

INTRODUCTION GENERALE

Tantalum Rare Earth Malagasy (TREM) qui a suggéré le sujet est une société minière de droit malagasy dont le siège est au Centre Commercial La City à Alarobia Antananarivo. Elle a une représentation permanente à Ambanja. Son objectif à termes est de mettre en exploitation les terres rares au sein de son actuel permis minier de type R (permis de recherche) institué sur la Presqu'île d'Ampasindava (Région Diana, District d'Ambanja dans le Nord – Ouest de Madagascar).

Historiquement les premières descriptions sur les minerais des terres rares (eudyalite $[\text{Na}_6\text{Ca}_{33}(\text{Fe},\text{Mn})\text{-}2(\text{Zr},\text{Nb})\text{-}2\text{Si}_{12}\text{O}_{34}(\text{OH})_{22}\text{Cl}_{0,5}]$ et le pyrochlore $[(\text{X},\text{Na})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH},\text{F})$; X= Ca ou Th ou Ce] dérivé par rétomorphose) et la roche porteuse (fasibitikite qui est une roche granitique à texture flux) qui est une composante filonienne du Massif Circulaire d'Ampasibitika ont été faites par Alfred Lacroix en 1902 et en 1922. Le Massif Circulaire d'Ampasibitika a été ultérieurement reconnu comme étant une caldeira volcanique et donc renommée « la Caldeira d'Ampasibitika » ou tout simplement « la Caldeira » (dénomination propre et interne de TREM). La cartographie géologique de base par le Service Géologique de Madagascar (Saint-Ours, de, 1956) et l'inventaire minier du Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM, Donnot, 1963) ont identifié la Province Alcaline d'Ampasindava avec des massifs intrusifs alcalins dont les plus importants sont Andranomatavy, Ambohimirahavavy, Bezavona et Manongarivo. Ils ont confirmé le possible intérêt minier et peut – être économique des terres rares du pyrochlore. Il a fallu attendre les années 1985 pour que les premiers programmes d'exploration eussent été menés par l'Office Militaire National pour les Industries Stratégiques (OMNIS) en collaboration avec la Zarubezhgeologia (de l'ex-Union Soviétique). Ils ont reconnu les Massifs de Manongarivo et d'Ampasibitika. Autant l'exploration que les travaux scientifiques sur les minerais des terres rares du Massif d'Ampasibitika n'ont porté que sur la minéralisation primaire notamment celle des environs du village d'Ampasibitika, aussi, les premiers travaux de prospection de TREM en 2010 ont – ils été pour la reconnaissance des gîtes primaires magmatiques de ce secteur. Dans le même temps, le dosage des terres rares des prélèvements aléatoires des faciès des sols de surface a permis un revirement fondamental de l'exploration de TREM vers les terres rares cationiques des argiles et des sols argileux. Un intensif échantillonnage des sols de couverture de toute l'Intrusion d'Ambohimirahavavy (exceptée une partie d'environ 5 kilomètres carrés) a été fait par creusement et rainurage de puits verticaux.

En 2014, TREM a pu définir trois catégories de ressources en terres rares des sols : les ressources mesurées (exploration à la maille carrée de 50 mètres), les ressources indiquées (exploration à la maille carrée de 200 mètres et à la maille rectangulaire de 200 mètres par 100 mètres) et les ressources estimées (exploration à la maille carrée de 500 mètres). La zone d'étude qui nous a été confiée est une partie de la zone d'exploration à la maille carrée de 50 mètres. Pour des raisons internes, TREM n'autorise pas la publication des chiffres du dosage des terres rares. Ils nous ont été confiés pour tout simplement les besoins de l'étude. Pour cette raison, aucun chiffre relatif aux oxydes des terres rares n'est mentionné dans cet ouvrage ni sur les illustrations du texte ni en annexe.

L'essentiel des cations des éléments chimiques susceptibles d'être contenus dans les sols ont été, au tout début de l'exploration, identifiés et dosés des échantillons des sols prélevés aléatoirement. Il s'est alors avéré qu'en plus des éléments chimiques des terres rares, seuls cinq éléments chimiques ont un comportement significatif (qui bougent, dans le jargon du Géochimiste) : le zirconium (Zr), le niobium (Nb), le tantale (Ta), l'uranium (U) et le thorium (Th). Les protocoles d'analyse émis ultérieurement par TREM ne contenaient plus, en plus des éléments chimiques des terres rares, que Nb, Ta, Th et U. D'ailleurs, et pour les besoins de l'étude d'impact environnemental ultérieure, l'uranium et le thorium doivent être connus.

Durant trois campagnes d'exploration géochimique, TREM a collecté un volume conséquent de données sur les sols et sur les teneurs en les éléments chimiques des terres rares et en les éléments certains éléments chimiques accompagnateurs. Chaque catégorie de données a été considérée séparément pour servir les objectifs de l'entreprise qui est la découverte et l'estimation des ressources de gîtes potentiels des terres rares. Les sols qui sont les hôtes des cations des éléments chimiques, dont ceux des terres rares, auraient dû se former en respect de modalités pédogénétiques données. Les éléments chimiques des terres rares et ceux des éléments chimiques accompagnateurs se seraient mis disponibles et aptes au piégeage par les sols néoformés suivant une organisation structurée définie. L'objectif a alors été d'arriver à établir les relations diverses entre les faciès des sols entre eux autant dans le sens vertical que dans le sens horizontal ainsi - que les relations entre les éléments chimiques des terres rares et les autres éléments chimiques qui les accompagnent et d'autre part, à comprendre le comportement des éléments chimiques en rapport aux évolutions des faciès des sols. Ces diverses relations serviraient à la définition de la méthode appropriée d'extraction des cations des terres rares de leurs sols hôtes.

Le permis d'exploration de TREM est institué sur la Presqu'Ile d'Ampasindava, au sein de cinq Communes Rurales du Distric d'Ambanja (Région Diana) : Ambaliha, Ankingameloka, Anoràtsangana, Antsirabe et Bemanevika Ouest. C'est une région sous l'influence d'un microclimat dit du Sambirano avec deux sous-zones :

- la sous – zone humide (façade sur le Canal du Mozambique) avec une hauteur de pluie annuelle de plus de 2.000 millimètres. La partie Ouest du PR de TREM est dans cette sous-zone ;
- la sous-zone orientale (façade sur la Baie d'Ampasindava) avec une hauteur de pluie plus modeste (deux saisons assez contrastées et une hauteur de pluie maximum de 500 millimètres aux mois de janvier). La partie Est du PR de TREM (sur laquelle est notre zone d'étude) est dans cette sous-zone.

L'accès au domaine d'exploration de TREM sur la Presqu'Ile d'Ampasindava se fait (i) soit par routes bitumées et permanentes (RN 4 jusqu'à Ambondromamy et RN 6 d'Ambondromamy à Ambanja pour un total d'environ 850 kilomètres) puis par 21 kilomètres de route en terre saisonnière réhabilitée et maintenue en état par TREM, (ii) soit par avion jusqu'à Nosy Be puis par mer jusqu'au village d'Ankatafa (une heure et demie en vedette rapide), (iii) soit par route jusqu'au port d'Ankify via Ambanja avec 25 kilomètres en plus et ensuite par mer jusqu'au village d'Ankatafa (une heure en vedette rapide).

