

Titre

« CARACTERISTIQUES LITHO-STRATIGRAPHIQUES ET REPARTITION SPATIO-TEMPORELLE DU GYPSE DE TATAO »

RASAMIMANANA Valisoa (Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinankaratra, Université d'Antananarivo)

TSIRAVONJATOVO Noela Mahatsangy (Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo)

Résumé

Tatao constitue une zone riche en gypse, elle se situe à 20 km d'Ambondromamy, dans le bassin sédimentaire de Mahajanga, Madagascar. En tant que minéral évaporite, le gypse résulte de la précipitation d'ions dans un milieu saturé. Ce processus est influencé par des facteurs climatiques, tectoniques, environnementaux de dépôt et chimiques. Actuellement, il n'existe pas de synthèse locale qui résume la la formation du gypse dans la région et son lien avec les phénomènes géologiques locaux. Cette étude vise à caractériser la litho-stratigraphie de la zone en s'appuyant sur la répartition spatio-temporelle du gypse. L'observation des affleurements sur le terrain de la zone d'étude et le traitement des données sur le mouvement des plaques par le logiciel libre Gplate permettent de fournir des éléments de réponses sur la mise en place du gypse de Tatao. La zone qui présente un potentiel significatif de gypse est située au sein de la formation du Jurassique supérieur, délimitée à l'est par la faille d'Ambondromamy et à l'ouest par l'escarpement d'Ankarafantsika. Elle serait lagunaire et de forme convexe dirigée vers le socle à l'Est. La variation eustatique de la mer suivie par le rifting, au Jurassique supérieur, a probablement favorisé la précipitation du gypse. Les caractéristiques litho-stratigraphiques de la région comprennent des argilites, des couches marneuses, ces dernières abritant des fossiles et des septarias.

Mots clés : Sédimentologie, paléoclimat, lagon, gypse, Ambondromamy

1- Introduction

Le gypse est un minéral évaporite, un sulfate de calcium hydraté $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Son processus de formation est le résultat de la précipitation d'ions en solution dans un milieu saumure conditionné par des facteurs : chimique, climatique, tectonique, eustatiques et son environnement de dépôt (Usiglio, 1849 ; Holser et al., 1979 ; Harvie et Weare, 1980 ; Warren, 2010) . Le gypse est utilisé dans la fabrication de ciments, de plâtre, de peinture, de colle et des engrais. Il peut servir de matière première en chimie et dans l'industrie à l'état pur.

Tatao est un village situé au Nord du carrefour de la Route Nationale RN6 et RN4, à environ 20km de la Commune d'Ambondromamy, du District d'Ambato-Boeny, Région Boeny. La présence des veinules de gypse dans la zone notamment aux alentours de Betsiboka et à Ankara a déjà signalé par Lacroix (1922a) et Besairie (1964). L'étude de BRGM (1985) a confirmé l'intérêt économique de l'exploitation de gypse pour l'industrie de cimenterie. La société SECAM a fait également une étude d'évaluation des réserves du gisement gypsifères en 2011. Du point de vue géologique, la zone se situe dans une formation Karroo du bassin sédimentaire de Mahajanga d'âge Jurassique supérieur (Besairie, 1966a). Les gypses se rencontrent souvent dans les marnolites (termes calcaires de la série marneuse, plus riche en argile que les calcaires marneux) Lacroix (1922a).

Actuellement, il n'existe pas de synthèse paléogéographique et sédimentologique à l'échelle locale permettant de mettre en relation les différents stades d'ouverture du Canal de Mozambique avec l'évolution du remplissage sédimentaire et le rôle de la tectonique dans la compréhension de la genèse du gypse de Tatao. L'objectif de cette étude vise à caractériser la litho-stratigraphie et à cartographier la distribution spatio-temporelle du gypse, ce qui permet de comprendre les mécanismes de sa formation à travers une analyse des données recueillies sur le terrain.

2- Matériels et méthodes

La méthodologie est structurée en deux phases distinctes : la première phase consiste en une prospection sur le terrain et une reconnaissance géologique sur place, suivie de la phase ultérieure qui implique le traitement des données à l'aide des outils logiciels de la Fondation OSGeo (Open Source Geospatial Foundation, Qgis) et de l'Université de Sydney grâce à Gplates.

La reconnaissance géologique englobe l'observation et la description macroscopique des affleurements, des tranchées et des puits. Tatao, Andalatapaka, Beronono, Amboazango, Tsaramandroso, Amborondolo et Betaramahamay, qui se trouvent à Ambondromamy, ont été visités lors de campagnes sur le terrain en novembre 2021 et décembre 2022 dans le cadre de cette étude.

L'itinéraire a été planifié de manière à couvrir l'ensemble de la zone, notamment les formations géologiques significatives associées au gypse. Des échantillons de gypse, de sédiments marneux, d'argiles et de fossiles ont été prélevés sur tous les sites en vue d'analyses ultérieures. Les informations concernant les caractéristiques litho-stratigraphiques et les sites potentiels en gypse sur le terrain sont ensuite croisées avec la carte géologique préexistante du bassin sédimentaire de Mahajanga (Besairie, 1964) ainsi qu'avec des données topographiques de Digital Elevation Model (<https://portal.opentopography.org>), dans le but de créer une carte de distribution spatiale du gypse. L'ensemble du processus est réalisé à l'aide du QGIS.

Pour obtenir une meilleure compréhension de l'environnement de dépôt dans la zone, il est nécessaire d'analyser l'évolution du mouvement de Madagascar lors de sa séparation avec l'Afrique. L'étude de l'ouverture des bassins océaniques de Somalie et du Mozambique est abordée en utilisant GPlates. Les données utilisées incluent les reconstructions paléogéographiques mondiales de Müller et al. (2018), Smith et al. (1994) et Golonka et al. (2006), ainsi que la base de données sur la paléobiologie (Paleobiology Database, <https://paleobiodb.org>). Cette base fournit des informations paléobiologiques pour cette étude. Elle peut aider à reconstituer les environnements anciens et à expliquer les mécanismes de formation du gypse en identifiant les interactions entre les organismes et les conditions environnementales.

3- Résultats

Répartition spatiale du gypse

En général, l'observation des affleurements, l'étude des tranchées et des puits met en évidence des formations argileuses et marneuses prédominantes avec des fossiles et des septarias. La partie orientale de la zone présente le socle cristallin du domaine d'Antananarivo. Quant à la partie Nord-Ouest, elle est constituée d'une formation continentale de type gréseuse à grain fin, de couleur rougeâtre, traversée par des veines basaltiques résistantes à l'érosion (Figure 1). La zone à potentielle en gypse de Tatao est observée dans la formation du Jurassique supérieur, au cœur de la grande faille d'Ambondromamy à l'Est et l'escarpement du massif Crétacé moyen et inférieur d'Ankarafantsika à l'Ouest (Figure 2).

Caractéristiques litho-stratigraphiques

En général, la série sédimentaire est divisée en trois formations litho-stratigraphiques: les couches supérieures d'argilites, les couches intermédiaires composées d'argile marneuse et/ou de marne argileuse et la couche marneuse (figure 3). La variation latérale du faciès litho-stratigraphique

de la zone se caractérise par la présence de sédiments fins mélangés avec des fossiles marins et de fines couches de gypse.

Les argilites ferrugineuses se présente comme des dépôts de surface d'épaisseur variable, allant de 10 cm à 2,5 m. Elles sont constituées de grains fins et présentent une palette de couleurs variées (gris, rouge, jaune, vert). Leur particularité réside dans la présence de nodules de fer et d'Ammonites pyriteuses de petite taille. Occasionnellement, le gypse apparaît sous forme de roses de sable et prenant la teinte de la couche dans laquelle il se trouve.

La partie intermédiaire, généralement de couleur gris rougeâtre, est constituée d'argiles marneuses et/ou marne-argileuses à grain fin, d'une épaisseur moyenne de 7 m. Ces couches sont entrecoupées des veines de gypse fibreux et laiteux, dont l'épaisseur varie de 0,5 à 5 cm. Ces veines sont en général en concordance avec la stratification, mais ils peuvent fréquemment présenter des déformations et des fractures irrégulières (Figure 3). À ce niveau, on trouve des nodules de septarias mesurant entre 30 et 50 cm, et des fossiles typiquement marins tels que les Bélemnites, les Ammonites (à forme très bombée), les Brachiopodes et les Lamellibranches, qui sont abondants.

La base marneuse apparaît à une profondeur d'environ 10 m, constituée de grains fins. Les septarias, peuvent atteindre un diamètre d'environ un mètre, tandis que les Ammonites parviennent parfois à dépasser les 25 cm, moulés dans la marne. Les Bélemnites demeurent toujours présentes, mais les autres fossiles sont absents. Cependant, la concentration de gypse commence à diminuer progressivement.

Paléogéographie et environnement de dépôts

La figure 4 illustre l'évolution du mouvement de Madagascar lors de sa séparation de Gondwana. Il y a environ 200 Ma, l'île était encore connectée à l'Afrique. Entre 175Ma et 150 Ma, Madagascar a commencé à s'éloigner progressivement de l'Afrique en se déplaçant vers le Sud-Est, atteignant une position à environ 30° Sud vers 125 Ma. Par la suite, il a continué son mouvement en se rattachant à l'Inde et en remontant ensemble, avant de se détacher complètement en 75 Ma. L'ouverture du Canal de Mozambique a laissé des traces de rifts entre la Somalie, le Mozambique et Madagascar. La base de données en paléobiologie (<https://paleobiodb.org>), examinée à l'aide de GPlates, met en évidence une abondance de fossiles sur une période s'étendant de 200 Ma à 100 Ma dans la zone concernée. En revanche, pour la période allant de 100 Ma à l'Actuel, la collection ne renferme que quelques spécimens fossiles en collection générale. La zone riche en gypse dans la zone d'étude est associée à ces fossiles marins et très abondant, tels que les Ammonites et les Bélemnites.

4- Discussion

Environnement de dépôts

La zone à potentiel en gypse de Tatao est positionnée entre deux éléments structuraux majeurs : la faille d'Ambondromamy à l'Est et l'escarpement (cuesta) d'Ankarafantsika à l'Ouest.

- La faille suit en général une direction NNE - SSW, s'alignant avec la structure de décrochement du rift continental extensif du bassin sédimentaire de Mahajanga, comme observé par Soukoreff en 1991. Cette disposition suggère que Madagascar a subi un déplacement vers le Sud-Est en suivant le ride de Davie lors de la première phase d'ouverture du bassin. Ce phénomène s'est déroulé pendant les périodes du Permien-Triasique et du Jurassique moyen au Jurassique supérieur (175 Ma - 150 Ma), correspondant à la phase de rifting lors de l'ouverture simultanée des bassins de Somalie et du Mozambique (Coffin & Rabinowitz, 1987; Segoufin & Patriat, 1980; Razafindrazaka et al., 1999 ; Reeves & De Wit, 2000; Matthews, et al., 2012; Roig et al., 2012 ; Tucker et al., 2014).

- Le soulèvement d'Ankarafantsika correspond à la réponse isostatique du magma basaltique à la fin du Crétacé (Besairie & Collignon, 1972). Cette élévation topographique joue un rôle de barrière naturelle qui atténue l'énergie hydrodynamique. Par conséquent, les courants et les vagues sont relativement calme. Cela favorise le dépôt progressif et l'accumulation des sédiments fins, correspondant avec les caractéristiques litho-stratigraphique de la zone.

L'existence d'une dépression au sein de cette zone est la résultante de l'interaction de ces deux phénomènes, engendrant ainsi la création d'un lagon propice à la précipitation du gypse. Ces observations viennent renforcer l'hypothèse avancée précédemment par Besairie & Collignon (1972) concernant l'environnement de type lagunaire qui caractérise cette région. Ces occurrences sont marquées par des événements tectoniques résultant de la séparation de Madagascar avec l'Afrique et des ajustements des rifts (Razafimbelo, 1987 ; Besairie & Collignon, 1972 ; Razafindrazaka, et al., 1999 ; Roig et al., 2012).

Paléoclimat

Parallèlement aux conditions environnementales de dépôt, le climat revêt une importance primordiale dans le processus de précipitation du gypse. Au cours de la période Jurassique, Madagascar, située à une latitude d'environ 30° Sud, a été marquée par des conditions climatiques arides (Scotese & McKerrow, 1990 ; Scotese, Boucot & McKerrow, 1999 ; Rees, Ziegler & Valdes, 2000; Tabor & Poulsen, 2008; Scotese et al., 2014b, 2014c, 2014d ; Scotese et al., 2021). Ces

conditions climatiques sont liés au déplacement de la grande masse continentale de Gondwana (Elouard, 1984 ; Frohlich, 1996 ; Scotese, Boucot & McKerrow, 1999 ; Tabor & Poulsen, 2008). Cette phénomène tectonique a eu un impact sur la circulation océanique de Téthys et sur les paramètres atmosphériques (Scotese, & Moore, 2014a). L'interaction complexe entre les mouvements des plaques tectoniques, les courants océaniques et les paramètres atmosphériques pourraient influencer les conditions climatiques chaudes du Jurassique et du Crétacé.

En conséquence, le réchauffement climatique a conduit à la déglaciation, entraînant une élévation du niveau de la mer (Clark & Ramanampisoa, 2002 ; Maganuco, Cau, & Pasini, 2005), favorisant ainsi la précipitation du gypse. Ces périodes sont caractérisées par une évolution significative de la biosphère dans les milieux aquatiques du bassin sédimentaire de Mahajanga . La présence de fossiles marins tels que les Ammonites, les Bélemnites, les Brachiopodes et les Lamellibranches, moulés dans la marne, témoigne d'un environnement marin sursaturé (Zakharov et al., 2016) et calme de la zone d'étude (Rakotonimanana, 2006).

Séquence sédimentaire et formation de gypse

Les caractéristiques litho-stratigraphiques des séries sédimentaires confirment un mode de dépôt par décantation, associé à un environnement lagunaire à faible énergie hydrodynamique. La couche marneuse à la base représente le premier dépôt sédimentaire de la zone, marquant le début de la transgression marine lors de séparation de Madagascar avec l'Afrique. Par la suite, le réchauffement climatique au cours du Jurassique a créé des conditions favorables à la précipitation du gypse. En conséquence, des veinules de gypse se forment en intercalation avec le faciès marne-argileux comme Besairie & Collignon en 1972 ont noté. La présence de fossiles d'Ammonites à coquille bombée indique un bassin peu profond avec un niveau de la mer relativement bas (Rakotonimanana, 2006), et les Bélemnites correspond à l'âge Jurassique et Crétacé (Doyle, P., 1987). La teinte gris-rougeâtre observée correspond à un phénomène d'oxydation qui se produit dans un environnement oxygéné en subsurface.

La disposition irrégulière des veines de gypse, illustrée par des flexures et des fractures, témoigne d'une extension à la fois horizontale et verticale (Lecomte et al., 2018) ou zone faillée (Rustichelli et al. , 2016). Ce phénomène pourrait être lié à la réactivation des rifts et à l'occurrence de séries de séismes à l'échelle locale . La variation de taille des septarias long du log stratigraphique pourrait corroborer cette théorie en lien avec la subsidence gravitationnelle durant les séismes. La présence de nodules de fer et d'ammonites pyriteuses dans les couches d'argile pourrait suggérer un environnement de dépôt en subsurface, influencé par des processus géochimiques particuliers. La

pyritisation des fossiles est un phénomène complexe. En principe, le processus consiste à remplacer des tissus organiques d'un organisme par des minéraux de pyrite (Briggs et al., 1991). Cela nécessite une concentration suffisante de sulfate et de fer pour favoriser la pyritisation. La morphologie du gypse à Tatao présente des variations en corrélation avec les niveaux de couches qu'il renferme. Le gypse fibreux se trouve associé à la couche marne-argileuse, tandis que la variété rose de sable est liée aux couches argileuses en sous-surface. Cette diversité morphologique est influencée par des facteurs géologiques, climatiques et principalement chimiques (Blättler et al., 2014 ; Rustichelli et al., 2016).

5- Conclusion

Le gypse est un minéral évaporite utilisés fréquemment dans les industries, en particulier dans la construction. Sa formation dépend de l'interaction de facteurs géologiques complexes. Cependant, bien que la présence de gypse dans le bassin sédimentaire de Mahajanga, à Madagascar a été mentionnée, aucune étude locale n'a été menée pour examiner la manière dont les différentes étapes de l'ouverture du Canal de Mozambique sont liées à la sédimentation de la zone potentiellement riche en gypse. Cette étude se concentre sur la litho-stratigraphie et la distribution spatio-temporelle du gypse de Tatao, région d'Ambondromamy située dans le bassin sédimentaire de Mahajanga, Madagascar.

