

ETUDE DE SOUS-SOL D'UN SITE HYDROELECTRIQUE PAR SISMIQUE REFRACTION ET MASW

RAKOTONIRINA A. Dieu-Donné, RAKOTO Heritiana A.

RESUME

Dans le cadre d'un projet d'installation de micro-centrale hydroélectrique, une étude préliminaire faisant intervenir la géophysique a été réalisée. L'objectif de la prospection géophysique est d'établir l'imagerie de la structure mécanique du sous-sol.

Des levés sismiques ont été mis en œuvre. Le sismographe DAQLink II a été déployé, le traitement des sismogrammes a été fait avec le logiciel Seislmager. L'interprétation combinée des résultats obtenus par la sismique réfraction et ceux de l'analyse en multicanaux des ondes de surface (MASW) nous a donné les Vp et Vs des couches du sous-sol, et nous a permis de connaître leurs propriétés mécaniques.

Les résultats montrent l'existence de trois formations bien distinctes, une formation meuble formée par des latérites observables en surface qui sont moins dures, des blocs rocheux ou des roches en phase d'altération qui sont plus ou moins dure et des roches saines plus dures constituant le substratum rocheux de la zone.

Les propriétés mécaniques de ces formations changent et augmentent avec la profondeur. Ces propriétés sont utiles au dimensionnement des futurs ouvrages à mettre en place.

Mots clés : Prospection sismique, Sismique réfraction, MASW, hydroélectrique

ABSTRACT

Within an installation of hydroelectric central, a preliminary study involving geophysical survey was carried out. The main goal of the geophysical survey is the imagery of the subsurface mechanical structure.

The seismic surveys were implemented. The seismograph DAQLink II was deployed to acquire data. Then, the data were processed with Seislmager software. The interpretation of the results obtained by both application of seismic refraction and MASW gave us the Vp and Vs 2D-sections of the subsurface, and allowed us to know their mechanical properties.

The results show three distinct formations: a layer formed by observable laterites less resistive on the surface, some boulders or weathered rocks more or less resistive and hard rocks which constitute the bedrock of the area.

The mechanical properties of these formations change and increase in depth. These properties are useful for the sizing of the different infrastructures to build.

Key words: Seismic survey, Seismic refraction, MASW, hydroelectric

Introduction

L'implantation d'un ouvrage tels qu'un pont, un barrage, une usine, un immeuble, etc... nécessite la reconnaissance au préalable de la structure du sous-sol. Plus l'ouvrage est d'envergure, plus la reconnaissance doit se développer en profondeur [1]. L'étude préliminaire de la zone d'installation, faisant intervenir les techniques multidisciplinaires, est nécessaire pour éviter les problèmes, et d'obtenir une construction stable et durable [10].

Ainsi, dans le cadre d'un projet d'installation de micro-centrale hydroélectrique, la prospection géophysique a été entreprise dans le but de reconnaître la structure mécanique du sous-sol aux environs de la rivière Ramena, sur les deux sites, Amboahangibe et Nosimpanihy. La prospection sismique a été réalisée.

La prospection sismique étudie la propagation des ondes sismiques dans le sous-sol [2]. Pour la sismique réfraction, cette propagation est analogue à celle des rayons lumineux et obéit à des lois similaires. La technique MASW étudie la vitesse de phase à partir des données multicanaux des ondes de surfaces ou : « **ondes de Rayleigh** », [7]. La vitesse de propagation de l'onde varie suivant les caractéristiques du milieu traversé [9].

L'objectif principal de cette étude est de déterminer le degré d'altération des couches en succession : l'épaisseur de la couverture et la morphologie du toit de la roche saine d'une part et la sensibilité des couches aux contraintes d'autre part.

Contexte général de la zone d'étude

La zone d'étude est située au Nord-Ouest de la grande Ile, dans la Région de DIANA. Elle appartient administrativement au District d'Ambanja et à la Commune Rurale d'Antsahabe (cf. Figure 1). Deux sites ont été prospectés lors de cette campagne de reconnaissance, le premier se trouve à Amboahangibe où l'unité de transformation et de production de l'électricité sera implantée et le deuxième est localisé à Nosimpanihy où le barrage sera construit. Les deux sites présentent une dénivellation altimétrique de 80m.

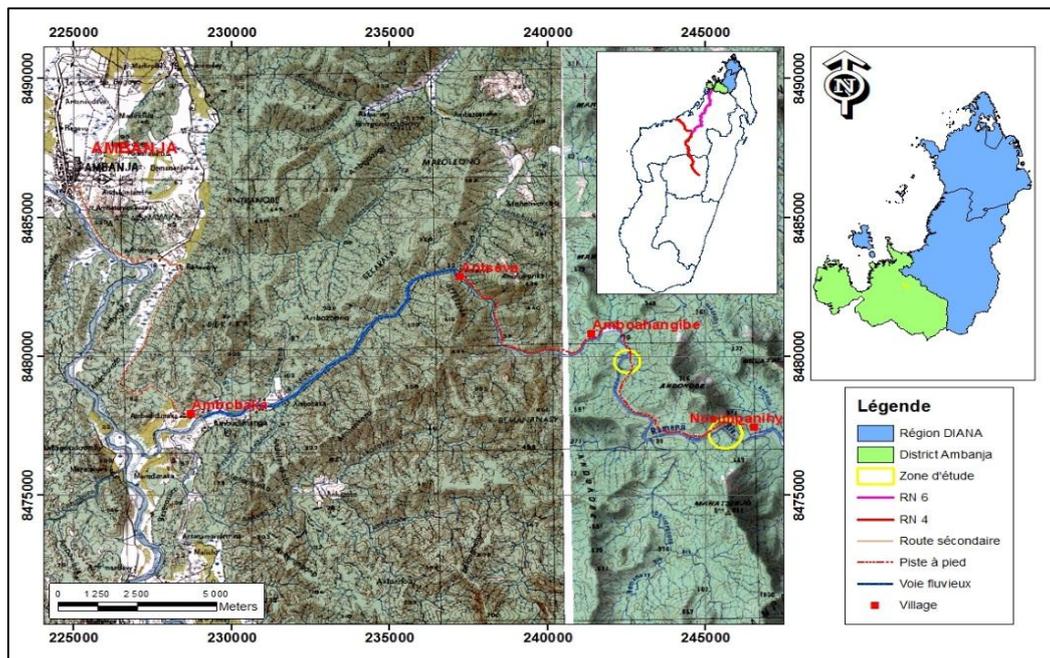
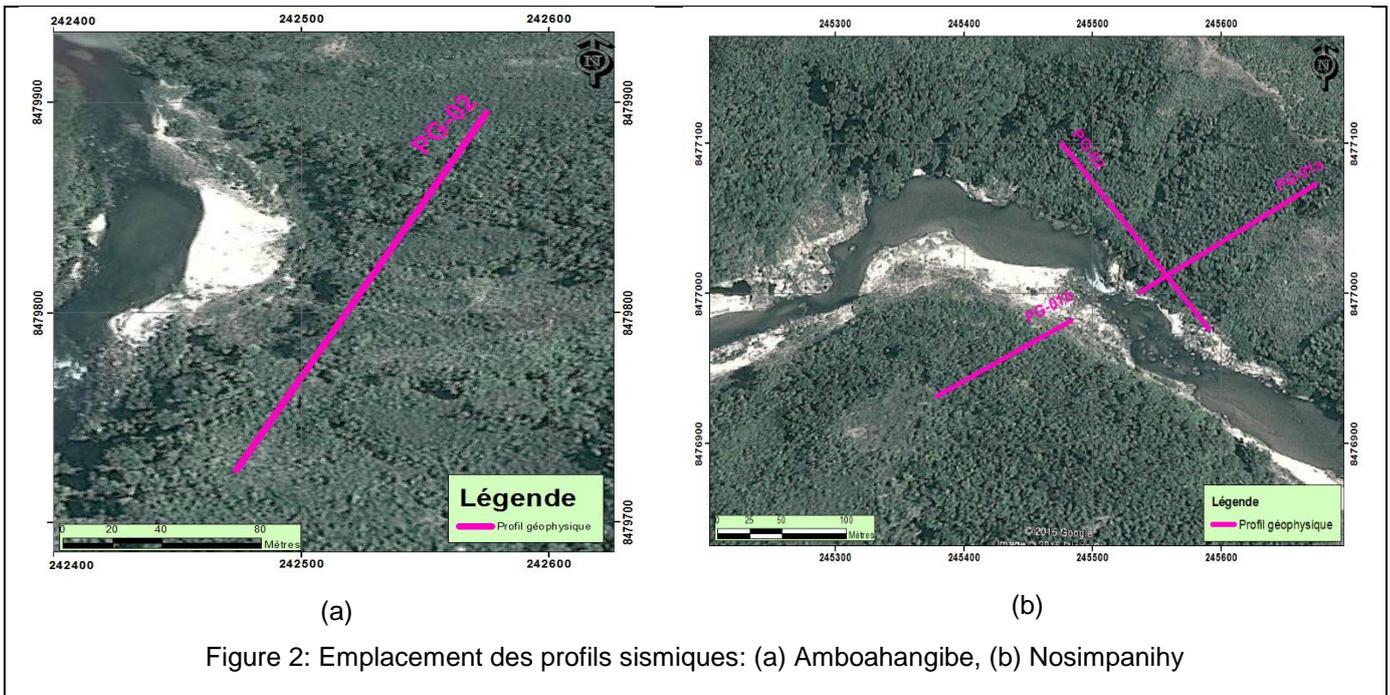


Figure1: Carte de localisation de la zone d'étude (source BD500, FTM)

Quatre profils ont été implantés sur les deux sites à étudier, un profil dans la zone de construction de la centrale, trois profils sur le lieu d'implantation du barrage, à Nosimpanihy.



Les deux zones prospectées sont décrites géologiquement par la feuille T34 ANTSABA. En se référant à la carte de la figure 3, le site Amboahangibe est géologiquement formé par de migmatite rubanée à amphibole et biotite, de gneiss à amphibole, de granite migmatitique et migmatite granitoïde type Tsaratanana. Pour le site Nosimpanihy, la structure géologique est dominée par du granite migmatitique et migmatite granitoïde type Tsaratanana, il est aussi formé par de gneiss et de migmatite dioritique ou syénitique à facies malgachitique.

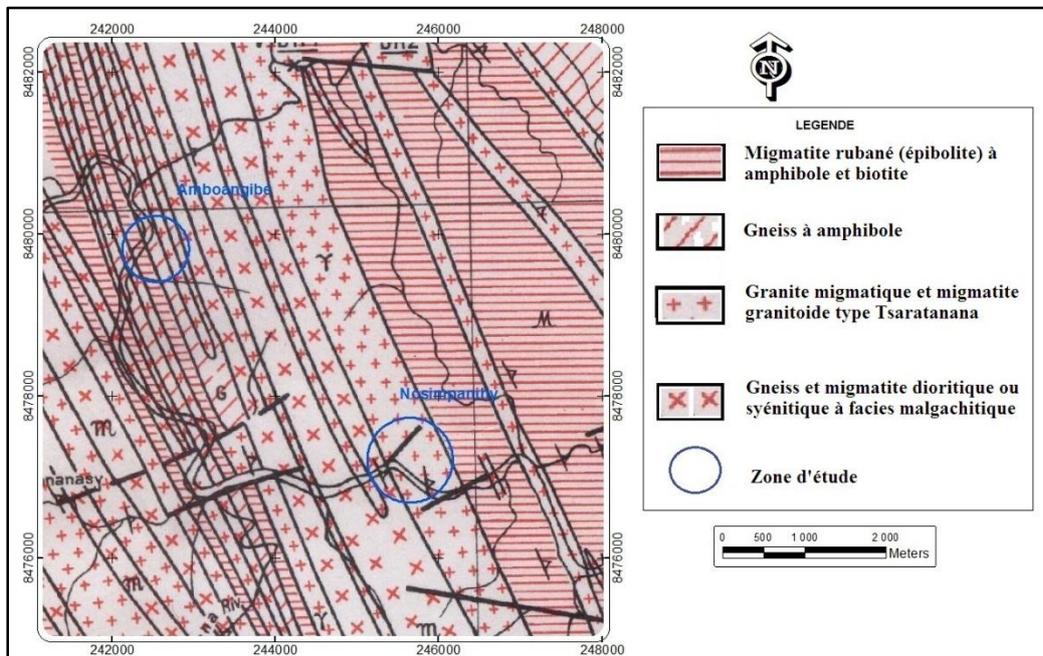


Figure 3: Géologie de la zone d'étude (Source : service Géologique de Madagascar-Antananarivo, extrait de la carte géologique T34 ANTSABA)

