

REPUBLIQUE DU CAMEROUN  
Paix-Travail-Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I  
FACULTE DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE ET  
FORMATION DOCTORALE  
SCIENCES, TECHNOLOGIES ET  
GEOSCIENCES



REPUBLIC OF CAMEROON  
Peace -Work-Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I  
FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL OF  
SCIENCES, TECHNOLOGY  
AND GEOSCIENCES

**UNITE DE RECHERCHE ET DE FORMATION DOCTORALE EN  
GEOSCIENCES ET APPLICATION**

**DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE**

*Laboratoire de Géosciences des Formations Superficielles et Applications*

**CARACTERES PETROGRAPHIQUES ET GEOCHIMIQUES DES  
SEDIMENTS DU FLEUVE LOBE (SUD CAMEROUN) ; PROVENANCE,  
ENVIRONNEMENT DE DEPOT ET STATUT ENVIRONNEMENTAL**

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

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

**Option** : Géologie Minière et Ressources Pétr

Présenté Par :

**CHOUGONG TCHATCHOUANG Dur**

Master es Sciences  
Matricule : 08X0082

Sous la codirection de :

**Pr YONGUE-FOUATEU Rose**

*Professeur*

**Pr NGUEUTCHOUA Gabriel**

*Maître de Conférences*



*Année 2023*



DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE  
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE DOCTORALE  
EN GEOSCIENCES ET APPLICATIONS

ATTESTATION DE CORRECTION DE THESE DE DOCTORAT/Ph.D

\*\*\*\*\*

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

Nom et Prénoms du candidat : CHOUGONG TCHATCHOUANG DURANE

Matricule : 08X0082

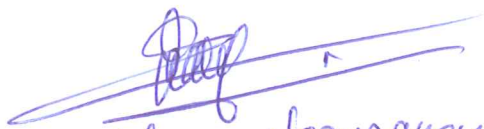
Titre de la thèse : "Caractères pétrographiques et géochimiques des sédiments du fleuve lobe (sud Cameroun) ; provenance, environnement de dépôt et statut environnemental"

Date de soutenance : Mardi, 17 Octobre 2023


Nous, membres du jury, après avoir lu le document qui nous a été présenté, 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.


Le Président du Jury

  
Adam Njoyou  
J.R.


Les Membres

 François NGUETSOP, PR

  
TEMGA J.P

  
E. Elomane

  
N. LONGUE

  
Nguetchouale

## **DEDICACE**

A mon cher papa **TCHATCHOUANG Emmanuel**

et ma tendre maman **CHIME Jeannette**

## REMERCIEMENTS

Cette thèse, sous la conduite du Seigneur Jésus-Christ, a été réalisée suite aux contributions directes ou indirectes des personnes qui ont permis que tout ceci soit une réalité. Chaleureusement, j'adresse mes remerciements aux personnes suivantes :

- YONGUE-FOUATEU Rose, Professeur et co-directeur de cette thèse. Je lui suis reconnaissante d'avoir accordé pour ce travail, de l'intérêt et sa disponibilité pour le codiriger malgré ses multiples occupations ;
- NGUEUTCHOUA Gabriel, Maître de Conférences et co-directeur de cette thèse. Je lui exprime ma reconnaissance pour la vision qu'il a apporté à ce travail, sa disponibilité, ses conseils, son soutien et surtout sa patience lors de la réalisation de ladite thèse ;
- NDJIGUI Paul-Désiré, Professeur et Chef du Département des Sciences de la Terre, qui à travers son bon management, a permis que ce cursus puisse se dérouler dans de bonnes conditions ; de plus, son ardeur et sa rigueur dans ses travaux nous ont toujours inspiré et rendu admiratif ;
- Les enseignants du Département de Sciences de la Terre, pour la bonne formation donnée tout au long de notre parcours académique ;
- L'équipe de recherche de la Station Spécialisée de Recherche en Ecosystèmes Marins et côtiers (SSRECOMA) qui a été à l'origine de ce travail, a aidé aux campagnes de terrain et à certains travaux en laboratoire ;
- Dr EKOA BESSA Armel pour ses conseils, suggestions, orientations et surtout sa disponibilité lors de la réalisation de ce travail ;
- Les techniciens des laboratoires ayant participé aux différentes analyses des échantillons (laboratoire halieutique du SSRECOMA, laboratoire des géosciences de l'Université de Yaoundé 1, l'IRGM, l'IITA, l'AGEs, l'ALS) ;
- Mes camarades de promotion, pour leur solidarité et leur assistance durant ce cursus ;
- Mes frères, sœurs et amis pour le soutien moral et conseils prodigués, plus particulièrement tout au long de cette période ;
- Tous ceux que je n'ai pas pu citer, mais sur qui j'ai toujours pu compter.



## TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
TABLE DES MATIERES.....	iii
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES .....	xii
RESUME .....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCTION GENERALE .....	1
CHAPITRE I : MILIEU NATUREL .....	6
I.1. Cadre géographique et géomorphologique .....	7
I.1.1. Localisation .....	7
I.1.2. Climat .....	7
I.1.3. Orographie .....	9
I.1.4. Hydrographie .....	9
I.1.5. Sols .....	11
I.1.6. Végétation .....	12
I.1.7. Milieu humain et activités socio-économiques .....	12
I.2. Cadre géologique .....	13
I.2.1. Géologie régionale .....	13
I.2.2. Géologie locale .....	15
I.2.3. Modélisation paléotectonique de la zone d'étude .....	16
CHAPITRE II: GENERALITES SUR LES SEDIMENTS.....	19
II.1. Origine, milieu de dépôt et toxicologie .....	20
II.1.1. Origines des sédiments .....	20
II.1.2. Milieux de sédimentation .....	20

II.1.3. Granulométrie des sédiments.....	21
II.1.4. Toxicologie et contamination des sédiments .....	22
II.1.4.1. Origine et enjeux des polluants dans les sédiments .....	23
II.1.4.2. Méthodes d'évaluation de la pollution dans les sédiments .....	23
II.1.4.5. Eléments permettant de donner le statut environnemental dans cette étude .....	24
II.2. Système fluvial ; transport et dépôt des sédiments .....	26
II.2.1. Le système fluvial .....	26
II.2.2. Transport solide .....	27
II.3. Caractérisation des alluvions de quelques fleuves à travers le monde .....	27
II.3.1. Caractérisation physique .....	27
II.3.2. Caractérisation minéralogique .....	28
II.3.3. Caractérisation géochimique .....	30
II.3.4. Marqueurs chimiques de dépôt fluviaux .....	31
II.3.4.1. Classification et transport des sédiments.....	31
II.3.4.2. Maturité et recyclage des sédiments .....	31
II.3.4.3. Altération des roches sources .....	32
II.3.4.4. Provenance des sédiments .....	33
II.3.4.5. Contexte tectonique, paléoclimat et conditions redox .....	33
II.3.5. Quelques traceurs de pollution dans les cours d'eau .....	34
II.3.6. Quelques exemples de dépôts fluviaux au Cameroun .....	35
II.3.6.1. Cas des sédiments du cours d'eau Kellé .....	36
II.3.6.2. Cas des sédiments du cours d'eau Lokoundjé .....	36
II.3.6.3. Cas des sédiments du cours d'eau Dibamba .....	37
II.3.6.4. Cas des sédiments du cours d'eau Nyong .....	38
II.3.6.5. Cas des sédiments des bassins versants (Kienké et Tchangué) .....	38
CHAPITRE III: METHODES D'ETUDE .....	39
III.1. Sur le terrain .....	40
III.2. En laboratoire .....	41
III.2.1. Analyses physiques .....	42
III.2.1.1. Analyse granulométrique .....	42
III.2.1.2. Teneur en eau .....	43

III.2.1.3. Matière Organique .....	44
III.2.2. Analyses minéralogiques .....	44
III.2.2.1. Lames minces de sédiments .....	44
III.2.2.2. Minéraux lourds .....	45
III.2.2.3. Diffraction aux rayons X (DRX) .....	45
III.2.3. Analyses géochimiques .....	46
III.2.3.1. Eléments majeurs .....	46
III.2.3.2. Eléments traces et terres rares .....	46
III.2.4. Analyses statistiques .....	47
 CHAPITRE IV: RESULTATS .....	 48
IV.1. Caractéristiques physiques des sédiments du cours d'eau Lobé .....	49
IV.1.1. Description des carottes de sédiments .....	49
IV.1.1.1. Données d'observation .....	49
IV.1.1.2. Classes texturales des sédiments.....	53
IV.1.1.3. Teneur en eau dans les sédiments .....	54
IV.1.2. Matière organique dans les sédiments .....	56
IV.2. Minéralogie des sédiments .....	57
IV.2.1. Minéraux légers et fragments lithiques .....	57
IV.2.2. Minéraux lourds .....	59
IV.2.3. Diffraction aux rayons X (DRX) .....	63
IV.3. Géochimie des sédiments .....	64
IV.3.1. Eléments majeurs .....	64
IV.3.2. Eléments traces .....	69
IV.3.3. Terres rares (REE) .....	71
IV.4. Statut environnemental des sédiments .....	73
IV.4.1. Répartition des métaux lourds et radionucléides .....	74
IV.4.1.1. Dans la couche de surface .....	75
IV.4.1.2. Dans la couche du milieu .....	76
IV.4.1.3. Dans la couche de base .....	76
IV.4.2. Evaluation verticale de la contamination des sédiments .....	77
IV.4.2.1. Dans la couche de surface .....	80
IV.4.2.1.1. Facteur d'enrichissement (EF) .....	80
IV.4.2.1.2. Indice de géoaccumulation (I <sub>géo</sub> ) .....	81

IV.4.2.1.3. Facteur de contamination (CF).....	82
IV.4.2.1.4. Indice de charge polluante (PLI).....	82
IV.4.2.2. Dans la couche du milieu .....	83
IV.4.2.2.1. Facteur d'enrichissement (EF) .....	83
IV.4.2.2.2. Indice de géoaccumulation (Igéó) .....	83
IV.4.2.2.3. Facteur de contamination (CF).....	84
IV.4.2.2.4. Indice de charge polluante (PLI).....	84
IV.4.2.3. Dans la couche de base .....	84
IV.4.2.3.1. Facteur d'enrichissement (EF) .....	84
IV.4.2.3.2. Indice de géoaccumulation (Igéó) .....	84
IV.4.2.3.3. Facteur de contamination (CF).....	85
IV.4.2.3.4. Indice de charge polluante (PLI).....	85
 CHAPITRE V: INTERPRETATION ET DISCUSSION.....	 87
V.1. Classification des sédiments .....	88
V.2. Maturité et recyclage des sédiments .....	89
V.3. Altération des roches sources .....	91
V.4. Provenance des sédiments .....	93
V.4.1 Nature des roches sources d'après les éléments majeurs et traces .....	93
V.4.2. Nature des roches mères source d'après les terres rares .....	98
V.4.3. Corrélation de la géochimie des sédiments et des roches sources potentielle .....	99
V.5. Contexte tectonique .....	100
V.6. Paléoclimat et conditions redox.....	104
V.7. Statut environnemental .....	105
V.7.1. Contribution des éléments au statut environnemental .....	105
V.7.2. Sources de polluants .....	106
V.8. Aspect économique : exploration des minéraux lourds et terres rares .....	109
 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	 112
 BIBLIOGRAPHIE .....	 115

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.</b> Localisation de la zone d'étude .....	7
<b>Figure 2.</b> Diagramme ombrothermique de Kribi .....	8
<b>Figure 3.</b> Orographie de la zone d'étude .....	9
<b>Figure 4.</b> Bassin versant des fleuves côtiers au sud de la Sanaga .....	10
<b>Figure 5.</b> Bassin versant du cours d'eau Lobé .....	11
<b>Figure 6.</b> Aperçu de la végétation du cours d'eau Lobé .....	12
<b>Figure 7.</b> Contexte géologique du Cameroun .....	14
<b>Figure 8.</b> Carte géologique du Sud Cameroun présentant le bassin versant de la Lobé .....	16
<b>Figure 9.</b> Proposition d'évolution géodynamique de la ceinture panafricaine au nord du craton du Congo.....	18
<b>Figure 10.</b> Emboîtement schématisé de l'hydrosystème dans le système fluvial .....	26
<b>Figure 11.</b> Prélèvement des carottes de sédiment .....	40
<b>Figure 12.</b> Carte d'échantillonnage des carottes de sédiments du cours d'eau Lobé .....	41
<b>Figure 13.</b> Manipulation des carottes en laboratoire .....	42
<b>Figure 14.</b> Matériels de sédimentométrie .....	43
<b>Figure 15.</b> Profil vertical de la carotte Nie1.....	49
<b>Figure 16.</b> Profil vertical de la carotte Nie2 .....	50
<b>Figure 17.</b> Profil vertical de la carotte Nie3 .....	51
<b>Figure 18.</b> Profil vertical de la carotte Lob1 .....	51
<b>Figure 19.</b> Profil vertical de la carotte Lob2 .....	52
<b>Figure 20.</b> Profil vertical de la carotte Lob3 .....	52
<b>Figure 21.</b> Profil vertical de la carotte Lob5 .....	53
<b>Figure 22.</b> Plot des sédiments du cours d'eau Lobé dans le diagramme ternaire de Folk .....	54

<b>Figure 23.</b> Variation des teneurs en eau dans les sédiments du cours d'eau Lobé .....	54
<b>Figure 24.</b> Lames minces de sédiments .....	57
<b>Figure 25.</b> Plot des sédiments du cours d'eau Lobé dans le diagramme ternaire Q-F-L .....	58
<b>Figure 26.</b> Observation microscopique des minéraux lourds des sédiments du cours d'eau Lobé .....	60
<b>Figure 27.</b> Diagrammes surfaciques des minéraux lourds des sédiments du cours d'eau Lobé .....	62
<b>Figure 28.</b> Spectres de diffraction aux rayons X des sédiments du cours d'eau Lobé .....	63
<b>Figure 29.</b> Spectres des éléments traces des sédiments du cours d'eau Lobé, normalisés par rapport à l'UCC .....	71
<b>Figure 30.</b> Spectres des terres rares des sédiments du cours d'eau Lobé normalisés par rapport à l'UCC .....	73
<b>Figure 31.</b> Répartition des métaux lourds et radionucléides dans les sédiments de surface du cours d'eau Lobé .....	75
<b>Figure 32.</b> Répartition des métaux lourds et radionucléides dans les sédiments de milieu du cours d'eau Lobé .....	76
<b>Figure 33.</b> Répartition des métaux lourds et radionucléides dans les sédiments de base du cours d'eau Lobé .....	77
<b>Figure 34.</b> Variation du facteur d'enrichissement dans les différentes couches des sédiments du cours d'eau Lobé .....	81
<b>Figure 35.</b> Variation de l'indice de géo accumulation dans les différentes couches des sédiments du cours d'eau Lobé .....	81
<b>Figure 36.</b> Variation du facteur de contamination dans les différentes couches des sédiments du cours d'eau Lobé .....	82
<b>Figure 37.</b> Variation de l'indice de charge polluante dans les différentes couches des sédiments du cours d'eau Lobé .....	83
<b>Figure 38.</b> Diagramme de classification géochimique des sédiments du cours d'eau Lobé ...	88



<b>Figure 39.</b> Diagramme bivarié ICV vs CIA, déduisant la maturité et l'altération des sédiments du cours d'eau Lobé .....	89
<b>Figure 40.</b> (a) Diagramme ternaire $Al_2O_3$ – $TiO_2$ –Zr (b) diagramme bivarié Th/Sc vs Zr/Sc, présentant le recyclage des sédiments du cours d'eau Lobé .....	90
<b>Figure 41.</b> Diagramme ternaire A ( $Al_2O_3$ ) – CN ( $CaO^*+Na_2O$ ) – K ( $K_2O$ ) des sédiments du cours d'eau Lobé, déduisant l'altération des roches sources .....	92
<b>Figure 42.</b> Diagramme bivarié Zr vs. $TiO_2$ des sédiments du cours d'eau Lobé .....	93
<b>Figure 43.</b> Diagramme bivarié La/Sc vs. Th/co des sédiments du cours d'eau Lobé .....	94
<b>Figure 44.</b> Diagramme bivarié Y/Ni vs. Cr/V des sédiments du cours d'eau Lobé .....	94
<b>Figure 45.</b> Diagramme ternaire V–Ni–Th*10 des sédiments du cours d'eau Lobé .....	95
<b>Figure 46.</b> Diagramme ternaire La–Th–Sc des sédiments du cours d'eau Lobé .....	95
<b>Figure 47.</b> Diagramme bivarié Hf vs. La/Th des sédiments du cours d'eau Lobé .....	96
<b>Figure 48.</b> Fonction discriminante des sédiments du cours d'eau Lobé .....	96
<b>Figure 49.</b> Spectres de normalisation des chondrites des roches mères probables des sédiments du cours d'eau Lobé .....	100
<b>Figure 50.</b> Diagrammes de discrimination tectonique des sédiments du cours d'eau Lobé ...	102
<b>Figure 51.</b> Diagrammes de discrimination tectonique des sédiments du cours d'eau Lobé ...	103
<b>Figure 52.</b> Contribution fractionnelle de chaque élément à leur répartition totale .....	105
<b>Figure 53.</b> Dendrogrammes de la classification hiérarchique des éléments chimiques sélectionnés du cours d'eau Lobé .....	107
<b>Figure 54.</b> Schéma de l'analyse des composantes principales des variables étudiées des sédiments du cours d'eau Lobé .....	108
<b>Figure 55.</b> Spectres des éléments majeurs des sédiments du cours d'eau Lobé normalisés par rapport à l'UCC .....	110

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I.</b> Distribution mensuelle des données climatologiques de Kribi de 2007 à 2021 .....	8
<b>Tableau II.</b> Classifications granulométriques .....	22
<b>Tableau III.</b> Classes des indices de pollution et niveau de contamination utilisés pour cette étude .....	24
<b>Tableau IV.</b> Caractéristiques physiques des sédiments du cours d'eau Lobé .....	55
<b>Tableau V.</b> Carbone organique total (COT) et matière organique (MO) des sédiments du cours d'eau Lobé .....	56
<b>Tableau VI.</b> Proportion des minéraux lourds (%) dans les sédiments du cours d'eau Lobé ....	61
<b>Tableau VII.</b> Composition semi- quantitative des minéraux des sédiments du cours d'eau Lobé .....	64
<b>Tableau VIII.</b> Teneurs des éléments majeurs (%) dans les échantillons des sédiments du cours d'eau Lobé .....	66
<b>Tableau IX.</b> Matrice de corrélation des données géochimiques (majeurs, traces et terres rares) des sédiments du cours d'eau Lobé .....	67
<b>Tableau X.</b> Teneurs des éléments traces (ppm) dans les échantillons des sédiments du cours d'eau Lobé .....	69
<b>Tableau XI.</b> Teneurs des terres rares (ppm) dans les échantillons des sédiments du cours d'eau Lobé .....	71
<b>Tableau XII.</b> Concentrations (mg/kg) en métaux lourds et radionucléides des sédiments du cours d'eau Lobé .....	74
<b>Tableau XIII.</b> Indices de pollution (EF, Igeo, CF and PLI) des métaux lourds et radionucléides des sédiments de surface du cours d'eau Lobé .....	77
<b>Tableau XIV.</b> Indices de pollution (EF, Igeo, CF and PLI) des métaux lourds et radionucléides des sédiments de milieu du cours d'eau Lobé .....	78
<b>Tableau XV.</b> Indices de pollution (EF, Igeo, CF and PLI) des métaux lourds et radionucléides des sédiments de base du cours d'eau Lobé .....	79

**Tableau XVI.** Corrélation entre les variables et les facteurs principaux .....108

## LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

**BIF** : Banded Iron Formation

**COTCO** : Comeroon Oil Transportation Company

**GPS** : Global Positioning System

**HEVECAM** : Hévéa Cameroun

**HREE** : High Rare Earth Elements

**Ia** : Indice d'aridité

**ICP-MS** : Inductivly Coupled Plasma-Mass Spectroscopy

**KPDC** : Kribi Power Development Company

**LPA** : Lumière polarisée analysée

**LPNA** : Lumière polarisée non analysée

**LREE** : Light Rare Earth Elements

**SNH** : Société Nationale des Hydrocarbures

**SOCAPALM** : Société Camerounaise de Palmeraies

**UCC** : Upper Continental Crust

## RESUME

La présente étude apporte des informations sur la nature des sédiments et l'histoire tectonique du substratum du cours d'eau Lobé et détermine au travers de leur statut environnemental, l'impact des activités anthropiques dans ce milieu. Des analyses physiques, minéralogiques et géochimiques ont été effectuées sur les carottes sédimentaires dudit cours d'eau. Les sédiments du cours d'eau Lobé, de couleur gris marron à blanchâtre, sont constitués de sables (81,54 % en amont et 82,18 % en aval), des limons (16,93 % en amont et 16,29 % en aval) et d'argiles (1,61 % en amont et 1,69 % en aval), leur conférant une texture sableuse à sablo-limoneuse où les niveaux sableux enregistrent de faibles teneurs en eau. Les concentrations en matière organique comprises entre 0,38 et 4,83 % en amont et entre 0,71 et 3,97 % en aval, sont faibles. Ces sédiments sont composés de quartz comme phase majeure et selon le diagramme Q-F-L, ils sont des litharenites feldspathiques et des arkoses lithiques. La classification géochimique de ces sédiments les identifie majoritairement comme sables ferreux et litharenite. Les diagrammes ternaire ( $Al_2O_3$ - $TiO_2$ -Zr) et binaire (Th/Sc-Zr/Sc) suggèrent un recyclage et un tri élevé des sédiments, indiquant que l'énergie hydraulique affecte la texture des sédiments. Les diagrammes ternaires A-CN-K, (A-K)-C-N, l'indice d'altération chimique (CIA) et l'indice d'altération des plagioclases (PIA) indiquent que les sédiments étudiés et leur zone source ont subi un degré d'altération chimique élevé. Le cortège minéralogique suggère une provenance hétérogène, constituée de roches ignées, métamorphiques et sédimentaires. Les diagrammes binaires Zr vs  $TiO_2$ , Th/Co vs La/Sc, Cr/V vs Y/Ni et La/Th vs Hf et ternaire V-Ni-Th\*10 et le diagramme discriminant de provenance, suggèrent des roches mères felsiques avec une contribution négligeable des roches mafiques/ultramafiques et des détritiques recyclés. La comparaison des spectres normalisés par rapport à la chondrite de ces sédiments avec des roches mères potentielles révèle que ces sédiments sont dérivés des roches du socle précambrien composées de suites tonaliques, trondhjemitiques et granodioritiques, avec des restes dérivés de la ceinture de roches vertes archéennes. Les diagrammes binaire  $SiO_2$  vs  $K_2O/Na_2O$ , ternaire La-Th-Sc et Th-Sc-Zr/10 et les fonctions discriminantes tectoniques, indiquent un contexte de rift en marge passive, cohérent avec l'histoire tectonique du Complexe du Ntem. La répartition des métaux lourds (Fe, Ni, Cr, Co, Sc et V) et des radionucléides (Th et U) étudiés dans les trois couches définies (surface, milieu et base) présente la même succession :  $Fe > Cr > Ni > V > Th > Co > Sc > U$ . La concentration maximale de la plupart de ces éléments a été enregistrée au milieu, puis la surface et la base. Les indices de pollution (EF, I-geo, CF et PLI) suggèrent que les couches de surface et du milieu sont « polluées » tandis que celle de la base est « non polluée », démontrant la dégradation de cet environnement avec le temps ; Cr, Ni et Th étant les éléments les plus « polluants ». Une source anthropique est suggérée pour les métaux et une source naturelle pour les radionucléides.

**Mots clés :** Cours d'eau Lobé, sédiment, métaux lourds et radionucléides, pollution, Cameroun.

## ABSTRACT

The present study provide information on the sediments nature and tectonic history of the bedrock of this River, and determine through their environmental status, the impact of anthropogenic activities. Physical, mineralogical and geochemical analyses have been carried out on the sedimentary sampling cores. The grey-brown to whitish sediments of the Lobé River are made up of sand (81.54 % upstream and 82.18 % downstream), silt (16.93 % upstream and 16.29 % downstream) and clays (1.61 % upstream and 1.69 % downstream), which confer them a sandy to sandy-loamy texture, where the sandy layers record low water content. Between 0.38 and 4.83 % for upstream and between 0.71 and 3.97 % for downstream, organic matter concentrations are low. These sediments are composed of quartz as a major phase and according to the Q-F-L diagram, they are feldspathic litharenites and lithic arkose. The geochemical classification of these sediments mainly identifies them as Fe-sand and litharenite. The ternary ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Zr}$ ) and binary ( $\text{Th/Sc-Zr/Sc}$ ) diagrams, suggest a high sediment recycling and sorting, indicating that the bulk hydraulic energy of the River controls the sediment texture. The ternary diagrams A-CN-K, (A-K)-C-N, the chemical index of alteration (CIA) and the plagioclase index of alteration (PIA) indicate that the studied sediments and their source areas underwent a high degree of chemical weathering. The mineral assemblage imply heterogeneous provenance, including igneous, metamorphic and sedimentary source rocks. Binary diagrams Zr vs  $\text{TiO}_2$ , Th/Co vs La/Sc, Cr/V vs Y/Ni and La/Th vs Hf, ternary diagram V-Ni-Th\*10 and the discriminant functions diagram of provenance, suggest mostly felsic source rocks with lesser contribution from mafic/ultamafic components and recycled detritus. The comparison of chondrite normalized REE patterns of LR sediments with potential source rocks reveals that the sediments were derived from the Precambrian basement rocks composed of tonalitic, trondhjemitic, and granodioritic suites, with remnants derived from Archean Greenstone Belt. The binary  $\text{SiO}_2$  vs  $\text{K}_2\text{O/Na}_2\text{O}$ , ternary La-Th-Sc and Th-Sc-Zr/10 diagrams and tectonic discriminant functions indicate a passive margin rift context, consistent with the tectonic history of the Ntem Complex. The distribution of heavy metals (Fe, Ni, Cr, Co, Sc and V) and radionuclides (Th and U) studied in the three defined layers (surface, middle and base) presents the same succession:  $\text{Fe} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{V} > \text{Th} > \text{Co} > \text{Sc} > \text{U}$ . The maximum concentration of most elements was recorded in the middle layer, then the surface and the base layers. The pollution indices (EF, I-geo, CF and PLI) suggest that the surface and middle layers are “polluted” while the base one is “unpolluted”, denoting the degradation of this environment over time; Cr, Ni and Th are the most “pollutant” elements. An anthropogenic source is suggested for heavy metals and a natural source for radionuclides.

**Keywords:** Lobé River, Stream sediment, Heavy metals and radionuclides, Pollution, Cameroon.



## **INTRODUCTION GENERALE**

## Contexte justificatif

Les sédiments clastiques ont un impact sur le fonctionnement des installations tels que les barrages, chenaux d'accès, bassins portuaires. Ils peuvent être utiles pour, les mines et la géotechnique. Par conséquent, la connaissance des caractères physiques, minéralogiques et géochimiques des sédiments clastiques ainsi que les caractéristiques du milieu de dépôt de ces derniers sont nécessaires (Mignot, 1968). Il est clairement établi que la granulométrie, renseignant principalement sur l'agent de transport et sa dynamique, couplée à la matière organique. Ce sont des facteurs importants qui affectent la répartition des éléments traces (Jain et al., 2005 ; Farkas et al., 2009 ; Bartoli et al., 2012, Ramasamy et al., 2014). En effet, les particules fines ont tendance à contenir des valeurs élevées en métaux.

La géochimie des sédiments fluviaux (Singh, 2009 ; Ndjigui et al., 2018 ; Mbale Ngama et al., 2019), lacustres (Roy et al., 2008 ; Ekoa Bessa et al., 2018 ; N'nanga et al., 2019), et marins (Wang et al., 2014 ; Zhang et Gao, 2015 ; Armstrong-Altrin et al., 2018) a largement été utilisée pour déduire l'état d'altération de la zone source, la composition des roches mères et les processus de dépôt. L'altération chimique des minéraux provoque la destabilisation des feldspaths (minéraux très altérables) des roches du substratum et les transforment en minéraux argileux secondaires. Cela se traduit par un lessivage sélectif des cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) par rapport aux constituants peu mobiles tels que  $\text{Al}^+$  et  $\text{Ti}^{4+}$  (Nesbitt et Young, 1982). Ces caractéristiques chimiques se retrouvent dans les détritiques sédimentaires et sont considérés comme des indicateurs utiles de la composition des roches mères et des conditions d'altération (McLennan, 1993).

Les sédiments des rivières et des terrasses alluviales et des plaines d'inondations adjacentes sont constituées principalement de résidus minéraux et de matériaux non biologiques qui représentent les produits détritiques des bassins versants (Arhin et Nude, 2009). Ces sédiments peuvent être utilisés pour déterminer la signature géochimique des zones sources et précisément des roches du substratum, car leur chimie est très sensible aux variations lithologiques (Singh, 2009; Kirkwood et al., 2016; Silva et al., 2016).

Dans la mesure où ils sont abondants et accessibles, les sédiments des cours d'eau actuels offrent les opportunités d'extraire des informations pétrographiques des zones qui sont dépourvues d'affleurements, tels que le domaine Atlantique équatorial en Afrique centrale. Dans cette zone, la connaissance du substratum rocheux est limitée par la rareté des affleurements. En effet, les affleurements sont inaccessibles, du fait de la densité de la

végétation et de l'épaisse couverture latéritique sous la forêt dense équatoriale. Afin de fournir une vue globale de la différence géochimique entre de nombreux secteurs de ce socle rocheux, il convient d'envisager des études géochimiques des sédiments de cours d'eau drainant les bassins versants.

### **Problématique**

La lithologie du substratum du bassin versant du cours d'eau Lobé et ses environs appartient au Complexe du Ntem, qui est principalement constitué de granites, de gneiss, de migmatites, des plutons granitoïdes, de suites tonalitique, trondhjemitique et granodioritique (TTG), de charnockites (granitoïdes à orthopyroxène), des formations de fer rubanées (BIF) et des paragneiss à sillimanite (Clifford et Gass, 1970 ; Cahen et al., 1976 ; Bessoles et Trompette, 1980 ; Nédélec et al., 1990). Bien que les précédentes études susmentionnées aient tenté de caractériser la genèse des roches du Complexe du Ntem, les structures, les conditions de dépôt et les étendues d'affleurements de ces roches restent à préciser sur la zone géographique du bassin versant de la Lobé et ses environs. En effet, les caractères pétrographiques et géochimiques des sédiments alluviaux du cours d'eau Lobé, qui appartient à l'une des zones côtières du bassin versant des fleuves côtiers, n'est pas encore documentée. On pense que le cours d'eau Lobé est important dans la zone équatoriale, car il a un régime permanent et porte toujours une quantité non négligeable de charges en suspension à la côte atlantique du Sud-Ouest du Cameroun (Olivry, 1986).

Peu d'études géochimiques sur les alluvions ont été rapportées dans la région Atlantique équatoriale (Ndjigui et al., 2015, 2018 ; Nyobe et al., 2018 ; Mbale Ngama et al., 2019 ; Bassanak Ongboye et al., 2019 ; Mioumnde et al., 2019). De plus, ces études ont été limitées en terme de nombre d'échantillon, et ne couvrent pas la plupart des bassins versants des rivières de la zone étudiée. Des recherches systématiques et des données quantitatives sont donc nécessaires pour mieux comprendre les variations lithologiques de ce substratum rocheux.

D'un autre côté, les écosystèmes aquatiques sont facilement endommagés par l'érosion des sols et autres contaminants provenant de sources naturelles et anthropiques (Kaushik et al., 2009 ; Hanif et al., 2016). En raison de l'adsorption, l'hydrolyse et la co-précipitation des ions métalliques, de grandes quantités de métaux lourds se déposent dans les sédiments, alors qu'il ne reste qu'une faible proportion d'ions métalliques libres en solution dans la colonne d'eau. En effet, Bartoli et al. (2012) révèlent que moins d'1 % des polluants restent dissouts dans l'eau, alors que plus de 99% sont stockés dans les sédiments. Les métaux lourds, les nutriments du

sol et les polluants chimiques proviennent des effluents liquides, des engrais et pesticides (Sun et al., 2018 ; Zhou et al., 2018 ; Armstrong-Altrin et al., 2019 ; Jiang et al., 2019), des ruissellements et des produits chimiques provenant de diverses zones urbaines, d'activités industrielles et agricoles (Xiao et al., 2013 ; Zahra et al., 2014 ; Mimba et al., 2018 ; Al-Hadithy et al., 2018 ; Chen et al., 2019). Ces polluants réduisent l'usage des ressources pour les personnes en aval et peuvent également endommager la vie aquatique des cours d'eau, lacs et estuaires (Chairman, 1991). De plus, l'intérêt porté à l'étude des radionucléides et l'évaluation de leurs impacts sur les sols, les plantes comestibles et les humains augmente constamment (Shtangeeva, et al. 2018). Les éléments radioactifs comme  $^{232}\text{Th}$  et  $^{238}\text{U}$  avec leurs produits de désintégration sont présents dans la plupart des environnements et peuvent être transférés au corps humain par différentes voies qui peuvent conduire aux sources d'exposition pour l'homme (Harmsen et Haan, 1980).

La pratique de l'agriculture semi intensive et le résultat de la transformation industrielle des produits agricoles dans le bassin versant de la Lobé et ses environs, peuvent affecter l'environnement. Il est donc important d'évaluer l'état de pollution de ces sédiments pour prévenir la dégradation de l'écosystème et envisager une veille écologique.

### **Objectifs de recherche**

- **Objectif général**

Déterminer la nature des sédiments et comprendre l'histoire tectonique du substratum du bassin versant du fleuve Lobé et déduire au travers de son statut environnemental, l'impact des activités anthropiques.

- **Objectifs spécifiques**

Plus spécifiquement, il s'agira de :

- Caractériser la pétrographie et la minéralogie des sédiments du fleuve Lobé ;
- Evaluer l'état d'altération et déterminer la provenance des alluvions ;
- Evaluer les distributions spatiales et verticales des métaux lourds et des radionucléides (Th et U) dans ces sédiments ;
- Déterminer le niveau de pollution de ces sédiments et identifier la source probable des éléments polluants.

## **Structure de la thèse**

Ce document de thèse sera articulé autour de cinq (5) chapitres, encadrés d'une introduction générale et d'une conclusion générale.

- Le premier chapitre décrira le milieu naturel de la zone d'étude au travers des contextes géographiques, géomorphologiques et géologiques ;
- Le deuxième chapitre mettra en exergue des généralités sur les sédiments ;
- Le troisième chapitre fera état de la démarche méthodologique adoptée pour l'acquisition des données tant sur le terrain qu'en laboratoire ;
- Le quatrième chapitre présentera les résultats d'analyses pétrographiques, minéralogiques et géochimiques des données récoltées ;
- Dans le cinquième chapitre, des interprétations des résultats obtenus et leur discussion seront données.

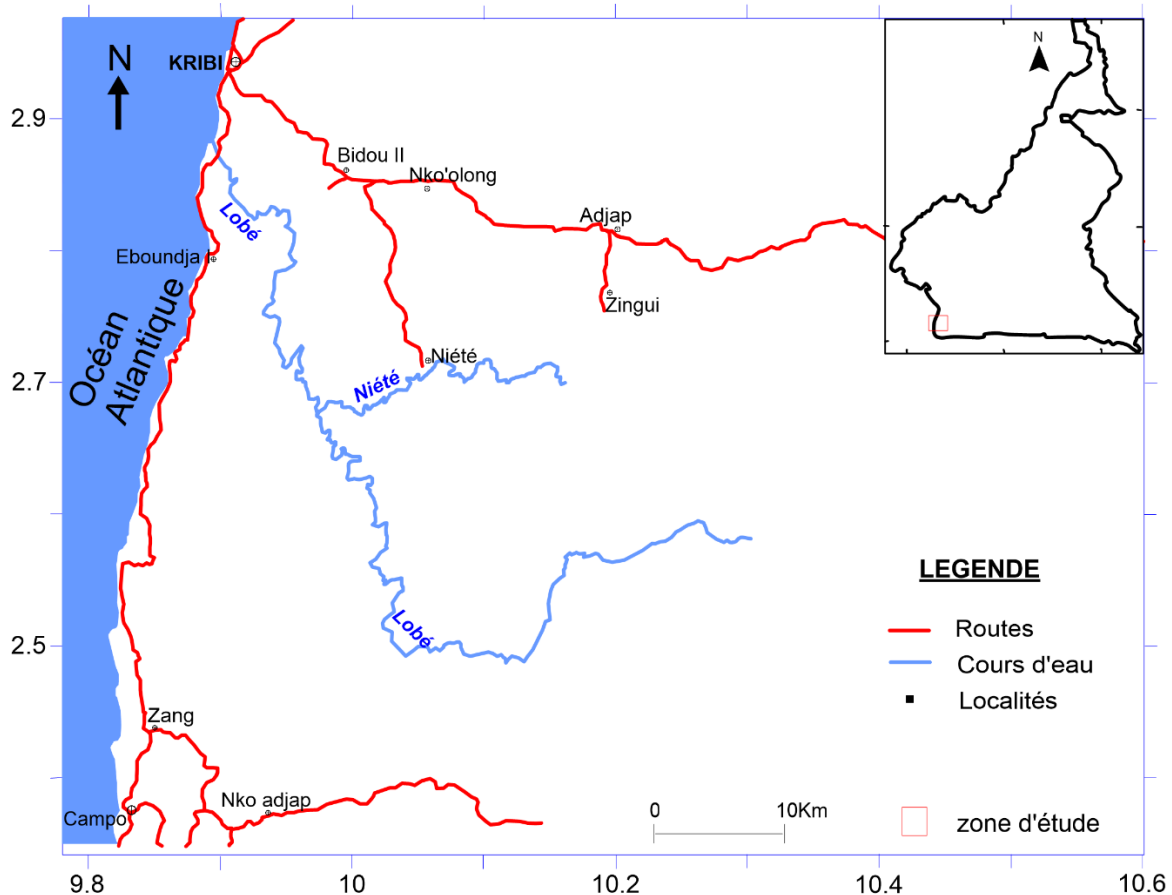
## **CHAPITRE I : MILIEU NATUREL**



## I.1. Cadre géographique et géomorphologique

### I.1.1. Localisation

Le cours d'eau Lobé est l'un des fleuves côtiers du Sud Cameroun. Il est localisé dans la Région du Sud, Département de l'Océan, entre les parallèles 2°24' et 2°54'N et les méridiens 9°48' et 10°30'E (Fig.1). Il prend sa source au centre du parc national Campo-Ma'an et rejoint l'Océan Atlantique à travers la forêt équatoriale par des chutes spectaculaires à proximité de la ville de Kribi.



**Figure1.** Localisation de la zone d'étude.

### I.1.2. Climat

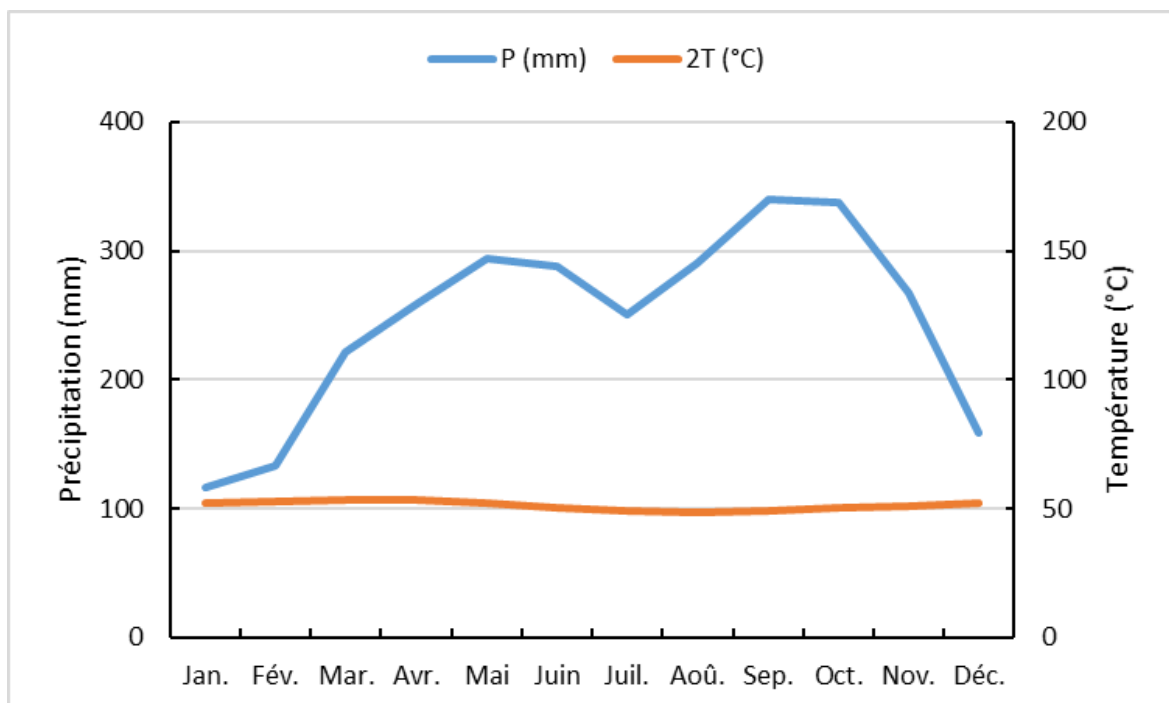
La zone d'étude appartient au domaine du climat tropical côtier, à une saison pluvieuse. Une température moyenne de 26 °C est enregistrée dans la zone d'étude. Le régime climatique tropical côtier y est régi, essentiellement par la mousson atlantique qui s'engouffre dans le Golfe de Guinée, entraînant un renforcement des précipitations sur la côte ; les précipitations annuelles sont d'environ 3000 mm, mais diminuent rapidement vers l'Est (Olivry, 1986 ; Liéno et al., 2008).

La caractérisation globale du climat est faite par l'indice de De Martonne ( $I_a$ ) dont la formule est donnée par :  $I_a = P * 12 / T + 10$ , P : pluviométrie du mois (mm) T : température du mois (°C). Les mois secs sont ceux qui ont  $I_a < 20$  et les mois humides,  $I_a > 50$ .

Les données climatologiques moyennes (précipitations, températures et indice d'aridité) de la station météorologique de Kribi sont résumées dans le tableau I, et le diagramme ombrothermique obtenu est présenté par la figure 2. Dans cette zone, nous remarquons qu'à l'exception du mois de février, tous les autres sont des mois humides (Tab. I). Les mois les plus pluvieux sont Septembre et Octobre tandis que les moins pluvieux sont Décembre et Janvier.

**Tableau I.** Distribution mensuelle des données climatologiques de Kribi de 2007 à 2021 (Station météorologique de Kribi)

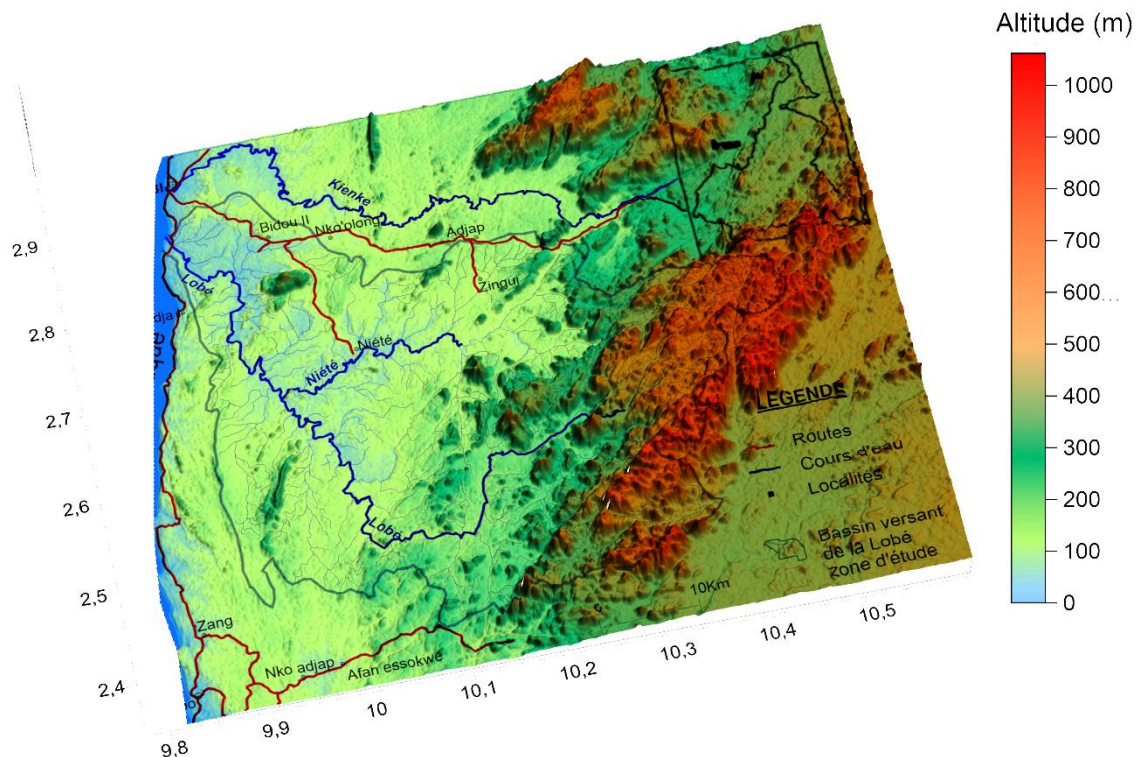
Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aoû.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Total / Moyenne annuelle
<b>P (mm)</b>	116	133	222	259	294	288	251	290	340	338	267	159	2957
<b>T (°C)</b>	26,2	26,5	26,7	26,6	26,2	25,3	24,6	24,4	24,7	25,2	25,6	26	26,67
<b><math>I_a</math></b>	38,5	43,7	72,6	84,9	97,5	97,9	87,1	101,2	117,6	115,2	90	53	80,6



**Figure 2.** Diagramme ombrothermique de Kribi (Bagnouls et Gausson, 1957)

### I.1.3. Orographie

La zone d'étude appartient au domaine côtier qui s'étend de l'océan vers l'intérieur du continent, sur environ 150 km en direction de l'Est et sur 200 km vers le Nord (Fig. 3). Ce domaine, occupée par la forêt dense ombrophile, s'élève graduellement vers l'intérieur et atteint l'altitude de 300-350 m (Champetier de Ribes, 1956). La morphologie de détail est constituée par un nombre considérable de petites collines séparées par des ruisseaux à écoulement lent. Une coupe d'une de ces collines montre que la majeure partie du sommet présente un arrondi convexe marqué ; la pente est assez forte et, après un point d'inflexion situé vers le bas du versant, la partie inférieure présente, au contraire, un arrondi concave mais assez court. C'est la forme en "demi-orange", classique en région équatoriale (Ségalen, 1967).

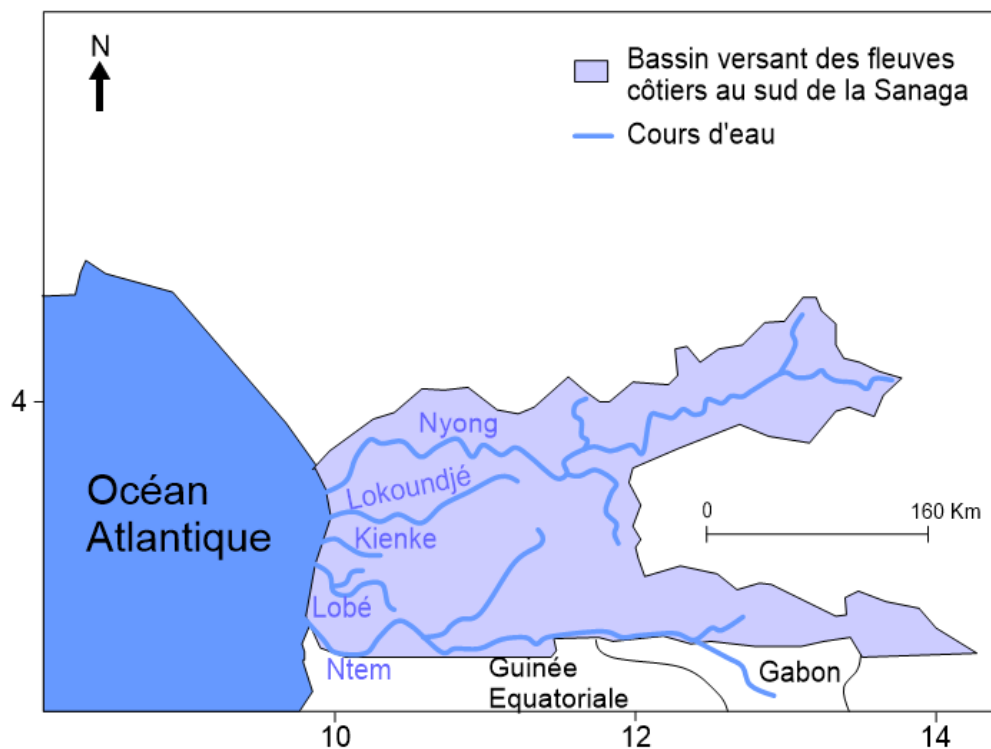


**Figure 3.** Orographie de la zone d'étude.

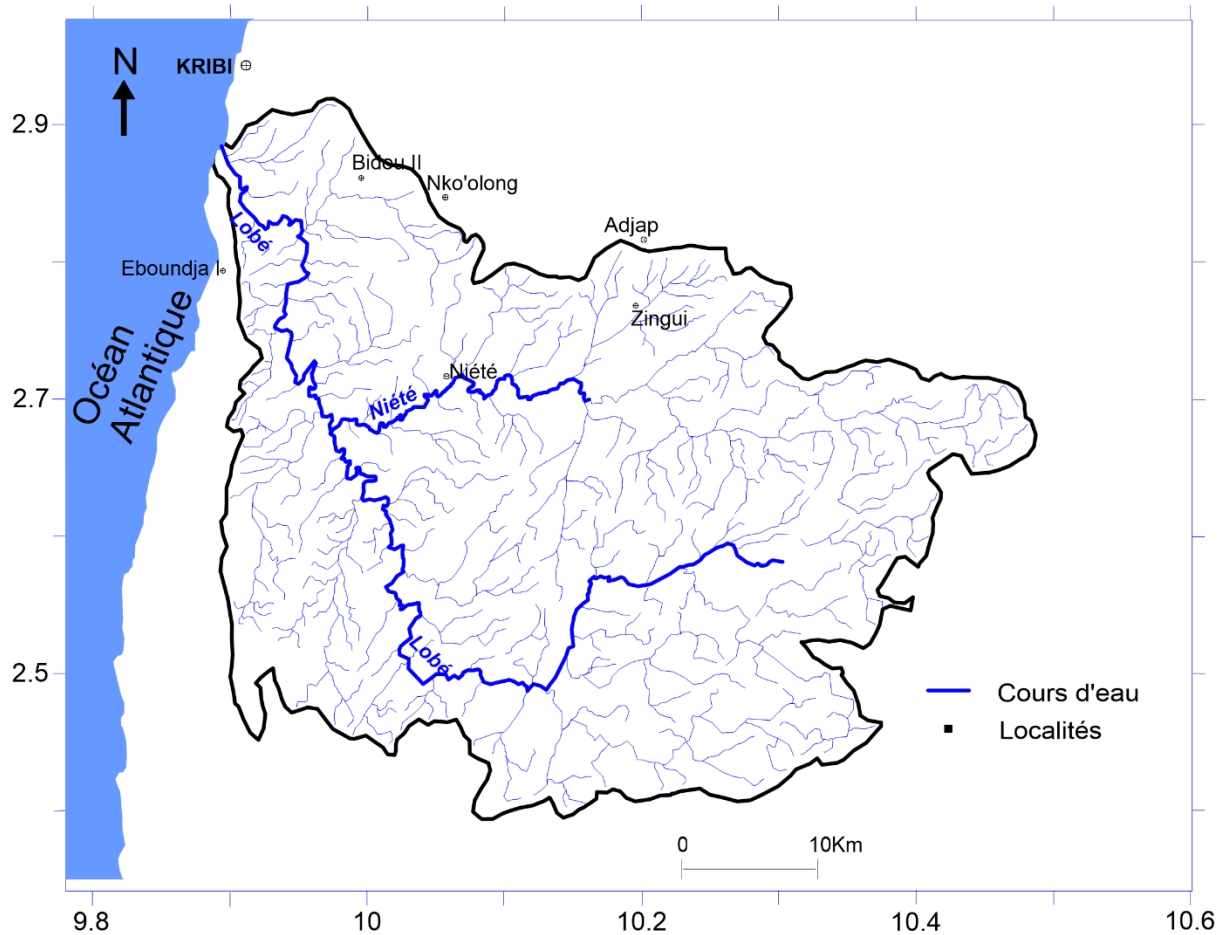
### I.1.4. Hydrographie

Cette zone Sud Cameroun est drainée par le bassin versant des fleuves côtiers au Sud de la Sanaga qui est un bassin exoréique dû au fait que ses cours d'eau se déversent dans l'Océan Atlantique. Les fleuves rencontrés sont : le Nyong, la Lokoundjé, la Kienké, la Lobé et le Ntem (Fig. 4). Le Nyong, long de 520 km, prend sa source à l'Est d'Abong-Mbang et draine une superficie de 29 000 km<sup>2</sup>. La Loukoundje qui prend naissance dans la région de Mvegue est

long de 170 km après avoir drainé une surface de 5200 km<sup>2</sup>. La Kienke prend sa source à l'Est d'Akom II, draine la ville Kribi sur une superficie de 1435 km<sup>2</sup> et a une longueur de 190 km. Le Ntem quant à lui prend sa source au Nord du Gabon ; son bassin versant est de 31 000 km<sup>2</sup> et sa longueur de 360 km. Partant de la zone de Nkolbengue, après un parcours orienté SE-NW de 130 km, la Lobé se jette dans l'océan atlantique sous forme de chute à proximité de la ville de Kribi, ayant drainé une superficie de 1940 km<sup>2</sup> avec la Niété, son principal affluent (Fig. 5) (Olivry, 1986).



**Figure 4.** Bassin versant des fleuves côtiers au sud de la Sanaga.



**Figure 5.** Bassin versant du cours d'eau Lobé.

### I.1.5. Sols

Dans la zone du Sud-Cameroun, appartenant au domaine forestier équatorial, les sols rencontrés sont de nature ferrallitique (9/10<sup>e</sup> de la superficie). Sous l'influence des trois principaux paramètres que sont : la nature de la roche mère, le climat (drainage), le pédo-climat (humidité), des variantes de ces sols ferrallitiques sont observées. Il s'agit des sols ferrallitiques jaunes, près de la côte atlantique; des sols ferrallitiques rouges vers l'intérieur et des sols ferrallitiques indurés dont la limite avec les précédents est difficile à établir (Ségalen, 1967). Lorsque le drainage est vertical et libre, on a une formation préférentielle des sols rouges tandis que les sols jaunes et bruns sont le résultat d'un drainage insuffisant. La richesse de la roche en minéraux ferromagnésiens favorise la formation des oxydes de fer responsables de la couleur rouge des sols. Les sols au bas de versants sont généralement jaunes à cause d'une forte humidité, tandis que vers les sommets l'humidité est moins forte, on observe essentiellement des sols rouges (Ségalen, 1967).



### I.1.6. Végétation

La zone Sud-Ouest Cameroun est dominée par deux formations forestières. La forêt sempervirente biafréenne d'une part, très diversifiée, présente une forte abondance en *Caesalpinaceae*. La forêt littorale atlantique pour sa part, est pauvre en *Caesalpinaceae* et caractérisée par l'abondance de *Lophira alata* (*Ochnaceae*), *Sacoglottis gabonensis* (*Humiriaceae*), *Coula edulis* (*Olacaceae*) et *Cynometra hankei* (*Caesalpinaceae*). À ses caractères floristiques héréditaires, la forêt littorale ajoute des caractères résultants d'actions anthropiques anciennes aujourd'hui apparemment effacées. *Sacoglottis gabonensis* est typiquement sempervirent, alors que l'origine de *Lophira alata* peut s'expliquer de deux manières : soit par un déplacement vers le Sud à partir des climats relativement secs lui permettant de pénétrer dans une zone nettement humide ou alors à partir de vastes défrichements cultureux humains entrepris depuis des siècles (Fig. 6 ; Letouzey, 1979).



**Figure 6.** Aperçu de la végétation du cours d'eau Lobé.

### I.1.7. Milieu humain et activités socio-économiques

Les populations de la région de Kribi et ses environs se répartissent de façon inégale à travers les arrondissements de Kribi et Campo. Elles appartiennent à la sphère culturelle Bantou de la zone côtière, qui s'étend entre l'embouchure du Nyong et du Ntem jusqu'à Campo. La



population estimée à plus de 72 454 habitants est repartis en six grands ensembles ethniques : Bantaga, Mabea, Bulu, Mvae, Ngumba et Yasa (Dikoume, 1970 ; Dounias, 1993). La population est majoritairement chrétienne et animiste, cependant des musulmans y sont rencontrés et sont pour la plupart des étrangers.

Les activités les plus importantes de la région sont : la pêche, l'agriculture, l'exploitation du bois, le tourisme, la chasse, l'extraction de sable, le commerce, l'exploitation pétrolière et l'aquaculture. Dans le secteur économique, plusieurs industries y sont rencontrées (SOCAPALM, HEVECAM, SNH, COTCO, KPDC ...) et de plus avec l'installation du Port Autonome de Kribi (PAK) beaucoup d'autres entreprises s'installent davantage, ce qui favorise une croissance démographique non négligeable.

## **I.2. Cadre géologique**

### **I.2.1. Géologie régionale**

La géologie régionale est dominée par les terrains archéens et paléoprotérozoïques ainsi que la ceinture panafricaine qui se développe dans la partie Nord de la bordure de ce craton (Fig. 7). L'ensemble géologique constitué du socle cratonique et de la zone remobilisée panafricaine se scinde en trois parties : un domaine Sud encore appelé domaine de Yaoundé, un domaine central encore appelé domaine Adamaoua-Yadé et un domaine Ouest et Nord.

#### **- Domaine Sud (DS)**

Le domaine Sud est constitué des unités métasédimentaires panafricaines tels que les roches observées à Betamba (Ngnotué et al. 2000) ou à Yaoundé (Nzenti et al. 1988). Il s'agit des schistes de faible à moyen degré de métamorphisme, passant graduellement du Sud, près du Craton du Congo au nord à des micaschistes grenatifères et des gneiss comportant des gneiss migmatitiques dans la région de Yaoundé. On y observe également des roches métaplutoniques tels que les métadiorites, les métagabbro, les métasyénites, les métagranites et les métapéridotes, associés au métasédiments. Cette ensemble chevauche la bordure nord du craton du Congo. Les unités métasédimentaires se seraient déposées dans un contexte tectonique de marge passive à la bordure nord du craton du Congo.

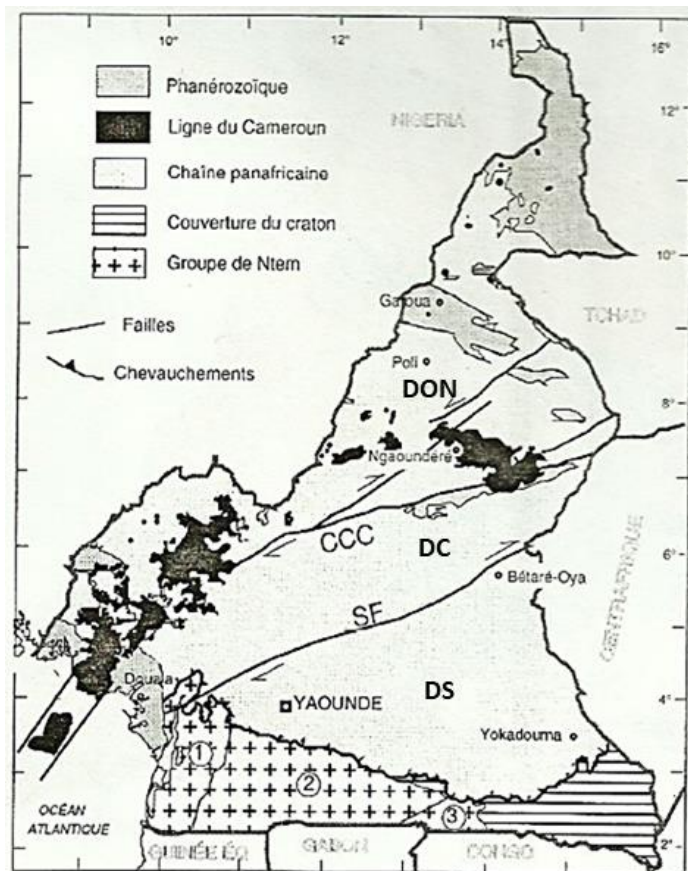
#### **- Domaine central (DC)**

Ce domaine, encore appelé Adamaoua-Yadé, est localisé entre la faille de la Sanaga (SF) au sud et la faille de Tcholliré-Banyo au Nord. La pétrographie de ce domaine est marquée par

une intense granitisation, des métasédiments et des orthogneiss d'âge archéen à paléoprotérozoïque. Les âges anciens indiquent que le substratum de ce domaine proviendrait du recyclage d'une ancienne croûte d'âge archéen à paléoprotérozoïque. Ceci pourrait correspondre à la remobilisation du craton du Congo. Ici le métamorphisme atteint un haut degré d'intensité et permet la formation des faciès granulitiques (Bouyo Houketchang et al. 2009 ; 2013). Ce domaine comprend également des roches volcano-sédimentaires qui ont été observées dans le bassin de Lom. On y observe également des roches métasédimentaires de faible gradient de métamorphisme ainsi que des roches volcoclasiques felsiques âgées d'environ 613 Ma et interprétées comme étant des bassins syntectoniques des événements panafricains (Ngako et al. 2003 ; Toteu et al. 2006).

- Domaine Ouest et Nord (DON)

Il est constitué de schistes volcanosédimentaires d'âge néoprotérozoïque, des gneiss d'âge 2.1Ga, et des orthogneiss. Les roches volcaniques montrent des faciès toléitiques et alcalins. Ce domaine montre des intrusions de granitoïdes variés de nature pré, syn et post tectonique. Ce domaine est représenté par le groupe de Poli au Nord Cameroun qui s'étend au Tchad où il correspond au groupe de Léré (Ngako et al. 2003 ; Toteu et al. 2006).



**Figure 7.** Contexte géologique du Cameroun (Vicat, 1998).

### **I.2.2. Géologie locale**

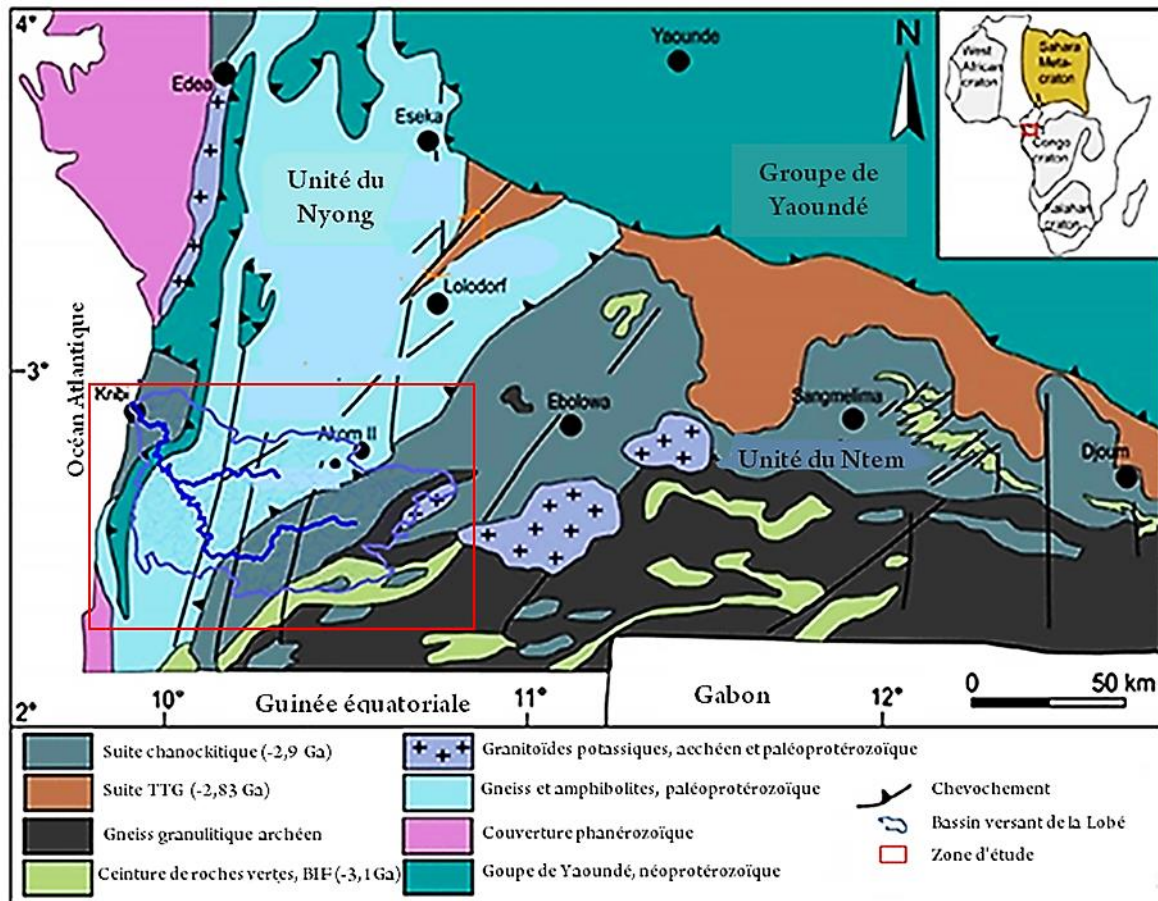
La zone d'étude se trouve dans le Complexe du Ntem, qui représente la partie Nord-Ouest du Craton du Congo (Fig. 8). Cette partie du craton est très bien exposée dans le Sud du Cameroun (Maurizot et al. 1985 ; Googwin, 1991). Ce complexe est majoritairement constitué de roches archéennes associées aux matériaux remobilisés au début du Protérozoïque (Tchameni, 1997). La partie ouest du Complexe du Ntem est constituée des unités du Ntem et du Nyong.

#### **- L'unité du Ntem**

Cette unité est composée de formations lithologiques diverses parmi lesquelles on note la ceinture de roches vertes archéennes et les complexes intrusifs (Nsifa et al. 1993 ; Tchameni, 1997). Les roches vertes archéennes ne sont préservées que sous forme de zénolites de tailles variables dans les complexes intrusifs jeunes. Ces complexes intrusifs sont représentés par des suites de roches de nature tonalitique, trondhjemitique et granodioritique (TTG). Ces roches sont datées entre 2.9 et 2.8 Ga (Toteu et al., 1994 ; Tchameni et al., 2000). Les déformations importantes endurées par les roches vertes et la granitisation importante observée à la fin de l'archéen ont conduit à la formation des gneiss. Les syénites recoupent la ceinture de roches vertes et les suites TTG (Maurizot et al. 1985 ; Nédélec, 1990 ; Tchameni, 1997 ; Tchameni et al., 2000 ; Kornsporst et al., 2002). Du point de vu structural, les roches de l'unité du Ntem sont caractérisées par une foliation S1 orientée N80 à N120°E. Cette foliation a été observée sur les reliques des roches vertes et sur les TTG. Localement, une foliation S1 orientée N-S a été observée dans les granitoïdes potassiques et les tonalites.

#### **- L'unité du Nyong**

Elle est caractérisée par des roches de haut degré de métamorphisme tel que les gneiss. Ces roches ont initialement été définis comme étant d'âge néoprotérozoïque ou paléoprotérozoïque, remobilisées de la bordure nord-ouest du craton archéen du Congo (Feybesse et al., 1998). Cette unité est dominée par des gneiss à biotite et à hornblende. Localement elles sont composées de TTG, des gneiss à grenat et orthopyroxènes (Charnokites), des pyroxénites, des amphibolites à grenat et des fer rubanés (BIF). Les roches magmatiques sont constituées de métadiorites, granodiorites et syénites. Les syénites sont orientées SW-NW et apparaissent sous forme d'intrusions s'étendant de Lolodorf à Olama. L'unité du Nyong est caractérisée par une foliation S1, S2, diversement orientée. L'évolution métamorphique de l'unité est polycyclique avec des assemblages granulitiques paléoprotérozoïques, marquée dans la partie ouest par des recristallisations métamorphiques de haut degré intervenues des évènements panafricains (Toteu et al., 1994).



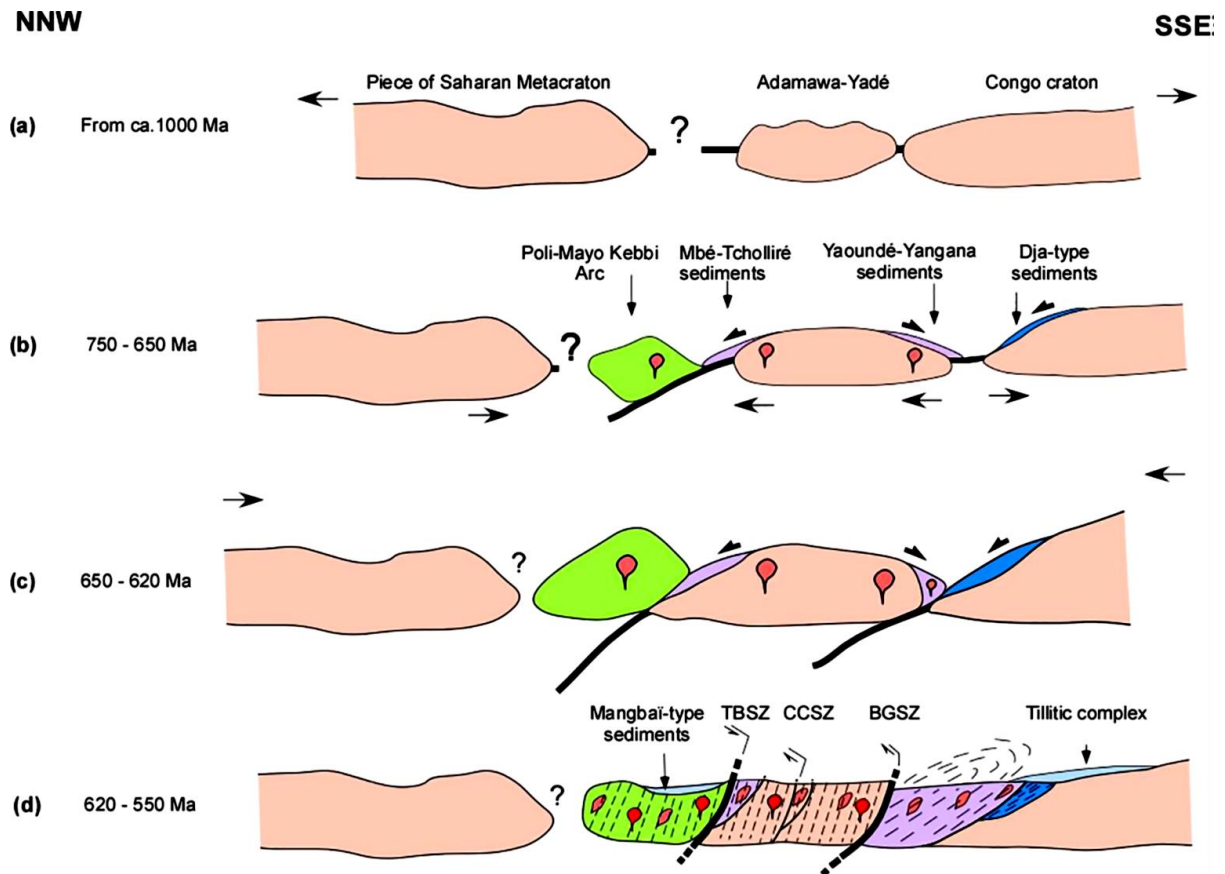
**Figure 8.** Carte géologique du Sud Cameroun présentant le bassin versant de la Lobé (Toteu et al., 2001).

### I.2.3. Modélisation paléotectonique de la zone d'étude

Plusieurs auteurs documentent un environnement de collision de blocs crustaux dans la région du Cameroun au nord du craton du Congo. Cet environnement de collision implique également des évènements tectoniques d'ouverture et de développement d'anciens bassins océaniques et sédimentaires (Nzenti, 1988 ; Toteu et al., 2006 ; Ngako et al., 2008 ; Bouyo Houketchang et al., 2013). Cette environnement de collision implique la dynamique de trois blocs continentaux crustaux : le bloc du craton du Congo au sud, le bloc des métacratons sahariens au Nord et entre les 2, le bloc d'Adamaoua-Yadé. Ce bloc d'Adamaoua-Yadé (AYD), se serait détaché du craton du Congo au début du néoprotérozoïque tel que le confirme les âges de C. 1000Ma obtenues sur des zircons détritiques du groupe de Yaoundé (Tchakounté et al., 2017). Ce détachement est à l'origine de l'ouverture et du développement du bassin sédimentaire de Yaoundé-Yangana (YYD) entre le tonien et le début de l'édiacarien. C'est donc un bassin qui se forme entre la bordure sud du bloc de l'Adamaoua-Yadé et la bordure nord du craton du Congo. L'ouverture et le développement de ce bassin a probablement conduit à l'apparition de

la croûte océanique tel que le suggère la présence des serpentinites et des harzbugites observées dans la nappe panafricaine. A la bordure nord du bloc Adamaoua-Yadé, des roches sédimentaires tel que celles de la région de Mbe-Tcholliré ont aussi été déposées entre le Tonien et l'Ediacarien (Bouyo Houketchang et al., 2009 ; Saha-Fouotsa 2019). Ces séquences sédimentaires déposées vers les bordures nord et sud du bloc Adamaoua-Yadé ont fait l'objet d'un métamorphisme granulitique de haute pression et d'une migmatisation généralisée. 600Ma (Nzenti, 1988 ; Stendal et al., 2006 ; Owona et al., 2011 ; Bouyo Houketchang et al., 2009 ; 2013 ; Saha-Fouotsa 2019). Au cours de ces évènements, les roches du bassin de Yaoundé-Yangana ont chevauché le craton du Congo.

Sur la base de ces données pétrographiques et géochronologiques, Toteu et al. (2022) propose un modèle géotectonique impliquant des zones de subduction au nord du craton du Congo. Dans ce modèle, la marge sud du bloc Adamaoua-Yadé se comporte comme une marge continentale active. La collision entre le bloc Adamaoua-Yadé et le craton du Congo aurait été précédée par l'ouverture et la fermeture de grands bassins océaniques. Des ouvertures et des fermetures de grands bassins océaniques ont également été envisagées pour la zone au nord du bloc Adamaoua-Yadé (Fig. 9).



**Figure 9.** Proposition d'évolution géodynamique de la ceinture panafricaine au nord du craton du Congo (Toteu et al., 2022). (a) : Détachement au Tonien du bloc AYD du craton du Congo ; le développement de l'arc de Poli-Léré implique la présence d'un océan au nord du bloc AYD ; (b) : dépôt du groupe Yaoundé-Yangana et des sédiments de Mbé-Tcholliré sur les bordures sud et nord du bloc AYD respectivement du Tonien au début de l'Ediacarien ; dépôt du groupe Dja-Nola sur la bordure nord du craton du Congo ; développement de l'arc de Poli-Léré ; (c) : raccourcissement général et enfouissement des sédiments déposés aux bordures du bloc AYD avec métamorphisme HP, migmatisation et granitisation; métamorphisme de faible à moyen degré dans le groupe Dja-Nola ; (d) : collision finale avec fusion crustale et granitisation, développement des zones de cisaillement à forte contrainte au niveau des sites d'anciennes sutures ; dépôt de bassins post collisionnels (type Mangbaï et complexe tillitique) ; mise en place de postcollision granitoïdes. La relation avec le métacraton saharien est inconnue car la région est couverte de dépôts méso-cénozoïques.

## **CHAPITRE II: GENERALITES SUR LES SEDIMENTS**

Ce chapitre abordera quelques notions liées à la caractérisation des sédiments au regard de leur typologie, les environnements de dépôt, les classifications granulométriques et leur toxicologie. Le fonctionnement du système fluvial sera décrit et enfin une synthèse de quelques travaux antérieurs déjà réalisés sur les sédiments de cours d'eau sera faite.

## **II.1. Origine, milieu de dépôt et toxicologie**

Les sédiments représentent un ensemble d'éléments, déposés par l'eau, le vent, la glace, qui proviennent de la destruction de roches préexistantes ou d'être vivants. La destruction se fait par des mécanismes physiques produisant la fragmentation des matériaux (altération physique) et des réactions chimiques donnant des solutions de lessivage (altération chimique). Les éléments solides sont déplacés sous l'effet de la gravité, souvent par l'intermédiaire d'un fluide transporteur (eau, glace), et sous l'effet des variations de pression atmosphérique qui produisent les vents (Foucault et Raoult, 1995).

### **II.1.1. Origines des sédiments**

Une partie des produits de destruction peut s'accumuler momentanément sur place, sans être transportée, et constitue alors une couche d'altération. Les débris, dans leur majeure partie, sont déplacés puis déposés, généralement dans l'eau, pour former un sédiment détritique (alluvions au sens large). Les éléments en solution qui précipitent forment un sédiment d'origine chimique ; lorsque les êtres vivants interviennent, ils sont d'origine biochimique (Ammon 1997 ; Chamley, 2000).

### **II.1.2. Milieux de sédimentation**

Les sédiments vont principalement se déposer dans des milieux continentaux aquatiques (plaines alluviales, lacs, marécages, delta, terrasse alluviale, méandres, bassin sédimentaire) ; ils se déposeront également dans des milieux marins (plages et plateforme littorales, talus sous-marin, bassin et fosse océanique) et dans les milieux intermédiaires (estuaires, deltas, lagunes), où leur consolidation sera à l'origine de la formation des roches sédimentaires (Clapcott, 2011 ; Foucault et Raoult, 1995).

La sédimentation d'origine éolienne augmente avec l'aridification et la désertification. Les sédiments transportés par le vent sont des minéraux issus de l'érosion des sols et des roches,



des incendies, ... Les dunes et le lœss sont des résultats d'un transport sédimentaire éolien (Chamley, 2000).

Des particules physiques, des êtres vivants et leurs excréta sédimentent en permanence dans les eaux douces, saumâtres et salées, ou se déposent dans les glaciers. Elles peuvent être remobilisées et transportées ailleurs. Les périodes de crue des rivières et des fleuves entraînent une plus grande quantité de sédiments, car les débits, plus forts, ont une plus importante force érosive et une plus grande énergie de transport. La baisse subséquente des niveaux d'eau crée souvent de vastes étendues de sol nouveau sur les plaines inondables (Clapcott, 2011).

Les lacs, deltas, mers et océans accumulent des sédiments pendant de longues périodes (transgression marine). Le matériau peut être terrigène (venant des terres) ou marin (dont l'origine est marine). Les sédiments déposés se transforment en roches sédimentaires qui peuvent contenir des fossiles des habitants de ce volume d'eau jadis recouvert par les couches de sédiments. Leur carottage permet de connaître l'évolution du climat (Chamley, 2000, Gesdon et al., 2014).

Les moraines et tills ou tillites sont des dépôts de sédiments ayant été transportés par la glace. Les effondrements gravitaires créent aussi des sédiments comme les talus et les glissements ainsi que les éléments de karstologie (Clapcott, 2011).

### **II.1.3. Granulométrie des sédiments**

La granulométrie est l'étude de la répartition des éléments d'un sédiment en fonction de leur taille (Ndjeng, 1978). Cette étude renseigne sur les conditions de dépôt, la nature et la vitesse de l'agent de transport. Ces méthodes sont le tamisage (le tamisage à sec et le tamisage sous eau), les méthodes optiques (la microscopie optique), le tri par fluide (la sédimentométrie) ou les méthodes électriques (la diffraction laser).

Les classes granulométriques sont nombreuses et variables selon les auteurs, l'échelle spatiale des secteurs géographiques étudiés et la nature des sédiments rencontrés. Le tableau suivant présente quelques classifications selon certains auteurs (Udden, 1914 ; Wentworth, 1922 ; Friedman, 1979 ; Blott et Pye, 2001).