La morphologie générale est caractérisée par l'aspect massif, imposant et perché de l'Intrusion d'Ambohimirahavavy qui a une bordure elliptique Nord Ouest – Sud Est abrupte (points

culminants à plus de 500 mètres) qui tranche sur une pénéplaine à moins de 150 mètres d'altitude.

De très rares villages et hameaux sont situés au sein du domaine exploratoire de TREM. La population est agraire et rurale ainsi - que conservatrice. La taille moyenne des ménages est de cinq personnes. La densité moyenne est de 67 habitants au kilomètre – carré. Le chômage est très élevé. Le syncrétisme est pratique et accepté.

La couverture végétale est caractérisée par des touffes de forêt de régénération (jeunes recrues) et de forêt de transition (bambou et ravalala) espacées de savane arbustive et de savane herborée. Un lambeau de forêt primaire est localisé sur l'extrémité Ouest de la partie Nord-Ouest du domaine exploratoire de TREM (site du Bongomirahavavy). La culture sur brûlis est très pratiquée et fait rapidement avancer la déforestation. Plusieurs espèces autant faunistiques que floristiques sont endémiques à divers niveaux (du Sambirano, de l'Ouest Malgache et de Madagascar) et certains sont à divers niveaux de vulnérabilité.

Aucun site habité n'est situé dans le secteur qui nous a été attribué. Il est couvert d'une savane herborée et il est localisé sur le rebord Est de la Caldeira d'Amipasibitika.

Aucun des travaux antérieurs sur les terres rares n'a été orienté vers les cations des terres rares des sols. Aussi le travail qui nous a été demandé est de nature pionnière : donner une première compréhension des sols. Comme ne disposant du temps nécessaire pour donner une compréhension des sols de couverture de l'intégralité de l'Intrusion d'Ambohimirahavavy, il nous a été demandé de la réaliser sur une aire restreinte d'environ 75 kilomètres carrés. Par ailleurs, il nous a été également demandé de livrer un premier aperçu des relations de comportement des éléments chimiques des terres rares et de leurs accompagnateurs (niobium, tantale, uranium et thorium). La présente étude ambitionne de pouvoir être considérée comme étant pilote des études pédologiques d'abord, et comportementales des éléments chimiques des sols de l'Intrusion d'Ambohimirahavavy, ensuite.

L'élaboration de cet ouvrage a été faite par la compilation et la synthèse des données consignées sur les documents d'exploration de TREM. Les données utilisées ont été :

- les analyses chimiques pour le dosage des éléments chimiques qui ont été effectuées par d'abord ALS Chemex puis par SGS ; les deux laboratoires étant en Afrique du Sud ;
- les descriptions des faciès des sols ainsi que toutes autres informations relatives à l'exploration établies et / ou collectées sur le terrain au cours de l'exécution des travaux de terrain d'exploration.

Chapitre 1: Contexte géologique de la zone d'étude

1.1. Les systèmes volcano-plutoniques d'Ampasindava dans le contexte gondwanéen

Les provinces alcalines sont généralement liées à une distension associée à un rift. Dans le cas de la province alcaline d'Ampasindava, la mise en place des divers corps volcano – plutoniques serait compatible à une configuration régionale d'un vaste champ volcanique du Cénozoïque (Ampasindava – Nosy Be – Nosy Mitsio) au Pléistocène et Actuel (les Iles Comores).

Le massif de Manongarivo fait partie intégrante du champ volcanique du Cénozoïque de l'Ambre – Ankaizina (PGRM, 2008). Il est alors, avec le Massif de Tsaratanana, sur la structure distensive majeure N130 réactivée lors du départ et de la séparation de l'Inde du Gondwana entre 165 et 100 Ma. Sur cette même structure distensive N130 sont également alignés les systèmes volcano-plutoniques d'Ampasindava dont les plus importants sont le Massif de Manongarivo, l'Intrusion d'Ambohimirahavavy et le Massif d'Andranomatavy (*figure 1*). Ils ont la même morphologie elliptique NW – SE et la même configuration géologique annulaire.

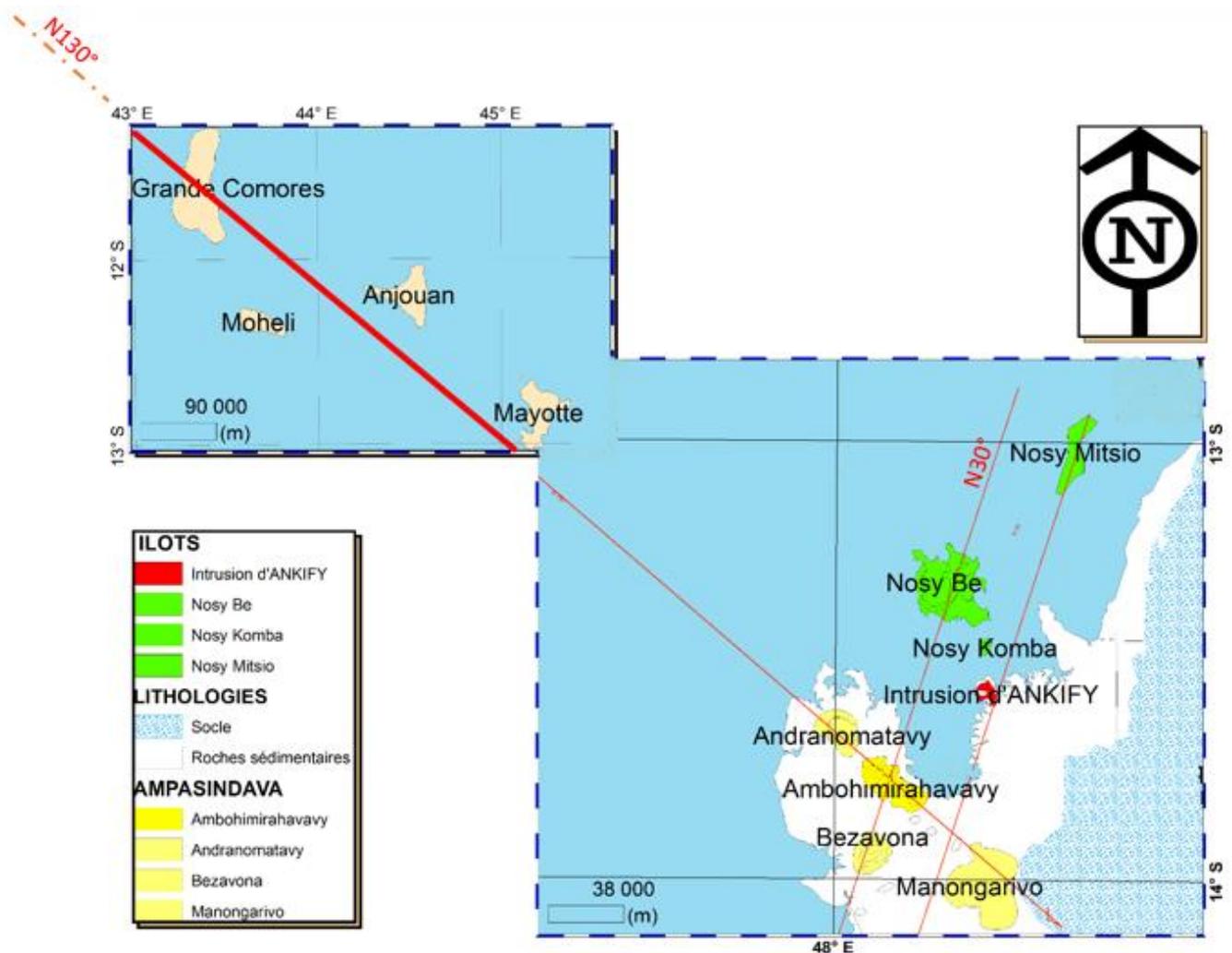


Figure 1: La carte évoquant la possibilité de tracer le linéament liant les Iles de l'Archipel des Comores avec la Presqu'île d'Ampasindava.

Le Massif de Tsaratanana et le Massif d'Ambre sont sur la structure distensive N – S également réactivée lors de cette séparation de l'Inde de Madagascar. Et il est relevé des cartes géologiques et des images satellitales deux linéaments parallèles N 30 qui auraient contrôlé la configuration de la Baie d'Ampasindava tel que :

- l'une est jalonnée par le Massif de Bezavona, l'Intrusion d'Ambohimirahavy et le champ volcanique de Nosy Be ;
- l'autre aligne le Massif de Manongarivo, les intrusions d'Ankify et le champ volcanique de Nosy Mitsio.

Sauf le Massif de Tsaratanana qui est intrusif sur le socle cristallin, ces divers corps volcano - plutoniques et volcaniques sont intrusifs dans les sédiments de faciès mixte de l'Isalo (Karoo) du Jurassique Inférieur terminal (Lias Supérieur) et du Jurassique Moyen avec une alternance de grès, schistes et marne. Toutefois, tous ces volcans et tous ces champs volcaniques et volcano – plutoniques se sont mis en place durant le Cénozoïque. La récurrence de la nature des laves est assez constante : trachyte, rhyolite, basalte et, pour les corps volcano – plutoniques, leurs équivalents grenus.

Les volcans qui ont façonné les Iles de l'Archipel des Comores ne se seraient pas mis en place suivant le rift d'ouverture de l'Océan Indien (relaté par **Perzo – Lafond, 2014**) mais serait plutôt à lier aux accidents tectoniques associés qui auraient affecté le Nord-Ouest de Madagascar (Ampasindava). Les volcans de Madagascar sont du Néogène tandis-que ceux des Comores sont du Quaternaire et le Karthala (Grande Comores) est actif à nos jours. Ce mécanisme d'alignement de volcans et de corps volcano – plutoniques et ce, dans le respect de la consécuitivité des âges suivant un sens bien défini, est compatible avec l'évolution d'un point chaud (hotspot). Dans le cas qui nous concerne, il peut être envisagé deux ou trois points chauds qui auraient évacué les mêmes magmas ; lesdits magmas ayant été canalisés et évacués grâce à des failles simultanément réactivées lors du début de la phase finale de l'insularisation de Madagascar (séparation de l'Inde et première incursion de la mer sur la côte Nord - Ouest de la future Ile). Dans cette optique,

- un des points chauds aurait eu un déplacement virtuel (effectivement, c'est la croûte terrestre qui aurait eu un déplacement par rapport au point chaud qui est considéré comme fixe dans le manteau supérieur) du Sud-Est vers le Nord-Ouest sur le linéament Tsaratanana – Archipel des Comores et
- un autre point chaud (ou deux relativement contigus) aurai(en)t eu un déplacement virtuel du Nord vers le Sud (ou l'un du Nord – Nord Est vers le Sud – Sud Ouest et l'autre du Nord vers le Sud).

Ces possibilités de déplacement relatif de points chauds pourraient être considérées comme au respect du déplacement de Madagascar vers le Sud suivant la ride de Davie après sa séparation de l'Afrique tout en observant une rotation senestre.

Les corps volcano – plutoniques de la Presqu'île d'Ampasindava sont intrusifs dans la couverture sédimentaire de la Makay (Isalo III) du Bajocien – Bathonien (**Razafimbelo, 1987**) avec de bas en haut:

- des grès, argiles et conglomérat continental du Makay I du Trias Moyen;
- le complexe argilo-gréso-calcaire du Makay II (Lias) et des grès à lentilles d'argile gréseuse du Makay III (Lias) ;
- d'argile et calcaire du Bajocien – Bathonien ;

Ces terrains sédimentaires sont couverts d'alluvions indifférenciées au Quaternaire (**PGRM, 2008**).

1.2.L'Intrusion d'Ambohimirahavavy

L'Intrusion d'Ambohimirahavavy est l'entité magmatique volcano – plutonique qui intéresse les efforts d'exploration des terres rares de TREM.

La carte de la **figure 2** suivante montre que l'Intrusion d'Ambohimirahavavy qui est de forme globalement en ellipse d'allongement Nord Est – Sud Ouest aurait été constituée selon les déroulés successifs de deux grandes époques volcaniques :

- d'une première époque volcanique à l'origine de la formation de deux caldeiras ayant émis les mêmes laves de nature hyperalcaline (Rakotova, 2009) de la Suite d'Ampasindava au Néogène Inférieur (**PGRM, 2008**). Les deux caldeiras sont voisines. Proviennent – elles d'une même chambre magmatique (générée par le même point chaud) ou de deux chambres magmatiques différentes (générées par deux points chauds distincts) pouvant ne pas être proches. Dans ce dernier cas, les voies de remontée du magma pourraient avoir des caractères de conduits qui, vers la surface, convergeraient. Leur structure en chaudron leur a valu l'appellation de Caldeira : morphologie positive circulaire dont l'intérieur est en dépression à fond plat. Cette configuration géomorphologique résulte de la consécuitivité de trois mécanismes :
 - vidage partiel ou total de la chambre magmatique sous – jacente après évacuation de son contenu durant les éruptions ;
 - effondrement de toit de la chambre magmatique soit par effet piston (surcharge lithostatique) soit dû à l'altération hydrothermale au niveau de la (des) cheminée(s) volcanique(s). L'effondrement provoque des ruptures physiques des matériaux géologiques qui définissent une faille en anneau (ring fault) qui limite la caldeira ;
 - une partie du reste du liquide au sein de la chambre magmatique emprunte ainsi la faille en anneau pour former le filon annulaire vertical grenu. La remontée se fait soit par effet de siphonnage soit par surpression exercée par les matériaux effondrés. Ce filon annulaire vertical est, en terme morphologique, une falaise formant une véritable muraille de très grande hauteur de commandement.

