

CARACTERISATION PETROGRAPHIQUE ET MINERALISATIONS ASSOCIEES DU MASSIF DE MANANGOTRY - CHAINES ANOSYENNES, DANS L'EXTREME SUD-EST DE MADAGASCAR

Dieudonné Razafimahatratra¹, Jean Marc Montel ² Lala Andrianaivo³, Alfred Andriamamonjy⁴

1- Ecole Normale Supérieure, Université d'Antananarivo, BP 881 Antananarivo 101, Madagascar

2- Ecole Nationale Supérieure de Géologie, Laboratoire Géoresources, CNRS-Université de Lorraine-CREGU, Nancy France.

3- Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, BP 1500 Antananarivo 101, Madagascar

4- Sciences de la Terre et de l'Environnement, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo, BP 906 Antananarivo 101, Madagascar

Résumé

Les chaînes anosyennes de l'extrême sud-est de Madagascar font partie de la suite d'Ambalavao-Kiangara-Maevarano d'âge 570Ma à 545 Ma qui traverse les différents domaines du socle précambrien du pays. Elles sont caractérisées par des faciès granito-charnockitiques qui présentent un intérêt exceptionnel comme porteur d'un type de gîte de monazite unique au monde par la taille des cristaux et l'association minérale : biotite, apatite, monazite, ilménite. Ce gîte se localise dans le massif de Manangotry dans le sud de la chaîne. Il se présente en filons aux contours mal définis dans le faciès granito-charnockitique. La richesse en Terres Rares et thorium (monazite), en titane (biotite, ilménite), en zirconium (zircon), ainsi que l'abondance du fluor des fluides attestés par la composition des minéraux caractérisent le faciès de la région. A partir de ces sources, des accumulations de minéraux en placers sur les plages ou dans les vallées se sont formées. Ces accumulations seront exploitées essentiellement pour l'ilménite, mais la monazite peut constituer un sous-produit intéressant.

Mots-clés : Pétrographie, faciès granito-charnockitique, chaînes anosyennes, monazite, Terres Rares, Manangotry.

I. INTRODUCTION

Depuis très longtemps, la région extrême sud Est de Madagascar a attiré l'attention de chercheurs en raison de ses minéralisations très diverses. Les plus importants sont les sables le long de la côte à partir de Manantenina jusqu'à Taolagnaro qui forment de véritable gisement d'ilménite, monazite et zircon. Ce gisement détritique est exploité actuellement par la société Rio Tinto / Qit Minerals Madagascar (QMM) pour minerai de titane. Il est considéré comme les produits du démantèlement des chaînes anosyennes (Du Sordet, 1952 ; De la Roche et Marchal, 1956 ; Pigneguy, 1958 ; Rantoanina, 1986 ; Razafimahatratra 2008 ; Razafimahatratra et al., 2011 ; Montel et al., 2011). En outre, à une trentaine de kilomètre à l'ouest, des massifs très complexes de nature granito-charnockitique formant des véritables chaînes sous le nom de « chaînes anosyennes » présentent des minéralisations en terres rares sous forme de monazite et de zircon. La présence d'étain sous forme de cassitérite en petits grains a été signalée dans la magnétite ou parfois associée à l'apatite et à la monazite. Ce faciès renferme également des divers sulfures sous forme de pyrite, mispickel et molybdénite (de la Roche, 1956). Le massif de Manangotry représente le faciès type des chaînes Anosyennes grâce à ses minéralisations particulières surtout en Terres Rares ; de ce fait, cette étude a pour objectif de caractériser ses faciès pétrographiques afin d'inventer les différents gîtes métallogéniques intéressants.

II. CONTEXTE GEOLOGIQUE REGIONAL

II.1. Localisation géographique

Les chaînes anosyennes forment entre les pénéplaines androyennes et les basses collines de la côte Est une vaste barrière Nord-Sud, large d'environ 50 km et allongée depuis Fort-Dauphin jusqu'à Midongy du Sud sur 200 km. La ligne faîtière s'élève entre 1700 et 2000 mètres. Les chaînes sont compartimentées par deux dépressions intérieures, accessibles par route, la cuvette d'Esira et la cuvette de Ranomafana, ainsi que par deux vallées très encaissées, le Haut Mandrare et l'Itomampy.

La plus grande partie du versant oriental est recouverte par la grande forêt ombrophile. Cet ensemble constitue une région très accidentée, de pénétration difficile, soumise à un climat relativement pluvieux. Vu la superficie des chaînes anosyennes, notre étude se focalise sur le massif de Manangotry (Figure1). Il se situe à 30 km à vol d'oiseau au nord-ouest de Taolagnaro (Figure 2) et présente une superficie de 100km² environ. C'est un massif représentatif des chaînes et qui présente les faciès pétrographiques et minéralogiques spécifiques de la zone.



Figure 1 : Massif de Manangotry

II.2. Cadre géologique

Madagascar est constitué par deux formations principales (Figure 3). Il s'agit du socle cristallin d'âge précambrien qui occupe les 2/3 orientaux de l'île, et les formations sédimentaires d'âge permien au quaternaire qui couvrent l'un tiers occidental de l'île (Bésairie, 1966 et 1970 ; Hottin, 1976). Le socle précambrien de Madagascar se subdivise en six grands domaines géologiques (Roig et al., 2012 ; Tucker et al., 2012), à savoir : le domaine d'Antongil-Masora, le domaine d'Antananarivo et Sous-domaine Itremo, le domaine d'Ikalamavony, le domaine Androyen-Anosyen, le domaine de Bemarivo et le domaine de Vohibory.

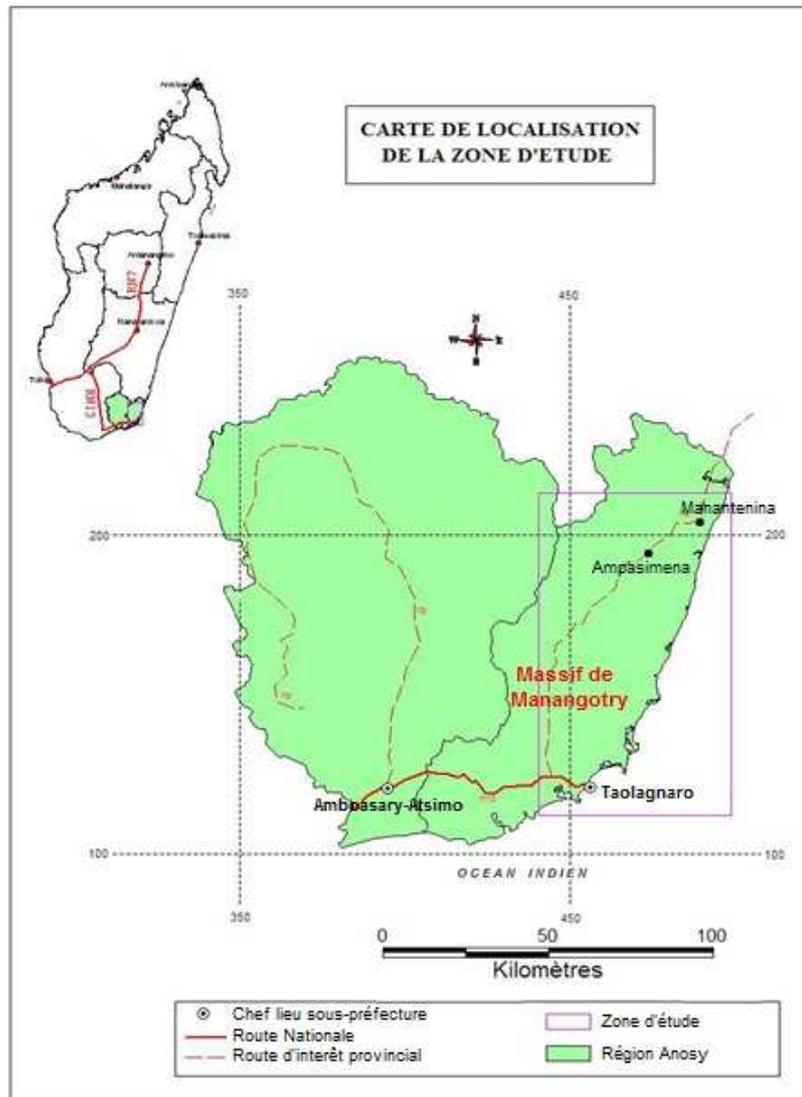


Figure 2 : Carte de localisation de la zone d'étude.

