fortement insolubles du type vivianite. L'absence de la vivianite dans le cortège minéralogique, laisse supposer que la première hypothèse soit la plus plausible pour expliquer leur association.

Tableau 25. Matrice de corrélation de Pearson illustrant les relations entre les nutriments

	P ₂ O ₅	Ba	Ni	Zn	Pb	Cd	Cu
P ₂ O ₅	1,00						
Ba	0,94	1,00					
Ni	0,95	0,97	1,00				
Zn	0,87	0,91	0,90	1,00			
Pb	0,73	0,82	0,78	0,81	1,00		
Cd	0,87	0,95	0,87	0,84	0,87	1,00	
Cu	0,88	0,96	0,95	0,87	0,79	0,92	1,00

Gras : valeurs significative à $p < 0,05$

V. 5. Qualité de l'eau et des sédiments

V.5.1. Qualité de l'eau

D'après Sigg *et al.* (2001), la qualité d'une eau dépend outre des paramètres biologiques, des paramètres physiques et chimiques. Ainsi, dans le cadre de la présente étude, les paramètres physiques (pH, Eh, T, Turb, Cs et OD) et chimiques (NO_3^- , PO_4^{3-} , Cu, Cr, Pb et Zn) ont permis d'évaluer la qualité de l'eau.

D'après l'OMS (2011), le pH des eaux destinées à la consommation devrait varier entre 6,5 et 8,8. Dans la présente étude, les valeurs du pH des eaux des milieux étudiés respectent les normes OMS (2011), relatives aux eaux de consommation. Cependant, la variation spatiale de ce paramètre d'une part, et des valeurs élevées par rapport au contexte géologique (roches acide) d'autre part, laisserait transparaître l'existence des facteurs locaux susceptibles d'influencer ces valeurs. D'après Haddad *et al.* (2014), les valeurs du pH dépendent en plus de la nature des formations géologiques traversées, de la décomposition de la MO et des activités anthropiques. Ainsi, ces fortes concentrations pourraient être associées à la décomposition de la MO. En effet, selon Braun *et al.* (2005), les valeurs trouvées dans le cadre de cette étude seraient caractéristiques de la zone forestière. En effet dans ces zones, les débris organiques sont déposés dans les cours d'eau. Leur dégradation favorise la libération des groupements basiques OH^- dans le milieu. Néanmoins, le fait que ces valeurs soient beaucoup plus élevées dans le LME et le cours d'eau Mfoumou, milieux les plus soumis à la pression anthropiques, que dans le cours Bengo'o, illustrerait une influence anthropique. Les déchets domestiques, étant pour la plupart composés de constituants organiques, contribueraient aussi à l'amplification de la présence des groupements OH^- dans le milieu. Ces valeurs restent néanmoins dans le même ordre que ceux trouvés par Madjiki *et al.* (2013) dans le même lac et celles trouvées par Ajeegah *et al.* (2013) dans le lac d'Obili. Il n'existe pas de norme fixe en ce qui concerne le Eh. Toutefois, il constitue un bon indicateur de la qualité de l'eau (Rodier, 1996, 2009). Les valeurs moyennes du Eh sont de -36,80, 45,22 et 8,75 mV, respectivement pour le LME, Mfoumou et Bengo'o. Ainsi, les eaux du LME ont un caractère réducteur. Ceux des cours d'eau Mfoumou et Bengo'o présentent en revanche un caractère oxydant, exception faite de l'échantillon NF1. D'après Rodier (1996), les milieux stagnants comme les lacs et les étangs se caractérisent par des conditions réductrices. Les eaux courantes sont en revanche oxydantes. Ainsi, les valeurs du potentiel redox observées dans le LME seraient attribuées au caractère stagnant de ses eaux. Il en est de même pour les eaux des cours d'eau Mfoumou et Bengo'o. Les conditions réductrices observées au niveau de la station NF1 serait liées au fait

que ce dernier se localise à la sortie d'un étang, milieu à priori caractérisé par des conditions réductrices. Les températures observées dans le LME et ses affluents sont relativement élevées, mais restent dans les normes prescrites par l'OMS (2011) pour les eaux de consommation (25 - 28°C). La variabilité de la température résulte selon Villeneuve *et al.* (2006), de l'étroitesse entre la température de l'eau et celle du milieu ambiant, ainsi que d'éventuels rejets d'eaux résiduaires. Ainsi, les fortes températures observées dans la zone d'étude seraient liées aux conditions climatiques qui prévalaient lors du prélèvement des échantillons. En effet, les échantillons ont été collectés pendant la saison sèche, période pendant laquelle les températures sont élevées. Néanmoins, ces températures semblent plus importantes dans le lac et le cours d'eau Mfoumou, que dans le cours d'eau Bengo'o. Ceci suggère que les fortes températures observées dans ces sites ne seraient uniquement pas liées aux conditions ambiantes, mais aussi aux déchets résiduaires introduits par les populations dans ces milieux. Toutefois, ces valeurs restent dans le même ordre d'idée que celles obtenues par Madjiki *et al.* (2013) dans le LME. La norme OMS (2011) montre que la conductivité d'une eau propre à la consommation devrait être en deçà de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dans le cadre de la présente étude, la conductivité électrique varie de 85 à 118,90 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans le LME. Elle oscille entre 111,20 et 217,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans le cours d'eau Mfoumou. Dans le cours d'eau Bengo'o elle est comprise entre 47,30 et 87,30 $\mu\text{S}/\text{cm}$. D'après Detay (1993), ces eaux sont faiblement à très faiblement minéralisées. Ces résultats sont en accord avec ceux de Viers *et al.* (2000) et Braun *et al.* (2005), qui ont montré que les eaux du Sud- Cameroun circulant sur les roches plutono-magmatiques sont faiblement minéralisées. Aussi, d'après Rodier (2009), la valeur de la conductivité électrique d'une eau est fonction de l'âge des formations traversées et de l'abondance ou non de la matière organique dans les eaux. Ainsi, les faibles valeurs observées seraient liées soit à l'âge des formations géologiques traversées, soit à un apport important de la matière organique, ou encore à la combinaison de ces deux facteurs (Madjiki *et al.*, 2013). En effet, les formations observées dans le bassin versant du LME sont d'âge Archéen, donc très anciennes. Toutefois, comparés aux travaux de Madjiki *et al.* (2013), les résultats obtenus dans le cadre de cette étude sont encore largement plus faible. Ainsi, la faible conductibilité observée dans le LME et ses affluents ne serait pas uniquement liée à la vieillesse des formations géologiques traversées, mais à un autre facteur qui serait l'abondance de la matière organique associée aux rejets domestiques. L'oxygène dissout participe à la majorité des processus chimiques et biologiques en milieu aquatique. Les valeurs de ce paramètre trouvées dans cette étude sont plus faibles que celles trouvées par Madjiki *et al.* (2013) dans le LME, pendant la même saison. Ceci serait lié à l'augmentation des déchets qui sont introduits dans ces milieux. Ce qui favoriserait le

développement des végétaux dans le lac et qui aurait pour conséquence la réduction de la teneur en OD. En effet, les travaux de Likjlema *et al.* (1993) ont montré que le développement de la végétation entraîne une consommation importante de l'oxygène du fait de la photosynthèse, ce qui entraîne la réduction de sa concentration dans le milieu. Les valeurs de la turbidité obtenues dans la présente étude sont suffisamment élevées par rapport aux normes prescrites par OMS (2011) (< 1 UTN), pour les eaux de consommation. Cependant, elles sont plus importantes dans le LME et le cours d'eau Mfoumou, à cause de l'action anthropique. D'après Betencourt *et al.* (2005), les valeurs de la turbidité sont associées à la présence des particules minérales et organiques en suspension dans l'eau. Celles-ci sont issues de l'érosion, de la décomposition de la matière organique issue de la végétation, mais surtout des activités anthropiques. Ainsi, le fait que les valeurs de ce paramètre soient plus élevées dans le LME et Mfoumou, suppose que les activités anthropiques joueraient un rôle déterminant sur ces valeurs

Les valeurs normatives des concentrations en PO_4^{2-} et NO_3^- des eaux de consommations sont respectivement de 5 et 50 mg/L (OMS, 2011). Dans la présente étude, les teneurs en ces éléments restent acceptables pour les eaux de consommation (Fig. 38). Toutefois, il n'en demeure pas moins qu'elles sont suffisamment élevées par rapport à la classification des niveaux trophiques des milieux aquatiques définis par Pinel-Alloul *et al.* (1998). D'après cette classification, le LME serait au stade hypereutrophe. Ceci expliquerait l'envahissement accéléré du lac par les végétaux observés au cours des dernières décennies (Tab 26). Aussi, les fortes corrélations négatives entre ces nutriments et OD, soit respectivement $R = -0,83$ pour PO_4^{2-} et $R = -0,76$ pour NO_3^- confirment le rôle positif de ces concentrations sur la dégradation du LME. Cette réduction accélérée serait vraisemblablement la résultante d'un apport de plus en plus important en ces éléments. En effet les résultats trouvés dans le cadre de la présente étude sont supérieurs à ceux trouvés par Madjiki *et al.* (2013) pendant la même saison.

Les teneurs maximales en Cu, Zn, Cr et Pb requises pour les eaux de consommation sont respectivement de 2, 3, 0,05 et 0,10 mg/L (OMS, 2011). Dans la présente étude, ces teneurs ont pour moyennes respectives : 0,11, 0,35, 0,05 et 0,00 mg/L dans le LME, 0,07, 0,26, 0,01 et 0,00 dans Mfoumou, et 0,06, 0,09, 0,01 et 0,00 dans Bengo'o. De même, les valeurs de l'indice de pollution des métaux lourds (< 100) illustrent que ces eaux ont une pollution insignifiante en ces éléments (Bhardway *et al.*, 2017). Toutefois, ces concentrations n'attestent pas forcément de leur faible proportion dans le milieu. En effet, plusieurs auteurs (Lesven, 2008 ; Devalois, 2009 ; Dai *et al.*, 2017) ont montré que la plupart des métaux lourds qui arrivent dans les milieux aquatiques sont stockés dans les sédiments. En fonction des paramètres physicochimiques du milieu, ces derniers peuvent être relargués dans la colonne d'eau. Le

tableau 26 illustre que la distribution des ETM dans les eaux étudiées est influencée par Eh, OD et turbidité. L'ensemble des éléments étudiés présentent en effet des corrélations moyennement négatives avec le Eh ; OD. Ceci suggère que la stagnation de l'eau et les faibles teneurs en OD jouent un rôle important sur la concentration de ces éléments dans les milieux étudiés. Les corrélations positives moyennes entre les métaux lourds et la turbidité (0,50 en moyenne) montrent que la turbidité augmente la teneur des éléments étudiés dans le milieu. Ceux-ci seraient donc associés aux particules en suspension.

V.5.2. Qualités des sédiments

V.5.2.1. Distribution des ETM

Comparés aux concentrations obtenues dans la colonne d'eau, les sédiments des trois sites ont des teneurs en ETM très élevées. Ces fortes valeurs observées au niveau des sédiments seraient liées à la différence des valeurs des paramètres physiques de ces deux compartiments, notamment le pH, qui est plus important au niveau de la colonne d'eau qu'au niveau sédiments. D'après plusieurs auteurs (Dzombak et Morel 1990 ; Blanchard, 2000 ; Lions, 2004 ; Hou et *al.*, 2013), ces conditions entraînent la formation de composés insolubles. Ceci entraîne la précipitation des ETM, puis leur absorption sur la fraction solide.

Dans le LME, la classification décroissante des valeurs moyennes de ces éléments est la suivante : Cr > Zn > Cu > Ni > Co > Pb > Mo > Cd (Fig. 39). Aussi, les teneurs en Cr, Ni, Co, Cd, et Cu sont supérieures à celles de l'UCC (Turekian et Wedepohl, 1961 ; McDonough et Sun, 1995). Ces fortes valeurs seraient liées aux faits que le LME subit la pression anthropique la plus importante. En effet, en plus des déchets transportés par ses deux affluents, il reçoit les déchets issus des activités du marché qui le longe. A ceux-ci s'ajoutent les déchets provenant des activités touristiques dont il est le siège, et les déchets domestiques drainés par les canalisations, qui arrivent en son sein. On observe aussi dans ce site, une grande variation spatiale des valeurs. En effet, les valeurs les plus importantes sont observées dans le centre, l'ouest et le sud-ouest du lac. Les valeurs les plus faibles sont obtenues au niveau de la partie sud du lac (Fig. 39). Les fortes valeurs observées dans la partie centrale et ouest seraient liées à aux apports associés du cours d'eau Mfoumou, aux débouchés des canalisations, et aux activités du marché. En effet, c'est cette partie du lac qui est la plus exposée à ces sources d'apports. Cette hypothèse est soutenue par la présence de faibles concentrations dans la partie Est qui ne semble exposé qu'aux apports du cours d'eau Bengo'o et aux activités touristiques. La partie Sud constitue l'exutoire du lac, partie caractérisée par un hydrodynamisme élevé. D'après Vinha et *al.* (2016), ces conditions ne favorisent pas le dépôt des particules, notamment les

ETM qui sont d'après certains auteurs (Serpaud *et al.*, 1994 ; Lario *et al.*, 2016) associés aux particules fines. Cependant, comparées avec les sédiments des autres lacs européens et asiatiques (Tab 28), les teneurs trouvées dans le cadre de cette étude semblent insignifiantes. Elles se rapprochent néanmoins de celles des grandes métropoles Camerounaise. On observe les teneurs en Cd (0,14 mg/kg) qui sont supérieures à celles du lac Simbock (0,13 mg/kg).

Dans la rivière Mfoumou, la classification décroissante est identique à celle observé dans le LME. Aussi, Cr, Ni, Co, Cd et Co ont des valeurs supérieures à l'UCC. Le fait que les mêmes éléments aient les concentrations élevées dans le LME et dans la rivière Mfoumou suggère que la rivière Mfoumou serait la principale source allochtone de ces éléments dans le lac. Aussi, l'absence d'une augmentation graduelle des concentrations des ETM de l'aval vers l'amont montre que les ETM auraient des sources proximales. Ainsi, les fortes concentrations observées dans les sites NF2, NF4, NF5 et NF7 seraient liées au fait que ces sites reçoivent des effluents issus des activités anthropiques qu'on y observe, notamment des activités agricoles, les activités commerciales et les déchets ménagers, à ceux-là s'ajoutent les rejets directs des objets métalliques dans le lit vif du cours d'eau. Les faibles valeurs observées au niveau du site NF6 quant à elles s'expliqueraient par la présence des particules grossières, qui ne favoriseraient pas la rétention des ETM (Jafarabadi *et al.*, 2017 ; Zhao *et al.*, 2017). Les faibles valeurs observées au niveau de la station NF3 quant à elles s'expliqueraient par le fait que celles-ci constituent une des sources (exurgence de l'eau) du cours d'eau Mfoumou.

Dans la rivière Bengo'o seuls Co et Cr ont des valeurs supérieures à l'UCC. Ces faibles concentrations seraient liées au fait que le cours d'eau Bengo'o traverse surtout des zones inhabitées, et par conséquent subit une influence anthropique négligeable. La présence des concentrations les plus importantes dans les sites situés en zone urbaines (Be3 et Be4) semble corroborer cette hypothèse.

Tableau 26. Matrice de corrélations de Pearson illustrant les relations entre les paramètres physiques et chimiques de la colonne d'eau des trois milieux étudiés

	Cu	Zn	Cr	Pb	PO₄²⁻	NO₃⁻	pH	Eh	T	Cs	Turb	DO
Cu	1,00											
Zn	0,70	1,00										
Cr	0,81	0,89	1,00									
Pb	0,46	0,61	0,48	1,00								
PO₄²⁻	0,70	0,89	0,83	0,69	1,00							
NO₃⁻	0,63	0,86	0,75	0,64	0,97	1,00						
Ph	0,35	0,48	0,57	0,18	0,45	0,45	1,00					
Eh	-0,59	-0,37	-0,59	-0,10	-0,23	-0,18	-0,62	1,00				
T	0,47	0,50	0,52	0,32	0,52	0,51	0,35	-0,52	1,00			
Cs	-0,11	0,37	0,10	0,43	0,43	0,46	0,09	0,23	0,04	1,00		
Turb	0,55	0,57	0,59	0,48	0,55	0,50	0,60	-0,66	0,63	0,12	1,00	
DO	-0,46	-0,66	-0,60	-0,37	-0,76	-0,83	-0,37	0,11	-0,29	-0,25	-0,32	1,00

Gras : valeurs significative à $p < 0,05$

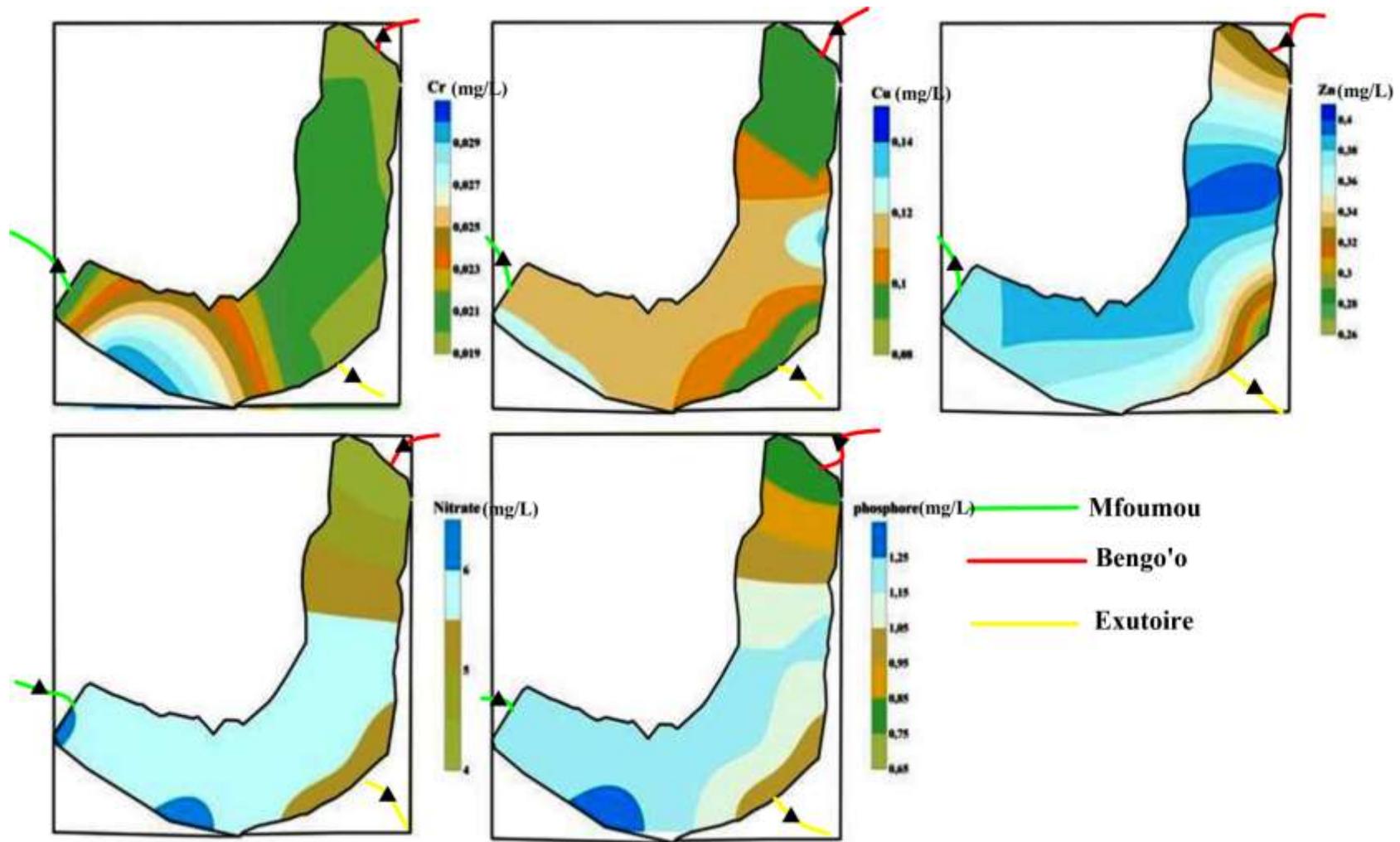


Figure 38. Distribution des ETM et des nutriments dans la colonne d'eau du LME

Tableau 27. Matrice de corrélation de Pearson illustrant les relations entre les ETM et les paramètres physiques des sédiments dans les différents sites étudiés

