

**v** : Coefficient de Poisson

**V<sub>p</sub>** : vitesse de propagation des ondes de compression

**V<sub>s</sub>** : vitesse de propagation des ondes de cisaillement

**E** : Module d'Young

**G** : Module de cisaillement

**ρ** : masse volumique.

**m** : mètre.

**s** : seconde.

**σ** : conductivité

**kg** : Kilogramme

**S** : siemens

**ρ** : résistivité

**Ω** : ohms

**μ<sub>r</sub>** : perméabilité magnétique relative

**χ** : susceptibilité magnétique

**ε<sub>r</sub>** : permittivité relative

**c** : vitesse de la lumière dans le vide

**RAN** : radioactivité naturelle

**γ-ray** : gamma ray

**γ** : gamma

**C<sub>R</sub>** : vitesse de phase

**f<sub>c</sub>** : fréquence caractéristique dépendant des propriétés du sol

**Hz** : Hertz

**RF-EM** : Radio Frequency Electromagnetics

**%** : Pourcentage

**Ep** : électrique primaire

**Hp** : champ magnétique

**Hs** : champ magnétique vertical secondaire

**MT** : magnétotellurique

**$\rho_a$**  : résistivité apparente

**$p$**  : profondeur de pénétration

**$e$**  : *expennentiel*

**E** : Capteur de champ électrique

**$v$**  : vitesse de l'onde électromagnétique (m/s),

**$c$**  : célérité de la lumière dans le vide

**$\epsilon_r$**  : permittivité relative (sans dimension).

**Pe** : résistivité de l'eau

**$\Phi$**  : porosité

**S** : fraction volumique de pores contenant de l'eau

**a, m, c et n** : constantes

**k** : facteur géométrique

**g** : la gravité au point courant

**go** : gravité à la base.

**z** : différence d'altitude entre le point courant et la base,

**T** : correction due au relief.

## LISTE DES ABREVIATIONS

**d** : masse volumique des terrains de surface qu'il convient d'estimer au mieux,

**G** : constante universelle de gravitation

**h** : heure

**mGal** : milligals

**ft** : feet

**R** : résistivité électrique des roches

**R<sub>w</sub>** : résistivité du fluide d'imbibition

**STE** : Stah Est.

**API** : American Petroleum Institute.

**DTC** : Compressional wave slowness.

**DTS** : Shear wave slowness.

**Dédicace**

**Remerciements**

**Résumé**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Liste des abréviations**

**Introduction générale**

## **CHAPITRE 1 : LES PROBLEMES GEOTECHNIQUES : VERS UNE DEMARCHE GEOPHYSIQUE**

|                                                                           |                |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------|
| I.Introduction .....                                                      | Erreur ! Signe |
| II.Grands problèmes de reconnaissance dans le domaine du génie civil..... | Erreur ! Signe |
| II.1 Caractérisation des sols grossiers naturels .....                    | Erreur ! Signe |
| II.2 La détection des cavités souterraines .....                          | Erreur ! Signe |
| □ La méthodologie générale pour la recherche de cavité : .....            | Erreur ! Signe |
| II.3 Module dynamique : .....                                             | Erreur ! Signe |
| II.4 Reconnaissance du sous-sol urbain.....                               | Erreur ! Signe |
| II.5 La profondeur du socle bed-rock.....                                 | Erreur ! Signe |
| II.6 Ripabilité, terrassement : .....                                     | Erreur ! Signe |
| II.7 Les fondations .....                                                 | Erreur ! Signe |
| II.8 Les venues d'eau .....                                               | Erreur ! Signe |
| II.9 La reconnaissance des gisements de granulats : .....                 | Erreur ! Signe |
| III.Les outils et techniques.....                                         | Erreur ! Signe |
| Références bibliographiques.....                                          | Erreur ! Signe |

## **CHAPITRE 2 : LES METHODES GEOPHYSIQUE APPLIQUEES AU GENIE CIVIL**

|                                                                                              |                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| I.Introduction : .....                                                                       | Erreur ! Signe |
| II.Paramètres physiques utilisés en géophysique.....                                         | Erreur ! Signe |
| II.1 Masse volumique : .....                                                                 | Erreur ! Signe |
| II.2 Caractéristiques élastiques (modules d'élasticité, vitesses des ondes mécaniques) ..... | Erreur ! Signe |
| II.3 Caractéristiques électriques .....                                                      | Erreur ! Signe |
| II.4 Caractéristiques magnétiques et électromagnétiques .....                                | Erreur ! Signe |
| II.5 Radioactivité des roches .....                                                          | Erreur ! Signe |
| III.Méthodes géophysiques .....                                                              | Erreur ! Signe |

|                                                     |                |
|-----------------------------------------------------|----------------|
| III.1 Les méthodes sismiques.....                   | Erreur ! Signe |
| □ Principe des méthodes sismiques : .....           | Erreur ! Signe |
| III.1.1 Sismique réfraction : .....                 | Erreur ! Signe |
| III.1.2 Sismique réflexion.....                     | Erreur ! Signe |
| III.1.3 Les ondes de surface (MASW): .....          | Erreur ! Signe |
| III.1.4 Tomographie sismique.....                   | Erreur ! Signe |
| III.1.5 Sismique passive .....                      | Erreur ! Signe |
| III.1.6 Sismique Parallèle : .....                  | Erreur ! Signe |
| III.1.7 Cross hole.....                             | Erreur ! Signe |
| III.2 Méthodes électromagnétiques : .....           | Erreur ! Signe |
| III.2.1 RF-EM et VLF-EM GRAD .....                  | Erreur ! Signe |
| III.2.2 Radio-magnétotellurique .....               | Erreur ! Signe |
| III.2.3 Radar géologique.....                       | Erreur ! Signe |
| III.3 Méthodes électriques en courant continu ..... | Erreur ! Signe |
| III.3.1 Sondage électrique .....                    | Erreur ! Signe |
| III.3.2 Traîné et carte de résistivité .....        | Erreur ! Signe |
| III.3.3 Le panneau électrique.....                  | Erreur ! Signe |
| III.4 Prospection gravimétrique .....               | Erreur ! Signe |
| III.4.1 Microgravimétrie .....                      | Erreur ! Signe |
| IV. Choix des méthodes à adopter .....              | Erreur ! Signe |
| Références bibliographiques.....                    | Erreur ! Signe |

## **CHAPITRE 3 : UN OUTIL NUMERIQUE SIMPLE MAIS EFFICACE POUR LA DETERMINATION DE LA VITESSE EN PROFONDEUR**

|                                                               |                |
|---------------------------------------------------------------|----------------|
| I. Introduction et objectifs.....                             | Erreur ! Signe |
| II.Uphole un outil numérique du terrain .....                 | Erreur ! Signe |
| II.1 Description de logiciel .....                            | Erreur ! Signe |
| II.2 <i>Procédure de l'interprétation</i> .....               | Erreur ! Signe |
| II.3 <i>Affichage des résultats de l'interprétation</i> ..... | Erreur ! Signe |
| III. StarUphole.....                                          | Erreur ! Signe |
| III.1 Description de logiciel .....                           | Erreur ! Signe |
| III.2 Procédure de l'interprétation. ....                     | Erreur ! Signe |

## **CHAPITRE 4 : INTERPRETATION THEORIQUE DE LA METHODE DITE CVT**

|                         |                |
|-------------------------|----------------|
| I.Partie théorique..... | Erreur ! Signe |
|-------------------------|----------------|

|                                                                                  |                |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| I.1 Présentation.....                                                            | Erreur ! Signe |
| I.2 Utilisation de la méthode CVT en génie civil.....                            | Erreur ! Signe |
| I.3 Présentation de la méthode CVT.....                                          | Erreur ! Signe |
| I.3.1 Avantage de la méthode CVT.....                                            | Erreur ! Signe |
| II.Partie pratique.....                                                          | Erreur ! Signe |
| II.2 Situation Géographique.....                                                 | Erreur ! Signe |
| II.3 Nature du terrain .....                                                     | Erreur ! Signe |
| II.4 Camp .....                                                                  | Erreur ! Signe |
| III.Procédure de mise en oeuvre et Réalisation.....                              | Erreur ! Signe |
| IV.Description des CVT réalisés.....                                             | Erreur ! Signe |
| V.Présentation des résultats .....                                               | Erreur ! Signe |
| Interprétation des résultats :.....                                              | Erreur ! Signe |
| <b>CHAPITRE 5 : Sismique 3D : Etude d'un cas réel</b>                            |                |
| I.Introduction.....                                                              | Erreur ! Signe |
| II.Terminologie de la sismique 3D .....                                          | Erreur ! Signe |
| III.Avantages de la sismique 3D.....                                             | Erreur ! Signe |
| IV.Procédures générales .....                                                    | Erreur ! Signe |
| V.Mise en œuvre .....                                                            | Erreur ! Signe |
| VII Présentation des résultats .....                                             | Erreur ! Signe |
| Références bibliographiques :.....                                               | Erreur ! Signe |
| <b>CHAPITRE 6 : Application des diagraphies pour la caractérisation des sols</b> |                |
| I. Introduction.....                                                             | 124            |
| II. Diagraphies géophysiques.....                                                | 126            |
| II.1 Diagraphie de radioactivité naturelle (RAN). ....                           | 127            |
| II.2 Diagraphie sonique. ....                                                    | 130            |
| II.3 Diagraphie de résistivité.....                                              | 132            |
| III. Application des diagraphies au puits STE. ....                              | 133            |
| a. Localisation de puits. ....                                                   | 133            |
| b. Cadre géologique.....                                                         | 134            |
| c. Prévisions litho-stratigraphiques.....                                        | 135            |
| IV. Présentation des résultats. ....                                             | 139            |
| V. Interprétation des résultats. ....                                            | 140            |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| Références bibliographiques..... | 145 |
| Conclusion générale. ....        | 146 |
| Annexes.                         |     |

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

La géophysique applique les moyens de la physique à l'étude de la structure des terrains. Elle se pratique à partir de la surface du sol (géophysique de surface), dans un forage au moyen d'une sonde portant les instruments de mesure (diagraphies) ou entre forages, forage et surface, forage et galerie (géophysique de forage). C'est l'une des approches utilisées pour la reconnaissance géotechnique du site avant la construction d'un ouvrage (bâtiment, infrastructure urbaine ou infrastructure de transport, barrage...). La reconnaissance géotechnique d'un site consiste à déterminer la nature et la répartition des matériaux dont il est composé et à déterminer leurs propriétés. Ces éléments servent à préciser l'emplacement ou le tracé de l'ouvrage à construire, à concevoir ses fondations et à décider des procédés de construction. Une grande partie des reconnaissances s'applique à l'hydrogéologie et en particulier aux relations de l'ouvrage avec l'eau.

La reconnaissance se traduit par l'élaboration d'un modèle géologique. **Un modèle géologique** est un ensemble de représentations d'un site sous ses différents aspects (nature, répartition, propriétés des matériaux qui le constituent). Ces représentations prennent matériellement la forme de cartes, de coupes, de blocs diagrammes, de coupes de sondages, de textes ou même de maquettes.

Au départ, la reconnaissance est toujours fondée sur un premier modèle géologique, qui peut être très sommaire, imprécis ou peu fiable. Le but de la reconnaissance est de l'améliorer, de le rendre fiable, précis, le plus complet possible afin de permettre une conception de l'ouvrage qui repose sur les données dont on a besoin et qui soient les plus sûres possible.

Une qualité indispensable du modèle géologique est sa cohérence. Toutes les méthodes employées pour la reconnaissance consistent à faire des observations et des mesures et à les interpréter. Observations et mesures ne peuvent se faire qu'à partir de la surface du sol ou d'excavations (forages, galeries, tranchées, puits...); leur interprétation doit

conduire à la description du sous-sol partout dans son volume. C'est là que l'exigence de cohérence intervient : les interprétations doivent être compatibles. Plus les méthodes utilisées sont variées, plus les contraintes sur l'interprétation sont fortes et plus la vérification du critère de cohérence rend fiable le modèle géologique élaboré.

### **Les méthodes de reconnaissance**

Elles peuvent être classées selon un ordre chronologique de leur usage et selon le niveau de détail souhaité. Naturellement, le processus de reconnaissance n'est pas linéaire ; à mesure que celle-ci est réalisée et que de nouvelles observations et de nouvelles mesures apportent des données supplémentaires, les données accumulées depuis le début sont réexaminées afin de s'assurer de la cohérence de l'ensemble.

**L'élaboration du modèle géologique** préalable commence par la recherche et l'exploitation des données disponibles, cela grâce à des enquêtes, collectes d'archives orales ou écrites, étude de documents géologiques (cartes géologiques, articles, thèses, rapports, etc.), banques de données publiques et privées, études de photos aériennes et satellitaires. Les résultats précédents sont validés et enrichis par des observations, des relevés et la cartographie détaillée sur le terrain, qui doivent être faits par un spécialiste mais restent d'un coût faible. Des échantillons peuvent être prélevés à la surface du sol dès ce stade de la reconnaissance ; ils servent à identifier précisément les matériaux rencontrés.

Le modèle géologique est maintenant de plus en plus élaboré. Les techniques géophysiques de surface sont choisies en fonction du type de terrain rencontré, du type de contraste attendu, des profondeurs d'investigation, du niveau de détail visé ainsi que du type particulier de problème technique à résoudre (par exemple évaluation des difficultés de terrassement, détection d'éventuelles cavités souterraines, etc.).

### **Place de la géophysique dans les méthodes de reconnaissance**

Dans le processus de reconnaissance, la géophysique intervient donc à plusieurs stades. Elle sert à améliorer le premier modèle géologique en donnant une vision d'abord approximative de la structure du sous-sol en volume (en complétant en profondeur les observations de surface), puis elle est utilisée pour optimiser l'implantation des sondages mécaniques qui, à leur tour, permettent de préciser les interprétations géophysiques.

Clicours.COM

À un stade plus avancé de la reconnaissance, la géophysique sert à valoriser les forages au moyen des diagraphies et des techniques géophysiques de forage.

Avec la géologie, la géophysique permet d'évaluer le caractère représentatif des informations ponctuelles tirées des sondages mécaniques et des essais géotechniques en place et elle contribue à la cohérence du modèle géologique.

Elle aide à la résolution de problèmes spécifiques comme les problèmes de terrassement, la détection de cavités souterraines ou d'autres types d'hétérogénéités, la détermination des masses volumiques ou des teneurs en eau, l'identification des argiles, l'évaluation de la fracturation, etc.

Après cette introduction très détaillée, ce mémoire de projet de fin d'études comporte deux parties :

La première partie c'est une étude bibliographique sur les problèmes qui se posent en génie civil où les méthodes géotechniques traditionnelles n'apportent pas de solution donc le recours vers les méthodes géophysiques est justifié ; deux chapitres qui se présentent dans cette partie :

**Chapitre 1** : Les problèmes géotechniques : vers une démarche géophysique ;

**Chapitre 2** : Les méthodes Géophysiques appliquées au génie civil ;

La deuxième partie c'est une application de trois procédés géophysiques nécessaire et complémentaire dans l'étude de sol : CVT, Sismique 3D et diagraphies. Correspondant à des études réelles qui ont eu lieu dans le sud algérien pour le compte de la société nationale de transport des hydrocarbures : **Sonatrach Hassi Messaoud**.

Quatre chapitres qui se présentent dans cette partie :

**Chapitre 3** : Un outil numérique simple mais efficace pour la détermination de la vitesse en profondeur ;

**Chapitre 4** : Interprétation théorique et pratique de la méthode dite CVT ;

**Chapitre 5** : Sismique 3D : Etude d'un cas réel ;

**Chapitre 6** : Application des diagraphies pour la caractérisation des sols.

On achèvera ce travail par des conclusions relatives à ce travail réalisé au sud algérien ainsi qu'une liste des références bibliographiques.

## Chapitre 1

### Les problèmes géotechniques : vers une démarche géophysique

#### I. Introduction

Les problèmes qui se posent en génie civil sont très divers, la spécificité de ces problèmes est qu'ils se situent en général dans les cents premiers mètres du sous-sol. Cette sub-surface est caractérisée par une grande hétérogénéité. Les géotechniciens doivent travailler dans ce milieu ou :

- ❖ La topographie à une très grande importance ;
- ❖ Les perturbations diverses telles que : le vent, le trafic routier, les courants induits provenant des lignes électriques, par exemple, ne sont pas négligeables ;
- ❖ Les contrastes entre les propriétés physiques sont souvent faibles ;
- ❖ Les variations latérales dans les propriétés physiques priment les variations verticales ;
- ❖ Les formations n'ont pas une épaisseur constante ;
- ❖ Les interfaces ne sont pas planes et les contacts latéraux bien rarement verticaux ;
- ❖ Il s'agit enfin souvent de milieux aérés.

Nous avons en effet essayé dans ce chapitre de poser la démarche presque unique pour résoudre la diversité des problèmes de la géotechnique en mettant souvent une alternative type géophysique et sortant son apport par rapport à la démarche classique.

## **II. Grands problèmes de reconnaissance dans le domaine du génie civil**

### **II.1 Caractérisation des sols grossiers naturels**

Les sols à granulométrie étalée se rencontrent fréquemment dans les régions montagneuses (éboulis, moraines, dépôts de lave torrentielle, cônes de déjection torrentielle, alluvions, ...).

La construction d'ouvrages, et notamment d'ouvrages en terre (digues, merlons de protection contre les risques naturels) sur ce type de sols, ainsi que leur réemploi comme matériaux de remblai (éloignement des zones d'approvisionnement en granulats) impose une bonne connaissance de ces matériaux.

La caractérisation de ces sols par les méthodes géotechniques traditionnelles est cependant rendue très difficile, voire impossible, par la présence d'hétérogénéités (galets, cailloux, blocs...) de dimension décimétrique à métrique, et ce pour au moins deux raisons:

- In situ, la nature ponctuelle des essais mis en œuvre est inadaptée à l'hétérogénéité des matériaux grossiers étudiés, chaque essai pouvant affecter au hasard une zone meuble ou une zone de blocs. Un essai de pénétration dynamique, ou a fortiori statique, est en effet facilement stoppé par la présence d'un bloc de taille décimétrique. Les essais nécessitant la réalisation préalable d'un forage, tels que le Pressiomètre ou le Phicomètre, sont en pratique limités à des tailles de blocs de l'ordre de 150 mm (norme NF P 94-120).
- Au laboratoire, les essais de caractérisation mécanique sur des matériaux grossiers réalisés au triaxial ou à la boîte de cisaillement direct ont souligné la nécessité d'utiliser des appareils de dimension nominale au minimum 10 fois supérieure au  $D_{\max}$  du matériau testé. En pratique, cette condition limite ce type d'essais à des matériaux comportant des éléments de diamètre 100 mm. En d'autres termes, lorsque la dimension des plus gros éléments excède 100 à 150 mm, le volume élémentaire représentatif (VER) du sol devient beaucoup trop important (norme NFP 94-056) pour les dispositifs d'essai classiques.

Dans un tel contexte, les mesures géophysiques, non-intrusives et capables d'investiguer simultanément un grand volume de sol, constituent une alternative

intéressante aux essais géotechniques in-situ. Leur rapidité de mise en œuvre et leur coût relativement modéré, peut permettre une caractérisation des matériaux hétérogènes sur une surface étendue, ainsi qu'éventuellement une détection des variations latérales à l'échelle du site. Si les méthodes géophysique ne permettent pas d'accéder directement aux propriétés mécaniques du sol en grande déformation, des corrélations existent entre les paramètres géophysiques et géotechniques.

La caractérisation du sol par les méthodes géophysiques suppose l'existence de corrélations entre les propriétés mesurées (observables géophysiques) et les caractéristiques géotechniques ou physiques du matériau qui soient directement utilisables (granulométrie, teneur en eau, propriétés mécaniques, ...). Dans le cas d'un sol hétérogène à deux composants (par exemple, éboulis constitué de blocs décimétriques à métriques emballés dans une matrice fine), la mesure des propriétés géophysiques effectives du sol, ainsi que des propriétés individuelles de chacun de ses composants, peut permettre de remonter à sa composition, grâce aux lois de mélange issues des modèles d'homogénéisation.

Parmi les propriétés géophysiques facilement mesurables, la résistivité électrique montre un large éventail de valeurs entre les différents matériaux naturels, variant de quelques Ohm.m dans le cas des argiles ou des sols pollués à plus de  $10^4$  Ohm.m pour les roches telles le calcaire ou le granite. Si elle n'est pas directement reliée aux propriétés mécaniques du sol, la résistivité électrique d'un matériau hétérogène s'avère très sensible à la présence d'inclusions résistives ou conductrices qu'il contient.

Des études récentes concernant l'homogénéisation des sols hétérogène par la méthode d'inversion des ondes de surface ou par la tomographie électrique montrent qu'il est a priori possible, grâce à ces deux méthodes, d'estimer la composition d'un sol hétérogène bi-composant uniquement à partir de mesures géophysiques.

## **II.2 La détection des cavités souterraines**

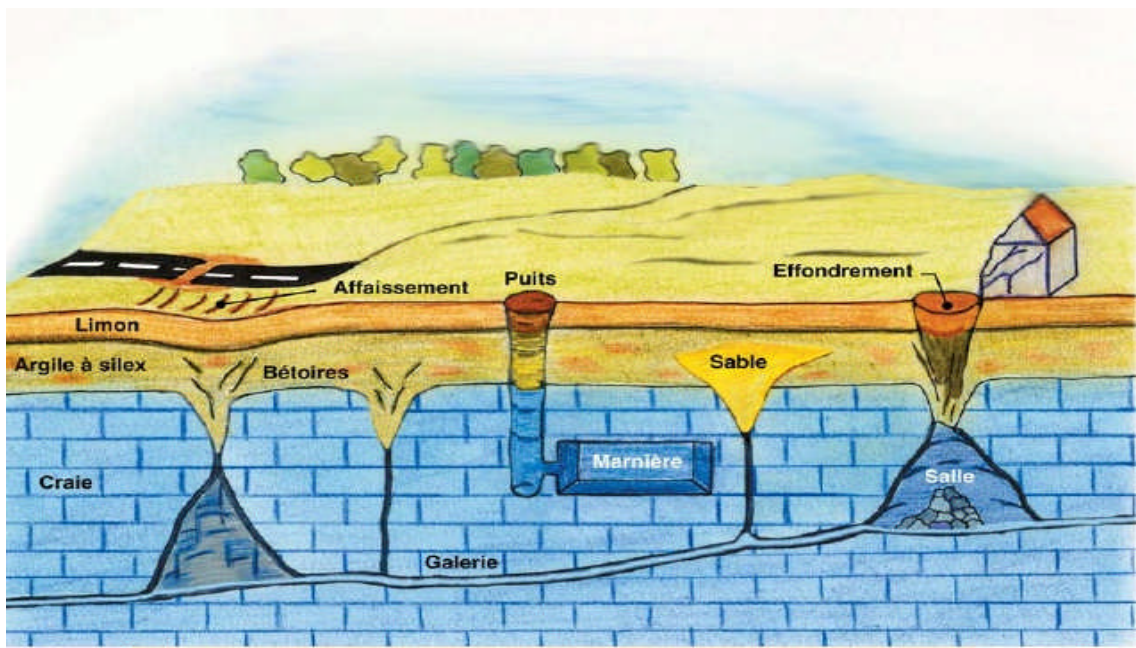
Les cavités souterraines sont une menace pour les constructions lorsque leur présence n'est pas détectée. En effet, si l'on construit au-dessus d'une cavité souterraine sans le savoir, on ne dimensionne pas l'ouvrage correctement et il peut se révéler fragile. Le poids de l'ouvrage fait céder le toit de la cavité et il s'ensuit une ruine brutale, d'autant plus grave qu'il peut y avoir des accidents corporels.

Les cavités rencontrées habituellement dans le domaine du génie Civil sont les carrières souterraines, les mines peu profondes et les cavités naturelles de dissolution.

On notera que les matériaux les plus fréquemment exploités en carrières (en dehors du sable, de l'argile ou de l'ardoise) sont des roches solubles susceptibles de donner dans certains cas des cavités naturelles. Il s'agit des roches carbonatées (calcaire et craie utilisés pour la pierre à bâtir, la chaux ou le ciment et pour l'amendement des sols siliceux) et des roches évaporitiques (essentiellement gypse, exploité pour le plâtre). La présence de tels matériaux dans le sous-sol doit donc inciter les maîtres d'œuvre à la prudence car les deux types de cavités, naturelles et anthropiques peuvent y être rencontrés.

Les instabilités de cavités souterraines génèrent des désordres qui peuvent se propager jusqu'à la surface. Les conséquences peuvent être très graves: ruine des constructions et des ouvrages de génie civil et mort d'homme en cas de phénomène brutal.

Il y a une gradation dans la gravité des problèmes de surface engendrés par les effondrements, depuis l'affaissement jusqu'à l'effondrement généralisé en passant par la montée d'un fontis au jour et l'effondrement localisé (Figure 1.1).



**Figure 1.1-** Profil géologique typique de Haute-Normandie. Relation entre le réseau karstique et les accidents en surface (source LRPC de Rouen).

Il se trouve que la nature des cavités souterraines est soit d'origine naturelle, soit d'origine anthropique. Les risques associés à leur présence relèvent donc des deux catégories :

- quand elles sont d'origine naturelle, le risque est géologique. L'effondrement à l'aplomb des surfaces sous-cavées est la conséquence de processus de dissolution de la roche ;
- quand elles sont d'origine anthropique, le risque est technologique. L'effondrement est lié au dimensionnement et à la stabilité de l'ouvrage.

Quelle que soit l'origine de la cavité, les accidents en surface peuvent être destructeurs. C'est pourquoi toute entreprise de génie civil doit prendre en compte cet aléa, et ce dès les premières études. L'objectif est d'aboutir à des solutions d'identification des vides et de sécurisation des sites sous-cavés.

La méthodologie de recherche de cavités proposée est présentée ci-dessous. Elle comporte deux aspects principaux :

- un travail d'inventaire,
- un ensemble de méthodes de détection et de mesures.

Le respect et la réalisation de l'ensemble de ces étapes sont les garants de la qualité des travaux de recherche de cavités souterraines naturelles ou anthropiques. Si le risque existe, les décisions concernant l'aplomb des surfaces sous-cavées doivent s'orienter vers l'une des solutions suivantes:

- un traitement (comblement ou confortement des cavités),
- une surveillance de la zone à risques,
- ou un éloignement.

➡ **La méthodologie générale pour la recherche de cavité :**

La recherche de cavités s'inscrit dans une politique de prévention des risques naturels et technologiques. Elle a pour objectif de déterminer les zones sous cavées susceptibles de provoquer des préjudices en surface. La méthodologie de recherche préconisée comporte les étapes suivantes : des études préliminaires, une campagne de mesures géophysiques, une campagne de forages. Elle doit mener à des solutions techniques de traitements.

➤ **Etudes préliminaires:**

▪ Etudes géologiques:

La recherche des cavités souterraines naturelles ou anthropiques commence par la consultation d'une carte géologique et d'une carte topographique. Elle doit permettre de déterminer la nature du terrain et les éventuelles conditions propices à l'apparition de cavités. Les cavités naturelles ou karsts se rencontrent dans un sol soluble comme le calcaire (milieu carbonaté) et le gypse (milieu sulfaté). Les cavités anthropiques, essentiellement des carrières et des mines, se trouvent dans les sols exploitables par l'homme. Elles sont plus problématiques que les karsts: elles sont beaucoup plus nombreuses, et pour les plus anciennes, leurs caractéristiques (localisation et dimensions) sont perdues ou inconnues. Il est fréquent que le sol soit soluble et exploitable (calcaire et gypse en particulier). La présence des deux types de cavités est alors possible. L'étude géologique consiste à recueillir les informations concernant la structure interne du terrain et à analyser l'ensemble des indices pour définir les zones de faiblesse: fractures, zones de décompression et, si possible, zones sous cavées.

▪ Recherche indices:

La recherche d'indices comporte la consultation d'archives et des enquêtes de voisinage. Selon les moyens mis en œuvre, le type de cavités recherchées et les dimensions de la zone d'étude, des techniques de télédétection compléteront cette étape. Un contrôle visuel in-situ vient clore la recherche d'indices. Les études préliminaires réalisées mènent à une première définition de l'aléa cavité et à un premier zonage. Elles peuvent être synthétisées, par exemple, sous la forme d'une fiche «Renseignement cavité».

➤ **Les méthodes géophysiques:**

Les méthodes géophysiques sont appliquées après la réalisation des études préliminaires. Elles apportent des informations supplémentaires sur le modèle géologique et permettent de réaliser un second zonage plus précis, au droit des anomalies mesurées susceptibles d'être reliées à des cavités.

➤ **Les forages:**

Les forages sont ensuite implantés sur le second zonage. Ils permettent de contrôler localement les hypothèses faites sur le modèle géologique et la nature des anomalies mesurées par les méthodes géophysiques. Il est impératif d'accompagner les forages de diagraphies instantanées et le cas échéant, en fonction des études préliminaires, de diagraphies différées.

- ❖ Si les forages rencontrent une cavité, alors elle est détectée.
- ❖ Si les forages ne rencontrent pas de cavité, cela ne signifie pas qu'il n'y a pas de cavité.

Des études supplémentaires peuvent être alors déployées: des mesures complémentaires en diagraphies permettent de préciser le modèle géologique et des mesures par méthodes géophysiques en forage permettent éventuellement de localiser des cavités près des forages quand elles sont indétectables depuis la surface. Ces dernières phases peuvent cependant s'avérer coûteuses et sont alors préférentiellement déployées autour des zones qu'il faut sécuriser impérativement.

Lorsque les cavités sont localisées, les solutions techniques de traitement sont envisagées pour sécuriser le site.

### **II.3 Module dynamique :**

Aujourd'hui, les problèmes posés aux ingénieurs civils dans le domaine des ouvrages souterrains deviennent de plus en plus complexes. En effet, ils sont confrontés à :

- ❖ Des conditions géographiques et géotechniques de sites de moins en moins favorables ;
- ❖ Des incertitudes permanentes sur la composition et le comportement réel du sous-sol ;
- ❖ La nécessité de minimiser les coûts de construction.

Pour ces raisons il est de plus en plus fait appel à des analyses numériques poussées de simulation.

Dans ces conditions il est capital de pouvoir fournir à l'ingénieur des données paramétriques lui permettant de modéliser des situations variables et évolutives lui

facilitant un choix adapté. En effet, c'est le comportement souterrain des roches qui est à l'origine du choix, à la fois de la technique d'excavation, du dimensionnement et du type de soutènement nécessaire.

L'obtention des modules dynamiques se fait généralement sur des carottes prélevées lors des forages de reconnaissance. Malheureusement, dans les terrains meubles et les roches altérées les carottes ne donnent pas de valeurs représentatives de la situation in situ. La géophysique peut parfois apporter une solution.

Les modules dynamiques sont obtenus par mesures sismiques par opposition aux modules dit statiques, calculés à partir des courbes effort-déformation obtenues soit en laboratoire, soit in situ au vérin. Le module statique est toujours inférieur au module dynamique et le rapport  $E_d/E_s$  varie beaucoup. Cela est lié aux vitesses de déformation mises en jeu lors des essais sismiques qui sont de l'ordre du cm/s ou du mm/s, ce qui correspond à des déplacements de l'ordre du micron. Il s'agit donc de déformations extraordinairement faibles et non comparables à celles qu'on fait subir au terrain lors d'essais statiques. Les valeurs des modules dynamiques et statiques peuvent différer assez considérablement jusqu'à se situer dans un rapport de 10.

Le principe de base de la théorie de l'élasticité infère que dans un solide homogène et isotrope les forces sont proportionnelles aux déplacements lorsque ceux-ci tendent vers zéro. En sismique, les contraintes et les déformations sont très faibles, et les modules que l'on détermine par cette méthode sont assimilables aux modules élastiques. En cela ils sont très différents des modules statiques.

Les contraintes de cisaillement se propagent à une vitesse dite vitesse de cisaillement  $V_s$  (ou vitesse transversale), les contraintes de compression se transmettent à une vitesse dite vitesse des ondes de compression  $V_p$  (ou vitesse longitudinale).

La connaissance de la vitesse de déplacement de ces deux types d'ondes permet de calculer les modules dynamiques des sols par les formules suivantes :

$$\text{Coefficient de Poisson :} \quad \nu = (V_p^2 - 2V_s^2) / (V_p^2 - V_s^2).$$

$$\text{Module d'Young:} \quad E = 2\rho \cdot V_s^2 \cdot (1 + \nu).$$

$$\text{Module de cisaillement :} \quad G = \rho \cdot V_s^2.$$

Où  $\rho$  est la masse volumique.

Il importe pour déterminer ces modules de créer ces deux types d'ondes par application de contraintes qui privilégient l'un ou l'autre type d'onde, ce qui confère une

importance fondamentale à la nature de la source de l'ébranlement ; et que les essais doivent être réalisés sur des bases très courtes, au sein d'un solide supposé alors homogène et isotrope, ce qui permet par ailleurs de privilégier le mode de création de l'ébranlement au détriment de l'énergie transmise.

