

Caractérisation sédimentologique et géochimique des grès de Tohou et de Tado, Sud - Est Togo

Yawovi Zikpi AMOUDJI^{1*}, Gnanwasou ALAYI¹, Yawoa Dzidzo DA COSTA¹, Essodina PADARO¹, Kodjovi ZONDOKPO^{1,2} et Mahaman Sani TAIROU^{1,2}

¹ *Université de Lomé, Faculté des Sciences, Département de Géologie, Laboratoire de Géologie, 01 BP 1515 Lomé 1, Togo*

² *Université de Lomé, Faculté des Sciences, Laboratoire d'Hydrologie Appliquée et Environnement (LHAE), 01 BP 1515 Lomé 1, Togo*

(Reçu le 10 Octobre 2023 ; Accepté le 30 Novembre 2023)

* Correspondance, courriel : yamoudji@gmail.com

Résumé

L'objectif de cette étude est de faire une description des lithofaciès de la formation de Tohou et de Tado et d'identifier leur composition en éléments chimiques majeurs afin de déterminer leur provenance, le paléoclimat et l'influence des conditions d'altération. La méthodologie adoptée repose sur une étude géologique de terrain pour la collecte de données et un traitement au laboratoire au moyen de microscope et de spectromètre. Les résultats mettent en évidence deux unités géologiques séparées par une discordance de ravinement. L'unité inférieure est dénommée grès de Tado tandis que l'unité supérieure est appelée grès de Tohou. Les analyses sédimentologiques montrent que les lithofaciès décrits indiquent un environnement marin peu profond à influence fluviale. Les données géochimiques montrent que les sédiments proviennent de roches mères felsiques et sont mis en place sous un climat humide. Ces résultats, hormis les caractéristiques sédimentologiques et géochimiques qu'ils ressortent, constituent également une base de données pour une meilleure connaissance de la partie septentrionale du bassin sédimentaire côtier du Togo.

Mots-clés : *sédimentologie, géochimie, paléoenvironnement, Tohou et Tado.*

Abstract

Sedimentological and geochemical characterisation of Tohou and Tado sandstones, south-east Togo

The aim of this study is to describe the lithofacies of the Tohou and Tado formations and to identify their composition in terms of major chemical elements in order to determine their origin, the paleoclimate and the influence of alteration conditions. The methodology adopted is based on a geological field study for data collection and processing in the laboratory using a microscope and spectrometer. The results reveal two geological units separated by an erosional unconformity. The lower unit is known as the Tado sandstone, while the upper unit is known as the Tohou sandstone. Sedimentological analyses show that the lithofacies described indicates a shallow marine environment with fluvial influence. Geochemical data indicate that the

sediments are derived from felsic source rocks and were deposited in a humid climate. These results, apart from the sedimentological and geochemical characteristics they reveal, also constitute a database for a better understanding of the northern part of Togo's coastal sedimentary basin.

Keywords : *sedimentology, geochemistry, paleoenvironment, Tohoun and Tado.*

1. Introduction

Les formations géologiques de la partie émergée des bassins côtiers du Golfe de Guinée (Ghana, Togo, Bénin, Nigeria, Cameroun) ont fait l'objet de plusieurs études [1 - 6]. Ces dépôts d'origine soit marine ou continentale se présentent généralement sous forme de plateaux gréseux de couleur rougeâtre. Ils présentent des faciès généralement altérés dépourvus de fossiles stratigraphiques, ce qui pose un véritable problème en ce qui concerne leur origine et leur âge. C'est le cas des sédiments argilo-détritiques situés au Nord-Est de la limite septentrionale du bassin côtier du Togo [7], dénommés "Formation de Tohoun et de Tado" [8]. Ces dépôts, de par leur position isolée sur le socle ainsi que leur nature lithologique (fortement érodées), ont été rattaché au complexe sablo-argileux néogène du Continental terminal faute d'arguments stratigraphiques. Les récents travaux de recherches dans la région ont permis de les attribuer au crétacé supérieur [8] par corrélations lithostratigraphiques au grès d'Adakplamé [9]. Les grès d'Adakplamé étant le prolongement Est des grès de Tohoun et de Tado. En outre, dans ces grès s'exprime un dense réseau de fractures généralement représentées par des plans portant des "tectoglyphes" indiquant des jeux de failles, et comparables à ceux du socle panafricain sur lequel ils reposent [10]. De plus, les formations de Tohoun et Tado constituent un témoin des premières phases de développement du bassin sédimentaire côtier onshore [7]. Dans l'état actuel des connaissances sur ces formations, de nombreuses questions demeurent quant à leur nature pétrographique, à leur genèse et au cadre paléoenvironnementale. Ce qui explique cette initiative qui a pour objectif d'examiner la pétrographie et la géochimie de ces grès afin de déduire leur provenance, la paléo-altération et le cadre climatique à l'époque de leur dépôt.

2. Méthodologie

2-1. Présentation de la zone d'étude

Les formations sédimentaires étudiées débutent à l'Ouest du méridien $1^{\circ}36'$ et se prolongent jusqu'au Bénin. Le secteur est une pénéplaine dominée par deux îlots orientés E-W (*Figure 1*). Les altitudes les plus hautes (223 m) se rencontrent dans le secteur de Tohoun (Wagba et Lomnava-Kpotamé). Les îlots sont séparés par une dépression d'environ sept (7) kilomètres où affleurent les gneiss de l'unité interne de la chaîne panafricaine des Dahomeyides. Le principal cours d'eau de la zone est la rivière Elon (affluent du Mono) qui prend sa source au Bénin. Cette dernière rassemble les eaux descendantes des plateaux de Tohoun et de Tado. Le climat de la zone d'étude est de type Guinéen caractéristique du Sud Togo (températures élevées toute l'année avec des maximas (33° en Avril) et des minimas (28° en Septembre). La moyenne annuelle des précipitations est comprise entre 1200-1300 mm.

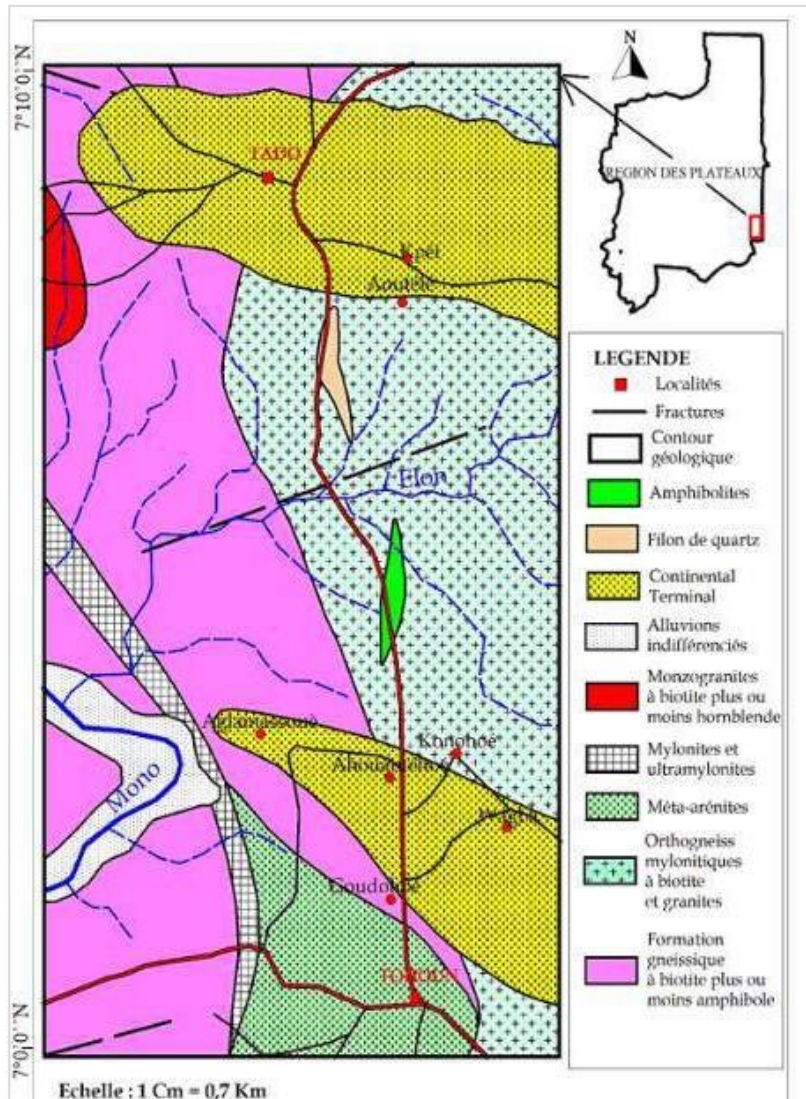


Figure 1 : Principaux ensembles géologiques de la zone d'étude d'après [8]

2-2. Cadre géologique

Les ensembles géologiques affleurants dans le secteur d'étude appartiennent à l'unité interne de la chaîne panafricaine des Dahomeyides et au bassin sédimentaire côtier du Togo. L'unité interne des Dahomeyides est composée de gneiss et migmatites issues de la remobilisation du panafricain (600 ± 50 Ma) et des granites calco-alcalins à fort teneurs de potassium d'âge Néoprotérozoïque [11, 12]. Le bassin sédimentaire côtier du Togo (**Figure 2**) est un ensemble de dépôts à faible pendage vers le Sud-Est et représentant une portion du bassin du Golfe de Guinée. La pile sédimentaire de ce bassin comprend deux mégaséquences : une mégaséquence marine et une mégaséquence continentale appelée Continental terminal [13]. Les séquences de dépôts sont regroupées en trois ensembles [14, 15].

- le Groupe de Tabligbo (Campanien-Eocène inférieur), comprend une formation détritique à la base (sable de base) et une formation carbonatée médiane (calcaire à Togocyamus) surmontée par une formation d'argilite feuilletée à palygorskite.
- le complexe phosphaté ou Groupe de Hahotoé-Kpogamé (Eocène inférieur à moyen) est composé d'une formation marno-phosphatée, d'une formation à phospharénites et d'une argilite phosphatée.

- la série détritique supérieure ou Continental terminal s.l. d'âge oligo-miocène à quaternaire, généralement azoïque, et d'origine continentale, et constituée d'une Formation regroupe une formation à Terriers (Oligocène supérieur-Miocène inférieur), surmontée d'une formation à Galets et puis de la Terre de Barre.

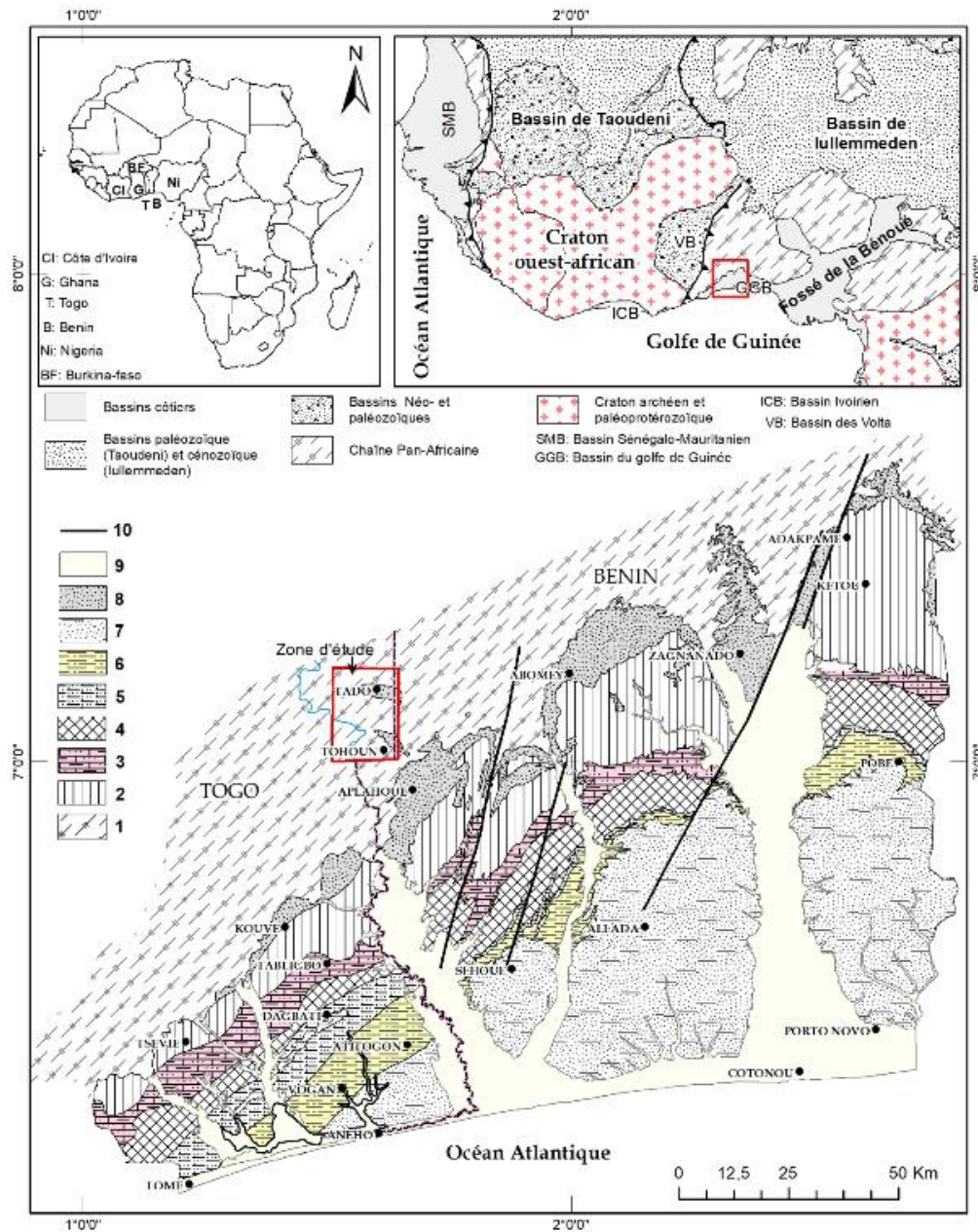


Figure 2 : Carte de localisation des grès de Tohou et Tado d'après [7]

1 = Socle panafricain ; 2 = Dépôts maastrichtiens ; 3 = Dépôts paléocènes ; 4 = Dépôts du Paléocène à l'Éocène inférieur ; 5 = Dépôts de l'Éocène inférieur ; 6 = Dépôts de l'Éocène moyen ; 7 = Dépôts de l'Oligocène-miocène ; 8 = Dépôts "continental terminal" ; 9 = Dépôts fluviolacustres et marins ; 10 = Fractures majeures.

2-3. Acquisition et traitement des données

Pour répondre à la problématique de cette étude, un travail de terrain a été effectué suivi des analyses de laboratoire. Le travail de terrain comprenait un échantillonnage des dépôts étudiés et une description géologique détaillée. Une coupe synthétique des dépôts a été présentée suivie de leurs conditions de mise en place. Au laboratoire, l'étude pétrographique des lithofaciès a été réalisée en microscopie optique à partir de sept (7) échantillons afin d'étudier la texture, la granulométrie et les éléments constitutifs de la roche. Les observations ont été faites en lumière polarisée analysée. Les analyses géochimiques ont été faites à partir de neuf (09) échantillons de roches sélectionnés. Ces analyses ont été menées au laboratoire de géologie de l'Université de Lomé (Togo). Les échantillons sélectionnés sont séchés à l'étuve à 105°C pendant 24 heures. Ils sont ensuite broyés à 45µm à l'aide d'un broyeur de marque ROCKLABS. La confection des perles d'analyse s'est faite à partir de 1 g de l'échantillon à analyser et 9 g de fondant au Tétraborate de Lithium. Le tout est homogénéisé puis transformé en verre à l'aide de la perleuse de marque xrFuse 2. L'analyse des oxydes chimiques des échantillons étudiés est réalisée à partir des perles obtenues. Ces dernières sont soumises aux rayonnements X sous vide dans le spectromètre de marque S6 Jaguar Bruker. Les résultats d'analyse sont traités par le programme SmartQuant. Les études géochimiques basées sur les données des éléments majeurs (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, K₂O, Na₂O, TiO₂, P₂O₅ et CO₂) ont été réalisées sur les échantillons sélectionnés. Les résultats obtenus ont permis de réaliser des diagrammes géochimiques afin de déterminer l'origine, le degré d'altération de la roche mère ainsi que leurs caractéristiques paléoclimatiques.

3. Résultats et Discussion

3-1. Caractérisation sédimentologique

La formation de Tohoun et de Tado présente deux niveaux : un niveau inférieur (grès de Tado) rougeâtre et généralement friable surmonté d'un niveau supérieur massif et compact (grès de Tohoun). Ces deux niveaux sont séparés par une discontinuité de ravinement qui est une surface durcie (*Figure 3, A et B*).

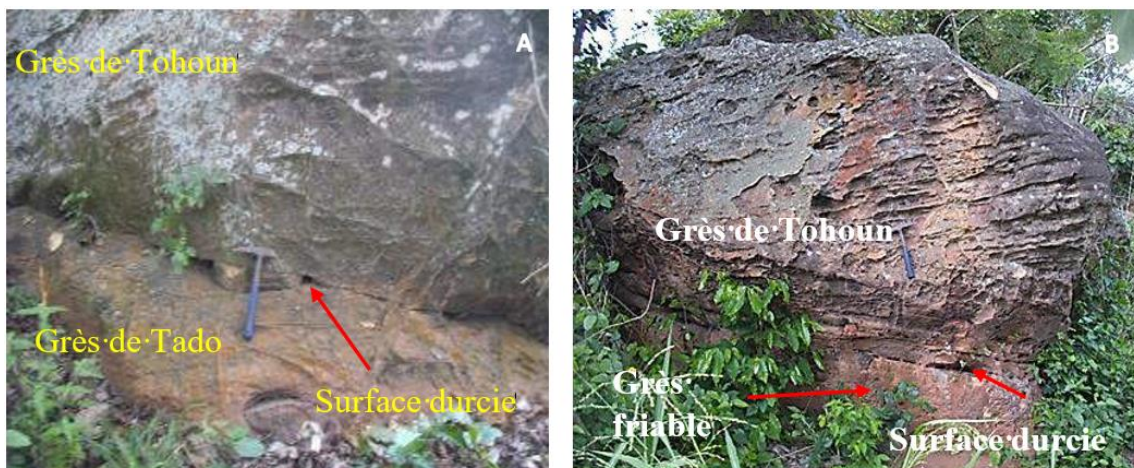


Figure 3 : A- Surface de discontinuité qui sépare les grès de Tohoun et de Tado. B- Bloc montrant les mégastratifications obliques et entrecroisées des grès de Tohoun

3-1-1. Grès de Tado

La formation de Tado repose en discordance fondamentale sur le socle panafricain. Ce socle comprend des granites et granodiorites à biotite et amphibole constitué de plagioclase, quartz, feldspath potassique, biotite, amphibole et accessoirement, les épidotes, le sphène, l'apatite et le zircon. Dans les grès de Tado, quatre lithofaciès sont distingués.

