

Caractéristiques générales des systèmes et des régions géothermiques de Madagascar

Lala Andrianaivo

Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo, BP 1500, Antananarivo 101, Madagascar
andrianaivo@univ-antananarivo.mg

Résumé - Il y a environ 175 sources thermales répertoriées à Madagascar. La distribution de sources chaudes, les sources de chaleur et la nature des réservoirs géothermiques sont contrôlées par les structures géologiques. Les régions géothermiques peuvent être divisées en trois sections: terrain volcanique, zone de faille, et bassin sédimentaire. Les ressources et les systèmes géothermiques sont de deux types : volcano-tectonique et non tectonique. Les régions géothermiques de basse à moyenne énergie sont largement étendues dans l'île.

Mots clés : Tectonique, volcanisme, sources thermales, géothermie, Madagascar.

Abstract - There are about 175 natural geothermal outcrops in Madagascar. The distribution of hot springs, heat flow and the nature of the geothermal reservoirs are controlled by the geological structures. The geothermal areas can be divided in three sections: volcanic terrain, fault zone, and sedimentary basin. Resources and geothermal systems are of two types: volcano-tectonic and non tectonic. Low and medium geothermal energy are widely spread in the vast area of the island.

Key words: Tectonic, volcanism, thermal springs, geothermal energy, Madagascar.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre d'une croissance économique saine et du développement durable, l'indépendance énergétique complète de Madagascar est plus que jamais pressante. L'abondance des ressources d'énergies renouvelables sans émission de gaz à effet de serre comme la géothermie en différents secteurs de la Grande Ile, permet d'envisager un grand plan stratégique et économique pour la sécurisation de l'approvisionnement.

Cependant, malgré les quelques travaux existants, le projet de développement en énergie géothermique n'est pas encore bien avancé. Notre contribution est de relater d'abord l'état actuel des connaissances dans le domaine de la géothermie dans l'objectif de la mise en œuvre de l'exploration dans un futur proche.

Cette note est le résultat de compilation bibliographique sur la géothermie à Madagascar ([14], [16]). Ce travail de recherche est également le résultat de synthèse de nos publications incluant des revues avec actes et comité de lecture [11], des communications dans des congrès internationaux avec actes et comité de lecture ([10], [18]), des communications sur invitation ([8], [9]) et des rapports de contrats ([1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]).

2. METHODOLOGIE

L'établissement de ce travail de synthèse passe par plusieurs phases depuis la recherche de documentation existante, la réinterprétation des données antérieures, l'analyse spectrale d'images satellites, l'analyse structurale, l'analyse statistique, la récolte d'échantillons, le traitement informatique, jusqu'à l'exploitation des données.

Elle utilise une approche multiscalaire (télé-détection, travaux de terrain, travaux de laboratoire, théorie, Système d'Information Géographique) de l'objet géothermie. Cette recherche est donc pluridisciplinaire et fait ainsi appel à diverses méthodes comme la géomatique, la géologie structurale, la morphotectonique, la cartographie, la pétrographie, l'hydrogéologie, l'hydrologie, la géochimie, et la thermodynamique.

3. RESULTATS

3.1. Système géothermique

La présence de volcans dans plusieurs régions [15] ainsi que les activités tectoniques (Figure 1) à Madagascar ([13], [14]) ont permis de préparer le modèle conceptuel de la formation des systèmes géothermiques ([1], [2], [5], [6], [7], [9]).

Ce modèle peut être utilisé comme guide d'exploration et dans l'estimation du potentiel énergétique de chaque prospect ([1], [2], [3], [4], [5], [7], [9]).

3.1.1. Sources thermales

Le présent paragraphe reprend les travaux antérieurs. Certaines sources, surtout dans les régions d'accès moins difficile, ont été visitées et réétudiées selon nos possibilités.

Du fait de la richesse en sources thermales à Madagascar, de nombreuses localités ou lieux-dits portent le nom de Ranomafana (eau chaude), d'Andranomangotraka ou d'Andranomandevy (où il y a de l'eau bouillante). Il y a environ 175 sources thermales répertoriées dans la Grande Ile avec des températures de plus de 25°C [14].

Sous l'influence des activités volcaniques et des conditions géochimiques locales, le fluide géothermique est souvent carbonaté, parfois sulfaté, rarement chloruré. Basés

sur les études géologiques et géochimiques [14], on distingue :

Les eaux thermales de la zone volcanique quaternaire du Nord.

Il y a des sources intermittentes avec déplacement de griffon. Le fluide hydrothermal est à forte teneur en carbonate de chaux. Le débit est généralement faible. Les températures varient entre 29°C à 44°C.

Les eaux thermales de la zone d'Andavakoera.

Les sources ont souvent des griffons multiples parfois répartis sur des surfaces assez grandes. Certaines sources déposent des travertins silico-calcaïques. Une série de sources est hyperthermale (60-75°C). Les eaux thermales sont relativement peu minéralisées avec un débit faible. Elles sont toujours sulfatées, bicarbonatées sodiques.

Les eaux thermales de la zone de Sambirano

Les sources sont caractérisées par une haute température (59-68°C). Les eaux sont moins sulfatées mais plus fortement carbonatées sodiques. Le débit est faible. Souvent on trouve des griffons.

Les eaux thermales de la zone de l'Antongil-Doany-Ankaizina

Elles sont sulfatées, bicarbonatées sodiques. Le débit est faible, parfois non mesurable. Les températures varient de 35-39°C.

Les eaux thermales au Nord d'Antananarivo, dans la zone de faille de l'Ikopa

La température est de l'ordre de 42°C. Les eaux sont faiblement minéralisées, sulfatées sodiques avec une faible teneur en chlorure.

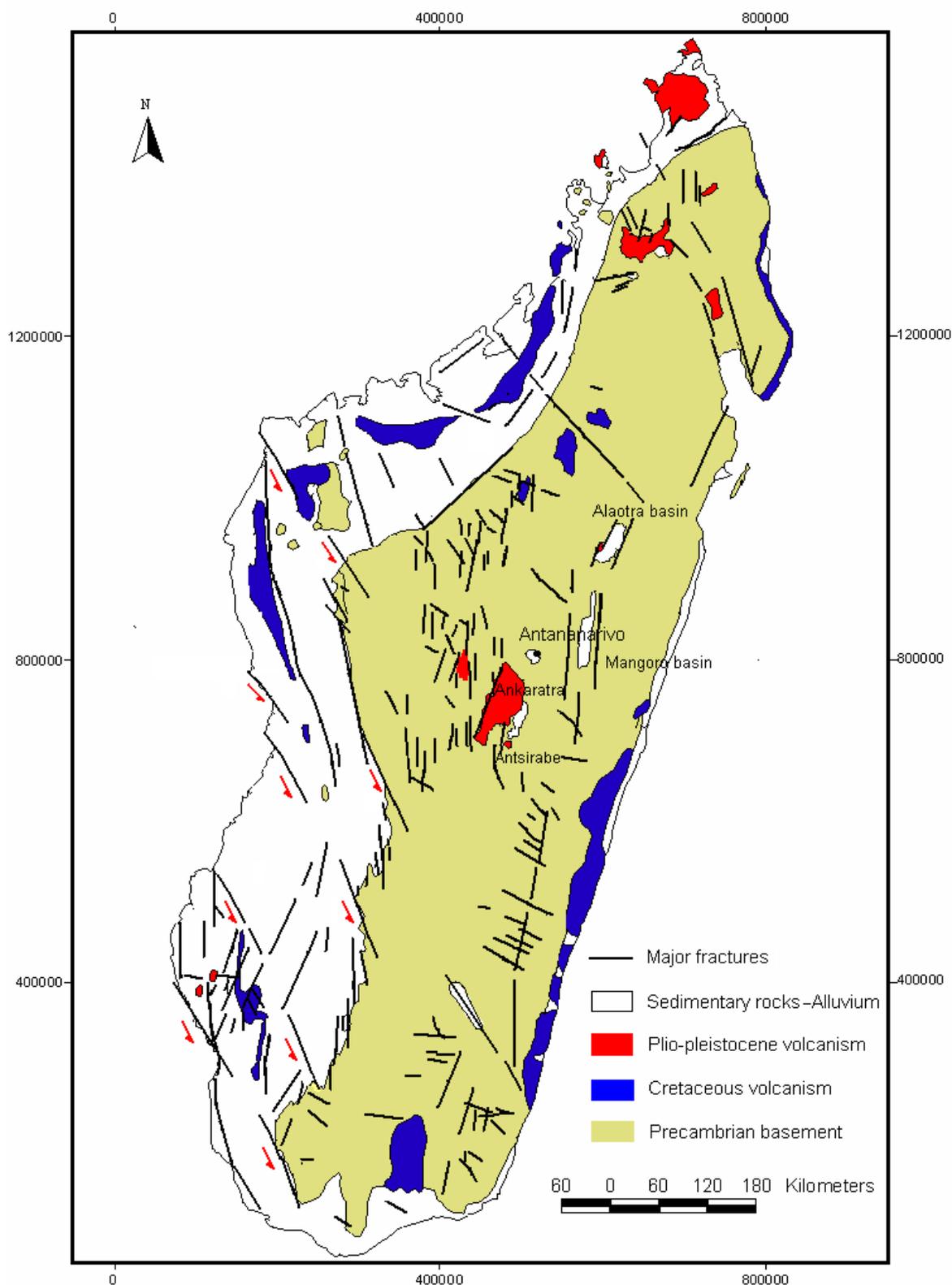


Figure 1 : Carte de Madagascar montrant les fractures majeures et le volcanisme [10]

Les eaux thermales de la région volcanique d'Itasy (Figure 2).

Il s'agit d'eau bicarbonatée sulfatée sodique. Les températures des sources varient de 28°C à 57°C. Le pH varie entre 6,72 et 6,98. Les sources se présentent sous forme de geysers, de griffons et de suintements. Par endroit, on trouve des travertins et de tufs calcaires.

Les eaux thermales de la région volcanique d'Ankaratra (Figure 2)

Certaines eaux thermales de la région d'Antsirabe forment un groupe de petites sources, de geysers, de griffons et de suintements. D'autres montrent des monticules de travertin, de tufs calcaires. Une comparaison avec les eaux thermales d'Itasy montre qu'il n'y a pas de variation considérable dans la composition chimique des sources. Les températures des eaux varient de 26°C à 58°C. Le pH varie entre 6,95 et 8,21.

Les eaux thermales de la région centrale au Sud d'Antsirabe (Figure 3)

Ambatofinandrahana est un district où l'eau émerge par de nombreux griffons des fissures des granites alcalins. Les températures varient de 40°C à 64°C. Parfois, le débit est très important allant de 5-6m³ par minute.

Les sources de Ranomafana sur Namorona sont peu minéralisées, faiblement sulfatées, silicatées sodiques. Ce sont des griffons. Les températures varient de 30°C à 47°C.

Les eaux thermales de la zone côtière orientale, de Fenoarivo-Est à Fort-Dauphin.

On y trouve des griffons dont les températures varient de 40°C à 75°C. L'odeur d'H₂S est parfois nette. Le débit est généralement

faible. L'eau est souvent bicarbonatée.

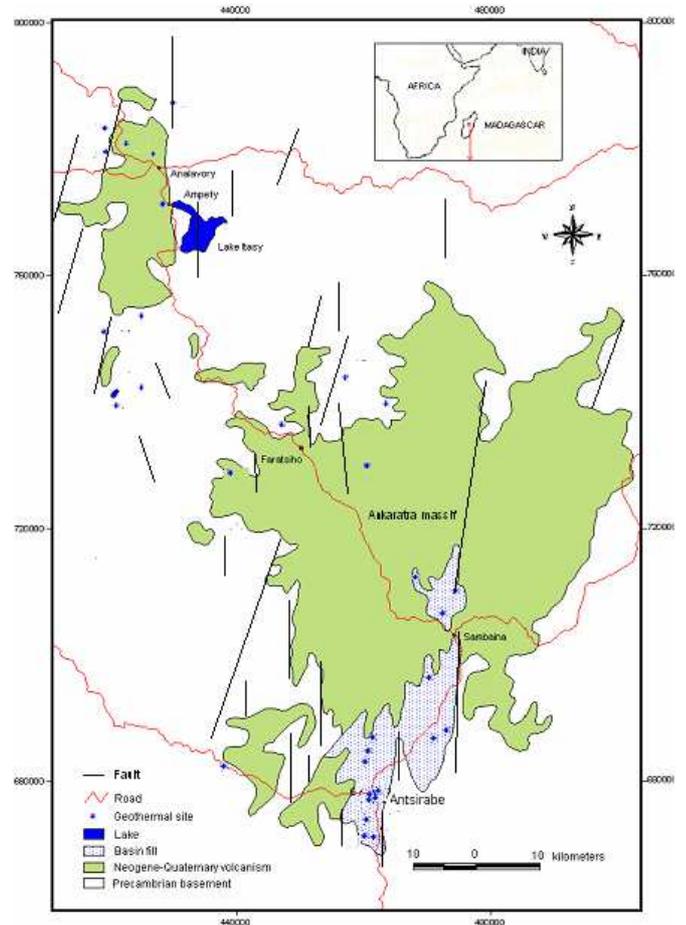


Figure 2: Carte de répartition des sources dans les régions d'Itasy et d'Antsirabe [18]

Les eaux thermales dans le bassin sédimentaire de Morondava.

Les sources se trouvent dans les séries sédimentaires. Mais il semble que les réservoirs se trouvent dans le socle cristallin sous-jacent. Elles peuvent être sulfureuses (Antsalova, Malaimbandy, Mangoky, Betioky), sulfatées et carbonatées (Ankilizato). Les températures varient de 30°C à 45°C.

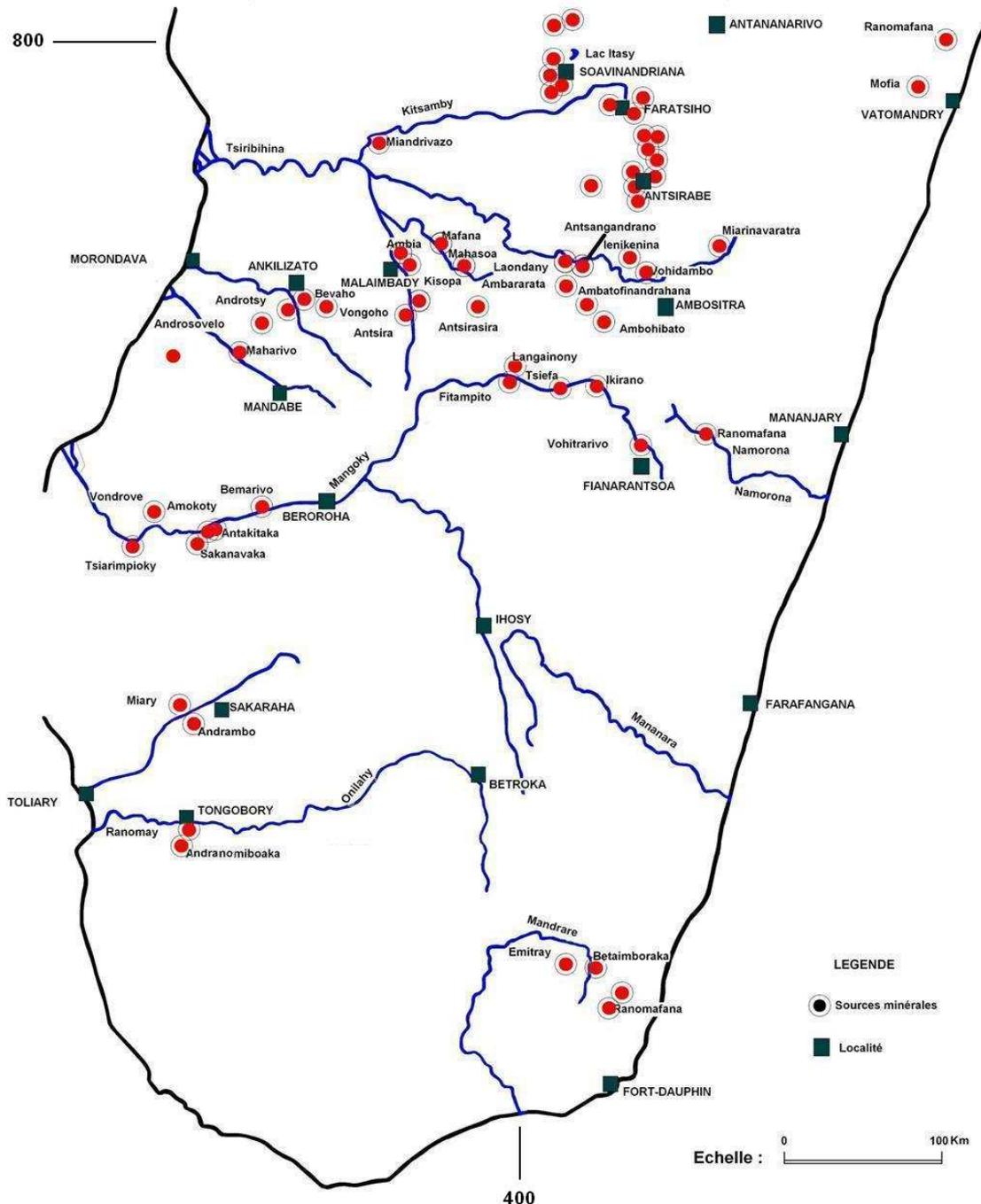


Figure 3 : Carte de répartition des sources thermales au Sud d'Antananarivo [14]

3.1.2. Caractéristiques générales des systèmes géothermiques

Les systèmes géothermiques sont associés avec le cadre tectonique, la composition chimique du magma, le type de roche et le fluide hydrothermal.

Les principales exigences pour former un système géothermique sont : source de la chaleur (magma intrusif ou effusif), fluides chauds, réservoir (roche perméable, roche fracturée) et couche ou toit imperméable (Figure 4).

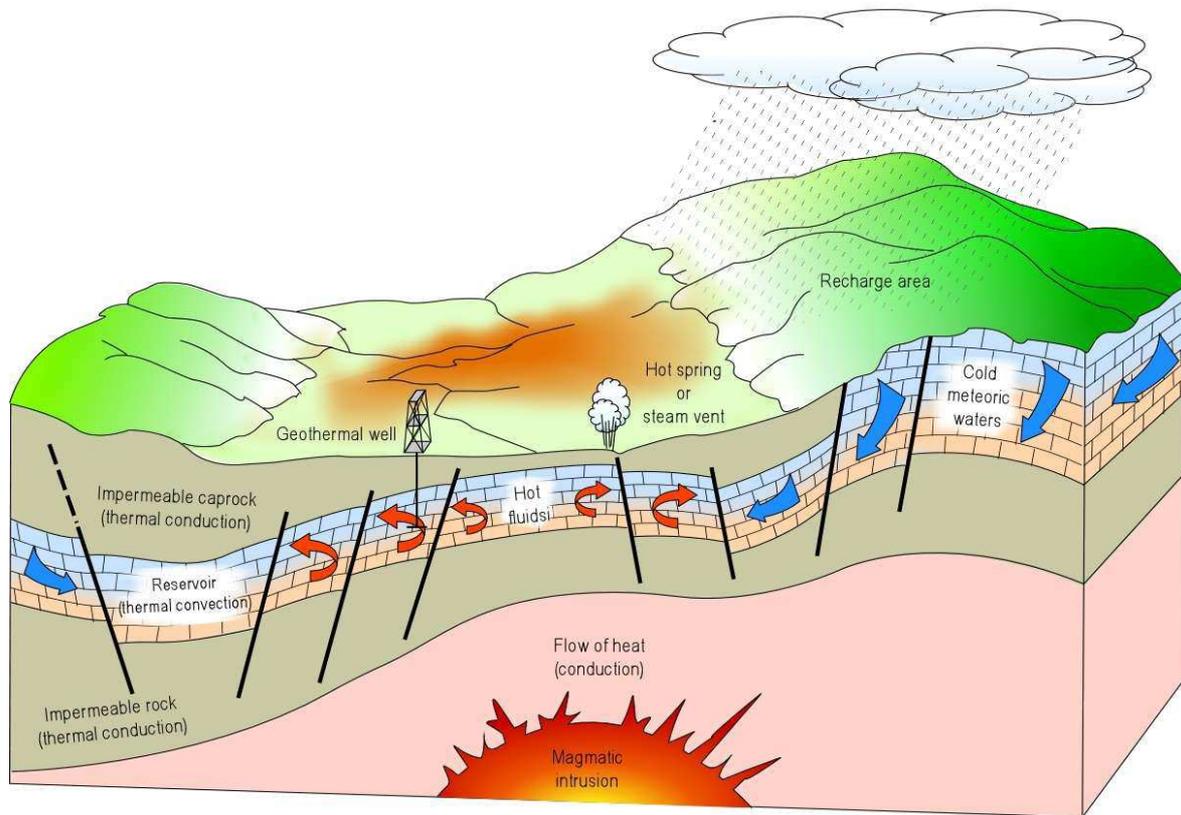


Figure 4: Représentation schématique d'un système géothermique idéal [5]

Les systèmes volcaniques peuvent être classés sur la base des disciplines comme la géologie, l'hydrologie et les caractéristiques du transfert de chaleur, entre autres les fluides hydrothermales d'origine volcanique ou non.

Ainsi, les systèmes géothermiques peuvent être groupés en trois principales catégories : volcanique, non volcanique (Figure 4) et volcano-tectonique. Les groupements de ce type peuvent être utilisés comme un guide dans l'estimation du potentiel énergétique d'un système géothermique.

L'estimation de la température du réservoir en profondeur - donc du potentiel énergétique - peut être effectuée à partir des géothermomètres utilisant la température de l'eau chaude ([18], [17], [20], [19], [14], [16]), du gaz ([17], [20]), ou des isotopes [16].

Chaque valeur calculée à partir du géothermomètre est très utile dans l'étape de développement géothermique, en particulier dans la détermination de la capacité génératrice qui peut être divisée en haute enthalpie ($T > 150^{\circ}\text{C}$), moyenne enthalpie (ou moyenne énergie) et basse enthalpie ($T < 90^{\circ}\text{C}$). T est la température du fluide hydrothermal dans le réservoir.

A Madagascar, les systèmes géothermiques peuvent être ainsi divisés en trois types ([1], [2], [3], [4], [5], [7], [9]):

- Type 1 : géothermie de moyenne à haute énergie d'origine volcano-tectonique liée au volcanisme quaternaire, à des activités magmatiques récentes et à un graben (faille active ou non)
- Type 2 : géothermie de basse à moyenne enthalpie dans le socle

cristallin, en liaison avec des systèmes de plis (bloc composite) et/ou en rapport avec une tectonique cassante (rift continental) et à un plutonisme

- Type 3 : géothermie de basse enthalpie dans les bassins sédimentaires en rapport avec l'ouverture du canal de Mozambique dans un contexte de rift de marge continentale passive.

3. 2. Distribution des ressources géothermiques

Basés sur les études géologiques, géochimiques [14], géophysiques et des forages pétroliers, on dénombre dix régions géothermiques à Madagascar ([1], [2], [5], [7], [9]). Ce sont :

- *Les régions volcaniques du Nord de Madagascar* : le système géothermique est de type volcanique ; les sources légèrement alcalines sont en liaison avec le volcanisme basaltique quaternaire récent de la montagne d'Ambre.
- *La zone de faille d'Andavakoera* : les sources sous forme de griffons multiples, hyperthermales (60-75°C) et sulfatées bicarbonatées sodiques apparaissent dans la zone de contact faillé du socle cristallin et du sédimentaire (Figure 5); ces formations sont traversées par des dykes basaltiques et par un système filonien quartzo-barytique ; le système géothermique est de type volcano-tectonique.
- *La zone de faille de Sambirano* : les sources bicarbonatées sodiques de la vallée du Sambirano sont en relation avec un système de faille de direction NW-SE (Figure 5) ; les roches alcalines sont aussi recoupées par des filons quartzo-

barytique-plombifères ; le système géothermique est de type 2 (tectonique).

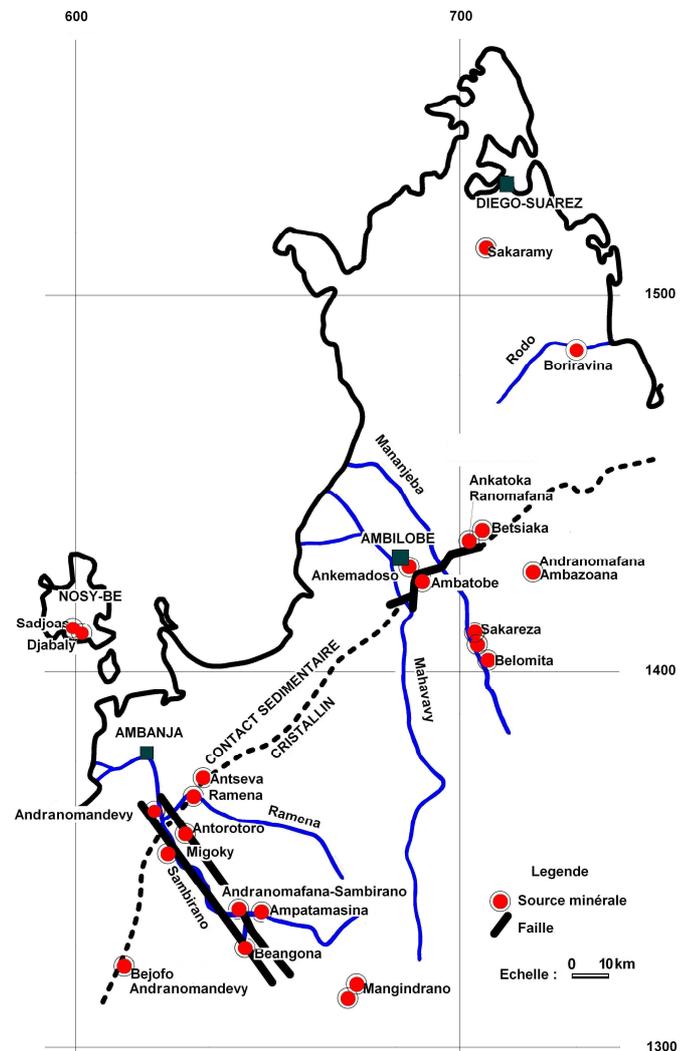


Figure 5 : Carte de répartition des sources dans le Nord de Madagascar [14]

- *La zone de faille de l'Antongil-Doany-Ankaizina* : dans la région côtière du Nord-Est, les sources sont en liaison avec des fractures du socle (système géothermique de type 2) et s'alignent d'une manière remarquable sur le prolongement du grand accident tectonique correspondant au fossé de la baie d'Antongil qui se prolonge vers le Nord par les cuvettes d'Andapa et de Doany (Figure 6).

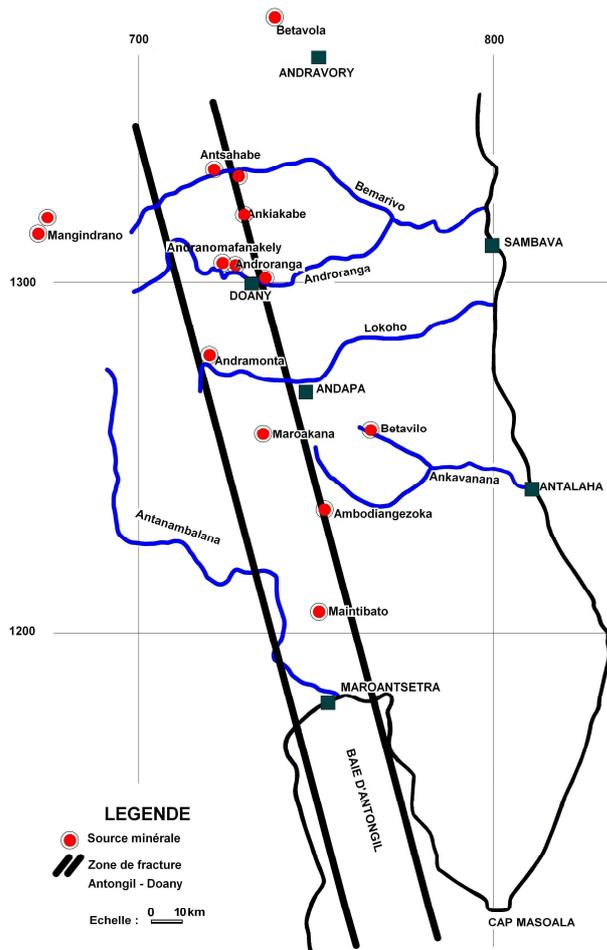


Figure 6 : Carte de répartition des sources dans le Nord-Est de Madagascar [14]

- La région volcano-tectonique cénozoïque d'Ankaratra-Antsirabe* : toutes les sources donnant naissance à des sources thermales sont antérieures aux dépôts lacustres ; aucune n'affecte les sédiments ; elles font donc partie des mouvements tectoniques qui ont précédé la première période volcanique de l'Ankaratra où elles sont liées (système géothermique de type 1).
- La région centrale au Sud d'Antsirabe* : il s'agit d'un système géothermique de type 2 ; les indications pour la région d'Ambatofinandrahana-Midongy correspondent à des sources émergeant le plus souvent le long des fractures remarquables par leur continuité. Pour les sources de Ranomafana-Ifanadiana ; l'étude photogéologique a montré l'existence de deux réseaux de fractures suborthogonaux, le premier de direction N40W à N60W, le second N50E ; les sources sont au nombre de trois et s'alignent sur la deuxième direction sur une distance de 200 mètres dans le fond de la vallée de la Namorona et à l'Ouest du fleuve.
- La zone de faille de la côte Est allant de Fenoarivo-Est à Vatohandry, avec quelques occurrences dans les chaînes anosyennes* : au pied de la falaise orientale, dans la zone côtière, plusieurs sources sont signalées entre les parallèles de Fenoarivo-Est, de Vatohandry et de Fort-Dauphin ; le système géothermique est de type tectonique (type 2).
- Le bassin sédimentaire de Morondava* : les sources sont généralement en liaison avec les trajets de grandes failles
- La zone de faille de l'Ikopa au Nord d'Antananarivo* : toutes les sources sont en rapport avec des fractures marquées par les alignements du cours du fleuve Ikopa (système géothermique de type 2).
- La région volcano-tectonique quaternaire d'Itasy* : il s'agit d'un système géothermique de type 1 ; toutes les sources sont manifestement en liaison avec le volcanisme quaternaire récent (Figure 2); la région est également le siège d'une activité sismique relativement faible mais assez fréquente qui est probablement le résultat d'une tectonique cassante active ([1], [2], [3], [8], [9], [18]).

(Antsalova, Ankilizato, Mangoky, Sakaraha, Betioky), avec des dykes doléritiques (Morafenobe, Malaimbandy) ou près du contact sédimentaire-socle (Miandrivazo) ; le système géothermique est de type 3.

Il convient de signaler que les réservoirs géothermiques dans le socle cristallin sont constitués de roches très fracturées ([2], [3], [4], [5], [9]). On ne connaît pas exactement leurs dimensions, leurs profondeurs ainsi que leurs natures lithologiques. Nous n'avons aussi aucune indication concernant les réservoirs géothermiques dans les roches sédimentaires. Les sources de chaleur sont généralement liées au magmatisme intrusif ou effusif.

Ces observations montrent l'importance des structures géologiques et du contrôle structural (tectonique cassante) dans la distribution des sources thermales, les sources de chaleur et la nature des réservoirs géothermiques.

Le niveau d'investigation est encore préliminaire dans la majorité des cas. La valeur du potentiel en énergie géothermique est encore spéculative ([1], [2], [3], [5], [7], [9]).

Néanmoins, notre conclusion sur les ressources et les systèmes géothermiques de Madagascar est en accord parfait avec celle de la "Global Energy Assessment" (GEA). En effet, selon la classification de la GEA qui a proposé 18 régions mondiales [12], les ressources et les systèmes géothermiques de Madagascar font partie de la Région East Africa (EAF). Les arguments en faveur de cette hypothèse supposent une certaine liaison entre volcanisme d'âge récent, système de rift continental, faille active et sources thermales ([1], [2], [3], [8], [9], [18]) que l'on trouve aussi dans certains pays de la East African Rift (Kenya, Ethiopie) qui

sont actuellement producteurs d'énergie électrique par leurs centrales géothermiques [12].

Selon les résultats d'inventaires et d'enquêtes effectués par le Service Géologique, ainsi que les niveaux d'avancement des activités de l'exploration par les chercheurs d'université, par les compagnies ou par les entreprises travaillant sur cette source d'énergie, les données sur le potentiel géothermique de Madagascar changeront de temps en temps au fur et à mesure de l'avancement des travaux d'investigations.

A l'heure actuelle, la valeur du potentiel géothermique dans toute l'île reste inconnue. Cependant, un potentiel de ressources est supposé sur la Grande Ile [16]. En 2008, "GNS Science" Company, a concentré son travail sur les possibilités d'utilisation de la géothermie à Madagascar. Marshfield Energy PTE Ltd., dans son rapport confidentiel de 2008, a déjà programmé l'installation de centrales géothermiques de capacité de moins de 10 mégawatts ($1\text{MW} = 10^6 \text{W}$) dans quelques régions de Madagascar.

Le projet d'installation de centrale géothermique produisant de l'électricité est envisageable ; on pense que les prospects d'Itasy et d'Ankaratra-Antsirabe sont les plus prometteurs ([1], [2], [3], [9], [18], [17], [20], [19], [16]). Les arguments en faveur de cette hypothèse sont : environnement géologique associé au volcanisme quaternaire récent, anomalies géochimiques, température du réservoir estimée à plus de 150°C , système de rift continental. La méthode volumétrique et la méthode comparative ont été utilisées pour l'évaluation du potentiel géothermique du prospect d'Itasy ; les calculs thermodynamiques ont montré que la capacité du réservoir géothermique du site d'Andranomafana serait de 25 mégawatts et l'énergie fournie serait de l'ordre de $2,4 * 10^{18}$ joules ([1], [2], [3], [6], [9]).

4. CONCLUSION

A l'issu de ces travaux de synthèse, les remarques suivantes sont à retenir :

- Les structures géologiques contrôlent la distribution des sources thermales, les sources de chaleur et la nature des réservoirs géothermiques.
- À Madagascar, on dénombre dix régions géothermiques qui sont divisées en trois sections: terrain volcanique, zone de faille, et bassin sédimentaire.
- Le modèle conceptuel de la formation des systèmes géothermiques est basé sur la présence de volcans dans plusieurs régions ainsi que les activités tectoniques. Les ressources et les systèmes géothermiques rencontrés sont de deux types : volcano-tectonique et non tectonique.
- Les systèmes géothermiques de basse à moyenne énergie sont largement étendus. La Grande Ile possède ainsi un potentiel de ressources non négligeables.

Ce rapport de synthèse est une contribution à l'état actuel des connaissances dans le domaine de la géothermie. Dans certaines régions géothermiques qui sont prometteuses et où les niveaux d'avancement des travaux d'exploration sont plus avancés, des études beaucoup plus approfondies (levés géophysiques suivis de reconnaissance par forage) doivent être programmées.

REFERENCES

- [1] Andrianaivo, L., 2010a: Geothermal Energy in Madagascar - Country Update 2010. *Final report 2010-03*, MCC, Antananarivo
- [2] Andrianaivo, L., 2009c: General Characteristics of Geothermal Areas in Madagascar. *Final report 2009-07*, MCC, Antananarivo
- [3] Andrianaivo, L., 2009b: Reconnaissance surveys of geothermal features and young volcanic in the Itasy region, central Madagascar. *Final report 2009-05*, MCC, Antananarivo
- [4] Andrianaivo, L., 2009a: Geothermal Energy Research in the Itasy Region, Madagascar. *Advanced report 2009-03*, MCC, Antananarivo
- [5] Andrianaivo, L., 2008c: Geothermal Working Areas Profile: Case Studies in Madagascar. *Advanced report 2008-09*, MCC, Antananarivo
- [6] Andrianaivo, L., 2008b: Geothermal Energy for Sustainable Development: An Expanded Role in Madagascar's Energy Supply Chain. *Final report 2008-07*, MCC, Antananarivo
- [7] Andrianaivo, L., 2008a: Geothermal system and Resource in Madagascar: Preliminary Results. *Advanced report 2008-05*, MCC, Antananarivo.
- [8] Andrianaivo L., et Ramasiarinoro, V.J., 2010d: Caractérisation des linéaments structuraux dans le prospect géothermique d'Itasy, centre de Madagascar : Implication dans l'évaluation des risques liés au séisme induit par les failles actives. *XIIème Journées Scientifiques du Réseau Télédétection de l'A.U.F.*, 23-25 novembre 2010, Tunisie, Résumé.

- [9] Andrianaivo L., and Ramasiarinoro, V.J., 2010c: Geothermal Energy in Madagascar: Scientific Context and Resource. *Journée des Sciences de la Terre 2010*, Union des Futurs Ingénieurs Géologues (UFIG), Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 3 juin 2010, Antananarivo.
- [10] Andrianaivo L. and Ramasiarinoro V.J., 2010b: Relation between Regional Lineament Systems and Geological Structures: Implications for Understanding Structural Controls of Geothermal System in the Volcanic Area of Itasy, Central Madagascar. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, 25-30 April 2010, Bali – Indonesia, Paper 1218, 1-9.
- [11] Andrianaivo L. and Ramasiarinoro V.J., 2010a: Thermal springs, fracture and drainage network in the Itasy region, central Madagascar. *Mada-Géo*, Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo (IOGA), Antananarivo, submitted.
- [12] Bertani, R., 2010: Geothermal Power Generation in the World 2005–2010 Update Report. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, 25-29 April 2010, Bali - Indonesia, Paper 008, 1-41.
- [13] Bertil, D. and Regnault, J.M., 1998: Seismotectonics of Madagascar. *Tectonophysics*, **294**, 57-74.
- [14] Besairie, H., 1959a: Contribution à l'étude des sources minérales et des eaux souterraines de Madagascar. *Travaux du Bureau Géologique*, n°92, Service Géologique Antananarivo.
- [15] Brenon, P., and Bussiere, P., 1959: Le volcanisme à Madagascar. *Bulletin volcanologique*, **21**, 77-93.
- [16] Gunnlaugsson, E., Arnórsson, S., and Matthíasson, M., 1981: Madagascar: Reconnaissance survey for geothermal resources. *U.N. Report: Virkir*, Consulting Group Ltd. Reykjavik, Iceland. Vol. **1** of 2, 4.2-6.1
- [17] Manissale, A., Vasseli, O., Tassi, F., Magro, G., and Pezzotta, F., 1999: Thermal springs around the Quaternary volcano Ankaratra, Madagascar. *Geochemistry of the Earth's surface*, *Armannsson Edit*, Rotterdam, 523 - 526.
- [18] Ramasiarinoro V.J. and Andrianaivo L., 2010: Geochemical Characteristic of Thermal Springs in Volcanic Areas of Antsirabe-Itasy, central Madagascar: Preliminary Results. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, 25-30 April 2010, Bali – Indonesia, Paper 1413, 1-6.
- [19] Ravaoarisoa, P.J., 1984 : Possibilité d'utilisation de l'énergie géothermique dans les régions d'Antsirabe-Itasy. *Mémoire de fin d'étude en ingénierat*, Etablissement d'Enseignement Supérieur Polytechnique, Antananarivo.
- [20] Sarazin, L., Michard, G., Rakotondrainy, and Pastor L., 1986: Geochemical study of the geothermal field of Antsirabe (Madagascar). *Geochemical Journal*, **20**, 41-50.