

## **Apports des mécanismes au foyer des séismes à l'analyse des structures créées par la géodynamique de Madagascar**

**Florentine RANIVONANDRASANA\*, Gérard RAMBOLAMANANA, Fenitra ANDRIAMPENOMANANA et Elisa Josiane RINDRAHARISAONA**

*Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo (IOGA), Faculté des Sciences, Laboratoire de Sismologie et Infrason, Ambohidempona, BP 3843, Antananarivo 101, Madagascar*

(Reçu le 29 janvier 2021 ; Accepté le 22 Avril 2021)

---

\* Correspondance, courriel : [ranivoflorentine@gmail.com](mailto:ranivoflorentine@gmail.com)

### **Résumé**

L'objectif de cette étude est d'analyser la corrélation entre le mécanisme au foyer et les structures tectoniques laissées par la géodynamique de Madagascar. La méthode des polarités des ondes P, grâce aux données sismiques locales de magnitude  $M \geq 3$  de 2012 à 2013 a été utilisée pour cette étude. Par ailleurs, quatre programmes écrits en fortran 77 ont été manipulés pour la réaliser. Les résultats montrent que 25 solutions focales donnent des jeux de familles de failles normales, de failles inverses et de failles de décrochement, de directions NO-SE, NE-SO, NNO-SSE, NNE-SSO et ENE-OSO. Les mécanismes normaux et de décrochement s'alignent parallèlement aux zones de cisaillement et coïncident avec les failles tectoniques. Le système des failles trouvées suivant le linéament de Bongolava-Ranotsara est la ramification des failles tectoniques héritées de zones de faiblesse précambrienne, engendrant la réactivation de failles tectoniques et la manifestation des structures dans les zones de cisaillement et traduisant l'existence de mouvements et de petites déformations du sous-sol. Aucun dégât ni rupture de terrain n'a été produit. Ainsi, ces informations sur l'évolution de la déformation des structures souterraines peuvent être utilisées pour l'étude des impacts des phénomènes naturels sur l'environnement.

**Mots-clés :** *mécanisme au foyer, tectonique, polarités, faille, zone de cisaillement.*

### **Abstract**

**Earthquake focal mechanism to the analysis of structures created by Madagascar geodynamics**

The objective of this study is to analyse the correlation between the focal mechanism and the tectonics structures created by Madagascar geodynamics. The P-wave polarities method, through local seismic data of magnitude  $M \geq 3$  from 2012 to 2013 was used for this study. In addition, four programs written in Fortran 77 were manipulated to perform it. The results show that 25 focal solutions give sets of normal, reverse, and strike-slip fault families with NW-SE, NE-SW, NNW-SSE, NNE-SSW, and ENE-OSW directions. The normal and strike-slip mechanisms are aligned parallel to the shear zones and coincide with the tectonic faults. The

fault system found along the Bongolava-Ranotsara lineament is the ramification of tectonic faults inherited from Precambrian weakness zones, causing the reactivation of tectonic faults and the manifestation of structures in the shear zones and reflecting the existence of movements and small deformations of the subsoil. No damage or land rupture was produced. Thus, this information on the evolution of the deformation of underground structures can be used to study the impacts of natural phenomena on the environment.

**Keywords :** *focal mechanism, tectonic, polarities, fault, shear zone.*

## 1. Introduction

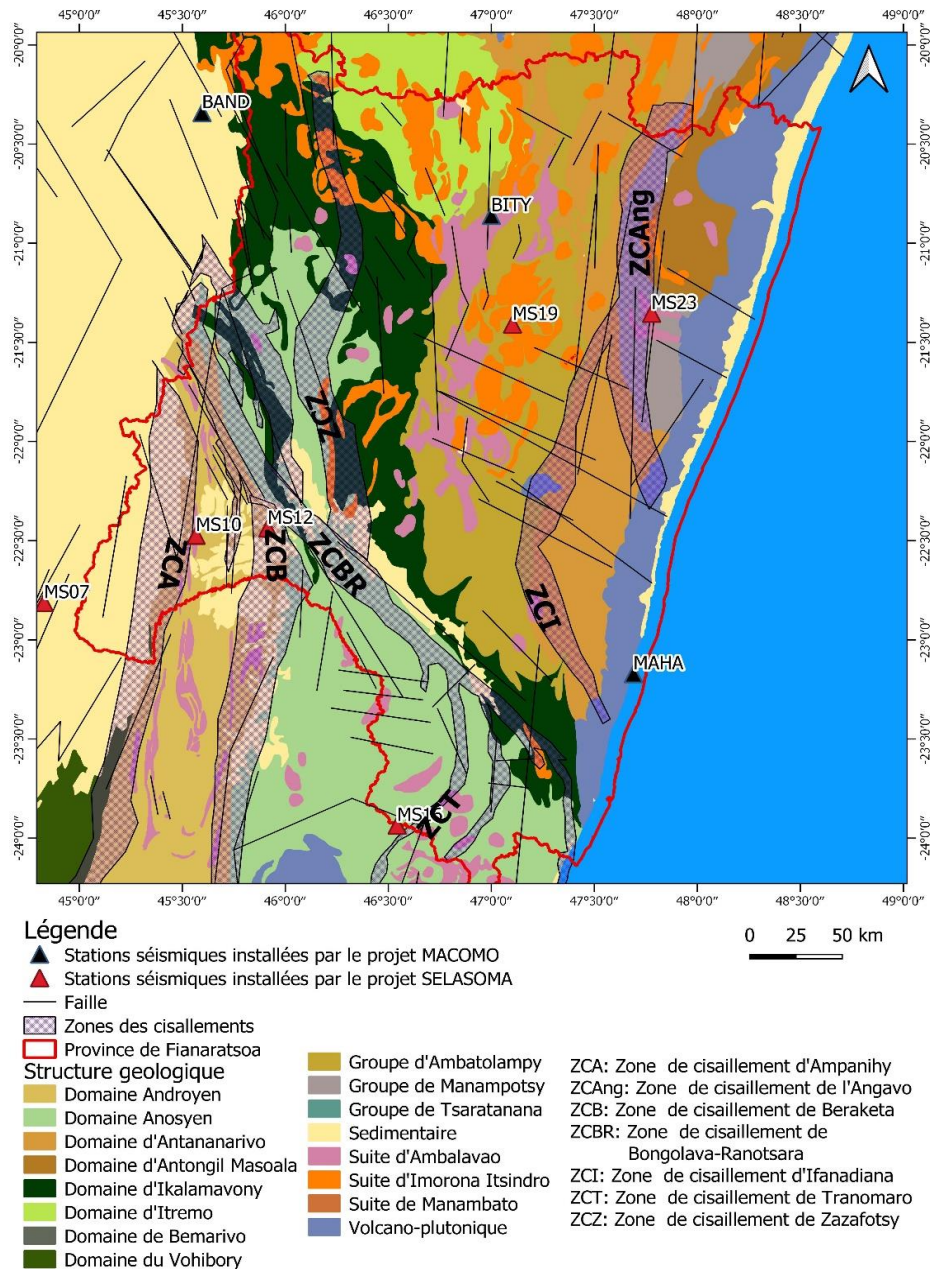
A l'ère Primaire, Madagascar fait partie du supercontinent de Gondwana, situé à l'origine entre les côtes actuelles du Kenya et celles de l'Inde [1, 2]. Actuellement, elle est séparée de l'Afrique par le canal de Mozambique sur environ 400 km. Cette grande Ile, qui a subi de différentes phases de dislocation, est l'objet d'une série d'interprétations de son histoire géologique. Ainsi, la géologie et la tectonique de différents territoires malagasy sont liées à l'histoire de la géodynamique de Madagascar lors de la reconstruction de Gondwana. L'ancienne province de Fianarantsoa, notre zone d'étude, est historiquement liée à ces événements tectoniques. De nombreux chercheurs ont précisé à leurs études. Les travaux sur l'étude des terrains sédimentaires [3] et l'architecture tectonique du centre de Madagascar [4] montrent que les dépôts sédimentaires dans la région d'Isalo et de Farafangana à Nosy-varika résultent de la séparation de cette grande Ile du continent africain à la fin de Paléozoïque. Des auteurs ont affirmé que le volcanisme a un lien avec la séparation de Madagascar de l'Inde dans la période du crétacé supérieur [5 - 8]. Ceux de Rolin (1991) [9] et Rajaomazava (1992) [10] sur l'étude de la présence de décrochement précambrien, de l'évolution géodynamique de la marge est-africaine ont souligné que la zone de cisaillement de Bongolava-Ranotsara, se prolongeant par celle d'Ashwa au Kenya [11 - 13] et par celle de l'Achankovil au Sud de l'Inde [14, 15], est une structure réactivée au crétacé, conséquence de la géodynamique de l'Est Gondwana.