Les travaux de prospection sur terrain et la reconnaissance géologique ont révélé une séquence sédimentaire caractérisée par des formations litho-stratigraphiques distinctes, comprenant des argilites, de l'argile marneuse et des couches riches en gypse. Le contexte géologique de la zone d'étude est influencé par la faille d'Ambondromamy et l'escarpement d'Ankarafantsika, créant un environnement sédimentaire propice à la précipitation du gypse de type lagunaire. Ce phénomène est attribué à des événements tectoniques liés à la séparation de Madagascar avec l'Afrique et aux ajustements des rifts, favorisant la structure irrégulière du dépôt de gypse. La carte de répartition spatiale met en évidence une zone à fort potentiel de gypse, délimitée par ces deux éléments structuraux majeurs. La position de Madagascar pendant sa séparation avec l'Afrique correspond à un climat aride à l'époque de Jurassique. Le réchauffement climatique a entraîné la fonte des glaces et l'élévation du niveau de la mer. Cela a contribué à la formation du gypse et à l'abondance des fossiles marins, notamment les Ammonites et les Bélemnites dans les couches marneuses de la région.

Cette étude fournit des informations essentielles sur l'origine du gypse dans la région. Le gypse de Tatao pourrait servir d'indicateur de la réchauffement climatique du Jurassique, en tenant compte les conditions tectoniques.

Références bibliographiques

- Lacroix, A. (1922a). Minéralogie de Madagascar, Tome I, *Minéralogie Appliquée Lithologie: in Challamel, A., ed., Librairie maritime et coloniale, Paris.*
- Besairie, H. (1964). Carte géologique de Madagascar. *Service Géologique de Madagascar, Antananarivo*, 1/1000000 (colour), 3 sheets.
- Gites Minéraux de Madagascar: Annales Géologiques de Madagascar, Fascicule XXXIV; *Tananarive Imprimerie Nationale. Madagascar, échelle: 1:1 000 000, color (3 sheets).*
- Besairie, H., & Collignon, M. (1972). Géologie de Madagascar. I. Les terrains sédimentaires. *Service Géologique de Madagascar.*
- Blättler, Clara L., & Higgins, J. A. (2014). Calcium isotopes in evaporites record variations in Phanerozoic seawater SO₄ and Ca. *Geology*, 42(8), 711-714.
- BRGM (1985). Plan directeur d'action pour la mise en valeur les ressource de sol et sous sol de Madagascar, Service Géologique de Madagascar, Antananarivo, 65-77.
- Briggs, D. E., Bottrell, S. H., & Raiswell, R. (1991). Pyritization of soft-bodied fossils: Beecher's trilobite bed, Upper Ordovician, *New York State. Geology*, 19(12), 1221-1224.
- Coffin, M. F., & Rabinowitz, P. D. (1987). Reconstruction of Madagascar and Africa: evidence from the Davie fracture zone and western Somali basin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B9), 9385-9406.
- Doyle, P. (1987). Lower Jurassic-Lower Cretaceous belemnite biogeography and the development of the Mesozoic Boreal Realm. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 61, 237-254.
- Frolich, F. (1996). La position de Madagascar dans le cadre de l'évolution géodynamique et de l'environnement de l'Océan Indien. *Laboratoire de Géologie, Muséum National d'Histoire Naturelle 43, rue de Buffon 75005 Paris Biogéographie de Madagascar*, 19-26.
- Golonka, J., Gahagan, L., Krobicki, M., Marko, F., & Oszcypko, N. (2006). Plate-tectonic evolution and paleogeography of the circum-Carpathian region. In J. Golonka and F. J. Picha [985606M843066]. *The Carpathians and their foreland: Geology and hydrocarbon resources: AAPG (The American Association of Petroleum Geologists). Memoir 84*, 11-46.

- Harvie, C. E. & Weare, J. H. (1980). The prediction of mineral solubilities in natural waters: the Na-K-Mg-Ca-Cl-SO₄-H₂O system from zero to high concentration at 25°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(7), 981-997.
- Holser, W. T., Kaplan, I. R., Sakai, H., & Zak, I. (1979). Isotope geochemistry of oxygen in the sedimentary sulfate cycle. *Chemical Geology*, 25 (1-2), 1-17.
- Lecomte, A., Charmoille, A., & Kreziak, C. (2018). Dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol: analyse et gestion des aléas mouvements de terrain de type affaissement et effondrement. In *Journée technique « Gypse: de la dissolution à la gestion du risque »*. Verneuil-en-Halatte, France. [ineris-03239375].
- Matthews, K. J., Seton, M., & Müller, R. D. (2012). A global-scale plate reorganization event at 105– 100 Ma. *Earth and Planetary Science Letters*, 355, 283-298.
- Müller, R. D., Cannon, J., Qin, X., Watson, R. J., Gurnis, M., Williams, S., & Zahirovic, S. (2018). *GPlates: Building a virtual Earth through deep time. Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(7), 2243-2261.
- Müller, R. D., Zahirovic, S., Williams, S. E., Cannon, J., Seton, M., Bower, D.J., Tetley, M. G., Heine, C., Le Breton, E., Liu, S., Russell, S. H. J., Yang, T., Leonard, J., & Gurnis, M. (2019). A Global Plate Model : Including lithospheric deformation along major rifts and orogens since the Triassic : Tectonics, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 38(6), 1884-1907.
- Rakotonimanana, R. (2006). Biostratigraphie des macrofossiles d'invertébrés de l'Albien d'Ambatolafia, Bassin de Mahajanga. *Thesis, Département de Paléontologie et d'Anthropologie Biologique, Université d'Antananarivo, Madagascar*, 39 (1), 116-126.
- Razafimbelo, E. (1987). Le Bassin de Morondava (Madagascar). Synthèse géologique et structurale. *Thèse de Docteur-Ingénieur, ULP Strasbourg*, 241.
- Razafindrazaka, Y., Randriamananjara, T., Piqué, A., Thouin, C., Laville, E., Malod, J., & Réhault, J. P. (1999). Extension et sédimentation au paléozoïque terminal et au Mésozoïque dans le bassin de Majunga (Nord-Ouest de Madagascar). *Journal of African Earth Sciences*, 28(4), 949-959.
- Reeves, C., & De Wit, M. (2000). Making ends meet in Gondwana: retracing the transforms of the Indian Ocean and reconnecting continental shear zones. *Terra Nova*, 12(6), 272-280.
- Roig J.Y., Tucker, R.D., Peters, S.G., Roig, J.Y., Théveniaut, H., Delor, C. 2012. Notice explicative des cartes géologique et métallogéniques de la République de Madagascar à 1/1000 000. *Ministère des Mines, Antananarivo, République de Madagascar*, 259.

- Rustichelli, A., Di Celma, C., Tondi, E., Baud, P., & Vinciguerra, S. (2016). Fibrous gypsum veins as diffuse features and within fault zones: The case study of the Pisco Basin (Ica desert, southern Peru). *Journal of the Geological Society*, 173(3), 405-418.
- Scotese, C. R., & McKerrow, W. S. (1990). Revised world maps and introduction. *Geological Society, London, Memoirs*, 12(1), 1-21.
- Scotese, C. R., Boucot, A. J., & McKerrow, W. S. (1999). Gondwanan palaeogeography and palaeoclimatology. *Journal of African Earth Sciences*, 28(1), 99-114.
- Scotese, C.R., and Moore, T.L. (2014a). Atlas of Phanerozoic Ocean Currents and Salinity (Mollweide Projection), Volumes 1-6, *PALEOMAP Project PaleoAtlas for ArcGIS, PALEOMAP Project, Evanston, IL*.
- Scotese, C.R., and Moore, T.L. (2014b). Atlas of Phanerozoic Rainfall (Mollweide Projection), Volumes 1-6, *PALEOMAP Project PaleoAtlas for ArcGIS, PALEOMAP Project, Evanston, IL*.
- Scotese, C.R., and Moore, T.L. (2014c). Atlas of Phanerozoic Temperatures (Mollweide Projection), Volumes 1-6, *PALEOMAP Project Paleo-Atlas for ArcGIS, PALEOMAP Project, Evanston, IL*.
- Scotese, C.R., and Moore, T.L. (2014d). Atlas of Phanerozoic Winds and Atmospheric Pressure (Mollweide Projection), Volumes 1-6, *PALEOMAP Project PaleoAtlas for ArcGIS, PALEOMAP Project, Evanston, IL*.
- Scotese, C.R., Song, H., Mills, B.J., & van der Meer, D.G. (2021). *Phanerozoic paleotemperatures: The earth's changing climate during the last 540 million years. Earth- Science Reviews*, 215, 103503.
- Segoufin, J., & Patriat, P. (1980). Existence d'anomalies mésozoïques dans le bassin de Somalie. Implications pour les relations Afrique-Antarctique-Madagascar. *C.R, Acad, Sci., Paris*, t. 291, 85-88.
- Soukoreff, W. (1991). Exploration handbook Madagascar. *For petro-canada international assistance corporation / Office Militaire National pour les Industries Stratégiques*. Chap.4, 410-415.
- Tabor, N. J., & Poulsen, C. J. (2008). Palaeoclimate across the Late Pennsylvanian-Early Permian tropical palaeolatitudes: a review of climate indicators, their distribution, and relation to palaeophysiographic climate factors. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 268(3-4), 293-310.

