

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	
UNIVERSITE D'ANTANANARIVO.....	1
<u>MODELISATION A TROIS DIMENSIONS DES MASSIFS ROCHEUX, UTILISANT LA TECHNIQUE D'IMAGERIE ELECTRIQUE: APPLICATION AUX TROIS CARRIERES D'ANDALAMBY, D'ANKILIBOBO ET D'EREHETA DE LA RN13</u>	1
<u>présenté publiquement le 29 Août 2006.</u>	1
<u>par ADA Herinjaka Niravoana.</u>	1
XXIème PROMOTION.....	1
REMERCIEMENTS.....	2
INTRODUCTION.....	1
Partie I.....	4
DEVELOPPEMENT METHODOLOGIQUE.....	4
I.1- METHODOLOGIE ELECTRIQUE.....	4
I.1.1- La résistivité électrique des roches.....	4
I.1.1.1- Définition.....	4
I.1.1.2- Facteurs influençant la résistivité des roches.....	4
a- La quantité et la qualité d'eau contenue dans les pores.....	4
b- La porosité.....	5
c- La tortuosité.....	5
I.1.1.3- La loi d'Archie.....	5
I.1.2- La méthode de résistivité électrique.....	6
I.1.2.1- Historique et principe.....	6
I.1.2.2- Théorie élémentaire.....	7
a- Potentiel créé pour un courant I injecté en un point de surface	7
b- Potentiel créé par une injection de courant entre deux électrodes.....	8
I.1.2.3- Le dispositif Wenner.....	10
a- La fonction de sensibilité.....	11
b- Profondeur d'investigation	11
c- Avantages et inconvénients du dispositif Wenner.....	11
I.1.3- Le panneau électrique.....	12
I.1.3.1- Principe du panneau électrique	12
I.1.3.2- Mise en œuvre selon la configuration Wenner.....	12
I.1.3.3- Présentation des pseudosections.....	14
I.1.3.4- L'inversion des pseudosections.....	14
I.1.3.5- Matériels d'acquisition.....	16
I.2- METHODOLOGIE TOPOGRAPHIQUE.....	17
I.2.1- Définition	17
I.2.2- Principe et procédés généraux de la topographie.....	17
I.2.3- Effet de la topographie sur les données géophysiques.....	18
I.2.4- Levés topographiques.....	18
I.2.5- Appareils de mesure.....	19
I.3- LA REPRESENTATION EN TROIS DIMENSIONS	19

I.3.1-Compilation des données	20
I.3.2- Méthode d'estimation de volume de la carrière.....	20
Partie II.....	23
CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE.....	23
II.1 - Situation géographique et administrative.....	23
II.2- Situation géologique.....	24
II.3- Description des principales formations géologiques présentes dans les sites étudiées.....	25
II.4- Sol	28
II.5- Climat général.....	28
II.6- Relief.....	29
Partie III	32
ESTIMATION VOLUMETRIQUE DES ROCHES MASSIVES EXPLOITABLES SUR LES TROIS CARRIERES : ANDALAMBY, ANKILIBOBO ET EREHETA.....	32
III.1- SITE D'ANDALAMBY (PK182).....	32
III.1.1- Présentation du site.....	32
III.1.2- Interprétation des levés topographiques et géophysiques.....	33
III.1.2.1- Interprétation topographique.....	33
III.1.2.2- Interprétation géophysique.....	34
III.1.3- Estimation du volume de la roche massive.....	36
III.1.3.1 - Carte d'isorésistivité à 4m de profondeur.....	36
III.1.3.2 - Carte d'isorésistivité à 8m de profondeur.....	37
III.1.3.3 - Carte d'isorésistivité à 12m de profondeur.....	37
III.1.3.4- Calcul du Volume exploitable.....	39
III.2- SITE D'ANKILIBOBO (PK 325+20).....	40
III.2.1- Présentation du site.....	40
III.2.2- Interprétation des levés topographiques et géophysiques.....	40
III.2.2.1- Interprétation topographique.....	40
III.2.2.2- Interprétation géophysique.....	41
III.2.3- Estimation de volume de la roche massive, basalte.....	43
III.2.3.1- Carte de résistivité à 4m de profondeur.....	43
III.2.3.2- Carte de résistivité à 8m de profondeur.....	43
III.2.3.3- Carte de résistivité à 12m de profondeur.....	44
III.2.3.4- Calcul du volume exploitable.....	45
III.3- SITE D'EREHETA (PK 425+19).....	46
III.3.1- Présentation du site.....	46
III.3.2- SITE A.....	47
III.3.2.1- Interprétation des levés topographique et géophysiques.....	47
a- Interprétation topographique.....	47
b- Interprétation géophysique.....	48
III.3.2.2- Estimation du volume exploitable	49
a – Carte des affleurements.....	49
b - Carte d'isorésistivité à 2m de profondeur.....	50
c- Calcul du volume exploitable.....	51
III.3.3- SITE B.....	51
III.3.3.1- Interprétation des levés topographique et géophysiques.....	51
a- Interprétation topographique.....	51
b- Interprétation géophysique.....	52
III.3.3.2- Estimation du volume exploitable	53

a – Carte des affleurements.....	53
b- Calcul du volume exploitable	54
CONCLUSION GENERALE.....	56

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

LISTES DES FIGURES

Figure I-1 : Ligne de courant et surface équipotentielle dans un milieu homogène et isotrope.....	8
Figure I-2 : Arrangement des électrodes de courant (A et B) et de potentiel (M et N) à la surface d'un terrain homogène et isotrope.	9
Figure I-3: Configuration géométrique du dispositif Wenner.....	10
Figure I-4 : Représentation des valeurs de la fonction de sensibilité pour le dispositif Wenner	11
Figure I.5 : Configuration des électrodes pour le panneau électrique du type Wenner. Exemple d'un panneau utilisant 32 électrodes.....	13
Figure I-6 : Exemple de valeurs calculées des résistivités apparentes, avec l'utilisation de dispositif Wenner.....	14
Figure I-7 : Représentation des blocs et des points de mesures.....	15
Figure I-8 : Résistivités apparentes mesurées (en haut), recalculées par le logiciel d'inversion (au centre) et vraies (en bas)	16
Figure I-9 : Le résistivimètre et ses accessoires.....	17
Figure I-10: Modèle de bloc arrangé avec la topographie.....	18
Figure I-11 : Modèle topographique tridimensionnel effectué pour un quadrilatère quelconque.	19
Figure II-1 : Localisation des sites étudiés.....	23
Figure II-2: Carte géologique régionale de la zone d'étude (Source: BD500).....	25
Figure II-3 : Carte géologique du secteur Andalamby (Extrait de la carte 1/200 000 du Service géographique de Madagascar, 1948).....	26
Figure II-4 : Carte géologique du secteur Ankilibobo (Extrait de la carte 1/200 000 du Service géographique de Madagascar, 1948).....	27
Figure II-5: Carte géologique du secteur Ereheta (Extrait de la carte 1/200 000 du Service géographique de Madagascar, 1948).....	28
Figure II-6 : Carte des isohyètes de la zone d'étude (Source : ANDEA, 2003).....	29
Figure II-7 : Carte topographique régional de la zone d'étude (Source : ANDEA, 2003).....	30
Figure III-1 : Plan d'accès PK 182(à gauche), photo du site (à droite).....	32
Figure III-2 : Plan de masse du gisement d'Andalamby.....	33
Figure III-3a : Coupe géoélectrique du profil 1, PK182.....	34
Figure III-3b: Coupe géoélectrique du profil 2, PK182.....	35
Figure III-3c : Coupe géoélectrique du profil 3, PK182.....	35
Figure III-4a : Carte de résistivité à Z=4m, Andalamby.....	36
Figure III-4b : Carte de résistivité à Z=8m, Andalamby.....	37
Figure III-4c: Carte de résistivité à Z=12m, Andalamby.....	38
Figure III-5: Bloc diagramme 3D, Andalamby.....	39

Figure III-6 : Plan d'accès PK325+200 (à gauche), photo du site (à droite).....	40
Figure III-7: Plan de masse du gisement d'Ankilibobo.....	41
Figure III-8a : Coupe géoélectrique du profil 1, PK325+20.....	42
Figure III-8b: Coupe géoélectrique du profil 2, PK325+20.....	42
Figure III-9a: Carte de résistivité à Z=4m, Ankilibobo.....	43
Figure III-9b: Carte de résistivité à Z=8m, Ankilibobo.....	44
Figure III-9c: Carte de résistivité à Z=12m, Ankilibobo.....	44
Figure III-10: Bloc diagramme 3D, Ankilibobo.....	45
Figure III-11: Plan d'accès PK 425+19(à gauche), photo du site (à droite).....	47
Figure III-12: Plan de masse du gisement d'Ereheta (Site A).....	48
Figure III-13: Coupe géoélectrique du profil géophysique 1, PK 425 + 19.....	48
Figure III-14 : Carte des affleurements, Ereheta A.....	50
Figure III-15: Carte de résistivité à Z=2m, Ereheta A.....	51
Figure III-16: Plan de masse du gisement d'Ereheta (Site B).....	52
Figure III-17: Coupe géoélectrique du profil géophysique 2, PK425+19.....	53
Figure III-18 : Carte des affleurements, Ereheta A.....	54

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1: Valeurs à utilisées avec la formule d'Archie (CHOUTEAU M.,1999).....</i>	<i>6</i>
<i>Tableau 2: Valeurs types de résistivité apparente (Giroux B., 1999).....</i>	<i>6</i>
<i>Tableau 3 : Tableau technique des trois carrières.....</i>	<i>55</i>

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ANDEA: *Autorité Nationale de l'Eau et de l'Assainissement*

BCEOM: *Bureau Central d'Etudes pour les équipements d'Outre Mer*

COLAS: *Cold Asphalt*

FED: *Fonds Européen de Développement*

IOGA: *Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo*

PK: *Point Kilométrique*

PGRM: *Projet de Gouvernance des Ressources Minérales*

RN: *Route Nationale*

SGDM: *Société Géosciences pour le Développement de Madagascar*

INTRODUCTION

La route, un moyen de communication, joue un rôle très important sur le développement économique d'une région. Sans méconnaître la difficulté de certaines régions, entre autre la région de l'extrême Sud de Madagascar, lieu traversé par la route nationale n°13, au niveau de développement économique, l'exécution de programme du gouvernement fait l'objet d'une remise à jour constant de la route à Madagascar.

Sous le financement du Fond Européen du Développement (FED) et en collaboration avec la Société Française d'Ingénierie (BCEOM) et la société Cold Asphalt (COLAS), la Société Géoscience pour le Développement de Madagascar (SGDM) avait réalisé une campagne des levées géophysique et topographique sur sept carrières se trouvant au bord de la RN13, dans le cadre du programme de la réhabilitation de la route inscrite dans le « *Désenclavement des régions du grand sud de Madagascar* ». Cette étude fait l'objet de l'aménagement de 384km de route entre Ihosy et Ambovombe et de la réhabilitation de 113km entre Ambovombe et Fort Dauphin.

L'objectif de l'étude est d'apporter plus d'informations techniques au maître d'ouvrage à la réhabilitation de la route nationale n°13 et de déterminer le volume de roche d'empierrement exploitable à l'aménagement de la route, entre le plateau d'Ihorombe PK0 et le village d'Ereheta PK425+19. L'étude proposée appartient à l'étude de faisabilité du projet.

L'exploitabilité d'un gisement rocheux dépend de plusieurs paramètres : la nature de la roche qui la constitue, le volume, l'épaisseur de sa couverture latéritique, la dureté de roche, l'éloignement, l'accès au site.....

Il faut comprendre que, l'éloignement et la quantité de la roche sont parmi les facteurs non négligeables à l'estimation du coût de la réhabilitation.

De plus, les techniques d'exploitation des gisements nécessitent la connaissance de leurs formes géométrique, de leur orientation et de la direction de leur extension.

Ainsi, le présent mémoire, portant sur « Modélisation à trois dimensions des massifs rocheux, utilisant la technique d'imagerie électrique: application aux trois carrières d'Andalamby, d'Ankilibobo et d'Ereheta de la RN 13», fait partie intégrante de ce projet dans le but d'appliquer le système multi-électrodes par panneau électrique et la méthode topographique à

l'étude des roches d'empierrements de la route RN13. Sur le plan technique, des études plus approfondies menées à partir des analyses des données existantes seront nécessaires.

Ce rapport comprend trois parties :

- la première partie évoque les rappels méthodologiques utilisés dans cette étude. On va étaler particulièrement la théorie et la méthode électrique, en prospection géophysique, la méthode topographique et enfin le principe utilisé pour la modélisation en trois dimensions des sites étudiées afin d'estimer le volume exploitable de la roche massive.

- dans la deuxième partie, on développe le contexte général de la zone d'étude qui va nous permettre de cadrer et d'apporter des informations nécessaires à l'étude des carrières.

- finalement, la troisième et dernière partie intègre tous les résultats et interprétations dans le but de dégager la synthèse conduisant à la conclusion et aux perspectives envisageables.

Partie I

DEVELOPPEMENT METHODOLOGIQUE

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Partie I

DEVELOPPEMENT METHODOLOGIQUE

Plusieurs problématiques jugées peu importantes en prospection aux moyennes et petites échelles deviennent prépondérantes en prospection de subsurface. A cet égard, on propose d'œuvrer sur des développements méthodologiques portant sur la modélisation et l'interprétation des signaux géophysiques et des données topographiques, afin de prendre en compte notamment :

- la nature hétérogène de l'objet étudié
- la distribution latérale et en profondeur de cette hétérogénéité, c'est à dire la distribution en trois dimensions (3D).

Pour parvenir à cette fin, on va tout d'abord élaborer les différentes étapes à suivre.

I.1- METHODOLOGIE ELECTRIQUE

I.1.1- La résistivité électrique des roches

I.1.1.1- Définition

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

On exprime la résistivité en ohm-mètre (Ωm), cette unité convenant particulièrement bien comme ordre de grandeur.

I.1.1.2- Facteurs influençant la résistivité des roches

Plusieurs facteurs affectent la résistivité d'une roche, mais les principaux sont les suivants :

- la quantité et la qualité d'eau contenue dans les pores
- la porosité
- la tortuosité

a- La quantité et la qualité d'eau contenue dans les pores

La majorité des roches ne sont pas de bons conducteurs électriques. On dit qu'elles possèdent une résistivité élevée. Or, la présence d'eau modifie la majeure partie des propriétés d'une roche, elle diminue en particulier sa résistivité électrique. Les roches ne conduisent le courant électrique que par l'eau d'imbibition qu'elles contiennent. Cette conduction de courant se produit grâce à la mobilité des électrons qui se trouvent dans l'eau présente dans ces roches. Donc, les roches, elles sont d'autant plus conductrices qu'elles contiennent plus d'eau et que cette eau est elle-même plus riche en sel.

b- La porosité

En effet, la quantité d'eau contenue dans les roches dépend de la porosité Φ et on distingue :

- la porosité totale Φ_t , qui est le rapport entre le volume de vides et le volume total de la roche. C'est un nombre sans unité exprimé en %.

. la porosité efficace ou effective Φ_e , qui est le rapport entre le volume total des vides communicants et le volume total de la roche. Elle peut être très inférieure à la porosité totale lorsque les pores de la roche ne sont pas en communication.

Plus les pores sont remplis d'eau, plus les roches sont conductrices.

c- La tortuosité

La tortuosité est un facteur qui exprime les modes de communication entre les pores. Plus les pores sont communicants, plus la circulation d'eau est facile et entraînant la conduction facile des courants.

I.1.1.3- La loi d'Archie

En fait, le facteur déterminant de la résistivité d'un sol est la teneur en eau. La formule d'Archie relie la résistivité apparente et la teneur en eau. C'est une relation empirique de la forme

$$\rho_a = IF \rho_w = a \rho_w \phi^{-m} S^{-n}$$

où ρ_w est la résistivité de l'eau contenue dans les pores, F est le facteur de formation et est égal à a

ϕ^{-m} et I est l'index de résistivité et vaut S^{-n} . Le terme m est appelé facteur de cimentation, ϕ est la porosité efficace et S est la saturation. Le terme n vaut approximativement 2. On retrouve au *tableau 1* les valeurs de a et m à utiliser pour différents types de roche avec la formule d'Archie.

<i>Description de la roche</i>	<i>a</i>	<i>m</i>
<i>Roche détritique faiblement cimentée, présentant une porosité entre 25 et 45%</i>	0.88	1.37
<i>Roche sédimentaire modérément cimentée, présentant une porosité entre 18 et 35%</i>	0.62	1.72
<i>Roche sédimentaire bien cimentée, présentant une porosité entre 5 et 25%</i>	0.62	1.95
<i>Roche volcanique à porosité élevée, de 20 à 80%</i>	3.5	1.44
<i>Roches à très faible porosité, moins de 4 %</i>	1.4	1.58

Tableau 1 : Valeurs à utilisées avec la formule d'Archie (CHOUTEAU M., 1999)

Le tableau 2 résume la résistivité de quelques roches :

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

Tableau2 : Valeurs types de résistivité apparente (GIROUX B., 1999)

I.1.2- La méthode de résistivité électrique

I.1.2.1- Historique et principe

La méthode géophysique utilisant les résistivités électriques prend son origine dès 1920, grâce au travail des frères Schlumberger. Cette méthode, basée sur le principe simple du courant continu, a évolué au cours du temps. A l'aide de quatre électrodes, deux d'injection du courant (notées généralement A et B) et deux de mesure du potentiel (notées généralement M et N), il est possible de connaître la résistivité apparente du sous-sol. Le positionnement de ces électrodes en surface est variable et influence la répartition du courant dans le sous-sol.

I.1.2.2- Théorie élémentaire

a- Potentiel créé pour un courant I injecté en un point de surface

Il existe de nombreux ouvrages généraux traitant de la théorie électrique. Dans les paragraphes suivants, on rappellera donc succinctement les principaux points de cette théorie.

Considérons un courant continu I se propageant dans un milieu homogène et isotrope. La densité de courant J [A/m²] et le champ électrique E [V/m] sont reliés par l'intermédiaire de la loi d'Ohm **(1)**.

$$J = \sigma E \quad (1)$$

La conductivité σ en [S/m] est l'inverse de la résistivité ρ [Ω m].

Considérons une électrode d'injection à la surface d'un terrain homogène et isotrope. Le circuit est fermé grâce à une autre électrode placée relativement loin de la première, pour qu'on puisse la supposer comme étant à l'infini. L'électrode d'injection délivre un courant I [A] traversant la demi-sphère inférieure (la conductivité de l'air étant nulle) de rayon r [m]. Le courant électrique est relié à la densité de courant par l'intermédiaire de l'élément de surface ds [m²] représenté par la surface de cette demi-sphère.

$$I = 2\pi r^2 J \quad (2)$$

Sachant que le champ électrique dérive d'un potentiel V [V], on peut écrire l'égalité suivante :

$$E = -\frac{dV}{dr} \quad (3)$$

En combinant les équations **(1)**, **(2)** et **(3)**, on obtient une relation **(4)** indépendante du champ électrique et de la densité de courant.

$$\frac{dV}{dr} = -\frac{I}{2\sigma\pi r^2} \quad (4)$$

La conductivité étant l'inverse de la résistivité, l'équation (4) devient :

$$\frac{dV}{dr} = -\frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad (5)$$

Pour exprimer le potentiel en fonction de r , il faut intégrer l'équation (5).

La constante C, due à l'intégration du potentiel en fonction de r , est nulle ($C=0$ car $V=0$ si $r=\infty$).

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (6)$$

L'équation (6) permet donc de trouver le potentiel en fonction de r . Il est ensuite possible de tracer les équipotentiels et les filets de courant induits par une électrode (figure I-1).

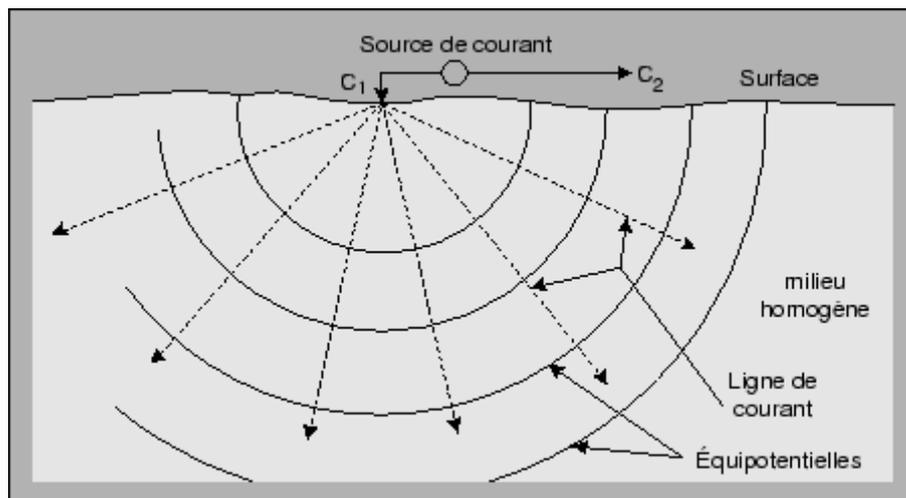


Figure I-1 : Ligne de courant et surface équipotentielle dans un milieu homogène et isotrope.

b- Potentiel créé par une injection de courant entre deux électrodes

La plupart du temps, on emploie quatre électrodes pour les acquisitions (Figure I.2). 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.

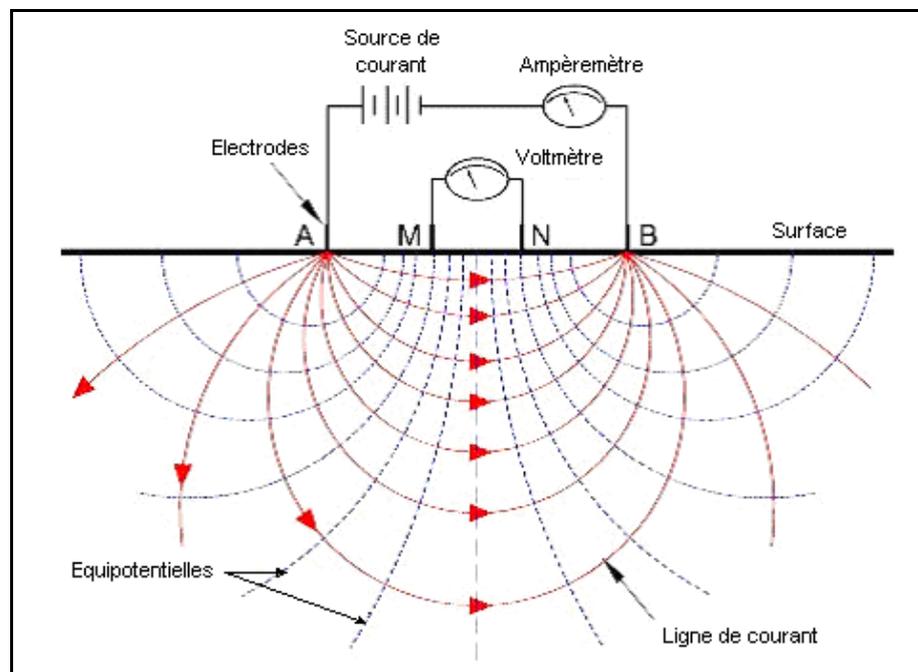


Figure I-2 : Arrangement des électrodes de courant (A et B) et de potentiel (M et N) à la surface d'un terrain homogène et isotrope.

Le potentiel effectif (7) en un point M est donc la sommation du potentiel de chaque électrode d'injection du courant (A et B).

$$V_1 + V_2 = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (7)$$

Où V_1 et V_2 sont respectivement les potentiels dus par les électrodes A et B

r_1 : distance entre A et M

r_2 : distance entre M et B

En introduisant la deuxième électrode de potentiel, on peut mesurer une différence de potentiel entre deux points (8).

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right) \quad (8)$$

Cette équation (8) est la base de toute mesure électrique utilisant quatre électrodes (r_3 et r_4 étant respectivement les distances entre A et N et celle entre N et B). On parle alors de dispositifs quadripôles. Il en existe de nombreux, et chacun a ses avantages et ses inconvénients. Dans la pratique, le paramètre que l'on veut calculer est la résistivité (ρ). De surcroît, les seuls paramètres qui varient, si l'arrangement du dispositif est constant, sont les valeurs I et ΔV . Le reste de l'équation est donc appelé **K** ou facteur géométrique, qui est fonction du dispositif utilisé. L'équation (8) devient donc :

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad \text{avec} \quad K = \frac{2\pi}{\left(\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right)} \quad (9)$$

Cette équation est donc calculée en nous donnant la valeur de la résistivité pour un terrain homogène et isotrope. Si ce n'est plus le cas, la résistivité calculée n'est plus une résistivité vraie, mais une résistivité apparente. Pour un terrain réel, c'est presque toujours le cas. Il convient donc d'inventer un modèle mathématique permettant de retrouver les vraies valeurs de la résistivité, que l'on pourra interpréter ensuite d'un point de vue géologique

I.1.2.3- Le dispositif Wenner

Les électrodes A, B, M, N, permettant l'injection du courant et la mesure du potentiel, sont alignées, et la distance inter-électrodes notée **a** est constante. Elles sont disposées suivant la configuration géométrique ci-dessous :

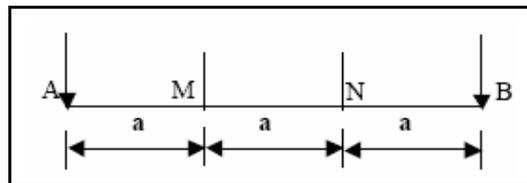


Figure I-3: Configuration géométrique du dispositif Wenner

Dans ce cas, le facteur géométrique, donné par l'équation (9), devient $K=2\pi a$, et par conséquent, la

$$\text{résistivité électrique devient } \rho = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (10)$$

a- La fonction de sensibilité

Cette notion représente la sensibilité aux changements verticaux et horizontaux de la résistivité. La Figure I.4 (ROY & APPARAO, 1971) représente les valeurs de la fonction de sensibilité pour le dispositif Wenner et pour un terrain homogène. La fonction de sensibilité nous permet de savoir à quel point les variations de la résistivité dans une région influenceront la mesure de la différence de potentiel. En effet, plus la valeur de cette fonction est élevée, comme c'est le cas proche des électrodes, et plus elle influencera la mesure du potentiel. On constate immédiatement que les valeurs de cette fonction diffèrent selon les dispositifs.

