

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

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



REPUBLIC OF CAMEROON

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

**POSTGRADUATE SCHOOL OF
SCIENCES-TECHNOLOGY AND
GEOSCIENCES**

**DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE
DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES**

**LABORATOIRE DE GÉOSCIENCES DES FORMATIONS PROFONDES ET
APPLICATIONS**

**ETUDE PÉTROGRAPHIQUE ET GÉOCHIMIQUE DES
FORMATIONS GÉOLOGIQUES DE MOLOUNDOU (SUD-EST
CAMEROUN) ET DES MINÉRALISATIONS FERRIFÈRES
ASSOCIÉES**

MÉMOIRE

Présenté et soutenu en vue de l'obtention du diplôme de

Master en Sciences de la Terre

Parcours : Géosciences des Formations Profondes et Applications

Option : Pétrologie et Géologie Structurale

Par

KOUAMEN TCHOUAKUI Roméo D'Aquin

Licencié ès-Sciences

Matricule : 13A2070

Sous la direction de

GANNO Sylvestre

Maître de Conférences



Année académique 2018-2019

DEDICACES

Je dédie ce mémoire à :

- ma mère **TCHATCHOUA Yvette Faustine**;
- mon père **TCHOUAKUI Hugues** (de regrettée mémoire);
- toute ma famille.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce mémoire, je tiens à rendre grâce à Dieu Tout Puissant, pour le souffle de vie, la protection qu'il m'a accordés jusqu'ici et pour la force, le courage et la détermination dont il m'a fait grâce afin que je puisse mener à bien ce travail.

J'adresse particulièrement mes remerciements à l'endroit de :

- mon directeur de mémoire et mon maître, le **Prof. Sylvestre GANNO** pour la confiance qu'il a bien voulu m'accorder en début d'année de recherche, l'intérêt qu'il a porté à mes travaux, sa disponibilité, son orientation scientifique. J'aimerais par ailleurs m'incliner face à son savoir-faire, célébrer son savoir-vivre et lui dire merci pour son assistance sur le plan financier et ses conseils ;

- **Prof. Jean Paul NZENTI**, Chef du Laboratoire de Géosciences des Formations Profondes et applications de l'Université de Yaoundé I, pour m'avoir admis dans son Laboratoire, pour ses enseignements, sa rigueur au travail et son immense sagesse qu'il prodigue au quotidien à ses enfants/étudiants.

J'exprime ma vive reconnaissance à l'endroit du **Prof. Émile EKOMANE**, pour ses enseignements et surtout pour sa disponibilité et sa contribution scientifique dans l'édification de ce mémoire.

Je voudrais dire un merci particulier au **Chef de Département des Sciences de la Terre, Prof. Paul Désiré NDJIGUI**, pour m'avoir accordé le privilège de poursuivre mes études supérieures dans son département.

Je n'oublierai pas tous les enseignants du Département des Sciences de la Terre qui m'ont tenu la main dans mes premiers pas à l'université. Je pense aux professeurs **Temdjim R., Kamgang P., Njilah I.K., Ndam J.R., Nkoumbou C., Yongue R., Onana V., Tchouankoue J.P., aux docteurs Metang V., Nomo E., Eyong J., Mouafo L., Ngo Belnoun R., Tchaptchet D., Numbem J. et Njom B.**

Je dis un grand merci au chef du village Guilili, et à toute sa famille pour l'hospitalité légendaire lors de la campagne de terrain. Grâce à eux, nous avons dormi sous un toit à des kilomètres de nos domiciles respectifs.

Il m'est également agréable d'exprimer ma gratitude à l'endroit de mes aînés académiques notamment aux doctorants **Ngah E., Moudioh C., Fossi D., Takam T., Mbata A., Takodjou W., Djoukouo A., Dadjo H., Nzepang M., Ekoa B., Bissé B.** et bien d'autres. Nos discussions scientifiques et leurs remarques ont contribué à éclairer plusieurs points

d'ombres de mes travaux et améliorer ma compréhension sur plusieurs aspects des sciences de la terre.

Il y'a des hommes qui marquent une vie; je pense notamment à **Taptue F., Simeu B.A., Priso M., Song J., Menkem E.**, qu'ils soient fiers d'avoir contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Je ne saurais poursuivre sans remercier tous mes camarades de promotion avec qui j'ai cheminé et acquis beaucoup d'expérience depuis bien des années, tant sur le plan académique que sur le plan humain. Il s'agit entre autres de **Majougang I., Madjo V., Lekomo R., Lowe D., Makouet A., Mbazoua A., Tonye D., Tankou J., Sepwouo A., Djerbo A., Akara E., Moundou A.**

Je ne serais jamais assez reconnaissant envers **Keuko D. B., Njimanu N. V.** et envers mon binôme **Kouayep T. L.** car ils m'ont constamment soutenu et encouragé tout au long de ce travail.

À tous mes amis, je leur dis un grand merci pour les encouragements et le soutien qu'ils m'ont apporté. Je pense à **Foueka U., Feudjeu V., Ibrahima, Pamitet M., Tchinda J., Kadje M., Kengne L., Teda C., Tsasse S., Taptue A.**

Que tous ceux-là qui de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire et dont j'oublie les noms trouvent ici mes sincères remerciements.

TABLES DES MATIÈRES

DEDICASES.....	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLES DES MATIÈRES.....	iv
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS	x
RÉSUMÉ	xi
ABSTRACT.....	xi
 INTRODUCTION GÉNÉRALE	 1
I. PROBLÉMATIQUE DE L'ÉTUDE	2
II. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	3
III. MATÉRIELS ET MÉTHODOLOGIE	3
III.1. Matériels	3
III.2. Méthodologie de travail	3
IV. STRUCTURE DU MÉMOIRE	4
 CHAPITRE I. CADRE NATUREL ET TRAVAUX ANTÉRIEURS.....	 6
I. 1. CADRE GÉOGRAPHIQUE ET ACCESSIBILITÉ	7
I.1.1. Localisation	7
I.1.2. Géomorphologie	7
I.1.2.1. Orographie	7
I.1.2.2. Hydrographie.....	8
I.1.3. Climat	8
I.1.4. Sols	10
I.1.5. Végétation.....	10
I.1.6. Faune	11
I.1.7. Population et activités humaines	11
I.2. CADRE GÉOLOGIQUE.....	11
I.2.1. Contexte géologique général	11
I.2.1.1. Chaîne Panafricaine Nord Équatoriale (CPNE).....	11
I.2.1.2. Domaine cratonique	13
I.2.2. Contexte géologique des formations de couverture du craton du Congo : pointe Sud- Est du Cameroun.....	14
I.3. TRAVAUX ANTERIEURX	16
I.3.1. Historique	16
I.3.2. Synthèse.....	16
 CHAPITRE II. ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE ET ANALYSE STRUCTURALE	 18
II.1. ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE	19
II.1.1. Ensemble non minéralisé	19
II.1.1.1. Cherts	20

II.1.1.2. <i>Pélites</i>	21
II.1.2. Minéral de fer	24
II.1.2.1. <i>Minéral de fer à structure massive</i>	24
II.1.2.2. <i>Minéral de fer à structure polygonale</i>	26
II.1.2.3. <i>Minéral de fer à structure pisolitique</i>	28
II.2. ÉTUDE STRUCTURALE	30
CHAPITRE III. ÉTUDE GÉOCHIMIQUE	33
III.1. CARACTÈRES GÉOCHIMIQUES DES ROCHES HÔTES	34
III.1.1. Classification géochimique	34
III.1.2. Caractères géochimiques	37
III.1.2.1. <i>Arenites quartzitiques</i>	37
III.1.2.2. <i>Arkoses</i>	38
III.2. CARACTÈRES GÉOCHIMIQUES DES FORMATIONS FERRIFÈRES	44
III.2.1. Éléments majeurs	44
III.2.2. Éléments en trace	47
III.2.3. Terres rares	48
CHAPITRE IV. ESSAI D'INTERPRÉTATION ET DISCUSSION	51
IV.1. SOURCE ET PALÉOENVIRONNEMENT DES ARKOSES (PÉLITES)	52
V.1.1. Influence de l'accumulation des minéraux lourds	52
V.1.2. Source des sédiments	53
V.1.3. Site géotectonique	54
IV.2. COMPARAISON DES SÉDIMENTS DE MOLOUNDOU AUX SHALES PROTEROZOÏQUES ET MÉTAPÉLITES DE YAOUNDÉ	55
IV.3. MINÉRALOGIE, NATURE ET ORIGINE DU MINÉRAI DE FER	58
IV.3.1 Minéralogie	58
IV.3.2. Nature et origine	59
IV.3.3. Comparaison avec les autres minerais de fer de haute teneur du Cameroun	61
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	65
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	65

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte de localisation .	7
Figure 2. Bloc diagramme de la zone d'étude (généré à partir de l'image SRTM à l'aide du logiciel Surfer 11bits).	8
Figure 3. Carte du réseau hydrographique du secteur	9
Figure 4. Diagramme ombrothermique de Bagnoul et Gausson (1957) appliqué aux données recueillies par la station météorologique de Nola.	10
Figure 5. Carte géologique du Cameroun (Nzenti et al., 2011) montrant la localisation de la localité de Moloundou (secteur étudié) et les principaux domaines lithotectoniques	12
Figure 6. Carte géologique du Sud-Est Cameroun, RCA et du Congo avec notice explicative (Vicat, 1998).	15
Figure 7. Carte géologique de la zone d'étude extraite de la feuille Nola N° 0-25 M. Laplaine (1971).	17
Figure 8. Carte d'échantillonnage du secteur étudié.	19
Figure 9. Affleurement de chert en boule.	20
Figure 10. Aspects macroscopique et microscopique des cherts de Makoka	21
Figure 11. Aspects macroscopique des pélites	22
Figure 12. Aspect microscopique des pélites de Moloundou	23
Figure 13. Aspects macroscopique et microscopique du minéral hématite-goethite (Ech.MMK8).	25
Figure 14. Aspects macroscopique et microscopique du minéral à hématite-kénomagnétite et goethite.	27
Figure 15. Aspects macroscopique et microscopique du minéral à martite-kénomagnétite et limonite	28
Figure 16. Aspects macroscopique et microscopique du minéral à hématite-limonite et reliques de magnétite	29
Figure 17. Microphotographies d'une lame mince de quartzite	31
Figure 18. Diagrammes binaires de variation $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (A) et TiO_2 (B) en fonction du CIA des pélites de Moloundou.	35
Figure 19. Diagramme de classification géochimique $\text{Log}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ vs $\text{Log}(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ d'après Herron (1988).	36

Figure 20. Diagrammes binaires de variation Fe_2O_3 (A) et Al_2O_3 (B) et en fonction du SiO_2 des arénites quartzitiques de Moloundou.....	37
Figure 21. Diagrammes binaires de variation de quelques oxydes en fonction du SiO_2 des arkoses de Moloundou.	39
Figure 22. Diagrammes binaires de variation de quelques éléments traces (ppm) en fonction du SiO_2 des arkoses de Moloundou.	41
Figure 23. Spectres des terres rares de arkoses de Moloundou:.....	42
Figure 24. Spectre multiélément normalisées par rapport à la croûte paléoprotérozoïque (EPC) d'après Condie (1993).....	42
Figure 25. A) Diagramme binaire de variation du Fe_2O_3 en fonction du LOI; B) Histogramme de variation des éléments majeurs du minerai de fer de Moloundou.....	45
Figure 26. Diagrammes de variation de quelques éléments majeurs du minerai de fer de Moloundou en fonction du Fe_2O_3	46
Figure 27. Diagrammes binaires de variation de quelques éléments traces des formations ferrifères de Moloundou en fonction du Fe_2O_3	48
Figure 28. Spectres des terres rares des formations ferrifères de Moloundou normalisés par rapport au PAAS (Taylor et McLennan, 1985).	49
Figure 29. A) Diagramme binaire Zr/Sc vs Th/Sc de McLennan et al. (1993), B) Diagramme binaire Zr vs $(\text{La/Yb})_{\text{CN}}$ des métapélites de Moloundou.....	52
Figure 30. Diagramme Th vs Th/U (McLennan et al., 1980) montrant la source d'origine crustale des pélites de Moloundou avec une légère implication mafique.....	53
Figure 31. Diagramme La/Sc vs Th/Co (Cullers, 2002) montrant la source principalement felsique des arkoses de Moloundou.	54
Figure 32. Diagramme binaire La/Sc vs Ti/Zr de discrimination du site géotectonique d'après Bhatia et Crook (1986).....	55
Figure 33. Diagramme ternaire La-Th-Sc (Girty et Barber, 1993) montrant la localisation des arkoses de Moloundou dans le champ du contexte de marge passive.....	55
Figure 34. Histogramme de comparaison des éléments majeurs des arkoses de Moloundou aux shales protérozoïques et aux métapélites de Yaoundé.	56
Figure 35. Histogramme de comparaison des éléments traces des pélites de Moloundou aux shales protérozoïques et aux métapélites de Yaoundé.	57

Figure 36. Spectres comparatifs des terres rares des sédiments de Moloundou, des shales protérozoïques et des métapélites de Yaoundé.	57
Figure 37. Diagramme ternaire $\text{SiO}_2\text{-(Fe}_2\text{O}_3\text{+TiO}_2\text{+CaO)-Al}_2\text{O}_3$ (James, 1954) montrant la composition minéralogique du minerai de fer de Moloundou.....	58
Figure 38. Diagramme Fe/Al vs Ca/Mg (James, 1969) montrant la nature du minerai de Moloundou.....	59
Figure 39. Diagramme $\text{SiO}_2\text{/Fe}_2\text{O}_3$ vs $\text{(MgO+CaO+MnO)/Fe}_2\text{O}_3$ d'après Angerer et al. (2012) montrant l'origine probable du minerai de fer de Moloundou.....	61
Figure 40. . Histogramme de comparaison des éléments majeurs du minerai de fer de Moloundou, Mbalam et Mamelles.	62
Figure 41. Diagramme Fe/Al vs Ca/Mg (James, 1969) montrant la nature des minerais de Moloundou, Mbalam et des Mamelles.....	64
Figure 42. Spectres comparatifs des terres rares du minerai de fer de Moloundou, Mbalam et Mamelles. Les valeurs de normalisation sont celles de Taylor et McLennan (1985).....	64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Relevés climatique moyenne sur une durée de 10 ans du secteur étudié.	9
Tableau II. Caractères pétrographiques des formations géologiques du secteur Moloundou	30
Tableau III : Analyses géochimiques sur roche totale des éléments majeurs (%) des échantillons représentatifs des roches hôtes de Moloundou.	36
Tableau IV. Analyses géochimiques sur roche totale des éléments en trace (ppm) des échantillons représentatifs des roches hôtes de Moloundou.	40
Tableau V. Analyses géochimiques sur roche totale des terres rares (ppm) des roches hôtes de Moloundou.	43
Tableau VI. Analyses géochimiques sur roche totale des éléments majeurs des formations ferrifères de Moloundou	45
Tableau VII. Analyses géochimiques sur roche totale des éléments traces des échantillons représentatifs du minerai de fer de Moloundou	47
Tableau VIII. Analyses géochimiques sur roche totale des terres rares des échantillons représentatifs des formations ferrifères de Moloundou.	50
Tableau IX. Composition des éléments majeurs des sédiments de Moloundou comparée à celle des shales protérozoïques et des métapélites de Yaoundé.	56
Tableau X. Composition moyenne des éléments en trace des sédiments de Moloundou comparée à celle des shales protérozoïques et des métapélites de Yaoundé. ...	57
Tableau XI. Composition moyenne des terres rares des sédiments de Moloundou comparée à celle des shales protérozoïques et des métapélites de Yaoundé.....	57
Tableau XII. Composition des éléments majeurs du minerai de fer de Moloundou comparée au minerai de Mbalam et des Mamelles.	62
Tableau XIII. Composition moyenne des terres rares du minerai de fer de Moloundou comparée au minerai de Mbalam et des Mamelles.	62

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abréviation des minéraux (Whitney et Evans, 2010)

Fe-Ox: Oxyde de fer

Gth: Goethite

Hem: Hématite

Kfs: Feldspath potassique

KMag: Kénomagétite

Lm : Limonite

Mag: Magnétite

Mar: Martite

Qtz: Quartz

Ser: Séricite

Autres abréviations

ACDI: Agence Canadienne de
Développement International

BIF: Banded Iron Formation

CCC: Cisaillement Centre Camerounais

CIA: Chemical Index of Alteration

DSO: Direct Shipping Ore

CPNE: Chaîne Panafricaine Nord
Équatoriale

EPC: Early Proterozoïque Crust

FFs: Formations Ferrifères

Ga: Milliard d'années

HREE: Heavy Rare Earth Element

LOI: Loss On Ignition

LPA: Lumière Polarisée Analysée

LPNA: Lumière Polarisée Non Analysée

LR: Lumière Réfléchie

LREE : Light Rare Earth Element

Ma: Million d'années

PAAS: Post-Archean Australian Shale

PNUD: Programme des Nations Unies pour
le Développement

RCA: République Centre Africaine

REE: Rare Earth Element

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission

RÉSUMÉ

Le secteur de Moloundou est situé dans la région de l'Est Cameroun et appartient à la couverture du craton du Congo plus précisément à la série du Dja inférieur qui repose partiellement à l'Ouest sur l'unité de l'Ayna.

Du point de vue pétrographique, ce secteur est essentiellement constitué d'un ensemble sédimentaire/épimétamorphique qui regroupent les formations ferrifères et leurs roches hôtes composées de cherts et de pélites. Ces derniers sont tous à structure hétérogranulaire, tandis que les formations ferrifères ont soit une structure massive fracturée (minerai à hématite-goethite); soit une structure massive à nid d'abeille (minerai à hématite-kénomagnétite et goethite); soit une structure polygonale (minerai à hématite-kénomagnétite et limonite); soit enfin une structure pisolitique (minerai à hématite-limonite et reliques de magnétite).

Sur le plan de la déformation, les structures enregistrées par les roches du secteur étudié sont synsédimentaires (stratification et plis) à diagénétiques supérieures ou épimétamorphiques (points triples des minéraux dans les cherts).

Les caractères géochimiques révèlent que les roches hôtes du secteur étudié correspondent aux arénites quartzitiques (cherts) et aux arkoses (pélites). Les arénites quartzitiques sont matures et non altérés (composition moyenne de $\text{SiO}_2 = 98,32\%$; $\text{LOI} = 0,05\%$) tandis que les arkoses relativement riches en CaO et MgO sont immatures (formes subanguleux des clastes) et ont été soumis à une altération météorique ($\text{CIA} = 65,32$) entraînant une mobilité des alcalins. Les matériaux qui constituent ces arkoses proviendraient du démantèlement d'une croûte de nature principalement felsique contaminés par des apports mafiques. L'environnement de mise en place de ces sédiments serait celui d'une marge continentale passive. Les formations ferrifères ont les teneurs élevées en Fe_2O_3 (96,22%) et très faibles en SiO_2 (<1%). La teneur moyenne en fer natif est de 67,35% , caractéristique du minerai de haute teneur ou DSO (Direct Shipping Ore ; > 65% Fe). Les caractères géochimiques du minerai de fer de Moloundou suggèrent qu'il proviendrait d'un enrichissement mixte hypogène-supergène à partir du BIF (Banded Iron Formation).

Les corrélations géochimiques montrent que la composition moyenne des arkoses de Moloundou est proche de celle des shales protérozoïques et différente des métapélites de Yaoundé ; le minerai de fer de Moloundou, tout comme celui de Mbalam et des Mamelles (Kribi) proviendraient tous d'un proto-minerai de nature ferrifère (BIF). Cependant, ils diffèrent par leur processus d'enrichissement (mixte à Moloundou et supergène à Mbalam et Mamelles).

Mots clés: Minerai de fer ; Chert ; BIF ; Marge passive ; Enrichissement mixte ; Moloundou

ABSTRACT

The Moloundou area is located in the Eastern region of Cameroon and belongs to the the lower Dja series which rest partially unto the west of the Ayna unit of the Congo craton.

From the petrography point of view, this area is mainly composed of sedimentary to very low grade metamorphic rocks made up of iron formations and their host rocks (cherts and pelites). The latter have heterogranular structure while the iron formations have either massive fractured structure (hematite-goethite ore); either beehive-like structure (hematite-kenomagnetite and goethite ore); or polygonal structure (hematite-kenomagnetite and limonite ore); and finally pisolitic structure (hematite-limonite and magnetite relics ore).

In terms of deformation, the main structures recorded in the area are primary syn-sedimentary features such as bedding and folds. Also, triple junction mineral points are observed in cherts, suggesting low grade metamorphic imprints.

Geochemical composition has revealed that chert and pelite correspond to quartz-arenite and arkose respectively. Quartz-arenites are mature and unaltered (average composition of $\text{SiO}_2 = 98.32\%$; $\text{LOI} = 0.05$), while arkoses with relatively high CaO and MgO contents, are immature and have been subjected to meteoric alteration ($\text{CIA} = 65.32$) resulting in alkaline mobility. Arkoses mainly derived from the dismantling of a felsic crust, contaminated by mafic inputs, and deposited in a passive continental margin setting. Iron formations display high Fe_2O_3 (96.22%) and very low SiO_2 (<1%) contents. The average of native iron (Fe) content is 67.35%, characteristic of high-grade ore or DSO (Direct Shipping Ore; > 65% Fe). The geochemical features of the Moloundou iron ore suggest that it originates from a mixed hypogene-supergene enrichment of the BIF (Banded Iron Formation) protore.

Geochemical correlations reveal that the average composition of the Moloundou arkoses is closed to that of the Proterozoic shales, but differ from the Yaoundé metashale; The Moloundou iron ore, as well as Mbalam and Mamelles (Kribi) iron ore, derived from BIF protore. However, they differ in their enrichment process (mixed hypogene-supergene at Moloundou and supergene enrichment model for Mbalam and Mamelles iron ore).

Keywords: Iron ore; Chert; BIF; Passive margin; Mixed enrichment model; Moloundou



INTRODUCTION GÉNÉRALE

I. PROBLÉMATIQUE DE L'ÉTUDE

L'histoire géologique du continent africain est essentiellement inscrite dans le socle précambrien. Ce socle est constitué de multiples cratons, séparés de part et d'autre par des ceintures orogéniques plissées appelées « chaînes » (Giresse, 1990). Sur certaines portions des socles anciens restées tectoniquement stable depuis leur mise en place (Cratons), reposent en discordance des formations de couverture peu ou non déformées.

En Afrique centrale, plus précisément au Cameroun, le socle précambrien a fait l'objet de nombreux travaux en l'occurrence des travaux pionniers et récents menés sur la Chaîne Panafricaine Nord Équatoriale (Nzenti et al., 1988, 2007; Ngnotué et al., 2000, 2012; Toteu et al., 2001; Mvondo et al., 2003; Bouyo Houketchang et al., 2013, 2016; Tchakounté et al., 2018; Ganwa et al., 2016, 2019; Nomo Negue et al., 2017; Ngamy Kamwa et al., 2019) ainsi que sur les formations cratoniques (Maurizot et al., 1986 ; Lerouge et al., 2006 ; Ganno et al., 2015a et b, 2017, 2018; Teutsong et al., 2017, Aye et al., 2017; Kankeu et al., 2018; Bouyo Houketchang et al., 2018; Soh et al., 2018, 2019 ; Fuanga et al., 2019). Si le socle en général a fait objet de tant d'études, il n'en est pas de même pour les formations de couvertures qui jusqu'ici restent peu connues.

Le secteur de Moloundou (Sud-Est Cameroun) appartient à la série grès-pélique du Dja inférieur (Gazel et al., 1956). D'après Laplaine (1971), cette zone est constituée principalement des formations épi-métamorphiques (faciès zéolite à schiste vert) qui reposent en discordance sur la bordure Nord du craton du Congo. En 1975 suite à l'exécution d'une couverture magnétique aéroportée sur un tiers environ du territoire camerounais financée par l'aide bilatérale canadienne (ACDI) et le gouvernement camerounais, l'Etat du Cameroun a présenté une requête d'assistance technique au Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) afin d'explorer systématiquement le Sud-Est du pays, soit une superficie d'environ 70000 km². Cette zone, l'une des moins connues et les plus enclavées du pays reçoit ainsi par sa localisation à la frontière avec le Congo et la RCA, une place prioritaire dans le développement régionale. Le rapport DP/UN/CMR-81-005/1 du PNUD signale les indices de fer dans les villages Mbatika (Moloundou), Nkolemboula (Mintom) et dans le district de Mbalam. Les collines de Metzimevin et de Mbarga (district de Mbalam) dès lors ont fait l'objet de travaux détaillés. Ces travaux ont conduit à la découverte et l'estimation de la réserve du gisement du minerai contenant plus de 60% de Fe à environ 220 millions de tonnes (www.Camiron.com). Par contre, l'indice de fer de Moloundou qui fait l'objet du présent

travail, présentant une faible extension géographique malgré l'enrichissement local en hématite n'a fait l'objet d'aucune investigation jusqu'à nos jours.

La proximité des indices de fer signalés dans la localité de Moloundou avec d'une part les gîtes de fer de Mbalam et de Cabosse (Congo) et d'autre part avec la province ferrifère du haut Ivindo (Gabon) tous connus pour leur fort potentiel en minéralisation ferrifère suscite des interrogations à savoir :

- quelle est la nature des indices de fer de Moloundou?
- quelle est l'origine et le contexte géotectonique de ces indices?
- quelle est la relation qui pourrait exister entre ces indices et les minéralisations ferrifères du craton du Congo en général?

II. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'étude du métamorphisme et des minéralisations en fer associées dans le secteur de Moloundou entreprise dans le cadre de ce travail est une étude préliminaire qui vise un double objectif à savoir:

- l'étude pétrographique détaillée;
- la caractérisation géochimique sur roche totale desdites formations en vue de déterminer leur origine et le contexte géotectonique. Un accent particulier sera mis sur les formations ferrifères.

III. MATÉRIELS ET MÉTHODOLOGIE

III.1. Matériels

Pour les travaux de terrain, nous avons eu recours aux outils de base suivants : une boussole de marque SUNTO munie d'un clinomètre pour les mesures structurales, le GPS (Système de Positionnement Globale) pour la localisation géographique du secteur et des différents affleurements; un appareil de photos numériques pour la prise des vues, les marqueurs indélébiles de différentes couleurs pour la codification des échantillons, un carnet des notes et un crayon pour la prise des notes et l'esquisse des structures rencontrées, les machettes pour le layonnage, une massette pour la récolte des échantillons, un sac pour le transport des échantillons et un équipement vestimentaire approprié.

III.2. Méthodologie de travail

Pour mener à bien nos travaux et atteindre les objectifs fixés, les études ont été conduites aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire.

Sur le terrain, à cause de la difficulté d'accès faute d'une infrastructure routière adéquate, l'on a effectué une seule campagne d'une durée de sept (07) jours. Les travaux de terrain ont consisté à la cartographie. Les activités spécifiques étaient :

- (i)-l'inventaire lithologique et les descriptions pétrographiques ;
- (ii)-l'identification et la description des éléments structuraux, suivie des prises des photographies et l'esquisse schématique ;
- (iii)-les mesures structurales ;
- (iv)-la récolte des échantillons représentatifs des principales lithologies affleurant dans le secteur.

Au laboratoire, nous avons d'abord fait une synthèse bibliographique des travaux disponibles en rapport avec la thématique à développer. Cette synthèse s'est faite au Laboratoire de Géosciences des Formations Profondes et Applications (LGFPA) de l'Université de Yaoundé I. Les travaux de laboratoire se sont poursuivis avec la confection des lames minces et des analyses géochimiques sur roche totale. Au total, douze (12) lames minces polies ont été confectionnées au laboratoire Langfang Rock Detection Technology Service Limited à Hebei en Chine. Les analyses géochimiques ont été faites par spectrométrie de masse couplée au plasma d'induction (ICP-MS), au laboratoire Acme Lab à Vancouver (Canada) sur quinze (15) échantillons représentatifs du minerai de fer et des roches hôtes. Les observations microscopiques des lames standards se sont déroulées au LGFPA sur le microscope binoculaire de marque OPTIC IVYMEM SYSTEM. Ces observations ont été faites successivement en lumière naturelle ou lumière polarisée non analysée (LPNA), et en lumière polarisée analysée (LPA) au LGFPA. Les observations en lumière réfléchie (LR) se sont déroulées à la 'China University of Mining and Technology' de Xuzhou (Chine) Toutes les données analytiques ont été traitées au LGFPA à l'aide des logiciels appropriés.

IV. STRUCTURE DU MÉMOIRE

Outre l'introduction générale et la conclusion générale, ce travail est organisé en quatre chapitres :

- le chapitre I (Cadre naturel et travaux antérieurs) présente les cadres géographique et géologique du secteur d'étude ;
- le chapitre II porte sur l'inventaire lithologique et l'étude pétrographique des différentes formations géologiques rencontrées à l'affleurement et l'analyse de la déformation. Ce chapitre vise l'atteinte de notre premier objectif ;

- le chapitre III présente les caractères géochimiques des roches étudiées et répondra au deuxième objectif ;

- le chapitre IV interprète les différents résultats obtenus en vue de définir la nature lithologique et l'origine des roches, leur environnement de dépôt et procéder à des corrélations locales et régionales;

Enfin, le travail s'achève par une conclusion générale avec une formulation des perspectives.

CHAPITRE I.
CADRE NATUREL ET TRAVAUX
ANTÉRIEURS

I. 1. CADRE GÉOGRAPHIQUE ET ACCESSIBILITÉ

I.1.1. Localisation

Le secteur d'étude est compris entre les parallèles 2°04' et 2°26' de latitude Nord et entre les méridiens 15°14' et 15°42' de longitude Est. Il est situé dans la région de l'Est Cameroun, département de la Boumba et Ngoko, arrondissement de Moloundou. Il couvre le village Mbatika au nord en passant par les villages Mbongo, Guilili, Makoka I et Makoka II vers le Sud sur une superficie d'environ 1100 km² (fig. 1).