**Tableau II.** Classifications granulométriques.

Taille de grain		Terminologie des classes			
$\Phi$	mm/ $\mu$ m	Udden (1914), Wentworth (1922)	Friedman (1979)	Blott et Pye (2001)	
-11	2048 mm	Galets	Très grand bloc	Très grand Grand Moyen Petit Très petit	Galets
-10	1024		Grand bloc		
-9	512		Bloc moyen		
-8	256		Petit bloc		
-7	128		Grand galet		
-6	64		Petit galet		
-5	32	Cailloux	Cailloux très grossier	Très Grossier Grossier Moyen Petit Très petit	Gravier
-4	16		Cailloux grossier		
-3	8		Cailloux moyen		
-2	4		Cailloux fin		
-1	2	Granules	Cailloux très fin		
0	1	Sable très grossier	Sable très grossier	Très Grossier Grossier Moyen Petit Très petit	Sable
1	500 $\mu$ m	Sable grossier	Sable grossier		
2	250	Sable moyen	Sable moyen		
3	125	Sable fin	Sable fin		
4	63	Sable très fin	Sable très fin		
5	31	Limons	Limons très grossier	Très Grossier Grossier Moyen Petit Très petit	Limon
6	16		Limons grossier		
7	8		Limons moyen		
8	4		Limons fin		
9	2	Argile	Limons très fin		
			Argile	Argile	

#### II.1.4. Toxicologie et contamination des sédiments

Les sédiments constituent un habitat colonisé par des espèces spécifiques (fouisseuses) qui y jouent un rôle majeur (épuration, aération, fermentation, bioturbation). Ce dernier joue un rôle de puits de carbone ; quand il est fin et riche en matière organique, il consomme de l'oxygène et devient anoxique. Il peut néanmoins être aérée par des vers ou animaux fouisseurs (Edwards et Rolley, 1965).

Le sédiment, souvent utilisé comme engrais ou amendement abrite parfois des espèces pathogènes (souvent anaérobies), et des polluants plus ou moins toxiques et persistants, pas ou peu ou lentement biodégradables selon les cas, éventuellement radioactifs ou mutagènes, ou génotoxiques (Grimalt et al., 2004 ; Chen et White, 2004). Il participe aussi à la qualité de l'eau des nappes phréatiques en jouant un rôle de tampon ou de « filtre », grâce auquel une partie des éléments polluants des rivières reste fixée (dont une partie peut toutefois être emportée vers la mer ou d'autres parties du bassin-versant lors des grandes crues) (Ferry, 1992).

En aval des zones habitées, cultivées et/ou industrialisées, les sédiments des fleuves, des canaux, des gares d'eau, des estuaires et des littoraux ainsi que de certains lacs sont souvent très pollués. La pollution peut être ancienne, issue de mines anciennes (de métaux par exemple) et/ou récentes. On parle parfois de « pollution de stock », qui peut devenir ou redevenir une « pollution de flux » en période de crue, de même qu'à la suite de la formation des méandres du cours d'eau soit à la suite de travaux contribuant directement ou indirectement (modification des courants) à leur remise en suspension (Clapcott, 2011). Des sédiments peuvent aussi avoir été pollués directement par le rejet volontaire ou involontaire de déchets, ou dans certains lacs par l'immersion volontaire de munitions, d'explosifs et de déchets divers. Le long des canaux, des dépôts de boues de curages peuvent parfois constituer des points de relargage de pollution (Clapcott, 2011).

#### **II.1.4.1. Origine et enjeux des polluants dans les sédiments**

Bien que cette pollution soit très souvent accentuée par les actions des hommes (pesticides, déchets ménagers et industriels ...), elle a une origine naturelle à la base (production naturelle des minéraux suite à l'altération des roches). Ainsi, des enjeux autour de la santé environnementale des sédiments sont donc posés du fait de la contamination de ces milieux qui affecte la faune et la flore liées à ces derniers. De ce fait, 99% de polluants sont retenus dans les sédiments contre 1% concentré dans l'eau, rendant ainsi la surveillance du statut environnemental de ces milieux nécessaire (Bartoli et al., 2012). De plus, Ramasamy et al. (2014) et Narayana et Rajashekara (2010), expliquent que, de faibles taux en matière organique ne facilitent pas la fixation des métaux lourds dans les sédiments. Tous ces paramètres compliquent la gestion de certains sédiments qui peuvent accumuler des polluants physiques, organiques ou organométalliques plus ou moins dégradables, des métaux toxiques non dégradables et des radionucléides artificiels et/ou naturels dans l'environnement qui recueillent les polluants aéroportés et déposés via les neiges, les pluies et les dépôts secs (Grimalt et al., 2004).

#### **II.1.4.2. Méthodes d'évaluation de la pollution dans les sédiments**

Qu'elle soit causée par les hydrocarbures, les composés organochlorés, les métaux lourds ou encore les radionucléides, plusieurs paramètres et méthodes permettent d'évaluer la pollution des sédiments et le risque écologique encourus par ces milieux. Il s'agira de certains indices tels que EF (facteur d'enrichissement ; Wang et al., 2008), Igeo (indice de geoaccumulation ; Müller, 1969), CF (facteur de contamination ; Hakanson, 1980; Tomlinson et al., 1980), CD

(Degré de contamination ; Hakanson, 1980), PLI (Indice de charge polluante ; Tomlinson et al., 1980), Er (facteur du risque écologique potentiel ; Hakanson, 1980) et le RI (indice du risque écologique potentiel ; Hakanson, 1980). Le tableau III représente la classification des indices de pollution qui seront utilisés dans cette étude.

**Tableau III.** Classes des indices de pollution et niveau de contamination utilisés pour cette étude.

EF		Igeo		CF		PLI	
Classes	Qualité du sédiment	Classes	Qualité du sédiment	Classes	Qualité du sédiment	Classes	Qualité du sédiment
EF < 1.5	Enrichissement naturel	Igeo ≤ 0; 0	Non pollué	CF < 1	Faible contamination	PLI < 1	Pas de pollution
EF > 1.5	Enrichissement anthropique	Igeo = 0–1; 1	Non pollué à moyennement pollué	CF = 1–3	Contamination modérée		
EF < 1	Pas d'enrichissement	Igeo = 1–2; 2	Moyennement pollué	CF = 3–6	Contamination considérable	PLI > 1	Pollution
EF = 1–3	Enrichissement mineur	Igeo = 2–3; 3	Moyennement à fortement pollué	CF > 6	Contamination élevée		
EF = 3–5	Enrichissement modéré	Igeo = 3–4; 4	Fortement pollué				
EF = 5–25	Enrichissement modéré à sévère	Igeo = 4–5; 5	Fortement à très fortement pollué				
EF = 25–50	Enrichissement très sévère						
EF > 50	Enrichissement extrêmement sévère						

EF: the enrichment factor (Wang et al., 2008); Igeo: the geoaccumulation index (Müller, 1969); CF: the contamination factor (Hakanson, 1980; Tomlinson et al., 1980); PLI: the pollution load index (Tomlinson et al., 1980).

#### II.1.4.5. Eléments permettant de donner le statut environnemental dans cette étude

Pour déterminer la qualité de ces sédiments, certains métaux lourds (Fe, Ni, Cr, Co, Sc et V) et les radionucléides (Th et U) ont été sélectionnés en fonction des effets de leur toxicité dans un tel écosystème.

Le fer (Fe) fait partie de la première rangée de la série des éléments de transition du tableau périodique. Il est connu comme étant l'un des éléments les plus abondants dans la couche terrestre (Taylor and McLennan, 1985).

Le nickel (Ni), la plus grande partie de tous ces composés qui sont libérés dans l'environnement seront absorbés par les sédiments ou les particules du sol et deviendront immobiles ; il n'est pas connu que le nickel s'accumule chez les plantes ou les animaux. Le nickel peut également se retrouver dans les eaux de surface lorsqu'il s'agit d'une partie des flux d'eaux usées (Chau et Kulikovskiy-Cordeiro, 1995).

Les niveaux de chrome dans l'air, l'eau et le sol sont généralement bas. Ces concentrations sont originaires des processus naturels et les activités humaines. Dans l'eau, le chrome sera absorbé

par les sédiments et devient immobiles et fortement attaché aux particules du sol (Reimann et Caritat, 1998). Le chrome est plus toxique pour les invertébrés que pour les poissons, il n'est pas connu pour s'accumuler dans le corps des poissons mais des concentrations élevées peuvent endommager leurs branchies (Moore et Ramamoorthy, 1984).

Le cobalt n'est pas souvent disponible librement dans l'environnement; il a tendance à être produit comme sous-produit des activités d'extraction du nickel et du cuivre (Kabata-Pendias et Pendias 2001). Cependant, lorsque les particules de cobalt ne sont pas liées aux particules de sol ou de sédiments, l'absorption par les plantes et les animaux est plus élevée, et une accumulation dans les plantes et les animaux peut se produire.

Le scandium peut rarement se trouver dans la nature, car il est produit en très petites quantités. On ne le trouve généralement que dans deux types de minerais, thortveitite est la source primaire et les sous-produit des résidus de traitement de l'uranium peuvent aussi être une importante source (Kabata-Pendias et Pendias 2001).

Le vanadium ne se trouve jamais non lié dans la nature. Il est produit dans les gisements contenant du carbone tels que le pétrole brut, le charbon, le schiste bitumineux et les sables bitumineux (Kabata-Pendias et Pendias 2001). L'arrosage est un moyen important par lequel le vanadium est redistribué dans l'environnement parce que les vanadates sont généralement très solubles. Il peut être associé aux algues, aux plantes, aux invertébrés, aux poissons et à de nombreuses autres espèces.

Le thorium se trouve en petites quantités dans la plupart des roches et des sols. Cet élément circule très peu dans l'environnement en raison de la grande insolubilité des oxydes de thorium (Reimann et Caritat, 1998; Sahoo et al., 2011).

Bien que l'uranium soit radioactif comme le thorium, il est plus présent dans la nature que ce dernier. On le trouve en petites quantités dans les roches, le sol, l'air et l'eau à des concentrations variables qui sont généralement très basses. Il est peu probable que l'uranium s'accumule dans les poissons ou les légumes en raison de sa solubilité dans l'eau, qui détermine sa mobilité dans l'environnement, ainsi que sa toxicité (Domingo, 2001).

## II.2. Système fluvial ; transport et dépôt des sédiments

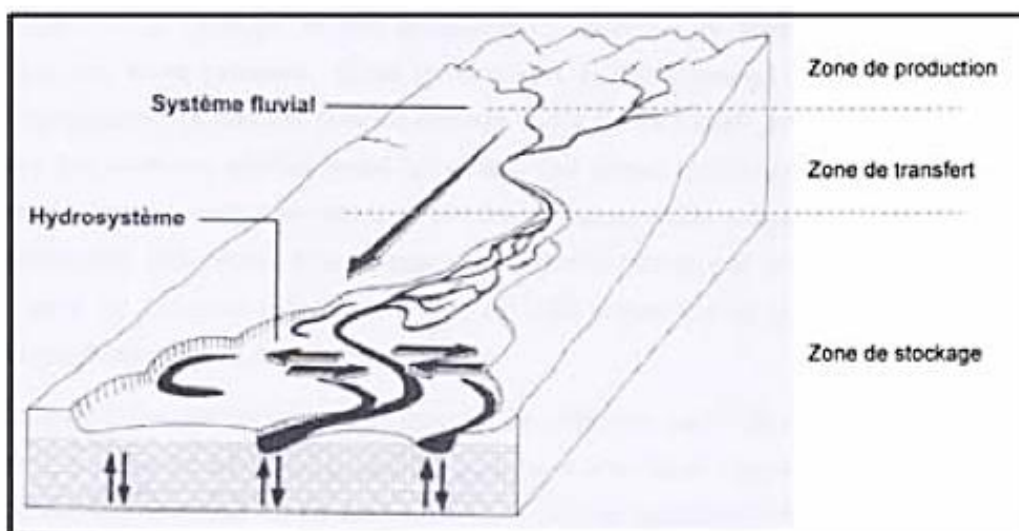
### II.2.1. Le système fluvial

L'approche systémique d'un cours d'eau et de ses espaces fonctionnels s'appuie sur deux (2) concepts complémentaires : le système fluvial qui formalise les interactions entre le cours d'eau et son bassin versant et l'hydrosystème fluvial, centré sur les échanges de matières et d'énergie entre le cours d'eau et sa plaine alluviale (Amoros et Petts, 1993 ; Fig. 10).

Le système fluvial est un concept géomorphologique centré sur l'organisation spatiale des transferts de sédiments. Il repose essentiellement sur la dimension longitudinale des échanges au sein d'un bassin versant et propose un découpage de ce dernier en trois (3) secteurs :

- La zone de production, constituée par l'ensemble des versants et des têtes de bassin qui ont pour fonction principale de produire les sédiments qui seront ensuite progressivement évacués par le système fluvial ;
- La zone de transfert, dont la fonction principale est d'assurer le transport des sédiments en direction de la zone de stockage ;
- La zone de stockage, où dominent les formes d'accumulations sédimentaires.

Ce type de conception met l'accent sur l'atténuation vers l'aval de l'influence des versants sur la dynamique fluviale. Cette atténuation s'explique par la formation progressive d'une plaine alluviale construite par les apports sédimentaires successifs depuis l'amont (Amoros et Petts, 1993).



**Figure 10.** Emboîtement schématisé de l'hydrosystème dans le système fluvial (Amoros et Petts, 1993).

L'hydrosystème fluvial est un sous ensemble du système fluvial qui permet une meilleure appréhension des échanges au sein d'un tronçon entre le cours d'eau et son environnement. Il s'agit d'un système à quatre (4) dimensions, transversale, verticale, longitudinale et temporelle. Il est composé de différentes unités hiérarchisées et emboîtées. Les secteurs fonctionnels (tronçons de la plaine alluviale, caractérisées par des styles géomorphologiques propres) conditionnent ainsi la dynamique des ensembles fonctionnels (ensembles d'écosystèmes régit par les mêmes processus dynamiques, comme par exemple la forêt alluviale), qui eux-mêmes, influence le comportement des unités fonctionnelles (unités homogènes constituées par des biotopes de peuplements végétaux et animaux spécifiques). Ce concept présente l'intérêt de mettre l'accent sur les échanges transversaux entre la plaine alluviale et la bande active des cours d'eau. En effet, la dimension latérale peu abordée dans le cadre du système fluvial est essentiel pour l'étude de secteurs mobiles à large plaine alluviale (Amoros et Petts, 1993).

## **II.2.2. Transport solide**

Le transport des sédiments par les cours d'eau est nommé « transport solide » ou « transit sédimentaire » ou « débit solide » ; il est fonction de la granulométrie des matériaux (Couvert, 1999). Différents modes de transport solide peuvent coexister. Le charriage d'une rivière désigne le transport des alluvions alternativement reprises et déposées par le courant qui gardent contact avec le sol. Les particules se déplacent en roulant ou en effectuant des bonds (saltation) (Couvert, 1999). Le mouvement s'effectue à une vitesse inférieure à celle du courant. Le transport par suspension désigne le transport de particules par le courant. Le mouvement s'effectue à la vitesse du courant. La part de petites particules appelées les fines est responsable de la turbidité de l'eau et est en auto suspension. Elle ne se dépose que rarement dans le lit mineur. Elles n'ont donc que peu d'influence sur la morphologie du cours d'eau (Degoutte, 2002).

## **II.3. Caractérisation des alluvions de quelques fleuves à travers le monde**

### **II.3.1. Caractérisation physique**

Garzanti et al. (2010) dans l'étude des sédiments des cours d'eau Gange et Brahmapoutre (Bangladesh) révèlent qu'ils sont constitués de grains fins, bien triés. Les sables du Brahmapoutre, lithofeldspathoquartzose ( $2,1 \pm 0,4 \phi$ ) ont tendance à être plus grossiers que ceux du Gange, qui sont feldspatholithoquartzose à lithofeldspathoquartzose ( $2,3 \pm 0,3 \phi$ ).

Les sédiments du cours d'eau Catumbela en Angola, majoritairement constitués de sable (63,2 – 99 % dans sa partie amont et 43,4 – 97,7 % en aval), de limon (0,7 – 32,3 % en amont et 2 – 52,3 % en aval) et d'argile (0,3 – 4,5 % en amont et 0,4 – 5 en aval) sont classés comme subarkoses et sublitharenites. Selon Folk (1980), ces sédiments révèlent des textures sableuses et sablo-limoneuses (Silva et al., 2016).

Les sédiments du cours d'eau Hemavati au Sud de l'Inde sont principalement des sables fins. Cependant, dans certains échantillons de la partie amont, le matériel détritique est représenté par 62 % de sable et un supplément de galet et granule d'environ 5 % ; la fraction limoneuse est  $\leq 2$  %. Ces variations observées expliquent le mauvais tri de ces grains. Les particules de la partie aval par contre sont mieux triées. De plus, la réduction progressive de taille des grains, bien que subtile, et le tri du matériel détritique se faisant de mieux en mieux sur une distance de transport raisonnablement courte (environ 100 km), indique que le processus d'altération dans le bassin versant était responsable lui-même les détritiques de taille et de tri observé (Semsarma et al., 2008).

L'étude des sédiments du Gange au Nord de l'Inde par Singh (2009), montre que les particules de son canal sont presque tous constitués de sable fin (89 %), de limon (10 %) et d'argile (1 %). Les particules de sa plaine d'inondation quant à elles sont principalement des limons (67 %), suivis de sables (27 %) et d'argiles (6 %). Les particules du canal sont modérément à bien triées tandis que celles de la plaine d'inondation le sont moins.

Les sédiments du cours d'eau Calore au Sud de l'Italie sont constitués de sable (90 %) et de limon (10 %) dans sa partie amont. En aval, la teneur en limon est élevée et varie entre 24,3 et 50,4 %. Le carbone organique total a des valeurs comprises entre 31,1 et 123 mg/g, où les très grandes valeurs seraient probablement liées aux eaux usées d'industries (Bartoli et al., 2012).

L'étude des sédiments du cours d'eau Vaigai en Inde par Ramasamy et al. (2014) montre qu'ils majoritairement constitués de sables (85,56 – 94,98 %). Ils sont respectivement suivis par les limons (4,34 – 14,02 %) et les argiles (0,15 – 1,25 %). Les teneurs en matières organiques enregistrées sont élevées et varient entre 0,15 et 1,25 % ; de plus, ces teneurs sont plus élevées dans la fraction argileuse.

### **II.3.2. Caractérisation minéralogique**

Les analyses pétrographiques et de minéraux lourds des sables du Gange au Bangladesh montrent des grains lithiques métamorphiques, calcaires et dolomitiques. Les plagioclases



(~ 60 % albite, ~ 40 % Ca-plagioclase) dominent les feldspaths potassiques et la biotite sur la muscovite. On distingue également des minéraux opaques, de la tourmaline, du clinopyroxène diopsidique, du dysthène, de la titanite, de l'apatite, de la sillimanite, du rutile, du zircon, de la staurolite, de la monazite, du chloritoïde et de l'allanite (Garzanti et al., 2010).

Les sables du cours d'eau Brahmapoutre (Bangladesh) sont plus riches en feldspaths et grains carbonatés ; ils comprennent également des grains lithiques volcaniques, métavolcaniques, métabasitiques et ultramafiques mineurs. De même que dans le Gange, les plagioclases (~ 40% albite, ~ 60% Ca-plagioclase) dominent les feldspaths potassiques et la biotite sur la muscovite. Les minéraux représentés sont les minéraux opaques, le clinopyroxène, la titanite, la sillimanite, le rutile, l'apatite, l'hypersthène, la tourmaline, le zircon, la cyanite, la staurolite, le chloritoïde, l'allanite, la monazite et quelques les rares Cr-spinelle, enstatite, olivine, et xénotime (Garzanti et al., 2010).

Silva et al. (2016) suggèrent que la composition minéralogique des sédiments du cours d'eau Catumbela en Angola est liée à la composition des roches sources, à l'énergie hydraulique et au classement des grains. En effet, son étude sur ces sédiments présente un cortège minéralogique, composé de quartz (53,8 – 89,5 %), feldspaths (5,7 – 8,8 %), les phyllosilicates (0 – 18,1 %), magnetite ( $\leq 17,7$  %) et ilmenite ( $> 8,8$  %). Les carbonates sont présents (3,6 – 14,8 %), lorsque le cours d'eau traverse les calcaires et les marnes dans sa partie aval. L'hématite et les pyroxènes ont également été identifiés dans très peu d'échantillons en amont, où les roches basiques affleurent. De plus, le classement des grains concentre le quartz dans la fraction sableuse.

Les minéraux des sédiments du cours d'eau São Francisco, au Brésil, sont majoritairement constitués de quartz et phyllosilicates ; cette abondance de quartz serait liée au remaniement des roches préexistantes (Cadaxo Sobrinho et al., 2014). Dans ces sédiments, feldspaths, anatase, opale, zéolite et goethite, sont présents et les argiles sont composées de kaolinite, smectite et illite. Ces résultats suggèreraient qu'une altération intense du milieu contribuerait à la modification de la composition des sédiments ; ceci expliquerait la décroissance de la teneur en illite dans la partie aval tandis que la teneur en smectite croît.

Les diffractogrammes des sédiments du cours d'eau Hemavati, au Sud de l'Inde, ont montré dans la partie amont la présence de minéraux primaires tels que quartz, plagioclases, et les feldspaths potassiques. Biotite, pyroxène et hornblende constituent la phase mafique tandis que kaolinite et gibbsite représentent les minéraux secondaires. Cependant, dans la partie aval, la

phase felsique est toujours formée de quartz et feldspaths alors que la phase mafique est constituée de biotite, augite et diopside. Les argiles sont majoritairement représentées par l'illite et la chlorite ; la kaolinite est mineure (Semsarma et al., 2008).

L'analyse pétrographique des sédiments du Gange, au Nord de l'Inde, a majoritairement révélé la présence de quartz, plagioclages, feldspaths potassiques, muscovite et biotite ; les minéraux lourds sont représentés par le grenat et le zircon. Dans les minéraux argileux identifiés par les diffractogrammes, l'illite dominante, est respectivement suivi par la chlorite, la smectite et la kaolinite (Singh, 2009).

### **II.3.3. Caractérisation géochimique**

La géochimie des sédiments clastiques renseigne sur les processus d'altération des roches sources qui, couplé aux caractères physiques et minéralogiques fournissent des informations sur la provenance et les processus de dépôts de ces sédiments (Mc Lennan et al., 1993 ; Nesbitt and Young, 1982 ; 1984 ; Singh, 2009; Silva et al., 2016).

Les sédiments du Gange, au Nord de l'Inde présentent une concentration élevée en  $\text{SiO}_2$  par rapport aux autres éléments, due au fort pourcentage en quartz dans les échantillons (Singh, 2009). Une bonne corrélation positive de Ba et K, avec  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , FeO, MgO, MnO et  $\text{TiO}_2$  suggère que la distribution de K et Ba est principalement contrôlée par les argiles (probablement l'illite) et les micas. Une corrélation positive modérée à forte des terres rares avec  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , FeO, MgO, MnO,  $\text{TiO}_2$ , Ni, Ba et la taille des grains avec Th et Zr, indique que les alumino-phyllosilicates (principalement des minéraux argileux et des micas) et les phases accessoires (zircon et la monazite) retiennent les terres rares.

Les teneurs élevées en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , MnO, MgO,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{P}_2\text{O}_5$  dans les sédiments du cours d'eau Catumbela en Angola s'expliqueraient par la présence des minéraux argileux, des oxydes férriques, les micas/chlorite et les feldspaths potassiques. Il existe une forte corrélation positive entre la taille des grains et  $\text{SiO}_2$  et une forte corrélation négative entre  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , reflétant le contrôle de la composition des roches sources (majoritairement granites et gneiss) riches en quartz et feldspaths, dans la composition des sédiments classés comme subarkoses et sublitharenites. La fraction fine contient une teneur élevée en éléments traces, due à leur enrichissement en minéraux argileux et oxyhydroxydes qui, possède une forte capacité d'absorption (Silva et al., 2016).

Les sédiments du cours d'eau Hemavati au Sud de l'Inde, étudié par Semsarma et al. (2008) enregistrent dans sa partie amont des faibles teneurs en  $K_2O$  ( $\leq 1,9$  %),  $CaO$  ( $\leq 0,53$  %),  $Na_2O$  ( $\leq 1$  %) et  $MgO$  ( $\leq 0,75$  %), et des teneurs élevées en  $FeO$  ( $\leq 7,52$  %) et  $TiO_2$  ( $\leq 1,1$  %). Les valeurs de  $SiO_2$  sont comprises entre 68 et 90 % et  $Al_2O_3$  est  $\leq 15,6$  %. En aval, les teneurs en  $SiO_2$  et  $Al_2O_3$  sont légèrement inférieures à celles de l'amont (66 – 84 % et  $\leq 14,2$  %, respectivement) et celles en  $TiO_2$  ne varient pas ( $\leq 1,1$  %). Ici, les échantillons présentent un enrichissement en  $CaO$  et en alcalins ( $CaO \leq 4,3$  % et  $Na_2O + K_2O \leq 2,3$  %). Plusieurs échantillons sont enrichis en Cr et en Ni, mais plus en amont (Cr  $\leq 325$  ppm et Ni  $\leq 161$  ppm) qu'en aval (Cr  $\leq 264$  ppm et Ni  $\leq 90$  ppm). Ces valeurs élevées en  $FeO$ ,  $TiO_2$ , Cr et Ni dans les échantillons suggèrent plus une altération de matériaux mafiques, alors que les teneurs élevées en  $CaO$  et  $K_2O$ , indiquent un apport de matériaux quartzo-feldspathiques.

#### **II.3.4. Marqueurs chimiques de dépôt fluviaux**

Les caractéristiques des sédiments sont liées aux processus ayant contribué à leur sédimentation. Les éléments généralement pris en compte sont : la nature chimique, le transport, la maturité, le tri, le recyclage et le lieu de dépôt de ces sédiments, l'altération, la provenance, le paléoclimat et le contexte tectonique des roches sources. Compte tenu des différents contextes de ces sédiments, plusieurs traceurs sont utilisés pour la caractérisation de cet environnement dépôt et la provenance des sédiments.

##### **II.3.4.1. Classification et transport des sédiments**

La classification chimique des sédiments est donnée par le diagramme de Herron (1988) ; il intègre les valeurs logarithmiques des ratios  $SiO_2/Al_2O_3$  et  $Fe_2O_3/K_2O$ . Les sédiments des placiers (riches en Fe et Ti) du cours d'eau Catumbela en Angola sont classés comme sables ferreux, tandis que les autres sables grossiers sont classés comme sublitharénite/subarkose. Ceux à grains fins sont classés comme litharénite/arkose et argile (Silva et al., 2016). Le transport de ces sédiments est déduit de l'énergie hydraulique globale qui ici, est un facteur majeur affectant la texture des sédiments. Les sédiments de surface du cours d'eau Dibamba au Cameroun sont en amont, des sables ferrifères et des sublitharénites et des sables et argiles ferrifères, en aval (Sonfack et al., 2021).

##### **II.3.4.2. Maturité et recyclage des sédiments**

L'indice de variabilité compositionnel (ICV), formulé comme suit:  $ICV = (Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + Mn + TiO_2)/Al_2O_3$ , et le ratio  $SiO_2/Al_2O_3$  sont généralement utilisés

pour déduire la maturité des sédiments (Cox et al., 1995 ; Roser et al., 1996). Les sédiments alluvionnaires du cours d'eau Lokoundjé et Ngaye au Cameroun sont caractérisés comme matures tandis que ceux du cours d'eau Dibamba sont immatures (Ndjigui et al., 2018, 2019 ; Sonfack et al., 2021).

Le diagramme  $Al_2O_3$ - $TiO_2$ -Zr de Garcia et al. (1994) utilisé pour les sédiments du cours d'eau Nyong au Cameroun révèle un recyclage peu prononcé qui serait accompagné d'un fractionnement de ces particules (Kontchipe et al., 2021). Les diagrammes Th/U vs Th et Th/Sc vs Zr/Sc peuvent également être utilisés pour évaluer le processus d'altération et le recyclage des sédiments (McLennan et al., 1993). Les sédiments alluviaux de la Mefou, au Cameroun, ont subi une forte altération et aucun recyclage significatif (Mbale Ngama et al., 2019).

#### **II.3.4.3. Altération des roches sources**

Outre le diagramme Th vs Th/U de McLennan et al. (1993), certains indices tels que le CIA (indice chimique d'altération), le PIA (Indice d'altération des plagioclases) et le CIW (indice chimique d'érosion), et des diagrammes, A ( $Al_2O_3$ ) - CN ( $CaO^*+Na_2O$ ) - K ( $K_2O$ ), AK ( $Al_2O_3+ K_2O$ ) - C ( $CaO^*$ ) - N ( $Na_2O$ ) sont très souvent utilisés pour les processus liés à l'altération chimique (Nesbitt et Young, 1982 ; Fedo et al., 1995 ; Cox et al., 1995 ; Harnois, 1988). Dans les formules de calcul de ces indices, utilisant les proportions moléculaires, le  $CaO^*$  représente le Ca contenu dans les minéraux silicatés. Dans cette étude, les teneurs en CaO ont été corrigées par rapport au Ca dans l'apatite comme suit :  $CaO^* = CaO - 10 (P_2O_5) / 3$ . Etant donné que certaines teneurs en CaO sont supérieures aux teneurs en  $Na_2O$ , le  $CaO^*$  a été calculée selon la méthode de McLennan (1993), formulée comme suit (après la correction au  $P_2O_5$ ) :

- Si la teneur en CaO est inférieure ou égale à la teneur en  $Na_2O$ , alors la valeur de CaO sera utilisée pour le calcul ;
- Si la teneur en CaO est supérieure à celle de  $Na_2O$ , alors la valeur de  $Na_2O$  est considérée comme celle du  $CaO^*$ .

La correction par rapport au Ca dans l'apatite, est due au fait qu'il peut provenir de certaines roches ignées et métasédimentaires qui sont probablement roches sources des sédiments étudiés. Pour l'interprétation, il est important de noter que les roches ignées non altérées ont des valeurs CIA proches de 50, alors que les matériaux argileux fortement altérés (kaolinite et chlorite) ont des valeurs proches de 100.

Tout comme les sédiments du cours d'eau Nyong (Cameroun), ceux de la Dibamba (Cameroun) ont subi une altération chimique modérée tandis que les alluvions du cours d'eau Lokoundjé (Cameroun) auraient subi une altération chimique intense (Kontchipe et al., 2021 ; Sonfack et al., 2021 ; Ndjigui et al., 2018). Les valeurs de CIA des sédiments du cours d'eau Catumbela en Angola et leur minéralogie indiquent que l'érosion physique progresse à un rythme plus rapide que l'altération chimique, ce qui est compatible avec le soulèvement de la région (Silva et al., 2016).

#### **II.3.4.4. Provenance des sédiments**

Certains éléments, et en particulier leurs ratios, sont des indicateurs utiles de provenance car ils sont moins affectés par des processus tels que l'altération, le transport et le tri. Même s'ils sont mobilisés, ces éléments ont un temps de séjour court dans l'eau et sont donc transférés presque totalement dans les sédiments (Taylor et McLennan, 1985). Les rapports  $Eu/Eu^*$  et  $(Ga/Yb)_{cn}$  des sédiments du cours d'eau Dibamba (Cameroun) suggèrent qu'ils auraient été dérivés de roches mères post-archéennes et archéennes. La signature post-archéenne est certainement liée aux roches panafricaines et aux successions sédimentaires du sous-bassin de Douala, tandis que les marqueurs archéens s'expliqueraient par le recyclage de matériaux plus anciens du complexe du Ntem (Sonfack et al., 2021).

Plusieurs diagrammes dont  $Y/Ni$  vs.  $Cr/V$ ,  $Hf$  vs.  $La/Th$ ,  $La-Th-Sc$ ,  $La/Sc$  vs.  $Th/Co$ ,  $V-Ni-Th*10$  (Hiscott, 1984 ; Flyod et Leveridge, 1987 ; Cullers, 1994 ; Cullers, 2002 ; Bracciali et al., 2007), et la fonction discriminante de Roser and Korsch (1988) sont utilisés pour déterminer la nature des roches sources. Les sédiments du cours d'eau Mefou (Cameroun) proviendraient de sources mafiques et quartzeuses, alors que ceux du cours d'eau Lokoundjé (Cameroun) auraient une provenance mafique à intermédiaire (Mbale Ngama et al., 2019 ; Ndjigui et al., 2018).

#### **II.3.4.5. Contexte tectonique, paléoclimat et conditions redox**

Plusieurs diagrammes de discrimination, basés sur la géochimie des sédiments ont été développés pour déterminer le cadre tectonique des roches sources, utilisant certains éléments majeurs et traces, leur ratio et même des fonctions discriminantes, quelques-uns notamment ceux de Bhatia et Crook (1983), Roser et Korsch (1986), Verma et Armstrong-Altrin (2013 ; 2016) sont communément appliqués. Les sédiments du cours d'eau Nyong, comme ceux du cours d'eau Dibamba, au Cameroun suggèrent un contexte de rift en marge passive pour les roches sources de ces particules (Kontchipe et al., 2021 ; Sonfack et al., 2021).

Les paramètres granulométriques, certains indices d'altérations (CIA et PIA), des éléments traces et leur ratio sont considérés comme des outils fiables pour la compréhension du paléoenvironnement des sédiments (Cao et al., 2012 ; Zilifi et Eagle, 2000 ; Gong et al., 2017). Les sédiments alluviaux de la rivière Lokoundje au Cameroun, révèlent des conditions paléooxiqes de dépôt (Ndjigui et al., 2018).

### **II.3.5. Quelques traceurs de pollution dans les cours d'eau**

Certains indices de pollution Igeo (indice de géoaccumulation), CF (facteur de contamination), CD (degré de contamination) et PLI (indice de charge polluante), utilisés pour évaluer l'enrichissement en métaux dans les sédiments du cours d'eau Ganga au Nord de l'Inde montrent un faible niveau de contamination de ces sédiments qui, en raison de l'absence d'industries à grande échelle dans la zone, serait d'origine naturelle au travers des processus d'altération. Cependant, l'enrichissement en Cr enregistré serait lié aux eaux usées d'une unité artisanale de textile (Singh et al., 2017).

La contamination par les métaux lourds des sédiments du bassin versant du cours d'eau Wen-Rui Tang, hautement industrialisé de l'Est de la Chine révèle des concentrations plus élevées de Zn, Pb et Cd dans le sud-ouest et une concentration plus élevée de Cu dans l'est du bassin versant. Le Zn, le Pb et le Cd seraient principalement apportés par une même source industrielle de pollution ; Cu proviendrait d'une source industrielle et d'une source agricole (Xia et al., 2018).

L'étude de la contamination des sédiments du cours d'eau Durgapur dans une zone industrielle de l'Est de l'Inde a montré des valeurs élevées en Pb, Cd, Hg et Cr par rapport à celles recommandées. L'évaluation de certains indices de pollution, indice de contamination (Cd), indice de contamination modifié (mCd) et l'indice de charge polluante (PLI) indique que ces sédiments sont fortement contaminés par les métaux lourds qui proviennent principalement des rejets industriels. L'évaluation du risque écologique de ces sédiments montre leur caractère hautement toxique (Pobi et al., 2019).

Les niveaux de contamination des métaux dans les sédiments du cours d'eau Weihe, au Nord de la Chine, ont été examinés en utilisant l'indice de géo-accumulation, le facteur d'enrichissement et le facteur de contamination tandis que le risque écologique de ces métaux a également été déterminé (Ahamad et al., 2020). Les teneurs des métaux sont classées comme suit : manganèse (Mn) > chrome (Cr) > zinc (Zn) > cuivre (Cu) > nickel (Ni) > arsenic (As) > plomb (Pb). Ces indices révèlent une contamination modérée de l'arsenic qui serait anthropique

tandis que Cu, Cr, Ni, Zn, Pb et Mn ne sont pas enrichis et auraient une source naturelle. Ces métaux ont un risque écologique faible mais l'arsenic contribue pour plus de la moitié au risque écologique total (53,43 %).

L'étude des radionucléides ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$ ) par Ramasamy et al. (2014), dans les sédiments du cours d'eau Vaigai en Inde présente des valeurs variables d'un site à l'autre avec des moyennes de 7,45, 33,81 et 448 Bq/kg respectivement pour l'uranium, le thorium et le potassium. Le thorium et le potassium sont liés aux minéraux argileux respectivement à travers les processus d'absorption et leur composition chimique, ce qui expliquerait la teneur légèrement élevée de ce dernier par rapport au seuil recommandé. Le rôle important de la matière organique et des argiles à augmenter la radioactivité par absorption des cations sur leur surface a clairement été démontré dans cette étude.

Dans le système estuarien du cours d'eau Huelva au Sud de l'Espagne, fortement pollué par les activités minières et industrielles, les sections de carottes sédimentaires affectées par les apports anthropiques de radionucléides de la série de l'uranium ont été déterminés à travers les profils verticaux du rapport isotopique du thorium ( $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ ). Les valeurs de ce ratio montrent que les couches en profondeur ne sont pas contaminées tandis que celles des niveaux supérieurs le sont, dues aux rejets des fertilisants de plantes. De plus, et sur la base des chronologies établies, le constat de la vitesse de sédimentation qui a drastiquement augmenté dans certaines zones de l'estuaire s'est fait, et ce depuis le démarrage de plusieurs activités industrielles mais également depuis la construction de deux digues dans cette zone (San Miguela et al., 2004).

### **II.3.6. Quelques exemples de dépôts fluviaux au Cameroun**

Les études sur les sédiments des cours d'eau au Cameroun ont pour la plupart été axées sur leurs caractérisations sédimentologique, minéralogique et géochimique afin de déterminer leur nature, leur provenance et leur environnement de dépôt ; le but ici étant soit de déterminer des indices potentiels de minéralisation, soit d'apporter des précisions sur la nature du substratum rocheux des zones étudiées (Etame et al., 2013 ; Ndjigui et al., 2018 ; 2019 ; Mbale Ngama et al., 2019 ; Miounde et al., 2019 ; Sonfack et al., 2021 ; Kontchipe et al., 2021). De plus, dans un contexte où le pays est en voie de développement, des activités visant à accroître l'économie nationale se développent de plus en plus et créent des problématiques liées à la santé des écosystèmes. Dans le but de caractériser les milieux influencés par l'action de l'homme, afin d'évaluer les contaminations potentielles, ou encore d'établir une base de données pour ceux

présentant des enjeux potentiels afin d'aider les décideurs, certaines études ont été faites sur ces sédiments de cours d'eau en particulier, mais également sur les autres composantes des écosystèmes (eau, faune, flore) et dans un contexte plus général (Binam Mandeng et al., 2019 ; Ekoa Bessa et al., 2020 ; 2021).

#### **II.3.6.1. Cas des sédiments du cours d'eau Kellé**

La minéralogie et la géochimie des sédiments alluvionnaires du bassin versant du cours d'eau Kellé dans la localité de Pouma (région du Littoral) montrent que les minéraux lourds de ces matériaux sont constitués de disthène, tourmaline, magnetite, zircon, grenat et rutile. Ces grains sont soit angulaires, subarrondis ou sous forme de cristaux à faces bien développés, indiquant que le matériau érodé aurait été drainé sur une courte distance. La géochimie de ces matériaux montre un enrichissement en Zr, Hf, Th et U, qui sont mis en relation avec la présence de Zircon qui aurait également contribué en partie à l'enrichissement des terres rares légères. La présence de traces d'Au (0,6 – 27 ppm) est probablement due à l'environnement de la zone de cisaillement (Etame et al., 2013).

#### **II.3.6.2. Cas des sédiments du cours d'eau Lokoundjé**

La caractérisation minéralogique et la géochimie des sédiments alluvionnaires de la partie aval du cours d'eau Lokoundjé dans la localité de Kribi (région du Sud) indique que ces alluvions sont principalement des argiles plastiques de couleurs jaune, jaune rouge, blanc et gris clair, avec une texture limono-argileuse. Le cortège minéralogique est composé de kaolinite, de quartz, d'illite, de gibbsite, de goethite, de rutile et d'interstratifiés. Ces matériaux sont principalement constitués de SiO<sub>2</sub> (44.33-69.19 %) et d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (20.69-30,26 %) avec de très faibles teneurs en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1-7,71 %). Les teneurs en alcalins (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) sont inférieures à 5 %. L'ICV, le CIA, le PIA et le ratio SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> représentent un degré d'altération chimique élevé dans la zone source ainsi que la maturité de sédiments. Le cortège minéralogique couplé aux données géochimiques révèlent que les terres rares sont principalement associées aux minéraux argileux. Les caractéristiques morphologiques, minéralogiques et géochimiques révèlent que les sédiments à grains fins dérivent de l'intense altération d'une source mixte. La kaolinite confirme que les sédiments ont été triés au cours d'un long transport avant leur dépôt en conditions oxiques (U/Th < 1,25 ; V/Cr < 2) dans les plaines inondables près de la côte atlantique (Ndjigui et al., 2018).



La sédimentologie des dépôts alluvionnaires du cours d'eau Lokoundjé dans la localité de Ngovayan-Bipindi (région du Sud) indique que ces alluvions sont très fins à grossiers, bien séparés et classifiés ; C'est le résultat de l'action d'une hydrodynamique turbulente. Du point de vue morphoscopique, les grains sont non usés et mats brillants. Du point de vue morphométrique, il existe des signes d'aplatissement et de dissymétrie des galets légèrement usés pour former des formes subsphériques. La minéralogie suggère des indices de zircon et la présence des gemmes tel que le topaze et la monazite, précurseur des accumulations aurifères (Miounde et al., 2019). Les minéraux lourds, incluent un processus métamorphique avec la présence d'aillimanite et d'andalousite tandis que la hornblende verte, la tourmaline suggère le magmatisme. Il existe des minéraux spécifiques tels que le zircon, qui peut être économiquement viable là où la teneur dépasse parfois  $10 \text{ kg/m}^3$ . Dans le même ordre d'idées, on a noté la présence de gemmes comme la Topaze et la Monazite qui sont de véritables précurseurs d'accumulation aurifère (Mioumnde et al., 2019).

### **II.3.6.3. Cas des sédiments du cours d'eau Dibamba**

Les sédiments de surface du cours d'eau Dibamba (région du Littoral), du fait de leur caractérisation minéralogique et géochimique révèlent qu'ils sont principalement des sables fins et grossiers. Le constituant principal est le quartz et les minéraux argileux comprennent la kaolinite et l'illite. Les minéraux accessoires sont représentés par les minéraux opaques, le disthène, le zircon, la sillimanite, le grenat et l'hypersthène. Ces sédiments sont géochimiquement classés comme schiste ferreux et sable ferreux. Le CIA (72,04), le PIA (66,1–89,2), CIW et les diagrammes A–CN–K et (A–K)–C–N indiquent une intensité modérée à élevée d'altération chimique dans les zones sources. Les ratio  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  et l'ICV suggèrent que les échantillons sont principalement matures du point de vue textural et compositionnel. L'indice ZTR et les diagrammes ternaire  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2\text{--Zr}$  et binaire Th/Sc versus Zr/Sc proposent le recyclage et le tri de la quasi-totalité des sédiments. Les spectres des terres rares et divers les diagrammes ternaires et binaires tels que Zr versus  $\text{TiO}_2$ , Th/Co versus La/Sc, et Cr/V versus Y/Ni indiquent la contribution des sédiments des roches mères intermédiaires et felsiques. Les diagrammes tectoniques de fonction discriminante ont révélé une faille ou une marge passive pour la région source. Cela correspond à la tectonique historique du domaine panafricain et du sous-bassin créacé de Douala, qui sont les terranes sources probables des sédiments (Sonfack et al., 2021).

#### **II.3.6.4. Cas des sédiments du cours d'eau Nyong**

L'étude minéralogique et géochimique des sédiments de surface du cours d'eau Nyong (région du Sud) montre que ces sédiments sont principalement des sables fins et grossiers, et la minéralogie est principalement composée de quartz, accompagné de kaolinite, d'illite, d'oxydes opaques, de cyanite, de rutile, de zircon, de tourmaline, de sillimanite, de grenat et d'hypersthène. Sur le plan géochimique, les sédiments sont classés en schiste ferreux, sable ferreux et arénite quartzifère. Le CIA, le PIA, le CIW et les diagrammes ternaires A–CN–K et (A–K)–C–N reflètent une forte intensité de l'altération chimique. Les valeurs de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ , l'ICV, et l'indice ZTR indiquent la maturité de nombreux échantillons. La plupart des échantillons de ces sédiments ont subi un recyclage, comme l'ont révélé le diagramme ternaire  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2\text{--Zr}$ . Plusieurs graphiques binaires tels que Zr vs  $\text{TiO}_2$  et Th/Co vs La/Sc, et les spectres des terres rares, suggèrent que la zone source est principalement composée de roches intermédiaires et felsiques, avec une moindre contribution de roches sources mafiques. Les diagrammes de discrimination tectoniques, basés sur les éléments majeurs et traces mettent en évidence un contexte de rift et de marge passive, ce qui est cohérent avec plusieurs modèles d'histoire tectonique du complexe du Ntem et de la ceinture panafricaine. Les indices de pollution (EF, I-geo, CF et PLI) indiquent une absence de pollution dans ces sédiments (Kontchipe et al., 2021).

#### **II.3.6.5. Cas des sédiments des bassins versants (Kienké et Tchangué)**

La contamination et l'évaluation du risque potentiel des sédiments de surfaces de deux (2) bassins versants (Kienké and Tchangué), dans la localité d'Abiété-Toko (région du Sud) ont été faites sur la base des éléments Cd, Pb, Hg, Cu, Ni, Al, Zn et U. Les valeurs d'EF et d'Igeo ont révélé que les sédiments étaient modérément enrichis par Ni et Cu. Le RI, l'Er, le CF et le PLI ont suggéré que les sédiments des bassins versants d'Abiété-Toko présentent un risque écologique important à très élevé et ne sont généralement pas pollués par des métaux traces et U, à l'exception de Ni et Cu. De petites quantités de métaux lourds avec de faibles teneurs en U ont été trouvés sur les sites proches de l'exploitation minière artisanale et du domaine périurbain. Cette proximité révèle que les activités d'extraction artisanale de l'or, le ruissellement agricole et d'autres activités anthropiques sont des sources probables de légère contamination métallique observée dans la zone d'étude. Cependant, l'absence d'effluents toxiques pour l'extraction de l'or et des pesticides pour l'agriculture peuvent être des arguments justifiant le statut non pollué de ces bassins versants (Binam Mandeng et al., 2019).

## **CHAPITRE III: METHODES D'ETUDE**

Dans ce chapitre il sera question de présenter les outils et les méthodes liés à l'acquisition des données sur le terrain et à leurs traitements en laboratoire. Dans un premier temps, le carottage des sédiments a été fait. Par la suite, une description de ces carottes et des analyses de granulométrie, de teneur en eau, de carbone organique total, de minéralogie et de géochimie ont été réalisées en laboratoire.

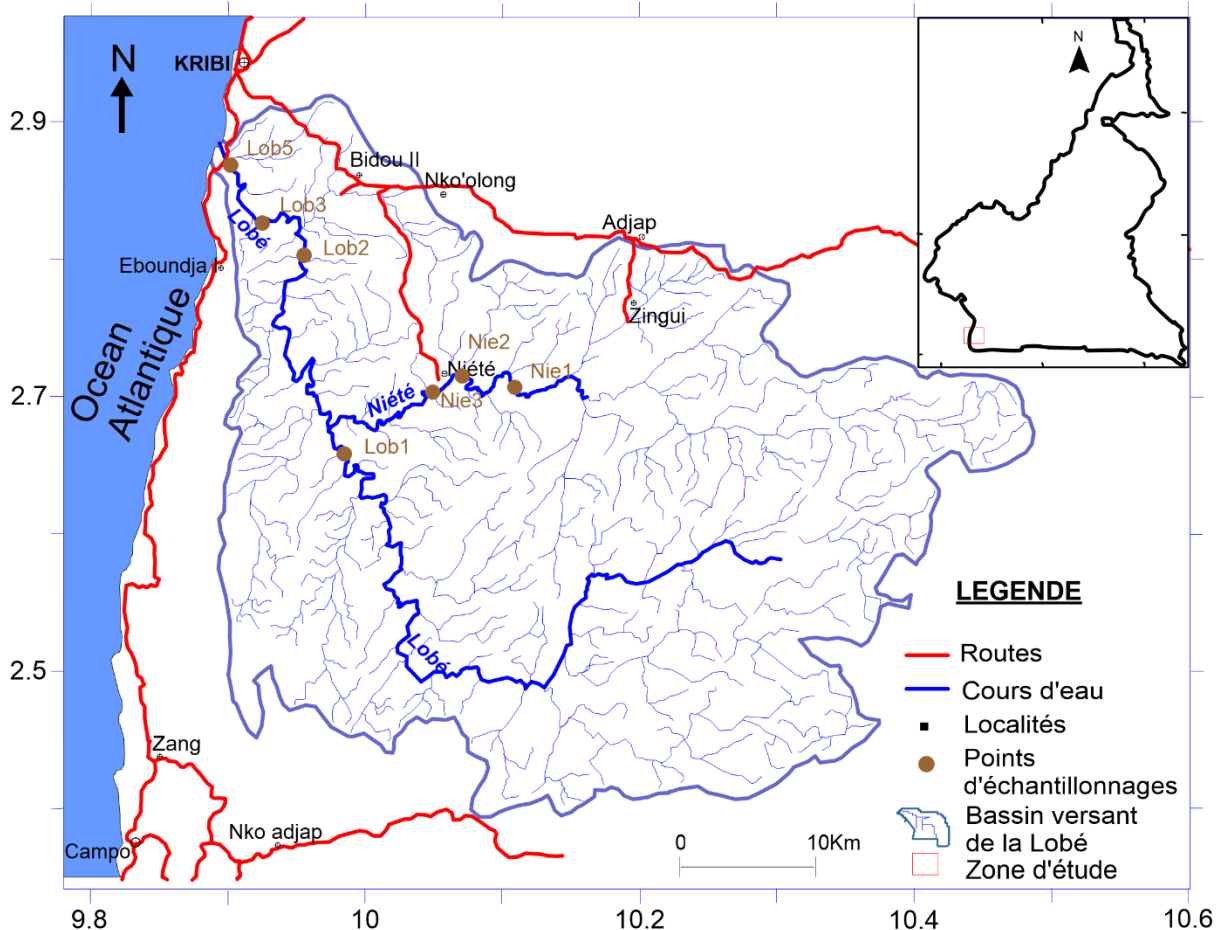
### III.1. Sur le terrain

Le but ici était de déterminer les éléments du milieu naturel, de localiser les sites potentiels pour le carottage des sédiments, de géo référencer les points de carottage des sédiments et de prélever les différentes carottes de sédiment (Fig. 11). Le prélèvement des sédiments par carottage permet d'évaluer la variation des paramètres physico-chimiques de ces derniers avec la profondeur (Guesdon, 2014). Dans l'optique d'apprécier l'évolution spatiale des paramètres étudiés, l'échantillonnage de sept (7) carottes, dont quatre (4) en amont de la confluence (Nie1, Nie2, Nie3 et Lob1) et trois (3) en aval (Lob2, Lob3 et Lob5), a été réalisé sur les terrasses des cours d'eau Lobé et Niété (Fig. 12). Pour cela, une carte topographique 1/50000 de la localité, un GPS de marque « Garmin Montana » et un carottier Hammer de marque « Uwitec » ont été utilisés. Pour l'accès aux sites de carottage, la prise de note et de vue, l'étiquetage, quelques matériels ont été nécessaires : machettes, appareil photo numérique, bloc-notes, stylo, marqueur, ruban adhésif.



**Figure 11.** Prélèvement des carottes de sédiment : (a) Enfoncement du tube, (b) carotte prélevée.

Dans les méandres du cours d'eau Lobé et son principal affluent, la Niété, les sept carottes de sédiment prélevées ont des hauteurs variables (de 47 à 94 cm). La différence de profondeur des carottes est liée à la présence de la roche mère située sous les sédiments empêchant le carottier de descendre plus en profondeur ou encore par la nature du substrat qui rend difficile le retrait de la carotte. Par vibration, le carottier enfonce progressivement le tube dans le sol. Par la suite, le tube est extrait et les carottes transportées et stockées au laboratoire pour diverses analyses.



**Figure 12.** Carte d'échantillonnage des carottes de sédiments du cours d'eau Lobé.

### III.2. En laboratoire

Des analyses physiques, minéralogiques et géochimiques ont été réalisées. Au préalable, les carottes prélevées ont été découpées et décrites, et les échantillons obtenus, séchés à l'air libre. Ces derniers ont été pulvérisés dans un mortier électrique « FRITSCHE Pulverisette » pour l'obtention des poudres qui ont servi pour les analyses.



### III.2.1. Analyses physiques

Une description macroscopique des carottes au laboratoire de la Station Spécialisée de Recherche en Ecosystèmes Marins (SSRECOMA) de l'Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD) de Kribi (Cameroun), a été nécessaire. Elle s'est faite par l'observation des lithofaciès (type, épaisseur, disposition et texture), la composition (débris végétaux, animaux), et la couleur (déterminée par la charte Munsell sur échantillons secs).

Chaque carotte a été découpée en tranches de 10cm, soit un total de 45 échantillons. Chaque échantillon est pesé à l'aide d'une balance sensible  $10^{-2}$ g de marque KERN EMB 1000<sup>-2</sup> (poids humide) puis séché à l'air ; une nouvelle pesée est effectuée sur échantillon sec afin de déterminer la teneur en eau. Une fois la description des échantillons terminée, ils sont conditionnés dans des sacs d'échantillonnages pour différentes analyses (Fig. 13).

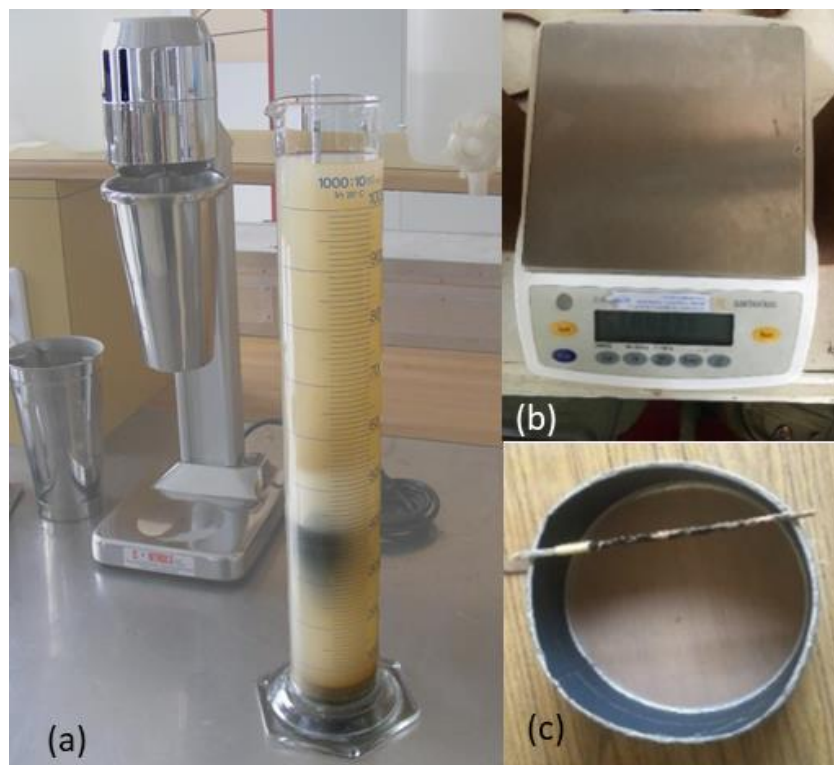


**Figure 13.** Découpage des carottes en laboratoire : (a) Support de découpage, (b, c et d) Tranches de sédiments découpés, (e) Séchage d'échantillons.

#### III.2.1.1. Analyse granulométrique

Les analyses de granulométrie des 45 échantillons obtenus après découpage des différentes carottes ont été réalisées au Laboratoire de la Faculté d'Agronomie et des Sciences Agricoles (FASA) de l'université de Dschang. Sur 25 g de chaque échantillon, les analyses effectuées ont

principalement porté sur la granulométrie fine (particules  $\leq 38 \mu\text{m}$ ), suivant la méthode de la pipette de Robinson-Kohn, après suppression des carbonates, des substances organiques et des possibles oxydes de fer (à cause de leur fonction liante) par l'acide chlorhydrique (Singh, 2009). Cette méthode prend en compte les teneurs de sable, limon et argile. Elle est basée sur la différence de vitesse de sédimentation entre les particules légères et les plus grosses. La sédimentation des particules résulte des deux forces opposées: gravité et friction entraînant un mouvement dans un milieu fluide. Dans cette méthode, un échantillon est pipeté à différentes périodes et à différentes profondeurs de la suspension du prélèvement dans une éprouvette. Durée et profondeur sont déterminées à l'aide de la loi de Stokes. La suspension pipetée est condensée et séchée, et la pesée détermine le ratio de masse de la fraction pipetée (Fig. 14).



**Figure 14.** Matériels de sédimentométrie : (a) Eprouvette pour décantation, (b) Balance sensible, (c) Tamis.

### III.2.1.2. Teneur en eau

La teneur en eau qui correspond à l'eau interstitielle est un paramètre qui est directement lié à l'activité et à la diversité microbienne dans les sédiments, ce qui régule le degré de décomposition de la matière organique et donc son contenu et sa composition. Cette analyse a été réalisée au laboratoire de la Station Spécialisée de Recherche en Ecosystèmes Marins (SSRECOMA) de l'Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD) de Kribi

(Cameroun), sur quarante-cinq (45) échantillons. L'échantillon humide qui a été préalablement pesé à l'aide d'une balance sensible  $10^{-2}$ g de marque « KERN EMB » puis séché à l'air libre pendant trois (3) jours a été pesé à nouveau afin d'obtenir le poids sec. La teneur en eau (W en %) est calculée par la formule  $W = \frac{\text{Masse humide} - \text{Masse sec}}{\text{Masse humide}} * 100$ .

### III.2.1.3. Matière Organique

La matière organique (MO) est un indicateur de l'activité biologique et du statut nutritionnel des sédiments. Le Carbone Organique Total (COT) a été déterminé par le laboratoire de l'Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA) de Yaoundé (Cameroun). Sur la base de la couleur et des différents faciès lithologiques observés, dix-neuf (19) échantillons ont été sélectionnés pour cette analyse. Le Carbone Total (CT) est déterminé en premier, par combustion total à  $105^{\circ}\text{C}$ . Par la suite, le Carbone Inorganique est déterminé par combustion à  $150^{\circ}\text{C}$ . La concentration de COT est déduite de la formule  $\text{COT} = \text{CT} - \text{CI}$ . Le prétraitement de l'échantillon se fait par élimination du  $\text{CO}_2$ , après purge de l'oxygène. Afin de décomposer le carbone inorganique en dioxyde de carbone gazeux, de l'acide orthophosphorique est ajouté à l'échantillon.

La MO est donc obtenue par la formule de Walkley and Black (1934) :

$$\text{OM} (\%) = \text{COT} (\%) * 1,72.$$

### III.2.2. Analyses minéralogiques

L'analyse minéralogique permet de déterminer les différents minéraux constitutifs des sédiments. Ces analyses consistent en la pétrographie des sédiments et des minéraux lourds et la diffraction aux rayons X.

#### III.2.2.1. Lames minces de sédiments

La répartition spatiale des carottes prélevées a permis la sélection de quatre échantillons de surface, dont deux en amont et deux en aval pour la confection des lames minces de sédiments. La confection de ces lames a été réalisée au laboratoire de Traitement des Minerais (LTM) de l'Institut de Recherche Géologique et Minière (IRGM) de Nkolbissong, Yaoundé (Cameroun). Après nettoyage de la lame porte objet au Carbure de silicium noir, la faire chauffer en rajoutant de l'araldite, puis étaler l'échantillon de sédiment et laisser sécher pendant 24 h ; la lame sera rectifiée (1,75 micron) puis polie (0,3 micron) pour l'observation. L'observation de ces dernières s'est faite au laboratoire de pétrologie des formations profondes à l'Université de Yaoundé 1 (Cameroun), au microscope optique polarisant de marque « Zeiss ».



### **III.2.2.2. Minéraux lourds**

Les minéraux lourds sont des minéraux de densité supérieure à 2.9 (densité du bromoforme). L'étude des minéraux lourds permet de déterminer à partir des minéraux caractéristiques, la source distributrice des sédiments. Cette analyse a été effectuée au laboratoire de géosciences de l'Université de Yaoundé 1 (Cameroun), sur dix-sept (17) échantillons sélectionnés, fonction des caractères physiques. Les techniques de préparation, d'extraction et de montage de ces minéraux sur les frottis sont celles préconisées par Duplaix (1958) et Parfenof et al. (1970). Après lavage, séchage et tamisage, les sédiments sont introduits dans une ampoule à décantation contenant préalablement du bromoforme. Ensuite, les minéraux lourds, ayant précipité vers le bas sont recueillis sur du papier filtre après ouverture du robinet, en asseyant d'entraîner le moins possible de bromoforme. Ces minéraux recueillis sont par la suite lavés à l'acide chlorhydrique dilué (10 %) et à chaud pendant 20 minutes, puis à l'alcool et à l'eau. Le montage de lames enfin, se fait entre lames (préalablement chauffées et enduite du baume de canada) et lamelles. L'observation de ces lames comme celle des lames de sédiments, s'est faite au microscope optique polarisant de marque « Zeiss », au laboratoire de pétrologie des formations profondes à l'Université de Yaoundé 1 (Cameroun).

### **III.2.2.3. Diffraction aux rayons X (DRX)**

La DRX est une méthode appropriée pour la détermination des phases minérales secondaires cristallisées ou cryptocristallisées. Pour cette analyse, des poudres de sédiments sont au préalable nécessaires. Elles ont été réalisées à l'Institut de Recherche Géologique et Minière de Nkolbisson, Yaoundé (Cameroun). Elles sont obtenues par broyage des différents échantillons à l'aide d'un mortier électrique "FRITSCH Pulverisette". Les sept (07) échantillons de surface des différentes carottes ont été analysés au laboratoire AGEs (Geology and sedimentary environment laboratories), de l'université de Liège (Belgique). Des montages de frottis de la poudre ont été préparés sur des disques de silicium à faible bruit de fond. Pour l'analyse, un diffractomètre de type PAN Analytical X' PERT PRO, équipé d'un monochromateur utilisant un rayonnement Cu-K $\alpha$  ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ) à 40 kV et 45 mA a été utilisé. Un faisceau de rayon X de longueur d'onde ( $\lambda$ ) connue est projeté sur un matériel cristallin selon un angle. Le phénomène de diffraction apparaît seulement quand la distance inter-recticulaire ( $d$ ) est égale à un multiple entier  $n$  de la longueur d'onde. Cette loi impose que l'angle entre le faisceau incident et le réseau cristallin soit égal à celui du réseau et le faisceau diffracté. Le goniomètre permet pour une rotation de  $\Theta$  de la platine porte échantillon,

d'amener le système d'analyse à un angle double de  $2\Theta$ . En faisant varier l'angle  $\Theta$ , les conditions de la loi de Bragg sont satisfaisantes pour des valeurs de  $(d)$  dans les matériaux polycristallins. Après leur passage dans les différents réseaux de fentes, les rayons X diffractés sont reçus sur un détecteur. Le signal amplifié est reçu par le détecteur puis transmis à un ordinateur qui présente les résultats sous forme d'un graphe ou diffractogramme (Holtzapffel, 1985).

### **III.2.3. Analyses géochimiques**

L'analyse géochimique permet de déterminer la composition chimique de la roche source et des sédiments. Elles ont été réalisées au laboratoire ALS (Australian Laboratory Services) de Vancouver (Canada), sur des poudres de dix-neuf (19) échantillons choisis sur la base de leur position le long de la carotte et de leurs caractères physiques.

#### **III.2.3.1. Éléments majeurs**

L'analyse des éléments majeurs s'est faite par fluorescence aux rayons X (XRF). Des disques de verres de 0,7 g d'échantillons séchés à 110 °C, représentant 1 part, est mélangé à 5 part de métaborate / tétraborate de lithium séché (JOHNSON MATTHEY SPECTROFLUX IOOB) et fusionné dans un four à moufle pendant 15 min à 1000 °C dans des creusets 95 % Pt-5 % Au. La masse fondue a été tourbillonnée pour assurer la dissolution et l'homogénéisation complète du matériau, puis versée dans un moule préchauffé sur une plaque chauffante et pressée pour former un disque mince (1,5 mm d'épaisseur) à surface plane (35 mm de diamètre). Une mesure de perte au feu (LOI) est entreprise sur des échantillons de poudre de sédiment séché en chauffant dans un creuset en silice pré-allumé à 1000 °C pendant 1 h et en enregistrant le pourcentage de perte de poids. La détermination de la LOI est une partie essentielle du programme d'analyse des éléments majeurs, en tenant compte des constituants (par exemple, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>) qui ne peuvent pas être mesurés directement par XRF et sont perdus lors de la formation du verre, nécessitant ainsi une correction dans la détermination des éléments majeurs. Les limites de détection variaient de 0,01 à 0,04 % ; à chaque série de dix échantillons, deux doubles et deux blancs ont été réalisés.

#### **III.2.3.2. Éléments traces et terres rares**

Les poudres ont été préparées pour une analyse ICP-MS afin de déterminer les concentrations d'éléments lithophiles par gravure triacide dans un récipient fermé. Ils ont été traités dans un mélange diacide (HCl + HClO<sub>4</sub>) à 120 °C dans un récipient fermé pendant une semaine, puis

dissous à nouveau dans des solutions acides ( $\text{HNO}_4 + \text{HCl} + \text{HF}$ ) chauffé à 100 °C. Les échantillons dissous ont été analysés en utilisant PERKIN ELMER ELAN 9000 ICP-MS. Initialement, l'analyse a été effectuée à l'aide d'une bandelette analytique IM100 dans laquelle une proportion moyenne d'échantillon correspond à trois matériaux de référence certifiés, préparés de la même manière que le blanc pour chaque élément. Des solutions standard ont été préparées pour 30 échantillons avec un contrôle après 10 échantillons à chaque fois. Les données sont rapportées pour une large gamme de métaux de transition. En raison de l'incertitude des concentrations d'éléments dans les matériaux de référence certifiés, les limites de détection pour la bande IM100 sont supérieures aux capacités maximales (limites supérieures) de l'instrument. Lorsque certaines concentrations étaient inférieures à la limite de détection pour la bande analytique IM100, les solutions ont été réanalysées à l'aide d'un deuxième groupe de 04 solutions synthétiques de concentrations égales contenant 14 terres rares, Y, U, Th, Zr, Nb, Ta, Rb et Sr (Burnham et Schweyer, 2004). Les limites de détection obtenues étaient très faibles, les doutes analytiques varient de 0,1 à 0,5 %. Les normes pour les éléments traces ont été contrôlées en utilisant le RAFT-2 comme matériau de référence interne et le LKSD-1 comme matériau de référence international et à chaque série de dix échantillons, deux doubles et deux blancs ont été réalisés.

#### **III.2.4. Analyses statistiques**

Pour évaluer les relations et l'interdépendance entre les caractéristiques des sédiments, une analyse statistique multivariée a été utilisée en raison de sa valeur en tant qu'outil de réduction et d'organisation de grands ensembles de données en groupes ayant des caractéristiques similaires sans perdre beaucoup d'informations. Des taux significatifs de niveau  $P < 0,05$  ont été ainsi appliqués en utilisant la version 18 du logiciel XLSTAT. La corrélation de Pearson a été réalisée pour déterminer la relation entre les variables. La classification hiérarchique a été appliquée pour fournir des informations sur les regroupements de variables basé sur la similarité. L'analyse en composantes principales a été utilisée pour déduire la source probable des métaux lourds (Salati et Moore 2010).

## **CHAPITRE IV: RESULTATS**

Les résultats d'observations et d'analyses des échantillons de sédiments du cours d'eau Lobé seront présentés ici. Ces résultats d'analyses physiques, minéralogiques et géochimiques permettront de déterminer à la fois l'environnement de dépôt de ces sédiments et leur statut environnemental.

#### IV.1. Caractéristiques physiques des sédiments du cours d'eau Lobé

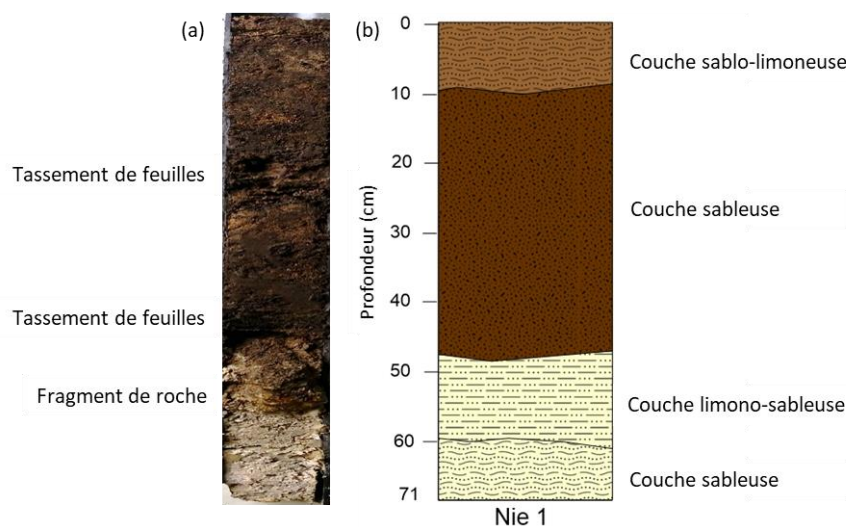
Ces caractéristiques prennent en compte la description des carottes de sédiments (couleur, taille des grains, paramètres granulométriques, classe texturale, teneur en eau) et leur teneur en matière organique. Sept (7) carottes de sédiment dont quatre (4) en amont (Nie1, Nie2, Nie3 et Lob1) et trois (3) en aval (Lob2, Lob3 et Lob5) ont été prélevées et décrites.

##### IV.1.1. Description des carottes de sédiments

###### IV.1.1.1. Données d'observation

- La carotte Nie1

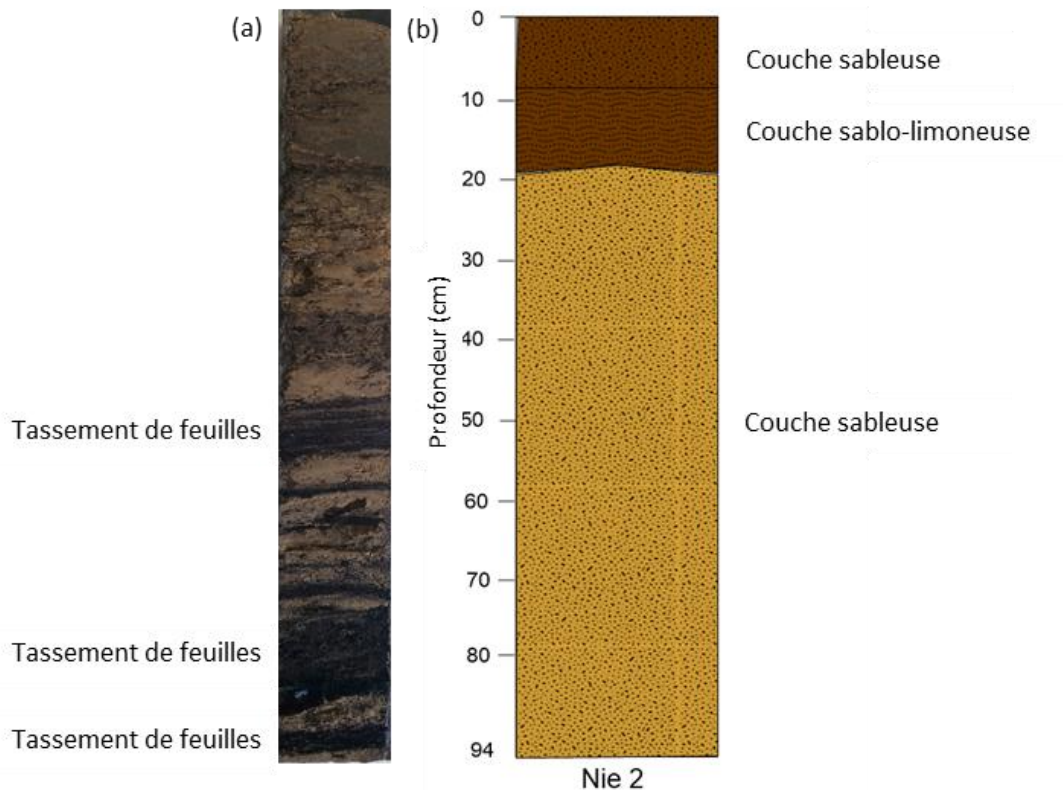
La carotte Nie1, haute de 71 cm est formée d'une alternance de sables fins et de limons (Fig. 15). Au sommet et dans la partie inférieure de la carotte, les limons sont dominants alors que dans la partie intermédiaire (entre 9 et 35 cm de profondeur) les sables fins dominent. Les couleurs vont du gris marron (10YR 6/3, 6/2 et 5/2) à blanchâtre (10YR 8/1) du sommet vers la base. Cette carotte contient des débris de feuilles, bien tassées par endroit, des tiges et même un fragment de roche, vers la base (Fig. 15a).



**Figure 15.** Colonne verticale de la carotte Nie1 : (a) Photo, (b) Schéma.

- La carotte Nie2

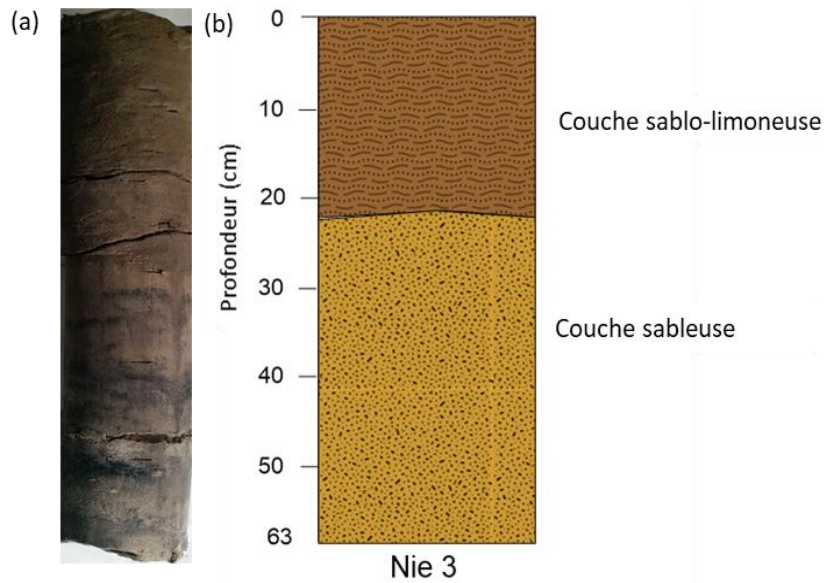
D'une hauteur de 94 cm, la carotte Nie2 est formée de limons et de sables fins (Fig. 16). La fraction sableuse est la plus représentée le long de la colonne ; les limons quant à eux se retrouvent juste au sommet (20 cm). Cette carotte contient une quantité importante de débris de feuilles, surtout bien tassés dans sa partie inférieure (Fig. 16a). Ces sédiments sont de couleur gris marron (10YR 6/2, 6/3 et 7/2).



**Figure 16.** Colonne verticale de la carotte Nie2 : (a) Photo, (b) Schéma.

- La carotte Nie3

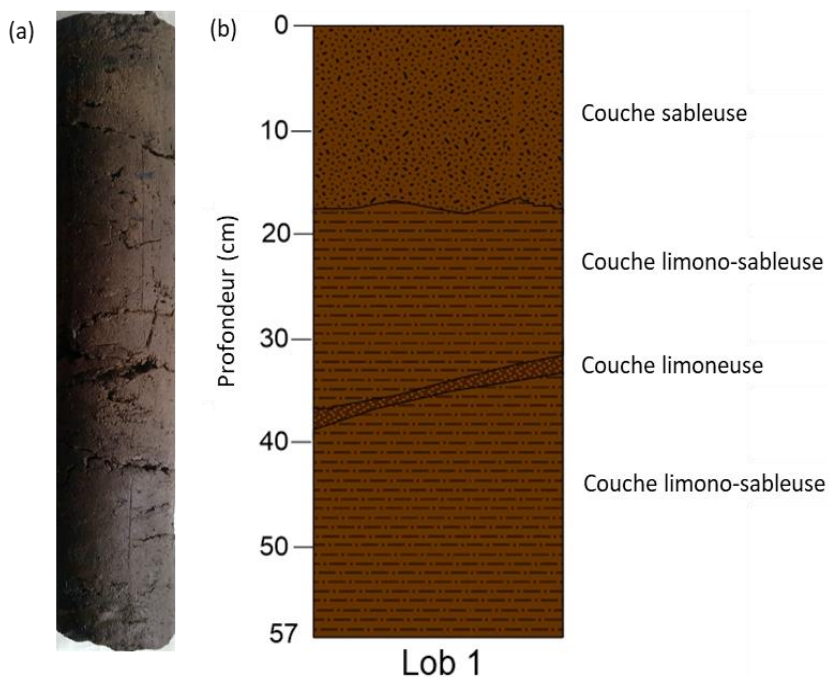
La carotte Nie3, haute de 63 cm est formée de limons et de sables fins (Fig. 17). Comme la précédente, les limons sont dominant dans la partie supérieure (22 cm) tandis le sables sont plus représentés dans la partie inférieure. Les sédiments de cette carotte sont de couleur gris marron (10YR 6/3, 7/2 et 7/3) et renferment peu de débris végétaux.



**Figure 17.** Colonne verticale de la carotte Nie3 : (a) Photo, (b) Schéma.

- La carotte Lob1

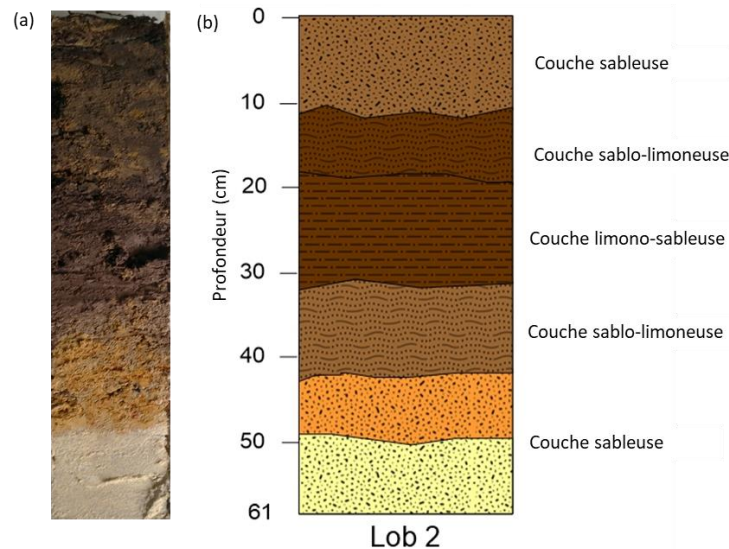
La carotte Lob1, d'une hauteur de 57 cm est formée de sables fins et de limons (Fig. 18). Les sables sont prédominant dans la partie supérieure (18 cm) et une fine couche de limons, d'une inclinaison d'environ  $20^\circ$  est observée entre 30 et 40 cm de profondeur (Fig. 18b). Ces sédiments ont une couleur gris marron (10YR 5/1, 5/2 et 5/3) et ils contiennent peu de débris végétaux.



**Figure 18.** Colonne verticale de la carotte Lob1 : (a) Photo, (b) Schéma.

- La carotte Lob2

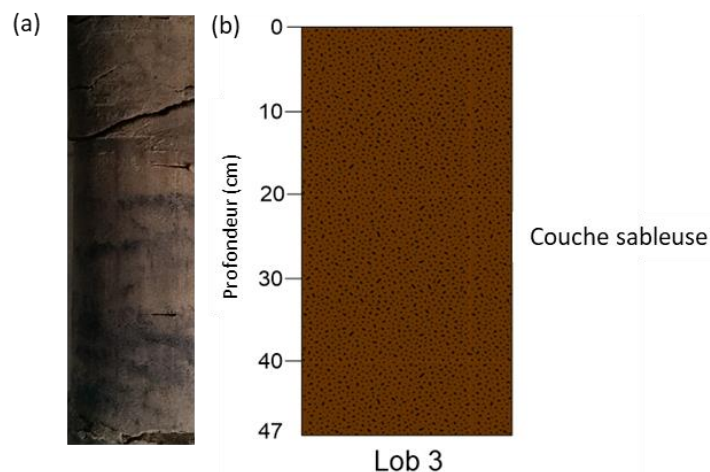
D'une hauteur de 61 cm, la carotte Lob2 est formée de sables fins et de limons (Fig. 19). Le sommet et la base sont représentés par des niveaux sableux. Partant du milieu vers la base ou vers le sommet, l'abondance en sables augmente progressivement. De couleur gris marron (10YR 6/2, 6/3 et 8/4) à blanchâtre (10YR 8/1), les sédiments de cette carotte renferment peu de débris végétaux.



