

**MODÈLES DE VITESSES DES ONDES S À MADAGASCAR PAR APPLICATION DE LA FONCTION
« RÉCEPTEUR »**

MOHAMED CHAHEIRE MOHAMED CHAMASSI ⁽¹⁾, ABDOULKARIM MOUSSA ⁽¹⁾,
RAKOTONDRAIBE TSIRIANDRIMANANA ⁽¹⁾, RAKOTOZAFY H.M. CLAUDINE ⁽²⁾, RAMBOLAMANANA GÉRARD ⁽¹⁾

1. Laboratoire de Sismologie et d'Infrasons, Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo
2. Laboratoire de Géophysique appliquée, Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo

Résumé

Vingt et un séismes enregistrés par le réseau de stations sismiques malgaches large bande (SBV, ABPO, VOI, FOMA) ont été traités en utilisant la méthode d'inversion de la fonction du récepteur. Cette méthode est basée sur l'application d'une technique de déconvolution itérative dans le domaine temporel. Les modèles de vitesses ainsi obtenus sont comparés avec un modèle de référence et comparés entre eux.

Les résultats ont mis en évidence pour Madagascar deux discontinuités séparant respectivement la croûte supérieure de la croûte inférieure, la croûte inférieure du manteau supérieur (discontinuité de Mohorovitch). Elles sont situées à 20 km et 40 km de profondeur ; les vitesses des ondes S dans les couches sont, en partant de la surface en profondeur : 3.5, 3.8 et 4.3 km/s. Ces valeurs sont en accord avec celles du modèle de référence.

Mots-clés : fonction récepteur, déconvolution, croûte, manteau, Madagascar.

Abstract

Twenty one seisms recorded by malagasy seismic stations set (SBV, ABPO, VOI, FOMA) were treated by using receiver function inversion method. This method is based on application of iterative deconvolution technics in time domain. The velocities models then obtained were compared with one reference model and compared between them.

The results pointed out for Madagascar two discontinuities separating respectively the superior crust and inferior crust, the inferior crust and the superior mantle (Mohorovitch discontinuity). They are located at 20 km and 40 km depths; the S waves velocities in the layers are, from surface to depth: 3.5, 3.8 and 4.3 km/s. Those values agreed with those of the reference model.

Key-words : receiver function, deconvolution, crust, mantle, Madagascar.

I – INTRODUCTION

La présente étude est consacrée à l'étude de la structure en dessous de stations sismiques à large bande : SBV située entre Vohémar et Sambava, dans la partie Nord-Est de Madagascar, ABPO située à Ambohipanombo Arivonimamo, VOI à Besoa dans la partie Sud de Madagascar et FOMA à Fort-Dauphin dans la partie Sud de Madagascar (**tableau I**). Le traitement des séismes est basé sur la méthode d'inversion des fonctions du récepteur en procédant à une déconvolution itérative dans le domaine temporel ; sur le sismogramme, on élimine les effets parasites enregistrés : effets de propagation des ondes sismiques, effets de la source sismique et effets dus au fonctionnement du sismomètre. La structure que nous déterminons ici est limitée à 60 km de profondeur.

II- Matériels et méthode

II.1- Données

En général les données ont été téléchargées à partir du site web www.iris.edu/wilber contenant les événements sismiques de chaque station. Les séismes sont de magnitude au moins égale à 5.5 sur l'échelle de Richter. De plus, le critère « faiblesse de bruit » a été retenu pour le choix de ces séismes.

Le **tableau II** contient la liste et les caractéristiques des 21 séismes étudiés. Les nombres d'événements considérés pour les stations sont respectivement de 7 pour SBV, 10 pour ABPO, 3 pour VOI et 10 pour FOMA. Dans la série de séismes étudiés, certains sont utilisés simultanément pour deux stations. Les qualités des signaux reçus dans les stations ne sont pas les mêmes, elles dépendent des caractéristiques des sources sismiques et celles de la station réceptrice. La **figure 1** localise sur le globe les sources des séismes étudiés.