Pour la commodité, la dénomination de « Caldeira d'Ampasibitika » désigne la Caldeira du Sud Est et d'appeler « Caldeira du Bongomirahavavy » la deuxième qui constitue la partie Nord-Ouest de l'Intrusion d'Ambohimirahavavy.

- d'une deuxième époque volcanique plus récente à l'origine des formations du Groupe d'Ankaizina au Néogène Supérieur (**PGRM, 2008**) avec
 - un dôme rhyolitique à nodules d'obsidienne au centre de la Caldeira d'Ampasibitika ;
 - des coulées de trachyte et de rhyolite émise depuis le dôme rhyolitique et s'épanchant vers le Nord-Ouest pour être arrêtées par la partie Ouest du filon annulaire syénitique de la Caldeira du Bongomirahavavy. Elles ont été appelées « Coulées volcaniques de Tsarabariabe » par de Saint-Ours, 1956.

La carte de la **figure 3** exprime la répartition des formations géologiques constituant les deux Caldeiras de l'Intrusion d'Ambohimirahavavy. La carte de la **figure 4** a été élaborée par

l'interprétation géologique des données aéromagnétiques et de laquelle ont été relevés les linéaments de discontinuité magnétique compris étant relatifs à la tectonique cassante.

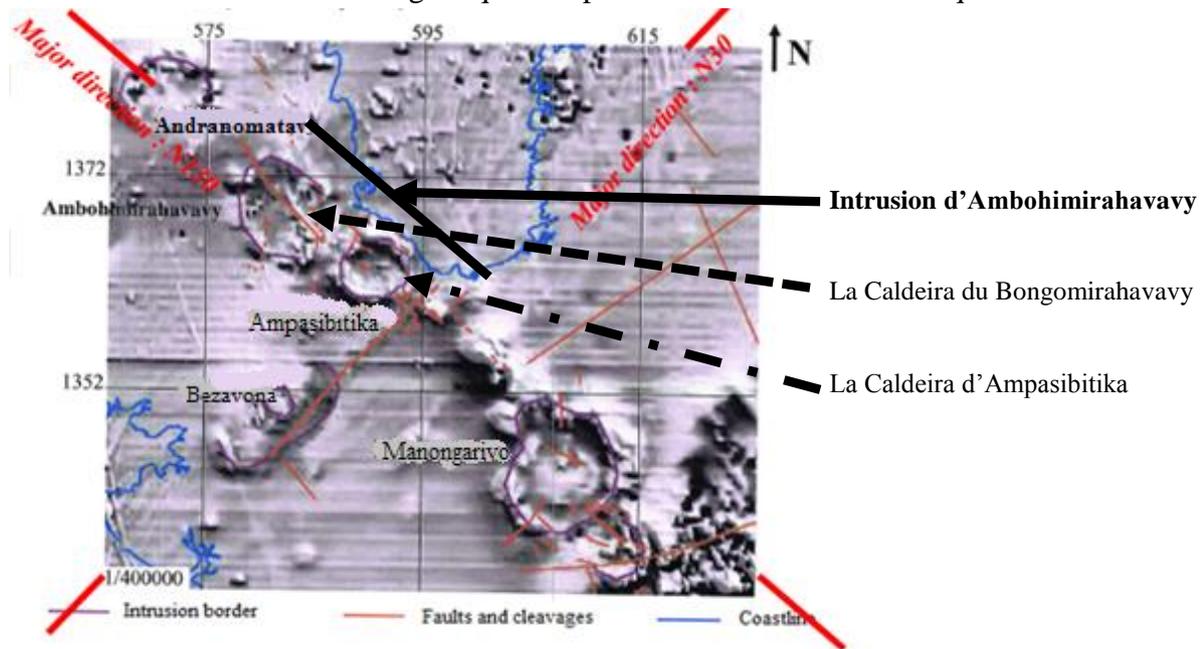


Figure 2: Carte extraite de l'image magnétométrique montrant bien les deux Caldeira sur l'Intrusion d'Ambohimirahavavy (RAKOTOVAO, 2009a)

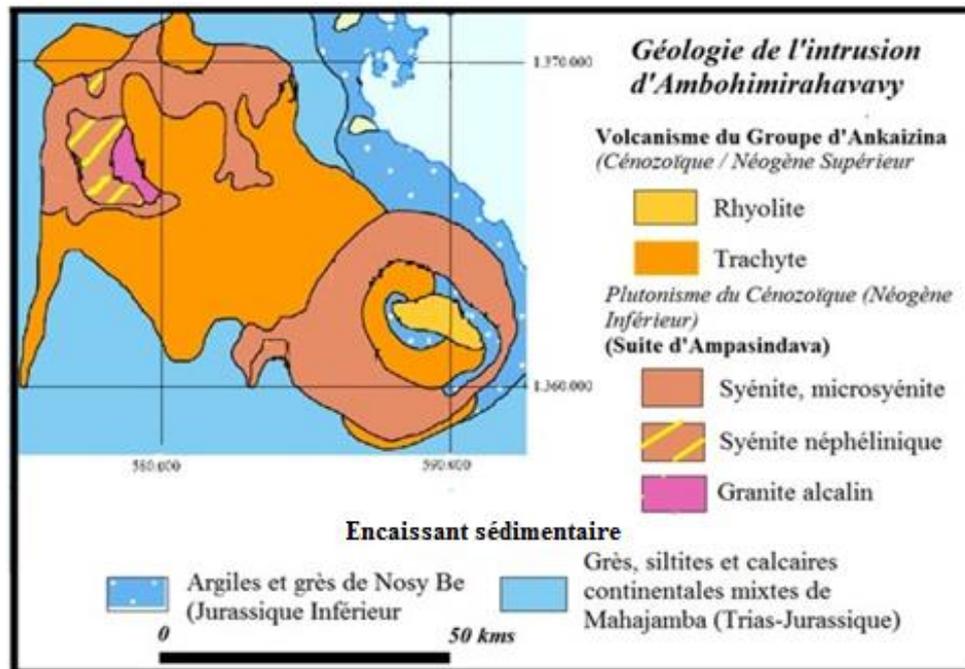


Figure 3: Géologie de l'Intrusion d'Ambohimirahavavy. Carte montée par l'assemblage partiel des feuilles 2 et 4 à l'échelle du 1/500.000 du PGRM (2008), et modifiée.