**Figure 19.** Colonne verticale de la carotte Lob2 : (a) Photo, (b) Schéma.

- La carotte Lob3

Haute de 47 cm, la carotte Lob3 est constituée principalement des sables fins (Fig. 20). Toute cette carotte est donc formée d'une épaisse couche de de sables où les débris végétaux sont presque absents. Ces sédiments sont gris marron (10YR 5/1, 5/2 et 6/2).

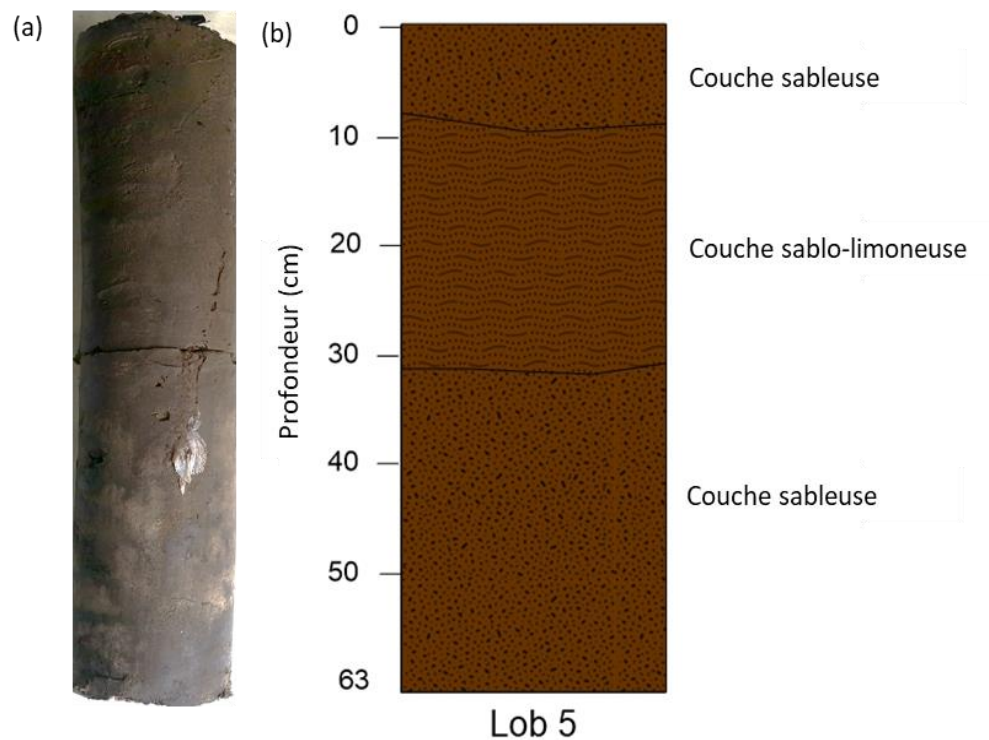


**Figure 20.** Colonne verticale de la carotte Lob3 : (a) Photo, (b) Schéma.



- La carotte Lob5

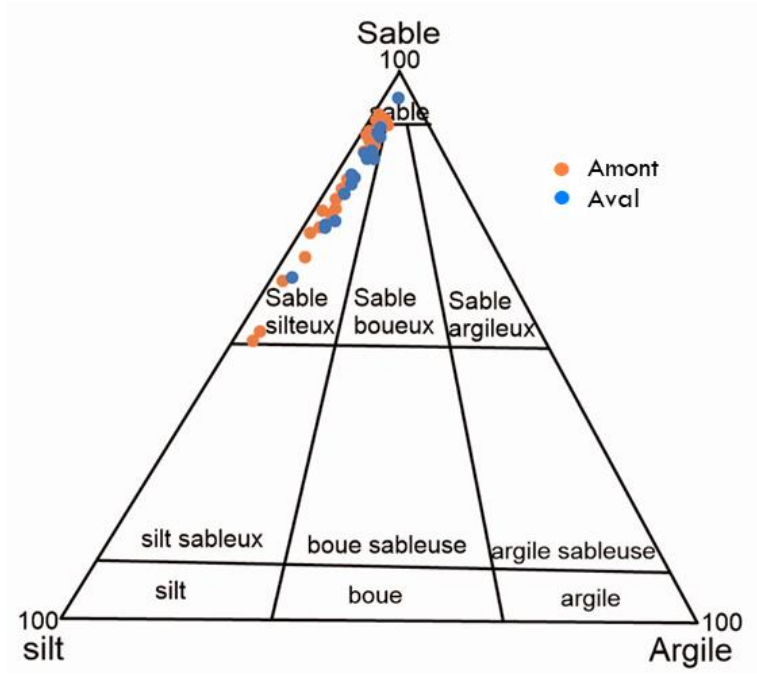
La carotte Lob5, d'une hauteur de 63 cm est formée de limons et sables fins (Fig. 21). Les sables prédominent au sommet et dans la partie inférieure tandis que dans la partie intermédiaire, les limons sont plus représentés. Les sédiments de cette carotte sont de couleur gris marron (10YR 5/1, 5/2 et 6/2) et ils renferment peu de débris végétaux.



**Figure 21.** Colonne verticale de la carotte Lob5 : (a) Photo, (b) Schéma.

#### IV.1.1.2. Classes texturales des sédiments

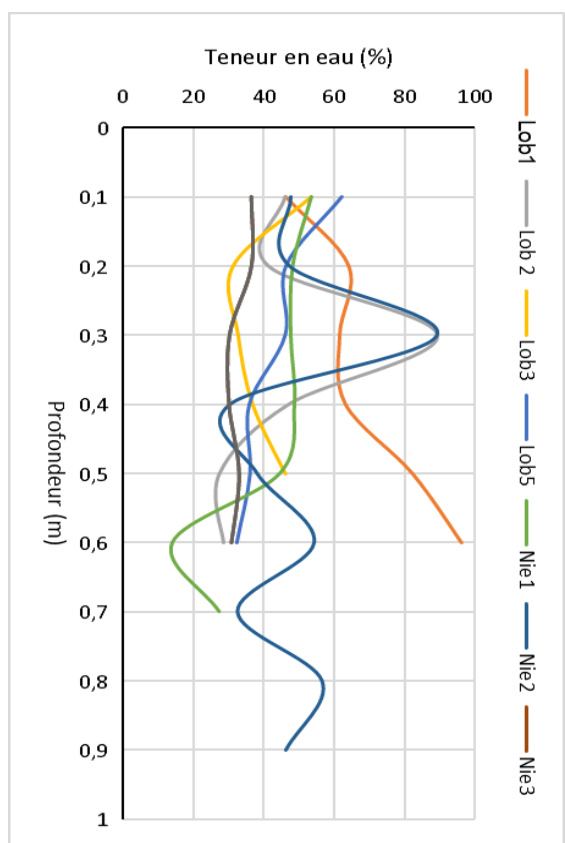
Folck (1980) propose un diagramme de classification texturale qui prend en compte les pourcentages de sable, argile et limon (Fig. 22). La carotte Nie1 présente des textures sableuses et sablo-limoneuses. Les mêmes classes texturales sont observées dans toutes les autres carottes de sédiment (Nie2, Nie3, Lob1, Lob2, Lob3 et Lob5).



**Figure 22.** Plot des sédiments du cours d'eau Lobé dans le diagramme ternaire de Folk (1980).

**IV.1.1.3. Teneur en eau dans les sédiments**

La figure 23 met en exergue la variation des teneurs en eau dans les carottes prélevées.



**Figure 23.** Variation des teneurs en eau dans les sédiments du cours d'eau Lobé.

Dans la carotte Nie1 ces teneurs sont comprises entre 14 et 53,46 %. Les valeurs de teneurs en eau dans la carotte Nie2 sont comprises entre 30,58 et 89,23%. Les teneurs en eau des sédiments de la carotte Nie3 varient entre 30,26 et 36,45%. Ces teneurs sont comprises entre 46,43 et 96,36% dans la carotte Lob1. Elles ont des valeurs qui varient entre 27,7 et 89,41% pour la carotte Lob2. Les valeurs de teneurs en eau dans la carotte Lob3 sont comprises entre 31,6 et 53,7%. Ces valeurs varient entre 32,42 et 62,11% dans la carotte Lob5 (Tab. IV). Cette variation des teneurs en eau montre que les sédiments sont actuels et la sédimentation encore active. Le processus de lithification qui aurait pu conduire au tassement des sédiments et à l'expulsion de l'eau interstitielle n'a pas encore eu lieu.

De manière générale, les sédiments du cours d'eau Lobé présentent pratiquement les mêmes données d'observation et de classe texturales, tant dans sa partie amont que dans sa partie aval (Tab. IV). Ils sont majoritairement constitués de sables (81,54 % en amont et 82,18 % en aval), respectivement suivis des limons (16,93 % en amont et 16,29 % en aval) et d'argiles (1,61 % en amont et 1,69 % en aval). Les textures résultantes sont donc essentiellement sableuses et sablo-limoneuses. Les teneurs en eau de ces sédiments ont des valeurs comprises entre 14 et 89.41 %, où les niveaux sableux enregistrent les valeurs les plus faibles.

**Tableau IV.** Caractéristiques physiques des sédiments du cours d'eau Lobé.

Lieux	Amont (n =43)											
Carotte	Nie1							Nie2				
Code	Nie1T1	Nie1T2	Nie1T3	Nie1T4	Nie1T5	Nie1T6	Nie1T7	Nie2T1	Nie2T2	Nie2T3	Nie2T4	Nie2T5
Couleur	BP	GBC	GBC	BG	BG	Bl	Bl	GBC	GBC	BP	GC	GC
Sables	73	87	91	82	82	63	72	81	76	90	93	91
Limons	25	11	7	16	16	36	27	18	23	9	6	7
Argiles	2	2	2	2	2	1	1	2	1	1	1	2
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Texture <sup>a</sup>	SL	S	S	SL	SL	SL	SL	SL	SL	S	S	S
Teneur en eau	53,46	48,18	47,62	48,65	44,54	14	27,3	47,8	47,38	89,23	30,58	38,24

Lieux	Amont											
Carotte	Nie2				Nie3				Lob1			
Code	Nie1T6	Nie2T7	Nie2T8	Nie2T9	Nie3T1	Nie3T2	Nie3T3	Nie3T4	Nie3T5	Nie3T6	Lob1T1	Lob1T2
Couleur	GC	GC	GBC	GC	BTP	BTP	GC	GC	GC	GC	B	BG
Sables	90	94	91	94	75	76	87	93	92	91	88	82
Limons	9	5	8	5	23	22	11	6	6	8	10	16
Argiles	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1	2	2
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Texture <sup>a</sup>	S	S	S	S	SL	SL	S	S	S	S	S	S
Teneur en eau	54,41	32,67	56,65	46,35	36,45	26,48	30,26	30,12	32,97	30,81	46,43	64,31

Lieux	Amont					Aval (n=17)						
Carotte	Lob1					Lob2						
Code	Lob1T3	Lob1T4	Lob1T5	Lob1T6	Moy.	Lob2T1	Lob2T2	Lob2T3	Lob2T4	Lob2T5	Lob2T6	
Couleur	BG	BG	G	BG	/	BP	GBC	GBC	BP	BTP	Bl	
Sables	67	78	53	51	82,18	82	73	63	79	87	99	
Limons	31	21	45	47	16,29	16	25	35	19	11	2	
Argiles	2	1	2	2	1,69	2	2	2	2	2	1	
Total	100	100	100	100	/	100	100	100	100	100	100	
Texture <sup>a</sup>	SL	SL	SL	SL	/	S	SL	SL	SL	SL	S	
Teneur en eau	61,76	63,44	111,44	116,36	47,31	46,27	41,51	89,41	47,26	27,7	28,84	

Lieux	Aval											
Carotte	Lob3						Lob5					
Code	Lob3T1	Lob3T2	Lob3T3	Lob3T4	Lob3T5	Lob5T1	Lob5T2	Lob5T3	Lob5T4	Lob5T5	Lob5T6	Moy.
Couleur	GBC	GBC	LBG	GBC	BG	GBC	BG	BG	LBG	GBC	BG	/
Sables	83	92	87	87	91	82	75	73	86	82	75	81,54
Limons	16	7	12	11	8	17	23	25	12	17	23	16,93
Argiles	1	1	1	3	1	2	3	2	2	2	3	1,61
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	/
Texture <sup>a</sup>	S	S	S	S	S	S	SL	SL	S	S	SL	/
Teneur en eau	53,7	31,36	32,83	36,96	46,34	62,11	46,32	46,11	35,95	36,17	32,42	49,57

n: nombre total d'échantillons ; Moy: moyenne.

BP: brun pâle ; GBC: gris brun clair ; BG: brun gris ; Bl: blanc ; GC: gris clair ; BTP: brun très pâle ; B: brun ; G: gris.

S: Sableuse ; SL: Sablo-limoneuse. Argiles:  $\Phi < 2\mu\text{m}$ ; limons:  $2\mu\text{m} < \Phi < 50\mu\text{m}$ ; sables:  $50\mu\text{m} < \Phi < 2000\mu\text{m}$ . <sup>a</sup> Folk (1980).

#### IV.1.2. Matière organique dans les sédiments

Les concentrations de matière organique déduites des valeurs des résultats de carbone organique total dans les sédiments du cours d'eau Lobé sont présentées dans le tableau V. Ces valeurs de matière organique sont relativement faibles et varient de 0,38 à 4,83 % ; ces valeurs sont enregistrées dans la partie amont. Les valeurs des concentrations de la partie aval quant à elles se rapprochent de celles de l'amont ; elles sont comprises entre 0,71 et 3,97%.

**Tableau V.** Carbone organique total (COT) et matière organique (MO) des sédiments du cours d'eau Lobé.

Lieux	Amont (n=11)											
Code	Nie1 T1	Nie1 T4	Nie1 T7	Nie2 T1	Nie2 T4	Nie2 T9	Nie3 T1	Nie3 T6	Lob1 T1	Lob1 T3	Lob1 T6	Moy.
COT (%)	2,18	2,28	0,22	2,01	1,90	1,86	0,96	1,40	1,23	2,36	2,81	1,72
MO (%)	3,75	3,92	0,38	3,46	3,27	3,20	1,65	2,41	2,12	4,06	4,83	3,00

Lieux	Aval (n=8)									
Code	Lob2 T1	Lob2 T4	Lob2 T5	Lob2 T6	Lob3 T1	Lob3 T5	Lob5 T1	Lob5 T6	Moy.	
COT (%)	2,31	1,95	0,78	0,41	2,00	2,21	0,98	1,48	1,52	
MO (%)	3,97	3,35	1,34	0,71	3,44	3,80	1,69	2,55	2,61	

## IV.2. Minéralogie des sédiments

### IV.2.1. Minéraux légers et fragments lithiques

L'observation des minéraux des lames minces de sédiments a permis l'identification de quartz, de feldspaths et d'éléments lithiques (Fig. 24).

#### - Le quartz

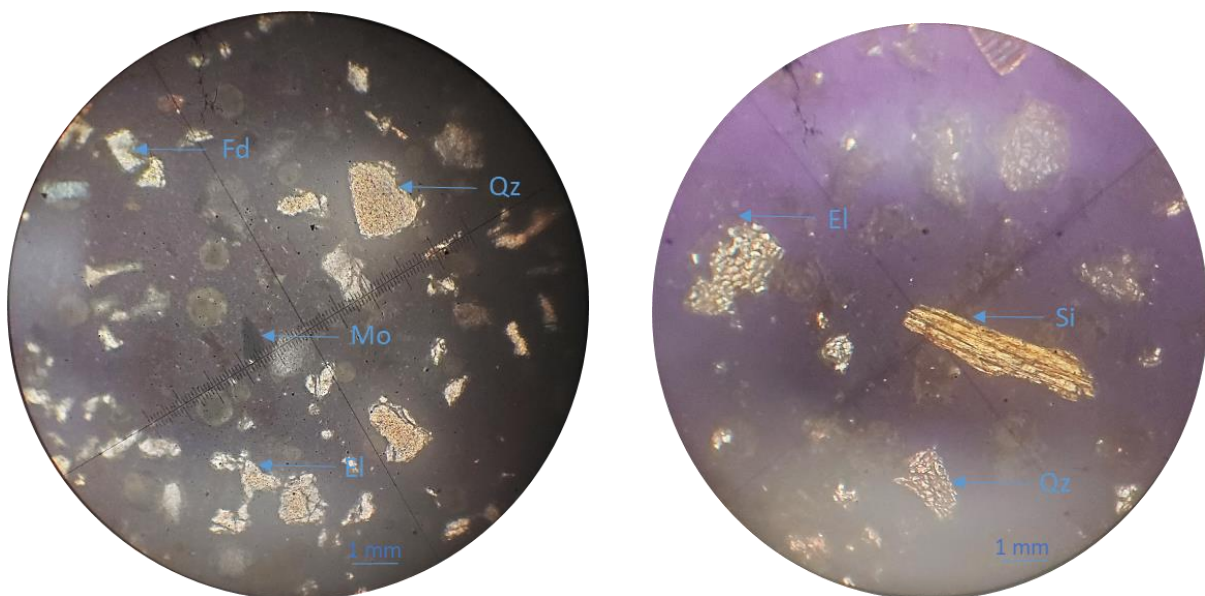
Il est le constituant détritique le plus abondant dans les sédiments étudiés. Les grains de quartz ont généralement des formes anguleuses à subanguleuses et arrondies à subarrondies. Il est très souvent incolore en LPNA et présente des teintes de polarisation gris blanc en LPA. Le quartz montre rarement les extinctions droites, mais présente très souvent une extinction ondulatoire.

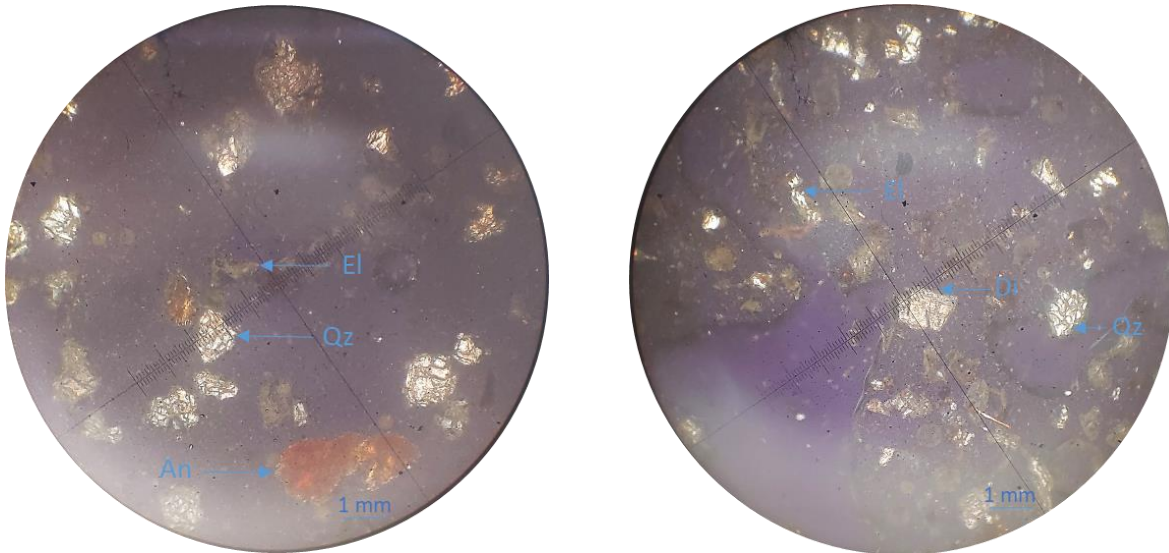
#### - Les feldspaths

Les feldspaths potassiques et les plagioclases ont été observés dans ces sédiments. La sanidine est incolore en LPNA et présente une section grossièrement rectangulaire à extrémité arrondies. En LPA, il présente une teinte grise plus ou moins foncée et est caractérisée par la macle de Carlsbad. Les plagioclases quant à eux sont également incolore en LPNA, mais se présente sous forme de baguettes plus ou moins allongées. Ils présentent des teintes gris clair à gris sombre et sont caractérisés par des macles polysynthétiques, dans le sens de l'allongement.

#### - Éléments lithiques

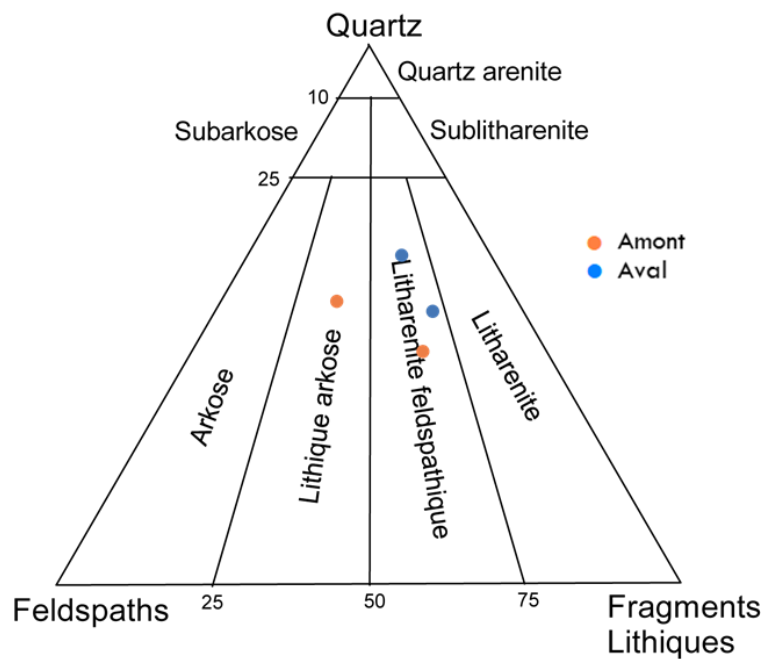
Dans ces sédiments, les fragments lithiques sont assez représentés. Ils sont dispersés dans la lames et sont pour la plupart associés aux feldspaths ou aux quartz en cour d'altération.





**Figure 24.** Lames minces de sédiments (Qz : quartz, Fd : feldspaths, El : éléments lithiques, Mo : minéral opaque, An : anatase, Si : sillimanite et Di : disthène).

Le diagramme ternaire Q-F-L a été utilisé pour déterminer la tendance de composition des roches clastiques; il est représenté en prenant en compte les pourcentages respectifs de quartz, feldspath et éléments lithiques d'un échantillon donné. Les sédiments de l'amont du cours d'eau Lobé sont caractérisés comme litharenite feldspathique et lithique arkose tandis que ceux de l'aval sont des litharenites feldspathiques (Fig. 25).



**Figure 25.** Plot des sédiments du cours d'eau Lobé dans le diagramme ternaire Q-F-L.

## IV.2.2. Minéraux lourds

L'étude du cortège des minéraux lourds a permis de distinguer les minéraux tels que : disthène, zoïsite, grenat, tourmaline, chloritoïde, diopside, anatase, sillimanite, augite, staurotide, zircon, actinote, hornblende, rutile et les oxydes opaques (Fig. 26).

**Disthène** : en PLNA, il est incolore ou très légèrement brunâtre ou bleuté et se présente sous forme de cristaux anguleux à relief fort et deux directions de clivage. En PLA, sa teinte de polarisation caractéristique est bleu de la fin de premier ordre.

**Zoïsite** : il représentée par l'épidote au sens strict. La zoïsite au sens large, est une espèce très rare. Elle présente des formes très anguleuses à anguleuses. En LPNA, elle est incolore, parfois légèrement coloré en jaune ou en rose. En LPA, il a une couleur bleue foncé ou gris jaunâtre et présente une extinction droite.

**Grenat** : il se présente sous forme de grains réguliers parfois angulaires. En LPNA, il est incolore à brun avec un relief fort tandis qu'en LPA, ce minéral est toujours éteint.

**Tourmaline** : en LPNA, il a un relief moyen et un pléochroïsme dans le brun et vert. En LPA, sa teinte de polarisation est du deuxième ordre et les sections allongées sont à extinction droite.

**Chloritoïde** : il se trouve généralement en grains écailleux à contours arrondis doués d'un relief assez accentué en LPNA. En LPA, son pléochroïsme caractéristique est visible sur la plupart des grains.

**Diopside** : il est de forme très anguleux à anguleux. En LPNA, il est incolore à verdâtre avec un relief fort. En LPA, il présente une extinction oblique.

**Anatase** : Il se présente plus souvent en tablette rectangulaires ou carrés, parfois biseautées. En LPA, l'extinction des tablettes basales n'est pas toujours continue.

**Sillimanite** : En PLNA, elle est incolore et très anguleuse ; parfois elle est fibreuse et très souvent prismatique. En LPNA, elle est parfois légèrement colorée en jaune ou en orange.

**Augite** : il est de forme prismatique, parfois acirculaire, anguleux. En LPNA, il a un relief fort et est de couleur verte ou brune. En LPNA, la diffringente est assez élevée avec une teinte de polarisation de fin de premier ordre. Il est faiblement pléochroïque avec des cassures nettes et présente une extinction oblique.



**Staurotide** : il est généralement brun rougeâtre à jaunâtre avec des grains de forme prismatique. Il présente des macles cruciformes communes et présente un pléochroïsme.

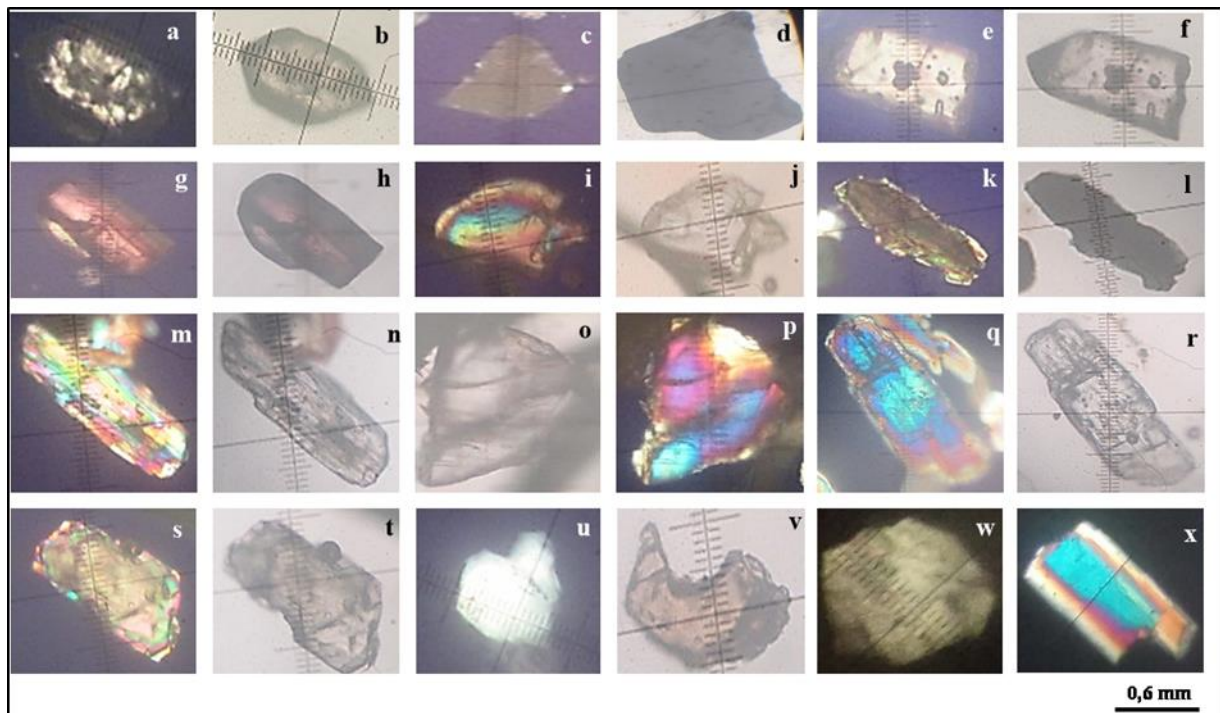
**Zircon** : il présente sous forme de prisme allongé souvent en grains subanguleux à subarrondis, faisant ressortir une teinte plus ou moins vive de troisième ordre. En LPNA, il est incolore avec un relief très fort. En LPA, il présente une extinction droite.

**Actinote** : il se présente souvent sous forme lamellaire, prismatique et aciculaire. En LPNA il est caractérisé par une couleur gris verdâtre, et présente des clivages.

**Hornblende** : elle présente généralement une forme de prisme allongé, de couleur brune à brun verdâtre avec un relief fort en LPNA. En LPA, elle présente une extinction oblique.

**Rutile** : En LPNA, il est souvent brunâtre et présente des clivages plus ou moins nets. En LPA, une teinte de polarisation pâle est masquée par la couleur du minéral.

**Oxydes opaques** : ils sont de formes très anguleuses à arrondies. En LPNA, ils ont une couleur noire, et sont toujours éteints en LPA.



**Figure 26.** Observation microscopique des minéraux lourds des sédiments du cours d'eau Lobé. a) Zircon LPA, b) Zircon LPNA ; c) Anatase, d) Minéral opaque ; e) Tourmaline LPA, f) Tourmaline LPNA ; g) Rutile LPA, h) Rutile LPNA ; i) Hornblende LPA, j) Hornblende LPNA ; k) Diopside LPA, l) Diopside LPNA ; m) Sillimanite LPA, n) Sillimanite LPNA ; o)



Augite LPNA, p) Augite LPA ; q) Disthène LPA, r) Disthène LPNA ; s) Staurotide LPA, t) Staurotide LPNA ; u) Zoïsite ; v) Grenat ; w) Chloritoïde ; x) Actinote.

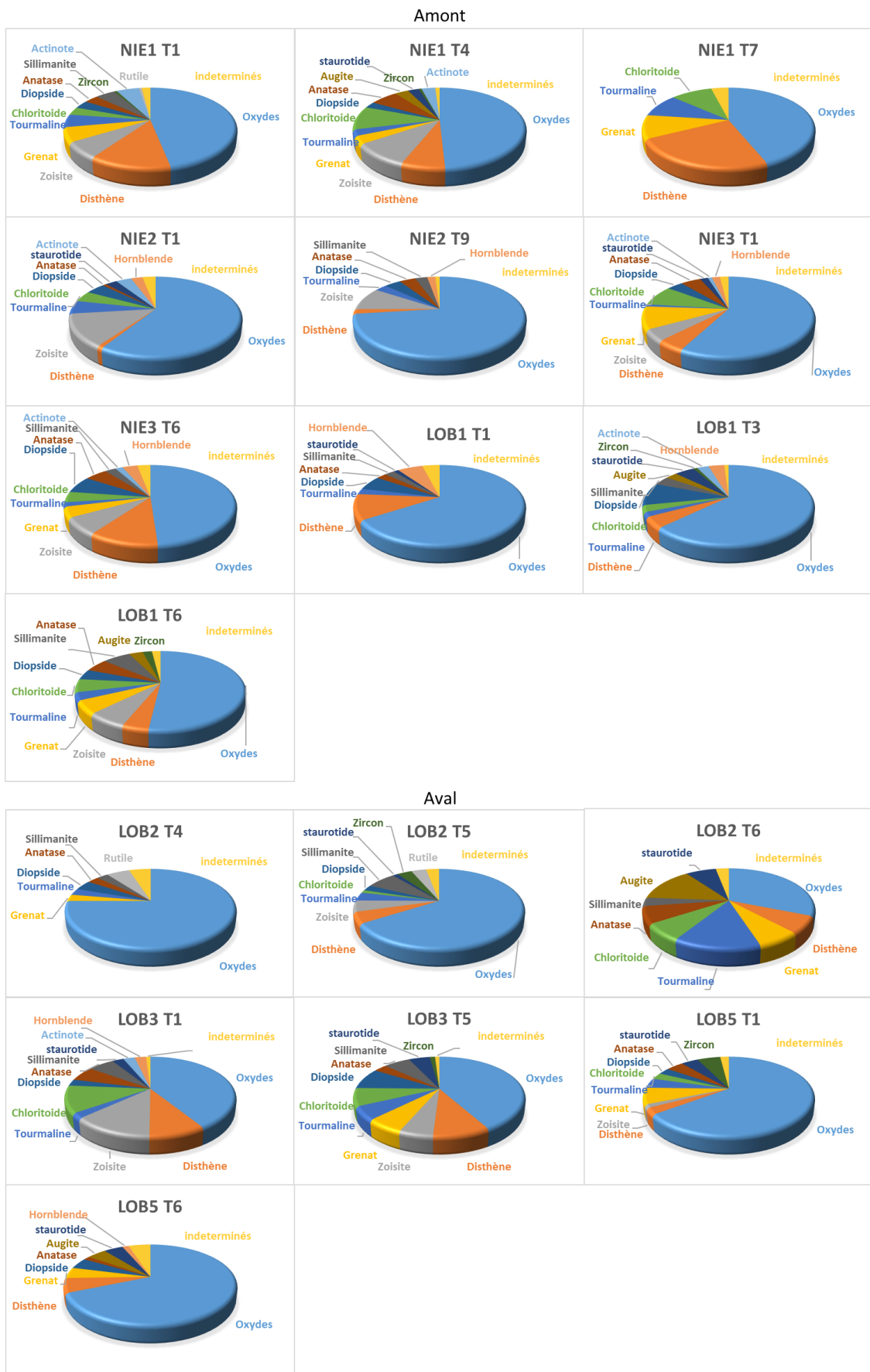
Le tableau VI présente les résultats de l'étude analytique de ces minéraux dans les différents échantillons. Nous remarquons que ce soit en amont ou en aval, les minéraux les plus communs aux différents échantillons sont : oxydes, disthène, zoïsite, tourmaline, chloritoïde, anatase et sillimanite.

**Tableau VI.** Proportion des minéraux lourds (%) dans les sédiments du cours d'eau Lobé.

Lieux	Amont (n=10)									
	Code	Nie1T1	Nie1T4	Nie1T7	Nie2T1	Nie2T9	Nie3T1	Nie3T6	Lob1T1	Lob1T3
Oxydes	47	49	44	59	73	58	49	66	63	52
Disthène	13	7	24	1	2	5	11	10	5	4
Zoïsite	6	9	-	13	9	5	7	-	-	6
Grenat	6	3	10	-	-	9	4	-	-	5
Tourmaline	5	3	10	5	3	1	2	2	2	3
Chloritoïde	3	9	10	4	-	8	4	-	3	5
Diopside	3	3	-	4	4	4	7	6	9	4
Anatase	3	6	-	1	4	5	5	2	-	5
Sillimanite	5	-	-	-	3	-	3	2	4	6
Augite	-	3	-	-	-	-	-	-	3	3
Staurotide	-	3	-	3	-	2	-	1	5	-
Zircon	1	1	-	-	-	-	-	-	1	2
Actinote	5	3	-	4	-	1	2	-	3	-
Hornblende	-	-	-	3	2	2	3	6	4	-
Rutile	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Indéterminés	2	1	4	3	1	2	3	4	1	2
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Lieux	Aval (n=7)						
	Code	Lob2T4	Lob2T5	Lob2T6	Lob3T1	Lob3T5	Lob5T1
Oxydes	75	66	31	41	42	65	69
Disthène	-	5	7	9	9	3	6
Zoïsite	-	5	-	13	5	1	-
Grenat	3	-	7	-	6	7	4
Tourmaline	3	3	14	2	5	4	-
Chloritoïde	-	1	7	11	7	3	-
Diopside	4	2	-	3	9	3	4
Anatase	3	-	7	6	3	4	1
Sillimanite	3	7	3	6	6	-	-
Augite	-	-	14	-	-	-	4
Staurotide	-	1	7	3	5	4	4
Zircon	-	3	-	-	1	5	-
Actinote	-	-	-	3	-	-	-
Hornblende	-	-	-	3	-	-	1
Rutile	5	3	-	-	-	-	-
Indéterminés	5	3	3	1	1	2	5
Total	100	100	100	100	100	100	100

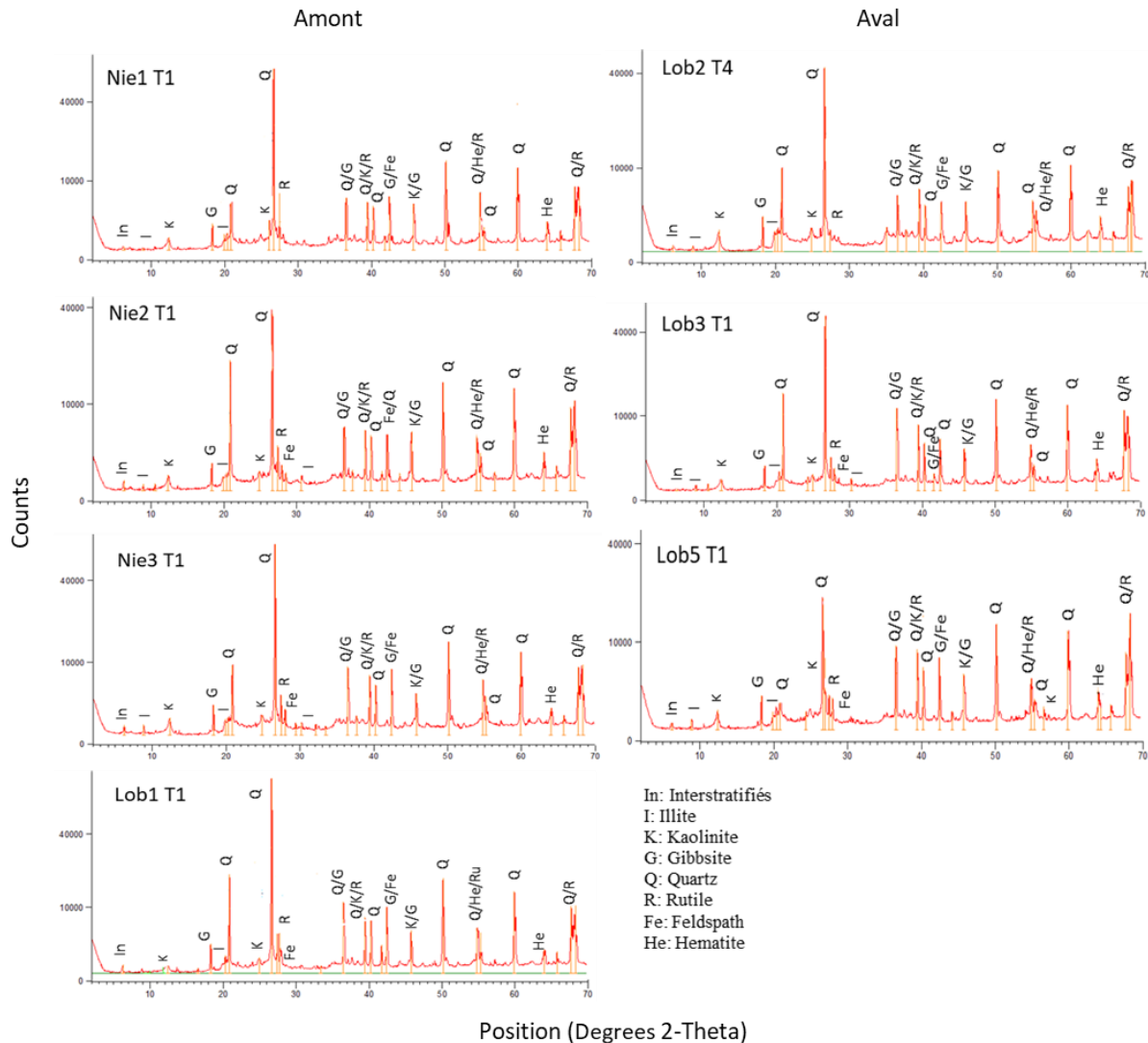
Ces différentes proportions dans chaque échantillon ont permis de réaliser les diagrammes surfaciques ci-après (Fig. 27).



**Figure 27.** Diagrammes surfaciques des minéraux lourds des sédiments du cours d'eau Lobé.

### IV.2.3. Diffraction aux rayons X (DRX)

Les diffractogrammes des différents échantillons ont permis d'identifier les minéraux suivants : quartz, rutile, gibbsite, kaolinite, feldspath, hématite, illite et interstratifiés (Fig. 28).



**Figure 28.** Spectres de diffraction aux rayons X des sédiments du cours d'eau Lobé.

L'analyse semi-quantitative de ces minéraux révèle que le quartz, le rutile et la gibbsite sont les principaux constituants de ces sédiments (Tab. VII).

**Tableau VII.** Composition semi- quantitative des minéraux des sédiments du cours d'eau Lobé.

Lieux Code	Amont (n=4)			Aval (n=3)			
	Nie1T1	Nie2T1	Nie3T1	Lob1T1	Lob2T4	Lob3T1	Lob5T1
Quartz	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++
Rutile	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Gibbsite	+	+	++	++	+	+	+
Kaolinite	+	+	+	+	+	-	+
Feldspath	-	+	+	+	-	-	+
Hematite	-	-	-	-	+	-	-
Illite	-	-	-	-	-	-	-
Interstratifiés	-	-	-	-	-	-	-

++++ très abondant, +++ abondant, ++ représenté, + faiblement représenté, - traces

### IV.3. Géochimie des sédiments

#### IV.3.1. Eléments majeurs

Les teneurs en éléments majeurs (en %), présentées par le tableau VIII montre qu'en amont, SiO<sub>2</sub> variant entre 62,6 et 84,4 % (avec une moyenne de 76,98 %) est le plus abondant ; sa valeur est supérieure à celle de la valeur moyenne de la croûte continentale supérieure (UCC : 66 % ; Taylor et McLennan, 1985 ; McLennan, 2001). La teneur en TiO<sub>2</sub> enregistrée (0,88 %) est légèrement supérieure à celle de l'UCC (0,50 %). De plus, les teneurs en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> comprises entre 5,38 et 16,89 % avec une moyenne de 9,00 % et celles en K<sub>2</sub>O variant de 0,46 à 3,74 % avec une moyenne de 1,04 %, sont relativement faible, indiquant que la teneur en minéraux argileux est faible dans les échantillons. Les teneurs en CaO et Na<sub>2</sub>O (< 0,4 % dans tous les échantillons) sont inférieures aux valeurs de l'UCC (4,20 et 3,90 % respectivement). Les teneurs en Na<sub>2</sub>O, inférieures à K<sub>2</sub>O, reflètent probablement l'abondance relative des minéraux contenant du potassium (c'est-à-dire K-feldspath) dans la zone source. Ces sédiments sont pauvres en MgO avec des valeurs comprises entre 0,09 et 0,30 %, et une moyenne de 0,21 % ; ces valeurs sont inférieures par rapport à celle de l'UCC (2,20 %). Avec des valeurs comprises entre 1,34 et 5,67 % avec une moyenne de 3,05 % le Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> enregistre des valeurs modérées (UCC : 4,50 %), certainement due à la présence des minéraux ferrifères (hématite). MnO et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> enregistrent de très faibles valeurs (0,04 et 0,08 % en moyenne, respectivement), inférieures à celles de l'UCC (0,10 et 0,17 % respectivement), dans tous les échantillons.

La corrélation entre SiO<sub>2</sub> versus Na<sub>2</sub>O et K<sub>2</sub>O (r = - 0,33 et r = - 0,26, respectivement) n'est pas statistiquement significatif (Tab VI), indiquant une forte mobilité de Na et K pendant les processus d'altération. SiO<sub>2</sub> est négativement corrélé avec Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (r = - 0,81), indiquant que la

silice est principalement présente dans les grains de quartz détritique (Armstrong-Altrin et al., 2017 ; Wang et al., 2019) (Tab. IX).

En aval, les teneurs de ces éléments ne diffèrent pas vraiment de celles de la partie amont. Les valeurs de SiO<sub>2</sub> variant entre 71,65 et 91,42 % avec une moyenne de 80,06 %, sont les plus élevées, suggérant une forte teneur en quartz. Les teneurs en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (comprises entre 3,94 et 11,24 % avec une moyenne de 7,89 %), en Na<sub>2</sub>O (variant entre 0,06 et 0,58 % avec une moyenne de 0,24 %) et en K<sub>2</sub>O (comprises entre 0,49 et 0,62 % avec une moyenne de 0,57 %) sont inférieures par rapport à l'UCC (15,20, 3,90 et 3,40 % respectivement ; Tab. V). Ces faibles valeurs de Na<sub>2</sub>O et de K<sub>2</sub>O seraient probablement liées aux faibles teneurs en feldspath dans le milieu. Les teneurs en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (comprises entre 1,04 et 4,98 % avec une moyenne de 3,44 %) sont faibles à modérées, comparées à celle de l'UCC (4,50 %) et les teneurs en CaO (comprises entre 0,05 et 0,32 % avec une moyenne de 0,18 %) sont inférieures à celle de l'UCC (4,20 %), dans tous les échantillons. MnO et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> enregistrent toujours des valeurs nettement inférieures (0,04 et 0,08 % en moyenne, respectivement) à celles de l'UCC (0,10 et 0,17 % respectivement), dans tous les échantillons.

Les corrélations entre SiO<sub>2</sub> versus Na<sub>2</sub>O et K<sub>2</sub>O ( $r = - 0,33$  et  $r = - 0,28$ , respectivement) ne sont pas statistiquement significatifs. SiO<sub>2</sub> est négativement corrélé à Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $r = - 0,93$ ). La corrélation entre Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et TiO<sub>2</sub> est statistiquement significative ( $r = 0,85$ ), ce qui indique la présence de phyllosilicates (Tab. IX).

Pour comprendre et évaluer l'altération des roches sources, les indices d'altération tels que le CIA (Chemical Index of Alteration ; Nesbitt et Young, 1982) et le PIA (Plagioclase Index of Alteration ; Nesbitt et Young, 1982 et Fedo et al., 1995) peuvent être utilisés (Tab. VIII).

Pour évaluer la maturité des sédiments, l'ICV (Index of Compositional Variability) a été utilisé (Tab. VIII). Pour des valeurs d'ICV > 1, les sédiments sont considérés comme immature et pour des valeurs d'ICV < 1, ces derniers sont matures (Cox et al., 1995).

**Tableau VIII.** Teneurs des éléments majeurs (%) dans les échantillons des sédiments du cours d'eau Lobé.

Lieux	Amont (n=11)												
	Code	Nie1T1	Nie1T4	Nie1T7	Nie2T1	Nie2T4	Nie1T9	Nie3T1	Nie3T6	Lob1T1	Lob1T3	Lob1T6	Moy
SiO <sub>2</sub> (adj)	87,44	84,64	75,72	84,61	87,36	89,74	83,43	87,24	86,87	79,56	76,09	83,88	4,76
SiO <sub>2</sub>	79,46	75,75	71,09	76,61	80,98	84,38	77,98	82,41	81,28	74,25	62,6	76,98	6,14
TiO <sub>2</sub>	0,69	0,64	0,12	0,69	1,04	1,23	0,86	1,34	0,85	1,27	0,98	0,88	0,35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,38	8,49	16,89	8,35	6,42	5,38	9,99	6,31	6,77	11,27	12,77	9,00	3,49
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,81	3,15	1,34	3,04	2,54	1,58	2,94	2,90	3,31	5,67	4,27	3,05	1,18
MnO	0,04	0,03	0,01	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05	0,05	0,02	0,04	0,04	0,01
MgO	0,20	0,23	0,17	0,25	0,24	0,16	0,28	0,19	0,21	0,09	0,30	0,21	0,06
CaO	0,23	0,20	0,05	0,24	0,21	0,19	0,19	0,26	0,30	0,02	0,33	0,20	0,09
Na <sub>2</sub> O	0,17	0,15	0,41	0,19	0,18	0,18	0,17	0,21	0,20	0,17	0,21	0,20	0,07
K <sub>2</sub> O	0,82	0,78	3,74	1,04	0,97	0,81	0,94	0,72	0,53	0,46	0,64	1,04	0,91
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07	0,08	0,06	0,09	0,08	0,08	0,09	0,07	0,06	0,10	0,13	0,08	0,02
LOI	8,90	10,20	5,90	9,20	7,10	5,50	6,20	5,50	6,10	6,50	17,40	8,05	3,50
Total	99,77	99,7	99,78	99,74	99,8	99,53	99,67	99,96	99,66	99,82	99,67	99,74	0,11
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,45	8,92	4,21	9,17	12,61	15,68	7,81	13,06	12,01	6,59	4,90	9,77	3,68
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	4,82	5,20	9,12	5,47	5,39	4,50	5,53	3,43	2,65	2,71	3,05	4,72	1,85
K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,13	0,09	0,22	0,12	0,15	0,15	0,09	0,11	0,08	0,04	0,05	0,11	0,05
Na <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /K <sub>2</sub> O	3,43	4,04	0,36	2,92	2,62	1,95	3,13	4,03	6,25	12,33	6,67	4,34	3,19
CIA (%)	81,51	86,39	78,3	82,67	79,63	78,55	86,37	81,1	84,6	95,1	90,22	84,04	5,21
PIA (%)	90,76	93,94	95,4	92,04	90,07	88,38	94,13	88,89	90,4	99,3	94,59	92,54	3,28
ICV	0,77	0,61	0,35	0,65	0,81	0,77	0,54	0,89	0,80	0,68	0,53	0,62	0,76

Lieux	Aval (n=8)											
	Code	Lob2T1	Lob2T4	Lob2T5	Lob2T6	Lob3T1	Lob3T5	Lob5T1	Lob5T6	Moy	± 1sd	UCC
SiO <sub>2</sub> (adj)	85,54	79,27	80,54	93,15	87,18	80,44	87,34	87,54	85,13	4,73	-	
SiO <sub>2</sub>	80,42	71,65	75,54	91,42	80,81	76,14	81,78	82,72	80,06	5,93	66,00	
TiO <sub>2</sub>	0,96	1,84	1,37	0,98	1,15	1,87	0,74	1,23	1,27	0,41	0,50	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,01	11,23	10,79	3,94	6,17	11,24	6,29	6,41	7,89	2,80	15,20	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,88	4,43	4,98	1,04	3,28	3,98	3,12	2,83	3,44	1,20	4,50	
MnO	0,04	0,05	0,04	0,03	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,01	0,10	
MgO	0,32	0,21	0,15	0,08	0,17	0,14	0,42	0,18	0,21	0,11	2,20	
CaO	0,29	0,15	0,09	0,05	0,23	0,08	0,32	0,23	0,18	0,10	4,20	
Na <sub>2</sub> O	0,45	0,13	0,12	0,06	0,18	0,58	0,21	0,18	0,24	0,18	3,90	
K <sub>2</sub> O	0,55	0,59	0,61	0,51	0,58	0,49	0,62	0,60	0,57	0,05	3,40	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09	0,11	0,10	0,03	0,07	0,09	0,08	0,06	0,08	0,03	0,17	
LOI	5,90	9,10	5,90	1,70	7,00	5,20	6,20	5,20	5,78	2,07	-	
Total	99,91	99,49	99,69	99,84	99,69	99,85	99,83	99,69	99,75	0,14	100,1	
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,47	6,38	7,00	23,20	13,10	6,77	13,00	12,90	10,15	5,50	4,34	
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1,22	4,54	5,08	8,50	3,22	0,84	2,95	3,33	2,38	2,42	0,87	
K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08	0,05	0,06	0,13	0,09	0,04	0,10	0,09	0,07	0,03	0,22	
Na <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,02	0,26	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /K <sub>2</sub> O	7,05	7,51	8,16	2,04	5,66	8,12	5,03	4,72	6,05	2,10	1,30	
CIA (%)	81,00	91,33	93,20	85,50	83,49	88,8	82,2	83,77	86,16	4,45	56,93	
PIA (%)	85,90	96,12	98,80	96,60	90,35	92,4	89,05	90,68	92,49	4,36	59,30	
ICV	0,92	0,65	0,68	0,69	0,91	0,64	0,86	0,82	0,77	0,12	1,20	

LOI: Loss on ignition.

CIA (%) =  $[\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$  de Nesbitt et Young (1982).

PIA (%) =  $[\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O} / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O})] \times 100$  de Nesbitt et Young (1982); Fedo et al. (1995).

ICV =  $(\text{FeO}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3$  de Cox et al. (1995).

Les valeurs de l'UCC sont données par Taylor et McLennan (1985); McLennan (2001).

(SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>: fait référence au SiO<sub>2</sub> recalculé avec une base anhydre et ajusté à 100%.

Moy. = moyenne. 1sd = erreur. n = nombre total d'échantillons.

**Tableau IX.** Matrice de corrélation des données géochimiques (majeurs, traces et terres rares) des sédiments du cours d'eau Lobé.

Amont (n=11)	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ba	Ni	Cr	Sc	Co	Ga	Hf	Nb	Rb	Sr	Ta	Th	U	V	Zr	Y	ΣREE	
SiO <sub>2</sub>	1,00																											
TiO <sub>2</sub>	0,38	1,00																										
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>-0,81</b>	-0,64	1,00																									
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,38	0,43	0,08	1,00																								
MnO	0,44	0,55	-0,79	0,01	1,00																							
MgO	-0,29	-0,21	-0,03	-0,12	0,37	1,00																						
CaO	0,04	0,22	-0,48	-0,03	0,87	0,72	1,00																					
Na <sub>2</sub> O	-0,33	-0,67	0,72	-0,47	-0,53	-0,18	-0,37	1,00																				
K <sub>2</sub> O	-0,26	-0,79	0,70	-0,59	-0,67	-0,13	-0,49	0,94	1,00																			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-0,65	0,31	0,21	0,62	0,00	0,36	0,20	-0,37	-0,42	1,00																		
Ba	0,01	-0,34	0,12	-0,58	0,04	0,41	0,17	0,42	0,49	-0,21	1,00																	
Ni	-0,09	0,08	-0,01	<b>0,55</b>	0,14	-0,24	0,09	-0,15	-0,33	-0,03	-0,77	1,00																
Cr	-0,02	-0,05	-0,11	0,30	0,34	0,04	0,38	-0,10	-0,28	-0,16	-0,57	0,92	1,00															
Sc	-0,06	-0,11	-0,10	0,10	0,20	0,28	0,22	-0,16	-0,11	0,21	0,37	-0,20	-0,19	1,00														
Co	-0,52	0,09	0,14	<b>0,81</b>	0,12	0,13	0,26	-0,33	-0,48	0,51	-0,63	0,78	0,68	0,07	1,00													
Ga	-0,63	-0,55	0,88	-0,07	-0,61	-0,04	-0,37	0,82	0,74	0,00	0,42	-0,18	-0,20	-0,11	-0,09	1,00												
Hf	0,67	0,63	-0,78	-0,31	0,52	0,04	0,26	-0,54	-0,45	0,00	0,08	-0,46	-0,40	0,03	-0,50	-0,71	1,00											
Nb	0,35	0,83	-0,68	0,26	0,56	0,13	0,38	-0,81	-0,82	0,42	-0,40	0,02	-0,01	-0,10	0,09	-0,76	0,76	1,00										
Rb	-0,29	-0,77	0,73	-0,54	-0,68	-0,18	-0,52	0,96	0,99	-0,41	0,46	-0,29	-0,25	-0,15	-0,44	0,80	-0,51	-0,84	1,00									
Sr	-0,43	-0,13	0,42	0,10	-0,08	0,18	0,00	0,42	0,32	0,28	0,51	-0,25	-0,29	0,47	-0,01	0,50	-0,27	-0,35	0,32	1,00								
Ta	-0,28	-0,27	0,38	-0,37	-0,42	-0,15	-0,32	0,46	0,50	0,14	-0,03	-0,23	-0,28	-0,14	-0,23	0,15	0,06	-0,11	0,46	0,23	1,00							
Th	0,46	0,08	-0,29	-0,71	-0,02	-0,21	-0,16	0,08	0,21	-0,25	0,12	-0,53	-0,46	-0,20	-0,72	-0,30	0,70	0,27	0,16	-0,28	0,61	1,00						
U	0,30	-0,22	0,01	-0,85	-0,19	-0,16	-0,26	0,50	0,62	-0,44	0,61	-0,76	-0,66	-0,08	-0,90	0,18	0,39	-0,24	0,58	0,12	0,52	0,79	1,00					
V	-0,66	0,23	0,38	<b>0,72</b>	0,01	0,28	0,21	-0,13	-0,31	0,69	-0,19	0,29	0,21	-0,07	0,62	0,36	-0,42	0,14	-0,24	0,25	-0,32	-0,70	-0,68	1,00				
Zr	0,67	0,68	-0,80	-0,27	0,57	0,04	0,30	-0,55	-0,48	0,01	0,12	-0,46	-0,40	0,03	-0,49	-0,68	<b>0,99</b>	0,76	-0,53	-0,23	-0,02	0,64	0,37	-0,36	1,00			
Y	0,51	0,07	-0,33	-0,74	0,00	-0,11	-0,13	0,02	0,19	-0,26	0,29	-0,68	-0,59	-0,07	-0,81	-0,29	0,75	0,26	0,13	-0,29	0,44	0,96	0,81	-0,69	0,70	1,00		
ΣREE	0,51	0,24	-0,44	-0,62	0,12	-0,13	-0,05	-0,11	0,02	-0,15	0,08	-0,53	-0,46	-0,17	-0,67	-0,45	<b>0,82</b>	0,45	-0,04	-0,32	0,52	<b>0,98</b>	0,70	-0,65	<b>0,77</b>	<b>0,95</b>	1,00	

Aval (n=8)	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ba	Ni	Cr	Sc	Co	Ga	Hf	Nb	Rb	Sr	Ta	Th	U	V	Zr	Y	ΣREE	
SiO <sub>2</sub>	1,00																											
TiO <sub>2</sub>	-0,74	1,00																										
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>-0,93</b>	<b>0,85</b>	1,00																									
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,95	0,61	0,90	1,00																								
MnO	-0,48	0,02	0,15	0,41	1,00																							
MgO	-0,17	-0,41	-0,05	0,16	0,63	1,00																						
CaO	-0,01	-0,50	-0,31	0,00	0,83	0,83	1,00																					
Na <sub>2</sub> O	-0,33	0,50	0,45	0,28	0,02	0,01	-0,10	1,00																				
K <sub>2</sub> O	-0,28	-0,35	0,01	0,38	0,69	0,62	0,69	-0,52	1,00																			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-0,98	0,62	0,91	0,96	0,46	0,30	0,06	0,28	0,36	1,00																		
Ba	-0,12	-0,38	-0,15	0,13	0,85	0,85	0,97	0,05	0,69	0,18	1,00																	
Ni	-0,95	<b>0,81</b>	<b>0,91</b>	0,84	0,47	0,17	0,00	0,54	0,08	0,91	0,13	1,00																
Cr	-0,13	-0,18	0,10	0,12	0,23	0,78	0,46	0,53	0,06	0,25	0,54	0,25	1,00															
Sc	-0,94	<b>0,89</b>	<b>0,98</b>	0,89	0,18	-0,15	-0,34	0,35	0,03	0,89	-0,20	0,90	-0,06	1,00														
Co	-0,58	0,07	0,29	0,55	0,95	0,67	0,79	0,23	0,64	0,58	0,85	0,57	0,41	0,27	1,00													
Ga	-0,89	0,89	0,99	0,86	0,05	-0,20	-0,43	0,42	-0,07	0,84	-0,28	0,86	-0,02	0,99	0,18	1,00												
Hf	-0,83	0,71	0,72	0,67	0,45	0,07	-0,04	-0,04	0,28	0,78	0,01	0,79	-0,15	0,81	0,37	0,71	1,00											
Nb	-0,93	0,71	0,84	0,80	0,51	0,28	0,07	0,23	0,28	0,92	0,17	0,93	0,19	0,86	0,54	0,79	0,93	1,00										
Rb	-0,95	<b>0,80</b>	<b>0,95</b>	0,94	0,28	-0,09	-0,23	0,21	0,21	0,91	-0,11	0,86	-0,12	0,98	0,36	0,95	0,82	0,86	1,00									
Sr	-0,09	-0,20	-0,17	0,09	0,83	0,46	0,83	0,19	0,46	0,05	0,85	0,14	0,22	-0,17	0,82	-0,25	-0,06	0,04	-0,10	1,00								
Ta	-0,83	0,86	0,87	0,70	0,14	-0,14	-0,36	0,15	0,02	0,78	-0,25	0,81	-0,14	0,92	0,14	0,89	<b>0,92</b>	0,89	0,89	-0,30	1,00							
Th	-0,78	0,62	0,73	0,69	0,25	0,04	-0,19	-0,19	0,31	0,78	-0,14	0,68	-0,18	0,80	0,20	0,73	0,94	0,87	0,83	-0,30	0,92	1,00						
U	-0,90	0,67	0,86	0,79	0,39	0,31	-0,01	0,23	0,25	0,92	0,11	0,89	0,26	0,85	0,43	0,80	0,88	0,98	0,83	-0,10	0,89	0,87	1,00					
V	-0,80	<b>0,57</b>	<b>0,79</b>	0,83	0,18	-0,07	-0,25	-0,17	0,41	0,80	-0,16	0,62	-0,26	0,84	0,20	0,80	0,79	0,75	0,91	-0,27	0,83	0,90	0,76	1,00				
Zr	-0,76	0,58	0,62	0,62	0,50	0,15	0,05	-0,19	0,40	0,73	0,08	0,70	-0,16	0,71	0,40	0,60	<b>0,99</b>	0,89	0,75	-0,03	0,85	0,94	0,85	0,78	1,00			
Y	-0,92	0,79	0,91	0,82	0,27	0,03	-0,22	0,14	0,18	0,89	-0,11	0,87	-0,03	0,94	0,30	0,90	<b>0,93</b>	0,95	0,94	-0,21	0,97	0,94	0,95	0,88	0,88	1,00		
ΣREE	-0,75	<b>0,57</b>	0,68	0,67	0,28	0,02	-0,16	-0,27	0,38	0,75	-0,12	0,63	-0,26	0,77	0,21	0,69	0,94	0,83	0,81	-0,27	0,88	<b>0,99</b>	0,83	0,91	<b>0,95</b>	0,91	1,00	

n = nombre total d'échantillons



### IV.3.2. Eléments traces

Les concentrations en éléments traces (en ppm) de ces sédiments sont présentés dans le tableau X.

**Tableau X.** Teneurs des éléments traces (ppm) dans les échantillons des sédiments du cours d'eau Lobé.

Lieux	Amont (n=11)												
Code	Nie1T1	Nie1T4	Nie1T7	Nie2T1	Nie2T4	Nie1T9	Nie3T1	Nie3T6	Lob1T1	Lob1T3	Lob1T6	Moy	± 1sd
Ba	495,00	478,00	609,00	608,00	541,00	453,00	544,00	635,00	391,00	336,00	493,00	507,50	72,60
Ni	72,00	158,00	71,00	66,00	60,00	56,00	45,00	41,00	506,00	325,00	189,00	144,50	109,10
Cr	230,00	460,00	220,00	210,00	190,00	180,00	200,00	180,00	1440,0	410,00	550,00	388,20	237,70
Sc	3,00	5,00	2,00	40,00	4,00	3,00	7,00	8,00	4,00	6,00	8,00	4,90	1,70
Co	7,40	10,40	4,70	8,60	6,50	4,10	6,20	5,30	12,90	12,5	13,90	8,40	3,00
Ga	7,50	9,70	21,60	9,70	7,50	5,50	11,90	13,50	7,90	11,80	14,50	11,00	3,30
Hf	22,40	19,40	4,20	24,40	34,90	47,60	27,10	30,20	14,90	15,30	16,10	23,30	8,70
Nb	8,70	9,40	5,20	9,10	11,10	13,00	11,40	10,20	10,00	10,60	11,10	10,00	1,40
Rb	15,40	15,90	108,40	20,00	15,80	14,30	19,30	18,20	9,10	10,50	12,90	23,60	15,40
Sr	62,8	58,90	72,80	75,10	71,80	61,60	66,20	70,50	64,20	68,90	73,30	67,80	4,60
Ta	0,40	0,50	0,80	0,60	0,70	0,80	0,50	0,40	0,50	0,60	0,70	0,60	0,10
Th	15,10	16,40	26,80	15,30	29,60	62,10	17,00	15,30	5,60	6,50	7,70	19,80	10,80
U	2,10	2,20	4,30	2,60	3,40	4,10	2,10	3,20	1,00	1,20	1,50	2,50	0,90
V	31,00	39,00	36,00	36,00	32,40	27,00	53,00	48,00	43,00	54,00	68,00	42,50	9,70
Zr	857,30	725,90	115,40	931,60	1358,3	1809,4	1040,3	1354,2	570,70	602,4	654,20	910,90	352,60
Y	34,00	34,30	38,70	34,80	41,80	77,60	38,30	34,5	12,20	14,80	16,20	34,30	10,90
Zr/Hf	38,30	37,40	27,50	38,20	38,90	38,00	38,40	44,8	38,30	39,40	40,60	38,20	2,10
Cr/Th	15,20	28,00	8,20	13,70	6,40	2,90	11,80	11,8	257,10	63,10	71,40	44,50	46,90
V/Cr	0,10	0,10	0,20	0,20	0,20	0,20	0,30	0,30	0,00	0,10	0,10	0,20	0,00
Th/Sc	5,00	3,30	13,40	3,80	7,40	20,70	2,40	1,90	1,40	1,10	1,00	5,60	4,50
Th/U	7,20	7,50	6,20	5,90	8,70	15,10	8,10	4,80	5,60	5,40	5,10	7,20	1,90
Rb/Sr	0,25	0,27	1,49	0,27	0,22	0,23	0,29	0,26	0,14	0,15	0,18	0,30	0,20
Ni/Co	9,73	15,19	15,11	7,67	9,23	13,66	7,26	7,74	39,22	26,00	13,60	14,90	6,50
U/Th	0,13	0,08	0,16	0,17	0,17	0,15	0,27	0,27	0,03	0,13	0,12	0,20	0,00
Zr/Sc	285,77	145,18	57,70	232,90	339,58	603,13	148,61	169,28	142,68	100,40	81,78	209,70	113,20

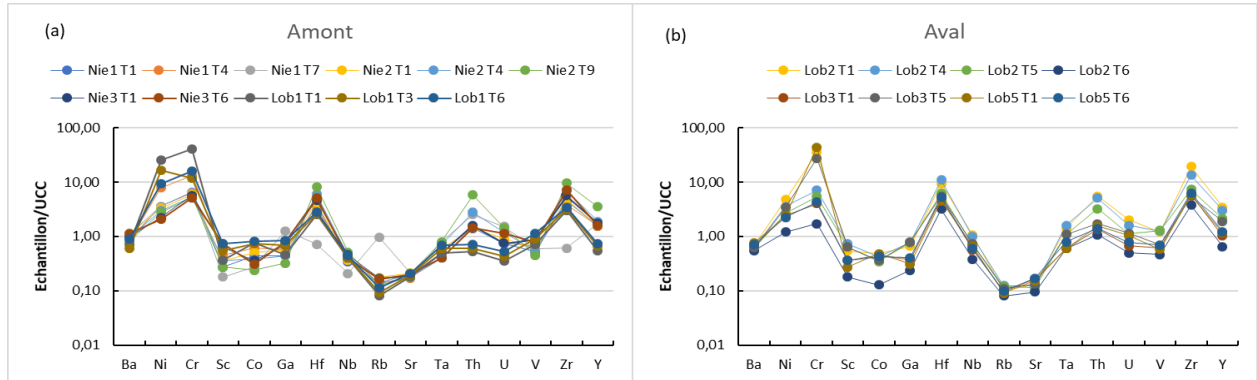
Lieux	Aval n=8)										
Code	Lob2T1	Lob2T4	Lob2T5	Lob2T6	Lob3T1	Lob3T5	Lob5T1	Lob5T6	Moy	± 1sd	UCC
Ba	385,00	353,00	337,00	304,00	372,00	339,00	421,00	394,00	363,10	99,60	650
Ni	95,00	72,00	53,00	24,00	48,00	68,00	47,30	45,00	56,50	73,90	55
Cr	1240,00	250,00	190,00	60,00	140,00	960,00	1540,00	150,00	566,30	333,00	110
Sc	6,00	8,00	7,00	2,00	4,00	7,00	3,00	4,00	5,10	1,80	16
Co	8,20	7,20	5,90	2,20	7,80	6,20	8,20	7,30	6,60	2,30	23
Ga	11,20	13,40	13,10	4,10	6,40	13,50	5,30	6,90	9,20	3,40	20
Hf	54,20	63,30	35,70	18,50	29,20	32,20	26,10	30,90	36,30	10,50	5
Nb	26,40	24,80	17,50	9,60	14,20	18,40	16,50	15,00	17,80	4,30	19
Rb	11,20	13,90	13,60	9,00	11,10	12,50	10,20	11,00	11,60	9,20	160
Sr	46,20	43,60	40,30	33,40	58,50	46,50	54,20	60,50	47,90	12,50	200
Ta	1,40	1,60	1,10	0,60	0,60	1,10	0,60	0,80	1,00	0,20	1,28
Th	58,60	54,40	34,60	11,50	14,50	18,50	16,50	15,00	28,00	12,50	14,6
U	5,70	4,50	3,10	1,40	1,90	3,20	2,90	2,20	3,10	1,00	3,1
V	72,00	75,00	78,00	28,00	37,00	42,00	35,00	42,00	51,10	13,20	150
Zr	3654,40	2535,80	1385,40	712,50	1144,80	1025,50	1098,90	1204,30	1595,20	503,50	210
Y	75,50	66,10	47,10	14,30	22,70	41,70	25,90	27,10	40,10	13,70	27
Zr/Hf	67,40	40,10	38,80	38,50	39,20	31,80	42,10	39,00	42,10	5,00	42,0
Cr/Th	21,20	4,60	5,50	5,20	9,70	51,90	93,30	10,00	25,20	35,00	7,5
V/Cr	0,10	0,30	0,40	0,50	0,30	0,00	0,00	0,30	0,20	0,10	1,4
Th/Sc	9,80	6,80	4,90	5,80	3,60	2,60	5,50	3,80	5,30	3,00	0,9
Th/U	10,30	12,10	11,20	8,20	7,60	5,80	5,70	6,80	8,50	2,10	4,7
Rb/Sr	0,24	0,32	0,34	0,27	0,19	0,27	0,19	0,18	0,20	0,10	0,80
Ni/Co	11,59	10,00	8,98	10,91	6,15	10,97	5,77	6,16	8,80	5,00	2,39
U/Th	0,06	0,30	0,41	0,47	0,26	0,04	0,02	0,28	0,20	0,10	1,36
Zr/Sc	609,07	316,98	197,91	356,25	286,20	146,50	366,30	301,08	322,50	117,30	13,13

Les valeurs de l'UCC sont données par Taylor and McLennan (1985). Moy. = moyenne. 1sd = erreur. n = nombre total d'échantillons.

Dans la partie amont, les HFSE (high field strength elements) Zr, Hf, Ta et Y par exemple, ont généralement des teneurs (Zr : 570,7 – 1809,4 ppm, Hf : 4,2 – 47,6 ppm, Ta : 0,4 – 0,8 ppm et Y : 12,2 – 77,6 ppm) supérieures à celles de l'UCC (210, 5, 1.28 et 27 ppm, respectivement). Zr et Hf montrent un coefficient de corrélation significatif ( $r = 0,99$ ), compte tenu de leur nature géochimique similaire. Les LILE (large ion lithophile elements) à l'instar de Ba, Rb et Sr montrent une plus large variation (Ba : 336 – 608 ppm, Rb : 9,1 – 108,4 ppm et Sr : 58,9 – 75,1 ppm) mais toutes leurs teneurs sont inférieures à celles de l'UCC (650, 160 et 200 ppm, respectivement). Ba et Sr ne montrent pas une corrélation significative avec  $Al_2O_3$ , suggérant que leurs concentrations ne sont pas contrôlées par les minéraux argileux. Les TTE (transitional traces elements) tels que Co (4,1 – 13,9 ppm), Sc (2 – 8 ppm) et V (27 – 68 ppm) ont généralement des concentrations plus faibles que celles de l'UCC (23, 16 et 150 ppm, respectivement), tandis que les teneurs en Cr (180 – 1440 ppm) et Ni (41 – 506 ppm) sont supérieurs à celles de l'UCC (110 et 55 ppm, respectivement). Les concentrations de ces TTE ne montrent pas de corrélation significative avec  $Al_2O_3$ , indiquant que ces éléments ne sont pas complètement associés aux phyllosilicates, mais sont largement contrôlés par les minéraux lourds (Tab. IX).

En aval, les concentrations de certains HFSE (Zr : 712,5 – 3654 ppm, Hf : 18,5 – 63,3 ppm) dans ces sédiments, sont très élevés par rapport à celles de l'UCC (210 et 5, respectivement). Ta (0,6 – 1,6 ppm) et Y (14,3 – 75,5 ppm) ont des teneurs modérées par rapport à celles de l'UCC (1,28 et 27 ppm, respectivement). Tous les HFSE (Zr :  $r = 0,99$ , Ta :  $r = 0,92$  et Y :  $r = 0,93$ ) montrent de fortes corrélations avec Hf, démontrant la similarité de leur nature chimique (Tab. IX). Comme observé en amont, les teneurs en LILE, tels que Ba (304 – 421 ppm), Rb (9 – 13,9 ppm) et Sr (33,4 – 60,5 ppm) sont nettement inférieures à celles de l'UCC (650, 160 et 200 ppm, respectivement). De même, les concentrations de certains TTE tels que Co (2,2 – 13,9 ppm), Sc (2 – 8 ppm) et V (27 – 78 ppm) sont inférieures à celles de l'UCC (23, 16 et 150 ppm, respectivement), alors que Cr (60 – 1540 ppm) et Ni (24 – 506 ppm) sont plus élevées (110 et 55 ppm, respectivement). Les LILE montrent de faibles corrélations avec  $Al_2O_3$  et  $TiO_2$ , exception faite par Rb ( $r = 0,95$  et  $r = 0,80$ , respectivement). De plus, excepté Co et Cr qui montrent de faibles corrélations avec  $Al_2O_3$  et  $TiO_2$ , les autres TTE (Sc :  $r = 0,98$  et  $r = 0,89$ , V :  $r = 0,79$  et  $r = 0,57$  et Ni :  $r = 0,91$  et  $r = 0,81$ ) sont fortement corrélés avec  $Al_2O_3$  et  $TiO_2$  respectivement. Ces corrélations indiquent que dans ce secteur, Rb et certains TTE (Sc, V et Ni) pourraient être concentrés dans les phyllosilicates (Tab. IX).

Les éléments traces ont été normalisés suivant les standards de l'UCC (Taylor et McLennan, 1985). Les spectres de ces éléments traces présentent des allures similaires pour les échantillons de l'amont et de l'aval (Fig. 29). Dans presque tous les échantillons, on note des valeurs importantes en Ni, Cr, Hf, Th et Zr.



**Figure 29.** Spectres des éléments traces des sédiments du cours d'eau Lobé, normalisés par rapport à l'UCC (Taylor et McLennan, 1985) ; (a) Amont, (b) Aval.

### IV.3.3. Terres rares (REE)

Les concentrations en terres rares (en ppm) des sédiments du cours d'eau Lobé sont présentés dans le tableau XI.

**Tableau XI.** Teneurs des terres rares (ppm) dans les échantillons des sédiments du cours d'eau Lobé.

Lieux	Amont (n=11)											Moy	± 1sd
Code	Nie1T1	Nie1T4	Nie1T7	Nie2T1	Nie2T4	Nie1T9	Nie3T1	Nie3T6	Lob1T1	Lob1T3	Lob1T6		
La	48,30	51,20	52,80	46,60	87,30	164,60	55,50	52,10	20,90	28,40	32,80	58,23	24,63
Ce	92,20	96,20	87,30	88,50	129,80	325,40	101,00	98,20	38,10	40,70	61,40	105,35	44,46
Pr	10,63	10,75	10,84	10,05	25,78	37,15	11,76	9,25	4,21	5,24	6,53	12,93	6,74
Nd	38,70	40,40	41,20	36,6	101,20	135,90	41,40	36,20	14,20	18,90	22,40	47,92	25,68
Sm	6,85	7,17	7,68	6,65	17,85	23,27	7,92	6,42	2,44	3,02	3,69	8,45	4,40
Eu	0,77	0,84	1,86	0,97	1,24	1,56	0,98	0,82	0,38	0,41	0,76	0,96	0,33
Gd	6,52	6,71	8,10	6,64	14,36	20,70	7,25	6,24	2,33	3,12	3,45	7,77	3,61
Tb	0,95	0,98	1,24	0,98	1,25	2,68	1,11	0,65	0,34	0,41	0,47	1,01	0,41
Dy	5,82	5,70	6,81	5,86	9,32	14,40	6,62	4,42	1,97	2,14	2,94	6,00	2,39
Ho	1,23	1,27	1,37	1,29	2,14	2,77	1,42	1,21	0,44	0,50	0,57	1,29	0,46
Er	3,99	3,79	3,87	4,05	6,54	8,05	4,34	3,24	1,45	1,54	1,69	3,87	1,39
Tm	0,56	0,52	0,55	0,61	0,93	1,09	0,63	0,54	0,21	0,24	0,27	0,56	0,19
Yb	4,00	3,53	3,41	3,93	5,34	7,05	4,10	3,21	1,41	1,52	1,67	3,56	1,20
Lu	0,62	0,58	0,47	0,64	0,89	1,12	0,69	0,46	0,21	0,25	0,30	0,57	0,21
REE	221,14	229,64	227,5	213,37	403,94	745,74	244,72	222,96	88,59	106,39	138,94	258,45	115,05
LREE	203,97	213,27	209,78	196,01	377,53	708,58	225,81	209,23	82,56	99,79	131,03	241,60	109,62
HREE	17,17	16,37	17,72	17,36	26,41	37,16	18,91	13,73	6,03	6,60	7,91	16,85	6,11
LREE/HREE	11,88	13,03	11,84	11,29	14,29	19,07	11,94	15,24	13,69	15,12	16,57	14,00	1,87
Ce/Ce* cn	0,99	1,00	0,89	0,99	0,67	1,01	0,96	1,09	0,99	0,81	1,02	0,95	0,08
Eu/Eu* cn	0,35	0,37	0,72	0,45	0,24	0,22	0,90	0,90	0,44	0,41	0,65	0,51	0,19
La/Th	3,20	3,12	1,97	3,05	2,95	2,65	3,26	3,41	3,73	4,37	4,26	3,27	0,49
La/Sc	16,10	10,24	26,40	11,65	21,83	54,87	7,93	6,51	5,23	4,73	4,10	15,42	10,46
(La/Yb)cn	8,20	9,85	10,52	8,06	11,11	15,86	9,20	11,03	10,07	12,69	13,34	10,90	1,59
(La/Sm)cn	4,40	4,46	4,29	4,38	3,05	4,42	4,38	5,07	5,35	5,87	5,55	4,66	0,54
(Gd/Yb)cn	1,32	1,54	1,92	1,37	2,18	2,38	1,43	1,57	1,34	1,66	1,67	1,67	0,24

Lieux	Aval (n=8)									Moy	±1sd	UCC	Chondrite
	Code	Lob2T1	Lob2T4	Lob2T5	Lob2T6	Lob3T1	Lob3T5	Lob5T1	Lob5T6				
La	139,70	141,90	96,70	35,40	45,70	36,20	40,80	48,30	73,09	30,36	30	0,237	
Ce	398,30	274,60	179,50	64,20	84,10	93,80	87,20	90,20	158,99	66,02	64	0,613	
Pr	40,10	30,72	20,67	7,26	9,54	8,54	8,96	9,89	16,96	7,96	7,1	0,093	
Nd	132,40	111,80	74,70	25,70	34,00	25,00	31,40	36,60	58,95	28,64	26	0,457	
Sm	19,20	18,93	12,63	4,03	5,75	3,47	5,32	6,19	9,44	4,64	4,5	0,148	
Eu	1,42	1,36	1,11	0,36	0,64	0,86	0,41	0,67	0,85	0,33	0,88	0,056	
Gd	17,80	16,37	11,16	3,40	5,19	4,25	4,24	5,46	8,48	3,95	3,8	0,199	
Tb	2,86	2,16	1,48	0,45	0,69	0,58	0,54	0,78	1,19	0,52	0,64	0,036	
Dy	13,41	11,93	8,40	2,63	3,82	6,54	3,54	4,68	6,87	2,68	3,5	0,246	
Ho	3,10	2,40	1,69	0,53	0,86	1,25	0,74	0,97	1,44	0,55	0,8	0,055	
Er	8,32	7,29	4,88	1,64	2,60	3,14	3,16	3,19	4,28	1,54	2,3	0,16	
Tm	1,52	1,04	0,73	0,26	0,39	0,87	0,42	0,48	0,71	0,25	0,33	0,025	
Yb	7,35	6,99	4,60	1,74	2,52	3,58	3,25	3,17	4,15	1,33	2,2	0,161	
Lu	1,30	1,10	0,75	0,32	0,44	0,68	0,47	0,50	0,70	0,23	0,32	0,025	
REE	786,78	628,59	419	147,92	196,24	188,76	190,45	211,08	346,10	148,48	146,37	2,51	
LREE	748,92	595,68	396,47	140,35	184,92	172,12	178,33	197,31	326,76	141,75	136,28	1,80	
HREE	37,86	32,91	22,53	7,57	11,32	16,64	12,12	13,77	19,34	6,91	10,09	0,71	
LREE/HREE	19,78	18,10	17,60	18,54	16,34	10,34	14,71	14,33	16,22	2,71	13,51	2,55	
Ce/Ce* <sub>cn</sub>	1,29	1,01	0,98	0,97	0,98	1,30	1,11	1,00	1,08	0,13			
Eu/Eu* <sub>cn</sub>	0,24	0,24	0,29	0,30	0,36	0,69	0,26	0,35	0,34	0,17			
La/Th	2,38	2,61	2,79	3,08	3,15	1,96	2,47	3,22	2,71	0,58			
La/Sc	23,28	17,74	13,81	17,70	11,43	5,17	13,60	12,08	14,35	7,16			
(La/Yb) <sub>cn</sub>	12,91	13,79	14,28	13,82	12,32	6,87	8,53	10,35	11,61	2,22			
(La/Sm) <sub>cn</sub>	4,54	4,68	4,78	5,49	4,96	6,51	4,79	4,87	5,08	0,67			
(Gd/Yb) <sub>cn</sub>	1,96	1,89	1,96	1,58	1,67	0,96	1,06	1,39	1,56	0,31			

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

$$Ce/Ce^*_{cn} = (Ce_{sample}/Ce_{chondrite})/(La_{sample}/La_{chondrite})^{1/2}(Pr_{sample}/Pr_{chondrite})^{1/2}$$

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

$$(La/Yb)_{cn} = (La_{sample}/La_{chondrite})/(Yb_{sample}/Yb_{chondrite})$$

$$(La/Sm)_{cn} = (La_{sample}/La_{chondrite})/(Sm_{sample}/Sm_{chondrite})$$

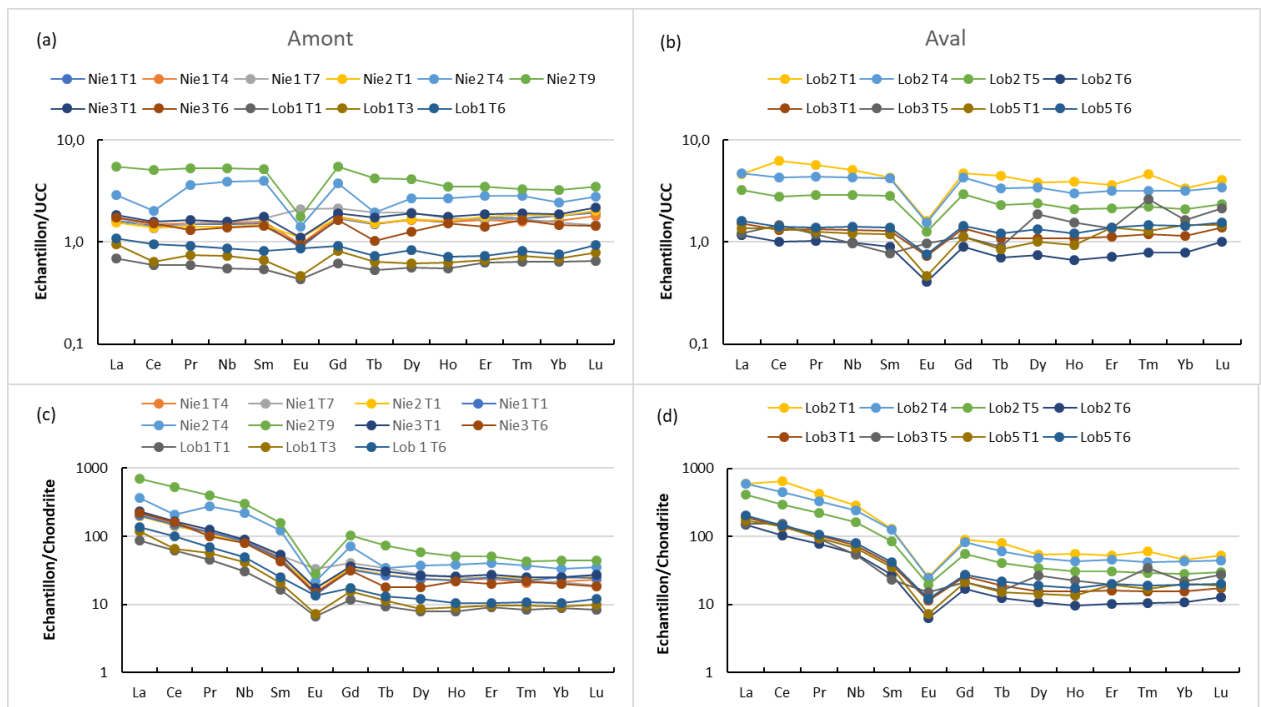
$$(Gd/Yb)_{cn} = (Gd_{sample}/Gd_{chondrite})/(Yb_{sample}/Yb_{chondrite})$$

Les valeurs de l'UCC et de la chondrite sont données par Taylor et McLennan (1985), McLennan (2001) et McDonough et Sun, 1995.

Moy. = average. Isd = one standard deviation. n = nombre d'échantillons. cn : fait référence aux valeurs normalisées.

En amont, la somme des terres rares varie entre 88,59 et 745,74 ppm dans les échantillons. Le rapport LREE/HREE présente des valeurs variant de 11,29 à 19,07 ppm traduisant un enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes. De plus, la normalisation de ces terres rares par rapport aux valeurs de l'UCC (Taylor et McLennan, 1985) et de la chondrite (McDonough et Sun, 1995) présente la même observation à savoir, un enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes (Fig. 22a, c). Ces normalisations des terres rares présentent pour la plupart des échantillons des anomalies négatives en Eu ( $Eu/Eu_{cn}^* = 0,51$  en moyenne). Ces terres sont caractérisées par un enrichissement du ratio  $(La/Sm)_{cn}$  (de 3,05 à 5,87 avec 4,66 de moyenne) et un appauvrissement de celui de  $(Gd/Yb)_{cn}$  (de 1,32 à 2,38 avec 1,67 de moyenne). La somme des terres rares présente une forte corrélation positive avec Hf ( $r = 0,82$ ), Th ( $r = 0,98$ ), Zr ( $r = 0,95$ ) et Y ( $r = 0,95$ ), mais ne présente pas de corrélation significative avec  $Al_2O_3$ , suggérant que ces éléments pourraient être hébergés dans des phases accessoires (Men et al., 2019). La faible corrélation entre la somme des terres rares et  $TiO_2$  ( $r = 0,25$ ) dans cette partie, suggère une faible abondance de minéraux contenant du Ti (rutile) (Tab. IX).

Dans la partie aval, la somme des terres rares varie de 188,8 à 786,8 ppm avec une moyenne de 346,10 ; Ces valeurs supérieures à celles de l'UCC (146,37). La normalisation de ces derniers par rapport aux valeurs de l'UCC et celles de la chondrite, tout comme le rapport LREE/HREE (10,34 – 19,78 ppm), indiquent un enrichissement des terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes (Tab XI et Fig. 30b, d). Tous les échantillons montrent des anomalies négatives en Eu ( $Eu/Eu_{cn}^* = 0,34$  en moyenne) et les rapports  $(La/Sm)_{cn}$  et  $(Gd/Yb)_{cn}$  varient entre 4,54 et 6,51 ; 0,96 et 1,96, respectivement. La forte corrélation de ces terres rares avec Th ( $r = 0,99$ ) et Zr ( $r = 0,95$ ) indique que sa distribution est probablement contrôlée par le zircon et les phases opaques (Ji et al., 2019 ; Ramos-Vázquez et Armstrong-Altrin, 2019). De plus, le  $TiO_2$  montre une corrélation significative avec les terres rares ( $r = 0,57$ ), suggérant une prédominance de minéraux contenant du Ti (rutile) dans ce secteur, par rapport au secteur amont (Tab. IX).



**Figure 30.** Spectres des terres rares des sédiments du cours d'eau Lobé normalisés par rapport à l'UCC (Taylor et McLennan, 1985), (a) amont et (b) aval ; et normalisés par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995), (c) amont et (d) aval.

#### IV.4. Statut environnemental des sédiments

Les recommandations pour la qualité des sédiments offrent un moyen simple pour évaluer les risques de contamination dans un écosystème aquatique (Ke et al, 2017). Pour cette étude,

certaines indices de pollution notamment EF (enrichment factor), Igéo (géoaccumulation Index), CF (contamination factor) et PLI (pollution load index) seront utilisés pour évaluer le degré de contamination de ces sédiments.

#### IV.4.1. Répartition des métaux lourds et radionucléides

L'étude de la distribution de ces éléments le long du cours d'eau, s'est faite à trois (3) niveaux de profondeur (surface, milieu et base). Pour cette distribution verticale, seule la couche de surface a été définie (0 – 10 cm) ; du fait de la variabilité de la longueur des différentes carottes, la couche du milieu a été arbitrairement choisie, et celle du fond correspond aux dernières tranches de toutes les carottes. Cette évaluation verticale des éléments chimiques reflète l'histoire de dépôt de ces éléments et aide à comprendre les caractéristiques d'accumulation dans les différentes couches de sédiment. Les concentrations de chaque élément sélectionné sont consignés dans le tableau XII.

**Tableau XII.** Concentrations (mg/kg) en métaux lourds et radionucléides des sédiments du cours d'eau Lobé.

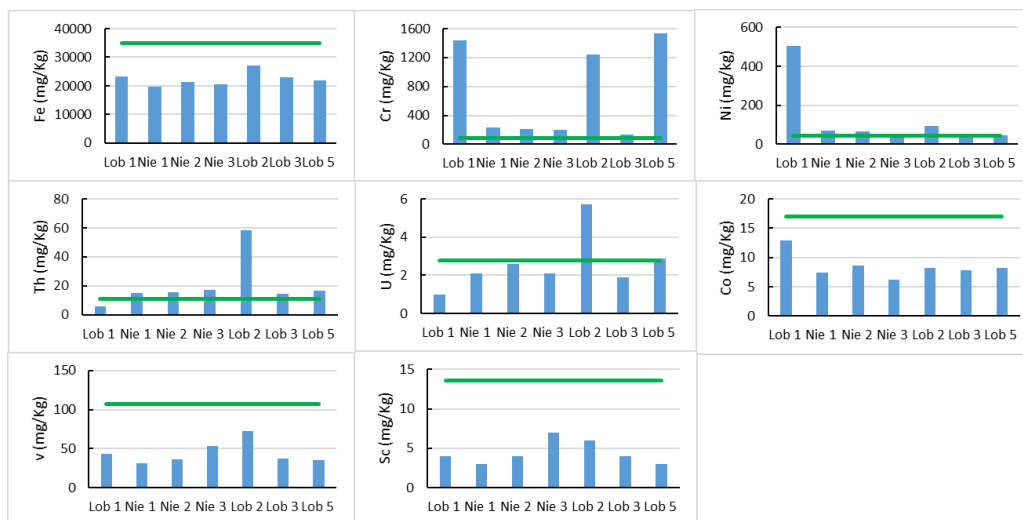
Elements	Concentration en métaux lourds (mg/Kg)						Concentration en radionucléides (mg/Kg)	
	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U
<b>Surface</b>								
Nie1	19653,14	72	230	7,4	3	31	15,1	2,1
Nie2	21261,76	66	210	8,6	4	36	15,3	2,6
Nie3	20562,36	45	200	6,2	7	53	17	2,1
Lob1	23150,14	506	1440	12,9	4	43	5,6	1
Lob2	27136,72	95	1240	8,2	6	72	58,6	5,7
Lob3	22940,32	48	140	7,8	4	37	14,5	1,9
Lob5	21821,28	47,3	1540	8,2	3	35	16,5	2,9
Moyenne (n=7)	22360.82	125.61	714.29	8.47	4.43	43.86	20.37	2.61
<b>Milieu</b>								
Nie1	22031,1	158	460	10,4	5	39	16,4	2,2
Nie2	17764,76	60	190	6,5	4	32,4	29,6	3,4
Lob1	39655,98	325	410	12,5	6	54	6,5	1,2
Lob2	30983,42	72	250	7,2	8	75	54,4	4,5
Lob2	34830,12	53	190	5,9	7	78	34,6	3,1
Moyenne (n=5)	29053.08	133.60	300.00	8.50	6.00	55.68	28.30	2.88
<b>Base</b>								
Nie1	9371,96	71	220	4,7	2	36	26,8	4,3
Nie2	11050,52	56	180	4,1	3	27	62,1	4,1
Nie3	20282,6	41	180	5,3	8	48	15,3	3,2
Lob1	29864,38	189	550	13,9	8	68	7,7	1,5
Lob2	7273,76	24	60	2,2	2	28	11,5	1,4
Lob3	27836,12	68	960	6,2	7	42	18,5	3,2

Lob5	19793,02	45	150	7,3	4	42	15	2,2
Moyenne (n=7)	17924.62	70.57	328.57	6.24	4.86	41.57	22.41	2.84
Moyenne total (n=19)	23112.84	109.93	447.62	7.74	5.10	47.04	23.70	2.78
UCC	35000	44	83	17	13.6	107	10.7	2.8

Les valeurs de l'UCC sont données par McLennan (2001).

#### IV.4.1.1. Dans la couche de surface

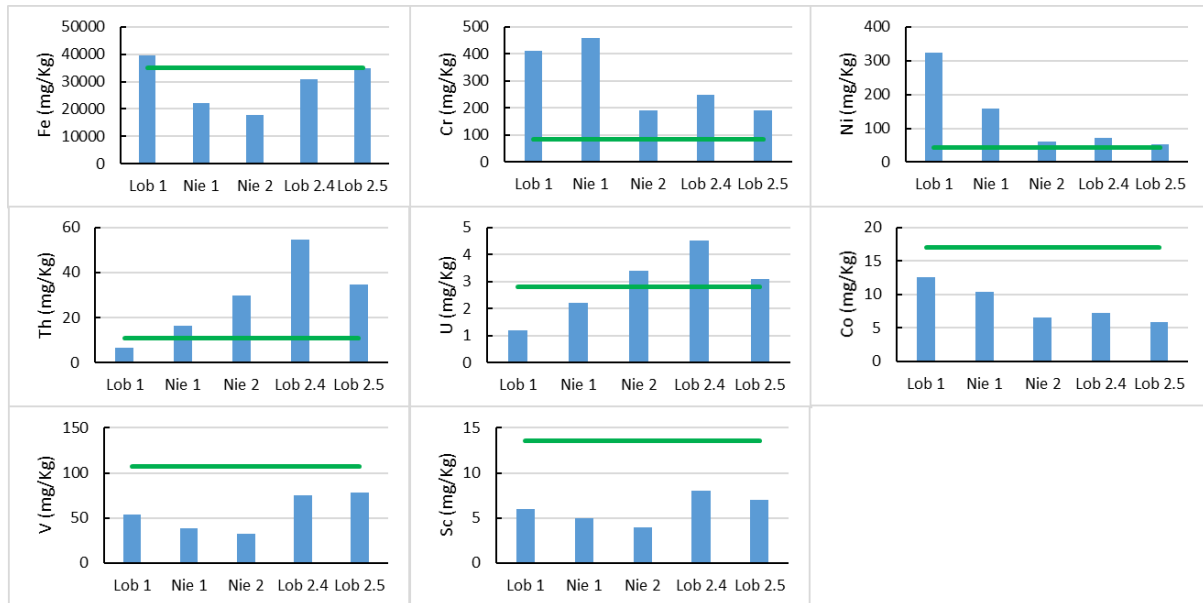
En surface, les concentrations moyennes des éléments (en mg/kg) sont classées comme suit : Fe (22 360,82) > Cr (714,29) > Ni (125,61) > V (43,86) > Th (20,37) > Co (8,47) > Sc (4,43) > U (2,61). Les éléments Ni, Cr et Th ont des teneurs plus élevées que celles de l'UCC, prises comme valeurs de référence tandis que les autres éléments ont des concentrations inférieures à ces dernières (McLennan, 2001) (Tab. XII, Fig. 31). La variation des concentrations en métaux lourds dans les sédiments est le résultat de la variabilité de la composition de la roche mère, de la texture des sédiments, des réactions redox, de l'adsorption/désorption, du transport sédimentaire, du tri des minéraux et des activités anthropiques (Selvaraj et al., 2004 ; Ramos-Vázquez et Armstrong-Altrin, 2019). En effet, les teneurs élevées en Ni, Cr et Th pourraient être attribuées à la charge polluante dérivée par divers rejets des activités agricoles (Ekoa Bessa et al., 2018 ; Tehna et al., 2019).



**Figure 31.** Répartition des métaux lourds et radionucléides dans les sédiments de surface du cours d'eau Lobé ; la ligne horizontale verte représente les valeurs références de l'UCC (McLennan 2001).

#### IV.4.1.2. Dans la couche du milieu

Les concentrations moyennes (mg/kg) de ces métaux lourds et radionucléides dans la couche du milieu décroît comme de celle de surface : Fe (29 053.08) > Cr (300) > Ni (133.60) > V (55.68) > Th (28.30) > Co (8.50) > Sc (6) > U (2.88). De même, Ni, Cr et Th ont des teneurs plus élevées que celles de l'UCC, tandis que les autres éléments ont des valeurs inférieures à ces dernières (McLennan, 2001) (Tab. XII, Fig. 32).

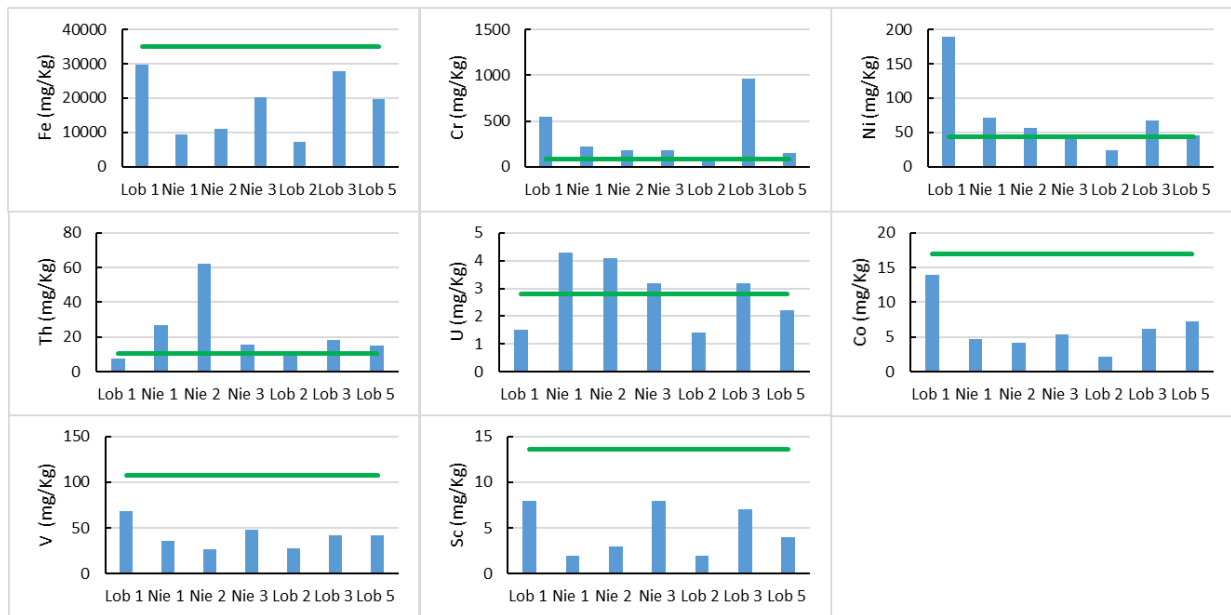


**Figure 32.** Répartition des métaux lourds et radionucléides dans les sédiments de milieu du cours d'eau Lobé ; la ligne horizontale verte représente les valeurs références de l'UCC (McLennan 2001).

#### IV.4.1.3. Dans la couche de base

La couche de base présente les informations similaires à celles des deux (2) autres couches, pour ce qui est des concentrations moyennes (mg/Kg) : Fe (17 924.62) > Cr (328.57) > Ni (70.57) > V (41.57) > Th (22.41) > Co (6.24) > Sc (4.86) > U (2.84); et des teneurs élevées en Ni, Cr et Th (Tab. XII, Fig. 33).





**Figure 33.** Répartition des métaux lourds et radionucléides dans les sédiments de base du cours d'eau Lobé ; la ligne horizontale verte représente les valeurs références de l'UCC (McLennan 2001).

#### IV.4.2. Evaluation verticale de la contamination des sédiments

Les tableaux XIII, XIV et XV présentent les résultats des différents indices de pollution, facteur d'enrichissement (EF), indice de géo accumulation (Igeo), facteur de contamination (CF) et l'indice de charge polluante (PLI), utilisés pour évaluer respectivement la contamination des sédiments du cours d'eau Lobé en surface, au milieu et à la base.

**Tableau XIII.** Indices de pollution (EF, Igeo, CF and PLI) des métaux lourds et radionucléides des sédiments de surface du cours d'eau Lobé.

Surface	Concentration en métaux lourds (mg/Kg)						Concentration en radionucléides (mg/Kg)	
	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U
Elements								
Nie1	19653,14	72	230	7,4	3	31	15,1	2,1
Nie2	21261,76	66	210	8,6	4	36	15,3	2,6
Nie3	20562,36	45	200	6,2	7	53	17	2,1
Lob1	23150,14	506	1440	12,9	4	43	5,6	1
Lob2	27136,72	95	1240	8,2	6	72	58,6	5,7
Lob3	22940,32	48	140	7,8	4	37	14,5	1,9
Lob5	21821,28	47,3	1540	8,2	3	35	16,5	2,9
Moy (n=7)	22360,82	125,6	714,2	8,47	4,43	43,86	20,37	2,61
UCC	35000	44	83	17	13,6	107	10,7	2,8
<b>EF</b>								
Elements	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U

Nie1	1	2,91	4,93	0,78	0,39	0,52	2,51	1,34	
Nie2	1	2,47	4,16	0,83	0,48	0,55	2,35	1,53	
Nie3	1	1,74	4,10	0,62	0,88	0,84	2,70	1,28	
Lob1	1	17,39	26,23	1,15	0,44	0,61	0,79	0,54	
Lob2	1	2,78	19,27	0,62	0,57	0,87	7,06	2,63	
Lob3	1	1,66	2,57	0,70	0,45	0,53	2,07	1,04	
Lob5	1	1,72	29,76	0,77	0,35	0,52	2,47	1,66	
Moy (n=7)	1	4,47	13,47	0,78	0,51	0,64	2,98	1,46	
<b>I-Geo</b>									
Elements	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U	
Nie1	-1,42	0,13	0,89	-1,78	-2,77	-2,37	-0,09	-1,00	
Nie2	-1,30	0,00	0,75	-1,57	-2,35	-2,16	-0,07	-0,69	
Nie3	-1,35	-0,55	0,68	-2,04	-1,54	-1,60	0,08	-1,00	
Lob1	-1,18	2,94	3,53	-0,98	-2,35	-1,90	-1,52	-2,07	
Lob2	-0,95	0,53	3,32	-1,64	-1,77	-1,16	1,87	0,44	
Lob3	-1,19	-0,46	0,17	-1,71	-2,35	-2,12	-0,15	-1,14	
Lob5	-1,27	-0,48	3,63	-1,64	-2,77	-2,20	0,04	-0,53	
Moy (n=7)	-1,23	0,93	2,52	-1,59	-2,20	-1,87	0,34	-0,68	
<b>CF&amp;PLI</b>									
Elements	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U	<b>PLI</b>
Nie1	0,56	1,64	2,77	0,44	0,22	0,29	1,41	0,75	0,72
Nie2	0,61	1,50	2,53	0,51	0,29	0,34	1,43	0,93	0,79
Nie3	0,59	1,02	2,41	0,36	0,51	0,50	1,59	0,75	0,80
Lob1	0,66	11,50	17,35	0,76	0,29	0,40	0,52	0,36	1,10
Lob2	0,78	2,16	14,94	0,48	0,44	0,67	5,48	2,04	1,59
Lob3	0,66	1,09	1,69	0,46	0,29	0,35	1,36	0,68	0,69
Lob5	0,62	1,08	18,55	0,48	0,22	0,33	1,54	1,04	0,95
Moy (n=7)	0,64	2,85	8,61	0,50	0,33	0,41	1,90	0,93	1,08

**Tableau XIV.** Indices de pollution (EF, Igeo, CF and PLI) des métaux lourds et radionucléides des sédiments de milieu du cours d'eau Lobé.

Milieu	Concentration en métaux lourds (mg/Kg)						Concentration en radionucléides (mg/Kg)	
	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U
Elements								
Nie1	22031,1	158	460	10,4	5	39	16,4	2,2
Nie2	17764,76	60	190	6,5	4	32,4	29,6	3,4
Lob1	39655,98	325	410	12,5	6	54	6,5	1,2
Lob2	30983,42	72	250	7,2	8	75	54,4	4,5
Lob2	34830,12	53	190	5,9	7	78	34,6	3,1
Moy (n=5)	29053,08	133,6	300	8,5	6	55,68	28,3	2,88
UCC	35000	44	83	17	13,6	107	10,7	2,8
<b>EF</b>								
Elements	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U
Nie1	1	5,70	8,80	0,97	0,58	0,58	2,43	1,25
Nie2	1	2,69	4,51	0,75	0,58	0,60	5,45	2,39

Lob1	1	6,52	4,36	0,65	0,39	0,45	0,54	0,38	
Lob2	1	1,85	3,40	0,48	0,66	0,79	5,74	1,82	
Lob2	1	1,21	2,30	0,35	0,52	0,73	3,25	1,11	
Moy (n=5)	1	3,66	4,35	0,60	0,53	0,63	3,19	1,24	
<b>I-Geo</b>									
Elements	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U	
Nie1	-1,25	1,26	1,89	-1,29	-2,03	-2,04	0,03	-0,93	
Nie2	-1,56	-0,14	0,61	-1,97	-2,35	-2,31	0,88	-0,30	
Lob1	-0,40	2,30	1,72	-1,03	-1,77	-1,57	-1,30	-1,81	
Lob2	-0,76	0,13	1,01	-1,82	-1,35	-1,10	1,76	0,10	
Lob2	-0,59	-0,32	0,61	-2,11	-1,54	-1,04	1,11	-0,44	
Moy (n=5)	-0,85	1,02	1,27	-1,58	-1,77	-1,53	0,82	-0,54	
<b>CF&amp;PLI</b>									
Elements	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U	<b>PLI</b>
Nie1	0,63	3,59	5,54	0,61	0,37	0,36	1,53	0,79	1,03
Nie2	0,51	1,36	2,29	0,38	0,29	0,30	2,77	1,21	0,81
Lob1	1,13	7,39	4,94	0,74	0,44	0,50	0,61	0,43	1,07
Lob2	0,89	1,64	3,01	0,42	0,59	0,70	5,08	1,61	1,26
Lob2	1,00	1,20	2,29	0,35	0,51	0,73	3,23	1,11	1,03
Moy (n=5)	0,83	3,04	3,61	0,50	0,44	0,52	2,64	1,03	1,14

**Tableau XV.** Indices de pollution (EF, Igeo, CF and PLI) des métaux lourds et radionucléides des sédiments de base du cours d'eau Lobé.

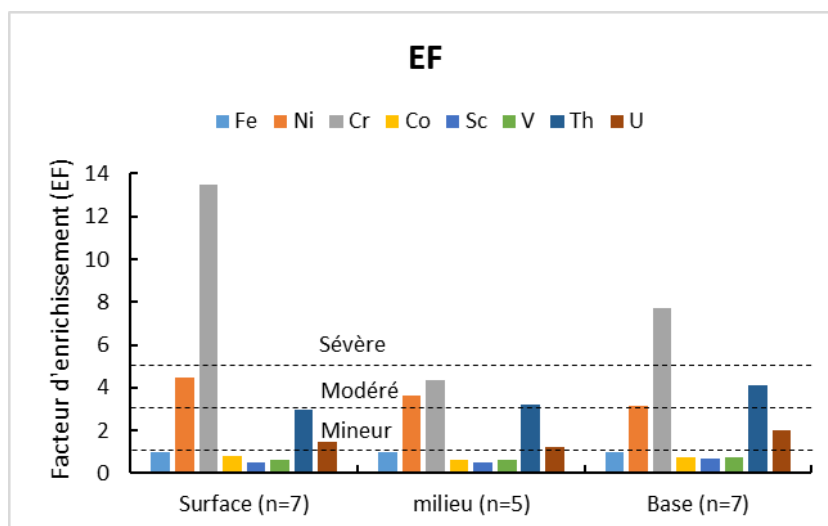
Base	Concentration en métaux lourds (mg/Kg)						Concentration en radionucléides (mg/Kg)	
	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U
Elements								
Nie1	9371,96	71	220	4,7	2	36	26,8	4,3
Nie2	11050,52	56	180	4,1	3	27	62,1	4,1
Nie3	20282,6	41	180	5,3	8	48	15,3	3,2
Lob1	29864,38	189	550	13,9	8	68	7,7	1,5
Lob2	7273,76	24	60	2,2	2	28	11,5	1,4
Lob3	27836,12	68	960	6,2	7	42	18,5	3,2
Lob5	19793,02	45	150	7,3	4	42	15	2,2
Moy (n=7)	17924,62	70,57	328,57	6,24	4,86	41,57	22,41	2,84
UCC	35000	44	83	17	13,6	107	10,7	2,8
<b>EF</b>								
Elements	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U
Nie1	1	6,03	9,90	1,03	0,55	1,26	9,35	5,74
Nie2	1	4,03	6,87	0,76	0,70	0,80	18,38	4,64
Nie3	1	1,61	3,74	0,54	1,02	0,77	2,47	1,97
Lob1	1	5,03	7,77	0,96	0,69	0,74	0,84	0,63
Lob2	1	2,62	3,48	0,62	0,71	1,26	5,17	2,41
Lob3	1	1,94	14,54	0,46	0,65	0,49	2,17	1,44
Lob5	1	1,81	3,20	0,76	0,52	0,69	2,48	1,39
Moy (n=7)	1	3,13	7,73	0,72	0,70	0,76	4,09	1,98
<b>I-Geo</b>								

Elements	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U	
Nie1	-2,49	0,11	0,82	-2,44	-3,35	-2,16	0,74	0,03	
Nie2	-2,25	-0,24	0,53	-2,64	-2,77	-2,57	1,95	-0,03	
Nie3	-1,37	-0,69	0,53	-2,27	-1,35	-1,74	-0,07	-0,39	
Lob1	-0,81	1,52	2,14	-0,88	-1,35	-1,24	-1,06	-1,49	
Lob2	-2,85	-1,46	-1,05	-3,53	-3,35	-2,52	-0,48	-1,58	
Lob3	-0,92	0,04	2,95	-2,04	-1,54	-1,93	0,20	-0,39	
Lob5	-1,41	-0,55	0,27	-1,80	-2,35	-1,93	-0,10	-0,93	
Moy (n=7)	-1,55	0,10	1,40	-2,03	-2,07	-1,95	0,48	-0,56	
<b>CF&amp;PLI</b>									
Elements	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U	PLI
Nie1	0,27	1,61	2,65	0,28	0,15	0,34	2,50	1,54	0,70
Nie2	0,32	1,27	2,17	0,24	0,22	0,25	5,80	1,46	0,75
Nie3	0,58	0,93	2,17	0,31	0,59	0,45	1,43	1,14	0,79
Lob1	0,85	4,30	6,63	0,82	0,59	0,64	0,72	0,54	1,14
Lob2	0,21	0,55	0,72	0,13	0,15	0,26	1,07	0,50	0,35
Lob3	0,80	1,55	11,57	0,36	0,51	0,39	1,73	1,14	1,10
Lob5	0,57	1,02	1,81	0,43	0,29	0,39	1,40	0,79	0,70
Moy (n=7)	0,51	1,60	3,96	0,37	0,36	0,39	2,09	1,01	0,88

#### IV.4.2.1. Dans la couche de surface

##### IV.4.2.1.1. Facteur d'enrichissement (EF)

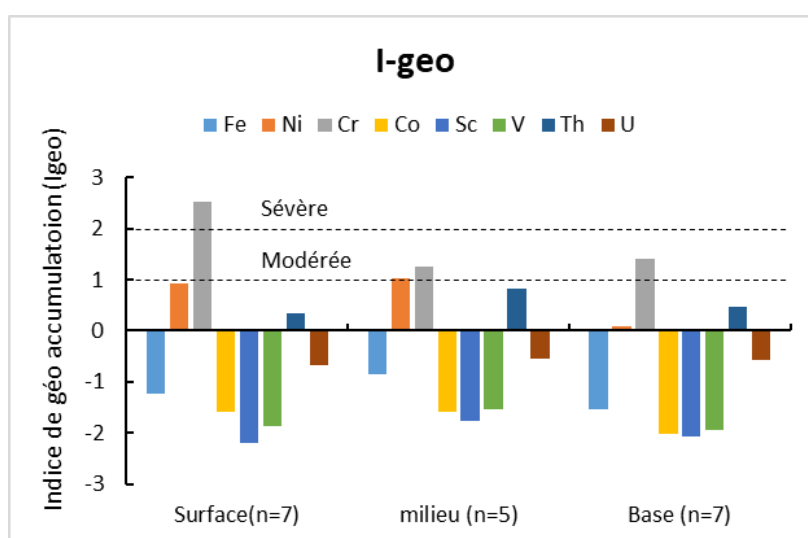
Les valeurs moyennes d'EF dans les sédiments de surface du cours d'eau Lobé révèlent que Cr a la valeur la plus élevée (13,47), respectivement suivi de Ni (4,47), Th (2,98), U (1,46), Fe (1), Co (0,78), V (0,64) et Sc (0,51) (Tab. XIII, Fig. 34). En se référant au tableau III (Wang et al., 2008), les valeurs d'EF de Cr, Ni et Th, sont supérieures à 1,5, indiquant que ces éléments proviennent de sources anthropiques, peut être due à l'utilisation d'engrais pour les activités agricoles (Salati et Moore, 2010). De plus, un enrichissement modéré (Th et Ni) et un enrichissement modérément sévère (Cr) sont notés. Les valeurs maximales de ces éléments Cr (29,76), Ni (17,39) et Th (7,06) sont enregistrés aux sites Lob5, Lob1 et Lob2.



**Figure 34.** Variation du facteur d'enrichissement dans les différentes couches des sédiments du cours d'eau Lobé.

#### IV.4.2.1.2. Indice de géoaccumulation (Igeo)

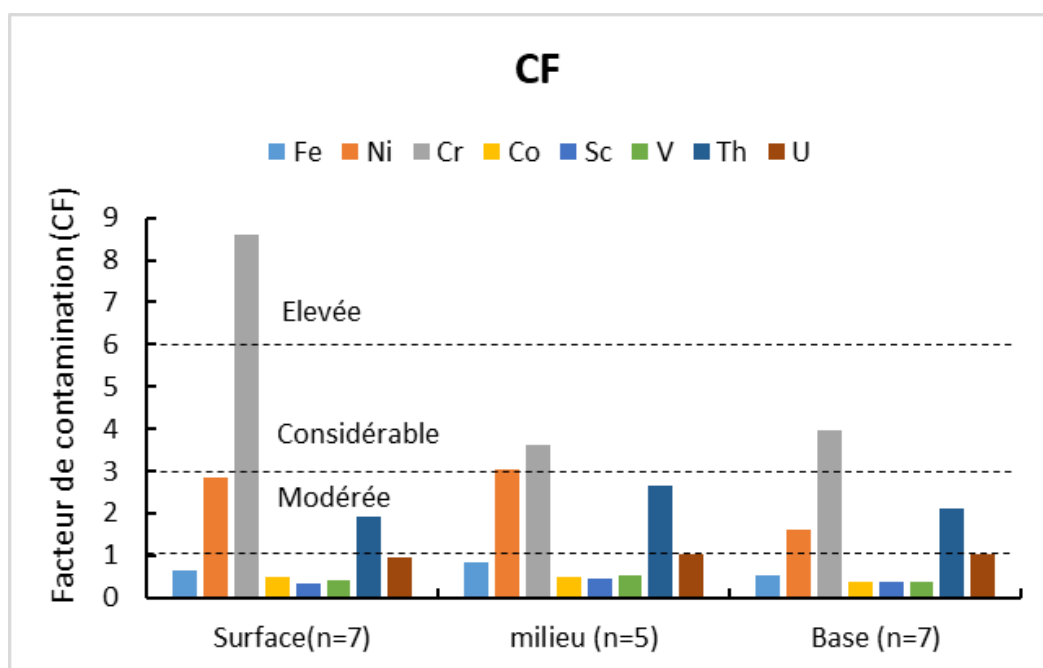
Les valeurs moyennes d'Igeo des éléments sélectionnés, sont classées comme suit : Cr (2,52) > Ni (0,93) > Th (0,34) > U (-0,68) > Fe (-1,23) > Co (-1,59) > V (-1,87) > Sc (-2,20) (Tab. XIII, Fig .35). Basé sur le tableau III (Müller, 1969), U, Fe, Co, V et Sc caractériseraient ces sédiments comme « non pollué ». Les valeurs en Cr, Ni et Th, les renvoient à la catégorie modérément à fortement polluée ; avec leurs valeurs maximales enregistrées dans les mêmes sites que celles des valeurs d'EF (respectivement Lob5, Lob1 et Lob2 pour Cr : 3.63, Ni : 2.94 et Th : 1.87).



**Figure 35.** Variation de l'indice de géo accumulation dans les différentes couches des sédiments du cours d'eau Lobé.

#### IV.4.2.1.3. Facteur de contamination (CF)

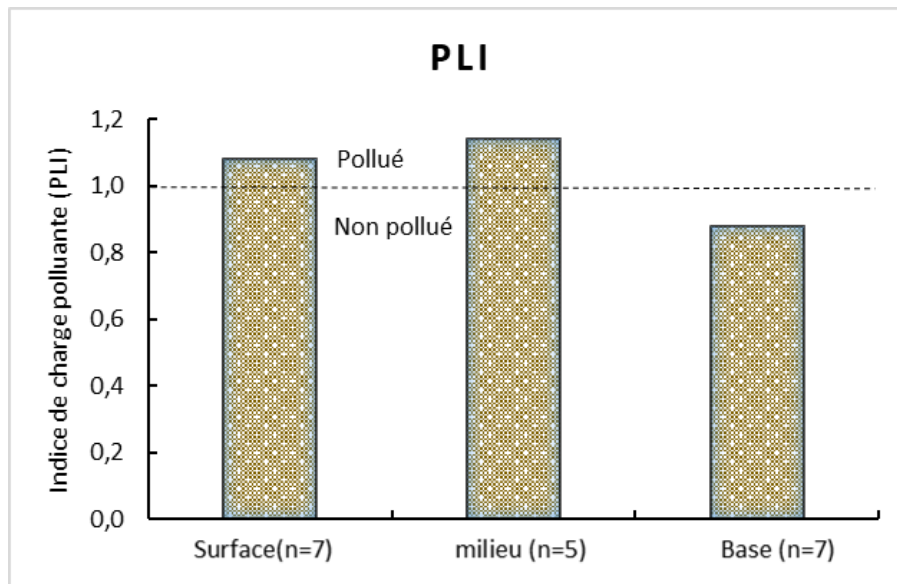
Les valeurs moyennes de CF dans ces sédiments de surface sont Cr (8,61), Ni (2,85), Th (1,90), U (0,93), Fe (0,64), Co (0,50), V (0,41) et Sc (0,33) (Tab XIII, Fig .36). Selon le tableau III (Hakanson, 1980 ; Tomlinson, 1980), certains éléments U, Fe, Co, V et Sc indique une faible contamination ; Th et Ni présentent une contamination modérée, tandis que Cr (8,61) indique une forte contamination. Les mêmes sites (respectivement Lob5, Lob1 et Lob2), enregistrent les valeurs maximales en ces éléments : Cr (18.55), Ni (11.50) et Th (5.48).



**Figure 36.** Variation du facteur de contamination dans les différentes couches des sédiments du cours d'eau Lobé.

#### IV.4.2.1.4. Indice de charge polluante (PLI)

PLI donne une évaluation de l'état global de toxicité de l'échantillon et est également un indice de la contribution combinée des huit éléments étudiés (Hakanson, 1980 ; Tomlinson et al., 1980). En se référant au tableau III, la valeur moyenne de PLI ici (1,08) indique l'état « pollué » de ces sédiments (Tab XIII, Fig. 37). Il faut noter qu'en particulier seuls les sites Lob1 (1.10) et Lob2 (1.59) dépassant la valeur seuil (1), ont conféré ce statut à cette couche de surface.



**Figure 37.** Variation de l'indice de charge polluante dans les différentes couches des sédiments du cours d'eau Lobé.

#### IV.4.2.2. Dans la couche du milieu

##### IV.4.2.2.1. Facteur d'enrichissement (EF)

Les valeurs moyennes d'EF dans cette couche décroissent comme suit : Cr (4,35) > Ni (3,66) > Th (3,19) > U (1,24) > Fe (1) > V (0,63) > Co (0,60) > Sc (0,53) (Tab. XIV, Fig. 34). Cette classification est presque similaire à celle de la couche de surface, exception faite par V, qui est supérieur à Co. En se référant au tableau III (Wang et al., 2008), les valeurs d'EF de Cr, Ni et Th sont supérieures à 1,5, indiquant que ces éléments proviendraient d'activités anthropiques. La même observation a été faite pour les sédiments de surface ; mais ici, des enrichissements modérés en Cr, Th et Ni sont observés. Les valeurs maximales en Cr (8.80), Ni (5.70) et Th (5.74) sont respectivement enregistrées aux sites Nie1, Nie1 et Lob2.

##### IV.4.2.2.2. Indice de géoaccumulation (I<sub>géo</sub>)

Les valeurs moyennes d'I<sub>géo</sub> des éléments sélectionnés décroissent comme celles des valeurs d'EF : Cr (1,27) > Ni (1,02) > Th (0,82) > U (-0,54) > Fe (-0,85) > V (-1,53) > Co (-1,58) > Sc (-1,77) (Tab. XIV, Fig. 35). Comme pour la couche de surface, le tableau III (Müller, 1969) classe U, Fe, Co, V et Sc comme caractérisant un état « non pollué » de ces sédiments. Pour Cr, Ni et Th, ces derniers sont modérément pollués ; ils enregistrent respectivement leurs valeurs maximales aux sites Nie1 (1.89), Lob1 (2.30) et Lob2 (1.76).

#### **IV.4.2.2.3. Facteur de contamination (CF)**

Les valeurs moyennes de CF sont présentées comme suit : Cr (3,61), Ni (3,04), Th (2,64), U (1,03), Fe (0,83), V (0,52), Co (0,50) et Sc (0,44) (Tab XIV, Fig. 36). Selon le tableau III (Hakanson, 1980 ; Tomlinson, 1980), certains éléments Fe, Co, V et Sc indiquent une faible contamination tandis que le reste présente des niveaux modérés (Ni, Th et U) à considérable (Cr) de contamination. Les sites Nie1, Lob1, Lob2 et Lob2 enregistrent les valeurs maximales en Cr (5.54), Ni (5.39), Th (5.08) et U (1.61).

#### **IV.4.2.2.4. Indice de charge polluante (PLI)**

La valeur moyenne de PLI dans cette couche (1,14) indiquerait l'état « pollué » de ces sédiments (Tab XIV, Fig. 37). Exception faite par le site Nie2 (0.81), tous les autres sont pollués.

#### **IV.4.2.3. Dans la couche de base**

##### **IV.4.2.3.1. Facteur d'enrichissement (EF)**

Dans la couche de base, les valeurs moyennes d'EF décroissantes comme suit : Cr (7,73) > Th (4,09) > Ni (3,13) > U (1,98) > Fe (1) > (V 0,76) > Co (0,72) > Sc (0,70) (Tab XV, Fig. 34). Excepté Th, qui enregistre une valeur plus élevée que celle de Ni, cette classification est presque la même que celle de la couche du milieu. En se référant au tableau III (Wang et al., 2008), les valeurs de Cr, Th, Ni et U sont supérieures à 1,5, indiquant que la source serait anthropique comme pour les autres couches. L'enrichissement ici est mineur (U), modéré (Th et Ni) et modérément sévère (Cr). Les sites Lob3, Nie1, Nie2 et Nie1 enregistrent respectivement les valeurs maximales en Cr (14.54), Ni (6.03), Th (18.38) et U (5.74).

##### **IV.4.2.3.2. Indice de géoaccumulation (I<sub>géo</sub>)**

Les valeurs moyennes d'I<sub>géo</sub> des éléments sélectionnés sont classées par ordre décroissant : Cr (1,40) > Ni (0,10) > Th (0,48) > U (-0,56) > Fe (-1,55) > V (-1,95) > Co (-2,03) > Sc (-2,07) (Tab XV, Fig. 35). Sur la base du tableau III (Müller, 1969), U, Fe, Co, V et Sc étaient similaires aux strates de surface et moyenne, caractérisent ces sédiments de « non pollués » comme les couches précédentes. Cr, Ni et Th représente la catégorie polluée, où la pollution est modérée. Ces éléments, Cr (2.14), Ni (1.52) et Th (1.95) enregistrent respectivement leurs valeurs maximales aux sites Lob1, Lob1 et Nie2.



#### **IV.4.2.3.3. Facteur de contamination (CF)**

La variation des valeurs moyennes de CF dans cette couche sont similaires à celles d'EF : Cr (3,96), Th (2,09), Ni (1,60), U (1,02), Fe (0,51), V (0,39), Co (0,37) et Sc (0,36) (Tab XV, Fig. 36). Selon le tableau III (Hakanson, 1980 ; Tomlinson, 1980), Fe, Co, V et Sc indiqueraient une faible contamination alors que les autres éléments présentent une contamination modérée (Ni, Th, et U) à considérable (Cr). Comme pour les valeurs d'EF, les sites Lob3, Nie1, Nie2 et Nie1 enregistrent respectivement les valeurs maximales en Cr (11.57), Ni (1.61), Th (5.80) et U (1.54).

#### **IV.4.2.3.4. Indice de charge polluante (PLI)**

La valeur moyenne du PLI des sédiments de base (0,88) indiquerait l'état « non pollué » des sédiments de base du cours d'eau Lobé (Tab XV, Fig. 37) ; cette observation est différente de celles des couches de surface et du milieu. Mais il faut noter que les sites Lob1 (1.14) et Lob2 (1.10) sont pollués.

En somme, il ressort de ce chapitre que les sédiments du cours d'eau Lobé sont majoritairement constitués de sables ; les limons et les argiles sont également présents. De couleur gris marron à blanchâtre ces sédiments ont une texture sableuse à sablo-limoneuse où les niveaux sableux enregistrent de faibles valeurs de teneurs en eau. Les concentrations en matière organique enregistrées sont faibles ce qui ne favoriserait pas la fixation des métaux lourds dans les sédiments (Ramasamy et al., 2014 ; Narayana et Rajashekara, 2010). Ces sédiments sont des litharenites feldspathiques et lithiques arkose et le cortège minéralogique, formé de quartz, rutile, gibbsite, kaolinite, feldspath, hématite, illite, interstratifiés, disthène, zoïsite, grenat, tourmaline, chloritoïde, diopside, anatase, sillimanite, augite, staurotide, zircon, actinote, hornblende et oxydes opaques, suggérerait une provenance hétérogène des roches sources. Les résultats d'analyses géochimiques révèlent des valeurs relativement faibles en  $Al_2O_3$  et en  $K_2O$ , indiquant que la teneur en minéraux argileux est faible dans les échantillons. Les teneurs en  $Na_2O$ , inférieures à  $K_2O$ , reflètent probablement l'abondance relative des minéraux contenant du potassium (c'est-à-dire K-feldspath) dans la zone source. Les corrélations entre  $TiO_2$  et Sc, V et Ni suggère que ces éléments sont largement contrôlés par les minéraux lourds. La corrélation significative du  $TiO_2$  avec les terres rares en aval, suggère une prédominance de minéraux contenant du Ti dans ce secteur, par rapport au secteur amont. Les indices de pollution traduisent le caractère « pollué » des couches de surface et du milieu et le caractère

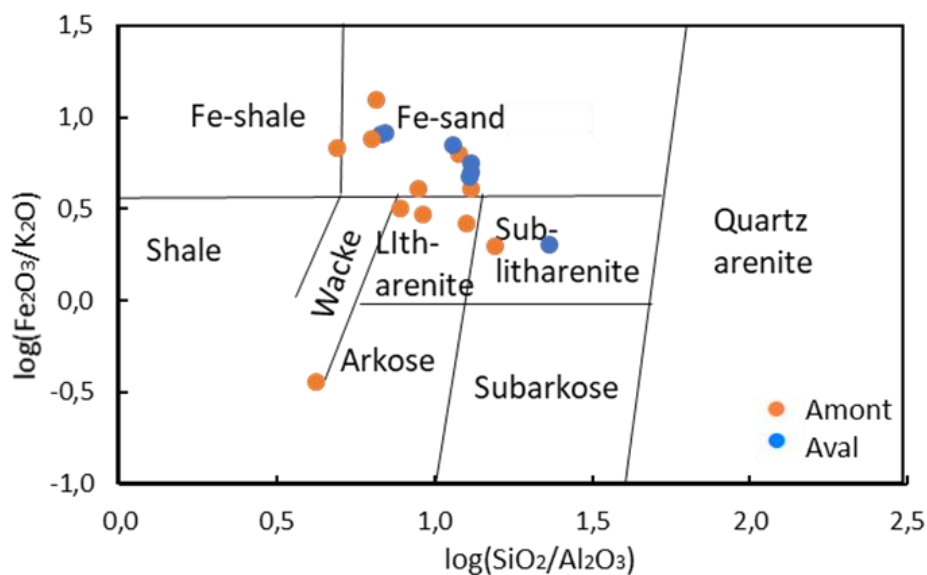
« non pollué » de celle de la base, suggérant la dégradation de l'environnement avec le temps ;  
Cr, Ni et Th sont les éléments les plus concernés par cette pollution.

## **CHAPITRE V: INTERPRETATION ET DISCUSSION**

Les résultats d'analyses physiques, minéralogiques et géochimiques dont le but était de déterminer à la fois l'environnement de dépôt des sédiments du cours d'eau Lobé et leur statut environnemental, sont discutés ici, suivant les axes de la classification géochimique de ces sédiments, de leur maturité et recyclage, de leur provenance et contexte tectonique, de l'altération des roches sources et du statut environnemental des sédiments.

### V.1. Classification des sédiments

Herron (1988) présente une classification qui permet de distinguer des roches à tendance silicoclastique selon les proportions logarithmiques de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  en fonction de  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ . Sur la figure 38, pratiquement tous les échantillons de l'amont du cours d'eau Lobé appartiennent à deux (2) classes : Fe-sands et litharenite, ceux de l'aval par contre sont majoritairement des sables ferreux. Les Fe-sands peuvent être justifiés par la nature de ces sédiments qui sont majoritairement constitués de sables. De plus, la nature du substratum rocheux de cette région, formé entre autre de fer rubané, pourrait dénoter de la richesse en fer de ces sédiments. Le remaniement des matériaux au Protérozoïque pourrait indiquer le recyclage des éléments lithiques et donc la présence des litharenites.

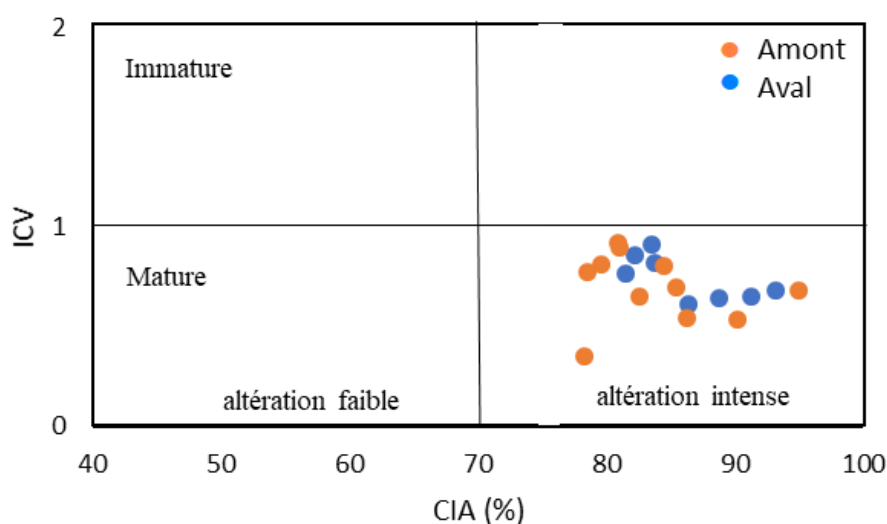


**Figure 38:** Diagramme de classification géochimique des sédiments du cours d'eau Lobé (Herron, 1988).

## V.2. Maturité et recyclage des sédiments

Une approche pour estimer la maturité des matériaux est l'indice de variabilité chimique (ICV ; Cox et al., 1995). La valeur moyenne de l'ICV des sédiments (0,70) indique une maturité texturale. De plus, le plot des échantillons sur la figure 39 montre que ces derniers sont matures.

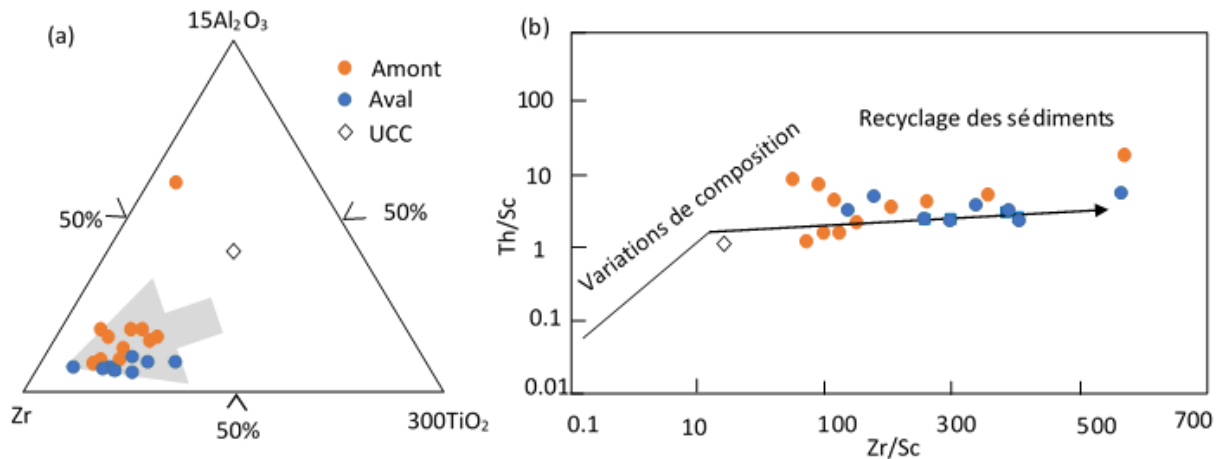
La maturité des sédiments peut également être déduite à l'aide du rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  puisqu'une valeur élevée de ce rapport représente des sédiments matures, indiquant une stabilité compositionnelle des minéraux et composants stables tels que le quartz (Roser et al., 1996). Les roches ignées basiques ont un rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  de 3, alors qu'il est d'environ 5 dans les roches ignées acides ; par conséquent, les valeurs  $> 5$  dans les sédiments clastiques indiquent la maturité des sédiments (Roser et al., 1996). Les rapports  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  varient de 4,21 à 15,68 avec une moyenne de 9,77 en amont et de 6,38 à 23,2 (moyenne = 10,15) en aval, indiquant une maturité de ces sédiments.



**Figure 39.** Diagramme bivarié ICV vs CIA, déduisant la maturité et l'altération des sédiments du cours d'eau Lobé (Cox et al., 1995 ; Nesbitt and Young, 1984).

La variation de la composition des sédiments et l'effet du recyclage sont reflétés par le contenu en Zr et Hf, qui sont HFSE associés au zircon (Armstrong-Altrin et Machain-Castillo, 2016). Généralement, un contenu élevé en ces éléments est lié à l'effet du recyclage. La teneur moyenne en Zr en amont (911 ppm) est relativement faible alors qu'elle est élevée (1595 ppm) en aval. De même, la teneur moyenne en Hf en amont (23 ppm) est relativement faible tandis qu'elle est élevée (36 ppm) en aval. Cela révèle la variation de ces teneurs en Zr et Hf entre l'amont et l'aval, indiquant un fractionnement lié au tri. L'effet du recyclage des échantillons est identifiable dans le diagramme ternaire  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Zr}$  (Garcia et al., 1994), qui montre

une simple tendance due à la modification du rapport  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Zr}$  (Fig. 40a). L'effet du recyclage des sédiments étudiés, et donc l'enrichissement en Zr au cours tri, peut également être présenté sur le diagramme binaire de Th/Sc vs Zr/Sc (McLennan, 1993). Dans ce diagramme (Fig. 40b), les rapports Zr/Sc augmentent plus rapidement que ceux de Th/Sc pour tous les échantillons, suggérant un recyclage et tri de ces sédiments. Cependant, le recyclage semble, plus prononcé pour les échantillons en aval (Fig 40b).



**Figure 40:** (a) Diagramme ternaire  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2\text{--Zr}$  (Garcia et al., 1994), (b) diagramme bivarié Th/Sc vs Zr/Sc (McLennan et al., 1993), présentant le recyclage des sédiments du cours d'eau Lobé.

Les teneurs en oligo-éléments tels que Ba et Sr, qui sont abondants dans le feldspath potassique et le mica, révèlent des variations de composition dans les sédiments (Muhs et al., 2003). En effet, les concentrations moyennes de Ba et Sr, qui peuvent se substituer à K dans le réseau des minéraux silicatés, sont légèrement plus élevées dans le secteur amont ( $507,5 \pm 72,6$  ppm et  $67,8 \pm 4,6$  ppm, respectivement) que dans le secteur aval ( $363,1 \pm 99,6$  ppm et  $47,9 \pm 12,5$  ppm, respectivement). De plus, les teneurs moyennes en  $\text{K}_2\text{O}$  sont plus élevées pour l'amont échantillons ( $1,04 \pm 0,91$  %) que pour les échantillons en aval ( $0,57 \pm 0,05$  %). En outre, la teneur en Ba reflète également la relative maturité des sédiments en aval, par rapport à ceux en amont. Les concentrations de Ba, qui sont des substituts du feldspath potassique semblent être faibles dans les échantillons en aval (Tableau X ; Muhs et Holliday, 2001). Cela suggère que les échantillons en amont sont plus proches des roches mères et sont légèrement enrichis en minéraux contenant du potassium par rapport aux sédiments en aval.

### V.3. Altération des roches sources

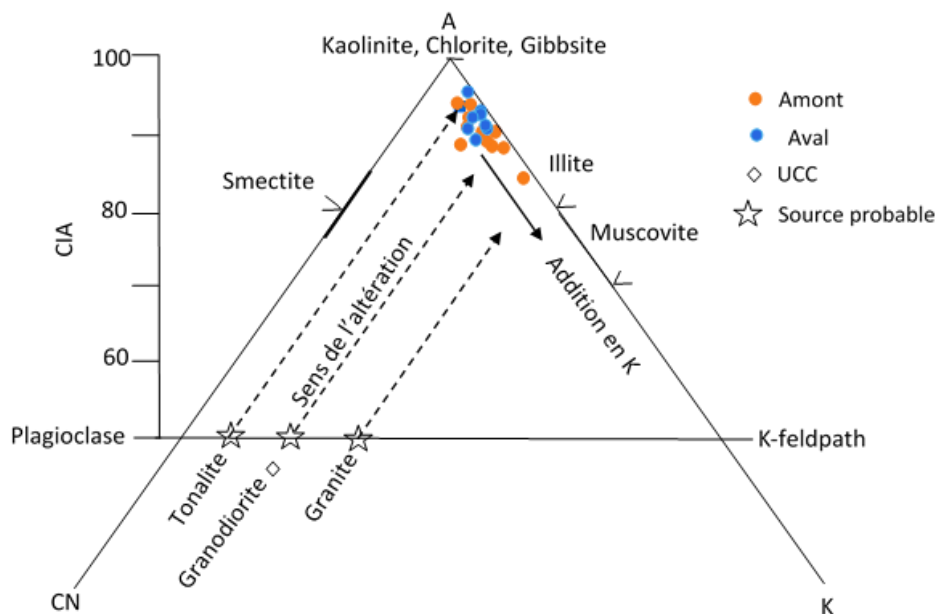
Le taux de transformation des minéraux primaires, et surtout des feldspaths du substratum cristallin, en argiles, oxydes secondaires et les hydroxydes, est lié à l'intensité de la paléaltération à travers les facteurs tels que paléoclimat et tectonique (Nesbitt et Young, 1984 ; Fedo et al., 1995 ; Nesbitt et al., 1997). La proportion de feldspath, qui est un minéral résiduel dans les sédiments étudiés est très faible ( $< 2\%$  ; Tab. VII), indiquant que l'altération était assez forte pour modifier presque tous les feldspaths, où l'érosion physique s'est déroulée à un rythme nul ou inférieur au taux d'altération chimique.

Les valeurs élevées de CIA indiquent la forte intensité de l'altération chimique dans les zones sources (Tab. VIII). Cependant, l'intensité de l'altération est plus élevée pour les échantillons en aval (86,16) par rapport aux échantillons en amont (84,04). La légère différence entre les valeurs de CIA entre les deux secteurs peut être due aux roches mères ou à la granulométrie liée à l'effet du tri. Shao et Yang (2012) a également signalé une variation des valeurs de la CIA dans les sédiments de cours d'eau Changjian due au tri hydrodynamique. La différence des roches sources peut également expliquer les variations des valeurs de CIA entre l'amont et l'aval. En effet, les sédiments de l'amont recevraient principalement la contribution des roches de l'unité du Nyong (Fig. 8), qui a connu des cycles sédimentaires dans le bassin intracratonique du Nyong (2515 – 2535 Ma ; Feybesse et al., 1998). Tandis que les sédiments de l'aval recevraient une contribution à la fois de l'unité du Nyong et du Ntem, ce dernier étant un craton stable (Tchameni et al., 2000 ; Shang et al., 2007).

Les échantillons en amont et en aval montrent des valeurs de CIA (84 et 86, respectivement) supérieures à celle de l'UCC (56,93 ; McLennan et al., 1993). Ces valeurs sont plotées dans le diagramme ternaire  $Al_2O_3 - (CaO + Na_2O) - K_2O$  (A-CN-K), qui permet d'apprécier la variation dans les changements de composition dus soit à l'altération chimique, soit à composition de la roche mère (Nesbitt et Young, 1982 ; Fedo et al., 1995). La plupart des échantillons étudiés se retrouve presque sur l'axe A-K, indiquant une forte intensité d'altération (Nesbitt et al., 1997). Cependant, la plupart des échantillons en aval sont près de l'apex A, indiquant que l'intensité de l'altération est légèrement variable entre les deux secteurs. Le reste des échantillons se rapproche dans une moindre mesure de l'apex K, indiquant un processus d'addition en K, connu sous le nom de métasomatisme potassique, qui peut survenir au cours de la diagenèse. L'addition en K est due à la conversion de la kaolinite en illite en incluant  $K^+$  dans leur structure avant leur dépôt (Fedo et al., 1995). Cette interprétation est cohérente avec la présence d'illite

dans les sédiments étudiés, comme le révèle le résultat DRX (Fig. 28). Le changement post-dépôt mentionné n'est probablement pas significatif, puisque les sédiments sont moins lithifiés à non lithifiés. Par conséquent, il n'a pas pu modifier, de façon notable, le contrôle primaire des informations d'altération, résultant en une valeur élevée d'autres indices d'altération tels que l'indice d'altération du plagioclase ( $PIA = [Al_2O_3 - K_2O / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O)] \times 100$  ; Fedo et al., 1995). La formule de PIA utilise l'aluminium total (Al) avec correction pour Al dans le feldspath potassique et donc ne prend pas en considération le métasomatisme potassique pour estimer l'altération de la roche mère (Tab. VIII). D'un autre côté, Fedo et al. (1995) montrent que les roches et leurs produits d'altération tombent le long de la même tendance linéaire et la projection de cette tendance linéaire sur le joint de feldspath suggère une composition chimique et une association minéralogique du matériel parental éventuel. La tendance de l'altération théorique des sédiments du cours d'eau Lobé (Fig. 41), suggère une source variable de roches (granite, granodiorite et tonalite).

Les roches formées de minéraux tels que feldspaths, amphiboles, et les pyroxènes ont une valeur d'ICV > 1, alors que des produits d'altération comme la kaolinite, l'illite et la muscovite ont une valeur ICV < 1 (Cox et al., 1995 ; Cullers, 2000). La valeur d'ICV de ces sédiments varie entre 0,35 et 0,92 (moyenne = 0,70), indiquant une altération des produits. Le degré élevé d'altération chimique est encore confirmé par le diagramme binaire ICV versus CIA (Fig. 39).



**Figure 41.** Diagramme ternaire A ( $Al_2O_3$ ) – CN ( $CaO^* + Na_2O$ ) – K ( $K_2O$ ) des sédiments du cours d'eau Lobé, déduisant l'altération des roches sources (Nesbitt et Young, 1982).



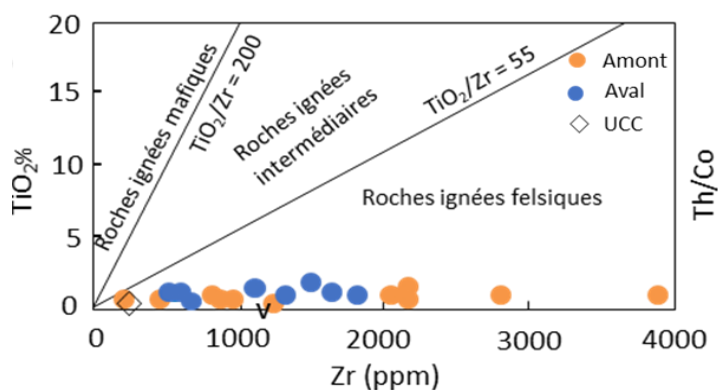
## V.4. Provenance des sédiments

### V.4.1 Nature des roches sources d'après les éléments majeurs et traces

Les éléments majeurs ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{TiO}_2$ ), traces (Hf, Th, Sc, Cr, Zr, Ni, V et Co) et rares sont fréquemment utilisés pour déduire la provenance des roches clastiques, car elles tendent à refléter la composition de la roche mère (Garcia et al., 1994; Cullers, 2000 ; Anaya-Gregorio et al., 2018). Les spectres des terres rares sont également très utilisés pour caractériser la composition de la roche mère (Armstrong-Altrin et al., 2019, 2020 ; Zeng et al., 2019). Les données géochimiques des sédiments de cours d'eau sont représentées dans plusieurs diagrammes binaires et ternaires, qui sont largement utilisés dans les études de provenance, pour déterminer la nature des leurs roches sources.

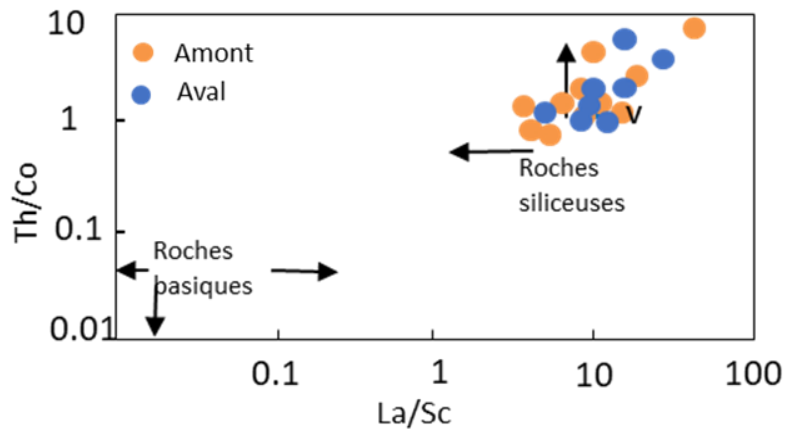
La disposition des échantillons de sédiments du cours d'eau Lobé sur le diagramme ternaire A-CN-K (Fig. 41) et leur projection sur le joint feldspathique, selon la tendance théorique d'altération (lignes pointillées; Nesbitt et Young, 1984) indiquent principalement un enrichissement en K-feldspaths des matériaux parents (K-feldspaths > plagioclases). Ces roches mères correspondent à des granitoïdes (granite et granodiorite). Cependant, peu d'échantillons proches de l'apex A présentent une tendance d'altération parallèle de l'axe A-CN, se projettent sur la jointure feldspath, indiquant une roche source enrichie en plagioclases. Ce dernier peut correspondre à des roches sources mafiques. Dans l'ensemble, ces observations pourraient suggérer des sources différentes pour les sédiments amont et aval, avec une dominance des roches sources felsiques par rapport aux roches mafiques qui seraient mineures.

Sur le diagramme binaire Zr vs  $\text{TiO}_2$ , tous les échantillons tombent dans le champ de roches ignées felsiques (Hayashi et al., 1997 ; Fig. 42).

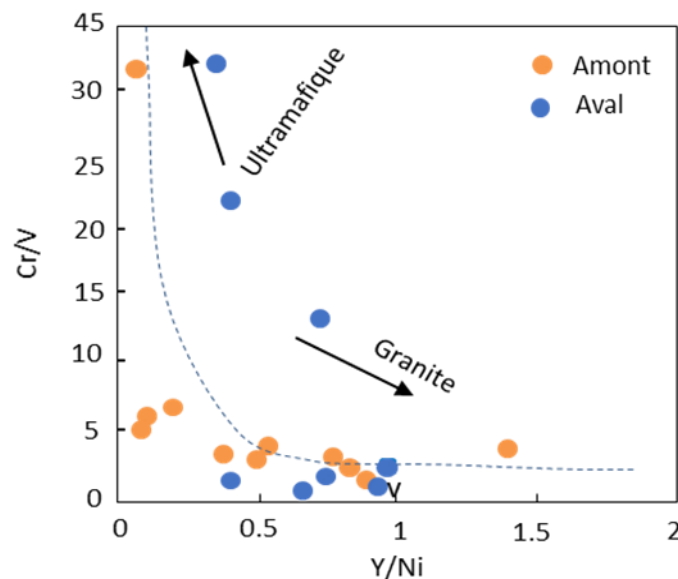


**Figure 42.** Diagramme bivarié Zr vs.  $\text{TiO}_2$  des sédiments du cours d'eau Lobé (Hayashi et al., 1997).

Les diagrammes bivariés Th/Co vs La/Sc (Cullers, 2002 ; Fig. 43) et Cr/V vs Y/Ni (Hiscott, 1984 ; Fig. 44) sont utilisées pour différencier les roches siliceuses des roches mafiques. Dans le Diagramme Th/Co vs La/Sc, tous les échantillons appartiennent au domaine des roches siliceuses. Dans le graphique Cr/V vs Y/Ni, la plupart des échantillons tombent dans le champ des granites, alors que très peu d'échantillons appartiennent au domaine des roches ultramafiques.



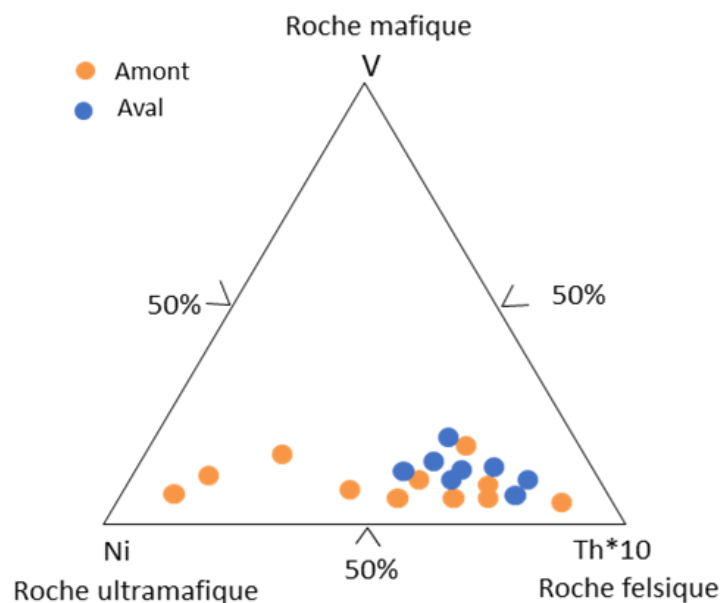
**Figure 43.** Diagramme bivarié La/Sc vs. Th/co des sédiments du cours d'eau Lobé (Cullers, 2002).



**Figure 44.** Diagramme bivarié Y/Ni vs. Cr/V des sédiments du cours d'eau Lobé (Hiscott, 1984).

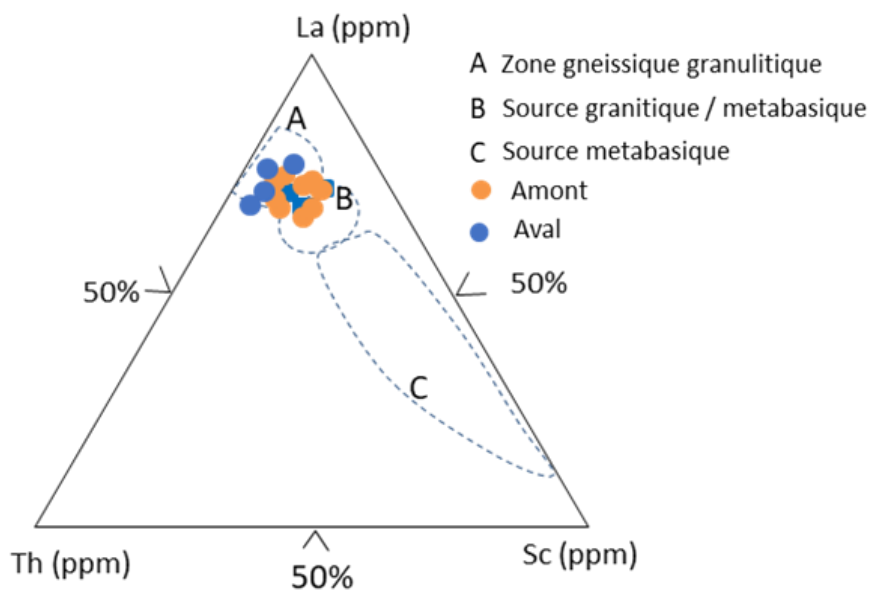
De même, le diagramme ternaire V–Ni–Th\*10 est utilisé pour distinguer les roches ultramafique, mafique et felsique ; ici très peu d'échantillons se situent près de l'apex

ultramafique alors que la majorité des échantillons est proche de l'apex des roches felsiques (Bracciali et al., 2007 ; Fig. 45).



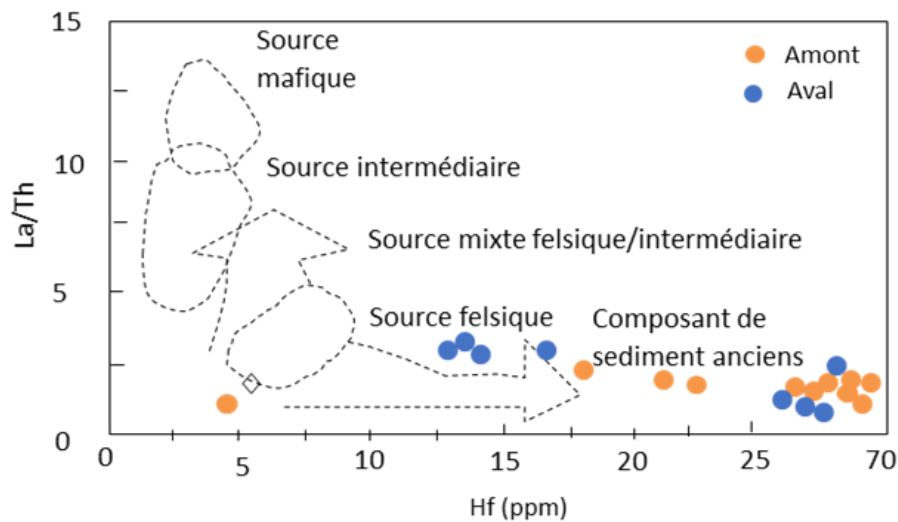
**Figure 45.** Diagramme ternaire V–Ni–Th\*10 des sédiments du cours d'eau Lobé (Bracciali et al., 2007).

Le diagramme ternaire La–Th–Sc est utilisé pour différencier les roches gneissiques granitiques, les roches sources mixtes gneissiques granitiques / metabasitiques et roches sources metabasitiques (Cullers, 1994; Fig. 46). Dans ce diagramme, tous les échantillons appartiennent aux domaines des roches gneissiques granitiques et mixtes.

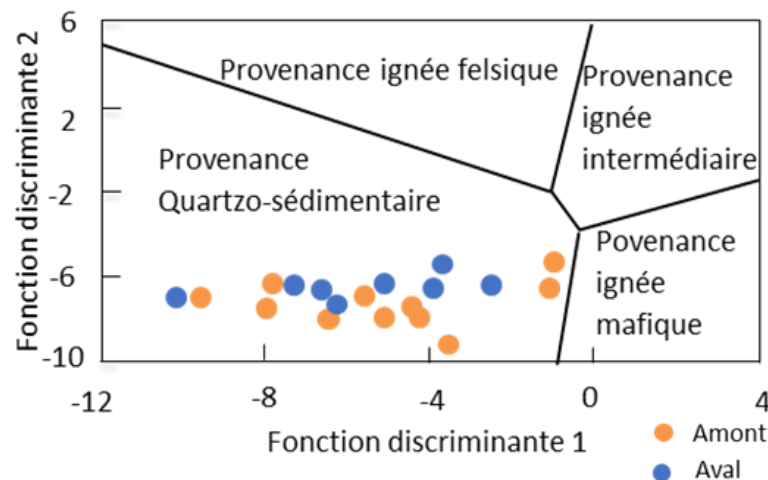


**Figure 46.** Diagramme ternaire La–Th–Sc des sédiments du cours d'eau Lobé (Cullers, 1994).

Le diagramme bivarié de dispersion La/Th vs Hf indique pour ces échantillons, la dérivation d'une zone source composée de roches felsiques (Flyod et Leveridge, 1987; Fig. 47). Sur la figure 48, présentant le diagramme de provenance des fonctions discriminantes de Roser et Korsch (1988), les échantillons révèlent la présence d'anciennes roches sédimentaires quartzieuses dans la zone source, qui seraient très anciens compte tenu du diagramme précédant (Fig. 47).



**Figure 47.** Diagramme bivarié Hf vs. La/Th des sédiments du cours d'eau Lobé (Flyod et Leveridge, 1987).



**Figure 48.** Fonction discriminante des sédiments du cours d'eau Lobé (Roser et Korsch 1988) ;  
Fonction discriminante 1 =  $(-1,773 \cdot \text{TiO}_2) + (0,607 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3) + (0,760 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3) + (-1,500 \cdot \text{MgO}) + (0,616 \cdot \text{CaO}) + (0,509 \cdot \text{Na}_2\text{O}) + (-1,224 \cdot \text{K}_2\text{O}) + (-9,090)$ ;  
Fonction discriminante 2 =  $(0,445 \cdot \text{TiO}_2) + (0,070 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3) + (0,250 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3) + (-1,142 \cdot \text{MgO}) + (0,438 \cdot \text{CaO}) + (1,475 \cdot \text{Na}_2\text{O}) + (-1,426 \cdot \text{K}_2\text{O}) + (-6,861)$ .