Tableau I : caractéristiques des stations sismiques large bande malgaches

CODE de la station	Lieu de localisation	Date de début de fonctionnement	Latitude (°)	Longitude (°)
SBV	Région Sambava-Vohémar-Antalaha	11-11-2009	-13,4584	49,9212
ABPO	Ambohipanombo	04-04-2007	-19,0180	47,2290
VOI	Besoa II	11-11-2009	-22,0260	46,7059

FOMA	Fort-Dauphin	01-09-2008	-24,9756	46,9788
------	--------------	------------	----------	---------

Tableau II : Caractéristiques des séismes utilisés pour chaque station

Date	Latitude (°)	Longitude (°)	Profondeur (km)	Magnitude	Stations
08-12-2007	-7,5241	37,5611	10	5,7	ABPO
22-08-2008	-17,769	65,394	6	6,0	ABPO
27-08-2008	-10,6809	41,374	10	5,6	ABPO
12-05-2009	-12,5	65,108	10	5,8	ABPO+FOMA
07-07-2009	-26,7418	67,4369	10	5,8	FOMA
12-10-2009(1)	-17,2004	66,6017	10	6,0	ABPO+FOMA
12-10-2009(2)	-17,099	66,688	10	6,1	ABPO+FOMA
09-11-2009	-43,492	39,6232	9	5,5	ABPO+FOMA
03-12-2009	-2,6642	68,052	10	5,6	FOMA
06-12-2009	-10,129	33,855	10	5,6	ABPO+FOMA
08-12-2009	-9,948	33,878	8	5,7	ABPO+FOMA
18-12-2009	-17,73	65,867	4	5,9	FOMA
19-12-2009	-10,108	33,818	6	6,0	ABPO+FOMA
05-02-2010	-47,95	99,59	10	6,2	SBV
11-02-2010	-10,06	113,85	54	5,7	SBV
27-02-2010	35,91	70,05	105	5,7	SBV+VOI
05-03-2010	-4,03	100,81	22	6,5	SBV
05-03-2010	38,87	83,68	10	6,1	VOI
08-03-2010	-37,65	-73,50	37	5,5	SBV
11-03-2010	-50,60	115,54	39	5,5	SBV
14-03-2010	-4,03	100,81	22	6,5	SBV+VOI

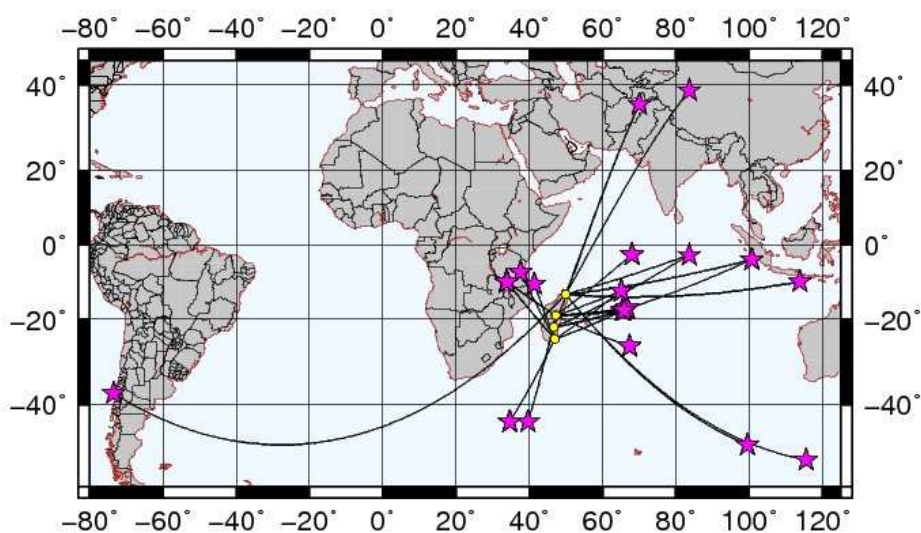


Figure 1 : localisations des séismes traités

II.2- Logiciels

Pour le traitement des données, nous avons utilisé les logiciels suivants :

- SEISAN, logiciel de base de données sismiques ;

- **Seismic Analysis Code, SAC**, logiciel de calcul des fonctions des récepteurs, de déconvolution et de filtrage des données ;

- **Generic Seismic Application Coding, GSAC**, logiciel servant à effectuer des rotations de composantes des événements ;

- Computer Program in Seismology, **CPS**, logiciel d'inversion des fonctions, pour obtenir les modèles de vitesse et de structure (croûte et manteau supérieur) ;
- Generic Mapping Tool, **GMT**, logiciel de représentation des évènements sismiques par rapport à une station.