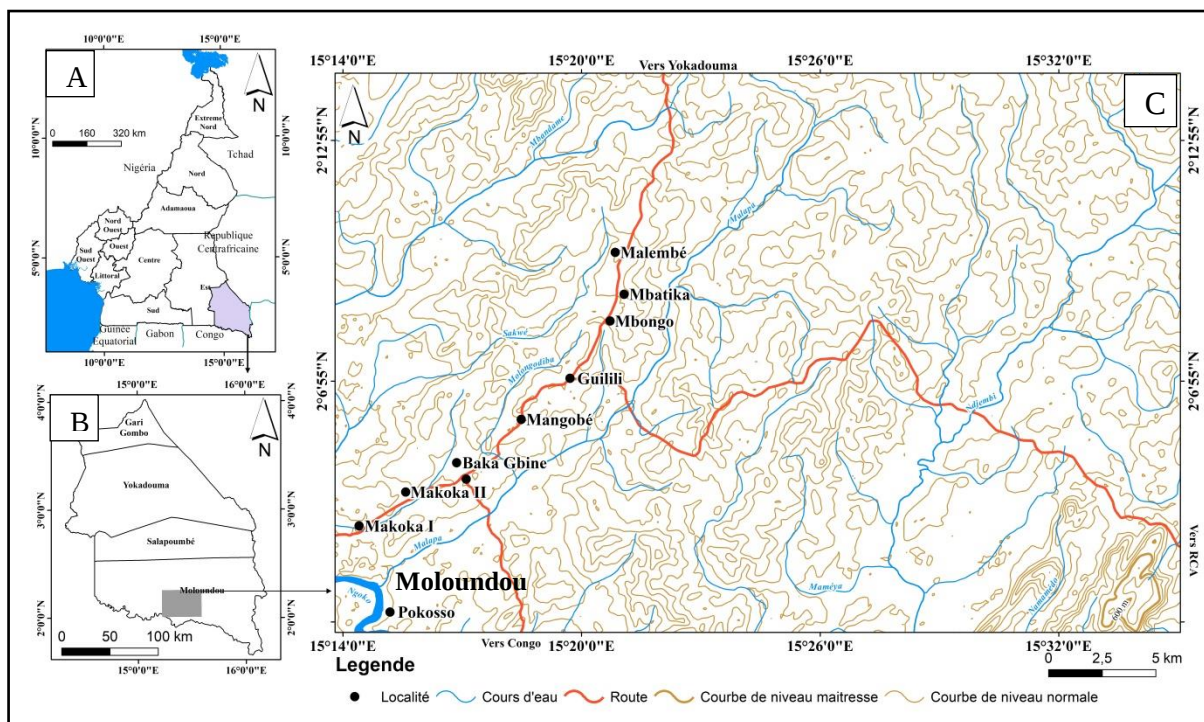


Figure 1. Carte de localisation : A) Carte administrative du Cameroun montrant la localisation de la région d'étude; B) Carte administrative de la région de l'Est; C) Carte topographique du secteur d'étude.

I.1.2. Géomorphologie

I.1.2.1. Orographie

Dans l'ensemble, le relief de la zone étudiée est très peu différencié. Le paysage est celui d'une pénéplaine assez ondulée, sur grès et schistes précambriens, dont les irrégularités sont masquées par l'épais manteau forestier (Atlas régional Sud-Est, 1969).

Les observations de terrain couplées à l'analyse détaillée de la carte topographique (fig. 1) et du bloc diagramme présenté plus bas (fig. 2) montrent que la morphologie du secteur de Moloundou définit trois unités géomorphologiques :

- l'unité basse (360-400m) qui dessine trois couloirs orientés NNE-SSW ;

- l'unité intermédiaire (420-540m) surmonte l'unité basse et forme un relief montagneux de même direction que les couloirs occupés par l'unité basse
- l'unité supérieure (540-630m) très peu représentée se rencontre à l'extrême NW et SE.

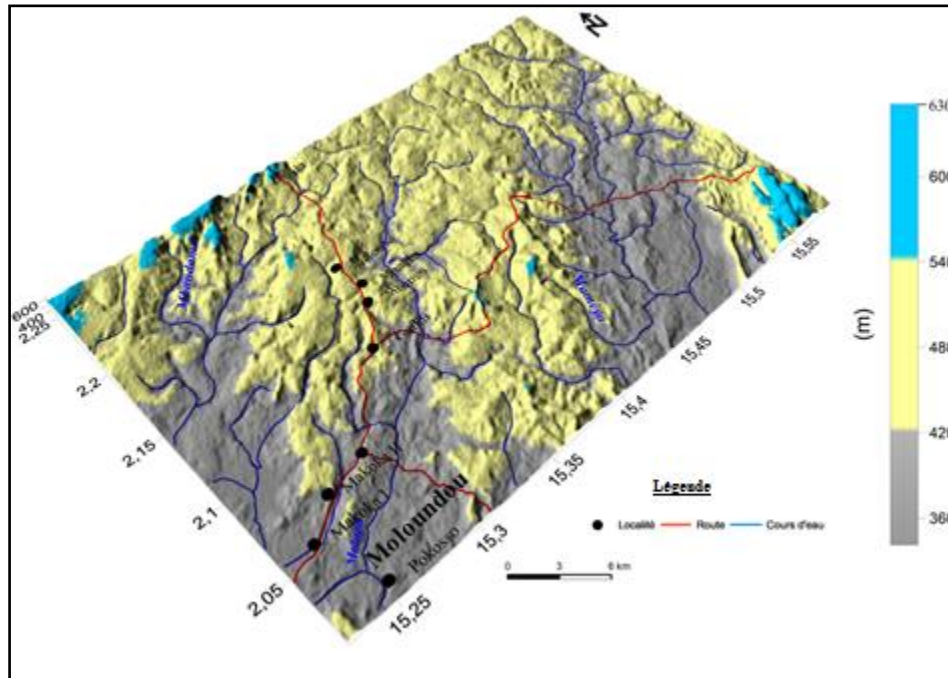


Figure 2. Bloc diagramme de la zone d'étude (généré à partir de l'image SRTM à l'aide du logiciel Surfer 11bits).

I.1.2.2. Hydrographie

Presque toute la partie Sud-Est du Cameroun à l'exception de la haute vallée du Nyong, appartient au bassin du Congo (Olivry, 1989). La plus grande partie de cette région est drainée par la rivière *Dja*, appelée *Ngoko* dans son cours inférieur, qui, après un large détour vers l'Ouest se jette dans la *Sangha* en amont d'Ouessou. Son principal affluent est la *Boumba* qui, coule dans la direction Ouest-Est. Cet affluent rejoint la *Ngoko* à Moloundou.

Le secteur de Moloundou est drainé par trois cours d'eau principaux *Malapa* et *Mbandame* et *Djembi*, tous affluents de la *Ngoko*. Ces cours d'eau principaux coulent suivant la direction NNE-SSW et dessinent avec l'ensemble des cours d'eau d'ordre inférieur un réseau dendritique (fig. 3).

I.1.3. Climat

La région de Moloundou subit dans son ensemble l'influence du climat équatorial de type guinéen classique (Suchel, 1987). La mousson et l'harmattan, qui forme le front

intertropical donnent au climat son rythme saisonnier. Le tableau I présente les données climatiques de la station de Nola (station la plus proche du secteur étudié située en RCA).

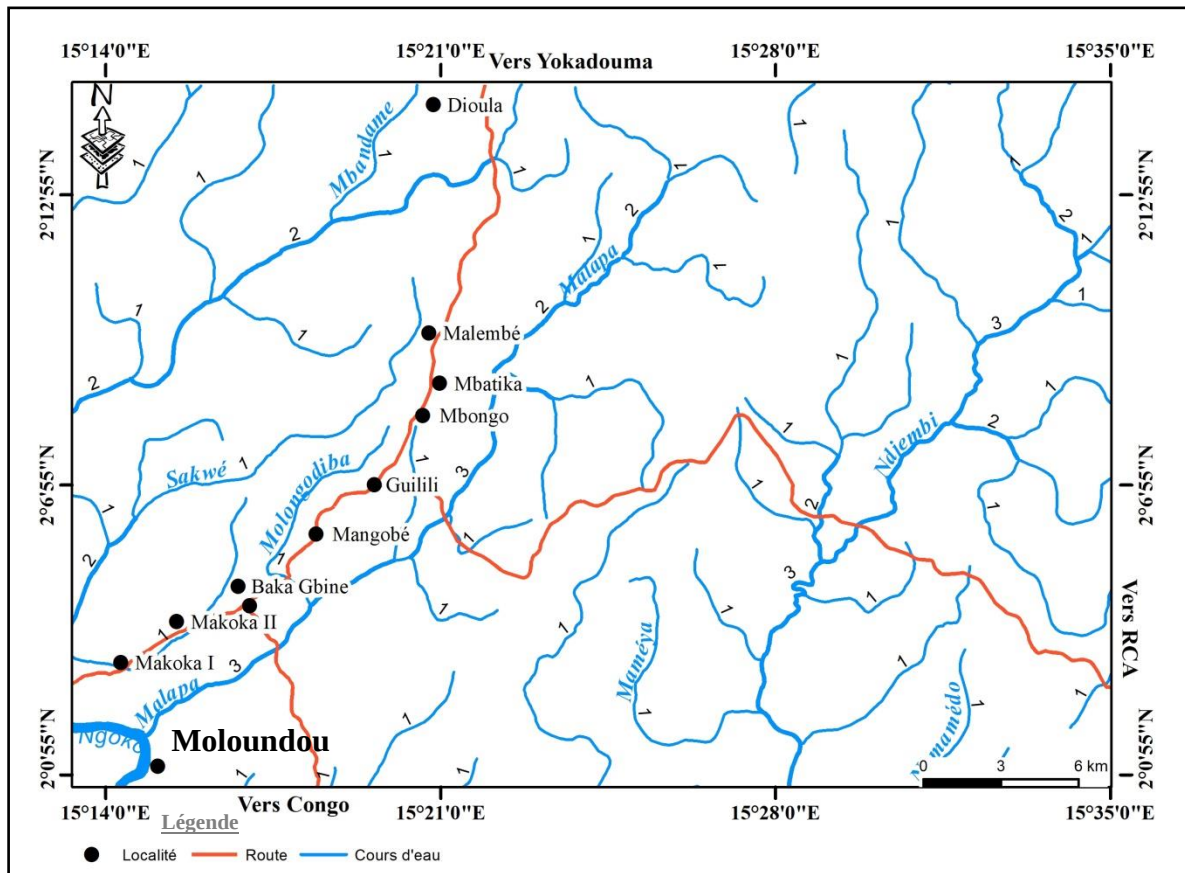


Figure 3. Carte du réseau hydrographique du secteur

Tableau I. Relevés climatique moyenne sur une durée de 10 ans du secteur étudié.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
P(mm)	29	48	127	151	187	135	101	123	204	257	120	41
T°C	23,2	23,9	24,8	25	24,3	23,8	22,8	22,8	23,4	23,7	23,6	23,2

Source : www.climatedata.eu consulté le 04/06/2018 à 16h20min

L'analyse du diagramme ombrothermique (fig. 4) montre que la région est soumise à un régime climatique à quatre saisons bien distinctes :

- une petite saison des pluies qui va de mi-mars à fin juin ;
- une petite saison sèche qui va de fin juin à mi-août ;
- une grande saison des pluies qui s'étale de mi-août jusqu'à mi-novembre ;
- une grande saison sèche qui s'étale de mi-novembre à mi-mars.

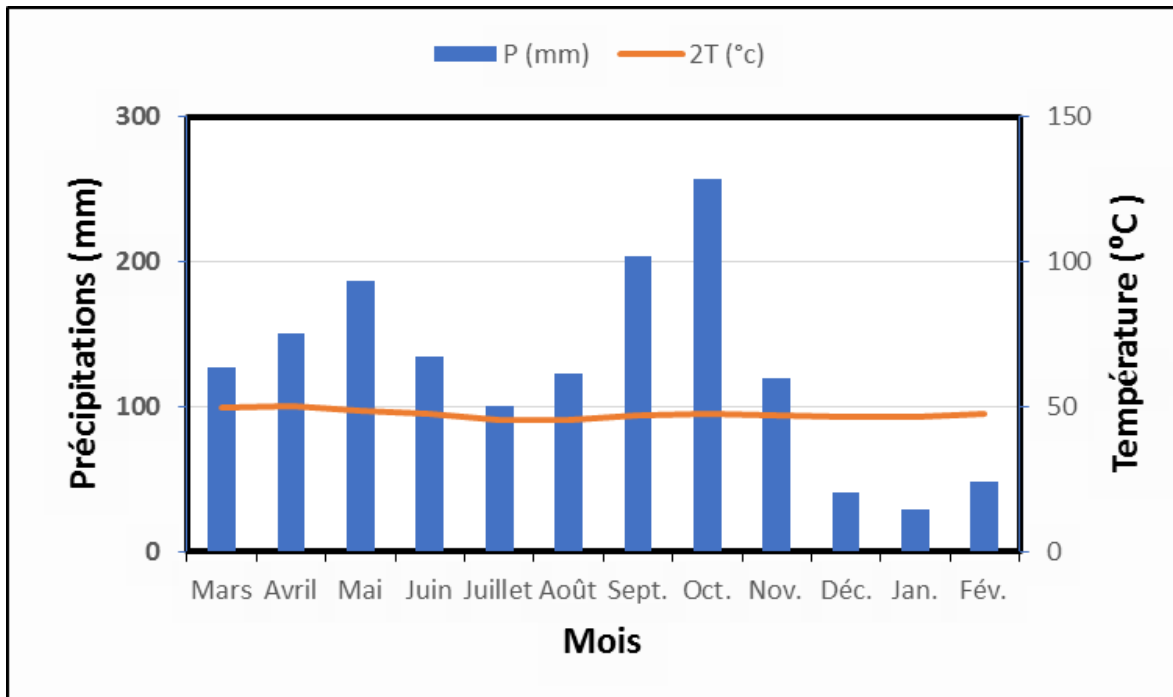


Figure 4. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957) appliqué aux données recueillies par la station météorologique de Nola.

I.1.4. Sols

Deux types de sols sont rencontrés dans la localité le secteur étudié (Segalen, 1957) à savoir :

- les sols hydromorphes rencontrés au niveau des bas-fonds marécageux. Ils résultent essentiellement de l'action d'une nappe phréatique sur une roche mère quelconque. Ils se caractérisent par de faibles teneurs en argile et de fortes teneurs en matière organique ;
- les sols ferralitiques rouges indurés dérivent des roches métamorphiques qui représentent l'essentiel des sols de la zone.

I.1.5. Végétation

La végétation du secteur étudié s'intègre parfaitement dans celle de la zone forestière de l'Est Cameroun. Les formations forestières sur sol ferme appartiennent au secteur forestier semi-caducifolié représenté par deux types de formations forestières :

- les forêts semi caducifoliées à Sterculiacées (*Man Sonia*, *trichophyton*) et Ulmacées (*Antan Ella*, *Terminalia superba*)

- les forêts toujours vertes du Dja localisées au sein de la précédente et caractérisées par des peuplements purs de *Gilbertiodendron dewevrei* (Letouzey, 1985).

I.1.6. Faune

Des études et des observations faites dans la zone où se situe la forêt communale de Moloundou, il y a dix-sept ans, faisaient ressortir que les densités de la population faunique étaient très élevées dans cette zone. Elles avaient permis d'identifier :

- 96 espèces de papillons appartenant à 17 sous-familles ;
- 194 espèces d'oiseaux.

Plusieurs espèces de mammifères (Eléphant, Buffle, Chimpanzé, Gorille, Panthère, Statuga, etc.) avaient été aussi répertoriées. Malheureusement, la densité de cette faune aurait diminuée à cause du braconnage intensif.

I.1.7. Population et activités humaines

La population est en grande partie rurale et tire sa nourriture de la nature en pratiquant les activités telles l'agriculture, la chasse et la cueillette. L'exploitation forestière est la principale source de revenus des populations locales. Les grands groupes ethniques sont les Mbangado, les Bakouélés, les Ésselles, les Baka de la famille des bantous et un autre peuple connu sous le nom de pygmées. La langue officielle est le français mais les peuples s'expriment dans diverses langues.

I.2. CADRE GÉOLOGIQUE

I.2.1. Contexte géologique général

Deux grandes entités litho-structurales constituent le socle précambrien au Cameroun : la Chaîne Panafricaine Nord Equatoriale qui couvre les deux tiers du territoire depuis le groupe de Yaoundé jusqu'à l'extrême Nord et le domaine cratonique qui représente le prolongement Nord-Ouest du craton du Congo (complexe du Ntem). Le domaine cratonique est recouvert par une épaisse couche sédimentaire qui fait l'objet de ce travail.

I.2.1.1. Chaîne Panafricaine Nord Équatoriale (CPNE)

Il s'agit d'une méga-chaîne d'orientation générale E-W, d'une longueur supérieure à 5000 kilomètres sur 300 kilomètres de largeur environ. Elle est limitée à l'Ouest par la Chaîne Panafricaine Transsaharienne et au sud par les formations archéennes du craton du Congo. La CPNE est subdivisée en trois grands domaines géodynamiques du Nord au Sud : (1) un domaine Nord; (2) un domaine Centre; (3) un domaine Sud (fig. 5).

Le domaine Nord-Cameroun est une vaste région qui s'étend du Sud de Poli, jusqu'à l'extrémité Nord du Cameroun. Il se compose de roches métavolcaniques datées à 830Ma et d'affinités tholéitiques et alcalines associées à des métasédiments connues sous le nom de série de Poli (Bouyo Houketchang et al., 2016) correspondant à une extension, aux metabasites et orthogneiss calco-alcalins répandus entre 630 et 660 Ma appartenant à un épisode d'accrétion (Toteu et al., 1987).

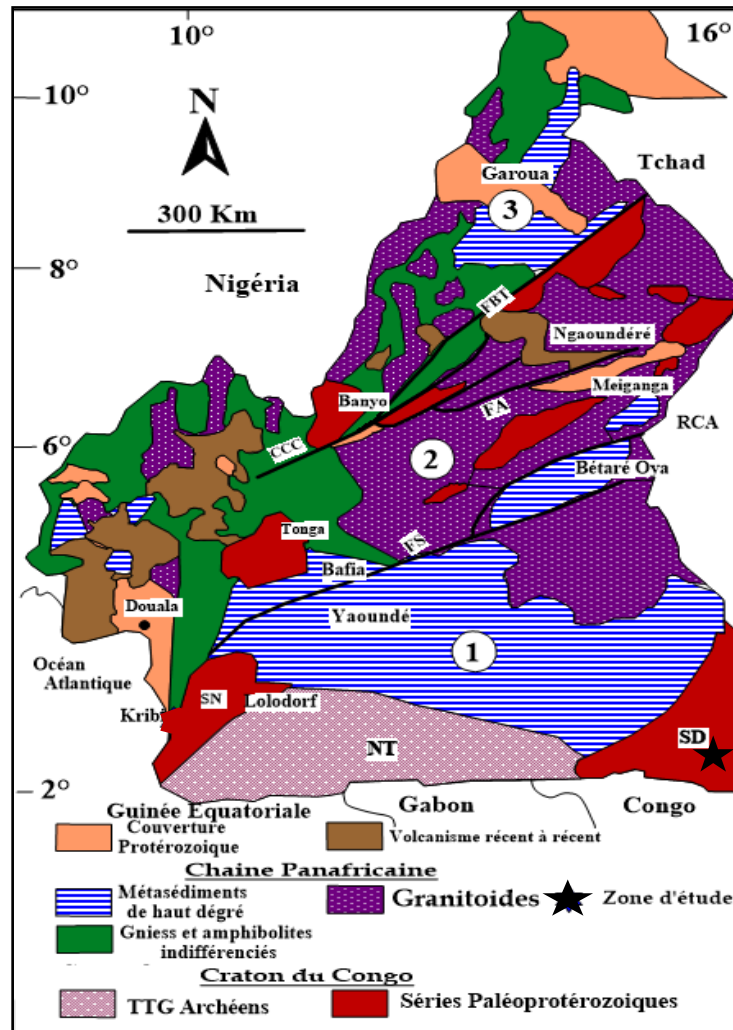


Figure 5. Carte géologique du Cameroun (Nzenti et al., 2011) montrant la localisation de la localité de Moloundou (secteur étudié) et les principaux domaines lithotectoniques: (1) domaine sud; (2) domaine centre; (3) domaine nord; CCC: Cisaillement Central Camerounais; FS: Faille de la Sanaga; FTB: Faille de Tibati-Banyo; NT: Complexe du Ntem; SD: Série du Dja; SN: Série du Nyong; FA: Faille l'Adamaoua.

Le domaine centre-Cameroun couvre une vaste zone allant du Sud de Bafia au Sud de Poli et constitue le lien entre les domaines nord et sud de la chaîne. Ce domaine est représenté par: (i) des granitoïdes dont nombreux sont syntectoniques et orthogneissifiés

dans un encaissant fortement métamorphique formé de gneiss archéens à paléoprotérozoïques et d'amphibolites (Nzenti et al., 1994, 2011; Njanko et al., 2006, 2010; Kouankap Nono et al., 2010; Nzina et al., 2010; Chebeu et al., 2011), et (ii) des granulites d'âge paléoprotérozoïque (Nzenti et al., 1998; Tanko Njiosseu et al., 2005; Ganwa et al., 2008, 2016 ; 2019; Tchakounté et al., 2018).

Le domaine Sud est essentiellement représenté par le groupe de Yaoundé limité dans sa partie australe par le craton du Congo. Deux grands ensembles lithologiques sont définis à l'échelle régionale : un ensemble faiblement métamorphisé composé de schistes et de quartzites (les séries de Ayos-Mbalmayo-Bengbis et Yokadouma) et un ensemble de haut degré métamorphique, composé de gneiss, de migmatites, de micaschistes, d'amphibolites et de roches à silicates calciques (séries de Yaoundé, de Ntui-Betamba et de Bafia). Ces deux grands ensembles lithologiques sont intrudés par des diorites et des granodiorites (Nzenti, 1998 ; Owona et al., 2011 ; Ngnotué et al., 2012 ; Nkoumbou et al., 2014).

1.2.1.2. Domaine cratonique

C'est un vaste domaine situé au Sud du Cameroun et comportant des formations archéennes et paléoprotérozoïques. Cette portion du craton encore appelé complexe du Ntem est constituée de trois (03) grandes unités: (i) l'unité du Ntem, (ii) l'unité du Bas Nyong et (iii) l'unité de l'Ayna.

L'unité du Ntem a été affecté par deux cycles orogéniques et est composée de divers matériaux. Le premier cycle orogénique ou cycle Libérien est marqué par la mise en place des protolites de roches vertes suivie d'une intrusion de TTG (Tonalite-Tondjémite-Granodiorite) entre 2900 et 2800 Ma. La fin de ce cycle est marquée par l'intrusion des granitoïdes anatectiques et potassiques 2600 et 2500 Ma (âges U-Pb sur zircon: Toteu et al., 1994 ; Shang et al., 2010).

L'unité du Bas Nyong est situé au Nord-Ouest de l'unité du Ntem et est constituée de roches métasédimentaires et métaplutoniques mises en place au cours d'un événement tectono-métamorphique de haut degré vers 2050 Ma. Cette unité repose sur le craton du Congo comme une nappe éburnéenne (Feybesse et al., 1987; Toteu et al., 1994; Tchameni et Nsifa, 1998). Des travaux de géochronologie SHRIMP U-Pb sur zircon (Lerouge et al., 2006) montrent que les roches de l'unité du Bas Nyong sont entièrement paléoprotérozoïques et que la plupart des protolites sont d'origine archéenne: BIFs (2776 ± 34 Ma); gneiss à grenat et gneiss à orthopyroxène (Mésarchéen et Néarchéen), métasyénites de Lolodorf (2055 Ma avec un protolite à 2836 Ma), intrusion des

charnockites de Bienkop (entre 2044 Ma et 1985 Ma). Les travaux récents (Ndema, 2016) montrent qu'en plus des roches méta-sédimentaires et des roches méta-ignées, il existe un troisième type issu de la fusion partielle (migmatites et TTG).

L'unité de l'Ayna, encore mal connue, est formée de roches «cristallophylliennes», des ceintures de roches vertes et des granitoïdes intrusifs (Gazel et Guiraudie, 1965). Elle comporte une foliation de direction N120-140°E à laquelle se superposent des plis dont l'axe est orienté à N50°E et des blastomylonites tous anté-panafricains et recouverts par la nappe panafricaine de Yaoundé (Vicat, 1998). Cette unité est partiellement recouverte dans sa partie Est par les formations de couverture du craton déposées dans une zone plus ou moins remobilisée au Panafricain (Bessoles et Trompette, 1980 ; Cahen, 1982).

I.2.2. Contexte géologique des formations de couverture du craton du Congo : pointe Sud-Est du Cameroun

Les formations de couverture du craton du Congo reposent partiellement à l'Ouest sur les unités de l'Ayna et du Ntem. Elles sont surmontées au Nord par la nappe panafricaine de Yaoundé (fig. 6) et disparaissent à l'Est sous la couverture phanérozoïque du bassin du Congo. Elles couvrent une superficie d'environ 60000 Km² entre les limites des Cameroun-RCA-Congo-Gabon (Vicat, 1998). La répartition des formations de couverture en séries varie selon les pays et les auteurs.

Au Cameroun, les formations de couverture sont regroupées en quatre séries : la série du Dja supérieur ; le Complexe tillitique, la série du Dja inférieur et la ride de Lobéké.

- **La série calcaro-argileuse du Dja supérieur** est localisée dans la secteur de Mintom. Elle est constituée des roches pélitiques plus ou moins carbonatées sur lesquelles reposent des calcaires marneux contenant des jaspes. Cet ensemble s'est déposé entre 640-580 Ma (Caron et al., 2010). Elle repose en discordance sur le socle du Ntem et sur la série du Dja inférieur.

- **Le Complexe tillitique** (Van Den Hende, 1969) est constituée des calcschistes gris noir pyriteux et des brèches polygéniques. On les retrouve dans la pointe Sud-est du Cameroun (tillite du Boulou), à la frontière avec la République Centrafricaine (tillite de Bela-Libongo), et aussi à la frontière avec le Congo (tillite de Moloundou). Ce complexe probablement Cryogénique d'âge compris entre 850-650 Ma (Knoll, 2000) est traversé par les dolérites D₃ (660 Ma) (Vicat et al., 2001). Il repose en discordance sur la série du Dja inférieur.

- **La série du Dja inférieur** appartient au même cycle sédimentaire que la série de Nola en RCA (Laplaine, 1971). Elle comprend un niveau inférieur constitué de grès grossiers, feldsparenites et de conglomérats. Ce niveau inférieur est surmonté par les formations pélitiques parfois ampélitiques, alternant avec des niveaux gréseux et quartzitiques à stratification entrecroisées et renfermant des rares dolomies et des jaspes. Vers le sommet de la série, les pélites, les ampélites et les argiles sont prépondérantes. Un important complexe doléritique qui apparaît sous forme de dykes traverse cette série Paléoprotérozoïque. Le secteur de Moloundou étudié fait partie de cette série.

- **La ride de Lobéké** (PNUD, 1971) ou série schisto-quartzitique (Laplaine, 1971) est composée de quartzites massifs alternant avec des quartzo-phyllades et des séricitoschistes tous paléoprotérozoïques. Elle est traversée par des granodiorites qui ont probablement un âge similaire aux intrusions de granodiorites de l'Ayna datées sur minéraux par la méthode K/Ar à 2027 ± 101 Ma (Maurizot et al., 1986).

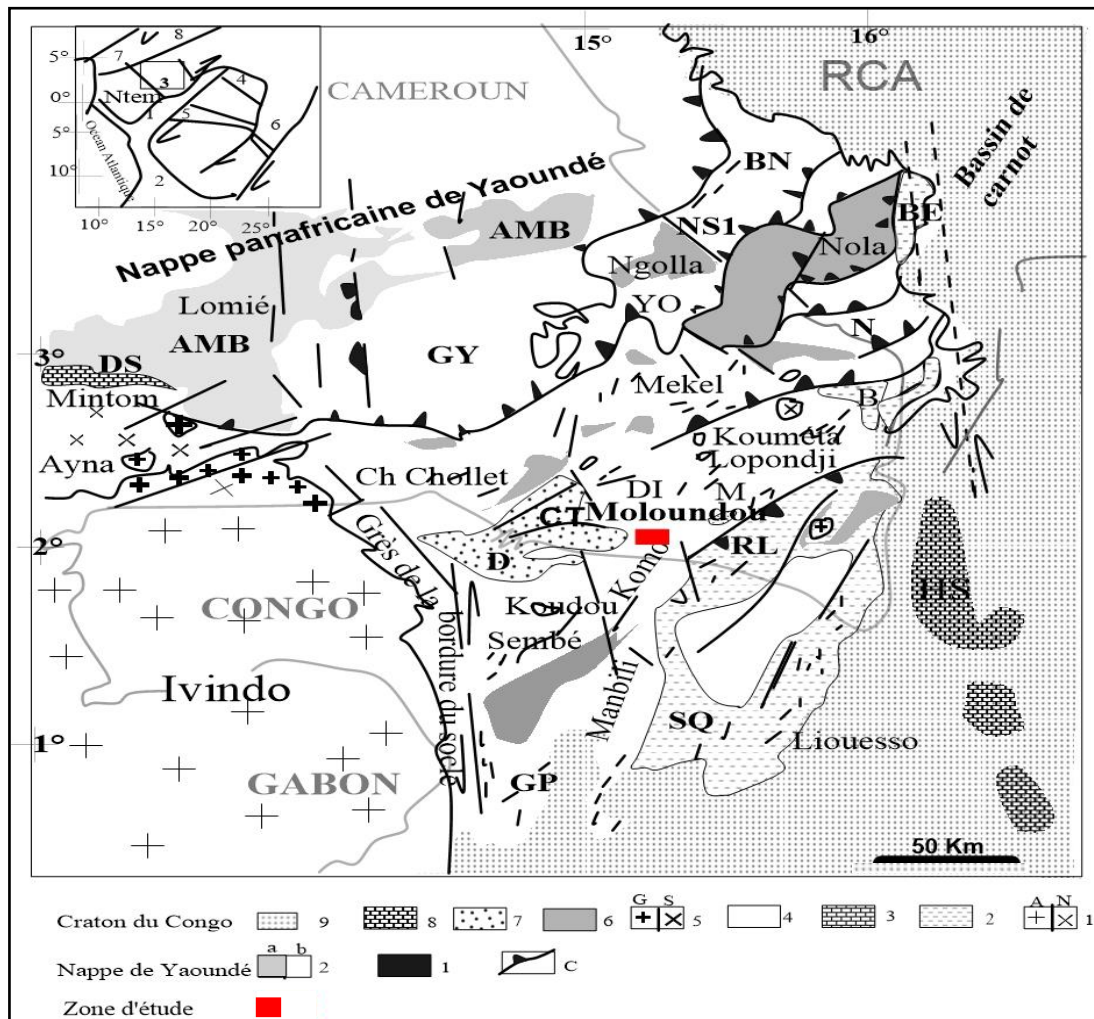


Figure 6. Carte géologique du Sud-Est Cameroun, RCA et du Congo avec notice explicative (Vicat, 1998).