## II.4 Reconnaissance du sous-sol urbain

La connaissance détaillée du sous-sol urbain suppose un défi auquel doivent faire face géotechniciens et ingénieurs civils. L'existence d'éléments souterrains (d'origine anthropique le plus souvent, tels que tunnels, canalisations, pieux, etc.) à proximité des chantiers constitue un problème non négligeable. Déterminer de façon précise les caractéristiques géotechniques des chantiers urbains n'est pas une tâche toujours facile, mais ils existent cependant quelques moyens fiables et rapides pour y parvenir. Malheureusement, ce genre d'information n'est pas toujours à portée de main. Il n'est pas toujours faisable d'obtenir des renseignements utiles à partir de mesures ou d'essais en forages ou en surface en raison des multiples interférences induites par l'activité humaine aux alentours et en-dessous des zones d'intérêt. En raison de leur qualité non destructive, l'emploi de méthodes géophysiques s'avère être un outil fondamental pour la résolution de ce type de problèmes, notamment les méthodes basées sur les principes de transmission de l'ondes sismiques à travers le sous-sol. Parmi elles, la Tomographie Sismique Cross-hole, la Sismique Passive et la Sismique Parallèle sont des méthodes simples et efficaces qui fournissent des résultats dont l'intérêt et la précision sont indiscutables.

## II.5 La profondeur du socle bed-rock

La détermination de la profondeur du bed-rock est une difficulté fréquemment abordée en génie civil.

Il faut tout d'abord préciser ce que l'on entend par bed-rock :

Pour un géologue ce peut être la plus ancienne roche consolidée sous des dépôts sédimentaires. Un ingénieur peut lui définir le bed-rock comme, le niveau ou la roche à des qualités susceptibles de supporter des structures, ou encore comme la roche saine sous la roche altérée.

La limite roche altérée/roche saine est primordiale lors de l'étude de glissement de terrain, car c'est elle qui va déterminer l'ampleur des travaux à effectuer. Elle intervient également pour le calcul de tassement des fondations.

Quelle que soit la définition, la question se ramène à la détermination de la profondeur d'une simple interface.

## II.6 Ripabilité, terrassement :

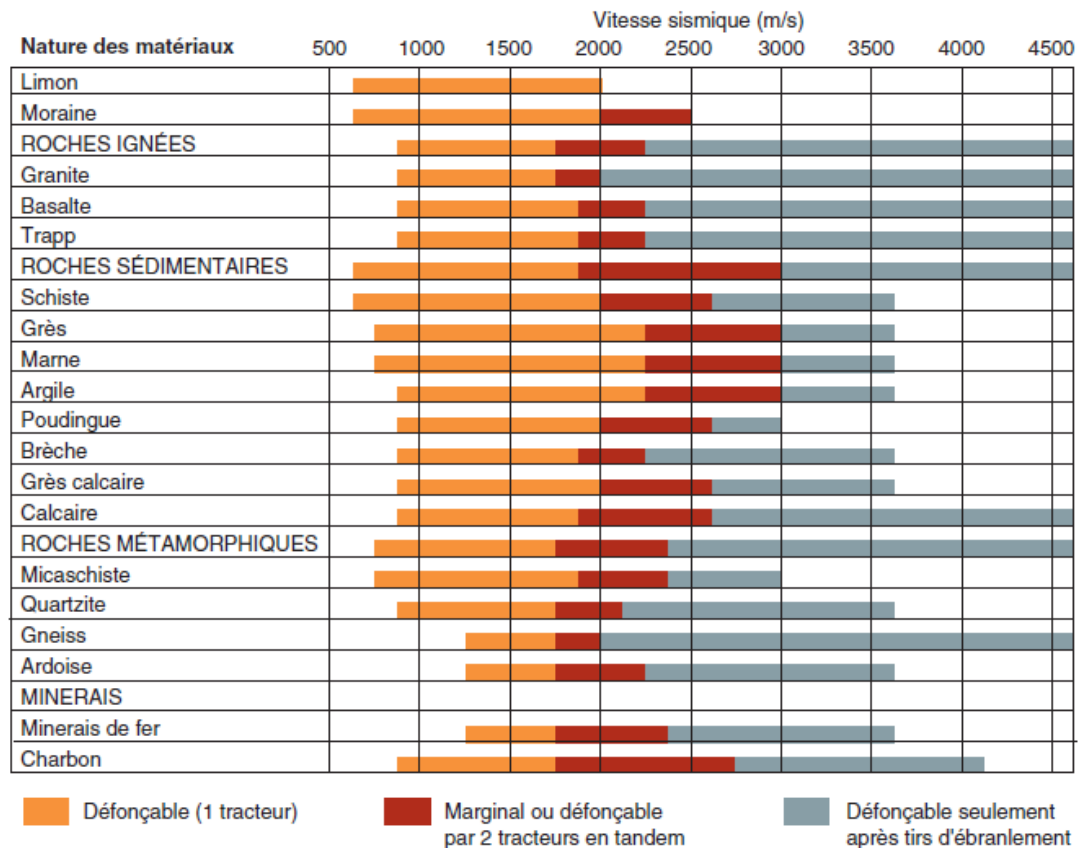
Par ailleurs, l'ingénieur s'intéresse particulièrement à la qualité, la santé des formations en présence. L'étude de leurs vitesses permet de caractériser les divers degrés de ripabilité des roches.

Les fabricants de rippers fournissent pour chaque type d'appareils des tableaux de la forme suivante ou sont représentés les degrés de ripabilité en fonction des vitesses des ondes P dans différentes roches (figure 1.2).

De cette façon, l'ingénieur peut décider des moyens d'excavation à utiliser, adaptés à la profondeur et au degré de ripabilité.

Les hauteurs de cette figure indiquent que l'échelle des vitesses est valable pour un tracteur de 320ch muni d'un ripper hydraulique porté à une dent. Ils ajoutent que :

- ➡ Pour un ripper à une dent monté sur un tracteur de 380ch, les chiffres de la figure sont à majorer de 10% ;
- ➡ Pour un ripper à une dent monté sur un tracteur de 320ch, les chiffres sont à diminuer de 15% ;
- ➡ Dans la zone limite du ripper, l'utilisation du ripper n'est en principe pas rentable, il est alors recommandé :
  - ✓ Soit de pousser le ripper avec un tracteur auxiliaire ;
  - ✓ Soit d'effectuer des tirs légers d'ébranlement qui fissurent la roche à défoncer.



**Figure 1.2-** domaine de ripabilité : tirée de l'ouvrage : reconnaissance géologique et géotechnique des tracés de routes et autoroutes édité par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en 1982.

## II.7 Les fondations

Le choix des différents types de fondations dépend des charges à transmettre par les piles, de la profondeur du massif rocheux, ainsi que de la topographie des versants.

Il convient de rappeler avant tout que ce qui est appelé massif rocheux par l'ingénieur est un milieu formé de discontinuités (fissures, diaclases, plans de stratification, etc.) et de la matrice rocheuse. De ce fait il n'existe pas de méthode analytique standard pour estimer la capacité portante des fondations appuyées sur le rocher. La difficulté est donc pour le géophysicien de fournir :

- ❖ L'épaisseur du terrain meuble ;
- ❖ L'épaisseur de la roche altérée ;
- ❖ Le toit de la roche saine ;
- ❖ Les caractéristiques géo-mécaniques du massif rocheux ;

- ❖ Les caractéristiques géo-mécaniques du terrain meuble dans le cas de micropieux.

## II.8 Les venues d'eau

Certains ouvrages souterrains peuvent poser des problèmes hydrogéologiques relativement importants. Il est nécessaire d'évaluer l'impact que les ouvrages prévus auront sur les eaux souterraines de la région. Dans le cas d'un tunnel, par exemple, il faut en effet établir:

- ❖ La nature et l'importance des écoulements souterrains que le tunnel risque de perturber;
- ❖ La nature des venues d'eau qui seront recoupées par le tunnel et les possibilités de captage qui s'offriront pendant les travaux.

Les venues d'eau sont également importantes dans l'étude des glissements de terrains car elles peuvent être la cause de la mécanique de glissement. La géophysique peut parfois apporter des solutions comme on peut déterminer par la sismique de réfraction la position du toit du substratum afin de déterminer l'épaisseur de tourbe constituant le fond du lac.

## II.9 La reconnaissance des gisements de granulats :

La reconnaissance détaillée des gisements est indispensable pour une bonne gestion de l'exploitation des carrières.

L'objectif est d'évaluer les quantités et qualités des matériaux commercialisables et des stériles, de préciser leur répartition et de recenser les contraintes particulières liées à l'exploitation et à l'environnement, de déboucher ainsi sur la définition d'un plan d'extraction et de remise en état du site et de contribuer à la conception rationnelle des installations ; permettre enfin la sélection qualitative des produits fabriqués tout en limitant autant que possible les investissements et les dépenses d'énergie.

### ➤ La découverte du gisement

On entend par découverte, la tranche de matériaux à extraire avant d'atteindre les couches exploitables. Longtemps considérée comme stérile, de plus en plus, la découverte est valorisée par sa réutilisation pour la protection de l'environnement (merlons anti bruits) ou la remise en état progressive du site. Dans l'étude de

gisement, on déterminera donc le volume de la découverte, mais aussi les variations de son épaisseur et de sa nature en vue de définir les conditions optimales de son extraction et de sa réutilisation.

On notera une attention particulière à l'étude des horizons de surface (pédologie) en vue d'une bonne gestion de la terre végétale dans le cadre du réaménagement de la carrière.

➤ **Problèmes de reconnaissance :**

Dans le cas de gisements sous-marins, les principaux problèmes à résoudre sont les suivants :

- Identification géo-mécanique du gisement : position, extension latérale, épaisseur, profondeur (il faut des raisons économiques qu'il se trouve sous moins de 30 mètres d'eau).
- Identification des matériaux : nature, granulométrie, minéralogie, teneur en carbonates, afin de vérifier que l'on peut les utiliser immédiatement. Il faut vérifier en outre qu'il n'y a pas de découverte stérile.

Ces deux types de problèmes sont purement techniques, les autres problèmes sont liés à l'environnement et à la gestion de l'occupation du domaine maritime.

Dans le cas de gisements terrestres, on étudie les caractéristiques suivantes du gisement :

D'abord la découverte, son épaisseur est un des éléments principaux permettant de décider de la rentabilité prévisible de l'exploitation.

Elle doit en outre être considérée de manière plus approfondie qu'auparavant car on utilise maintenant les matériaux qui la constituent pour répondre à une partie des exigences de la protection du milieu. On construit par exemple des merlons anti-bruit, et la terre végétale de la découverte peut servir au réaménagement final de la carrière. Si le gisement reconnu est destiné à une exploitation directement liée à un projet routier, la découverte contient des matériaux qui pourront être éventuellement utilisés en remblai, il doit donc être étudié de ce point de vue.

Ensuite il faut déterminer le volume total des matériaux exploitables et sa répartition dans l'espace en sous-ensembles prenant en compte les caractéristiques du gisement et du matériau. Chaque unité doit être identifiée avec précision. Cette connaissance conditionne en effet le plan d'extraction, la conception des installations et la qualité des granulats produits. On détermine ainsi :

- ✦ La nature pétrographique des matériaux, le comportement physique et mécanique des granulats, l'état de fragmentation du massif rocheux ou la granularité des matériaux alluvionnaires, enfin les différentes pollutions (graves argileuses par exemple) ou hétérogénéités (zones broyées) dans les zones à exploiter.

Une autre caractéristique importante à étudier est l'hydrogéologie du gisement : profondeur et propriétés de la nappe.

La reconnaissance d'un gisement se traduit en particulier sous la forme d'une carte d'orientation qui décrit en plan les zones favorables à l'exploitation et les zones à éviter.

### ➤ **Les méthodes et moyens d'études**

Pour répondre aux objectifs précédemment définis, l'étude détaillée d'un gisement doit être réalisée à l'échelle compatible avec la précision recherchée (1/2500 à 1/1000).

Les études préliminaires, dans le cas d'un gisement neuf, ou l'étude préalable du front de taille, dans le cas d'une extension, permettent en général de définir les paramètres les plus sensibles du gisement et d'orienter le choix des moyens pour répondre aux problèmes posés. Il faut d'autre part rechercher les méthodes de reconnaissance les mieux adaptées au contexte local (occupation des sols, morphologie, géologie).

Ces différentes démarches permettent d'établir un plan de reconnaissance spécifique du gisement à étudier, en sélectionnant, parmi les méthodes qui vont être présentées, celles qui conviennent le mieux au projet.

### ✦ **Etude morphologique et géologique de surface**

Toute étude de gisement commence par une étude morphologique et géologique englobant le site à exploiter et ses abords. Celle-ci a pu débiter lors d'études préalables visant à définir des secteurs favorables à l'exploitation de granulats à l'échelle du 1/25000 au 1/10000. A ce stade, les moyens suivants ont pu notamment être employés :

- ❖ Exploitation de la documentation géologique et géotechnique existante (carte géologique, hydrogéologiques, pédologiques,..., archives du code minier, dossiers géotechniques antérieurs, synthèses régionales,...) ;

- ❖ Analyse morphologique et géomorphologique par photo-interprétation à partir de la couverture noir et blanc de l'institut géophysique national ou de prises de vues spécifiquement réalisées pour mettre en évidence les phénomènes géologiques (émulsions spéciales, choix de la période et de l'angle de prise de vue,...) ;
- ❖ Levé géologique et structural précis, s'appuyant sur les fronts existants ou les affleurements naturels ;
- ❖ Echantillonnage des différents matériaux constituant le gisement, prélevés sur front de taille ou affleurements, ou en leur absence, par quelques sondages carottés ;
- ❖ Identification qualitative des échantillons-types par des études pétrographiques précises (analyse minéralogique quantitative, texture, altérations), des essais permettant d'évaluer la résistance mécanique des différents faciès (micro Deval, Los Angeles, polissage accéléré) et si possible des essais d'élaboration en vraie grandeur permettant de définir les caractéristiques des granulats produits par type de roche( granulométrie, pourcentage de sables, de fines produites au concassage, qualité des fines,...).

Cependant, le niveau des études préalables étant extrêmement variable, il convient lorsque l'étude détaillée du gisement est abordée, d'apporter les compléments d'information géologique et géotechnique nécessaire à une bonne définition des objectifs et des moyens de la reconnaissance et de préciser à l'échelle de l'étude détaillée (1/1000) :

- La topographie de la surface du sol (nivellement très précis servant de base à l'évaluation des volumes) ;
- Le levé géologique et structural, sachant que toute observation de surface est la moins coûteuse et qu'une bonne compréhension initiale de la structure du gisement permettra la meilleure organisation de la reconnaissance.

### ➤ **La géophysique de surface**

On détermine, à partir de mesures effectuées à la surface, une caractéristique physique du sous-sol et on étudie ses variations dans l'espace à prospector. Si le paramètre géophysique mesuré est sensible aux changements de nature des terrains, on peut traduire l'information géophysique en termes géologiques en s'appuyant sur quelques sondages de référence.

On établit ainsi des coupes de terrain ou une carte de zonage géophysique permettant de :

- ❖ Donner une vue d'ensemble de la structure du gisement et d'en déduire les zones les plus favorables à l'exploitation ;
- ❖ Orienter le choix de l'emplacement des sondages mécaniques à mettre en œuvre pour transformer les données géophysiques en coupes et cartes géologiques ;
- ❖ En déduire éventuellement le nombre si la réponse géophysique est homogène dans une zone déterminée ;
- ❖ Extrapoler les résultats de sondages ponctuels, notamment dans les zones inaccessibles aux sondeuses.

En reconnaissance de gisement, les paramètres géophysiques discriminant le mieux la nature, l'altération ou la fissuration des terrains sont la résistivité électrique et la vitesse de propagation des ondes sismiques dans le sous-sol. Ces deux paramètres sont complémentaires, la résistivité étant sensible surtout aux variations de la quantité d'eau du sol qui dépend elle-même de sa nature, la vitesse de propagation des ondes sismiques variant en fonction des caractéristiques mécaniques du terrain de sa compacité et surtout de sa fissuration.

### **Sondage mécaniques**

Les sondages mécaniques apportent des informations géologiques précises mais ponctuelles et coûteuses. Il importe donc de les implanter au mieux, sur la base des études géologiques et géophysiques préalables, mais aussi de choisir la technique la mieux adaptées au gisement et la moins coûteuse pour les objectifs recherchés qui sont à ce niveau :

- ❖ La production d'une coupe géologique précise ;
- ❖ Le prélèvement d'échantillons représentatifs pour l'identification qualitative des matériaux ;
- ❖ La connaissance du niveau de la nappe (équipement des forages en piézomètres).

### **Diagraphies différées**

Les diagraphies consistent à enregistrer dans un sondage, généralement d'une manière continue, en fonction de la profondeur, un ou plusieurs paramètres qui caractérisent le sol.

Les paramètres les plus fréquemment enregistrés en reconnaissance de gisements sont les suivants :

- **La radioactivité naturelle (R.A.N.), globale ou sélective :**

Ce paramètre varie en fonction de la nature géologique des terrains.

- **Les diagraphies électriques :**

Elles mesurent la résistivité des terrains.

- **Les diagraphies soniques (ou micro-sismique) :**

Le paramètre mesuré est la vitesse de propagation des ondes longitudinales dans le terrain au voisinage d'un sondage.

- **Les diagraphies nucléaires :**

Elles utilisent les phénomènes de diffusion des rayonnements gamma par la matière (sonde gamma-gamma) ou de ralentissement des neutrons rapides par l'hydrogène (sonde neutron-neutron).

- **Association des diagraphies et interprétation :**

Le cout des diagraphies étant faible par rapport à celui des forages, on peut réaliser plusieurs diagraphies dans chaque sondage pour obtenir par recoupements successifs des données précises sur la coupe géologique.

L'éventail de techniques dont on dispose est donc très large. Aucune d'entre elles n'étant à elle seule suffisante pour résoudre tous les problèmes, il est indispensable de bien définir au préalable les objectifs – techniques, économiques et ceux liés à l'environnement – de la reconnaissance détaillée du gisement de granulat afin de marier au mieux les moyens d'investigation que l'on utilisera : géologie, géophysique de surface, sondages carottés et destructifs, diagraphies instantanées et différées, essais sur éclats et sur échantillons intacts.

### III. Les outils et techniques

Comme le montre le tableau 1.1, de nombreuses méthodes géophysiques peuvent être utilisées pour résoudre les difficultés qui se posent à l'ingénieur. Plusieurs facteurs interviennent dans le choix des méthodes à employer :

- ❖ La présence d'un contraste suffisant ;
- ❖ La pénétration ;
- ❖ Le pouvoir de résolution ;
- ❖ Une interprétation non univoque.

Alors que dans les études de gisements pétroliers, les outils utilisés sont essentiellement sismiques et acoustiques, en génie civil c'est le plus souvent la combinaison de plusieurs techniques géophysiques qui permettra de fournir la réponse adéquate.

Des facteurs cités ci-dessus, c'est la présence d'un contraste suffisant qui domine.

Ainsi, par exemple, il n'est pas rare que la vitesse sismique du premier terrain soit inférieure à celle de l'air, la présence de la nappe phréatique constitue alors une interface géophysique, interface qui n'est pas nécessairement utile à l'ingénieur. De même les terrains meubles peuvent très bien avoir une vitesse proche de celle de la roche altérée, il sera plus judicieux dans ce cas d'utiliser par exemple les méthodes électriques.

**Tableau 1.1 :** Guide d'emploi des techniques géophysiques adaptées au génie civil. Tirée de l'ouvrage : géophysique de gisement et de génie civil, 1998.

| Techniques                   | Gravimétrie | Sismique | Résistivité | Electro-magnétisme | Radar | Magnétisme | Acoustique champ total | Autres diagraphies |
|------------------------------|-------------|----------|-------------|--------------------|-------|------------|------------------------|--------------------|
| Fondations                   | 0           | +++      | ++          | ++                 | ++    | 0          | ++                     | ++                 |
| Modules mécaniques           | 0           | +++      | 0           | 0                  | 0     | 0          | +++                    | ++                 |
| Zone d'emprunt de matériaux  | 0           | +++      | +++         | ++                 | 0     | 0          | 0                      | +                  |
| RipabilitéTerrassement       | 0           | +++      | 0           | 0                  | 0     | 0          | 0                      | 0                  |
| Etudes de tracés route, etc. | 0           | +++      | +++         | ++                 | 0     | 0          | 0                      | 0                  |
| Recherche de cavités         | ++          | ++       | ++          | 0                  | ++    | 0          | ++                     | +                  |
| Glissement stabilité         | 0           | ++       | ++          | ++                 | 0     | 0          | ++                     | ++                 |
| Venues d'eau                 | 0           | ++       | +++         | ++                 | ++    | 0          | +                      | +++                |

0 : Technique non adaptée.

+: Technique d'emploi limité.

++ : Technique adaptée, à combiner avec d'autres méthodes géophysiques.

+++ : Technique généralement utilisée.

## Références bibliographiques

1. Chevassu G., Lagabrielle R., Rat M., 1984. La reconnaissance détaillée des gisements de granulats. Bulletin de l'association internationale de Géologie de l'ingénieur. Volume: 31-37. Paris. in. Lagabrielle R., 1986. Nouvelles applications de méthodes géophysiques à la reconnaissance en génie civil. Rapports des LPC. Série : Géotechnique GT-17.
2. Fauchard C., Pothérat P., 2004. Détection des cavités souterraines par méthodes géophysiques. Guide technique. Techniques et méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées.
3. Granda T. et al. Méthodes Géophysiques Appliquées aux Problèmes Géotechniques en Milieu Urbain : Tomographie Sismique Cross-hole, Sismique Passive et Sismique Parallèle.
4. Lagabrielle R., 1986. Nouvelles applications de méthodes géophysiques à la reconnaissance en génie civil. Rapports des LPC. Série : Géotechnique GT-17.
5. Magnin O., Bertrand Y., 2005. Guide sismique réfraction. Les cahiers de l'AGAP n°2. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
6. Mari J. et al., 1998. Géophysique de gisement et de génie civil. Ed. Technip, Paris, 468 pages.
7. Rey E. et al., 2007. Caractérisation d'un sol grossier naturel, apport des méthodes géophysiques. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées. n°268-269.
8. Chapellier D., 1987. Diagraphies appliquées à l'hydrologie. Techniques et Documentation (Lavoisier), Paris, 165 pages.

## Chapitre 2

### Les méthodes géophysiques appliquées au génie civil : Recherche bibliographique.

#### I. Introduction :

La géophysique appliquée est la discipline qui consiste à étudier (observer, mesurer) un champ physique à la surface du sol ou dans des cavités creusées dans le sol. Ce champ physique, dont l'origine peut être naturelle ou provoquée, dépend d'un ou plusieurs paramètres caractéristiques des matériaux dont on cherche à déterminer la répartition dans le terrain.

La reconnaissance géophysique, ou prospection géophysique, met en œuvre un ensemble de méthodes indirectes où l'on cherche, à partir d'une ou plusieurs propriétés physiques à déterminer la structure du milieu souterrain de manière non destructive (non-invasive) et avec un échantillonnage spatial suffisamment dense pour que les variations latérales et verticales en soient décrites aussi complètement que le permettent la propriété et la méthode de mesure utilisées. La résolution, c'est à dire le degré de finesse avec lequel le sous-sol va être décrit, est en effet variable selon la propriété choisie et la méthode utilisée.

Les mesures peuvent être réalisées à partir de la surface, de puits ou d'excavations préexistantes. Le plus souvent elles ne permettent pas, à elles seules, de déterminer les valeurs de paramètres géotechniques mais sont indispensables pour placer judicieusement les forages où seront effectuées les mesures de ces paramètres, pour interpoler entre ces localisations et pour déceler les anomalies préjudiciables à un projet.

Certaines méthodes de grand rendement et capables de déterminer les grands traits de la structure géologique – sismique réfraction et méthodes électriques en particulier – seront mises en œuvre dès les premiers stades de l'étude du projet (faisabilité géotechnique). Ces mesures seront réalisées quasi obligatoirement pour les études de tracés linéaires (routes, autoroutes, voies ferrées).

On choisit la propriété à mesurer à partir de la corrélation qu'on lui connaît avec les caractéristiques géotechniques recherchées et de l'amplitude des contrastes qu'elle peut montrer. Toutefois, les propriétés physiques montrant à la fois une variabilité suffisamment importante en fonction des paramètres d'état du terrain significatifs en géotechnique (porosité, teneur en eau, argilosité...), et donnant lieu à des méthodes de mesure réalisables à faible coût avec des appareils robustes et de mise en œuvre facile sur le terrain, sont en nombre limité.

Si une même propriété physique peut-être mesurée de plusieurs façons, le premier choix du prospecteur reste celui de la propriété à mesurer, en fonction des caractéristiques recherchées du terrain, la facilité d'emploi et les sensibilités des appareils disponibles intervenant ensuite dans le choix de la méthode de mesure et de l'appareillage. Le coût de la mise en œuvre d'une méthode reste toujours un élément déterminant dans les choix.

Ce chapitre de caractère bibliographique recense d'une manière détaillée l'ensemble des méthodes géophysique que dispose l'ingénieur civil. Une étude comparative et critique a été aussi réalisée.

Ce pendant, nous avons uniquement utilisé dans le cadre de ce travail de fin d'études la méthode sismique 3D et la méthode des diagraphies dans le cadre de la partie pratique et travail personnel réalisé.

## **II. Paramètres physiques utilisés en géophysique**

### **II.1 Masse volumique :**

- L'ordre de grandeur courant de la masse volumique des sols en place est de  $2000\text{kg/m}^3$ .
- Le champ de pesanteur dépend de la répartition des masses donc de la répartition de la masse volumique des matériaux du terrain. Par exemple, l'existence d'une cavité souterraine correspond à un déficit de masse et provoque une anomalie négative de la pesanteur mesurée en surface. La gravimétrie est la méthode qui exploite ces phénomènes.
- Une autre méthode géophysique est utilisée pour déterminer précisément la valeur de la masse volumique et sa répartition; il s'agit de la méthode de diagraphie différée appelée gamma-gamma.

## II.2 Caractéristiques élastiques (modules d'élasticité, vitesses des ondes mécaniques)

- La vitesse de propagation des ondes mécaniques dans les matériaux dépend de leurs modules d'élasticité (modules d'Young et de Poisson, coefficients de Lamé) et de leur masse volumique. Les méthodes sismiques ont pour but de découvrir la répartition des vitesses des ondes mécaniques.
- Les valeurs les plus basses (500 m/s) correspondent aux matériaux très altérés de surface, les valeurs les plus fortes (6000 m/s) à du rocher très sain et non fracturé.
- Les principales méthodes sismiques sont la : sismique réfraction et la sismique réflexion, la tomographie sismique, le cross-hole ainsi que les diagraphies sonique et microsismique.

## II.3 Caractéristiques électriques

- Les matériaux du sous-sol sont conducteurs de l'électricité. La conductivité, notée  $\sigma$ , est la grandeur qui caractérise cette propriété. Elle se mesure en siemens par mètre (S/m). La résistivité, notée  $\rho$ , est l'inverse de la conductivité, elle se mesure en ohms-mètres ( $\Omega.m$ ). Plus  $\rho$  est faible, plus le matériau est conducteur.
- La résistivité peut prendre des valeurs qui couvrent plusieurs ordres de grandeur, de quelques ohms-mètres pour des terrains très argileux et très humides à plusieurs dizaines de milliers d'ohms-mètres pour des matériaux rocheux très sains, en passant par toutes les valeurs intermédiaires.
- Il y a donc entre les matériaux des contrastes de résistivité très forts. Cela confère aux méthodes fondées sur la recherche de la répartition de la résistivité un grand pouvoir de discrimination entre les matériaux. Ces méthodes sont la prospection électrique par courant injecté et les méthodes électromagnétiques en basses fréquences.

## II.4 Caractéristiques magnétiques et électromagnétiques

- Les propriétés magnétiques des matériaux sont quantifiées par la perméabilité magnétique relative  $\mu_r$  et la susceptibilité magnétique  $X$  :  $\mu_r = 1 + X$

- Elles sont peu utilisées en génie civil. Une méthode magnétique est parfois utilisée pour rechercher des objets contenant du fer sur un site qui peut avoir servi de décharge (en revanche, le magnétisme est très utilisé en archéologie pour découvrir des restes de poteries ou d'autres hétérogénéités comme les vestiges du phare de Pharos).
- Les caractéristiques électromagnétiques autres que  $\mu_r$  et  $X$  sont encore la conductivité  $\sigma$ , déjà citée, et la permittivité relative  $\epsilon_r$  : Celle-ci a une influence sur la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques qui vaut:

$$V = c / \sqrt{\epsilon_r} ;$$

Avec  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide ( $3.10^8$  m/s).

Les méthodes géophysiques fondées sur la détermination de la répartition des caractéristiques électromagnétiques ( $\sigma$  et  $\epsilon_r$ ) sont le radar géologique et la tomographie électromagnétique en ondes monochromatiques.

## II.5 Radioactivité des roches

Les roches contiennent en quantités variables des éléments naturels radioactifs, le potassium 40, le radium et l'uranium. Elles sont donc naturellement plus ou moins radioactives. Cette propriété est mise à profit en géophysique pour les distinguer. Ainsi, parmi les matériaux sédimentaires, les argiles sont les matériaux les plus radioactifs, les calcaires purs ne le sont pas et les marnes et marno - calcaires le sont plus ou moins suivant leurs teneurs en minéraux argileux. Parmi les matériaux cristallins, les granites sont les plus radioactifs.

Les diagraphies de radioactivité naturelle (RAN ou  $\gamma$  -ray) utilisent ces propriétés pour déterminer les matériaux traversés par un forage.

La radioactivité peut aussi être provoquée par un bombardement neutronique des matériaux. L'étude de ces phénomènes (de durée de vie de quelques dizaines de minutes au maximum) a conduit à la mise au point de méthodes d'analyse chimique élémentaire en forage (diagraphie neutron  $\gamma$ ).

En fin, les propriétés d'absorption des rayonnements par les matériaux sont exploitées. L'absorption des rayons  $\gamma$  permet la mesure en place, très précise, de leur masse volumique (diagraphie  $\gamma$ - $\gamma$ ). L'absorption des neutrons permet la mesure de leur teneur en eau (diagraphie neutron - neutron).

### III. Méthodes géophysiques

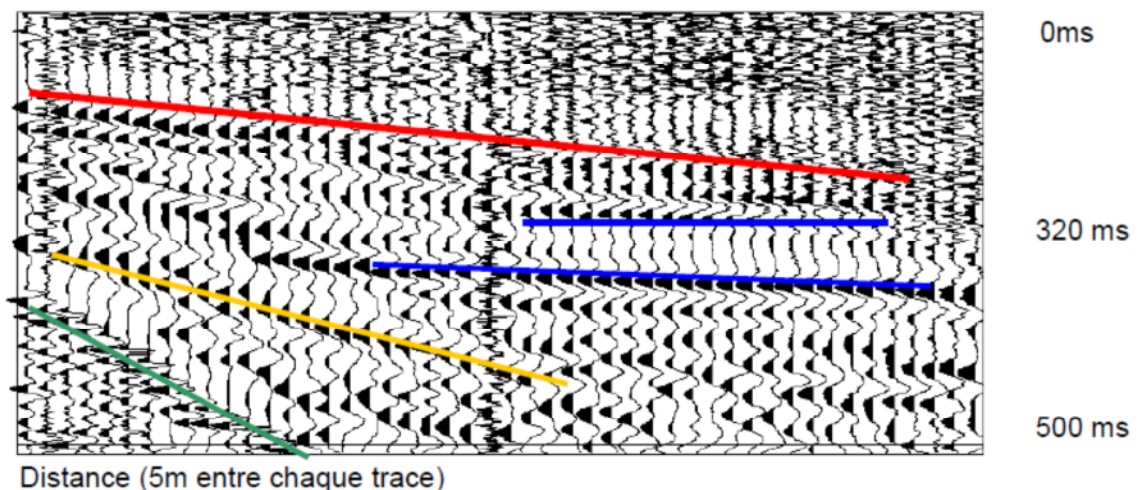
#### III.1 Les méthodes sismiques

Les méthodes sismiques permettent de distinguer des couches possédant un contraste de vitesse/densité, et fait très important, les roches ou les masses en glissement ont pratiquement toujours des vitesses sensiblement plus lentes que le substratum en place non tectonisé.

Par contre, seule une bonne connaissance de la géologie locale peut permettre au géophysicien d'attribuer une vitesse à une unité lithologique car, dans certains cas, deux faciès très différents peuvent posséder la même vitesse sismique, comme par exemple une moraine très consolidée et un substratum rocheux altéré.

- **Principe des méthodes sismiques :**

Le principe de la sismique est d'envoyer des ondes de type sonore dans le sol et d'enregistrer le retour en surface des ondes directes, réfléchies ou réfractées. Les ondes réfractées sont toujours les premières à atteindre les géophones. Sur un même enregistrement tous les types d'ondes peuvent être visibles: réfléchies réfractées, ondes P, ondes S, ondes de surface, bruit aérien...ceci explique l'aspect parfois complexe des enregistrements sismiques.



