

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

FACULTE DES SCIENCES

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

UNITE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN
GEOSCIENCES ET APLICATIONS



THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL FOR
SCIENCES, TECHNOLOGY AND
GEOSCIENCES

DOCTORATE RESEARCH UNIT
FOR GEOSCIENCES AND
APPLICATIONS

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

LABORATOIRE DE GEOSCIENCES DES FORMATIONS
SUPERFICIELLES ET APPLICATIONS

*LABORATORY OF GEOSCIENCES OF SUPERFICIAL FORMATIONS AND
APPLICATIONS*

ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE ET GEOCHIMIQUE DES ALLUVIONS DE LA DJOUEL A BIBODI

Mémoire rédigé en vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences de la
Terre et de l'Univers

Spécialité : Géosciences des Formations Superficielles et Applications

Option : Géologie Minière et Ressources Pétrolières

Présenté par

OUSMAN HASSAN MALICK

Matricule : 19V2256

Licencié ès-Sciences

Sous la direction de :

NGOS III Simon

Professeur

Université de Yaoundé I



Année académique : 2024 - 2025

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

FACULTE DES SCIENCES

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

UNITE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN
GEOSCIENCES ET APPLICATIONS



THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE SCHOOL FOR
SCIENCES, TECHNOLOGY AND
GEOSCIENCES

DOCTORATE RESEARCH UNIT
FOR GEOSCIENCES AND
APPLICATIONS

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

LABORATOIRE DE GEOSCIENCES DES FORMATIONS SUPERFICIELLES
ET APPLICATIONS

*LABORATORY OF GEOSCIENCES OF SUPERFICIAL FORMATIONS AND
APPLICATIONS*

**ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE ET GEOCHIMIQUE DES
ALLUVIONS DE LA DJOUEL A BIBODI**

Mémoire rédigé en vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences de la
Terre et de l'Univers

Spécialité : Géosciences des Formations Superficielles et Applications

Option : Géologie Minière et Ressources Pétrolières

Présenté par

OUSMAN HASSAN MALICK

Matricule : **19V2256**

Licencié ès-Sciences

Sous la direction de :

NGOS III Simon

Professeur

Université de Yaoundé I

Année académique : 2024 - 2025

À mon père HASSAN MALICK ZAHAB;

À ma mère ZAHARA ABDALRASSOUL HAMADI.

REMERCIEMENTS

Je remercie Allah le tout puissant pour la volonté, le courage, l'intelligence, la santé physique et morale qu'il m'a donné. Ces qualités m'ont permis de faire face à de nombreuses difficultés tout au long de mes travaux de recherche et de l'élaboration de ce document. Au terme de ce travail, il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation.

J'exprime sincèrement ma très profonde reconnaissance au Professeur Ngos III Simon, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, sa disponibilité inconditionnelle, ses critiques, son soutien moral, ses conseils judicieux, sa rigueur au travail m'ont été bénéfiques. Ces quelques mots de gratitude ne suffiront pas à exprimer l'admiration que je lui porte, ainsi que la joie et la chance de l'avoir eu comme enseignant et comme encadreur.

Mes remerciements les plus distingués vont à l'endroit du Chef de Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, Professeur Bisso Dieudonné, pour la bonne gouvernance au sein de son illustre département.

J'adresse mes remerciements au Professeur Ndjigui Paul-Désiré, vice doyen de la Faculté des Sciences pour le savoir, l'encouragement et les conseils durant son enseignement.

Mes remerciements vont également à l'endroit du Docteur Mbanga Nyobe Jules avec qui, j'ai beaucoup échangé. Ses conseils, sa rigueur scientifique et sa disponibilité ont contribué à l'amélioration et à la finalisation de ce travail.

Je témoigne sans réserve ma reconnaissance à tout le corps enseignant du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, pour leurs enseignements et les nombreux conseils reçus qui m'ont permis de perfectionner ma qualité de recherche.

Toute ma gratitude va à l'endroit de mes aînés académiques et mes camarades de promotion pour des nombreux échanges scientifiques et les remarques qui ont permis la compréhension sur certains points géologiques.

Mes chers parents, Hassan Malick Zahab et Zahara Abdalrassoul Hamadi, je vous dis sincèrement merci pour votre amour et votre soutien depuis ma naissance jusqu'à ce jour.

Je remercie tous mes frères (Adam Hassan Malick., Bahar Hassan Malick., Amine Hassan Malick., Charafadine Hassan Malick., Ali Hassan Malick) et sœurs (Zenaba Hassan Malick., Asma'a Hassan Malick., Haoua Hassan Malick) pour le soutien moral et financier sans

condition qu'ils m'ont apporté au cours de la réalisation de ce travail. Que ceci soit pour nous un symbole de la solidarité familiale.

A tous mes amis que je côtoie depuis longtemps et qui ont contribué à leur façon à la réalisation de ce mémoire : soit en m'aidant pour l'analyse au laboratoire, soit en me soutenant moralement. Je vous dis grand merci.

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

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	i
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES ABREVIATIONS	ix
RESUME.....	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : MILIEU NATUREL ET CADRE GEOLOGIQUE.....	4
Introduction	5
I.1. GEOGRAPHIE PHYSIQUE	5
I.1.1. Situation géographique	5
I.1.2. Climat.....	6
I.1.3. Sols.....	7
I.1.4. Végétation	7
I.1.5. Géomorphologie	8
I.1.5.1. Orographie	8
I.1.5.2. Hydrographie	9
I.2. GEOGRAPHIE HUMAINE ET ECONOMIQUE	11
I.2.1. Histoire du peuplement	11
I.2.2. Population-peuplement et économie.....	11
I.3. CADRE GEOLOGIQUE	12
Conclusion.....	13
CHAPITRE II : TRAVAUX ANTERIEURS ET METHODOLOGIE	14
Introduction	15
II.1. TRAVAUX ANTERIEURS	15
II.1.1. Généralités	15
II.1.1.1. Concepts et définitions	15
II.1.1.2. Mode de mise en place et composition des alluvions.....	16
II.1.1.3. Utilisation des matériaux alluvionnaires	19

II.1.2. Caractérisation physique des alluvions.....	20
II.1.3. Synthèse des travaux sur la géologie	22
II.1.4. Synthèse des travaux sur la géochimie des alluvions	23
II.1.4.1. Eléments majeurs.....	23
II.1.4.2. Eléments traces	24
II.1.4.3. Eléments de terres rares	26
II.1.4.4. Classification géochimique des sédiments alluvionnaires.....	27
II.1.4.5. Degré d'altération de la roche source	28
II.1.4.6. Maturité des sédiments alluvionnaires	30
II.1.4.7. Provenance des sédiments alluvionnaires.....	31
II.1.5. Minéraux lourds.....	32
II.1.6. Echelle expérimentale d'altération	33
II.1.7. Morphoscopie	34
II.2. METHODOLOGIE	36
II.2.1. Travaux de terrain.....	36
II.2.1.1. Techniques de prélèvement	37
II.2.1.2. Echantillonnage	38
II.2.2. Travaux au laboratoire.....	40
II.2.2.1. Analyse pétrographique des roches	40
II.2.2.2. Analyses sédimentologiques.....	40
II.2.2.2.1. Granulométrie	40
II.2.2.2.2. Minéraux lourds	43
II.2.2.2.3. Analyse morphoscopique.....	44
II.2.2.3. Analyses géochimiques	45
Conclusion.....	46
CHAPITRE III : RESULTATS	47
Introduction	48
III.1. PÉTROGRAPHIE	48
III.1.1. Micaschiste à grenat et à biotite	48
III.1.2. Gneiss à micas et à grenat	50
III.2. SEDIMENTOLOGIE.....	52
III.2.1. Granulométrie.....	52
III.2.1.1. Courbes cumulatives	52

III.2.1.2. Histogrammes.....	53
III.2.1.3. Indices granulométriques	49
III.2.2. Morphoscopie.....	53
III.2.2.1. Analyse des diagrammes surfacés des grains.....	53
III.2.2.2. Formes des grains.....	54
III.2.3. Minéraux lourds	57
III.2.3.1. Description des différentes espèces minérales	57
III.2.3.2. Présentation analytique des minéraux lourds	59
III.3. GEOCHIMIE	61
III.3.1. Eléments majeurs	61
III.3.1.1. Distribution des éléments majeurs	61
III.3.1.2. Corrélation des éléments majeurs	63
III.3.2. Eléments traces.....	65
III.3.2.1. Distribution des éléments traces.....	65
III.3.2.2. Normalisation des éléments traces	67
III.3.3. Terres rares.....	67
III.3.3.1. Distribution des terres rares.....	67
III.3.3.2. Normalisation des terres rares	70
Conclusion.....	80
CHAPITRE IV : INTERPRETATION ET DISCUSSION.....	81
Introduction	82
IV.1. PÉTROGRAPHIE.....	82
IV.2. DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE	82
IV.3. CLASSIFICATION GEOCHIMIQUE	83
IV.4. PROVENANCE.....	85
IV.5. MATURITE DES SEDIMENTS	86
IV.6. DEGRE D'ALTERATION.....	88
Conclusion.....	90
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	91
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	94
ANNEXES.....	A

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte de localisation du secteur d'étude à partir d'un fond topographique de Yaoundé: (a) carte de l'Afrique montrant le Cameroun ; (b) carte montrant la Région du Centre Cameroun ; c) carte montrant la zone d'étude.	5
Figure 2: Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957) de la localité de Bibodi.	6
Figure 3: Vue panoramique de la végétation du secteur d'étude.	8
Figure 4: Carte géomorphologique du secteur d'étude	9
Figure 5 : Carte hydrographique de la zone d'étude	10
Figure 6 : Carte géologique du secteur d'étude.....	13
Figure 7 : Mode de transport des sédiments vue en coupe d'une rivière.....	17
Figure 8 : Diagramme de Hjulström (1935) illustrant le comportement des grains en fonction de leur taille et la vitesse du courant.	18
Figure 9 : Différentes formes de courbes granulométriques des sédiments.....	21
Figure 10: Echelle d'altération des minéraux lourds.	34
Figure 11 : Charte visuelle permettant l'estimation de la sphéricité des sables et graviers (Powers.1953).	35
Figure 12 : a) Lavage du sable et b) Prise des mesures de profondeur de puits.	38
Figure 13 : Carte d'échantillonnage.	39
Figure 14 : Matériels de laboratoire : a) vue global du matériel, b) balance numérique et c) colonne de tamis.....	43
Figure 15 : Micaschiste à grenat à biotite.	49
Figure 16 : Gneiss à micas et à grenat.....	51
Figure 17 : Diagramme synthétique de la granulométrie des sédiments alluvionnaires de la Djouel.	50
Figure 18 : Courbes cumulées des échantillons.	51
Figure 19 : Histogrammes des échantillons.	52
Figure 20 : Diagrammes surfacés des grains de quartz.	55
Figure 21 : Différentes formes et aspects de surface des grains de quartz observés à la loupe binoculaire au grossissement 50 X et 160 X.	56
Figure 22 : Minéraux lourds.....	59
Figure 23: Diagrammes circulaires indiquant la répartition des minéraux lourds dans les sédiments BIB-02, BIB-04, BIB-05 et BIB-06.	60

Figure 24: Diagramme binaires en fonction de : A) Al_2O_3 et B) SiO_2	64
Figure 25 : Spectres de normalisation des éléments traces par rapport : A) à la chondrite (McDonough et Sun, 1995) et B et C) au PAAS et à l'UCC respectivement.....	68
Figure 27 : Diagramme de classification géochimique des sédiments alluvionnaires de la Djouel.....	84
Figure 28 : Diagramme de : A) dispersion de Zr par rapport à TiO_2 et B) Th versus Sc montrant la source des sédiments alluvionnaires de la Djouel.....	86
Figure 29 : Diagramme géochimique ICV/CIA des sédiments alluvionnaires dans la zone d'étude.....	87
Figure 30 : Diagramme A-CN-K illustrant l'intensité d'altération des feldspaths calco sodiques (CN) et des feldspaths potassiques (K) dans les sédiments de la Djouel.	89

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Moyenne mensuelle des précipitations et des températures de la localité de Bibodi pour la période de 1993 – 2022.....	6
Tableau II: Échelle partielle de classification des sédiments.	20
Tableau III : Différents sites de prélèvements ainsi que les coordonnées géographiques des points de prélèvements et afin les profondeurs des puits	39
Tableau IV : Echelle de notation Trask $S_0=\sqrt{Q_3/Q_1}$, adaptée des mesures graphiques de Folk et Ward (1957).	42
Tableau V: Fractions granulométriques des échantillons en pourcentage de refus cumulés et de tamisât cumulés.	48
Tableau VI : Indices sédimentométriques et les paramètres granulométriques des sédiments.	49
Tableau VII : Inventaire des aspects de surfaces des grains observés	54
Tableau VIII : Distribution des minéraux lourds en pourcentage (%).	57
Tableau IX : Proportion (en %) des éléments majeurs.	62
Tableau X : Proportion (en ppm) des éléments traces.	66
Tableau XI : Proportion (en ppm) des terres rares.	69
Tableau XII : Matrice de corrélations de certains éléments majeurs et traces des sédiments de la Djouel.	79

LISTE DES ABREVIATIONS

AFNOR :	Association française de normalisation
ALS :	<i>Australian Laboratory Services</i>
As :	Coefficient d'asymétrie
CIA:	<i>Chemical Index of Alteration</i>
CNPE :	Chaîne Panafricaine Nord Equatoriale
GPS:	<i>Global Positionning System</i>
HREE:	<i>Heavy Rares Earths Elements</i>
ICP-AES:	<i>Inductively coupled Plasma-Atomic Emission Specctroscopy</i>
ICP-MS:	<i>Inductively coupled Plasma-Mass Specctroscopy</i>
ICV :	Indice de Viabilité Compositionnel
IRGM :	Institut de Recherches Géologiques et Minières
Kfs :	Feldspath alcalin
LD :	Limite de détection
LOI :	<i>Loss of ignition</i>
LPA :	Lumière polarisée analysée
LPNA :	Lumière polarisée non analysée
LREE :	<i>Light Rare Earth Element</i>
Ms:	Muscovite
Mz :	Moyenne
Op :	Minéraux opaques
PAAS :	<i>Post-Archean Average Australian Shale</i>
PCD :	Plan Communal de Développement
PFNL :	Produits Forestiers Non Ligneux
PIA :	Indice d'altération des plagioclases
QdØ :	Indice de déviation des quartiles
Qtz :	Quartz
REE :	<i>Rare Earth Element (Terre Rares)</i>
SE - NW :	Sud Est - Nord Ouest
S_o:	<i>Sorting-Index ou Indices de Trask</i>
SRTM :	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
UCC :	<i>Upper Continental Crust</i>

RESUME

Le site d'étude est localisé dans la partie Sud-Ouest de Bot-Makak, à l'Ouest de Yaoundé, à proximité de l'autoroute Yaoundé-Douala. L'objectif principal est de déterminer les caractéristiques sédimentologiques et géochimiques des alluvions du secteur en vue d'une éventuelle valorisation afin de déterminer la composition, la provenance des sédiments et le degré d'altération de ces sédiments. Le relief est marqué par la présence des collines à pentes fortes. Le substratum est constitué de roches métamorphiques recouvertes par des sols ferralitiques rouges et jaunes et le sol hydromorphe. La végétation est une forêt secondaire avec un réseau hydrographique dense et dendritique. La méthodologie utilisée a consisté en une prospection systématique, à la collecte des échantillons, à la réalisation des analyses pétrographiques des roches et aux études sédimentologiques et géochimiques. Les roches métamorphiques rencontrées sont des micaschistes à grenat et à biotite à texture lépidogranoblastique hétérogranulaire, et de gneiss à micas et à grenat à texture granoblastique hétérogranulaire. L'analyse granulométrique montre que les sédiments sont grossiers, très mal triés et mal classés. L'allure forte des pentes traduit une hétérogénéité des sédiments dans un milieu plus ou moins agité et à forte énergie. La morphoscopie indique une prédominance des grains anguleux et subanguleux suggérant un court transport par l'eau et une source d'apport proche. L'étude des minéraux lourds montre que les sédiments sont constitués de chloritoïde, de tourmaline, de disthène, de grenat, de rutile, de zircon, de zoïsite, de staurotide, de diopside, d'anatase, d'augite, de sillimanite, et des minéraux opaques. L'analyse géochimique révèle des fortes teneurs en SiO_2 (72,88 à 85,05 %), des teneurs considérables en Al_2O_3 (5,14 à 11,58 %), Fe_2O_3 (4,58 à 7,61 %) et TiO_2 (1,16 à 3,24 %). Les indices d'altération (CIA : 74,38 à 85,91 %), (PIA : 75,19 à 89,03 %) et le diagramme A-CN-K indiquent que les roches sources ont subi une altération modérée à élevée dans les zones sources. Les faibles rapports $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (inférieurs à 1) et l'ICV (> 1) indiquent que les sédiments sont immatures. D'après le diagramme de Herron (1988), les sédiments sont dans le domaine de Fe-Sand. Les terres rares normalisées par rapport à la chondrite présentent un enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes, ainsi qu'une anomalie négative en Eu ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,62-0,76$). Ces sédiments proviennent de roches métamorphiques felsiques. Les diagrammes binaires (Zr versus TiO_2 et Th versus Sc) ont fourni la preuve de la contribution des roches felsiques à l'origine de ces sédiments.

Mots Clés : sédiments, provenance, sédimentologie, géochimie, Djouel, Bot-Makak.

ABSTRACT

The study site is located in the south-western part of Bot-Makak, west of Yaoundé, close to the Yaoundé-Douala freeway. The main objective is to determine the sedimentological and geochemical characteristics of the alluvial deposits in the area, with a view to their possible recovery, in order to determine the composition, origin and degree of alteration of the sediments. The relief is marked by the presence of hills with steep slopes. The bedrock consists of metamorphic rocks covered by red and yellow ferrallitic soils and hydromorphic soil. The vegetation is secondary forest with a dense, dendritic hydrographic network. The methodology used consisted of systematic prospecting, sample collection, petrographic analysis of the rocks and sedimentological and geochemical studies. The metamorphic rocks encountered were garnet and biotite-bearing micaschists with heterogranular lepidogranoblastic texture, and garnet and micas-bearing gneisses with a heterogranular granoblastic texture. Granulometric analysis shows that the sediments are coarse, very poorly sorted and poorly classified. The steepness of the slopes reflects the heterogeneity of the sediments in a more or less agitated, high-energy environment. Morphoscopy shows a predominance of angular and sub-angular grains, suggesting short transport by water and a nearby source of supply. Heavy mineral analysis shows that the sediments are composed of chloritoid, tourmaline, kyanite, garnet, rutile, zircon, zoisite, staurotide, diopside, anatase, augite, sillimanite and opaque minerals. Geochemical analysis reveals high SiO_2 contents (72.88 to 85.05%), considerable Al_2O_3 (5.14 to 11.58%), Fe_2O_3 (4.58 to 7.61%) and TiO_2 (1.16 to 3.24%). The alteration indices (CIA: 74.38 to 85.91%), (PIA: 75.19 to 89.03%) and the A-CN-K diagram indicate that the source rocks have undergone moderate to high alteration in the source zones. Low $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratios (below 1) and ICV (>1) indicate immature sediments. According to the diagram by Herron (1988), the sediments are in the Fe-Sand range. Rare earths normalized to chondrite show an enrichment of light rare earths relative to heavy rare earths, as well as a negative Eu anomaly ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.62\text{-}0.76$). These sediments are derived from felsic metamorphic rocks. Binary diagrams (Zr versus TiO_2 and Th versus Sc) provided evidence of the contribution of felsic rocks to the origin of these sediments.

Keywords: sediment, provenance, sedimentology, geochemistry, Djouel, Bot-Makak.

A decorative horizontal scroll with a light beige marbled texture and a dark blue border. The scroll is slightly curved at the ends, with the left end showing a rolled-up edge. The text "INTRODUCTION GENERALE" is centered on the scroll in a bold, black, serif font.

INTRODUCTION GENERALE

Les alluvions continentales sont des sédiments déposés par des cours d'eau et des lacs, qui varient en fonction des régions traversées et de la puissance du courant. Les galets, les graviers et les sables sont généralement déposés de manière lenticulaire pour la fraction grossière, tandis que les limons et les argiles constituent la fraction fine (Foucault et Raoult, 2019). Les alluvions, constituées de plusieurs matériaux de tailles granulométriques diverses (galets, graviers, sables, limons et des argiles), peuvent présenter des différences au niveau de leur texture, minéralogie et de leur géochimie. Les éléments chimiques dans les sédiments alluviaux dépendent de la taille de leurs grains et de leur composition minéralogique (Kasanzu *et al.*, 2008 ; Bhuiyan *et al.*, 2011 ; Mbale Ngama *et al.*, 2019 ; Chougong *et al.*, 2021 ; Mbog *et al.*, 2022). Ils offrent une meilleure compréhension des mécanismes d'évolution à l'interface continentale (Armstrong-Altrin *et al.*, 2015 ; Kwewouo *et al.*, 2022 ; Nanga *et al.*, 2022). Au Cameroun, les alluvions ont fait l'objet de nombreuses études sédimentologiques et géochimiques dans le but de caractériser la source de provenance des sédiments (Ndjigui *et al.*, 2018 ; Nyobe *et al.*, 2018, 2021 ; Nanga *et al.*, 2022 ; Ouambeti-Wickon *et al.*, 2024 ; Kouankap *et al.*, 2024 ; Sababa *et al.*, 2024 ; Tsanga *et al.*, 2025). Le classement des sédiments alluviaux détermine la distribution des minéraux dans les différentes fractions qui dépendent de la composition et du degré d'altération de la roche source (Marques *et al.*, 2011 ; Lui *et al.*, 2013 ; Ndjigui *et al.*, 2014 ; Varghese *et al.*, 2024 ; Hossain *et al.*, 2024 ; Sababa *et al.*, 2024). La géochimie des dépôts des sédiments clastiques donne des informations sur l'origine de la roche qui le nourrit (McLennan *et al.*, 1993). Les alluvions peuvent contenir des minerais tels que l'or, le platine, le rutile et une grande variété des pierres précieuses (Nyobe *et al.*, 2018 ; Nguimatsia *et al.*, 2019 ; Fuanya *et al.*, 2019 ; Yadav and Patel, 2024 ; Nzesseu *et al.*, 2025). Les alluvions sont essentielles pour la fertilité des sols, en les enrichissant en matières minérales et organiques, favorisant l'agriculture dans les vallées fluviales. Elles contribuent à la formation de plaines fertiles, de deltas, à la régénération naturelle des terres, et à la stabilisation des cours d'eau. Riches en matériaux utiles (sable, graviers, parfois or), elles jouent aussi un rôle majeur dans l'alimentation des nappes phréatiques, fournissant une ressource vitale en eau douce.

L'objectif principal est de déterminer les caractéristiques sédimentologiques et géochimiques des alluvions du bassin versant de la Djouel en vue d'une éventuelle valorisation. Plus spécifiquement, il sera question de :

- faire une étude pétrographique des roches de la zone d'étude ;

- présenter les caractéristiques, granulométriques, morphoscopiques et les minéraux lourds des alluvions étudiés ;
- déterminer la maturité, le degré d'altération et la source des sédiments à travers les analyses géochimiques

Pour atteindre ces objectifs, ce travail est structuré en quatre chapitres, hormis l'introduction générale et la conclusion générale :

- le chapitre I présente le milieu naturel et le cadre géologique ;
- le chapitre II porte sur les travaux antérieurs et la méthodologie ;
- le chapitre III présente les résultats ;
- le chapitre IV est axé à l'interprétation et la discussion

**CHAPITRE I : MILIEU NATUREL ET CADRE
GEOLOGIQUE**

Introduction

Le présent chapitre a pour but de présenter le secteur d'étude à travers la géographie physique, le cadre géologique et les activités socioéconomiques.

I.1. GEOGRAPHIE PHYSIQUE

I.1.1. Situation géographique

La zone d'étude s'étend entre la latitude 3°54' - 4°00' Nord et la longitude 10°50' - 10°59' Est. Elle est située dans la région du Centre, Département du Nyong-et-Kellé, Arrondissements de Ngog-Mapubi et Bot-Makak. Le site est localisé dans la partie Sud-Ouest de Bot-Makak et à l'Ouest de Yaoundé, à proximité de l'autoroute Yaoundé-Douala.

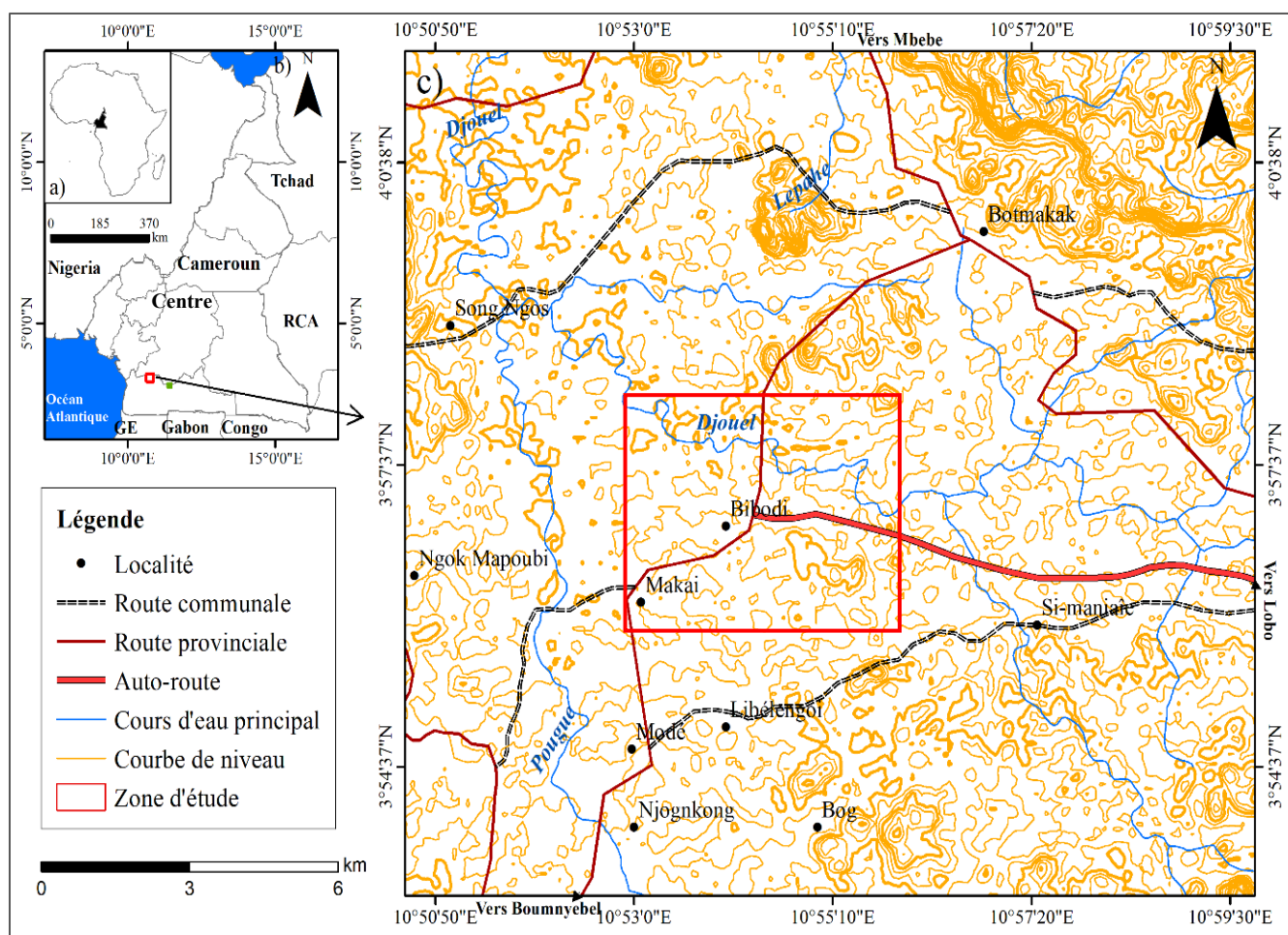


Figure 1: Carte de localisation du secteur d'étude à partir d'un fond topographique de Yaoundé: (a) carte de l'Afrique montrant le Cameroun ; (b) carte montrant la Région du Centre Cameroun ; (c) carte montrant la zone d'étude (extraite de la carte SRTM et du fond topographique de Yaoundé 3c au 1/200000).

I.1.2. Climat

Le domaine d'étude est caractérisé par un climat équatorial de type guinéen classique avec deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses (correspondant aux saisons de culture). La température moyenne du secteur d'étude oscille entre 24°C et 27°C, avec une amplitude thermique variant entre 8 et 13°C. Selon les données pluviométriques de Bot-Makak, les précipitations annuelles atteignent en moyenne 2119 mm par an (tableau I). La grande saison sèche se situe de décembre à février, la période de petite pluie se situe de mars à juin, avec une diminution des précipitations en juillet, et la période de grande pluie se déroule d'août à novembre (Figure 2). Globalement, le climat du secteur d'étude est chaud et humide.

Tableau I : Moyenne mensuelle des précipitations et des températures de la localité de Bibodi pour la période de 1993 – 2022. Source : <https://www.climatechart.net> (téléchargé le 24/10/2024)

Mois	Jan	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total	Moy
P(mm)	22,7	41,7	160,6	210,7	237,8	208,9	90,8	254	341,5	357,1	149,7	28	2119,5	-
T(°C)	26,9	26,6	27,3	26,9	26,5	25,7	24,7	24,4	25	25,4	26,2	26,4	-	26

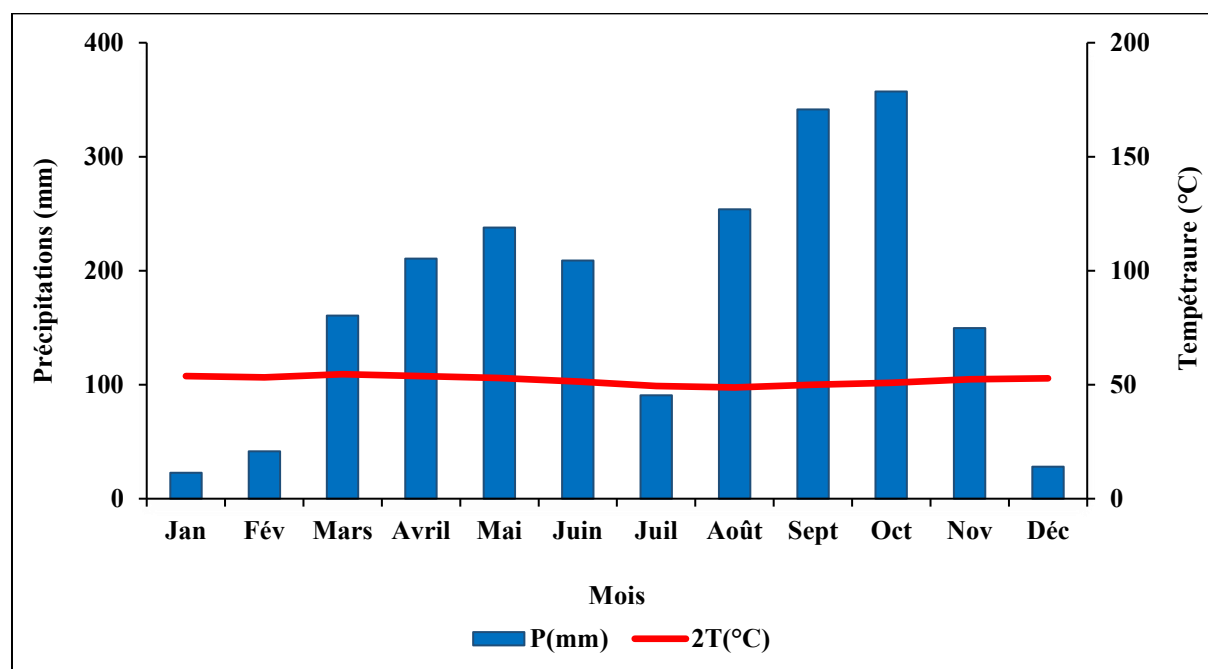


Figure 2: Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957) de la localité de Bibodi.

I.1.3. Sols

Les études menées sur les matériaux d'altération à Yaoundé et ses environs (Angue, 1982, 1993 ; Ngon Ngon, 1996, 2007 ; Ndjigui *et al.*, 2013 ; Nyeck *et al.*, 2018) démontrent que ces formations sont principalement composées de sols ferralitiques et de sols hydromorphes. La région d'étude présente une forte concentration de sols hydromorphes et ferralitiques. Selon Nyeck (2004), les formations latéritiques sont principalement influencées par les facteurs pédologiques dans leur répartition spatiale.

▪ Les sols ferralitiques

Ces sols, souvent d'une grande épaisseur (jusqu'à 50 mètres), se trouvent au niveau des zones d'interfluve. Elaborés à partir de diverses roches métamorphiques, telles que les micaschistes et les gneiss (Nyobe *et al.*, 2018), ces sols sont composés de minéraux tels que la kaolinite, la gibbsite, le quartz, la goethite, l'hématite, et accessoirement l'illite, le grenat, le zircon et le rutile (Nyeck *et al.*, 2018). La composition minéralogique présente une similarité avec les profils d'altérations élaborés sur des argiles sédimentaires kaolinitiques (Ndjigui *et al.*, 1999).

▪ Les sols hydromorphes

On trouve principalement des sols hydromorphes près du cours d'eau principal, la Djouel et dans certains bas-fonds étendus. Ils ont une épaisseur d'environ un mètre. Ils se distinguent par une présence de matière organique peu décomposée en surface (souvent 20 % de la masse de l'horizon de surface), ainsi que par une abondance de débris végétaux variés (Tonjé, 2013).

I.1.4. Végétation

Les fortes précipitations enregistrées ont un impact sur la végétation du secteur d'étude qui se distingue par deux caractéristiques :

- Une forêt primaire secondaire,
- Une forêt secondaire dans le reste des villages et aux bords des agglomérations.

Des espèces de bois exploitées sont présentes dans la forêt primaire, comme le Moabi (*Baillonella toxisperma*), le Sapelli, l'Iroko et l'Ayous... En plus de ventes de coupes, il existe quelques activités clandestines de coupe sauvage de bois (Letouzey, 1985). Les populations riveraines exploitent de nombreux produits forestiers non ligneux (PFNL), tels que les mangues sauvages (*Irvingia gabonensis*), les fruits de Moabi (*Baillonella toxisperma*), le ndjansang (*Ricinodendron heudoletti*), le rotin (*Lacosperma securdiflorum*), les plantes médicinales, le miel sauvage, les fibres de raphia, d'autres fruits sauvages, l'ekok (*Gnetum africana*), les noisettes (Letouzey, 1968). Le secteur d'étude (de Bibodi) est une zone forestière riche en

biodiversité. Les espèces floristiques vont des grands arbres à une multitude d'herbes hautes et basses. Une partie des forêts qui se trouve sur des collines est préservée et celle se trouvant sur les basses terres en contrebas des collines est massivement détruite pour des raisons agricoles ou d'exploitation forestière (PCD de Bot-Makak 2015). Les espèces fauniques rencontrées sont principalement le rat palmiste, le porc-épic, les antilopes (de plus en plus rares), la biche le hérisson et le pangolin.



Figure 3: Vue panoramique de la végétation du secteur d'étude.

I.1.5. Géomorphologie

I.1.5.1. Orographie

Du point de vue de relief, le domaine d'étude possède trois unités géomorphologiques majeures (Figure 4) :

- une zone qu'on peut caractériser de basses terres d'altitude de 332 à 400 mètres, qui représentent 60 % de la surface de la zone d'étude. Elle se compose d'interfluves séparés par des vallées marécageuses étendues et principalement drainées par la Djouel et Pougoué. Cette zone est située au Centre et à l'Ouest du secteur d'étude ;

- une zone située au Sud-Ouest du secteur d'étude, présentant un relief contrasté avec des collines et bas-fonds plus ou moins plats, avec parfois des plateaux et des vallées qui hébergent fréquemment des marécages avec cours d'eau en leur sein. Cette morphologie a une altitude variant de 400 à 500 mètres et représente environ 30 % ;
- une zone de hautes terres située au Nord-Est et au Sud-Est du secteur d'étude, avec une altitude de 500 à 698 mètres et représente 10 % de la localité. Elle se distingue par la présence de nombreux reliefs résiduels qui s'élèvent en mornes, avec des versants convexes qui se rejoignent brusquement avec les bas-fonds. Elle est recouverte d'une forêt primaire (Figure 4).

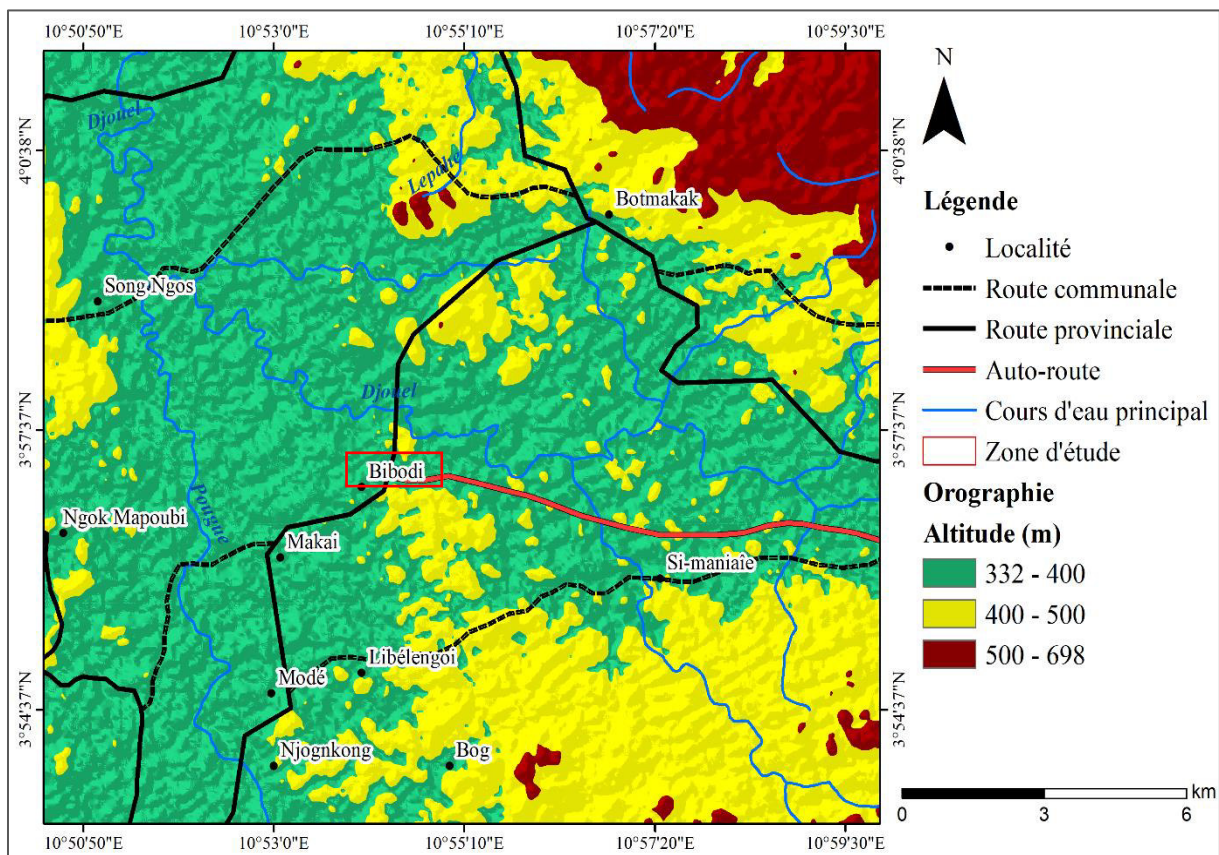


Figure 4: Carte géomorphologique du secteur d'étude (extraite de la carte SRTM et du fond topographique de Yaoundé 3c au 1/200000).

I.1.5.2. Hydrographie

La zone d'étude fait partie du sous-bassin du Nyong et des fleuves côtiers. Elle est drainée par la Djouel, principal collecteur du secteur (arrosant les villages Bibodi, Song Ngos, Ngog-Mapubi, Bot-Makak), Pougoue (Ngog-Mapubi, Njognkong, Modé, Makai, Libélengoi, Ngo-Bassong) coulant du Sud vers le Nord, la rivière, Manyai (Manyai, Si-maniaie) est orientée en direction SE-NW, les rivières Minken et Nguri coulent d'Est en Ouest (Tonjé, 2007).

