

Extraction de cuivre dans la malachite par voie hydrométallurgique, Cas de la mine Pachoud d'Ambatvarahina, zone Daraina et zone de Vohibory

Rafalimanana Lydie Jeanne
Ranaivoniarivo Velomanantsoa Gabriely
EAD : Ingénierie des Matériaux et des Matières premières
Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
lydierafalimananan@gmail.com

Résumé

L'objectif de cette étude est d'extraire du cuivre des échantillons de roche malachite par voie hydrométallurgique. Le plan d'étude suit la méthode TIMRDC2R (Titre, Introduction, Méthodologie, Résultat, Discussion, Conclusion, Références et Résumé). La méthodologie adoptée est basée sur une étude explicative et expérimentale. Avec tous les états de recherche déjà menés jusqu'à ce jour, la possibilité d'extraire du cuivre des roches malachites n'est plus un exploit. Par contre, à Madagascar, c'est une première. De toutes les carrières exploitables malagasy, la zone de prélèvement exposée ici est la mine de Pachoud d'Ambatvarahina. Ce choix a été orienté par le taux de cuivre conséquent dans la malachite présente dans ces carrières. Le taux de cuivre dans la roche mère est de 0.12%. À l'aide de la méthode spectrophotométrique Ultra-violet (UV) visible, la concentration et l'absorbance en sulfate de cuivre II de chaque échantillon de roche lixiviée a été déterminée. Le pourcentage de cuivre II présent dans la roche est passé de 0.12% à 91.54% après enrichissement pour l'un des échantillons par exemple. D'après les résultats obtenus lors de cette étude, le taux maximum de cuivre dans la roche est passé de 2% avant la lixiviation, et de 98% après l'opération. Elle est donc comparable avec les minerais du Chili présentant des teneurs en cuivre de 2 à 5 %. La masse de cuivre théorique est légèrement supérieure à celle obtenue après électrolyse. Une étude plus poussée permettrait d'accroître le taux obtenu pour se rapprocher de la valeur théorique. Cependant le rendement est très intéressant. De ce fait, l'exploitation de ces zones est donc envisageable. De plus, l'optimisation des résultats est possible avec des matériels plus performants. Non seulement, l'extraction par voie hydrométallurgique est plus respectueuse de l'environnement, mais elle est aussi plus économique et profitable selon cette étude. En guise de conclusion, Madagascar est dans la capacité de produire du cuivre in-situ grâce à la mine qu'elle possède.

Mots clés : Cuivre, Malachite, Lixiviation, Electrolyse, Hydrométallurgie, Extraction, solvant

1 INTRODUCTION

D'après les données de la société chimique de France (Vignes, 2013), la production annuelle mondiale de cuivre atteint 16,7 millions de tonnes en 2012. Les réserves mondiales en ce temps sont estimées à 680 millions de tonnes de cuivre contenu. À l'échelle continentale, le continent asiatique est le principal promoteur vu qu'il détient les 46% de la production mondiale. Cependant, c'est la Chili qui produit la majeure partie de cuivre contenu, environ 190 millions, grâce à la mine de Chuquibambilla (European Copper Institut, 2018). Pour le cas de Madagascar, bien que le cuivre ait été produit en de nombreux secteurs, aucune minéralisation majeure n'est connue. Toutefois, avant même l'établissement en 1883 du protectorat français sur Madagascar, des prospections eurent lieu à Madagascar par l'administrateur Jean Laborde (1805-1878) qui créa en outre une industrie métallurgique avec haut-fourneau et exploitation de gisements de fer, de cuivre et de plomb (Peters, 2012). Seulement, de nos jours, cette industrie ne fonctionne plus. Or, le cuivre est un métal qui sert de base pour le développement d'un pays (European Copper Institut, 2018). L'autosatisfaction cuprifère de Madagascar pourrait bien redresser son situation économique. Cependant avant l'installation d'une usine, l'étude des mines et des gisements ; des études de faisabilité d'extractions devrait d'abord être faite. Alors, en tant qu'ingénieur matériaux, cet ouvrage a été réalisé. Ce travail a été réalisé suivant la méthodologie explicative et comparative. Dans le présent mémoire, de nombreuses expériences sur des roches malachites provenant de diverses zones de Madagascar ont été effectuées afin de pouvoir en extraire du cuivre par voie hydrométallurgique. Cette méthode d'extraction récupère un plus haut pourcentage du métal contenu dans le minerai. Elle dépense également moins d'énergie et respecte plus l'environnement que le traitement pyrométallurgique. Pour mieux cerner le contenu de ce travail, le plan IMReD (Introduction, méthodologie, résultat et Discussion) sera adopté. Tout d'abord les sites d'exploitation à Madagascar seront abordés. Ensuite, viendra la présentation des méthodologies du travail effectué et les matériels employés. Enfin, une clôture de l'étude avec les résultats et les interprétations de ces derniers avec une brève conclusion.

2 ZONES D'ETUDES

2.1 Etude géologique des gisements de cuivre à Madagascar

Bien que le cuivre ait été produit en de nombreux secteurs, aucune minéralisation majeure n'est connue à Madagascar. Toutefois, des environnements géologiques favorables existent et pourraient être à l'origine de gisements moyens, voire grands (Peters, 2012). Environ 150 indices à cuivre sont recensés à Madagascar, beaucoup d'entre eux étant de nature alluviale. Le secteur idéal pour trouver de grandes minéralisations à Cu serait dans des sédiments cuprifères des bassins de la Protérozoïque semblable à ceux décrits par Boyle en 1989 et Hitzman en 2003. Les domaines principaux qui ont le potentiel pour de grandes minéralisations à Cu sont :

(i) La zone de Daraina au nord où sont localisées les sulfures massifs de type Kuroko et/ou en liaison avec des ophiolites ainsi que les basaltes du Crétacés, principalement ceux présents dans le bassin de Mahajanga, mais aussi situés à l'est de la zone de Daraina.