**Figure 2.1 :** Exemple d'enregistrement montrant de belles réflexions (trait bleu) sous les premières arrivées (trait rouge), en vert l'onde sonore et jaune les ondes de surface (ground roll).

### **III.1.1 Sismique réfraction :**

#### **Domaine d'application**

Le principal domaine d'application de la sismique réfraction en génie civil est l'étude du terrain en surface altéré et du substratum rocheux. L'étude est quantitative puisqu'elle fournit l'épaisseur du terrain altéré et la vitesse des ondes mécaniques dans ce terrain ainsi que dans le substratum. Ces informations peuvent servir en particulier pour la préparation des terrassements en donnant des indications sur la qualité des matériaux que l'on pourra extraire avec des engins ou au contraire abattre à l'explosif.

Si le terrain en surface est constitué de plusieurs couches, celles-ci pourront être distinguées.

#### **Conditions d'application**

La sismique réfraction ne peut être appliquée que si la vitesse des ondes sismiques croît avec la profondeur. De même, il est indispensable que les limites entre couches soient, au moins grossièrement, parallèles à la surface du sol.

Il convient aussi de prendre garde à ce que les conditions de mesures soient suffisamment bonnes: le signal mesuré est le mouvement de la surface du sol résultant d'une impulsion mécanique créée par l'opérateur. Si le mouvement provoqué par d'autres sources (microséismes, circulation automobile, etc.) est trop important, les mesures peuvent être impossibles à réaliser.

Le résultat d'une campagne de sismique réfraction est une coupe du sol décrivant la géométrie des couches qui le constituent, caractérisées par la valeur de la vitesse des ondes mécaniques de compression.

La profondeur d'investigation dépend de la longueur des dispositifs de mesures (distance source-capteur) mis en œuvre; elle est en génie civil généralement inférieure à 20 m pour des dispositifs de moins de 200 m.

#### **Principe de base**

La sismique réfraction a pour objectifs principaux la caractérisation de l'état physique des diverses formations composant le sous-sol via le paramètre vitesse sismique ainsi que l'estimation de leur épaisseur.

Cette méthode d'exploration est généralement utilisée dans le cadre des aménagements routiers ou ferroviaires.

L'acquisition en sismique réfraction est réalisée à partir d'un dispositif qui se compose d'une série de capteurs (géophones) plantés au sol, reliés par un câble à une unité d'acquisition. Une onde de choc est émise sur le profil en frappant à l'aide d'une masse sur une plaque posée au sol. Pour une investigation plus profonde, on utilise l'explosif. L'onde se propage dans le terrain à une vitesse qui dépend de la nature des matériaux (en particulier leur compacité). Les géophones permettent d'enregistrer les ondes réfractées converties en signal électrique.

Le pointé des temps des premières ondes réfractées, sur les enregistrements, permet d'établir les hodochrones (temps d'arrivée des premières ondes en fonction de la distance sur le profil).

L'analyse de ces hodochrones aboutit à la détermination des différents milieux traversés par les ondes. Chaque milieu est caractérisé par une vitesse de propagation des ondes ainsi que la profondeur et le pendage des interfaces identifiées.

- Les vitesses sismiques étudiées en réfraction sont les vitesses de déplacement de l'onde de compression qui a la particularité d'être la plus rapide. Cette onde arrivant toujours en premier sur les capteurs est ainsi aisément reconnaissable,
- Les ondes sismiques sont un traitement assez délicat, et pour rendre aisée l'étude du mécanisme de leur propagation, la convention veut qu'on les représente par les rayons sismiques qui leur sont orthogonaux, mais qui n'ont aucune existence physique (Figure 2.2).
- Les rayons sismiques ainsi définis suivent les mêmes lois que les rayons lumineux, en particulier les lois de la réflexion et bien sûr de la réfraction (lois de Descartes) (Figure 2.3),
- Une des particularités des lois de l'optique exploitée par la sismique réfraction est la réfraction totale qui est liée au fait que les ondes sismiques peuvent se propager horizontalement au toit d'une couche plus rapide, à condition que les rayons sismiques l'atteignent sous un angle d'incidence égal à l'angle de réfraction limite  $\lambda$ , ceci avant de remonter ensuite vers la surface avec le même angle d'émergence. Cette propriété se conçoit plus facilement si l'on considère non plus le rayon rasant, mais le tronçon de front d'onde qui se propage perpendiculairement à la surface de séparation des deux milieux.

Cette propriété est illustrée sur la figure 2.4 où  $i_c$  est l'angle de réfraction limite atteint lorsque  $i_2$  est égal à  $\pi/2$  et tel que  $\sin i_c = V_1/V_2$ .

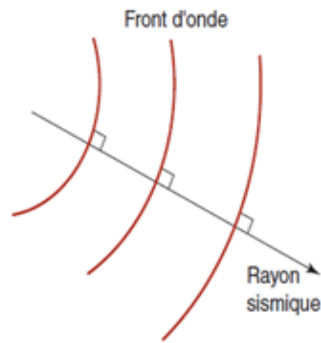


Figure 2.2 : Représentation du rayon sismique

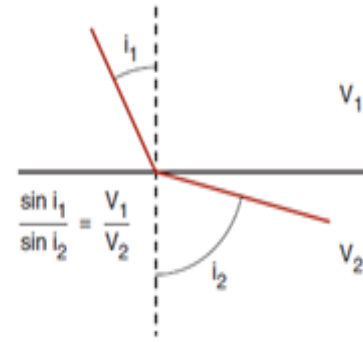
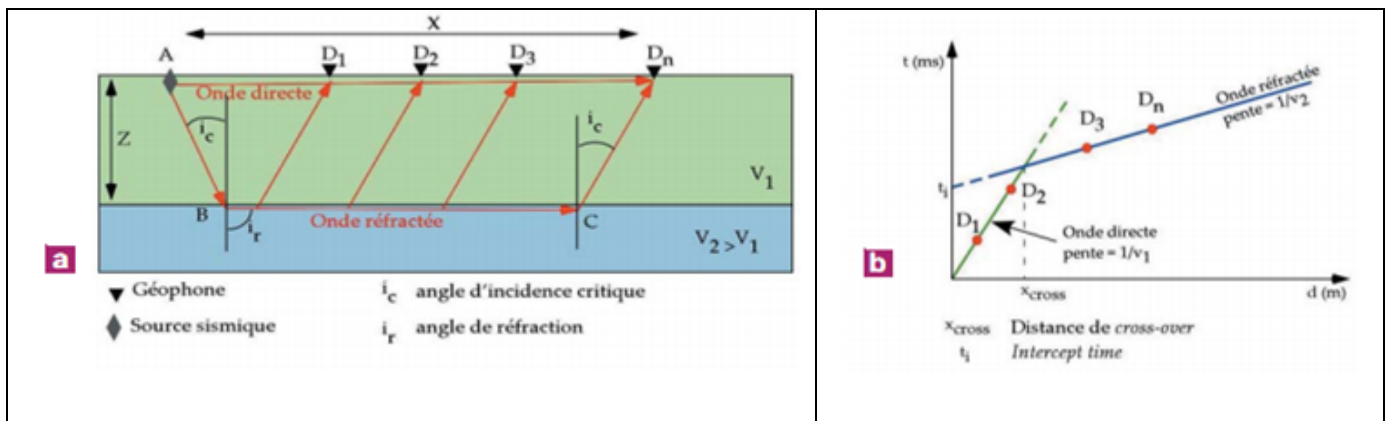


Figure 2.3 : Loi de Snell Descartes.



**Figure 2.4 :** Principe de la sismique réfraction pour un milieu tabulaire à 2 couches 1 et 2 avec une distribution croissante des vitesses des ondes mécaniques en fonction de la profondeur ( $V_2 > V_1$ ).

- Cheminement des ondes directes et réfractées et dispositif simplifié d'acquisition des données [adapté de Keary et Brookes, 1991].
- Construction de la courbe temps – distance (dromochronique) d'après les données de la figure (a).

Il est intéressant de noter que plus le constante de vitesse est grand, plus l'angle de réfraction limite est petit.

Exemple:

$$V_1 = 1000 \text{ m/s}$$

$$\lambda = 11^\circ$$

$$V_2 = 5000 \text{ m/s}$$

$$V_1 = 1000 \text{ m/s}$$

$$\lambda = 30^\circ$$

$$V_2 = 2000 \text{ m/s}$$

### Principales étapes de l'interprétation

Connaissant la distance qui sépare le point d'impact des capteurs, on construit un diagramme temps-distance appelé dromochronique. Les temps sont en ordonnée et les distances en abscisse.

En second lieu, on procède à l'interprétation des hodochrones réalisée selon la méthode Plus Minus (Hagedoorn). Cette méthode est une étape de base de l'interprétation graphique. Elle permet, d'une part, de déterminer par le MINUS la vitesse de fond, c'est-à-dire celle de la couche la plus profonde atteinte, et d'autre part, de déterminer par le PLUS les variations d'épaisseurs des horizons surmontant la couche de fond.

A l'issue de cette interprétation, nous établissons les coupes sismiques, vitesse sismique en fonction de la profondeur.

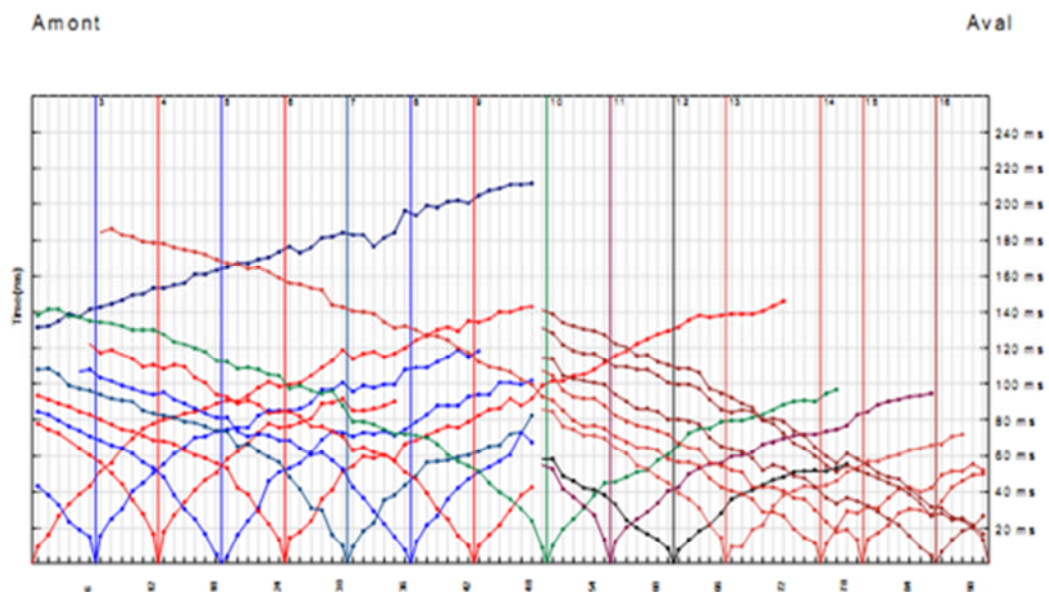


Figure 2.5 : Exemple de dromochronique.

**Les applications de la sismique réfraction sont :**

- Détermination de la ripabilité d'un terrain (relation directe avec la vitesse).
- Géométrie des glissements de terrain.
- Épaisseur de la couverture quaternaire, localisation du bedrock.
- Épaisseur de la couche filtrante d'un aquifère.
- Présence de zone altérée (fissurée).

### III.1.2 Sismique réflexion

#### Domaine et conditions d'application

Le domaine d'application de la sismique réflexion est l'étude de la structure du sous-sol lorsque celui-ci est formé de couches sédimentaires plus ou moins plissées et tectonisées, en particulier pour les tracés de tunnels à couverture importante (plusieurs

centaines de mètres). Pour des profondeurs plus faibles, quelques dizaines de mètres, elle peut être utilisée aussi pour rechercher à l'intérieur d'une structure sédimentaire monotone des hétérogénéités telles que des cavités souterraines de grandes dimensions.

Suivant le type d'ondes utilisées (onde P ou ondes S), elle sert aussi parfois à déterminer la répartition des propriétés élastiques du sous-sol.

Comme pour la sismique réfraction, il est nécessaire qu'il existe entre les différentes couches des contrastes d'impédance acoustique (vitesse sismique et/ou densité) permettant d'obtenir de bons réflecteurs pour les ondes sismiques. Lorsque les couches présentent des pendages supérieurs à  $60^\circ$ , les réflexions des ondes sont déviées et ne retournent pas en surface. Cela constitue donc une contre-indication majeure à l'emploi de la sismique réflexion.

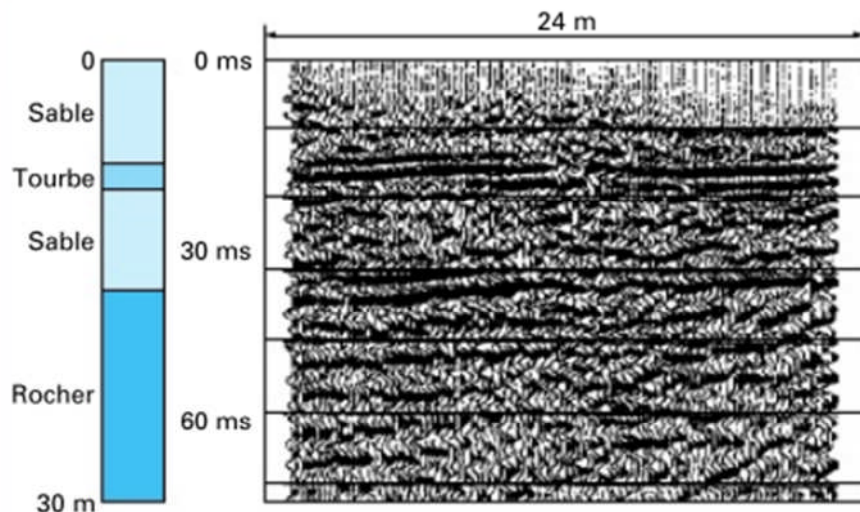
### **Principe de la méthode et type de résultat fourni**

Le principe de la méthode consiste à envoyer dans le sol une impulsion mécanique sous la forme d'un choc (explosif, chute de poids...) qui se propage dans le sol et se réfléchit sur les différentes interfaces caractérisées par un contraste d'impédance acoustique entre les couches (produit de la vitesse de l'onde par la densité du matériau). En surface, on place des géophones suivant une ligne rectiligne. La distance source-géophones est faible devant la profondeur de l'interface. À chaque géophone (capteur de vitesse particulière), on enregistre le signal sismique en fonction du temps. Celui-ci est formé d'une série d'impulsions réfléchies sur les interfaces successives. L'ensemble du dispositif source-géophones est ensuite déplacé. Les signaux correspondant aux positions des dispositifs sont juxtaposés sur une section sismique ou coupe-temps (Figure 2.6), dans laquelle la coordonnée verticale est le temps et la coordonnée horizontale la position de la source et des géophones.

Pour une position donnée de la source et des distances source-géophones croissantes, les réflexions sur une interface plane se matérialisent sur les coupes-temps par des hyperboles dont le sommet est à l'aplomb de la source et les asymptotes ont pour pente l'inverse de la vitesse de l'onde dans le matériau (s'il n'y a pas de pendage). La sismique réflexion est une des méthodes géophysiques où les techniques de traitement du signal jouent le rôle le plus important. Les coupes-temps sont traitées pour que les informations qui y apparaissent soient ramenées à celles que l'on aurait pour une distance source-géophone idéalement nulle et pour en effacer tout ce qui peut être considéré comme du bruit non organisé ou organisé (ondes réfractées,

ondes aériennes, réflexions multiples, etc.). Une coupe-temps de sismique réflexion, une fois traitée, représente une image déformée de la structure du sous-sol puisque les corrélations qui apparaissent entre les signaux sous forme de lignes mettent en évidence les interfaces, leur structure plissée ou non, faillée ou non. D'autre part, le traitement des signaux correspondant à une position de la source et des géophones qui s'en éloignent de plus en plus fournit des informations sur la vitesse des ondes qui servent, d'une part, à aider à l'identification mécanique des terrains et, d'autre part, à passer de la coupe-temps à la coupe-profondeur. Du point de vue formel, la sismique réflexion ressemble au radar géologique et aboutit à des documents comparables (coupes-temps). Mais ce sont des techniques extrêmement différentes: la sismique s'intéresse aux ondes mécaniques qui se propagent à des vitesses au maximum de quelques kilomètres par seconde; l'unité de temps est la milliseconde.

Les profondeurs d'investigation sont de quelques dizaines à quelques centaines de mètres (en génie civil), la résolution est de quelques mètres (pour le radar, il s'agit d'ondes électromagnétiques, de vitesse de centaines de milliers de kilomètres par seconde, l'unité de temps est la nanoseconde, la profondeur d'investigation de quelques mètres et la résolution de quelques décimètres).



**Figure 2.6 :** Coupe-temps de sismique réflexion. Tirée de l'ouvrage : géophysique appliquée au génie civil édité par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en 2007.

**Les applications de la sismique réflexion haute résolution sont :**

- Recherche de cavités.
- Imagerie de glissement de terrain.
- Imagerie de la couverture quaternaire.

- Recherche de gisements de substances utiles.
- Recherche de réservoir en eau ou de sites hydrothermaux.
- génie civil pour l'implantation et les fondations des grands ouvrages: (retenues de barrage, tunnels ou galeries, tracé de chemin de fer ou routiers, bâtiment industriel...).

### **III.1.3 Les ondes de surface (MASW):**

Cette technique, récemment développée, est basée sur l'analyse des ondes de surface (ondes de Rayleigh) généralement considéré comme signal indésirable. Elle permet d'obtenir un modèle profondeur des ondes S ( $V_s$ ). Le modèle de vitesse des ondes P ( $V_p$ ) est lui obtenue à partir des méthodes classiques de sismique (réfraction).

A partir de ces vitesses et de la densité des terrains, il est possible de calculer le module de Young et le coefficient de Poisson.

**Les applications de cette méthode sont:**

- Évaluation du potentiel de liquéfaction.
- Design et dimensionnement des fondations.
- Contrôle de compaction.
- Contrôle qualité de structure en béton.

### **III.1.4 Tomographie sismique**

La tomographie sismique permet d'obtenir par inversion des modèles complexes impossibles à calculer par les méthodes traditionnelles du traitement de la sismique réfraction. Cette méthode récente est possible grâce à la puissance actuelle des ordinateurs.

#### **Principe de la méthode**

Le principe est de fournir à l'ordinateur le temps des premières arrivées aux géophones ainsi que la localisation de tous les géophones et des tirs. L'ordinateur recherche ensuite au moyen d'algorithmes complexes un modèle de vitesses théorique qui fournirait une dromochronique le plus proche possible des données expérimentales.

Avec cette méthode, il est possible de mettre en évidence des zones lentes aux seins de couches rapides ou vice-versa. Les failles sont souvent plus faciles à localiser sur les profils tomographiques qu'en sismique réfraction conventionnelle.

Le danger de cette méthode réside dans la quasi-absence de contrôle possible dans l'interprétation par le géophysicien et donc une interprétation «conventionnelle» en parallèle est très souhaitable. La fiabilité du modèle peut être estimée en comparant les premières arrivées mesurées sur le terrain et celles calculées à partir du modèle proposé par le programme. La couverture est également contrôlable. Il est possible de combiner parfois sismique réflexion et tomographie (sismique hybride) en « pointant » les premières arrivées des profils sismiques réflexions.

### III.1.5 Sismique passive

Lorsque les caractéristiques des zones de chantier sont telles que l'application de méthodes géophysiques conventionnelles devient non-viable (chantiers urbains, notamment), il est nécessaire de recourir à d'autres techniques permettant de contourner ces inconvénients. Les méthodes sismiques "traditionnelles", basées sur la détermination des valeurs de  $V_p$ , deviennent quasiment inutiles.

Les particularités de la Sismique Passive qui en font une méthode largement plus avantageuse que les autres méthodes sismiques dans les zones urbaines sont sa capacité de détecter des zones où se produisent des inversions de vitesse et le fait d'employer le bruit de l'environnement comme source du signal sismique à mesurer.

La Sismique Passive est une méthode de développement récent, qui apparait souvent appelé Refraction Microtremor (ReMi), et qui a des similitudes avec d'autre méthodes connues, SAWS (*Spectral Analysis of Surface Waves*) et MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), ces deux dernières méthodes concernant l'étude des ondes de surface du type *Rayleigh*. L'objectif principal est de déterminer la distribution des valeurs de transmission des ondes de cisaillement ( $V_s$ ) à travers le terrain, à partir de l'analyse spectrale du bruit sismique environnant, qui est convenablement enregistré.

En dépit de sa jeunesse, la Sismique Passive a prouvé qu'il s'agit d'une option fiable lorsqu'il s'agit de caractériser en termes géotechniques le terrain urbain ou à proximité d'autoroutes, aéroports ou voies ferrées. Ce sont là des milieux où le niveau de bruit ambiant empêche la mise en place d'autres types de dispositifs sismiques.

La connaissance de la distribution des valeurs de  $V_s$  du terrain est un aspect incontournable à tenir en compte lors des projets d'intervention géotechnique.

Ces valeurs dépendent spécifiquement du degré de contact entre les matériaux et de la cohésion entre leurs grains, sans que le contenu en eau n'ait aucune influence. Le but principal des mesures est donc l'évaluation de la consistance du terrain.

Ceci est possible à partir de l'analyse des ondes superficielles (Rayleigh) qui font partie du bruit sismique ambiant (parmi ce bruit sismique on trouve des ondes de compression, des ondes de cisaille, des réfractions, des réflexions, des ondes directes...). A l'aide de la transformée bidimensionnelle de Fourier et de calculs que nous ne développerons pas ici, on arrive à isoler les ondes de Rayleigh des enregistrements sismiques et à connaître leur vitesse  $C_R$ , vitesse de phase. A partir de là on calcule facilement les valeurs de  $V_s$  en employant la formule:

$$C_R = 0,94 V_s$$

Une fois que les données ont été enregistrées et traitées on arrive donc à construire un modèle de la distribution des valeurs de  $V_s$  en suivant le processus de la figure 2.7, qui se fait en trois étapes.

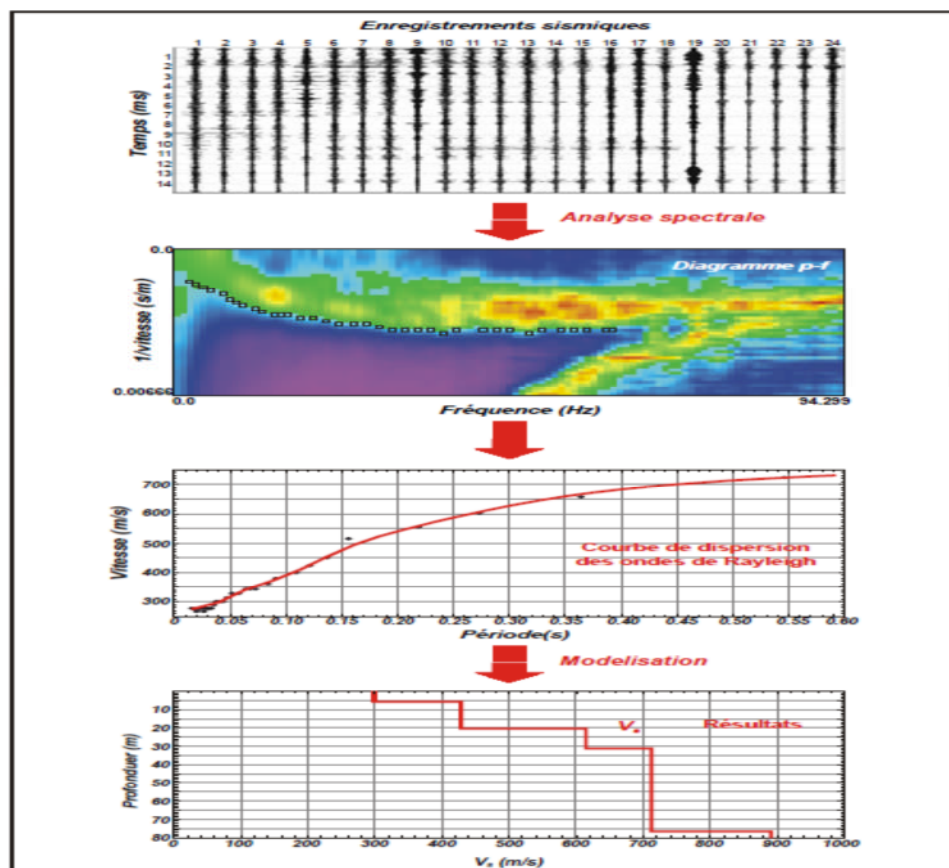


Figure 2.7 : Traitement des données de Sismique Passive.

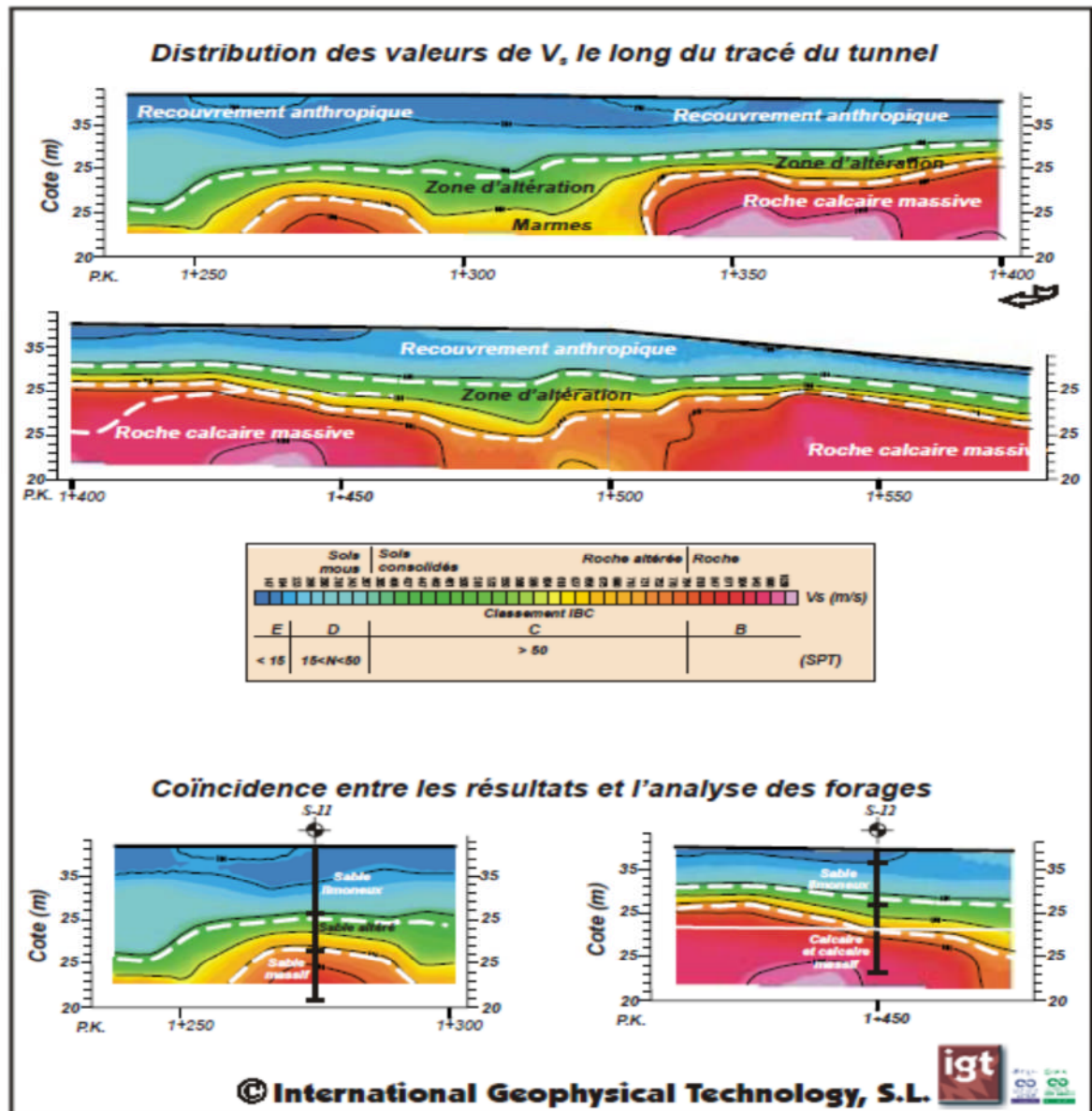
La représentation graphique des résultats peut se faire sous forme de diagrammes 1D ou de sections 2D distance-profondeur, selon le type de dispositif (configuration géométrique des géophones) employé pour faire les mesures.

Un exemple que j'ai choisi correspondent à des représentations 2D et 1D. La section de la figure 2.8 représente le sous-sol sous le tracé d'un tunnel urbain à Santander. Grâce aux mesures linéales de Sismique Passive on put déterminer la structure géologique du terrain, une information importante à tenir en compte à l'heure de concevoir les caractéristiques de soutien de l'excavation. Les forages perforés par la suite coïncidèrent totalement avec les résultats géophysiques.

### **III.1.6 Sismique Parallèle :**

La méthode géophysique appelée Sismique Parallèle consiste en la réalisation de mesures style down- hole dans un forage perforé à proximité d'un pieu ou d'un mur de fondation, l'objectif étant d'obtenir des renseignements à propos de leur continuité, leur intégrité et leur longueur.

Pour y aboutir, il faut générer un signal sismique en frappant verticalement le bout du pieu ou bien, dans le cas des murs de fondation, verticalement le plus près possible du mur que l'on veut caractériser.



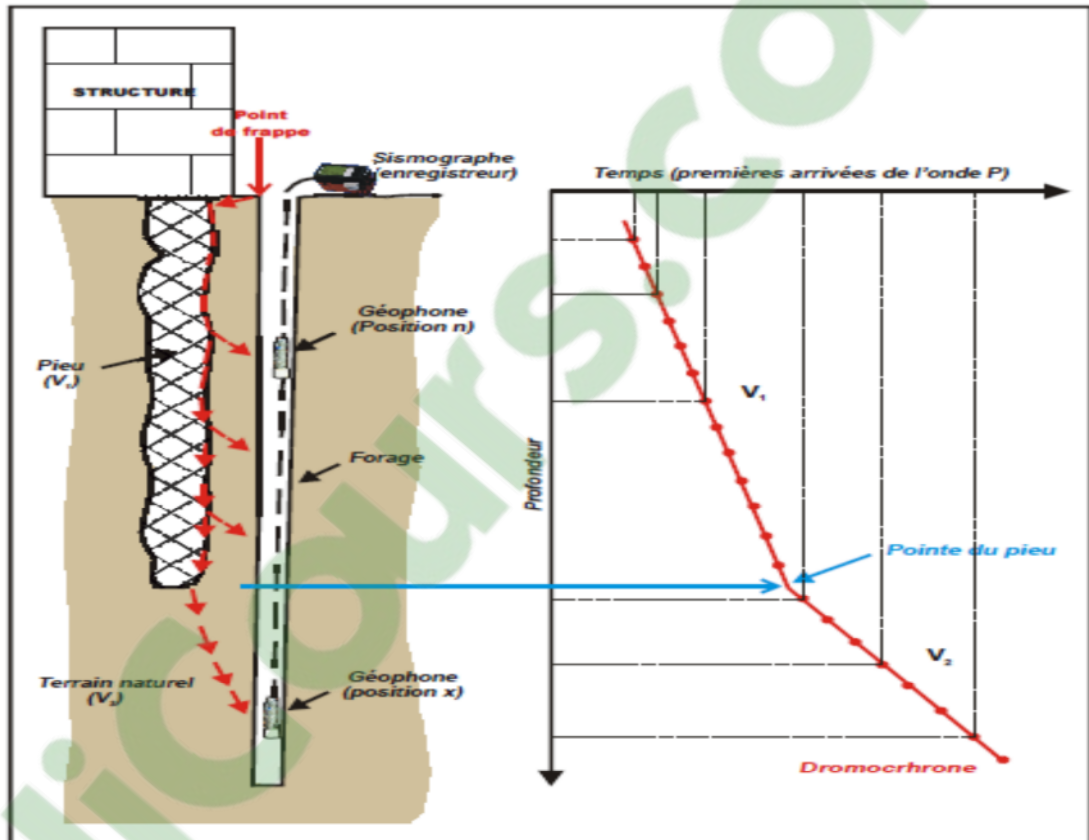
**Figure 2.8 :** Structure géologique du sous-sol obtenue par des mesures de Sismique Passive à Santander, suivant le tracé d'un futur tunnel urbain.

La transmission de ce signal sismique est enregistrée à l'aide de plusieurs senseurs (géophones) régulièrement espacés et placés à l'intérieur du forage.