	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Co</i>	<i>Zn</i>	<i>Pb</i>	<i>Cd</i>	<i>Mo</i>	<i>Cu</i>	<i>Mz</i>	<i>pH</i>	<i>Eh</i>	<i>Cs</i>	<i>T</i>
Cr	1,00												
Ni	0,65	1,00											
Co	0,85	0,84	1,00										
Zn	0,58	0,63	0,61	1,00									
Pb	0,44	0,52	0,34	0,49	1,00								
Cd	0,55	0,75	0,59	0,56	0,57	1,00							
Mo	0,71	0,78	0,69	0,57	0,68	0,71	1,00						
Cu	0,69	0,89	0,73	0,62	0,74	0,74	0,83	1,00					
Mz	0,35	0,58	0,49	0,57	0,63	0,58	0,58	0,69	1,00				
pH	-0,11	0,17	-0,14	0,25	0,40	0,24	0,16	0,34	0,19	1,00			
Eh	-0,03	-0,23	-0,05	0,03	-0,54	-0,13	-0,29	-0,43	-0,22	-0,64	1,00		
Cs	-0,21	0,20	-0,03	-0,20	0,38	0,32	0,04	0,24	0,31	0,20	-0,47	1,00	
T	-0,38	-0,46	-0,46	-0,08	-0,26	-0,21	-0,52	-0,52	-0,26	-0,23	0,58	-0,08	1,00

Gras : valeurs significative à $p < 0,05$

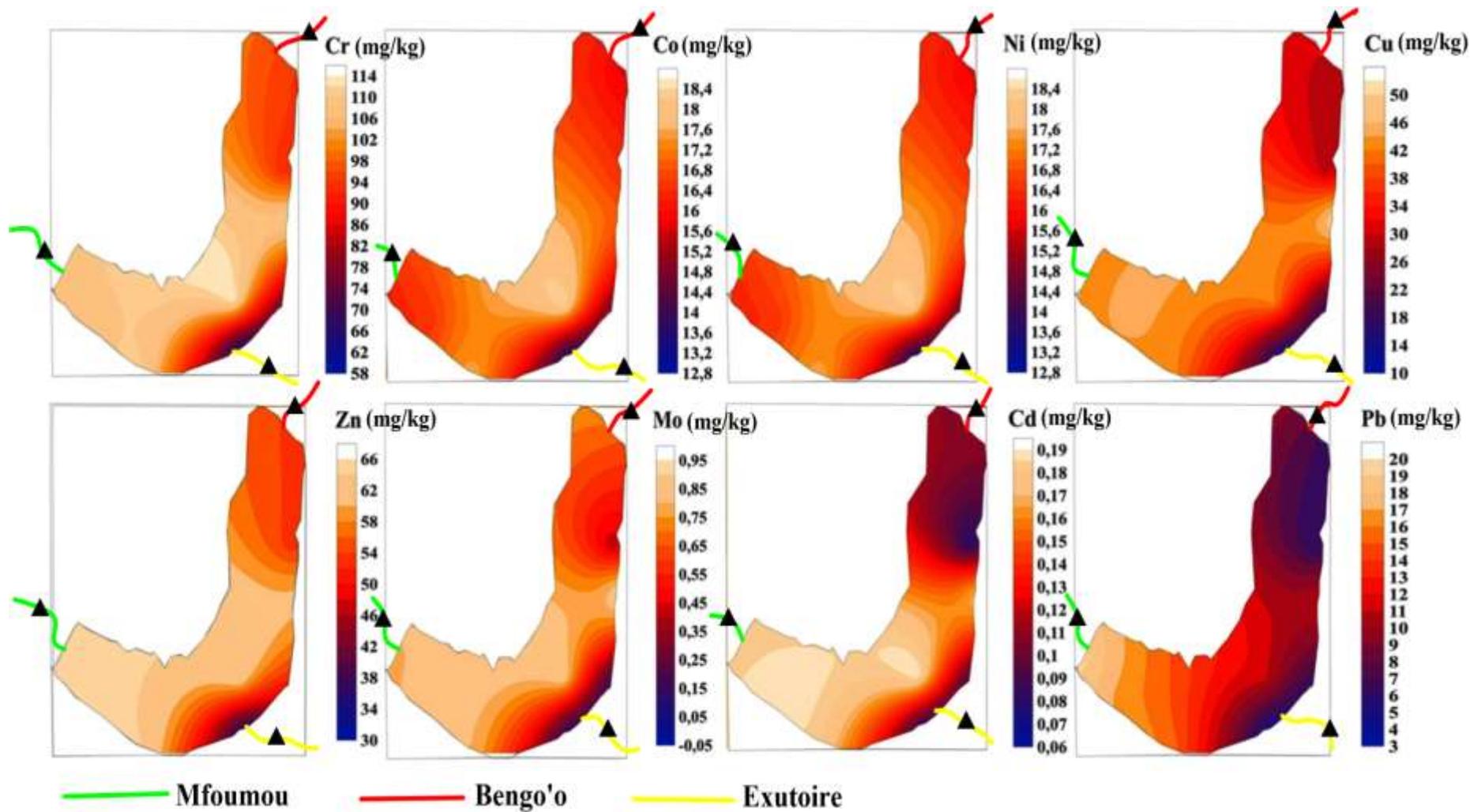


Figure 39. Distribution spatiale des teneurs en ETM dans les sédiments du LME

IV.5.2.2. Pollution et risque écologique associés aux ETM dans le LME

Les valeurs du facteur de concentration montrent que, les sédiments du LME présentent une contamination considérable ($3 < FC < 6$) en Cr dans 50% des échantillons, et modérée ($1 < FC < 3$) pour les 50% restant des échantillons du LME. Dans le cours d'eau Mfoumou, elle est considérable dans 57% des échantillons, modérée dans 27% et faible ($FC < 1$) dans le reste des échantillons. La contamination en Cr est modérée dans toutes les stations de Bengo'o. Le chrome présente une contamination modérée dans toutes les stations des trois sites. La contamination en Ni est modérée dans tous les échantillons du LME et ceux du cours d'eau Mfoumou. Elle est faible dans tous les échantillons du cours d'eau Bengo'o, sauf au niveau de l'échantillon Be4. Le Cd a une contamination modérée dans 70% des stations du LME, 100% des stations de Mfoumou, et une contamination faible dans 30% des échantillons du LME et 100% des échantillons de Bengo'o. La contamination en Cu est modérée dans 80% des stations du LME et 86% des stations de Mfoumou, et une contamination faible dans toutes les stations de Bengo'o et les stations restantes du LME et Mfoumou. Zn, Pb et Mo présentent une contamination faible dans les trois sites. Le Facteur d'Enrichissement (FE) a permis d'identifier et de quantifier les éléments traces métalliques d'origine anthropique. Les valeurs de ce paramètre montrent que les sédiments présentent un enrichissement modéré ($2 < FE < 5$) à faible ($FE < 2$) pour l'ensemble des éléments étudiés. Le chrome a un enrichissement modéré dans tous les trois sites, sauf dans l'échantillon NF1 de la rivière Mfoumou. Le nickel présente un enrichissement modéré dans 80% des stations du LME, six des sept stations du cours d'eau Mfoumou, et pas d'enrichissement pour les autres stations. Le cobalt a en moyenne un enrichissement modéré dans le LME et Mfoumou, et pas d'enrichissement dans Bengo'o. Les valeurs moyennes de Cd illustrent un enrichissement modéré dans le site de Mfoumou et pas d'enrichissement dans les autres sites. Zn, Pb, Mo et Cu ont des valeurs moyennes illustrant une absence d'enrichissement pour l'ensemble des sites étudiés. D'après Bing et *al.* (2015) ; Zhang et *al.*, (2020), les métaux issus des processus naturels et de la croûte terrestre ont des valeurs de FE comprises entre 0,5 et 1,5. Ainsi, Cr, Ni, Co, et Cd dont les teneurs moyennes sont supérieures à ces valeurs auraient une source anthropique. Cet enrichissement des sédiments en ces éléments avait déjà été observé par Ekoa et *al.* (2018) dans les sédiments du lac Simbock. Pour ces auteurs, il serait associé aux pratiques agricoles mises en œuvre dans cette localité. Dans la présente étude, il serait aussi associé aux multiples activités anthropiques observées dans le bassin versant. Les valeurs de Igeo trouvées dans le cadre de cette étude montrent que les sédiments des trois sites sont non contaminés à modérément contaminés en

Tableau 28. Comparaison des teneurs moyennes des ETM en mg/kg dans le LME et ceux des autres lacs urbains

Site	Localisation	Cr	Ni	Co	Zn	Pb	Cd	Mo	Cu	Reference
LME	Cameroun	96.46	30.77	16.14	55.94	10.58	0.14	0.61	34.01	
Lac Simbock	Cameroun	150.5	35	25	83	17	0.13	1.7	39	Ekoa et al. (2018)
Lac Hazar	Turqui	174.2	126.7	30.8	87.8	18.1	0.24	-	55.2	Varol et al. (2020)
Lac de Poyong	Chine	141.6	-	-	108.9	44.4	0.5	-	62	Dai et al. (2018)
Reservoir de Malter	Allemagne	210	-	-	1362	465	37.5	-	196	Muller et al. (2000)

Cr, Ni, Co, Zn, Pb et Cu ($0 < I_{geo} < 1$: classe 1). Ceux-ci ne présentent pas de contamination en Cd et Mo ($I_{geo} < 0$) pour l'ensemble des sites. Contrairement à FC, Igeo et FE qui permettent de définir la pollution en un seul élément. Les valeurs du PLI sont supérieures à 1 dans le LME et le cours d'eau Mfoumou. Dans le cours d'eau Bengo'o en revanche, $PLI < 1$. Ces résultats illustrent que les sites du LME et Mfoumou connaissent une détérioration progressive, tandis que le cours d'eau Bengo'o n'est pas pollué.