De plus, les valeurs élevées en Zr (910.90 ppm en amont et 1595.20 ppm en aval) indiquent une forte teneur en zircon et suggère une source granitique ou une source de roches sédimentaires recyclées (Carranza-Edwards et al., 2001, 2019 ; Armstrong-Altrin et al., 2020). Cette interprétation est basée sur le fait que divers chercheurs ont décrit différentes roches métasédimentaires, telles que métagraywakes, métaquartzites et BIF, à la bordure nord du Complexe du Ntem (Vicat et Pouclet, 1995 ; Vicat et al., 1996 ; Feybesse et al., 1998 ; Pouclet et al., 2007). Il convient en plus de noter que BIF fait référence à des couches sédimentaires riches en fer, alternant généralement avec couches riches en silice ou leur équivalent métamorphique (Trendall, 2002).

Les teneurs élevées en Cr, Ni et V dans les sédiments clastiques suggèrent une provenance mafique (Cullers et al., 1997). Cr > 150 ppm et Ni > 100 ppm sont indicatif de roches ultramafiques dans la zone source (Garver et al., 1996). Dans cette étude, les échantillons de l'amont et de l'aval ont une moyenne élevée en Cr (respectivement 388.20 et 566.30 ppm) et en Ni (respectivement 144.50 et 56.50 ppm) indiquant globalement, la présence de détritiques mafiques dans la zone source (Tab VII). Il est intéressant de noter que les teneurs les plus élevées en Ni (506, 325 et 189 ppm) sont enregistrées par les échantillons de la carotte Lob1 ; cette dernière enregistre aussi de forte teneurs en Cr (410, 550 et 1440 ppm). Les échantillons de cette carotte n'ont pas reçu de contribution du bassin versant du cours d'eau Niété (de l'unité du Nyong), alors le résultat obtenu pourrait indiquer une source plus mafique dans la partie supérieure du bassin versant du cours d'eau Lobé, qui traverse l'unité du Ntem. Ceci pourrait être soutenu plus loin par des teneurs relativement élevées en V (43, 54 et 68 ppm) dans les échantillons de la carotte Lob1, par rapport aux autres échantillons du secteur en amont (27 à 53 ppm). Il convient également de mentionner que des teneurs élevées en Cr sont révélatrices de chromite et minéraux ferromagnésiens (pyroxène, amphibole et olivine), qui sont des minéraux accessoires des roches vertes. Quelques auteurs évoquent des roches vertes archéennes dans la zone d'étude, suggérant qu'elles pourraient être la source des détritiques mafiques (Tchameni et al., 2000; Shang et al., 2004, 2007).

En résumé, les sédiments étudiés semblent être dérivés de divers types de roches, dont principalement les roches felsiques et dans une moindre mesure les roches mafiques/ultramafiques et des détritiques recyclés. La nature hétérogène des roches sources est également soutenue par la présence de certains minéraux lourds qui sont de bons indicateurs de l'origine des sables (Tab. V ; Garzanti et al., 2005 ; Garzanti et Ando, 2007). Les types de roches déduits comprennent les roches ignées, métamorphiques et sédimentaires. La présence

courante de tourmaline angulaire et de zircon dans les sédiments étudiés indique des roches mères felsiques, tandis que la présence de l'augite et le rutile peuvent suggérer la contribution des roches mafiques. D'un autre côté, l'abondance relative de minéraux tels que le grenat, le disthène, la sillimanite et la staurotide impliquent une provenance de roches métamorphiques de degré moyen à supérieur, tandis que la tourmaline arrondie et le zircon, supportent une origine détritique.

#### **V.4.2. Nature des roches mères source d'après les terres rares**

Les spectres des terres rares des sédiments du cours d'eau Lobé ont été examinés afin de déterminer les roches mères. Selon Armstrong-Altrin et al. (2012), les teneurs en  $\Sigma$ REE dépendent principalement des roches mères, de la taille des grains et proportion de minéraux lourds. Les teneurs moyennes en  $\Sigma$ REE de ces échantillons en amont et en aval sont respectivement de 258.45 et 346.10 ppm, indiquant probablement une différence de composition dans les roches mères. De faibles  $\Sigma$ REE sont enregistrés dans les échantillons de la carotte Lob1 par rapport aux autres échantillons en amont, indiquant une roche plus mafique dans le cours supérieur de la Lobé. Cullers et al. (1987) suggère que les roches ignées mafiques contiennent de faibles ratios LREE/HREE, alors que les roches ignées felsiques présentent des ratios LREE/HREE plus élevés. Cependant, les résultats obtenus dans cette étude affichent une correspondance étroite à la fois avec les caractéristiques de roches mafiques et de roches felsiques, comme suggéré par les auteurs ci-dessus mentionnés. Les échantillons étudiés montrent des ratios LREE/HREE variant entre 10 et 20, indiquant une hétérogénéité lithologique des zones sources (roches felsiques et mafiques) ; ceci pourrait s'expliquer par une lithologie et une période géologique particulière. À cet égard, presque tous les spectres de normalisation des échantillons par rapport à l'UCC et à la chondrite en amont et en aval, présentent de fortes valeurs du ratio LREE/HREE (>15), qui sont similaires à celles des roches sources précambriennes, avec des lithologies diverses et spécifiques telles que celles de la zone d'étude (Fig. 22 ; Tab. VIII ; Singh et Rajamani, 2001 ; Tchameni et al., 2000 ; Shang et al., 2007). D'autre part, Clifford et Gass (1970), Cahen et al. (1976), Bessoles et Trompette (1980), et Nédélec et al. (1990) suggèrent que la géologie de la zone du bassin versant du cours d'eau Lobé appartient au Complexe du Ntem, représentant la partie nord-ouest du craton du Congo (archéen) en Afrique centrale. Selon ces auteurs, le Complexe du Ntem est composé de différents types de roches, avec les suites TTG qui constituent la plus grande partie, et une association de métasédiments et roches intrusives mafiques-ultramafiques. Enfin, les sédiments du cours d'eau Lobé semblent principalement provenir des roches précambriennes du

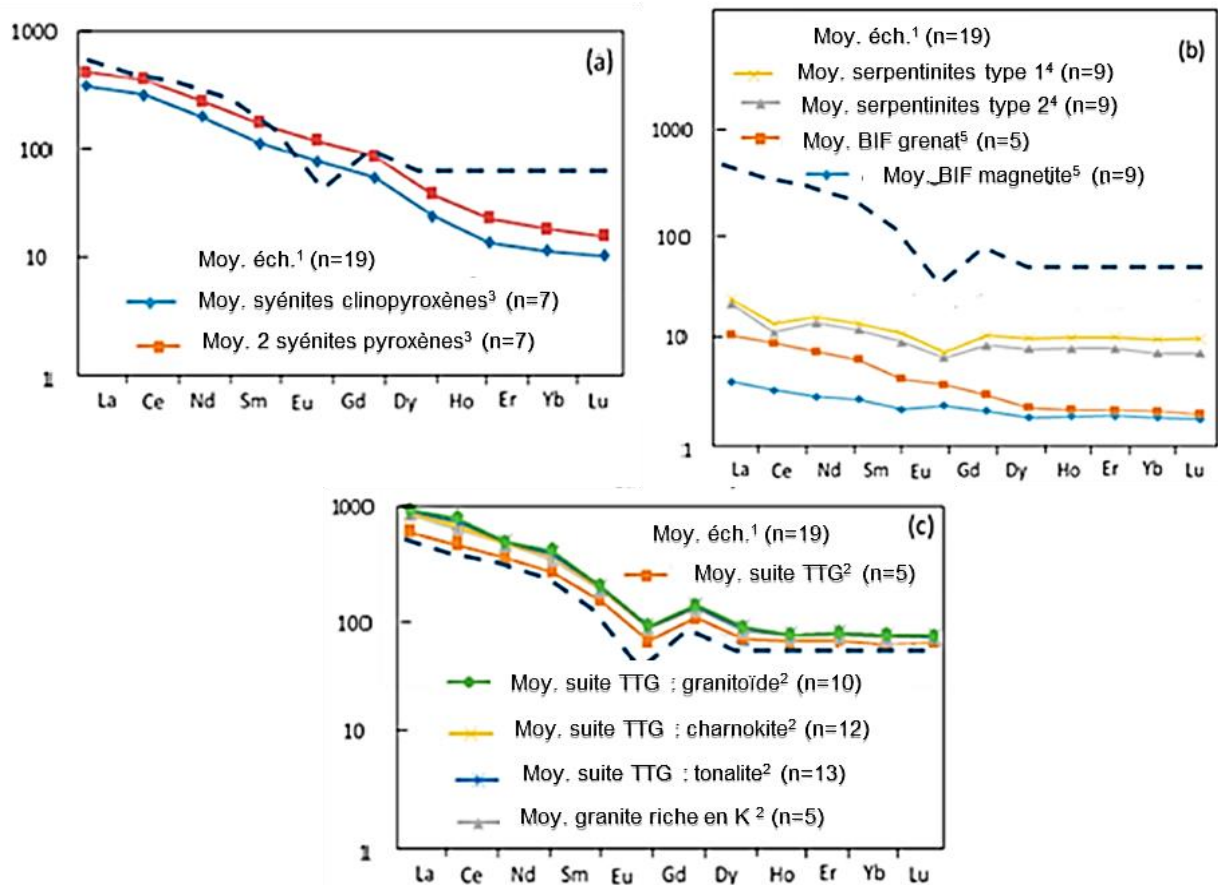
Complexe du Ntem, qui semblent être majoritairement de composition felsiques (TTG, migmatite et granite). Cependant, les roches sources semblent être relativement enrichies en composants mafiques dans la partie supérieure du cours d'eau Lobé, qui traverse l'unité du Ntem. Il est donc intéressant de noter que le cours d'eau Niété et le tronç principal du cours d'eau Lobé traversent l'unité du Nyong. Les composants mafiques de l'unité du Ntem peuvent être attribué aux ceintures de roches vertes archéennes constituées de xénolithes, métasédiments et amphibolite à grenat observés dans les granitoïdes formés entre 2.9 et 2.8 Ga, métadolérites et BIF paléoprotérozoïque (Tchameni et al., 2000 ; Toteu et al., 2001). De même, dans l'unité du Nyong du Paléoprotérozoïque (2400-1800 Ma), les composantes mafiques peuvent être attribuées aux restes de ceintures de roches vertes généralement composées de pyroxénites, de serpentinites et de BIF, mais aussi aux métavolcanites mafiques et ultramafiques, et des dykes métadoléritiques post-tectoniques (Feybesse et al., 1998 ; Penaye et al., 2004).

#### **V.4.3. Corrélation de la géochimie des sédiments et des roches sources potentielles**

Les spectres des moyennes de REE normalisés par rapport à la chondrite de différentes roches de l'unité du Ntem et du Nyong ont été comparés avec ceux des échantillons du cours d'eau Lobé, pour identifier les roches mères probables (Fig. 49). Les types de roches comparés comprennent les suites TTG (comprenant les charnockites, granodiorites et tonalites ; Shang et al., 2004, 2007), les syénites (les syénites à pyroxène et clinopyroxène; Tchameni et al., 2001), les serpentinites (Tsoungui et al., 2019) et les BIF (Ndime Ekah et al., 2019). Les syénites sélectionnées du Complexe du Ntem présentent une allure similaire à celles de nos échantillons, pour les LREE, mais différentes pour les HREE (Fig. 49a). Les BIF montrent un faible enrichissement à la fois en LREE et en HREE avec des teneurs faibles par rapport à ceux de nos sédiments, et leur anomalie en Eu est négligeable (Fig. 49b). Les péridotites serpentinisées de l'unité du Nyong montrent également des teneurs faibles à la fois pour LREE et HREE, une anomalie légèrement négative en Eu et des spectres plats pour les HREE (Fig. 49b). Les échantillons étudiés ont une allure similaire à celle des suites TTG (Fig. 49c). Cependant, les suites TTG montrent un degré de fractionnement légèrement plus élevé des HREE par rapport à celui de nos sédiments.

Bien que les sédiments du cours d'eau Lobé soient un mélange de détritits provenant de différentes lithologies de roche mère, plusieurs indicateurs géochimiques et les spectres des REE en particulier montrent une plus grande similitude avec ceux des suites TTG, qui

représenteraient le type principal de roches de la zone étudiée, suggérant que les suites TTG seraient leur source dominante. Le manque de similarité entre les types potentiels de roches mères et les échantillons étudiés est certainement dû à l'érosion et à l'élimination totale de certains composants de ces roches sources. Cela peut également être dû à l'absence de ces roches sources potentielles ou la rareté de leurs affleurements dans le bassin versant du cours d'eau Lobé.



**Figure 49.** Spectres de normalisation des chondrites (McDonough and Sun, 1995) des roches mères probables des sédiments du cours d'eau Lobé. Les données de terres rares sont <sup>1</sup> de cette étude, <sup>2</sup> Shang et al. (2004, 2007), <sup>3</sup> Tchameni et al. (2000) <sup>4</sup> Tsoungui et al. (2019) <sup>5</sup> Ndime Ekah et al. (2019).

### V.5. Contexte tectonique des sédiments

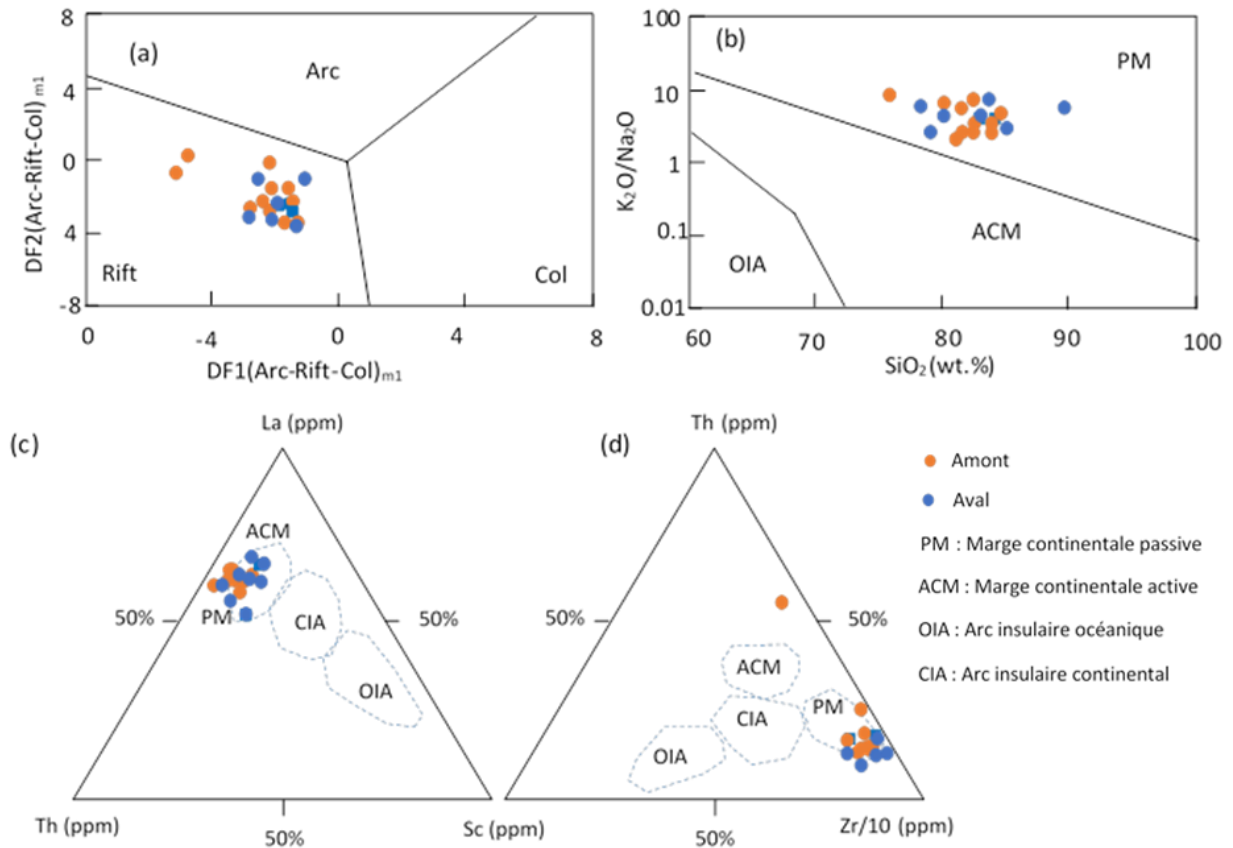
La géochimie des sédiments clastiques peut être utilisée pour déterminer le cadre tectonique de la zone source (Etemad-Saeed et al, 2015 ; Dinis et Oliveira, 2016 ; Nguetchoua et al., 2019). Plusieurs diagrammes de discrimination utilisant le contenu chimique des sédiments ont été



récemment développés pour déterminer le cadre tectonique de bassins inconnus et ceux de leurs terranes sources (Bhatia, 1983 ; Roser et Korsch, 1986 ; Verma et Armstrong-Altrin, 2013, 2016). Parmi ces approches, les diagrammes conventionnels de Bhatia (1983) et Roser et Korsch (1986) montrent un faible taux de réussite pour déduire le contexte tectonique exact, selon une évaluation récente de leurs résultats (Hegde et Chavadi, 2009 ; Armstrong-Altrin et Verma 2005). De nombreuses études par contre approuvent la bonne performance des diagrammes de fonctions discriminantes proposées par Verma and Armstrong-Altrin (2013, 2016) (Li et al., 2016; Maslov et al., 2016; Vosoughi Moradi et al., 2016).

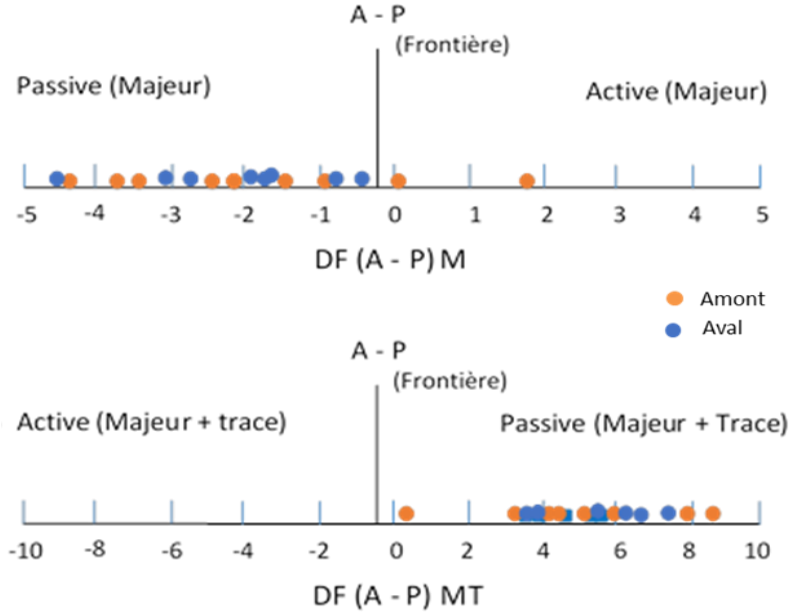
Des diagrammes discriminants à teneur élevée et faible teneur en silice de Verma et Armstrong-Altrin (2013) ont été proposés par la combinaison de concentrations en éléments majeurs pour discriminer les contextes d'arc, de rift et de collision. Le diagramme à teneur élevée en silice montre des valeurs de  $(\text{SiO}_2)_{\text{adj}}$  variant entre 63 et 95%, alors que celui de faibles teneurs en silice montre des sédiments avec des teneurs en  $(\text{SiO}_2)_{\text{adj}}$  variant entre 35 et 63% ; l'indice  $_{\text{adj}}$  fait référence au fait que les données chimiques ont été ajustées, avant tout calcul, à 100 %. Les diagrammes de discrimination de Verma et Armstrong-Altrin (2013) combinent les concentrations d'éléments majeurs et d'éléments traces pour discriminer les contextes en marge active (arc et collision) et les contextes en marge passive (le rift). Dans le diagramme à haute teneur en silice, tous les échantillons se situent dans le champ de rift, suggérant un environnement tectonique de rift ou un environnement de marge passive pour les zones sources (Fig. 50a). De même, sur les diagrammes binaire et ternaires conventionnels très utilisés de Bhatia et Crook (1986) et Roser et Korsch (1988), la plupart des échantillons tombent dans le domaine de la marge passive (Fig. 50b, c, d).

Pour être certain de l'histoire tectonique de ces zones sources, deux diagrammes multidimensionnels (l'un basé sur les éléments majeurs et l'autre sur les éléments majeurs et traces) également proposés par Verma et Armstrong-Altrin (2016) ont été appliqués aux données géochimiques étudiées (Fig. 51a, b). Ces diagrammes comprennent les diagrammes à un axe de la fonction discriminante ( $DF_{(A-P)M}$  et  $DF_{(A-P)MT}$ , où M et T représentent respectivement les éléments majeurs et les éléments traces), qui sont censés identifier correctement les marges actives et passives pour le passé géologique lointain. Pour les sédiments du cours d'eau Lobé, presque tous les échantillons du diagramme basé sur oxydes majeurs se situent dans le cadre de la marge passive ; tandis que dans le diagramme basé sur les éléments majeurs et traces, tous les échantillons sans exception tombent dans le champ de la marge passive, qui comme précisé plus haut définit un contexte de rift continental.



**Figure 50.** Diagrammes de discrimination tectonique des sédiments du cours d'eau Lobé. (a) Fonction discriminante du diagramme multidimensionnel pour sédiments clastiques à fortes teneurs en silice (Verma and Armstrong-Altrin, 2013), (b) Diagramme de discrimination tectonique basé sur les oxydes majeurs (Roser and Korsch, 1988), (c) Diagramme ternaire La-Th-Sc et d) Diagramme ternaire Th-Sc-Zr/10 (Bhatia and Crook, 1986).

Le contexte de rift en marge passive déduit est cohérent avec l'histoire tectonique généralement acceptée du Complexe du Ntem qui serait la source probable de nos dépôts étudiés. Il est généralement documenté que le Complexe du Ntem a subi un rift pré-éburnéen ancien de plus de 2500 Ma, suivi de l'ouverture du Nyong et de nombreux autres anciens bassins intracontinentaux africains (Ogoue, Ayina, Ikoke-Waka and Franceville basins) entre 2515-2435 Ma, suggérant que les sédiments ultérieurs se sont déposés dans un environnement de marge passive sur la bordure nord du Complexe du Ntem (Vicat et Pouclet, 1995; Vicat et al., 1996 ; Feybesse et al., 1998 et Pouclet et al., 2007). Le métamorphisme de ces dépôts a conduit à la formation d'une séquence de roches supracrustales (métagraywakes, BIF, paragneiss à sillimanite et amphibolites). Cette séquence supracrustale se présente sous forme de ceintures orogéniques déformées pouvant atteindre plusieurs kilomètres de longueur et sous forme de xénolite dans TTG (Shang et al., 2004; 2007).



**Figure 51.** Diagrammes de discrimination tectonique des sédiments du cours d'eau Lobé. (a) Eléments majeurs (M) et (b) Eléments majeurs et traces (MT) basés sur les diagrammes de fonction discriminantes des marges actives (AM) et des marges passives (PM) (Verma and Armstrong-Altrin, 2016). L'inscription m1 dans DF1 et DF2 représente un diagramme de teneurs élevées en silice basé sur les rapports logarithmiques des éléments majeurs. Les équations de fonctions discriminantes sont : DF1 (Arc-Rift-Col)m1 = (- 0,263 x ln(TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>)adj) + (0,604 x ln(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>)adj) + (- 1,725 x ln(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>t/SiO<sub>2</sub>)adj) + (0,660 x ln(MnO/SiO<sub>2</sub>)adj) + (2,191 x ln(MgO/SiO<sub>2</sub>)adj) + (0,144 x ln(CaO/SiO<sub>2</sub>)adj) + (- 1,304 x ln(Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub>)adj) + (0,054 x ln(K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub>)adj) + (- 0,330 x ln(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>)adj) + 1,588. DF2 (Arc-Rift-Col)m1 = (- 1,196 x ln(TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>)adj) + (1,604 x ln(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>)adj) + (- 0,303 x ln(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>t/SiO<sub>2</sub>)adj) + (0,436 x ln(MnO/SiO<sub>2</sub>)adj) + (0,838 x ln(MgO/SiO<sub>2</sub>)adj) + (- 0,407 x ln(CaO/SiO<sub>2</sub>)adj) + ( 1,021 x ln(Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub>)adj) + (- 1,706 x ln(K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub>)adj) + (- 0,126 x ln(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>)adj) - 1,068. La fonction DF<sub>(A-P)M</sub> est calculée de l'équation : DF<sub>(A-P)M</sub> = (3,0005 x ilr<sub>1TiM</sub>) + (-2,8243 x ilr<sub>2AlM</sub>) + (-1,0596 x ilr<sub>3FeM</sub>) + (-0,7056 x ilr<sub>4MnM</sub>) + (-0,3044 x ilr<sub>5MgM</sub>) + (0,6277 x ilr<sub>6CaM</sub>) + (-1,1838 x ilr<sub>7NaM</sub>) + (1,5915 x ilr<sub>8KM</sub>) + (0,1526 x ilr<sub>9PM</sub>) - 5,9948. La fonction DF<sub>(A-P)MT</sub> est calculée de l'équation : DF<sub>(A-P)MT</sub> = (3,2683 x ilr<sub>1TiMT</sub>) + (5,3873 x ilr<sub>2AlMT</sub>) + (1,5546 x ilr<sub>3FeMT</sub>) + (3,2166 x ilr<sub>4MnMT</sub>) + (4,7542 x ilr<sub>5MgMT</sub>) + (2,0390 x ilr<sub>6CaMT</sub>) + (4,0490 x ilr<sub>7NaMT</sub>) + (3,1505 x ilr<sub>8KMT</sub>) + (2,3688 x ilr<sub>9PMT</sub>) + (2,8354 x ilr<sub>10CrMT</sub>) + (0,9011 x ilr<sub>11NbMT</sub>) + (1,9128 x ilr<sub>12NiMT</sub>) + (2,9094 x ilr<sub>13VMT</sub>) + (4,1507 x ilr<sub>14YMT</sub>) + (3,4871 x ilr<sub>15ZrMT</sub>) - 3,2088.

Les schémas d'interprétation ci-dessus mettent en évidence l'importance des sédiments de cours d'eau étudiés dans le décryptage du cadre tectonique et de l'histoire du Complexe du Ntem, faisant office de roche mère, car cette histoire est complexe et encore mal connue. D'après les résultats obtenus, il apparaît que la déformation et le métamorphisme poussés des roches mères envisagées, n'ont pas totalement effacé les enregistrements géochimiques des événements tectoniques très anciens vécus par le Complexe du Ntem (Vicat et Pouclet, 1995 ; Vicat et al., 1996).

## **V.6. Paléoclimat et conditions redox**

Les indices d'altération tels que CIA, PIA, les éléments traces tels que Sr, Ba, Cu et Rb, et leur ratio sont considérés comme des outils fiables pour traiter le paléoenvironnement des sédiments (Cao et al., 2012). Le degré d'altération chimique est principalement fonction du climat, en effet des précipitations plus élevées correspondent à une perte accrue de minéraux labiles et à des teneurs élevées de CIA (White et Blum, 1995). De plus, le taux d'altération augmente avec des températures plus élevées (Meunier et al., 2013). Les valeurs élevées de CIA (84.04 en amont et 86.16 en aval) et PIA (92.54 en amont et 92.49 en aval) des sédiments du cours d'eau Lobé indiquent des conditions paléoclimatiques chaudes.

La distribution granulométrique des sédiments peut également être utilisée pour déduire le cadre de dépôt (Zilifi et Eagle, 2000 ; Gong et al., 2017) ; des tailles de grains plus grandes sont généralement interprétées comme indiquant des périodes de climat plus chaud et plus sec, tandis que des tailles de grains plus petites indiquent généralement des périodes plus fraîches et plus humides. La classe texturale sablo-limoneuse pour la plupart de ces échantillons suggère un environnement de dépôt chaud et sec.

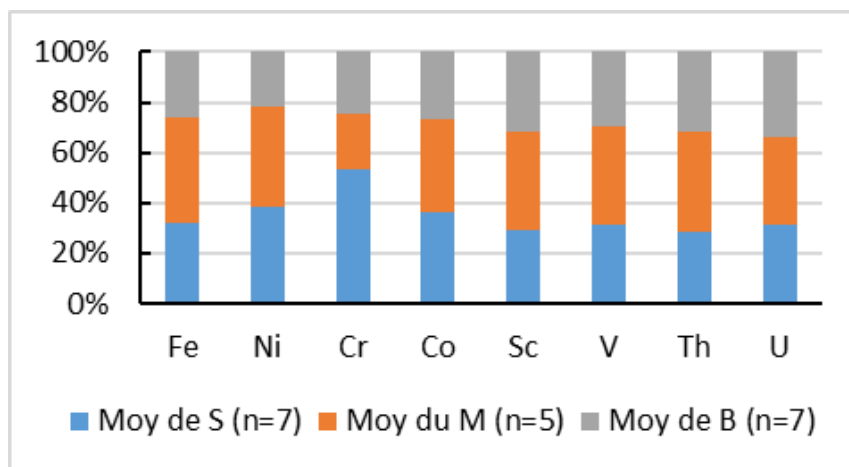
Plusieurs auteurs ont longtemps considéré la valeur de l'anomalie Ce ( $Ce/Ce^*$ ) et les rapports des éléments traces tels que U/Th et V/Cr dans les sédiments clastiques comme un indice pour expliquer la condition redox d'un environnement de dépôt (Christopher et Elderfield, 1990 ; Nath et al., 1997 ; Cao et al., 2012 ; Madhavaraju et al., 2016).  $Ce/Ce^* > 0,1$  est lié à un environnement oxydant alors que la valeur de ce rapport  $< 0,1$  suggère des conditions de réduction (Birgel et al., 2011 ; Nagarajan et al., 2011). L'anomalie en Ce (0,95 en amont et 1.08 en aval) reflète des conditions de dépôt oxygénés pour les sédiments du cours d'eau Lobé (Tab. X). Jones et Manning (1994) expliquent que des valeurs élevées ( $>1,25$ ) du rapport U/Th indiquent un environnement anoxique tandis que des valeurs faibles ( $<0,75$ ) sont

caractéristiques des conditions oxiques lors du dépôt des particules; Le rapport  $V/Cr < 2$  représente des conditions de dépôt oxique, tandis que les valeurs de ce rapport  $> 4,5$  indiquent une condition réductrice du milieu. Les rapports  $V/Cr$  (0,2 en amont et aval) et  $U/Th$  (0,2 en amont et aval) pour ces sédiments donnent les mêmes informations que l'anomalie Ce, notamment un environnement de dépôt oxique (Tab. XI).

## V.7. Statut environnemental

### V.7.1. Contribution des éléments au statut environnemental

Les concentrations moyennes des métaux lourds et radionucléides étudiés dans les sédiments du cours d'eau Lobé sont à peu près répartis de la même manière dans les trois niveaux (Fig. 52). Il ressort que la teneur en Cr (714,29 mg/kg) en surface contribue de moitié à la distribution de cet élément dans cette zone. En surface, Cr et Ni enregistrent les concentrations les plus élevées. Parmi tous les éléments, Cr, Th et U enregistrent leurs valeurs les plus élevées dans la couche du milieu (Tableau XIII ; Fig. 51). La tendance (milieu > surface > fond) des profils verticaux des différents éléments a également été observée dans les carottes de sédiments de la zone de démolition des navires du Bangladesh (Hossain et al. 2021). Nawrot et al. (2019) ont suggéré qu'une teneur plus élevée en métaux lourds dans la couche du milieu indique un dépôt historique de ces métaux dans les carottes de sédiments.



**Figure 52.** Contribution fractionnelle de chaque élément à leur répartition totale (S: surface. M: milieu and B: base).

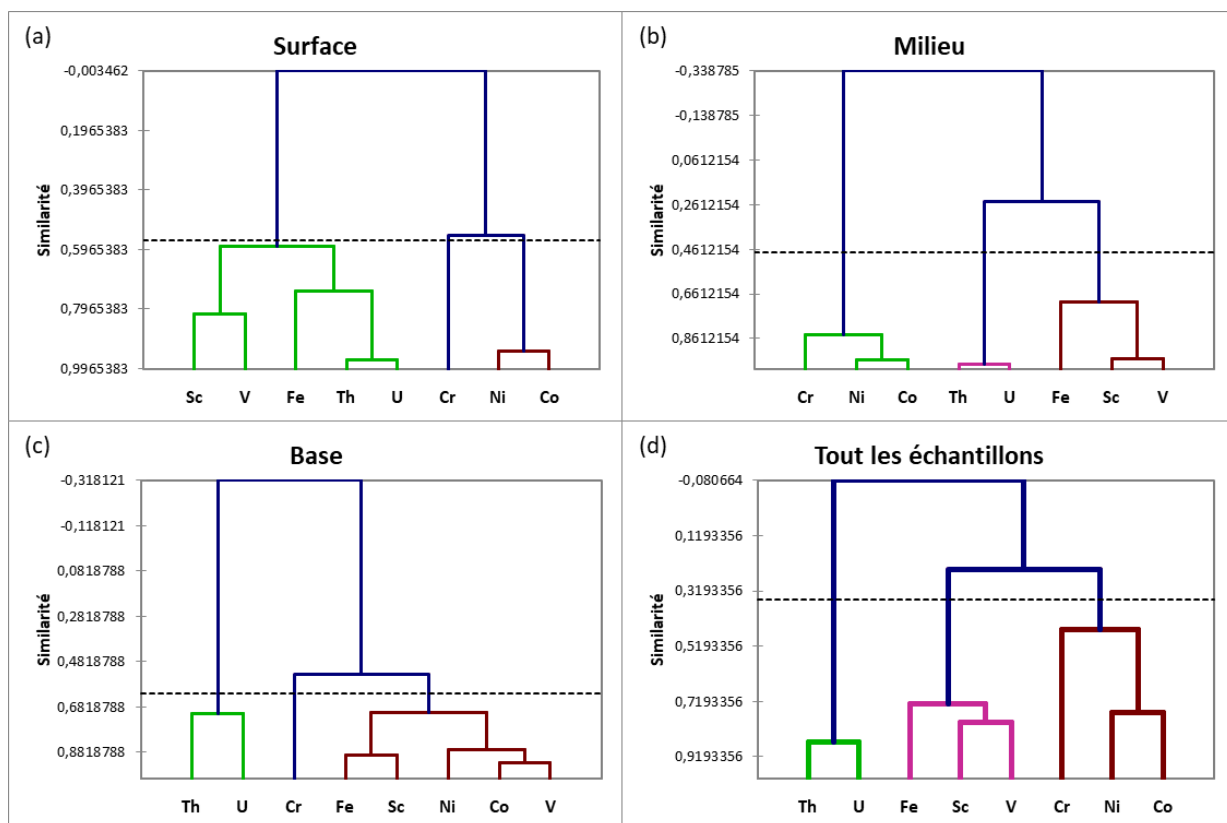
### V.7.2. Sources de polluants

Dans la présente étude, une classification hiérarchique et une analyse des composantes principales de chaque niveau (surface, milieu et base) ont été utilisés pour identifier les relations entre les variables (concentration en éléments sélectionnés, paramètres granulométriques et matière organique), qui permettraient déterminer la source de pollution des sédiments du cours d'eau Lobé.

La classification hiérarchique est une technique d'analyse utilisée pour fournir des informations importantes sur le regroupement des variables basé sur la similitude. La figure 53 représente les dendrogrammes des métaux lourds et radionucléides de ces sédiments, regroupés en trois groupes statistiquement significatifs pour toutes les couches.

Dans les sédiments de surface (Fig. 53a), le premier groupe comprend Sc, V, Fe, Th et U ; Cr est le seul élément du deuxième groupe tandis que Ni et Co représentent le troisième groupe. Le premier groupe du niveau du milieu comprend Cr, Ni et Co; les radionucléides (Th et U) forment le deuxième groupe et le troisième intègre Fe, Sc et V (Fig. 53b). La couche de base regroupe les radionucléides dans le premier groupe, seulement Cr dans le second comme en surface, et le reste (Fe, Sc, Ni, Co et V) dans le troisième groupe (Fig. 53c). En raison de certaines différences obtenues dans chaque niveau, un dendrogramme de tous les échantillons a été réalisé (Fig. 53d) et il est à noter que les radionucléides (Th et U) forment effectivement un groupe, le premier. Le second quant à lui prend en compte Fe, Sc et V tandis que Cr, Ni et Co représentent le troisième. Ce regroupement a révélé que des éléments appartenant au même groupe auraient une source similaire.

Pour soutenir les associations obtenues à partir de la classification hiérarchique, une analyse des composantes principales (ACP) a été réalisée avec les éléments chimiques, les paramètres granulométriques et la matière organique. Dans l'analyse, les trois premières composantes principales représentaient près 73 % de la variance totale, et les variances de F1, F2 et F3 sont respectivement de 40.08, 20.92 et 12 % (Tab. XVI).



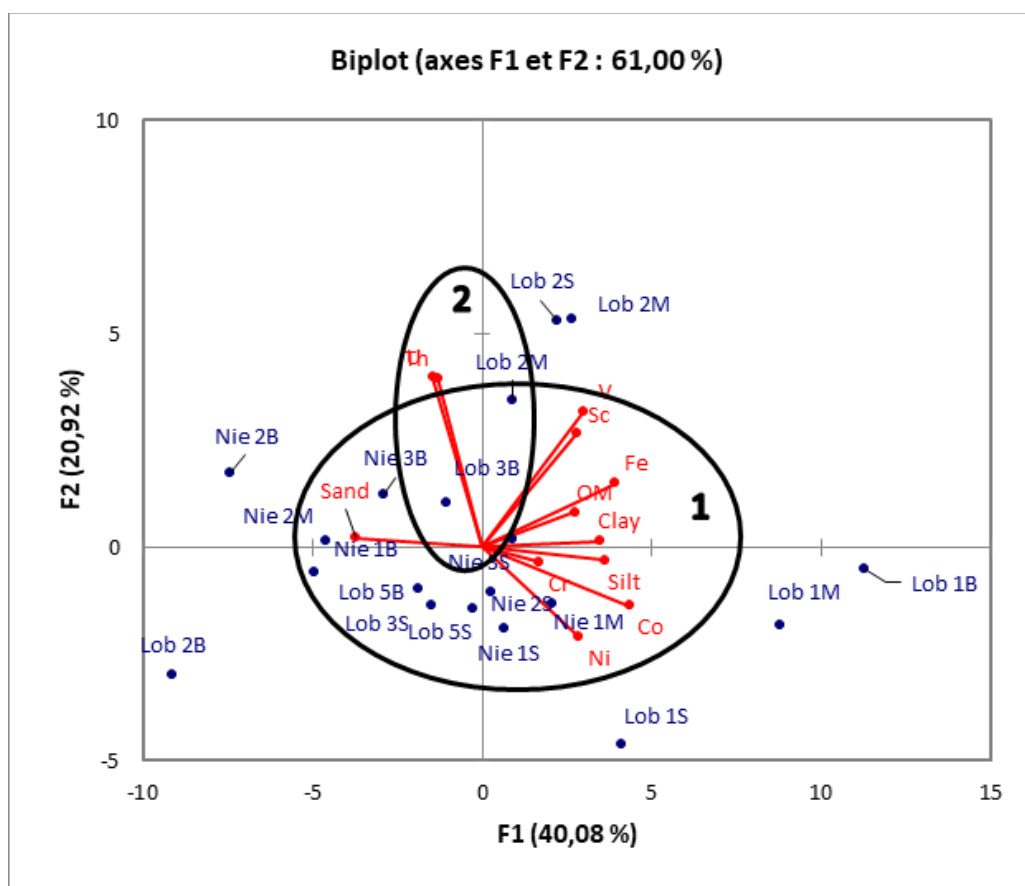
**Figure 53.** Dendrogrammes de la classification hiérarchique des éléments chimiques sélectionnés du cours d'eau Lobé.

Deux groupes principaux se distinguent : le premier, intégrant la composante F1 et F3 et le second, représenté par la composante F2 (Tab. XVI). Le premier groupe comprend les métaux lourds (Fe, Ni, Cr, Co, Sc et V), les paramètres granulométriques (sable, limon et argile) et la matière organique. Nous avons noté qu'à l'exception du sable qui est négativement corrélé, les autres sont positivement corrélés à ce groupe (Tab. XVI ; Fig. 54). En accord avec la classification hiérarchique, ce groupe intègre le deuxième (Fe Sc et V) et le troisième (Cr, Ni et Co), matérialisés par la figure 53d. Wang et al. (2008) en Chine, dans les sédiments de l'estuaire de la rivière des Pearl, a expliqué que Cr, Ni et Co proviennent des matières détritiques terrigènes emportées par le ruissellement, et des caractéristiques lithologiques de la zone de drainage. Cette observation suggère que ce groupe pourrait être identifié comme « facteur anthropique » tandis que le second, composé des radionucléides (comme matérialisé par le premier groupe de cette figure 53d), pourrait être identifié comme « facteur naturel ». Comme observé dans le tableau XVI, Sc et V pourraient également être attribués au deuxième groupe.

Pour résumer, les éléments étudiés (Fe, Ni, Cr, Co, Sc, V, Th et U) auraient deux (2) sources dont une « anthropique » et une « naturelle ». La source anthropique serait responsable de l'enrichissement du milieu en Fe, Ni, Cr, Co, Sc et V, tandis que les radionucléides (Th et U) auraient une source naturelle.

**Tableau XVI.** Corrélation entre les variables (éléments chimiques sélectionnés, paramètres granulométriques et matière organique) et les facteurs principaux.

	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U	Sable	Limon	Argile	MO
F1 (40.08 %)	<b>0,81</b>	<b>0,59</b>	0,34	<b>0,90</b>	<b>0,58</b>	<b>0,62</b>	-0,27	-0,30	<b>-0,77</b>	<b>0,75</b>	<b>0,72</b>	<b>0,56</b>
F2 (20.92 %)	0,31	-0,44	-0,07	-0,28	<b>0,55</b>	<b>0,66</b>	<b>0,82</b>	<b>0,83</b>	0,04	-0,06	0,03	0,17
F3 (12 %)	0,12	0,47	<b>0,77</b>	0,18	-0,09	0,01	0,18	0,14	0,49	-0,51	0,14	-0,04



**Figure 54.** Schéma de l'analyse des composantes principales des variables étudiées (éléments chimiques sélectionnés, paramètres granulométriques et matière organique) des sédiments du cours d'eau Lobé.

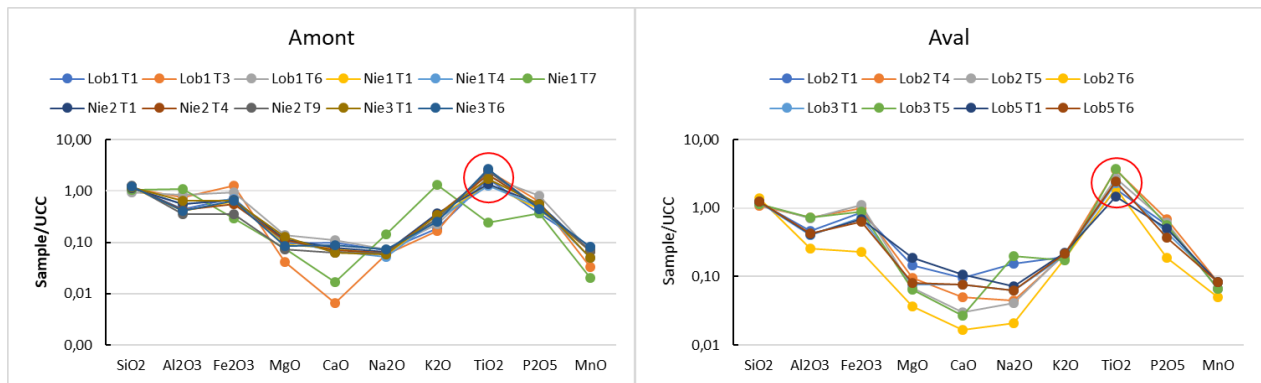


## **V.8. Aspect économique : exploration des minéraux lourds et terres rares**

L'Afrique est un continent riche en divers gisements de minéraux. Les découvertes continues des gisements de ces minéraux ont fait du continent une ruche d'activité avec des sociétés minières multinationales. L'extraction des minéraux lourds est l'une des nombreuses activités d'exploration entreprises sur le continent. Les minéraux lourds ont des applications économiques remarquables. Les sables de minéraux lourds sont une accumulation de minéraux précieux normalement appelés dépôts de placers, formés par séparation gravitaire au cours des processus sédimentaires. Ces sables sont une source importante de titane, d'éléments de terres rares, de thorium, de zirconium, de tungstène et de minéraux industriels tels le diamant, le saphir, le grenat et parfois des pierres précieuses (Arndt et al., 2015).

Les 75 % du titane mondial sont produits à partir des sables de minéraux lourds. Divers pays africains possèdent d'énormes gisements de ce minéral, l'Afrique du Sud étant le deuxième plus grand producteur de titane et de zircon au monde après l'Australie. Même si la résistance et l'inertie chimique du titane lui permettent d'être utilisé dans diverses industries, plus de 95 % de l'approvisionnement total en titane est destiné à la production de pigment. En médecine, l'adhérence spontanée du titane à l'os est un atout privilégié pour la réalisation des prothèses. Le titane est également utilisé dans l'industrie aérospatiale et automobile pour la production des pièces légères et résistantes à la corrosion et par conséquent à leur durée dans le temps. Pour l'industrie militaire il est utile pour le blindage, du fait de ses propriétés mécaniques résistantes au feu et à la corrosion.

La normalisation des éléments majeurs par rapport à l'UCC des alluvions du cours d'eau Lobé montre un enrichissement notable en  $TiO_2$ , indiquant la présence du rutile ou de l'anatase comme mentionné par les résultats minéralogiques (Fig. 55). Dans le Sud Cameroun, les études liées au rutile se sont beaucoup plus concentrées sur leur relation avec l'orogénèse panafricaine (Nzenti et al., 1988 ; Tchakounté et al., 2017 ; Ngo Bidjeck Bondje et al., 2020). Cependant, leur aspect économique n'a pas été véritablement documenté. Des investigations plus approfondies pourraient mieux renseigner sur l'origine et les proportions du rutile alluvionnaire.



**Figure 55.** Spectres des éléments majeurs des sédiments du cours d'eau Lobé normalisés par rapport à l'UCC (Taylor et McLennan, 1985).

Le zircon est utilisé dans les écrans de télévision en raison de sa capacité à absorber les rayons X. Sa dureté, son point de fusion élevé et son faible coefficient de dilatation à la chaleur lui permettent d'être utilisé dans le sable de fonderie et comme abrasif. Il est également utilisé comme source de zirconium pour l'industrie chimique dans les adhésifs, les antitranspirants, les catalyseurs, les polymères acqueux, le durcissement à la gélatine et les colorants. Le zircon est utilisé principalement dans l'industrie de la céramique pour émailler les finitions de carreaux, de la vaisselle et des articles de bain pour leur durabilité et leur résistance à la décoloration.

En tant que métal, le zirconium est assez mou, malléable et facile à travailler. Sa haute densité et son point de fusion le rendent approprié pour être utilisé dans les supraconducteurs modernes. L'oxyde est également utilisé dans les piles à combustibles, les transducteurs d'équipements audio et les capteurs d'oxygène. Dans l'industrie de revêtement de papier, le Zr-carbonate agit comme un insolubilisant, tandis que dans les textiles, l'hexafluorozirconate de potassium agit comme un retardateur de flamme.

Les spectres de normalisation des éléments traces par rapport à l'UCC des alluvions du cours d'eau Lobé ont montré un enrichissement notable en Zr (Fig. 29). Les proportions de zircon dans cette zone ne sont pas négligeables mais un enrichissement mécanique artificiel pourrait rendre ces teneurs intéressantes.

Pour résumer, les sédiments du cours d'eau Lobé, classés comme sables ferreux et litharenite sont matures et ont été recyclés et triés. Ayant subi une altération intense, les roches mères semblent être dérivés de divers types de roches, dont principalement les roches felsiques et dans une moindre mesure les roches mafiques/ultramafiques et des détritiques recyclés. Les

suites TTG, formées en contexte tectonique de rift en marge passive seraient les roches sources de ces sédiments qui se seraient déposés dans un environnement oxique, chaud et sec. Les sources de polluants pour ces sédiments seraient naturelles pour les radionucléides (Th et U) et anthropiques pour les métaux lourds (Fe, Sc, V, Cr, Ni et Co). Les teneurs remarquables du  $\text{TiO}_2$  et du Zr dans ces alluvions ne sont pas à négliger.

## **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

Cette étude, basée sur la caractérisation pétrographique et géochimique des sédiments du cours d'eau Lobé, appartenant au domaine Atlantique équatorial de l'Afrique centrale, a permis d'apporter des informations sur la nature et l'histoire tectonique du substratum de ces sédiments et de déterminer au travers de leur statut environnemental, l'impact des activités anthropiques dans ce milieu.

Les sédiments du cours d'eau Lobé sont constitués de sables, limons et argiles de couleur gris marron à blanchâtre. Les sables majoritairement représentés confèrent une texture sableuse à sablo-limoneuse à ces sédiments où les niveaux sableux enregistrent de faibles valeurs de teneurs en eau. Les concentrations en matière organique enregistrées sont faibles. Ces sédiments sont des sables ferreux et litharenites modérément à bien triés, composés de quartz comme phase majeure. Les feldspaths, le rutile, la gibbsite, la kaolinite, l'hématite, l'illite, les interstratifiés, le disthène, la zoïsite, le grenat, la tourmaline, le chloritoïde, le diopside, l'anatase, la sillimanite, l'augite, la staurotide, le zircon, l'actinote, la hornblende et les oxydes opaques ont également été identifiés.

La richesse de ces sédiments en quartz justifie les teneurs élevées en  $\text{SiO}_2$  enregistrées. Les teneurs relativement faibles en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  indiquent que la teneur en minéraux argileux est faible dans ces sédiments. La présence d'anatase et de rutile dénote des teneurs élevées en  $\text{TiO}_2$  enregistrées. Les valeurs modérées en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  enregistrées sont dues à la présence des minéraux ferri-fères (hématite). Les faibles valeurs de  $\text{Na}_2\text{O}$  et de  $\text{K}_2\text{O}$  enregistrées sont liées aux faibles teneurs en feldspaths dans le milieu. De plus, les teneurs en  $\text{Na}_2\text{O}$ , inférieures à  $\text{K}_2\text{O}$ , reflètent l'abondance relative des feldspaths potassiques dans la zone source. Ces sédiments enregistrent des valeurs importantes en Ni, Cr, Hf, Th et Zr. Un enrichissement des terres légères par rapport au terres rares lourdes observé, avec la présence d'une anomalie négative en Eu, suggère une altération chimique intense comme révélés par les indices d'altération chimique.

Ces sédiments matures sont dérivés de divers types de roches, dont principalement les roches felsiques, avec une contribution négligeable des roches mafiques/ultramafiques et des détritiques recyclés. Les suites TTG et des restes dérivés de la ceinture de roches vertes archéennes, formées en contexte tectonique de rift en marge passive seraient les roches sources de ces sédiments qui se seraient déposés dans un environnement oxique, de climat chaud et sec. Ces résultats sont cohérents avec la géologie régionale du bassin versant du cours d'eau Lobé, qui est celle de l'histoire tectonique du Complexe du Ntem, qui aurait subi un rifting pré-éburnéen suivi de l'ouverture du bassin intracontinental du Nyong, et qui a évolué dans un contexte

d'environnement de marge passive à la lisière nord du craton du Congo. En outre, ils suggèrent également que, malgré l'altération intense des roches sources, les processus de dépôt et les effets diagénétiques, la géochimie de ces alluvions étudiées est principalement contrôlée par la composition de la roche mère.

La distribution des métaux lourds et radionucléides de ces sédiments présentent des concentrations élevées en Cr, Ni et Th, leur conférant un statut modérément à sévèrement pollué en ces éléments, dans toutes les couches (surface, milieu et base). La distribution verticale suggère que la concentration maximale de la plupart des éléments étudiés a été enregistrée dans la couche du milieu, respectivement suivie de celles de surface et de base. En raison des activités humaines telles que les déchets ménagers, l'agriculture et le résultat de transformations des produits d'industries, ces sédiments sont « pollués » pour les couches du milieu et de surface et « non pollués » pour de celle de la base, dénotant ainsi de l'action négative de l'homme dans ce milieu avec le temps. Les métaux lourds ont une source commune, qui serait « anthropique » tandis que la source des radionucléides serait « naturelle ».

Pour des travaux ultérieurs, il faudrait dans un premier temps, étendre cette étude à plusieurs bassins versants environnants, soit pour soutenir les résultats obtenus, ou alors souligner les potentielles différences permettant de mieux documenter la géologie locale. Par la suite, compte tenu de l'activité agricole intensive se pratiquant dans cette zone, une étude de pollution par les composés organochlorés pourrait être envisagée afin d'évaluer leur impact sur les différents composants de cette écosystème.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- Ahamad, M.I., Song, J., Sun, H., Wang, X., Mehmood, M.S., Sajid, M., Su, P., Khan, A.J., 2020.** Contamination Level, Ecological Risk, and Source Identification of Heavy Metals in the Hyporheic Zone of the Weihe River, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (3), 1070.
- Al-Hadithy, O.N., Youssef, A.M., Hassanein, R.A., El-Amier, Y.A., 2018.** Vegetation composition related to environmental factors along the international highway-West Alexandria, Egypt. *Annual Research Review of Biology*, 1–15.
- Ammon, C.J., 1997.** Earth, Our Environment, in the Cornerstones of Geology: Rocks.
- Amoros, C., Petts, G.E., 1993.** Bases conceptuelles In. Amoros C. et Petts G.E. (eds), *Hydrosystèmes fluviaux*, Paris, Masson, coll. *Ecologie*, 24, 3-17.
- Anaya-Gregorio, A., Armstrong-Altrin, J.S., Machain-Castillo, M.L., Montiel-García, P.C., Ramos-Vázquez, M.A., 2018.** Textural and geochemical characteristics of late Pleistocene to Holocene fine-grained deep-sea sediment cores (GM6 and GM7), recovered from southwestern Gulf of Mexico. *Journal of Palaeogeography*, 7 (3), 253–271.
- Arhin, E., Nude, P.M., 2009.** Overbank sediments as appropriate geochemical sample media in regional stream sediment surveys for gold exploration in the savannah regions of northern Ghana. *Journal of Geochemistry and Exploration*, 103, 50–56.
- Armstrong-Altrin, J.S., Botello, A.V., Villanueva S.F., Soto, L.A., 2019.** Geochemistry of surface sediments from the northwestern Gulf of Mexico: implications for provenance and heavy metal contamination. *Geological Quarterly*, 63 (3), 522–538.
- Armstrong-Altrin, J.S., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J., Carranza-Edwards, A., Garcia, D., Eby, N., Balaram, V., Cruz-Ortiz, N.I., 2012.** Geochemistry of beach sands along the western Gulf of Mexico, Mexico: implication for provenance. *Chemie der Erde Geochemistry*, 72, 345–362.
- Armstrong-Altrin, J.S., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J., Trejo-Ramírez, E., 2017.** Mineralogy and geochemistry of sands along the Manzanillo and El Carrizal beach areas, southern Mexico: implications for palaeoweathering, provenance, and tectonic setting. *Geological Journal*, 52 (4), 559–582.



- Armstrong-Altrin, J.S., Machain-Castillo, M.L., 2016.** Mineralogy, geochemistry, and radiocarbon ages of deep sea sediments from the Gulf of Mexico, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 71, 182–200.
- Armstrong-Altrin, J.S., Ramos-Vázquez, M.A., Hermenegildo-Ruiz, N.Y., Madhavaraju J., 2020.** Microtexture and U-Pb geochronology of detrital zircon grains in the Chachalacas beach, Veracruz State, Gulf of Mexico. *Geological Journal*, 1–21. <https://doi.org/10.1002/gj.3984>.
- Armstrong-Altrin, J.S., Ramos-Vázquez, M.A., Zavala-Léon, A.C., Montiel-García, P.C., 2018.** Provenance discrimination between Atasta and Alvarado beach sands, western Gulf of Mexico, Mexico: constraints from detrital zircon chemistry and U-Pb geochronology. *Geological Journal*, 53 (6), 2824–2848.
- Arndt, N. T., Ganino, C., Kesler, S., 2015.** Ressources minérales ; origine, nature et exploitation. Dunod, Paris, 2. ISBN 978-2-10-072049-1.
- Bagnouls, F., Gaussen, H., 1957.** Biological climates and their classification. *American Geography*. XXVI, 193-220.
- Bartoli, G., Papa, S., Sagnella, E., Fioretto, A., 2012.** Heavy metal content in sediments along the Calore River: Relationships with physical-chemical characteristics. *Journal of Environment and Management*, 95, S9–S14.
- Bassanak Ongboye, P.R., Sababa, E., Bidzang, F.D., Ndjigui, P.-D., 2019.** Geochemical characterization of surface sediments from Tongo Gandima (Eastern Cameroon): implications for gold exploration. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 598.
- Bernard, F., 1992.** Part des transformations naturelles et provoquées dans la nappe de la craie du nord de la France (Diplôme d'études approfondies de génie civil), USTL, 11 p.
- Bessoles, B., Trompette, R., 1980.** Géologie de l'Afrique, La Chaîne Pan-Africaine : Zone mobile d'Afrique centrale, partie Sud, et zone mobile soudanaise. *Bureau de Recherche Géologique et Minière*, 92, 1-397.
- Bhatia, M.R., 1983.** Plate tectonics and geochemical composition of sandstone. *The Journal of Geology*, 91, 611-627.

- Bhatia, M.R., Crook, K.A., 1986.** Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92, 181-193.
- Binam Mandeng, E.P., Bidjeck, L.M.B., Ekoa Bessa, A.Z., Ntomb, Y.D., Wadjou, J.W., Doumo E.P.E., Dieudonné, L.B., 2019.** Contamination and risk assessment of heavy metals, and uranium of sediments in two watersheds in Abiete-Toko gold district, Southern Cameroon. *Heliyon*, 5 (10)-02591.
- Birgel, D., Fend, D., Roberts, H.H., Peckmann, J., 2011.** Changing redox conditions at cold seeps as revealed by authigenic carbonates from Alaminos Canyon, northern Gulf of Mexico. *Chemical Geology*, 285 (1-4), 82-96.
- Blott, S.J., Pye, K., 2001.** Gradistat: a grain size distribution and statistic package for the analysis of uncololidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1237-1248.
- Bouyo Houketchang, M., Penaye, J., Barbey, P., Toteu, S.F., Wandji, P., 2013.** Petrology of high-pressure granulite facies metapelites and metabasites from Tcholliré and Banyo regions: Geodynamic implication for the central African fold belt (CAFB) of north-central Cameroon. *Precambrian Research*, 224, 412-433.
- Bouyo Houketchang, M., Toteu, S.F., Deloule, E., Penaye, J., Van Schmus, R.W., 2009.** U-Pb and Sm-Nd dating of high-pressure granulite from Tcholliré and Banyo regions: evidence for Pan-African granulite facies metamorphism in north-central Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 54, 144-154.
- Bracciali, L., Marroni, M., Pandolfi, L., Rocchi, S., 2007.** Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): from source area to configuration of margins, 420. *Geological Society of America Special Paper*, pp. 73–93.
- Burnham, O.M., Schweyer, J., 2004.** Trace element analysis of geological samples by ICP–MS at the Geoscience Laboratories: Revised capabilities due to improvements to instrumentation. *Summary of field work and other activities*, 54-71.
- Cadaxo Sobrinho, E.S.C., Ribeiro, J., Neto, C., H. Sant’Ovaia, H., Rocha, F., Flores, D., Garção de Carvalho, C.E., 2014.** Mineralogy and geochemistry of sediments from São

- Francisco stream (Amazonian River Basin, Brazil). *Comunicações Geológicas* 101, Especial I, 57-60.
- Cahen, L., Delhal, H., Lavreau, J., 1976.** The Archaean of equatorial Africa: a review. In: Windley, B.F. (Ed.), *the early History of the Earth*. Wiley, New York, pp. 486–498.
- Cao, J., Wu, M., Chan, Y., Hu, K., Bian, L., Zhang, Y., 2012.** Trace and rare earth element geochemistry of Jurassic mudstones in the northern Qaidam Basin, northwest China. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 72, 245–252.
- Carranza-Edwards, A., Centeno-García, L., Rosales-Hoz, L., Lozano-Santa, Cruz R., 2001.** Provenance of beach gray sands from western Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 14, 291–301.
- Carranza-Edwards, A., Kasper-Zubillaga, J.J., Martínez-Serrano, R.G., Cabrera-Ramírez, M., Rosales-Hoz, L., Mendieta, M.A.A., M´arquez-García, A.Z., Santa-Cruz, R.L., 2019.** Provenance inferred through modern beach sands from the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Geological Journal*, 54, 552–563.
- Chairman, B.R., 1991.** Construction techniques for sediment pollution control, Epa Victoria.
- Chamley, H. 2000.** Bases de sédimentologie (2<sup>ème</sup> Edition). Ed. Dunod, Paris, pp. 178 CNR. (2005). Analyse de l’impact des dragages du Rhône au regard de la qualité physico - chimique des sédiments. Rapport Technique, CNR, 102 p.
- Champetier de Ribes, 1956.** Notice explicative sur la feuille Yaoundé-Est. Direction des Mines et Géologie, Cameroun, Yaoundé, 35 p.
- Chau, Y.K., Kulikovskiy-Cordeiro, O.T.R., 1995.** Occurrence of nickel in the Canadian environment. *Environmental Reviews*, 3, 95–120.
- Chen, N., Chen, L., Ma, Y., Chen A., 2019.** Regional disaster risk assessment of China based on self-organizing map: clustering, visualization and ranking. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 33, 196–206.
- Christopher, R.G., Elderfield, H. 1990.** Application of the Ce anomaly as a paleoredox indicator: the ground rules. *Paleoceanography*, 5, 823–833.
- Clapcott, J.E., Young, R.G., Harding, J.S., Matthaei, C.D., Quinn, J.M., Death R.G., 2011.** *Sediment Assessment Methods: Protocols and guidelines for assessing the effects*

- of deposited fine sediment on in-stream values. Cawthron Institute, Nelson, New Zealand, 108 p.
- Clifford, T.N., Gass, I.G., 1970.** African Magmatism and Tectonics. Olivier and Boyd, Edinburgh, 461 p.
- Couvert, B. S., 1999.** Guide méthodologique du transport solide et des atterrissements. Agences de l'Eau, 97 p.
- Cox, R., Low, D.R., Culler R.L., 1995.** The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimimica and Cosmochimica Acta*, 59, 219–2940.
- Cullers, R.L., 1994.** The chemical signature of source rocks in size fractions of Holocene stream sediment derived from metamorphic rocks in the Wet Mountains region, Colorado, USA. *Chemical Geology*, 113, 327–343.
- Cullers, R.L., 2000.** The geochemistry of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: implications for provenance and metamorphic studies. *Lithos*, 51, 181–203.
- Cullers, R.L., 2002.** Implications of elemental of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chemical Geology*, 191, 305–327.
- Cullers, R.L., Barrett, T., Carlson, R., Robinson, B., 1987.** Rare earth element and mineralogic changes in Holocene soil and stream sediment: a case study in the Wet Mountains, Colorado. U.S.A. *Chemical Geology*, 63, 275–297.
- Cullers, R.L., Bock, B., Guidotti, C., 1997.** Elemental distributions and neodymium isotopic compositions of Silurian metasediments. *Geochimimica et Cosmochimica Acta*, 61, 1847–1861.
- Degoutte, G., 2002.** *Hydraulique fluviale, chapitre 2 : Transport solide en hydraulique fluviale*, 53 p.
- Dikoume, C., 1970.** Etude concrète d'une population traditionnelle. Doctorat en sociologie. Université des sciences et techniques, Lille, 290 p.

- Dinis, P., Oliveira, A., 2016.** Provenance of Pliocene clay deposits from the Iberian Atlantic Margin and compositional changes during recycling. *Sedimentary Geology*, 336, 171-182.
- Domingo, J.L., 2001.** Reproductive and developmental toxicity of natural and depleted uranium: a review. *Reproductive Toxicology*, 15, 603–609.
- Dounias, E., 1993.** Dynamiques et gestion différentielles du système de production à dominante agricole de Mvae du Sud Cameroun forestier, Montpellier, Université de sciences et Techniques du Languedoc, Thèse de Doctorat, 2, 644 p.
- Duplaix, S., 1958.** Détermination microscopique des minéraux des sables, 2e édition révisée, Librairie polytechnique ch. Béranger, Paris et Liège, 96 p.
- Edwards, R.W. H., Rolley, L. J., 1965.** Oxygen Consumption of River Muds. *The Journal of Ecology*, 53, 1965.
- Ekou Bessa, A.Z., El-Amier, Y.A., Doumo, E.P.E., Nguetchoua, N., 2018.** Assessment of Sediments Pollution by Trace Metals in the Moloundou Swamp, Southeast Cameroon. *Annual Research & Review in Biology*, 30, 1–13.
- Etame, J., Ngouabe, E.G.T., Ngon, G.F.N., Ntamack-Nida, M.J., Suh, C.E., Gerard, M., Bilong P., 2013.** Mineralogy and geochemistry of active stream sediments from the Kélé River drainage system (Pouma, Cameroon). *Sciences, Technology and development*, 14, 35-47.
- Etemad-Saeed, N., Hosseini-Barzi, M., Adabi, M.H., Sadeghi, A., Houshmandzadeh, A., 2015.** Provenance of Neoproterozoic sedimentary basement of northern Iran, Kahar Formation. *Journal of African Earth Sciences*, 111, 54-75.
- Farkas, A., Erratico, C., Vigano, L., 2009.** Assessment of the environmental significance of heavy metal pollution in surficial sediments of the River Po. *Chemosphere*, 68, 761-768.
- Fedo, C.M., Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1995.** Unravelling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23, 921–924.
- Feybesse, J.L., Johan, V., Triboulet, C., Guerrot, C., Mayaga-Mokolo, F., Bouchot, V., Eko N'Dong J., 1998.** The West Central African belt: a model of 2.5-2.0 Ga accretion and two-phase orogenic evolution. *Precambrian Research*, 87, 161–216.

- Feybesse, J.L., Johan, V., Triboulet, C., Guerrot, C., Mayaga-Mokolo, F., Bouchot, V., Eko N'Dong, J., 1998.** The West Central African belt: a model of 2.5-2.0 Ga accretion and two-phase orogenic evolution. *Precambrian Research*, 87, 161–216.
- Floyd, P.A., Leveridge, B.E., 1987.** Tectonic environments of the Devonian Gramscatho Basin. South Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbidite sandstones. *Journal of Geological Society of London* 144, 531–542.
- Folk, R.L., 1980.** *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing, Austin, Texas, p. 184.
- Foucault, A., Raoult, J.F., 1995.** *Dictionnaire de Géologie*, p. 316.
- Friedman, G.M., 1979.** Differences in size distributions of populations of particles among sands of various origins. *Sedimentology*, 26, 3-32.
- Garcia, D., Fontelles, M., Moutte, J., 1994.** Sedimentary fractionations between Al, Ti, and Zr, and the genesis of strongly peraluminous granites. *Journal of Geology*, 102, 411–422.
- 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 Sediment Research*, 100, 100–106.
- Garzanti, E., Ando, S., 2007.** Heavy mineral concentration in modern sands: implications for provenance interpretation. *Development of Sedimentology*, 58, 517–545.
- Garzanti, E., Andò, S., France-Lanord, C., Vezzoli, G., Censi, P., Galy, V., Najman, Y., 2010.** Mineralogical and chemical variability of fluvial sediments 1. Bedload sand (Ganga–Brahmaputra, Bangladesh). *Earth and Planetary Science Letters*, 299, 368–381.
- Garzanti, E., Vezzoli, G., Ando, S., Paparella, P., Clift, P., 2005.** Petrology of Indus river sands: a key to interpret erosion history of the western Himalayan Syntaxis. *Earth and Planet Science Letters*, 229, 287–302.
- Gong, F., Hao, T., Liu, Y., Liu, X., Zhang, D., Zhang, X., Xiang, R., Liu, Q., Li, X., 2017.** Evidence for paleoclimate changes from lignin records of sediment core A02 in the southern Yellow Sea since ~9.5 cal. kyr B.P. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology Journal*, 479, 173–184.

- Goodwin, A.M., 1991.** Precambrian Geology. The Dynamic Evolution of the Continental Crust. Academic Press, San Diego, 666 p.
- Guesdon, G., De Santiago, M.A., Galvez-Cloutier, R., 2014.** Restauration du lac La Retenue, l'Ange-Gardien, Québec Phase I : Caractérisation des sédiments et qualité de l'eau de surface Département de génie civil et de génie des eaux. Université Laval, Québec, 37 p.
- Guosheng, C. Paul White, A., 2004.** The mutagenic hazards of aquatic sediments: a review. Mutation Research/Reviews in Mutation Research, 567, 151–225.
- Hakanson, L., 1980.** An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach. Water Research, 14, 975–1001.
- Hanif, N., Eqani, S.A.M.A.S., Ali, S.M., Cincinelli, A., Ali, N., Katsoyiannis, I.A., 2016.** Geo-accumulation and enrichment of trace metals in sediments and their associated risks in the Chenab River. Pakistan Journal of Geochemistry Exploration, 165, 62–70.
- Harmsen, K., Haan, F.A.M., 1980.** Occurrence and behaviour of uranium and thorium in soil and water. Netherlands Journal of Agricultural Sciences, 28, 40–62.
- Harnois, L., 1988.** The CIW index: a new chemical index of weathering. Sedimentology Geology, 55, 319–322.
- Hayashi, K.I., Fujisawa, H., Holland, H.D., Ohmoto, H., 1997.** Geochemistry of ~ 1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. Geochemistry Cosmochimica Acta 61, 4115–4137.
- Herron, M., 1988.** Geochemical classification of terrigenous and sandshales, 10 p.
- Hiscott, R.N., 1984.** Provenance of deep-water sandstones, Tourelle Formation, Quebec, and implications for the initiation of the Taconic orogeny. Canadian Journal of Earth Sciences, 15, 1579–1597.
- Holtzapffel, T., 1985.** Les minéraux argileux, preparation, analyse diffractométrique et détermination, Société Géologique Nord, 12, 135p.
- Hossain, M.B., Runu, U.H., Sarker, M.M., Hossain, M.K., Parvin, A., 2021.** Vertical distribution and contamination assessment of heavy metals in sediment cores of ship breaking area of Bangladesh. Environmental Geochemistry Health, 43(10), 4235-4249.

- Jain, C.K., Singhal, D.C., Sharma, M.K., 2005.** Metal pollution assessment of sediment and water in the river Hindon, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 105, 193-207.
- Ji, H., Tao, H., Wang, Q., Ma, D., Hao, L., 2019.** Petrography, geochemistry, and geochronology of lower Jurassic sedimentary rocks from the northern tianshan (west bogda area), northwest China: implications for provenance and tectonic evolution. *Geological Journal*, 54, 1688–1714.
- Jiang, Y., Zhong, W., Yan W., Yan L., 2019.** Arsenic mobilization from soils in the presence of herbicides. *Journal of Environmental Sciences*, 85, 66–73.
- Jones, B., Manning, D.A.C., 1994.** Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 111, 111–129.
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H., 2001.** Trace elements in soils and plants. 3<sup>rd</sup> edition, CRC Press, Boca Raton, 403 p.
- Kaushik, A., Kansal, A., Kumari, S., Kaushik, C.P., 2009.** Heavy metal contamination of river Yamuna, Haryana, India: assessment by metal enrichment factor of the sediments. *Journal of Hazard and Material*, 164, 265–270.
- Ke, X., Gui, S., Huang, H., Zhang, H., Wang, C., Guo, W., 2017.** Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China. *Chemosphere*, 175, 473-481.
- Kirkwood, C., Everett, P., Ferreira, A., Lister, B., 2016.** Stream sediment geochemistry as tool for enhancing geological understanding: an overview of new data from south-west England. *Journal of Geochemistry and Exploration*, 163, 28-40.
- Kontchipe, Y.S.N., Sopie, F.T., Nguetchoua, G., Sonfack, A.N., Nkouathio, D.G., Tchatchueng, R., Nguemo, G.R.K., Njanko, T., 2021.** Mineralogy and geochemistry study of the Nyong River sediments, SW Cameroon: Implications for provenance, weathering, and tectonic setting. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1018.
- Kornprobst, J., 2002.** *Metamorphic Rocks and Their Geodynamic Significance*. Kluwer Academic Publisher, 225 p.



- Lerouge, C., Cocherie, A., Toteu, S.F., Penaye, J., Milési, J.-P., Tchameni, R., Nsifa, E.N., Fanning, C.M., Deloule, E., 2006.** Shrimp U-Pb zircon age evidence for paleoproterozoic sedimentation and 2.05 Ga syntectonic plutonism in the Nyong group: consequences for the eburnean-transamazonian belt of NE Brasil and central Africa. *Journal of Africa Earth Sciences*, 44, 413–427.
- Letouzey, R., 1979.** Phytogéographic map of Cameroon. In: *les atlas Jeune Afrique* (Eds, Jeune Afrique), Paris, p. 20-24.
- Li, B., Zhuang, X., Liu, X., Wu, C., Zhou, J., Ma, X., 2016.** Mineralogical and geochemical composition of Middle Permian Lucaogou Formation in the southern Junggar Basin, China: Implications for paleoenvironment, provenance, and tectonic setting. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 174.
- Lienou, G., Mahe, G., Paturol, J.E., Servat, E., Sighomnou, D., Ekodeck, G.E., Dezetter, A., Dieulin, C. 2008.** Evolution des régimes hydrologiques en région équatoriale camerounaise: un impact de la variabilité climatique en Afrique équatoriale. *Hydrology Sciences Journal*, 53(4), 789-801.
- Madhavaraju, J., Ramírez-Montoya, E., Monreal, R., González-León, C.M., Pi-Puig, T., Espinoza-Maldonado, I.G., Grijalva-Noriega, F.J., 2016.** Paleoclimate, paleoweathering and paleoredox conditions of Lower Cretaceous shales from the Mural Limestone, Tuape section, northern Sonora, Mexico: constraints from clay mineralogy and geochemistry. *Revista Mexicana Ciencias Geológicas*, 33 (1), 34–48.
- Maslov, J.M., Podkovyrov, V.N., Mizens, G.A., Noshkin, A.D., Fazliakhmetov, A.M., Malinovsky, A.I., Khudoley, A.K., Kovota, L.N., Kuptsova, A.V., Gareev, E.Z. et Zainullin, R.I., 2016.** Tectonic setting discrimination diagrams for terrigenous rocks: a comparison. *Geochemistry International*, 54 (7), 569-583.
- Maurizot, P., Abessolo, A., Feybesse, J.L., Johan, V., Lecomte, P., 1985.** Etude de prospection minière du Sud-Ouest Cameroun. Synthèse des travaux de 1978 à 1985. Rapport de BRGM 85 CMR 66, 274 p.
- Mbale Ngama, E., Sababa, E., Bayiga, E.C., Ekoa Bessa, A.Z., Ndjigui, P.-D., Bilong, P. 2019.** Mineralogical and geochemical characterization of the unconsolidated sands from the Mefou River terrace, Yaoundé area, Southern Cameroon. *Journal of Africa Earth Sciences* 159, 103570.

- McDonough, W.F., Sun, S.-S., 1995.** The composition of the Earth. *Chemistry Geology*, 120, 223–253.
- McLennan, S.M., 1993.** Weathering and global denudation. *Journal of Geology*, 101, 295–303.
- McLennan, S.M., 2001.** Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. G-cubed 2, 2000GC000109.
- Men, X., Mou, C., Ge, X., Wang, Y., 2019.** Geochemical characteristics of siliceous rocks of Wufeng Formation in the Late Ordovician, South China: assessing provenance, depositional environment, and formation model. *Geological Journal*, 55 (4), 2930–2950.
- Meunier, A., Caner, L., Hubert, F., El Albani, A., Prêt D., 2013.** The weathering intensity scale (WIS): an alternative approach of chemical index of alteration (CIA). *American Journal of Sciences*, 313, 113–143.
- Mignot, C., 1968.** Etudes des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leurs comportements sous des actions hydrodynamiques. *Grenoble, La Houille Blanche*, 7, 591-620.
- Mimba, M.E., Ohba, T., Fils, S.C.N., Nforba, M.T., Numanami, N., Bafon, T.G., Festus, T.A., Suh, C.E., 2018.** Regional geochemical baseline concentration of potentially toxic trace metals in the mineralized Lom Basin. East Cameroon: a Tool for Contamination Assessment. *Geochemical Transition*, 19, 11.
- Miounnde, A.P., Mboui, F.A.K., Kue, P.R.M., Kabir, S.A., Bessong, M., Liqiang, Z., 2019.** Sedimentological studies of alluvium deposits along Ngovayang-Bipindi of Lokoundje River, southwestern Cameroon. *International Journal of Geosciences*, 10, 119–139.
- Moore, J.W., Ramamoorthy, S., 1984.** Heavy metals in natural waters: Applied monitoring and impact assessment Springer-Verlag; New York 28–246.
- Muhs, D.R., Holliday, V.T., 2001.** Origin of late quaternary dune fields on the southern high plains of Texas and New Mexico. *Geological Society American Bullutin*, 113, 75–87.
- Muhs, D.R., Reynolds, R.L., Been, J., Skipp, G., 2003.** Eolian sand transport pathways in the southwestern United States: importance of the Colorado River and local sources. *Quaternary International*, 104, 3–18.

- Müller, G., 1969.** Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geological Journal*, 2, 108–118.
- N’nanga, A., Ngos III, S. Ngueutchoua, G., 2019.** The late Pleistocene-Holocene paleoclimate reconstruction in the Adamawa plateau (Central Cameroon) inferred of the Lake Fonjak sediments. *Journal of Africa Earth Sciences*, 150, 23–36.
- Nagarajan, R.C., Madhavaraju, J., Nagendra, R., Armstrong-Altrin, J.S., Moutte, J., 2007.** Geochemistry of Neoproterozoic shales of Rabanpalli Formation, Bhima basin, northern Karnataka, southern India: implications for provenance and paleo-redox conditions. *Revista Mexicana Ciencias Geológicas*, 24, 150–160. *Geológicas*, 285, 82–96.
- Narayana, Y., Rajashekara K.M., 2010.** The importance of physicochemical parameters on the speciation of natural radionuclides in riverine ecosystems. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101, 958–964.
- Nath, B.N., Bau, M., Ramalingeswara, Rao, B., Rao, C.M., 1997.** Trace and rare earth elemental variation in Arabian Sea sediments through a transect across the oxygen minimum zone. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 61 (12), 2375–2388.
- Nawrot, N., Wojciechowska, E., Matej-Lukowicz, K., Walkusz- Miotk, J., Pazdro, K., 2019.** Spatial and vertical distribution analysis of heavy metals in urban retention tanks sediments: a case study of Strzyza Stream. *Environmental Geochemistry Health*, 42, 1–17.
- Ndime Ekah, N., Ganno, S., Nzenti, J.P., 2019.** Geochemistry and Pb-Pb geochronology of the Neoproterozoic Nkout West metamorphosed banded iron formation, southern Cameroon. *International Journal of Earth Sciences*, 108, 1551–1570.
- Ndjeng, E., 1978.** Etude sédimentologique de niveaux à galets et à sables au Sud de l’Adamaoua -Thèse 3<sup>è</sup> cycle – Université de Dijon (France) ,115p.
- Ndjigui, P.-D., Bayiga, E.C., Onana, V.L., Djenabou-Fadil, S., Assomo Ngonu, G.S., 2019.** Mineralogy and geochemistry of recent alluvial sediments from the Ngaye River watershed, northern Cameroon: Implications for the surface processes and Au-PGE distribution. *Journal of Africa Earth Sciences*, 150, 136-157.

- Ndjigui, P.-D., Ebah Abeng, S.A., Ekomane, E., Nzeukou, N.A., Ngo, Mandeng, F.S., Lindjeck, M.M., 2015.** Mineralogy and geochemistry of pseudogley soils and recent alluvial clastic sediments in the Ngog-Lituba region, Southern Cameroon: an implication to their genesis. *Journal of African Earth Sciences*, 108, 1–14.
- Ndjigui, P.-D., Onana, V.L., Sababa, E., Bayiga, E.C., 2018.** Mineralogy and geochemistry of the Lokoundje alluvial clays from the Kribi deposits, Cameroonian Atlantic coast: implications for their origin and depositional environment. *Journal of African Earth Sciences*, 143, 102–117.
- 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.
- 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., Fedo, C.M., Young G.M., 1997.** Quartz and feldspar stability, steady and non-steady-state weathering, and petrogenesis of siliciclastic sands and muds. *Journal of Geology*, 105 (2), 173–192.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1982.** Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715–717.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1984.** Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic consideration. *Geochemica and Cosmochimica Acta*, 48, 1523–1534.
- Ngako, V., Affaton, P., Njonfang, E., 2008.** Pan-African tectonics in northwestern Cameroon: implication for the history of western Gondwana. *Gondwana Research*, 14, 509–522.
- Ngako, V., Affaton, P., Nnange, J.M., Njanko, T., 2003.** Pan-african tectonic evolution in central and Southern Cameroon: transpression and transtension during sinistral shear movements. *Journal of African Earth Sciences*, 36, 207–214.
- Ngnotué, T., Nzenti, J.P., Barbey, P., Tchoua, F.M., 2000.** The Ntui- Be'tamba high-grade gneisses: a northward extension of the panafrikan Yaounde' gneisses in Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 31, 369–381.

- Ngueutchoua, G., Ekoka Bessa, A.Z., Eyong, T.J., Demanou, Z.D., Baba Djaoro, H., Tchami N.L., 2019.** Geochemistry of cretaceous fine-grained siliciclastic rocks from Upper Mundeck and Logbadjeck formations, Douala sub-basin, SW Cameroon: implications for weathering intensity, provenance, paleoclimate, redox condition, and tectonic setting. *Journal of African Earth Sciences*, 152, 215–236.
- Nsifa, N.E., Tchameni, R., Belinga, S.M.E., 1993.** De l'existence des formations catarchéennes dans le Complexe cratonique du Ntem (Sud-Cameroun), Projet N°273, *Archaean cratonic rocks of the Africa*, Abstract Vol p. 23.
- Nyobe, J.M., Sababa, E., Bayiga, E.C., Ndjigui, P.-D., 2018.** Mineralogical and geochemical features of alluvial sediments from the Lobo watershed (Southern Cameroon): implications for rutile exploration. *Compte Rendus Geosciences*, 350, 119–129.
- Nzenti, J.P., Barbey, P., Macaudiaire, J., Soba, D., 1988.** Origin and evolution of the late Precambrian high-grade Younde Gneisses (Cameroon). *Precambrian Research*, 38, 91-109.
- Olivry, J.C., 1986.** Fleuves et rivières du Cameroun. Monographies hydrologiques ORSTOM, 32 p.
- Owona, S., Schulz, B., Ratschbacher, L., Mvondo Ondoa, J., Ekodeck, G.E., Tchoua, F. M., Affaton, P., 2011.** Pan-African metamorphic evolution in the southern Yaounde Group (Oubanguide Complex, Cameroon) as revealed by EMPmonazite dating and thermobarometry of garnet metapelites. *Journal of African Earth Sciences*, 59, 125–139.
- Parfenoff, A., Pomerol C., Tourenq, J., 1970.** Les minéraux en grains, méthodes d'études et détermination. Masson et Cie. Edit. Paris, 571p.
- Penaye J., Toteu, S.F., Tchameni, R., Van Schmus, W.R., Tchakounte, J., Ganwa, A., Minyem, D., Nsifa, E.N., 2004.** The 2.1 Ga west central african belt in Cameroon: extension and evolution. *Journal of African Earth Sciences*, 39, 159–164.
- Pobi, K. K., Satpati, S., Dutta, S., Nayek, S., Saha, R.N., Gupta S., 2019.** Sources evaluation and ecological risk assessment of heavy metals accumulated within a natural stream of Durgapur industrial zone, India, by using multivariate analysis and pollution indices. *Applied Water Science*, 9, 58.

- Pouclet, A., Tchameni, R., Mezger, K., Vidal, M., Nsifa, N.E., Shang, C.K., 2007.** Archaean crustal accretion at the northern border of the Congo craton (South Cameroon), the charnockite-TTG link. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 178, 331-342.
- Ramasamy, V., Paramasivama, K., Suresh, G., Jose, M.T., 2014.** Role of sediment characteristics on natural radiation level of the Vaigai river sediment, Tamilnadu, India. *Journal of Environmental Radioactivity*, 127, 64–74.
- Ramos-Vázquez, M.A., Armstrong-Altrin, J.S., 2019.** Sediment chemistry and detrital zircon record in the Bosque and Paseo del Mar coastal areas from the southwestern Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 110, 650–675.
- Reimann, C., Caritat, P., 1998.** *Chemical Elements in the Environment*. Springer-Verlag, Berlin, Factsheets for the Geochemist and Environmental Scientist. *Geological Magazine*, 137 (5), 593-598.
- Roser, B.P., Cooper, R.A., Nathan, S., Tulloch, A.J., 1996.** Reconnaissance sandstone geochemistry, provenance and tectonic setting of the lower Paleozoic terranes of the West Coast and Nelson. *N. Z. J. Geological Geophysics*, 39, 1–16.
- Roser, B.P., Korsch, R.J., 1986.** Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using Si<sub>2</sub>O content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio. *The Journal of Geology*, 94, 635-650.
- Roser, B.P., Korsch, R.J., 1988.** Provenance signature of sandstone-mudstone suites determined using discrimination function analysis of major-element data. *Chemistry Geology*, 67, 119–139.
- Saha-Fouotsa, A.N., Vanderhaeghe, O., Barbey, P., Eglinger, A., Tchameni, R., Zeh, A., Tchunte, P.F., Nomo, E.N., 2019.** The geologic record of the exhumed root of the Central African Orogenic Belt in the central Cameroon domain (Mbé – Sassa- Mbersi region). *Journal of African Earth Sciences*, 151, 286–314.
- Sahoo, S.K., Hosoda, M., Kamagata, S., Sorimachi, A., Ishikawa, T., Tokonami, S., Uchida, S., 2011.** Thorium, Uranium and Rare Earth Elements Concentration in Weathered Japanese Soil. *Samples Progress in Nuclear Science and Technology*, 1, 416–419.

- Salati, S., Moore, F., 2010.** Assessment of heavy metal concentration in the Khoshk River water and sediment, Shiraz, Southwest Iran. *Environmental Monitoring Assessment*, 164, 677–689.
- San Miguel, E.G., Bolivar, J.P., Garcia-Tenorio, R., 2004.** Vertical distribution of Th-isotope ratios, <sup>210</sup>Pb, <sup>226</sup>Ra and <sup>137</sup>Cs in sediment cores from an estuary affected by anthropogenic releases. *The Science of the Total Environment*, 318, 143–157.
- Ségalen, P., 1967.** Les sols et la géomorphologie du Cameroun. *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie*, 5 (2), 137-187.
- Selvaraj, K., Mohan, V.R., Szefer, P., 2004.** Evaluation of metal contamination in coastal sediments of the Bay of Bengal, India: geochemical and statistical approaches. *Marine Pollution Bulletin*, 49 (3), 174–185.
- Sensarma, S., Rajamani, V. Tripathi, J.K., 2008.** Petrography and geochemical characteristics of the sediments of the small River Hemavati, Southern India: Implications for provenance and weathering processes. *Sedimentary Geology*, 205, 111–125.
- Shang, C.K., Satir, M., Nsifa, E.N., Liégeois, J.-P., Siebel, W., Taubald, H., 2007.** Archean high-K granitoids produced by remelting of earlier Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG) in the Sangmelima region of the Ntem Complex of the Congo craton, southern Cameroon. *International Journal of Earth Sciences*, 96, 817–841.
- Shang, C.K., Satir, M., Siebel, W., Nsifa, E.N., Taubald, H., Liégeois, J.-P., Tchoua, F.M., 2004.** TTG magmatism in the Congo craton; a view from major and trace element geochemistry, Rb-Sr and Sm-Nd systematics: case of the Sangmelima region, Ntem Complex, southern Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 40, 61–79.
- Shao, J.Q., Yang, S.Y., 2012.** Does chemical index of alteration (CIA) reflect silicate weathering and monsoonal climate in the Changjiang River basin? *Chinese Science Bulletin*, 57, 1178–1187.
- Shtangeeva, I., Perämäki, P., Niemelä, M., Kurashov, E., Krylova, Y., 2018.** Potential of wheat (*Triticum aestivum* L.) and pea (*Pisum sativum*) for remediation of soils contaminated with bromides and PAHs. *International Journal of phytore*, 20, 560–566.

- Silva, M.M.V., Cabral Pinto, M.M.S., Carvalho, P.C.S., 2016.** Major, trace and REE geochemistry of recent sediments from lower Catumbela River (Angola). *Journal of African Earth Sciences*, 115, 203-217.
- Singh, H., Pandey, R., Singh, S.K., Shukla, D.N., 2017.** Assessment of heavy metal contamination in the sediment of the River Ghaghara, a major tributary of the River Ganga in Northern India. *Applied Water Science*, 7, 4133–4149.
- Singh, P., 2009.** Major, trace and REE geochemistry of the Ganga River sediments: influence of provenance and sedimentary processes. *Chemical Geology*, 266, 242–255.
- Singh, P., Rajamani, V., 2001.** REE geochemistry of recent clastic sediments from the Kaveri floodplains, southern India: implication to source area weathering and sedimentary processes. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 65, 3093–3108.
- Sonfack, A.N., Nguetchoua, G., Kontchipe, Y.S.N., Sopic, F.T., Nkouathio, D.G., Wouatong, A.S.L., Tchatchueng, R., Nguemo, G.R.K., Njanko, T., 2021.** Mineralogical and geochemical signatures of surface stream sediments from Dibamba River basin, SW Cameroon: Implications for provenance, weathering, and tectonic setting. *Journal of African Earth Sciences*, 181, 104251.
- Stendal, H., Toteu, S.F., Frei, R., Penaye, J., Njel, U.O., Bassahak, J., Nni, J., Kankeu, B., Ngako, V., Hell, J.V., 2006.** Derivation of detrital rutile in the Yaounde region from the Neoproterozoic Pan-African belt in southern Cameroon (Central Africa). *Journal of African Earth Sciences*, 44, 443–458.
- Sun, Z.H., Xie, X.D., Wang, P., Hu, Y.A., Cheng, H.F., 2018.** Heavy metal pollution caused by small-scale metal ore mining activities: a case study from a polymetallic mine in South China. *Sciences Total Environnement* 639, 217–227.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985.** *The Continental Crust: its Composition and Evolution*. Blackwell Scientific, Oxford, 312 p.
- Tchakounté, J., Eglinger, A., Toteu, S.F., Zeh, A., Nkoumbou, C., Mvondo-Ondoa, J., Penaye, J., de Wit, M., Barbey, P., 2017.** The adamawa-Yad'è domain, a piece of Archaean crust in the Neoproterozoic central African orogenic belt (Bafia area, Cameroon). *Precambrian Research*, 299, 210–229.



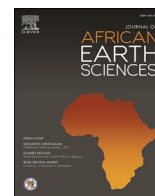
- Tchameni, R., 1997.** Géochimie et géochronologie des formations de l'archéen et du paléoprotérozoïque du Sud-Cameroun (Groupe du Ntem, craton du Congo). Thèse de Doctorat en Terre, océan, espace.
- Tchameni, R., Mezger, K., Nsifa, N.E., Pouclet, A., 2000.** Late Archean crustal evolution of the Congo craton: evidence from the K-rich granitoids of the Ntem Complex, southern Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 30, 133–147.
- Tchameni, R., Mezger, K., Nsifa, N.E., Pouclet, A., 2000.** Late Archean crustal evolution in the Congo craton: evidence from the K-rich granitoids of the Ntem Complex, southern Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 30, 133–147.
- Tehna, N., Sababa, E., Ekoa Bessa, A.Z., Etame, J., 2019.** Mine waste and heavy metal pollution in Betare-Oya mining area (Eastern Cameroon). *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 6 (4), 167-176.
- Tomlinson, 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 *Helgol Meeresunters* 33, 566-575.
- Toteu, S.F., Penaye, J., Deloule, E., Van Schmus, R.W., Tchameni, R., 2006.** Diachronous evolution of volcano-sedimentary basins north of Congo craton: insights from U-Pb ion microprobe dating of zircons from Poli, Lom and Yaoundé Group (Cameroon). *Journal of African Earth Sciences*, 44, 428-442.
- Toteu, S.F., Van Schmus, W.R., Penaye, J., Michard, A., 2001.** New U-Pb and Sm-Nd data from north-central Cameroon and its bearing on the Pre-Pan-African history of central Africa. *Precambrian Research*, 108, 45–73.
- Toteu, S.F., Van Schmus, W.R., Penaye, J., Nyobé, J.B., 1994.** U-Pb and Sm-Nd evidence for Eburnian and Pan-African high-grade metamorphism in cratonic rocks of southern Cameroon. *Precambrian Research*, 67, 321–347.
- Toteu, S.F., Van Schmus, W.R., Penaye, J., Nyobé, J.B., 1994.** U-Pb and Sm-Nd evidence for Eburnian and Pan-African high-grade metamorphism in cratonic rocks of southern Cameroon. *Precambrian Research*, 67, 321–347.
- Trendall, A.F., 2002.** The significance of iron formation, in Precambrian stratigraphic record, 33. *International Association of Sedimentologists, Special Publication*, pp. 33–66.

- Tsoungui, P.N.E., Ganno, S., Njiosseu Tanko, E.L., Mbongue, J.L.N., Woguia, B.K., Tamehe, L.S., Takodjou Wambo, J.D., Nzenti, J.P., 2019.** Geochemical constraints on the origin and tectonic setting of the serpentized peridotites from the Paleoproterozoic Nyong series, Eseka area, SW Cameroon. *Acta geochimica*, 39 (3), 404-422.
- Udden, J.A., 1914.** Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America*, 25, 655-744.
- Verma, S.P., Armstrong-Altrin, J.S., 2013.** New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Pre-Cambrian basins. *Chemical Geology*, 355, 117–180.
- Verma, S.P., Armstrong-Altrin, J.S., 2016.** Geochemical discrimination of siliciclastic sediments from active and passive margin settings. *Sedimentary Geology*, 332, 1-12.
- Vicat, J.P., 1998.** Esquisse géologique du Cameroun. *Géosciences au Cameroun*, collection GEOCAM, 19 p.
- Vicat, J.P., Léger, J.M., Nsifa, N.E., Piguet, P., Zenith, J.P., Tchameni, R., Pouclet, A., 1996.** Distinction au sein du craton congolais du Sud-Ouest du Cameroun de deux épisodes doléritiques initiant les cycles orogéniques éburnéen (paleoprotérozoïque) et panafricain (Néoprotérozoïque). *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Paris*, 323, 575-582.
- Vicat, J.P., Pouclet, A., 1995.** Nature du magmatisme lié à une extension pré-panafricaine : Les dolérites des bassins de Comba et de Sembé-Ouessou. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 166 (4), 355-364.
- Vosoughi Moradi, A., Sari, A., Akkaya, P., 2016.** Geochemistry of the Miocene oil shale (Hançilli Formation) in the Çankiri-Çorum Basin, Central Turkey: implications for paleoclimate conditions, source-area weathering, provenance, and tectonic setting. *Sedimentary Geology*, 78, 136-150.
- Walkley, A., Black, I.A., 1934.** An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37 (1), 29-38.
- Wang, J., He, Z., Zhu, D., Ding Q., 2019.** Geochemical characteristics, depositional environment, and provenance attitude of the middle Jurassic yangye formation lacustrine

- mudstones in kashi sag, south-western tarim basin. *Geological Journal*, 55 (4), 2976–2994.
- Wang, S., Cao, Z., Lan, D., Zheng, Z., Li G., 2008.** Concentration distribution and assessment of several heavy metals in sediments of westfour Pearl River Estuary. *Environmental Geology*, 55, 963–975.
- Wang, S., Zhang, N., Chen, H., Li, L., Yan, W., 2014.** The surface sediment types and their rare earth element characteristics from the continental shelf of the northern South China Sea. *Continental Shelf Research*, 88, 185–202.
- Wentworth, K.H., 1922.** A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30, 377-392.
- White, A.F., Blum, A.E., 1995.** Effects of climate on chemical weathering in watersheds. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 59, 1729–1747.
- Xia, F., Qu, L., Wang, T., Luo, L., Chen, H., Dahlgren, R.A., Zhang, M., Mei, K., Huang, H. 2018.** Distribution and source analysis of heavy metal pollutants in sediments of a rapid developing urban river system. *Chemosphere*, 207, 218-228.
- Xiao, R., Bai, J., Huang, L., Zhang, H., Cui, B., Liu, X., 2013.** Distribution and pollution, toxicity and risk assessment of heavy metals in sediments from urban and rural rivers of the Pearl River delta in southern China. *Ecotoxicology*, 22, 1564–1575.
- Zahra, A., Hashmi, M.Z., Malik R.N., Ahmed, Z., 2014.** Enrichment and geo-accumulation of heavy metals and risk assessment of sediments of the Kurang Nallah feeding tributary of the Rawal Lake Reservoir, Pakistan. *Sciences of Total Environnement*, 470, 925–933.
- Zeng, S., Wang, J., Chen, W., Fu, X., Feng, X., Song, C., Wang, D., Sun, W., 2019.** Geochemical characteristics of Early Cretaceous marine oil shale from the Changshe Mountain area in the northern Qiangtang Basin, Tibet: implications for palaeoweathering, provenance, tectonic setting, and organic matter accumulation. *Geological Journal*, 55 (4), 3229–3246.
- Zhang, Y., Gao, X., 2015.** Rare earth elements in surface sediments of a marine coast under heavy anthropogenic influence: the Bohai Bay, China. *Estuarine. Coastal and Shelf Science*, 164, 86–93.

**Zhou, Z., Chen, Z., Pan, H., Sun, B., Zeng, D., He, L., Yang, R., Zhou, G., 2018.** Cadmium contamination in soils and crops in four mining areas. *China Journal of Geochemistry and Exploration*, 192, 72–84.

**Zilifi, D., Eagle, M., 2000.** Sediment Cores from the Kalya platform, slope and horst: High resolution and long-time span paleolimnology and paleoclimate records, in Cohen (ed.) *The Nyanza project 2000 annual report*, University of Arizona, Tucson, AZ. Student report, p 20-23.



## Mineralogy and geochemistry of Lobé River sediments, SW Cameroon: Implications for provenance and weathering

Durane Tchatchouang Chougong<sup>a,b</sup>, Armel Zacharie Ekoa Bessa<sup>b</sup>, Gabriel Ngueutchoua<sup>b,\*</sup>, Rose Fouateu Yongue<sup>b</sup>, Sylvie Carole Ntyam<sup>a</sup>, John S. Armstrong-Altrin<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Fisheries Research Laboratory, CERECOMA IRAD-KRIBI, P.O. Box: 219 Kribi-Cameroon

<sup>b</sup> Department of Earth Sciences, University of Yaoundé 1, P.O. Box: 812, Yaoundé, Cameroon

<sup>c</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad de Procesos Oceanicos y Costeros, Circuito Exterior s/n, 04510, Mexico D.F., Mexico

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Lobé river  
Stream sediment  
Geochemistry  
Provenance  
Ntem complex

### ABSTRACT

The Lobé River (LR) watershed basement rock, Ntem Complex (NC), south Cameroon is covered by a thick lateritic soil. To better constrain the geology of the basement rock, textural, mineralogical and bulk geochemical (major, trace, and rare earth elements) analyses were undertaken on the recent stream sediments from the LR. The aims of this study were to investigate the provenance of sediments and to determine the weathering intensity of the source area. The ternary ( $Al_2O_3$ - $TiO_2$ -Zr) and binary (Th/Sc-Zr/Sc) diagrams suggested high sediment recycling and sorting, indicating that the bulk hydraulic energy of the LR controls the sediment texture. Despite the diagenetic processes of K-metasomatism observed on the A-CN-K plot, the (A-K)-C-N plot, Chemical Index of Alteration (CIA), and Plagioclase Index of Alteration (PIA) indicate that the studied sediments and their source areas underwent a high degree of chemical weathering. The heavy mineral suites imply heterogeneous provenance, including igneous, metamorphic and sedimentary source rocks. The ternary diagrams and Co/Th, La/Sc, Sc/Th, Cr/V, and Y/Ni elemental ratios indicate mostly felsic source rocks with lesser contribution from mafic components. The comparison of chondrite normalized REE patterns of LR sediments with potential source rocks reveals that the sediments were derived from the Precambrian basement rocks composed of tonalitic, trondhjemitic, and granodioritic suites, with remnants derived from Archean Greenstone Belt.

### 1. Introduction

The geochemistry of sediments from dune (Újvári et al., 2008; Rao et al., 2011; Asadi et al., 2013), lacustrine (Roy et al., 2008; Ekoa Bessa et al., 2018; N'anga et al., 2019), fluvial (Singh, 2009; Ndjigui et al., 2014, 2015, 2018, 2015; Mbale Ngama et al., 2019), and marine environments (Wang et al., 2014; Zhang and Gao, 2015; Armstrong-Altrin et al., 2017, 2018, 2018; Anthony et al., 2019; Ayala-Pérez et al., 2021) have been analyzed widely to infer the source area weathering, parent rock composition, and depositional processes. The chemical weathering and the pedogenesis cause the degradation of labile feldspar from pristine rocks to secondary clay minerals. This results in the selective leaching of labile cation ( $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Fe^{2+}$ , and  $Mg^{2+}$ ) relative to hydrolysate constituents such as  $Al^{3+}$  and  $Ti^{4+}$  (Nesbitt and Young, 1982). These chemical attributes are finally transferred to sedimentary records and are deemed to be useful indicators of the original

composition of parent rocks and subsequent weathering conditions (McLennan, 1993).

River and alluvial terrace sediments are resulting from chronic inundation of adjacent floodplain, which consist predominantly of soil particles and non-biological materials that represent the detrital products of the catchment basins (Arhin and Nudé, 2009). These sediments are considered to provide an overview and a more comprehensive understanding of the geochemical signature of source domains and precisely the underlying bedrock, since their chemistry is highly sensitive to compositional variability (Singh, 2009; Kirkwood et al., 2016; Silva et al., 2016).

As they are obtainable and easy to reach, modern river sediments offer opportunities to extract petrographic information from areas which are devoid of extensive outcrop such as the Atlantic equatorial domain in central Africa. In this area, the knowledge of the bedrock is limited by the availability of outcrop. In fact, outcrops are rare, due to

\* Corresponding author. Department of Earth Sciences, University of Yaoundé 1 Address: P.O. Box 812 Yaoundé, Cameroon.

E-mail address: [ngueutchoua2@yahoo.fr](mailto:ngueutchoua2@yahoo.fr) (G. Ngueutchoua).

the dense vegetation and the thick lateritic cover under the equatorial rainforest. In order to provide a holistic view of the geochemical difference between many sectors of this bedrock, indicating geologically diverse regions, it is worth considering geochemical survey from stream sediments of several or all catchment basins. However, few geochemical studies on alluviums have been reported in the Atlantic equatorial area (Ndjigui et al., 2015, 2018, 2018; Nyobe et al., 2018; Mbale Ngama et al., 2019; Bassanak Ongboye et al., 2019; Mioumnde et al., 2019). Furthermore, these studies have been limited in terms of sampling density and extent, and do not cover most of the river watersheds of the area studied such as the LR watershed. Among the results obtained from previous geochemical studies on alluviums from the Atlantic equatorial area, data on unconsolidated alluvial sands from the Mefou River terrace in Yaoundé area, southern Cameroon, are noticeable, regarding provenance issue (Mbale Ngama et al., 2019). Mbale Ngama et al. (2019) further suggested that the nature of sediments is inherited from the gneiss basement which experienced a high degree of weathering. However, more systematic investigation and quantitative data are required to better constrain the various geology of this basement rock. The lithology of LR watershed and its environs belongs to the Ntem Complex (NC) and consists predominantly of granite, gneisses, migmatite, granitoid plutons of Tonalitic, Trondhjemitic, and Granodioritic (TTG) suites, charnockite (i.e., orthopyroxene bearing granitoid), Banded Iron Formations (BIF) and sillimanite-bearing paragneisses (Clifford and Gass, 1970; Cahen et al., 1976; Bessoles and Trompette, 1980; Nédélec et al., 1990). Although the aforementioned previous studies have been attempted to characterize the features and the genesis of rocks from NC, the structures, depositional settings and relative extents of these rocks remain to be precisely constrained on the restricted geographical area of the LR watershed. In particular, the supracrustal rocks (BIF and sillimanite-bearing paragneisses), representing remnants of greenstone belts, form xenoliths whose geometries are not well mapped (Feybesse et al., 1998; Penaye et al., 2004). Furthermore, the greenstone belts and TTG are characterized by vertical tectonics (vertical foliation, stretching and vertical lineation, and isoclinal folding) which makes it difficult to reconstruct their stratigraphy (Tchameni et al., 2000; Shang et al., 2004, 2007). This thereby results in the uncertainty on the nature and the spatial repartition of the various types of basement rocks existing within the drainage basins. This uncertainty is further enhanced within the LR watershed where outcrops are rare, due to the thick lateritic covers of the underlying basement rocks. Thus, as an alternative approach, the geochemistry of stream sediments from the studied watershed could be used to provide a more comprehensive understanding of the parent rock types, since cartographic ground and field observations are rare (e.g., Singh, 2009; Ndjigui et al., 2014, 2015; 2018; Mbale Ngama et al., 2019). In this regard, the alluvial sediment geochemistry of the LR, which belongs to one of the noticeable coastal river watersheds of the African equatorial region, is not yet documented. The LR is thought to be of importance in the equatorial area, since it has a permanent regime and always carries a non-negligible amount of suspension loads to the Atlantic coast of southwest Cameroon (Olivry, 1986). Hence, it is interesting to provide, for the LR sediments, a geochemical dataset which could help to characterize their source rocks.

In this paper, we report the mineralogical and geochemical features of alluvial sediments from the LR, in order to infer their provenance and the weathering intensity of the source terrane. Since the river draining area is diverse in terms of lithology, it is important to understand to what extent some geological features of the LR sediments are inherited from their predicted parent rocks. This study also help to better establish the nature of the Precambrian bedrock of the Atlantic sector of African equatorial region, since the outcrops of this bedrock are rare and less extensive, resulting in the limitation of the traditional geological survey method.

## 2. Geographical and geological context

The LR has its headwaters towards the southwestern part of the South Cameroon Plateau, which is characterized by sloping terrain and gently rolling hills. The altitude varies from 250 to 800 m with an average of 650 m (Olivry, 1986). The South Cameroon plateau gives way, after slight escarpments, to the Cameroon coastal plain. The latter extends 20–80 km inland from the Gulf of Guinea shoreline to the edge of the plateau. This topography has resulted in the creation of the Lobé Falls near Kribi, where the LR meets the sea in a series of rapids. The river flows through approximately 130 km in the NNE-SSE direction to the Atlantic coast where it has its mouth 10 km south from Kribi. The main tributary of this stream is the Niété River (NR), which flows to the East, with a length of about 20 km, before entering the LR eastward of the Niété locality. All the tributaries join at various places in the drainage basin finally forming the main trunk of the LR (Fig. 1a and b). The catchment basin of the LR, lying between 2°4'–2°10' N and 9°9'–9°5' E, covers an area of about 1940 km<sup>2</sup> and experiences warm and humid oceanic equatorial climate with little differentiated seasons and average

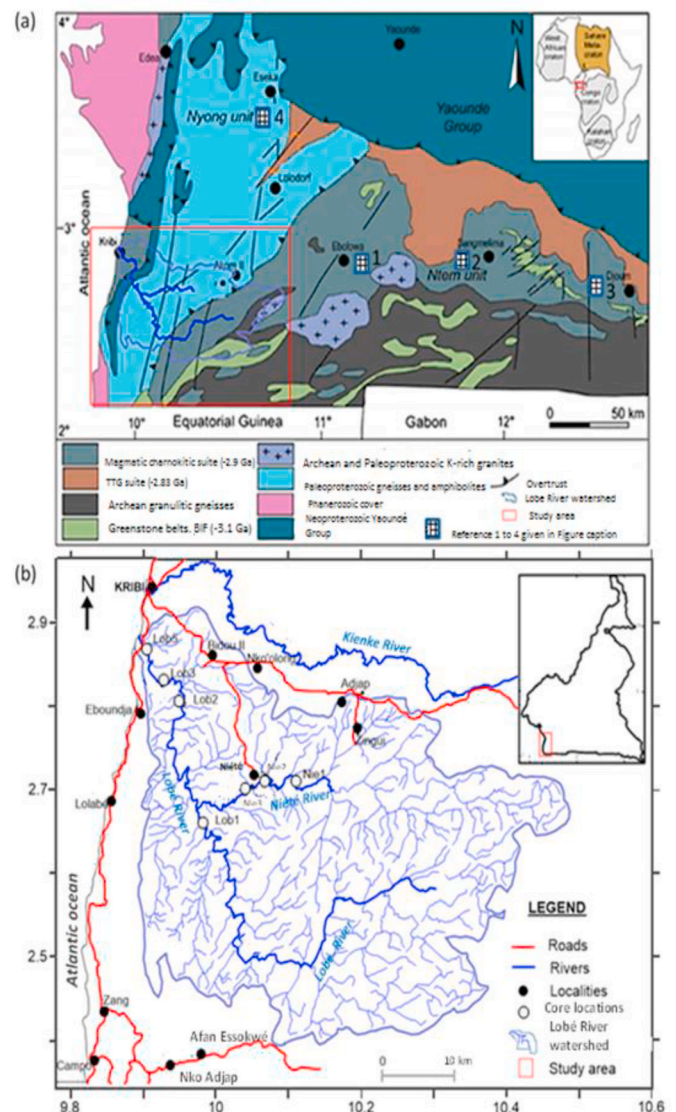


Fig. 1. (a) Geological map of the South Cameroon (from Toteu et al., 2001) with the outline of the study area and the location of the areas from where the geochemical data of parental rocks were compiled in this study to identify probable source rocks. (b) Simplified map of Lobé River watershed (modified from Olivry, 1986) showing coring sites (Lob1-5 and Nie1-3).



rainfall of about 2919 mm/year. The mean annual temperatures are fairly stable, around 25 °C (Mama et al., 2018).

The main lithologies of the drainage basin, deduced from the regional geology, are Archean rocks with some Early Proterozoic reworked materials (Fig. 1a), belonging to the NC (Maurizot et al., 1985; Goodwin, 1991; Tchameni et al., 2000). In its western part, the NC is made up of Ntem and Nyong units (Fig. 1). Both units are composed mainly of felsic rocks and comparatively lesser mafic materials. The felsic rocks in the Ntem unit consist of charnockites and other granitoid plutons of TTG composition, dated between 2.91 and 2.82 Ga (Tchameni et al., 2000; Shang et al., 2004, 2007), and granite and syenite, which cross-cut the members of the TTG suites at the time of Eburnean orogeny (ca 2.05 Ga) (Tchameni et al., 2001; Lerouge et al., 2006). In the Nyong unit, these felsic rocks are composed of reworked Archean TTG, charnockites, and migmatites of Paleoproterozoic age (2400–1800 Ma).

The mafic rocks in the Ntem unit consist of the remnants of green stone belts (xenolith of metasediment and garnet-amphibolite), Paleoproterozoic metadolerites, various pyroxene-syenites and BIF. Mafic constituent from Nyong unit consists of rocks that can be also attributed to remnants of green stone belts such as pyroxenites, serpentinites, and BIF, and of metadoleritic dykes and mafic and ultramafic volcanics (Feybesse et al., 1998; Penaye et al., 2004).

The Ntem unit suffered pre-Eburnean rifting older than 2500 Ma (Vicat and Pouclet, 1995; Vicat et al., 1996; Pouclet et al., 2007), followed by the opening of the Nyong intracratonic basin (2515–2535 Ma), as well as the Eburnean and Pan African events (Feybesse et al., 1998). In the upper reaches, the LR (including NR) flows through the Ntem unit, whereas in the middle reaches and a portion of the lower reaches, the LR flows through the Nyong unit. Before entering the sea, in the lower reaches, the LR flows through a narrow band of Neoproterozoic rocks (granite, migmatitic gneiss, migmatite) reworked from the Nyong unit during the Pan-African orogeny (Penaye et al., 2004).

The influence of the climate on these basement rocks favors the

formation of thick lateritic covers, consisting of ferralitic and hydromorphic soils. Ferralitic soils generally exhibit secondary minerals such as kaolinite, illite, smectites, Al-hydroxide (gibbsite), Fe-oxide (hematite and magnetite), Fe-hydroxide (goethite), residual minerals like quartz and muscovite, and some accessory minerals such as rutile. Hydromorphic soils, observed in swampy valleys, consist of smectites, kaolinite, illite, muscovite, and accessory minerals such as zircon and rutile (Ndjigui et al., 2018).

### 3. Sampling and method

Eight sediment cores fairly less than 1 m thickness were collected using an Uwitec Corer along the alluvial terrace, exhibiting less lithified to unlithified recent sediments, of the LR and its prominent tributary (NR). The accessibility to the river beds allows sampling of two sectors (i.e., upstream and downstream sectors). All the sediment cores were taken along the margins of LR, including NR, but close to these rivers themselves (Fig. 2a–d). The sediment cores were subsampled at different intervals (Fig. 3) and prepared for various analysis at the Center of Research in Marine and Coastal Ecosystems (CERECOMA), Kribi, Cameroon.

Grain size analysis was carried out for forty-five samples at the Faculty of Agronomy and Agricultural Sciences (FASA), Dschang, Cameroon. Silt and clay-size fractions were measured following the standard Robinson-Köln's pipetting method, pretreatment details are described by Singh (2009). Sands were separated by wet sieving and size fractions above 0.050 mm were by dry sieving. Heavy minerals (~150 µm) were determined in seventeen alluvium samples, using heavy liquid (i.e., bromoform) at the Geoscience laboratories, University of Yaoundé I, Cameroon.

Seven samples from each core were selected for mineralogical analysis and carried out at the geology and sedimentary environment laboratories (AGEs), University of Liège, Belgium. Samples were



**Fig. 2.** Physical characteristics of Lobé River and of some coring points: (a) Location of core Lob1 in an inactive sand bank; (b) River margin near the location of core Lob2, where the water depth was low; (c) River margin where the core Lob3 was taken; (d) Lobe fall, nearby the Lobe River mouth, not far from where Lob5 was taken.

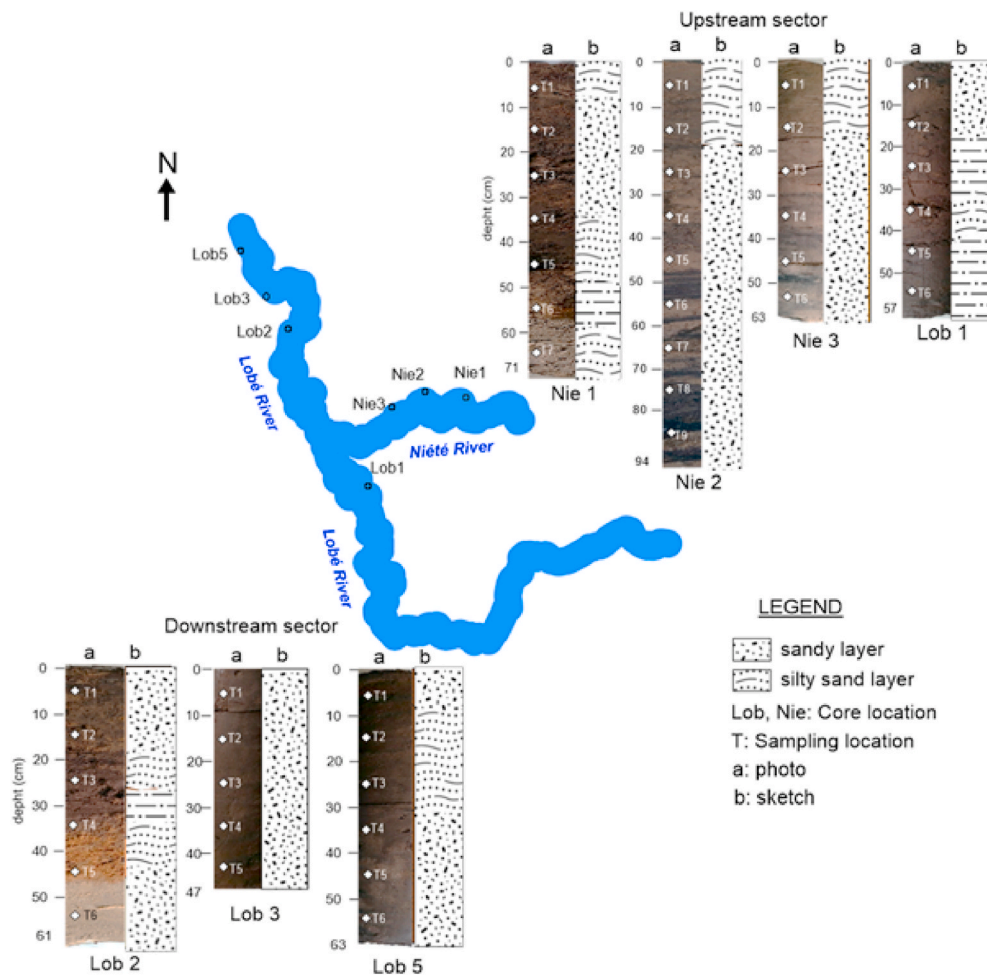


Fig. 3. Vertical organization of the alluvial sequences from Lobé River watershed and sampling location.

pulverized using an agate mortar and pestle. Smear mounts were prepared on low background silicon disks for X-ray diffraction (XRD) analysis, using a PAN-Analytical X'PERT PRO diffractometer provided with a monochromator using a Cu-K $\alpha$  radiation ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) at 40 kV and 45 mA and interpreted by using [Crystallography Open database \(2014\)](#).

Nineteen representative samples (i.e., from the eight sediment cores), were selected for geochemical analysis and were analyzed at the Australian Laboratory Services (ALS), Vancouver, Canada. Samples analyzed for a series of major and trace elements were crushed using a jaw crusher with steel plates and pulverized in a ball mill composed of 99.8% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The loss on ignition (LOI) was measured after heating the dry sample at 1000 °C. Major element concentrations were determined using a wavelength-dispersive X-ray fluorescence (XRF) spectrometer (Rigaku RIX-3000) whereas trace elements, including rare earth elements (REE), were analyzed using inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) technique. For ICP-MS, sediment powders were digested by acid attack (HNO<sub>3</sub>, HCl, HF, and HClO<sub>4</sub>) procedure in closed beakers, using a PerkinElmer 9000 instrument. XRF measurements have precisions up to  $\pm 2$  rel% for major element and  $\pm 5$  rel% for trace element, including REE. The analytical accuracy errors, determined by replicates, for major and trace elements were better than  $\pm 5$  rel%. The accuracy and precision of the analytical methods were established using international reference materials (INTL 15–23810 and 17–28360) and in-house reference materials (IHST15-17295 and 17–22679).

## 4. Results

### 4.1. Physical, granulometric, and mineralogical characteristics

#### 4.1.1. Upstream sector

The sediment cores from the upstream sector of LR (Lob1, Nie1, Nie2, and Nie3) mostly exhibit thicker sandy layers (Fig. 3). The textural parameters reveal that, for some core sediments (e.g., Nie2 and Nie3), the grain size of layers decreases from the bottom to the top of the sequence. The sediment samples comprise 81.54% of sand-sized particles, 16.93% of silt-sized grains and less than 1.61% of clay-sized particles, and have sand-sized class ranging frequently between 2 and 3, in the phi scale ( $\Phi$ ), indicating mostly fine sand-sized particles, according to the [Folk \(1980\)](#) classification (Table 1; Fig. 4). The standard deviation in the phi scale ( $s\Phi$ ) varies from 0.50 to 0.71 for the NR sediments, so the sediments are classified as well sorted ( $s\Phi = 0.50$ ) to moderately sorted ( $s\Phi = 0.71$ ). The sediments contain abundant quartz (Fig. 5; Table 2), as a major phase. A variety of heavy mineral grains with different shapes were observed. The common heavy mineral assemblage includes opaque oxides, kyanite, zoisite, and rounded as well as angular tourmaline. The relative abundances of the heavy minerals in the studied samples are given in Table 3. Clay minerals such as gibbsite, kaolinite, and illite, in the order of decreasing abundance, were identified by X-Ray diffraction (Fig. 5).



**Table 1**  
Color, grain size distribution (wt.%) and texture of the Lobé River sediments.

Sector	Upstream (n = 28)											
core	Nie1						Nie2					
Ref. code	Nie1T1	Nie1T2	Nie1T3	Nie1T4	Nie1T5	Nie1T6	Nie1T7	Nie2T1	Nie2T2	Nie2T3	Nie2T4	Nie2T5
Color	PB	LBG	LBG	GB	GB	W	W	LBG	LBG	PB	LG	LG
sands	73	87	91	82	82	63	72	81	76	90	93	91
Silts	25	11	7	16	16	36	27	18	23	9	6	7
Clays	2	2	2	2	2	1	1	2	1	1	1	2
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Texture <sup>a</sup>	S Sd	Sd	Sd	S Sd	S Sd	S Sd	S Sd	S Sd	S Sd	Sd	Sd	Sd

Sector	Upstream											
core	Nie2				Nie3				Lob1			
Ref. code	Nie1T6	Nie2T7	Nie2T8	Nie2T9	Nie3T1	Nie3T2	Nie3T3	Nie3T4	Nie3T5	Nie3T6	Lob1T1	Lob1T2
Color	LG	LG	LGB	LG	VPB	VPB	LG	LG	LG	LG	B	GB
sands	90	94	91	94	75	76	87	93	92	91	88	82
Silts	9	5	8	5	23	22	11	6	6	8	10	16
Clays	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1	2	2
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Texture <sup>a</sup>	Sd	Sd	Sd	Sd	S Sd	S Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd	Sd

Sector	Upstream				Downstream (n = 17)							
core	Lob1				Lob2				Lob3			
Ref. code	Lob1T3	Lob1T4	Lob1T5	Lob1T6	Lob2T1	Lob2T2	Lob2T3	Lob2T4	Lob2T5	Lob2T6	Lob3T1	Lob3T2
Color	GB	GB	G	GB	PB	LBG	LBG	PB	VPB	W	LBG	LBG
sands	67	78	53	51	82	73	63	79	87	99	83	92
Silts	31	21	45	47	16	25	35	19	11	2	16	7
Clays	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Texture <sup>a</sup>	S Sd	S Sd	S Sd	S Sd	Sd	S Sd	S Sd	S Sd	S Sd	Sd	Sd	Sd

Sector	Downstream									
Core	Lob3			Lob5						
Ref. code	Lob3T3	Lob3T4	Lob3T5	Lob5T1	Lob5T2	Lob5T3	Lob5T4	Lob5T5	Lob5T6	
Color	LBG	LBG	GB	LBG	GB	GB	LBG	LBG	GB	
sands	87	87	91	82	75	73	86	82	75	
Silts	12	11	8	17	23	25	12	17	23	
Clays	1	3	1	2	3	2	2	2	3	
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Texture <sup>a</sup>	Sd	Sd	Sd	Sd	S Sd	S Sd	Sd	Sd	S Sd	

PB: Pale brown; LBG: Light brownish gray; GB: Grayish brown; W: White; LG: Light gray; VPB: Very pale brown; B: Brown; G: Gray.  
 Sd: Sand; S Sd: Silty sand . Clays:  $\Phi < 2 \mu\text{m}$ ; silts:  $2 \mu\text{m} < \Phi < 50 \mu\text{m}$ ; sands:  $50 \mu\text{m} < \Phi < 2000 \mu\text{m}$  <sup>a</sup> from Folk (1980). n = total number of samples.

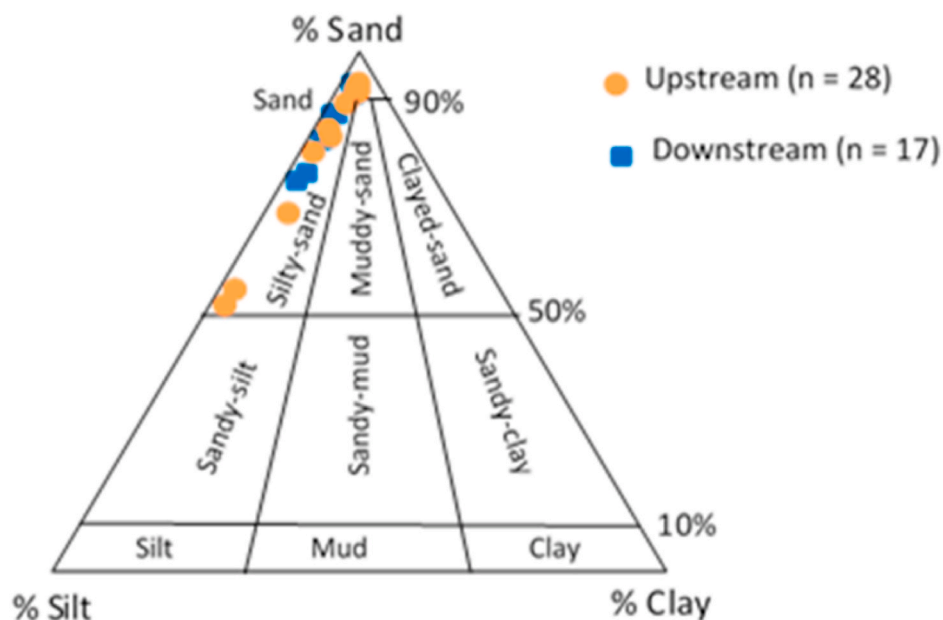


Fig. 4. Plot of samples from Lobé River sediments in the sand-silt-clay diagram (Folk, 1980).

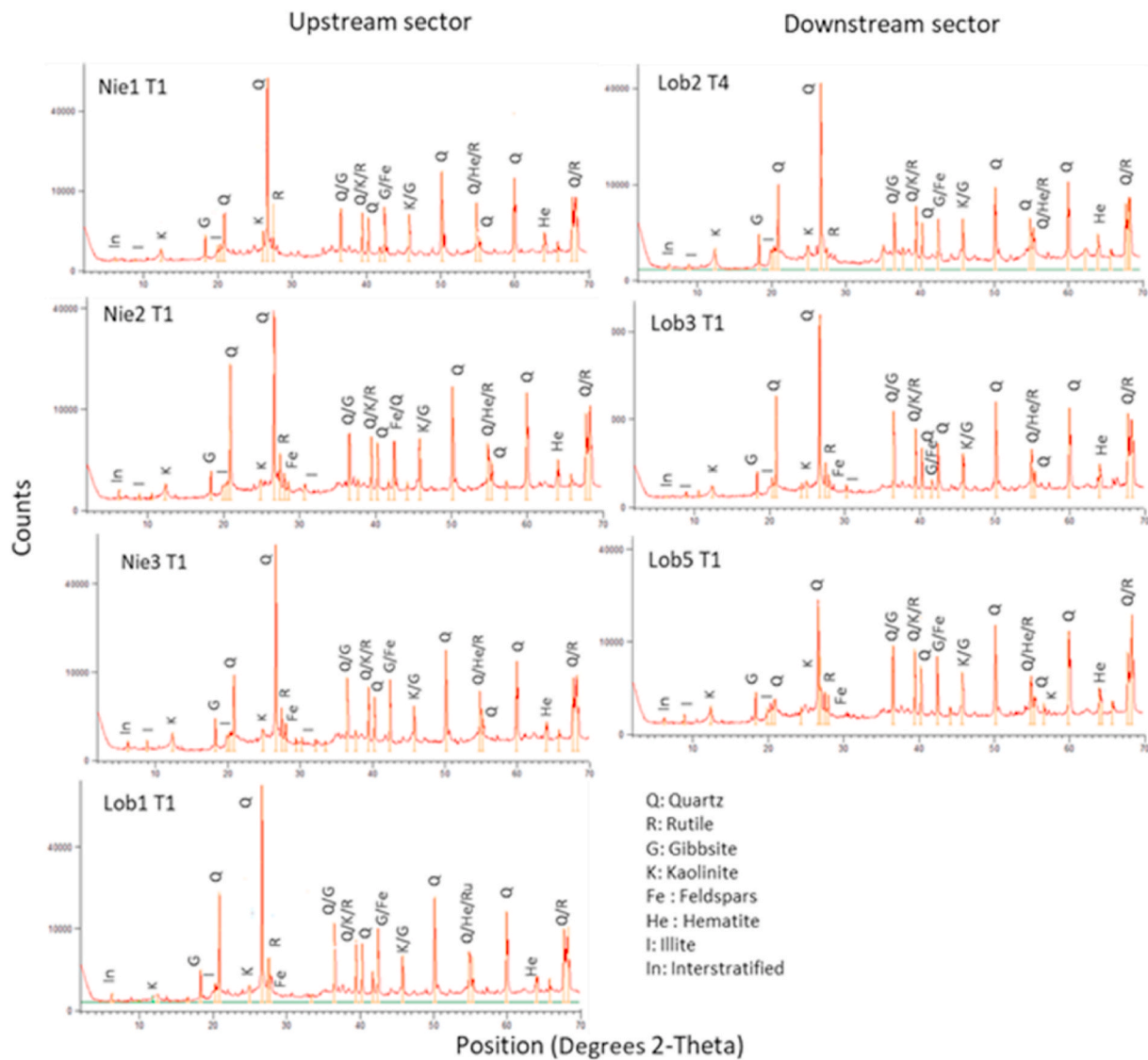


Fig. 5. X-ray diffraction spectra of the Lobé River sediments.

Table 2  
Mineralogical composition (semi-quantitative) of sediments from Lobé River.

Sector	Upstream (n = 4)				Downstream (n = 3)		
	Nie1T1	Nie2T1	Nie3T1	Lob1T1	Lob2T4	Lob3T1	Lob5T1
Quartz	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++
Rutile	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Gibbsite	+	+	++	++	+	+	+
Kaolinite	+	+	+	+	+	-	+
Feldspars	-	+	+	+	-	-	+
Hematite	-	-	-	-	+	-	-
Illite	-	-	-	-	-	-	-
Interstratified	-	-	-	-	-	-	-

++++ Very abundant, +++ abundant, ++ represented, + poorly represented, - traces. n = total number of samples.

#### 4.1.2. Downstream sector

The sediment cores from the downstream of LR (Lob2, Lob3, and Lob5) exhibit sandy and silty sand layers (Fig. 3). The samples have sand-sized class ranging mostly between 3  $\Phi$  and 4  $\Phi$ , falling into very fine sand size (Folk, 1980). This suggests a deposit fairly far from the headwater (Table 1). The presence of few size fractions in various samples indicates their sorted nature. The standard deviation (s $\Phi$ ) varies from 0.35 to 0.50, so the sediments are classified as well sorted (s $\Phi$  =

0.50). Less clay content in all sediment samples suggests that this size particle was taken away, toward the Atlantic sea, into suspension, even during flooding period. Overall, the fine size of sediments is not only due to the degree of transport, but is also because of the predominant chemical weathering in the source, which do not yield coarser materials. The evergreen forest, which stabilizes the thick lateritic cover of parent rocks prevents the mobilization of eventual coarser particles of terrigenous materials. The major heavy mineral found in the downstream

**Table 3**  
Heavy mineral distribution (grain %) in the sediments from Lobé River.

Sector	Upstream (n = 10)									
	Ref. Code	Nie1T1	Nie1T4	Nie1T7	Nie2T1	Nie2T9	Nie3T1	Nie3T6	Lob1T1	Lob1T3
Oxydes	47	49	44	59	73	58	49	66	63	52
Kyanite	13	7	24	1	2	5	11	10	5	4
Zoisite	6	9	-	13	9	5	7	-	-	6
Garnet	6	3	10	-	-	9	4	-	-	5
Tourmaline	5	3	10	5	3	1	2	2	2	3
Chloritoide	3	9	10	4	-	8	4	-	3	5
Diopside	3	3	-	4	4	4	7	6	9	4
Anatase	3	6	-	1	4	5	5	2	-	5
Sillimanite	5	-	-	-	3	-	3	2	4	6
Augite	-	3	-	-	-	-	-	-	3	3
staurotide	-	3	-	3	-	2	-	1	5	-
Zircon	1	1	-	-	-	-	-	-	1	2
Actinote	5	3	-	4	-	1	2	-	3	-
Hornblende	-	-	-	3	2	2	3	6	4	-
Rutile	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
indetermined	2	1	4	3	1	2	3	4	1	2
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Sector	Downstream (n = 7)							
	Ref. Code	Lob2T4	Lob2T5	Lob2T6	Lob3T1	Lob3T5	Lob5T1	Lob5T6
Oxydes	75	66	31	41	42	65	69	
Kyanite	-	5	7	9	9	3	6	
Zoisite	-	5	-	13	5	1	-	
Garnet	3	-	7	-	6	7	4	
Tourmaline	3	3	14	2	5	4	-	
Chloritoide	-	1	7	11	7	3	-	
Diopside	4	2	-	3	9	3	4	
Anatase	3	-	7	6	3	4	1	
Sillimanite	3	7	3	6	6	-	-	
Augite	-	-	14	-	-	-	4	
staurotide	-	1	7	3	5	4	4	
Zircon	-	3	-	-	1	5	-	
Actinote	-	-	-	3	-	-	-	
Hornblende	-	-	-	3	-	-	1	
Rutile	5	3	-	-	-	-	-	
indetermined	5	3	3	1	1	2	5	
Total	100	100	100	100	100	100	100	

n = total number of samples.

samples are opaque oxides, which are followed by rounded and angular tourmaline, kyanite, zoisite, and sillimanite grains (Table 3). The XRD study (Fig. 5) reveals the presence of clay minerals like gibbsite, kaolinite, and hematite in the sediment samples.

## 4.2. Geochemistry

### 4.2.1. Major element concentrations

**4.2.1.1. Upstream sector.** The major element concentrations for LR sediments are reported in Table 4. The SiO<sub>2</sub> content in the upstream sediments is varying between 62.6 and 84.4 wt% (mean with 01 standard deviation = 77 ± 6.1 wt%; number of samples n = 11), which is higher than that of the average upper continental crust value (UCC; 66 wt%; Taylor and McLennan, 1985; McLennan, 2001). TiO<sub>2</sub> content is also recorded slightly higher relative to UCC. Besides, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5.38–16.89 wt%; 9.00 ± 3.49 wt%; n = 11) and K<sub>2</sub>O contents are relatively low, indicating that the content of clay minerals is low in the samples. Both CaO and Na<sub>2</sub>O contents (<0.4 wt%) are lower than the UCC in all the samples. The Na<sub>2</sub>O contents are lower than K<sub>2</sub>O, reflecting probably the relative abundance of potassium-bearing minerals (i.e., K-feldspar) in the source area. The sediments are also depleted in MgO relative to UCC. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents are varying between 1.34 wt% and 5.67 wt%. The high Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content (~4–5 wt%) is possibly due to the abundance of the Fe-bearing minerals (i.e., hematite, goethite). The variations of MnO and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> are not significant in all samples, as presented by the UCC normalized major element patterns (Fig. 6a).

The correlation between SiO<sub>2</sub> versus Na<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>O (correlation coefficient r = -0.35 and r = -0.26, respectively, n = 11, p-value = 0.05) are not statistically significant (Table 5), indicating high mobility of Na and K during weathering processes. SiO<sub>2</sub> is negatively correlated with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (r = -0.81, n = 11, p = 0.05), indicating that silica is mostly present in detrital quartz grains (e.g., Armstrong-Altrin et al., 2017; Wang et al., 2019).

**4.2.1.2. Downstream sector.** In comparison with UCC, the downstream sediments exhibit higher SiO<sub>2</sub> contents (range = 71.7–91.4 wt%; 80.1 ± 5.9 wt%; n = 8), suggesting high quartz content. The Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7.89 ± 2.8 wt%, n = 8) and K<sub>2</sub>O contents are lower relative to UCC (Table 4; Fig. 6b). The depletion in Na<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>O contents is possibly related to the low feldspar content. CaO have contents (<0.32 wt%) lower than the UCC in all of the samples. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents vary between 1.04 wt% and 4.98 wt%. The MnO and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> contents are significantly lower than that of the UCC.

The correlations between SiO<sub>2</sub> versus Na<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>O (r = -0.28 and r = -0.28, respectively, n = 8, p = 0.05) are not statistically significant (Table 5). SiO<sub>2</sub> is negatively correlated with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (r = -0.92, n = 8, p = 0.05). The correlation between Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> is statistically significant (r = 0.84, n = 8, p = 0.05), which indicates the presence of phyllosilicates.

**4.2.1.3. A-CN-K diagram.** Paleoweathering can be estimated through weathering indices such as the Chemical Index of alteration (CIA). The CIA value is calculated using the following equation: CIA = (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/

**Table 4**

Major element concentrations (wt.%) and element ratios of the Lobé River sediments, and average composition of UCC. Normalization values are from Taylor and McLennan (1985) and McLennan (2001).

Location	Upstream sector (n = 11)												
	Ref code	Nie1T1	Nie1T4	Nie1T7	Nie2T1	Nie2T4	Nie1T9	Nie3T1	Nie3T6	Lob1T1	Lob1T3	Lob1T6	Av
SiO <sub>2</sub> (adj)	87.4	84.6	75.7	84.6	87.4	89.7	83.4	87.2	86.9	79.6	76.1	83.9	4.8
SiO <sub>2</sub>	79.5	75.8	71.1	76.6	81	84.4	78	82.4	81.3	74.3	62.6	77	6.1
TiO <sub>2</sub>	0.69	0.64	0.12	0.69	1.04	1.23	0.86	1.34	0.85	1.27	0.98	0.88	0.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.38	8.49	16.89	8.35	6.42	5.38	9.99	6.31	6.77	11.27	12.77	9	3.49
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.81	3.15	1.34	3.04	2.54	1.58	2.94	2.9	3.31	5.67	4.27	3.05	1.18
MnO	0.04	0.03	0.01	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05	0.05	0.02	0.04	0.04	0.01
MgO	0.2	0.23	0.17	0.25	0.24	0.16	0.28	0.19	0.21	0.09	0.3	0.21	0.06
CaO	0.23	0.2	0.05	0.24	0.21	0.19	0.19	0.26	0.30	0.02	0.33	0.2	0.09
Na <sub>2</sub> O	0.17	0.15	0.41	0.19	0.18	0.18	0.17	0.21	0.20	0.17	0.21	0.2	0.07
K <sub>2</sub> O	0.82	0.78	3.74	1.04	0.97	0.81	0.94	0.72	0.53	0.46	0.64	1.04	0.91
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.08	0.06	0.09	0.08	0.08	0.09	0.07	0.06	0.1	0.13	0.08	0.02
LOI	8.9	10.2	5.9	9.2	7.1	5.5	6.2	5.5	6.1	6.5	17.4	8.05	3.5
Total	99.8	99.7	99.8	99.7	99.8	99.5	99.7	100	99.7	99.8	99.7	99.7	0.1
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.5	8.9	4.2	9.2	12.6	15.7	7.8	13.1	12	6.6	4.9	9.8	3.7
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	4.82	5.2	9.12	5.47	5.39	4.5	5.53	3.43	2.65	2.71	3.05	4.72	1.85
K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.13	0.09	0.22	0.12	0.15	0.15	0.09	0.11	0.08	0.04	0.05	0.11	0.05
Na <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /K <sub>2</sub> O	3.43	4.04	0.36	2.92	2.62	1.95	3.13	4.03	6.25	12.33	6.67	4.34	3.19
CIA (%)	81.5	86.4	78.3	82.7	79.6	78.6	86.4	81.1	84.6	95.1	90.2	84	5.2
PIA (%)	90.8	93.9	95.4	92	90.1	88.4	94.1	88.9	90.4	99.3	94.6	92.5	3.3
ICV	0.77	0.61	0.35	0.65	0.81	0.77	0.54	0.89	0.8	0.68	0.53	0.62	0.76

Location	Downstream sector (n = 8)											
	Ref code	Lob2T1	Lob2T4	Lob2T5	Lob2T6	Lob3T1	Lob3T5	Lob5T1	Lob5T6	Av	± 1sd	UCC
SiO <sub>2</sub> (adj)	85.5	79.3	80.5	93.2	87.2	80.4	87.3	87.5	85.1	4.7	-	-
SiO <sub>2</sub>	80.4	71.7	75.5	91.4	80.8	76.1	81.8	82.7	80.1	5.9	66	66
TiO <sub>2</sub>	0.96	1.84	1.37	0.98	1.15	1.87	0.74	1.23	1.27	0.41	0.5	0.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.01	11.23	10.79	3.94	6.17	11.24	6.29	6.41	7.89	2.8	15.2	15.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.88	4.43	4.98	1.04	3.28	3.98	3.12	2.83	3.44	1.2	4.5	4.5
MnO	0.04	0.05	0.04	0.03	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.01	0.1	0.1
MgO	0.32	0.21	0.15	0.08	0.17	0.14	0.42	0.18	0.21	0.11	2.2	2.2
CaO	0.29	0.15	0.09	0.05	0.23	0.08	0.32	0.23	0.18	0.10	4.2	4.2
Na <sub>2</sub> O	0.45	0.13	0.12	0.06	0.18	0.58	0.21	0.18	0.24	0.18	3.9	3.9
K <sub>2</sub> O	0.55	0.59	0.61	0.51	0.58	0.49	0.62	0.6	0.57	0.05	3.4	3.4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.11	0.1	0.03	0.07	0.09	0.08	0.06	0.08	0.03	0.17	0.17
LOI	5.9	9.1	5.9	1.7	7	5.2	6.2	5.2	5.78	2.07	-	-
Total	99.9	99.5	99.7	99.8	99.7	99.9	99.8	99.7	99.8	0.1	100.1	100.1
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.5	6.4	7	23.2	13.1	6.8	13	12.9	10.2	5.5	4.3	4.3
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.22	4.54	5.08	8.5	3.22	0.84	2.95	3.33	2.38	2.42	0.87	0.87
K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08	0.05	0.06	0.13	0.09	0.04	0.1	0.09	0.07	0.03	0.22	0.22
Na <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.01	0.01	0.02	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03	0.02	0.26	0.26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /K <sub>2</sub> O	7.05	7.51	8.16	2.04	5.66	8.12	5.03	4.72	6.05	2.1	1.3	1.3
CIA (%)	81	91.3	93.2	85.5	83.5	88.8	82.2	83.8	86.2	4.5	56.9	56.9
PIA (%)	85.9	96.1	98.8	96.6	90.4	92.4	89.1	90.7	92.5	4.4	59.3	59.3
ICV	0.92	0.65	0.68	0.69	0.91	0.64	0.86	0.82	0.77	0.12	1.2	1.2

LOI: Loss of ignition.

CIA (%) =  $[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$  from Nesbitt and Young (1982).

PIA (%) =  $[\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O})] \times 100$  from Nesbitt and Young (1982) and Fedo et al. (1995).

ICV =  $(\text{FeO}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2)/\text{Al}_2\text{O}_3$  from Cox et al. (1995).

The UCC values are cited from Taylor and McLennan (1985) and McLennan (2001).

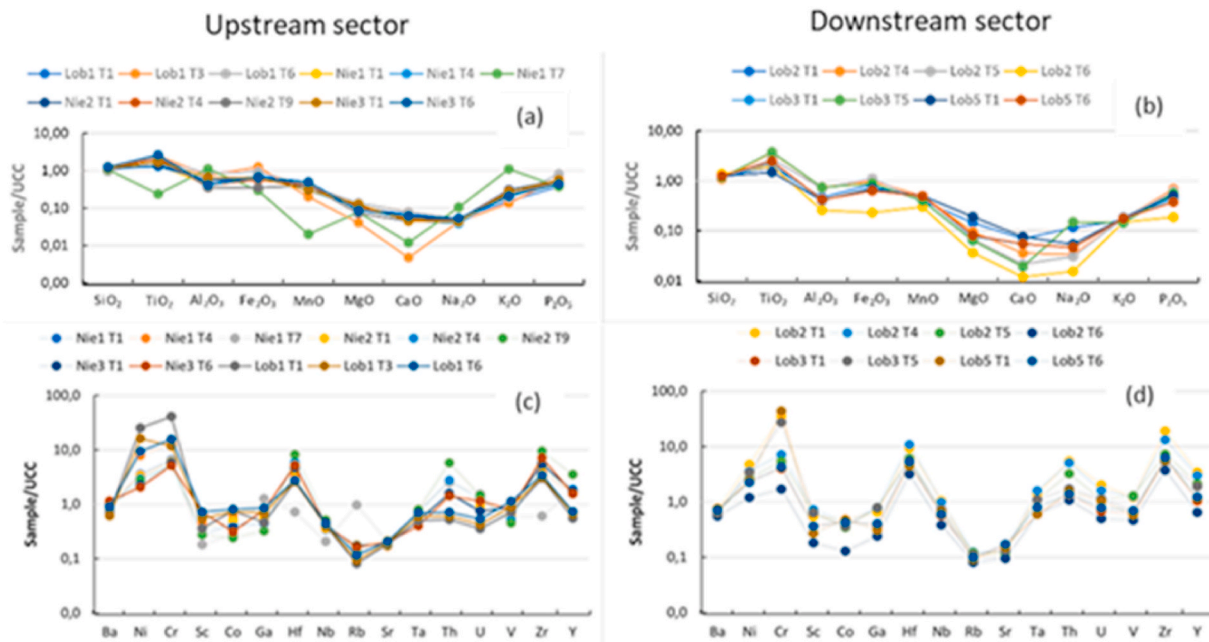
(SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>: refers to SiO<sub>2</sub> contents recalculated to an anhydrous basis and adjusted to 100%.

Av. = average. 1sd = one standard deviation. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = Total Fe expressed as Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. n = total number of samples.

(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Na<sub>2</sub>O + CaO\* + K<sub>2</sub>O)\*100, using molecular proportion (Nesbitt and Young, 1982). In this formula, the CaO\* represents Ca in silicate fractions only. In this study, CaO contents were corrected for Ca in apatite as follows: CaO\* = CaO - 10(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)/3. Since some of the CaO contents are higher than those of Na<sub>2</sub>O contents, the CaO\* has been calculated based on the McLennan (1993) method, formulated as follows (after the P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> correction): 1) if the content of CaO is less or equal to the Na<sub>2</sub>O content, then the CaO value is used for further calculation, 2) if the CaO content is higher than Na<sub>2</sub>O, then Na<sub>2</sub>O value is considered as CaO\*. Due to their low contents in the current study, it is considered that the Ca in sediments are sourced from inorganic carbon. The correction for Ca in apatite, is due to the fact that it can be sourced from certain igneous and metasedimentary rocks which are likely parent rocks of the sediments studied. For the interpretation, it is important to

note that unweathered igneous rocks have CIA values near to 50, while intensively weathered clay material (i.e., kaolinite, gibbsite, and chlorite) have values up to 100. The up- and downstream samples show CIA values (CIA = 84 and 86, respectively) higher than that of average sediment composition (~65–70; McLennan et al., 1993).

The CIA values for the up and downstream samples of LR sediments and average composition of UCC are plotted in the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(CaO + Na<sub>2</sub>O)-K<sub>2</sub>O (A-CN-K) ternary diagram, which permits to appreciate the variation in compositional changes either due to chemical weathering or to source rock composition (Fig. 7a; Nesbitt and Young, 1982; Fedo et al., 1995). On the A-CN-K diagram (Fig. 7a), most of the studied samples plotted almost on the A-K axis, indicating a high intensity of weathering, under a nearly steady state (Nesbitt et al., 1997). However, most of the downstream samples plot near to the A apex, indicating that the



**Fig. 6.** UCC-normalized major and trace element patterns of the Lobé River sediments. Normalization values are from Taylor and McLennan (1985) and McLennan (2001). (a, c) upstream sector and (b, d) downstream sector.

intensity of weathering is a slightly variable between both sectors. The rest of the samples plot, in a lesser extent, closer to the K apex, indicating K-addition process, known as potassium metasomatism, which may occur during diagenesis. K-addition is due to the post depositional conversion of kaolinite to illite by including  $K^+$  in their structure (Fedo et al., 1995). This interpretation is consistent with the presence of illite in the studied sediments, as revealed by the DRX result (Fig. 5). The abovementioned post depositional change is probably not markedly significant, since the sediments are less lithified to unlithified. Hence, it could not modify, noticeably, the primary control of weathering information, resulting in a high value of another weathering indices such as the Plagioclase Index of Alteration (PIA =  $[\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O} / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O})] \times 100$ ; Fedo et al., 1995). The formula of PIA uses total aluminum (Al) with correction for Al in K-feldspar and hence does not take into consideration the potassium metasomatism to estimate the weathering of the source rock (Table 4). On the other hand, Fedo et al. (1995) documented that pristine rocks and their altered products fall along the same linear trend and the projection of this linear trend onto the feldspar join suggests the chemical composition and mineralogical association of the possible parental material. The theoretical alteration trends of the LR sediments (dotted lines, Fig. 7a) suggest variable source rocks (i.e., granite, granodiorite, and tonalite).

Another approach to estimate the weathering of parental materials is the Index of Chemical Variability (ICV; Cox et al., 1995). The ICV is formulated as follows:  $\text{ICV} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Mn} + \text{TiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3$ . Typical rock forming minerals such as feldspars, amphiboles, and pyroxenes have ICV value of  $>1$ , whereas alteration products like kaolinite, illite, and muscovite have ICV value  $<1$  (Cox et al., 1995; Cullers, 2000). The ICV value of LR sediments range between 0.35 and 0.92 (average =  $0.70 \pm 0.44$ ), indicating alteration products. The high degree of chemical weathering is further confirmed by the binary diagram of ICV versus CIA (Fig. 7b).

**4.2.1.4. (A-K)-C-N diagram.** The  $(\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}) - \text{CaO}^* - \text{Na}_2\text{O}$  ((A-K)-C-N) ternary diagram shows molar proportion of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (subtracting the Al associated with K),  $\text{CaO}^*$ , and  $\text{Na}_2\text{O}$  (Fig. 7c). Hence, it does not take into consideration the K-metasomatism and can be used to better estimate the weathering intensity of sediments which underwent K-addition during diagenetic processes (Fedo et al., 1995), as it is the case in the

current study. In this diagram, all the samples plot close to the A-K apex, indicating a high degree of weathering for the sediments and the source rocks (Fig. 7c). This indicates that the effect of weathering had proceeded to the stage where alkali and alkaline earth elements are substantially removed from the clay mineral during a high degree of weathering (Taylor and McLennan, 1985).

#### 4.2.2. Trace elements

**4.2.2.1. Upstream sector.** The trace element concentrations for the upstream sediments (Table 6; Fig. 6c) revealed the following patterns:

High field strength elements (HFSE; i.e., Zr, Hf, Ta, and Y) are usually higher than UCC. In general, the Zr and Hf contents (115.4–1358 ppm and 4.2–47.6 ppm, respectively) are greatly higher than UCC (190 and 5.8 ppm, respectively). Zr and Hf show significant correlation coefficient ( $r = 0.99$ ), as expected from their similar geochemical nature.

The large ion lithophile elements (LILE; i.e., Ba, Rb, and Sr) show wider variations (Ba = 336–608 ppm, Rb = 9.1–108.4 ppm, and Sr = 58.9–75.1 ppm) but their mean contents are lower than UCC. Ba and Sr show negative correlation with  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , suggesting that their concentrations are not controlled by mica-like clay minerals.

The transitional trace elements (TTE) such as Co (4.1–13.9 ppm), Sc (2–8 ppm), and V (27–68 ppm) have generally lower concentrations than the UCC, whereas Cr (180–1440 ppm) and Ni (41–506 ppm) contents are higher than UCC. The concentrations of these TTE do not show significant correlation with  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , indicating that these elements are not completely associated with phyllosilicates, but are largely controlled by the heavy minerals (Table 5).

**4.2.2.2. Downstream sector.** In the downstream sediments, the concentrations of some HFSE (i.e., Zr = 712.5–3654 ppm, Hf = 18.5–63.3 ppm) are significantly higher than UCC (190 and 5.8 ppm, respectively; Table 6; Fig. 6d). The contents of LILE, like Ba (304–421 ppm), Rb (9–13.9 ppm), and Sr (33.4–60.5 ppm) are significantly lower than the UCC. Similarly, the concentration of some TTE such as Co (2.2–13.9 ppm), Sc (2–8 ppm) and V (27–78 ppm) are lower than the UCC, whereas Cr (60–1540 ppm) and Ni (24–506 ppm) are higher relative to UCC. Low correlation is recorded between LILE and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , and  $\text{TiO}_2$ . Also, the

**Table 5**  
Correlation matrix of geochemical data from the Lobé River sediments.

Upstream sector (n = 11)																												
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ba	Ni	Cr	Sc	Co	Ga	Hf	Nb	Rb	Sr	Ta	Th	U	V	Zr	Y	∑REE	
SiO <sub>2</sub>	1																											
TiO <sub>2</sub>	0.35	1																										
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.81	-0.56	1																									
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.39	0.43	0.1	1																								
MnO	0.44	0.52	-0.79	0	1																							
MgO	-0.3	-0.2	-0.02	-0.11	0.36	1																						
CaO	0.05	0.2	-0.48	-0.03	0.87	0.71	1																					
Na <sub>2</sub> O	-0.35	0.63	0.73	-0.46	-0.54	-0.17	-0.38	1																				
K <sub>2</sub> O	-0.26	-0.76	0.69	-0.59	-0.67	-0.13	-0.5	0.94	1																			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-0.66	0.34	0.25	0.61	-0.03	0.36	0.17	-0.32	-0.39	1																		
Ba	0	-0.33	0.12	-0.58	0.04	0.41	0.16	0.42	0.49	-0.2	1																	
Ni	-0.11	0.11	0.03	0.56	0.11	-0.23	0.07	-0.12	-0.31	0	-0.75	1																
Cr	-0.04	-0.0	-0.07	0.30	0.31	0.05	0.36	-0.07	-0.27	-0.12	-0.56	0.92	1															
Sc	-0.3	0.56	0.02	0.59	0.26	0.33	0.32	-0.36	-0.51	0.61	0.03	0.05	0.01	1														
Co	-0.52	0.11	0.15	0.81	0.11	0.13	0.25	-0.31	-0.46	0.52	-0.62	0.78	0.69	0.36	1													
Ga	-0.64	-0.47	0.89	-0.05	-0.62	-0.02	-0.38	0.82	0.74	0.05	0.42	-0.13	-0.16	0.16	-0.06	1												
Hf	0.66	0.62	-0.75	-0.31	0.51	0.05	0.26	-0.53	-0.45	0.01	0.08	-0.45	-0.39	0.02	-0.5	-0.68	1											
Nb	0.31	0.84	-0.59	0.27	0.52	0.14	0.35	-0.75	-0.79	0.45	-0.39	0.05	0.02	0.44	0.11	-0.66	0.75	1										
Rb	-0.3	-0.73	0.73	-0.53	-0.69	-0.18	-0.52	0.96	0.99	-0.38	0.46	-0.26	-0.23	-0.45	-0.42	0.79	-0.5	-0.8	1									
Sr	-0.45	-0.07	0.46	-0.11	-0.11	0.19	-0.03	0.45	0.33	0.32	0.49	-0.18	-0.23	0.2	0.02	0.54	-0.25	-0.26	0.33	1								
Ta	-0.31	0.16	0.44	-0.3	-0.42	-0.1	-0.33	0.48	0.49	0.22	-0.01	-0.13	-0.18	-0.37	-0.17	0.24	0.07	0	0.45	0.33	1							
Th	0.44	0.1	-0.25	-0.7	-0.04	-0.2	-0.17	0.1	0.22	-0.22	0.13	-0.5	-0.44	-0.47	-0.71	-0.26	0.7	0.28	0.17	-0.24	0.59	1						
U	0.28	-0.2	0.04	-0.83	-0.21	-0.15	-0.27	0.51	0.62	-0.4	0.61	-0.72	0.63	-0.44	-0.88	0.21	0.39	-0.2	0.58	0.15	0.52	0.79	1					
V	-0.66	0.27	0.43	0.7	-0.03	0.28	0.17	-0.07	-0.27	0.7	-0.17	0.32	0.24	0.85	0.61	0.41	-0.39	0.19	-0.2	0.32	-0.14	-0.63	-0.6	1				
Zr	0.66	0.68	-0.76	-0.27	0.56	0.04	0.29	-0.53	-0.48	0.01	0.12	-0.45	-0.39	0.11	-0.49	-0.64	0.99	0.75	-0.52	-0.21	0	0.64	0.37	-0.33	1			
Y	0.5	0.07	-0.32	-0.74	0	-0.11	-0.13	0.02	0.19	-0.25	0.29	-0.67	-0.58	0.41	-0.81	-0.28	0.75	0.26	0.13	-0.27	0.4	0.96	0.8	-0.66	0.7	1		
∑REE	0.49	0.25	-0.4	-0.61	0.11	-0.13	-0.05	-0.1	0.03	-0.13	0.09	-0.51	-0.45	-0.37	-0.66	-0.42	0.82	0.45	-0.03	-0.28	0.49	0.98	0.7	-0.59	0.77	0.95	1	

Downstream sector (n = 8)																												
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ba	Ni	Cr	Sc	Co	Ga	Hf	Nb	Rb	Sr	Ta	Th	U	V	Zr	Y	∑REE	
SiO <sub>2</sub>	1																											
TiO <sub>2</sub>	-0.71	1																										
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.92	0.84	1																									
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.94	0.53	0.87	1																								
MnO	-0.47	0.08	0.17	0.37	1																							
MgO	-0.14	-0.48	-0.1	0.2	0.48	1																						
CaO	0.01	-0.56	-0.33	0.06	0.64	0.86	1																					
Na <sub>2</sub> O	-0.28	0.28	0.34	0.31	-0.08	0.2	0.13	1																				
K <sub>2</sub> O	-0.28	-0.28	0.03	0.34	0.7	0.49	0.54	-0.53	1																			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-0.96	0.53	0.86	0.96	0.41	0.34	0.13	0.33	0.32	1																		
Ba	-0.11	-0.43	-0.18	0.16	0.76	0.85	0.95	0.15	0.62	0.21	1																	

(continued on next page)





**Table 6**

Trace element concentrations (ppm) and element ratios of the Lobé River sediments, and average composition of UCC. Normalization values are from Taylor and McLennan (1985).