Les résultats obtenus seront représentatifs si certaines conditions concernant le forage sont respectées: il doit être parallèle au pieu ou au mur, la distance entre eux ne doit pas dépasser 2 mètres et sa profondeur doit dépasser largement celle du pieu ou du mur.

Le traitement des données de ce genre de mesures consiste principalement à construire les graphiques temps-distance ou dromochrones. Après avoir identifié la première arrivée de l'onde de compression à chacun des géophones placés à

l'intérieur du forage, on calcule le temps mis par celle-ci pour atteindre les senseurs. Ces temps calculés nous permettent de construire le diagramme temps-distance qui montre le temps de parcours de l'onde P pour arriver à chacun des senseurs (c'est à dire pour chaque profondeur). Ce diagramme constitue le document principal de synthèse des mesures, ainsi que la base à partir de laquelle s'effectue l'interprétation des résultats. La figure 2.9 montre le schéma classique d'acquisition des données et de construction du graphique temps-distance.



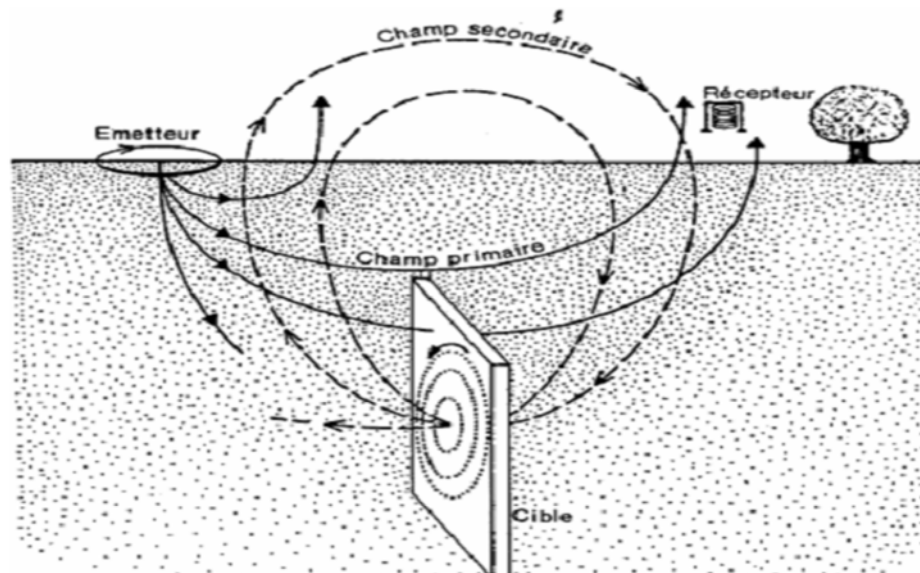
**Figure 2.9 :** Acquisition des données et obtention des résultats en Sismique Parallèle.

La base du pieu ou du mur est mise en évidence par un changement brusque de pente de la dromochrone. La première partie de la courbe est normalement affectée exclusivement par la présence du mur ou du pieu, qui ont des valeurs de transmission des ondes P supérieures à ceux du terrain naturel. En dessous, une fois dépassée la pointe du pieu ou la fin du mur, l'effet du terrain naturel modifie l'allure de la courbe et sa pente change. Ce changement de pente est d'autant plus accentué que le contraste de valeurs de  $V_p$  est important. Néanmoins il est toujours visible sur les dromochrones.

### III.1.7 Cross hole

L'objectif des essais Cross-Hole est de déterminer les modules dynamiques des diverses couches du sous-sol. Pour cela, on doit déterminer les vitesses des ondes sismiques de compression, ou ondes P, et de cisaillement, ou ondes S, dans les différentes couches. La méthode consiste à exécuter des mesures de vitesses entre deux ou plusieurs forages. On émet un signal à un niveau déterminé dans un forage et on réceptionne ce signal au même niveau dans un ou plusieurs forages voisins. La détermination des temps de propagation des ondes P et S entre l'émission et la ou les réceptions permet de calculer les vitesses des ondes P et S, connaissant les distances séparant les points émission-réception.

### III.2 Méthodes électromagnétiques :



**Figure 2.10 :** principe des méthodes électromagnétiques.

- **Principe de base**

La prospection géophysique par méthodes électromagnétiques consiste à étudier les propriétés des ondes électromagnétiques et leur interaction avec le terrain. Elles se réfléchissent et se réfractent partiellement (loi de Snell - Descartes) lorsqu'elles rencontrent un contraste d'impédance électromagnétique. La propagation de ces ondes est décrite par les équations de Maxwell. Elle présente deux régimes : le régime de diffusion lié aux phénomènes de conduction et le régime de propagation lié aux phénomènes de polarisation. Ces deux phénomènes dépendent de la fréquence à

laquelle ils sont sollicités et des paramètres physiques que sont la conductivité (inverse de la résistivité) et la permittivité du matériau. La frontière entre ces deux régimes est définie par une fréquence caractéristique dépendant des propriétés du sol. Elle est la limite en dessous de laquelle les phénomènes de conduction dominant et au-dessus de laquelle les phénomènes de polarisation dominant :

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\rho \epsilon} \text{ [Hz]}$$

Où :  $\sigma$  est la conductivité du terrain et  $\epsilon$  est sa permittivité,  $\rho$  la résistivité.

- **Les différentes méthodes électromagnétiques**

Si l'on parle des fréquences utilisées pour la prospection et du mode de propagation, on distingue les méthodes à basse fréquence et les méthodes haute fréquence.

Si on parle de la distance qui sépare le récepteur de la source électromagnétique, on distingue les méthodes en champ lointain et les méthodes en champ proche.

Si on parle de la nature du champ électromagnétique utilisé, on distingue les méthodes passives et les méthodes actives.

Si on parle du mode de mesure envisagé, de son traitement et particulièrement du type de source utilisée, on distingue les méthodes fréquentielles et les méthodes temporelles.

- **Domaine d'application**

- **Prospection hydrogéologique:** localisation de fractures aquifères pour l'implantation de puits de pompage en terrains rocheux, fissurés ou karstiques.
- **Prospection géologique:** cartographie des fractures et failles dans les terrains fissurés ou karstiques (RF-EM) ainsi que dans l'épikarst (VLF-EM GRAD), recherche de filons.
- **Sites pollués ou contaminés:** repérage de conduites enterrées, délimitation d'anciennes décharges.
- **Géotechnique:** mise en évidence d'éventuels changements latéraux importants dans la nature du sous-sol pouvant engendrer des tassements différentiels à une future construction, délimitation de glissements de terrain.

- **Instrumentation**

La rapidité et la facilité de mise œuvre de l'appareil (seules deux personnes sont nécessaires pour son utilisation) en font une méthode particulièrement bien adaptée pour la cartographie géologique. Son grand avantage est de ne pas avoir recours à un contact au sol ce qui permet de réaliser rapidement des profils de mesure en continue sur de grandes distances.

L'appareillage (figure 2.11), facile à transporter, comprend :

- une antenne pour la mesure des champs magnétiques,
- un boîtier – récepteur permettant le traitement du signal,
- un data-logger pour l'enregistrement en continu des valeurs.



**Figure 2.11 :** Appareillage géophysique électromagnétique pouvant travailler en mode RMT, RF-EM et VLF-EM GRAD.

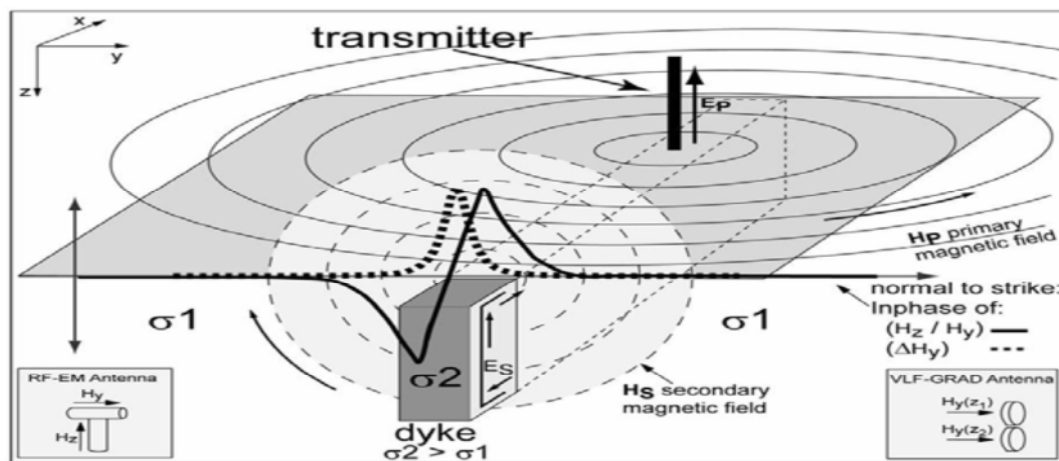
### III.2.1 RF-EM et VLF-EM GRAD

#### Principe des méthodes

La méthode RF-EM (Radio Frequency Electromagnetics) utilise comme source d'énergie les antennes radio dans la gamme de fréquence LF et VLF et à l'aide de deux bobines orthogonales, elle compare le champ primaire de l'émetteur avec l'intensité d'un champ secondaire induit (en %) dans les fractures. Les courbes ainsi obtenues, par enregistrement en continu des paramètres de l'induction, grâce à un datalogger de 4 Hz, donnent une très bonne information sur la position et la dimension des fractures, mais ces hétérogénéités conductrices doivent encore être positionnées entre un pic positif et un pic négatif sur la courbe enregistrée. Théoriquement la fissure doit se trouver entre les deux pics, au milieu, mais sur des courbes complexes, cette interprétation n'est pas toujours aisée. Ce dilemme a été dissipé par la mise au point d'une nouvelle antenne sur l'instrument RF-EM: l'antenne à gradient. Celle-ci ne mesure que l'intensité du champ total (addition vectorielle du champ primaire et du champ secondaire) avec deux bobines à axe horizontal, mais superposées à différentes hauteurs. Cette nouvelle antenne à gradient facilite la localisation des

fractures par un pic très net, juste à l'aplomb du conducteur, capable ainsi d'identifier et de séparer des fractures de faibles développements et très rapprochées l'une de l'autre. L'antenne a été testée sur plusieurs sites déjà fort bien documentés dans le karst, notamment derrière la paroi d'une carrière aux Breuleux (JU), où il a été possible de contrôler sur les affleurements de la carrière que la méthode VLF-EM-Grad est particulièrement bien adaptée pour la cartographie extensive des milieux fissurés.

La figure 2.12 ci-dessous donne une représentation schématique du fonctionnement de la méthode. Pour chaque fréquence, l'émetteur produit dans le sous-sol un champ magnétique ( $H_p$ ) et électrique primaire ( $E_p$ ). Si le sous-sol est électriquement homogène, le champ magnétique est horizontal et perpendiculaire à la direction de l'émetteur; le champ électrique est aussi horizontal mais parallèle à cette direction.



**Figure 2.12:** Principe des méthodes RF-EM et VLF-EM GRAD pour la mise en évidence d'une structure conductrice verticale (Bosch, 2002).

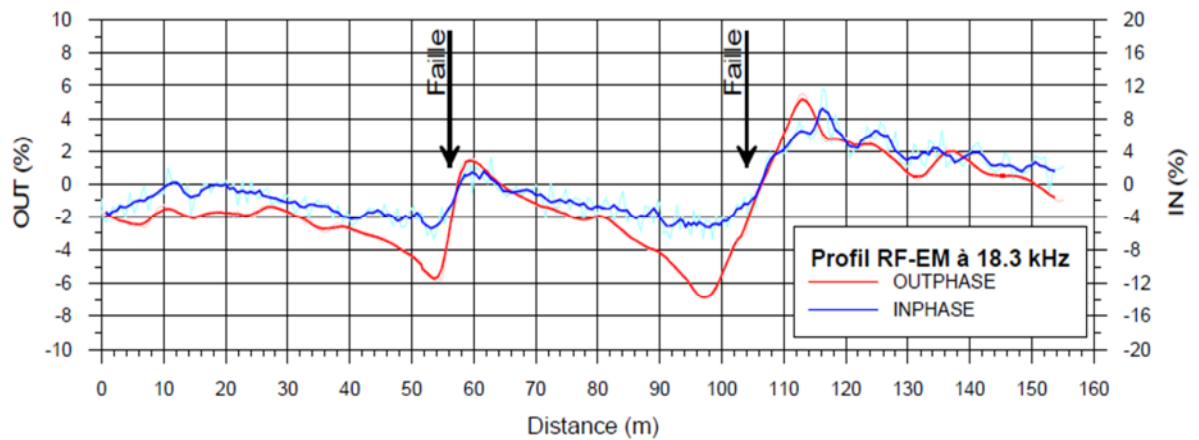
Lorsque des variations latérales de résistivités sont présentes (failles, changements lithologiques), les amplitudes de ces différents champs sont modifiées et un champ magnétique vertical secondaire ( $H_s$ ) apparaît.

En mode **RF-EM**, l'appareil mesure l'intensité du champ secondaire vertical en % du champ primaire horizontal ( $H_{s,z}/H_p$ ). Deux paramètres sont enregistrés :

- l'inphase ou composante en phase avec le champ primaire,
- l'outphase ou composante en quadrature ( $90^\circ$ ) par rapport au champ primaire.

La courbe en % dessinée sur le profil de la figure 2.12 (ligne continue) montre une représentation théorique de l'anomalie RF-EM engendrée par une structure géologique conductrice. Le centre de la structure est donné par le point d'inflexion de la courbe

situé entre deux pics de signe contraire. La figure 2.13 ci-dessous montre une réponse enregistrée au passage d'une faille dans des gneiss.

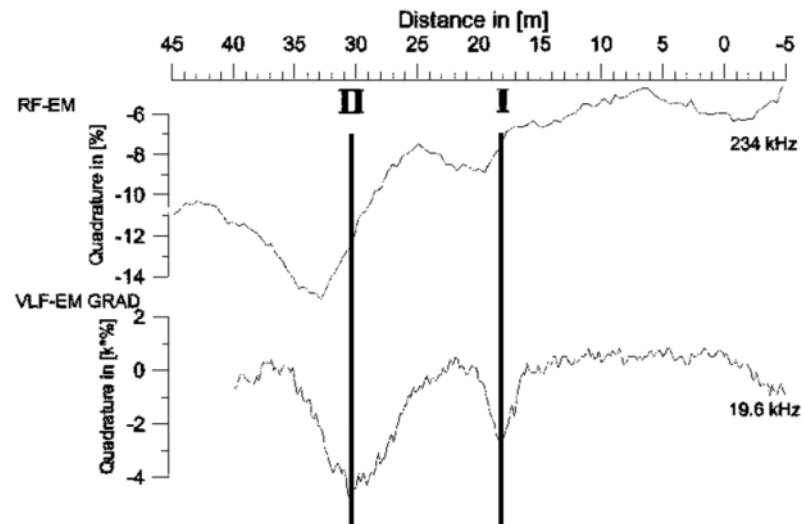


**Figure 2.13:** Courbe de réponse au passage de deux fractures dans des calcaires (mesures HydroSol).

En mode **VLF-EM GRAD**, l'appareil mesure, grâce à deux bobines horizontales superposées, le gradient du champ électromagnétique engendré par la fissure (= résultante de la composante horizontale du champ primaire et des composantes horizontale et verticale du champ secondaire). Avec cette technique, un pic apparaît sur l'enregistrement exactement à l'aplomb de la fracture (ligne discontinue, figure 2.12). La résolution spatiale très fine de cette méthode et la rapidité d'exécution en continu en font un outil particulièrement adapté pour la cartographie de la fracturation sub-surface (epikarst par exemple).

Dans la nature, l'allure et l'intensité des courbes de réponse peuvent sensiblement varier, suivant la longueur, la largeur et le pendage de la structure géologique, l'épaisseur de la couche de couverture ainsi que la résistivité du milieu. Les méthodes RF-EM et VLF-EM GRAD sont aussi très sensibles à la présence de câbles ou de conduites enterrées, se traduisant souvent par une anomalie resserrée d'une forte intensité.

La figure 2.14 ci-dessous compare les réponses engendrées par deux fractures dans des calcaires, en mode RF-EM et VLF-EM GRAD.



**Figure 2.14:** Comparaison entre les courbes enregistrées en continu par RF-EM et VLF-EM GRAD au passage de deux fractures dans des calcaires (Bosch, 2002).

### III.2.2 Radio-magnétotellurique

#### Domaine et conditions d'application

La radio-magnétotellurique (radio-MT) sert à préciser l'étude géologique d'un site. C'est, en particulier, une technique bien indiquée pour identifier des contacts à faible profondeur (contact géologique incliné, contact par faille) et à en préciser la position. Bien adaptée à la cartographie, c'est aussi une technique à grand rendement qui permet de reconnaître de grands tracés linéaires (routes, voies ferrées, tranchées, canaux, tranchées) où elle aide notamment à prendre des décisions en matière de terrassements. Comme la prospection électrique par courant continu elle permet de cartographier les variations d'épaisseur ou de nature (à l'aide de forages qui aident à caler l'interprétation) des matériaux altérés avant exploitation d'une carrière...

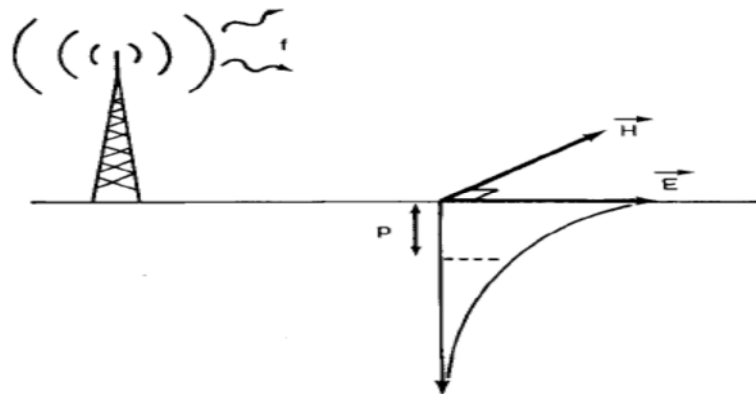
La radio-MT pour être applicable nécessite que deux conditions soient remplies: les formations géologiques que l'on désire distinguer doivent présenter un contraste de résistivité suffisant le long des profils où les mesures sont réalisées puisque le but de la radio-MT est de décrire les variations de la résistivité du sous-sol le long de profils horizontaux ou en plan; la résistivité apparente étant mesurée grâce à l'interaction entre une onde électromagnétique, émise par un émetteur de radio-diffusion, et le sous-sol à une fréquence comprise entre 8 kHz et 1 MHz, il est indispensable que les conditions de réception des ondes radio soient bonnes dans l'une au moins des bandes VLF, grandes ondes et ondes moyennes, celle-ci étant choisie en fonction des

résistivités des matériaux et de l'ordre de grandeur de la profondeur d'investigation souhaitée.

Les conditions de mesure doivent être bonnes: les mesures sont perturbées par les masses métalliques proches de l'appareil (clôtures grillagées) et les matériaux métalliques enterrés. La technique peut être utilisée pour détecter les objets métalliques enterrés, mais, si ce n'est pas le but de l'étude, la présence de ces derniers peut masquer l'effet des autres propriétés du sous-sol. La radio-MT doit donc être employée avec prudence en milieu urbain. D'autre part, une surface topographique irrégulière (sillons dans un champ labouré par exemple) peut causer des perturbations qui rendent la radio-MT inapplicable.

### Principe de la méthode

Lorsqu'une onde électromagnétique plane (c'est-à-dire issue d'un émetteur lointain) se propage au-dessus du sol, elle est le siège de phénomènes dont on peut tirer parti pour connaître le sous-sol (figure 2.15).



**Figure 2.15 :** Principe de la radio-magnétotellurique : un émetteur de radiodiffusion, lointain, émet une onde électromagnétique de fréquence  $f$ .

Dans cette figure on observe à la surface du sol les composantes électrique et magnétique du champ électromagnétique résultant. On en déduit la résistivité apparente du sous-sol sur une épaisseur inférieure à la profondeur de pénétration  $p$  de l'onde (qui dépend de la fréquence et de la résistivité).

- Le rapport entre le champ électrique et le champ magnétique ne dépend que de la résistivité du sous-sol et de la fréquence de l'onde. On définit ainsi la résistivité apparente du sous-sol :

$$\rho_a = \frac{1}{2\pi\mu_0 f} \frac{E^2}{H^2}$$

- L'onde électromagnétique pénètre dans le sous-sol en s'atténuant de manière exponentielle. On définit la profondeur de pénétration  $p$  (profondeur de peau) comme la profondeur à laquelle le module des champs est divisé par environ 3 ( $e = 2,718$ ). Dans un sous-sol homogène de résistivité  $\rho$  :

$$p = \sqrt{\rho/\pi} \mu_0 f \approx 500 \sqrt{\rho/f}$$

Un sol résistant ( $p$  fort, par exemple un calcaire franc) est donc facilement pénétré par une onde électromagnétique; un sol conducteur ( $p$  faible, par exemple une argile humide) est peu pénétré. Les ondes de fréquence élevée pénètrent difficilement (phénomène de la cage de Faraday).

On conçoit que le résultat des mesures de champ électrique et de champ magnétique en surface ne dépende que très peu de propriétés du sous-sol situées à des profondeurs plus grandes que  $p$ . En pratique, l'expérience montre que la profondeur d'investigation de la R M T peut être évaluée à la moitié de la profondeur de pénétration.

On n'est naturellement pas maître de la résistivité du sous-sol, mais on est maître de la fréquence de l'onde électromagnétique dont on observe les propriétés à la surface.

Ainsi, une onde électromagnétique de fréquence 1 MHz donne sur un sol de résistivité 100  $\Omega\text{m}$ , une profondeur de pénétration de 5 m, soit une profondeur d'investigation de 2,5 m. Cela signifie que des hétérogénéités du sol à une profondeur plus grande n'ont pratiquement pas d'influence sur le résultat de la mesure. Le poids sur le résultat de la mesure des propriétés d'un élément de sous-sol est d'autant plus fort que sa profondeur est faible.

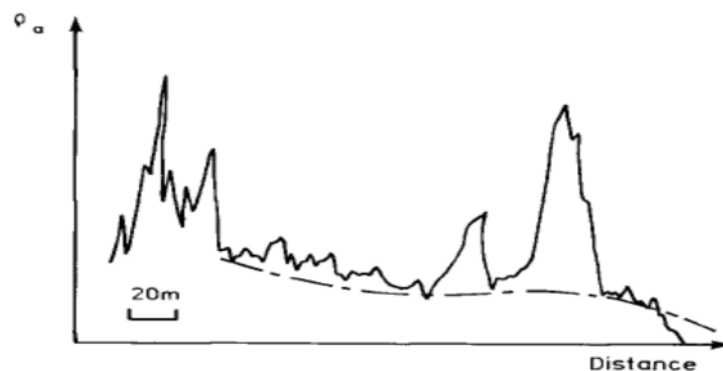
On constate parfois que la profondeur d'investigation de la méthode est un peu trop forte, si bien que des résistivités apparentes fortes peuvent avoir pour origine la présence du rocher à une profondeur plus grande que celle de la tranchée. C'est pourquoi l'étalonnage des profils par des moyens mécaniques est indispensable. Quoi qu'il en soit, l'erreur d'interprétation due à ce phénomène ne peut aller que dans le sens d'une légère surestimation des volumes rocheux à extraire.

Les émetteurs de radio-diffusion, qui émettent dans la gamme des petites ondes de 500 à 1,6 MHz, conviennent donc généralement à l'exploration des tracés de tranchées. Ils existent presque partout dans le monde, et c'est l'interaction entre l'onde

électromagnétique qu'ils émettent et le sous-sol qui est à la base de l'utilisation de la RMT.

La deuxième formule semble indiquer que des fréquences plus élevées seraient utilisables; malheureusement, la première formule n'est plus valable au-delà de 2 MHz environ.

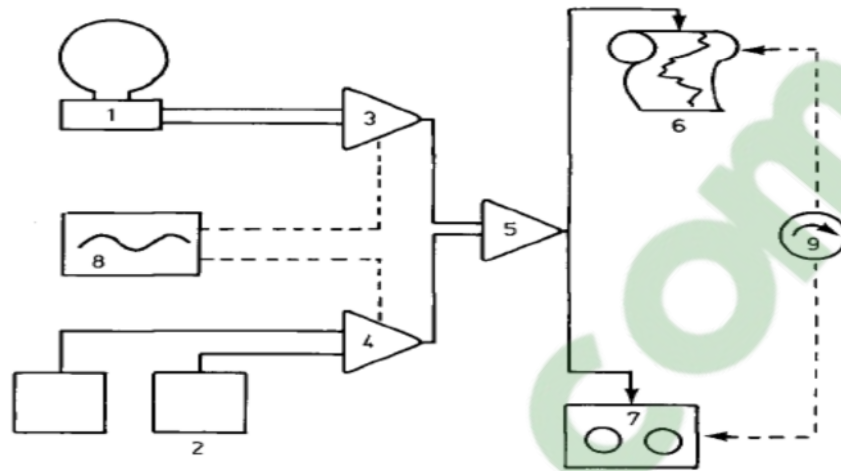
En effet, on a sous-entendu ici que les courants de déplacements étaient négligeables, ce qui n'est plus vrai pour des fréquences élevées.



**Figure 2.16 :** Profil continu de résistivité apparente le long d'un tracé routier. La mesure sur environ 120 m n'a duré que quelques minutes.

Dans cette figure le trait mixte rend compte de l'approfondissement progressif du recouvrement argileux reposant sur un substratum calcaire. Les deux anomalies très fortes indiquent la présence de calcaires subsistant localement dans l'argile et qui poseront des problèmes de terrassement.

La figure 2.16 montre que la RMT permet de donner une description détaillée des hétérogénéités du sous-sol. La résistivité apparente est mesurée en continu le long de profils parcourus très rapidement (environ 3 km/h). Ainsi dans un environnement argileux reposant sur un substratum calcaire, on peut mettre en évidence la présence de rognons calcaires localisés. Il est possible d'obtenir de tels détails dans la variation latérale de la constitution du sous-sol grâce au matériel que nous décrivons maintenant.

**Le matériel de mesure :****Figure 2.17 : Schéma de principe.**

- |                                                        |                             |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------|
| (1) Capteur de champ magnétique H                      | (3) Voie H                  |
| (2) Capteur de champ électrique E                      | (4) Voie E                  |
| (5) Calculateur analogique de la résistivité apparente |                             |
| (6) Enregistreur graphique                             | (7) Enregistreur numérique  |
| (8) Générateur de fréquence                            | (9) Capteur de déplacement. |

La figure 2.17 est un schéma qui indique les constituants principaux. Le capteur de champ magnétique est une double spire de cuivre. La différence de potentiel, induite par la variation de flux du champ magnétique, y est mesurée par une méthode à contre-réaction (méthode de zéro).

Le capteur de champ électrique est un capteur électrostatique (2 m x 1 m) (deux condensateurs noyés dans des plaques de néoprène). On utilise aussi maintenant un capteur à patins métalliques plus petit (1 m x 0,2 m) et plus maniable.

Ces capteurs, portés par un traîneau, ou traînant sur le sol, peuvent être déplacés en continu. Les mesures de champs sont traitées soit analogiquement, soit numériquement, et la résistivité apparente est enregistrée sur un enregistreur en même temps que la position de l'appareil le long du profil. Cela donne des enregistrements du type de ceux qui apparaissent sur la figure 2.18. Les performances pratiques de la méthode varient de 5 à 20 km de profils par jour. Un intérêt supplémentaire de la RMT est que le couplage entre les capteurs et le sous-sol est électrostatique ou inductif, ce

qui autorise le travail dans un terrain dont la couche superficielle est isolante (chaussée, sol gelé) ce qui n'est pas le cas en prospection électrique par courant continu. L'unité de mesure doit être orientée dans la direction de l'émetteur, cela pose parfois des problèmes lorsque le tracé à reconnaître est sinueux (par exemple le long d'une route). Pour résoudre ce problème, deux solutions sont possibles: ou bien l'unité de mesure est orientable le long du profil, ou bien on utilise un appareil à quatre capteurs: deux capteurs de champ électrique perpendiculaires et deux capteurs de champ magnétique. La composition vectorielle des composantes des champs permet de retrouver la résistivité apparente sans qu'il soit nécessaire de se préoccuper de la direction de l'émetteur.

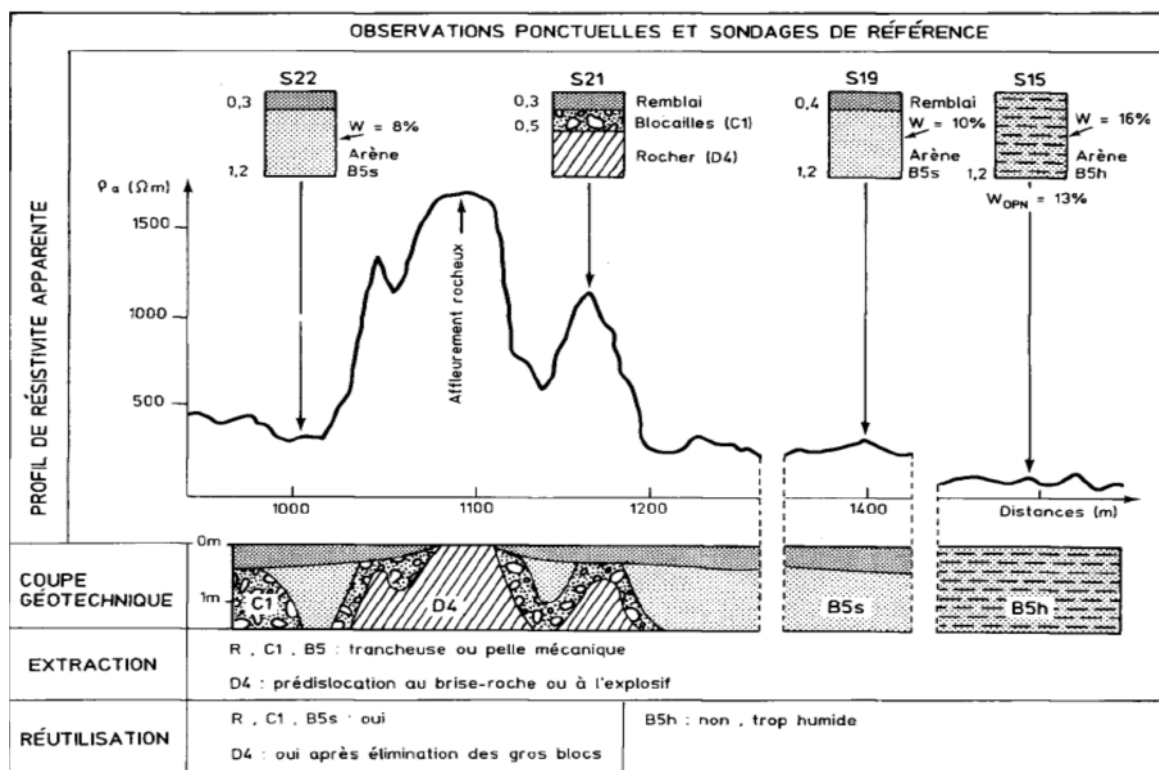


Figure 2.18 : Présentation des résultats.

### III.2.3 Radar géologique

#### Domaine et conditions d'application

Le radar géologique sert surtout à détecter les réseaux (câbles, canalisations) enterrés, mais ses applications peuvent être variées: préciser la géologie superficielle, étudier la fracturation, détecter les cavités souterraines à faible profondeur. C'est un outil de contrôle non destructif des ouvrages (chaussées, pistes d'aéroports, ouvrages

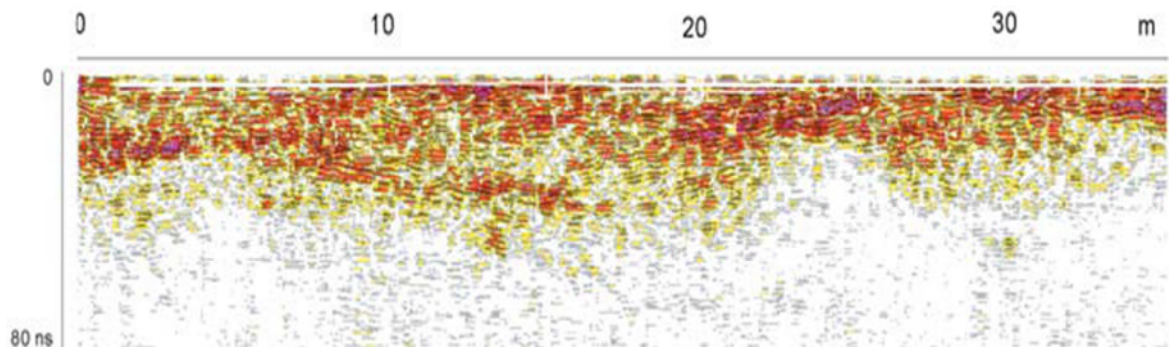
en béton, soutènements de tunnels). C'est une des meilleures techniques pour la géophysique en site urbain.

