

Les minéralisations de manganèse du Nord Téra (Liptako, Ouest Niger) : origine et conditions de mise en place.

Hamidou Garba Saley¹, Moussa Konaté^{1*}, Yacouba Ahmed¹ et Amadou Soumaila¹

Résumé

Les minéralisations de manganèse du Nord Téra sont situées dans la ceinture de roches vertes de Diagorou-Darbani, dans la zone de contact avec le pluton de Téra-Ayérou à l'extrême ouest du Niger.

L'objectif de cette étude est de dégager les principales caractéristiques de la minéralisation de manganèse du Nord Téra et de proposer un modèle métallogénique de sa mise en place. La méthodologie mise en œuvre a consisté à faire une étude de terrain puis une analyse au microscope polarisant en lumières transmises et réfléchies des roches porteuses de minéralisations de manganèse. L'utilisation des diagrammes de référence a permis, d'une part de confirmer l'origine de la minéralisation en manganèse (Nicholson, 1992a) et, d'autre part de préciser les conditions de formation de cette minéralisation (Hansuld, 1967 et Brookins, 1987).

Deux types de minéralisation de manganèse ont été mis en évidence : l'une primaire (exhalativo-sédimentaire) et l'autre secondaire (par altération supergène des gondites).

La minéralisation primaire est concomitante de la mise en place de pélites gréseuses enrichies en Mn, qui ont été affectées par la schistosité/foliation régionale (S1//S0), d'orientation moyenne NE-SW. Celle-ci résulte du raccourcissement régional NW-SE, associé à la mise en place de plutons granitoïdiques, en relation avec le fonctionnement de grands couloirs cisailants N45° (Soumaila & Konaté, 2005). Ces déformations sont associées à un métamorphisme dans les conditions de faciès amphibolite qui a transformé l'ensemble des roches en quartzite à grenat (gondite) riche en manganèse, en amphibolite et en micaschiste à disthène-staurotide-cordierite-sillimanite-grenat (Soumaila, 2000 ; Soumaila & Garba, 2006).

La minéralisation secondaire résulte de l'altération des gondites, à grenat de type spessartine à 33,3% de Mn métal selon Machens (1961). Des processus d'altération supergène (oxydation, hydrolyse et lessivage d'éléments chimiques), dans des conditions de PH = 7 à 9 et Eh = +0,4 à +0,6 V, ont conduit au développement d'un gîte résiduel de Mn sous forme d'oxydes (pyrolusite) en croûte botryoidale avec des teneurs de 39,4% de Mn métal (Machens, 1961).

Mots-clés : Manganèse, Nord-Téra, Liptako, exhalativo-sédimentaire, grenatite, altération supergène.

Abstract

Manganese mineralizations of the North Téra (Western part of Niger) are located in the Diagorou-Darbani greenstone belt, closely to the Téra-Ayorou pluton.

The methodology developed consisted of a field study, a polarizing microscope analysis in transmitted and reflected light, of rocks bearing manganese mineralizations: garnet micaschists, garnet amphibolites and grenatites.

Using reference diagrams made it possible to confirm the origin of the manganese mineralization (Nicholson, 1992a) and specifying the conditions of the mineralization formation (Hansuld, 1967 and Brookins, 1987).

Two types of manganese mineralization have been identified: one primary (exhalativo-sedimentary) and the other secondary (by supergene alteration of the gondites).

The primary mineralization is concomitant with the setting of Mn-enriched pelites sandstone, which have been affected by the regional schistosity / foliation (S1 // S0), with a mean NE-SW orientation. These results from the NW-SE regional shortening, associated with the setting of granitoid plutons, in relation with large N45° shear zones activation (Soumaila & Konaté, 2005). These deformations are associated with metamorphism in amphibolite facies conditions that transformed all rocks into manganese rich quartzite with garnet (gondite), amphibolite, and micaschist-stauroilite-cordierite-sillimanite-garnet (Soumaila, 2000; Soumaila & Garba, 2006).

Secondary mineralization results from the alteration of gondites, with spessartine-type garnet at 33.3% of Mn metal. Supergene alteration processes includes oxidation, hydrolysis and chemical elements leaching, under high PH (7 to 9) and Eh (+ 0.4 to +0.6 V) conditions, leading to the development of residual manganese deposits. In the study area, pyrolusite oxides in a botryoidal crust are observed. They content 39.4% of manganese metal (Machens, 1961).

Keywords: Manganese, North-Téra, Liptako, exhalativo-sedimentary, grenatite, supergene alteration.

¹Université Abdou Moumouni de Niamey, Faculté de Sciences et Techniques, Département de Géologie, Laboratoire Eaux Souterraines et Géoressources, BP 10662, Niamey, Niger

*Corresponding author : konate.moussa@gmail.com

1. INTRODUCTION

Les gisements de manganèse ont été décrits dans plusieurs régions du globe, au Ghana (Mücke *et al.*, 1999), en Inde (Ghosh *et al.*, 2015), en Grèce (Papavassiliou *et al.*, 2017), en Hongrie (Polgári *et al.*, 2004), au Maroc (Lafforgue, 2016) dans

des contextes géologiques variés (Wissink, 1972). Plusieurs classifications ont été proposées (Machens, 1961; Grandin, 1968; Wissink, 1972; Kuleshov, 2011; Papavassiliou *et al.*, 2017). Ces classifications prennent en compte les contextes qui peuvent être : tectonique, sédimentaire, supergène,

métamorphique, minéralogique ou exhalativo-sédimentaire (volcano-sédimentaire).

Dans le Liptako nigérien, au Nord de Téra, un important indice de manganèse a été mis en évidence par Machens (1961, 1964) dans la zone de contact entre le pluton de Téra et la ceinture de Diagorou-Darbani, objet de la présente étude (**fig. 1**). D'autres indices de moindre importance ont été signalés dans la ceinture de Diagorou-Darbani et dans celle de la Sirba Machens (1964). Depuis les travaux de reconnaissance des années 1970, aucune étude détaillée n'a été entreprise à ce jour.

Le but de cette étude est :

- d'affiner la cartographie géologique de la zone Nord Téra ;
- de caractériser les minéralisations de manganèse associées aux grenatites à spessartine;
- de proposer un modèle métallogénique de mise en place de cette minéralisation de manganèse.

2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

2.1. Principaux traits de la géologie régionale du Liptako nigérien

La région de Téra fait partie du Liptako nigérien qui correspond à la partie Sud-Est du Craton Ouest-Africain, stabilisé depuis 1700 Ma. Les travaux de reconnaissance géologique de Machens (1961, 1964, 1967, 1973) et divers travaux ultérieurs dont ceux de Dupuis *et al.* (1991), Pons *et al.* (1995), Ama Salah *et al.* (1996), Abdou *et al.* (1998), Affaton *et al.* (2000), Soumaila (2000), Soumaila *et al.* (2004), Soumaila et Konaté (2005), Soumaila *et al.* (2008) ont contribué à l'amélioration des connaissances sur l'évolution géodynamique du Liptako.

Ainsi, deux principaux ensembles géologiques ont été distingués :

- (1) le socle, d'âge paléoproterozoïque 2300 à 2000 Ma (Soumaila, 2000) qui comprend des plutons granitoïdiques alternant avec les ceintures de roches vertes (**fig. 1**).
- (2) la couverture sédimentaire qui regroupe des formations infracambriennes, tertiaires (post-éocène) du Continental terminal, et quaternaires.

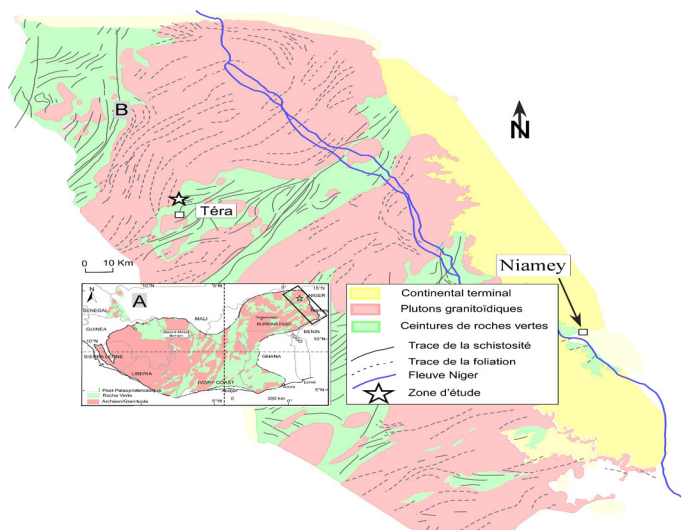


Figure 1 : (A) - Le Liptako nigérien dans le contexte du Craton Ouest Africain. (B) - Carte géologique simplifiée localisant le secteur d'étude (d'après Machens, 1967, modifiée).

2.2. Géologie du Secteur d'étude

Dans le secteur d'étude, le pluton granitoïdique de Téra-Ayorou daté à 2158 Ma \pm 9 (Lama, 1993 et Cheilletz *et al.*, 1994) sépare la ceinture de roches vertes du Gorouol à l'ouest de celle de Diagorou-Darbani à l'est (**fig. 1**). Les affleurements étudiés sont localisés à la limite du pluton granitoïdique de Téra/ceinture de roches vertes de Diagorou-Darbani (**fig. 1**).