Selon plusieurs auteurs (Rath *et al.*, 2000 ; Krishna *et al.*, 2013 ; Manoj *et al.*, 2014), le risque écologique d'un élément représente la toxicité qui lui est associée dans un milieu. Dans le LME, Cr présente des concentrations moyennes supérieures au TEC et au PEC dans tous les sites, sauf dans les échantillons La9 et La10 où ces valeurs sont inférieures au PEC. Les valeurs de Ni sont supérieures au TEC, mais restent inférieures au PEC. Les autres éléments ont des concentrations inférieures à ces standards. Dans le cours d'eau Mfoumou, les échantillons NF2, NF3, NF4, NF5 et NF7 ont des concentrations en Cr supérieures au TEC et au PEC. Tandis que les stations NF1 et NF6 ont des valeurs inférieures au PEC. Les teneurs en Ni sont supérieures au TEC, mais inférieures au PEC. Comme dans le LME, les autres éléments sont inférieurs aux SQGs. Les concentrations en Co, Zn, Cd, Cu, Mo et Pb des sédiments du cours d'eau Bengo'o sont similaires à ceux des deux autres milieux en ce qui concerne le TEC et le PEC. Ils présentent aussi des concentrations supérieures à celles du TEC et PEC en Cr, supérieure au TEC et inférieure au PEC en Ni. Ainsi, compte tenu de ces deux paramètres, seuls les effets dommageables du chrome pourraient être ressentis par la faune aquatique et la population en contact avec ces eaux. Néanmoins, ces effets ne sont associés qu'au chrome trivalent (Varol *et al.*, 2020). Le facteur de risque écologique (E_r) a permis d'évaluer les effets désagréables d'un élément sur l'environnement. La classification des valeurs moyennes du risque écologique des différents ETM est la suivante : $Cd > Ni > Cu > Cr > Pb > Zn$. Elles illustrent que les sédiments étudiés présentent un risque écologique faible en Cr, Ni, Cu, Zn, et Pb ($E_r < 30$), et, un risque écologique modéré en Cd dans 70% des échantillons du LME et dans tous les échantillons du cours d'eau Mfoumou ($30 < E_r < 60$). Selon Ahmad *et al.* (2020), les valeurs du facteur de risque écologique du Cd seraient associées à son facteur de réponse-toxique (T_r) élevé, qui est de 30. Toutefois, les valeurs observées dans le LME (moyenne : 42,86) sont inférieure à celles du cours d'eau Mfoumou (45,92). Ceci confirme que ce dernier serait la principale source allochtone des polluants observés dans le LME. Les valeurs du risque écologique potentiel (RI) sont inférieures à 110. Ce résultat suggère que les trois sites étudiés présentent un risque écologique faible. Plusieurs auteurs (Walker *et al.*, 1996 ; Defaye *et al.*, 1998 ; Varol *et al.*, 2020) ont montré que RI est beaucoup plus fiable pour l'évaluation du risque écologique d'un

milieu. En effet, contrairement à Er qui ne prend en compte que les effets d'un seul élément, il tient en compte l'effet de synergie. Laquelle est un facteur déterminant qui conditionne la mobilité et la biodisponibilité d'un élément.

V.5.3. Activités potentiellement sources de polluants

Plusieurs activités ont été observées dans le bassin versant du LME, notamment les activités du marché, les activités touristiques, la pêche, les laveries, l'agriculture et les activités ménagères. Plusieurs travaux (Fergusson, 1990; Nriagu, 1996 ; Jarafarabadi, 2017) ont associé les polluants étudiés à ces activités. En effet, l'origine anthropique du cuivre est liée à son utilisation dans les activités agricoles, en chaudronnerie, dans la fabrication des insecticides, des molluscides destinés d'une part aux filets de pêche, d'autre part à la coque des bateaux. Le zinc est surtout utilisé dans la galvanisation des objets métalliques. D'après plusieurs auteurs (Savary, 2003 ; Hanif *et al.*, 2016 ; Zhang *et al.*, 2020), le chrome anthropique provient des engrais minéraux notamment des engrais phosphatés où ils sont présents sous forme d'impuretés, mais aussi des déjections animales et des couvercles des boîtes de conserves. Ni et Cd sont communément utilisés dans la fabrication des batteries nickel-cadmium, les installations électriques, les systèmes de chauffage et la stabilisation des matières plastiques. Ils sont rejetés dans l'environnement par les centrales éclectiques et la circulation automobile (Goher *et al.*, 2014 ; Xu *et al.*, 2017). Le nitrate anthropique provient de son utilisation comme engrais synthétique dans l'agriculture, mais aussi des installations septiques déficientes et de la décomposition de la matière organique d'origine animale et végétale (Ali *et al.*, 2016). Le phosphore est utilisé dans les engrais agricoles et dans l'industrie chimique, mais aussi dans les lessives où ils constituent un adoucisseur qui facilite le lavage (Choi *et al.*, 2015 ; Wang *et al.*, 2019). Dans la présente étude, les analyses statistiques montrent la grande influence de ces activités sur les concentrations de ces polluants. En effet, la matrice de corrélation (Tab 29), l'analyse en composante principale (Fig. 29) et la classification hiérarchique ascendante (Fig. 31) suggèrent deux principales sources d'apports : les sources naturelles et anthropiques. La première se matérialise par des corrélations significatives entre les polluants et les marqueurs du fond géochimique comme Al_2O_3 et Fe_2O_3 . En effet, les travaux d'Alloway (2013) ont montré que ces éléments sont les constituants des roches. La libération de ces éléments pendant le processus d'altération chimique entraînerait leur concentration dans les sédiments (Nriagu, 1996). La seconde source se caractérise surtout par les fortes proportions de polluants observées dans les milieux soumis à une pression anthropique élevée. L'impact négatifs le plus palpable de ces activités est le processus d'eutrophisation accéléré que subi le LME depuis des années.

La figure 35 montre en effet que ce plan d'eau connaît un taux d'envahissement par les macrophytes moyen de 350 m²/An depuis sa création. Selon Lijklema et *al.* (1993), le phosphore dont les concentrations anormales sont liées aux activités anthropiques, constitue le principal moteur de ce phénomène, car il est le nutriment le plus facilement absorbable par les producteurs primaires.

Tableau 29. Matrice de corrélation de Pearson illustrant les relations entre les ETM, Fe et Al dans les sédiments

	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Co</i>	<i>Zn</i>	<i>Pb</i>	<i>Cd</i>	<i>Mo</i>	<i>Cu</i>
<i>Al₂O₃</i>	1,00									
<i>Fe₂O₃</i>	0,77	1,00								
<i>Cr</i>	0,50	0,72	1,00					N = 21		
<i>Ni</i>	0,61	0,62	0,65	1,00						
<i>Co</i>	0,52	0,63	0,85	0,84	1,00					
<i>Zn</i>	0,57	0,82	0,58	0,63	0,61	1,00				
<i>Pb</i>	0,77	0,64	0,44	0,52	0,34	0,49	1,00			
<i>Cd</i>	0,51	0,62	0,55	0,75	0,59	0,56	0,57	1,00		
<i>Mo</i>	0,71	0,76	0,71	0,78	0,69	0,57	0,68	0,71	1,00	
<i>Cu</i>	0,75	0,72	0,69	0,89	0,73	0,62	0,74	0,74	0,83	1,00

CONCLUSION GENERALE ETPERSPECTIVES

Le présent travail avait pour objectif d'étudier la genèse des sédiments et le niveau de contamination en éléments traces métalliques des sédiments du Lac Municipal d'Ebolowa. Pour ce faire, les échantillons solides (sédiments) et liquides (eau) ont été prélevés. Les premiers ont été soumis aux analyses des paramètres physiques (teneur en eau, granulométrie, potentiel d'hydrogène, potentiel redox, et morphoscopique), minéralogique et géochimique. Les seconds quant à eux ont été soumis à la mesure *in situ* des paramètres physiques et aux analyses hydrochimiques.

Les paramètres physiques de l'eau montrent que, celle-ci est neutre à basique, trouble, faiblement minéralisée avec une faible teneur en oxygène dissout. Ces caractéristiques suggèrent une influence anthropique

Les valeurs du potentiel d'hydrogène montrent que les sédiments étudiés reflètent la nature acide du socle. Celles du potentiel redox illustrent que le LME est soumis aux conditions réductrices, tandis que ses affluents (Mfoumou et Bengo'o) ont des caractéristiques des milieux oxydants. L'analyse granulométrique des sédiments du LME révèle une prépondérance de la fraction fine sur la fraction grossière. Celle des sédiments de ses affluents montre une abondance des particules grossières. Ces caractéristiques suggèrent des conditions hydrodynamiques faibles dans le LME, et fortes dans les rivières Mfoumou et Bengo'o. L'observation morphoscopique montre la prédominance des grains de quartz anguleux, traduisant un court transport, et une source proximale.

L'analyse minéralogique par DRX présente des sédiments dominées par le quartz et les minéraux argileux, reflétant des sédiments issus d'une altération chimique intense des roches sources. Le cortège des minéraux lourds a montré que les sédiments sont caractéristiques des paragenèses magmatique et métamorphique.

Les données géochimiques des éléments majeurs des sédiments sont en moyenne plus abondantes que ceux de l'UCC. Ces sédiments sont dominés par la silice, les oxydes d'aluminium et les oxydes de fer. Les valeurs du CIA et PIA prouvent une altération chimique intense et des sédiments matures. Lesquels se caractérisent par un enrichissement des LREE par rapport aux HREE, un fractionnement des LREE, une anomalie négative en Eu lorsqu'ils sont normalisés par rapport à la chondrite et au PAAS. Ces résultats suggèrent un apport felsique.

Les valeurs du coefficient de concentration (Q_i) et certaines données du MEB illustrent un enrichissement en Fe, Mn, Al, K, Na et P dans le LME et un appauvrissement en Si. Ces résultats montrent que le LME serait le siège des réactions diagenétiques notamment : la précipitation, la dissolution, l'absorption et la minéralisation de la matière organique..

Sur le plan environnemental, les valeurs du phosphore et du nitrate de la colonne d'eau prouvent que le LME est déjà au stade hypereutrophe. Celles des ETM restent dans les normes requises pour les eaux de consommation. Leurs concentrations sont dix fois plus élevées dans les sédiments. Cette variation de concentrations entre les deux compartiments serait liée aux valeurs de pH, plus importantes dans la colonne d'eau que dans les sédiments et aux réactions diagenétiques suscitées. La distribution spatiale de ces éléments révèle que les concentrations les plus élevées sont observées dans les sites soumis à une forte pression anthropique. Les valeurs du Cr, Ni, Co, Cu, Cd et Mo sont supérieures à celles de l'UCC. Toutefois, les plus importantes sont observées dans le LME et dans la rivière Mfoumou. Cette rivière apparaît ainsi comme la principale source allochtone des polluants dans le lac. Les indices de pollution ont montré que les sédiments étudiés ont une contamination modérée en Cr, Ni, Co, Cu Cd et Mo. Cependant, Cd apparaît comme le seul élément présentant un risque écologique. Les déchets ménagers, les activités du marché, les laveries artisanales, les rejets directs des déchets et les débouchés des canalisations représentent les principales activités anthropiques sources de polluants.