La zone d'étude fait partie du domaine Androyen-Anosyen qui se subdivise en deux sous domaines ; il s'agit du domaine d'Androyen et celui d'Anosyen. Les chaînes anosyennes se trouvent dans le sous-domaine d'Anosyen. Elles font partie de la suite d'Ambalavao-Kiangara-Maevarano. C'est une suite qui recoupe tous les domaines tectoniques du sud à l'exception de Vohibory. Deux phases d'intrusions sont connues. La première phase s'est déroulée vers 580-570 Ma avec la mise en place d'intrusions pré- à syn-tectoniques. Ces roches sont essentiellement représentées dans le domaine Anosyen-Androyen et plus rares voire absentes dans les autres domaines. La seconde phase intrusive, plus fréquente et répartie sur la plupart des domaines, s'est déroulée entre 550 et 510 Ma avec la mise en place de plutons tardi- à post-tectoniques d'allure générale semi-circulaire ou stratoïde. Dans le sous-domaine Anosyen, les orthogneiss forment le « batholite d'Anosyen » (Figure 4) affleurant à l'Est de Tranomaro et d'Esira. Il s'agit d'un d'orthogneiss granitique de couleur pale, nettement folié. L'assemblage des minéraux préservés est dominé par le feldspath-K et le quartz. Dans la plupart des affleurements, ces minéraux forment respectivement 40-50% et 30-40% environ de la roche. Le plagioclase est présent mais constitue généralement moins de 10% de la roche. Les silicates ferromagnésiens ne sont pas abondants et sont représentés par la biotite (<5%) et/ou le grenat (<10%). Le spinelle-hercynite peut également être

présent en tant que minéral accessoire. Les deux variantes à gros grain équigranulaire et à phénocristaux sont observées. Lorsqu'ils existent, les phénocristaux déformés de feldspath potassique forment des yeux de taille centimétrique, tandis que dans la plupart des roches grenues, ils forment un grain grossier baignant dans une matrice interstitielle de quartz et de plagioclase. Ces orthogneiss sont datés par la méthode U-Pb sur zircon à 573 ± 6 Ma pour le batholite anosyen (GAF-BGR, 2008c).

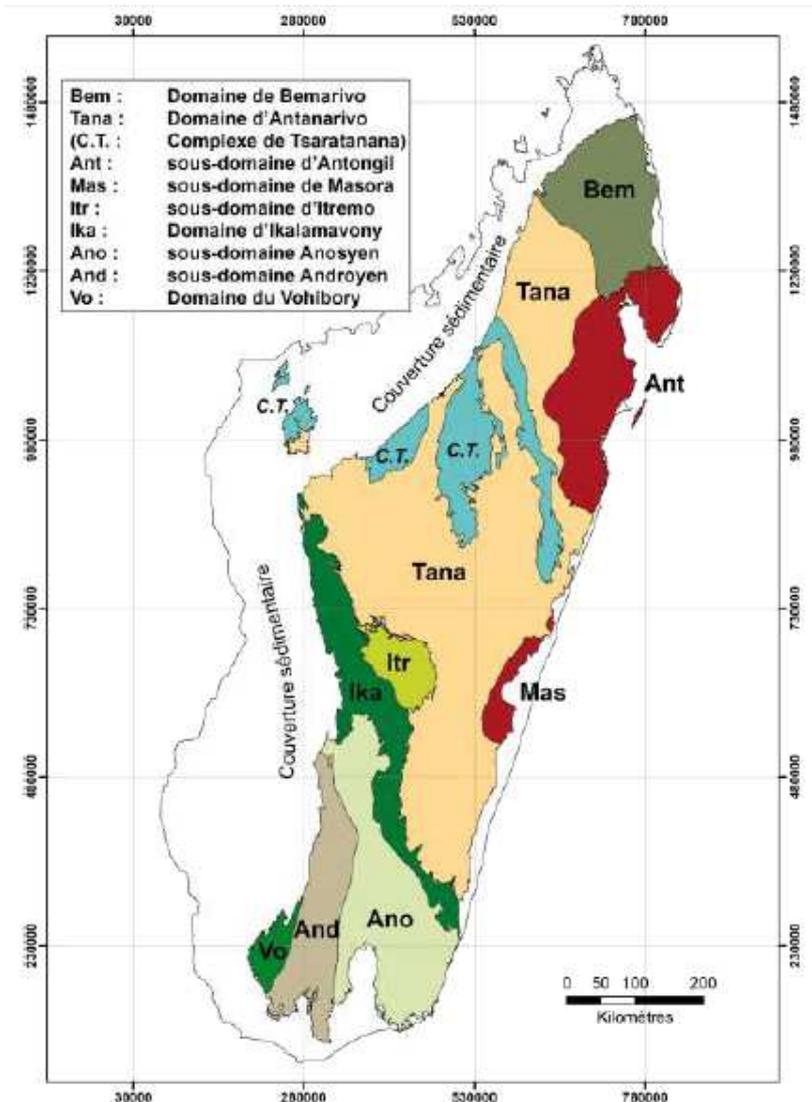


Figure 3 : Carte géologique des différents domaines du socle précambrien (Tucker et al., 2012)