La ceinture de roches vertes de Diagorou-Darbani consiste en des metabasites à débit en coussins (pillow lavas), des amphibolites, des roches grenues ultramafiques à mafiques. Ces dernières sont souvent transformées en talcschistes, talc-chloritoschistes et chloritoschistes. Les métasédiments et les métavolcano-sédiments sont métamorphisés selon le cas en micaschistes, grenatites (gondites), quartzites avec ou sans grenat et en quartzites à manganèse (les micaschistes datés à 2300 Ma, Soumaila *et al.*, 2008). L'intensité du métamorphisme varie du faciès schiste vert au faciès amphibolite. Ce dernier est surtout développé au contact du pluton de Téra. Sur ses bordures, le pluton de Téra présente une foliation concordante à celle des micaschistes et des amphibolites.

La minéralisation de manganèse du Nord Téra est portée essentiellement par des affleurements de grenatites (gondites), formant un chaînon de collines d'orientation globale NW-SE. Les minéralisations sont contenues dans des blocs métriques à centimétriques enrichis en Mn (**fig. 2**).

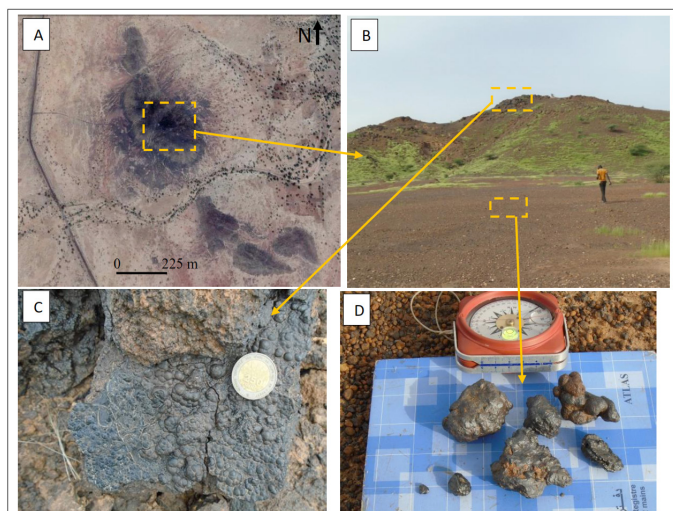


Figure 2 : Indice de manganèse du Nord Téra. A) Images Google Earth de l'indice de Mn de Téra. B) Colline principale à Mn. C) Blocs de manganèse mamelonnés. D) Concrétions de manganèse.

3. MATERIEL ET METHODES

La méthodologie mise en œuvre pour mener cette étude a consisté :

- (1) en des travaux de lever géologique ayant permis de réaliser une carte géologique sectorielle, puis de faire des coupes géologiques ainsi qu'un profil d'altération de la minéralisation de manganèse;
- (2) en des travaux de laboratoire qui ont consisté en des analyses microscopiques, (minéralogique, microstructurales et métallogéniques) ;
- (3) à traiter les données géochimiques préexistantes (Machens, 1961) sur le diagramme géochimique discriminant (Nicholson 1992a) permettant de déterminer l'origine primaire de cette minéralisation ;

- (4) à déterminer le type d'oxyde de manganèse et les conditions (pH-Eh) d'altération supergène, en superposant le diagramme de Hansuld (1967) sur ce celui de Brookins (1987) ;
- (5) et à proposer un modèle de mise en place de la minéralisation.

4. RESULTATS

4.1. Caractéristiques géologiques de l'indice de Mn du Nord Téra

Les principales caractéristiques géologiques du secteur d'étude ont été mises en évidence par la réalisation d'une carte géologique sectorielle (fig. 3) et de coupes géologiques (figs. 4, 5 et 6).

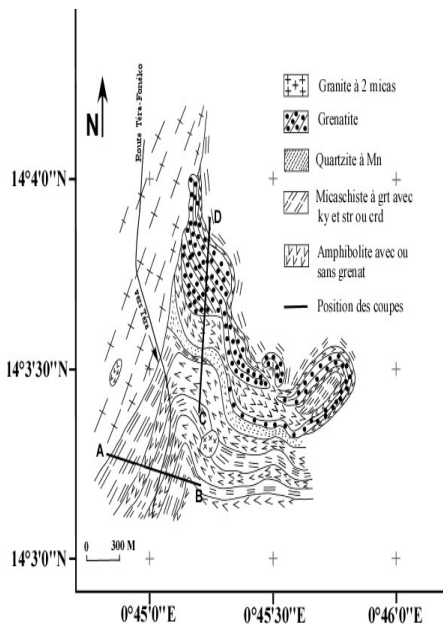


Figure 3 : Carte géologique simplifiée du secteur d'étude. A-B et C-D représentent les traits de coupes géologiques (figs. 4 et 5).

La coupe AB (zone S-W du secteur d'étude) montre que l'encaissant du gîte de manganèse consiste en une alternance de micaschistes et d'amphibolites, intrudée par des filons de granites, de quartz et de pegmatite à disthène (fig. 4). Cet ensemble est affecté par une schistosité de direction N20° à N50° (globalement N30°) ayant des pendages de 40° à 65°SE.

Au niveau de la coupe C-D, apparaissent les faciès pétrographiques de plus en plus riches en grenat. Il s'agit de quartzites noirs, d'amphibolites et de grenatites (porteuses de la minéralisation). Les micaschistes, les quartzites et les amphibolites (sans grenat) sont relativement pauvres en grenat. Ces roches sont affectées par une schistosité/foliation de direction N90° à 140° (globalement N110°) avec des pendages de 35° à 60° N (fig. 5).

Les variations des trajectoires de la schistosité/foliation observées sur ces roches sont le résultat d'une interférence entre :

- une déformation transcurrente régionale ayant provoqué la schistosité/foliation N30° compatible avec un raccourcissement régional NW-SE ;
- et la schistosité/foliation N110° serait liée à la mise en place des plutons granitoïdes intrusifs (tectonique verticale) et leur expansion latérale (Dupuis et al., 1991 ; Soumaila, 2000, Soumaila et Konaté, 2005).

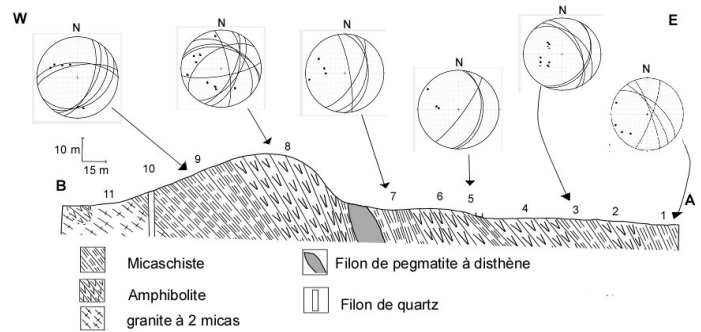


Figure 4 : Coupe géologique A-B (SW du secteur d'étude). 1 à 11 : différentes stations de mesures et les stéréogrammes représentant les projections des plans de schistosité/foliation avec leurs pôles correspondants.

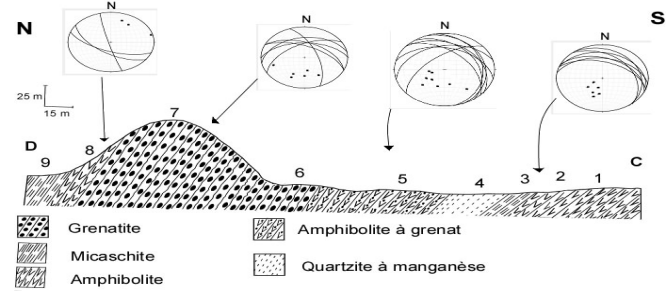


Figure 5 : Coupe géologique passant par la colline principale de manganèse (localisation fig. 3). Les différentes stations de mesures sont numérotées de 1 à 9 et les stéréogrammes représentant les projections des plans de schistosité/foliation avec leurs pôles correspondants.

La succession lithostratigraphique observée se présente comme suit : micaschistes (à disthène, staurotide et tourmaline), amphibolites sans grenat, micaschistes (à disthène, staurotide, cordiérite et sillimanite), quartzites à grenat, amphibolites à grenat et grenatites. Une coupe conceptuelle du secteur montre que les roches affleurantes forment une structure synclinale perchée dont les grenatites (gondites) occupent une position sommitale dans la lithostratigraphie (fig. 6).

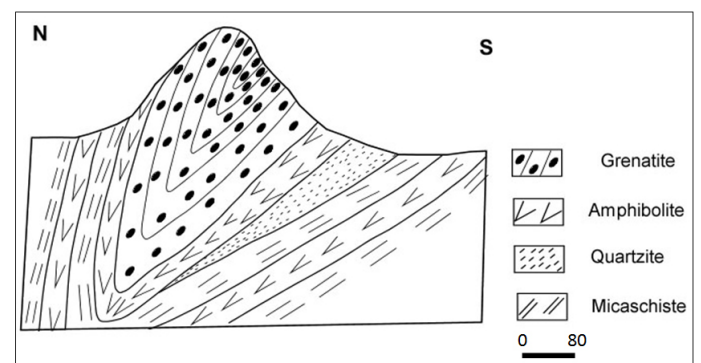


Figure 6 : Coupe synthétique montrant les faciès pétrographiques du secteur d'étude, l'échelle verticale a été volontairement exagérée.

Localement, dans les micaschistes, des amas de restites biotitiques à disthène (fig. 7-A) et des filons de quartz à tourmaline ont été observées (fig. 7-B) ainsi que des boudins de quartzites autour desquels se moule la schistosité S1 (fig. 8). La présence des amas de restites biotitiques suggèrent que certains de micaschistes ont atteint le stade de la fusion partielle (Soumaila et Garba, 2006).

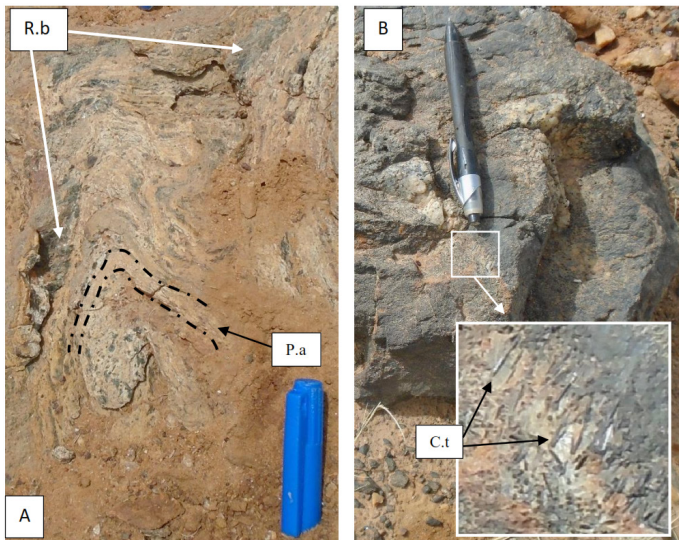


Figure 7 : (A)- Restites de biotite dans un micaschiste, **R.b** : restites biotitiques ; **P.a** : plis anisopaque (B)-une poche de tourmalinite dans un filon de quartz. **C.t** : cristaux de tourmaline.

La présence de boudins de quartzites dans les micaschistes correspondrait originellement à des passées gréseuses au sein de niveaux pélitiques. En effet au cours de la déformation métamorphique, les niveaux argileux à rhéologie ductile sont plus favorables au développement d'une schistosité contrairement aux niveaux gréseux plutôt résistant.

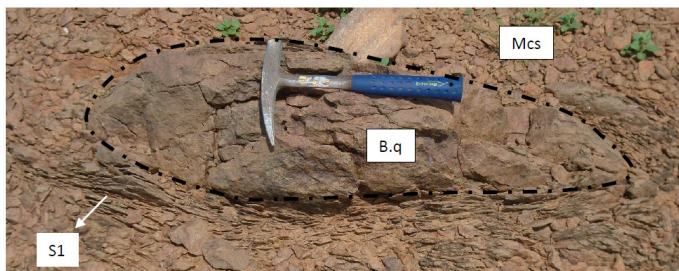


Figure 8 : La schistosité S1 se mouplant autour d'un boudin de quartzite dans les micaschistes.

S1 : la schistosité N40° ; **B.q** : boudin de quartzite à mica ; **Mcs** : micaschiste.

4.2. Analyses microscopiques

La texture dominante des micaschistes est de type grano-lépidoblastique. Les micaschistes sont constitués de quartz, de muscovite, de grenat, de staurotide, de disthène, de cordiérite, de sillimanite, de biotite, de tourmaline, d'épidote (pistachite et clinozoïsite), de chlorite (provenant de la rétro-morphose de la biotite) et de plagioclase (fig. 9 A, B et C).

Les amphibolites, sont constituées de hornblende, de quartz, de grenat, et de plagioclase. La présence de la hornblende indique que le faciès amphibolite (mésozone) est atteint (fig. 9 D).

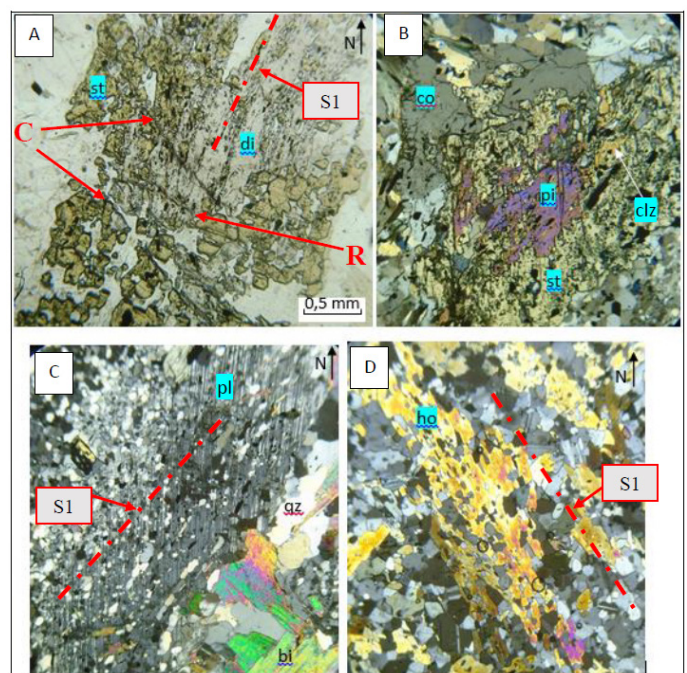
Les micaschistes renferment des minéraux tels que le disthène, la cordiérite, la sillimanite, et la staurotide. Tous ces minéraux ne sont pas stables dans les mêmes conditions thermo-barométriques. En effet le disthène et la staurotide se forment à haute et moyenne pression, tandis que la cordiérite et la sillimanite caractérisent les conditions de basse pression. Soumaila et Garba (2006) ont associé les paragenèses à disthène et staurotide à des pressions relativement élevées (7 à 9 kbar) tandis que les paragenèses à sillimanite et cordiérite correspondent à des pressions plus faibles (3 à 5 kbar). Les mêmes auteurs expliquent cette baisse de pression par une exhumation de ces micaschistes.

L'analyse microscopique a permis la mise en évidence de trois climats métamorphiques attestés par les trois types de paragenèses observées :

- à disthène et staurotide indiquant des pressions moyennes du faciès amphibolite ;
- à cordiérite et sillimanite (fibrolite) indiquant de faibles pressions du faciès amphibolite ;
- à chlorite et pistachite, paragenèse caractérisant le faciès schiste vert.

L'association de ces minéraux indique qu'il y a au moins deux climats métamorphiques qui ont prévalu lors de la formation des roches du secteur :

- (1) un enfouissement de l'encaissant (micaschiste) jusque dans les conditions du «faciès amphibolite» de moyenne à relativement forte pression (T = 600 à 700°C et P = 7 à 9kb) favorisant l'apparition du grenat ;



pl : plagioclase ; qz : quartz ; ho : hornblende ; bi : biotite ; st : staurotide ; pi : pistachite ; clz : clinozoïsite ; co : cordiérite ; di : disthène.

Figure 9 : Compositions minéralogiques : micaschistes (A, B, C) et amphibolites (D). En lumière naturelle (A) et en lumière polarisée analysée (B, C et D). **A**-Recristallisation syncinématique de la staurotide et du disthène, affectée par une microdéformation cassante à fabrique R/C (plan de fracture R de Riedel/ plan de Cisaillement). **B**-Paragenèse de type cordiérite- staurotide. **C**-Surimposition d'un phénocristal de plagioclase sur la foliation S1. **D**-Minéraux de hornblende soulignant la foliation S1 dans une amphibolite. NB : la schistosité/foliation S1 est plissée : au niveau du micaschiste S1= 30°E et l'amphibolite S1=110°NE.

- (2) une remontée rapide conduisant à de faibles pressions (P= 3 à 5kb) et à des températures analogues (560 à 680°C), qui empêche la transformation du disthène en andalousite (Soumaila et Garba, 2006) mais qui favorise la cristallisation de cordiérite et sillimanite (fibrolite).

4.3. Analyse structurale

L'analyse microtectonique montre que le secteur d'étude est affecté par des déformations ductiles, semi-ductiles et cassantes. Deux phases majeures de déformations ont été distinguées :

- (1) la première phase D1, ductile à semi-ductile, comporte deux épisodes. Le premier épisode D1a est caractérisé par une schistosité/foliation (S1//S0) d'orientation N20° à N50°E, par aplatissement pur, souligné par le caractère quasi-symétrique des marqueurs de déformation tel que des boudins de quartzite à grenat (**fig. 10**). Ces marqueurs mettent en évidence une forte composante coaxiale, compatible avec un raccourcissement régional NW-SE. La tectonique souple a généré des plis pluridécamétriques (**fig. 3**) et des plis dysharmoniques qui affectent la schistosité/foliation S1. Ce premier épisode de déformation est suivi par un autre D1b, à composante non coaxiale. En fonction de la rhéologie, deux type de fabriques peuvent être distingués : une première fabrique semi-ductile S/C, à quartz déformé sigmoïde dextre (**fig. 11 A**) et des microdécrochements ductiles sénestres NW-SE (**fig. 12**), et une deuxième fabrique cassante R/C à jeu dextre (**fig. 11 B**) et sénestre observables à l'échelle microscopique (**fig. 9 A**).

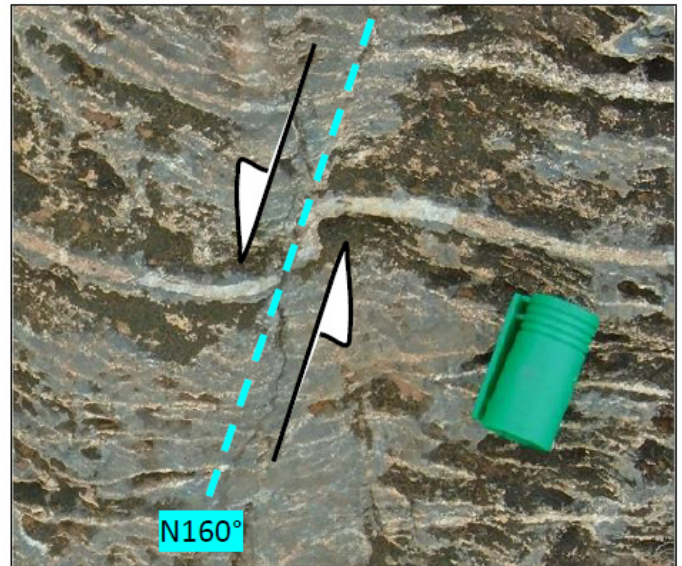


Figure 12 : Décrochement sénestre induisant une flexuration d'un niveau quartzo-feldspathique. Ceci dénote une relative ductilité du matériel pendant le jeu décrochant.

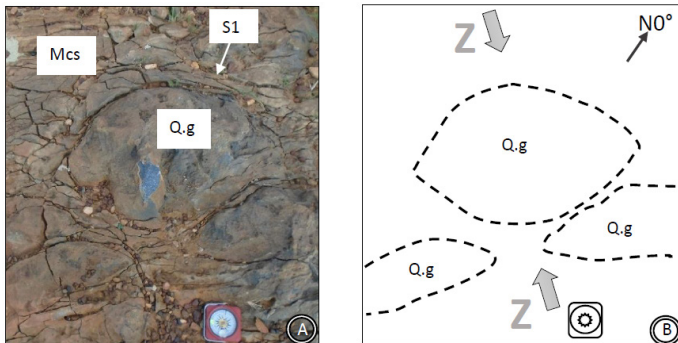


Figure 10 : A) : Schistosité/foliation S1 (N35°) qui se moule autour d'amygdale quasi-symétrique de quartzite à grenat boudiné (Q.g), dans un micaschiste (Mcs). B) : Schéma d'interprétation de la photo A indiquant la direction moyenne de raccourcissement.

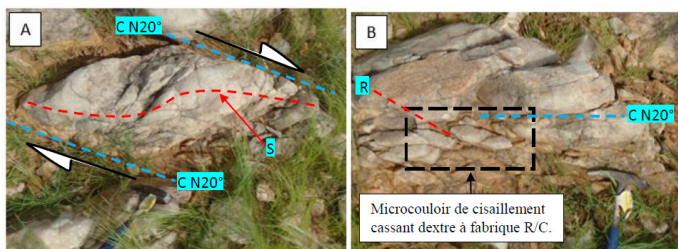


Figure 11 : Microcouloir de cisaillement dextre. A) La déformation ductile dextre à fabrique S/C. B) la déformation cassante dextre à fabrique R/C.

- (2) la deuxième phase de déformation cassante D2, est marquée par la présence de failles normales N50° à N75° à composante décrochante dextre ou sénestre correspondant à un épisode à raccourcissement NE-SW. Abdou *et al.* (1998) ainsi que Soumaila et Konaté (2005) ont décrit à l'échelle du Liptako des accidents cisailants dextres N130° à N150° et sénestre N60° à N90°. Cette deuxième phase de déformation a été associée à une rotation des contraintes depuis l'azimut N130° jusqu'à N0° (Soumaila et Konaté, 2005). Ces derniers ont souligné des réactivations de couloirs cisailants N40° à l'échelle de la ceinture de Diagourou-Darbani.

4.4. Origine de la minéralisation en Mn de Nord-Téra

Les observations de terrain montrent de fortes concentrations de concrétions de manganèse au voisinage des grenatites

(gondites). Les gondites correspondent à des quartzites à grenat de type spessartine $Mn_3Al_2(SiO_4)_3$ (10 à 95%) avec 33,3% de Mn métal (Machens, 1961).

4.4.1 Origine primaire

Ces gondites sont associées à des micaschistes et des amphibolites avec ou sans grenat, dont le spectre sont très enrichis en terres rares légère et appauvris en terres rares lourdes (**fig. 13**). Ce résultat suggère une mise en place en contexte d'arc et de bassin arrière arc océanique pour les formations du Nord de Téra (Soumaila *et al.*, 2004 et 2008). Ces environnements sont propices à la mise en place des minéralisations de type sedex (exhalativo-sédimentaire).

Cette origine exhalativo-sédimentaire a été d'ailleurs mise

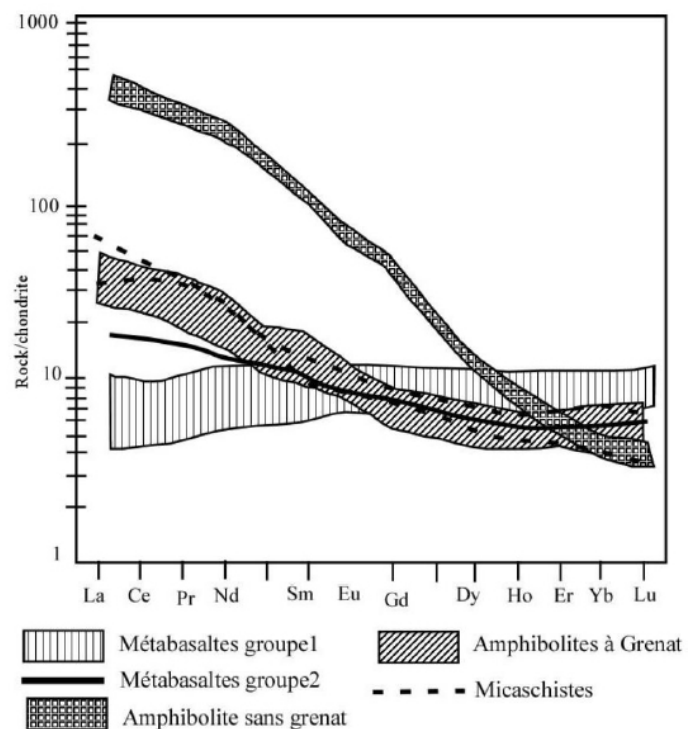


Figure 13 : Diagramme de terres rares des micaschistes, et amphibolites avec ou sans grenat (Soumaila *et al.*, 2004 et 2008).

en évidence par Reformatsky (1932) et Machens (1964). A diverses époques, le volcanisme a apporté dans les parties hautes de la lithosphère, des éléments métalliques (fer, manganèse, cuivre et autres métaux) d'origine plus profonde, par l'intermédiaire des solutions hydrothermales minéralisatrices. Cette dernière observation est en accord avec celle de Papavassiliou *et al.*, (2017) qui attribue une origine hydrothermale aux minéralisations de manganèse localisées en Grèce au Nord-Ouest de Milos island.

Des coulées de laves sous-aqueuses et des tufs, surtout sous-marins, peuvent par exhalaison gazeuse apporter dans les eaux des éléments surtout chimiques qui se sédimentent au-dessus des coulées. Il s'accompagne de la libération de la silice, qui entraîne souvent la prolifération de radiolaire ou radiolarite (Routhier, 1963 ; Papavassiliou *et al.*, 2017). En même temps peuvent être introduites dans l'eau de mer de grosses quantités de fer ou de manganèse qui se sédimentent, surtout sous forme d'oxydes en lits ou en lentilles alternant avec les jaspes.

4.4.2 Métamorphisme des pélites gréseuses en gondites

Les gondites sont le produit d'un métamorphisme régional de roches pélitico-gréseuses, riches en manganèse (Reformatsky, 1932 ; Machens, 1961 ; Routhier, 1963). Dans le contexte général, le Mn contenu dans les pélites ou shales proviendrait de la précipitation (sur les fonds marins ou sur les plateformes peu profondes) : soit des fluides hydrothermaux (sedex ou sédimentaire exhalatif), soit des fluides d'altération supergène résultant du démantèlement et de la remobilisation d'une ancienne minéralisation de Mn (Lafforgue, 2016). Dans les fluides, le Mn se trouve à l'état dissout (Mn^{2+}) et précipite sous l'action des processus d'oxydo-réduction, d'augmentation de l'alcalinité ou de processus microbiens (Lafforgue, 2016).

4.4.3 Origine secondaire : altérations supergènes

Dans les conditions supergènes (ou de surface), les roches endogènes (roches magmatiques et métamorphiques) subissent l'altération physique (désagrégation) et ou chimique (lessivage, hydrolyse) sous l'effet des agents atmosphériques (interface géosphère/hydrosphère/atmosphère). Le résultat de l'altération est une libération dans le milieu de particules et d'ions en solution, provenant de la roche-mère. Le comportement de ces éléments est fonction de leur potentiel ionique (**fig. 14**) (Goldschmidt, 1954).