Ce travail est le premier du genre à être effectué sur le lac municipal d'Ebolowa. Ainsi, il présente de nombreuses zones d'ombres. Pour le compléter beaucoup reste à faire tant sur la caractérisation pétrologique que sur l'évaluation environnementale. Ainsi, il serait important de :

- évaluer l'épaisseur des sédiments grâce aux méthodes géophysiques ;
- effectuer les analyses de la fraction $< 2\mu\text{m}$ pour déterminer la nature exacte de certains minéraux argileux.
- analyser les autres types de polluants notamment les polluants organiques et les micropolluants plastiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adamu C.I., Okon; E.E., and, Inyang, D.O., 2020, Granulometry, heavy mineral and geochemical studies of stream sediments around bula, dass district, northeast Nigeria. *Global journal of Geological Sciences* 18, 63-73.
- Ajeegah G., Bikitbe J.; F. Longo F.. 2013. Qualité bioécologique d'un milieu lacustre hyper-eutrophisé en zone équatoriale (Afrique Centrale) : peuplement de protozoaires ciliés et macro invertébrés benthos-aquatiques. *Afrique Science* 2, 50 – 66.
- Akame J.M., Oliveira P.E., Poujol M., Hublet G., Debaille V., 2020. LA – ICP – MS zircon U-Pb dating, Lu-Hf, Sm-Nd geochronology and tectonic setting of the Mesoarchean mafic and felsic magmatic rocks in the Sangmelima granite-greenstone terrane, Ntem. *Lithos* 372, 105702.
- Algeo T.J., Maynard J.B., 2004. Traceelement behaviour and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems. *Chemical Geology* 206, 289-318.
- Ali M.M., Ali, M.L., Islam, M.S., Rahman, M.Z., 2016. Preliminary assessment of heavy metals in water and sediment of Karnaphuli River, Bangladesh. *Environ. Nanotechnology. Monitoring Management*. 5, 27e35.
- Aller C., 1994. The sedimentary Mn cycle in Long Island Sound : Its role as intermediate oxidant and the influence of bioturbation, O₂, and Corg flux on diagenetic reaction balances: *Journal of Marine Research* 52, 259–295.
- Alloway B.J, 2013. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability, *Environmental Pollution* 22, 15-24.
- Alloway B.J. 1995. Heavy metals in soils. second edition London, 368 pp.
- Amajor L.C., 1987. Major and trace elements geochemistry of Albin and Tournonian shales from the Southern Benue trough, Nigeria. *Journal of African Earth Sciences* 6, 633-641.
- Arnason, J.G., Fletcher, B.A., 2003. A 40+ year record of Cd, Hg, Pb, and U deposition insediments of Patroon Reservoir, Albany County, NY, USA. *Environment. Pollution* 123,383–391.
- Asaah V.A., Abimbola F., Such C.E., 2005. Heavy metal concentrations and distribution in surface sols of the Bassa industrial zone 1. Douala Cameroun. *Arabian Journal for Sciences and Engineening* 31, 147-158.

- Audry S., 2003. Bilan géochimique du transport des éléments métalliques dans le système fluvial anthropisé Lot-Garonne-Gironde, Université de Bordeaux I, 415 pp.
- Audry S., Blanc, G., Schafer, J., 2006. Solid state partitioning of trace metals in suspended particulate matter from a river system affected by smelting-waste drainage. *Science of the Total Environment* 363, 216-236.
- Babeesh C., Hema Achyuthan, Sajeesh T.P., 2018. Geochemical Signatures of Karlad Lake Sediments, North Kerala: Source Area Weathering and Provenance. *Journal Geological Society of India* 9, 177-186.
- Bagnouls F., Gaussen H., 1957. Les climats biologiques et leur classification. *Annexe. Géographie*. 2, 193-220.
- Baize D., 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). INRA Editions, Paris, 408 pp.
- Baize D., Tercé, M., 2002. Les Éléments Traces Métalliques dans les Sols – Approches Fonctionnelles et Spatiales, INRA Éditions, Paris, France, 570 pp.
- Balasubramanian A., 2015. Classification of lakes. DOI : 10.13140/RG.2.2 19008.33282.
- Beauvais A., 2000, Geochemical balance of laterization processes and climatic signatures in weathering profiles overlain by ferricretes in Central Africa. *Geochimical et Cosmochimical Acta* 63, 3939-3957.
- Bekoa 1994. Etude pétrologique et géochimique d'une couverture forestière de l'extrême Sud-Cameroun : relation avec les paysages de fer. Thèse Doctorat 3e cycle, Université de Yaoundé I, 187p.
- Benoit C., 2005. Biogéochimie et enregistrement des composés organostanniques dans les sédiments du bassin d'Arcachon. Thèse de Doctorat, Université de Provence, 252p.
- Betancourt O., Narvaez A., Roulet M., 2005. Southern Ecuador: a study of environmental impacts and human exposures. *EcoHealth* 2, 323–332.
- Bhardwaj R., Gupta A., Garg J.K., 2017. Evaluation of heavy metal contamination using environmetrics and indexing approach for River Yamuna, Delhi stretch, India. *Water Science*.http. DOI :10.1016/j.wsj.2017.02.002

- Bing H.J., Zhou, J., Wu, Y.H., Wang, X., Sun, H., Li, R., 2019. Current state, sources, and potential risk of heavy metals in sediments of Three Gorges Reservoir, China. *Environmen. Pollution* 214, 485–496.
- Blanchard C., 2000. Caractérisation de la mobilité potentielle des polluants inorganiques dans les sols pollués, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 241 pp.
- Bodin S., Godet A., Föllmi K.B., Vermeulen J., Arnaud H., Strasser A., Fiet N., Adatte T., 2006. The late Hauterivian Faraoni oceanic anoxic event in the western Tethys: Evidence from phosphorus burial rates. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 235, 238-257.
- Boust D., Fischer J.C., Ouddane, B., Petit F., Wartel, M., 1999. Fer et manganèse: réactivités et recyclages. Rapport Seine Aval. Ifremer, 40 pp
- Braun J.J., Ndam Ngoupayou J.R., Viers J., Dupre B., Bedimo Bedimo J.P., Boeglin J.L., Robain H., Nyeck B., Freydier R., Sigha Nkamdjou L., Rouiller J, Muller J.P., 2005. Present weathering rates in a humid tropical watershed: Nsimi site (South Cameroon). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69, 357–387.
- Cailleux A., 1942. Distinction des sables marins et fluviatiles. *Bulletin société de Geologie* 2, 25 – 138.
- Calace N., Liberatori, A., Petronio, B.M., Pietroletti, M., 2001. Characteristics of different molecular weight fractions of organic matter in landfill leachate and their role in soil sorption of heavy metals. *Environmental Pollution* 113, 331-339.
- Callender E. et Robbins J.A., 1993. Transport and accumulation of radionuclides and stable elements in a Missouri River reservoir. *Water Resources Research* 29, 1787-1804.
- Campy M. et Meybeck M., 1995. Les sédiments lacustres. In Pourriot R. et Meybeck M. (Eds). *Limnologie générale*, Masson, Paris, Fra. 185-226.
- Cardona J.P., Guitiérrez Mas J.M., Sanchez A., Martinez Bellon J., 2004. Surface texture of heavy-mineral grains : a new contribution to provenance studies. *Sedimentary Geology* 174, 223 – 235.
- Chamley H., 1988. Les milieux de sedimentation. Lavoisier, 287 pp.
- Chappell J., 1967. Recognizing fossil strand line from grain size analysis. *Journal of Sedimentary and Petrology* 37, 157e165.

- Choi M., Park, J., Cho, D., Jang, D., Kima, M., Choi, J., 2015. Tracing metal sources in core sediments of the artificial lake An-Dong, Korea: concentration and metal association. *Science Total Environment* 527, 384–392.
- Choudhary S., Anoop K.T., G.N., PurnimaBejugam N., 2016. Sedimentological and geochemical investigations to understand source of sediments and processes of recent past in Schirmacher Oasis, East Antarctica. *Polar Science* 15, 87-98.
- Citeau, L. 2004. Etude des colloïdes naturels dans les eaux gravitaires de sols contaminés: relation entre nature des colloïdes et réactivité vis-à-vis des métaux (Zn, Cd, Pb, Cu), Université de Paris VI, INRA Versailles, 251 pp.
- Cox R., Lowe, D.R., Cullers, R.L., 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59, 2919–2940.
- Cullers R.L., 1994. The controls on the major and trace element variation of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age from uplifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58, 4955–4972.
- Cullers R.L., 2000. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian Permian age, Colorado, U.S.A.: implications for provenance and metamorphic studies: *Lithostratigraphy* 51, 305-327.
- Cullers R.L., Podkovyrov, V, M, 2000. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: Implications for mineralogical and provenance, and recycling. *Precambrian Research* 104, 77-93 pp.
- Dai L., Wang, L., Li, 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. *Science Total Environment* 621, 1433–1444.
- Das B.K., AL-Mikhlaifi A.S., Kaur P., 2006. Geochemistry of Mansar lake sediments, Jammu, India: Implication for source-area weathering, provenance, and tectonic setting. *Journal of Asian Earth Sciences* 26, 649-668.

- Das B.K., Gaye, B., and Kaur, P., 2003. Geochemistry of Renuka Lake and wetland sediments, Lesser Himalaya (India): implications for source-area weathering, provenance, and tectonic setting. *Environmental Geology* 54, 147– 163.
- Datta D. K.; Subramanian 1997. Texture and mineralogy of the sediment from Gange-Brahmaputra-Meghna river system in the Bengal Basin, Bangladesh and their environmental implications. *Environmental Geology* 30, 181 – 188.
- Davison W., et De Vitre R., 1992. Iron particles in fresh-water in Environmental Particles. *Environmental Geology* 1, 315-355.
- De Vitre R., Buffe J., Perret D., and Baudat D., 1988. A study of the iron and manganese transformations at the O₂/S(-II) transition in an eutrophic lake (Lake Bret, Switzerland) : a multi method approach. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52, 1601-1613.
- Defaye S., Plumail, D., Vitré E., 1998. Les boues d'épuration composent-elles un risque de pollution des sols Environnement et technique 177, 41-44.
- Defo C., Yerima P.B., Noums K.I., Bemmo N., 2005. Assessment of heavy metals in soils and grow water in an urban watershed of Yaoundé (Cameroon – West Africa). *Environment monitoring assessment*. 13, 77-187.
- Detay M., 1993. Le forage d'eau, réalisation, entretien, réhabilitation. Masson, Paris, 375 pp.
- Devallois V., 2009. Transfert et mobilité des éléments traces métalliques dans la colonne sédimentaire des hydrosystèmes continentaux. Thèse Doctorat, Université de Provence, 225p
- Dong D., Hua X., Li Y., Zhang J., Yan D., 2003. Cd adsorption properties of components in different freshwater surface coatings: the important role of ferromanganese oxides. *Environmental Science & Technology* 37, 4106-4112.
- Dymond J., Suess E., Lyle M. 1992. Barium in deep-sea sediment : A geochemical proxy for
- Dzombak D.A. and Morel, F.M.M., 1990. Surface Complexation Modeling - Hydrated Ferric Oxide. John Wiley & Sons, 393 pp.
- Ekenguele L.N., Baussand P., Ekodeck E.G., 2012. Heavy metals accumulation in sediment cores of the Municipal Lake of Yaounde, Cameroon. *Global Journal Environment Research*. 6, 100-110.