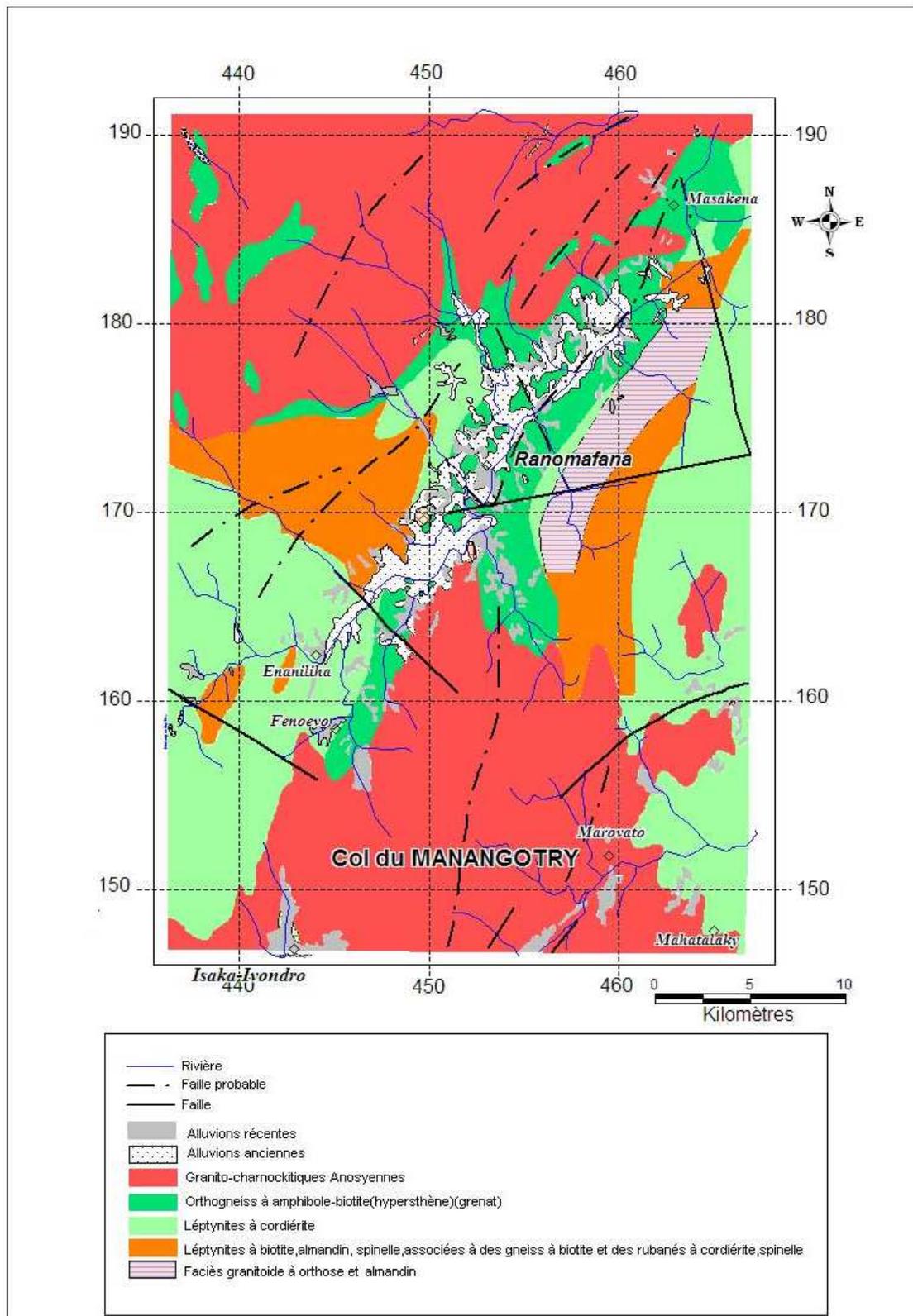


Figure 4 : Carte géologique de la zone d'étude

III. CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTS FACIES PETROGRAPHIQUES

Les roches du massif de Manangotry sont formées surtout par des granites et des charnockites qui constituent les principales formations des chaînes Anosyennes. D'une manière générale, ce sont des roches riches en quartz et feldspath avec des minéraux colorés plus ou moins abondants tel que la biotite, le grenat, l'orthopyroxène. Leur texture va d'une texture grenue, quand le granite n'a pas subi de déformation, et à texture foliée dans le cas contraire. Des textures porphyroïdes sont également observées. Deux sous-groupes principaux ont été distingués pour ces granites :

- Granites à faciès charnockitiques
- Granites à grenat et/ou biotite (leucocrates)

III.1. Les granites à faciès charnockitique

Les granites à faciès charnockitiques ou malgachitique (Lacroix, 1922) sont caractérisés par la couleur verte des feldspaths, ce qui donne un aspect sombre à la roche (Figure 5). Ils sont effectivement à orthopyroxène. La biotite et l'amphibole sont aussi présentes. La biotite est typiquement brun rouge (riche en titane). La paragenèse minérale est caractérisée par : Quartz + Plagioclase + Feldspath K + Opx + Biotite + Hornblende + Ilménite +/- monazite, apatite, zircon.

Il existe deux types de faciès charnockitique dans le secteur d'étude :

- les variétés porphyroïdes à texture orientée qui sont des charnockites en massifs ou en lames ;
- les charnockites à grains fin ou moyen qui forment des bancs plus ou moins réguliers ou des lentilles généralement peu puissantes, à texture massive. Certains de ces charnockites constituent des enclaves au sein des variétés de granites leucocrates.



Figure 5 : Granite à faciès charnockitique

L'étude de l'échantillon DN13 au col du Manangotry que la roche est orientée, celle-ci est matérialisée par l'alternance des minéraux clairs de grande taille avec les minéraux ferromagnésiens et d'autres minéraux clairs de petite taille. Au microscope, les feldspaths alcalins sont souvent perthitiques, présentent parfois des microfractures colmatées par un film argileux jaunâtre (Figure 6). Les plagioclases (andésines) sont parfois criblés d'antiperthites ; leurs macles polysynthétiques sont souvent tordues. Les myrmékites sont plus ou moins fréquentes. L'hypersthène, abondant, très pléochroïque, est souvent altéré en chlorite. La biotite brune rougeâtre est subordonnée et provient souvent de l'altération de l'hypersthène. Les minéraux accessoires sont la monazite en microcristaux.

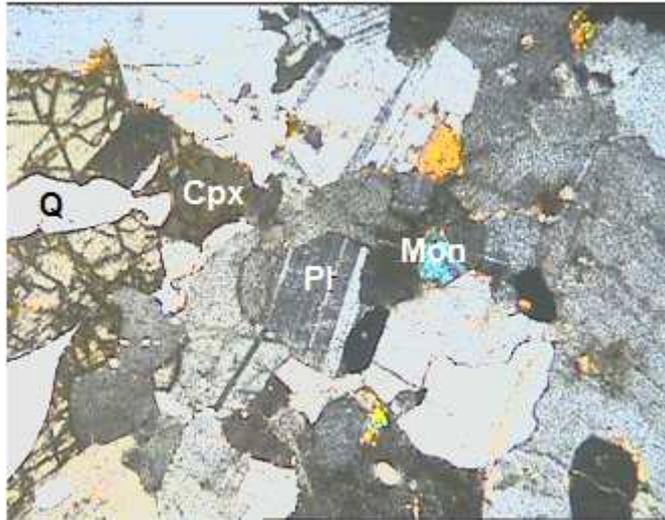


Figure 6 : Microphotographie en lumière polarisée de l'association minérale de DN13 (grossissement X10). Cpx = clinopyroxène, Pl = plagioclase, Mon = monazite, Q = quartz

III.2. Les granites à grenat et/ou biotite

Ce sont des roches claires ou légèrement rosâtres à prédominance de quartz et de feldspath avec du grenat et/ou de la biotite (Figure 7). Comme les granites à faciès charnockitique, ils peuvent avoir une texture orientée selon l'intensité de la déformation, ou porphyroïde à aspect pegmatitique. Il existe deux variétés :

- Granite orienté qui se distingue des autres roches par leur texture orientée et leur grain plus fin, rarement porphyroïde. Le quartz est souvent aplati, les feldspaths présentent souvent une couleur rosâtre et les minéraux accessoires sont la biotite et le grenat. La monazite est présente quelque fois dans ce faciès. La puissance de ce granite varie de plusieurs mètres à quelques décimètres.
- Leucogranites à grenat et à texture orientée qui se reconnaissent facilement par leurs grains grossiers (aspect pegmatitique) en donnant ainsi une structure porphyroïde. Ce type de granite couvre une surface considérable sur le versant Sud du massif de Manangotry et plus précisément dans la partie Ouest du secteur étudié. Cette roche pauvre en minéraux colorés montre aussi une orientation marquée par les gros cristaux de feldspaths donnant une foliation caractéristique de direction moyenne N 20 à 25 et de pendage 35°E. Dans ce type, les quartz se présentent en amandes étirées (col du Manangotry, rivière d'Antavibe). Outre le type orienté, on rencontre aussi des variétés porphyroïdes non orientées à l'Ouest d'Isaka-Ivondro, d'Abakole et de Montifeno.