[16] a confirmé, par l'explication du modèle structural du socle précambrien malgache dans le cadre de la tectonique des plaques, que les failles et les zones cisailées au Nord et au Sud de la ligne de Bongolava-Ranotsara sont des structures faisant suite à la perforation du continent africain par le continent de Dharwar lors de la construction de Gondwana. Toutes ces données historiques traduisent l'évolution de la déformation des structures souterraines dans cette région. Cette dernière mérite d'être étudiée. L'étude du mécanisme au foyer permet d'expliquer les mécanismes à la source des séismes et les déformations qui les associent. Une question se pose alors: existe-t-il, d'une part, des corrélations entre le mécanisme au foyer et les structures tectoniques, et d'autre part, une dissémination des menaces dans cette zone? L'analyse des résultats du calcul des mécanismes au foyer apporte des informations globalement satisfaisantes pour répondre à cette question. Les résultats de cette étude peuvent être utilisés pour connaître l'impact des phénomènes naturels à l'intérieur de la Terre sur l'environnement. L'objectif de cette étude est de calculer les valeurs de l'azimut, de pendage et de l'angle de glissement caractérisant les types de failles actives à l'origine des séismes afin d'analyser la corrélation entre les mécanismes obtenus, les failles et les zones de cisaillement de cette région.

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Données et matériel

Les données utilisées pour cette étude sont des séismes locaux de magnitude  $M \geq 3$  sur l'échelle de Richter, de 2012 à 2013, enregistrées par les réseaux des stations sismiques temporaires installées par les projets MACOMO (Madagascar-Comores-Mozambique) [17], SELASOMA (Seismological Signatures in the Lithosphere / Asthenosphere system of Southern Madagascar) [18] autour de la région de Fianarantsoa (**Figure 1**). Les **Tableaux 1 et 2** représentent les codes et situations géographiques des stations.



**Figure 1** : Carte Tectonique et réseaux des stations sismiques de l'ancienne Province de Fianarantsoa (extraite de la carte géologique de la République de Madagascar à 1/1000 000 [19])

**Tableau 1 : Réseau de stations sismiques installées par le projet MACOMO**

Code station	Latitude (°)	Longitude (°)
BAND	-20.3420	45.5960
BITY	-20.8611	47.0003
MAHA	-23.1715	47.6900

**Tableau 2 : Réseau de stations sismiques installées par le projet SELASOMA**

Code station	Latitude (°)	Longitude (°)
MS04	-23.10502	44.21986
MS07	-22.81237	44.82891
MS10	-22.47351	45.5668
MS12	-22.43738	45.91504
MS16	-23.93573	46.54300
MS19	-21.40929	47.10285
MS23	-21.35424	47.77802

Chaque station sismique était équipée d'un enregistreur de données de 24 bits (Quanterra Q330), des capteurs à large bande (Guralp CMG-3T, Streckeisen STS-2 ou Nano-métriques, Trillium 120 PA (stations MACOMO), Trillium 240 PA (stations SELASOMA)) et d'une horloge GPS.

## 2-2. Zone d'étude

### 2-2-1. Localisation

L'ancienne province de Fianarantsoa est délimitée géographiquement entre les longitudes 44°59'38.51"Est et 48°45'22.68"Est et les latitudes 19°53'31.21" et 24°18'45.24"Sud (*Figure 1*).

### 2-2-2. Contextes tectoniques

Des cartes géologiques de Madagascar au 1/1000 000 [19] et prospections au 1/100 000 des feuilles de Fianarantsoa, d'Ambohimahasoa - Ifanadiana [20], d'Ifanadiana-Mananjary [21], d'Ankarimbelo (055), d'Ifaniria (P55) et de Vohipeno (Q55) [22] nous fournissent les informations sur les structures tectoniques (*Figure 1*) constituées essentiellement des failles, des plis et des zones de cisaillements dans cette ancienne province dont elles sont présentées par domaine tectonomorphique.

#### 2-2-2-1. Domaine Anosyen

Le domaine Anosyen se prolonge selon la direction Nord-Ouest Sud-Est et est rattaché aux domaines d'Ikalavony et d'Androyen [19]. Le caractère structural est variable. Dans le Sud, il est un peu large et caractérisé par des plis ouverts à serrés. Dans le Nord, les structures restent des plis souvent de formes serrées à isoclinales. Ces caractères sont visibles dans la trace des pôles de la stratification litho-tectonique de ces différentes régions. Ce domaine est marqué par la présence de la zone de cisaillement de Bongolava-Ranotsara qui est un grand escarpement dans les roches du socle et de celle de cisaillement de Zazafotsy [19]. Bon nombre des failles s'y trouvent. Certaines ont une tendance parallèle à ces zones de cisaillement [19]. Les failles de Ranotsara [23] sont marquées par de faibles niveaux topographiques, de même orientation que les foliations.

### 2-2-2-2. Domaine Androyen

Pour le domaine Androyen, les roches ont une tendance subparallèle Nord et une forte dépression avec des pendages dont la plupart des angles sont  $\pm 30^\circ$  de la verticale. Les plis ont des formes serrées à isoclinales et plongent superficiellement au Nord ou au Sud. Les axes des plis sont coaxiaux avec des linéations minérales. Ce domaine est marqué par la présence des zones de cisaillement d'Ampanihy, de Beraketa et de Tranomaro. Les failles qui y sont présentes, ont des directions NNO-SSE et NE/SO [19].

### 2-2-2-3. Domaine d'Ikalamavony

Dans le domaine d'Ikalamavony, on trouve trois failles majeures de direction NO-SE, parallèles et espacées environ de 20 Km [19]. Ces failles ont de flexures vivantes au moment de la sédimentation. La stratification litho-tectonique du domaine Ikalamavony montre une tendance prédominante Nord-Nord-Ouest et un fort plongement Ouest parallèle à l'évolution du domaine en ses limites [7]. Les données linéaires du plongement, pour la plupart des angles superficiels, montrent un écart entre les orientations OSO et SE. La conjugaison des plongements ENE-OSO au Sud des axes de plis est parallèle aux limites du domaine, alors que la tendance Sud- Ouest à Nord-Est montre des plis dans le centre et le Nord de la carte avec des orientations à angle modéré.