- Ekengele L.N., Jung M.C., Ekodeck E.G., 2017. Accumulation of metals in three fish species from the Yaounde Municipal Lake in Cameroon. *Environmental Monitoring and Assessment*. 187, 1-12.
- Ekengele N.L., Baussand P., and Ekodeck G.E., 2005, Heavy Metals Accumulation in Sediment Cores of the Municipal Lake of Yaounde, Cameroon. *Global Journal of Environmental Research* 6, 100-110.
- Ekengele N.L., Jung M.C., Ombolo A., Ngatcha N., Ekodeck G., Mbome L., 2008. Metals pollution in freshly deposited sediments from river Mingoa, main tributary to the Municipal lake of Yaounde, Cameroon. *Geosciences Journal* 12, 337-347.
- Ekoa Bessa .Z., Ngueutchoua G., Ndjigui P.D., 2018. Mineralogy and geochemistry of sediments from Simbock Lake, Yaoundé area (southern Cameroon): Provenance and environmental implications. *Arabian Journal of Geosciences* 11, 699-710.
- Ekoa Bessala Z., Ndjigui P.D., Fuh G.C., Armstrong-Altrin, Bineli Betsi T., 2021. Mineralogy and geochemistry of the Ossa lake Complex, Southern Cameroon : implication for paleoweathering and provenance. *Arabian Journal of Geosciences* 14, 1-17.
- El Ganaoui, O., 2002. Modélisation de la dynamique sédimentaire pour les transferts des radionucléides dans les cours d'eau. Doctorat, Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, Ecole Supérieure de Mécanique de Marseille, 201 pp.
- Fedo, C.M. Young, G.M., Nesbitt, H.W., Hanchar, J.M., 1995. Potassic and sodicmetasomatism in the Southern Province of the Canadian Shield: evidence from the Paleoproterozoic Serpent Formation Huronian Supergroup, *Canada. Press Ressource*. 84, 17–36.
- Fergusson J.E., 1990. The heavy elements:chemistry, environmental impact and health effets. Pergamon Press, Oxford, 614 pp.
- Feybesse J.L., Johan, V., Triboulet, C., Guerrot, C., Mayaga-Mikolo, F., Bouchot, V., Eko N'dong, J, 2008. The West Central African belt: a model of 2.5–2.0 Ga accretion and two-phase orogenic evolution. *Precambrian Research*, 87, 161–216
- Folk R.L., 1966. A review of grain-size parameters. *Sedimentology* 6, 73– 93.
- Folk R.L., Ward, W.C., 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain-size parameters. *Sedimentology Petrology* 27, 3-26.

- Fonkou T., Agendia P., Kengne I., Akoa A., 2005. Concentration in some biotic and abiotic components of the Olezoa wetland complex (Yaoundé – Cameroon). *Arabian Journal of Geosciences* 13, 15 – 25.
- Friedman, G.M., 1967. Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands. *Journal of Sedimentary Petrology* 37, 327e354.
- Froelich P.N., Klinkhammer, G.P., Bender, M.L., Luedtke, N.A., Heath, G.R., Cullen, D., Dauphin, P., Hammond, B. and Maynard, V. 1979. Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of eastern equatorial Atlantic: Suboxic diagenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 43, 1075-1090.
- Garnier-Laplace J., Fournier-Bidoz, V. and Baudin, J.P., 1997. Etat des connaissances sur les échanges entre l'eau, les matières en suspension et les sédiments des principaux radionucléides rejetés en eau douce par les centrales nucléaires. *Radioprotection* 32, 49-71.
- Garver J.I., Royce, P.R., Smick, T.A., 1996. Chromium and Nickel in Shale of the Taconic Foreland; a Case Study for the Provenance of Fine-Grained Sediments with an Ultramafic Source. *Journal of Sedimentary Research* 66, 100–106.
- Garzanti E., Andó, S., Vezzoli, G., 2008. Settling equivalence of detrital minerals and grain-size dependence of sediment composition. *Earth Planetary Sciences Letters* 273, 138–151.
- Ghosal S., Agrahari, Guin, R., Sengupta, 2017. Implications of modeled radioactivity measurements along coastal Odisha, Eastern India for heavy mineral resources. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 184, 83-89.
- Goher M.E., Farhat, H.I., Abdo, M.H., Salem, S.G., 2014. Metal pollution assessment in the surface sediment of Lake Nasser, Egypt. *Egyptian Journal Aquatic. Ressource* 40, 213–224.
- Gosselin B., 1996. Application des réseaux de neurones artificiels à la reconnaissance automatique de caractères manuscrits: Thèse de Doctorat, Faculté Polytechnique, Mons, 231 p.

- Gouzy A., 2004. Etude du comportement du plutonium au cours de la diagénèse précoce des sédiments marins: application à deux environnements marins marqués par les rejets issus d'usines de retraitement de combustibles usés. Doctorat, Université de Caen/Basse Normandie, IRSN, 302 pp.
- Haddad H., Ghoualem H., 2014. Caractérisation physico-chimique des eaux du bassin hydrographique côtier algérois. *Larhyss Journal* 18, 155-167.
- Hakanson L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Ressource* 14, 975–1001.
- Hanif N., Eqani SAMAS, Ali S.M., Cincinelli A., Ali N., Katsoyiannis I.A., Tanveer Z.I., Bokhari H., 2003. Geo-accumulation and enrichment of trace metals in sediments and their associated risks in the Chenab River. *Pakistan Journal of Geochemical Exploration* 165, 62e16570.
- Harnois I., 1988. The CIW index: a new chemical index of weathering. *Sediment Geology* 55, 319-407.
- Hayashi K., Fujisawa H., Holland H.D., Ohmoto H., 1997. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 8, 14 - 29
- Herron M.M., 1988, Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentological Petrology* 58, 820–829.
- Hiscott R.N., 1984. Ophiolitic source rocks for Taconic-Age flysch: trace-element evidence. *Geological Society of America Bulletin* 95, 1261–1267.
- Hou D., He, J., Lü, C., Ren, L., Fan, Q., Wang, J., Xie, Z., 2013. Distribution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd) in water and sediments from Lake Dalinouer, China. *Ecotoxicology Environmental Safety* 93,135–144.
- Ikenaka Y, Souta M.M.N., Muzandu K., Hiroko K.C., 2010. Heavy metal contamination of soil and sediment in zambie. *African Journal of Environmental and Technology* 4, 729 – 739.
- Jafarabadi A.R., Bakhtiyari, A.R., Toosi, A.S., Jadot, C., 2017. Spatial distribution, ecological and health risk assessment of heavy metals in marine surface sediments andcoastal seawaters of fringing coral reefs of the Persian Gulf, Iran. *Chemosphere* 185, 1090–1111.

- Ji Y., Zhang, J., Li, R., Pan, B., Zhang, L., Chen, X., 2015. Distribution and partitioning of heavy metals in sediments of the Xinjiang River in Poyang Lake Region, China. *Environment Sustain Energy* 34, 713–723.
- Jones B., Manning, D.C., 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of paleo-redox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology* 111, 111–129.
- Jumbe A.S., Nandini, N., 2009. Impact assessment of heavy metals pollution of Vartur Lake. *Journal. Applied National Sciences* 1, 53-61.
- Kohonen T., 1999. Comparison of SOM point densities based on different criteria.: *Neural computation* 11, 2081–2095.
- Kouakou L.K., Ama V.W., Theophile J.R., Courivaud P.K., Kouamé A., 2007. Caractérisation des sables et la morphologie du fond du lac du barrage hydroélectrique de Taabo (Côte d'Ivoire). *Science & nature* 4, 93 – 103.
- Krauskopf K.B. et Bird, D.K., 1995. Surface chemistry: the solution-mineral interface. In: Introduction to geochemistry (Ed M.G.-H.I. Editions) Mc Graw-Hill International Editions edn, *Earth Sciences and Geology Series* 6, 135-163.
- Krishna A.K., Mohan K.R., Murthy N.N., Periasamy, Bipinkumar G., Manohar K., Rao S., 2013. Assessment of heavy metal contamination in soil around chromite mining area Nuggihalli Karnataka, India. *Environmental Earth Science* 70, 699-708.
- Kwon C.J., Ekengele N.L., Myng C.J., Ekodeck G.E., Mbome L., Ki-Hyun K., 2012. Impact assessment of heavy metal pollution in the municipal lake water, Yaoundé Cameroon. *Geosciences Journal* 16, 193-202.
- Lerouge C., Cocherie, A., Toteu, S.F., Penaye, J., Milési, J.P., Tchameni, R., Nsifa, E.N., Fanning, M, Deloele, E., 2006. Shrimp U–Pb zircon age evidence for Paleoproterozoic sedimentation and 2.05 Ga syntectonic plutonism in the Nyong Group, South Western Cameroon: consequences for the Eburnean–Transamazonian belt of NE Brazil and Central Africa. *Journal of African Earth Sciences* 44, 413–427.
- Lesven L., 2008. Devenir des éléments traces métalliques au sein du sédiment, un compartiment clé de l'environnement aquatique. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille, 158p.

- Letouzey R., 1985. Notice de la carte phytogéographique du Cameroun au 1/500.000. Institut de la carte de végétation, Toulouse, 240 p.
- Li S., Zhang, Q., 2010. Spatial characterization of dissolved trace elements and heavy metals in the upper Han River (China) using multivariate statistical techniques. *Journal of Hazard Materials* 176, 579–588.
- Lijklema I., 1993. Interaction of orthophosphate with iron (III) and aluminium hydroxides. *Environmental Sciences and Technologies* 14, 537-541.
- Lions J., 2004. Etude hydrogéochimique de la mobilité de polluants inorganiques dans des sédiments de curage mis en dépôt: expérimentations, étude in situ et modélisations. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 260 pp.
- Liu M., Yang, Y., Yun, X., Zhang, M., Li, Q.X., Wang, J., 2014. Distribution and ecological assessment of heavy metals in surface sediments of the East Lake, China. *Ecotoxicology* 23, 92–101.
- Madjiki G.A., Pial A.C., Ndam J.R., Akoa A., 2013. Caractérisation hydrologique, morphométrique et physicochimique d'un hydro- système urbain : le lac municipal d'Ebolowa (Sud-Cameroun). *Afrique Sciences* 09, 122 – 134.
- Manoj K. et Krumar P.P., 2014. Distribution, enrichment and ecological risk of six elements in bed sediments of a tropical river, Chottanagpur Plateau: a spatial and temporal appraisal. *Journal of Environmental Protection* 5, 1419 – 1429.
- Mbale N.M., Sababa E., Bayiga E.C., Bessa E.A.Z., 2019. Mineralogical and geochemical characterization of the unconsolidated sands from the Mefou river terrace, Yaoundé area, Southen Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 159, 103570.
- McDonough W..F, Sun, S.S., 1995. The composition of the earth. *Chemical Geology* 120, 223–253
- McKee E.D.; Weir G.W., 1953. Terminology for stratification and cross-stratification. *Bullettin of Geology Society of America* 64, 381–390.
- McLennan S.M., 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. In: Lipin, B.R., McKay, G.A. (eds.), *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements. Mineralogical Society of America*, 21, 169–200.