Figure 7 : Leucogranite à grenat et/ou biotite à structure pegmatitique

L'observation microscopique l'échantillon DN12 montre les minéraux suivants (Figure 8) :

- Le feldspath alcalin, qui est abondant, se présente parfois en phénocristaux mesoperthitiques et des antiperthites ; il est caractérisé par un certain degré d'altération (microfractures remplies d'un film argileux jaunâtre en lumière naturelle). Il présente des inclusions de quartz, zircon et monazite. Le plagioclase (oligoclase) montre des macles polysynthétiques oblitérés. Le microcline est rare.
- Le quartz qui se présente en gros cristaux, à extinction onduleuse, parfois à inclusions de biotite, et de grenat. On rencontre aussi des petits cristaux interstitiels inférieurs au millimètre formant des sous-grains en damier ou des néograins.
- La biotite de couleur brune rouge est abondante. Elle est parfois fléchée, subautomorphe ou en baguette et localement en association avec le quartz.
- Le grenat qui est sous forme globulaire et isotrope ; il montre d'inclusions de biotite et de quartz ; il est liséré de cordiérite secondaire (ou de feldspath) au contact du grenat.
- Minéraux accessoires :
 - . L'apatite, est abondante ; elle se présente en plage ovoïde ou allongé, et est accolée à la monazite.
 - . La monazite, souvent accolée à l'apatite et au zircon, est xénomorphe ou en plages ovoïdes.
 - . Le zircon est entouré d'une auréole jaunâtre.
 - . L'ilménite est opaque.

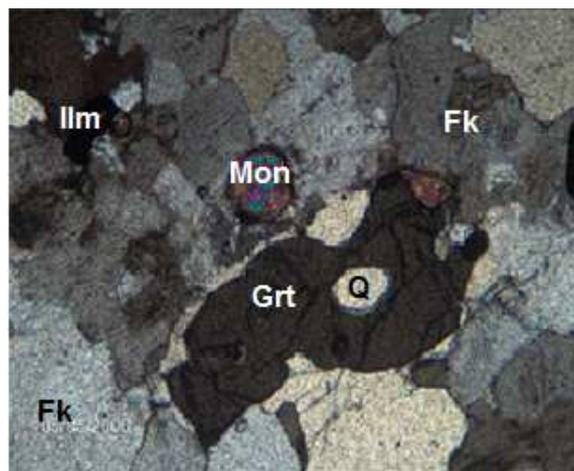


Figure 8 : Microphotographie en lumière polarisée du leucogranite à grenat ; Grt=grenat, Q=quartz, Mon=monazite, Fk=feldspath K, Ilm=ilménite

III.3. Géochimie

Les granites anosyens sont de vrais granites, riches en Fe et Mg, caractérisés par un rapport K/(K+Na) élevé. Cependant, les granites à faciès charnockitiques sont nettement plus calciques que les granites à grenat et/ou biotite qui sont au contraire plus potassiques. Ces granites sont enrichis en Terres Rares par rapport à un granite moyen et ils présentent un fractionnement régulier des terres rares légères avec un rapport La/Yb élevé. Les variations des teneurs en terres rares légères résultent uniquement des proportions variables de monazite. Le diagramme (Figure 9) représente les spectres de Terres Rares des granites Anosyens (Ramambazafy, 1998).

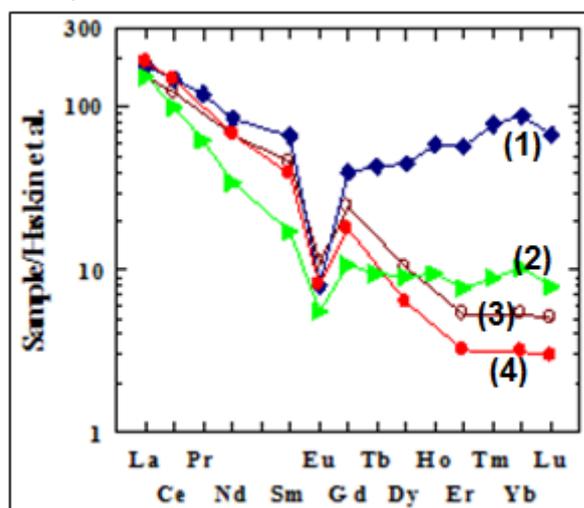


Figure 9 : Diagramme de spectres de terres rares des granites
(1) = leucogranite ; (2), (3), (4) = granites charnockitiques

Deux tendances majeures se distinguent pour les profils de Terres rares de ces granites : fractionnement important du spectre de Terres Rares avec un rapport La/Yb élevé, cas de granites charnockitiques. Les variations des teneurs en terres rares légères résultent uniquement des proportions variables de monazite. Par contre, les granites charnockitiques présentent un très faible de terres rares lourdes. L'anomalie négative en Eu est forte et variable dans les différents échantillons, ce qui caractérise la richesse en monazite des roches.

IV. MINERALISATIONS

Ce complexe granito-charnockitique d'âge panafricain des chaînes anosyennes de l'extrême Sud Est de Madagascar présente un intérêt géologique et minier en Terres Rares, par ses gîtes en monazite, qui forment des filons très particuliers des apatites à monazite (Andrianaivo, 1993), dont on ne connaît pas d'équivalents dans le monde (Razafimahatratra, 2008 ; Montel et al., 2011). A part de la monazite et de l'apatite qui forment des gros cristaux constitutifs du filon de gîte du col de Manangotry, la biotite, l'ilménite, ainsi que le zircon sont présents.

IV.1.1. Indices de monazites

Elles se présentent, soit en filon pegmatitique (au col de Manangotry) formant un site exceptionnel par la taille des cristaux de monazite et par l'association minérale biotite-apatite-monazite (Figure 10), soit en microcristaux disséminés dans les protolithes granito-charnockitiques encaissants.