➤ **Faciès T1 : Grès conglomératiques roses**

Le faciès de grès conglomératique rose est constitué de galets de quartz de diverses tailles baignant dans une matrice à grain fin et moyen de couleur rose (**Figure 4A**). Ce niveau affleure sur la route de Konohoé-Lomnava, au Nord d'Ahouantéhoé et plus à l'Est à Wagba (échantillon T1'). Il constitue le contact entre la formation de Tado et du socle dans le secteur de Tohoun. En lame mince (**Figure 4B**), la roche est composée de feldspaths ou de fragments lithiques qui se distinguent facilement du quartz par leur aspect zoné (zonation), due à l'altération chimique. Le quartz, plus clair et non altéré, avec une extinction ondulante. La matrice contient des minéraux opaques, probablement de l'oxyde de fer. C'est un grès feldspathique à matrice ferrugineuse, de texture hétérogranulaire à grains non jointifs.

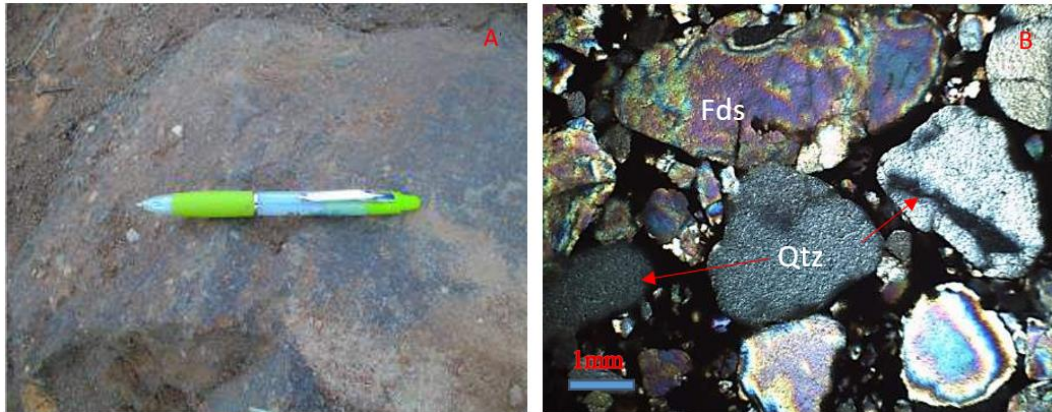


Figure 4 : A- Bloc de grès conglomératique ferrugineux à quelques mètres des amphibolites du socle ; B- Microphotographie en lumière polarisée des grès ferrugineux. Qtz = Quartz ; Fds = Feldspath

➤ **Faciès T2 : Grès violacés et tachetés**

Rougeâtre à violacé avec des tâches de ferruginisation, ce faciès de grès fin lité (**Figure 5, T2 et T2'**) alterne avec un grès fin à moyen finement lité, argileux, faiblement consolidé, de couleur jaunâtre à rougeâtre (**Figure 5, T3 et T3'**). Le microfaciès de ces grès violacés est caractérisé par une abondance de grains de quartz anguleux de la taille du microns ; limpides en Lumière Polarisée et non Analysée (LPNA) et colorés en de diverses teintes de gris en Lumière polarisée analysée (LPA). La roche contient aussi des oxydes et des fragments lithiques. Les oxydes sont de grande taille et sont entourés par plusieurs éléments qui forment une couronne. La forme pseudo-hexagonale de ces oxydes laisse supposer qu'ils seraient des cristaux de magnétite.

➤ **Faciès T3 : Grès fins à moyens rougeâtres**

Ce faciès est très répandu dans tout le secteur d'étude. Il affleure en dessous des grès de Tohoun et subaffleure tout au long des routes Goudohoé-Ahouantéhoé et de Konohoé- Lomnava Kpotamé ; par endroit dans les villages de Wagba et Aglamassoè et recouvre tout le secteur de Tado (faciès T3 et T3' du puits de Kpéi ; **Figure 5 A et B**). Le faciès est un grès fin à moyen et à lamines faiblement obliques et finement lités, de couleur jaunâtre à rougeâtre à altération brune ou rouille. Ces grès sont micacés à rares granules de quartz hétérogènes, millimétriques, parfois centimétriques et subanguleux ; ils renferment de fins lits ferrugineux et sont parfois traversés de filonnets oxydés. Ils présentent à leurs surfaces des marques de ruissellement dénommées rill marks (**Figure 5B**). Le microfaciès (**Figure 5, C et D**) montre des éléments figurés constitués essentiellement de grains de quartz émoussés. Les fragments lithiques sont rares ou absents. Les oxydes sont présents dans la matrice et à la surface des grains de quartz. Les grains de grande taille sont subarrondis à subanguleux alors que les éléments de la taille des sables-silteux sont anguleux. Le sédiment est peu cimenté, si bien que des espaces poreux importants subsistent donnant un aspect tacheté en LPNA et noir en LPA. La roche a subi un tassement ce qui fait que certains grains portent des microfractures.

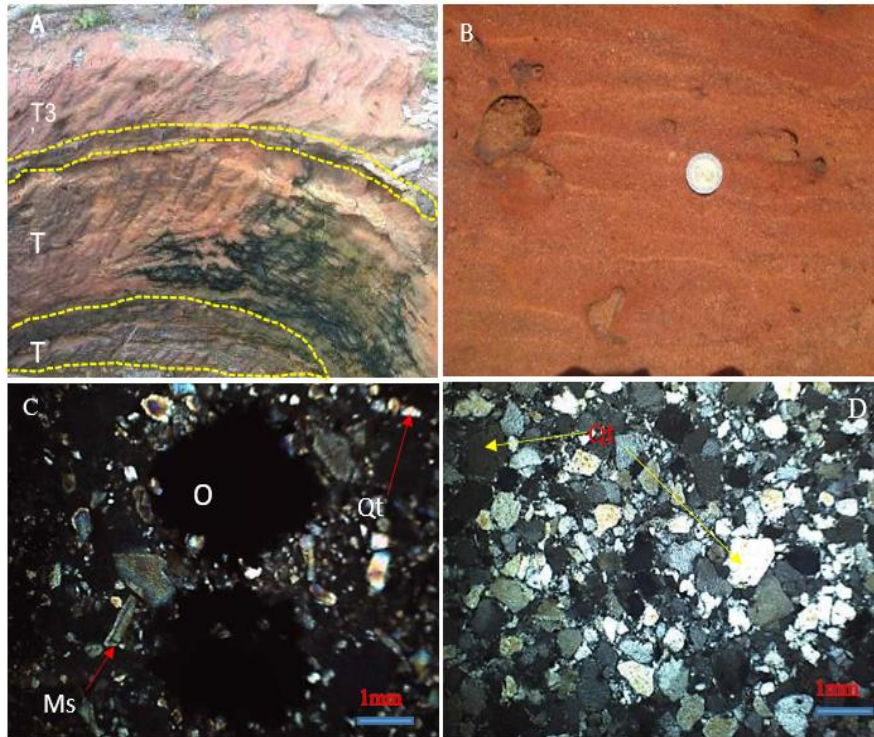


Figure 5 : *A- puits de Kpéi. T2 et T2' – grès tachetés ; T3- grès fins rougeâtres faiblement lités ; T3'- grès fins rougeâtres à lamines faiblement obliques ; B- Grès rougeâtres et lités portant les rill marks. C- Observations pétrographiques des grès tachetés (T2 et T2') ; D- microfaciès de T3 et T3' ; Qtz- Quartz ; Fds- Feldspath ; Ox- Oxydes ; Msc- muscovite*

Ce sont des grès quartzeux ou arénites quartzueuses à matrice ferrugineuse et à texture hétérogranulaire à grains jointifs[16]. Ces grès correspondent à un sédiment d'aspect homogène reflétant une sédimentation lente (granulométrie fine). Le principal processus sédimentaire à l'origine de la mise en place de ce faciès serait celui des dépôts par décantation. Il s'effectue lorsque les actions hydrodynamiques interviennent peu et autorisent la chute lente de particules vers le fond sans transport horizontal ou oblique brutal. Les figures de ruissellement (rill marks) généralement observées lors du retrait des eaux sur les plages ou lors de phénomènes de ruissellement subaérien sur des sédiments fins présents à la surface de ces grès suggèrent un milieu littoral (plage) pour ces grès.