- McLennan S.M., Taylor S.R., Hemming, S.R., 2006. Composition, differentiation, and evolution of continental crust: Constraints from sedimentary rocks and heat flow. In: M. Brown and T. Rushmer, (eds), *Evolution and Differentiation of the Continental Crust*. Cambridge University Press, 92-134.
- Meyers A.P., Ishiwatari R., 1993. Lacustrine organic geochemistry-an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Organic Geochemical* 20, 867-900.
- Michard G., Sarazin G., Jez D., Alberic P., Ogier S., (2001). Annual budget of chemical elements in a eutrophic lake, Aydat lake (Puy-de-Dôme), France. *Hydrobiologia* 459, 27–46.
- Michard G., Alberic P., Jezequel D., Sarazin G., Viollier E., 1998. Pathways of redox processes in a seasonally anoxic lake, Ayday lake, France. *Goldschmidt Conference*, 989-990.
- Mohammad A., Murthy B., Dhanamjaya Rao E.N., Prasad H., 2020. A study on textural characteristics, heavy mineral distribution and grain-microtextures of recent sediment in the coastal area between the Sarada and Gosthani rivers, east coast of India. *International Journal of Sediment Research* 35, 484-503.
- Montuelle B., 2015. Le tour des grands lacs alpins en 80 questions. Rapport scientifique de la Zone Atelier du Rhone (ZABR), 12p.
- Morse J. W., Wang Q., 1997. Pyrite formation under conditions approximating those in anoxic sediments: Influence of precursor iron minerals and organic matter: *Marine Chemistry* 57, 187–193.
- Morton A.C., 1985. Heavy mineral in provenance studies. In Zuffia editor , *Provenance of arenite*. Dondrecht, 247 – 77.
- Mouldi B., Chkiou, A., 2007. Répartition granulométrique et minéralogique des sédiments de surface dans le golfe de Tunis. *Bulletin Institut National des Sciences et Technologies Mer de Salammbô* 34, 21-32.
- Müller G., 1981. Die Schwermetallbelastung der sedimente des Neckars und seiner Nebenflüsse: eine Bestandsaufnahme. *Chemical Ziertg* 105, 157–164.

- Müller J., Ruppert H., Muramatsu Y., Schneider J., 2000. Reservoir sediments – a witness of mining and industrial development (Malter Reservoir, eastern Erzgebirge, Germany). *Environment Geology* 39, 1341–1351
- N’anga A., Ngos S., Ngueutchoua G., 2018. The late Pleistocene – Holocene paleoclimate reconstruction in the Adamawa plateau (Central Cameroon) inferred from the geochemistry and mineralogy of the Lake Fonjak sediments, *Journal of African Earth Sciences*, doi: 10.1016/j.jafrearsci.2018.09.024.
- Naah 2008. Impact temporel du développement urbain du bassin versant de la rivière Mingoa sur la qualité du lac municipal de Yaoundé (Cameroun). Thèse Doctorat, Université de Douala, 202 pp.
- Ndjigui P.D., Fadil-Djenabou S., Beauvais A., Ambrosi J.P., 2014. Origin and evolution of Ngaye River alluvial sediments, Northern Cameroon: geochemical constraints. *Journal 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 African Earth Sciences* 143, 102–117.
- Nédélec, A., Nsifa, E.N., Martin, H., 1990. Major and trace element geochemistry of the Archaean Ntem plutonic complex (South Cameroon): petrogenesis and crustal evolution. *Precambrian Research* 47, 35–50.
- Nesbitt H.W, Young, G.M., 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica. et Cosmochimica Acta* 48, 1523–1534.
- Ngagoun Konchipe Y.S., Tempo F.S., Ngueutchoua G., Sonfack A.N., Nkouathio D.G., Tchatchueng R., Kenfack Nguema G.R., Njanko T., 2021. Mineralogy and geochemistry study of Nyong River sédiments, SW Cameroon: Implication for provenance, weathering, and tectonic setting. *Arabian Journal of Geosciences*. 14:1018. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07145-9>

- Ngon Ngon G.F., Bayiga E., Ntamack-Nida M. J., Etamé J., Noa Tang S., 2012. Trace elements geochemistry of clay deposits of Missole II from the Douala sub basin in Cameroon (Central Africa): a provenance study. *Sciences, Technologie & Développement* 13, 2035.
- Nriagu J.O., 1996. A History of Global metal Pollution. *Sciences* 272, 223-224.
- Nsifa NE., 2005. Magmatisme et évolution géodynamique de l'Archéen au Protérozoïque de la bordure nord-ouest du craton du Congo (complexe du Ntem) au Sud-Ouest Cameroun. Thèse de Doctorat d'Etat, Univ de Yaoundé I. 297 p.
- Ogier S., 1999. Diagenèse précoce en domaine lacustre : étude des composés minéraux et organiques des sédiments récents du lac d'Aydat (Puy de Dôme, France). Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, 206p.
- Olivry J.C., 1986. Fleuves et rivières du Cameroun. Mesres-Yaoundé-Orstom Paris, 733p.
- Omari H., 2018. Etude du phosphore dans les sédiments des principaux oueds de la région de Meknès : Oued Ouislane, Oued Boufekrane et Oued Toulal. These de Doctorat PhD, Université de Meknes. 187 p
- OMS, 2011. Guidelines for Drinking-water Quality Recommendations. fourth edition. (518 pp.)
- Omwene P.I., Mehmet S.O., Çelen M., Mehmet K., 2018. Heavy metal pollution and spatial distribution in surface sediments of Mustafakemalpas, a stream located in the world's largest borate basin (Turkey). *Chemosphere* 208, 782 – 796.
- Onana V.L., Ngo'o Zeh A., Medjo Eko R., Ntoula R.D.F., Nanga B., Ngonon O.B., Ekodeck G.E., 2016. Geological identification, geotechnical and mechanical and mechanical characterization of charnockite-derived lateritic gravels from Southern Cameroon for road construction purposes. *Transportation Geotechnics* 10, 35-46.
- Ongboye B.P.R., Sababa E., Bidzang N.F., Ndjigui P.D., 2019. Geochemical characterization of surface sediment from Tongo Gandima (Eastern Cameroun): implication for gold exploration. *Arabian Journal of Geosciences* 12, 598.
- Oumar B., Ekengele N.L., Balla, A.D., 2014. Évaluation du niveau de pollution par les métaux lourds des lacs Bini et Dang (Ngaoundéré, Cameroun). *Afrique Sciences* 10, 184-198.
- Owona S., Mvondo Ondo J., Tichomirowa M., Rastsbacher L., Tchoua M.F., Ekodeck G.E., 2012. New $^{217}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -Zr evaporation, metamorphic $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ -WR-Bt ages and

- tectonic imprints in the Archean So'o group (Ntem complex/Congo craton, SW Cameroon). *Global Journal of Geological Science* 10, 99-109.
- Parfenoff A., Pomerol C., Tourenq J., 1970. Les minéraux en grains. Méthode d'étude et détermination. Masson et Cie. Edit .paris, 571 p.
- Penaye J, Toteu S.F, Tchameni R., Van Schmus WR., Tchakounte, Ganwa A., Minyem D., Nsifa, N.E, 2004. The 2.1 Ga West Central African Belt in Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 39, 159-164.
- Pétard J., 2013. Les méthodes d'analyse : tome 1 : méthode d'analyse des sols. Nouméa: ORSTOM, (5), 192p
- Petr T., 1977. Bioturbation and exchange of chemicals in the mud water interface: Interactions Between Sediments and Fresh Water. Proceedings of an International Symposium.
- Phartiyal B, Sharma, A., Bera, S.K., 2011. Glacial lakes and geomorphological evolution of Schirmacher Oasis, east Antarctica, during late Quaternary. *Quaternary International* 235, 128–136.
- Pinel-Alloul B., Mazumber A., Lacroix G., Lazzaro X., 1998. Les réseaux trophiques lacustres : structures, fonctionnement, interactions et variations spatio-temporelle. *Revue des sciences de l'eau/journal of water sciences* 11, 163 – 178.
- Poucllet A., Tchameni, R., Mezger, K., Vidal, M., Nsifa, N.E., Penaye, P., 2007. Archaean crustal accretion at the northern border of the Congo Craton (South Cameroon). The charnockite-TTG link. *Bulletin of Society Geology* 178, 3–14.
- Rakotondrabe F., Ndam Ngoupayou J.R., Mfonka Z., Rasolomanana E.H., Abolo A.J.N., Ako A.A., 2017. Water quality assessment in the Bétaré-Oya gold mining area (East-Cameroon): Multivariate Statistical Analysis approach. *Science of the Total Environment* 610–611, 831–844.
- Rath N.C., Huff W.E., Balog J.M., 2000. Factor regulating bone maturity and strength in the poultry. *Poultry science* 79, 163 – 176.
- Robbe D., 1981. Pollutions métalliques du milieu naturel: guide méthodologique de leur étude à partir des sédiments: Rapport de recherche LPC, No. 104, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Ministère de L'Urbanisme et du Logement, Ministère de Transports, 88 p.

- Rodier L., 1996. L'analyse de l'Eau. 8^e édition. Dunod: Paris. 1384 pp.
- Rodier L., 2009. L'analyse de l'eau naturelle, eaux résiduaires, eau de mer. 9^eme édition. Dunod, Paris, 1383 pp.
- Roser B.P., et Korsch, R.J., 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major element data. *Chemical Geology* 67, 119–139.
- Sahoo P.K., Guimarães, José.Tasso.Felix., Souza-Filho P.W.M., da Silva M.S., Nascimento Júnior W., Powell M.A., Reis L.S., Pessenda L.C.R., Rodrigues, Tarcí. Magevski, da Silva D.F., Costa, V.E., 2017. Geochemical characterization of the largest upland lake of the Brazilian Amazonia: Impact of provenance and processes. *Journal of South American Earth Sciences* 54, 147-159.
- Sahoo P.K., Souza-Filho P.W.M., Guimarães J.T., Silva M.S.d., Costa F.R., Manes L.d.O., Oti D., Júnior R.O.S., Dall'Agnol R., 2015. Use of multi-proxy approaches to determine the origin and depositional processes in modern lacustrine sediments: Carajás Plateau, Southeastern Amazon, Brazil. *Applied Geochemistry*. Doi 10.1016/j.apgeochem.2014.11.010.
- Sahoo PK., Felix Guimarães J.T., Martins Souza-Filho P.W., Sousa da Silva M., Maurity CW., Powell M.A., Rodrigues T.M., Fonseca da Silva D., Mardegan S.F., Furtini Neto A.E., Dall'Agnol R., 2016. Geochemistry of upland lacustrine sediments from Serra dos Carajás, Southeastern Amazon, Brazil: Implications for catchment weathering, provenance, and sedimentary processes. *Journal of South American Earth Sciences*. DOI: 10.1016/j.jsames.2016.09.003.
- Santschi P., P. Höhener, G. Benoit, Buchholtz-ten Brink, 1990. Chemical processes at the sediment-water interface: *Marine Chemistry* 30, 269–315.
- Savary V., 2003. Rapport de fin de contrat, LMTG - Université Paul Sabatier, Toulouse. 324p
- Schnurrenberger D., Russell J., Kelts, K., 2003. Classification of lacustrine sediments based on sedimentary components. *Journal of Paleolimnology* 29, 141–154.
- Schulz H.D., Zabel, M., 2000. Marine geochemistry. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 455 pp.

- Scordia P.Y., 2008. Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers. Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Lille, France, 258p.
- Segalen P., 1994. Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique. Collection études et thèse. 579p
- Serpaud B., Al-Shukry R., Casteignau M., Matejka G., 1994. Absorption des métaux lourds (Cu, Zn, Cd, Pd) par les sédiments superficiels d'un cours d'eau : rôle du pH, de la température et de la composition du sédiment. *Revue des sciences de l'eau* : 7, 343 – 365.
- Serve L., Gade, F., Liberia, J.L., Blazi, J.L., 1999. Caractères biogéochimiques de la matière organique dans la colonne d'eau et les sédiments d'un écosystème saumâtre: l'étang de Thau-Variations saisonnières. *Revue des Sciences de l'eau* 12, 619-642.
- Shang C.K, Satir M., Siebel W., Nsifa E.N., Taubald H., Liegeois J.P., Tchoua F.M., 2004. Major and trace element geochemistry, Rb–Sr and Sm–Nd systematics of TTG magmatism in the Congo craton: case of the Sangmelima region, Ntem Complex, southern Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 40, 61–79.
- Shang, C.K., Satir, M., Siebel, W., Taubald, H., Nsifa, E.N., Westphal, M., Reitter, E., 2001. Genesis of K-rich granitoids in the Sangmelima region, Ntem complex (Congo craton), Cameroon. *Terra Nostra* 5, 60–63.
- Shen Y.H., 1999. Sorption of humic acid to soil: the role of soil mineral composition. *Chemosphère* 38, 2489-2499.
- Sigg L., Behra, P. and Stumm, W. 2001. Chimie des milieux aquatiques: chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement. Dunod, Paris, 567 pp.
- Singh P., 2009. Major, trace and REE geochemistry of the Ganga River sediments: influence of provenance and sedimentary processes. *Chemical Geology* 266, 242–255.
- Sparks D.L., 1999. Kinetics and mechanisms of chemical reactions at the soil mineral/water interface. In: Soil physical chemistry (Ed n.e. D.L. Sparks editor), pp. 135-191. CRC Press, Boca Raton.
- Sposito G. 1989. The chemistry of soils. Oxford University Press, Oxford, 277 pp.
- Suchel J.B., 1987. Les climats du Cameroun. Thèse de Doctorat d'état, Université de Bordeaux III, 1186p

- Sunderland S.M., 2000. An inventory of historical mercury emission in Maritime Canada: Implication for present and future contamination. *Science of the total Environment* 256, 39-57.
- Taylor S.R, McLennan S.M., 1985. The continental crust: its composition and evolution. Blackwell, Oxford, 312 p
- Tchameni R., 1997. Géochimie et géochronologie des formations de l'Archéen et du Paléoproterozoïque du Sud-Cameroun (Groupe du Ntem, Craton du Congo). Thèse de l'Université d'Orléans, France, 395p.
- Tchameni R., Lerouge, C., Penaye, J., Cocherie, A., Milesi, J.P., Toteu, S.F., Nsifa, N.E., 2010. Mineralogical constraint for metamorphic conditions in a shear zone affecting the Archean Ngoulemakong tonalite, Congo Craton (Southern Cameroon) and retentivity of U-Pb SHRIMP zircon dates. *Journal of African Earth Sciences* 58, 67-80.
- Tchameni R., Mezger, K., Nsifa, E.N., Pouclet, A., 2001. Crustal origin of early Proterozoic syenites in the Congo Craton (Ntem Complex), South Cameroon. *Lithos* 57, 23e42.
- Tchameni R., Mezger, K., Nsifa, N.E., Pouclet, A., 2000. Neoproterozoic evolution in the Congo craton: evidence from K rich granitoids of the Ntem complex, Southern Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 30, 133–147.
- Tchouatcha M.S., Njoya, Ganno S., Toyama R.P.A., Ngouen. Njiké Ngaha P.R, 2016. Origin and paleoenvironment Pleistocene-Holocène Travertine deposit from the Mbéré sedimentary sub-basin along the Central Cameroon shear zone: insights from petrology and palynology and evidence for neotectonic. *Journal of African Earth Sciences* 118, 24 - 34
- Ternat F. 2007. Prise en compte de la diagénèse sédimentaire dans les modèles de transferts de radionucléides dans les cours d'eau: étude bibliographique sur la diagénèse précoce. Rapport IRSN DEI/SECRE n°2004-047.
- Tessier A., Fortin, D., Belzile, N., DeVitre R.R., Leppard G.G., 1996. Metal sorption to diagenetic iron and manganese oxyhydroxides and associated organic matter: Narrowing the gap between field and laboratory measurements. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60, 387-404.

- Tomlilinson D.L, Wilson J.G, Harris C.R, Jeffrey D.W, 1980. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgolandermeeresuntersuchungen* 33, 566-575.
- Toteu S. F., Penaye J., Deschamps Y., Maldan F., Nyama Alibagoua B., Bouyo Houketchan M., Sep Nlomgan J.P., Mbola Nzana S.P., 2008, Géologie et ressources minérale du Cameroun, 33rd International geological congress, Oslo, Norway, 6-14.
- Toteu S.F., Van Schmus W.R., Penaye J., Nyobe J.B., 1994. U/Pb and Sm/Nd evidence for Eburnean and Pan-African high grade metamorphism in cratonic rocks of Southern Cameroon. *Precambrian Research*. 67, 321e347.
- Touchart L., 2000. Les lacs : origine et morphologie. L'Harmattan, ISBN : 2-7384-9800-0.
- Valerie M., 1995. Pédologie, Atlas, régional Sud-Cameroun. Rapport ORSTOM, 147 pp.
- Varol M., Canpolat, Eris KK, Çaglar M., 2020. Trace metals in core sediment from a deep lake in eastern Turkey: vertical concentration profile, eco-environmental and possible sources. *Ecoenvironment* 189, 1 – 9.
- Varol M., 2011. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques. *Journal of Hazard Materials* 195, 355–364.
- Vicat J.P et Bilong P., 1998. Esquisse de la géologie du Cameroun. Collection Geocam, presse Université de Yaoundé, p : 3-11.
- Viers J, Dupre B, Braun JJ, Deberdt S, Angeletti B, Ndam Ngoupayou J.R, Michard A., 2000. Major and trace element abundances, and strontium isotopes in the Nyong Basin Rivers Cameroon constraints on chemical weathering processes and elements transport mechanisms in humid tropical environments. *Chemical Geology* 169, 211–241.
- Vilaplana J. M. et Bordonau J., 1989. Dynamique sédimentaire glaciaire. Le paleolac de Llestui (Nogura Ribagorçana – versant sud des pyrénées). *Bulletin de l'association française pour l'étude du quaternaire* 26, 219 – 224.
- Villeneuve V., Légaré S., Painchaud J., Vincent W., 2006. Dynamique et modélisation de l'oxygène dissous en rivière. *Revue des sciences de l'eau* 19, 259.

- Vinha M., M., G., S., Cabral Pinto M. M. S.; Carvalho P.C. 2016. Major, trace, and REE geochemistry of recent sediments of lower Catumbela River (Angola). *Journal of African Earth Sciences* 115, 203 – 217.
- Walker C., Hopkin, S., Sibly, R. & Peakall, D., 1996. Principles of ecotoxicology. *Taylor and Francis* 12, 43-50.
- Wang S., Wang, W., Chen, J., Zhao, L., Zhanga, B., Jiang, X., 2019. Geochemical baseline establishment and pollution source determination of heavy metals in lake sediments: a case study in Lihu Lake, China. *Science of Total Environment* 657, 978–986.
- Wentworth C., 1922. Scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*. 30, 377-392.
- Wronkiewicz D.J., Condie, K.C., 1990. Geochemistry and mineralogy of sediments from the Ventersdorp and Transvaal Supergroups, South Africa: Cratonic evolution during the early Proterozoic. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54, 343–354.
- Xu F., Liu, Z., Cao, Y., Qiu, L., Feng, J., Xu, F., Tian, X., 2017. Assessment of heavy metal contamination in urban river sediments in the Jiaozhou Bay catchment, Qingdao, China. *Catena* 150, 9–16.
- Young L.B., Harvey H.H., 1992. The relative importance of manganese and iron oxides and organic matter in the sorption of trace metals by surficial lake sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56, 1175-1186.
- Zhang Q., Dong X., Chen Y., Yang X., Xu M., Davidson T.A., Jeppersen E. 2020. Hydrological alterations as the major driver on environmental change in a floodplain Lake Poyang (China): Evidence from monitoring. *Journal of Great Lakes Research* 16, 25 – 38.
- Zhang Q., Dong X., Chen Y., Yang X., Xu M., Davidson TA., Jeppersen E., 2018. Hydrological alterations as the major driver on environmental change in a floodplain Lake Poyang (China): Evidence from monitoring, *Journal of Great Lakes Research* 41, 14 – 29.
- Zhao X., Gao, B., Xu, D., Gao, L., Yin, S., 2017. Heavy metal pollution in sediments of the largest reservoir (Three Gorges Reservoir) in China: a review. *Environmental Science Pollution Research* 24, 20844–20858.

Zhu L., Liu, J., Xu, S., Xie, Z., 2017. Deposition behavior, risk assessment and source identification of heavy metals in reservoir sediments of Northeast China. *Ecotoxicology Environment Safety* 142, 454–463.

PUBLICATIONS