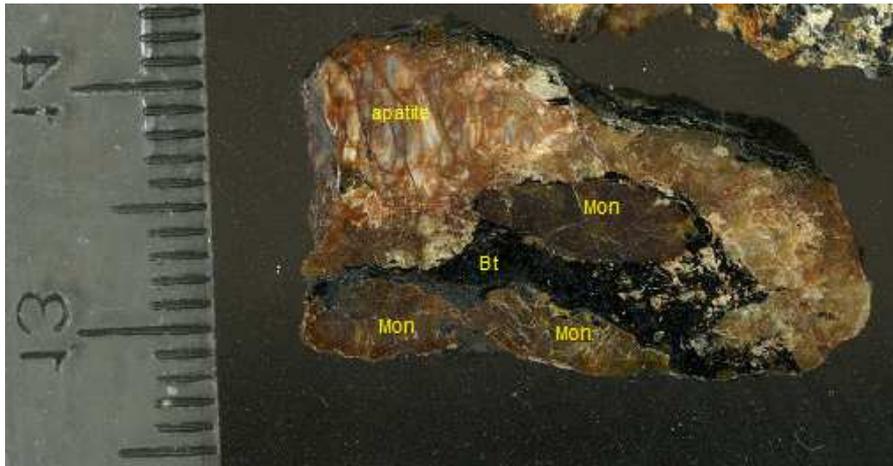


Figure 10. Association minérale exceptionnelle caractérisée par des gros cristaux d'apatite-monazite-biotite. Bt = biotite, Mon = monazite

IV.1.2. Les monazites géantes filoniennes

Cet indice se situe au pied du parement amont de la chaussée au flanc d'une très forte pente boisée à 6km au nord d'Isaka Ivondro d'où son appellation PK6 (Razafimahatratra, 2008 ; Montel et al., 2011). La puissance de la formation minéralisée atteint 3 à 4 m de haut et son extension est de 45 m. C'est un filon à gros cristaux de monazite et à apatite, qui représente la pegmatite de type particulier que De la Roche (1958) a la dénommé « Schlierens phosphatés ». Des gros cristaux de monazite en éluvion qui pèsent jusqu'à 100 grammes se trouvent sur la route (Figure 11). Au bas de la paroi, le granite à gros grain (kaolinisé) qui est probablement l'encaissant direct des filons dont la radioactivité varie de 400 cps à 700 cps. Ensuite, un filon kaolinisé à grain fin, à biotite, monazite, grenat, zircon, apatite et quartz enfumé, en forte teneur de radioactivité qui varie de 800 à 3000 cps. Une masse à très gros cristaux d'apatite jaunâtre à blanchâtre atteignant trois mètres d'épaisseur. Cette masse à apatite renferme des petites lentilles à gros cristaux de monazite et de biotite en grosses paillettes dont la radioactivité β (Andrianaivo, 1993) est très forte allant de 4 000 à plus de 10 000 cps. Cet ensemble montre une direction moyenne de N45, pendage 35 à 40°SE (Figure 12). Les éluvions et éboulements recouvrent localement la formation minéralisée.



Figure 11 : Gros cristaux de monazite sur le talus du col de Manangotry

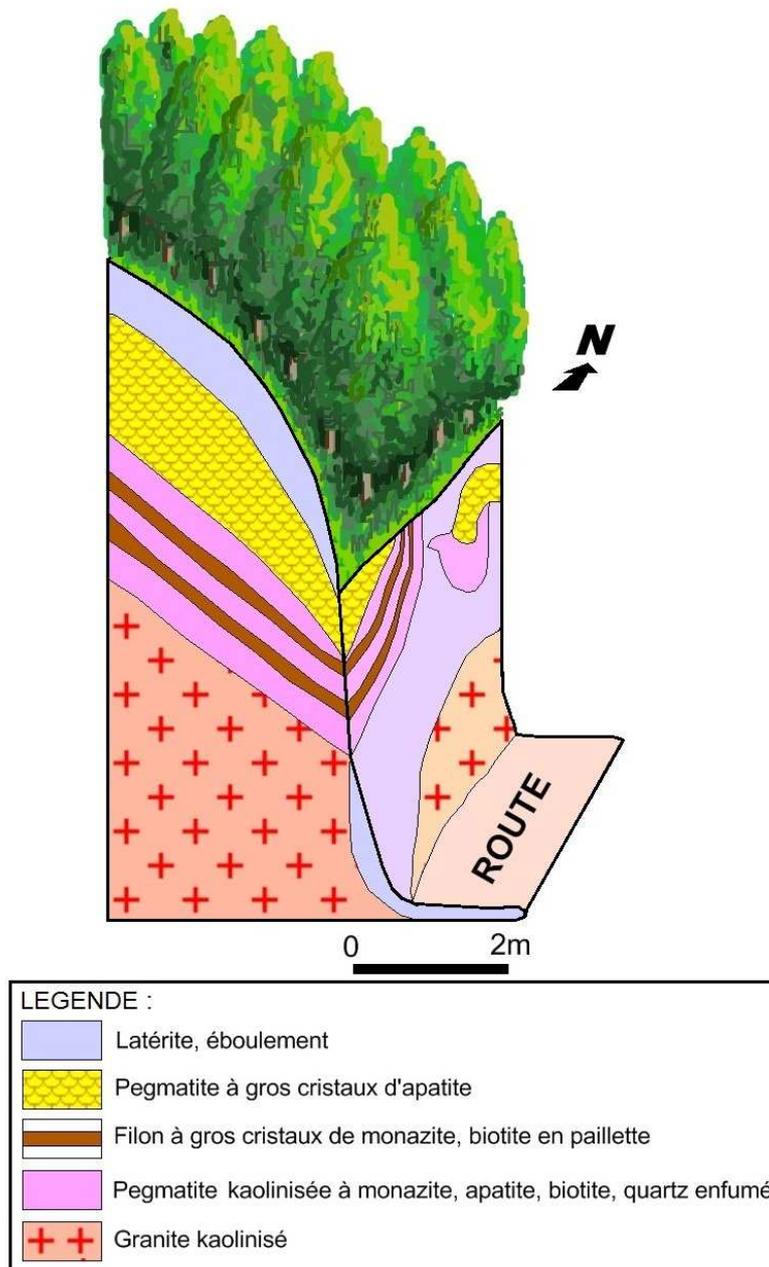


Figure 12 : Modèle en 3 dimensions de la formation minéralisée du col de Manangotry

La composition des monazites géantes est très constante, à l'intérieur des cristaux ou d'un cristal à l'autre. Aucune différence significative pour les éléments majeurs n'est visible dans l'étude détaillée réalisée sur l'échantillon DN11. Les variations visibles pour les éléments en trace ne sont pas significatives, et sont dues simplement à l'incertitude analytique. Les monazites géantes sont riches en thorium (11-14 % ThO₂) et assez riches en uranium (0.1-0.5 % UO₂), avec une substitution huttonitique majoritairement (tableau 1). Elles sont riches en Terres Rares légères avec des teneurs en Terres Rares moyennes (Samarium par exemple) faibles. La constance des compositions chimiques suggère que les monazites géantes se sont formées lors d'un épisode unique, avec des conditions très constantes.

Tableau 1 : composition chimique d'un cristal géant de monazite (échantillon DN11)