Cette zone demeure limitée entre ces deux principaux cours d'eau de la région : la Sanaga et le Nyong. Certains cours d'eau saisonniers et permanents comme Nguri, Minken, Seha et Lepkegni traversent le site d'étude, étant des affluents de la Djouel qui est le principal collecteur de ce réseau hydrographique (Figure 5). La principale rivière, la Djouel est orientée suivant la direction SE-NW. Les bas-fonds sont des zones marécageuses qui constituent des pièges potentiels pour les minéraux lourds industriels. Au fil du temps, ce réseau hydrographique est influencé par les changements climatiques et les travaux de construction de l'autoroute Yaoundé-Douala.

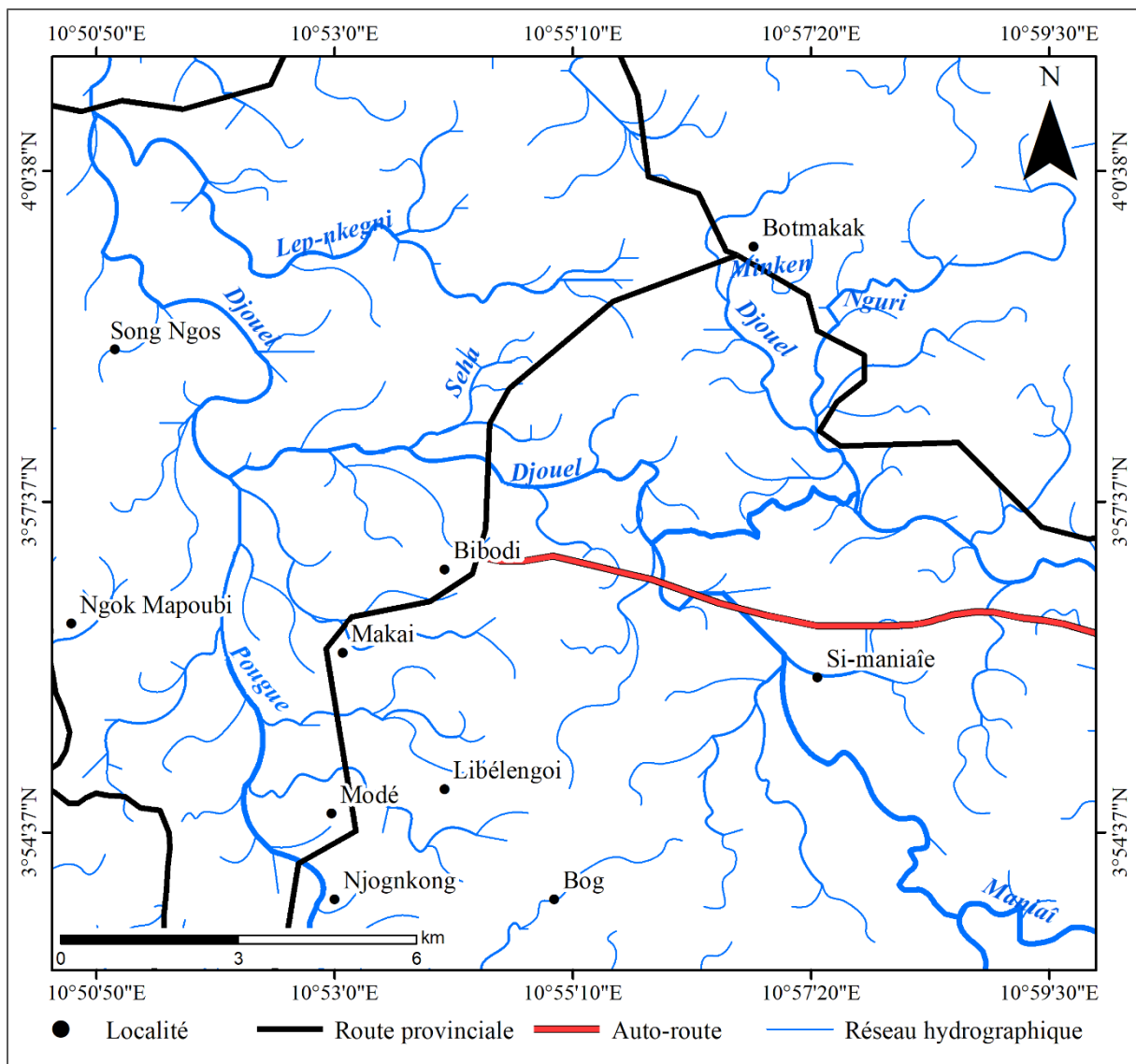


Figure 5 : Carte hydrographique de la zone d'étude (d'après la carte topographique de Yaoundé 3c au 1/200000).

I.2. GEOGRAPHIE HUMAINE ET ECONOMIQUE

I.2.1. Histoire du peuplement

La zone de Bot-Makak est peuplée par l'ethnie Basaa. En recoupant les différents profils historiques, les différents clans se seraient installés au XVIII^e siècle, venant du côté de l'actuel Sanaga Maritime, après une traversée de la Sanaga (PCD de Bot-Makak 2015). De nombreux clans auraient évolué ensemble avant de se disloquer à Mbokanda dans l'actuel village de Mbonga. Un autre groupuscule, les Pan auraient traversé tardivement pour s'implanter au village Njockbanè où ils se sont manifestement trouvés à l'étroit entre les Ndog Nlet et les Ndogbéa déjà occupants des terres ; ce qui les aurait poussés à migrer vers d'autres localités de la commune, comme Pan-Makak et d'autres contrées voisines. La migration semble caractériser tous ces clans qui se retrouveront plus tard dans d'autres communes du Nyong et Kélé, à l'exception des Ndogbatjeck plus sédentaires qui occupent les hautes terres de l'Est de la zone (PCD de Bot-Makak 2015).

I.2.2. Population-peuplement et économie

La population est constituée pour l'essentiel de Basaa à laquelle s'ajoute une minorité constituée de représentants des autres tribus du Cameroun (Loung *et al.*, 1979). Elle est répartie le long des routes et des pistes en une multitude de petits villages. Ces derniers sont distants les uns des autres de 2 à 4 km. Elle couvre les arrondissements de Ngog Mapubi, Dibang, Bot Makak et Matomb, appartenant au département du Nyong-et-Kélé. Les villages sont organisés en chefferies de 1^{er}, 2^e et 3^e degré.

Selon le PCD de Bot-Makak (2015), la commune de Bot-Makak compte une population de 35 572 habitants (femmes 18,882 ; hommes 16,690), ce qui représente une densité de 14,2 habitants/km.

L'agriculture est la principale activité économique, avec des cultures de rente (cacao et palmier à huile), vivrières (macabo, taro, manioc arachide, plantain et banane douce) (Loung *et al.*, 1979), fruitières (mangue, ananas, citron, orange, pamplemousse, papaye, safou, kola et noisette) et maraichères (piment, légumes). Dans les chefs-lieux d'arrondissement, le commerce sur les routes bitumées est la deuxième activité économique après l'agriculture. D'autres revenus importants pour la population sont l'élevage des caprins, la pêche, le transport inter-villages et la chasse constituent d'autres sources non négligeables de revenus pour la population.

I.3. CADRE GEOLOGIQUE

Le domaine d'étude fait partie de la Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale (Penaye *et al.*, 2004 et 2006), également connue sous le nom de Chaîne des Oubanguides (Podevin, 1983, Trompette, 1994) ou Chaîne Panafricaine Nord Equatoriale (CNPE : Nzenti *et al.*, 1988 ; Davison et Reginaldo, 1989). Effectivement, il s'agit d'une immense structure orientée E-W, mesurant environ plus de 5000 km de long sur 3000 km de large, et encadrée à l'Ouest par la Chaîne Panafricaine Trans-Saharienne et au Sud par le craton du Congo. Elle se poursuit jusqu'au Nord-Est du Brésil (province de Borborema) où elle constitue la Chaîne Néoprotérozoïque de Sergipano, qui constitue l'ensemble de la chaîne Panafricano-Brésilienne (Castaing *et al.*, 1994 ; Brito de Neves *et al.*, 2001). Selon les recherches menées sur la Chaîne Panafricaine au Cameroun, il est observé qu'elle est divisée du Nord au Sud en trois (03) grands domaines géodynamiques distincts : le domaine Nord, le domaine Centre ou Adamaoua-Yadé et le domaine Sud ou groupe de Yaoundé (Nzenti *et al.*, 1999 ; Ngnotue *et al.*, 2001 ; Toteu *et al.*, 2004 ; Mvondo *et al.*, 2007). L'évolution métamorphique de la région de la Bot-Makak et Ngog-Mapubi est semblable à celle de la série de Yaoundé, avec laquelle elle semble avoir une évolution pétrostructurale commune (Balep, 1997). Le substratum lithologique est principalement composé de gneiss micaschisteux grénatifères à deux micas, micaschistes grénatifères à deux micas et des para-amphibolites (Figure 6).

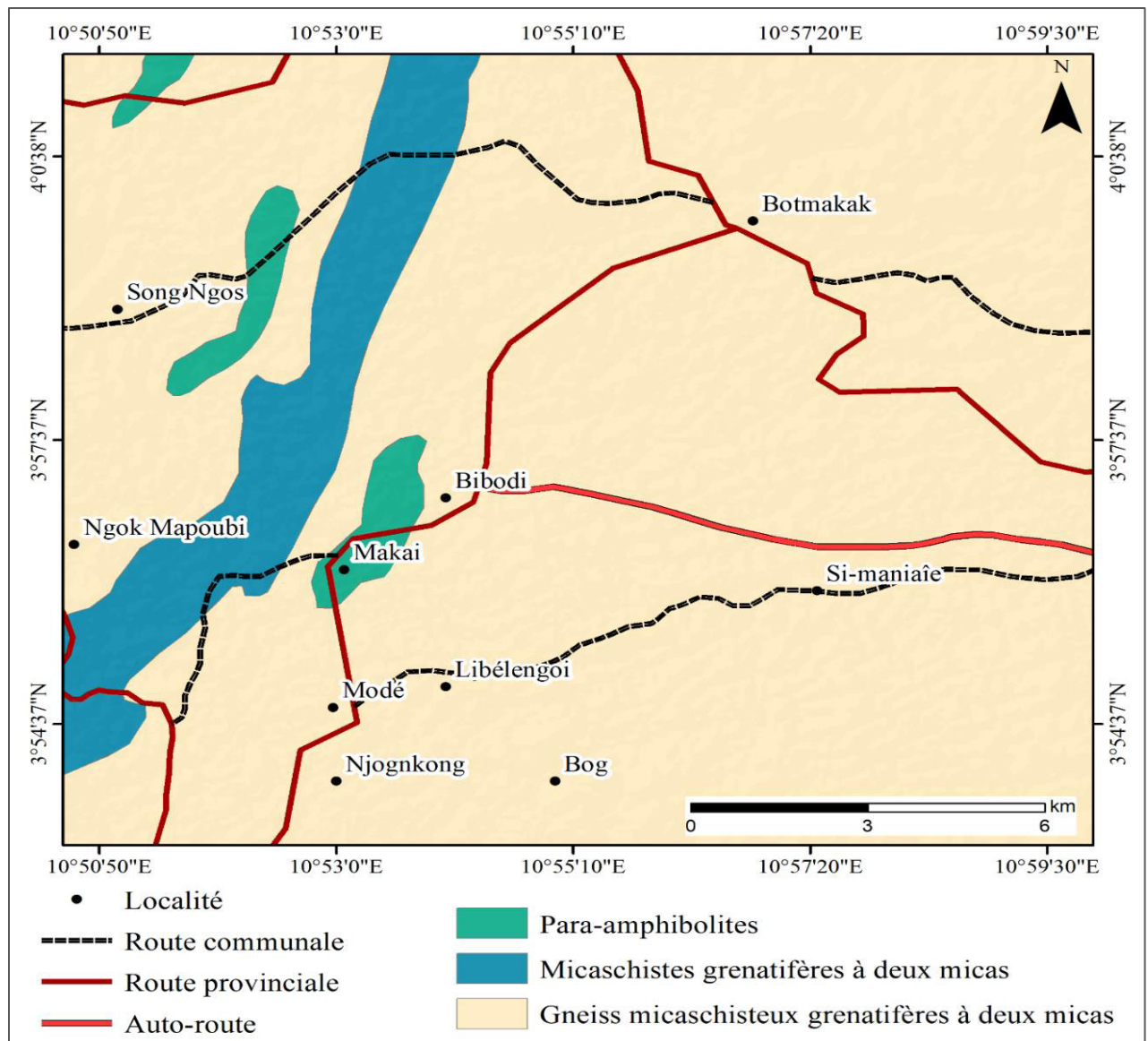


Figure 6 : Carte géologique du secteur d'étude (établie à partir de la carte de Champetier de Ribes et Aubague, 1956).

Conclusion

La région d'étude est localisée dans la zone de transition du département du Nyong-et-Kellé entre les arrondissements de Ngok-Mapubi et de Bot-Makak. Le climat dominant est tropical humide à 4 saisons, ce qui favorise l'altération des roches à savoir les micaschistes et les gneiss donnant naissance aux sols ferralitiques rouges et jaunes. La végétation est de type secondaire dominant et primaire, avec une croissance par endroit sur des unités morphologiques d'altitudes variables. La population se compose principalement de Bassa dont l'activité économique principale est la culture du cacao.

A decorative horizontal scroll with a light gray marbled texture and a dark blue border. The scroll has a small circular tab on the left side and a small circular tab on the right side.

CHAPITRE II : TRAVAUX ANTERIEURS ET METHODOLOGIE

Introduction

Au cours de ce chapitre, nous examinerons une revue bibliographique sur les alluvions au Cameroun et dans le reste du monde, ainsi que la méthodologie qui sera utilisée dans le cadre de cette étude.

II.1. TRAVAUX ANTERIEURS

II.1.1. Généralités

II.1.1.1. Concepts et définitions

Le terme alluvion est défini comme un accroissement de terrain qui se fait insensiblement à l'un des bords de la rive d'une rivière ou qui a lieu lorsque la rivière se retire et prend son cours d'un autre côté. Les alluvions sont des sédiments dont la granulométrie est liée au débit de la rivière (Giroux et Tran, 1996). Ils sont constitués de galets, de graviers, de sables, de limons et d'argiles. Chaque matériau possède une granulométrie spécifique. Les alluvions des rivières sont généralement composées d'un matériel de granulométrie non uniforme et souvent très « étendue » (des sables aux gros galets). Quand ces éléments sont soumis à certaines gammes de vitesse de courant, les éléments fins à moyens sont mis en mouvement tandis que les plus gros restent en place. Si cette ségrégation des particules dure assez longtemps, cela peut aboutir à la concentration d'éléments grossiers à la surface du lit (Malavoi et Bravard, 2010).

Selon Hervieu (1966), le mot Alluvion (ou Alluvium) désigne à proprement parler un apport, un dépôt par l'eau courante. Ce terme ne s'applique pas en général aux dépôts lacustres ou marins pour lesquels on utilise le mot *Sédiments*. Dépôts de sédiments abandonnés par un cours d'eau quand la pente ou le débit sont devenus insuffisants. (Selon la force du courant, il s'établit un tri mécanique séparant les éléments charriés en fonction de leur taille [galets, gravier, sable ou argiles]. Ils sont généralement disposés en terrasses) (Dictionnaire.fr).

Historiquement, en géologie et science du sol, le terme argile correspond à l'ensemble des minéraux présentant une taille inférieure à 2 μm dans une roche (Foucault et Raoult, 2001). Cette classification granulométrique est héritée des études pétrographiques effectuées par microscopie optique à la fin du XIX siècle (Giroux et Tran, 1996). On regroupe sous le terme de dépôts alluviaux ou dépôts fluviaux ou alluvions, des sédiments déposés en régime d'eau courantes continentales depuis la zone d'origine source, jusqu'à déboucher dans un bassin versant, en générale marin, mais parfois lacustre. On parle d'alluvion pour désigner des

sédiments très peu transportés par le ruissellement et le glissement le long des reliefs et dont le stade initial est rarement conservé.

II.1.1.2. Mode de mise en place et composition des alluvions

Selon Giroux et Tran (1996), les alluvions résultent de l'érosion des continents, c'est-à-dire, la dégradation des roches. La dégradation se produit grâce à un processus physique qui entraîne la fragmentation des matériaux. Les corps solides sont transportés par la gravité, un fluide porteur, ou encore par le vent sous l'effet de la pression atmosphérique. Les débris pour la plupart, sont transportés puis déposés, généralement dans l'eau, formant ainsi un sédiment détritique (alluvions en général). Les dépôts sédimentaires les plus fréquents sont les alluvions. Ces dépôts sont dominés par les variétés dont les grains sont les plus fins : il y a 2/3 d'argiles/silts ; 1/3 de sables, graviers (Biju, 1999). Une première classification des alluvions repose sur l'état d'agrégation des particules sédimentaires. Dans les roches meubles, les grains détritiques sont totalement indépendants les uns des autres : ils constituent un assemblage en équilibre mécanique dont les espaces inter granulaires (pores) constituent une part importante du volume de la roche. En présence de minéraux argileux en grande quantité, les roches plastiques sont susceptibles de se déformer sous la contrainte. Les paramètres essentiels qui régulent les systèmes fluviaux sont la pente, la taille du réseau de drainage, le climat, la technique, la charge sédimentaire et la végétation.

La composition de la roche source, la taille des grains et la géochimie des sédiments dépendent des processus d'altération et de diagenèse (Sawyer, 1986). Pour Malibangar *et al.*, (2014), la composition des sédiments actifs dans un cours d'eau est influencée par la source, la lithologie, le climat, l'altération, l'hydraulique et le transport. Au Cameroun, on trouve dans les flats des affluents des rivières partout dans le pays (Ntep Gweth *et al.*, 2001).

Les sédiments alluviaux sont généralement composés de quartz, de feldspaths et de micas comme constituants majeurs et de quantités mineures de minéraux lourds tels que le zircon, rutil, tourmaline, grenat et épidote (Meihold *et al.*, 2008). Les éléments en traces tels que les terres rares, l'yttrium, le thorium, le zirconium, le hafnium, le niobium et le scandium sont adaptés pour tracer la provenance des sédiments (Martins *et al.*, 2014) en raison de leur mobilité relativement faible au cours des processus sédimentaires (Ahmad *et al.*, 2014).

Une fois que ces roches ont été altérées, les sédiments se déplacent habituellement par gravité, souvent par un fluide transporteur, et par pression atmosphérique. Dans leur grande majorité, les débris sont transportés puis déposés dans l'eau afin de constituer un sédiment

alluvionnaire. Selon Adrien Berchet (2014), ce processus de transport est directement associé au poids et à la taille des particules. On peut classer le transport de ces sédiments en trois catégories (Figure 7) :

- le charriage : c'est le roulement et le glissement d'une particule sédimentaire sur le fond. Il s'agit des sédiments de type bloc et de gros cailloux ;
- la saltation : lorsque les particules de sédiment sont arrachées du fond par les fluides et suivent une trajectoire quasi-balistique pour se déposer à nouveau plus loin sur le fond ;
- le transport en suspension : lorsque les particules de sédiment restent de manière prolongée en suspension dans le fluide. Ce mode de transport s'applique principalement aux sédiments fins.

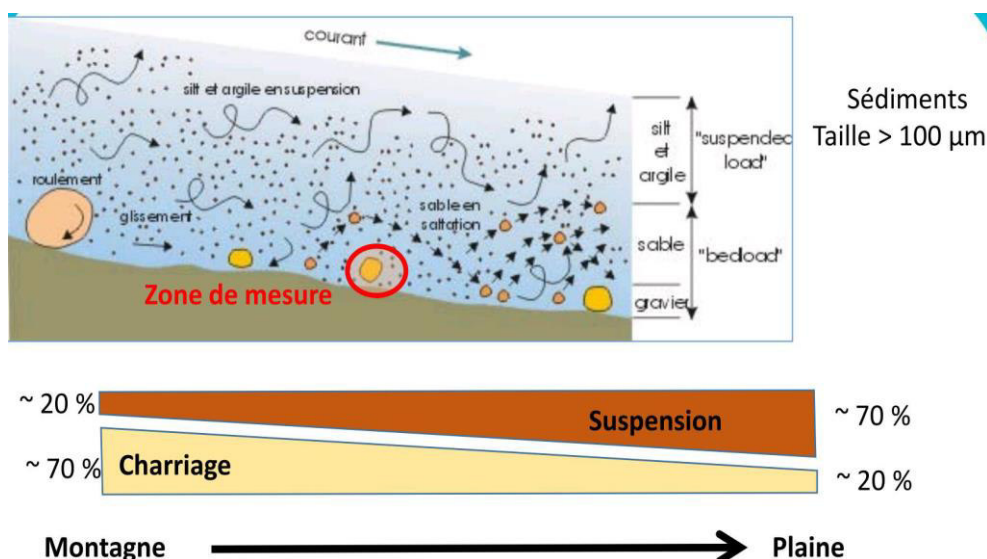


Figure 7 : Mode de transport des sédiments vue en coupe d'une rivière, Source : Adrien Berchet (2014).

Les matériaux en suspension représentent habituellement 90 à 95 % de l'ensemble des matériaux transportés. Ils ne sont pas apportés en permanence tout au long de l'année, mais principalement pendant les périodes de crue. La matière minérale provenant du bassin versant provient essentiellement de l'érosion des sols. Les grains étaient angulaires à sub-angulaires, avec des contours complexes et des textures de surface comme des stries, des piqûres et des cavités. Selon Fuanya *et al.*, (2019), ces caractéristiques morphologiques suggéraient une source proche. Les grains de forme arrondie ont généralement une origine éloignée.

Les premières recherches significatives sur l'érosion datent des années 1930 avec les travaux de Hjulström (1935) et Shields (1936). Le diagramme de Hjulström résume les travaux de Hjulström et permet de déterminer s'il y aura érosion, transport ou sédimentation (Figure 8).

Le domaine intéressant de l'érosion des particules moyennes à grossières des sables fins aux galets apparaît logique en observant la partie supérieure de ce graphe. La vitesse du courant nécessaire pour mobiliser les grains augmente à mesure que leur granulométrie augmente. En ce qui concerne les particules fines, la courbe indique que la vitesse du courant augmente avec la diminution de la granulométrie. La cohésion élevée des particules fines explique ce comportement paradoxal, en particulier en raison d'un effet électrostatique. Le graphique inférieur (sédimentation) illustre la corrélation entre la granulométrie des particules et la vitesse du courant lors de leur accumulation (Figure 8).

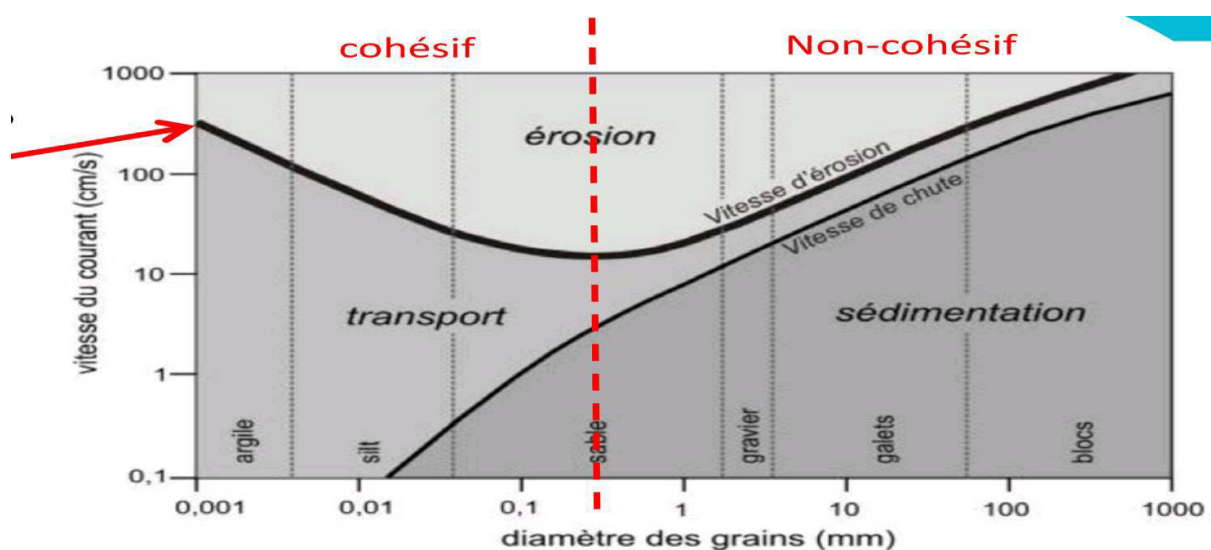


Figure 8 : Diagramme de Hjulström (1935) illustrant le comportement des grains en fonction de leur taille et la vitesse du courant.

La dynamique fluviale peut donc être représentée de manière très simplifiée comme l'oscillation continue de l'aiguille d'une balance dont l'un des plateaux serait rempli de sédiments et l'autre d'eau (Malavoi *et al.*, 2012). Ces deux éléments étant très variables en termes de quantités et d'apports (à l'échelle de la journée, de l'année, du millier d'années).

L'évolution morphologique des rivières est principalement due au transport sédimentaire avec les processus d'érosion et de dépôt (Bigot et Rome, 2012). Une analyse de cette évolution montre qu'il existe des zones préférentielles d'érosion et de dépôt (Forst, 2010). Le fonctionnement d'équilibre dynamique des cours d'eau est caractérisé par une interaction permanente entre ces deux processus (Kaupe et Geffray, 2012). Ces deux processus dépendent principalement du débit et de la pente du cours d'eau. Le phénomène d'érosion intervient soit en amont des bassins versants montagneux sous l'action des précipitations qui arrachent des matériaux, qui sont ensuite transportés par simple gravité vers le cours d'eau, soit lorsque le débit du cours d'eau est important, soit lors d'une rupture de pente, soit dans des morphologies

méandriformes de la rivière où la rive extérieure (concave) est une zone d'érosion privilégiée sous l'effet de la force centrifuge.

Le phénomène de dépôt de matériaux apparaît quand l'écoulement dans le cours d'eau perd de « l'énergie » :

- pour un débit liquide faible
- ou une faible pente du cours d'eau
- ou pour des cours d'eau méandriformes notamment au niveau de la rive intérieure (convexe).

II.1.1.3. Utilisation des matériaux alluvionnaires

Les alluvions, formées de divers matériaux, représentent d'importantes potentialités économiques et interviennent dans plusieurs domaines, en l'occurrence les sables et les graviers utilisés dans le domaine du génie civil. Que ce soit pour une autoroute, une piste d'atterrissage ou une voie ferrée, les technologies de construction nécessitent de très grandes quantités de sables et graviers qui peuvent provenir des alluvions des rivières ou de la mer : ballast des chemins de fer, fondations, différentes couches qui structurent une chaussée de route... Pour la fabrication de certaines couches, on met en œuvre des granulats mélangés à un liant, tel que le ciment, le bitume ou le laitier (résidu de hauts-fourneaux). Pour les couches de fondation et de base et pour les accotements, on peut également utiliser des granulats de recyclage. Localement, un petit volume d'agrégats, sables, graviers naturels ou roches concassées, est aussi utilisé comme matière de filtration, pour les travaux de drainage de terrain, des traitements des eaux. Les alluvions présentent également un intérêt minier. Des métaux et des pierres rares ou précieux sont transportés par les cours d'eau, puis se déposent dans les alluvions. Ces gisements sont appelés placers. Leur exploitation se fait soit à la main grâce à une batée ou un pan américain, soit par un traitement mécanisé. Ainsi, on peut trouver de l'or dans le lit de certaines rivières. Les alluvions peuvent constituer des plaines alluviales très fertiles. Il en est ainsi du Nil par exemple, dont les crues déposaient des tonnes d'alluvions et rythmaient la vie agricole de l'Égypte ancienne. C'est une des raisons principales de l'essor des civilisations de l'Égypte antique. Les alluvions constituent des aquifères utiles pour l'approvisionnement en eau douce. Les nappes d'eaux souterraines produisent 45 % des eaux souterraines prélevées en France. Pour les alluvions les plus fines, les argiles sont utilisées dans les secteurs de l'industrie du pétrole, de l'industrie pharmaceutique, de l'industrie chimique, l'agronomie, et la céramique.

II.1.2. Caractérisation physique des alluvions

L'analyse granulométrique des alluvions consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des alluvions constituant un granulat dont les dimensions sont supérieures à 0,063mm.

La nomenclature décrivant les distributions de texture des sédiments est importante pour les géologues et les sédimentologues car la taille des grains est l'attribut le plus fondamental des sédiments. Traditionnellement, les géologues ont divisé les sédiments en quatre fractions de taille qui comprennent le gravier, le sable, le limon et l'argile, et ont classé ces sédiments en fonction des proportions relatives des différentes fractions *Geological Survey Open-File Report 2006-1195*). Les définitions des fractions sont depuis longtemps normalisées selon l'échelle de granulométrique décrite par Wentworth (1922). Selon cette échelle de qualité, Wentworth a distingué les particules dont la taille est celle du gravier ($4 \text{ mm} < d < 2 \text{ mm}$); les particules de la taille du sable ($2 \text{ mm} < d < 62,5 \text{ }\mu\text{m}$) ; les particules de la taille du limon ($62,5 \text{ }\mu\text{m} < d < 4 \text{ }\mu\text{m}$) ; et l'argile ($< 4 \text{ }\mu\text{m}$). Ainsi, en fonction de la taille de ces derniers, Wentworth (1922) a distingué trois grands groupes de sédiments selon une échelle standardisée (tableau II).

Tableau II: Échelle partielle de classification des sédiments (Wentworth, 1922).

Taille en (mm)	Classe de sédiments	Groupe de sédiments
256 >	Blocs	Rudistes
256 - 64	Galets	
64 – 4	Cailloux	
4 - 2	Graviers	
2 - 1	Sables très grossiers	Arénites
1 – 0,5	Sables grossiers	
0,5 – 0,25	Sables moyens	
0,25 – 0,125	Sables fins	
0,125 – 0,0625	Sables très fins	
0,0625 – 0,039	Limons	Lutites
< 0,039	Argiles	

Mouldi *et al.*, (2013) proposent des modèles de courbes granulométriques qui ont permis d'identifier la nature des sédiments et de préciser les facteurs et les phénomènes qui interviennent dans leur transport et leur dépôt. Concernant la fraction grossière ($D > 63 \text{ }\mu\text{m}$),

les courbes ayant la forme d'un « S » à forte pente (Figure 9 A) et une forme parabolique (Figure 9 D) montrent qu'on a un stock sédimentaire homogène et des conditions d'énergie adaptées à la charge transportée. Celle en forme de droite (Figure 9 C) où la pente est faible indique un mode de transport par les courants et un dépôt par excès de charge lorsque la vitesse de ces courants diminue. Les courbes sous formes hyperboliques (Figure 9 B) montrent que les sédiments se sont déposés par décantation dans un milieu calme où l'hydrodynamisme est trop faible pour les remettre en suspension. Ces sédiments sont formés essentiellement par les matériaux fins ($D < 63 \mu m$) dans les plus grandes profondeurs. Pour ce qui est de la fraction fine ($D < 63 \mu m$), l'allure des courbes granulométriques en forme parabolique (Figure 9 D) indique que les dépôts sont peu à non évolués et les sédiments (limons et argiles) sont transportés par un courant de turbidité.

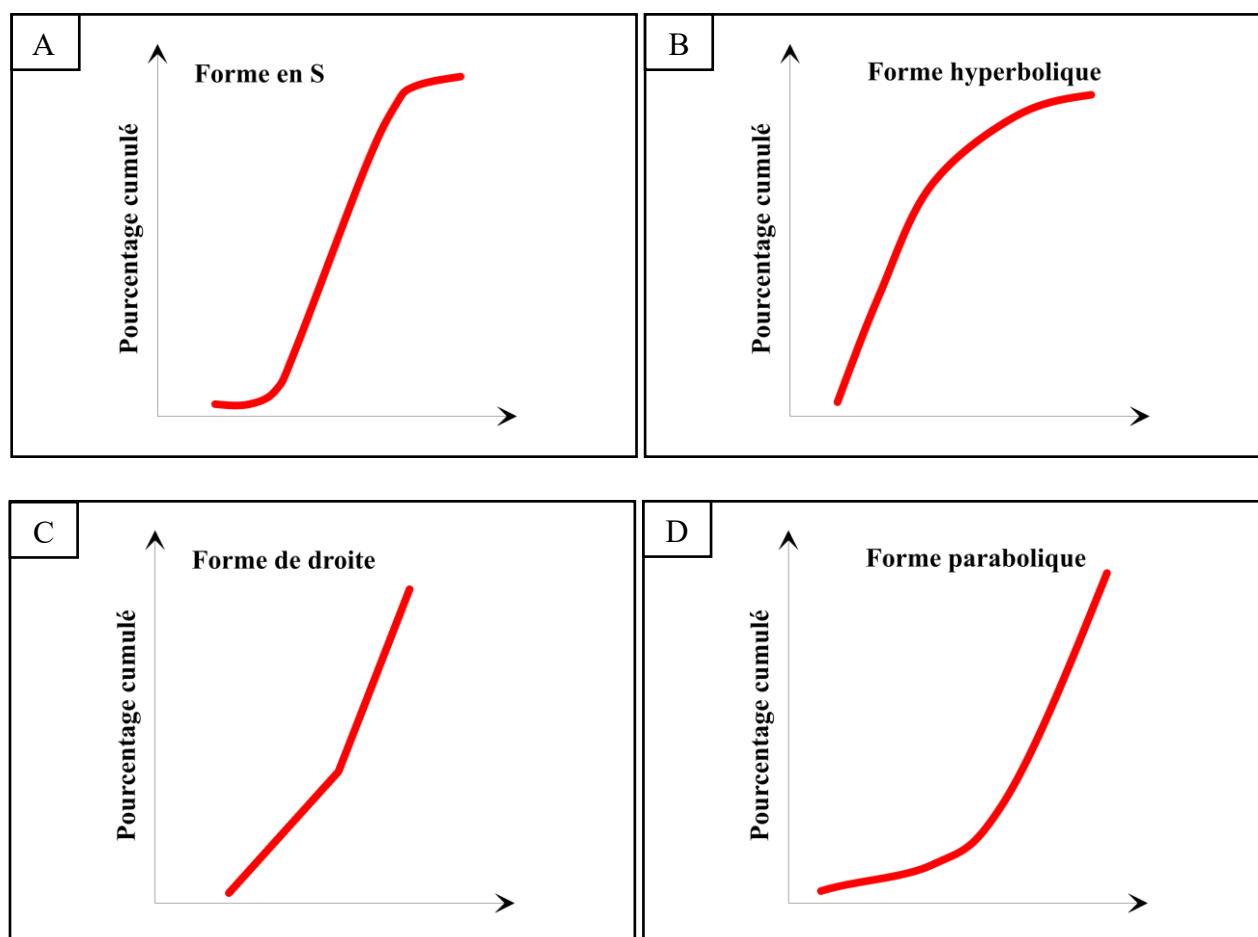


Figure 9 : Différentes formes de courbes granulométriques des sédiments (Mouldi et al., 2013).

Les travaux de prospection alluvionnaires en relation avec la recherche du potentiel métallogénique ont été intensément menés dans les régions de l'Est (Suh *et al.*, 2006 ; Asaah, 2010), du Centre (Tonjé *et al.*, 2013 ; Evina Nkoto., 2018 ; Nyobe *et al.*, 2018), du Sud (Belinga, 2017 ; Janpou, 2018), de l'Adamaoua (Boaka Kooul *et al.*, 2009), du Nord-Est et du Sud-Ouest

Cameroun (Embui *et al.*, 2013 ; Kwewouo, 2018). La majorité de ces travaux de recherche ont effectués des études sédimentologiques, minéralogiques, et géochimiques pouvant donner des informations sur l'altération et l'érosion, les conditions de dépôts des sédiments, la composition des roches originelles, la maturité des sédiments, la provenance des sédiments et le degré d'altération des sédiments. Certains de ces travaux ont mis en exergue que les dépôts alluvionnaires sont des sites de minéralisation d'or (Belinga, 2017), du rutile (Nyobe *et al.*, 2018 ; Evina Nkoto, 2019 ; Nzesseu, 2019). D'après ces travaux, les dépôts alluvionnaires étudiés dans les régions suscitées sont des sédiments à granulométrie et à morphoscopie variable dépendant de leurs roches sources et de leur environnement. Ces auteurs ont montré que les dépôts alluvionnaires sableux sont généralement constitués d'éléments sub-anguleux et anguleux et rarement arrondis présentant des grains non usés par l'eau d'une fraction comprise de 2 à 0,02 mm Par ailleurs, les travaux effectués sur les minéraux lourds présentés par Nzenti *et al.*, (2001), montrent la présence des cristaux centimétriques des minéraux lourds tel que le rutile dans la série micaschisteuse et même des cristaux de la taille du poing notamment dans les niveaux quartzitiques intercalés dans les micaschistes, en particulier du secteur de Matomb. D'après Tonjé (2007), les observations à la loupe binoculaire indiquent que les matériaux alluvionnaires sont constitués en moyenne de 39,41 % de quartz de taille centimétrique à millimétrique, 40,5 % de rutile et 6 % de Zircon. Tonjé (2013) révèle que les teneurs en rutile évoluent graduellement des niveaux graveleux vers les niveaux sableux dans les puits alluvionnaires de la rivière Téba (Matomb) et que l'étude des minéraux lourds montre la présence d'un cortège riche en quartz, rutile, zircon, tourmaline, andalousite et disthène. Les travaux réalisés par Nyobe *et al.*, (2018) révèlent que les minéraux lourds du bassin versant de Lobo auraient une origine liée aux formations métamorphiques in situ. Stendal *et al.* (2006) suggèrent que certains minéraux lourds se seraient mis en place durant les transformations métamorphiques des grenats contenus dans les métasédiments (schistes et grès) datant du Néoprotérozoïque dans le groupe de Yaoundé.

II.1.3. Synthèse des travaux sur la géologie

Stendal *et al.*, (2006) concluent à partir des études géologiques réalisées dans la localité de Dibang et ses environs (secteurs situés à l'Ouest de Bot-Makak) que: (1) le rutile alluvial et éluvial de la région de Yaoundé provient de la dégradation des métapélites, des roches métamorphiques et des pegmatites proches du groupe de Yaoundé; (2) le rutile du Groupe de Yaoundé s'est formé au cours du métamorphisme panafricain ou provient du rutile détritique

de source d'environ 900 Ma; (3) les sédiments à l'origine du groupe de Yaoundé se sont mis en place dans un contexte de marge active.

Yonta (2010) a mis en évidence dans la région de Boumnyebel (située à l'ouest de Matomb Makak) deux ensembles métasédimentaires (micaschistes à grenat et migmatites à grenat et disthène) aux caractéristiques pétrologiques, chronologiques et structurales différentes. Les blocs, boudins et intrusions de roches méta-ignées associées à ces ensembles métasédimentaires sont observés par endroits dans la région.

Nyobe *et al.*, (2018) montrent que les formations rocheuses situées dans le bassin versant de Lobo sont constituées des gneiss et des micaschistes avec presque la même composition minéralogique. Ces formations sont constituées principalement de quartz, feldspaths, de biotite, de grenat et de minéraux opaques.

Tonjé (2013) montre trois types lithologiques identifiés dans la zone de Matomb, il s'agit des gneiss à grenat et à micas, micaschistes, quartzites et gneiss migmatitique. Ce sont des roches métamorphiques grisâtres à structure foliée et à texture granoblastique. Elles sont composées de quartz (45 %), rutile (5 %), disthène (7 %), plagioclases (10-45 %), grenat (< 10%), biotite, muscovite (11 %) et minéraux opaques pour les gneiss à grenat. Les micaschistes sont composés de quartz (35 %), rutile (1 %), plagioclases (40 %), biotite, muscovite (11 %) et minéraux opaques. Les gneiss migmatitiques ont presque la même composition que les gneiss à grenat sauf qu'ils n'ont ni de disthène ni de rutile dans leur composition.