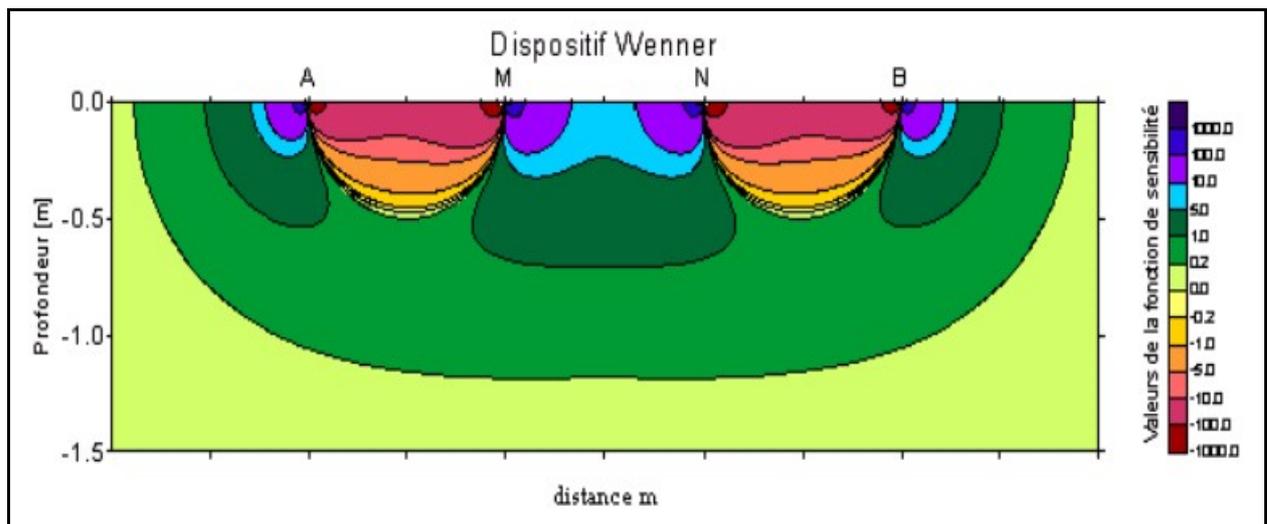


Figure I-4 : Représentation des valeurs de la fonction de sensibilité pour le dispositif Wenner

Cette fonction permet de se rendre compte de l'influence d'un volume unitaire sur la mesure de la différence de potentiel.

b- Profondeur d'investigation

En panneau électrique et pour le dispositif Wenner, la profondeur d'investigation p est définie par la relation (11):

$$p = 0.519a \quad (11)$$

Avec a : pas de mesure ou distance inter-électrodes

p : profondeur d'investigation

c- Avantages et inconvénients du dispositif Wenner

On voit de la figure I-4 que les contours des valeurs de la sensibilité sont quasiment horizontaux à l'aplomb du centre du dispositif. L'acquisition en Wenner est donc plus sensible aux changements

verticaux de la résistivité. Le dispositif Wenner est alors recommandé à la détection des structures verticales (bonne résolution verticale), mais il est moins fiable à la localisation des structures horizontales (faible résolution horizontale). Le facteur K du dispositif Wenner est de loin le plus petit par rapport aux autres dispositifs. C'est pour cette raison que ce dernier possède le plus fort signal. Cette propriété peut devenir déterminante dans des terrains avec des bruits de fond élevés. Un des problèmes de ce dispositif est la faible densité de points, c'est-à-dire le nombre des points de mesure réalisé est inférieur aux autres dispositifs.

I.1.3- Le panneau électrique

Le panneau électrique sert à la fois à une investigation latérale et une investigation verticale du sous-sol. C'est-à-dire une investigation à deux dimensions du sous-sol. L'intérêt de ce dispositif est de permettre d'étudier avec le maximum de détails des coupes géologique complexes, avec des applications en reconnaissance géologique, génie civil environnement et en archéologie par exemple.

I.1.3.1- Principe du panneau électrique

Le principe d'acquisition est basé sur la réalisation d'un grand nombre de sondages électriques très rapprochés le long d'un profil à partir de diverses combinaisons de quatre électrodes spécifique à un type de dispositif parmi les N électrodes implantés.

En écartant la distance inter-électrodes, la profondeur de pénétration augmente et le nombre des points expérimentaux diminue.

Le modèle géoélectrique est obtenu en inversant automatiquement les données expérimentales, grâce au programme d'inversion.

I.1.3.2- Mise en œuvre selon la configuration Wenner

Pendant la prospection, nous avons utilisé l'arrangement Wenner. Il y a, cependant, les différentes caractéristiques à prendre en considération pour celui-ci : la sensibilité du dispositif aux changements verticaux et horizontaux de la résistivité, la profondeur effective d'investigation, la puissance du signal.

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

Soit " $n.a$ " la distance inter-électrode où n est le nombre de la séquence de mesures qui s'incrémente 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 les électrodes 1, 2, 3 et 4 dont les électrodes 1 et 4 sont utilisées comme électrodes de courant et les deux autres électrodes 2 et 3 comme électrodes de potentiel. La seconde série de mesures utilise ensuite les électrodes 2, 3, 4 et 5 et ainsi de suite jusqu'à ce que toutes les séries de mesures soient terminées. On peut aussi optimiser la séquence des mesures pour que les électrodes utilisées au temps t comme électrodes de courant ne soient pas utilisées au temps $t+1$ comme électrodes de potentiel : suite à la mesure entre A1 et B1 aux points 1 et 4, on « place » A2 et B2 en 4 et 7, puis A3 et B3 en 7 et 10 etc...Après la fin de la ligne d'électrodes on place A1 et B1 aux points 2 et 5, A2 et B2 aux points 5 et 8 etc...

Nous passons après à la seconde séquence de mesures dont la distance inter-électrodes s'incrémente à $2.a$. On effectue les autres séries de mesures. L'opération continue jusqu'à ce que toutes les mesures possibles soient effectuées.

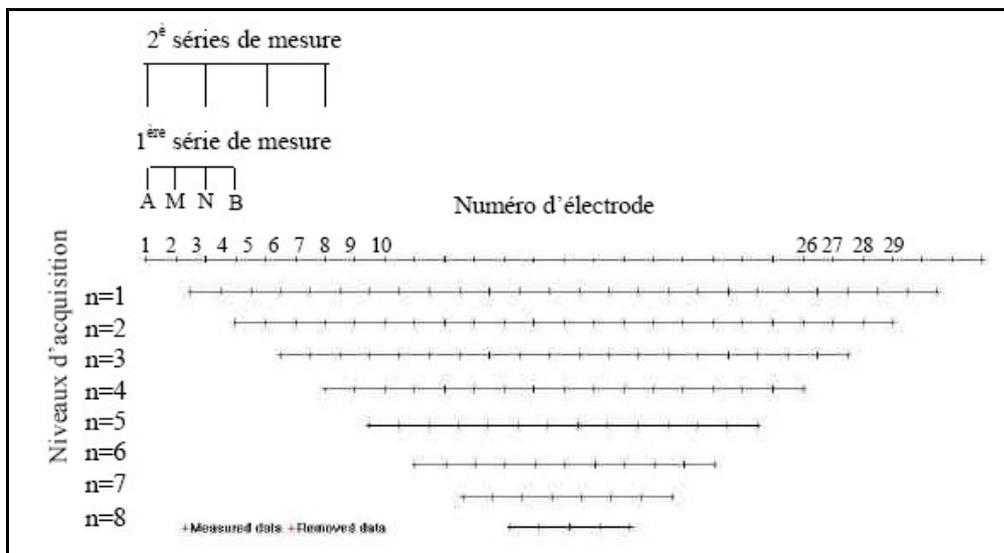


Figure I.5 : Configuration des électrodes pour le panneau électrique du type Wenner. Exemple d'un panneau utilisant 32 électrodes.

I.1.3.3- Présentation des pseudosections

Les pseudosections (coupes de résistivités apparentes du sous sol) sont représentées à l'aide d'un logiciel permettant de dessiner les contours des valeurs de résistivité apparente. Les points de mesure sont reportés à l'aplomb du centre du dispositif et à une pseudo-profondeur proportionnelle à la distance séparant les électrodes.

La Figure I-6 permet de faire quelques commentaires intéressants. Les formes engendrées par un objet identique diffèrent fortement en fonction du dispositif employé. C'est la raison pour laquelle, il est quasiment impossible d'interpréter correctement une pseudosection (i.e. non inversée). On peut juste faire quelques hypothèses sur la distribution des résistivités apparentes

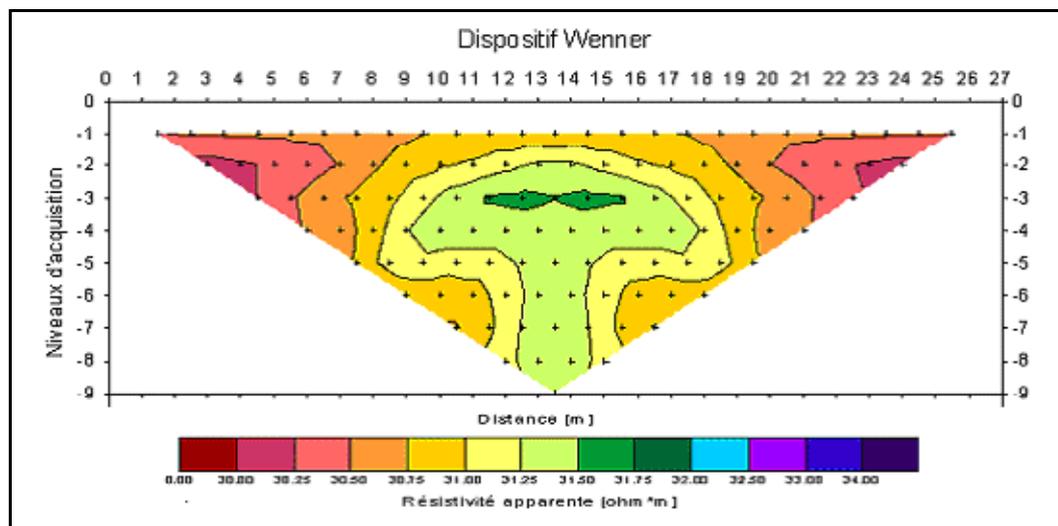


Figure I-6 : Exemple de valeurs calculées des résistivités apparentes, avec l'utilisation de dispositif Wenner.

I.1.3.4- L'inversion des pseudosections

Les données mesurées sur le terrain sont les résistivités apparentes. En effet, on mesure des paramètres intégrant les résistivités sur un volume donné du sous-sol.

On cherche, à partir de ces valeurs, les épaisseurs et résistivités vraies des différents corps présent dans le sous-sol. Pour ce faire, nous avons utilisés le programme d'inversion (Res2Dinv ; LOKE, 1997) qui, par une méthode itérative (LOKE & BARKER, 1996a), va nous donner le modèle de résistivité vraie du sous-sol.

Le logiciel employé pour retrouver les vraies valeurs de la résistivité à partir des valeurs apparentes de terrain s'appelle logiciel d'inversion. Ce nom lui est donné car il reconstitue, par une méthode itérative, tous les différents terrains en résistivités et épaisseurs vraies qui ont donné naissance à nos résistivités apparentes.

Le logiciel détermine automatiquement la pseudosection en utilisant les valeurs de résistivité apparentes mesurées. Tenant compte des points expérimentaux, il subdivise le modèle 2D en des blocs rectangulaires, dont la dernière ligne correspond à la profondeur d'investigation maximale atteinte. En utilisant la méthode de différence finie et la méthode des moindres carrées (*Annexe 1*), le programme fournit les valeurs de résistivité vraie de chaque bloc.

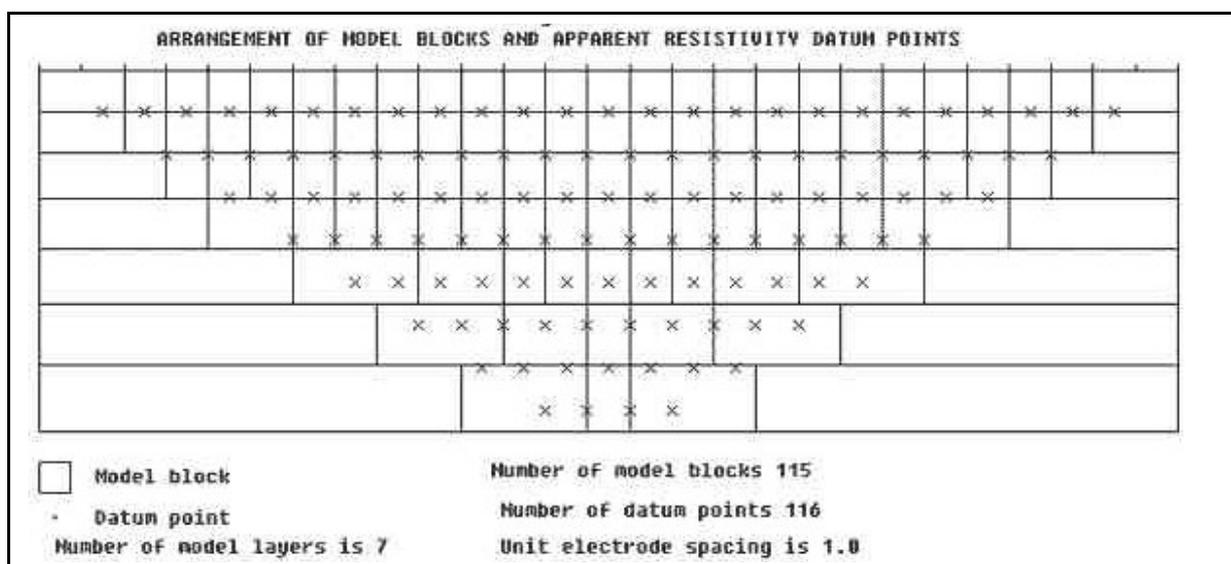


Figure I-7 : Représentation des blocs et des points de mesures

La méthode d'inversion utilisée par le programme est basée sur « Smoothness constrained method » ou méthode de lissage par contrainte (*Annexe 1*)

Pour l'opération, les premières valeurs, qu'introduit le logiciel, sont les valeurs apparentes qui lui permettent de donner un premier modèle (Figure I-8, en haut) approximatif. A partir de ce modèle, il injecte un courant fictif et recalcule les valeurs apparentes (Figure I-8, centre). Il compare ensuite cette coupe de résistivité apparente avec celle qui a été dessinée à l'aide des valeurs mesurées (Figure I-8, haut). La comparaison lui permet de corriger la matrice et de recalculer un modèle plus précis (Figure I-8, bas). Le logiciel essaie donc, à l'aide d'une méthode itérative, de 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 (root-mean-squared). Bien que cette mesure soit une bonne indication de la qualité d'un profil, ce n'est pas toujours l'itération qui a la plus faible erreur RMS qui donne le profil le plus juste géologiquement. En général, le modèle le plus fiable est celui qui se situe juste après l'itération où l'erreur RMS ne change plus de manière significative, ce qui arrive habituellement entre 3 et 6 itérations.

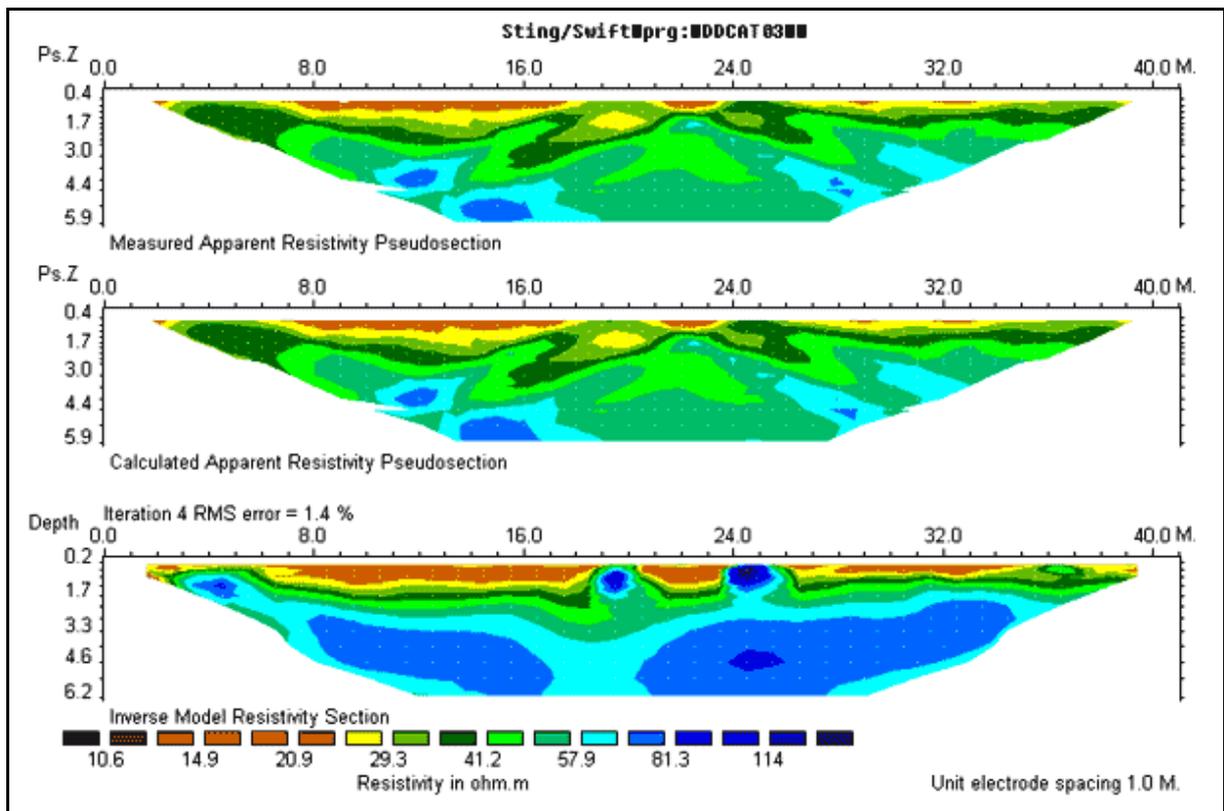


Figure I-8 : Résistivités apparentes mesurées (en haut), recalculées par le logiciel d'inversion (au centre) et vraies (en bas)

I.1.3.5- Matériels d'acquisition

Nous avons utilisé 32 électrodes reliées sur deux multinodes. Les 32 électrodes ont été installées avec la distance inter-électrode de 3m et/ou 5m selon le cas, donnant la longueur totale de profil de 93m et/ou 155m. Chaque électrode est utilisée comme électrode d'injection puis comme électrode de potentiel. Nous avons utilisé la configuration Wenner- α à 32 électrodes pour toutes les mesures par ce que ce dispositif est beaucoup plus sensible aux variations verticales de résistivité.

L'appareil SYSCAL R2 d'Iris Instruments a été utilisé pour l'exécution du panneau électrique. Le SYSCAL R2 est géré par un microprocesseur. Il a des éléments de :

- compensation automatique de la polarisation spontanée (PS),
- accumulation digitale pour l'amélioration du rapport signal/bruit,
- affichage de messages d'erreur en cas d'erreur opératoire.

Il est relié avec un convertisseur DC/DC qui est alimenté par une batterie de 12V. La mise à station du panneau électrique nécessite les deux multinodes, le multiplexeur RMC alimenté d'une batterie 12V, les électrodes en acier inox, les câbles de connexion et les rouleaux de fils divers (figure I-9).

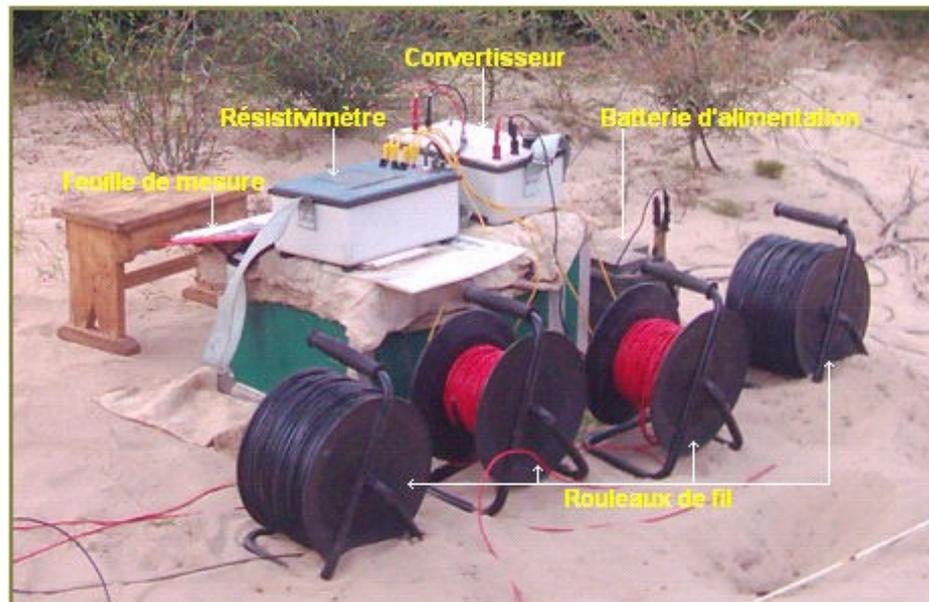


Figure I-9 : Le résistivimètre et ses accessoires

I.2- METHODOLOGIE TOPOGRAPHIQUE

I.2.1- Définition

La topographie est la science, l'art de mesure et de représentation des formes et des détails visibles sur le terrain, qu'ils soient naturels, notamment le relief, ou artificiels (bâtiments, les routes, limites des forêts...). Son objectif est de déterminer la position des points situés dans une zone donnée.

Nous avons effectué des levés topographiques, pendant la prospection, pour nous donner de l'information sur la morphologie du terrain et sur la localisation des objets en surface, notamment les affleurements rocheux.

I.2.2- Principe et procédés généraux de la topographie

Il existe plusieurs techniques d'approche. La planimétrie et l'altimétrie sont les plus souvent utilisées en cartographie (MORIN A., 1997).

L'altimétrie est l'exécution et l'exploitation des observations relatives à la détermination des altitudes dans un levé topographique. Par extension, elle est utilisée à la représentation du relief.

La planimétrie est l'exécution et l'exploitation des observations qui conduisent à la représentation en projection plane des détails à deux dimensions du plan topographique. Par extension, c'est la représentation de l'ensemble des détails.

I.2.3- Effet de la topographie sur les données géophysiques

La topographie est rarement plate dans la nature. Il faut donc en tenir compte dans nos travaux de levée géophysique, car leur influence est non négligeable.

La méthode de l'imagerie électrique est sensible à ce paramètre. Le programme va donc inverser les données en corrigeant l'effet de la topographie. (LOKE M. H., 2000). Le modèle de bloc est arrangé suivant la topographie (Figure I-10)

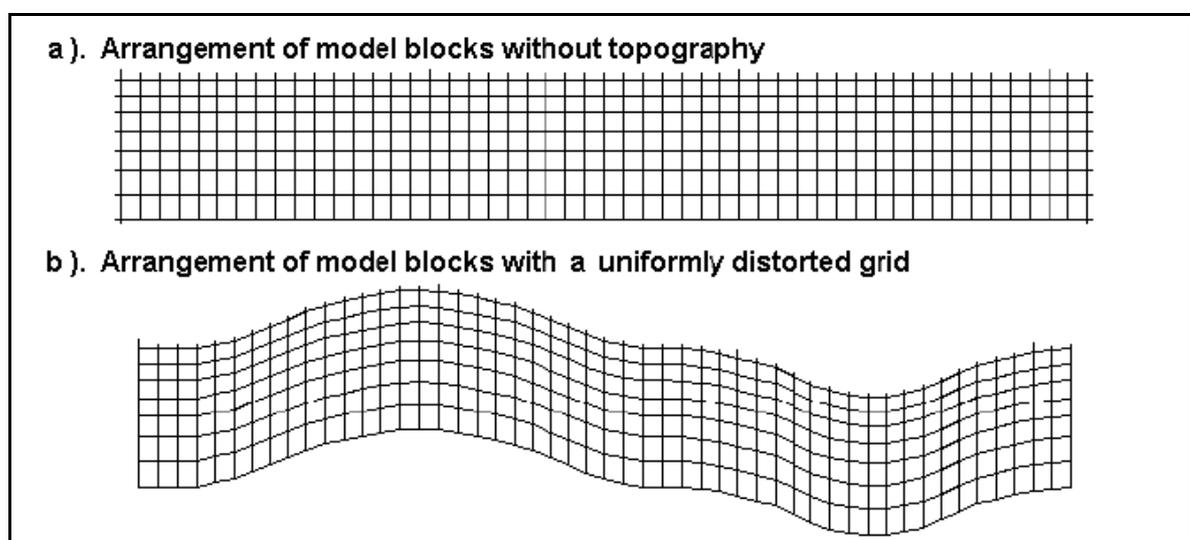


Figure I-10: Modèle de bloc arrangé avec la topographie

I.2.4- Levés topographiques

Pour avoir une meilleure idée de la distribution spatiale des roches étudiées, il était nécessaire de disposer d'un plan de masse général du site. Aussi, sur les 3 sites étudiés (Andalamby, Ankilibobo et Ereheta A et B), on a fait des levés au 1/1.000è et les cartes sont tracées dans les rapports à l'aide d'un programme informatique, courbes de niveau y compris.

Selon la morphologie globale du massif rocheux, quelques 50 à 100 points ont été implantés.

La figure I-11 représente un exemple de modèle topographique d'un terrain quelconque.

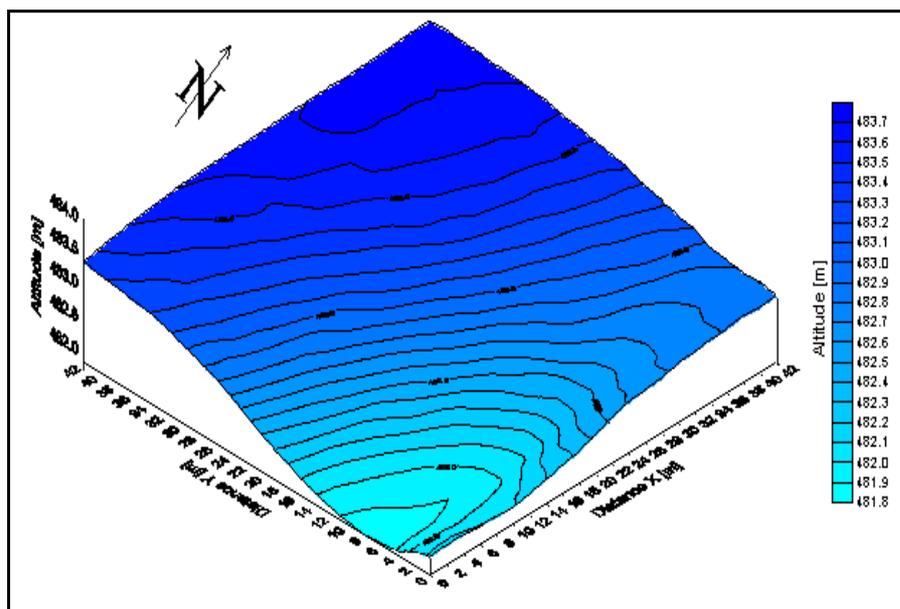


Figure I-11 : Modèle topographique tridimensionnel effectué pour un quadrilatère quelconque.

I.2.5- Appareils de mesure

Pendant les levés, nous avons utilisé le théodolite de type T02. C'est un instrument précis de géodésie ou de topométrie, constitué essentiellement d'une lunette et de deux cercles gradués : le cercle horizontal pour la mesure des angles azimutaux et le cercle vertical pour la mesure des angles verticaux

I.3- LA REPRESENTATION EN TROIS DIMENSIONS

En géophysique de surface et de subsurface, l'intérêt du panneau électrique 2D tel que la caractérisation des structures perpendiculaires à la ligne de mesure, le suivi de l'état hydrique des sols à été démontré par plusieurs travaux au cours de ces dernières années. En Science du Sol, on a démontré l'utilité de cette technique pour la caractérisation des couvertures pédologiques à petite échelle et la caractérisation des structures bidimensionnelles, puis notamment la variabilité de la couche. Cependant, une caractérisation fine tridimensionnelle (3D) de la couverture pédologique sur des surfaces par résistivité électrique reste difficilement envisageable, même si la variabilité des sols à courte distance, méritait d'être explicitée.

Ce travail présente donc les premiers résultats de l'étude de la variabilité tridimensionnelle des carrières du sud de Madagascar par résistivité électrique et par méthode topographique

I.3.1-Compilation des données

Toutes les acquisitions ont été effectuées le long de profils. Ces derniers permettent de recouper la structure sous-jacente du sous-sol. En compilant tous les profils, il est donc possible de donner une carte de section trois dimensions (3D), modèle suivant la profondeur spécifiée, de la structure en dessous.

Puisque les sites étudiés se reposent sur la formation cristalline, il est probable que la structure présente une variabilité. Ainsi, on établit la carte d'isorésistivité à une profondeur donnée selon le cas pour mieux connaître la formation du sous-sol.

I.3.2- Méthode d'estimation de volume de la carrière

L'hétérogénéité du modèle obtenu, la discontinuité des roches massives, se posent en outre comme une contrainte dans le calcul, et ils peuvent amener à des interprétations grossières. Il est alors utile d'accéder à la considération à trois dimensions lors de l'estimation de volume du gisement.

Le principe se fait en deux étapes telles que :

- l'établissement des cartes d'isovaleurs de la résistivité (caractéristique du sous-sol à une profondeur spécifiée), à partir des coupes géoélectriques
- la représentation en trois dimensions (3D) du terrain avec la topographie correspondante pour le calcul de volume exploitable de la roche massive.

Afin d'estimer le volume exploitable, il faut donc concevoir la structure et la forme des roches sous-jacentes. Presque toujours il y a intérêt à établir, pour la même site, des cartes de résistivité avec des profondeurs d'investigation différentes, servant à ressortir l'**action des terrains superficiels** (c'est à dire la couverture stérile) et pour **explorer le sous-sol plus profond**.

L'estimation du volume exploitable des gisements a été donc faite à partir de la distribution de la résistivité électrique du sous-sol reflétant la lithologie et l'altération de la roche.

L'information fournie par les profils est très limitée. Il est difficile d'estimer le volume exploitable du gisement sans avoir effectué l'interpolation des modèles dans les deux directions X, Y de l'espace.

Pour établir ces cartes de résistivités, on introduit, donc avec une profondeur d'investigation choisie, la résistivité vraie du sol sous-jacent sur une série de profils effectués le long d'alignements et qui s'interprètent comme une coupe de terrains. Il s'agit donc de l'exploration horizontale d'une tranche de terrain d'épaisseur régulière. Les profils géophysiques ainsi effectués ont permis de réaliser, par la méthode d'interpolation, une carte de profondeur d'apparition. Des courbes d'équi-résistivités

sont donc tracées par interpolation par le logiciel SURFER. Ce logiciel utilise la *méthode de krigeage* (Annexe 2), utilisée fréquemment en géostatistique, pour le traçage.

La carte de résistivités électriques du sol donne la distribution de la résistivité électrique spécifique de la roche sous-jacente. Elle constitue un document analogue à une carte géologique habituelle, sauf qu'aux caractères lithologiques servant normalement à définir le terrain, se trouve substituée la résistivité électrique du corps présent dans le sous-sol.

Une fois les cartes sont effectuées, on les superpose l'un à l'autre pour interpréter les résultats suivant la verticale. Dans cette étape, on utilise la méthode d'interpolation linéaire pour l'estimation du volume. L'introduction des données topographique est nécessaire pour concevoir le modèle final. C'est donc la méthode du bloc diagramme en trois dimensions (3D).

Partie II

CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE

Partie II

CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE

II.1 - Situation géographique et administrative

La prospection géophysique a été menée sur les trois carrières au Sud de Madagascar, plus précisément dans la région méridionale de l'Androy.

La première carrière ou le premier site se trouve au PK 182 de la route RN13, reliant Ihosy et Fort-Dauphin. Administrativement, il est situé dans le fokontany d'Andalamby, commune de Bekirobo, district de Betroka, région d'Androy et province autonome de Toliary. Il est localisé géographiquement en $X = 0582454\text{m}$ et en $Y = 7380659\text{m}$ du système rectangulaire UTM 38K. La carrière étudiée se trouve à 5 m, à l'Est de l'axe de la route nationale n°13.

Le second site se trouve à Ankilibobo, commune d'Antanimora, district d'Ambovombe, région d'Androy et province autonome de Toliary. Il est à 20km à l'Est d'Antanimora, au PK325. Il est située aux coordonnées géographiques $X = 0582749\text{m}$ et $Y = 7259462\text{m}$ en référence UTM 38K.

Enfin, le dernier site se trouve à Ereheta, commune de Behara, district d'Amboasary, région d'Anosy et province autonome de Toliary. Il est localisé à 19km au Nord Ouest de la ville d'Amboasary. Le centre de la carrière se trouve géographiquement en $X = 0631319\text{m}$ et en $Y = 7237688\text{m}$ du système de coordonnée rectangulaire UTM 38J.

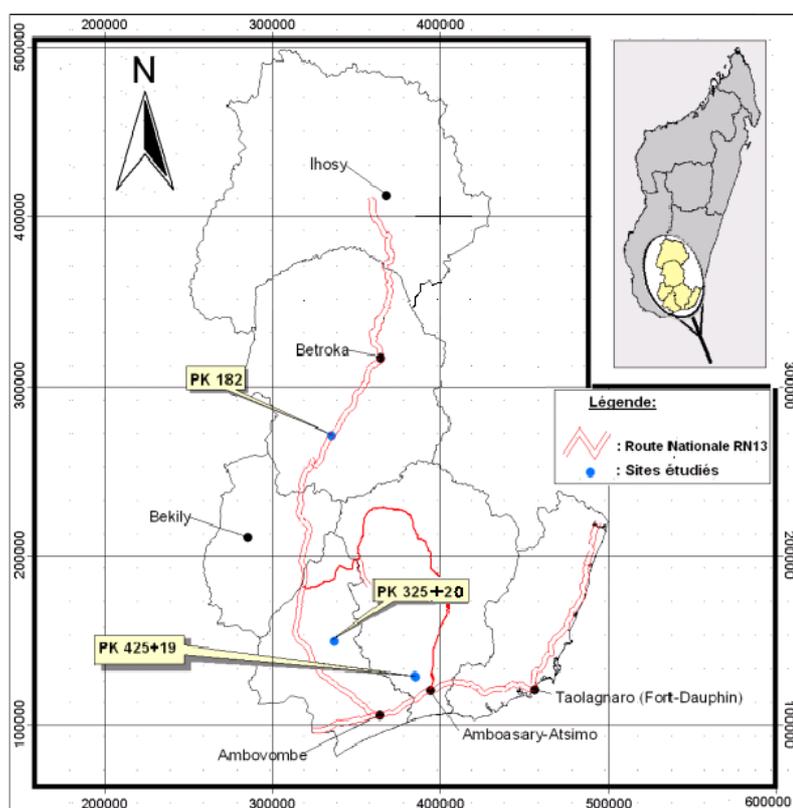


Figure II-1 : Localisation des sites étudiés

II.2- Situation géologique

La région d'Androy, qui s'étend sur la partie centrale de l'extrême Sud de Madagascar constitue notre zone d'étude.

Trois unités géologiques sont à distinguer dans la région de l'Androy : le socle cristallin, les formations sédimentaires et le massif volcanique.

Le socle cristallin

Madagascar est formé en quasi-totalité des roches cristallines précambriennes qui affleurent sur les deux tiers orientaux (400 000km²) de sa superficie.

Dans la région Sud de Madagascar, le socle caractérisé par des faciès granulites est lié aux événements panafricains entre 580 et 530Ma. Il apparaît en affleurement dans la partie septentrionale de la région de l'Androy. Dans les premiers travaux dans le Sud de Madagascar, Besairie a distingué trois systèmes précambriens, de base au sommet :

- le système Androyen formé par des roches catazonales : les faciès granulites du Sud de Madagascar ;
- le système du graphite avec des gneiss et des leptynites caractérisés par l'abondance de graphite ;
- le système de Vohibory formé principalement par des amphibolites et des marbres.

Des études plus récentes ont remis largement en cause ce schéma et ont contribué à l'élaboration des nouvelles interprétations du précambrien malgache. Nous nous limiterons seulement au secteur Sud, situé au Sud de grand axe de cisaillement Bongolava-Ranotsara et qui se subdivise en six ceintures tectoniques de direction méridienne (Vohibory, Ampanihy, Bekily, Betroka, Tranomaro et Fort Dauphin – Chaînes Anosyennes) (Windley *et al*, 1994). Chacune de ces six ceintures est caractérisée par sa propre composition lithologique et structurale.

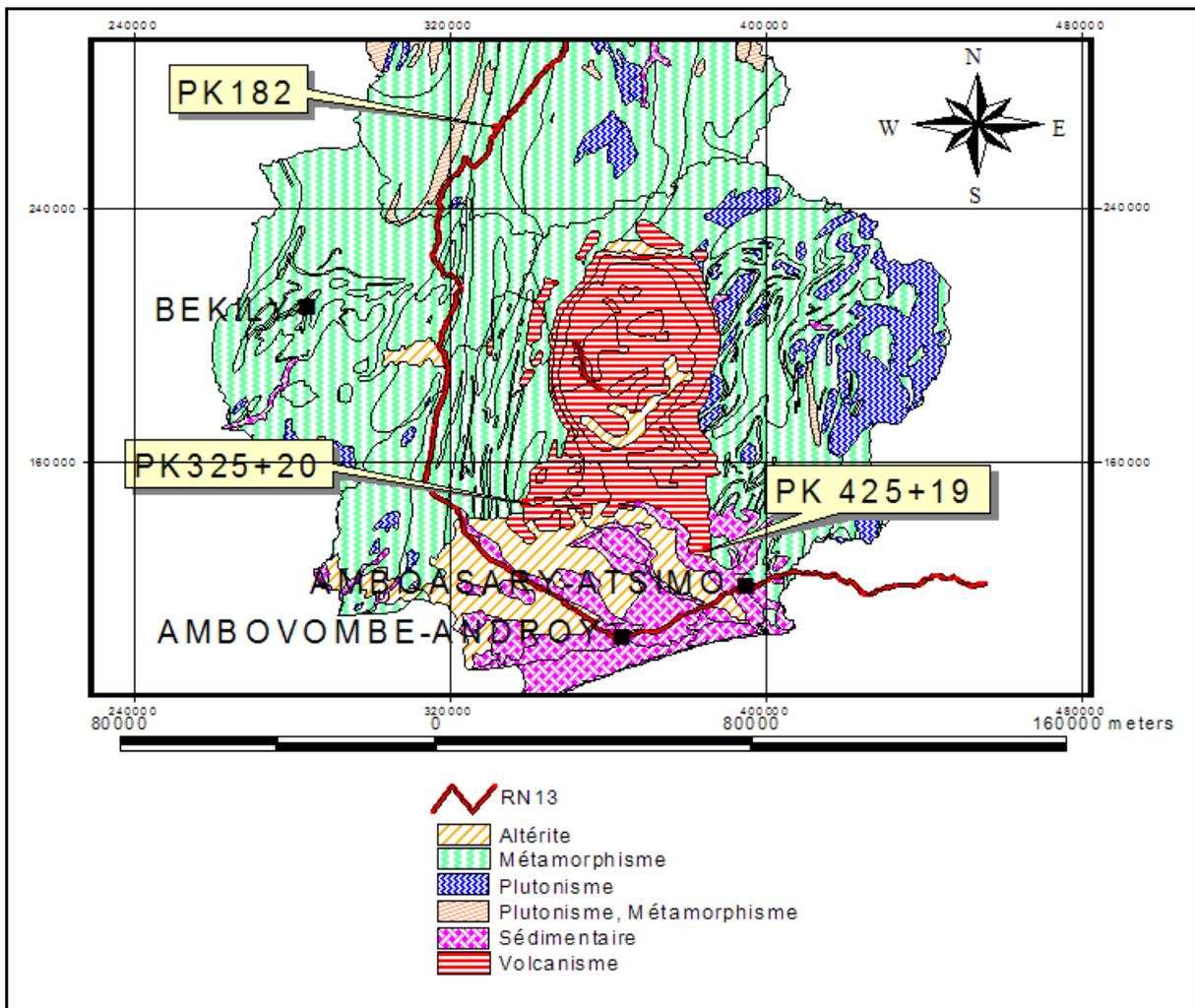
Le premier site appartient à la ceinture de Betroka (caractérisé par des paragneiss à sillimanite, à cordiérite, à grenat) ; tandis que les deux derniers sites appartiennent à la formation volcanique.

Le massif volcanique

La mise en place du volcanisme de l'Androy est en relation avec le rifting indo-malgache au crétacé supérieur. Des formations volcaniques ont pu recouvrir la partie centrale de l'Androy (figure II.2). Sur ce vaste massif volcanique de 90km de long sur 40km de large, des coulées basaltiques et rhyolitiques s'entassent sur une puissance de 1500m.

Les formations sédimentaires

Dans la région de l'Androy, les formations sédimentaires du Néogène et du quaternaire reposent sur le socle cristallin. Le quaternaire formé par des grès calcaires, des sables marins et dunaires constitue les principaux affleurements sédimentaires. Le Néogène continental recouvert par des sables dunaires est constitué de grès argileux, de conglomérats à graviers, d'argiles et de marnes (Battistini, 1964).



II.3- Description des principales formations géologiques présentes dans les sites étudiés

Premier site

Il est composé de roche métamorphique du système Androyen, groupe d'Ampanrandava avec du léptynite à grenat fin très cristallisé (BESAIRIE H., 1948).

Les argiles et les terres rouges forment un manteau épais et qui masquent souvent les roches sous-jacentes. Le substratum est formé de paragneissique du système Androyen, de gneiss, de gneiss à

grenat, de sillimanites, de leptynites et Amphibolites, traversés par les venues granitique du système Anosyen (figure II-3).

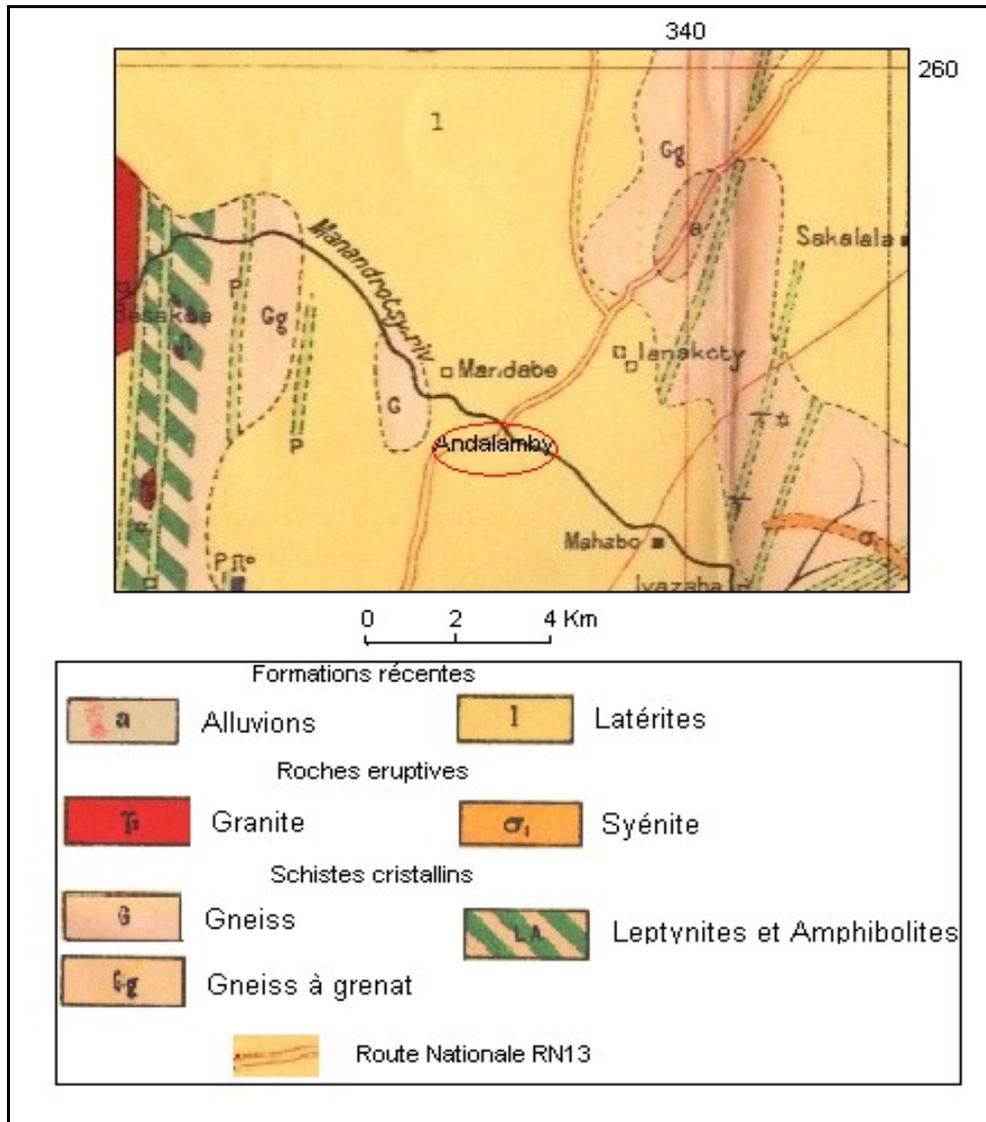


Figure II-3 : Carte géologique du secteur Andalamby (Extrait de la carte 1/200 000 du Service géographique de Madagascar, 1948)

Deuxième site

Le socle est caractérisé par le système paragneissique Androyen.

Au crétacé supérieur, des grosses coulées volcaniques formées par des rhyolites et basaltes se sont épanchées au Sud Est de la région, volcanisme de l'Androy (figure II-4).

La carrière est composée principalement de basalte (filon couche).

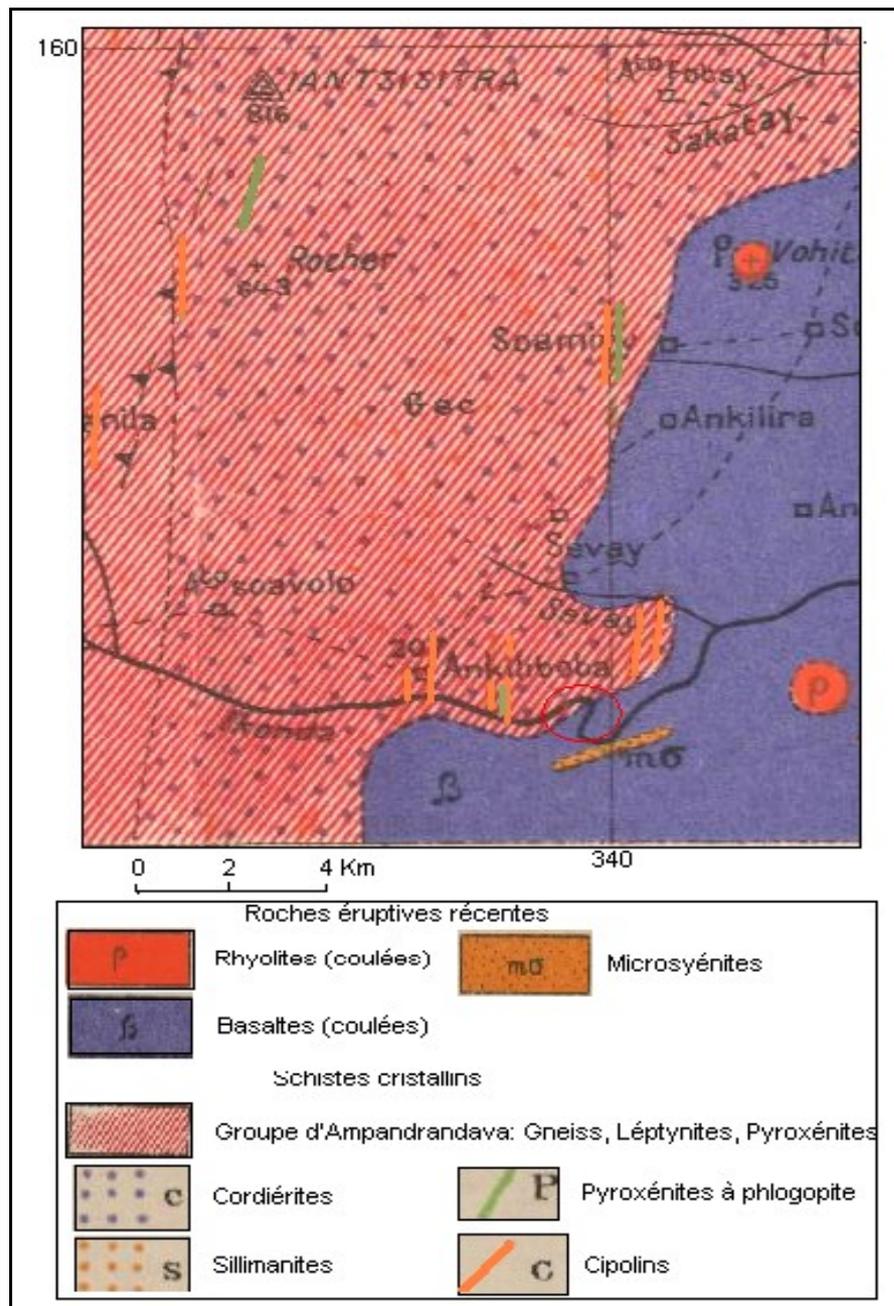


Figure II-4 : Carte géologique du secteur Ankilibobo (Extrait de la carte 1/200 000 du Service géographique de Madagascar, 1948)

Troisième site

Le dernier site se trouve vers la limite de l'Androy Mandraréen et du massif volcanique crétaé de l'Androy. La région est aussi riche en gisement de phlogopite, de rhyolite, de leptynite. Le substratum est représenté par le système paragneissique Androyen traversé par les venues granitiques du système Anosyen. L'ensemble forme un complexe isoclinal redressé appartenant aux vieilles chaînes précambriennes. Au crétaé supérieur, des grosses coulées volcaniques formées par des rhyolites et basaltes se sont épanchées.

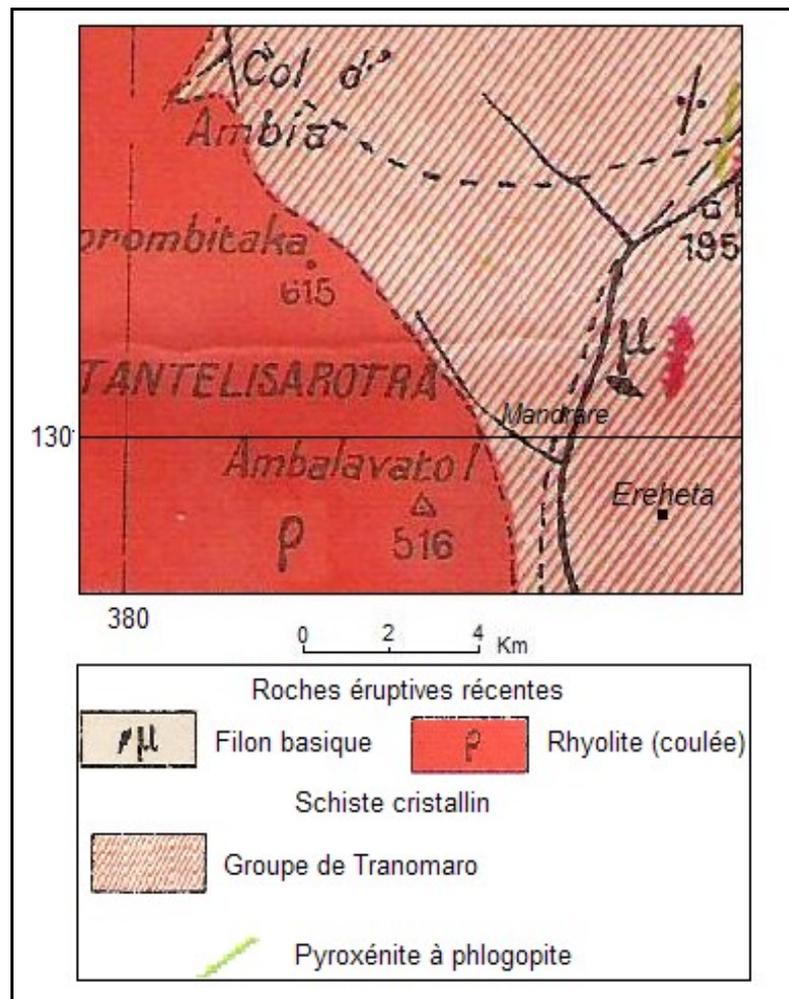


Figure II-5: Carte géologique du secteur Ereheta (Extrait de la carte 1/200 000 du Service géographique de Madagascar, 1948)

II.4- Sol

Dans l'ensemble de l'Androy, on peut séparer l'Androy cristallin, domaine de transition, et l'Androy sédimentaire.

L'Androy cristallin, constituant notre zone d'étude, comprend :

- la pénéplaine cristalline ou Androy Manambovien, domaine de terres rouges variées, parfois squelettiques et lessivées sur les groupes.
- le massif volcanique, domaine de terre brun et du sable roux, au centre.
- l'Androy Mandraréen, domaine pédologique de la carapace calcaire avec de terres rouges fréquentes et abondantes, à l'Est.

II.5- Climat général

Le Sud de Madagascar, généralement objet de plusieurs qualificatifs : Sud sec, Sud aride, Sud désertique, constitue la zone d'étude. Avec une pluviométrie totale de l'ordre de 400mm à 600mm

par an. La hauteur pluviométrique annuelle dépasse 1000mm dans la partie Est, à l'Est de Ranopiso (RABEMANANA V. 2002).

La région Ouest jouit le climat aride avec une saison sèche très longue presque toute l'année. L'évapotranspiration est largement supérieure à la précipitation. La température moyenne enregistrée tourne autour de 24°C (service météorologique Ampandrianomby).

La pression atmosphérique et le vent sont, pour une part, non négligeables à la base du déficit pluviométrique dans le Sud de Madagascar. L'effet du premier paramètre se manifeste par ses valeurs élevées qui s'y règnent et de façon quasi permanente toute l'année.

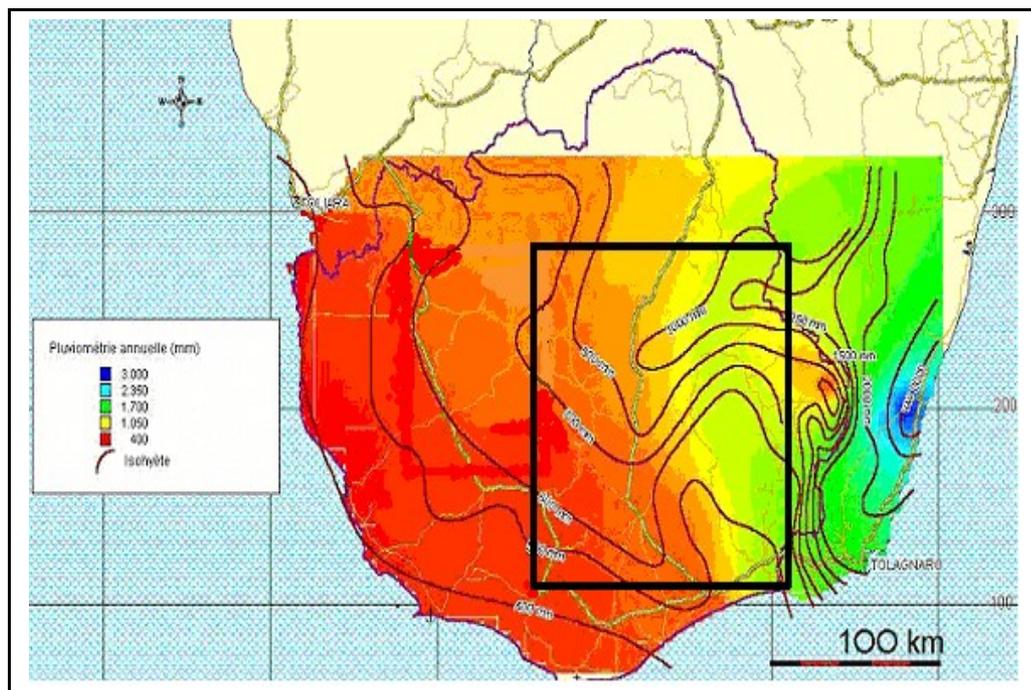


Figure II-6 : Carte des isohyètes de la zone d'étude (Source : ANDEA, 2003)

II.6- Relief

Le relief est constitué par une masse montagneuse continue dont les sommets dépassent 2500m et dont l'altitude moyenne est comprise entre 1000 et 1500m. Les versants orientaux sont très abrupts et les plaines côtières correspondantes sont étroites. Les alizés doivent franchir ou contourner cet obstacle. Par contre, les versants occidentaux sont en pente plus douce et les plaines et pénéplaines beaucoup plus larges. Les zones de Betroka et Ambovombe se trouvent dans un relief accidenté. Ses altitudes varient de 350 m à 550 m.

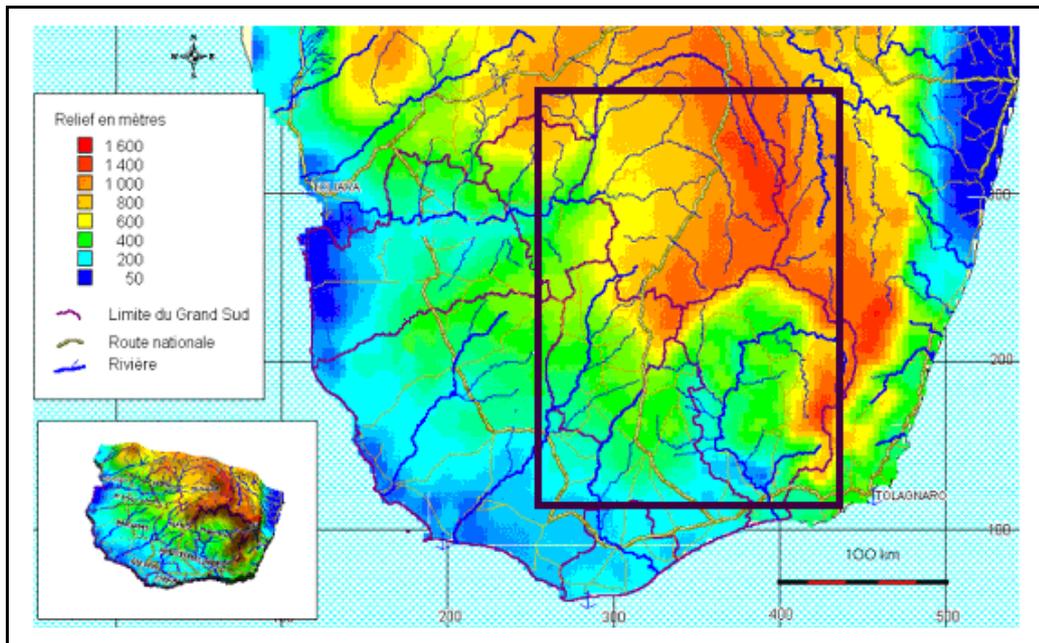


Figure II-7 : Carte topographique régional de la zone d'étude (Source : ANDEA, 2003)

La structure du relief de la partie Est de la zone, montagneux, influence le climat de la région centrale de l'Androy (COULIBALY A., 2004).

Partie III

ESTIMATION VOLUMETRIQUE DES ROCHES MASSIVES EXPLOITABLES SUR LES TROIS CARRIERES: ANDALAMBY, ANKILIBOBO ET EREHETA

Partie III

ESTIMATION VOLUMETRIQUE DES ROCHES MASSIVES EXPLOITABLES SUR LES TROIS CARRIERES : ANDALAMBY, ANKILIBOBO ET EREHETA

III.1- SITE D'ANDALAMBY (PK182)

III.1.1- Présentation du site

Le site se trouve au PK 182km de la route RN13 reliant Ihosy et Fort-Dauphin. Il est localisé aux coordonnées géographiques en X = 0582454m et Y = 7380659m en coordonnée UTM 38K. La carrière se trouve à 5 m, à l'Est de l'axe routier.

La carrière se trouve au Nord du village, côté Ouest de la route nationale. Les affleurements de dimension métrique s'étalent suivant la direction N40 (Figure III-1).

C'est une ancienne carrière, exploitée lors de la construction du pont d'Andalamby. Les roches sont des leptynites à grenat.

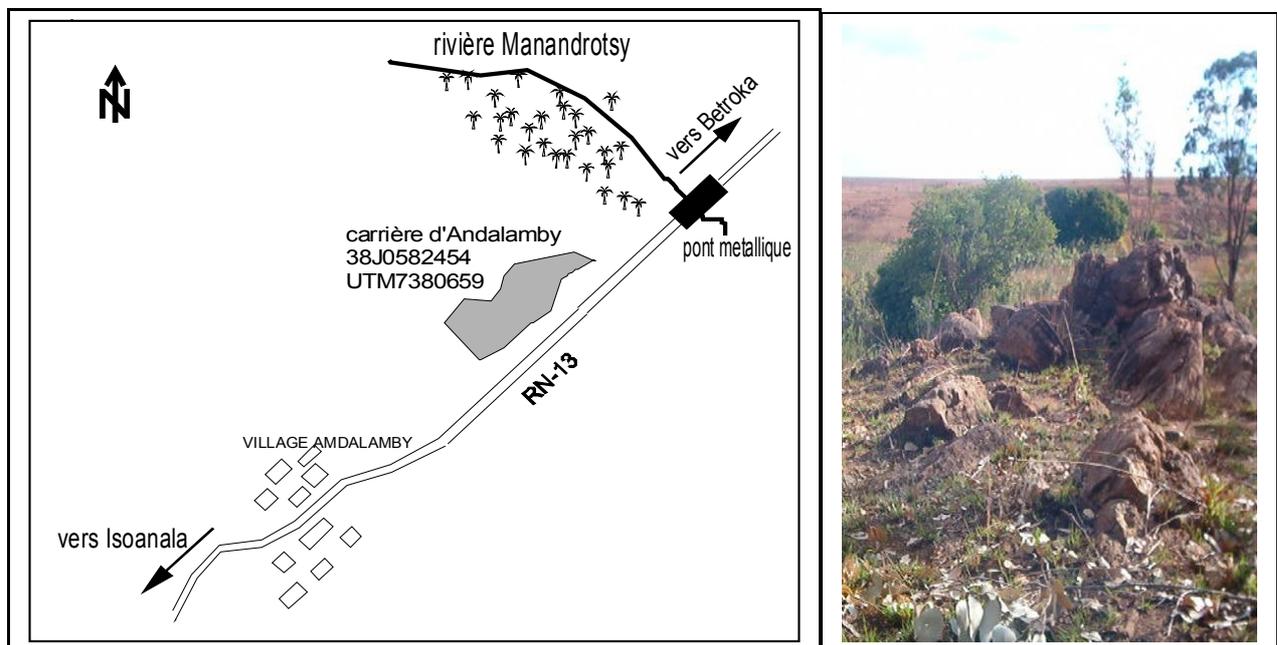


Figure III-1 : Plan d'accès PK 182(à gauche), photo du site (à droite)

III.1.2- Interprétation des levés topographiques et géophysiques

III.1.2.1- Interprétation topographique

Le plan de masse présentant le gisement et son environnement immédiat, avec les courbes de niveau est nécessaire à l'estimation de volume des roches massives exploitables sur cette carrière (Figure III-2).

Le volume et la couverture latéritique seront facilement déduits à partir de la géophysique.

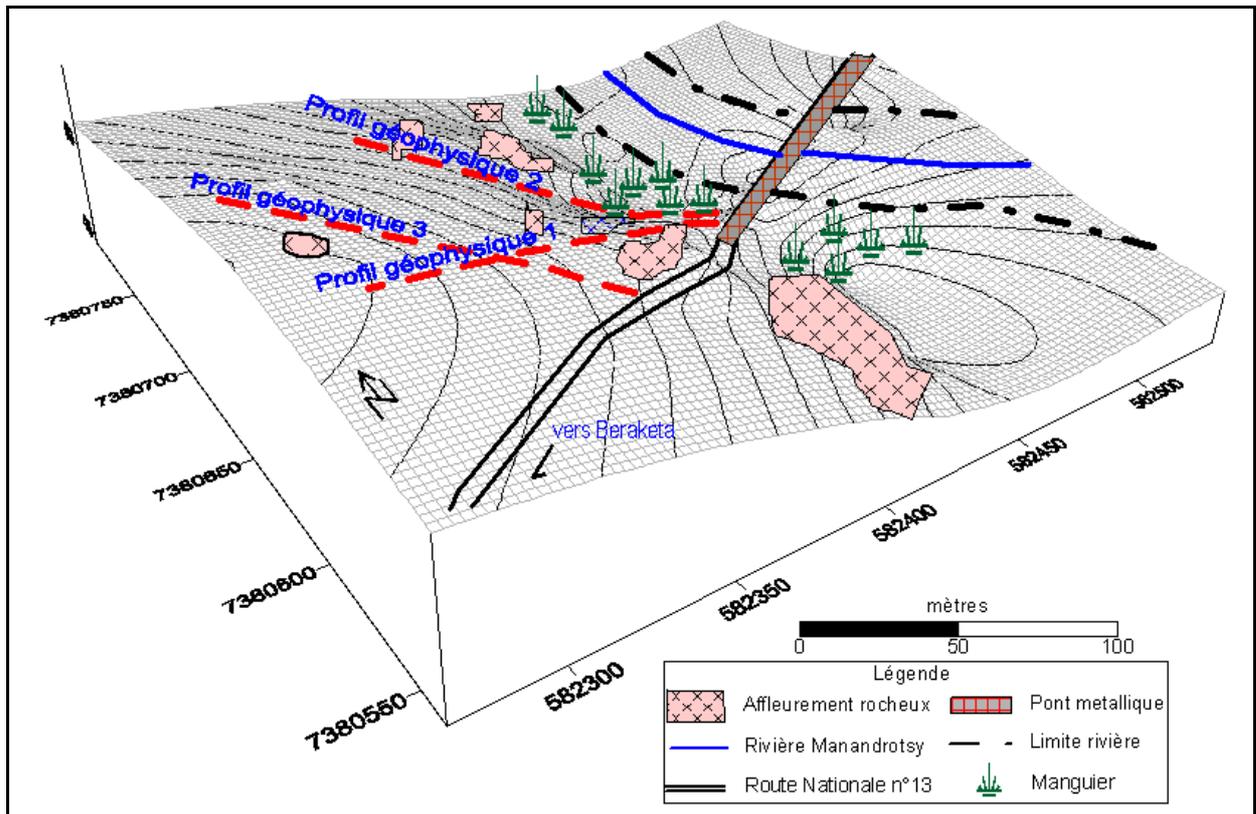


Figure III-2 : Plan de masse du gisement d'Andalamby

On a pris comme référence relative pour l'exécution de mesure le niveau 50m,

La carte montre que la dénivellation entre les deux niveaux extrêmes, maximal et minimal, est de 9m. Ce qui indique que la pente ne dépasse pas les 4%.

L'emplacement des profils géophysiques ainsi que les différents objets observés en surface, lors de la campagne de mesure, sont repérés sur cette carte.

Les affleurements sont relativement discontinus et de faible largeur sur ce site.

III.1.2.2- Interprétation géophysique

Trois profils ont été exécutés sur le site. Le but de la manipulation est de déterminer le volume exploitable de roche massive de la carrière.

Le premier profil, de longueur 155m, a été étalé entre les deux affleurements Est et Ouest observés sur le site (Figure III-2). La direction a été choisie dans le but de connaître s'il y a la continuité en profondeur des deux blocs affleurants.

Le deuxième profil, de longueur 93m, traverse la quasi-totalité de l'affleurement de l'Ouest. Il a été fait dans le but d'avoir plus de détail sur l'épanchement en profondeur des roches affleurantes de l'Ouest.

Le troisième, de longueur 155m, est parallèle à ce du profil 2.

Les coupes géoélectriques obtenues à partir de ces trois profils sont, généralement, caractérisées par les trois formations de résistivité électrique différentes : la formation à faible valeur de résistivité, colorée en bleu (40 à 400 Ω m), celle à gamme de résistivité faiblement résistante, colorée en verte et jaune (400 à 3300 Ω m), et la formation résistante (supérieure à 4 000 Ω m), colorée en rouge et marron.

Profil 1:

Les formations faiblement résistante et résistante, de couleur verte, rouge et marron dominent le sous-sol traversé par le profil 1 (*figure III-3a*) :

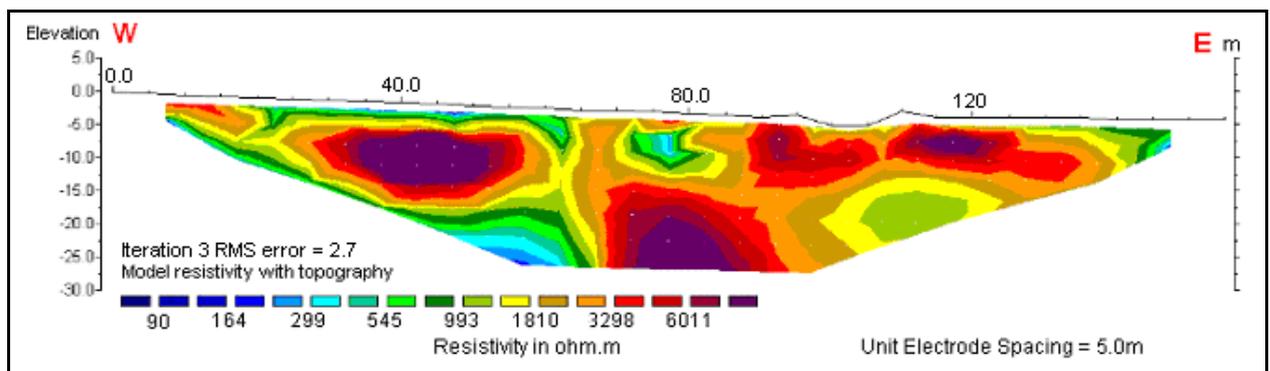


Figure III-3a : Coupe géoélectrique du profil 1, PK182

L'identification réalisée lors de la campagne de prospection nous a permis de connaître la nature de ces deux formations

- la formation faiblement résistante est constituée de roches fissurées, faiblement altérées,
- la formation résistante indique la roche saine, leptynites à grenat du secteur.

Les deux blocs de leptynites affleurants (aux points X=86m et X= 120m), caractérisés par la valeur de résistivité élevée, surmontent des couches conductrices qui sont constituées de roche à altération bien avancée.

La coupe géoélectrique du profil 1 a montré que les deux blocs aux points 40 et 120m ne sont pas continus. Mais on note la présence d'une racine, constituée de roche saine et de résistivité élevée, au milieu du profil (point 80m). Le toit de celle-ci se trouve à 8m de profondeur environ. Elle n'est donc pas exploitable à cause de sa couverture latérale fortement épaisse.

Profil 2:

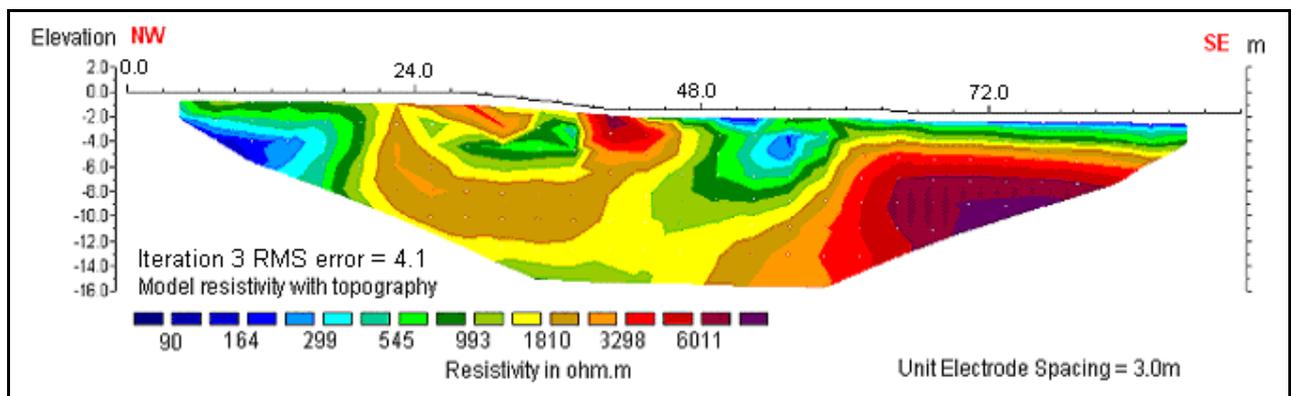


Figure III-3b: Coupe géoélectrique du profil 2, PK182

La figure III-3b, coupe géoélectrique du Profil 2, a montré la dominance de la formation résistante dans le secteur Sud Est de la zone, à partir du point 60m. La résistivité moyenne est de 6000Ω m. La couverture latéritique, d'épaisseur moyenne de 3m et caractérisée par la formation conductrice, surmonte la formation résistante observée dans ce secteur.

La partie Nord Ouest est dominée par des formations faiblement résistante et conductrices. Elle n'est pas intéressante de point de vue exploitation de roche massive.

Profil 3:

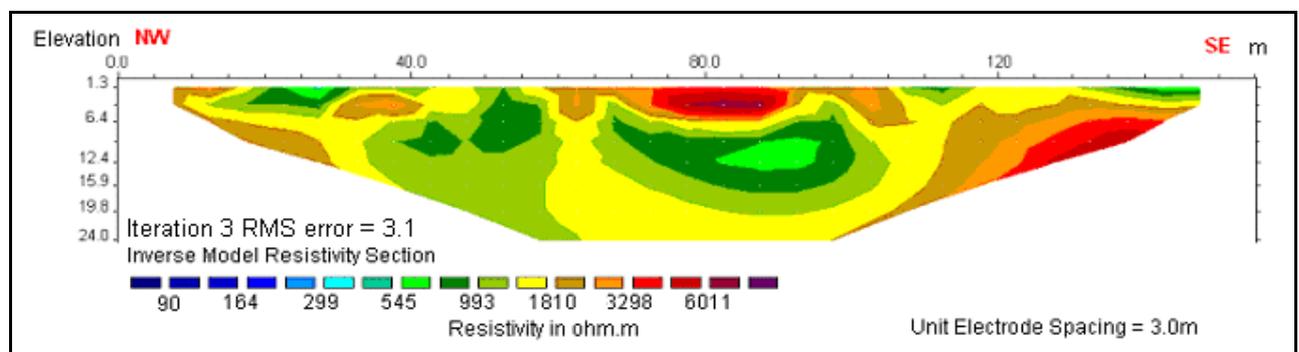


Figure III-3c : Coupe géoélectrique du profil 3, PK182

La coupe géoélectrique du profil 3 (figure III-3c) confirme l'extension Sud-Ouest de la roche saine dans le secteur Est de la zone. La formation résistante est réapparue à l'aplomb du point X = 120m du profil. L'épaisseur de sa couverture latéritique est de 3m environ.

La roche saine, très superficielle, est observée au centre de ce profil. Cette formation, de dimension moyenne 6x5m, ne s'enracine pas du tout en profondeur.

III.1.3- Estimation du volume de la roche massive

En tenant compte la direction de prolongement de la structure, Nord Sud, qui donne la direction privilégiée de la structure dans le calcul d'extrapolation, et en prenant la valeur de résistivité de chaque point du sous-sol, il est possible de connaître le changement probable de la structure du sous sol à une profondeur donnée.

Les trois profils exécutés sur le site nous ont permis de structurer la formation sous-jacente. Trois surfaces d'isovaleurs, à de profondeurs Z différentes, ont été dressées, à partir de ces trois panneaux. Le but de la présentation est de connaître la continuité en profondeur et effectivement de délimiter l'extension latérale de la roche massive (Figure III-4a).

III.1.3.1 - Carte d'isorésistivité à 4m de profondeur

La carte de la résistivité vraie à 4m de profondeur a mis en évidence deux zones à forte valeur, qui indiquent la roche massive (figure III-4a). Les zones sont situées sous les affleurements des leptynites.

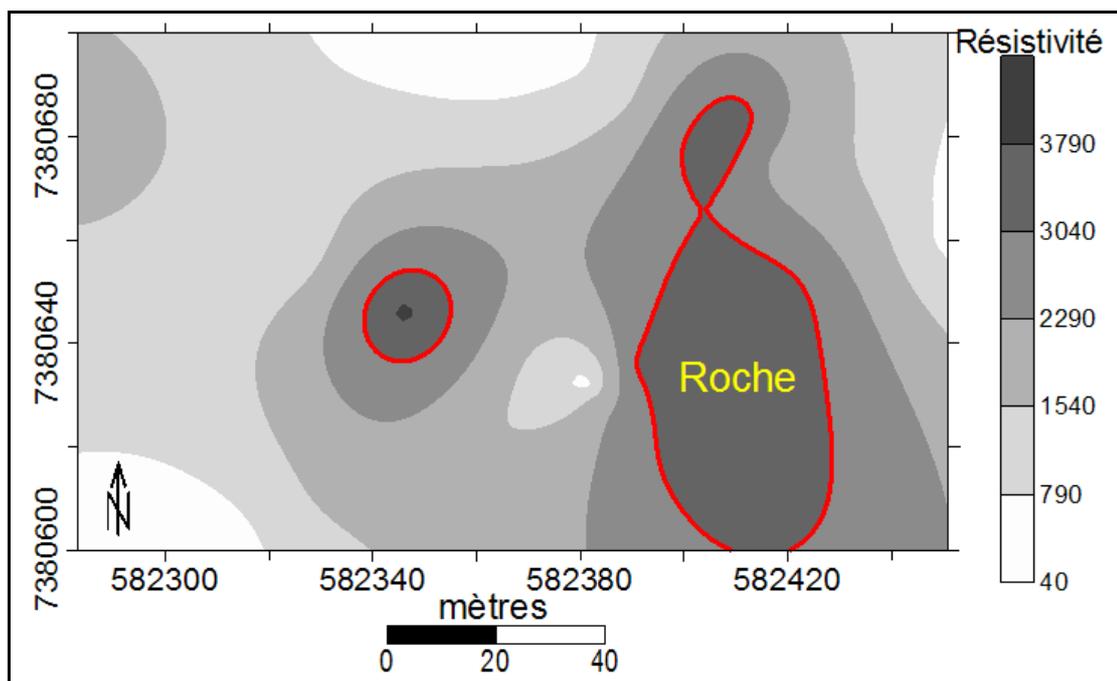


Figure III-4a : Carte de résistivité à Z=4m, Andalamby

L'allongement Nord Sud de la structure de la résistivité renforce la direction privilégiée de la structure, direction généralement Nord Sud de la schistosité dans cette région.
La carte a confirmé la discontinuité des roches entre les deux affleurements.

III.1.3.2 - Carte d'isorésistivité à 8m de profondeur

La carte a montré la continuité des deux blocs résistants de la figure III-4a au dessus. On peut dire alors que les roches affleurantes, leptynites, sont vraiment massives et forme un seul bloc à 8m de profondeur. Notons que, seulement dans le secteur Sud Est de la zone qu'on rencontre le bloc (Figure III-4b).

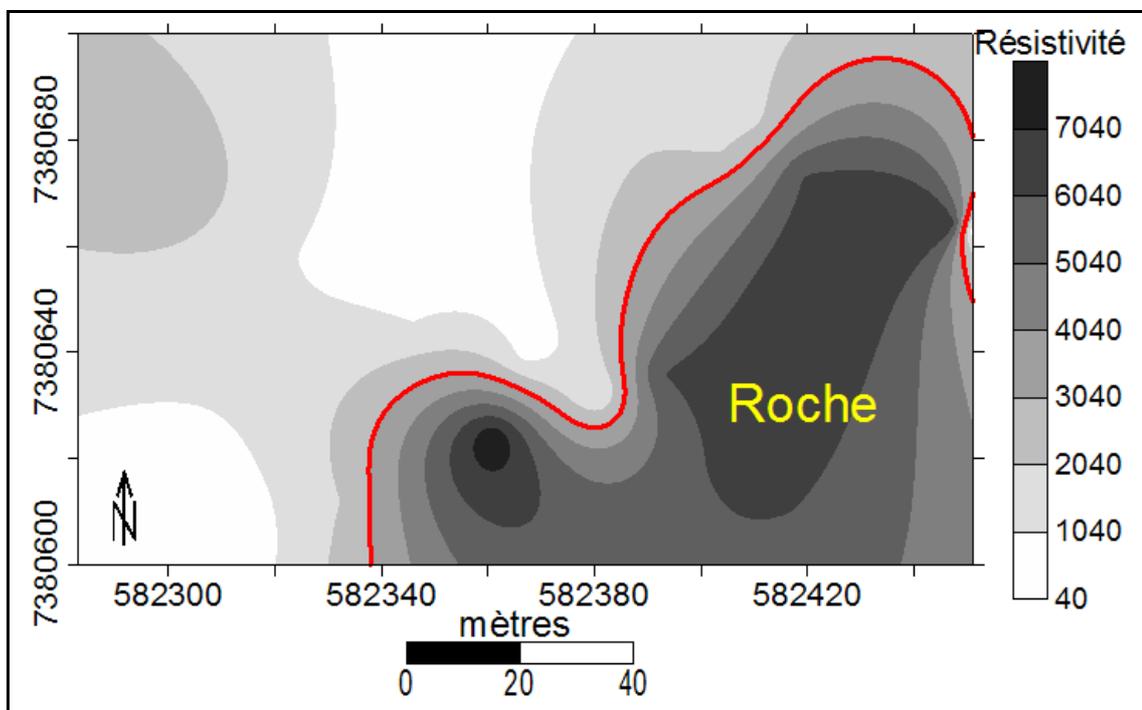


Figure III-4b : Carte de résistivité à Z=8m, Andalaby

III.1.3.3 - Carte d'isorésistivité à 12m de profondeur

La roche saine occupe toujours le secteur Sud Est de la zone à 12m de profondeur (figure III-4c). Elle a subi de faible altération au centre Est du secteur, d'où l'altération faible de la formation de roche au environ de la ligne Y = 7380640m de la carte.

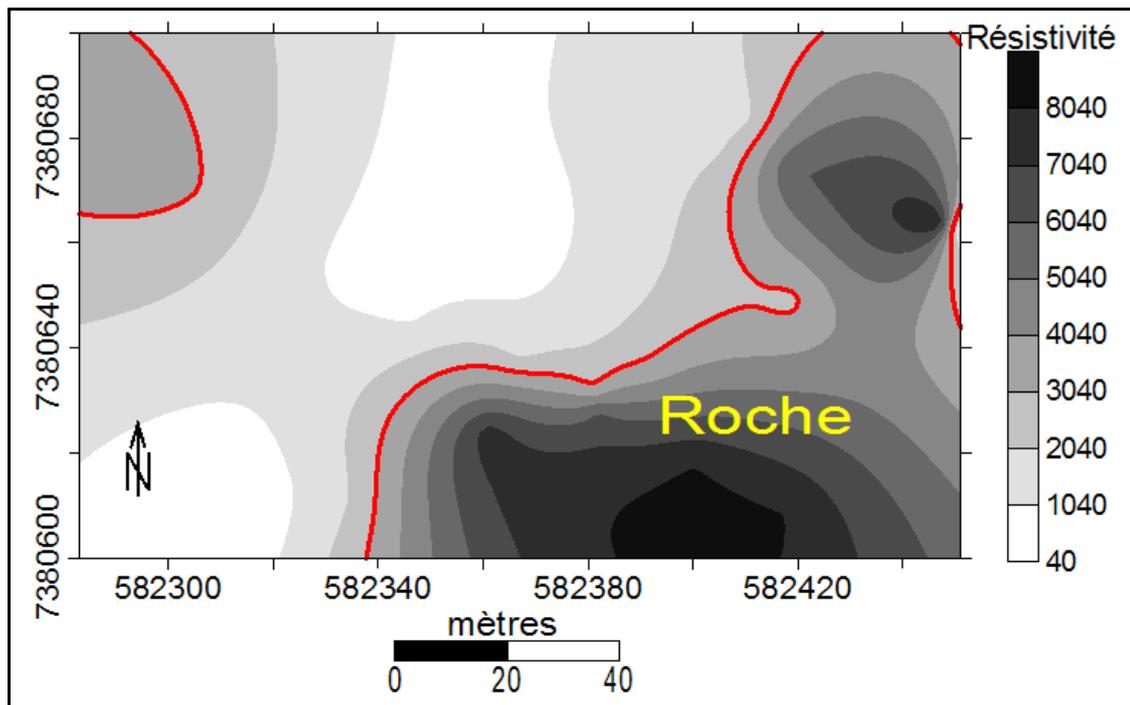


Figure III-4c: Carte de résistivité à Z=12m, Andalamby

La forme de la roche selon les trois surfaces d'isovaleurs est analogue et ce qui traduit que la roche apparaît à Z= 4m est continue en profondeur. Les résultats confirment l'allongement Nord Sud.

La compilation de toutes les données :

- Topographiques,
- Coupes géoélectriques,
- Cartes d'iso-résistivités aux trois profondeurs considérées ;

amène au bloc diagramme qui donne l'extension en trois dimensions de la roche massive étudiée (Figure III-5).

La roche saine se trouve en majeure partie dans le secteur Sud Est de la zone. Elle est caractérisée par la formation électriquement résistante. Le volume de celle-ci augmente en allant en profondeur, de 4m à 12m.

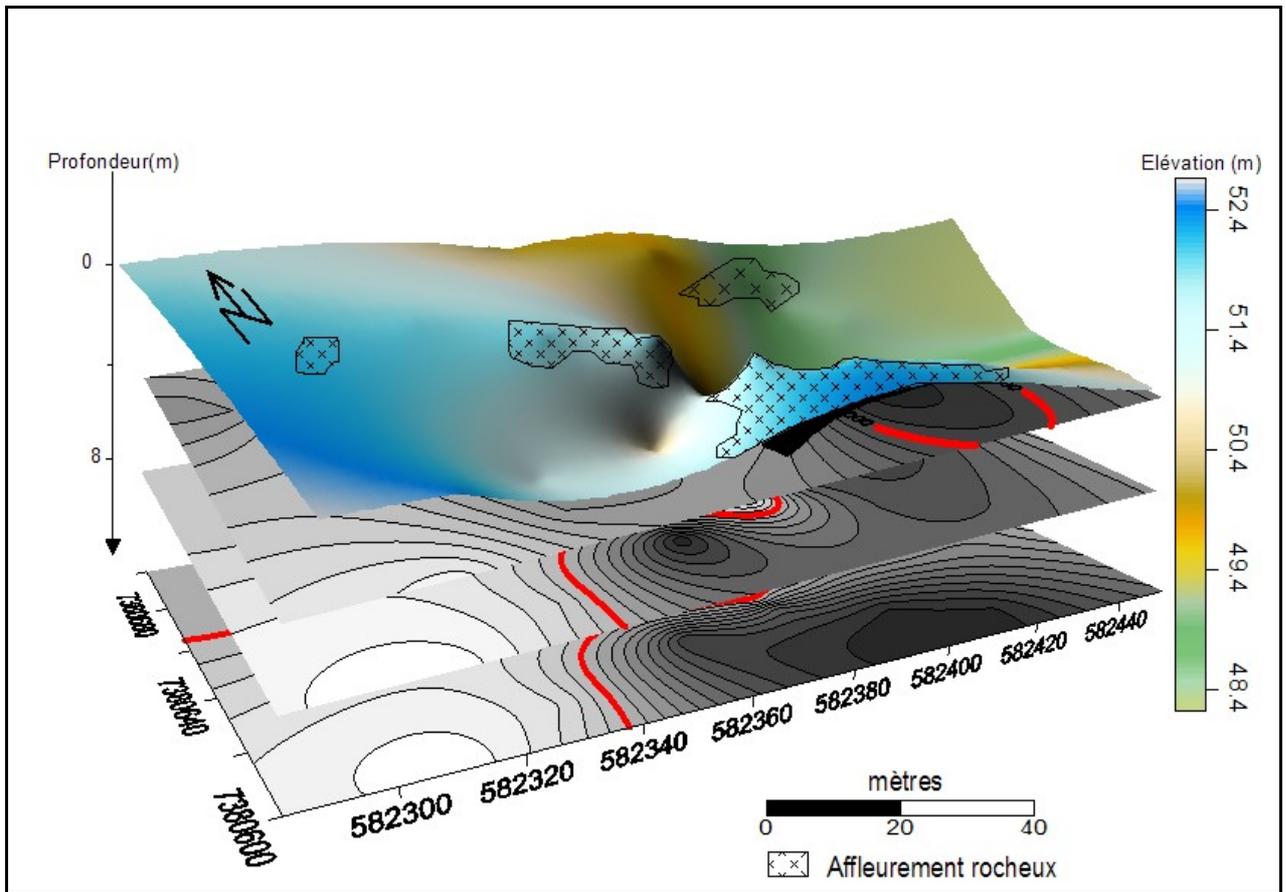


Figure III-5: Bloc diagramme 3D, Andalamby

III.1.3.4- Calcul du Volume exploitable

Le calcul du volume exploitable du gisement peut se faire à partir de la distribution de la résistivité électrique suivant les trois coupes et dans les plans d'égalité de profondeur $Z=4\text{m}$, $Z=8\text{m}$ et $Z=12\text{m}$.

Le processus est le suivant :

- calcul des surfaces occupées par la roche sur les trois niveaux effectués.
- calcul du volume moyen encadré par ces surfaces c'est-à-dire en trois dimensions.

Réserves d'après la géophysique:

- surface 1 : $S_1 = 1\,800\text{m}^2$ (couverture rocheuse à $Z=4\text{m}$)
- surface 2 : $S_2 = 6\,000\text{m}^2$ (couverture rocheuse à $Z=8\text{m}$)
- surface 3 : $S_3 = 5\,000\text{m}^2$ (couverture rocheuse à $Z=12\text{m}$)

Volume entre les surfaces 1 et 2 : $V_{1,2} = 15\,600\text{ m}^3$

Volume entre les surfaces 2 et 3 : $V_{2,3} = 22\,000\text{ m}^3$

 Volume exploitable $V = V_{1,2} + V_{2,3} = 37\,600\text{ m}^3$

III.2- SITE D'ANKILIBOBO (PK 325+20)

III.2.1- Présentation du site

Le site est localisé à 20km à l'Est d'Antanimora, PK325. Il se situe aux coordonnées géographiques $X = 0582749m$ et $Y = 7259462m$ du système de référence rectangulaire UTM 38K (Figure III-6).

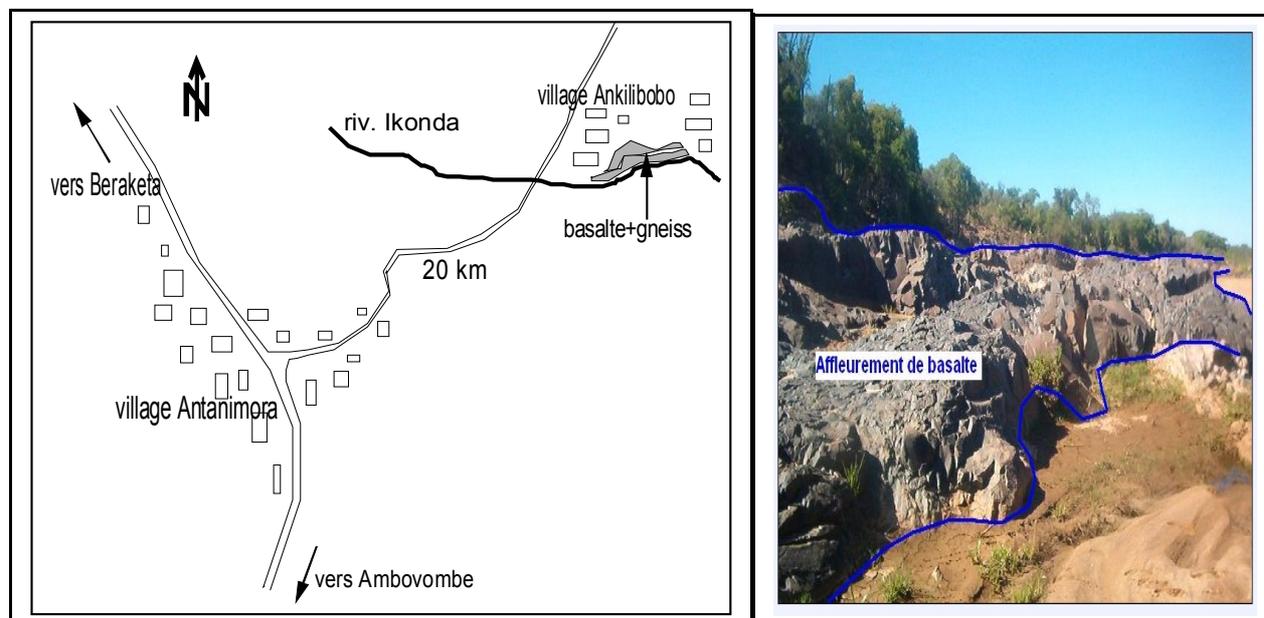


Figure III-6 : Plan d'accès PK325+200 (à gauche), photo du site (à droite)

Les coulées de basaltes reposent sur les gneiss à pyroxène formant la carrière. Elles affleurent dans le lit et sur la rive gauche de la rivière Ikonda, à l'Ouest du village d'Ankilibobo.

Les coulées se sont étendues globalement suivant la direction N80 (Figure III-6).

III.2.2- Interprétation des levés topographiques et géophysiques

III.2.2.1- Interprétation topographique

Le site est relativement accidenté par rapport au premier site. La pente y est assez importante. La variation de niveau enregistrée dans le secteur est de l'ordre de 15m.

Les données topographiques sont alors pondérant dans le calcul du volume.

Les deux profils géophysiques présentent des variations topographiques importantes, à cause de la morphologie de la surface. La valeur de dénivelé peut paraître forte et l'inversion correspondante au calcul de la résistivité vraie nécessite de la correction topographique.

La couverture de couche de basalte, d'épaisseur apparente maximale 12m, est bien observée sur le front ouvert, sur la rive gauche de la rivière d'Ikonda.

L'affleurement occupe une largeur environ 40m et s'étende sur 300m de longueur.

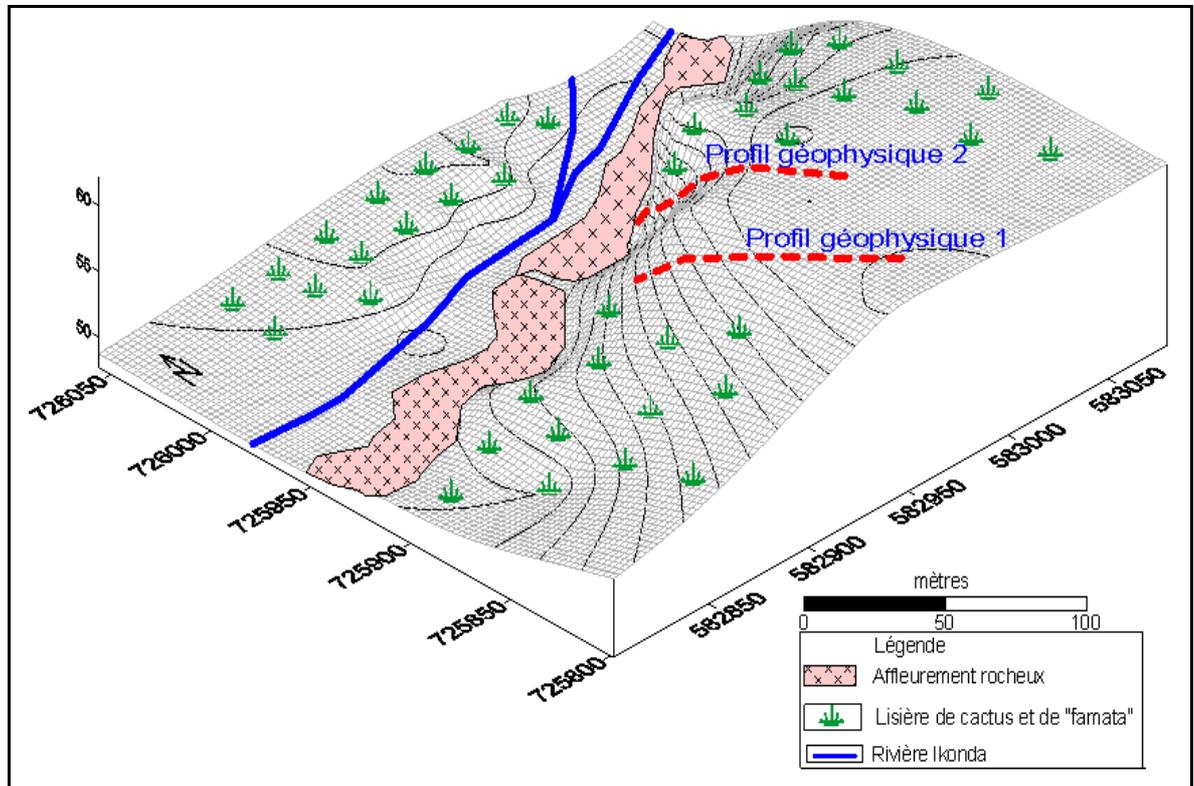


Figure III-7: Plan de masse du gisement d'Ankilibobo

III.2.2.2- Interprétation géophysique

Deux profils quasiment parallèles distants de 35 m et de longueur de 93m, chacun, ont été implantés dans le secteur sud, rive gauche de la rivière. Le bout nord du profil est implanté au bord de la rivière tandis que le bout sud arrive au centre du village.

Le deuxième profil est plus proche du bord de la rivière que le premier. Le but est de déterminer l'épaisseur de la couverture stérile et l'extension du gisement vers le Sud.

Profil 1 :

La coupe de résistivité vraie ou coupe géoélectrique a mis en évidence la succession de trois terrains:

- le premier terrain constitué de formation conductrice s'épaissit en allant vers le Sud Est, son épaisseur maximale de 8m est rencontrée au point 48m du bout Nord Ouest du profil,

- le second terrain est formé de couche à faible valeur de résistivité électrique (entre 60 et 600Ω m)
- la formation dure, le basalte, est caractérisée par la valeur de résistivité électrique supérieure à 1000Ω m, elle forme le substratum du secteur Nord Est de la zone prospectée (Figure III-8a).

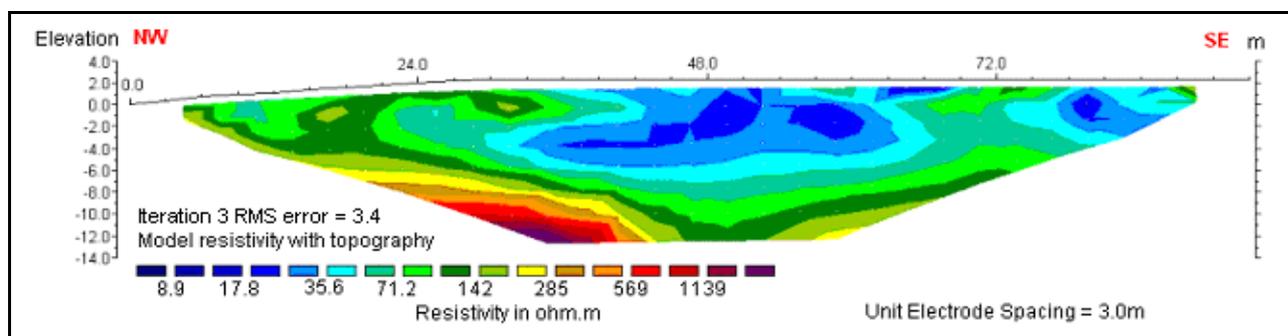


Figure III-8a : Coupe géoélectrique du profil 1, PK325+20

Profil 2 :

La formation de résistivité obtenue avec le deuxième profil confirme celle mise en évidence par le profil 1. Les coulées basaltiques sont beaucoup plus épaisses sous le profil 2.

La couverture est moins importante dans la partie Nord Ouest du profil 2 que du profil 1. Le secteur traversé par le profil 2 est alors plus intéressant pour une exploitation ultérieure de gisement de roche massive.

L'épaississement de la couverture apparaît à l'Est du point 48m. La couverture dépasse 6m d'épaisseur au Sud Est de ce point.

Le substratum résistant occupe presque la moitié de la coupe. On peut dire alors que l'épanchement s'arrête au point 48m (Figure III-8b).

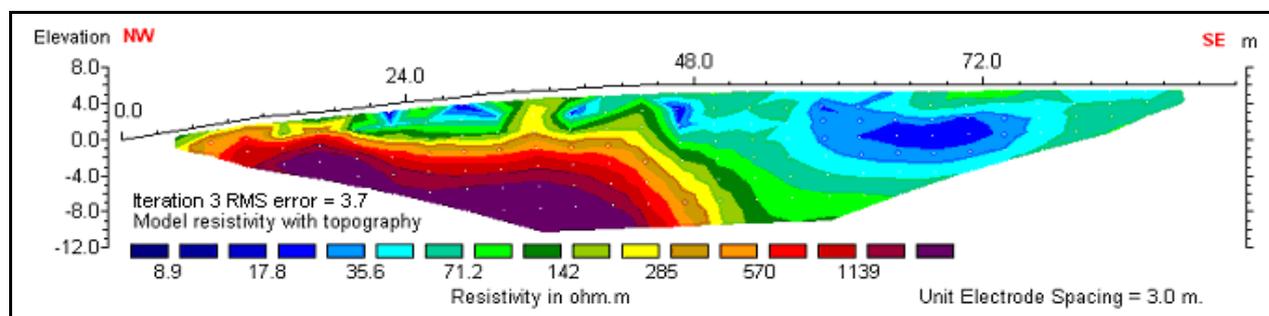


Figure III-8b: Coupe géoélectrique du profil 2, PK325+20

III.2.3- Estimation de volume de la roche massive, basalte

III.2.3.1- Carte de résistivité à 4m de profondeur

La formation faiblement résistante commence à apparaître sur le secteur Nord Ouest de la carte de résistivité. Le gneiss à pyroxène et les basaltes altérés prédominent le reste de la zone, ils sont caractérisés par la valeur de résistivité faible (Figure III-9a).

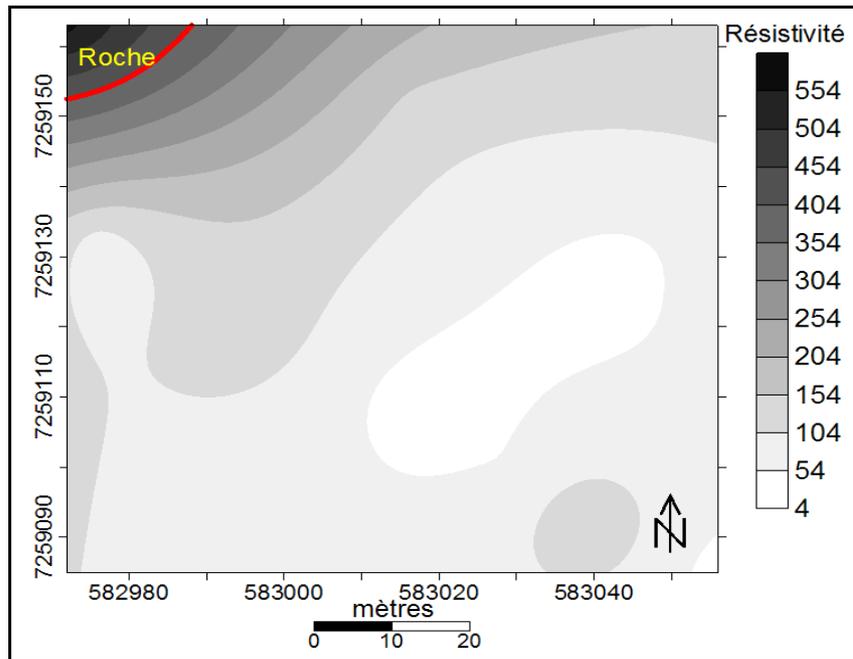


Figure III-9a: Carte de résistivité à Z=4m, Ankilibobo

III.2.3.2- Carte de résistivité à 8m de profondeur

La partie résistante occupe beaucoup plus de superficie sur la carte. Elle se trouve dans le secteur Nord Ouest de la zone. L'augmentation de la superficie (Figure III-9b), observée sur la carte, de la roche massive constituée de basalte, semble indiquer que la roche penche légèrement vers le Sud Est.

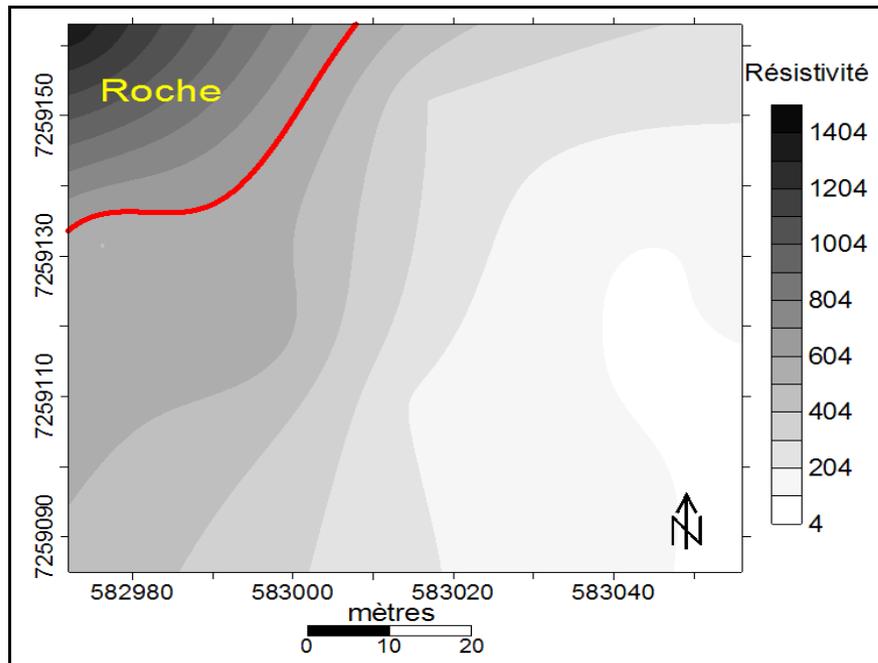


Figure III-9b: Carte de résistivité à Z=8m, Ankilibobo

III.2.3.3- Carte de résistivité à 12m de profondeur

La formation résistante occupe la partie occidentale de la carte. L'extension vers l'Est arrive jusqu'au méridien X=583020.

La carte à 12m de profondeur, confirme la direction de pendage vers l'Est (figure II-9c).

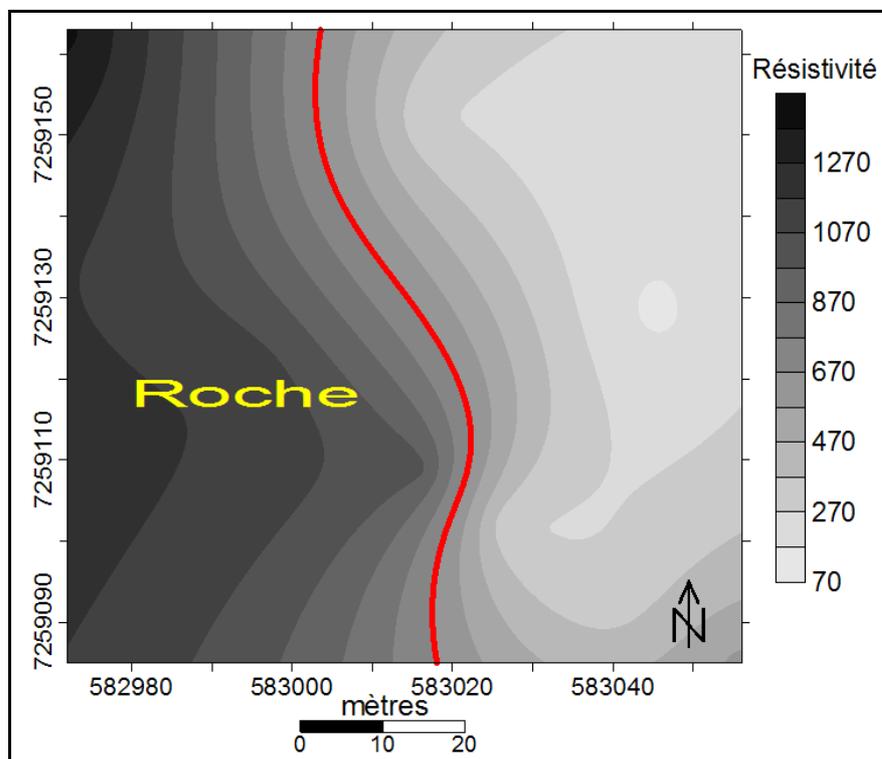


Figure III-9c: Carte de résistivité à Z=12m, Ankilibobo

Les trois cartes obtenues montrent que le basalte observé dans ce site est continu en profondeur et s'étale de plus en plus large vers l'Est si l'on pénètre en profondeur. On note que la variation altimétrique est beaucoup importante dans le secteur Ouest de la zone. Ainsi, le pendage avancé lors de l'interprétation dessus pourrait ne pas être vrai.

La topographie de la zone est vraiment utile à l'estimation et à la modélisation de la structure du massif rocheux dans ce secteur.

La figure III-10 représente, en introduisant la correction topographique correspondante aux trois cartes de résistivités, l'évolution du corps rocheux sous la couverture.

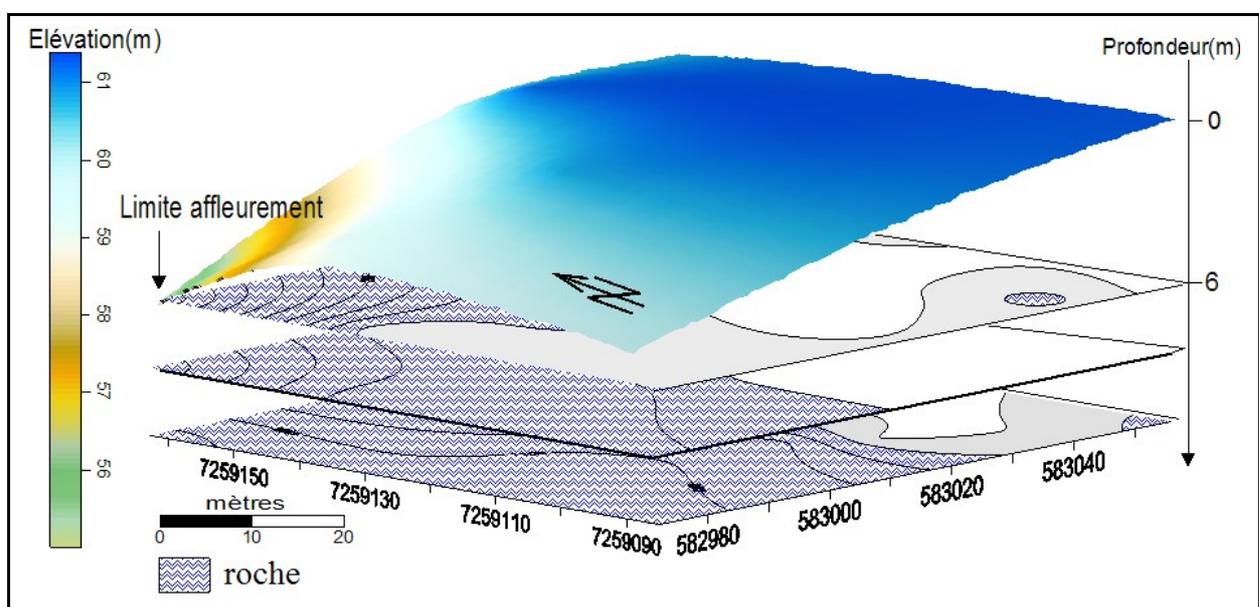


Figure III-10: Bloc diagramme 3D, Ankilibobo

Le bloc diagramme montre que le pendage est beaucoup plus important dans la partie Sud Ouest de la zone. Le toit du massif est relativement plat dans le secteur Est de la zone. Seulement, la couverture épaisit dans ce dernier secteur.

L'extension latérale maximale s'arrête en X= 583020

III.2.3.4- Calcul du volume exploitable

L'estimation a été faite, en considérant l'épaisseur de la couverture ou la formation stérile surmontant le basalte sain. L'épaisseur de la couverture considérée est inférieure à 12m.

En tenant compte les résultats de la figure III-10 et la lithologie du site, on peut avancer que la roche est continue latéralement vers l'Est depuis le bord de la rivière et suivant la direction de

l'affleurement observée. La roche sous la couverture s'allonge donc sur 300m de longueur (direction de prolongement de l'affleurement).

Le volume de la roche basaltique affleurante:

-Longueur de l'affleurement : $L = 300\text{m}$

-Largeur : $l = 40\text{m}$

-Epaisseur : $e = 10\text{m}$

$$V_{\text{aff}} = L \times l \times e = 120\,000\text{ m}^3$$

Le volume du basalte sous la couverture:

- surface 1 : $S_1 = 1\,200\text{m}^2$ (couverture rocheuse à $Z = 4\text{m}$)

- surface 2 : $S_2 = 3\,200\text{m}^2$ (couverture rocheuse à $Z = 8\text{m}$)

- surface 3 : $S_3 = 4\,000\text{m}^2$ (couverture rocheuse à $Z = 12\text{m}$)

Volume entre les surfaces 1 et 2 : $V_{1,2} = 8\,800\text{ m}^3$

Volume entre les surfaces 2 et 3 : $V_{2,3} = 14\,400\text{ m}^3$

Volume selon la carte, $V_{\text{carte}} = V_{1,2} + V_{2,3} = 23\,200\text{m}^3$ (sur 35m de longueur)

Volume totale sous la couverture le long de l'affleurement, $V_{\text{sous}} = 198\,000\text{m}^3$

Volume total exploitable sur PK325+20 (RN13), Ankilibobo :

$$V = V_{\text{sous}} + V_{\text{aff}} = 318\,000\text{m}^3$$

III.3- SITE D'EREHETA (PK 425+19)

III.3.1- Présentation du site

Les carrières d'Ereheta sont localisées à 19km au Nord Ouest de la ville d'Amboasary. Le centre ou le village d'Ereheta est situé géographiquement au point $X = 0631319\text{m}$ et $Y = 7237688\text{m}$ en coordonnées UTM 38J.

Deux gisements distincts, distants de 1,3 km, sont identifiés dans ce secteur. Les rhyolites, formant la carrière, affleurent à deux endroits distants (Figure III-11).

La végétation épineux (cactus, fantsiolitra,...) couvre les roches.

Comme certains endroits de l'Androy, l'existence des zones taboues (« fady ») ne nous a pas permis de tirer des lignes plus longues malgré la grande surface à étudier.

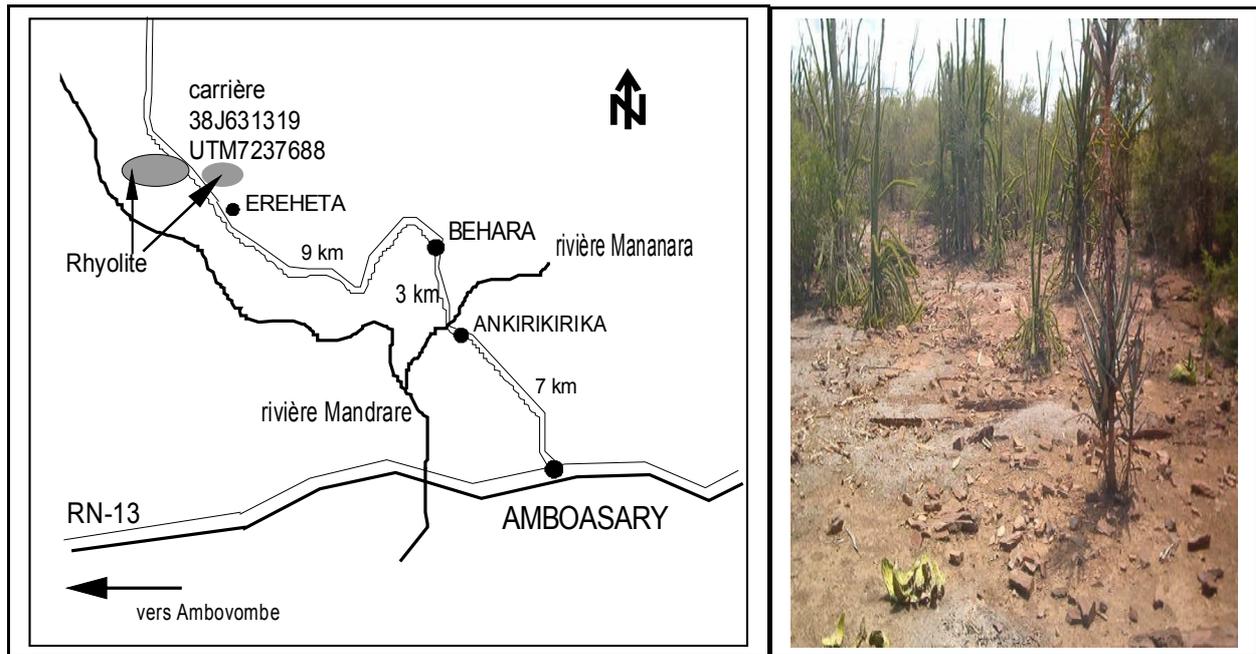


Figure III-11: Plan d'accès PK 425+19(à gauche), photo du site (à droite)

III.3.2- SITE A

III.3.2.1- Interprétation des levés topographique et géophysiques

a- Interprétation topographique

Le site A est relativement plat. Sur une longueur de 80m, seulement 1m de dénivelé a été enregistré.

Les roches affleurantes sont très larges sur le site A. Elle occupe une superficie de 140m x 80m.

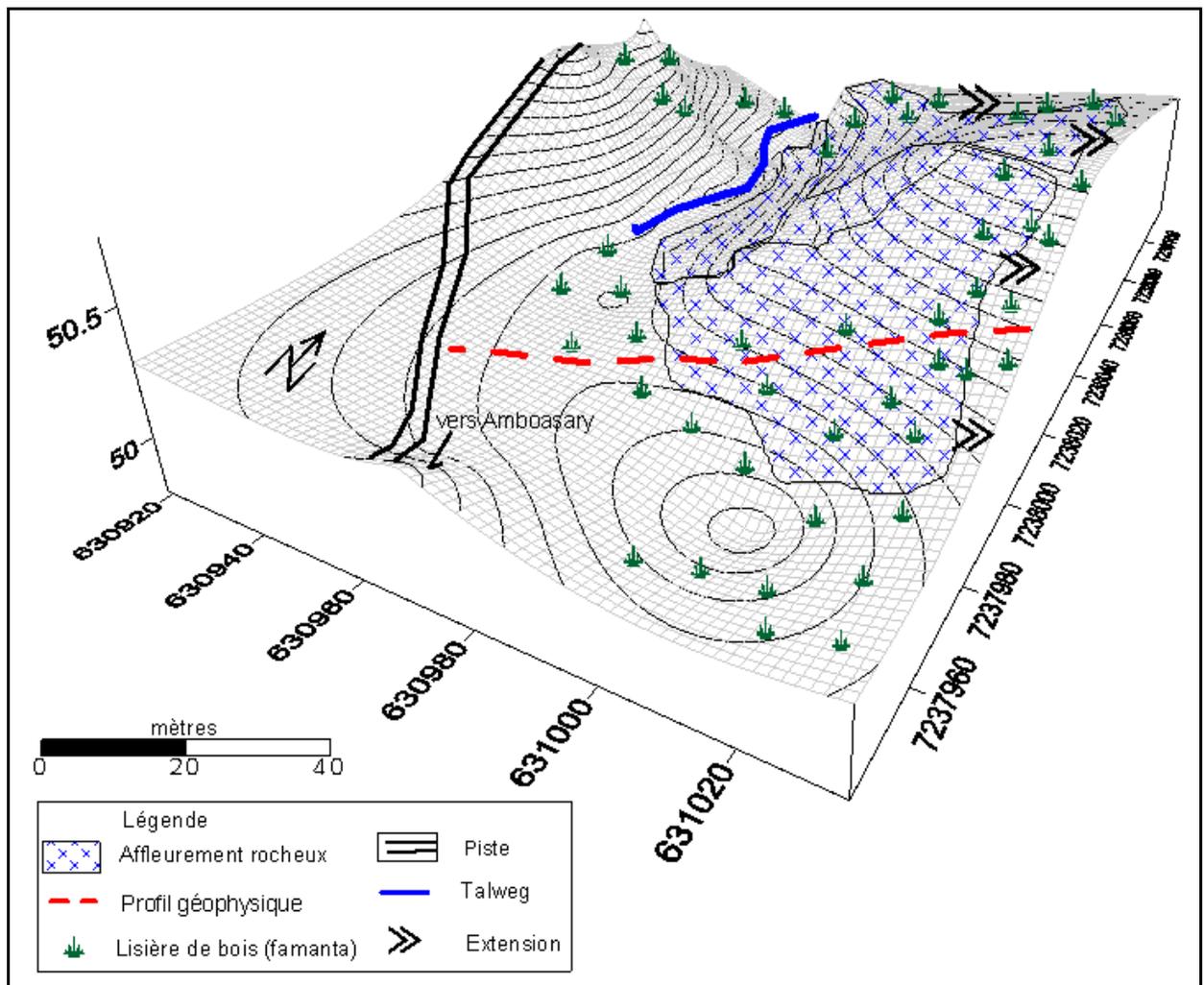


Figure III-12: Plan de masse du gisement d'Ereheta (Site A)

b- Interprétation géophysique

Le profil du panneau électrique, coupe transversalement l'affleurement de rhyolite. Le but de l'installation est de déterminer l'épanchement vers les deux côtés de prolongement des affleurements, vers Sud Ouest et vers Nord Est, et d'estimer l'épaisseur de la roche dure (figure III-13).

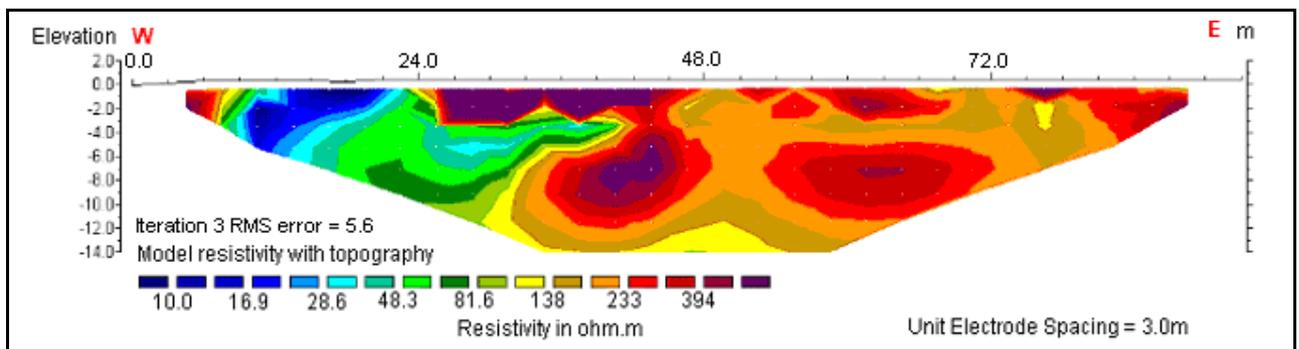


Figure III-13: Coupe géoélectrique du profil géophysique 1, PK 425 + 19

La coupe met en évidence l'épanchement de rhyolite Est-Ouest. Son épaisseur est évaluée à 2m. La coulée s'épaissit au point 42m. Elle a la puissance de 10m au environ de ce point et s'étale sur une largeur de 12m. Dans la partie Est, à partir de 45m, les rhyolites sont plutôt altérées et fissurées. La valeur de la résistivité électrique diminue considérablement dans ce secteur.

La formation en résistivité électrique est relativement hétérogène, elle représente une forte discontinuité latérale. Ce qui nous amène à conclure que la base des coulées de rhyolite n'est pas tabulaire. Elle se présente en blocs sous la couverture relativement plate.

III.3.2.2- Estimation du volume exploitable

a – Carte des affleurements

Les roches massives affleurantes occupent une grande superficie. Elles sont alors intéressantes, si elles continuent en profondeur.

Il est non négligeable, de point de vue exploitabilité car elle couvre une surface de 160m x 80m (Figure III-14).

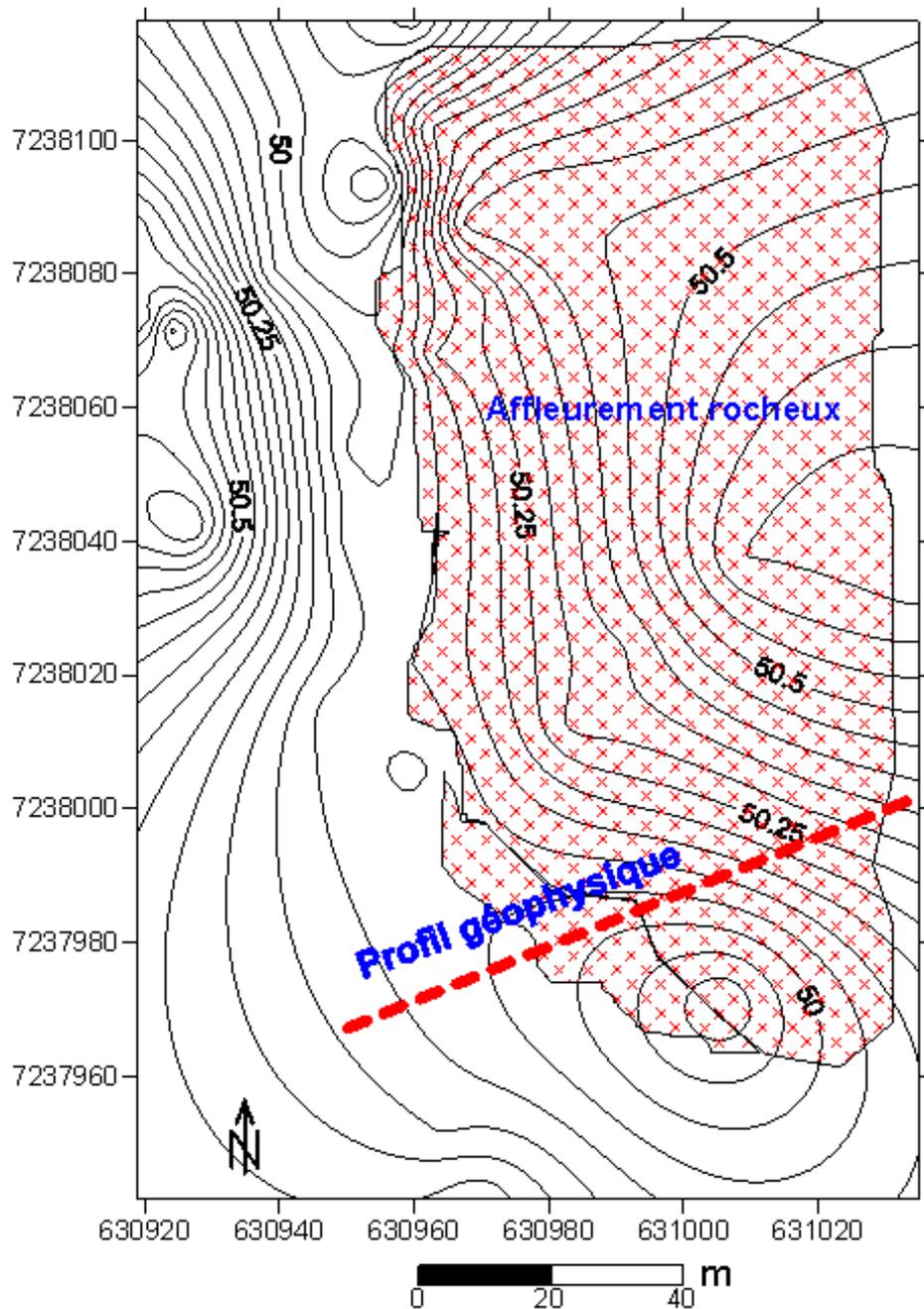


Figure III-14 : Carte des affleurements, Ereheta A

b - Carte d'isorésistivité à 2m de profondeur

Les données d'une seule coupe géoélectrique ne sont pas suffisantes pour la réalisation de la carte d'iso résistivité du secteur. Nous essayons, quand même, de présenter la carte de 50m x 80m, traversé par le profil dans le secteur Sud de la zone d'étude, pour avoir de l'information sur l'évolution en profondeur de la structure du massif.

La formation résistante caractérisant la rhyolite occupe la partie Est de la zone (figure III-15). Elle occupe presque le 50% du secteur considéré, soit 50m x 40m.

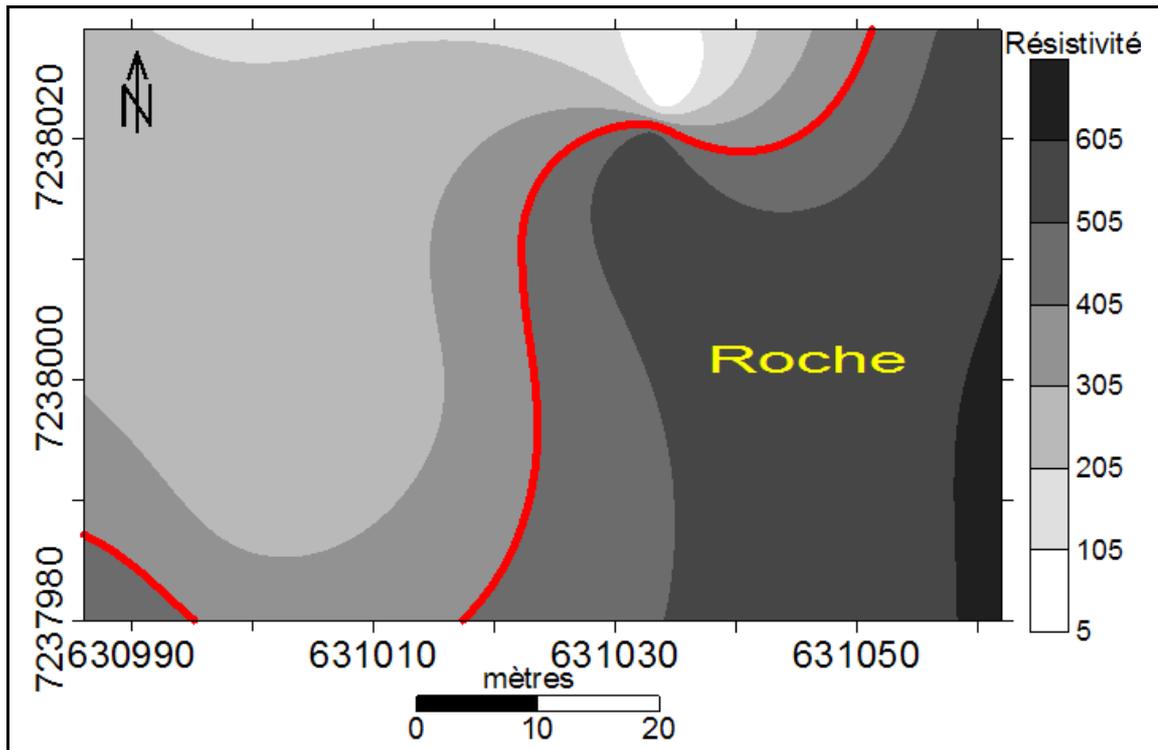


Figure III-15: Carte de résistivité à Z=2m, Ereheta A

c- Calcul du volume exploitable

Le volume a été calculé à partir de la superficie des affleurements et la carte d'isorésistivité à profondeur de 2m.

- surface affleurante: $S = 80\text{m} \times 160\text{m} = 12\,800\text{m}^2$
- épaisseur $e = 2\text{m}$
- Surface occupée à 2 m, pourcentage = 50%

Le volume estimé est donc $V = S \times e \times \text{Pourcentage} = 12\,800\text{m}^3$

III.3.3- SITE B

III.3.3.1- Interprétation des levés topographique et géophysiques

a- Interprétation topographique

On a pu couvrir 140m x 120m de surface topographique dans ce site. Il est traversé par la piste reliant Amboasary et Maromena.

Les affleurements rocheux, observés sur la partie Sud de la carte, occupent une superficie de 100m x 25m (Figure III-16).

Le site présente la pente descendante vers l'Ouest. La différence de niveau entre les deux courbes extrêmes est de 5m

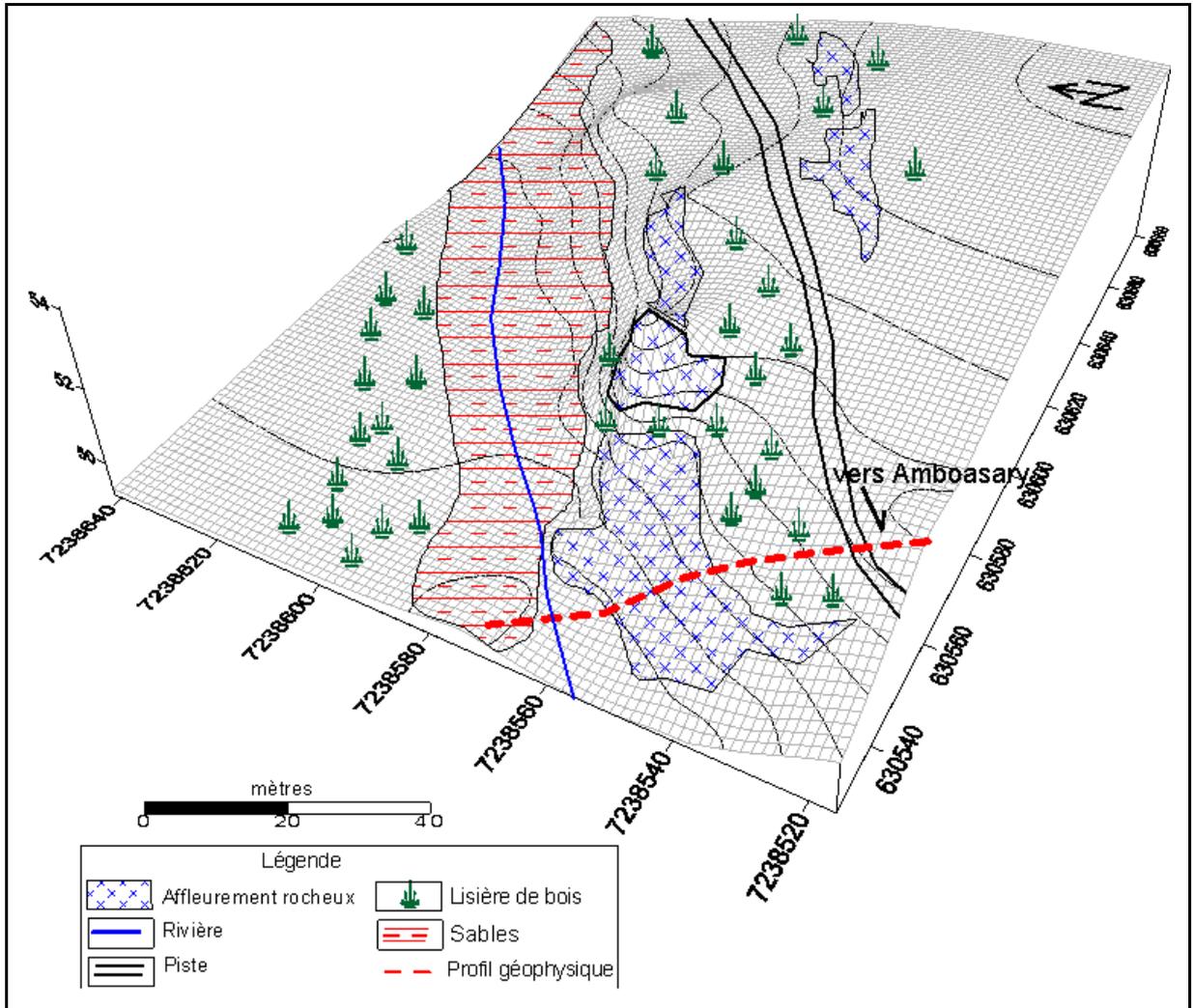


Figure III-16: Plan de masse du gisement d'Ereheta (Site B)

b- Interprétation géophysique

Un profil géophysique a été implanté sur le site B, situé à 1.3km du site A. Le profil géophysique coupe transversalement l'affleurement rocheux. Il a la direction Sud Est Nord Ouest.

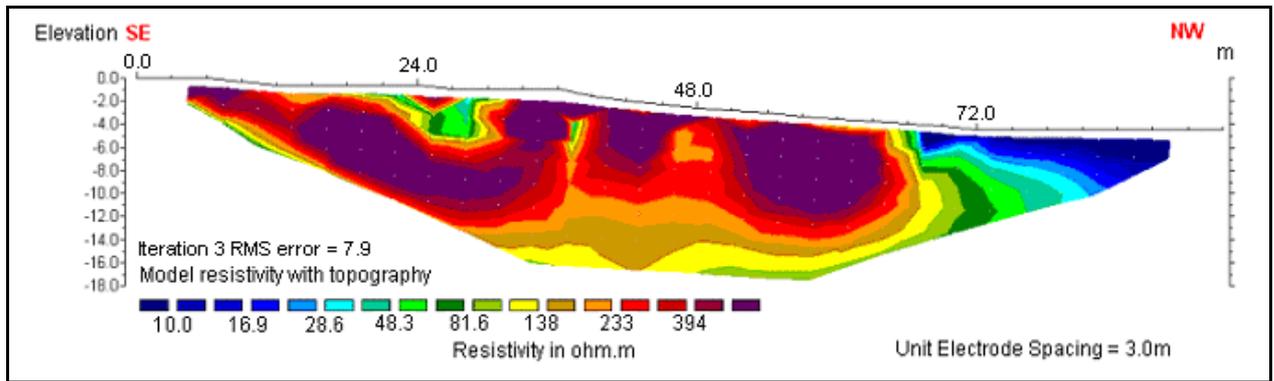


Figure III-17: Coupe géoélectrique du profil géophysique 2, PK425+19

L'épaisseur de la roche saine, qui est représentée par la formation résistante est beaucoup plus épaisse dans ce secteur (Figure III-17). La formation de roches dures étend sur 65m de largeur sans aucune discontinuité. Son épaisseur moyenne est évaluée à 5m.

La couverture stérile est quasiment inexistante, toutefois elle apparaît entre 21 et 30m et variant de 0.5 à 3m d'épaisseur.

On observe sur le terrain de nombreux affleurements de roches.

III.3.3.2- Estimation du volume exploitable

Le seul profil géophysique réalisé n'est pas suffisant pour une modélisation à trois dimensions. Il nous a informé, néanmoins, sur l'épaisseur de la roche massive et sur l'extension latérale de la formation sous la couverture stérile.

a – Carte des affleurements

La carte, en supposant l'homogénéité de la structure suivant la direction de prolongement des affleurements, nous serve de base sur le calcul du volume (figure III-18).

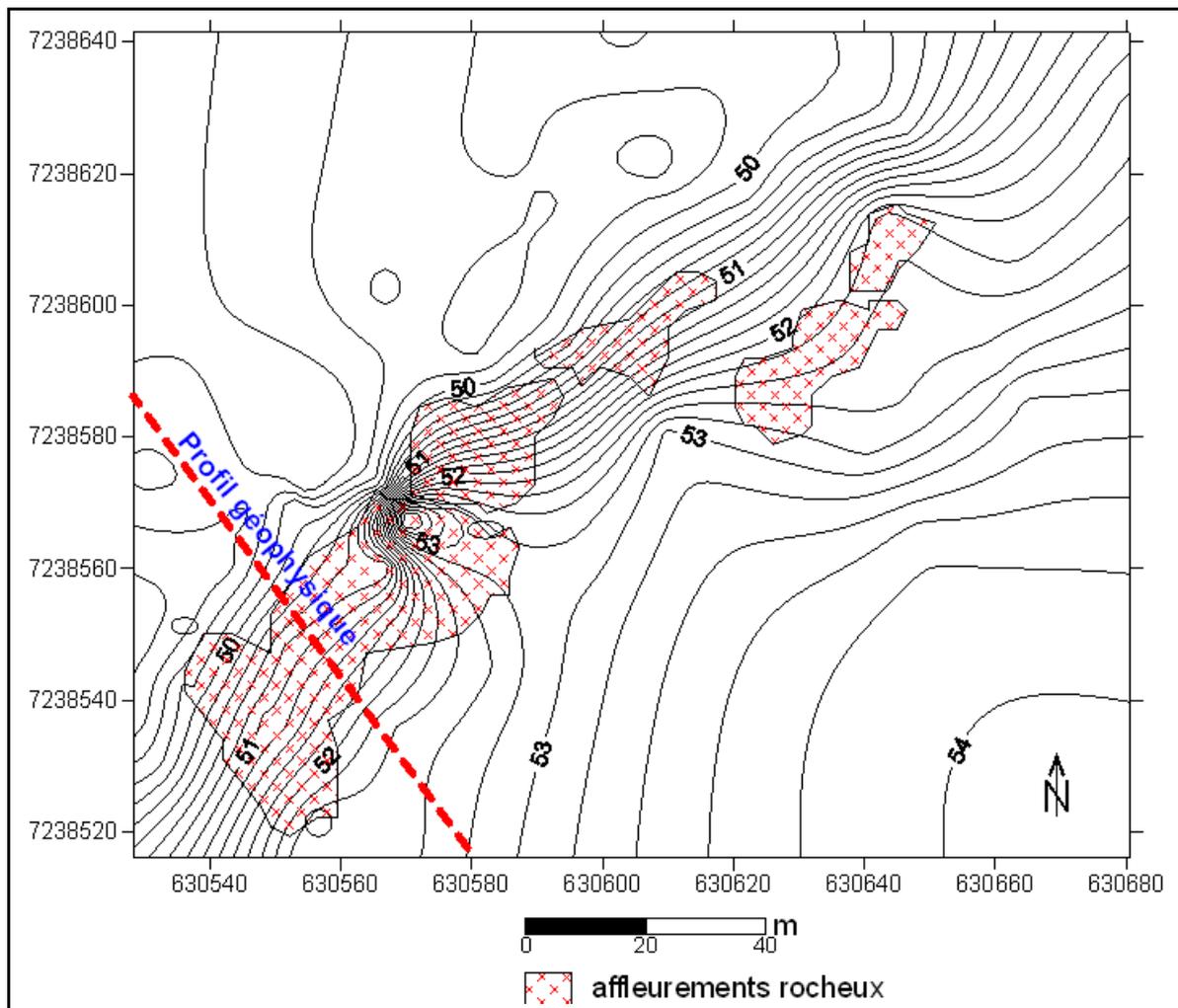


Figure III-18 : Carte des affleurements, Ereheta A

b- Calcul du volume exploitable

L'estimation a été faite en calculant le volume occupé par la limite de la roche.

- Longueur occupée par les roches affleurantes : $L = 100\text{m}$
- Largeur déduite de la coupe géophysique : $l = 65\text{m}$
- Epaisseur observée sur la coupe géophysique : $e = 5\text{m}$

 Le volume estimé $V = L \times l \times e = 32\,500\text{m}^3$

La considération géologique, les coupes géoélectrique et la cartographie électrique nous ont permis de délimiter la zone à roche saine affleurante et dans le sous-sol. Les différentes situations (couverture stérile, altérabilité, épaisseur de la roche, ...etc) nous ont conduit à la détermination du secteur intéressant au futur exploitation.

Par ailleurs, les altérations sont vraiment différentes d'un site à un autre. Elle se développe dans l'espace et on a observé qu'elle est importante même sous l'affleurement. Le gisement des roches étudié n'est donc pas homogène. La roche saine est alors limitée en volume.

.Le tableau 3 résume les traits essentiels sur les trois sites étudiés :

Secteur		Andalamby	Ankilibobo	Ereheta A	Ereheta B	
Situation du gisement	PK Accès	182	325	425	425	
	Distance (m)	5	20 000	19 000	19 000	
Direction		N40	N80	-	-	
Matériau		Léptynite à grenat	Basalte+ Gneiss à pyroxène	Rhyolite	Rhyolite	
Superficie de l'espace carrière (surface topographique en m ²)		11 400	18 000	11 200	9 800	
Puissance moyenne potentiellement exploitable (m)		8	8	2	5	Réserve total
Réserve estimée potentiellement exploitable (m ³)		37 600	318 000	12 800	32 500	400 900

Tableau 3 : Tableau technique des trois carrières

CONCLUSION GENERALE

Le stage, au sein de la société SGDM, m'a permis d'élargir les connaissances que j'ai acquises au cours des trois années d'étude à l'IOGA. Il s'agit d'un travail de reconnaissance géophysique sur les carrières du sud de Madagascar, plus précisément entre Betroka et Amboasary.

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a pour principal objectif de s'assurer la représentativité des mesures réalisées qui serviront à la caractérisation globale des sites.

Trois sites ont fait l'objet de prospection géophysique utilisant la technique d'imagerie électrique et du levé topographique. Les buts de ce travail étaient : de mettre au point la technique d'interprétation géophysique à l'estimation volumétrique de roche massive, de reconnaître l'éventuelle discontinuité en profondeur des structures.

Les résultats obtenus, après amélioration de la technique, mettent en évidence la précision apportée par la méthode de l'imagerie électrique et la technique de calcul utilisé.

De plus, la modélisation en trois dimensions des sites a permis de localiser avec plus d'aisance les réserves intéressantes.

Malgré l'insuffisance des données, on n'a pas pu présenter certains blocs à trois dimensions, cas des deux sites d'Ereheta.

Néanmoins, on peut avancer que l'application jointe du panneau électrique et de la topographie a atteint ses objectifs. De telle application peut aussi être mise en œuvre dans les autres régions de Madagascar où les besoins en matière de construction, effectivement comme les roches d'empierrement, se font sentir.

Bien que le choix du dispositif soit tributaire de la structure à imager ainsi que de la formation dans laquelle il est implanté, quelques suggestions peuvent être données. Celles-ci auraient sûrement encore amélioré la qualité de ce travail.

- Exécuter plus de profils couvrant la totalité du secteur à étudier,
- Tester d'autres dispositifs avec un recouvrement plus grand et en particulier le Wenner-Schlumberger. Il a en effet des qualités intermédiaires dans la détection des structures horizontales et verticales ainsi qu'un rapport signal sur bruit élevé.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRÉ D., 2002.** Prospection électrique à 2D sur le site de la villa gallo-romaine d'Orbe-Boscéaz, Travail de diplôme.
- BATTISTINI R., 1964.** L'extrême Sud de Madagascar : étude géomorphologique. Tome I : le relief de l'intérieur. Thèse de Doctorat, Université de Madagascar.
- BESAIRIE H., 1948.** L'extrême Sud et Sud-Sud Est (premier et second volume), (Service géologique Antananarivo)
- BESAIRIE H., 1973.** Précis de géologie de Madagascar. Imprimerie Nationale
- CHOUTEAU M., 1999.** Géophysique appliquée II- Méthodes électriques
- COULIBALY A. (MALI), 2004.** Contribution à l'étude de la sécheresse et de l'aridité dans le Sud de Madagascar.
- DAHLIN T., LOKE M.H., 1997.** Quasi-3D Resistivity Imaging - Mapping of three dimensional structures using two dimensional DC Resistivity techniques, Environmental & Engineering Geophysical Society, 3rd Meeting
- FAMANTANANTSOANIRINA M. R., 2004.** Etude de la sensibilité des dispositifs Wenner, Wenner – Schlumberger et Dipôle- dipôle en prospection électrique. Rapport de stage DEA, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo
- GIROUX B., 1999.** Résistivité électrique des roches et minéraux.
- LOKE M. H., BARKER R.D., 1996a.** Rapid left-squares inversion of apparent resistivity pseudosection by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting 44, n°1: pp 131-152.
- LOKE M. H. and DAHLIN, 1997.** A combined Gauss-Newton and quasi-Newton inversion method for the interpretation of apparent resistivity pseudosection.
- LOKE M. H., 2000.** Topographic modelling in electrical imaging inversion.
- MORIN A., 1997.** Cours topographie.
- RABEMANANA V., 2002.** Origine et caractérisation de la salinité des eaux dans les aquifères de socle : cas de la région de l'Androy (Sud de Madagascar). Thèse de doctorat de 3ème cycle en Sciences de la terre, Université de Paris VI.
- RALAMBOSON H. L., 1999,** Contribution à l'exploitation du gisement de pegmatites d'Ambatondrabary (Soavinandriana-Itasy)
- RAMANANTSOA A. H., 2000.** Prospections électriques à 1D et 2D. Application à l'étude des formations calcaires de Mahaleotse (Toliara) et des formations altérées du socle cristallin à Antananarivo ville. Rapport de stage DEA, faculté des sciences, Université d'Antananarivo.
- RAMIANDRASOA D. H., 2004.** Etude de préféabilité de l'exploitation d'une carrière de granite sans l'utilisation des explosifs (Diplôme d'ingénieur)

RAVELOJAONA F. H., 2004. Etude de préfaisabilité de l'exploitation d'une carrière de granite de la région d'Ambatomirahavavy (Diplôme d'ingénieur)

ROY A., APPARAO A., 1971. Depth of investigation in direct current methods, *Geophysics*, 36, pp 943-959.

SEGUIN M. K., 1971. La géophysique et les propriétés physiques des roches, in : les presses de l'Université Laval. Québec.

WINDLEY B. F., RAZAFINIPARANY A., RAZAKAMANANA T., (1994). Tectonic framework of the Precambrian of Madagascar and its connections, a review and reappraisal. *Geologische Rundschau*.

ANNEXE 1

1-Methode de lissage par contrainte

Toutes les méthodes d'inversion cherchent un modèle de sous-sol ayant la même réponse que celle des valeurs expérimentales. Le programme RES2DINV utilise une méthode itérative. En commençant du modèle initial, réaliser grâce au modèle de différence fini, il essaie de trouver un modèle amélioré où les valeurs de résistivités apparentes calculées sont proches des valeurs mesurées. Une des méthodes d'optimisation est la méthode de lissage par contrainte ou «Smoothness constrained method» (de Groot-Hedlin et Constable, 1990). Son expression mathématique est :

$$(J^T J + uF) d = J^T g - u Fr$$

où: F= matrice de lissage

J= matrice de Jacobi des dérivées partielles

r= vecteur contenant le logarithme des valeurs de résistivité

u= damping factor ou facteur d'atténuation

d= vecteur de perturbation de modèle

g= vecteur de mésentente

Le vecteur de mésentente, g, contient la différence entre les valeurs calculées et mesurées de résistivité apparente. La magnitude de ce vecteur s'exprime en valeur RMS (Root Mean Square). La méthode cherche à diminuer cette quantité pour trouver un meilleur modèle après chaque itération. Le vecteur de perturbation, d, est le changement dans les valeurs de résistivité apparente calculée utilisant l'expression mathématique précédente et les résultats sont normalement dans le modèle amélioré. Le « damping factor » ou facteur d'atténuation 'u' contrôle le poids donné au modèle lissage dans le processus de l'inversion.

2-Quelques paramètres d'inversion

Il est possible, dans le programme d'inversion, de modifier différents paramètres afin de tenir compte des conditions de terrain. On va décrire dans ce paragraphe les principaux points importants.

Le « *damping factor* » est un paramètre permettant de tenir compte du bruit de fond. Pour une acquisition de terrain, il est plus élevé. Si ce paramètre est sous-estimé, le processus d'inversion devient instable et empêche toute convergence. Le surestimer aurait pour effet de lisser nos anomalies et ainsi de rendre notre modèle moins précis. Le programme possède en outre une option qui permet d'optimiser le bruit de fond.

Pour donner un modèle en résistivités vraies, le logiciel a besoin d'un certain nombre d'itérations. Généralement, il oscille entre 3 et 6. Ce n'est pas forcément le profil qui a le plus grand nombre d'itérations qui est le plus juste géologiquement ou archéologiquement. En effet, à partir d'un certain nombre d'itérations, l'erreur (RMS) du modèle ne diminue presque plus. Le programme a alors tendance à prendre des valeurs extrêmes afin d'améliorer le modèle de quelques dixièmes de pour-cent. Le modèle devient donc plus juste mathématiquement, mais aberrant du point de vue géologique.

La résolution des méthodes électriques décroît avec la profondeur. En effet, pour avoir une influence sur les mesures, un bloc profond devra être plus grand, ce qui diminue la résolution. On peut choisir une augmentation de la taille des blocs (« *Thickness of model layers* ») de 10% (= 8 niveaux d'acquisition) ou 25% (> 8 niveaux d'acquisition), ceci en fonction du nombre de niveaux d'acquisition. Il est aussi possible de choisir manuellement l'épaisseur du premier niveau de blocs ainsi que l'augmentation en fonction de la profondeur.

Le processus d'inversion se sert d'une matrice pour calculer les valeurs de la résistivité vraie. Cette matrice peut être estimée par la méthode des moindres carrés ou recalculée après chaque itération. Le fait de recalculer la matrice après chaque itération permet de donner un modèle plus précis, mais demande aussi un temps de calcul plus long. Il est donc conseillé d'estimer une première fois cette matrice lors des acquisitions de terrain afin d'avoir une idée du profil, puis de la recalculer ultérieurement en vue d'un traitement définitif.

3- Traitement des données du panneau avant l'inversion

Les données brutes sortant du résistivimètre doivent être traitées avant toute utilisation. En effet, elles contiennent les valeurs de la résistivité apparente, l'emplacement des électrodes de mesure, la valeur de chargeabilité, ainsi que d'autres paramètres moins importants. Il permet aussi de se soustraire des valeurs négatives (dus par exemple à des courants vagabonds ou à un mauvais contact entre le sol et les électrodes) ainsi que des valeurs dont l'erreur dépasse une limite fixée. Le fichier d'acquisition peut ensuite être lu par le programme Res2Dinv. Il est possible, dans ce programme, de représenter géométriquement les points de mesure (« *Exterminate bad data points* » dans le logiciel Res2Dinv). Cette représentation place les points de mesure par niveau d'acquisition avec une échelle très restreinte. Ce type de représentation fait ressortir les points dont les résistivités sont très fortes ou faibles par rapport à leurs voisines. Un changement aussi rapide des valeurs ne pouvant être dû à un phénomène géologique, on se doit de les enlever, afin qu'elle ne faussent pas les résultats de l'inversion. Ces mesures aberrantes sont de deux types : le premier est aléatoire (Figure 1) et le deuxième systématique (Figure 2). Les erreurs du premier type sont dues souvent à des courants aléatoires, il est difficile de faire deux mesures successives identiques. Les erreurs du

deuxième type sont dues à un phénomène plus évident. Les électrodes contiennent des circuits qui permettent à cette dernière de jouer le rôle d'électrode d'injection du courant ou de mesure du potentiel. Elles contiennent donc des circuits électroniques ainsi que des connections qui peuvent devenir défectueux à la suite d'un mauvais traitement. Ceci implique que chaque fois que l'électrode incriminée est impliquée dans une mesure, la valeur obtenue sera aberrante. Ce phénomène se remarque très bien sur la Figure 2 où les valeurs aberrantes se disposent selon plusieurs lignes qui convergent vers l'électrode incriminée (électrode N°10 à 9 mètres, Figure.2). On constate souvent une absence de point de mesure le long de ces lignes. Ce manque de données est dû à deux raisons principales. Premièrement, la valeur de cette mesure peut être négative et deuxièmement son erreur dépasse généralement 1,5%. Dans ces deux cas, le programme « *Swiftenv* » supprime ces valeurs. Il en résulte donc une absence de données aux endroits susmentionnés.

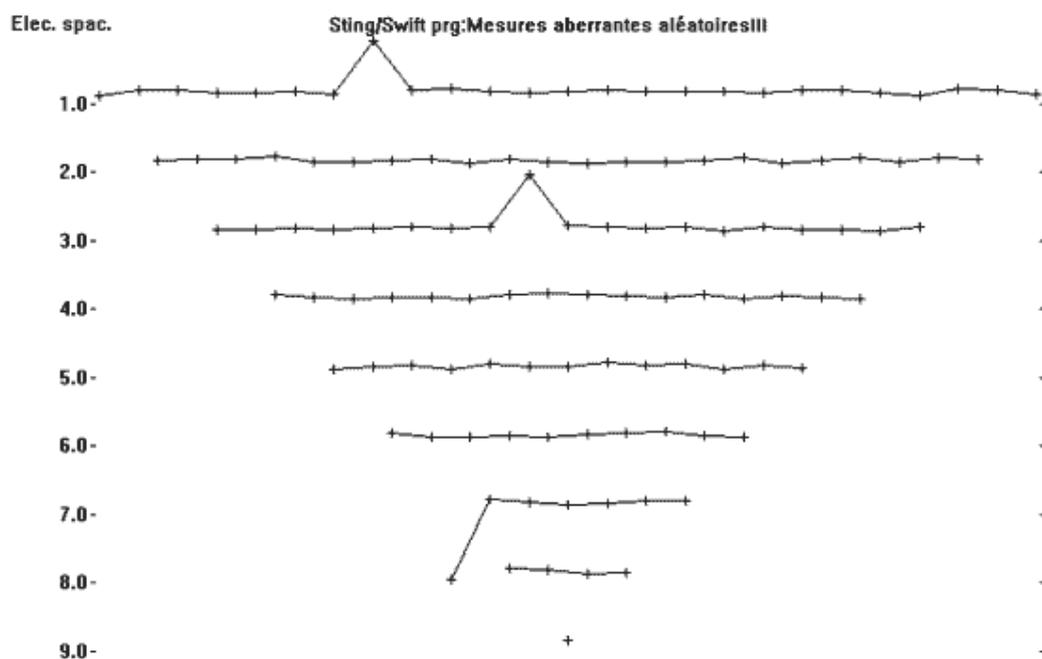


Figure 1- Représentation géométrique des mesures aberrantes aléatoires dans les fichiers d'acquisition.

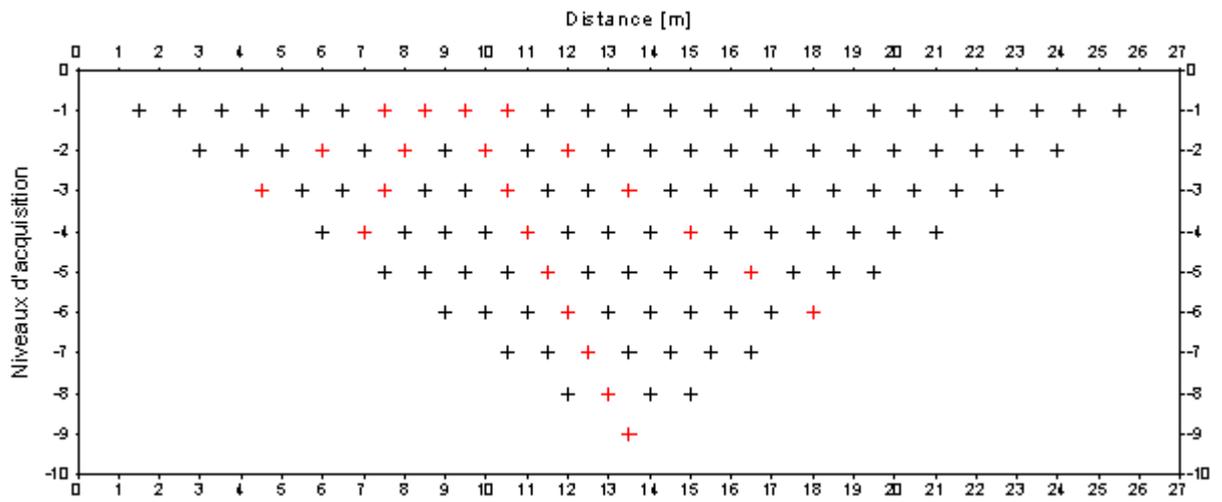


Figure 2- Représentation géométrique des mesures aberrantes systématiques dans les fichiers d'acquisition.

ANNEXE 2

LE KRIGEAGE

1-Définition du krigeage

Le krigeage est une technique qui consiste à trouver la meilleure estimation possible de la teneur d'un panneau, compte tenu des informations disponibles au voisinage, c'est à dire des teneurs des différents échantillons qui ont été prélevés, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur du panneau que l'on veut estimer.

2-Principe du krigeage

Le krigeage consiste à réaliser une pondération en attribuant un poids à la teneur de chaque échantillon. On calcule ensuite ces poids de façon à rendre minimale la variance d'estimation résultante, correspondant aux caractéristiques géométriques du gisement comme les formes, les dimensions et implantation relative du panneau et des échantillons.

Généralement, le krigeage attribuera des poids faibles aux échantillons éloignés, et inversement. Il est nécessaire de faire certaines hypothèses sur les caractéristiques géostatistiques du gisement étudié pour pouvoir résoudre le problème de krigeage.

On suppose que le gisement est géostatistiquement homogène c'est à dire que les teneurs, à l'intérieur de ce gisement, considérées comme une variable régionalisée $z(x)$, peuvent être interprétées comme une réalisation d'un schéma intrinsèque. Cette hypothèse d'homogénéité est fondamentale car aucun krigeage rigoureux n'est possible entre des portions hétérogènes d'un même gisement. La seconde hypothèse, qui est moins fondamentale, concerne l'isotropie. On la considère ainsi car certains types d'anisotropie, comme l'anisotropie zonale et l'anisotropie géométrique, fréquents en pratique, peuvent être ramenés à un modèle isotrope.

3-Les équations générales du krigeage

L'intérêt du krigeage découle de sa définition car en minimisant la variance d'estimation, on est sûr de tirer profit au maximum des informations dont on dispose, autrement dit, obtenir l'estimation la plus précise possible du gisement.

Dans les problèmes de krigeage, le terme du meilleur estimateur signifie que :

- l'estimation est sans biais ;
- la variance d'estimation est minimale ;

Pour établir les équations générales du krigeage, désignons par z_i les valeurs données disponibles et par z_k^* l'estimateur en question.

z_k^* étant la combinaison linéaire des z_i . Elle s'exprime suivant la relation suivante :

$$z_k^* = \sum_i \lambda_i z_i$$

La première condition signifie que l'erreur $z_i - z_k^*$ doit avoir une espérance nulle.

$$E(z - z_k^*) = E(z) - E\left(\sum_i \lambda_i z_i\right) = E(z) - \sum_i \lambda_i E(z_i)$$

En admettant l'hypothèse de stationnarité, on a :

$$E(z) = m = E(z_i)$$

Ce qui entraîne que :

$$E(z - z_k^*) = m - \sum_i \lambda_i m = 0 \Rightarrow m(1 - \sum_i \lambda_i) = 0$$

La condition de l'estimation sans biais se traduit donc par :

$$\boxed{\sum_i \lambda_i = 1}$$

La deuxième condition exprimant la variance minimale se traduit par l'expression :

$$\text{Var}[z_v - z_k^*] = E[z_v - z_k^*]^2 \quad \text{minimum}$$

En introduisant la formule de Lagrange, on peut écrire :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Var}(z - z_k^*) \text{ minimum} \\ \sum_i \lambda_i = 1 \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Var}(z_v - z_k^*) + u(\sum_i \lambda_i - 1) \text{ minimum (1)} \\ \sum_i \lambda_i = 1 \end{array} \right. \quad (2)$$

u étant le paramètre de Lagrange.

En calculant les dérivées partielles de l'expression (1) par rapport à λ_i et en égalisant à zéro, on obtient la condition de « minimum ». Il s'agit donc d'optimiser la variance sous contrainte

$$: \quad \sum_i \lambda_i = 1$$

On montre que ce problème peut se présenter sous la forme d'un système d'équations linéaires dit : « Système de krigeage ».

$$(I) \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n \lambda_j \bar{\gamma}(v_i, v_j) + u = \bar{\gamma}(v_i, V) \quad i \in 1 \dots n \quad (3) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (4) \end{array} \right.$$

où v_i et v_j sont les supports des informations ;

V étant l'étendue du volume inconnu (volume du panneau à estimer) ;

u le paramètre de Lagrange ;

$\bar{\gamma}$ la valeur moyenne du variogramme quand les extrémités du vecteur \vec{h} décrivent indépendamment v_i et v_j ou v_i et V .

On peut écrire le système de krigeage sous la forme matricielle suivante

$$\begin{matrix}
 \left[\begin{array}{cccccccc}
 \bar{\gamma}(v_1, v_1) & \bar{\gamma}(v_1, v_2) & \bar{\gamma}(v_1, v_3) & \cdots & \bar{\gamma}(v_1, v_i) & \cdots & \bar{\gamma}(v_1, v_n) & 1 \\
 \bar{\gamma}(v_2, v_1) & \bar{\gamma}(v_2, v_2) & \bar{\gamma}(v_2, v_3) & \cdots & \bar{\gamma}(v_2, v_i) & \cdots & \bar{\gamma}(v_2, v_n) & 1 \\
 \vdots & \vdots \\
 \bar{\gamma}(v_j, v_1) & \bar{\gamma}(v_j, v_2) & \bar{\gamma}(v_j, v_3) & \cdots & \bar{\gamma}(v_j, v_i) & \cdots & \bar{\gamma}(v_j, v_n) & 1 \\
 \vdots & \vdots \\
 \bar{\gamma}(v_n, v_1) & \bar{\gamma}(v_n, v_2) & \bar{\gamma}(v_n, v_3) & \cdots & \bar{\gamma}(v_n, v_i) & \cdots & \bar{\gamma}(v_n, v_n) & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0
 \end{array} \right]
 \begin{matrix}
 \left[\begin{array}{c}
 \lambda_1 \\
 \lambda_2 \\
 \vdots \\
 \lambda_j \\
 \vdots \\
 \lambda_n \\
 u
 \end{array} \right]
 =
 \begin{matrix}
 \left[\begin{array}{c}
 \bar{\gamma}(v_1, V) \\
 \bar{\gamma}(v_2, V) \\
 \vdots \\
 \bar{\gamma}(v_j, V) \\
 \vdots \\
 \bar{\gamma}(v_n, V) \\
 1
 \end{array} \right]
 \end{matrix}
 \end{matrix}
 \end{matrix}
 \tag{G} \qquad \qquad \qquad \tag{\Lambda} \qquad \qquad \tag{M}$$

(G) est une matrice symétrique calculable par la position et la valeur des échantillons. (γ

_{ii} = effet de pépité éventuel) ;

(Λ) est le vecteur des inconnues λ_i et u ;

(M) est le vecteur dont les composantes sont les variogrammes moyens entre le bloc à estimer et les échantillons utilisés pour l'estimation.

L'inversion de (G) nous donne la résolution du système de krigeage en donnant les valeurs de (Λ).

$$\boxed{(\Lambda) = (G)^{-1} \times (M)} \tag{5}$$

En pratique, ces calculs nécessitent l'utilisation d'un ordinateur. La variance de krigeage ou la variance de l'erreur ($z - z^*_k$) est donnée par la relation :

$$\boxed{\sigma_k^2 = 2\lambda_i \bar{\gamma}(v_i, V) - \bar{\gamma}(V, V) + u} \tag{6}$$

ANNEXE 3

PRINCIPES TOPOGRAPHIQUES

1-Détermination des altitudes

Les méthodes de détermination des altitudes ont connu un grand essor pendant les grandes périodes d'urbanisation et de viabilisation des espaces habités. L'objectif de ces mesures est de connaître précisément l'altitude de points, généralement pour assurer les écoulements. Par conséquent, la considération d'un point de référence est obligatoire.

Les techniques de détermination des altitudes diffèrent entre elles, d'une part par, selon le type d'instrument utilisé et la méthodologie, et d'autre part, selon la précision qu'on veut atteindre avec la manipulation.

a- Nivellement direct ou géométrique

Les méthodes de nivellement direct sont le plus efficaces pour déterminer l'altitude de points particuliers. La précision des déterminations dépend du matériel employé mais aussi et surtout, des méthodes utilisées. Il en existe beaucoup mais les principaux sont :

Nivellement par rayonnement : la première mesure est effectuée sur un point d'altitude connue, de façon à déterminer l'altitude du plan de visée. A partir de là, toutes les altitudes sont déterminées par différence par rapport à ce plan. Cette méthode permet de lever rapidement un semis de points matérialisés (sondages, points de berges, de fonds...).

-Nivellement d'itinéraires par cheminement : c'est la méthode la plus couramment employée pour déterminer les altitudes de points matérialisés, non situés à une même distance d'une seule station d'appareil.

Le principe du nivellement géométrique est la mesure d'une différence d'altitude, ou d'une succession de différences, par rapport à un plan ou un point connu. Il est réalisé au niveau, et la précision des mesures peut aller de 1/10^{ème} de mm à quelques mm, selon les matériels et protocoles de mis en œuvre.

De manière générale, la relation entre l'altitude Z_{R1} du point de départ R1 et Z_{R2} du point d'arrivée R2 d'un nivellement par cheminement est donné par la relation :

$$Z_{R2} = Z_{R1} + \sum (AR - AV)$$

où AR représente les lectures Arrière (en rapport à la direction de l'itinéraire), et AV les lectures Avant.

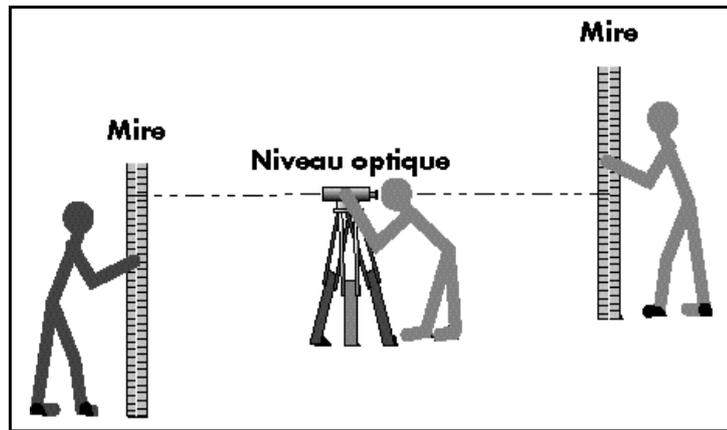


Figure 3 : Acquisition de mesure en topographie

b- Nivellement indirect ou trigonométrique

A la différence, le nivellement trigonométrique est réalisé par calcul de la dénivelée à partir de la distance oblique entre les points, et l'angle (également appelé distance) zénithal. Le principe général est explicité par la figure ci-dessous.

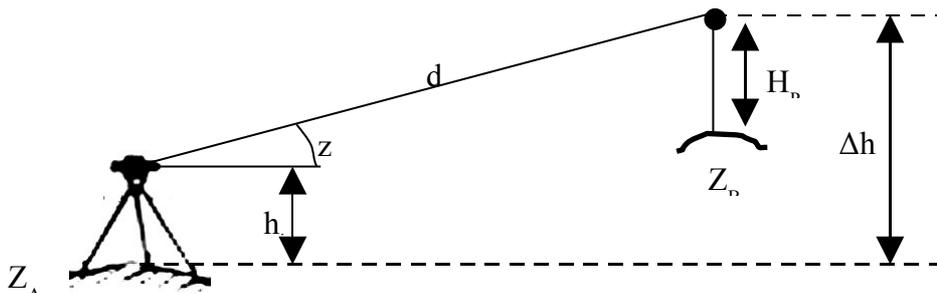


Figure 4: Principe du nivellement trigonométrique

Selon ce schéma, l'altitude du point B peut être reliée à celle du point A par la relation :

$$Z_B = Z_A + h + d \cdot \sin(z) - H_P$$

Nous avons précédemment affirmé que la méthode du nivellement direct ou géométrique était beaucoup plus précise que celle-ci. Cela vient essentiellement du mode de détermination des différentes variables : h_i est mesuré au ruban (au centimètre, voire au demi centimètre près) comme la hauteur de prisme H_P , puis, interviennent les précisions de mesure sur la distance oblique et l'angle vertical. Il est néanmoins très utile pour déterminer la hauteur de point inaccessible.

Le nivellement trigonométrique peut être employé selon la méthodologie du cheminement. Ainsi, il n'est pas nécessaire de déterminer ni la hauteur d'appareil h_i , ni la hauteur de prisme (qui doit cependant rester constante pour une même station). On n'exploite alors que la distance oblique et la distance zénithale.

2-Détermination des coordonnées

Nous sommes à présent capables de déterminer, plus ou moins précisément, l'altitude de points particuliers du terrain. Il s'agit maintenant de les localiser en planimétrie.

a- Calcul d'orientation et de distances

Nous abordons ici quelques rappels sur le calcul d'angles et de distances à partir des coordonnées de points.

Les distances

Le calcul de la distance, horizontale ou non, entre deux points de coordonnées connues est extrêmement simple puisqu'il résulte de **l'application stricte de la géométrie, du théorème de Pythagore**. On rappelle ici la formule générale de calcul de la distance à partir des coordonnées tridimensionnelles des points A et B :

$$d_A^B = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2}$$

De la même façon, la distance horizontale entre ces points A et B peut être obtenue (I.10) :

$$d_H = d \cdot \cos(z)$$

Le gisement

On définit le gisement V_A^B comme l'**angle**, dans le plan horizontal, entre un vecteur, défini par deux points connus en coordonnées, et la direction du **nord cartographique**. Il est compté dans le **sens horaire**.

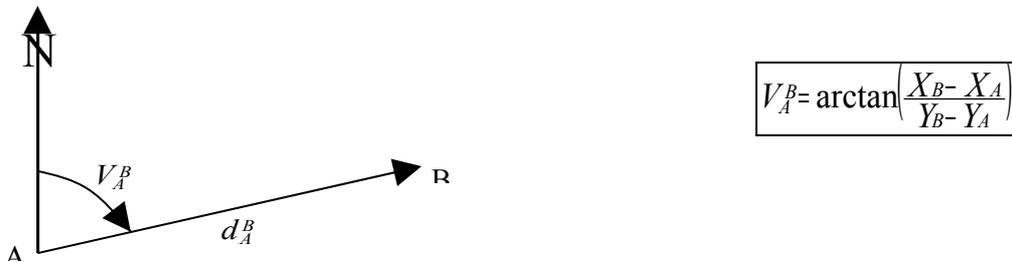


Figure 5 : Définition du gisement

b- La transmission de gisement

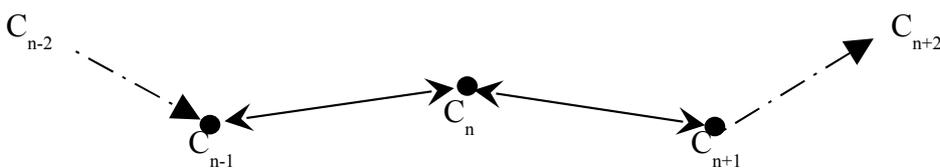


Figure 6: Cheminement polygonal

On suppose que le gisement du premier segment, entre les deux premiers points C_{n-2} et C_{n-1} du cheminement est connu. Ainsi, le gisement du segment suivant est donné par la relation :

$$V_{C_n}^{C_{n+1}} = V_{C_{n-1}}^{C_n} + (L_{C_n}^{C_{n+1}} - L_{C_n}^{C_{n-1}}) \pm 200 \text{ gon}$$

Par conséquent, tout cheminement angulaire est calculé de proche en proche à partir des lectures L sur le cercle horizontal, et toujours à 200 grades près.

c- Orientation de cheminements

Un théodolite est muni d'un dispositif de mesure des angles horizontaux. Afin de pouvoir déterminer les coordonnées de points à partir de points connus, il est nécessaire de déterminer l'orientation du zéro du cercle horizontal. Ce calcul est appelé la détermination du V_0 de la station.

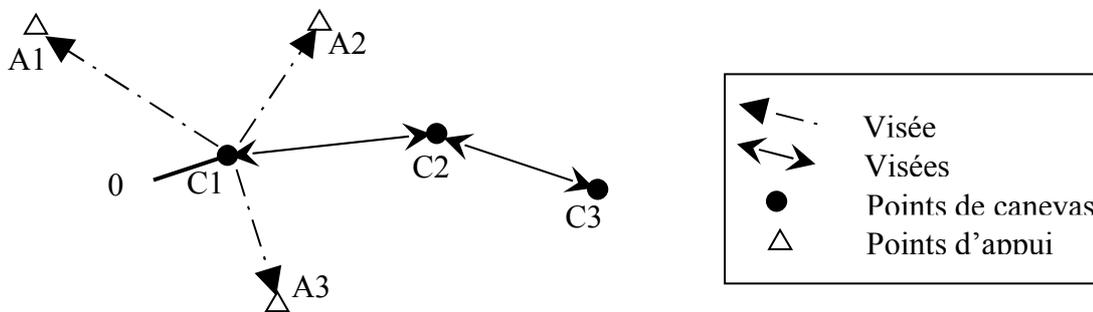


Figure 7: Orientation de canevas

Le cas le plus simple se trouve lorsque le premier point C_1 est connu en coordonnées. On peut ainsi calculer les gisements des segments C_1-A_i facilement, et les rattacher au gisement de la visée à 0 gon sur le cercle horizontal. Pour chaque visée sur un point d'appui, on peut déterminer un V_{0i} , et leur moyenne donnera la V_0 de la station.

$$V_{0i} = V_{C_1}^{A_i} - L_{C_1}^{A_i}$$

$$V_0 = \frac{\sum_{i=1}^n V_{0i}}{n}$$

3- Les points de détails

La théorie voudrait que l'on commence par déterminer les points de canevas puis, lorsque leurs coordonnées sont calculées et vérifiées, on passe seulement au levé des points de détail. Pratiquement, le détail est levé en même temps que la polygonale pour des questions évidentes de rentabilité, même si ces précautions sont parfois prises sur des réalisations de grande envergure.

Nous partirons du principe que la station est correctement orientée : il est recommandé, en début de station de procéder à toutes les **observations sur référence avant de commencer le levé** de détails. Puis en fin de levé, il est souhaitable de réaliser un **contrôle des fermetures** angulaires. Depuis une station orientée, les coordonnées de tout point de détail mesuré peuvent être obtenus par le triplet de formules suivant :

$$X = X_s + d_i \cdot \sin z \cdot \sin(V_0 + H)$$

$$Y = Y_s + d_i \cdot \sin z \cdot \cos(V_0 + H)$$

$$Z = Z_s + d_i \cdot \cos z$$

CALCULS TOPOGRAPHIQUES

Lors des travaux sur terrain, nous avons utilisé la méthode de cheminement utilisant essentiellement des visées directes et inverses. Le calcul de l'Altitude des points à déterminer (**APD**) se base sur l'application des formules suivantes.

$$\mathbf{APD} = \mathbf{APC} \pm \mathbf{DA}$$

Où **APC** et **DA** sont respectivement l'altitude des points connus et la différence d'altitude.

Appelons **ha** la hauteur d'appareil, **hv** la hauteur du voyant, **dn** la dénivelée brute et **dh** la distance horizontale :

Si la visée est directe ascendante i.e $\mathbf{av} < 100\text{grad}$

$$\mathbf{DA} = \mathbf{dn} + (\mathbf{ha} - \mathbf{hv})$$

Si la visée est directe descendante i.e $\mathbf{av} > 100\text{grad}$

$$\mathbf{DA} = -\mathbf{dn} + (\mathbf{ha} - \mathbf{hv})$$

Si la visée est inverse ascendante i.e $\mathbf{av} < 100\text{grad}$

$$\mathbf{DA} = -\mathbf{dn} - (\mathbf{ha} - \mathbf{hv})$$

Si la visée est directe descendante i.e $\mathbf{av} > 100\text{grad}$

$$\mathbf{DA} = \mathbf{dn} - (\mathbf{ha} - \mathbf{hv})$$

Avec :

$\mathbf{dn} = \mathbf{dh} \cdot \sin(100 - \mathbf{av})$ si $100 - \mathbf{av} < 5$ grad ou $\mathbf{dn} = \mathbf{dh} \cdot \tan(100 - \mathbf{av})$ si $100 - \mathbf{av} \geq 5$ grad (pour la visée ascendante)

$\mathbf{dn} = \mathbf{dh} \cdot \sin(\mathbf{av} - 100)$ si $\mathbf{av} - 100 < 5$ grad ou $\mathbf{dn} = \mathbf{dh} \cdot \tan(\mathbf{av} - 100)$ si $\mathbf{av} - 100 \geq 5$ grad (pour la visée descendante)

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES