

## SOMMAIRE

**REMERCIEMENTS**

**LISTE DES FIGURES**

**LISTE DES TABLEAUX**

**GLOSSAIRE**

**LISTE DES ABREVIATIONS**

**INTRODUCTION**

**PROBLEMATIQUE**

**CHAPITRE I : DESCRIPTION DU MILIEU D'ETUDE**

I.1- CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE

I.2- CONTEXTE CLIMATIQUE

I.3- CONTEXTE GEOLOGIQUE

I.4- MILIEU HUMAIN

**CHAPITRE II : BASE METHODOLOGIQUES DE LA PROSPECTION SISMIQUE**

II.1- TECHNIQUE DE LA SISMIQUE REFRACTION

II.2- ACQUISITION DES DONNEES SISMIQUES

II.3- METHODE D'INTERPRETATION

II.4- ESTIMATION DES PARAMETRES PHYSIQUE DU SOUS-SOL.

**Chapitre III : APPLICATION ET INTERPRETATION**

III.1- LES PROFILS SISMIQUES

III.2- METHODES ET LOGICIELS DE TRAITEMENT

III.3-RESULTAT avec PICKWIN<sup>TM</sup>

III.4-RESULTAT avec PLOTREFA

**CONCLUSION**

**RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES**

**ANNEXES**

ANNEXE I : LES ONDES SISMIQUES

ANNEXE II: VITESSE SISMIQUE ET NATURE DES MATERIAUX

## LISTE DES FIGURES

Figure I. 1: Carte de localisation du site d'étude.....	7
Figure I. 2: Moyenne des températures mensuelles maximales et minimales de 2012.....	9
Figure I. 3: Variation de la précipitation pour la station de Fianarantsoa au cours de 2012...	10
Figure I. 4: Carte pluviométrique de la région haute Matsiatra .....	11
Figure I. 5: Carte Géologique de la région Haute Matsiatra .....	15
Figure II. 1: Propagation des ondes coniques .....	23
Figure II. 2: Illustration de propagation des ondes.....	24
Figure II. 3: Géométrie des ondes .....	25
Figure II. 4: Conversion des ondes.....	25
Figure II. 5: Réfraction pour un terrain de deux couches et l'hodochrone correspondante ....	27
Figure II. 6: Géométrie sismique-réfraction sur un plan inclinée .....	28
Figure II. 7: Géométrie sismique-réfraction sur deux réflecteurs horizontaux .....	29
Figure II. 8: Géométrie pour le problème de la sismique-réfraction.....	31
Figure II.9: Géométrie pour le problème de la sismique-réfraction couche inclinée.....	33
Figure II. 10: Illustration de la méthode de sismique réfraction .....	36
Figure II. 11: Sismomètre DAQLINK II.....	37
Figure II. 12: Capteurs de géophones.....	38
Figure II. 13: Diagramme montrant les branchements des différents appareils.....	39
Figure II. 14: Disposition des tirs en sismique réfraction .....	40
Figure II.15: Temps de parcours Tomographique et rayon réfracté entre source récepteur. ...	42
Figure II. 16: Illustration de calcul de temps de parcours par méthode tomographique.....	43
Figure II.17: Exemple d'un cas de couche cachée .....	45
Figure II. 18: Exemple d'un cas d'inversion de vitesses.....	46

Figure III. 1: Emplacement du profil sismique .....	53
Figure III.2: Organigramme des traitements des données sismiques .....	54
Figure III. 3: Organigramme des traitements des données dans Pickwin .....	56
Figure III. 4: Présentation de l'interface Plotrefa.....	57
Figure III. 5: Algorithme générale de la méthode inversion Tomographique.....	58
Figure III. 6: Lecture du fichier .sg2 des films sismique.....	60
Figure III. 7: Pointage du film sismique pour le tir au centre .....	61
Figure III. 8: Les hodochrones du profil P1 (à gauche) et du profil P2 (à droite) .....	62
Figure III.9: Lecture du pointage des premières arrivées du profil P1.....	63
Figure III. 10:Modèle initiale générer par inversion tomographique du profil P2.....	64
Figure III. 12:Hodochrones observées et calculées du profil du profil P2.....	65
Figure III. 13:Hodochrones observées et calculées du profil P1.....	66
Figure III. 14:Dromochroniques calculées du profil P2.....	67
Figure III.15: Coupe de vitesse sismique $V_p$ (m/s) Profil P1 .....	68
Figure III.16: Profils de couches vitesses par conversion du profil P1 .....	69
Figure III. 17:Coupe sismique $V_p$ (m/s) par inversion Tomographique Profil 2.....	70
Figure III. 18:Profils de couches vitesses par conversion du profil P2.....	72
Figure A.1: Schéma d'une onde de compression P .....	iv
Figure A.2: Caractéristique de l'Onde S .....	iv
Figure A.3: Onde de Love.....	v
Figure A.4: Onde de Rayleigh.....	v
Figure A.5: Onde P, onde S et ondes de surface .....	v
Figure A.6: Nature des matériaux en fonction de la vitesse sismique .....	ix

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1: occupation du sol .....	13
Tableau I. 2: Couvertures végétales .....	14
Tableau I. 3: Effectif de la population pour chaque Fokontany .....	17
Tableau III. 1: Vitesse de l'onde P et types de sols du profil P1 .....	69
Tableau III. 2: Vitesse de l'onde P et types de sols du profil P2 .....	71
Tableau A. 1: Indication des puissances en fonction des profondeurs d'investigation.....	vi
Tableau A. 2: Références vitesses et densités des ondes-roches.....	x
Tableau A. 3: Autre référence vitesse et nature des roches.....	x

## GLOSSAIRE

<u>Courbe d'Hodochrone:</u>	Courbe de temps d'arrivée de l'onde P réfractée pointée
<b><u>Coupe sismique:</u></b>	Représentation des sections de vitesse sous forme des couches dans le plan Profondeur-distance
<u>Dromochronique:</u>	Hodochrone d'une onde directe ou réfractée.
<b><u>Onde :</u></b>	Une onde est un phénomène de propagation d'une perturbation sans transport de matière.
<u>Offset:</u>	Distance source-récepteur.
<b><u>Géophone:</u></b>	Récepteur des ondes sismiques, correspondant à un capteur qui enregistre le mouvement du sol. Ou instrument qui transforme l'énergie sismique en voltage électrique.
<u>Impédance sismique:</u>	Produit de la vitesse des ondes sismiques et de la masse volumique. Elle est généralement mesurée en $\text{g/cm}^3 \text{ m/s}$ .
<b><u>Inversion Tomographique:</u></b>	
<u>Lithologie:</u>	Nature des roches formant une couche géologique.
<b><u>Profondeur d'investigation:</u></b>	Profondeur maximale exploitable
Signal Sismique	Représentation en fonction du temps du mouvement du sol produit par un ébranlement (provoqué ou non).

## LISTE DES ABREVIATIONS

**A/N** : Analogique/Numérique  
**LP** : Logistique Pétrolier  
**ONG** : Organisation Non Gouvernementale  
**P1** : Profil P1  
**P2** : Profil P2  
**RN 7** : Route Nationale numéro 7  
**SEG** : Society of Exploration Geophysicists  
**2D** : Deux dimensions  
**SW** : Surface Wave  
**WEQ** : Wave Equation

## **INTRODUCTION**

Les quelques premiers mètres de terrain du sol constituent la subsurface. C'est un milieu extrêmement complexe dans lequel les ondes sismiques de volume et de surface, sont réfractées, diffractées et réfléchies. La caractérisation de la subsurface d'un point de vue mécanique et structurel constitue un véritable challenge parmi les défis de l'ingénierie environnementale et du génie civil. L'intérêt de ces études au sein de la communauté scientifique a permis le développement de plusieurs approches basées sur les méthodes géophysiques, en particulier les méthodes de prospection sismique.

C'est dans ce contexte que plusieurs études se sont intéressées à l'exploitation des diverses techniques de traitement sismique pour la caractérisation des formations : la sismique réflexion et la sismique réfraction. Chaque technique utilise une partie de l'onde sismique dans le processus de traitement et fournit par conséquent des informations relatives aux sous-sols. C'est ainsi que la sismique réflexion s'intéresse à la réflexion des ondes P avec des fréquences élevées et quant à la sismique réfraction, elle est utilisée pour l'étude des premières arrivées, en se basant sur l'inversion des vitesses.

En effet, dans le domaine d'investigation du sous-sol, la sismique réfraction a pour vocation, la localisation des zones de faille ou de cisaillement, analyse des propriétés mécaniques des massifs pour l'édification des grands ouvrages destinés aux travaux publics, la reconnaissance de l'épaisseur des différentes couches reposant sur un terrain plus dur, identifier des contacts géologiques sub-verticaux et la recherche et le suivi de l'évolution de la position du substratum.

Dans le cadre d'une initiative, afin de faire le suivi de la structure du substratum (pendage, fracture...) qui conditionne en majeure partie la direction de l'écoulement souterrain. Une campagne de prospection sismique a été effectuée à AMBALAKELY. Dans ce cas, nous avons adopté la sismique réfraction qui est une méthode adaptée aux reconnaissances à faible et moyenne profondeur (200 m maximum), en réalisant deux profils sismiques globalement perpendiculaires sur le site.

L'exploitation des données ainsi obtenues, nous permettra par la suite de déterminer le sens d'écoulement et de caractériser le substratum. Cette étude, nous permettra de corréler les résultats de la prospection aux événements météorologiques, aux fluctuations de la nappe phréatique et des écoulements superficiels. A long terme, nos données devront être

complétées par d'autres mesures dans le but de réaliser une cartographie 2D du site tant au niveau géométrique qu'au niveau hydrologique.

En termes de recherche, la réalisation de ce mémoire a pour objectif d'apporter des améliorations sur la méthode de traitement des données et de familiariser avec les outils et logiciels de traitements sismiques. C'est pour cette raison que nous avons choisi le thème, intitulé **«APPLICATION DE L'ETUDE DE LA NAPPE SOUTERRAINE A AMBALAKELY PAR APPROCHE SISMIQUE REFRACTION»**.

Le développement de ce thème se fait en trois chapitres : le premier chapitre s'articule autour du contexte général de la zone d'étude, ses aspects géologiques et son contexte socio-économique. La seconde chapitre se rapporte aux bases méthodologiques de la sismique réfraction, l'implantation des travaux géophysiques et aux acquisitions des données. Et enfin, la troisième et dernière chapitre sera consacré à la présentation du logiciel du traitement, aux profils 2D de vitesses obtenues et les interprétations des résultats en combinant la géologie et la géophysique. Notre ouvrage se termine par une conclusion sur ce qu'on peut dire concernant la présente étude.



## PROBLEMATIQUE

En guise de préambule, la formation en génie minéral de ECOLE SUPERIEUR POLYTECHNIQUE d'ANTANANARIVO a pour but de développer chez un étudiant un haut niveau de connaissances, de rigueur intellectuelle, de curiosité scientifique et de créativité nécessaire tant dans les activités professionnelles que dans la recherche scientifique.

En termes de prospection, la sismique s'emploie pour désigner d'une manière générale les vibrations et les secousses, c'est une méthode géophysique, sa théorie est construite à partir de connaissance de l'élasticité, de l'optique géométrique, de la physique vibratoire, du traitement du signal, et enfin de la géologie. Elle est utilisée non seulement, pour connaître la constitution géologique d'une région, les géophysiciens procèdent à diverses mesures de surface mais aussi pour préciser en particulier les courbes de niveau des couches géologiques.

On peut citer quelques problèmes de la méthode sismique au niveau d'acquisition et aux traitements de données obtenues. En ce qui concerne les limites de la méthode sismique, plus particulièrement à la méthode par réfraction, les traitements et le choix des méthodes adoptées constituent la plupart de contraintes majeures une fois que les milieux deviennent plus complexes. Au niveau du traitement les erreurs liées au pointage des premières arrivées des ondes P pour certains signaux de faible amplitude pourraient aboutir à des modèles de vitesse erronés. Et au niveau de l'interprétation du profil 2D beaucoup de problèmes interviennent, comme par exemple manque de contraste et hétérogénéité entre les vitesses sismiques des terrains investigués.

Parmi ces problèmes et les solutions exigées, même si l'acquisition des enregistrements est possible et de bonne qualité, deux points principaux soulèvent des questions dans le cadre de l'étude: Premièrement, les terrains investigués manquent de contraste entre les vitesses sismiques. Le mauvais choix des méthodes nous conduit à des modèles de terrains éloignés de la réalité. La seconde contrainte est que l'inversion n'est pas capable de recréer avec fidélité les dromochroniques pour les profils qui traversent une cassure (ex pente). Dans cette disposition-là, la comparaison entre la courbe temps-distance mesurée et celle calculée montre une forte divergence.

Au vu des problèmes non encore résolus et pour pouvoir reprendre le problème inverse dans le cas de modélisation 2D, une alternative consiste à inverser les formes d'ondes

élastiques et corriger les erreurs dans le domaine espace fréquence à 2 dimensions. Toute information issue de l'onde sismique est ainsi exploitée. La formulation théorique, les tests ainsi que les traitements qui ont fait l'objet de travaux antérieurs constitueront les bases et le point de départ de notre prochain travail de recherche.

Dans le cadre de la recherche des données à traités pour la modélisation, nous avons l'opportunité d'avoir les données des travaux effectués à Ambalakely en adoptant la méthode sismique réfraction. Ainsi, l'étude sismique réfraction comme toutes les méthodes géophysiques nécessitent la description du lieu où l'on fait la prospection et cette description même constitue notre premier chapitre.

CHAPITRE I :  
**DESCRIPTION DU MILIEU  
D'ETUDE**

## I.1- CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE

Pour commencer, cette section comme son intitulé l'indique est réservée à la présentation de la zone d'étude qui a pour objectif de délimiter géographiquement la zone d'intervention dans le cadre de l'étude. Ensuite, il sera question de donner successivement un aperçu des composantes pédologiques, hydrologiques, biologiques et humaines de la zone afin d'établir ses spécificités.

### I.1.1- Situation géographique et administrative

La région de la Haute Matsiatra est délimitée entre 45,51° et 47,41° longitude Est et 20,68° et 22,21° latitude Sud. Administrativement elle est composée par les Districts de Fianarantsoa I, Fianarantsoa II, Ambalavao, Ikalamavony et Ambohimahasoa est relativement vaste et hétérogène. La région haute Matsiatra est limitée au Nord par la région d'Amoron'i Mania, au Sud par la région d'Ihorombe, à l'Est par les régions de Vatovavy et de Manakara, à l'Ouest par les régions du Menabe et du Sud-Ouest.

Le site qui fait l'objet de cette étude est localisé au Nord-Est de la ville de Fianarantsoa. La zone appartient administrativement à la région de Haute Matsiatra, au district de Fianarantsoa II dans le village d'Ambalakely. Il est situé près de la Route Nationale RN7 et elle est centrée géographiquement à la latitude S 21°25'4.02" et à la longitude E 47°10'0.86", selon le système de coordonnées géographiques « WGS 1984 » » (figure. I.1).

Dans le cadre d'un tourisme local, Ambalakely se trouve environ à 11 Km au nord de Fianarantsoa-ville le long de la RN7. On peut y parvenir par voie routière; la commune rurale d'Ambalakely s'étend sur une superficie de 54Km<sup>2</sup>. Elle regroupe 11 Fokontany dont Vohimasina, Ambalakely, Ambalabe, Anteza, Volamena, Miandrifekona, Ampitanandriambola, Ambatolahimavo, Ivoay, Anato, Akondro.

La figure I.1 ci-dessous montre la localisation spatiale de la zone d'étude.

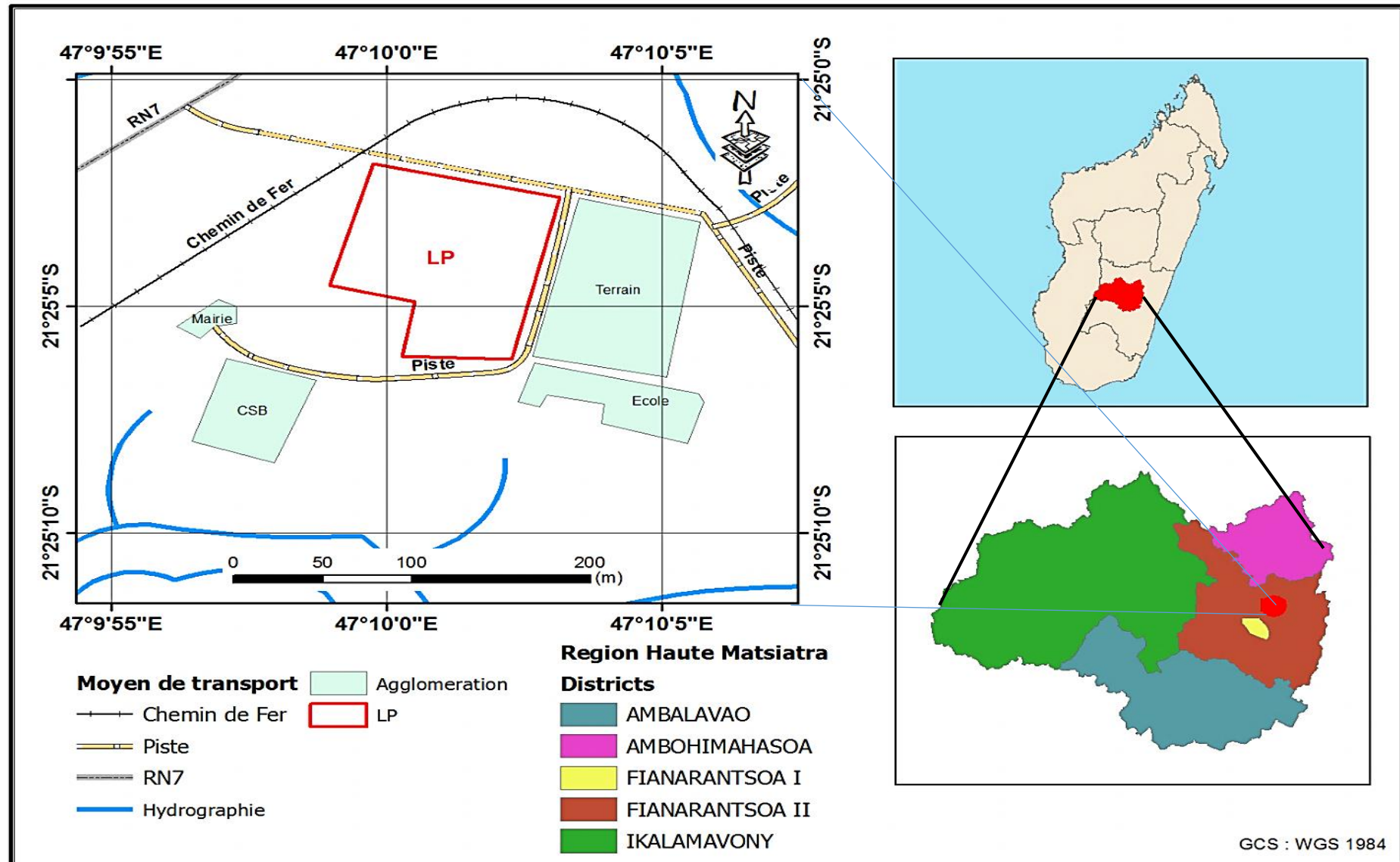


Figure I. 1: Carte de localisation du site d'étude (source : BD 500 FTM / Google Earth)

### I.1.2- Morphologie

Au niveau régional, si l'on considère ces espaces, deux (2) sous-régions se distinguent: **la partie Orientale**, à topographie indécise et **les Hautes Terres centrales**, correspondant à la partie méridionale du pays Betsileo. Densément peuplée, relativement bien desservie par un réseau routier suffisamment ramifié, cette région, à relief tourmenté, offre des paysages de rizières en gradins typiques.

Le pays Betsileo présente un relief montagneux où les pics peuvent dépasser les 2500m, heurté par des massifs vigoureux isolés dont l'altitude moyenne varie de 1000m à 1500m et sillonnés par des dépressions étroites. L'agencement du relief peut se concevoir à partir de l'Andringitra qui s'élève brusquement (Pic Boby : 2600m) au-dessus du seuil de Ranotsara et qui s'étend, le long de la RN7 et la partie méridionale des Hautes Terres Centrales qui correspond à la zone d'affleurement la moins large du socle ancien.

Les terrasses rizicoles constituent une particularité de la région. Pour pallier l'insuffisance des bas-fonds et profitant des possibilités de captage d'eau en hauteur, les paysans ont installé des terrasses irrigables sur les flancs des collines.

### I.1.3- Hydrographie

L'hydrographie de la Région de la Haute Matsiatra est caractérisée par le Bassin versant du MANGOKY. Le réseau hydrographique de ce bassin versant prend sa source dans les régions de la Haute Matsiatra et d'Ihorombe (rivières Manantanana - Zomandao et Ihosy). Sa superficie totale est de 55.750 km<sup>2</sup> et il se déverse dans le canal du Mozambique une fois récupéré par le fleuve MANGOKY.

Du point de vue répartition hydrographique, il est traversé au Nord par la Matsiatra, au centre par la Manantanana, au Sud par la Zomandao (limite avec Ihosy), et d'Est en Ouest par les affluents de la Mangoky.

Les principaux cours d'eau sont : Mitody, Manambaroa et Fanindrona Fisakana traversant Fandriana et Manandriana.

## I.2- CONTEXTE CLIMATIQUE

Bien que Madagascar est dotée d'un climat majoritairement tropical, elle est découpée en cinq régions climatiques à savoir : le Nord et Nord-Ouest, la côte Est allant du Nord-Est au Sud-Est, la partie Ouest, les hautes terres centrales et enfin le partie Sud. Sa position géographique en fait qu'elle est dirigée par les vents Alizés du Sud-Est et les vents du Nord-Ouest. On peut aussi y observer différents microclimats.

Comme notre zone d'étude fait partie du Moyenne-Sud, le climat de la région est du type **tempéré** et on y trouve trois saisons distinctes : La saison sèche commence au mois d'Avril jusqu'au mois de juillet, une saison intermédiaire le mois d'Août jusqu'au mois d'Octobre et la saison pluvieuse s'étale du mois de Novembre au mois de Mars.

### I.2.1- Température

La température est un élément majeur qui contribue à une étude climatique. Elle présente un grand intérêt pour l'évaluation du bilan hydrologique, permettant ainsi de conditionner d'alimentation de la nappe aquifère.

Dans cette même partie, à mesure qu'on descend vers le Sud, on remarque une augmentation des températures jusqu'à 20°C. Les mêmes phénomènes sont observés, aussi bien du centre des hautes terres vers l'Ouest que vers l'Est, respectivement de 16°C à 25°C et de 16°C à 21°C. Le gradient de température est moins élevé dans le sens Nord-Sud que dans les sens Centre-Est ou Centre-Ouest. La région Haute Matsiatra connaît une température moins chaude. En effet, la température moyenne annuelle varie de 14°C à 25,5° C selon la distribution inter-annuelle des températures du service Météorologie Ampandrianomby.

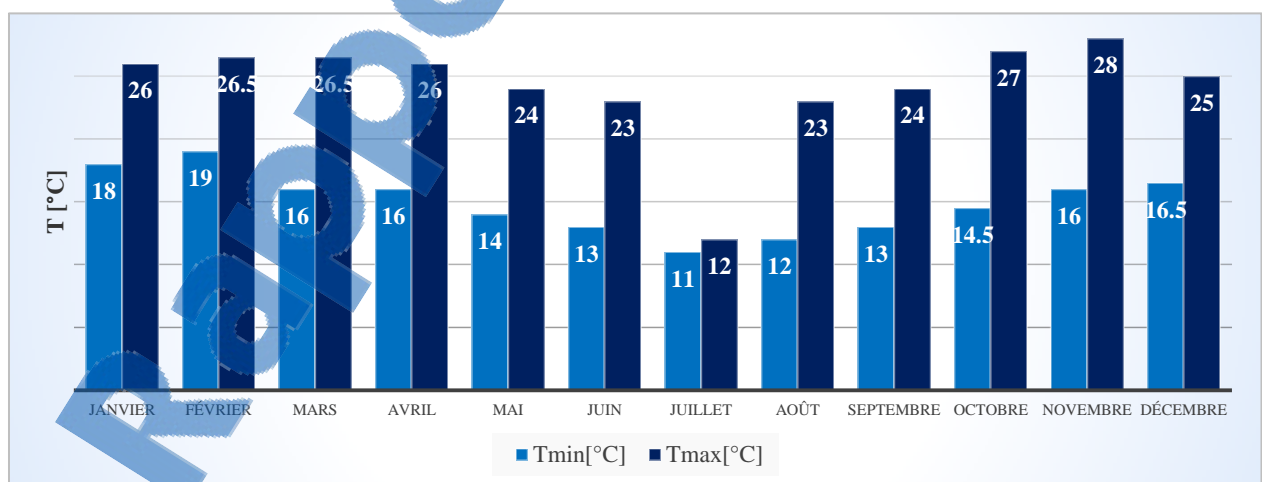


Figure I. 2: Variation de la moyenne des températures mensuelles maximales et minimales pour la station de Fianarantsoa de 2012.

(Source Direction. Météorologie Ampandrianomby, Avril 2013).

Généralement, la plus forte chaleur est enregistrée entre décembre et février. On remarque que les mois le plus froid sont les mois de Juin, Juillet et Août. Et pour les mois qui restent la température ambiante prédomine.

### I.2.2- Précipitation

La connaissance des précipitations est très importante car elles conditionnent le cycle de l'eau. Pourtant, la quantité de pluies dépend principalement de la situation climatique et du contexte de la zone. Leur impact est notamment déterminant sur la répartition des ressources en eau: nappes d'eau souterraines, écoulements de surface etc.,...

Le district de Fianarantsoa présente une précipitation assez faible allant de 4 à 248,905 mm par an en moyenne.

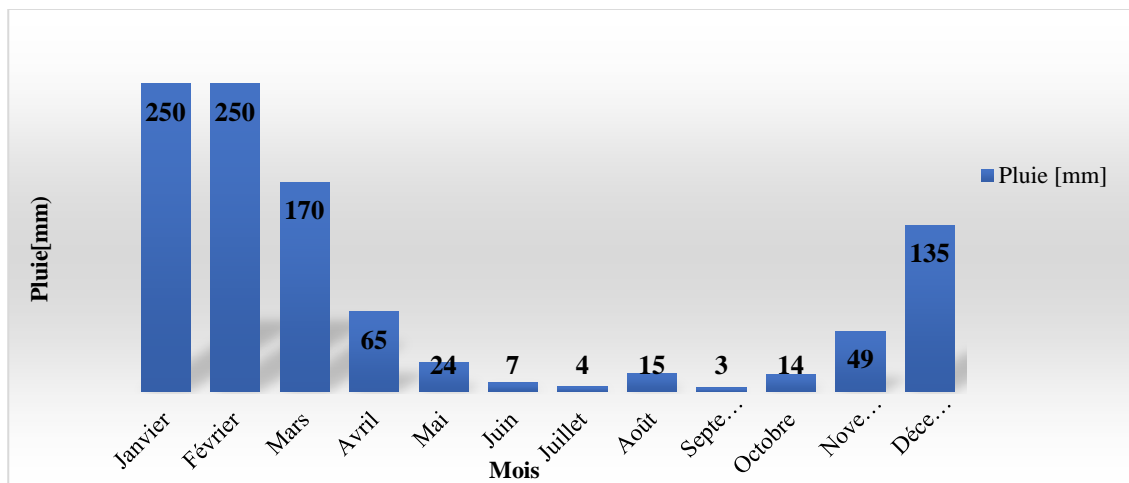


Figure I. 3: Variation de la précipitation pour la station de Fianarantsoa au cours de 2012.  
(Source Direction. Météorologie Ampandrianomby, Avril 2013).

Les isohyètes annuelles sont au niveau 800-900 mm dans la région de la Haute Matsiatra, avec une légère augmentation jusqu'à 1.400 mm au fur et à mesure que l'on monte vers le Nord et en allant jusqu'à 2.000 mm à la frontière Est de la région. Vers le Sud et le Sud-Ouest de la région, l'on remarque une nette stabilisation des courbes isohyètes avec leur étalement dans l'espace.

La période pluvieuse commence en Octobre. La quantité des pluies reçues est la plus importante en Décembre - Janvier. Celle-ci décroît rapidement aux mois d'Avril - Mai. La période sèche coïncide avec les mois de Mai à Octobre au cours de laquelle sont enregistrées des précipitations sous forme de crachin.



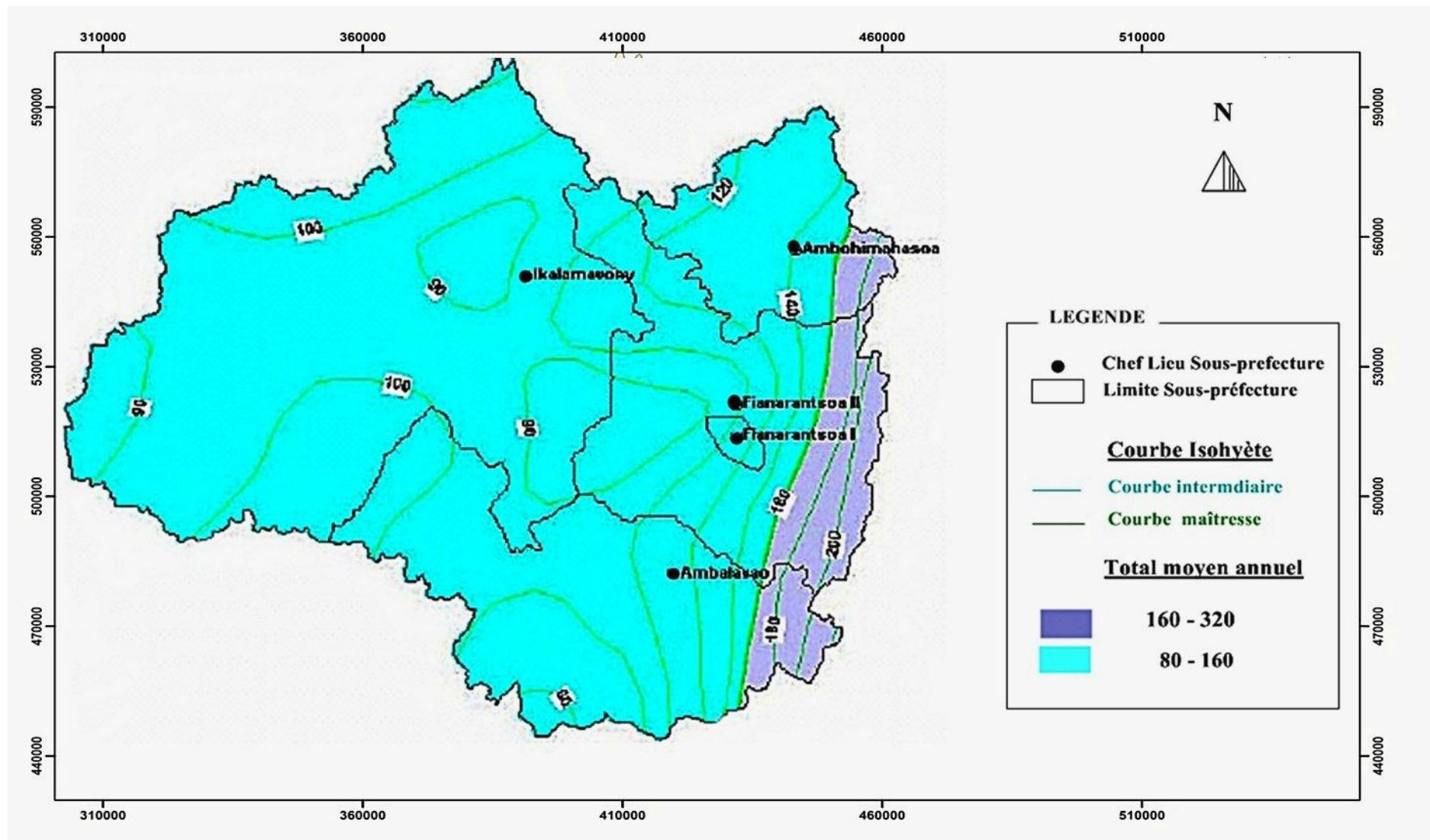


Figure I. 4: Carte pluviométrique de la région haute Matsiatra

La figure I.4 nous montre une carte pluviométrique de la région Haute-Matsiatra, elle nous donne une idée sur le tracé des courbes iso-valeurs de précipitations tombées. Notre zone d'étude se situe entre deux courbes de 120mm et 140mm de pluies, et ces valeurs synchrones bien avec les valeurs obtenues dans le figure I.3.

### **I.2.3- Humidité**

Les données récentes sur l'humidité atmosphérique, les vents dominants, les cyclones ne sont pas encore disponibles. En effet, le Service Inter-régional n'a fonctionné que récemment et les données sont encore centralisées au Ministère de la Météorologie et de l'Hydrologie.

Pour les données météorologiques des autres stations, elles seront indiquées lors que la future Banque de Données au niveau du Service Inter-Régional de la Météorologie et de l'Hydrologie sera fonctionnelle.

## **I.3- CONTEXTE GEOLOGIQUE**

L'île de Madagascar est divisée en deux grands types de terrains géologiques : le socle cristallin et les terrains sédimentaires.

Le socle cristallin qui couvre environ les deux tiers de l'île est le résultat de la métamorphisassions de formations sédimentaires primitives déposées dans une aire géosynclinale à la suite d'une orogénèse majeure vieille de 2 600 millions d'années.

Les terrains sédimentaires forment une large bande sur la côte Ouest de l'île. Alors que les roches cristallines sont très plissées, les terrains sédimentaires, au contraire, n'ont subi aucune action orogénique notable et se sont déposés régulièrement. Ils présentent actuellement un très faible pendage vers l'Ouest.

### **I.3.1- Géologie régionale**

L'étude géologique de la partie Sud-Est, montre qu'elle est essentiellement constituée de roches éruptives, de formations métamorphiques et les formations superficielles telles que les alluvions et argile latéritique. La région est en générale, caractérisée par des terrains cristallins comme toutes les autres parties de la Haute terre malagasy.

La région de Haute Matsiatra est caractérisée par le système de VOHIBORY. Ce système s'allonge et se rétrécit du Nord vers le Sud et le système du graphite, dans la partie Est de la région et parallèlement à la côte.

Entre ces deux systèmes sont plaqués des roches granitiques et migmatites de Tampoketsa, sous forme de minces filets allongés le long des régions d'Amoron'i Mania, de la Haute Matsiatra et d'Ihorombe, toujours du Nord au Sud. Des couches allongées parallèles à la côte et des îlots discontinus de roches granitiques. Le système Androyen : très important dans la région. Ce système couvre environ le tiers de la région de la Haute Matsiatra dans sa partie occidentale.

- Série de schisto-quartzo-calcaire à l'Ouest ;
- Système du graphite au Centre qui occupe la majeure partie de la région ;
- Quelques parties par un système d'Antogil au Sud Est, avec une formation de migmatites du Mananara.

Les terrains sédimentaires sont aussi importants dans les parties centrales et orientales de la région.

### I.3.2- Géologie appliquée

#### ➤ Type du sol

Le sol des collines est de couleur rouge ferralitique. Les bas-fonds se divisent en trois catégories dont 60% de type argilo sableux de couleur noire, 35% de couleur marron de type alluvionnaire et les 5% de caractère sablo-limoneux. Les occupations du sol se répartissent comme suit :

Tableau I. 1: occupation du sol

Tanety	Rizière	Baiboho
60%	30%	10%

Pédologiquement, la région de Haute Matsiatra est caractérisée par des sols ferralitiques jaunes/rouges et rouges, de superficies assez importantes, mais discontinues. L'on remarque en outre la présence de sols ferrugineux tropicaux couvrant la partie centrale de la région de la Haute Matsiatra, et des îlots d'association de sols ferralitiques rouges et jaunes/rouges et des sols faiblement ferralitiques et ferrisols.

Cet ensemble est réuni dans l'espace de la région par des sols peu évolués et rankers, ainsi que des sols peu évolués dunaires sableux. Les bas-fonds portent essentiellement des sols hydromorphes à gley.

### ➤ Végétation

La région est caractérisée par la prédominance de grandes superficies de savanes à savoir :

- savanes herbeuses à *Hyparrhenia rufa* et *Heteropogon*,
- savanes herbeuses de l'ouest à *Hyparrhenia rufa*, *Hyparrhenia dissoluta* et *Heteropogon*.

Ces deux types de savanes couvrent les parties centrales de la Région. Dans la partie orientale de la région et parallèlement à la côte Est sont localisées des savanes et steppes à *Aristida* et *Ctenium* ou *Loudetia*. Ces types de savanes sont délimités par un mince filet de forêt dense ombrophile de moyenne altitude.

La commune représente une végétation de 300 ha en 2002. Voici quelques formations végétales :

Tableau I. 2: Couvertures végétales

Types	Exemples
<b>Forêt claire en reboisement</b>	<i>eucalyptus, grevillia, pinus</i>
<b>Savanes arborées</b>	<i>eucalyptus, grevillia, pinus</i>
<b>Savanes arbustives :</b>	<i>Kanda, Tsingarivary, dingadigana, Anjavidy Dendemy, Kinina mena, Fandramanana, Roina, Ambatry, Goyave, Taindelosiona, Kinina fotsy ;</i>
<b>Savanes herbeuses</b>	espèces <i>graminéennes</i> comme le <i>Talapetraka</i> , <i>Tenina</i> et par des fourgères, sisal. <i>L'aristida</i> se développe sur les sols fortement dégradés.

La déforestation est souvent remarquée par le biais de la fabrication de charbon et la construction des meubles.

La figure I.5 ci-dessous montre les aspects géologiques de la région Haute-Matsiatra: les différentes origines des formations ainsi que les types sols.

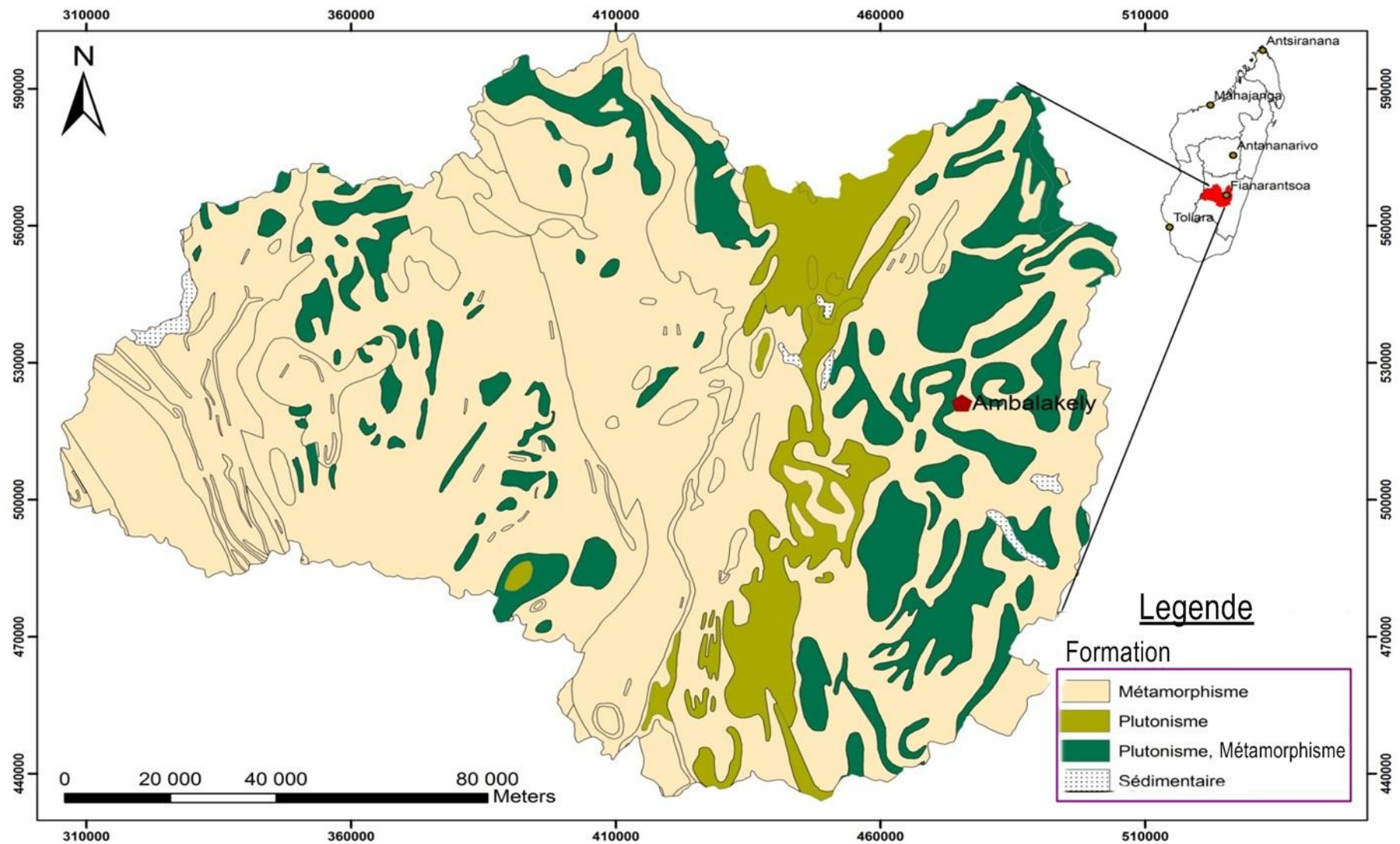


Figure I. 5: Carte Géologique de la région Haute Matsiatra

Source BD 500 FTM/MAEP/SAGE



## I.4- MILIEU HUMAIN

### I.4.1- Démographie

#### ➤ Au niveau de la région

La région de la Haute Matsiatra, qui couvre 20,46% de la superficie totale de la Province de Fianarantsoa et qui représente 22,9 % de la population totale, est la plus forte densité (38habitants /km<sup>2</sup>). A l'intérieur de cette région, les sous-préfectures les moins peuplées sont celles d'Ikalavony (4,5 habitants/km<sup>2</sup>) et d'Ambalavao (31 habitants/km<sup>2</sup>). Dans la région de la Haute Matsiatra, le taux de natalité varie entre 24 et 37 ‰. La population de la Région est en majorité rurale (81,1%). Le taux d'urbanisation (population urbaine/population totale) est de 18,9 %.

La composition ethnique par sous-préfecture n'est pas chiffrable. On note seulement la présence de quelques ethnies (Merina, Antaisaka, Bara, Antandroy et Sakalava) dans chaque sous-préfecture. La majorité de la population sont des Betsileo. Dans chaque sous-préfecture, l'on remarque l'existence d'un certain nombre de gens qui ont quitté leur région pour se diriger soit vers d'autres régions limitrophes, soit vers d'autres Provinces. Il est difficile de chiffrer les effectifs. Toutefois, l'on peut dire que les causes de ces mouvements migratoires sont multiples : causes économiques (recherche de sources monétaires et de revenus), causes d'ordre social (insécurité, etc. ....).

#### ➤ Au niveau de la commune rurale d'Ambalakely

Une enquête a été menée, en 2008, sur le taux de la population de la commune pour établir le PCD et a donné le résultat suivant :

- Population totale : 12 600 habitants dont 233 habitants par Km<sup>2</sup>
- Taux de natalité : 2,31% par an
- Taux de mortalité : 0,48% par an.

Ainsi, la densité serait de : 229,23 habitants /Km<sup>2</sup> en 2003, sauf s'il y aurait un mouvement migratoire qui tend vers le sens de l'immigration, c'est à dire, un certain nombre de cette population quittent leur localité natale vers d'autre région ou d'autres populations viennent s'implanter dans cette région. Cette localité renferme 7 Fokontany, pour avoir certaine idée sur la répartition de cette population, il s'avère plus logique de dresser un tableau.

Tableau I. 3: Effectif de la population pour chaque Fokontany

Désignation	Effectifs
Ambalakely	4225
Ambatolahimavo	1375
Ampitanandriambola	3430
Anara	403
Miandrifekona	
Ivoay	394
Volamena	904
TOTAL	11511

#### I.4.2- Agriculture et élevage

##### Agriculture

L'activité agricole la plus dominante est la riziculture irriguée et pluviale dont le rendement par hectare est compris entre 2 à 3 tonnes. Elle occupe la moitié des surfaces cultivées et les trois-quarts ( $\frac{3}{4}$ ) des exploitations paysannes ont un rapport riz/surface tanety supérieur ou égal à 1. L'aménagement des rizières en gradins est typique du pays Betsileo (récupération des sols de pente potentiellement irrigables).

Sur les Hauts plateaux, la presque totalité des vallées sont exploitées et les pentes présentant des possibilités d'irrigation sont occupées par les rizières en étage. Les autres cultures vivrières (manioc, patate douce, haricot, maïs, etc...), destinées surtout à l'autoconsommation sont très pratiquées. Et avec des techniques culturales adéquates et suivies, la production agricole accroîtra très rapidement. Les cultures à tubercules occupent la moitié des surfaces et les légumineuses à graines (haricot, arachide) en occupent à peu près 20 % (le haricot sur les hautes terres est cultivé sur 85% des surfaces à légumineuses, tandis que, dans la Moyen Ouest, c'est la surface arachidière qui l'emporte à 65%).

Par ailleurs, les cultures maraîchères et fruitières (agrumes surtout) sont importantes et la viticulture est en plein essor dans la région. La culture de tabac est prospère dans le Sud. La région orientale est favorable aux cultures de rente, plus particulièrement le café.

Le problème de l'intrant est le fixisme technique à la méthode traditionnelle tant au niveau matériel que dans le domaine de mise en culture des plantes à partir du pepinière

jusqu'au repiquage constitue un facteur qui bloque à un plus bon extrant. Les autres cultures telles que la culture de céréale : manioc, patates douce pomme de terre, maïs forment une activité secondaire. L'association de la culture irriguée, pluviale et culture sèches est limitée par l'espace arable.

### **Elevage:**

L' élevage bovin tient une grande place dans la Région. La conduite des animaux varie selon la disponibilité des terres de parcours et l'intérêt manifesté par les paysans aux bovins (fabrication des fumiers, traction de matériel, piétinage). Sur les Hautes terres, contrairement au Moyen Ouest où l'élevage conserve un caractère extensif, l'exiguïté des pâturages et les contraintes des travaux agricoles poussent les paysans éleveurs à adopter un mode semi-intensif (gardiennage sur parcours limité pendant une partie de la journée, complément d'alimentation et parage le soir).

Dans cette région, la pauvreté du pâturage naturel (couvert graminée en à aristida en général avec des plages disséminées d'hyparrhenia et d'hétéropogon) et sa forte dégradation dûe à l'érosion et feux de brousse, assurent mal l'alimentation du bétail.

L'élevage des autres types d'animaux se rapporte essentiellement sur le porc, les caprins, les ovins et les volailles. Le développement de ces types d'élevage dépendra des projets existants dans la région, compte tenu des différents problèmes rencontrés (couverture sanitaire faible, insuffisance d'alimentation et d'encadrement etc . . .).

On constate ici que l'élevage aviaire (volaille) est beaucoup plus prise par la population locale, mais son évolution en l'espace durant de 4 ans semble faible, de l'ordre de 0,44%. L'élevage bovin se trouve au deuxième rang où son évolution est de 2,07%. L'élevage caprin, même si sa proportion est de 13, 51%, l'effectif de la chèvre élevée paraît moindre par rapport aux autres espèces. Concernant l'élevage porcin, on constate une réduction à l'ordre de 1,36% du 1997 jusqu'au 2001.

#### **I.4.3- Contrainte économique du secteur**

Cette partie, nous essayerons de relever les contraintes majeures qui apparaissent tout au long de cette monographie et dont la résolution constitue un préalable au développement de l'ensemble de la région.



### **Contrainte local**

Etant donné que notre site se trouve dans une commune rurale, le secteur primaire prédomine. La majorité des villageois pratique la culture et l'élevage pour leur ressource économique. On assiste principalement aux problèmes de santé suivants : menace permanente de charbon, infection de douve de foie (dita), tuberculose et mauvaise alimentation en hiver, épidémies de choléra (poule) et peste (poule et porc) ainsi que de la maladie de Teschen.

Au fond du développement socio-économique local souffre de problèmes suivants : Insécurité sociale (environnement sanitaire, un certain manque d'eau potable, destruction irraisonnée des superficies boisées ; Insuffisance des crédits ruraux ; conflit d'option et de couleur politiques.

Les pratiques dévastatrices en l'occurrence, les feux de pâturages et les feux de brousses sévissent entre autres. Ces activités anthropiques renforcent les phénomènes de lessivage, la régression de la couverture végétale et la dégradation de la structure du sol. La destruction de la couverture végétale entraîne l'ensablement des plaines, les rizières et les bas-fonds. Les pluies torrentielles provoquent des éboulements des versants. La conjugaison de ces différents facteurs, conduit à l'ensablement des rizières et plaines, à la détérioration des infrastructures routières et à l'inondation fréquente des bas-fonds.

### **Contrainte régionale**

La région offre des caractéristiques physiques plus ou moins hétérogènes : sols à vocation pastorale et agricole. L'activité agricole est dominée par les cultures vivrières, mais avec l'évolution des besoins monétaires, des cultures de rentes, industrielles et de contre-saison se sont développées. Avec l'agriculture, l'élevage, surtout bovin, constitue une activité essentielle au sein de la région. Les éleveurs doivent faire face à l'insuffisance des moyens pour la protection de la santé animale et surtout à l'insécurité qui sévit à la campagne du fait de la recrudescence des vols de bœufs.

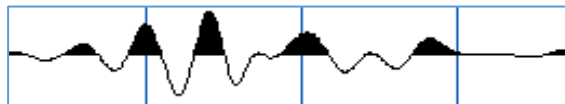
La région connaît un niveau d'équipement insuffisant, surtout dans les zones rurales (électrification, adduction d'eau, équipement socio-culturel et existence de zones enclavées). Malgré l'existence d'un réseau de pistes ramifiées à partir de la RN 7 qui la traverse, la région souffre du manque de pistes de desserte praticables toute l'année. L'enseignement rencontre des problèmes d'encadrement, équipement et parfois même de niveau des enseignants qui viennent aggraver la mauvaise répartition des établissements essentiellement concentrés dans les villes.

La couverture sanitaire reste faible et des régions entières demeurent à l'écart des efforts en matière de santé. La plupart des formations sanitaires nécessitent des dotations en lits, matelas et autres mobiliers. Aux problèmes de vétusté des bâtiments, s'ajoutent ceux de l'approvisionnement en eau d'assainissement et de nutrition. L'approvisionnement en eau constitue un problème crucial pour la population en milieu rural. Elle s'approvisionne aux rivières, aux canaux d'irrigation, aux lacs et aux marécages. D'où la propagation de maladies hydriques.

Les projets, les ONG, les collecteurs, grossistes et transporteurs qui y résident, étendent leurs rayons d'actions sur l'ensemble de la région. Pour la région, l'intensification et la diversification des cultures constituent une issue parmi tant d'autres pour aboutir à la suffisance alimentaire et à l'augmentation de revenu des paysans. La disponibilité et l'approvisionnement en intrants sont des facteurs limitants.

C'est dans ces contextes que des mesures sismiques ont été effectués dans cette zone que nous venons de décrire les bases méthodologiques de la prospection sismique constitue ainsi l'objectif du chapitre suivant.

# CHAPITRE II : BASE METHODOLOGIQUES DE LA PROSPECTION SISMIQUE



La prospection sismique est une méthode de prospection géologique qui permet de visualiser les structures géologiques en profondeur grâce à l'analyse des échos d'ondes sismiques. Il ne faut pas la confondre avec la sismologie, qui est l'étude des ondes sismiques et des séismes pour eux-mêmes. Les ondes sismiques étudiées peuvent avoir des causes naturelles (séisme) ou artificielles (camion vibreur, explosif, canon à air, etc.).

La sismique réflexion utilise les ondes réfléchies qui permet de dresser des profils sismiques en révélant les différents réflecteurs du sous-sol ainsi que les structures (plis et failles). Quant à la sismique réfraction permet de déterminer la vitesse des ondes sismiques donc la nature des roches traversées.

Dans le cas des sols hétérogènes, la vitesse de propagation des ondes sismiques dans le milieu constitue une observable géophysique particulièrement intéressante permettant d'estimer la composition du sol investigué. Ce sont cette technique avec les théories respectives font l'objet de cette seconde chapitre qui prend une place importante sur l'étude de la sismique réfraction.

## **II.1- TECHNIQUE DE LA SISMIQUE REFRACTION**

En sismique réfraction, une source d'énergie est utilisée pour transmettre à un instant précis ( $T_0$ ) des ondes acoustiques qui se propagent dans le sol et le roc sous-jacent. Ces ondes acoustiques se divisent en quatre catégories principales ("P", "S", Love et Rayleigh) en fonction de leurs modes de propagation. Les ondes "P" et "S" sont principalement mises à profit dans le calcul des profondeurs et des propriétés élastiques des matériaux. L'onde "P", aussi appelée onde de compression ou onde longitudinale, se propage à une vitesse double de celle de l'onde "S", aussi nommée onde de cisaillement ou onde transversale.

Les ondes "P" et "S" se propagent dans le sol, en se conformant aux lois de la propagation des ondes, elles suivent les mêmes lois de propagation que les ondes lumineuses, en particulier à la loi de Snell-Descartes.

### II.1.1- Loi de Snell DESCARTES

La loi de Snell-Descartes est donc utilisée lors de la prospection sismique réfraction en supposant que le sous-sol est considéré comme une succession de couches superposées, on utilise le principe de l'onde conique. La «sismique réfraction», en réalité, n'est autre que la sismique des ondes coniques.

La figure suivante montre la propagation des ondes coniques et les temps d'arrivées de chaque onde.

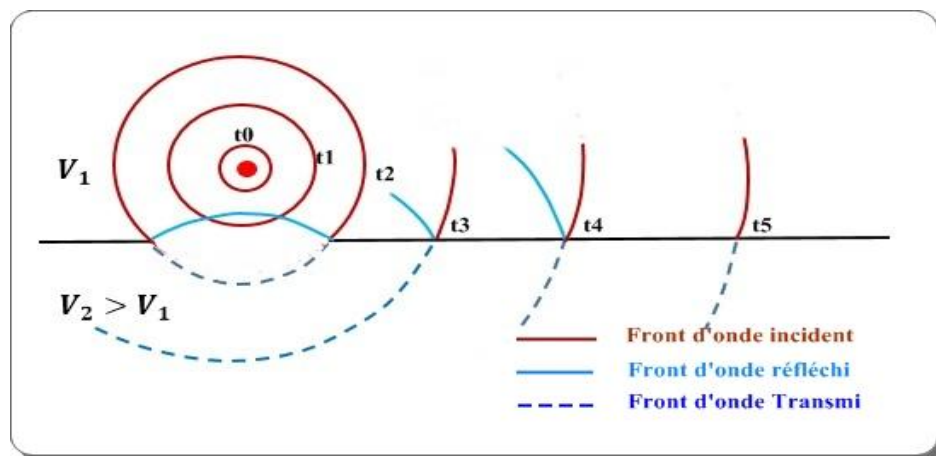


Figure II. 1: Propagation des ondes coniques

On remarque que **les rais sismiques** sont toujours orthogonaux au front d'onde".

En sismique on a l'habitude de raisonner sur les **TRAJETS SISMQUES** qui sont les normales aux surfaces d'onde issues du point d'ébranlement E. Plaçons-nous toujours dans le cas de trois milieux 0, 1 et 2 (Figure.II.2) et considérons un point M suffisamment éloigné de E. Trois sortes de trajets sismiques issus de E vont aboutir en M :

- les trajets directs EM qui restent dans le même milieu 0 ou 1
- les trajets réfléchis EAM qui situés dans le milieu 1 touchent en un seul point A le milieu 2
- les trajets réfractés EBCM qui pénètrent dans le milieu 2 après avoir traversé le milieu 1.

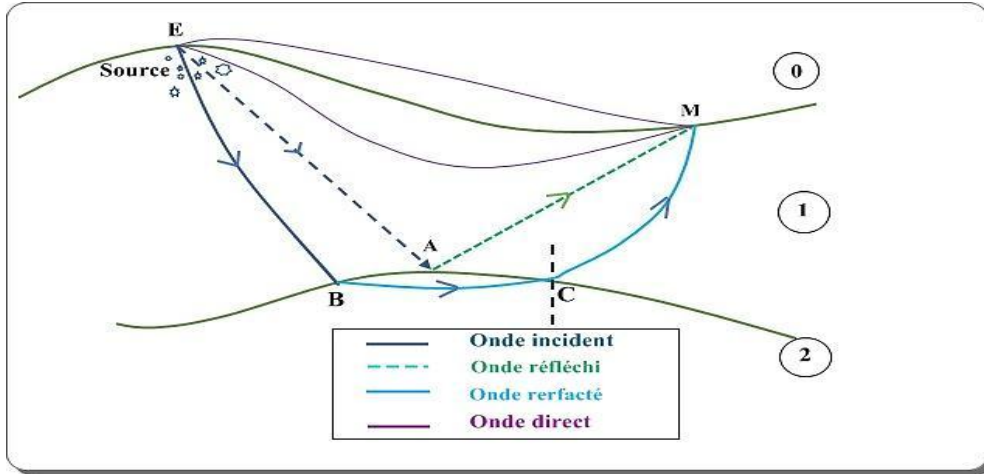


Figure II. 2: Illustration de propagation des ondes

La sismique réfraction a pour objet l'étude des trajets directs et réfractés. A partir des temps de propagation de ces trajets elle permet de dessiner la géométrie des surfaces de discontinuité et de calculer la vitesse des divers milieux (sous certaines conditions).

Dans la réalité les choses se compliquent du fait de l'existence de plusieurs types d'ondes du fait de plusieurs types de déformation du milieu. Les principales sont les ondes de compression en ondes **P** encore appelées ondes longitudinales et les ondes de cisaillement en ondes **S** encore appelées ondes transversales. Les ondes les plus rapides sont les ondes P et en sismique réfraction classique on ne s'intéresse qu'à leurs trajets. Lorsque l'on parle de la vitesse d'un matériau, il s'agit toujours de la vitesse des ondes de compression.

### Géométrie des ondes

#### Formulation de la loi de Snell-Descartes:

1<sup>ère</sup> Loi : l'onde incidente, l'onde réfléchi, l'onde réfractée et la normale d'un dioptré au point d'incidence sont dans un même plan.

$$\underline{2^{\text{ème}} \text{ Loi}} : n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 = n_3 \sin i_3 = \dots = n_n \sin i_n$$

La loi de **Snell-Descartes** donne les relations angulaires entre rais incidents, réfléchis et transmis ou réfractés pour les différents types d'onde.

En sismologie, l'indice  $n = \frac{1}{V}$  ou V est la vitesse d'onde.

Ainsi,

$$\frac{\sin i_1}{V_1} = \frac{\sin i_2}{V_2} = \frac{\sin i_3}{V_3} = \dots = \frac{\sin i_n}{V_n} \quad (II.1)$$

Cette loi nous a permet d'écrire

$$\frac{\sin i}{V_{P1}} = \frac{\sin i_{P1}}{V_{P1}} = \frac{\sin i_{S1}}{V_{S1}} = \frac{\sin i_{P2}}{V_{P2}} = \frac{\sin i_{S2}}{V_{S2}}$$

On peut en tirer :

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

$V_1$  et  $V_2$  sont les vitesses respectives dans le milieu 1 et 2.

On suppose  $V_2 > V_1$

Cas de l'onde conique où  $i_2 = \frac{\pi}{2}$

$$\sin i_{1c} = \frac{V_1}{V_2} \quad (II.2)$$

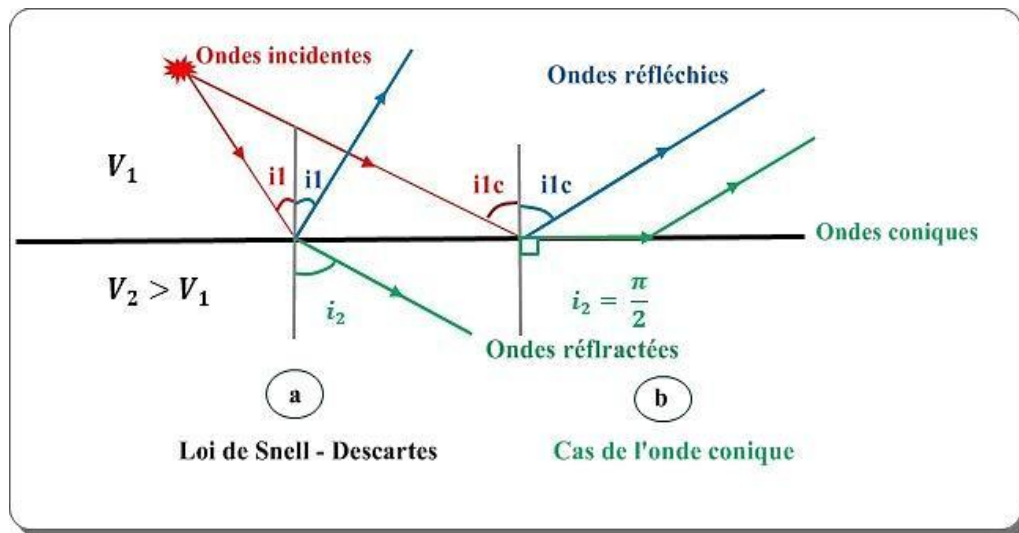


Figure II. 3: Géométrie des ondes

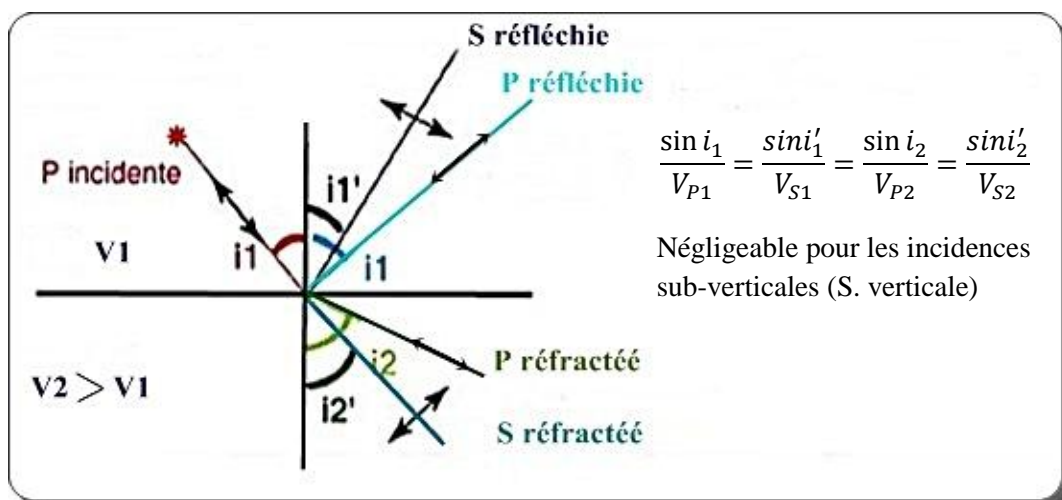


Figure II. 4: Conversion des ondes

En résumé, la méthode sismique réfraction (Reynolds J.M, 1997) est basée sur le principe tel que lorsqu'une onde sismique (onde P et/ou S) arrive à une interface où il y a un contraste de vitesse, alors la direction de cette onde va changer dans le nouveau milieu. Ce changement de direction est régi par le contraste de vitesse à l'interface selon la loi de Snell-Descartes.

### II.1.2- Réfraction des ondes sismiques

La sismique réfraction enregistre la propagation d'un front d'ondes élastiques le long d'un profil équipé de géophones. Les ondes sismiques sont réfractées aux contacts entre différentes couches géologiques et se propagent à des vitesses différentes. De ce fait, dans un terrain constitué de couches horizontales dont la vitesse de propagation pour chaque couche augmente avec la profondeur, une partie des ondes est réfléchi, et une partie est réfractée à l'interface entre chaque couche. Certaines de ces ondes sont réfractées critiqueusement, c'est-à-dire qu'elles se propagent dans un plan parallèle à la surface du réfracteur. C'est cette propriété qui est mise à profit en sismique réfraction.

La technique consiste donc à mesurer le temps écoulé entre l'instant  $T_0$  et l'arrivée des ondes en surface à des distances connues de la source d'énergie. Lorsque l'on est près de la source, les premières ondes enregistrées sont celles qui se sont propagées dans la première couche; à mesure qu'on s'éloignera de la source, les premières arrivées seront les ondes qui auront voyagé à la surface de chacune des couches puisque la vitesse de propagation dans ces couches étant plus grande, le temps de parcours est plus court.

En mesurant le temps d'arrivée de la première onde sismique, plusieurs méthodes permettent d'en calculer sa vitesse et ensuite de déterminer le nombre et l'épaisseur des couches géologiques. En connaissant les vitesses théoriques d'une formation géologique il est possible de réaliser une représentation géologique du sous-sol.

Du fait des matériaux très hétérogènes et du relief prononcé, l'utilisation de la réfraction dans un tel contexte peut être délicate, d'où la nécessité des réfractions dans divers types de couches.

#### Réfraction pour deux couches horizontales

Dans le cas d'un milieu composé de deux terrains, les ondes sismiques se réfractent sur la surface du second milieu caractérisé par une vitesse de propagation des ondes élastiques plus importante.



▪ **Conditions de réfraction :**

Il y a réfraction si l'angle d'incidence  $i_{12}$  est égal à  $\pi/2$  et la vitesse  $V_1$  du premier terrain est inférieure à la vitesse du deuxième terrain,  $V_2 > V_1$ .

▪ **Les hypothèses de bases pour la sismique réfraction :**

- milieu homogène et isotrope,
- couche suffisamment épaisse pour qu'elle soit observable,
- interface parallèle entre elles, et à la surface de mesure,
- couches tabulaires

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

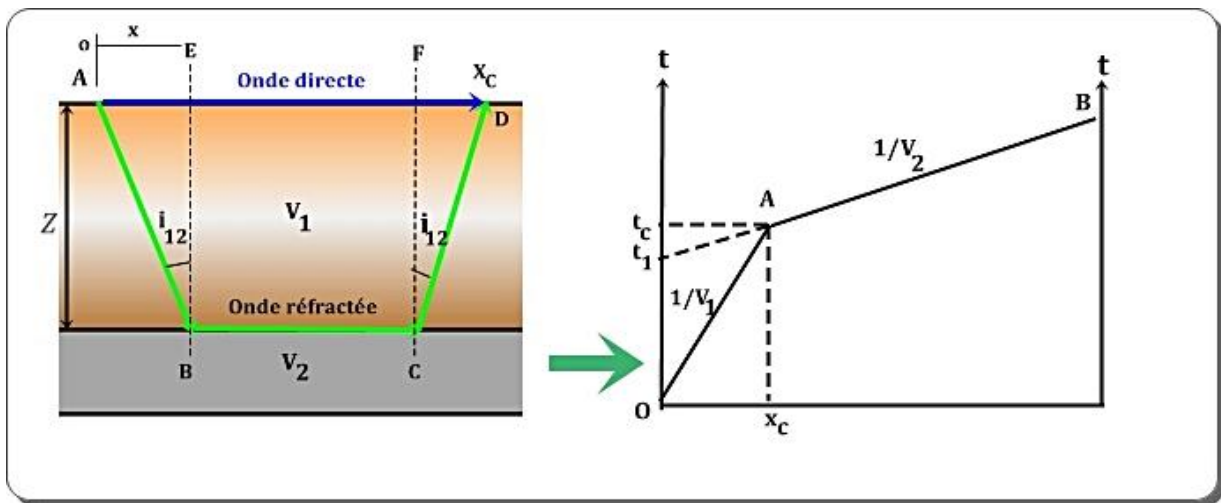


Figure II. 5: Illustration de la réfraction pour un terrain de deux couches et l'hodochrone correspondante

La portion de droite OA de pente  $\frac{1}{V_1}$  correspond à l'onde directe, AB de pente  $\frac{1}{V_2}$  correspond à l'onde réfractée. L'angle d'incidence  $i_{12}$  satisfait la **loi de Descartes** :

$$\sin i_{12} = V_1/V_2$$

Le phénomène de réfraction totale ne peut se produire que lorsque l'on passe d'un milieu lent à un milieu rapide ( $V_2 > V_1$ ).

Le temps de parcours de l'onde réfractée est :

$$t_r = 2Z \frac{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 V_2} + \frac{x_c}{V_2}$$

La profondeur de la première couche est donnée par la formule ci-après :

$$Z = \frac{t_1 V_1 V_2}{2 \sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \quad \text{ou} \quad Z = \frac{x_c}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad (4) \quad (II.3)$$

✚ Réfraction sur un plan incliné

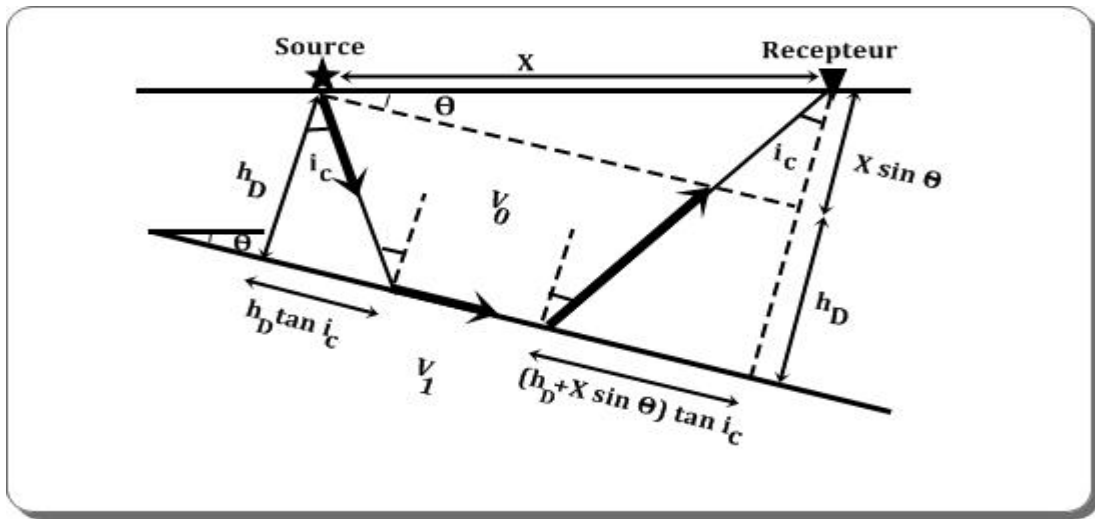


Figure II. 6: Géométrie sismique-réfraction sur un plan inclinée

Expression complètes

$$t_{up}(x) = \frac{X}{V_{up}} + I_{up} \quad (II.4)$$

et

$$t_{dw} = \frac{X}{V_{dw}} + I_{dw} \quad (II.5)$$

avec

$$V_{up} = \frac{V_0}{\sin(i_c - \theta)} > V_{dw} = \frac{V_0}{\sin(i_c + \theta)}$$

et

$$I_{up} = \frac{2 h_{up} \cos i_c}{V_0} > I_{dw} = \frac{2 h_{down} \cos i_c}{V_0}$$

### ✚ Réfraction sur deux réflecteurs

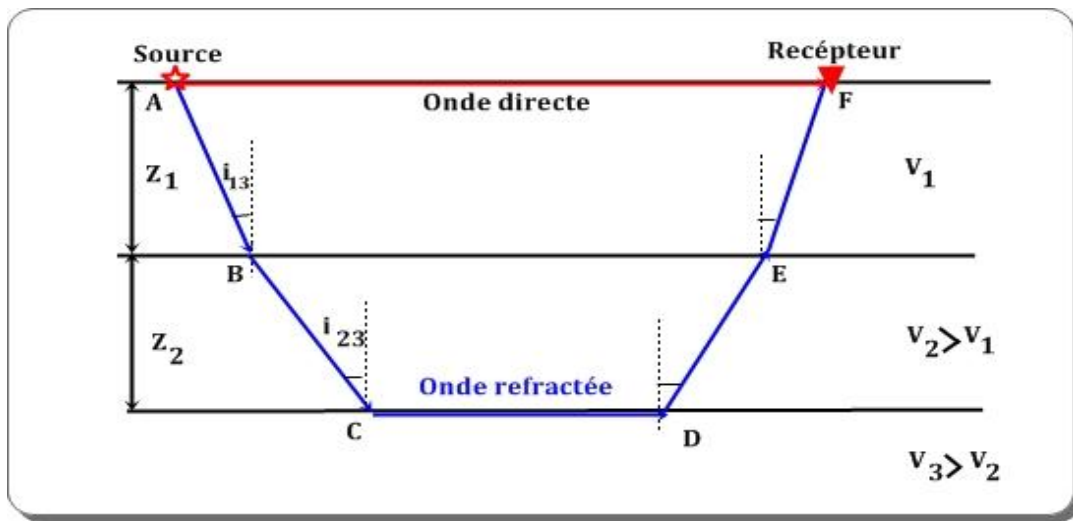
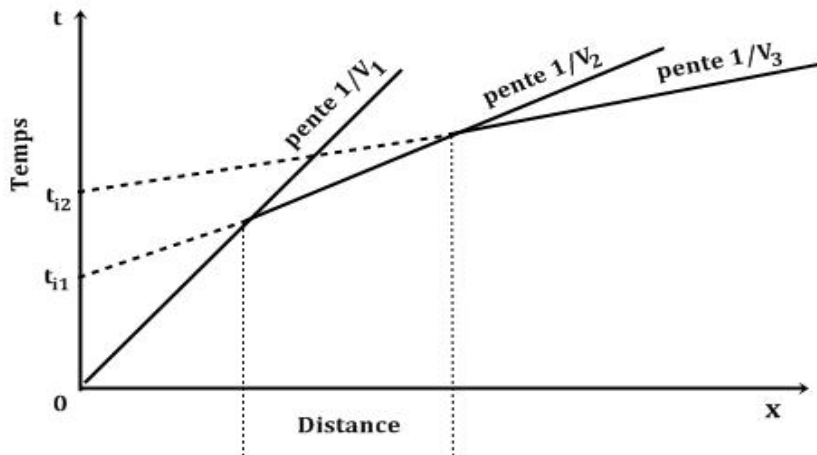


Figure II. 7: Géométrie sismique-réfraction sur deux réflecteurs horizontaux

La profondeur de la première couche est donnée par la formule ci-après :

$$Z_1 = \frac{t_1 V_1 V_2}{2\sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \quad (II.6)$$

L'expression de la profondeur de la deuxième couche est donnée par la formule suivant:

$$Z_2 = \frac{1}{2} \left( t_{12} - 2Z_1 \frac{\sqrt{V_3^2 - V_1^2}}{V_3 V_1} \right) \frac{V_3 V_2}{\sqrt{V_3^2 - V_2^2}} \quad (II.7)$$

Ou

$$Z_2 = \frac{X_{c2}}{2} \sqrt{\frac{V_3 - V_2}{V_3 + V_2}} - Z_1 \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{V_1}{V_3}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 - \left(\frac{V_1}{V_3}\right)^2}} \quad (II.8)$$

### ✚ Réfraction de plusieurs couches parallèle

**Fonction de l'analyse de la vitesse:**

$$t_V = (t_{AY} - t_{BX} + t_{AB})/2$$

$$\bar{V} = \sum_{a=1}^{n-1} \frac{Z_n}{t_n} \quad (II.8)$$

**Fonction de la temps-Profondeur:**

$$t_G = \left[ t_{AY} + t_{BX} - \left( t_{AB} + \frac{XY}{V_n} \right) \right] / 2$$

$$t_G = \sum_{j=1}^{n-1} Z_{jG} (V_n^2 - V_j^2)^{\frac{1}{2}} / V_n V_j$$

$$T_n = 2 \sum_{k=1}^n \frac{Z_k}{V_k} \cos i_{k(n+1)} \quad (II.9)$$

**Et la profondeur de chaque couche :**

$$Z_n = \left[ \frac{T_n}{2} - \sum_{k=1}^{n-1} \frac{Z_k}{V_k} \cos i_{k(n+1)} \right] \frac{V_n}{\cos i_{n(n+1)}} \quad (II.10)$$

#### II.1.3- Calcul du temps d'arrivé

La reconnaissance sismique est basée sur la mesure des temps de propagation dans les couches du sous-sol, d'ondes acoustiques générées artificiellement par une source. Ces temps de propagation permettent de déterminer la géométrie, la structure et la configuration des couches géologiques. Dans certains cas, ils permettent également la détermination de la vitesse de propagation des ondes longitudinales dans le sol.

#### ❖ Equation des hodochrones:

##### 1<sup>ère</sup> cas : Couches planes et horizontales

- Onde directe

$$t_d = \frac{X}{V_1} \quad (II.11)$$

- Onde réfléchie

$$t_r = \frac{1}{V_1} \sqrt{X^2 + 4h_1^2} \quad (II.12)$$

▪ **Onde Conique (réfractée), couche 2**

$$t_{refr} = \frac{X}{V_2} + \frac{2h_1 \cos i}{V_1} \quad (II.13)$$

$$\text{Avec } \sin i = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{et} \quad X_{critique} = 2h_1 \tan i$$

▪ **Onde Conique (réfractée), couche 3**

$$t = \frac{X}{V_3} + \frac{2h_1 \cos i_1}{V_1} + \frac{2h_2 \cos i_2}{V_2} \quad (II.14)$$

$$\text{Avec } \sin i_1 = \frac{V_1}{V_3} \quad \text{et} \quad \sin i_2 = \frac{V_2}{V_3} \quad \text{et} \quad X_{critique} = 2h_1 \tan i_1 + 2h_2 \tan i_2$$

▪ **Onde conique sur la nième interface**

$$t_c^{(n)} = \frac{X}{V_n} + \sum_i^{n-1} \frac{2h_i}{V_i} \cos i_c^{(in)} \quad \text{avec} \quad \sin i_c^{(in)} = \frac{V_i}{V_n} \quad (II.15)$$

Nous savons, que l'onde diffractée se propage dans tous les sens du point de réfraction. Les fronts d'une onde réfractée peuvent être construits d'après le principe de Huygens. L'onde réfractée a été considérée comme une onde parasite. Mais ces dernières années on a commencé à l'utiliser pour étudier des éléments structuraux, tels que les failles, ruptures de couches etc...

❖ **Prenons le cas de deux couches horizontales**

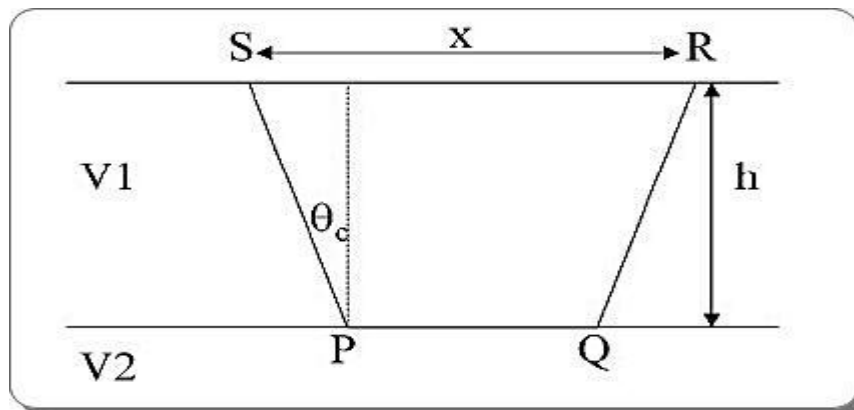


Figure II. 8: Géométrie pour le problème de la sismique-réfraction

Nous allons calculer l'hodochrone pour une onde conique se propageant le long d'une interface plane

Dans la couche 1, le trajet est

$$d = SP + QR$$

$$d = \frac{2h}{\cos \theta_c}$$

donc le temps de parcours est

$$t_1 = \frac{d}{V_1} = \frac{2h}{V_1 \cos \theta_c}$$

Dans la couche 2, le trajet est

$$d = PQ$$

$$d = X - 2h \tan \theta_c$$

$$t_2 = \frac{X - 2h \tan \theta_c}{V_2}$$

Combinons les deux temps pour trouver le temps total  $t$

$$t = t_1 + t_2$$

$$t = \frac{2h}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{X - 2h \tan \theta_c}{V_2}$$

$$t = \frac{X}{V_2} + \frac{2h}{V_1 \cos \theta_c} \left( 1 - \frac{V_1 \sin \theta_c}{V_2} \right)$$

mais  $\frac{V_1}{V_2} = \sin \theta_c$  d'où

$$t = \frac{X}{V_2} + \frac{2h \cos \theta_c}{V_1}$$

$$t = \frac{X}{V_2} + \frac{2h}{V_1} \sqrt{1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^2}$$

On voit qu'ici, l'hodochrone est une simple droite de pente  $1/V_2$  et dont l'ordonnée à l'origine ne dépend que de l'épaisseur de la couche et des vitesses de part et d'autre de l'interface.

Nous pouvons généraliser cette relation pour un milieu à  $N$  vitesses (on ne fera pas la démonstration ici):

$$t_N = \frac{X}{V_N} + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{2h_i}{V_i} \sqrt{1 - \left( \frac{V_i}{V_{i+1}} \right)^2} \quad (II.16)$$

Où  $t_N$  est l'onde conique se propageant à l'interface au-dessus de la couche  $N$ , c'est-à-dire. L'interface le plus profond. Si on s'intéresse à une interface moins profonde, on n'a qu'à choisir un immédiatement supérieur à l'interface désirée.

❖ Ensuite le cas des couches inclinées

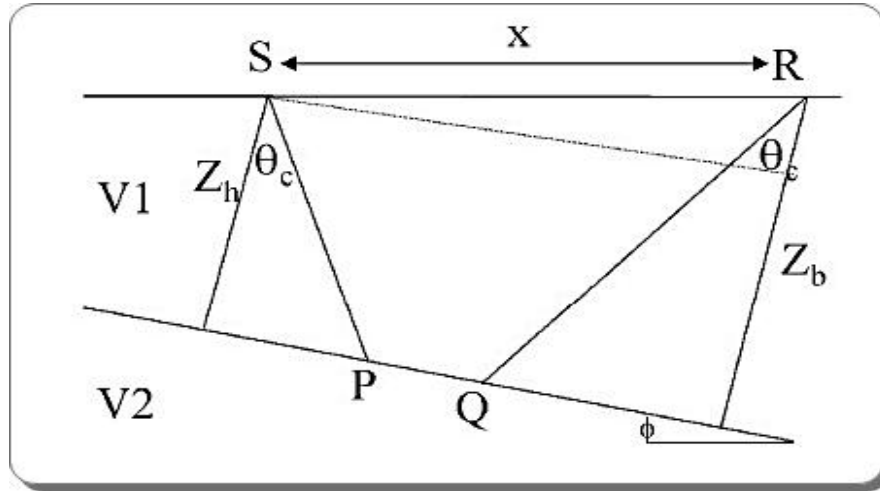


Figure II.9: Géométrie pour le problème de la sismique-réfraction couche inclinée.

Comme dans le cas précédent, le temps de parcours total est la somme des temps dans chaque milieu.

$$t = \frac{SP + QR}{V_1} + \frac{PQ}{V_2}$$

avec

$$SP = \frac{Z_h}{\cos \theta_c} \quad \text{et} \quad QR = \frac{Z_b}{\cos \theta_c}$$

$$PQ = X \cos \phi - (Z_h + Z_b) \tan \theta_c$$

$$t = \frac{Z_h + Z_b}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{X \cos \phi}{V_2} - \frac{(Z_h + Z_b) \tan \theta_c}{V_2}$$

$$t = \frac{X \cos \phi}{V_2} + \frac{Z_h + Z_b}{V_1 \cos \theta_c} \left( 1 - \frac{V_1 \sin \theta_c}{V_2} \right)$$

mais  $\frac{V_1}{V_2} = \sin \theta_c$ , d'où

$$t = \frac{X \cos \phi}{V_2} + \frac{Z_h + Z_b}{V_1 \cos \theta_c} (1 - \sin^2 \theta_c)$$

$$t = \frac{X \cos \phi}{V_2} + \frac{Z_h + Z_b}{V_1} \cos \theta_c$$

Nous voici donc confrontés à deux cas de figure: soit le tir est réalisé de S vers R (tir direct) ou de R vers S (tir inverse). Déterminons les hodochrones pour ces deux cas.

❖ **Tir en S.** On tire alors vers le bas de la pente. Comme on sait que  $Z_h$  et  $Z_b$  sont reliés par  $X$  et  $\phi$ , on va éliminer  $Z_b$  en utilisant la relation  $Z_h = Z_b + X \sin \phi$

$$t_{SR} = \frac{X \cos \phi}{V_2} + \frac{2Z_h}{V_1} \cos \theta_c + \frac{X \sin \phi}{V_1} \cos \theta_c$$

mais  $\sin \theta_c = \frac{V_1}{V_2}$  donc

$$\frac{X \cos \phi}{V_2} = \frac{X \sin \theta_c \cos \phi}{V_1}$$

substituons

$$t_{SR} = \frac{X}{V_1} (\sin \theta_c \cos \phi + \cos \theta_c \sin \phi) + \frac{2Z_h}{V_1} \cos \theta_c$$

$$t_{SR} = \frac{X}{V_1} \sin(\theta_c + \phi) + \frac{2Z_h}{V_1} \cos \theta_c$$

❖ **Tir en R.** On tire alors vers le haut de la pente. On élimine  $Z_h$  en utilisant la relation  $Z_b = Z_h - X \sin \phi$ . En suivant le même raisonnement, on retrouve

$$t_{RS} = \frac{X \cos \phi}{V_2} + \frac{2Z_b}{V_1} \cos \theta_c - \frac{X \sin \phi}{V_1} \cos \theta_c$$

$$t_{RS} = \frac{X}{V_1} (\sin \theta_c \cos \phi - \cos \theta_c \sin \phi) + \frac{2Z_b}{V_1} \cos \theta_c$$

$$t_{RS} = \frac{X}{V_1} \sin(\theta_c - \phi) + \frac{2Z_b}{V_1} \cos \theta_c$$

Dans les deux cas, on remarque que l'hodochrone est une droite, mais les pentes (i.e. les vitesses) sont différentes :

$$V_{SR} = \frac{V_1}{\sin(\theta_c + \phi)} \quad \text{et} \quad V_{RS} = \frac{V_1}{\sin(\theta_c - \phi)}$$

Ces vitesses apparentes nous permettent de déterminer, sans aucun calcul, où sont le haut et le bas de la pente de l'interface. En effet, comme  $\theta_c$  et  $\phi$  sont des nombre positifs, on sait que  $\theta_c + \phi > \theta_c - \phi$  et donc que  $V_{SR} < V_{RS}$ . Le tir à la vitesse apparente la plus élevée est au-dessus du bas de la pente. Mais on peut aller plus loin et déterminer les deux angles  $\theta_c$  et  $\phi$  à partir de ces vitesses apparentes.



$$\begin{aligned} \text{Angle critique} \quad \theta_c &= \frac{1}{2} \left[ \arcsin \left( \frac{V_1}{V_{SR}} \right) + \arcsin \left( \frac{V_1}{V_{RS}} \right) \right] \\ \text{Pendage} \quad \phi &= \frac{1}{2} \left[ \arcsin \left( \frac{V_1}{V_{SR}} \right) - \arcsin \left( \frac{V_1}{V_{RS}} \right) \right] \end{aligned}$$

D'où on tire ensuite  $V_2$ ,  $Z_b$  et  $Z_h$

On en déduit  $V_2$

$$V_2 = \frac{V_1}{\sin \theta_c}$$

$$Z_h = \cos \theta_c \times SP$$

$$\text{et} \quad Z_b = \cos \theta_c \times QR \quad \text{ou} \quad Z_b = Z_h - X \sin \phi$$

On voit donc l'importance d'effectuer au moins un tir direct et un tir inverse afin de déterminer le pendage. Si on n'a qu'un seul tir à notre disposition, on est obligé d'interpréter nos données de sismique-réfraction en termes de couches planes.

## II.2- ACQUISITION DES DONNEES SISMIQUES

### II.2.1- Aperçue de la méthode

Dans la pratique, le mode d'acquisition des données sismiques est similaire pour chacune de ces méthodes : il consiste à enregistrer grâce à des géophones les signaux sismiques émis par une source artificielle (marteau, explosif...) et transmis par le sol. Les caractéristiques fréquentielles de la source et des géophones doivent être optimisées pour enregistrer soit les ondes de volume (sismique réfraction ou sismique réflexion), soit les ondes de surface (inversion), soit les deux.

Pour caractériser les terrains de subsurface (de l'ordre de quelques mètres de profondeur), la sismique réfraction, basée sur l'enregistrement des premières arrivées, permet de mesurer la vitesse des ondes P et celle des ondes S.

Le choix du dispositif de mesure dépend de l'objet géologique étudié et des objectifs recherchés (résolution spatiale, sensibilité au bruit,...). Chaque dispositif présente en effet des avantages et inconvénients qui lui sont propres et qui sont liés à son diagramme de sensibilité (également appelé section de contribution au signal).

La mise en œuvre de la sismique réfraction sur le terrain nécessite un dispositif d'émission (source), de détection (récepteurs, traces, capteurs) et d'enregistrement appropriés.

Les séismes provoqués sont enregistrés sur des dispositifs récepteurs composés de traces. Une trace sismique peut être un capteur unique ou un ensemble de capteurs formant

une antenne réceptrice. L'ensemble des traces provoquées par le même séisme forme un enregistrement sismique. Le séisme artificiel est généré par un dispositif émetteur composé d'une ou de plusieurs sources. Les dispositifs émetteur et récepteur forment un *tir sismique*. Un profil sismique est un ensemble de tirs sismiques. Elle utilise les techniques les plus modernes de l'électronique, permettant l'enregistrement numérique de l'information avec une rapidité et une précision considérables.

En réalité, on utilise un dispositif similaire à celui représenté à la figure II.7 de la page suivante. Une série de douze (12) ou vingt-quatre (24) géophones sont couplés mécaniquement au sol à intervalle régulier. Ces géophones transforment l'onde acoustique reçue en une onde électrique qui est transmise à un enregistreur numérique à 12 ou 24 canaux qui amplifie, filtre et mémorise la forme de l'onde pour chacun des géophones. Par la suite, ces résultats seront imprimés ou enregistrés sur support magnétique pour être interprétés.

En général, cinq (5) ou sept (7) tirs seront effectués à des endroits stratégiques de manière à résoudre les incertitudes dues à la géométrie des couches et à la non-homogénéité du milieu.

Une illustration de la méthode est montrée à la figure suivante.

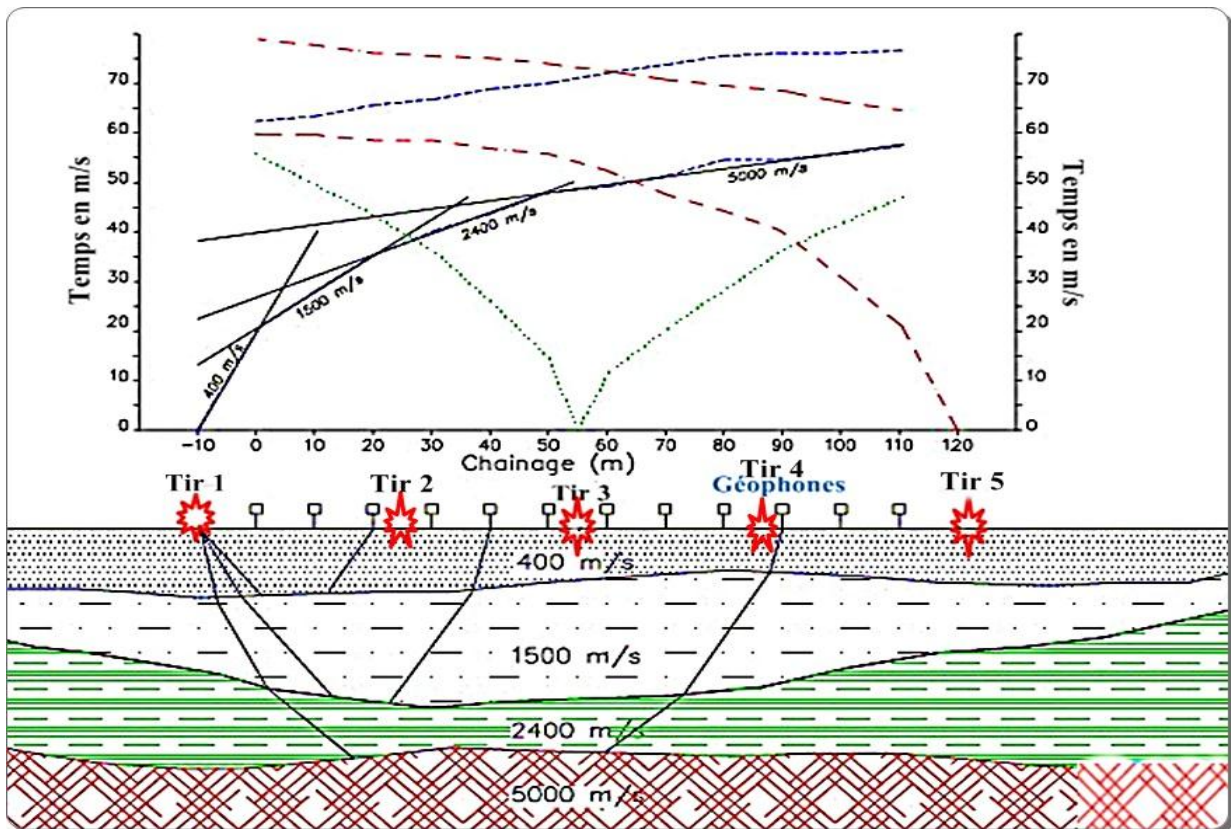


Figure II. 10: Illustration de la méthode de sismique réfraction

### II.2.2-Matériels utilisés

Pour l'acquisition de données les matériels suivants sont utilisés :

- 1- Sismomètre DAQLINK II,
- 2- Ordinateur portable,
- 3- 24 géophones
- 4- Marteau 20kg,
- 5- Deux flûtes
- 6- Rouleau de fil électrique,
- 7- Convertisseur 12V/220V,
- 8- Batteries de 5V et de 12V,



Figure II. 11: sismomètre DAQLINK II

La suite de cette travail consiste donner une bref description pour chaque appareil et matériel utilisée et ses fonctions respectives :

**Un sismomètre** : DAQlink II System de Seismic Source à multiple canaux avec un système de conversion A/N de 24bit, relié avec un ordinateur portable où est installé le logiciel d'acquisition et d'enregistrement «Vibrascope ». Le sismomètre est l'appareil qui mesure le mouvement du sol et l'enregistre sur un support visuel. Si les géophones captent le mouvement du sol et transmettent les signaux au sismomètre, ce dernier effectue l'enregistrement des données. Néanmoins, le sismomètre utilisé est un sismomètre à large bande allant du continu à 25 Hz avec un niveau théorique de détection de  $10 \text{ m.s}^{-2}.\text{Hz}^{1/2}$  et une dynamique de 140 dB.

On peut résumer qu'un Sismomètre = capteur + "horloge" + amplificateur-numériseur + stockage + alimentation

**Une source** : marteau de 20kg, la source d'énergie en sismique peut être de type impact (marteau, chute de poids), projectile (fusil à balle, airgun) ou vibreur (vibrois, plaque vibreur). L'explosif est la source la plus énergique mais son utilisation est réglementée et soumise à des autorisations administratives strictes. Le choix de la source d'énergie se réfère aux conditions requises pour une source sismique.

Pour notre cas, la source d'énergie utilisée est de type marteau. A l'aide de ce marteau en frappant sur une plaque d'aluminium (peu performant sur des terrains meuble) ou directement

sur l'asphalte (souvent très bon). Le marteau constitue une source d'énergie de bonne fréquence et facile à mettre en œuvre.

**Des Géophones:** Les capteurs sismiques sont les géophones. Un géophone est composé d'une bobine suspendue à un ressort. Lorsque le sol se déplace, le ressort transmet le mouvement du sol à la masse. Celle-ci porte une bobine qui peut se déplacer dans le champ d'un aimant. Le déplacement produit un courant induit. Il faut aussi noter que le signal enregistré est le courant, proportionnel à la vitesse de déplacement du sol. Le géophone est un capteur de vitesse. Les géophones sont regroupés pour former une antenne réceptrice à la trace. Le rôle de l'antenne réceptrice est de réaliser un filtrage en nombre d'onde  $k$  continu, dit analogique avant échantillonnage et numérisation des données sismiques. Le filtrage en  $k$  assure un bon échantillonnage en distance de la fonction sismique. Il augmente le rapport signal sur bruit. La bande passante d'un géophone est de [10-100Hz].

Nous limiterons au cas du géophone vertical (celui qui enregistre le déplacement vertical du sol), c'est le cas de 99% des géophones utilisés en prospection sismique. Les géophones verticaux ont une fréquence minimale d'enregistrement égale à 4.5Hz (fréquence de résonance amortie), de manière à enregistrer des ondes de surface dans les basses fréquences.

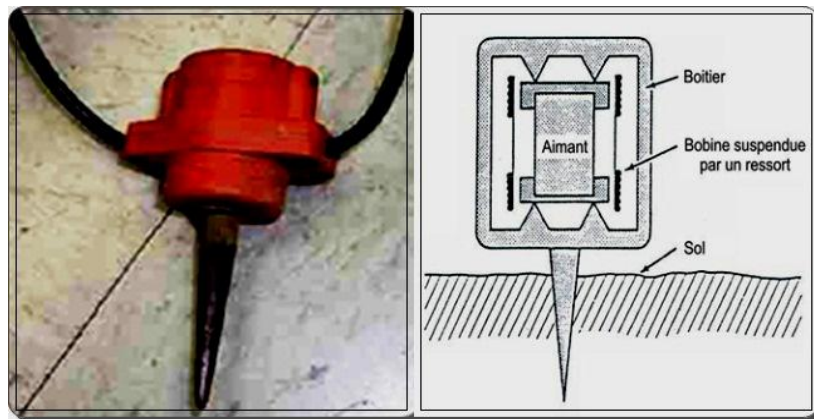


Figure II. 12: Capteurs de géophones

La prospection sismique nécessite plusieurs géophones pendant la campagne géophysique, plus les géophones sont nombreux, plus nous avons des informations précises. Nous disposons sur le terrain en général d'un groupe de géophones alignés, équidistants, suivant un profil (figure II.10). Pour la prospection sismique réfraction la bande passante

variant de 0 – 100Hz. La distance entre les géophones dans ce cas est de l'ordre de 0.5 – 10 mètres.

**Des accessoires** : rouleaux de fils, plaque métallique servant de contacteur, batterie de 12V.

Afin d'éviter l'atténuation de l'onde par la couche superficielle de matériaux lâches, les capteurs utilisés étaient des géophones fermement plantés dans le sol, une fois la couche superficielle enlevée. Les dispositifs de mesure étaient constitués de 24 géophones espacés de 2 mètres. Pour obtenir un profilage continu, 5 tirs par dispositif étaient effectués, avec un marteau de 20kg comme source d'énergie.

Une illustration de cette technique est montrée à la figure suivante.

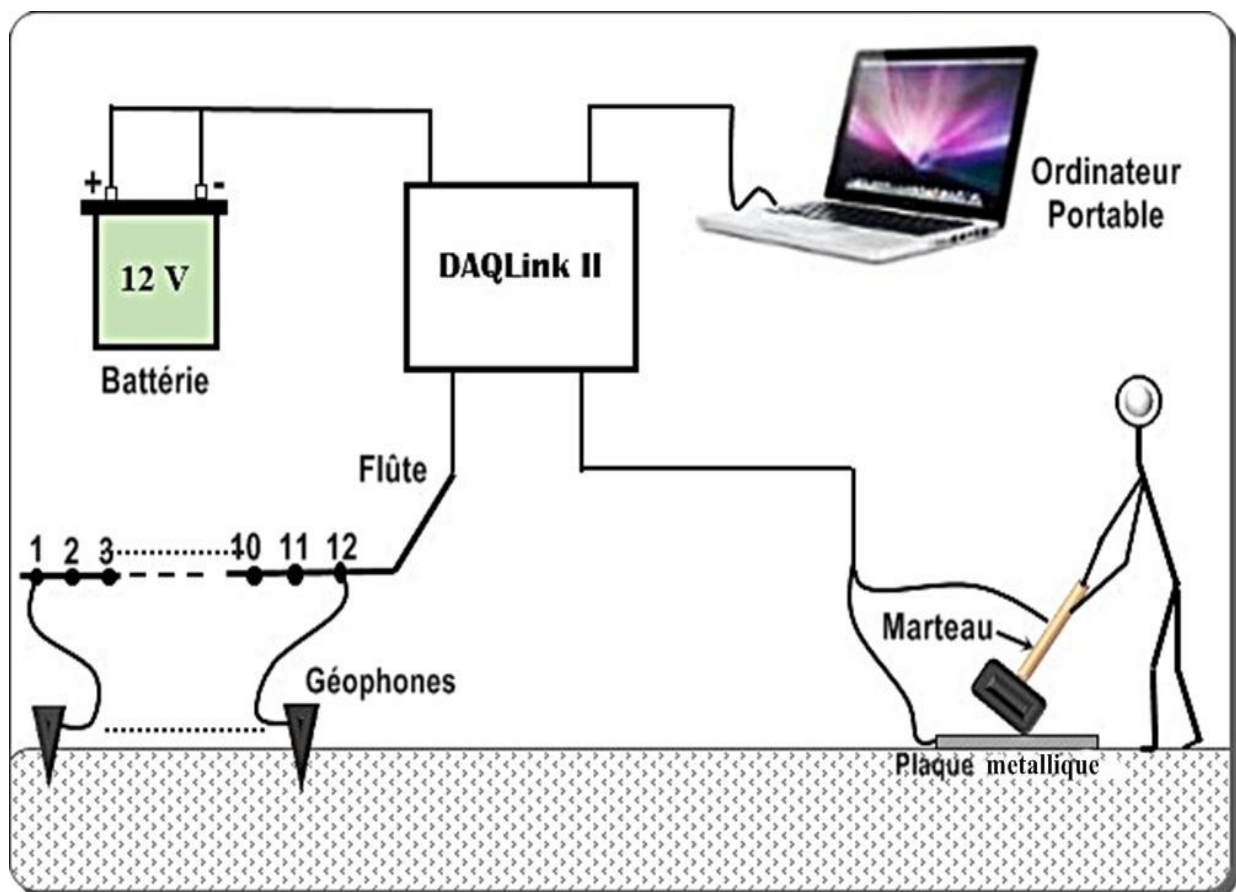


Figure II. 13: Diagramme montrant les branchements des différents appareils



### II.2. 3- Configurations géométriques

L'essai consiste à mettre en place à la surface du sol, un profil rectiligne de capteurs sismiques, appelée dispositif sismique, reliés par un câble de mesure à un enregistreur sismique. La source sismique est actionnée en différents points le long du dispositif et on enregistre le temps de propagation entre la source et chaque capteur. La source sismique et l'enregistreur sont synchronisés pour mesurer précisément l'instant de l'émission sismique (TB). L'enregistreur numérique à échantillonnage rapide permet également de sommer plusieurs émissions sismiques afin d'augmenter le rapport signal sur bruit. Typiquement, on utilise des dispositifs de 12, 24 ou 48 capteurs espacés de 5, 10 ou 20 mètres pour des profondeurs de reconnaissance variant de 15 m à 100 m. La source est généralement un dispositif de chute de poids mais on peut aussi utiliser de petites charges explosives mises à feu au fond de petits forages, ce qui est très efficace mais très contraignant réglementairement. Les temps de propagation sont reportés sur un graphique hodochrone.

L'imagerie du sous-sol par réfraction est fondée sur l'analyse des dromochroniques de réfraction, ce qui nécessite des tirs où les géophones sont alignés avec les points de tir (Mari J-L et al, 1998). Le dispositif de base pour une prospection sismique de surface utilisant la méthode réfraction est illustrée par la figure ci-après:

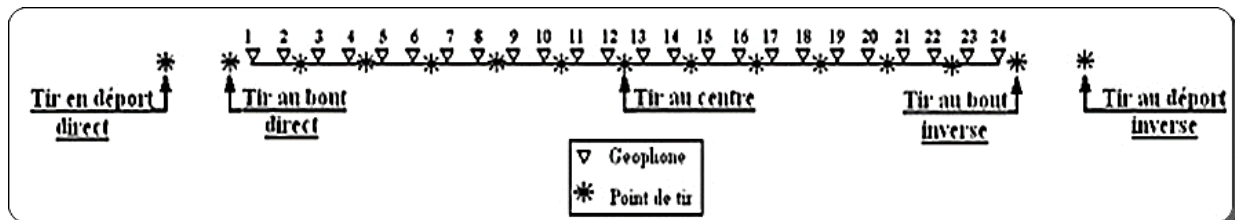


Figure II. 14: Disposition des tirs en sismique réfraction

Un certain nombre de géophones, 5 dans notre cas, sont étalés le long d'une ligne. Les tirs sont regroupés en deux catégories : tirs aux bouts (offset) et tirs à l'intérieur de la ligne (on set). L'emplacement relatif des tirs étant choisis de façon à avoir une couverture complète du réfracteur et afin de fournir une résolution latérale adéquate (Underwood D, 2007). Pour notre étude, on a adopté les profils continus qui permettent de déterminer progressivement la morphologie des terrains présents et la variation de leur vitesse. Pour ce faire, on exécute successivement des tirs jointifs et alignés sur le profil choisi, ces tirs se recouvrent sur un ou deux géophones (Mari J-L et al, 1998).

### ❖ Enregistrement numérique

Le mouvement du sol suite à un tir sismique et la sortie d'un géophone sont des fonctions continues dans le temps. Ces sorties primaires sont de forme analogique. L'acquisition des données sismiques modernes se fait avec une visualisation directe à l'écran d'un ordinateur du mouvement du sol, c'est-à-dire que les fonctions continues analogiques sont digitalisées (échantillonnées suivant un intervalle de temps aussi petit que possible sans pour autant distordre le signal original) avant d'être stockées. Cette conversion analogique numérique (A/N) permet le traitement numérique des données, qui demeure un grand avantage de l'enregistrement numérique.

En réflexion, l'énergie de ces ondes étant faible, il est nécessaire d'avoir un bon couplage et une énergie de source plus puissante.

L'étape suivante consiste à développer les méthodes de traitement de données obtenues, le choix de méthode est un travail délicat, il faut avoir une maximum d'information sur le site étudié et sur les résultats attendues. Cette partie constitue l'un des objectifs principaux de cette mémoire d'où l'importance de développement de la méthode adoptée.

## II.3- METHODE D'INTERPRETATION

Plusieurs méthodes d'interprétation des données de sismique réflexion existent. Dans le cadre de ce mémoire, nous avons adopté la méthode inversion Tomographique qui est fréquemment utilisée et aussi elle constitue un moyen rapide de contrôler la validité des résultats.

### II.3.1- Méthode inversion TOMOGRAPHIQUE

La méthode du tomographique, implique la création d'un modèle de vitesse initial, et alors l'itération qui trace des rayons à travers le modèle, comparer le temps de parcours calculé au temps de parcours mesuré, modifier le modèle, et répéter le processus jusqu'à ce que la différence entre temps calculés et mesurés soit minimisée. Les maths sont assez complexes; ce qui est présenté ici est une démarche pour comprendre le calcul sous forme d'algèbre linéaire.

Le but essentiel est de trouver le temps de parcours minimum entre source et récepteur pour chaque paire de source-récepteur. Cela est accompli en résolvant les équations de  $L_{ij}$  (trajectoire du rayon) et  $S$  (inverse de vitesse).

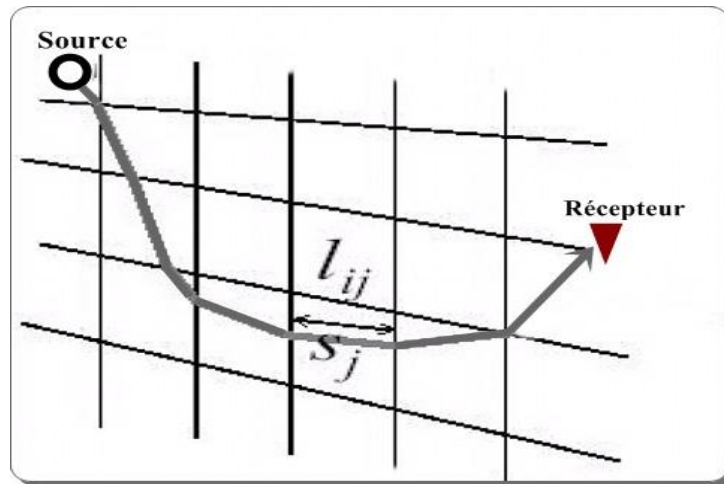


Figure II.15: Temps de parcours Tomographique et rayon réfracté entre source récepteur.

On définit:

$$S = \frac{1}{V}$$

$S$  = Inverse de la vitesse

$V$  = Vitesse

$L_{ij}$  = Trajectoire du rayon

Le temps de parcours est obtenu par la formule ci-après :

$$t_i = \int_X \frac{dX}{V(X)} = \int_X S(X) dX$$

En discrétisant, nous obtenons:

$$t_i = S_1 L_{i1} + S_2 L_{i2} + S_3 L_{i3} + S_4 L_{i4} + \dots + S_N L_{iN}$$

Ou

$$t_i = \sum_{j=1}^N S_j L_{ij} \quad (II. 21)$$

Nous finissons avec M équations simultanées (un pour chaque temps de parcours), et N inconnus:



$$\begin{aligned}
t_1 &= L_{11}S_1 + L_{12}S_2 + \cdots + L_{1N}S_N \\
t_2 &= L_{21}S_1 + L_{22}S_2 + \cdots + L_{2N}S_N \\
t_3 &= L_{31}S_1 + L_{32}S_2 + \cdots + L_{3N}S_N \\
&\vdots \\
t_M &= L_{M1}S_1 + L_{M2}S_2 + \cdots + L_{MN}S_N
\end{aligned}$$

Dans la notation matricielle, nous obtenons:

$$LS = \begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdot & l_{1N} \\ l_{21} & l_{22} & \cdot & l_{2N} \\ l_{31} & l_{32} & \cdot & l_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{M1} & l_{M2} & \cdot & l_{MN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ \vdots \\ S_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \cdot \\ t_M \end{pmatrix} = T$$

Trajectoire du rayon      Modèle      Temps de parcours

### Résumé général:

Calcul du temps de parcours le plus court en traçant les rayons:

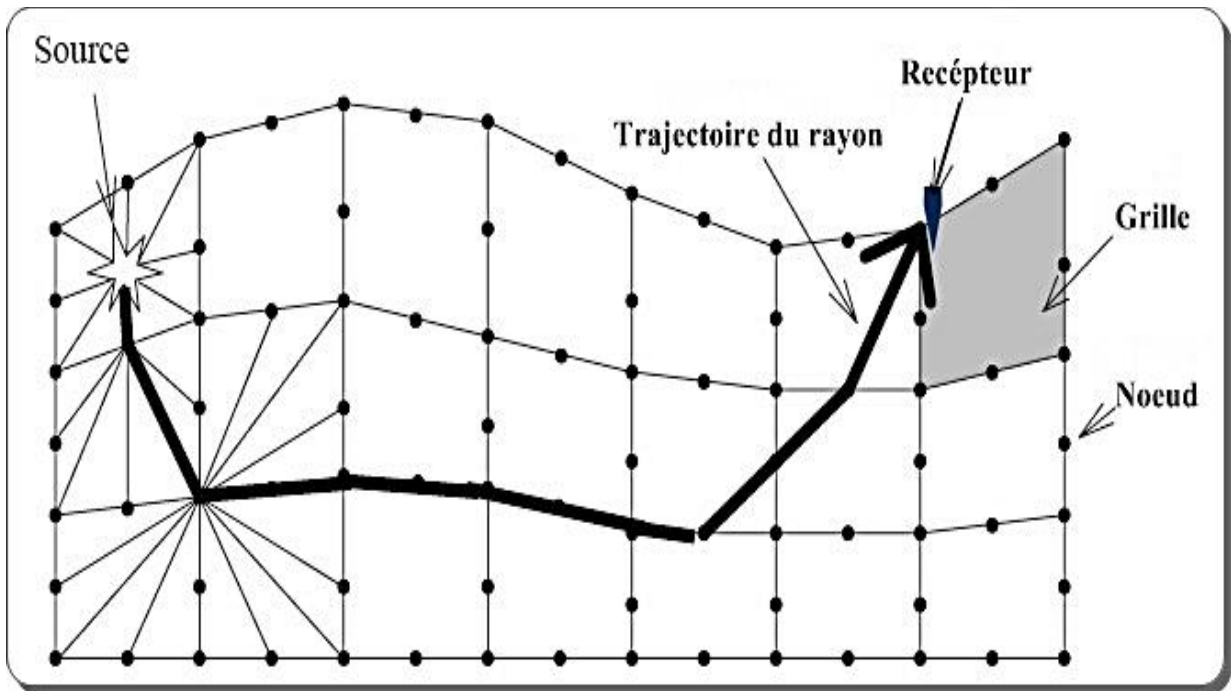


Figure II. 16: Illustration de calcul de temps de parcours par méthode tomographique

### II.3.2- Problème lors de l'INTERPRETATION

Bien que dans la majorité des cas, la sismique réfraction permette de définir avec une précision supérieure à 10 % la profondeur des couches incluant le roc, il existe des conditions physiques pour lesquelles la profondeur est mésestimée de façon grossière. Pour certaines de ces situations, la connaissance du problème grâce à d'autres méthodes (forage, résistivité) permet de ramener la marge d'erreur à l'intérieur d'un écart de 10 % généralement accepté.

Au nombre de ces problèmes, on rangera les cas de couches cachées et ceux d'inversion de vitesses. Il existe cependant d'autres cas, tels les failles à déplacement vertical, pour lesquels il n'existe pas de technique d'interprétation exacte, même en présence de forage. Une réinterprétation des données pourra permettre de réduire la marge d'erreur. Cependant, cette réinterprétation étant fondée sur des hypothèses ne pouvant pas être vérifiées, il arrive dans certains cas que la marge d'erreur demeure importante.

Compte tenu de la présence possible de ces problèmes lors de l'exploration sismique effectuée dans le cadre de ce projet, nous incluons ci-après une description plus complète de celles-ci. Certains de ces cas sont illustrés dans les pages qui suivent.

#### ▪ COUCHE CACHEES

Dans le cas de la couche cachée, compte tenu de la vitesse de propagation des ondes dans les matériaux, une couche ne possède pas une épaisseur suffisante en comparaison de sa profondeur et ne peut être détectée. Si l'on ignore la présence de ces horizons, la profondeur calculée sera plus petite que la profondeur réelle.

Pour arriver à une interprétation valable, on doit donc identifier dans le train d'arrivées secondes, les arrivées correspondant aux réfractions critiques sur les horizons qui nous intéressent. Cette tâche est en général très difficile puisque ces arrivées secondes se confondent souvent entre elles ou avec les arrivées d'ondes d'un autre type (onde S) ou avec les arrivées correspondant à des réfractions non critiques ou des réflexions. Notons que, dans ce type de problème, la profondeur calculée est toujours inférieure à la profondeur vraie.

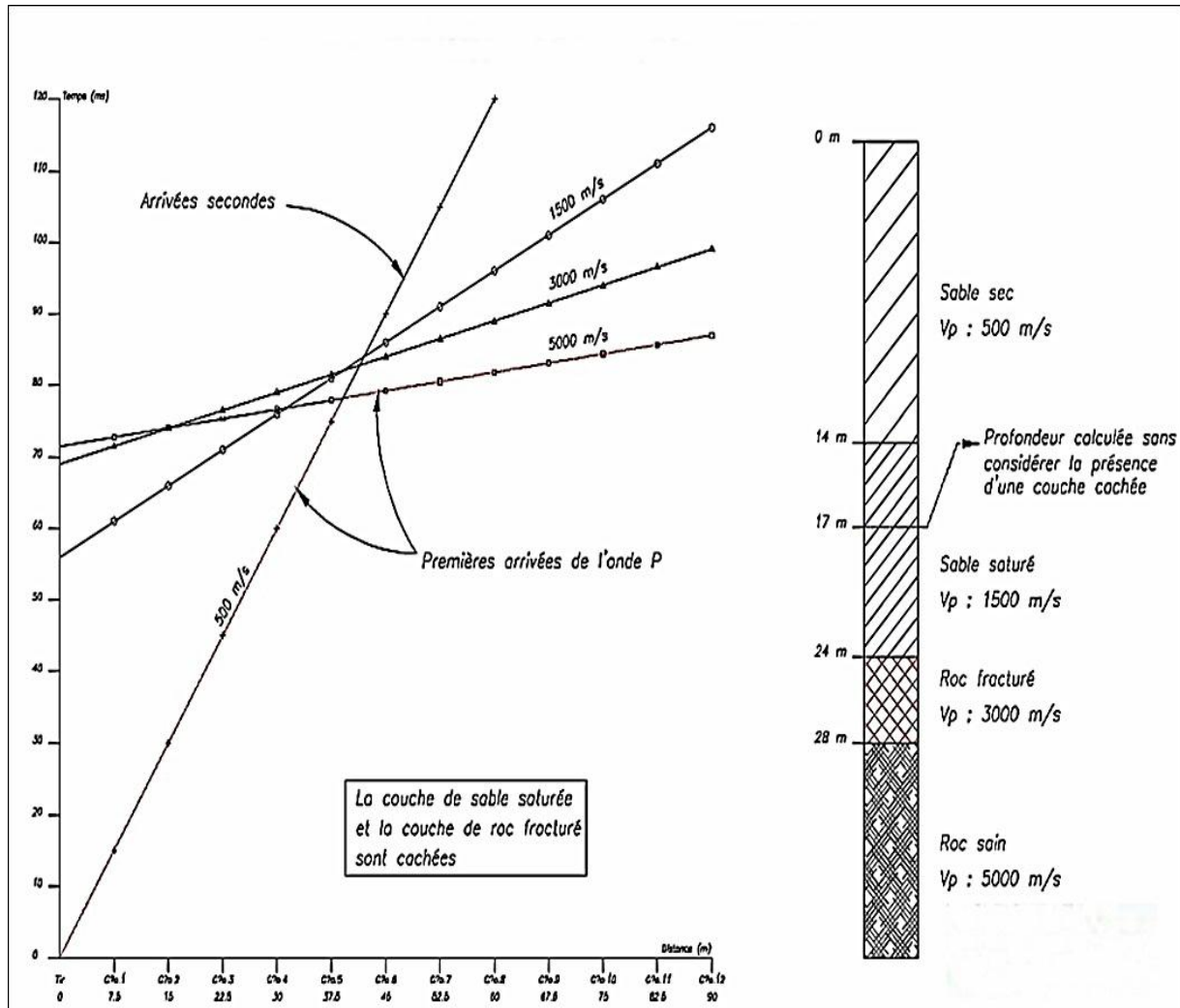


Figure II.17: Exemple d'un cas de couche cachée

### ■ INVERSION DE VITESSES

Dans le cas de l'inversion de vitesses, la vitesse d'onde dans une couche est inférieure à la vitesse de propagation de l'onde dans la couche située immédiatement au-dessus et dans la couche sous-jacente. En conséquence, il n'y a pas de réfraction critique; il s'ensuit donc que cette couche n'est pas observée. Elle n'est donc pas prise en considération dans les calculs, ce qui cause des imprécisions non négligeables.

Cette situation, plutôt rare heureusement, est illustrée à la figure suivante. À moins d'avoir les résultats d'autres méthodes, ce type de problème est impossible à résoudre étant donné qu'aucun signal n'a été réfracté par l'interface argile-sable ; au mieux, on pourra suspecter la présence d'un tel phénomène.

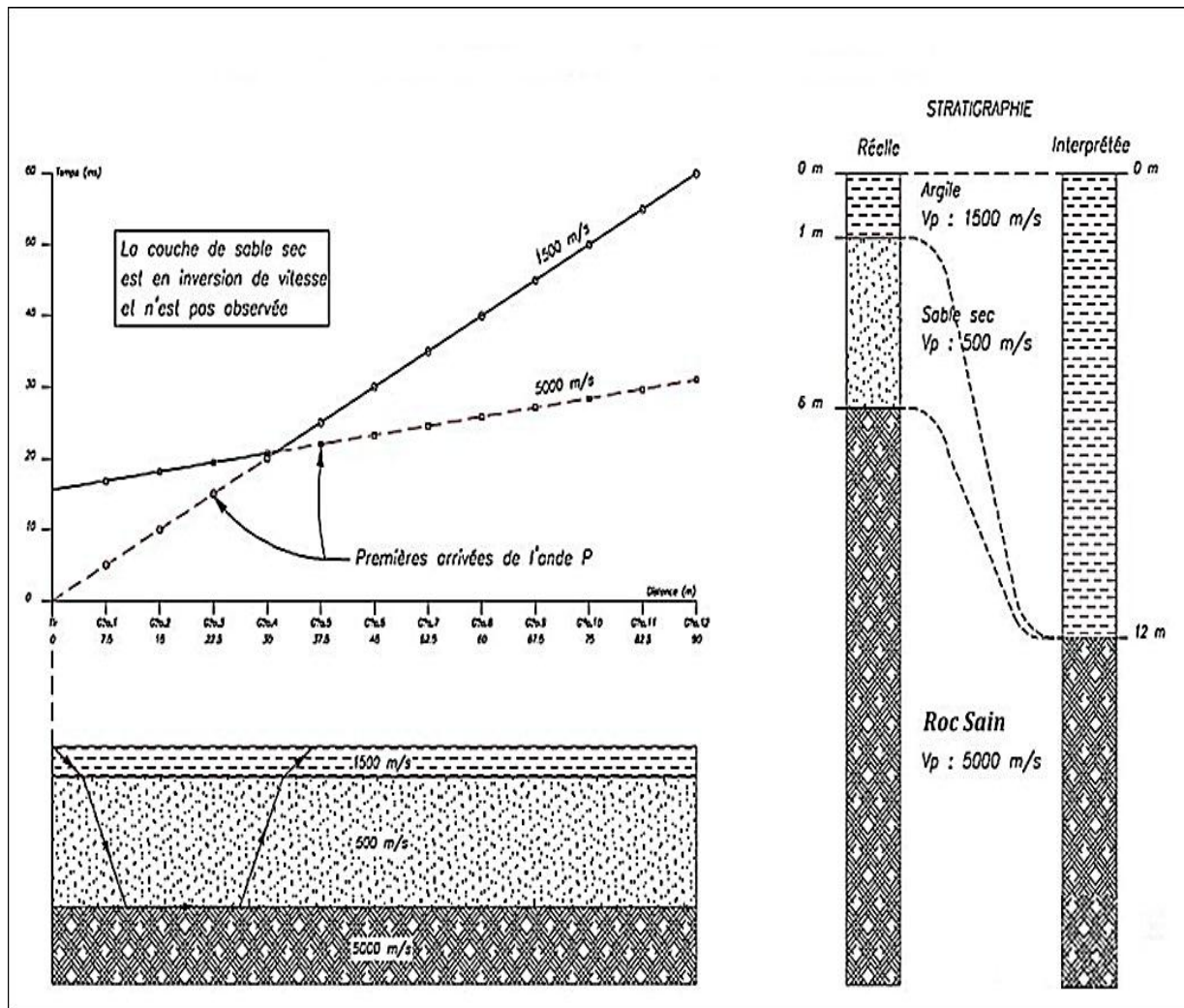


Figure II. 18: Exemple d'un cas d'inversion de vitesses

Dans le cas de la couche cachée et de l'inversion de vitesses, en l'absence de forage de validation, l'erreur sur la profondeur totale peut être de l'ordre de 25 à 50 % et même plus pour l'inversion de vitesses. Cependant, si le phénomène est observé par forage ou tout autre moyen, l'erreur peut facilement être ramenée à l'intérieur de la précision générale de la méthode, soit 10%.

De point de vue géologique, lorsqu'on définit par sismique réfraction la structure d'un ensemble géologique, les vitesses sismiques sont les paramètres qui séparent les différentes unités de cette structure. On attend de ces vitesses qu'elles offrent des contrastes suffisants pour que la structure apparaisse avec le maximum de finesse. Mais les vitesses sismiques ont une fonction bien plus importante que ce simple moyen mis à notre disposition pour définir les structures.

## II.4- ESTIMATION DES PARAMETRES PHYSIQUE DU SOUS-SOL.

La sismique réfraction est née du principe de réfraction des ondes élastiques traversant deux milieux caractérisés par un contraste de vitesse important. Pendant que la technique de la réfraction sismique mesure la vitesse sismique de rai en termes de matières, c'est l'interpréteur qui fait le travail de synchronisation des documents, basé sur la connaissance des conditions locales ou autres données (forage), pour arriver à une interprétation géologique solution raisonnable.

L'équation du temps de parcours de l'onde réfracté permet de déterminer les vitesses de propagation des ondes sismiques, ainsi que la profondeur des différentes interfaces. Puisque, la méthode sismique a été construite à partir de la relation paramètre élastique et vitesse de propagation de l'onde, les paramètres physiques du sous-sol sont la vitesse de l'onde de compression  $V_p$  et l'épaisseur de la couche qui fait l'objet de cette partie.

### II.4.1- Vitesses des couches

Le premier paramètre physique du sous-sol est la vitesse de l'onde de compression (P) dans les matières qui constitue le sous-sol. Bien que la vitesse de l'onde P puisse être une bonne indicatrice du type de sol, ce n'est pas un indicateur unique. Cependant, elle nous permet de déterminer la profondeur, le pendage, la position des miroirs et même la nature des roches et leur fluide interstitiel. Cette vitesse dépend de plusieurs facteurs comme le degré de compacité et d'altération, et de la lithologie.

Géophysiquement, la vitesse de l'onde P dépend des modules élastiques ( $K, \mu$ ) et de la densité  $\rho$  et on peut calculer directement cette vitesse par la formule:

$$V_p = \sqrt{\left[ \frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho} \right]} \quad (II.22)$$

D'un point de vue plus large, la vitesse de propagation des ondes sismiques dans un sol renseigne sur ses caractéristiques mécaniques en domaine élastique. Pour des déformations de faible amplitude, les différents modules élastiques du matériau ( $K, \mu, E$ ) peuvent être calculés en connaissant la masse volumique  $\rho$  et la vitesse de propagation des ondes de compression ( $V_P$ ) et de cisaillement ( $V_S$ ), selon les équations suivantes :

- Module d'incompressibilité  $K$  :  $K = \rho \left( V_P^2 - \frac{4}{3} V_S^2 \right)$  (II.23)

- Module de cisaillement  $\mu$  (ou  $G$ ):  $\mu = G = \rho V_S^2$  (II.24)

- Module Young  $E$  :  $E = \rho V_P^2 \frac{(1-2\sigma)(1+\sigma)}{(1-\sigma)}$  (II.25)

Où le coefficient de Poisson  $\sigma$  est définie par:

$$\sigma = \frac{(V_P^2 - 2V_S^2)}{2(V_P^2 - V_S^2)} \quad (II.26)$$

Il a été également établi, après calcul, que dans un solide élastique, le rapport entre la vitesse de propagation de l'onde de compression et de cisaillement:

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{3} \quad (II.27)$$

Lorsqu'on provoque un ébranlement en surface, le mouvement initial se propage en profondeur sous forme d'ondes élastiques ou sismiques. Les vitesses de propagation longitudinale et transversale sont données par les formules :

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{d(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (II.28)$$

$$V_t = \sqrt{\frac{E}{d \times 2(1+\sigma)}} \quad (II.29)$$

$E$ =module d'élasticité d'Young,  $d$ =densité,  $\sigma$ : coefficient de poisson

$V_L$  = vitesse logitudinale  $V_t$  = vitesse transersale

On voit sur ces formules que la vitesse est liée aux caractéristiques mécaniques de la roche, en particulier à son état de compacité où de fracturation en place. Ces formules sont valables en milieu isotrope et parfaitement élastiques.

#### II.4.2- Epaisseur des couches

Le second paramètre physique du sous-sol est la profondeur. L'équation du temps d'intercept de déterminé ce paramètre. Connaissant les vitesses  $V_p$  pour chaque couche sous les géophones, on peut obtenir la profondeur du réflecteur correspondant comme montre cette étude:

Soit

$$Inclinaison = \frac{\text{Changement du temps}}{\text{changement du distance}}$$

La vitesse se définit :

$$V = \frac{1}{\text{inclinaison}}$$

La profondeur sous les géophones a été obtenue par la formule ci-après, connaissant les vitesses  $V_1$  et  $V_2$ .

$$Z = \frac{T_i}{2} \frac{V_1 V_2}{\sqrt{(V_2^2 - V_1^2)}} \quad (II.30)$$

En utilisant la distance critique :

$$Z = \frac{X_c}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad (II.31)$$

Pour le calcul, les équations suivantes sont utilisées pour déterminer l'épaisseur de la couche i :

$$Z_i = \frac{T_i}{2} \frac{V_i}{\cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{V_i}{V_{i+1}}\right)\right)} \quad (II.32)$$

Où par l'équation de distance critique

$$Z_i = \frac{X_{ci}}{2} \sqrt{\frac{V_{i+1} - V_i}{V_{i+1} + V_i}} + \sum_1^{i-1} (Z_{i-1} Y_{i+1,i}) \quad (II.33)$$

Où:

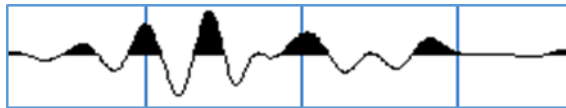
**$Z_i$**  : est l'épaisseur de la couche i

**$V_i, V_{i+1}$**  : sont les vitesses de propagation dans les couches i, i+1

**$X_{ci}$**  : est la distance critique i (i.e. la distance à laquelle le temps de parcours par la couche i est égale au temps de parcours par la couche i+1)

Notons que ces méthodes ont été développées en prenant pour hypothèses que les couches sont subparallèles, d'épaisseurs suffisantes pour être détectées et que la vitesse de propagation des ondes dans une couche est toujours inférieure à celle de la couche sous-jacente.

## **CHAPITRE III :** **APPLICATION ET INTERPRETATION**





La réalisation de cette campagne sismique en adoptant la méthode réfraction nécessite des techniques sur la mise en place de des profils, l'utilisation des logiciels de haut niveau mini des méthodes d'interprétation et des corrections qui fait l'objet de ce dernier chapitre.

### III.1- LES PROFILS SISMIQUES

#### III.1.1- Technique et choix du profil

Comme toutes les méthodes de géophysique classiques, la sismique réfraction comporte des limitations. Principalement, elles sont assez sensibles aux effets de relief de la surface, aussi bien que de celui du sous-sol. Il y a lieux de bien comprendre ces limites lors de l'implantation sur le terrain. De plus, il est important de pouvoir caler les mesures avec des forages.

L'essai consiste à mettre en place à la surface du sol, un profil rectiligne de capteurs sismiques, appelée dispositif sismique, reliés par un câble de mesure à un enregistreur sismique. La source sismique est actionnée en différents points le long du dispositif et on enregistre le temps de propagation entre la source et chaque capteur. La source sismique et l'enregistreur sont synchronisés pour mesurer précisément l'instant de l'émission sismique (TB).

L'enregistreur numérique à échantillonnage rapide permet également de sommer plusieurs émissions sismiques afin d'augmenter le rapport signal sur bruit. Typiquement, on utilise des dispositifs de 12, 24 ou 48 capteurs espacés de 5, 10 ou 20 mètres pour des profondeurs de reconnaissance variant de 15 m à 100 m. La source est généralement un dispositif de chute de poids mais on peut aussi utiliser de petites charges explosives mises à feu au fond de petits forages, ce qui est très efficace mais très contraignant réglementairement. Les temps de propagation sont reportés sur un graphique hodochrone.

#### III.1.2- Mise en place des profils sismiques

Dans une première approche on peut dimensionner la profondeur d'investigation  $h$  par la relation avec la longueur  $L$  de la ligne d'acquisition :

Lors de la mise en place des profils sismiques, un bon dimensionnement des tirs d'*offset* permet d'assurer une profondeur d'acquisition uniforme sur le profil. Mesurer la

position des géophones avec une précision centimétrique (DGPS + opérateur compétent). Dans le but d'améliorer la comparaison entre le résultat des forages et des profils sismiques, implanter, si possible, les profils proches de gros blocs pour fixer une sondeuse. Eviter d'implanter les profils trop proches de la rupture de pente, la méthode étant sensible aux effets de bord.

Deux profils sismiques globalement perpendiculaires ont été réalisés sur le site (cf. fig.7). Ils ont été disposés ainsi afin de faire le suivi de la structure du substratum (pendage, fracture...). Rappelons que la disposition et la structure de ce dernier conditionne en majeure partie la direction de l'écoulement souterrain.

Ces deux profils ont été réalisés avec une distance inter-géophones de 2m, donnant ainsi une profondeur d'investigation moyenne de l'ordre de 15m.

#### ▪ **Implantation des profils sismiques**

Le choix de la direction du profil a été réalisé en prenant en considération la morphologie du terrain et le sens probable d'écoulement dans le substratum. L'étalement du dispositif a été fait de façon à nous donner le maximum d'informations sur l'évolution du substratum. Comme le gisement n'est recouvert d'une végétation, l'ouverture des layons pour étaler le dispositif n'est pas nécessaire. Pour l'alignement des 24 géophones qui constituent la ligne sismique on n'a pas besoin d'une boussole. 2 profils sismiques mesurant 50 m ont été implantés sur le site d'Ambalakely. La distance inter-géophone 2 m a été adoptée,

#### **Précaution à prendre lors de l'acquisition des données sismiques**

- les géophones doivent être implantés verticalement,
- la vibration générée à la source doit être nette et puissante,
- le contact géophone / flûte bon,
- le bruit de fond, minimum possible.

La sismique réfraction nécessite uniquement la mesure des délais de propagation des ondes P, ondes arrivant le premier sur les géophones (ondes directes, ondes réfractées). La présentation graphique du temps en fonction de la distance Source et Géophone donne l'hodochrone ou dromochroniques.

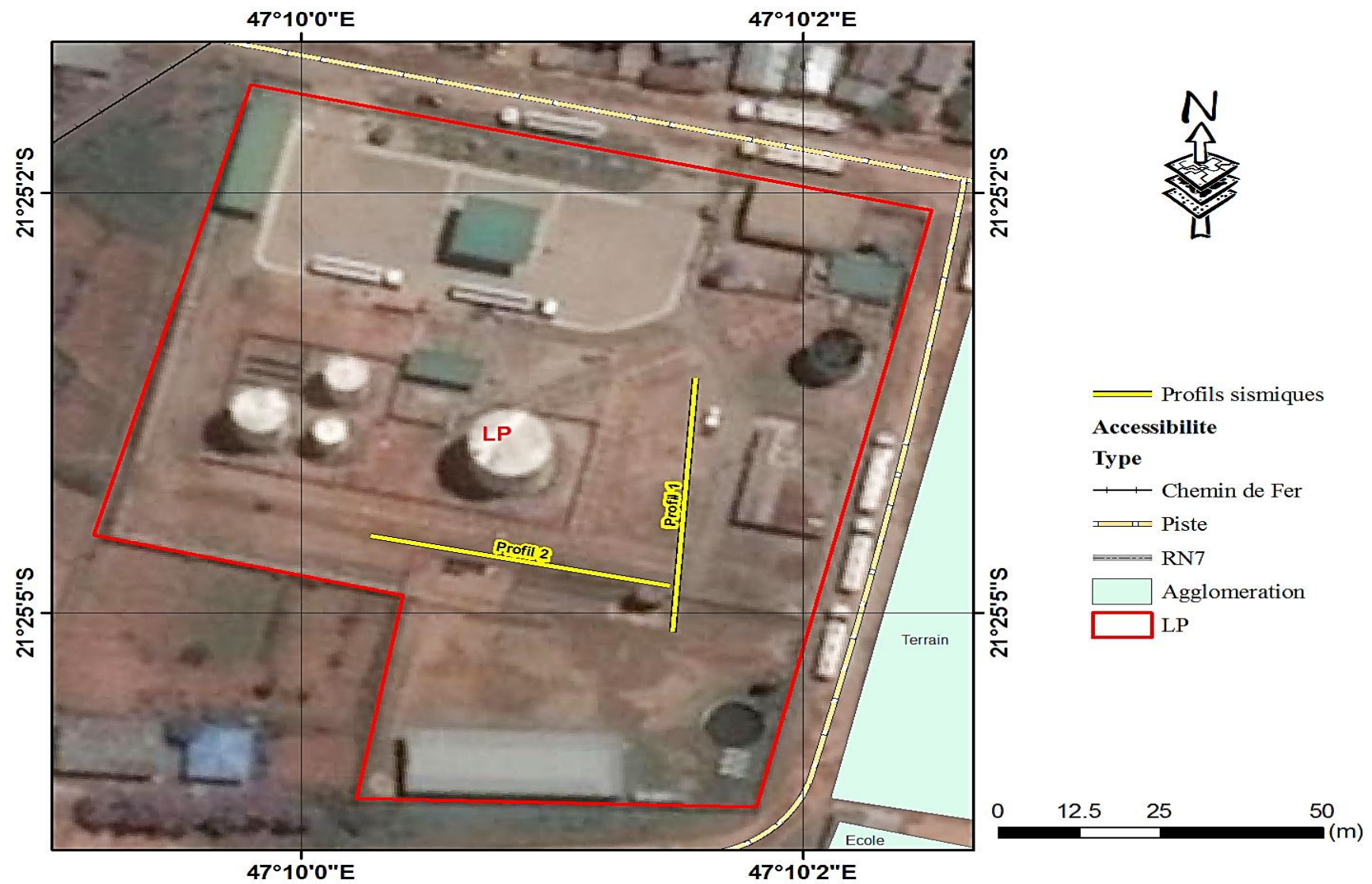


Figure III. 1: Emplacement du profil sismique

### III.2- METHODES ET LOGICIELS DE TRAITEMENT

En général, les traitements des données pour l'obtention d'une coupe de vitesse en sismique réfraction se résument en deux étapes : pointage des premières arrivées et la transformation de ces pointages sous forme de coupe de vitesse reflétant l'épaisseur de chaque couche. Les dromochroniques ou les courbes d'hodochrone sont les résultats de la première étape; la coupe de vitesse est obtenue après calcul et transformations suivant la méthode de traitement adoptés.

Pour notre étude le processus de traitement est résumé dans le schéma ci-après:

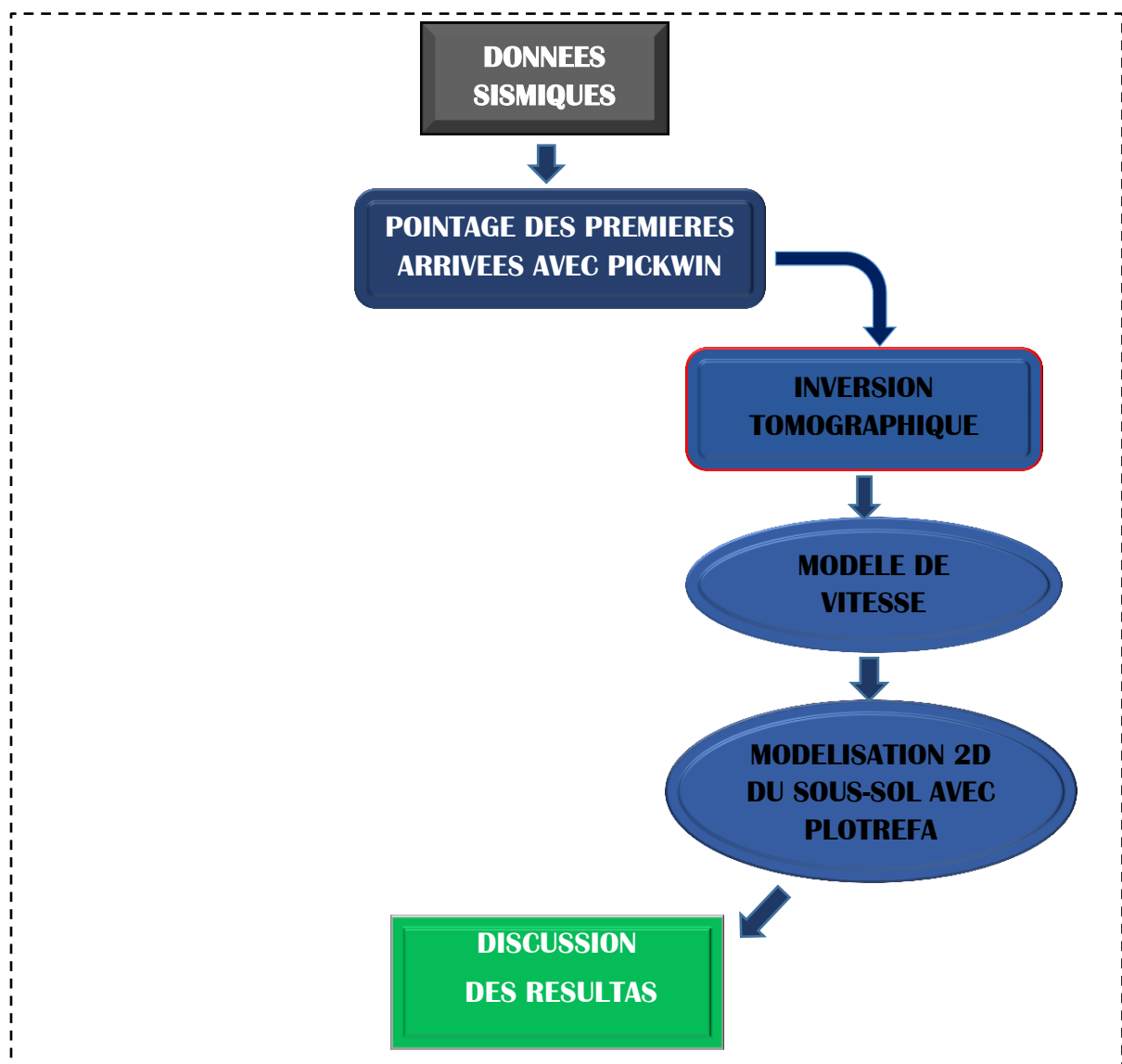


Figure III.2: Organigramme des traitements des données sismiques

Pour le traitement des données sismiques on utilise SEISIMAGER, avec les modules PICKWIN et PLOTREFA.

### III.2.1- Présentation des logiciels

#### ▪ Le logiciel SEISIMAGER

Le logiciel SeisImager est fourni par OYO corporation en japon. C'est un logiciel de traitement d'onde de vibration. Principalement utilisé dans le domaine de la géotechnique, il permet de traiter les données de sismique réfraction, d'ondes de surface actives et passives. La conception modulaire de SeisImager en fait un outil complet et évolutif pour l'analyse de nos données sismiques. Déplus le logiciel est reconnu pour la qualité de ses résultats et sa très grande convivialité.

Le module « SeisImager 2D » permet l'analyse de la sismique réfraction en proposant 3 méthodes différentes selon la complexité de l'étude. On peut interpréter les données en utilisant la méthode de la "distance critique", la "méthode réciproque" ou bien la "méthode en tomographie".

SeisImager est une plateforme de 4 logiciels composé de :

- **Pickwin:** Assemblage des enregistrements, édition de la géométrie des dispositifs, pointage des premières arrivées au niveau de chaque capteur.
- **Plotrefa:** Modélisation de vitesse, création d'hodochrone et modélisation 2D du sous-sol.
- **WaveEq (WEQ):** Analyse des courbes de dispersion et les fonctions de calculs.
- **Surface wave (SW) :** qui permet d'analyser les ondes de surfaces.

Lors des traitements informatiques des données sismiques, nous utilisons le logiciel Pickwin et Plotrefa. Afin de pouvoir modéliser le sous-sol et savoir le sens de l'écoulement, il est nécessaire de savoir plus sur ces logiciels, d'où l'intérêt de cette étape suivant.

### ▪ Le module PICKWIN <sup>TM</sup>

Le logiciel « Pickwin » a été conçu, pour effectuer comme tâches : l'élimination du bruit du fond obtenue lors de la mesure à l'aide d'un filtre passe bas et le pointage de la première arrivée des ondes à chaque signal au niveau des 24 géophones, c'est à dire, on marque sur les signaux le temps d'arrivée des ondes P.

Ce module peut lire comme type de format des données (.dat, .sg2), l'architecture du logiciel nous conduit à faire successivement les étapes suivant : la lecture des données, puis l'ajustage des paramètres, le pointage des premières arrivées et le sauvegarde du pointage sous format (.vs) afin de continuer le traitement dans le module Plotrefa.

Voici l'algorithme général montrant le processus des traitements des données dans le module Pickwin.

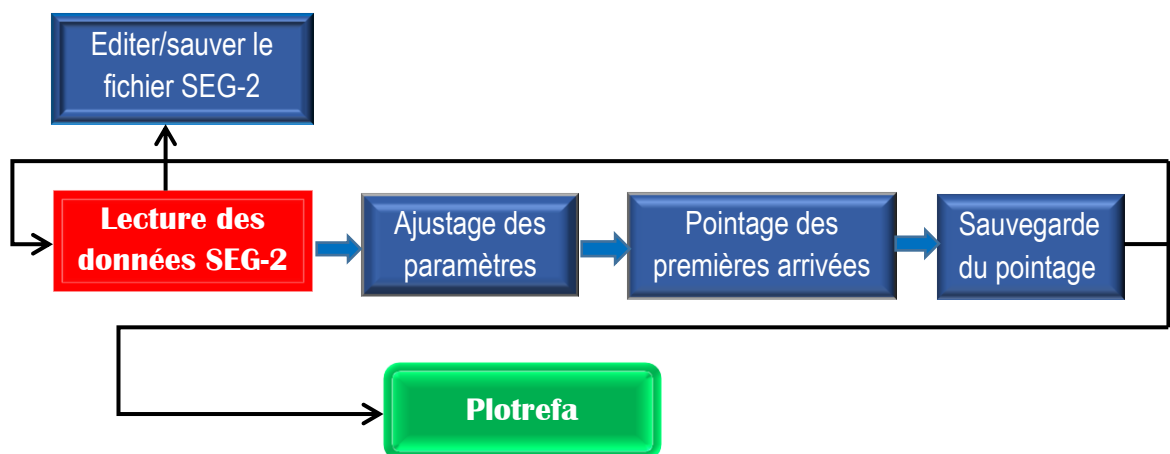


Figure III. 3: Organigramme des traitements des données dans Pickwin

Les démarches à suivre pour le traitement informatique des données dans l'interface du module Pickwin sont les suivant :

### ▪ Pointage des premières arrivées

- Ouvrir le fichier .sg2 du profil P1 sous l'icône
- Ajustement des paramètres avec les boutons
- Pointage des premières arrivées avec le bouton
- Puis joignez-les avec le bouton

Puis, on répète le même processus d'opération du «*Pointage des premières arrivées*» en ajoutant les autres données du même profil avec l'option «new file» et on travaille dans le même fichier.

On termine cette par le sauvegarde du pointage dans le menu « file » l'option « save first break pick file».

#### ▪ Le Module PlotRefa<sup>TM</sup>

**PlotRefa** est le second module de l'interprétation du logiciel de SeisImager/2D. Il prend la production de **Pickwin** comme type de données à traité, et reprend le travail à travers d'un des trois techniques disponibles de l'interprétation à savoir : la méthode en terme de temps, la méthode Inversion du temps où Delay Time et la méthode Tomographique, en fournissant une carte de section de vitesse. Le module comporte plusieurs articles de menu (Figure III) et on applique à chacun des trois techniques d'interprétation le traitement correspondant avec le même ensemble des données.

Comme **Pickwin**, l'interface utilisatrice de **Plotrefa** consiste en une série de menus avec un toolbar. Nous discuterons maintenant en détail les plusieurs menus de **Plotrefa**.

#### ▪ Aperçue de l'interface

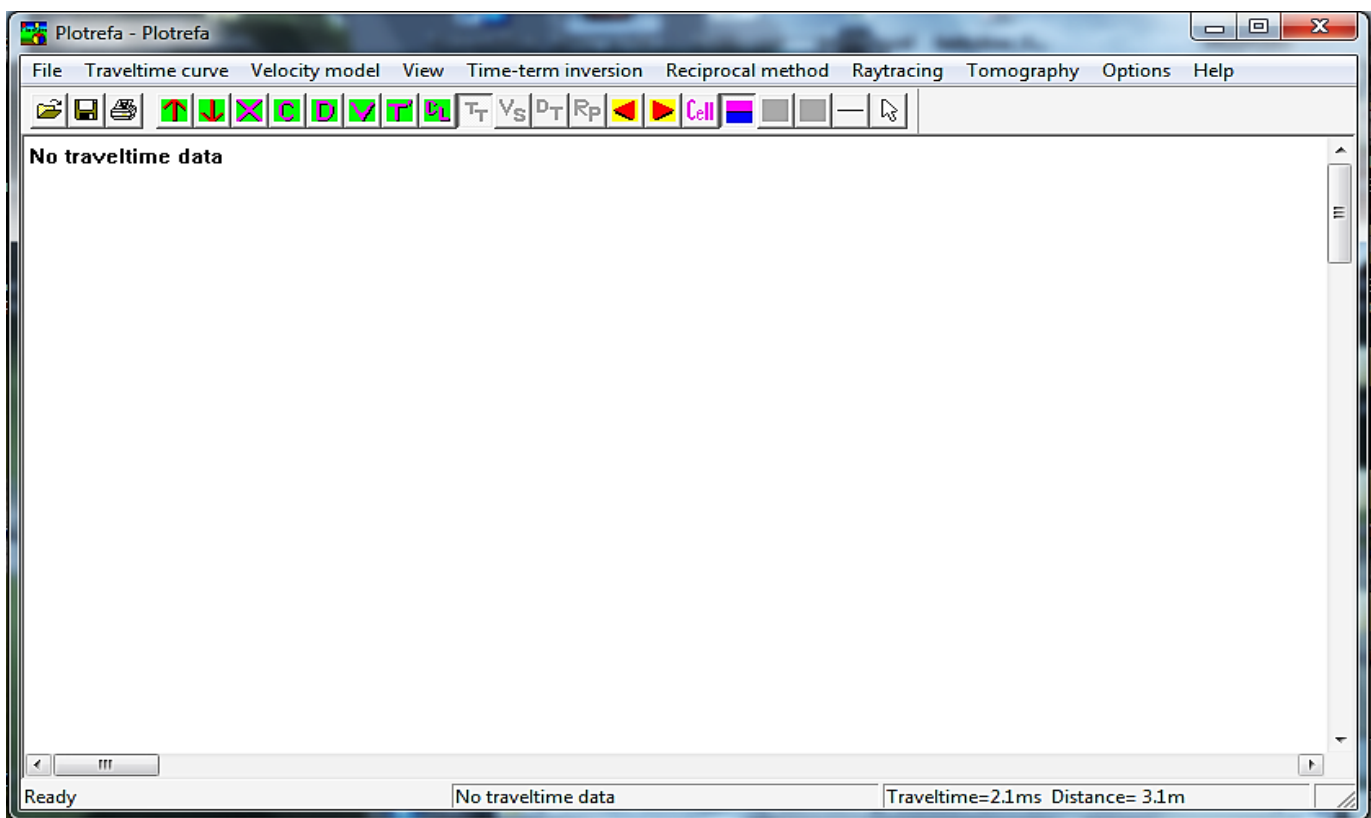


Figure III. 4: Présentation de l'interface Plotrefa



Nous allons maintenant procéder aux deux méthodes d'interprétation des hodochrones qui sont la méthode Tomographique et la méthode de Plus Minus qui est une méthode semblable à la méthode de Temps de Délai.

### III.2.2- Méthode inversion TOMOGRAPHIQUE

En général, l'inversion Tomographique est utilisée lorsque les contrastes de la vitesse sont plus discrets, en présence des fortes variations de la vitesse horizontales, et dans de topographie extrême. Tous ces cas peuvent mener aux résultats erronés avec les deux techniques de l'interprétation antérieures, selon la sévérité. Le processus à suivre d'une inversion tomographique est montré dans le diagramme du courant dessous:

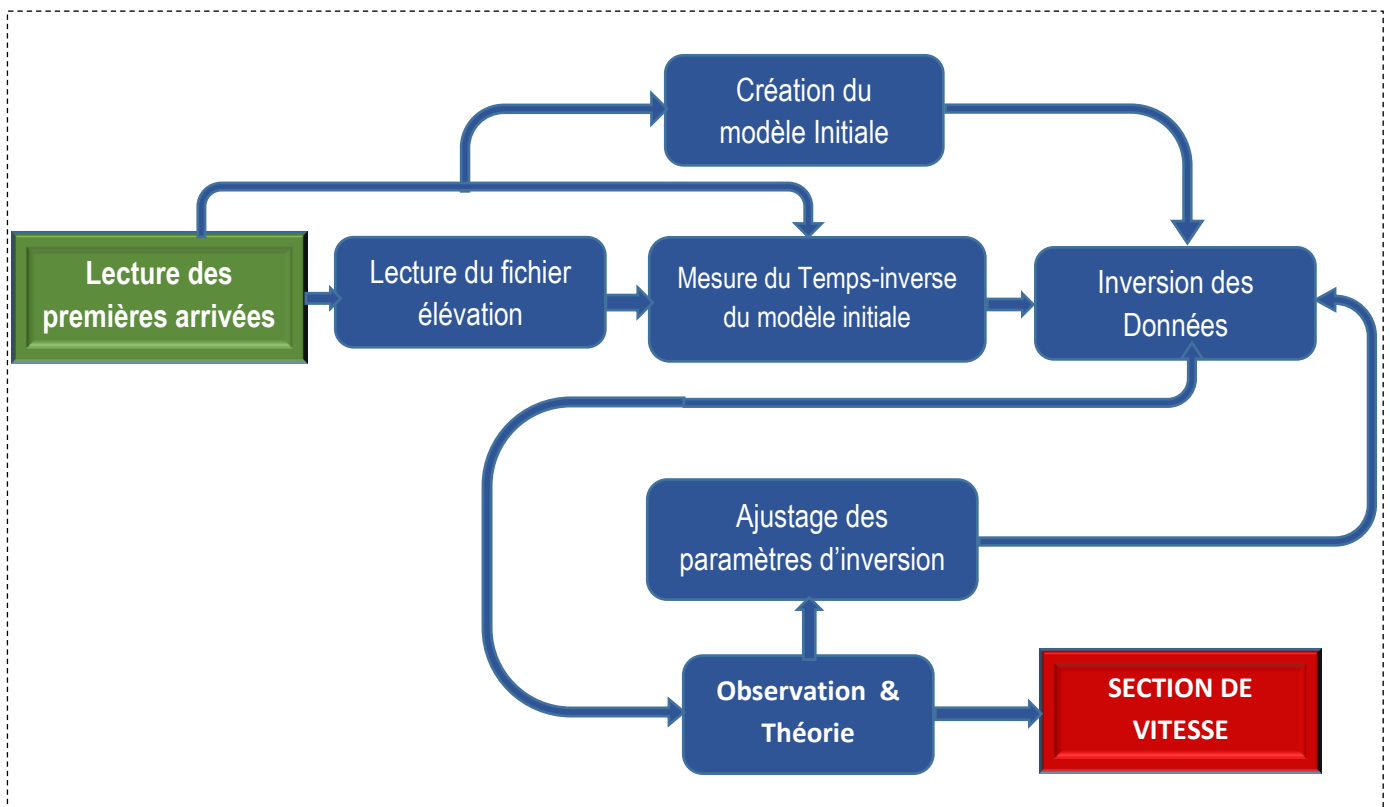


Figure III. 5: Algorithme générale de la méthode inversion Tomographique

Afin de pouvoir réaliser ces étapes de traitements citez ci-dessus et d'en discutez sur les processus et le produits obtenu à chaque étape, le logiciel PickWin semble performant pour le pointage et le logiciel PlotRefa pour l'interprétation des courbes hodochrones.



### III.3-RESULTAT avec PICKWIN™

La méthode de la sismique réfraction est basée sur le temps d'arrivée des ondes P que l'on peut déterminer sur « les films » enregistrés sur le terrain ou sur l'écran de l'ordinateur.

#### III.3.1- Pointage des premières arrivées


C'est un procédé de traitement numérique des signaux enregistrés à l'aide d'un logiciel Pickwin. La technique consiste à détecter et à pointer le premier temps d'arrivée du signal au niveau de chaque capteur. Le signal à pointer est de type basse fréquence forte amplitude ce qui le diffère des bruits naturels (signaux de haute fréquence).

On commence par augmenter l'amplitude des signaux puis on coupe les parties supérieures à l'aide du bouton CLIP, cette méthode permet d'afficher seulement une partie du temps enregistré. La suite consiste à pointer les premières arrivées sur chaque trace et de joindre pour avoir la courbe d'hodochrone, en répétant l'opération avec d'autres données des suivant tirs sur le même profil.

Un exemple de pointage et d'interprétation par méthode inversion tomographique sera développé dans cette partie de l'étude.

#### ▪ Technique de pointage

Un bon pointage des films conditionne une interprétation correcte, alors il faut faire attention sur la façon de pointage et bien distinguer l'onde de perturbation d'air et la premières arrivées des onde de compression P. Les erreurs commise sur le pointage des premières l'arrivée conditionne la fiabilité des résultats tant sur les courbes dromochroniques ainsi que sur les coupes de vitesses. Voici un exemple de pointage de ce type d'onde:

- 1) Ouvrir le fichier SEG-2 

La figure III.6 ci-dessous montre un exemple de lecture de donnée du profil P1 (00000007 .sg2), tir effectué au centre. L'arrivée des ondes de compression P est indiquée en rouge sur cette figure.

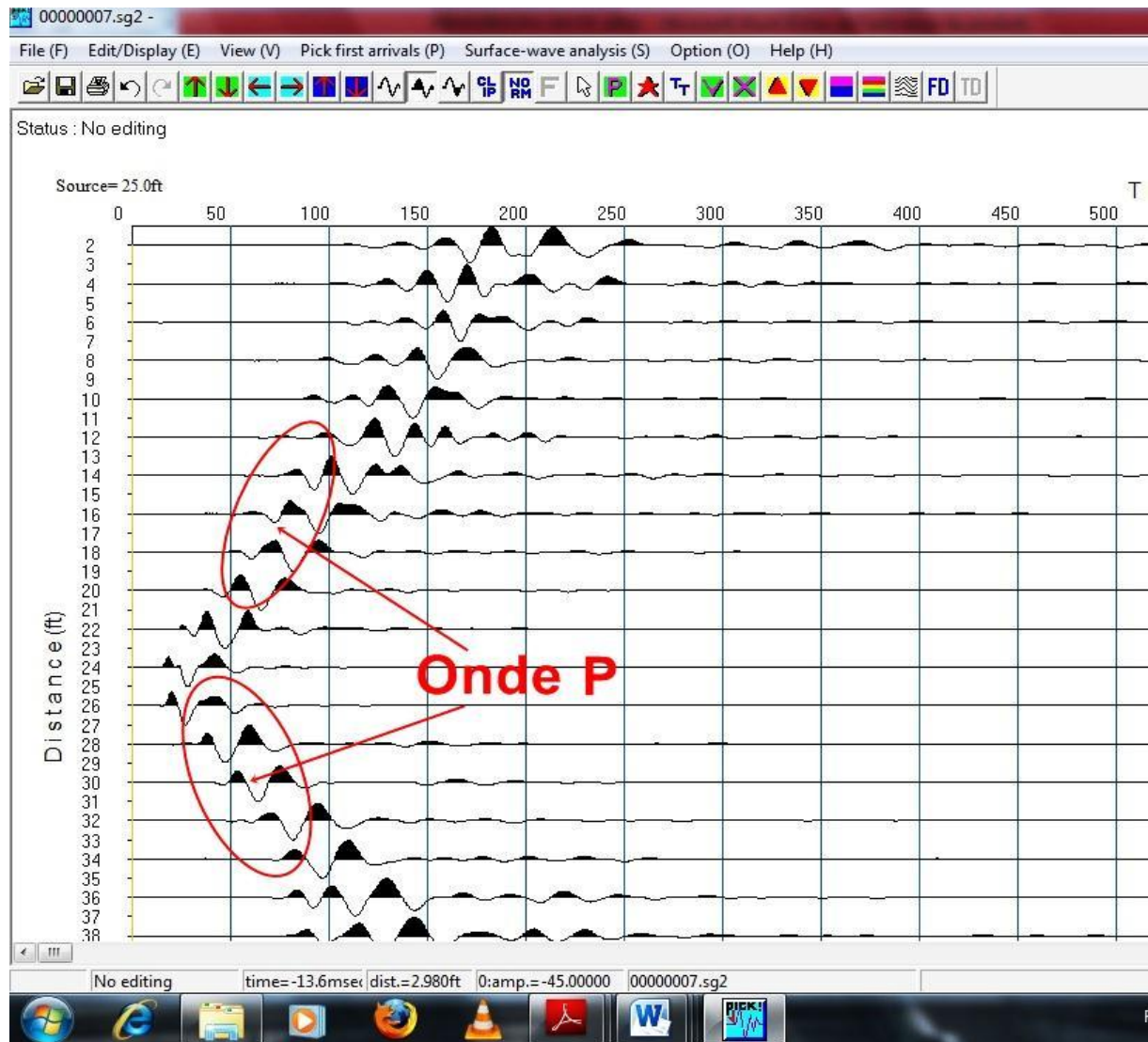


Figure III. 6: Lecture du fichier .sg2 des films sismique

- 2) Ajustage des paramètres
- 3) Pointage de premières arrivées
- 4) Ajustage manuel des pointages
- 5) Joignez les pointages avec
- 6) Sauvegarde du pointage (optionnel)
- 7) Lecture du nouveau fichier
- 8) Répétitions de l'opération pour les autres tirs

La figure ci-après montre les deux courbes d'hodochrones correspondants aux deux tirs directs OffSet et OnSet ainsi que le pointage du tir au centre.

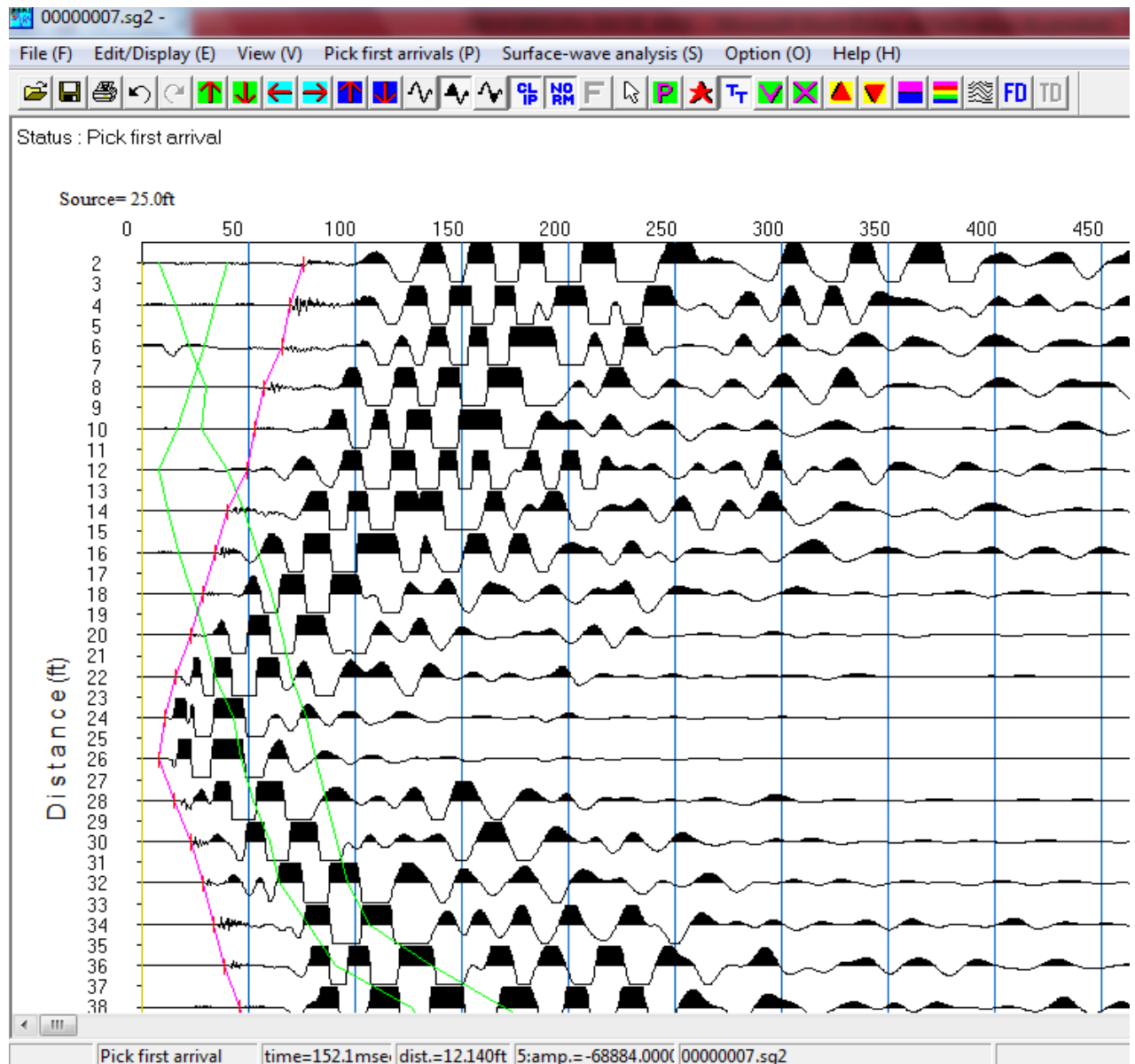


Figure III. 7: Pointage du film sismique pour le tir au centre et les deux autres hodochrones.

- 9) En répétant la même opération avec les autres tirs inverse, on obtient une figure regroupant tous les tirs effectués sur un même profil. La dernière tâche à faire dans le module PickWin est d'effectuer la sauvegarde du pointage en choisissant l'option « save the first break picks file » dans le menu « File » et le format du produit obtenu est de type « .vs ». Cette étape est obligatoire avant de continuer ou passer dans l'autre module du logiciel SeisImager.

### III.3.2- Interprétation du Produit de Pickwin

Comme le produit des travaux de pointage du film sismique dans le module PickWin se présentent sous formes des dromochroniques ensembles dans une figure 2D ou une sorte de diagramme appelée « Travel Time curve ». Ce diagramme est la base de à toute les interprétations. Les distances (en mètres) sont reportées en abscisse et le temps (en millisecondes) en ordonnées comme montre la figure ci-dessous:

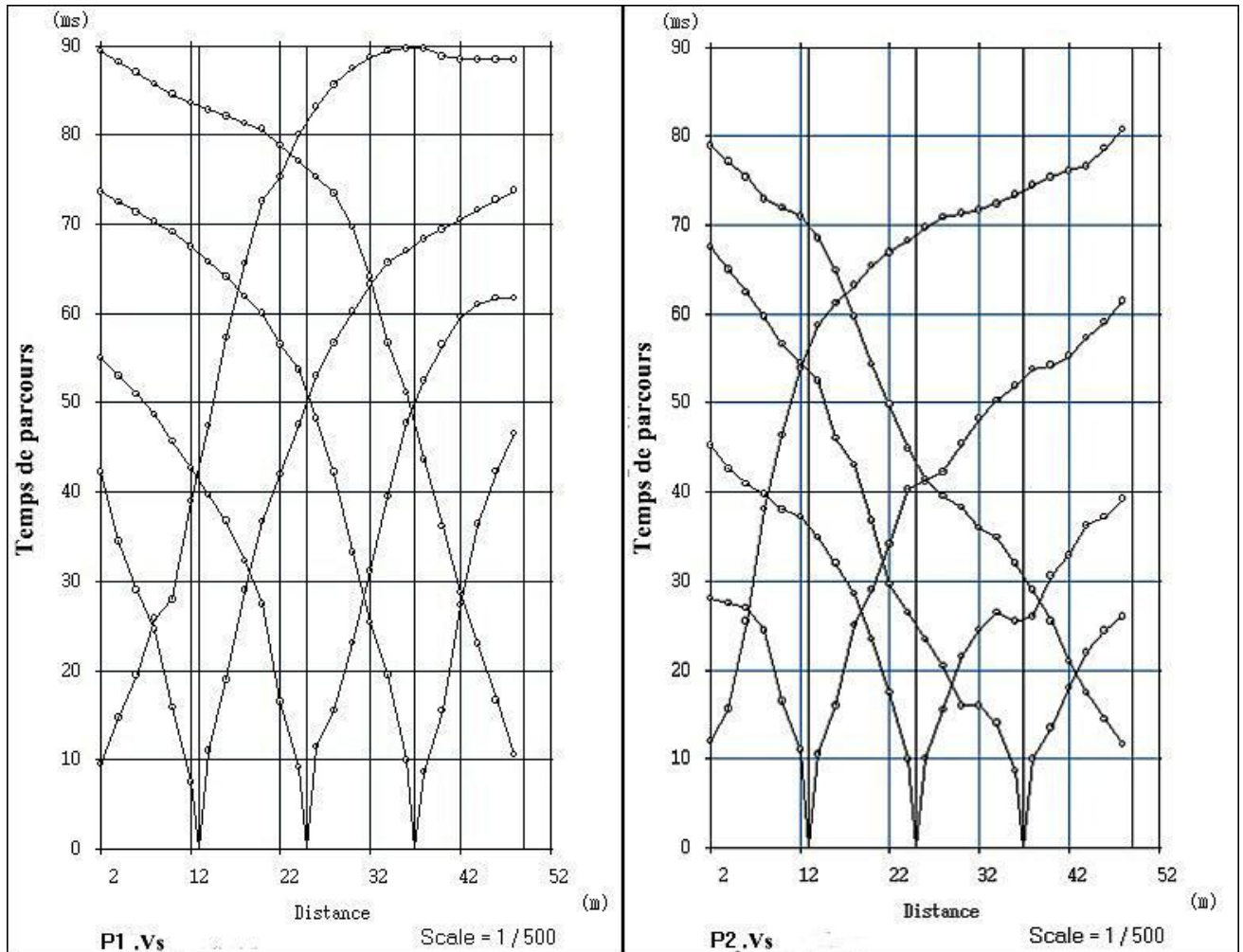


Figure III. 8: Les hodochrones du profil P1 (à gauche) et du profil P2 (à droite)

On voit bien sur cette figure beaucoup des points noirs repartis le long des courbes des hodochrones, ces points indiquent l'emplacement respectif des géophones. De plus les piques comme montre la figure III.8 indiquent l'emplacement des sources ou le point des tirs effectués. Ces deux ensembles des courbes hodochrones sont respectivement celle du profil P1 à gauche de direction N/S et à droite celle du profil P2.

Les deux figures ci-dessus présentent des erreurs de pointage et d'enregistrement sur les terrains. Sur ces deux figures précédentes, les erreurs sont localisées au niveau des pentes qui n'est autres que l'inverse de la vitesse et aussi sur l'emplacement sources des tirs offsets. Cela nécessitent des corrections suivant la ou les méthodes d'interprétation adopté, d'où l'importance de traitement dans le module Plotrefa.

### III.4-RESULTAT avec PLOTREFA

#### III.4.1- Modélisation par méthode inversion Tomographique

En choisissant l'option inversion tomographique parmi les trois méthodes de traitement dans le module Plotrefa : méthode intercept-Time et méthode inversion de temps ou Delay Time. Un exemple de traitement sera développé.

La première étape consiste à ouvrir le dossier (.vs) dans Plotrefa avec 

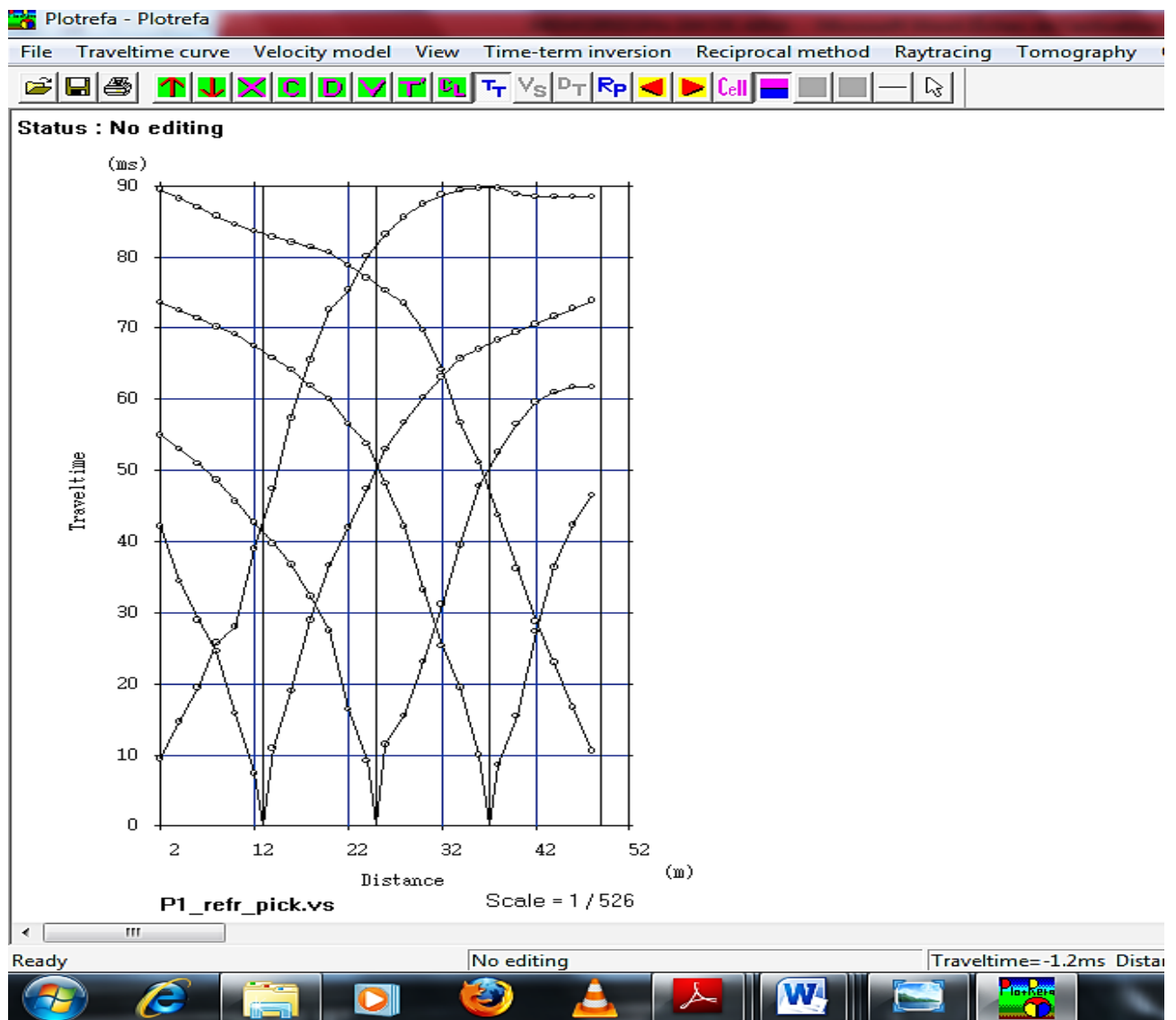


Figure III.9: lecture du pointage des premières arrivées du profil P1

Cet exemple choisi et celle du produit du pointage du profil P1. Importer le fichier l'élévation de la donnée topographique si possible, Cette donnée est nécessaire et conditionne l'allure du toit du profil traité.

L'option inversion tomographique, nous donne le choix de créer le module de la vitesse initiale, le modèle initial de ce même profil est représenté par la figure ci-dessous:

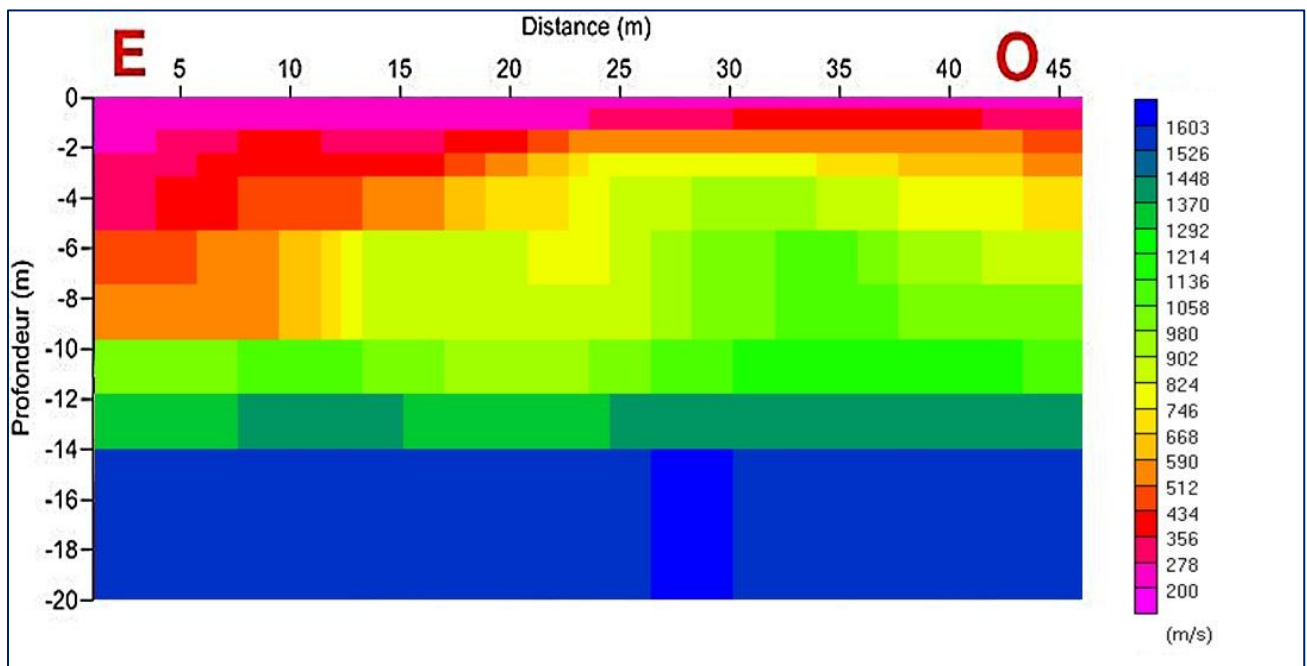


Figure III. 10: modèle initial généré par inversion tomographique du profil P2

Le traitement continue en choisissant l'option « Inversion » dans le menu Tomographie, cette option utilise la fonction de lissage en générant l'allure du profil de vitesse, en effectuant dix itérations pour avoir les trajets probables de chaque onde réfractée. En pratique le travail semble moins léger, cependant le logiciel effectue une lourde tâche des milliers de calculs durant chaque itération.

En accord avec le modèle initial et pour avoir les écarts acceptables entre les hodochrones calculée et observée, mieux vaut répéter l'analyse avec le modèle initial et avec les paramètres de la tomographie si nécessaire. Si le modèle obtenu semble satisfaisant et reflète la structure du sous-sol recherché, on arrête l'itération si l'erreur est moins de 5%.

Le traitement des dromochroniques du profil P2 nous donne la coupe de vitesse 2D, en abscisse la distance (exprimer mètre) et en ordonnée celle de la profondeur (exprimer aussi en mètre).



### ▪ Obtention des hodochrones calculées.

Dans le menu « Raytracing », et cliquant sur « Exécute », on peut voir ensemble les deux types de courbes des hodochrones calculées et observées

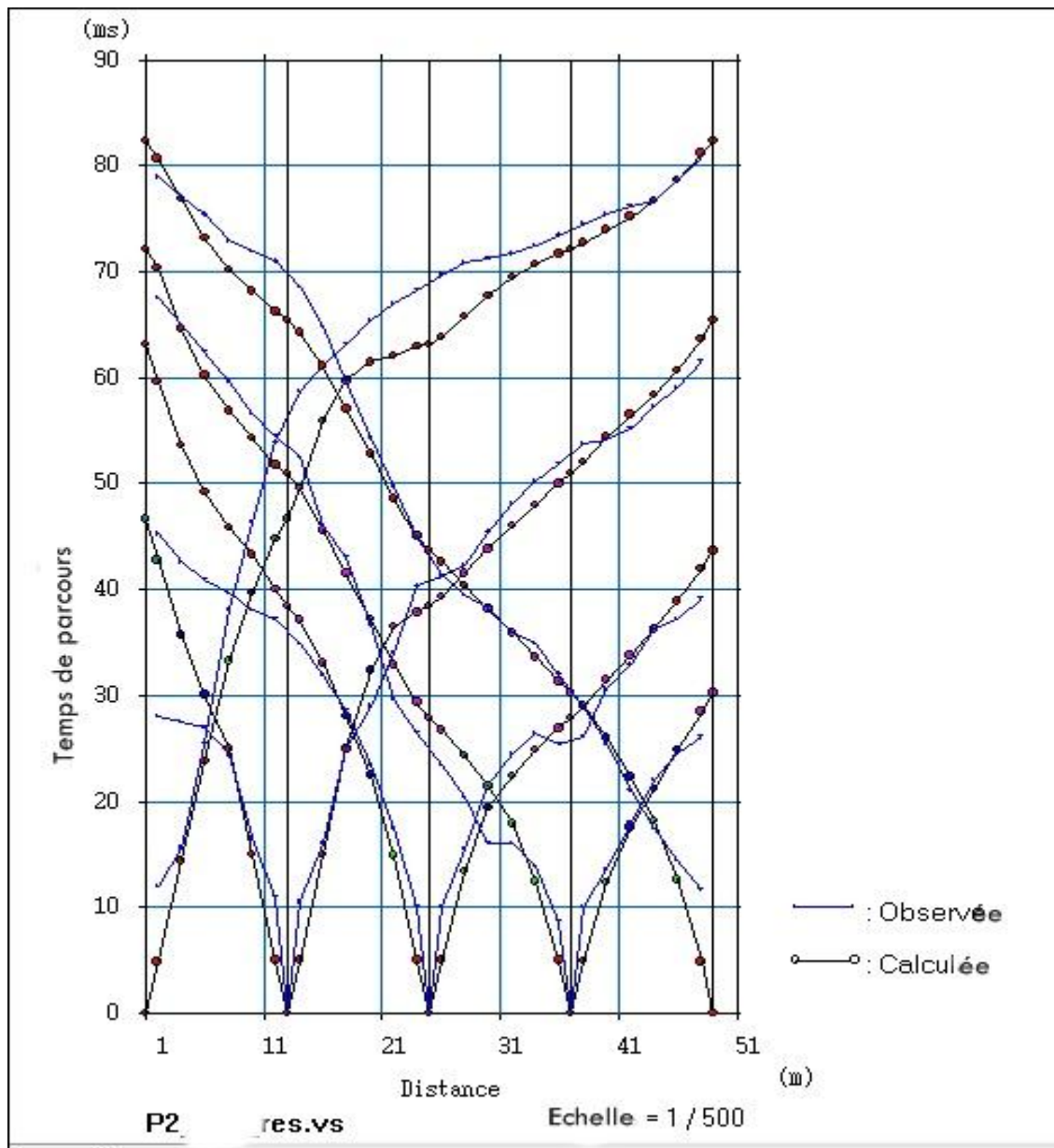


Figure III. 11: Hodochrones observées et calculées du profil du profil P2

Nous avons les deux courbes d'hodochrones observée et calculée du profil P2, les tirs inverses se dressent vers la partie gauche. Les points représentent les emplacements des géophones et les pics montrent les tirs respectifs. A ce stade les calculs et les ajustements de ces courbes sont effectués par inversion tomographique. On peut aussi prévoir que les couches qui constituent les profils de vitesses s'inclinent vers l'Est.

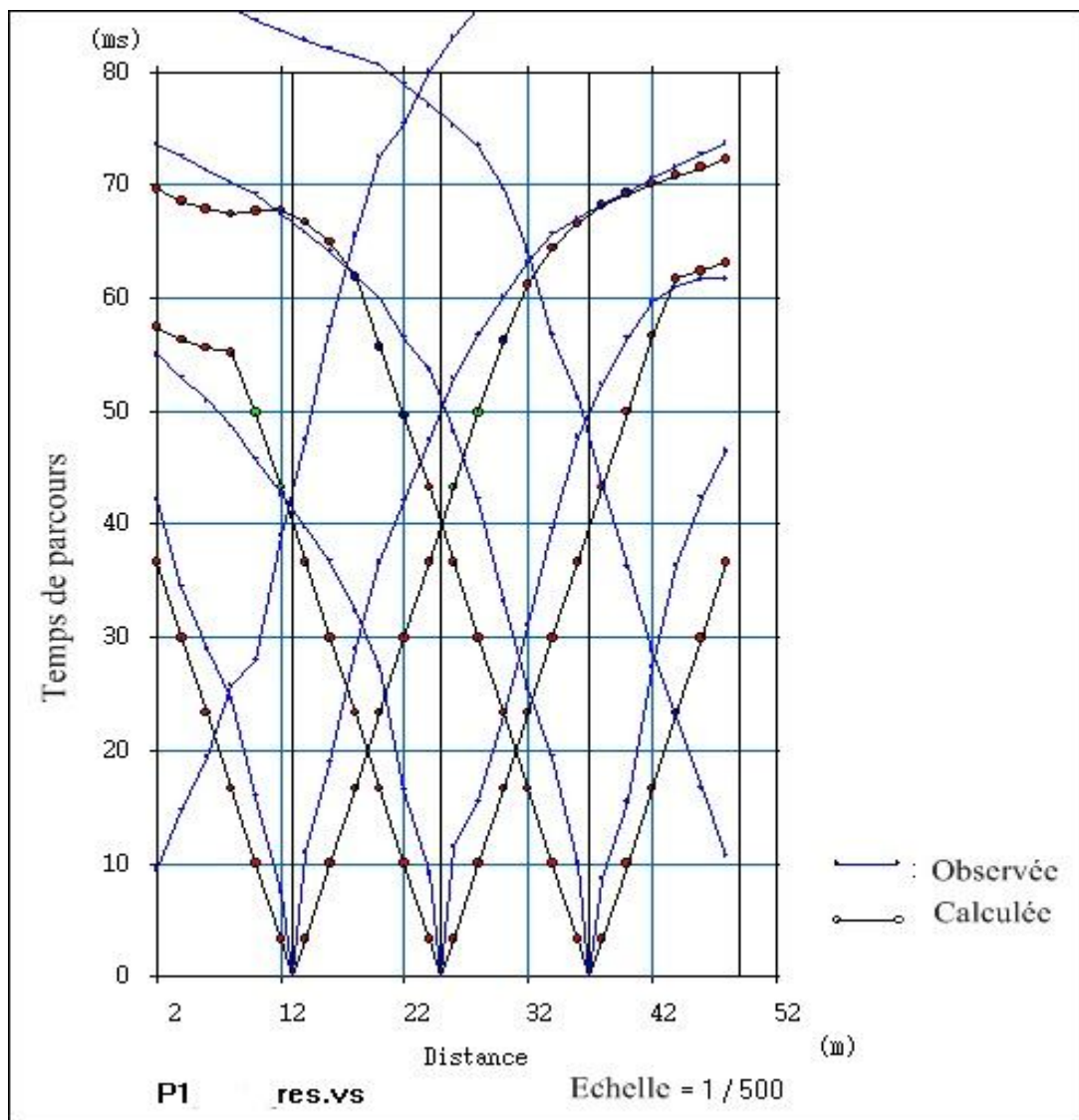


Figure III. 12: Hodochrones observées et calculées du profil P1

Ces deux courbes d'hodochrones se différencient du profil P2 par le fait que: les tirs direct et les tirs inverses sont centrés et on peut estimer que les couches qui constituent le profil de vitesse sont presque parallèles.

On peut extraire uniquement les courbes calculées qui reflètent l'aperçu de la coupe de vitesse finale. Nous avons choisi comme exemple celle du profil P2.



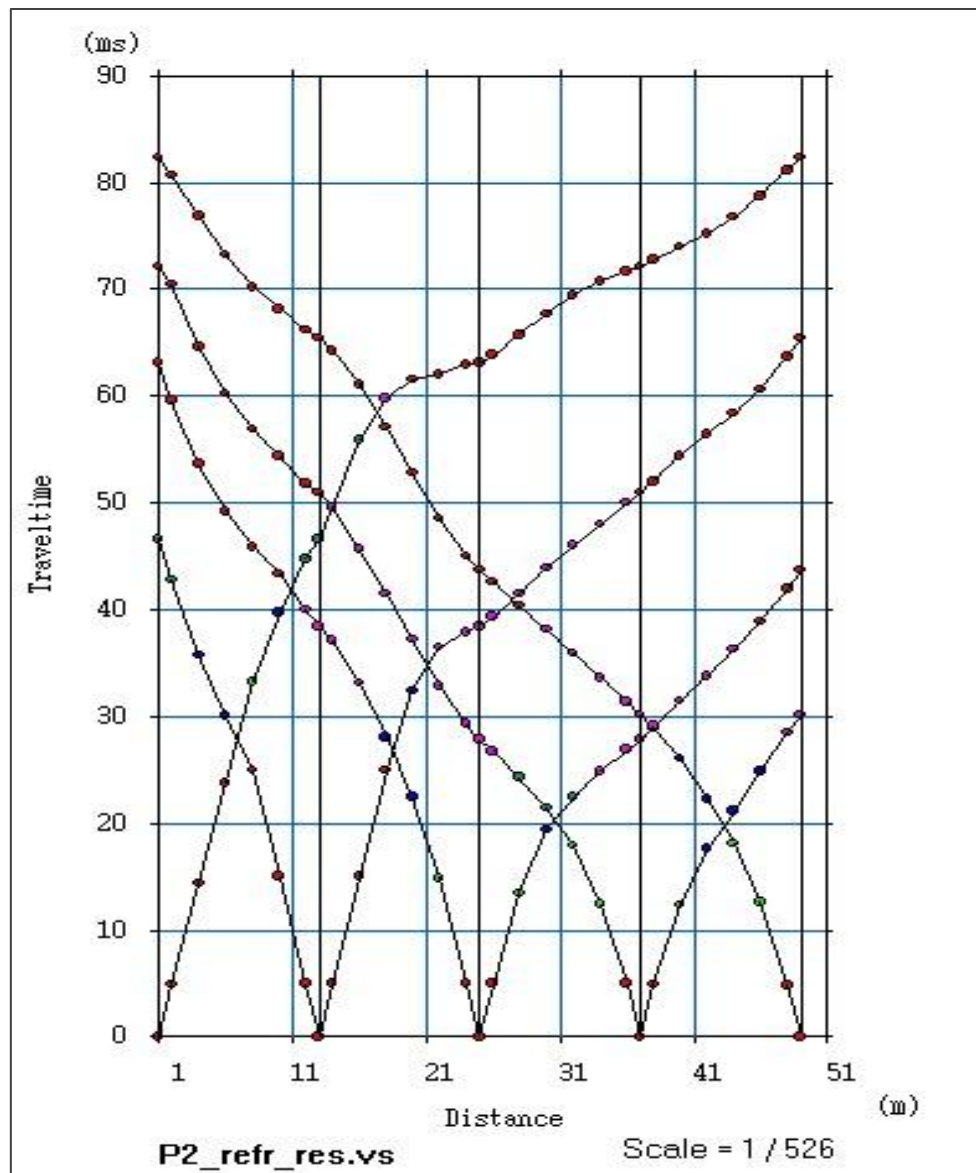


Figure III. 13: Dromochroniques calculées du profil P2

#### ▪ Conversion des couches sous forme de coupe de vitesse 2D

Ces hodochrones seront traités numériquement par la méthode de l'inversion tomographique, le paramètre inverser est la vitesse et le modèle obtenu est encore inversé pour donner le vrai modèle du sous-sol. La restitution des données se fait sous forme d'une coupe verticale 2D pour le profil sismique. Les coupes, ainsi obtenues, donnent la variation latérale de la succession de vitesse de propagation d'onde du sous-sol.

Les résultats obtenus lors après cette inversion sont les coupes de vitesse 2D ci-dessous:

### ▪ Le premier Profil P1

Ce premier profil a été effectué le d'une ligne sismique de 50m de longueur, direction globale est Nord-Sud. La coupe obtenue montre la succession des couche de vitesse de l'onde de compression  $V_p$  (m/s), en abscisse la distance (en m) et la profondeur en ordonnée (en m).

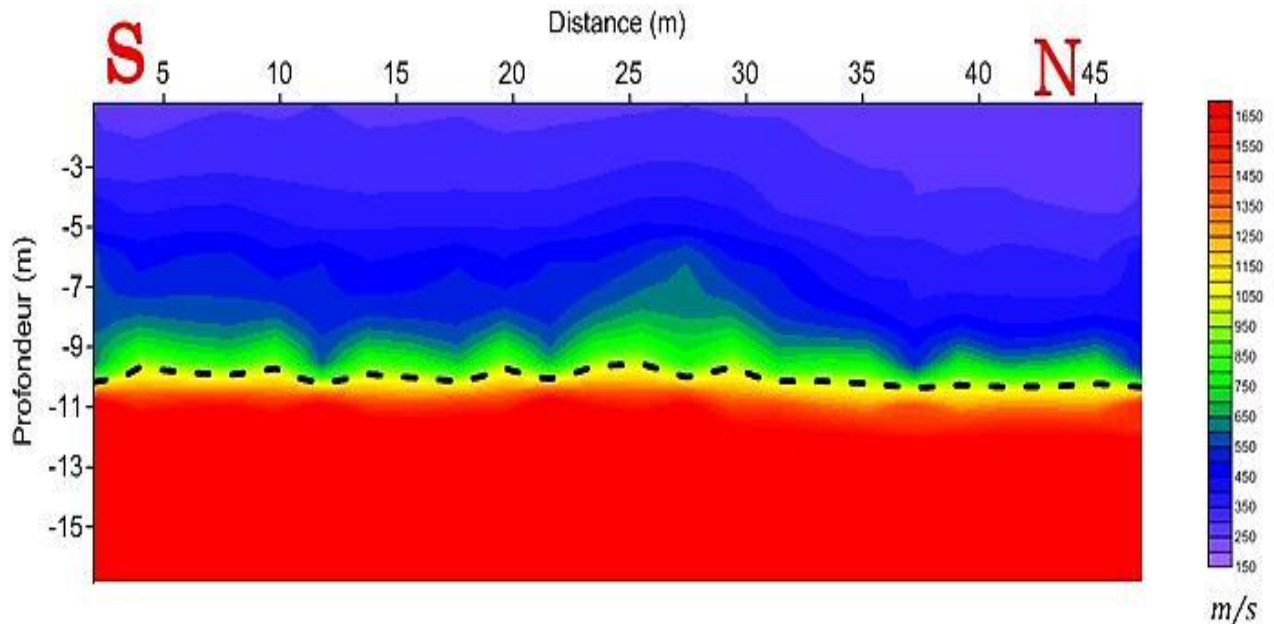


Figure III.14: Coupe de vitesse sismique  $V_p$  (m/s) – Profil P1

L'interprétation de cette coupe nous permet de dire que ce profil de vitesse sismique présente la succession de deux formations bien distinctes ayant probablement des variations de vitesse qu'on peut classer comme suit:

La première formation de couleur bleu à couleur vert correspond à la vitesse 500 m/s. Et la deuxième formation a une couleur variant de jaune à rouge vif ayant une vitesse intermédiaire comprise entre 1000m/s à 2500m/s'épaisseur autour de 5m.

Quantitativement, le profil de vitesse du profil P1 montre deux terrains bien distincts : Le premier terrain de vitesse inférieur 500m/s possède une épaisseur environ 10m. Les successions des couches de vitesse de couleur différente suit le toit du précédent voisin. Une anomalie est localisé entre l'abscisse  $X=22m$  et  $X=32m$  montrant une augmentation de la vitesse.

De point de vue géologique, la coupe obtenue montre une structure tabulaire qui n'influe pas beaucoup sur la direction de l'écoulement souterrain. Même si les couches prennent la forme d'un signal de faible amplitude.

En choisissant l'option « convert into layered model », on peut avoir un modèle de couche de vitesse en termes d'intervalle ou en termes de vitesse moyenne de couche. En relation avec la géologie du site et les types des matières qui constituent le sous-sol. Les intervalles des vitesses relatives pour chaque couche sont comparés et corrélés avec les tableaux de références ou diagramme reliant les vitesses – nature des roches présentées dans la partie ANNEXE:

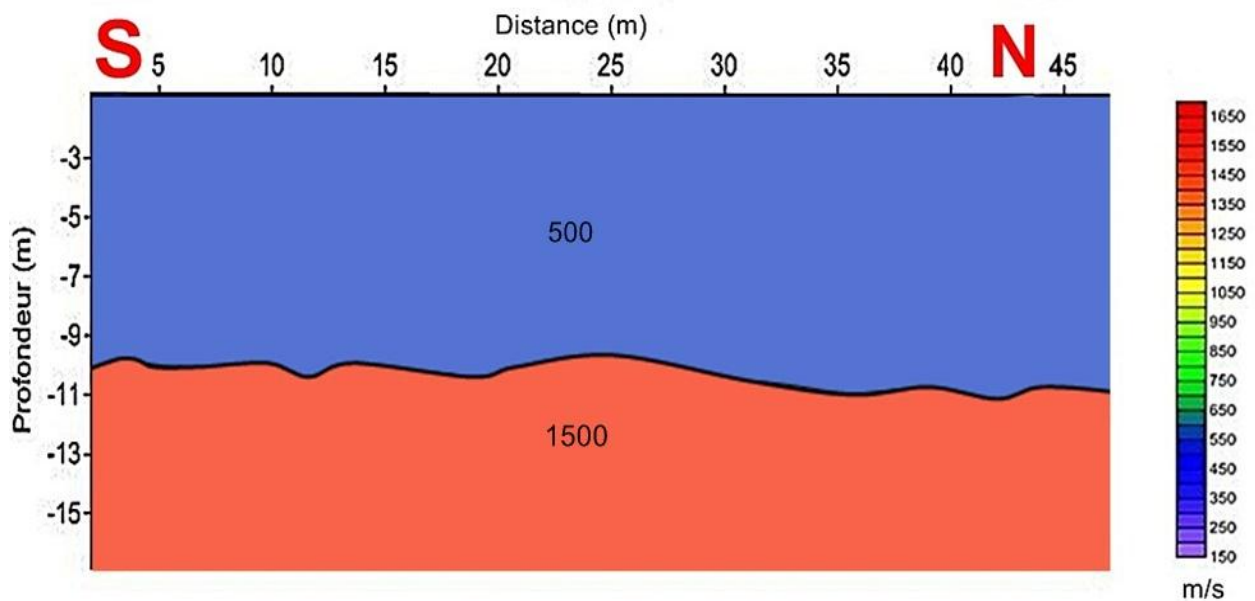


Figure III.15: Profils de couches vitesses par conversion du profil P1

En utilisant le tableau de références des valeurs de vitesse de l'onde compression  $V_p$ , l'interprétation qu'on doit à cette coupe de vitesse du profil P1 sont résumés dans le

Tableau III. 1: Vitesse de l'onde P et types de sols du profil P1

Couche	Type des sols	Vitesses	Epaisseur
<b>Sol 1</b>	Roche meubles, éboulis, Sables secs, graviers	$V = 500 \text{ m/s}$	10 m
<b>Sol 2</b>	Argile saturée, sable humide Série argilo-gréseuse saturée	$V = 1500 \text{ m/s}$	+ 5m

Deux (02) types de vitesses se distinguent sur ce profil : la première de vitesse moyenne environ 500m/s correspond à la couche superficielle composée de couverture meuble, des roches altérées, graviers et des sables non saturées... ; la seconde couche de vitesse comprise entre 1000m/s et 1700m/s forme le substratum et le type de sol semble

constituer des sables humides et d'Argiles saturées ou d'une série argilo-gréseuse saturée d'eau.

En général l'allure de couche semble parallèle et presque horizontale. La structure de ce profil de vitesse du profil P1 est de type TABULAIRE, elle n'a aucune influence sur le sens d'écoulement du substratum.

#### ▪ Le second profil P2

Le profil P2 de direction Est-Ouest s'étend sur une longueur de 50m, perpendiculaire au profil P1.

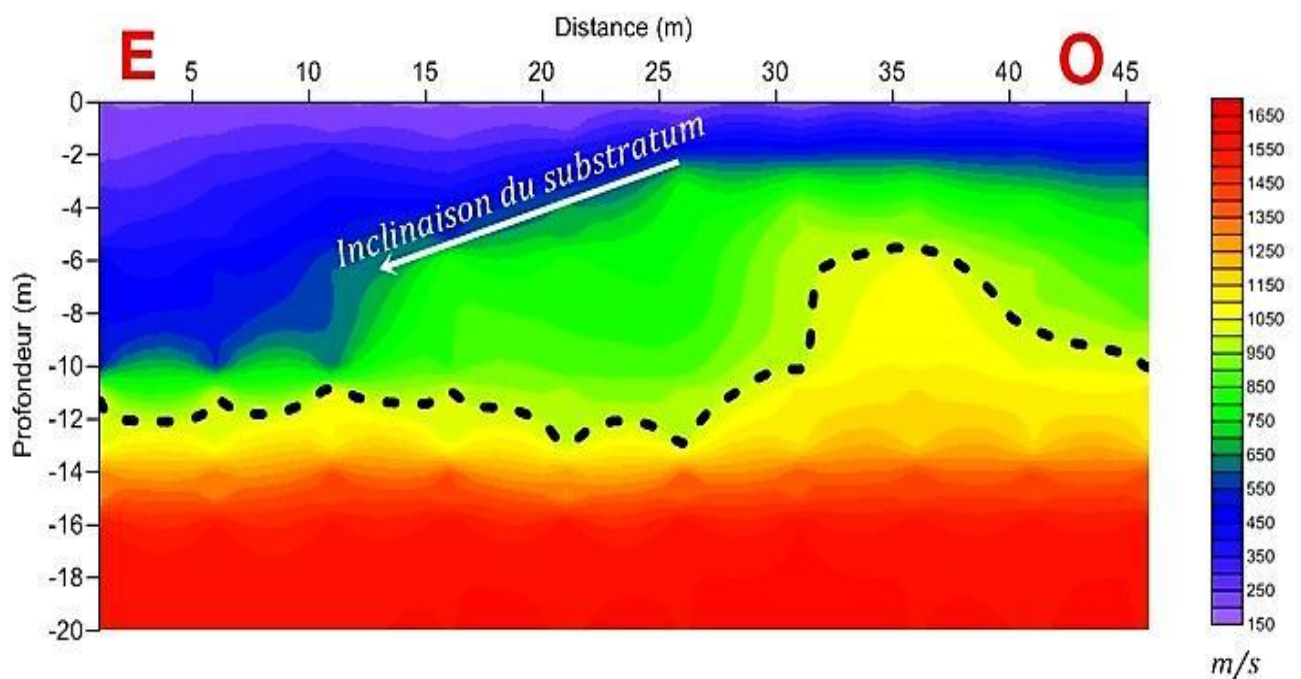


Figure III. 16: Coupe sismique  $V_p$  (m/s) par inversion Tomographique Profil 2

Lecture directe sur cette deuxième coupe de vitesse, nous montre deux formations bien distinctes:

La première formation de faible vitesse est relativement épaisse sur la partie Est qui peut atteindre de 10 mètres en moyenne. Elle est relativement constante entre l'abscisse  $X=0\text{m}$  et  $X=12\text{m}$ , elle s'amincit d'une épaisseur de 6m jusqu'à 3m entre l'abscisse  $X=15\text{m}$  et  $X=30\text{m}$ . En se rapprochant du côté Ouest entre l'abscisse  $X=30\text{m}$  et  $X=50\text{m}$  cette première formation présente une épaisseur constante environ 3m.

La seconde formation de vitesse comprise entre 1000 m/s et 1700 m/s, il nous montre une mince épaisseur moyenne de 11m. Au milieu cette formation présente une inclinaison

vers l'Est, qui indique le sens d'écoulement. Cette deuxième couche répond à notre problème car elle conditionne le SENS DE L'ÉCOULEMENT DANS LE SUBSTRATUM.

#### ▪ De point de vue géologique

La première couche de faible vitesse correspond à la couche de couverture des roches meuble et des sables non saturées qui constitue le toit. Quant à la seconde couche à vitesse moyenne de 1500m/s, elle est constituée de couche de sable saturées, d'argile saturées ou une série argilo-gréseuse saturés d'eaux, cette seconde couche forme le substratum.

Pour une vue globale les résultats de l'inversion tomographiques peut être résumé en deux horizon bien distinct :

#### ❖ Horizon supérieur

La vitesse de propagation dans l'horizon supérieur se maintient de 300 m/s à 900 m/s pour ce site. Les matériaux correspondant à ces vitesses sont des matériaux organiques ou des matériaux meubles secs de tout type.

#### ❖ Horizon inférieur

Cet horizon, dont la vitesse de propagation varie de 1000 à 1700 m/s, est observé dans les deux profils. Les vitesses de propagation inférieures pourraient indiquer que les particules fines ont été lessivées alors que les vitesses supérieures pourraient indiquer la présence de plus de particules fines et une augmentation de la teneur en eau.

Les types des sols et les vitesses correspondants sont résumés dans le tableau ci-après.

Tableau III. 2: Vitesse de l'onde P et types de sols du profil P2

Couche	Type des sols	Vitesses	Epaisseur
<b>Sol 1</b>	Roche meubles, éboulis, Sables secs, graviers	V = 500 m/s	5 m
<b>Sol 2</b>	Argile saturée, sable humide Série argilo-gréseuse saturée	V = 1500 m/s	11m

En choisissant l'option « convert to layer modèle », on obtient la coupe de vitesse de la figure ci-après. Les couches prennent la forme des signaux, des parties descendantes et des parties montantes. Ces couches forment des structures ANTIFORMES.

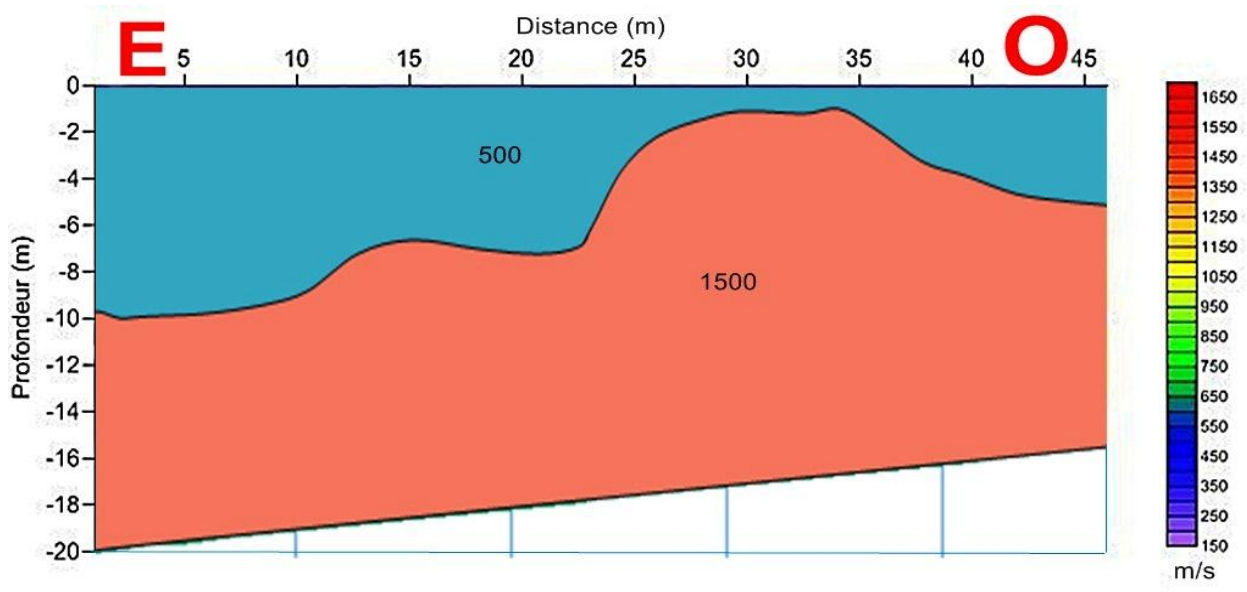


Figure III. 17: Profil des couches vitesses par conversion du profil P2

Les toits de chaque couche de vitesse ont des allures différentes, ces différences influent beaucoup sur les épaisseurs respectives, comme celle de la deuxième couche on voit bien des augmentations des vitesses au niveau des abscisses  $X=11\text{m}$  et  $X=16\text{m}$  et aussi entre  $X=22\text{m}$  et  $X=40\text{m}$ . Cette augmentation conditionne le sens d'écoulement de substratum à cause de l'inclinaison nette du toit de la seconde couche.

Géologiquement le second profil réalisé suivant la direction Est-Ouest du Profil 2 montre une structure antiforme formant ainsi inclinaison du substratum, et qui va jouer un rôle important sur la direction de l'écoulement souterrain. En effet, à ce niveau, l'écoulement va se départager de l'Ouest vers l'Est. D'ailleurs, cette anomalie est observée au niveau des courbes isopièzes.

L'interprétation menée par la méthode inversion Tomographique permet de cartographier les couches du sous-sol et d'établir la coupe sismique (Les vitesses sont exprimées en m/s). Comme lors de toute campagne géophysique, il est nécessaire de croiser l'interprétation avec d'autres méthodes géophysiques ou de calibration, par exemple le résultat des forages permet de calibrer les vitesses sismiques avec les terrains observés.



### III.4.3- DISCUSSION ET RECOMMANDATION

L'interprétation des résultats de la réfraction sismique nous permet d'établir deux coupes de vitesse et d'en déduire la composition lithologique du sous-sol qui constitue le substratum dans notre zone d'étude. Pour mieux cerner notre sujet et pour avoir une vue d'ensemble assez claire de l'aperçue de notre travail, nous allons répondre quelques questions et qui fait l'objet de cette dernière partie.

#### ▪ **DISCUSSION**

##### **1- Pourquoi on choisit la méthode sismique réfraction pour modéliser le sous-sol ?**

Le choix de la méthode utilisé repose sur plusieurs critères, parmi les méthodes de l'exploration du sous-sol, nous avons adopté la sismique réfraction, en raison de sa capacité à fournir un efficace et effectif à l'intention d'obtenir de l'information générale au sujet de grands volumes de la subsurface, bonne résolution verticale et horizontale, équipement léger, calcul des paramètres vitesse sismique, indicateur de dureté, de qualité, des roches massives. Les nouvelles méthodes rendent possible d'interprétation des changements de la vitesse comme inclinaisons aussi bien que les couches discrètes. De plus, la réfraction des données sismiques peuvent rehausser considérablement la valeur d'autres données de l'exploration telle que le forage. Le lissage des nuages des points, les premières arrivées des ondes, donne des portions de droite qui nous permettront de déterminer le nombre des terrains et de calculer la vitesse des ondes P correspondantes.

##### **2- Pourquoi le choix de 5 tir?**

Le traitement des données en utilisant la méthode sismique réfraction nécessite plusieurs tirs pour caractériser le sous-sol. Même si nous avons le choix entre : 1 tir, 3 tirs, 5 tirs, 7 tirs, 9 tirs, .... Pour notre étude 5 tirs est suffisant pour modéliser le sens d'écoulement et caractériser le substratum. L'explication de chaque tir est les suivant:

#### ▪ **Tirs offset**

Pour l'indentification de la conique la plus profonde (en d'autre terme toit du Substratum)

#### ▪ **Tirs on set: Tir allé et tir retour**

Fermeture en temps et pendage de l'interface

#### ▪ **Tir centré**

Confirme les tirs offset + contrôle de la géométrie

En général, cinq (5) ou sept (7) tirs seront effectués à des endroits stratégiques comme celle-ci de manière à résoudre les incertitudes dues à la géométrie des couches et à la non-homogénéité du milieu.

### 3- Quels sont les raisons du choix du logiciel de traitement ?

Des nombreux logiciels commerciaux sont maintenant disponibles pour une grande gamme de méthodes de l'interprétation et concepts. Pour produire la vitesse l'onde P pour chacun des 12 ensembles de la donnée du temps de parcours, nous avons le choix entre trois systèmes de logiciels de traitement des données réfraction à savoir **Rayfract, Seisimager, et SeisOpt**. Chacun de ces systèmes contient trois composants importants:

- 1) Un modèle avancé pour les calculs des temps d'arrivées entre la source et le récepteur, ces calculs sont basé sur le modèle courant de la vitesse.
- 2) Une routine d'inversion pour ajuster le modèle de la vitesse jusqu'à un vue acceptable entre calculé et mesuré du premier l'arrivée des temps de parcours.
- 3) un moyen pour produire un modèle de la vitesse initial.

Le logiciel Seisimager nous donne la possibilité de cartographier le sous-sol sous forme coupe de vitesse 2D. Une espace libre de 10Mo sera recommandée pour l'installation de ce logiciel et le traitement des données.

### 4- Pourquoi le choix de la méthode d'interprétation ?

Plusieurs méthodes d'interprétation des données de sismique réfraction existent. La méthode de Plus-Minus ou méthode de Temps de délais, la méthode d'intercept time et la méthode inversion Tomographique : la première parce qu'elle permet l'interprétation en profilage continu, la seconde parce qu'elle constitue un moyen rapide de contrôler la validité des résultats.

Notons que ces méthodes ont été développées en prenant pour hypothèses que les couches sont subparallèles, d'épaisseurs suffisantes pour être détectées et que la vitesse de propagation des ondes dans une couche est toujours inférieure à celle de la couche sous-jacente.

Le choix de ce méthode est très délicat car les deux autres méthodes d'interprétation du module Plotrefa sont aussi plus performant tel que le « Delay time » et ma méthode d'intercept Time.



## RESULTAT DE LA MODELISATION

Le développement des théories de la sismique réfraction nous permet de connaître la base théorique de cette méthode. Déplus les traitements des données nous donne beaucoup d'informations sur l'architecture des logiciels de traitements ainsi que les méthodes d'interprétations comme l'inversion tomographique.

Après avoir effectués l'opération des ajustements des courbes des hodochrones, on peut passer à l'étape conversion sous formes des profils de vitesses en faisant en général 10 itérations. Si l'erreur n'est pas inférieure à 5%, on répète l'opération jusqu'à ce que l'erreur soit minimale, mais cette opération peut fausser les précisions sur l'épaisseur et l'allure des couches si on ne fait pas beaucoup d'attention sur les paramètres entrées lors de traitements

L'interprétation du profil P1 de direction Nord-Sud, nous indique une structure tabulaire du site étudié, de point de vue géologique, les couches sont presque parallèles et ne présentent pas grand chose sur le sens de l'écoulement du substratum. Par contre le second profil de direction Est-Ouest, présente une structure antiforme, l'allure des couches conditionne la structure du substratum et beaucoup d'influences sur le sens d'écoulements. Cette inclinaison du substratum est due à la morphologie du site et s'incline vers l'exutoire du bassin versant.

L'étape de conversion du profil des vitesses est l'un des opérations importantes lors d'une étude par sismique réfraction, chaque couche obtenue est le résultat en faisant la moyenne des vitesses. Ensuite, on peut procéder à l'étape identification de type de sol, de formation et l'épaisseur de chaque couche. Dans les deux profils de vitesse P1 et P2 les types des sols qui constituent le sous-sol sont les mêmes seuls l'inclinaison et les épaisseurs des couches sont différents: la première couche sont des roches meubles, sable sec, et altérées quant aux secondes couches, ils sont formés par des argiles et des sables humides. L'inclinaison du substratum est donnée par le profil P2

En résumé, la prospection sismique réfraction effectué sur le site AMBALAKELY nous permet de familiariser avec le logiciel de traitement SeisImager, d'approfondir la connaissance sur les méthodes d'interprétation et de traitement informatique, d'estimer composition géologique et structurale du substratum et aussi la direction de l'inclinaison qui conditionne le sens d'écoulement.

### ▪ **RECOMMANDATIONS**

Une des problèmes de la méthode sismique réfraction repose sur la présence de la couche cachée ou couche aveugle, est qui est indétectable par inspection de la réfraction. Dans la pratique, l'erreur sur la profondeur totale peut être de l'ordre de 25 à 50 % et même plus pour l'inversion de vitesses. Cependant, si le phénomène est observé par forage ou tout autre moyen, l'erreur peut facilement être ramenée à l'intérieur de la précision générale de la méthode, soit 10%.

Dans les deux profils de vitesses, il y a eu présence de couche caché: faible épaisseur et des erreurs de pointage des premières arrivées et de mesures. Il est important de noter que les traitements doit être effectués par une seule personne pour avoir des profils de vitesse proche de la réalité.

Dans certains cas, l'interprétation quantitative à des limites et une simple interprétation qualitative peut être suffisant. L'objectif de cette étude est de porter sur la détermination des allures de toit du substratum et la localisation des anomalies dans le sous-sol. Des études préalables des cartes (géologique, topographique) et des analyses de photo-aérienne sont nécessaires pour ces mêmes genre des prospections géophysique, avant de descendre sur terrain afin de savoir les formations et les renseignements nécessaires pour la campagne.

Le maitrise des diverses méthodes de traitements et la familiarisation des chercheurs avec les logiciels informatiques. Faires les programmations informatiques pour la mise à jour des logiciels, et études théoriques font partie des bases et technique de nouveau traitement. La conception de cette interface logicielle n'est pas dans le cadre de ce mémoire.

En résumé la réalisation de ce mémoire nous permet de familiariser avec le logiciel de traitement et d'approfondir nos connaissances sur les bases théoriques de la sismique réfraction et ces trois méthodes d'interprétation. Les données de forages et les données topographiques sont très importantes pour l'interprétation des données sismiques réfraction. Ces données nous permet de vérifier si l'acquisition et le traitement données sont bien effectués en tenant compte les paramètres physique du sous-sol.

## CONCLUSION

Parmi les techniques géophysiques, ce sont les méthodes sismiques qui sont le plus utilisées pour les recherches des structures géologiques de la croûte terrestre. Ces techniques sont basées sur la mesure des temps de propagation des ondes élastiques. Ces ondes obéissent aux lois de l'optique et sont en particulier sujettes à des réflexions et à des réfractions.

Les travaux de prospection sismique sont effectués à AMBALAKELY, dans le district de FIANARANTSOA II, région haute Matsiatra, dans le but de connaître la structure du sous-sol et aussi le sens de l'écoulement. Notre site se situe dans le système Schisto-Quartzocalcaire et du Graphite. L'élevage bovin et la culture en terrasse tiennent une place importante parmi les activités de la population.

La méthode sismique réfraction est basée sur le principe tel que lorsqu'une onde sismique (onde P et/ou S) arrive à une interface où il y a un contraste de vitesse, alors la direction de cette onde va changer dans le nouveau milieu. Ce changement de direction est régi par le contraste de vitesse à l'interface selon la loi de Snell-Descartes. Les vitesses sismiques renseignent bien sur la nature des terrains de recouvrement et du substratum. Le contraste de vitesse est important avec le recouvrement, ce qui favorise la détection par sismique réfraction. La mise en œuvre de la méthode sismique réfraction peut concerner des mesures en surface ou avec un forage associé.

Le traitement des données sismiques, consiste à pointer les premières arrivées, création des courbes d'hodochrones dans le logiciel PICKWIN, ensuite le travail d'inversion des courbes de vitesse avant de s'appliquer l'inversion Tomographique afin d'obtenir les profils 2D du sous-sol. Sur les deux profils réalisés sur le site d'AMBALAKELY, le premier profil du Profil P1 a été réalisé suivant la direction globale Nord-Sud. La coupe obtenue montre une structure tabulaire qui n'influe pas beaucoup sur la direction de l'écoulement souterrain. Le second profil réalisé suivant la direction Est-Ouest du Profil 2 par contre montre une structure antiforme formant ainsi une inclinaison du substratum, et qui va jouer un rôle important sur la direction de l'écoulement souterrain. En effet, à ce niveau, l'écoulement va se départager vers l'Ouest ou vers l'Est. D'ailleurs, cette anomalie est observée au niveau des courbes isopièzes.

Tout au long de cette étude beaucoup de difficultés et problèmes sont rencontrés, le problème de données de forage pour valider le résultat de la modélisation, ainsi que le

problème du données topographiques qui conditionne le profilage. Beaucoup de logiciel commerciaux Comme SeisImager sont disponible sur le marché. Mais chaque logiciel présente des atouts et aussi des faiblesses.

## RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Ackermann H.D., Pankratz, L.W., and Dansereau, D.** (1986), Resolution of ambiguities of shallow refraction travel-time curves: *Geophysics*, **51**, 223–235.
- [2] **Barry, K.M.** (1967), Delay-time and its application to refraction profile interpretation: in Musgrave, A.W. (ed.), *Seismic Refraction Prospecting*: Society of Exploration Geophysicists, 348–361.
- [3] **Barton, R., and Barker, N.** (2003), Velocity imaging by tau-p transformation of refracted traveltimes: *Geophysical Prospecting*, **51**, 195–203.
- [4] **Dampney, C.N.G., and Whiteley, R.J.** (1980), Velocity determination and error analysis for the shallow seismic refraction method: *Geophysical Prospecting*, **18**, 2–17.
- [5] **Hagedoorn, J.G.** (1959), The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections: *Geophysical Prospecting*, **7**, 158–182.
- [6] **Hawkins, L.V.** (1961), The Reciprocal method of routine shallow seismic refraction investigations: *Geophysics*, **26**, 806–819.
- [7] **Jennifer ABRAHAMSON.** Determining the thickness of sediments using seismic refraction P.14
- [8] **Leung T.M.** (1995), Examination of the optimum XY value by ray tracing: *Geophysics*, **40**, 1151–1156.
- [9] **Leung, T.M.** (2003), Controls of traveltimes data and problems with the generalized reciprocal method: *Geophysics*, **68**, 1626–1632.
- [10] **Rohdewald, S.R.** (in prep.), Delta-t-v 1D seismic refraction inversion method: theory.
- [11] **Schuster, G.T., and Quintus-Bosz, A.** (1993), Wavepath eikonal traveltimes inversion: *Geophysics*, **58**, 1314–1323.
- [12] **Sjogren, B.** (2000), A brief study of the generalized reciprocal method and some limitations of the method: *Geophysical Prospecting*, **48**, 815–834.
- [13] **Whiteley, R.J.** (1990), Discussion: *Exploration Geophysics*, **21**, 131–138.
- [14] **Whiteley, R.J.** (1994), Seismic refraction testing - a tutorial: in Richard D. Woods, R.D. (ed.), *Geophysical Characterization of Sites*: Oxford & IBH Publishing, 45–47.
- [15] **Whiteley, R.J.** (2002), Shallow refraction interpretation in complex conditions with visual interactive ray tracing: *64th EAGE Conference & Exhibition*, paper P155.
- [16] **Jaques JENNY, Miguel BORREGUERO, Alain BURGISSER** (Janvier 1999). Interprétation sismique réfraction, P.27
- [17] **Mari, J.L., G. Arens, D. Chapellier et P. Gaudiani** (1998). Géophysique de gisement et de Génie civil. Editions Technip, Paris.

- [18] Michel CHOUTEAU, Bernard GIROUX (2008). Méthodes sismiques, P. 40
- [19] Miha RUCAREANU (1999). Inversion des données Tomographique des données de Radar en forage avec correction des variations instrumentales, P.133
- [20] Olivier MAGNIN (Janvier 2007). Cours de sismique réfraction appliquée, P.50
- [21] OYO Corporation (2004). SeisImager Manual Version 3.0 [Computer program manual]: Japan: OYO Corporation. P.248
- [22] Valenti TURI i MICHELS (1997). Méthodologie de la prospection sismique, P.12

## WEBOGRAPHIE

[1] [www.memoireonline.com](http://www.memoireonline.com)

[2] [www.geometrics.com](http://www.geometrics.com).

[3] [www.google.com](http://www.google.com)

[4] <http://www.adobe.com/products/acrobat/readermain.html>

## ANNEXES

### ANNEXE I : LES ONDES SISMQUES

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques. L'onde peut traverser un milieu sans modifier durablement ce milieu. L'impulsion de départ va "pousser" des particules élémentaires, qui vont "pousser" d'autres particules et reprendre leur place. Ces nouvelles particules vont "pousser" les particules suivantes et reprendre leur place, etc.

Les vibrations engendrées par un séisme se propagent dans toutes les directions. On distingue les ondes de volume qui traversent la Terre et les ondes de surface qui se propagent parallèlement à sa surface. Elles se succèdent et se superposent sur les enregistrements des sismographes. Leur vitesse de propagation et leur amplitude sont modifiées par les structures géologiques traversées, c'est pourquoi, les signaux enregistrés sont la combinaison d'effets liés à la source, aux milieux traversés et aux instruments de mesure.

**Les ondes de compression P**, se traduit par les mouvements des particules qui subissent des déformations sans rotation et de même direction que celui de l'onde caractérise la longueur d'onde, ces ondes sont appelées ondes P (cf. figure).

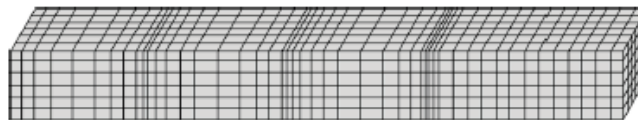


Figure A.1: Schéma d'une onde de compression P

**Les ondes S ou de cisaillement** : vibration transversale (Figure II.2) qui agite les particules perpendiculairement à la direction de propagation.

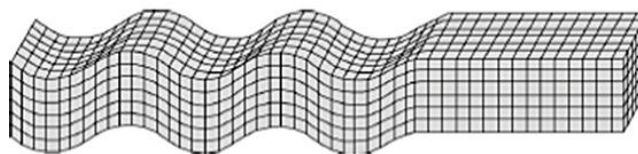


Figure A.2: Caractéristique de l'Onde S

**Les ondes de surface**, la vitesse de ces ondes à qui on a donné le nom d'onde de Rayleigh est faible, comparée à celle des ondes longitudinales. Pour un milieu donné, la vitesse de l'onde de Rayleigh est à peu près 0,9 fois celle de l'onde transversale. Ils sont illustrés par les figures A.3 et A.4 ci-dessous.



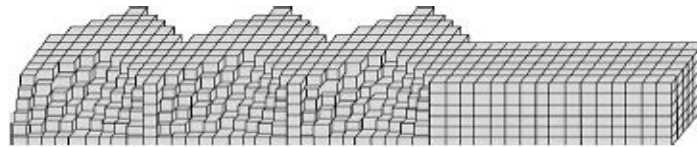


Figure A.3: Onde de Love

**L'onde de Love ou L** déplace le sol d'un côté à l'autre dans un plan horizontal perpendiculairement à sa direction de propagation.

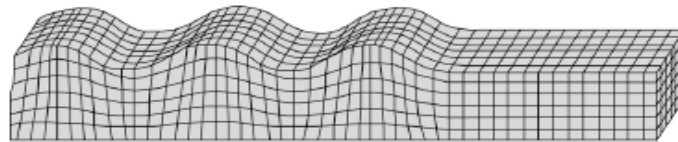


Figure A.4: Onde de Rayleigh

Pour obtenir la vitesse de propagation des ondes sismiques P et S dans la subsurface, trois grandes techniques de prospection sismique se distinguent à savoir:

- la sismique réfraction ou la tomographie sismique
- la sismique réflexion
- et l'inversion des ondes de surface

Ces types d'ondes sont résumés dans la figure A.5 sous formes géométrique et sous formes signal analogique.

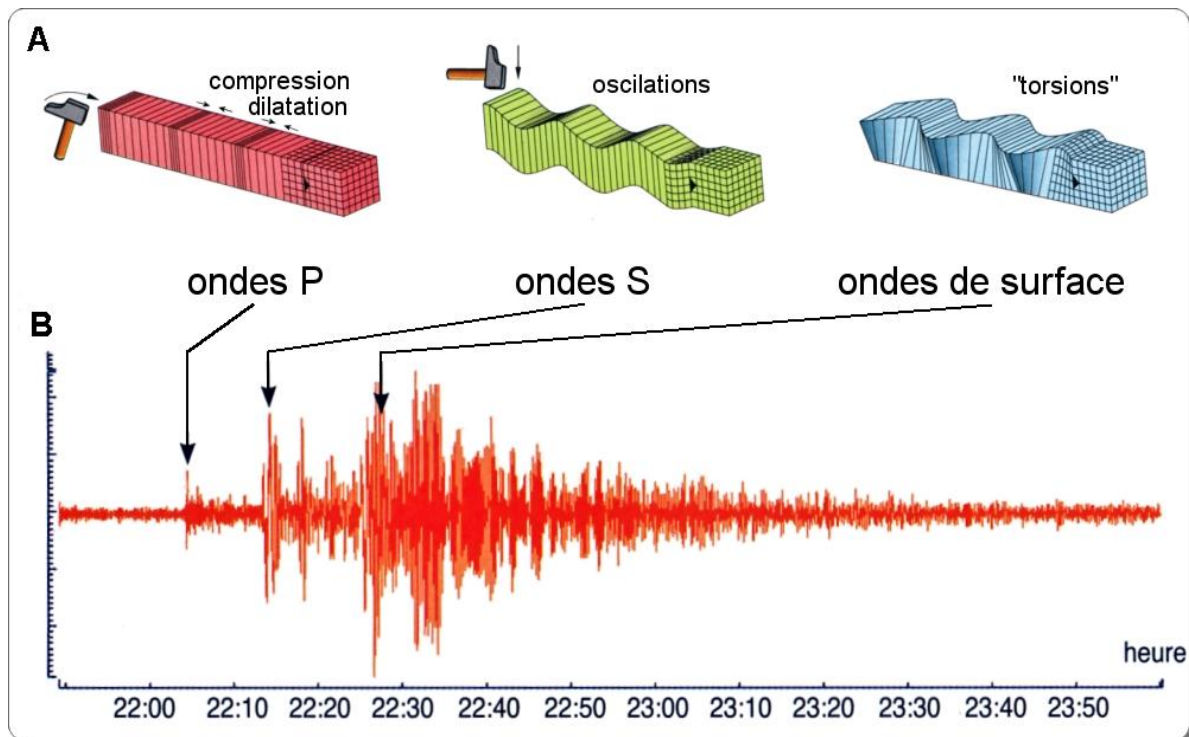


Figure A.5: Onde P, onde S et ondes de surface

**Signal sismique** : Un signal sismique est une représentation, en fonction du temps, du mouvement du sol produit par un ébranlement (provoqué ou non).

Le signal présenté ci-dessous, se divise en 2 zones bien distinctes :

- La première, relativement calme, précède l'arrivée de l'onde sismique au capteur ;
- la deuxième commence à l'arrivée du front d'onde qui marque le passage de l'état de repos relatif du sol, à l'état d'agitation consécutif à l'arrivée de l'ébranlement.

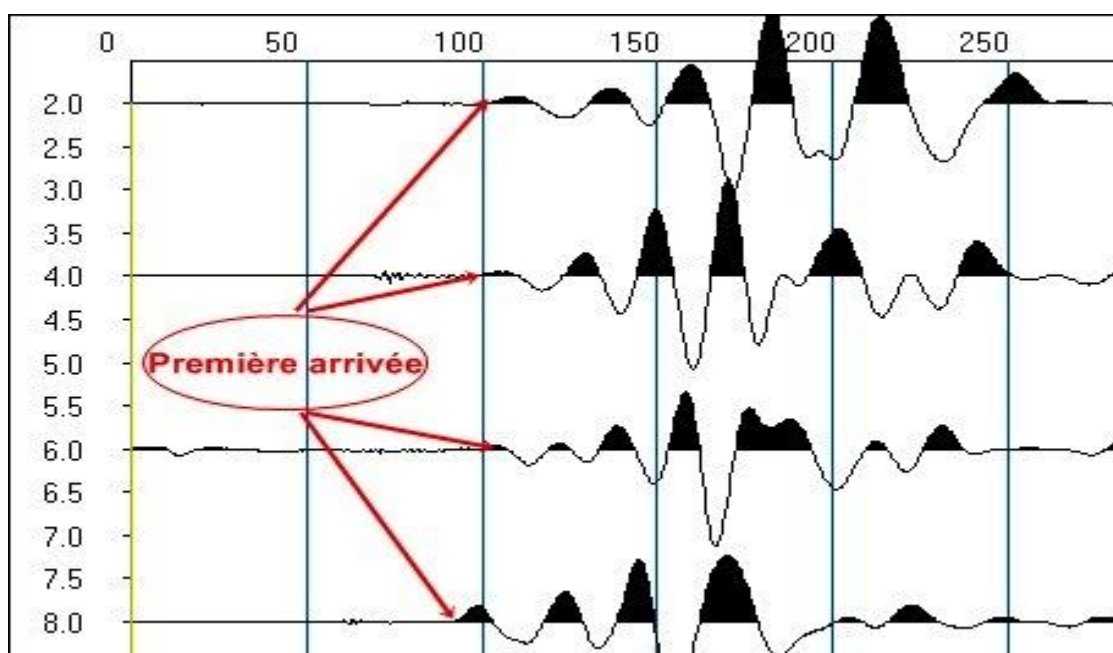


Figure A. 6: Représentation du signal sismique

Le tableau ci-dessous donne une indication des puissances nécessaires en fonction des profondeurs d'investigation souhaitées.

Tableau A. 1: Indication des puissances en fonction des profondeurs d'investigation

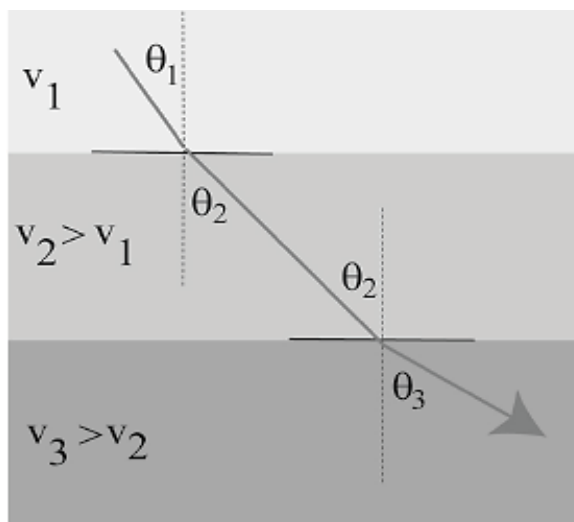
Profondeurs en m	Longueur du dispositif en m	Puissance en joules	Exemple
<b>15</b>	60	100	Masse de 5 kg
<b>30</b>	120	1000	Dameuse DELMAG
<b>50-60</b>	240	2500	Source VAKIMPAC
<b>&gt; 100</b>	480	5000	Source SOURSILE

## ANNEXE II : REFRACTION DES ONDES SISMQUES

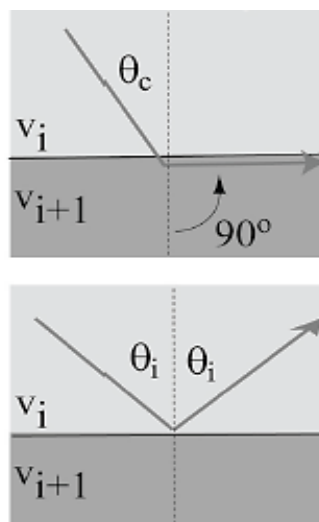
### ONDES CONIQUES

Si  $V_2 > V_1$ , il existe un angle critique: Ondes coniques ➡ Sismique réfraction

Snell



Angle critique



$$\frac{\sin i_c}{V_1} = \frac{\sin 90^\circ}{V_2}$$

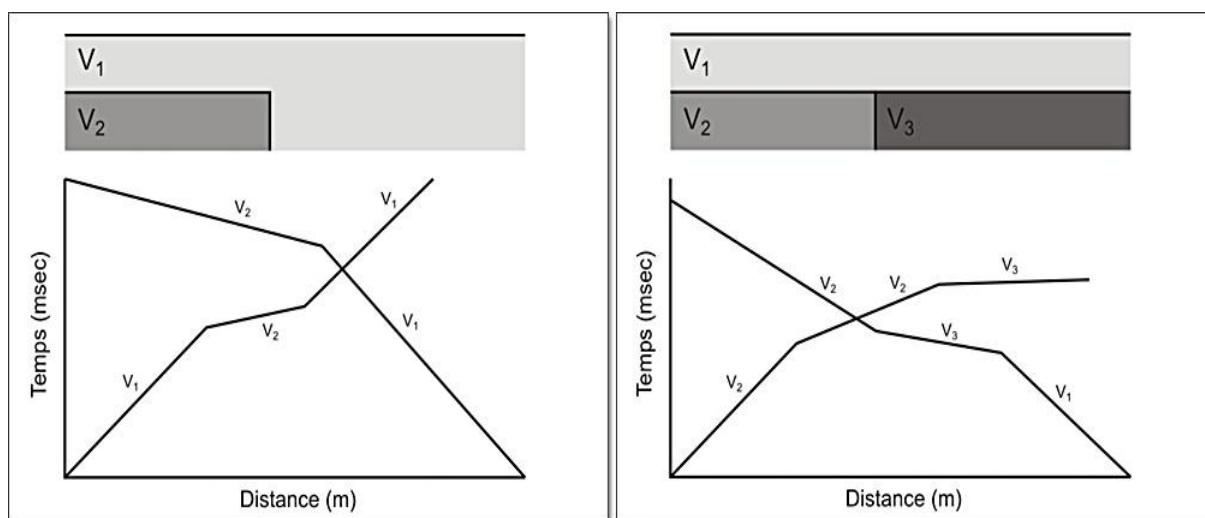
$$\sin i_c = \frac{V_1}{V_2}$$

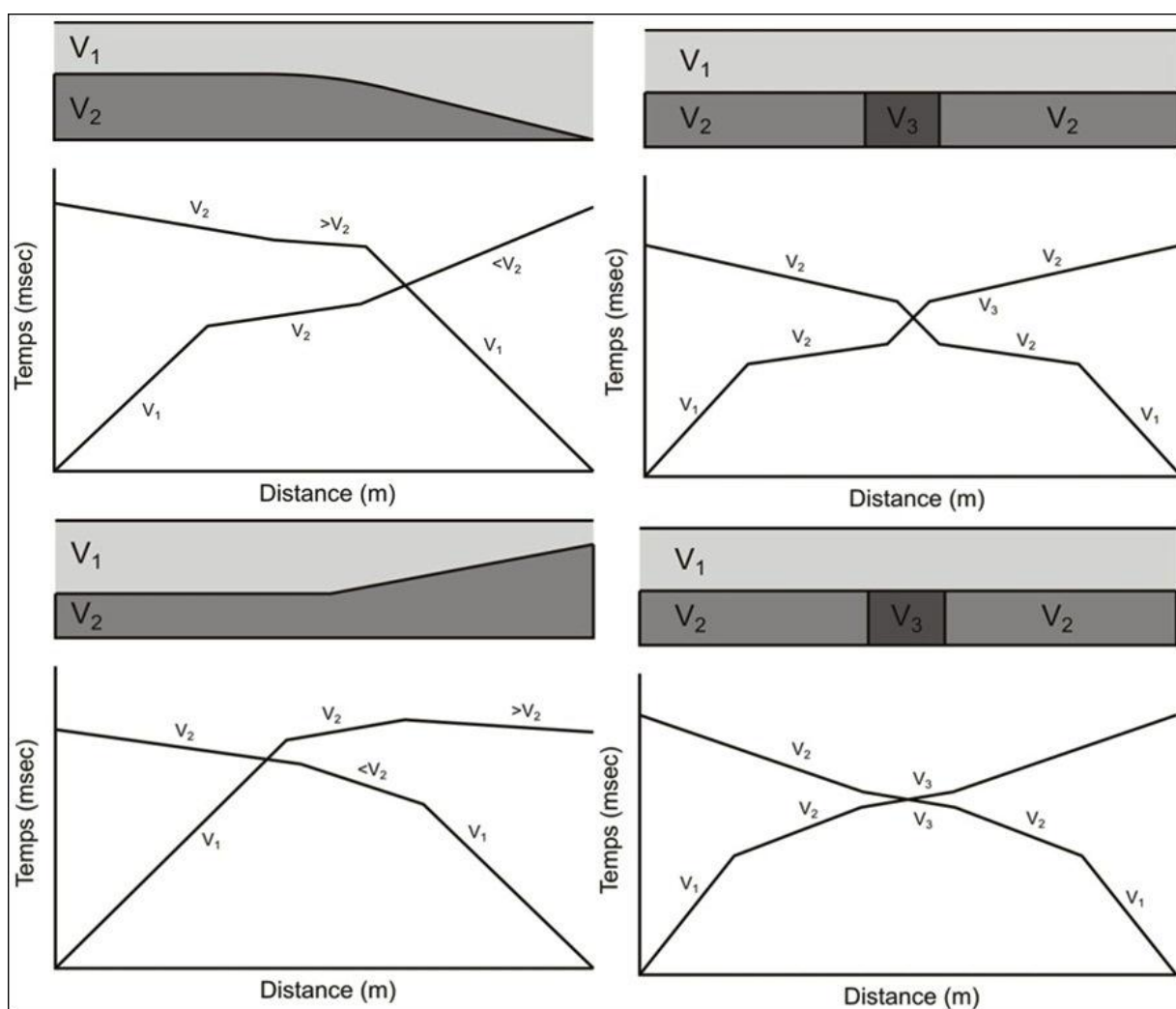
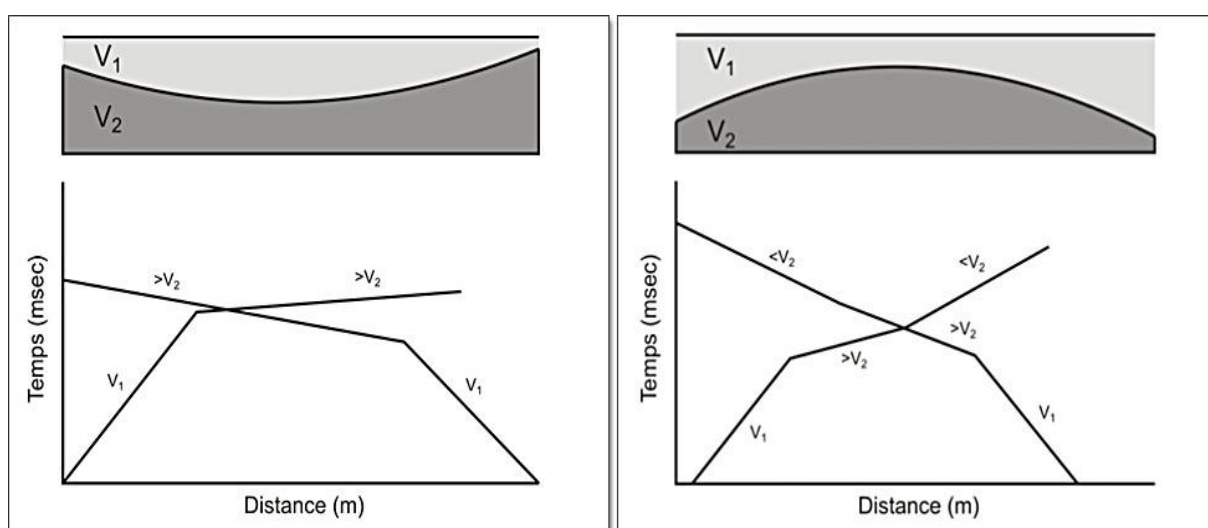
Il existe donc un angle  $i_1 = i_c$  au-delà duquel il n'y a plus d'onde transmise.

Pour  $i_1 = i_c$ ,  $i_2 = 90^\circ$ , l'onde est une onde réfractée appelée onde conique.

### Effets de structures bidimensionnelles :

Voici quelques références des formes et positions des couches en fonctions de courbe d'hodochrone respective.





### ANNEXE III: VITESSE SISMIQUE ET NATURE DES MATERIAUX

La vitesse sismique indiquée sur les coupes représente la vitesse de propagation de l'onde P dans le matériau. Cette vitesse de propagation est tributaire des paramètres physiques de ces matériaux. En effet, la vitesse de propagation dépendra de la densité des matériaux, de leur structure, de leur teneur en eau et de leur porosité, pour n'en nommer que quelques-uns.

La compilation des vitesses sismiques en fonction de la nature des matériaux a été réalisée indépendamment par plusieurs chercheurs, soit par mesure directe sur le terrain, soit par mesure en laboratoire. En première analyse, on observe qu'il n'y a pas de vitesse unique pour un matériau donné, mais plutôt une gamme de vitesses à l'intérieur de laquelle on retrouve un type de matériau donné. Cette variabilité de la vitesse sismique d'un matériau est facilement concevable si l'on considère le nombre de paramètres pouvant influencer la propagation de l'onde sismique.

On peut cependant regrouper ces résultats dans un diagramme montrant les principaux groupes de matériaux ainsi que la gamme de vitesses qui leur est attribuée. Ce diagramme permet de prévoir la nature des matériaux présents, en particulier si l'on a une connaissance du contexte géologique de la région où les travaux sismiques ont été réalisés.

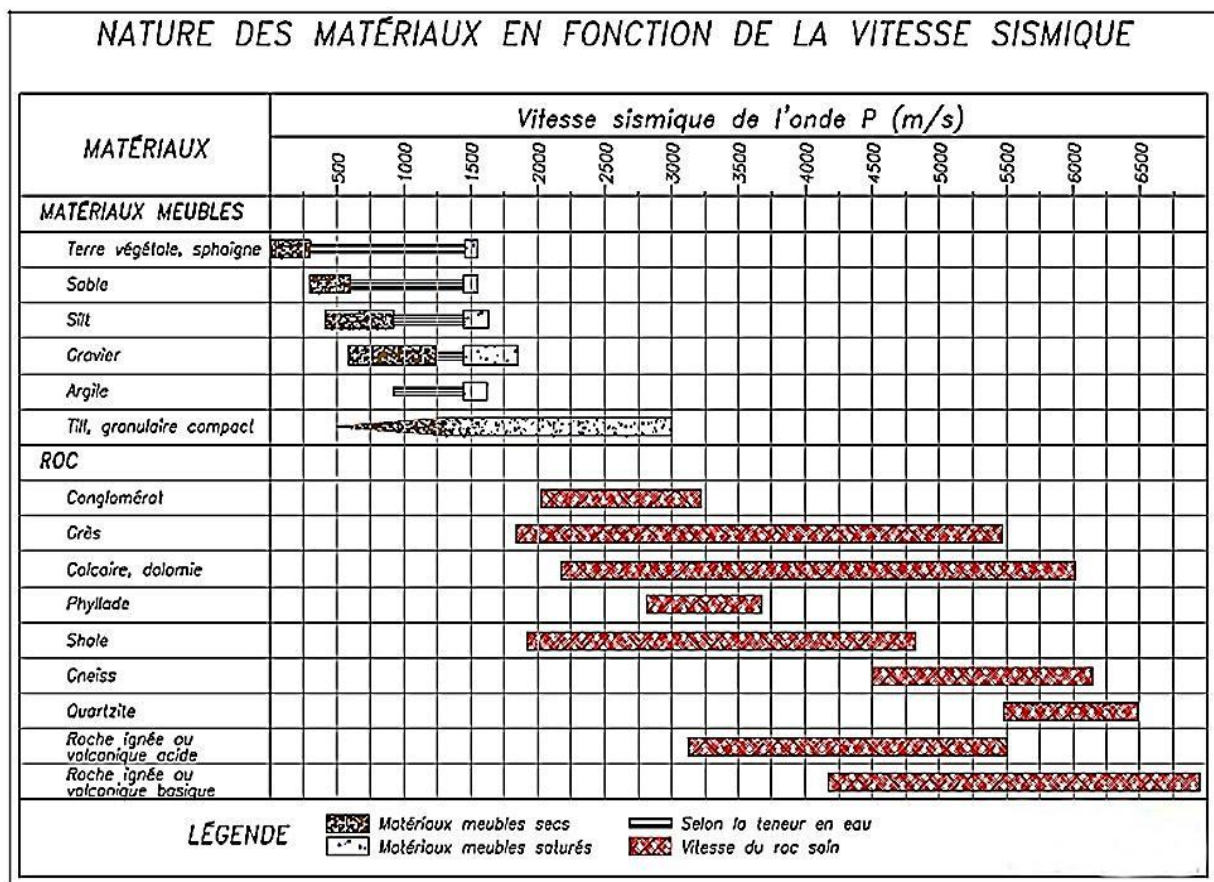


Figure A.7: Nature des matériaux en fonction de la vitesse sismique

Le diagramme c'est un extrait de « Caterpillar matériels et méthode, édition 23 », Nous a permis les calages de la nature et types des couches avec leurs vitesses respectives.

Voici quelques tableaux de référence utilisées pour la prospection sismique:  
Tableau A. 2: Références vitesses et densités des ondes-roches

Milieu	$V_P$ (m/s)	$V_S$ (m/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Roche altérée</b>	300-700	100-300	1.7 – 2.4
<b>Sable sec</b>	400-1200	100-500	1.5 – 1.7
<b>Sable humide</b>	1500-4000	100-500	1.9 – 2.1
<b>Argiles</b>	1100-2500	200-800	2.0 – 2.4
<b>Marnes</b>	2000-3000	750-1500	2.1 – 2.6
<b>Grès</b>	3000-4500	1200-2800	2.1 – 2.4
<b>Calcaire</b>	3500-6000	2000-3300	2.4 -2.7
<b>Craie</b>	2300-2600	1100-1300	1.8 – 2.3
<b>Salt</b>	4500-5500	2500-3100	2.1 – 2.3
<b>Granite</b>	4500-6000	2500-3300	2.5 – 2.7
<b>Basalte</b>	5000-6000	2800-3400	2.7 – 3.1
<b>Charbon</b>	2200-2700	1000-1400	1.3 - 1.8
<b>Eau</b>	1450-1500	-	1
<b>Glace</b>	3400-3800	1700-1900	0.9
<b>Pétrole</b>	1200-1250	-	0.6 – 0.9

Tableau A. 3: Autre référence vitesse et nature des roches

MATERIAUX	Vitesses $V_p$ (m/s)	Vitesses $V_s$ (m/s)	MATERIAUX	Vitesses $V_p$ (m/s)	Vitesses $V_s$ (m/s)
<b>Alluvions en surface</b>	200-500		Gneiss	3100-5400	
<b>Alluvions à 200m de profondeur</b>	3000-3500		Basalte	3000-6400	
<b>Sol (zone altéré)</b>	300-900		Granite	4000-5700	2100 -3300
<b>Marne</b>	1800-3800		Eau douche à 5°C	1440	
<b>Sable</b>	200-2000		Eau douche à 15°C	1480	
<b>Calcaire</b>	1700-6400		Eau douche à 25°C	1500	
<b>Grès</b>	1400-6000		Eau douche à 35°C	1530	
<b>Dolomie</b>	3300-7600		Eau de mer	1480-1530	
<b>Sel (NaCl)</b>	4600		Glace	3200-3700	
<b>Anhydride (<math>CaSO_4</math>)</b>	6100		Pétrole	1300-1400	
<b>Charbon</b>	2000-3400		Gaz methane	400	

Ces tableaux montrent les relations entre la nature du milieu, vitesse de l'onde de compression  $V_p$ , de l'onde de cisaillement  $V_s$  ainsi que sa masse volumique.



## TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>I</b>
<b>GLOSSAIRE.....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>III</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>V</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS .....</b>	<b>VII</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>PROBLEMATIQUE .....</b>	<b>3</b>
 <b>CHAPITRE I : DESCRIPTION DU MILIEU D'ETUDE .....</b>	 <b>5</b>
<b>I.1- CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE .....</b>	<b>6</b>
I.1.1- Situation géographique et administrative.....	6
I.1.2- Morphologie.....	8
I.1.3- Hydrographie .....	8
<b>I.2- CONTEXTE CLIMATIQUE .....</b>	<b>9</b>
I.2.1- Température .....	9
I.2.2- Précipitation .....	10
I.2.3- Humidité .....	12
<b>I.3- CONTEXTE GEOLOGIQUE.....</b>	<b>12</b>
I.3.1- Géologie régionale .....	12
I.3.2- Géologie appliquée .....	13
<b>I.4- MILIEU HUMAIN .....</b>	<b>16</b>
I.4.1- Démographie.....	16
I.4.2- Agriculture et élevage .....	17
I.4.3- Contrainte économique du secteur.....	18
 <b>CHAPITRE II : BASE METHODOLOGIQUES DE LA PROSPECTION SISMIQUE</b>	 <b>21</b>
<b>II.1- TECHNIQUE DE LA SISMIQUE REFRACTION .....</b>	<b>22</b>
II.1.1- Loi de Snell DESCARTES.....	23
II.1.2- Réfraction des ondes sismiques .....	26
II.1.3- Calcul du temps d'arrivé.....	30
<b>II.2- ACQUISITION DES DONNEES SISMIQUES .....</b>	<b>35</b>

II.2.1- Aperçue de la méthode .....	35
II.2.2-Matériels utilisées .....	37
II.2. 3- Configurations géométriques.....	40
<b>II.3- METHODE D'INTERPRETATION .....</b>	<b>41</b>
II.3.1- Méthode inversion TOMOGRAPHIQUE .....	41
II.3.2- Problème lors de l'INTERPRETATION .....	44
<b>II.4- ESTIMATION DES PARAMETRES PHYSIQUE DU SOUS-SOL.....</b>	<b>47</b>
II.4.1- Vitesses des couches.....	47
II.4.2- Epaisseur des couches .....	48
<b>Chapitre III : APPLICATION ET INTERPRETATION.....</b>	<b>50</b>
<b>III.1- LES PROFILS SISMIQUES .....</b>	<b>51</b>
III.1.1- Technique et choix du profil .....	51
III.1.2- Mise en place du coupe sismiques .....	51
<b>III.2- METHODES ET LOGICIELS DE TRAITEMENT.....</b>	<b>54</b>
III.2.1- Présentation des logiciels .....	55
III.2.2- Méthode inversion TOMOGRAPHIQUE .....	58
<b>III.3-RESULTAT avec PICKWIN <sup>TM</sup> .....</b>	<b>59</b>
III.3.1- Pointage des premières arrivées .....	59
III.3.2- Interprétation du Produit de Pickwin.....	62
<b>III.4-RESULTAT avec PLOTREFA.....</b>	<b>63</b>
III.4.1- Modélisation par méthode inversion Tomographique.....	63
III.4.3- DISCUSSION ET RECOMMANDATION.....	73
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>77</b>
<b>RECHERCHES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>i</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>iii</b>
ANNEXE I : LES ONDES SISMIQUES .....	iv
ANNEXE II: VITESSE SISMIQUE ET NATURE DES MATERIAUX.....	ix



## **Titre : APPLICATION DE L'ETUDE DE LA NAPPE SOUTERRAINE A AMBALAKELY PAR APPROCHE SISMIQUE REFRACTION**

### **RESUME:**

Les temps de propagation en sismique réfraction permettent de calculer les vitesses de propagation des ondes dans le sous-sol et de déterminer la géométrie, la structure et la configuration des couches géologiques.

Les résultats obtenus sont les hodochrones des profils sismiques. Un tableau des vitesses de compression, de cisaillement et épaisseurs moyennes mesurés des couches.

Deux (02) profils sismiques de longueur égale à 50 mètres avec un pas régulier de 2 mètres, et cinq tirs (5) Pour chaque profil ont été exécutés durant la prospection et suivie du substratum à AMBALAKELY. L'interprétation se fait suivant la méthode inversion tomographique. Le premier profil – Profil 1 montre une structure tabulaire qui n'influe pas beaucoup sur la direction de l'écoulement souterrain. Le second profil par contre montre une structure antiforme formant ainsi inclinaison du substratum, et qui va jouer un rôle important sur la direction de l'écoulement souterrain.

**Mots clés :** en premier arrivées, géophone, hodochrone, réfraction, inversion, sismomètre, sismique, tomographie, profil sismique.

### **ABSTRACT:**

The times of propagation in seismic refraction permit to calculate the speeds of propagation of the waves in the basement and to determine geometry, the structure and the configuration of the geological layers.

The gotten results are the hodochrone of the seismic profiles. A picture of the compression speeds, of shearing and middle thickness measured of the layers.

Two (02) seismic profiles of length equal to 50 meters with a regular step of 2 meters, and five shootings (5) for every profile have been executed during the prospecting and consistent of the substratum in AMBALAKELY. The interpretation makes itself according with method inversion tomographic. The first profile - Profile P1 watch a tabular structure that doesn't many influence on the direction of the underground out-flow. The second profile shows a structure antiform forming slant of the substratum thus on the other hand, and that is going to play an important role on the direction of the underground out-flow.

**Keywords:** first arrivals, géophone, hodochrone, refraction, reciprocal, seismometer, seismic, tomography, seismic profile.

#### **Encadreur:**

Mr ANDRIAMBAHOAKA Zedidia

Tel: +261 331491152

E-mail: [Zedidia\\_and@yahoo.fr](mailto:Zedidia_and@yahoo.fr)

#### **L'impétrant:**

RAFALIARISON Aina Elie

SICU BLOC 302 AB Ambatomaro

Tel: +261337679746

E-mail: [kaneswins@gmail.com](mailto:kaneswins@gmail.com)

