

Formation et mise en place du volcanisme tholéiitique paléoproterozoïque du Craton Ouest Africain : cas du groupe de Mako, boutonnière de Kédougou-Kéniéba, Sénégal Oriental

Adrien GOZO^{1*} et Mahamadane DIENE²

¹ *Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, Laboratoire de Pétrologie, BP 5005, Dakar-Fann, République du Sénégal*

² *Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Institut des Sciences de la Terre, Laboratoire de Pétro-structurale et Métallogénie, BP 5396 Dakar-Fann, République du Sénégal*

* Correspondance, courriel : gozoadrien@yahoo.fr

Résumé

Ce travail porte sur l'étude pétrographique et géochimique du volcanisme tholéiitique paléoproterozoïque du Groupe de Mako. La méthodologie utilisée pour sa réalisation est basée sur les travaux de terrain, l'étude pétrographique réalisée au microscope polarisant et le traitement des analyses géochimiques. Les résultats obtenus montrent que les roches volcaniques paléoproterozoïques tholéiitiques du groupe de Mako sont représentées par des basaltes et des basaltes andésitiques, tous décrits dans les secteurs de Konkoto, Sabodala et Mako situés respectivement au nord, au centre et au sud du groupe. Ces roches ont une paragenèse primaire, complètement transformée en paragenèse secondaire constituée des mêmes minéraux (épidote, chlorite, actinote, albite, quartz et leucoxène). L'étude géochimique indique que les laves du secteur de Sabodala sont plus riches en MgO, Cr, Ni, Zr, Sr, Ba et plus pauvres en Al₂O₃, tandis que celles de Mako sont riches en TiO₂, Fe₂O₃. Elle met en évidence deux groupes ou tendances au sein de la série tholéiitique. Le premier groupe localement connu dans le secteur de Mako s'apparente aux N-MORB. Le deuxième groupe observé dans les trois secteurs présente beaucoup d'analogies avec les T-MORB. Ce travail surtout de synthèse peut aider à comprendre l'histoire géologique du groupe de Mako.

Mots-clés : *paléoproterozoïque, volcanisme tholéiitique, boutonnière de Kédougou-Kéniéba, groupe de Mako.*

Abstract

Formation and implementation of the Palaeoproterozoic Tholeiitic volcanism of the West African Craton : case of the Mako group, Kédougou-Kéniéba Inlier, Eastern Senegal

This work consists of a petrographic and geochemical study of the Paleoproterozoic Tholeiitic volcanism of the Mako Group. The methodology used for its realisation is based on field work, the petrographic study carried out with a polarising microscope and the processing of geochemical analyses. The results obtained show that the Palaeoproterozoic tholeiitic volcanic rocks of the Mako Group are represented by basalts and andesitic basalts, all described in the Konkoto, Sabodala and Mako sectors located respectively in the North, Centre and South of the Group. These rocks have a primary paragenesis, completely transformed into a secondary paragenesis consisting of the same minerals (epidote, chlorite, actinote, albite, quartz and leucoxene). The

geochemical study indicates that: the lavas of the Sabodala sector are richer in MgO, Cr, Ni, Zr, Sr, Ba and poorer in Al₂O₃, while those of Mako are rich in TiO₂, Fe₂O₃. It highlights two groups or trends within the tholeiitic series. The first locally known group in the Mako sector is similar to the N-MORB. The second group observed in the three sectors shows many similarities with T-MORB. This synthesis work can help to understand the geological history of the Mako group.

Keywords : *palaeoproterozoic, tholeiitic volcanism, Kédougou-Kéniéba Inlier, Mako group.*

1. Introduction

Les roches volcaniques tholéiitiques du paléoprotérozoïque appartenant au Craton Ouest Africain sont des matériaux de la lithosphère présentant auprès de la communauté scientifique un vif intérêt du fait d'une part de l'importance de cette période (Paléoprotérozoïque) dans la configuration actuelle de la planète terre et d'autre part à cause de l'abondance de ressources minérales rencontrées dans ce type de formations. L'étude de ces formations peut permettre de comprendre l'évolution de la lithosphère au cours des temps géologiques ou servir de guide aux géologues qui font la prospection des ressources minérales. Dans le groupe de Mako qui constitue la partie occidentale de la boutonnière de Kédougou-Kéniéba, les roches volcaniques de la série tholéiitique sont représentées par des laves basaltiques. Elles affleurent en plusieurs endroits que l'on peut regrouper en trois secteurs qui sont : le secteur de Konkoto au nord, le secteur de Sabodala au centre et le secteur de Mako au sud. Ce volcanisme a fait récemment l'objet de nombreuses études sectorielles [1 - 15] qui ont permis de contraindre les caractères structurales, minéralogiques, pétrographiques, géochimiques et géochronologiques des laves basaltiques de chaque secteur. Cependant, une étude des roches tholéiitiques concernant l'ensemble de tous les secteurs n'avait jamais été réalisée. Tout en reconnaissant l'importance des résultats obtenus par les études précédentes, nous pensons que des travaux complémentaires sont toujours nécessaires. Ainsi, le présent article a pour objectif majeur d'apporter une contribution à la connaissance de la géologie du Groupe de Mako à travers une étude du volcanisme tholéiitique réalisée dans les secteurs où il affleure. Une comparaison des résultats obtenus nous permettra de mettre en évidence les caractères distinctifs et/ou communs des roches de chaque secteur. En d'autres termes, il s'agira de mettre en évidence les caractéristiques pétrographiques et géochimiques des roches basaltiques de chaque secteur et de les comparer pour montrer leurs analogies ou leurs particularités.

2. Matériel et méthodes

Située à cheval sur le Sénégal et le Mali, la boutonnière de Kédougou-Kéniéba couvre une superficie d'environ 15000km². Elle constitue avec la boutonnière de Kayes située au Mali, la partie la plus occidentale du Craton Ouest Africain. Ces boutonnières se positionnent entre la dorsale de Réguibat au nord et celle de Léo-Man au sud. Limité à l'ouest par la chaîne hercynienne des Mauritanides, le socle birimien de la boutonnière de Kédougou-Kéniéba est recouvert en discordance par les formations géologiques d'âge protérozoïque supérieur et paléozoïque des séries du Mali et de Ségou-Madina-Kouta (au sud), de la Falémé (à l'ouest) et du bassin de Taoudéni (à l'est et au nord). Les formations géologiques d'âge paléoprotérozoïque de la boutonnière de Kédougou-Kéniéba sont constituées de deux unités lithologiques qui sont d'ouest en est : le groupe de Mako et le groupe de Dialé- Daléma [16, 17]. Le groupe de Mako, essentiellement volcanique, comprend des basaltes, des andésites, des dacites, des rhyodacites et des rhyolites. Il est caractérisé par un volcanisme bimodal : tholéiitique et calco-alcalin. Le pôle tholéiitique, essentiellement basaltique, présentant des caractères de T-MORB [4, 6, 8] est surmonté par le pôle calco-alcalin, à dominante andésitique

[4, 7, 18, 19]. Ce dernier contient dans certains secteurs des termes allant des basaltes aux rhyolites. Le groupe de Dialé-Daléma, étudié par de nombreux géologues [17, 20 - 24] est essentiellement sédimentaire (grès, pélites, conglomérats, calcaires, etc.). Il est recoupé par des formations volcano-plutoniques calco-alkalines et par le batholite de Saraya. Toutes ces formations, affectées par l'orogénèse éburnéenne, ont été métamorphosées dans le faciès schistes vert. Les travaux de terrain, sur la base des fonds topographiques et des cartes géologiques disponibles, ont permis l'échantillonnage et la description des roches volcaniques paléoprotérozoïques de la série tholéiitique. Les lames minces ont été confectionnées à Nancy (France) et à l'université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal). Les analyses géochimiques ont été faites au Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG) de Vandœuvre (France), au Laboratoire de Service commun d'Analyses de l'Université de Nancy I (France) et au Laboratoire d'essai aux Rayons X de Ontario (Canada). Le dosage des éléments majeurs et des éléments en traces, a été réalisé par la fluorescence de rayons X et par l'absorption atomique. Celui des terres rares a été fait par les méthodes d'émission plasmique et par l'activation neutronique.

3. Résultats

3-1. Pétrographie

Les roches volcaniques de la série tholéiitique du Groupe de Mako affleurent en plusieurs endroits que l'on peut grouper en trois secteurs qui sont du nord au sud les secteurs de Konkoto, de Sabodala et de Mako (*Figure 1*). Elles sont représentées par des laves basaltiques. A l'affleurement, ces roches verdâtres ou sombres forment soit des pillow-lavas soit des coulées de laves massives. Ces laves vésiculaires, dont certaines dans le secteur nord sont peu ou pas déformées, présentent une texture microlitique ou microlitique porphyrique. Signalons que des textures de type plumose ou à spinifex sont localement observées dans certaines roches des secteurs central et nord. Elles sont constituées de clinopyroxène, de plagioclase et de minéraux opaques. Le clinopyroxène est complètement ou partiellement transformé en actinote, chlorite, épidote et leucoxène. Le plagioclase présente des individus ou des sections albitisées et épidotisées. Les minéraux opaques constituent des individus soit isolés, soit associés aux sections d'anciens minéraux ferro magnésiens (clinopyroxène). Tous ces minéraux sont dans une mésostase riche en minéraux secondaires caractéristiques du métamorphisme de type schiste vert (actinote + albite + chlorite + épidote + séricite + calcite + quartz + minéraux opaques).

3-2. Géochimie

Les variations des éléments majeurs et des éléments traces sont appréciées grâce au $Mg\# = [(Mg/40)]/[(Mg/40+FeO/72)]$, choisi comme indice de différenciation. Les concentrations des terres rares sont normalisées par rapport aux chondrites C1 [25]. Les terres rares élargies sont normalisées par rapport au manteau primitif [26]. Les valeurs extrêmes et les valeurs moyennes des concentrations des éléments majeurs, des éléments traces ainsi que celles des rapports caractéristiques des terres rares pour les laves des différents secteurs étudiés figurent dans le *Tableau 1*.

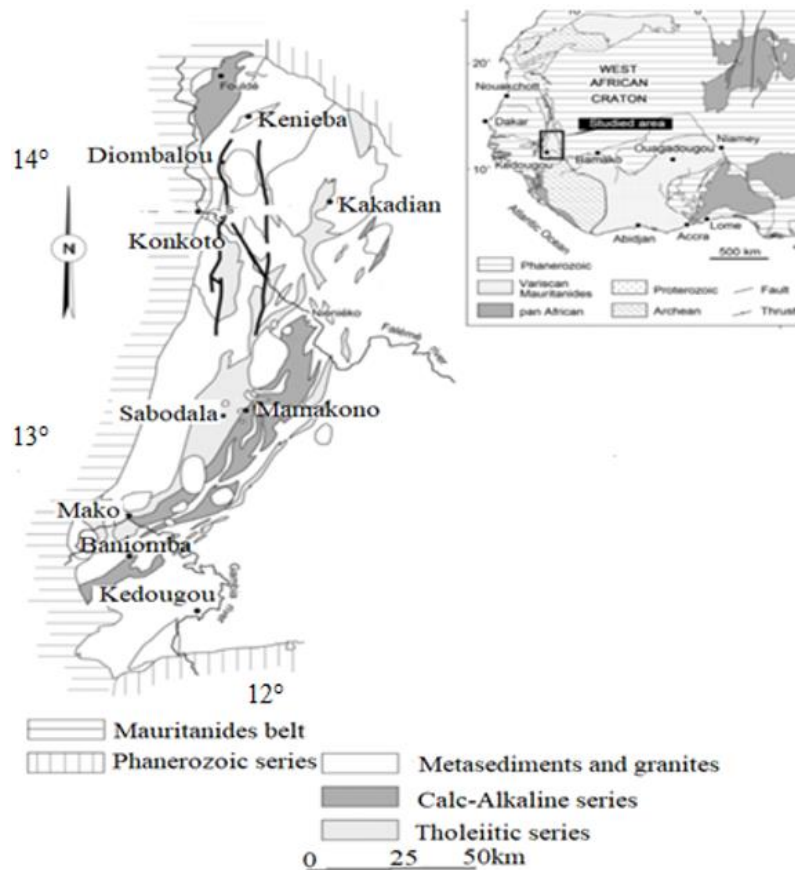


Figure 1 : Position des différents secteurs du volcanisme tholéiitique dans le groupe de Mako

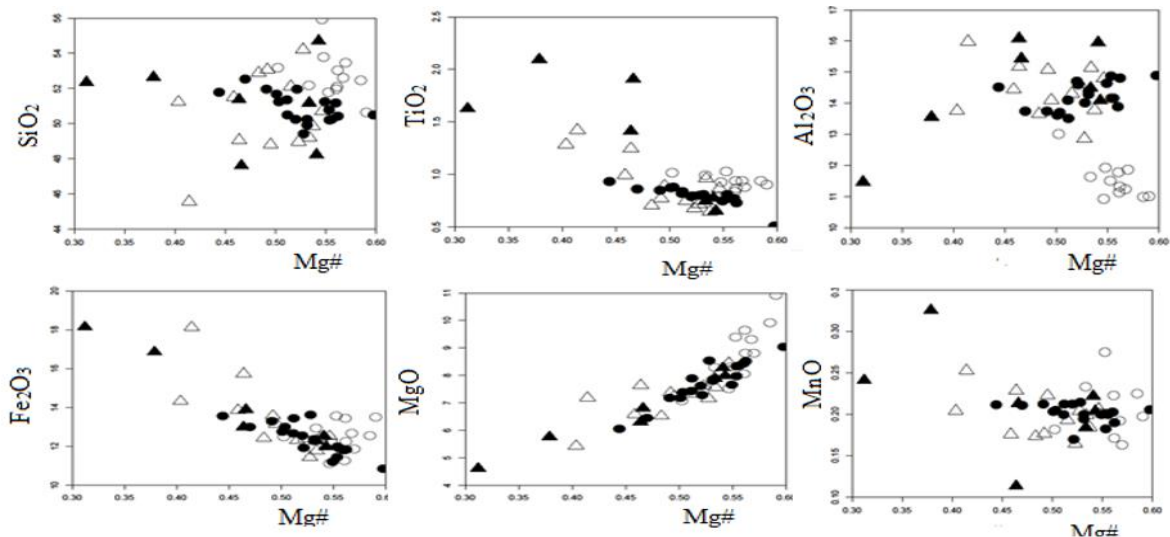
3-2-1. Géochimie des éléments majeurs

Les variations des principaux éléments majeurs (*Tableau 1*) en fonction de $Mg\#$ sont mises en évidence dans la *Figure 2*. La silice (43,73 à 53,1 %) varie de façon tout à fait comparable dans les laves des secteurs étudiés. Elle est dispersée et ne montre aucune corrélation avec le $Mg\#$. Cela montre son caractère mobile au cours des phénomènes post magmatiques (l'altération et le métamorphisme). Le titane (0,59 à 1,6 %) et le fer (10,56 à 15,16 %) montrent de grandes variations. Leurs teneurs diminuent en fonction de la hausse de l'indice de différenciation. Pour des valeurs de $Mg\#$ inférieures à 0,4, ils présentent des teneurs élevées dans les basaltes du secteur de Mako. Pour des valeurs de $Mg\#$ supérieures à 0,4, les teneurs en titane dans les laves de Konkoto présentent une position intermédiaire entre celles de Mako et de Sabodala. Le comportement de ces deux éléments au cours de la différenciation peut être lié à la cristallisation des minéraux ferro-titanés. L'alumine (10,56 à 14,83 %) varie peu dans les laves de tous les secteurs, ses teneurs, inférieures à celles observées dans les roches orogéniques sont très faibles dans les laves de Sabodala ; et ne montrent aucune corrélation avec l'indice de différenciation. Le magnésium (5,33 à 10,5 %) varie peu dans les laves de tous les secteurs. Cependant, il présente des teneurs élevées dans les laves de Sabodala et montre une bonne corrélation positive avec l'indice de différenciation. Son comportement est mis en relation avec la présence des clinopyroxènes décrits dans la partie pétrographique. Le calcium (6,79 à 15,8 %) présente une variation assez importante dans les laves du secteur de Mako. Dans les laves de Konkoto, il augmente avec la hausse de $Mg\#$ alors que dans les laves des autres secteurs, il est dispersif. Ses teneurs élevées sont dues à la présence des clinopyroxènes et des plagioclases

Tableau 1 : Valeurs extrêmes et moyennes des concentrations des éléments majeurs, des éléments traces (en ppm) et quelques rapports caractéristiques des terres rares dans les laves basaltiques du groupe de Mako. min : valeur minimale, max : valeur maximale, moy : valeur moyenne, Mako1 : premier groupe de la série tholéiitique du secteur de Mako, Mako2 : deuxième groupe de la série tholéiitique du secteur de Mako

Éléments chimiques	Secteur de Mako						Secteur de Sabodala			Secteur de Konkoto		
	1 ^{er} Groupe (Mako1)			2 ^{ème} Groupe (Mako2)			min	max	moy	min	max	moy
	min	max	moy	min	max	moy						
SiO ₂	48,23	54,7	50,7	45,55	52,63	49,9	48,7	53,2	51,91	48,38	52,22	50,39
TiO ₂	0,64	0,99	0,84	1,41	2,091	0,69	0,83	1,01	0,91	0,5	0,93	0,79
Al ₂ O ₃	12,9	15,95	14,43	11,47	16,07	14,5	10,6	12,9	11,96	13,38	14,83	14,09
FeOt	11,4	13,85	12,93	12,98	18,13	15,99	11,13	13,33	12,30	10,56	13,47	12,28
MnO	0,17	0,22	0,20	0,11	0,32	0,22	0,16	0,27	0,20	0,17	0,21	0,20
MgO	6,52	8,27	7,43	4,61	7,18	6,13	7,02	10,5	8,70	6,03	8,73	7,66
CaO	6,81	13,79	10,85	5,05	9,78	7,97	5,18	10,37	8,66	9,17	12,36	11,34
Na ₂ O	1,49	3,37	2,35	2,16	3,29	2,75	0,19	3,7	2,27	1,11	3,17	1,85
K ₂ O	0,06	0,23	0,13	0,03	1,18	0,61	0,08	0,73	0,28	0,09	0,72	0,25
P ₂ O ₃	0,05	0,12	0,069	0,13	0,33	0,198	0,03	0,2	0,13	0,07	0,23	0,11
Mg#	0,45	0,54	0,5	0,31	0,46	0,40	0,5	0,59	0,56	0,44	0,60	0,53
Ni	71	205,82	133,07	12,71	380,9	167,93	120	223,83	133	97	309	154,88
Co	43	58,63	56,68	2,69	55,49	47,48	45	100	65,5	62	118	80,4
Cr	64	441,16	248	15,95	735,54	329,06	190	906	617,75	135	412	271,76
Cu	39	144,86	102				84	150	106,86	60	119	66,31
V	252,85	351	293,66	12,74	467,95	274,05	232	399	287	163	314	246,65
Sr	43	135	1017,43	96,01	333,25	168,51	14	284	129,58	81	140	98,61
Rb	1,34	26	7,03	3,03	39	12,62	2	12	7,5	4	11	6,5
Ba	21	124	47,27	35,27	101,32	68,37	10	190	73,42	22	93	42,54
Nb	1,44	14	5,52	2,67	11,5	6,45	3	6	3,08	3	6	4,88
Zr	4,21	61,5	38,08	22,62	114,21	60,65	42	87	52,5	9	65	47,88
Y	14	22	17,91	16,26	84,18	40,099	15	28	13,93	14	22	19
(La/Yb) _N	0,58	1,07	0,88	1,01	2,65	1,75	1,65	2,89	2,38	0,92	1,87	1,45
(La/Sm) _N	0,67	1,07	0,83	0,82	1,40	1,09	0,87	1,49	1,25	0,76	1,18	0,83
(Gd/Yb) _N	0,96	1,187	1,16	1,23	1,62	1,47	1,39	1,80	1,59	1,08	1,37	1,31
Eu ⁺	0,88	2,52	1,63	0,80	1,02	0,99	1,06	1,12	1,01	0,94	1,23	1,08

Le sodium (1,11 à 3,72 %) varie peu dans les laves étudiées et ne montre aucune corrélation avec le Mg#. Son caractère dispersif reflète un comportement mobile au cours des phénomènes post magmatiques.



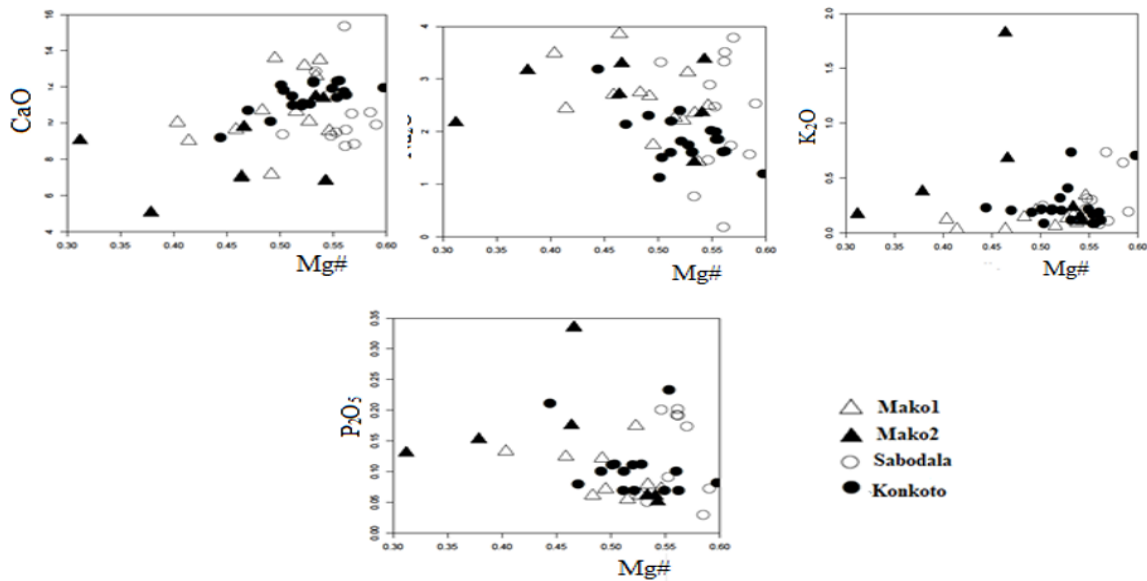


Figure 2 : Variation des éléments majeurs dans les laves basaltiques du groupe de Mako en fonction de Mg#. Mako1 : laves du premier groupe de la série tholéiitique ; Mako2 : laves du deuxième groupe de la série tholéiitique

Le manganèse (0,16 à 0,27 %), le potassium (0,08 à 0,73 %) et le phosphore (0,03 à 0,23 %) ont des teneurs très faibles (≤ 1 %) et varient peu dans les laves des secteurs étudiés. Ils ne montrent aucune corrélation avec l'indice de différenciation. Notons que le comportement du potassium est le même que celui du sodium. Il reflète son caractère mobile au cours des phénomènes post magmatiques qui se traduisent dans les roches étudiées par la présence des minéraux secondaires remplaçant ainsi la paragenèse originelle.

3-2-2. Géochimie des éléments traces

Les variations des principaux éléments traces en fonction de Mg# sont mises en évidence dans la **Figure 3**. Les écarts entre les valeurs extrêmes des différents éléments traces ne sont pas homogènes dans les laves des différents secteurs (**Tableau 1**). Ils sont plus importants que ceux observés au niveau des éléments majeurs. Le nickel (71 à 333 ppm) montre une grande variation dans les laves de Mako ; la plus petite variation en cet élément est observée dans les laves de Konkoto. Ses teneurs augmentent en fonction de la hausse de Mg#. Le chrome (64 à 906 ppm) varie beaucoup dans les laves des secteurs de Sabodala et de Mako, sa plus petite variation est observée dans les laves de Konkoto. Les teneurs en cet élément sont très élevées dans les laves de Sabodala. Il augmente en fonction de la hausse de l'indice de différenciation malgré le caractère dispersif. Le comportement des éléments Ni et Cr / Mg# est lié à la cristallisation des clinopyroxènes. Le cobalt (2,69 à 118 ppm) a des faibles teneurs comparées au nickel, chrome et vanadium. Il varie différemment dans les laves des secteurs de Sabodala, Konkoto et Mako et ne montrent aucune corrélation avec Mg#. Le vanadium (163 à 399 ppm) ne varie pas de façon homogène dans les laves de tous les secteurs, sa plus grande variation est signalée dans les laves du secteur de Mako ; la plus faible est connue dans les laves de Konkoto. Malgré la dispersion, les teneurs en cet élément diminuent en fonction de la hausse l'indice de différenciation. Le zirconium (30 et 90 ppm) varie différemment dans les laves étudiées. Il présente des teneurs élevées dans les roches du secteur de Sabodala et faibles dans celles du secteur de Mako. Pour les valeurs de Mg# supérieures à 0.4, les teneurs en Zr pour les laves de Konkoto présentent une position intermédiaire entre celle des roches des deux autres secteurs et diminuent en fonction de l'augmentation de l'indice de différenciation. L'yttrium (14 à 28 ppm) varie peu dans les laves de Konkoto, mais beaucoup dans les laves de

Mako. Ses teneurs dans l'ensemble faibles semblent assez élevées dans les laves de Mako. Les concentrations en cet élément diminuent au cours de la différenciation. Le strontium (14 à 284ppm) varie beaucoup dans les laves de Mako : la plus petite variation étant observée dans les laves de Konkoto. Ces teneurs, élevées dans les laves de Sabodala présentent dans l'ensemble un caractère dispersif au cours de la différenciation. Le baryum (10 à 190 ppm) montre de grandes variations dans les laves de Sabodala et dans celles de Konkoto. Cet élément présente des fortes concentrations dans les laves de Sabodala et montre un caractère dispersif en fonction de Mg#. Le rubidium (1,34 à 39 ppm) varie peu, ces concentrations sont faibles comparées à celles du Sr et du Ba, au cours de la différenciation, il montre aussi un caractère dispersif. Notons que le caractère dispersif que présentent les éléments Sr, Ba et Rb au cours de la différenciation est en accord avec leur comportement réputé mobile au cours des phénomènes post magmatiques. Dans les roches étudiées ces phénomènes sont signalés par la présence d'une paragenese secondaire ayant remplacé la phase minérale originelle.

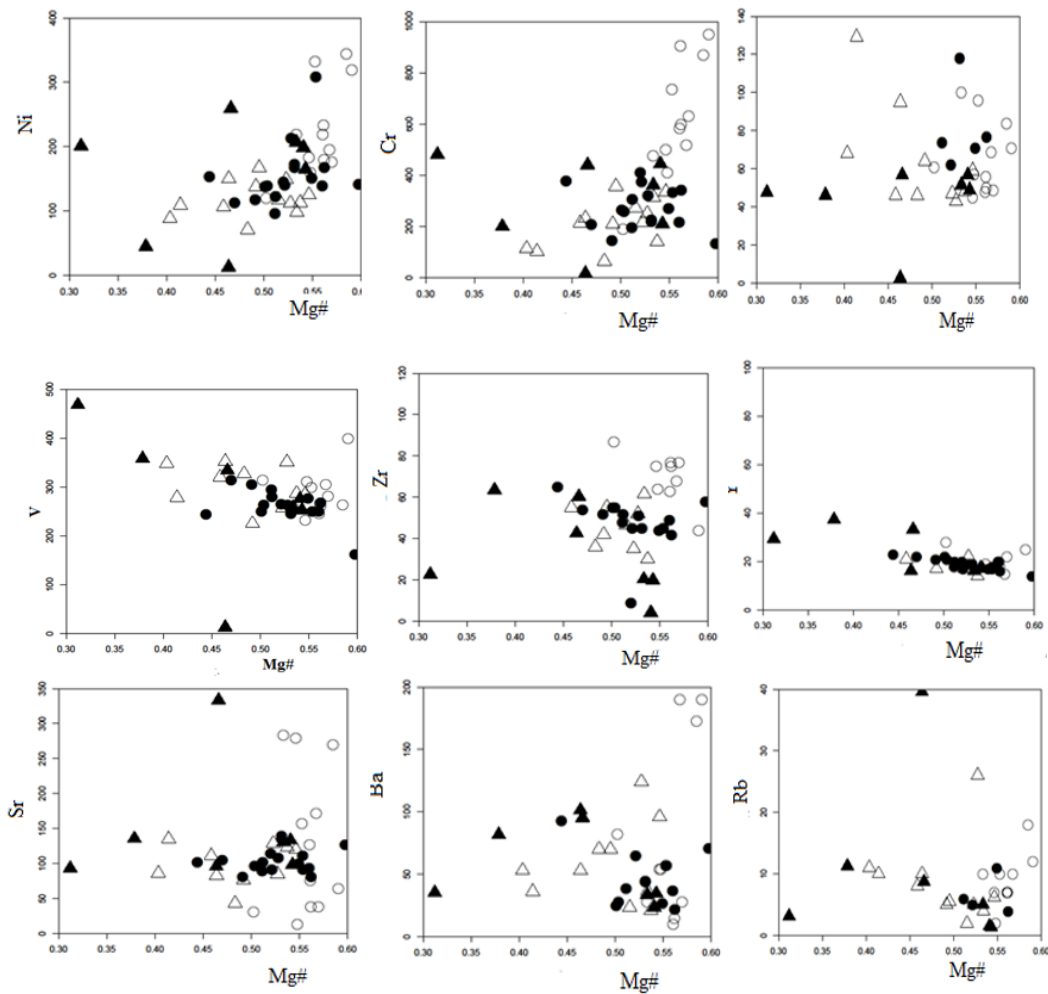


Figure 3 : Variation des éléments majeurs dans les laves basaltiques du groupe de Mako en fonction de Mg# (même légende que la figure 2)

3-2-3. Géochimie des terres rares

3-2-3-1. Secteur de Mako

Les laves basaltiques du secteur de Mako montrent deux types de spectres de terres rares normalisées par rapport aux chondrites [25] (**Figure 4**). L'un (constituant le premier groupe de la série tholéiitique : Mako1) essentiellement plat, peu appauvri, caractérisé par des rapports (La/Yb)_N variant entre 0,58 et 1,07, (La/Sm)_N

de 0,68 à 1,07, (Gd/Yb)_N de 0,96 à 1,187, l'autre (constituant le second groupe de la série tholéiitique : Mako2) peu fractionné et peu enrichi en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes présente quelques légères anomalies négatives en europium. Il est caractérisé par des rapports (La/Yb)_N variant entre 1,10 et 2,69, (La/Sm)_N de 0,82 à 1,40, (Gd/Yb)_N de 1,23 à 1,62. Le profil des spectres multiéléments normalisés par rapport au manteau primitif [26] essentiellement plat est appauvri à légèrement enrichi en éléments lithophiles (Ba, Rb). Il montre des anomalies en général positives et négatives en Nb et en K, négatives et très discrètes ou faibles en Zr. (*Figure 5*)

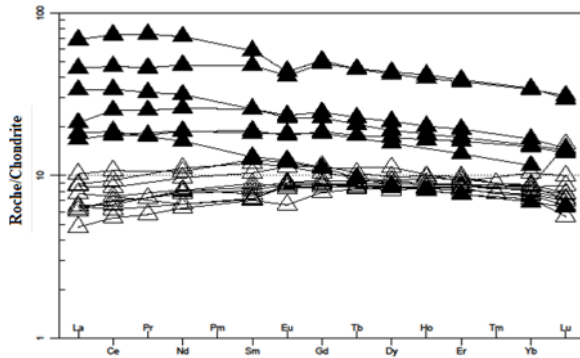


Figure 4 : Spectres des terres rares normalisés par rapport aux chondrites C1 [25] pour les laves du secteur de Mako (même légende que la figure précédente)

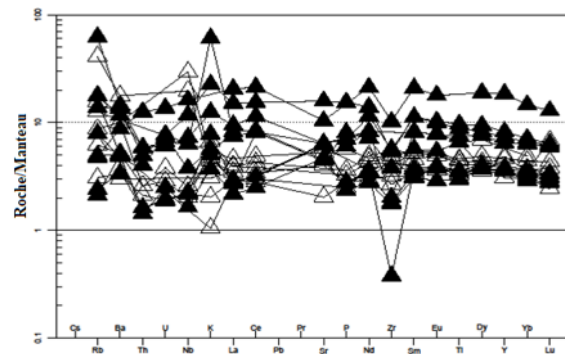


Figure 5 : Spectres des terres rares élargies normalisés par rapport au manteau [26] pour les laves du secteur de Mako (même légende que la figure précédente)

3-2-3-2. Secteur de Sabodala

Les laves basaltiques de Sabodala sont caractérisées, du point de vue géochimique, par :

- des profils des spectres des terre rares sub plats, semblables à ceux observés dans les T- MORB (*Figure 6*), traduisant ainsi un léger enrichissement et un léger fractionnement de terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes. Les valeurs du rapport (La/Yb)_N varient de 1,65 à 2,89, celles des rapports (La/Sm)_N et (Gd/Yb)_N vont de 0,87 à 1,49 et de 1,39 à 1,80 respectivement.
- des anomalies négatives très faibles en Eu (qui peuvent être mises en relation avec le fractionnement des plagioclases) et en Yb.

Le profil de spectres multi-éléments normalisés par rapport au manteau primitif (*Figure 7*) montre des anomalies négatives qui sont discrètes en zirconium, faibles en titane et faibles à fortes en strontium. Signalons que les anomalies négatives en Zr et en Ti sont l'une des caractéristiques des roches mises en place dans un environnement d'arc insulaires ou des zones de subduction. Des anomalies positives et négatives en K et Ba y sont également observées.

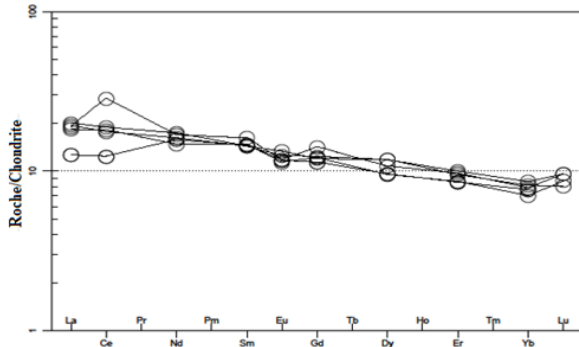


Figure 6 : Spectres des terres rares normalisés par rapport aux chondrites C1 [25] pour les laves du secteur de Sabodala (même légende que la figure 2)

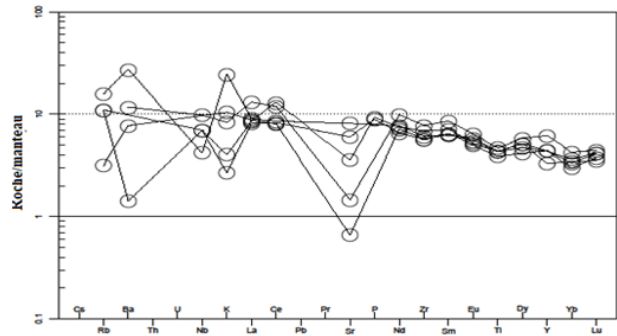


Figure 7 : Spectres des terres rares élargies normalisés par rapport au manteau [26] pour les laves du secteur de Sabodala (même légende que la figure 2)

3-2-3-3. Secteur de Konkoto

Dans le secteur de Konkoto, la géochimie des terres rares met en évidence des profils des spectres sub plats (**Figure 8**) traduisant ainsi un léger enrichissement et un léger fractionnement en terres rares légères. Ils présentent des anomalies positives et négatives en césium qui seraient dues aux phénomènes post magmatiques [4, 5]. Les valeurs du rapport $(La/Yb)_N$ varient de 0,92 à 1,87, $(La/Sm)_N$ allant de 0,76 à 1,84 et $(Gd/Yb)_N$ de 1,08 à 1,37. Le profil de spectres multi-éléments sub plat présente de légères anomalies négatives en titane, positives et négatives en phosphore (à l'exception de deux échantillons qui ne présentent aucune anomalie), en césium et en potassium. Dans l'ensemble, ils sont légèrement fractionnés en éléments lithophiles par rapport aux HFSE (**Figure 9**)

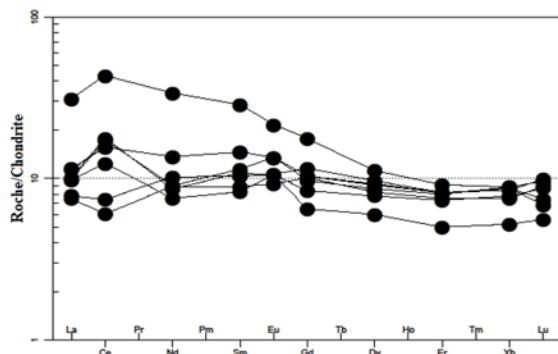


Figure 8 : Spectres des terres rares normalisés par rapport aux chondrites C1 [25] pour les laves du secteur de Konkoto

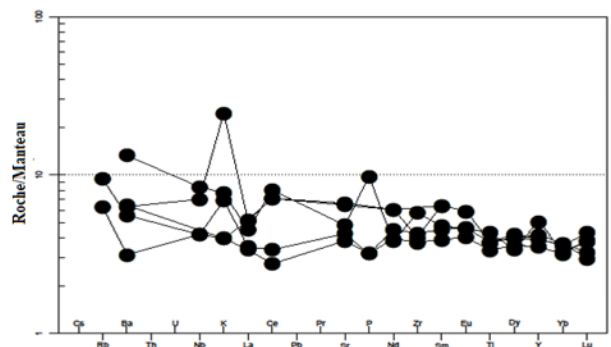


Figure 9 : Spectres des terres rares élargies normalisés par rapport au manteau [26] pour les laves du secteur Konkoto

Ces laves correspondant à des basaltes et à des basaltes andésitiques appartiennent au domaine des roches subalcalines. Les fortes teneurs en fer et en magnésium indiquent qu'elles appartiennent à la série tholéiitique. S'agissant du contexte géodynamique, les laves constituant le premier groupe de la série tholéiitique du secteur de Mako correspondent à des basaltes des fonds océaniques [1, 14]. Par contre, les laves du deuxième groupe de la série tholéiitique du secteur de Mako, ainsi que celles des secteurs de Sabodala et de Konkoto sont des roches mises en place dans un environnement d'arc insulaire [3 - 5, 14].

4. Discussion

Cette discussion, essentiellement basée sur la comparaison des résultats obtenus, met en évidence les analogies et les particularités des laves tholéitiques de chaque secteur. La description pétrographique faite ci-dessus ne montre aucune différence notable entre les laves des secteurs étudiés. Elles ont toutes une texture bien conservée. Leur composition est homogène avec une paragenèse primaire complètement transformée en paragenèse secondaire (épidote, chlorite, actinote, albite, quartz et de leucoxène) caractéristique d'un métamorphisme de type schiste vert. Les valeurs moyennes des teneurs en éléments majeurs (*Tableau 1*) ne sont pas les mêmes pour les roches des trois secteurs cependant, elles sont relativement proches. Cette observation rend difficile une distinction des séries tholéitiques à partir des éléments majeurs. Cependant, soulignons que malgré cette homogénéité dans leur composition, une analyse de la *Figure 2* permet de constater que les laves de Sabodala se révèlent plus riches en MgO et pauvres en Al_2O_3 que celles de Mako et de Konkoto. Par contre, les laves de Mako sont plus enrichies en fer, titane, alumine, et dans la moindre mesure en manganèse. Elles se révèlent aussi faiblement à fortement enrichies en calcium que celles des laves des autres secteurs. Pour les valeurs de Mg# supérieures à 0,4, les teneurs en TiO_2 des laves de Konkoto occupent dans le diagramme de corrélation une position intermédiaire ou transitionnelle entre celle de Mako et celle de Sabodala (*Figure 2*). Cela suggère que les laves de Konkoto proviennent d'une source magmatique qui avait une composition chimique intermédiaire pour certains éléments majeurs entre celles dont dérivent les laves des secteurs de Mako et de Sabodala. Les valeurs de Mg# calculées pour les roches étudiées sont moyennes dans les laves de Sabodala (0,5 à 0,59) alors qu'elles sont faibles à moyennes dans les laves des autres secteurs (de 0,33 à 0,56 pour les laves de Mako et de 0,44 à 0,60 pour les basaltes de Konkoto). Ces rapports indiquent que les roches basaltiques proviennent des sources magmatiques différenciées et que les roches de Sabodala sont moins différenciées que celle de Mako. Les teneurs moyennes des éléments traces n'ont pas la même valeur (*Tableau 1*).

Cependant, les laves de Sabodala sont plus riches en Cr, Ni, Zr, Sr et en Ba que celles de Mako et de Konkoto. Par leurs teneurs en Zr, les laves de Konkoto occupent dans le diagramme de corrélation une position intermédiaire entre celles des laves du secteur de Mako (moins enrichies en Zr) et des laves du secteur de Sabodala (plus enrichies en Zr). Cette divergence des valeurs observée au niveau des éléments chimiques permet d'exclure l'hypothèse d'une même source magmatique pour les roches des trois secteurs. Dans l'ensemble, les valeurs moyennes des concentrations en éléments de transition (Ni, Co, Cr) pour toutes les laves basaltiques du groupe de Mako sont plus élevées que celles rencontrées dans les laves tholéitiques de certains secteurs du craton Ouest Africain (cas de Bouroum Nord au Burkina Faso [27] et de Fétékro en Côte d'Ivoire [28]) et dans les IAT [29]. Par contre, leurs concentrations en Zr et Y sont inférieures à celles observées dans les laves des secteurs précités (Bouroum Nord [27] et Fétékro [28]). L'analyse de ces observations indique que les sources magmatiques des roches volcaniques tholéitiques paléoprotozoïques n'ont pas toujours une composition chimique homogène dans les différents segments du craton Ouest africain. Il y a donc une divergence en ce qui concerne leur composition. En d'autres termes, la composition chimique des sources varie d'un segment à un autre. Comparées au manteau, les laves basaltiques du groupe de Mako ont des concentrations en éléments de transition plus faibles que celles du manteau primitif [29]. Par contre, leurs concentrations en éléments incompatibles (Zr et Y) sont supérieures ou plus élevées que celles du manteau primitif [29]. Nous pensons d'après ce constat que les roches étudiées ne proviennent pas directement de la fusion partielle du manteau primitif. Vue leurs concentrations élevées en éléments de transition et les faibles valeurs de Mg#, nous pouvons affirmer qu'elles dérivent probablement des sources mantelliques différenciées. Ces laves ont des concentrations moyennes en Co et en Ni supérieures à celles des MORB [29]. Par contre, leurs concentrations moyennes en Cr sont plus faibles que celles des MORB à l'exception de celle des laves des Sabodala qui renferment des fortes teneurs en cet élément. Les fourchettes

des valeurs extrêmes et les moyennes des rapports entre éléments incompatibles (Zr/Y, Zr/Nb et Y/Nb) dans les laves du premier groupe de la série tholéiitique de Mako (Mako1) sont proches de celles observées dans les N-MORB, le groupe 1 de la série tholéiitique de Bouroum Nord, et dans les laves Tholéiitiques de Fétékro (**Tableau 2**); tandis que les valeurs moyennes et les fourchettes des rapports entre les mêmes éléments, comparables pour les laves du deuxième groupe de la série tholéiitique du secteur de Mako (Mako 2), de Sabodala, de Konkoto et du groupe 3 de la série tholéiitique de Bouroum Nord sont assimilables à de celles observées dans les T-MORB. Les laves du premier groupe de la série tholéiitique du secteur de Mako (Mako1) présentent le profil de spectre des moyennes des terres rares (**Figure 10**), les fourchettes des valeurs extrêmes et les valeurs moyennes des rapports (La/Yb)N et (La/Sm)N (**Tableau 2**) semblables à ceux observés pour les N-MORB, le groupe1 de Bouroum Nord et la série tholéiitique de Fétékro. Ces roches (laves du premiers groupe tholéiitique) correspondent à des tholéiites des fonds océaniques [1, 14]. Les laves du second groupe (Mako2) ont le profil de spectre des moyennes des terres rares (**Figure 11**), des fourchettes des valeurs extrêmes et des valeurs moyennes des rapports (La/Yb)N et (La/Sm)N (**Tableau 2**) différents de ceux des N-MORB, mais proches de ceux rencontrés dans les séries tholéiitiques des secteurs de Sabodala et Konkoto, du groupe3 de Bouroum Nord et des T-MORB. Notons que les laves du second groupe de la série tholéiitique de Mako de même que celles des secteurs de Sabodala et de Konkoto correspondent à celles mises en place dans un environnement d'arc insulaire [3 - 5, 14]. Ce fait est également confirmé par la présence d'anomalies négatives en Zr et en Ti qui constituent l'une des caractéristiques des roches de ce type d'environnement.

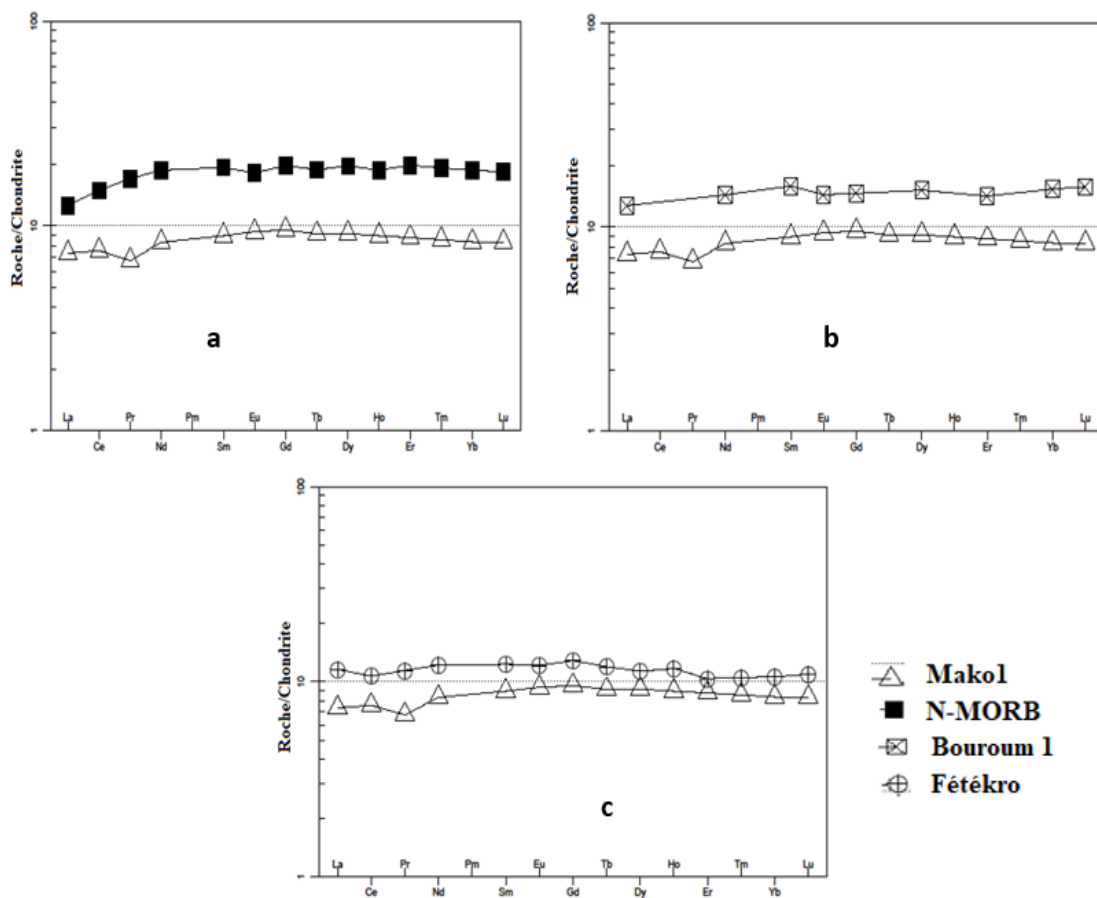


Figure 10 : Comparaison du premier groupe de la série tholéiitique du secteur de Mako avec les N- MORB (a), le groupe 1 de la série tholéiitique de Bouroum nord (b : bouroum 1) et la série tholéiitique de Fétékro (c)

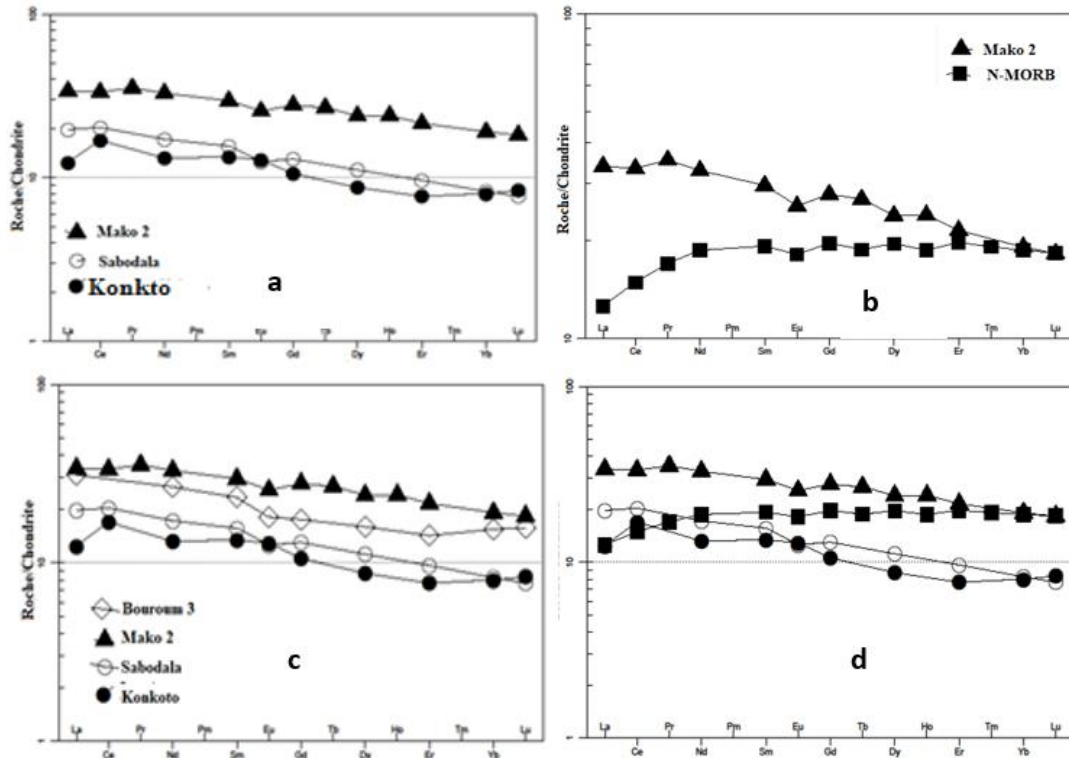


Figure 11 : Comparaison du second groupe de la série tholéiitique du secteur de Mako avec les séries tholéiitiques des secteurs de Sabodala et de Konkoto (a et c), le groupe3 de la série tholéiitique de Bouroum nord (c : bouroum 3) et les N- MORB (b et d)

Par leur composition en terres rares légères, les laves de Sabodala et de Konkoto présentent un caractère intermédiaire entre celles du premier groupe tholéiitique de Mako (faiblement enrichi) et de second groupe tholéiitique de Mako (fortement enrichi) (**Figure 12**). Cependant, dans la partie terres rares lourdes, l'allure du profil de spectre des moyennes des terres rares pour les laves du second groupe tholéiitique est parallèle à celui des spectres des moyennes des terres rares des roches des secteurs de Sabodala, Konkoto et du premier groupe de la série tholéiitique qui présentent une composition presque identique. En plus, les rapports (Gd/Yb)_N sont comparables pour les trois secteurs (**Tableau 1**). Cette observation permet de suggérer pour ces laves, une évolution des liquides magmatiques dans des conditions voisines.

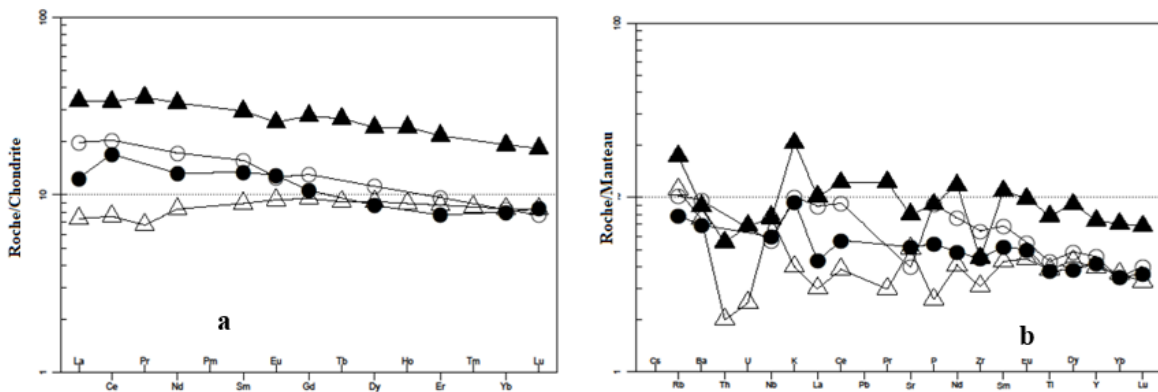


Figure 12 : Comparaison du volcanisme tholéiitique à l'échelle du groupe de Mako (même légende que la figure 2). a : spectres des moyennes des terres rares normalisées par rapport aux chondrites [25] ; b : spectres des moyennes des terres rares élargies, normalisées par rapport au manteau primitif[26]

Tableau 2 : Comparaison du volcanisme tholéiitique du groupe de Mako avec celui des autres provinces birimiennes du Craton ouest africain (Fétékro et Bouroum Nord) et des Tholéiites océaniques (N-MORB, T-MORB, E-MORB, OIB [30-32]) : min : valeur minimale, max : valeur maximale, moy : valeur moyenne, Mako1 : premier groupe de la série tholéiitique du secteur de Mako, Mako2 : deuxième groupe de la série tholéiitique du secteur de Mako

Traces (ppm) et Rapports caractéristiques	Secteur de Mako						Sabodala			Konkoto			Fétékro (Région de Dabakala en Côte d'Ivoire)			Groupel Nord (Burkina Faso)			Group3 Nord(Burkina Faso)		
	Mako1			Mako2			min	max	moy	min	max	moy	min	max	moy	min	max	moy	min	max	moy
	min	max	moy	min	max	moy															
Ni	71	205,8	133	12,7	380,1	167,98	120	223,8	133	97	309	154,9				86	166	129	86	89	88
Cr	64	444	248	15,9	735	329	190	906	617,7	135	412	271,7				62	353	168			92
Y	14	22	17,91	16,3	84,2	40,1	15	28	13,93	14	22	19	19,4	38,9	23,5	26	53	33	21	94	55
Zr	4,21	61,5	38,08	22,6	114	60,6	42	87	52,5	9	65	47,88	2	70	51	36	106	80,8	5	245	115
Nb	1,44	14	5,52	2,67	11,5	6,45	3	6	3,08	3	6	4,9	2,54	40	8,84	1	4	2	2	27	13
La/Yb	0,58	1,07	0,88	1,1	2,65	1,75	1,7	2,89	2,38	0,92	1,87	1,45	0,93	1,26	1,04	0,52	1,09	0,87	0,5	2	1,5
La/Sm	0,68	1,07	0,83	0,82	1,4	1,09	0,9	1,49	1,25	0,76	1,18	0,83	0,83	1,08	0,94	0,65	0,94	0,8	1	1,3	1,2
Zr/Y	0,24	2,62	2,39	0,77	2,61	1,65	3,1	4,53	3,5	2,36	4,14	2,55	0,1	3,03	2,2	1,16	3,03	2,29	0,1	5	3,2
Zr/Nb	1,71	42,7	18,68	7,19	12,2	9,45	12	15,4	14,78	8	16	10,47	0,05	24,13	19,3	9	94	81	0,2	48	25
Y/Nb	1,57	14,5	27,01	3,61	7,18	6,61	3,2	5	41,3	3,16	29,7	5,33	0,48	13,41	7,64	7,75	31	23,5	3,5	11	6,5

	Secteur de Mako						Sabodala			Konkoto			N-MORB			T-MORB			E-MORB			OIB
	Mako1			Mako2			min	max	moy	min	max	moy	min	max	moy	min	max	moy	min	max	moy	moy
	min	max	moy	min	max	moy																
Y			17,91			40,1			13,9			19			28						22	29
Zr			38,08			60,6			52,5			48			74						73	280
Nb			5,52			6,45			3,03			4,9			2,33						8	48
La/Yb	0,58	1,07	0,88	1,1	2,65	1,75	1,7	2,89	2,38	0,92	1,87	1,5	0,35	1,1	0,82	1,7	4,3		4,8	6,9	3	17
La/Sm	0,68	1,07	0,83	0,82	1,4	1,09	0,9	1,49	1,25	0,76	1,18	0,8			<1	1,1	1,5				2	
Zr/Y	0,24	2,62	2,39	0,77	2,61	1,65	3,1	4,53	3,5	2,36	4,14	2,6	2,2	4,2	2,64	3,1	4,7				7	9,7
Zr/Nb	1,71	42,7	18,68	7,19	12,2	9,45	12	15,4	14,8	8	16	10			>17	8,8	15,5				6	5,8
Y/Nb	1,57	14,5	27,01	3,61	7,18	6,61	3,2	5	41,3	3,16	29,7	5,33	4,6	23	24,1	1,9	4,3		0,9	12	31	130

le magma responsable des laves de Konkoto présente une composition chimique intermédiaire pour certains éléments entre celles des magmas générateurs des laves de Sabodala et du premier groupe de la série tholéiitique du secteur de Mako. Dans la partie du diagramme comprise entre le titane et le lutétium les spectres représentant les moyennes des terres rares élargies des secteurs de Sabodala, Konkoto et du premier groupe tholéiitique montrent une composition presque homogène et sont tous sub parallèles à celui représentant la moyenne des laves du second groupe de la série tholéiitique du secteur de Mako. L'analyse de ces observations nous conduit encore à penser que les liquides magmatiques à l'origine de ces roches ont évolué dans des conditions presque voisines ou similaires.

5. Conclusion

Les volcanites tholéiitiques paléoprotérozoïques du groupe de Mako sont représentés par des laves basaltiques. Elles ont toutes une composition minéralogique homogène avec une paragenèse primaire complètement transformée en paragenèse secondaire caractéristique d'un métamorphisme de type schiste vert. Les valeurs des concentrations en éléments majeurs, traces et terres rares ne sont pas les mêmes dans les analyses chimiques des laves des trois secteurs. Cependant, les laves du secteur de Mako se révèlent plus riches en TiO_2 , Fe_2O_3 , et dans une moindre mesure en Al_2O_3 et MnO et pauvre en Zr. Tandis que les laves de Sabodala, très pauvres en Al_2O_3 sont très riches en MgO , Ni, Cr, Zr, Sr et Ba. Dans le secteur de Mako ces laves forment deux groupes au sein la série tholéiitique. Le premier groupe présentant beaucoup d'analogies avec, le groupe 1 de la série tholéiitique de Bouroum Nord et la série tholéiitique de Fétékro s'apparente aux N-MORB. Le second groupe a un comportement similaire à celui des laves de Sabodala, de Konkoto et du groupe 3 de la série tholéiitique de Bouroum Nord et sont toutes comparables aux T-MORB. Toutes ces laves dérivent des sources différenciées.

Références

- [1] - P. M. NGOM, "Caractérisation de la croûte birimienne dans les parties centrale et méridionale du Supergroupe de Mako. Implications géodynamiques et pétrogénétiques, Thèse d'Etat, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, (1995) 240 p.
- [2] - P. M. NGOM, M. GUEYE, S. CISSOKHO, J. L. JERON, M. TREUIL, M. DABO, Signification géodynamique des roches volcaniques dans les ceintures de roches vertes d'âge paléoprotérozoïque ; Exemple de la partie méridionale du Supergroupe de Mako, boutonnière de Kédougou (Sénégal). Approche des éléments en traces. *Journal des Sciences et Technologies*, Vol. 5, (2007) 52 - 71
- [3] - D. P. DIALLO, "Caractérisation d'une portion de croûte d'âge Protérozoïque inférieur du Craton Ouest Africain : cas de l'encaissant des granitoïdes dans le Supergroupe de Mako (Boutonnière de Kédougou). Implications géodynamiques», Thèse d'Etat, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, (1994) 446 p.
- [4] - E. DIOH, "Caractérisation, signification et origine des formations birimiennes encaissantes de granite de Dioumbalou (Partie septentrionale de la boutonnière de Kédougou-Sénégal Oriental)", Thèse d'Etat, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, (1995) 427 p.
- [5] - A. DIA, "Caractères et signification des complexes magmatiques et métamorphiques du secteur de Sandikounda-Laminia (Nord de la boutonnière de Kédougou ; Est du Sénégal)", Thèse d'Etat, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, (1988) 351 p.
- [6] - S. CISSOKHO, "Etude Géologique du secteur de Mako (partie méridionale du Supergroupe de Mako, boutonnière de Kédougou-Kéniéba, Sénégal oriental) : Implications sur la diversité magmatique", Thèse 3^{ème} cycle, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, (2010) 177 p.
- [7] - M. DIENE, " Evolution structurale d'un segment du craton ouest africain : cas des formations paléoprotérozoïques du supergroupe de Mako, boutonnière de Kedougou - Kenieba (sud -est du Sénégal)", Thèse de doctorat unique, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, (2013) 161 p.
- [8] - M. DIENE, M. GUEYE, D. P. DIALLO, A. DIA, Structural Evolution of a Precambrian Segment: Example of the Paleoproterozoic Formations of the Mako Belt (Eastern Senegal, West Africa). *International Journal of Geosciences*, 3 (2012) 153 - 165
- [9] - M. GUEYE, A. M. VAN DEN KERKHO, U. F HEIN, M. DIENE, A. MUCKE, S. SIEGESMUND, Structural control, fluid inclusions and cathodoluminescence studies of Birimian gold-bearing quartz vein systems in the Paleoproterozoic Mako Belt, Southeastern Senegal. *S. Afr. J. Geol.*, 116 (2) (2013) 199 - 218

- [10] - P. M. NDIAYE, E. DIOH, F. DIATTA, A. TRAORE, M. FALL, O. BALDE, Polycyclic Evolution of Paleoproterozoic Rocks in the Southwestern Part of the Mako Group (Eastern Senegal, West Africa). *International Journal of Geosciences*, 5 (2014) 739 - 748
- [11] - M. DIENE, T. FULLGRAF, F. DIATTA, E. GLOAGUEN, M. GUEYE, P. M. NDIAYE, Review of the Senegalo-Malian shear zone system - Timing, kinematics and implications for possible Au mineralisation styles. *J Afr Earth Sci.*, 112 (2015) 485 - 504
- [12] - S. SYLLA, M. GUEYE, P. M. NGOM, New Approach of Structural Setting of Gold Deposits in Birimian Volcanic Belt in West African Craton: The Example of the Sabodala Gold Deposit, SE Senegal. *International Journal of Geosciences*, 7 (2016) 440 - 458
- [13] - M. DABO, T. AIFA, I. GNING, M. FAYE, M. F. BA, P. M. NGOM, Lithological architecture and petrography of the Mako Birimian greenstone belt, Kedougou-Kenieba Inlier, eastern Senegal. *J. Afr. Earth Sci.*, 131 (2017) 128 - 144
- [14] - I. LABOU, "Les complexes mafiques et ultramafiques birimiens de la ceinture de Mako (Sénégal Oriental) témoins d'une évolution d'un domaine intra-océanique vers un domaine d'arc insulaire", Thèse de doctorat, Université de Toulouse 3-Paul Sabatier, (2019) 301 p.
- [15] - I. LABOU, M. BENOIT, L. BARATOUX, M. GREGOIRE, P. M. NDIAYE, N. THEBAUD, D. BEZIAT, P. DEBAT, Petrological and geochemical study of Birimian ultramafic rocks within the West African Craton : Insights from Mako (Senegal) and Loraboue (Burkina Faso) lherzolite/harzburgite/wehrlite associations, *Journal of African Earth Sciences*, 162 (2020) 1 - 29
- [16] - H. THEVENIAUT, P. M. NDIAYE, F. BUSCAIL, R. COUEFFE, C. DELOR, T. FULLGRAF et J. C. GOUJOU, Notice explicative de la carte géologique du Sénégal oriental à 1/500 000. *Ministère des Mines, de l'Industrie, de l'Agro-Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie*, Dakar, (2010) 120 p.
- [17] - J. P. BASSOT, Le complexe volcano-plutonique calco-alkalin de la rivière Daléma (Est Sénégal) : discussion de sa signification géodynamique dans le cadre de l'orogénie Eburnéenne (Protérozoïque Inférieur). *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 6, 1 (1987) 109 - 115
- [18] - A. GOZO, "Pétrologie du volcanisme paléo protérozoïque calco-alkalin du Groupe de Mako (Sénégal oriental) : Incidences géotectonique", Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop, Dakar
- [19] - A. GOZO, M. DIENE, D.P. DIALLO, E. DIOH, M. GUEYE, P. M. NDIAYE, Petrological and Structural Approach to Understanding the Mechanism of Formation and Development of Paleoproterozoic Calc-Alkaline Volcanic Rocks of West Africa's Craton : An Example of the Mako and Foulde Groups (Kedougou Inlier in Western Senegal, *International Journal of Geosciences*, 6 (2015) 675 - 691
- [20] - F. DIATTA, P. M. NDIAYE, M. DIENE, P. O. AMPONSAH, J. GANNE, The structural evolution of the Diale-Dalema basin, Kedougou-Kenieba Inlier, eastern Senegal. *Journal of African Earth Sciences*, 129 (2017) 923 - 933
- [21] - M. DABO, "Tectonique et minéralisations aurifères dans les formations birimiennes de Frandi-Boboti, boutonnière de Kédougou-Kéniéba, Sénégal", Thèse d'Etat, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, (2011) 294 p.
- [22] - M. DABO, T. AIFA, Late Eburnean deformation in the Kolia-Boboti sedimentary basin, Kédougou-Kéniéba Inlier, Sénégal, *Journal of African Earth Sciences*, 60 (2011) 106 - 116
- [23] - M. DABO and T. AIFA, Structural styles and tectonic evolution of the Kolia-Boboti sedimentary Basin, Kédougou-Kéniéba inlier, eastern Senegal. *C. R. Geoscience*, 342 (2010) 796 - 805
- [24] - J. KONE, O. VANDERHAEGHE, F. DIATTA, L. BARATOU, N. THEBAUD, O. BRUGUIER, P. M. NDIAYE, S. DUCHENE, P. PITRA, J. GANNE, Source and deposition age of the Dialé-Daléma metasedimentary series (Kédougou-Kéniéba Inlier, Senegal) constrained by U–Pb geochronology on detrital zircon grains, *Journal of African Earth Sciences*, 165 (2020) 1 - 20

- [25] - N. M. EVENSEN, P. J. HAMILTON and R. K. O'NIONS, Rare earth abundances in chondritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42 (1978) 1199 - 1212
- [26] - S. S. SUN and W. F. Mc DONOUGH, Chemical isotopic systematics of oceanic basalts : implication for mantle composition and processes. From Saunders A. D and Norry M. J. Eds *Magmatism of ocean basins*, *Geol. Soc. Spec., Publ.*, N° 42 (1989) 313 - 345
- [27] - S. ZONOU, "Les formations Leptyno-amphibolitiques et le complexe volcanique et volcano-sédimentaire du Protérozoïque inférieur de Bouroum-Nord (Burkina-Faso Afrique de l'Ouest). Etude pétrographique, géochimique, approche pétrogénétique et évolution géodynamique", Thèse, Université de Nancy I, (1987) 294 p.
- [28] - A GNANZOU, "Étude des séries volcano-sédimentaires de la région de Dabakala (Nord-Est de la Côte d'Ivoire) : genèse et évolution magmatique. Contribution à la connaissance de la minéralisation aurifère de Bobosso dans la série de la Haute-Comoé", Thèse de l'Université Paris Sud Orsay, France et de l'Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan, Côte d'Ivoire, (2014) 229 p.
- [29] - D. I. ANDERSON, "*Theory of the earth*", Blackwell scientific publications, (1989) 366 p.
- [30] - A. P. LE ROEX, H. J. B. DICK, A. J. ERLANK, A. M. REID, F. A. FREY and S. R. HART, Geochemistry, mineralogy and petrogenesis of lavas erupted along the southwest Indian Ridge between the Bouvet triple junction and 11 degrees East. *J. Petrol.*, 24 (1983) 267 - 318
- [31] - A. P. LE ROEX, H. J. B. DICK, A. M. READ, F. A. FREY and S. R. HART, Petrology and geochemistry of basalt from the America Antarctic Ridge, Southern ocean : implications for the West-ward influence of the Bouvet mantle plume. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 90 (1985) 367 - 390
- [32] - X. BOESPFLUG, "Évolution Géodynamique et Géochimique des bassins arrière-arcs. Exemples des bassins d'Okinawa, de Lau, et Nord-Fidjien", Thèse, Université de Bretagne occidentale, (1992) 353 p.