### 2-2-2-4. Domaine d'Antananarivo

Le domaine d'Antananarivo est vaste. Le groupe des migmatites et migmatitiques granitoïdes dans ce domaine constitue les grands axes anticlinaux, de la région centrale en particulier la grande dorsale de Vondrozo - Mangoro - Anjafy qui s'allonge en direction méridienne de Vangaindrano au Sud jusqu'à la partie Est de Fandriana et se termine à Sofia au Nord. L'ensemble de la région de Betsileo, d'Antanala et d'Antaimoro a subi une tectonique cassante qui correspond à un rejet de vieilles failles antécambriennes au crétacé [22]. Ces vieilles failles jouaient des failles récentes. Les directions et pendages ont été affectés par ces cassures. On relève trois directions principales :

- Des failles concordantes qu'il est difficile de mettre en évidence et qui sont à l'origine de la grande falaise ;
- Des failles des directions  $N60^\circ O$  et  $N50^\circ E$ .

Une des caractéristiques de ces régions est l'existence des mylonites de basaltes, voire des brèches qui sont nettement identifiables. La dernière phase tectonique est marquée par l'apparition des venus volcaniques crétacées [22]. Les régions d'Ifanadiana et de Mananjary sont marquées par l'existence de plusieurs falaises. La première et grande falaise se trouve dans la région de Ranomafana [21]. Elle est constituée par des strates subhorizontales au sommet, incliné à  $45^\circ$  vers l'Ouest au pied. Les pendages semblent croître assez régulièrement vers l'Est. La foliation des roches éruptives est identique à la schistosité des migmatites encaissantes. La zone des migmatites à partir du pied de la falaise vers l'Est s'étend en une série de migmatites schisteuses uniformément, inclinées de  $45^\circ$  à  $60^\circ$  vers l'Ouest [21]. Le relief constitué par la falaise est le résultat d'une série d'effondrements le long d'un système de failles Nord-Sud en escalier [21]. La présence d'eau thermale à Ranomafana constitue une preuve de l'existence de ces failles [21].

### 2-2-2-5. Zones de cisaillement

Les zones de cisaillement ont été formées après la subduction et la fermeture de l'océan Mozambique [7]. Sept grandes zones de cisaillement (*Figure 1*) ont été mises en évidence dans l'ancienne province de Fianarantsoa [24]:

- la zone de cisaillement de l'Angavo [4, 12] ;
- la zone de cisaillement d'Ifanadiana [25];
- la zone de cisaillement de Zazafotsy [25];
- la zone de cisaillement de Bongolava-Ranotsara [25];
- la zone de cisaillement d'Ampanihy [5, 9, 25] ;
- la zone de cisaillement de Beraketa [25];
- la zone de cisaillement de Tranomaro [25].

### 2-3. Méthode de la détermination des solutions du mécanisme au foyer

Les solutions du mécanisme au foyer à déterminer sont les paramètres d'une faille à l'origine de séisme :

- L'azimut  $\theta$  (strike) : angle que fait le plan de la faille et le Nord géographique avec  $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$  ;
- L'angle de glissement  $\lambda$  (rake) : angle de glissement du plan de la faille avec un axe horizontal dans le plan de la faille avec  $-180^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$  ;
- Le pendage (dip) : angle que fait le plan de la faille et l'horizontale avec  $0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$ .

Les calculs de ces trois principaux paramètres à la source nous permettent de distinguer les types de faille. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour calculer mécanisme au foyer. Nous citons comme exemples la méthode d'inversion du tenseur de moment [26] la méthode des polarités des ondes de première arrivée [27] et la méthode systématique d'inversion des polarités (P, SV et SH) et des rapports des amplitudes SV/P, SH/P et SV/SH [28]. Nous avons choisi la méthode des polarités des ondes primaires (ondes P) qui sont liées au sens des premiers mouvements du sol. Ce qui permet de calculer un mécanisme au foyer à partir d'un nombre de stations et des données réduites. Cette méthode est basée sur l'analyse du sens de la première impulsion de l'onde P sur le sismogramme. Notons par la lettre « C » ou « compression » pour la première impulsion vers le haut et par « D » ou « Dilatation » dans le sens contraire. A l'hypocentre, le mouvement est contraire à celui de la station : une « compression » correspond à une « tension » et inversement, une dilatation à la station convient à une « pression » [29]. L'axe de pression est situé dans le cadran des dilatations, l'axe de tension dans celui des compressions. L'amplitude de l'onde P est un critère plus important à la détermination des plans nodaux. Elle comporte des informations sur la polarité de l'onde et peut se déduire à partir de l'équation de déplacement de l'onde P causé par la rupture de faille, dans un milieu homogène isotrope, modélisée dans le système de coordonnées sphérique  $(r, \varphi, \theta)$  [30] :

$$u_r = \frac{1}{4\pi\rho\alpha^3 r} M \left(t - \frac{r}{\alpha}\right) \sin 2\theta \cos \varphi \quad (1)$$

$\alpha$  étant la vitesse de l'onde P à la distance constante "r" et  $\rho$  la densité du milieu.

$M \left(t - \frac{r}{\alpha}\right)$  la fonction de moment sismique. Elle reflète l'impulsion rayonnée de la faille telle que :

$$M \left(t - \frac{r}{\alpha}\right) = C_{jkpq} v_k n_j A \Delta u s \left(t - \frac{r}{\alpha}\right) \quad (2)$$

A étant l'aire de la faille et  $\Delta u$  son déplacement,  $C_{jkpq}$  les paramètres élastiques,  $s \left(t - \frac{r}{\alpha}\right)$  la fonction source.

La variation normalisée  $u_r$  de l'amplitude est exprimée par :

$$A_p(\theta, \varphi) = u_r = \frac{\sin 2\theta \cos \varphi}{4\pi\rho\alpha^3 r} \tag{3}$$

La distribution de l'amplitude des ondes P pour une distance  $r$  grande et une source ponctuelle avec le mécanisme de cisaillement de pur double couple est modélisée par la formule suivante [29]:

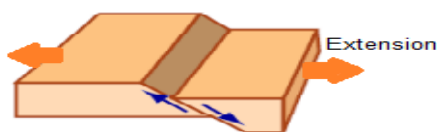
$$A_p(\theta, \varphi) = \sin 2\theta \cos \varphi \tag{4}$$

*Les sens du premier mouvement sont pondérés en fonction de cette amplitude.*

Les signes plus et moins de l'expression (4) indiquent la variation d'amplitude en fonction des angles  $\theta$  et  $\varphi$  des mouvements dirigés vers l'extérieur et vers l'intérieur du foyer de séisme. Cette variation est liée au mouvement ascendant ou descendant de l'onde. Les arrivées des ondes P en compression et en dilatation sont séparées par deux plans nodaux perpendiculaires. Le plan de faille et auxiliaire sont les lignes nodales sur lesquelles [29] :

$$\cos \varphi \sin 2\theta = 0 \tag{5}$$

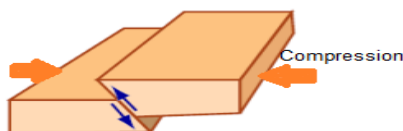
La position des quadrants sur la sphère focale dépend de l'orientation de la faille active et de la direction de glissement dans l'espace. Le type de faille et le mécanisme au foyer associé peuvent se déterminer à partir de la position relative de ces portions d'espace. Une faille est normale (**Figure 2a**), associée en un jeu en extension lorsque les deux plans nodaux sont inclinés et que le cadran en dilatation (cadran blanc) est au centre (**Figure 2b**). Tandis qu'elle est inverse (**Figure 2c**), associée à un jeu en compression dans le cas contraire, que le cadran en compression (cadran noir) est au centre (**Figure 2d**). Si les deux plans nodaux sont verticaux (**Figure 2f**), la faille est décrochante (**Figure 2e**), associée à un mouvement purement cisailant.



**Figure 2a :** Faille normale



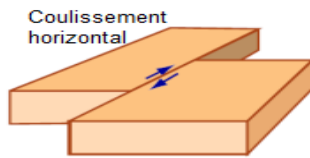
**Figure 2b :** Mécanisme au foyer associé à la faille normale



**Figure 2c :** Faille inverse



**Figure 2d :** Mécanisme au foyer associé à la faille inverse



**Figure 2e :** Faille décrochante



**Figure 2f :** Mécanismes au foyer associé à la faille décrochante

Les calculs des paramètres (azimut (Strike), pendage (dip) et de l'angle de glissement (slip ou rake)) d'une faille nécessite des informations sur la localisation, les azimutes, les angles d'émergence ou take of angle ainsi que la polarité par station sismique et d'amplitude d'un séisme. Quatre différents programmes écrits en fortran 77 sont utilisés pour cette étude, dont un programme pour déterminer les paramètres de localisation, un autre pour calculer les azimutes ainsi que les angles d'émergences ou take of angle d'un séisme, un pour observer l'ensemble des polarités des ondes P des toutes les stations sismiques et enfin un programme pour calculer les paramètres d'une faille. Après l'exécution des trois premiers programmes avec SEISAN [31], le fichier de données obtenues doit contenir les paramètres au foyer (latitude, longitude, profondeur, heure d'origine), la magnitude, le nombre de stations sismiques, le code de chaque station et la polarité du premier mouvement pour chaque station. Le programme FOCMEC [31] a été utilisé pour calculer les trois angles d'une faille. Les résultats relatent les caractéristiques de la faille responsable de séisme : l'azimut  $\theta$  (strike), l'angle de glissement  $\lambda$  (rake) et le pendage (dip).

### 3. Résultats

#### 3-1. Calcul de mécanisme au foyer à partir des signaux de mauvaises qualités

Pour cette étude, 36 événements sismiques de magnitude  $M \geq 3$  ont été téléchargés. Pour le calcul de mécanisme au foyer, 11 séismes ne donnent pas des solutions. Les problèmes proviennent soit de la qualité des signaux qui ne permet pas l'identification des différentes phases de l'onde, soit de l'insuffisance du nombre de stations d'enregistrement des signaux. La qualité des solutions focales dépend de la précision des pointages des premières arrivées des ondes P et du nombre des stations d'observation. Les signaux de mauvaise qualité induisent à des erreurs de lecture des polarités des ondes P et l'insuffisance de nombre d'observation des polarités entraînent un effet dramatique sur la solution de mécanisme au foyer. Les résultats de calcul à partir des signaux enregistrés par trois stations sismiques sont mauvais pour la recherche de plans nodaux par rapport aux quatre stations et plus.

#### 3-2. Magnitudes et profondeurs des séismes

Les résultats (**Tableaux 3 et 4**) montrent que 25 séismes ont donné des solutions focales acceptables. Les magnitudes des séismes sont comprises entre 3,8 et 5,5. Les 12 % des séismes sont de magnitude  $M < 4$ , 60 % pour  $4 < M < 5$  et 28 % pour la magnitude  $M \geq 5$ . Les profondeurs des hypocentres varient de 1 à 35 km dont 65 % sont inférieures à 4 km, 8 % entre 5 à 10 km, 24 % entre 10 à 20 km et 16 % entre 20 à 35 km.















### 3-3. Angles de glissement et types des failles

Trois principaux types des failles se trouvent dans cette zone d'étude : failles normales, failles inverses et failles de décrochement. La famille des jeux de failles de décrochement compte pour 52 % des séismes, 32 % pour les jeux de failles normales et 16 % pour les jeux de failles inverses. L'angle de glissement varie de  $-173,7^\circ$  à  $176,7^\circ$ . Les failles se distinguent en huit composantes : faille purement normale, faille normale-oblique associée à un décrochement latérale droite, faille normale-oblique associée à un décrochement latérale gauche, faille purement inverse, faille inverse oblique associée à un décrochement, latérale droite, faille de décrochement associée à un mouvement purement cisailant, faille de décrochement, latérale droite, faille de décrochement, latérale gauche. Les valeurs négatives, comprises entre  $-147^\circ$  et  $-42^\circ$  justifient la présence de la famille des failles normales [32]. Les gammes des valeurs  $\lambda \in ]-113^\circ; -95^\circ[$ ,  $\lambda \in ]-67,5^\circ; -22,5^\circ[$  et  $\lambda \in ]-157,5^\circ; -112,5^\circ[$  correspondent respectivement à l'existence des jeux de faille purement normale, normale-oblique associée à un décrochement latérale gauche et droite [32]. Les valeurs positives, comprise entre  $67,5^\circ$  et  $157,5^\circ$  traduisent, selon la convention, admise la présence de la famille des jeux des failles inverses [34] dont  $\lambda \in ]67,5^\circ; 112,5^\circ[$  indiquent les jeux de failles purement inversées et  $\lambda \in ]112,5^\circ; 157,5^\circ[$  pour les failles inverse-oblique avec un décrochement latéral droite. Les jeux des failles de décrochement prennent à la fois des valeurs négatives et positives. Les valeurs  $\lambda \in ]-166,5^\circ; -157,5^\circ[$ ,  $\lambda \in ]-22,5^\circ; -22,5^\circ[$  et  $\lambda \in ]-174^\circ; 174^\circ[$  traduisent la présence de jeux aux failles de décrochement purement cisailant, de décrochement latéral gauche et droite [32].

### 3-4. Directions et pendages des failles

Sur l'ensemble des mécanismes au foyer, les azimutes des failles varient de  $2^\circ$  à  $346^\circ$ , soient de directions NE-NO, NO-SE, NNE-SSO, NNO-SSE, ENE-OSO. Un seul mécanisme représente l'azimute de  $2^\circ$ . Pour les jeux des failles normales, ils sont compris entre  $189^\circ$  et  $320^\circ$  et un seul mécanisme représente l'azimute de  $2^\circ$ . Ce qui donne les directions NNE-SSO et ENE-OSO. 75 % des mécanismes normaux suivent la direction NNE-SSO et s'orientent de  $N2^\circ E$ ,  $N9^\circ E$ ,  $N23^\circ E$ ,  $N29^\circ E$ ,  $N40^\circ E$  et  $N40^\circ O$  (mécanismes 6,9,11,15,16,22). 25 % sont de direction ENE-OSO qui s'orientent de  $N42^\circ O$  et  $N50^\circ E$  (mécanismes 13 et 17). Pour les jeux de failles de décrochement, les azimuts varient de  $36^\circ$  à  $342,1^\circ$ , soient de directions NNE-SSO, NNO-SSE, ENE-OSO et NE-SO. 35,71 % des mécanismes ont de directions NNO-SSE qui s'orientent de  $N23^\circ O$ ,  $N17,9^\circ O$ ,  $N14^\circ O$ ,  $N24,6^\circ O$  et  $N15^\circ O$  (mécanismes 5,20,23,24,25) et 28,57 % pour celles de NNE-SSO et ENE-OSO. Un seul mécanisme a la direction NE-SO, soit 7,14 %. Pour les jeux de faille inverse, l'azimut est compris entre  $78^\circ$  et  $342^\circ$ , soit de directions NO-SE et ENE-OSO. Les pendages (dip) sont compris entre  $32^\circ$  et  $88^\circ$ . Les 92 % des mécanismes ont de pendage supérieur ou égal à  $40^\circ$ , 80 % sont supérieurs ou égal à  $50^\circ$  et 16 % pour le pendage supérieur ou égal à  $80^\circ$ . Les **Tableaux 3** et **4** renseignent sur les résultats de calcul du mécanisme au foyer.

**Tableau 3 : Mécanisme au foyer de la Province de Fianarantsoa entre le mois de février et septembre 2012**

Ann/Mois/JJ	HH :MN :SS	Lon (°)	Lat (°)	Prof (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Mag	N°	Méca foyer
2012/2/7	00:51:09	46,49	-23,88	10	315	40	102	3,9	1	
2012/3/5	00:38:40	45,73	-21,95	2	219,7	78	-174	3,9	2	
2012/4/5	14:07:56,7	46,92	-20,55	15	187	28	15,2	3,8	3	
2012/4/9	18:35:38,8	46,05	-20,35	2,4	338,8	54	128	5,1	4	
2012/6/23	11:13:43,1	45,89	-23,27	15,7	337	79	157	4,3	5	
2012/6/26	00:08:59,2	45,18	-22,84	11,44	209	82	-103	4,5	6	
2012/7/3	01:29:07,3	47,77	-21,31	29,75	239	80	-167	5,2	7	
2012/7/24	00:42:46,8	45,93	-21,75	2,7	36	58	172	4,4	8	
2012/7/30	16:43:23,8	46,86	-23,54	20,2	2	65	-42	4,7	9	
2012/8/8	05:03:52,9	46,16	-21	14,87	340	44	174	5,5	10	
2012/9/22	06:20:27,6	47,17	-23,43	6,9	189	72	-147	4,7	11	
2012/9/29	09:55:56,4	46,5	-23,56	2	78	78	110	4,4	12	

*Ann : Année ; JJ : Jour ; HH : Heure ; MN : Minute ; SS: Seconde ; Lat: Latitude ; Lon: Longitude ; Prof: Profondeur ; Mag: Magnitude ; N° : Numéro ; ° : Degré ; Meca foyer : Mécanisme au foyer*

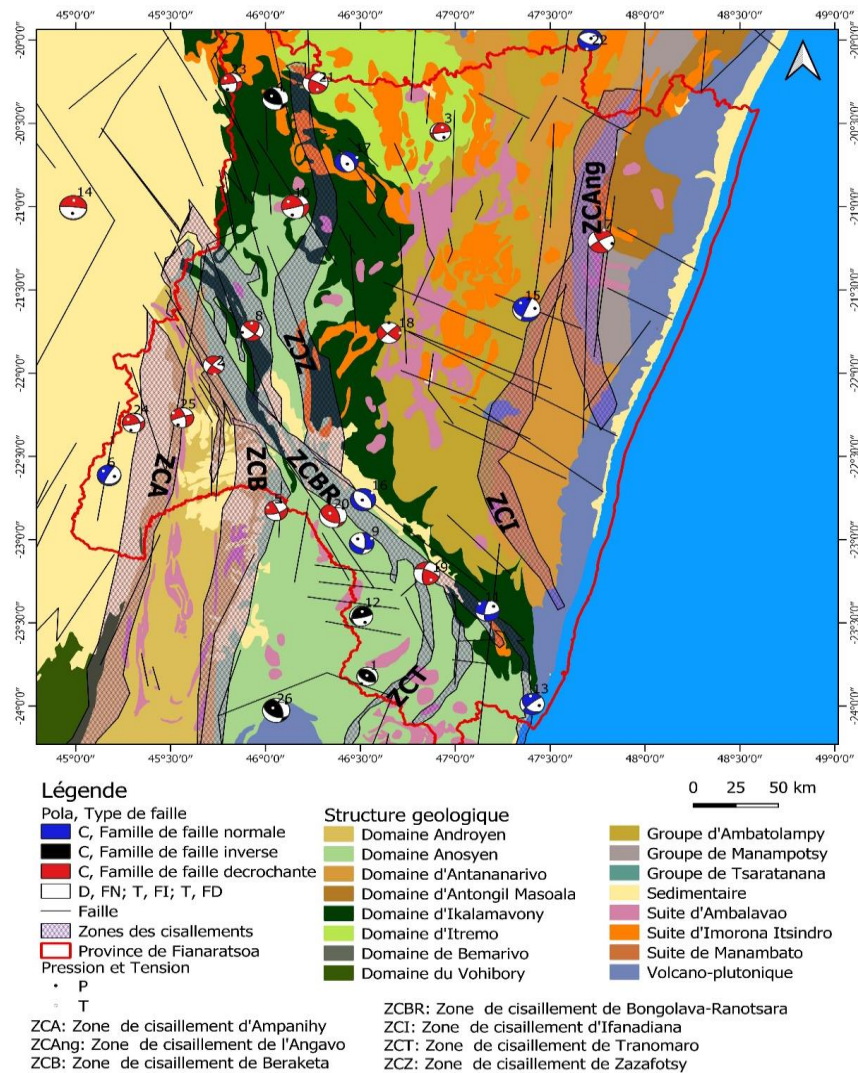
**Tableau 4 :** Résultats du calcul de mécanisme au foyer de la Province de Fianarantsoa entre le mois d'octobre 2012 et juillet 2013

Ann/Mois/JJ	HH :MN :SS	Lon (°)	Lat (°)	Prof (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Mag	N°	Méca foyer
2012/10/3	22:05:08,6	47,41	-23,99	3,4	230	82	-129	4,7	13	
2012/10/10	16:20:24,5	44,99	-21,01	2,4	275	84	-89	5,4	14	
2012/10/23	09:00:10,5	47,38	-21,62	2	203	88	-123	5,5	15	
2012/11/4	12:45:40,1	46,51	-22,76	15,7	320	50	-89	4,9	16	
2012/11/21	00:57:05,9	46,43	-20,73	18,5	318	48	-113	4,5	17	
2012/12/23	06:53:41,4	46,65	-21,76	3,78	135	79	177	4,6	18	
2013/11/9	04:15:19,7	46,85	-23,2	1,7	190	64	155	5,1	19	
2013/2/13	07:05:56,8	46,36	-22,86	2,7	342,1	54	122	5,4	20	
2013/2/18	04:04:46,5	46,26	-20,26	35	198,2	48	169	4,9	21	
2013/3/8	15:22:01,2	47,71	-20	25,1	220..0	32	-95	5	22	
2013/3/17	04:56:52,8	45,82	-20,26	2	346	52	174	4,1	23	
2013/5/10	11:25:36,4	45,31	-22,3	2,7	335,4	45	165	4,2	24	
2013/7/20	10:48:45,2	45,56	-22,27	1,7	345	68	-173	4,3	25	

*Ann : Année ; JJ : Jour ; HH : Heure ; MN : Minute ; SS : Seconde ; Lat : Latitude ; Lon : Longitude ; Prof : Profondeur ; Mag : Magnitude ; N° : Numéro ; ° : Degré ; Meca foyer : Mécanisme au foyer*

**3-5. Répartition des mécanismes au foyer**

La **Figure 2** représente la répartition spatiale des mécanismes au foyer. Elle montre que les mécanismes se répartissent de façon inégale. Les 88 % se concentrent dans les parties Sud et Nord-Ouest à l’alentour du domaine d’Ikalamavony. Ils sont moins fréquents dans les parties Est et Nord Est et il n’y en a que 12 %. Les 75 %, 62,5 % et 53,84 % des mécanismes inverses, normaux et de décrochement se trouvent dans la partie Sud. Les mécanismes normaux et de décrochement s’alignent parallèlement à la zone de cisaillement de Bongolava-Ranotsara. Le 64 % de la totalité de jeux de failles correspondantes aux mécanismes coïncident avec les failles tectoniques.



**Figure 2 : Carte de Mécanisme au foyer de la Province de Fianarantsoa**

### 3-6. Axe de pression

La **Figure 3** montre que les axes de pression P déduits des mécanismes au foyer ont des directions NO-SE, NE-SO, ESE-ONO et ENE-OSO. Pour les mécanismes en décrochement, l'ensemble des axes P ont des directions hétérogènes. Au Sud de la zone de cisaillement de Bongolava-Ranotsara, ils sont de direction homogène NE-SO. Par contre, au Nord, ils ont des directions NO-SE, ESE-ONO et ENE-OSO. Cette hétérogénéité peut être interprétée par l'influence des caractères géologiques différents dans ces deux régions : présence des intrusions magmatiques au Nord et absence au Sud. La direction de contrainte à l'origine des séismes dépend des résistances mécaniques des matériaux. Ce qui nous amène à suggérer que les directions des axes P ne seront dépendantes que les directions des failles qui sont remobilisées. Les mécanismes normaux présentent des axes P des directions NE-SO et ESE-ONO. Piqué et al. (1999) [33] a proposé que Madagascar est actuellement soumis à une extension E-O et que cette extension est compatible avec les failles normales de direction N-S La direction des contraintes a été changée depuis le Pliocène [34]. Cela nous revient à proposer l'hypothèse que pour la direction d'extension de mécanisme au foyer ESE-ONO, il est possible d'avoir la direction NE-SO après une rotation et un changement de direction de contraintes depuis quelques milliard d'années. Ainsi, cette zone d'étude peut être animée par une extension E-O.

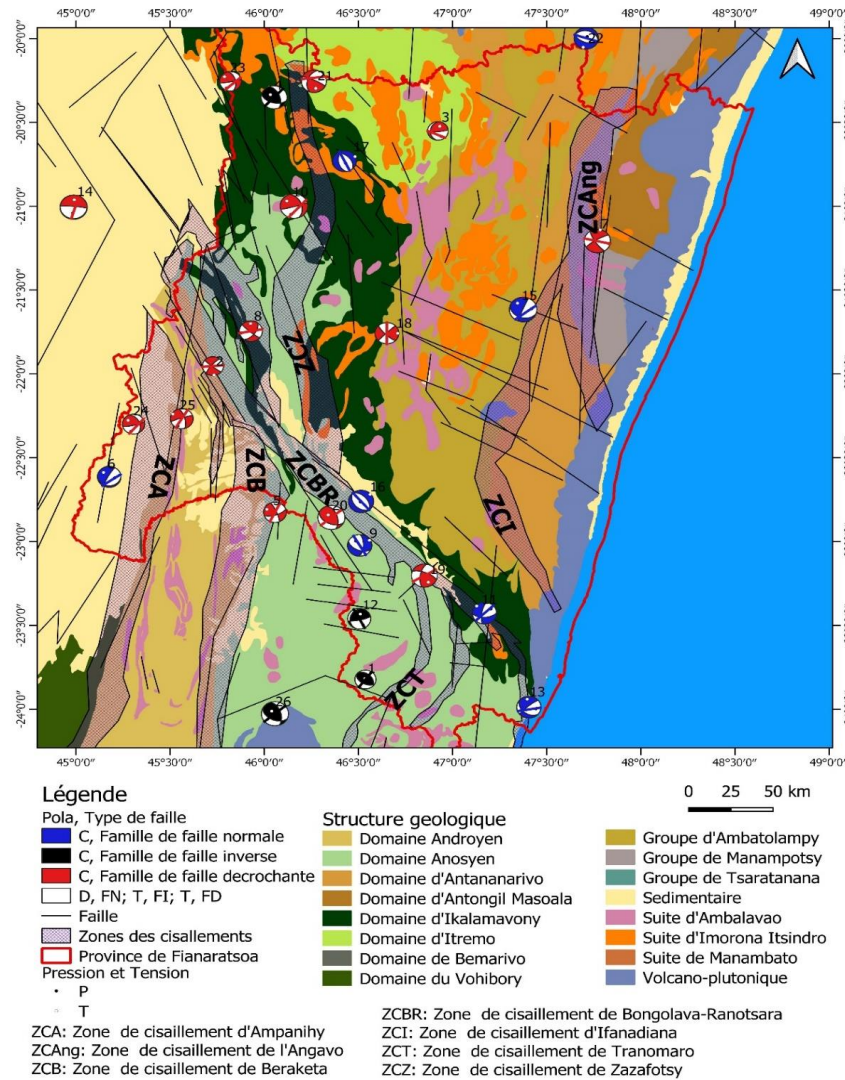


Figure 3 : Carte synthétique des axes de Pression correspondant aux solutions focales

## 4. Discussion

### 4-1. Méthode et programmes

Les résultats de calcul de mécanisme au foyer dépendent de la qualité du signal, ainsi que du nombre d'observations sur les sismogrammes. Les programmes et méthode utilisés peuvent calculer les mécanismes au foyer des séismes ayant les signaux de bonne qualité sans tenir compte de nombre des stations sismiques. Ils sont donc très bien adaptés aux séismes enregistrés à partir de trois stations et peuvent aussi donner des résultats informatifs. Toutes les solutions focales obtenues peuvent être utilisées à l'interprétation de la déformation produite par les séismes. La résistance des matériaux joue un rôle important dans la libération de l'énergie sismique. L'interprétation peut être pondérée avec la magnitude. Les mécanismes au foyer des séismes de magnitude  $M < 4$  indiquent la phase des réajustements des failles tectoniques. Ceux de magnitude  $M > 4$  traduisent la manifestation des failles et les structures au voisinage des zones de cisaillement.

#### 4-2. Relation entre les profondeurs des épïcêtres et mécanismes au foyer

La plupart des épïcêtres origines des mécanismes sont proches ou coïncident avec les failles existantes et suivent leurs directions tectoniques. Les profondeurs des hypocentres varient de 1 à 35 Km. Elles indiquent les lieux d'origine des fractures des failles responsables des séismes. Pour les jeux des failles de décrochement, les fractures se trouvent aux profondeurs inférieures à 5 km, entre 10 km à 11 km pour les jeux de failles inverses et entre 15 km à 35 km pour les failles normales. En effet, les mécanismes de décrochement représentent la déformation superficielle. Par contre, les mécanismes normaux engendrent des déformations en profondeur. L'activité sismique est donc due à la manifestation des failles tectoniques. Ces résultats montrent la réactivation sismique des anciennes structures tectoniques.

#### 4-3. Relation entre le mécanisme au foyer, les failles tectoniques et les zones de cisaillement

La répartition spatiale des mécanismes au foyer (*Figure 3*) indique que la majorité des mécanismes normaux et en décrochement représentant les failles normales et décrochantes s'étendent parallèlement aux zones de cisaillement. Les jeux en faille de décrochement (mécanismes 19) et failles normales (mécanismes 11, 13, et 16) de direction « côte-Est », orientées NNE-SSO et NE-SE sont parallèles au linéament précambrien de Bongolava-Ranotsara [25]. On suggère que ce système de failles peut être en relai avec la faille de Ranotsara [23] qui interfère avec ce linéament, la ramification des failles tectoniques héritées de zones de faiblesse précambriennes qui définissent le contour de l'île de Madagascar [35]. Les activités sismiques sont donc dues à la manifestation de ces failles tectoniques. C'est ce qui traduit la remobilisation des failles créées, suite de la géodynamique de l'Est Gondwana. Au Sud de ce linéament, les jeux de faille de décrochement (mécanismes 5 et 25), sont de direction NNE-SSO, similaire à celle de la zone de cisaillement de Beraketa [25] et d'Ampanihy et coïncident avec les failles tectoniques. Les zones de cisaillement constituent de roches métamorphiques de faciès granulites et le champ de déformation, contemporain du métamorphisme granulitique est possible avec un raccourcissement horizontal Est - Ouest. Selon cet argument, la déformation observée dans la partie Sud de la zone d'étude est compatible avec un raccourcissement Est-Ouest qui résulterait de la convergence des cratons lors de la fin de consolidation du Gondwana [25]. Les jeux de failles obtenues prouvent la manifestation des zones de cisaillement et des failles tectoniques. Ce sont des failles héritées par des failles tectoniques créées lors de la consolidation du Gondwana. Au Nord du linéament de Bongolava-Ranotsara, deux autres mécanismes (7 et 21) associés aux jeux de failles de décrochement sont également parallèles aux zones de cisaillement de l'Angavo et de Zazafotsy. Le socle a été une intense activité magmatique granitique. La source sismique pourrait être alors provenir d'une réactivation magmatique. Ces résultats indiquent que la zone de cisaillement de Bongolava-Ranotsara est une structure réactivée. Cela est confirmé également par [9]. Le site d'étude est tectoniquement dominé par des zones de cisaillement dont les structures sont faibles par rapport à leur entourage. Les roches que l'on y trouve sont différentes. Ces caractéristiques ont des incidences sur l'environnement qui l'entoure et les jeux des failles obtenues se forment par influence de ces structures. C'est qui explique la domination des jeux des failles de décrochement, de directions similaires aux zones de cisaillement.

#### 4-4. Intérêt des résultats

Ces résultats permettent de connaître l'évolution de la déformation des structures souterraines de l'ancienne province de Fianarantsoa ainsi que son impact sur l'environnement. Le plus fort séisme est de magnitude  $M = 5,5$  sur l'échelle de Richter. Il est ressenti par la population mais n'a provoqué ni de dégât ni de rupture de terrain. Les jeux de failles trouvées traduisent l'existence de mouvement et de petite déformation du sous-sol. Ainsi, au problème posé sur les risques qui pourront survenir au sein de la

structure souterraine de cette province, les résultats montrent que la rupture de terrain est loin d'être présent. L'analyse de la corrélation entre les mécanismes au foyer et les structures tectoniques laissées par la géodynamique de Madagascar apporte des réponses globalement satisfaisantes.

## 5. Conclusion

Les solutions des mécanismes au foyer montrent l'existence de trois types de familles de jeux de failles, à savoir les failles normales, les failles inverses et les failles de décrochement. Les azimutes et angles de glissement varient respectivement de  $2^{\circ}$  à  $346^{\circ}$  et de  $-173,7^{\circ}$  à  $176,7^{\circ}$ . Les pendages sont compris entre  $32^{\circ}$  et  $88^{\circ}$ . Les failles sont de direction générale NNE-SSO, NNO-SSE et ENE-OSO. Les mécanismes de décrochement engendrent des déformations superficielles, contrairement aux mécanismes normaux. La plupart des mécanismes normaux et en décrochement représentant les failles normales et décrochantes s'alignent parallèlement aux zones de cisaillement et coïncident avec les failles tectoniques. Les jeux de failles obtenues prouvent la manifestation des zones de cisaillement et des failles tectoniques créées par la géodynamique de Madagascar. L'analyse de la corrélation entre le mécanisme au foyer et les failles et zones de cisaillement apporte des informations sur l'évolution de la déformation des structures souterraines dans la zone d'étude.

## Références

- [1] - J. SEGOUFIN et PATRIAT, " Reconstructions de l'Océan Indien Occidental pour les époques des anomalies M21, M2 et 34. Paléopositions de Madagascar ", *Bull. Géol. Fr.*, 23(7) (1981) 603 - 607
- [2] - P. K. AGRAWAL, O. P. PANDEY et J. G. NEGI, " Madagascar a continental fragment of the paleo-super Dharwar craton of India ", *Geological society, America* 6(20) (1992) 543 - 546, [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0543:MACFOT>2.3.CO.2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0543:MACFOT>2.3.CO.2) (12 Mars 2020)
- [3] - H. BÉSAIRIE, et M. COLLINGNON, "Géologie de Madagascar. I. Les terrains sédimentaires ", *Annales Géologiques de Madagascar*, Ed. National Press, Tananarive (1972) 1 - 463
- [4] - A. S. COLLINS, B. F. WINDLEY, A. KRNER, I. FITZSIMONS, AND B. HULSCHER, "The tectonic architecture of central Madagascar: implications this places on the evolution of the east African orogeny ", *Gondwana Research*, 4 (2001) 52 - 153
- [5] - B. F. WINDLEY, A. RAZAFINIPARANY, T. RAZAKAMANANA and D. ACKERMAND, " Tectonic framework of the Precambrian of Madagascar and its Gondwana connections: a review and reappraisal ", *Geol Rundsch*, 83 (1994) 642-649, <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.07.013> (10 Février 2020)
- [6] - S. REKHA, A. BHATTACHARYA, N. CHATTERJEE, " Tectonic restoration of the Precambrian crystalline rocks along the west coast of India; Correlation with eastern Madagascar in East Gondwana ", *Precambrian Research*, 252 (2014) 191 - 208, <https://doi.org/10.1016/j.precamres> (20 Mars 2020)
- [7] - R. TUCKER, J. Y. ROIG et B. MOINE, "A geological synthesis of the Precambrian shield in Madagascar ", *Journal African Earth Sciences*, 94 (2014) 9 - 30, <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.02.001> (20 Mars 2020)
- [8] - C. REEVES, " The position of Madagascar within Gondwana and its movements during Gondwana dispersal ", *Journal of African Earth Science*, 94 (2014) 45-57, <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.07.011> (20 Mai 2020)
- [9] - P. ROLIN, " Présence de décrochements précambriens dans le bouclier méridional de Madagascar : implications structurales et géodynamiques ", *C. R. de L'Académie des Sciences, Paris*, 312 (1991) 625 - 629

- [10] - F. RAJAOMAZAVA, " Etude de la subsidence du Bassin de Morondava dans le cadre de l'évolution géodynamique de la marge est-africaine ", Thèse unique, Université des Sciences et Techniques, Montpellier, France (1992) 159 p.
- [11] - M. G. ABDELSALAM and R. STERN, " Structures and shear zones in the Arabian-Nubian Shield ", *African Earth Sciences*, 23 (1996) 289 - 310
- [12] - A. NEDELEC, B. RALISON, J. L. BOUCHEZ & V. GREGOIRE, " Structure and metamorphism of the granitic basement around Antananarivo : a key to the Panafrican history of central Madagascar and its Gondwana connections ", *Journal Tectonics*, 19 (2000) 997 - 1020
- [13] - V. GREGOIRE, " Caractérisation petrostructurale du socle précambrien de Madagascar (Pays Betsileo, Province de Fianarantsoa) : Methodologie et implication géodynamique ", Thèse unique, Université Paul-Sabatier, Toulouse (1999) 193 p.
- [14] - H. M. RAJESH, M. SANTOSCH and M. YOSHIDA, " Dextral Pan-African Shear along the Southwestern Edge of the Achankovil Shear Belt, South India : Constraints on Gondwana Reconstructions : A Discussion ", *Journal of Geology*, 106 (1998) 105 - 114, <https://doi.org/10.1086/515998> (10 Novembre 2020)
- [15] - S. A. DRURY, N. B. HARRIS, R. W. HOLT, G. J. REEVES-SMITH and R. T. WIGHTMAN, " Precambrian tectonics and crustal evolution in South India ", *Journal of Geology*, 92 (1984) 3 - 20
- [16] - J. M. REGNOULT, "Modèle structural du socle précambrien Malgache dans le cadre de la tectonique des plaques ", Académie Malgasy, Antananarivo, (1996)
- [17] - M. WYSESSION, D. WIENS and A. NYBLADE, Investigation of Sources of Intraplate Volcanism Using PASSCAL Broadband Instruments in Madagascar, the Comores, and Mozambique, International Federation of Digital Seismograph Networks. Other/Seismic Network, (2011), [https://doi:10.7914/SN/XV\\_2011](https://doi:10.7914/SN/XV_2011) (12 Février 2020)
- [18] - F. TILMANN, X. R. YUAN G. UMPKER and E. RINDRAHARISAONA, SELASOMA Project, *DeutschesGeoForschungsZentrum GFZ*, Seismic Network (2012), <https://doi:10.14470/MR7567431421> (12 Février 2020)
- [19] - J. Y ROIG (BRGM), R. D. TUCKER (USGS), S. G. PETERS (USGS), C. DELOR (BRGM), H. THÉVENIAUT, "Carte géologique de la République de Madagascar à 1/1000000 ", Ed. Bureau de Recherches Géologiques et Minière (BRGM), Antananarivo, 110 (2012) 1
- [20] - J. CHANTRAINE, "Géologie et prospection de la région Fianarantsoa-Ifanadiana- Ambohimaso ", Ed. Bureau Géologique de Madagascar, Antananarivo, 127 (1967)
- [21] - H. ROCHE, " Etude géologique des feuilles Ifanadiana (529) et Mananjary (530) ", Ed. Bureau Géologique de Madagascar, Antananarivo, Madagascar, (1951)
- [22] - R. GIRAUDON, " Etude géologique et prospection des feuilles d'Ankarimbelo (055), d'Ifaniria (P55) et de Vohipeno (Q55) ", Ed. Bureau géologique de Madagascar, Antananarivo, Madagascar, (1952) 151 - 157
- [23] - G. HOTTIN, " Présentation et essai d'interprétation du Précambrien de Madagascar ", *Bulletin du BRGM*, Antananarivo, IV (2) (1976) 117 - 153
- [24] - J. M. LARDEAUX, J. E. MARTELAT, C. NICOLLET, E. PILI, R. RAKOTONDRAZAFY, H. CARDON, " Metamorphism and tectonics in southern Madagascar: an overview. Gondwana Research ", 2(1) (1999) 355 - 362, [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70274-4](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70274-4) (07 Mars 2020)
- [25] - J. R. MARTELAT, J. M. LARDEAUX, NICOLLET, R. J. E. MARTELAT, LARDEAUX, C. NICOLLET and RAKOTOZAFY, « Strain pattern and history of the southern Madagascar ", *Precambrian Research* 102 (2000) 1 - 20
- [26] - B. SINGH, P. MANDAL, " Moment Tensor Solutions of some Selected Local Events : Implications towards the Present-day Tectonics of the Kachchh Rift zone ", *Journal Geological Society, India*, 91 (2018) 158-164 Vol.91, <http://doi:10.1007/s12594-018-0829-6> (22 Avril 2021)



- [27] - J. L. HARDEBECK and P. M. SHEARER, "A new method for determining first-motion focal mechanisms ", *Bulletin of the Seismological Society, America*, 92(6) (2002) 2264 - 2276, <http://dx.doi.org/10.1785/0120010200> ( 2 Février 2020)
- [28] - B. DELOUIS, " Determination of Focal Mechanism and First Estimate of Rupture Directivity Using Near-Source Records and a Linear Distribution of Point Sources ", *Bulletin of the Seismological Society, America*, 104(3) (2014) 1479
- [29] - K. AKI and P. RICHARDS, " Quantitative seismology: Theory and Methods ", W. H. Freeman and co., San Francisco, CA (1980)
- [30] - R. G. PEARCE, " Fault plane solutions using the relative amplitude of P and pP ", *Geophys. J.*, 50 (2) (1977) 381 - 394, <http://doi.10.1111/j.1365-246X.1977.tb04179.x> (06 janvier 2020)
- [31] - L. OTTEMÖLLER, P. VOSS and J. HAVSKOV, "Seisan earthquake analysis software ", *Bull. Seismol.*, (2011) 37 - 232
- [32] - Aki and Richards, " Quantitative Seismology, W.H.Freeman ", New York, (1965)
- [33] - A. PIQUE, E. LAVILLE, P. CHOTIN, J. CHOROWICZ, S. RAKOTONDRAOMPIANA and C. THOUIN, " L'extension à Madagascar du Néogène à l'actuel : arguments structuraux et géophysiques Néogène and present extension in Madagascar : structural and geophysical data ", *Journal African Earth Sciences* 28 (4) (1999) 975 - 983, [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(99\)00073-1](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(99)00073-1) (16 Octobre 2020)
- [34] - F. ARTHAUD, J. C. GRILLOT and M. RAUNET, " Mise en évidence d'une néotectonique en distension N - S à Madagascar (Hauts Plateaux) ", *Compte Rendu. Acad ; Sc. Earth Science, Paris* 309 (1999) 125 - 128
- [35] - P. GONCALVES, C. NICOLLET, C. and J. M. LARDEAUX, " Finite Strain Patten in Andriamena 3unit (North-Central Madagascar): Evidence for Late Neoproterozoic-Cambrian Thrusting Continental Convergence ", *Precambrian Research* 123 (2001) 135 - 157