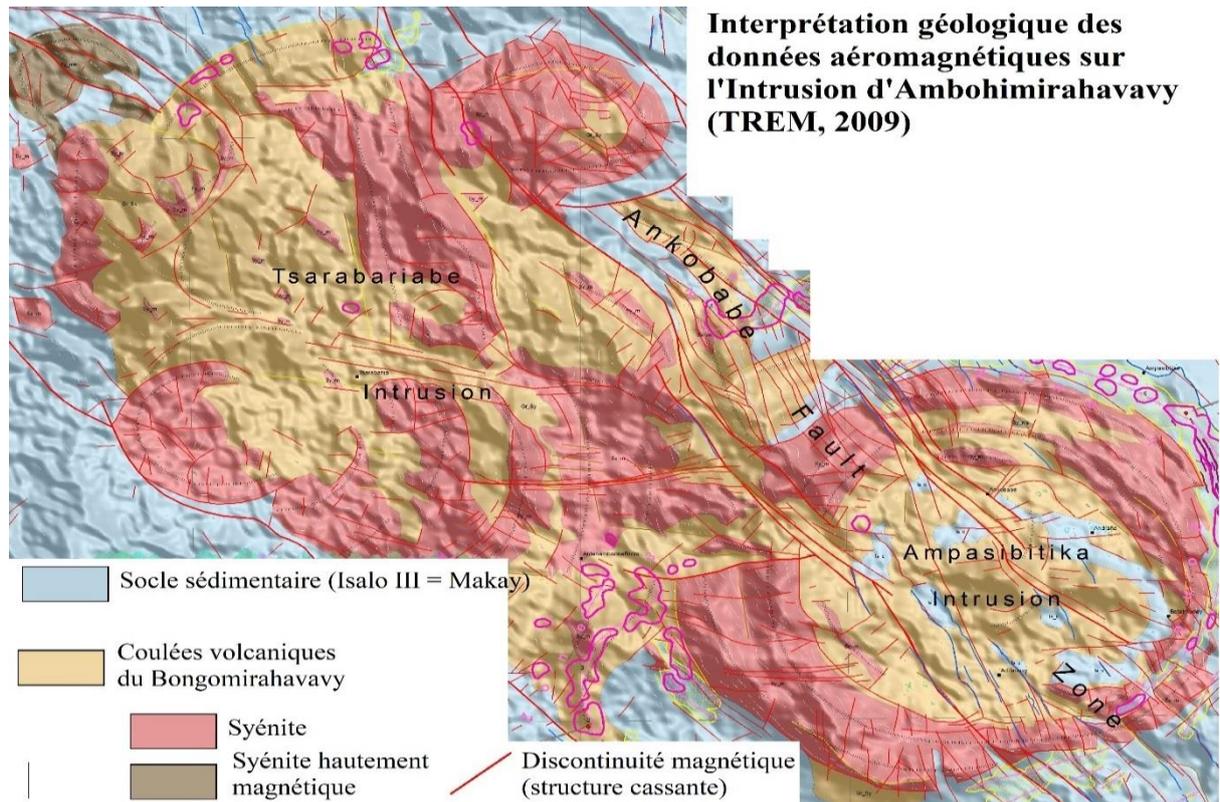


Figure 4: La carte du champ magnétique total confirmant les contours des deux Caldeiras ainsi – que les effets de la tectonique d'Ankobabe sur l'Intrusion d'Ambohimirahavavy. A remarquer l'évidence de la foliation tectonique NW-SE. Elle est matérialisée sur le terrain par l'individualisation d'une importante brèche volcanique polygénique.

La phase ultime du volcanisme de l'Intrusion d'Ambohimirahavavy aurait été l'évacuation de deux générations consécutives de fluide magmatique. La première émission liquide L₁ aurait été de nature hyperalcaline donnant des filons F₁ de syénite, microsyrénite et granite à aégyrine (pyroxène alcalin) et riebeckite (amphibole sodique). La deuxième émission de liquide L₂ aurait également été de la même nature hyperalcaline et aurait provoqué une fracturation hydraulique sélective pour n'affecter que certains des filons de granite à aégyrine – riebeckite qui auraient dû être déjà à la phase de refroidissement pour offrir une résistance mécanique à L₂. Une circulation de divagation de L₂ aurait donné une fausse figure structurale avec un filon plissé de diverses manières, à épontes instables et molles et intrusif dans un filon non déformé. Cette figure que les anciens auteurs ont décrit comme étant une tectonique de fluage est caractéristique de la « fasibitikite » (Lacroix, 1922). La fasibitikite est la roche granitique porteuse de l'eudyalite qui a été le collecteur des éléments chimiques des terres rares. L'eudyalite a, par la suite, été rétrotransformée pour être remplacée par la paragenèse dérivée.

Chapitre 2 : la Caldeira d'Ampasibitika

La Caldeira d'Ampasibitika est de forme grossièrement circulaire, (*figure 5*), de 7 kilomètres de diamètre. Sa bordure est formée par un filon annulaire vertical de syénite. La plupart des caldeiras sont remplies d'eau soit par l'accumulation des eaux de pluie donnant des lacs, soit par l'invasion de la mer pour donner des golfes et des baies. L'intérieur de la Caldeira d'Ampasibitika n'a pas été envahi par l'eau (l'illustre exemple de ce genre est la Caldeira de Yellowstone). Il a une morphologie en dômes et bassins. Cet intérieur est couvert par quelques touffes de forêt de régénération et de forêt de transition espacées par de la savane arbustive et de de la savane herborée. La strate de sous-bois des forêts est le plus souvent plantée de caféier et de vanillier. Le riz est cultivé dans de petites espaces gagnées sur la forêt par la pratique du tavy. Il n'y a plus aucun vestige de la forêt primaire sur la Caldeira d'Ampasibitika. Même la forêt de régénération et la forêt de transition y sont en voie de disparition pour faire place à de plus en plus d'espaces dénudées.

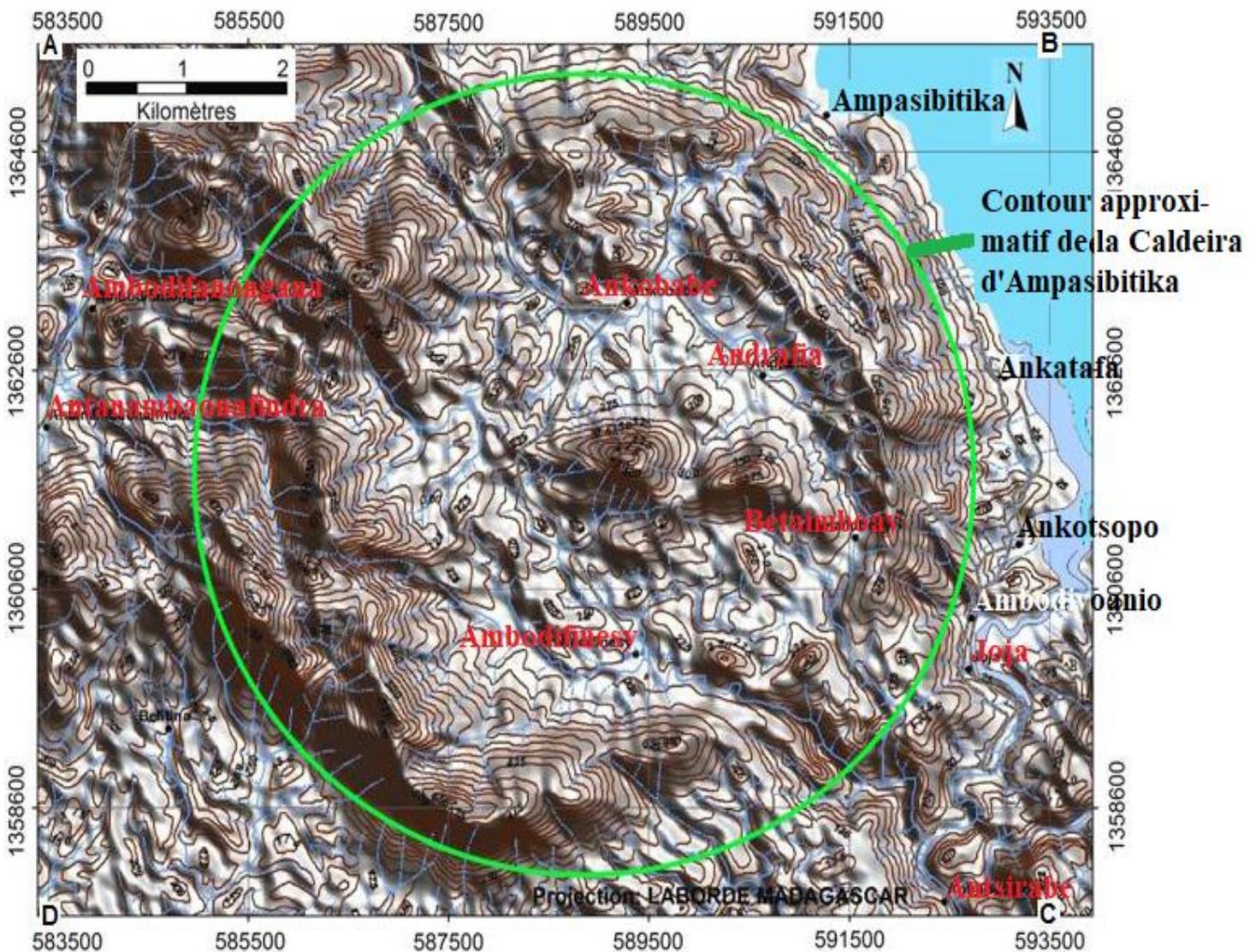


Figure 5: Contour approximatif de la Caldeira d'Ampasibitika projeté sur la carte topographique de la FTM, coupure R33 – 34 d'Ankaramibe

2.1. Lithologie de la Caldeira d'Ampasibitika

Les travaux antérieurs de cartographie et d'exploration n'ont fait qu'esquisser la géologie de la Caldeira d'Ampasibitika. Les détails de cartographie géologique les plus récents sont du Consortium British Geological Survey – United States Geological Survey – GLW Conseil (pour **PGRM, 2008**) et de **Raoul (2014)**.

La caldeira d'Ampasibitika est un gros ensemble filonien intrusif dans son encaissant sédimentaire de la Makay que détaille la **figure 6, page 11**. Le tout, filons et roches de la couverture sédimentaire, a été intrudé par une remontée rhyolitique qui a formé un dôme duquel est parti un vaste épanchement avec de la rhyolite et surtout du trachyte.

Les failles associées à la zone de déformation d'Ankobabe

- ont généré des brèches polygéniques qui ont largement affecté les coulées volcaniques et
- ont conféré à une structure tectonique générale NordOuest – SudEst.

La Caldeira d'Ampasibitika est constituée par (**Raoul, 2014**)

- un filon annulaire de bordure constituée de syénite normale sauf sur sa partie Ouest-Sud-Ouest où elle est une syénite quartzifère ;
 - o sur sa partie Sud où elle passe localement à du trachyte
- un intérieur sédimentaire avec des argiles, des calcaires et des grès. Dans les abords immédiats des corps filoniens
 - o et à leurs contacts, il se forme des skarns
 - o et dans leur zone probablement d'influence thermique, les argiles sont lithifiées pour donner de la mudstone
- un système volcanique tardif et terminal suivant deux étapes
 - o un volcanisme à appareil du type strato-volcan gris ayant édifié un dôme de rhyolite à nodules d'obsidienne rhyolitique. Le sommet de cet édifice volcanique constitue le point culminant de la Caldeira d'Ampasibitika (516 mètres) ;
 - o un épanchement de trachyte et plus localement de rhyolite. Il a été intensément bréchiifié au sein de la zone de déformation d'Ankobabe.

Les venues liquides postérieures (voir section précédente sur l'Intrusion d'Ambohimirahavavy) ont intrudé autant le filon annulaire de syénite que les formations sédimentaires de l'encaissant.

2.2. Métamorphisme de contact dû à la mise en place des filons

Les liquides magmatiques, notamment les liquides desquels dérive le filon annulaire de syénite, ont été responsables d'un métamorphisme de faible intensité de l'encaissant sédimentaire à leur contact. Le métamorphisme de contact s'est opéré avec ou sans apport d'éléments chimiques (**Raoul, 2014**).

• Le métamorphisme de contact avec apport en éléments chimiques

Ce mode de métamorphisme apparaît au contact du calcaire de l'encaissant sédimentaire avec le filon annulaire de syénite et avec les filons F₁ (granite hyperalcalin, fasibitikite, microsyénite et syénite) pour générer des skarns par métagénèse. Les deux zones des skarns sont bien décrites :