Fondé sur la propagation des ondes électromagnétiques dans les matériaux à des fréquences variant de quelques dizaines de MHz à 3 GHz, le radar géologique ne peut être efficace que si les ondes ne sont pas absorbées trop vite par les matériaux. Ceux-ci doivent donc être aussi peu conducteurs de l'électricité que possible. Plus le matériau est électriquement résistant, plus les ondes se propagent facilement et plus la profondeur d'investigation est importante. En pratique on considère que si la résistivité est inférieure à  $100 \Omega \cdot m$ , l'utilisation du radar géologique devient aléatoire. Elle est impossible dans les matériaux de résistivité inférieure à  $50 \Omega \cdot m$ . Ceci exclut l'emploi du radar géologique dans les sous-sols argileux.

La profondeur d'investigation est de quelques mètres. Elle dépend des fréquences (plus la fréquence est basse, plus grande est la profondeur d'investigation) et des propriétés d'absorption du matériau. L'augmentation de la profondeur d'investigation se fait aux dépens de la résolution. À titre d'exemple la profondeur d'investigation peut être nulle dans un sol argileux, de plusieurs dizaines de mètres dans la glace ou des sables très secs.

### Principe physique

La technique radar est employée pour obtenir une image de la sub-surface à haute-résolution. Une impulsion électromagnétique est envoyée dans le sous-sol, par le biais d'une antenne, à une fréquence centrale déterminée. Cette impulsion se propage en s'atténuant dans les matériaux ou les sols et, à chaque interface de deux matériaux différents, une partie de son énergie est réfléchie vers la surface. Les échos successifs sont enregistrés en fonction du temps par l'antenne de réception (Daniels, 1996). La juxtaposition des signaux temporels enregistrés lors du déplacement de l'antenne radar permet d'obtenir une coupe-temps, ou radar-gramme, souvent représentée avec une échelle de couleur corrélée aux amplitudes des signaux et donnant des informations géométriques sur la structure auscultée (figure 2.19).



**Figure 2.19 :** Exemple de radar-gramme, ou profil radar. L'axe horizontal représente une distance (en mètres) et l'axe vertical un temps-double (aller-retour, en nanosecondes).

La prospection présentée ici a été réalisée dans le bassin Parisien avec une antenne de fréquence centrale 400 MHz. Les niveaux supérieurs (couleurs vives) signent des paléo-chenaux conglomératiques carbonatés würmiens tandis qu'au-dessous, en teinte blanc-gris, les niveaux sans contraste correspondent à de la craie d'âge Santonien.

Le temps de trajet correspondant à une figure est d'autant plus grand que la structure qui en est la cause est plus profonde. L'interprétation des coupes-temps consiste à identifier les structures (canalisations, fractures, couches géologiques, couches de chaussées, armatures dans le béton, cavités...), éventuellement à trouver leur profondeur, déterminer leur forme, etc.

La vitesse de propagation des ondes dépend principalement de la constante diélectrique (ou permittivité relative) du milieu environnant et peut être représentée en première approche sous la forme suivante :

$$v \approx c / (\epsilon_r)^{1/2}$$

Avec :

- ❖ V : vitesse de l'onde électromagnétique (m/s),
- ❖ C : célérité de la lumière dans le vide ( $= 3 \times 10^8$  m/s),
- ❖  $\epsilon_r$  : permittivité relative (sans dimension).

Plus un matériau est humide, plus la vitesse de propagation est lente (différentes valeurs sont présentées dans Cariou et al., 1997; cela peut influencer la précision des mesures lorsqu'il existe un gradient d'humidité au sein de ce milieu (comme pour le béton, par exemple).

La profondeur d'auscultation dépend quant à elle de plusieurs facteurs:

- la conductivité du matériau encaissant, principale cause de l'atténuation des ondes ;

- le choix de la fréquence centrale: la profondeur d'investigation décroît lorsque la fréquence augmente;
- la dynamique du système radar, qui indique le rapport signal/ bruit minimal détectable, et que l'on peut relier à une profondeur limite d'auscultation; l'adaptation de l'antenne au matériau (l'aptitude à transmettre le maximum d'énergie dans le matériau);
- le lobe de rayonnement de l'antenne qui focalise plus ou moins l'énergie rayonnée dans une direction donnée;
- la section équivalente radar (valeur décrivant l'énergie réfléchie dans une direction donnée suivant la forme et la taille de l'objet à détecter);
- le contraste électromagnétique de l'objet par rapport au matériau encaissant, en sachant que plus celui-ci est élevé et plus l'énergie rétrodiffusée est importante;
- le niveau de bruit diffractant dû à la nature du matériau encaissant (taille et géométrie des granulats ou blocs).

Tous ces facteurs interagissent sur les ondes radar enregistrées au niveau de l'antenne réceptrice. Mais on peut retenir que, dans un même environnement, suivant la nature et la forme d'un objet enterré, la profondeur maximale à partir de laquelle il ne sera plus détecté peut être notablement différente.

Il existe aussi une relation entre la profondeur d'investigation possible et la résolution qui sont liées à la longueur d'onde émise (Leparoux, 1997). Une grande longueur d'onde induit une faible atténuation et l'onde électromagnétique va pénétrer en profondeur. Corrélativement, la résolution est faible et l'onde n'est pas affectée par les objets de dimension réduite.

### III.3 Méthodes électriques en courant continu

- **Domaine d'application**

La prospection électrique est une des méthodes géophysiques, appliquée dans l'exploration du sous-sol, par sondage vertical ou par profilage (recherche des conducteurs).

La profondeur d'investigation s'étale de quelques centimètres à quelques centaines de mètres de profondeur; donc son spectre d'utilisation est très large: En sub surface, en recherche minière, dans l'agriculture, dans l'aménagement du territoire, construction de bâtiments, des ponts et chaussées, voies ferrées, dans les recherches archéologiques, également dans la recherche des aquifères en hydrogéologie.

Elle est utilisée en sub surface, grâce aux techniques de multi électrodes, on peut ausculter la partie superficielle du sol avec une grande précision.

- **Définition de la résistivité**

Les méthodes électriques par courant continu en géophysique ont pour objet de déterminer les propriétés des sols par la mesure de leur résistivité  $\rho$ . L'unité de mesure est l'Ohm mètre ( $\Omega.m$ ). La résistivité d'un matériau est l'inverse de la conductivité  $\sigma$  mesurée en siemens par mètre ( $S.m^{-1}$ ). Un matériau conduit d'autant mieux le courant électrique que sa résistivité est faible (ou sa conductivité élevée).

La résistivité des matériaux dépend essentiellement des phénomènes de conduction électrolytique et d'une manière moindre de conduction électronique. Les valeurs des résistivités dépendent de la nature du matériau et couvrent un large domaine. Les contrastes de résistivité doivent être suffisants pour que les hétérogénéités soient détectables. La valeur de la résistivité d'un matériau géologique dépend aussi de la teneur en eau, de la porosité du milieu, du mode de communication entre les vides (la tortuosité) et de la salinité de l'eau. La loi d'Archie (loi empirique (Reynolds, 2000)) synthétise ces propriétés :

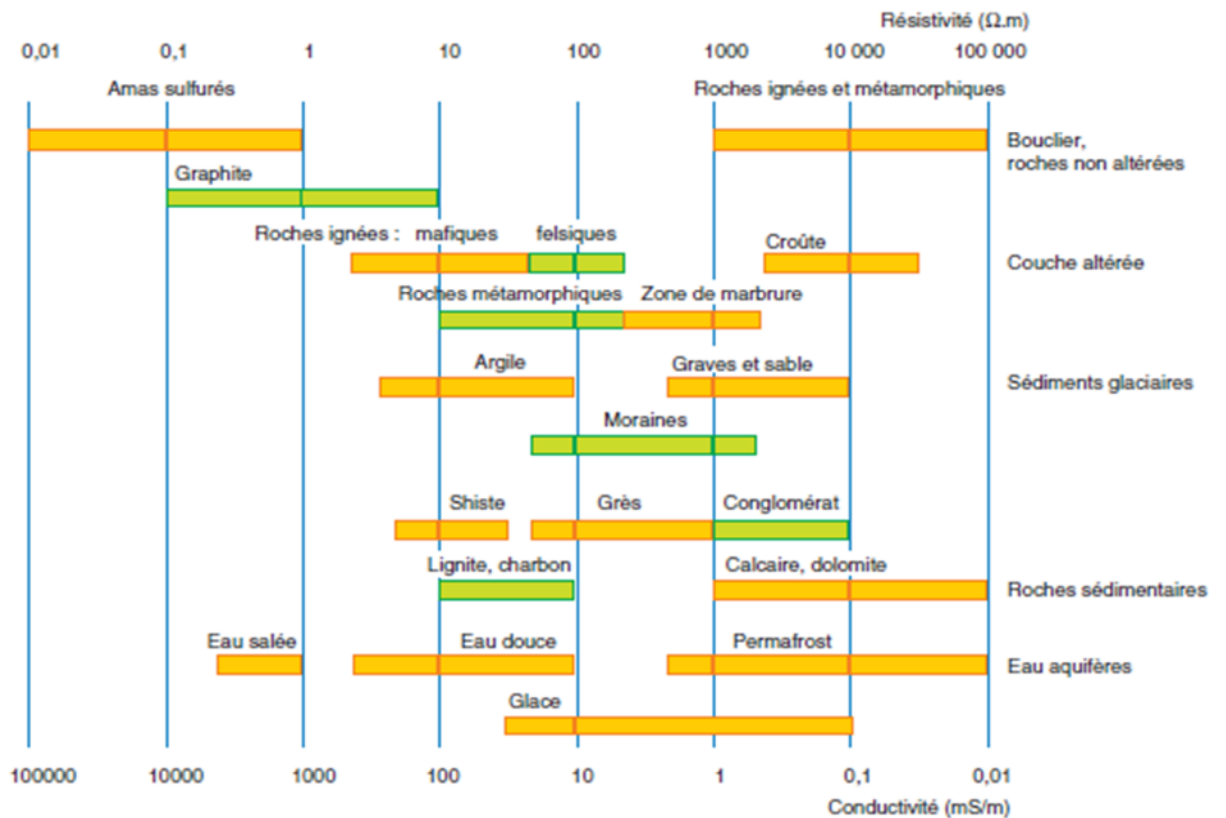
$$\rho = a \rho_e \Phi^{-m} S^{-n}$$

Où  $\rho$  et  $\rho_e$  sont respectivement les résistivités du matériau sec et de l'eau contenue dans les pores,  $\Phi$  est la porosité,  $S$  la fraction volumique de pores contenant de l'eau,  $a$ ,  $m$ , et  $n$  sont des constantes telles que:  $0,5 \leq a \leq 2,5$ ,  $1,3 \leq m \leq 2,5$  et  $n = 2$ .

L'ordre de grandeur de la résistivité (et inversement de la conductivité) des principaux composants des sols est représenté sur la figure 2.20.

Les valeurs de résistivité des matériaux utilisés en génie civil varient également dans de grandes proportions. Nous donnons ici quelques indications sur les bétons, dont une étude complète a été effectuée par Lataste (2002). Le béton frais (non durci) est très conducteur ( $1 \Omega m$  à  $10 \Omega m$ ). Lorsque le béton durcit, nous pouvons noter une rapide augmentation de la résistivité, qui passe de  $10 \Omega m$  à  $200 \Omega m$  à  $50000 \Omega m$  selon le mélange utilisé pour le mortier et les granulats, son état d'endommagement et d'humidité. Les armatures métalliques, très fréquentes, rendent évidemment ces milieux assez complexes. On s'intéresse d'ailleurs plus souvent aux problèmes de corrosion de ces armatures qu'aux propriétés intrinsèques de la matrice. Plus un béton est conducteur ( $< 100 \Omega m$ ), et plus la probabilité de corrosion des aciers est importante.

Au-dessus de 1000  $\Omega\text{m}$  le risque de corrosion est négligeable. Il est donc intéressant d'étudier la résistivité de ce matériau.



**Figure 2.20** : Gamme des résistivités des principaux sols terrestres (Palacky, 1991).

- **Le principe de mesure des méthodes électriques en courant continu**

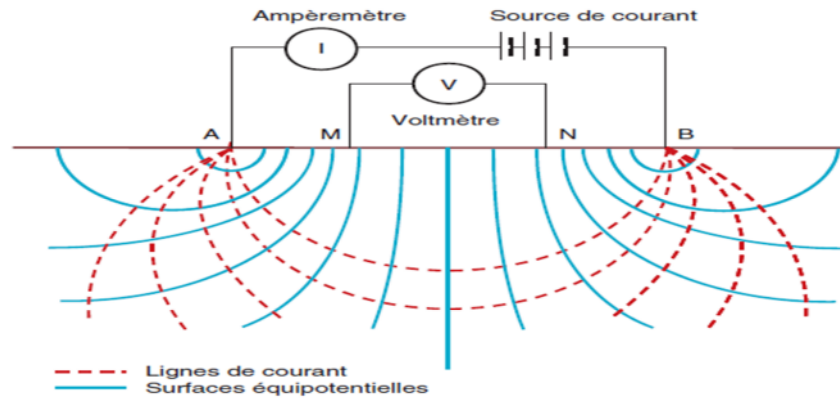
Le principe de mesure est le suivant: un courant continu  $I$  est injecté dans le sol par deux électrodes A et B. La différence de potentiel  $V$  est mesurée aux bornes de deux autres électrodes notées M et N (figure 2.21).

La résistivité apparente est «le rapport de la différence de potentiel mesurée sur le terrain à celle que l'on mesurerait avec le même dispositif et la même injection de courant sur un terrain homogène de résistivité  $1\Omega\text{m}$ ». Cette grandeur a les dimensions d'une résistivité. Elle vaut:

$$\rho_a = k \frac{V_M - V_N}{I}$$

Où  $k$ , le facteur géométrique est défini par:

$$k = 2\pi \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right]^{-1}$$



**Figure 2.21 :** Principe de la prospection électrique par courant continu.

Les principaux dispositifs sont présentés sur la figure 2.22. Ce sont tous des quadripôles. Les plus utilisés sont les dispositifs Wenner, Schlumberger, et le dipôle-dipôle.

Leur profondeur d'investigation est une fonction croissante de la longueur du dispositif. Pour tous les types de dispositifs, cette distance est définie comme la plus petite entre l'électrode d'injection et l'électrode de potentiel.

Si on prend comme référence cette distance AM, tous les dispositifs ont une profondeur d'investigation équivalente. Des auteurs comme (Militzer et al., 1979) et (Roy et Appareo, 1971) ont étudié plus précisément les profondeurs d'investigation en fonction des dispositifs. Dans une première approximation, on peut considérer que la profondeur investiguée est de l'ordre de 1/6 à 1/8 de la longueur du dispositif.

Il y a trois types de mise en œuvre de la prospection électrique par courant continu depuis la surface :

- le sondage électrique: en un point fixe en surface, les électrodes sont écartées,
- le traîné électrique: le dispositif est déplacé le long d'un profil. Les distances entre les électrodes sont fixes,
- le panneau électrique qui est la combinaison des deux méthodes précédentes. C'est une méthode utilisée pour la détection des cavités souterraines, pour la localisation de structures conductrices (poches, fractures, failles). Elle est très utilisée en milieu karstique.

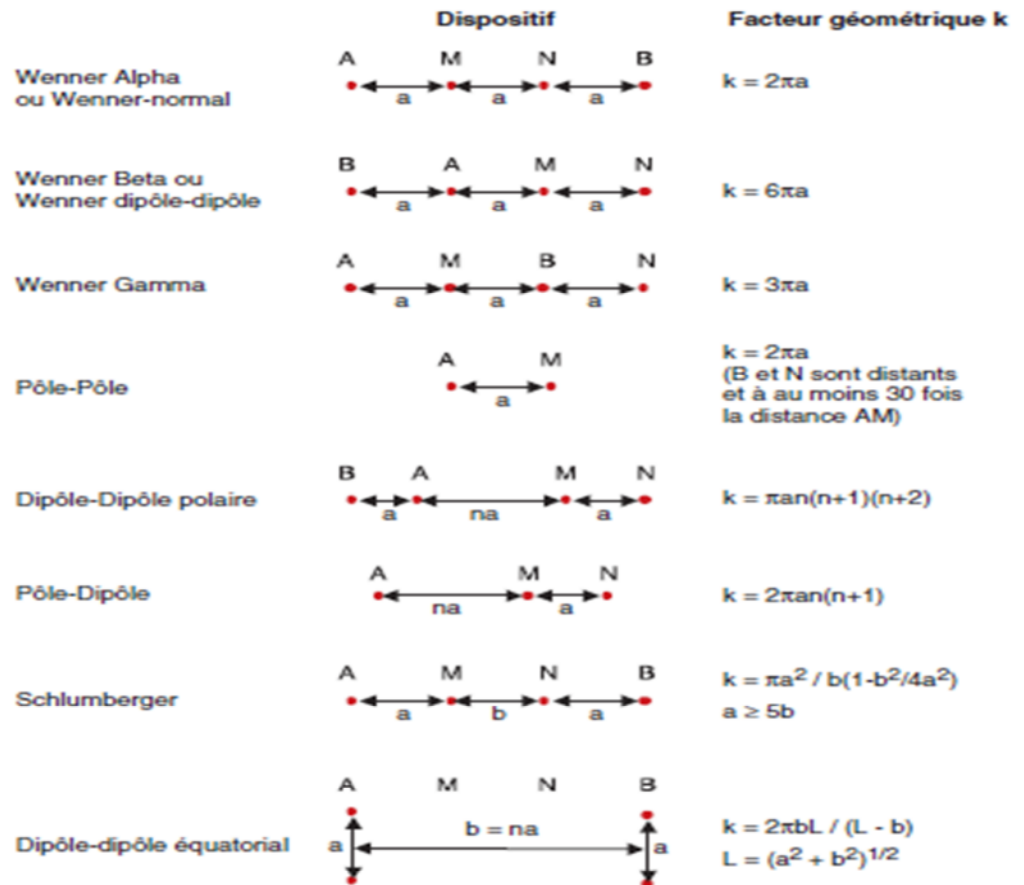


Figure 2.22 : Dispositifs et facteurs géométriques associés (Loke, 2002).

### III.3.1 Sondage électrique

#### Domaine et conditions d'application

Le sondage électrique sert comme toute méthode géophysique à préciser le modèle géologique du sous-sol que l'on reconnaît. Plus particulièrement en génie civil, il est bien indiqué lorsque l'on veut déterminer l'épaisseur d'altération, celle d'un matériau de recouvrement ou du matériau stérile avant exploitation d'une carrière (découverte) ou encore l'épaisseur d'une couche de gravier ou de sable entre une couche altérée de surface et un substratum rocheux.

Le sondage électrique, pour être efficace, nécessite que deux conditions soient remplies: la couche que l'on désire étudier doit présenter un contraste de résistivité avec les matériaux encaissants et les variations latérales de résistivité doivent être faibles. Le sondage électrique est en effet une technique dont le but est de décrire les variations de la résistivité du sous-sol en fonction de la profondeur à l'aplomb d'un point donné. Ce but ne peut être atteint que si la résistivité ne varie que dans la

direction verticale.

Du point de vue des conditions de mesure, la mesure de potentiel doit être aussi peu perturbée que possible par les courants circulant dans le sol au voisinage des installations urbaines et industrielles.

On doit s'assurer de pouvoir réaliser des mesures telles que le rapport signal sur bruit soit suffisant, si non la pratique du sondage électrique dans ces zones doit être évitée.

### **Principe de la méthode**

Dans le dispositif du sondage électrique, le centre est fixe et les électrodes sont écartées pour mesurer la résistivité apparente en fonction de la longueur du dispositif. Ce principe est illustré sur la figure 2.23 pour un dispositif Wenner: les distances entre électrodes des points A, B, M et N varient d'un nombre entier deux fois l'écartement initial  $a$ .

### **Grandeur mesurée**

La grandeur mesurée est la résistivité apparente du sol, perpendiculaire à la surface de mesure au droit du centre du dispositif: le sondage électrique renseigne sur les variations verticales de la résistivité du terrain. La profondeur d'investigation dépend de la longueur finale des mesures et de la résistivité du sous-sol.

### **Résultat attendu**

Le résultat d'un sondage électrique est une coupe du sous-sol décrite à partir de la distribution des résistivités à la verticale d'un point donné.

Le résultat attendu est une courbe représentant la résistivité apparente ( $\Omega.m$ ) en fonction de la distance entre électrodes d'injection (exprimée généralement en mètres, en échelle logarithmique).

Pour les milieux tabulaires, l'interprétation des résultats se fait en terme d'épaisseurs et de résistivités des couches. On utilisait auparavant des abaques où étaient représentées les résistivités apparentes du milieu multicouche (Parasnis, 1986). On a recours aujourd'hui à des logiciels d'interprétation automatique assistés par ordinateur. L'interprétation n'est pas unique à cause des lois de similitude: le résultat est basé sur l'hypothèse de la répartition 1D des structures, alors que les mesures intègrent le demi-espace constitué par le sol et délimité par la surface.

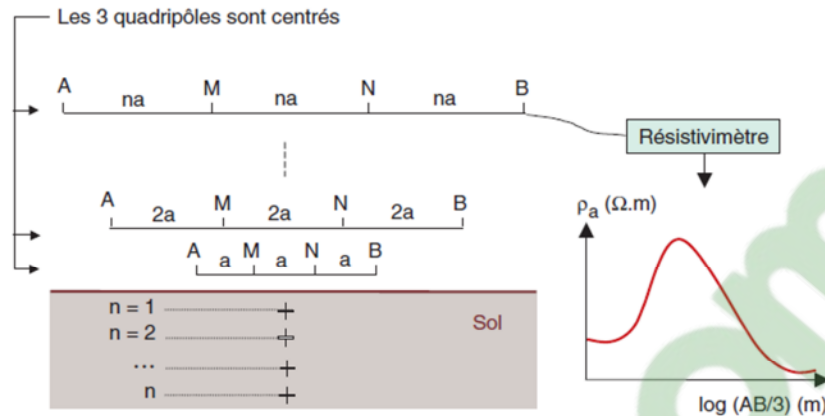


Figure 2.23 : Principe du sondage électrique en dispositif de Wenner (alpha).

### III.3.2 Traîné et carte de résistivité

#### Domaine d'application

La principale application en génie civil du traîné et des cartes de résistivité est l'étude des variations de l'épaisseur et des propriétés du terrain de recouvrement, zone d'altération, découverte pour les gisements de matériaux. D'une manière générale, ces techniques aident la cartographie géologique en précisant la position des contacts lithologiques ou tectoniques.

#### Principe de la méthode

On déplace un quadripôle de longueur fixe et en chaque point d'un profil, on mesure  $\rho_a$ . C'est la méthode dite des traînés de résistivité. Elle permet de mettre en évidence des variations horizontales de résistivité, par exemple liées à la présence de failles juxtaposant 2 terrains de résistivités différentes, ou révélant des structures archéologiques de type fondations enterrées, etc. En réalisant plusieurs traînés parallèles les uns aux autres, on peut obtenir une carte des résistivités mettant en évidence les variations latérales de  $\rho_a$  à une profondeur donnée, fonction de l'écartement constant entre les électrodes.

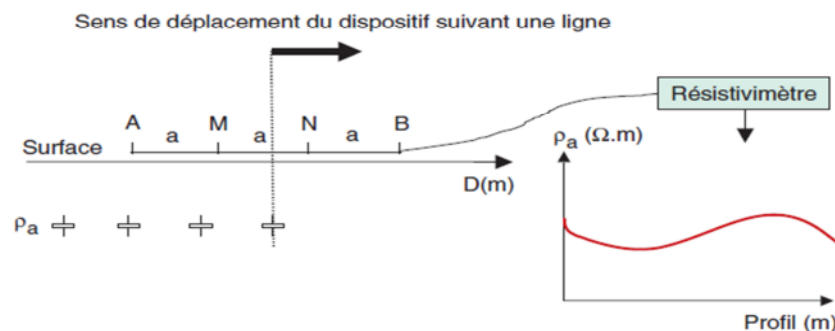
#### Grandeur mesurée

La grandeur mesurée est la résistivité apparente du sol pour une longueur de dispositif donnée. La profondeur d'investigation dépend de cette longueur mais aussi de la résistivité du sous-sol.

Ce dispositif est particulièrement sensible aux variations latérales de résistivité. La réalisation de plusieurs profils permet d'obtenir des cartes de résistivité apparente.

### Résultat attendu

Le résultat d'un trainé de résistivité est une courbe représentant la résistivité apparente (en  $\Omega.m$ ) du terrain en fonction de la position du dispositif de mesure le long du profil en mètre (figure 2.24).



**Figure 2.24** : Principe du traîné électrique, cas d'un dispositif Wenner.

### III.3.3 Le panneau électrique

#### Domaine d'application

Il faut vérifier que les contrastes de résistivité sont suffisants pour appliquer la méthode. Une modélisation permet de les évaluer. Un contraste de résistivité apparente de 10 % est généralement considéré comme significatif.

En milieu karstique, le panneau électrique permet d'imager les structures remplies d'eau ou de matériaux argileux ou limoneux. Il est donc préconisé pour la recherche de structures (failles, poches ou boyaux karstiques) conductrices, facteurs d'instabilité et pouvant déboucher sur des vides.

L'utilisation d'un dispositif particulier dépend des objectifs fixés, et bien souvent des habitudes des responsables des mesures. Quelques grandes caractéristiques sont néanmoins à retenir pour certains dispositifs :

- pour les profondeurs inférieures à 20 m, le dispositif pôle-pôle est bien indiqué. Seules les électrodes A (de courant) et M (de potentiel) sont mobiles, les électrodes B et N sont à une distance de plus de 30 fois AM.
- le dispositif quadripôle symétrique est utilisé pour de plus grandes profondeurs, de même que le dispositif pôle-dipôle.

- le dispositif dipôle-dipôle est souvent utilisé pour le panneau mais peut conduire à des résultats difficiles à interpréter, car il est très sensible aux à-coups de prises (très bruité).

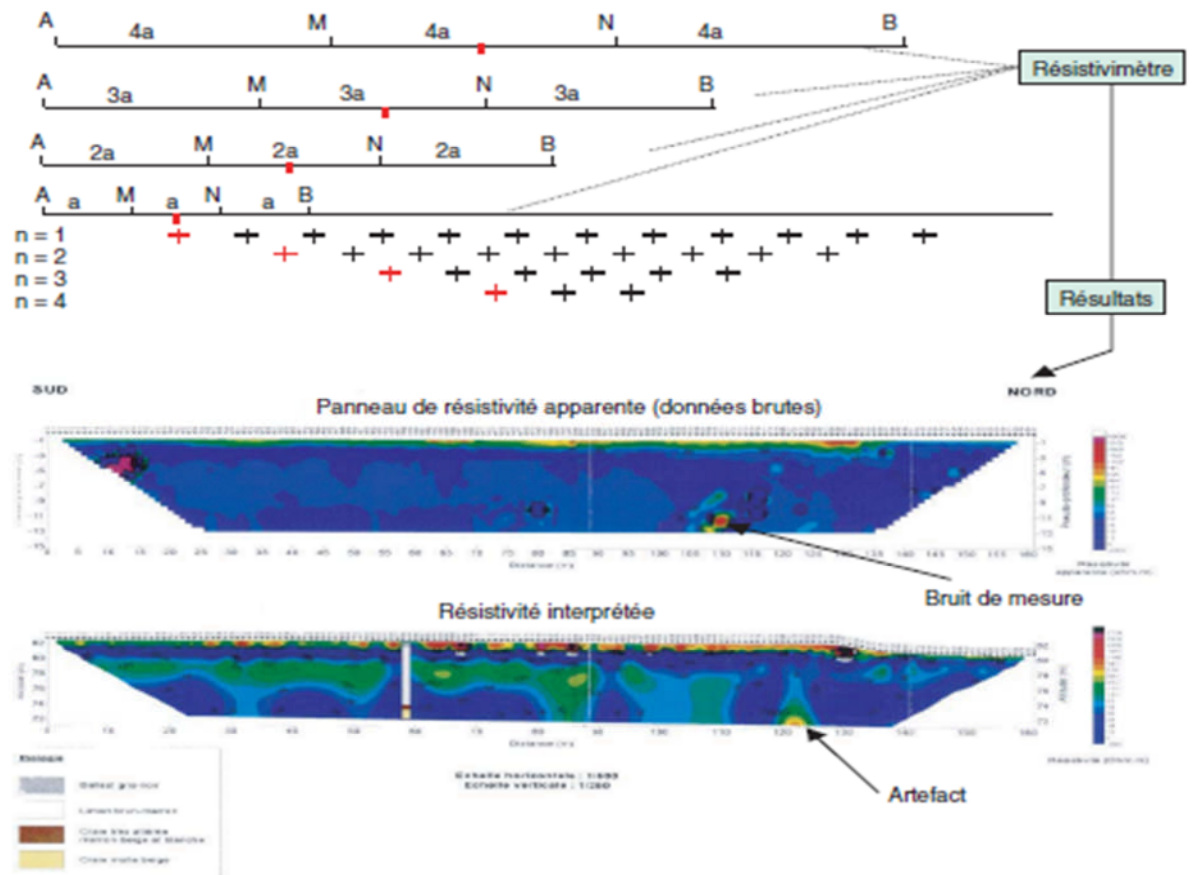
## Principe

Le dispositif de mesure est constitué d'un réseau d'électrodes de réception et d'émission disposées en ligne et réparties selon un écart constant. On injecte un courant continu par l'intermédiaire de ces électrodes qui deviennent des électrodes d'émission puis on mesure simultanément des différences de potentiel entre deux électrodes de réception. L'augmentation des écartements entre les électrodes de réception et d'émission permet de faire pénétrer le courant à des profondeurs variables dans le terrain. Le panneau électrique par sa forte densité de mesures permet de localiser avec précision des anomalies résultant de variations résistivité.

## Résultat attendu

Le résultat brut (figure 2.25) d'une mesure en panneau électrique est une carte de résistivité apparente ( $\Omega.m$ ), souvent appelée pseudo-section. L'échelle des couleurs est proportionnelle à la valeur de la résistivité. Les coordonnées horizontales représentent la position du centre du dispositif le long du profil. Les coordonnées verticales représentent la longueur du dispositif. Ce n'est pas une représentation d'une coupe de terrain: pour une ordonnée donnée, c'est-à-dire pour une longueur de dispositif donnée, c'est la résistivité apparente qui est représentée le long du profil. Les résultats bruts, très variés suivant le type de dispositif, sont difficiles à interpréter et nécessitent une grande expérience de la méthode.

Le résultat attendu est une carte de résistivité inversée (figure 2.25). Il existe des logiciels qui permettent de réaliser l'inversion des mesures en terme de variation de la résistivité interprétée en fonction de la position du dispositif et de la profondeur. Il faut savoir que le résultat est basé sur l'hypothèse de la répartition 2D des matériaux, alors que la mesure en panneau électrique intègre le demi-volume sous la surface. En réalisant une acquisition suivant un maillage en surface, l'inversion donne un diagramme de résistivité avec l'hypothèse d'une répartition 3D des structures.



**Figure 2.25 :** Principe du panneau électrique et exemple de résultats. En haut, l'anomalie rouge à 110 m est du bruit (Document SNCF).

### III.4 Prospection gravimétrique

- **Principe de base**

La gravimétrie est l'étude des variations du champ de pesanteur à la surface du sol.

Le champ de pesanteur se mesure au moyen d'un gravimètre. Le principe est de mesurer la force qui s'exerce sur une masse unitaire suspendue à un ressort (peson à ressort). Naturellement, un gravimètre comporte des raffinements qui lui confèrent une très grande sensibilité et qui rendent la mesure aussi peu dépendante que possible de la pression atmosphérique ou de la température. Les gravimètres utilisés pour la reconnaissance ne servent pas à mesurer la gravité absolue mais ses variations dans l'espace et dans le temps, leur précision est de quelques micro-gals.

La force qui s'exerce sur la masse du gravimètre dépend du temps (phénomène de la marée terrestre due à l'influence sur la valeur de la gravité de la position de la lune et du soleil). Elle dépend aussi de la latitude et de l'altitude du point de mesure ainsi que du relief. On compare la valeur de la gravité en différents points d'un réseau maillé à celle d'un point de référence appelé base. Les mesures sont toutes ramenées à la même altitude, corrigées des variations temporelles, de l'effet de la latitude et du relief. On calcule ainsi « l'anomalie de Bouguer » :

$$A = g - (g_0 - C.z - T)$$

Avec :

$g$  : la gravité au point courant,

$g_0$  : gravité à la base.

$C$  : constante,

$z$  : différence d'altitude entre le point courant et la base,

$T$  : est la correction due au relief.

La constante  $C$  vaut :  $C = 3.10^{-5} \cdot 2\pi G d$  (en unités SI).

