



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
FACULTE DES SCIENCES



DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de

MAITRISE DES SCIENCES ET TECHNIQUES
EN GEOPHYSIQUE APPLIQUEE

Option : Mines et Environnement

Intitulé

ESTIMATION VOLUMETRIQUE DE ROCHES MASSIVES
DISPONIBLES SUR LES CARRIERES D'ANALABE ET DE
SAHAVAKAKE

Présenté par

ANDRINIFONY Manandraibe

Devant la commission d'examen composé de :

Président :	Monsieur RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien	Professeur
Rapporteur :	Monsieur RAKOTO Heritiana	Maître de conférences
Examineurs:	Monsieur RAMBOLAMANANA Gérard	Professeur
	Monsieur RAZAFINDRAKOTO Boni	Docteur

Le 22 janvier 2008





UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
FACULTE DES SCIENCES



DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de

MAITRISE DES SCIENCES ET TECHNIQUES
EN GEOPHYSIQUE APPLIQUEE

Option : Mines et Environnement

Intitulé

ESTIMATION VOLUMETRIQUE DE ROCHES MASSIVES
DISPONIBLES SUR LES CARRIERES D'ANALABE ET DE
SAHAVAKAKE

Présenté par



Devant la commission d'examen composé de :

Président :	Monsieur RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavier	Professeur
Rapporteur :	Monsieur RAKOTO Heritiana	Maître de conférences
Examineurs:	Monsieur RAMBOLAMANANA Gérard	Professeur
	Monsieur RAZAFINDRAKOTO Boni	Docteur



Le janvier 2008



REMERCIEMENTS

En premier lieu, je rends grâce au Seigneur Tout Puissant qui m'a toujours soutenu durant toute ma vie et pour la réalisation de ce mémoire.

Je voudrais exprimer mon entière reconnaissance à toutes les personnes qui ont collaboré pour la réalisation de ce travail. Particulièrement, j'adresse mes remerciements et ma vive reconnaissance :

A Monsieur RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien, Directeur de l'Institut Observatoire Géophysique d'Antananarivo (IOGA), et Responsable Pédagogique de la formation Maîtrise des Sciences et Techniques en Géophysique Appliquée (MSTGA), d'avoir bien voulu accepter de présider la présente mémoire.

A Monsieur RAKOTO Heritiana, Chercheur Enseignant au Laboratoire de Géophysique Appliquée de l'Institut Observatoire Géophysique Appliquée de l'IOGA. Je tiens à lui adresser ma profonde gratitude de ne pas avoir ménagé son temps pour m'encadrer tout au long de ce travail.

A Monsieur RAMBOLAMANANA Gérard, Professeur à la Faculté des Sciences, qui malgré ses lourdes responsabilités, a accepté d'être membre de jury.

A Monsieur RAZAFINDRAKOTO Boni, Docteur, Chercheur Enseignant au Laboratoire de Géophysique Appliquée de l'IOGA, qui a bien voulu faire partie du jury aujourd'hui.

A toute l'équipe de la SGDM (Société Géosciences pour le Développement de Madagascar).

Je voudrais également remercier toutes les équipes de l'IOGA/MSTGA de m'avoir conseillé au cours de mes études, en particulier, mes enseignants, les chercheurs et mes collègues étudiants.

Je n'oublierai pas de remercier ma famille qui m'a soutenu moralement et financièrement tout au long de mes études.

SOMMAIRE

REMERCIEMENT

LISTE DES ACRONYMES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION

I- RAPPEL THEORIQUE

I.1 Géophysique appliquée

I.1.1 Généralités

I.1.2 La méthode géophysique de prospection électrique

I.1.3. Technique de prospection électrique du sous sol

I.2. Méthode sismique

I.2.1. Description de mode de calcul et interprétation

I.2.2. Principe de la méthode

I.3. Principe topographique

Présentation du logiciel Covadis

II- PRESENTATION DES ZONES D'ETUDE

II.1. Contexte général

Présentation des zones

II.2. Géologie régionale

II.3. Présentation du gisement

II.4. Implantation des travaux géophysiques

III- EVALUATION DE ROCHES MASSIVES EXPLOITABLES SUR LES DEUX CARRIERES, ANALABE ET SAHAVAKAKE.

III.1. Interprétation des profils géophysiques

III.2. Cubage estimatif

CONCLUSION

ANNEXE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

TABLE DE MATIERES

LISTE DES ACRONYMES

2D : deux dimensions

3D : trois dimensions

COLAS: Cold Asphalt

Cov 2D: Covadis 2D

Cov 3 D: Covadis 3D

Covcal: Covadis calculs

CovEc: Covadis Echanges

CovEd: Covadis Edition

ITE: Image par Tomographie Electrique

K : facteur géométrique dépendant de la disposition des électrodes

MSTGA: Maîtrise en Sciences et Techniques en Géophysique Appliquée

PK: point kilométrique

RN2: route national numéro 2

SGDM: Société Géosciences pour le Développement de Madagascar

TE: tomographie électrique

Symboles des unités de mesure

Symbole	Unité
I : intensité de courant électrique	A (Ampère)
R : résistance	Ω (Ohm)
ΔV :différence de potentielle	V (volt)
V : volume	m^3 (mètre cube)
ρ : résistivité électrique	Ωm (Ohm mètre)
ρ_a : résistivité apparente	Ωm (Ohm mètre)

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: VALEUR TYPE DE RESISTIVITE APPARENTE (GIROUX B. ,1999)	3
TABLEAU 2: RIPABILITE ET VITESSE SISMIQUE DE QUELQUES TYPES DE ROCHES (EXTRAIT DU LIVRE GEOPHYSIQUE DE GISEMENT ET DE GENIE CIVIL, MARI J. L. , ARENS G., CHAPPELLIER D. , GAUDIANI P., 1998).....	13

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1: CONFIGURATION DES ELECTRODES EN PROSPECTION ELECTRIQUE	2
FIGURE 2: LES EQUIPEMENTS SYSCAL R2 COMPLETS	5
FIGURE 3: REPRESENTATION DU PANNEAU ELECTRIQUE DU TYPE WENNER.....	6
FIGURE 4: TRAJETS DE L'EBRANLEMENT SISMIQUE EXPRIMES SOUS FORME DE RAYONS .	7
FIGURE 5: HODOCHRONE IDEALE SUR TERRAIN	8
FIGURE 6: HODOCHRONE DU TIR DIRECT ET DU TIR INVERSE.....	8
FIGURE 7: MODELE TABULAIRE A 3 TERRAINS.....	9
FIGURE 8: HODOCHRONE POUR UN MODELE TABULAIRE A 3 TERRAINS	9
FIGURE 9: MODELE INCLINE, TIR EN AMONT	10
FIGURE 10: MODELE INCLINE, TIR EN AVAL	10
FIGURE 11: HODOCHRONE POUR UN MODELE INCLINE	11
FIGURE 12: PRINCIPE DE "DELAY TIME"	12
FIGURE 13: SCHEMA DE L'APPAREIL SISMIQUE	14
FIGURE 14: EXEMPLE DE POINTAGE D'UN SIGNAL (POINT DE TIR ENTRE 14E ET 15E GEOPHONE)	15
FIGURE 15: EXEMPLE DES HODOCHRONES D'UN PROFIL	16
FIGURE 16: CARTE DE LOCALISATION DES GISEMENTS D'ANALABE ET DE SAHAVAKAKE (EXTRAIT DE LA CARTE 1/100 000 DU FTM, 1990).....	20
FIGURE 17: GEOLOGIE DES DEUX ZONES D'ETUDES (EXTRAIT DE LA CARTE 1/200 000 DU SERVICE GEOGRAPHIQUE DE MADAGASCAR, 1962)	21
FIGURE 18: PHOTO DE LA CARRIERE OUVERTE.....	22
FIGURE 19: PHOTO DU RESTE DE LA CARRIERE OUVERTE	23
FIGURE 20: BLOCS ROCHEUX	23
FIGURE 21: PHOTO DU FRONT ET DE LA TERRASSE.....	24
FIGURE 22: COUVERTURE VEGETALE	25
FIGURE 23: BLOCS ROCHEUX	25
FIGURE 24: IMPLANTATION DES PROFILS GEOPHYSIQUES A ANALABE	26
FIGURE 25: IMPLANTATION DES PROFILS GEOPHYSIQUES A SAHAVAKAKE.....	27

<i>FIGURE 26: COUPE GEOELECTRIQUE DU PROFIL PE1</i>	28
<i>FIGURE 27: COUPE SISMIQUE DU PROFIL PS1</i>	29
<i>FIGURE 28: COUPE GEOELECTRIQUE DU PROFIL PE2</i>	30
<i>FIGURE 29: COUPE SISMIQUE DU PROFIL PS2</i>	30
<i>FIGURE 30: COUPE GEOELECTRIQUE DU PROFIL PE3</i>	31
<i>FIGURE 31: COUPE SISMIQUE DU PROFIL PS3</i>	32
<i>FIGURE 32: COUPE GEOELECTRIQUE PE4</i>	33
<i>FIGURE 33: COUPE SISMIQUE PS4</i>	34
<i>FIGURE 34: COUPE SISMIQUE DU PROFIL PS5</i>	34
<i>FIGURE 35: COUPE GEOELECTRIQUE PE5</i>	35
<i>FIGURE 36: COUPE SISMIQUE DU PROFIL L1A</i>	36
<i>FIGURE 37: COUPE SISMIQUE DU PROFIL L1B</i>	37
<i>FIGURE 38: COUPE SISMIQUE DU PROFIL L1C</i>	38
<i>FIGURE 39: COUPE SISMIQUE DU PROFIL L1D</i>	38
<i>FIGURE 40: COUPE SISMIQUE DU PROFIL L1E</i>	39
<i>FIGURE 41: COUPE SISMIQUE DU PROFIL L2A</i>	40
<i>FIGURE 42: COUPE SISMIQUE DU PROFIL L2B</i>	40
<i>FIGURE 43: COUPE SISMIQUE DU PROFIL L2C</i>	41
<i>FIGURE 44: COUPE SISMIQUE DU PROFIL L2D</i>	42
<i>FIGURE 45: COUPE SISMIQUE DU PROFIL L3A</i>	43
<i>FIGURE 46: COUPE SISMIQUE DU PROFIL L3B</i>	44
<i>FIGURE 47: COUPE SISMIQUE DU PROFIL L3C</i>	44
<i>FIGURE 48: COUPE SISMIQUE DU PROFIL L3D</i>	45
<i>FIGURE 49: COUPE SISMIQUE DU PROFIL L3E</i>	46
<i>FIGURE 50: COUPE SISMIQUE DU PROFIL L4A</i>	47
<i>FIGURE 51: COUPE SISMIQUE DU PROFIL L4B</i>	48
<i>FIGURE 52: COUPE SISMIQUE DU PROFIL L4C</i>	48
<i>FIGURE 53: COUPE SISMIQUE DU PROFIL L4D</i>	49

INTRODUCTION

Madagascar se lance actuellement vers un développement économique à grande vitesse. L'infrastructure est l'une des actions menées par l'Etat dans cette perspective, à noter les routes, les bâtiments et les ports.

La mise en place de ces infrastructures nécessite la disponibilité, en grande quantité, des matières premières dont les roches d'empierrement.

En conséquence, la demande en roche massive ne cesse d'augmenter ces derniers temps, en particulier à Toamasina où les bâtiments, le port et les routes sont actuellement en cours de construction.

La Société Cold Asphalt (COLAS) est une entreprise internationale de génie civil et de construction implantée à Madagascar. Elle œuvre dans la mise en place des grandes infrastructures, le port, la route, les grands bâtiments, les usines, les barrages,...etc. Ainsi, pour la mise en place des différentes entités: usine, port, piste et bâtiments, utiles aux traitements et à l'exportation de Nickel-Cobalt venant d'Ambatovy Moramanga, dans le cadre de projet Ambatovy par Sherritt, COLAS aura besoin de plusieurs millions de mètre cube de roche massive disponible.

Suite à cette demande, COLAS a sollicité la Société en Géosciences pour le Développement de Madagascar (SGDM) à faire l'évaluation volumétrique des roches massives exploitables sur les deux gisements se trouvant à Analabe et à Sahavakake au bord de la RN2.

Le présent mémoire portant sur «*Evaluation de roches massives exploitables sur les carrières d'Analabe et de Sahavakake*» fait partie intégrante de ce projet. Il développe l'application des deux méthodes géophysiques, électrique et sismique, à l'étude des roches d'empierrement. Sur le plan technique, l'étude a été menée à partir des analyses des documents existants.

Le mémoire comporte trois parties:

- la partie théorique développant les différentes modes de calcul utilisée en électrique et en sismique réfraction,
- la deuxième partie se porte sur la présentation des zones d'étude,
- la troisième partie s'attèle sur l'évaluation de roches massives exploitables sur les deux carrières, Analabe et Sahavakake.

Partie I: RAPPEL THEORIQUE

I.1 GEOPHYSIQUE APPLIQUEE

I.1.1 Généralités

La Géophysique ou Physique de la Terre a pour but d'étudier les propriétés physiques du globe terrestre. Son objectif principal est de connaître la constitution de la Terre à partir des propriétés physiques qui leur sont associées.

On sépare la géophysique du globe de la géophysique appliquée pour des raisons d'échelle (spatiale et temporelle). Par conséquent, le géophysicien a toujours à l'esprit les trois mots clefs suivants : dynamique, structure (ou modèle) et échelle.

Pour notre cas, on va se cantonner à la géophysique appliquée qui étudie seulement la croûte. La dénomination «appliquée» vient du fait que le sous sol contient des matières premières susceptibles d'être exploitées par l'homme.

Les méthodes de prospection électrique et de prospection sismique seront développées par la suite car elles s'avèrent les mieux appropriées à l'étude des gisements de roches massives objet de ce mémoire.

I.1.2 La méthode géophysique de prospection électrique

La méthode géophysique de prospection électrique est basée sur la loi d'Ohm $R = \Delta V / I$.

R : la résistance

ΔV : différence de potentielle

I : intensité de courant électrique

I.1.2.1 Principe

La prospection électrique consiste à injecter un courant d'intensité I dans le sol par l'intermédiaire de deux électrodes A et B. La réponse est recueillie par une paire d'électrodes qui mesure la différence de potentiel ΔV entre deux points M et N (cf Figure1).

A partir de la valeur du courant injecté I, de la mesure de la différence de potentielle DV et de l'écartement entre les différentes électrodes, on peut déterminer la résistivité électrique en se basant sur la loi d'Ohm.

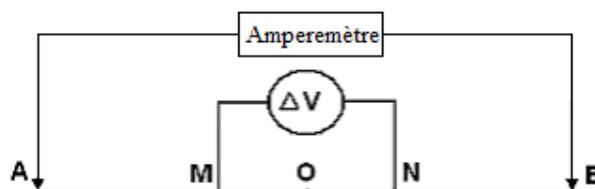


Figure 1: configuration des électrodes en prospection électrique

O centre de mesure.

La formule qui traduit la résistivité vraie du sou sol est donnée par la relation :

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)} \quad (2)$$

Où: ρ appelée «résistivité vraie» du sous sol homogène exprimée en Ωm

- ΔV en V

- I en A

- K est un facteur géométrique qui dépend de la configuration géométrique des électrodes

1.1.2.2 Résistivité des roches

En général, la résistivité apparente est élevée si la roche est saine, peu fracturée, pas poreuse.

Dans les sédiments et les roches sédimentaires, la résistivité est généralement plus faible.

1.1.2.3. Notion de résistivité vraie et de résistivité apparente du sol.

La relation (1) est valable seulement pour un terrain homogène et isotrope. Dans ce cas, la résistivité est dite « vraie ». Mais en réalité, le sol est hétérogène, c'est-à-dire, des couches de résistivités différentes se superposent. Dans ce cas, les surfaces équipotentielles ne sont plus des hémisphères mais déformées. La résistivité donnée par la relation (1) est alors la résistivité d'un milieu homogène fictif produisant la même différence de potentiel entre les électrodes M et N que le milieu réel. Dans ce cas, la résistivité est dite « apparente ».

La résistivité apparente dépend de la nature du sous-sol, de ses diverses composantes, et également de son degré de porosité. Elle dépend aussi de la quantité et de la qualité des eaux retenues dans les pores.

Le tableau suivant indique quelques résistivités des roches.

Type des roches	Gamme de résistivité (Ωm)
Granite	$3 \cdot 10^2 - 10^6$
Basalte	$10 - 1,3 \cdot 10^7$
Gneiss	$6,8 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^6$
Schiste	$20 - 10^4$
Quartzite	$10 - 2 \cdot 10^8$
Grès	$1 - 6,4 \cdot 10^8$
Calcaire	$5 - 10^7$
Argile	1-100
Alluvion et sable	10-800

Tableau 1: Valeur type de résistivité apparente (GIROUX B., 1999)

1.1.3. Technique de prospection électrique du sous sol

Il existe plusieurs techniques de prospection électrique dont le sondage électrique, le profilage électrique, et le panneau électrique.

Le sondage électrique est une technique d'exploration verticale du sous sol, au cours de laquelle quatre électrodes (deux d'injection et deux de potentiel) sont alignées et disposées symétriquement de part et d'autre du point de mesure O. On fait varier la longueur en laissant le point O centre de AB et de MN fixe. On peut alors tracer la courbe représentative de ρ_a en fonction de $L = AB/2$.

Le profilage électrique est une technique d'exploration horizontale du sous sol. Il consiste à déplacer un quadripôle AMNB de dimension fixe. A chaque station, on fait une mesure de ρ_a pour une profondeur donnée. Si les mesures se font sur une ligne, on établit un profil de résistivité (à une dimension).

Les contours tracés sur un plan à partir de mesures effectuées sur plusieurs profils constituent des courbes d'iso-résistivité (à deux dimensions horizontales).

En faisant varier la distance inter électrodes sur la même ligne, on obtient une représentation qualitative de la variation de ρ_a suivant un plan vertical. Cette dernière donne une représentation de la résistivité en profondeur et latéralement (coupe à deux dimensions). La technique correspondante est appelée panneau électrique ou image par tomographie électrique.

1.1.3.1. Image par Tomographie Electrique (ITE) ou panneau électrique 2D

La tomographie électrique (TE) est une opération qui consiste à connaître la distribution de résistivités électriques du sous sol en deux dimensions (horizontale et verticale). La réponse obtenue est une image à deux dimensions de la distribution des résistivités du sous sol. Ce document est appelé coupe de résistivité ou coupe géoélectrique.

1.1.3.2. Principe de la mesure

Le panneau électrique sert à la fois à une investigation verticale et latérale du sous-sol. Autrement dit, il permet à une investigation à deux dimensions du sous-sol.

Le principe d'acquisition est basé sur la réalisation d'un grand nombre de sondages électriques le long d'un profil à partir de diverses combinaisons de quatre électrodes spécifiques à un type de dispositif parmi les N électrodes. En écartant la distance inter électrodes, la profondeur de pénétration augmente et le nombre des points expérimentaux diminue.

Le modèle géoélectrique est obtenu en inversant automatiquement les données expérimentales en modèle 2D, grâce au programme Res2dinv de M.H. Loke, 1996.

1.1.3.3. Matériel de prospection électrique

Le résistivimètre (Figure 2), de marque SYSCAL R2 équipé de système multi électrodes accompagné de ses matériels annexes, permet l'acquisition des données de terrain.

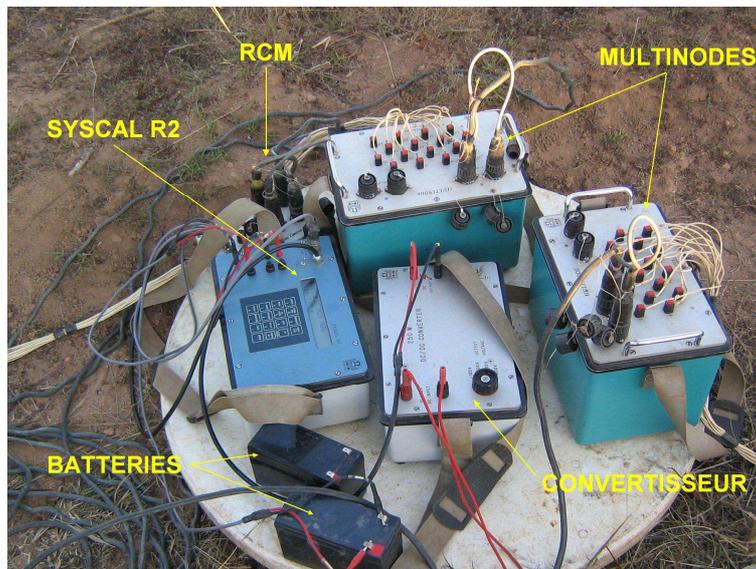


Figure 2: Les équipements SYSCAL R2 complets

1.1.3.4. Dispositif

Le dispositif de Wenner est un dispositif classique, utilisant N électrodes, que l'on adopte pour la réalisation du panneau électrique.

Soient "a" la distance entre les deux électrodes consécutives, "na" la distance inter électrodes où n est le nombre de la séquence de mesures qui s'incrémente de 1 à $(N-1)/3$ si le nombre d'électrode total N est égal à un multiple de 3 plus 1.

Pour la première séquence de mesure, la distance inter électrodes est égale à $1.a$. La première série de mesures débute d'abord avec les électrodes 1, 2, 3 et 4 dont les électrodes 1 et 4 sont utilisées comme électrodes de courant et les deux autres électrodes 2 et 3 comme électrodes de potentiel. La seconde série de mesures utilise ensuite les électrodes 2, 3, 4 et 5 et ainsi de suite jusqu'à ce que toutes les séries de mesures soient terminées.