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
SiO ₂	1.86	1.84	1.98	1.82	1.88	1.82	1.93	1.76	1.93	2.02	2.06
P ₂ O ₅	26.41	26.70	26.49	26.58	26.57	26.64	26.61	26.43	26.32	26.77	26.94
CaO	0.94	0.93	1.04	0.94	0.88	0.88	0.88	0.90	0.83	1.00	1.02
Y ₂ O ₃	0.16	0.07	0.15	0.02	0.16	0.10	0.00	0.00	0.04	0.07	0.08
La ₂ O ₃	14.22	14.16	13.82	14.16	14.17	14.14	14.21	14.05	14.01	13.48	13.95
Ce ₂ O ₃	28.71	28.93	28.09	28.28	29.13	28.52	28.87	28.62	28.73	27.66	28.79
Pr ₂ O ₃	3.16	3.23	2.63	3.76	3.19	3.08	3.04	2.31	2.75	2.50	2.27
Nd ₂ O ₃	9.43	9.59	9.90	8.86	9.47	9.86	10.37	9.36	10.39	9.41	10.09
Sm ₂ O ₃	1.30	1.02	0.92	1.58	0.86	1.32	0.76	1.00	0.51	1.38	1.20
Gd ₂ O ₃	0.37	0.09	0.37	0.48	0.00	0.43	0.49	0.80	0.04	0.86	0.55
Dy ₂ O ₃	0.03	0.07	0.00	0.00	0.00	0.02	0.12	0.00	0.00	0.16	0.00
PbO	0.34	0.10	0.31	0.42	0.42	0.01	0.31	0.41	0.38	0.35	0.11
ThO ₂	11.89	11.88	13.57	12.32	12.18	11.64	12.09	12.48	11.93	13.25	12.84
UO ₂	0.15	0.23	0.33	0.32	0.44	0.32	0.23	0.15	0.29	0.18	0.22
T total	98.97	98.84	99.63	99.55	99.35	98.77	99.93	98.28	98.16	99.09	100.12
P	0.916	0.923	0.914	0.918	0.918	0.922	0.915	0.923	0.919	0.922	0.919
Si	0.076	0.075	0.081	0.074	0.077	0.075	0.078	0.073	0.080	0.082	0.083
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
La	0.215	0.213	0.208	0.213	0.213	0.213	0.213	0.214	0.213	0.202	0.207
Ce	0.431	0.432	0.419	0.422	0.435	0.427	0.429	0.432	0.434	0.412	0.424
Pr	0.047	0.048	0.039	0.056	0.047	0.046	0.045	0.035	0.041	0.037	0.033
Nd	0.138	0.140	0.144	0.129	0.138	0.144	0.150	0.138	0.153	0.137	0.145
Sm	0.018	0.014	0.013	0.022	0.012	0.019	0.011	0.014	0.007	0.019	0.017
Gd	0.005	0.001	0.005	0.006	0.000	0.006	0.007	0.011	0.001	0.012	0.007
Y	0.003	0.002	0.003	0.000	0.003	0.002	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002
U	0.001	0.002	0.003	0.003	0.004	0.003	0.002	0.001	0.003	0.002	0.002
Th	0.111	0.110	0.126	0.114	0.113	0.108	0.112	0.117	0.112	0.123	0.118
Pb	0.004	0.001	0.003	0.005	0.005	0.000	0.003	0.005	0.004	0.004	0.001
Ca	0.041	0.041	0.046	0.041	0.039	0.038	0.038	0.040	0.037	0.044	0.044

IV.2. Les petites monazites disséminées

Ce sont des monazites disséminées ou dispersées dans les encaissements granito-charnockitiques aux alentours du massif de Manangotry. Tous ces indices présentent des anomalies radioactives entre 150 cps jusqu'à 600 à 900 cps. Elles sont microscopiques en éléments accessoires avec l'apatite, l'ilménite, le grenat et le zircon dans les granites. Ce sont donc des monazites disséminées qui appartiennent à la paragenèse magmatique. Elles présentent une forte teneur en thorium (18 à 21%). Il existe donc une cohérence entre l'encaissement et le gisement lui-même qui contiennent tous les deux des monazites très riches en Th.

IV.3. Les apatites

L'apatite forme des masses filoniennes qui peuvent atteindre trois mètres d'épaisseur et renfermant des lentilles biotitiques à gros cristaux de monazite. Au col de Manangotry, elle est interstratifiée dans un autre filon kaolinisé (Figure 12). Les masses d'apatites sont constituées de monocristaux pluricentimétriques xénomorphes, d'aspect pierreux et fracturées (Figure 13). En outre, d'autres petits cristaux d'apatite se trouvent dans tous les faciès. Toutes les apatites montrent une fluorescence au UV dans la teinte orange vive.

Les analyses à la microsonde montrent que les apatites sont des fluorapatites avec un peu de chlore et très peu d'eau. La composition chimique est très peu variable et les teneurs en Terres Rares sont faibles (Tableau 2). Les apatites en petits grains et les grosses apatites ont des compositions identiques.

Les apatites renferment des inclusions de monazites en petits grains très pauvres en thorium, ce qui les différencie très nettement des autres monazites (Figures 14).



Figure 13 : Fragment d'apatite dans le gîte exceptionnel du col de Manangotry

Tableau 2 : Composition chimique du gros cristal d'apatite (échantillon DN11)

	1	2	3	4	5	6	7	8
F	2.77	2.78	2.97	2.79	2.76	2.87	2.86	2.75
Na ₂ O	0.21	0.11	0.21	0.25	0.22	0.15	0.11	0.20
MgO	0.15	0.24	0.07	0.18	0.13	0.08	0.19	0.12
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.00
SiO ₂	0.01	0.53	0.05	0.06	0.00	0.00	0.16	0.01
P	42.28	42.68	42.27	42.21	43.00	42.75	41.91	42.41
Cl	0.64	0.78	0.73	0.82	0.72	0.64	0.54	0.63
CaO	53.65	52.54	53.43	52.68	53.07	52.60	52.96	53.33
Mn	0.19	0.05	0.12	0.14	0.19	0.14	0.02	0.05
FeO	1.15	1.59	1.08	0.98	1.31	1.12	0.69	0.93
SrO	0.00	0.07	0.00	0.04	0.08	0.00	0.00	0.00
La ₂ O ₃	0.14	0.22	0.16	0.19	0.18	0.07	0.00	0.11
Ce ₂ O ₃	0.27	0.42	0.29	0.58	0.19	0.35	0.12	0.30
total	101.47	102.01	101.37	100.90	101.86	100.76	99.59	100.82
Ca	4.83	4.73	4.83	4.79	4.77	4.79	4.85	4.83
Na	0.03	0.02	0.04	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03
Mg	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
Fe	0.08	0.11	0.08	0.07	0.09	0.08	0.05	0.07
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
La	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Ce								
somme	4.98	4.92	4.97	4.95	4.93	4.92	4.95	4.96
P	3.01	3.04	3.02	3.03	3.05	3.07	3.03	3.04
Si	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Al	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	0.09	0.11	0.10	0.12	0.10	0.09	0.08	0.09
F	0.74	0.74	0.79	0.75	0.73	0.77	0.77	0.74
OH	0.17	0.15	0.10	0.13	0.16	0.14	0.15	0.17

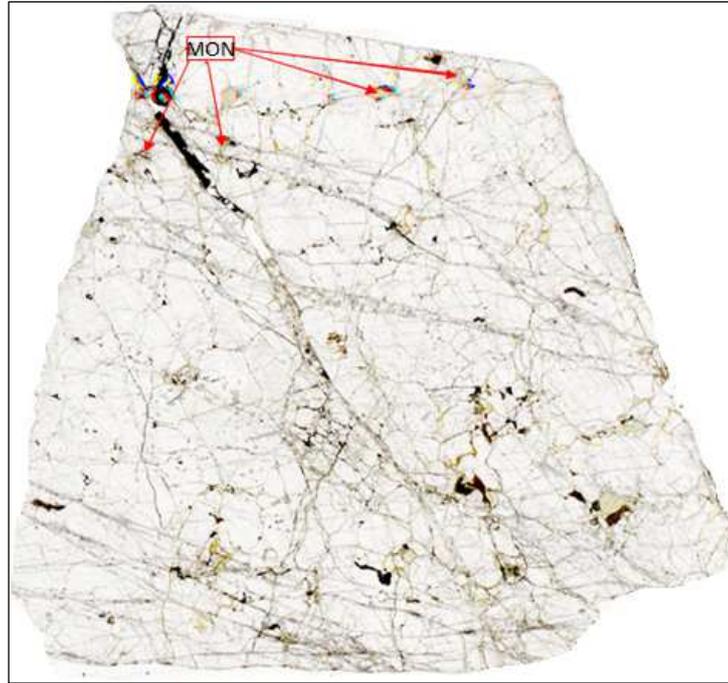


Figure 14 : Microphotographie d'un gros cristal d'apatite fracturée (montrant de nombreuses inclusions de monazite et biotite)

IV.4. Les autres minéraux

A part de la monazite et de l'apatite qui forment des gros cristaux constitutifs du filon de gisement du col de Manangotry, la biotite, l'ilménite ainsi que quelques zircons se trouvent également dans ce faciès.