De l'exploitation du diagramme de Goldschmidt (1954), il apparaît que lorsque le potentiel ionique d'un cation comme le Mn est inférieur à 3 il est soluble (**fig. 14**). C'est ce phénomène qui se produit dans les solutions hydrothermales où le manganèse est à l'état réduit (Mücke *et al.*, 1999 ; Kuleshov, 2011 ; Lafforgue, 2016). Par contre, lorsque le potentiel ionique est supérieur à 3 le manganèse précipite. Cette situation se produit au contact de l'eau de mer ou dans les conditions d'une altération supergène. Chacune de ces situations peut favoriser l'oxydation du manganèse (Mücke *et al.*, 1999 ; Hein et Tshibubudze, 2015 ; Lafforgue 2016).

Les processus d'hydrolyse, de lessivage et d'oxydation pendant l'altération des silicates de manganèse produisent des oxydes et des hydroxydes de manganèse dans une large gamme tel la *cryptomélane* [$K(Mn^{4+}, Mn^{2+})_8O_{16}$], *lithioporite* [$(Al, Li)MnO_2(OH)_2$], *manganite* [$Mn^{3+}O(OH)$], *nsutite* [$(Mn^{4+}, Mn^{2+})(O, OH)_2$], *psilomélane* [$Ba(Mn^{+2})(Mn^{+4})_8O_{16}(OH)_4$], *pyrochroïte* [$Mn(OH)_2$], *pyrolusite* [MnO_2], *todorokite* [$(Ca, K, Na, Mg, Ba, Mn)(Mn, Mg, Al)_6O_{12} \cdot 3H_2O$],

groutite [$Mn^{3+}O(OH)$]... et de la silice (Mücke *et al.*, 1999). Cette dernière provenant de l'altération des minéraux silicatés s'injecte dans les fractures de la roche et une partie reste sous forme de colloïde amorphe dans la structure des minéraux (Machens 1961).

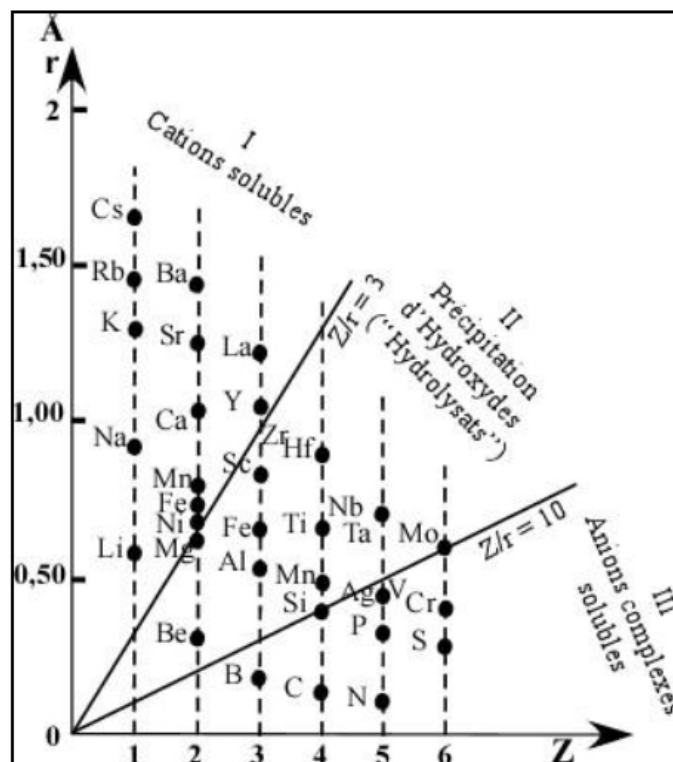


Figure 14 : Diagramme de référence de Goldschmidt (1954) représentant la variation du potentiel ionique Z/r des cations.

Dans le cas des gondites du Nord de Téra, l'altération supergène libère une partie du manganèse contenue dans le grenat (de type spessartine). Ce manganèse forme des encroutements d'oxyde de manganèse qui couvrent la roche. L'altération supergène a développé 4 horizons (**fig. 15A**) de la base au sommet :

- **Un niveau de base où les gondites sont peu ou non altérées** à 1,1% Mn ;
- **Une zone d'altération** d'environ 5 m d'épaisseur. Dans cette zone, l'altération à un stade relativement avancé a généré des blocs de gondite non altérée ainsi que des veinules de quartz. Le lessivage de la silice des gondites est suivi par l'accumulation d'oxydes de manganèse dans des cassures recoupant la stratification (**fig. 15B**). Ce processus est à l'origine de la formation des minerais hétérogènes de manganèse, dont les teneurs varient de 4 à 6,6% ;
- **Une zone intermédiaire à carapace poreuse** d'environ 40m. Dans cette zone l'altération est à un stade plus avancée. La majorité de la silice ayant été lessivée, cette carapace forme une grande partie de la colline principale. Les teneurs en manganèse sont plus importantes que dans le niveau sous-jacent (10,5 à 17,9% Mn) ;
- **Une couche supérieure correspondant à une cuirasse massive**. En effet, au sommet de la colline, suite à un lessivage et une hydrolyse intense, se forme une cuirasse massive, à structure localement

botryoïdale (**fig. 16A**). L'observation microscopique montre que les oxydes/hydroxydes de manganèse et de fer précipitent dans les microfractures (**fig. 16B**). La cuirasse résultante a une épaisseur estimée environ 2 m. Elle s'étend sur environ 5000 m². Les concentrations en manganèse sont devenues plus importantes, les teneurs varient de 38,8 à 39,4% (Machens, 1961).

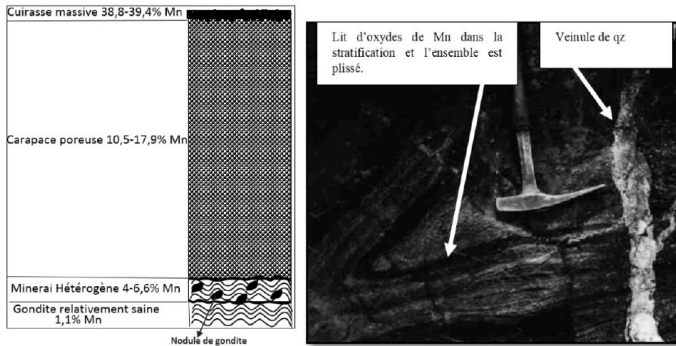


Figure 15 : Effet de l'altération supergène des gongites du Nord de Téra. A) Profil schématique d'altération de la colline principale. B) Injection dans les fractures de gongite de veinule de quartz provenant de l'altération des minéraux silicatés (Machens, 1961).

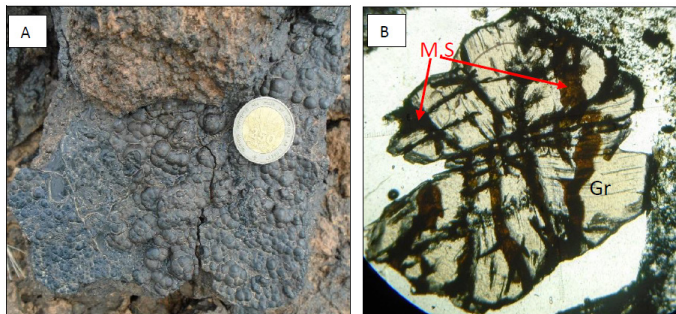


Figure 16 : Altération météoritique des gongites. A) Structures botryoïdales de la cuirasse ; B) Image microscopique en LNA montrant, dans les cassures du grenat (Gr), renfermant les minéraux secondaire (M.S.) comme l'hématite et la pyrolusite.

Du fait de l'altération, ces gongites donnent des concrétions d'oxyde de manganèse oblitérant la schistosité/foliation S1. En effet, l'altération du grenat donne des concrétions noirâtres, mises en relief par une dissolution sélective des autres minéraux (**fig. 17**). Ces concrétions (**fig. 18**) renferment des teneurs importantes en manganèse (jusqu'à 39,4%, Machens 1961).

L'étroite relation entre les concrétions de manganèse et les gongites montre que la minéralisation de Nord Téra provient du processus d'altération supergène de ces dernières.

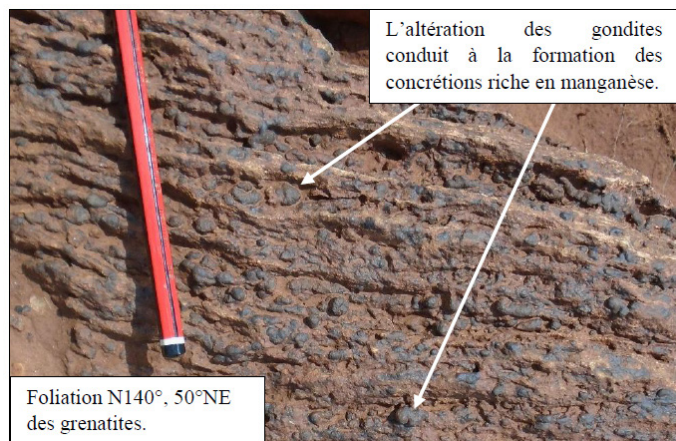


Figure 17 : Libération du Mn par altération.



Figure 18 : Concrétions de manganèse.

5. DISCUSSION

Les résultats obtenus se rapportant à l'origine de la minéralisation et au processus de mise en place, ont été comparés à ceux des études antérieures.

5.1. Origine de la minéralisation

La source des matériaux à l'origine de la minéralisation peut être déduit par le diagramme de discrimination du rapport Si / Al qui différencie les matériaux d'origine hydrothermale, ou détritique. Machens (1961) a étudié dans les détails l'affleurement de gongite du Nord Téra, en procédant à des analyses géochimiques (**tableau 1**).

Ces analyses géochimiques ont été utilisées dans le diagramme Si/Al (Nicholson, 1992a) permettant de déterminer l'origine primaire de cette minéralisation. Dans les 8 échantillons projetés, 6 se situent dans la zone hydrothermale (**fig. 19**). Ce qui confirme l'origine primaire hydrothermale (exhalative) de cette minéralisation.

Une autre indication importante prouvant l'exhalation volcanique sous-marine est la présence de la tourmaline (**fig. 7B**). En effet, plusieurs types de minéralisations d'origine exhalative sous-marine connues depuis l'Archéen jusqu'au Mésozoïque, sont associées à la tourmaline (Al₆Y₃Na[(Si₆O₁₈)(BO₃)₃(OH, F)₄]) (Cleland *et al.*, 1996).

Des résultats analogues ont été obtenus par Mücke *et al.* (1999) sur le gisement de manganèse de Nsuta au Ghana.

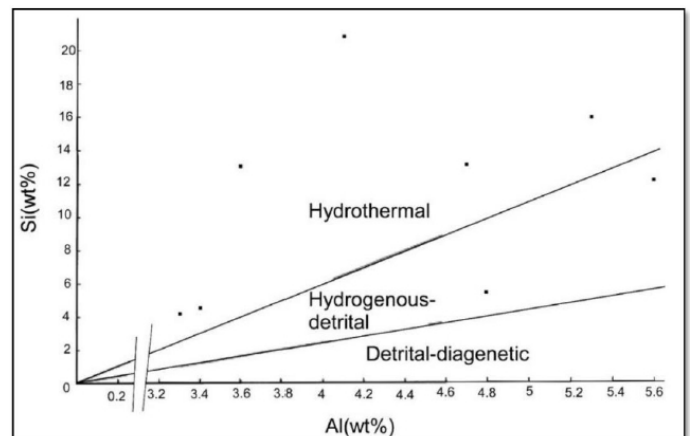


Figure 19 : Diagramme Si/Al permettant de déterminer l'origine hydrothermale ou détritique des dépôts de manganèse (Nicholson 1992a ; modifié) et les points analytiques des échantillons de Nord Téra.

Tableau 1 : Analyses géochimiques (Machens 1961).

Eléments chimiques	Cuirasse massive			Carapace poreuse		Minerai hétérogène		Gondite peu ou non altérée
	Echantillon N°1	Echantillon N°2	Echantillon N°3	Echantillon N°1	Echantillon N°2	Echantillon N°1	Echantillon N°2	Echantillon N°1
Mn soluble	38,8%	39,4%	32,0%	10,5%	17,3%	4,0%	6,6%	1,1%
Fe ₂ O ₃	9,2	5,6	9,6	5,8	10	8,4	10,4	12,8
Al ₂ O ₃	12,5	13,1	18,2	17,9	19,4	15,7	21,5	13,6
SiO ₂	5,8	9,7	12,4	28,3	34,4	45,5	26,1	27,7
Al	3,3	3,4	4,8	4,7	5,3	4,1	5,6	3,6
Si	4,1	4,5	5,7	13,2	16	21,2	12,2	12,9
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,46	0,74	0,68	1,58	1,77	2,89	1,21	2,03

5.2. Métamorphisme des sédiments sous-marins en gondite (quartzite à grenat manganésifère)

L'association des minéraux tel que le disthène, la cordiérite, la sillimanite et la staurotite indique qu'il y a au moins deux climats métamorphiques qui ont prévalu lors de la formation des gondites :

- un enfouissement de l'encaissant (micaschiste) jusque dans les conditions du «faciès amphibolite» de moyenne à relativement forte pression (T = 600 à 700°C et P = 7 à 9kb) favorisant l'apparition du grenat ;
- une remontée rapide conduisant à de faibles pressions (P = 3 à 5kb) et à des températures analogues (560 à 680°C), qui empêche la transformation du disthène en andalousite (Soumaila et Garba, 2006) mais qui favorise la cristallisation de cordiérite et sillimanite (fibrolite) et la stabilisation du grenat.

5.3. Altération supergène

Pour déterminer les conditions de concentration secondaire de manganèse, les analyses pétrographiques et minéralogiques des échantillons porteurs ont permis de signaler la présence des oxydes de Mn, cela a servi à établir un diagramme discriminant croisé (Brookins, 1987 et Hansuld, 1967). Ces deux diagramme superposés, associés à la température de stabilité des oxydes de manganèse (300°C pour la pyrolusite MnO₂ (Folch et al., 2005), 530 à 800°C pour le manganate Mn₂O₃ et entre 900 et 1000°C pour la hausmanite Mn₃O₄) ont permis de préciser la nature exact de l'oxyde de manganèse présent (Das Gupta, 1965), mais aussi les conditions de PH et Eh qui ont prévalu lors de sa formation (fig. 20).

Selon ces considérations, la pyrolusite semble être la plus stable dans les environnements d'altération supergène. Les conditions sont estimées à PH = 7 à 9 et Eh = + 0,4 à +0,6 V (fig. 20).

Ce résultat théorique est accompagné par une observation des échantillons de la gondite au microscope polarisant à lumière réfléchiée en vue d'effectuer une analyse métallogénique. Cette dernière confirme que les minéraux opaques sont constitués d'oxydes de fer et de manganèse et que l'oxyde de manganèse présent est de la pyrolusite MnO₂ (fig. 21A et C) et l'oxyde de fer est de l'hématite Fe₂O₃ (fig. 21A).

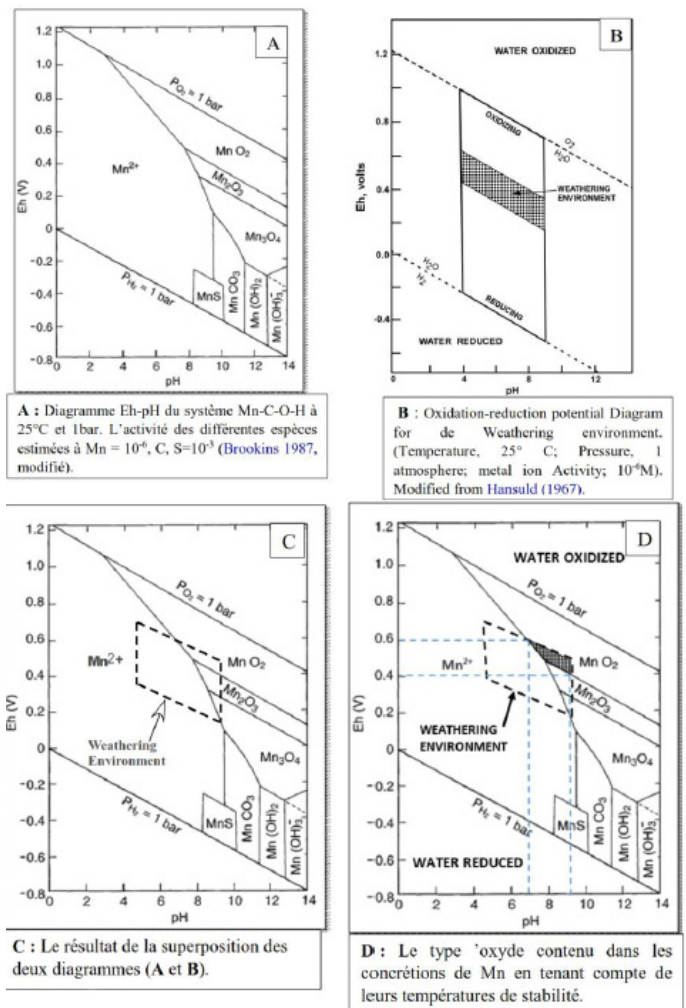
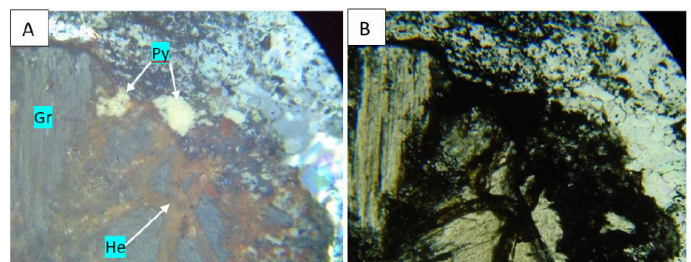


Figure 20 : Détermination graphique des conditions d'altération supergène (pH-Eh) des gondites du Nord-Téra.



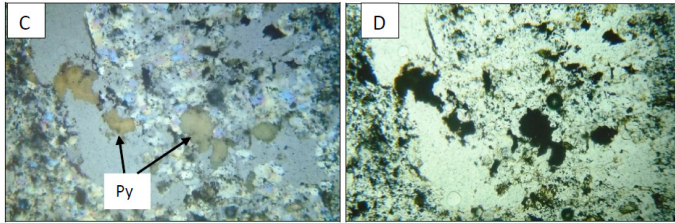


Figure 21 : Observations métallogéniques de la gondite altérée. Les images A et C sont en lumière réfléchie et les images B et D sont leurs correspondants en lumière transmise. L'oxyde de manganèse présent dans le grenat (Gr) est de la pyrolusite (Py) et l'oxyde de fer est l'hématite (He).

5.4. Modèle de minéralisation du manganèse de Nord Téra

La minéralisation observée dans le Nord Téra, ayant une histoire métallogénique complexe (exhalativo-sédimentaire, métamorphique et supergène), ne peut être rangée dans la classification de Nicholson (1992b) qui est basée sur les dépôts d'oxyde, ne prenant pas en compte les minéralisations métamorphisées.

Par contre, dans la minéralisation de type hydrothermal marin (Hmar) de Nicholson (1992b), Routhier (1963) propose deux modèles de mise en place primaire du manganèse, en relation avec le volcanisme et la sédimentation sous-marine :

- **(1) Premier modèle de mise en place syn-sédimentaire.** Dans ce modèle, l'exhalation s'associe à la sédimentation qui se produit au-dessus des épanchements de lave sous-aqueuse. Le gisement birimien de Nsuta au Ghana, d'âge compris entre 2170 et 2180 Ma, correspond à ce modèle de mise en place (Mücke *et al.*, 1999). Le modèle syn-sédimentaire a également été décrit dans le Liptako par Machens (1961). En effet, dans la région de Téra, comme dans plusieurs régions d'Afrique de l'Ouest, les tuffis appartenant à la série birimienne présentent des minéralisations de manganèse. Selon Machens (1961), ces minéralisations proviennent des exhalations sous-marines, liées à des phénomènes volcaniques ou subvolcaniques qui se seraient produits à plusieurs reprises durant la sédimentation dans un domaine océanique. Toute chose qui est conforme au modèle syn-sédimentaire de Routhier (1963).

- **(2) Deuxième modèle de mise en place post-sédimentaire.** Par l'intermédiaire de solutions hydrothermales, le manganèse d'origine profonde vient imprégner les sédiments supérieurs tels que les schistes ou les grauwaques non consolidés. Dans ce modèle, le caractère post-sédimentaire est marqué par la présence de diaclases, à remplissage en manganèse, recoupant la stratification (Machens, 1964). Selon Machens 1964, sur plus de 8 échantillons de schistes manganésifères, prélevés dans le Liptako nigérien, les teneurs en manganèse dépassent rarement 5%, la moyenne étant de 3%.

En effet, Machens (1961) a montré que dans le Nord Téra, l'altération supergène a engendré un résidu saprolitique recouvert par un encroûtement botryoidal d'oxyde de manganèse. Cette altération a ainsi permis un enrichissement en manganèse (de 1,1 à 39,4%).

Les datations radiométriques des minéralisations de manganèse du Liptako burkinabé (mine de Tambao) donnent un âge de 59-45 Ma pour le résidu saprolitique et un âge de 29-24 Ma à 18-11,5 Ma pour la croûte indurée (Beauvais *et al.*, 2008). Compte tenu du contexte géologique identique entre le Liptako burkinabé et nigérien les travaux de Beauvais *et al.* (2008) permettent d'attribuer pour les minéralisations supergènes du Nord Téra, un âge paléocène-éocène pour le résidu saprolitique et un âge oligo-miocène pour la croûte indurée.

A la lumière de ce qui précède, le modèle génétique suivant (fig. 22) est proposé pour expliquer la formation de la minéralisation en manganèse du Nord Téra. Ce modèle comprend trois étapes :

- Au cours de la première étape, une minéralisation primaire dans un sédiment de boue, déposé dans un environnement sous-marin serait associé à une exhalation hydrothermale dans des conditions réductrices. Cette étape se serait déroulée vers 2230-2260 Ma (Soumaila *et al.*, 2008) ;
- La deuxième étape serait liée à un métamorphisme dans les conditions du faciès amphibolite du sédiment argileux riche en Mn. Il se forme alors des gondites (quartzites à grenat spessartine) ;
- La troisième étape implique le développement des zones à oxyde de manganèse dans lesquels l'étape d'oxydation passe de cations divalents à des cations à charge supérieur. Les minéraux secondaires de manganèse (pyrolusite) ont été générés par l'oxydation et la décomposition de la spessartine qui ne sont pas stables dans les conditions supergènes. Cette altération se serait déroulée dans les conditions de PH = 7 à 9 et Eh = +0,4 à +0,6V. Cette étape a un âge paléocène à miocène dont paléocène-éocène pour le résidu saprolitique et oligo-miocène pour la croûte indurée.

Ce modèle de mise en place de la minéralisation de Mn au Nord de Téra est comparable à celui du gisement de Nsuta au Ghana (Mücke *et al.*, 1999). La seule différence est que le gisement de Nsuta présente des intercalations de couches de carbonate de manganèse (Rhodocrosite $MnCO_3$) avec les métasédiments, comme à Tambao au Burkina Faso (Hein et Tshibubudze, 2015) où les formations consistent en des roches volcano-sédimentaires et carbonates riches en manganèse. A Ansongo-Inlier (Mali) également, les minéralisations sont encaissées dans une intercalation de quartzites et de silts à carbonate de Mn, métamorphisé en gondite (Servant, 1956).

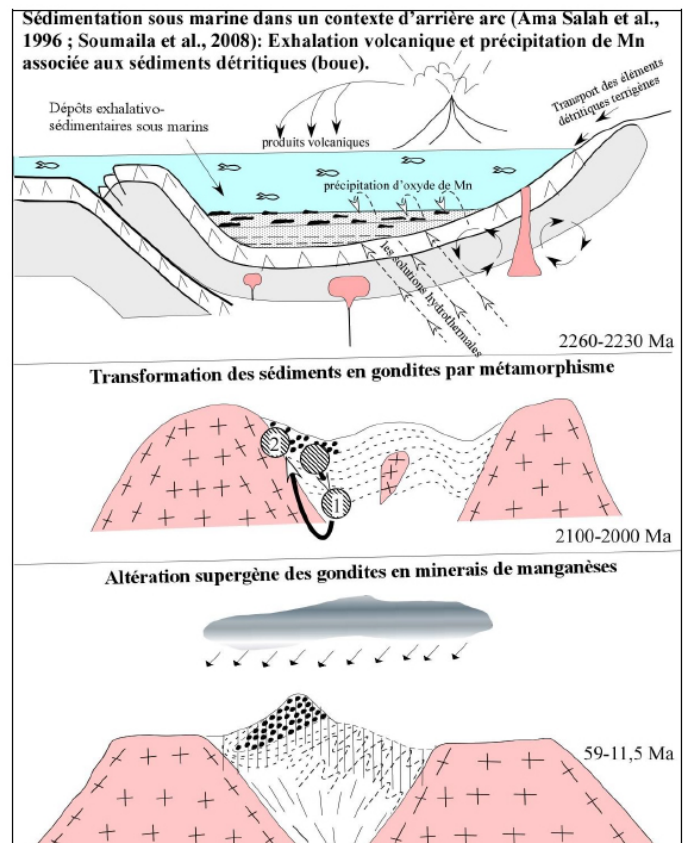


Figure 22 : Modèle d'évolution génétique de la minéralisation de Mn du Nord-Téra (inspiré de Soumaila 2000 ; Soumaila & Garba, 2006 et Kuleshov, 2011). 1 : (paragenèses à staurotide-disthène) et 2 : (paragenèses à cordiérite-

sillimanite) sont les paragenèses développées dans les micaschistes pendant la tectonique verticale lors de la mise en place des plutons. 1 : mouvement descendant de l'encaissant du pluton ; 2 : remontée de l'encaissant facilitée par la fusion partielle locale (Soumaila et Garba, 2006).

CONCLUSION

L'étude du gîte de manganèse du Nord de Téra permet de préciser que :

- 1) Les grenatites constituent le sommet d'une alternance de micaschistes et d'amphibolite ayant subi au moins trois phases de déformation;
- 2) Ces roches constituent un ensemble sédimentaire à volcano-sédimentaire mis en place dans un contexte océanique, suivi d'un métamorphisme dans les conditions du faciès amphibolites de moyenne pression ;
- 3) La minéralisation de Mn a une double origine ; (a) une origine primaire sédimentaire-exhalatif par le biais de fluides hydrothermaux, avec enrichissement de shales (argiles marines), suivie de métamorphisme, (b) une origine secondaire par altération supergène ;
- 4) L'hydrolyse et la déstabilisation de la spessartine, ont conduit par lessivage des cations divalents et de la silice à la précipitation des oxydes de fer et de Mn. Ces processus se sont produits dans les conditions $PH = 7 \text{ à } 9$ et $Eh = +0,4 \text{ à } +0,6 V$ et ont développé un résidu saprolitique recouvert par un encroûtement de pyrolusite (MnO_2). Ils ont conduit à un enrichissement en manganèse, d'une teneur de 1,1% dans la roche saine à 39,4% dans l'encroûtement. Des résultats comparables ont été obtenus dans les dépôts de manganèse de :

- Nsuta au Ghana (Mucke *et al.*, 1999);
- Tambao au Burkina Faso (Beauvais *et al.*, 2008; Peters, 2011; Peters, 2014; Hein et Tshibubudze, 2015);
- Ansongo-Inlier au Mali (Servant 1956; Hein et Tshibubudze, 2015).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDOU A. et BONNOT H., BORY KADEY D., CHALAMET D., SAINT MARTIN M., YOUNFAI. (1998):- Notice explicative des cartes géologiques du liptako à 1/100 000 et 1/200 000, Ministère des Mines et de la géologie, Rép. Niger 64p.
- AFFATONP., GAVIGLIOP et PHARISATA. (2000):- Réactivation du craton ouest africain au Panafricain : paléocontraintes déduites de la fracturation des grès néoprotérozoïques de Karey Gorou (Niger, Afrique de l'Ouest). C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes, n° 331, pp 609-614.
- AMA SALAH I., LIEGEOIS J.P. et POUCKET A. (1996):- Evolution d'un arc insulaire océanique birimien précoce au Liptako nigérien (Sirba) : géologie, géochronologie et géochimie. Journal of African Sciences, Vol. 22, n° 3, pp 235-254.
- BEAUVAIS A., RUFFET G., HENOCQUE O. and COLIN F. (2008):- Chemical and physical erosion rhythms of the West African Cenozoic morphogenesis: the $^{39}Ar-^{40}Ar$ dating of supergene K-Mn oxides. J. Geophys. Res. 113, 1-15.
- CHEILLETZ A., BARBEY P., LAMA C., PONS J., ZIMMERMANN J-L., ET DAUTEL D. (1994):- Age de refroidissement de la croûte juvénile birimienne d'Afrique de l'Ouest, Données U/Pb et K-Ar sur les formations à 2.1Ga du SW du Niger. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Série II, 319, 435-442.
- CLELAND J.M., MOREY G.B. and MCSWIGGEN P.L. (1996):- Significance of tourmaline-rich rocks in the North Range Group of the Cuyuna Iron Range, east-central Minnesota. Econ Geol 91: 1282-1291 Das Gupta.
- DAS GUPTA D.R. (1965):- Oriented transformation of manganite during heat treatment; Min. Mag., vol.35, 131-139.
- DUPUIS D., PONS J. et PROST A.E. (1991):- Mise en place de plutons et caractérisation de la déformation birimienne au Niger occidental. Compte Rendus Acad. Sci. Paris, n° 312 (II), pp 769-776.
- FOLCH B., LARIONOVO J., GUARI Y., GUÉRIN C. et REIBEL C. (2005):- Synthesis of $MnOOH$ nanorods by cluster growth route from $[Mn_{12}O_{12}(RCOO)_{16}(H_2O)_n]$. Rational conversion of $MnOOH$ into Mn_3O_4 or MnO_2 nanorods; *Journal of State Chemistry*, vol.178, n°7, 2368-2375.
- GHOSH R., CHAKRABORTY D., HALDER M. and BAIDYA T.K. (2015):- Manganese mineralization in Archean greenstone belt, Joda-Noamundi sector, Noamundi basin, East Indian Shield. Journal Ore Geology Reviews 70 (2015) 96-109.
- GOLDSCHMIDT, V. M. (1954):- *Geochemistry* : Clarendon Press, Oxford, 730 pp.
- GRANDIN G. (1968):- Aspects exogènes du gisement de manganèse de Grand-Lahou (Côte d'Ivoire). Extrait de la Chronique des Mines et de la Recherche Minière, juillet-août 1968 No. 375, pp. 199-206.
- HANSULD J.A. (1967):- Eh and pH in geochemical prospecting. Geol.Sur. Canada Paper 66-54, 172-187.
- HEIN K.A.A. and TSHIBUBUDZE A. (2015):- Manganese deposits of the Oudalan province in the northeast of Burkina Faso, and Ansongo Inlier in eastern Mali. School of Geosciences, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa. Journal Ore Geology Reviews, pp 1-7.
- KULESHOV V. N. (2011):- Manganese Deposits : Communication 1. Genetic Model of Manganese Ore Formation. Lithology and Mineral Resources, Vol. 46, No. 5, pp. 473-493.
- LAFFORGUE L. (2016):- Place de la minéralisation de manganèse de Bouarfa dans l'évolution mésocénozoïque de l'oriental marocain. Minéralogie. Thèse, 357p. Université Paris-Saclay.
- LAMA C. (1993):- Apport de la Méthodes K-Ar à la compréhension de l'histoire géologique des granitoides birimiens du Liptako (Niger occidental) et des leucogranites à 2 micas de Tgragra d'Akka (Anti-Atlas Occidental, Maroc), Thèse INPL Lorraine, 142p.
- MACHENS E. (1961):- Prospection générale du liptako, campagne 1960-1961. B.R.G.M. pp 8-12.
- MACHENS E. (1964):- Mission de prospection générale du liptako, rapport de fin de mission (1958-1964) et inventaire d'indice de minéralisation. B.R.G.M ; 74, Rue de la fédération Paris XVe. 81-84p.
- MACHENS E. (1967):- Notice explicative sur la carte géologique du Niger occidental, Carte géol. 1/200 000^{ème}, Dir. Mines Géol., Niger.
- MACHENS E. (1973):- Contribution à l'étude des formations du socle cristallin et de la couverture sédimentaire de l'Ouest de

la République du Niger. Mémoire du Bureau des Recherches Géologiques et Minières, France, n°82.

MUCKE A., K. DZIGBODI-ADJIMAH A. and ANNOR (1999):- Mineralogy, petrography, geochemistry and genesis of the Paleoproterozoic Birimian manganese-formation of Nsuta/Ghana. © Springer-Verlag 1999. Mineralium Deposita (1999) 34: 297-311.

NICHOLSON K. (1992b):- Contrasting mineralogical-geochemical signatures of manganese oxides: guides to metallogenesis. Econ Geol 87: 1253-1264.

PAPAVASSILIOU K., VOUDOURIS P., KANELLOPOULOS C., GLASBY G., ALFIERIS D. and MITSIS I. (2017): - New geochemical and mineralogical constraints on the genesis of the Vani hydrothermal manganese deposit at NW Milos island, Greece: Comparison with the Aspro Gialoudi deposit and implications for the formation of the Milos manganese mineralization. *Journal Ore Geology Reviews* 80 (2017) 594–611.

PETERS L. (2011):- Geology of the Eastern Markoye Region, Oudalan–Gorouol Greenstone Belt, NE Burkina Faso. University of the Witwatersrand, Johannesburg, p. 61.

PETERS L. (2014):- The volcanology, geochemistry and metallogenic potential of the Goren Volcano-sedimentary belt, northeast Burkina Faso, West Africa. Master of Science dissertation (unpublished) University of the Witwatersrand Johannesburg, pp 155.

POLGÁRIM., SZABÓ-DRUBINA M. and SZABÓ Z. (2004):- Theoretical model for Jurassic manganese mineralization in Central Europe, Úrkút, Hungary. *Bulletin of Geosciences*, Vol. 79, No. 1, 53–61

PONS J., BARBEY P., DUPUIS D. and LÉGER J.M., (1995):- Mechanism of emplacement and structure of a 2.1 Ga juvenile continental crust: the Birimien of southwestern Niger. *Précambrien research*, n° 70, pp 281-301.

REFORMATSKY N. (1932):- Rapport sur les recherches

géologiques effectuées dans la colonie du Niger, année 1930/1932 B.R.G.M, Dakar.

ROUTHIER P. (1963):- Les gisements métallifères. TOME I, Page 650.

SERVANT J. (1956):- Les Gisements et Indices de Manganèse de l'Afrique Occidentale Française. In: Reyna, J.G. (Ed.), Symposium on Manganese Deposits, Vol II, Africa, XXth International Geological Congress, Mexico, pp. 89–98.

SOUMAILA A. (2000):- Etude structurale, pétrographique et géochimique de la ceinture de Diagorou-Darbani, Liptako, Niger Occidental (Afrique de l'Ouest). Thèse, Univ. Franche-Comté, 56-203p.

SOUMAILA A., HENRY P. et ROSSY M. (2004):- Contexte de mise en place des roches basiques de la ceinture de roches vertes birimienne de Diagorou-Darbani (Liptako, Niger, Afrique de l'Ouest) : plateau océanique ou environnement d'arc/bassin arrière-arc océanique. *C. R. Géoscience*, n° 336, pp 1137–1147.

SOUMAILA A. et KONATE M. (2005):- Caractérisation de la déformation dans la ceinture birimienne (paléoprotérozoïque) de Diagorou-Darbani (Liptako nigérien, Afrique de l'Ouest). *Afr. Geo. Review.*, vol. 13, n° 3, pp 161-178.

SOUMAILA A. et GARBA Z. (2006):- Le métamorphisme des formations de la ceinture de roches vertes birimienne (paléoprotérozoïque) de Diagorou-Darbani (Liptako, Niger, Afrique de l'Ouest). *Africa Geoscience Review*, Vol.13, No.1, pp.107-128.

SOUMAILA A., HENRY P., GARBA Z. and ROSSIM. (2008):- REE Patterns, Nd-Sm and U-Pb ages of the metamorphic rocks of the Diagorou-Darbani greenstone belt (Liptako, SW Niger): implication for Birimian (Paleoproterozoic) crustal genesis, *Geological Society, London, Special Publications*, v. 297; p. 19-32.

WISSINK A. (1972):- Les gisements de manganèse du monde. Conditions de dépôts, typologie et métal contenu. B.R.G.M, chronique des mines, section II, France, n°1.