Nous passons après à la seconde séquence de mesures dont la distance inter électrodes s'incrémente à $2a$. On effectue les autres séries de mesures. L'opération continue jusqu'à ce que toutes les mesures possibles soient effectuées. La figure 3 montre la configuration des électrodes pour le panneau électrique du type Wenner

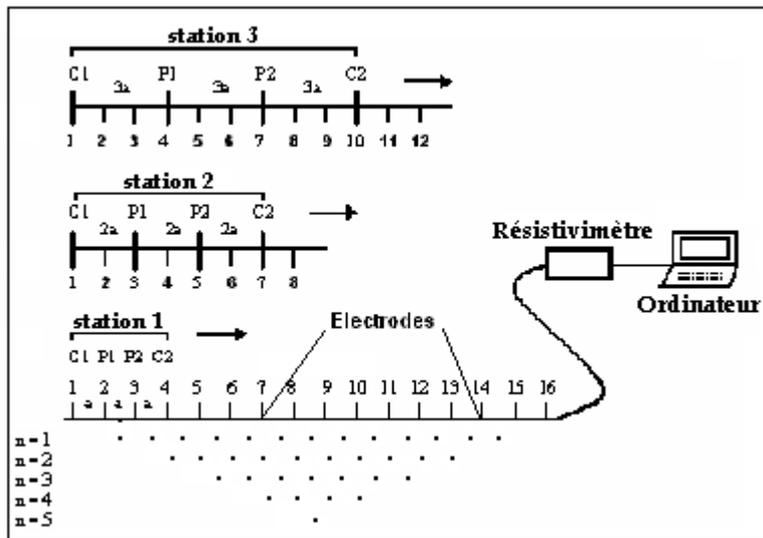


Figure 3: Représentation du panneau électrique du type Wenner

Dans le cas général utilisant N électrodes, le nombre total de mesures m, pour un profil dont la distance entre deux électrodes est égale à na, a pour expression :

$$m = \sum (N-3n) \quad \text{où } n=1, 2, 3, 4, \dots$$

Le nombre d'électrodes N est choisi suivant la profondeur d'investigation voulue. On a au total 35 mesures à effectuer pour un nombre d'électrodes égal à 16. La profondeur d'investigation est de l'ordre de 0,519.a, pratiquement égale à a/2. On remarque que, le nombre de point de mesure diminue lorsque n augmente

1.1.3.5. Mode de traitement des données du panneau électrique

On utilise le programme RES2DINV développé par H. Loke pour inverser automatiquement les données expérimentales en modèle 2D appelé « pseudo-section ».

La méthode d'inversion utilisée par le programme est basée sur la méthode des moindres carrés, utilisant la méthode des différences finies pour le calcul de la résistivité.

En tenant compte des points expérimentaux, ce programme subdivise le modèle géoélectrique en des blocs rectangulaires. Ce modèle fournit la résistivité vraie de chaque bloc par la méthode de moindre carrée utilisant la méthode de différence finie.

Après traitement, le résultat ou le modèle finalement retenu est représenté sous forme de coupe géoélectrique 2D.

Le document servant à l'interprétation des résultats est donc le document obtenu après inversion. Ce document sera confronté aux contextes géologique et géomorphologique du terrain.

I.2. MÉTHODE SISMIQUE REFRACTION

La méthode sismique réfraction permet d'obtenir une image précise de la structure du sous sol. Elle est particulièrement bien adaptée à la détermination de la profondeur du substratum et de la rippabilité des roches.

I.2.1. Description de mode de calcul et interprétation

I.2.1.1 Cas du modèle tabulaire 2 terrains

C'est le modèle le plus simple, la discontinuité étant plane et horizontale d'épaisseur h_1 .

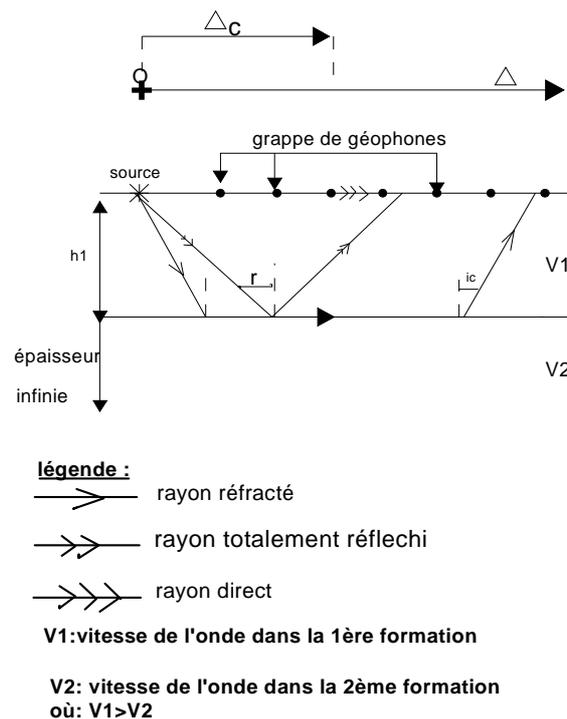


Figure 4: Trajets de l'ébranlement sismique exprimés sous forme de rayons

Trois ondes peuvent se propager :

- Une onde directe : le temps de propagation est $t = \frac{\Delta}{V_1}$
- Une onde réfléchi : l'onde se réfléchit sur la discontinuité,

$$\text{le temps de propagation est } t = \frac{(\Delta^2 + 4h_1^2)^{1/2}}{V_1}$$

où h_1 : l'épaisseur de la 1^{ère} formation

Δ : distance entre la source et le géophone

- Une onde conique : l'angle d'incidence i_c satisfait la loi de Snell Descartes

$\sin i_c = V_1/V_2$, l'onde réfractée est horizontale: $V_2 > V_1$. Elle se propage dans le milieu 2 à la vitesse V_2 et va donner naissance à une série d'ondes revenant dans le milieu 1 avec un angle d'émergence i_c et c'est l'onde réfractée.

Le temps de propagation est $t = \frac{\Delta}{V_2} + \frac{2h_1 \cos i_c}{V_1}$

Dans la pratique l'allure idéale de l'hodochrone correspondant à un modèle tabulaire de 2 terrains est illustrée par la figure 5 :

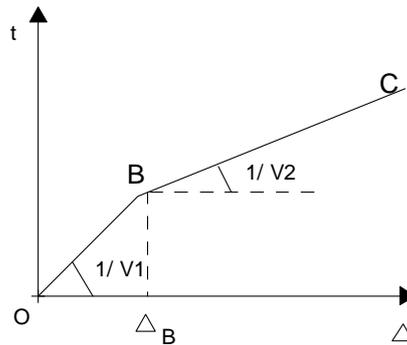


Figure 5: Hodochrone idéale sur terrain

La portion de droite OB de pente $1/V_1$ correspond à l'onde directe, BC de pente $1/V_2$ à l'onde réfractée.

Pour vérifier l'horizontalité du terrain, on effectue un deuxième tir symétrique au premier appelé "tir inverse". Les géophones restent fixes (la source étant du côté opposé à la première).

Si les deux hodochrones obtenues sont identiques alors, le choix sera justifié sinon, il faudra abandonner le modèle tabulaire.

Généralement on porte sur le même axe des abscisses les 2 hodochrones

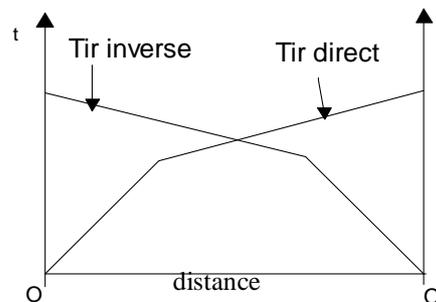


Figure 6: Hodochrone du tir direct et du tir inverse

Détermination de h_1

En Δ_B , le temps de propagation mis par l'onde directe est égal à celui de l'onde réfractée d'où :

$$h_1 = \frac{\Delta_B \cdot (V_2 - V_1)^{1/2}}{2 \cdot (V_2 + V_1)^{1/2}}$$

V_1 et V_2 sont respectivement déterminées à partir de $1/V_1$ et $1/V_2$

I.2.1.2. Cas du modèle tabulaire à 3 terrains

L'épaisseur du 1^{er} terrain est h_1 , celle du deuxième h_2 , et celle du troisième supposée infinie (en réalité très grande par rapport à h_1 et h_2). Les vitesses des ondes P sont respectivement V_1 , V_2 , V_3 telles que: $V_2 > V_1$ et $V_3 > V_2$, plus on va en profondeur, plus la formation est rigide, donc l'onde se propage avec une vitesse plus grande.

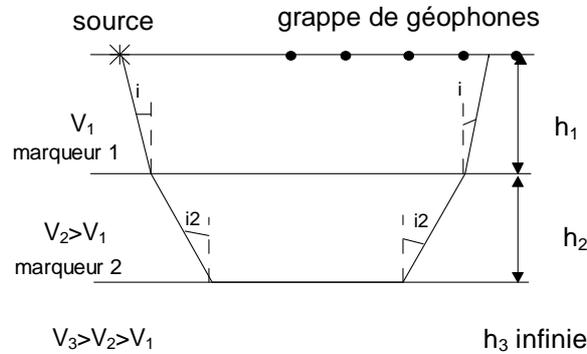


Figure 7: Modèle tabulaire à 3 terrains

L'hodochrone correspondante sera :

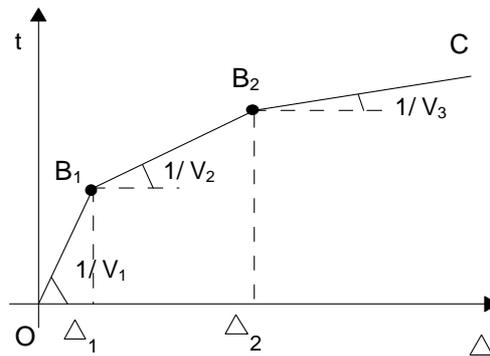


Figure 8: Hodochrone pour un modèle tabulaire à 3 terrains

- ✓ La portion de droite OB_1 correspond à l'onde directe.
- ✓ La portion de droite B_1B_2 correspond à l'onde réfractée par le marqueur 1.
- ✓ La portion de droite B_2C correspond à l'onde réfractée par le marqueur 2.

Détermination de h_1 et h_2

On applique le même raisonnement que précédemment

En B_1 correspondant à Δ_1 on a égalité des temps de propagation des ondes directes et réfractées par le marqueur 1 d'où :

$$h_1 = \frac{\Delta_1 \cdot (V_2 - V_1)^{1/2}}{2 \cdot (V_2 + V_1)^{1/2}}$$

En B_2 correspondant à Δ_2 on a l'égalité de temps de propagation des ondes réfractées des marqueurs 1 et 2

Alors:

$$h_2 = \frac{\Delta_2 \cdot (V_3 - V_2)^{1/2}}{2 \cdot (V_3 + V_2)^{1/2}} + \frac{h_1 \left(\left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)^{1/2} - \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_3}\right)^2\right)^{1/2} \right)}{V_1 \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_3}\right)^2\right)^{1/2} \cdot \frac{V_2}{V_3}}$$

I.2.1.3 Cas du modèle incliné à 2 terrains

Nous allons voir l'importance du tir direct inverse:

1^{er} tir : Considérons le modèle suivant

- ✓ Tir en D (comme direct): tir en amont
- ✓ Géophones : du côté versant par rapport à l'horizon

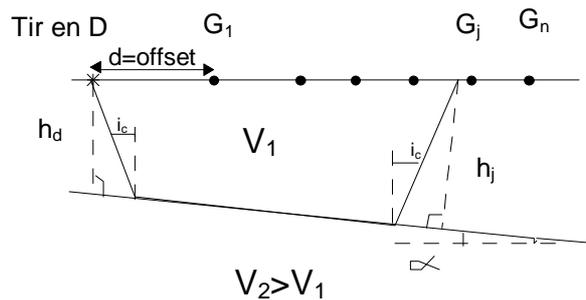


Figure 9: Modèle incliné, tir en amont

L'équation du temps de propagation, de l'onde de la source au géophone j, s'écrit :

$$t = \frac{\Delta}{V_{2app}^{amont}} + 2 \cdot \frac{h_d \cdot \cos i_c}{V_1} \quad \text{où} \quad V_{2app}^{amont} = \frac{V_2 \cdot \sin i_c}{\sin(i_c + \alpha)} < V_2 \quad \text{car} \quad i_c < (i_c + \alpha)$$

V_{2app}^{amont} : appelée vitesse apparente de l'onde dans le milieu 2, le tir en amont. Tout se passe donc comme si on avait ralenti l'onde P dans ce milieu par rapport à un modèle tabulaire de même épaisseur h_d .

2^e tir : Considérons le modèle suivant (cf Figure 10) :

- tir en I (comme inverse): tir en aval
- les géophones gardent les mêmes places, mais vus de la source ils sont sur la partie ascendante de l'horizon

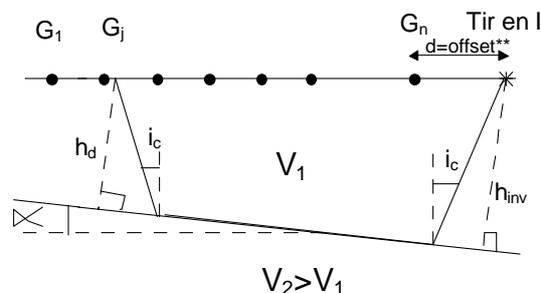


Figure 10: Modèle incliné, tir en aval

L'équation du temps de propagation de l'onde :

$$t = \frac{\Delta}{V_{2app}^{aval}} + 2 \cdot \frac{h_{inv} \cdot \cos i_c}{V_1} \quad \text{où} \quad V_{2app}^{aval} = \frac{V_2 \cdot \sin i_c}{\sin(i_c - \alpha)} > V_2 \quad \text{car } i_c > (i_c - \alpha)$$

V_{2app}^{aval} : appelée vitesse apparente de l'onde dans le milieu 2, le point de tir en aval. Tout se passe comme si on avait accéléré l'onde, par rapport à un modèle tabulaire de même épaisseur h_{inv}

On voit que : $V_{2app}^{amont} \neq V_{2app}^{aval} \neq V_2$: vitesse vraie de l'onde dans la deuxième formation.

Les hodochrones des 2 tirs sont différentes et consignés dans la figure 11 ci-dessous.

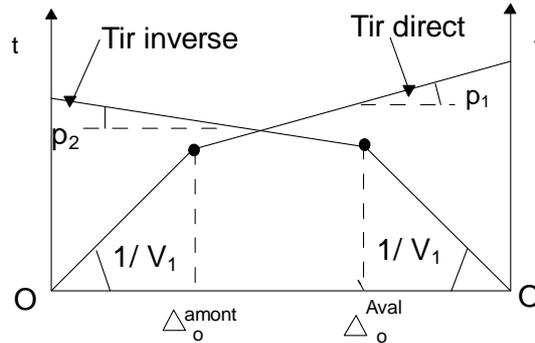


Figure 11: Hodochrone pour un modèle incliné

Cela montre l'importance du tir direct-inverse en prospection sismique.

❖ Détermination de α , V_2 , h_d , h_{inv}

Comme p_1 et p_2 sont déterminées graphiquement, et tenant compte de la loi de Snell Descartes alors:

$$\alpha = \frac{\text{Arc sin}(V_1 \cdot p_1) - \text{Arc sin}(V_1 \cdot p_2)}{2}$$

$$\text{et } V_2 \text{ sera } V_2 = \frac{V_1}{\sin i_c} \quad \text{où} \quad i_c = \frac{\text{Arc sin}(V_1 \cdot p_1) + \text{Arc sin}(V_1 \cdot p_2)}{2}$$

d'où :

$$h_d = \frac{\Delta_0^{amont} \cdot (1 - \sin(i_c + \alpha))}{2 \cdot \cos i_c}$$

$$h_{inv} = \frac{\Delta_0^{aval} (1 - \sin(i_c - \alpha))}{2 \cdot \cos i_c}$$

1.2.1.4 "Delay time"

On appelle Delay-Time le temps nécessaire à une onde pour parcourir le trajet séparant l'interface de réfraction d'un point à la surface de référence (ou inversement), diminué du temps nécessaire à une onde pour couvrir une distance équivalente à la projection de ce trajet sur l'interface à la vitesse de l'interface.

Principe

Le temps de retard associé avec le chemin SMNG dans la figure ci-dessous est le temps de réfraction observé en G, T_g , diminué du temps exigé pour l'onde se propageant de P en Q. (la projection du chemin sur le réfracteur) par rapport à V_2 .

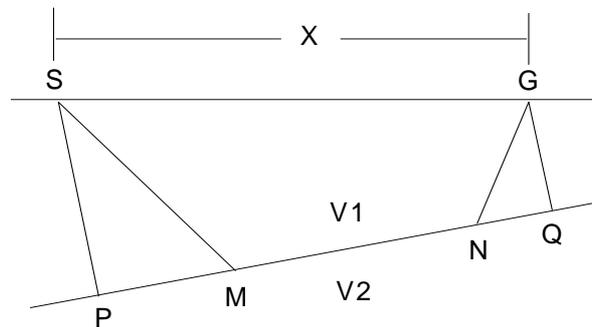


Figure 12: Principe de “delay time”

En notant δ le temps de retard, nous avons

$$\begin{aligned}\delta &= T_g - \frac{PQ}{V_2} = \left(\frac{SM + NG}{V_1} + \frac{MN}{V_2} \right) - \frac{PQ}{V_2} \\ &= \left(\frac{SM + NG}{V_1} \right) - \left(\frac{PM - NQ}{V_2} \right) \\ &= \left(\frac{SM}{V_1} - \frac{PM}{V_2} \right) + \left(\frac{NG}{V_1} - \frac{NQ}{V_2} \right) \\ &= \delta_s + \delta_g\end{aligned}$$

où δ_s et δ_g sont connus comme temps de retard du point d'impact (de l'Anglais “ shotpoint delay time ”) et temps de retard du Géophone (de l'Anglais “ Géophone delay time ”)

La valeur approximative de δ peut-être estimée en assimilant que l'inclinaison est assez petite que PQ, elle est approximativement égale à l'offset x.

Dans ce cas,

$$\delta = \delta_s + \delta_g \approx T_g - \frac{x}{V_2}$$

$$\text{D'où } \delta_g \approx T_g - \left(\frac{x}{V_2} \right) - \delta_s$$

1.2.2. Principe de la méthode

La technique fondamentale utilisée en méthode sismique, c'est de produire des ondes sismiques et de mesurer le temps mis par ses ondes pour aller depuis les sources jusqu'à une série de géophone, habituellement disposée sur une droite passant par la source. Connaissant les temps de parcours jusqu'au géophone et la vitesse de propagation de ses ondes, on tente de reconstruire leurs trajets. Les informations structurales résultent surtout des trajets que l'on décompose en deux catégories principales : les trajets réfractés dont la partie principale s'effectue le long de l'interface séparant deux couches de terrain, à peu près horizontales et les trajets réfléchis pour les quelles les ondes se propagent d'abord vers le bas et, en un point,

sont réfléchies vers la surface, les trajets sont alors à peu près verticaux. Dans les deux cas, les temps des trajets dépendent essentiellement des propriétés physiques des roches et de la disposition des couches. Voici l'intervalle de vitesses des ondes de quelques types de roches.