(ii) Le domaine d'Itremo où se situe de l'hydrothermal ou skarn en liaison avec le magmatisme à 800 Ma comme le gisement de la mine Pachoud.

(iii) Le domaine du Vohibory qui abrite des ophiolites.

Ainsi, il y a également des zones secondaires de minéralisations à Cu, à savoir :

(i) Plus au sud, les indices à Cu dans les secteurs d'Antsahabe-Ankera sont localisés dans les ceintures de roches vertes d'Andriamena et de Beforona. Ces minéralisations sont à mettre en relation avec celles à Ni-Cu d'origine magmatique associées à des intrusions basiques à ultrabasiques.

(ii) Les restes érodés des basaltes du Crétacé de la région de Mahajanga sur le plateau d'Antanimena contiennent de nombreux éléments lithiques à Cu natif (e.g. Maintirano). Dans la même région, des indices de cuivre associés à des limburgites, des basaltes et des sakalavites du Crétacé ont des ressemblances avec les minéralisations à Cu de type basaltique, ou de type volcanique, ou encore de type grès rouge. Les nombreux indices à Cu stratiforme au sein des grès rouges du Permien sont localisés au-dessus de niveaux à lignite dans le secteur de Besakoa. Ces indices à Cu ont des caractéristiques semblables aux minéralisations à Cu sédimentaire. (Peters, 2012)

2.2 Zones de prélèvement

Trois (03) sites (Figures 2 et 3) ont été considérés pour effectuer l'échantillonnage de roche malachite. La mine de Pachoud : dans la région d'Ambatofinandrahana. A une altitude de 1524 m. Et de coordonnées GPS 30°20' 32,4" au Sud et 64°85'52,3" à l'Est. La zone sédimentaire de Daraina : au nord de Madagascar. Dans la région de Daraina dans la province de Diego Suarez. La zone de Vohibory : au Sud de Madagascar. Dans la région d'Ampanihy dans la province de Tuléar. D'ailleurs la société minière de MADA-AUST exploite déjà du cuivre dans la zone d'Ampanihy de nos jours. Les échantillons tout venants prélevés sont présentés respectivement sur les photos (Figure 1) qui suivent :

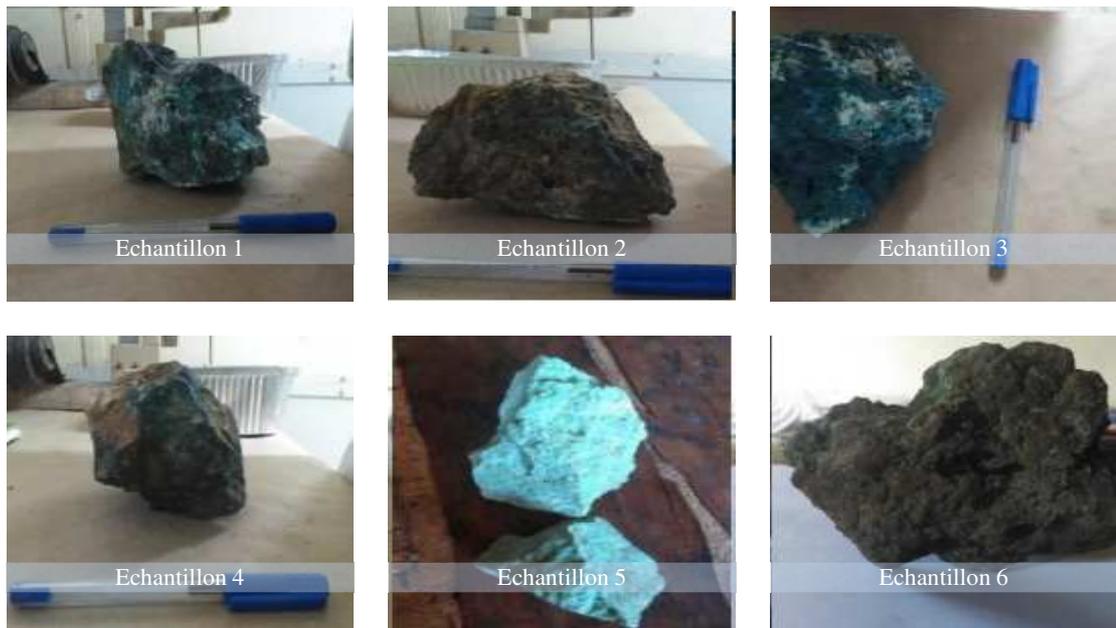


Figure 1. Les différents types de malachite (Rafalimanana et al, 2017)

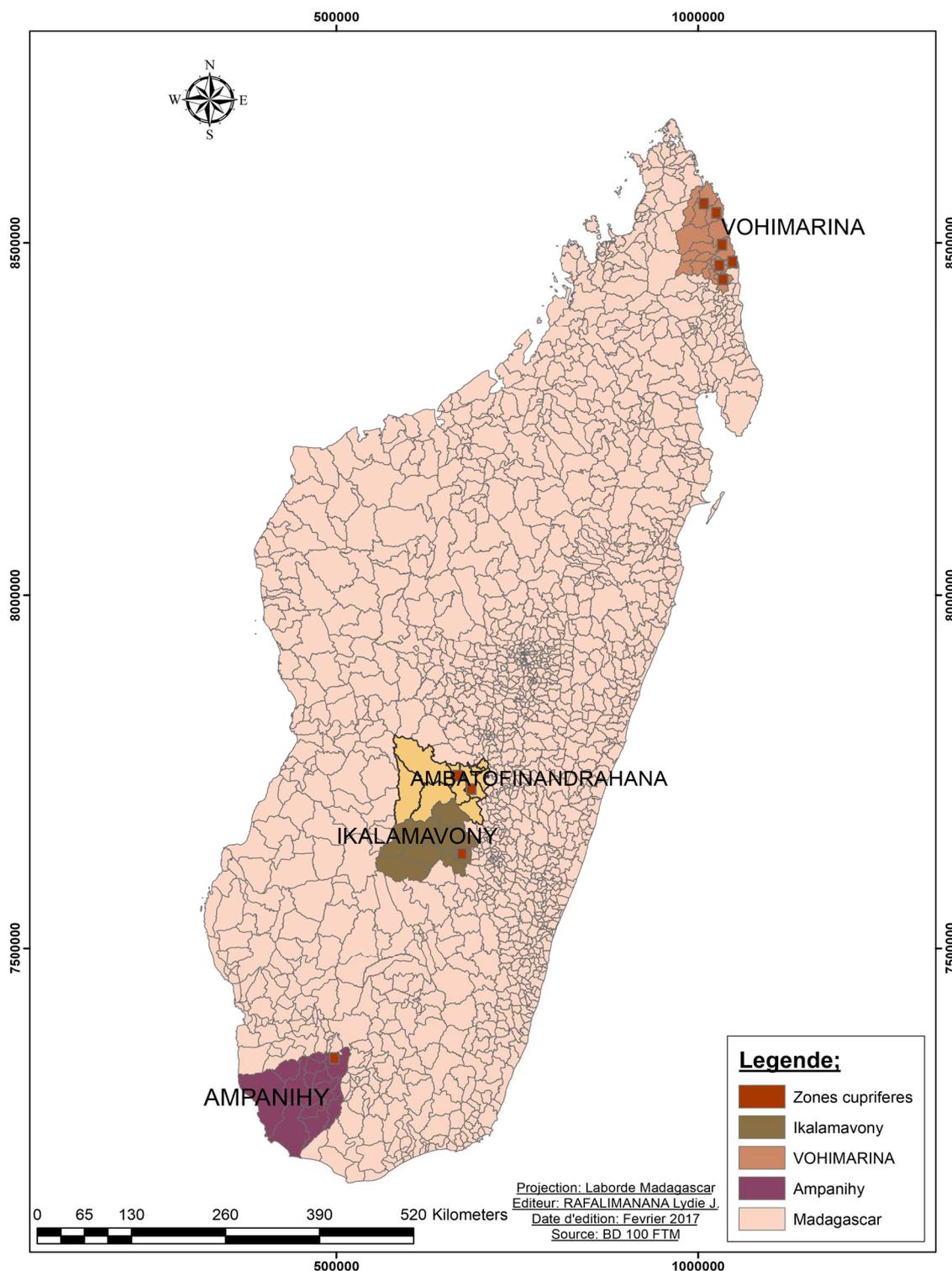


Figure 3. Zones d'échantillonnage (JEANNE, 2017)

3 MATERIELS ET METHODES

L'intégralité de cette étude expérimentale a été réalisée au sein de l'OMNIS (Office des Mines Nationales et des Industries Stratégiques) Mangasoavina et le laboratoire de chimie de l'ESPA (Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo). Encadré par une équipe de recherche expérimentée, l'étude a été réalisée selon les normes de santé et sécurité. Grâce à un système d'échantillonnage et des études analytique physico-chimique, la roche a été

caractérisé et le taux de cuivre identifié. A l'échelle laborantine, le procédé hydrométallurgique a permis d'extraire le cuivre brut de la roche malachite.

3.1 Prétraitement de la roche

3.1.1 Méthodologie

La méthodologie appliquée dans cette étude est l'étude explicative. Après avoir extrait la malachite de la carrière d'exploitation, la roche est acheminée au laboratoire. Le plan de réalisation de l'étude pour le prétraitement est basé sur la figure 4.

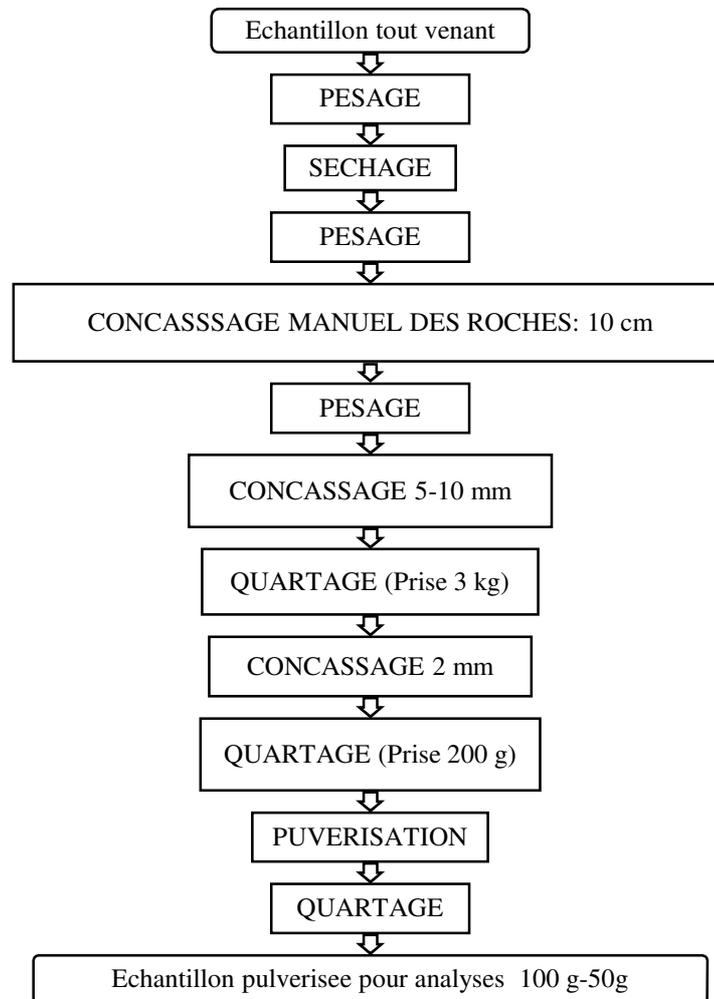


Figure 4. Préparation des échantillons de tranchées

3.1.2 Matériels

Ils sont résumés dans la figure 5.



Figure 5 : Matériels utilisés

3.2 Dosage des éléments majeurs

3.2.1 Matériels et réactifs

Matériels : Balance de précision, creuset en platine, four à moufle, pince inoxydable, capsule en porcelaine, bain de sable, entonnoir en verre, fiole de 500 ml, éprouvette graduée et non graduée, tube à essai, papier filtre moyen, baguette de verre, dessiccateur, bécher de 600 ml, pipette graduée de 50 ml, agitateur magnétique chauffant, barreau aimantée, burette graduée, spatule.

Réactifs : HCl concentrée, solution d'AgNO₃, acide perchlorhydrique concentrée, bleu de bromophénol, solution ammoniacale à 50 %, solution tampon (HCl 0.1N, solution de glycine), solution d'acide salicylique, EDTA 0.03M, acide acétique, acétate d'ammonium, complexonate de cuivre, PAN (pyridylazonaphthol).

3.2.2 Mode opératoire

La détermination de la composition chimique a été faite selon deux types de protocole constitués de 03 sortes de dosage. Le pourcentage des composants chimiques de la roche s'obtient par des formules particulières présentées dans le tableau 1 :

Tableau 1 : Pourcentage des composants chimiques

Éléments chimiques	Dosage selon le protocole du laboratoire de l'OMNIS	Dosage volumétrique au laboratoire de l'ESPA
SiO ₂	P: poids creuset associé au poids du résidu R1 p: poids creuset vide en g $\%SiO_2 = \frac{(P - p) * 100}{0.5}$	M: masse creuset vide M': masse creuset et son contenu après calcination $\%SiO_2 = (M' - M) \times 100$
MOH : Somme des hydroxydes	P3: poids du précipité en g $\% \sum MOH = P_3 \times \frac{100}{0.5}$	$\sum MOH = Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3$

Fe ₂ O ₃	V: volume de la complexion III en ml $\%Fe_2O_3 = \frac{80 * 0,01 * V * 200}{1000 * 10 * 0,5} = 3,2 V$	V: volume d'EDTA versé : Facteur de l'EDTA pour l'oxyde ferrique $\%Fe_2O_3 = V \times f_{EDTA/Fe_2O_3}$
Al ₂ O ₃	$Al_2O_3 = \sum MOH - TiO_2 - Fe_2O_3$	V: volume d'EDTA versé : Facteur de l'EDTA pour l'alumine $\%Al_2O_3 = V \times f_{EDTA/Al_2O_3}$
CaO	V: volume de permanganate en ml $\%CaO = 0,56V$	V: volume d'EDTA versé : Facteur de l'EDTA oxyde de calcium $\%CaO = V \times f_{EDTA/CaO}$
TiO ₂	V: volume de permanganate en ml $\%TiO_2 = 0,4V$	V: volume d'EDTA versé : Facteur de l'EDTA pour le dioxyde de titane $\%TiO_2 = V \times f_{EDTA/TiO_2}$
MgO	ΔP variation de masse avant et après calcination en mg $\%MgO = 200 * P_{MgO} = 0,0361\Delta P(mg)$	V: volume d'EDTA versé : Facteur de l'EDTA de la magnésie $\%MgO = (V_1 - V) \times f_{EDTA/MgO}$
Cu	VE: volume de thiosulfate de sodium à l'équivalence en l $\%Cu = \frac{m_{Cu}}{m_{PE}} \times 100 = 12800V_E$	V: volume d'EDTA versé : Facteur de l'EDTA du cuivre $\%Cu = (V \times f_{EDTA/Cu}) \times 2$

3.3 Dosage spectrométrique UV

3.3.1 Matériel

Verrerie courante et spectrophotomètre UV (Figure 6) réglée à la longueur d'onde 540 nm



Figure 6 : Spectromètre UV LX-300 et son éprouvette (de gauche à droite)

3.3.2 Mode opératoire

Peser 1,4g d'échantillon de malachite. Dans un premier temps, attaquer l'échantillon de malachite par de l'acide nitrique concentré. Après neutralisation et dilution, on obtient une solution de Cu²⁺ de volume 40 ml d'eau. Ajouter

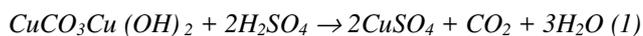
10 ml de solution tampon ammoniacale. Compléter à 100 ml avec eau distillée. Puis agiter. Attendre 30 mn la stabilisation de la coloration et passer à la lecture au spectrophotomètre à la longueur d'onde 550nm.