Location	Upstream sector (n = 11)												
Ref code	Nie1T1	Nie1T4	Nie1T7	Nie2T1	Nie2T4	Nie1T9	Nie3T1	Nie3T6	Lob1T1	Lob1T3	Lob1T6	Av	± 1sd
Ba	495	478	609	608	541	453	544	635	391	336	493	507	73
Ni	72	158	71	66	60	56	45	41	506	325	189	145	109
Cr	230	460	220	210	190	180	200	180	1440	410	550	388	238
Sc	3	5	2	40	4	3	7	8	4	6	8	5	2
Co	7.4	10.4	4.7	8.6	6.5	4.1	6.2	5.3	12.9	12.5	13.9	8.4	3
Ga	7.5	9.7	21.6	9.7	7.5	5.5	11.9	13.5	7.9	11.8	14.5	11	3.3
Hf	22	19.4	4.2	24	35	48	27	30	14.9	15.3	16.1	23	9
Nb	8.7	9.4	5.2	9.1	11.1	13	11.4	10.2	10	10.6	11.1	10	1.4
Rb	15.4	15.9	108	20	15.8	14.3	19.3	18.2	9.1	10.5	12.9	24	15
Sr	62	58	72	75	71	61	66	70	64	68	73	68	5
Ta	0.4	0.5	0.8	0.6	0.7	0.8	0.5	0.4	0.5	0.6	0.7	0.6	0.1
Th	15.1	16.4	27	15.3	28	62	17	15.3	5.6	6.5	7.7	19.8	10.8
U	2.1	2.2	4.3	2.6	3.4	4.1	2.1	3.2	1	1.2	1.5	2.5	0.9
V	31	39	36	36	32	27	53	48	43	54	68	42.5	9.7
Zr	857	726	115	932	1358	1809	1040	1354	571	602	654	911	353
Y	34	34	39	35	42	78	38	35	12.2	14.8	16.2	34	11
Zr/Hf	38	37	28	38	39	38	38	45	38	39	41	38	2
Cr/Th	15	28	8	14	6	3	12	12	257	63	71	45	47
V/Cr	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0	0.1	0.1	0.2	0
Th/Sc	5	3	13	4	7	21	2	2	1	1	1	6	5
Th/U	7.2	7.5	6.2	5.9	8.7	15.1	8.1	4.8	5.6	5.4	5.1	7.2	1.9
Rb/Sr	0.25	0.27	1.5	0.27	0.22	0.23	0.29	0.26	0.14	0.15	0.18	0.3	0.2
Ni/Co	10	15	15	8	9	14	7	8	39	26	14	15	7
U/Th	0.13	0.08	0.16	0.17	0.17	0.15	0.27	0.27	0.03	0.13	0.12	0.2	0
Zr/Sc	286	145	58	233	340	603	149	169	143	100	82	210	113

Location	Downstream sector (n = 8)										UCC
Ref code	Lob2T1	Lob2T4	Lob2T5	Lob2T6	Lob3T1	Lob3T5	Lob5T1	Lob5T6	Av	± 1sd	UCC
Ba	385	353	337	304	372	339	421	394	363	100	550
Ni	95	72	53	24	48	68	47	45	57	74	44
Cr	1240	250	190	60	140	960	1540	150	566	333	92.3
Sc	6	8	7	2	4	7	3	4	5	2	13.6
Co	8.2	7.2	5.9	2.2	7.8	6.2	8.2	7.3	6.6	2.3	17
Ga	11.2	13.4	13.1	4.1	6.4	13.5	5.3	6.9	9.2	3.4	17
Hf	54	63	36	18.5	29	32	26	31	36	11	5.8
Nb	26	24	17.5	9.6	14.2	18.4	16.5	15	17.8	4.3	12
Rb	11.2	13.9	13.6	9	11.1	12.5	10.2	11	11.6	9.2	112
Sr	46	44	40	33	59	47	54	61	48	13	350
Ta	1.4	1.6	1.1	0.6	0.6	1.1	0.6	0.8	1	0.2	1
Th	59	54	35	11.5	14.5	18.5	16.5	15	28	13	10.7
U	5.7	4.5	3.1	1.4	1.9	3.2	2.9	2.2	3.1	1	2.8
V	72	75	78	28	37	42	35	42	51	13	107
Zr	3654	2536	1385	713	1145	1025	1099	1204	1595	504	190
Y	76	66	47	14.3	23	42	26	27	40	14	22
Zr/Hf	67	40	39	39	39	32	42	39	42	5	33
Cr/Th	21	5	6	5	10	52	93	10	25	35	9
V/Cr	0.1	0.3	0.4	0.5	0.3	0	0	0.3	0.2	0.1	1.16
Th/Sc	9.8	6.8	4.9	5.8	3.6	2.6	5.5	3.8	5.3	3	0.79
Th/U	10.3	12.1	11.2	8.2	7.6	5.8	5.7	6.8	8.5	2.1	3.82
Rb/Sr	0.24	0.32	0.34	0.27	0.19	0.27	0.19	0.18	0.2	0.1	0.32
Ni/Co	12	10	9	11	6	11	6	6	9	5	2.6
U/Th	0.06	0.3	0.41	0.47	0.26	0.04	0.02	0.28	0.2	0.1	0.26
Zr/Sc	609	317	198	356	286	147	366	301	323	117	14

The UCC values are cited from Taylor and McLennan (1985). Av. = average. 1sd = one standard deviation. n = total number of samples.

4.2.3.2. *Downstream sector.* The  $\sum$ REE contents vary from 188.8 to 786.8 ppm (Table 7). The UCC and chondrite-normalized REE patterns (Fig. 8b, d) indicate slight LREE enrichment with (La/Sm)<sub>cn</sub> ratios varying between 4.54 and 6.51, and flat to moderately fractionated HREE with (Gd/Yb)<sub>cn</sub> ratios varying between 0.96 and 1.96. All the samples show negative Eu anomalies (Eu/Eu<sub>cn</sub>\* = 0.34 ± 0.17). The low correlation of REE with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> indicates that REE distribution is not likely to be controlled by the influence of phyllosilicate. In contrast, the significant correlation of REE with Th and Zr indicates that its distribution is probably controlled by zircon and opaque phases (Ji et al., 2019; Ramos-Vázquez and Armstrong-Altrin, 2019).

## 5. Discussion

### 5.1. Controls on texture, sediment maturity and recycling

The sediment samples have sand-sized class ranging between 2 Φ and 4 Φ, indicating mostly very fine and fine sand-sized particles, probably due to the chemical weathering of the parent rocks. Overall, the studied sediment is well sorted, indicating its textural maturity. This implies long transport of very fine size particles and indicates the bulk hydraulic energy of the LR and NR, which controls the texture of the sediments.

The textural maturity of sediments can also be inferred using the SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio since a high value of this ratio represents



Table 7

Rare earth element concentrations (ppm) and element ratios of the Lobé River sediments, and average composition of UCC and chondrite. Normalization values are from Taylor and McLennan (1985) and McDonough and Sun (1995).

Location	Upstream sector (n = 11)												
Ref. Code	Nie1T1	Nie1T4	Nie1T7	Nie2T1	Nie2T4	Nie1T9	Nie3T1	Nie3T6	Lob1T1	Lob1T3	Lob1T6	Av	± 1sd
La	48	51	53	47	87	165	56	52	21	28	33	58	25
Ce	92	96	87	89	130	325	101	98	38	41	61	105	45
Pr	10.63	10.75	10.84	10.05	26	37	11.76	9.25	4.21	5.24	6.53	12.93	6.74
Nd	39	40	41	37	101	136	41	36	14.2	18.9	22	48	26
Sm	6.85	7.17	7.68	6.65	17.85	23	7.92	6.42	2.44	3.02	3.69	8.45	4.4
Eu	0.77	0.84	1.86	0.97	1.24	1.56	0.98	0.82	0.38	0.41	0.76	0.96	0.33
Gd	6.52	6.71	8.1	6.64	14.36	21	7.25	6.24	2.33	3.12	3.45	8	4
Tb	0.95	0.98	1.24	0.98	1.25	2.68	1.11	0.65	0.34	0.41	0.47	1.01	0.41
Dy	5.82	5.7	6.81	5.86	9.32	14.4	6.62	4.42	1.97	2.14	2.94	6	2.39
Ho	1.23	1.27	1.37	1.29	2.14	2.77	1.42	1.21	0.44	0.5	0.57	1.29	0.46
Er	3.99	3.79	3.87	4.05	6.54	8.05	4.34	3.24	1.45	1.54	1.69	3.87	1.39
Tm	0.56	0.52	0.55	0.61	0.93	1.09	0.63	0.54	0.21	0.24	0.27	0.56	0.19
Yb	4	3.53	3.41	3.93	5.34	7.05	4.1	3.21	1.41	1.52	1.67	3.56	1.2
Lu	0.62	0.58	0.47	0.64	0.89	1.12	0.69	0.46	0.21	0.25	0.3	0.57	0.21
REE	221	230	228	213	404	746	245	223	89	106	139	258	116
LREE	204	213	210	196	378	709	226	209	82.6	99.8	131	242	110
HREE	17	16	18	17	26	37	19	14	6	7	8	17	6
LREE/HREE	12	13	12	11	14	19	12	15	14	15	17	14	2
Ce/Ce*	0.99	1	0.89	0.99	0.67	1.01	0.96	1.09	0.99	0.81	1.02	0.95	0.08
Eu/Eu*	0.35	0.37	0.72	0.45	0.24	0.22	0.9	0.9	0.44	0.41	0.65	0.51	0.19
La/Th	3.2	3.12	1.97	3.05	2.95	2.65	3.26	3.41	3.73	4.37	4.26	3.27	0.49
La/Sc	16.1	10.24	26	11.65	22	55	7.93	6.51	5.23	4.73	4.1	14	10
(La/Yb) <sub>cn</sub>	8.2	9.85	10.52	8.06	11.11	15.86	9.2	11.03	10.07	12.69	13.34	10.9	1.73
(La/Sm) <sub>cn</sub>	4.4	4.46	4.29	4.38	3.05	4.42	4.38	5.07	5.35	5.87	5.55	4.66	0.58
(Gd/Yb) <sub>cn</sub>	1.32	1.54	1.92	1.37	2.18	2.38	1.43	1.57	1.34	1.66	1.67	1.67	0.27
Location	Downstream sector (n = 8)												
Ref. Code	Lob2T1	Lob2T4	Lob2T5	Lob2T6	Lob3T1	Lob3T5	Lob5T1	Lob5T6	Av	± 1sd	UCC	Chondrite	
La	140	142	97	35	46	36	41	48	73	30	30	0.237	
Ce	398	275	180	64	84	94	87	90	159	66	64	0.613	
Pr	40	31	21	7.26	9.54	8.54	8.96	9.89	16.96	8	7.1	0.093	
Nd	132	112	75	26	34	25	31	37	59	29	26	0.457	
Sm	19.2	18.93	12.63	4.03	5.75	3.47	5.32	6.19	9.44	4.64	4.5	0.148	
Eu	1.42	1.36	1.11	0.36	0.64	0.86	0.41	0.67	0.85	0.33	0.88	0.056	
Gd	17.8	16.37	11.16	3.4	5.19	4.25	4.24	5.46	8.48	3.95	3.8	0.199	
Tb	2.86	2.16	1.48	0.45	0.69	0.58	0.54	0.78	1.19	0.52	0.64	0.036	
Dy	13.41	11.93	8.40	2.63	3.82	6.54	3.54	4.68	6.87	2.68	3.5	0.246	
Ho	3.1	2.4	1.69	0.53	0.86	1.25	0.74	0.97	1.44	0.55	0.8	0.055	
Er	8.32	7.29	4.88	1.64	2.60	3.14	3.16	3.19	4.28	1.54	2.3	0.16	
Tm	1.52	1.04	0.73	0.26	0.39	0.87	0.42	0.48	0.71	0.25	0.33	0.025	
Yb	7.35	6.99	4.6	1.74	2.52	3.58	3.25	3.17	4.15	1.33	2.2	0.161	
Lu	1.3	1.1	0.75	0.32	0.44	0.68	0.47	0.5	0.7	0.23	0.32	0.025	
REE	787	629	419	148	196	189	190	211	346	149	146	2.51	
LREE	749	596	397	140	185	172	178	197	327	142	136	1.8	
HREE	38	33	23	8	11	17	12	14	19	7	10	0.71	
LREE/HREE	20	18	18	19	16	10	15	14	16	3	14	2.55	
Ce/Ce* <sub>cn</sub>	1.19	1.01	0.98	0.97	0.98	1.3	1.11	1	1.08	0.13			
Eu/Eu* <sub>cn</sub>	0.24	0.24	0.29	0.3	0.36	0.69	0.26	0.35	0.34	0.17			
La/Th	2.38	2.61	2.79	3.08	3.15	1.96	2.47	3.22	2.71	0.58			
La/Sc	23	17.74	13.81	17.7	11.43	5.17	13.6	12.08	14.35	7.16			
(La/Yb) <sub>cn</sub>	12.91	13.79	14.28	13.82	12.32	6.87	8.53	10.35	11.61	2.28			
(La/Sm) <sub>cn</sub>	4.54	4.68	4.78	5.49	4.96	6.51	4.79	4.87	5.08	0.68			
(Gd/Yb) <sub>cn</sub>	1.96	1.89	1.96	1.58	1.67	0.96	1.06	1.39	1.56	0.32			

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

$$Ce/Ce^*_{cn} = (Ce_{sample}/Ce_{chondrite})/(La_{sample}/La_{chondrite})^{1/2}(Pr_{sample}/Pr_{chondrite})^{1/2}$$

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

$$(La/Yb)_{cn} = (La_{sample}/La_{chondrite})/(Yb_{sample}/Yb_{chondrite})$$

$$(La/Sm)_{cn} = (La_{sample}/La_{chondrite})/(Sm_{sample}/Sm_{chondrite})$$

$$(Gd/Yb)_{cn} = (Gd_{sample}/Gd_{chondrite})/(Yb_{sample}/Yb_{chondrite})$$

The UCC and chondrite values are cited from Taylor and McLennan (1985) and McDonough and Sun (1995).

Av. = average. 1sd = one standard deviation. n = total number of samples. Subscript <sub>cn</sub> refers to chondrite-normalized values.

compositionally matured sediments, exhibiting the composition trends toward stable minerals and components such as quartz (Roser et al., 1996). Basic igneous rock have SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio of 3, whereas it is about 5 in the acid igneous rocks, hence the values > 5 in clastic sediments indicate sediment maturity (Roser et al., 1996). The SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratios vary from 4.21 to 15.68 with an average of 9.77 ± 3.68 in the upstream sediments and from 6.38 to 23.2 (average = 10.15 ± 5.5) in downstream

sediments, indicating a moderate textural maturity. Another approach to determine the compositional maturity of sediments is to use the ICV (Cox et al., 1995). The average ICV value of LR watershed sediments indicates a moderate textural and compositional maturity (ICV = 0.70 ± 0.44). Contents of trace elements such as Ba and Sr, which are abundant in K-feldspar and mica, reveal compositional variation in the studied sediments (Muhs et al., 2003). Indeed, the average concentrations of Ba

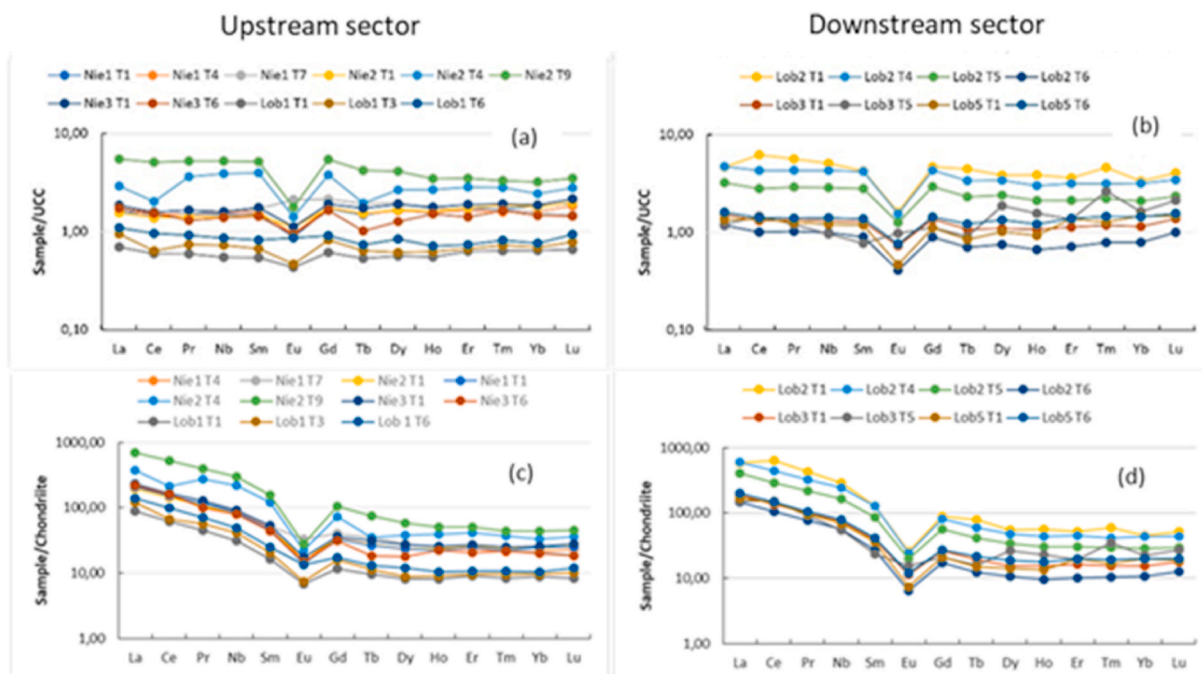


Fig. 8. UCC- and chondrite-normalized rare earth element patterns of the Lobé River sediments. Normalization values are from Taylor and McLennan (1985) and McDonough and Sun (1995). (a, c) upstream sector and (b, d) downstream sector.

and Sr, which may substitute for K in the lattice of silicate minerals, are slightly higher in the upstream sector ( $507 \pm 73$  ppm and  $68 \pm 5$  ppm, respectively) than in downstream sector ( $363 \pm 100$  ppm and  $48 \pm 13$  ppm, respectively). Also, the average  $K_2O$  contents are higher for upstream samples ( $1.04 \pm 0.91$  wt%) than for the downstream samples ( $0.57 \pm 0.05$  wt%). Moreover, the Ba contents reflect also the relative maturity of the downstream sediments, as compared to the upstream ones. It appears that, Ba concentrations, which are proxies for K-feldspar content, seem to be low in the downstream samples (Table 6; Muhs and Holliday, 2001). This suggests that the upstream samples are closer to the source rocks and are slightly enriched in K-bearing minerals as compared with the downstream sediments, although K-bearing minerals are low for both the up- and downstream sediments.

Compositional variation in sediments and recycled effect are reflected in the contents of Zr and Hf, which are HFSE associated with zircon (Armstrong-Altrin and Machain-Castillo, 2016). Generally, high

contents of these elements are related to recycled effect. The average Zr contents in the upstream sector ( $911 \pm 353$  ppm) is relatively low while it is high ( $1595 \pm 504$  ppm) in the downstream sector. Similarly, the average Hf contents in the upstream sector ( $23 \pm 9$  ppm) is relatively low while it is high ( $36 \pm 11$  ppm) in the downstream sector. This reveals variation in Zr and Hf contents between the up- and downstream samples is indicating a sorting-related fractionation. The recycled effect of downstream samples relative to upstream samples is identifiable in the ternary  $Al_2O_3$ - $TiO_2$ -Zr diagram (Garcia et al., 1994), which shows a simple mixing trend due to the change in  $Al_2O_3/Zr$  ratio (Fig. 9a). The recycled effect of the sediments studied, and thus Zr enrichment during sorting, can also be documented on the binary diagram of Th/Sc versus Zr/Sc (McLennan, 1993). In this diagram (Fig. 9b), the Zr/Sc ratios increase more rapidly than Th/Sc for all samples, suggesting recycling and sorting of sediments. However, recycling seems, as expected, more pronounced for downstream samples.

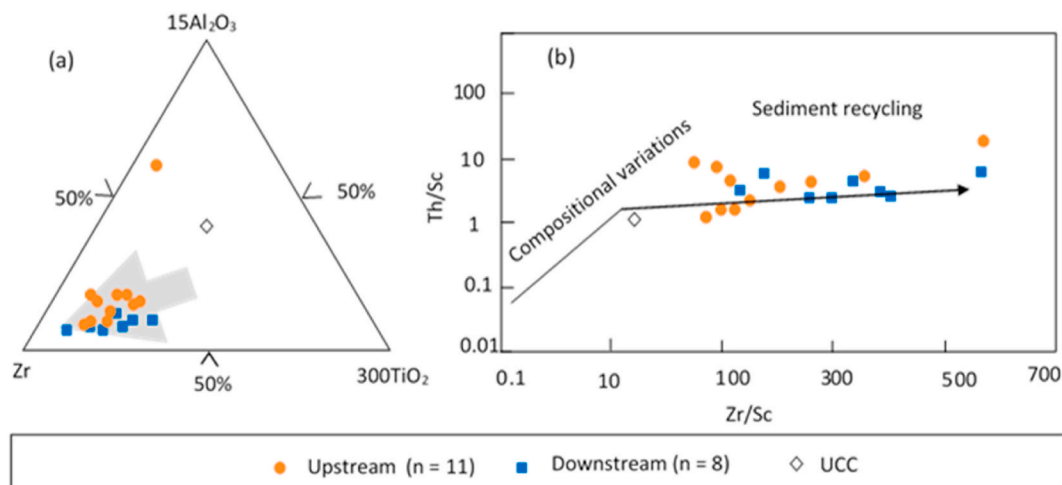


Fig. 9. (a) Ternary plot of  $Al_2O_3$ - $TiO_2$ -Zr (after Garcia et al., 1994), and (b) Th/Sc versus Zr/Sc bivariate plot (after McLennan et al., 1993) for the Lobé River sediments, showing possible sorting effects and recycling.

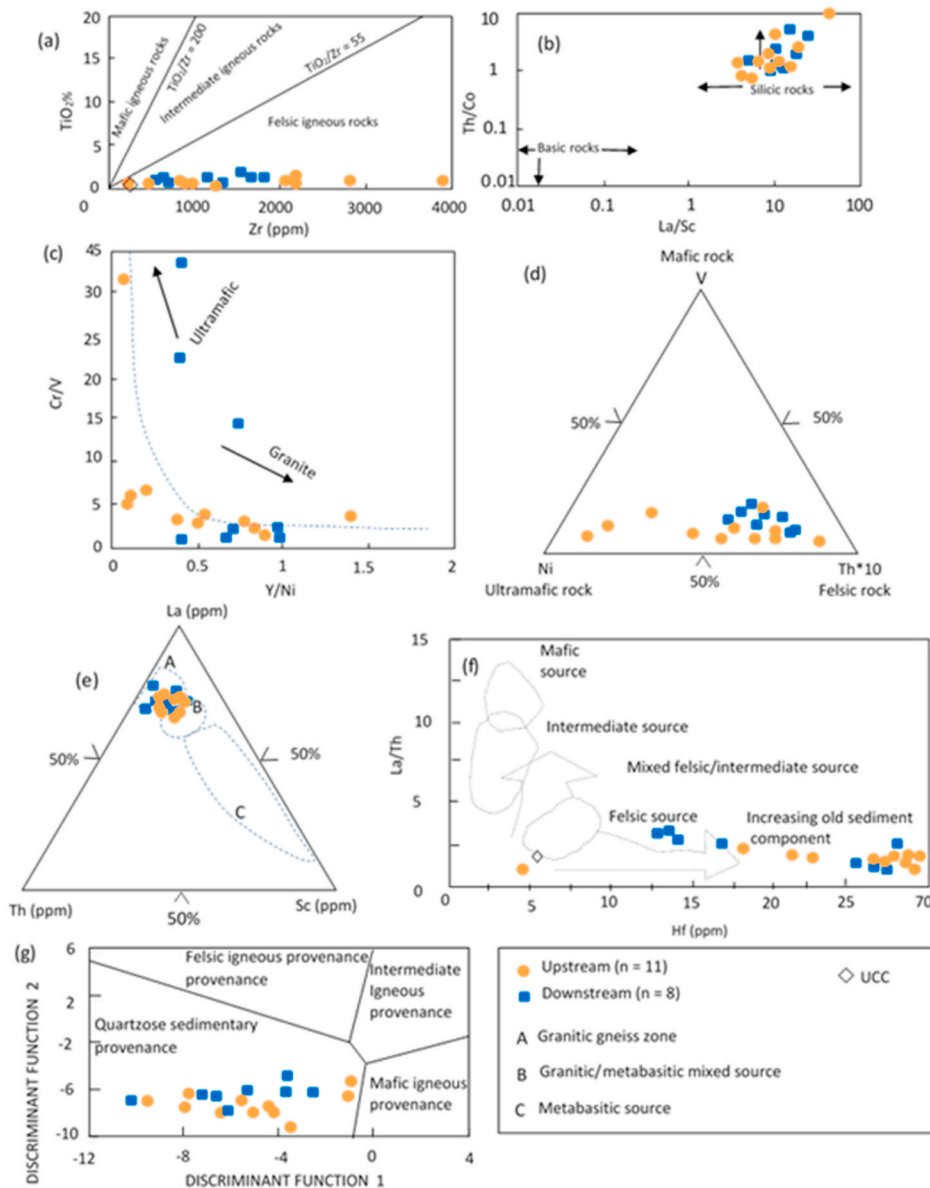
5.2. Source area weathering

The rate of transformation of primary minerals, and especially of the feldspars, from crystalline bedrocks into clays, secondary oxides, and hydroxides is related to the paleoweathering intensity among other factors such as paleoclimate and tectonism (Nesbitt and Young, 1984; Fedo et al., 1995; Nesbitt et al., 1997). The proportion of feldspar, which is a residual mineral in the studied sediments is very low (<2%; Table 2), indicating that the weathering was strong enough to alter nearly all the feldspar or the physical erosion proceeded at a rate which was nil or lesser than the rate of chemical weathering.

The high CIA values indicate the high intensity of chemical weathering in the source areas. However, the intensity of weathering is higher for downstream sediments compared to the upstream samples. The slight difference between the CIA values of up- and downstream sectors may be due to parent rocks or grain-size effect due to sorting. Shao and Yang (2012) also reported variation in the CIA values in the Changjian River sediments due to hydrodynamic sorting. Differences in source rocks may also explain the variations in CIA values between the upstream and downstream samples. The sediments from upstream sector receive contribution mainly from Nyong unit source rock (located in the

NR watershed), which experienced sedimentary cycles in Nyong intracratonic basin (2515–2535 Ma; Feybesse et al., 1998). Whereas the sediments from downstream sector receive contribution from both the Nyong and Ntem units, the latter being a stable craton (Tchameni et al., 2000; Shang et al., 2007). On the A-CN-K diagram, despite the effects of K-metasomatism (Fig. 7a), all the studied samples plotted near to the A apex, on the A-K axis, indicating a high intensity of weathering, under a nearly steady state (Nesbitt et al., 1997). The ((A-K)-C-N) ternary diagram, which does not take into consideration the K-addition, monitor the trend of plagioclase weathering in the sediments. In the current study, this diagram also suggests a high degree of weathering (Fig. 7c).

Some trace element contents like those of Th, U, Rb, and Sr can also be used to measure the intensity of weathering in the source region. Th is immobile in the superficial environment, whereas U is strongly mobile and the weathering and recycling are expected to result in oxidation of  $U^{4+}$  to the soluble  $U^{6+}$  state (McLennan et al., 1993). Hence, the removal of the soluble  $U^{6+}$  from the alteration profiles will increase the Th/U ratio above the average UCC values (Th/U = 4.7). The Th/U values are more than 4.8 for up- and downstream samples. Hence, all the analyzed sediments exhibit the Th/U ratio relatively far above that of UCC (Table 6), indicating intense chemical weathering of source rocks.



**Fig. 10.** Bivariate and ternary plots of the Lobé River sediments, inferring possible source rocks: (a) Zr vs.  $TiO_2$  (after Hayashi et al., 1997), (b) Th/co vs. La/Sc (after Cullers, 2002), (c) Cr/V vs. Y/Ni (after Hiscott, 1984), (d) V–Ni–Th\*10 (after Bracciali et al., 2007), (e) La–Th–Sc (after Cullers, 1994), (f) La/Th vs. Hf (after Flyod and Leveridge, 1987), and (g) Discriminant function plot of Roser and Korsch (1988). The discriminant functions are: Discriminant Function 1 =  $(-1.773 * TiO_2) + (0.607 * Al_2O_3) + (0.760 * Fe_2O_3) + (-1.500 * MgO) + (0.616 * CaO) + (0.509 * Na_2O) + (-1.224 * K_2O) + (-9.090)$ ; Discriminant Function 2 =  $(0.445 * TiO_2) + (0.070 * Al_2O_3) + (0.250 * Fe_2O_3) + (-1.142 * MgO) + (0.438 * CaO) + (1.475 * Na_2O) + (-1.426 * K_2O) + (-6.861)$ .

Similarly, the weathering leads to accumulate Rb, which is fixed in weathered profiles relative to Sr, the latter being easily removed from weathered profiles (McLennan et al., 1993). Hence, Rb/Sr ratios are other indicators of intense degree of weathering. Rb/Sr ratios of up- and downstream sediments, varying from 0.14 to 1.49 and from 0.18 to 0.34, respectively, suggest that the weathering is more intense in the downstream samples. As discussed above, this slight difference probably indicate the influence of source rocks or grain-size sorting on the weathering proxies.

### 5.3. Provenance

Major (i.e.,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ) and trace (i.e., Hf, Th, Sc, Cr, Zr, Ni, V, and Co) elements, including REE concentrations in clastic sediments are frequently used to infer the provenance of clastic rocks, because they tend to reflect the source rock composition (Garcia et al., 1994; Cullers, 2000; Anaya-Gregorio et al., 2018). The REE patterns are also highly useful to characterize the source rock composition (Armstrong-Altrin et al., 2019, 2020, 2020; Zeng et al., 2019). The geochemistry data of the stream sediments are displayed in several binary and ternary diagrams, which are widely used in provenance studies, to determine the nature of their source rocks (Hernández-Hinojosa et al., 2018; Tobia and Shangola, 2019; Kettanah et al., 2020; Fig. 10).

The position of samples from LR sediments in the A-CN-K (Fig. 7a) and their projection on the feldspar join, according to the theoretical weathering trend (dotted lines; Nesbitt and Young, 1984) indicate mostly K-feldspars enriched parent materials (K-feldspars > plagioclases). These parent rocks correspond to granitoids (i.e., granite and granodiorite). However, few samples very close to A apex displaying weathering trend parallel and close to the A-CN axis, project onto the feldspar join indicating plagioclase enriched source rock. The latter may correspond to mafic source rocks. Overall, this observation might suggest a different source terrains for the upstream and downstream sediments, i.e. felsic source rocks dominating, whereas the mafic supply is minor.

On the Zr versus  $\text{TiO}_2$  binary diagram, all the samples plot in the field of felsic igneous rocks (Hayashi et al., 1997; Fig. 10a). The Th/Co versus La/Sc (Cullers, 2002; Fig. 10b) and Cr/V versus Y/Ni (Hiscott, 1984, Fig. 10c) plots are used to differentiate silicic and mafic rocks. In the Th/Co versus La/Sc diagram, all the samples plot in the field of silicic rock. In the Cr/V versus Y/Ni plot, most of the samples fall in the field of granite, whereas very few samples plot in the field of mafic-ultramafic rocks. Similarly, V–Ni–Th\*10 ternary plot is used to distinguish ultramafic, mafic, and felsic rocks, very few samples plot near the ultramafic apex whereas the majority of the samples are close to the field of felsic rocks (Bracciali et al., 2007; Fig. 10d). The La–Th–Sc ternary plot is used to discern granitic gneiss source rocks, granitic gneiss/metabasitic mixed sources, and metabasitic source rocks (Cullers, 1994; Fig. 10e). In this diagram, all the samples plot in the field of granitic gneiss source rocks. A scatter plot of La/Th versus Hf indicates derivation from a source area composed of felsic rocks (Flyod and Leveridge, 1987; Fig. 10f). Furthermore, this plot, alongside with the major element provenance discriminant function plot of Roser and Korsch (1988), tends to reveal the presence of old and quartzose sedimentary rocks in the source region (Fig. 10g). Additionally, high Zr values (up to 3654 ppm) are indicative of high zircon content and suggest granitic or recycled sedimentary rock sources (Carranza-Edwards et al., 2001, 2019, 2019; Armstrong-Altrin, 2020). This interpretation is based on the fact that various workers have described different metasedimentary rocks, such as metagraywakes, metaquartzites, and BIF, at the northern edge of the NC (Vicat and Pouclet, 1995; Vicat et al., 1996; Feybesse et al., 1998; Pouclet et al., 2007). It should be noted, in addition, that BIF refers to sedimentary iron rich layers, generally alternating with silica-rich layers or their metamorphic equivalent (Trendall, 2002).

The high contents of Cr, Ni, and V in clastic sediments suggest a mafic provenance (Cullers et al., 1997). Cr > 150 ppm and Ni > 100 ppm are

indicative of ultra-mafic rocks in the source area (Garver et al., 1996). In this study, samples from down and upstream have high average Cr ( $566 \pm 333$  ppm and  $388 \pm 238$  ppm, respectively) and Ni contents ( $57 \pm 74$  ppm and  $145 \pm 109$  ppm, respectively) indicating, overall, the presence of mafic detritus in the source areas (Table 6). It is interesting to note that very high contents of Cr (410–1440 ppm) and Ni (189–506 ppm) are recorded in samples from core Lob1. Samples of this core did not receive contribution from NR watershed (i.e., from Nyong unit), hence the result obtained may indicate a more mafic source area in the upper reaches of LR, which flows through the Ntem unit. This is further supported by relative high V contents (43–68 ppm) in samples from core Lob1, compared to those of other samples from upstream sector (27–53 ppm). Noteworthy too is the fact that high contents of Cr are indicative of chromite and ferromagnesian minerals (i.e. pyroxene, amphibole, and olivine), which are accessories of greenstones. Few authors reported Archean greenstones in the study area, indicating that they might have acted as the source rocks of mafic detritus (Tchameni et al., 2000; Shang et al., 2004, 2007). To sum up, the studied stream sediments appear to have been derived from various types of rocks, including principally felsic rocks and subordinate amount of mafic/ultramafic and recycled detritus. The heterogeneous nature of the source rock is also supported by the presence of certain heavy minerals that are good indicators of the origin of sands (Table 3; Garzanti et al., 2005; Garzanti and Ando, 2007). The inferred rock types include igneous, metamorphic and sedimentary rocks. The common occurrence of angular tourmaline and zircon in the studied sediments indicates felsic source rocks, while the presence of augite and rutile may suggest the contribution of mafic rocks. On the other hand, the relative abundance of heavy minerals such as garnet, kyanite, sillimanite, and staurolite implies provenance from middle-to upper rank metamorphic source rocks, whereas heavy mineral suites, having rounded tourmaline and zircon, support a detrital origin.

The REE patterns of the LR sediments were examined in order to determine the parent rocks. According to Armstrong-Altrin et al. (2012), the  $\sum\text{REE}$  contents depend primarily on parent rocks, grain size, and proportion of heavy minerals. The average  $\sum\text{REE}$  contents of up- and downstream samples are  $258 \pm 116$  ppm and  $346 \pm 149$  ppm, respectively, indicating probably a compositional difference in source rocks. Low  $\sum\text{REE}$  are recorded in samples from core Lob1 compared to other upstream samples, indicating a more mafic rocks in the upper reaches of LR. Cullers et al. (1987) suggested that mafic igneous rocks generally contain low LREE/HREE ratios, whereas felsic igneous rocks usually show higher LREE/HREE ratios. However, the results obtained in this study do not display a close matching with the features of both mafic and felsic rocks, as suggested by these authors. The studied samples show LREE/HREE ratios varying between 10 and 20, indicating heterogeneous lithologies at the source areas (i.e., felsic and mafic rocks). The possible explanation for this irregular trend may include a particular lithology and geological period. In this regard, the UCC and chondrite normalized REE patterns for most of the upstream sediments and all of the downstream sediments (Fig. 8a–d; Table 7), exhibiting high LREE/HREE (>15), are similar to those of Precambrian source rocks (e. g., Singh and Rajamani, 2001) with various and specific lithologies, such as those of the study area (Tchameni et al., 2000; Shang et al., 2007). On the other hand, Clifford and Gass (1970), Cahen et al. (1976), Bessoles and Trompette (1980), and Nédélec et al. (1990) documented that the geology of the LR watershed zone belongs to the NC, representing the north-western part of the Archean Congo craton in central Africa. According to these authors, the NC is composed of various rock types, with rocks of the TTG suites constituting the greater part and an association of metasediments and mafic-ultramafic intrusive rocks. Lastly, the stream sediments of LR appear to have been derived principally from the Precambrian rocks of the NC, which seem to be predominantly of felsic composition (i.e., TTG, migmatite, and granite). However, the source rocks seem to be relatively enriched in mafic components in the upper reaches of LR, which flows only through the Ntem unit. In this regard, it is interesting to note that the NR and the main trunk of the LR flow



through the Nyong unit. Mafic components from Ntem unit can be attributed to Archean greenstone belts that consist of xenoliths of metasediments and garnet amphibolite in granitoids formed between 2.9 and 2.8 Ga (Tchameni et al., 2000; Toteu et al., 2001), Paleoproterozoic metadolerites, and BIF. Similarly, in the Nyong unit of Paleoproterozoic age (2400–1800 Ma), mafic components can be attributed to remnants of greenstone belts commonly made up of pyroxenites, serpentinites, and BIF, but also to mafic and ultramafic metavolcanics, and post-tectonic metadoleritic dykes (Feybesse et al., 1998; Penaye et al., 2004).

The average chondrite normalized REE patterns of different rocks

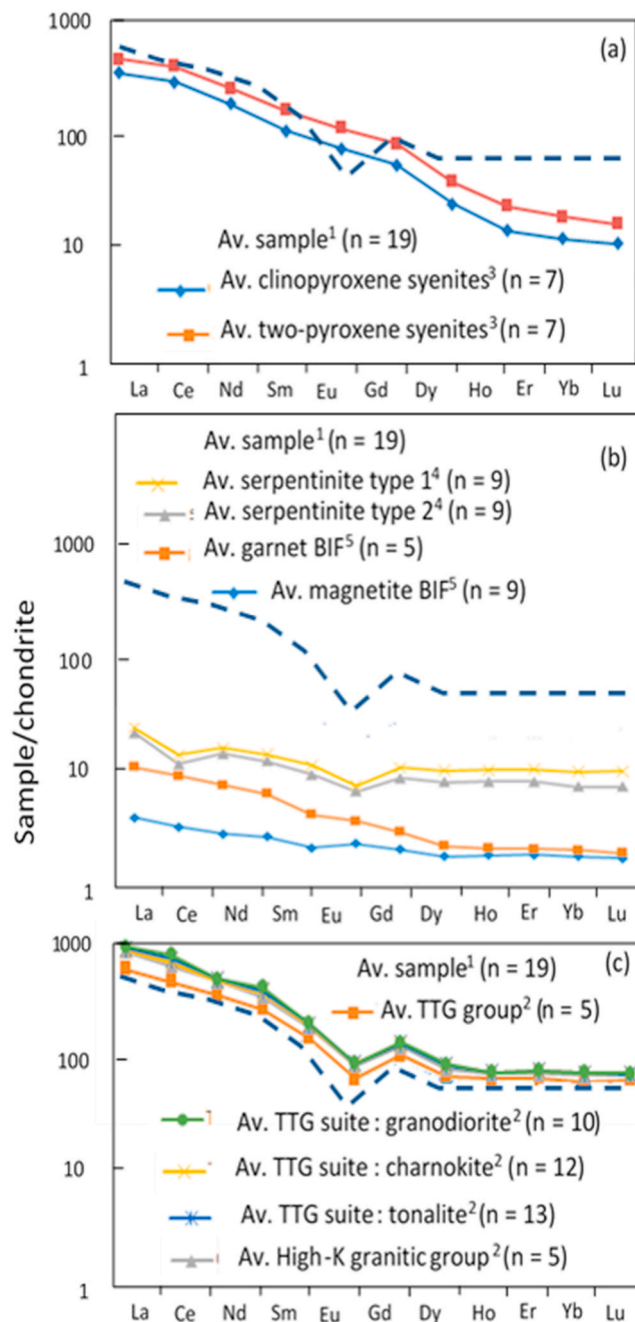


Fig. 11. Chondrite normalized REE pattern (McDonough and Sun, 1995) of the probable source rocks of the Lobé River sediments. REE data are from <sup>1</sup> this study, <sup>2</sup> Shang et al. (2004, 2007), <sup>3</sup> Tchameni et al. (2000) <sup>4</sup> Tsoungui et al. (2019) <sup>5</sup> Ndime Ekah et al. (2019). Av. = average. Refer to Fig. 1 for location of the source area.

from the Ntem and Nyong units were compared with REE patterns of up- and downstream samples to identify the probable source rocks (Fig. 11). The compared rock types include TTG suites (comprising charnockites, granodiorites and tonalites; Shang et al., 2004, 2007), syenites (i.e., two pyroxene syenites and clinopyroxene syenites; Tchameni et al., 2001), serpentinites (Tsoungui et al., 2019), and BIF (Ndime Ekah et al., 2019). Selected syenites from the NC show LREE similar to those of sediments but slight different HREE patterns and contents (Fig. 11a). The BIF lithologies show low enrichment of both LREE and HREE with low contents compared to the sediments, and have negligible Eu anomalies (Fig. 11b). The serpentinized peridotites from Nyong unit also show low content for both LREE and HREE, a slightly prominent negative Eu anomalies, and flat HREE patterns (Fig. 11b). The studied samples have REE patterns similar to TTG suites (Fig. 11c). However, TTG suites show a slightly higher degree of HREE fractionation compared to the sediments.

To conclude, although the studied stream sediments are an admixture of detritus from different source rock lithologies, several geochemical indicators and especially their REE patterns show greater similarity with TTG suites, which symbolize the key rock types of the studied area, suggesting them to have acted as their dominant source. The lack of similarity between some of the particular kinds of potential source rocks and the studied sediments in certain respects is possibly due to both erosion and total removal of some components of these source rocks. This may be also due to the absence of those potential source rocks or the scarcity of their outcrops in the LR watershed.

## 6. Conclusion

This paper reports the textural, mineralogical, and multi-element geochemical data of sediments from LR alluvial terraces to determine their provenance and the weathering intensity in the source area, and better constrain the geology of the LR watershed. The following conclusions are made:

1. The sediments from LR alluvial terraces are moderately to well sorted silty sands and sands composed of quartz as major phase, feldspars, and phyllosilicates. Hematite, opaque oxides, kyanite, and zoisite were also identified as minor components.
2. The CIA, PIA, and (A-K)-C-N plots indicate that the studied stream sediments and their source areas were underwent a high degree of chemical weathering.
3. The A-CN-K ternary plot and the mineralogical assemblages indicate that some of these sediment samples experienced K-metasomatism processes.
4. High recycling and sorting of sediments are revealed by the textural parameters and other ternary  $Al_2O_3$ - $TiO_2$ -Zr and binary Th/Sc-Zr/Sc diagrams.
5. The Zr versus  $TiO_2$ , Th/Co versus La/Sc, Cr/V versus Y/Ni binary diagrams, and the La-Th-Sc ternary plots indicate the derivation of the studied stream sediments from a source area dominantly composed of felsic rocks, with little contribution of mafic detritus. The source rocks seem to be relatively enriched in mafic components in the upper reaches of LR.
6. The result obtained is consistent with the regional geology of the LR watershed. This finding further suggests that despite the intense weathering of the source terranes, the fluvial depositional processes, and the diagenetic effects, the geochemistry of the studied alluviums are mainly controlled by the parent rock composition.

## Declaration of competing interest

The authors do not have any conflict of interests.

## Acknowledgements

This represents part of an on-going PhD work of the first author. We thank Nghepdeu Youbouni Gisèle Flodore and the staff of Fisheries Research Laboratory (CERECOMA IRAD-KRIBI) for their help in field work and physical analysis. We are also grateful to the Geoscience Laboratories (Sudbury, Canada) for XRF and ICP-MS analysis, and the University of Liege (Belgium) for XRD analysis. At last, we are indebted to the anonymous reviewers for their constructive comments that greatly improved the final version of the manuscript.


## References

- Anaya-Gregorio, A., Armstrong-Altrin, J.S., Machain-Castillo, M.L., Montiel-García, P.C., Ramos-Vázquez, M.A., 2018. Textural and geochemical characteristics of late Pleistocene to Holocene fine-grained deep-sea sediment cores (GM6 and GM7), recovered from southwestern Gulf of Mexico. *J. Palaeogeogr.* 7 (3), 253–271.
- Anthony, E.J., Almar, R., Besset, M., Reyns, J., Laibi, R., Ranasinghe, R., Abessolo Ondoua, G., Vacchi, M., 2019. Response of the Bright of Benin (Gulf of Guinea, West Africa) coastline to anthropogenic and natural forcing, Part 2: sources and patterns of sediment supply, sediment cells, and recent shoreline change. *Continent. Shelf Res.* 173, 93–103.
- Arhin, E., Nudé, P.M., 2009. Overbank sediments as appropriate geochemical sample media in regional stream sediment surveys for gold exploration in the savannah regions of northern Ghana. *J. Geochem. Explor.* 103, 50–56.
- Armstrong-Altrin, J.S., 2020. Detrital zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Riachuelos and Palma Sola beach sediments, Veracruz State, Gulf of Mexico: a new insight on palaeoenvironment. *J. Palaeogeogr.* 9 (4). <https://doi.org/10.1186/s42501-020-00075-9>.
- Armstrong-Altrin, J.S., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J., Carranza-Edwards, A., Garcia, D., Eby, N., Balam, V., Cruz-Ortiz, N.I., 2012. Geochemistry of beach sands along the western Gulf of Mexico, Mexico: implication for provenance. *Chemie der Erde Geochemistry* 72, 345–362.
- Armstrong-Altrin, J.S., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J., Trejo-Ramírez, E., 2017. Mineralogy and geochemistry of sands along the Manzanillo and El Carrizal beach areas, southern Mexico: implications for palaeoweathering, provenance, and tectonic setting. *Geol. J.* 52 (4), 559–582.
- Armstrong-Altrin, J.S., Ramos-Vázquez, M.A., Zavala-León, A.C., Montiel-García, P.C., 2018. Provenance discrimination between Atasta and Alvarado beach sands, western Gulf of Mexico, Mexico: constraints from detrital zircon chemistry and U-Pb geochronology. *Geol. J.* 53 (6), 2824–2848.
- Armstrong-Altrin, J.S., Botello, A.V., Villanueva, S.F., Soto, L.A., 2019. Geochemistry of surface sediments from the northwestern Gulf of Mexico: implications for provenance and heavy metal contamination. *Geol. Q.* 63 (3), 522–538.
- Armstrong-Altrin, J.S., Ramos-Vázquez, M.A., Hermenegildo-Ruiz, N.Y., Madhavaraju, J., 2020. Microtexture and U-Pb geochronology of detrital zircon grains in the Chachalacas beach, Veracruz State, Gulf of Mexico. *Geol. J.* 1–21. <https://doi.org/10.1002/gj.3984>. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/gj.3984>.
- Armstrong-Altrin, J.S., Machain-Castillo, M.L., 2016. Mineralogy, geochemistry, and radiocarbon ages of deep sea sediments from the Gulf of Mexico, Mexico. *J. S. Am. Earth Sci.* 71, 182–200.
- Asadi, S., Moore, F., Keshavarzi, B., 2013. The nature and provenance of Golestan loess deposits in northeast Iran. *Geology Journal* 48, 646–660.
- Ayala-Pérez, M.P., Armstrong-Altrin, J.S., Machain-Castillo, M.L., 2021. Heavy metal contamination and provenance of sediments recovered at the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico. *Journal of Earth System Science* (in press).
- Bessoles, B., Trompette, R., 1980. Géologie de l'Afrique, La Chaîne Pan-Africaine : Zone mobile d'Afrique centrale, partie Sud, et zone mobile soudanaise. Bureau de Recherche Géologique et Minière.
- Bracciali, L., Marroni, M., Pandolfi, L., Rocchi, S., 2007. Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): from source area to configuration of margins, 420. Geological Society of America Special Paper, pp. 73–93.
- Cahen, L., Delhal, H., Lavreau, J., 1976. The archaean of equatorial africa: a review. In: Windley, B.F. (Ed.), *The Early History of the Earth*. Wiley, New York, pp. 486–498.
- Carranza-Edwards, A., Centeno-García, L., Rosales-Hoz, L., Lozano-Santa Cruz, R., 2001. Provenance of beach gray sands from western Mexico. *J. S. Am. Earth Sci.* 14, 291–301.
- Carranza-Edwards, A., Kasper-Zubillaga, J.J., Martínez-Serrano, R.G., Cabrera-Ramírez, M., Rosales-Hoz, L., Mendieta, M.A.A., Márquez-García, A.Z., Santa-Cruz, R.L., 2019. Provenance inferred through modern beach sands from the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Geol. J.* 54, 552–563.
- Clifford, T.N., Gass, I.G., 1970. African Magmatism and Tectonics. Oliver and Boyd, Edinburgh, p. 461p.
- Cox, R., Low, D.R., Culler, R.L., 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59, 219–2940.
- Crystallography open database, 2014. <http://www.crystallography.net/> last accessed 01.06.14.
- Cullers, R.L., 1994. The chemical signature of source rocks in size fractions of Holocene stream sediment derived from metamorphic rocks in the Wet Mountains region, Colorado, USA. *Chem. Geol.* 113, 327–343.
- Cullers, R.L., 2000. The geochemistry of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: implications for provenance and metamorphic studies. *Lithos* 51, 181–203.
- Cullers, R.L., 2002. Implications of elemental of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chem. Geol.* 191, 305–327.
- Cullers, R.L., Barrett, T., Carlson, R., Robinson, B., 1987. Rare earth element and mineralogical changes in Holocene soil and stream sediment: a case study in the Wet Mountains, Colorado. *U.S.A. Chemical Geology* 63, 275–297.
- Cullers, R.L., Bock, B., Guidotti, C., 1997. Elemental distributions and neodymium isotopic compositions of Silurian metasediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 1847–1861.
- Ekoa Bessa, A.Z., Nguetchoua, 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 (22), 710. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4061-x>.
- Fedo, C.M., Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1995. Unravelling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology* 23, 921–924.
- Feybesse, J.L., Johan, V., Triboulet, C., Guerot, C., Mayaga-Mokolo, F., Bouchot, V., Eko N'Dong, J., 1998. The West Central African belt: a model of 2.5–2.0 Ga accretion and two-phase orogenic evolution. *Precambrian Res.* 87, 161–216.
- Floyd, P.A., Leveridge, B.E., 1987. Tectonic environments of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbidite sandstones. *Journal of Geological Society of London* 144, 531–542.
- Folk, R.L., 1980. Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing, Austin, Texas, p. 184.
- García, D., Fonteilles, M., Moutte, J., 1994. Sedimentary fractionations between Al, Ti, and Zr, and the genesis of strongly peraluminous granites. *J. Geol.* 102, 411–422.
- 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. *J. Sediment. Res.* 100, 100–106.
- Garzanti, E., Ando, S., 2007. Heavy mineral concentration in modern sands: implications for provenance interpretation. *Dev. Sedimentol.* 58, 517–545.
- Garzanti, E., Vezzoli, G., Ando, S., Paparella, P., Clift, P., 2005. Petrology of Indus river sands: a key to interpret erosion history of the western Himalayan Syntaxis. *Earth Planet Sci. Lett.* 229, 287–302.
- Goodwin, A.M., 1991. Precambrian Geology. The Dynamic Evolution of the Continental Crust. Academic Press, San Diego, p. 666.
- Hayashi, K.I., Fujisawa, H., Holland, H.D., Ohmoto, H., 1997. Geochemistry of 1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61, 4115–4137.
- Hernández-Hinojosa, V., Montiel-García, P.C., Armstrong-Altrin, J.S., Nagarajan, R., Kasper-Zubillaga, J.J., 2018. Textural and geochemical characteristics of beach sands along the western Gulf of Mexico, Mexico. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 13 (1), 161–174.
- Hiscott, R.N., 1984. Provenance of deep-water sandstones, Tourelle Formation, Quebec, and implications for the initiation of the Taconic orogeny. *Can. J. Earth Sci.* 15, 1579–1597.
- Ji, H., Tao, H., Wang, Q., Ma, D., Hao, L., 2019. Petrography, geochemistry, and geochronology of lower jurassic sedimentary rocks from the northern tianshan (west bogda area), northwest China: implications for provenance and tectonic evolution. *Geol. J.* 54, 1688–1714.
- Kettanah, Y.A., Armstrong-Altrin, J.S., Mohammad, F.A., 2020. Petrography and geochemistry of siliciclastic rocks of the Middle Eocene Gercus Formation, northern Iraq: implications for provenance and tectonic setting. *Geol. J.* <https://doi.org/10.1002/gj.3880>.
- Kirkwood, C., Everett, P., Ferreira, A., Lister, B., 2016. Stream sediment geochemistry as tool for enhancing geological understanding: an overview of new data from south west England. *J. Geochem. Explor.* <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.01.010>.
- Lerouge, C., Cocherie, A., Totéu, S.F., Penaye, J., Milési, J.-P., Tchameni, R., Nsifa, E.N., Fanning, C.M., Deloule, E., 2006. Shrimp U-Pb zircon age evidence for paleoproterozoic sedimentation and 2.05 Ga syntectonic plutonism in the Nyong group: consequences for the eburnean-transamazonian belt of NE Brasil and central africa. *J. Afr. Earth Sci.* 44, 413–427.
- Mama, A.C., Ghepdeu, Y.G.F., Ndám, G.J.R., Bonga, M.D., Onana, F.M., Onguene, R., 2018. Assesment of water quality in the lower Nyong estuary (Cameroon Atlantic coast) from environmental variables and phytoplankton community composition. *Afr. J. Environ. Sci. Technol.* 12 (6), A9EDCF757199.
- Maurizot, P., Abessolo, A., Feybesse, J.L., Johan, V., Lecomte, P., 1985. Etude de prospection minière du Sud-Ouest Cameroun. Synthèse des travaux de 1978 à 1985. Rapport de BRGM 85 CMR 66, 274p.

- Mbale Ngama, E., Sababa, E., Bayiga, E.C., Ekoa Bessa, A.Z., Ndjigui, P.-D., Bilong, P., 2019. Mineralogical and geochemical characterization of the unconsolidated sands from the Mefou River terrace, Yaoundé area, Southern Cameroon. *J. Afr. Earth Sci.* 159, 103570.
- McDonough, W.F., Sun, S.-S., 1995. The composition of the Earth. *Chem. Geol.* 120, 223–253.
- McLennan, S.M., 1993. Weathering and global denudation. *J. Geol.* 101, 295–303.
- McLennan, S.M., 2001. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. G-cubed 2, 2000GC000109.
- McLennan, S.M., Hemming, S., McDaniel, D.K., Hanson, G.N., 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. Special paper, 284. Geological Society of America, pp. 21–40.
- Men, X., Mou, C., Ge, X., Wang, Y., 2019. Geochemical characteristics of siliceous rocks of Wufeng Formation in the Late Ordovician, South China: assessing provenance, depositional environment, and formation model. *Geol. J.* 55 (4), 2930–2950.
- Miomoude, A.P., Mbouli, F.A.K., Kue, P.R.M., Kabir, S.A., Bessong, M., Liqiang, Z., 2019. Sedimentological studies of alluvium deposits along ngovayang-bipindi of lokoundje river, southwestern Cameroon. *Int. J. Geosci.* 10, 119–139.
- Muhs, D.R., Holliday, V.T., 2001. Origin of late quaternary dune fields on the southern high plains of Texas and New Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.* 113, 75–87.
- Muhs, D.R., Reynolds, R.L., Been, J., Skipp, G., 2003. Eolian sand transport pathways in the southwestern United States: importance of the Colorado River and local sources. *Quat. Int.* 104, 3–18.
- Ndime Ekah, N., Ganno, S., Nzenti, J.P., 2019. Geochemistry and Pb-Pb geochronology of the Neoproterozoic Nkout West metamorphosed banded iron formation, southern Cameroon. *Int. J. Earth Sci.* 108, 1551–1570.
- Ndjigui, P.-D., Beauvais, A., Fadil-Djenabou, S., Ambrosi, J.-P., 2014. Origin and evolution of ngaye river alluvial sediments, northern Cameroon: geochemical constraints. *J. Afr. Earth Sci.* 100, 164–178.
- Ndjigui, P.-D., Ebah Abeng, S.A., Ekoman, E., Nzeukou, N.A., Ngo Mandeng, F.S., Lindjeck, M.M., 2015. Mineralogy and geochemistry of pseudogley soils and recent alluvial clastic sediments in the Ngog-Lituba region, Southern Cameroon: an implication to their genesis. *J. Afr. Earth Sci.* 108, 1–14.
- Ndjigui, P.-D., Onana, V.L., Sababa, E., Bayiga, E.C., 2018. Mineralogy and geochemistry of the Lokoundje alluvial clays from the Kribi deposits, Cameroonian Atlantic coast: implications for their origin and depositional environment. *J. Afr. Earth Sci.* 143, 102–117.
- 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 Res.* 47, 35–50.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299, 715–717.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic consideration. *Geochem. Cosmochim. Acta* 48, 1523–1534.
- Nesbitt, H.W., Fedo, C.M., Young, G.M., 1997. Quartz and feldspar stability, steady and non-steady-state weathering, and petrogenesis of siliciclastic sands and muds. *J. Geol.* 105 (2), 173–192.
- N'anga, A., Ngos III, S., Ngueutchouga, G., 2019. The late Pleistocene-Holocene paleoclimate reconstruction in the Adamawa plateau (Central Cameroon) inferred of the Lake Fonjak sediments. *J. Afr. Earth Sci.* 150, 23–36.
- Nyobe, J.M., Sababa, E., Bayiga, E.C., Ndjigui, P.-D., 2018. Mineralogical and geochemical features of alluvial sediments from the Lobo watershed (Southern Cameroon): implications for rutile exploration. *Compt. Rendus Geosci.* 350, 119–129.
- Olivry, J.C., 1986. Fleuves et rivières du Cameroun. Collection Monographies, vol. 9. Hydrologiques ORSTOM No., Paris, p. 733p.
- Penaye, J., Toteu, S.F., Tchameni, R., Van Schmus, W.R., Tchakounte, J., Ganwa, A., Minyem, D., Nsifa, E.N., 2004. The 2.1 Ga west central african belt in Cameroon: extension and evolution. *J. Afr. Earth Sci.* 39, 159–164.
- Poucllet, A., Tchameni, R., Mezger, K., Vidal, M., Nsifa, N.E., Shang, C.K., 2007. Archaean crustal accretion at the northern border of the Congo craton (South Cameroon), the charnockite-TTG link. *Bull. Soc. Geol. Fr.* 178, 331–342.
- Ramos-Vázquez, M.A., Armstrong-Altrin, J.S., 2019. Sediment chemistry and detrital zircon record in the Bosque and Paseo del Mar coastal areas from the southwestern Gulf of Mexico. *Mar. Petrol. Geol.* 110, 650–675.
- Rao, W., Tan, H., Jiang, S., Chen, J., 2011. Trace element and REE geochemistry of fine- and coarse-grained sands in the Ordos deserts and links with sediments in surrounding areas. *Chem. Erde* 71, 155–170.
- Roser, B.P., Cooper, R.A., Nathan, S., Tulloch, A.J., 1996. Reconnaissance sandstone geochemistry, provenance and tectonic setting of the lower Paleozoic terranes of the West Coast and Nelson. *N. Z. J. Geol. Geophys.* 39, 1–16.
- Roser, B.P., Korsch, R.J., 1988. Provenance signature of sandstone-mudstone suites determined using discrimination function analysis of major-element data. *Chem. Geol.* 67, 119–139.
- Roy, P.D., Caballero, M., Lozano, R., Smykatz-Kloss, W., 2008. Geochemistry of late quaternary sediments from tecocomulco lake, central Mexico: implication to chemical weathering and provenance. *Chemie der Erde Geochemistry* 68, 383–393.
- Shang, C.K., Satir, M., Nsifa, E.N., Liégeois, J.-P., Siebel, W., Taubald, H., 2007. Archaean high-K granitoids produced by remelting of earlier Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG) in the Sangmelima region of the Ntem Complex of the Congo craton, southern Cameroon. *Int. J. Earth Sci.* 96, 817–841.
- Shang, C.K., Satir, M., Siebel, W., Nsifa, E.N., Taubald, H., Liégeois, J.-P., Tchoua, F.M., 2004. TTG magmatism in the Congo craton; a view from major and trace element geochemistry, Rb-Sr and Sm-Nd systematics: case of the Sangmelima region, Ntem Complex, southern Cameroon. *J. Afr. Earth Sci.* 40, 61–79.
- Singh, P., Rajamani, V., 2001. REE geochemistry of recent clastic sediments from the Kaveri floodplains, southern India: implication to source area weathering and sedimentary processes. *Geochem. Cosmochim. Acta* 65, 3093–3108.
- Shao, J.Q., Yang, S.Y., 2012. Does chemical index of alteration (CIA) reflect silicate weathering and monsoonal climate in the Changjiang River basin? *Chin. Sci. Bull.* 57, 1178–1187.
- Silva, M.M.V.V., Pinto, M.M.S.C., Carvalho, P.C.S., 2016. Major, trace and REE geochemistry of recent sediments from lower Catumbela River (Angola). *J. Afr. Earth Sci.* 115, 203–217.
- Singh, P., 2009. Major, trace and REE geochemistry of the Ganga River sediments: influence of provenance and sedimentary processes. *Chem. Geol.* 266, 242–255.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. The Continental Crust: its Composition and Evolution. Blackwell Scientific, Oxford, p. 312.
- Tchameni, R., Mezger, K., Nsifa, N.E., Poucllet, A., 2000. Late Archaean crustal evolution in the Congo craton: evidence from the K-rich granitoids of the Ntem Complex, southern Cameroon. *J. Afr. Earth Sci.* 30, 133–147.
- Tchameni, R., Mezger, K., Nsifa, N.E., Poucllet, A., 2001. Crustal origin of early proterozoic syenites in the Congo craton (Ntem complex), south Cameroon. *Lithos* 57, 23–42.
- Tobia, F.H., Shargola, S.S., 2019. Geochemistry of sandstones from Beduh Formation in northern thrust zone, Kurdistan region, Northern Iraq: provenance and tectonic setting. *Iraqi Geological Journal* 52 (1), 1–25.
- Toteu, S.F., Van Schmus, W.R., Penaye, J., Michard, A., 2001. New U-Pb and Sm-Nd data from north-central Cameroon and its bearing on the Pre-Pan-African history of central Africa. *Precambrian Res.* 108, 45–73.
- Trendall, A.F., 2002. The significance of iron formation, in Precambrian stratigraphic record, 33. International Association of Sedimentologists, Special Publication, pp. 33–66.
- Tsoungui, P.N.E., Ganno, S., Njiosseu Tanko, E.L., Mbongue, J.L.N., Woguia, B.K., Tamehe, L.S., Takodjou Wambo, J.D., Nzenti, J.P., 2019. Geochemical constraints on the origin and tectonic setting of the serpentinized peridotites from the Paleoproterozoic Nyong series, Eseké area, SW Cameroon. *Acta geochim.* <https://doi.org/10.1007/s11631-019-00368-4>.
- Újvári, G., Varga, A., Balogh-Brunstad, Z.S., 2008. Origin, weathering, and geochemical composition of loess in southwestern Hungary. *Quaternary. Research*, 69, 421–437.
- Vicat, J.P., Léger, J.M., Nsifa, N.E., Pigué, P., Zenith, J.P., Tchameni, R., Poucllet, A., 1996. Distinction au sein du craton congolais du Sud-Ouest du Cameroun de deux épisodes doléritiques initiant les cycles orogéniques éburnéen (paleoproterozoïque) et panafricain (Néoproterozoïque). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris* 323, 575–582.
- Vicat, J.P., Poucllet, A., 1995. Nature du magmatisme lié à une extension pré-panafricaine : les dolérites des bassins de Comba et de Sembé-Ouessou. *Bull. Soc. Geol. Fr.* 166 (4), 355–364.
- Wang, S., Zhang, N., Chen, H., Li, L., Yan, W., 2014. The surface sediment types and their rare earth element characteristics from the continental shelf of the northern South China Sea. *Continental Shelf Res.* 88, 185–202.
- Wang, J., He, Z., Zhu, D., Ding, Q., 2019. Geochemical characteristics, depositional environment, and provenance attitude of the middle jurassic yangye formation lacustrine mudstones in kashi sag, south-western tarim basin. *Geol. J.* 55 (4), 2976–2994.
- Zeng, S., Wang, J., Chen, W., Fu, X., Feng, X., Song, C., Wang, D., Sun, W., 2019. Geochemical characteristics of Early Cretaceous marine oil shale from the Changshé Mountain area in the northern Qiangtang Basin, Tibet: implications for palaeoweathering, provenance, tectonic setting, and organic matter accumulation. *Geol. J.* 55 (4), 3229–3246.
- Zhang, Y., Gao, X., 2015. Rare earth elements in surface sediments of a marine coast under heavy anthropogenic influence: the Bohai Bay, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 164, 86–93.



# Distributions of Trace Metals and Radionuclides Contamination in Alluvial Sediments from the Lobé River in Cameroon

Durane Tchatchouang Chougong<sup>1,2</sup> · Gabriel Ngueutchoua<sup>2</sup> · Emmanuel Henock Dicka<sup>1</sup> · Armel Zacharie Ekoa Bessa<sup>2</sup>  · Gisèle Flodore Youbouni Ghepdeu<sup>1</sup> · Ulrich Joël Filicien Bilounga<sup>1</sup> · Rose Fouateu Yongue<sup>2</sup> · Sylvie Carole Ntyam<sup>1</sup> · John S. Armstrong-Altrin<sup>3</sup>

Received: 23 May 2021 / Revised: 9 August 2021 / Accepted: 10 August 2021  
© King Abdulaziz University and Springer Nature Switzerland AG 2021

## Abstract

The spatial and vertical distribution of heavy metals (Fe, Ni, Cr, Co, Sc and V) and radionuclides (Th and U) and the sediment characteristics of Lobé River, south–west Cameroon were assessed in this study to determine the possible source of pollutants and evaluate the level of pollution. Cores sediments were analyzed to measure grain size parameters, organic matter and geochemical composition. To understand the vertical distribution, three strata were chosen (surface, middle and bottom). The main constituent of studied sediment is sand (82.06%). In these sediments, low content was recorded for organic matter (2.87%). The average concentration (mg/kg) of selected elements are in the order Fe (23,112.84) > Cr (447.62) > Ni (109.93) > V (47.04) > Th (23.70) > Co (7.74) > Sc (5.10) > U (2.78). The maximum concentration of most selected chemical elements was recorded in the middle, followed by surface and bottom, respectively. Enrichment factor (EF > 1.5), Geo-accumulation index ( $I_{geo} > 0$ ) and contamination factor (CF > 1) revealed a moderate to severe pollution of Cr, Ni and Th in all strata. The pollution load index (PLI) show that surface and middle sediments (1.08 and 1.14, respectively) are polluted, while bottom sediments (0.88) are unpolluted. Pearson correlation, cluster analysis and component principal analysis confirmed that heavy metals (Fe, Sc, V, Cr, Ni and Co) have common anthropogenic sources where grain size parameters (sand, silt and clay) were associated with them while radionuclides (Th and U) have a natural source. The presence of human activities such as household wastes, intensive agriculture and the result of the processing of the industries products could be possible sources of the anthropogenic pollution, threatening for the environmental related issues in the region.

**Keywords** Heavy metals and radionuclides · Spatial and vertical distributions · Pollution indices · Stream sediment · Lobé River

## 1 Introduction

Washed soil is usually deposited as sediment in streams. The aquatic ecosystems are easily damaged by eroded soil and other contaminants from natural and anthropogenic sources

(Kaushik et al. 2009; Hanif et al. 2016). Because of the adsorption, hydrolysis and co-precipitation of metal ions, large amounts of heavy metals are deposited in sediment, whereas only a small proportion of free metal ions remain in solution in the water column. Indeed, Bartoli et al. (2012) reveal that, far less than 1% of pollutants remain dissolved in the water, whereas more than 99% are stored in the sediments. Heavy metals, soil nutrients and chemical pollutants become attached through disposal of liquid effluents, fertilizers and pesticides (Sun et al. 2018; Zhou et al. 2018; Armstrong-Altrin et al. 2019; Jiang et al. 2019) and terrestrial runoff and chemicals originating from various urban, industrial and agricultural activities (Xiao et al. 2013; Zahra et al. 2014; Mimba et al. 2018; Al-Hadithy et al. 2018; Chen et al. 2019). These pollutants reduce the usefulness and

✉ Armel Zacharie Ekoa Bessa  
arમેlekoa@yahoo.fr

<sup>1</sup> Fisheries Research Laboratory, CERECOM IRAD-KRIBI, P.O. Box: 219, Kribi, Cameroun

<sup>2</sup> Department of Earth Sciences, University of Yaoundé 1, P.O. Box: 812, Yaoundé I, Cameroon

<sup>3</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del Mar Y Limnología, Unidad de Procesos Oceánicos Y Costeros, Circuito Exterior s/n, 04510 México, D.F, México



enjoyment of the environment to people downstream and damage aquatic life in streams, lakes and estuaries (Chairman 1991).

The interest of the radionuclides and the assessment of the impacts of these radioactive elements on soils, soil microbiota, edible plants and humans has been increasing constantly (Shtangeeva et al. 2018). Radioactive elements like  $^{232}\text{Th}$  and  $^{238}\text{U}$  with their decay products are present in most environmental matrices and can be transferred to living bodies by different pathways which can lead to the sources of exposure to man (Harmsen and Haan 1980). Uranium and Thorium occur generally in low concentrations in rocks, soils and waters. Thorium is surprisingly abundant in the Earth's crust, being almost three times more abundant than uranium (Vinogradov 1959; Talibudeen 1964; Klement 1965; Baranov and Morozova 1971; Unscear 1977). It has been observed that felsic rocks (granite) contain higher amounts of U and Th compared to mafic rocks such as basalt and andesites (Rogers and Adams 1969; Harmsen and Haan 1980; Armstrong-Altrin et al. 2018; Armstrong-Altrin 2020). Results of the uranium distribution in rocks and sediments could indicate higher concentration in sediments and further support the possible effect of fertilizers as an additional source of uranium (Sahoo et al. 2011; Mandeng et al. 2019). For these reasons, it has been necessary to monitor those natural radionuclides in weathered soil samples to assess the possible hazards.

The developed practice of intensive agriculture and the result of the processing of its products in the Lobé watershed and its surroundings can affect environment. It is important to give a current environmental status of sediments for a potential monitoring of this environment. The aim of this study is to assess the spatial and vertical distributions of heavy metals and radionuclides in Lobé river sediments, to determine the possible source of pollutants and to evaluate the level of pollution.

## 2 Materials and Methods

### 2.1 Study Area

Lobé River is located in the south of Cameroon with the river Niété as main tributary. Lobé River is one of the main rivers in Cameroon's coastal river basin and is 130 km long. Lobé River takes its rise in the Ntem massif and joins the Atlantic Ocean by an estuary with spectacular falls. The hydrographic network is dendritic and the catchment basin of the Lobe with an area of about 1940 km<sup>2</sup> is, therefore, an exoreic basin (Fig. 1a). This zone is under the influence of a warm and humid oceanic equatorial climates with little differentiated seasons, with average rainfall around 2919 mm/year (Gaston Lienou et al. 2008). Average temperatures are

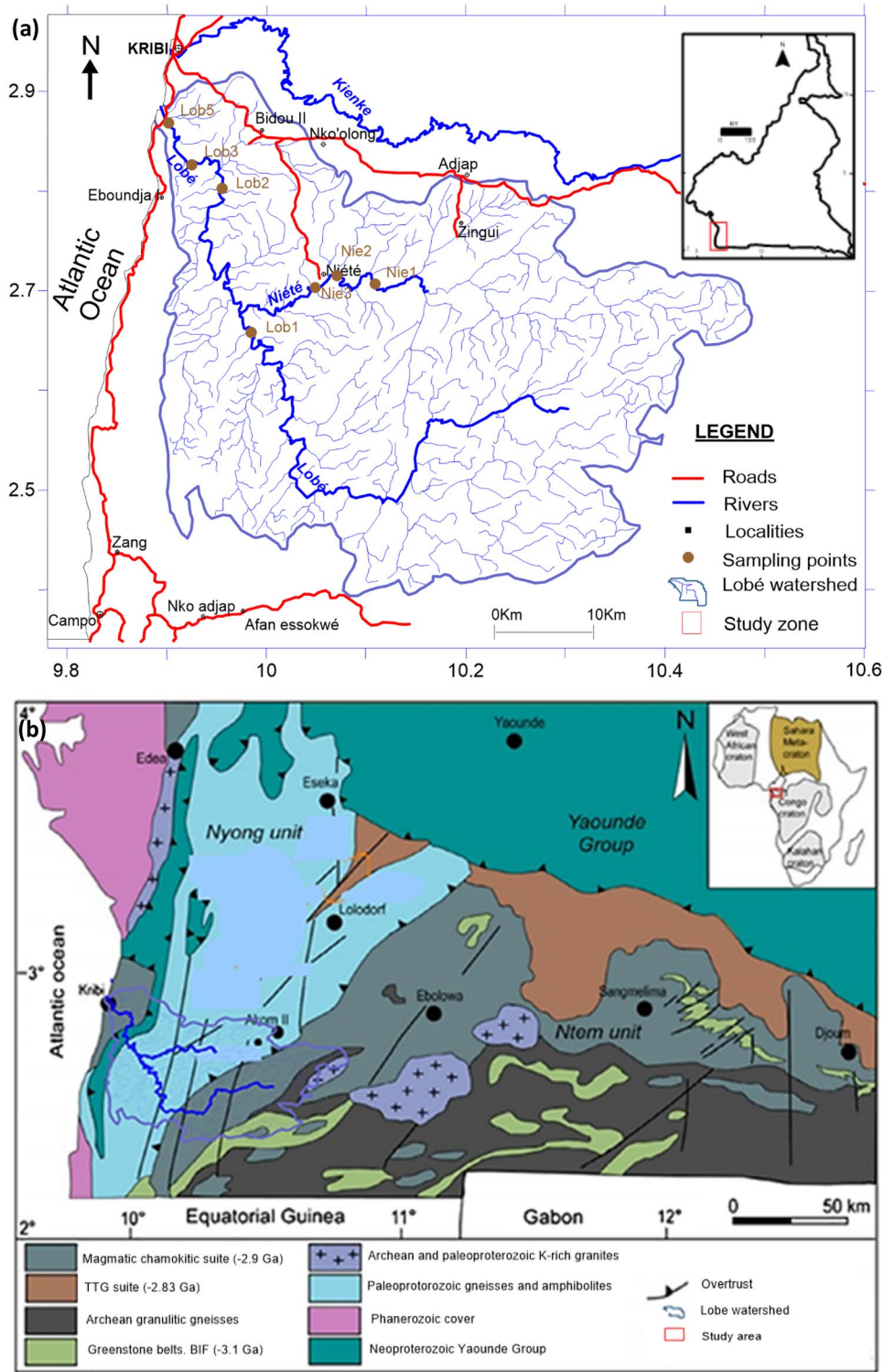
stable, around 25 °C, while the relative humidity is maintained at values above 70% for most of the year.

The basement of South Cameroon is made up of two complexes (Fig. 1b): the Ntem Complex and the Nyong Complex. The Lobe watershed lies NW to the Ntem Complex, which partially represents the Congo Craton. The Ntem complex is divided into three units: Ntem, Nyong and Ayina and consists of charnockites, monzogranites, syenogranites, TTGs (tonalites, trondhjemites, granodiorites), syenites, Banded Iron Formation (BIF), green rocks, migmatites and gneisses (Maurizot et al. 1986; Toteu et al. 2001; Shang et al. 2007). The Nyong complex represents the Cameroonian part of the west central African chain described by Feybesse et al. (1998); Binam Mandeng et al. (2018). It consists of TTGs, anorthosites, charnockites, gneisses, migmatites, eclogites, metagabbros, quartzites and BIFs (Toteu et al. 2001; Lerouge et al. 2006). The alteration of these rocks favors the formation of ferrallitic and hydromorphic soils. Ferrallitic soils generally consist of kaolinite, gibbsite, hematite, goethite, quartz and some accessory minerals such as rutile, muscovite, illite, smectite and magnetite. Hydromorphic soils consist of smectites, kaolinite, illite and accessory minerals such as zircon, rutile and muscovite (Ndjigui et al. 2018; Zogo Mfegue et al. 2021).

### 2.2 Sampling and Analytical Methods

Sampling was collected (April 2019) from the alluvial terrace of the Lobe and Niété Rivers from up (Lob 1, Nie 1, Nie 2 and Nie 3) to downstream (Lob 2, Lob 3 and Lob 5). Seven cores were collected using an Uwitec Corer Sampler hammer. A tube is driving into the alluvium by gravity or vibrations, by raising and dropping weights connected to hammer with a cable (Guesdon et al. 2014; Chougong et al. 2021). To study the vertical distribution tree strata were chosen (surface, middle and bottom). Only the first stratum was defined for every core (surface: 0–10 cm); due to the variability of core lengths, the middle and the bottom strata was defined arbitrarily in different cores. These sediment cores were subsampled at different intervals (every 10 cm), air-dried and prepared for analyses. Grain size distribution was determined following the Robinson-Köln's pipetting standard method in Faculty of Agronomy and Agricultural Sciences (FASA) in Dschang, Cameroon (e.g. Ndjigui et al. 2014; Ekoa Bessa et al. 2018, 2021). To determine the total organic matter content (TOC), 20 g of samples were ground to pass through a 2 mm sieve and further fine ground to pass through a 0.5 mm sieve, TOC was determined by chromic acid digestion and spectrophotometric analysis (Heanes 1984). Powdered samples, 0.2 g (crushed, sieved with a 0.080 mm sieve) was mixed with 1.5 g LiBO<sub>2</sub>. The mixture was dissolved in 100 ml 5% HNO<sub>3</sub>. The intensity of metal concentration of Fe, Ni,

**Fig. 1** Study area location: (a) Simplified map of Lobe River watershed showing coring sites (Lob1-5 and Nie1-3). (b) Geological map of the South Cameroon (from Toteu et al. 2001)



Cr, Co, Sc, V, Th and U was resolved into air/acetylene fire utilizing the Inductively Coupled Plasma-Mass spectrometry (ICP-MS) using the pulp at ALS (Australian Laboratory Services), Vancouver (Canada). Analytical doubts vary from 0.1 to 0.5% for traces of metal.

### 2.3 Pollution Indices and Ecological Risk Assessment

The sediment quality guidelines offer a simple, comparative means for evaluating the risk of contamination in an aquatic

ecosystem (Ke et al. 2017). Heavy metals (Fe, Ni, Cr, Co, Sc and V) and radionuclides (Th and U) were selected based on spatial and vertical concentrations, toxicity and other methods used by various authors (Müller 1969; Hakanson 1980; Tomlinson et al. 1980). Table 1 lists pollution indices and their classification levels.

### 2.3.1 Enrichment Factor (EF)

The probable sources (natural or anthropogenic) of elements in sediments were determined by enrichment factor (EF). The EF of elements is expressed by the equation of Wang et al. (2008)

$$EF = (C_n/Fe)_{sample} / (C_n/Fe)_{background}$$

$C_n$  is the concentration of element “n” and the background value is that of Upper Continental Crust (McLennan 2001). Iron (Fe) is considered as the normalizing metals for the following reasons: Fe is associated with fine to medium solid elements; its geochemistry is comparable to that of many heavy metals; and its natural concentration in the study area tends to be uniform (Bhuiyana et al. 2010; Rahman et al. 2019).

### 2.3.2 Geo-accumulation Index (Igeo)

Geo-accumulation index was used to understand the current environmental status and the metal contamination with respect to natural background. It relies on the chemical data to evaluate the level of pollution. Müller (1969) defined the following equation to determine Igeo values.

$$Igeo = \text{Log}_2(C_{sample} / 1.5 B_{sample})$$

C is the considered contents (mg/kg) of metal in the sample sediment, B represents chemical background concentration (mg/kg) of an element in the background sample and the factor 1.5 is introduced to reduce the effects of probable dissimilarities in the background values, which may be assigned to lithogenic effects.

### 2.3.3 Contamination Factor (CF) and Pollution Load Index (PLI)

The contamination factor and pollution load index were used to determine the contamination status of the sediment (Hakanson 1980; Tomlinson et al. 1980).

$$CF = \left( \frac{C_{metal}}{C_{background}} \right)$$

$C_{metal}$  represents the pollutant concentration in the sediment and  $C_{background}$  refers to metal background values.

$$PLI = \sqrt[n]{CF1 \times CF2 \times CF3 \times \dots \times CFn}$$

$n$  is the number of metals, while CF denotes the factor of contamination.

## 2.4 Statistical Analysis

A multivariate statistical analysis was performed at significant level of  $P < 0.05$  to study the interrelationship among the chemical elements, grain size distribution and organic matter. Pearson correlation analysis was conducted to determine the relationship among these variables. Cluster

**Table 1** Classes of pollution indices and contamination levels used in this study

EF		Igeo		CF		PLI	
Classes	Sediment quality	Classes	Sediment quality	Classes	Sediment quality	Classes	Sediment quality
EF < 1.5	Natural	Igeo ≤ 0; 0	Unpolluted	CF < 1	Low contamination	PLI < 1	No pollution
EF > 1.5	Anthropogenic	Igeo = 0–1; 1	Unpolluted to moderately polluted	CF = 1–3	Moderate contamination	PLI > 1	Polluted
EF < 1	No enrichment	Igeo = 1–2; 2	Moderately polluted	CF = 3–6	Considerable contamination		
EF = 1–3	Minor enrichment	Igeo = 2–3; 3	Moderately to strongly polluted	CF > 6	High contamination		
EF = 3–5	Moderate enrichment	Igeo = 3–4; 4	Strongly polluted				
EF = 5–25	Moderately severe enrichment	Igeo = 4–5; 5	Strongly to very strongly polluted				
EF = 25–50	Very severe enrichment						
EF > 50	Extremely severe enrichment						

EF the enrichment factor (Wang et al. 2008); Igeo: the geo-accumulation index (Müller 1969); CF the contamination factor (Hakanson 1980; Tomlinson et al. 1980); PLI the pollution load index (Tomlinson et al. 1980)

analysis (AC) was applied to provide information about the grouping of variables based on similarity. Results are shown in a dendrogram that graphically illustrates the hierarchical cluster. Principal component analysis (PCA) was employed to infer the hypothetical source of heavy metals (Salati and Moore 2010).