II.1.4. Synthèse des travaux sur la géochimie des alluvions

Plusieurs travaux scientifiques ont été effectués sur les alluvions dans le monde aussi bien qu'en Afrique Centrale, ces études sont encore très rares (Ndong *et al.*, 2014 ; Ndjigui *et al.*, 2018 ; Nyobe *et al.*, 2018 ; Mbale Ngama *et al.*, 2019 ; Noa Tang *et al.*, 2020 ; Tonjié, (2020) ; Bokanda *et al.*, 2021 ; Assomo *et al.*, 2022 ; Sababa *et al.*, 2024 ; Chougong *et al.*, 2024 ; Kouankap *et al.*, 2024).

II.1.4.1. Eléments majeurs

Assomo *et al.*, (2022) montrent que les résultats obtenus dans les argiles alluviales de la vallée du Nyong à Akonolinga (Cameroun), présente la teneur en silice (SiO_2) plus abondant suivie de l'alumine (Al_2O_3). Les autres éléments majeurs (TiO_2 , FeO_3 , K_2O , MnO , NiO , P_2O_5 , CaO , Cr_2O_3) ont des concentrations insignifiantes. Ces argiles sont contenues dans un mélange alluvionnaire riche en sable, quartz et dérivés de fer.

Selon Kouankap *et al.*, (2024), les sédiments de la rivière Mugheb (Bamenda), présentent des concentrations élevées en Fe_2O_3 (22,13 à 27,02 %) et en SiO_2 (ajusté) (66,74 à 72,98 %). De légères variations sont observées en Al_2O_3 (1,30 à 1,97 %) et TiO_2 (1,75 à 2,67 %). MgO , K_2O , P_2O_5 , CaO et Na_2O présentent de faibles teneurs. L'enrichissement en Fe_2O_3 suggère que ces éléments proviennent de l'hématite de roches basaltiques.

La fraction globale de sédiments de Matomb (Tonjé, 2020), montre que les éléments majeurs comme la silice (SiO_2) ont de teneurs très élevées (76,65 et 95,03 %), Celles en Al_2O_3 (2,71 et 11,53 %) et de TiO_2 (1,03 à 2,03 %). Les teneurs en Fe_2O_3 évoluent entre 0,75 et 9,22 %. Les concentrations en CaO et MgO varient entre (0,07 – 1,05 % et 0,01 et 1,17 % respectivement. Celles en Na_2O , MnO , K_2O et P_2O_5 sont faibles.

Chougong *et al.*, (2024) révèlent que les sédiments de la rivière Lobé, ont des teneurs en SiO_2 variant de (62,6 et 91,4 %), en Al_2O_3 (5,38 et 16,89 %), Fe_2O_3 (1,43 et 5,67 %). Les teneurs en TiO_2 , K_2O , Na_2O , CaO , MgO et MnO sont insignifiantes.

Les sédiments de base du golfe du Mexique montrent des variations de teneurs moyennes en SiO_2 , les teneurs en Al_2O_3 , K_2O et MgO sont significativement plus élevés. Les teneurs en Fe_2O_3 et en CaO sont similaires et sont légèrement enrichies en Na_2O et dont la teneur en P_2O_5 est appauvrie. Ceci peut indiquer une différence de l'abondance de plagioclase et de minéraux détritiques parmi les carottes de sédiments (Armstrong-altrin *et al.*, 2015).

Ekoa Bessa *et al.*, (2021) montrent que les sédiments du complexe du lac Ossa ont une concentration abondante en SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 (varient de 32,37 à 54,26 % ; 18,42 à 23,12 % et 5,56 à 10,44 % respectivement) et des concentrations faibles en TiO_2 , K_2O , Na_2O , P_2O_5 , CaO , MgO et MnO . Il existe des corrélations négatives entre Al_2O_3 et SiO_2 et positives entre Fe_2O_3 , P_2O_5 et MgO avec Al_2O_3 .

Pour Mbale Ngama *et al.*, (2019) les teneurs élevées en SiO_2 ont été confirmées dans les sables meubles de la terrasse alluviale de la rivière Mefou (Sud-Cameroun), ce qui confirme la texture sableuse et l'abondance de quartz, en particulier au bas de la séquence (71-85 %). La nature silicoclastique des sédiments est confirmée par les valeurs élevées de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ et les faibles concentrations d'alcalins (Na_2O et K_2O).

II.1.4.2. Éléments traces

Dans le bassin hydrographique de Koubou (Est-Cameroun), Ndong *et al.*, (2014) ont réalisé des analyses qui ont révélé que les rivières de la rive gauche présentent une concentration élevée d'éléments tels que l'Eu, Ga, Au, Sn, Dy, Tb, Er, Tm, Ho, U, Lu, V, Nd, Y et Ce, tandis que les rivières de la rive droite présentent un enrichissement en Ba, Rb et Sr. Ces résultats

confirment que l'étude du fonds géochimique des sédiments de ruisseau permet de repérer les anomalies causées par des éléments traces naturels ou anthropiques.

Les schistes noirs de Mamfé présentent des lignes spectrales de terres rares normalisées par chondrite comparables à celles de PAAS et UCC, indiquées par un enrichissement de LREE par rapport à HREE, une tendance HREE presque plate à légèrement appauvrie et une anomalie en Eu négative (Bokanda *et al.*, 2021).

Sababa *et al.*, (2024) ont démontré que les argiles alluviales de la vallée de la Sanaga contiennent respectivement des éléments traces. Le baryum est le plus présent, avec une concentration allant de (175 à 944 ppm), avec une valeur moyenne de 597 ppm. Les concentrations de zirconium varient de (304 à 775 ppm), avec une moyenne de 556 ppm. Les niveaux de V (116 ppm), Sr (101 ppm) et Cr (100 ppm) sont plus bas que ceux observés pour les éléments traces mentionnés précédemment. Les variations sont également importantes pour le Zn (34-88 ppm), le Rb (17-63 ppm), le Nb (57-723 ppm) et le Ni (19-47 ppm). À titre d'exemple, les ratios Cr/V, Y/Ni, Rb/Sr et U/Th sont très faibles. Les relations Ni/Co, Zr/Sc et, dans une moindre mesure, Th/Sc indiquent que Zr, Ni et Th sont probablement moins mobiles que Sc et Co dans ces milieux.

Noa Tang *et al.*, (2020) montrent que les éléments traces les plus contrôlés des sédiments alluviaux de la plaine de kadey sont : Zr (210 à 1676 ppm), Ba (61,6 à 711 ppm) et Y (56,8 à 0,224). La somme de terres rares est variable (87 à 395 ppm). Les terres rares légères sont légèrement plus enrichies $(La/Sm)_N : 3,74 - 5,80$), que les terres rares lourdes $(Gd/Yb)_N : 1,12 - 1,78$), avec des anomalies négatives en $(Eu/Eu^* : 0,51 - 0,67)$.

Bolarinwa *et al.*, (2019). Les sédiments contenaient de faibles concentrations de la plupart des éléments traces, à l'exception des éléments de Zr (651-1352), Ba (56-157), V (38-90) et Sr (15,1-59,6 ppm). Les valeurs moyennes de Co et Ni étaient de 1,5 et 0,7 ppm respectivement. Les valeurs des oligoéléments et terres rares étaient inférieures aux valeurs correspondantes de l'UCC et du PAAS à l'exception du Zr.

Nyobe *et al.*, (2018) dans les sédiments alluviaux du bassin versant de Lobo (Sud-Cameroun) relèvent que les teneurs en Zr (662 à 1450 ppm), V (>370 ppm) et Nb (>227 ppm) sont élevées. Les terres rares les plus concentrées sont le lanthane, le cérium, le praséodyme, le néodyme et le samarium. La somme de terres rares varie entre 28 et 1752 ppm. La relation La/Sc, La/Co, Th/Sc et Zr/Cr témoigne de l'apport des sources felsiques et mafiques. Les teneurs élevées en TiO_2 , constatée à la sortie du bassin versant de Lobo, témoigne la résistance du rutile. On pourrait associer la répartition des terres rares au tri des minéraux

lourds. Les faibles taux de $(La/Yb)_N$ et les teneurs élevées en Zr sont dues à la présence du zircon.

II.1.4.3. Eléments de terres rares

Bokanda *et al.*, (2021) ont montré que les schistes noirs de Mamfè présentent des lignes spectrales de terres rares normalisées par chondrite comparables à celles de PAAS et UCC, indiquées par un enrichissement de LREE par rapport à HREE, une tendance HREE presque plate à légèrement appauvrie et une anomalie en Eu négative.

Kouankap *et al.*, (2024) montrent que les sédiments de la rivière Mugheb de terres rares indiquent des anomalies négatives en Eu ($Eu/Eu^*=0,54-0,82$) et positives en Ce ($Ce/Ce^* \sim =1,04-1,67$), suggérant qu'elles proviennent de roches mafiques fractionnées et, dans une moindre mesure, de roches felsiques fractionnées.

Ndjigui *et al.*, (2018) ont démontré que les teneurs en terres rares dans les argiles alluviales de Lokoundjé (Kribi) varient de 94 à 1065 ppm, avec une forte présence de terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes ($LREE/HREE \sim 19$ à 36). Parmi ces terres rares, le cérium est le plus présent, avec des concentrations allant de 200 à 547 ppm, suivi du lanthane et du néodyme. La normalisation des terres rares par rapport au PAAS montre une légère différence positive en europium et des différences négatives en cériums. Selon le rapport $(La/Yb)_N$, il est observé une légère fractionnement des terres rares.

D'après l'étude menée par Ongboye *et al.*, (2019), les alluvions de Tongo Gadima dans la région de l'Est présentent des niveaux élevés de terres rares (92 à 1408 ppm), avec une forte présence de LREE par rapport aux HREE. On observe des concentrations élevées de Ce ($\sim 190,9$ ppm), La ($\sim 95,4$ ppm), Nd ($\sim 78,0$ ppm) et Pr ($\sim 21,6$ ppm). Enrichissement, anomalie négative en europium ($Eu/Eu^* = 0,21 - 0,72$) et valeurs variables du rapport $(La/Yb)_N$ (entre 3,56 et 45,47) sont observés dans les terres rares normalisées par rapport à la chondrite, tandis que les terres rares normalisées par rapport au PAAS ont de faibles valeurs par rapport à celles de la chondrite.

Selon Ndjigui *et al.*, (2020), dans les gisements de Tongo Gandima, on observe également une forte présence de LREE dans les sédiments concentrés (notamment dans La, Ce, Pr et Nd) par rapport au HREE ($LREE/HREE 3,23 - 49,57$). Les modèles de REE normalisés par chondrite montrent une augmentation de la LREE, une évaluation négative de l'Eu ($Eu/Eu^* = 0,07-0,49$) et des anomalies de Ce. Les motifs en V légers exprimés sont caractéristiques des différentes variétés de minerai ainsi que des modèles REE normalisés du PAAS. Selon le

rapport $(La/Yb)_N$, on observe une forte fractionnement des terres rares dans la majorité des échantillons $((La/Yb)_N 3,56- 14,08)$.

Selon Sababa *et al.*, (2024), on observe une variation de 73 à 288 ppm de terres rares (TRE) dans les gisements argileux alluviaux de la vallée de la Sanaga, avec une valeur moyenne de 191 ppm. Les terres rares légères (LREE) sont particulièrement enrichies dans les gisements d'argiles alluviales de la vallée de la Sanaga, avec une moyenne de 173 ppm, tandis que les terres rares lourdes (HREE) sont en moyenne de 17 ppm sur les deux sites. De 7 à 13, les valeurs LREE/HREE varient, avec une moyenne de 10. Les échantillons des deux sites présentent des anomalies négatives en Eu pour la plupart des profils normalisés, avec un rapport Eu/Eu^* moyen de 0,63. On observe également de légères anomalies négatives et positives en Ce (Ce/Ce^* variant de 0,8 à 1,17). Selon les profils des terres rares, des rapports tels que $(La/Yb)_N$, $(La/Sm)_N$ et $(Gd/Yb)_N$ témoignent d'un faible fractionnement, notamment pour les HREE.

Pour Varghese *et al.*, (2024), les sédiments alluviaux situés sur le plateau au large de Quilon présentent des concentrations moyennes de ΣREE , Th et U, respectivement de 222 ppm, 15,2 ppm et 2,58 ppm dans les sédiments en vrac. Les concentrations de ΣREE (moyenne = 3009 ppm), Th (moyenne = 478 ppm) et U (moyenne = 30 ppm) ont été considérablement augmentées en raison de la présence de monazite. Étant donné les fortes concentrations de ΣREE , Th et U dans les sédiments dus à la monazite, cette étude suggère une exploration plus approfondie de ces sédiments, qui pourraient avoir une contribution importante à la base de ressources du pays.

Pour Mimba *et al.*, (2019), les eaux des ruisseaux dans le bassin inférieur de Lom ont des concentrations variables en REE normalisées par rapport aux PAAS (0,24–4978 ng/l), des anomalies positives en Ce (Ce/Ce^* varie de 1,08 à 8,03), une anomalie positive générale en Eu (Eu/Eu^* varie de 0,9 à 15,2, moyenne = 4,9) et sont légèrement enrichies en éléments de terres rares légères (LREE/HREE varie de 1,7 à 10,3). De même, les sédiments sont légèrement appauvris en éléments de terres rares lourdes (HREE), ont une anomalie négative prédominante en Ce, mais présentent une anomalie positive omniprésente en Eu.

II.1.4.4. Classification géochimique des sédiments alluvionnaires

Les rapports logarithmiques SiO_2/Al_2O_3 en fonction de Fe_2O_3/K_2O sont utilisés pour la classification des sédiments afin de déterminer leur composition et leur provenance (Herron, 1999).

Les sédiments de la plaine de Kadei sont de quatre types : les shales, wackes ; litharenites et les Fe-Sands (Noa Tang *et al.*, 2020). Les sédiments alluviaux de la Mefou sont

classés en Feshale et Fesand dans le diagramme de classification géochimique (Herron, 1988) qui est en concordance avec les observations pétrographiques (Mbale Ngama *et al.*, 2019).

Le diagramme binaire Nb/Y vs Zr/Ti de Winchester et Floyd (1977) et de Garzanti et Resentini (2016) pour la détermination de la source des sédiments. Les rapports canoniques des éléments immobiles (Nb/Y, Zr/Ti) indiquent que les roches felsiques étaient de la syénite et de la monzodiorite ou leurs produits métamorphiques (Mbog *et al.*, 2022). C'est aussi le cas observé avec celui des résultats obtenus par Kwewouo (2018) donc les sables se classent dans le domaine de Fe-Sand.

Nanga *et al.*, (2020) révèlent les sables du cours inférieur de la sanaga sont principalement des litharénites provenant de granitoïdes, d'orthogneiss et de métasédiments d'âge panafricain (1000–500 Ma) du sud du Cameroun mis en place dans une marge passive. Les sédiments de la rivière Lokoundje ont été classés géochimiquement comme schistes (Ndjigui *et al.*, 2018).

Pour Ramos-Vasquez *et al.*, (2024), les sédiments des métaux lourds sur la plage de « Mis Amores » sont classés comme subarkose. Les sédiments alluviaux du bassin du lac Tchad sont classés en schistes ferreux, sables ferreux et (sub)litharénite (Sababa *et al.*, 2023) et ceux des argiles alluviales de Nkoteng-Mbandjock, le diagramme de classification géochimique les a positionnés dans les domaines des schistes et des schistes ferreux (Sababa *et al.*, 2024).

II.1.4.5. Degré d'altération de la roche source

Le degré d'altération de la roche source est déterminé par les valeurs de plusieurs indices notamment le CIA (Indice d'altération Chimique), Cet indice peut être calculé en utilisant la formule $\{(CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100)\}$ (Nesbitt et Young, 1982) ; le PIA (Indice d'altération des Plagioclases) de formule $PIA = \{(Al_2O_3 - K_2O) / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O) \times 100\}$ (Fedo *et al.*, 1995) ; le CIW (Indice de désagrégation chimique) de formule $\{(CIW = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O)] \times 100)\}$ (Harnois, 1988) ; le MIA (indice d'altération mafique) de formule $\{(MIA(o) = [(Al_2O_3 + Fe_2O_3(t)) / (Al_2O_3 + Fe_2O_3 + MgO + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100)\}$ (Babechuk *et al.*, 2014). Le CaO^* est corrigé selon la méthodologie de calcul proposée par McLennan *et al.* (1993), dans laquelle les valeurs de CaO ne sont acceptées que si $CaO < Na_2O$. Lors que $CaO > Na_2O$, on suppose que la concentration de CaO est égale à celle de Na_2O .

Les fortes valeurs de CIA, MIA, PIA et CIW comprises entre 80 et 100 % indiquent une altération intense typique d'une zone intertropicale. Tandis que des valeurs comprises entre 60

et 80 % indiquent une altération modérée. Les valeurs comprises entre 0 et 60 % montrent que la roche est peu ou pas altérée.

Les valeurs de de CIW déterminées dans les sédiments de la formation du Mundeck et Logbadjeck varient de 97,13 % à 98,74 % respectivement, ce qui suggère une altération de la roche source (Ngueutchoua *et al.*, 2019). De même les sédiments de Moloundou ont les mêmes caractéristiques que la précédente étude avec des valeurs de CIW allant de 93 et 96 % (Ekoa Bessa *et al.*, 2020).

Pour Ekoa Bessa *et al.*, (2021), les valeurs CIA des échantillons de sédiments des lacs Ossa fluctuent entre 84,4 à 96,1 % (moyenne = $\sim 88,1$ %), indiquant un degré intense d'altération chimique des roches mères. De plus, les valeurs élevées de PIA (moyenne = $\sim 94,7$ %) et de CIW (moyenne = $\sim 95,2$ %) confirment une altération chimique importante.

Selon les études menées par Chougong *et al.*, (2021), les valeurs élevées de CIA et PIA dans les sédiments de la rivière Lobé (Sud-Ouest Cameroun) reflètent l'intensité élevée de l'altération chimique dans les zones sources. Cependant, les sédiments en aval présentent une altération plus significative que les échantillons en amont

Les valeurs des indices d'altération (CIA, PIA et CIW) et les diagrammes ACNK et (AK)CN indiquent une forte intensité d'altération chimique dans la zone source (Ouambeti-Wickon *et al.*, 2024).

Les sédiments alluviaux situés sur le plateau au large de Quilon ont été analysés par Varghese *et al.*, (2024). Ils ont révélé que l'indice d'altération chimique (CIA) (moyenne = 72,88), l'indice chimique d'altération (CIW) (moyenne = 92,72) et l'indice d'altération du plagioclase (PIA) (moyenne = 89,74) sont élevés, ce qui suggère une altération modérée à intense de la zone source. Il est également confirmé que la zone source présente une altération importante, avec un rapport Th/U élevé (moyenne = 5,68), qui est supérieur au rapport Th/U crustal moyen de 3,8.

Liu *et al.*, (2013) démontrent que l'indice chimique d'altération (CIA) des sédiments du versant nord de la mer de Chine méridionale dans la carotte sédimentaire était compris entre 54 et 72 avec une moyenne de 64, ce qui témoigne d'une intensité d'altération faible à moyenne dans la zone source. L'intensité de l'altération chimique, combinée aux indicateurs géochimiques Ti/Na, Al/Na et K/Na, ainsi qu'aux caractéristiques minéralogiques de la carotte sédimentaire, suggérerait que le climat de la zone source s'était progressivement refroidi depuis le début du Miocène.

II.1.4.6. Maturité des sédiments alluvionnaires

L'ICV (Indice de Variabilité de la Composition) de formule $ICV = [(Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + TiO_2) / Al_2O_3]$ (Cox et al., 1995) indique si un sédiment est mature (bien arrondi et trié, tailles similaires et minéraux stables) ou immature (plus anguleux, tailles diverses et une composition diversifiée). Un sédiment est d'autant plus mature que son ICV est inférieur à 1, tandis qu'un sédiment immature possède un ICV supérieur à 1. La maturité des sédiments peut aussi être évaluée à partir du rapport massique SiO_2/Al_2O_3 , qui reflète l'abondance des quartz et des feldspaths dans les sédiments (Hossain *et al.*, 2014). Les sédiments matures possèdent des rapports SiO_2/Al_2O_3 inférieur à 1,3 et les valeurs comprises entre 1,3 et 6,3 indiquent des sédiments immatures (Asiedu *et al.*, 2004).

Ekoa Bessa *et al.*, (2021), dans les sédiments du lac Ossa ont montré que les valeurs ICV des sédiments étudiés varient de 0,31 à 0,67 (moyenne = $\sim 0,57$), ce qui déduit des sédiments compositionnellement matures déposés dans un environnement tectoniquement actif. Les rapports K_2O/Na_2O pour les sédiments centraux varient de 4,8 à 7,7 (moyenne = $\sim 5,3$), ce qui suggère également la maturité des sédiments. Le rapport SiO_2/Al_2O_3 est généralement utilisé pour déduire la maturité texturale des sédiments, qui varie de 1,7 à 2,7 (moyenne = $\sim 2,27$) indiquant une maturité compositionnelle élevée, probablement due à l'altération des feldspaths.

Selon Sababa *et al.*, (2024), les valeurs Na_2O/K_2O (moyenne de 0,18) observées dans les dépôts d'argile alluviale de la vallée de la Sanaga indiquent que les sédiments sont immatures. Cette immaturité est confirmée par l'indice de variabilité de composition (ICV; moyenne de 2,29) et leurs rapports SiO_2/Al_2O_3 , tous deux inférieurs à 5. Indiquant que ces sédiments proviendraient probablement d'environnements stables.

Kouankap *et al.*, (2024) montrent que les rapports de $SiO_2(adj)/Al_2O_3$, K_2O/Al_2O_3 et K_2O/Na_2O et l'indice de variabilité compositionnelle (ICV) indiquent que des sédiments sont matures et ont subi un recyclage, un tri et de remaniement. Les courbes d'indice chimique d'altération (CIA) et d'indice d'altération du plagioclase (PIA) indiquent une altération et une lixiviation intenses des feldspaths et des plagioclases dans la zone source sous un climat chaud et humide qui corroborent la nature climatique du Cameroun.

Bokanda *et al.*, (2021) relèvent que les digrammes binaires des rapports Rb/Sr, Th/U, Zr/Sc, Th/Sc et $(Gd/Yb)_N$, ainsi que la corrélation de Zr et $(La/Yb)_N$ et les faibles valeurs d'ICV montrent que les schistes de Mamfé sont des sédiments immatures du premier cycle, qui n'ont pas subi d'enrichissement minéral important.

II.1.4.7. Provenance des sédiments alluvionnaires

La provenance des sédiments inclut tous les aspects sur la surface de drainage, y compris la source lithologique, le relief, le climat, l'énergie de transport et l'hydrodynamisme de l'environnement de dépôt (Basu, 1985).

Le rapport $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ est largement utilisé pour déterminer les caractéristiques de la roche source (Sheldon *et al.*, 2009). Pour des valeurs de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ comprises entre (2-8), la source provient des roches mafiques (roches magmatiques riches en Fer et en Magnésium). Pour des valeurs comprises entre (8 - 21), les sédiments proviennent des roches intermédiaires (roches plutoniques et volcaniques contenant 52 à 66 % de SiO_2) et pour des valeurs comprises entre (21 - 70), la source correspond aux roches felsiques (Hayashi *et al.*, 1997).

Chougong *et al.*, (2021), dans les sédiments de la rivière Lobé (Sud-Ouest Cameroun) relèvent que les échantillons en aval et en amont ont des teneurs moyennes élevées en Cr (566 ± 333 ppm et 388 ± 238 ppm, respectivement) et en Ni (57 ± 74 ppm et 145 ± 109 ppm, respectivement) cela suggère dans l'ensemble la présence de détritiques mafiques dans les zones sources. Les représentations des diagrammes ternaires et les rapports élémentaires Co/Th, La/Sc, Sc/Th, Cr/V et Y/Ni montrent principalement des roches mères felsiques avec une contribution moindre des composants mafiques.

Pour Amoudji *et al.*, (2023), dans les grès de Tohoun et de Tado, Sud -Est Togo, les données géochimiques montrent que les sédiments proviennent de roches mères felsiques et sont mis en place sous un climat humide.

Varghese *et al.*, (2024) ont exposé que les sédiments du plateau continental au large de Quilon, sur la côte sud-ouest de l'Inde, sont des sédiments du premier cycle provenant de la zone source voisine. Cela est démontré par l'identification des minéraux lourds non altérés et des minéraux contenus dans la roche saine, ainsi que la moyenne de l'indice de variabilité compositionnelle (ICV = 1,20). Les taux élevés de $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (moyenne = 3,88) et les taux élevés de LREE/HREE (moyenne = 20), ainsi que la position des échantillons dans les diagrammes binaires (parcelles binaires SiO_2 vs $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, Zr vs TiO_2 , Ce vs La/Yb et La/Th contre Hf), et les schémas REE normalisés avec enrichissement LREE et anomalie Eu négative, suggèrent que les sédiments provenaient principalement des Khondalites du bloc de Trivandrum et ont été transportés par les rivières Kallada et Ithikkara.

Bokanda *et al.*, (2021), dans les schistes noirs de Mamfé montrent que les diagrammes ternaires et binaires désignent une source de roche de marge active pour les schistes, qui lors du dépôt, présentaient des caractéristiques de marge passive.

II.1.5. Minéraux lourds

Pendant la dernière décennie, l'analyse qualitative et quantitative des minéraux lourds des sables prélevés dans les vallées de la Meurthe et de la Moselle (France, Luxembourg, Allemagne) a mis en évidence les associations minéralogiques propres aux sources qui ont alimenté les alluvions quaternaires des cours d'eau. Selon les recherches menées par Beiner et al, (2009), les minéraux lourds permettent également de déterminer l'origine des alluvions quaternaires dans le bassin de la Moselle (NE France). En Guyane française, les sédiments du littoral sont principalement composés de tourmaline, rutile, zircon, magnétite et ilménite (Pomérol *et al.*, 1968).

Tsanga *et al.*, (2025), dans les sédiments de la zone de la plage de Campo ont montré que la fraction minérale lourde est dominée par des minéraux opaques, notamment l'anatase, l'augite, la chloritoïde, le diopside, la cyanite, la glauconite, le grenat, la hornblende, l'hypersthène, le rutile, la sillimanite, la staurotide, la tourmaline, le zircon et la zoïsite, qui indiquent des sources de roches magmatiques et métamorphiques.

Selon les recherches menées par Ambassa Bela *et al.*, (2024), il a été observé que Les assemblages de minéraux lourds de la partie centrale du golfe de Guinée sont dominés par des minéraux stables (zircon, rutile), suivis de minéraux semi-stables (augite, diopside, enstatite et minéraux opaques), communs aux roches ignées et métamorphiques. D'autres minéraux, tels que la hornblende, le grenat, la kyanite, la sillimanite et le chloritoïde, sont caractéristiques des roches métamorphiques.

Les sédiments du fleuve Sanaga montrent la présence de minéraux lourds et d'oxydes opaques abondants, ainsi que de quelques grains de tourmaline, de rutile et de zircon arrondis. On note aussi la présence de grenat, de kyanite, de sillimanite, d'andalousite, de sphène, d'épidote, d'hypersthène et de zoïsite (Liyouck *et al.*, 2023).

Ndjigui *et al.*, (2019) ont montré que, les sables non consolidés de la terrasse de la rivière Mefou sont principalement constitués de grenat, staurotide, et andalousite.

Les minéraux lourds des sédiments côtiers de Yoyo ont un cortège minéralogique constitué de : augite, enstatite, diopside, apatite, zircon, hornblende brune, grenat, rutile et minéraux opaques (Ambassa, 2020). Ceux des alluvions de Pan-Makak sont constitués de zircon, rutile, disthène, tourmaline, sillimanite, chloritoïde, grenat, zoïsite, diopside, staurotide, augite et les minéraux opaques. Ce résultat montre que les alluvions ont une origine métamorphique (Welba, 2022).

Nanga *et al.*, (2022), dans ces travaux, indiquent que les sables de la Sanaga sont constitués par les minéraux indicateurs du métamorphisme (andalousite, disthène, sillimanite, épidote, staurotide, et tourmaline), des minéraux du magmatisme (augite et péridot) et des minéraux mixtes (apatite, grenat, hornblende, minéraux opaques et zircon). D'après les travaux de Ndjigui *et al.*, (2014), les sédiments alluviaux de Ngaye contiennent les espèces telles que : le zircons, rutil, amphiboles, olivines et pyroxènes.

L'analyse des minéraux lourds de la baie d'Audierne révèle qu'une part significative des sables de l'estran dérive d'une source lointaine. Cette vision est confirmée notamment par la présence des minéraux comme la staurotide, le zircon, le rutil, le glaucophane, ainsi que, en partie, par l'ilménite, le grenat et l'épidote (Chauris, 2021).

En d'autres termes, les sédiments détritiques sont principalement constitués de quartz, de feldspaths, de carbonates, de micas et de minéraux lourds ($d > 2,9$), avec des pourcentages variant de 0,05 à 3 % (Duplaix, 1958). Ces proportions sont courantes, à l'exception de certains concentrés naturels comme les sables de plages où les minéraux lourds peuvent représenter jusqu'à 90 % du total. Selon Beiner *et al.* (2009), la rareté et la diversité des minéraux lourds permettent de caractériser un sédiment, que ce soit par l'association minéralogique, ou par un minéral indicateur.

Les premiers pétrographes ayant étudié les minéraux lourds les extrayaient de l'ensemble du sédiment, mais ils ont rapidement réalisé que les minéraux lourds se trouvent généralement dans la fraction fine du sable et que les espèces minéralogiques ont des tailles préférées (tourmaline dans la fraction grossière 0,315-0,160 mm, zircon, rutil et anatase dans la fraction fine 0,160-0,050 mm).

II.1.6. Echelle expérimentale d'altération

À partir d'attaques chimiques en laboratoire, Bustamante Santa Cruz (1976) a établi une nouvelle échelle d'altération des minéraux lourds (Ces derniers provenaient de sables alluviaux du bassin de la Meuse ardennaise). L'auteur définit ainsi, quatre groupes distincts au sein desquels la densité, la forme et la résistance à l'altération sont comparables : il s'agit de :

- minéraux lourds stables : Zircon ; Rutil ; Anatase et Brookite
- minéraux lourds Résistants : Tourmaline ; Staurotide ; Disthène ; Andalousite
- minéraux lourds altérés : Sphène ; Epidote ; Grenat ; Amphibole ; Pyroxène
- minéraux lourds très altérés : Hypersthène ; Apatite ; Olivine ; Ortho pyroxène.

Les résultats de l'expérience concordent assez bien avec les observations du terrain

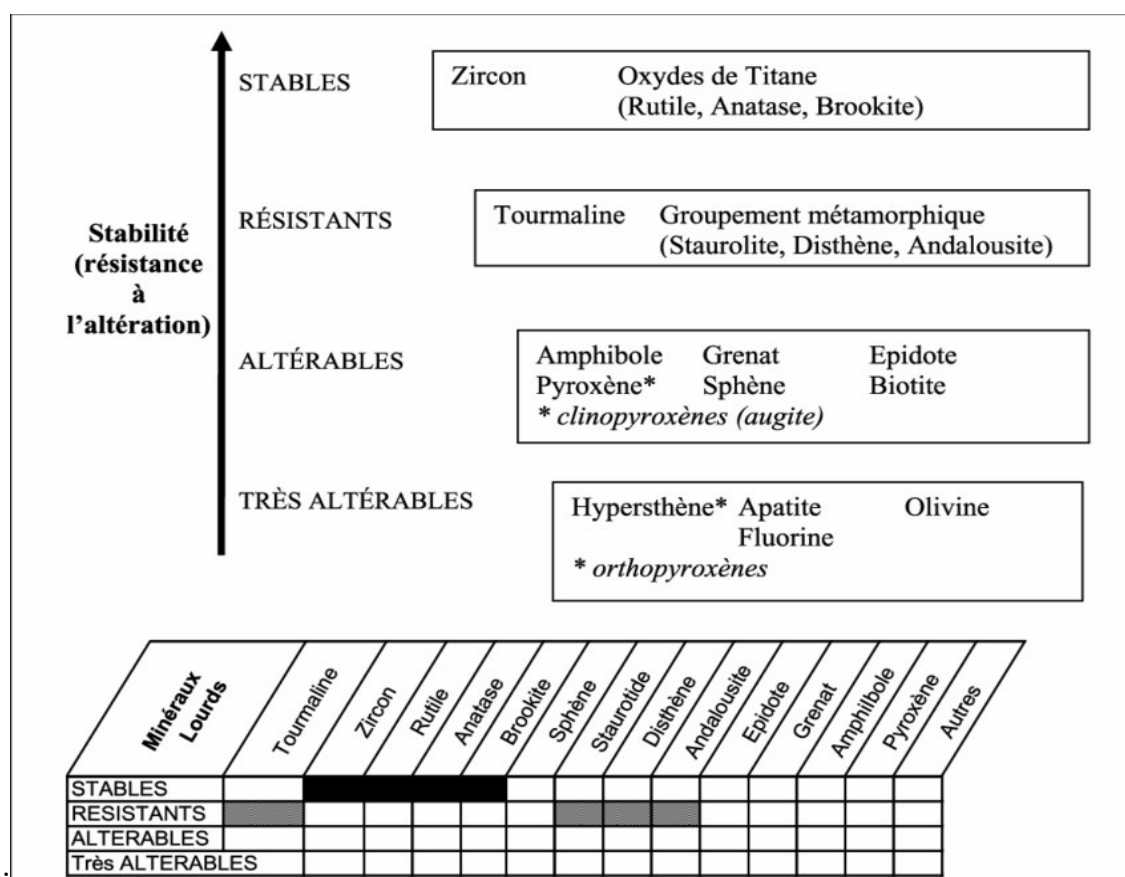


Figure 10: Echelle d'altération des minéraux lourds (d'après Bustamante Santa Cruz (1976)).

II.1.7. Morphoscopie

La morphoscopie est l'étude de la forme et de l'aspect des grains de quartz dans les dépôts sableux (Ritchot et Cailleux, 1971). Elle consiste à trier par tamisage les principales fractions granulométriques d'un sédiment, puis à classer par observation à la loupe binoculaire les grains afin de déterminer le type de transport. En tenant compte de la forme des grains et leur aspect de surface, Cailleux (1942) a proposé quatre catégories des grains :

- les grains non usés (NU) sont caractérisés par leurs formes anguleuses, que les cristaux soient automorphes ou non. Les arêtes ne présentent aucune trace de polissage ou d'arrondi. Leur aspect de surface peut être indifféremment mat ou luisant ;
- les grains sub-émoussés luisants (SEL) présentent des sommets et arêtes plus ou moins émoussés et luisants ;
- les grains émoussés luisants (EL) présentent une dominance d'arêtes arrondies et peuvent parfois acquérir la forme d'une sphère presque parfaite. Leur aspect de surface est toujours très

poli, brillant et luisant sous l'éclairage de la loupe binoculaire ;

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

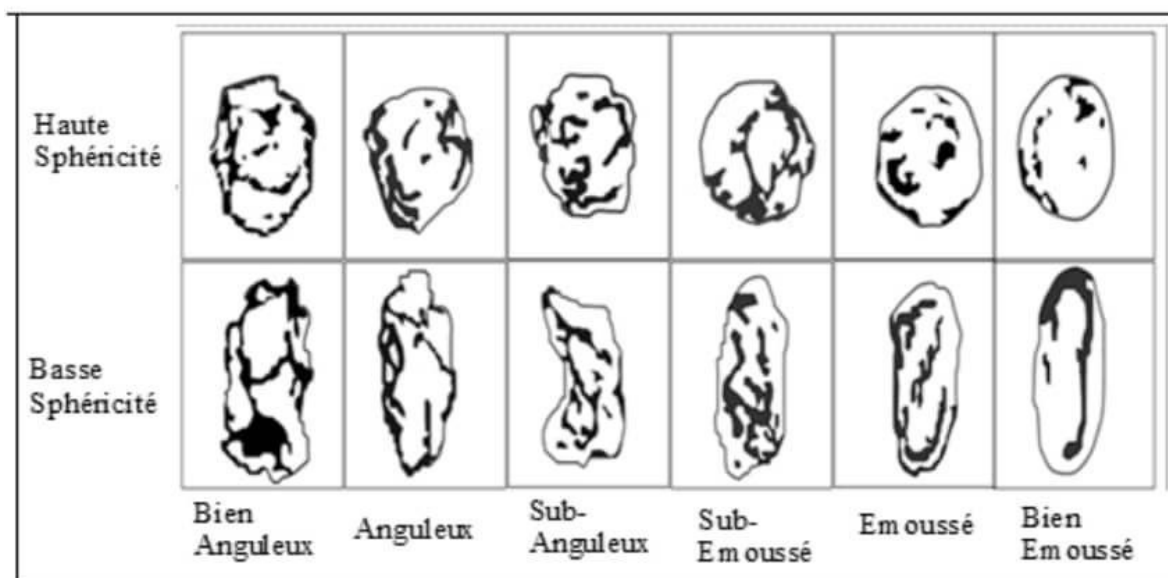


Figure 11 : Charte visuelle permettant l'estimation de la sphéricité des sables et graviers (Powers, 1953).

La morphologie des particules d'or change pendant le transport dans les alluvions du lit des cours d'eau du versant oriental de la Cordillera Real (Bolivie), comme dans toutes les rivières : émoussé et indice d'aplatissement augmentés, stries et traces de déformations mécaniques apparues, Selon Fornari et Viscarra (1988), l'analyse morphoscopique des particules d'or collectées le long du versant de la Cordillère révèle l'existence de paillettes très peu évoluées mécaniquement situées dans les schistes noirs du Llanvirnien.

Hossain *et al.*, (2024), dans les sédiments du site de la forêt des Sundarbans, Bangladesh, indiquent les microtextures d'origine mécanique comprennent des stries parallèles, des marches droites, des marques de percussion en croissant, des fractures conchoïdales, des marches arquées, des surfaces fraîchement polies, des marques en forme de V, des bords cassés, une fatigue par abrasion et des bords bulbeux et méandreux, qui sont plus fréquents dans les QG et attribués aux transports éoliens et fluviaux à haute énergie. Les caractéristiques chimiques abondantes telles que la prolifération cristalline, les globules de silice, l'écaillage, la pellicule de silice et la fleur de silice sont omniprésentes sur les surfaces QG, témoignant d'un

environnement diagénétique subaquatique. Plaques/plans de fracture, relief élevé, dépressions allongées, particules adhérentes, marques de broutage et piqûres de gravure orientées sont fréquents dans le QG, suggérant un environnement marin subaquatique proche du littoral.

Selon Huberson *et al.*, (2018), les résultats d'une analyse morphoscopique et exoscopique au microscope électronique à balayage (MEB) montrent que les grains de quartz prélevés sur le cordon littoral entre Fresco et Jacquerville présentent les caractéristiques du milieu intertidal et infratidal. Les grains de quartz présents sur la plage de Fresco présentent des formes très anguleuses et peuvent être d'origine locale, c'est-à-dire très proches de la zone d'altération et d'érosion (zone d'origine). À Grand Lahou, la majorité des grains de quartz présentent des formes subanguleuses à subarrondies et brillantes. En général, les grains de quartz sur la plage de Jacquerville sont plus fins que ceux des stations précédentes en raison d'un transport à une longue distance.

Pour Hamimed *et al.*, (2015), l'observation morphoscopique des grains de quartz à la loupe binoculaire permet de proposer une évolution plus ou moins importante, puisqu'ils sont souvent émoussés ou sub-émoussés. L'exoscopie des grains de quartz montre que ces grains ont subi une évolution complexe avant leur épisode d'immobilisation dans la terrasse.

II.2. METHODOLOGIE

La méthodologie adoptée repose sur les différentes méthodes employées pour obtenir les résultats, telles que la collecte de données sur le terrain, une étude pétrographique des roches, une analyse granulométrique, une étude morphoscopique, l'étude des minéraux lourds et une analyse géochimique dans les sédiments.

II.2.1. Travaux de terrain

Le travail a débuté par une exploration générale des différents sites puis une prospection systématique au cours de laquelle on a exploré le secteur d'étude. Ceci a permis de faire une reconnaissance des formations géologiques du secteur d'étude afin d'identifier des zones de prélèvements. Le matériel utilisé sur le terrain était constitué d'une carte topographique de Yaoundé au 1/200000, a servi de reconnaissance du secteur d'étude ; une boussole à clinomètre, un récepteur GPS (*Global Position System*) Garmin 60 Cx, un carnet de terrain, un marteau, un double décimètre, des sacs à échantillons, un appareil photo, une machette, un marqueur, des crayons ordinaires, une pelle bêche, des battées etc. Les prélèvements des échantillons ont été effectués dans le bassin versant de la Djouel et ses affluents.