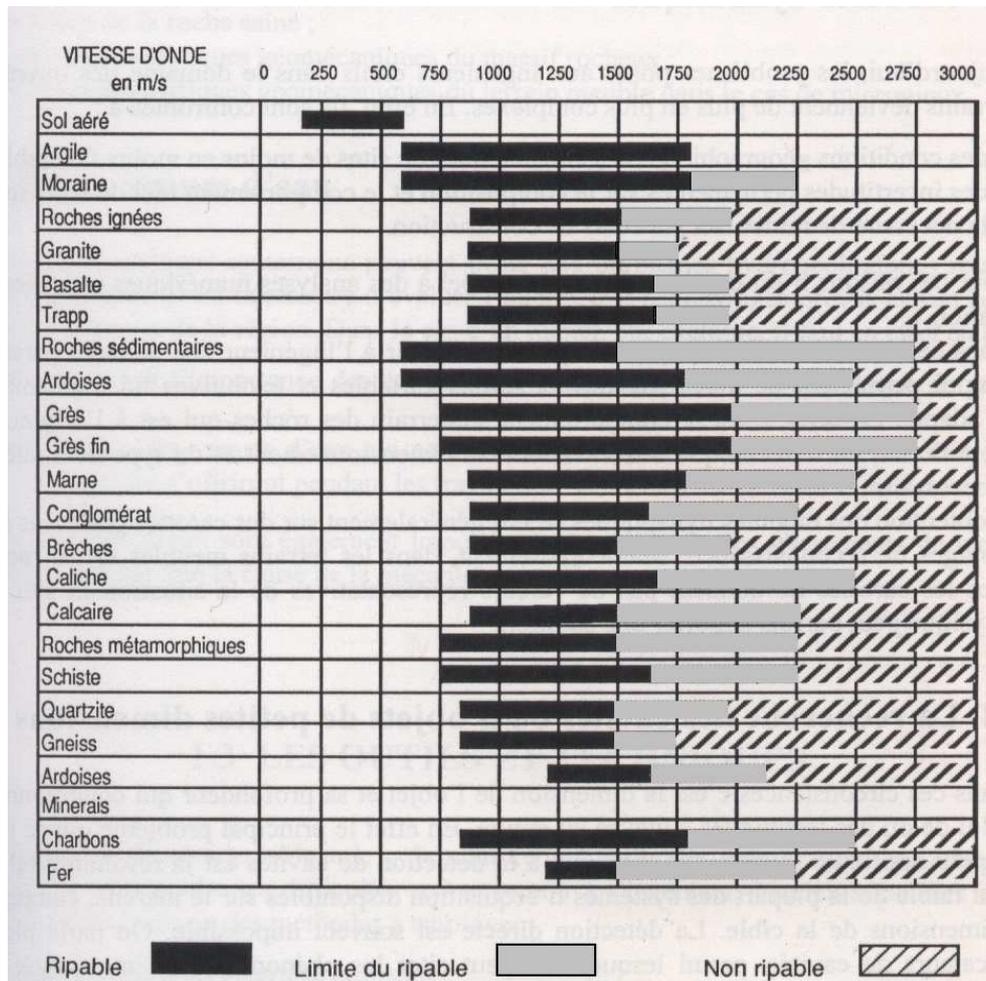


Tableau 2: Ripabilité et Vitesse sismique de quelques types de roches (extrait du livre *Géophysique de Gisement et de Génie Civil*, MARI J. L., ARENS G., CHAPPELLIER D., GAUDIANI P., 1998)

1.2.2.1. Appareils utilisés

Daqlink : c'est le moteur de la méthode sismique

Ordinateur portable : il enregistre les ondes captées

24 géophones : capteurs des ondes venant de la source

Source : masse pesante en chute libre qui peut atteindre 80kg

GPS de marque Garmin : localisation

2 câbles (flûtes) : reliant le Daqlink avec les géophones

Batterie : alimentation du Daqlink

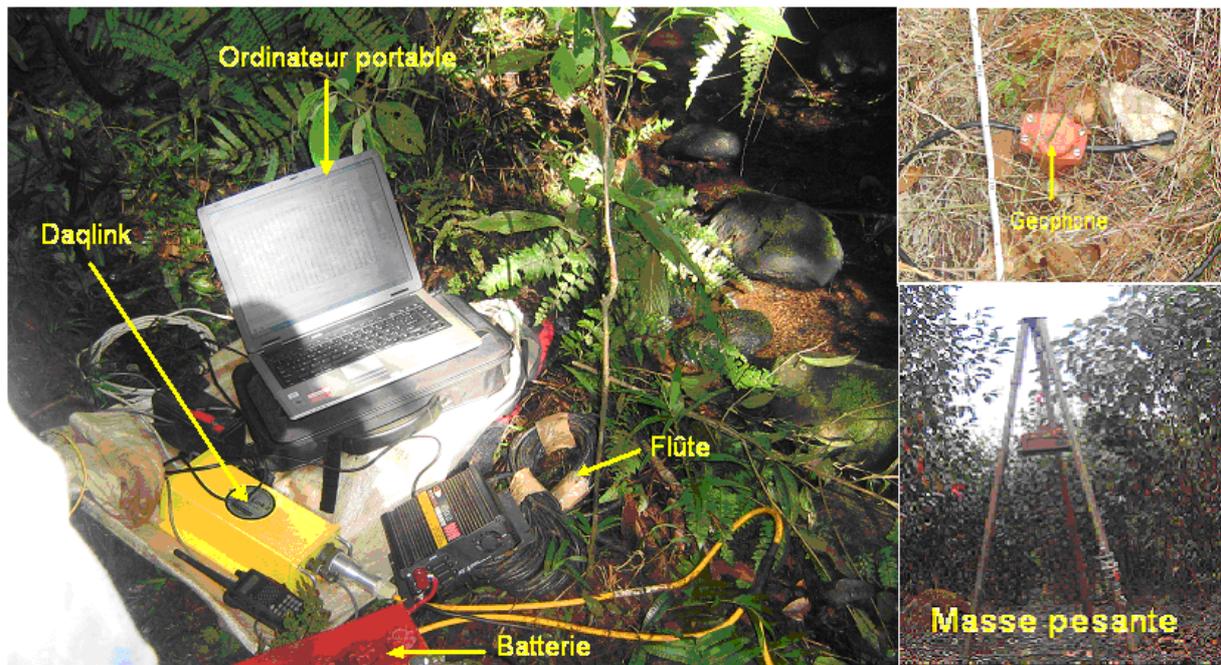


Figure 13: Schéma de l'appareil sismique

1.2.2.2. Processus du traitement de données

Le processus de traitement se divise en 4 parties :

- ✚ L'acquisition des données
- ✚ Le pointage
- ✚ Création des hodochrones
- ✚ Adoption d'un modèle

L'acquisition des données

Elle fait partie de la phase de mesure. On enregistre l'onde de vibration résultant du tir effectué à la source et qui est capté par les géophones disposées linéairement le long d'un profil. Les signaux seront envoyés vers l'appareil DAQLINK et stockés immédiatement dans l'ordinateur portable de terrain. Pour faciliter les traitements numériques et aussi pour minimiser les erreurs, les tirs effectués sont disposés symétriquement par rapport au centre de du profil.

Le pointage :

C'est un procédé de traitement numérique des signaux enregistrés à l'aide d'un logiciel Vibroscope.

La technique consiste à détecter et à pointer le premier temps d'arrivée du signal au niveau de chaque capteur (Figure 14). Le signal provoqué est de basse fréquence donc à forte amplitude ce qui le diffère des bruits naturels (signaux de haute fréquence).

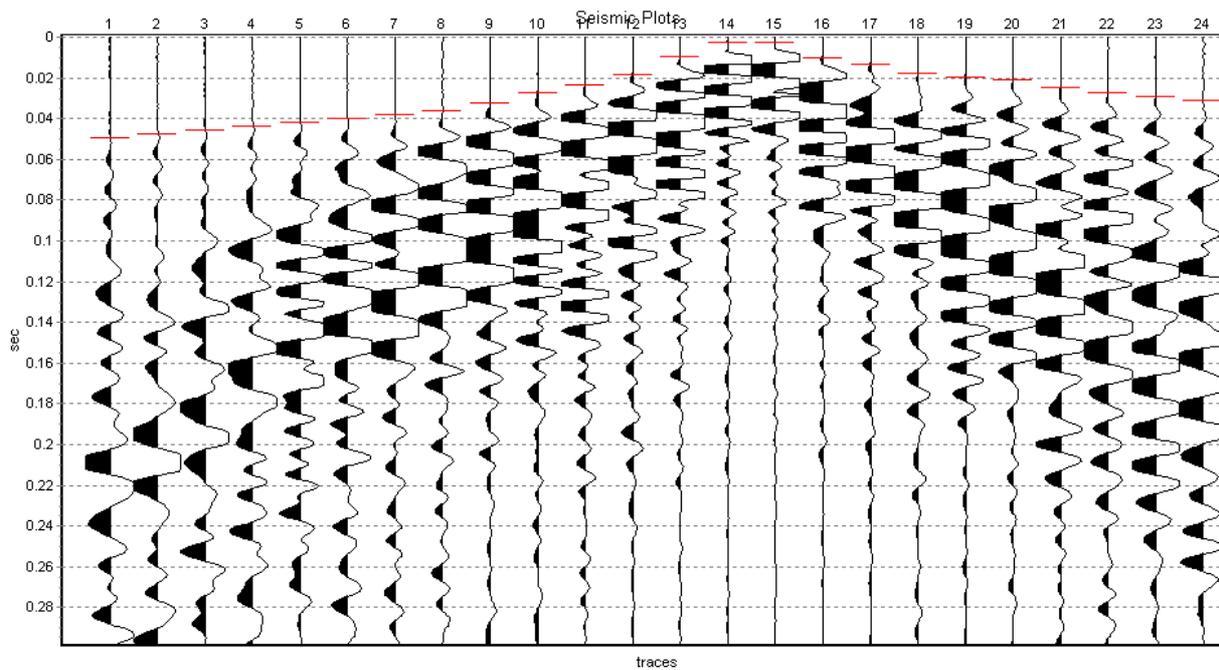


Figure 14: Exemple de pointage d'un signal (point de tir entre 14e et 15e géophone)

Création des hodochrones :

Chaque tir correspond à un hodochrone. Dans un profil, on effectue plusieurs tirs et on recommence le même procédé. Ainsi, pour un seul profil, on a plusieurs hodochrones qui sont spécifiques pour chaque point de tir. On a alors un modèle d'hodochrone (Figure 15).

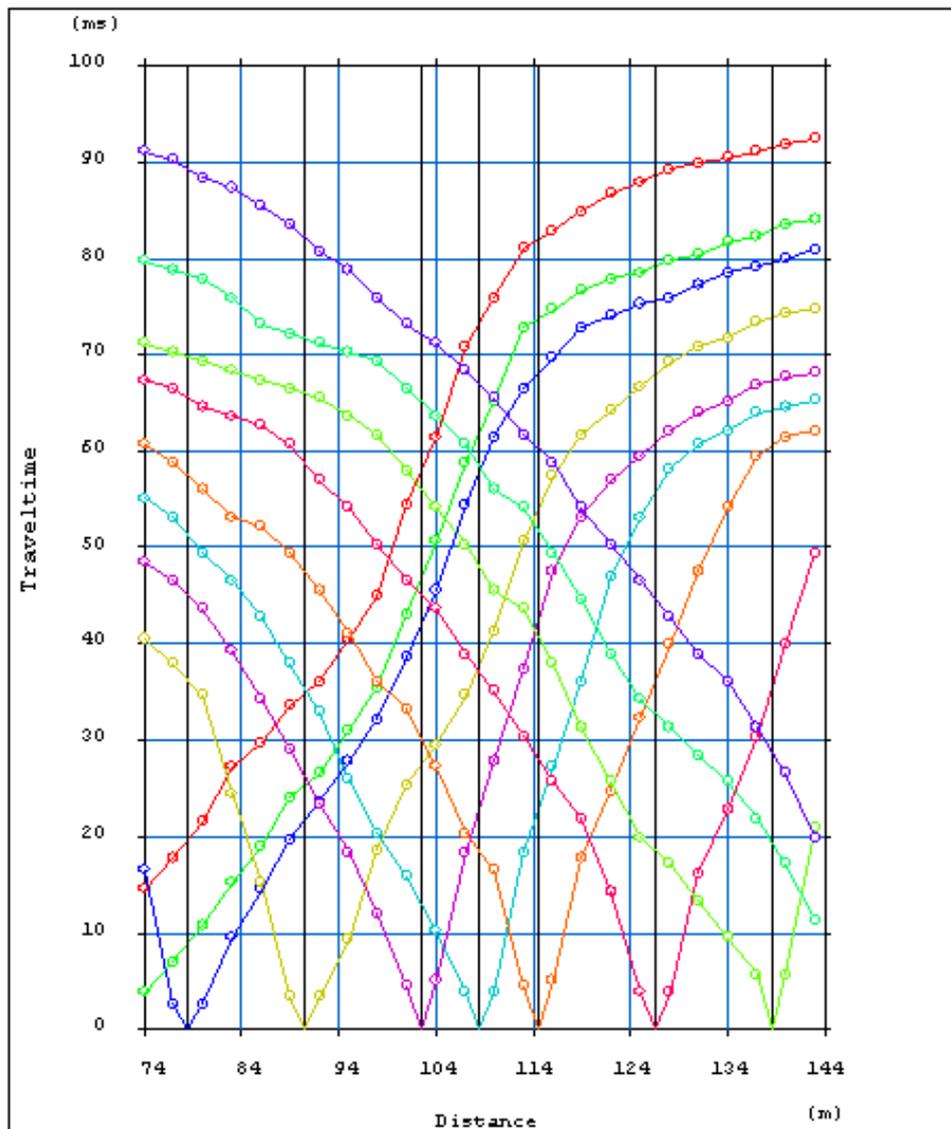


Figure 15: Exemple des hodochrones d'un profil

Adoption d'un modèle

Ces hodochrones seront traités numériquement par l'inversion du modèle d'hodochrones par le logiciel PLOTREFA pour donner un modèle de terrain.

I.3 PRINCIPE TOPOGRAPHIQUE

La plupart des topographes utilisent encore des théodolites manuels avec une mire verticale.

I.3.1 Acquisition des données topographiques

Trois personnes assurent l'acquisition des données de terrains pour un levé topographique. La première qui est le topographe responsable du levé s'occupe de la manipulation et de la lecture des valeurs données par le théodolite. La deuxième joue à la fois le rôle de croquiser et de secrétaire qui enregistre sur une feuille de mesure préétablie les valeurs lues sur le théodolite et dessine les détails observés sur terrain. Et la troisième et dernière personne tient verticalement la mire à un emplacement désigné par le topographe.

Les données récoltées seront ensuite saisies sur ordinateur pour être traité par des logiciels qui par la suite nous permet d'accéder à la détermination des différentes côtes spécifiques de chaque gisement.

I.3.2 Traitement des données topographiques

Lors du traitement, on utilise les logiciels suivants:

- Microsoft Excel ;
- Covadis ;
- Autocad.

Le Microsoft Excel facilite la saisie des données brutes obtenues lors du levé sur terrain ; on peut enregistrer ces données dans un fichier «.txt». Ensuite, on importe ce fichier à partir du logiciel Covadis 2D, où le module de calcul topométrique permet de convertir les fichiers bruts «.txt» en un fichier au format «.gis». A l'issus des calculs, la fonction chargement de semis du menu Covadis 2D permet d'afficher tous les points relevés sur terrain, et de relier ceux qui forment un même profil.

Après avoir établi le plan d'un profil, on peut passer à Covadis 3D pour déterminer la côte de chaque point.

A partir de la géobase contenant les points calculés, on importe directement les résultats sur Autocad afin de tracer tous les détails rencontrés en surface (route, rizière, rivière étang, etc...).

1.3.3 Présentation du logiciel Covadis

Le logiciel Covadis est fourni par **Géomédia s.a** qui est une société spécialisée en topographie et infrastructure. Covadis est un logiciel complet et performant pour les calculs topométriques et géocodification de levés. On peut l'exploiter pour la production de plans topographiques et la conception de projet d'aménagement. C'est également un applicatif de modélisation, de calcul de projet et d'intégration dans le site.

1.3.3.1 Différentes fonctionnalités du covadis

Covadis comporte cinq menus qui lui sont propre :

- Covadis calculs (Covcal);
- Covadis 2D (Cov 2D);
- Covadis 3D (Cov 3 D);
- Covadis Edition (CovEd);
- Covadis Echanges (CovEc).

1.3.3.2 Domaines d'utilisation de Covadis

Covadis est un logiciel complet et performant pour la réalisation des projets 3D et modélisation, il est également un puissant outil de topographie, de cartographie. En voici quelques exemples de ce que peut faire le logiciel :

- calcul des cubatures
- modélisation du terrain en 3D
- dessin des courbes de niveaux
- conception de projet des routes et de voiries
- réseaux d'assainissement.

1.3.3.3 Méthodes de calcul par cubatures

Pour estimer les volumes, cette méthode permet de calculer les cubatures (déblais, remblais), à partir d'un modèle numérique de terrain (cf. [5]).

Partie II: PRESENTATION DES ZONES D'ETUDE

II.1. CONTEXTE GENERAL

Suite à la demande accrue des besoins en roches massives sur la partie orientale de Madagascar, deux études ont été effectuées aux abords de la RN 2 reliant Antananarivo à Toamasina.

Présentation des carrières

Ces études ont été réalisées sur deux sites Analabe et Sahavakake, où le premier est une carrière abandonnée et le second formé par quatre collines accompagnées d'affleurements de roches basaltiques.

Localisation des zones

ANALABE

Le gisement étudié se trouve au Sud Ouest de la ville de Toamasina, à environ une douzaine de kilomètres. Le terrain appartient administrativement au village d'Analabe, au Quartier de Tanandava, de la Commune Rurale Suburbaine de Toamasina, du District de Toamasina II, dans la Région Atsinanana.

Il est localisée géographiquement (cf Figure 16) entre les latitudes Sud 7 990 000 m et 7 990 300 m et les longitudes Est 318 800 m et 319 200 m, selon le système de coordonnées UTM.

Un front de taille y est déjà ouvert.

SAHAVAKAKE

Le site étudié se trouve au Sud de la ville de Toamasina, à environ une quinzaine de kilomètres, aux abords de la route nationale numéro 2 reliant Antananarivo Toamasina au PK 336. Le terrain appartient administrativement au Village d'Ambodikininina, du Quartier d'Antananambo de la Commune Rurale de Fanandrana du District de Toamasina II, dans la Région Atsinanana.

Il est localisé géographiquement (cf. Figure 16) entre les latitudes Sud 321 800m et 222 300 et les longitudes Est 7 986 000m et 7 986 600m, selon le système de coordonnées UTM. L'accès sur le site est relativement facile.

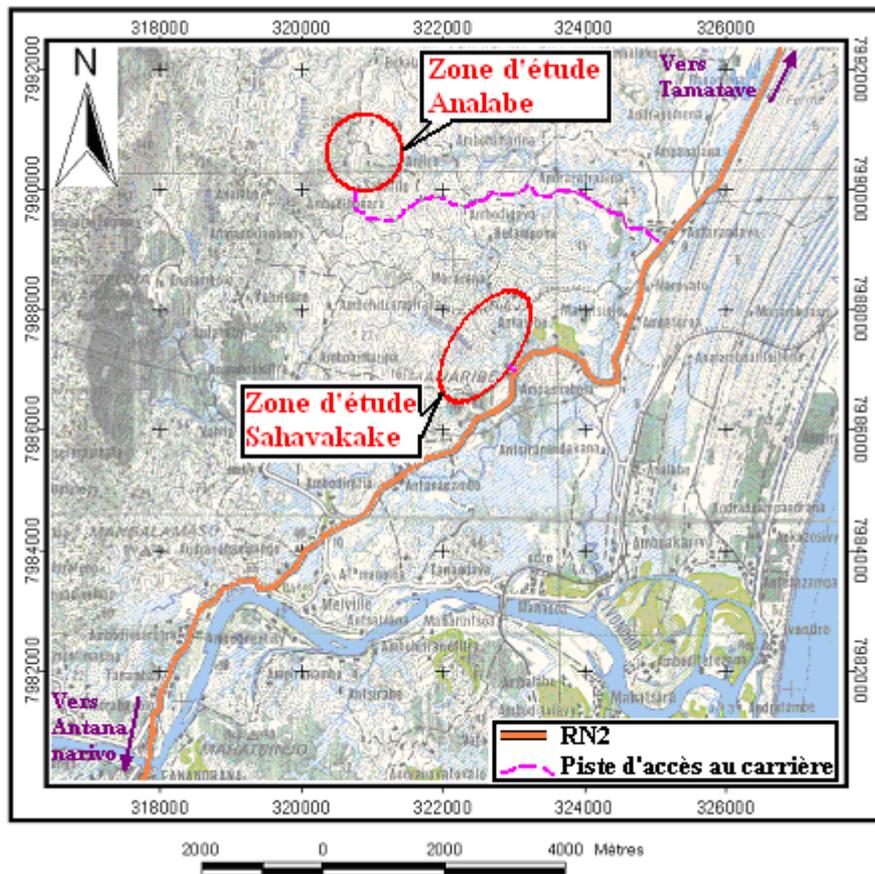


Figure 16: Carte de localisation des gisements d'Analabe et de Sahavakake (Extrait de la carte 1/100 000 du FTM, 1990)

II.2. GEOLOGIE REGIONALE

Ces deux zones se trouvent dans la ceinture de Maevatanana de la série d'Ambodirina. Le socle est formé de micaschistes, de gneiss et de migmatites à graphite, de quartzites et de khondalites. Les roches éruptives se classent en deux catégories selon leur âge. La première catégorie regroupe les intrusions ultrabasiques de forte densité. Ce sont des roches éruptives anciennes telles que les harzburgites, ultrabasites et amphibolites dérivées. La seconde plus récente, d'âge crétacé, est formée de basaltes à texture doléritique et de microgranites. Cette catégorie constitue d'excellent matériau d'empierrement et de construction (cf. Figure 17).

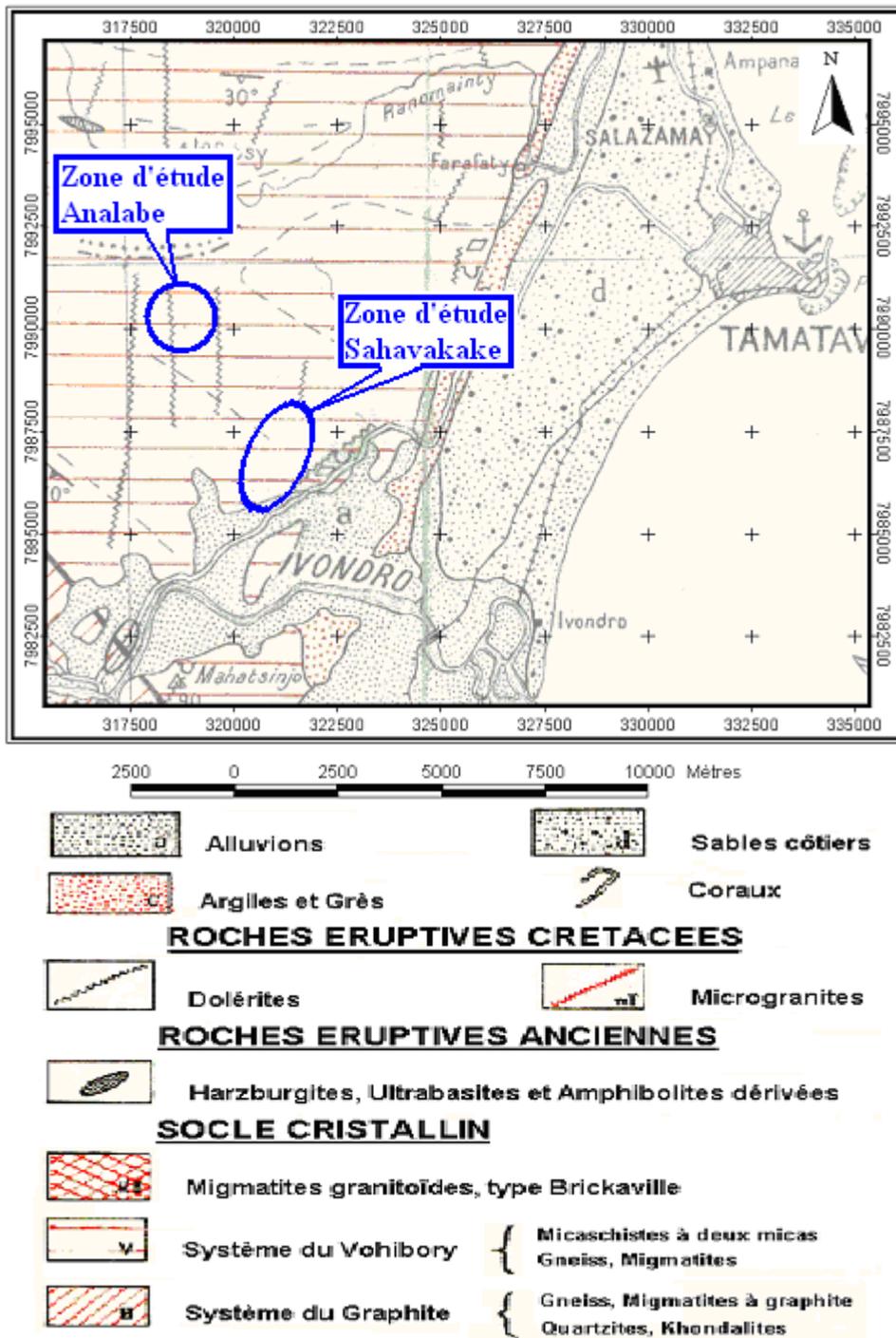


Figure 17: Géologie des deux zones d'études (Extrait de la carte 1/200 000 du service géographique de Madagascar, 1962)

La tectonique de la région est assez simple malgré la grande différence de direction des couches qui varient d'une direction Nord Sud à Est Ouest.

Les fractures récentes du socle ont des directions qui vont de N°35 à Nord Sud. Le fait essentiel dans cette région est la limite bien définie des différentes séries, celle de Maevatanana et les autres suivant une direction généralement Est Ouest.

II.3. PRESENTATION DU GISEMENT

ANALABE:

Le gisement d'Analabe se trouve sur une colline où un front de taille de 25m est déjà ouvert. C'était une carrière exploitée pour l'empierrement de la RN2. La coupe géologique, réalisée au niveau du front existant, a permis d'établir de haut en bas les successions lithologiques suivantes

- Couverture latérites de puissance inférieure à 3m
- L'intrusion basaltique fissurée



Figure 18: Photo de la carrière ouverte

SAHAVAKAKE

Le gisement de Sahavakake est constitué de quatre secteurs formés chacun par une colline.

Le premier se trouve sur la colline située à l'Est de la zone où une carrière artisanale ouverte a un front de taille de 5m (cf. Figure 19). La coupe géologique, réalisée au niveau du front existant, a permis d'établir depuis la surface les successions lithologiques suivantes ; une couverture latéritique de puissance inférieure à 2 m et les roches altérées très décomposées,



Figure 19: Photo du reste de la carrière ouverte

Le deuxième, au Sud, est une colline, limité à l'Est par la route nationale, au Sud par la ligne Haute tension de la Jirama, au Nord et à l'Ouest par un bas fond aménagé en rizière. Il présente des blocs rocheux de dimensions décimétriques (cf. Figure 20) affleurants le long de la ligne de crête, suivant une direction N40°. Ce sont des roches ultrabasites d'origines volcaniques,



Figure 20: Blocs rocheux

Le troisième à l'Ouest est une colline qui prend une direction globalement Est Ouest. A son extrémité Est, on observe un talus de 7m de hauteur et une terrasse aménagée pour la construction d'une cabane (cf. Figure 21). La coupe lithologique effectuée au niveau de ce front nous donne la succession de terrain suivante : la couverture latéritique très épaisse et les roches intrusives en altération avancée.



Figure 21: Photo du front et de la terrasse

Le quatrième et dernier secteur étudié culmine au Nord de la zone. Il se trouve sur une butte recouverte d'une dense végétation (cf. Figure 22). Il est séparé du troisième secteur par le bas fond principal de direction Ouest Est et du premier secteur par un bas fond adjacent. Des blocs rocheux, de dimensions décimétriques (cf. Figure 23), sont observés sur la partie Ouest et l'extrême Sud du secteur. Ils sont denses sur le versant Ouest et prennent une direction N40°.



Figure 22: Couverture végétale



Figure 23: Blocs rocheux

II.4. IMPLANTATION DES TRAVAUX GEOPHYSIQUES

ANALABE

Les deux méthodes de prospection électrique et sismique ont été utilisées lors de l'étude de ce gisement.

Les panneaux électriques ont été implantés sur 5 profils et les lignes sismiques sur 5 profils (cf. figure 24). Le choix de la direction du profil a été réalisé à partir de la morphologie du terrain et du sens probable d'extension de façon à nous donner le maximum d'informations sur l'évolution des roches dures sous-jacentes.

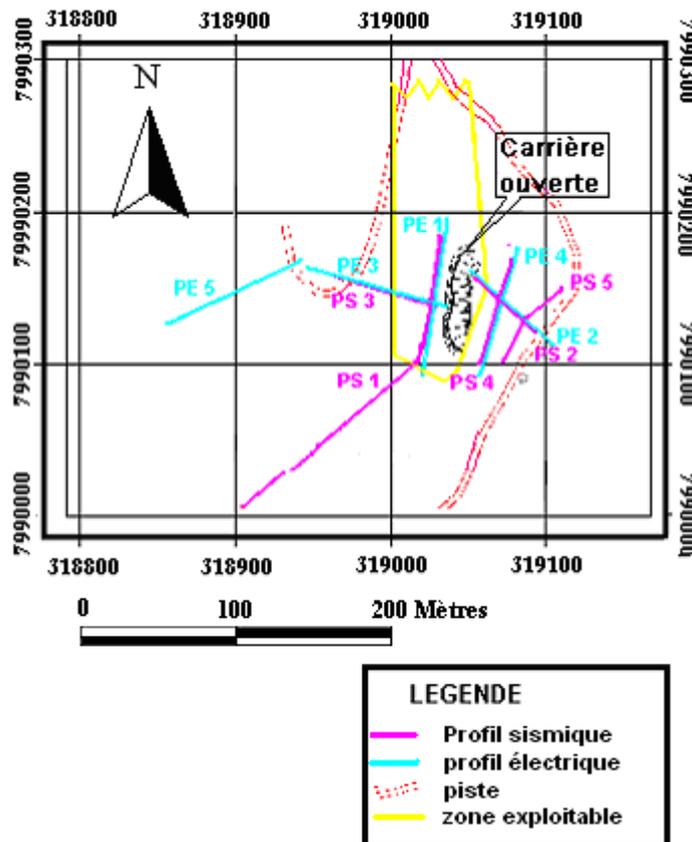


Figure 24: Implantation des profils géophysiques à Analabe

SAHAVAKAKE

Seule, la méthode sismique a été utilisée sur le gisement de Sahavakake. Les lignes sismiques ont été implantées sur 18 profils (cf. Figure 25).

Comme le cas d'Analabe, le choix de la direction du profil a été réalisé à partir de la morphologie du terrain et du sens probable d'extension de la roche dure de façon à nous donner le maximum d'informations sur son évolution.

Comme le gisement est recouvert en partie par une dense végétation, l'ouverture des layons pour étaler le dispositif a été nécessaire. En conséquence, pour éviter que les profils partent en zigzagant, on a utilisé le théodolite pour le tracé de ces profils. Seulement,

l'existence de gros arbres en plein milieu d'une ligne nous a contraint de les dévier légèrement.

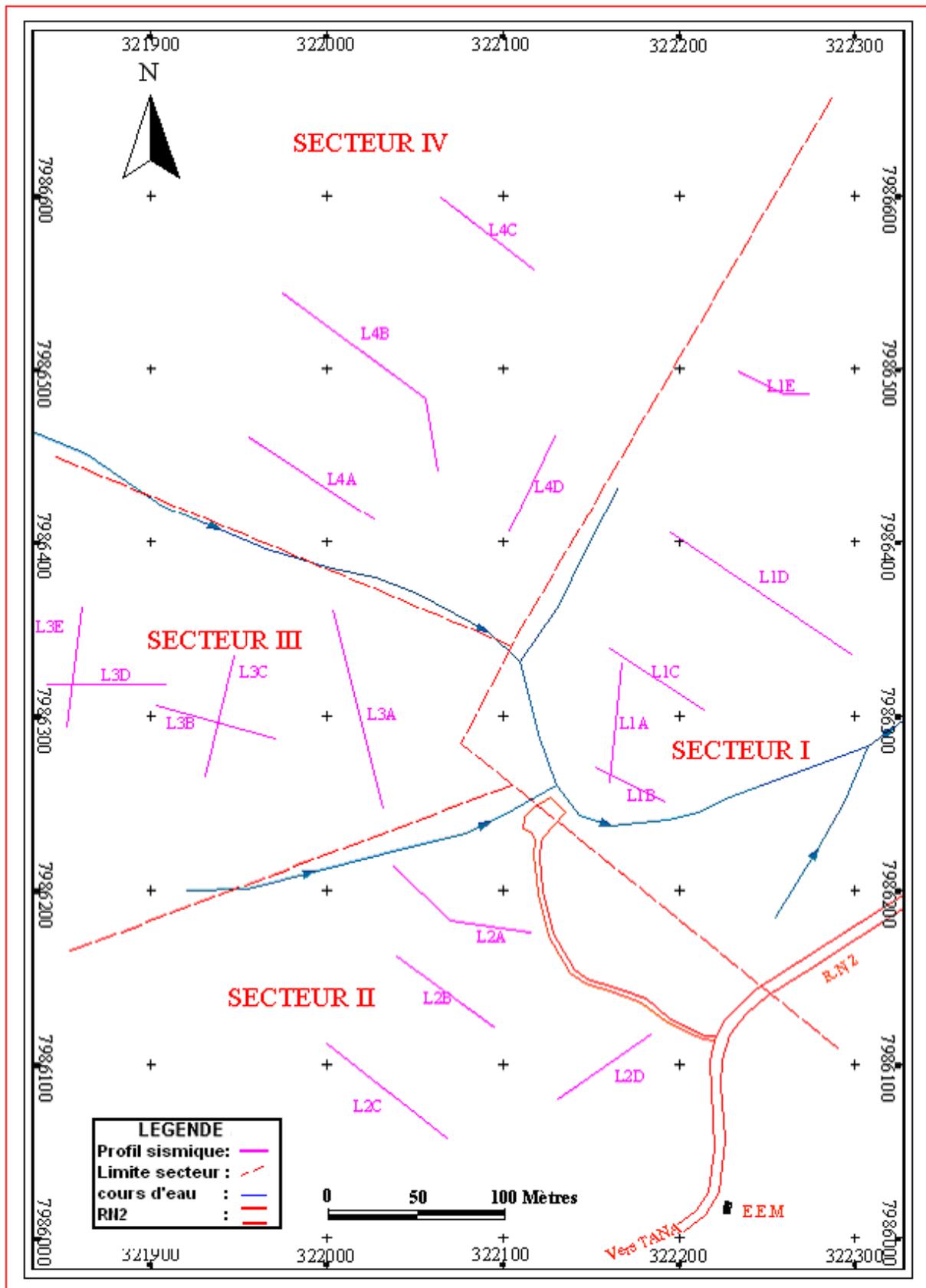


Figure 25: Implantation des profils géophysiques à Sahavakake

**Partie III: EVALUATION DE ROCHES MASSIVES
EXPLOITABLES SUR LES DEUX CARRIERES, ANALABE
ET SAHAVAKAKE**

III.1. INTERPRETATION DES PROFILS GEOPHYSIQUES

ANALABE

Pour différencier les profils sismiques des profils électriques, on les dénommera respectivement PS1 et PE1 suivant leurs numéros.

La longueur totale des 5 profils électriques est égale à 465m et celle des 5 profils sismiques est de 345m

Profils PE1 et PS1

Ils ont été implantés, longitudinalement, sur la terrasse située juste au dessus, à l'Ouest, du front de la carrière ouverte actuellement (cf figure 24). Les profils ont suivis la direction N20°.

Le profil PE1 a été réalisé dans le but de nous donner la gamme de valeurs de résistivités des différentes formations observées sur le front de taille.

Le profil PS1, beaucoup plus long que PE1, a été effectué pour nous donner à la fois la gamme de valeurs de vitesses des différentes formations observées sur le front de taille mais aussi de suivre l'extension probable de l'ancienne carrière vers le Sud Ouest.

Les coupes obtenues (cf Figures 26 et 27) ont mis en évidence deux terrains.

Pour l'électrique :

- la couverture latéritique a des valeurs de résistivité relativement élevée, supérieure à 2000 Ω m ;

- les intrusions basaltiques à texture doléritiques fissurées ont des valeurs de résistivité inférieure à 2000 Ω m.

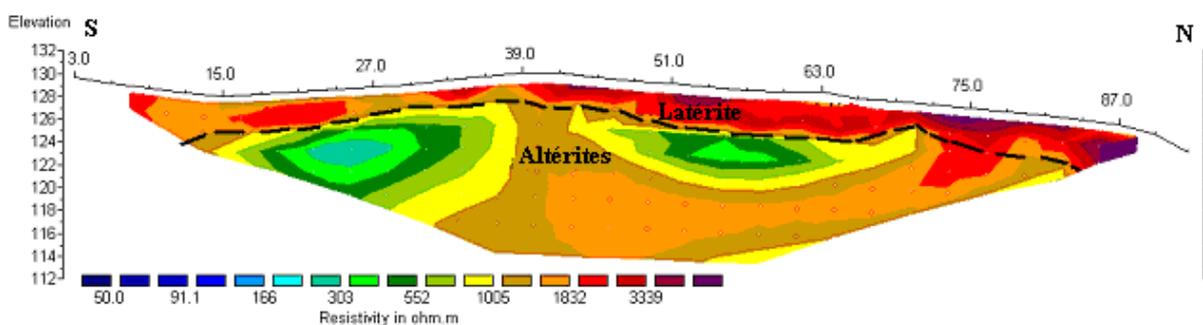


Figure 26: Coupe géoélectrique du profil PE1

Pour la sismique :

- la couverture latéritique est caractérisée par la vitesse sismique lente, inférieur à 400m/s
- la formation de valeur de vitesse comprise entre 400m/s et 1400m/s est formée par des altérites. Elle constitue la deuxième couche ;
- la formation à vitesse rapide (supérieur à 1400m/s) constitue la roche compacte.

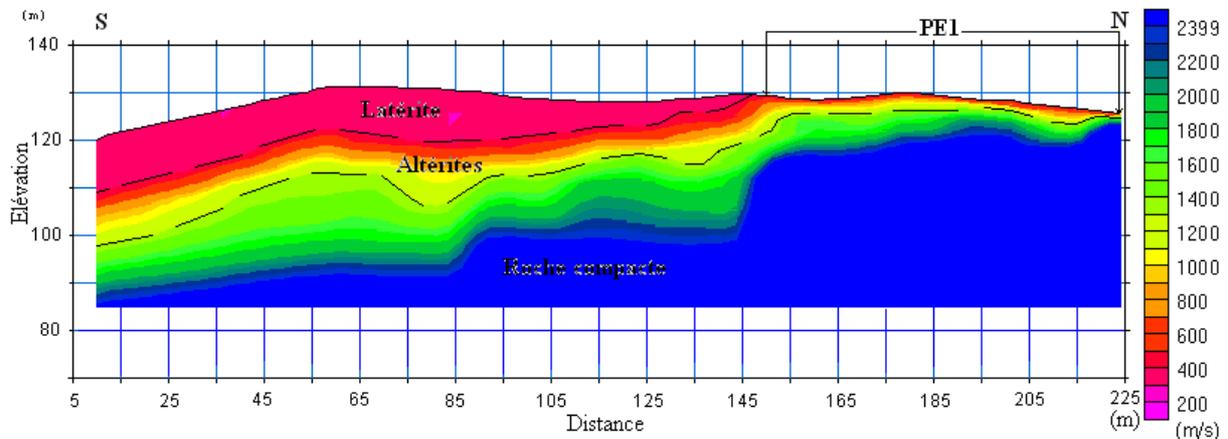


Figure 27: Coupe sismique du profil PS1

La coupe électrique a confirmé l'extension Nord Sud de l'intrusion basaltique. La couverture stérile est inférieure à 4m en moyenne.

Le profil sismique présente une discontinuité à l'aplomb du point A. Le front Ouest de l'intrusion est situé au niveau de cette discontinuité.

Profils PE2 et PS2

Ils ont été étalés, à l'Est, suivant la direction N130° (cf. Figure 24). Ils sont généralement perpendiculaires à la direction supposée de l'intrusion. L'extrémité Ouest est implantée au cœur même de la carrière pour la ligne électrique et l'autre extrémité au bord du ravin. Pour la ligne sismique, le premier géophone à l'Ouest a été décalé de la première électrode pour éviter la flaque d'eau qui pourrait affecter le résultat.

La coupe électrique PE2 a mis en évidence deux formations résistantes constituées, d'une part ; par l'intrusion basaltique en altération localisée depuis l'extrémité Ouest du profil jusqu'à l'abscisse X=24 m, et d'autre part, par la couche latéritique et les éboulis qui s'éparpillent sous la ligne géophysique.

Une formation conductrice de résistivité inférieure à 300Ωm, en subsurface et en profondeur est observée sur la partie Ouest du profil (cf. Figure 28). Elle correspond à la formation imbibée d'eau.

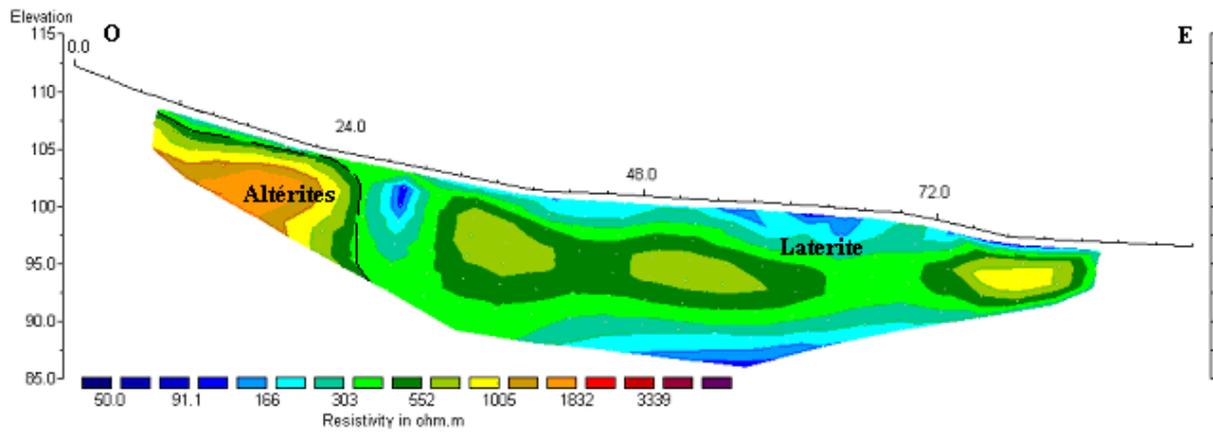


Figure 28: Coupe géoélectrique du profil PE2

La coupe sismique PS2 a mis en évidence l'intrusion basaltique à son extrémité Ouest. Elle confirme l'observation faite sur le terrain et le résultat de la coupe géoélectrique.

Le front de la carrière ouverte est situé à 24m de la limite Est de cette intrusion. L'ouverture d'un nouveau front au niveau de la limite du filon apportera beaucoup plus de volume de roche.

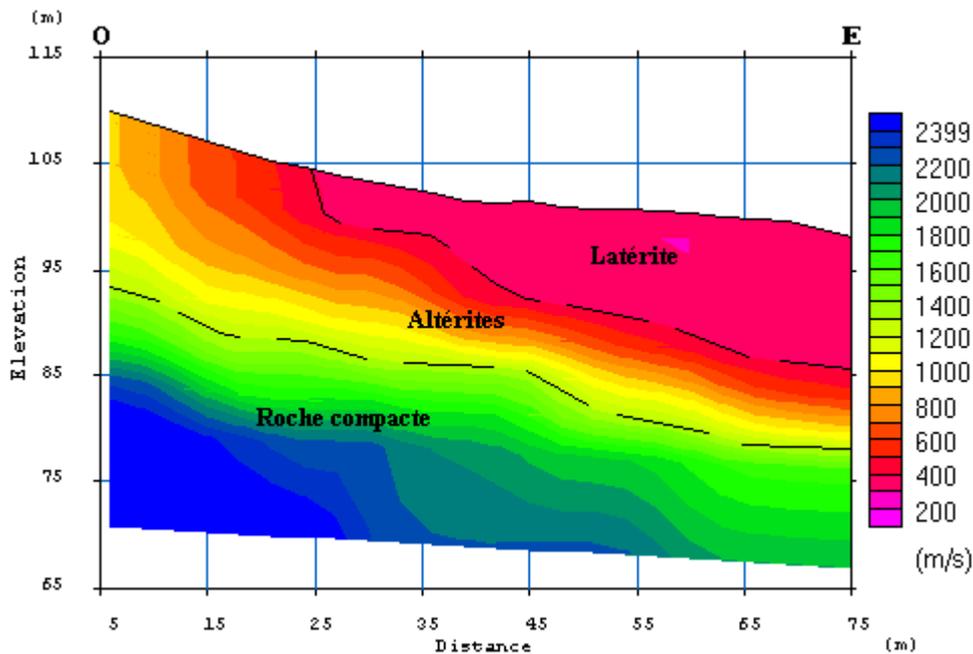


Figure 29: Coupe sismique du profil PS2

Profils PE3 et PS3

Comme on ne peut pas couper perpendiculairement l'intrusion au niveau de la carrière ouverte. Les profils ont été étalés, à l'Ouest, depuis le sommet de la crête où se situe l'ouverture de la carrière, suivant la direction N105° (cf. Figure 24).

Pour l'électrique (cf. Figure 30), la coupe a rencontré les deux formations résistantes et la formation conductrice :

- La première formation résistante couvre le sommet avec une épaisseur moyenne de 4m. Elle correspond à la couverture latéritique. Elle surmonte l'intrusion basaltique sur une largeur de 24m.
- La deuxième formation résistante dévale la pente. Elle a une puissance moyenne de 3m et correspond à la couverture latéritique et les roches altérées accompagnées des éboulis
- La formation conductrice dans la partie Ouest de la colline repose probablement sur la roche encaissante en profondeur qui n'est pas atteinte par les lignes électriques.

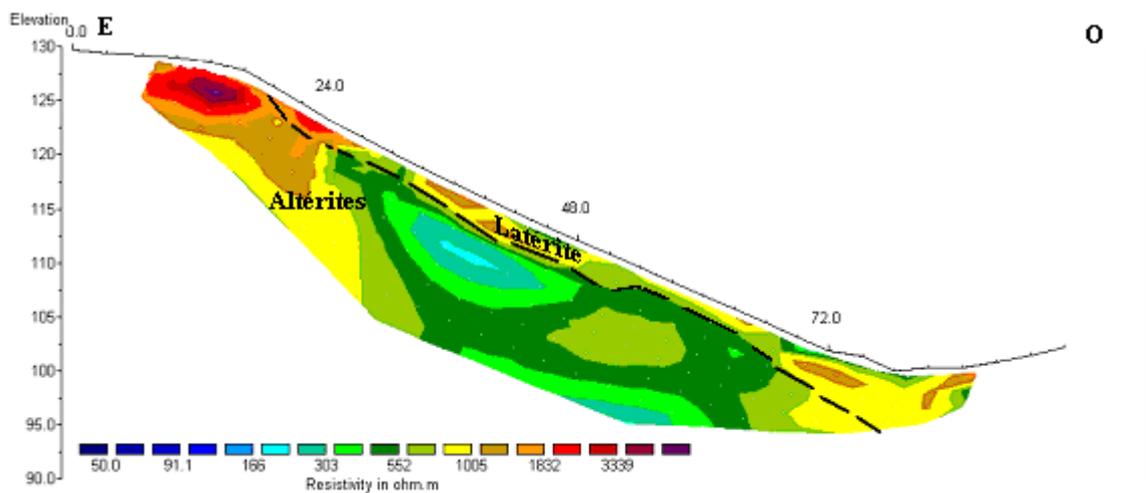


Figure 30: Coupe géoélectrique du profil PE3

Le bout Est du profil sismique (cf. Figure 24) a été décalé de 10m à l'Ouest de celui de l'électrique, pour pouvoir effectuer le tir « Offset ». La coupe sismique (cf. figure 31) obtenue nous confirme le résultat de l'électrique, la mi-largeur de l'intrusion de 24m, mais avec une profondeur d'investigation beaucoup plus importante.

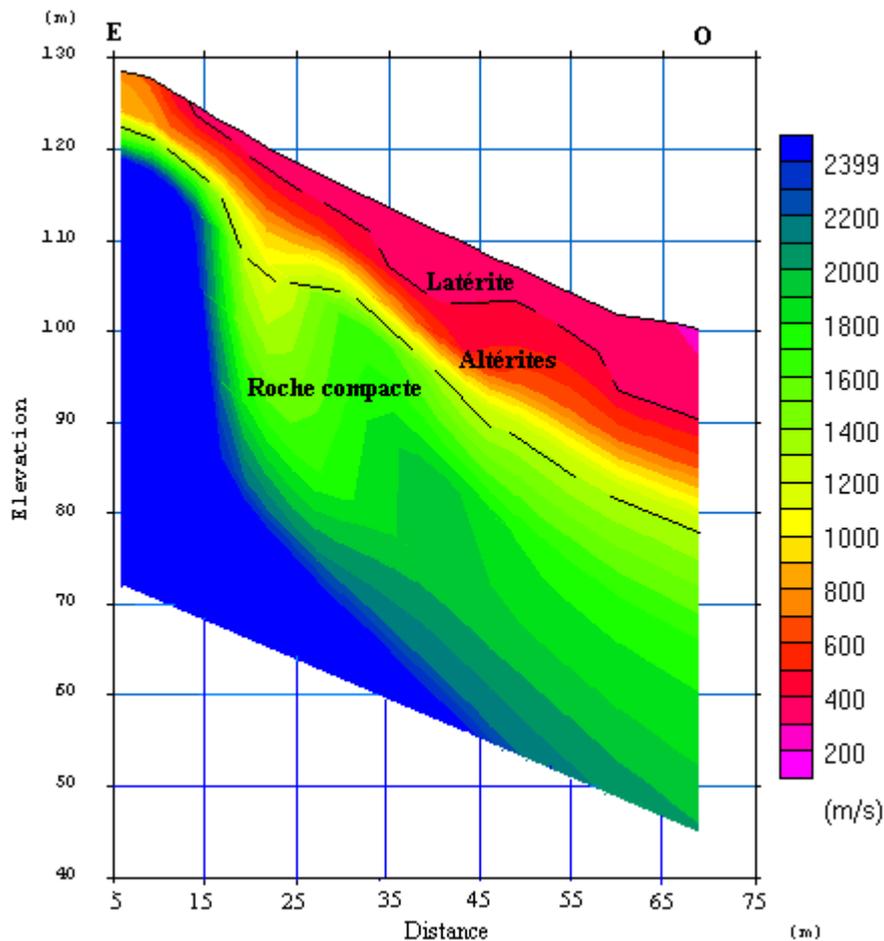


Figure 31: Coupe sismique du profil PS3

La largeur obtenue, après combinaison des deux profils, est plus de 48m. Les fronts Est et Ouest de l'intrusion sont subverticaux.

Profils PE4 et PS4

Les deux profils ont été implantés, longitudinalement, sur la terrasse située juste au dessous, à l'Est, du front de la carrière ouverte actuellement. Les deux profils sont quasiment confondus et ont suivi la direction N15°. La longueur de ligne utilisée en électrique est de 93m permettant d'atteindre la profondeur d'investigation 15m. La distance inter géophone pour la sismique est de 3m.

Ils ont été réalisés dans le but de suivre l'évolution vers l'Est de la carrière ouverte. La coupe géoélectrique obtenue (cf figure 32) a mis en évidence deux formations.

Le premier terrain, de valeur de résistivité faible, est formé par la partie superficielle qui retient l'humidité causée par les pluies récentes. Elle est localisée sur la partie creuse du profil et à une très faible épaisseur.

Le deuxième terrain, de valeur de résistivité relativement élevée, représente les éboulés. On les retrouve aux environs des deux extrémités et s'enfoncent jusqu'à plus de 10m de profondeur.

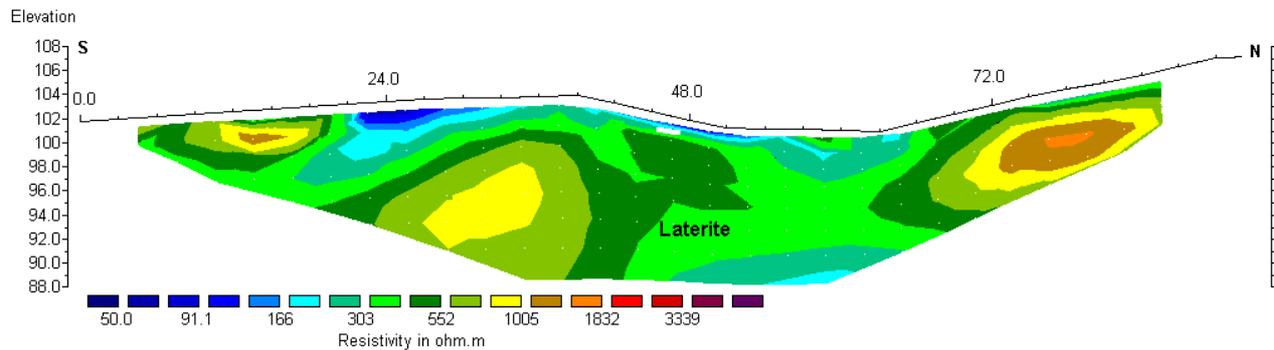


Figure 32: Coupe géoélectrique PE4

Comme les cas précédents, la coupe sismique nous a permis d'avoir plus d'information en profondeur.

Le sous sol est formé (cf. Figure 33) :

- du premier terrain constitué des latérites jaunes rougeâtres provenant du décapage effectué lors de l'ouverture de la carrière;
- du deuxième terrain formé des éboulés plus ou moins compacts, résultant de l'altération de l'intrusion basaltique ;
- de la roche compacte, qui n'est pas atteinte par l'électrique, formée par l'intrusion basaltique saine.

La roche compacte se trouve à plus de 15m de profondeur sous le profil. On peut dire que la roche saine plonge rapidement en allant vers l'Est.

Les profils ont confirmé l'extension probable Nord Sud de cette intrusion.

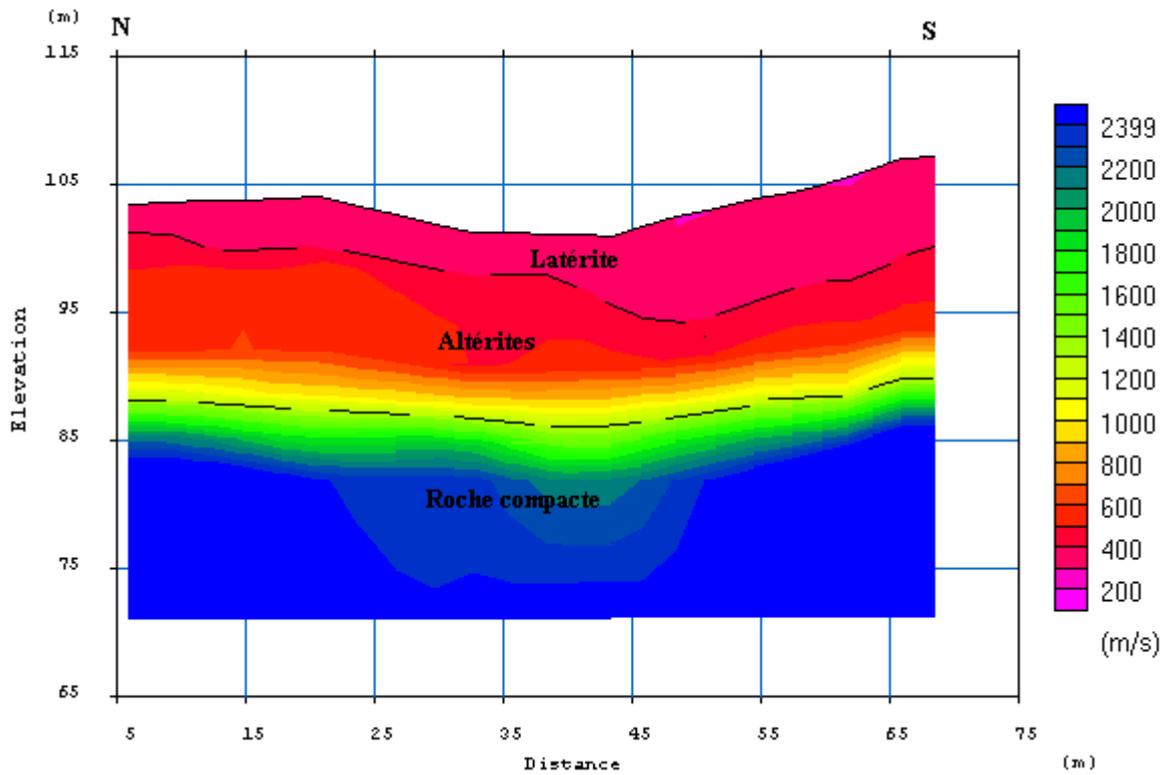


Figure 33: Coupe sismique PS4

Profil PS5

Il a été implanté, à 20m à l'Est des profils PE4 et PS4, sur la terrasse située juste en face du front de la carrière ouverte actuellement (cf. Figure 24). Il a pris la direction N45. Il a été réalisé dans le but de confirmer le résultat obtenu avec les deux profils précédents.

La coupe a montré que la roche saine est à plus de 20m de profondeur.

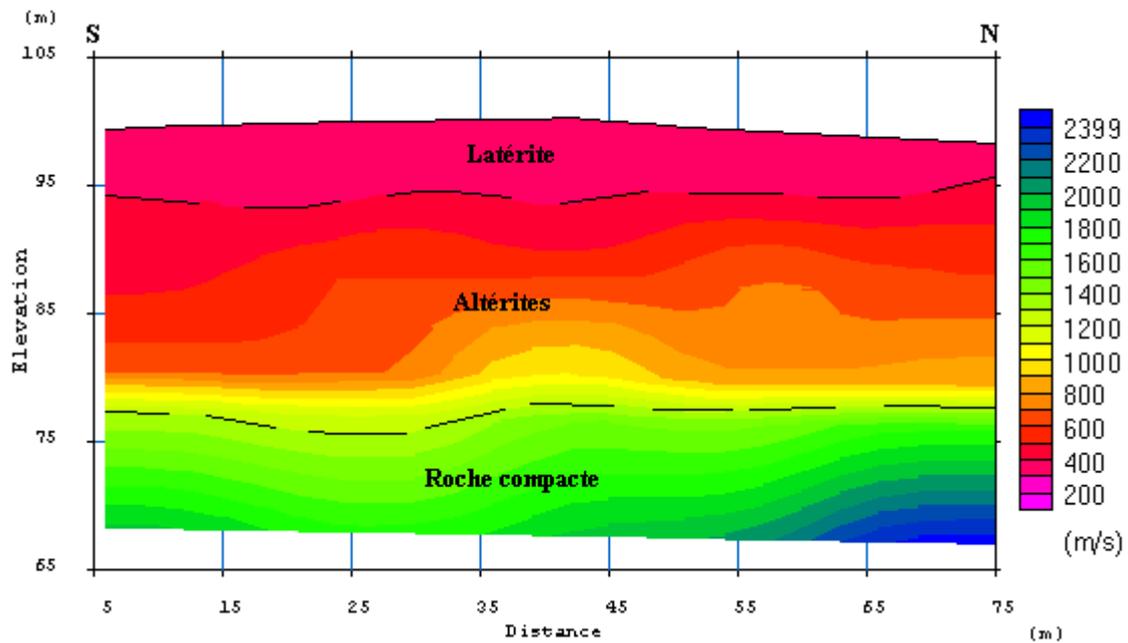


Figure 34: Coupe sismique du profil PS5

Profil PE5

Il a été implanté à 100m, côté Ouest, de la colline principale où se trouve la carrière ouverte (cf. Figure 24). Il a pris la direction N65°. Il a été réalisé dans le but de suivre l'extension probable vers l'Ouest de la carrière. Il se trouve à la limite de la propriété de l'Agence Immobilière Mahasoava.

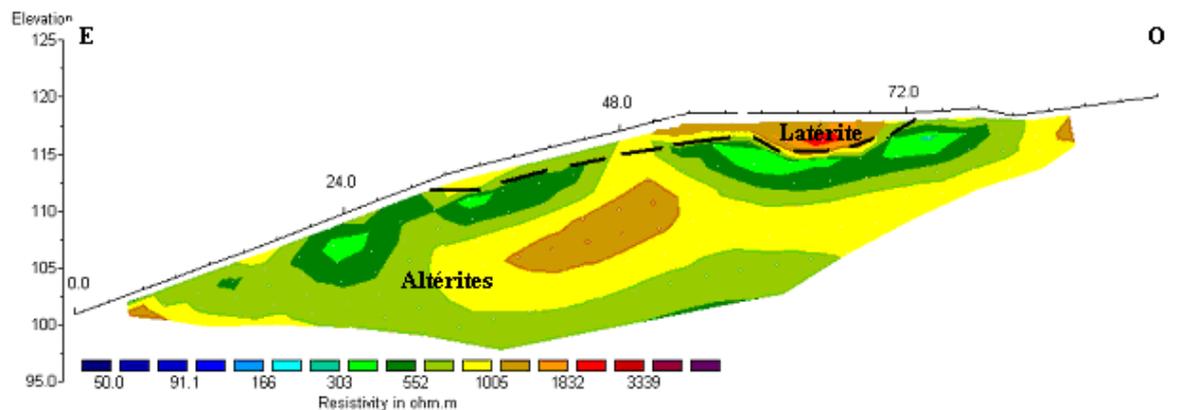


Figure 35: Coupe géoélectrique PE5

La coupe nous montre que la formation atteinte par la ligne installée est de l'ordre de 15m. Elle est constituée de latérite. La roche saine est certainement à une profondeur beaucoup plus importante.

D'après l'interprétation ci-dessus les méthodes électrique et sismique se corrèlent assez bien malgré les quelques nuances dues aux parties imbibées d'eau et la profondeur d'investigation qui est plus importante en sismique. Ainsi, la méthode sismique s'avère la mieux adapter pour l'étude de gisement de roche massive pour empierrement.

SAHAVAKAKE

Seule, la méthode sismique a été déployée sur ce site. Les lignes ont été implantées sur 18 profils (cf. Figure 25).

Le choix de la direction du profil et l'implantation du dispositif de mesure ont été réalisés suivant la même procédure que ce que l'on a fait à Analabe.

Secteur I

Il comporte cinq profils sismiques de longueur total égal à 421m

Profil L1A

Il a été implanté, longitudinalement, sur la pente située juste au dessus, à l'Est, du front de la carrière ouverte actuellement (cf. Figure 25).

On a observé la succession de terrains suivante :

- Couverture latéritique, inférieure à 2m,
- Intrusion basaltique à texture doléritique de 2m à 7m.

Le profil L1A a été réalisé dans le but de nous donner la gamme de valeurs de vitesses des différentes formations observées sur le front de taille. Il joue le rôle de profil étalon (cf Figure 36).

La couverture latéritique est caractérisée par la valeur de vitesse lente (inférieur à 500m/s), tandis que, la roche altérée accompagnée des roches éboulées est caractérisées par la vitesse intermédiaire (entre 500 et 1400m/s), elle constitue la deuxième couche. Ces deux premières couches sont interprétées par lecture directe sur l'ancien front.

La formation à vitesse rapide (supérieur à 1400m/s) constitue la roche compacte.

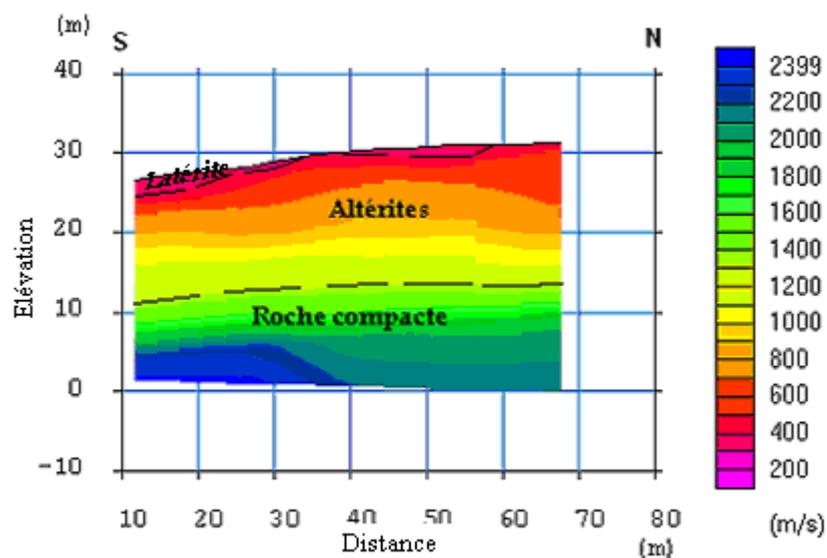


Figure 36: Coupe sismique du profil L1A

Ainsi, les formations sous le profil sismique se succèdent par degré d'altération décroissant du haut en bas. La couverture latéritique a une puissance inférieure à 2 m. La roche en boule altérée a une épaisseur moyenne de 14m. La roche compacte sous la roche altérée a une profondeur supérieure à 15m.

Profil L1B

Il a été étalé, à l'extrémité Sud du secteur I, suivant la direction N115° (cf. Figure 25). Il est globalement perpendiculaire à la direction supposée de l'intrusion qui suit la ligne de crête de la colline constituant le secteur I et coupe le profil L1A à son extrémité Sud. L'extrémité Ouest est implantée au bord du talus qui est le reste de l'ancienne exploitation et l'autre extrémité à l'Est affleure le bas fond principal.

La vitesse obtenue sur la coupe sismique L1B (cf. Figure 37) est relativement basse, inférieure à 1100m/s. Le dispositif n'a atteint que les deux premières couches qui ont une puissance supérieure 20m.

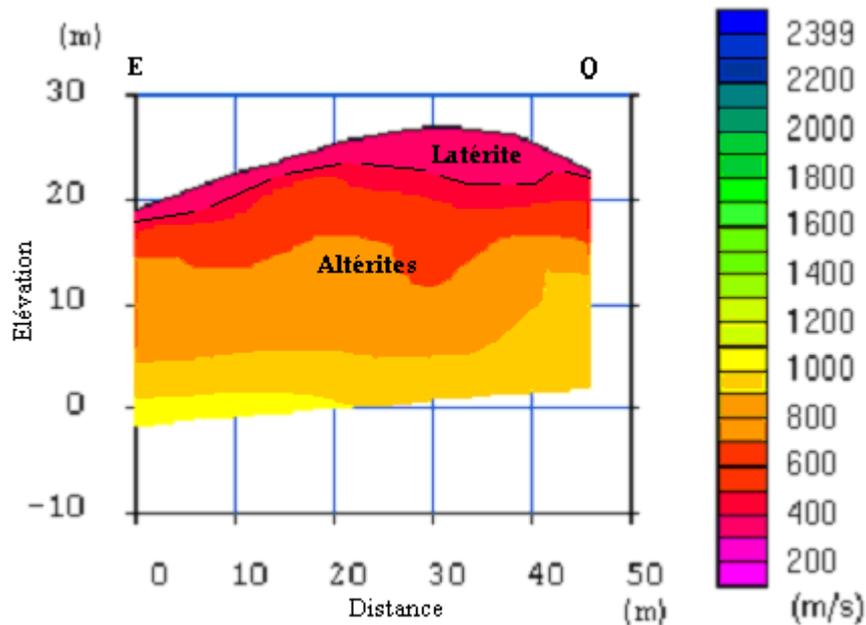


Figure 37: Coupe sismique du profil L1B

Profil L1C

Ce profil a été étalé à 60m au Nord du Profil L1B. Il a pris la direction N120° et coupe perpendiculairement la ligne de crête de la colline du secteur I (cf. Figure 25).

La coupe sismique (cf. Figure 38) obtenue nous montre que les trois formations de la coupe L1A sont retrouvées. La couverture latéritique proprement dite a une épaisseur minimale de 5m à l'Ouest et s'épaissit jusqu'à 9m à l'Est. Les roches fissurées a une puissance de 20m au centre et s'amincie de 10m aux deux extrémités Est et Ouest. La roche compacte surmontée par la roche altérée se trouve à plus de 20m de profondeur sous la ligne sismique.

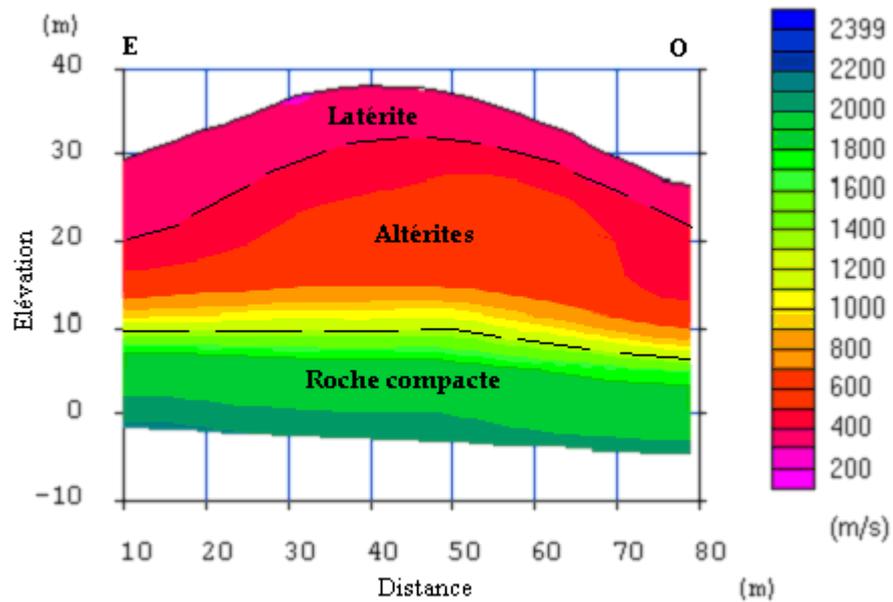


Figure 38: Coupe sismique du profil L1C

Profil L1D

Ce profil est constitué de deux lignes sismiques imbriquées dont la distance inter géophones est de 3m. Il a été étalé parallèlement à 75m au Nord du profil L1C. Il coupe perpendiculairement la colline de l'Ouest à l'Est avec une direction N120°. Il a été réalisé dans le but de détecter la présence de roches massives.

Ainsi, la coupe sismique obtenue (cf. Figure 39) a mis en évidence trois formations, la couverture latéritique a une puissance moyenne de 12m au centre et au centre Est, elle devient 4m à l'Ouest. Les éboulées suivent généralement la première formation d'épaisseur moyenne de 20m. La roche compacte se situe à une profondeur supérieure à 25 m sous le profil.

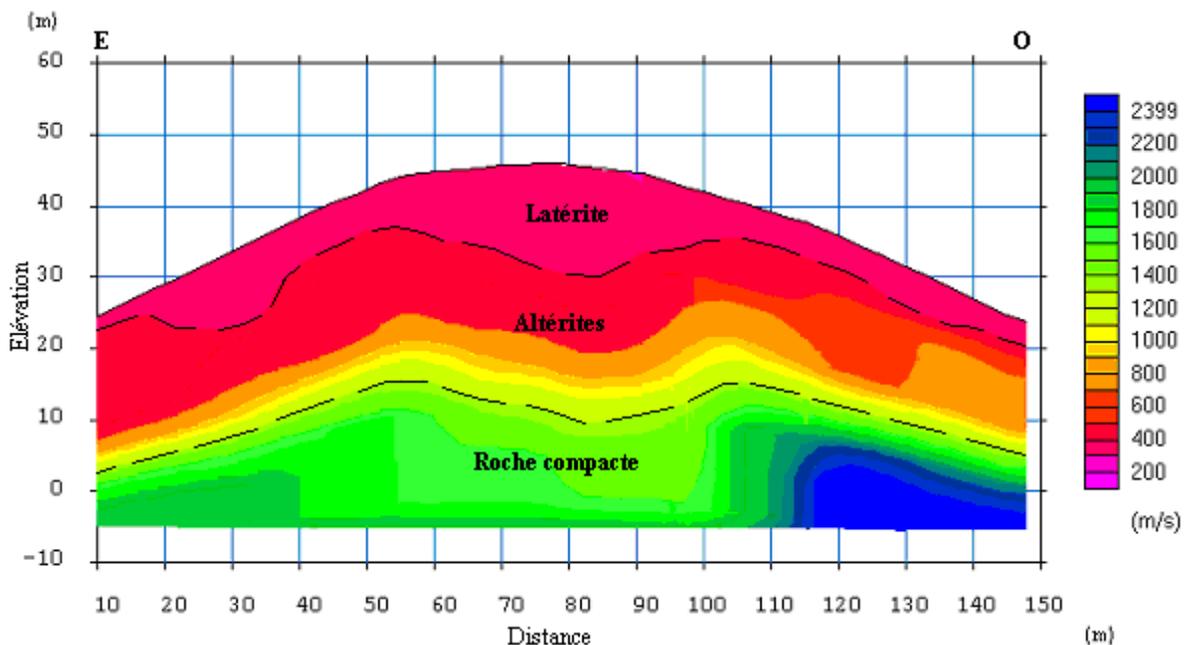


Figure 39: Coupe sismique du profil L1D

Profil L1E

Il a été implanté à 110m du profil L1D (cf. Figure 25). Il ferme la série de mesures sur le secteur I car il se trouve à la limite Nord de la zone d'étude. Il a été réalisé dans le but de suivre l'évolution vers le Nord de la roche altérée et la roche compacte.

La coupe (cf. Figure 40) nous montre que la couverture latéritique est inférieure à 5m d'épaisseur et les roches altérées ont une puissance moyenne de 12m à l'extrémité Est du profil et croît régulièrement jusqu'à la valeur de 20m à l'Ouest. La roche compacte n'est décelable qu'à une petite partie à l'Est sous le profil. Elle se situe à 15m de profondeur.

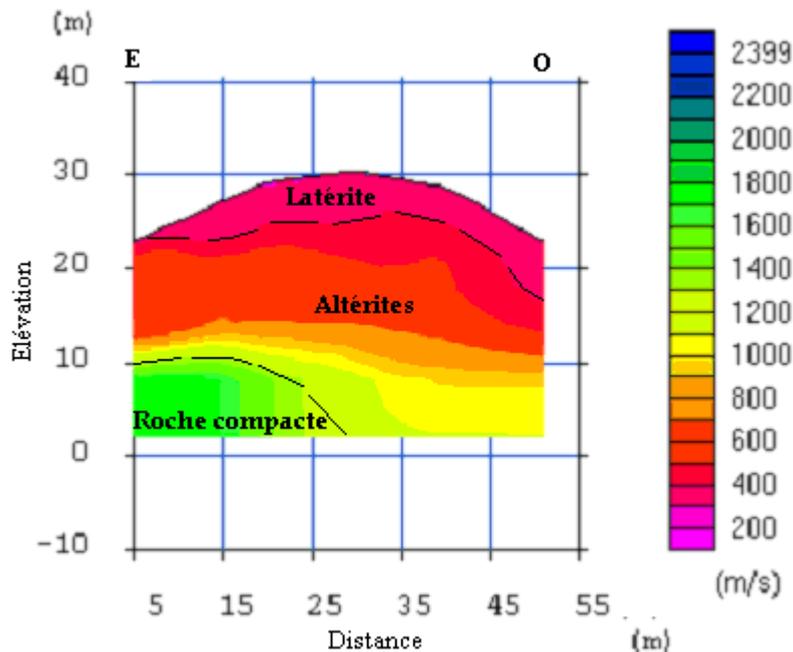


Figure 40: Coupe sismique du profil L1E

Les trois profils L1A, L1C, L1D ont mis en évidence la présence de roches massives susceptibles d'être utilisées pour empierrement.

Secteur II

Il comporte quatre profils sismiques de longueur total égal à 316m (cf. Figure 25).

Profil L2A

Le profil L2A a été implanté à extrémité Nord de la colline constituant le secteur II. Il est constitué de deux lignes sismiques imbriquées dont la distance inter géophones est de 2m. Il coupe perpendiculairement la direction de la ligne de crête supposée être la direction préférentielle des intrusions basaltiques de la zone. Il a pris la direction N130°.

La coupe sismique a mis en évidence la succession de trois formations identiques à celles observées sur le secteur I. La couverture latéritique a une puissance moyenne de 4m et

dévié 1m à Ouest de ce profil. Les altérites ont une puissance supérieure 15m (cf. Figure 41). Le toit de la roche compacte se trouve à une profondeur supérieure à 20m.

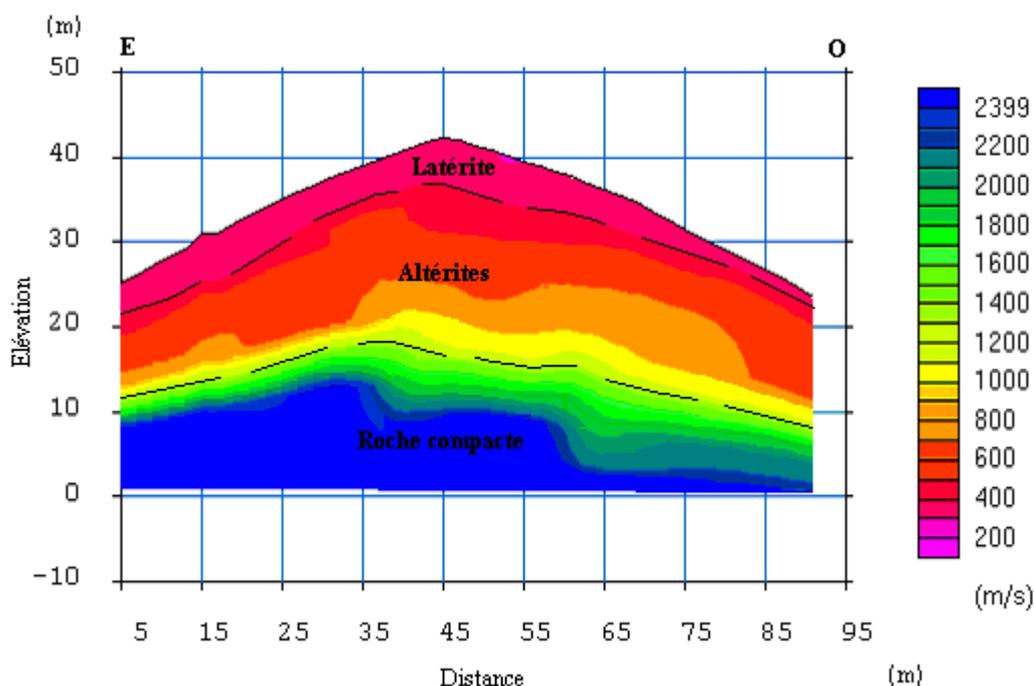


Figure 41: Coupe sismique du profil L2A

Profil L2B

Il a été implanté perpendiculairement à la direction de la ligne de crête de la colline. Il se trouve à 35m au Sud du profil L2A. Il a pris la direction N125° (cf. Figure 25). Il a été réalisé dans le but de peaufiner l'observation que l'on a effectuée en surface.

La couverture latéritique a une puissance de 3m aux deux extrémités Est et Ouest (cf. Figure 42), et elle augmente jusqu'à 10m d'épaisseur au centre. L'épaisseur de la roche fissurée varie de 16m à 20m de l'Est vers l'Ouest.

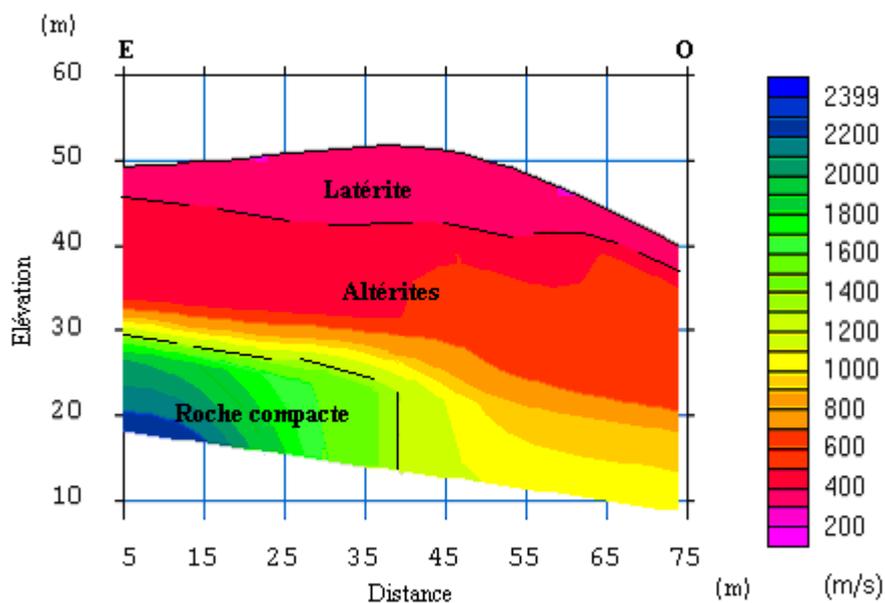


Figure 42: Coupe sismique du profil L2B

Profil L2C

Il a été implanté à l'extrême Sud du domaine. Il se trouve à 70m au Sud du profil L2B. Il a pris la direction N130° (cf. Figure 25). Il a été réalisé dans le but de suivre l'évolution de l'intrusion basaltique vers le Sud et d'évaluer la couverture latérite

La coupe a mis en évidence que (cf. Figure 43) la couverture latéritique a une profondeur de 10m sur la moitié Ouest du profil et s'amincit jusqu'à 4m au bout Est. La puissance moyenne des altérites est de 15m. La profondeur de la roche compacte est supérieure à 25m sous le profil.

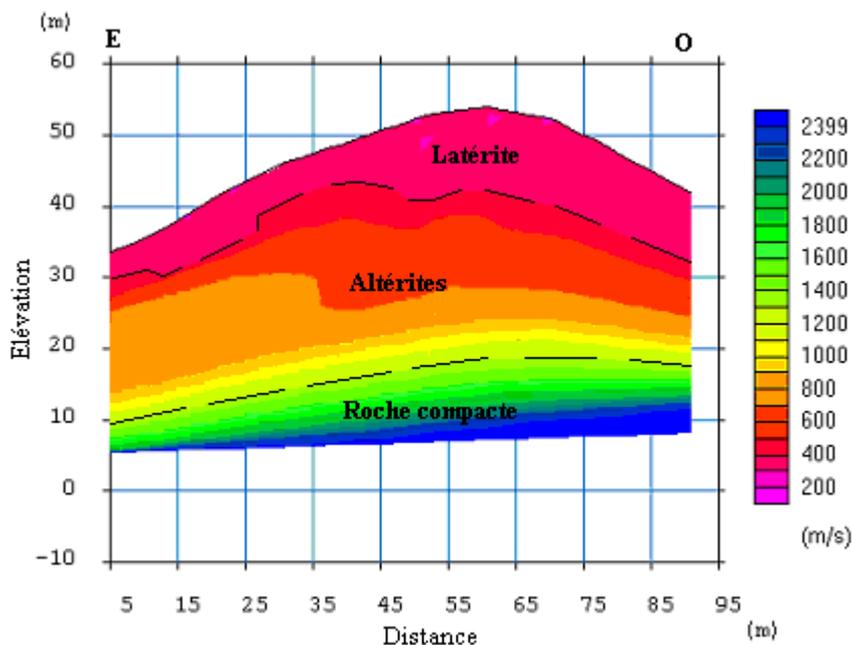


Figure 43: Coupe sismique du profil L2C

Profil L2D

Il a été implanté au Nord Est du secteur II. Il a pris la direction N60° (cf. Figure 25). Il a été réalisé dans le but d'évaluer la couverture latéritique et de suivre l'évolution de la roche massive vers l'Est.

La coupe obtenue (cf. Figure 44) a mis en évidence trois terrains :

- La couverture latéritique est beaucoup plus épaisse, elle a une puissance moyenne de 18m ;
- La deuxième formation, constituée par les éboulées, a une épaisseur supérieure à 10m ;
- Le toit de la roche compacte est à 25m de profondeur sous le profil.

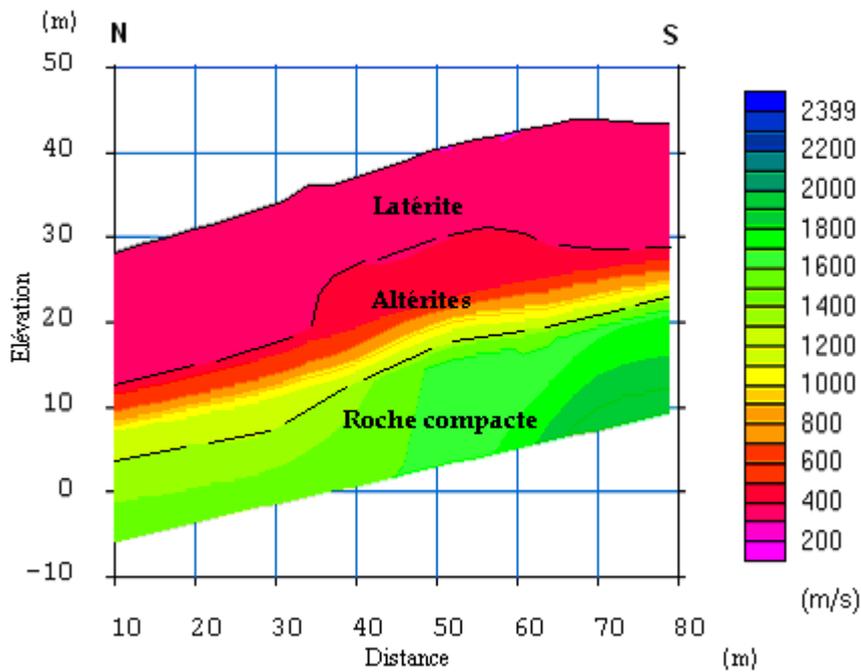


Figure 44: Coupe sismique du profil L2D

L'étude, réalisée sur le secteur II, a indiqué que la roche massive s'allonge suivant la direction de la ligne de crête globalement Nord Sud. Les trois premiers profils nous indiquent que l'épaisseur de la latérite est relativement faible, elle est inférieure à 10m. La couverture latéritique du quatrième a une épaisseur beaucoup plus importante. Elle avoisine les 15m.

Secteur III

Le secteur III se situe plus ou moins au centre de la zone d'étude. La colline qui le constitue s'oriente de l'Ouest à l'Est. Lors de la prospection, on a remarqué la présence de quelques affleurements de roches intrusives, tandis que toute indice, de présence de roches massives, est absent sur la partie Est. Alors, cinq profils (cf. Figure 25), d'une longueur totale de 408m, ont été étalés.

Le but est de couvrir le secteur pour déceler la présence de roches massives, ensuite d'évaluer la puissance de la stérile et enfin de suivre, si le cas se présente, l'évolution de la roche dure sous jacente.

Profil L3A

Il a été implanté perpendiculairement à la direction de la ligne de crête de la colline que forme le secteur III. Il a pris la direction N160° (cf. Figure 25). Il est constitué de trois lignes sismiques imbriquées dont la distance inter géophones est de 2m.

La succession de terrain, en terme de vitesse, donne une épaisseur de couverture latéritique de l'ordre de 5m (cf. Figure 45) au Sud du profil, au centre, elle augmente jusqu'à

10m puis, diminue pour atteindre la valeur minimale de 2m à l'extrême Nord du profil. La formation à vitesse intermédiaire s'épaissit insensiblement depuis l'extrême Sud jusqu'à l'abscisse X=110m. Elle a une épaisseur moyenne de 15m. Ensuite, elle présente une discontinuité accompagnée d'une diminution de l'épaisseur pour atteindre la valeur de 6m au Nord du profil. La roche compacte caractérisée par la valeur de vitesse sismique élevée est probablement enfouie à plus de 20m de profondeur depuis l'extrême Sud jusqu'à la discontinuité.

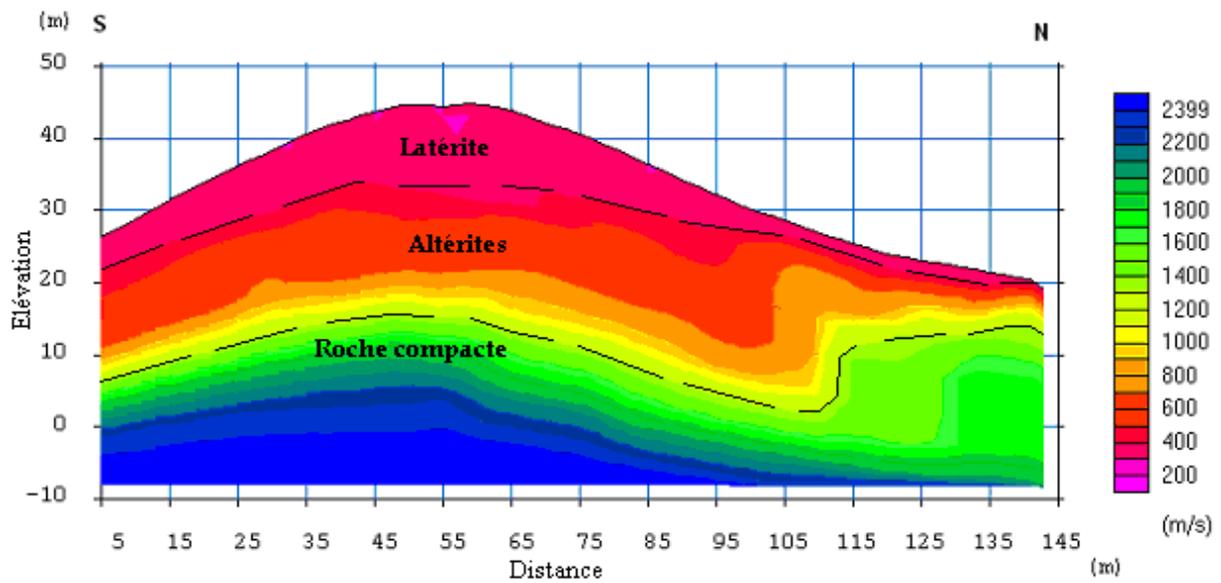


Figure 45: Coupe sismique du profil L3A

Profil L3B

La ligne a été étalée le long de la ligne de crête (cf Figure 25). La présence de quelques affleurements nous a incité à faire l'implantation à ce niveau. Le profil a pris la direction N85°. L'objectif de cette implantation est de délimiter la roche s'il est présent.

La coupe sismique n'a pas mis en évidence que les deux premières formations:

- La couverture latéritique présente une épaisseur de 5m ;
- Tandis que les roches altérées ont une profondeur beaucoup plus importante, leur puissance est supérieure à 25m.

En conséquence, le dispositif n'a pas atteint la roche compacte.

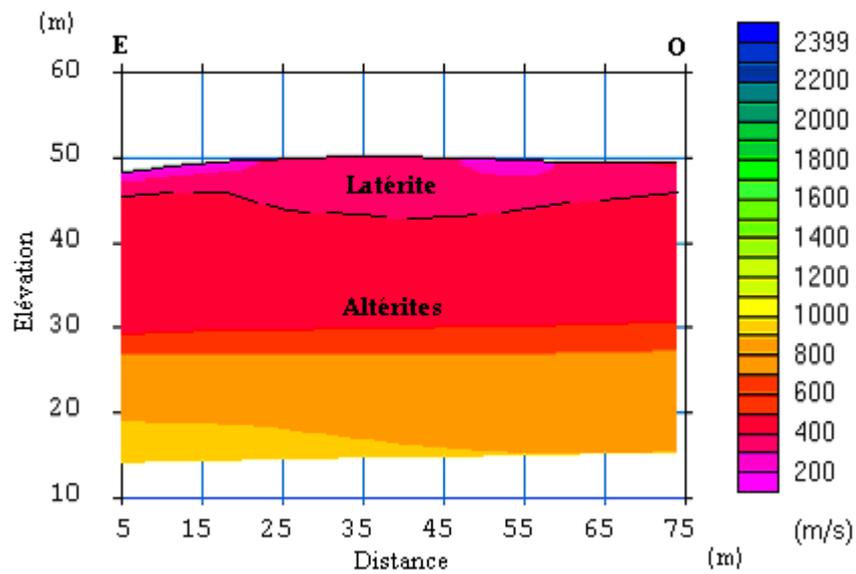


Figure 46: Coupe sismique du profil L3B

Profil L3C

Le profil a été étalé perpendiculairement au précédent. Leurs centres sont confondus (cf. Figure 25). Il a pris une direction globalement N20°. L'objectif est de couper la ligne de crête de la colline comme le cas du profil L3A.

Les roches altérées sont présentes sous la totalité de la ligne sauf, sur une toute petite partie au Sud sous le profil (cf. Figure 47) où la roche compacte est présente au Sud à 2m de profondeur sous le profil avec une largeur de l'ordre de 10m.

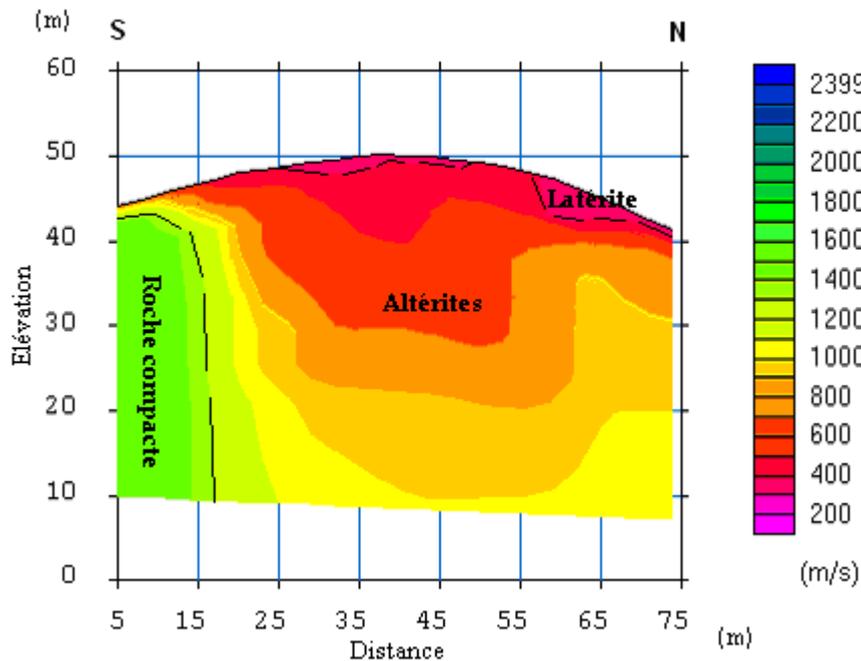


Figure 47: Coupe sismique du profil L3C

Profil L3D

Il a été implanté à l'extrémité Ouest du secteur III et longe la ligne de crête depuis l'extrémité Ouest (cf. Figure 25). Il a le même objectif que le profil L3B. Il a pris la direction N05°.

La formation latéritique a une faible épaisseur égale à 4m au centre. Puis, son épaisseur augmente de part et d'autre, elle atteint les valeurs de 15m au bout Est et 10m au bout Ouest. Inversement, La deuxième formation se présente comme un dôme où le sommet est localisé à l'aplomb de l'abscisse X=50m (figure 48). Le dispositif n'a pas atteint la roche compacte.

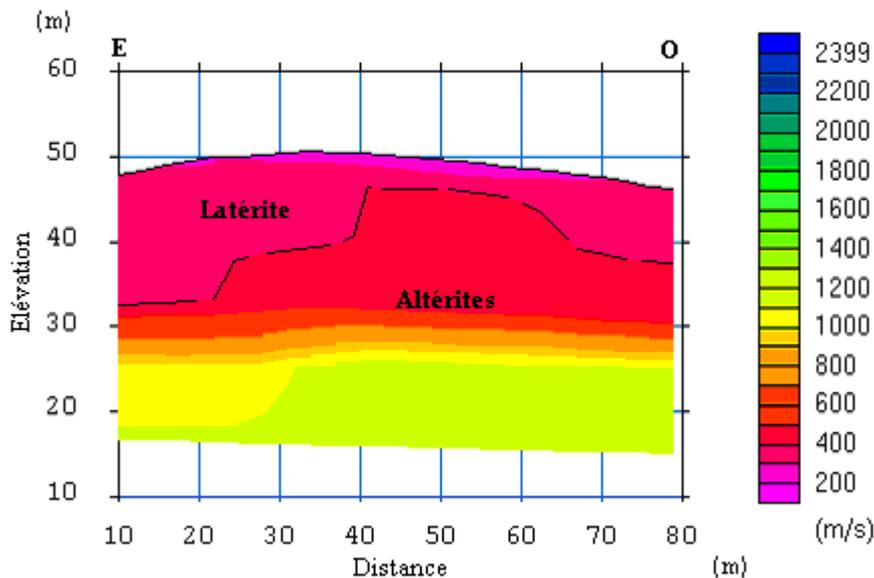


Figure 48: Coupe sismique du profil L3D

Profil L3E

Il a été étalé perpendiculairement au profil L3D. Il a pris la direction N20° (cf. Figure 25). Comme les trois derniers profils, la distance inter géophones est de 3m.

La coupe sismique a mis en évidence trois formations :

- la formation à vitesse lente (inférieur à 500m/s) a une profondeur variable, 18m au Sud et diminue jusqu'à 6m à l'extrême le Nord (cf. Figure 49);
- la formation à vitesse intermédiaire (entre 500 et 1400m/s) présente une puissance de l'ordre de 20m ;
- le toit de la formation à vitesse rapide (supérieur à 1400m/s) se trouve à 30m de profondeur sous le profil.

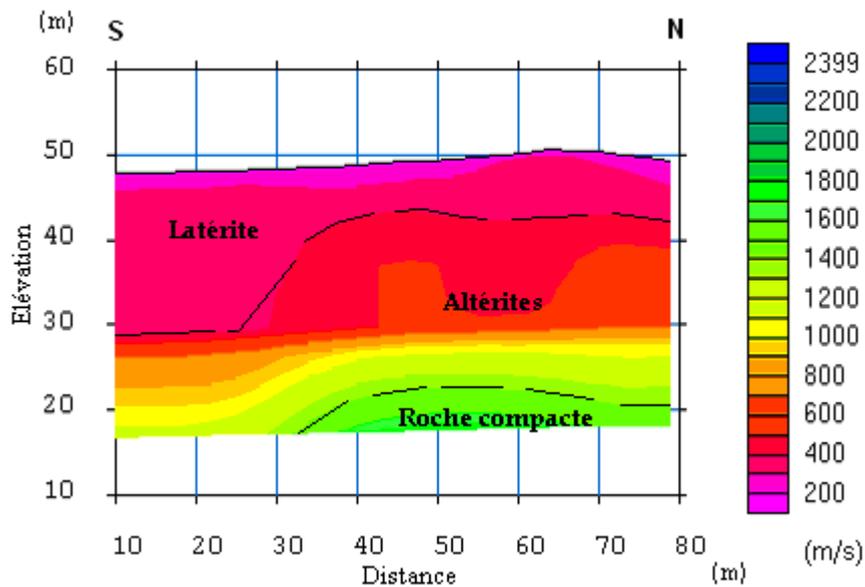


Figure 49: Coupe sismique du profil L3E

La colline du secteur III n'est pas intéressante, les différentes formations rencontrées sont à vitesse relativement faible. La roche compacte susceptible d'être utilisée en empierrement se trouve à une profondeur relativement élevée.

Secteur IV

Le secteur IV culmine au Nord de la zone prospectée. Elle comporte quatre profils sismiques L4A, L4B, L4C et L4D, de longueur totale égale à 362m.

Profil L4A

Il a été étalé, au Sud Ouest du secteur IV, sur une pente en coupant la ligne de crête. Il a pris la direction N130° (cf. Figure 25).

La coupe sismique a mis en évidence la succession de terrains suivants :

- la couverture latéritique qui s'épaissit de l'Est vers l'Ouest. Elle est de l'ordre de 2m au bout Est et atteint la valeur de 10m au bout Ouest.
- les altérites, formées essentiellement des roches éboulées, qui s'amincissent de l'Est vers l'Ouest (cf. Figure 50) ;
- la roche compacte dont le toit à 18m de profondeur sous le profil.

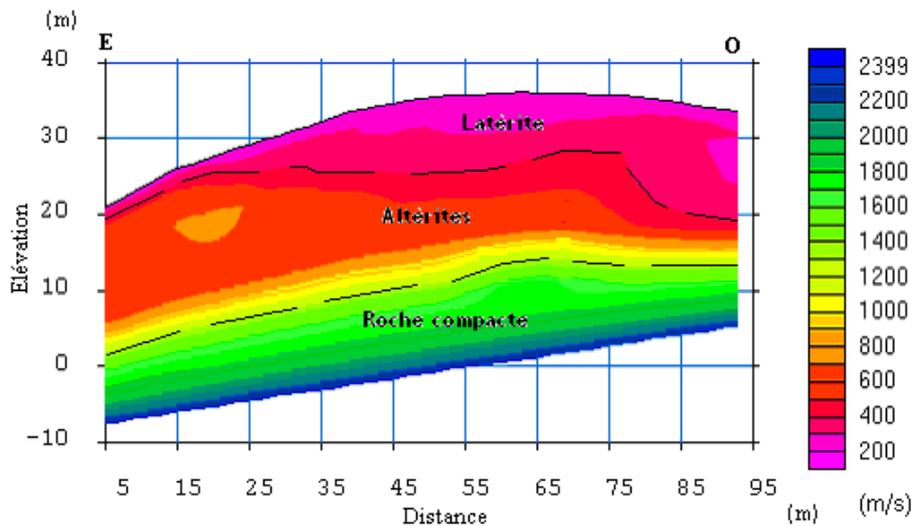


Figure 50: Coupe sismique du profil L4A

Profil L4B

Il a été étalé à 80m au Nord du profil L4A. La première moitié a pris la direction N125° et la deuxième moitié la direction N180° (cf. Figure 25). Cette procédure a été adoptée dans le but de couper la colline suivant sa ligne de crête. Il est le résultat de l'imbrication de deux lignes sismiques où la distance inter géophone est de 3m.

La coupe sismique nous montre que :

- la couverture latéritique accompagnée par les éboulis a une faible épaisseur au Sud. Puis, augmente jusqu'à 10m au centre du profil. Ensuite, diminue de nouveau vers l'Ouest
- les altérites surmontant la roche compacte a une puissance variable, elle oscille entre 6m et 20m et se trouve a une profondeur de 20m, et elle diminue de 8m à l'Ouest ;
- la roche compacte dont le toit se trouve à une profondeur supérieure à 20m excepté le flanc Ouest où il se trouve à moins de 10m de profondeur. A ce niveau, on a une discontinuité de la formation à vitesse élevée (figure 51).

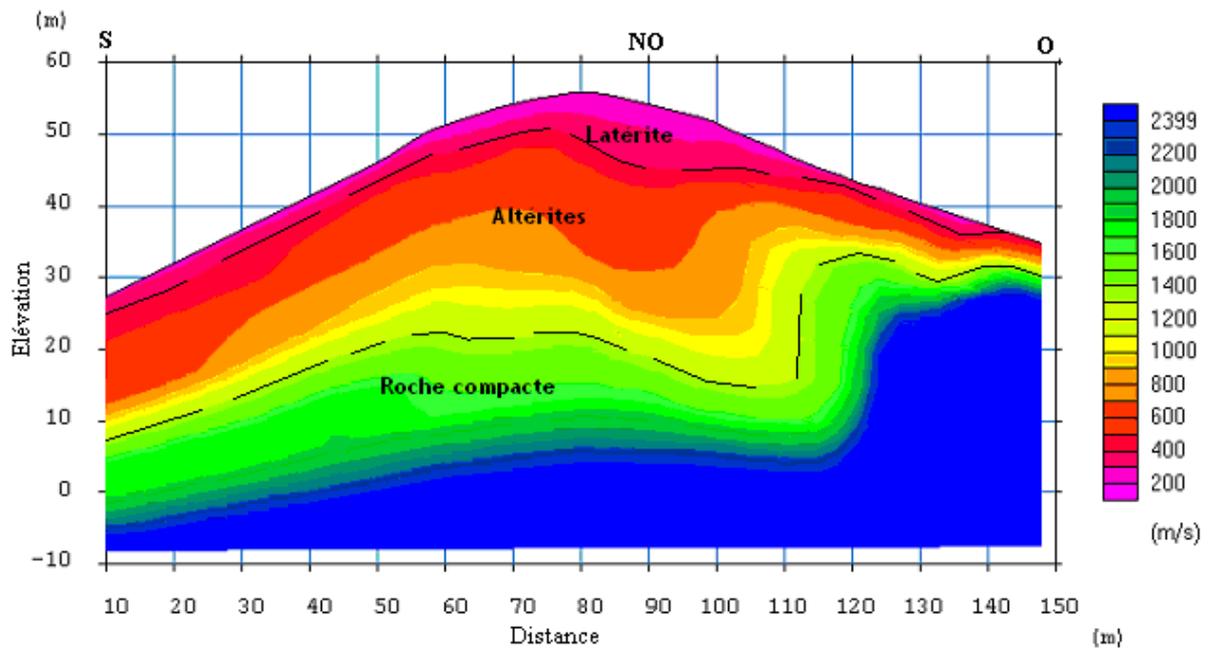


Figure 51: Coupe sismique du profil LAB

Profil L4C

Il a été étalé à l'extrême Nord du secteur IV à 95m du profil L4B (cf. Figure 25). Il a pris la direction N125°. L'objectif est de suivre l'évolution de l'intrusion basaltique vers le Nord.

La coupe obtenue (cf. Figure 52) nous donne que la couverture latéritique et les éboulis ont une épaisseur de 5m à l'extrême Ouest du profil. Il s'épaissit vers l'Est pour atteindre la valeur de 13m. Les roches altérées surmontées par la roche compacte ont une puissance moyenne de 15m.

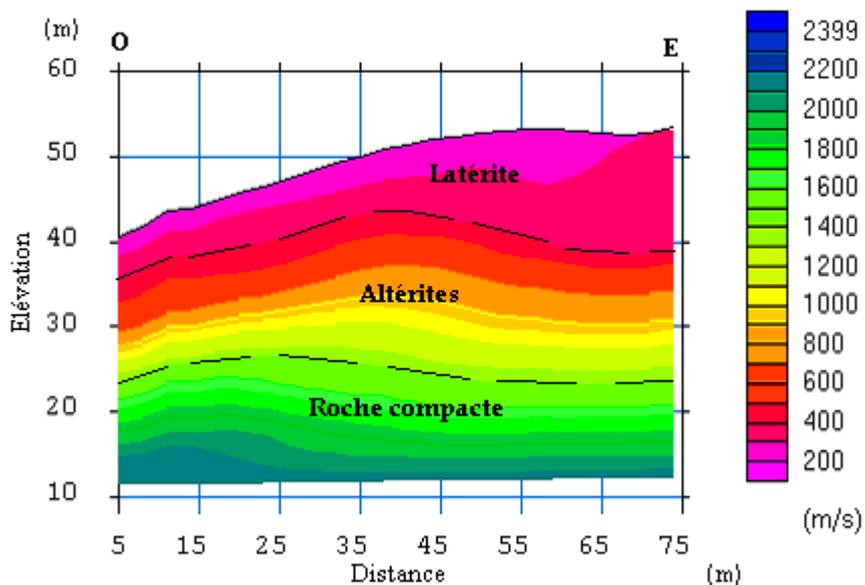


Figure 52: Coupe sismique du profil L4C

Profil L4D

Il a été étalé au Nord Est du secteur en coupant la ligne de crête de la colline formant le secteur IV. Il a pris la direction N30° (cf. Figure 25). Son objectif est de couvrir le secteur IV et de déceler la présence de roches massives, côté Nord.

La coupe obtenue (cf. Figure 53) a mis en évidence trois terrains :

- la couverture latéritique caractérisée par la valeur de vitesse sismique lente,
- la formation à vitesse intermédiaire constituée par les altérites,
- la formation à vitesse rapide constituée par la roche compacte.

La roche compacte se situe à 20m de profondeur sous ce profil car la partie stérile a une épaisseur moyenne de 20m.

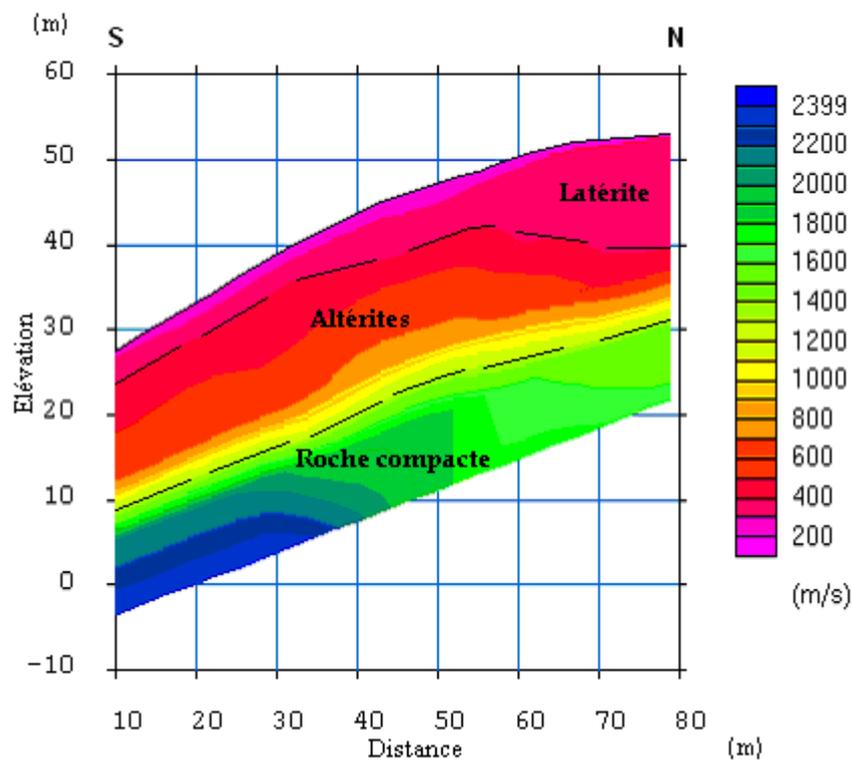


Figure 53: Coupe sismique du profil L4D

Les quatre profils L4A, L4B, L4C et L4D ont mis en évidence l'épanchement de l'intrusion basaltique à texture doléritique qui s'allonge suivant la direction Sud Ouest Nord Est.

III.2. CUBAGE ESTIMATIF

III.2.1. Estimation de la teneur

Considérons V le volume de la roche massive estimée, et v_i les points dont chacun a une vitesse sur les coupes sismiques. L'objectif est de connaître le volume V à partir des vitesses v_i c'est-à-dire s'estimer la teneur de V à partir des teneurs des v_i .

Notons par Z_M la teneur moyenne du volume V .

Déterminer d'abord l'expression de la teneur moyenne $Z_M(V)$

On sait que : $Z_M = 1/V \int Z(X) dx$ et $V = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_n\}$

$$Z_M = 1/V [1/V_1 \int Z(X) dx + 1/V_2 \int Z(X) dx + 1/V_3 \int Z(X) dx + \dots + 1/V_n \int Z(X) dx]$$

$$Z(i) = 1/V_i \int Z(X) dx$$

$$\text{Alors, } Z(i) \cdot V_i = \int Z(X) dx$$

$$\text{D'où : } Z_M = 1/V [Z(V_1)V_1 + Z(V_2)V_2 + \dots + Z(V_n)V_n]$$

$$\text{Donc, } Z_M = 1/V \sum Z(V_i)V_i$$

Z_M est obtenue par l'utilisation du logiciel GEOEAS,

La densité de la roche (basalte) est comprise entre 2,70 et 3,20

Mais en faisant la moyenne des densités on a $d = 2.95$.

Pour un volume de $1m^3$, $v = 1/2,95$

Alors, $Z_M = Z_n \cdot (1/2,95)^{-1}$ où $n = \{0, 1, 2, 3\}$ avec $Z_0 = 1.281\%$, $Z_1 = 1.156\%$, $Z_2 = 0.935\%$ et $Z_3 = 1.214\%$.

Pour :

$$\text{Analabe : } Z_M = 1.281 \times 2.95 = 3.779$$

$$\text{Secteur I: } Z_M = 1.156 \times 2.95 = 3.410$$

$$\text{Secteur II: } Z_M = 0.935 \times 2.95 = 2.758$$

$$\text{Secteur IV: } Z_M = 1.214 \times 2.95 = 3.581$$

III.2.2. Variogramme expérimental

Le variogramme expérimental est effectué à partir du logiciel GEOEAS. Il nous donne l'effet de pépité C_0 , le palier C et la portée a .

$$\text{Analabe: } C_0 = 0.35, C = 0.45, a = 55$$

$$\text{Secteur I: } C_0 = 0.1, C = 0.4, a = 40$$

$$\text{Secteur II: } C_0 = 0.1, C = 0.18, a = 35$$

$$\text{Secteur IV: } C_0 = 0.1, C = 0.5, a = 40$$

III.2.3. Erreur d'estimation

L'erreur (entre la courbe théorique et la courbe calculé) donnée par le logiciel PLOTREFA est au voisinage de 3%.

Alors, $\delta v = v_i \times 0,03$

En utilisant la somme des erreurs pondérées, pour

- Analabe : $e \approx 4\%$

- secteur I : $e \approx 3\%$

- secteur II : $e \approx 3\%$

- secteur IV : $e \approx 3\%$ où e: erreur estimée

En bref, le gisement d'ANALABE comporte une couverture latéritique de l'ordre de 3m, aux environs de la ligne de crête.

Pour le site SAHAVAKAKE, la reconnaissance effectuée sur l'ensemble des quatre secteurs constituant le périmètre d'étude, c'est-à-dire le secteur I où est située l'ancienne carrière artisanale, le secteur II localisé au Sud de la zone étudiée, le secteur III, où la partie Est a été aménagée pour la construction d'une cabane, et le secteur IV qui culmine au Nord. a montré que les roches massives sont constituées par des intrusions basaltiques

Le calcul de surface, de roches massives exploitables, a été effectué à partir de Covadis. Aussi, le calcul du volume, de roches massives exploitables, a été faite en prenant en considération la hauteur du front exploitable au dessus du niveau d'eau qui correspond au point bas du thalweg où on ne rencontre pas de l'eau.

III.2.4. Evaluation des volumes de ces sites

Analabe

La superficie est de l'ordre de $9\,000\text{m}^2$, la hauteur du front exploitable est de 40m au dessus du niveau d'eau,

Le volume des roches estimé est de $V = 9\,000\text{m}^2 \times 40\text{m} = 360\,000\text{m}^3$

Le volume total des roches est $V_t = V \times Z_M = 360\,000\text{m}^3 \times 3.779 = 1\,360\,440\text{m}^3$

En affectant au résultat obtenu la valeur de l'erreur commise, la volume total des roches est de l'ordre de $V_t = 1\,360\,440\text{m}^3 \pm 54417\text{m}^3$.

Secteur I

La superficie est de l'ordre de $1\,200\text{m}^2$, la hauteur du front exploitable est 10m au dessus du niveau d'eau.

Le volume des roches estimé est de $V = 1\,200\text{m}^2 \times 10\text{m} = 12\,000\text{m}^3$.

Le volume total des roches est $V_t = V \times Z_M = 12\,000\text{m}^3 \times 3.410 = 40\,920\text{m}^3$.

En affectant au résultat obtenu la valeur de l'erreur commise, la volume total des roches est de l'ordre de $V_t = 40\,920\text{m}^3 \pm 1228\text{m}^3$.

Secteur II

La superficie est de 2200m^2 , la hauteur du front exploitable est 12m au dessus du niveau d'eau.

Le volume des roches estimé est de $V = 2\,200\text{m}^2 \times 12\text{m} = 26\,400\text{m}^3$.

Le volume total des roches est $V_t = V \times Z_M = 26\,400\text{m}^3 \times 2.758 = 72\,811\text{m}^3$.

En affectant au résultat obtenu la valeur de l'erreur commise, la volume total des roches est de l'ordre de $V_t = 72\,811\text{m}^3 \pm 2184\text{m}^3$.

Secteur III: ce secteur est pratiquement inexploitable.

Secteur IV

La superficie est de $2\,700\text{m}^2$, la hauteur du front exploitable est 12m au dessus du niveau d'eau.

Le volume des roches estimé est de $V = 2\,700\text{m}^2 \times 12\text{m} = 32\,400\text{m}^3$.

Le volume total des roches est $V_t = V \times Z_M = 32\,400\text{m}^3 \times 3.581 = 116\,024\text{m}^3$.

En affectant au résultat obtenu la valeur de l'erreur commise, la volume total des roches est de l'ordre de $V_t = 116\,024\text{m}^3 \pm 3480\text{m}^3$.

Le volume total de roches massives exploitables dans le gisement d'ANALABE est de l'ordre de $1\,360\,440\text{m}^3 \pm 54417\text{m}^3$, et l'ensemble des quatre secteurs sur le site à SAHAVAKAKE est de l'ordre de $229\,755\text{m}^3 \pm 6\,892\text{m}^3$.

CONCLUSION

Le travail présenté dans ce mémoire a pour principal objectif de satisfaire, dans la limite du possible, la demande accrue en roche massive de la Société COLAS. Elle sera utilisée pour la construction et la réhabilitation des différentes infrastructures dans la région, en particulier pour la mise en place des infrastructures de Sherritt.

Deux sites ont fait l'objet de prospection géophysique en utilisant la méthode électrique et la méthode sismique. Pour le gisement d'Analabe, il a été prospecté en utilisant les deux méthodes et pour celui de Sahavakake, seule la méthode sismique a été mise en oeuvre.

Les deux méthodes, pour l'estimation de la réserve en roches massives et l'évaluation de la couverture stérile d'un gisement pour empierrement, sont complémentaires. Toutefois, la méthode sismique a une meilleure résolution à la séparation des formations compactes aux formations altérées. Alors, elle est très sollicitée en prospection de roches massives pour empierrement. C'est la raison pour laquelle, on a laissé de côté la méthode électrique lors de l'étude du gisement de Sahavakake.

Les avantages de la méthode sismique réfraction par rapport à la méthode électrique sont en effet un équipement léger mais efficace. A la délimitation du gisement, la sismique réfraction est essentiellement utilisée pour calculer les corrections statiques. Elle fournit une image à deux dimensions du sous sol, l'analyse des attributs sismiques, tels que les amplitudes et les fréquences, ouvre la voie vers une interprétation lithologique des sections.

Le résultat obtenu sur le gisement d'Analabe est intéressant, Le volume exploitable estimé est de l'ordre de $360\ 000\text{m}^3$ avec une faible couverture latéritique qui ne dépasse pas les 8m.

A Sahavakake, trois parmi les quatre secteurs étudiés sont concluants. Toutefois, le volume de roches massives exploitables est relativement faible. Elle est de l'ordre de 70800m^3 .

Le stage que j'ai passé au sein de la SGDM m'a permis d'acquérir plusieurs expériences sur ma vie estudiantine. Il a été très enrichissant du point de vue scientifique, technique et même social. Ces quelques mois m'ont amené à Toamasina pour l'étude des roches massives pour empierrement, utilisant à la fois la méthode électrique et sismique, à Ilakaka pour la localisation du bedrock où se reposent les couches à graviers susceptibles de contenir des minéraux précieux, à Sahanivotry Antsirabe où j'ai pu pratiquer la méthode magnétique pour la cartographie d'une zone aurifère et aux environs d'Antananarivo où j'ai profité de l'utilisation de la méthode électrique pour la recherche d'eau souterraine.

ANNEXE

Les dispositifs utilisés en méthode électrique

Wenner : il est recommandé pour détecter les structures horizontales. Il sera bien sensible aux changements verticaux qu'horizontaux de la résistivité (bonne résolution verticale). Ce dispositif a la plus faible profondeur d'investigation.

Dipole-dipole : il est très sensible aux changements horizontaux de la résistivité, donc idéal pour détecter les structures verticales. La profondeur d'investigation dépend fortement des paramètres a et n .

Wenner-Schlumberger : intermédiaire entre les deux, c'est-à-dire détection de structure horizontale et verticale. Il est le plus employé lors de sondage.

Les critères du choix du dispositif dépendent de la nature de la cible, du bruit de fond du milieu, la sensibilité de l'appareil (la sensibilité du dispositif aux changements verticaux et horizontaux, la profondeur effective d'investigation, la couverture horizontale, la force du signal).

Tracé du pseudo section

Le pseudo section est une bonne représentation des données. Elle donne une image très approchée de la distribution de résistivité du sous sol. Elle donne une image très conquêt de la surface car la forme du contour utiliser dépend du dispositif employé mais aussi de la résistivité vraie du sous sol.

Modèle direct

On utilise deux méthodes mathématiques à l'aide d'un sous programme RES2D INV:

- soit de méthode des différences finies (Dey and Morrison 1979)
- soit de méthode des éléments finies (Siloester and Ferrari 1990)

Dans ce modèle direct, les sous sol sont décomposés en un petit élément rectangulaire.

Inversion du modèle direct

On inverse le modèle direct à l'aide du programme RES2DINV. Le processus d'inversion se sert d'une matrice de dérivé partiel pour calculer les valeurs de la résistivité vraie. Cette matrice peut être estimée par la méthode de moindre carrée ou recalculer la matrice après chaque itération. Le faite de recalculer la matrice après chaque itération permet de donner un modèle plus précis mais demande ainsi un temps de calcul plus long. Lorsque le $RMS < 5\%$ après quelques itérations, on obtient une ITE (ou panneau électrique). Ce document est alors la base de l'interprétation à deux dimensions du sous sol.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **ADA H. N.**, 2006. Modélisation à trois dimensions des massifs rocheux, utilisant la technique d'imagerie électrique : application aux trois carrières d'Andalamby, d'Ankilibobo et d'Ereheta de la RN13. Diplôme d'Etudes Approfondies (D.E.A) Option Géophysique Appliquée : Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Institut et Observatoire de Géophysique Ambohidepona.
- [2] **Collins et al**, 2003. Precambrien Research 123.
- [3] **GIROUX B.**, 1999. Résistivité électrique des roches et minéraux.
- [4] **JAOTOMBO N.**, 2007. Utilisation de la géostatistique dans l'évaluation des réserves du gisement de fer de Bekisopa. Mémoire de Maîtrise en MSTGA. Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Institut et Observatoire de Géophysique Ambohidepona.
- [5] **JIKY S.**, 16 Janvier 2007. Elaboration de modèles numériques d'exploitation de carrières de roches massives cas de la RN6 Port Bergé à Djangoa. Mémoire de Maîtrise en MSTGA. Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Institut et Observatoire de Géophysique Ambohidepona.
- [6] **LOKE M.H., BARKER R. D.**, 1996. Rapid left squares inversion of apparent resistivity pseudosection by a quasi-Newton method, Géophysical Prospection.
- [7] **MARI J.-L., ARENS G., CHAPPELLIER D., GAUDIANI P.**, 1998. Géophysique de Gisement et de Génie Civil. Edition Technip, Paris.
- [8] **RAKOTONDRAINAIVO L. F.**, 2007. Prospection géophysique et conception d'une base de données des carrières de roches massives entre Antananarivo et Toamasina. Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo (EPSA).
- [9] **RAKOTOSELY R. A.**, 2007. Potentialités en eaux souterraines dans trois fokontany de la Commune Rurale d' Imerintsiatosika. Mémoire de Maîtrise en MSTGA Option Eau et Environnement : Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Institut et Observatoire de Géophysique Ambohidepona.
- [10] **TELEFORD W., GELDART L. P., CHERIFF, KEYS D. A.**, 1976. Prospection Géophysique Tome 1 prospection sismique. ERG Edition.

SITE WEB

http://membre.lycos.fr/talisker/CDDU/Bellac/bellac_geotec02.htm, Janvier 2008.

<http://www.cour.poymtl.ca>, décembre 2007.

http://www.geolithe.com/IMG/16_sismref.pdf. Janvier 2008.

TABLE DE MATIERES

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE.....	II
LISTE DES FIGURES	II
LISTE DES ACRONYMES	III
LISTE DES TABLEAUX	IV
LISTE DES FIGURES	IV
INTRODUCTION.....	1
PARTIE I: RAPPEL THEORIQUE	2
I.1 GEOPHYSIQUE APPLIQUEE	3
I.1.1 GENERALITES.....	3
I.1.2 LA METHODE GEOPHYSIQUE DE PROSPECTION ELECTRIQUE	3
I.1.2.1 Principe.....	3
I.1.2.2 Résistivité des roches	4
I.1.2.3. Notion de résistivité vraie et de résistivité apparente du sol.....	4
I.1.3. TECHNIQUE DE PROSPECTION ELECTRIQUE DU SOUS SOL	5
I.1.3.1. Image par Tomographie Electrique (ITE) ou panneau électrique 2D	5
I.1.3.2. Principe de la mesure.....	5
I.1.3.3. Matériel de prospection électrique.....	6
I.1.3.4. Dispositif.....	6
I.1.3.5. Mode de traitement des données du panneau électrique.....	7
I.2. MÉTHODE SISMIQUE REFRACTION.....	8
I.2.1. DESCRIPTION DE MODE DE CALCUL ET INTERPRETATION	8
I.2.1.1 Cas du modèle tabulaire 2 terrains	8
I.2.1.2. Cas du modèle tabulaire à 3 terrains.....	9
I.2.1.3 Cas du modèle incliné à 2 terrains.....	10
I.2.1.4 “Delay time”	11
I.2.2. PRINCIPE DE LA METHODE.....	12
I.2.2.1. Appareils utilisés.....	13
I.2.2.2. Processus du traitement de données.....	14
L’acquisition des données	14
I.3 PRINCIPE TOPOGRAPHIQUE.....	17
I.3.1 ACQUISITION DES DONNEES TOPOGRAPHIQUES	17
I.3.2 TRAITEMENT DES DONNEES TOPOGRAPHIQUES	17
I.3.3 PRESENTATION DU LOGICIEL COVADIS	18
I.3.3.1 Différentes fonctionnalités du covadis	18
I.3.3.2 Domaines d’utilisation de Covadis	18
I.3.3.3 Méthodes de calcul par cubatures.....	18
PARTIE II: PRESENTATION DES ZONES D’ETUDE.....	2
II.1. CONTEXTE GENERAL	19
PRESENTATION DES CARRIERES.....	19
Localisation des zones.....	19
II.2. GEOLOGIE REGIONALE	20
II.3. PRESENTATION DU GISEMENT	22
II.4. IMPLANTATION DES TRAVAUX GEOPHYSIQUES	26
PARTIE III: EVALUATION DE ROCHES MASSIVES EXPLOITABLES SUR LES DEUX CARRIERES, ANALABE ET SAHAVAKAKE.....	19
III.1. INTERPRETATION DES PROFILS GEOPHYSIQUES	28
III.2. CUBAGE ESTIMATIF.....	50

III.2.1. ESTIMATION DE LA TENEUR.....	50
III.2.2. VARIOGRAMME EXPERIMENTAL.....	50
III.2.3. ERREUR D'ESTIMATION	51
III.2.4. EVALUATION DES VOLUMES DE CES SITES	51
CONCLUSION.....	53

TITRE : ESTIMATION VOLUMETRIQUE DE ROCHES MASSIVES DISPONIBLES SUR LES CARRIERES D'ANALABE ET DE SAHAVAKAKE

RESUME

Les carrières étudiées, se trouvent au Sud Ouest de Toamasina. L'étude a pour objectif principal de connaître l'exploitabilité de chaque carrière.

L'utilisation des deux méthodes géophysiques, électrique et sismique, sur les carrières d'Analabe et de Sahavakake nous a permis de connaître ce volume.

L'application des deux méthodes sur le premier site a montré leur efficacité et leur complémentarité. En outre, la technique de sismique réfraction est mieux précise que celle de l'électrique sur la séparation de la couverture stérile à la roche compacte.

Les résultats obtenus donnent la capacité des roches massives, la variation spatiale d'épaisseur de la couverture et la forme générale du gisement, sur les deux sites.

Mots clés : carrière, méthode géophysique, électrique, sismique, réfraction, stérile, roche massive, épaisseur, site.

ABSTRACT

The quarries are located at the South West of Toamasina. The focus of the study is to define the availability of rock material or rock massif needed for construction.

The both methods, electrical and seismic were used during this exploration, and they help us on delineation of the exploitable area in fact the volume of rock massif under the weathered zone.

The using of both methods on the first site shows their efficiency and theirs complementarities. The seismic refraction technique is more accurate than the electrical on delineation of weathered zone. High contrast is well determined on a great variation of the medium.

The result leads us on the determination of the quantity of rock massif, the spatial distribution of the lateritic thickness and the rock massif body, on the both quarries.

Key words: quarry, geophysical method, electric, seismic, refraction, weathered zone, solid rock, rock massif, thickness, site.

Encadreur: RAKOTO Heritiana

Impétrant: ANDRINIFONY Manandraibe
Tel : 033 14 617 71
andrinifony@yahoo.fr
Bloc 29/4 CU ANKATSO II