- Tucker, R. D., Roig, J. Y., Moine, B., Delor, C., & Peters, S. G. (2014). A geological synthesis of the Precambrian shield in Madagascar. *Journal of African Earth Sciences*, 94, 9-30.
- Usiglio, M. J. (1849). Études sur la composition de l'eau de la Méditerranée et sur l'exploitation des sels qu'elle contient. *Annales Chim. Phys.*, ser 3, 27, 172-191.
- Warren, J. K. (2010). Evaporites through time: tectonic, climatic and eustatic controls in marine and non marine deposits. *Earth-Science Reviews*, 98, 217-268.
- Zakharov, Y.D., Tanabe, K., Shigeta, Y., Safronov, P.P., Smyshlyaeva, O.P., DrilEarly, S.I.(2016). Albian marine environments in Madagascar: An integrated approach based on oxygen, carbon and strontium isotopic data, *Cretaceous Research*, 58, 29-41.

Webographie

<https://www.gplates.org>

<https://paleobiodb.org>

<https://portal.opentopography.org>

Figures

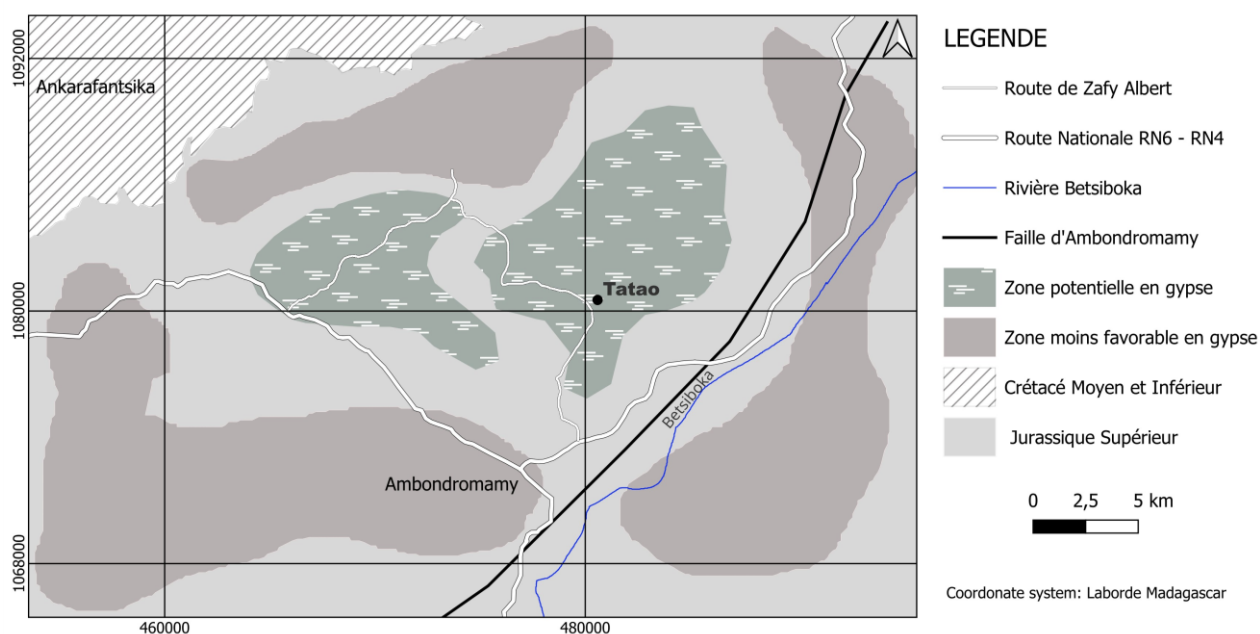


Figure 1 : Carte de la zone à potentielle en gypse de Tatao, dans la formation Karroo du Jurassique supérieur

Figure 2 : Profil topographique, illustré la morphologie de l'environnement de dépôt de la zone d'étude (<https://portal.opentopography.org>)

Figure 3 : Coupe litho-stratigraphie d'un puits observé dans la zone d'étude, présentant la variation du faciès (à gauche), photo du niveau à veines de gypse intercalés dans la marne-argileuse , MA : marne-argileuse, Sp : septarias, G : gypse (à droite)

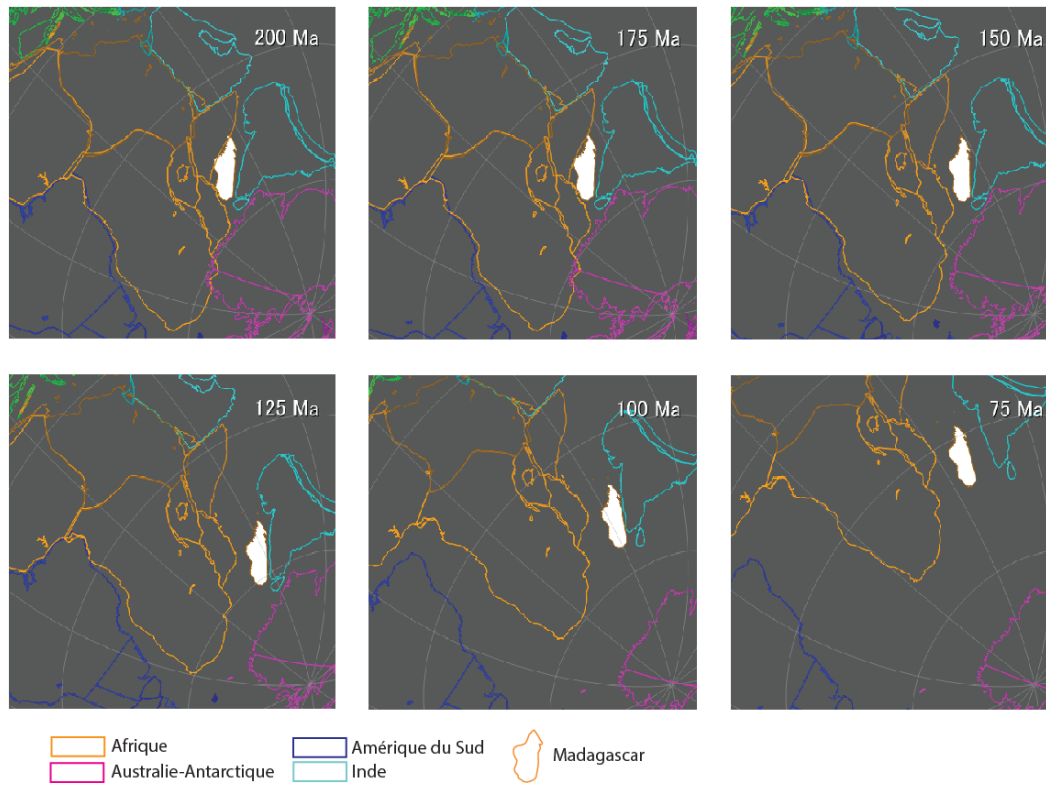


Figure 4 : Evolution de déplacement de Madagascar lors de sa séparation avec l'Afrique et Inde, du 200 Ma à 75 Ma (<https://www.gplates.org>)