

Chapitre II

**Gaston GIULIANI, Michel RAKOTONDRAZAFY,
Daniel OHNENSTETTER, Gabriel CARLIER, Jean-Pierre LORAND,
Benjamin RONDEAU, Bernard MOINE, François FONTANT**

Géologie et minéralogie



Ce chapitre est dédié à la mémoire de François Fontan.

Introduction

Le présent chapitre¹ a pour but de retracer la contribution des géologues et minéralogistes français et malgaches à l'histoire de la connaissance géologique et minière de Madagascar. Terre de prédilection pour la minéralogie, la Grande Île a fasciné les chercheurs par la richesse et l'originalité de ses espèces minérales. Elle a accueilli Alfred Lacroix et lui a permis de publier de 1894 à 1942, plus de 115 notes originales dont les fameux trois volumes sur la *Minéralogie de Madagascar*. Les travaux de pionnier d'Alfred Lacroix débouchèrent sur la création du Service géologique qui, de 1930 à 1967, sous la direction de Henri Besairie, a réalisé la cartographie géologique et l'inventaire des richesses minérales économiques du pays avec la collaboration du BRGM, de la Société des pétroles de Madagascar, du CEA et de l'Orstom.

On distinguera donc les connaissances acquises au cours des trois périodes suivantes : avant la colonisation, de la colonisation à l'indépendance (avec un accent particulier sur l'œuvre de Alfred Lacroix), de l'indépendance à nos jours. Parallèlement, on s'intéressera à la structuration de la recherche et de la formation universitaire malgaches et à la création du Service géologique et on analysera la contribution française à ces activités. En effet, depuis l'ouverture politique du pays en 1990, on a assisté au développement de recherches géologiques menées par des universitaires malgaches de l'université d'Antananarivo, de l'École polytechnique d'Antananarivo et des universitaires français. Depuis 2002, une impulsion nouvelle a été donnée à la connaissance de l'infrastructure géologique de Madagascar par la mise en place du Projet de gouvernance des ressources minérales (PGRM) sous la responsabilité du ministère des Mines et de l'Énergie. Ce projet a pour objectif une révision géologique et structurale de la cartographie du socle précambrien de l'île.

1. Ce chapitre reprend en grande partie l'article de GIULIANI *et al.* (2008) publié dans la revue « Le règne minéral, n° 80 – Aventures minéralogiques à Madagascar », et intitulé « Contribution des géologues et minéralogistes français et malgaches à la connaissance géologique et minière de Madagascar du XIX au XXI^e siècle ».

La géologie et la minéralogie à Madagascar avant la colonisation

En 1500, une flotte portugaise, dérivée du cap de Bonne-Espérance sur la route des Indes, débarqua sur la Grande Île sous le commandement de Diego Diaz et déjà Madagascar exhala un parfum de terre de prédilection pour les gemmes. En 1547, l'expédition française de Jean de Fonteneau, dit Alphonse-le-Saintongeais, signala l'existence de pierres précieuses à Madagascar, les fameuses « pierreries » (LACROIX, 1922). En 1658, le directeur de la Compagnie française de l'Orient, M. Étienne DE FLACOURT énumère topazes, aigues-marines, émeraudes, rubis et saphirs qui seront consignés dans son « Histoire de la Grande Isle de Madagascar ».

Les premiers échanges commerciaux avec la France furent réalisés entre 1643 et 1674 avec le comptoir français, installé à Fort-Dauphin, qui posa les jalons du premier empire colonial français. De ce minuscule territoire, Louis XIV s'était arrogé la souveraineté sur l'ensemble de l'île. Cependant, en 1668, la Compagnie française de l'Orient qui envoie De Faye contrôler ses comptoirs de l'océan Indien, s'aperçoit que les « pierreries » de Madagascar sont des tromperies. Les monts et merveilles rapportés par les voyageurs s'érodent ; l'explication de l'absence de gemmes sur le marché local est donnée par Alfred Grandidier qui rapporte à Alfred Lacroix que les Malgaches n'avaient aucune idée de la valeur d'une pierre précieuse. L'ornementation malgache était constituée principalement par des perles de verre et des « *haranga* » ou fuseaux en tube de cornaline qui provenaient de l'Inde ainsi que du corail.

Les premiers voyageurs français rapportèrent des récits enthousiastes sur les merveilles naturelles malgaches. Nous pouvons citer la lettre passionnée écrite le 18 avril 1771 par le botaniste Commersan, de l'île Bourbon, à son ami l'astronome La Lande (BANKS et SOLANDER, 1772) : « Quel admirable pays que Madagascar. Ce n'est pas dans une course rapide qu'on peut parvenir à connaître ses riches productions ; ce serait l'étude d'une longue suite d'années, encore faudrait-il des Académies entières pour une si abondante moisson. C'est à Madagascar qu'est la véritable terre de prédilection pour les naturalistes ; c'est là que la nature semble s'être retirée comme dans un sanctuaire naturalisé pour y travailler sur un autre modèle que ceux auxquels elle s'est asservie dans d'autres contrées. Les formes les plus insolites et les plus merveilleuses s'y rencontrent à chaque pas ».

Les récits fleurirent et les premiers cristaux de quartz, terme attesté par l'Académie française depuis 1762 et synonyme du « cristal de roche », arrivèrent directement sur les marchés européens. Ces beaux cristaux aux formes recherchées par les savants permirent en 1783 à Romé de l'Isle, cofondateur avec Haüy de la cristallographie moderne, de discuter dans son traité de cristallographie sur l'origine de ces blocs transparents : « débris de montagnes de pierre transparente ou bien fragments de quilles monstrueuses de quartz ».

Ainsi, les cristaux géants de cristal de roche, parsemés de cheveux de Vénus qui sont des cristaux de rutile d'un blond doré ou d'aiguilles de tourmaline noire, entretenrent la curiosité des minéralogistes français sur Madagascar.

Jusqu'en 1880, la connaissance minéralogique et minière sur Madagascar, territoire alors internationalement reconnu, n'avait pas évolué car le gouvernement des Hovas, l'une des castes des Mérinas et des Betsileos régnant sur les hauts plateaux du centre de l'île, prohiba sévèrement (sous peine de mort) toute recherche relative à la nature du sol. Ainsi, de 1865 à 1870, le voyageur et botaniste français Alfred Grandidier, avait rapporté, de ses longues campagnes de terrain, de précieux échantillons zoologiques et botaniques, mais seulement quelques notes minéralogiques. Vers 1883, le pasteur anglican Richard Baron, qui s'intéressait à la géologie, permit une première connaissance des terrains malgaches, mais la minéralogie y fut délaissée. En 1885, la France transforma Madagascar en protectorat au cours du Congrès des puissances coloniales de Berlin. Un débarquement militaire eut lieu sur la côte ouest à Majunga avant de signer en 1890 avec l'Angleterre un traité qui définissait les aires respectives d'influences maritimes et terrestres. Ce n'est que dans les années 1890, pour payer les indemnités de guerre du traité de protectorat de 1885 avec les Français, que le gouvernement malgache permit aux autochtones l'exploitation des mines d'or. Ainsi, en 1893, lorsque Alfred Lacroix, minéralogiste tout juste nommé professeur au Muséum national d'histoire naturelle de Paris (MNHN), débuta la rédaction de son mémoire sur la « Minéralogie de la France et de ses colonies », le chapitre malgache était vide.

Le 15 janvier 1895, suite à un désaccord profond avec le gouvernement malgache encore en place, une armée française forte de 20 000 hommes débarqua à nouveau à Majunga pour conquérir Tananarive, sous le commandement du général Duchesne. C'est chose faite le 30 septembre 1895 après une campagne éprouvante : la reine Ranaivalona III capitule et Madagascar est proclamée colonie française, le 6 août 1896, à l'issue d'une loi votée au Parlement français. Le général Joseph Gallieni, grand connaisseur des questions coloniales, est nommé en septembre de la même année gouverneur général de l'île, qu'il pacifie entre 1896 et 1899. À l'occasion de la conquête coloniale de Madagascar, décidée par la classe politique française en octobre 1894, une exposition fut organisée au MNHN pour présenter à la nation les richesses de la Grande Île. Seulement une centaine d'échantillons minéralogiques furent exposés avec notamment ceux de la mission Catat et Suberbie ainsi que le premier cristal de tourmaline lithique (rubellite), de petits saphirs et zircons donnés en 1891 au MNHN par Alfred Grandidier (LACROIX, 1922). L'intérêt scientifique de Madagascar était né pour Alfred Lacroix, mais pas encore pour l'administration française qui refusa le financement d'une expédition scientifique proposée par le directeur du MNHN, M. Alphonse Milne-Edwards. La devise de l'administration était d'exploiter les richesses avant de les étudier !

La géologie et la minéralogie à Madagascar au cours de la période coloniale

Aperçu général

Le général Gallieni, gouverneur général de Madagascar de 1896 à 1905, créa le service des Mines de Madagascar à Tananarive. Par ailleurs, Alfred Lacroix proposa la réalisation d'un premier inventaire minéralogique et gîtologique en préparant une fiche destinée aux collecteurs de terrain. Ceux-ci devaient remplir un questionnaire détaillé, échantillonner et envoyer le matériel récolté au MNHN pour l'expertise. Ce fut un échec, mais temporaire, car le chef du service des Mines, le capitaine du Génie Mouneyres, devint un collaborateur majeur de Lacroix pour la récolte d'échantillons de minéraux et de leur détermination : l'inventaire minéralogique de Madagascar était né. Ainsi, officiers, prospecteurs, zoologistes, le pasteur anglican Baron, Gautier, Grandidier (Guillaume), Alluaud, Lemoine, de Geay, de Prince, de Mouneyres, Rouquette et Perrier de la Bathie participèrent activement à ces récoltes (LACROIX, 1922).

Les matières minérales utiles à l'homme, tels les minerais métalliques, les métaux natifs, les sels minéraux et les combustibles, se localisent dans des formations géologiques bien différentes. Ainsi, le charbon, le pétrole et le phosphate de chaux ne pouvaient exister que dans les formations sédimentaires des parties nord et nord-ouest de Madagascar. Maxime Villiaume, officier d'administration de l'artillerie coloniale, prospecta le charbon et le général Gallieni lui ordonna de réaliser des sondages dans le nord-ouest de l'île. L'élève et le collaborateur de Villiaume, le capitaine Colcanap, découvrit en 1908 la houille dans le bassin de la Sakoa dans le sud-ouest de l'île, à la limite du recouvrement sédimentaire occidental et du socle cristallin oriental.

La localisation des minerais métalliques et natifs est par contre beaucoup plus complexe. Les métaux peuvent exister dans des roches plutoniques très variées, granites, syénites, péridotites et même des roches sédimentaires. Par ailleurs, ces minerais peuvent résulter de concentrations locales dues à la circulation de fluides le long de failles sur des distances pluri-kilométriques, qui transforment chimiquement les roches traversées. Cette grande diversité rend naturellement leur prospection difficile et nécessite de mener la recherche sur des bases scientifiques. Ainsi, la découverte de gisements à Madagascar devenait une entreprise complexe. Cependant, l'or alluvial était déjà récupéré dans les cours d'eaux et les statistiques donnaient, en 1909, une production d'or de 3 697 kg qui plaçait Madagascar en tête de la production coloniale de l'empire français (ROUBAULT, 1945). Pour orienter les recherches et surtout mieux connaître le type de roches cristallines présentes à Madagascar, des collections lithologiques furent réalisées. Ainsi, M. Vuillaume permit à Lacroix de réaliser deux grands mémoires sur les roches éruptives de la province d'Ampasindava. En 1911, le ministère des Colonies et celui de l'Instruction publique décidèrent enfin de financer une mission de terrain à Madagascar et à la Réunion pour Alfred Lacroix.

Il parcourut principalement la zone centrale de l'île et plus particulièrement la zone comprise entre Antsirabe, Betafo et Fianarantsoa. Cette mission de longue durée lui permit de découvrir la Grande Île et de recadrer dans leur environnement géologique les différentes collections et échantillonnages qu'il avait pu étudier depuis l'envoi de la première tourmaline lithique par Grandidier.

L'étude des gisements économiques de la colonie a été développée avec une attention particulière pour l'or, les gemmes, les minéraux radioactifs et industriels. Le platine était récupéré dans les rivières de la région de Maevatanana (production officielle de 148 kg en 1911) et l'argent extrait des filons de la région d'Andavakoera qui a assuré une production de 1 782 kg de 1906 à 1921 (LACROIX, 1922). Les premières exploitations de gemmes furent celles ouvertes par la Société nantaise à Antandrokomby et dans la vallée de la Sahatany. Les minéraux exploités étaient la rubellite et autres tourmalines, puis les béryls. Entre 1905 et 1909, l'administration française mandata un lapidaire, M. Villierme, qui prospecta et publia ses travaux à l'Académie malgache. C'est l'époque de la découverte des corindons rouges et bleus de l'Ankaratra (région d'Antsirabe), des spodumènes gemmes (kunzite) de la vallée de la Sahatany et d'Anjanabonina, du béryl rose (variété morganite), de la cordiérite, des grenats gemmes, et d'autres minéraux rares mais de grande taille et transparents comme la danburite, la kornéropine, l'orthose jaune, la scapolite et le diopside (LACROIX, 1922). Le quartz industriel était exploité mais un effort important pour la prospection de l'uranium était développé après la découverte de minéraux radioactifs dans de nombreuses pegmatites, propres à Madagascar, comme la bétafite, la samirésite et l'ampangabéite dans la région d'Antsirabe-Itasy (GIULIANI *et al.*, 2008). Ces pegmatites, qui ont assuré une production d'une centaine de tonnes d'uranium, ne présentaient pas réellement un intérêt économique.

L'exploitation du mica devint un enjeu stratégique durant la Première Guerre mondiale et les gisements malgaches, d'excellente qualité, participèrent fortement à la production coloniale en assurant une centaine de tonnes de mica marchand en 1919. Les principaux gisements de mica « blanc » (muscovite) extrait des filons de pegmatites se situaient dans les régions de Betafo, Ankazobe et Ambatondrazaka, sur les bords du lac Alaotra. Les gisements de micas « phlogopite », situés dans les pyroxénites du sud de Madagascar, furent découverts par Rossi en 1908 (LACROIX, 1922). Les cristaux de micas atteignaient des tailles de l'ordre de 50 cm de diamètre et plusieurs centimètres d'épaisseur. Ils étaient d'excellente qualité et les exploitations de la région de Fort-Dauphin produisirent jusqu'à 110 tonnes de mica marchand entre 1908 et 1919.

L'exploitation du graphite a été intense durant la période 1910-1921 et Madagascar faisait partie des principaux producteurs mondiaux. Le graphite était d'excellente qualité, de faible coût d'exploitation dû à l'altération tropicale intense des roches gneissiques qui le contenait, et le nombre de gisements dans les différentes provinces étaient nombreux. Le graphite extrait de Madagascar a alimenté l'industrie de guerre du conflit de 1914-1918 pour la fabrication des creusets métallurgiques destinés à la fusion du laiton (LACROIX, 1922).

Les trois volumes de la *Minéralogie de Madagascar* rédigés par LACROIX (1922) ont été publiés par Augustin Challamel, éditeur à la librairie maritime et coloniale de Paris. De cette œuvre monumentale, riche en illustrations et précise tant pour la localisation géographique des sites géologiques que leurs descriptions, on retint l'anecdotique, c'est-à-dire les cristaux géants, les espèces minérales rares et les roches uniques comme les sakénites et les pyroxénites à phlogopite.

En 1926, la carte géologique de reconnaissance débuta par des levés au 1/200 000. Après 1945, l'apport financier du Fonds français d'investissement pour le développement économique et social (Fides) apporta un nouveau souffle à la poursuite des recherches minières à Madagascar. Ce nouveau financement permit le développement du Service géologique et surtout l'installation à Madagascar de différents organismes d'État dont le Bureau de recherche minière (BU.MI.FOM. devenu par la suite le BRGM), le Commissariat à l'énergie atomique (CEA), la Société des pétroles de Madagascar (SPM) et également de grandes sociétés comme Ugine et Pechiney. Par la suite, l'aide française du Fonds d'aide et de coopération (FAC) succéda au Fides et le nombre de géologues et de prospecteurs augmenta régulièrement au Service géologique qui, fort de 32 personnes en 1948, atteignit le nombre de 187 en 1956 (BESAIRIE, 1966).

Le CEA entreprit une exploration à large échelle pour l'uranium et le béryllium, minerais stratégiques. À partir de 1947, des découvertes importantes se multiplièrent, notamment la thorianite ($\text{Th, U} \text{O}_2$), la monazite ($\text{PO}_4 [\text{Ce, La, Dy}]$), l'ilménite ($[\text{Fe, Mg, Mn}] \text{TiO}_3$), le fer, la chromite (FeCr_2O_4) et les minerais de nickel. Les minéraux de plus grand intérêt à cette époque étaient le graphite, la phlogopite, le disthène, la sillimanite, le corindon, la barytine, le zircon, le quartz, les oxydes de niobium et tantale (Nb-Ta) et les feldspaths.

À partir de 1950, le CEA orienta la prospection sur le béryl industriel ($\text{Al}_2\text{Be}_3\text{Si}_6\text{O}_{18}$) connu depuis Lacroix dans les régions situées à l'ouest de Fianarantsoa, Tsaratanana, Betafo-Antsirabe et Miandrivazo. Le BU.MI.FOM-BRGM et le Service géologique y participèrent activement sans réellement trouver de nouveaux gisements. Toute la production provenait des gisements connus. De 1949 à fin 1963, la production a été de 6 276 tonnes (BESAIRIE, 1966). En 1964, la chute des cours du béryl va provoquer un abandon de la quasi-totalité des titres miniers des principaux champs minéralisés dans la région d'Ampandramaika-Malakialina.

La thorianite se rencontre dans les pyroxénites du sud de l'île où elle accompagne la phlogopite. Les principaux gisements de thorianite se situaient dans le secteur de Tranomaro, Belafa, Andranondambo et le sud Manara. Ce minéral contient de 5 à 25 % d'uranium et la teneur des gisement était constante. De vastes recherches prospectives furent organisées par le CEA en 1954 et, en 1955, débuta l'exploitation mécanisée. Les volumes minéralisés étaient restreints et la production entre 1953 et 1963 atteignit 4 000 tonnes. Les gisements primaires s'épuisèrent très vite et les exploitations s'essoufflèrent (BESAIRIE, 1966).

La monazite renferme une quantité importante de terres cériques et elle fut exploitée entre 1955 et 1965. Les gisements de plage, notamment ceux de Fort-Dauphin, étaient les plus importants. En 1955 et 1956, H. de La Roche et J. Marchal mirent en évidence l'importance de ces gisements dans les dunes anciennes et, à la fin 1956, des réserves estimées à 32 000 tonnes avec de gros gisements étaient identifiées. La monazite de plage provenait du démantèlement de granites et de charnockites des chaînes anosyennes.

L'ilménite est répandue sur les plages de la côte orientale mais surtout dans le Nord-Est (plage nord Foulpointe) et le Sud-Ouest (plages entre Vangaindrano et Mandrare). Le Service géologique débuta la prospection en 1953 et le BU.MI.FOM. poursuivit les recherches entre 1954-1955 (BESAIRIE, 1966). Seuls les gisements du Sud étaient de valeur économique mais ils ne furent pas exploités car l'utilisation métallurgique nécessitait, d'une part, un traitement du minerai et, d'autre part, l'aménagement du port de Fort-Dauphin. Les estimations des gisements de plage effectuées par le CEA, entre Vangaindrano et Mandare, étaient de 700 000 tonnes de minerai et des réserves probables de 2 millions de tonnes.

La chromite était connue à Madagascar par le petit gisement de Ranomena près de Tamatave. En 1955, les prospections du Service géologique menées par P. Giraud aboutirent à l'une des plus grandes découvertes de l'époque : le gisement d'Andriamena. Dès 1957, la société Ugine et le BU.MI.FOM s'intéressèrent à ces découvertes. En 1965, les réserves étaient estimées à six millions de tonnes. La lentille à chromite de Bemanavika contenait deux millions de tonnes avec un minerai à 42 % de Cr_2O_3 brut (BESAIRIE, 1966).

La phlogopite a continué d'être exploitée après 1920 et jusqu'en 1929. La reprise économique fut lente et la production atteignit 680 tonnes en 1938 (BESAIRIE, 1966). À partir de 1948, la production crût suite à la demande américaine et atteignit 959 tonnes en 1949. En 1950, la moitié de la production provenait de deux grandes sociétés : la SMGI et l'Union des Micas. Les contrats avec le gouvernement américain assurèrent une production à plus de 1 000 tonnes par an mais, en 1954, la saturation du marché international provoqua une nouvelle crise. L'exploitation superficielle des gisements malgaches se termina et les lourds investissements miniers exigés pour une exploitation à plus grande profondeur provoquèrent une chute du nombre d'exploitants. En 1959, seulement six mines assuraient à elles seules 80 % de la production malgache. L'exigence sur la qualité du mica sur le marché international s'ajouta au déclin de l'exploitation de la phlogopite à Madagascar (BESAIRIE, 1966).

La carte géologique de reconnaissance au 1/200 000 fut achevée en 1951 et la carte géologique au 1/100 000 qui couvrait les deux tiers du pays en 1960. À cette date, Jean BÉHIER, minéralogiste au Service géologique depuis 1953, publia le deuxième livre de synthèse sur Madagascar intitulé : « Contribution à la minéralogie de Madagascar ». L'essentiel des exploitations minières était réservé pour le minerai et peu de minéraux exceptionnels par leur taille ou leur qualité et rareté étaient systématiquement préservés. Cependant, une collection des minéraux malgaches était rassemblée au musée de l'École des mines de

Paris. À cette époque, Béhier établissait une liste des minéraux interdits à l'exportation. Le Service géologique était le seul organisme à exporter ces minéraux rares pour les collections des musées.

Au lendemain de l'indépendance, le Service géologique présenta un premier plan de développement économique inventoriant les principales ressources minières disponibles et proposant un plan de développement pour le futur. En 1960, un mémoire sur « Les ressources minérales de Madagascar » était publié en tenant compte des contraintes imposées par l'économie minière.

Henri Besairie demeura le directeur du Service géologique malgache. En 1964, il mena à bien la publication de la carte géologique au 1/1 000 000. En 1966, il publia un livre intitulé « Les gîtes minéraux de Madagascar », fruit de son expérience de géologue de terrain, des archives du Service géologique et de l'expertise des géologues du service des Mines, notamment G. Noizet, géologue principal. Les agents de l'assistance technique française furent remplacés par des techniciens, ingénieurs et géologues malgaches. Henri Besairie continua ses recherches géologiques avec l'aide de quelques géologues formés à son école. Il demeura à Madagascar jusqu'à la fin de ses jours en 1978.

Alfred Lacroix et son œuvre sur la minéralogie à Madagascar

Les éléments biographiques ci-dessous sont largement empruntés à J. ORCEL (1949).

L'année qui précède la décision de conquérir militairement l'île de Madagascar et de l'administrer comme une colonie (octobre 1894) est marquée au MNHN par un changement de titulaire à la chaire de minéralogie, changement qui aura des conséquences incalculables, tant pour l'orientation de la minéralogie française, que pour l'exploration et l'inventaire des richesses minéralogiques et géologiques de la Grande Île. À Alfred Descloizeaux, cristallographe de renom, co-fondateur de la Société française de minéralogie et cristallographie en 1878, succède le 1^{er} avril 1893 son élève et ami, François Antoine Alfred Lacroix. Ce dernier devient, à 30 ans, le plus jeune titulaire de la chaire de minéralogie qu'il occupera pendant 43 ans, jusqu'en 1936. Lacroix est à la fois cristallographe, minéralogiste, pétrographe et géologue. On pourrait dire, pour employer des termes actuels, qu'il avait une vision réellement transversale de nos disciplines. Il a coutume de professer que la minéralogie ne s'arrête pas à la simple détermination des propriétés physiques et chimiques des minéraux, mais se doit d'étudier aussi les roches qui les contiennent, sources essentielles d'informations sur la genèse des minéraux. En ce qui le concerne, son activité ira bien au-delà puisqu'il effectuera de nombreuses observations purement géologiques : il est notamment chargé par l'Académie des sciences et le gouvernement français d'étudier sur place les circonstances de l'éruption volcanique de la Montagne Pelée, à la Martinique (6 mai 1902) qui a ravagé la ville de Saint-Pierre, tuant 28 000 personnes en quelques minutes. Il tirera de ce voyage de nombreuses et minutieuses observations qui lui permettront de décrire pour la première fois un type d'éruption volcanique jusqu'alors inconnu, celui des nuées ardentes. Cette

mission « d'expertise », pour reprendre le vocabulaire actuel, lui vaudra son fauteuil à l'Académie des sciences – dans la section minéralogie – le 11 janvier 1904, et achèvera de confirmer son renom couronné en 1914 par son élection comme secrétaire perpétuel de cette Académie.

Né à Macon, le 4 février 1863, dans une famille de médecins et de pharmaciens imprégnés d'histoire naturelle (son grand-père Tony Lacroix, était préparateur du grand chimiste Vauquelin au MNHN), Lacroix obtint son diplôme de pharmacien de première classe le 17 décembre 1887. Cependant, il délaissera vite cette profession de notable pour vivre de sa passion : la minéralogie. Sa rencontre avec Descloizeaux en 1887 lui permet d'obtenir un poste de préparateur (assistant) au Collège de France et de compléter ses connaissances en cristallographie avec les meilleurs maîtres. Il s'initie aux toutes nouvelles méthodes et techniques d'analyses au microscope polarisant qui, suite aux travaux théoriques de Descloizeaux, viennent d'être mises au point par Ferdinand Fouqué et Auguste Michel-Lévy, pétrographes des roches éruptives et aussi géologues du service des Mines. Sa participation à ces recherches apparaît dans l'ouvrage sur « Les minéraux des roches » (MICHEL-LÉVY et LACROIX, 1888), qui contient la fameuse échelle des teintes de polarisation que des générations de géologues ont utilisée, et continuent d'utiliser, pour déterminer les minéraux des roches.

Il a obtenu brillamment son doctorat ès sciences naturelles le 31 mai 1889 sur un sujet concernant des roches métamorphiques « Contributions à l'étude des gneiss à pyroxènes et des roches à wernérite ». Toutes les conditions sont réunies pour que le nom de Lacroix soit définitivement attaché à la minéralogie de Madagascar. Grâce à sa formation et ses connaissances encyclopédiques, il est armé pour aborder la grande diversité géologique et minière qu'il va rencontrer dans la Grande Île. L'époque est aux monographies volumineuses traitant de vastes étendues, contenant des inventaires très détaillés des objets étudiés. Si les richesses naturelles botaniques et zoologiques sont déjà en partie connues grâce aux remarquables travaux d'Alfred Grandidier (1836-1921) qui a longuement parcouru l'île entre 1865 et 1870, presque tout reste à faire dans le domaine de la minéralogie et de la géologie quand la pacification menée par le général Gallieni s'achève en 1899. De plus, les récits sur les pierres précieuses et les rares échantillons parvenus en Europe entretiennent un mythe autour de la Grande Île. Enfin, le MNHN est à l'époque le lieu incontesté de conservation des collections d'histoire naturelle amassées dans l'empire colonial français. Un vrai laboratoire, séparé de la galerie de minéralogie, a été créé en 1894, doté un peu plus tard d'un service d'analyse chimique. Nul doute que tous ces aspects aient été parfaitement perçus par Lacroix quand il s'est lancé dans ce qui va devenir son œuvre majeure et lui permettra aussi de ranimer la collection de minéralogie, alors en demi-sommeil depuis plus de cinquante ans.

Comme il a été évoqué plus haut, Alfred Lacroix dispose d'un réseau parfaitement organisé de collecteurs d'informations et d'échantillons sur le terrain. L'un d'eux, le capitaine Mouneyres, chef du service des Mines nouvellement créé à Tananarive, va devenir un collaborateur dévoué. En fait, les relations sont à double sens car les premiers interlocuteurs de Lacroix sont d'abord formés au

MNHN à Paris où ils suivent les cours du professeur destinés à leur donner les bases d'une culture géologique et minéralogique qu'ils n'ont pas. Ainsi, le cahier d'inscription des élèves contient les noms du capitaine Mouneyres (1901-1902 et 1908-1909), du capitaine Colcanap (1905-1906), de Monsieur Auclair, contrôleur des Mines de Madagascar (1913-1914), de Périer de la Bathie (1917-1918) et bien d'autres encore, moins connus. C'est la base de la réussite du système mis en place par Lacroix. On recense de nombreux officiers, administrateurs dans les dix premières années (quelques lettres de Villiaume et Colcanap sont conservées au MNHN, dactylographiées dès 1896 !). Après la période du corps d'occupation de Madagascar (1896-1905), ce sont essentiellement des ingénieurs du service des Mines, des prospecteurs, exploitants de mines, mais aussi des conducteurs de travaux, importateurs, quelques médecins, enseignants du secondaire (certains se mettent spontanément à disposition du professeur pour son œuvre minéralogique). Le ministre des Colonies en 1905 a transmis des instructions au nouveau gouverneur général de l'île pour qu'il incite les chefs de circonscription de l'île et les agents placés sous leurs ordres à envoyer leurs échantillons au service des Mines qui centralise ensuite les envois vers le Muséum. Ces envois continuent pendant la Première Guerre mondiale et des lettres attestent la perte de certains d'entre eux dans des torpillages. Certaines sont de véritables rapports de missions, comprenant une dizaine de pages avec croquis, plans et coupes géologiques, qui parviennent à Paris en plus des échantillons. Pour les années 1910-1920, les minéraux reçus sont essentiellement tourmalines, béryls, orthose, corindon, grenat, amazonite, agate, graphite, bornite, améthyste, phlogopite, bétafite, monazite, autunite et minerais radioactifs et radium, thorite, quartz et or.

La liste des collaborateurs « bénévoles » occupe plus d'une page de la préface de l'édition du tome 1 de la « Minéralogie de Madagascar ». L'abondante récolte de matériel donne lieu à 31 publications en minéralogie, lithologie et gîtologie avant que Lacroix n'ait la possibilité de visiter, en compagnie de son épouse, le sol de la Grande Île. Ce voyage occupe une grande partie de l'année 1911 (25 avril-13 octobre). Il a ainsi l'occasion de sillonner en *filanzane* (chaise à porteur rudimentaire) la région des pierres précieuses, celles du graphite, des micas, du corindon, du zircon et des minerais d'uranium qu'il venait de décrire. Il s'intéresse également au volcanisme et à l'altération des roches : la terre rouge (cf. chapitre 10). Ce seul voyage à Madagascar lui permet de poursuivre ses travaux sur la minéralogie et la pétrographie de l'île. Quand s'achève la grande période qui va jusqu'à la publication de la *Minéralogie de Madagascar* en trois volumes (1894-1922), LACROIX a produit les trois quarts des publications qu'il a consacrées à Madagascar. La minéralogie et la géologie de Madagascar sont alors bien mieux connues que beaucoup de régions d'Europe. Par la suite, une de ses élèves pétrographe du Muséum, Yvonne Brière, est affectée comme attachée au service des Mines de Madagascar (1923-1933). À partir des années 1930, les envois de roches sont essentiellement dus à l'exploration géologique et à la réalisation de la carte au 200 000. On note le nom de Besairie qui a revu entre 1932 et 1933 les affleurements de « lamboanites »

à grenat et cordiérite gemme, et de « sakénites » à corindon, spinelle, grenat déjà visités par Lacroix. Ces roches feront l'objet des dernières publications de LACROIX (1941).

Même s'il affirme qu'il faut d'abord étudier scientifiquement avant d'exploiter les richesses coloniales, Lacroix semble adhérer aux conceptions dominantes de l'époque qui considèrent la colonisation comme « véritable œuvre humanitaire » apportant civilisation et connaissance aux peuples colonisés. La colonie de Madagascar rend bien à Lacroix l'intérêt qu'il lui porte. Grâce à l'intervention de membres influents de la chambre des Mines de Madagascar comme Ulysse Gros importateur-exportateur de pierres précieuses, le gouverneur général alloue une subvention de 4 000 francs en 1921, 6 000 francs en 1922, puis 9 000 francs en 1923, pour l'impression de la *Minéralogie de Madagascar*. Ces sommes sont aussi destinées à couvrir les frais d'analyse et d'étude des minéraux envoyés au laboratoire de minéralogie, les crédits accordés par l'État étant trop restreints. Nul doute que le crédit de Lacroix et de son laboratoire, à Madagascar comme dans le territoire métropolitain, est immense à cette époque. En « échange » de leur participation à l'inventaire minéralogique de l'île, certains hauts fonctionnaires locaux sollicitent son intervention pour des promotions honorifiques (légion d'honneur). Il peut influencer sur les nominations des administrateurs coloniaux en fonction des critères de l'exploration minéralogique. Enfin, il est aussi sollicité pour des subventions à destination d'autres administrations comme l'institut Pasteur de Tananarive.

De 1894 à 1942, Lacroix écrit 115 notes originales traitant de Madagascar, publiées essentiellement au *Bulletin de la Société française de minéralogie* (63) et aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences* (49).

Dans son œuvre malgache, Lacroix applique sa conception de la minéralogie, à savoir que la détermination des propriétés physiques et chimiques des minéraux doit être complétée par celle des roches qui les contiennent, sources essentielles d'information sur la genèse des minéraux. 320 analyses chimiques de roches éruptives et métamorphiques sont ainsi consignées dans le cahier d'analyse de Madagascar (*Archives du laboratoire de minéralogie du MNHN*). Il consacre 34 articles à la pétrographie, notamment des roches éruptives alcalines et hyperalcalines, ainsi qu'aux roches métamorphiques de hauts degrés (« lamboanite », « sakénite » à corindon, cipolin, gneiss à wernérite et phlogopite, gneiss à cordiérite-grenat). Les deux volumes du mémoire, publiés aux *Nouvelles Archives du Muséum* en 1902 et 1903, sur les roches alcalines d'Ampasindava constituent le plus gros travail de pétrographie de Lacroix sur Madagascar. Quelques notes purement géologiques, des synthèses minéralogiques et/ou minières (Académie des sciences coloniales, la « Géologie et les mines de la France d'outre-mer et les pierres précieuses, semi-précieuses et d'ornementation », Ressources minérales de la France d'outre-mer), des articles destinés à informer le public de la lointaine colonie (*Voyage au Pays des Bérils*, 1912, imprimé en anglais par la Smithsonian Institution of Washington), des recommandations pour prospector les minéraux radifères (1911, *La Tribune de Madagascar*), complètent l'imposante liste de travaux produits par Lacroix sur la minéralogie malgache.

Que reste-t-il de son œuvre minéralogique ? En 1948, Robert Courrier, élu secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences à la mort de Lacroix, dénombre 11 minéraux et 13 types de roches décrits par Lacroix à Madagascar et nouveaux pour l'époque. Si les noms de roches ont été balayés par l'évolution constante des classifications, quatre espèces minérales ont survécu dans la nomenclature minéralogique actuelle. Ce chiffre constitue un pourcentage remarquable compte tenu du fait que les espèces minérales en question ont été décrites avant la diffusion des premiers appareillages de radiocristallographie mis au point par Max VON LAUE (1913). Tout reposait alors sur l'observation et des analyses chimiques globales laborieuses qui ne permettaient pas de différencier réellement les espèces à part entière des variétés ou des mélanges. Actuellement, les nouveaux minéraux définis à Madagascar, post Lacroix, soumis au contrôle de l'International Mineralogical Association sont des espèces à part entière. On en dénombre 7 dont la Béhierite, la Hibonite, la Liandratite, la Liddicoatite, la Londonite, la Petscheckite et la Pezzotaite (GIULIANI *et al.*, 2008).

Recherche et formation en géologie et minéralogie depuis l'indépendance de Madagascar

Depuis la déclaration de l'indépendance du pays en 1960, trois Républiques se sont succédé à Madagascar. Les activités géologiques et minières, l'organisation du Service géologique du ministère des Mines, de l'Enseignement et de la Recherche évoluèrent suivant les courants politiques.

L'enseignement et la recherche

L'enseignement

Dans le secondaire, à l'indépendance, et au début de la Première République, l'École technique du Génie civil formait des techniciens de niveau baccalauréat dont des géologues. Les élèves préparaient le baccalauréat accompagné d'une spécialité : géologie et mines. À leur sortie, ils avaient la qualification d'adjoint technique. Dans l'enseignement général, la géologie était enseignée parmi les matières des sciences naturelles en classe de quatrième, puis en classe de terminale dans la série D. Le Service géologique formait aussi des aides géologues qui étaient recrutés après avoir passé des tests.

Dans l'enseignement supérieur, en 1960, à l'ouverture de l'université Charles de Gaulle, actuellement université d'Antananarivo, la géologie était enseignée dans la filière BG (Biologie Géologie), devenue la filière sciences naturelles, qui regroupait les sciences de la terre et les sciences de la vie. À cette époque,

la géologie et la paléontologie étaient enseignées en fonction des programmes du Service géologique.

Après l'événement de 1972 et le mouvement des étudiants, la filière sciences naturelles fut créée formant des enseignants naturalistes de niveau licence ou maîtrise ès sciences naturelles, destinés à enseigner dans les classes secondaires et au lycée. À cette époque, la filière géologie et mines fut créée à l'École d'ingénieurs de polytechnique.

En 1978, le professeur A. Razafiniparany met en place le Diplôme d'études approfondies de la faculté des sciences d'Antananarivo. Ce diplôme marque le début des recherches réalisées par des étudiants malgaches en collaboration avec des universités du Nord. Les trois premiers docteurs de troisième cycle furent diplômés en 1990. La première thèse de doctorat d'État fut défendue par M. A. F. Rakotondrazafy en 1995.

La recherche

Avant 1960 et pendant la Première République, le Service géologique, rattaché au ministère des Mines, dirigeait quasiment toutes les recherches en géologie et formait des aides géologues. En 1972, durant le mouvement des étudiants et le départ des Français de Madagascar, différents services furent créés dans chaque filière des sciences de la Terre parmi lesquels les Services de géologie et de paléontologie. Les enseignants consacraient plus de temps à l'enseignement qu'à la recherche. Cette dernière était réalisée sur des thèmes proposés par le Service géologique dirigé par Besairie. Ces thèmes assuraient la continuité des recherches menées par le Service géologique comme, par exemple, l'étude du système androyen dans les régions de Tranomaro et de Fort-Dauphin et de l'Anosyen. En 1995, le projet d'une section de formation de techniciens supérieurs géologues prospecteurs prenait forme et se concrétisait en 1998, par l'ouverture de la section des techniciens supérieurs en sciences de la Terre.

Le Service géologique sous les Républiques

La Première République (1960-1976)

Les recherches et planifications projetées par les géologues français se poursuivirent sous la coordination de Besairie, responsable du Service géologique de 1930 à 1967. Les travaux ont été principalement réalisés par les géologues du Service géologique et du BRGM avec des contributions importantes de la Société des pétroles de Madagascar, du CEA et de l'Orstom (BESAIRIE, 1966). Ces géologues ont été essentiellement des Français. Ce n'est que quelques années après l'indépendance en 1960, que les premiers géologues malgaches, diplômés universitaires, ont pu contribuer à la connaissance géologique de leur pays. Mais pendant toute la période de cartographie, les géologues français ont été assistés par de nombreux prospecteurs malgaches dont certains, très expérimentés, ont eu la responsabilité du levé de cartes au 1/100 000.

La carte géologique au 1/100 000 a été achevée en 1975. La synthèse au 1/500 000 par Besairie a été publiée pour la première fois en 1956 et une seconde édition a

été révisée en 1968-1971. Une synthèse au 1/1 000 000 est publiée par BESAIRIE en 1964.

Cette cartographie a été accompagnée de nombreux mémoires et notices (Travaux du Bureau (Service) géologique, rapports du BRGM, mémoires de thèses, etc.). De 1963 à 1972, les *Comptes rendus de la semaine géologique* ont consigné les actes de colloques annuels qui ont rassemblé les différents auteurs des travaux géologiques.

En 1976, fut créé l'Omnis (Office militaire national pour les industries stratégiques). Il s'occupait surtout de la recherche du pétrole et de ses dérivés et de l'uranium. Toutes les recherches de l'Omnis ont été financées par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). En fait, l'Omnis n'effectuait pas de nouvelles recherches, ni de nouvelles prospectives, mais elle assurait plutôt la continuité des recherches développées par les équipes de Besairie avant l'indépendance.

La Deuxième République (1976-1991)

HOTTIN (1976) a présenté une synthèse des connaissances de cette période, accompagnée d'une carte au 1/2 000 000. On y trouvera une grande partie des principales références bibliographiques des travaux de ces géologues qui, avec Besairie, sont à l'origine de la mise en place de l'infrastructure géologique de Madagascar, en particulier : Alsac, Bazot, Bertucat, Boulanger, Bousteyak, Brenon, Chantraine, Delbos, Donnot, Emberger, Fournié, Giraud, Guigues, Guyonnaud, Henry, Heurtebize, Hottin, Joo', Jourde, Laplaine, de La Roche, Lautel, Moine, Noizet, Razafiniparany, de Saint-Ours.

L'orientation socialiste des dirigeants de la Deuxième République de Madagascar a eu d'énormes répercussions sur la vie économique et sociale du pays et, notamment, sur les programmes de recherche du Service géologique du ministère des Mines. Ceux-ci ont été axés sur des thèmes qui intéressaient les partenaires socialistes, en particulier l'URSS et la Corée du Nord dont les résultats n'ont jamais été divulgués. Par ailleurs, la valorisation scientifique de la recherche, assurée par l'édition des *Annales Géologiques de Madagascar* (Semaine géologique de Madagascar) et financée par le Service géologique, disparaît à cette époque après le décès de Besairie.

Durant cette Deuxième République, Madagascar s'est isolée du reste du monde, et la recherche géologique fondamentale ne faisait plus partie des priorités nationales. Seule la première carte métallogénique de Madagascar, publiée en 1978 et produit de la recherche menée par l'Université avec un financement assuré par le laboratoire de radio-isotopes, restera dans les annales.

La Troisième République (depuis 1991)

Depuis le début des années 1980, mais surtout depuis l'ouverture politique du pays en 1990, on assiste à un développement des recherches géologiques menées par des universitaires de différents pays (France, Italie, Allemagne, Suisse, USA, Afrique du Sud, etc.) en collaboration avec l'université d'Antananarivo et de

Toliary. Les progrès des connaissances ont permis la tenue, en 1997, d'un symposium international de l'Unesco-IUGS sur le thème de la géologie du Protérozoïque de Madagascar dans le cadre du continent Gondwana.

Depuis 2002, une impulsion nouvelle a été donnée à la connaissance géologique de Madagascar par la réalisation du projet PGRM (Projet de gouvernance des ressources minérales). Financé par la Banque mondiale, avec une participation des Coopérations française et sud-africaine, le PGRM (2002-2008) a pour objectif une révision et interprétation structurale de la cartographie du socle précambrien de l'île aux échelles du 1/100 000 et 1/500 000.

Recherches actuelles : géologie et métallogénie du Précambrien de Madagascar

Le socle précambrien, cristallin, occupe les deux tiers orientaux de l'île alors que les bassins sédimentaires (Permien à Quaternaire) se situent en bordure du canal du Mozambique (fig. 1). Les connaissances sur le domaine sédimentaire ont été acquises très rapidement. Sa cartographie au 1/100 000 a été presque totalement réalisée avant 1960. Sa paléontologie a été connue grâce, notamment, aux travaux remarquables (1927-1955) de Maurice Collignon. Au contraire, les connaissances sur la géologie du socle ont été acquises plus tardivement et ont largement évolué en raison des progrès des sciences de la Terre dans le domaine des roches ignées et métamorphiques (géologie structurale, géochimie, thermo-barométrie des roches et des fluides, géochronologie, etc.).

En premier lieu, la minéralogie et la pétrographie du socle cristallin et des formations volcaniques ont été largement débroussaillées par l'immense travail de Lacroix. Les cartes géologiques au 1/100 000 levées entre l'après-guerre et 1975 et leurs synthèses au 1/500 000 (BESAIRIE, 1969-1971) constituent d'excellentes cartes lithologiques qui ont servi de base solide à des études scientifiques ou à des prospections minières. Leur levé a permis la découverte de gisements importants : chrome, nickel, fer, thorianite, monazite, ilménite.

Mais ces cartes sont à réinterpréter pour trois raisons principales :

- les informations structurales sont insuffisantes. Si les schistosités et les foliations sont bien dessinées, les données sur les linéations et les zones de cisaillement sont pratiquement absentes ;
- le socle précambrien métamorphique a été cartographié comme des formations sédimentaires en cherchant à y définir un ordre stratigraphique. C'est ainsi qu'a été établie la succession « classique » des « systèmes » Androyen, du Graphite, du Vohibory et de la « Série schisto-quartzocalcaire » ;

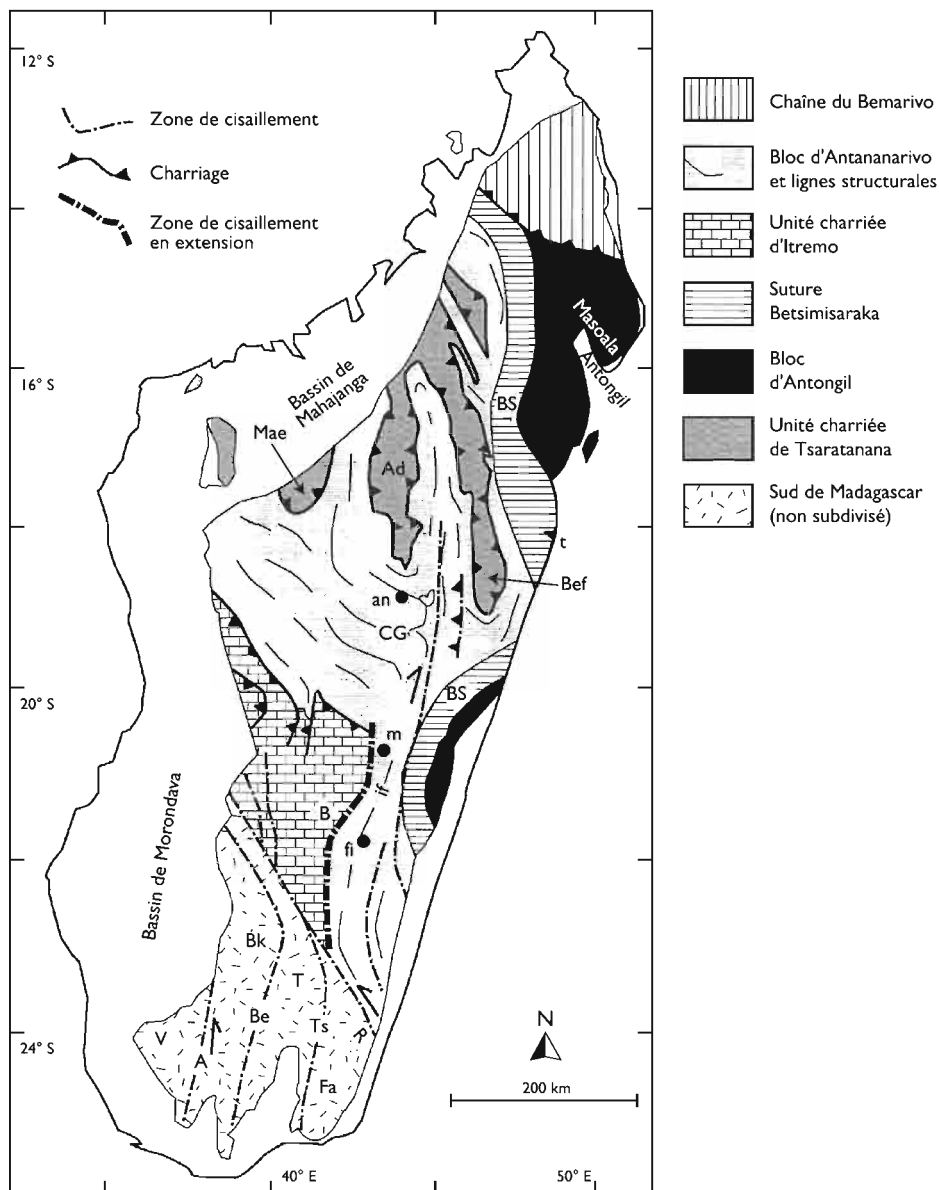


Fig. 1

Unités tectoniques du Précambrien de Madagascar d'après Collins et Windley (2002).

an : Antananarivo ; t : Toamasina ; fi : Fianarantsoa ; m : Manandona ;

Ad : ceinture d'Andriamena ; BS : zone de cisaillement de Betsileo ; Bef : ceinture de Beforona ;

BS : zone de suture de Betsimisaraka ; if : zone de cisaillement de Ifandriana ;

Mae : ceinture de Maevatanana ; R : zone de cisaillement de Ranotsara ;

CG : granite de Carion ; Masoala : péninsule de Masoala ; Antongil : baie d'Antongil ;

V : ceinture du Vohibory ; A : zone de cisaillement de Ampanihy ; Bk : ceinture de Bekily ;

Be : zone de cisaillement de Betroka ; T : ceinture de Tranomaro ;

Ts : zone de cisaillement de Tranomaro ; FA : ceinture anoytienne de Fort-Dauphin.

– les datations isotopiques de cette époque étaient encore très imprécises (U-Th-Pb) ou mal adaptées à l'approche des ensembles poly-métamorphiques (Rb-Sr). Les grands domaines archéens, le rôle de l'orogénèse fini-archéenne (2 500 mA) et celui de l'orogénèse panafricaine (550 mA) ont été reconnus, mais les événements protérozoïques ont échappé ou ont été mal datés.

Depuis une vingtaine d'années, des travaux universitaires, localisés dans des régions forcément limitées, ont conduit à d'importants progrès vers une approche moderne de la géologie du socle précambrien (fig. 1) :

– en géologie structurale, des grandes zones de cisaillement et des charriages ont été mis en évidence par ROLIN (1991), LARDEAUX *et al.* (1999) et MARTELAT *et al.* (2000) ;

– en géochronologie, on a reconnu quatre principaux groupes d'événements (GUERROT *et al.*, 1991 ; PAQUETTE *et al.*, 1994, 1998, 2003 ; HANDKE *et al.*, 1999 ; TUCKER *et al.*, 1999 ; KRÖNER *et al.*, 2000 ; DE WIT *et al.*, 2001 ; JÖNS et SCHENK, 2008) autour des âges suivants : 3 200 mA (formations d'origine volcano-sédimentaires les plus anciennes) ; 2 500 mA (orogénèse fini-archéenne) ; 800 mA (intrusions de granites et gabbros attribuées à un magmatisme d'arc de type andin ; déformation et métamorphisme probables) ; 630-500 mA (différentes phases de l'orogénèse panafricaine). En pétrographie, on a montré la superposition de deux ou trois cycles métamorphiques dont on a défini les conditions thermo-barométriques (GONCALVÈS *et al.*, 2003) ;

– en métallogénie, les travaux universitaires récents ont montré le rôle important des processus hydrothermaux (ou métasomatiques par la circulation de fluides) d'âge panafricain, dans la formation des concentrations minérales jusque-là rapportées au métamorphisme de gisements primaires au sein des protolithes volcano-sédimentaires (MOINE *et al.*, 1985 ; RAKOTONDRAZAFY *et al.*, 1996 ; MOINE *et al.*, 2004 ; GIULIANI *et al.*, 2007 ; RAKOTONDRAZAFY *et al.*, 2008).

L'architecture du socle de Madagascar résulte de l'assemblage des pièces d'un puzzle, encore mal connues, que les études en cours cherchent à définir en identifiant les différentes unités tectono-métamorphiques par leurs caractères lithologiques, structuraux, métamorphiques et géochronologiques ; la figure 1 montre une des hypothèses proposées par COLLINS et WINDLEY (2002). Suivant cette hypothèse, le socle précambrien de Madagascar serait composé de sept (ou neuf) unités tectono-métamorphiques : trois unités archéennes au centre et à l'est où s'intercale une unité considérée comme une possible zone de suture néoprotérozoïque ; trois (ou cinq unités) protérozoïques au sud, à l'ouest et au nord. Les unités archéennes sont respectivement celles de l'unité charriée de Tsaratanana, de la suture Betsimisaraka, du bloc d'Antongil, et du bloc d'Antananarivo. Les unités protérozoïques correspondent à la chaîne de Bemarivo, aux formations du sud de Madagascar (non subdivisé) et à l'unité d'Itremo.

Les gîtes minéraux de Madagascar ont été décrits par BESAIRIE (1966) qui a établi une carte minière (BESAIRIE, 1964-1977). Les travaux en cours du Projet de

gouvernance des ressources minérales (analyses des sédiments fluviaux, études géologiques, recherches en métallogénie) vont conduire à une meilleure connaissance du potentiel minier et des modalités de formation des gisements. Les précisions qui seront apportées sur les corrélations, au sein du Gondwana, avec l'Afrique de l'Est et de l'Inde vont aussi apporter une contribution importante à la métallogénie de Madagascar. Actuellement, le potentiel minier est le suivant :

- Cr-Ni-Pt : les minéralisations liées aux roches mafiques et ultramafiques (Unité de Tsaratanana, ceinture de roches vertes probable ; d'autres unités à composante mafique) sont importantes avec les gisements de chrome (chromite d'Andriamena), de nickel (exploitation en latérite à Ambotovy) et des indices de platinoïdes ;

- Au : l'or, en veines de quartz et les placers qui en dérivent, est abondant en un grand nombre de petits gisements (ANDRIANJAKAVAH *et al.*, 2007). Sa relation avec la présence de roches mafiques est souvent nette, en particulier dans l'Unité de Tsaratanana (Maevatanana) et dans celle d'Ikalavavony (Dabolava) ;

- Fe : le fer est surtout représenté par des gisements de type rubané métamorphisés en quartzites à magnétite, avec notamment le grand gisement de Soalala dans un témoin de l'Unité de Tsaratanana de la région du Cap Saint-André (seuil de Bekodoka) ;

- C : le graphite constitue des gisements importants, exploités, dans les paragneiss (khondalites) des Unités d'Antananarivo et Betsimisaraka.

- Be-Nb-Ta-gemmes : Madagascar est connue pour l'abondance des pegmatites, source de béryls, de niobo-tantalates et de pierres précieuses. Ces roches sont partout en relation avec le magmatisme granitique à 500-550 m.a. Les gisements d'émeraude de la région de Mananjary sont aussi d'origine métasomatique et leur genèse est à relier à la réaction de fluides pegmatitiques sur des roches ultramafiques riches en chrome (MOINE *et al.*, 2004). Les gisements d'émeraude de Ianapera au sud-ouest d'Ihosy sont également à relier à une circulation de fluides hydrothermaux issus de la mise en place de pegmatites (ANDRIANJAKAVAH, 2009 ; ANDRIANJAKAVAH *et al.*, 2009). Depuis une dizaine d'années, le pays est devenu un très important producteur de corindons gemmes (saphir et rubis) et, depuis 2004, un programme de recherche sur la genèse de ces gisements est mené par l'IRD (UR154 LMTG) avec l'université d'Antananarivo (Département des sciences de la Terre). On connaît des gisements liés aux basaltes alcalins (RAKOTOSAMIZANANY, 2009) et aux roches métamorphiques, mais on exploite surtout des gisements alluvionnaires (Ilakaka) qui proviennent du démantèlement de nombreux types de gisements, surtout métasomatiques, découverts dans le socle cristallin (GIULIANI *et al.*, 2007 ; RAKOTONDRAZAFY *et al.*, 2008) ;

- Al-Ti-Zr-Th : les bauxites du sud-est de Madagascar et surtout les sables de plages à ilménite (zircon et monazite) qui vont être exploités (Fort-Dauphin) complètent ce bref aperçu des principales ressources au XXI^e siècle.

Perspectives

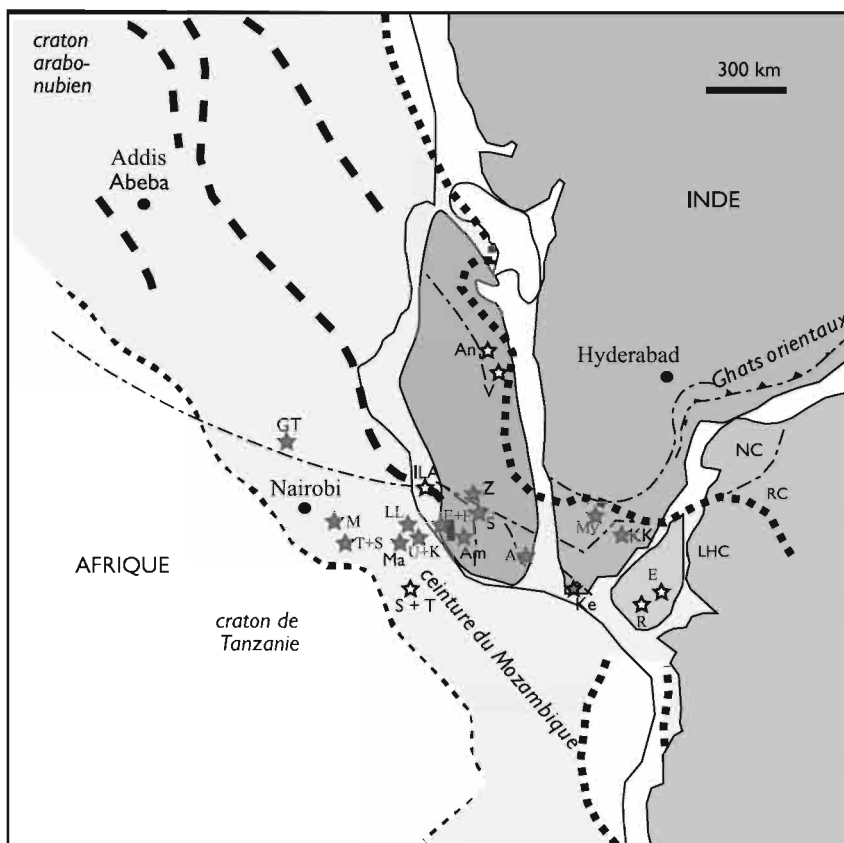
Les travaux du Projet de gouvernance des ressources minérales (levé 2004-2007) ont des implications majeures sur la connaissance de la structuration du socle précambrien malgache et sur l'orientation de la prospection des métaux pour l'avenir.

Ce projet a pour objectif une révision approfondie de la carte géologique du socle précambrien en vue d'une meilleure évaluation de son potentiel minier. La révision de la cartographie au 1/100 000, qui porte sur 45 % des coupures, a été précédée par une vaste campagne de géophysique aéroportée, magnétisme et radiométrie, tandis que la révision de la cartographie au 1/500 000 porte sur l'ensemble du socle. De très nombreuses données analytiques, pétrographiques et géochimiques (analyses isotopiques pour datations, roches totales, minéraux, sédiments fluviaux) sont acquises pour venir à l'appui des approches scientifiques. Les descriptions et hypothèses actuelles de l'évolution du socle précambrien, présentées au paragraphe précédent, risquent donc d'être largement renouvelées dans les toutes prochaines années.

À titre d'exemple, les travaux en cours remettent en cause le rattachement au continent indien (craton de Dharwar), de l'unité d'Antongil, à l'extrême est de la Grande Île. De même, le cisaillement de Ranotsara n'est pas une limite tectonique majeure, mais plutôt une simple virgation et l'unité d'Itremo passe de façon continue au domaine du Sud. Cette unité d'origine volcano-sédimentaire, de faciès amphibolites, est aussi charriée vers l'est sur celle d'Antananarivo. Par ailleurs, l'étude structurale et métamorphique de l'unité de Vohibory au sud de Madagascar, à l'ouest du cisaillement d'Ampanhy, semble indiquer que le métamorphisme de cette unité est antérieur au métamorphisme de haut degré subi par les autres unités du socle du sud de Madagascar (JÖNS et SCHENK, 2008).

Les études de gîtologie et de métallogénie vont conduire à une meilleure connaissance du potentiel minier et des modalités des conditions de genèse des gisements malgaches. Les précisions qui seront données sur les corrélations, au sein du Gondwana, avec l'Afrique de l'Est, l'Inde et le Sri Lanka, vont aussi apporter une contribution notable à la métallogénie du socle malgache (fig. 2). Y aurait-il des pipes kimberlitiques à diamants dans la partie orientale du socle malgache et les Sud de Madagascar (RANDRIANASOLO, 2009) ? Les kimberlites sont connues dans le socle tanzanien et indien. Cependant, l'unité d'Antongil n'appartiendrait pas au craton de Dharwar ! Ceci n'empêche pas la compagnie de Beers de prospecter dans cette région. De même, les corindons malgaches font partie de la ceinture néoproterozoïque mozambicaine qui s'étend de l'Éthiopie jusqu'en Inde. La caractérisation systématique des gisements de gemmes malgaches et leur comparaison avec ceux de la ceinture mozambicaine permettront d'orienter la prospection vers la recherche de nouveaux types de gisements inconnus dans la Grande Île, comme les gisements de rubis associés aux marbres.

L'ensemble de ces nouvelles données, obtenues au cours du Projet de gouvernance des ressources minérales et d'autres programmes de coopération, notamment ceux développés avec l'IRD, orientera les recherches géologiques futures réalisées par les universitaires et les instituts de géologie malgaches et internationaux.



- Roches néoproterozoïques juvéniles et/ou régions affectées par un métamorphisme de fort degré (amphibolite ou supérieur) entre 750-500 Ma
- ★ Gisement de corindon primaire
- ☆ Gisement de corindon secondaire (placer)
- Zone de suture néoproterozoïque
- Limite des roches néoproterozoïques juvéniles et/ou régions affectées par un métamorphisme de fort degré (amphibolite ou supérieur) entre 750-500 Ma
- Zones de chevauchement et cisaillement

Fig.2

Juxtaposition du Sri Lanka, du sud de l'Inde, de Madagascar et de l'Afrique dans le super-continent Gondwana avec la localisation des gisements de corindons (modifié d'après Collins et Windley, 2002 ; Mercier et al., 1999).

Afrique de l'Est = GT : Garba Tula ; M : Mangari ; T + S : Twiga et Si Ndoto ;

LL : Longido et Lonsogonoi ; Ma : Mahenge ; U + K : Uмба et Kalalani ;

S + T : Songea et Tunduru. Madagascar = ILA : Ilakaka ; Z : Zazafootsy ; S : Sahambano ;

E + F : Ejeda et Fotadrevo ; Am : Ambatomena ; A : Andranondambo ; V : Vatomandry ;

An : Andilamena. Sud de l'Inde = My : Mysore ; KK : ceinture à corindons de Karur-Kangayam ;

Ke : sud du Kerala. Sri Lanka = R : Ratnapura ;

E : Elahera. Antarctique avec les complexes métamorphiques suivant NC : Napier ;

RC : Rayner ; LHC : Lützow-Holm.

Bibliographie

ANDRIANJAKAVAH P. R.

2009 – *Contexte géologique et métallogénique des minéralisations en émeraude du gisement de Ianapera, bloc du Vohibory-sud-ouest de Madagascar*. Thèse doct. en cotutelle, univ. Toulouse-univ. Antananarivo, 216 p.

ANDRIANJAKAVAH P. R., SALVI S.,

BÉZIAT D., GUILLAUME D.,

RAKOTONDRAZAFY A. F. M., MOINE B.

2007 – Textural and fluid inclusion constraints on the origin of the banded-iron-formation-hosted gold deposits at Maevatanana, Central Madagascar. *Miner Deposita*, 42 : 385-398.

ANDRIANJAKAVAH P. R., SALVI S., BÉZIAT D.,

RAKOTONDRAZAFY A. F. M., GIULIANI G.

2009 – Proximal and distal styles of pegmatite-related metasomatic emerald mineralization at Ianapera, southern Madagascar. *Miner Deposita*, DOI 10.1007/s00126-009-0243-5.

BANKS Sir J., SOLANDER D.

1772 – *Supplément au voyage de M. de Bougainville*. Paris, Saillant & Nyon.

BÉHIER J.

1960 – Contribution à la minéralogie de Madagascar. *Annales Géologiques de Madagascar*, XXIX, Tananarive, 78 p.

BESAIRIE H.

1964 – *Carte géologique de Madagascar à l'échelle de 1/1 000 000*. Tananarive, Service géologique de Madagascar.

BESAIRIE H.

1966 – Gîtes minéraux de Madagascar. *Ann. Géol. Mad.*, n° XXXIV.

BESAIRIE H.

1968-1971 – Description géologique du massif ancien de Madagascar. *Doc. Bur. Géol. Mad.*, n° 177.

BESAIRIE H.

1969-1971 – *Cartes géologiques de Madagascar à l'échelle de 1/500 000*. Tananarive, Service géologique de Madagascar.

BESAIRIE H.

1964-1977 – *Carte minière de Madagascar à l'échelle de 1/2 500 000*. Tananarive, Service géologique de Madagascar.

COLLIGNON M.

1958 – *Atlas des fossiles caractéristiques de Madagascar*. Antananarivo, République malgache, Service géologique de Madagascar, V. 15, Ministère de l'Industrie et des Mines.

COLLINS A. S., WINDLEY B. F.

2002 – The tectonic evolution of central and northern Madagascar and its place in the final assembly of Gondwana. *J. Geol.*, 110 : 325-339.

COURRIER R.

1948 – *Notice historique sur Alfred Lacroix, membre de la section minéralogique, secrétaire perpétuel pour les sciences physiques. Lecture faite en séance annuelle des prix du 13 décembre 1948*. Institut de France, Académie des Sciences, 1949-36, 126 p.

DE WIT M. J., BOWRING S. A., ASHWAL L. D., RANDRIANASOLO L. G., MOREL V. P. I., RAMBELOSON R. A.

2001 – Age and tectonic evolution of Neoproterozoic shear zones in southwestern Madagascar, with implications for Gondwana studies. *Tectonics*, 20, 1 : 1-45.

FLACOURT DE E.

1658 – *Histoire de la Grande Île de Madagascar*. 384 p.

GIULIANI G., FALLICK A. E.,

RAKOTONDRAZAFY M., OHNENSTETTER D., ANDRIAMAMONJY D., RALANTOARISON T., RAKOTOSAMIZANANY S., MADISON M., OFFANT Y., GARNIER V., DUNAIGRE Ch., SCHWARZ D., MERCIER A., RATRIMO V., RALISON B.

2007 – Oxygen isotope systematics of gem corundum deposits in Madagascar: relevance for their geological origin. *Miner Deposita*, 42 : 251-270.

GIULIANI G., RAKOTONDRAZAFY M., FONTAN F., MOINE B., CARLIER G., LORAND J. P., RONDEAU B.
2008 – Contribution des géologues et minéralogistes français et malgaches à la connaissance géologique et minière de Madagascar du XIX au XXI^e siècle. *Le Règne Minéral*, 80 : 5-21.

GONCALVÈS P., NICOLLET C., LARDEAUX J. M.
2003 – Finite strain pattern in Andriamena unit (north-central Madagascar): evidence for late Neoproterozoic-Cambrian thrusting during continental convergence. *Precambrian Res.*, 123 : 135-157.

GUERROT C., COCHERIE A., OHNENSTETTER M.
1991 – « Les complexes ultrabasiques de la zone ouest-Andriamena (Madagascar) : contraintes géochronologiques ». *In : Principaux résultats scientifiques et techniques du BRGM 1990/1991* : 99-101.

HANDKE M. J., TUCKER R. D., ASHWAL L. D.
1999 – Neoproterozoic continental arc magmatism in west-central Madagascar. *Geology*, 27 : 351-354.

HOTTIN G.
1976 – Présentation et essai d'interprétation du Précambrien de Madagascar. *Bull. BRGM*, section IV, n° 2 : 117-153.

JÖNS N., SCHENK V.
2008 – Relics of the Mozambique ocean in the central East African orogen: evidence from the Vohibory block of southern Madagascar. *J. metamorphic Geol.*, 26 : 17-28.

KRÖNER A., HEGNER E., COLLINS A. S., WINDLEY B. F., BREWER T. S., RAZAKAMANANA T., PIDGEON R. T.
2000 – Age and magmatic history of the Antananarivo Block, central Madagascar, as derived from zircon geochronology and Nd isotopic systematics. *Am. J. Sci.*, 300 : 251-288.

LACROIX A.
1922 – *Minéralogie de Madagascar. Tomes 1, 2, 3.* Paris, Challamel, A. (Éd.).

LACROIX A.
1941 – Les gisements de phlogopites de Madagascar et les pyroxénites

qui les renferment. *Annales Géologiques du Service des Mines*, Imprimerie officielle, Tananarive, 115 p.

LARDEAUX J. M., MARTELAT J. E., NICOLLET C., PILI E., RAKOTONDRAZAFY R., CARDON H.
1999 – Metamorphism and tectonics in southern Madagascar : an overview. *Gondwana Research*, 2 : 355-362.

MARTELAT J. E., LARDEAUX J. M., NICOLLET C., RAKOTONDRAZAFY R.
2000 – Strain pattern and late Precambrian deformation history in southern Madagascar. *Precamb. Res.*, 102 : 1-20.

MERCIER A., RAKOTONDRAZAFY M., RAVOLOMIANDRINARIVO B.
1999 – Ruby mineralization in Southwest Madagascar. *Gondwana Res.*, 2 : 233-438.

MICHEL-LÉVY A., LACROIX A.
1888 – *Les minéraux des roches. L'application des méthodes minéralogiques et chimiques à leur étude microscopique.* Paris, Baudry et Cie (ed.), 334 p.

MOINE B., CHAN P. C., MERCIER A.
2004 – Rôle du fluor dans la formation des gisements d'émeraude de Mananjary (est de Madagascar). *C. R. Geoscience*, 336 : 513-522.

MOINE B., RAKOTONDRAZAFY M., CUNNEY M.
1985 – Les pyroxénites à urano-thorianite du sud-est de Madagascar : conditions physico-chimiques de la métasomatose. *Bull. Minéral.*, 108 : 325-340.

ORCEL J.
1949 – Alfred Lacroix (1863-1948). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 5^e série, tome XIX, 355-408. Bibliographie A. Lacroix, site du Département Histoire de la Terre du MNHN : <http://www2.mnhn.fr/hdtlacroix/>

PAQUETTE J. L., MOINE B., RAKOTONDRAZAFY M.
2003 – ID-TIMS using the step-wise dissolution technique versus ion microprobe U-Pb dating of metamict Archean zircons from NE Madagascar. *Precambrian Research*, 121 : 73-84.

PAQUETTE J. L., NÉDÉLEC A.

1998 – A new insight into Pan-African tectonics in the East-West Gondwana collision by U-Pb zircon dating of granites from central Madagascar. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 155 : 45-56.

PAQUETTE J. L., NÉDÉLEC A.,

MOINE B., RAKOTONDRAZAFY M.

1994 – U-Pb, single zircon Pb-evaporation and Sm-Nd isotopic study of o granulite domain in SE Madagascar. *J. Geol.*, 102 : 523-538.

RAKOTONDRAZAFY A. F. M.

1995 – *La hibonite (CaAl₁₂O₁₉) du sud-est de Madagascar. Caractères et modalités de formation dans les skarns à thorianite du faciès granulite*. Unpublished PhD Thesis, University Toulouse III-Antananarivo, 195 p.

RAKOTONDRAZAFY M.,

MOINE B., CUNEY M.

1996 – Mode of formation of hibonite (CaAl₁₂O₁₉) within the U-Th skarns from the granulites of S-E Madagascar. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 123 : 190-201.

RAKOTONDRAZAFY A. F. M.,

GIULIANI G., FALICK A. E.,

OHNESTETTER D.,

ANDRIAMAMONJY A.,

RAKOTOSAMIZANANY S.,

RALANTOARISON Th., RAZANATSEHENO M.,

OFFANT Y., GARNIER V., MALUSKI H.,

DUNAIGRE Ch., SCHWARZ D.,

MERCIER A., RATRIMO V., RALISON B.

2008 – « Gem corundum deposits in Madagascar: a review. Ore Geology Reviews ». In Graham I. T., Khin Zaw, Cook N. J. (eds) : *Special Issue : The genesis of gem deposits*, sponsored by De Beers, 34 : 134-154.

RAKOTOSAMIZANANY S.

2009 – *Les corindons gemmes dans les basaltes alcalins et leurs enclaves à Madagascar : signification pétrologique et métallogénique*. Thèse doct., univ. Henri-Poincaré de Nancy-univ. Antananarivo-IRD, 414 p.

RANDRIANASOLO B.

2009 – *Nouvelles méthodes de cartographie du socle protérozoïque de Madagascar. Nature et géométrie de la croûte continentale inférieure d'un domaine orogénique en convergence, implications économiques*. Thèse doct., univ. Grenoble.

ROLIN P.

1991 – Présence de décrochements précambriens dans le bouclier méridional de Madagascar : implications structurales et géodynamiques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 312 : 625-629.

ROUBAULT M.

1945 – *Trésors méconnus. Les mines de l'Empire français*. Paris, Éditions Marco, 93 p.

TUCKER R. D., ASHWAL L. D., HANDKE M.

J., HAMILTON M. A., LE GRANGE M.,

RAMBELOSON R. A.

1999 – U-Pb geochronology and isotope geochemistry of the Archean and Proterozoic rocks of north-central Madagascar. *J. Geol.*, 107 : 135-153.

UNESCO-IUGS-IGCP-368

1997 – International Symposium on Geology and Mineral Ressources of Madagascar, 21-22 August 1997, Antananarivo, Madagascar.

VON LAUE M.

1913 – Röntgenstrahlinterferenzen. *Physikalische Zeitschrift*, 14 (22/23) : 1075-1079.

Éditeurs scientifiques

Christian Feller

Frédéric Sandron

Parcours de recherche à Madagascar

L'IRD – Orstom et ses partenaires



Parcours de recherche à Madagascar

L'IRD – Orstom et ses partenaires

Éditeurs scientifiques

Christian FELLER, Frédéric SANDRON

IRD Éditions

INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT

Marseille, 2010

Préparation éditoriale

Yolande Cavallazzi

Mise en page

Bill Production

Maquette de couverture

Michelle Saint-Léger

Maquette intérieure

Pierre Lopez, Catherine Plasse

Coordination, fabrication

Catherine Plasse

Photos de couverture : « Paysages de Madagascar »

De gauche à droite et de haut en bas : © IRD/J.-P. Rolland, P. Laboute, J.-P. Rolland, P. Laboute, M. Grouzis, B. Moizo, B. Moizo, P. Blanchon, B. Moizo, M. Grouzis, G. Giuliani, B. Moizo, M. Grouzis, B. Moizo, M.-N. Favier, B. Moizo, C. Chaboud, B. Moizo

La loi du 1^{er} juillet 1992 (code de la propriété intellectuelle, première partie) n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans le but d'exemple ou d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon passible des peines prévues au titre III de la loi précitée.

© IRD, 2010

ISBN : 978-2-7099-1695-0