Matériels et méthode

Lors de la campagne, de nombreux appareils ont été utilisés : un sismomètre DAQLink II, un ordinateur portable, 24 géophones, un marteau de 20kg avec une plaque métallique, deux flûtes, un décimètre, des GPS, un rouleau de fil électrique et une batterie de 12V. L'acquisition des données consiste à enregistrer grâce à des géophones les signaux sismiques émis par une source artificielle (marteau, explosif...) et transmis par le sol [2]. Nous avons choisi la méthode sismique compte tenu du contraste assez élevé de vitesses de propagation des ondes entre deux couches superposées [5].

La méthode sismique réfraction est basée sur le principe suivant : lorsqu'une onde sismique (onde P et/ou S) arrive à une interface où il y a contraste de vitesses, alors la direction de cette onde va changer dans le nouveau milieu [8]. Ce changement de direction est régi par le contraste de vitesses à l'interface selon la loi de Snell-Descartes :

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{V_1}{V_2}, \text{ avec } i_1 < 90^\circ \text{ pour la réfraction. } \sin i_c = \frac{V_1}{V_2} \text{ pour la réfraction totale.}$$

Où V_1 est la vitesse des ondes du premier milieu,

V_2 est la vitesse des ondes du deuxième milieu,

i_1 est l'angle d'incidence, si i_2 était l'angle réfracté.

Pour la sismique réfraction, l'onde P est généralement considérée, spécialement, l'onde P directe et l'onde P réfractée [13]. Si x est la distance séparant la source et le géophone, alors la durée du trajet de l'onde directe pour atteindre le géophone est donnée par la relation $t = x/V_1$ [3]. Pour les ondes réfractées, ce temps est donné par :

$$t = \frac{x}{V_2} + \frac{2h \cos(i_c)}{V_1}$$

Où h est l'épaisseur du premier terrain (cf. figure 4).

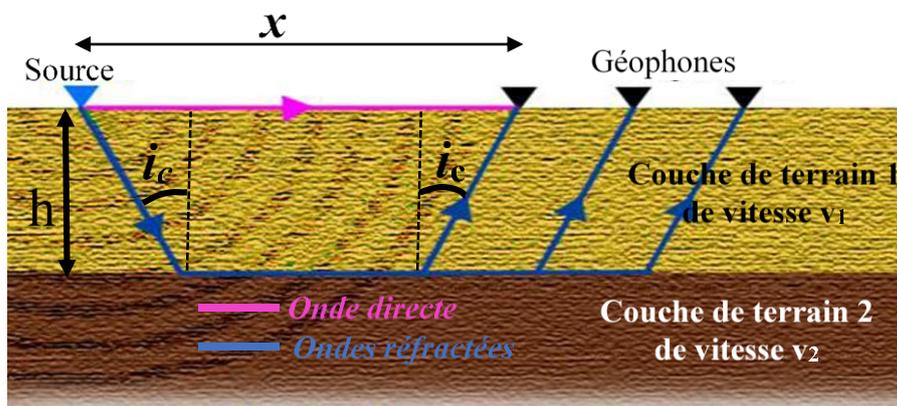


Figure 4 : Propagation des ondes dans le sous-sol.

La sismique réfraction nécessite uniquement la mesure des temps d'arrivées des ondes qui arrivent en premier (ondes directes, ondes réfractées) pour fournir un modèle géologique [4]. L'imagerie par réfraction est donc basée sur l'analyse des dromochroniques des ondes directes et réfractées. En général, les traitements des données pour l'obtention d'une coupe de vitesses en sismique réfraction se résument en deux étapes : pointage des premières arrivées et inversion de ces

pointages en coupe de vitesses. Les dromochroniques sont les résultats de la première étape, la coupe de vitesses est obtenue après inversion des dromochroniques [11].

Si l'étude des ondes de volume est la base de la technique de sismique réfraction, la méthode MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) ou Méthode active d'analyse en multicanaux des ondes de surface se fonde sur l'étude des ondes de type Rayleigh [12]. Cette technique consiste à étudier la propagation des ondes de Rayleigh dans le but d'en déduire les variations de vitesse des ondes de cisaillement (V_s) sous le profil d'acquisition [9]. La vitesse des ondes de Rayleigh et la vitesse des ondes de cisaillement sont reliés par :

$$V_R = \frac{1,12\sigma+0,87}{1+\sigma} V_S \text{ (Viktorov, 1965)}$$

Où V_R est la vitesse des ondes de Rayleigh

V_S : Vitesse des ondes S

σ : Coefficient de Poisson

Les logiciels Vibroscope et SeisImager permettent d'enregistrer les signaux de vibration et de les traiter en utilisant la technique de corrélation croisée des points milieux communs (CMGCC : Common Mid-Points Cross Correlation) pour générer la courbe de dispersion enfin d'obtenir la coupe 2D de la vitesse des ondes de cisaillement [6]. La profondeur d'investigation augmente avec la puissance de la source utilisée et la distance inter-géophones (longueur de ligne) [11].

En connaissant V_p et V_s , on peut calculer les paramètres physico-mécaniques du sous-sol (*Mari J-L et al, 1998*). L'incompressibilité volumique K nous intéresse particulièrement et nous traitons dans cet ouvrage.

Résultats

Les coupes de vitesse ont mis en évidence la succession des couches suivantes :

- la première, à vitesses relativement faibles $V_p < 0,9$ km/s et $V_s < 0,3$ km/s, constituée de latérites, forme la couche d'affleurement visible en surface.
- la seconde, de vitesses V_p et V_s telles que $0,9$ km/s $< V_p < 2,7$ km/s et $0,3$ km/s $< V_s < 0,7$ km/s, est une formation altérée, fissurée ou fracturée surmontant la roche saine.
- le substratum, une formation saine dure, transmet l'onde de vibration mécanique beaucoup plus rapide. V_p y est supérieure à 2.5Km/s et V_s est supérieure à 0.7Km/s.

Le tableau ci-dessous donne la synthèse des structures rencontrées et les coupes dans les figures illustrent la variation latérale de module d'incompressibilité sous chaque profil.

Tableau I : Résultats des mesures sismiques

Nom et direction des profils	Nature de formation	Epaisseur de deux première formations et profondeur du toit de la formation saine (m)		
		DEBUT	CENTRE	FIN
PG-01a (SO-NE)	Latérite	2	-	2
	Formation altérée, fissurée ou fracturée	25	12	12
	Formation saine dure	27	12	14
PG-01b (SO-NE)	Latérite	4	1	-
	Formation altérée, fissurée ou fracturée	15	15	12
	Formation saine dure	19	16	12
PG-02 (NO-SE)	Latérite	2	-	2
	Formation altérée, fissurée ou fracturée	8	8	20
	Formation saine dure	10	8	22
PG-03 (SSO-NNE)	Latérite	3	-	3
	Formation altérée, fissurée ou fracturée	10	25	15
	Formation saine dure	13	25	18

Profil PG-01a

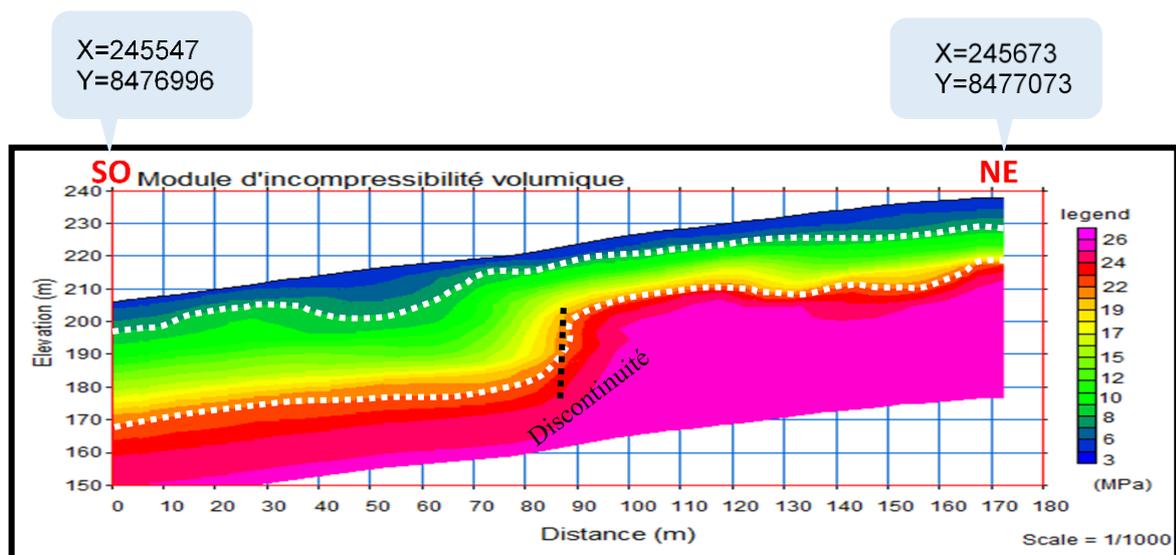


Figure 5: Coupe 2D du module d'incompressibilité volumique K- Profil PG-01a

Où X et Y sont les coordonnées UTM (Universal Transverse Mercator) du premier et dernier géophone (début et fin du profil).

Profil PG-01b

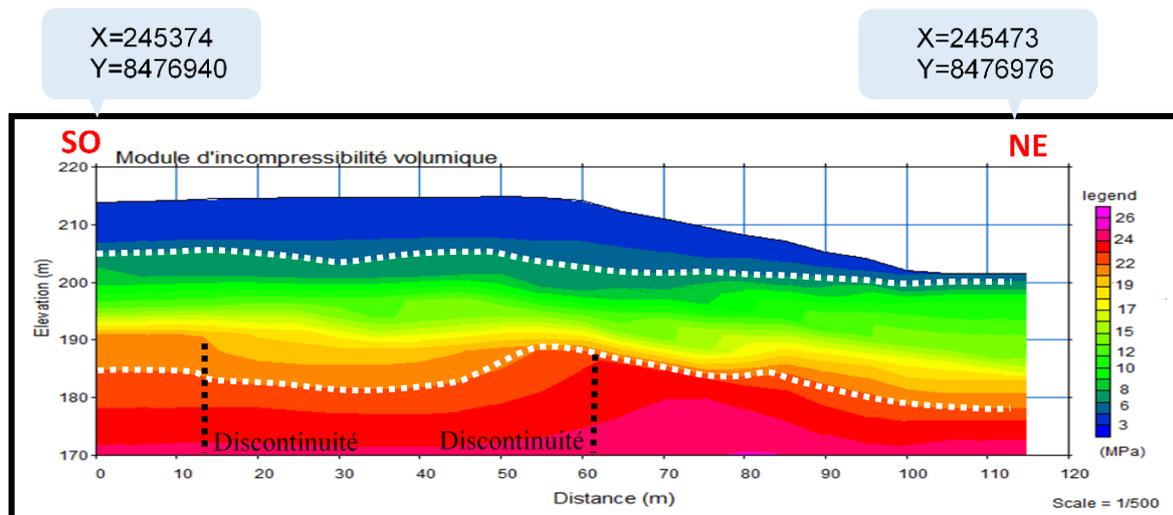


Figure 6: Coupe 2D du module d'incompressibilité volumique K- Profil PG-01b

Profil PG-02

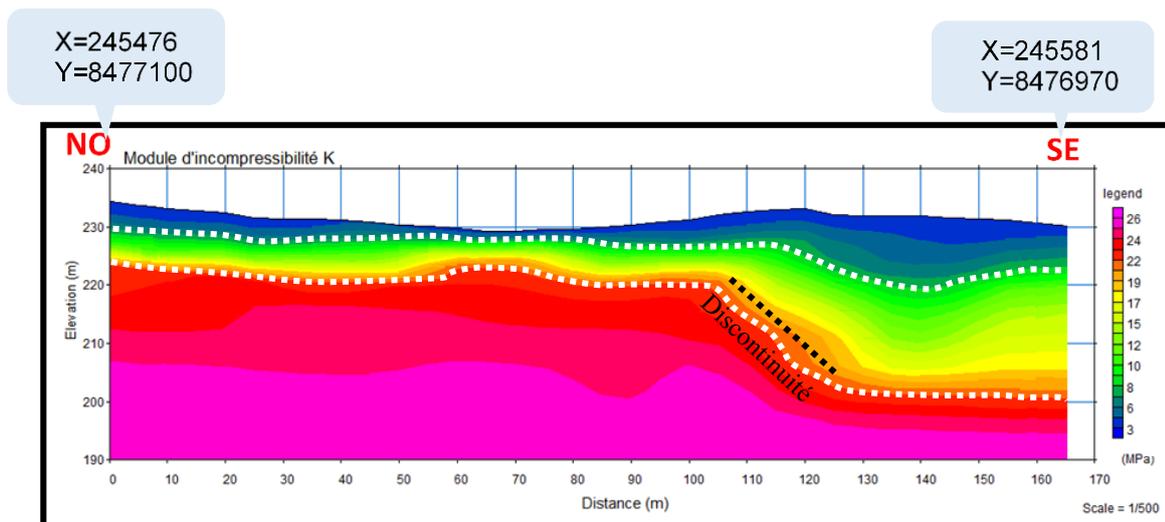


Figure 7 : Coupe 2D du module d'incompressibilité volumique K- Profil PG-02

Profil PG-03

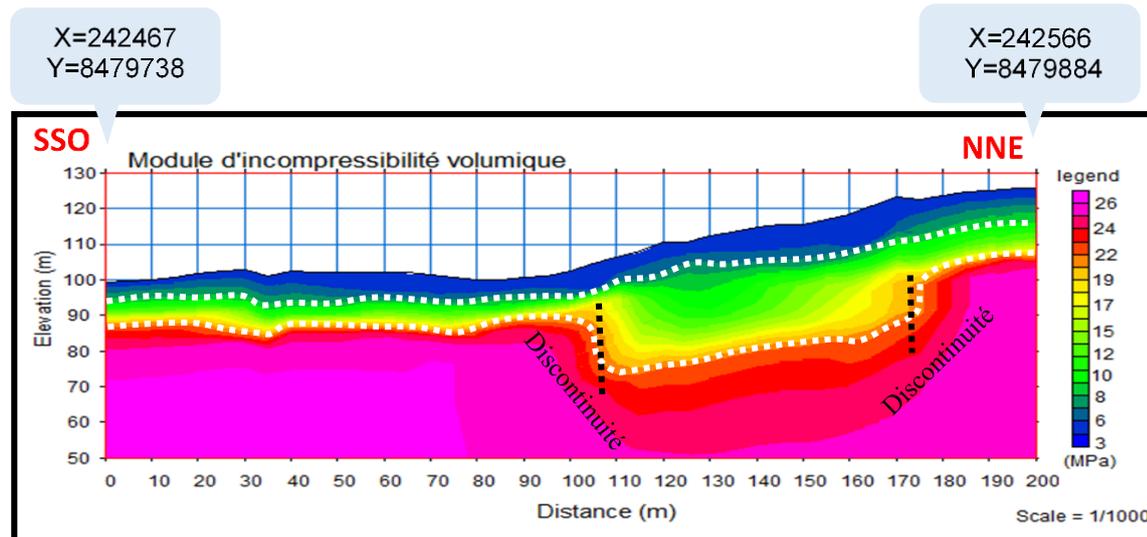


Figure 8 : Coupe 2D du module d'incompressibilité volumique K- Profil PG-03

Discussions

La méthode sismique réfraction suppose par ailleurs que la vitesse des ondes P croît avec la profondeur (Reynolds J.M, 1997). En descendant en profondeur à partir de la surface, la vitesse V_s s'accroît mais de façon lente par rapport à la V_p . La méthode MASW joue un rôle majeur lors d'une étude de structure du sous-sol parce qu'elle permet d'accéder directement à la V_s .

Les coupes du module d'incompressibilité (cf. figure 5 à figure 8) montrent que le module d'élasticité volumique K augmente progressivement avec la profondeur et on distingue les trois formations: moins dures, plus ou moins dure et plus dures, mises en évidence par le traitement de V_p .

Les profils ont traversés des séries de migmatitique et de gneiss, migmatite rubanée et gneiss à amphibole à Amboahangibe, et granite migmatitique, migmatite granitoïdes et migmatite dioritique à Nosimpanihy, cf. Figure 3. Le passage d'une formation à une autre se manifeste comme la discontinuité latérale, par la variation de l'épaisseur des couvertures qui sont toutes formées essentiellement de latérite, PG-01a, PG-01b, PG-02 et PG-03. Dans un schéma de profil, cette variation se traduit comme l'épaississement de la première formation sur une partie de la coupe.

Les variations montrées par la sismique réfraction et l'analyse en multicanaux des ondes de surface sur les coupes d'incompressibilité volumique indiquent que les propriétés mécaniques des formations sont différentes, même si elles appartiennent à une seule famille de migmatite. On rencontre des discontinuités aux points d'abscisse suivants :

- X = 85m sur le profil PG-01a, cf. figure 5
- X = 12m et X = 60m sur le profil PG-01b, cf. figure 6
- X = 110m à X=130m sur le profil PG-02, cf. figure 7
- X = 100m et X = 175m sur le profil PG-03, cf. figure 8

Les coupes de module d'incompressibilité issues de la sismique réfraction et de l'analyse en multicanaux des ondes de surface guident les géotechniciens au dimensionnement des futurs ouvrages à mettre en place. Elles les aident à la prise de décision à l'installation des différentes unités qui constituent la centrale.

Conclusion

L'objectif final du déploiement du sismique est l'imagerie de la structure mécanique du sous-sol, le long du tracé de la galerie d'eau et au lieu d'implantation de la centrale hydro-électrique. Il ne serait pas pourtant atteint que par l'utilisation combinée de la sismique des premières arrivées et l'analyse en multicanaux des ondes de surface, MASW.

Alors on a analysé dans le cadre de cette recherche les coupes d'incompressibilité sur deux zones, à Amboahangibe et à Nosimpanihy. Les coupes ont montré trois formations en succession, qui sont les latérites, les formations fissurées et enfin les formations saines. Les propriétés mécaniques de ces formations changent et augmentent avec la profondeur. On constate également la présence de discontinuités latérales dûes aux changements de structure.

Ces coupes d'incompressibilité sont utiles à la mise en place de la centrale hydro-électrique.

Cette étude a démontré que la méthode choisie est adéquate pour l'application en géotechnique. Elle a permis, sans le forage destructif, de connaître la propriété mécanique du sous-sol, en particulier celle du module d'incompressibilité.

Références

- [1] **BOUROKBA MRABENT S.A.**, 2016. Calcul pratique des fondations, Faculté d'Architecture et de Génie Civil, Département de Génie Civil.
- [2] **CAROLINE PAULUS**, 2008. Filtrage de données sismiques multi composantes et estimation de la polarisation. Sciences de la Terre. Institut National Polytechnique de Grenoble – INPG.
- [3] **CLARA LEVY, ANNE S.**, 2011. Méthodes sismiques L3Pro - LPG2. UJF - OSUG – LGIT, Notes de cours.
- [4] **HERMANN ZEYEN**, 2013. La Sismique: méthodes, Interprétation et Applications. Note de cours, Université Paris-Sud.
- [5] **MARI J.L., ARENS D., CHAPPELLIER D., GAUDIANI P.**, 1998. Géophysique de gisement et de Génie civil, Paris : Edition TECHNIP.
- [6] **KOICHI HAYACHI, SUZUKI H.**, 2004. CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data, Exploration Geophysics.
- [7] **BODETL.**, 2005. Mécanique, thermique et génie civil, Thèse de DOCTORAT, Diplôme délivré conjointement par l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes.
- [8] **CHOUTEAUM., GIROUX B.**, 2005. Géophysique appliquée II GLQ 3202, Méthodes sismiques. Notes de cours, Ecole Polytechnique.

- [9] **PARK C.B., MILLER R.D., XIA J.**, 1999. Multichannel analysis of surface waves: Geophysics, 64: 800 808.
- [10] **BALANDIER P.**, 2010. Traitement des sols et fondations. DDE de la Martinique – SECQUIP. 2^{ème} édition.
- [11] **SEISIMAGER/2DTM MANUAL *Version 3.3*** Pickwin v. 4.0.1.5 Plotrefa v. 2.9.1.6, October2009.
- [12] **SEROT T.**, Fiche technique de la sismique MASW.
- [13] **SEROT T.**, Fiche technique de la sismique réfraction.