➤ ***Faciès T4 : Argilite ferrugineuse et cuirassée***

Ce faciès subaffleure en lentilles discontinues dans le village de Tado (**Figure 6A**). Il est constitué d'une argilite feuilletée et cuirassée, jaunâtre à rougeâtre qui repose sur un grès fin moyen rougeâtre (faciès T3). Vers l'Est, dans le village de Kpéi, on observe une cuirasse ferrugineuse présentant des concrétions noirâtres isolées et des taches jaunes (**Figure 6B**). Ces faciès n'affleurent pas au sommet des grès de Tado dans le secteur de Tohoun. Il serait probablement érodé ou constituerait un non dépôt. L'environnement marin est confirmé par la présence des argilites feuilletées au toit de ces grès.

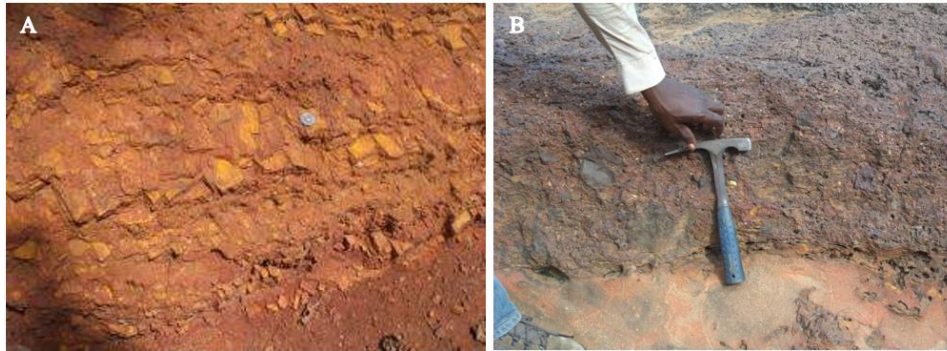


Figure 6 : *Faciès cuirassés des grès de Tado. A. Argilites feuilletées et cuirassé de Tado ; B- Niveau cuirassé des grès de Tado dans le village de Kpéi*

3-1-2. Les grès de Tohoun

3-1-2-1. Membre inférieur des grès de Tohoun

Il réunit les faciès T5 et T6.

❖ *Faciès T5 : Grès conglomératiques*

Ce faciès repose sur la surface de ravinement séparant les grès de Tohoun et de Tado. Ce sont des grès conglomératiques ferrugineux de couleur jaunâtre à rougeâtre à galets hétérogènes et anguleux pluri centimétriques. Ces grès sont parfois associés à des galets de quartz sans granoclasement baignant dans une matrice grés-argileuse dépourvues de structures sédimentaires. Il s'observe à la base de la pile sédimentaire. Ce niveau atteste un régime hydrodynamique élevé et un transport court du fait de la composition pétrographique, de la morphoscopique (grains subanguleux ; galets grossiers), de l'hétérogénéité des blocs et l'absence de granoclasement.

❖ *Faciès T6 : Grès fins à galets de grès microconglomératiques*

Ces grès sont constitués de grains fins à moyens hétérogènes, massifs plus ou moins lités, de couleur beige, à altération saccharoïde, parfois grisâtre (**Figure 7 A et B**) et présentant un débit en bloc. Ils sont marqués par un enchevêtrement de filonnets cicatrisés par un grès siliceux (**Figure 7D**) et traversés par des stratifications obliques. La stratification est parfois masquée ou recoupée par les filonnets et de structures probablement origines algaires (stromatolites ?), qui sous l'effet de l'altération puis de l'érosion, créent des cavités particulières de taffonis (**Figures 7C**).

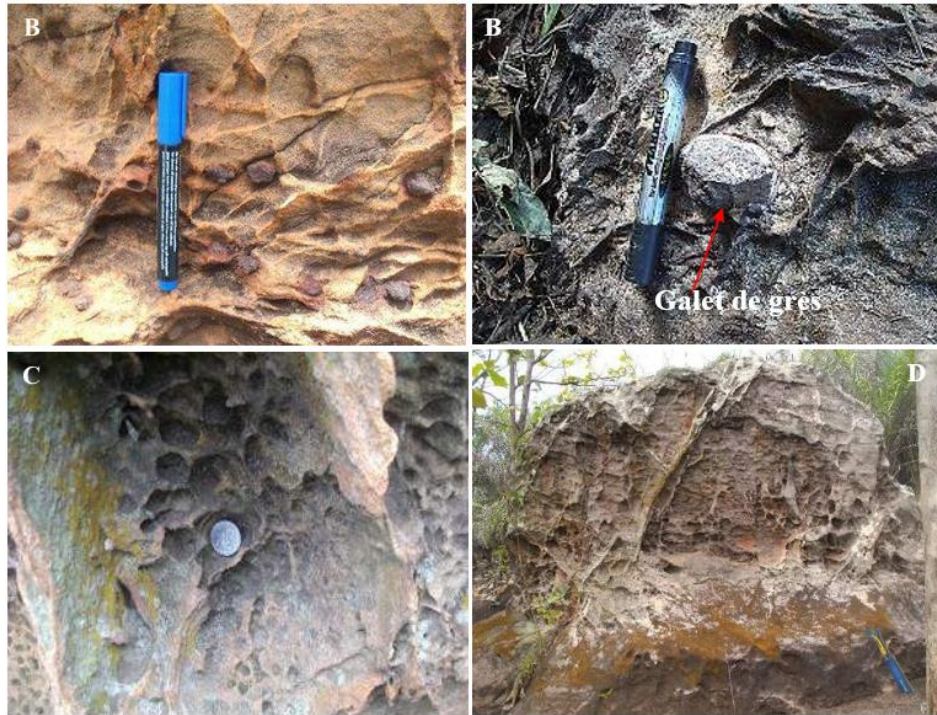


Figure 7 : *Membre inférieur des grès de Tohoun. A- Grès à galets de grès microconglomératiques ferrugineux ; B- galets de grès ; C- détail de la base de grès fins à galets de grès microconglomératiques et D- faciès à galets de grès microconglomératiques ferrugineux*

Le microfaciès (**Figure 8A**) de ces grès montre des éléments figurés constitués essentiellement de quartz subanguleux à anguleux, des oxydes et quelques rares fragments lithiques. Les grains sont à granulométrie moyenne et mal classés. Ils portent des microfractures et des pores remplis parfois d'oxydes. C'est un grès quartzueux à texture hétérogranulaire et à grains jointifs. L'analyse pétrographique des galets de grès contenus dans ce faciès (**Figure 8B**) correspond à un grès quartzueux à ciment ferrugineux (grains de quartz anguleux et un ciment ferrugineux) et à texture hétérogranulaire à grains non jointifs. Ces grès seraient probablement immatures. La présence de grains de quartz centimétriques anguleux dans ces grès implique que la roche mère distributrice n'est pas loin ou le continent est proche. La présence des galets de grès ferrugineux témoigne d'une érosion ou d'un démantèlement d'anciens grès sur le continent. Les faciès 5 et 6 composent le membre inférieur des grès de Tohoun. Les structures algaires donnant l'aspect des stromatolites du membre inférieur, très rarement signalés dans les faciès gréseux sont caractéristiques des zones supratidales à intertidales.

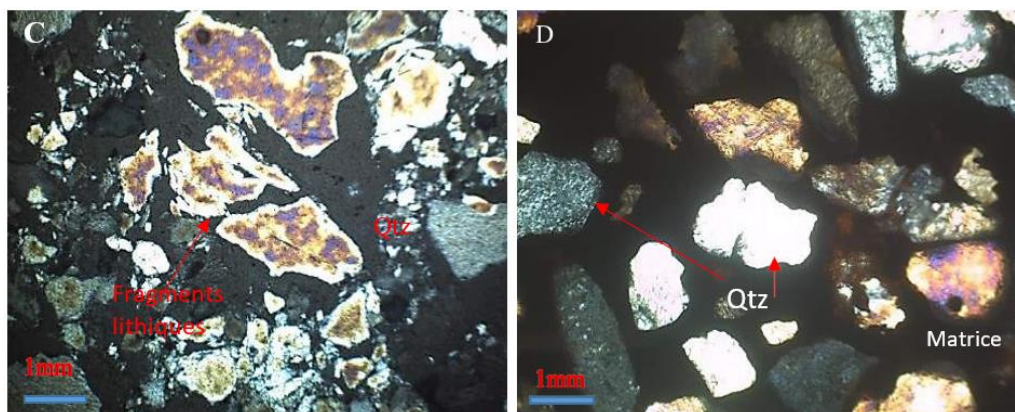


Figure 8 : *Observations pétrographiques respectives du faciès T6 et des galets de grès. Qtz = Quartz*

3-1-2-2. Membre supérieur des grès de Tohoun

Il est composé des faciès T7 à T11. Ce membre s'organise en bancs décimétriques à métriques séparés par des surfaces de discontinuités ou surfaces d'érosion et sont marqués par des stratifications obliques et entrecroisés. Ils sont traversés par un enchevêtrement de filonnets cicatrisés par un grès siliceux et n'affleurent que dans le secteur de Tohoun. Ce sont des grès fins à moyens, finement lités, plus ou moins argileux à galets de quartz millimétriques à centimétriques, anguleux de couleur grisâtre à jaunâtre (**Figure 9, A et B et Figure 10, A et B**). Ce faciès est suivi de grès moyens et grossiers microconglomératiques, massifs plus ou moins lités et de couleur gris clair à altération saccharoïde (faciès T8 à T11 ; **Figure 10, A et B ; Figure 9C**). En lame mince ces grès sont caractérisés par l'abondance de deux types de grains de quartz (**Figure 9, C et D**) : des grains de quartz montrant des couleurs de biréfringence hétérogènes (grains polycristallins) et des grains à couleurs de biréfringence homogènes (grains monocristallins). Ces grains de quartz sont généralement anguleux à subanguleux et présentent des microfractures (**Figure 9D**). Ils sont associés à quelques rares fragments lithiques et à des oxydes. Ce sont des grès quartzeux à texture hétérogène et à grains jointifs ayant subi un tassement modéré (contacts linéaires et concavo-convexes).

