

CARACTERISATION DU GISEMENT DE MALACHITE D'AMBATOVARAHINA, DISTRICT D'AMBATOFINANDRAHANA, MADAGASCAR

Alfred ANDRIAMAMONJY¹, Louis Théogène RALANTOARISON¹, Lala ANDRIANAIVO², Daniel RAKOTOARISOA⁴, Dieudonné RAZAFIMAHATRATRA³

- 1- Sciences de la Terre et de l'Environnement, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo, BP 906, Antananarivo 101, Madagascar
- 2- Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, BP 1500 Antananarivo 101, Madagascar
- 3- Ecole Normale Supérieure, Université d'Antananarivo, BP 881 Antananarivo 101, Madagascar
- 4- Institut Supérieur de Technologie d'Ambositra, Madagascar

Résumé

Le gisement de malachite d'Ambatovarahina se situe dans le district d'Ambatofinandrahana. Sa formation est principalement contrôlée par un système de fracturation qui a permis d'importantes circulations de fluides traversant les marbres dolomitiques. L'origine de la mine d'Ambatovarahina est liée à la deuxième phase de la déformation (D2) entraînant à la fois de plissement et de fracturation durant l'orogénèse Panafricaine. La dimension du corps minéralisé varie selon la grandeur des fracturations de la roche carbonatée encaissante. Ce type de gisement est classé parmi des gisements métasomatiques riches en cuivre. Il est constitué essentiellement par des veines, des stockwerks, des lentilles et des filons hydrothermaux pour former un gisement de type skarn. En général, les cristaux de malachite de couleur vert émeraude se présentent soit sous forme massive en associant avec du cuivre natif, soit sous forme d'agrégats et soit sous forme d'enduit dans les roches foliées. L'assemblage minéralogique dans les roches métasomatiques minéralisées est généralement formé de malachite, de chalcopryrite, de calcite, de limonite, de galène et des minéraux cuprifères indifférenciés. Les minéraux d'azurite, de bornite et de blende sont omniprésents mais presque rares par rapport aux gîtes environnants. Cette association minérale varie suivant la phase métasomatique. La teneur en cuivre peut atteindre de 24,43 à 30%, ce qui justifie en partie son exploitation.

Mots clés : Marbres, filons, stockwerks, veines, hydrothermal, skarn, malachite, cuivre, Ambatovarahina.

I. INTRODUCTION

Madagascar est incontestablement l'un des pays les plus riches au monde lorsqu'on parle de ressources sous-sols. L'or, les métaux de bases (cuivre, fer, argent, plomb), les métaux rares (nickel, cobalt, platinoïde,...), les métaux stratégiques (terres rares, uranium, thorium,...), les ressources énergétiques (pétrole, charbon, phosphore,...), les pierres gemmes (saphir, rubis, émeraude, tourmaline,...) rendent célèbre la Grande Ile comme un pays béni de Dieu. Pour les métaux de base qui font l'objet de cette étude, Madagascar renferme plusieurs types de gîtes de Pb et de Zn, qui sont souvent associés à d'autres minéralisations notamment en Cu.

Pour le cuivre en particulier, il est considéré comme l'un des métaux de base les plus utilisés dans les secteurs industriels. Madagascar présente plusieurs indices de cuivre, parmi eux le gisement de malachite d'Ambatovarahina à Ambatofinandrahana. Ce gisement se développe essentiellement dans des marbres fracturés associés à des phases hydrothermales (Lacroix, 1922). Quelques petits indices isolés de malachite apparaissent dans les quartzites et des micaschistes (Bésairie, 1966). Ce gîte de cuivre fut découvert en 1884 et exploité au temps de la Reine pour fabriquer des armements. M. Pachoud a autorisé la zone minière en 1907 et a installé sa propre usine de production de cuivre. Il produisit 12t de cuivre au début et 500t de minerai de 1915 à 1918 (Lacroix, 1922). Le service de la mine à Antananarivo poursuivit les travaux d'exploration de 1918 à 1924 en creusant des tunnels souterrains et estima, par Lenoble, une réserve de 1000t de cuivre métallique (Lenoble, 1936). La société BUMIFOM dirigée par R. Dudan et G. Clair a poursuivi la campagne d'exploration 1958-1959 et a défini les détails de la zone de prospection

(Bésairie, 1966). Ces études montrent qu'il s'agit d'une minéralisation contenue dans des diopsidites, skarnoïdes formées à partir des métadolomies (Fournié, 1968, 1969, 1970 ; Joo', 1973). Les exploitations artisanales ont été développées depuis 2010. Les réserves sont estimées à 250 000 tonnes de minerai avec 4 à 5% de cuivre (Moine, 1974).

Actuellement, l'augmentation de la demande dudit métal sur le marché international a permis de réfléchir sur la revalorisation des différents indices cuprifères de Madagascar. C'est la raison pour laquelle que cette présente étude se focalise sur la caractérisation d'un gisement de malachite d'Ambatovarahina afin de justifier à nouveau son exploitation.

L'objectif principal de cette étude est donc d'obtenir de nouvelles données de terrain et de laboratoire afin de déterminer la genèse de la malachite et du cuivre. Outre la compilation et la recherche bibliographique qui nous ont permis d'avoir préalablement des informations du secteur d'étude, la méthodologie adoptée concerne l'étude pétrographique, géochimique et métallogénique du gisement, la réalisation d'une carte géologique du secteur d'étude par la mise en relation entre les zones minéralisées et la déformation structurale locale, et enfin, le couplage des différentes données pour pouvoir proposer un modèle métallogénique de formation du gisement. Les analyses chimiques multiéléments sur roches totales ont été effectuées à l'ICP-MS du laboratoire de l'IMME Madagascar SARLU, Fitroafana Talatamaty. Le logiciel MAP INFO 11.0 a été utilisé pour la numérisation des cartes géologiques.

II. GENERALITES SUR LE CUIVRE

Le cuivre est un métal malléable et ductile, de couleur rouge, de symbole chimique Cu, de numéro atomique 29, de masse atomique 63,54 et de densité 8,9 ([http1](#), [http3](#)). Il s'altère superficiellement à l'air (vert-de-gris avec malachite et azurite). Il existe un minéral à l'état natif. Le cuivre se cristallise dans le système cubique, mais rarement bien cristallisé et se présentant en fils dendritiques, en feuillets, ou en imprégnations (Palache et al., 1951). A la surface du globe, les minerais de cuivre se présentent généralement sous 2 formes ([http1](#)): les minerais sulfurés et les minerais oxydés. Les minerais sulfurés sont d'origine profonde, ils se présentent sous formes de sulfures (covellite CuS, chalcocite Cu₂S) ou parfois associé au Fer (chalcopyrite CuFeS₂ ; cubanite CuFe₂S₃ ; bornite Cu₅FeS₄) ou à l'arsenic (Enargite Cu₃As₄S₄) ou au Stibium. Les minerais oxydés sont la cuprite Cu₂O ou des carbonates tels que la malachite Cu₂(CO₃)(OH)₂ et l'azurite Cu₃(CO₃)₂(OH)₂.

Le cuivre est utilisé dans la fabrication des tissus, des peintures marines, des conducteurs et fils électriques (Il est un excellent conducteur d'électricité et de chaleur), des appareils et tuyaux de plomberie, des pièces de monnaie et des ustensiles de cuisine ([Ghomari, 2014](#)).

La malachite est un carbonate hydraté de cuivre Cu₂(OH)₃CO₃ qui se cristallise dans le système monoclinique (Süsse, P., 1967). Elle se présente en général en masses fibroradiées à éclat soyeux, ou en masses mamelonnées de couleur vert émeraude à vert d'herbe ([http2](#)). Elle fait effervescence avec l'acide chlorhydrique diluée et s'associe parfois avec la chalcopyrite.

Les gisements de malachite sont en général liés à un hydrothermalisme et à des roches magmatiques basiques (Zigan, et al., 1977). Selon les gisements, ces divers corps peuvent servir de minerais, le principal d'entre eux étant la chalcopyrite. Le cuivre est présent dans la nature dans un large éventail de gisements de minerai. Les gisements les plus connus sont : Oural en Russie, Roumanie, Allemagne, Israël, Namibie, République démocratique du Congo, États-Unis, Australie, d'Afrique du Sud, des États-Unis et Eilat en Israël (Zigan, et al., 1977).

A Madagascar, il n'y a pas de minéralisation majeure connue, mais environ 150 indices à Cu sont recensés dans tout le pays, beaucoup d'entre eux étant de nature alluviale (Tucker et al., 2012). Les principales zones qui renferment de grandes minéralisations à Cu sont : la zone de Daraina dans le nord, la zone d'Antasabe-Ankera, le sous-domaine d'Itremo, les basaltes du Crétacé dans le bassin de Mahajanga

et le Domaine de Vohibory (Figure 1). Le gisement d'Ambatovarahina se localise dans le sous-domaine de l'Itremo.