3.4 Lixiviation

3.4.1 Mode opératoire

Tout commence par le broyage de l'échantillon à lixiviés suivie de son tamisage avec un tamis de module 30. Ensuite viens le mélange de l'échantillon avec de l'eau pure (eau déminéralisée de préférence), d'un ratio 1/3 à 1/10. Soit S la solution obtenu. Puis préchauffer le réacteur de 40 à 50 °C et le faire remplir avec la solution S de 60 à 70% de son volume. Après, tourner l'agitateur du réacteur petit à petit jusqu'à 480 rpm. Et introduire de l'acide sulfurique de concentration 2 mol. L⁻¹ petit à petit d'un volume X (volume X : 10% en masse de l'échantillon à lixiviés). Et pour finir, la lixiviation doit durer entre 30 à 45 minutes.

La lixiviation du cuivre est en accord avec la réaction suivante :



3.5 Extraction solide liquide

3.5.1 Matériels

Beisner, fiole à vide, pompe à air (figure 7) , filtre lent. Réactifs : eau purifiée

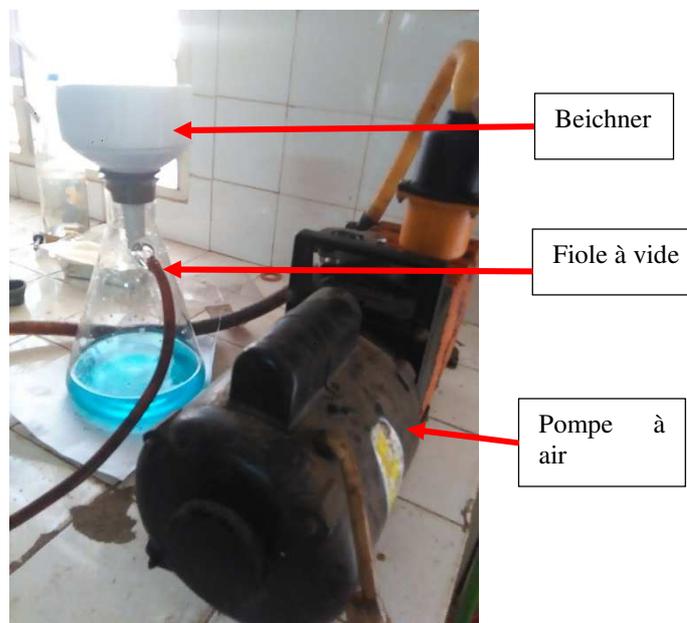


Figure 7 : .Séparation solide liquide

3.5.2 Mode opératoire

Après avoir lixiviés l'échantillon, peser un papier filtre lent. Mettre le papier filtre lent dans le Beisner. Monter le Beisner sur une fiole à vide. Ensuite relier la fiole à vide avec une pompe à air pour accélérer la filtration. Après un certain temps, le gâteau reste dans le Beisner tandis que le jus ou lixiviat passe à travers. Enfin mettre le gâteau dans une étuve à 105 C pendant 24h puis peser. Remarquons que, suivant la teneur recherchée, le jus doit être précipité ou non. Si la teneur n'est pas satisfaisante, recommencer l'analyse et le processus depuis la lixiviation.

3.6 Affinage du cuivre

Matériels (Figure 8):

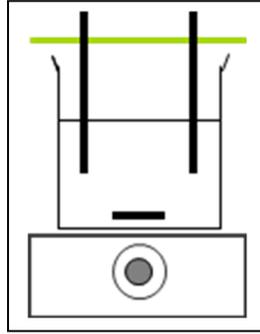


Figure 8 : Matériels pour affinage du cuivre

- ✓ Un générateur de tension continue (12 V - 1 A) ;
- ✓ Un rhéostat (33 Ω - 1 A) ;
- ✓ Un multimètre ;
- ✓ Un chronomètre ;
- ✓ Un électrolyseur constitué :
 - d'un bécher (ou pot) de 200 mL contenant la solution électrolytique
 - de deux électrodes (plaques de cuivre) soigneusement décapées et dégraissées, notées A (pour anode) et C (pour cathode).

Réactifs : Solution de sulfate de cuivre (II)

N.B : Ne pas toucher ces électrodes avec les doigts.

4 RESULTATS

4.1 Pourcentage de cuivre

La malachite ne contient qu'un faible teneur en cuivre. Elle est comprise entre 0,38 et 1,28% pour les tout-venants et de 0,13 à 1,92% pour les passants aux tamis de diamètre D50 et D90.

4.2 Compositions chimiques de la malachite

La comparaison de la composition chimique à des niveaux de granulométrie différente est illustrée par la figure 9.

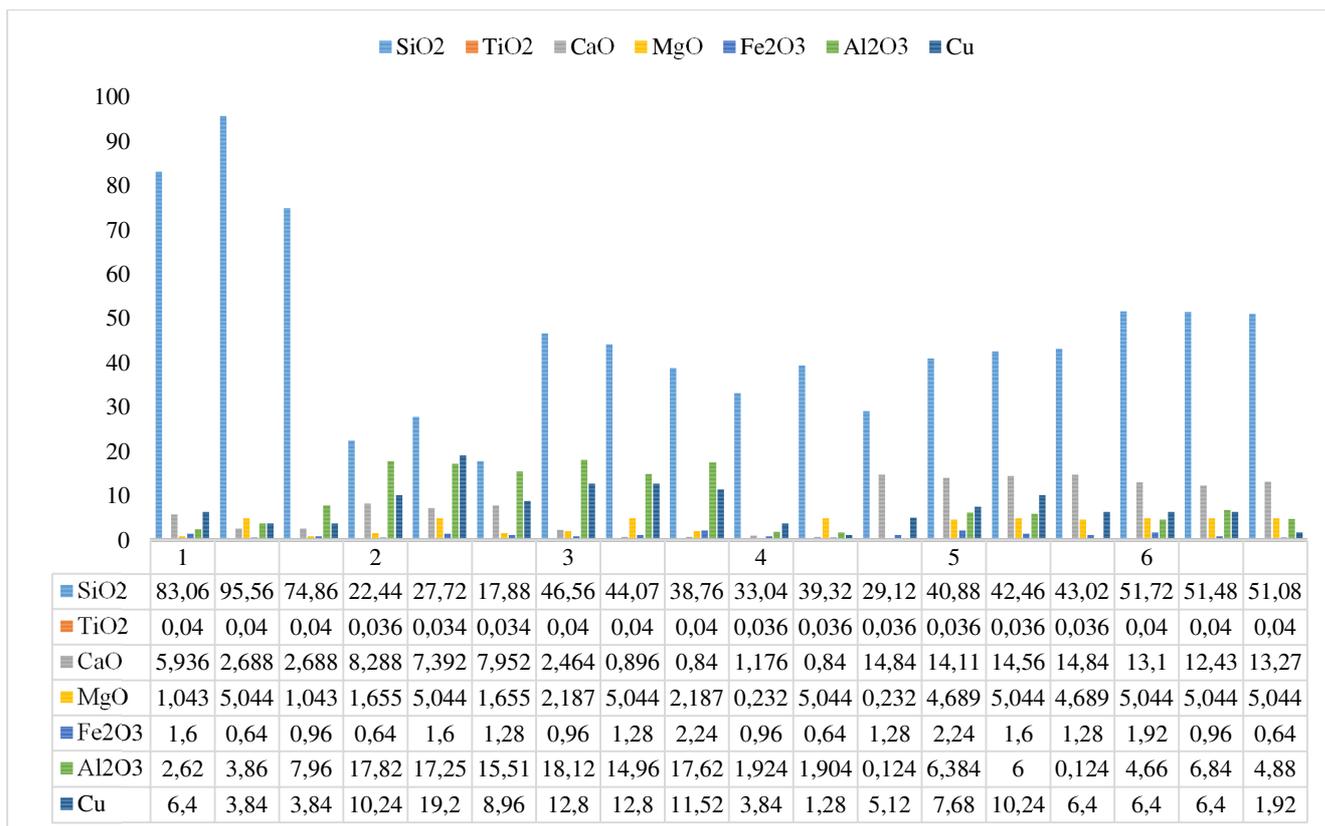


Figure 9. Composition chimique des échantillons de roche malachite

4.3 Lixiviation

La masse de prise d'essai est de 100g. La température varie de 40 à 50°C suivant les échantillons. Pareillement pour le temps. Le volume d'eau de dilution a été choisi selon un protocole déjà établi. Au cours de la mise en solution, l'eau purifiée est ajoutée petit à petit à la solution. Le jus obtenu après la filtration est montré sur la figure 10.



Figure 10. Lixiviats

4.4 Extraction solide-liquide

Les gâteaux obtenus ont été séché à l'étuve puis pesé dans le but de déterminer le rendement de la lixiviation.

4.5 Spectrophotométrie UV-visible

A la fin du dosage spectrophotométrie, des données sont imprimées. Il est à noter que la machine est de marque anglaise. D'où l'impression des résultats tel que le montre le tableau 2.

Tableau 2 .Analyse spectrophotométrique du lixiviat

Sample	Time	Absorbance	Concentration
001	20:12	0.555	25.8255%
002	20:14	1.966	91.5445%
003	20:19	1.755	81.7128%
004	20:23	1.960	86.4112%
005	20:29	1.720	80.0774%
006	20:36	1.898	83.6172%

Dans la première colonne sont placées les échantillons ou « sample » en anglais. Puis dans la seconde colonne s'affiche l'heure exacte de l'exécution de l'opération. A la suite de cette colonne, vient l'absorbance correspondant à une longueur d'onde λ de 540 nm. Et enfin, la concentration exprimée en pourcentage % se trouve dans la dernière colonne. Des 06 échantillons, c'est la 2^{ème} qui a le taux de cuivre le plus élevé. La teneur en cuivre du premier échantillon est infime par rapport aux autres.