II.2.1.1. Techniques de prélèvement

Après la réalisation de la carte de localisation montrant les cours d'eau et la topographie dans le site réalisé au préalable, la méthode de prélèvement sur le terrain, a débuté par une prospection générale du site pour identifier les affluents de la Djouel et les différents affleurements de la roche grâce à la carte de localisation.

Plusieurs types d'échantillons ont fait l'objet de prélèvement :

- **Méthodologie de prélèvement de la roche** : après localisation d'un affleurement, nous avons cassé un fragment de roche fraîche à l'aide du marteau géologue, puis nous l'avons introduit dans un sac à échantillons étiqueté et codifié pour éviter toute contamination. En fin, nous avons relevé les coordonnées du lieu de prélèvement grâce au GPS. Deux (02) échantillons de roche ont été prélevés dans le cadre de notre travail ;
- **Méthodologie de prélèvement des sables ou graviers** : ici la technique principale était de prélever un échantillon plus en amont et un échantillon plus en aval de chaque affluent de la Djouel observer. Après identification des points d'échantillonnage c'est à dire les zones de méandre ou marmite de géants susceptible d'accumuler les minéraux lourds, nous avons creusé des puits d'environ 0,5 mètre de profondeur à l'aide d'une pelle bêche jusqu'à l'obtention des graviers. Un total de 8 échantillons des sédiments qui ont été prélevés, étiquetés et codifiés et emballés dans les sacs à échantillon avant d'être acheminés au laboratoire pour des analyses ;
- **Méthodologie de prélèvement des concentrés** : Après prélèvement du sable ci haut, une autre partie du même sable de chaque échantillon est lavée jusqu'à obtention des minéraux lourds à l'aide des batées. Puis les concentrés sont mis dans un autre sac à échantillon étiqueté et codé pour effectivement éviter toute contamination.



Figure 12 : a) Lavage du sable et b) Prise des mesures de profondeur de puits.

II.2.1.2. Echantillonnage

Au total dix (10) échantillons ont été prélevés dans le bassin versant la Djouel et ses affluents. Deux (02) échantillons de roches ont été prélevés au niveau des affleurements. Il s'agit : des gneiss à micas et à grenat et des micaschistes à grenat et à biotite. Le prélèvement des échantillons de sédiments a été réalisé à plusieurs niveaux dans les puits alluvionnaires ouverts sur les berges (Figure12). Huit (08) échantillons de sédiments ont été prélevés au total. Tous ces échantillons ont été codifiés puis emballés dans des sacs à échantillons pour des analyses ultérieures en laboratoire.

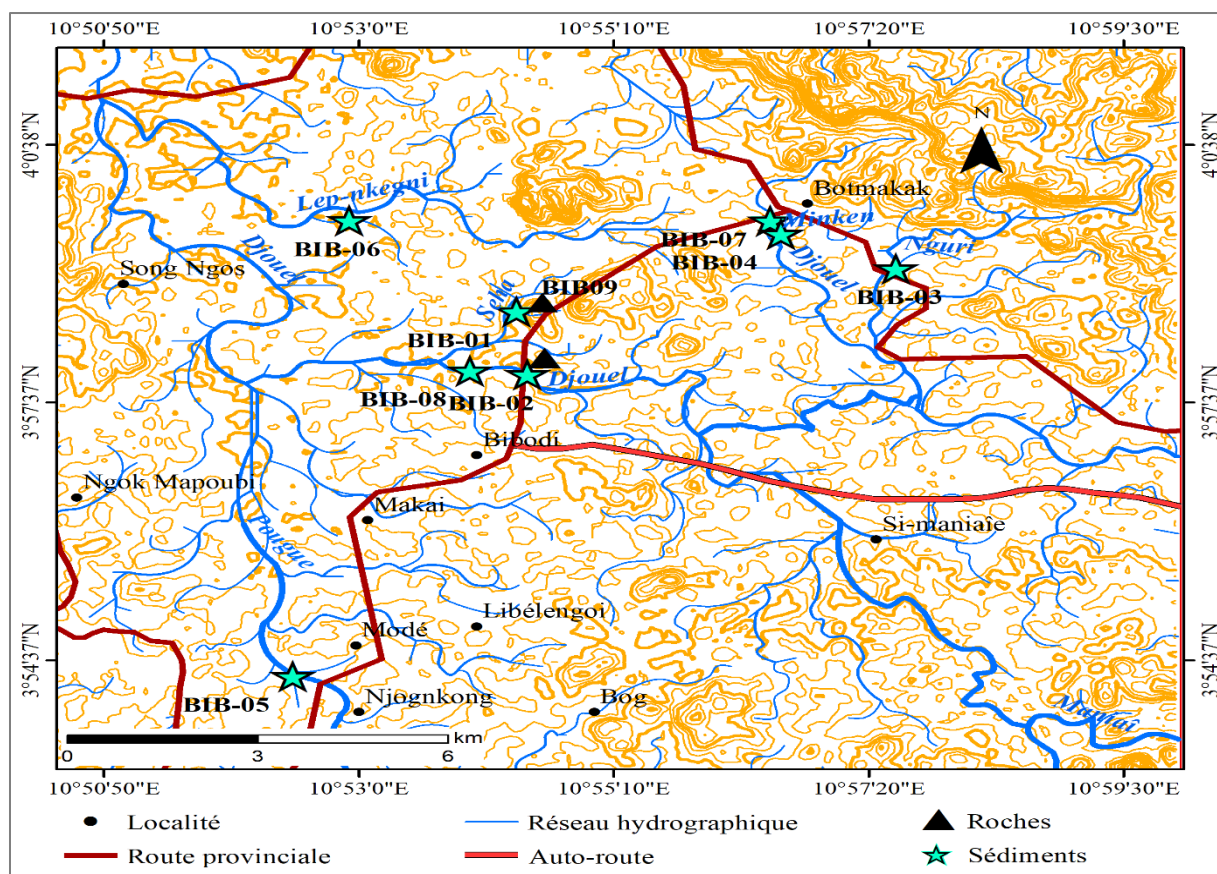


Figure 13 : Carte d'échantillonnage (extrait du SRTM et du fond topographique de Yaoundé 3c au 1/200000).

Tableau III : Différents sites de prélèvements ainsi que les coordonnées géographiques des points de prélèvements et afin les profondeurs des puits

Noms	Codes	Latitudes	Longitudes	Altitudes (m)	Profondeur de puits (cm)	Types d'échantillons
SEHA	BIB-01	03.97800	010.90564	367	60	Sables, Concentrés
DJOUEL EN AVAL	BIB-02	03.96698	010.90779	353	80	Roche, Sables, Concentrés
NGURI	BIB-03	03.98638	010.95936	377	30	Sables, Concentrés
MINKEN	BIB-04	03.99173	010.94034	381	40	Sable, Concentrés
POUGOUE	BIB-05	03.90707	010.87398	391	1,3 m	Sables, Concentrés
LEP NKEGNI	BIB-06	03.99410	010.88105	356	50	Sables, Concentrés
DJOUEL AMONT	BIB-07	03.99527	010.93909	360	50	Sables, Concentrés
DJOUEL	BIB-08	03.96836	010.90700	341	40	Sables, Concentrés
NGANDJIP	BIB-09	03.98030	010.90747	382		Roche

II.2.2. Travaux au laboratoire

Au laboratoire, les échantillons de roches ont subi des analyses pétrographiques. Les échantillons des alluvions ont subi des analyses granulométriques, morphoscopiques, l'extraction et montage des lames minces des minéraux lourds et les analyses géochimiques.

II.2.2.1. Analyse pétrographique des roches

Une lame mince de roche est un échantillon de roche aminci de manière à le rendre transparent et translucide afin de permettre l'observation en lumière transmise au microscope polarisant. La confection des lames minces nécessite plusieurs étapes et tout un appareillage comprenant : des scies diamantées, une rodeuse, une rectifieuse, une plaque chauffante, des lames porte-objet, une pointe diamantée, une colle spéciale des poudres abrasives, d'une polisseuse de l'eau et d'un microscope optique. Les principales étapes pour confectionner une lame mince sont :

- Sciage des échantillons ;
- Polissage des échantillons à l'aide d'une polisseuse ;
- Séchage des échantillons sur la plaque chauffante à 100°C ;
- Collage des sucres sur les lames porte-objet protection de la surface polie.

Deux échantillons de roches saines sélectionnés dans les principaux types pétrographiques ont servi à la confection des lames minces, à l'IRGM. L'étude des lames minces s'est effectuée au laboratoire des Géosciences des Formations Superficielles et Applications de l'Université de Yaoundé I. Ces lames ont été observées au microscope binoculaire de marque OPTIC IVYMEM SYSTEM.

II.2.2.2. Analyses sédimentologiques

II.2.2.2.1. Granulométrie

L'analyse granulométrique est une technique qui permet la séparation d'un ensemble de particules et leur fréquence statistique en fonction de leur taille. Les ensembles de particules obtenus sont appelés fractions granulométriques. Ces fractions sont constituées de particules dont la dimension couvre un intervalle relativement restreint et varie d'une fraction à l'autre. La méthode d'analyses granulométriques utilisée est celle préconisée par Mathieu et Pieltain (1998).

La granulométrie a été réalisée sur 200 grammes de huit (8) échantillons de sédiments du bassin de la Djouel. Cette analyse a été effectuée à l'aide d'une colonne de tamis de huit mailles (10 ; 4 ; 2 ; 1 ; 0,5 ; 0,25 ; 0,125 ; 0,063 mm), (Figure 14). L'application de cette analyse

permettra de connaître la nature des fractions granulométriques contenu dans les sédiments. L'analyse granulométrique sert à déterminer si les alluvions sont situées dans les fractions fines, moyennes ou grossières. Les différentes étapes à réaliser ici sont:

- mettre l'échantillon dans une batée ;
- laver sous une eau abondante pour éliminer l'argile et le limon ;
- sécher l'échantillon dans une étuve ;
- peser l'échantillon prêt à être tamiser ;
- passer l'échantillon de 200 gramme dans la colonne à tamiser ;
- ensuite peser la quantité retenue par chaque tamis avec soin ;
- tracer des courbes granulométriques.

Pour la construction des histogrammes, les diamètres des mailles de tamis sont portés en abscisses et les pourcentages simples équivalents aux masses de refus en ordonnées (Folk, 1968). Les courbes cumulatives portent en abscisses les diamètres des mailles exprimés sur une échelle logarithmique et en ordonnées les pourcentages cumulés en masses de refus exprimés sur une échelle arithmétique. Les courbes cumulatives logarithmiques pour les différents points d'échantillons sont tracées et les indices granulométriques ont été calculés pour connaître la nature des sédiments, leurs classements et leurs origines. La cumulation employée ici est régressive car elle va des éléments grossiers aux plus fins, donnant de ce fait une information sur les modes de dépôts des sédiments. Les éléments grossiers se déposent en premier, ensuite les moyens et en dernier les fins (Davis et Ehrlich, 1970). Les quartiles Q_1 , Q_2 et Q_3 correspondent aux refus des tamis à 25 %, 50 % et 75 % ont été déduits des courbes cumulatives avec $Q_1 < Q_3$. Ces quartiles serviront à déterminer les paramètres granulométriques suivants :

- **le $Qd\phi$ de Krumbein ou Quartile de déviation** : C'est l'indice qui permet de déterminer le classement et d'apprécier les actions de tri au cours du transport et du dépôt. C'est le coefficient d'hétérométrie. Ainsi, les alluvions sableuses seront d'autant mieux triées ou homométriques lorsque sa valeur se rapprochera de zéro. $Qd\phi = (Q_1 - Q_3) / 2$ avec Q_1 qui correspond au quartile à 25% et Q_3 qui correspond au quartile à 75% (en mm ou en phi), tableau VI.

- **le sorting index (S_0)** $S_0 = \sqrt{Q_3 / Q_1}$ ($S_0 = (Q_3 / Q_1)^{1/2}$), c'est le degré de classement des sédiments. Il dépend de la taille des sédiments et du type de dépôt (Folk et Ward, 1957).

Trask (1930) a proposé les limites suivantes (Tableau IV).

Tableau IV : Echelle de notation Trask $S_0 = \sqrt{Q_3/Q_1}$, adaptée des mesures graphiques de Folk et Ward (1957) dans Blott et Pye (2001).

Valeur de tri (S_0)	Termes de notation de sédiments
$S_0 < 0,35$	très bien trié
$S_0 = 0,35 - 0,50$	bien trié
$S_0 = 0,50 - 0,70$	moyennement trié
$S_0 = 0,70 - 1$	modérément trié
$S_0 = 1,00 - 2,00$	mal trié
$S_0 = 2,00 - 4,00$	très mal trié
$S_0 > 4,00$	mal trié

L'allure des pentes renseigne sur le classement des sédiments :

- si la pente est forte, le sédiment est bien classé, bien trié et homométrique ;
- si la pente est faible, le sédiment est mal classé, mal trié et hétérométrique.

Le calcul de la moyenne (M_z), permet de définir la taille moyenne des grains (Folk et Ward, 1957). M_z (en mm ou en phi) = $(Q_1 + Q_2 + Q_3) / 3$ La moyenne permet aussi d'individualiser les faciès suivants :

- granules : $2 \text{ mm} < M_z < 4 \text{ mm}$;
- sables très grossiers : $1 \text{ mm} < M_z < 2 \text{ mm}$;
- sables grossiers : $0,5 \text{ mm} < M_z < 1 \text{ mm}$;
- sables moyens : $0,25 < M_z < 0,5 \text{ mm}$;
- sables fins : $0,125 \text{ mm} < M_z < 0,25 \text{ mm}$;
- sables très fins : $0,0625 \text{ mm} < M_z < 0,124 \text{ mm}$;
- limons : $0,0312 \text{ mm} < M_z < 0,0625 \text{ mm}$;
- argiles : $0,0001 \text{ mm} < M_z < 0,0039 \text{ mm}$;

Le coefficient d'asymétrie (A_s)

$$A_s = Q_1 \times Q_3 / Q_2^2$$

Le coefficient d'asymétrie exprime la répartition des éléments par rapport à la médiane Q_2 (Chamley, 1987). Les limites du coefficient d'asymétrie sont :

- $As < 1$, le classement maximum s'effectue vers les éléments grossiers. Les grains sont mieux triés (dépôts torrentiels) ;
- $As = 1$, le mode de la courbe de fréquence coïncide avec le diamètre moyen des grains, ce qui correspond aux sédiments bien triés ;
- $As > 1$, le classement maximum s'effectue vers les éléments fins, ils représentent une meilleure sélection et correspondent aux dépôts de fond de bassin, correspondant aux grains très bien triés.

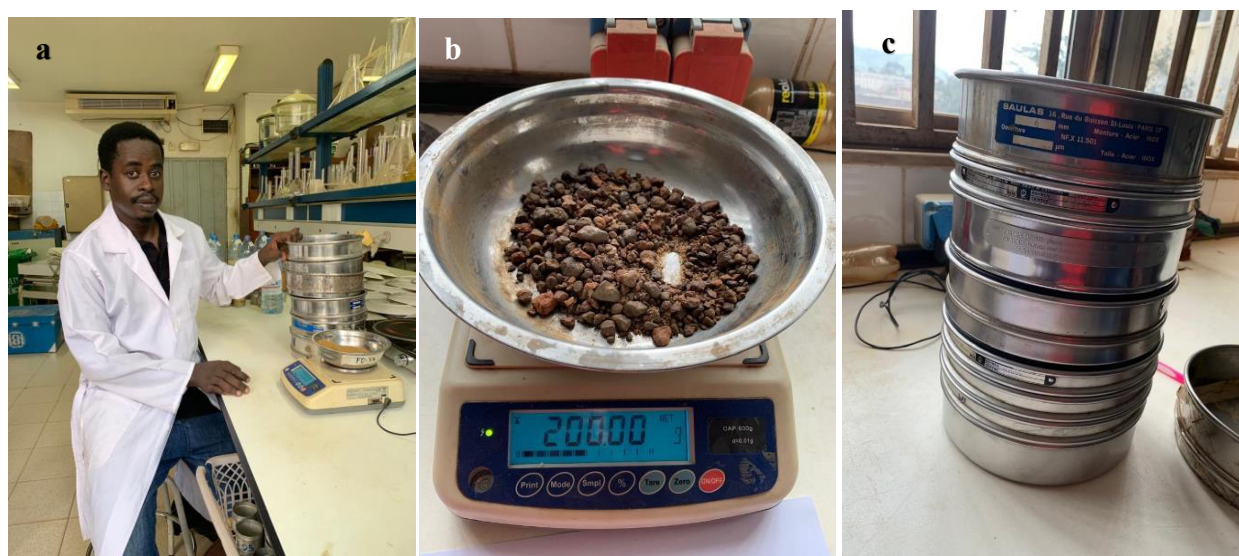


Figure 14 : Matériels de laboratoire a) vue globale du matériel, b) balance numérique et c) colonne de tamis.

II.2.2.2.2. Minéraux lourds

Les minéraux lourds peuvent être définis comme les minéraux dont la densité est supérieure à 2,9 (densité du bromoforme). L'étude des minéraux lourds permet non seulement, d'identifier les différents types minéralogiques présents dans le milieu de dépôt, mais aussi de remonter jusqu'à leur province distributrice. Les minéraux lourds contenus dans les concentrés alluvionnaires sont extraits par séparation densimétrique à l'aide du bromoforme. Les techniques d'extraction, de montage sur lames minces et d'exploitation des résultats sont préconisées et suit le protocole ci-dessous :

- la préparation de l'échantillon

Elle est identique à celle utilisée dans le cadre de la granulométrie et une fraction seulement a été retenue. Il s'agit de la fraction 0,125 mm.

- extraction des minéraux lourds

Pour extraire les minéraux lourds des alluvions, on procède de la manière suivante : le robinet étant gardé fermé, on remplit l'ampoule à décanter au $\frac{3}{4}$ avec du bromoforme, on y verse ensuite les fractions granulométriques de sable issue du tamisage 0,125 mm. À l'aide d'un agitateur en verre, on tourne le liquide et son contenu. Cette opération est répétée jusqu'à ce que la séparation soit totale. Après un temps de repos, on ouvre le robinet afin de recueillir les minéraux lourds tombés au fond ceci à l'aide d'un entonnoir muni d'un papier filtre ; l'erlenmeyer placé en dessous permet de recueillir le bromoforme. La technique de montage des minéraux lourds sur lame de frottis est celle préconisée par Parfenoff (1970).

- lavage à l'acide chlorhydrique

Les minéraux extraits sont ensuite lavés avec l'acide chlorhydrique dilué à 10 % afin de les débarrasser de la fine pellicule d'oxyde qui pourrait les recouvrir.

- montage des minéraux lourds entre lames et lamelles

Les lames sont préalablement chauffées sur une plaque chauffante, puis imprégnées de baume de Canada. Dès que le baume prend la coloration jaune, on dispose d'une quantité de minéraux lourds sur la lame porte-objet à l'aide d'un pinceau. Cette dernière est ensuite recouverte par une lamelle. Après refroidissement, le concentré de minéraux lourds obtenu est trempé dans un bain d'alcool afin d'éliminer le baume débordant de la lame. Ainsi, quatre (04) lames minces de minéraux lourds des sédiments sont confectionnées. Il s'agit des échantillons BIB-02, BIB-04, BIB-05 et BIB-06. Les observations de ces lames minces ont été faite au microscope électronique de marque **leitz wetzlar HM-POL** au Laboratoire des Formations Superficielles et Applications de l'Université de Yaoundé I.

II.2.2.2.3. Analyse morphoscopique

La morphoscopie est l'étude de l'aspect de surface des grains de quartz (Cailleux, 1942). Elle permet de déterminer les différents modes d'usures, l'agent de transport, et la dynamique sédimentaire.

Mode opératoire

La morphoscopie des grains a été faite sur cinq (5) échantillons (BIB-01, BIB-03, BIB-04, BIB-06 et BIB-08). Les sédiments ont été préalablement lavées à l'eau, séchés à l'air libre pour éliminer les particules fines ; ils ont été ensuite lavés à l'aide de l'acide chlorhydrique dilué à 10% et chauffés à une température de 60°C pendant 15 minutes afin d'éliminer la pellicule d'oxyde de fer recouvrant les grains, ils ont été à nouveaux rincés à l'eau puis séchés. Au terme de ce travail, trois (3) fractions sont retenues :

- Une fraction très grossière (2 mm - 1 mm) ;

- Une fraction moyenne (0,5 mm - 0,25 mm) ;
- Une fraction fine (0,45 – 0,25).

Par la suite, 50 grains sont choisis de manière aléatoire puis séparés à la loupe binoculaire de marque Aus JENA TECHNIVAL 2, en fonction de leur forme tel que proposé par Cailleux (1942).

Les résultats de comptage des grains de quartz et les minéraux ferromagnésiens sont exprimés en pourcentage et ont servi à la réalisation des diagrammes surfacés. L'estimation des formes et la sphéricité des grains de quartz et les minéraux ferromagnésien seront présentées selon l'analyse comparative présentée par Pettijohn *et al.* (1987).

II.2.2.3. Analyses géochimiques

Les analyses géochimiques ont été effectuées au laboratoire ALS *Geochemistry* à Vancouver (Canada). Il s'agit de quatre (4) échantillons analysés par la méthode ME-XRF24, qui est la spectrométrie de fluorescence X et qui se fait par la fusion de borate de lithium (WEI-GRA13b) et six (6) échantillons ont été analysés par la méthode ME-MS19 qui se fait par lixiviation au sulfate d'ammonium (GEO-AS04) et l'ICP-MS.

Eléments majeurs

Après broyage, les concentrations en éléments majeurs ont été déterminées par fluorescence de rayons X. Les poudres ont été calcinées, ensuite mélangées à du tétra borate de lithium avant d'être analysées au spectromètre de rayons X. Les échantillons ont fait l'objet d'une perte au feu. Pour la détermination de la perte au feu, les poudres ont d'abord été placées à l'étuve à 105°C sous nitrogène pour la détermination de l'eau adsorbée, refroidies et pesées, ensuite au four à 1000°C sous oxygène pour la détermination de l'eau de constitution.

Un échantillon préparé (0,66 g) est fusionné avec un flux 12:22 tétraborate de lithium - métaborate de lithium, puis coulé dans un moule en platine. Le disque qui en résulte est ensuite analysé par spectrométrie de fluorescence X (XRF).

Eléments traces et terres rares

Les analyses chimiques des éléments traces et terres rares ont été effectuées par la méthode ME-MS19 pour un total de six (06) échantillons des fractions argileuses contenues dans les sédiments alluvionnaires de la zone d'étude. Cette méthode offre des limites de détection basses et permet une bonne précision dans l'exploration des terres rares dans les

argiles, les sols ou les sédiments. La méthode ME-MS19 utilise un réactif qui peut extraire des parties de terres rares des argiles dans des conditions spécifiques.

Cette méthode couplée, analyse des terres rares de faible concentration par lixiviation au sulfate d'ammonium et ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry*). La décomposition de l'échantillon s'est fait par lixiviation au sulfate d'ammonium (GEO-AS04) avec les méthodes d'analyse : spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif (ICP-AES) et spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS). Cette méthode libère et détecte efficacement les terres rares absorbées sur les surfaces d'argiles jusqu'à des limites de détection supérieures pour les éléments traces et terres rares, améliorant ainsi la précision de l'exploration. La lixiviation est un processus d'extraction d'une substance à partir d'un matériau solide dissous dans un liquide. Cela signifie que toutes les espèces ne peuvent pas être extraites ou dissoutes, en raison de la matrice minérale.

30 g de poudres de chaque échantillon ont été lixiviés par une solution de sulfate d'ammonium 0,5 M et agité par culbutage. Après lixiviation, le mélange est centrifugé puis une aliquote de la solution est prélevée et diluée avec de l'acide nitrique à 2 %. Le processus de digestion est optimisé pour améliorer la récupération des éléments des terres rares. La solution obtenue est analysée par une combinaison d'ICP-AES et d'ICP-MS.

Conclusion

Les travaux du terrain comprennent des revues bibliographiques, la localisation, la collecte des échantillons de roches et de sédiments dans le bassin versant de la Djouel. Les travaux de laboratoire ont permis de conditionner les échantillons et de réaliser les analyses pétrographiques, sédimentologiques et géochimiques. Les résultats obtenus au cours de ces travaux seront présentés au chapitre suivant.



CHAPITRE III : RESULTATS

Introduction

Dans ce chapitre il est question de présenter les différents résultats d'analyses effectuées en laboratoire. Il s'agit des analyses pétrographiques, sédimentologiques et géochimiques des alluvions récoltées dans les sites d'étude.

III.1. PÉTROGRAPHIE

Les analyses pétrographiques ont été effectuées sur deux (2) types de roches, à savoir : les micaschistes à grenat et à biotite et les gneiss à micas et à grenat.

III.1.1. Micaschiste à grenat et à biotite

À l'affleurement, La roche se présente en dôme au sommet de la colline. Elle présente une structure schisteuse avec une surface brillante et de teinte gris-foncé à brun. Cette roche montre une superposition de lits micacés, constitués essentiellement de micas (biotite et muscovite), de quartz et de grenat. Au microscope, la roche présente une texture lépidogranoblastique hétérogranulaire et elle est constituée de biotite, de muscovite, de quartz, de feldspaths alcalins, de grenat et des minéraux opaques (Figure 15).

Grenat (15 – 25 %) est observé soit sous forme de cristaux globuleux dispersés dans la roche, soit sous forme de porphyroblastes. Les cristaux présentent parfois des golfes de corrosion dans la biotite. Certains porphyroblastes de grenat présentent des couronnes de biotite, enveloppées par la schistosité externe. Le grenat est aussi associé au plagioclase, quartz et amphibole (Figure 15 A et B).

Quartz (25 %) forme des individus polycristallins, sub-automorphes. Les microcristaux se rencontrent préférentiellement autour des grands cristaux de feldspath et de plagioclase (Figure 15 B, D). Il s'observe également le long des microfractures des cristaux de feldspath potassique.

Muscovite (~ 20 %) est représentée sous forme de lamelles à relief net et à clivage parallèle. Elle mesure environ 0,2 mm sur les petits axes et de 0,2 à 0,4 mm sur les grands axes. La muscovite est généralement associée au quartz, aux feldspaths alcalins, au plagioclase et à la biotite (figure 15 E). Elle est plus large que la biotite, teintée de jaune, vert et rouge, et elle est parfois en inclusion dans le plagioclase (Figure 15 E).

Biotite (~ 20 %) se présente d'une part sous forme de baguettes allongées et d'autre part sous forme des minéraux subautomorphes. Certaines baguettes de biotite se déstabilisent en chlorite. Elle est en association avec la chlorite, le grenat et la muscovite (Figure 15 D).

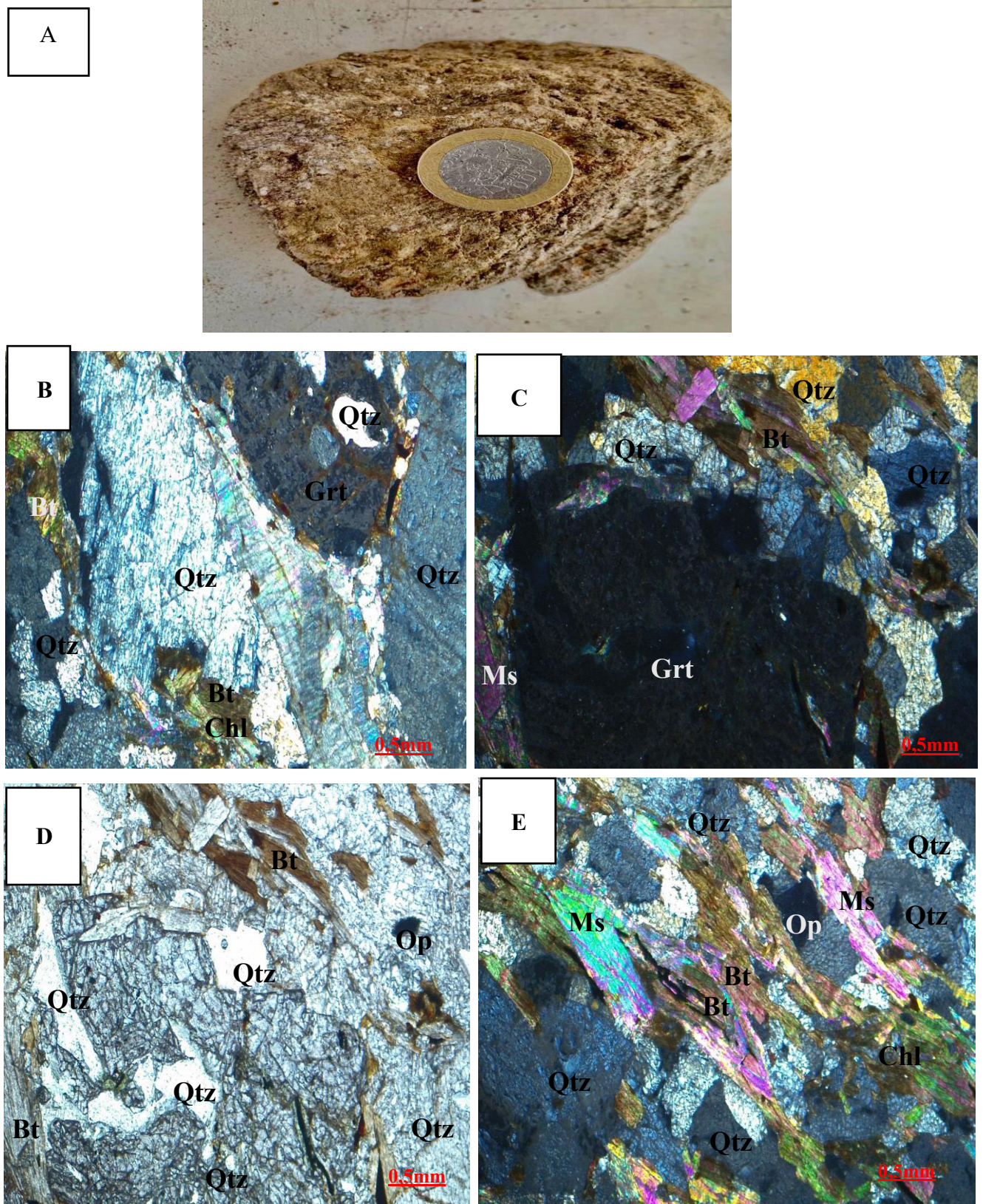


Figure 15 : Micaschiste à grenat et à biotite ; **A)** Échantillon de roche ; **B)** association du quartz avec la biotite et le grenat et inclusion du quartz dans le grenat ; **C)** transformation du grenat en minéraux opaques ; **D)** texture lépidogranoblastique hétérogranulaire. **E)** orientation de la muscovite et altération de la biotite en chlorite.

Plagioclase (10 – 15 %) se présente sous forme de cristaux subautomorphes en association fréquente avec le quartz. Les plagioclases renferment des inclusions de muscovite et sont en association fréquentes avec le quartz, et la biotite.

Chlorite (~ 10 %) elle provient de l'altération de la biotite et elle est présente sous forme de mylonites. Elle est en association avec la biotite et la muscovite (Figure 15 E).

Minéraux opaques (~ 2 %) sont accessoirement représentés dans la roche. Ils sont sous forme xénomorphe et parfois en inclusion dans d'autres minéraux (Figure 15 D et E).

III.1.2. Gneiss à micas et à grenat

Le gneiss affleure sur le lit du cours d'eau Djouel. Il est identifiable à l'œil nu grâce à sa couleur grise marquée par l'alternance de lits clairs quartzo-feldspathiques et de lits sombres ferromagnésiens. À l'échelle macroscopique, les minéraux observables sont : le quartz, les feldspaths, la muscovite et la biotite (Figure 16 A). Au microscope, la roche présente une texture granoblastique hétérogranulaire et est constituée de quartz, biotite, grenat, feldspaths potassiques, muscovite et de minéraux opaques (Figure 16).

Quartz (~ 50 %) il est présent sous forme subautomorphe à xénomorphe ; il contient des inclusions des minéraux opaques et est en association avec la biotite, le pyroxène, le plagioclase et présente également des inclusions de la biotite (Figure 16 D).

Muscovite : elle représente (~ 25 %) de minéral de la roche et elle est associée au quartz et au feldspath potassique (Figure 16 C).

Grenat (~ 25 %), il se présente sous la forme de porphyroblastes xénomorphes de dimensions variables (0,8 mm à 2 mm) avec des craquelures à fort relief, renfermant des inclusions de quartz (Figure 16 E).

Biotite (~ 25 %) se présente soit sous forme minéraux subautomorphes à xénomorphes. Dans certaines sections de la lame, elle est en inclusion dans le quartz et dans d'autre, elle est en association avec le pyroxène et le quartz (Figure 16 B et D).

Plagioclase (10 – 15 %) se présente sous forme de porphyroblastes biseautés, en association fréquente avec le pyroxène et les minéraux opaques. Les plagioclases renferment des inclusions de muscovite et sont en association fréquente avec le quartz et la biotite (Figure 16 C).

Feldspaths alcalins (~ 15 %) se représentent en cristaux subautomorphes à xénomorphes ; certains présentent des inclusions de quartz (Figure 16 E).

Minéraux opaques (~ 2 %) se présentent sous forme de cristaux subautomorphes à xénomorphes.

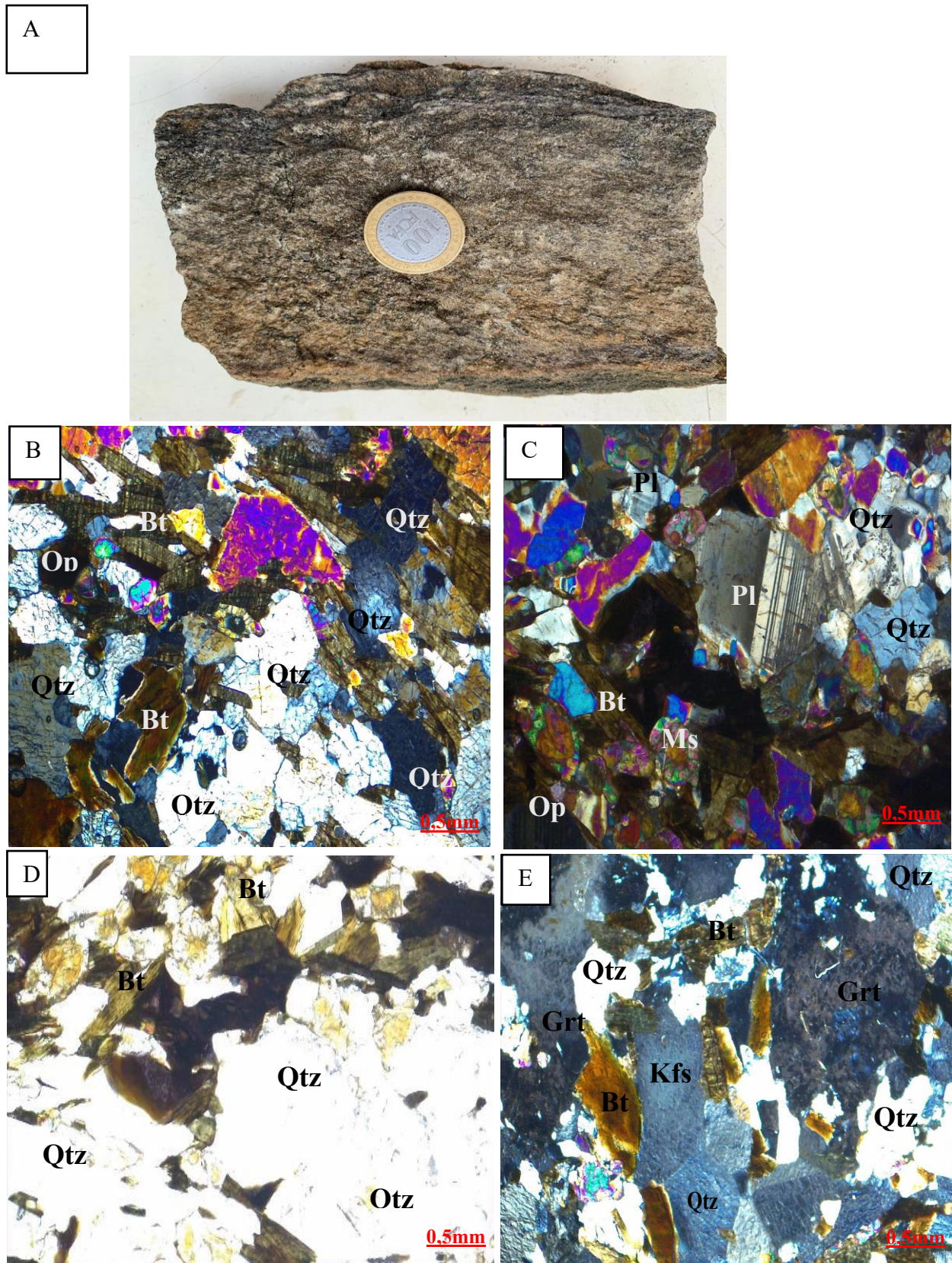


Figure 16 : Gneiss à micas et à grenat ; A) Échantillon de roche ; B) Microphotographie montrant une texture granoblastique hétérogranulaire ; C) Microphotographie montrant les associations minérales dans une orientation préférentielle ; D et E) inclusion de biotite dans le quartz.

Conclusion

L'étude pétrographique des formations géologiques de la zone d'étude a permis de mettre en évidence deux (2) types pétrographiques distincts appartenant tous à l'ensemble métamorphique. Il s'agit du micaschiste à grenat et à biotite et des gneiss à micas et à grenat. Ces roches sont essentiellement constituées de biotite, de muscovite, de pyroxène, de l'amphibole, de feldspaths alcalins, de quartz et de minéraux opaques.

III.2. SEDIMENTOLOGIE

Cette partie du chapitre présente les résultats qui portent sur la caractérisation granulométrique, morphoscopique et des minéraux lourds des alluvions de la Djouel à Bibodi.

III.2.1. Granulométrie

L'analyse granulométrique a été effectuée sur huit (8) échantillons de sédiments du bassin versant de la Djouel et ses affluents (BIB-01 à BIB-08). Les données des analyses granulométriques des différents échantillons ont été traitées et récapitulées dans le tableau 5 en refus simple, refus cumulés, pourcentages simples et pourcentages cumulés. Les pourcentages de refus simples, cumulés et tamisât ont permis de construire diverses courbes granulométriques telles que les courbes cumulées et les histogrammes (Figure 18 et 19). Les courbes ainsi obtenues ont permis de calculer les différents paramètres granulométriques.

III.2.1.1. Courbes cumulatives

Les courbes semi-logarithmiques des échantillons sont tracées et les indices granulométriques ont été calculés pour déterminer la nature des sédiments, leurs classements et leurs origines. Ces courbes ont des formes paraboliques (en forme de S) plus ou moins étalées et régulières montrant des pentes assez fortes et fortes (Figure18). L'observation des courbes cumulées a aussi permis d'identifier les différents quartiles et de ressortir les indices granulométriques consignés dans le tableau VI.

- Echantillons BIB-01 et BIB-02

Ils présentent une courbe cumulative à pente forte. Les sables sont plus abondants que les graviers, le matériau est donc sablo-graveleux. Le coefficient d'asymétrie supérieur à 1 montre que le classement de ces matériaux constitutifs s'effectue vers les sédiments fins. Ils représentent une meilleure sélection et correspondent aux dépôts de fond de bassin, c'est à dire

aux grains très bien triés. Le quartile de déviation est loin de zéro, ce qui indique que les sédiments sont hétérométriques.

- **Echantillons BIB-03**

La courbe cumulative montre une pente assez forte, le sédiment est graveleux. Le coefficient d'asymétrie est inférieur à 1, montrant que le classement maximum s'effectue vers les éléments grossiers. Les grains sont mieux triés (dépôts torrentiels) et les particules sont hétérométriques.

- **Echantillon BIB-04**

Il présente une courbe cumulative à pente assez forte, le matériau est sableux. Le coefficient d'asymétrie est supérieur à 1 montre que le classement des éléments des particules évolue vers les éléments fins. Ils représentent une meilleure sélection et correspondent aux dépôts de fond de bassin, c'est à dire aux grains très bien triés. Le quartile de déviation est éloigné de zéro, les sédiments sont hétérométriques.

- **Echantillons BIB-05 et BIB-08**

Ils montrent une courbe cumulative assez forte, le sable est plus abondant que les graviers. Le quartile de déviation est loin de zéro, ce qui montre que les sédiments sont hétérométriques. Le coefficient d'asymétrie A_s est inférieur à 1 : le classement des matériaux évolue vers les éléments grossiers et les grains sont mieux triés.

- **Echantillon1 BIB-06**

Cet échantillon présente une courbe cumulative à pente faible, le matériau est graveleux. Le coefficient d'asymétrie est inférieur à 1, le classement maximum s'effectue vers les éléments grossiers. Les grains sont mieux triés. Le quartile de déviation est de 0,85, ce indique que les grains hétérométriques.

- **Echantillon BIB-07**

Le quartile de déviation est égal à 1, ce qui confirme l'hétérométrie des sédiments. La courbe cumulative à une forte pente ce qui montre que le sable est plus abondant que les graviers. Le coefficient d'asymétrie est égal à 1 ($A_s = 1$), le mode de la courbe de fréquence coïncide avec le diamètre moyen des grains, ce qui correspond aux sédiments bien triés.

III.2.1.2. Histogrammes

L'histogramme permet de déterminer le mode qui est le plus grand pourcentage de grains de la classe granulométrique, et la médiane est la taille moyenne des grains (Figure 16).

- Echantillons BIB-01 et BIB-02

Les échantillons montrent des histogrammes bimodaux : de modes respectifs 4 mm pour les premiers et 0,5 à 0,25 mm pour les seconds. La taille des particules dominantes est de 4 à 0,125 mm de diamètre. Il s'agit des graviers, sables grossiers, sables moyens et des sables fins.

- Echantillons BIB-03

Il présente l'histogramme bimodal, montrant deux principaux modes à 4 mm et 0.25 mm pour le second. Le diamètre des particules dominantes est situé entre 4 – 0,25 mm. Il est constitué de graviers, sables grossiers, sables moyens et de sables fins.

- Echantillons BIB-04

L'échantillon présente un histogramme unimodal, dont le mode principal est 0,25 mm. Le diamètre des particules dominantes est compris dans l'intervalle 4 – 0,125 mm. Il s'agit de graviers, sables très grossiers, de sables moyens et de sables fins.

- Echantillons BIB-05

Cet échantillon présente un histogramme bimodal, montrant deux principaux modes à 0,25 mm et 0,125 mm. Le diamètre de particules dominantes est compris dans l'intervalle 0,5 – 0,063 mm. Il s'agit de sables moyens, sables fins et de sables très fins.

- Echantillons BIB-06

Il présente un histogramme unimodale dont le mode principal est 4 mm. Les fractions dominantes sont comprises entre 4 mm et 0,125 mm. Il est constitué de graviers, sables grossiers, sables moyens et de sables fins.

- Echantillons BIB-07

L'histogramme de cet échantillon présente une allure unimodale dont le mode est 0,5 mm. Les particules dominantes sont comprises entre 4 mm – 0,125 mm. Il s'agit de graviers, sables grossiers, sables moyens et de sables fins.

- Echantillons BIB-08

Il présente un histogramme unimodal, de mode 0,25 mm. Le diamètre de particules est compris entre 1 à 0,125 mm. Il est constitué de sables grossiers, sables moyens et sables moyens et fins.

Tableau V: Fractions granulométriques des échantillons en pourcentage de refus cumulés et tamisât cumulés.

Echantillons	Mailles (mm)	10	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	< 0,063
BIB-01	Masse de refus	0	68,84	23,85	17,97	32,13	38,19	17,36	1,46	0,2
	refus cumulé	0	68,84	92,69	110,66	142,79	180,98	198,34	199,8	200
	% refus cumulé	0	34,42	46,345	55,33	71,395	90,49	99,17	99,9	100
	%tamisât cumulé	100	65,58	53,655	44,67	28,605	9,51	0,83	0,1	0
BIB-02	Masse de refus	0	48,54	26,63	26,23	39,35	25,26	27,15	6,15	0,69
	refus cumulé	0	48,54	75,17	101,4	140,75	166,01	193,16	199,31	200
	% refus cumulé	0	24,27	37,585	50,7	70,375	83,005	96,58	99,655	100
	%tamisât cumulé	100	75,73	62,415	49,3	29,625	16,995	3,42	0,345	0
BIB-03	Masse de refus	0	85,23	20,14	9,38	25,5	44,41	14,68	0,55	0,11
	refus cumulé	0	85,23	105,37	114,75	140,25	184,66	199,34	199,89	200
	% refus cumulé	0	42,615	52,685	57,375	70,125	92,33	99,67	99,945	100
	%tamisât cumulé	100	57,385	47,315	42,625	29,875	7,67	0,33	0,055	0
BIB-04	Masse de refus	0	23,74	23,7	15,58	39,4	74,77	21,95	0,76	0,1
	refus cumulé	0	23,74	47,44	63,02	102,42	177,19	199,14	199,9	200
	% refus cumulé	0	11,87	23,72	31,51	51,21	88,595	99,57	99,95	100
	%tamisât cumulé	100	88,13	76,28	68,49	48,79	11,405	0,43	0,05	0
BIB-05	Masse de refus	0	1,77	1,32	1,53	15,29	88,85	80,42	10,56	0,26
	refus cumulé	0	1,77	3,09	4,62	19,91	108,76	189,18	199,74	200
	% refus cumulé	0	0,885	1,545	2,31	9,955	54,38	94,59	99,87	100
	%tamisât cumulé	100	99,115	98,455	97,69	90,045	45,62	5,41	0,13	0
BIB-06	Masse de refus	0	75,67	63,24	21,7	18,16	14,6	6,2	0,42	0,01
	refus cumulé	0	75,67	138,91	160,61	178,77	193,37	199,57	199,99	200
	% refus cumulé	0	37,835	69,455	80,305	89,385	96,685	99,785	99,995	100
	%tamisât cumulé	100	62,165	30,545	19,695	10,615	3,315	0,215	0,005	0
BIB-07	Masse de refus	0	7	27,53	44,08	58,1	40,19	21,03	1,9	0,17
	refus cumulé	0	7	34,53	78,61	136,71	176,9	197,93	199,83	200
	% refus cumulé	0	3,5	17,265	39,305	68,355	88,45	98,965	99,915	100
	%tamisât cumulé	100	96,5	82,735	60,695	31,645	11,55	1,035	0,085	0
BIB-08	Masse de refus	0	0,16	2,47	14,3	64,12	73,98	41,11	3,57	0,29
	refus cumulé	0	0,16	2,63	16,93	81,05	155,03	196,14	199,71	200
	% refus cumulé	0	0,08	1,315	8,465	40,525	77,515	98,07	99,855	100
	%tamisât cumulé	100	99,92	98,685	91,535	59,475	22,485	1,93	0,145	0

III.2.1.3. Indices granulométriques

Pour identifier les différents types granulométriques rencontrés, l'échelle de Wentworth et Ndjeng (1978) a été utilisée. Elle présente trois grands groupes :

- les rudites qui regroupent les blocs, les galets, graviers et les granules dont le diamètre est supérieur à 2 mm ;
- les arénites dont la taille des grains est comprise entre 2 mm et 0,0625 mm qui présente : les sables très grossiers 2 à 1 mm ; les sables grossiers 1 à 0,5 mm ; les sables moyens 0,5 à 0,25 mm ; les sables fins 0,25 à 0,125 mm ; et les sables très fins 0,125 à 0,0625 mm ;
- les lutites qui regroupent les argiles et les limons dont le diamètre est compris entre 0,0625 et 0,0039 mm. Le traçage des courbes cumulatives semi-logarithmiques des différents échantillons et le calcul des différents indices granulométriques permettent de connaître la nature des sédiments, leurs classements et leurs hydrodynamismes. Ces courbes ont des formes de S pour tous les échantillons (Figure 17). L'observation des courbes cumulées (Figure 18) a aussi permis d'identifier les différents quartiles et de ressortir les indices granulométriques consignés dans le tableau VI.

Tableau VI : Indices sédimentométriques et les paramètres granulométriques des sédiments.

	Quartile: Q ₁ (25)	Quartile: Q ₂ (50)	Quartile: Q ₃ (75)	Sorting Index: (S ₀)	Le coefficient d'asymétrie: (A _s)	Quartile de déviaton:(Qdφ)	La moyenne
ECHANTILLONS	Q ₁ (mm)	Q ₂ (mm)	Q ₃ (mm)	S ₀ = (Q ₃ /Q ₁) ^{1/2}	A _s =(Q ₁ ×Q ₃)/Q ₂	Qdφ=(Q ₁ – Q ₃) /2	Mz : (mm)
BIB - 01	0,45	1,5	5,5	3,50	1,10	1,81	2,48
BIB - 02	0,4	1	4	3,16	1,60	1,66	1,80
BIB - 03	0,45	3	6	3,65	0,30	1,87	3,15
BIB - 04	0,33	0,45	1,8	2,34	2,93	1,22	0,86
BIB - 05	0,18	0,28	0,39	1,47	0,90	0,56	0,28
BIB - 06	1,6	3	5,2	1,80	0,92	0,85	3,27
BIB - 07	0,4	0,8	1,6	2,00	1,00	1,00	0,93
BIB - 08	0,28	0,3	0,7	1,58	2,18	0,66	0,43

➤ sorting index: (S₀)

L'indice de tri des échantillons analysés dans le tableau VI montre que les matériaux sont des sédiments mal triés ou très mal triés. Avec une prédominance d'échantillons mal triés ; ce mauvais tri général peut être confirmé par le fait que la plupart des échantillons présentent des

fractions insignifiantes de grains plus fins, ou les particules grossières sont dominantes. On suppose que les sédiments ont été déposés par des courants à haute énergie (Wan *et al.*, 2015).

➤ **Coefficient d'asymétrie (As)**

Le coefficient d'asymétrie (As) analysé dans le tableau VI montre que la valeur d'As est supérieure à 1, le classement de ces matériaux constitutifs s'effectue vers les sédiments fins, ils représentent une meilleure sélection et correspondent aux dépôts de fond de bassin, correspondant aux grains très bien triés (BIB-01, BIB-02, BIB-04 et BIB-08). Le coefficient d'asymétrie est inférieur à 1, le classement maximum s'effectue vers les éléments grossiers. Les grains sont mieux triés (dépôts torrentiels) (BIB-03 et BIB-06). Le coefficient d'asymétrie est égal à 1, le mode de la courbe de fréquence coïncide avec le diamètre moyen des grains, ce qui correspond aux sédiments bien triés (BIB-07).

➤ **Quartile de déviation (Qdφ)**

C'est l'indice qui permet de faire le classement et d'apprécier les actions de tri au cours du transport et du dépôt, pour tous les échantillons, les valeurs du Qdφ s'éloignent de zéro, ces sédiments sont donc mal triés ou hétérométriques.

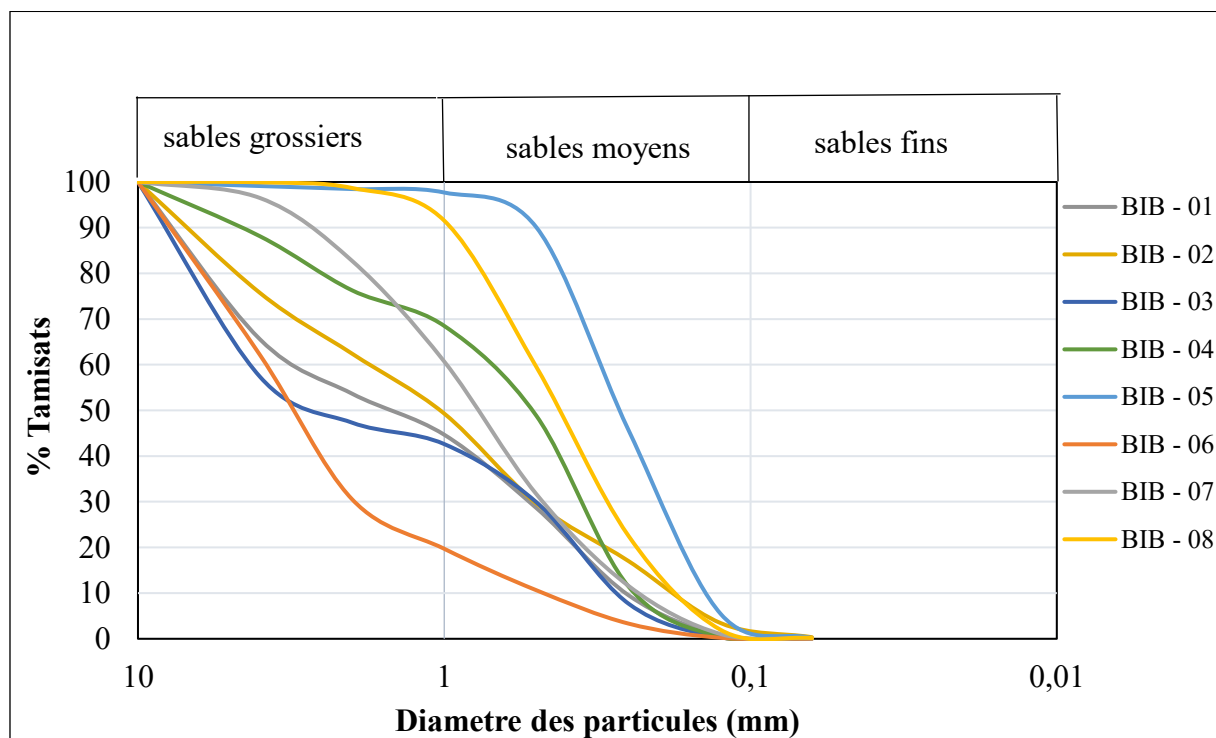


Figure 17 : Diagramme synthétique de la granulométrie des sédiments alluvionnaires de la Djouel.

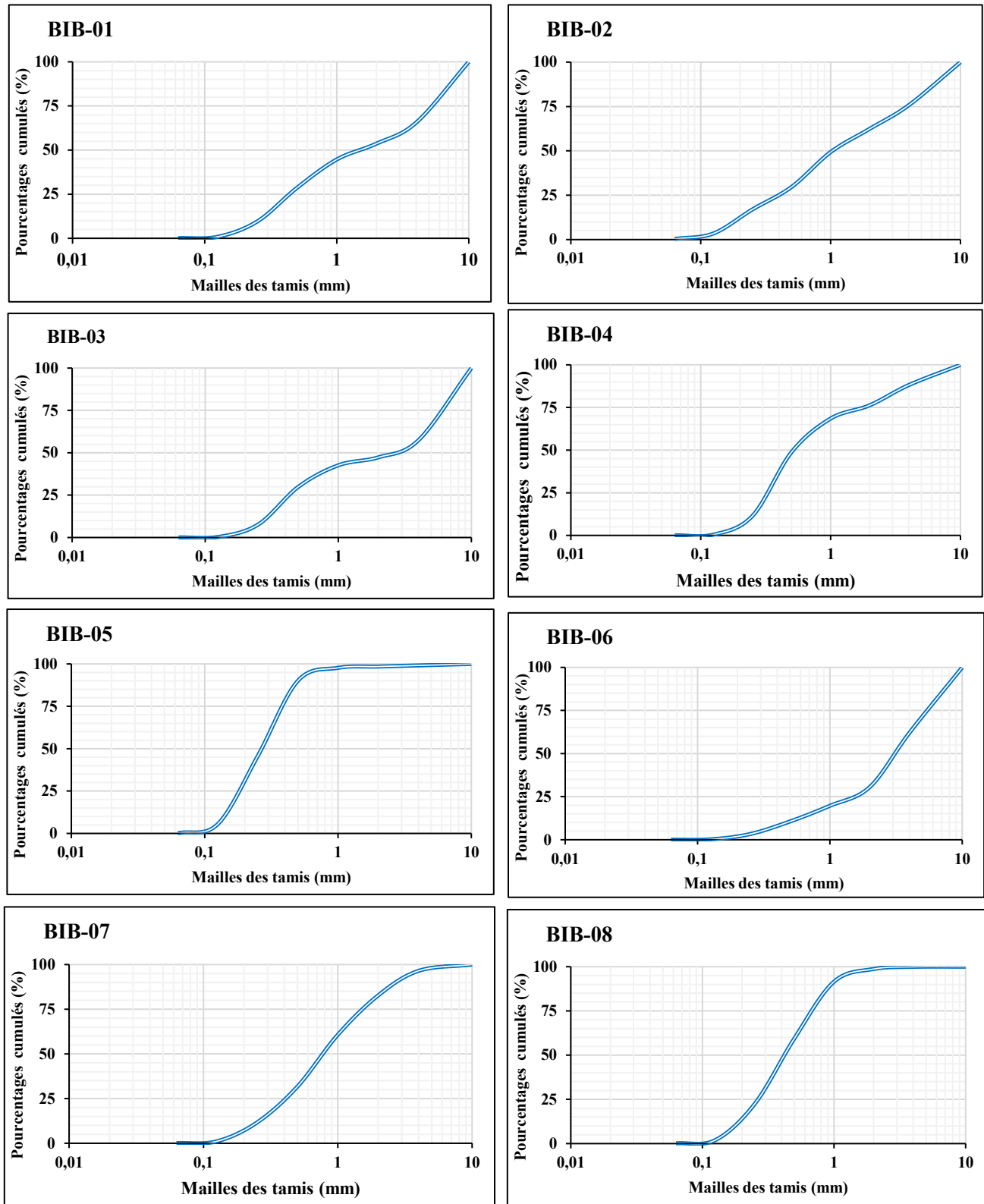


Figure 18 : Courbes cumulées des échantillons.

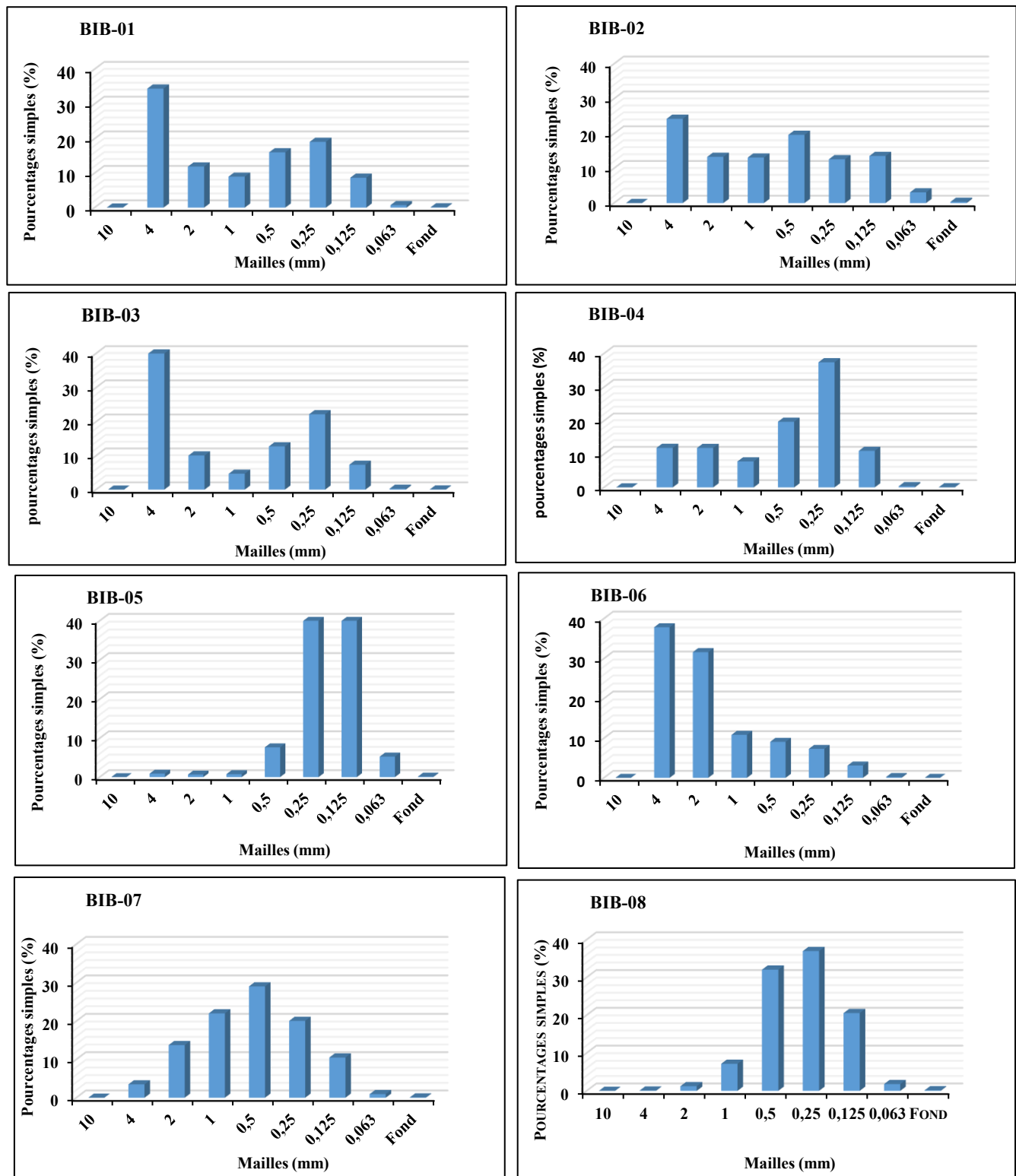


Figure 19 : Histogrammes des échantillons.

III.2.2. Morphoscopie

L'analyse morphoscopique des sédiments a permis de mettre en évidence quatre aspects de surface des grains à savoir : les grains anguleux, les grains sub-anguleux, les grains arrondis et les grains sub-arrondis.

Les données de cette étude ont été réalisées sur cinq (05) échantillons BIB-01, BIB-03, BIB-04, BIB-06 et BIB-08. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le Tableau VII et représentés sur les diagrammes surfacés de la Figure 20.

III.2.2.1. Analyse des diagrammes surfacés des grains

Les analyses des diagrammes surfacés indiquent les différentes proportions des grains de sable observés (Tableau VII) et (Figure 20 et 21).

- **Les grains anguleux**

Avec un pourcentage de 59,14 % dans la fraction totale des échantillons, Les grains anguleux sont présents dans tous les échantillons de sédiments de la Djouel.

- **Les grains sub-anguleux**

Ils viennent juste après les grains anguleux avec un pourcentage de 28,76 %. Sauf dans la fraction 0,45 - 0,25 mm de l'échantillon BIB-08, les grains de quartz sub-anguleux sont les moins abondants de tous les échantillons.

- **Les grains arrondis**

Ils sont en faible pourcentage dans la fraction totale des grains de quartz soit 6,18 %. Les grains de quartz arrondis sont complètement absents dans les fractions 0,45–0,25 mm de tous les échantillons. Ils sont aussi absents dans la fraction 1-0,45 mm de l'échantillon BIB-04.

- **Les grains sub-arrondis**

Ils sont également en faible pourcentage après les grains sub-arrondis et ne représentent que 5,91 % des grains de quartz dans la fraction totale. Ils sont absents dans les fractions 0,45–0,25 mm de tous les échantillons de même que dans la fraction 1-0,45 mm de l'échantillon BIB-04.

Tableau VII : Inventaire des aspects de surfaces des grains observés

	Formes et aspects de grains					
Echantillons	Mailles (mm)	Anguleux	Sub-anguleux	Arrondis	Sub- arrondis	Total de grains
BIB-01	0,45 - 0,25mm	39	11	0	0	50
	1 - 0,45mm	22	22	4	2	50
	2 - 1mm	22	13	7	8	50
BIB-03	0,45 - 0,25mm	39	11	0	0	50
	1 - 0,45mm	18	23	2	7	50
	2 - 1mm	17	21	9	3	50
BIB-04	0,45 - 0,25mm	40	10	0	0	50
	1 - 0,45mm	40	10	0	0	50
	2 - 1mm	29	9	7	5	50
BIB-06	0,45 - 0,25mm	32	18	0	0	50
	1 - 0,45mm	22	17	1	4	44
	2 - 1mm	26	12	5	7	50
BIB-08	0,45 - 0,25mm	44	6	0	0	50
	1 - 0,45mm	26	20	2	2	50
	2 - 1mm	24	11	9	6	50
Total		440	214	46	44	744
Pourcentage (%)		59,14	28,76	6,18	5,91	100

III.2.2.2. Formes des grains

Les formes des grains sont observées à partir d'une loupe binoculaire au grossissement 50 X et 160 X et sont représentées sur la Figure 21. L'observation des grains au travers de la loupe binoculaire a permis de répertorié au total 744 grains de quartz. Les grains de forme anguleuse et sub-anguleuse sont les plus représentés avec de pourcentages respectifs 59,14 % et 28,76 % pour l'ensemble des espèces minérales. Les grains de quartz représentent 6,18 % des grains arrondis, contrairement aux grains de formes sub-arrondis ayant un pourcentage de 5,91 % pour les grains de quartz (Tableau VII).

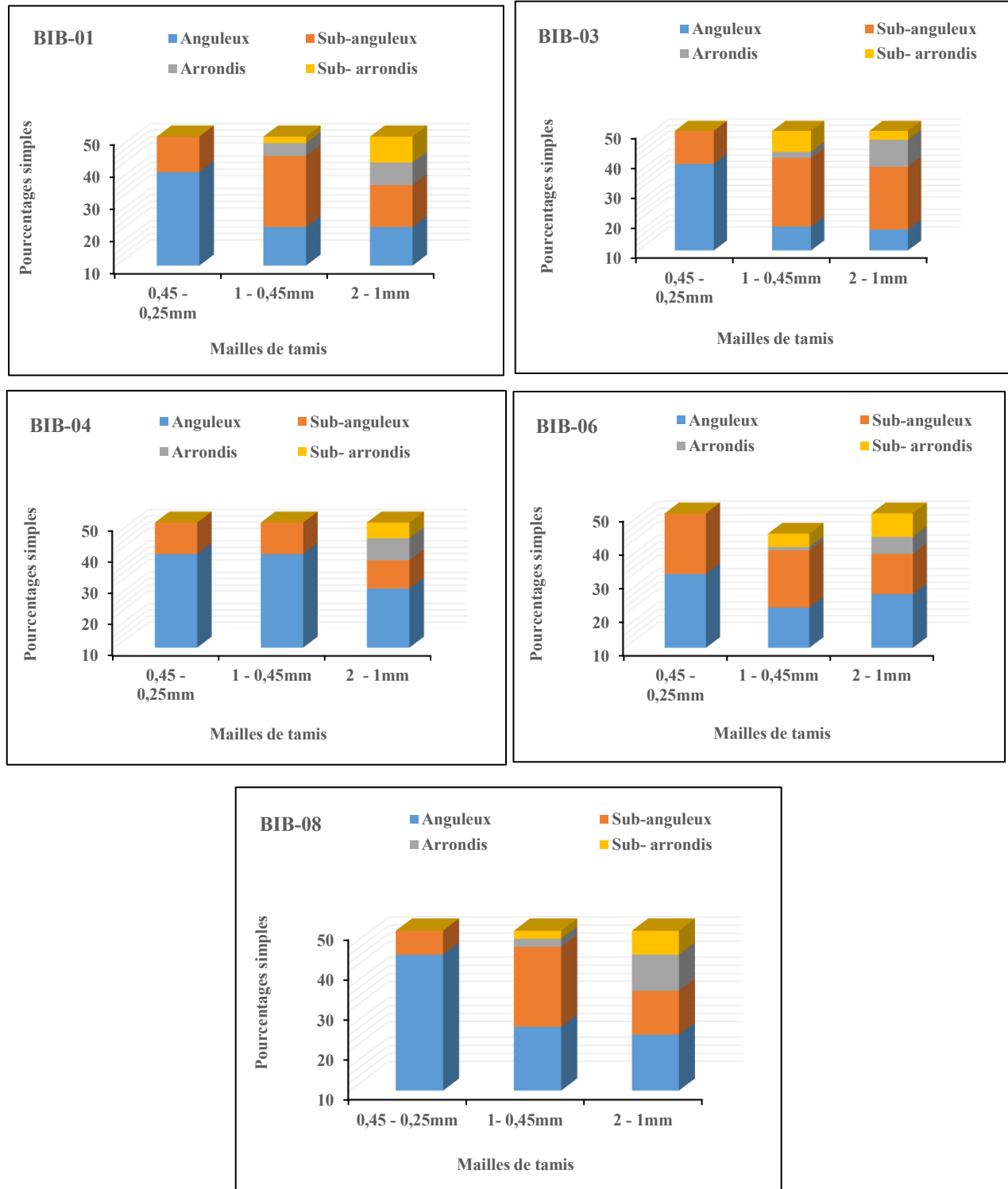


Figure 20 : Diagrammes surfacés des grains de quartz.

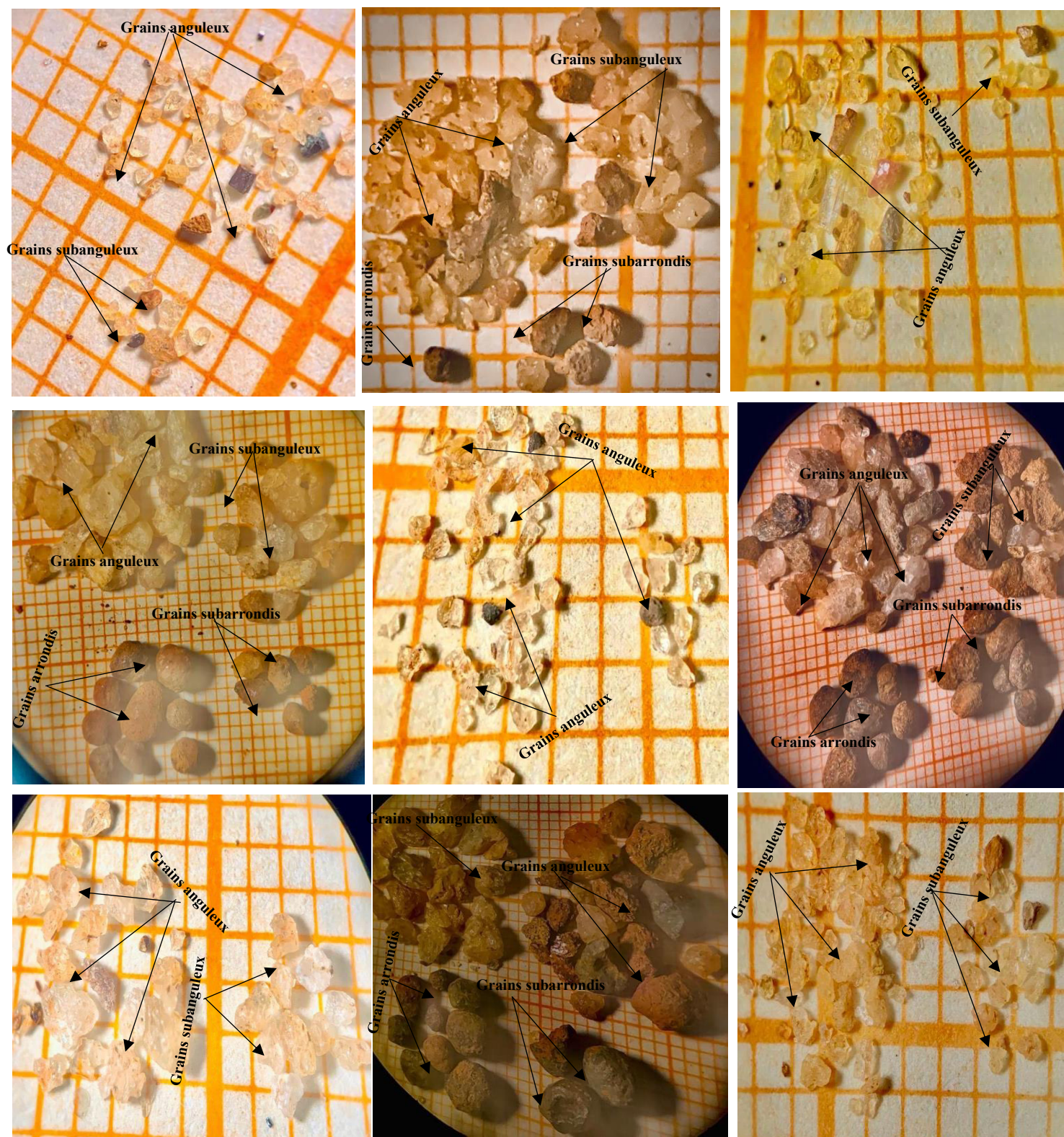


Figure 21 : Différentes formes et aspects de surface des grains de quartz observés à la loupe binoculaire au grossissement 50 X et 160 X.

III.2.3. Minéraux lourds

L'analyse des minéraux lourds a été faite par observation des lames minces au microscope optique. Quatre échantillons des alluvions (BIB-02, BIB-04, BIB-05, BIB-06) ont été sélectionnés pour cette analyse. Elle permet, ainsi à partir des minéraux caractéristiques de déduire la source distributrice des sédiments. Cette étude a permis de reconnaître les minéraux lourds tels que : le diopside, le rutile, l'anatase, le disthène, la chloritoïde, le zircon, la tourmaline, la zoïsite, la staurotide, la glauconie, l'augite, le grenat et les minéraux opaques (tableau VIII).

Tableau VIII : Distribution des minéraux lourds en pourcentage (%).

Minéraux	BIB-02	BIB-04	BIB-05	BIB-06
Anatase	3	6	4	4
Chloritoïde	12	9	5	13
Disthène	3	38	0	4
Rutile	10	0	10	6
Grenat	3	19	17	17
Tourmaline	2	3	2	13
Augite	2	0	0	0
Diopside	0	3	6	8
Zoïsite	0	3	2	0
Staurotide	0	3	6	0
Sillimanite	0	0	4	2
Zircon	0	0	5	0
Minéraux opaques	65	19	39	33
Total	100	100	100	100

III.2.3.1. Description des différentes espèces minérales

Les caractéristiques minéralogiques des minéraux lourds rencontrés (Figure 22) ont permis d'affiner leur description et leur spécificité :

- le disthène : se présente sous forme de prisme aplati usé avec des formes courbes. Ses formes ovoïdes sont de grandes dimensions. Il possède un clivage à 90° et une extinction droite. Il est absent dans l'échantillon BIB-05 et présent dans le reste des échantillons avec un pourcentage qui varie entre 3 % à 38 % ;
- chloritoïde : se rencontre en général en grains écaillés à contours arrondis, doués d'un relief assez accentué. Son pléochroïsme caractéristique, visible sur la plupart des grains est un des caractères les plus nets qui permettent d'en faire la discrimination. Il est rencontré dans tous les échantillons et oscille entre 5 % et 13 % ;

- diopside : se présente rarement en prisme plutôt en grains anguleux ou arrondi, vert plus ou moins foncé. On la rencontre que dans les échantillons BIB-04, BIB-05 et BIB-06 avec un pourcentage qui varie entre 3 % et 8 % ;
- l'anatase : se présente le plus souvent en tablette rectangulaires ou carrées, parfois biseautées. L'extinction des tablettes basales en lumière polarisée n'est pas toujours continue. Elle varie entre 3 % et 6 % dans les échantillons ;
- le zircon : se présente sous forme de fragments de prismes plus ou moins allongés aux arêtes légèrement émoussées, parfois zonés. Certains grains très usés sont ovoïdes. Ce minéral est caractérisé par de nombreuses inclusions. Elle existe en trace dans l'échantillon BIB-05 avec une proportion de 5 % ;
- la zoïsite : se présente en grains plus ou moins roulés ou en fragments de prismes courts, sans pointements. Elle est habituellement incolore. On la rencontre que dans les échantillons BIB-04 et BIB-05 avec un pourcentage qui varie entre 2 % et 3 % ;
- la staurotide : elle se présente sous forme de grains irréguliers ou aplatis avec des cannelures. Elle possède une zonation concentrique avec parfois des fragments de prismes aux extrémités en dents de scies. Des inclusions de quartz sont présentes dans ce minéral. Elle est présente en faible pourcentage (3 à 6 %) dans les échantillons BIB-04 et BIB-05 ;
- le grenat : ce minéral se présente sous la forme de grains sub-sphériques à sphériques. Il a parfois une texture grenue avec quelquefois des cristaux cassés, et sa couleur est brune. Il est présent avec une proportion considérable (3 à 19 %) dans tous les échantillons ;
- le rutile : c'est un cristal prismatique allongé généralement avec des contours très usés. Certains grains sont très arrondis et marqués par la présence d'inclusions aciculaires. Son relief est très fort. Il est absent dans l'échantillon BIB -04 et présent dans le reste des échantillons avec un pourcentage qui varie entre 6 % à 10 % ;
- l'augite : est habituellement de nuance verte ou brune. Elle est mauve, de nuance allant de mauve franc au gris mauve plus ou moins foncé. Elle est présente uniquement dans l'échantillon BIB-02 en faible proportion (2 %) ;
- la tourmaline : elle est fragmentée et de forme prismatique. Ses grains sont bien roulés et sa couleur est rose – clair. Elle a une macle polysynthétique. Il faut aussi noter la présence de nombreuses inclusions en grains de zircons ou en aiguilles de quartz ou de rutile. Elle est présente avec une proportion qui varie entre 2 % et 13 % dans les échantillons ;

- la sillimanite : elle est souvent prismatique et incolore en lumière naturelle. Son extinction est droite et sa structure fibreuse. Elle existe en trace dans l'échantillon BIB-05 et BIB-06 ;
- minéraux opaques : ils présentent des formes très anguleuses à arrondies. En LPNA, ils ont une couleur noire et en LPA ils sont toujours éteints. Présents dans tous les échantillons avec une forte proportion (19 - 65 %).

III.2.3.2. Présentation analytique des minéraux lourds

Les différentes proportions des minéraux lourds sont connues à travers le tableau VIII et les diagrammes circulaires de la Figure 23. Il ressort que les minéraux opaques sont prédominants (19-65 %) dans tous les échantillons de sédiments de la Djouel. Le disthène, le chloritoïde, la tourmaline, le rutile et le grenat sont en proportions moyennes et occupent respectivement 3 à 38 %, 5 à 13 %, 2 à 13 %, 6 à 10 % et 3 à 19 %. Les autres minéraux lourds comme le diopside, la sillimanite, la staurotide, l'anatase et le zircon sont en faibles teneurs comprises entre 3 et 8 %. La zoisite et l'augite sont en très faibles proportions, voire nulles autour de 0 à 3 %.

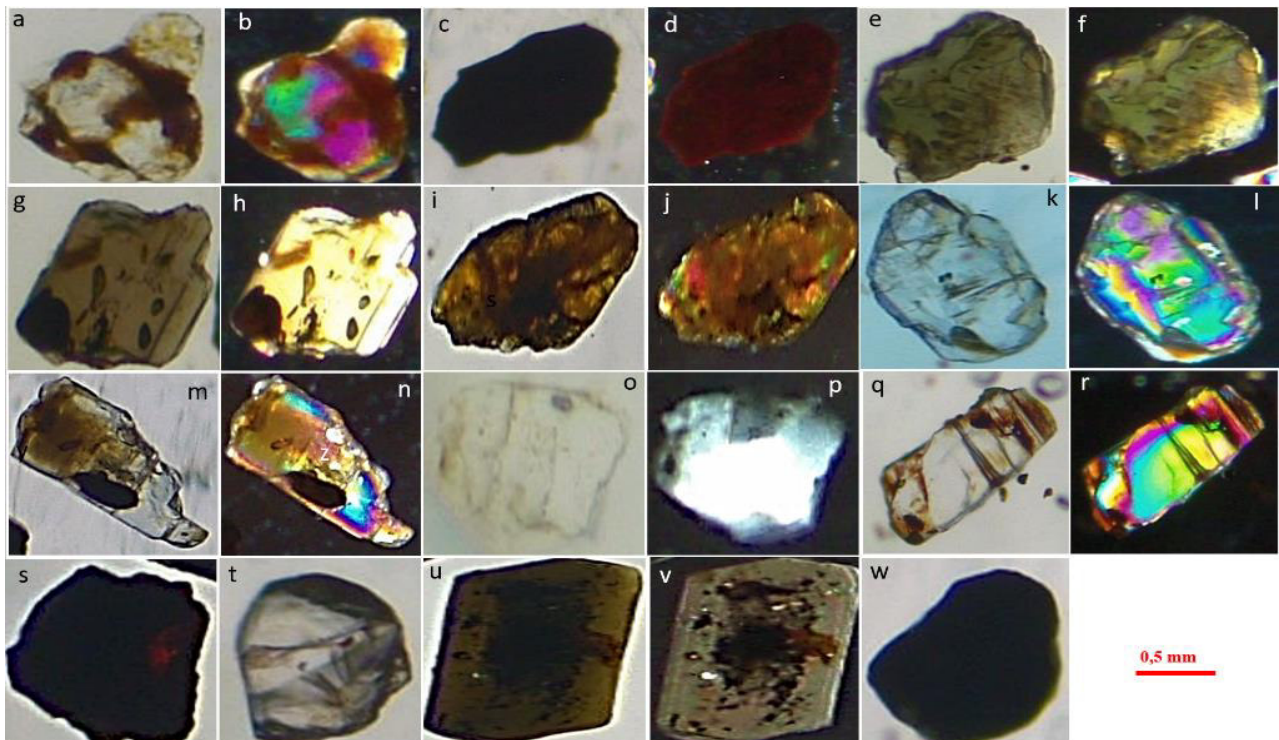


Figure 22 : Minéraux lourds. a) Augite LPNA, b) Augite LPA ; c) Anatase LPNA, d) Anatase LPA ; e) Chloritoïde LPNA, f) Chloritoïde LPA ; g) Tourmaline LPNA, h) Tourmaline LPA ; i) Staurotide LPNA, j) Staurotide LPA ; k) Diopside LPNA, l) Diopside LPA ; m) Disthène LPNA, n) Disthène LPA ; o) Zoisite LPNA, p) Zoisite LPA ; q) Sillimanite LPNA, r) Sillimanite LPA ; s) Rutile ; t) Grenat ; u) Zircon LPNA, v) Zircon LPA ; w) Minéral opaque.

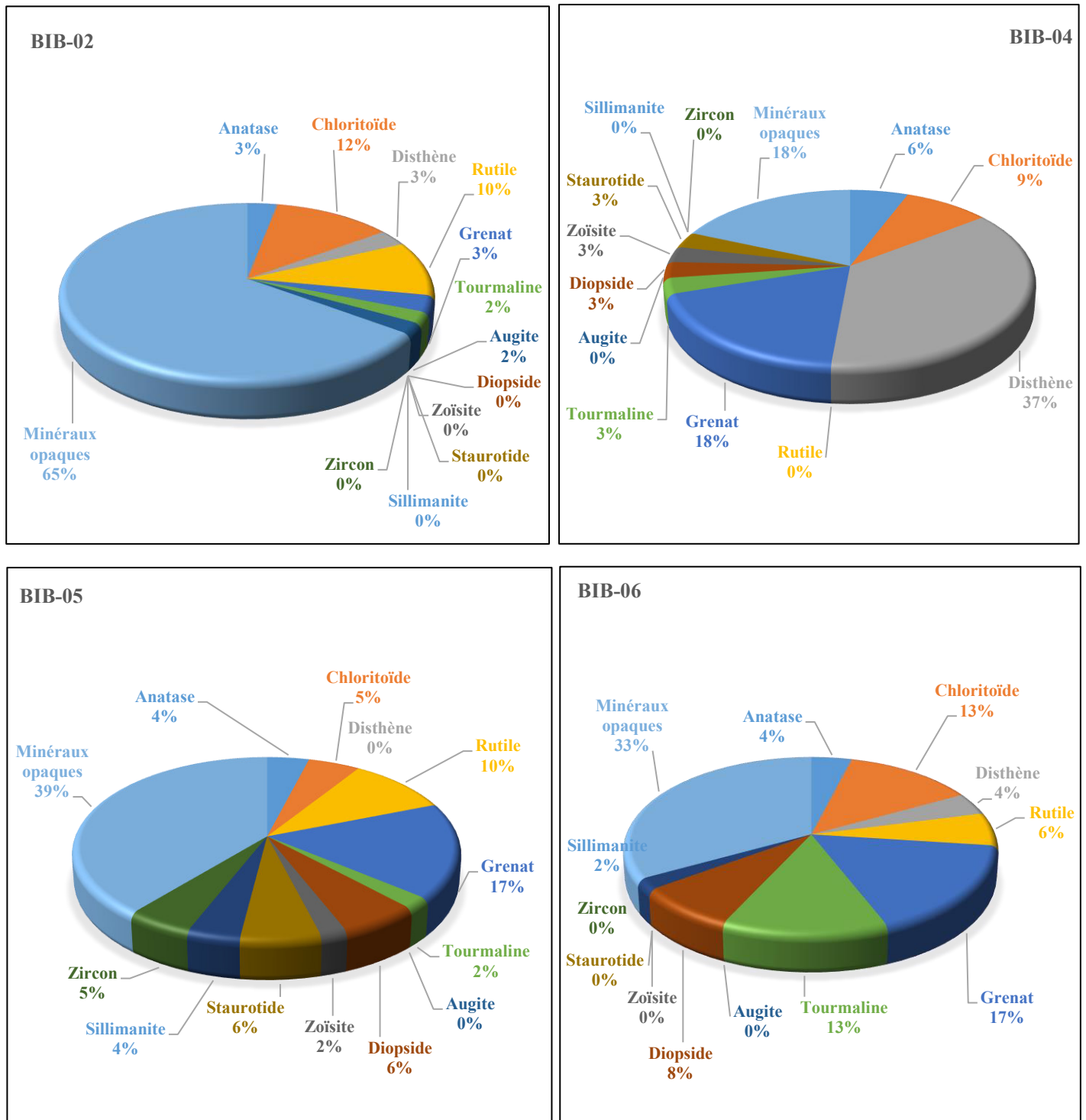


Figure 23: Diagrammes circulaires indiquant la répartition des minéraux lourds dans les échantillons BIB-02, BIB-04, BIB-05 et BIB-06.

III.3. GEOCHIMIE

III.3.1. Eléments majeurs

Quatre échantillons des sédiments alluvionnaires ont été soumis aux analyses géochimiques en éléments majeurs. Il s'agit des échantillons BIB-01, BIB-04, BIB-06 et BIB-08. Les résultats obtenus sur les éléments majeurs des sédiments étudiés sont consignés dans le tableau IX.

III.3.1.1. Distribution des éléments majeurs

Le tableau IX présente les teneurs (en %) des éléments majeurs contenus dans les échantillons des sédiments. Les échantillons présentent des teneurs élevées en SiO_2 , comprises entre 72,88 % et 85,06 % avec une proportion moyenne de 77,58 %. Tous les échantillons ont une teneur en SiO_2 supérieurs à celle du PAAS (62,8 %) et à l'UCC (66 %). La concentration en TiO_2 est très élevée pour l'échantillon BIB-01 (3,24 %) alors qu'elle oscille entre 1,16 % et 2,38 % pour le reste des échantillons. Les concentrations en Al_2O_3 varient entre 5,14 % et 11,58 %, avec une teneur moyenne de 8,76 %. Cette teneur moyenne est très inférieure à celle du PASS (18,9 %) et à celle de l'UCC (15,2 %). L'échantillon BIB-04 a une concentration très élevée en Fe_2O_3 (7,61 %) par rapport aux autres échantillons qui sont comprise entre 4,58 % et 6,05 % avec une teneur moyenne de 5,97 %. Les proportions en Na_2O oscillent de 0,63 % à 1,73 % avec une teneur moyenne de 0,98 %. Cette teneur moyenne est inférieure à celle du PAAS (1,2 %) et de l'UCC (3,9 %). Les concentrations en MnO varient de 0,16 % à 0,38 % avec une teneur moyenne de 0,27%. Cette teneur est supérieur à celle du PAAS (0,11 %) et de l'UCC (0,1 %). Les autres échantillons montrent des concentrations variant entre 0,05 % et 0,81 % (Tableau 9). Les teneurs de MgO (0,25 % à 0,5 %), de CaO (0,61 % à 0,81 %), de K_2O (0,11 % à 0,54 %), et P_2O_5 (0,05 % à 0,21 %) sont toutes inférieures à celle du PASS et de l'UCC pour les alcalins (K_2O), alcalino-terreux (MgO et CaO) et les autres oxydes comme P_2O_5 .

Les rapports massiques $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ et $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ présentent les valeurs moyennes (6,29 - 16,55 ; 3,15 - 6,69 ; 6,05 - 8,38 ; 1,17 - 14,42 et 11,20 – 63,42) respectivement. Tandis que les rapports $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$; $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ et $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ n'excède pas 1. Les échantillons ont des valeurs de CIA comprises entre 74,38 % et 85,91 %, celles de PIA sont comprises entre 75,19 % et 89,03 %. Les valeurs d'ICV sont comprises entre 1,01 et 1,51 (Tableau IX).

Tableau IX : Proportion (en %) des éléments majeurs.

Echantillons	l,d	BIB-01	BIB-04	BIB-06	BIB-08	Av
SiO ₂	0,05	72,88	74,73	85,06	77,63	77,58
Al ₂ O ₃	0,01	11,58	10,83	5,14	7,49	8,76
Fe ₂ O ₃	0,01	6,05	7,61	4,58	5,64	5,97
MnO	0,01	0,31	0,23	0,16	0,38	0,27
MgO	0,01	0,47	0,43	0,25	0,5	0,41
CaO	0,01	0,73	0,69	0,81	0,75	0,75
Na ₂ O	0,01	0,63	1,73	0,85	0,7	0,98
K ₂ O	0,01	0,54	0,12	0,11	0,16	0,23
TiO ₂	0,01	3,24	1,62	1,16	2,38	2,10
P ₂ O ₅	0,01	0,21	0,09	0,05	0,14	0,12
LOI	0,01	3,59	1,97	1,1	2,32	2,25
Total	-	100,23	100,05	99,27	98,09	99,41
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	-	6,29	6,90	16,55	10,36	10,03
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	-	3,57	6,69	4,43	3,15	4,46
Al ₂ O ₃ /Na ₂ O	-	18,38	6,26	6,05	10,70	10,35
K ₂ O/Al ₂ O ₃	-	0,05	0,01	0,02	0,02	0,02
K ₂ O/Na ₂ O	-	0,86	0,07	0,13	0,23	0,24
Na ₂ O/K ₂ O	-	1,17	14,42	7,73	4,38	6,92
Fe ₂ O ₃ /K ₂ O	-	11,20	63,42	41,64	35,25	37,88
Log (Fe ₂ O ₃ /K ₂ O)	-	1,05	1,80	1,62	1,55	1,50
Log (SiO ₂ /Al ₂ O ₃)	-	0,80	0,84	1,22	1,02	0,97
Al ₂ O ₃ +Na ₂ O+K ₂ O	-	12,75	12,68	6,10	8,35	9,97
Na ₂ O+CaO	-	1,36	2,42	1,66	1,45	1,72
MgO/Al ₂ O ₃	-	0,04	0,04	0,05	0,07	0,05
CIA	-	85,91	81,00	74,38	82,31	80,90
PIA	-	89,03	81,57	75,19	83,49	82,32
ICV	-	1,01	1,13	1,51	1,35	1,25

CIA (%) = [Al₂O₃/ (Al₂O₃ + CaO* + Na₂O+ K₂O)]×100 de Nesbitt et Young (1982) PIA (%) = [Al₂O₃- K₂O/(Al₂O₃ + CaO* + Na₂O - K₂O)] × 100 de Nesbitt et Young (1982) et Fedo et al. (1995).

ICV= (Fe₂O₃ +K₂O +Na₂O +CaO + MgO + MnO+TiO₂)/Al₂O₃ de Cox et al. (1995).

Av. = moyenne, l,d =limite de détection, LOI= *Los of Ignition*.

III.3.1.2. Corrélation des éléments majeurs

Les corrélations des éléments chimiques sont faites en fonction de la silice SiO_2 et l'aluminium Al_2O_3 (Figure 24). Elles ont pour objectif de connaître l'intensité du lien existant entre les différents éléments majeurs placés en ordonné en fonction de SiO_2 et Al_2O_3 . Ces corrélations définissent aussi des affinités corrélatives des oxydes avec SiO_2 et Al_2O_3 dans la formation des sédiments.

La matrice de corrélation (Tableau XII) de ces différents éléments montre une corrélation parfaite entre SiO_2 vs SiO_2 (1), une bonne corrélation positive entre MgO vs MnO (0,91) et P_2O_5 vs K_2O (0,89) et une bonne corrélation négative entre CaO vs Al_2O_3 (-0,88) et MgO vs SiO_2 (-0,85), des corrélations significatives positives et négatives entre MgO vs Al_2O_3 (0,67) ; K_2O vs Si_2O (-0,63) respectivement et des faibles corrélations positives et négatives entre MnO vs Al_2O_3 (0,34) ; TiO_2 vs CaO (-0,37) respectivement (Tableau XII).

Les diagrammes de Harker (Figure 24 A) en fonction de Al_2O_3 présentent de fortes corrélations négatives entre Al_2O_3 vs Si_2O (-0,92). Des corrélations négatives moyennes entre Al_2O_3 vs P_2O_5 (-0,60). De faibles corrélations négatives entre Al_2O_3 vs TiO_2 (-0,56). De même, ces diagrammes présentent des fortes corrélations positives entre Al_2O_3 vs CaO (0,78). Des corrélations positives moyennes entre Al_2O_3 vs Fe_2O_3 (0,61) et des faibles corrélations positives entre Al_2O_3 vs MgO (0,44).

La Figure 24 B en fonction de Si_2O présente de fortes corrélations négatives entre SiO_2 vs Al_2O_3 (-0,92). Des corrélations négatives moyennes entre SiO_2 vs P_2O_5 (0,60) et des faibles corrélations négatives entre SiO_2 vs Fe_2O_3 (-0,58) ; SiO_2 vs TiO_2 (-0,56) et SiO_2 vs K_2O (-0,38). De même, ces diagrammes présentent des fortes corrélations positives entre SiO_2 vs CaO (0,78).

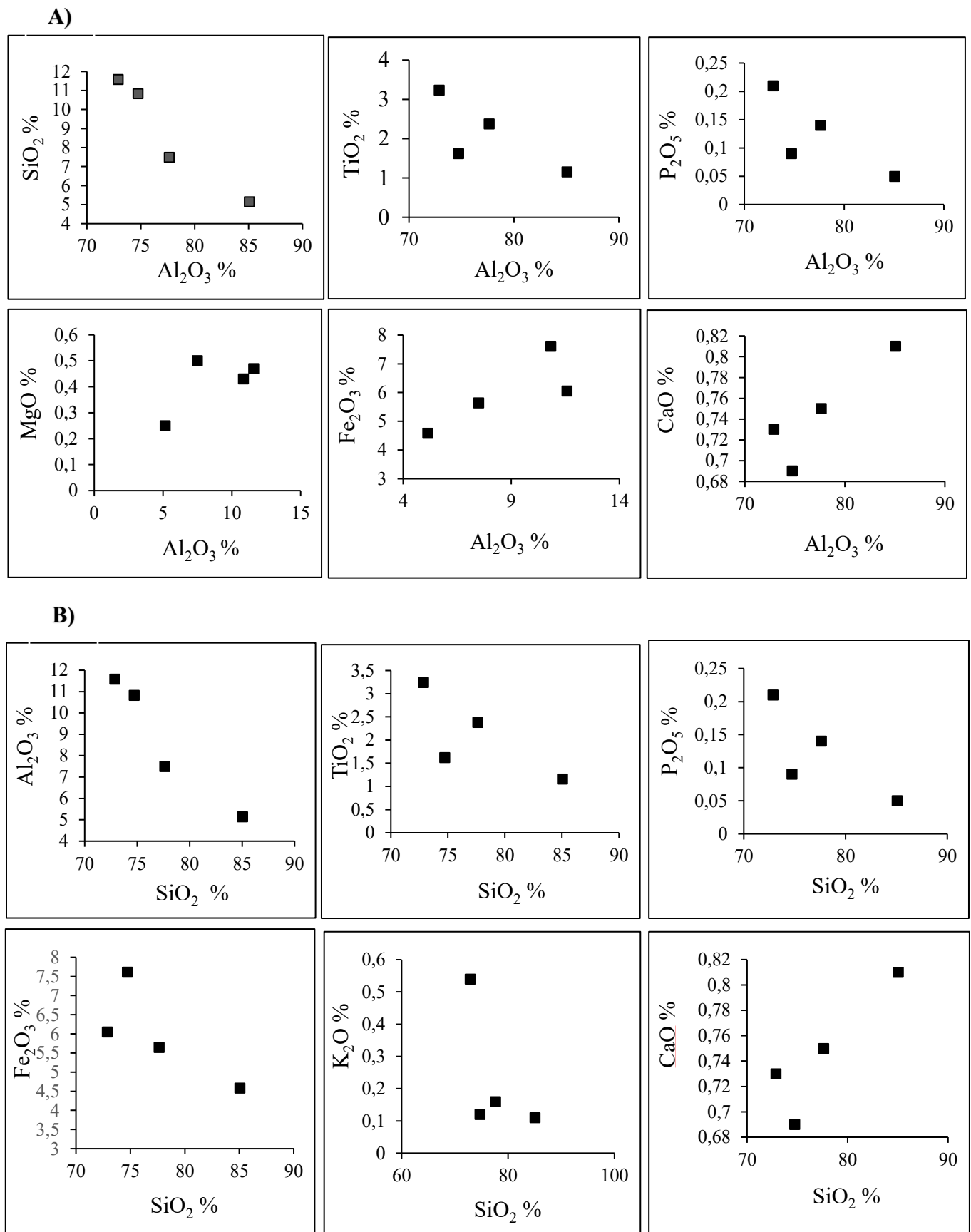


Figure 24: Diagramme binaires en fonction de : **A)** Al_2O_3 et **B)** SiO_2 .

III.3.2. Eléments traces

III.3.2.1. Distribution des éléments traces

Six échantillons des sédiments alluvionnaires ont été soumis aux analyses géochimiques en éléments traces. Il s'agit des échantillons BIB-01, BIB-03, BIB-04, BIB-05, BIB-06 et BIB-08. Le Tableau X et la Figure 25 présentent les proportions (en ppm) et les spectres des éléments en traces des alluvions de la Djouel. Ces éléments peuvent être subdivisés en six groupes.

Le groupe des métaux de transition.

Ils sont les plus nombreux (V, Zr, Ni, Co, Y, Sc, Nb, Hf, Ta et W). La teneur en vanadium varie de (3,00 à 5,30 ppm). La teneur moyenne en vanadium est de 6,20 ppm. Cette teneur est très inférieure à celle du PASS (150ppm) et à celle de l'UCC (107ppm). Les teneurs en Zirconium oscillent entre 0,30 et 0,74 ppm. Ces teneurs sont très faibles avec une moyenne de 0,49 ppm. La teneur en Cuivre (Cu) oscille entre 1,62 et 4,10 ppm avec une moyenne de 2,73 ppm. Les concentrations en Cobalt (Co), l'Yttrium (Y), en Nickel (Ni), en scandium (Sc), le Hafnium (Hf) et le Molybdène (Mo) sont faibles et présentent les valeurs moyennes (0,84 ; 1,13 ; 0,55 ; 1,10 ; 0,01 et 0,02 ppm). Ces teneurs sont toutes inférieures à celle du PAAS et à celle de l'UCC.

Le groupe des métaux alcalins (Cs, Li et Rb)

La teneur en Rubidium (Rb) varie de 0,15 à 0,29 ppm avec une teneur moyenne de 0,21 ppm. Le Césium (Cs) se retrouve en très faibles proportions. La teneur en cet élément n'excède pas 0,05 ppm. Toutes ces teneurs sont très inférieures à celle du PASS et à celle d'UCC.

Le groupe des métaux alcalino-terreux (Sr, Ba et Be)

Les échantillons présents ont des teneurs en Strontium (Sr) qui varient entre 0,28 et 1,38 ppm avec une teneur moyenne de 0,63 ppm. La teneur en Baryum (Ba) et en Béryllium (Be) sont comprises entre 1,40 à 2,90 ppm.

Le groupe des Actinides (Th et U)

Le Thorium (Th) et Uranium (U) possèdent des teneurs très faibles et varient de (0,218 à 1,43 ppm) pour tous les échantillons.

Les autres métaux (Pb, Sn et B)

Les concentrations en plomb (Pb) varient de 0,67 à 3,59 ppm avec une teneur moyenne de 1,88 ppm. L'étain (Sn) et le Bore (B) ont des teneurs inférieures à 0,005 ppm. Les rapports La/Co, Ni/Co et Th/U présentent des valeurs comprises entre (0,56 et 7,70), (0,25 et 1,18) et (1,55 et 3,37) respectivement. Alors que les rapports Zr/Sc, Th/Sc et Rb/Sr présentent des valeurs qui n'excèdent pas 1,05.

Tableau X : Proportion (en ppm) des éléments traces.

Echantillons	l,d	BIB-01	BIB-03	BIB-04	BIB-05	BIB-06	BIB-08	Av
V	0,4	3,30	3,00	5,30	5,00	5,00	6,20	4,63
Ni	0,1	0,40	0,30	1,00	0,50	0,60	0,50	0,55
Cu	0,04	2,32	1,62	4,10	2,82	2,86	2,66	2,73
Co	0,005	1,61	0,96	0,85	0,41	0,79	0,43	0,84
Sc	0,005	0,916	0,654	1,3	1,308	1,056	1,384	1,10
Ba	0,5	1,60	1,60	1,50	1,60	1,40	2,90	1,77
Zr	0,01	0,38	0,30	0,54	0,56	0,40	0,74	0,49
Sr	0,03	1,38	0,42	0,71	0,38	0,62	0,28	0,63
Y	0,005	0,82	0,84	0,785	1,128	0,852	2,376	1,13
Li	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	-
Pb	0,05	0,67	1,41	1,66	2,55	1,38	3,59	1,88
Rb	0,05	0,22	0,15	0,18	0,29	0,22	0,22	0,21
Nb	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	-
Hf	0,005	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
Mo	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Th	0,005	0,69	0,60	0,83	1,04	0,82	1,43	0,90
U	0,005	0,265	0,218	0,534	0,325	0,327	0,425	0,35
Ta	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	-
Be	0,01	1,60	1,60	1,50	1,60	1,40	2,90	1,77
Cs	0,005	0,03	0,03	0,02	0,04	0,03	0,02	0,03
Sn	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-
W	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-
B	10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	-
Zr/Sc		0,41	0,46	0,42	0,43	0,38	0,53	0,44
Th/Sc		0,76	0,92	0,64	0,80	0,78	1,03	0,82
Ni/Co		0,25	0,31	1,18	1,23	0,76	1,18	0,82
Rb/Sr	-	0,16	0,36	0,25	0,76	0,35	0,79	0,45
La/Co	-	0,56	0,87	1,20	4,39	1,05	7,70	2,63
Th/U		2,62	2,77	1,55	3,21	2,52	3,37	2,67

l,d = limite de détection, Av = moyenne.

III.3.2.2. Normalisation des éléments traces

La normalisation des éléments traces selon les standards PAAS, UCC (Taylor et McLennan, 1985) et chondrite (McDonough et Sun, 1995) permet de suivre le comportement des éléments traces par rapport au PAAS, à l'UCC et à la Chondrite (Figures 25 A, B et C). Les spectres des éléments traces par rapport au PAAS, à l'UCC et à la Chondrite présentent des allures différentes Figures 25 A, B et C.

Les spectres normalisés par rapport à la chondrite montrent des forts enrichissements en Cu, et en Y puis un enrichissement moyen en Ni et de forts appauvrissements en Rb et Sr puis un moyen appauvrissement en U et Hf. Les autres éléments présentent des enrichissements et appauvrissements peu significatif dans les échantillons (Figure 25 A).

Les spectres normalisés par rapport au PAAS montrent des forts enrichissements en Y et des très faibles appauvrissements en U ; Hf et Rb (Figure 25 B). Les spectres normalisés par rapport à l'UCC présentent un léger enrichissement en Be. Les autres éléments présentent des moyens à faibles appauvrissements dans tous les échantillons (Figure 25 C).

III.3.3. Terres rares

III.3.3.1. Distribution des terres rares

Six échantillons des sédiments alluvionnaires ont été soumis aux analyses géochimiques en terres rares. Il s'agit des échantillons BIB-01, BIB-03, BIB-04, BIB-05, BIB-06 et BIB-08. Les concentrations en terres rares des différents échantillons sont consignées dans le Tableau XI et illustré par la Figure 26 A, B, C. La teneur de Ce dans l'échantillon BIB-08 est élevée (28,40 ppm) par rapport aux autres restes d'échantillons. La concentration moyenne de cet élément (12,25 ppm) est inférieure au PAAS (80 ppm) et à l'UCC (35 ppm) mais supérieure à la chondrite (0,613 ppm). La concentration du La varie de 0,83 à 3,27 ppm. Les teneurs moyennes du Pr et du Nd (0,43 et 1,79 ppm respectivement) sont inférieure au PAAS (8,83 et 32 ppm) et à l'UCC (17 et 28,6 ppm respectivement) mais supérieur à la chondrite (0,093 et 0,457 ppm). Les concentrations de Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb et Lu n'excèdent pas 1 ppm dans tous les échantillons.

La somme des terres rares varie de (7,17 à 39,46 ppm) avec une moyenne de 17,27 ppm et le rapport LREE/HREE varie de (10,63 à 24,87 ppm) soit une moyenne de 17,15 ppm.

Les anomalies en europium (Eu/Eu^*) se situent entre 0,62 ppm et 0,76 ppm. En revanche les anomalies en cérium (Ce/Ce^*) oscillent entre 1,98 ppm et 5,84 ppm. Les proportions du rapport $(\text{La}/\text{Yb})_N$, $(\text{La}/\text{Sm})_N$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ sont comprises entre (5,68 à 9,32 ppm ; 2,15 à 2,58 ppm ; 1,52 à 2,02 ppm) respectivement.

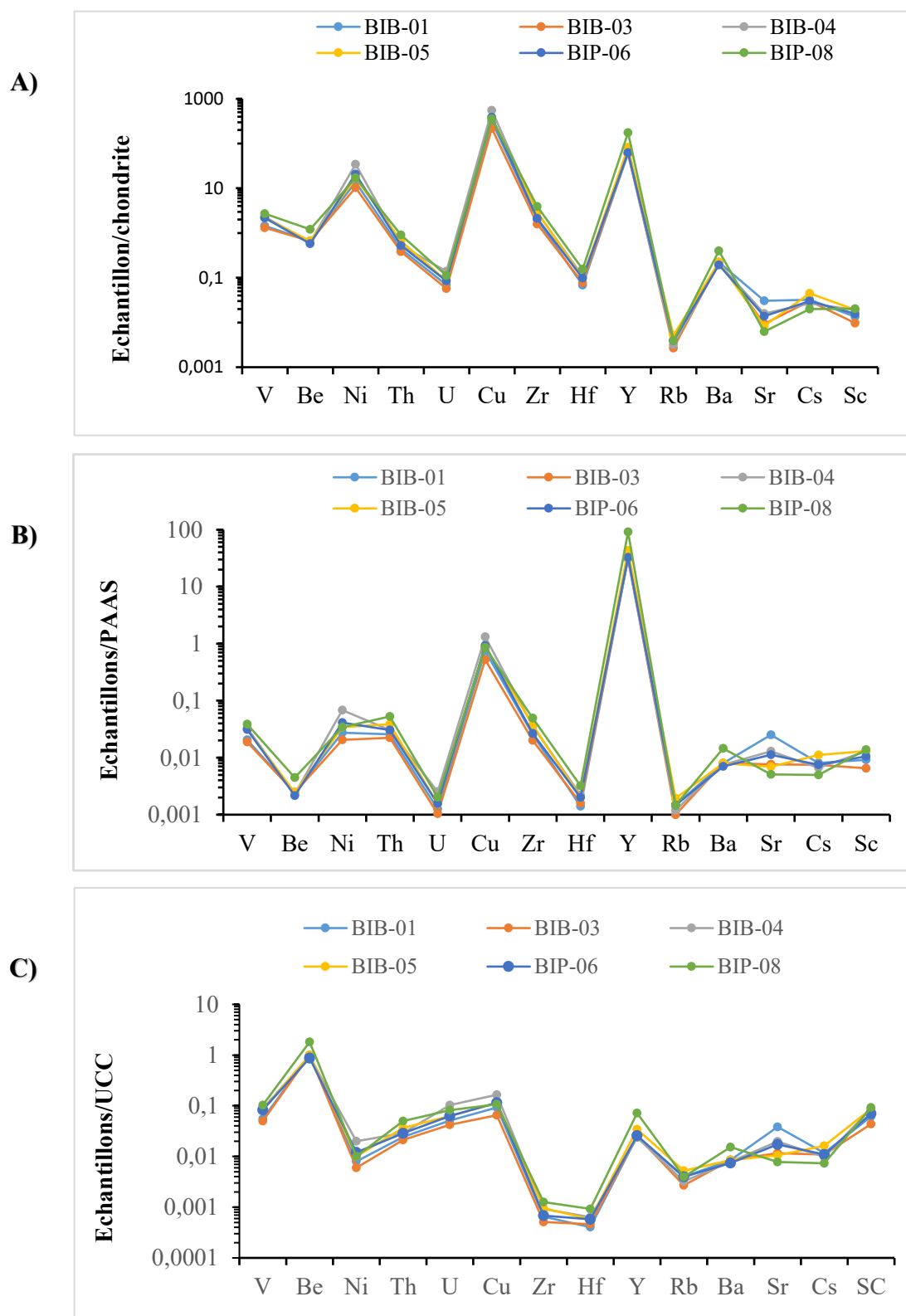


Figure 25 : Spectres de normalisation des éléments traces par rapport : **A)** à la chondrite (McDonough et Sun, 1995) et **B** et **C)** au PAAS et à l'UCC respectivement (Taylor et McLennan, 1985).

Tableau XI : Proportion (en ppm) des terres rares.

Echantillons	l,d	BIB-01	BIB-03	BIB-04	BIB-05	BIB-06	BIB-08	Av	Chondrite	PAAS	UCC
La	0,002	0,90	0,83	1,02	1,78	0,84	3,27	1,44	0,237	38	60
Ce	0,005	3,97	9,88	13,32	13,08	4,87	28,40	12,25	0,613	80	35
Pr	0,004	0,26	0,26	0,30	0,51	0,26	0,97	0,43	0,093	8,83	17
Nd	0,05	1,13	1,15	1,27	2,13	1,11	3,97	1,79	0,457	32	28,6
Sm	0,004	0,23	0,24	0,28	0,43	0,24	0,79	0,37	0,148	5,6	5,19
Eu	0,004	0,05	0,05	0,05	0,08	0,05	0,15	0,07	0,056	1,1	55
Gd	0,005	0,19	0,20	0,20	0,32	0,19	0,61	0,29	0,199	4,7	584
Tb	0,002	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,09	0,04	0,036	0,77	17,3
Dy	0,005	0,17	0,18	0,18	0,27	0,19	0,49	0,25	0,246	4,66	33
Ho	0,002	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,09	0,05	0,055	0,99	55,7
Er	0,004	0,09	0,10	0,09	0,15	0,11	0,28	0,13	0,16	2,85	189
Tm	0,002	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,04	0,02	0,025	0,4	36
Yb	0,004	0,08	0,09	0,09	0,13	0,10	0,26	0,12	0,161	2,8	2,46
Lu	0,002	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,04	0,02	0,025	0,43	30
ΣREE	-	7,17	13,07	16,89	19,01	8,04	39,46	17,27	-	-	-
LREE	-	6,55	12,41	16,24	18,01	7,37	37,56	16,36	-	-	-
HREE	-	0,62	0,66	0,65	1,00	0,68	1,91	0,92	-	-	-
LREE/HREE	-	10,63	18,77	24,87	18,01	10,90	19,72	17,15	-	-	-
Ce/Ce* (1) Chondrite	-	1,98	5,13	5,84	3,33	2,54	3,86	3,78	-	-	-
Eu/Eu* (1) Chondrite	-	0,76	0,67	0,69	0,62	0,70	0,68	0,69	-	-	-
Ce/Ce* (2) PAAS	-	1,87	4,85	5,52	3,15	2,40	3,65	3,57	-	-	-
Eu/Eu* (2) PAAS	-	1,16	1,02	1,06	0,94	1,07	1,03	1,04	-	-	-
Ce/Ce* (3) UCC	-	7,44	19,31	22,01	12,56	9,57	14,56	14,24	-	-	-
Eu/Eu* (3) UCC	-	0,25	0,22	0,23	0,20	0,23	0,22	0,22	-	-	-
(La/Yb)_N	-	7,68	6,50	8,06	9,32	5,68	8,48	7,62	-	-	-
(La/Sm)_N	-	2,43	2,19	2,29	2,58	2,15	2,57	2,37	-	-	-
(Gd/Yb)_N	-	1,92	1,88	1,92	2,02	1,52	1,90	1,86	-	-	-

$Ce/Ce^* (1) = (Ce_{\text{échantillon}}/Ce_{\text{chondrite}})/(La_{\text{échantillon}}/La_{\text{chondrite}})^{1/2} (Pr_{\text{échantillon}}/Pr_{\text{chondrite}})^{1/2}$ $Ce/Ce^* (2) = (Ce_{\text{échantillon}}/Ce_{\text{PAAS}})/(La_{\text{échantillon}}/La_{\text{PAAS}})^{1/2} (Pr_{\text{échantillon}}/Pr_{\text{PAAS}})^{1/2}$ $Ce/Ce^* (3) = (Ce_{\text{échantillon}}/Ce_{\text{UCC}})/(La_{\text{échantillon}}/La_{\text{UCC}})^{1/2}$

$(Pr_{\text{échantillon}}/Pr_{\text{UCC}})^{1/2}$ $Eu/Eu^* (1) = (Eu_{\text{échantillon}}/Eu_{\text{chondrite}})/(Sm_{\text{échantillon}}/Sm_{\text{chondrite}})^{1/2} (Gd_{\text{échantillon}}/Gd_{\text{chondrite}})^{1/2}$ $Eu/Eu^* (2) = (Eu_{\text{échantillon}}/Eu_{\text{PAAS}})/(Sm_{\text{échantillon}}/Sm_{\text{PAAS}})^{1/2} (Gd_{\text{échantillon}}/Gd_{\text{PAAS}})^{1/2}$ $Eu/Eu^* (3) =$

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

$(Gd_{\text{échantillon}}/Gd_{\text{chondrite}})/(Yb_{\text{échantillon}}/Yb_{\text{chondrite}})$ Les valeurs de l'UCC et de la chondrite citée d'après Taylor et McLennan (1985) et McDonough et Sun (1995) Av. = moyenne.

III.3.3.2. Normalisation des terres rares

Les spectres de normalisation des échantillons ont permis de mettre en évidence de façon graphique les spectres des Figure 26. Les anomalies en Cérium (Ce) en Europium (Eu) et en Erbium (Eb) sont graphiquement représentées par des pics et des creux distinctifs. Le rapport Ce/Ce^* mesure l'appauvrissement et l'enrichissement en Cérium (Ce) au voisinage du Lanthane (Ta) et du Prométhium (Pr).

L'anomalie en Cérium $Ce/Ce^* > 1$ est positive dans tous les échantillons normalisés par rapport à la chondrite : $1,98 < Ce/Ce^* < 5,84$; aux schistes australiennes post-archéens (PAAS): $1,87 < Ce/Ce^* < 5,52$ et à la croûte continentale supérieure (UCC) : $7,44 < Ce/Ce^* < 22,01$.

La normalisation des terres rares par rapport à la Chondrite montre que les spectres sont fracturés et laissent apparaître un enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes $LREE/HREE = 10,63 - 24,87$ (Figure 26).

Le rapport Eu/Eu^* mesure l'appauvrissement et l'enrichissement en Europium (Eu) au voisinage du Samarium (Sm) et du Gadolinium (Gd).

L'anomalie en Europium $Eu/Eu^* < 1$ est négative dans tous les échantillons normalisés par rapport à la chondrite avec des variations de $0,62 < Eu/Eu^* < 0,76$. De même, la normalisation par rapport au PAAS d'après le rapport Eu/Eu^* montre des anomalies faiblement légèrement positives dans l'échantillon BIB-01 et une absence d'anomalie dans le reste des échantillons avec des variations allant de $0,94 < Eu/Eu^* < 1,07$. L'anomalie en Europium $Eu/Eu^* < 1$ est légèrement négative à l'UCC dans l'échantillon BIB-05. Par ailleurs elle présente une absence d'anomalies dans les échantillons restant avec des variations avec de $7,44 < Eu/Eu^* < 22,01$ (Tableau XI).

Les sédiments de la Djouel présentent une signature en terre rares caractérisée par une prédominance des éléments légers (LREE) au détriment des terres rares lourdes (HREE), ce qui indique un enrichissement relatif des premiers par rapport aux seconds.

L'indice de fractionnement des terres rares $(La/Yb)_N$, dans les échantillons varie de $5,68 < (La/Yb)_N < 9,32$ (Wood *et al.* 1979), plus il est supérieur à 1, plus les terres rares sont fractionnées. Les spectres de normalisation de terres rares par rapport à la chondrite (McDonough et Sun, 1995), au PAAS et à l'UCC (Taylor et McLennan, 1985) montrent des pics au niveau de l'élément terre rare Ce ainsi qu'un léger creux au niveau de l'élément Ho (Figure 26 C).

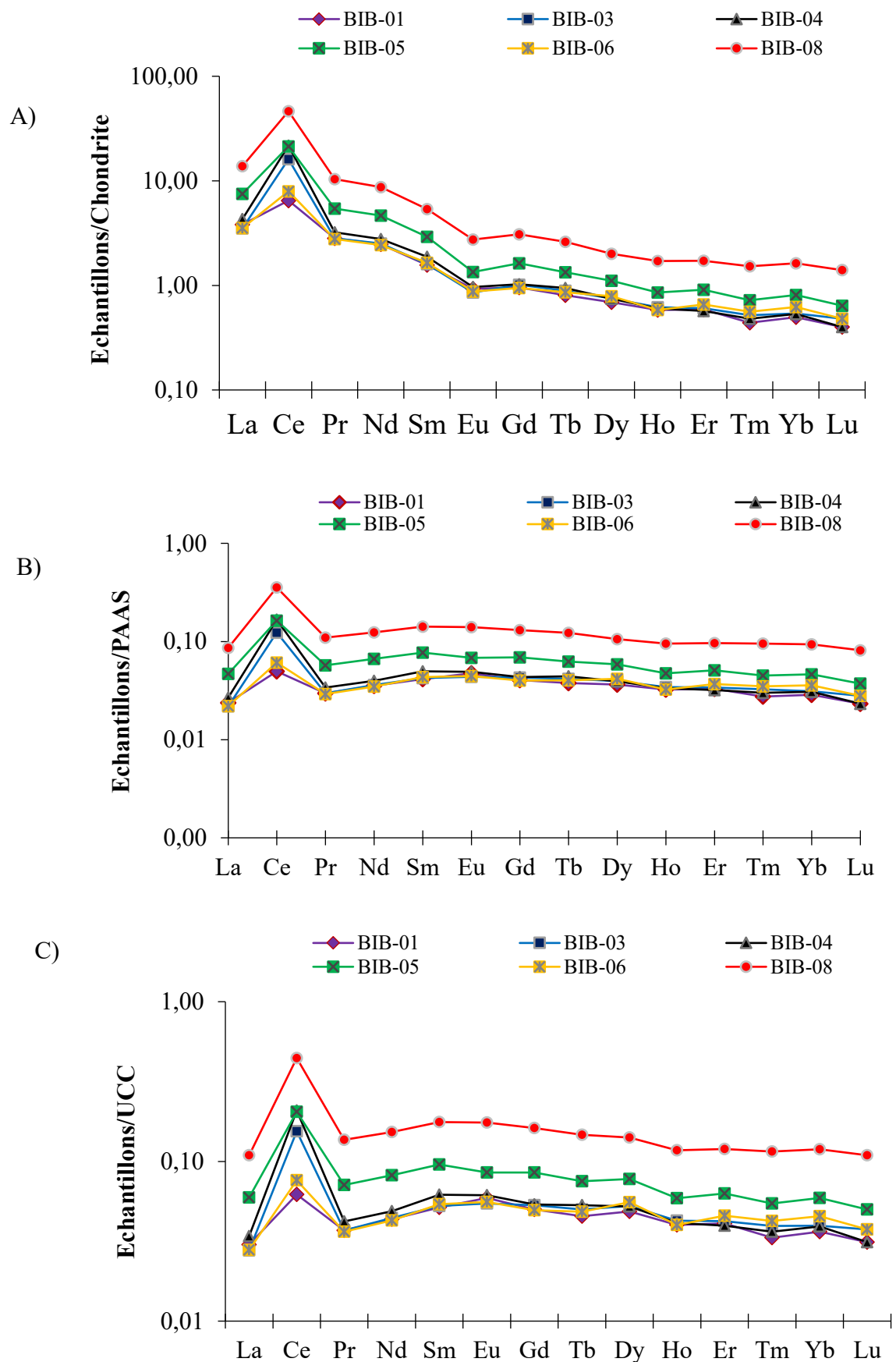


Figure 26 : Spectres des terres rares normalisés par rapport : **A)** à la chondrite (McDonough et Sun, 1995) et **B** et **C)** au PAAS et à l'UCC respectivement (Taylor et McLennan, 1985).

Tableau XII : Matrice de corrélations de certains éléments majeurs et traces des sédiments de la Djouel.

	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>MnO</i>	<i>MgO</i>	<i>CaO</i>	<i>Na₂O</i>	<i>K₂O</i>	<i>TiO₂</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>CIA</i>	<i>ICV</i>	<i>V</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Co</i>	<i>Sc</i>	<i>Ba</i>	<i>Zr</i>	<i>Sr</i>	<i>Y</i>	<i>Pb</i>	<i>Th</i>	<i>U</i>	<i>Be</i>	ΣREE
SiO ₂	1																									
Al ₂ O ₃	-0,96	1,00																								
Fe ₂ O ₃	-0,77	0,80	1,00																							
MnO	-0,58	0,34	0,15	1,00																						
MgO	-0,85	0,67	0,55	0,91	1,00																					
CaO	0,89	-0,88	-0,97	-0,35	-0,71	1,00																				
Na ₂ O	-0,18	0,30	0,77	-0,41	-0,06	-0,60	1,00																			
K ₂ O	-0,62	0,63	0,04	0,38	0,42	-0,22	-0,49	1,00																		
TiO ₂	-0,75	0,64	0,15	0,76	0,76	-0,37	-0,51	0,89	1,00																	
P ₂ O ₅	-0,78	0,68	0,19	0,74	0,77	-0,40	-0,48	0,89	1,00	1,00																
CIA	-0,94	0,83	0,50	0,77	0,91	-0,69	-0,17	0,75	0,93	0,94	1,00															
ICV	0,95	-0,99	-0,73	-0,35	-0,66	0,82	-0,20	-0,72	-0,71	-0,74	-0,86	1,00														
V	0,85	-0,95	-0,87	-0,06	-0,46	0,88	-0,53	-0,46	-0,39	-0,44	-0,63	0,93	1,00													
Ni	0,96	-0,90	-0,88	-0,57	-0,87	0,96	-0,38	-0,36	-0,57	-0,60	-0,84	0,85	0,55	1,00												
Cu	0,91	-0,91	-0,96	-0,38	-0,73	1,00	-0,56	-0,27	-0,42	-0,45	-0,73	0,85	0,65	0,97	1,00											
Co	-0,49	0,66	0,21	-0,16	0,04	-0,27	-0,08	0,82	0,51	0,54	0,45	-0,72	-0,75	-0,19	-0,25	1,00										
Sc	0,71	-0,85	-0,91	0,12	-0,31	0,87	-0,73	-0,23	-0,14	-0,19	-0,43	0,80	0,93	0,59	0,73	-0,64	1,00									
Ba	-0,93	0,81	0,74	0,77	0,97	-0,87	0,17	0,40	0,69	0,70	0,90	-0,78	0,55	-0,18	-0,11	-0,43	0,45	1,00								
Zr	0,71	-0,86	-0,87	0,15	-0,28	0,83	-0,68	-0,30	-0,18	-0,22	-0,44	0,82	0,89	0,34	0,47	-0,68	0,91	0,77	1,00							
Sr	-0,31	0,41	-0,18	0,02	0,03	0,06	-0,51	0,92	0,64	0,65	0,43	-0,51	-0,51	0,01	0,02	0,92	-0,32	-0,41	-0,45	1,00						
Y	-0,12	-0,16	-0,03	0,81	0,62	-0,08	-0,27	-0,21	0,25	0,22	0,29	0,18	0,65	-0,15	-0,06	-0,57	0,55	0,98	0,83	-0,51	1,00					
Pb	0,43	-0,64	-0,27	0,31	0,06	0,28	-0,08	-0,71	-0,36	-0,39	-0,33	0,69	0,78	0,04	0,14	-0,86	0,71	0,81	0,89	-0,77	0,89	1,00				
Th	0,42	-0,65	-0,62	0,50	0,11	0,54	-0,62	-0,27	0,03	-0,02	-0,14	0,63	0,85	0,10	0,23	-0,72	0,81	0,85	0,95	-0,54	0,93	0,94	1,00			
U	0,96	-0,92	-0,90	-0,53	-0,84	0,97	-0,40	-0,37	-0,56	-0,59	-0,83	0,87	0,78	0,90	0,91	-0,39	0,80	0,26	0,69	-0,18	0,28	0,42	0,48	1,00		
Be	-0,93	0,81	0,74	0,77	0,97	-0,87	0,17	0,40	0,69	0,70	0,90	-0,78	0,55	-0,18	-0,11	-0,43	0,45	1,00	0,77	-0,41	0,98	0,81	0,85	0,26	1,00	
ΣREE	0,78	-0,86	-0,98	-0,06	-0,47	0,95	-0,75	-0,16	-0,18	-0,22	-0,51	0,79	0,86	0,34	0,44	-0,55	0,85	0,83	0,97	-0,35	0,86	0,83	0,93	0,70	0,83	1,00

Conclusion

L'analyse pétrographique des formations géologiques relève une prédominance des roches métamorphiques, principalement des micaschistes à grenat et à biotite et des gneiss à micas et à grenat. L'étude granulométrique a montré que les sédiments analysés sont majoritairement constitués de sables grossiers. Les matériaux alluvionnaires de la Djouel sont des sédiments hétérométriques, très mal triés et mal classés puis asymétriques vers les sables grossiers. Les courbes logarithmiques des sables étudiés sont en forme de « S ». Les histogrammes des échantillons sont pour certains unimodaux et pour d'autres bimodaux. L'étude morphoscopique montre une dominance des grains très anguleux suivie des grains sub-anguleux, puis arrondis et enfin sub-arrondis. Le cortège minéralogique est constitué de chloritoïde, de tourmaline, de disthène, de grenat, de rutile, de zircon, de zoïsite, de staurotide, de diopside, d'anatase, d'augite, de sillimanite, et des minéraux opaques. L'analyse géochimique relève que les teneurs de sédiments de la Djouel sont élevées en SiO_2 suivie de Al_2O_3 , puis de Fe_2O_3 et de TiO_2 . Il existe des corrélations en fonction de SiO_2 et Al_2O_3 . Des corrélations négatives entre Al_2O_3 vs SiO_2 , et SiO_2 vs Fe_2O_3 et de corrélations positives Al_2O_3 vs CaO , SiO_2 vs CaO et Al_2O_3 vs Fe_2O_3 . La normalisation des éléments traces montre des forts enrichissements en Cu et Y par rapport à la chondrite et au PAAS et faibles appauvrissement en Rb et Sr par rapport à la chondrite et au PAAS, puis des faibles appauvrissements en Rb, V, U et Hf par rapport à la chondrite et au PAAS et enfin un léger enrichissement en Be par rapport à l'UCC. La normalisation des terres rares montre que les spectres sont étalés avec de légères anomalies négatives par rapport à l'UCC. Il ressort également que les teneurs en terres rares des sédiments de la Djouel sont modérées et plus enrichies en terres rares légères (LREE) qu'en terres rares lourdes (HREE).

A decorative border resembling a scroll, with a dark blue outline and a light beige, marbled interior. The border has a scroll-like shape on the left side and a small circular element on the right side.

CHAPITRE IV : INTERPRETATION ET DISCUSSION

Introduction

Le présent chapitre a pour objectif d'interpréter et de discuter les principaux résultats obtenus sur le terrain et en laboratoire.

IV.1. PÉTROGRAPHIE

Le secteur d'étude s'inscrit dans le cadre du plateau sud Camerounais, domaine tectonique issu de l'orogénèse panafricaine. L'analyse pétrographique relève un ensemble lithologique métamorphique composé de micaschistes à grenat, et à biotite et de gneiss à micas et à grenat. Le micaschiste à grenat à biotite présente une foliation marquée et une texture lépidogranoblastique hétérogranulaire. Il est caractérisé par un métamorphisme de haut degré avec une paragenèse associant la biotite, le quartz, le grenat, le feldspath et le disthène. Le gneiss à micas et grenat présente une alternance de lits clairs quartzo-feldspathiques et de lits sombres ferromagnésiens, caractérisé par une texture granoblastique hétérogranulaire. Sa composition minéralogique inclut principalement du quartz, de la biotite, du feldspath potassique, de la muscovite ainsi que des minéraux opaques. Les roches métamorphiques de la zone d'étude présentent un cortège minéralogique similaire à celui observé à Mbébé/Kikot (Miguel, 2024), à Pan-Makak (Welba, 2022) et le long du fleuve Sanaga (Nanga *et al.*, 2020). Ils sont principalement composés de quartz, de feldspaths, de plagioclase, de biotite, de muscovite, de grenat, de disthène et de minéraux opaques. Les observations faites sur les plans minéralogiques et texturaux des roches pourraient être liées à une variation des conditions du métamorphisme (Maurizot *et al.*, 1986, Nyobe *et al.*, 2018). D'après Bouyo *et al.*, (2015), les roches telles que les micaschistes et les gneiss pourraient résulter du métamorphisme d'un protolithe felsique.

IV.2. DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE

Les résultats granulométriques des alluvions de la Djouel relèvent que les sédiments sont principalement composés de sables grossiers (Figure 17). Ces résultats sont en accord avec les travaux de Nanga *et al.*, (2022) et (Miguel, 2024). Les courbes cumulatives des sédiments sont caractérisées par les formes en « S », ce qui traduirait que les alluvions sont hétérométriques, très mal triées, mal classées et asymétriques vers les éléments grossiers. Ces alluvions auraient été déposés dans un milieu plus ou moins agité à forte énergie (Mouldi et Chkiou, 2013), les sédiments étudiés partagent des caractéristiques similaires avec ceux de Pan-Makak (Welba, 2022) et Mbébé/Kikot (Miguel, 2024). Le caractère unimodale à bimodale des

histogrammes témoignerait que les sédiments ont une source influencée par les affluents. L'allure unimodale observée dans les échantillons témoignerait de la provenance d'une même source d'apport de sédiments. De même, ce caractère est observé dans les sables de Campo (Tsanga, 2020). Par contre les travaux effectués dans la localité de Batoké montrent que les histogrammes ont pour la plupart un caractère bimodal (Kwewouo, 2018 ; Njike Njome, 2019). Ce résultat est semblable à celui de Tonjé (2014) et de Welba (2022).

L'analyse morphoscopique a mis en évidence quatre (04) aspects de surface des grains : des grains anguleux, subanguleux, arrondis et subarrondis. Les grains anguleux et subanguleux traduisent un transport court suite à la désagrégation mécanique de la roche source (Cailleux, 1942). Tandis que les formes arrondies et subarrondies des grains traduisent un transport long par roulement en milieu fluvial (Pye et Blott, 2016). Les formes anguleuses sont plus abondantes dans tous les échantillons (Figure 23). Les sédiments alluvionnaires de la Djouel sont très angulés et seraient déposés au cours d'un court transport. Cette abondance des formes anguleuses indique une source proximale des sédiments. Les grains arrondis ou subarrondis seraient liés à un long transport et proviendraient probablement d'une source distale. Les grains de quartz des sédiments alluvionnaires de Mbébé/Kikot et de Pan-Makak montrent les mêmes aspects de surface que ceux observés dans les sédiments étudiés par Welba (2022) et Miguel (2024). Ce qui conduit à dire que les sédiments de la Djouel auraient effectué un transport court à partir de la zone amont et seraient pour la plupart locaux. De même, les travaux effectués par Nyobe *et al.*, (2018) sur le bassin versant de Lobo, montrent que les grains du rutile sont anguleux et dans une moindre mesure sub-émoussés à prismatiques. Ces auteurs montrent que la nature angulaire des grains est une caractéristique principale de la relique conservée pendant le transport. Ces résultats suggèrent que la nature anguleuse des grains serait liée à la résistance de certaines particules pendant le transport face au phénomène d'usure. Cette prédominance des grains anguleux et sub-anguleux sur les autres grains montre que les sédiments alluvionnaires de la Djouel sont pour la plupart locaux et issus de la désagrégation plus ou moins intense de la roche originelle.

IV.3. CLASSIFICATION GEOCHIMIQUE

Le diagramme de classification des sédiments présente une classification qui permet de distinguer les lithologies des roches à tendance silicoclastique selon les proportions logarithmiques de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ en fonction de $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ (Herron, 1988). Sur ce diagramme, les roches sédimentaires sont subdivisées en plusieurs sous-groupes (schistes ferri-fères,

schistes, sables ferrifères, wacke, arkoses, litharénites, sublitharénites, subarkoses et quartz arénites).

La Figure 27 montre que les sédiments de la Djouel sont concentrés dans le domaine des Fe-Sandstone. Ce résultat confirme les résultats observés dans les sables de Batoké qui sont classés dans le domaine des sables ferrifères (Kwewouo, 2018 ; Kankeu, 2019). Ils sont similaires aussi à ceux observés dans les sables de la Mancha placés dans la zone des Fe-sand à l'ouest du Golfe du Mexique (Hernandez-Hinojosa et *al.*, 2018), ceux de Campo (Tsanga, 2020) qui sont classés dans le domaine Fe-shale et Fe-Sand par les travaux de Mbale Ngama *et al.*, (2019). Par contre, il est très éloigné de la classification géochimique des sables de Geregu au Nigeria qui sont classés dans le domaine des grau wacke et shale (Adiotome et *al.*, 2017) ; ainsi que les résultats obtenus dans les sables de la baie du Japon (Bah Mamadou et Hiroaki, 2016) et ceux du golfe du Mexique (Armstrong-Altrin et *al.*, 2012), dont les sables sont classés dans les arkoses, subarkoses et litharénites. De même dans les recherches effectués par Sababa *et al.*, (2024) montrent des sables classés dans les Fe-shale, shale, wack et arkozés. Les sédiments de la Djouel ayant subi un transport court et une désagrégation de la roche source appartiennent au domaine des Fe-sand.

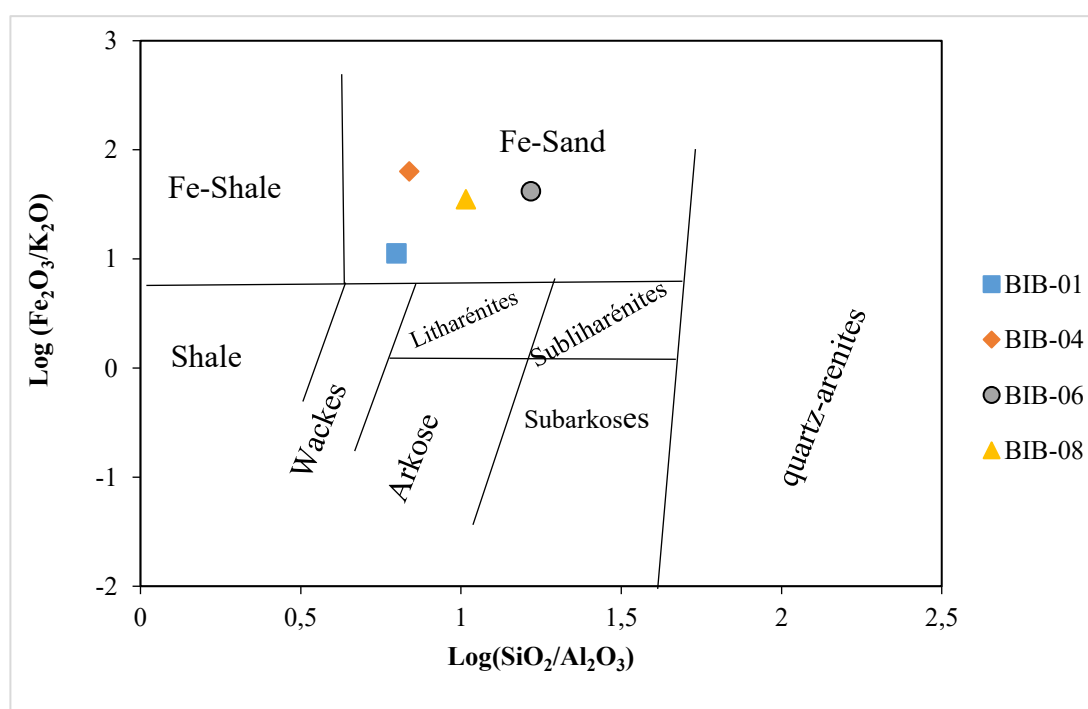


Figure 27 : Diagramme de classification géochimique des sédiments alluvionnaires de la Djouel (Herron, 1988).

IV.4. PROVENANCE

L'observation des lames minces des minéraux lourds relève que l'abondance et la nature de certains minéraux lourds dans les sédiments dépendent des roches sources, ainsi des minéraux ubiquistes, qui sont des minéraux communs aux roches magmatiques et métamorphiques (zircon, diopside, anatase, rutile, minéraux opaques) pouvant être rattachés aux formations magmatiques et métamorphiques en place dans la zone d'étude et les minéraux caractéristiques du métamorphisme (disthène, staurotide, chloritoïde, tourmaline, sillimanite, zoïsite,) qui confirment une lithologie essentiellement métamorphique. Ainsi, l'abondance des minéraux comme : le disthène, la chloritoïde, le rutile et les minéraux opaques dans tous les échantillons indique une source distributrice métamorphique. Ces résultats sont similaires aux résultats des travaux de (Stendal *et al.*, 2006 et Nanga *et al.* 2022).

La provenance des sédiments clastiques peut être déduite en examinant le contenu et les relations parmi les éléments majeurs et traces et terres rares (Nesbitt et Young, 1982 ; Madhavaraju *et al.*, 2016 ; Ngueutchoua *et al.* 2019 ; Sababa *et al.*, 2024). Dans la présente étude, l'abondance de SiO_2 (72,88 à 85,06 %) dans les échantillons étudiés révèle une forte proportion de quartz dans les sédiments. Ceci indiquerait des produits d'altération de nature felsique. Ces résultats suivent la même tendance en concentration de SiO_2 que ceux du sédiment de la rivière Lobé (Chougong *et al.*, 2021), ceux des matériaux de la terrasse de la rivière Mefou (Mbale *et al.*, 2019) et ceux des sables du cours inférieur de la Sanaga (Nanga *et al.*, 2020).

Le diagramme Zr versus TiO_2 d'Hayalshi *et al.*, (1997) illustre également une source acide (Figure 28 A). La distribution des échantillons dans ce diagramme montre qu'excepté l'échantillon BIB-01 qui appartient à moitié au champ de roches ignées intermédiaires, tous les restes des échantillons appartiennent au champ de roches ignées felsiques. Cette provenance felsique pourrait être liée au gneiss. Ces résultats sont semblables à ceux obtenus dans les sédiments de la rivière Lobé Sud-ouest Cameroun (Chougong *et al.*, 2021). Aussi, les valeurs élevées des rapports LREE/HREE (10,63 à 24,87 ppm) et les anomalies négatives en europium (Eu/Eu^* 0,62 à 0,76 ppm) des sédiments étudiés confirment l'absence des roches ultramafiques dans les zones sources (Etemad-Saeed *et al.*, 2011).

L'élément Th présente un caractère immobile et plus abondant dans les roches felsiques que basiques, alors que Sc est plus concentré dans les roches basiques que dans les roches felsiques (Taylor et McLennan, 1985 ; Wronkiewicz et Condie, 1987 ; Condie *et al.*, 1995). Le rapport Th/Sc est aussi utilisé pour évaluer la provenance des échantillons alluvionnaires. Dans

le diagramme Th vs Sc (Figure 28 B), les échantillons se dispersent au-dessus de la ligne Th/Sc = 1, correspondant à une source felsique de la croûte continentale supérieure (UCC).

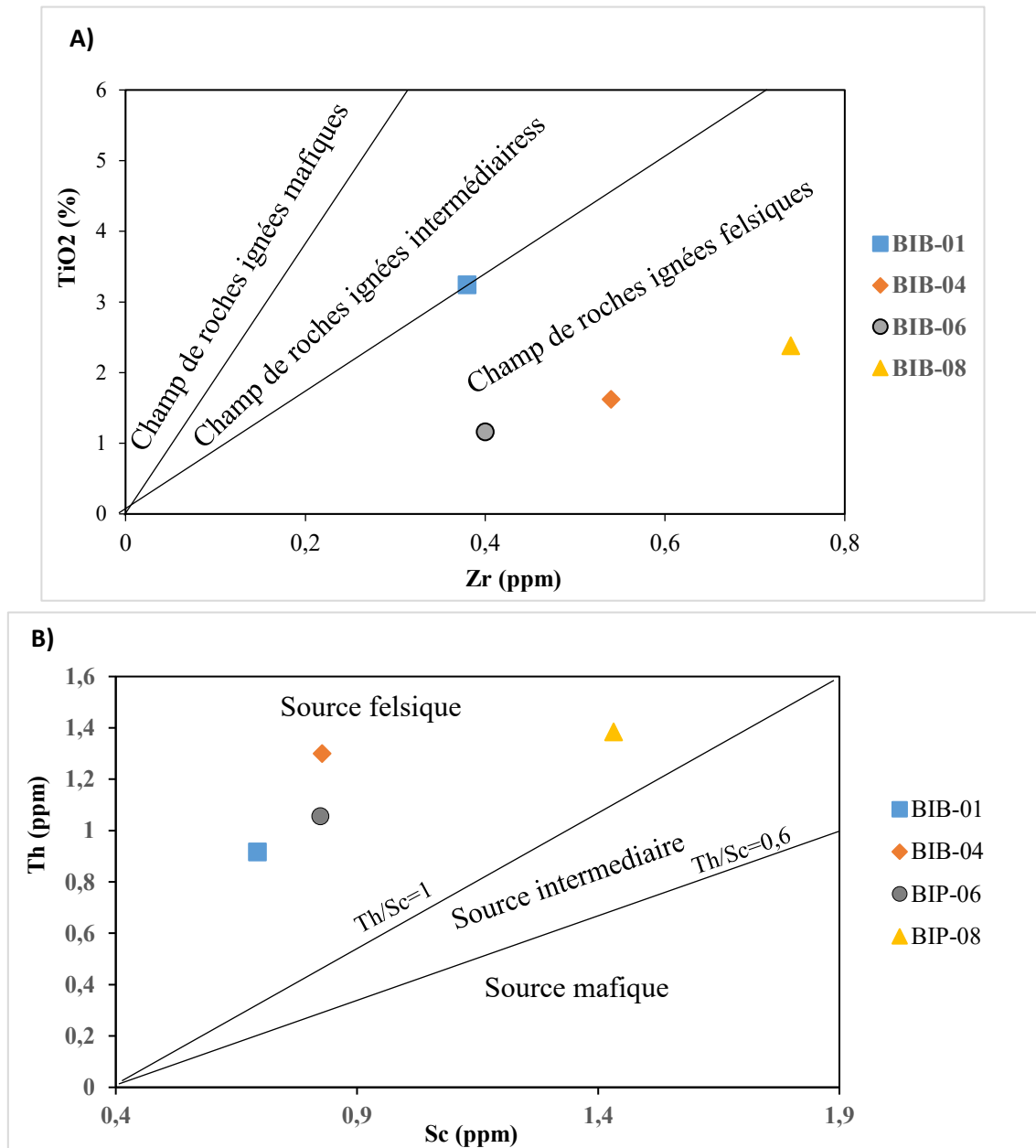


Figure 28 : Diagramme de : **A)** dispersion de Zr par rapport à TiO₂ (Hayashi *et al.*, 1997) et **B)** Th versus Sc montrant la source des sédiments alluvionnaires de la Djouel.

IV.5. MATURITE DES SEDIMENTS

La maturité des sédiments peut être évaluée à partir de l'indice de variabilité compositionnel (ICV) (Cox *et al.*, 1995). Un sédiment est d'autant plus mature que son ICV est inférieur à 1, tandis qu'un sédiment immature possède un ICV supérieur à 1. Dans la présente étude, les valeurs de l'ICV (1,0 à 1,5) étant toutes supérieures à 1, celles-ci indiqueraient que ces sédiments seraient immatures, excepté l'échantillon BIB-01 qui est à moitié mature. Cette

immaturité serait due à l'altération moyenne des feldspaths, à la forme des grains et aux valeurs obtenues sur les différents indices, ou elle peut être discutée dans la mesure où l'on note une faible proportion des minéraux ferromagnésiens et une forte proportion de quartz, ce qui est le cas dans notre étude. Le degré d'altération et la maturité des sédiments sont mis en relation à partir du diagramme ICV/CIA (Nesbitt et Young, 1982 ; Cox *et al.*, 1995). La position des sédiments étudiés sur ce diagramme, confirme l'intense altération de la roche source et le caractère totalement immature des sédiments de la zone d'étude (Figure 28).

Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est largement utilisé pour déterminer la maturité texturale des sédiments (Armstrong-Altrin *et al.*, 2012, 2015 ; Madhavaraju, 2015 ; Guo *et al.*, 2018). La valeur moyenne de ce rapport est 3 dans les roches ignées basiques et, 5 dans les roches ignées acides. Les valeurs de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ supérieures à 5 dans les sédiments clastiques indiquent des sédiments matures (Roser et Korsch, 1986). Les sédiments étudiés ont des valeurs du rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ qui varient entre 6,29 et 16,55. La valeur moyenne du rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est de 10,03. Cette valeur est deux fois supérieure à la valeur moyenne UCC qui est égale à ~ 4 (Armstrong-Altrin *et al.*, 2015). Ce qui n'est pas le cas dans ce diagramme. Par contre, les rapports $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ et $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ sont tous inférieurs à 1, ce qui suggère que ces sédiments sont immatures. Cette immaturité est confirmée par l'indice de variabilité compositionnel ($\text{ICV} > 1$) et le diagramme ICV/CIA.

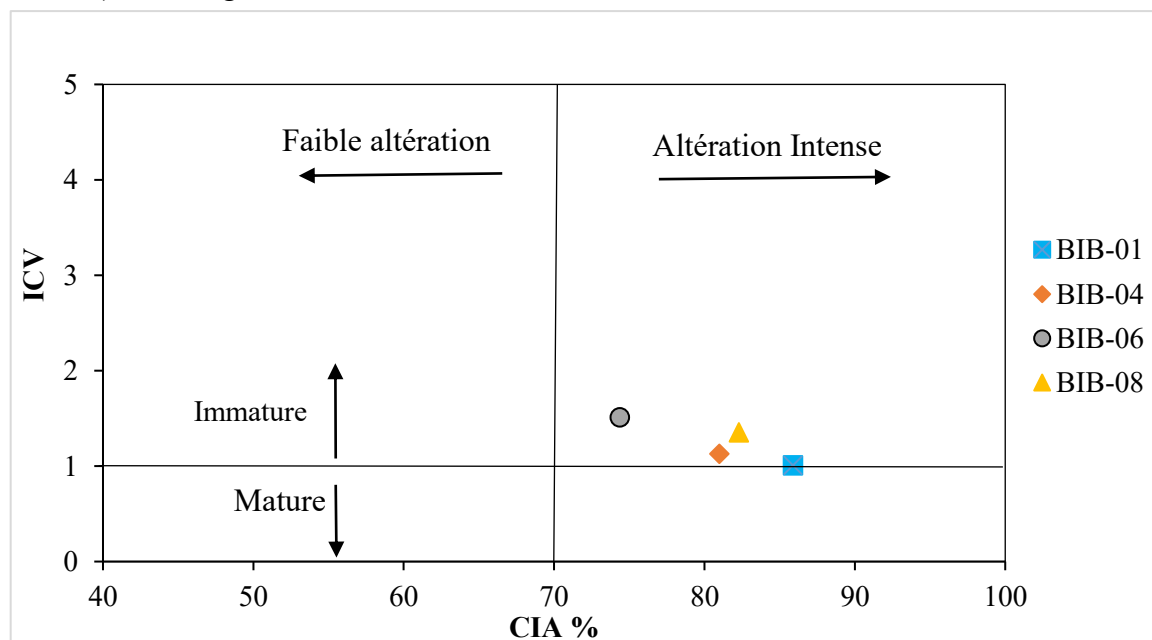


Figure 29 : Diagramme géochimique ICV/CIA des sédiments alluvionnaires dans la zone d'étude (Nesbitt et Young (1982) ; Cox *et al.*, 1995).

IV.6. DEGRE D'ALTERATION

De nombreux indices d'altération ont été proposés afin d'évaluer la mobilité des éléments durant l'altération chimique (Nesbitt et Young, 1982 ; Fedo *et al.*, 1995 ; Babechuk *et al.*, 2014). Ces indices d'altération sont communément utilisés afin de déterminer l'intensité de l'altération (Armstrong-Altrin *et al.*, 2012, 2015 ; Ndjigui *et al.*, 2018, 2019 ; Ngueutchoua *et al.*, 2019 ; Noa Tang *et al.*, 2020 ; Varghese *et al.*, 2024). En général, les indices d'altération comparent la concentration d'un élément immobile par rapport aux éléments mobiles (Garzanti *et al.*, 2014). De tous les indices, l'indice d'altération chimique CIA de Nesbitt et Young (1982), demeure l'indice le plus utilisé et permet de déterminer de manière quantitative le degré d'altération d'un matériau. Cet indice évalue l'hydrolyse progressive des feldspaths en minéraux argileux (Bhaskar *et al.*, 2015).

Les valeurs de CIA comprises entre 50 et 60 % indiquent un faible degré d'altération chimique, tandis que celles comprises entre 60 et 80 %, indiquent une altération chimique modérée. Lorsque les valeurs de CIA sont supérieures à 80 %, l'altération chimique est extrême. Le paramètre CIA permet aussi de se faire une idée sur le paléoclimat dans l'environnement source (Nesbitt et Young, 1982). En effet, l'abondance des minéraux argileux alumineux indique une intense altération chimique sous climat tropical ou équatorial. Les valeurs de CIA des matériaux d'altération sous climat tropical ou équatorial varient entre 80 et 100 %. Par contre, en milieu glacial, où la désagrégation mécanique domine l'altération chimique, les valeurs de CIA oscillent autour de 50 % (Nesbitt et Young, 1982). Les sédiments étudiés ont des valeurs de CIA comprises entre 74,38 et 85,91 %, soit une moyenne de 80,90 %. Ces matériaux ont subi une altération modérée à intense. Le degré d'altération des sédiments de la Djouel est donc modéré à intense. Les valeurs de l'indice d'altération des plagioclases (PIA) sont généralement utilisées pour quantifier le degré d'altération de la roche source (Bhaskar *et al.*, 2015). La valeur minimale de ce paramètre est de 50 %. La valeur maximale de PIA est égale à 100 % et elle indique une altération complète des plagioclases avec la formation de la kaolinite et de la gibbsite. Les valeurs de PIA autour de 50 % traduisent une altération très faible des plagioclases (Bhaskar *et al.*, 2015). Les sédiments étudiés ont des valeurs de PIA comprises entre 75,19 et 89,03 %, soit une moyenne de 82,32 %. Cette valeur confirme une altération intense des sédiments alluvionnaires de la Djouel. Il convient de noter que si les valeurs de CIA et de PIA démontrent une tendance similaire, les indices indiquent collectivement un degré d'altération modéré à élevé, corroboré par le graphique de l'indice de variabilité compositionnelle (ICV) par rapport au CIA (Figure 29). L'indice chimique d'altération (CIA)

et l'indice d'altération du plagioclase (PIA) calculés suggèrent collectivement une altération modérée à intense des matériaux sources. Ces résultats sont semblables à ceux obtenus dans les sédiments alluvionnaires sur le plateau continental au large de Quilon, côte sud-ouest de l'Inde (Varghese *et al.*, 2024) et ceux de la plage de Campo (Tsanga *et al.*, 2025). Ce comportement observé correspond au climat tropical humide et chaud qui prévaut dans le cours de la Djouel.

Pour déduire la tendance d'altération des sédiments du cours de la Djouel, certaines concentrations (Al_2O_3 , CaO, Na_2O et K_2O) ont été plotées dans le diagramme Al_2O_3 - ($\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}$) - K_2O (A-CN-K) (Nesbitt et Young, 1984 ; Fedo *et al.*, 1995). Les sédiments de la Djouel tombent sur des lignes parallèles à l'axe A-CN, au-dessus de la ligne qui relie les plagioclases aux feldspaths potassiques, et près du champ de la smectite et de la kaolinite (Figure 30). Ceci suggère que les sédiments ont subi une altération modérée à intense.

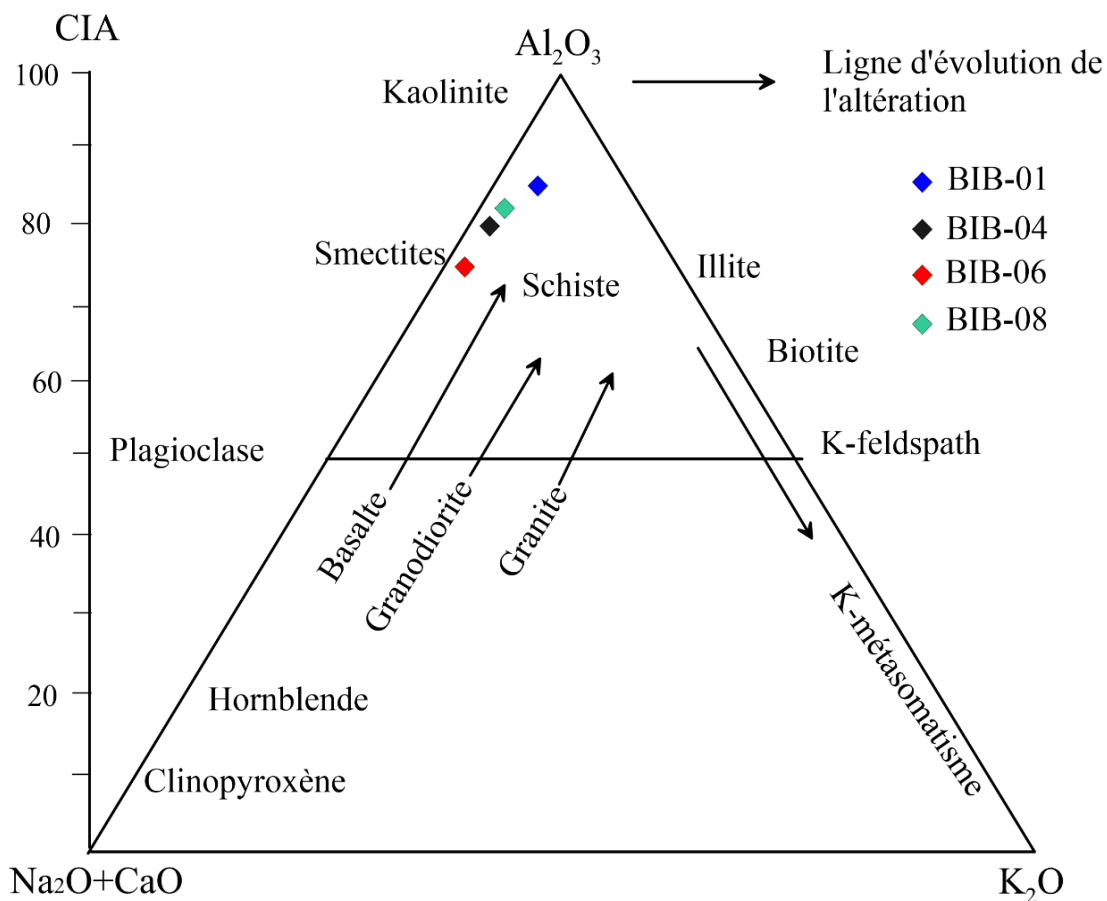


Figure 30 : Diagramme A-CN-K illustrant l'intensité d'altération des feldspaths calco sodiques (CN) et des feldspaths potassiques (K) dans les sédiments de la Djouel.

Conclusion

Les sédiments alluvionnaires de la Djouel sont mal triés. Les pentes fortes des courbes paraboliques traduisent l'hétérométrie des sédiments et un mauvais classement. Ces sédiments se distinguent par un régime hydrodynamique plus ou moins turbulent et à haute énergie, ayant subi un transport fluviatile. L'étude morphoscopique des grains de quartz et montre la prédominance des grains anguleux et sub-anguleux. Ceci illustre un court transport et une source proximale. L'analyse des minéraux lourds révèle la présence de chloritoïde, de tourmaline, de disthène, de grenat, de rutil, de zircon, de zoïsite, de staurotite, de diopside, d'anatase, d'augite, de sillimanite, et des minéraux opaques. Les analyses géochimiques ont montré que les sédiments se classent dans le domaine des Fe-Sand ; ce sont des sédiments immatures de roches sources felsiques provenant d'une altération modérément intense.

A decorative horizontal scroll graphic with a dark blue border and a light blue marbled interior. The scroll is slightly curved at the ends, giving it a three-dimensional appearance.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les études sédimentologiques et géochimiques des alluvions de la Djouel ont été réalisées dans le but de déterminer la provenance des sédiments, d'évaluer leur degré d'altération, ainsi que d'identifier les caractéristiques reflétant le plus fidèlement la nature des roches sources, conformément aux données de la littérature. Les principaux résultats obtenus sont présentés ci-dessous.

Du point de vue lithologique, les assemblages minéralogiques révèlent la présence de deux types pétrographiques à savoir : le micaschiste à grenat et à biotite caractérisé par une texture granolépidoblastique hétérogranulaire constitué de quartz, muscovite, biotite, grenat, disthène et minéraux opaques ; et le gneiss à micas et à grenat à texture granoblastique hétérogranulaire, constitué de quartz, de feldspath, de la biotite, de la muscovite et des minéraux opaques. Les sédiments de la Djouel sont majoritairement constitués de sables grossiers à moyens, à granulométries serrées. Ces sédiments sont hétérométriques, très mal triés, mal classés et asymétriques vers les éléments grossiers. La dynamique de dépôt est liée à un milieu plus ou moins agité de forte énergie. Les grains de quartz sont constitués en majorité des grains en formes anguleuses et sub-anguleuses. Ceci illustre un court transport et une source proximale.

L'assemblage minéralogique est dominé par des minéraux opaques et comprend du chloritoïde, de la tourmaline, du disthène, du grenat, du rutile, du zircon, de la zoïsite, de la staurotide, du diopside, de l'anatase, de l'augite et de la sillimanite. Cette association caractéristique relève une provenance métamorphique.

Sur le plan géochimique, les sédiments des alluvions de la Djouel sont riches en silice et en alumine. Les terres rares normalisées par rapport à la chondrite présentent un enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes, ainsi qu'une anomalie négative en Eu ($Eu/Eu^* = 0,62-0,76$). Ces sédiments proviennent de roches métamorphiques felsiques. Les diagrammes binaires (Zr versus TiO_2 et Th versus Sc) ont fourni la preuve de la contribution des roches felsiques à l'origine de ces sédiments. Les sédiments alluviaux sont classés dans le domaine des sables ferreux.

L'état d'altération de ces roches a été mis en évidence par le calcul des indices d'altération (CIA, PIA et CIW) et par les diagrammes A-CN-K, qui indiquent une altération modérément extensive dans la zone source et des conditions d'altération instables. De faibles rapports K_2O/Na_2O , K_2O/Al_2O_3 (< 1) et un indice de variabilité compositionnelle élevé (ICV

>1) suggèrent des sédiments immatures. Ces sédiments immatures sont le résultat d'une altération modérément extensive de roches mères felsiques.

PERSPECTIVES

Le travail effectué a permis d'étudier les sédiments alluvionnaires par leurs caractéristiques sédimentologiques et géochimiques. Dans le but d'approfondir cette étude, il convient de :

- Densifier la base de données pétrographique et géochimique des alluvions afin de consolider les résultats obtenus dans le bassin versant étudié.
- Améliorer la connaissance de la pétrographie des alluvions du bassin versant de la Djouel. Les méthodes géochimiques ont très peu été utilisées pour les études de ces sédiments. Il convient donc d'envisager une campagne géochimique détaillée pour améliorer la connaissance de ces sédiments.

A decorative horizontal scroll with a blue outline and a light beige marbled interior. The scroll has a vertical tab on the left side and small circular details at the top and bottom corners.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adiotome, E. E., Ejeh, I. O., Adaikpoh, E. O., 2017.** Geochemistry of Fluvial Sediments from Geregú, Southwest Nigeria. *Materials and Geoenvironment*, 64, 35-52.
- Adrien Berchet., 2014.** Modélisation par des méthodes lagrangiennes du transport sédimentaire induit par les mascarets. 116. <https://theses.hal.science/error/pagenotfound>.
- Ahmad, A. H. M., Noufal, K. N., Masroor, A. M., Travheed, K., 2014.** Petrography and geochemistry of Jumara Dome sediments, Kachchh Bas: implications for provenance, tectonic setting and weathering intensity. *Chinese Journal of Geochemistry*. 33, 009-023.
- Ambassa Bela, V., Ekoa Bessa, A. Z., Armstrong-Altrin, J. S., Ngueutchoua, G., Sababa, E., 2024.** Heavy Minerals in Beach Sediments Along the Gulf of Guinea, Cameroon: Clues on Weathering Conditions and Provenance. *Thalassas : An International Journal of Marine Sciences*, 40. 693-710. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3540948/v1>.
- Ambassa, B. V., 2020.** Pétrographie et géochimie des sédiments Côtiers de Yoyo, Sud-ouest du Cameroun. *Mémoire de Master de l'Université de Yaoundé I*. 107 p.
- Angue, A. M., 1982.** Étude géologique des séquences et faciès d'altération des gneiss migmatitiques du secteur sud-ouest de Yaoundé. *Mémoire Maîtrise de l'Université de Yaoundé I*. 60 p.
- 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, 345-362.20.
- Armstrong-Altrin, J. S., Ramasamy, N., Balaram, V., Olmedo, N. P., 2015.** Petrography and geochemistry of sands from the Chachalacas and Veracruz beach areas, western Gulf of Mexico. Constraints on provenance and tectonic setting. *Journal of South American Earth Sciences*, 64, 199–216.
- Asaah, V.A., 2010.** Lode gold mineralization in the Neoproterozoic granitoids of Batouri, South eastern Cameroon. Unpublished Doct Thesis, Clausthal. *University of Technology*, 202 p.
- Assiedu, D. K., Dampare, S. B., Asamoah, S. P., Banoeng-yakubo, B., Osae, S., Nyarko, B. J. B., Manu, J., 2004.** Geochemistry of Paleoproterozoic metasedimentary rocks from the birim diamondiferous field, southern Ghana: implications for provenance and crustal evolution at the Archean-Proterozoic boundary. *Geochemical Journal*. 38, 215-228.

- Babechuk, M. G., Widdowson, M., Kamber, B. S., 2014.** Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India. *Chemical Geology* 363, 56–75.
- Bagnouls, F. et Gaussen, H., 1957.** Les climats biologiques et leur classification. *Annales de Géographie*. 2, XXVI, 335, 183-220 p.
- Bah Mamadou. L., Hiroaki, I., 2016.** Geochemical classification and determination of maturity source weathering in Beach Sands of eastern San' in coast, Tango Peninsula, and Wakasa Bay, Japan. *Earth Sciences Research*, 5, 44-56.
- Balep, J., 1997.** Contribution à l'étude pétro structurale des métamorphites de la région de Matomb. *Mémoire de Master de l'Université de Yaoundé I*. 59 p.
- Beiner, M., Harmand, D., Cordier, S., Occhietti, S., 2009.** Les minéraux lourds des alluvions quaternaires du bassin de la Moselle: nouvelles données. *Quaternaire*, 20, (1), 2009, p. 63-80
- Belinga, C., 2017.** Caractérisation sédimentologique et chimique des placers d'or de Nkoléban (Département de la Mvila-Région du Sud). *Mémoire de Master de l'Université de Yaoundé I*, 46 p.
- Bhaskar, J. S., Satya, R. G., Borthakur, R., Indu, B. R., Rashmi, R. B., 2015.** Spectroscopic characterization and quantitative estimation of natural weathering of silicates in sediments of Dikrong River. India. *Journal of Modern Physics*. 6, 1631–1641.
- Bhuiyan, M.A., Rahman, J.J, Dampare, S.B., Suzuki, S., 2011.** Provenance, tectonics and source wearthing of modern fluvial sediments of the Baahmaputra-Jamuna River, Bangladesh: inference from geochemistry. *Journal Geochemistry Exploration.*, 111, 113 – 137.
- Biju-Duval, B., 1999.** Bassin, environnement de dépôts, formation du pétrole, *ed. technip*. Paris. 312p.
- Boaka Koul, L. M., Yongue, F. R., Ndjigui, P-D., 2009.** The alluvial sapphire profiles of Mayo Kewol placer in the Adamawa region (North- Cameroon): Granulometric and mineralogical features. *Journal of African Earth Sciences*. 56: 121–126.
- Bokanda, E. E., Philip, F., Ekomane, E., Bisse, S. B., Tata, C. N., Ashukem E. N., Belinga, B. C., 2021** 'Geochemical constraints on the provenance, paleoweathering and maturity of the Mamfe black shales , West Africa', *Journal of African Earth Sciences*, 175p. 104078. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.104078>.

- Bolarinwa, A. T., Idakwo, S. O., and Bish, D. L., 2019** 'Rare-earth and trace elements and hydrogen and oxygen isotopic compositions of Cretaceous kaolinitic sediments from the Lower Benue Trough, Nigeria: provenance and paleoclimatic significance', *Acta Geochimica* 18.781. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11631-019-00328-y>.
- Bouyo Houketchang, M., Zhaa, Penaye, J., Zhang, S.H., Njel, U.O., 2015.** Neoproterozoic subduction-related metavolcanic and metasedimentary rocks from the Rey Bouba Greenstone Belt of north-central Cameroon in the central African Fold Belt: New insights into a continental arc geodynamic setting. *Precambrian Research*. 261. DOI: [10.1016/j.precamres.2015.01.012](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.01.012).
- Brito De Neves, B. D., Van, S., Fetter, A., 2001.** North-West Africa North-Eastern Brazil. Major tectonic links and correlation problems. *Journal of African Earth Sciences*, 34, 275-273.
- Bustamante Santa Cruz., 1976.** Échelle d'altération des minéraux lourds. 146.
- Cailleux, A., 1942.** Distinction des sables marins et fluviatiles. *Bulletin of social Geology*, 125-138.
- Castaing, C., Triboulet, C., Feybesse, J. L., Chèvremont, P., 1994.** Tectonometamorphic Evolution of Ghana, Togo, Benin in the light of the Pan-African/ Brazilian orogeny. *Tectonophysics* 218, 323-347.
- Chamley, H., 1987.** Sédimentologie. *Edition Dunod, collection géosciences*, 175.
- Champetier De Ribes, G., Aubague., 1956.** Carte géologique de reconnaissance du Cameroun au 1/500 000, feuille de Yaoundé-Est, avec notice explicative, *Direction des Mines et de la Géologie du Cameroun*, 35 p.
- Chauris, L., 2021.** Contribution à l'étude du littoral de la baie d'Audierne (Finistère). Nature et origine des minéraux lourds des plages . *Hal Open Science*. 39 (156), pp.451-458.
- Chougong, D. T., Ekoa Bessa, A. Z., Ngueutchoua, G., Fouateu Yongue, R., Ntyam, S. C., Armstrong-Altrin, J. S., 2021.** Mineralogy and geochemistry of Lobé River sediments, SW Cameroon: Implications for provenance and weathering. *Journal of African Earth Sciences*, 183. 104320. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104320>.
- Cox, R., Lowe, D. R., Cullers, R. L., 1995.** The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochemistry, Cosmochimica. Acta* 59, 2919-2940 p.

- Davidson et Reginaldo., 1989.** Tectonic evolution for the seripano Fold Belt, NE Brazil, during the Brazilian Orogeny. *Precambrian Research* 45, 319-342.
- Davis, M. W., Ehrlich, R., 1970.** Relationships between measures of sediment-size frequency distributions and the nature of sediments. *Geological Society of America Bulletin* 81, 3537–3548 p.
- Duplaix, S., 1958.** Détermination microscopique des minéraux de sable. Librairie polytechnique ; Béranger, 2, 97 p.
- Ekoa Bessa, A. Z., Ndjigui, P. D., Fuh, G. C., Armstrong-Altrin, J. S., Betsi, T. B., 2021.** Mineralogy and geochemistry of the Ossa lake Complex sediments, Southern Cameroon: implications for paleoweathering and provenance. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(4). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06591-9>.
- Embui, V. F., Omang, B. O., Che, V. B., Nforba, M.T., Suh, E. C., 2013.** Gold grade variation and stream sediment geochemistry of the Vaimba-Libi drainage system, Northern Cameroon (West Africa). *Natural Science* 5, 282-290.
- Espinoza-Maldonado, I. G., Grijalva-Noriega, F. J., 2016.** Paleoclimate, paleoweathering and paleoredox conditions of Lower Cretaceous shales from the Mural Lime stone, Tuape section, northern Sonora, Mexico: constraints from clay mineralogy and geochemistry. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33(1). 34-48.
- Etemad-Saeed, N., Hosseini-Barzi, M., Armstrong-Altrin, J. S., 2011.** Petrography and geochemistry of clastic sedimentary rocks as evidence for provenance of the Lower Cambrian Lalun Formation, Posht-e-badam block, central Iran. *Journal of African Earth Sciences*. 61, 142–159.
- Evina Nkoto, S., 2018.** Contribution à l'étude sédimentologique, minéralogique et géochimique du rutile de Mbili-Medoumou-Nkol Djaa près d'Akonolinga (Centre Cameroun). *Mémoire Master de l' Université de Yaoundé I*, 89 p.
- Fedo, C. M., Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1995.** Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rock sand paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology of African Earth Science* (23), 921-924 p.
- Folk, R. L., Ward, W. C., 1957.** Brazos River bar, a study in the significance of grain size parameters: *Journal of Sedimentology Petrology* 27, 3-26 p.

- Fornari, M., Viscarra, G., 1988.** La Cordillère Royale de Bolivie à partir de l'analyse morphoscopique de paillettes d'or prélevées en alluvion. 63–69.
- Forst, C., 2010.** La dynamique fluviale, à l'origine de la biodiversité et du bon état écologique. Hydromorphologie. *ONEMA*. pp. 1-6.
- Foucault, A., Raoult, J. F., 2001.** Dictionnaire de Géologie.
- Foucault, A., Raoult, J. F., 2019.** Dictionnaire de Géologie.
- Fuanya, C., Temidayo, A., Kankeu, B., Fouateu, R., Bryan, R., Emmanuel, T., 2019.** Morphological and chemical assessment of alluvial gold grains from Ako 'ozam and Njabilobe, southwestern Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*. 154. 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.03.012>.
- Garzanti, E., Padoan, M., Setti, M., López-Galindo, A., Villa I. M., 2014.** Provenance versus weathering control on the composition of tropical river mud (Southern Africa). 123. 76-89.
- Giroux, M., Tran, S., 1996.** Critères agronomiques et environnementaux liés à la disponibilité, la solubilité et la saturation du phosphore des sols agricoles du Québec. *Agrosol*, 9, (2), 51-57.
- Guo, Y., Yang S., Su, N., Li, C., Yin, P., Wang, Z., 2018.** Revisiting the effects of 28 hydrodynamic sorting and sedimentary recycling on chemical weathering indices. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 227, 48–63.
- Hamimed, M., Gouaidia, L., a Nabil, D., Abdessadok, S., Djerrab, A., 2015** 'Approche Stratigraphique et Sédimentologique de Terrasses Alluviales Quaternaires du Site de Ben Hliem Sud-Ouest de Tébessa, (Algérie)' *European Journal of Scientific Research*. Vol. 129 No4, pp.395 – 409.
- Hayashi, K., Fujisawa, H., Holland, H. D., Ohmoto, H., 1997.** Geochemistry of 1.9 Ga sedimentary rocks from North Eastern Labrador, Canada. *Geochemistry Cosmochimica Acta* 61, 4115-4137p.
- Hernandez-Hinojosa, V., Patricia, C., Montiel-G., Amstrong, J. S., Ramasamy, M. Juan, J., 2018.** Texturals and geochemical characteristics of beach sands along the western Gulf of Mexico, Mexio. *Carpathian journal of earth and environmental sciences*, 13 (1), 161-174 p.
- Herron, M. M., 1988.** Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentology Petroleum* 58, 820–829p.

- Hervieu, J., 1966.** Contribution à l'étude de l'alluvionnement en milieu tropical : les facteurs de la sédimentation continentale, les produits de l'érosion, les sols alluviaux, sur le versant occidental de Madagascar. 468, 15.
- Hjulström, F., 1935.** Studies of Morphological Activity of Rivers as Illustrated by the River Fyris. *Bulletin of the Geological Institute University of Uppsala*, 25, 221-527.
- Hossain, S. M. D., Jorn, H. K., 2014.** Fracture patterns and fragment size distributions as indicators of shock-related brittle deformation, 25p. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.01.003>.
- Hossain, H. M. Z., Islam, M. A., Al Hossain, A., Armstrong-Altrin, J. S., Nipa, F. Y., 2024** 'Forest site, Bangladesh : Constraints on the depositional environment and Quartz grain surface features and mineralogy of sediments in the Sundarbans Forest site, Bangladesh : Constraints on the depositional environment and provenance', *Arabian Journal of Geosciences*, 17:314. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12517-024-12124-x>.
- Huberson, G., Doufou, C. N., Konan, K. E., Boga, A. H., 2018.** Origine et évolution des quartz du littoral compris entre Fresco et Jacqueville, Côte d ' Ivoire Résumé. 14(1), 171–180.
- Janpou, A., 2018.** Pétrologie et géochimie des sables littoraux de Batoké Camp Secteur Sud, Limbé, Sud- Ouest Cameroun. *Mémoire de Master de l'Université de Yaoundé I*, 77 p.
- Kankeu, K. U., 2019.** Minéralogie et géochimie des sables littoraux de la localité de Batoké Camp, secteur Nord ligne du Sud-Ouest Cameroun. *Mémoire de Master de l'Université de Yaoundé I*. 94 p.
- Kasanu, C., Matboko, M. A. H., Many, S., 2008.** Geochemistry of fine grained sedimentary rocks of the Neoproterzoic Ikorongo Group, NE Tanzania: Implications for provenance and source rock weathering. *Precipitation Research.*, 164, 201 - 213.
- Kaupe, S., Geffray, O., 2012.** Valorisation des berges de Loire : Quelques Conseils. Conservatoire régional des rives de la Loire et de ses affluents, (*CORELA*). pp.1-39.
- Kouankap, N. G. D., Yiika, L. P., Ewokoko, M., Mbua, M., Eric, B. E., Emmanuel, E. M., Jean-lavenir, N. M., Armstrong-altrin, J. S., 2024.** Geochemistry of sediments from the Mugheb River , Bamenda , Cameroon Volcanic Line : implications for provenance, paleoweathering and tectonic setting. *Arabian Journal of Geosciences*, 17:331 . <https://doi.org/10.1007/s12517-024-12148-3>.

- Kwewouo, J. A., 2018.** Pétrologie des Sables littoraux de la localité de Batoké Camp secteur Sud Limbé Sud-Ouest Cameroun. *Mémoire de Master de l'Université de Yaoundé I.* 83.
- Kwewouo, J.A., Ngueutchoua, G., Ekoa Bessa, A. Z., Armstrong-Altrin, J.S., Kankeu Kayou, U. R., Mbella Nguetnga, O. A. N. N., Njanko, T., Ambassa Bela, V., Tiotsop, M. S. K, Tankou, J. G., 2022.** Composition, altération et provenance des sables de plage adjacents aux roches volcaniques dans le nord du golfe de Guinée. Sud-Ouest du Cameroun. *Journal of African Earth Sciences*, 188:104473.
- Letouzey, R., 1985.** Carte de la végétation du Cameroun (8 feuilles au 1/ 500,000, 5 notices explicatives), Institut de la carte internationale de la végétation, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Liu, B., Wang, Y., Su, X., Zheng, H., 2013** 'Elemental geochemistry of northern slope sediments from the South China Sea: Implications for provenance and source area weathering since Early Miocene', *Chemie der Erde*, 73(1), pp. 61–74. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2012.11.005>.
- Liyouck, P. R., Ngueutchoua, G., Armstrong-Altrin, J. S., Sonfack, A. N., Ngagoum, Y. S. K., Ekoa Bessa, A. Z., Ambassa Bela, V., Tsanga, D. A., Wouatong, A. S. L., 2023.** Petrography and geochemistry of the Sanaga river sediments, central Cameroon: Constraints on weathering, provenance, and tectonic setting. *Journal of African Earth Sciences*, 199. 104840. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.104840>.
- Loung, J. F., Laclavère, G., 1979.** Atlas de la république unie du Cameroun. *Edition. Jeune Afrique, Groupe J. E, Paris.*
- Madhavaraju, J., 2015.** Geochemistry of Late Cretaceous sedimentary rocks of the Cauvery Basin, south India: constraints on paleoweathering, provenance, and End Cretaceous environment. *Chemostratigraphy*, 185-214, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-780419-968-2.00008-X>.
- Madhavaraju, J., Ramírez-Montoya, E., Monreal, R., González-León, C.M., Pi-Puig, T., Espinoza-Maldonado, I.G., Grijalva-Noriega, F.J., 2016.** Paleoclimate, paleoweathering and paleoredox conditions of Lower Cretaceous shales from the Mural Lime stone, Tuape section, northern Sonora, Mexico: constraints from clay mineralogy and geochemistry. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33(1). 34-48.
- Malavoi, J-P., Bravard, J-R., 2010.** Eléments-dhydromorphologie-fluviale. *ONEMA*, 27.

- Malavoi, J. R., Garnier, C. C., Landon, N., Recking, A., Baran, P., 2012.** Elements de connaissance pour la gestion. Office national de l'eau et des milieux aquatiques (*ONEMA*). 76.
- Malibangar, A., Lang, J., Censier, C., 2014.** Utilisation des minéraux lourds comme indicateurs de paleoplacers alluvionnaires diamantifères en République Centrafricaine (RCA). *Pangea*, 2001, 36/36, pp.43-58. <insu-00947841>.
- Marques, R., Prudencio, I. M., Rocha, F., 2011.** Patterns of rare earth and other traces element in different size fraction of clays of Campanian-Maastrichtian deposits from the portuguese western margin(Aveuro and Traveiro formations). *Chemie Erde-Geochemistry.*, 71, 337-347.
- Martins, R., Azevedo, M. R., Mamede, R., Sousa, B., Freitas, R., Rocha, F., Quintino, V., Rodrigues, A. M., 2014.** Sedimentary and geochemical characterization and provenance of the portuguese continentalshelf soft-bottom sediments . *Journal Of Marine Systems.*, 91, 41-52.
- Mathieu, C., Pieltain, F. 1998.** Physical analysis of soil. Masson, 274.
- Maurizot, P., Abessolo, A., Feybesse, J. L., Johan, L. P., 1986.** Etude de prospection minière du Sud Ouest Cameroun. Synthèse des travaux de 1978 à 1985. Rapport de BRGM, 85 p.
- Mbale Ngama, E., Sababa, E., Bayiga, E. C., Ekoka Bessa, A. Z., Ndjigui, P-D., Bilong, P., 2019.** Mineralogical and geochemical characterization of the unconsolidated sands from the Mefou River terrace, Yaoundé area, Southern Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 159, 103570. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103570>.
- Mbog, M. B., Ngon Ngon, J.F., Tassongwa, B., Tehna, N., 2022.** Clay deposits of Ngoma (Douala sedimentary subbasin Cameroon, Central Clay deposits of Ngoma (Douala sedimentary subbasin Cameroon, Central Africa): a provenance study. 15:1122 <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10130-5>.
- McDonough, W. F., Sun, S. S., 1995.** The composition of the Earth. *Chemical geology*, 120, 223-253.
- McLennan, S. M., Hemming, S., Mc Daniel, D. K., Nanson, G. N., 1993.** Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. In: Johnsson, M.J., Basu, A. (Eds), Processes Controlling the composition of clastic Sediments: Boulder, Colorado. *Geological Society of America, Special Publications*. 284, 21-40.
- Meinhold, G., Andres, B., Kostopoulos, D., Reischmann, T., 2008.** Rutile chemistry and thermometry as provenance indicator: an example from Chios Island, Greece. *Sediment Geological.*, 203, 98-111.

- Miguel, G. G. R., 2024.** Caractérisation sédimentologique et géotechnique des alluvions de la Sanaga en Mbébé/Kikot. *Mémoire de Master de l'Université de Yaoundé I*, 78 p.
- Mimba, M. E., Wirmvem, M., Jude, M., César, S., Fils, N., Numanami, N., Tamnta, M., 2019** 'Geochemical Behavior of REE in Stream Water and Sediments in the Gold - Bearing Lom Basin, Cameroon: Implications for Provenance and Depositional Environment', *Aquatic Geochemistry*, 67-101. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10498-019-09365-8>.
- Minyem, D., 1994.** Contribution à l'étude de l'évolution métamorphique et structurale du secteur Eséka-Makak (Cameroun, Département du Nyong et Kellé, Province du Centre). Thèse de Doctorat 3^e Cycle, Université de Yaoundé I : 166 p.
- Mouldi, B., Chkiou, A., 2013.** Répartition granulométrique et minéralogique des sédiments de surface dans le golfe de Tunis. Bulletin institut national des sciences et Technologies Mer de Salammbô, 34, 9 p.
- Mvondo, H., Owona, S., Mvondo, J., Essono, J., 2007.** Tectonic evolution of the Yaoundé segment of the Neoproterozoic Central African Orogenic Belt in southern Cameroon. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 44: 433-444.
- Nanga, B. M. T., Onana, V. L., Noa Tang, S.D., Bikoy, Y. R., Ekodeck G. E., 2020.** Mineralogy and geochemistry of sands of the lower course of the Sanaga River, Cameroon: implications for weathering, provenance, and tectonic setting. *Acta Geochimica*. <https://doi.org/10.1007/s11631-020-00437-z>.
- Nanga, B. M. T., Ndzié Mvindi, A. T., Effoudou-Priso, N. E, Bikoy, Y. R., Ohandja, N. H, Onana, V. L, Ekodeck, G.E., 2022.** Mineralogy, geochemistry and physic-mechanical characterization of basalts, granites, and sands from Sanaga River (Cameroon): Potential use as construction materials. *Arabian Journal of Geosciences*. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10589-2>.
- Ndjigui, P-D., Bilong, P., Nyeck, B., Eno Belinga, S. M., Vicat, J.P., Gerard, M., 1999.** L'étude morphologique, minéralogique et géochimique de deux profils latéritiques dans la plaine côtière de Douala (Cameroun), Géologie et environnement du Cameroun. *Edition Collect. GEOCAM*. 2/1999. Press. Université de Yaoundé I. pp. 189-201.
- Ndjigui, P-D., Badinane, M. F.B. B., Nyeck, B., Nandjip, H. P. K., Bilong, P., 2013.** Mineralogical and geochemical features of the coarse saprolite developed on orthogneiss in the SW of Yaoundé, South Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*. 79: 125–142.

- Ndjigui, P.D., Fadil-Djenabou, S., Beauvais, A., Ambrosi, J. P., 2014.** Origin and evolution of Ngaye River alluvial sediments, Northern Cameroun: Geochemical constraints. *Journal of African Earth Sciences*. 100, 164-178.
- Ndjigui, P-D., Onana, V.L., Sababa, E., Bayiga, E.C., 2018.** Mineralogy and geochemistry of the Lokoundje alluvial clays from the Kribi deposits, Cameroon Atlantic coast : Implications for their origin and depositional environment. *Journal of African Earth Sciences* 143. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.03.023>.
- Ndjigui, P-D., Bayiga, E. C., Onana, V. L., Djenabou-Fadil, S., Ngono, G. S. A., 2019.** Mineralogy and geochemistry of recent alluvial sediments from the Ngaye River water shed, northern Cameroon: implications for the surface processes and Au-PGE distribution. *Journal of African Earth Sciences* 150, 136–157.
- Ndjigui, P-D., Bidzang, F. N., Ongbaye, B. P. R., 2020.** TiO₂ – Zr – Th – Y – rare-earth elements ore deposit in unconsolidated fine-grained sediments from Tongo Gandima in the Bétaré Oya Gold district , Eastern Cameroon. *Geological Journal*. 1-23. <https://doi.org/10.1002/gj.4061>.
- Ndong, F. B., Ntomba, S. M., José, E., Okia, D., 2014.** Géochimie comparative des sédiments de ruisseaux des rives droite et gauche du sous-bassin hydrographique de Koubou (Est-Cameroun). *Afrique SCIENCE*. 10 (3), 171–181.
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1982.** Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299, 715-717 p.
- Ngnotue, T., Nzenti, J. P., Barbey, P., Tchoua, F. M., 2001.** The Ntui-Betamba high grade gneisses: a northward extension of the pan-african Yaoundé gneisses in Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*. 312. pp, 369-381.
- Ngon Ngon, G. P., 1996.** Étude de la genèse des dépôts de rutile alluvionnaire du Cameroun : le cas des dépôts de rutile alluvionnaires du bassin versant de la Messié Mezoa, Département de la Mefou-et-Akono, province du centre. *Mémoire de Maîtrise de l'Université de Yaoundé I*, 60 p.
- Ngon Ngon G. F., 2007.** Étude morphologique, minéralogique, géochimique et Cristallographique des argiles latéritiques et des argiles hydromorphes de la région de Yaoundé en zone tropicale humide. Essai industriel et évaluation de leur potentialité comme matériaux de construction. Thèse Doctorat/PhD. *Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I*. 200

- Ngueutchoua, G., Eyong, T. J., Ekoa Bessa, A. Z., Azanji Agheenwi, Z. B., Emame Maschouer, A., Sobdjou Kemteu, C., Lontchi Dzoti, Y., Touda Hamadou, Ongbassouek Baboule, B. M., Kenfack Nguemo, G. R., 2019.** Provenance and depositional history of Mesozoic sediments from the Mamfe basin and Douala sub-basin (SW Cameroon) unraveled by geochemical analysis. *Journal of African Earth Sciences*, 158, 103550.849 <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103550>.
- Nguimatsia, F. W. D., John, R., Temidayo, A., Fouateu, R., Banks, D. A., Olajide-kayode, J. O., 2019.** Journal of African Earth Sciences Microchemical characterization of placer gold grains from the Meyos- Essabikoula area, Ntem complex, southern Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 151. 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.12.006>.
- Noa Tang, S. D., Ntsama Atangana, J., Onana, V. L., 2020.** Mineralogy and geochemistry of alluvial sediments from the Kadey plain, eastern Cameroon: Implications for provenance, weathering, and tectonic setting. *Journal of African Earth Sciences* 163.103763. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103763>.
- Ntep Gaweth, P., Dupuy, J. J., Matip, O., Fogakoh, A. Fa., Kalngui, E., 2001.** Ressources minérales du Cameroun . Notice explicative de la carte thématique des ressources minérales du Cameroun sur fond géochimique. République du Cameroun , 375.
- Nyeck, B., Ngimbous, R.V., Ndjigui, P-D., 2018.** Petrology of saprolite developed on gneisses in the Matomb region, south Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*. 150: 107–122.
- Nyobe, J. M., Sababa E., Bayiga, E. C., Ndjigui, P-D., 2018.** Mineralogical and geochemical features of alluvial sediments from the Lobo watershed (Southern Cameroon): implications for rutile exploration. *Comptes Rendus des Geosciences*. 350, 119-129.
- Nyobe M. J., Ngo Bidjeck B. L. M., Ilouga D. C., Sababa E., 2021.** Petrography Sedimentology and geochemistry and geochemistry of rocks and sediments from three key localities from the Yaounde group (centre region, Cameroon): implications for Rutile exploration. *International journal of Geosciences*, 14, 157-172.
- Nzenti, J. P., Barbey, P., Macaudiere, J., Soba, D., 1988.** Origin and evolution of late Precambrian high-grade Yaoundé gneisses. *Precambrian Research* 38: 91-109.
- Nzenti, J. P., Barbey, P., Tchoua, F. M., 1999.** Évolution crustale au Cameroun : élément pour un modèle géodynamique de l'orogénèse Néoprotérozoïque, Géologie et environnement du Cameroun. *Ed. Collect. GEOCAM. 2/1999*. Press. Université de Yaoundé I. 397-407 p.

- Nzenti, J.P., Minyem, D., Tchouankoué, J.P., Belinga, S.E., 2001.** Histoire Géologique du Cameroun. Le Panafricain. *Les Classiques Camerounais*, 39-55
- Nzesseu, N. V., 2019.** Caractéristiques sédimentologiques du rutile alluvionnaire de Minto, Département de la Mvila, Sud-Cameroun. *Mémoire de Master de l'Université de Yaoundé I*, 61 p.
- Nzesseu, N. V., Betsi, B. T., Belinga, B. C., Ekomane, E., Tebogo, K., 2025.** Rutile U-Pb ages and implications for the extension of the timing of the Eburnean overprint in the Ntem Complex (southern Cameroon) portion of the Congo Craton. *Journal of African Earth Sciences* 221. 105459. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2024.105459>.
- Ongboye Bassanak, P. R., Sababa, E., Ndong, Bidzang, F., Ndjigui, P-D., 2019.** Geochemical characterisation of surface sediments from Tongo Gadima (Eastern Cameroon): implication for gold exploration. *Arabian Journal of Geosciences*. 7.
- Ouambeti-wickon, A. J., Ngueutchoua, G., Wouatong, A.S.L., Danguene, P. E., Takenne, D. G., Sonfack, A. N., 2024.** Mineralogy and geochemistry of the sediments of the Ouaka river , central- eastern Central African Republic : weathering, provenance and tectonic setting. *Research Square*.3-36. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4621855/v1>.
- Parfenoff, A., Pomerol, C., Tourenq, J., 1970.** Minerals in grains: methods of study and determination. Masson and Cie, *Edition, Paris*, 571.
- Penaye, J., Toteu, S. F., Tchameni, R., Van Schmus, W. R., Tchakounté, J., Ganwa, A., Minyem, D., Nsifa, E. N., 2004.** The 2.1 Ga West Central African Belt in Cameroon: extension and evolution. *Journal of Earth Sciences*. 39: 159-164.
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., Siever, R., 1987.** Sand and sandstones. *Springer, New York*, 553 p.
- Plan Communal de Développement de BotMakak et de Nyanon, 2015.** 173 p.
- Poidevin, J. L. 1983.** La tectonique panafricaine à la bordure Nord du craton du congolais. L'orogénèse des "Oubanguides". Abstracts 12th *African Geological. Tervuren*: 75.
- Pomerol, C., Fouet, R., 1972.** Minerais et terres rares. Masson, 135.
- Powers, M.C., 1953.** A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal Sedimentary Research*. 23 (2): 117-119p.

- Ramos-vázquez, M. A., Armstrong-altrin, J. S., Fernández-guevara, G. D., 2024.** Provenance of sediments and environmental risk assessment of heavy metals in the “ Mis Amores ” beach, Veracruz , Gulf of Mexico. *Journal Indian Association of Sedimentologists*. 41(2582), 55–67. DOI: <https://doi.org/10.51710/jias.v41i1.355>.
- Robert Étienne et Jean-Pierre Larue., 2011** « Contribution à l'étude des liaisons Loire-Seine : mise en évidence par l'étude des minéraux lourds de l'antécédence de la Loire en Sologne (Bassin Parisien, France) », *Physio-Géo*, Vol 5.123. URL: <http://journals.openedition.org/physio-geo/2181>; DOI: <https://doi.org/10.4000/physio-geo.2181>.
- Roser, B. P., Korsch R. J., 1986.** Determination of tectonic setting of sandstones-mudstones suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *Journal of Geology* 94, 635–650.
- Sababa, E., Ekoa Bessa, A. Z., Beyanu, A.Y., Ahounta, S.B. L., Welba, M. 2023.** Morphological , mineralogical and geochemical features of alluvial sediments in Bol area (Lake Chad Basin): implications for source area-weathering and tectonic settings. *Research Square*: 1–22 :DOI : <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2977473/v1>.
- Sababa, E., Tehna, N., Aye, B. A., Chiozem, M. M. M., Zacharie, A., Bessa, E., Kanewene, E., Isaac, N., 2024.** Heliyon Mineralogical and geochemical characteristics of the Nkoteng-Mbandjock alluvial clays from Sanaga valley deposits (Cameroon, Central Africa): Implications for source weathering and provenance. *Héliyon*.10.e28395 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28395>.
- Sawyer, E. W., 1986.** The influence of source rock type, chemical weathering and sorting on the geochemistry of clastic sediments from the Quetico meta sedimentary belt, Superior Province, Canada. *Chemical Geological.*, 55, 77- 95.
- Sheldon, N. D., Tabor, N. J., 2009.** Quantitative paleoenvironmental and paleo-climatic Reconstruction using paleosols. *Earth-Science Reviews* 95, 1-52 p.
- 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 Yaoundé region from the Neoproterozoic Pan-African belt in southern Cameroon (Central Africa), *Journal of African Earth Sciences*. 44: 443–456.
- Suh, C. E., Lehmann, B., Mafany, G. T., 2006.** Geology and geochemical aspects of gold mineralization at Dimako-Mboscorro, SE Cameroon. *Geochemistry Exploration Environment Analysis* 6, 295-309.

- Tonje, J. C., 2007.** Contribution à l'étude des dépôts alluvionnaires riches en rutile de la rivière Teba, secteur de Matomb (Plateau Sud-Camerounais), *Thèse de Doctorat PhD., Université de Yaoundé I.* 84p.
- Tonje, J.C., Ndjigui, P-D., Nyeck, B., Bilong, P., 2013.** Geochemical features of the Matomb alluvial rutile from the Neoproterozoic Pan-African belt, Southern Cameroon (in press), *Chemie der Erde - Geochemistry.* 89- 115.
- Tonjé. J. C., 2020.** Petrologie des laterites et des alluvions dans la région de Matomb (plateau Sud Camerounais) : *Thèse de Doctorat*, 115.
- Toteu, S. F., Penaye, J., Poudjom D. Y. H., 2004.** Geodynamic evolution of the Pan-African belt in Central Africa with special reference to Cameroon. *C. Journal of Earth Sciences* 41: 73–85.
- Trompette, R., 1994.** Geology of western Gondwana (2000-500 Ma). Pan-African- Brazilian aggregation of South America and Africa. *A.A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands*, 350p.
- Tsanga, A. D., Ekoa Bessa, A. Z., Ngueutchoua, G., Armstrong-Altrin, J.S., 2025.** Microtexture, mineralogy, and geochemistry of sediments in the Campo beach area, South Cameroon. *Journal des environnements sédimentaires.* 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43217-025-00229-6>.
- Varghese, S., Remya, C., Joseph, S., Rajaneesh Narayan, P. R., Mukhopadhyay, B., 2024.** Provenance, Intensity of Weathering, and Economic Potential of Placer-bearing Sediments on the Shelf off Quilon, Southwestern Coast, India. *Pubs.geoscienceworld.org. Journal Geological Social. India* 100 (9): 1299–1310. <https://doi.org/10.17491/jgsi/2024/173983>.
- Welba, M., 2022.** Caractérisation physique des matériaux alluvionnaires de la rivière djel a Pan-makak (Bot-Makak). *Mémoire de Master de l'Université de Yaoundé I.* 64 p.
- Wentworth C. K., 1922.** A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology* 30 (5), 377-392.
- Wronkiewicz, D. J., Condie, K. C., 1987.** Geochemistry of Archean shales from the Witwaters and Super group, South Africa: Source area, weathering and provenance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 2401-2416.
- Yadav, P. K. and Patel, D. K., 2024.** Geology and Geochemistry of Medium to Coarse-grained Sandstone of the Facies-B of Patherwa Formation Belonging to the Semri Group, Eastern India:

Implications on Provenance, Source-area Weathering, Depositional Environment and Geodynamic Set-up. 10. 1019.

Yonta-Ngouné, C., 2010. Le contexte géologique des indices de talc de la région de Boumnyebel (chaîne panafricaine d'Afrique Centrale, Cameroun). *Thèse de Doctorat PhD., Université de Yaoundé I*: 221 p +annexes.

ANNEXES

Annexe 1: Explication de la méthode ME-MS19.

Geochemistry / Method Description

ME-MS19

Low-Level Rare Earth Element Analysis by Ammonium Sulphate Leach and ICP-MS

Sample Decomposition:
Ammonium Sulphate Leach (GEO-AS04)

Analytical Method:
Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES) and Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry (ICP-MS)

A prepared sample (30g) is leached by 0.5M Ammonium Sulphate solution and agitated by tumbling. After leaching, the mixture is centrifuged, and an aliquot of the solution is taken and diluted with 2% nitric acid. Digestion process is optimised to improve recoveries of rare-earth elements. The resulting solution is analysed by a combination of ICP-AES and ICP-MS.

NOTE: The low detection limits are particularly useful for REE exploration in clays, soils, or sediments. This method is not appropriate for mineralised samples.

Analytes and Ranges (ppm)									
Al	5-250000	Er	0.004-1000	Mg	1-250000	Rb	0.05-10000	Tm	0.002-1000
B	10-10000	Eu	0.004-1000	Mn	0.2-50000	Sc	0.005-10000	U	0.005-10000
Ba	0.5-10000	Fe	5-500000	Mo	0.01-10000	Si	10-10000	V	0.4-10000
Be	0.01-1000	Gd	0.005-1000	Na	50-100000	Sm	0.004-1000	W	0.01-10000
Ca	20-250000	Hf	0.005-500	Nb	0.005-500	Sr	0.03-10000	Y	0.005-500
Ce	0.005-500	Ho	0.002-1000	Nd	0.05-10000	Ta	0.005-500	Zr	0.004-1000
Co	0.005-10000	K	20-100000	Ni	0.1-10000	Tb	0.002-1000		
Cs	0.005-500	La	0.002-10000	P	5-10000	Th	0.005-10000		
Cu	0.04-10000	Li	0.2-10000	Pb	0.05-10000	Ti	5-100000		
Dy	0.005-1000	Lu	0.002-1000	Pr	0.004-1000				

February 2024
Revision 2.1

ALS right solutions. right partner.

alsglobal.com

Geochemistry / Method Description

ME-GRA05

LOI by TGA Analyser

Sample Decomposition:
TGA

Analytical Method:
Gravimetric

A prepared sample (1-5g) is placed in a TGA furnace at ambient temperature, then heated to 105°C and weighed, then heated to 1000°C and weighed. The percent loss on ignition (LOI) is calculated from the difference in weight from 105°C to 1000°C divided by the weight at 105°C.

$$LOI = \frac{W_{105} - W_{1000}}{W_{105}} \times 100\%$$

where: W_{105} = Weight at 105°C
 W_{1000} = Weight at 1000°C

Method Code	Analyte	Symbol	Units	Lower Limit	Upper Limit
ME-GRA05	Loss on Ignition	LOI	%	0.01	100

March 2023
Revision 3.0

ALS right solutions. right partner.

alsglobal.com

ANALYTES & RANGES (ppm)									
Al	5-250000	Er	0.004-1000	Mg	1-250000	Rb	0.05-10000	Tm	0.002-1000
B	10-10000	Eu	0.004-1000	Mn	0.2-50000	Sc	0.005-10000	U	0.005-10000
Ba	0.5-10000	Fe	5-500000	Mo	0.01-10000	Si	10-10000	V	0.4-10000
Be	0.01-1000	Gd	0.005-1000	Na	50-100000	Sm	0.004-1000	W	0.01-10000
Ca	20-250000	Hf	0.005-500	Nb	0.005-500	Sr	0.03-10000	Y	0.005-500
Ce	0.005-500	Ho	0.002-1000	Nd	0.05-10000	Ta	0.005-500	Zr	0.004-1000
Co	0.005-10000	K	20-100000	Ni	0.1-10000	Tb	0.002-1000		
Cs	0.005-500	La	0.002-10000	P	5-10000	Th	0.005-10000		
Cu	0.04-10000	Li	0.2-10000	Pb	0.05-10000	Ti	5-100000		
Dy	0.005-1000	Lu	0.002-1000	Pr	0.004-1000				

ME-MS19™

Specialised ammonium sulphate leach for REE exploration in clays. Effectively liberates and detects REEs adsorbed on clay surfaces to super trace detection limits, enhancing exploration accuracy.

Annexe 2: A) lavage de sables, B) extraction des minéraux lourds et C) vue global du matériel au laboratoire.