Craton du Congo. 1: Complex du Ntem; 2: Séricitoschistes à micaschistes de la formation basale de couverture paléoprotérozoïque du Craton; SQ = série schisto-quartzitique; RL = ride de Lobeké; BE = partie

Est de la série de Bolé; 3: intrusion éburnéennes (2Ga environ); G = granodiorites ; S = syénite; 4: quartzites, grès et pélites de la formation supérieur de la couverture paléoprotérozoïque; DI = série du Dja inférieur; N = série de Nola; GP = série grès-pélitique de Sembé; YO = série de Yokadouma; BN = partie nord de la série de Bolé; 5: Granite à 1Ga; 6: Complexe doléritique d'âge paléoprotérozoïque à néoprotérozoïque; 7: tillites cryogène; 8: Super-groupe schisto-calcaire; DS = série du Dja supérieur; HS = formations carbonatée de la Haute-Sangha; 9: Couverture phanérozoïque.

Nappe de Yaoundé. 1 : Roche ultrabasique ; 2: Métasédiments néoprotérozoïques ; 2a = formations épimétamorphiques la série de Ayos-Mbalmayo-Bengbis (AMB); 2b = micaschistes, gneiss, migmatiques et granite du groupe de Yaoundé (GY) ; c: principaux chevauchements panafricains.

I.3. TRAVAUX ANTERIEUX

Lors des travaux de recherche bibliographique au laboratoire, exceptés les rapports du PNUD et quelques travaux de reconnaissance sur l'ensemble des séries de la couverture du craton du Congo qui datent des années quatre-vingt, aucune investigation spécifique n'a été répertoriée dans le secteur de Moloundou. Les résultats présentés dans cette section sont ceux des travaux pionniers sur la série du Dja inférieur.

I.3.1. Historique

Les formations de la série du Dja inférieur ont été observées pour la première fois par Vidal (1933) puis par Babet (1935). En 1951, Bruet a tenté de préciser les limites de cette dernière. Champetier de Ribes et al. (1956) puis Gazel (1956) et Van Den Hende (1969) ont entrepris son étude générale. L'étude géologique de cette série fut ensuite poursuivie par les géologues du commissariat Français à l'Energie Atomique (C.E.A), une esquisse photo-géologique fut établie par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M). L'ensemble de ces travaux a été résumés par Laplaine (1971). De 1977 à 1987, ces formations ont été étudiées par le PNUD dans le cadre du projet CMR-81-005/1. En 1998, Vicat et Bilong dans l'édition Collection Géocam font un bilan complet de l'ensemble de toutes les connaissances acquises.

I.3.2. Synthèse

D'après le bilan des connaissances acquises sur les formations de couverture du craton publié dans Collection Géocam 1/1998 par Vicat et Bilong, les roches de les séries du Dja inférieur et de Nola (en RCA) se sont mises en place durant le Paléoprotérozoïque. Les roches qui constituent la série Dja inférieur sont faiblement ou non métamorphiques, il s'agit : des grès grossiers, des feldsparenites, des grès quartzeux, des metabasites interstratifiées dans les couches de grès quartzeux, des ampélites, des pélites et des argiles (fig. 7).

Les formations de couverture du craton sont structurées en trois zones de décrochements senestres (fig. 6) qui séparent un bloc occidental étroit bordant le socle du Ntem et l'Ivindo, un bloc central auquel le secteur Moloundou appartient entre Sembé et

Douma et un bloc oriental de Douma à Nola. Le bloc central au Cameroun est structuré en écaïlle à plongement Nord. La déformation diminue vers le Sud jusqu'au Congo où l'on observe seulement les plis de couvertures de plan axial N20E à N70E. La schistosité reste cependant constante dans les niveaux fins. Un épimétamorphisme daté par les méthodes Rb/Sr et K/Ar sur fraction fine à 630Ma environ a été mis en évidence au Congo (Dianzenza-Ndéfi, 1983). Des dykes doléritiques orientés NNE-SSW, N-S et NW-SE recoupent l'ensemble de la série du Dja. Les directions NW-SE coïncident avec les directions principales des fractures de Moloundou et celles des grandes fractures majeures de la région (Nforba et al., 2018). Ces dolérites ont des caractères chimiques et une tendance calco-alcaline qui ressemble aux dolérites paléoprotérozoïques D₁ de l'unité du Ntem, mises en place vers 2Ga (Tchameni, 1997 ; Vicat et al., 2001).

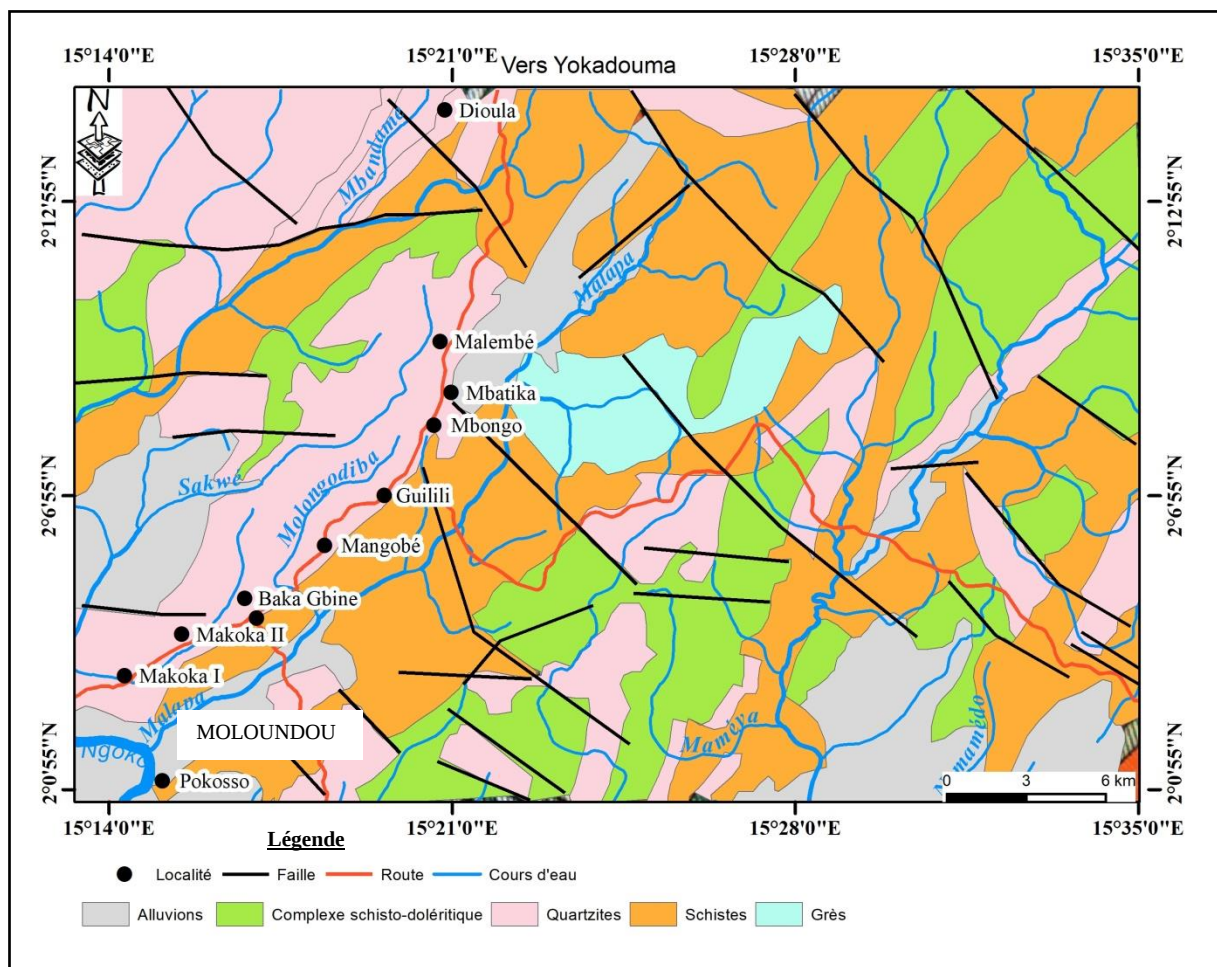


Figure 7. Carte géologique de la zone d'étude extraite de la feuille Nola N° 0-25 M. Laplaine (1971).

CHAPITRE II.
ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE ET
ANALYSE STRUCTURALE

INTRODUCTION

Le présent chapitre se propose de faire ressortir les caractéristiques pétrographiques et minéralogiques des formations géologiques recensées lors de la campagne de terrain dans le secteur Moloundou. Par la suite, une brève étude descriptive des différents éléments structuraux observés sur le terrain et au laboratoire (observation microscopique) sera présentée.

II.1. ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE

Les observations de terrain couplées aux analyses de laboratoire ont permis de mettre en évidence deux ensembles: un ensemble non minéralisé et un ensemble fortement minéralisé en fer qui constitue le minerai de fer (fig. 8).

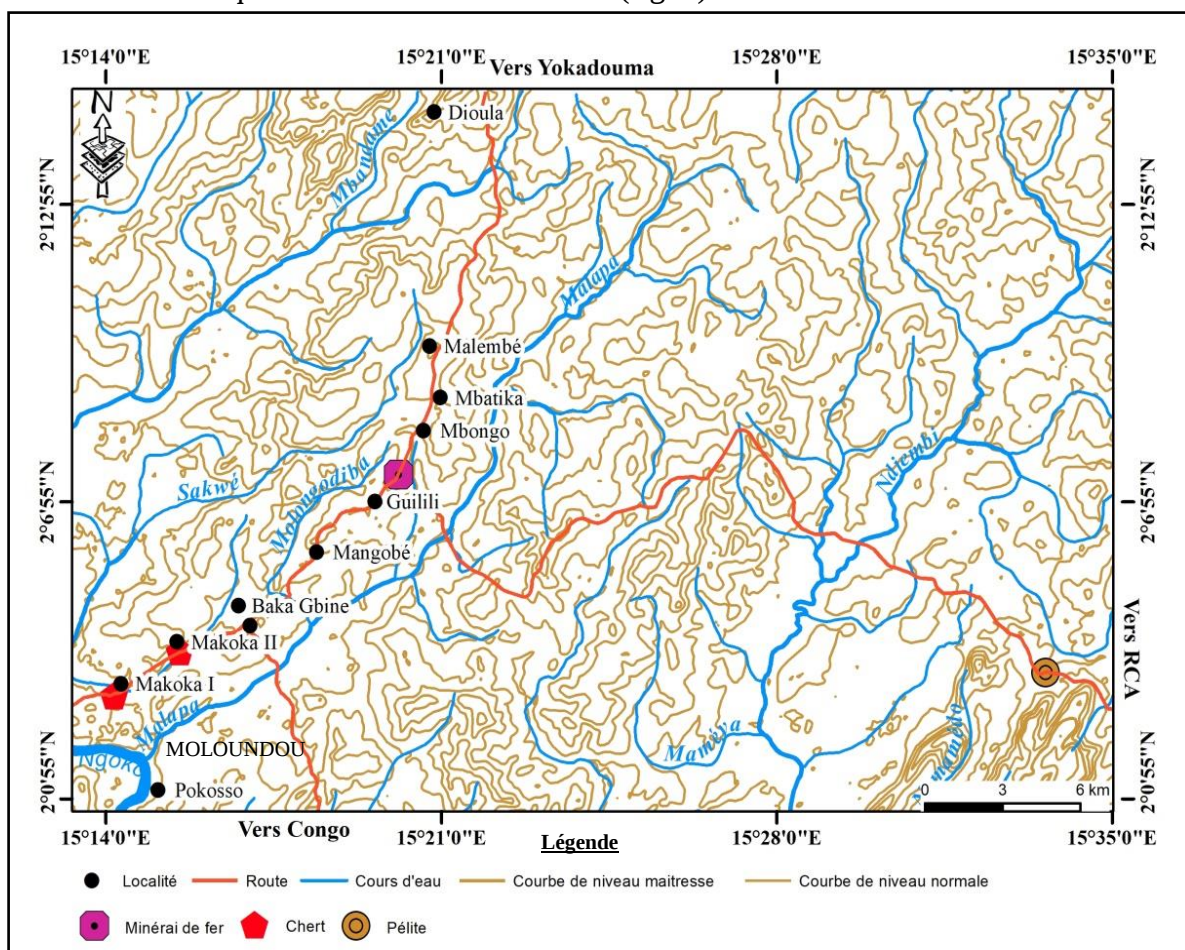


Figure 8. Carte d'échantillonnage du secteur étudié.

II.1.1. Ensemble non minéralisé

Deux types pétrographiques constituent cet ensemble à savoir : les pélites (Ech. MK4-1 et MK4-2) et les cherts (Ech. MK1, MK2-1 et MK2-2). Cette nomenclature combine la granulométrie et la composition minéralogique.

II.1.1.1. Cherts

Les cherts affleurent sous forme de boules (fig. 9) le long de la route entre les villages Makoka I et Makoka II situés au Sud-Ouest du secteur étudié (fig. 8). Ils ont un aspect d'ensemble gris clair et ressemblent à des agrégats compacts. Les petites cavités et les plans de fracturation confèrent à ces roches une structure assez complexe. L'échantillon frais (fig. 10A) présente des surfaces de cassures conchoïdales et une granulométrie très fine constituée essentiellement de quartz.



Figure 9. Affleurement de chert en boule.

Au microscope, la roche présente une microstructure hétérogranulaire (fig. 10B) constituée majoritairement de quartz. L'on observe également des oxydes de fer minoritaires.

- *Le quartz* représente plus de 95% de la proportion minéralogique. Les cristaux n'ont pas le même diamètre ni la même forme dans l'ensemble de la roche. L'on peut ainsi distinguer les grains de quartz cryptocristallins (cherts siliceux qui représentent la fraction fine de la roche), des grains de quartz cristallins (diamètres compris entre 0,2-0,3mm) le long des microfractures de la roche (fig. 10C). Les formes et les relations de contacts entre les grains de quartz cristallins indiquent l'action des fortes pressions. Cet aspect sera développé dans la partie structurale.

- Les oxydes de fer sont minoritaires dans la roche et représentent moins de 5% de la proportion minéralogique. Ils sont alignés le long des microfractures occupées par les cristaux de quartz. L'eau qui s'infiltre à travers ses microfractures altère progressivement ses oxydes probablement en hydroxydes de fer (fig. 10D).

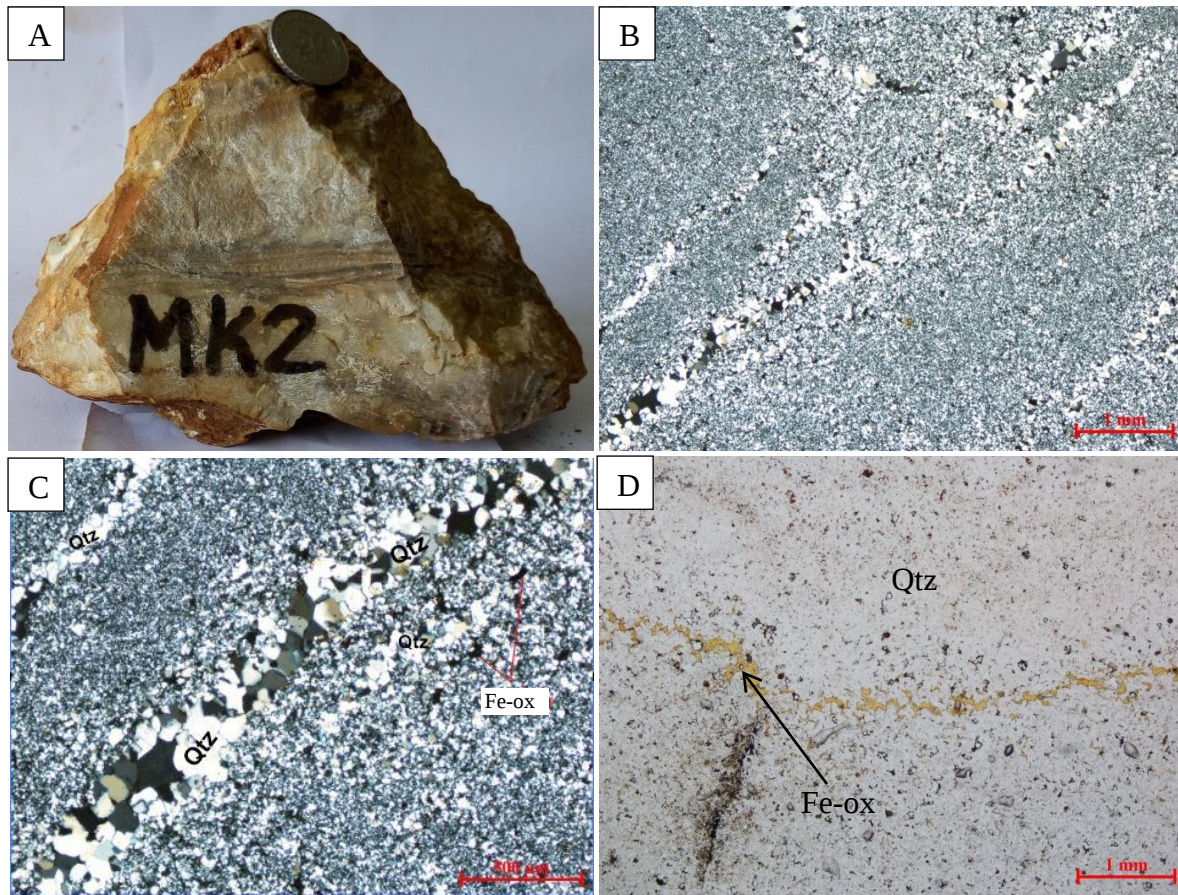


Figure 10. Aspects macroscopique et microscopique des cherts de Makoka : A) Détail d'un échantillon ; B) microstructure hétérogranulaire ; C) Microphotographie montrant la composition minéralogique et les veines de quartz cristallins ; D) Microphotographie en lumière réfléchie montrant l'altération des oxydes de fer le long d'une microfracture.

II.1.1.2. Pérites

Elles affleurent en dalle plissée (fig. 11A) dans la partie Sud-Est du secteur étudié en bordure de la route qui mène en RCA. Cette dalle rocheuse constitue une sorte de caniveau naturel le long duquel ruissellent les eaux de pluie. L'échantillon frais est verdâtre légèrement tacheté de blanc et présente une granulométrie très fine ne laissant ainsi apparaître aucun minéral à l'œil nu (fig. 11B).



Figure 11. Aspects macroscopique des pélites ; A) Mode d’affleurement en dalle plissée, notez le plissement des couches; B) Détail d’un échantillon frais de pélite.

L’examen microscopique de l’ensemble de la lame mince taillée sur cette roche montre une organisation hétérogène à grains très fins, à niveaux silteux constitué de quartz et de feldspath potassique noyés dans un fond verdâtre à chlorite, séricite et carbonate qui constitue la fraction fine de la roche (fig. 12A). L’alternance entre niveau silteux et fraction fine ressemble plus à un granoclassement. Les oxydes de fer y sont minoritaires et disséminés dans l’ensemble de la roche.

- *Le quartz* représente environ 35% de la masse rocheuse. Il est représenté par des cristaux sub-anguleux à sub-arrondi dont la taille ne dépasse pas 0.05 mm. La forme de ces cristaux est caractéristique des sédiments mis en place par des courants de turbidité.

- *Le feldspath potassique* (20%) est sub-arrondi, légèrement plus fin que les cristaux de quartz. Son pléochroïsme dans les teintes gris bleutés en LPA (fig. 12C) serait dû à l’altération. Il s’altère probablement en séricite (séricitisation) observée dans la fraction fine.

- *L’oxyde de fer* est minoritaire (<5%). Il a une forme arrondie et parfois allongée.

- *La fraction fine* est estimée à environ 40%. Elle est constituée des carbonates (fond légèrement rose en LPA), de chlorite et de séricite tous deux cryptocristallins (taille inférieure à 0,004mm). Certains cristaux de séricite sont de taille nettement supérieure à la fraction fine (fig. 12B).

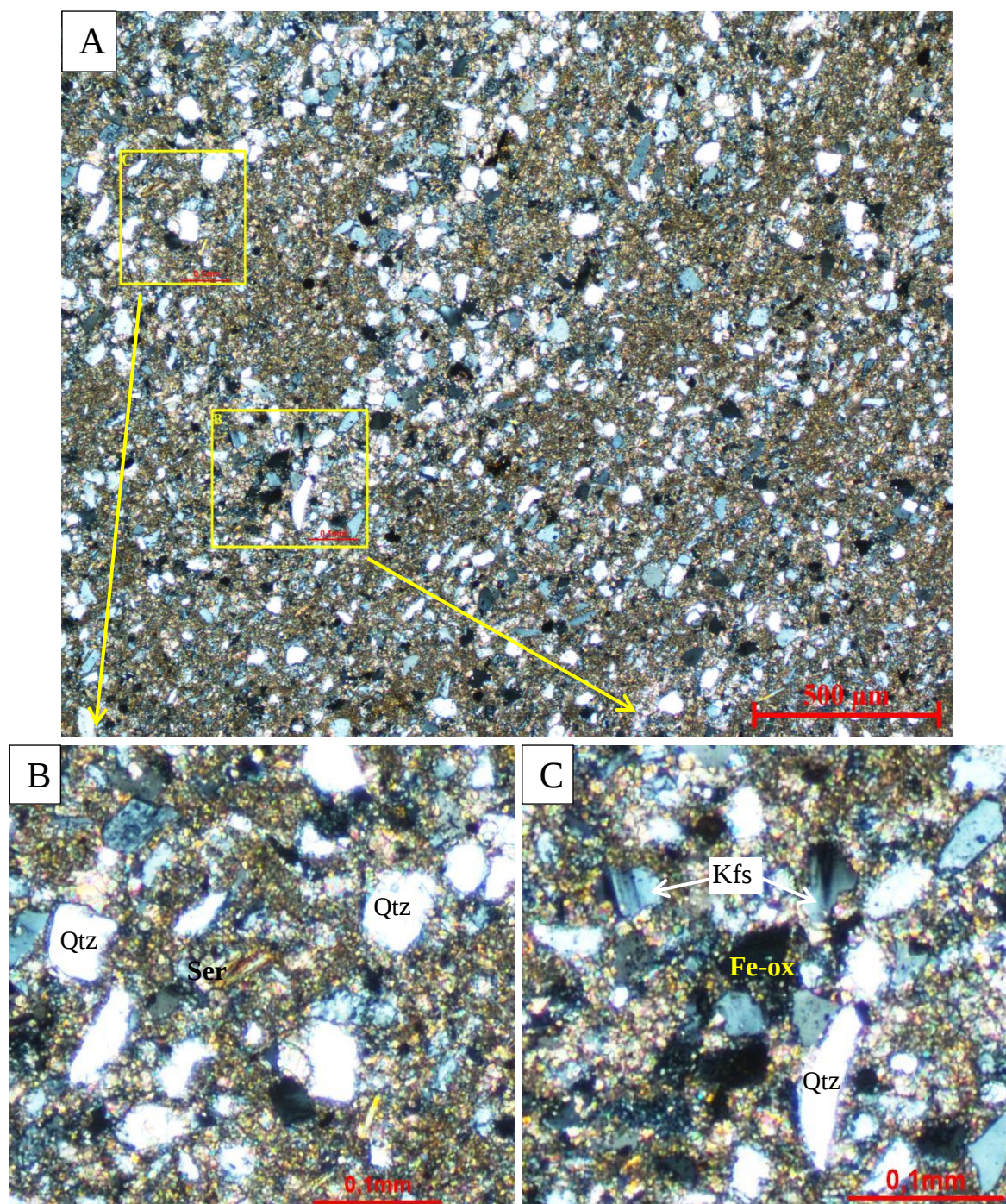


Figure 12. Aspect microscopique des pélites de Moloundou; A) Microstructure hétérogranulaire, notez le contraste entre le niveau silteux et la fraction fine; B) Zoom montrant les cristaux subarrondis de quartz et les baguettes de séricite en cours de recristallisation ; C) Zoom montrant la composition minéralogique et la macle simple du feldspath potassique.

II.1.2. Minerai de fer

Les formations ferrifères (FFs) de Moloundou affleurent au sommet d'une petite colline à une centaine de mètres de la chefferie du village Guilili. Le mode d'affleurement principal est celui des blocs centimétriques à métriques. Les échantillons frais prélevés présentent très peu de différence sur le plan macroscopique. L'observation microscopique des lames minces taillées sur les échantillons prélevés a permis de dissocier les FFs en trois groupes selon que la structure est massive (Ech. MMK4, MMK7 et MMK8), polygonale (MMK3 et MMK5) et pisolitique (MMK1 et MMK2).

II.1.2.1. Minerai de fer à structure massive

Le minerai massif est riche en hématite et accessoirement en kénomagnétite et goethite. La silice amorphe (quartz colloïdale) y est minoritaire. Cette composition minéralogique a permis de distinguer deux sous-types à savoir le minerai à hématite-goethite et le minerai à hématite-kénomagnétite et goethite.

i) Minerai à hématite-goethite

C'est le principal type de minerai de fer rencontré sur le terrain. Le mode d'affleurement est celui d'un bloc dont la section basale s'étend sur 240 cm et se dresse à environ 170 cm de haut (fig. 13A). La roche est modérément magnétique. Elle est de couleur gris sombre et d'aspect métallique (fig. 13B).

Au microscope, la roche présente une microstructure massive microfracturée (fig. 13C), constituée majoritairement de cristaux d'hématite. L'on y rencontre également du quartz colloïdale et la goethite tous deux minoritaires.

- *L'hématite* représente environ 95% de la proportion minéralogique de la roche. Elle se présente sous forme de très fins cristaux (hématite cryptocristalline). On la retrouve également sous forme de fragments colmatés par la goethite dans les microfractures qui affectent l'ensemble de la roche. Dans ces microfractures, l'on observe l'hématite en cours d'altération probablement en goethite (fig. 13D).

- *La goethite* (environ 3%) occupe localement les microfractures et les espaces existant entre les cristaux d'hématite. Elle est secondaire dans la roche.

- Le quartz est minoritaire et représente moins de 2% de la proportion minéralogique. Il est amorphe et reconnaissable en LPA (fig. 1.12E) par sa teinte de polarisation gris clair.

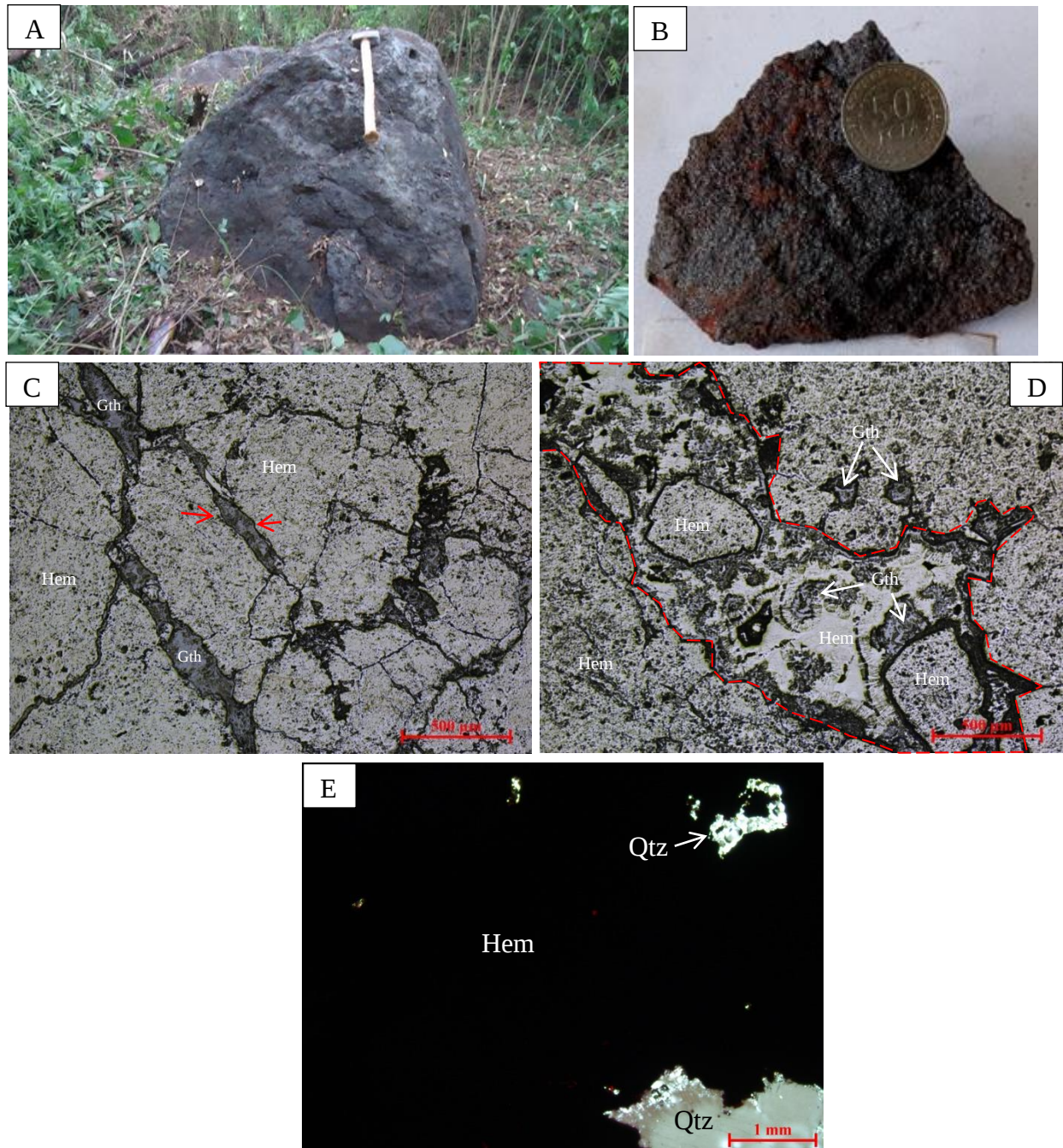


Figure 13. Aspects macroscopique et microscopique du minerai hématite-goethite (Ech.MMK8): A) Mode d’affleurement en blocs ; B) Détail d’un échantillon; C) Microstructure massive microfracturée, les fléchettes de couleur rouge

pointent les microfractures occupées par la goethite (LR); D) Relation entre l'hématite et la goethite, les tirés rouges délimitent les voies de circulation des fluides à travers les microfractures. Notez l'hydratation de l'hématite en goethite le long de ces fractures (LR); E) Microphotographie en LPNA montrant le quartz.

ii) Minerai à hématite-kénomagnétite et goethite

Le mode d'affleurement du minerai à hématite-kénomagnétite et goethite est similaire à celui du minerai à hématite-goethite. L'échantillon collecté présente les mêmes caractères macroscopiques que ce dernier à la seule différence qu'il a un magnétisme un peu plus fort (ceci s'explique par la présence de la kénomagnétite). Un lit discontinu de quartz a été observé sur l'affleurement (fig. 14A).