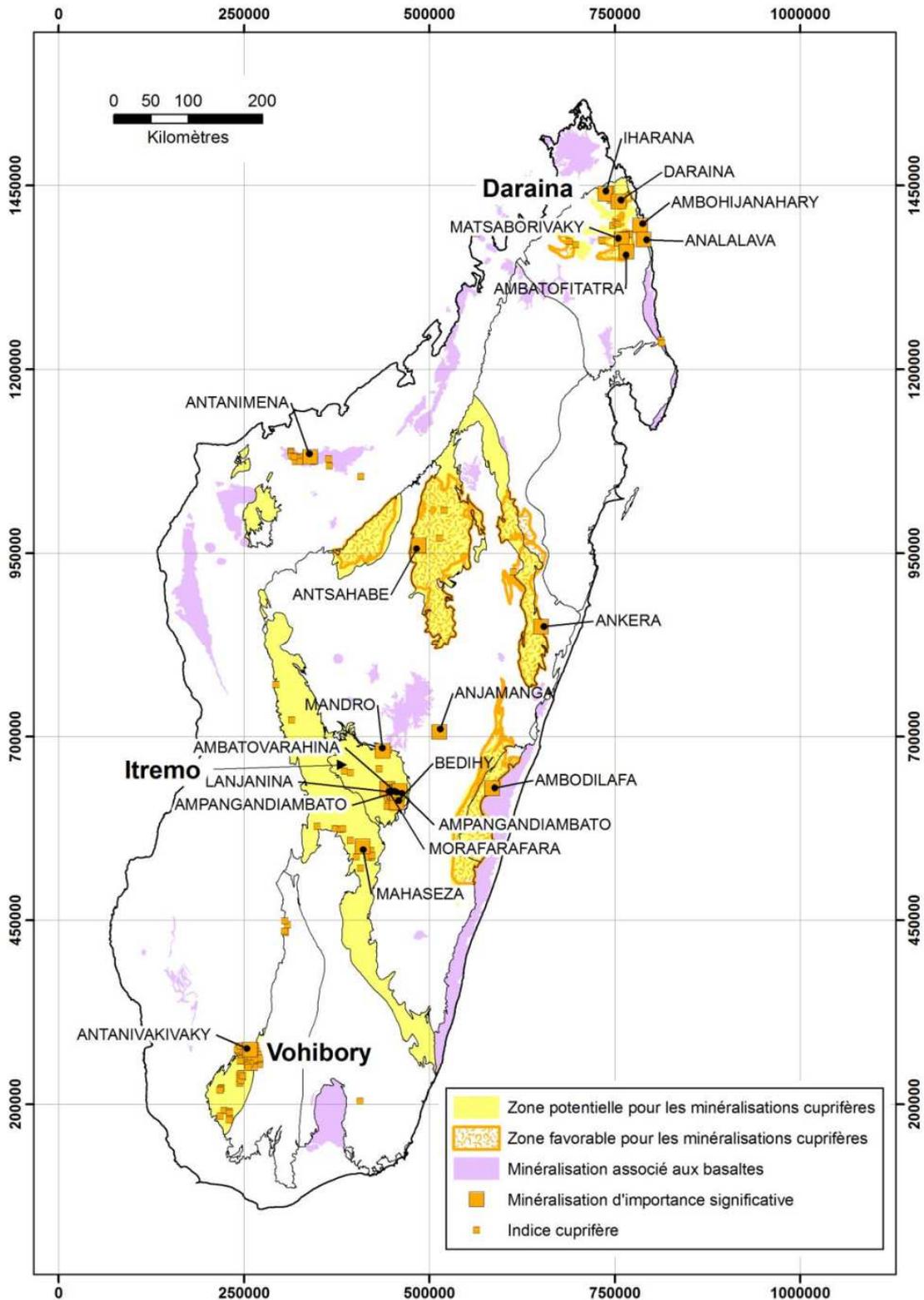


Figure 1 : Carte des indices, gisements et zones potentielles en Cu de Madagascar (Tucker et al., 2012)

III. GEOLOGIE REGIONALE

Le sous-domaine d'Itremo ou groupe schisto-quartzito-cipolins (SQC) fait partie du domaine d'Antananarivo. Il représente avec le Domaine d'Ikalamavony une chaîne de nappes et de pli couchés à vergence en chevauchant sur le Domaine néoarchéen d'Antananarivo (Fernandez et al., 2003 ; Nédélec et al., 2003 ; Tucker et al., 2007 ; Collins, 2006). Le groupe SQC (Figure 2) est constitué par une série para-métamorphique de schistes, de quartzites et de cipolins, d'âge Paléoprotérozoïque (Cox et al., 2004 ; Tucker et al., 2012).

III.1. Les schistes

Il s'agit de schistes pseudo-ardoisiers à grains fins (Tucker et al., 2012) à extension plus restreinte que la série des quartzites (Moine, 1974). Ils s'observent soit sous la forme d'un ensemble quartzo-micacé à schistosité plane très marquée, soit sous celle d'un banc de micaschiste homogène. Les principaux minéraux sont la muscovite et la biotite en proportion variable.

III.2. Les quartzites

Ils couvrent la majeure partie du groupe SQC avec des puissances apparentes de 1500 m (cas du mont d'Ibity et d'Amporona). Ils peuvent présenter des bancs métriques ou décamétriques interstratifiés dans les autres faciès du groupe. Ils sont formés essentiellement de quartz à granulométrie variable (grains fins à gros grains) et de minéraux accessoires tels que la muscovite, la biotite, la tourmaline, le microcline et la sillimanite (Moine, 1974). Des quartzites à itacolumite c'est-à-dire des quartzites à grains très fins de quartz et de micas, engrenés d'une manière lâche et articulée, leur conférant une certaine flexibilité, sont également décrits. Les quartzites présentent le plus souvent des structures sédimentaires telles des stratifications entrecroisées, des rides sédimentaires et des niveaux conglomératiques (Moine, 1974).

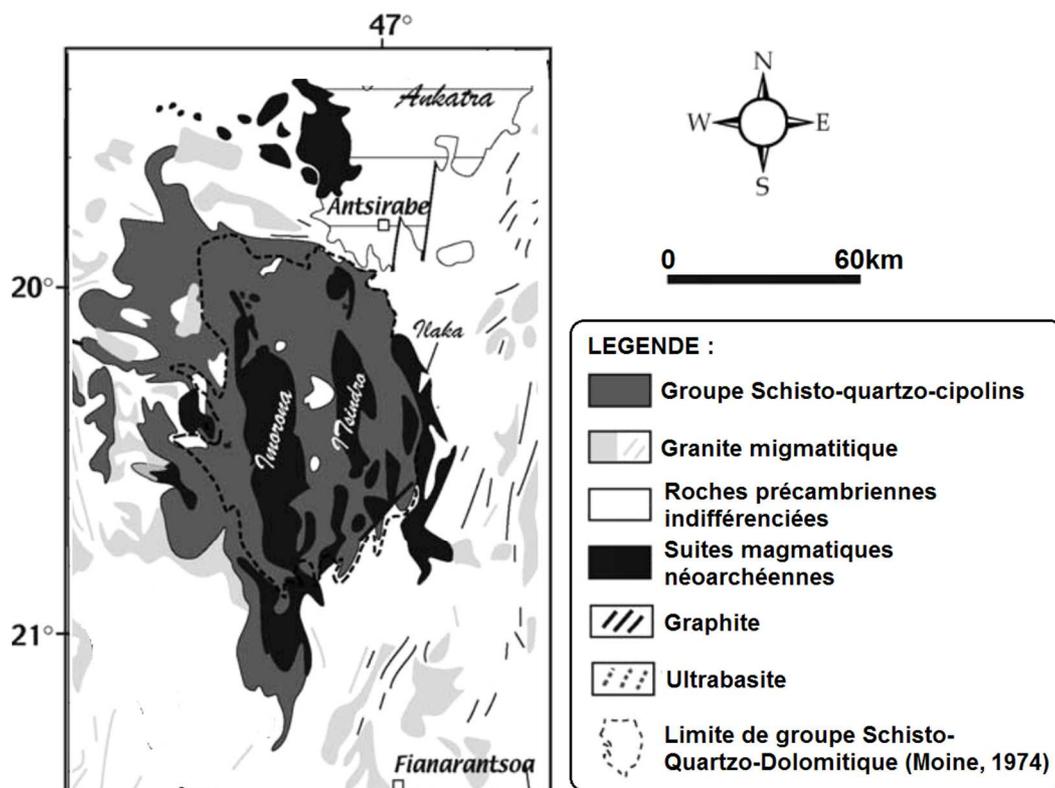


Figure 2 : Carte géologique simplifiée du groupe SQC (modifiée d'après Fernandez et al., 2003)

III.3. Les cipolins

Ce sont des roches carbonatées considérées comme le sommet de la colonne stratigraphique du Groupe SQC (Lenoble, 1936). Deux faciès majeurs y sont reconnus avec un marbre blanc à stromatolites (construction discoïde ou mamelonnée due à l'activité d'algues bleues-Cyanophycées) et un marbre brun sableux. Ces roches sont constituées de calcite et de dolomite, du quartz, de la trémolite, du diopside, de la biotite, du périclase, de la phlogopite, du microcline et de disséminations sulfurées à pyrite, chalcopyrite et galène ; quelques fois, des bancs de cipolin renferment des minéraux du cuivre comme à Ambatovarahina (Moine, 1974).

III.4. Les suites magmatiques

Les formations SQC sont recoupées par les suites magmatiques de l'Imorona-Itsindro et d'Ambalavao-Kiangara-Maevarano (Tucker et al., 2012). La suite magmatique d'Imorona-Itsindro, datée entre 820 et 760 Ma, présente des faciès allant des granites alcalins aux syénites quartziques. Elle comprend également des faciès basiques avec des termes de gabbro à diorite voire des gabbronorites (Tucker et al., 2012). La suite magmatique d'Ambalavao-Kiangara-Maevarano, datée entre 550 et 510 Ma, forme des complexes granitoïdes à orthogneiss porphyroblastiques pré à syn-tectoniques et plutons intrusifs, parfois à structures emboîtés, tardi- à post-tectoniques (Tucker et al., 2012).

IV. DESCRIPTION DU GISEMENT DE MALACHITE

Le gisement de malachite d'Ambatovarahina se localise dans la commune rurale d'Andakatany, district d'Ambatofinandrahana, région Amoron'i Mania. Il se trouve sur le flanc Ouest de la ligne de crête de Tsihazahoana. Le secteur d'étude est constitué par des marbres interstratifiés avec des quartzites et des micashistes. Cet ensemble est recoupé par les gabbros de type Imorona-Itsindro à l'Ouest et par les granites de la suite d'Ambalavao-Kiangara-Maevarano à l'Est (Figure 3).

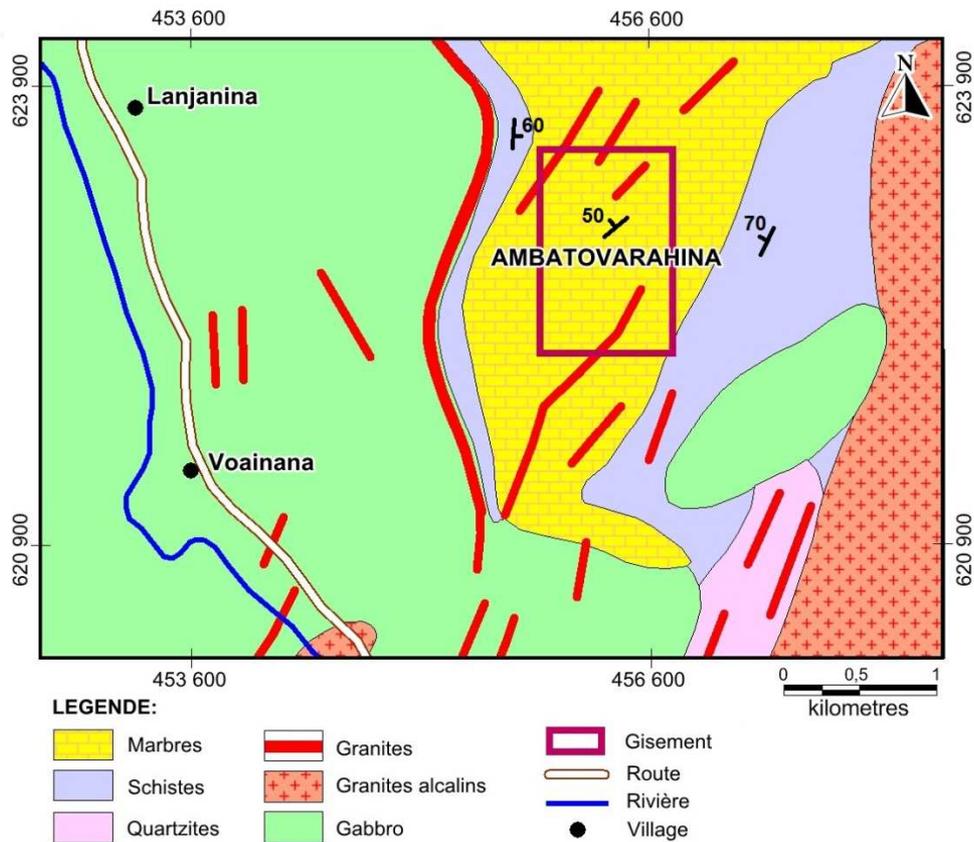


Figure 3 : Carte géologique de la zone d'étude et localisation du gisement de malachite d'Ambatovarahina (modifiée d'après Moine, 1968)

IV.1. Les facies environnants

IV.1.1. Les quartzites

Ils se présentent sous forme de bancs intercalés avec les micaschistes au Sud de la zone d'étude. Ce sont des roches à texture orientée et très fracturées parfois engrenées, de couleur claire, à gros grains et à grains moyens (Figure 4A).

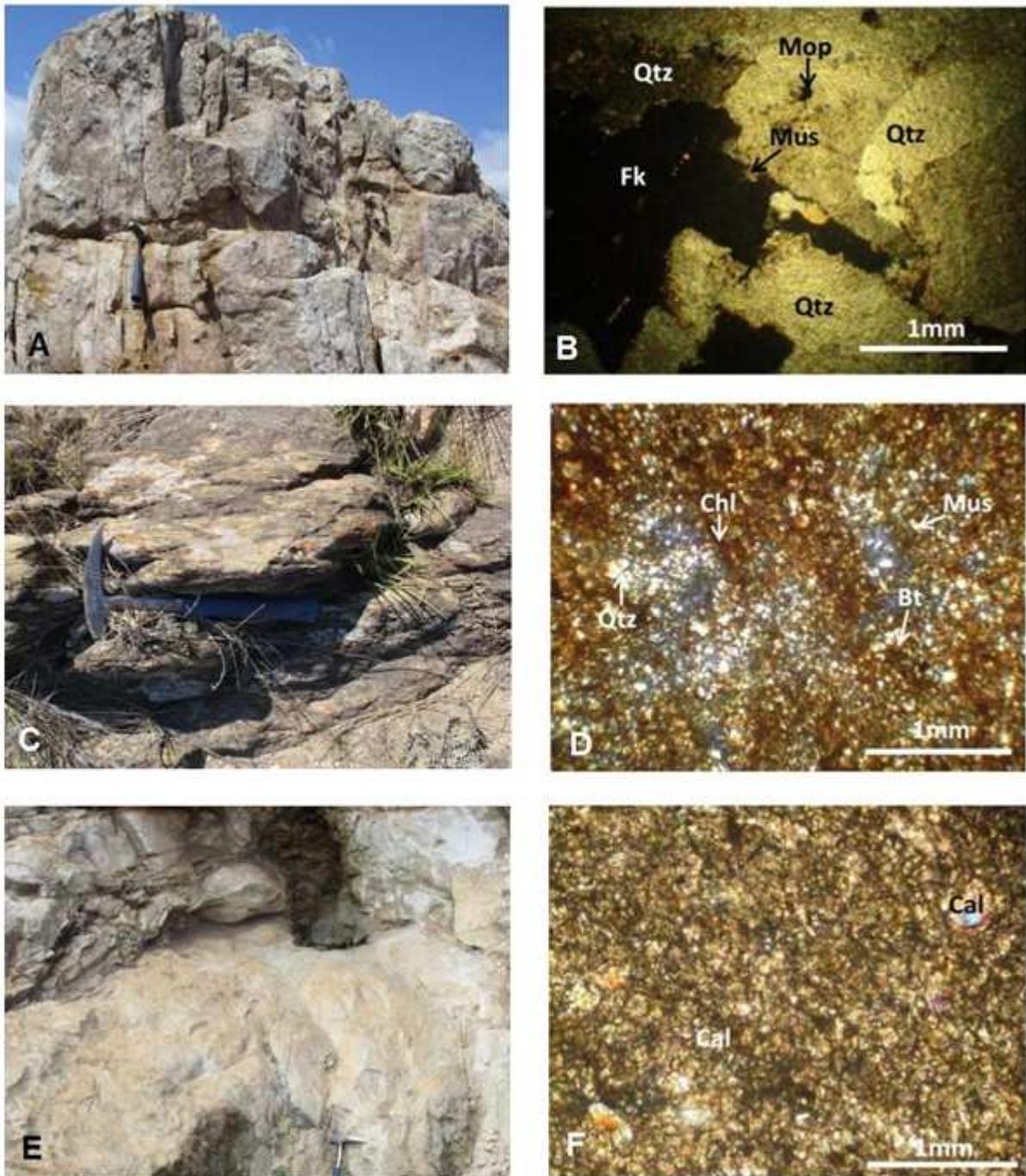


Figure 4 : Les différents faciès métamorphiques dans le secteur d'étude. A : bloc de quartzites ; B : microphotographie de quartzite en lumière polarisée ; C : schistes en banc ; D : microphotographie des schistes en lumière polarisée ; E : bloc de marbres ; F : microphotographie de marbre en lumière polarisée

L'observation microscopique de quartzite présente une structure granoblastique hétérogranulaire (Figure 4B). Cette roche est constituée de : 75% de quartz limpide ; 15% de feldspath potassique, xénomorphe, avec inclusion de muscovite et de quartz ; 7% de muscovite incolore de forme allongée ; 3% de minéraux opaques.

IV.1.2. Les schistes

Ils se présentent sous forme de bancs intercalés avec les marbres, ils se trouvent à l'Est et à l'Ouest du gisement. Ces roches sont fracturées, de couleur grise, à grains fins, à texture schisteuse et altérée (Figure 4C). Elles referment parfois des pegmatites, des microfilons et veinules de quartz concordant ou discordant à la foliation. Au microscope, les schistes présentent une structure lépido-granoblastique hétérogranulaire (Figure 4D). Elles sont constituées 35% de muscovite incolore sous forme de petits cristaux allongés, 25% de biotite qui est en petits cristaux allongés de couleur brun, 20% de chlorite de couleur brun-verte, plus ou moins altéré, 15% de quartz en cristaux de petite taille et 5% de minéraux opaques.

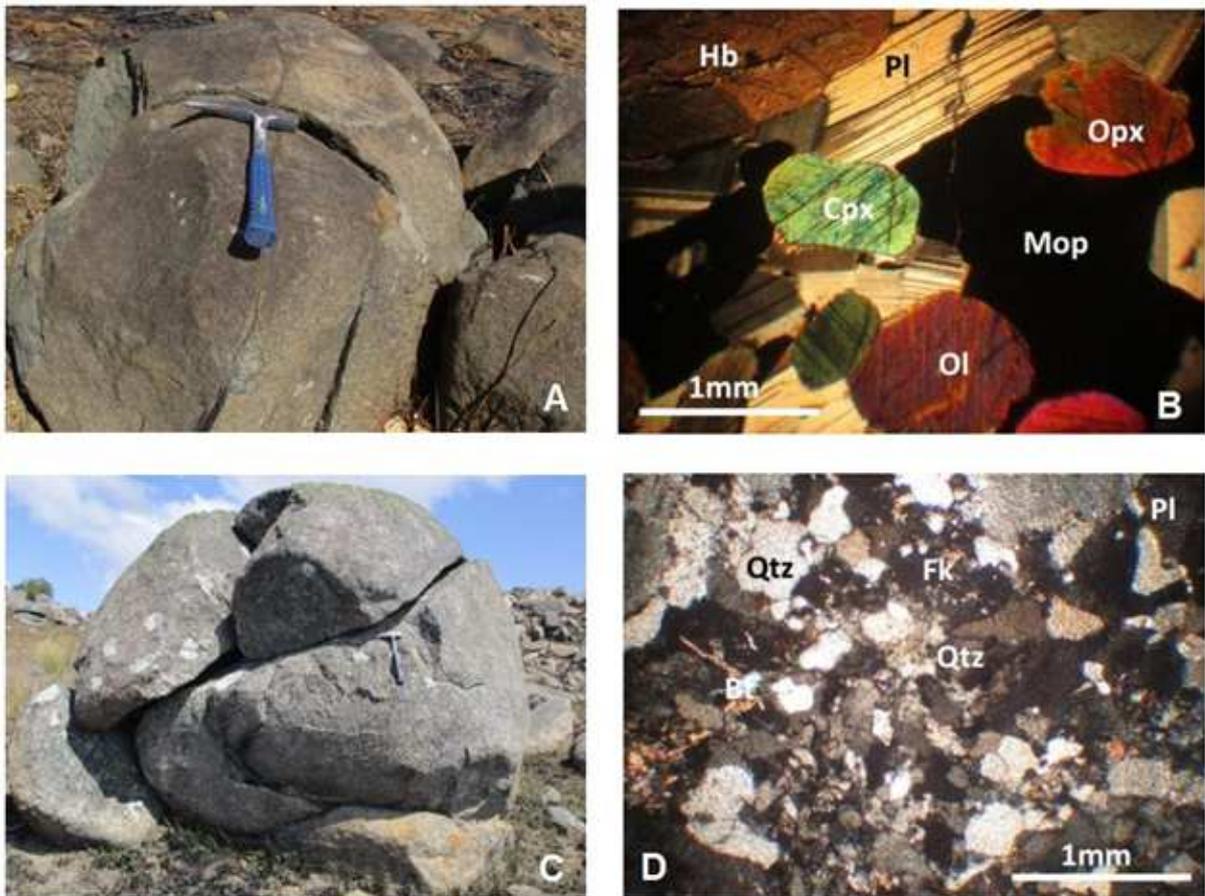


Figure 5 : Les suites magmatiques aux environs du gisement. A : bloc de gabbros de l'Itsindro ; B = microphotographie de gabbros en lumière polarisée ; C : granites alcalins fracturé et en boule ; D = microphotographie de granite en lumière polarisée

IV.1.3. Les marbres

Ils ont une couleur blanche parfois avec des bandes grises, à structure foliée, et généralement à grains, fins (Figure 4E). Ils se forment dans une zone de faible intensité de métamorphisme. L'orientation de la foliation générale des marbres d'Ambatovarahina est de N45 50°NW. L'observation microscopique du marbre présente une structure granoblastique hétérogranulaire (Figure 4F). La roche est formée par la calcite et la dolomite qui sont caractérisées par sa biréfringence très élevée et de teinte irisée.



Figure 6 : Clichés du gisement de malachite d’Ambatovarahina. A : vue panoramique de la mine Pachoud. B : les puits de mine dans la carrière. C : veines à malachite dans les marbres. D : stockwerks à malachite dans un puits. E : filons concordants à la foliation des marbres au fond des puits. F : vue de détail de veine de malachite et cuivre. G : microphotographie de roche à malachite en lumière naturelle.

IV.1.4. Les gabbros

Ils font parties du massif gabbroïque de l'Itsindro qui s'affleure à l'Ouest et au Sud du gisement. Il s'agit des gabbros-noritiques et gabbros-dioritiques à texture grenue, d'âge entre 820 et 760 Ma (Tucker et al., 2012). Ces roches sont facilement altérables à la surface car elles sont très riches en minéraux ferromagnésiens. Les roches saines se débitent en boule, fracturés et parfois très altérées (Figure 5A). Elles sont mélanocrates, typiquement à grains moyens à gros grain. Au microscope, le gabbro montre une structure granoblastique hétérogranulaire (Figure 5B). Cette roche est constituée de : 35% de labrador, en cristaux xénomorphes; 10% de hornblende à relief moyen ; 27% de clinopyroxène qui est en cristaux subautomorphes et à relief moyen ; 15% d'orthopyroxène, en cristaux subautomorphes et à relief moyen ; 10% d'olivine ; 3% de biotite en cristaux allongés et à extinction droite ainsi que 5% de minéraux opaques.

IV.1.5. Les granites

Ils se présentent soit sous forme de massif (type alcalin) qui se trouve à l'Est soit sous forme des filons recoupant certaines roches de la zone d'étude. Ils se débitent en boule et à structure grenue et leucocrate (figure 5C). L'observation microscopique de l'échantillon montre une structure granoblastique hétérogranulaire (Figure 5D). Cette roche est constituée de : 20% de quartz limpide et à extinction roulante ; 35% d'orthose, en cristaux xénomorphes avec macle de Carlsbad; 20% de microcline qui est en cristaux xénomorphes avec macle polysynthétique; 10% de plagioclase en cristaux xénomorphes à macle d'albite ; 7% de biotite en cristaux allongés et à extinction droite; 3% de myrmékite et 5% de minéraux opaques.

IV.2. Les facies minéralisés

La dimension de gisement est de 70m x 400m environ (Figure 6A). L'exploitation des minerais se fait sous forme des puits d'une dizaine à centaine de mètres de profondeur (Figure 6B). Les faciès dans les gisements ont été affectés par un système de fracturation souvent avec ouverture et une déformation ductile matérialisée par les plis et les cisaillements. Les faciès minéralisés sont constitués généralement par la malachite qui se développe la zone métasomatisée du marbre dolomitique (Figure 6C).

L'orientation de la foliation générale de marbres dolomitiques dans la mine varie de N45 à N55 avec un pendage 50°NW, ces roches présentent également trois familles de fractures orientées respectivement de N155 85°ENE, N170 75°WSW et N8 80°W. Ces deux formes de déformation correspondent à la seconde phase de déformation (D2) de direction NS qui est à la fois plicative et cassante, signalé par Fernandez et al., (2003), lors de l'assemblage final du Gondwana à la fin du Néoprotérozoïque et du début du Cambrien. Des fluides hydrothermaux circulent le long des zones de fracturation des roches encaissantes et dans les zones d'ouvertures des cisaillements pour former les faciès minéralisés en malachites. Plusieurs types de minéralisation ont été trouvés dans le gisement (Figures 6C, 6D, 6E, 6F) : de veines millimétriques à centimétriques concordants ou discordants à la foliation des marbres, de filons sur une puissance centimétrique à quelques mètres qui sont généralement concordant à la foliation générale, des lentilles atteignant de quelques décimètres à 2 mètres de puissances qui se trouvent dans les puits, de veinules entrecroisées formant les stockwerks ainsi que minéralisations disséminées dans les marbres. Au microscopique, la roche à malachite montre une structure granoblastique hétérogranulaire (Figure 6G). Elle est formée des agrégats massifs de couleur vert émeraude en assemblage avec 45% de malachite, 15% de la calcite, 10% de chalcopryrite et 30% d'autres minéraux opaques.

V. GEOCHIMIE, MINERALISATION ET HYPOTHESE METALLOGENIQUE

Les analyses chimiques montrent une teneur moyenne en cuivre de 24,43%, 5,03% de calcium et 5,34% de fer. Les teneurs des éléments en trace tels que l'or, l'argent, le cobalt, le molybdène, le nickel, le titane

et le zinc varient de 0,009 à 111ppm (Tableau 1). La teneur en cuivre peut atteindre jusqu'à 30% (Ralantoarison, 2013).

Tableau 1 : Analyses chimiques d'une roche à malachite d'Ambatovarahina

Ref_Point	Au_ppm	Ag_ppm	Ca_%	Co_ppm	Cu-Rp1_%	Fe_%	Mo_ppm	Ni_ppm	Pb_ppm	Ti_ppm	Zn_ppm
Ambatovarahina	0,009	6,1	5,03	111	24,43	5,34	33	44	52	54	39

La minéralisation en malachite ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) se concentre généralement dans le facies carbonaté très fracturé et cisailé pour former un gisement de type skarn. Un modèle proposé sur la genèse de ce gisement montre que la formation des minéraux cuprifères peut être liée aux nombreuses intrusions basiques dans les marbres, suivis de différentes pulsations des fluides sulfureux hydrothermaux tardifs qui sont justifiés par la présence des minéraux sulfureux. La malachite, la chalcopryrite, la galène et autres minéraux sulfureux et minéraux cuprifères sulfureux peuvent être formés en premier lieu. La molybdénite et les autres minéraux cuprifères secondaires comme le cuivre natif se forment ultérieurement. Vue sur l'affleurement, la genèse et le développement de ce type de minéral riche en cuivre varient en fonction du caractère structurale de la roche porteuse et son environnement :

- Dans la zone métasomatique carbonatée où la fracturation est bien développée, la malachite forme un agrégat ou d'imprégnation massive de couleur vert émeraude associé parfois à la minéralisation secondaire en cuivre natif. Ce dernier a formé par pseudomorphose hydrothermale du minéral cuprifère sulfureux existant. Ce type d'échantillon intéresse les ouvriers locaux car le taux du cuivre peut aller jusqu'à 24.43%Cu. Quelques éléments significatifs relevés sur ce type d'échantillon sont 0.009ppmAu, 6.1ppmAg, 39ppmBa, 44ppmNi, 0.948%P, 52ppmPb, 33ppmSr, 17ppmV, 39ppmZn, 54ppmTi. Ces résultats d'analyse chimique d'échantillons collectés indiquent une variation et une différenciation de pulsation de fluides hydrothermale qui affecte la roche carbonatée encaissante.
- Dans la zone métasomatique carbonatée moins développée et plus ou moins cisailé, la malachite se forme d'imprégnation diffuse dans les roches broyées cisailées avec d'autres minéraux tels que la galène, chalcopryrite et des minéraux cuprifère indifférenciés tels que l'azurite, la bornite et la blende. Des stockwerks sont parfois visibles dans la matrice métasomatique carbonatée et sont matérialisés par des veinules minéralisées montrant une association minérale composée de calcite secondaire, de paillète de malachite, de paillète de galène et quelques minéraux indifférenciés riches en plomb, zinc, phosphate et titane.
- Dans la zone foliée ou dans le contact schistes-marbres, la malachite se développe sous forme d'imprégnation diffuse suivant la foliation ou contact entre les roches existantes. Ce type de minéral forme un enduit verdâtre facile à détacher par la main.

VI. CONCLUSION

Le gisement d'Ambatovarahina se trouve dans des marbres interstratifiés avec des quartzites et des micashistes sur le flanc Ouest la ligne de crête de Tsiahazahoana.

Les études structurales réalisées dans les puits, les observations pétrographiques et minéralogiques montrent que les roches riches en malachite se sont formées par métasomatose matérialisée par la circulation de fluides hydrothermaux qui sont contrôlés par le système de fracturation des marbres dolomitiques et les cisaillements. Ces différentes structures tectoniques correspondent à la deuxième phase de la déformation (D2) durant les événements panafricains qui ont été l'origine de la mise en place du gisement d'Ambatovarahina.

Les corps minéralisés se présentent sous forme des filons, des lentilles, des veines et stockwerks qui sont concordants ou discordants à la foliation générale. Au moins deux phases de pulsation des fluides hydrothermaux minéralisateurs ont été proposées pour la formation du gisement. La différenciation des fluides hydrothermaux tardifs ont joué le rôle important à la minéralisation de malachite de la mine d'Ambatovarahina. L'assemblage minéralogique est formé de malachite, de chalcopryrite, calcite, galène et d'autres minéraux cuprifères indifférenciés. La teneur moyenne en cuivre dans le gisement d'Ambatovarahina varie de 24,43% à 30%.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Besairie H., 1966. Gîtes minéraux de madagascar. Ann. Géol. Madagasikara. Fasc. Xxxiv.
- Collins, A.S., 2006. Madagascar and the amalgamation of central Gondwana. *Gondwana Res.* 9 (1-2), 3–16.
2. Cox, R., Coleman, D.S., Chokel, C.B., DeOreo, S.B., Wooden, J.L., Collins, A.S., Kröner, A., De Waele, B., 2004. Proterozoic tectonostratigraphy and paleogeography of central Madagascar derived from detrital zircon U-Pb age populations. *J. Geol.* 112 (4), 379–399.
3. Fernandez, A., Schreurs, G., Villa, I.M., Huber, S., Rakotondrazafy, M., 2003. Age constraints on the tectonic evolution of the Itremo region in Central Madagascar. *Precambrian Research* 123, 87–110.
4. Fournié, L., 1968. Gisements des terres cériques de la région d'Ambatofinandrahana. Rapport BRGM Madagascar. 68 Tan 28.
5. Fournie, L. (1969). Nouvelle étude de la mine de cuivre « Pachoud » (Ambatovarahina), Centre de Madagascar. Bureau de recherche géologique et minière de Madagascar. 69 TAN 13, 39p.
6. Fournie, L. (1970). Mine de cuivre « Pachoud » (Ambatovarahina), Centre de Madagascar. Bureau de recherche géologique et minière de Madagascar. 70 TAN 13, 15p.
7. Joo', J., 1973. Interprétation gîtologique et évaluation économique du cuivre d'Ambatovarahina. Rapport Annuel du Service Géologique pour 1972, pp 47-62.
8. Lacroix, A., 1922. Minéralogie de Madagascar, Tome II, Minéralogie Appliquée Lithologie : in Challamel, A., ed., Librairie maritime et coloniale, Paris, p. 80–92.
9. Lenoble, A., 1936. Sur la découverte d'une faune et d'une flore fossile dans les formations schisteuses de la série schisto-quartzo-calcaire du centre de Madagascar. *C.R. Acad. Sci. Paris*, Vol. 202, 674-675.
10. Moine, B., 1968. Carte du massif schisto-quartzo-dolomitique, région d'Ambatofinandrahana, centre-ouest du socle cristallin précambrien de Madagascar. Centre de l'Institut Géographique National à Tananarive (Imprimeur), Sciences de la terre, Nancy (Editeur), Echelle : 1/200 000.
11. Moine, B., 1974. Caractères de sédimentation et de métamorphisme des séries précambriennes épizonales à catazonales du centre de Madagascar (Région d'Ambatofinandrahana), Approche structurale, pétrographique et spécialement géochimique. Thèse de Doctorat ès-Sciences Naturelles. Université de Nancy I, France, 293p.
12. Nédélec, A., Bouchez, J.-L., Grégoire, V., 2003. Quartz fabric evidence for early Pan-African penetrative east-directed shearing in the Itremo Supracrustal Group of central Madagascar. *Terra Nova* 15, 20– 28.
13. Palache, C., Berman H., and Frondel C., 1951. Dana's system of mineralogy, (7th edition), v. II, 252–256.
14. Ralantoarison L. T., 2013. Pachoud copper mine" in Ambatovarahiana Ambatofinandrahana Center of Madagascar. Geological report of Tanety Lava Society, 8p.
15. Süssse, P., 1967. Verfeinerung der Kristallstruktur des Malachites, $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$. *Acta Cryst.*, 22, 146–151 (in German with English abs.)
16. Tucker, R.D., Kusky, T.M., Buchwaldt, R., Handke, M.J., 2007. Neoproterozoic nappes and superposed folding of the Itremo Group, west-central Madagascar. *Gondwana Res.* 12 (4), 356–379.

17. Tucker, R.D., Peters, S.G., Roig, J.Y., Théveniaut, H., Delor, C., 2012. Notice explicative des cartes géologiques et métallogéniques de la République de Madagascar à 1/1 000 000. Ministère des Mines, Antananarivo, République de Madagascar, 263p.
18. Zigan, F., W. Joswig, H.D. Schuster, and Mason S.A., 1977. Verfeinerung der Struktur von Malachit, $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$. in German with English abs: Durch Neutronenbeugung. Zeits. Krist. 145, 412–426.
19. Ghomari F., 2014. Sciences de matériaux de construction. <http1://ft.univ-tlemcen.dz/assets/uploads/pdf/departement/gc/partie2/cuivre.pdf> ; consulté le 19 octobre 2018.
20. John W. Anthony, Richard A. Bideaux, Kenneth W. Bladh, and Monte C. Nichols, Eds., 2001. Handbook of Mineralogy, Mineralogical Society of America <http2://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/malachite.pdf> ; consulté le 06 octobre 2018.
21. Kelley B., 2015. Azurite, Malachite & Cuprite, The Cooper Minerals. http3://www.eastkingco.org/resources/CopperMinerals_2015-03-20.pdf ; consulté le 06 Octobre 2018.