IV.4.1. Ilménite

L'ilménite se présente en grains xénomorphes de quelques dizaines de microns à millimétriques dans les niveaux biotitiques (Figure 16). Elle se trouve plus rarement en inclusion dans la monazite et l'apatite. La composition chimique des ilménites est très constante, quelle que soit sa position texturale. C'est toujours une ilménite très pure, avec un peu de manganèse comme seule impureté notable.

IV.4.2. La biotite

Le filon à monazite du col de Manangotry renferme des veines ou des lentilles très riches en biotite qui se présentent en paillettes ou en grandes lames (Figure 16). Ces niveaux biotitiques s'alternent avec des lits riches en apatite. Les gros cristaux de monazite se trouvent à l'intérieur de ces zones à biotite. Elles présentent une teinte brune rouge avec un fort pléiochromisme.

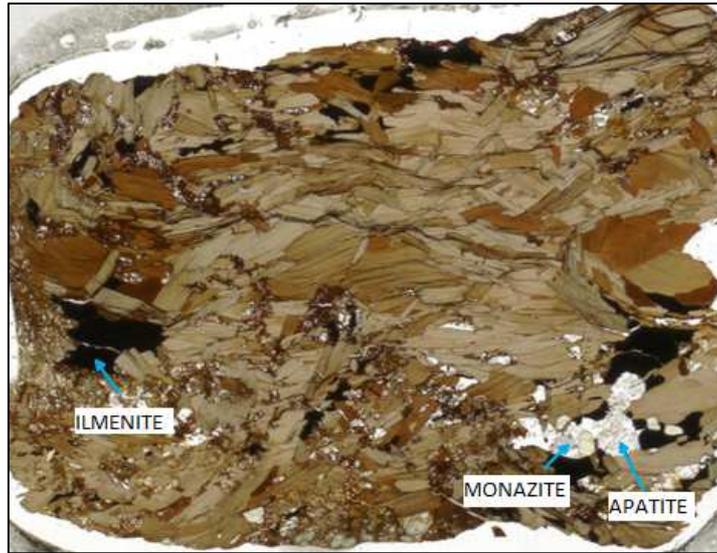


Figure 16 : Microphotographie de lit riche en biotite (lumière naturelle)

Tableau 3 : Composition de la biotite

	BT3a	BT3a	BT3a	BT3a	BT3a	BT3a	BT3b	BT3b	BT1	BT1	BT1	BT2	BT2	BT2	B
F	3.35	3.46	4.21	4.18	3.42	3.41	4.48	3.55	3.79	3.20	4.19	4.07	3.75	3.96	
Na ₂ O	0.15	0.02	0.01	0.08	0.10	0.08	0.06	0.17	0.22	0.22	0.00	0.14	0.06	0.08	
MgO	11.20	10.04	11.48	10.52	11.12	11.65	10.94	10.95	10.52	10.31	13.06	10.93	10.82	11.00	
Al ₂ O ₃	13.57	14.26	12.60	12.47	13.74	12.42	12.81	12.65	13.13	12.98	13.15	12.96	13.03	12.96	
SiO ₂	36.46	36.78	36.73	36.42	36.81	36.45	36.35	36.68	36.56	36.29	37.83	36.63	37.02	36.62	
Cl	1.33	1.55	0.94	1.37	1.16	1.19	1.16	1.50	0.74	0.85	0.77	0.76	0.77	0.84	
K ₂ O	8.63	8.13	9.10	9.16	8.33	9.33	9.14	9.10	8.95	8.68	9.02	9.28	9.13	9.29	
CaO	0.03	0.04	0.00	0.02	0.01	0.04	0.03	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	
TiO ₂	4.46	3.19	4.58	4.43	4.12	4.14	3.60	5.20	4.72	5.60	3.36	5.38	5.26	4.50	
Cr ₂ O ₃	0.06	0.06	0.03	0.09	0.00	0.02	0.04	0.00	0.05	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.11	0.00	0.00	0.00	0.05	0.07	0.14	0.00	0.07	
FeO	18.74	18.64	19.39	19.72	18.11	18.46	18.88	20.17	20.48	20.58	17.66	19.96	19.87	19.54	
NiO	0.04	0.04	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.08	0.07	0.01	0.01	0.21	0.09	0.00	
ZnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.47	0.13	0.02	0.12	0.09	0.00	0.00	
BaO	0.28	0.39	0.36	0.13	0.12	0.47	0.37	0.29	0.23	0.46	0.15	0.21	0.26	0.38	
total	98.31	96.60	99.43	98.72	97.06	97.78	97.93	100.83	99.61	99.29	99.38	100.77	100.06	99.24	
Si	5.65	5.79	5.69	5.73	5.73	5.72	5.75	5.83	5.64	5.60	5.77	5.61	5.66	5.68	
Al ^{IV}	2.35	2.21	2.31	2.27	2.27	2.28	2.25	2.37	2.36	2.40	2.23	2.39	2.34	2.32	
Al ^{VI}	0.13	0.44	-0.01	0.04	0.25	0.01	0.14	-0.08	0.03	-0.04	0.14	-0.06	0.01	0.05	
Fe	2.43	2.46	2.51	2.59	2.36	2.42	2.50	2.59	2.64	2.66	2.25	2.55	2.54	2.53	
Mg	2.59	2.36	2.65	2.47	2.58	2.72	2.58	2.51	2.42	2.37	2.97	2.49	2.47	2.54	
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	
Zn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	
Ti	0.52	0.38	0.53	0.52	0.48	0.49	0.43	0.80	0.55	0.65	0.39	0.62	0.61	0.52	
Cr	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Ni	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	
K	1.71	1.63	1.80	1.84	1.65	1.87	1.85	1.78	1.76	1.71	1.76	1.81	1.78	1.84	
Na	0.04	0.01	0.00	0.03	0.03	0.02	0.02	0.05	0.07	0.07	0.00	0.04	0.02	0.02	
Ca	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Ba	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	
F	1.64	1.72	2.06	2.08	1.68	1.69	2.24	1.72	1.85	1.56	2.02	1.97	1.81	1.94	
Cl	0.35	0.42	0.25	0.37	0.31	0.32	0.31	0.39	0.19	0.22	0.20	0.20	0.20	0.22	
Mg	0.52	0.49	0.51	0.49	0.52	0.53	0.51	0.49	0.48	0.47	0.57	0.49	0.49	0.50	

La composition chimique des biotites (Tableau 3) montre une grande constance dans la composition chimique de ce minéral. Toutes les biotites sont riches en F et Cl. Elles sont également riches en titane, et équilibrées en Fe et Mg. La présence de Titane dans leur réseau, dont sa teneur varie de 4 % à 5,5 % explique que ce sont des biotites formées à haute température.