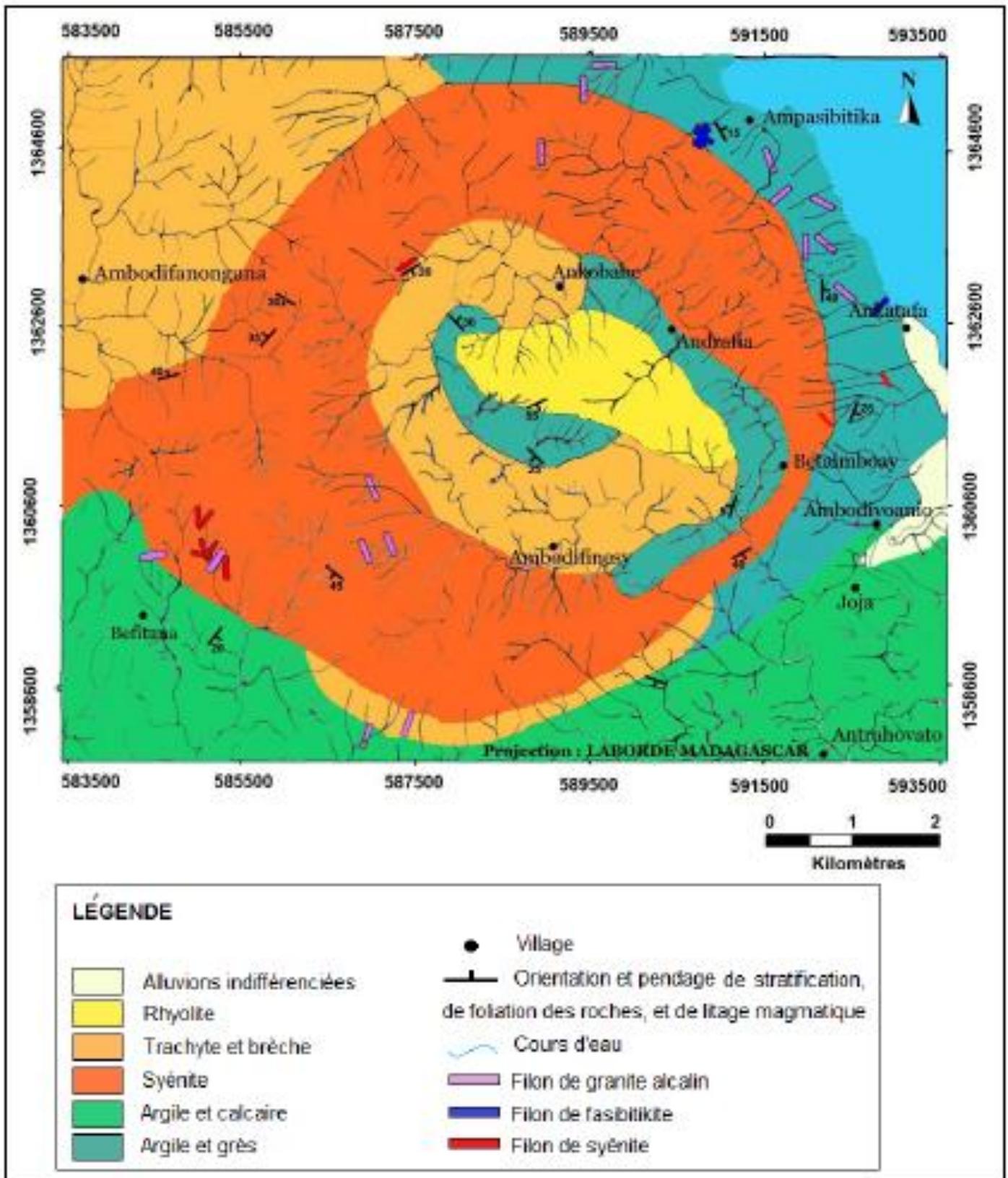


Figure 6: Carte géologique de la Caldeira d'Amipasibitika. (Raoul, 2014)

- l'endoskarn (la zone du skarn en bordure interne du filon magmatique) : de couleur verte, une zone de cœur constituée surtout par des minéraux magmatiques tels que l'arfvedsonite, l'aégyrine, le feldspath et le quartz. Les minéraux du pyroxène sont d'autant plus altérés qu'ils sont près de l'interface avec l'exoskarn où se développent des poches de quartz avec des minéraux de calcite. Des minéraux du zircon à ETR y sont disséminés ;
- l'exoskarn est la zone du skarn en bordure externe du filon magmatique : de couleur grise, essentiellement à calcite néoformée, grenat, quartz et fluorine et zircons disséminés. Le contact avec l'endoskarn est souligné par un niveau à aégyrine (pyroxène)

2.3. Les modes de minéralisation en terres rares de la Caldeira d'Ampasibitika

Les mécanismes de la minéralisation primaire en les éléments chimiques des terres rares sont les suivants (**TREM, 2014** principalement basé sur **Lacroix (1902, 1903)**, **Ganzeev et al (2003)**, **Rakotovo (2009)** et **Estrade (2014)**) :

- le minéral primaire magmatique qui aurait collecté les ETR est l'eudyalite (**Lacroix, 1902 ; Lacroix, 1922**). L'eudyalite est disséminée dans le filon annulaire de syénites de bordure, elles – mêmes étant dérivées d'un liquide tardi-magmatique enrichi en les éléments chimiques fortement chargés (High Strengthen Field Energy = HSFE) et en les éléments chimiques hygromagmatophiles (ayant de l'affinité avec la phase liquidus) auxquels font partie les actinides et les lanthanides. Une minéralisation en terres rares des skarns au contact du filon annulaire de syénites et des calcaires de l'encaissant sédimentaire s'individualise alors. Cet ensemble est modélisé sur la **figure 8** ainsi que illustré par les *photos* en pages **annexes planche photographique I-1**.
- dû à la surpression provoquée par l'effondrement, et faisant suite à l'évacuation du liquide à l'origine du filon annulaire de syénites, les liquides (L_1) auraient été évacués à plus basse température de la chambre et auraient emprunté les fractures et les failles du filon annulaire et de l'encaissant sédimentaire pour donner les filons F_1 . Les liquides L_1 sont les résidus après une importante évacuation antérieure de liquide et donc toujours de nature tardi-magmatique mais pauvres en les éléments hygromagmatophiles dont les ETR. Toutefois, les filons F_1 , lors du mécanisme de skarnisation ont opéré avec du liquide rendu carbonaté et qui aurait lessivé les ETR des F_1 et du filon annulaire pour les transférer vers les endoskarns ;
- un événement hydrothermal terminal (L_2) dans la continuité des F_1 aurait eu une circulation partiellement juxtaposée à L_1 pour fracturer une partie des F_1 tout en lessivant les éléments chimiques (dont les ETR) des matériaux antérieurs. Les fasibitikites qui en résultent sont les plus enrichis en ETR et auraient favorisé la formation de l'eudyalite qui est le minéral collecteur des ETR.

Les événements liquides consécutifs ont déstabilisé par rétro-morphose et ce, dans une large part, l'eudyalite pour la transformer en une association de minéraux dérivés. L'association est plus ou moins complète en fonction des conditions thermodynamiques des roches hôtes (**figure 7**) : la bastnaésite et la parisite sont plutôt dans les skarns, le pyrochlore, le zircon, la monazite et la chevkinite sont plutôt dans la fasibitikite.