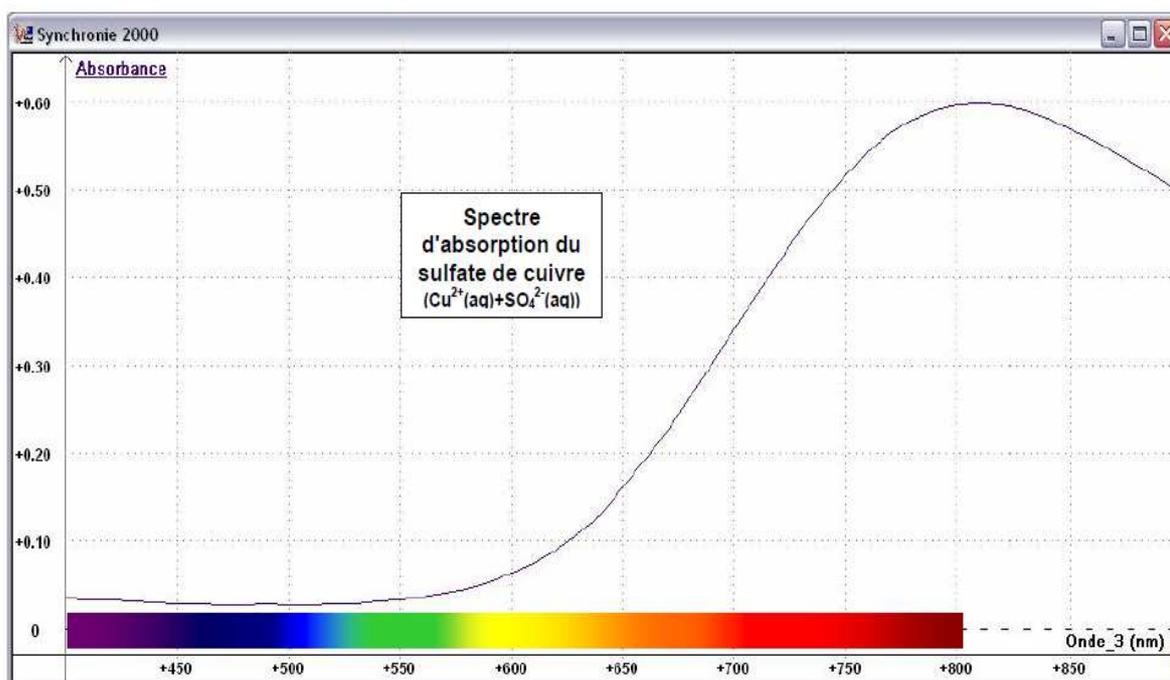


Figure 11 .Spectre d'absorption du sulfate de cuivre

4.6 Electrolyse

Les cuivres contenus dans la solution s'accrochent sur la cathode des électrodes comme le montre la figure 12. La masse des deux électrodes a diminué après l'opération.

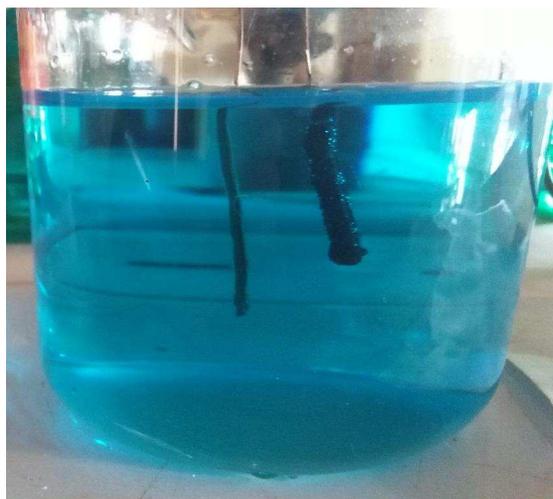


Figure 5. Electrolyse du cuivre

A la fin de l'électrolyse, nous avons pu constater les résultats résumés dans le tableau 3 :

Tableau 3 : Résultats de l'électrolyse

Echantillon	1	2	3	4	5	6
Masse après extraction solide- liquide	97,88	90,88	95,88	88,88	90,88	96,88
Masse lixivié	2,12	9,12	4,12	11,12	9,12	3,12
Masse du cuivre après électrolyse théorique	0.55	8.35	3.37	9.61	7.30	2.61
Masse réelle	0.50	7.85	2.95	9	6.75	2
Rendement	0.91	0.94	0.87	0.94	0.92	0.77

5 DISCUSSION

5.1 Pourcentage de cuivre

En changeant de granulométrie, le pourcentage de cuivre dans chaque échantillon varie. Cependant, le pourcentage optimum n'est pas le même pour tous les cas. Lors du dosage iodométrique, le pourcentage de cuivre prélevé au niveau des 06 types d'échantillons est très faible par rapport à ceux du dosage volumétrique. Cependant comme la roche malachite est une roche oxydée, sa teneur est comprise entre 0 et 2 %. Ainsi, le dosage iodométrique se rapproche plus de la valeur exacte. Afin d'avoir plus de précision, le dosage spectrophotométrique a été réalisé. Il a été montré que les taux de cuivre de la roche se trouvent tous autour de l'intervalle susmentionné.

5.2 Compositions chimiques de la malachite

Les teneurs pour un même type de roche diffèrent. Dans le tableau 22, toutes les valeurs ont été décuplées par rapport au premier. Divers facteurs peuvent être à l'origine de cet écart de pourcentage. A commencer par la différence de protocole. Comme les dosages sont colorimétriques, les erreurs relatives sont à considérer. Puis vient l'état et la contamination des échantillons du fait de l'éloignement des laboratoires et des conditions de travail. Les éléments majeurs représentent plus de 99% de la composition chimique de la roche et ont des concentrations supérieures à 1% en poids dans les matériaux géologiques. La conclusion à tirer est que les éléments majeurs des roches étudiées sont : MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃, SiO₂, CaO, et le TiO₂ est un élément de trace. Le quatrième échantillon se distingue cependant des autres roches malachites, car pour lui, le MgO est un élément mineur.