### 3 Results and Discussion

#### 3.1 Grain Size Distribution and Organic Matter

Grain size distribution has been carried out to determine the content of sand, silt and clay (%) in Lobé and Niété sediments (Table 2, Fig. 2). The results show that sand is the main constituent at all the sampling locations, which ranges from 51 to 99%. Silt is the second most constituent, with 2 to 47% content. The least concentrated constituent is clay which varied from 1 to 2%. The average sand, silt and clay percentages in the sediment are, respectively, 80.57, 17.86 and 1.86% from surface, 81.60, 16.60 and 1.80% middle and 84, 15 and 2.55% bottom. These results are similar to those observed along the Vaigai River, Tamil Nadu, India (Ramasamy et al. 2014). In Fig. 2, the vertical evolution of sands is inversely proportional to that of silts; Suresh et al. (2011) documented a similar observation in Ponnaiyar River sediment.

Organic matter content in sediments ranges from 0.38 to 4.83% (Table 2). Like grain size distribution, these values are recorded in the bottom stratum. The average organic matter percentages in the sediment are 2.87% from surface, 3.19% from middle and 1.29% from the bottom. The comparison of these values from those of Narayana and Rajashekara (2010) in Sharavathi River, India (ranging from 1.8 to 4.7%) and Aytas et al. (2012) in two different rivers of Turkey namely Maritza and Tundja (ranging from 0.82 to 7.80% and 1.05 to 6.67%, respectively) show low levels of organic matter in the Lobé and Niété sediments, although the geological context is not the same as in this study. Moreover, Ramasamy et al. (2014) and Narayana and Rajashekara (2010) noted that high levels of organic matter in sediments shift the pH to a highly acidic condition, which facilitates the fixation of high concentrations of metals and radionuclides in sediments.

#### 3.2 Distribution of Metals and Radionuclides

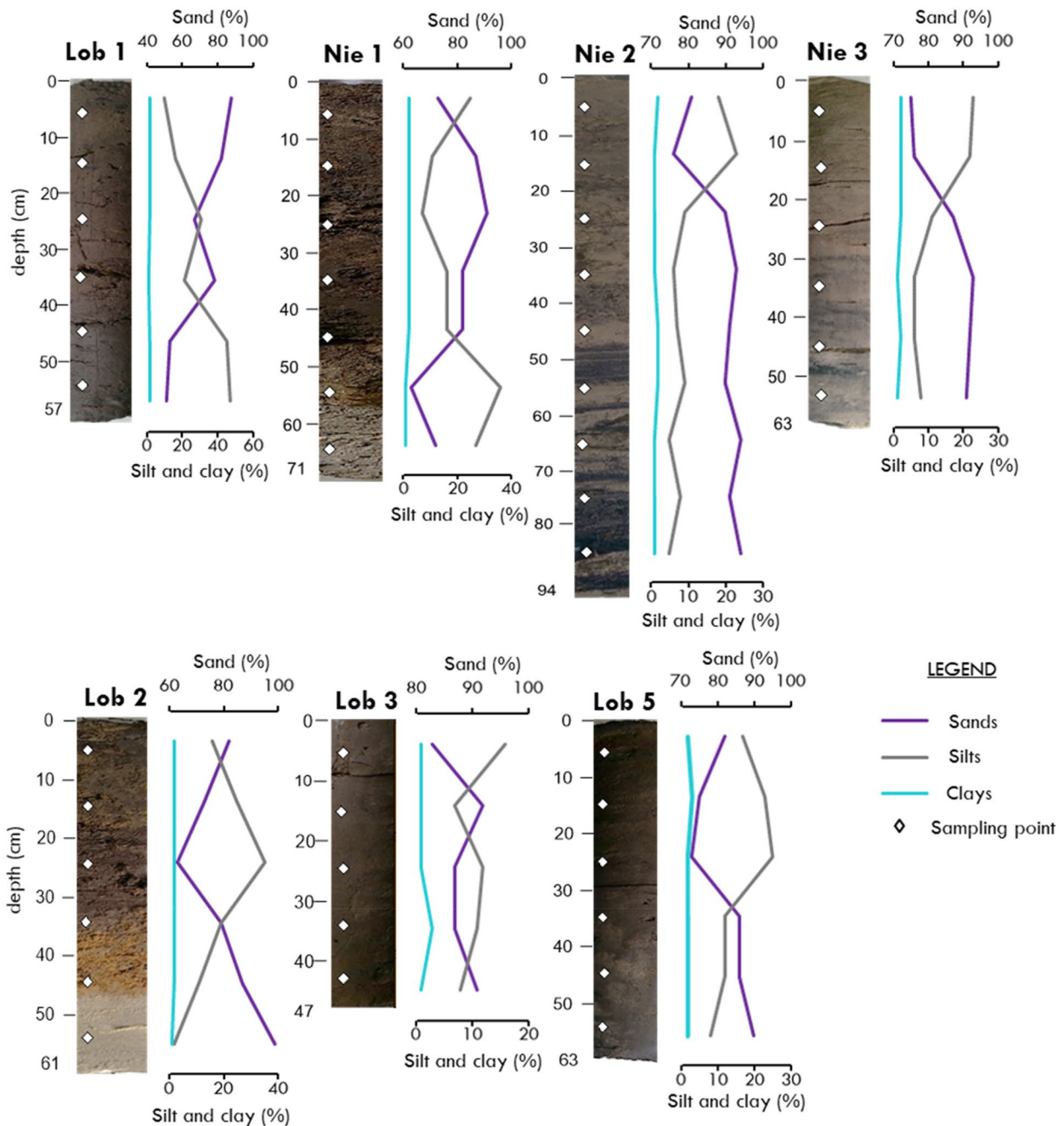
##### 3.2.1 Spatial Distribution (Surface)

The distribution of heavy metals (Fe, Ni, Cr, Co, Sc, V) and radionuclides (Th and U) of Lobé and Niété surface sediments is presented in Fig. 3. The average concentration (mg/kg) of these elements in the upper surface sediments decreased as Fe (22,360.82) > Cr (714.29) > Ni (125.61) > V (43.86) > Th (20.37) > Co (8.47) > Sc (4.43) > U (2.61) (Table 2). Comparison of average

**Table 2** Heavy metals and radionuclides concentrations (mg/kg) of Lobé and Niété sediments

Elements	Metal concentration (mg/Kg)						Radioactive element concentration (mg/Kg)		Grain seize distribution (%)			Organic matter (%)
	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U	Sand	Silt	Clay	
Surface												
Average (n=7)	22,360.82	125.61	714.29	8.47	4.43	43.86	20.37	2.61	80.57	17.86	1.86	2.87
Minimum	19,653.14	45.00	140.00	6.20	3.00	31.00	5.60	1.00	73	10	1	1.65
Maximum	27,136.72	506.00	1540.00	12.90	7.00	72.00	58.60	5.70	88	25	2	3.97
Middle												
Average (n=5)	29,053.08	133.60	300.00	8.50	6.00	55.68	28.30	2.88	81.60	16.60	1.80	3.19
Minimum	17,764.76	53.00	190.00	5.90	4.00	32.40	6.50	1.20	67	6	1	1.34
Maximum	39,655.98	325.00	460.00	12.50	8.00	78.00	54.40	4.50	93	31	2	4.06
Bottom												
Average (n=7)	17,924.62	70.57	328.57	6.24	4.86	41.57	22.41	2.84	84.00	15.00	1.29	2.55
Minimum	7273.76	24.00	60.00	2.20	2.00	27.00	7.70	1.40	51	2	1	0.38
Maximum	29,864.38	189.00	960.00	13.90	8.00	68.00	62.10	4.30	99	47	2	4.83
Total average (n=19)	23,112.84	109.93	447.62	7.74	5.10	47.04	23.70	2.78	82.06	16.49	1.65	2.87
Minimum	16,692.35	43.00	190.00	5.75	3.33	31.80	6.60	1.23				
Maximum	30,890.17	340.00	845.00	13.10	7.50	63.25	39.78	3.68				
UCC	35,000	44	83	17	13.6	107	10.7	2.8				



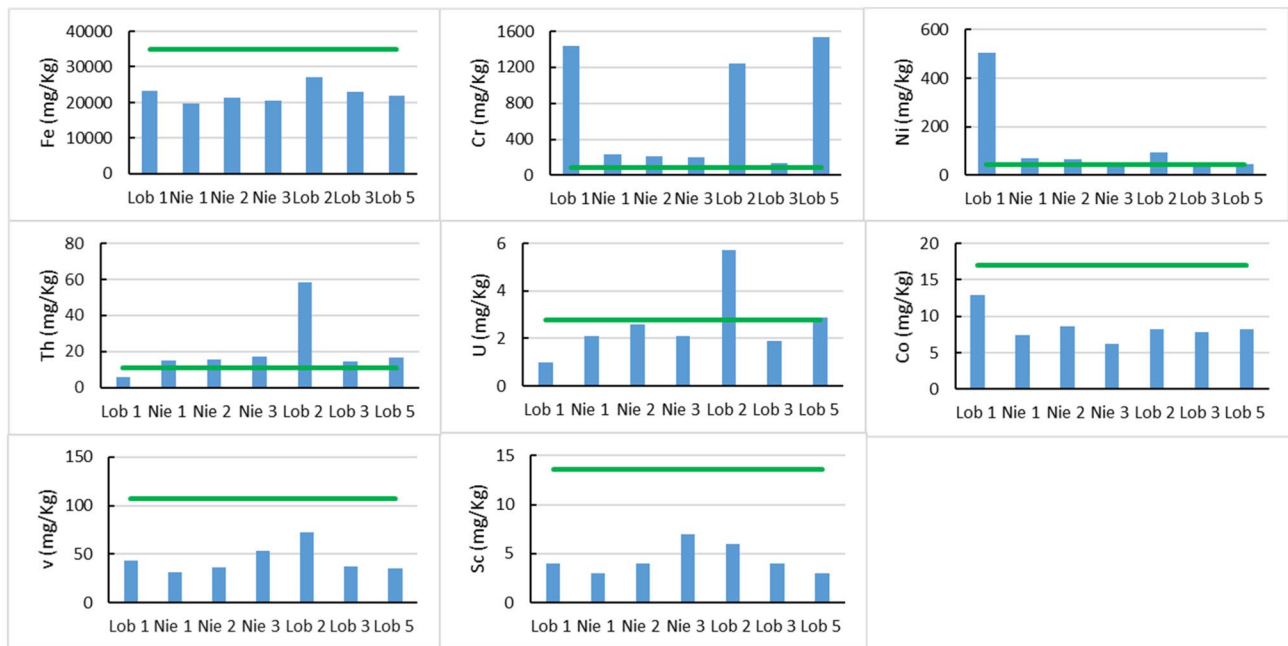


**Fig. 2** Core sediments variation in grain size distribution

concentrations of these elements shows that Ni, Cr and Th are higher than the Upper Continental Crust (UCC) reference values (McLennan 2001) while the remaining are less. Variation in metal concentrations in sediments is the result of the variability of source rock composition, sediment texture, redox reactions, adsorption/desorption, sediment transport, mineral sorting and anthropogenic activity (Selvaraj et al. 2004; Ramos-Vázquez and Armstrong-Altrin 2019). Indeed, the high levels of Ni, Cr

and Th could be attributed to the pollutant load derived through various discharges from agricultural activities (Ekoa Bessa et al. 2018; Tehna et al. 2020).

Iron is believed to be the most abundant element in the earth's crust. Ranging from 19,653.14 to 27,136.72 mg/kg, the highest value was recorded at Lob 2 (27,136.72 mg/kg). The average value of Fe in the present study is 22360.82 mg/kg; all of each value are lesser than the UCC reference value (35,000 mg/kg).



**Fig. 3** Distribution of heavy metals and radionuclides of Lobé and Niété surface sediments; the horizontal green line represents the UCC reference values (McLennan 2001)

The levels of chromium in air, water and soil are generally low and form through natural processes and human activities. In water, chromium will be absorbed into sediment and become immobile and strongly attached to soils particles (Reimann and Caritat 1998). Chromium is more toxic to invertebrates than to fish, it is not known to accumulate in the bodies of fish but high concentrations can damage their gills (Moore and Ramamoorthy 1984). The Cr content in this study is about 140 to 1540 mg/kg, with an average of 714.29 mg/kg and at all sampling sites, the Cr content is higher than the UCC reference value (83 mg/kg). This element is irregularly distributed along the River, with highest values (more than 1200 mg/kg) recorded at Lob 5, Lob 1 and Lob 2, whereas the remaining had low values (under 400 mg/kg).

The larger part of all nickel compounds that are released to the environment will be absorbed into sediment or soil particles and became immobile, it is not known to accumulate in plants or animals (Chau and Kulikovsky-Cordeiro 1995). Nickel can also end in surface water when it is a part of wastewater streams. The highest value of Ni in Lobé and Niété sediments was recorded at Lob 1 (506 mg/kg) while the rest are less than 100 mg/kg. Ranging from 45 to 506 mg/kg, the average content of Ni in the present study is 125.61 mg/kg. All of these values are higher than the UCC reference value (44 mg/kg).

Thorium is found in small amounts in most rocks and soils. Very little of this element circulates through the environment due to the highly insolubility of thorium oxides

(Reimann and Caritat 1998; Sahoo et al. 2011). Ranging from 5.6 to 58.6 mg/kg, the average value content of Th in present samples is 20.37 mg/kg and all samples have higher value than the UCC reference value (10.7 mg/kg) except Lob 1.

Although uranium is radioactive like thorium, it is not particularly rare. It is found in small amounts in rocks, soil, air and water in varying concentrations that are usually very low. Uranium is not likely to accumulate in fish or vegetables because of its water-solubility, which determines its mobility in the environment, as well as its toxicity (Domingo 2001). The mean concentration of U is 2.61 mg/kg, ranging from 1 to 5.7 mg/kg. The highest value is recorded at Lob 2, is the only one that exceeds the UCC reference value (2.8 mg/kg).

Cobalt is not often freely available in the environment; it tends to be produced as by-product of nickel and copper mining activities. However, when cobalt particles are not bound to soil or sediment particles the uptake by plants and animals is higher and accumulation in plants and animals may occur. The Co content in this study is about 6.20 to 12.90 mg/kg, with an average of 8.47 mg/kg and all of this value is less than the UCC reference value (17 mg/kg). Like Ni, the highest concentration of Co was recorded at Lob 1 (8.2 mg/kg).

Vanadium is never found unbound in nature. It occurs in carbon containing deposits such as crude oil, coal, oil shale and tar sands. Watering is an important way in which vanadium is redistributed around the environment because vanadates are generally very soluble. It can be associated with

algae, plants, invertebrates, fishes and many other species. Ranging from 31 to 72 mg/kg, the average value content of V in Lobé and Niété River sediments is 43.86 mg/kg and each of these values is less than the UCC reference value (107 mg/kg); Lob 2 recorded the highest value (72 mg/kg).

Scandium can rarely be found in nature, as it occurs in very small amounts. It is usually found only in two different kinds of ores, Thortveitite is the primary source and uranium mill tailings by-product also being an important source. The Sc content of Lobé and Niété sediments is about 3 to 7 mg/kg, with an average of 4.43 mg/kg. Like Fe, V and Co, Sc has all its values less than the UCC reference value (13.6 mg/kg). The highest concentration was recorded at Nie 3 (7 mg/kg).

### 3.2.2 Vertical Distribution

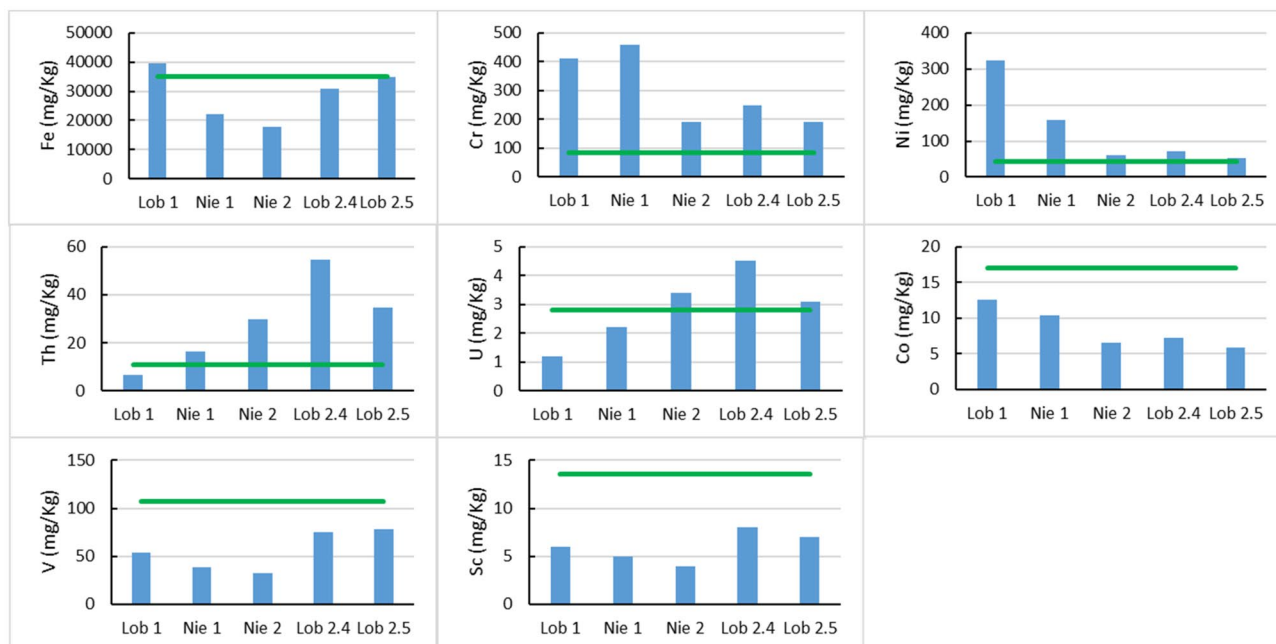
Vertical chemical elements assessment reflects the history of the deposition of these elements and helps to understand the characteristics of accumulation in various layers of the sediment.

### 3.2.3 Middle

The range of concentrations of the studied metals and radionuclides in the sampled strata of Lobé and Niété sediments are shown in Table 2 and Fig. 4. The average concentration (mg/Kg) of these metals and radionuclides in the middle section decreased, like the surface stratum as

Fe (29,053.08) > Cr (300) > Ni (133.60) > V (55.68) > Th (28.30) > Co (8.50) > Sc (6) > U (2.88). Like the surface stratum, the comparison of average concentrations of these elements with UCC (McLennan 2001) also shows higher values of Ni, Cr and Th, while the remaining elements are lower.

Fe content ranges from 17,764.76 to 39,655.98 mg/kg, the average value of Fe in this stratum is 29053.08 mg/kg. All values are less than the UCC reference value (35,000 mg/kg). The Cr content is about 190 to 460 mg/kg, with an average of 300 mg/kg and at all sampling sites, the Cr content is higher than the UCC reference value (83 mg/kg) with highest values recorded at Nie 1. The highest value of Ni in Lobé and Niété sediment was recorded at Lob 1 and are higher than the UCC reference value (44 mg/kg). Ranging from 53 to 325 mg/kg, the average value of Ni is 133.60 mg/kg. Ranging from 6.50 to 54.40 mg/kg, the average value of Th is 28.30 mg/kg and all samples have higher value than the UCC reference value (10.7 mg/kg) except Lob 1; Lob 2 recorded the highest concentration. The average concentration of U is 2.88 mg/kg, ranging from 1.20 to 4.50 mg/kg. The highest value is recorded at Lob2. The Co content varies from 5.90 to 12.50 mg/kg, with an average of 8.50 mg/kg, where Lob 1 recorded the highest concentration, however, is less than the UCC reference value (17 mg/kg). Ranging from 32.40 to 78 mg/kg, the average value of V is 55.68 mg/kg and is lesser than the UCC reference value (107 mg/kg); Lob 2 recorded the highest value. The Sc content of Lobé and Niété sediments is about 4 to 8 mg/kg, with an average of 6 mg/kg. Like Fe, V and Co, Sc is lesser than the UCC



**Fig. 4** Distribution of heavy metals and radionuclides of Lobé and Niété middle sediments; the horizontal green line represents the UCC reference values (McLennan 2001)

reference value (13.6 mg/kg) and Lob 2 recorded the highest concentration.

### 3.2.4 Bottom

The average concentration (mg/Kg) of Lobé and Niété sediments in the bottom stratum in decreasing order: Fe (17,924.62) > Cr (328.57) > Ni (70.57) > V (41.57) > Th (22.41) > Co (6.24) > Sc (4.86) > U (2.84) (Table 2; Fig. 5).

Fe content ranges from 7273.76 to 29,864.38 mg/kg, the average value in this stratum is 17924.62 mg/kg. With highest value recorded at Lob 1, all Fe values are less than the UCC reference value (35,000 mg/kg). The Cr content in this study is about 60 to 960 mg/kg, with an average of 328.57 mg/kg and at all sampling sites, the Cr content is higher than the UCC reference value (83 mg/kg). Lob 3 recorded the highest Cr value (960 mg/kg). Ranging from 24 to 189 mg/kg, the average value content of Ni is 70.57 mg/kg. The highest value of Ni in Lobé and Niété sediment was record at Lob 1. All of these Ni values are higher than the UCC reference value (44 mg/kg) except Nie 3 and Lob 2. With an average of 22.41 mg/kg, the Th content ranges from 7.70 to 62.10 mg/kg. Th content is higher than the UCC reference value (10.7 mg/kg) except Lob 1, where the highest concentration was recorded at Nie 2. The average concentration of U is 2.84 mg/kg, which ranges from 1.40 to 4.30 mg/kg, U content of these samples (Nie 1, Nie 2, Nie 3 and Lob 3) were higher than the UCC reference value (2.8 mg/kg). With 4.3 mg/kg,

Nie 1 recorded the highest value. The Co content in this study varies from 2.20 to 13.90 mg/kg, with an average of 6.24 mg/kg, which is lesser than the UCC reference value (17 mg/kg). Lob 1 recorded the highest Co concentration. Ranging from 27 to 68 mg/kg, the average content of V in Lobé and Niété sediments is 41.57 mg/kg. Vanadium (V) contents are lesser than the UCC reference value (107 mg/kg), with highest value recorded at Lob 1. The Sc content is about 2 to 8 mg/kg, with an average of 4.86 mg/kg. Like Fe, V and Co, Sc has all of its values lesser than the UCC reference value (13.6 mg/kg). The highest Sc value was recorded at Lob 1 and Nie 3.

The general distribution of chemical elements in Lobé and Niété sediments are shown in Fig. 6. The average concentration (mg/Kg) in decreasing order: Fe (23,112.84) > Cr (447.62) > Ni (109.93) > V (47.04) > Th (23.70) > Co (7.74) > Sc (5.10) > U (2.78) (Table 2). The same observation was made in the previous strata and for the comparison of average concentrations, the same elements Ni, Cr and Th are higher than the UCC reference values (McLennan 2001).

In Lobé and Niété sediments, the average content of Fe is 23112.84 mg/kg. Lob 1 recorded the highest concentration (30,890.17 mg/kg) and all of each average value is less than the UCC reference value (35,000 mg/kg). Fe contents were similar to those found in the soil of the Betare-Oya, eastern Cameroon (Tehna et al. 2020). The basement of South Cameroon region (Feybesse et al. 1998; Shang et al. 2007) can explained these results through the alteration of these rocks which formed ferralitic and hydromorphic soils.

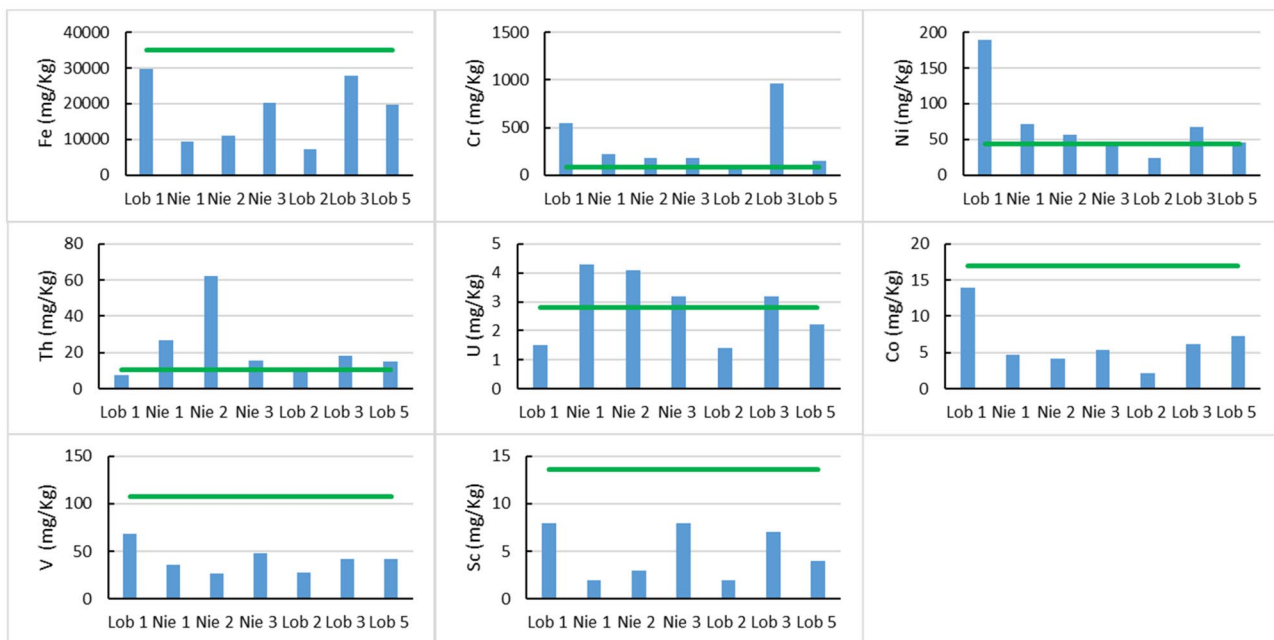
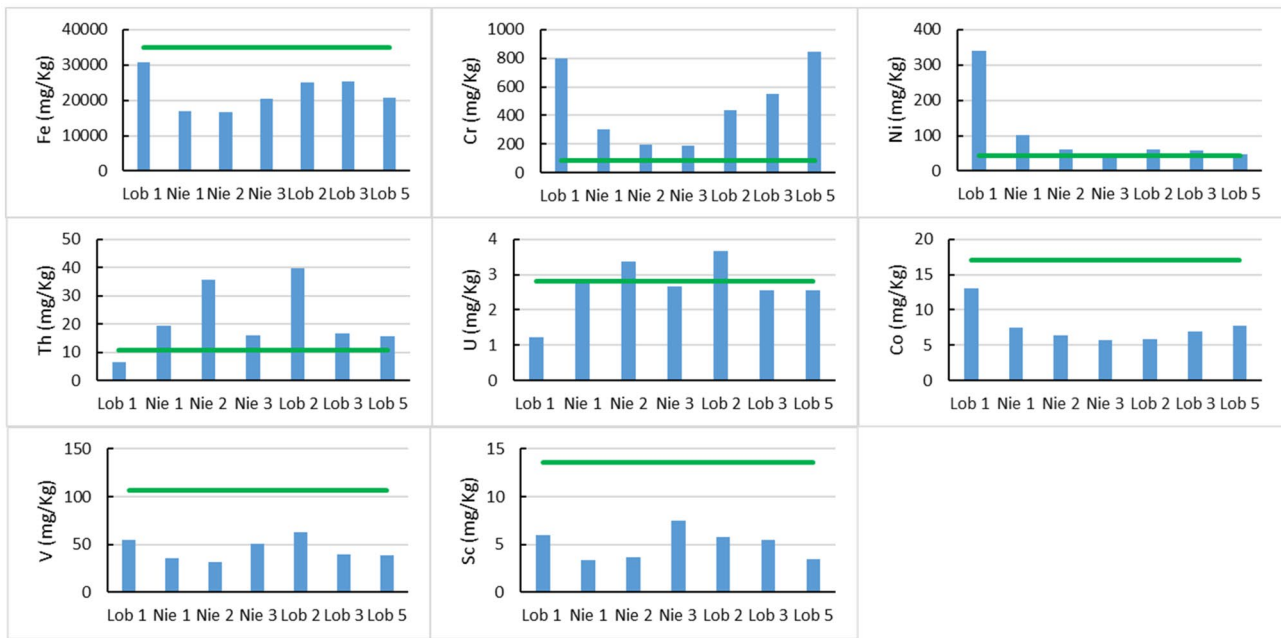


Fig. 5 Distribution of heavy metals and radionuclides of Lobé and Niété bottom sediments; the horizontal green line represents the UCC reference values (McLennan 2001)





**Fig. 6** Distribution of heavy metals and radionuclides of all samples in Lobé and Niété; the horizontal green line represents the UCC reference values (McLennan 2001)

The Cr average content in this study is 447.62 mg/kg and at all sampling sites has their average value higher than that of UCC reference value (83 mg/kg); Lob 5 recorded the highest average value (845 mg/kg). With similar values in tributaries from the southwestern coast of the Rio de la Plata estuary, Ronco et al. (2008) suggested that Cr levels in sediments could indicate historic levels of this metal pollution that still remains to the present.

The highest average value of Ni in Lobé and Niété sediments was recorded at Lob1 (340 mg/kg) while the rest are less than 100 mg/kg. This highest Ni concentration could be ascribed to its accumulation at the surface of sediments from deposition by agricultural activities (Cempel and Nickel 2006; Anaya-Gregorio et al. 2018; Ayala-Pérez et al. 2021). The average content of Ni is 109.93 mg/kg; all of these values are higher than the UCC reference value (44 mg/kg) except at Lob 5 (43 mg/kg). These values were similar to those recorded in Abiete-Toko gold district, Southern Cameroon (Mandeng et al. 2019).

The average content of Th in present samples is 23.70 mg/kg and all samples have higher contents than the UCC reference value (10.7 mg/kg) except Lob 1 (6.60 mg/kg). It can be explained by the fact that, felsic rocks with constitute the basement of South Cameroon region contains higher U and Th contents compared to mafic rocks (Rogers and Adams 1969; Harmsen and Haan 1980).

The average concentration of U is 2.78 mg/kg. The highest value is recorded at Lob 2 (3.68 mg/kg), which exceeded the UCC reference value (2.8 mg/kg). The addition of

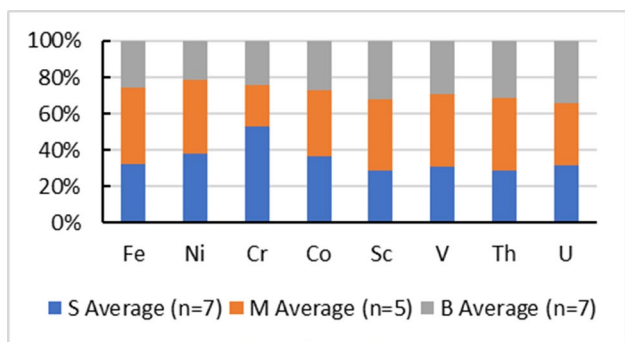
uranium to the soil through industrial activities, especially by the possible effect of fertilizers (Sahoo et al., 2011) could explain these high values. The U contents are higher than those recorded in Abiete-Toko gold district, Southern Cameroon (Mandeng et al. 2019), but lower than those observed in the Vale De Abrutiga uranium Mine, Central Portugal (Pinto et al. 2004).

The Co average content in the present study is 7.74 mg/kg and are lesser than the UCC reference value (17 mg/kg). Like Ni and Fe, the highest concentration of Co was recorded at Lob 1 (13.10 mg/kg). The level of this element is similar to those observed along the Saudi coastline of the Gulf of Aqaba (Al-Trabulsy et al. 2010), but lower than those reported for Moloundou swamp, eastern Cameroon (Ekoa Bessa et al. 2018) which can link to the high affinity of Co with iron and manganese oxyhydroxides present in that zone.

The average content of V in Lobé and Niété sediments is 47.04 mg/kg and are lesser than the UCC reference value (107 mg/kg); Lob 2 recorded the highest value (63.25 mg/kg). Same results were reported along the Saudi coastline of the Gulf of Aqaba (Al-Trabulsy et al. 2010) and in the soil of the Betare-Oya, eastern Cameroon (Tehna et al. 2020).

The Sc average content of Lobé and Niété sediments is 5.10 mg/kg. Like Fe, V and Co, Sc has all its values lesser than the UCC reference value (13.6 mg/kg). The highest concentration was recorded at Nie 3 (7.5 mg/kg).

In summary, the average concentrations of the studied metals and radionuclides of Lobé and Niété sediments



**Fig. 7** Fractional contribution of each element to the total distribution (S: surface. M: middle and B: bottom)

were approximately evenly distributed among the three strata (Fig. 7). Cr content (714.29 mg/Kg) in the surface strata contributed half to the distribution of this element in this zone. In this surface stratum, Cr and Ni recorded the highest concentration. Among other elements, Cr, Th and U have their highest values at the middle stratum (Table 2; Fig. 7). The similar trends of the vertical profiles of heavy metals (middle > surface > bottom) suggest common sources of each metal and was also observed in sediment cores in the ship breaking area of Bangladesh (Hossain et al. 2021). Wang et al. (2015) also reported metal concentrations at the maximum in the middle layer. Nawrot et al. (2019) suggested that higher content of heavy metals in the middle layer denotes historical deposition of these metals in the sediment cores.

### 3.3 Assessment of Sediment Contamination

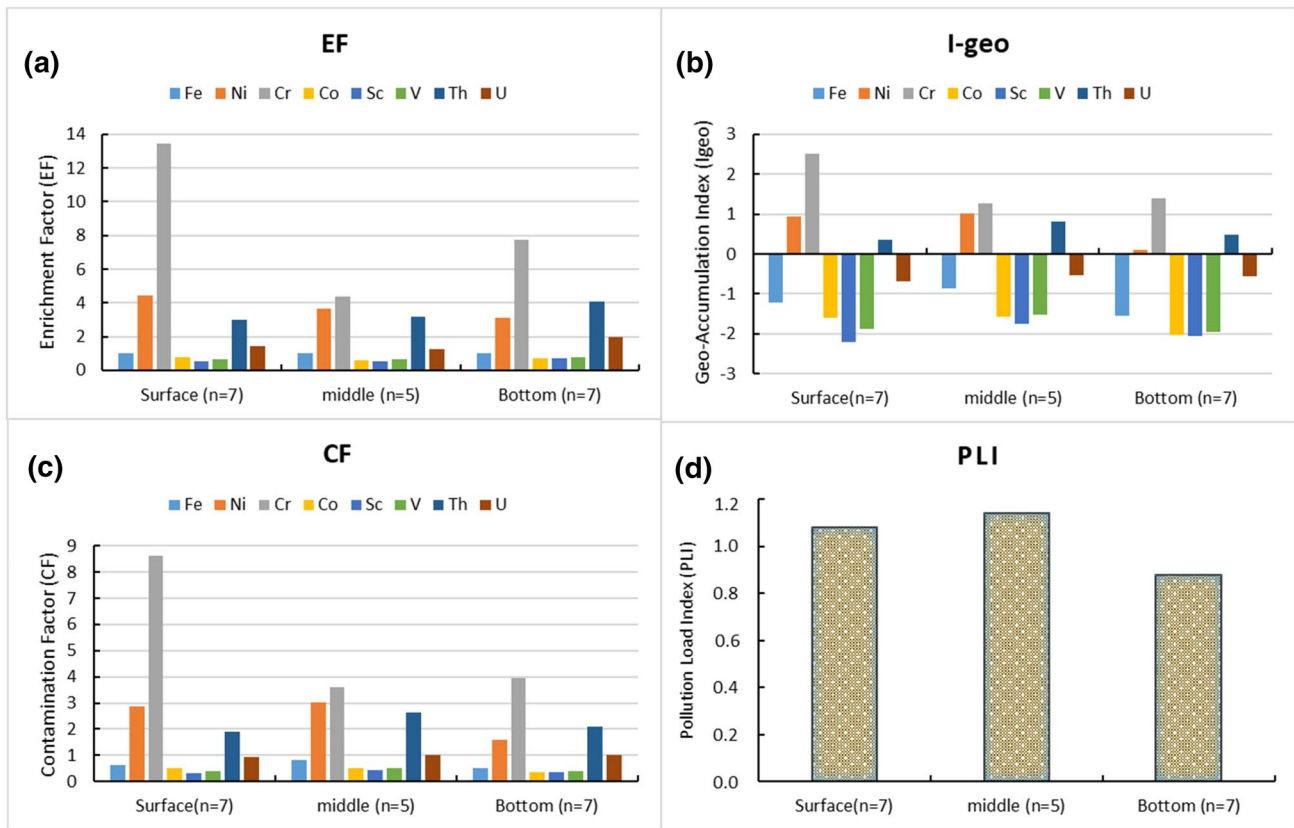
Numerous indices are available to infer the environmental risks associated with heavy metals in sediments, which are based on metal content, bioavailability and toxicity (Yang et al. 2009). For example, the enrichment factor (EF), the geo-accumulation index (Igeo) and the contamination factor (CF) for individual heavy metals and radioactive elements in sediments are calculated using the metal content and background values (Wang et al. 2008; Müller 1969; Hakanson 1980; Tomlinson et al. 1980). To evaluate the combined risk of multiple heavy metals in sediment, the pollution load index (PLI), has also been developed (Hakanson 1980; Tomlinson et al. 1980). A summary of the values obtained from the indices of metals and radioactive elements in Lobé and Niété sediments are listed in Table 3 and Fig. 8.

#### 3.3.1 Spatial Distribution of Sediment Contamination (Surface Section)

Enrichment factor (EF) of metals is a robust tool in heavy metal pollution evaluation (Hakanson 1980). The average EF of metal contents in Lobé and Niété surface sediments (Table 3, Fig. 8a) reveals that Cr has highest value (13.47), respectively, followed by Ni (4.47), Th (2.98), U (1.46), Fe (1), Co (0.78), V (0.64) and Sc (0.51). Referring to Table 1, the EF of Cr, Ni and Th, are higher than 1.5, indicates that these elements originated from anthropogenic sources, may be through the use of fertilizers in agricultural activities. Indeed, Salati and Moore (2010) in Khoshk River, Shiraz, Southwest Iran reported high EF values for the urban area located near the farmlands. Moreover, a moderate

**Table 3** Enrichment factor (EF), geo-accumulation index (Igeo), contamination factor (CF) and pollution load index (PLI) for heavy metals and radioactive elements in sediments of Lobé and Niété sediments

EF	Metal concentration (mg/Kg)								Radioactive element concentration (mg/Kg)	
	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U		
Elements	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U		
Surface (n=7)	1	4.47	13.47	0.78	0.51	0.64	2.98	1.46		
Middle (n=5)	1	3.66	4.35	0.60	0.53	0.63	3.19	1.24		
Bottom (n=7)	1	3.13	7.73	0.72	0.70	0.76	4.09	1.98		
Igeo	Elements	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U	
Surface (n=7)	-1.23	0.93	2.52	-1.59	-2.20	-1.87	0.34	-0.68		
Middle (n=5)	-0.85	1.02	1.27	-1.58	-1.77	-1.53	0.82	-0.54		
Bottom (n=7)	-1.55	0.10	1.40	-2.03	-2.07	-1.95	0.48	-0.56		
CF&PLI	Elements	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U	PLI
Surface (n=7)	0.64	2.85	8.61	0.50	0.33	0.41	1.90	0.93	1.08	
Middle (n=5)	0.83	3.04	3.61	0.50	0.44	0.52	2.64	1.03	1.14	
Bottom (n=7)	0.51	1.60	3.96	0.37	0.36	0.39	2.09	1.02	0.88	



**Fig. 8** Indices of **a** enrichment factor (EF); **b** geo-accumulation index (Igeo); **c** contamination factor (CF); **d** pollution load index (PLI); in Lobé and Niété sediments

enrichment (Th and Ni) and moderately severe enrichment (Cr) were noted. In Moloundou swamp, eastern Cameroon, Ekoa Bessa et al. (2018) also noted high EF value of Cr and attributed it to agricultural wastes and artisanal gold exploitation.

The geo-accumulation index (Igeo) is a quantitative measure of the degree of pollution in sediments (Müller 1969). The average Igeo values of selected elements in present samples in decreasing order are Cr (2.52) > Ni (0.93) > Th (0.34) > U (-0.68) > Fe (-1.23) > Co (-1.59) > V (-1.87) > Sc (-2.20) (Table 3, Fig. 8b). Based on Table 1, U, Fe, Co, V and Sc were, characterizing, respectively the sediments as unpolluted. Cr, Ni and Th represent the category polluted, where the category is moderate to strongly polluted. The high Cr Igeo values suggesting that the sediments retain Cr (Pinto et al. 2004).

To determine the contamination status of sediments, the contamination factor (CF) is calculated (Hakanson 1980; Tomlinson et al. 1980). The CF values in the Lobé and Niété surface sediments are Cr (8.61), Ni (2.85), Th (1.90), U (0.93), Fe (0.64), Co (0.50), V (0.41) and Sc (0.33) (Table 3, Fig. 8c). According to Table 1, some elements U, Fe, Co, V and Sc indicated a low contamination; Th and Ni presented

a moderate contamination, while Cr (8.61) indicated a high contamination. In Abiete-Toko gold district, Southern Cameroon same value of Ni CF was observed, but the EF value of U is higher than those recorded in this study (Mandeng et al. 2019).

PLI gives an assessment of the overall toxicity status of the sample and is also an index of the combined contribution of the eight studied elements (Hakanson 1980; Tomlinson et al. 1980). Referring to Table 1, the PLI value of the surface sediment (1.08) indicated the polluted status of Lobé and Niété sediments (Table 3, Fig. 8d). Same value was recorded in Moloundou swamp, eastern Cameroon (Ekoa Bessa et al. 2018).

### 3.3.2 Vertical Distribution of Sediment Contamination (Middle Section)

The EF average of metals in Lobé and Niété middle section in decreasing order: Cr (4.35) > Ni (3.66) > Th (3.19) > U (1.24) > Fe (1) > V (0.63) > Co (0.60) > Sc (0.53) (Table 3, Fig. 8a). This classification is almost similar to that of surface sediments, except for V, which is higher than that of Co. Referring to Table 1, the EF of Cr, Ni and Th are higher than

1.5, indicated that the source of these elements was from anthropogenic activities. The same observation was done in the surface strata but here, only a moderated enrichment for Cr, Th, and Ni is observed.

The Igéo average of selected elements in this stratum is decreasing like the EF values: Cr (1.27) > Ni (1.02) > Th (0.82) > U (-0.54) > Fe (-0.85) > V (-1.53) > Co (-1.58) > Sc (-1.77) (Table 3, Fig. 8b). Based on Table 1, U, Fe, Co, V and Sc are similar to the surface strata, characterizing restrictively the sediments as unpolluted. Cr, Ni and Th representing the category polluted, where the pollution is moderate.

In the Lobé and Niété Rivers middle section sediments the average CF values of Cr (3.61), Ni (3.04), Th (2.64), U (1.03), Fe (0.83), V (0.52), Co (0.50) and Sc (0.44) are similar as EF and Igeo (Table 3, Fig. 8c). According to Table 1, some elements Fe, Co, V and Sc indicated a low contamination while the rest presented moderate (Ni, Th and U) to considerable (Cr) contamination. Referring to Table 1, the PLI value of the middle sediment (1.14) indicated the polluted status of Lobé and Niété sediments like the surface section (Table 3, Fig. 8d).

### 3.3.3 Vertical Distribution of Sediment Contamination (Bottom Section)

In the bottom strata of the Lobé and Niété sediments, the EF average values are (Table 3, Fig. 8a) decreasing as: Cr (7.73) > Th (4.09) > Ni (3.13) > U (1.98) > Fe (1) > V (0.76) > Co (0.72) > Sc (0.70). Except Th, which is higher than that of Ni, this classification is almost the same as that of middle section sediment. Referring to Table 1, the EF of Cr, Th, Ni and U are higher than 1.5, indicating that the source of these elements was from anthropogenic activities. The enrichment was minor (U), moderate (Th and Ni) and moderately severe (Cr).

The Igéo average of selected elements in the bottom strata (Table 3, Fig. 8b) in decreasing order: Cr (1.40) > Ni (0.10) > Th (0.48) > U (-0.56) > Fe (-1.55) > V (-1.95) > Co (-2.03) > Sc (-2.07). Based on Table 1, U, Fe, Co, V and Sc were similar to surface and middle stratum, characterizing restrictively the sediments as unpolluted. Cr, Ni and Th representing the category polluted, where the pollution is moderate.

The variations in CF average values of Lobé and Niété bottom sediments (Table 3, Fig. 8c) are similar as EF: Cr (3.96), Th (2.09), Ni (1.60), U (1.02), Fe (0.51), V (0.39), Co (0.37) and Sc (0.36). According to Table 1, Fe, Co, V and Sc indicated a low contamination while the remaining elements presented moderate (Th, Ni, and U) to considerable (Cr) contamination.

The PLI value of the bottom sediment (0.88) indicated the unpolluted status of Lobé and Niété sediments (Table 1;

Table 3, Fig. 8d); this observation is different to those in the surface and middle strata.

## 3.4 Statistical Analysis

To assess the relationships and interdependency among the sediment characteristics, a multivariate statistical analysis was used because of its value as a tool for reducing and organizing large data sets into groups with similar characteristics without losing much information. In the present study, a multivariate statistical analysis (Pearson correlation, cluster and principal component analysis) for each stratum was used to identify relationships among the variables. The measured heavy metals and radionuclides concentrations and sediment characteristics (grain size parameters and organic matter) were used in this multivariate analysis.

### 3.4.1 Pearson Correlation

The Pearson correlation coefficients of studied variables (element concentrations, grain size parameters and organic matter) in Lobé and Niété sediments are presented in Table 4. In surface sediments (Table 4a), Fe concentration was significantly positive correlated with Cr (0.53), V (0.77), Th (0.77) and U (0.70). Like Fe, Ni vs Cr (0.51), Ni vs Co (0.94), Cr vs Co (0.59), Sc vs V (0.81), V vs Th (0.84), V vs U (0.73) and Th vs U (0.97) showed a significant positive correlation. Fe, Ni, Cr and Co are significantly positively correlated with sand (0.58, 0.65, 0.62 and 0.80, respectively) and significantly negatively correlated with silt (-0.61, -0.70, -0.64 and -0.84, respectively). Clay and organic matter (OM) do not show a significant correlation with metals.

The middle strata show first a significant positive correlation between Fe vs Ni (0.51), Fe vs Sc (0.69), Fe vs V (0.71), Ni vs Cr (0.77), Ni vs Co (0.96), Cr vs Co (0.92), Sc vs V (0.95), Sc vs Th (0.59), V vs Th (0.56), Th vs U (0.98) and second, a significant negative correlation between Ni vs Th (-0.79), Ni vs U (-0.86), Cr vs Th (-0.69), Cr vs U (-0.72), Co vs Th (-0.79), Co vs U (-0.83) (Table 4b). Sand was significantly negatively correlated with Fe (-0.74), Ni (-0.87), Cr (-0.66) and Co (-0.83) and significantly positively correlated with U (0.56). On the other hand, with same proportion, silt was positively correlated with same elements Fe (0.73), Ni (0.88), Cr (0.66) and Co (0.83) and negatively correlated with U (-0.56). Similarly, Fe (0.70), Sc (0.71) and V (0.63) shows a positive correlation with clay. Organic matter is negatively correlated with V (-0.60) and positively correlated with Ni (0.88), Cr (0.66) and Co (0.83).

At bottom section (Table 4c), almost all elements, except Th and U were significantly positive correlated with each other. Ni, Co, V and Fe (clay only) were significantly positively correlated with silt (0.93, 0.82 and 0.77, respectively)

**Table 4** Pearson correlation matrix of studied variables (chemical elements content, grain size parameters and organic matter) in Lobé and Niété sediments (a: surface. b: middle. c: bottom and d: all samples)

(a)	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U	Sand	Silt	Clay	OM
Fe	1											
Ni	0.2	1										
Cr	<b>0.53</b>	<b>0.51</b>	1									
Co	0.29	<b>0.94</b>	<b>0.59</b>	1								
Sc	0.33	-0.11	-0.14	-0.32	1							
V	<b>0.77</b>	0.03	0.29	-0.07	<b>0.81</b>	1						
Th	<b>0.77</b>	-0.3	0.24	-0.27	0.48	<b>0.84</b>	1					
U	<b>0.7</b>	-0.4	0.28	-0.31	0.36	<b>0.73</b>	<b>0.97</b>	1				
Sand	<b>0.58</b>	<b>0.65</b>	<b>0.62</b>	<b>0.8</b>	-0.17	0.11	-0.04	-0.05	1			
Silt	<b>-0.61</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.64</b>	<b>-0.84</b>	0.12	-0.17	0.01	0.04	<b>-0.99</b>	1		
Clay	-0.1	0.2	0.39	0.14	0.13	0.21	0.15	0.21	-0.21	0.17	1	
OM	0.32	-0.25	-0.35	-0.14	-0.12	0.13	0.49	0.45	-0.13	0.13	-0.25	1
(b)	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U	Sand	Silt	Clay	OM
Fe	1											
Ni	<b>0.51</b>	1										
Cr	0.12	<b>0.77</b>	1									
Co	0.33	<b>0.96</b>	<b>0.92</b>	1								
Sc	<b>0.69</b>	-0.11	-0.19	-0.17	1							
V	<b>0.71</b>	-0.21	-0.36	-0.32	<b>0.95</b>	1						
Th	-0.11	<b>-0.79</b>	<b>-0.69</b>	<b>-0.79</b>	<b>0.59</b>	<b>0.56</b>	1					
U	-0.32	<b>-0.86</b>	<b>-0.72</b>	<b>-0.83</b>	0.39	0.37	<b>0.98</b>	1				
Sand	<b>-0.74</b>	<b>-0.87</b>	<b>-0.66</b>	<b>-0.83</b>	-0.37	-0.22	0.41	<b>0.56</b>	1			
Silt	<b>0.73</b>	<b>0.88</b>	<b>0.66</b>	<b>0.83</b>	0.35	0.2	-0.42	<b>-0.56</b>	<b>-1</b>	1		
Clay	<b>0.7</b>	0.36	0.48	0.39	<b>0.71</b>	<b>0.63</b>	-0.04	-0.23	<b>-0.65</b>	<b>0.63</b>	1	
OM	-0.18	<b>0.63</b>	<b>0.72</b>	<b>0.75</b>	-0.35	<b>-0.6</b>	-0.44	-0.38	<b>-0.52</b>	<b>0.53</b>	-0.04	1
(c)	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U	Sand	Silt	Clay	OM
Fe	1											
Ni	<b>0.63</b>	1										
Cr	<b>0.76</b>	0.46	1									
Co	<b>0.8</b>	<b>0.92</b>	0.45	1								
Sc	<b>0.9</b>	<b>0.51</b>	<b>0.59</b>	<b>0.65</b>	1							
V	<b>0.84</b>	<b>0.82</b>	0.43	<b>0.93</b>	<b>0.81</b>	1						
Th	-0.44	-0.23	-0.19	-0.39	-0.41	<b>-0.58</b>	1					
U	-0.29	-0.27	0.01	-0.4	-0.22	-0.41	<b>0.71</b>	1				
Sand	-0.47	<b>-0.93</b>	-0.29	<b>-0.84</b>	-0.36	<b>-0.79</b>	0.29	0.16	1			
Silt	0.44	<b>0.93</b>	0.28	<b>0.82</b>	0.34	<b>0.77</b>	-0.3	-0.17	-1	1		
Clay	<b>0.53</b>	<b>0.58</b>	0.05	<b>0.8</b>	0.29	<b>0.66</b>	-0.41	<b>-0.58</b>	<b>-0.55</b>	<b>0.53</b>	1	
OM	<b>0.85</b>	<b>0.66</b>	<b>0.64</b>	<b>0.75</b>	<b>0.75</b>	<b>0.65</b>	-0.01	-0.21	-0.39	0.36	0.49	1
(d)	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U	Sand	Silt	Clay	OM
Fe	1											
Ni	0.37	1										
Cr	0.25	0.47	1									
Co	<b>0.62</b>	<b>0.76</b>	0.45	1								
Sc	<b>0.72</b>	0.07	0.02	0.3	1							
V	<b>0.74</b>	0.13	0.12	0.31	<b>0.8</b>	1						
Th	-0.05	-0.34	-0.04	-0.39	0.09	0.3	1					
U	-0.09	-0.46	0.07	-0.43	0.11	0.26	0.87	1				
Sand	-0.43	-0.27	-0.05	<b>-0.63</b>	-0.31	-0.4	0.24	0.18	1			
Silt	0.4	0.25	0.03	<b>0.61</b>	0.28	0.37	-0.25	-0.19	<b>-1</b>	1		
Clay	<b>0.56</b>	0.36	0.31	<b>0.62</b>	0.27	<b>0.5</b>	-0.1	-0.19	-0.48	0.45	1	
OM	<b>0.5</b>	0.2	0.1	<b>0.58</b>	0.4	0.2	0.07	-0.01	-0.38	0.36	0.24	1

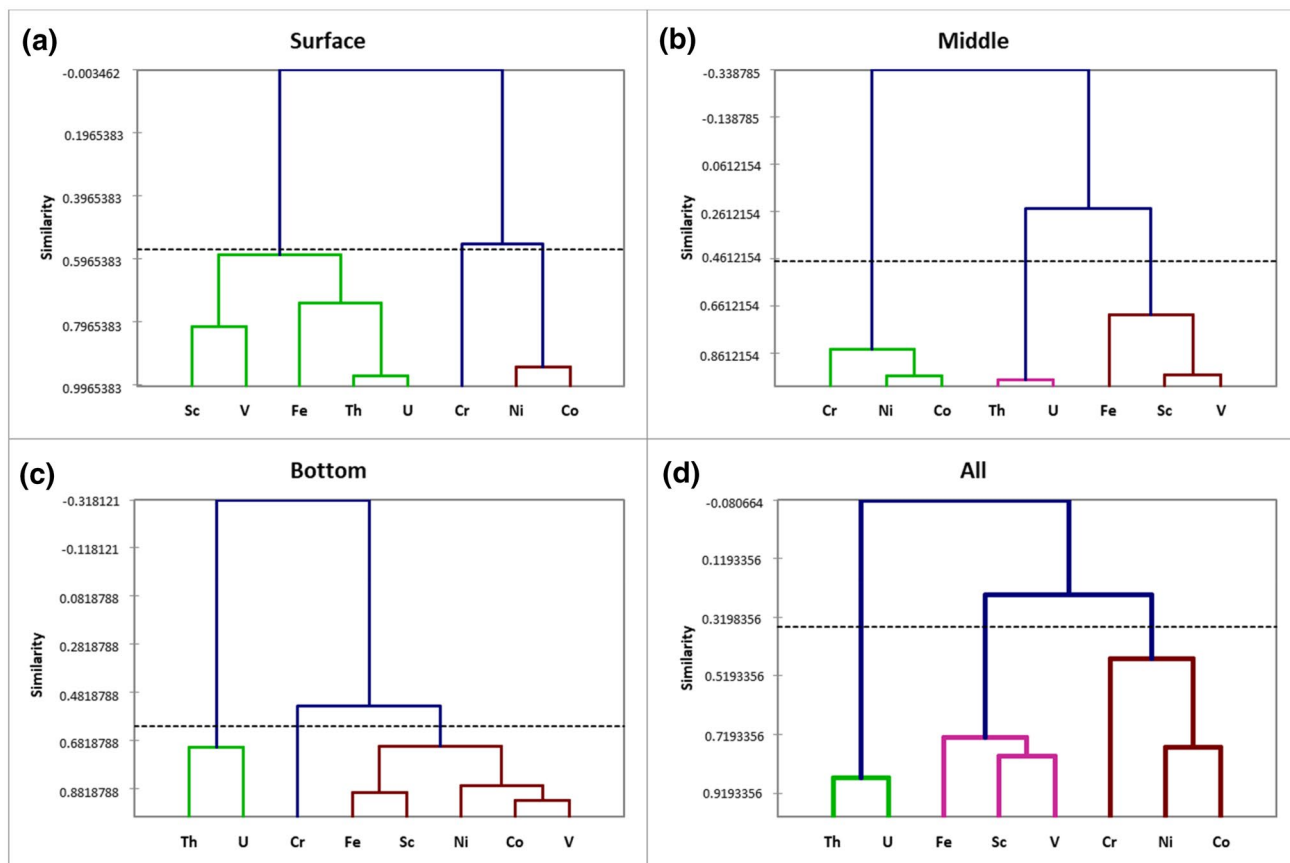
and clay (0.58, 0.80, 0.66 and 0.53, respectively). Sand shows a significant negative correlation with Ni (-0.93), Co (-0.84) and V (-0.79) like clay with U (-0.58). Except Th and U, the remaining elements were positively correlated with organic matter.

The matrix of all studied samples (Table 4d) shows a significant positive correlation between Fe vs Co (0.62), Fe vs Sc (0.72), Fe vs V (0.74), Ni vs Co (0.76), Sc vs V (0.80) and Th vs U (0.87). Silt shows a significant positive correlation with Co (0.60) like clay with Fe (0.56), Co (0.62) and V (0.50), and organic matter with Fe (0.50) and Co (0.58). Sand shows a significant negative correlation with Co (-0.63).

The relationship among selected elements indicated a common source in the area. According to Singh et al. (2017) in the River Ghaghara, a major tributary of the River Ganges in Northern India, positive relationship between Co, Cr, and Ni demonstrated a characteristic natural origin of these components in the waterway sediment while good correlation between each other could be suggested from common anthropogenic sources, and that they can be affected by possible additions.

### 3.4.2 Cluster Analysis

Cluster analysis is a technique that is used to provide important information about the grouping of variables based on similarity. Figure 9 represents the dendrograms of metals and radionuclides of Lobé and Niété sediments, grouped into three statistically significant clusters for all strata. In surface sediments (Fig. 9a), the first cluster includes Sc, V, Fe, Th and U; Cr is the only element of the second cluster while Ni and Co represent the third cluster. The first cluster of middle strata includes Cr, Ni and Co; Th and U form the second and the third integrates Fe, Sc and V (Fig. 9b). Bottom strata regroup Th and U in the first cluster, only Cr in the second like the surface and the remaining (Fe, Sc, Ni, Co and V) in the third cluster (Fig. 9c). Due to some differences obtained in each stratum, a dendrogram of all sample was done (Fig. 9d) and we noted that Th and U formed the first cluster. The second cluster included Fe, Sc and V while Cr, Ni and Co represent the third. This grouping revealed that elements belonging to the same cluster have similar source.



**Fig. 9** Dendrograms of cluster analysis of the concentration of analyzed variable (chemical elements) in Lobé and Niété sediments



### 3.4.3 Principal Component Analysis

To sustain the association obtained from the Pearson correlation and cluster analyses, a principal component analysis (PCA) was performed with chemical elements, grain size parameters and organic matter as variables. In the analysis, the first three principal components accounted for nearly 72.99% of the total variance, and the variances of F1, F2 and F3 is 40.08, 20.92 and 12%, respectively. Two main groups are distinguished: the first integrating the component F1 and F3 and the second is represented by the component F2 (Table 5, Fig. 10). The first group includes Fe, Ni, Cr, Co, Sc and V, grain size parameters (Sand, silt and clay) and organic matter. We noted that except sand with a significant negative correlation, the rest are positively correlated to this group (Table 5, Fig. 10). According to the cluster analysis, this group integrated the second (Fe Sc and V) and the third (Cr, Ni and Co) clusters materialized by the Fig. 9d. Wang et al. (2008) in west-four Pearl River Estuary sediments, China, explained that Cr, Ni and Co come from the terrigenous detrital matter taken by the runoff, and the lithological characteristics of drainage area. This observation suggest

that this group could be identified as “anthropogenic factor” while the second, made of Th and U (like also materialized by the first cluster) could be identified as “natural factor”. As seen in Table 5 and Fig. 10, Sc and V could also be attributed to the second group.

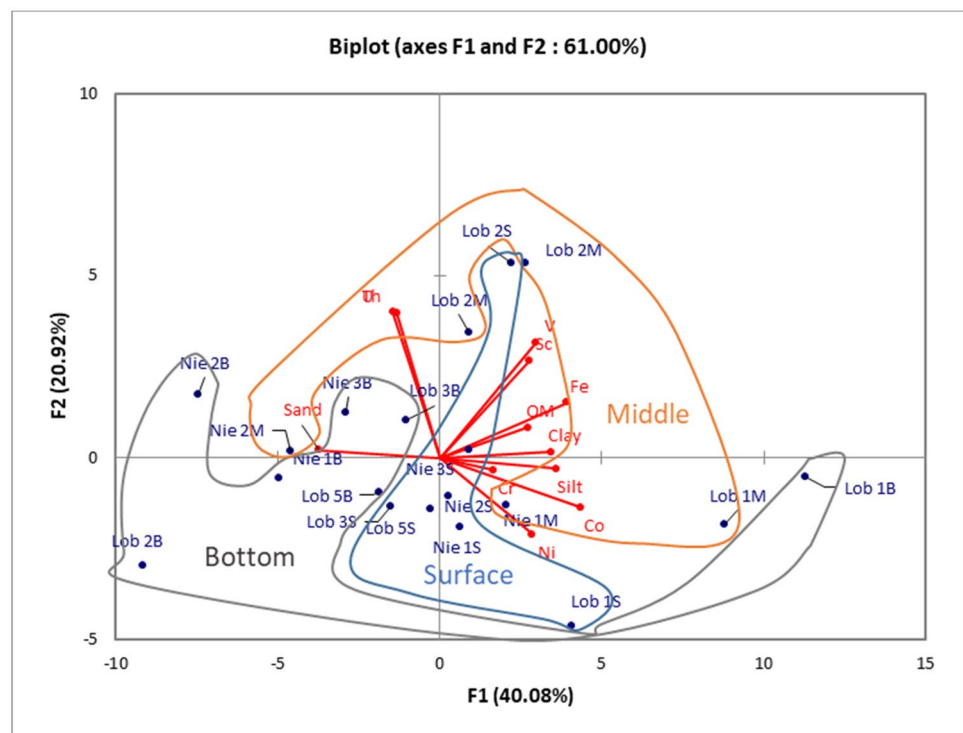
## 4 Conclusions

This is the first study on spatial and vertical distribution and contamination assessment in sediment cores of Lobé River, south-west Cameroon. The study was carried out on heavy metals (Fe, Ni, Cr, Co, Sc and V) and radionuclides (Th and U) in sediment cores and to assess their contamination level in the environment through the EF, Igeo, CF and PLI values and source apportionments of these metals. The result of sediment characteristics analysis showed that sand is the main constituent. The river sediments recorded low levels of organic matter. The average concentration of selected elements decreased as  $Fe > Cr > Ni > V > Th > Co > Sc > U$ . Spatial and vertical distributions of chemical elements presented high concentration of Cr, Ni and Th which exceed the

**Table 5** Correlation between variables (chemical elements contents, grain size parameters and organic matter) and factors

	Fe	Ni	Cr	Co	Sc	V	Th	U	Sand	Silt	Clay	OM
F1	<b>0.81</b>	<b>0.59</b>	0.34	<b>0.90</b>	<b>0.58</b>	<b>0.62</b>	-0.27	-0.30	<b>-0.77</b>	<b>0.75</b>	<b>0.72</b>	<b>0.56</b>
F2	0.31	-0.44	-0.07	-0.28	0.55	0.66	<b>0.82</b>	<b>0.83</b>	0.04	-0.06	0.03	0.17
F3	0.12	0.47	<b>0.77</b>	0.18	-0.09	0.01	0.18	0.14	0.49	-0.51	0.14	-0.04

**Fig. 10** Principal component analysis of studied variables (chemical elements contents, grain size parameters and organic matter) of Lobé and Niété sediments



average values. The maximum concentration of most studied metals was recorded in the middle stratum of sediment cores, followed by surface and bottom strata, respectively. Due to the human activities such as household wastes, intensive agriculture and the result of the processing of industries products, the highest concentrations of most chemical elements were recorded at Lob 1, Nie 2, Lob 2 and Lob 5. Pollution indices (EF, Igéo and CF) of Lobé sediments revealed a moderate to severe pollution of Cr, Ni and Th in all strata, with a low contamination of U at the bottom section. Several pollution indices show that surface and middle section sediments are polluted while bottom sediments are unpolluted. According to statistical analysis, heavy metals (Fe, Sc, V, Cr, Ni and Co) have common anthropogenic sources, whereas grain size parameters (sand, silt and clay) were associated with them while radionuclides (Th and U), which have a natural source. Through the contamination assessment in sediment cores of Lobé River of south–west Cameroon, this study provides environmental pollution related information over the study area, which is important for policy makers.

**Acknowledgements** This represents part of an on-going PhD work of the first author. The authors are indebted to the field team and the Department of Earth Sciences, University of Yaoundé I, Cameroon. We are grateful to the anonymous reviewers and the Editor in Chief for their comments, discussions and suggestions on the manuscript.

## Declarations

**Conflict of interest** On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest.

## References

- Al-Hadithy ON, Youssef AM, Hassanein RA, El-Amier YA (2018) Vegetation composition related to environmental factors along the international highway-West Alexandria, Egypt. *Annu Res Rev Biol* 1–15.
- Al-Trabulsy HAM, Khater AEM, Habbani FI (2010) Heavy elements concentrations, physicochemical characteristics and natural radionuclides levels along the Saudi coastline of the Gulf of Aqaba. *Arab J Chem* 6:183–189
- Anaya-Gregorio A, Armstrong-Altrin JS, Machain-Castillo ML, Montiel-García PC, Ramos-Vázquez MA (2018) Textural and geochemical characteristics of late Pleistocene to Holocene fine-grained deep-sea sediment cores (GM6 and GM7), recovered from southwestern Gulf of Mexico. *Journal of Palaeogeography* 7:253–271
- Armstrong-Altrin JS (2020) Detrital zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Riachuelos and Palma Sola beach sediments, Veracruz State, Gulf of Mexico: a new insight on palaeoenvironment. *Journal of Palaeogeography* 9(1):1–27
- Armstrong-Altrin JS, Ramos-Vázquez MA, Zavala-León AC, Montiel-García PC (2018) Provenance discrimination between Atasta and Alvarado beach sands, western Gulf of Mexico, Mexico: Constraints from detrital zircon chemistry and U-Pb geochronology. *Geol J* 53:2824–2848
- Armstrong-Altrin JS, Botello AV, Villanueva SF, Soto LA (2019) Geochemistry of surface sediments from the northwestern Gulf of Mexico: implications for provenance and heavy metal contamination. *Geological Quarterly* 63:522–538
- Ayala-Pérez MP, Armstrong-Altrin JS, Machain-Castillo ML (2021) Heavy metal contamination and provenance of sediments recovered at the Grijalva River delta, southern Gulf of Mexico. *J Earth Syst Sci* 130(2):1–23
- Aytas S, Sabriye Y, Aslani Mahmud A, Turgey K, Alkim Turkozu D, Cem G, Sema E, Melis G, Firat Oguz K (2012) Natural radioactivity of riverbank sediments of the Maritza and Tundja Rivers in Turkey. *J Environ Sci Health Part A* 47:2163–2172
- Baranov VI and Morozova NG (1971) Behavior of natural radionuclides in soil Chapter 1 in: Klechkovskii et al (1971).
- Bartoli G, Papa S, Sagnella E, Fioretto A (2012) Heavy metal content in sediments along the Calore river: Relationships with physical-chemical characteristics. *J Environ Manage* 95:S9–S14
- Bhuiyan MAH, Parvez L, Islam MA, Dampare SB, Suzuki S (2010) Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh. *J Hazard Mater* 173:384–392
- Cempel M, Nickel G (2006) Nickel: a review of its sources and environmental toxicology. *Pol J Environ Stud* 15 (3).
- Chairman B R (1991) Construction techniques for sediment pollution control, Epa Victoria.
- Chau YK, Kulikovskiy-Cordeiro OTR (1995) Occurrence of nickel in the Canadian environment. *Environ Rev* 3:95–120
- Chen N, Chen L, Ma Y, Chen A (2019) Regional disaster risk assessment of China based on self-organizing map: clustering, visualization and ranking. *Int J Disaster Risk Reduct* 33:196–206
- Chougong DT, Bessa AZE, Nguetchoua G, Yongue RF, Ntyam SC, Armstrong-Altrin JS (2021) Mineralogy and geochemistry of Lobé River sediments, SW Cameroon: Implications for provenance and weathering. *J Afr Earth Sc* 183:104320
- Domingo JL (2001) Reproductive and developmental toxicity of natural and depleted uranium: a review. *Reprod Toxicol* 15:603–609
- Ekoka Bessa AZ, El-Amier YA, Doumo EPE, Nguetchoua N (2018) Assessment of Sediments Pollution by Trace Metals in the Moundou Swamp, Southeast Cameroon. *Annual Research & Review in Biology* 30:1–13
- AZ Ekoka Bessa G Nguetchoua AK Janpou YA El-Amier ONNM Nguetnga UR Kayou SB Bisse ECN Mapuna JS Armstrong-Altrin (2021) Heavy metal contamination and its ecological risks in the beach sediments along the Atlantic Ocean (Limbe coastal fringes Earth Systems and Environment Cameroon)
- Feybesse JL, Johan V, Triboulet C, Guerrot C, Mayaga-Mokolo F, Bouchot V, Eko N'Dong J (1998) The West Central African belt: a model of 25–20 Ga accretion and two-phase orogenic evolution. *Precambr Res* 87:161–216
- Guesdon G, De Santiago MA, Galvez-Cloutier R (2014) Restauration du lac La Retenue, l'Ange-Gardienn, Québec Phase I : Caractérisation des sédiments et qualité de l'eau de surface Département de génie civil et de génie des eaux. Université Laval, Québec
- Hakanson L (1980) An ecological risk index for aquatic pollution control A sedimentological approach. *Water Res* 14:975–1001
- Hanif N, Eqani SAMAS, Ali SM, Cincinelli A, Ali N, Katsoyiannis IA (2016) Geo-accumulation and enrichment of trace metals in sediments and their associated risks in the Chenab River. *Pakistan J Geochem Explor* 165:62–70
- Harmsen K, Haan FAM (1980) Occurrence and behaviour of uranium and thorium in soil and water. *Neth J Agric Sei* 28:40–62
- Heanes DL (1984) Determination of organic C in soils by an improved chromic acid digestion and spectrophotometric procedure. *Comm Soil Sci Plant Anal* 15:1191–1213
- Hossain MB, Runu UH, Sarker MM, Hossain MK, Parvin A (2021) Vertical distribution and contamination assessment of heavy



- metals in sediment cores of ship breaking area of Bangladesh. *Environ Geochem Health*.
- Jiang Y, Zhong W, Yan W, Yan L (2019) Arsenic mobilization from soils in the presence of herbicides. *J Environ Sci* 85:66–73
- Kaushik A, Kansal A, Kumari S, Kaushik CP (2009) Heavy metal contamination of river Yamuna, Haryana, India: assessment by metal enrichment factor of the sediments. *J Hazard Mater* 164:265–270
- Ke X, Gui S, Huang H, Zhang H, Wang C, Guo W (2017) Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China.
- Klement AW (1965) Natural radionuclides in foods and food source materials. In: Fowler EB (ed) radioactive fallout, soils, plants, foods, man, Ch 6. Elsevier, Amsterdam
- Lerouge C, Cocherie A, Toteu SF, Penaye J, Milesi JP, Tchameni R, Deloule E (2006) Shrimp U-Pb zircon age evidence for paleoproterozoic sedimentation and 205 Ga syntectonic plutonism in the Nyong Group, south-western Cameroon: consequences for the eburnean–transamazonian belt of NE Brazil and central Africa. *J Afr Earth Sci* 44:413–427
- Lienou G, Mahe G, Paturel JE, Servat E, Sighomnou D, Ekodeck GE, Dezetter A, Dieulin C (2008) Evolution des régimes hydrologiques en région équatoriale camerounaise: un impact de la variabilité climatique en Afrique équatoriale. *Hydrol Sci J* 53(4):789–801
- Mandeng EPB, Bidjeck LMB, Wambo JDT, Taku A Jr, Betsi TB, Ipan AS, Nfada LT, Dieudonné LB (2018) Lithologic and structural mapping of the Abiete-Toko gold district in southern Cameroon, using Landsat 7 ETM+/SRTM. *CR Geosci* 350(3):130–140
- Mandeng EPB, Bidjeck LMB, Bessa AZE, Ntomb YD, Wadjou JW, Doumo EPE, Dieudonné LB (2019) Contamination and risk assessment of heavy metals, and uranium of sediments in two watersheds in Abiete-Toko gold district. *Southern Cameroon Heliyon* 5:02591
- Maurizot P, Abessolo A, Feybesse JL, Johan V, Lecomte P (1986) Study and Mining Exploration in Southwest Cameroon Synthesis of the Work from 1978 to 1985 Rapp BRGM, p 85 (in French).
- McLennan SM (2001) Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochem Geophys Geosyst*. <https://doi.org/10.1029/2000GC000109>
- Mimba ME, Ohba T, Fils SCN, Nforba MT, Numanami N, Bafon TG, Festus TA, Suh CE (2018) Regional geochemical baseline concentration of potentially toxic trace metals in the mineralized Lom Basin, East Cameroon: a Tool for Contamination Assessment *Geochem Trans* 19:11
- Moore JW, Ramamoorthy S (1984) Heavy metals in natural waters: Applied monitoring and impact assessment Springer-Verlag; New York 28–246
- Müller G (1969) Index of geoaccumulation in sediments of the rhine river. *GeoJournal* 2:108–118
- Narayana Y, Rajashekara KM (2010) The importance of physico-chemical parameters on the speciation of natural radionuclides in riverine ecosystems. *J Environ Radioact* 101:958–964
- Nawrot N, Wojciechowska E, Matej-Łukowicz K, Walkusz- Miotk J, Pazdro K (2019) Spatial and vertical distribution analysis of heavy metals in urban retention tanks sediments: a case study of Strzyza Stream. *Environ Geochem Health* 42:1–17
- Ndjigui P-D, Beauvais A, Fadil-Djenabou S, Ambrosi J-P (2014) Origin and evolution of Ngaye River alluvial sediments, Northern Cameroon: Geochemical constraints. *J Afr Earth Sc* 100:164–178
- Ndjigui P-D, Onana VL, Sababa E, Bayiga EC (2018) Mineralogy and geochemistry of the Lokoundje alluvial clays from the Kribi deposits, Cameroonian Atlantic coast: Implications for their origin and depositional environment. *J Afr Earth Sc* 143:102–117
- Pinto MMSC, Silva MMVG, Neiva AMR (2004) Pollution of Water and Stream Sediments Associated with the Vale De Abrutiga Uranium Mine, Central Portugal Mine. *Water and the Environment* 23:66–75
- Rahman MS, Khan MDH, Jolly YN, Kabir J, Akter S, Salam A (2019) Assessing risk to human health for heavy metal contamination through street dust in the Southeast Asian Megacity: Dhaka, Bangladesh. *Sci Total Environ* 660:1610–1622
- Ramasamy V, Paramasivama K, Suresh G, Jose MT (2014) Role of sediment characteristics on natural radiation level of the Vaigai river sediment, Tamilnadu, India. *J Environ Radioact* 127:64–74
- Ramos-Vázquez MA, Armstrong-Altrin JS (2019) Sediment chemistry and detrital zircon record in the Bosque and Paseo del Mar coastal areas from the southwestern Gulf of Mexico. *Mar Pet Geol* 110:650–675
- Reimann C, Caritat P (1998) Chemical Elements in the Environment. Springer-Verlag, Berlin, Fact Sheets for the Geochemist and Environmental Scientist
- Rogers JJW, Adams AS (1969) Thorium, Handbook of Geochemistry, Ed KH Wedepohl, Vol II/5, Springer-Verlag, Berlin, 90-E.
- Ronco A, Peluso L, Jurado M, Rossini GB, Salibian A (2008) Screening of sediment pollution in tributaries from the southwestern coast of the Rio de la Plata estuary. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 15:67–75
- Sahoo SK, Hosoda M, Kamagata S, Sorimachi A, Ishikawa T, Tokonami S, Uchida S (2011) Thorium, Uranium and Rare Earth Elements Concentration in Weathered Japanese Soil. *Samples Progress in Nuclear Science and Technology* 1:416–419
- Salati S, Moore F (2010) Assessment of heavy metal concentration in the Khoshk River water and sediment, Shiraz, Southwest Iran. *Environ Monit Assess* 164:677–689
- Selvaraj K, Mohan VR, Szefer P (2004) Evaluation of metal contamination in coastal sediments of the Bay of Bengal, India: geochemical and statistical approaches. *Mar Pollut Bull* 49(3):174–185
- Shang CK, Satir M, Nsifa EN, Liégeois J-P, Siebel W, Taubald H (2007) Archean high-K granitoids produced by remelting of earlier Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG) in the Sangmelima region of the Ntem complex of the Congo craton, southern Cameroon. *International Journal of Earth Science* 96:817–841
- Shtangeeva I, Perämäki P, Niemelä M, Kurashov E, Krylova Y (2018) Potential of wheat (*Triticum aestivum* L.) and pea (*Pisum sativum*) for remediation of soils contaminated with bromides and PAHs. *Inter J phytore* 20: 560–566
- Sun ZH, Xie XD, Wang P, Hu YA, Cheng HF (2018) Heavy metal pollution caused by small-scale metal ore mining activities: a case study from a polymetallic mine in South China. *Sci Total Environ* 639:217–227
- Suresh G, Ramasamy V, Meenakshisundaram V, Venkatachalapathy R, Ponnusamy V (2011) Influence of mineralogical and heavy metal composition on natural radionuclide concentrations in the river sediments. *Appl Radiat Isot* 69:1466–1474
- Talibudeen O (1964) Natural Radioactivity in Soils *Soils Fert* 27:347–359
- Tehna N, Sababa E, Bessa EAZ Etame J (2020) Mine waste and heavy metal pollution in Betare-Oya mining area (Eastern Cameroon). *Environmental and Earth Sciences Research Journal*.
- Tomlinson DL, Wilson JG, Harris CR, Jeffrey DW (1980) Problems in the Assessment of Heavy-Metal Levels in Estuaries and the Formation of a Pollution Index *Helgol Meeresunters* 33:566
- Toteu SF, Van Schmus WR, Penaye J, Michard A (2001) New U-Pb and Sm-Nd data from north-central Cameroon and its bearing on the Pre-Pan-African history of central Africa. *Precamb Res* 108:45–73
- UNSCEAR (1977) Sources and effects of ionizing radiation UN Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation, 1977; report to the General Assembly, with annexes UN Publ, E 77 IX.1. UN, New York
- AP Vinogradov 1959 The geochemistry of rare and dispersed chemical elements in soils Consultants Bureau New York

- Wang S, Cao Z, Lan D, Zheng Z, Li G (2008) Concentration distribution and assessment of several heavy metals in sediments of west-four Pearl River Estuary. *Environ Geol* 55:963–975
- Wang G, Yinglan A, Jiang H, Fu Q, Zheng B (2015) Modeling the source contribution of heavy metals in surficial sediment and analysis of their historical changes in the vertical sediments of a drinking water reservoir. *J Hydrol* 520:37–51
- Xiao R, Bai J, Huang L, Zhang H, Cui B, Liu X (2013) Distribution and pollution, toxicity and risk assessment of heavy metals in sediments from urban and rural rivers of the Pearl River delta in southern China. *Ecotoxicology* 22:1564–1575
- Yang Z, Wang Y, Shen Z, Niu J, Tang Z (2009) Distribution and speciation of heavy metals in sediments from the main stream, tributaries, and lakes of the Yangtze River catchment of Wuhan, China. *J Hazard Mater* 166:1186–1194
- Zahra A, Hashmi MZ, Malik RN, Ahmed Z (2014) Enrichment and geo-accumulation of heavy metals and risk assessment of sediments of the Kurang Nallah feeding tributary of the Rawal Lake Reservoir, Pakistan. *Sci Total Environ* 470:925–933
- Zhou Z, Chen Z, Pan H, Sun B, Zeng D, He L, Yang R, Zhou G (2018) Cadmium contamination in soils and crops in four mining areas. *China J Geochem Explor* 192:72–84
- Zogo MB, Mbey JA, Coulibaly SL, Onana VL, Ndjigui PD (2021) DMSO deintercalation in kaolinite – DMSO intercalate influence of solution polarity on removal. *J Compos Sci* 5:97