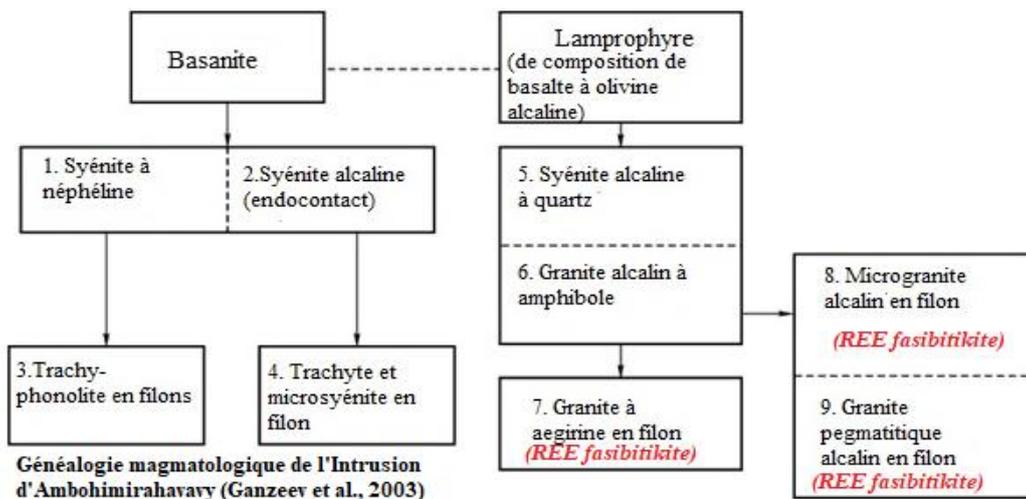


Figure 7- a: Filiation des roches magmatiques de la Caldeira d'Ampasibitika. (Adapté de Ganzeev et al. 2003)

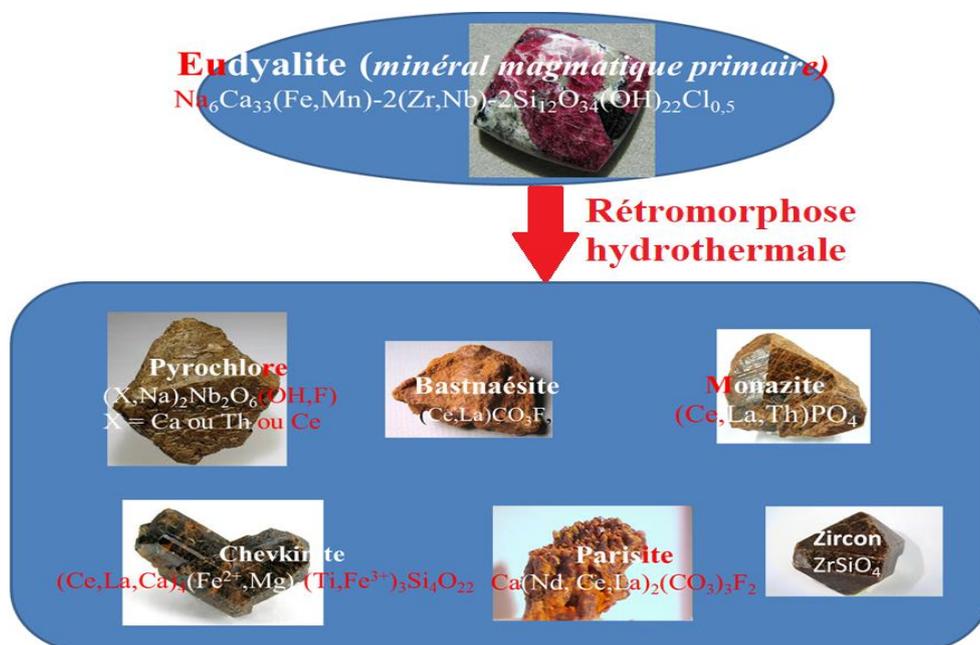


Figure 7- b: L'eudyalite avec les minéraux dérivés par rétro-morphose (TREM)

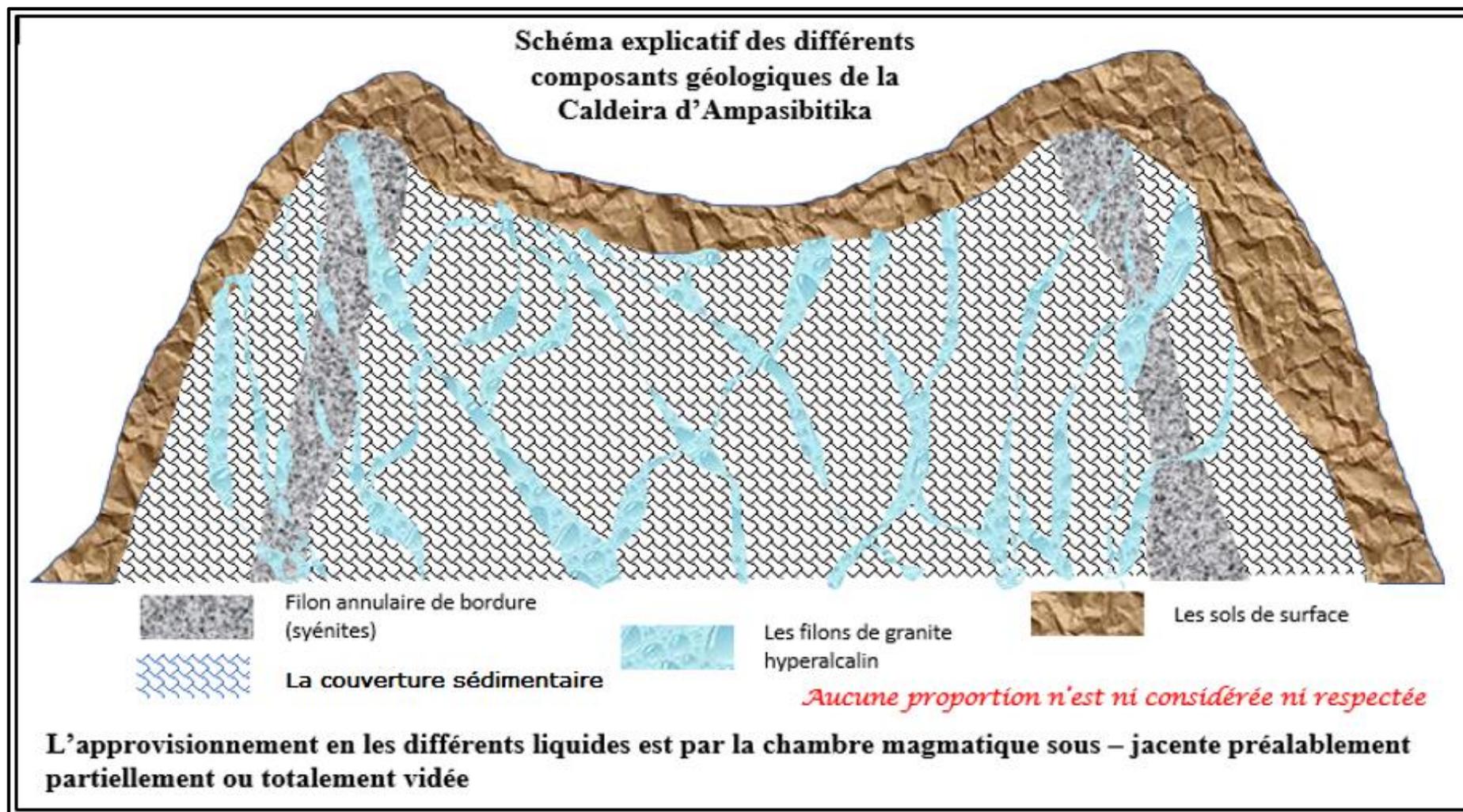


Figure 8: Schéma de principe des différents composants pétrographiques de la Caldeira d'Ampasibitika