5.3 Lixiviation

La vitesse de dissolution de la malachite, qui est l'espèce minérale la plus abondante dans les minerais oxydés, est contrôlée par la diffusion des éléments à travers une couche poreuse superficielle. En réacteur agité, on observe en effet que la vitesse de rotation de la turbine influence peu la cinétique de mise en solution. La couleur du jus obtenu nous permet de dire que des 06 échantillons, c'est le troisième échantillon qui se rapproche le plus de la couleur du vert de malachite. Les autres tendent plus à de l'azurite. De plus, le lixiviat numéro trois (03) est très colorant par rapport aux autres. La couleur obtenue est très difficile à enlever. On observe également après analyse du jus, que le taux de cuivre dans chacun des spécimens est très varié. La cause en est le facteur temps et le facteur thermique. Plus la durée de la lixiviation est longue avec une température comprise entre 40° C et 50°C, plus le taux de cuivre contenu est élevé.

5.4 Extraction solide-liquide

Les couleurs des jus observés sont soit bleue soit verte. Le taux de dilution et la durée de lixiviation des échantillons jouent des facteurs en ce terme. Le calcul du rendement permet de déterminer l'efficacité d'une synthèse chimique. L'intérêt du chimiste sera de déterminer des conditions opératoires permettant de l'optimiser pour s'approcher le plus près possible de 100%. Les pertes de rendement peuvent avoir diverses origines : réactions parasites, pertes lors des diverses étapes de la synthèse (filtration, séchage, recristallisation...)

5.5 Spectrophotométrie UV-visible

Les résultats obtenus lors de la spectrophotométrie UV-visible LX 320 sont très précis. La teneur en cuivre prélevée pour les tout-venants se trouve entre une fourchette de 0 à 2%. A la suite de la lixiviation, le taux de cuivre a augmenté de façon exponentielle. Par conséquent, la lixiviation est un succès. L'électrolyse est donc réalisable à l'exception du premier spécimen. L'opération n'est pas possible du fait de la teneur inférieure à 40 %. L'analyse spectrophotométrique UV-visible a permis de faire le point sur la vraie teneur en cuivre des 06 échantillons de malachite avant et après lixiviation. Grâce à elle, la vérification de la possibilité de l'extraction du cuivre se confirme.

5.6 Electrolyse

L'électrolyse est une transformation forcée qui n'a lieu que si le générateur fournit une énergie suffisante pour que puissent se produire simultanément une oxydation à l'anode et une réduction à la cathode.

6 CONCLUSION

Dans l'ambition de développer des solutions énergétiques plus respectueuses de l'environnement, il était nécessaire de trouver un métal qui puisse apporter tous les éléments souhaités. Transformer une énergie en électricité fait partie des préoccupations premières et il est évident que dans ce cadre le cuivre est le métal parfait compte tenu de sa conductibilité parfaite. Sa résistance permet de mettre en place aujourd'hui les installations qui vont durer pendant les siècles à venir. La présente étude intitulée : « *Extraction de cuivre de la roche malachite par voie hydrométallurgique dans la mine Pachoud d'Ambatovarahina, la zone de Daraina et la zone de Vohibory* » a donné l'opportunité d'identifier et d'analyser les roches malachites. De déterminer ces caractéristiques et composantes chimiques.

D'après les résultats obtenus lors de cette étude, le taux maximum de cuivre dans la roche est passé de 2% avant la lixiviation, et de 98% après l'opération. La masse de cuivre théorique est légèrement supérieure à celle obtenue après électrolyse. Cependant le rendement est très intéressant. Des trois zones d'extraction effectuées, c'est la mine de Pachoud d'Ambatovarahina qui est la plus rentable. Nous en concluons donc que Madagascar est dans la capacité de produire pour lui-même grâce à la mine qu'elle possède. Malencontreusement, plusieurs études sont encore à faire pour s'assurer de l'exploitation à l'échelle industrielle de ces mines. A l'aide de matériels plus performant, la possibilité de se rapprocher de la masse théorique est envisageable. Dans le monde moderne, le recyclage est une des principales sources de cuivre. De ce fait, ainsi que du fait d'autres facteurs, l'avenir de la production et de la fourniture en cuivre est l'objet de nombreux débats, incluant le concept de pic du cuivre, analogue à celui de pic pétrolier.

7 BIBLIOGRAPHIE

European Copper Institute., (2018) : *Le cuivre*, Bruxelles, Belgique, <https://copperalliance.eu/about-copper> , (consulté le 30 Janvier 2018)

Peters, S.G., Roig, J.Y., Tucker, R.D., Delor, C., Thévenaut, H., (2012) : *Carte géologique de la république de Madagascar à 1 / 1 000 000*, Ministère des Mines, PGRM, Antananarivo, République de Madagascar,

Palache, C., Berman, H., Frondel, C., (1951): *Dana's system of mineralogy*, Edition John Wiley & Sons, Inc., 7è édition, Université d'Harvard, New York.

Rafalimanana, L.J., Razafimahefa, M., Rasoloniaina, K.A., (2017) : Extraction de cuivre de la roche malachite par voie hydrométallurgique dans la mine Pachoud d'Ambatovarahina, la zone de Daraina et la zone de Vohibory, *Thèse de Master*, Département science et ingénierie des matériaux, Université d'Antananarivo, Madagascar.

Vignes, J.,L., (2013) : *Données industrielles, économiques, géographiques sur les principaux produits chimiques , métaux et matériaux ; Cuivre, alliages de cuivre*, Société chimique de France, 9ème édition, Paris, France.