Pour analyser les FR, nous avons considéré la tranche d'onde allant du début de la phase P jusqu'à la coda de la phase P.

II.3 La fonction du récepteur (FR)

Les FR sont des séries temporelles chronologiques calculées à partir de composantes sismiques enregistrées en une station à large bande : composantes radiale et transversale et composante verticale. Elles reflètent trois facteurs. D'abord un facteur lié à la vitesse des ondes sismiques ; ensuite un facteur lié à la source du séisme : profondeur et distance épacentrale ; enfin un facteur dépendant de l'appareil de mesure [1, 2].

L'énergie apportée par l'onde P est représentée par : $D_t(t) = I(t) * S(t) * E_t(t)$

Où $I(t)$: réponse impulsionnelle de l'instrument,

$S(t)$, réponse de la structure,

$E(t)$, réponse de la source du séisme.

Une FR part de l'analyse d'une onde P et ses multiples réverbérations sur différentes interfaces rencontrées. Ces réverbérations sont à l'origine des transformations de l'onde P en S, transformations qui servent à trouver le modèle de vitesse en dessous de la station de réception. Pour ce faire, il est nécessaire de passer du système de directions est, nord, verticale au système de directions radiale, tangentielle, verticale.

La fonction temporelle de la source et de l'effet de propagation dans le manteau supérieur sont généralement les mêmes pour les trois composantes d'ondes P téléseismiques et sont présents dans la composante verticale des sismogrammes. Ils sont estimés à partir d'une division spectrale, solution par moindres carrés du problème inverse mal posé de déconvolution, exprimé dans le domaine fréquentiel [3, 4] :

$$R_H(t) = \int \frac{D_H(\omega) D_V^*(\omega)}{D_V(\omega) D_V^*(\omega) + \varepsilon} e^{i\alpha x} d\omega \quad (1), \text{ où :}$$

- $R_H(t)$ est la FR, $D(\omega)$, le spectre des formes d'onde P téléseismiques à trois composantes,
- les indices H, V correspondent respectivement aux composantes horizontale (radiale et transversale) et verticale,
- ε est une valeur permettant de maintenir la stabilité de la division spectrale.

Les bruits de haute fréquence dans les FR, sont éliminés par utilisation d'un filtre gaussien.

Inversion des FR

Le calcul de l'inversion s'effectue en utilisant une approximation linéaire à une fonction non linéaire. En général, les solutions sont obtenues par linéarisation d'un modèle de vitesses, ici représenté sur la **figure 2** et déduit de valeurs de vitesses de propagation calculées pour Madagascar [5, 6, 7]. Nous avons ajouté à ce modèle les profondeurs des discontinuités à ± 2 km.

La qualité de l'inversion est obtenue lorsqu'on regroupe les FR à paramètres de rai p presque égaux.

L'inversion des FR pour chacune des quatre stations donnera un modèle correspondant de vitesse de l'onde S.

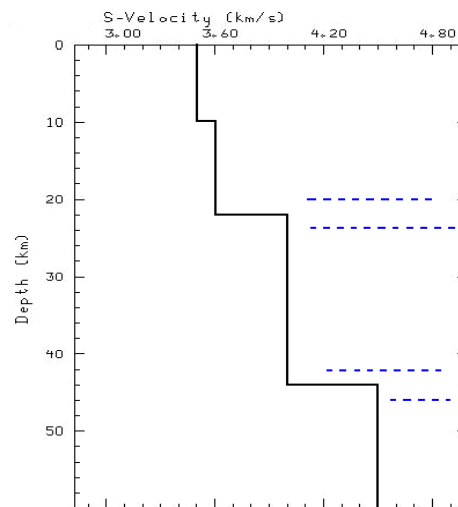


Figure 2 : Modèle de vitesses des ondes S pour la région centrale de Madagascar

Résultats

Les modèles de structures de vitesse en dessous des stations SBV, ABPO, VOI et FOMA sont représentés sur les **figures 3, 4, 5 et 6**, les valeurs moyennes des épaisseurs de couche et les vitesses moyennes correspondantes de l'onde S sont récapitulées dans le **tableau III**.

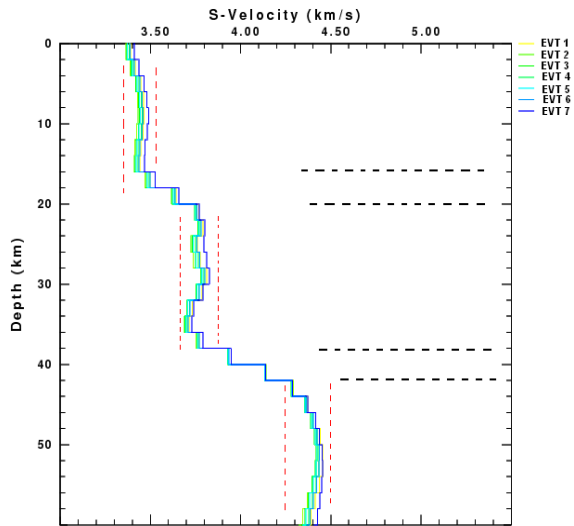


Figure 3: Modèle de vitesse de l'onde S obtenu en dessous de la station SBV

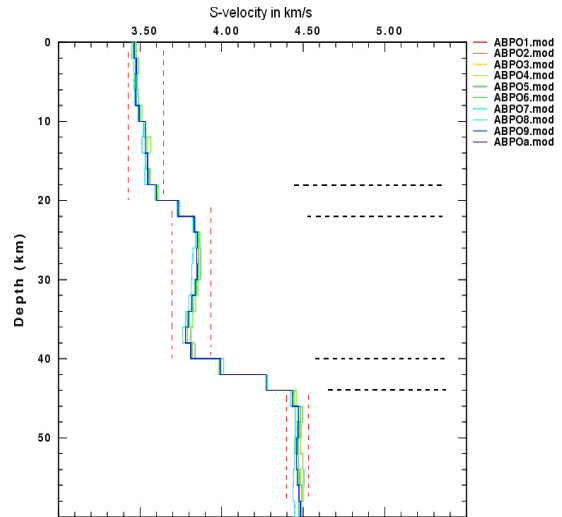


Figure 4: Modèle de vitesse de l'onde S obtenu en dessous de la station ABPO

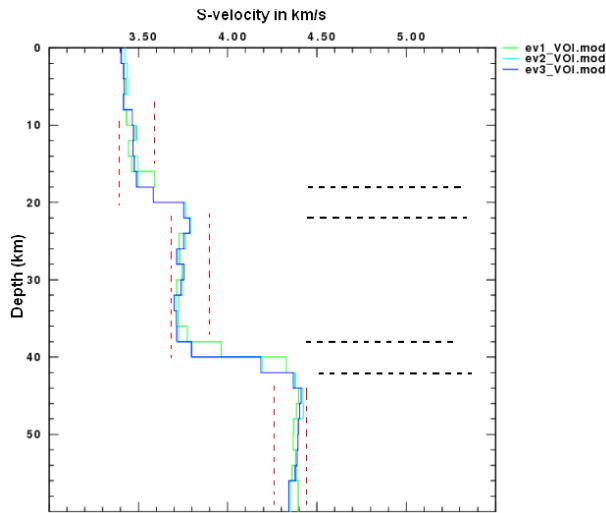


Figure 5 : Modèle de vitesse de l'onde S obtenu en dessous de la station VOI

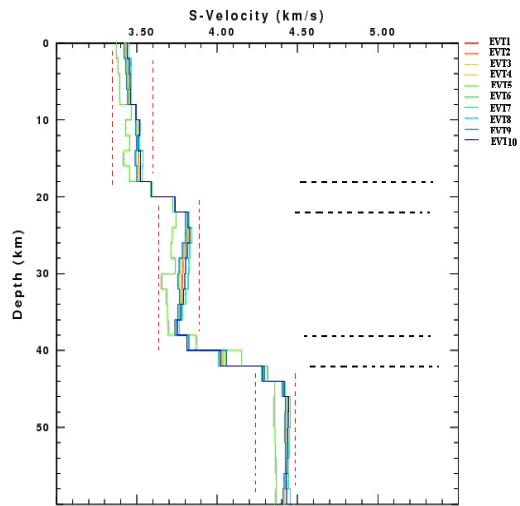


Figure 6 : Modèle de vitesse de l'onde S obtenu en dessous de la station FOMA

Tableau III : tableau récapitulatif r des épaisseurs et vitesses moyennes V_s obtenues en dessous des stations

Code de la station	Numéro de la couche	Epaisseur (Km)	Vitesse moyenne de l'onde S (Km/s)
Modèle	1	22+2	3.5-3.6
	2	22+2	3.8
	3	-	4.5
SBV	1	19+2	3.3-3.6
	2	20+2	3.7-3.9
	3	-	4.2-4.5
ABPO	1	20+2	3.4-3.7
	2	22+2	3.7-3.9
	3	-	3.9-4.1
VOI	1	20+2	3.4-3.6
	2	20+2	3.7-3.9
	3	-	4.2-4.5-
FOMA	1	20+2	3.3-3.6
	2	20+2	3.6-3.9
	3	-	4.2-4.5

DISCUSSIONS

Les séismes traités dLe modèle de référence des vitesses des ondes S, V_S , a été établi pour la région centrale de Madagascar [5], à partir d'un réseau de stations sismiques courtes périodes, installé dans la région ou autour d'Antananarivo.

Les modèles ici obtenus, figures 3, 4, 5, 6 ont été déterminés à partir de télé-séismes enregistrés par un réseau de stations installées globalement sur la longueur de Madagascar, de direction NNE-SSW. Les différences entre les caractéristiques de ces réseaux expliquent celles notées entre le modèle de référence et les quatre modèles.

Pour Madagascar, la similitude des courbes reflètent les avantages des stations large bande et de l'utilisation de la fonction « récepteur ». Les points communs aux quatre modèles sont les suivants :

- Vers 10 km de profondeur, V_S tend à croître,
- De 22 à 36 km de profondeur, V_S tend à diminuer,
- Les discontinuités sont localisées aux mêmes profondeurs à 0.1 km près : 20 km pour la croûte supérieure - croûte inférieure et 40 km pour la croûte inférieure – manteau supérieur.

L'homogénéité des modèles relatifs aux quatre stations traduit la performance de l'utilisation des fonctions « récepteur » qui tient compte des caractéristiques des sources sismiques, du mode de propagation des ondes ainsi que de l'appareil de

mesure. Cette méthode nécessite toutefois des signaux sismiques qui se distinguent nettement des bruits sur les sismogrammes.

REFERENCES

1. Langston, 1977, *The effect of planar dipping structure on source and receiver responses for constant ray parameter*, Bull. Seismol., 67, 1029-1050
2. Ammon C. J., 1991, *The isolation of receiver effects from teleseismic P waveforms*, Bull. seism. Soc. Am., 1991, 81, 2504-2510.
3. Gurrola H., Baker G.E., Minster J.B., 1995, *Simultaneous time-domain deconvolution with application to the computation of receiver functions*, Geophys. J. Int., 1995, 120, 537-534.
4. Kikuchi, M., and H. Kanamori, 1982, *Inversion of complex body waves*, Bull. Seism. Soc. Am., 1982, 72, 491-506.
5. Rambolamana G. Suhadolc P., Panza G.F., 1997, *Simultaneous inversion of hypocentral parameters and structure velocity of the central region of Madagascar as a premise for the mitigation of seismic hazard in Antananarivo*, PAGEOPH. 149, 707-730
6. Rakotondrainibe, 1977, *Contribution à l'étude de la sismicité de Madagascar*, Thèse d'Etat, Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo
7. Rambolamanana G., 1999, *Modélisation de la partie centrale de Madagascar par la sismologie*, Thèse d'Etat, Faculté de Sciences de l'Université de Madagascar, Thèse du troisième cycle, Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo.