

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des photos

Liste des tableaux

Liste des acronymes

Introduction

I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

II. RAPPELS METHODOLOGIQUES ET ACQUISITION DES DONNEES

III. INTERPRETATION DES DONNEES ET RESULTATS

Conclusion

References bibliographiques

Annexes

Table des Matières

Résumé

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte de localisation de la zone d'étude (source BD500, FTM)	3
Figure 2: Carte topographique de la zone d'étude (échelle: 1/100 000, FTM).....	5
Figure 3: Carte géologique de la zone d'étude (Source BD 200, FTM).....	8
Figure 4: Dispositif à quatre électrodes à la surface	14
Figure 5: Schéma du dispositif Wenner normal.....	15
Figure 6: Mise en place du resistivimètre SYSCAL R2 et ses accessoires	17
Figure 7 : Représentation du panneau électrique du type Wenner	19
Figure 8: Profils géoélectrique en résistivités apparentes	21
Figure 9: Schéma de traitement des données en MASW	28
Figure 10: La conception de l'analyse de CMP	29
Figure 11: Schéma simplifié du calcul de CMPCC	31
Figure 12: (a) le sismogramme et (b) la courbe de dispersion $F(c, \omega)$	32
Figure 13: la courbe de dispersion incluant le mode le plus élevé et le bruit	33
Figure 14: (a) courbe de dispersion, (b) modèle initial	33
Figure 15: Organigramme d'inversion	34
Figure 16: Emplacement des profils électriques et sismiques (source Google Earth, 2010)	38
Figure 17: Coupes géoélectrique, module K et de vitesse sismique N°01	39
Figure 18: Coupes géoélectrique, du module K et de vitesse sismique N°02	41
Figure 19: Coupes géoélectrique, module K et de vitesse sismique N°3	42
Figure 20: Coupes géoélectrique, module K et de vitesses sismiques N°4	43
Figure 21: Coupes géoélectrique, du module K et de vitesses sismiques N°5	45
Figure 22: Coupes géoélectrique, du module K et de vitesses sismiques N°6	46
Figure 23: Coupes géoélectrique, module K et de vitesses sismiques N°7	48
Figure 24: Coupes géoélectrique, du module K et de vitesses sismiques N°8	50
Figure 25: Coupes géoélectrique, du module K et de vitesses sismiques N°9	52
Figure 26: Coupe géoélectrique, du module K et de vitesses sismiques N°10.....	54
Figure 27: Coupes géoélectrique, du module K et de vitesses sismiques N°11	55
Figure 28: Coupes géoélectrique, module K et de vitesses sismiques N°12	57
Figure 29: Coupes géoélectrique, du module K et de vitesses sismiques N°13	58

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Aperçu globale de la zone d'étude (source SGDM ,2010)	5
Photo 2: Les gisements de pegmatite et de quartzite dans le secteur	9
Photo 3 : Photo aérienne de la zone d'étude	13
Photo 4: Exemples de l'emplacement des profils géophysiques (source SGDM ,2010).....	16
Photo 5: Schéma du montage d'appareil de mesure en sismique (source impétrant, 2010).....	25
Photo 6: Linéaments et schistosités existant dans la zone d'étude.....	37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Emplacement de l'anomalie pour chaque coupe	60
--	----

LISTE DES ACRONYMES

PA: Photo aérienne

E-W: Est-Ouest et **S-N:** Sud-Nord

IOGA: Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo

SW: Surface Wave

KGS: Kansas Geological Survey

USA: United States of America

MASW: Multichannel Analysis of Surface Waves

SASW: Spectral Analysis of Surface Waves

CMPCC: Common Mid-Points Cross Correlation

CMP: Common Mid-Points

SPAC: Spatial Autocorrelation

V_s: vitesse des ondes S

V_p: vitesse des ondes P

V_R: vitesse de phase

K: Module d'incompressibilité volumique

SGDM: Société Géosciences Pour le Développement de Madagascar

UTM: Universal Transverse Mercator

INTRODUCTION

Madagascar est l'un des pays africains se trouvant dans l'Océan indien. Elle possède des ressources naturelles, en particulier les ressources minières, qui se repartissent dans toutes les différentes parties de l'île selon les différentes étapes et l'âge de leurs formations, comme le saphir à Ilakaka, l'or à Maevatanana, le nickel et le cobalt à Ambatovy-Analamay, le chromite à Andriamena, l'ilménite à Taolanaro, ...etc.

Durant le stage de préparation de mémoire de fin d'étude, au sein de la Société Géosciences pour le Développement de Madagascar (**SGDM**), le travail que j'ai entrepris, s'intéresse particulièrement à l'utilisation de la méthode géophysique à la recherche minière. Ainsi, le responsable de la dite société m'a confié la mission de **localisation des poches de minéralisation par méthodes électrique et sismique à Soatanambary**, dans la partie sud de Madagascar.

Rappelons que l'exploitation au hasard, sans connaissance au préalable du gisement, n'est qu'une perte de temps et ne donne aucun rendement aux exploitants. Ainsi, le propriétaire du périmètre d'exploitation, situé à Soatanimbar, a sollicité le service de la SGDM pour localiser l'emplacement des poches de minéralisation et pour lui conseiller à l'exploitation de sa carrière.

Une campagne de reconnaissance et de prospection a été réalisée par l'équipe de la SGDM, pour étudier cette carrière. Rappelons que la carrière est exploitée artisanalement.

La géophysique, la prospection électrique et la prospection sismique, a été utilisée particulièrement, en raison de sa rapidité et de sa large couverture.

On peut dire que l'utilisation des techniques, imagerie électrique combinée au sismique MASW, est encore en phase de développement dans le domaine de la recherche minière.

Le présent rapport de stage comporte trois grandes parties: la première partie développe et présente la situation et le contexte général de la zone d'étude, la deuxième partie rappelle les bases méthodologiques et les techniques adoptées, et la troisième et la dernière partie traite les données collectées sur le terrain et elle donne l'interprétation des résultats du traitement des données géophysiques.

PARTIE I

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Cette partie comporte quatre chapitres interdépendants, entre autre, le cadre géographique, le contexte climatique, la morphologie et le contexte géologique.

I.1. CADRE GEOGRAPHIQUE

La zone se trouve dans la partie Sud Ouest de Madagascar. Elle appartient administrativement à la région de Haute Matsiatra, et fait partie du District d'Ikalamavony, de la commune rurale de Tanamarina Bekisopa et du Fokontany de Soatanimbarby. Elle est localisée géographiquement aux coordonnées. **X=0583822m** et **Y=7619460m**, selon le système de projection **UTM 38K**. L'altitude moyenne de la zone étudiée est de **845m**.

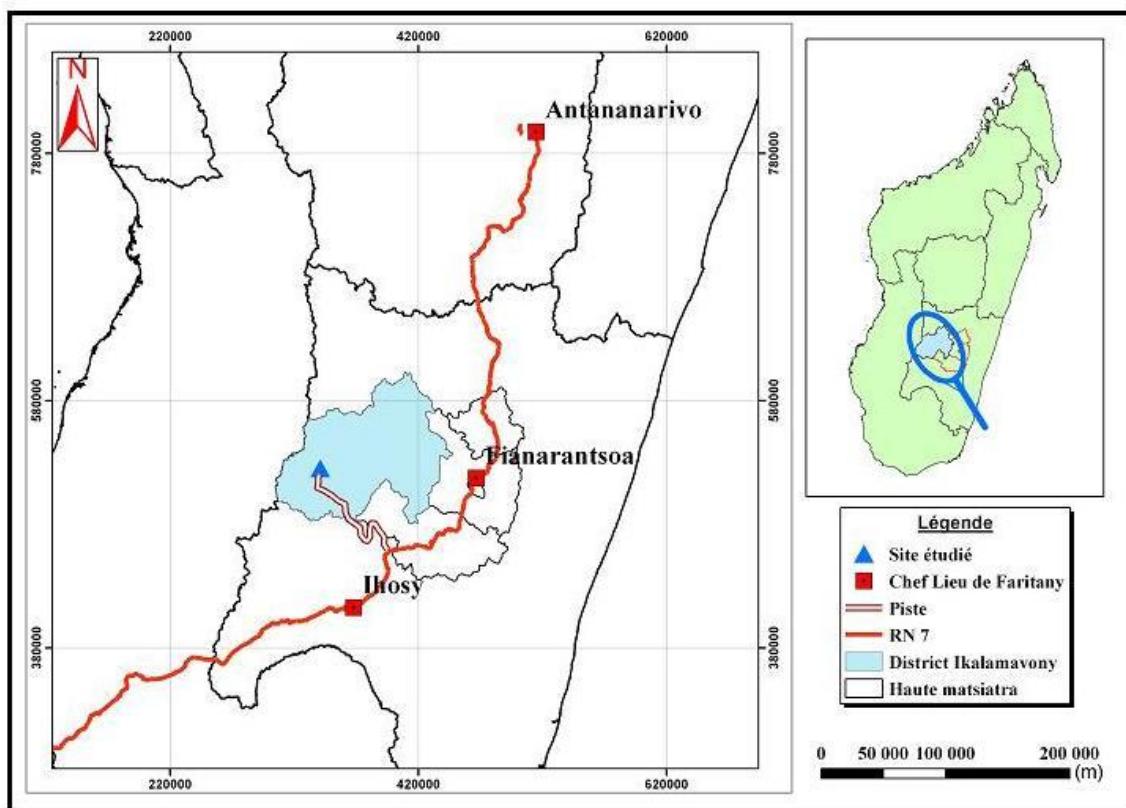


Figure 1: Carte de localisation de la zone d'étude (source BD500, FTM)

I.2. CONTEXTE CLIMATIQUE

Le régime climatique de la région, où se trouve la zone d'étude, est caractérisé par une alternance de la saison de pluie (du mois de Novembre au mois de Mars) et de la saison sèche

(du mois Avril au mois d'Octobre). La précipitation moyenne annuelle est de l'ordre de 1300mm et la température moyenne est de 28°C. C'est un climat tropical tempéré.

La zone d'altération est alors épaisse dans le secteur d'étude. La présence d'une importante zone d'altération facilite la mise en œuvre de la technique géophysique utilisée : implantation des électrodes et meilleurs contacts entre électrodes et sol, implantation des géophones.

L'exploitation de la carrière ne peut se faire qu'en saison sèche, à cause de l'accès qui est impraticable pendant la saison de pluie.

I.3. MORPHOLOGIE

En général, la zone d'étude est formée d'un relief relativement accidenté. Elle appartient à la région de Haute Matsiatra, à des hauts plateaux du Betsileo. Elle est aussi constituée par des vallées assez peu développées sur le socle ancien mais assez largement aménagées en casiers rizicoles dans cette région (Zomandao, Ikalamavony, Manantanana). Donc, le versant dans cette zone présente des pentes plus douces occupées par ces grandes plaines qui rejoignent le Manantanana et le Zomandao, et qui se dirigent vers le sud et forment le Mangoky.

L'évolution morphologique de la région Sud de Madagascar est rythmée par une succession d'érosion liée à des modifications du climat.

La zone d'étude comprend les trois unités géomorphologiques: les bas fonds, le versant et le plateau. Le point le plus haut culmine à 845m d'altitude, dans le secteur.

Les bas fonds sont aménagés par la population locale en rizière. Les sources de résurgences sortant de la base de la colline forment des petits ruisseaux au niveau de ces bas fonds et coulent vers la rivière environnante.

L'exploitation se fait actuellement au niveau des versants où la formation géologique est satisfaisante pour contenir des minéraux intéressants, tourmaline, beryl,...etc.

Le plateau se trouvant juste en amont de l'interfluve est formé de quartzite.

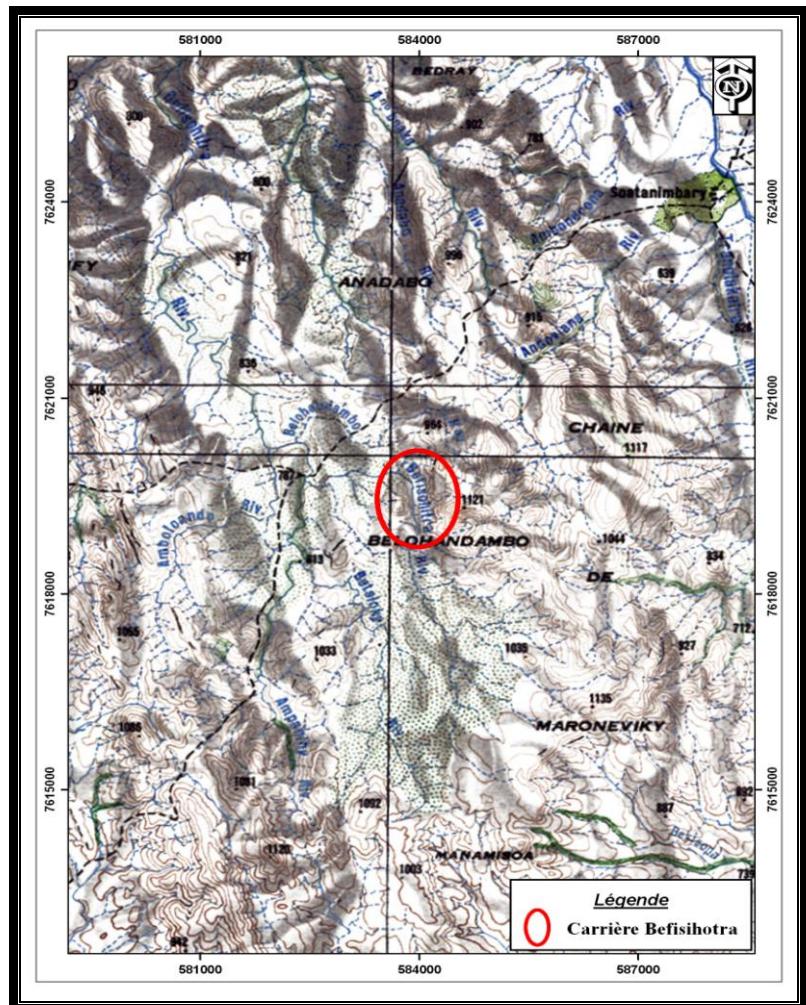


Figure 2: Carte topographique de la zone d'étude (échelle: 1/100 000, FTM)



Photo 1: Aperçu globale de la zone d'étude (source SGDM ,2010)

I.4. CONTEXTE GEOLOGIQUE

I.4.1. Géologie régionale

La géologie de Madagascar comprend deux grands ensembles : les formations du socle cristallin qui constitue le 2/3 de la grande île et les couvertures sédimentaires. La zone d'étude se trouve dans la partie Sud de Madagascar. Géologiquement, elle appartient aux formations du socle cristallin, au groupe de l'Itremo âgé de 800Ma. La zone est formée essentiellement de formation cristalline, datée du précambrien. Ce sont des roches métamorphiques et éruptives et qui ont subit successivement des métamorphismes accompagnés d'orogenèse différente. La formation est très plissée et est très complexe. Elle ne renferme pas de fossiles à part les stromatolites que l'on rencontre dans les cipolins de la région d'Ambatofinandrahana (Géologie de Madagascar-accesmad, 2009).

I.4.2. Géologie du gisement

Le secteur étudié est constitué essentiellement des formations récentes. On rencontre, ainsi des quartzites, du Gneiss, de la sillimanite, des amphibolites et des cipolins qui sont groupés dans la famille des schistes cristallins.

Les quartzites sont métamorphisés en ortho quartzite, en quartz arénite, en micaceous quartzite.

Il existe également des roches éruptives dans le secteur. Ces roches se présentent sous forme de granite manzonitique, des filons de pegmatite et des filons de quartz.

Notons que, la formation pegmatitique nous intéresse particulièrement dans le cadre de cette étude, du fait qu'elle encaisse les minérais intéressants.

Les pegmatites se subdivisent en trois catégories:

- les pegmatites potassiques uranifères à bétafite, euxenite et autres minéraux radioactifs;
- les pegmatites potassiques à beryl seul qui est à la fois de type industriel et de type gemme, et des minéraux uranifères;
- les pegmatites à zone sodo-lithiques plus ou moins développées avec minéralisation en gemme diverses (beryls, tourmalines de couleurs variées, triphanes).

La couverture est formée des formations latéritiques. La minéralisation se trouve souvent dans la zone à grenue qui renferme des structures différenciées: muscovite en books,

grenat, magnétite, columbite, beryllium, tourmaline noire. On rencontre parfois de bordure riche en tourmaline, dans la zone où la tourmalinisation des éponges est favorisée.

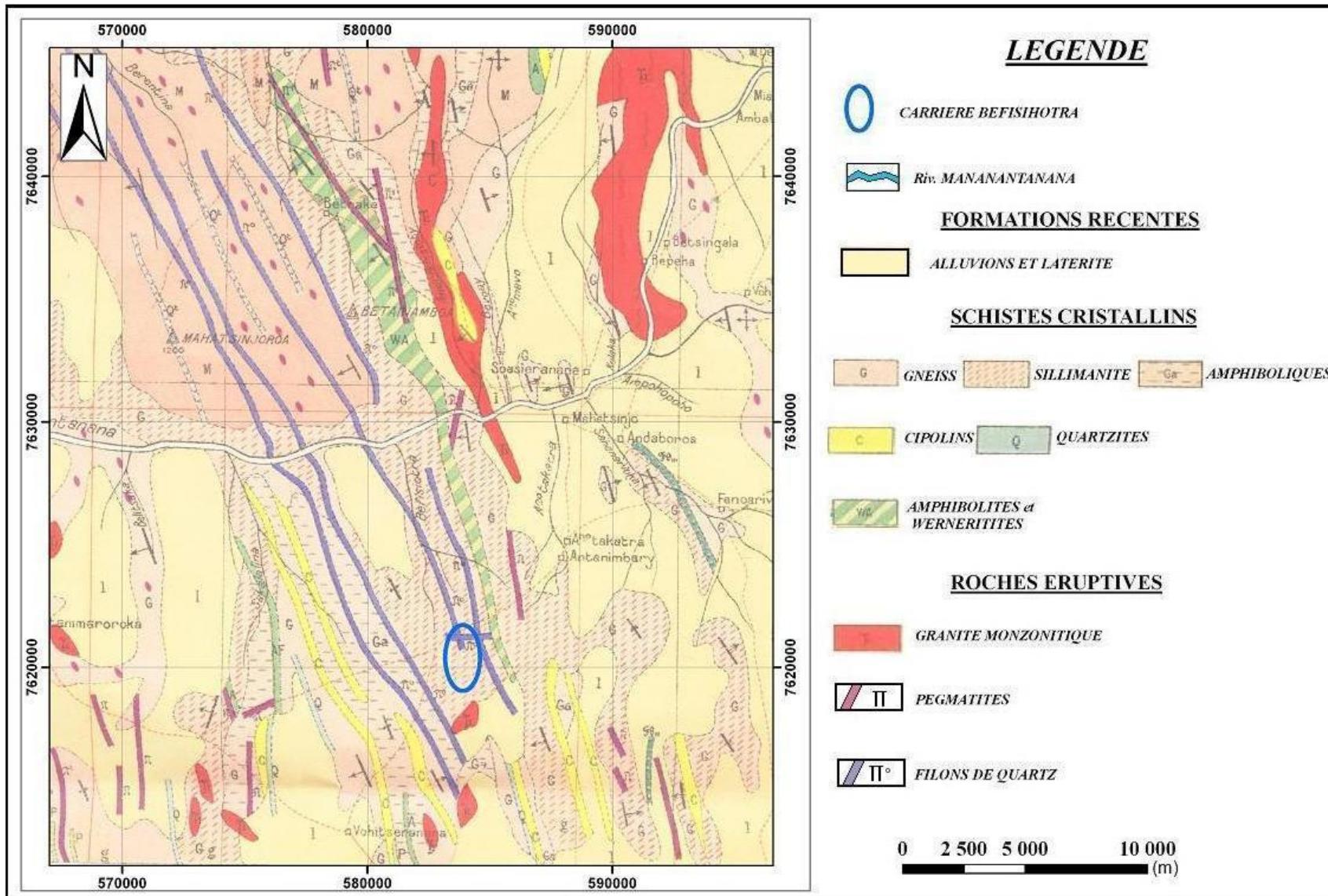


Figure 3: Carte géologique de la zone d'étude (Source BD 200, FTM)

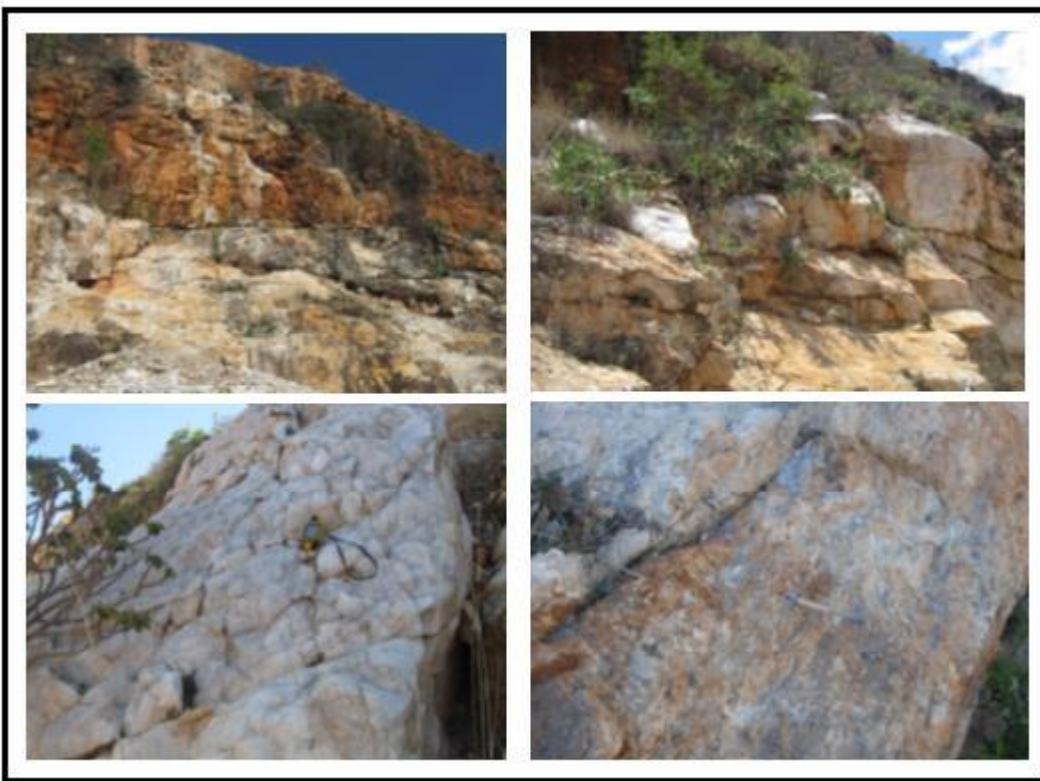


Photo 2: Les gisements de pegmatite et de quartzite dans le secteur

En bref, le terrain est relativement accidenté. L'exploitation se fait actuellement au niveau des versants où les pegmatites affleurent. Les éruptions récentes ont amenés les éléments constituants les minéraux intéressants. Et, la succession des différents événements métamorphiques a favorisé la formation par endroit des pierres gemmes.