Au microscope, la roche présente une microstructure massive à nid d'abeille. Elle est essentiellement constituée d'oxydes de fer représenté par l'hématite et plus ou moins la kénomagnétite. Tout comme dans le minerai à hématite-goethite, l'on note la présence du quartz colloïdale et la goethite qui occupent les vacuoles de la roche.

- *L'hématite* (85%) est présente sous forme de grains fins qui donne à la roche sa microstructure massive d'ensemble, parsemée de part et d'autre des vacuoles semblables aux nids d'abeille dans lesquels se loge la goethite. L'on note également quelques microfractures (aucun remplissage de goethite observé).

- *La kénomagnétite* est une phase minérale transitionnelle entre la magnétite et la maghémite (Kullerud et Donnay, 1969). Elle est identifiable en lumière réfléchie par sa couleur rose grisâtre. L'on l'observe sous forme de cristaux relictuels disséminés dans la masse d'hématite. (fig. 14E).

- *Les vacuoles* représentent environ 10% du volume de la lame. Elles sont remplies par la goethite (3%) qui colmate les reliques de silice (fig. 14D).

I.1.2.2. Minerai de fer à structure polygonale

Le minerai à structure polygonale affleure sous forme de blocs anguleux de dimension métrique qui présentent sur leur surface des traces jaunes probablement de limonite (fig. 15A). La couleur d'ensemble est noir rougeâtre avec un aspect mat.

L'examen microscopique de lame mince sur une section de l'échantillon de cette roche révèle une microstructure polygonale constituée de la martite, la kénomagnétite et la limonite (fig. 15C).

- *La martite* (85%) définit la microstructure d'ensemble de la roche. Elle est représentée par les cristaux subautomorphes à automorphes dont la taille varie de 0,1-0,3mm. Elle serait issue du pseudomorphisme de la magnétite. C'est donc le résultat du processus d'oxydation de la magnétite (Hensler et al., 2015). On la reconnaît par les multiples hachures ou taches de couleur noir sur la surface du cristal (fig. 15C).

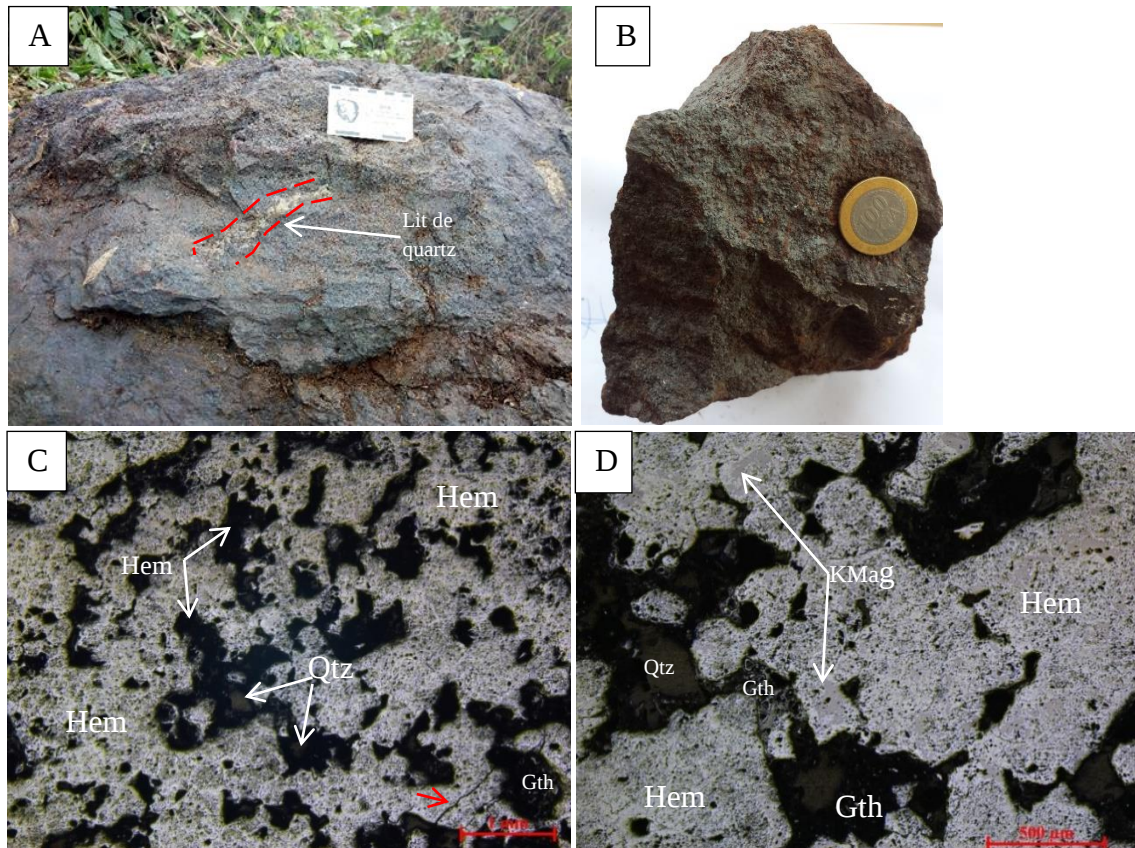


Figure 14. Aspects macroscopique et microscopique du minerai à hématite-kénomagnétite et goéthite: A) Photo de l'affleurement, notez la présence d'un lit de quartz; B) Détail d'un échantillon; C) Microstructure massive à nid d'abeille, la fléchette rouge pointe une microfracture; D) Cristaux d'hématite contenant les reliques de kénomagnétite, silice colmatées par la goéthite.

- *La kénomagnétite* (15%) est présente sous forme de cristaux subautomorphes à automorphes. La plupart des cristaux est partiellement ou totalement transformé en martite et ou en limonite. La martitisation (altération de la kénomagnétite en martite) ici est centripète.

- *La limonite* se développe entre les cristaux de martite, remplissant ainsi les vacuoles. Elle est reconnaissable en lumière réfléchie par sa couleur jaune pâle.

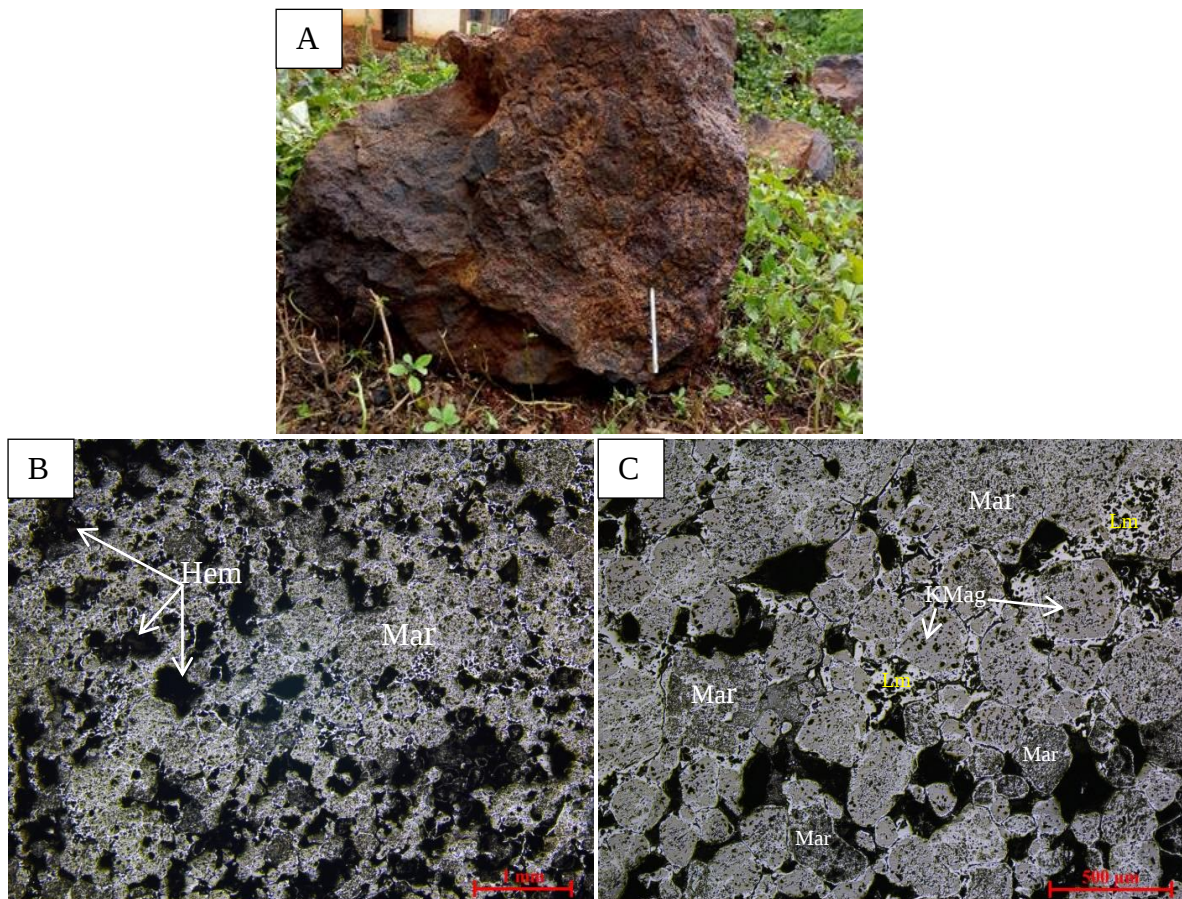


Figure 15. Aspects macroscopique et microscopique du minerai à martite-kénomagnétite et limonite : A) Photo de l'affleurement, notez les traces jaunes de limonite; B & C) Microstructure polygonale et composition minéralogique (LR), notez la limonite qui se développe entre la martite et la kénomagnétite.

1.1.2.3. Minerai de fer à structure pisolitique

La roche affleure sous forme de blocs centimétriques d'aspect rougeâtre. Elle est plus altérée que les autres types de minerai de fer décrits précédemment.

Au microscope, la roche présente une microstructure pisolitique constituée majoritairement d'hématite, de limonite et des reliques de magnétite. Le quartz y est en minoritaire.

- *L'hématite* (85%) constitue l'essentiel des minéraux ferrifères présents dans la roche. Elle est de forme sphérique à ovoïdale (diamètre compris entre 0,1-0,2 mm) semblable aux pisolites, ce qui confère à la roche sa structure pisolitique d'ensemble (fig. 16C).

- *La magnétite* se présente sous forme de tapis squelettique sur lequel se développent les ovoïdes d'hématite. Cette dernière proviendrait de la magnétite par oxydation (hématitisation). L'hématite est donc secondaire dans la roche.

- *La limonite* se développe au contact des grains de magnétite, elle est reconnaissable par couleur jaune pâle en lumière réfléchie.

- *Le quartz* est minoritaire dans la roche. Il est amorphe, étiré (0,4 mm) avec des contours irréguliers semblables à ceux d'une dendrite (fig. 16D).

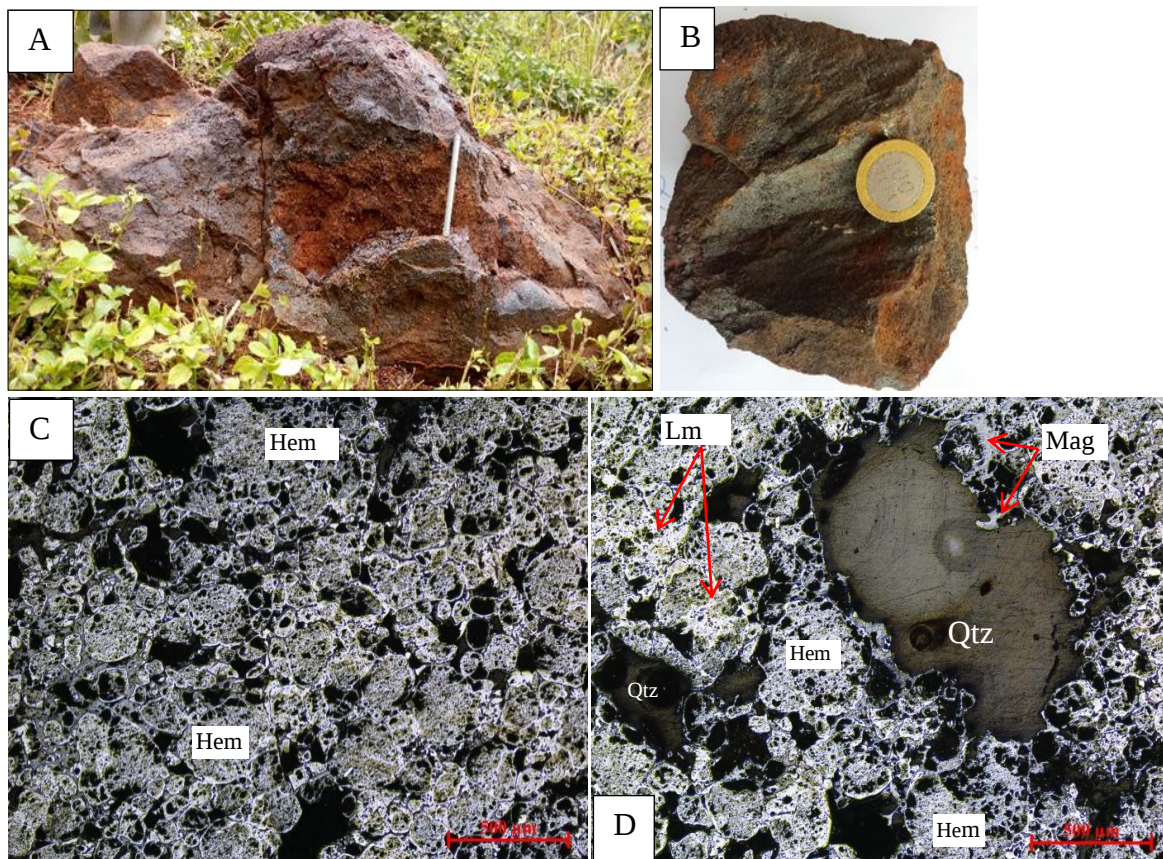


Figure 16. Aspects macroscopique et microscopique du minerai à hématite-limonite et reliques de magnétite : A) Photo de l'affleurement ; B) Détail d'un échantillon; C & D) Microstructure pisolitique et composition minéralogique (LR).

CONCLUSION

L'étude pétrographique du secteur Moloundou a permis de mettre en évidence six types pétrographiques dont le minerai de fer qui comporte quatre types pétrographiques

(minerai à hématite-goethite ; le minerai à hématite-kénomagnétite et goethite ; le minerai à martite-kénomagétite et limonite et enfin le minerai à hématite-limonite) et leurs roches hôtes essentiellement constituées de cherts et des pélites. Les caractères pétrographiques sont résumés dans le tableau II.

Tableau II. Caractères pétrographiques des formations géologiques du secteur Moloundou.

Types pétrographiques	Modes d'affleurement	Structures	Composition minéralogique
Roches hôtes			
Cherts	Blocs	Hétérogramulaire	Qtz
Pélites	Dalles	Hétérogranulaire	Qtz-Kfs-Ser-Chl
Minerais de fer			
Minerai à hématite-goethite	Blocs	Massive fracturée	Hem-Gth-Qtz
Minerai à hématite-kénomagétite et goethite	Blocs	Massive à nid d'abeille	Hem-KMag-Gth-Qtz
Minerai à hématite-kénomagnétite et limonite	Blocs	Polygonale	Mar-KMag-Lm-Qtz
Minerai à hématite-limonite et reliques de magnétite	Blocs	Pisolitique	Hem-Lm-Qtz-Mag

II.2. ÉTUDE STRUCTURALE

Le secteur de Moloundou étudié dans le cadre de ce travail appartient aux formations de la couverture du craton du Congo plus précisément à la série du Dja inférieur. Cette série est délimitée par deux zones de décrochement senestre. L'étude de la déformation abordée dans cette section analyse et décrit les différents éléments structuraux qui ont affecté les formations géologiques dudit secteur d'étude. Les éléments structuraux rencontrés dans ce secteur sont essentiellement les plis de couverture dans les pélites, de direction N030E avec un pendage de 80° vers WNW. L'on rencontre également une structuration peu nette des cherts.

L'observation des lames minces taillées sur les échantillons représentatifs des formations rencontrés sur le terrain révèle que certaines de ces roches ont été soumises à des fortes pressions probablement lors de l'enfouissement diagénétique. Il s'agit des cherts et du minerai à hématite-goethite qui présente des microbrèches d'hématite dans les microfractures (fig. 13C). Une analyse microstructurale des relations de contact entre les grains de quartz est présentée à la suite de ce paragraphe. Les relations de contact entre les cristaux dans une roche peuvent donner des renseignements sur les conditions qui ont

prévalu pendant leur mise en place. Les grains de quartz qui font l'objet de cette analyse ont des diamètres compris entre 0,2-0,3. L'on observe deux types de contact entre les grains : les contacts concavo-convexes, et les points triples.

- *Contact concavo-convexes*, la zone de contact forme un emboîtement qui est la résultante des fortes pressions lithostatique. L'aspect détritique des surfaces de contacts est probablement causé par la dissolution sous l'effet de l'augmentation de la pression au cours de la diagenèse.

- *Point triple*, c'est le point de rencontre entre trois cristaux. Les grains 1, 2 et 3 développent ce contact. À la différence du premier qui est la résultante de la pression unidirectionnelle (pression lithostatique), le point triple qu'en a lui résulterait d'une pression multidirectionnelle. En effet, la pression lithostatique devient très forte lorsque la diagenèse atteint son paroxysme et crée des tensions entre les grains. Ces derniers se réorganisent en formant les points triples. Cette restructuration marque alors la limite supérieure du domaine diagénétique laissant place au début du domaine métamorphique.

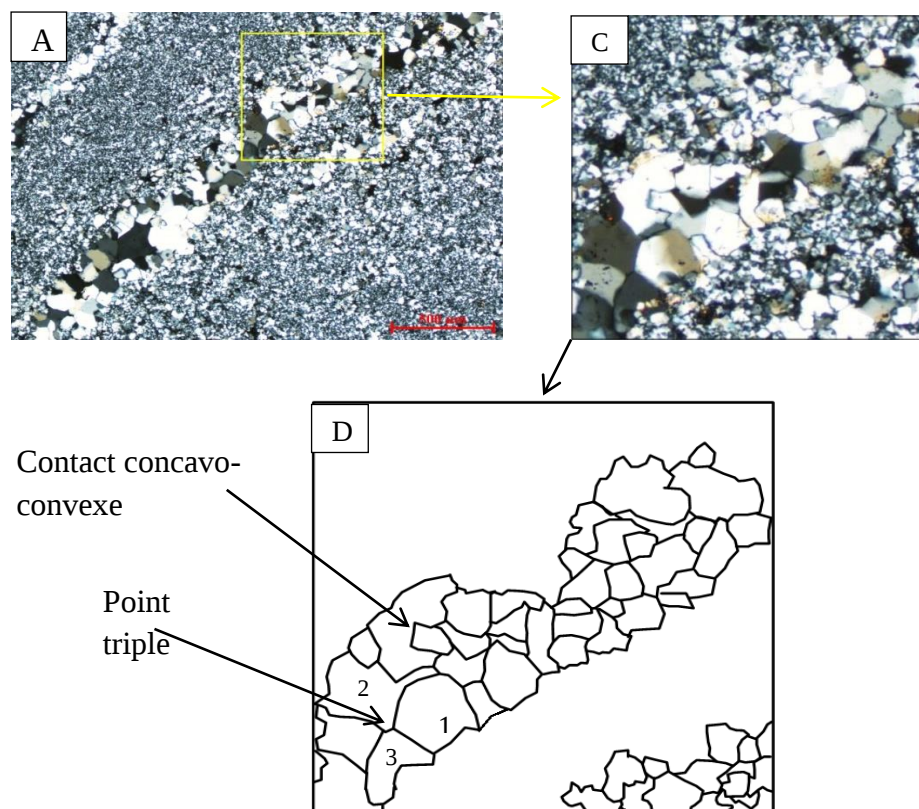


Figure 17. Microphotographies d'une lame mince de quartzite: A) Section entière montrant une bande riche en quartz; B) Zoom montrant les relations inter-granulaires ; D) Esquisse interprétative de la microstructure.

CONCLUSION

Les formations géologiques du secteur Moloundou auraient subi une déformation compressive qui s'exprime par les structures plicatives syn-sédimentaires enregistrées par les pélites et les microstructures de contact observées au sein des cherts.

CHAPITRE III
ÉTUDE GÉOCHIMIQUE

INTRODUCTION

L'étude géochimique présentée dans ce chapitre a pour but principal de préciser la signature chimique (nature et origine) des formations étudiées, puis de déterminer leur contexte géotectonique de mise en place. Pour y parvenir, l'utilisation des diagrammes usuels de classification, de caractérisation et de discrimination est nécessaire. Au terme des travaux de terrain, des analyses géochimiques sur roche totale ont été effectuées sur les échantillons représentatifs des roches du secteur étudié. Au total, quinze échantillons ont été analysés parmi lesquels figurent 04 échantillons de cherts, 03 échantillons des pélites et 08 échantillons du minerai de fer. Les résultats de ces analyses sont consignés dans les tableaux de ce chapitre.

III.1. CARACTÈRES GÉOCHIMIQUES DES ROCHES HÔTES DU MINERAI DE FER

L'étude pétrographique présentée dans le chapitre précédant a permis de proposer une nomenclature aux roches hôtes du secteur étudié. Il s'agit donc des cherts constitués à plus de 95% de quartz cryptocristallin et des pélites constitués de quartz, feldspath potassiques et oxydes de fer dans la fraction silteuse, de séricite, chlorite et carbonate dans la fraction fine. Dans les paragraphes qui suivent, nous utiliserons les caractères géochimiques afin de confirmer, voire compléter cette nomenclature pétrographique.

III.1.1. Classification géochimique

Les résultats analytiques des éléments majeurs de sept échantillons de roches hôtes du minerai de fer de Moloundou sont présentés dans le tableau III. Du point de vue global, les résultats montrent que ces roches ont des teneurs en SiO_2 modérées à élevées (48,27-99,39 %) et relativement pauvre en d'autres éléments majeurs. Toutefois les teneurs en ces derniers (éléments majeurs autre que le SiO_2) sont plus élevées dans les pélites que dans les cherts.

Au cours de l'altération, certains éléments majeurs à l'instar du Na_2O , CaO et K_2O sont susceptibles d'être mobilisés tandis que d'autres sont immobiles (Al_2O_3 et TiO_2) ou peu mobiles (SiO_2). La perte au feu (LOI) est communément utilisée comme un indicateur de l'altération des roches en ce sens que les faibles valeurs (< 1%) caractériseraient les roches saines. Les cherts de Moloundou ont des pertes au feu comprises entre 0 et -0,1% ; ce qui suggère qu'ils ne sont presque pas altérés tandis que les fortes valeurs de pertes au feu (13,8-16%) dans les pélites indiquent un fort degré d'altération de ces dernières. L'indice chimique d'altération ($\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})]$) de Nesbitt et Young (1982) basé sur l'utilisation des proportions molaires du Al_2O_3 , CaO^* , Na_2O et K_2O

permettant de déterminer le degré d'altération météorique des roches a été appliqué aux pélites de Moloundou. D'après Fedo et al. (1995), les roches qui ont les valeurs de CIA comprises entre 50-65 sont faiblement altérées, celles qui ont les valeurs de CIA entre 65-85 sont modérément altérées et les valeurs de CIA comprises entre 85-100 caractérisent les roches fortement altérées. En générale, les valeurs de CIA dans la croute supérieure sont comprises entre 55-60 (Wimmenauer, 1984). Les valeurs de CIA des pélites étudiées sont comprises entre 64,45-66,44 avec une valeur moyenne de 65,32 (Tableau III), ce qui indique qu'elles ont subi une altération modérée. Lors des processus d'altération, les alcalins ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) peuvent subir une remobilisation tandis que d'autres éléments à l'instar du TiO_2 et le Al_2O_3 restent immobiles. Les diagrammes de variation des alcalins et du TiO_2 en fonction du CIA montre une forte corrélation négative ($r = -0,8$) avec les alcalin (fig. 18A) en opposition à la forte corrélation positive avec le TiO_2 , ce qui signifie que les alcalins dans les pélites étudiées ont subi une remobilisation (fig. 18B). Dans la suite de la caractérisation géochimique des pélites de Moloundou, compte tenu du fait que certains éléments ont été mobilisés lors de l'altération, nous utiliserons uniquement les éléments majeurs immobiles, les éléments en traces et les terres car ces derniers sont communément considérées comme immobiles au cours des processus post-mise en place (diagenèse, altération et métamorphisme) (Garofalo, 2012).

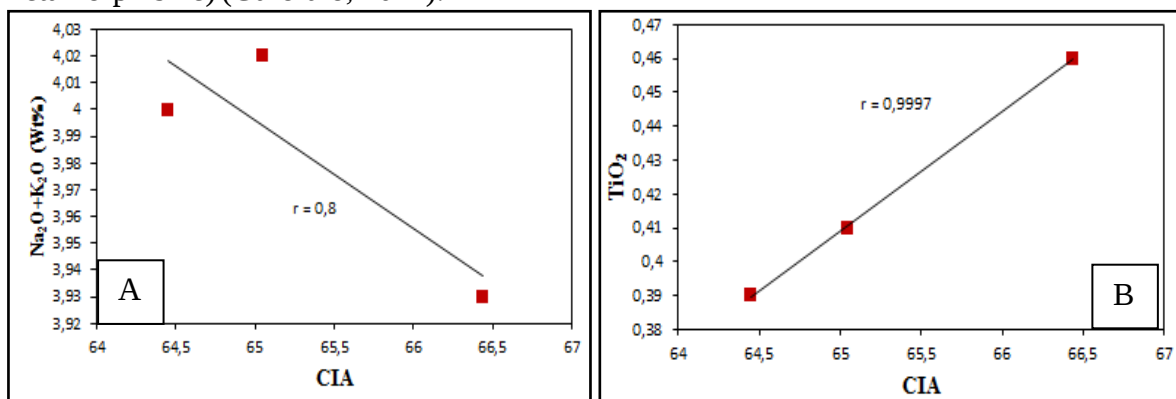


Figure 18. Diagrammes binaires de variation $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (A) et TiO_2 (B) en fonction du CIA des pélites de Moloundou. Notez l'opposition des corrélations.

Le diagramme de classification géochimique $\text{Log} (\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ vs $\text{log} (\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ d'après Herron (1988) place les roches hôtes de Moloundou à la limite du champ des grauweekes et des arkoses pour les pélites et dans le champ des arénites quartzitiques pour les cherts (fig.19). La différence géochimique entre arkoses et grauweekes se fait au niveau des teneurs en K_2O et Na_2O , dans les arkoses le $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ tandis que dans les grauweekes $\text{K}_2\text{O} < \text{Na}_2\text{O}$ (Condie, 1993). Les pélites de Moloundou ont des teneurs en K_2O (3,16-3,23 %)

> Na₂O (0,76-0,84 Wt%), ce qui signifie que ces roches ont en réalité la composition géochimique des arkoses.

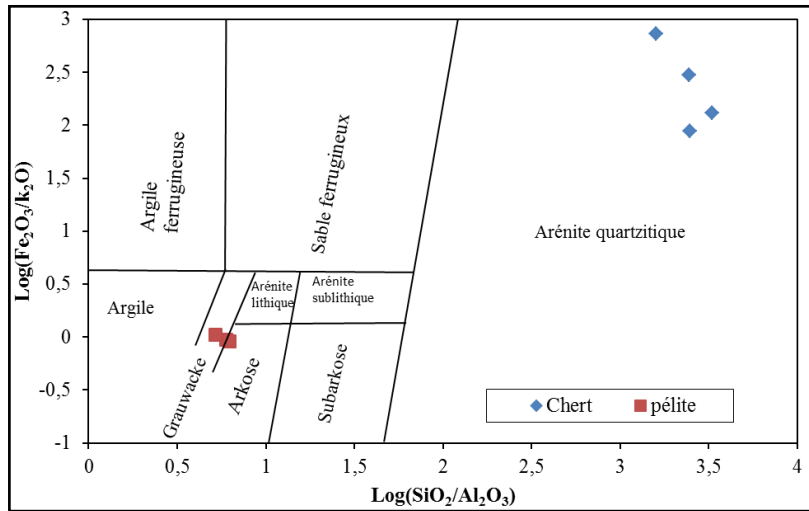


Figure 19. Diagramme de classification géochimique Log (SiO₂/Al₂O₃) vs Log (Fe₂O₃/K₂O) d'après Herron (1988).

Tableau III : Analyses géochimiques sur roche totale des éléments majeurs (%) des échantillons représentatifs des roches hôtes de Moloundou.

Roches		Arénites quartzitiques					Arkoses			
échantillons		MK1	MK2-1	MK2-2	MK2-3	Moy.	MK4-1	MK4-2	MK4-3	Moy.
Oxy. (Wt%)	LD									
SiO ₂	0,01	95,95	98,44	99,39	99,5	98,32	53,18	54,47	48,27	51,97
Al ₂ O ₃	0,01	0,06	0,04	0,03	0,04	0,04	8,93	8,71	9,27	8,97
Fe ₂ O ₃	0,04	3,67	1,5	0,65	0,44	1,56	3,05	2,9	3,34	3,1
MnO	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	/	0,06	0,06	0,07	0,06
MgO	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	/	7,58	7,34	8,67	7,86
CaO	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	/	8,02	7,88	9,5	8,47
Na ₂ O	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	/	0,79	0,84	0,76	0,8
K ₂ O	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	/	3,23	3,16	3,17	3,19
Cr ₂ O ₃	0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	/	0,005	0,004	0,006	0,005
TiO ₂	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	/	0,41	0,39	0,46	0,42
P ₂ O ₅	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	/	0,09	0,1	0,1	0,1
LOI	-5,1	0,3	0	-0,1	0	0,05	14,2	13,8	16	14,67
Total	0,01	100,2	100,2	100,1	100,2	100,1	99,79	99,8	99,77	99,79
Log (SiO ₂ /Al ₂ O ₃)		3,20	3,39	3,52	3,39	3,38	0,77	0,79	0,71	0,76
Log (Fe ₂ O ₃ /K ₂ O)		2,86	2,47	2,11	1,94	2,35	-0,02	-0,03	0,02	-0,01
K ₂ O/Na ₂ O		/	/	/	/	/	4,08	3,76	4,17	4
SiO ₂ /Al ₂ O ₃		/	/	/	/	/	5,95	6,25	5,20	5,8
CIA		/	/	/	/	/	65,05	64,45	66,44	65,32

LD : Limite de détection ; LOI : Loss On Ignition ou perte au feu ; CIA : Chemical Index of Alteration ou Indice d'altération chimique.

III.1.2. Caractères géochimiques

III.1.2.1. Arenites quartzitiques

i) Éléments majeurs

Les arénites quartzitiques de Moloundou sont constituées uniquement de trois éléments majeurs. Il s'agit de la silice SiO_2 , avec des teneurs comprises entre 95,96 et 99,39% ; de l'alumine Al_2O_3 (0,003-0,06%) et le fer (Fe_2O_3 : 0,65-3,67%). La teneur en ce dernier est plus élevée dans l'échantillon MK1 (Fe_2O_3 : 3,67%). Les autres éléments majeurs ont des teneurs inférieures à la limite de détection. Les diagrammes binaires de variation du Fe_2O_3 et du Al_2O_3 en fonction du SiO_2 (fig. 20) montrent de fortes corrélations négatives entre le SiO_2 et ces oxydes ($r = -0,99$ pour Fe_2O_3 ; $r = -0,87$ pour Al_2O_3).

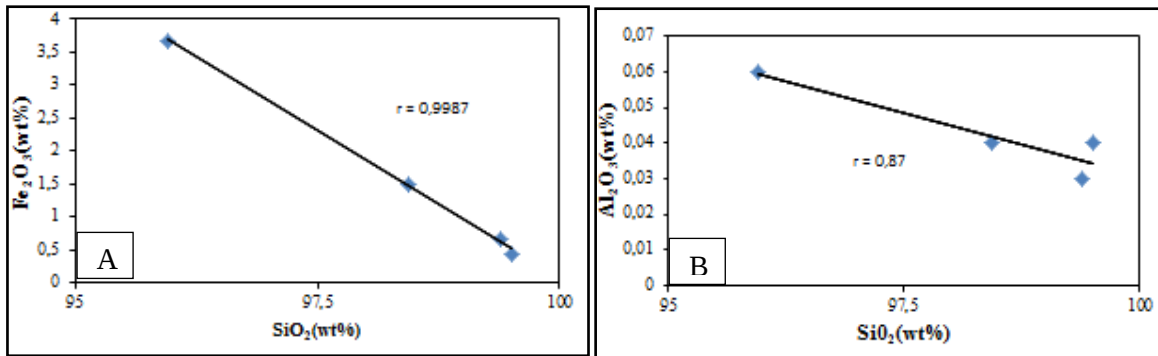


Figure 20. Diagrammes binaires de variation Fe_2O_3 (A) et Al_2O_3 (B) et en fonction du SiO_2 des arénites quartzitiques de Moloundou. Notez les fortes corrélations négatives entre ces éléments.

ii) Éléments traces

Les résultats analytiques des éléments en trace sont présentés dans le tableau IV. Les éléments lithophiles concentrés dans les phases silicatés (Ba : 19-23 ppm ; Zr : 0,8-4,5ppm et Y : 0,2-0,7ppm) sont présents dans tous les échantillons. Le cobalt (Co : 0,6-1,9 ppm) et le vanadium (V : 15 ppm) sont plus concentrés dans les échantillons MK1 et MK2-1 relativement enrichis en fer.

iii) Terres rares

Les résultats analytiques des terres rares des roches sédimentaires de Moloundou sont consignés dans le tableau V. Ces résultats révèlent que les teneurs en terres rares (REE) sont très faibles (moyenne $\sum \text{REE} = 0,99$ ppm) dans les arénites quartzitiques. En dehors des deux terres rares légères (La : 0,3 - 0,7 ppm et Ce : 0,2 - 0,5 ppm), les autres éléments ont des teneurs inférieures à la limite de détection. La somme des terres rares se réduit alors à la

teneur de ces deux éléments. Ces deux terres rares légères seraient portées par le quartz, principal minéral identifié lors des études pétrographiques. Il est donc impossible de caractériser ces formations en utilisant les diagrammes spectrométriques.

III.1.2.2. Arkoses

i) Éléments majeurs

Les arkoses de Moloundou ont des teneurs moyennes SiO_2 (48,27-54,47%) et en Al_2O_3 (8,71-9,27%). Elles sont légèrement enrichies en ferromagnésiens (MgO : 7,34-8,67% et Fe_2O_3 : 2,9-3,34%) et en CaO (7,88-9,5%) et appauvries en K_2O (3,16-3,23%). Par contre, Na_2O (0,76-0,84%), TiO_2 (0,09-0,1%), CrO_5 (0,004-0,006%), P_2O_5 (0,09-0,1%) et MgO (0,06-0,07%) sont en très faibles proportions dans ces roches. Les diagrammes binaires de variation de Fe_2O_3 (fig. 21E), Al_2O_3 (fig. 21A), CaO (fig. 21C), TiO_2 (fig. 21F), MnO (fig. 21D) et $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (fig. 21B), en fonction de SiO_2 montrent des fortes corrélations négatives entre le SiO_2 et l' Al_2O_3 ($r = -0,95$), le MgO ($r = -0,99$), le CaO ($r = -0,98$), le TiO_2 ($r = -0,99$) et le Fe_2O_3 ($r = -0,97$). Ces diagrammes montrent également une forte corrélation positive entre le SiO_2 et $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ($r = 0,83$) ce qui traduit une compatibilité minéralogique entre ces trois éléments.

ii) Éléments en trace

Tout comme les éléments majeurs, les arkoses sont caractérisées par les fortes concentrations en éléments en trace comparativement aux arénites quartzitiques. L'on note des teneurs très élevées en Ba (1450-1912 ppm) soit plus de trois fois supérieur à la valeur moyenne (500 ppm) de la croûte continentale supérieure (Taylor and McLennan, 1985). Les teneurs en Y (66,5-81,1ppm), Zr (156,8-196,3 ppm), Rb (99,2-104 ppm) et Sr (69,2 -70,4 ppm) sont élevées tandis que U (2-2,3ppm), Th (7,9-9,4ppm), Sc (6-7ppm) et Co (7-7,7ppm) ont des teneurs faibles. Le Ni (2,3-2,9ppm) et le Ta (0,6-0,7ppm) ont des teneurs très faibles alors que le Sn et Be sont non détectables dans certains échantillons.

Les diagrammes binaires de variation d'Hf (fig. 22A), Y (fig. 22B), Nb (fig. 22C), Sr (fig. 22D), Th (fig. 22E), Rb (fig. 22F), Zr (fig. 22G) et Ta (fig. 22H) en fonction du SiO_2 montrent de fortes corrélations négatives entre le SiO_2 et le Ta ($r = -0,96$), le Th ($r = -0,99$), le Nb ($r = -0,81$), Rb ($r = -0,73$) et Sr ($r = -0,67$) tandis que le Zr ($r = 0,99$) et l'Hf ($r = 0,96$) ont de fortes corrélations positives avec le SiO_2 . La corrélation positive entre l'Y et le SiO_2 est moyenne ($r = 0,51$).

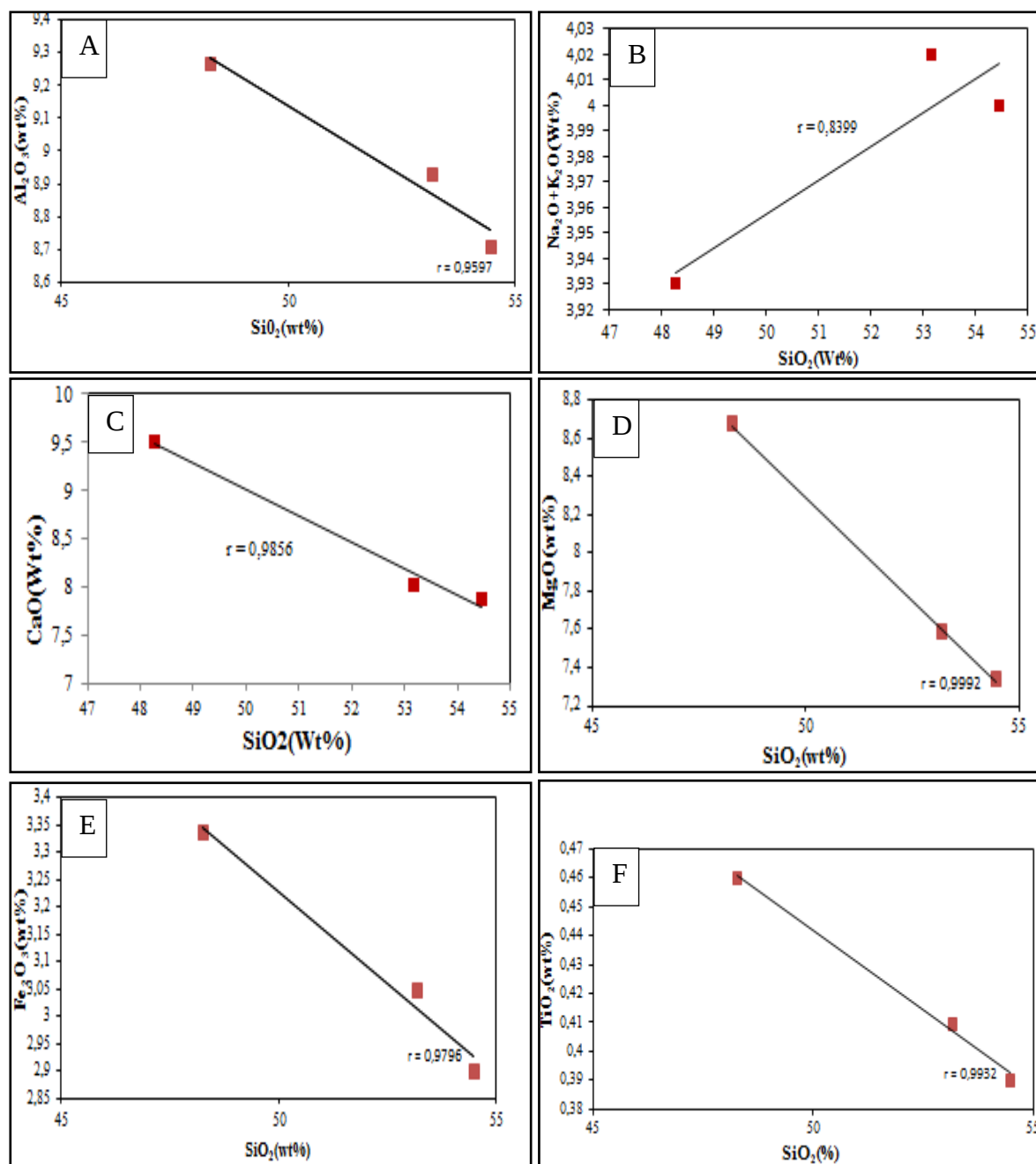


Figure 21. Diagrammes binaires de variation de quelques oxydes en fonction du SiO_2 des arkoses de Moloundou.

Tableau IV. Analyses géochimiques sur roche totale des éléments en trace (ppm) des échantillons représentatifs des roches hôtes de Moloundou.

Roches		Arénites quartzitiques					Arkoses			
Codes		MK1	MK2-1	MK2-2	MK2-3	Moy .	MK4-1	MK4-2	MK4-3	Moy.
Eléments	L.D	ppm								
Ba	1	21	23	19	20	20,75	1912	1675	1450	1679
Ni	20	<20	<20	<20	<20	/	26	29	23	26
Sc	1	<1	<1	<1	<1	/	6	6	7	6,33
Be	1	<1	<1	<1	<1	/	1	<1	2	1,5
Co	0,2	1,9	0,6	<0,2	<0,2	1,25	7,1	7,7	7	7,26
Cs	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	/	1,9	2	2,2	2,03
Ga	0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	/	8,6	8,4	9,4	8,8
Hf	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	/	5,1	5,1	4,4	4,86
Nb	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	/	6,7	6,9	7,5	7,03
Rb	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	/	102,5	99,2	104	101,9
Sn	1	<1	<1	<1	<1	/	1	<1	1	1
Sr	0,5	0,7	0,6	<0,5	<0,5	0,65	70,1	69,2	70,4	69,9
Ta	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	/	0,6	0,6	0,7	0,63
Th	0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	/	8,3	7,9	9,4	8,53
U	0,1	<0,1	<0,1	0,2	<0,1	0,2	2	2,3	2,3	2,2
V	8	15	<8	<8	<8	15	43	38	46	42,33
W	0,5	<0,5	1,1	<0,5	<0,5	1,1	1,1	1	0,9	1
Zr	0,1	0,9	0,8	1,8	4,5	2	190,2	196,3	156,8	181,1
Y	0,1	0,2	0,2	0,2	0,7	0,32	81,1	73,2	66,5	73,6
Th/U	/	/	/	/	/	/	4,15	3,43	4,08	3,88
La/Sc	/	/	/	/	/	/	7,38	7,4	5,84	6,87
Th/Co	/	/	/	/	/	/	1,16	1,02	1,34	1,17
Ti/Zr	/	/	/	/	/	/	12,71	11,72	17,30	13,91
Th/Sc	/	/	/	/	/	/	1,38	1,31	1,34	1,34
Zr/Sc	/	/	/	/	/	/	31,7	32,71	22,4	28,93

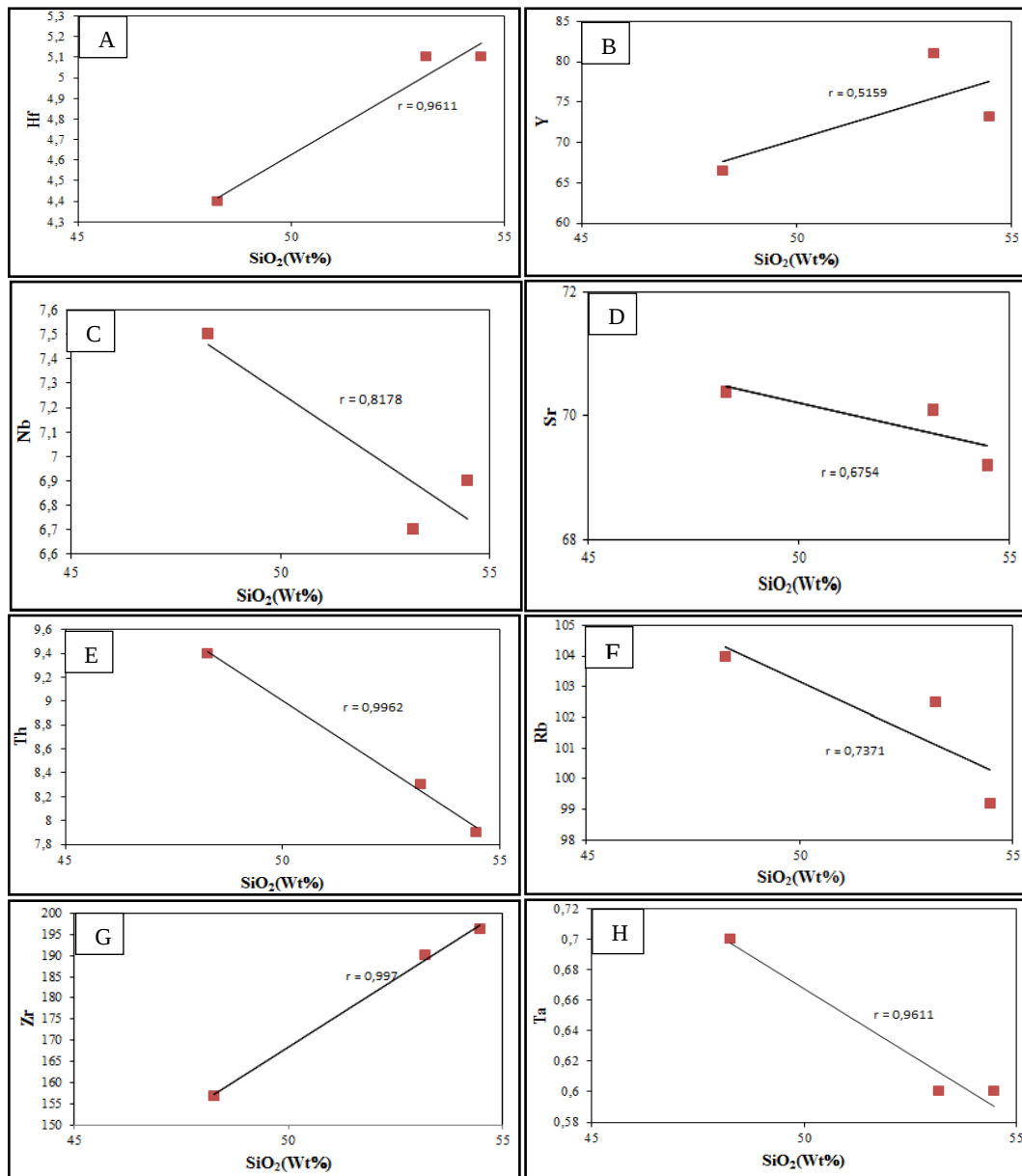


Figure 22. Diagrammes binaires de variation de quelques éléments traces (ppm) en fonction du SiO_2 des arkoses de Moloundou.

iii) Terres rares

Les résultats analytiques des terres rares ou rare earth element (REE) des arkoses sont présentés dans le tableau V. De ce tableau, il en ressort que ces roches sont relativement riches en terres rares (moyenne $\sum \text{REE} = 183,51$ ppm) par rapport aux arénites quartzitiques. Les spectres des terres rares normalisées par rapport à la chondrite C1 (Sun et McDonough, 1989) montre un enrichissement en terres rares légères (LREE) ($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{CN}} = 9,02-10,22$) par rapport aux terres rares lourdes (HREE) ($(\text{Tb}/\text{Yb})_{\text{CN}} = 1,88-2,04$). Ces spectres

présentent des anomalies négatives en Eu ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,56-0,60$) et en Ce ($\text{Ce}/\text{Ce}^*=0,63-0,73$).

Les spectres normalisés par rapport aux sédiments australiens post-archéens (PAAS : Post-Archean Australian Shale) de Taylor et McLennan (1985) sont parallèles avec des anomalies négatives en Ce ($\text{Ce}/\text{Ce}^*=0,59-0,68$). L'on note une absence d'anomalie en Eu et un enrichissement en terres rares lourdes (fig. 23B).

Les spectres multiéléments normalisés par rapport à la croûte continentale (fig. 24) sont presque similaires et montrent des enrichissements en MgO et en La.

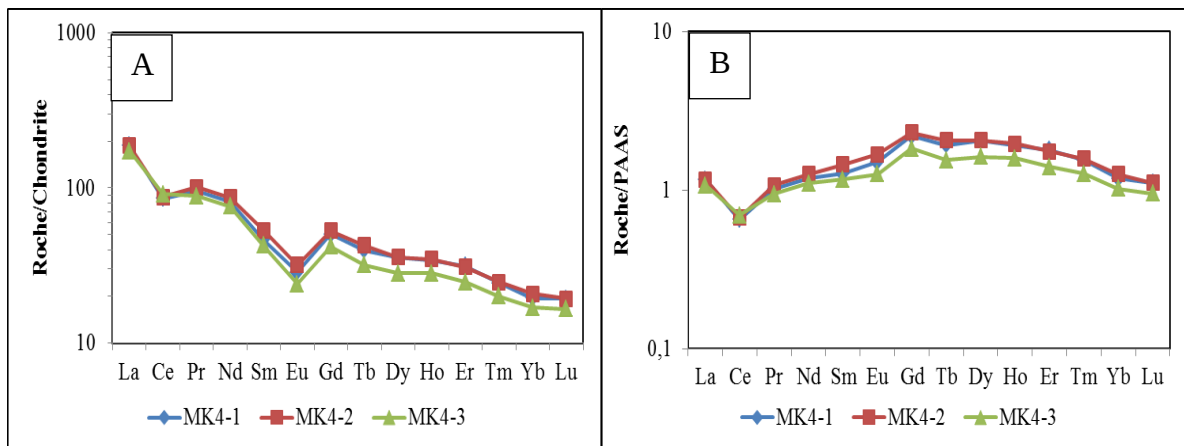


Figure 23. Spectres des terres rares de arkoses de Moloundou: A) Spectres normalisés par rapport à la chondrite; B) Spectres normalisés par rapport au PAAS. Les valeurs de normalisation sont celles Sun et McDonough (1989) pour la chondrite et Taylor et McLennan (1985) pour le PAAS.

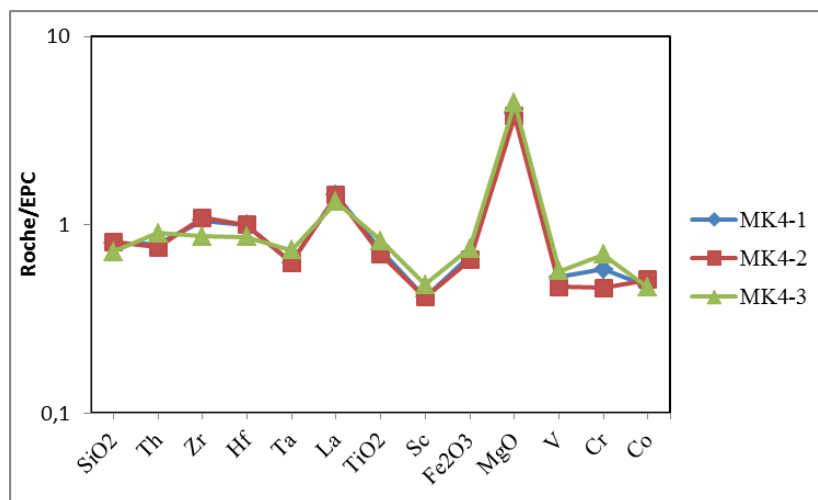


Figure 24. Spectre multiélément normalisées par rapport à la croûte paléoprotérozoïque (EPC) d'après Condie (1993).

Tableau V. Analyses géochimiques sur roche totale des terres rares (ppm) des roches hôtes de Moloundou.

Roches		Arénites quartzitiques				Arkoses			
Codes		MK1	MK2-1	MK2-2	MK2-3	MK4-1	MK4-2	MK4-3	Moy.
Ppm	L.D								
La	0,1	0,7	0,6	0,5	0,3	44,3	44,4	40,9	43,2
Ce	0,1	0,5	0,4	0,2	0,4	52,1	53,5	55,7	53,76
Pr	0,02	0,03	<0.02	<0.02	0,04	9,04	9,56	8,42	9
Nd	0,3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	38,1	40,4	35,4	37,96
Sm	0,05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	7,1	8,14	6,53	7,25
Eu	0,02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	1,65	1,85	1,39	1,63
Gd	0,05	<0.05	<0.05	<0.05	0,07	10,34	10,86	8,63	9,94
Tb	0,01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1,48	1,59	1,19	1,42
Dy	0,05	<0.05	0,06	<0.05	0,07	8,99	9,09	7,17	8,41
Ho	0,02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	1,92	1,96	1,59	1,82
Er	0,03	<0.03	0,03	<0.03	0,05	5,19	5,1	4,08	4,79
Tm	0,01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0,62	0,63	0,51	0,58
Yb	0,05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	3,31	3,53	2,87	3,23
Lu	0,01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0,49	0,49	0,42	0,46
ΣLREE	/	1,23	1	0,7	0,74	152,29	157,85	148,34	152,82
ΣHREE	/	0	0,09	0	0,23	32,34	33,25	26,46	30,68
ΣREE	/	1,23	1,09	0,7	0,97	184,63	191,1	174,8	183,51
(Eu/Eu*) _{CN}	/	/	/	/	/	0,58	0,60	0,56	0,58
(Ce/Ce*) _{CN}	/	/	/	/	/	0,63	0,63	0,73	0,66
(Ce/Sm) _{CN}	/	/	/	/	/	1,83	1,64	2,13	1,86
(Gd/Yb) _{CN}	/	/	/	/	/	2,58	2,54	2,48	2,53
(Ce/Ce*) _{SN}	/	/	/	/	/	0,59	0,59	0,59	0,59
(La/Yb) _{CN}	/	/	/	/	/	9,60	9,02	10,22	9,61
(Tb/Yb) _{CN}	/	/	/	/	/	2,03	2,04	1,88	1,98

$Eu/Eu^* = Eu/(Sm \times Gd)^{1/2}$; $Ce/Ce^* = Ce/(La \times Pr)^{1/2}$; CN : Normalisé par rapport aux chondrites ; SN : Normalisé par rapport au PAAS ; LD : Limite de détection.

III.2. CARACTÈRES GÉOCHIMIQUES DES FORMATIONS FERRIFÈRES

L'étude pétrographique a révélé que les formations ferrifères étudiées sont essentiellement constituées des oxydes/hydroxydes de fer. Le quartz y est en très faible proportion. Dans cette section, nous présenterons les résultats des analyses géochimiques de ces roches en vue d'une meilleure caractérisation de ces dernières.

III.2.1. Éléments majeurs

Les résultats analytiques des éléments majeurs du minerai de fer de Moloundou sont présentés dans le tableau VI. Ces résultats révèlent que les teneurs en Fe_2O_3 dans ces roches varient entre 94,12-97,41% ; moyenne : 96,22%. Les teneurs de fer natif oscillent entre 65,88 et 68,18% ; moyenne : 67,35%, caractéristique du minerai de fer de haute teneur ou DSO (Direct Shipping Ore). Les teneurs en SiO_2 sont faibles dans ces roches, en général inférieure à 1% excepté dans l'échantillon MMK4 où l'on note une valeur de l'ordre de 1,42%. De même, les teneurs en Al_2O_3 et en MgO sont très faibles et varient respectivement entre 0,11-0,52% et <0,01-0,26%. Les concentrations des autres éléments majeurs sont proches à inférieures à la limite de détection (MnO = 0,02-0,07% ; Cr_2O_3 = 0,002-0,004% ; P_2O_5 = <0,01-0,05% ; CaO = <0,01-0,04% ; Na_2O et K_2O = <0,01%). Contrairement aux autres échantillons, l'échantillon MMK2 possède des teneurs en Al_2O_3 (0,52%) et P_2O_5 (0,05%) et une perte au feu (4,1%) un peu plus élevées. Ceci traduirait la forte altération de ce dernier. Cette interprétation est confirmée par l'abondance de la limonite dans cet échantillon par rapport aux autres. Le diagramme binaire de variation du Fe_2O_3 en fonction du LOI (fig. 25A) montre que les pertes au feu faibles sont rencontrées dans les échantillons fortement riches en Fe_2O_3 .

L'histogramme de variation des teneurs moyennes des éléments majeurs des échantillons du minerai de fer de Moloundou (fig.25B) montrent un seul pic correspondant à la teneur moyenne du Fe_2O_3 (96,22%). Le SiO_2 , Al_2O_3 et le MgO présentent des teneurs très faibles (proche de 1%) tandis que les autres oxydes ont des teneurs moyennes inférieures à 0,1% (fig. 25B).

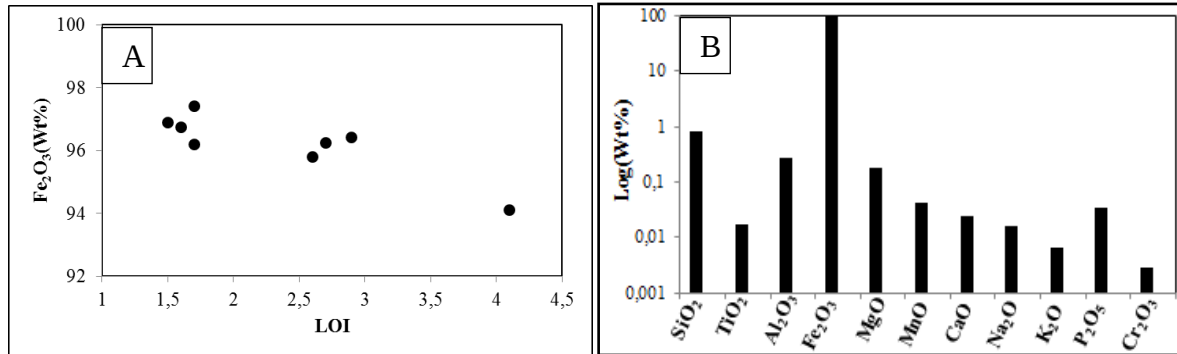


Figure 25. A) Diagramme binaire de variation du Fe₂O₃ en fonction du LOI; B) Histogramme de variation des éléments majeurs du minerai de fer de Moloundou.

Tableau VI. Analyses géochimiques sur roche totale des éléments majeurs des formations ferrifères de Moloundou

		Minerai de fer								
N° d'éch.		MMK1	MMK2	MMK3	MMK4	MMK5	MMK6	MMK7	MMK8	Moy.
Oxydes (Wt%)	LD									
SiO ₂	0,01	0,98	0,88	0,66	1,42	0,6	0,95	0,66	0,51	0,83
Al ₂ O ₃	0,01	0,25	0,52	0,38	0,22	0,11	0,42		0,12	0,27
Fe ₂ O ₃	0,04	95,79	94,12	96,74	96,19	97,41	96,89	96,25	96,41	96,22
MnO	0,01	0,04	0,04	0,05	0,07	0,03	0,04	0,04	0,02	0,04
MgO	0,01	0,18	0,12	0,4	0,26	0,07	0,11	0,09	<0,01	0,2
CaO	0,01	0,03	0,02	0,01	0,04	0,02	0,02	0,03	<0,01	0,02
Na ₂ O	0,01	0,02	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	/
K ₂ O	0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	/
Cr ₂ O ₃	0,002	0,002	0,002	0,003	0,004	0,002	0,003	0,004	0,003	0,003
TiO ₂	0,01	0,01	0,03	0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	/
P ₂ O ₅	0,01	<0,01	0,05	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	/
LOI	/	2,6	4,1	1,6	1,7	1,7	1,5	2,7	2,9	
Total	/	99,9	99,9	99,86	99,9	99,96	99,94	99,94	99,97	99,92
Fe	/	67,05	65,88	67,71	67,33	68,18	67,82	67,37	67,48	67,35
Si/Al	/	3,46	1,49	1,53	5,70	4,82	2,00	3,64	3,75	3,46
Al/Ti	/	21,66	15,02	32,93	14,3	7,15	18,2	10,4	7,8	21,66

Fe/Ti	/	11175	3660	11286	8416	8523	5651	8421	8435	11175
-------	---	-------	------	-------	------	------	------	------	------	-------

Les diagrammes binaires de variations de quelques éléments majeurs en fonction du Fe_2O_3 (fig. 26) montrent une dispersion des points représentatifs des échantillons étudiés. Toutefois, l'on note que le point représentatif de l'échantillon MMK2 s'écarte en se rapprochant de l'origine des diagrammes. Ceci s'expliquerait par la teneur relativement faible en Fe_2O_3 (<95%) dans cette roche par rapport aux autres. L'on ne note aucune corrélation inter-éléments dans ces diagrammes.

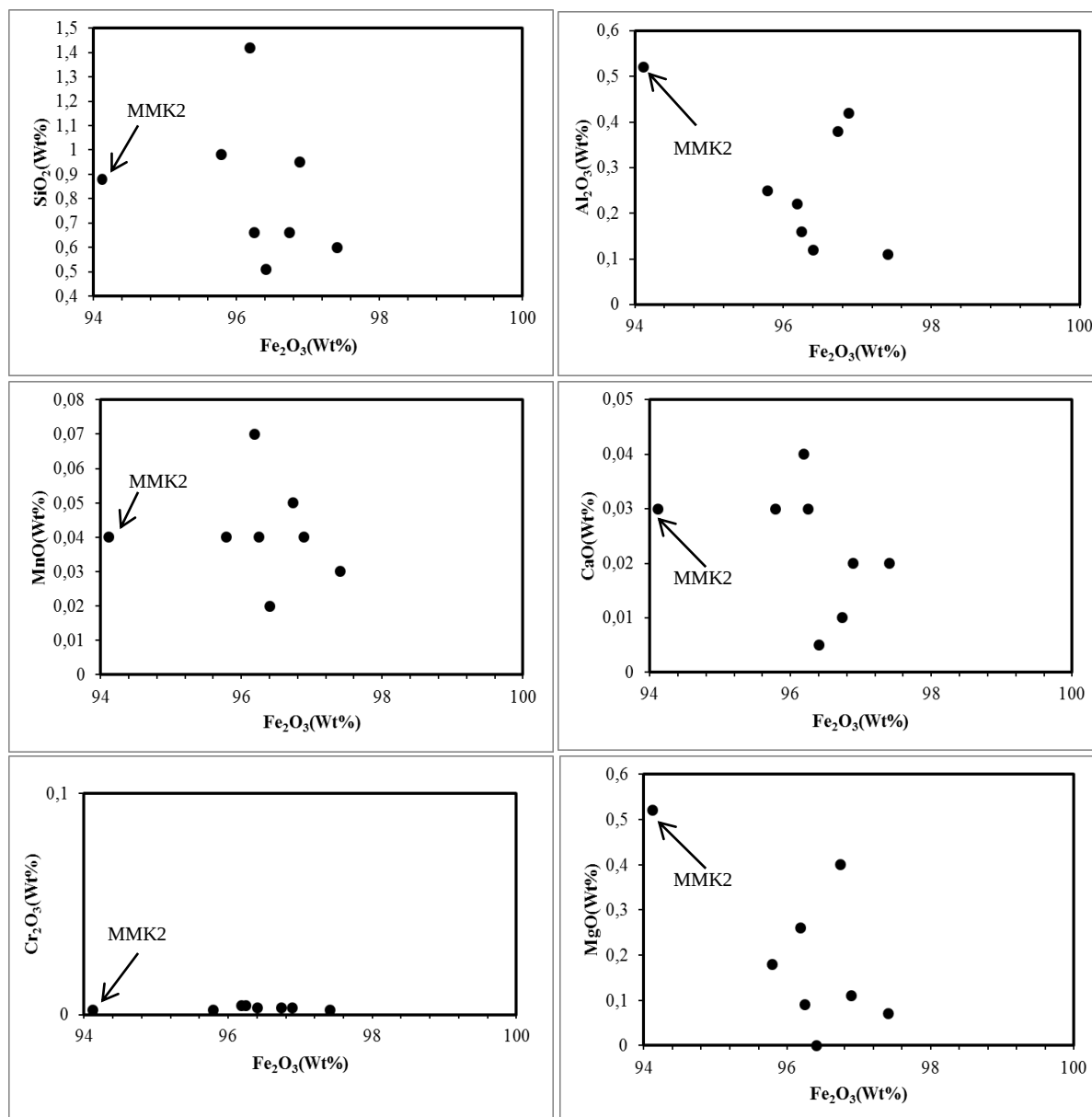


Figure 26. Diagrammes de variation de quelques éléments majeurs du minerai de fer de Moloundou en fonction du Fe_2O_3 .

III.2.2. Éléments en trace

Les résultats analytiques des éléments en trace des formations ferrifères de Moloundou sont présentés dans le tableau VII. Les éléments sidérophiles (Co et Ni) ont des teneurs élevées dans les échantillons MMK1, MMK2, MMK3, MMK4 et MMK7 ; par contre dans les échantillons MMK5, MMK6 et MMK8 les teneurs en ces éléments sont moins élevées (Co: 30,7-35,8 ppm) à très faibles pour le Ni (< LD-21 ppm). Les teneurs en V sont également élevées dans les échantillons MMK1 (108 ppm), MMK2 (163 ppm), MMK3 (126 ppm), MMK4 (212 ppm) et MMK6 (110 ppm) et faibles dans les échantillons MMK5 (9 ppm), MMK7 (39 ppm) et MMK8 (8 ppm). Les teneurs en U sont faibles dans tous les échantillons étudiés (0,2-2,6 ppm). Les éléments lithophiles comme le Rb (<0,1ppm), Sr (6,2-36,2 ppm), Ba (18-133 ppm) et Th (<0,2–0,3 ppm) ont également des teneurs très faibles dans l'ensemble de ces roches.

Tableau VII. Analyses géochimiques sur roche totale des éléments traces des échantillons représentatifs du minerai de fer de Moloundou

		Minerai de fer								
N° d'éch.		MMK1	MMK2	MMK3	MMK4	MMK5	MMK6	MMK7	MMK8	Moy.
ppm	LD									
Ni	20	50	32	47	43	21	<20	27	20	34,28
V	8	108	163	126	212	9	110	39	<8	109,50
Co	0,2	104	59,8	256,5	72,8	30,7	42,4	98,8	35,8	87,60
Ba	1	42	106	25	114	117	73	133	18	78,50
Zr	0,1	2,8	4,3	3,1	5,7	4,5	3,9	3,5	1,3	3,63
Th	0,2	<0,2	0,3	<0,2	<0,2	<0,2	0,2	<0,2	<0,2	0,25
Sc	1	2	5	2	2	1	1	1	<1	2
Ga	0,5	2,4	6,8	5	2,1	1,4	9,4	1,9	2	3,87
Hf	0,1	<0,1	0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,10
Nb	0,1	0,2	0,5	0,3	<0,1	<0,1	0,6	<0,1	0,2	0,36
Rb	0,1	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,3	<0,1	<0,1	0,30
Sr	0,5	3,8	4	1,5	37,4	29,2	18,4	36,2	6,2	17,08
U	0,1	2,6	2,6	2,1	1,6	0,3	0,9	0,6	0,2	1,36
W	0,5	9,7	6,3	14,1	7,1	10	1,6	4,2	2,9	6,98
Y	0,1	2,4	3,9	3,3	2,6	0,8	1,6	1,1	0,4	2,01

Les diagrammes binaires de variation des éléments traces (Co, Ni, V, Ba, Zr, et Sr) en fonction du Fe₂O₃ (fig. 27) montrent que le point représentatif de l'échantillon MMK2 se

distingue des autres points. L'explication donnée plus haut dans la rubrique "éléments majeurs" reste valable ici. L'on ne note également aucune corrélation entre ces éléments en trace et le Fe_2O_3 .

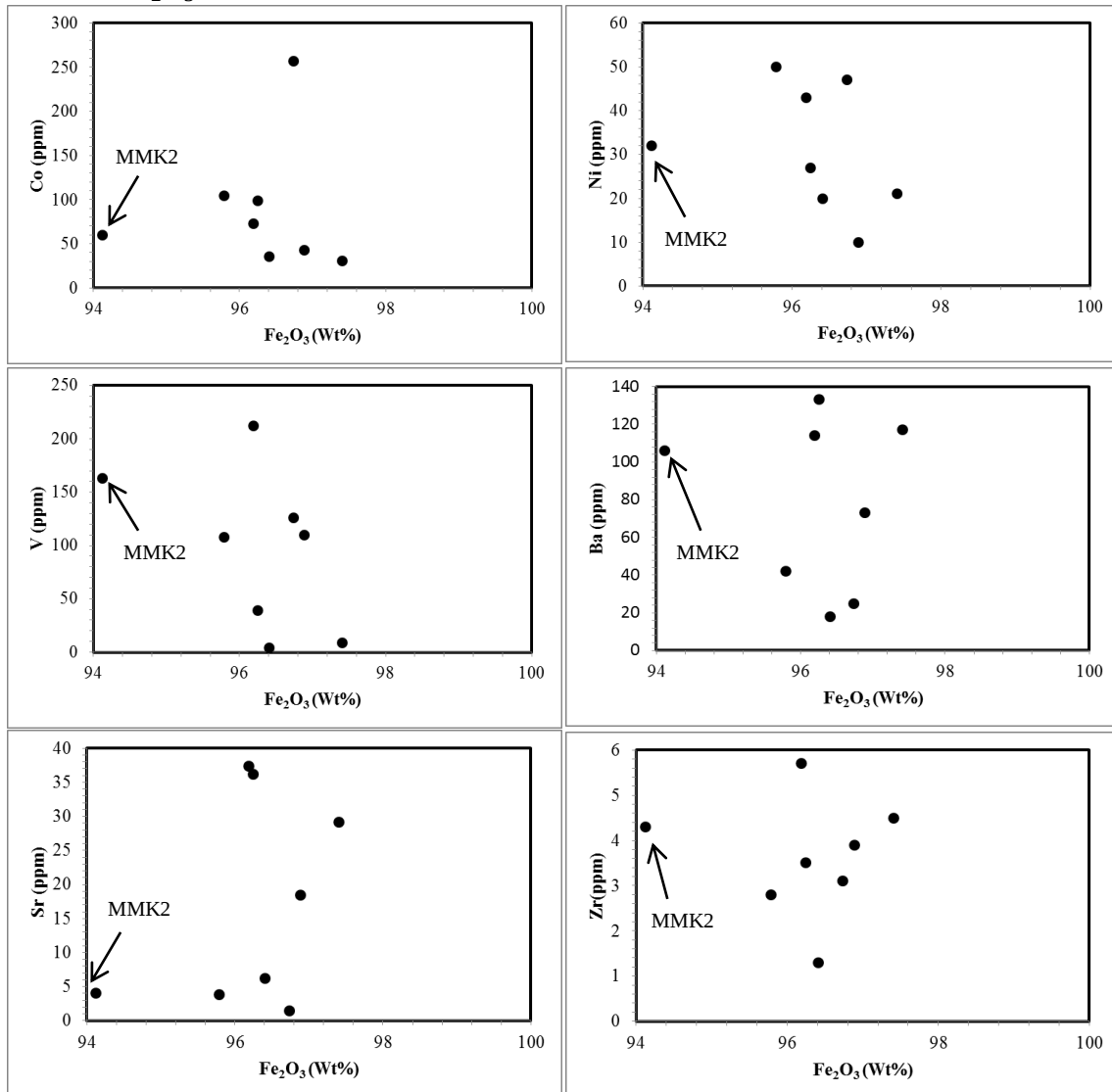


Figure 27. Diagrammes binaires de variation de quelques éléments traces des formations ferrières de Moloundou en fonction du Fe_2O_3 .

II.2.3. Terres rares

Le tableau VIII présente les résultats analytiques des terres rares (REE) des formations ferrières de Moloundou. Toutes les valeurs des REE ont été normalisées par rapport aux Sédiments Australiens Post-Archéens (PAAS). Les valeurs de normalisation sont celles de Taylor et McLennan (1985). Les rapports LREE/HREE, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{SN}}$ et $(\text{Tb}/\text{Yb})_{\text{SN}}$ sont utilisés pour exprimer le fractionnement des terres rares légères (LREE) par rapport aux terres rares lourdes (HREE). Les anomalies en Ce et en Eu sont définies par les rapports $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{SN}}$ et

$(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_{\text{SN}}$. Ces dernières se calculent respectivement par les formules $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{SN}} = 2\text{Ce}_{\text{SN}} / (\text{La}_{\text{SN}} + \text{Pr}_{\text{SN}})$ et $(\text{Eu}/\text{Eu}^*) = \text{Eu}_{\text{SN}} / (0,67\text{Sm}_{\text{SN}} + 0,33\text{Tb}_{\text{SN}})$ d'après Bau et Dulski (1996).

Dans l'ensemble, les formations ferrifères étudiées montrent des faibles teneurs en REE (moyenne $\sum\text{REE}=7,45$ ppm), avec la teneur en terres légères ($\sum\text{LREE} = 5,74$ ppm) nettement au-dessus de celle des terres rares lourdes ($\sum\text{HREE}=1,7$ ppm). Dans les échantillons MMK8, MMK7 et MMK5 les teneurs en REE sont très faibles ($\sum\text{REE} < 5$ ppm). Dans ces trois échantillons, la teneur en Lu est inférieure à la valeur détectable par la méthode analytique utilisée. Il en est de même pour le Sm, Eu, Ho, Yb, Tm et Lu dans l'échantillon MMK8 et Tm dans l'échantillon MMK5.

Les spectres des terres rares normalisés par rapport au PAAS (fig. 28) montrent que six échantillons (MMK1, MMK2, MMK3, MMK4, MMK6 et MMK7) sont plus fractionnés en HREE $((\text{Tb}/\text{Yb})_{\text{SN}} = 0,90\text{-}1,21$ ppm) qu'en LREE $((\text{La}/\text{Yb})_{\text{SN}} = 0,17\text{-}1,30$ ppm). Par contre dans l'échantillon MMK5, l'on note plutôt un grand fractionnement en LREE $((\text{La}/\text{Yb})_{\text{SN}} = 1,30$ ppm) par rapport en HREE $((\text{Tb}/\text{Yb})_{\text{SN}} = 0,80$ ppm). Les profils des REE de ces roches ne sont pas homogènes. Tous les échantillons étudiés présentent des anomalies négatives en Ce ($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 0,55\text{-}0,80$) à l'exception de l'échantillon MMK13 qui présente une anomalie positive ($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 1,32$). Les spectres des échantillons MMK1, MMK2, MMK4, MMK6 et MMK7 montre des anomalies positives Eu ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1,1\text{-}1,83$) tandis que les spectres des échantillons MMK5 et MMK3 montrent respectivement des anomalies nulle ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1,01$) et faiblement négative ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,91$).

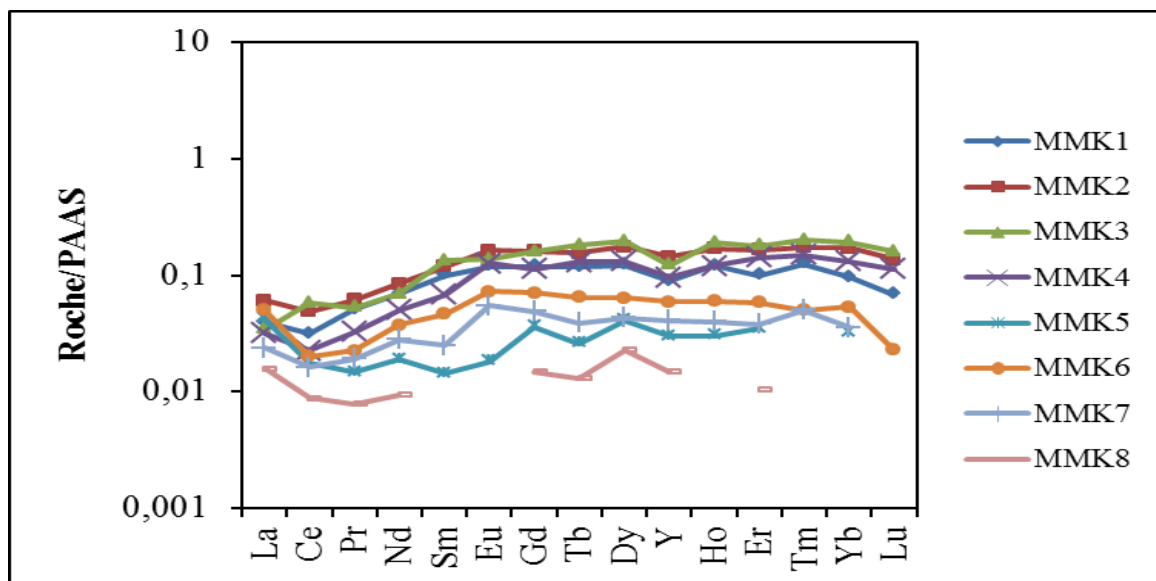


Figure 28. Spectres des terres rares des formations ferrifères de Moloundou normalisés par rapport au PAAS (Taylor et McLennan, 1985).

Tableau VIII. Analyses géochimiques sur roche totale des terres rares des échantillons représentatifs des formations ferrifères de Moloundou.

		Minerai de fer								
N° d'éch.		MMK1	MMK2	MMK3	MMK4	MMK5	MMK6	MMK7	MMK8	Moy.
Ppm	LD									
La	0,1	1,5	2,3	1,3	1,2	1,6	1,9	0,9	0,6	1,41
Ce	0,1	2,5	3,9	4,6	1,8	1,4	1,6	1,3	0,7	2,22
Pr	0,02	0,45	0,55	0,47	0,29	0,13	0,2	0,17	0,07	0,29
Nd	0,3	2,2	2,7	2,2	1,6	0,6	1,2	0,9	0,3	1,46
Sm	0,05	0,56	0,67	0,75	0,38	0,08	0,26	0,14	<0,05	0,35
Eu	0,02	0,13	0,18	0,15	0,14	0,02	0,08	0,06	<0,02	0,09
Gd	0,05	0,56	0,76	0,75	0,53	0,17	0,33	0,23	0,07	0,42
Tb	0,01	0,09	0,12	0,14	0,1	0,02	0,05	0,03	0,01	0,07
Dy	0,05	0,54	0,78	0,86	0,58	0,18	0,28	0,19	0,1	0,43
Ho	0,02	0,12	0,17	0,19	0,12	0,03	0,06	0,04	<0,02	0,09
Er	0,03	0,29	0,48	0,52	0,41	0,1	0,17	0,11	0,03	0,26
Tm	0,01	0,05	0,07	0,08	0,06	<0,01	0,02	0,02	<0,01	0,03
Yb	0,05	0,27	0,48	0,54	0,37	0,09	0,15	0,1	<0,05	0,25
Lu	0,01	0,03	0,06	0,07	0,05	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,02
ΣLREE		7,21	10,12	9,32	5,27	3,81	5,16	3,41	1,67	5,74
ΣHREE		2,08	3,1	3,3	2,36	0,62	1,15	0,78	0,26	1,70
ΣREE		9,29	13,22	12,62	7,63	4,43	6,31	4,19	1,93	7,45
(La/Yb) _{SN}		0,40	0,35	0,17	0,23	1,30	0,93	0,66	/	0,58
(Tb/Yb) _{SN}		1,21	0,90	0,94	0,98	0,80	1,21	1,09	/	1,02
(Eu/Eu*) _{SN}		1,11	1,24	0,91	1,44	1,01	1,38	1,84	/	1,27
(Ce/Ce) _{SN}		0,69	0,80	1,32	0,70	0,62	0,55	0,76	0,74	0,80

CONCLUSION

Les caractères géochimiques présentés ci-haut montrent que les roches hôtes des formations ferrifères du secteur étudié sont des arénites quartzitiques et des arkoses. Ces dernières sont modérément altérées comme en témoignent leur valeur de CIA de 65,32. Les arénites quartzitiques sont caractérisés par les concentrations très élevées en SiO₂ (98,32%) et des très faibles concentrations en Fe₃O₃ (0,4 %) et Al₂O₃ (1,5 %), similaires aux sédiments matures. Les formations ferrifères sont très riches en Fe (65,88-68,18 %).) caractéristiques du minerai de fer de haute teneur ou DSO.

CHAPITRE IV.
ESSAI D'INTERPRÉTATION ET
DISCUSSION

INTRODUCTION

Le présent chapitre porte sur l'essai d'interprétation et discussions des résultats présentés tout au long de ce travail. La discussion intègre les aspects pétrographiques et géochimiques dans l'optique de déterminer non seulement la ou les sources mais aussi les environnements géotectoniques de mise en place des formations étudiées. Les arénites quartzitiques (cherts) de Moloundou présentent les caractéristiques d'un sédiment très mature (sédiment dépourvu de tout oxyde excepté le SiO_2). Ils ne sont donc des témoins fiables pour la caractérisation des sources et les environnements de dépôt, en conséquence ils n'ont pas été utilisés à cet effet.

IV.1. SOURCE ET PALÉOENVIRONNEMENT DES ARKOSES (PÉLITES) DE MOLOUNDOU

V.1.1. Influence de l'accumulation des minéraux lourds

Certains minéraux lourds à l'instar du zircon (ZrSiO_4) et la monazite (Ce, La, Nd, Th) PO_4 ont exceptionnellement des teneurs élevées en éléments traces. Ainsi donc, une accumulation importante de ces minéraux s'accompagne d'un enrichissement en éléments traces à large rayon ionique (McLennan et al., 1993). Aucun de ces deux minéraux (zircon et monazite) n'a été observé lors de l'étude pétrographique. Néanmoins, dans le diagramme Th/Sc et Zr/Sc (McLennan et al., 1993), la composition chimique des roches sédimentaires de Moloundou révèle que les matériaux sources auraient subi des ajouts de zircon (fig. 29A). Cet ajout aurait eu lieu lors du recyclage et du tri sédimentaire (fig. 29A). Le zircon est susceptible d'incorporer plus de HREE que les LREE. Ainsi donc l'enrichissement en Zr est justifié par les teneurs élevées en HREE dans les arkoses. Cet enrichissement se traduit également par la corrélation négative entre le Zr et le rapport $(\text{La/Yb})_{\text{SN}}$ (fig. 29B).

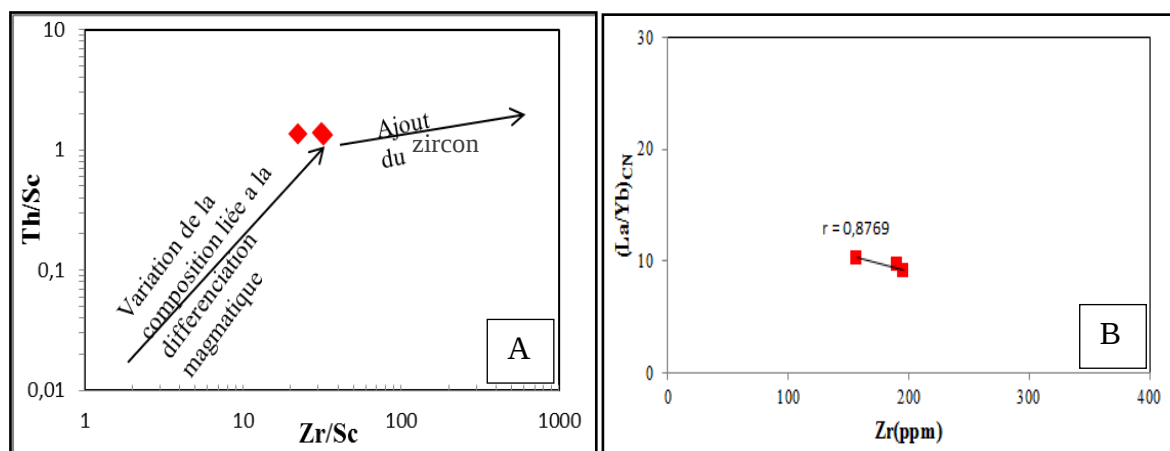


Figure 29. A) Diagramme binaire Zr/Sc vs Th/Sc de McLennan et al. (1993), B) Diagramme binaire Zr vs $(\text{La/Yb})_{\text{CN}}$ des métapélites de Moloundou.

V.1.2. Source des sédiments

Le rapport Th/U est utilisé dans la caractérisation des sources des sédiments clastiques (Roddaz et al., 2006). Les rapports de Th/U élevés dans les sédiments traduisent une altération chimique (oxydation) qui conduit à la perte de l'uranium et l'augmentation du rapport Th/U (McLennan et al., 1980). Les rapports Th/U supérieurs ou égales à 4 caractérisent les sédiments provenant de la croûte supérieure, par contre les rapports inférieures à 4 traduisent une implication du manteau (Roddaz et al., 2006). La figure 30 montre que les rapports Th/U des arkoses de Moloundou sont compris entre 3,43 et 4,15. Ce qui signifie qu'elles proviennent de la croûte supérieure avec une légère contamination mafique.

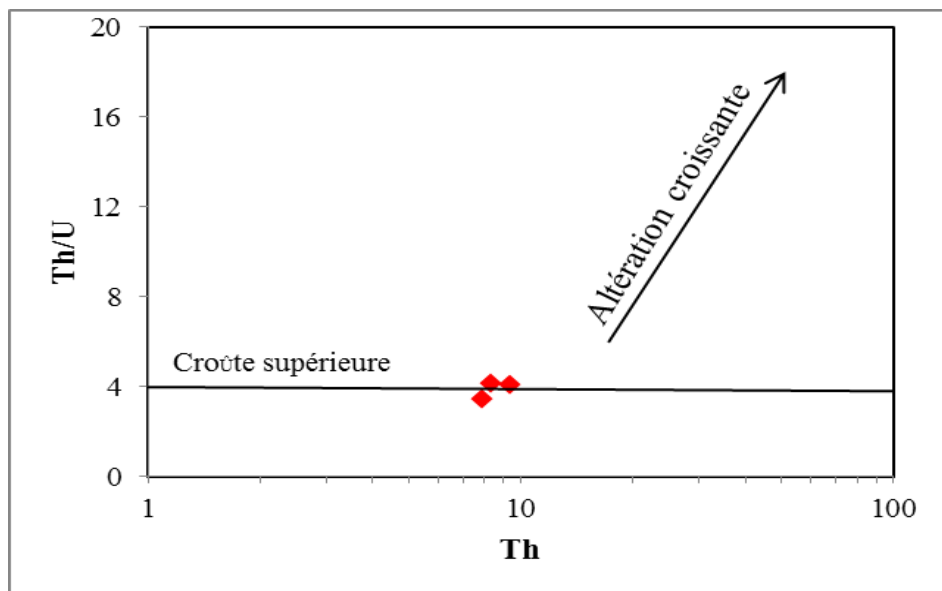


Figure 30. Diagramme Th vs Th/U (McLennan et al., 1980) montrant la source d'origine crustale des pélites de Moloundou avec une légère implication mafique.

Les éléments à fort potentiel ionique (HFSE) tels que Zr, Nb, Y, Th, et le V sont préférentiellement repartis dans le liquide silicaté pendant la cristallisation (Feng et Kerrich 1990). Par conséquent, ils ont des teneurs élevées dans les sources felsiques par rapport aux sources mafiques. Les éléments traces ferromagnésiens tels que le Cr, Ni, Co et V ont des comportements qui reflètent les processus magmatiques, mais ils subissent un fractionnement durant les processus d'altération (Feng et Kerrich, 1990). Le Zr, Hf et Y à cause de leur faible mobilité sont donc utilisés pour l'identification des sources (Taylor et McLennan, 1985).

Les spectres multiéléments des arkoses de Moloundou montrent un appauvrissement en Ni, Co, V et Cr comparé aux valeurs de la croûte (Condie, 1993). Par contre, l'on observe un pic en MgO ce qui indiquerait un apport mafique (fig. 24). Les spectres montrent également que ces roches sont enrichies en Th, Hf et en La. Les variations des teneurs en Th

et La (indicateurs felsiques), Sc et Co (indicateurs mafiques) ont été utilisées pour différencier les sources felsiques des sources mafiques par plusieurs auteurs (McLennan et al., 1989 ; Nagarajan et al., 2007a, b ; Cullers, 2002). Le diagramme Th/Co vs La/Sc (Cullers, 2002) appliqué aux arkoses de Moloundou montre qu'elles proviennent d'une source principalement de nature felsique (fig. 31), les apports en éléments mafiques étant négligeables.

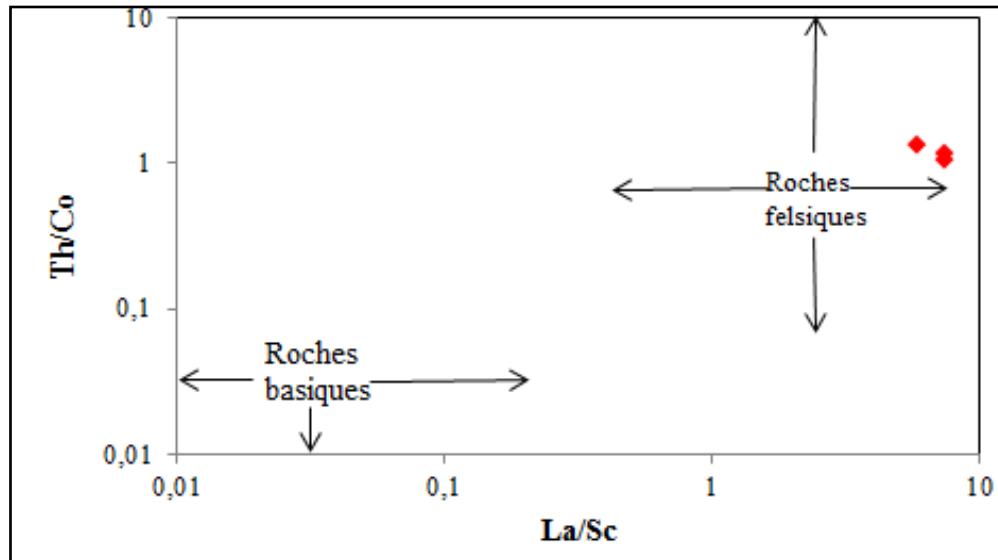


Figure 31. Diagramme La/Sc vs Th/Co (Cullers, 2002) montrant la source principalement felsique des arkoses de Moloundou.

V.1.3. Site géotectonique

Les arkoses de Moloundou auraient subi une altération météorique qui aurait remobilisé les éléments chimiques mobiles (Na_2O et K_2O) tandis que le TiO_2 et l' Al_2O_3 seraient restés immobiles dans ces roches. Par conséquent, ces éléments majeurs peu mobiles tout comme certains éléments à forts potentiels ioniques (La, Th, Sc et Zr) présents dans ces roches ont été utilisés pour caractériser le contexte géotectonique des matériaux sources.

Dans le diagramme binaire Ti/Zr vs La/Sc de Bhatia et Crook (1986) les points représentatifs des arkoses tombent près du champ D (contexte de marge passive) (fig. 32). Ce résultat est confirmé par le diagramme ternaire La-Th-Sc de Girty et Barber (1993), dans lequel tous les échantillons étudiés occupent le champ de marge continentale passive (fig. 33). Les matériaux sources des roches sédimentaires de Moloundou proviendraient donc d'un contexte de marge continentale passive. Ce résultat est similaire à celui obtenu dans la série grès-pélitique de Sembé au Congo (Vicat, 1998) et sur les dépôts sédimentaires de Franceville au Gabon (Ledru et al., 1994).