IV.4.2. Le zircon

Dans le filon du PK 6, les zircons sont en inclusion dans la biotite ou dans le feldspath kaolinisé, et accolés avec les opaques (ilménites) ou avec les petites monazites. Leur taille varie de 300 µm à 500 µm. Les images MEB montrent des zonations : zones sombres à l'extérieur et claire à l'intérieur, et qui sont perturbées par des microfractures en disposition anastomosée (Figure 17).

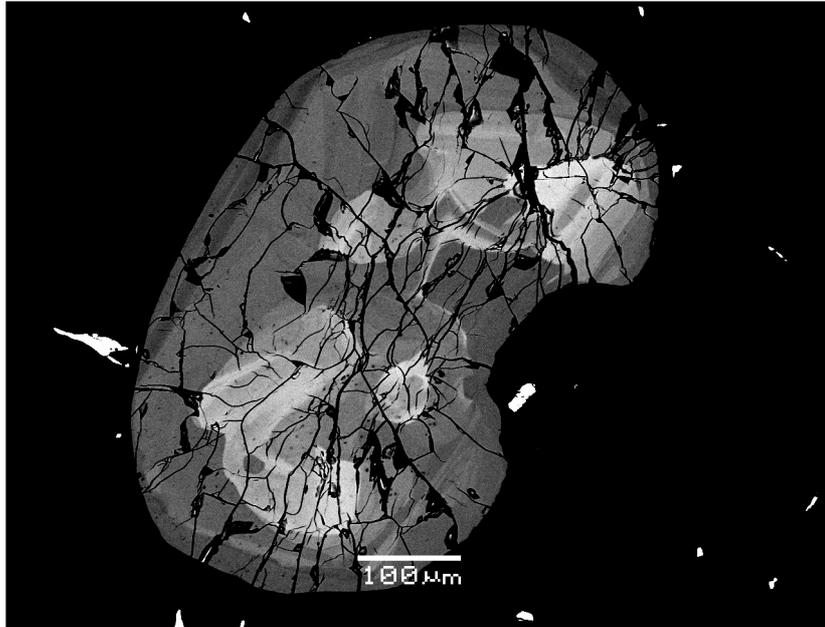


Figure 17 : Image MEB montrant de zircon microfracturé en disposition anastomosée

V. INTERPRETATION ET CONCLUSION

Le rôle de l'orogénèse panafricaine dans cette région permet de proposer l'hypothèse suivante : la collision continentale ont été effectuée en deux temps, un évènement autour de 700 à 650 Ma se serait produite entre l'Ouest Gondwana et une partie de l'Est (Nord et centre de Madagascar) ; la seconde étape vers 590 à 550 Ma correspondrait au stade final de l'amalgamation du Gondwana et responsable du magmatisme de la formation du complexe granito-charnockitique des chaînes anosyennes vers 570Ma (Razafimahatratra, 2008). Au cours de la différenciation magmatique, lors du stade pegmatitique, les gros cristaux de monazites se cristallisent en premier vers 545Ma pour former les filons d'apatite à monazite. Des altérations hydrothermales tardives affectent ces filons, et conduisent à la formation de la deuxième génération de petites monazites vers 500Ma issues de la fracturation et de la corrosion en partie des premiers. Cette étude géochronologique montre que deux épisodes de formation de monazite ont eu lieu dans les roches, les monazites riches en thorium qui se précipitent en premier tandis que celles qui sont pauvres en thorium sont les plus récentes. La position des apatites massives dans ce modèle reste un peu ambiguë. Elles contiennent en abondance des inclusions d'aiguille de monazites pauvres en thorium. Ceci montre que les monazites précipitent en même temps que les apatites, donc la précipitation des apatites serait découplée de la précipitation de la monazite. Ces évènements ont été accompagnés par des fortes variations de concentration en Terres Rares.

VI. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Andrianaivo L., (1993). Etude géologique du massif de Manangotry et de ses minéralisations en monazite (chaînes anosyennes, sud-est de Madagascar). Mémoire de DEA, Université d'Antananarivo, 57p.
2. Besairie H., (1966). Gîtes minéraux de Madagascar. Ann. Géol. Madagasikara. Fasc. Xxxiv.

3. Besairie, H., (1970). Description géologique du massif ancien de Madagascar, 4^e volume: La région centrale 2. Le système de Vohibory, Série schisto-quartzo-calcaire, Groupe d'Amborompotsy. Service Géologique Madagascar, Document du Bureau Géologique, Tananarive. 177 p.
4. De la roche H., et Marchal, J., (1956). Géologie et minéralisation des chaînes anosyennes. Trav. Bur. Géol. Madagasikara., v.76.
5. De la Roche H., (1956). Les indices de monazite du col de Manangotry. Etude d'ensemble provisoire. Arch. Serv. Géol. Madagasikara. A1082.
6. De la roche, H. et Marchal J., (1956). Géologie et minéralisation des chaînes anosyennes. Trav. Bur. Géol. Madagasikara., v.76.
7. Du Sordet (1952). Prospecteur du Commissariat à l'Energie Atomique : CEA. Arch. Serv. Géol. Madagasikara. A1183.
8. GAF-BGR, 2008c. Rapport Final : Explanatory notes for the Anosyen Domain southeast Madagascar. Réalisation des travaux de cartographie géologique de Madagascar, révision approfondie de la cartographie géologique et minière aux échelles 1/100 000 et 1/500 000 zone Sud. République de Madagascar, Ministère de L'Energie et des Mines (MEM/SG/DG/UCP/PGRM), 93 pp.
9. Hottin G., (1976). Présentation et essai d'interprétation du cambrien de Madagascar. Bull. BRGM, 2^e série, section iv : pp117-153.
10. Lacroix A. (1922). Minéralogie de Madagascar. Challamel. Paris.
11. Montel J-M., Razafimahatratra, D., Ralison, B., De Parseval, P., Michel Thibault, M., Randranja, R., 2011. Monazite from mountain to ocean: a case study from Taolagnaro (Fort-Dauphin), Madagascar: European Journal of Mineralogy, v. 23, p. 745–757.
12. Pigneguy (1958). Prospecteur du commissariat à l'énergie atomique : CEA. Arch. Serv. Géol. Madagasikara.
13. Ramambazafy A., (1998). Granites et fluides en relation avec les skarns à thorianite dans les granulites du sud-est de Madagascar. Thèse de doctorat de l'Université de Paul Sabatier.
14. Rantoanina M. (1986). L'ilménite de sables de plages et de dunes à Madagascar. Communication personnelle. Antananarivo
15. Razafimahatratra D., 2008. La monazite des chaînes anosyennes : des gisements en place aux sables de plages à ilménite-zircon-monazite. Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, Département Mines, thèse de doctorat, 319, p.
16. Razafimahatratra D., Montel J.M., 2011. La monazite des chaînes anosyennes : des gisements en place aux sables de plages à ilmenite-zircon-monazite : [abs], Géologie et métallogénie de Madagascar, Société Géologique de France, Paris, 6-7décembre 2011.
17. Roig J.Y., Tucker R.D., Delor C., Peters S.G., Theveniaut H., 2012. Carte géologique de la République de Madagascar à 1/1 000 000. Ministère des Mines, PGRM, Antananarivo, République de Madagascar.
18. Tucker, R.D., Peters, S.G., Roig, J.Y., Théveniaut, H., Delor, C., (2012). Notice explicative des cartes géologiques et métallogéniques de la République de Madagascar à 1/1 000 000. Ministère des Mines, Antananarivo, République de Madagascar, 263p