Le changement de formation est accompagné souvent par la variation des propriétés physiques du sous sol, résistivité électrique, compacité et induration.

Ce changement pourrait être détecté par la technique de la géophysique: la prospection électrique et/ ou la prospection sismique.

Malgré cette incertitude, les deux méthodes complémentaires, électrique et sismique, ont été essayées et utilisées pour la détection et pour la localisation des poches de minéralisation dans la zone de pegmatite, dans le secteur.

PARTIE II

RAPPELS METHODOLOGIQUES

ET

ACQUISITION DES DONNEES

La partie ci-dessous développe les bases méthodologiques de la technique utilisée lors de la campagne de prospection. Ce développement sera donné dans le but d'expliquer la théorie fondamentale de la technique adoptée: photo-interprétation, prospection électrique et prospection sismique.

I.5. LA PHOTO INTERPRETATION

Les géophysiciens doivent se fier aux indices visibles en surface. Par exemple, relief (vallée, crête, versant,...). On peut percevoir les éléments rectilignes ou curvilignes à la surface de la croûte terrestre et qui traduisent la présence de phénomènes plus profonds, comme par exemple des failles, schistosités, des fractures, et des contacts géologiques. Ce qui nous permet de déterminer la direction des profils électrique et sismique lors de la prospection.

Il est primordial de localiser les fissures et les linéaments ce qui ne peut pas faire que par l'interprétation de la photographie aérienne. En effet la stéréographie permet de localiser les linéaments à partir de la photographie aérienne. Mais ils doivent être vérifiés sur le terrain.

I.5.1. Principe

La photo-interprétation consiste à identifier des objets (géologique, morphologiques,...) sur une photographie aérienne, à les repérer et à les comprendre. Elle se porte sur l'étude et l'analyse des morphologies et sur la délimitation des différentes entités observées sur la photographie aérienne (PA). La photographie aérienne constitue le document de base, et elle complète efficacement les cartes existantes (topographiques, géologiques,...)

Les principes généraux se basent sur le principe de restitution du relief qui est obtenue en utilisant deux (02) prises de vue d'une même scène recueillie depuis deux points de vue différentes (stéréogramme) avec l'aide d'un stéréoscope.

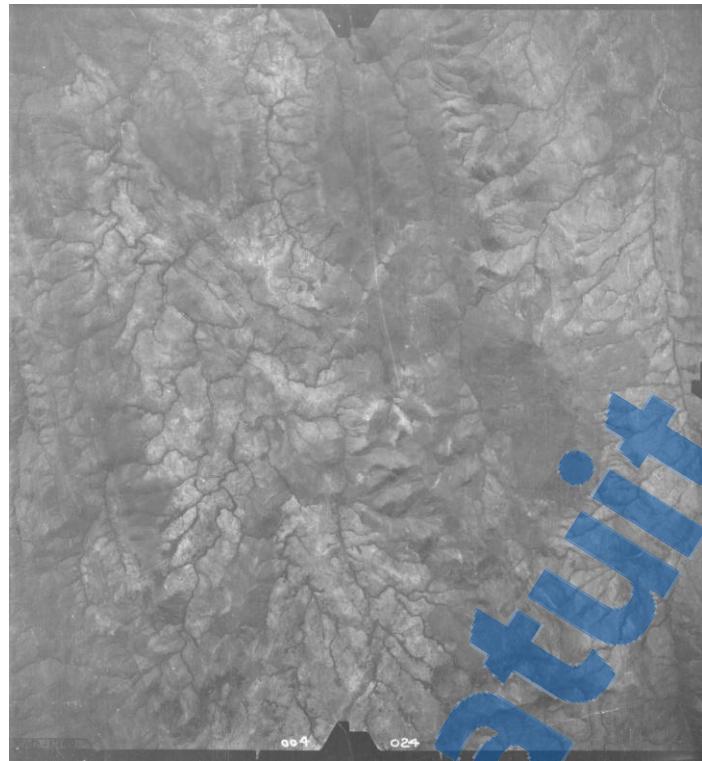


Photo 3: Photo aérienne de la zone d'étude

I.5.2. Clés de la photo-interprétation

La méthodologie de l'interprétation des PA comporte deux (02) phases:

- Phase d'identification;
- Phase d'interprétation;

I.5.2.1. Phase d'identification

Cette phase consiste à identifier sur la photo le réseau hydrographique, la tonalité ou teinte, et les failles, les schistosités et linéaments.

I.5.2.2. Phase d'interprétation

Cette phase consiste à comprendre les objets identifiés précédemment: origine, cause,.... Après avoir effectué l'étude sur table, on doit faire une première descente sur terrain considérée comme phase de reconnaissance.

I.6. LA METHODE DE LA PROSPECTION ELECTRIQUE

La méthode de la prospection électrique met en évidence la distribution des résistivités dans le sous sol. Elle est basée sur la mesure du potentiel électrique généré par l'injection d'un courant continu dans le sous sol.

I.6.1. Principe de la méthode électrique

La prospection électrique implique la détection d'effets produits lorsqu'un courant électrique traverse le sous-sol. Il existe une grande variété de techniques utilisant les méthodes électriques, on peut mesurer par exemple:

- Une chute de potentiel
- Un courant
- Un champ électromagnétique

I.6.1.1. La résistivité électrique

La résistivité ρ d'un milieu est la propriété physique qui détermine la capacité de ce milieu à laisser passer le courant électrique.

I.6.1.2. Notion de résistivité vraie et de résistivité apparente

Les deux électrodes A et B sont les électrodes d'injection de courant, tandis que les deux autres, M et N, sont les électrodes de potentiel.

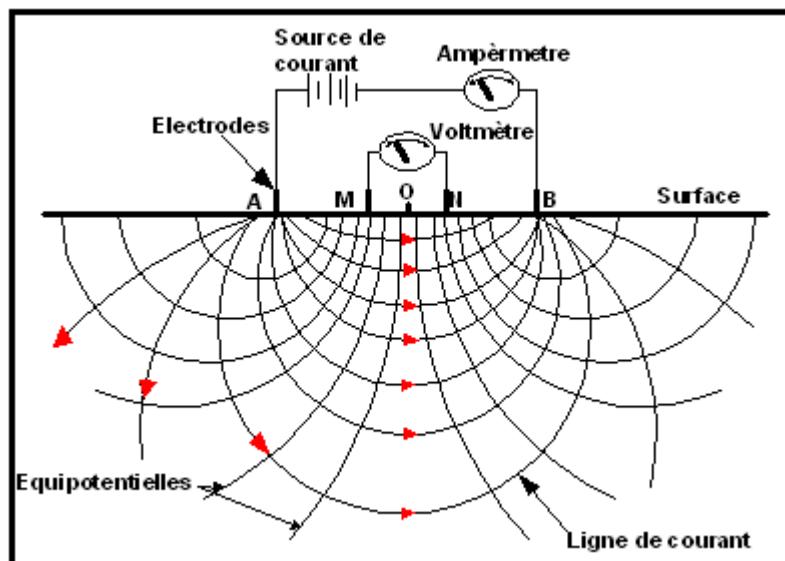


Figure 4: Dispositif à quatre électrodes à la surface

Nous supposons que le sous- sol est homogène et isotrope. La différence de potentielle entre deux points M et N est obtenue en soustrayant le potentiel en M et en N.

$$\Delta V = V(M) - V(N) = \rho \frac{I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (1.1)$$

La résistivité vraie, exprimée en Ohm mètre (**Ωm**) du sous-sol s'en déduit et s'écrit :

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1.2)$$

avec

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

K : Facteur géométrique de la configuration des électrodes utilisées;

ΔV : Différence de potentielle entre M et N exprimée en volts (V);

I : Intensité du courant injecté exprimé en Ampère (A);

L'hypothèse d'un sous-sol homogène et isotrope ne constitue qu'un cas idéal. Dans la pratique, on a des structures hétérogènes, et la résistivité vraie obtenue en (1.2) n'est pas la résistivité réelle du terrain mais seulement une résistivité apparente, c'est-à-dire la résistivité vraie d'un milieu fictif homogène et isotrope équivalent au milieu hétérogène mesurée dans les mêmes conditions.

I.6.1.3. Le dispositif utilisé

Il existe plusieurs dispositifs en prospection électrique: dispositif Wenner, dipôle-dipôle, Wenner-Schlumberger,....etc. Dans notre étude, nous avons utilisé le dispositif Wenner normal.

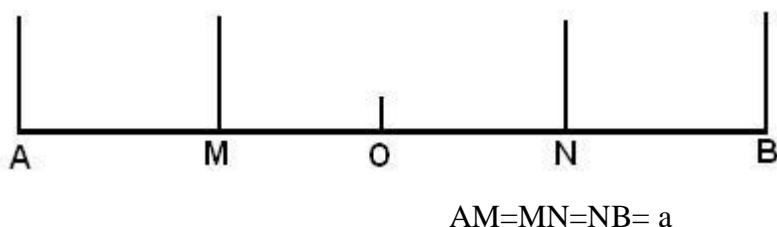


Figure 5: Schéma du dispositif Wenner normal

Les électrodes sont équidistantes, la résistivité apparente devient:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (1.3)$$

La profondeur d'investigation P dépend de la nature du terrain. Elle est comprise entre $AB/10$ et $AB/4$ c'est-à-dire $AB/10 < P < AB/4$.

I.6.2. La méthode du panneau électrique

L'imagerie électrique 2D ou panneau électrique 2D est une exploration en deux dimensions du sous sol. La méthode consiste à la fois en une investigation verticale (sondage électrique) et une investigation latérale (profilage électrique). Ce qui nécessite alors l'utilisation de plusieurs électrodes. Dans notre cas, 32 électrodes ont été utilisées.



Photo 4: Exemples de l'emplacement des profils géophysiques lors de cette étude (source SGDM ,2010).

I.6.2.1. Appareillage et acquisition des données

On a utilisé les matériels ci-dessous pour l'acquisition de données électriques:

N°1: Electrodes et marteaux

N°2: Décamètre

N°3 et N°4: Multinodes (1 à 16 et 16 à 32)

N°5: RCM (Remote Control Multiplexor)

N°6: Batterie GM pour le convertisseur

N°7: Batterie PM pour le RCM

N°8: Convertisseur (courant continu – courant continu)

N°9: Resistivimètre SYSCAL R2

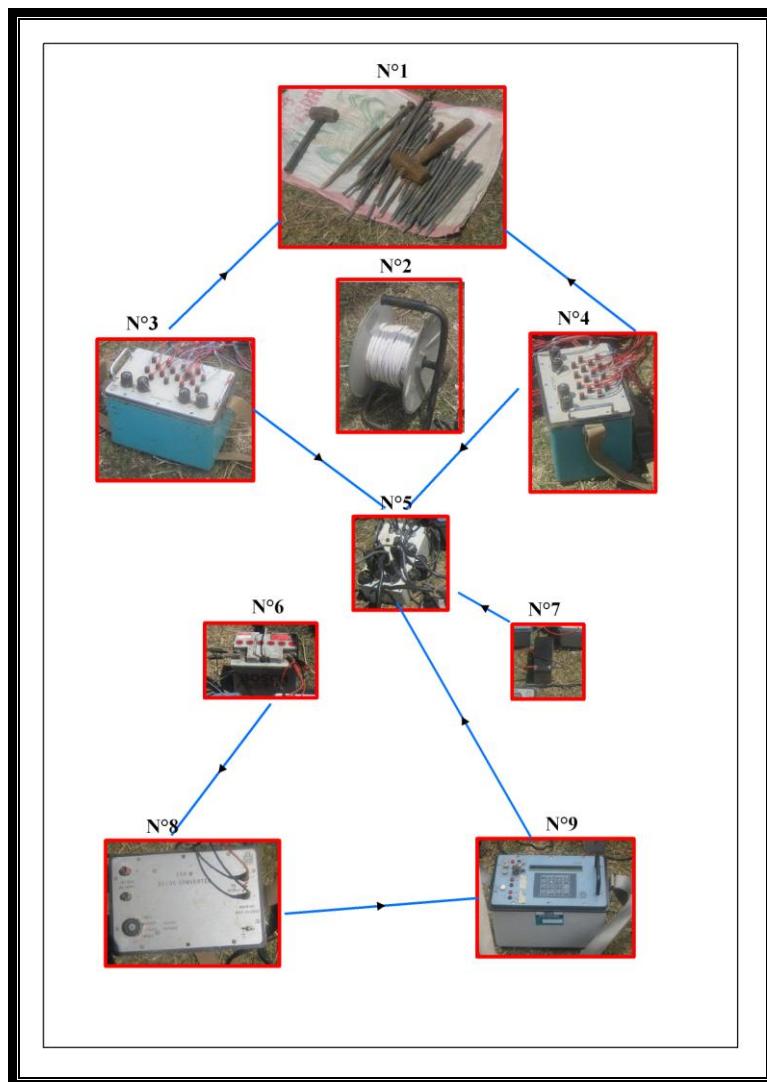


Figure 6: Mise en place du resistivimètre SYSCAL R2 et ses accessoires

I.6.2.2. Principe de la méthode

Le principe d'acquisition est basé sur l'utilisation d'un grand nombre de sondages électriques le long d'un profil à partir de diverses combinaisons de quatre électrodes,

spécifiques au dispositif de type Wenner, parmi les 32 électrodes. La distance entre chaque électrode est constante. En écartant la distance inter électrodes, la profondeur de pénétration augmente et le nombre de points expérimentaux diminue.

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

I.6.2.3. Mise en œuvre

Le panneau électrique exige l'utilisation du dispositif multi électrode comme dispositif de base. Soit "a" la distance entre les deux électrodes consécutives. Chaque électrode est utilisée comme électrode d'injection du courant puis électrode de potentiel.

Le dispositif, utilisant N électrodes, que l'on adopte pour la réalisation du panneau électrique est le dispositif Wenner. Soit "na" la distance inter électrodes où n est le nombre de la séquence de mesures qui s'incrémentent de 1 à $(N-1)/3$, si le nombre d'électrodes total N est égal à un multiple de 3 plus 1.

Pour la première séquence de mesures, la distance inter électrodes est égale à 1.a. La première série de mesures débute d'abord avec la combinaison 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'incrémentent à 2a. On effectue les autres séries de mesures. L'opération continue jusqu'à ce que toutes les mesures possibles soient effectuées.

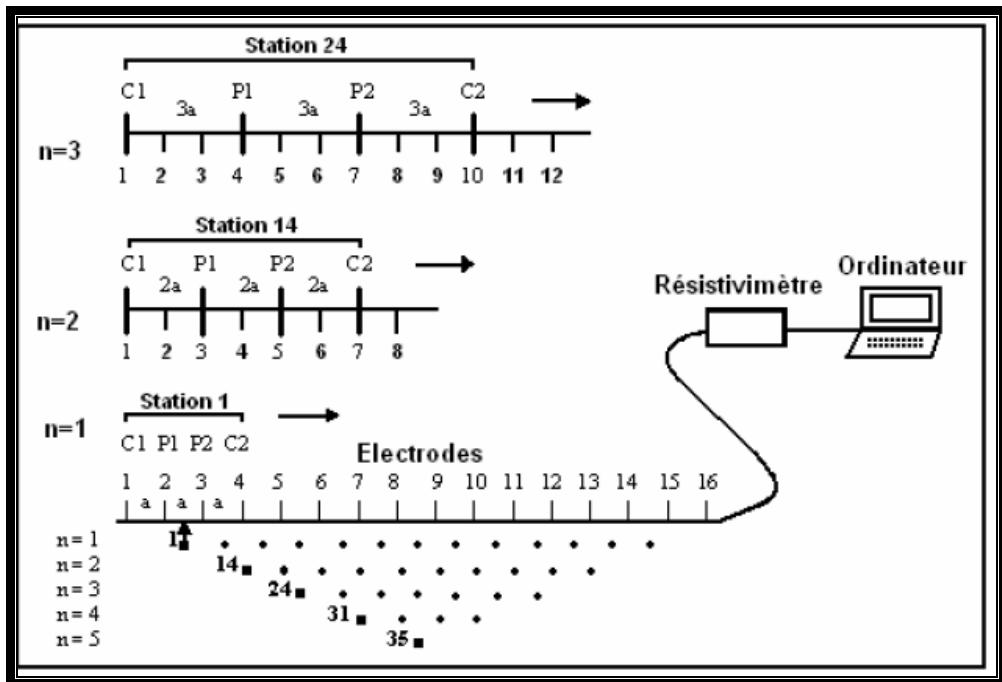


Figure 7 : Représentation du panneau électrique du type Wenner

Dans le cas général utilisant N électrodes, le nombre total de mesures m, pour un profil de distance "na", entre électrodes a pour expression :

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

Le nombre d'électrodes N est choisi suivant la profondeur d'investigation voulue.

Nous avons au total 35 mesures à effectuer pour un nombre d'électrodes égal à 16.

Nous montrons dans la Figure 7 la disposition des valeurs expérimentales pour établir un pseudo section.

La profondeur d'investigation est de l'ordre de 0,519.a (Edwards, 1997), pratiquement égale à a/2.

I.6.2.4. Mode de traitement des données du panneau électrique

I.6.2.4.1. *Préparation des données avant l'inversion*

Il est parfois nécessaire de faire quelques filtrages et ajouter aux données obtenues automatiquement avec le système multinode. Ceci afin d'enlever les valeurs aberrantes et d'approcher le mieux la réalité de terrain. On peut citer, parmi ces opérations: l'enlèvement des valeurs négatives, l'introduction de la topographie, l'élimination des valeurs aberrantes, etc....Cette opération a pour objectif de réduire le Root-Mean-Squared (RMS) ou écart quadratique moyen entre le modèle calculé et l'observé.

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

La méthode d'inversion utilisée par le programme est basée sur la méthode de moindre carrée, utilisant la méthode des différences finies pour le calcul de la résistivité. Elle utilise la méthode de lissage par contrainte pour déterminer le modèle approximatif. En tenant compte des points expérimentaux, ce programme subdivise le modèle géoélectrique en des blocs rectangulaires. Il fournit la résistivité vraie de chaque bloc par la méthode de moindres carrés, utilisant la méthode des différences finies.

I.6.2.4.2. Traitements des données

Les valeurs obtenues sur le terrain sont des résistivités apparentes. A partir de ces valeurs, on cherche à retrouver les épaisseurs et résistivités vraies des différents corps présents dans le sous sol. Le programme d'inversion (Res2Dinv, Loke, 1997) qui, par une méthode itérative (Loke & Barker, 1996a), va donner un modèle géologique ou archéologique correspondant aux données de terrain.

I.6.2.4.3. Principe de l'inversion

L'inversion utilise la méthode des moindres carrés et la technique soit de différence finie ou l'élément fini pour le calcul de la résistivité vraie. Le lissage par contrainte est également utilisé durant l'incrémentation du modèle.

En partant des points expérimentaux, le RES2DINV subdivise le modèle 2D en blocs rectangulaires dont la taille augmente avec la profondeur, à cause de la perte de résolution en allant en profondeur. Le logiciel attribue les valeurs de résistivité apparente mesurées à chaque bloc ainsi construit. Le calcul de la résistivité vraie commence par ce modèle de bloc de résistivité apparente. A partir de ce modèle, la technique de calcul consiste à fixer une valeur fictive de l'intensité de courant I sur le bloc considéré et recalculer les valeurs apparentes correspondantes sur chaque bloc. On compare ensuite la coupe de résistivité apparente calculée avec celle qui est observée. La comparaison lui permet de corriger la matrice et de recalculer un modèle plus précis.

Grâce à la méthode itérative, l'incrémentation consiste à réduire la différence entre les valeurs calculées et mesurées de résistivité apparente en ajustant la résistivité vraie de

chaque bloc. Une mesure de cette différence est donnée par l'erreur RMS. En général, le modèle le plus fiable est habituellement obtenu après 4 à 6 itérations.

En ce qui concerne la méthode itérative, le logiciel RES2DINV calcule, à l'aide d'une matrice de dérivée partielle, la valeur de résistivité vraie de chaque bloc.

I.6.2.5. Coupe géoélectrique ou «pseudo section»

Voici par exemple un modèle géoélectrique après inversion:

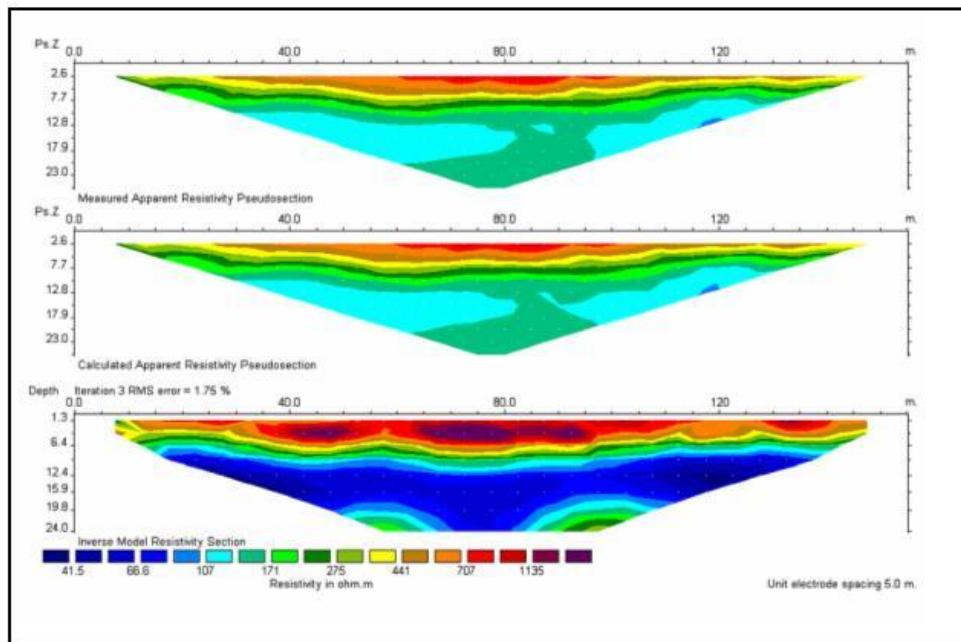


Figure 8: Profils géoélectriques en résistivités apparentes

I.7. LA METHODE SISMIQUE

Les méthodes sismiques employées en géophysique se basent sur le fait que les ondes élastiques se propagent à des vitesses différentes dans des formations différentes.

I.7.1. Définition de la méthode sismique

La méthode sismique est l'étude de propagation d'ondes sismiques provoquées par l'homme. Le paramètre qui nous s'intéresse est la vitesse de propagation de ces ondes dans le sous-sol. En effet chaque roche peut être définie à partir de la mesure de la vitesse sismique qui lui est propre.

La propagation des ondes sismiques dépend des propriétés élastiques de roches composant le sous-sol. La théorie de l'élasticité est une théorie mathématique rigoureuse.

I.7.2. Type des ondes sismiques

On a deux types d'ondes sismiques:

- Les ondes de volume;
- Les ondes de surface;

I.7.2.1. Les ondes de volume

Elles se propagent à l'intérieur du globe. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé et d'une manière générale, elle augmente avec la profondeur. On distingue :

- Ondes P;
- Ondes S;

Dans le cas d'un milieu homogène, isotrope et parfaitement élastique la propagation des ondes dépend des deux paramètres de Lamé λ et μ .

D'où la vitesse de propagation des ondes P et S est donnée par les formules suivantes:

$$VP = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{et} \quad VS = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Avec:

λ et μ sont les constantes de Lamé. Pour le cas d'un solide: $\lambda \approx \mu = 0.25$

λ : Module de torsion ou de rigidité, module de cisaillement exprimé en Pascal (Pa);

ρ : Densité (sans dimension);

μ : Module de torsion exprimé en Pascal (Pa);

On peut aussi exprimer ces vitesses en fonction E, K et σ :

$$VP = \sqrt{\frac{K + \frac{4\mu}{3}}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$$

$$VS = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}}$$

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{(\lambda + \mu)} ; \sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} ; K = \frac{3\lambda + 2\mu}{3} ;$$

$$K = \rho(V^2_p - \frac{4}{3}V^2_s)$$

E: Module d'Young ou coefficient d'élasticité, exprimé en Pascal (Pa)

K: Module d'incompressibilité, exprimé en Pascal (Pa)

σ: Coefficient de poisson (sans dimension) et il est compris entre 0 et 0.5.

I.7.2.2. Les ondes de surface

Ce sont des ondes guidées par la surface de la Terre. Leur effet est comparable aux ripples formées à la surface d'un lac. Elles sont moins rapides que les ondes de volume mais leur amplitude est généralement plus forte. On distingue:

- Ondes de Love;
- Ondes de Rayleigh;

En prospection sismique, les seules ondes de surface importantes sont les ondes de Rayleigh. Elles résultent d'une combinaison de mouvements transversal et longitudinal. L'amplitude du mouvement décroît exponentiellement avec la profondeur.

I.7.3. Vitesses sismiques des roches

On peut distinguer 6 grands groupes de roches sur les vitesses P:

- Roches compactes, porosités inférieures à 3%, pas de fracturation, pas d'altération (Granite, Gneiss, Dolomites et calcaires massifs, Marbres, Quartzites, Basaltes), vitesses variant de 4000 à 6000 m/s.
- Les mêmes roches mais fracturées, porosité totale de 3 à 10%, peu ou pas d'altération, vitesses variant de 3000 à 4000 m/s.
- Roches poreuses, porosité supérieure à 5% pas de fracturation, pas d'altération (Calcaire, Craies, Grès,...), ayant de vitesses de 2500 à 4000 m/s.
- Les mêmes roches mais fracturées, porosité supérieures à 8%, peu ou pas d'altération, vitesses variant de 2000 à 3500 m/s.

- Roches altérées, les vitesses sont très variables selon le degré d'altération. Les vitesses sont toujours inférieures aux vitesses dans les roches saines.
- Formations meubles, soit non consolidées, par une profonde altération (surtout pour les roches à feldspaths abondants, Graviers, sables, silts, tuf, Moraines Altérées), les vitesses varient de 300 à 2500 m/s.

I.7.4. Principe de la méthode sismique réfraction

Cette méthode consiste à étudier la variation de temps de propagation des ondes sismiques en fonction de la distance séparant le point d'enregistrement et le point de tir. Elle permet de déterminer les vitesses sismiques des différents niveaux réfracteurs ainsi que les différentes moyennes des différentes interfaces. En pratique on utilise plusieurs capteurs équidistants les uns les autres. La différence des temps d'arrivée des ondes P et S suffit, connaissant leur vitesse, à donner une indication sur l'éloignement du séisme. Les ondes de volume se propagent un peu comme les rayons lumineux : elles peuvent être réfléchies ou réfractées, c'est-à-dire déviées à chaque changement de milieu, au passage manteau- noyau par exemple. Elles peuvent ainsi suivre des trajets très complexes à l'intérieur de la Terre. Leur temps de parcours dépend de ce trajet, elles n'arrivent pas toutes en même temps au même endroit.

I.7.5. Appareils géophysiques et acquisition des données

On a utilisé les matériels ci-dessous pour l'acquisition de données sismiques:

- 01:** Appareil sismique DAQ LINK II: qui est l'interface entre les signaux analogiques et signaux numériques, il relie les géophones à l'ordinateur.
- 02:** Ordinateur portable: appareil de lancement de mesure et de stockage des données
- 03:** Batterie 12V: alimentation
- 04:** Convertisseur: qui transforme le courant continu (12V) en courant alternatif (220V).
- 05:** Source: la source de propagation d'onde sismique qui est, soit un marteau de 10 à 20kg ou une masse pesante de 70kg.
- 06:** Géophones: qui sont les capteurs de signaux.

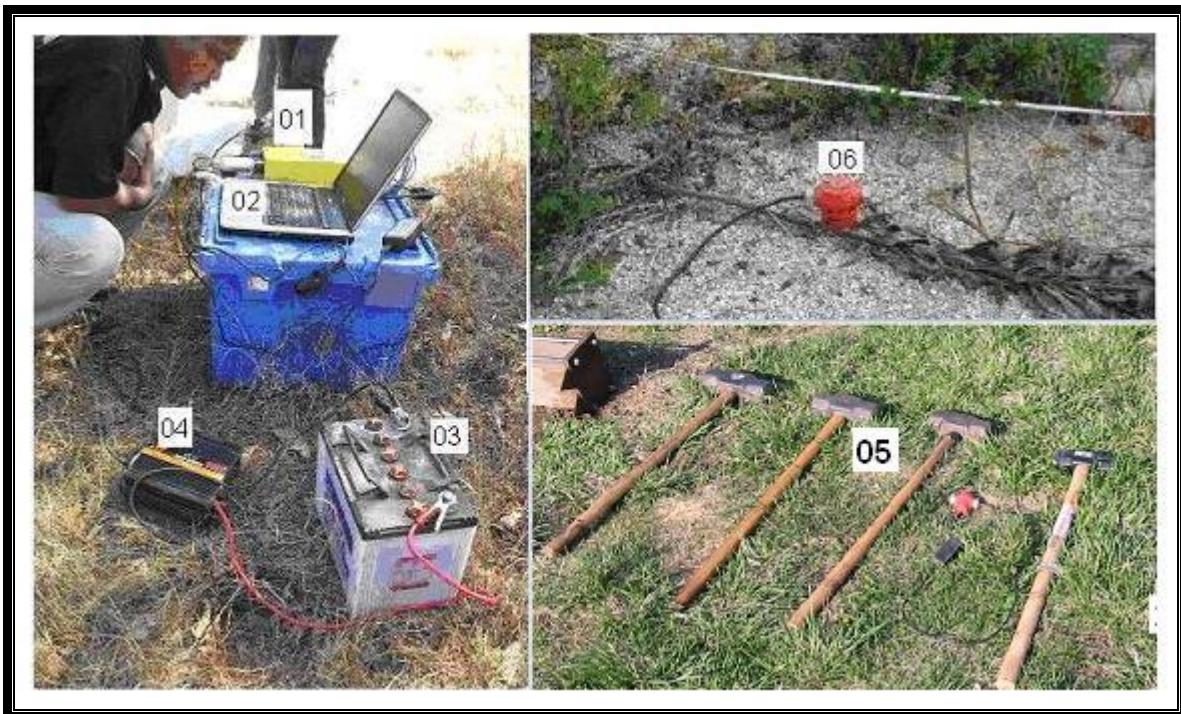


Photo 5: Schéma du montage d'appareil de mesure en sismique (source impétrant, 2010)

I.7.5.1. Acquisition des données

La mise en œuvre de la méthode sismique sur le terrain nécessite un dispositif d'émission (source), de détection (récepteurs) et d'enregistrement appropriés. Les vibrations provoquées par une marteau 20 kg, faisant de choc avec une plaque métallique, située à 10m du 1^{er} géophone et les autres espacées de 4m, sont enregistrés sur des dispositifs récepteurs. Les 24 géophones de 4,5Hz de fréquence de coupure, sont reliés à un sismographe Daalink II de Seismic Source par l'intermédiaire des câbles nommées flûtes. Dans cette étude, les géophones sont présentés dans une rangée linéaire avec un espacement de 2m. En outre, un géophone de déclenchement, placé à la proximité de la source, est employé pour initialiser l'enregistrement. Ensuite, les ondes produites, sous forme d'un sismogramme, sont enregistrées dans un ordinateur portable par le biais du logiciel vibroscope de Seismic Source. Enfin, les données acquises sont alors transférées pour l'analyse en utilisant le logiciel de SeisImager/SW.

La méthode MASW s'intéresse, quand à elle, aux ondes guidées appelées ondes de surface. L'analyse de ces ondes permet également de calculer les vitesses **V_s** ainsi que les épaisseurs des terrains.

I.7.5.2. Sources sismiques

La source d'énergie en sismique peut être de type impact (marteau, chute de poids), projectile (fusil à balle, airgun) ou vibrateur (vibroseis, plaque vibratrice). Elle porte le nom de *point de tir* ou tout simplement *tir*. L'explosif est la source la plus énergique mais son utilisation est réglementée et soumise à des autorisations administratives strictes. Le marteau est la moins énergique. Le choix de la source d'énergie se réfère aux conditions requises pour une source sismique.

I.7.5.3. Géophones

Les capteurs sismiques sont les géophones. Un géophone est composé d'une bobine suspendue à un ressort. La bobine et le ressort du géophone constituent un système oscillant dont la fréquence propre est l'ordre de 4Hz à 15Hz pour la réflexion et de 1Hz à 10Hz pour la réfraction.

I.7.5.4. Profondeur d'investigation

La profondeur d'investigation augmente avec la puissance de la source utilisée (Hayachi and Suzuki, 2004), la longueur de ligne et la longueur d'onde. Soit $P \geq L/2$ (Koichi Hayachi, 2003) avec L est longueur de ligne et $P < \lambda_{\max}/2$ (Rix and Leipski, 1991) avec λ_{\max} est la longueur d'onde maximale du système.

I.7.6. Processus de traitement de données

Pour le sismique de réfraction, le processus de traitement se divise en quatre parties:

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

L'acquisition des données fait partie de la mesure. On enregistre durant cette phase l'onde de vibration résultant du tir effectué à la source et qui est capté par les géophones disposés linéairement le long d'un profil. Les signaux seront envoyés vers l'appareil **DAQ LINK II** et stocké immédiatement dans l'ordinateur portable. Pour faciliter les traitements

numériques et aussi pour minimiser les erreurs les tirs effectués sont symétriques par rapport au centre du profil.

Le pointage est un procédé de traitement numérique des signaux enregistrés. La technique consiste à détecter et à pointer le premier temps d'arriver de chaque enregistreur (voir figure). Le signal provoqué est de basse fréquence donc à forte amplitude ce qui la diffère des bruits naturels (signaux hautes fréquences).

Chaque tir correspond à un hodochrone. Dans un seul profil on effectue plusieurs tirs, et on fait la même procédé c'est pourquoi dans un seul profil on a plusieurs hodochrones qui sont spécifique en fonction du point de tirs (voir figure). On a alors un modèle d'hodochrone.

Ces hodochrones seront traités numériquement par l'inversion du modèle de vitesse en couche tabulaire. Le modèle obtenu est encore inversé pour avoir le vrai modèle du sous sol. On ajoute à ce modèle les données topographiques afin d'obtenir le vrai modèle du terrain avec les variations topographiques.

I.7.7. Utilisation des ondes de surface

La méthode **MASW**, mise au point par l'équipe du Dr Choon Park du Kansas Geological Survey (KGS) aux USA1996, s'intéresse, quand à elle, aux ondes guidées appelées ondes de surface (**ondes de Rayleigh**). Elle permet de déterminer directement les vitesses de phase à partir des données multicanaux des ondes de surfaces, après avoir appliqué une intégrale qui transforme les données brutes, qui sont dans le domaine fréquentiel, en des données dans le domaine temporel. En outre, cette intégration convertit directement les signaux du domaine temporel en une courbe de vitesse de phase en fonction de la fréquence en utilisant la technique de corrélation croisée des points milieux communs (CMPCC) pour la méthode MASWI.

I.7.7.1. Traitements des données

L'analyse des ondes de surfaces permet également de calculer les vitesses Vs ainsi que les épaisseurs des terrains. D'autres paramètres du sous-sol peuvent également être calculés comme la vitesse des ondes P, le coefficient de Poisson, le module de cisaillement G (ou μ), le module d'Young, ... Le schéma suivant montre la démarche lors du traitement des données à l'aide du logiciel SeisImager.

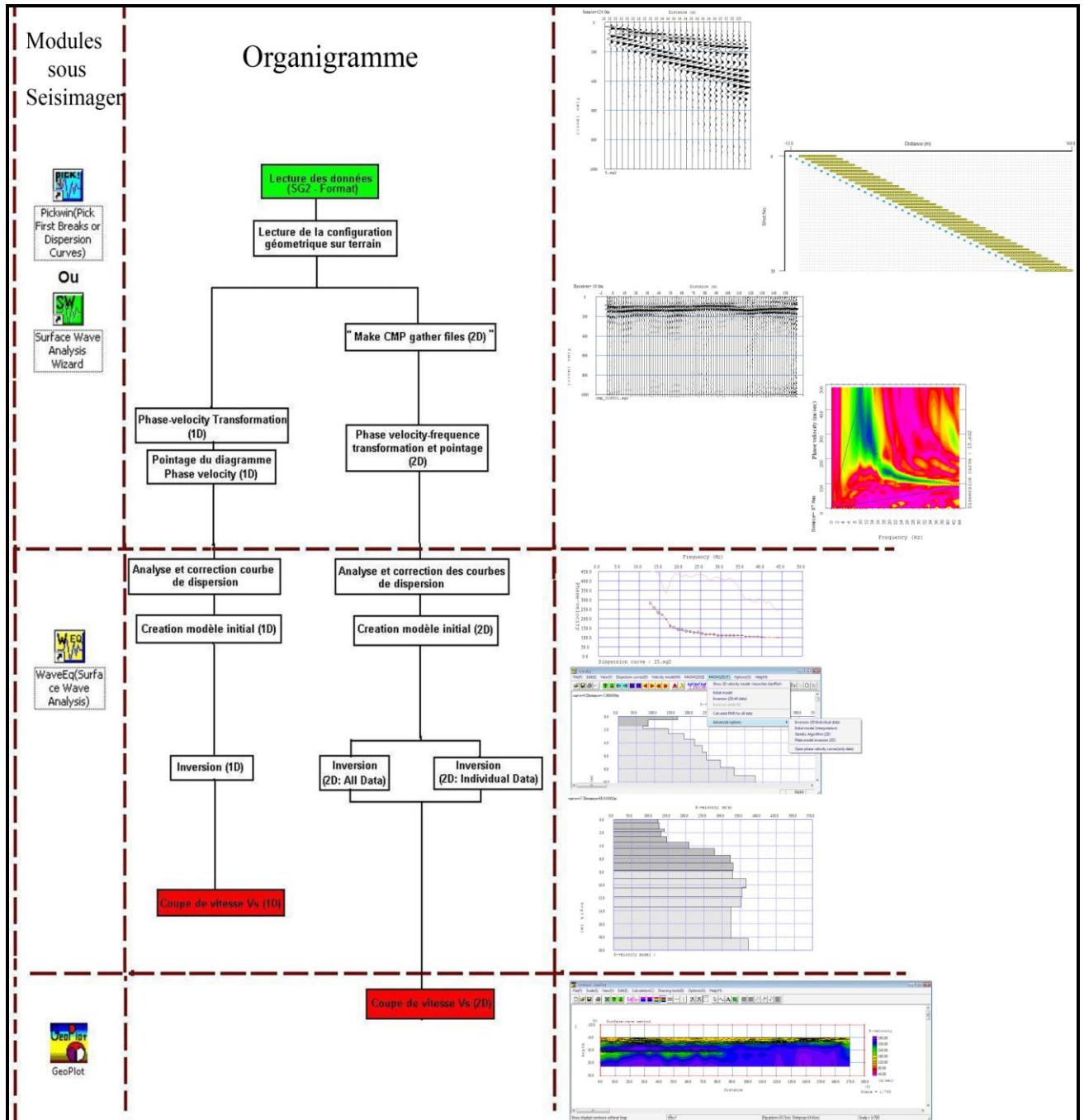


Figure 9: Schéma de traitement des données en MASW

I.7.7.2. Méthode active

Pour la méthode active, deux types de méthode MASW ont été développés au KGS: analyse multi canal d'ondes de surface utilisant le vibroseis (MASWV) et de l'analyse multi canal d'ondes de surface utilisant la source impulsive comme le marteau ou masse pesante de 70-100 kilos (MASWI). Chaque méthode se différencie du type de source utilisée et de la technique de traitement des données pour générer la courbe de dispersion.

I.7.7.3. CMPCC (Common Mid-Points Cross Correlation)

Pour la corrélation croisée des points milieux communs (CMPCC), les quatre étapes suivantes doivent être suivies: d'abord, les corrélations croisées sont calculées pour chaque paire de traces dans chaque ensemble de tir. En second lieu, des traces de corrélation ayant un point milieu commun sont recueillies, et des traces équidistantes sont cumulées dans le domaine temporel. Les résultats de ces collectes de corrélation croisée ressemblent à des collectes de tir et sont mentionnées pendant qu'on recueille la corrélation croisée de CMP. Troisièmement, une analyse multicanal est appliquée aux collectes de corrélation croisée de CMP en calculant les vitesses de phase des ondes de surface. Enfin, un profil 2D de vitesse des ondes S est reconstruit par l'inversion par la méthode des moindres carrés non linéaire. Ci-après la conception de l'analyse de CMP, les cercles ouverts indiquent les emplacements des récepteurs et les cercles pleins indiquent les points milieux des corrélations croisées. Les espacements 1,2, 3... se rapportent aux distances des récepteurs pour calculer la corrélation croisée; par exemple, l'espacement (spacing)1 correspond aux paires 1 –2, 2 –3, 3 –4, et 4 –5, tandis que l'espacement 2 correspond aux paires 1 –3, 2 –4 et 3 –5. (a) Endroit des points d'observation, et la structure de vitesse estimée, dans l'analyse conventionnelle de MASW; (b) Corrélation croisée qui a les mêmes endroits de CMP (CMPCC); (c) CMPCC pour un tir et (d) CMPCC pour deux tirs.

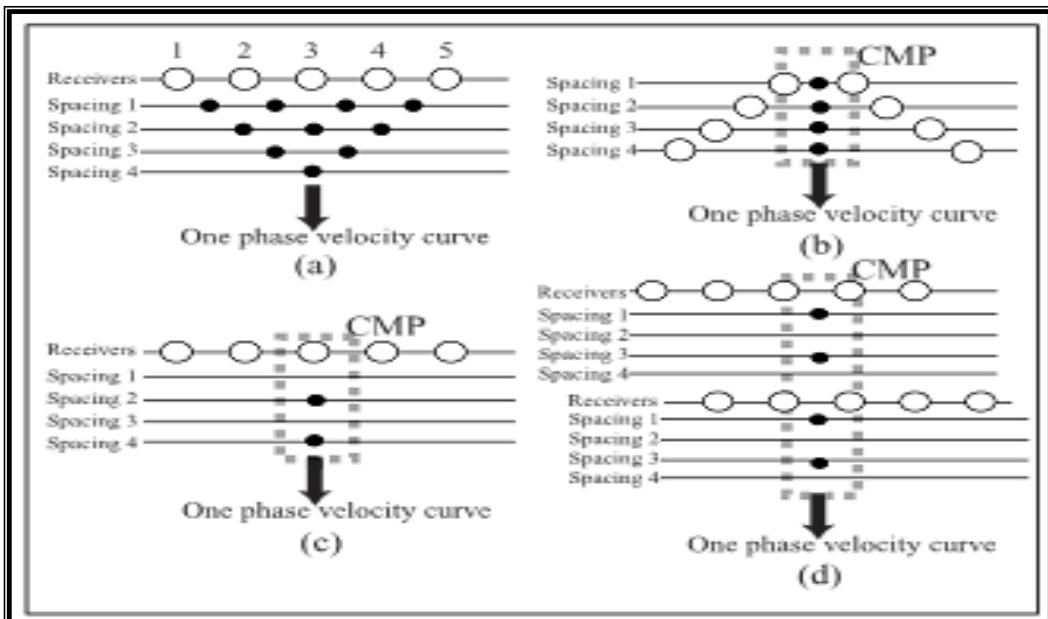


Figure 10: La conception de l'analyse de CMP

Calcul de la corrélation croisée entre deux ondes définies par les fonctions $f(t)$ et $g(t)$

Soit Δx , la distance entre les deux ondes. D'abord, on fait les transformations de Fourier qui transforme $f(t)$ en $F(\omega)$ et $g(t)$ en $G(\omega)$.

Ainsi,

$$\begin{aligned} F(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \exp^{-i\omega t} dt & G(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) \cdot \exp^{-i\omega t} dt \\ &= A_f(\omega) \cdot \exp^{-i\phi_f(\omega)} & &= A_g(\omega) \cdot \exp^{-i\phi_g(\omega)} \end{aligned}$$

avec $A_f(\omega)$ et $A_g(\omega)$ sont les amplitudes respectives de $F(\omega)$ et de $G(\omega)$;

$\phi_f(\omega)$ et $\phi_g(\omega)$ sont leur phases respectives; t exprime le temps en seconde et $\omega = 2\pi f$, la pulsation en rad/s (f : fréquence en Hz).

Puis pour la différence de phase, on a:

$$\Delta\phi(\omega) = \phi_f(\omega) - \phi_g(\omega)$$

Donc la vitesse de phase $C(\omega)$ pour chaque fréquence est égale:

$$c(\omega) = \frac{\omega \cdot \Delta x}{\Delta\phi(\omega) + 2n\pi}, \text{ où } n \text{ est un entier naturel.}$$

Ensuite pour la corrélation croisée, on a la relation suivante:

$$CC_{fg}(\omega) = F(\omega) \cdot \overline{G(\omega)} = A_f(\omega) A_g(\omega) \cdot \exp^{i\Delta\phi(\omega)}$$

Avec $\overline{G(\omega)} = A_g(\omega) \cdot \exp^{-i\phi_g(\omega)}$

Des traces de corrélation ayant un point milieu commun sont maintenant recueillies, et des traces équidistantes sont cumulées dans le domaine temporel comme:

$$F(\tau, p) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, t + xp) dx \quad \text{et} \quad \tau = t$$

Enfin, en faisant la transformation de Fourier, on obtient:

$$F\left(\omega, \frac{1}{c}\right) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F\left(\tau, \frac{1}{c}\right) \cdot e^{-i\omega\tau} d\tau$$

qui nous mène directement la fonction exprimant la courbe de dispersion, $\mathbf{F}(\mathbf{C}, \omega)$

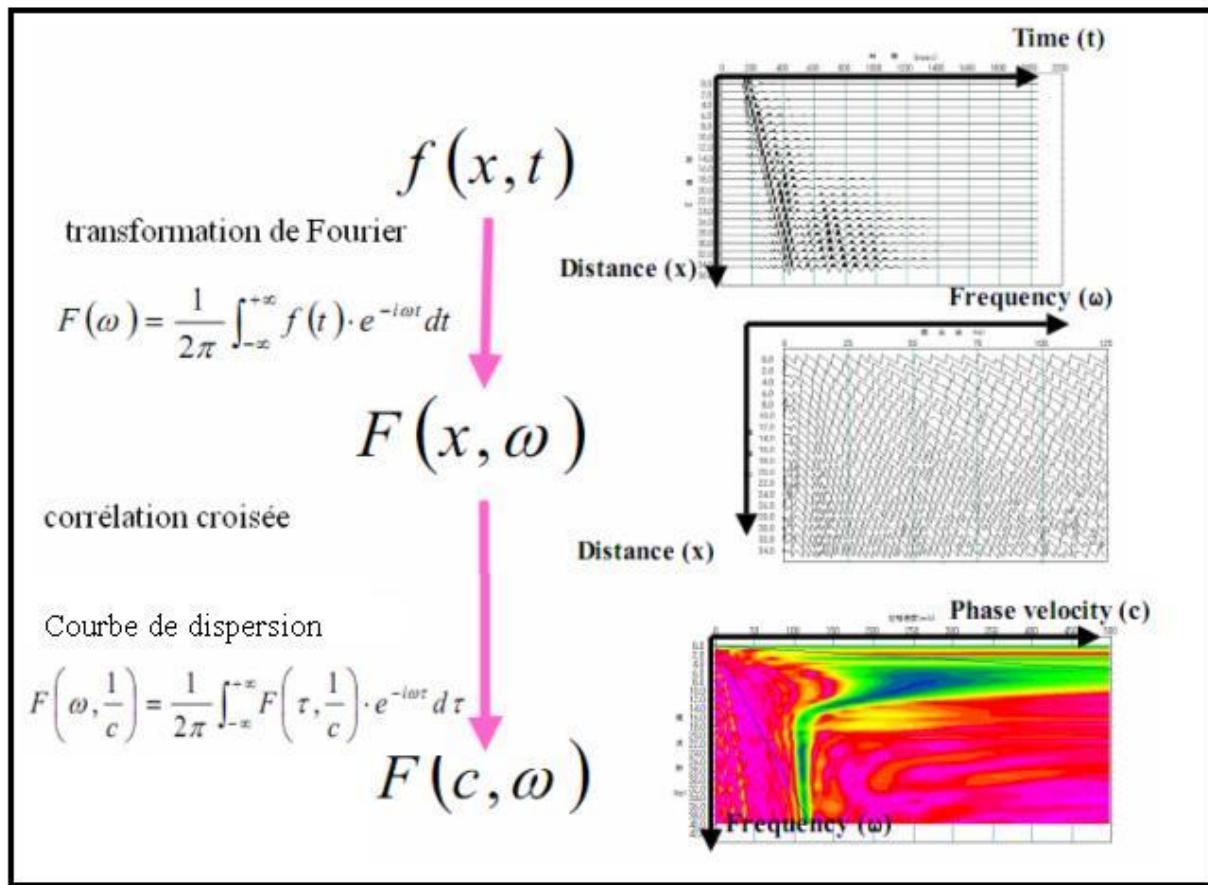


Figure 11: Schéma simplifié du calcul de CMPCC

La CMPCC est une extension de la méthode MASW qui nous permet de déterminer les vitesses de phase et aussi la fonction $F(c, \omega)$ exprimant la courbe de dispersion des données obtenues directement par des tirs multiples. La méthode améliore non seulement l'exactitude et la résolution de la méthode de MASW, mais elle permet également, à la méthode de SASW, d'exécuter une pseudo-analyse multicanale afin de distinguer un mode fondamental des modes les plus élevés visuellement.

I.7.7.4. La courbe de dispersion

La courbe de dispersion est la courbe montrant la vitesse de phase en fonction de la fréquence. Elle est le résultat final du calcul de CMPCC. Le profil de Vs est déterminé à base de cette courbe. Par conséquent, la détermination exacte des courbes de dispersion est la partie la plus critique qui affecte la précision du profil de Vs.

L'onde à basse fréquence est rapidement transmise que l'onde à haute fréquence. On considère que le mode fondamental compris entre la longueur d'onde minimum et maximum.

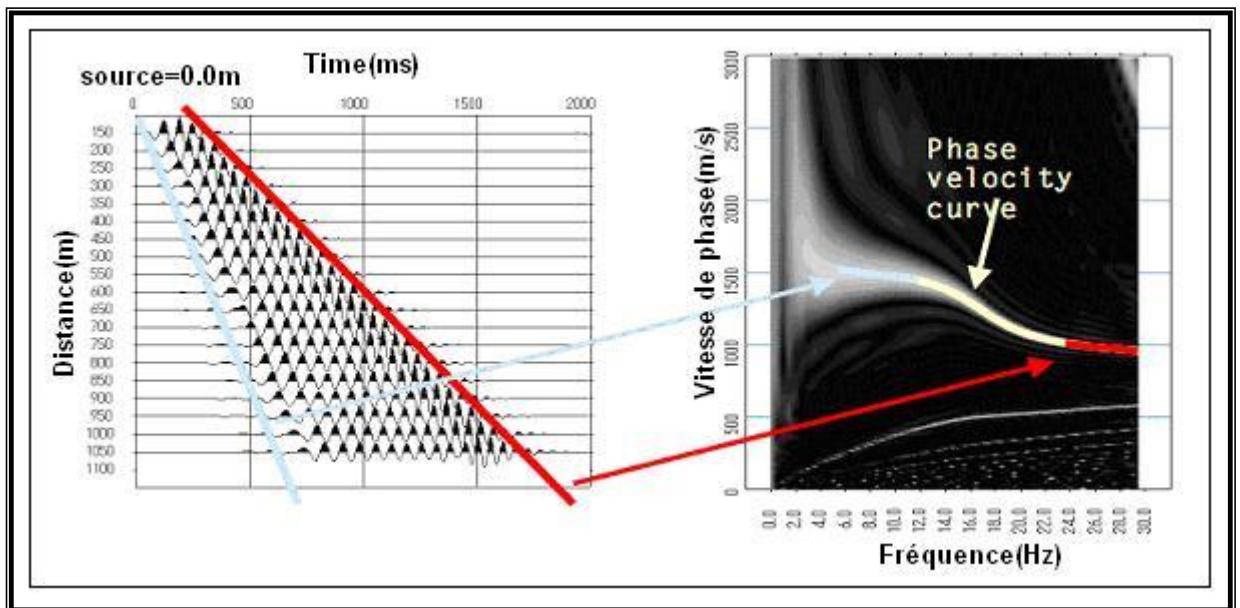


Figure 12: (a) le sismogramme et (b) la courbe de dispersion $F(c, \omega)$

Le mode le plus élevé (higher mode) et le bruit gênant (noise) doivent être supprimés avant l'analyse car ils risquent de corrompre le résultat.

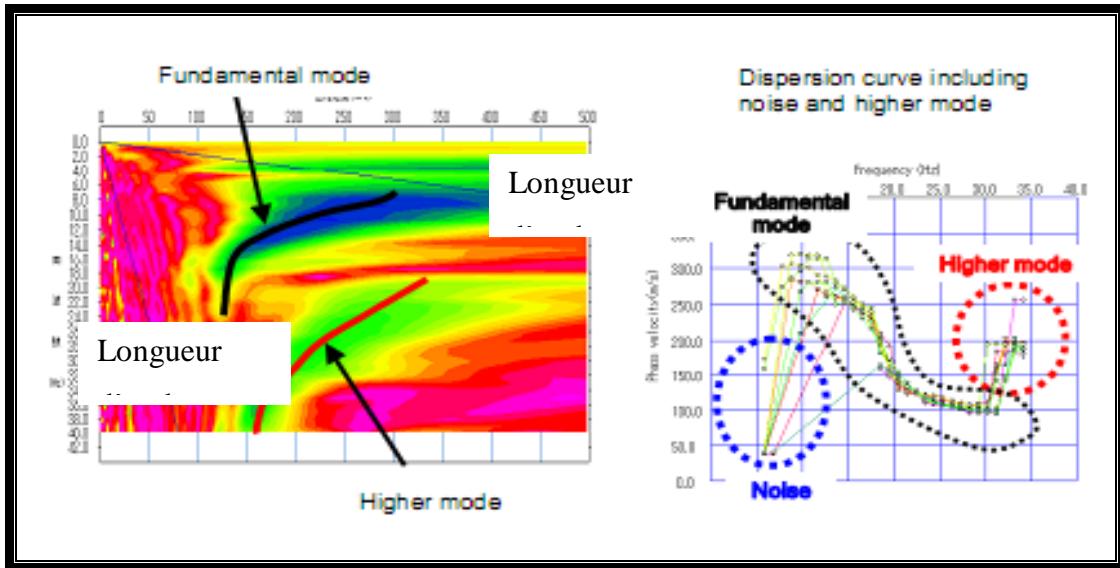


Figure 13: la courbe de dispersion incluant le mode le plus élevé et le bruit

La courbe de dispersion doit être lissée. Ci-après un exemple de modèle initial obtenu à partir d'une courbe de dispersion.

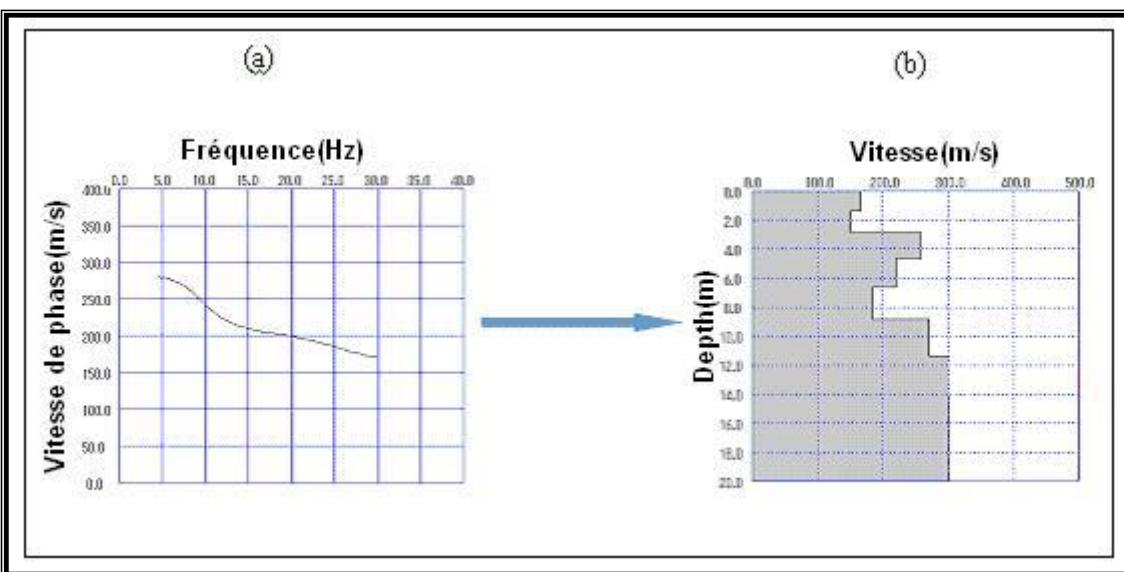


Figure 14: (a) courbe de dispersion, (b) modèle initial

I.7.7.5. L'inversion

Puisque V_s n'est pas constante, ainsi la méthode d'inversion consiste à utiliser la méthode des moindres carrés non linéaire (Matrice de Jacobien n'est pas constante).

La démarche est comme suit: soit $Y = V_s$ la valeur observée. D'abord, nous calculons la valeur théorique $Y_0 = V_{s_0}$ à partir de la valeur initiale X_0 : $Y_0(Z) = Y(Z, X_0)$, Z étant la

profondeur; puis on calcule le vecteur résiduel entre la valeur théorique et la valeur observée, $\Delta Y = Y - Y_0$

Si ΔY n'est minimal, par la méthode des moindres carrés, on fait le calcul des valeurs de $X(\Delta Y)$ avec $(A^T A)\Delta X = A^T \Delta Y$, A est la matrice de Jacobien correspondante;

Ensuite, on estime la nouvelle valeur X_1 telle que $X_1 = X_0 + \Delta X$; et enfin, on retourne à la première étape, on calcule la valeur théorique Y_1 en prenant X_1 comme étant la valeur initiale. Et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on obtient un résiduel minimal (proche de 0).

On fait la même procédure pour l'inversion des données de chaque tir. Et la coupe de Vs pour une ligne est obtenue en faisant une modélisation 2D à partir des résultats obtenus ci-dessus par le biais d'un logiciel correspondant.

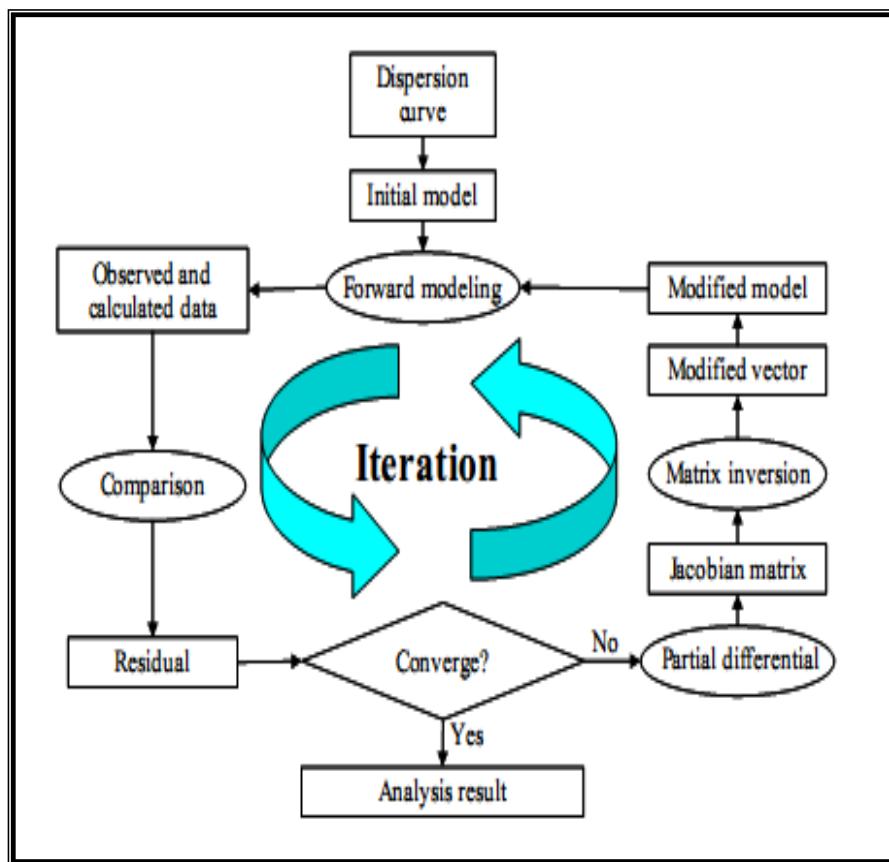


Figure 15: Organigramme d'inversion

PARTIE III

INTERPRETATION DES DONNEES

ET

RESULTATS

La troisième partie développe particulièrement l'interprétation des résultats des travaux réalisés sur le terrain.

Notons que la prospection géophysique a été précédée par la reconnaissance géologique et par les traitements et observation de la photographie aérienne.

I.8. IMPLANTATION DES LIGNES GEOPHYSIQUES

L'implantation des lignes géophysiques ont été effectuées à partir de ces photo-interprétations. On a choisi en particulier les zones de contact, où la minéralisation est favorable.

I.8.1. Photo interprétation

On a observé les différentes linéaments et schistosités, sur les photographies aériennes, couvrant la zone d'étude. La schistosité est orientée généralement suivant un axe Nord Sud.

La photo a montré la présence des deux structures de teinte différente, claire et sombre. La partie à teinte claire est constituée d'une formation à dominance quartzite tandis que celle à teinte sombre est plus ou moins schisteuse. Le contact entre les deux formations est bien marqué sur la photo-interprétation ci-dessous.

Les linéaments ne suivent pas un axe privilégié. Ils ont les directions plus ou moins aléatoires. Celles-ci témoignent l'existence de plusieurs événements tectonique et métamorphique dans le secteur. Les linéaments importants, de longue distance, sont orientés suivant l'axe N70° et N30° qui coïncident avec les axes de faille majeur de Madagascar.

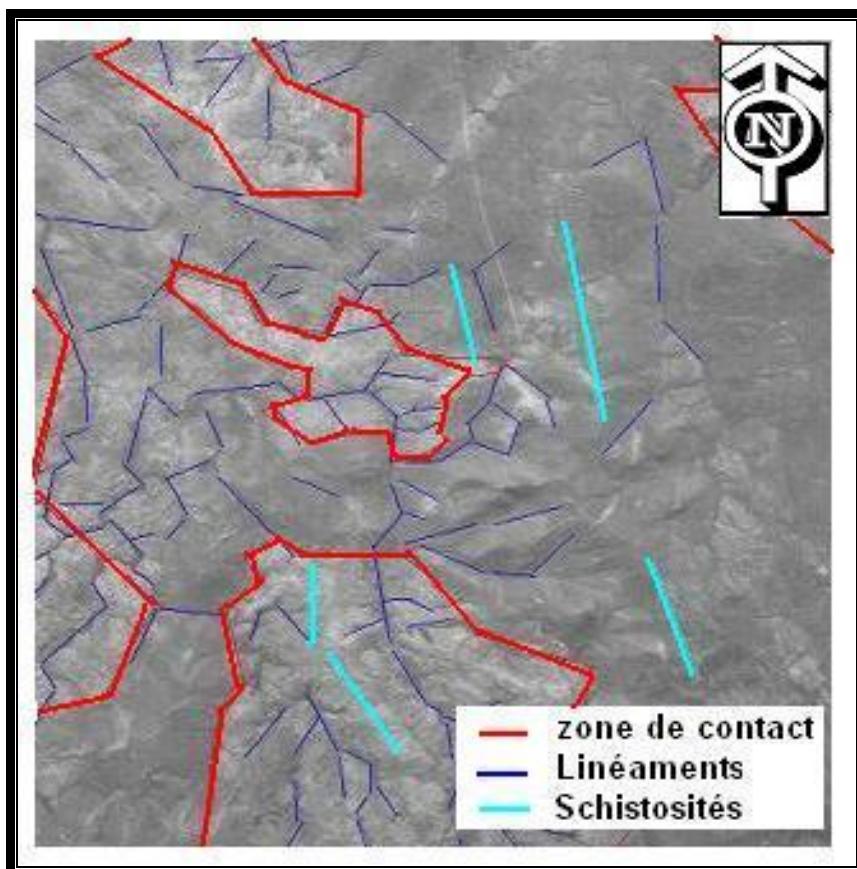


Photo 6: Linéaments et schistosités existant dans la zone d'étude

I.8.2. Les lignes géophysiques

Seize (16) profils électriques et treize (13) profils sismiques ont été implantés aux environs de la zone d'exploitation de tourmaline. L'emplacement et la direction des profils ont été faits à partir de la photo-interprétation. Les profils géophysiques ont été étalés dans les deux directions: d'abord, en coupant les linéaments observés sur la photo et après, en suivant les linéaments donnant des anomalies significatives.

On a utilisé le dispositif Wenner pour les panneaux électriques.

Comme les deux méthodes sont complémentaires, alors les deux profils géophysiques, électrique et sismique, se sont confondus. Celles-ci afin d'avoir les signatures, les anomalies, beaucoup plus significatives.

A cause de l'accessibilité de certaines zones, relativement difficile à l'exécution des tirs sismiques, seulement treize (13) lignes sismiques ont été implantées lors de cette campagne. On a utilisé les distances inter électrode de 5m, 4m, 3m et 2m, selon la profondeur d'investigation voulue, et la distance inter géophone de 2m pour la sismique.

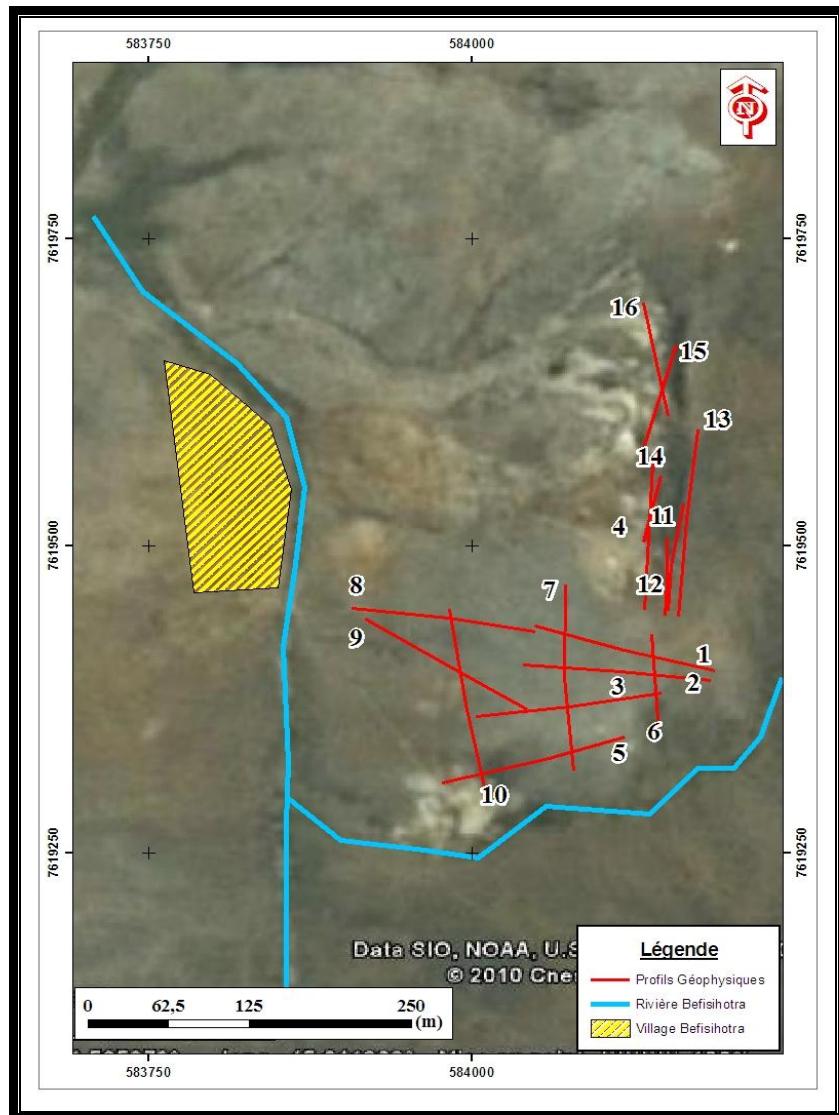


Figure 16: Emplacement des profils électriques et sismiques (source Google Earth, 2010)

I.9. INTERPRETATION

Les lignes géophysiques effectuées lors de cette campagne de mesure sont constituées à la fois d'un profil électrique et d'un profil sismique.

I.9.1. Profils P1: électrique PE1 et sismique PS1

Le profil électrique PE1 a été implanté dans une formation latéritique exploitée par les miniers locaux. Il se trouve au Nord Est de ce secteur (cf. figure 17). Il a été étalé avec une

distance inter électrodes $a= 5\text{m}$ dont la profondeur d'investigation maximale est de 25m . Il a pris la direction N125° qui est perpendiculaire à la direction de la schistosité.

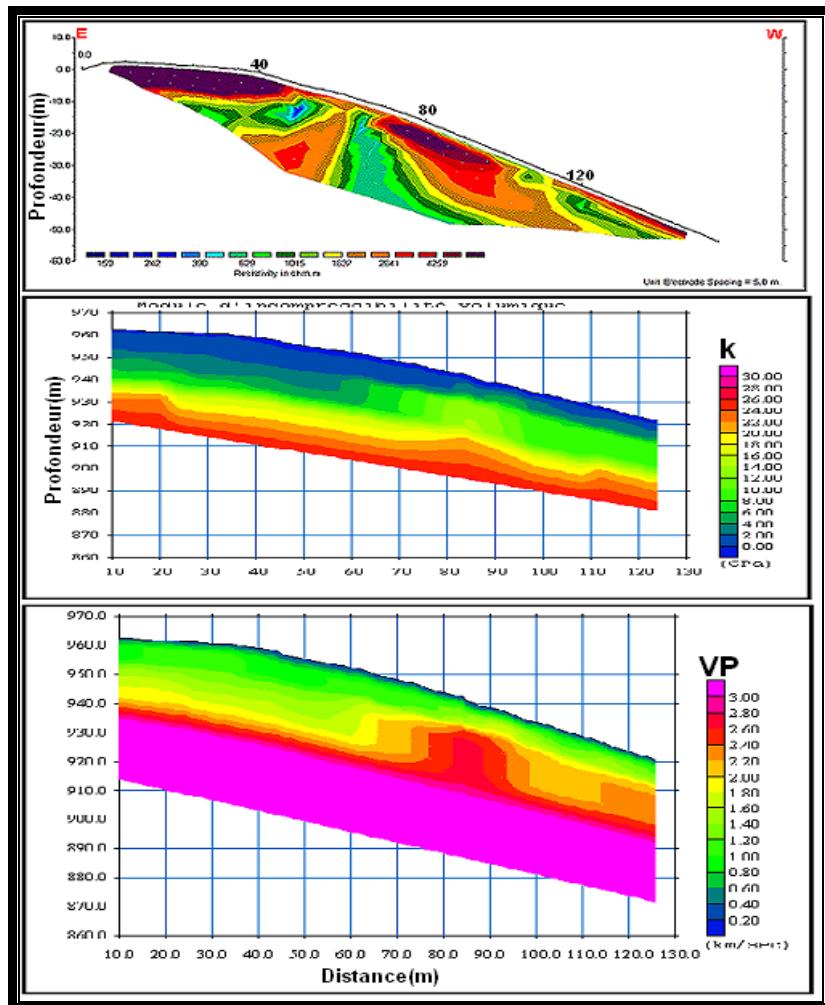


Figure 17: Coupes géoélectrique, module d'incompressibilité volumique (K) et de vitesse sismique N°01

La coupe ainsi obtenue a mis en évidence trois formations électriquement différentes:

- la première formation est résistante dont les valeurs de la résistivité varient entre $1500\Omega\text{m}$ et $5000\Omega\text{m}$. Elle couvre presque la totalité de la coupe. Elle correspond à la formation latéritique en surface dont l'épaisseur s'amincit de l'Est vers l'Ouest (cf. Fig 17) et en profondeur à la formation quartzitique.
- la deuxième formation moyennement résistante, ayant des valeurs de résistivité comprises entre $500\Omega\text{m}$ et $1500\Omega\text{m}$, est localisée au centre et sur les deux extrémités de la coupe. Elle peut être assimilée à la formation pegmatitique.
- la dernière formation est conductrice. Elle est caractérisée par une couleur bleue, dont la résistivité reste inférieure à $500\Omega\text{m}$. Elle se trouve à l'aplomb de l'abscisse $X=$

50m, à la profondeur 5m (cf. fig. 17). Elle pourrait correspondre à une formation schisteuse fissurée.

La coupe du module d'incompressibilité volumique K présente également trois structures différentes. La première, couvrant la partie superficielle, a deux puissances différentes. De l'abscisse X=0 m à l'abscisse X=62 m, elle a une épaisseur moyenne de 16m, puis présente une discontinuité qui la ramène à une épaisseur égale à 9m jusqu'à l'extrémité Ouest de la coupe. Les valeurs de l'incompressibilité volumique K correspondantes (0.01GPa - 8GPa) montre que la formation est tendre. Ensuite, la deuxième structure moyennement compacte (8GPa-16GPa), repose sur la troisième qui est incontestablement le plus compact des trois structures (K supérieure à 16GPa). Cette dernière correspond à la formation quartzitique.

Pour la sismique réfraction, la coupe de vitesses présente trois formations bien distinctes:

- la première formation, se trouvant sur la partie superficielle de la coupe est relativement mince (couleur bleu sur la coupe). Elle est caractérisée par des vitesses faibles inférieures à 1km/s. Elle pourrait correspondre à la formation latéritique.
- la deuxième formation, de couleur verte virant au jaune (cf. fig. 17), est relativement épaisse. Elle est caractérisée par des valeurs de vitesses comprises entre 1km/s et 2km/s. Toutefois, elle présente une discontinuité à l'abscisse X=62 m, tel que la partie Est, est plus puissante que la partie Ouest. Il s'agirait de la formation pegmatitique.
- la troisième formation et dernière formation se trouve en profondeur sous les deux premières formations. Elle est caractérisée par une vitesse de propagation supérieure à 2km/s. Elle présente une anomalie de vitesse qui se présente sous forme de Dyke de largeur égale à 40m.

I.9.2. Profils P2: électrique PE2 et sismique PS2

Le profil électrique PE2 a été étalé en aval au sud du profil PE1, avec les mêmes dispositifs de mesure. Il a pris la direction N100°. Les trois formations restent identique à celles de la coupe obtenue sous le profil PE1. Toutefois, la formation conductrice localisée au centre de la coupe est plus nuancé avec des valeurs de résistivités beaucoup plus faibles.

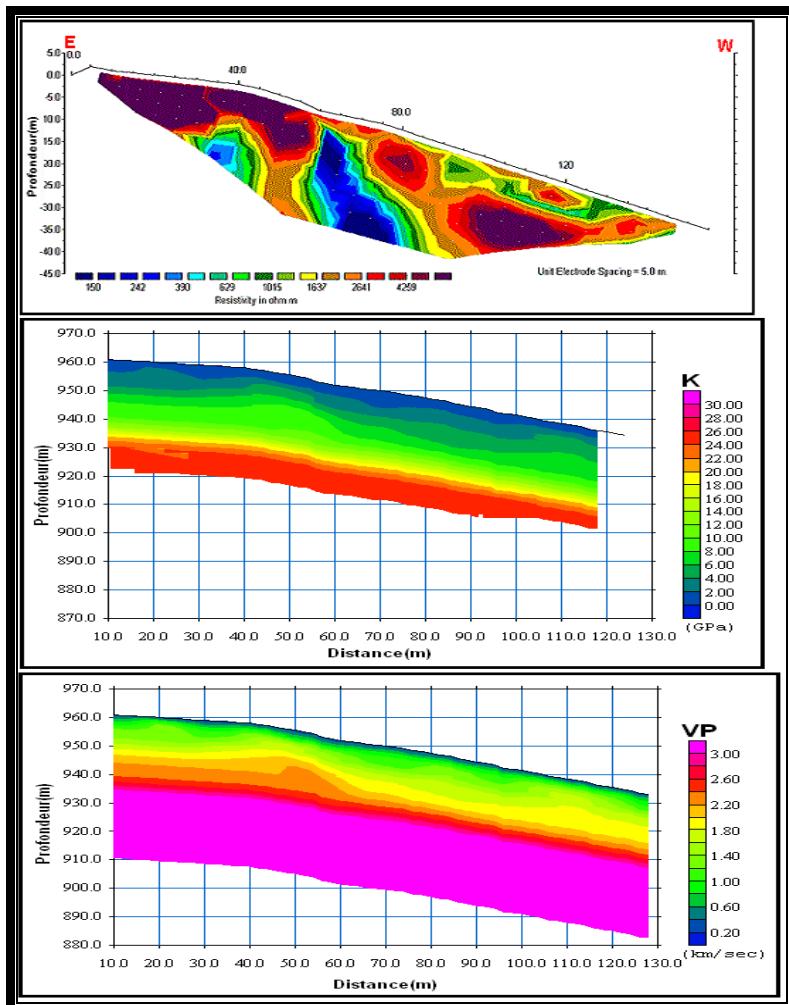


Figure 18: Coupes géoélectrique, du module K et de vitesse sismique N°02

La coupe du module d'incompressibilité volumique K reproduit les mêmes structures que le profil PE1. Pour la partie superficielle, de module faible, elle présente deux rétrécissements aux niveaux des abscisses $X=48m$ et $X=110m$. La formation de module intermédiaire présente deux anomalies sous forme de dyke de largeur moyenne égale à 10m chacun. La formation compacte formant le substratum suit globalement la topographie.

La coupe de vitesse pour la sismique réfraction est pratiquement la même que celle du premier profil. Seule, l'anomalie de vitesse de la troisième formation s'est déplacée à l'abscisse $X=50m$.

I.9.3. Profils P3: électrique PE3 et sismique PS3

Le profil électrique PE3, de même configuration que les deux précédentes, a été étalé au Sud du deuxième profil PE2 (cf. fig. 19). Il a permis de suivre l'évolution des anomalies

observées sur les deux premiers profils. L'anomalie de résistivité au centre s'enfonce légèrement en profondeur par rapport à celles observées sur les deux profils précédents.

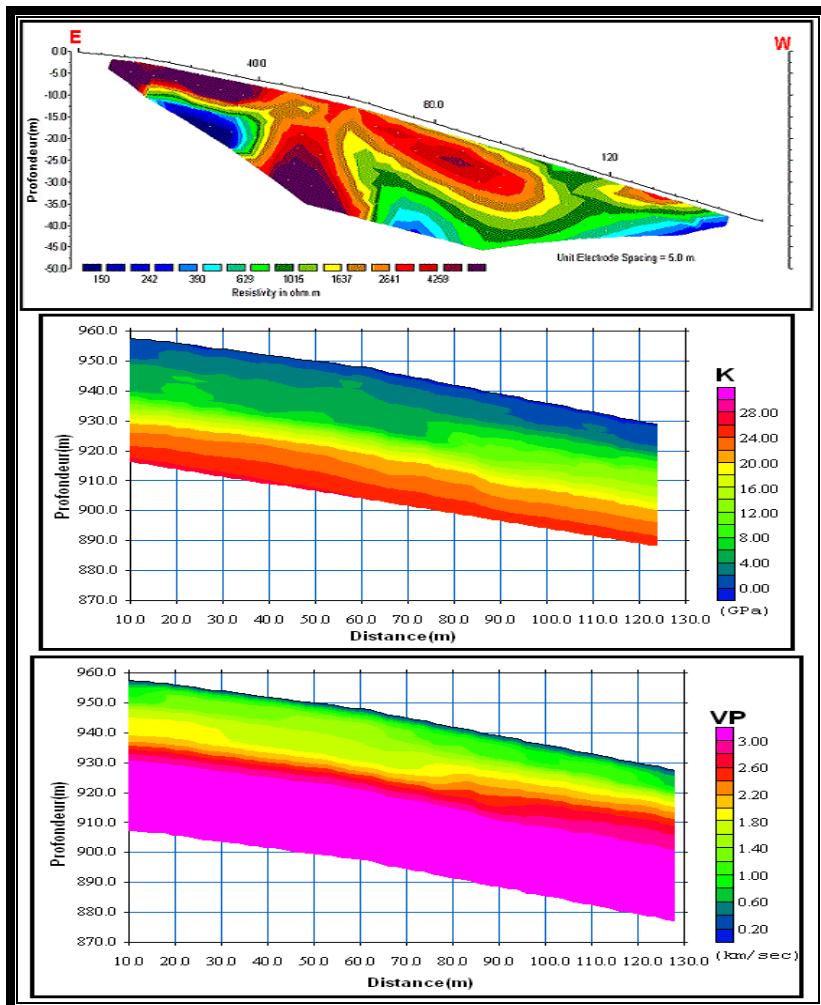


Figure 19: Coupes géoélectrique, module K et de vitesse sismique N°3

La coupe du module d'incompressibilité K reproduit celle observée sous le premier profil pour la partie superficielle et la deuxième formation. La discontinuité se trouve à l'abscisse X=74m. La troisième formation ne présente plus d'anomalie. Son toit est relativement plat.

Pour la sismique réfraction, les anomalies observées de la troisième formation ont disparu.

I.9.4. Profils P4: électrique PE4 et sismique PS4

Le profil électrique PE4 a été étalé sur la carrière déjà exploitée. Il a pris la direction Nord Sud parallèle à la schistosité. Il couvre une longueur totale de 62m, avec une distance inter électrodes égale à 2m. L'investigation atteint la profondeur égale à 10m.

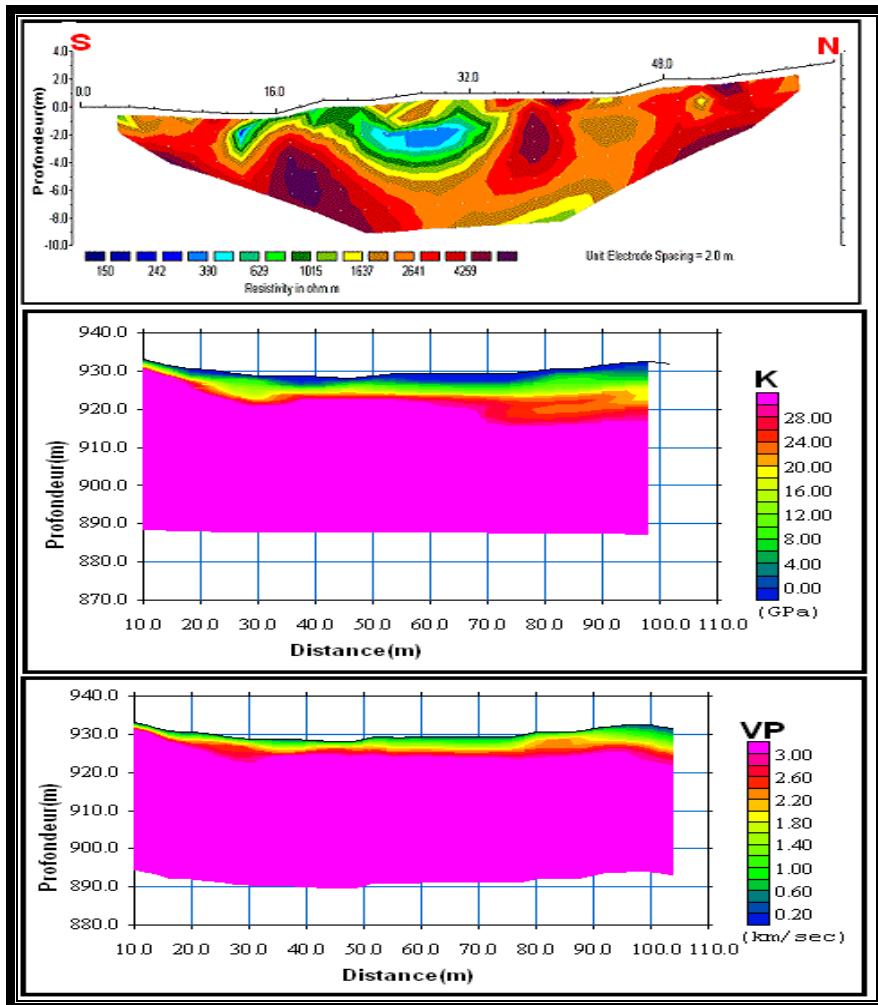


Figure 20: Coupes géoélectrique, module K et de vitesses sismiques N°4

La coupe géoélectrique met en évidence trois formations électriquement différentes (cf. fig. 20) telle que la formation résistante de résistivité supérieure à $1500\Omega\text{m}$ couvre la totalité de la coupe. Elle pourrait correspondre à une formation quartzitique. Elle présente deux anomalies de résistivités bien contrastées. Au centre de la coupe, elle est synclinale et constitue une poche conductrice (inférieure. à $500\Omega\text{m}$) relativement large. La deuxième localisé à l'aplomb de l'abscisse $X=13\text{m}$ se trouve à la profondeur de 2m (cf. fig 20). Elles correspondent probablement à la formation schisteuse altérée. Une formation de résistivité intermédiaire caractérisée par la couleur verte sous la coupe enrobe la formation schisteuse. C'est une formation pegmatitique dont l'altération atteint une phase avancée.

La coupe d'incompressibilité K met en évidence que la partie molle se trouve sur la partie superficielle. Elle est relativement mince dont la puissance ne dépasse pas le mètre. La deuxième structure plus ou moins compacte ou repose la partie molle s'épaissit du Sud vers le

Nord. Elle varie de 1m à l'extrême Sud pour atteindre la valeur de 5m à l'extrême Nord. Le substratum est formé par une formation de module d'incompressibilité K élevé correspondant à la formation quartzitique

La coupe de vitesse pour la sismique réfraction nous montre en surface une formation très mince d'épaisseur centimétrique à faible vitesse (0.2km/s à 1km/s) (cf. fig. 20). Elle couvre la partie superficielle et correspondrait à la couverture latéritique. En dessous de laquelle se situe la formation de vitesses intermédiaires (1km/s à 2km/s) qui repose sur la formation de vitesses élevées (supérieure à 2km/s). Cette dernière peut être assimilée à la formation quartzitique.

I.9.5. Profils P5: électrique PE5 et sismique PS5

Le profil électrique PE5 a été étalé en aval au Sud du profil PE3 avec une distance inter-électrode $a= 5m$. Il a pris la direction N100°. (cf. fig. 21)

La coupe géoélectrique obtenue montre une discontinuité latérale de résistivité bien contrastée dont sa valeur atteint 2.5. Elle est localisée à l'abscisse $X=75$ m.

La coupe du module d'incompressibilité K présente la succession, du haut vers le bas, de trois formations dont la compacité croît régulièrement. Toutefois, une anomalie de forme synclinale est localisée à l'aplomb de l'abscisse $X=82m$ pour la formation dont les valeurs de K varient entre 8GPa et 16GPa

Similairement, la coupe de vitesse pour la sismique réfraction présente les mêmes accroissements de vitesses en allant vers les formations profondes. L'anomalie de vitesse, sous forme de dyke de largeur égale à 30m, est observée à l'extrême Nord pour la formation constituant le substratum dont les vitesses sont supérieures à 2km/s (couleur virant du jaune au rose).

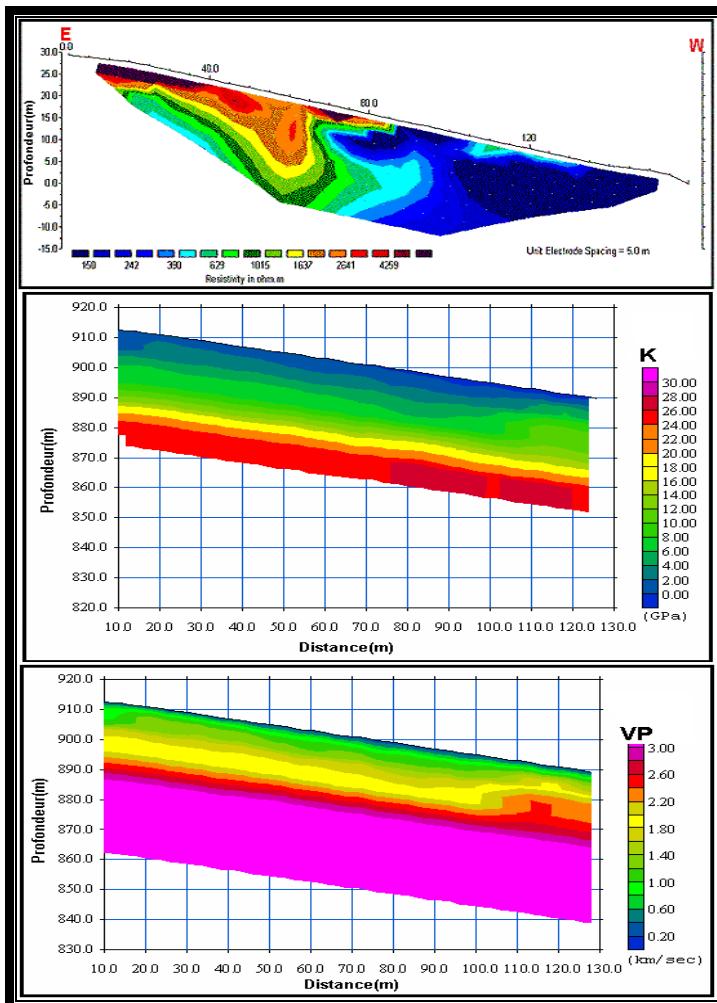


Figure 21: Coupes géoélectrique, du module K et de vitesses sismiques N°5

I.9.6. Profils P6: électrique PE6 et sismique PS6

Le profil électrique PE6 a été effectué avec une distance inter-electrode de 3m. La coupe ainsi, obtenue atteint la profondeur d'investigation maximale égale à 15m. Il a pris la direction N10°, parallèle à la schistosité. Il est constitué du prolongement du profil PE4, implanté dans le secteur latéritique.

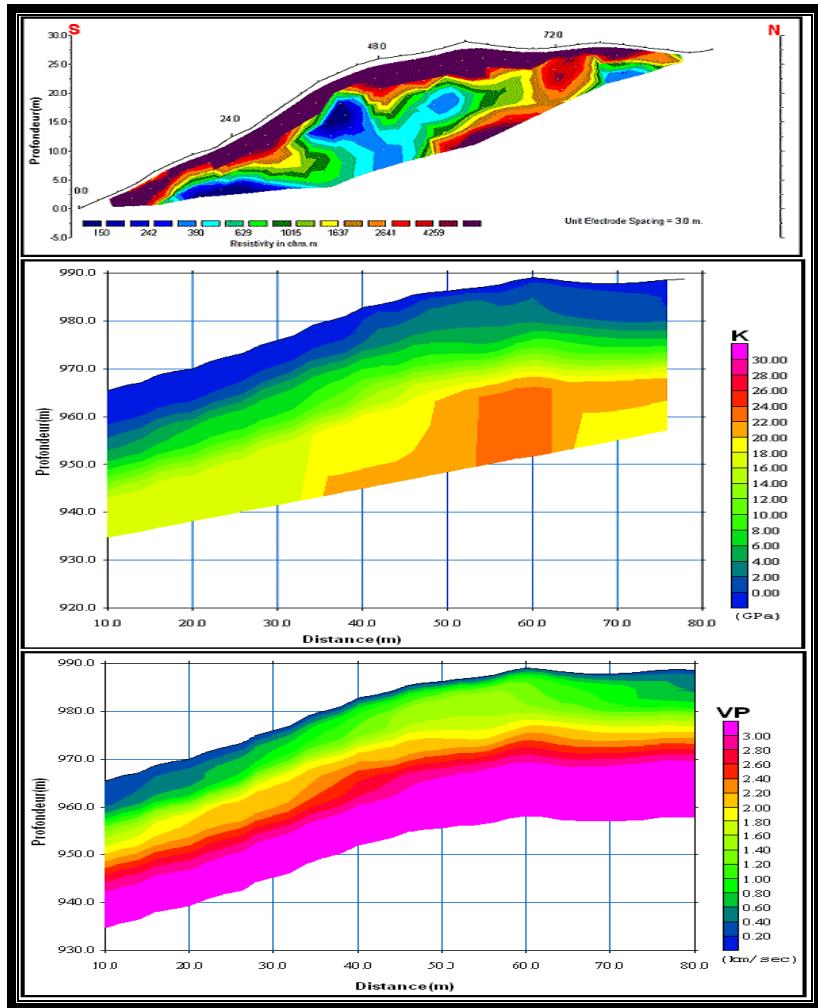


Figure 22: Coupes géoélectrique, du module K et de vitesses sismiques N°6

La coupe obtenue montre que la partie superficielle est électriquement résistante (cf. fig. 22). Son épaisseur oscille entre 3m et 8m. Elle est caractérisée par la couverture latéritique. Plusieurs anomalies de résistivité sont observées en profondeur. Celles, dont les valeurs de résistivité caractérisant les formations conductrices, sont localisées respectivement aux aplombs des abscisses X1=24m, X2=42m, X3=57m et X4=81m. Leurs toits respectifs se trouvent à 5m, 4m, 8m et 5m. Celle dont les valeurs de résistivité sont élevées présente un pendage Nord Sud est affleure entre les abscisses X5=72m et X6=75m. Elle est constituée par des quartzs observés sur terrain.

La coupe du module d'incompressibilité K montre aussi la succession de trois terrains différents:

- le premier terrain superficiel d'épaisseur moyenne égale à 13m caractérise une formation molle qui est probablement les latérites.

- le deuxième terrain moyennement compact a une puissance oscillant entre 8m et 12m.
- le troisième terrain constituant le substratum atteint par l'investigation est compact. Il est caractérisé par les valeurs de K élevées (supérieure à 16GPa). Néanmoins, elle présente une anomalie de largeur égale à 16m. Il s'agirait d'une formation quartzitique.

Pour la sismique réfraction, la formation à faible vitesse (0.2km/s à 1km/s) est relativement mince, en particulier, à l'aplomb de l'anomalie observée sur la coupe du module d'incompressibilité (cf. fig. 22). Elle couvre la partie superficielle de la coupe et elle correspondrait à la formation latéritique. Ensuite la formation à une vitesse intermédiaire (1km/s à 2km/s) se trouvant en dessous de la formation précédente. Son épaisseur présente un léger élargissement à l'aplomb de l'anomalie du module. Enfin, la formation à vitesse élevée (supérieure à 2km/s) occupe la partie inférieure de la coupe. Elle est constituée par la formation quartzitique

I.9.7. Profils P7: électrique PE7 et sismique PS7

Le profil électrique PE7 est étalé parallèlement à l'Ouest à une distance 67m du profil PE6. Son objectif est de suivre l'évolution des anomalies observées sous les coupes du PE6.

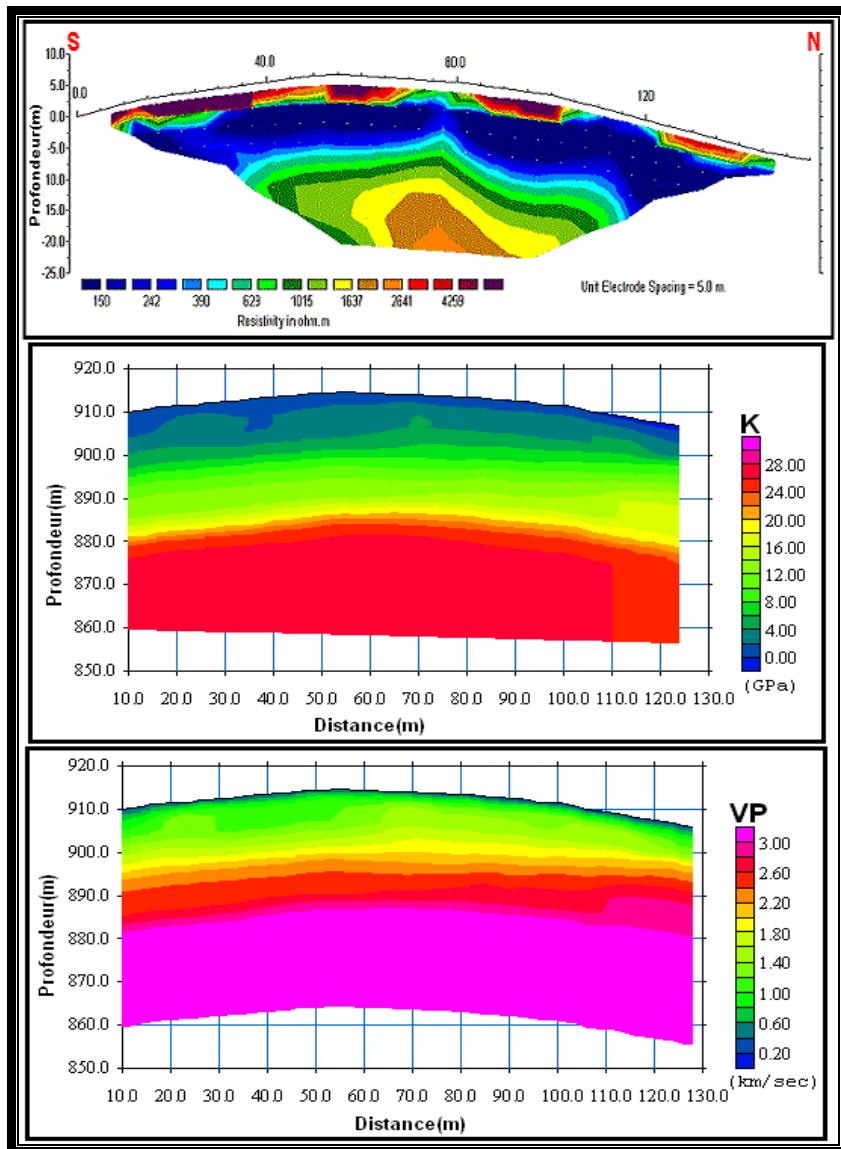


Figure 23: Coupes géoélectrique, module K et de vitesses sismiques N°7

La coupe a mis en évidence la succession de trois formations électriquement différentes:

- la première formation résistante, de résistivités variant entre $1500\Omega\text{m}$ et $5000\Omega\text{m}$, présente la couverture superficielle. Elle a une puissance moyenne de 3m. Elle est entrecoupée de quelques formations conductrices (cf. fig. 23) Elle correspond à la formation latéritique où les parties résistantes sont les latérites secs et les parties conductrices sont les latérites humides.
- la formation suivante est relativement conductrice (inférieure à $500\Omega\text{m}$). Elle constitue le substratum atteint par les lignes électriques. Toutefois, elle présente une anomalie de résistivité qui se présente sous forme d'intrusion caractérisé par la couleur marron auréolé de jaune sous la coupe (cf. fig. 23). Cette anomalie est centrée à l'abscisse $X=80\text{m}$. Elle pourrait correspondre à un filon de pegmatite. Il est à

remarquer que la formation enrobant le filon est moyennement conductrice. C'est la partie schisteuse où l'altération est plus moins avancée.

Pour la coupe du module d'incompressibilité K, les trois structures sont reproduites:

- la couverture superficielle, caractérisée par les valeurs faibles de K comprise entre 0.01GPa à 8GPa, a une épaisseur qui s'amincit du Sud vers le Nord. Elle correspond à la formation latéritique.
- la deuxième formation est marquée par les valeurs de K comprises entre 8GPa et 16GPa. Elle est beaucoup plus puissante que la couverture superficielle. Il s'agirait de la formation pegmatitique.
- la troisième formation constituant le substratum est marquée par des valeurs de K supérieures à 16GPa. Son toit suit la topographie du terrain. Elle correspond à la formation quartzitique.

Pour la sismique réfraction, la coupe de vitesse montre aussi trois sortes de formations et interprétées comme suit:

- la formation superficielle, très mince à faible vitesse (0.2km/s à 1km/s), se présente sous forme de pellicule d'épaisseur centimétrique. Elle correspond à la formation latéritique.
- ensuite une formation épaisse de vitesse intermédiaire (1km/s à 2km/s), dont la puissance s'amincit du Sud vers le Nord. Elle varie de 12m à 7m. Elle serait une formation pegmatitique.
- et enfin, une formation à une vitesse supérieure à 2km/s (couleur variant de jaune au rose) occupe la partie inférieure de la coupe. Il s'agirait d'une formation quartzitique.

I.9.8. Profils P8: électrique PE8 et sismique PS8

Le profil électrique PE8 a été étalé en prolongeant le profil PE1. Il se trouve au Nord Ouest du secteur latéritique où aucune exploitation n'a pas été exécutée. Il a été réalisé avec une distance inter-électrodes $a=5m$. Il est dirigé à $N120^\circ$ perpendiculairement à la schistosité.

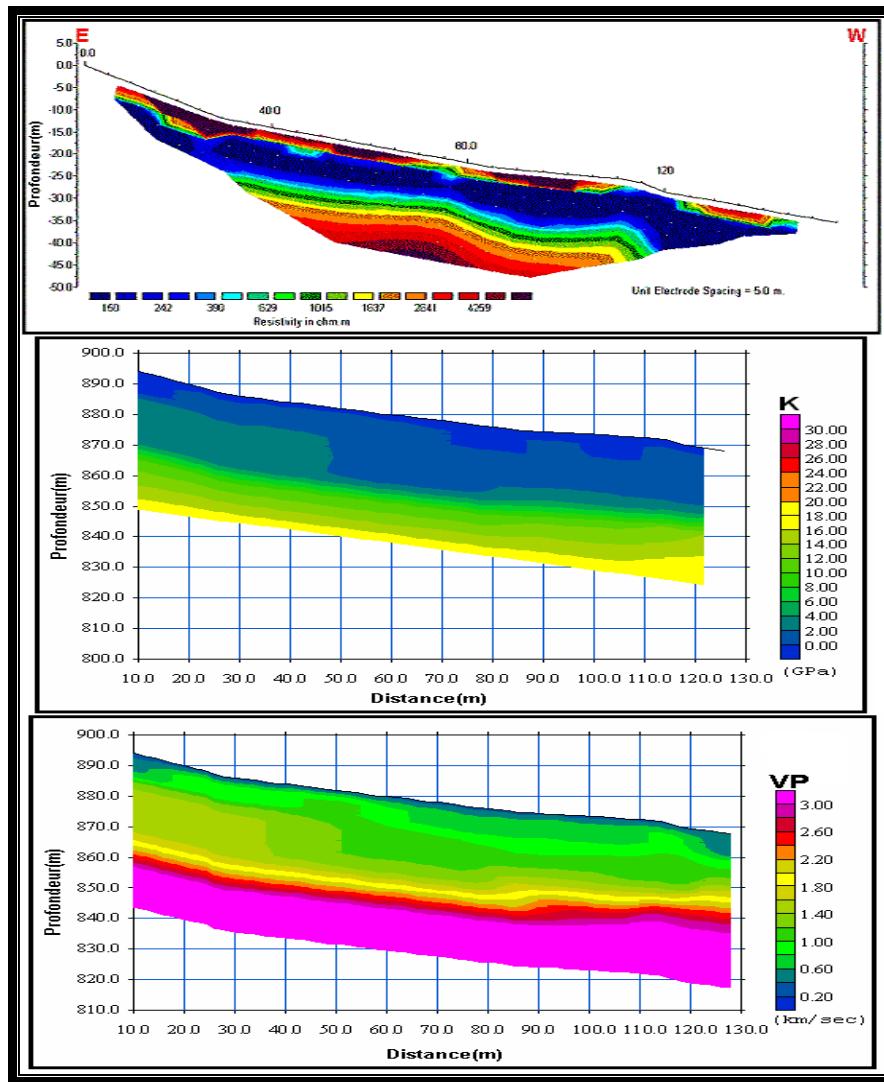


Figure 24: Coupes géoélectrique, du module K et de vitesses sismiques N°8

La coupe géoélectrique nous a permis de distinguer trois couches:

- la première couche résistante est localisée en surface et en subsurface. Elle est relativement mince dont l'épaisseur ne dépasse guère 5m. Elle correspond à la formation latéritique sèche.
- la deuxième couche conductrice se trouve juste en dessous de cette formation. Elle est la continuation de la formation latéritique en profondeur. Seulement cette partie est humide, sous l'influence du tracé d'une ligne d'écoulement érodé dans la partie tendre de la formation latéritique, d'où l'abaissement des valeurs de résistivité.
- la deuxième formation résistante se trouve à une profondeur moyenne de 12m. C'est le substratum atteint par les lignes électriques.

La coupe d'incompressibilité K obtenue met en évidence trois structures bien distinctes:

- la première de module K faible couvre la partie superficielle de la coupe. Il s'agit d'une formation tendre qui est la latérite observée en surface.
- la deuxième formation est représentée par les valeurs du module K comprises entre 8GPa et 16GPa. Il s'agit d'une formation plus ou moins compacte.
- la dernière formation de module K supérieure à 16GPa constitue le substratum. Son toit, légèrement incurvé, se trouve à environ trente mètre (30m) de profondeur. Il s'agit d'une formation compacte.

Pour la sismique réfraction, la coupe montre la succession de trois formations:

- une formation mince à faible vitesse (0.2km/s à 1km/s) couvre la partie superficielle de la coupe. Elle correspondrait à une formation latéritique.
- ensuite une formation ayant de vitesses intermédiaires (couleur allant du vert au jaune). Elle est caractérisée par une vitesse d'ondes sismiques comprise entre 1mk/s et 2km/s. Elle correspond probablement à la formation pegmatitique.
- et enfin, une formation dont les valeurs des vitesses d'onde d'ébranlement sont supérieures à 2km/s (couleur variant jaune au rose). Son toit est incurvé et se trouve à une profondeur moyenne de 23m. Elle correspondrait à la formation quartzitique.

I.9.9. Profils P9: électrique PE9 et sismique PS9

Le profil électrique PE9 a été étalé entre les profils PE3 et PE8 en coupant le profil PE10 (cf. fig. 25). Il a pris la direction N140°. La distance inter électrodes utilisée est égale à 5m.

La coupe géoélectrique obtenue montre également trois formations électriquement distinctes:

- la formation résistante est localisée par endroit en surface, dont la résistivité varie de 1500Ωm à 5000Ωm (cf. fig. 25). Elle a une puissance moyenne de 5m. Elle correspond à la formation latéritique. Ensuite, une amorce de formation résistante est située à la profondeur 17m à l'aplomb de l'abscisse X=97 m. cette formation est probablement du quartzite.
- la formation électriquement moyennement résistante est représentée par la couleur vert sous la coupe. Les valeurs de résistivité sont comprises entre 500Ωm et 1500Ωm. Elle correspond à la formation quartzitique où le degré d'altération est moins avancé.

- la partie conductrice, de valeurs de résistivités inférieures à $500\Omega\text{m}$, est représentée par la couleur bleu sur la coupe. Elle se présente sous forme d'intrusion au milieu de la coupe et s'épanche en subsurface.

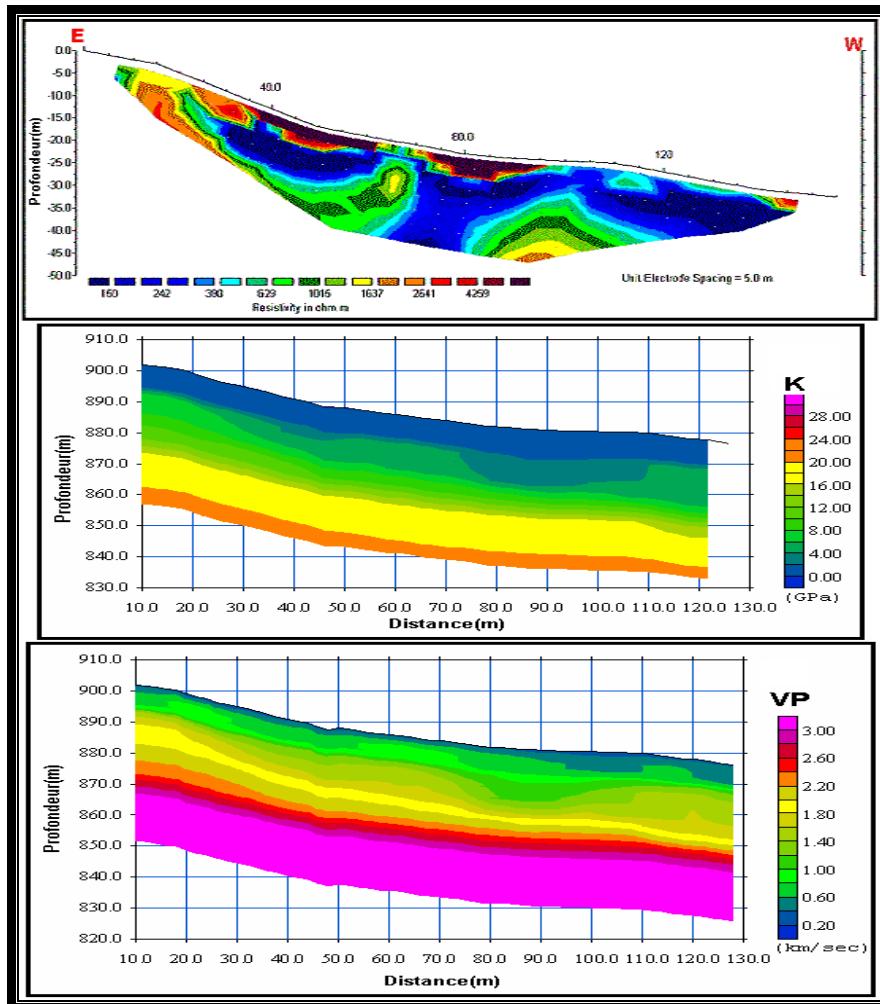


Figure 25: Coupes géoélectrique, du module K et de vitesses sismiques N°9

La coupe d'incompressibilité volumique K obtenue met en évidence trois structures bien distinctes:

- la première structure superficielle d'une puissance moyenne 8m est la formation latéritique. Elle est caractérisée par les valeurs du module K inférieurs à 8GPa. Il s'agirait d'une formation tendre. Toutefois, deux anomalies sont observées respectivement entre les abscisses X1=38 m, X2=50 m et X3=73m, X4=110m
- la deuxième structure, de modules d'incompressibilité K comprises entre 8GPa et 16GPa, juste en dessous de la formation tendre. Elle a une épaisseur qui s'amincit de l'Est vers l'Ouest (cf. fig. 25).

- la dernière structure dont le toit se trouve à la profondeur moyenne de 28m suit pratiquement la topographie du terrain. Elle a une compacité élevée dont les valeurs sont supérieures à 16GPa. C'est donc une formation dure qui correspond probablement à des quartzites.

Pour la sismique réfraction, la coupe montre trois formations différentes:

- la partie superficielle de vitesse faible à une puissance relativement faible. Elle s'épaissit de l'Est vers l'Ouest, telle que: au bout Est, elle est de l'ordre du mètre et au bout Ouest, elle atteint la valeur de trois mètres (3m). Deux anomalies de mêmes types que celles observées sur la coupe du module d'incompressibilité K sont localisées entre les abscisses X1=95 m, X2=110 m et X3=120 m, X4=130 m
- la deuxième formation, de vitesses intermédiaires (1km/s – 2km/s), a une épaisseur qui croît de l'Est vers l'Ouest. Cette variation se situe entre 10m et 18m.
- la dernière formation, de vitesse élevée (sup à 2km/s), est constituée par le substratum atteint par la ligne étalée. Son toit suit la topographie du terrain. Elle correspond à la formation quartzitique.

I.9.10. Profils P10: électrique PE10 et sismique PS10

Le profil PE10 a été réalisé avec une distance inter-électrode $a=5m$. La profondeur d'investigation atteinte est de l'ordre de 25m. Il a pris la direction N170°.

La coupe géoélectrique ainsi obtenue est hétérogène:

- la partie superficielle est entrecoupée de formations résistantes et de formations conductrices. Elle correspond à la formation latéritique.
- la deuxième couche conductrice de valeurs comprises entre $150\Omega m$ et $500\Omega m$ occupe presque la totalité de la coupe en surface et en subsurface. Cette hétérogénéité est due par influence des lignes d'écoulement d'eau qui le coupent de travers. Ce sont, soit des latérites humides, soit de pegmatites fissurés.
- une intrusion de formation résistante sous forme de dôme apparaît à l'aplomb de l'abscisse $X=70m$. Son toit se trouve à la profondeur égale à 15m. Elle est enrobée d'une formation moyennement résistante. Cette formation est probablement pegmatitique.

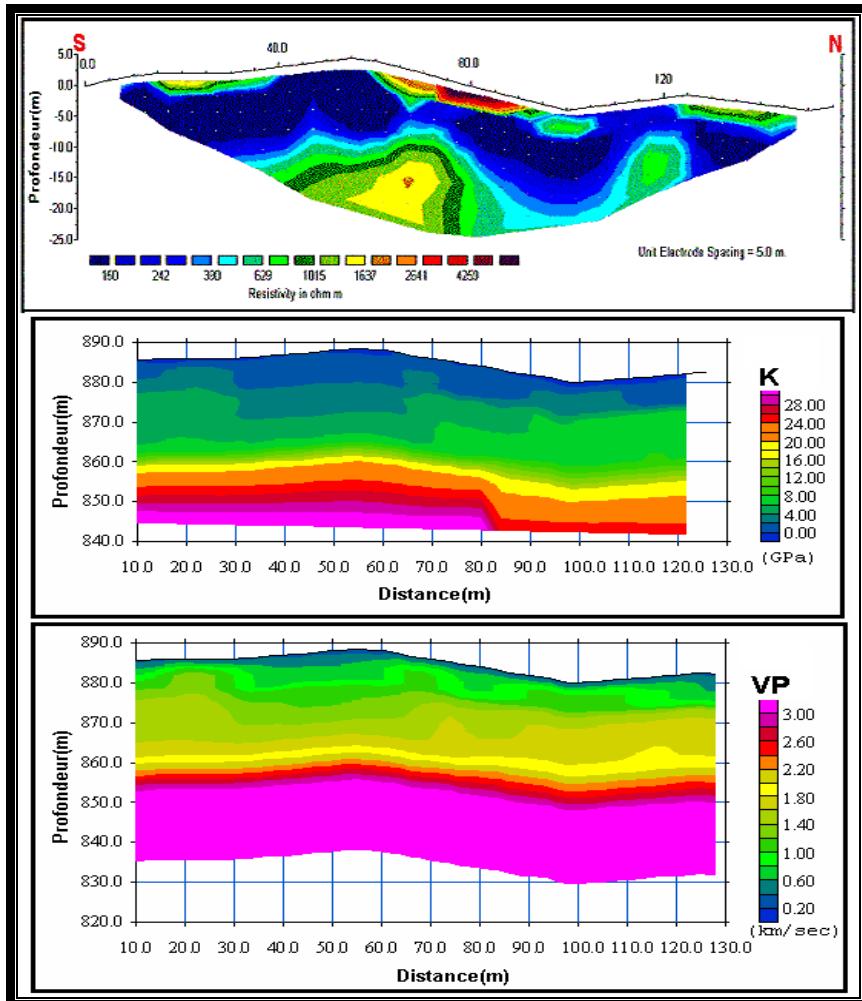


Figure 26: Coupe géoélectrique, du module K et de vitesses sismiques N°10

La coupe d'incompressibilité volumique K obtenue met en évidence trois structures différentes:

- la première structure de formation tendre possède les valeurs de K inférieures à 8GPa. Sa puissance est quasiment constante égale à 7m. Toutefois, elle présente une anomalie de largeur égale à 32m (cf. fig. 26).
- la deuxième structure constituée par la formation de compacité intermédiaire (8GPa – 16GPa) possède une puissance moyenne de l'ordre de 18m. Elle accuse un étranglement au niveau de l'anomalie de la première structure.
- la dernière structure est constituée par la formation la plus compacte (K supérieure à 16GPa). Elle présente une discontinuité à l'aplomb de l'abscisse X=83 m.

Pour la sismique réfraction, la coupe met en évidence trois formations de vitesses différentes. Ces trois formations suivent l'allure de la topographie du terrain.

La partie superficielle, de vitesses faibles, à une puissance de l'ordre du mètre. La deuxième formation de vitesses intermédiaires a une épaisseur moyenne de 20m. La dernière formation constituant le substratum se trouve à 20m de profondeur.

I.9.11. Profils P11: électrique PE11 et sismique PS11

Le profil électrique PE11 a été réalisé avec une distance inter-electrode de 2m. La profondeur d'investigation atteinte est de l'ordre de 10m. Il a été implanté à l'Est du profil PE4 sur la formation quartzitique (cf. fig. 27). Il a pris la direction N20°.

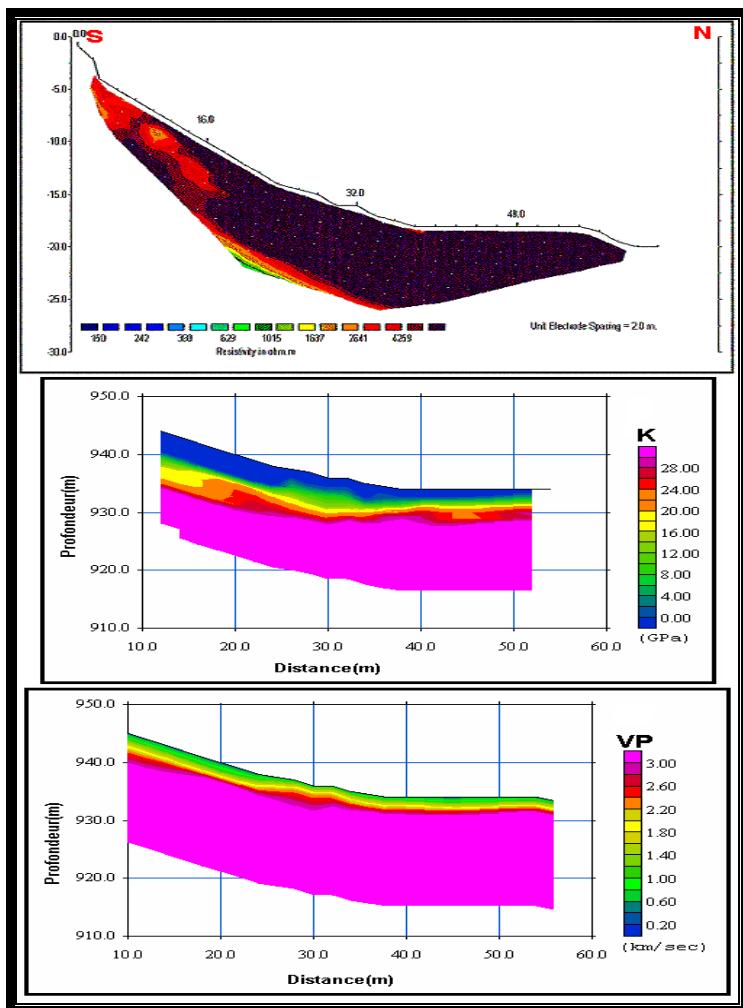


Figure 27: Coupes géoelectrique, du module K et de vitesses sismiques N°11

La coupe obtenue est pratiquement résistante jusqu'à la profondeur atteinte par les lignes de courant. Toutefois, une anomalie ronde de résistivité relativement faible se trouve à l'aplomb de l'abscisse X=10m à la profondeur égale à 3m et une amorce de formation moyennement conductrice est localisée à l'aplomb de l'abscisse X=22m. Cette formation est constituée de quartzites.

La coupe d'incompressibilité volumique K obtenue présente trois structures différentes:

- la première structure est caractérisée par les valeurs de K faibles (0.01GPa-8GPa). Elle constitue la partie superficielle de la coupe. Elle s'amincit du Sud vers le Nord, dont l'épaisseur varie de 4m à 1m. Il s'agirait de la formation latéritique sur la première moitié Sud et du quartzite sur l'autre moitié.
- la deuxième formation sous jacente de module d'incompressibilité K moyen (8GPa à 16GPa) a une puissance relativement mince. Toutefois, elle présente deux anomalies localisées respectivement aux abscisses $X1=3m$ et $X2=30m$ aux profondeurs 7m et 5m.
- la troisième formation, de module d'incompressibilité K supérieur à 16GPa, présente un toit incurvé. Elle est constituée probablement par la formation quartzitique saine.

La coupe de vitesse pour la sismique réfraction ne représente plus la formation où la vitesse d'onde est inférieure à 1 km/s. La formation de vitesse intermédiaire constitue la partie superficielle. Elle a une puissance moyenne à 1m. Toutefois, à l'abscisse $X=30m$ la formation présente un rétrécissement appréciable.

La formation à vitesse élevée (supérieure à 2km/s) constitue le substratum dont le toit de forme concave se trouve à moins de 2m de profondeur et présente une anomalie en forme de bosse à l'abscisse $X=30m$.

I.9.12. Profils P12: électrique PE12 et sismique PS12

Le profil PE12 a été implanté parallèlement au profil PE11. Il a été effectué avec une distance inter-électrodes $a=3m$. La profondeur d'investigation atteinte est de l'ordre de 15m et la longueur du profil est égale à 93m.

La coupe a mis en évidence que la formation sous la ligne est électriquement résistante. Les valeurs de résistivité sont comprises entre $1500\Omega m$ et $5000\Omega m$. Elle correspond à la formation quartzitique. Toutefois, une anomalie conductrice, de forme ronde, est localisée à l'aplomb de l'abscisse $X=72 m$ à la profondeur 10m.

La coupe du module d'incompressibilité K obtenue met en évidence trois formations différentes:

- la première formation est caractérisée par les valeurs du module K. faibles Elles sont inférieures à 8GPa. Cette formation est localisée en surface et en subsurface. Son

épaisseur oscille entre 1m et 5m. La partie la plus puissante se trouve au Sud sous la ligne et est centré à l'abscisse X=25 m. C'est la formation la plus molle sous le profil.

- la deuxième formation est caractérisée par les valeurs intermédiaire de K (8GPa – 16GPa). Elle est plus ou moins compacte. Sous la coupe, elle est représentée par la couleur allant du vert au jaune sur la coupe. Une discontinuité est observée à l'aplomb de l'abscisse X=64 m. C'est la formation quartzitique.
- la troisième formation, de valeurs du module d'incompressibilité K élevée (supérieure à 16GPa), constitue le substratum atteint par l'investigation. Une anomalie sous forme de dyke de largeur 6m est centrée à l'abscisse X=67m. Elle peut correspondre à la formation quartzitique.

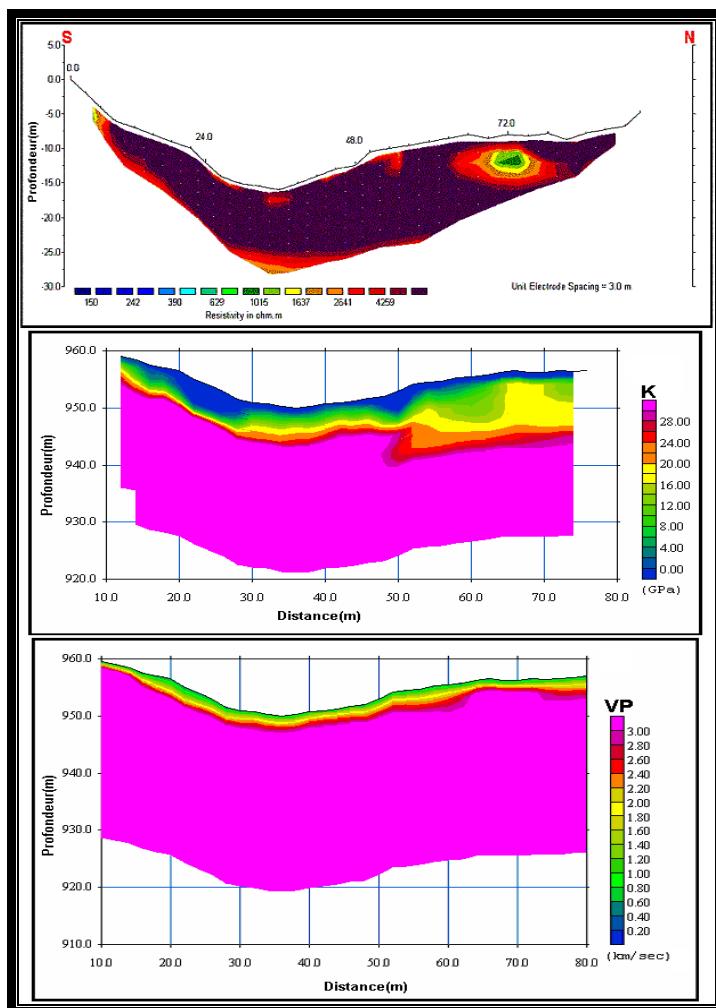


Figure 28: Coupes géoélectrique, module K et de vitesses sismiques N°12

La coupe de vitesse pour la sismique réfraction nous montre deux formations:

- la formation superficielle, mince, dont les valeurs de vitesse sont comprises entre 1km/s et 2km/s. Elle a une puissance inférieure à deux mètres (2m). Elle correspond à la formation quartzitique altérée.
 - la formation qui suive constitue le substratum de vitesses élevées (supérieure à 2km/s). Elle peut correspondre à la formation quartzitique.
- Sous la coupe, la première formation de faible vitesse a disparu.

I.9.13. Profils P13: électrique PE13 et sismique PS13

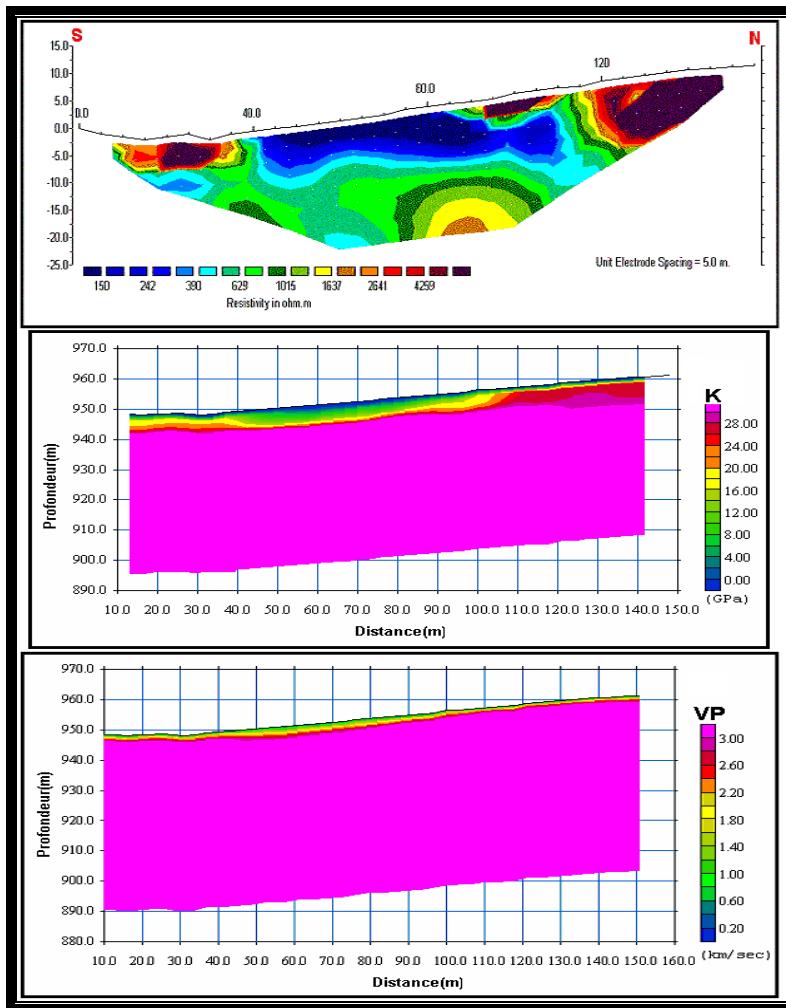


Figure 29: Coupes géoélectrique, du module K et de vitesses sismiques N°13

Le profil PE13 a été étalé le plus à l'Est du secteur quartzitique (cf. fig. 29). Elle se trouve sur la ligne de crête de la colline exploité actuellement. La distance inter électrodes utilisée est égale à 5m. Il a pris la direction N25°.

La coupe géoélectrique obtenue montre trois formations électriquement différentes:

- la première formation est résistante. Elle est représentée par les valeurs de résistivités comprises entre 1500Ωm et 5000Ωm. Cette formation est localisée en trois endroits

différents. Les deux premiers se trouvent aux deux extrémités de la coupe (cf. fig. 29) et le troisième apparaît en profondeur à l'aplomb de l'abscisse $X=87\text{m}$.

- la deuxième formation est moyennement résistante ($500\Omega\text{m}$ - $1500\Omega\text{m}$). Cette formation, couleur allant du vert au jaune sous la coupe, enrobe la formation résistante (cf. fig. 29). Elle pourrait correspondre à la formation pegmatitique plus ou moins fissurée;
- la dernière formation est conductrice. Les valeurs de résistivités restent inférieures à $500\Omega\text{m}$. Elle est localisée en majorité sur la partie superficielle du centre de la coupe (cf. fig. 29). Elle a une puissance moyenne de 8m . Néanmoins, deux discontinuités sont observées aux abscisses $X1=50\text{m}$ et $X2=100\text{m}$. Elles présentent un léger pendage vers le Nord. C'est encore de la pegmatite dont l'altération est plus avancée.

La coupe du module d'incompressibilité K obtenue présente trois structures différentes.

- la première très mince est caractérisée par des valeurs inférieures à 8GPa . Son épaisseur ne dépasse pas le mètre et couvre la partie superficielle. Elle peut correspondre à la couverture latéritique.
- la deuxième formation est caractérisée par les valeurs de K comprises entre 8GPa et 16GPa . Elle est relativement mince aux deux extrémités de la coupe et s'élargie pour atteindre la valeur de 4m entre les abscisses $X1=40\text{m}$ et $X2=100\text{m}$. Ce sont les pegmatites fissurées.
- la troisième formation, sous jacente, dont les valeurs de K sont supérieures à 16GPa est constituée probablement par des pegmatites saines

La coupe de vitesse pour la sismique réfraction reproduit les mêmes allures que la coupe du module K . Seule, les puissances des deux premières formations changent. En effet, la première couche n'est qu'une trace. Tandis que la deuxième couche présentant l'élargissement entre les abscisses $X1=40\text{m}$ et $X2=100\text{m}$, à une puissance ne dépassant pas le mètre. La formation, correspondant sous la coupe entière, est des pegmatites, dont leurs degrés d'altération les différencies.

I.10. RESULTATS

Les coupes obtenues mettent en évidence trois formations différentes que ce soit en prospection électrique qu'en prospection sismique.

Les coupes géoélectriques ont montré que, la première formation résistante est superficielle, quelque fois elle est entrecoupée par la formation conductrice qui est caractérisée par les latérites humides de la surface. La couche, qui suive, est moyennement résistante. La deuxième formation résistante constitue le substratum atteint par les lignes électriques.

Les anomalies observées sont caractérisées par les contrastes élevés de résistivité. Elles se présentent sous forme de poche (cf. tableau1) entre la première et la deuxième formation et sous forme de dyke intrusif dans le substratum.

Comme précédemment, les coupes du module d'incompressibilité K, ont mises en évidence trois structures dont la compacité croît en allant en profondeur. Toutefois, des anomalies se présentent sous forme de poches ou de dykes. Leurs emplacements seront consignés dans le tableau ci-dessous.

Pour les coupes de vitesses Vp, les trois formations sont toujours présentes. Les anomalies sont plus accentuées au niveau du substratum. En conséquent, les discontinuités en surface et en subsurface sont plus ou moins masquées (cf. tableau1).

Tableau 1: Emplacement de l'anomalie pour chaque coupe

N° du	Abscisse du début	Abscisse de la	Profondeur	Nature de la coupe
P1	X=45m	X=55m	10m	Coupe géoélectrique
P1	X=10m	X=60m	10m	Coupe du module K
P1	X=20m	X=60	10m	Coupe de la vitesse
P2	X=30m	X=45m	15m	Coupe géoélectrique
P2	X=60m	X=80m	15m	Coupe géoélectrique
P2	X=55m	X=95m	15m	Coupe du module K
P2	X=50m	X=90m	15m	Coupe de la vitesse
P3	X=15m	X=40m	10m	Coupe géoélectrique
P3	X=70m	X=85m	25m	Coupe géoélectrique
P3	X=30m	X=73m	10m	Coupe du module K
P3	X=30m	X=73m	10m	Coupe de la vitesse
P4	X=12m	X=15m	4m	Coupe géoélectrique
P4	X=22m	X=32m	7m	Coupe géoélectrique
P4	X=20m	X=35m	7m	Coupe du module K
P4	X=75m	X=95m	1m	Coupe du module K
P4	X=15m	X=80m	5m	Coupe de la vitesse
P5	X=70m	X=100m	10m	Coupe géoélectrique
P5	X=70m	X=100m	10m	Coupe du module K
P5	X=75m	X=100m	15m	Coupe de la vitesse
P6	X=12m	X=30m	8m	Coupe géoélectrique

P6	X=33m	X=45m	4m	Coupe géoélectrique
P6	X=51m	X=57m	10m	Coupe géoélectrique
P6	X=50m	X=60m	10m	Coupe du module K
P6	X=45m	X=65m	10m	Coupe de la vitesse
P7	X=67m	X=90m	20m	Coupe géoélectrique
P7				Coupe du module K
P7	X=60m	X=80m	12m	Coupe de la vitesse
P8	X=49m	X120m	10m	Coupe du module K
P8	X=65m	X=70m	7m	Coupe de la vitesse
P8				Coupe géoélectrique
P9	X=30m	X=65m	5m	Coupe géoélectrique
P9	X=70m	X=90m	5m	Coupe géoélectrique
P9	X=75m	X=110m	10m	Coupe du module K
P9	X=28m	X=52m	5m	Coupe de la vitesse
P9	X=75m	X=100m	10m	Coupe de la vitesse
P10	X=7m	X=65m	2m	Coupe géoélectrique
P10	X=80m	X=110m	5m	Coupe géoélectrique
P10	X=130m	X=145m	2m	Coupe géoélectrique
P10	X=55m	X=75m	12m	Coupe géoélectrique
P10	X=30m	X=65m	15m	Coupe du module K
P10	X=70m	X=120m	7m	Coupe du module K
P10	X=35m	X=60m	10m	Coupe de la vitesse
P10	X=110m	X=120m	15m	Coupe de la vitesse
P11	X=12m	X=16m	2m	Coupe géoélectrique
P11	X=12m	X=18m	5m	Coupe du module K
P11	X=25m	X=35m	5m	Coupe du module K
P11	X=10m	X=18m	5m	Coupe de la vitesse
P11	X=25m	X=33m	4m	Coupe de la vitesse
P12	X=69m	X=75m	3m	Coupe géoélectrique
P12	X=18m	X=30m	3m	Coupe du module K
P12	X=50m	X=75m	5m	Coupe du module K
P12	X=52m	X=64m	5m	Coupe de la vitesse
P12	X=64m	X=75m	2m	Coupe de la vitesse
P13	X=15m	X=30m	7m	Coupe géoélectrique
P13	X=75m	X=95m	15m	Coupe géoélectrique
P13	X=100m	X=110m	3m	Coupe géoélectrique
P13	X=35m	X=105m	2m	Coupe du module K
P13	X=40m	X=95m	1m	Coupe de la vitesse

La compilation et l'analyse de ces résultats nous ont conduites à dire que les poches minéralisées ont des valeurs de résistivité relativement faible, de module d'incompressibilité moindre et de valeur de vitesse lente.

La corrélation effectuée avec la géologie nous permet d'avancer que, la zone d'étude est scindée en deux secteurs:

- le premier au sud est constitué par des quartzites sous la couverture latéritique,
- le second au Nord, la couverture latéritique est quasiment absente. Les quartzites sont affleurants et subaffleurants.

Les filons de pegmatites, localisées dans les deux secteurs, renferment les poches de minéralisation qui engendrent probablement les tourmalines objet de notre étude.

CONCLUSION

Cette étude nous montre l'application de deux méthodes géophysiques: la méthode électrique et la méthode sismique à la localisation des poches de minéralisation de tourmaline à Soatanimbaray.

L'étude est basée sur l'analyse et observation de la carte géologique et photo aérienne pour pouvoir interpréter ou caractériser les différentes formations du sous sol utilisant la vitesse des ondes sismiques et la résistivité électrique.

L'utilisation de ces deux méthodes nous a conduits à la comparaison des résultats et la réponse de ces deux techniques. On peut dire que les deux méthodes sont complémentaires et elles donnent généralement des réponses comparables.

La vitesse des formations varie généralement selon leur emplacement. Elle est plus rapide si elle se trouve en profondeur. Nous avons vu que le terrain constitue généralement trois formations différentes caractérisées par sa vitesse de propagation des ondes sismiques et par sa résistivité électrique.

La prospection sismique est beaucoup plus sensible que celle de l'électrique à la détection des différentes formations compactes. La méthode MASW utilise des ondes de surface plus précisément «onde de Rayleigh». Elle donne beaucoup d'informations par rapport au sismique de réfraction. Elle donne des résultats plus détaillés. La sismique de réfraction est la méthode géophysique la plus appropriée à la détermination des différentes formations. Elle a une bonne résolution à la séparation des formations compactes et à la détermination de leur profondeur et de leur épaisseur.

Par ailleurs, la combinaison de ces deux méthodes permet de localiser les points favorables de trouver les poches de minéralisation de tourmaline.

Enfin, le stage que j'ai effectué au sein de la société Géosciences pour le Développement de Madagascar (SGDM) m'a permis d'améliorer mes connaissances géophysiques acquises à l'université d'Antananarivo (I.O.G.A) et d'acquérir une nouvelle expérience.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CHOUTEAU M., GIROUX B., Méthodes électriques, électromagnétiques et sismiques. Géophysique appliquée II, Notes de cours, 2005.
- DOBRIN M.B., SAVIT C.H., *Introduction to Geophysical prospecting*, New York, McGraw-Hill Book Company, 1988.
- DUBOIS J., DIAMENT M., *Géophysique- Cours et exercices corrigés*, Paris: DUNOD, 2005.
- HENRY G., GRAU G., *Géophysique des bassins sédimentaires*, Paris: Edition TECHNIP, 1994.
- LAVERGNE M., *Méthodes Sismiques*, Paris: Edition TECHNIP, 1986.
- LAY T., WALLACE C., *Modern Global seismology*, San Diego: Academic Press, 1995.
- MARI J., ARENS G., CHAPPELLIER D., P.Gaudiani, *Géophysique de Gisement et de Génie Civil*, Paris: Edition TECHNIP, 1998.
- NELY G., *Les séries à évaporites en exploration pétrolière, Tome 2, Méthodes géophysiques*, Paris: Edition TECHNIP, 1989.
- SHEARER P.M., *Introduction to seismology*, New York: Cambridge University Press, 1999.
- STETTLER E., SMIT J., *La géophysique pour les débutants*. Pretoria: Council for Geosciences, 2004.
- HAYASHI K., 2001, Surface wave propagation in two-dimensional models and its application to near-surface S-wave velocity delineation: *Proceedings of the 5th SEGJ international symposium*, 385–392.
- MILLER R.D., XIA J., PARK C.B., and IVANOV J.M., 1999, Multichannel analysis of surface waves to map bedrock: *The Leading Edge*, **18**, 1392–1396.
- NAZARIAN S., STOKOE K.H., and HUDSON W.R., 1983, Use of spectral analysis of surface waves method for determination of modulus and thickness of pavement system: *Transport. Res. Record*, **930**, 38–45.
- PARK C.B., MILLER R.D., and XIA J., 1999b, Multichannel analysis of surface waves: *Geophysics*, **64**, 800–808.
- XIA J., MILLER R.D., and PARK C.B., 1999, Configuration of near surface shear wave velocity by inverting surface wave: *Proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems '99*, 95–104.
- PIERRE CHAPERON, J.DANLOUX, Luc FERRY, *Fleuves et rivières de Madagascar*.
- W.M.TELFORD, L.P.GELDART, R.E.SHERIFF, D.A.KEYS, *Prospection géophysique, prospection sismique, volume 2*, Cambridge University press, 1983.
- W.M.TELFORD, L.P.GELDART, R.E.SHERIFF, D.A.KEYS, *Prospection géophysique, prospection sismique, volume 1*, Cambridge University press, 1976.

ANNEXES

Quelques définitions

Les termes qui seront détaillés ci-dessous se rapportent essentiellement à cette étude.

Pegmatite: c'est une roche magmatique à grands cristaux de taille supérieure à 20 mm, et pouvant atteindre plusieurs mètres.

Schistosité: c'est le plan où les minéraux constitutifs de la roche sont orientés parallèlement les uns par rapport aux autres sous l'influence de contraintes tectoniques, son orientation est mesurée à l'aide des affleurements rencontrés sur le terrain ou par photo aérienne.



Exemple de schistosité, de direction N-S existant dans cette carrière.

Linéaments: ce sont des cassures, fissures, fractures qui facilitent la circulation d'eau souterraine et qui sont dues par des événements tectoniques.

Filon: c'est une sorte de veine de masse tabulaire de matière minérale, déposée dans une fissure, une fente ou une crevasse d'une assise rocheuse, et présentant une composition différente de celle de la roche encaissante. La plupart des veines résultent de la précipitation graduelle de substances apportées par des eaux souterraines ou des gaz après formation du matériau encaissant. La taille des veines varie de la simple strie parcourant un spécimen rocheux de petite taille à des masses de milliers de long. Les veines de quartz et d'autres minéraux peuvent également se former lorsque des fluides magmatiques sont injectés dans

des fissures ouvertes par intrusion de masses importantes de roche magmatique. Quand cette formation s’interpose entre des couches étroitement stratifiées, elle prend le nom de filon.

Outils et documents de base

Les outils et les documents de base qu’on avait mis en place lors des travaux sur terrain sont:

Une voiture : pour le moyen de déplacement vers la carrière.

La carte géologique (disponible aux échelles du 1/500.000,1/200.000 et 1/100.000): elle représente les différentes formations géologiques qu’on peut rencontrer sur le terrain. Ainsi on peut y voir les différents pendages des couches et leurs âges et aussi les formations tectoniques comme les failles.

La carte topographique (disponible à l'échelle de 1/100 000): les cartes topographiques sont généralement utilisées pour présenter des régions terrestres. Elles indiquent les caractéristiques naturelles et artificielles de la région représentée: elles peuvent ainsi comporter le réseau de transports, l’hydrographie, les habitations, la forme et l’altitude du relief etc. En raison de la grande diversité des informations qu’elles comportent, les cartes topographiques servent le plus souvent de cartes de référence pour un usage courant.

Photo aérienne: comme les deux cartes précédentes, elle représente l’aspect de la topographie prise par photo vu entre 3000m à 10000m d’altitude avec une échelle de 1/45.000^e. On peut y voir les aspects morphologies, les rivières, routes, villages, les directions de schistosités, failles, linéaments, zone de contact et de fractures.

Un GPS: pour repérer la carrière, l’emplacement de chaque profil et aussi pour prendre les coordonnées des point à forer.

Une boussole: c’est un appareil très utile pour la mesure de direction des profils, filons, fractures, schistosité et pendages.

Un stéréoscope: un outil très essentiel qui permet de mettre en relief les parties communes des couplées des photos aériennes afin de trouver de fractures, linéaments et de schistosités.

Table des Matières

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE	ii
Liste des figures	iii
Liste des photos.....	iv
Liste des tableaux	iv
Liste des acronymes	iv
Introduction.....	1
I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	2
I.1. CADRE GEOGRAPHIQUE.....	3
I.2. CONTEXTE CLIMATIQUE	3
I.3. MORPHOLOGIE	4
I.4. CONTEXTE GEOLOGIQUE	6
I.4.1. Géologie régionale	6
I.4.2. Géologie du gisement	6
II. RAPPELS METHODOLOGIQUES ET ACQUISITION DES DONNEES	10
I.5. LA PHOTO INTERPRETATION	12
I.5.1. Principe	12
I.5.2. Clés de la photo-interprétation	13
I.5.2.1. Phase d'identification	13
I.5.2.2. Phase d'interprétation.....	13
I.6. LA METHODE DE LA PROSPECTION ELECTRIQUE	14
I.6.1. Principe de la méthode électrique	14
I.6.1.1. La résistivité électrique.....	14
I.6.1.2. Notion de résistivité vraie et de résistivité apparente.....	14
I.6.1.3. Le dispositif utilisé	15
I.6.2. La méthode du panneau électrique	16
I.6.2.1. Appareillage et acquisition des données.....	16
I.6.2.2. Principe de la méthode	17
I.6.2.3. Mise en œuvre	18
I.6.2.4. Mode de traitement des données du panneau électrique	19

I.6.2.4.1.	Préparation des données avant l'inversion.....	19
I.6.2.4.2.	Traitements des données	20
I.6.2.4.3.	Principe de l'inversion.....	20
I.6.2.5.	Coupe géoélectrique ou «pseudo section».....	21
I.7.	LA METHODE SISMIQUE.....	21
I.7.1.	Définition de la méthode sismique	21
I.7.2.	Type des ondes sismiques	22
I.7.2.1.	Les ondes de volume	22
I.7.2.2.	b-Les ondes de surface	23
I.7.3.	Vitesses sismiques des roches	23
I.7.4.	Principe de la méthode sismique réfraction	24
I.7.5.	Appareils géophysiques et acquisition des données	24
I.7.5.1.	Acquisition des données	25
I.7.5.2.	Sources sismiques	26
I.7.5.3.	Géophones	26
I.7.5.4.	Profondeur d'investigation	26
I.7.6.	Processus de traitement de données.....	26
I.7.7.	Utilisation des ondes des ondes de surface	27
I.7.7.1.	Traitement des données	27
I.7.7.2.	Méthode active.....	28
I.7.7.3.	CMPCC (Common Mid-Points Cross Correlation)	29
I.7.7.4.	La courbe de dispersion.....	32
I.7.7.5.	L'inversion.....	33
III.	INTERPRETATION DES DONNEES ET RESULTATS	35
I.8.	Implantation des lignes géophysiques	36
I.8.1.	Photo interprétation.....	36
I.8.2.	Les lignes géophysiques.....	37
I.9.	Interprétation	38
I.9.1.	Profils P1: électrique PE1 et sismique PS1	38
I.9.2.	Profils P2: électrique PE2 et sismique PS2.....	40
I.9.3.	Profils P3: électrique PE3 et sismique PS3	41
I.9.4.	Profils P4: électrique PE4 et sismique PS4.....	42
I.9.5.	Profils P5: électrique PE5 et sismique PS5	44
I.9.6.	Profils P6: électrique PE6 et sismique PS6.....	45
I.9.7.	Profils P7: électrique PE7 et sismique PS7.....	47
I.9.8.	Profils P8: électrique PE8 et sismique PS8.....	49
I.9.9.	Profils P9: électrique PE9 et sismique PS9.....	51

I.9.10. Profils P10: électrique PE10 et sismique PS10	53
I.9.11. Profils P11: électrique PE11 et sismique PS11	55
I.9.12. Profils P12: électrique PE12 et sismique PS12	56
I.9.13. Profils P13: électrique PE13 et sismique PS13	58
I.10. Resultats	59
Conclusion	63
References bibliographiques	v
Annexes.....	vi
Table des matières.....	ix
Résumé.....	xii

LOCALISATION DES POCHES DE MINERALISATION PAR METHODES ELECTRIQUE ET SISMIQUE A SOATANIMBARY

Résumé

Des études utilisant l'outil géophysique à deux dimensions (2D) combinées à des observations géologiques et des photos aériennes ont été réalisées dans la partie Sud de Madagascar, à Befisihotra dans la région de Haute Matsiatra, District Ikalamavony, commune rurale Tanamarina Bekisopa, Fokontany Soatanimbaray.

La caractéristique physique de la cible, conductrice de courant électrique, ralentie la propagation des ondes sismiques et incompressible, nous a conduit à utiliser les méthodes électrique et sismique sur la zone, en vue de localiser les poches de minéralisation de tourmaline, sur un secteur artisanalement exploité auparavant.

Les résultats de l'étude montrent, à travers les différentes coupes obtenues, que le terrain est constitué de trois formations différentes: latéritiques, quartzitiques, pegmatitiques. Chaque formation est caractérisée par sa résistivité, son module d'incompressibilité volumique K et sa vitesse de propagation des ondes sismiques.

Mots clés: tourmaline, filons, pegmatites, module d'incompressibilité volumique, méthodes électriques, méthodes sismiques, résistivité

Abstract

Geophysical surveys were conducted in the southern part of Madagascar, particularly at Befisihotra - Soatanimbaray, where mineralized rock, tourmaline, has been exploited since the colonization. The study area is belonging to the Haute Matsiatra region, District of Ikalamavony and township of Tanamarina Bekisopa. In addition of the geophysical methods, geological survey and aerial photography observation were also used during to support the classical geophysical prospecting.

Theoretically, the target, the mineralized zone, would probably have low resistivity, low P-wave velocity and also low rate of bulk modulus, so electrical methods surveys using the ERT (Electrical Resistivity Tomography) and seismic methods were chosen in order to locate the mineralization.

After processing and interpretation, three layers were pointed out. The first one is a lateritic layer, the second is essentially composed of quartz and the last is pegmatite. They could be separated by means of their physical properties (electrical resistivity, P-wave velocity and rate of bulk modulus).

Keywords: Tourmaline, pegmatite, resistivity, seismic methods, bulk modulus, geophysical methods.

Rapporteur: RAKOTO Heritiana

E-mail : rakoto_heritiana@gmail.com

Impétrant: RAKOTOMALALA Primo

E-mail : rpprimoj@gmail.com