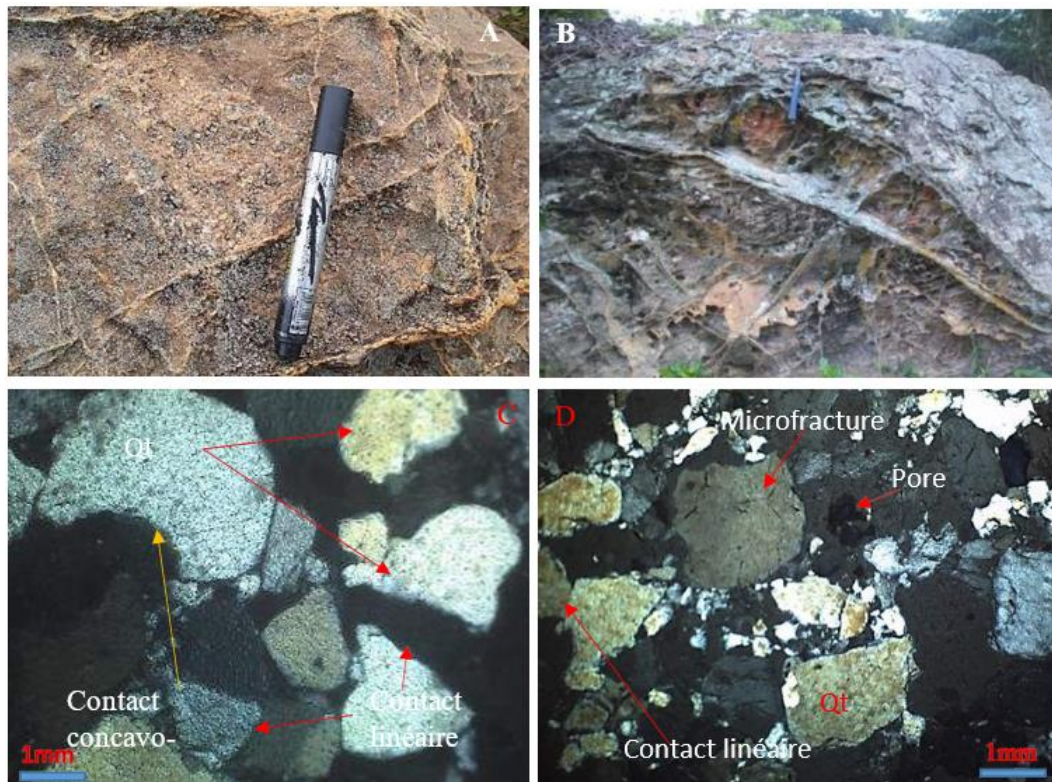


Figure 9 : A et B. Grès microconglomératiques à enchevêtrements de filonnets du membre supérieur et microfaciès montrant : C- forme et les contacts entre les grains de quartz ; D- les microfractures ; Qt = Quartz

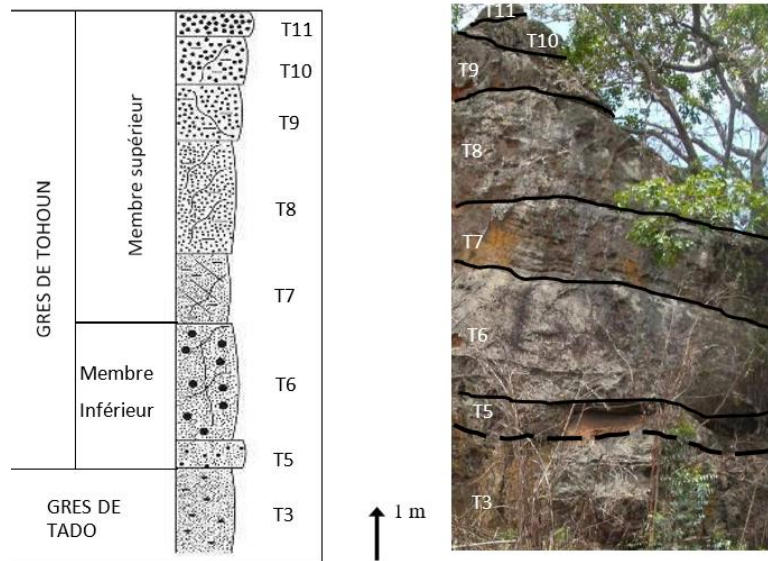


Figure 10 : Formation de Tohoun et Tado dans le secteur de Tohoun. A- coupe schématique ; B- Photo illustrant les différents faciès ; T3. Grès fins rougeâtre ; T5. Niveau conglomératique ; T6. Grès à galets gréseux ; T7. Grès fins et moyens à galets de quartz ; T8. Grès moyens plus ou moins lités ; T9. Grès fins à grossiers ; T10. Grès moyens à grossiers ; T11. Grès grossiers argileux

3-2. Caractéristiques géochimiques

Le tableau ci-dessous (**Tableau 1**) présente les résultats des analyses chimiques des échantillons sélectionnés. Il ressort que, le SiO_2 (variant de 75 à 99 %) est l'élément majeur le plus abondant. Le fer (1 à 32%) et l'aluminium (0 à 10%) ont des teneurs moyennes. Le potassium (0 à 0,21 %), le sodium (0 à 0,63 %), le titane (0 à 0,92 %), le phosphore (0 à 0,28%) ont de faibles teneurs alors que le manganèse, le magnésium et le calcium ont de très faibles teneurs. A l'exception des grès de Tado (échantillons T1 à T3), tous les échantillons (T6 à T10) des grès de Tohoun présentent une teneur en Al_2O_3 très faible (0 à 0,4 %). Cet appauvrissement en Al_2O_3 peut être attribué à la plus grande quantité de grains de quartz détritiques dans ces grès, ce qui est cohérent avec les preuves pétrographiques. La concentration de Na_2O est relativement faible pour tous les échantillons étudiés. Tous les échantillons de grès de la formation de Tohoun sont pauvres en K_2O alors que certains échantillons de Tado en contiennent une faible quantité. Ceci prouve la dominance du feldspath riche en K dans leur composition minérale. En outre, le rapport $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ pour tous les types de grès est supérieur à 1, pour les grès de Tado, et inférieur 1 pour les grès de Tohoun. Ceci qui confirme fortement la prédominance de la teneur en feldspath riche en K dans les grès de Tado et une prédominance des feldspaths sodiques dans les grès de Tohoun.

Tableau 1 : Concentrations d'éléments majeurs des grès de Tohoun et Tado.

sample name	SiO2 %	Al2O3 %	Fe2O3 %	MgO %	CaO %	Na2O %	K2O %	TiO2 %	MnO %	P2O5 %	Al2O3 /SiO2	SiO2/ Al2O3	CIA	EFVP	ICM
T1	65,22	2,21	32,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	34,04	100	100	100
T6	98,91	0,00	0,88	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0
T2	80,72	10,01	8,11	0,00	0,00	0,11	0,12	0,92	0,00	0,00	0,12	8,06	97.75	98.90	98.91
T3	76,18	5,37	17,89	0,00	0,00	0,14	0,21	0,00	0,00	0,21	0,07	14,19	93.88	97.35	97.45
T7	98,59	0,22	0,91	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,002	448,1	44.89	44.89	48.89
T8	98,17	0,77	0,42	0,00	0,00	0,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,008	127,5	55	55	55
T9	97,62	0,40	1,75	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,12	0,004	244,1	78.43	78.43	78.43
T10	98,74	0,00	1,11	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0
T1'	75,67	0,80	22,87	0,00	0,00	0,38	0,00	0,00	0,00	0,28	0,01	94,59	67.79	67.79	67.79

CIA : Indice chimique d'altération, *EFVP (PIA)* : Indice d'altération des plagioclases, *ICW* : Indice d'estimation des conditions d'altération. $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$; $EFVP (PIA) = [(Al_2O_3 - K_2O) / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O)] \times 100$; $ICM = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O)] \times 100$.

3-3. Origine et Environnement de dépôt

La moyenne globale de SiO_2 (87,76 %) implique que tous les grès sont riches en minéraux silicatés. Ces grès proviendraient soit d'une formation riche en silice, soit d'un socle granito-gneissique altéré ou d'une formation sédimentaire préexistant [17]. La plupart des lames minces étudiées montrent des grains de quartz ayant des couleurs de biréfringence hétérogène. Ce phénomène d'extinction ondulante est caractéristique des quartz d'origine métamorphique. Les grains de quartz qui sont dépourvus d'extinction roulante seraient d'origine magmatique. La diversité des grains de quartz de cette formation montre qu'ils proviennent de diverses origines notamment de l'altération des roches du socle (gneiss et granites) affleurants à proximité des dépôts étudiés. La présence de grains anguleux et subanguleux avec des feldspaths dans les sédiments confirme un milieu de sédimentation proche de la source pourvoyeuse. Les grains de quartz sub-émoussés luisants indiquent un transport relativement long et proviendraient du remaniement des conglomérats de base ou des premiers dépôts du bassin (galets de grès inclus dans les grès de Tohou). Ces reprises de sédimentation et d'individualisation des faciès ont été signalés plus tôt dans le bassin sédimentaire du Mounjo au Cameroun de l'ouest [18]. Ce qui permet de penser que l'évolution de ces grès s'est faite en plusieurs phases de transport ou de remaniement dont la dernière serait la mise en place dans le milieu côtier. Ces mêmes observations ont été faites dans les grès du bassin onshore de Côte d'Ivoire [19]. La cimentation de ces grès, serait faite par la précipitation des minéraux authigènes d'oxyde de fer comme les beach-rocks du plateau continental de la Côte d'Ivoire [16, 20]. La projection des données géochimiques dans le diagramme des fonctions discriminantes d'éléments majeurs de [21 - 23] (**Figure 11**), montre que la provenance des grès étudiés peut s'expliquer par un système sédimentaire dominé par des détritiques provenant de terrains granito-gneissiques recyclés, fortement altérés et/ou de matériaux sédimentaires de terrain préexistants. Ces résultats sont similaires à ceux de [24, 25] et concordantes aux données pétrographiques. Le diagramme ternaire $Fe_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2$ montre une faible fraction en Al_2O_3 des grès étudiés tandis que l'espace $Fe_2O_3 - Al_2O_3 - MgO$ montre que les sédiments ont deux origines (magmatique et sédimentaire) (**Figures 11 et 12**).

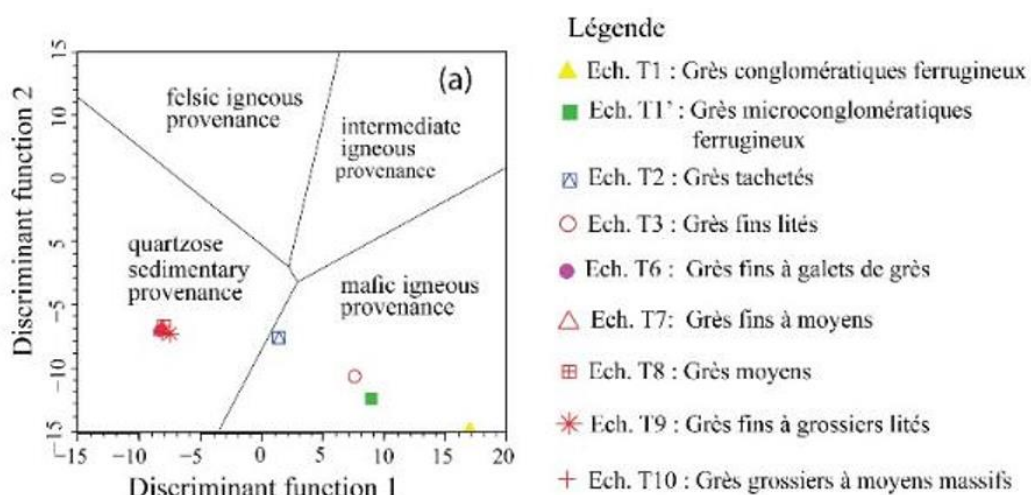


Figure 11 : Diagramme de discrimination de provenance pour les grès de Tohou et Tado d'après [21]

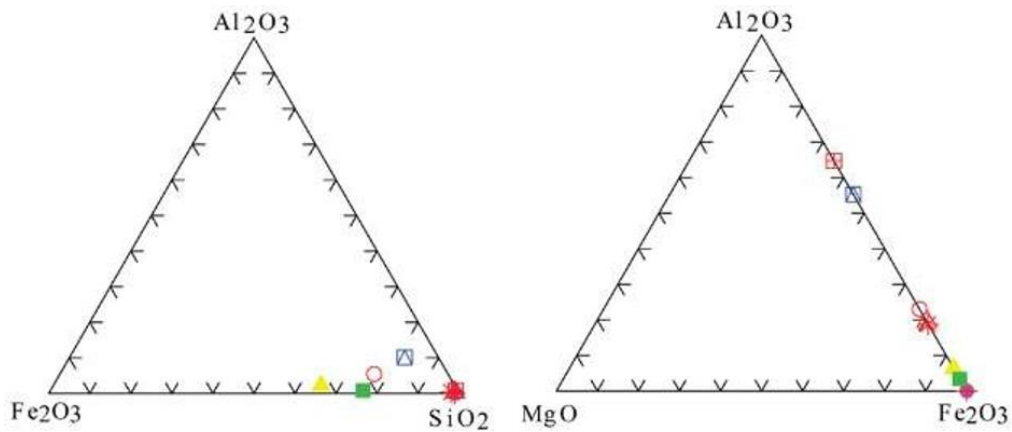


Figure 12 : Diagrammes ternaires comparatifs des caractéristiques géochimiques

Les méga stratifications obliques et entrecroisées observées dans les grès de Tohoun seraient liées à un courant bidirectionnel ou à un milieu de faible énergie, mais agité [18, 26]. Quant aux argilites feuilletées et rills marks des grès de Tado, elles évoqueraient respectivement un milieu profond et une plage. Ces faciès s'organisent en séquence négative débutant par des grès fins et moyens devenant plus grossiers vers le sommet. Ce type de granoclassement inverse résulterait de la progression d'une ligne de rivage dans un bassin [26]. Le granoclassement inverse s'inscrit dans une période régressive ; on peut aussi l'observer lorsqu'une rivière chargée de sédiments pénètre dans l'eau dense de la mer ou d'un lagon [27]. La dissémination des galets de quartz anguleux dans l'unité supérieure traduit une influence fluviale permettant à des matériaux de granulométrie différente à se déposer ensemble. Ces sédiments auraient subi de courts transports puis déposés sans tri de façon brutale par des courants qui perdaient leur capacité de transport [16]. La formation de Tohoun et Tado est caractérisée par une sédimentation détritique terrigène dans un environnement côtier de mer peu profonde à influence fluviale. Les résultats géochimiques des éléments majeurs révèlent que les grès de Tohoun présentent des teneurs élevées en SiO₂ ($65,22 \leq \% \text{SiO}_2 \leq 98,91$). Ces teneurs reflètent l'enrichissement en quartz des échantillons étudiés suivant les critères de [28]. Ces sédiments ont donc une maturité chimique élevée étant donné que la maturité chimique est définie par le caractère prédominant des grains figurés par rapport à la composante de la matrice et du ciment [19]. Par ailleurs, un rapport SiO₂/Al₂O₃ supérieur à 5 ou 6 dans les roches sédimentaires fournit des preuves de maturation sédimentaire [21]. Dans les dépôts étudiés, la valeur moyenne du rapport SiO₂/Al₂O₃ est d'environ 107, ce qui est significativement élevé, indiquant des sédiments très matures [29]. La dominante des arénites quartzieuses identifiées sur les lames minces est un critère supplémentaire pour leur maturité élevée [25]. De plus, les échantillons étudiés ont révélé des conditions environnementales humides avec une maturité chimique élevée [17]. **(Figure 13)**. La nature ferrugineuse et silicifiée de la formation de Tohoun et Tado est en accord avec le climat type tropical humide qui prévalait pendant la période du Crétacé supérieur. Des résultats similaires ont été obtenus dans les sables campaniens et Maestrichtiens du Togo, au Sénégal et au Niger [30, 31].

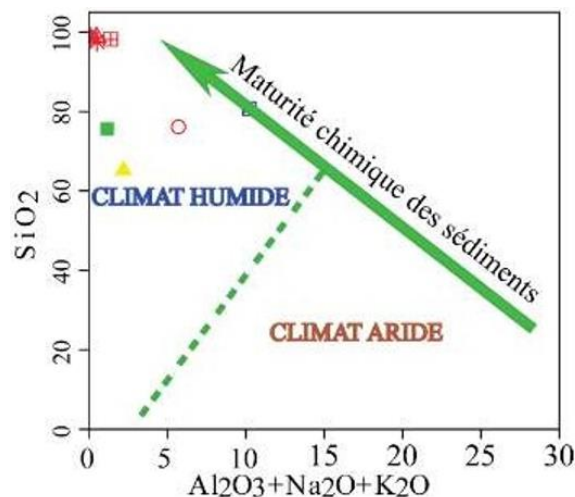


Figure 13 : Caractérisation du climat de l'environnement de dépôt des sédiments de la formation de Tohoun et Tado, déduites des échantillons projetés dans le diagramme de [17]

En outre, les faibles teneurs en Al_2O_3 , K_2O et en P_2O_5 (0,28 %) implique un apport terrigène considérable et une faible productivité du milieu de dépôt. Il s'agirait donc d'un milieu peu favorable à la prolifération des organismes vivants. Ce qui est confirmé par l'absence de fossiles dans ces formations. Des phénomènes similaires ont été observés au Cameroun [18].

3-4. Altération des roches sources

Pour analyser les Paléo-altération des roches sources, les indices chimiques d'altération (CIA), d'altération de plagioclase (PIA) et d'estimation des conditions d'altération (ICW), proposé [32, 33]. Ces indices ont également permis de déduire la nature et le degré d'altération chimique subi par les roches dans leur zone de provenance. Dans les dépôts étudiés, ces valeurs sont pour la plupart supérieures à 70 %, indiquant une altération intermédiaire à intense soit à la source, soit pendant le transport avant le dépôt. De plus, les fortes valeurs de PIA comprises entre 97 et 100, traduiraient une altération intense du plagioclase dans la zone source ; ce qui occasionnerait une faible teneur en Na_2O , K_2O et CaO . Cela implique qu'avec l'altération chimique croissante, les sédiments sont progressivement appauvris en plagioclases et enrichis en minéraux argileux alumineux secondaires [34, 35]. Généralement les teneurs en Ca, Na et K sont contrôlées par les feldspaths. Ainsi une forte déplétion en CaO , Na_2O et K_2O suggérant en outre une destruction du plagioclase sous l'effet de l'altération de la roche source ou pendant le transport du sédiment. L'existence de très faibles teneurs de Na_2O ($0,11\% \leq Na_2O \leq 0,63\%$) et de K_2O ($0,00\% \leq K_2O \leq 0,21\%$) toutes inférieures à 1%, implique un rapport de K_2O/Na_2O inférieure à 1. Ce qui suggère la présence d'une concentration plus élevée de feldspath sodique dans les roches sources. Ce type d'altération est soutenu par le digramme [35] (Figure 14). La valeur de CIA comprise entre de 0 et 60% indique que les roches sources de ces sédiments ont été soumises à des conditions faiblement altérantes. Ces conditions sont : (1) soit caractérisées par un relief, initialement plus ou moins abrupt, ayant favorisé beaucoup plus l'altération mécanique que chimique, mais qui aurait par la suite évolué vers un relief à pentes faibles, (2) soit par un climat peu altérant à faible température et à forte humidité [31]. Toutes ces caractéristiques permettent de penser que l'évolution de ces sables s'est faite en plusieurs phases de transport ou de remaniement dont la dernière serait la mise en place dans le milieu côtier. Après la mise en place des grès de Tado, les dépôts auraient été soumis à une forte altération pédogénétique provoquant la formation des niveaux cuirassés présents au toit de ces grès. Le cuirassement au sommet de ces couches témoigne d'une émergence à la fin de cette formation. Des phénomènes similaires ont été décrit au sommet de la formation sableuse du groupe de Tabligbo dans le bassin sédimentaire côtier

du Togo [15]. Une seconde période d’immersion d’énergie moyenne à modérée et interrompue par des périodes d’arrêt de sédimentation (discontinuité) a mis en place les grès de Tado sous un climat chaud et humide. Au cours de cette période, la faible profondeur du niveau marin aurait entraîné la mise en place d’un système fluvial drainant les sédiments du socle dans le bassin (nature des grains et présence de fragments lithiques). L’oxydation et le cuirassement seraient donc à l’origine des teneurs élevées en oxyde de fer ($8 \% \leq Fe_2O_3 \leq 32,57\%$) dans les échantillons des grès de Tado alors que l’absence de P_2O_5 et TiO_2 de la plupart des échantillons des grès provient du tri hydraulique qui influence de manière significative la composition chimique des sédiments [36]. Ces faibles valeurs peuvent être également la conséquence d’une forte altération et érosion (nature des grès de Tohou) causées par l’intense fracturation qu’ils enregistrent [7, 8, 10]. Ceci est confirmé par les faibles teneurs observées en Na_2O , MnO , K_2O et CaO indiquant une altération et un recyclage intenses subis par les sédiments étudiés [37].

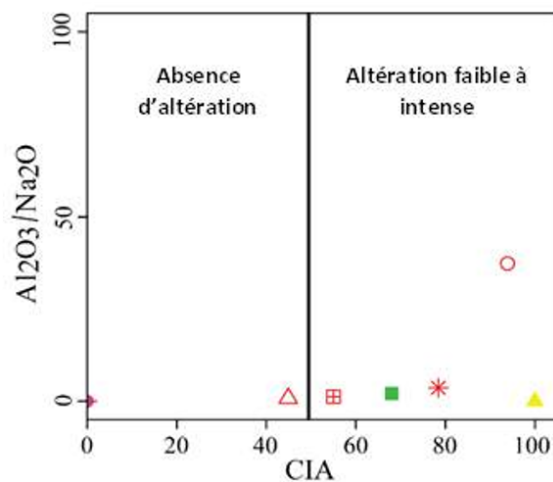


Figure 14 : Diagrammes théoriques des conditions de paléaltération Al_2O_3/Na_2O versus CIA d’après [35]

4. Conclusion

Les analyses lithostratigraphiques et sédimentologiques détaillées réalisées sur les grès de Tohou et de Tado met en évidence deux unités lithologiques discordantes : les grès de Tado et les grès de Tohou. Les données pétrographiques indiquent que la Formation de Tohou et de Tado est constituée essentiellement de grès quartzeux ou arénites quartzeuses ayant subi une diagenèse modérée. Ces grès ont été mis en place dans un milieu littoral. Les données géochimiques ont permis de déterminer un climat humide avec une maturité chimique élevée des sédiments. Les principaux ratios et diagrammes de provenance suggèrent que les sédiments ont été dérivés de roches mères felsiques. Les valeurs des indices d’altération (CIA, PIA et ICW) suggèrent des conditions d’altération faibles à extrêmes dans la zone source et/ou pendant le transport.

Références

- [1] - F. K. BEMPONG, B. M. OZUMBA, V. HOTOR, B. TAKYI and C. S. NWANJIDE, "A Review of the Geology and the Petroleum Potential of the Cretaceous Tano Basin of Ghana," *J. Pet. Environ. Biotechnol.*, Vol. 10, N°1000395 (2019) 8 p.
- [2] - P. Y. D. DA COSTA, J. MEDUS, R. FLICOTEUX and J. SALAJ, "Biostratigraphie de la bordure septentrionale du bassin côtier togolais. Apport des données palynologiques et structurales. Biostratigraphy of the northern edge of the Togo coastal basin : contribution of palynological and structural datas," *Rev. Cames*, Vol. 01, N°3, (2013) 6 - 20 p.
- [3] - Y. Z. AMOUDJI, G. GUINOT, L. HAUTIER, K. E. KASSEGNE, N. CHABROL, A.-L. CHARRUAULT, A. K. C. JOHNSON, R. SARR, P. Y. D. DA COSTA & J. E. MARTIN, "New data on the Dyrosauridae (Crocodylomorpha) from the Paleocene of Togo". *Annales de Paléontologie*, 107 (2) (2021) 102472, <https://doi.org/10.1016/j.annpal.2021.102472>
- [4] - K. B. B. I. O. OUMAROU, C. KAKI and G. A. FRANCK, "Pétrographie et environnements de dépôt des calcaires paléocènes du bassin sédimentaire côtier du Bénin Résumé," Vol. 13, N°5 (2017) 422 - 438 p.
- [5] - I. O. ADELABU, S. A. OPELOYE and O. A. OLUWAJANA, "Petrography and geochemistry of Paleocene-Eocene (Ewekoro) limestone, eastern Benin basin, Nigeria: implications on depositional environment and post-depositional overprint," *Heliyon*, Vol. 7, N°12, (2021) e08579 p., doi : 10.1016/j.heliyon.2021.e08579
- [6] - I. V. HARUNA, H. A. AHMED and A. S. AHMED, "Geology and tectono-sedimentary disposition of the Bima sandstone of the Upper Benue Trough (Nigeria) : Implications for sandstone-hosted Uranium deposits," *J. Geol. Min. Res.*, Vol. 4, N°7, (2012) 168 - 173 p., doi : 10.5897/JGMR12.008
- [7] - E. PADARO, M. S. TAIROU, Y. D. DA COSTA and Z. Y. AMOUDJI, "Evidence of Atlantic Extension in South-East Togo : Case of Fracturing in the Sandstone Relics of Tohou," *Int. J. Geosci.*, Vol. 12, N°05 (2021) 517 - 530 p., doi : 10.4236/ijg.2021.125028
- [8] - Y. Z. AMOUDJI, "Caractérisation des dépôts gréseux de Tohou et de Tado," N° 80 (2017) 1 - 47 p.
- [9] - P. AFFATON, A. HOUESSOU and G. GOMEZ, "La formation d'Adakplamé (Bénin, Ouest-Afrique) n'appartient pas au Continental Terminal," *J. African Earth Sci.*, Vol. 3, N°3 (1985) 359 - 364 p, doi : 10.1016/0899-5362(85)90009-0
- [10] - O. S. AKAKPO, "Etude comparée de la fracturation socle / couverture dans le sud-togo," N° 87 (2017) 1 - 43
- [11] - G. ALAYI, "Les granitoïdes tardifs de la chaîne panafricaine des Dahomeyides au togo : étude pétro-structurale, géochimique et géochronologique," *Univ. Lomé*, (2018) 1 - 215 p.
- [12] - C. L. ADISSIN GLODJI, "La zone de cisaillement de Kandi et le magmatisme associé dans la région de Savalou-Dassa (Bénin) : étude structurale, pétrologique et géochronologique," *Sci. la Terre*, (2012) 276 p.
- [13] - P. Y. D. DA COSTA, M. S. TAIROU, A. K. C. JOHNSON and P. AFFATON, "Neogene/Quaternary boundary in the coastal basin of Togo," *Quat. Int.*, Vol. 262, (2012) 32 - 38 p., doi : 10.1016/j.quaint.2011.01.029
- [14] - K. E. KASSEGNE, M. J. MOURLAM, G. GUINOT, Y. Z. AMOUDJI, J. E. MARTIN, K. A. TOGBE, A. K. C. JOHNSON & L. HAUTIER "First partial cranium of *Togocetus* from Kpogamé (Togo) and the protocetid diversity in the Togolese phosphate basin," *Ann. Paleontol.*, Vol. 107, N°2 (2021) doi : 10.1016/j.annpal.2021.102488
- [15] - Y. Z. AMOUDJI, "Stratigraphie et évolution paléoenvironnementale des terrains crétacés," (2021) 314 p.
- [16] - A. C. AKOBE, E. M. AMANI, E. DIANGONE, Y. F.N'DA, S. MONDE, A. V. WOGNIN and K. AKA, "caractérisation pétro-sédimentaire des grès d'âge crétacé de la marge d'Abidjan du bassin sédimentaire offshore de côte d'ivoire (zone Abidjan-adiake)", Vol. 10, N° Figure 1 (2020) 33532 - 33539 p.

- [17] - M. E. OGHENEKOME, T. K. CHATTERJEE, J. M. V. B. DONKER and Q. NAPOLEON, "Geochemistry and weathering history of the Balfour sandstone formation, Karoo basin, South Africa : Insight to provenance and tectonic setting," (2018) 623 - 632 p.
- [18] - C. K. SOBDJOU, F. B. NDONG and J. M. ONDOA, "Paléoenvironnement de mise en place des faciès détritiques terrigènes de la formation du Moungo-fleuve dans le bassin sédimentaire du Moungo (Ouest Cameroun) [Paleoenvironment of implementing terrigenous clastic facies of the formation of Mungo-river i," Vol. 13, N°2 (2015) 355 - 367 p.
- [19] - A. C. AKOBE, E. M. AMANI, M. TOURE, S. MONDE, K. AKA and K. AFFIAN, "caractérisation pétro-sédimentaire des grès d'âge crétacé de la marge d'abidjan du bassin sédimentaire offshore de côte d'ivoire (zone abidjan-adiake)," Vol. 31, (2018) 138 - 160 p.
- [20] - S. MONDE, C. AKOBE, B. DIGBEHI and K. AKA, "Morphodynamisme des environnements à Beach-rocks du plateau continental de Côte d'Ivoire (golfe de Guinée)," *Afrique Sci. Rev. Int. des Sci. Technol.*, Vol. 4, N°3 (2010) 591 - 614 p., doi : 10.4314/afsci.v4i3.61702
- [21] - E. E. BOKANDA, F. PHILIP, E. EKOMANE, S. B. BISSE, C. N. TATA, E. N. ASHUKEM, B. C. BELINGA, "Geochemical constraints on the provenance, paleoweathering and maturity of the Mamfe black shales, West Africa," *J. African Earth Sci.*, Vol. 175, (2021) 104078 p., doi : 10.1016/j.jafrearsci.2020.104078
- [22] - E. GARZANTI, M. PADOAN, M. SETTI, A. LÓPEZ-GALINDO and I. M. VILLA, "Provenance versus weathering control on the composition of tropical river mud (southern Africa)," *Chem. Geol.*, Vol. 366, (2014) 61 - 74 p., doi : 10.1016/j.chemgeo.2013.12.016
- [23] - J. S. ARMSTRONG-ALTRIN, Y. IL LEE, J. J. KASPER-ZUBILLAGA, A. CARRANZA-EDWARDS, D. GARCIA, G. N. EBY, V. BALARAM & N. L. CRUZ-ORTIZ, "Geochemistry of beach sands along the western Gulf of Mexico, Mexico : Implication for provenance," *Chemie der Erde*, Vol. 72, N°4 (2012) 345 - 362 p., doi : 10.1016/j.chemer.2012.07.003
- [24] - B. ROBERT and E. B. BROWN, "Provenance and source Area weathering Derived from the Geochemistry of Pre-Cenomanian sandstones, East Sinai, Egypt," N°1 (2011) 1 - 14 p.
- [25] - W. ZHANG, J. WU, S. ZHAN, B. PAN and Y. CAI, "Environmental geochemical characteristics and the provenance of sediments in the catchment of lower reach of Yarlung Tsangpo River, southeast Tibetan Plateau," *Catena*, Vol. 200, N°November 2020 (2021) 105150 p., doi : 10.1016/j.catena.2021.105150
- [26] - I. KONOTIO, A. LAGNAOUI, E. H. CHELLAI, I. FABUEL-PEREZ and J. REDFERN, "Reconnaissance des caractères sédimentaires et ichnofaciès des grès triasiques de Tighadwine, Haut-Atlas de Marrackech-Maroc," *Boletín Geológico y Min.*, Vol. 127, N°2--3 (2016) 361 - 374 p.
- [27] - I. FABUEL-PEREZ, J. REDFERN and D. HODGETTS, "Sedimentology of an intra-montane rift-controlled fluvial dominated succession: The Upper Triassic Oukaimeden Sandstone Formation, Central High Atlas, Morocco," *Sediment. Geol.*, Vol. 218, N°1 - 4 (2009) 103 - 140 p., doi : 10.1016/j.sedgeo.2009.04.006
- [28] - S. ALI, K. STATTEGGER, D. GARBE-SCHÖNBERG, W. KUHN, O. KLUTH and H. JABOUR, "Petrography and geochemistry of Cretaceous to quaternary siliciclastic rocks in the Tarfaya basin, SW Morocco : Implications for tectonic setting, weathering, and provenance," *Int. J. Earth Sci.*, Vol. 103, N°1 (2014) 265 - 280 p., doi : 10.1007/s00531-013-0965-6
- [29] - A. D. BOHARI, M. HAROUNA and A. MOSAAD, "Geochemistry of Sandstone Type Uranium Deposit in Tarat Formation from Tim-Merso Basin in Northern Niger (West Africa) : Implication on Provenance, Paleo-Redox and Tectonic Setting," *J. Geosci. Environ. Prot.*, Vol. 06, N° 08 (2018) 185 - 225 p., doi : 10.4236/gep.2018.68014

- [30] - P. Y. D. DA COSTA, P. AFFATON, D. BORSCHNECK, L. VIDALB, C. SONZOGNIB and A. K. C. JONHSON, "Evolution verticale des minéraux argileux de la série crétacé supérieur- tertiaire du bassin côtier togolais et leurs implications paléoclimatiques," Vol. 20, N°3 (2013) 105 - 120 p.
- [31] - L. I. KARIMOU, "Etudes sédimentologique, paléontologique, paléogéographique et structurale des dépôts d'âge maastrichtien à yprésien du bassin des lullemeden (Niger central)," *Thèse Dr. Abdou Moumouni école Dr. Sci. la vie la terre n°006/GEOL/2020*, (2020) 131 p.
- [32] - C. M. FEDO, H. W. NESBITT and G. M. YOUNG, "Unraveling the Effects of Potassium Metasomatism in Sedimentary-Rocks and Paleosols, with Implications for Paleoweathering Conditions and Provenance Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications f," Vol. 7613, N°March (2016) 921 - 924 p., doi : 10.1130/0091-7613(1995)023<0921
- [33] - P. N. SANG, Z. LIU, Y. ZHAO, X. ZHAO, P. D. PHA and H. VAN LONG, "Chemical weathering in central Vietnam from clay mineralogy and major-element geochemistry of sedimentary rocks and river sediments," *Heliyon*, Vol. 4, N° 7 (2018) e00710 p., doi : 10.1016/j.heliyon.2018.e00710
- [34] - M. RAZA, A. H. M. AHMAD, M. SHAMIM KHAN and F. KHAN, "Geochemistry and detrital modes of Proterozoic sedimentary rocks, Bayana Basin, north Delhi fold belt: Implications for provenance and source-area weathering," *Int. Geol. Rev.*, Vol. 54, N°1 (2012) 111 - 129 p., doi : 10.1080/00206814.2010.517044
- [35] - S. FATIMA and M. S. KHAN, "Petrographic and geochemical characteristics of mesoproterozoic kumbalgarh clastic rocks, NW Indian shield: Implications for provenance, tectonic setting, and crustal evolution," *Int. Geol. Rev.*, Vol. 54, N°10 (2012) 1113 - 1144 p., doi : 10.1080/00206814.2011.623032
- [36] - D. BAKKIARAJ, R. NAGENDRA, R. NAGARAJAN and J. S. ARMSTRONG-ALTRIN, "Geochemistry of sandstones from the upper Cretaceous sillakkudi Formation, Cauvery basin, Southern India : Implication for provenance," *J. Geol. Soc. India*, Vol. 76, N°5 (2010) 453 - 467 p., doi : 10.1007/s12594-010-0128-3
- [37] - Z. SAJID, M. S. ISMAIL and T. HANIF, "Mineralogical and geochemical imprints to determine the provenance, depositional history and tectonic settings of Triassic turbidites in the Semanggol and Semantan Basins, Peninsular Malaysia," *J. Asian Earth Sci.*, Vol. 203, N°August (2020) 104539 p., doi : 10.1016/j.jseaes.2020.104539