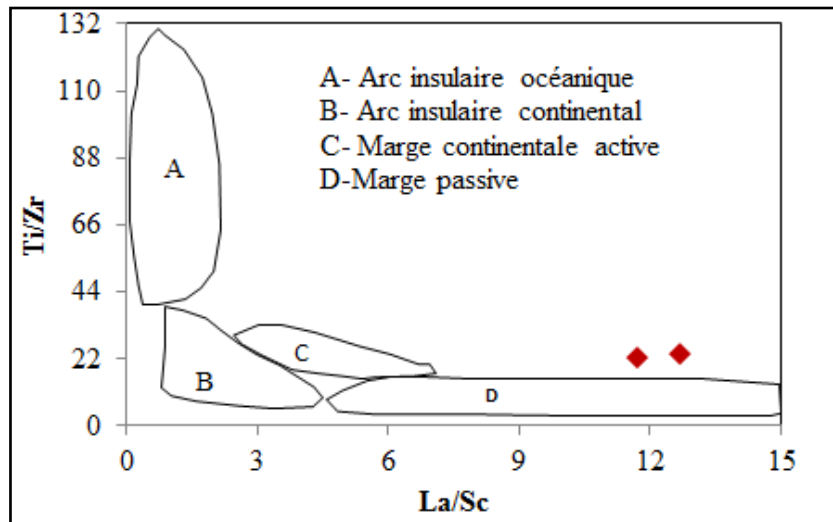


Figure 32. Diagramme binaire La/Sc vs Ti/Zr de discrimination du site géotectonique d'après Bhatia et Crook (1986).

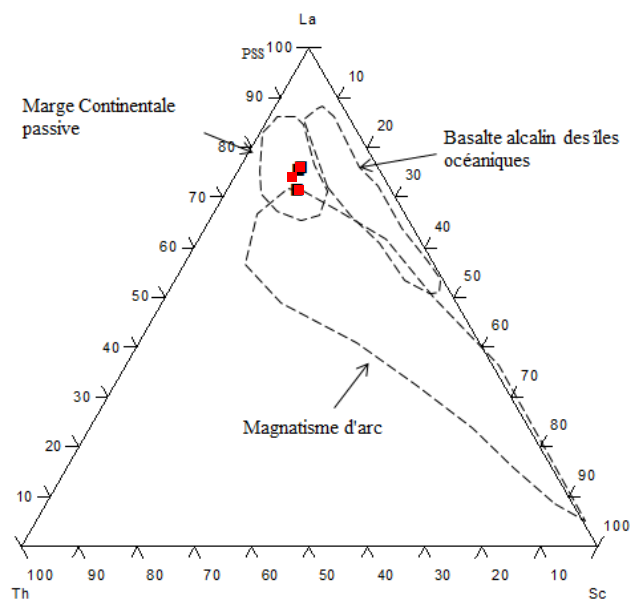


Figure 33. Diagramme ternaire La-Th-Sc (Girty et Barber, 1993) montrant la localisation des arkoses de Moloundou dans le champ du contexte de marge passive.

IV.2. COMPARAISON DES SÉDIMENTS DE MOLOUNDOU AUX SHALES PROTEROZOÏQUES ET MÉTAPÉLITES DE YAOUNDE

- **Éléments majeurs:** l'histogramme de la figure 34 montre que les teneurs moyennes des oxydes des arkoses de Moloundou sont proches de celles des shales protérozoïques et des métapélites de Yaoundé. Toutefois, les teneurs moyennes en SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 sont

legerement plus faibles dans les arkoses de Moloundou. Par contre les teneurs en MgO_2 et CaO y sont élevées.

- **Éléments en trace:** le graphe de la figure 35 montre que les arkoses de Moloundou ont une teneur moyenne en Ba deux fois supérieure à celle des shales protérozoïques et la teneur moyenne en Y légèrement au-dessus de celle des shales. Les concentrations moyennes de Ni, Rb, Sr et V dans ces roches sont inférieures aux valeurs des shales de Yaoundé.

- **Terres rares:** la figure 36 présente les spectres comparatifs des terres rares des arkoses de Moloundou avec les shales protérozoïques et les métapélites de Yaoundé. Cette figure montre que les sédiments de Moloundou ont un comportement différent des shales protérozoïques et des métapélites de Yaoundé. En effet, le spectre moyen des arkoses de Moloundou montre une anomalie fortement négative en Ce ($(Ce/Ce^*)_{SN} = 0,57$) tandis que celui des shales protérozoïques montre une anomalie négative légère ($(Ce/Ce^*)_{SN} = 0,93$). Les spectres montrent également une absence d'anomalie en Eu dans les arkoses de Moloundou et les shales protérozoïques ($(Eu/Eu^*)_{SN} = 1-1,01$). Cependant, l'on note un enrichissement en terres rares lourdes dans les arkoses de Moloundou par rapport aux shales protérozoïques et aux métapélites de Yaoundé.

Tableau IX. Composition des éléments majeurs des sédiments de Moloundou comparée à celle des shales protérozoïques et des métapélites de Yaoundé.

Wt%	Sédiments de Moloundou	Shales protérozoïques*	Métapélites de Yaoundé**
SiO_2	51,97	63,6	64,02
Al_2O_3	8,97	17,5	16,61
Fe_2O_3	3,09	5,65	8,66
MgO	7,86	2,2	2,93
CaO	8,46	0,71	1,1
Na_2O	0,79	1,06	1,39
K_2O	3,18	3,62	3,25
P_2O_5	0,09	0,14	0,06
TiO_2	0,42	0,64	1,14

* :Condie (1993) ; ** : Nzenti et al. (1988)

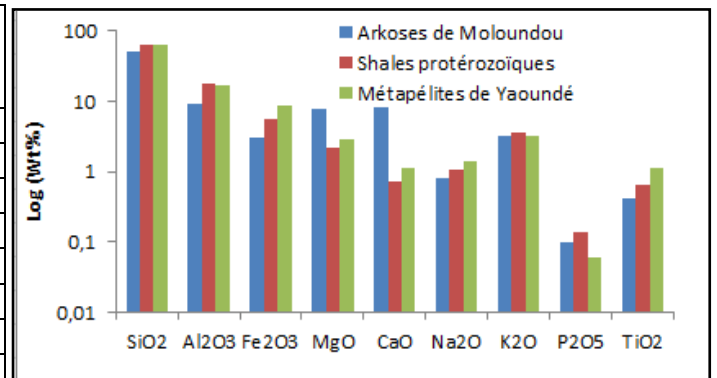


Figure 34. Histogramme de comparaison des éléments majeurs des arkoses de Moloundou aux shales protérozoïques et aux métapélites de Yaoundé.

Tableau X. Composition moyenne des éléments en trace des sédiments de Moloundou comparée à celle des shales protérozoïques et des métapélites de Yaoundé.

	Sédiment de Moloundou	Shales protérozoïques*	Métapélites de Yaoundé**
Ba	1679	642	/
Ni	26	52	/
Sc	6,33	17	/
Co	7,26	18	/
Hf	4,86	5,2	/
Nb	7,03	6,8	/
Rb	101,9	165	108,67
Sr	69,9	108	162,67
Ta	0,63	1,4	/
Th	8,53	14,3	/
U	2,2	3,4	/
V	42,33	100	/
Zr	181,1	196	/
Y	73,6	35	/

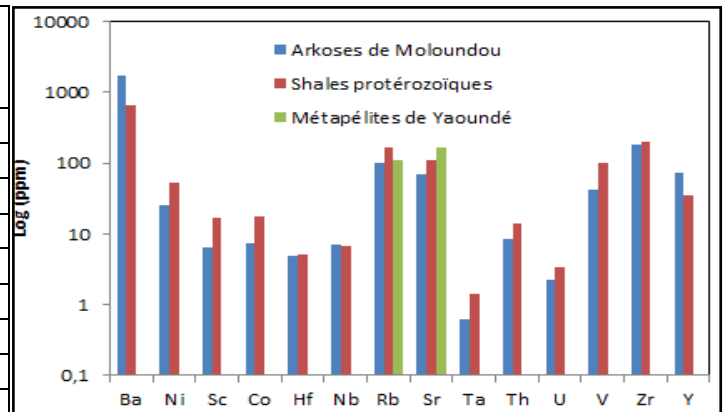


Figure 35. Histogramme de comparaison des éléments traces des pélites de Moloundou aux shales protérozoïques et aux métapélites de Yaoundé.

Tableau XI. Composition moyenne des terres rares des sédiments de Moloundou comparée à celle des shales protérozoïques et des métapélites de Yaoundé.

ppm	Sédiments de Moloundou	Shales protérozoïques*	Métapélites de Yaoundé**
La	1,13	1	0,81
Ce	0,67	1,01	0,79
Nd	1,18	1,17	0,91
Sm	1,29	1,19	1,11
Eu	1,48	1,2	1,16
Gd	2,11	1,19	1,13
Tb	1,84	1,16	/
Yb	1,15	1,02	1,16
Lu	1,04	1,09	1,18
(Eu/Eu*) _{SN}	1,00	1,01	/
(Ce/Ce*) _{SN}	0,57	0,93	/

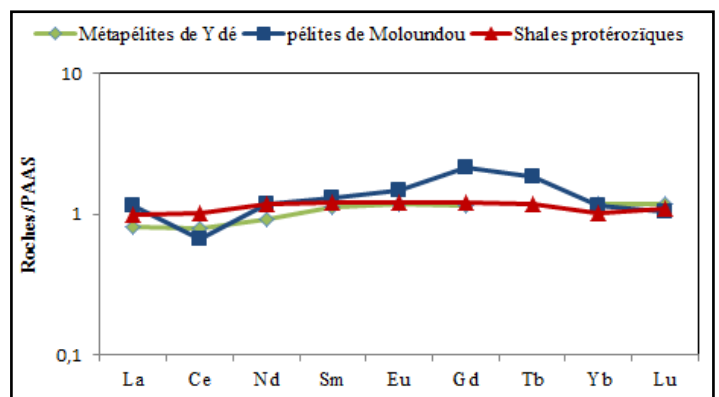


Figure 36. Spectres comparatifs des terres rares des sédiments de Moloundou, des shales protérozoïques et des métapélites de Yaoundé. Les valeurs de normalisation sont celles de Taylor et McLennan (1985).

IV.3. MINÉRALOGIE, NATURE ET ORIGINE DU MINÉRAI DE FER DE MOLOUNDOU

IV.3.1 Minéralogie

Les résultats obtenus lors de l'étude pétrographique des formations ferrifères de Moloundou révèlent que ces roches sont essentiellement constituées d'oxydes/hydroxydes de fer (majoritairement l'hématite), et du quartz minoritaire (inférieur à 2%). Les données géochimiques des éléments majeurs ont permis de préciser avec exactitude la proportion des oxydes de fer et les autres oxydes (moyenne $\text{Fe}_2\text{O}_3=96,22\%$ et moyenne du reste d'oxydes présents dans la roche est égale à 3,7%). Les diagrammes de variation des éléments majeurs en fonction de Fe_2O_3 ne montrent aucune corrélation avec ce dernier traduisant ainsi une incompatibilité minéralogique. Ceci est confirmé par la position des points représentatifs des échantillons analysés au sommet du diagramme ternaire $\text{SiO}_2\text{-(Fe}_2\text{O}_3\text{+TiO}_2\text{+CaO)-Al}_2\text{O}_3$ (fig. 37). Les carbonates n'ayant pas été observés dans la roche, le fer serait donc uniquement porté par les oxydes/hydroxydes de fer que sont l'hématite, la magnétite, la goethite et la limonite. Cette caractéristique est propre aux formations ferrifères de type oxyde (James, 1954).

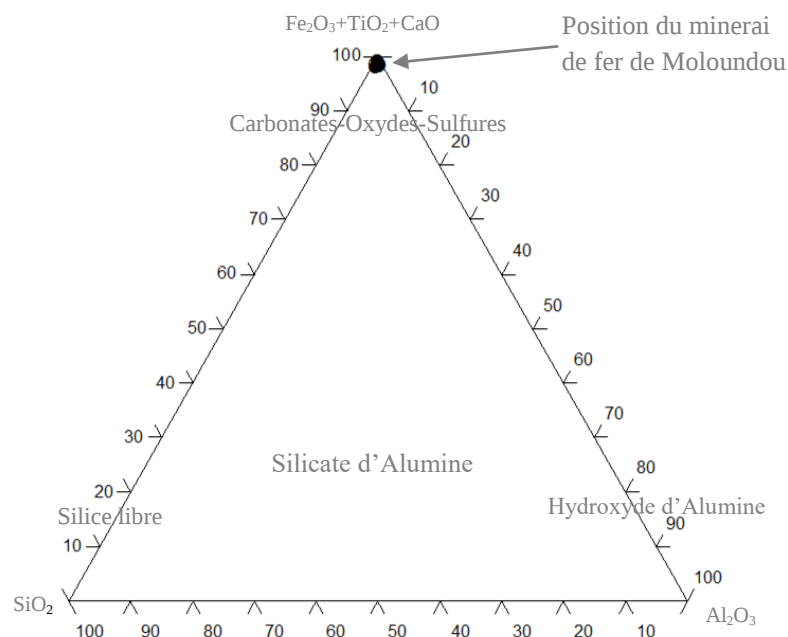


Figure 37. Diagramme ternaire $\text{SiO}_2\text{-(Fe}_2\text{O}_3\text{+TiO}_2\text{+CaO)-Al}_2\text{O}_3$ (James, 1954) montrant la composition minéralogique du minerai de fer de Moloundou.

IV.3.2. Nature et origine

La plupart des minerais de type DSO (Direct Shipping Ore ; Fe = 60-67%) résulte d'un enrichissement in situ à partir des formations ferrifères rubanées (BIFs) précambriens (Beukes, 2003). Cependant, les formations ferrifères rubanées n'ont pas été observées sur le terrain, bien que les cherts (composant principal des BIFs) affleurent dans le secteur d'étude. Pour déterminer la nature du minerai de fer, James (1969) a proposé l'utilisation du diagramme Ca/Mg vs Fe/Al pour discriminer le minerai dérivant des BIFs de celui issu des cuirasses ferrugineuses. Dans ce diagramme, tous les échantillons du minerai de fer de Moloundou tombent dans le champ des formations ferrifères (fig. 38). Cependant, les processus conduisant à cet enrichissement restent énigmatiques.

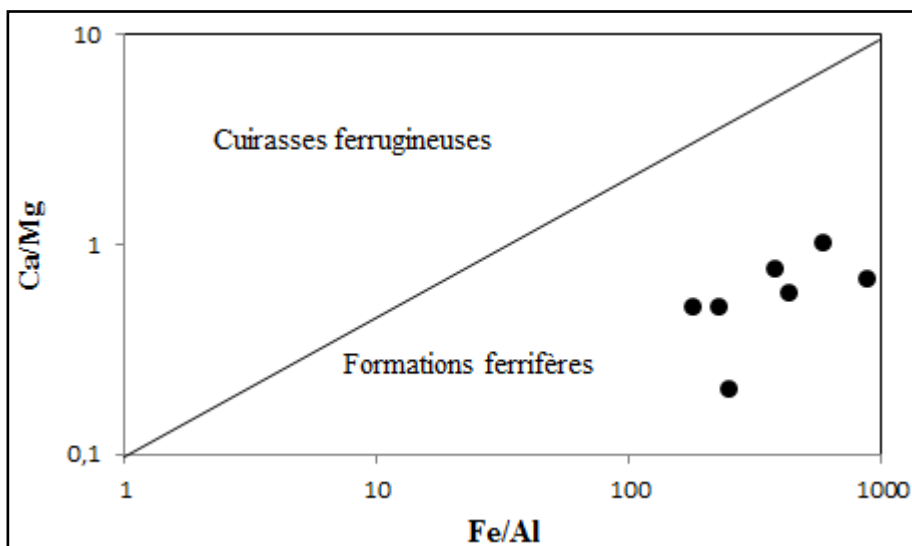


Figure 38. Diagramme Fe/Al vs Ca/Mg (James, 1969) montrant la nature du minerai de Moloundou.

Le minerai à martite-hématite se compose principalement de la martite à grains fins et des microplaques d'hématite, ainsi que la goethite, limonite et la silice minoritaire. Ce minerai peut être friable ou dur et conserve généralement la structure du protolite (Morris et Kneeshaw, 2011; Ramanaidou et Wells, 2014). Le minerai à hématite de Moloundou composé principalement d'hématite et de martite à grains fins, de la goethite et de la limonite ressemble à ce type de minerai.

L'origine du minerai à hématite reste controversée. Trois modèles principaux sont proposés pour tenter d'expliquer leur mode de formation (Ramanaidou et Wells, 2014) :

(i) le modèle syngénétique ou syn-dépositionnel a été proposé pour certains gisements où aucune preuve de bandes de chert n'est préservée (Lascelles, 2007). Ce modèle

ne s'applique pas au minerai de fer de Moloundou car l'on note des bandes de chert sur certains affleurements du minerai et aussi des affleurements de chert à proximité du minerai.

(ii) le modèle supergène-métamorphique propose un processus en plusieurs étapes, avec la formation d'un minerai de type martite-goethite, qui par la suite est enfouit et soumis à un métamorphisme de faible intensité (80-100°C), transformant la goethite en microplaques d'hématite (Morris, 1985; Morris et Kneeshaw, 2011). Dans le secteur de Moloundou, bien que l'on note des preuves d'enfouissement (microfractures liées à de fortes pressions) après la formation des corps minéralisés, aucune évidence métamorphique n'apparaît, les preuves pétrographiques indiquent que la martite est le résultat de l'oxydation de la magnétite et non de la déshydratation de la goethite. La goethite résulte de l'oxydation de la magnétite par infiltration d'eau dans les microfractures et entre les espaces intergranulaires. En outre, il semble peu probable qu'une déshydratation importante de la goethite puisse se produire dans le minerai de fer de Moloundou.

(iii) le modèle hypogène est proposé pour la formation du minerai à martite-hématite (semblable à celui de Moloundou) impliquant une altération hypogène et la circulation de fluides hydrothermaux après la diagenèse (Barley et al., 1999; Taylor et al., 2001; Netshiozwi, 2002; Angerer et Hagemann, 2010; Figueiredo et al., 2013). Ces études définissent les fluides hydrothermaux comme étant des solutions riches en ions qui réagissent avec les roches. Cette définition ne tient pas compte de la source des fluides. L'altération hypogène implique des modifications de la composition chimique ou minéralogique de la roche hôte dues à l'ascension des fluides hydrothermaux (Hagemann et al., 2008). Les fluides hydrothermaux sont capables de lessiver les silicates de fer, les carbonates et le chert (Angerer et al., 2012), d'oxyder la magnétite en martite (libérant du Fe^{2+} ; Ohmoto, 2003) en précipitant les microplaques d'hématite secondaire et en créant une porosité secondaire. Les preuves pétrographiques du minerai de fer de Moloundou (présence des reliques de silice amorphe, absence des carbonates, l'oxydation de la magnétite en martite, présence de l'hématite secondaire et la présence des vacuoles remplis par la goethite) militent en faveur de ce modèle. Cependant la présence des hydroxydes de fer (goethite et limonite) montrent que les processus supergènes ont également prévalu lors de la formation de ce minerai. Le diagramme $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ versus $(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{MnO})/\text{Fe}_2\text{O}_3$ de Angerer et al. (2012) montre que l'évolution du minerai de fer de Moloundou depuis le proto-minerai (probablement un BIF) jusqu'à son état actuel (minerai de haute teneur) serait due à un modèle d'enrichissement mixte hypogène-supergène.

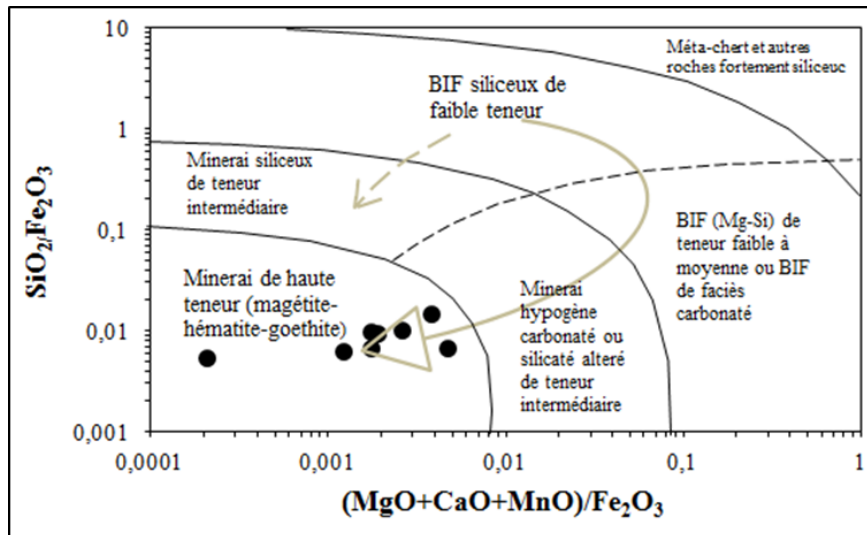


Figure 39. Diagramme $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ vs $(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{MnO})/\text{Fe}_2\text{O}_3$ d'après Angerer et al. (2012) montrant l'origine probable du minerai de fer de Moloundou.

IV.3.3. Comparaison avec les autres minerais de fer de haute teneur du Cameroun

Le secteur de Moloundou appartient aux formations de la couverture du craton du Congo plus pressément à la série du Dja inférieur. Cette dernière repose sur le complexe du Ntem (extension du craton du Congo au Cameroun) auquel appartiennent le secteur Mbalam (unité du Ntem) et Mamelles (unité du bas Nyong).

Sur le plan minéralogique, le minerai de fer de haute teneur de Moloundou et de Mbalam sont à hématite dominant (Nforba et al., 2011) tandis que celui des Mamelles est à magnétite (Djamo Mbenjo, 2018).

Les travaux de Toteu et al. (1994), Suh et al. (2008) et Djamo Mbenjo (2018) montre que les secteurs Mbalam et Mamelles ont subi un métamorphisme du faciès schiste vert à amphibolite. Dans le secteur Moloundou, bien que l'on ait observé des structures diagnostiques, aucune preuve métamorphique n'a été mise en exergue dans ce travail.

Les caractères géochimiques montrent que le minerai de fer de Moloundou tout comme celui de Mbalam et de Mamelles ont des concentrations très élevées en Fe_2O_3 : ils appartiennent donc au minerai de type DSO (Tab. XII et fig. 40).

La figure 41 montre la classification du minerai de fer de Moloundou, de Mbalam et des Mamelles. Dans ce diagramme, ces trois minerais proviendraient tous d'un même proto-minerai qui est le BIF (fig. 41). L'enrichissement dans le secteur de Mbalam et de Mamelles serait associé à un métamorphisme de faciès schiste vert à amphibolite tandis que dans le secteur de Moloundou l'enrichissement serait dû aux processus diagénétiques à zéolitiques

Le minerai de fer de Moloundou a des faibles concentrations en terres rares (moyenne $\Sigma\text{REE} = 7,39$ ppm) par rapport aux minerai de fer des Mamelles (moyenne $\Sigma = 14,91$ ppm) et de Mbalam (moyenne $\Sigma\text{REE} = 66,76$ ppm) (Tab. XIII). Le diagramme comparatif des spectres des terres rares de ces trois gîtes (fig. 42) montrent que les spectres des Mamelles et de Mbalam sont plus ou moins similaires et présentent tous des anomalies positives en Eu, avec des anomalies plus prononcées sur le minerai des Mamelles en Eu ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 2,87$). Le spectre de Moloundou ne montre pas d'anomalie en Eu, cependant il présente une anomalie négative en cérium ($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 0,79$) tout comme le spectre des Mamelles ($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 0,77$).

Tableau XII. Composition des éléments majeurs du minerai de fer Moloundou comparée au minerai de Mbalam et des Mamelles.

Wt%	Minerai de Mbalam*	Minerai de Moloundou	Minerai des Mamelles**
SiO ₂	3,63	0,83	0,86
Al ₂ O ₃	0,91	0,27	0,49
Fe ₂ O ₃	94,15	96,22	98
MgO	0,01	0,2	0,59
CaO	0,03	0,02	0,05
Na ₂ O	0,02	0,02	/
K ₂ O	0,01	0,02	/
TiO ₂	0,03	0,01	0,01
P ₂ O ₅	0,06	0,03	/
MnO	0,01	0,04	0,1
Cr ₂ O ₃	0,04	0,003	/

*: Nforba et al. (2011) ; **: Djamo Bendjo, (2018)

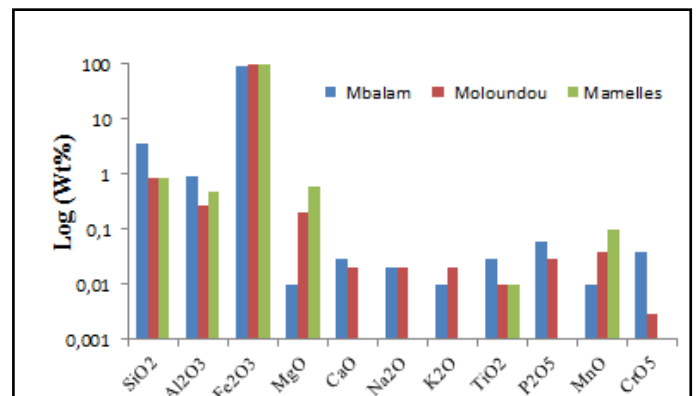


Figure 40. Histogramme de comparaison des éléments majeurs du minerai de fer de Moloundou, Mbalam et Mamelles.

Tableau XIII. Composition moyenne des terres rares du minerai de fer de Moloundou comparée au minerai de Mbalam et des Mamelles.

ppm	Minerai de Mbalam*	Minerai de Moloundou	Minerai des Mamelles**
La	12,7	1,41	3,72
Ce	25,8	2,22	5,17
Pr	3,38	0,29	0,62
Nd	13,5	1,46	2,47
Sm	2,62	0,35	0,48
Eu	0,83	0,09	0,29
Gd	2,67	0,42	0,58

Tb	0,43	0,07	0,08
Dy	2,24	0,43	0,55
Ho	0,41	0,09	0,11
Er	1,08	0,26	0,36
Tm	0,14	0,03	0,06
Yb	0,84	0,25	0,36
Lu	0,12	0,02	0,06
Σ REE	66,76	7,39	14,91
(Ce/Ce*) _{SN}	0,90	0,79	0,77
(Eu/Eu*) _{SN}	1,51	1,13	2,87

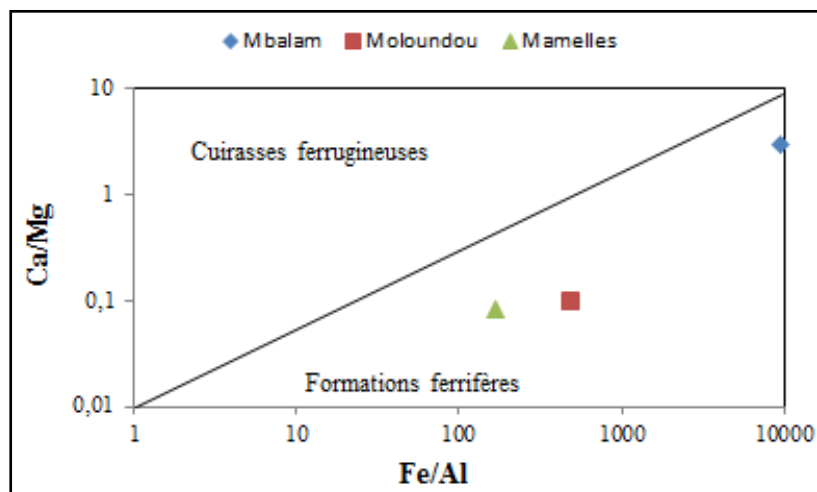


Figure 41. Diagramme Fe/Al vs Ca/Mg (James, 1969) montrant la nature des minerais de Moloundou, Mbalam et des Mamelles.

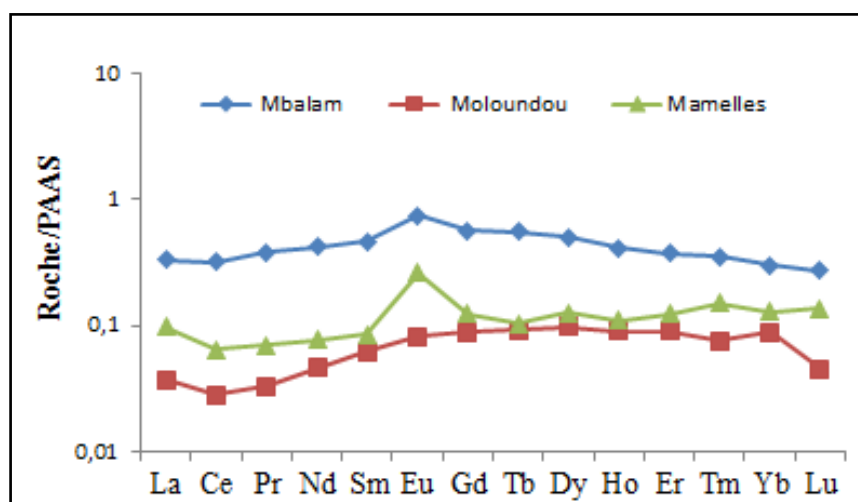


Figure 42. Spectres comparatifs des terres rares du minerai de fer de Moloundou, Mbalam et Mamelles. Les valeurs de normalisation sont celles de Taylor et McLennan (1985).



CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Le pressant travail intitulé métamorphisme et minéralisations en fer associées dans la région de Moloundou (Sud-Est Cameroun) avait pour objectif principal la caractérisation des formations géologiques de ce secteur et les minéralisations en fer qu'elles regorgent. Pour y parvenir, les études pétrographique et géochimique sur roche totale ont été menées. Au terme de ce travail, nous sommes arrivés aux conclusions suivantes :

- sur le plan pétrographique, les études de terrain et de laboratoire révèlent que le secteur d'étude est un domaine sédimentaire/épimétamorphique minéralisé en fer. Il est constitué de six types pétrographiques à savoir: (i) le minerai à hématite-goethite, (ii) le minerai à hématite-kénomagnétite et goethite, (iii) le minerai à martite-kénomagnétite et limonite, (iv) le minerai à hématite-limonite, (v) les cherts et (vi) les pélites, les quatre premiers types constituent le minerai de fer et les deux derniers les roches hôtes de ce minerai. Les structures enregistrées par ces formations sont synsédimentaires (plan de stratification ; structures plicatives dans les pélites) et diagénétiques (points triples des minéraux dans les cherts et dans le minerai de fer).

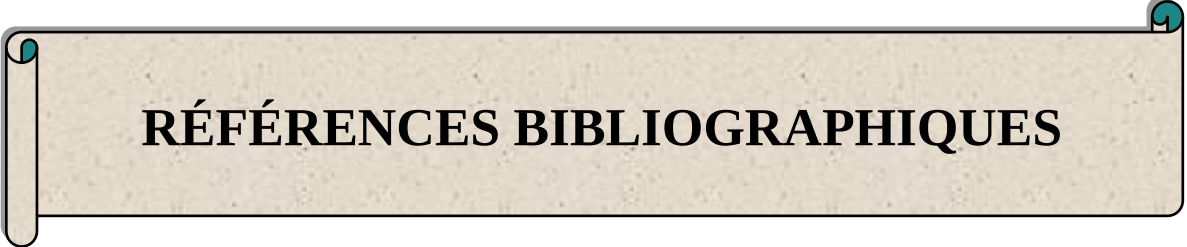
- Sur le plan géochimique, la classification basée sur l'utilisation des éléments majeurs et les diagrammes de discrimination révèlent d'une part que : les cherts et les pélites étudiés ont des compositions chimiques respectives des arénites quartzitiques et des arkoses; l'indice d'altération chimique (CIA) dans les arkoses compris entre 64,45-65,40 indique un degré d'altération moyen. Les matériaux qui constituent les arkoses proviendraient du démantèlement d'une croûte continentale de nature felsique qui auraient subi un tri sédimentaire avec ajout de zircon et une contamination mafique, par la suite auraient sédimentés dans un environnement géodynamique de type marge continentale passive. D'autre part, les résultats des analyses géochimiques couplés aux observations pétrographiques montrent que les formations ferrifères étudiés sont de type oxyde provenant d'un enrichissement in situ à partir d'un proto-minerai (probablement un BIF) suite à un processus assez complexe, combinant aussi bien les phénomènes hypogènes que supergènes; Les teneurs en Fe_2O_3 sont très élevées (<95%) tandis que les teneurs en SiO_2 sont très faibles (<1%) ; la teneur moyenne en fer natif (Fe) est de 67,35%, caractéristique du minerai de fer de haute teneur ou DSO (Direct Shipping Ore ; >65% Fe).

Les corrélations pétrographiques et géochimiques entre les arkoses étudiées et les shales protérozoïques et les métapelites de Yaoundé d'une part et entre les minerais de haute teneur étudiés et ceux de Mbalam et des Mamelles d'autre part relèvent des points de ressemblance et de dissemblance : (i) les arkoses étudiées ressemblent plus aux shales

protérozoïques qu'aux métapélites de Yaoundé ; (ii) les arkoses de Moloundou sont plus riches en MgO et en CaO et présentent un spectre des terres rares qui diffère de ceux des shales protérozoïques et des métapélites de Yaoundé par des anomalies négatives en Ce ($((\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{SN}} = 0,57)$) et par l'enrichissement relatif en terres rares lourdes ; (iii) le minerai de haute teneur étudié est de type oxyde tout comme celui de Mbalam et des Mamelles. Ils proviendraient tous d'un proto-minerai de même nature (probablement un BIF). (iv) L'enrichissement dans les secteurs de Mbalam et de Mamelles serait associé à un métamorphisme de faciès schiste vert à amphibolite tandis que dans le secteur de Moloundou l'enrichissement serait dû aux processus diagénétiques à zéolitiques

Perspectives

Dans les travaux futurs, il serait souhaitable que les études plus approfondies de chimico-minéralogie, de géochimie isotopique et de géochronologie soient faites enfin de déterminer la composition minéralogique exacte du minerai, de retracer la source du minerai de fer et de dater les entités lithologiques en vue des corrélations locales et régionales.



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Angerer, T., Hagemann, S.G. 2010.** The BIF-hosted high-grade iron ore deposits in the Archean Koolyanobbing Greenstone Belt, Western Australia: Structural control on synorogenic- and weathering-related magnetite-, hematite-, and goethite-rich iron ore. *Economic Geology* 105, 917-945.
- Angerer, T., Hagemann, S.G., and Danyushevsky, L.V., 2012.** Geochemical evolution of the banded iron formation-hosted high-grade iron ore system in the Koolyanobbing Greenstone Belt, Western Australia. *Economic Geology* 107, 599-644.
- Aye, B.A., Sababa, E., Ndjigui, P.-D., 2017.** Geochemistry of S, Cu, Ni, Cr and Au-PGE in the garnet amphibolites from the Akom II area in the Archean Congo Craton, Southern Cameroon *Chemie der Erde* 77, 81–93.
- Babet, V., 1935.** Esquisse géologique provisoire de la région comprise entre Bangui et la frontière du Cameroun. *Chroniques Mines Collection Paris* 38, 160-164.
- Bagnouls, L., Gaussen, H., 1957.** Les climats biologiques et leur classification. *Annales de géographie* XXVI 355, 193-220.
- Barley, M.E., Pickard, A.L., Hagemann, S.G. and Folkert, S.L. 1999.** Hydrothermal origin for the 2 billion year old Mount Tom Price giant iron ore deposit, Hamersley Province, Western Australia. *Mineralium Deposita* 34, 784-789.
- Barral, H., Franqueville, A., 1969.** Atlas régional Sud-Est Cameroun. Office de la recherche scientifique et technique outre-mer centre de Yaoundé 52p.
- Bau, M., Dulski, P., 1996.** Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman Iron Formation, Transvaal Supergroup, South Africa. *Precambrian Research* 79, 37–55.
- Bessoles, B., Trompette, R., 1980.** Géologie de l'Afrique, la chaîne pan-africaine "zone mobile d'Afrique Centrale (partie sud) et zone mobile soudanaise". *Mém. BRGM*, n° 92 France, 397.
- Beukes, N.J., Gutzmer, J. and Mukhopadhyay, J. 2003.** The geology and genesis of high-grade hematite iron ore deposits. *Applied Earth Science* 112, 18-25.
- Bhatia, M.R., Crook, A.W., 1986.** Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 92, 181– 193.
- Bouyo, Houketchang, M., Penaye, J., Mouri, H., Toteu, S.F., 2019.** Eclogite facies metabasites from the Paleoproterozoic Nyong Group, SW Cameroon: Mineralogical evidence and implications for a high-pressure metamorphism related to a subduction

- zone at the NW margin of the Archean Congo craton. *Journal of African Earth Sciences* 149, 215-234
- Bouyo, Houketchang, M., Njel, O.U., Moussango, I.P.A., Sep, N.P. J., Yaya, F., Mahamat, A., Haoye., Fei Wu., 2016.** Geochronological, geochemical and mineralogical constraints of emplacement depth of TTG suite from the Sinassi Batholith in the Central African Fold Belt (CAFB) of northern Cameroon: Implications for tectonomagmatic evolution. *Journal of African Earth Sciences* 116, 9-41.
- Bouyo, Houketchang, M., Penaye, J., Barbey, P., Toteu, F.S., Wandji, P., 2013.** Petrology of high-pressure granulite facies metapelites and metabasites from Tcholliré and Banyo regions: Geodynamic implication for the Central African Fold Belt (CAFB) of north-central Cameroon. *Precambrian Research* 224, 412-433
- Bruet, E., 1951.** Exploration géologique dans le Cameroun oriental. *Comptes Rendus Académie des Sciences de Paris* 233, 754-756.
- Caron, V., Mahieux, G., Ekomane, E., Moussango, P., Babinski, M., 2010.** One, two or no record of late neoproterozoic glaciation in South-East Cameroon? *Journal of African Earth Sciences* 59 (2011) 111–124.
- Cahen L., 1982.** Geochronological correlation of the Precambrian sequence and around the stables zones of Equatorial African. *Precambrian Research* 1, 73-86.
- Champetier de Ribes G., Aubagne M., 1956.** Carte géologique de reconnaissance à l'échelle du 1/500000, feuille Yaoundé-Est, avec notice explicative. Direction des Mines et de Géologie du Cameroun 35p.
- Chebeu, C., Ngo Nlend, C.D., Nzenti J.P., Ganno, S., 2011.** Neoproterozoic high-K calc-alkaline granitoids from Bapa-Batié, North Equatorial Fold Belt, Central Cameroon: petrogenesis and geodynamic significance. *The Open Geology Journal* 5, 1-20.
- Condie, K.C. 1993.** Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology* 104, 1–37.
- Cullers, R.L., 2000.** Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chemical Geology* 191, 305-327.
- Dianzenza-Ndefi, H., 1983.** Les sédiments du protérozoïque supérieur et leur transformation au Nord-Ouest de la cuvette congolaise (Afrique centre) ; apport des

- datations par la méthode Rb-Sr et K-Ar. Thèse 3^{ème} cycle, Université de Strasbourg, 147p.
- Djamo Mbendjo, F., 2018.** Évolution tectono-métamorphique potentialités métallogéniques du secteur de Biyo-Bwendjo. Mémoire de Master , Université de Yaoundé I, 95p.
- Fedo, C.M., Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1995.** Unraveling the effects of potassium metasomatism in the sedimentary rocks and paleosols with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology* 23, 921-924.
- Feng, R and Kerrich, R. 1990.** Geochemistry of fine grained clastic sediments in the Archean Abitibi greenstone belt, Canada : implication for provenance and tectonic setting. *Chemical Geology* 54, 1061-1081.
- Feybesse, J. L., Johan, V., Maurizot, P., Abessolo, A., 1987.** Evolution tectonométamorphique libérienne et éburnéenne de la partie NW du craton zairois (SW Cameroun). In G. Mathéïs and H. Schandelmeier (editors), *Current Research in African Earth Sciences*. Balkema, Rotterdam, 9 - 12.
- Figueiredo Silva, R.C., Hagemann, S., Lobato, L.M., Rosiere, C.A., Banks, D.A., Davidson, G.J., Vennemann, T. and Hergt, J. 2013.** Hydrothermal fluid processes and evolution of the Giant Serra Norte Jaspilite-hosted iron ore deposits, Carajas mineral province, Brazil. *Economic Geology* 108, 739-779.
- Fuanya, C., Bolarinwa, T. A., Kankeu, B., Yongue, F. R., Ngatcha., B. R., Tangko, E. T., 2019.** Morphological and chemical assessment of alluvial gold grains from Ako'ozam and Njabilobe, southwestern Cameroun. *Journal of African Earth Sciences* 154, 111-119.
- Ganno, S., Ngnotué, T., Kouankap, Nono, G.D., Nzenti, J.P., Notsa, Fokeng, M., 2015a.** Petrology and geochemistry of the banded iron-formations from Ntem complex greenstones belt, Elom area, Southern Cameroon: Implications for the origin and depositional environment. *Chemie der Erde* 75, 375-387.
- Ganno, S., Moudioh, C., Nzina Nchare, A., Kouankap Nono, G. D., Nzenti, J. P., 2015b.** Geochemical fingerprint and iron ore potential of the siliceous itabirite from Paleoproterozoic Nyong Series, Zambi area, Southwestern Cameroon. *Resource Geology* 66 (1), 71-80.
- Ganno, S., Njiosseu, Tanko,E,L., Kouankap, N,G,D., Djoukouo, S, A., Moudioh, C., Ngnotue, T., Nzenti, J, P., 2017.** A mixed seawater and hydrothermal origin of superior – type banded iron formation (BIF) hosted kouambo iron deposit,

- palaeoproterzoic Nyong series, Southwestern Cameroon: constraints from petrography and geochemistry. *Ore Geology Reviews* 80, 860-875.
- Ganno, S., Tsozué, D., Kouankap Nono, G.D., Tchouatcha, M.S., Ngnotué, T., Takam, G.R., and Nzenti, J. P., 2018.** Geochemical constraints on the origin of banded iron formation hosted iron ore from the Archaen Ntem Complex (Congo Craton) in the Meyomessi Area, Southern Cameroon. *Resource Geology* 68 (3), 287-302.
- Ganwa, A. A., Klötzli, U.S., Christoph, H., 2016.** Evidence for Archean inheritance in the pre-panafrican crust of central Cameroun: Insight from zircon internal structure and La-Mc ICP-MS U/Pb ages. *Journal of African Earth Sciences* 120, 12-22.
- Ganwa, A., Frisch, W., Siebel, W., Shang, C.K., Mvondo, O.J., Satir, M. and Tchakounte, N.J., 2008.** Zircon 207Pb-206Pb evaporation ages of Pan-African metasedimentary rocks in the Kombé-II area (Bafia Group, Cameroon): constraints on protolith age and provenance. *Journal of African Earth Sciences* 51, 77-88.
- Ganwa, A.A., Klötzli, U.S., Kepnamou, A.D., Hauzenberger, C., 2018.** Multiple ediacaran tectono-metamorphic events in the Adamawa-Yadé Domain of the Central Africa Fold Belt: insight from the zircon U-Pb LAM-ICP-MS geochronology of the metadiorite of Méiganga (Central Cameroon). *Geological journal* 53 (6), 2955-2968.
- Garofalo, P.S., 2012.** The composition of Alpine marine sediments (Bündnerschiefer Formation, W Alps) and the mobility of their chemical components during orogenic metamorphism. *Lithos* 128–131, 55–72.
- Gazel J., Hourcq V., Nickelés M., 1956.** Carte géologique du Cameroun à 1/1000000, feuilles avec notice explicative (62), Bulletin Direction Mines et Géologie du Gouvernement Général de l'Afrique équatoriale Française, Brazzaville.
- Gazel, J., Guiraudie, C., 1965.** Carte géologique de reconnaissance à l'échelle 1/500 000, feuille Abong-Mbang Ouest, plus notice explicative. Imprimerie nationale de Yaoundé, 28p.
- Giresse, P., 1990.** Esquisse géologique de l'Afrique centrale occidentale. In : Lanfranchi Raymond (ed.), Schwartz Dominique (ed.). *Paysages quaternaires de l'Afrique centrale atlantique*. Paris : ORSTOM, p. 15-19. (Didactiques). ISBN 2-7099-1022-5.
- Girty, G.H., Barber, R.W., 1993.** REE, Th, and Sc evidence for the depositional setting and source rock characteristics of the Quartz Hill chert, Sierra Nevada, California. *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments* (Johnsson, M. J. and Basu, A., eds.), *Geology Society of America Special Paper* 284, 109–119.

- Hensler, A.-S., Hagemenn, S., Rosière, C.A., Angerer, T., Gilbert, S., 2015.** Hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction associated with hypogene “hard” iron ore mineralisation in the Quadrilatero Ferrifero, Brazil : Implication from in-situ laser ablation ICP-MS iron oxide chemistry. *Ore Geology Reviews* 69, 325-351.
- Herron M.M., 1988.** Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentary Petrology* 58. 820-829.
- James, H.L., 1969.** Comparison between red sea deposits and older ironstone and iron formation in E.T Degens et al., hôte brines and recent metal deposits in the red sea. Springer Sciences Business Media New York 1960.
- James, H.L., 1954.** Sedimentary facies of iron formation. *Economic Geology*, 49, 235-293.
- Kouankap Nono, G. D., Nzenti, J. P., Suh., C. E., and Ganno, S., 2010.** Geochemistry of ferriferous, High-K calc-alkaline granitoids from Banefo – Mvoutsaha Massif (NE Bafoussam), Central Domain of the Pan-African Fold Belt, Cameroon. *The Open Geology Journal* 4, 21-34.
- Kullerud, G., Donnay, J.D.H, 1969.** Omission solid solution in magnetite : Kenotetrahegral magnetite. *Z. Krist. Cryst. Mater* 128,1-17.
- Laplaine, L., 1971.** Carte géologique de reconnaissance au 1/500000 avec notice explicative, feuille Nola (partie Cameroun). Direction de Géologie., Yaoundé, Cameroun, 39.
- Lascelles, D.F. 2007.** Black smokers and density currents: A uniformitarian model for the genesis of banded iron-formations. *Ore Geology Reviews* 32, 381-411.
- Ledrup, P., Johan, V., Milesi, J. P., Tegnyey, M., 1994.** Markers of last stages of the paleoproterozoic collision : evidence for a 2Ga continent involving Circum-South Atlantic provinces. *Precambrian Research* 69, 169-191
- Lerouge, C., Cocherie, A., Toteu, S.F., Penaye, J., Milési, J.P., Tchameni, R., Nsifa, E.N., Fanning, M., Deloele, E., 2006.** Shrimp U–Pb zircon age evidence for Paleoproterozoic sedimentation and 2.05 Ga syntectonic plutonism in the Nyong Group, South-Western Cameroon: consequences for the Eburnean–Transamazonian belt of NE Brazil and Central Africa. *Journal of African Earth Sciences* 44, 413–427.
- Letouzey, R., 1985.** Notice de la carte phytogéographique du Cameroun au 1/500000 Institut de la carte Internationale de la végétation, Toulouse, et institut de recherche agronomique., Yaoundé (p. 80-81)

- Maurizot, P., Abessolo, A., Feybesse, J.L., Johan,V., Lecomte,P., 1986.** Etude et prospection minière du Sud-Ouest Cameroun. Synthèse des travaux de 1978 à 1985. Rapport BRGM, Orléans 85, CMR 066, 274 pp.
- McLennan, S.M., Nance, W. and Taylor, S.R., 1980.** Th and U in sedimentary rocks: Crustal evolution and Sedimentary recycling. *Nature* 285, 621-624.
- McLennan, S.M., Hemming, S.R., McDaniel, D.K. and Hanson, G.N., 1993.** Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments* (Johnsson, M. J. and Basu, A., eds.), *Geology Society of America Special Paper* 284, 21–40.
- Morris, R.C. 1985.** Genesis of iron ore in banded iron-formation by supergene and supergene-metamorphic processes: A conceptual model. In *Handbook of Strata-Bound and Stratiform Ore Deposits: Part II. Regional Studies and Specific Deposits*. Amsterdam, Elsevier 13,73-235.
- Morris, R.C., Kneeshaw, M. 2011.** Genesis modelling for the Hamersley BIF-hosted iron ores of Western Australia: a critical review. *Australian Journal of Earth Sciences* 58, 417-451.
- Mvondo, H., den Brok, S.W.J., Mvondo Ondo, J., 2003.** Evidence for extension and exhumation of the Yaounde nappe (Pan-African fold belt, Cameroon). *Journal of African Earth Sciences* 36, 215–231.
- Nagarajan, R., Armstrong-Altrin, J.S., Nagendra, R., Madhavaraju, J. and Moutte, J. 2007a.** Petrography and geochemistry of terrigenous sedimentary rocks in the Neoproterozoic Rabanpalli Formation, Bhima Basin, southern India: Implications for paleoweathering condition, provenance, and source rock composition. *Journal of Geological Society of India* 70(2), 297-312.
- Nagarajan, R., Madhavaraju, J., Nagendra, R., Armstrongaltrin, J.S. and Moutte, J. 2007b.** Geochemistry of Neoproterozoic shales of Rabanpalli formation, Bhima Basin, Northern Karnataka, Southern India: implications for provenance and paleoredox conditions. *Revista Mexicana Ciencias Geológicas* 24(2), 150-160.
- Ndema Mbongue J.L., 2016.** Évolution tectono-métamorphique de la série du Nyong à Edéa et à Eséka. Thèse de doctorat/Ph. D, Université de Yaoundé I, 179p.
- Nesbitt, H., Young, G., 1984.** Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic consideration. *Geochimica Cosmochimica Acta* 48, 1523-1534.

- Netshiozwi, S.T. 2002.** Origin of high-grade hematite ores at Thabazimbi mine, Limpopo Province, South Africa. Unpublished M.Sc. thesis, Rand Afrikaans University 135 p.
- Nforba Tamnta, M., Api, L., Berinyuy, N., Fils, Nguemhe, C.S. 2018.** Lineament Mapping Using Rs and Gis Techniques at Mbateka, SE Cameroon: Implication for Mineralization. Springer Nature Switzerland. In: H. M. El-Askary et al. (eds.), *Advances in Remote Sensing and Geo Informatics Applications, Advances in Science, Technology & Innovation*, 197-201.
- Nforba Tamnta, M., Kamgang, K.V., Suh, E.C., 2011.** Regolith Geochemistry and Mineralogy of the Mbalam Itabirite-Hosted Iron Ore District, South Eastern Camereroon. *Open Journal of Geology* 1, 17-36.
- Ngamy Kamwa, A., Numbem Tchakounté J., Nkoumbou C., Owona S., Tchouankoué J.P., Mvondo Ondoua J., 2019.** Petrology and geochemistry of the Yoro-Yangben Pan-African granitoid intrusion in the Archean Adamawa-Yade crust (Sw-Bafia, Cameroon). *Journal of African Earth Sciences* 150, 401-414.
- Ngnotue, T., Nzenti, J.P., Barbey, P., and Tchoua, F.M., 2000.** The Ntui-Betamba high grade gneisses: a Northward extension of the Pan-African Yaoundé gneisses in Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 31, 369-381.
- Nisbett, H.W., Young, G.M., 1982.** Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature (London)*, 299, 715- 717.
- Njanko, T., Nédélec, A., Affaton, P., 2006.** Synkinematic high-K calc-alkaline plutons associated to the Pan-African central Cameroon shear zone (west-Tibati area): petrology and geodynamic significance. *Journal of African Earth Sciences* 44, 494-510.
- Njanko, T., Nédélec, A., Kwékam, M., Siqueira, R., Esteban, L., 2010.** Emplacement and deformation of the Fomopé'a pluton: Implication for the Pan-African history of Western Cameroon. *Journal of Structural Geology* 30, 1-15.
- Nkoumbou, C., Barbey, P., Yonta, M., Paquette, J.L., Villieras, F., 2014.** Pre-collisional geodynamic context of the margin of the southern margin of the Pan-African fold belt in Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 99, 245- 260.
- Nomo, N.E., Tchameni, R., Vanderhaeghe, O., Fenguye, S., Barbey, P., Tekoum L. Fosso, T.P.M., Eglinger, A., Saha, F.N.A., 2017.** Structure and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of syntectonic plutons emplaced in the Pan-African Banyo-Tchollire shear zone (central north Cameroon). *Journal of African Earth Sciences* 131, 251- 271.

- Nzenti, J.P., Barbey, P., Bertrand, J. M.L. et Macaudiere, J., 1994.** La chaîne panafricaine au Cameroun : cherchons suture et modèle. In : S.G.F. édit., 15e réunion des Sciences de la Terre, Nancy, France, 99 P.
- Nzenti, J.P., Barbey, P., Macaudiere, J. et Soba, D., 1988.** Origin and evolution of the late Precambrian high-grade Yaoundé gneisses (Cameroon). *Precambrian Research* 38, 91-109.
- Nzenti, J. P., Njanko, T., Njiosseu, E.L.T. et Tchoua, F.M., 1998.** Les domaines granulitiques de la Chaîne Panafricaine Nord–Equatoriale au Cameroun. In *Géologie et environnement au Cameroun*, Vicat et Bilong editors, Collection Geocam 1, 255 – 264.
- Nzenti, J.P., Njiosseu Tanko, T.E. L., Nzina Nchare A., 2007.** The metamorphic evolution of the Paleoproterozoic high grade Banyo gneisses (Adamawa, Cameroon, Central Africa). *Journal of the Cameroon Academy of Sciences* 7, 95-109.
- Nzenti, J.P., Abaga, A., Suh, C.E., Nzolang, C., 2011.** Petrogenesis of peraluminous magmas from the Akum-Bamenda Massif, Pan-African Fold Belt, Cameroon. *International Geology Review* 53(10), 1121-1149.
- Nzenti, J.P., Barbey, P., Macaudière, J., Soba, D., 1988.** Origin and evolution of late Precambrian high -grade Yaoundé gneisses (Cameroon). *Precambrian Research* 38, 91-109.
- Nzina Nchare, A., Nzenti, J.P., Tanko Njiosseu, E.L., Ganno, S., Ngnotué, T., 2010.** Synkinematic ferro-potassic magmatism from the Mekwene-Njimafofire Fouban Massif, along the Fouban-Banyo shear zone in central domain of Cameroon Pan-African fold belt. *Journal of Geology and Mining Research* 2 (6), 142-158.
- Olivry J.P., 1986.** Fleuves et rivières du Cameroun. Monographies hydrologiques, MESRES/ORTOM, Paris 733p.
- PNUD, 1987.** Rapport Technique Final du projet de recherche minier du Sud-Est du Cameroun. 89p.
- Ramanaidou, E.R., Wells, M.A. 2014.** Sedimentary hosted iron ores. In *Treatise on Geochemistry* (Second Edition). Edited by H.D. Holland and K.K. Turekian. Oxford, Elsevier 313-355.
- Roddaz, M., Brusset, S., Baby, P., Hérail, G., 2006.** Miocene tidal-influenced sedimentation to continental Pliocene sedimentation in the forebulge-blackbulge

- depozones of the Beni-Mamore foreland basin (northern Bolivia). *Journal of South American Earth Sciences* 20, 79-96.
- Segalen, P., 1964.** Les sol et la géomorphologie du Cameroun. Cahiers ORSTOM. Série Pédologie IV, 137-187.
- Shang, C.K., Liégeois, J.P., Satir, M., Frisch, W., Nsifa, E.N., 2010.** Late Archaean high-K granite geochronology of the northern metacratonic margin of the Archaean Congo craton, Southern Cameroon: Evidence for Pb-loss due to non-metamorphic causes. *Gondwana Research* 18 (2-3), 337-355.
- Soh, Tamehe, T., WeiChongtao, L., Ganno, S., Simon, S.J., Kouankap, N.G.D., Nzenti, J.P., Lemdjoue, Y.B., Lina.H.N., 2019.** Geology of the Gouap iron deposit, Congo craton, southern Cameroon. *Ore Geology Reviews* 107, 1097-1128.
- Soh, Tamehe, T., Nzepang, T.M., Changtao, W., Ganno, S., Ngnotue, T., Kouankap, N. G.D., Simon, S.J., Zang, J., Nzenti, J.P., 2018.** Geology and geochemical constrains on the origin and depositional setting of the Kpwa-Atop Boga banded iron formations (BIFs), northern Congo craton, Southern Cameroon. *Ore Geology Reviews* 95, 620-638.
- Suchel, J.B., 1987.** Les climats du Cameroun. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux II, 1186P.
- Suh, C.E., Cabral, A., Shemang, E.M., Mbinkar, L., Mboudou, G.G.M., 2008.** Two contrasting iron-ore deposits in the Precambrian mineral belt of Cameroon, West Africa. *Exploration and Mining Geology* 17, 197–207.
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989.** Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes. In the ocean basins, Blackwell Sci. Publi., Oxford 42, 323-345.
- Tanko Njiosseu, E.L., Nzenti, J.P., Njanko, T., Kapajika, B., Nédelec, A., 2005.** New U-Pb zircon ages from Tonga (Cameroon): coexisting Eburnean-Transamazonian (2.1 Ga) and Pan-African (0.6 Ga) imprints. *Comptes Rendus Géosciences* 337, 551-562.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985.** The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell, London, 312 pp.
- Taylor, D., Dalstra, H.J., Harding, A.E., Broadbent, G.C. and Barley, M.E. 2001.** Genesis of high-grade hematite ore bodies of the Hamersley Province, Western Australia. *Economic Geology* 96, 837-873.

- Tchakounté, J., Eglinger, A., Toteu, S.F., Zeh, A., Nkoumbou, C. Mvondo,-O.J., Penaye, J., de Wit M., Barbey, P., 2018.** The Adamawa-Yadé domain, a piece of Archaean crust in the Neoproterozoic Central African Orogenic belt (Bafia area, Cameroon). *Precambrian Research* 299, 210–229.
- Tchameni, R., 1997.** Géochimie et géochronologie des formations de l'Archéen et du Protérozoïque du sud-Cameroun (groupe du Ntem, Craton du Congo). Thèse Université d'Orléans, 35p.
- Tchameni, R., Nsifa, N.E., 1998.** Revue des données géochronologiques sur la partie Nord-Ouest du Craton du Congo (groupe du Ntem) Sud-Cameroun. In *Géosciences au Cameroun*, Vicat T. P. et Bilong P., Editors, Collection GEOCAM 1, Presses Universitaires de Yaoundé I, 339- 350.
- Tchouankoué, J.P., Xian-Hua Li, Ngo Belnoum R.N., Mouafo L., Ferreira Pinto V., 2016.** Timing and tectonic implications of the Pan-African banded Syenomonzonite, West Cameroon: Constraints from in situ zircon U-Pb age and Hf-O isotopes. *Journal of African Earth Sciences* 124, 94-103.
- Teutsong, T., Bontognali, T.R.R., Ndjigui, P.,-D., Vrijmoed, J.C., Teagle, D., Cooper, M., Vance, D., 2017.** Petrography and geochemistry of the Mesoarchean Bikoula banded iron formation in the Ntem complex (Congo craton), Southern Cameroon : Implications for its origin. *Ore Geology Reviews* 80, 267-288.
- Toteu, S.F., Van Schmus, W.R., Penaye, J., Nyobe, J.B., 1994.** U-Pb and Sm-Nb evidence for Eburnian and Pan-African high-grade metamorphism in cratonic rocks of Southern Cameroon. *Precambrian Research* 67, 321-347.
- Toteu, S.F., Van Schmus, W.R., Penaye, J., Michard, A., 2001.** New U-Pb and Sm-Nd data from north-central Cameroon and its bearing on the pre-Pan-African history of central Africa. *Precambrian Research* 108, 45-73.
- Toteu, S.F., Michard, A., Bertrand, J.M., Rocci, G., 1987.** U/Pb dating of Precambrian rocks from northern Cameroon, orogenic evolution and chronology of the Pan-African belt in Central Africa. *Precambrian Research* 37, 71 - 87.
- Van Den Hende, R., 1969.** Carte géologique de reconnaissance du Cameroun à l'échelle du 1/500000 (feuille Abong-Mbang Est avec notice explicative. Direction des Mines et Géologique du Cameroun, Yaoundé.
- Vicat, J.P., 1998.** Bilan des connaissances acquises sur les séries protérozoïques de la couverture du craton, aux confins du Cameroun, du Centrafrique et du Congo.

Géosciences au Cameroun, Vicat, J.P., Bilong, P. (Eds.) Collection Géocam 171888, Presses Universitaires de Yaoundé I, 369-383.

Vicat, J.P., Moloto-A-Kenguemba, G.R., Pouclet, A., 2001. Les granitoïdes de la couverture protérozoïque de la bordure nord du craton du Congo (Sud-Est du Cameroun et Sud-Ouest de la République Centrafricaine), témoins d'une activité magmatique post-Kibarienne à pan-africaine. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris 332, 235-242.

Vidal, C., 1933. Étude de géologie générale de la région de Yokadouma. Rapport Archives Services Mines, Cameroun, (inédit).

Wimmenauer, W., 1984. Das pravariskische Kristallin im Schwarzwald. Fortschritt der Mineralogie 62,69-86.

Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist 95, 185–187.

www.climatedata.eu consulté le 04/06/2018 à 16h20min

www.Camiron.com consulté le 06/05/2019 à 10h12 min