Où  $d$  est la masse volumique des terrains de surface qu'il convient d'estimer au mieux,  $G$  étant la constante universelle de gravitation ( $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$ ). Le terme indépendant de la densité correspond à la correction dite «à l'air libre » (la gravité diminue lorsque l'altitude augmente, parce que l'on s'éloigne des masses qui en sont la source), le terme dépendant de la densité compense partiellement ce phénomène, il s'agit de la correction dite de «plateau», qui tient compte de la présence d'une lame de matière entre l'altitude de référence et celle du point courant.

La correction  $T$  de relief corrige le fait que cette dernière lame de matière présente en réalité une épaisseur variable, un relief. Son calcul est analytique et il existe des logiciels permettant de l'effectuer. Dans la formule précédente, les variations temporelles de  $g$  dues à la marée ou à la dérive de l'appareil sont déjà prises en compte et évaluées expérimentalement grâce à des mesures périodiques à la base avec une période inférieure à 1 h.

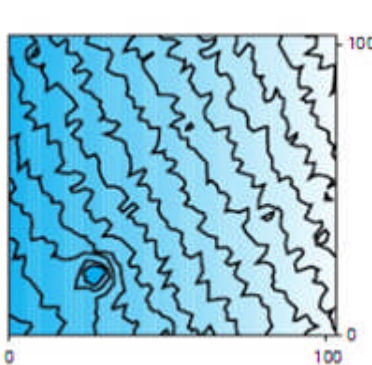
- La formule précédente de l'anomalie de Bouguer, avec la signification des termes que l'on vient de donner, n'est pas la formule rigoureuse de la gravimétrie en général mais celle qui est utilisée pour la reconnaissance en génie civil. Dans sa définition rigoureuse,  $g_0$  est une valeur théorique sur un ellipsoïde de référence dont l'altitude est zéro par définition.  $z$  est alors l'altitude

du point de mesure par rapport à l'ellipsoïde de référence. En génie civil, la taille des surfaces explorées est suffisamment faible pour que l'effet des variations de latitude soit négligeable et il vaut mieux prendre l'altitude de référence à la base pour que les corrections soient faibles.

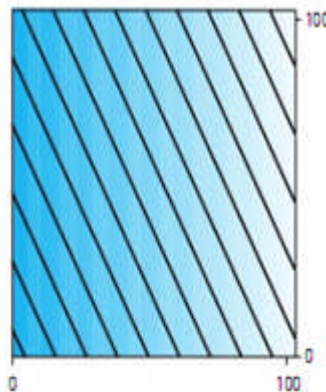
La carte de l'anomalie de Bouguer est le document qui résulte d'une campagne de mesures (figure 2.26). Remarquons au passage que les mesures ne se résument pas à celle de la gravité mais qu'il faut aussi connaître l'heure de passage aux différentes stations (avec une précision de l'ordre de la minute) et les altitudes relatives (avec une précision de l'ordre du centimètre).

L'anomalie de Bouguer (figure 2.26a) présente des variations de grandes longueurs d'onde dues à des phénomènes géologiques régionaux et profonds et des variations à petites longueurs d'ondes dues à des phénomènes locaux et peu profonds. Le premier type de variation est l'anomalie régionale (figure 2.26b) et n'intéresse pas en principe la reconnaissance en génie civil.

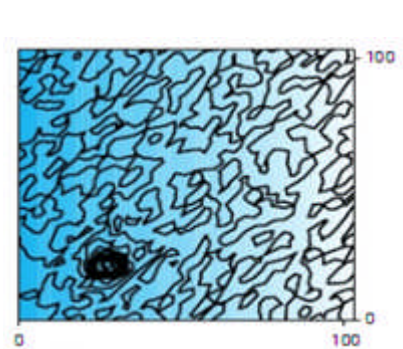
L'anomalie résiduelle (figure 2.26c) est la différence entre l'anomalie de Bouguer et l'anomalie régionale. C'est elle qu'il faut interpréter.



**Figure 2.26a :** anomalie de Bouguer.



**Figure 2.26b :** anomalie régionale.



**Figure 2.26c :** anomalie résiduelle : différence entre l'anomalie de Bouguer et l'anomalie régionale.

Les courbes (en tracé ondulé) représentent les courbes d'égale valeur d'anomalie, correspondant aux variations relevées en surface. Les ondulations donnent une idée de l'erreur de mesure. La zone arrondie foncée résulte de la présence d'une cavité souterraine à son aplomb.

Les différents grisés donnent les variations régionales liées à la géologie profonde.

### III.4.1 Microgravimétrie

C'est la seule technique de gravimétrie utilisée en génie civil. D'autres techniques existent pour d'autres domaines d'application de la géophysique.

#### Domaine d'application

La méthode gravimétrique est certainement la méthode géophysique la moins perturbée par les bruits électromagnétiques, électrique, magnétique ou encore par le trafic automobile si on la compare à d'autres méthodes géophysiques (Nozaki et Kanemori, 1996). C'est une méthode non destructive qui s'adapte particulièrement bien en milieu urbain. L'interprétation des mesures de pesanteur acquises à la surface du sol avec une grande résolution, permet de modéliser la structure du sous-sol, c'est-à-dire de situer en profondeur de l'interface terrains meubles – molasse. Et de répondre ainsi aux besoins des ingénieurs civils en leur donnant la profondeur du socle tertiaire avec une précision de quelques mètres voire de 1 à 2 mètres. Ainsi lorsqu'il s'agit de déterminer un modèle géologique avec la meilleure précision possible, nous appliquons la méthode de la microgravimétrie où les mesures sont établies avec une résolution de 5 millièmes de milligals (5mGal) ce qui représente la 500 millionième partie de g (accélération terrestre). Dans ce cas, l'instrument utilisé est un microgravimètre ; La microgravimétrie en milieu urbain implique de corriger avec soin les perturbations gravifiques sur la mesure de la pesanteur dues aux effets de la topographie, des bâtiments, des caves et de l'infrastructure des réseaux de distribution (Yule et al., 1998) afin d'isoler l'effet gravifique dû exclusivement à l'épaisseur du remplissage des terrains meubles.

A part l'effet de la topographie, la méthode standard de la gravimétrie ne requiert pas ces nouvelles corrections, aussi la microgravimétrie ne s'applique-t-elle que sur des zones restreintes, telles que des travaux de génie civil ou minier, car la densité d'implantation des stations de mesure doit être très élevée pour assurer la meilleure continuité du phénomène mesuré, ce qui est obtenu avec une équidistance de quelques mètres à une vingtaine de mètres.

En génie civil, la microgravimétrie sert à rechercher des cavités souterraines qu'elles soient d'origine naturelle (cavités karstiques principalement) ou artificielles (anciennes carrières souterraines, anciennes exploitations minières, caves, citernes, galeries de drainage ou d'alimentation en eau...). Les cavités sont soit remplies d'air, soit plus ou moins remblayées ou noyées. Dans ces deux derniers cas, elles sont plus difficiles à détecter que s'il s'agit de vides francs.

## Principe de base

La méthode de prospection microgravimétrique a pour objet de mesurer, à l'aide d'un microgravimètre, les variations relatives de la composante verticale de l'accélération de la pesanteur. Elle consiste à mettre en évidence les déficits de masse existant dans le sol qui se traduisent en surface par une diminution locale de la valeur du champ de pesanteur.

Le principe de la méthode de prospection gravimétrique repose sur l'application de la loi de Newton de l'attraction universelle :

$$F = (G m_1 m_2) / d^2$$

Le champ de gravité terrestre,  $g$ , en un point donné dépend de la répartition de la densité dans l'espace. Ainsi, la mesure de la valeur relative de la gravité à la surface du sol permet d'établir la répartition des densités dans le sous-sol.

Elle est préconisée pour mettre en évidence des vides d'origine naturelle ou anthropique, elle peut aussi être utilisée afin de révéler des anomalies de densité positive (minier, hydrothermalisme).

## Résultat attendu

Le résultat d'une campagne de microgravimétrie est une carte de l'anomalie de Bouguer. Cette carte sert à établir l'anomalie régionale qui, retranchée de l'anomalie de Bouguer, donne l'anomalie résiduelle. L'interprétation consiste alors à identifier les anomalies et à en déduire l'existence possible de cavités dont on peut calculer, moyennant des hypothèses sur les contrastes de densité, le volume et la profondeur maximale. Ces informations sont alors utilisées pour préconiser l'emplacement de sondages mécaniques destinés à découvrir effectivement les cavités. Certaines anomalies sont positives; elles ne correspondent naturellement pas à des cavités souterraines. Il peut pourtant être utile de les contrôler par forage car, le but de la reconnaissance étant toujours d'affiner le modèle géologique du site, il convient d'expliquer les anomalies positives. L'information qu'on obtient grâce aux forages permet aussi d'évaluer le «bruit géologique », c'est-à-dire les fluctuations de la gravité dues aux variations des matériaux à faible profondeur dont l'influence sur l'anomalie résiduelle peut brouiller le signal dû aux cavités.

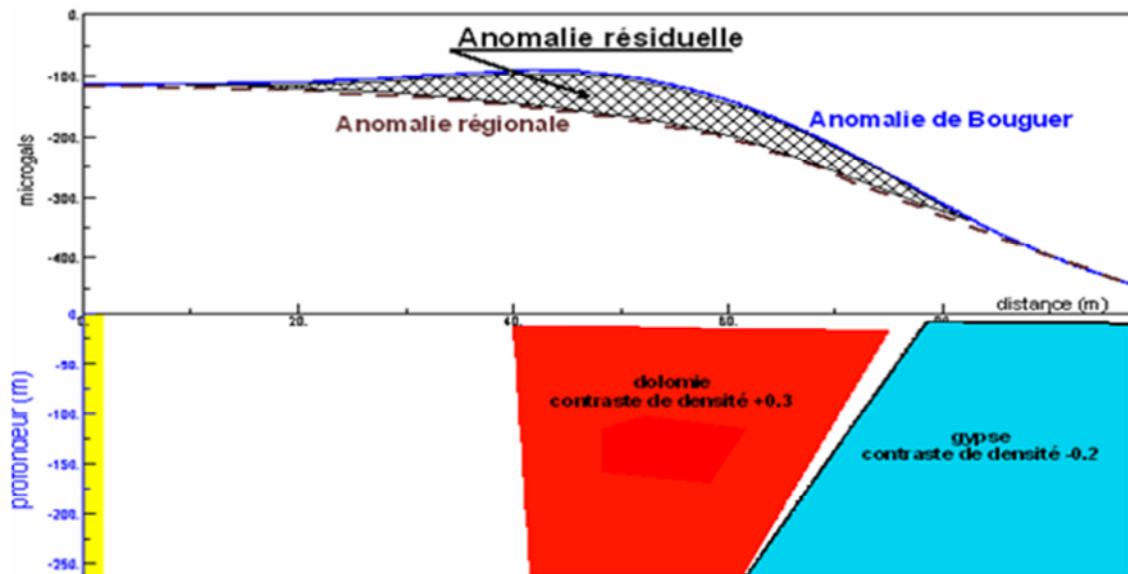


Figure 2.27 : Carte de l'anomalie de Bouguer.

#### IV. Choix des méthodes à adopter

Il n'y a pas de règles absolues dans le choix des méthodes à adopter, car les problèmes qui se posent dans la nature ne sont d'une part, jamais simples, et d'autre part jamais suffisamment bien définis en ce qui concerne la succession la nature, les constantes physiques des roches du sous-sol la stabilité ou la linéarité des paramètres. En outre, les structures que l'on cherche à déceler ou à préciser s'écartent toujours plus ou moins des types simplifiés classiques (modèle théorique ou "expérimental").

A priori, il faudrait adopter la méthode pour laquelle la caractéristique physique est la plus différenciée d'une roche à l'autre; la méthode gravimétrique devrait, réussir sur des formations de densités très différentes les unes des autres. Mais ce critère est trop vague pour être utilisable réellement.

Dans la pratique, le choix des méthodes géophysiques à adopter s'appuie en général, sur d'autres considérations liées, en dehors de certaines conditions matérielles indépendantes du sous-sol, aux possibilités physiques des diverses méthodes devant les problèmes géologiques posés, et à la recherche du meilleur rendement économique possible dans un cadre budgétaire donné.

## Références bibliographiques :

1. Bièvre G., Maurin P., 2002. Evaluation d'un radar géologique sur le site - test géophysique du LCPC à Nantes (France). Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées. pp.73-85.
2. Bosch F; Millier I., 2007. Nouveau développement dans la prospection géophysique électromagnétique. Le Very Low Frequency Electromagnetics - Gradient (VLF-EM-Grad), facilitant la cartographie des zones sensibles dans l'Epikarst et dans les aquifères fissurés.
3. Bosch F., 2002. Shallow depth karst structure imaging with the Very Low Frequency – Electromagnetics Gradient Method (VLF EM GRAD). Thèse Université de Neuchâtel, Centre d'hydrogéologie.
4. Fauchard C., Pothérat P., 2004. Détection des cavités souterraines par méthodes géophysiques. Guide technique. Techniques et méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées.
5. Georges B, 1987. Reconnaissance rapide de projets de tranchées par radio-magnétotellurique. Bulletin Liaison Laboratoire des Ponts et Chaussées. pp. 85-91.
6. Glissements de terrain et zones instables : Apports de la géophysique: Méthodes sismiques [en ligne]. Disponible sur <[http://www.risknat.org/projets/riskhydrogeo/docs/guide\\_pratique/Acivite1\\_Ateliers/Presentations%20Atelier1/A1P11-Geophysique-Jenny.pdf](http://www.risknat.org/projets/riskhydrogeo/docs/guide_pratique/Acivite1_Ateliers/Presentations%20Atelier1/A1P11-Geophysique-Jenny.pdf)> consulté le (02/01/2012).
7. Granda París T., Madrid Contreras A., Granda Sanz A. Méthodes Géophysiques Appliquées aux Problèmes Géotechniques en Milieu Urbain : Tomographie Sismique Cross-hole, Sismique Passive et Sismique Parallèle. [en ligne]. Disponible sur : <http://www.igt-geofisica.com/publicaciones/PUBLISH/PublicacionTGP.pdf> (consulté le 29/11/2011).
8. Microgravimétrie [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.arkogeos.fr/include/images/doc/microgravimetrie.pdf>> consulté le (21/01/2012).
9. Lagabriele R., 2007. Géophysique appliquée au génie civil. Rapports des laboratoires des ponts et chaussées.
10. La qualité en géophysique appliquée [en ligne]. Disponible sur : <[http://www.geophy.eu/EDG/edg\\_fr.nsf/site/Methodes-et-references.Methodes](http://www.geophy.eu/EDG/edg_fr.nsf/site/Methodes-et-references.Methodes)> consulté le (02/01/2012).
11. La sismique haute résolution [en ligne]. Disponible sur <<http://www.wgeosoft.ch/Acquisition/HR-seismic/Sismique-HR.pdf>> consulté le

(02/01/2012).

12. Les Méthodes Géophysiques RF-EM et VLF-EM GRAD ; Prospection géologique et hydrogéologique, sites pollués [en ligne]. Disponible sur <<http://www.hydrosol.ch/rfem.pdf> > consulté le (02/01/2012).
13. La géophysique pour les géologues tome 1 : les méthodes électriques [en ligne]. Disponible sur : < <http://www.umc.edu.dz/vf/images/cours/geophysique-tome%201.pdf> > consulté le (08/01/2012).
14. La géophysique pour les géologues tome 3 : les méthodes gravimétriques [en ligne]. Disponible sur : < <http://www.umc.edu.dz/vf/images/cours/geophysique%20tome%203.pdf> > consulté le (08/01/2012).
15. Laurent M., 2004. Modélisation directe et inverse en prospection électrique sur des structures 3D complexes par la méthode des éléments finis. Thèse de doctorat en cotutelle. Lausanne.
16. Magnin O., Bertrand Y., 2005. Guide sismique réfraction. Les cahiers de l'AGAP n°2. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
17. Le métro M2 de Lausanne : site exemplaire d'une application de microgravimétrie urbaine [en ligne]. Disponible sur <<http://www.unil.ch/webdav/site/gse/shared/recherche/microgravimetrie/microgravimetrie3.pdf>> Consulté le : 12/02/2012.
18. Reconnaissance Géophysique [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.sisyphe.upmc.fr/~tabbagh/cours/recongeophy.pdf>> (consulté le 08 /12/2011).
19. Sismique réfraction [en ligne]. Disponible sur <[http://www.arkogeos.fr/include/images/doc/sismique\\_refraction.pdf](http://www.arkogeos.fr/include/images/doc/sismique_refraction.pdf) > consulté le (02/01/2012).
20. Stiefelwagen W. (1998). Radio Frequency Electromagnetics (RF-EM): Kontinuierlich messendes Breitband-VLF, erweitert auf hydrogeologische Problemstellungen. Thèse Université de Neuchâtel, Centre d'hydrogéologie.

## Chapitre 3

### Un outil numérique simple mais efficace pour la détermination de la vitesse en profondeur

#### I. Introduction et objectifs

Pour l'étude de la zone altérée (WZ), un programme de CVT est établi au démarrage de l'étude couvrant la totalité de la zone d'étude avec en générale une densité moyenne de 1CVT/8Km<sup>2</sup>, cette densité peut augmenter ou diminuer en fonction de la complexité de la surface et de la couche WZ.

Les carottages sont positionnés sur les lignes de géophone d'une façon homogène suivant un maillage régulier. Les CVT peuvent être décalés de quelques centaines de mètres par rapport à leurs emplacements théoriques en cas de problème d'accès (sommets des dunes, falaises, habitation,.....) ou des problèmes de forage (perte totale, éboulement du trou, ....).

Les CVT sont forés à l'aide de machine de forage puissante capable de forer jusqu'à 500 mètres en utilisant un compresseur à air en cas d'exploitation du CVT avec une sonde ou un système de circulation d'eau mélangé à une boue bentonitique poussé par une pompe dans le cas où le CVT est exécuté au moyen d'un hydrophone.

Pour l'interprétation des données de Carottage VT enregistrés : deux logiciels sont utilisés par Enageo : Uphole et le StarUphole, tous les deux sont venus avec des Labo WZ.

L'interprétation des CVT consiste en premier temps à une organisation des données par profondeur on leur affectant les numéros des enregistrements et les positions chanel, une fois les traces de toutes les cotes enregistrés rassemblés ensemble, nous procédant à pointer la première onde arrivée (première rupture), les temps brut obtenus sont corrigés pour les ramener à un offset zéro (la verticale) puis ils sont représentés en fonction de la profondeur pour avoir une courbe temps-profondeurs à partir duquel on peut tirer les vitesses longitudinales et les épaisseurs des différentes couches de la zone altérée ainsi que la vitesse de comblement (milieu rapide).

Sur terrain l'observateur qui se charge de l'enregistrement des CVT peut faire un aperçu de toutes les traces enregistrées dans le trou en utilisant l'interface du Labo WZ ce qui permet d'avoir une idée sur l'atteinte ou non du milieu consolidé. Ceci permettrait de proposer une prolongation immédiate du forage et éviter par conséquent une perte de temps inutile.

L'objet de ce chapitre est ainsi double : d'abord la maîtrise du logiciel et après son application à un cas réel.

## II. Uphole un outil numérique du terrain

### II.1 Description de logiciel

Cette section contient une description des éléments du menu Uphole et la procédure d'interprétation.

Le logiciel est composé de quatre (04) feuilles de travail pour la préparation des données qu'on appelle « worksheet » et de plusieurs utilitaires et fonctions pour la suite de l'interprétation.

La première feuille est réservée pour l'inscription des informations en relation avec le CVT : nom de l'étude, nom de la compagnie pétrolière, position du CVT, coordonnées du CVT, profondeur du forage, offset de tir.

La deuxième feuille est utilisée pour la définition des profondeurs à loguer et la réception automatique des temps brut du picking des traces ainsi que les temps corrigés qui sont calculés à l'extérieur du programme puis importés dans cette feuille.

La troisième et la quatrième feuille sont utilisées pour l'affectation des numéros d'enregistrement des channels aux profondeurs loguées.

Le reste de la procédure de l'interprétation est détaillé en bas.

#### Barre de menu :

Le menu du logiciel est défini comme suit :



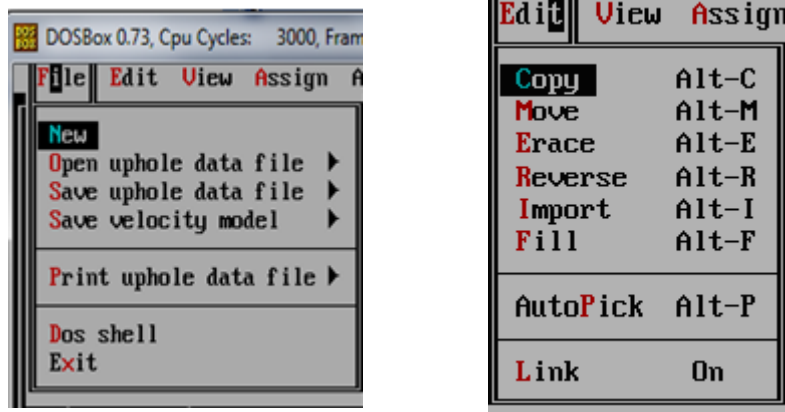
- **File**

**New** : pour ouvrir une nouvelle interprétation.

**Open uphole data file** : pour ouvrir une ancienne interprétation.

**Save uphole data file** : pour enregistrer une nouvelle interprétation ou une modification d'une ancienne interprétation.





**Save velocity model:** pour enregistrer le model de la vitesse.

**Print uphole data file:** pour l'impression des rapports de l'interprétation (header, traces pointées, model de WZ avec les vitesse et les épaisseurs des couches).

**Dos shell :** Pour basculer vers l'invité dos et pouvoir écrire des commandes dos.

**Exit :** pour sortir du programme.

- **Edit :**

**Copy, Move, Erace, Reverse:** Pour copier, déplacer, effacer et inverser les données contenues dans les différentes feuilles respectivement.

**Import :** Pour importer les temps corrigé contenues dans un fichier d'extension ASCII, calculé à l'extérieur du programme.

**Fill :** Pour remplir automatiquement la colonne des profondeurs.

**Auto pick :** Pointé automatique des temps de l'arriver de l'onde directe (première rupture du signal).

**Link :** Pour activer le lien entre les traces enregistrées et leurs numéros de file.

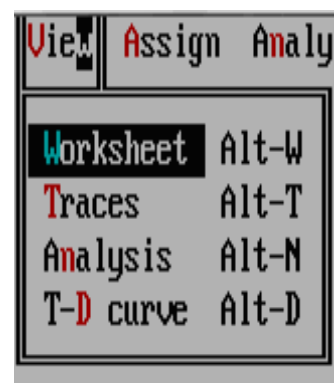
- **View**

Ce menu permet de basculer d'un utilitaire à un autre

**Worksheet :** utilitaire de préparation de données pour l'interprétation, il est composé de quatre feuilles et qu'on a déjà expliqué en haut.

**Traces :** utilitaire permettant de rassembler les traces correspondantes aux profondeurs loguées afin de pouvoir les pointés (picking). Cette dernière opération se fait trace par trace, le temps obtenu est placé en temps réel sur un plan temps-profondeur adjacent au plan des traces, dans le but d'avoir un contrôle global du picking.

**Analysis :** utilitaire permettant la visualisation d'une



interprétation déjà effectuée et sur laquelle nous pouvons apportés de nombreux réajustements (création de couches, suppression de couches, changement des épaisseurs et des vitesses des couches,....

**T-D curve** : pour indiquer la séparation des milieux.

- **Assign**

**Assigne** : commande qui permet d'affecter chaque file a sa profondeur correspondante dans la troisième feuille de l'utilitaire de préparation de données « worksheet).

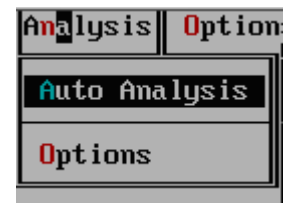
**Directory** : pour changer le répertoire de travail quand les données d'un CVT sont déplacées d'un ordinateur à un autre.



- **Analysis**

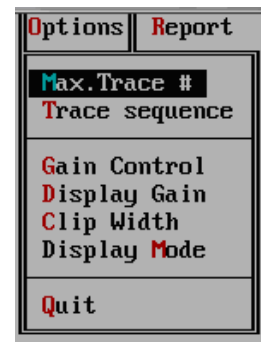
**Auto analysis** : lancer une analyse automatique qui se traduit par la détermination automatique des épaisseurs et des vitesses des couches de la WZ, par un tracé des dromochromes en joignant les points par la méthode des moindre carré.

**Option** : permet d'activer ou désactiver le passage des courbes par l'origine (zéro)



- **Options**

Elle permet de définir certains paramètres de représentation et de visualisation comme le nombre des traces, organisation des traces, le type de gain, le gain des traces, la troncature des traces et le mode de représentation.



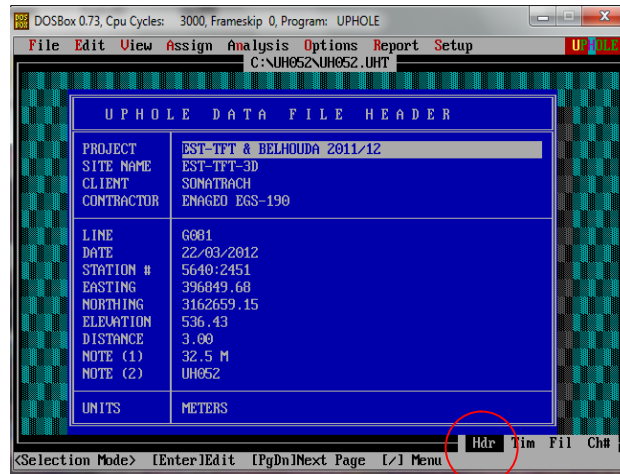
- **Report**

Pour l'établissement des rapports final pour l'impression (liste des traces pointé, header et log de l'interprétation qui contient les épaisseurs et les vitesses du model de WZ).

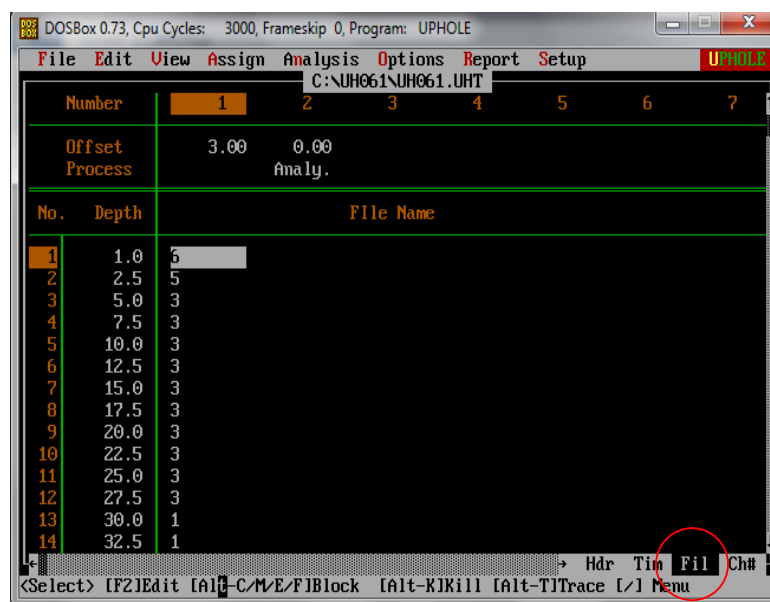


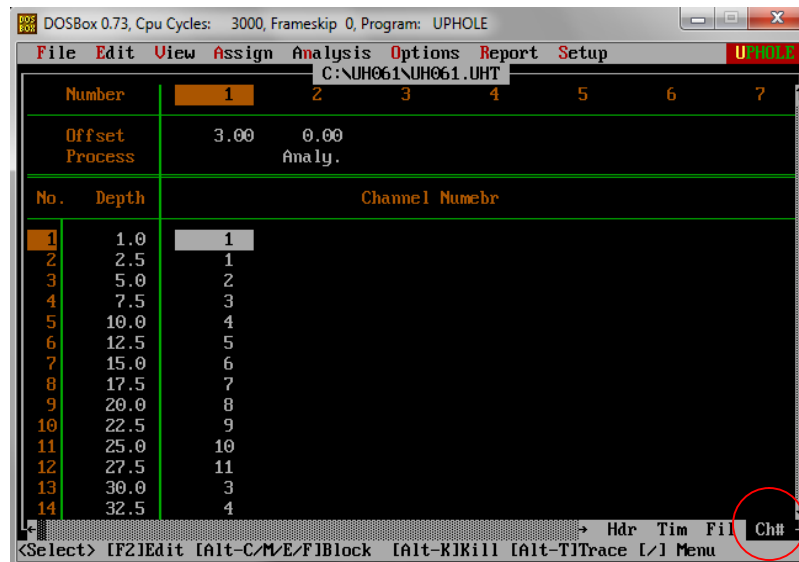
## II.2 Procédure de l'interprétation

Avant de commencer l'interprétation proprement dite on inscrit toutes les informations utiles concernant le CVT, dans la première feuille de l'utilitaire worksheet, qui est appelée le header du CVT, ces informations permettent de reconnaître le CVT on question et pouvoir le représenté sur un plan de position.



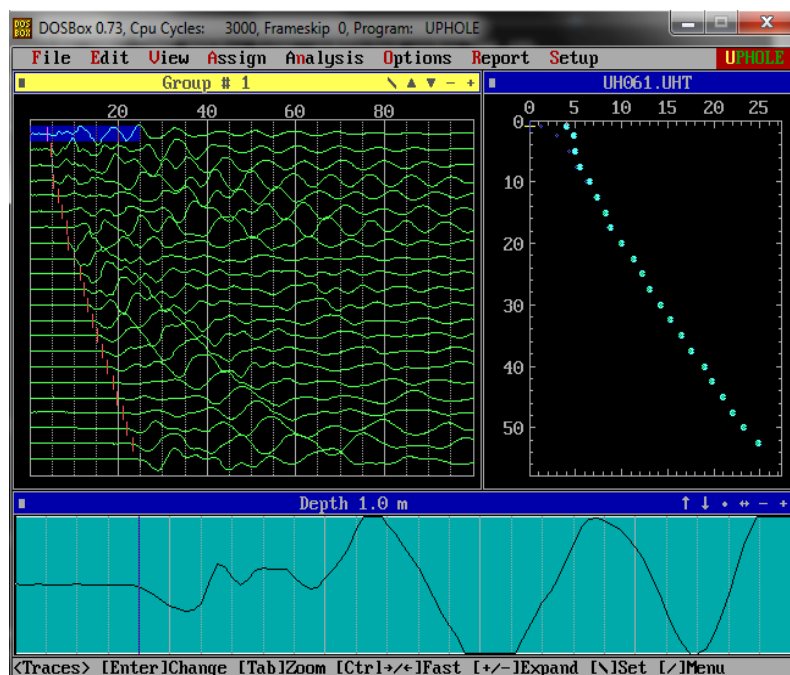
En commence l'interprétation par la définition des profondeurs ensuite en affectent à chaque profondeur son numéro d'enregistrement (file) et sa position Channel correspondante c'est-à-dire le numéro du récepteur (élément hydrophone) qui a permis d'enregistrer le signal de la trace ceci dans la troisième et la quatrième feuille du worksheet respectivement.





Après la préparation des données du CVT, on peut maintenant rassembler toutes les traces correspondantes aux profondeurs loguées à l'aide de l'utilitaire « trace » et qui permet aussi d'effectuer le picking et la visualisation des temps pointés sur un plan temps profondeur.

Les traces sont arrangées en fonction de la profondeur (en allant vers le bas du trou), la trace active de la liste est zoomée en bas de la fenêtre afin de pouvoir pointer la première rupture (onde directe). Le temps obtenu est positionné automatiquement sur le plan temps-profondeur à droite de la fenêtre et reporté en face de la profondeur correspondante dans la deuxième feuille de l'utilitaire « worksheet ».



Tous les temps obtenus lors du picking de l'onde directe (première arrivée) sont corrigés et ramenés à la verticale (offset zéro) par d'autre moyen à l'extérieur du programme Uphole,

puis importé directement à partir d'un fichier ASCII dans les colonnes de la deuxième feuille du worksheet.

| Number  | 1     | 2                    | 3     | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------|-------|----------------------|-------|---|---|---|---|
| Offset  | 3.00  | 0.00                 |       |   |   |   |   |
| Process |       | Analy.               |       |   |   |   |   |
| No.     | Depth | Time (milli-seconds) |       |   |   |   |   |
| 1       | 1.0   | 4.00                 | 1.30  |   |   |   |   |
| 2       | 2.5   | 4.80                 | 3.00  |   |   |   |   |
| 3       | 5.0   | 5.00                 | 4.30  |   |   |   |   |
| 4       | 7.5   | 5.50                 | 5.10  |   |   |   |   |
| 5       | 10.0  | 6.50                 | 6.20  |   |   |   |   |
| 6       | 12.5  | 7.30                 | 7.10  |   |   |   |   |
| 7       | 15.0  | 8.30                 | 8.10  |   |   |   |   |
| 8       | 17.5  | 8.80                 | 8.60  |   |   |   |   |
| 9       | 20.0  | 10.00                | 9.90  |   |   |   |   |
| 10      | 22.5  | 11.30                | 11.20 |   |   |   |   |
| 11      | 25.0  | 12.30                | 12.20 |   |   |   |   |
| 12      | 27.5  | 13.00                | 12.90 |   |   |   |   |
| 13      | 30.0  | 14.30                | 14.20 |   |   |   |   |
| 14      | 32.5  | 15.30                | 15.20 |   |   |   |   |

## Correction d'obliquité

La correction d'obliquité est une opération qui s'impose lors des interprétations des CVT, qui consiste à ramener les temps oblique (de la source située en surface vers l'hydrophone situé dans le trou) à des temps verticaux.

L'exploitation des CVT avec un offset est dû au fait qu'il est impossible de placer la source exactement sur la gueule de trou en raison des conditions terrain aux alentours de trou.

Afin d'éliminer l'effet de cette obliquité des coefficients sont calculés en fonction de l'offset et des profondeurs des récepteurs (hydrophone ou sonde) puis appliqués aux temps bruts obtenus à partir du peacking de l'onde directe pour les différentes profondeurs enregistrés.

$$\begin{aligned}
 t_{nc} &= D/V = (P^2 + \text{offset}^2)^{1/2} / V \\
 &= (P^2 + \text{offset}^2)^{1/2} P / V.P \\
 &= (P^2 + \text{offset}^2)^{1/2} t_c / P \\
 \Rightarrow t_c &= P / (P^2 + \text{offset}^2)^{1/2} t_{nc}
 \end{aligned}$$

Avec:

$t_c$  : temps corrigé de trajet de l'onde (temps à offset zéro).

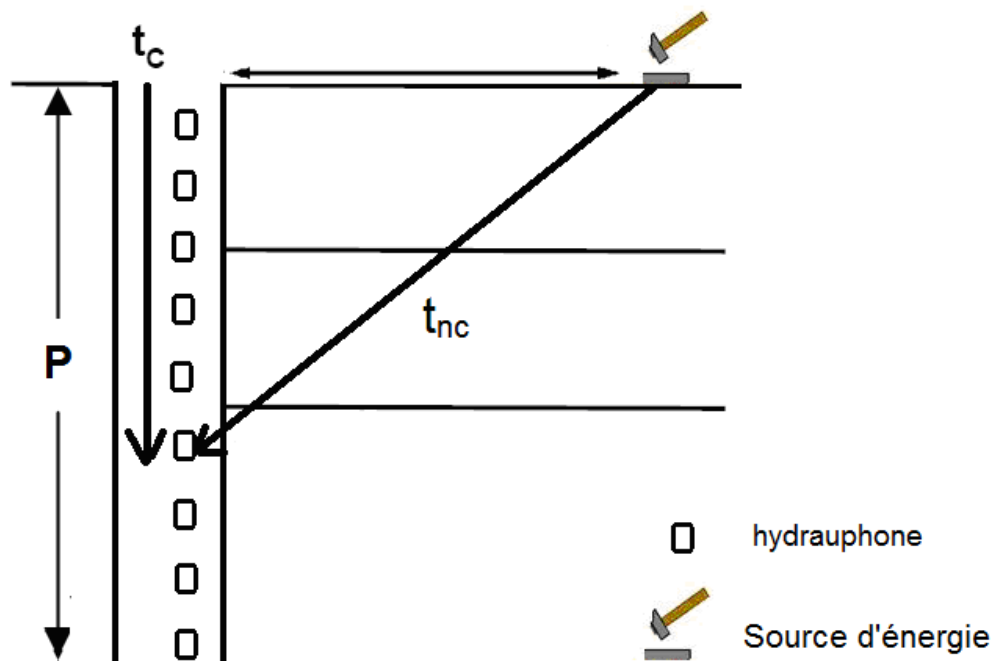
$t_{nc}$  : temps non corrigé de trajet de l'onde (source – récepteur).

D : la distance direct entre la source et l'hydrophone.

V : la vitesse de la propagation de l'onde longitudinale.

P : la profondeur de récepteur.

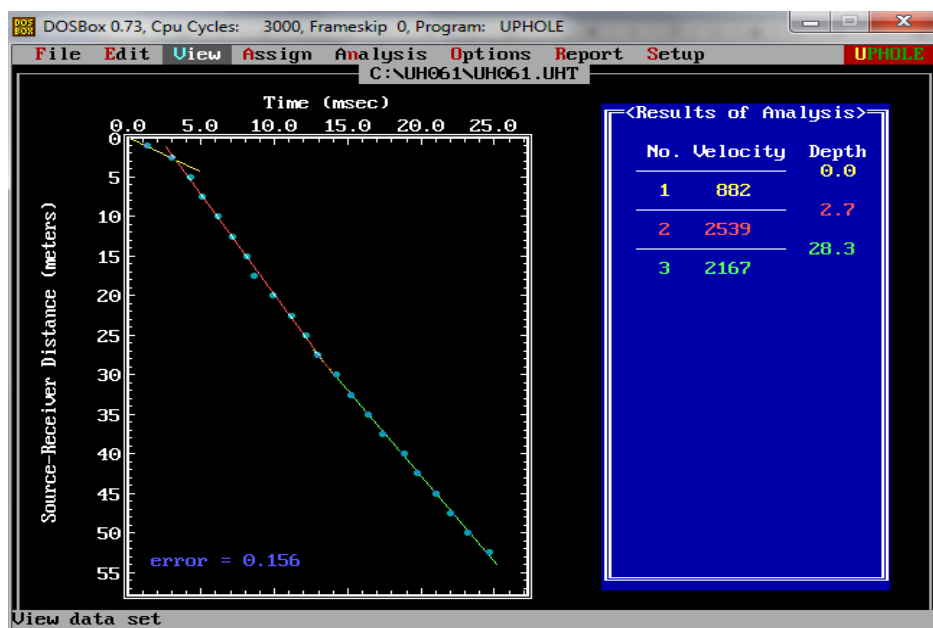
Offset: la distance entre la source et la gueule du trou.



### II.3 Affichage des résultats de l'interprétation

L'interprétation sera finalisée, une fois l'ensemble des traces sont pointées.

L'utilisateur peut cliquer sur le menu View pour afficher la courbe temps/profondeur (figure ci-dessous), à partir duquel on peut tirer les vitesses longitudinales et les épaisseurs des différentes couches de la zone altérée ainsi que la vitesse de comblement (milieu rapide).



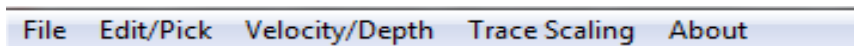
### III. StarUphole

#### III.1 Description de logiciel

Lors du lancement du programme, les menus suivants sont disponibles:

##### Barre de menu :

Le menu du logiciel est défini comme suit :

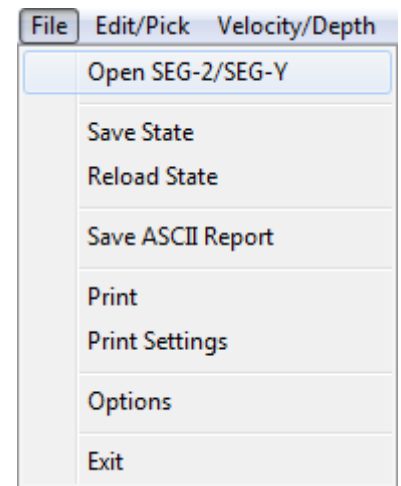


- **File**

Permet de charger un set de données de uphole, permet d'enregistrer ou de sauver le projet en court, ainsi que l'impression des résultats;

**Save State** : L'utilisateur peut sauver ses pointés et sa géométrie en utilisant l'option Save State dans le menu File.

Ainsi, il pourra recharger son travail en cours à l'aide de l'option **Load State** du même menu File.



**Save Ascii Report** : L'utilisateur peut sauver l'ensemble des informations (Géométrie, pointés, temps verticaux corrigés, interprétation, header) dans un fichier texte à l'aide de la fonction Save Ascii Report dans le menu File.

**Print et Print Settings** : L'utilisateur peut sauver imprimer sont rapport à l'aide du menu Print et Print Settings situés dans le menu File.

Le menu **Print Settings** permet d'ajuster les échelles pour la géométrie, pour le temps et pour l'amplitude des traces ainsi que la grille des temps.

Il permet également de choisir le mode d'affichage ainsi que la visualisation de l'ensemble des traces ou uniquement les traces choisies par l'utilisateur.

Le menu **Print** permet quant à lui de renseigner le header du rapport et d'imprimer ce dernier.

- **Edit/Pick**

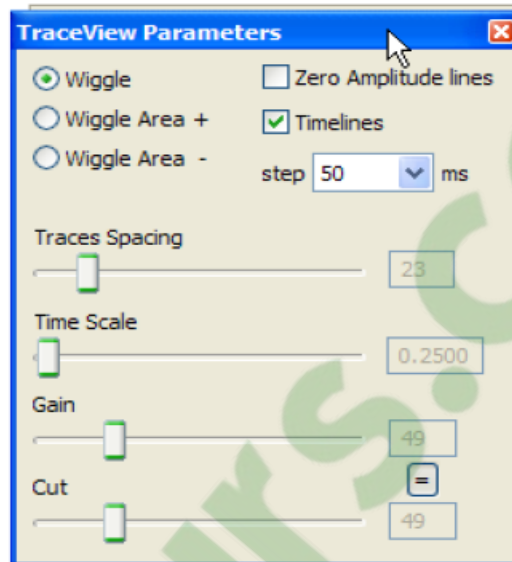
Permet d'afficher les données et de pointer les premières arrivées;

- **Velocity/Depth**

Permet de passer en mode temps / profondeurs et de finaliser l'interprétation des données;

- **Trace scaling**

Ouvre la fenêtre de dialogue gérant l'affichage des traces;



- **About**

Regroupe les informations sur le programme.



### III.2 Procédure de l'interprétation

L'interprétation commence par la commande **Menu File Open SEG-2/SEG-y** : Ce menu permet de charger des fichiers acquis lors des mesures uphole.

Open and Apply Simple Geometry

Num Receivers per Shot: 12

Receivers Spacing: 2.50 m

Channels Recording Order: ☒ Top-Down ☐ Bottom-Up

Source radial Distance: 5.00 m

Source Depth: 0.00 m (positive downward)

Shot Direction: ☒ Downward ☐ Upward

Overlap: 0 traces

Initial Depth: 0.00 m (positive downward)

for depth Reference = Top Receiver

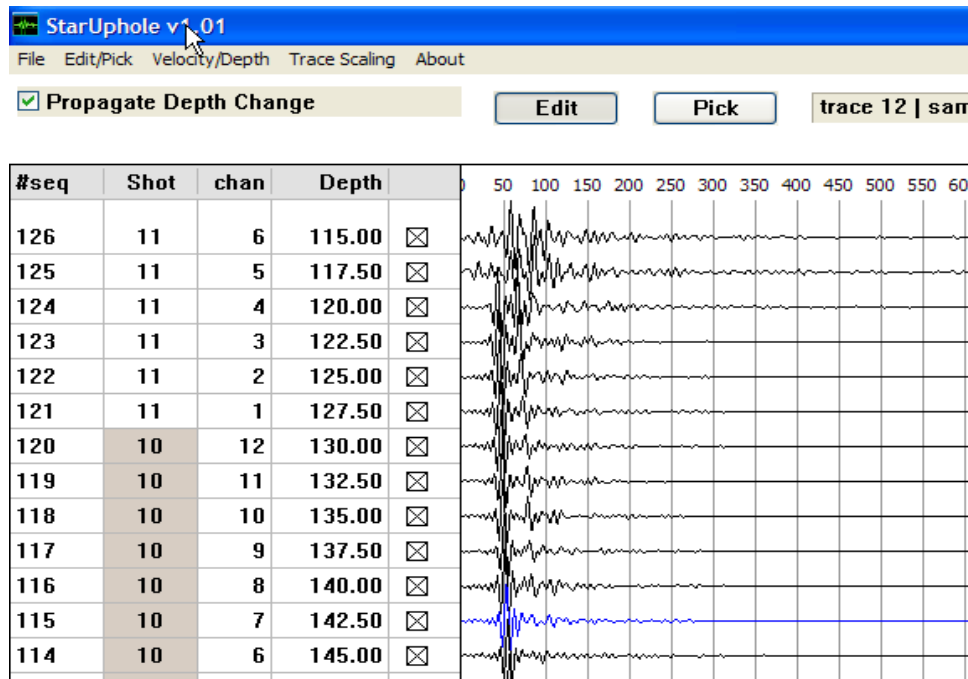
Buttons: Load SEG-Y, Load SEG-2, Cancel

L'utilisateur doit alors renseigner le logiciel avec les différentes valeurs:

- **Source radial Distance:** Valeur à rentrer en mètre par l'utilisateur indiquant la distance horizontale entre la tête de forage et le point source;
- **Source Depth:** Valeur à rentrer en mètre par l'utilisateur indiquant la profondeur du point source;
- **Number of receiver per shot:** Valeur à rentrer en nombre de capteur pour un enregistrement;
- **Receiver Spacing:** Valeur à rentrer en mètre correspondant à la distance verticale entre deux capteurs successifs pour un même tir ;
- **Channels recording order:** Ordre des capteurs pour un même tir. Si le capteur avec le plus petit numéro de channel est en haut, choisir Top-Down, si le capteur avec le plus petit numéro de channel est en bas dans le forage, choisir Bottom-Up.
- **Shot direction:** Ordre des différents tirs. Si le premier tir est enregistré avec les capteurs en haut du forage, choisir Downward, si le premier tir est enregistré avec les capteurs en bas du forage, choisir Upward.
- **Overlap:** Nombre de channel se recouvrant d'un tir au tir suivant.
- **Initial Depth:** Valeur à rentrer par l'utilisateur en mètre indiquant la profondeur du capteur de référence pour le premier tir.
- **Depth Reference:** Capteur de référence pour la profondeur. Si la profondeur du capteur supérieur est connu, choisir Top Receiver, si la profondeur du milieu du dispositif est connu, choisir Middle of Receiver Group, si la profondeur du capteur du fond est connu choisir Bottom of receiver.

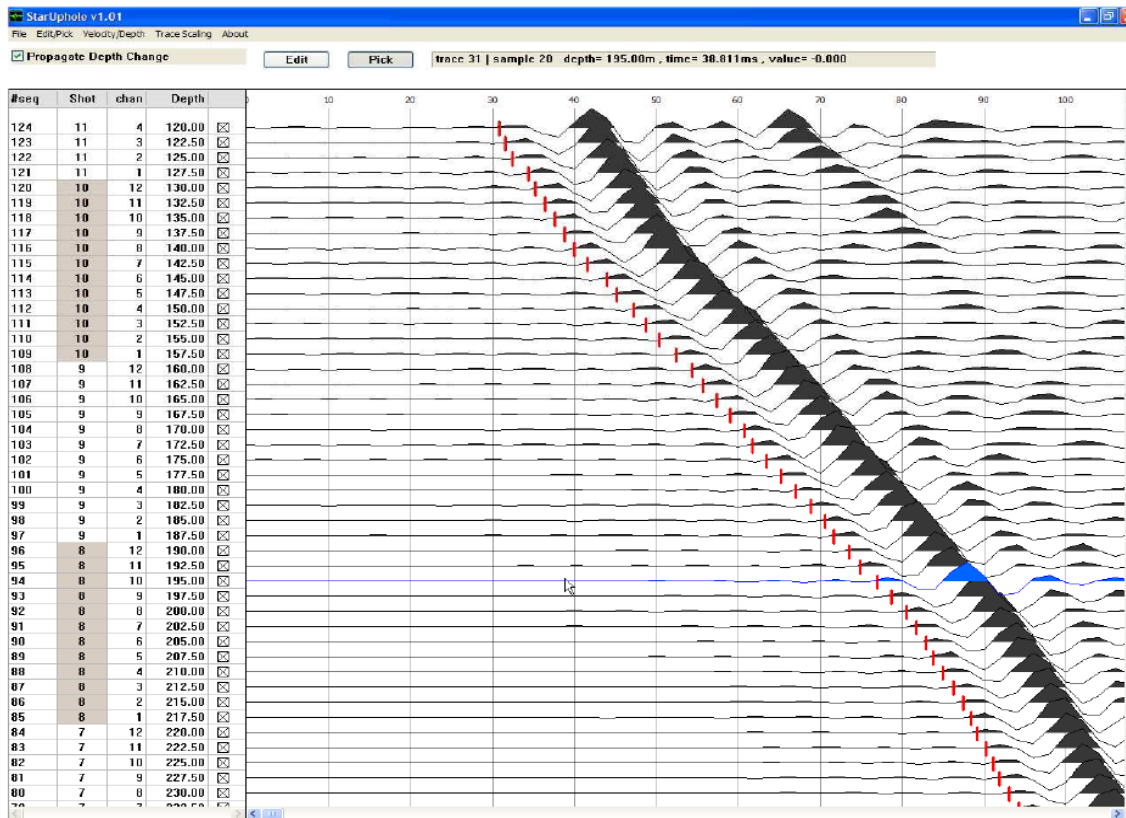
Une fois l'ensemble des champs renseignés, l'utilisateur peut importer une liste de fichier **SEG-2** ou une liste de fichier **SEG-Y** en cliquant sur les boutons **Load SEG-Y** ou **Load SEG2**.

Après la sélection des fichiers SEG-Y ou SEG-2, le logiciel affiche l'ensemble des traces pour tous les tirs avec la géométrie recalculée.

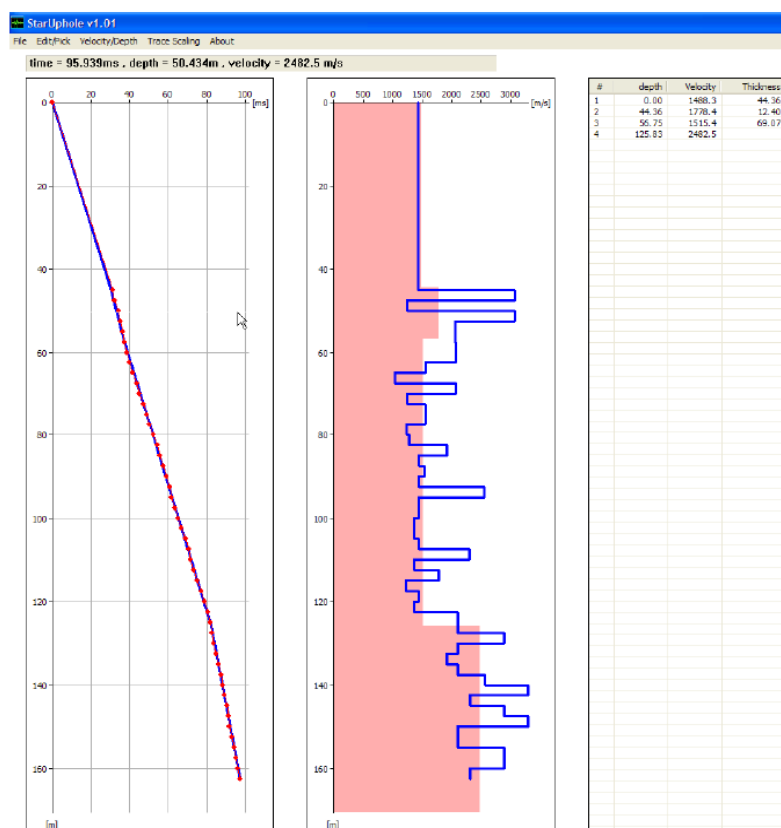


L'utilisateur peut alors :

- Directement pointer les premières arrivées,
- Corriger manuellement les profondeurs en cliquant sur les valeurs dans la colonne Depth (les traces sont automatiquement retriées lors des changements de profondeur),
- Changer les paramètres d'affichage à l'aide du menu Trace Scaling,
- Dans le mode Edit, l'utilisateur peut choisir les traces à conserver et les traces à éliminer,
- Dans le mode Pick, seules les traces choisies sont affichées.



Une fois l'ensemble des traces pointées, l'utilisateur peut cliquer sur le menu Velocity/Depth pour afficher la courbe temps/profondeur et finaliser l'interprétation en terme de couche WZ. Les couches sont choisies en cliquant sur la courbe temps profondeur et l'interprétation se crée automatiquement en tenant compte de l'offset de la source par rapport au puits. En bleu est également affiché la vitesse d'intervalle fournissant un control sur la qualité de l'acquisition des données et sur la qualité de l'opération de pointé.



Ce chapitre nous a permis d'acquérir une méthodologie et une maîtrise de logiciel Uphole et ses applications. Nous avons pu réaliser une application avec succès après plusieurs tentatives.

## Chapitre 4

### Interprétation théorique et pratique de la méthode dite CVT.

## I. Partie théorique

### I.1 Présentation

La zone des couches superficielles du sol est caractérisée par une grande variation des vitesses des ondes sismiques. Elle est connue sous le nom de (zone altérée) ou WZ (Weathered Zone). Son épaisseur est très variable: plusieurs dizaines de mètres dans le cas des dunes et moins d'un mètre lorsque des terrains durs affleurent à la surface du sol. Le signal sismique qu'on recueille lors d'une campagne sismique traverse deux fois cette zone, il est alors très perturbé.

Elle est caractérisée par :

- de faibles vitesses de propagation des ondes sismiques :  $350 < v < 1600$  m /s.
- un grand coefficient d'amortissement (l'amplitude d'une onde qui se propage dans La zone altérée (wz) décroît rapidement).
- la présence d'ondes élastiques parasites dues ou non à l'explosion. Celles dues à l'explosion (ground-roll) se propagent à la surface du sol ou à faible profondeur. Leurs fréquences sont généralement basses (5-20 HZ) et les filtres permettent de les éliminer en grande partie. Ces ondes parasites du ground-roll sont relativement plus importantes que les autres quand le tir a lieu à l'intérieur de la zone altérée.

### I.2 Utilisation de la méthode CVT en génie civil

Pour dimensionner des fondations ou assurer la stabilité des ouvrages, il est indispensable de connaître la structure et la nature du sol et du sous-sol.

Les données recueillies alimentent les études techniques, lesquelles déterminent les caractéristiques des ouvrages en fonction des capacités mécaniques du sol et du sous-sol et des contraintes des ouvrages.

**Les méthodes géophysiques** sont pratiquées pour étudier la nature géologique des premières couches du sol à l'échelle de plusieurs mètres. Non destructives, elles consistent à mesurer et à interpréter la propagation d'ondes dans le sous-sol.

Parmi ces méthodes géophysiques nous présentons la méthode Carottage Vitesse Temps (CVT), qui détermine les caractéristiques de la zone altérée.

## I.3 Présentation de la méthode CVT

La méthode CVT consiste à exécuter des mesures de vitesses dans un forage. On émet un signal à un niveau déterminé dans la surface du sol et on réceptionne ce signal au niveau des capteurs de signal placé dans un trou de forage (hydrophone ou sonde) de caractéristique bien déterminer soit d'une seul dimension (seul les ondes P sont captées) ou trois dimensions (les ondes P et S sont captées) et cela dépend des objectifs de l'opérateurs.

La détermination des temps de propagation des ondes P et S entre l'émission et les réceptions permet de calculer les vitesses des ondes P et S, connaissant les distances séparant les points émission-réception.

### I.3.1 Avantage de la méthode CVT

Cette méthode présente de nombreux avantages, parmi ces avantages elle nous permet de :

- déterminer la profondeur du socle bedrock donc la détermination de la limite entre la roche altérée et la roche saine, cette limite est primordiale lors de l'étude de glissement de terrain, car c'est elle qui va déterminer l'ampleur des travaux à effectuer. Elle intervient également pour le calcul de tassement des fondations.
- L'orsqu'on définit par la méthode de CVT la structure d'un ensemble géologique, les vitesses sismique 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. Les ingénieurs familiarisés avec ce paramètre ont appris à le manier avec la même aisance que d'autres paramètres géotechniques.

Il faut signaler que dans le cas des roches, les variations de la vitesse des ondes de cisaillement rend mieux compte des variations de la rigidité que celles des ondes de compression. Le tableau suivant donne un ordre de grandeur de la gamme des vitesses longitudinal des principales formations géologiques. On remarquera, pour les formations sans cohésion ou à cohésion faible, la différence importante existant entre les vitesses sismiques sous nappe et hors nappe. La capacité de cette méthode à détecter les limites entre formations dépend des contrastes de vitesse sismique. L'observation des valeurs du tableau fait apparaître que la localisation de certaines limites est très délicate, quelques fois impossible. Citons en particulier le cas d'alluvions propres sous nappe surmontant un calcaire fracturé, ces deux formations ayant des vitesses sismiques très proche de l'ordre de 2000m/s.

| Nature des terrains     | Vitesse des ondes P<br>[m/s] | Vitesse des ondes S<br>[m/s] | Masse volumique<br>[g/cm <sup>3</sup> ] |
|-------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|
| éboulis, terre végétale | 300-700                      | 100-300                      | 1.7-2.4                                 |
| sable sec               | 400-1200                     | 100-500                      | 1.5-1.7                                 |
| sable humide            | 1500-4000                    | 400-1200                     | 1.9-2.1                                 |
| argiles                 | 1100-2500                    | 200-800                      | 2.0-2.4                                 |
| marnes                  | 2000-3000                    | 750-1500                     | 2.1-2.6                                 |
| grès                    | 3000-4500                    | 1200-2800                    | 2.1-2.4                                 |
| calcaires               | 3500-6000                    | 2000-3300                    | 2.4-2.7                                 |
| craie                   | 2300-2600                    | 1100-1300                    | 1.8-2.3                                 |
| sel                     | 4500-5500                    | 2500-3100                    | 2.1-2.3                                 |
| anhydrite               | 4000-5500                    | 2200-3100                    | 2.9-3.0                                 |
| dolomie                 | 3500-6500                    | 1900-3600                    | 2.5-2.9                                 |
| granite                 | 4500-6000                    | 2500-3300                    | 2.5-2.7                                 |
| basalte                 | 5000-6000                    | 2800-3400                    | 2.7-3.1                                 |
| charbon                 | 2200-2700                    | 1000-1400                    | 1.3-1.8                                 |
| eau                     | 1450-1500                    | -                            | 1                                       |
| glace                   | 3400-3800                    | 1700-1900                    | 0.9                                     |
| huile                   | 1200-1250                    | -                            | 0.6-0.9                                 |

**Tableau 1 :** Vitesse sismique des principales formations géologiques tirée de l'ouvrage : guide technique de sismique réfraction.

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

1. **Roche compactes**, porosités inférieures à 3%, pas de fracturation, pas d'altération.

Granites, Gneiss, Dolomites et calcaires massifs, Marbres, Quartzites, Basaltes. Vitesses de 4000 à 6000 m/s.

2. **Les mêmes roches mais fracturées**, porosité totale de 3 à 10%, peu ou pas d'altération. Vitesses de 3000 à 4000 m/s.

3. **Roches poreuses**, porosité supérieure à 5% pas de fracturation, pas d'altération. Calcaires, Craies, Grès,... Vitesses 2500 à 4000 m/s.

4. **Les mêmes roches mais fracturées**, porosités supérieures à 8%, peu ou pas d'altération.

Vitesses 2000 à 3500 m/s.

5. **Roches altérées**, vitesses très variables selon le degré d'altération. Vitesses toujours inférieures aux vitesses dans les roches saines.

6. **Formations meubles**, soit non consolidées, soit déconsolidées par une profonde altération (surtout pour les roches à feldspaths abondants) Gravier, sables, silts, tuf, Moraines Altérites. Vitesses 300 à 2500 m/s.

➤ Calcul des modules dynamiques.

## **II. Partie pratique**

### **II.1 Présentation du bassin d'illizi**

Situé au sud-est algérien, le bassin d'illizi est l'une des provinces pétrolières les mieux explorées du Sahara oriental, avec le bassin de Berkine.

Il occupe la partie sud de la dépression Berkine-Illizi, entre les latitudes 29°00 et 26°30 nord, et les longitudes 6°00 et 10°00 est, couvrant une superficie d'environ 110000 km<sup>2</sup>

Plusieurs éléments structuraux viennent délimiter ce bassin (figure 4.1). On citera :

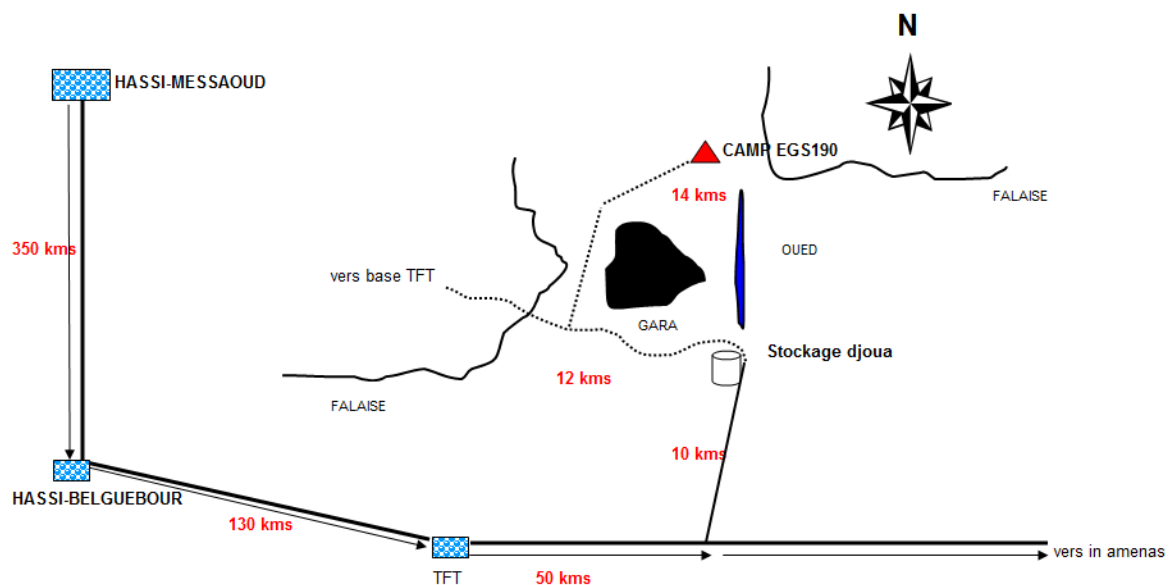
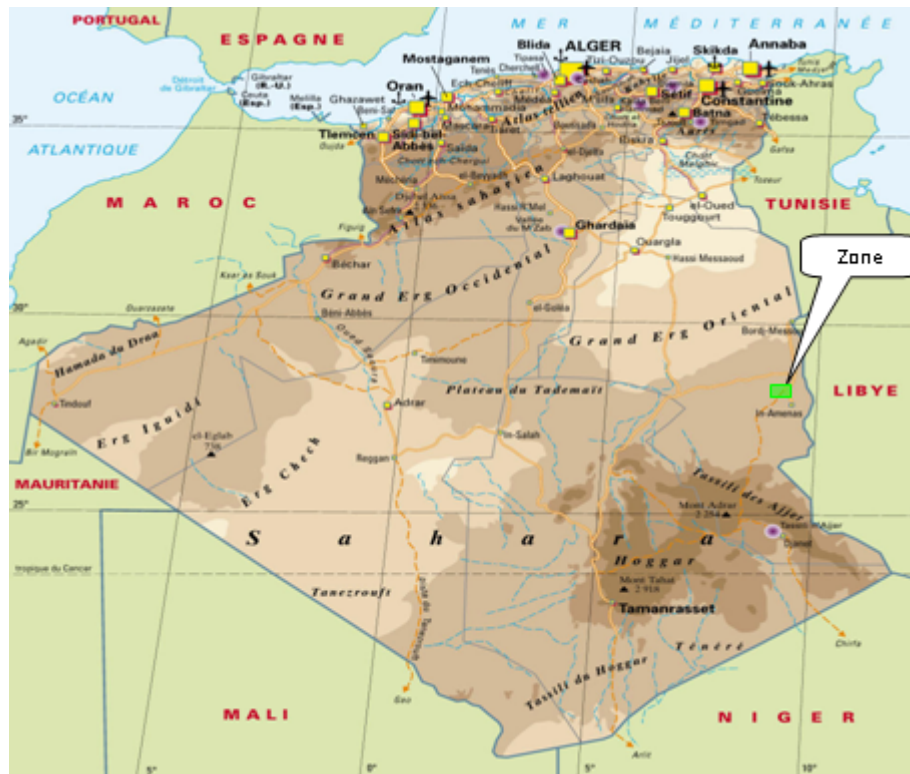
Au nord, le môle d'Ahara qui le sépare du bassin de Berkine, à l'est, le môle de Tihemboka, le séparant des bassins de Djado et Murzuk en Libye, à l'ouest, le môle d'Amguide-el-Biod et la voûte de Tin-Foué au nord-ouest, le séparant, respectivement, du bassin de Mouydir et Oued-mya, au sud, il est limité par le bouclier du Hoggar dans la région du Tassili n'Ajjers.

Du point de vue lithostratigraphique, la couverture sédimentaire, d'âge essentiellement paléozoïque, est moins importante que dans le bassin de Berkine. Néanmoins elle peut atteindre les 3500m d'épaisseur. Les dépôts d'âge primaire et secondaire affleurent au sud et à l'est du bassin, et du tertiaire au nord-ouest.

Du point de vue morphologique, on note l'existence de vastes zones dunaires, principalement l'erg d'Issouane au centre et de Bourarhet à l'est.

### **II.2 Situation Géographique**

La zone d'étude qui s'étale sur environ 964 km<sup>2</sup> est située dans le bloc 238b appartenant au bassin d'illizi et dépendant administrativement de la willaya d'illizi. Les travaux sont exécutés à partir d'un camp principal placé presque au milieu de l'étude.



### II.3 Nature du terrain

La zone d'étude Est-TFT est caractérisée par trois type de terrain distincts : la première partie situé au nord du programme caractérisée par un terrain rocailleux entrecoupé par la grande falaise, plat sur le coté haut et très accidenté sur le coté bas ou se trouve des garas et des cours d'eau rendant la circulation des véhicules et des personne très difficile et dangereuse. La deuxième partie est située au centre du programme, elle est caractérisée

par un terrain dunaire avec présence de garas. Quant à la troisième partie, elle est située au sud du programme et présente un terrain reg entièrement plat.

L'accès des véhicules sur certains endroits de la partie nord et centrale du programme est quasi impossible à cause des grandes dénivelées, quant à la circulation sur le reste du terrain elle est facile.

Aussi, l'existence de plusieurs pistes traversant la zone d'étude de l'Est vers l'Ouest et du Nord vers le Sud a facilité énormément la circulation des véhicules.

**Obstacles :** les principaux obstacles présent dans la région sont les grandes falaises, les garas, les routes goudronnées et les pistes.

Il existe plusieurs sondes avec un important nombre de pipes, manifold et station de stockage.

## II.4 Camp

Le camp principal de la mission qui était destiné pour conduire des travaux dans le désert est complètement mobile, mais il est resté sur place pendant toute la durée du projet Est-TFT.

Le camp était placé au Nord - Est à l'extrémité de la zone d'étude à coté d'une piste de forage afin de réduire les déplacements vers les lieux de travail sur terrain.

EGS 190 comporte un ensemble de roulottes (pour le personnel senior avec toutes les accommodations, ateliers et bureaux) et des tentes pour héberger les manœuvres. Le staff senior bénéficie aussi d'autres roulottes réservées pour la restauration, la cuisine et les sanitaires. Des constructions semi permanentes en brick ont été réalisées pour installer la cuisine junior, les toilettes juniors et senior et les douches juniors. Le poste de garde de la société de protection privé El Djanoub est construit lui aussi en brick.

Deux groupes électrogènes A 400-kVA alimentent alternativement (12 x 12) le camp en électricité en continuité (jour et nuit). De courtes coupures de courant sont observées chaque jour pour des raisons d'entretien.

Pour l'hébergement des agents de la société de gardiennage, un camp de toiles est installé séparément à 300 mètres du camp civil.

L'approvisionnement en eau industriel pour les différents besoins et en eau potable est assuré à partir de In Amenas en utilisant des citernes d'une capacité de 30000 litres. Le gasoil et l'essence sont obtenus à partir du terminal de distribution de Naftal à Hassi-messaoud est délivré à la mission d'une façon périodique par de grandes citernes, puis versé dans des citernes de grandes capacités pour le gasoil et dans une citerne mobile pour l'essence.

De la même façon, les consommables, la pièce de rechange et la bouffe sont acheminées par route à partir de la base d'Enageo à Hassi-messaoud. Les produits alimentaires périssables et congelés sont délivrés par camion frigorifique directement à la mission chaque semaine.

## II. Personnel

L'équipe EGS 190 est l'une des meilleurs équipe sismique E.NA.GEO possédant une très longue expérience, elle a travaillé continuellement dans différent endroit en Algérie et même à l'étranger.

Tous les employés (technique et soutiens) sont engagés par Enageo par des contrats permanent ou temporaire, à l'exception de quelques chauffeurs conduisant des véhicules légers ou des Bulldozers appartenant au privé (sous-traitance). La plus part des manœuvres sont recrutés à partir des villes les plus proches du périmètre de l'étude, la majorité d'entre eux ont déjà travaillé dans la sismique pendant de Olongues années et par conséquent cumulant une grande expérience dans le domaine.

## III. Procédure de mise en œuvre et Réalisation

### A- Equipe Forage

Cet échelon était dotée d'une machine de forage de type GEFCO en moyen état, capable de forer jusqu'à 400 mètres avant d'être renforcé par une deuxième machine de forage de même type dans le but d'accélérer les travaux CVT et éviter d'accusé du retard par rapport au labo réflexion.

Le programme de forage est constitué de 117 CVT positionnés tous sur les lignes de géophones et répartis suivant une densité de 1 Cvt/8.24km<sup>2</sup>, la distance entre les CVT dans la direction Inline et dans la direction Xline n'excède pas 3800 m et 4000 m respectivement. Des plates formes et des accès sont effectués au passage des bulldozers pour les CVT situés dans des endroits plus ou moins difficile.

Les travaux de forage ont débuté le 16/11/11 Durant ce mois de mars 2012, **1069 m** ont été forés et **925 m** ont été logués, soit l'équivalent de l'exécution de **23 CVT**.

Afin de déterminer la profondeur adéquate pour l'exploitation de ce programme CVT, un trou du programme Est-TFT a été foré à une grande profondeur afin d'avoir une bonne idée sur les caractéristiques de la WZ (épaisseur, vitesse, inversion).

Les profondeurs forées variaient en fonction de la position et de l'altitude de 45 à 128 m

L'équipe forage est conduite par un sondeur senior accompagné de quatre assistants en plus des chauffeurs des différents véhicules de soutien, qui comporte le camion porte GEFCO, le camion porte tiges et bentonites, le camion citerne d'eau et le véhicule de transport.

L'équipe forage a été renforcée d'une deuxième machine de forage ramenée d'une autre mission sismique, le deuxième l'échelon était incomplet (sans la citerne d'eau).

Le forage est accompli en moyen d'un jeu de lame 4"3/4, des tricônes (4"1/2, 4"3/4 et pastilles 4"3/4), un marteau fond de trou (en cas de terrain dur) et une boue bentonitique.

Une petite cuvette est creusée à l'aide des pelles pour chaque CVT, utilisée pour assurer la circulation de l'eau dans le trou (mélangé avec la boue) dans le but de cimenter ces parois et dégager les débris de forage. L'eau est déversée directement à partir de la citerne qui s'approvisionne à partir d'un puits d'eau situé au voisinage du camp.

Une fois le trou est foré à la profondeur désirée, la machine de forage reste sur place jusqu'à l'achèvement de l'enregistrement du CVT, afin de pouvoir remédier aux problèmes qui peuvent être rencontrés durant la procédure d'enregistrement, comme l'effondrement du trou ou l'impossibilité d'introduire l'hydrophone à la profondeur souhaitée.

À la fin de chaque exploitation d'un CVT, un effort supplémentaire est fourni pour le nettoyage de l'endroit du reste de la boue. La restauration du lieu par la suppression de la cuvette de forage et le bouchage du la gueule du trou sont effectués à la fin de l'étude par une équipe spéciale.

## **B- Enregistrement Labo WZ**

L'équipe carottage est dotée d'un Labo Geode ms300 24channels installé à l'arrière d'une Nissan station wagon, d'un Hydrophone en état moyen (12 éléments espacés à chaque 5 m ou 2.5m).

Pour la détermination des caractéristiques de la zone altérée, 117 CVT vont être enregistrés sur l'ensemble de l'étude.

La source d'énergie utilisée au départ était le marteau, qui servait à frapper une plaque métallique distant de 03 mètres de la gueule du trou (voir schéma ci-dessous), puis changer par un système de chute de poids confectionné au niveau de l'atelier mécanique, permettant la génération de plus d'énergie indispensable pour l'exploitation des CVT profonds.

Le TB est déclenché par un géophone placé sous la plaque de la source d'énergie au moment de la frappe manuelle du marteau par un manoeuvre.

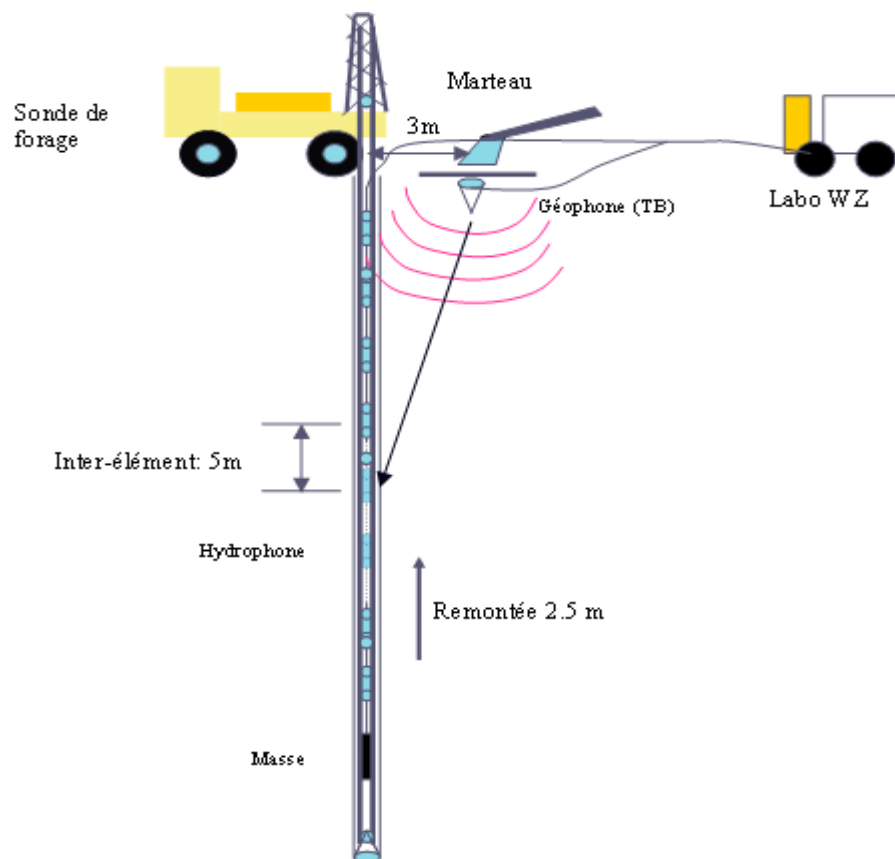
L'échantillonnage des profondeurs d'enregistrement des CVT est de 2,5 m, ajouter à cela la profondeur d'un mètre nécessaire pour le tracé de la première couche.

Les films obtenus parfois après plusieurs reprises pour certains CVT sont de qualité acceptable sur l'ensemble des profondeurs et les premières arrivées sont facilement pointables. Néanmoins, quelques CVT ont été refait pour mauvais enregistrement.

Pour renforcer la qualité des ruptures sur les traces des films WZ et réduire les bruits aléatoires, des sommations de tirs sont effectués sans déformer les traces enregistrées.

Les films sont enregistrés pour chaque tir dans des files contenant les données brutes et placées dans un flashdisk qu'on ramène au camp pour le traitement et l'interprétation.

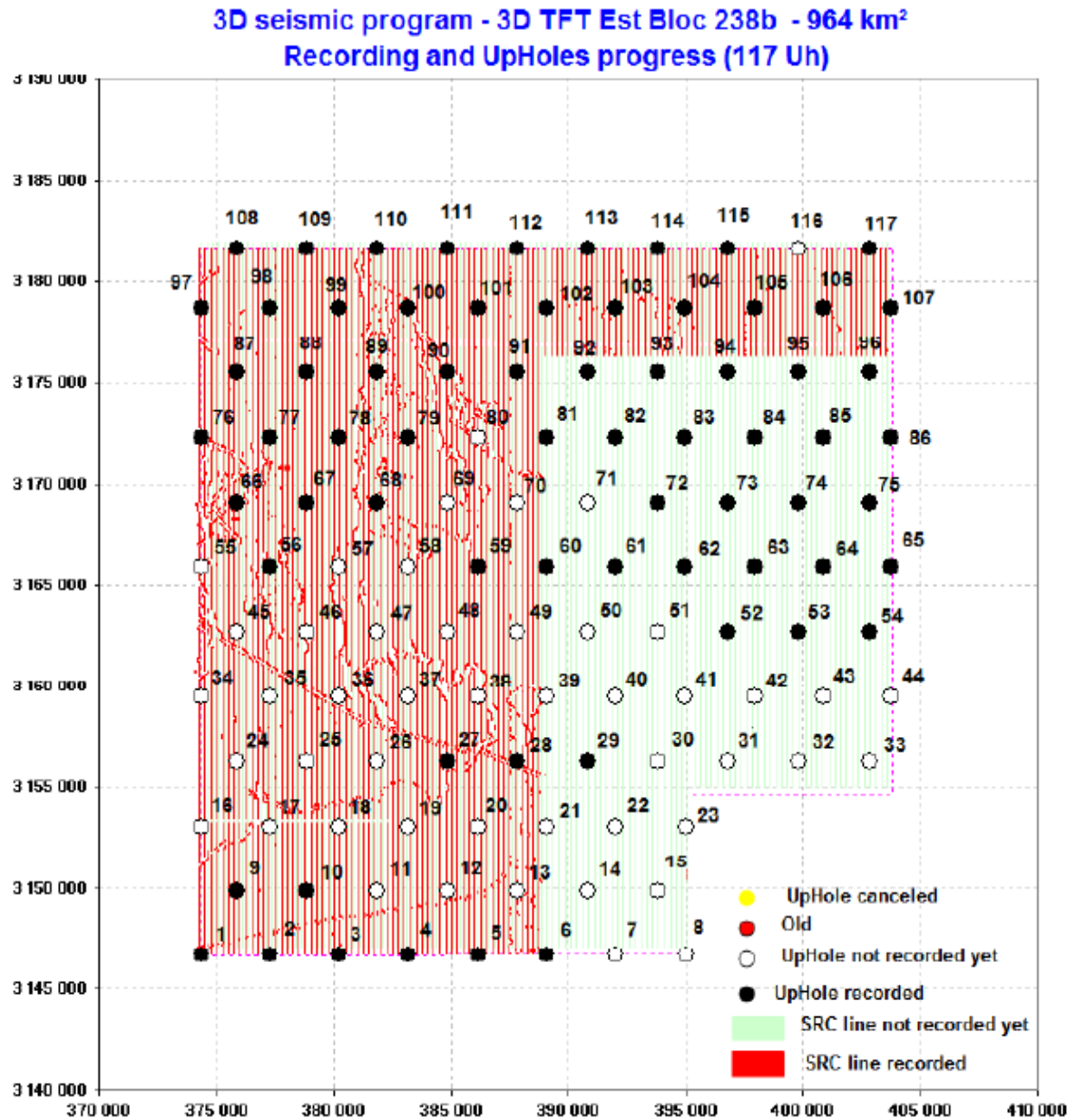
Le schéma du dispositif est présenté ci-dessous.



#### IV. Description des CVT réalisés

L'acquisition des données sismiques a été réalisée par l'Entreprise Nationale de GEO-physique (ENAGEO) pour le compte de la division exploration de la SONATRACH.

Un programme de 117 CVT a été réalisé Pour la détermination des caractéristiques de la zone altéré, les positions des CVT sont présentées comme suit dans la figure ci-dessous.



## V. Présentation des résultats

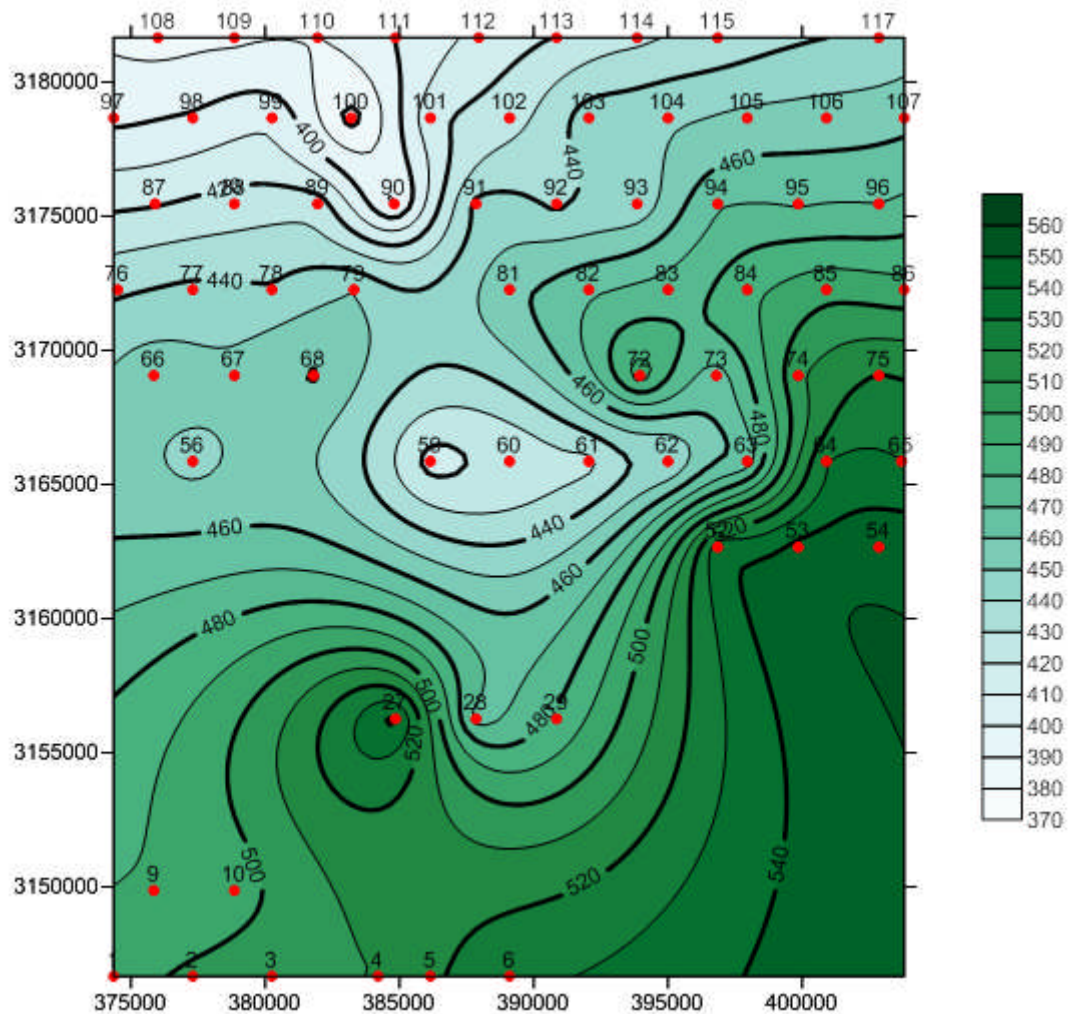
Le tableau suivant contient une synthèse des paramètres imposés et mesurés durant cette campagne.

Les résultats des CVT réalisés avant et durant ma durée de stage sont présentés ci-dessous

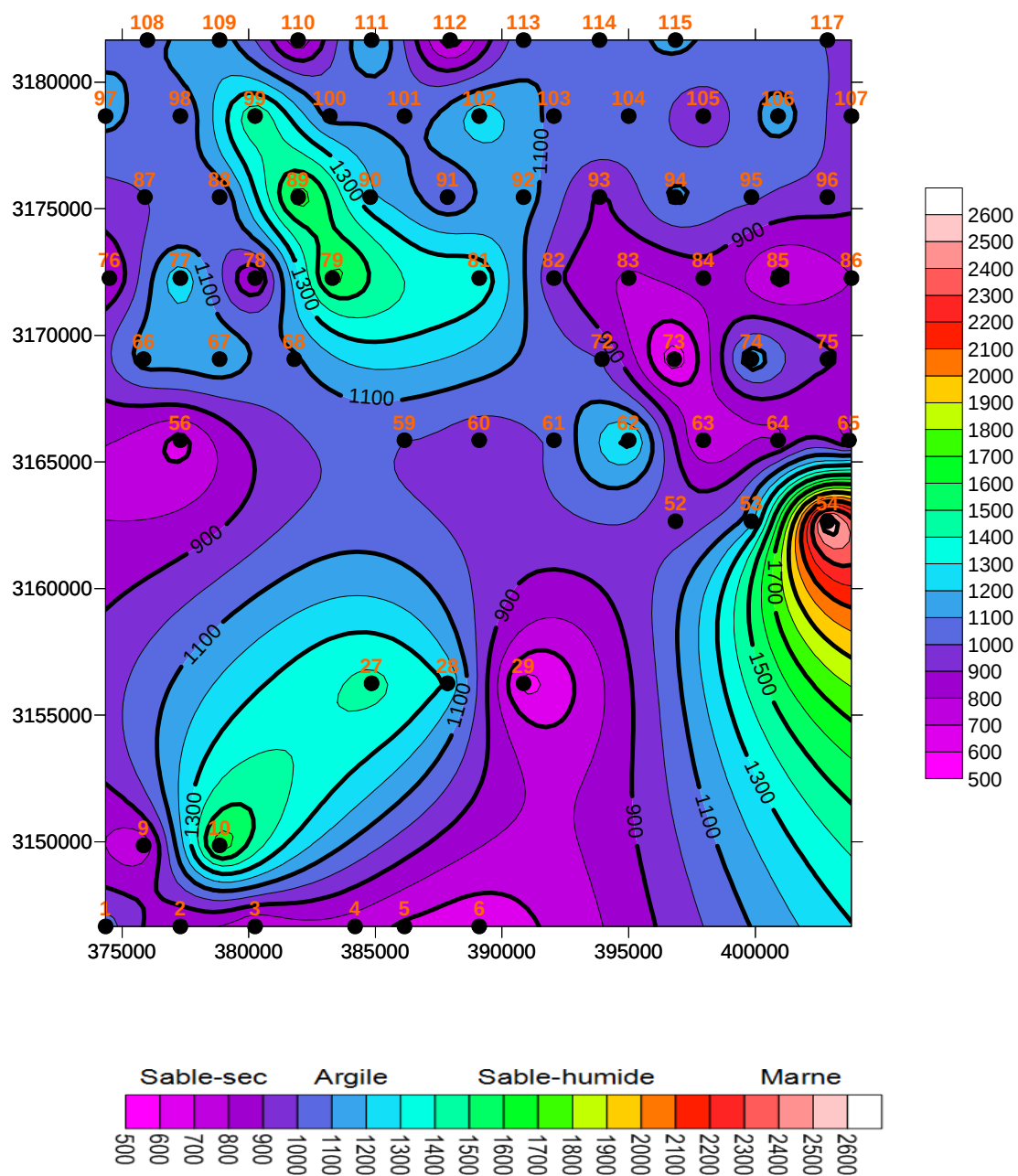
| Uph<br>Nb | RCV line | Flag<br>number | Clarke 1800 Coordinates |             |       | Drilling<br>Depth | Logging<br>depth | WZ features |      |      |      |      |      |     |     | Interpretation Results |            |          |     |
|-----------|----------|----------------|-------------------------|-------------|-------|-------------------|------------------|-------------|------|------|------|------|------|-----|-----|------------------------|------------|----------|-----|
|           |          |                | X                       | Y           | Z     |                   |                  | H0          | V0   | H1   | V1   | H2   | V2   | H3  | V3  | VC                     | Elev. B WZ | Epai. WZ | CST |
| 1         | G001     | 50002001       | 374 349.8               | 3 146 659.4 | 497.2 | 45.0              | 30.0             | 2.2         | 1057 | 8.4  | 1884 | 7    | 2948 | 3.9 | 915 | 2646                   | 475.69     | 21.50    | -43 |
| 2         | G001     | 50002060       | 377 299.7               | 3 146 659.3 | 501.9 | 45.0              | 30.0             | 2.2         | 789  |      |      |      |      |     |     | 1817                   | 499.67     | 2.20     | -43 |
| 3         | G001     | 50002119       | 380 249.7               | 3 146 659.4 | 508.0 | 50.0              | 35.0             | 2.3         | 682  | 10.4 | 1101 |      |      |     |     | 2040                   | 495.25     | 12.70    | -51 |
| 4         | G001     | 50002198       | 384 199.6               | 3 146 659.3 | 510.1 | 55.0              | 40.0             | 2.3         | 750  | 9.8  | 1173 |      |      |     |     | 2232                   | 498.00     | 12.10    | -51 |
| 5         | G001     | 50002237       | 386 149.6               | 3 146 659.4 | 518.1 | 53.0              | 35.0             | 2.5         | 682  | 5.9  | 1282 | 11.7 | 1692 |     |     | 2341                   | 497.95     | 20.10    | -54 |
| 6         | G001     | 50002296       | 389 099.7               | 3 146 659.3 | 528.5 | 53.0              | 40.0             | 2.8         | 625  | 11.6 | 1202 |      |      |     |     | 2350                   | 514.05     | 14.40    | -60 |
| 9         | G017     | 51282031       | 375 849.8               | 3 149 859.3 | 491.4 | 50.0              | 30.0             | 5           | 713  |      |      |      |      |     |     | 2426                   | 486.43     | 5.00     | -42 |
| 10        | G017     | 51282091       | 378 849.7               | 3 149 859.3 | 494.4 | 45.0              | 30.0             | 3.2         | 1687 |      |      |      |      |     |     | 2586                   | 491.16     | 3.20     | -38 |
| 27        | G049     | 53842211       | 384 849.7               | 3 156 259.2 | 543.1 | 55.0              | 40.0             | 22.1        | 1432 |      |      |      |      |     |     | 1830                   | 521.00     | 22.10    | -64 |
| 28        | G049     | 53842271       | 387 849.6               | 3 156 259.2 | 466.1 | 65.0              | 50.0             | 6.9         | 1296 |      |      |      |      |     |     | 2387                   | 459.19     | 6.90     | -29 |
| 29        | G049     | 53842331       | 390 849.8               | 3 156 259.4 | 481.9 | 125.0             | 110.0            | 2.6         | 563  |      |      |      |      |     |     | 2131                   | 479.28     | 2.60     | -36 |
| 52        | G081     | 56402451       | 396 849.7               | 3 162 659.2 | 536.4 | 36.0              | 32.5             | 2.6         | 937  | 9.5  | 2809 |      |      |     |     | 1734                   | 524.34     | 12.10    | -56 |
| 53        | G081     | 56402511       | 399 849.8               | 3 162 659.3 | 542.9 | 53.0              | 50.0             | 2.6         | 1154 | 8.7  | 3125 |      |      |     |     | 1711                   | 531.63     | 11.30    | -58 |
| 54        | G081     | 56402571       | 402 849.7               | 3 162 659.3 | 546.1 | 43.0              | 40.0             | 10.2        | 2615 | 7.2  | 1248 |      |      |     |     | 1697                   | 528.65     | 17.40    | -61 |
| 56        | G097     | 57682060       | 377 299.6               | 3 165 859.3 | 446.7 | 63.0              | 60.0             | 6.8         | 656  | 46.1 | 1506 |      |      |     |     | 2358                   | 393.81     | 52.90    | -39 |
| 59        | G097     | 57682237       | 386 149.5               | 3 165 859.2 | 415.9 | 50.0              | 47.5             | 3.4         | 1000 |      |      |      |      |     |     | 2327                   | 412.53     | 3.40     | -8  |
| 60        | G097     | 57682296       | 389 099.8               | 3 165 859.4 | 422.1 | 45.0              | 42.5             | 2.8         | 937  | 4.9  | 1429 |      |      |     |     | 2448                   | 414.37     | 7.70     | -12 |
| 61        | G097     | 57682355       | 392 049.7               | 3 165 859.3 | 427.6 | 55.0              | 52.5             | 2.8         | 1012 |      |      |      |      |     |     | 2369                   | 424.76     | 2.80     | -13 |
| 62        | G097     | 57682414       | 394 999.7               | 3 165 859.3 | 438.9 | 52.5              | 50.0             | 7.6         | 1345 |      |      |      |      |     |     | 2468                   | 431.33     | 7.60     | -18 |
| 63        | G097     | 57682473       | 397 949.7               | 3 165 859.3 | 463.6 | 50.0              | 47.5             | 11.1        | 697  |      |      |      |      |     |     | 2568                   | 452.48     | 11.10    | -37 |
| 64        | G097     | 57682532       | 400 899.7               | 3 165 859.3 | 529.9 | 52.5              | 50.0             | 2.3         | 789  |      |      |      |      |     |     | 1739                   | 527.61     | 2.30     | -54 |
| 65        | G097     | 57682532       | 403 699.7               | 3 165 859.2 | 530.0 | 50.0              | 47.5             | 2.3         | 789  |      |      |      |      |     |     | 1739                   | 527.66     | 2.30     | -54 |
| 66        | G113     | 58962031       | 375 849.7               | 3 169 059.3 | 455.7 | 50.0              | 30.0             | 3           | 1149 |      |      |      |      |     |     | 2912                   | 452.67     | 3.00     | -24 |
| 67        | G113     | 58962091       | 378 849.6               | 3 169 059.3 | 451.3 | 50.0              | 30.0             | 12.3        | 1194 |      |      |      |      |     |     | 1976                   | 439.04     | 12.30    | -26 |
| 68        | G113     | 58962150       | 381 799.8               | 3 169 059.3 | 461.3 | 50.0              | 30.0             | 2.1         | 1080 |      |      |      |      |     |     | 2943                   | 459.18     | 2.10     | -26 |
| 72        | G113     | 58962393       | 393 949.7               | 3 169 059.3 | 495.7 | 31.0              | 25.0             | 2.3         | 1000 | 7.4  | 2671 | 8.7  | 1456 |     |     | 1955                   | 477.31     | 18.40    | -42 |
| 73        | G113     | 58962450       | 396 799.7               | 3 169 059.3 | 465.2 | 57.0              | 55.0             | 5.8         | 520  | 17.9 | 1550 |      |      |     |     | 1733                   | 441.51     | 23.70    | -39 |
| 74        | G113     | 58962511       | 399 849.7               | 3 169 059.2 | 508.3 | 31.0              | 27.5             | 2.9         | 1194 | 7.8  | 1679 |      |      |     |     | 1908                   | 497.61     | 10.70    | -46 |
| 75        | G113     | 58962571       | 402 849.8               | 3 169 059.4 | 520.5 | 31.0              | 27.5             | 6.4         | 917  | 7    | 4627 |      |      |     |     | 1841                   | 507.07     | 13.40    | -51 |
| 76        | G129     | 60242004       | 374 499.7               | 3 172 259.3 | 438.3 | 50.0              | 30.0             | 2.6         | 781  | 4.7  | 2588 | 9.6  | 4681 |     |     | 1809                   | 421.36     | 16.90    | -16 |
| 77        | G129     | 60242060       | 377 299.8               | 3 172 259.3 | 442.1 | 50.0              | 30.0             | 4.5         | 1282 |      |      |      |      |     |     | 2625                   | 437.64     | 4.50     | -19 |
| 78        | G129     | 60242119       | 380 249.7               | 3 172 259.3 | 440.8 | 50.0              | 30.0             | 2.3         | 762  |      |      |      |      |     |     | 2329                   | 438.49     | 2.30     | -18 |
| 79        | G129     | 60242180       | 383 299.7               | 3 172 259.2 | 449.8 | 50.0              | 30.0             | 5.8         | 1641 |      |      |      |      |     |     | 2965                   | 443.98     | 5.80     | -21 |
| 81        | G129     | 60242296       | 389 099.7               | 3 172 259.3 | 458.3 | 76.0              | 67.5             | 3.1         | 1388 |      |      |      |      |     |     | 1775                   | 455.16     | 3.10     | -24 |
| 82        | G129     | 60242355       | 392 049.8               | 3 172 259.3 | 468.1 | 31.0              | 27.5             | 2.8         | 917  |      |      |      |      |     |     | 2085                   | 465.32     | 2.80     | -29 |
| 83        | G129     | 60242414       | 394 999.7               | 3 172 259.3 | 473.9 | 55.0              | 52.5             | 6.5         | 780  | 6.6  | 1341 |      |      |     |     | 1802                   | 460.79     | 13.10    | -38 |
| 84        | G129     | 60242473       | 397 949.6               | 3 172 259.3 | 487.8 | 31.0              | 27.5             | 4.1         | 861  |      |      |      |      |     |     | 2992                   | 483.65     | 4.10     | -38 |
| 85        | G129     | 60242532       | 400 899.7               | 3 172 259.2 | 496.8 | 31.0              | 27.5             | 2.3         | 662  | 7.3  | 2992 |      | 1750 |     |     | 1750                   | 487.22     | 9.60     | -41 |
| 86        | G129     | 60242590       | 403 799.7               | 3 172 259.4 | 493.5 | 31.0              | 27.5             | 5.1         | 798  | 10.9 | 2660 |      | 2016 |     |     | 2016                   | 477.52     | 16.00    | -41 |
| 87        | G145     | 61522032       | 375 899.7               | 3 175 459.3 | 419.2 | 47.0              | 35.0             | 2.9         | 1000 |      | 1790 |      |      |     |     | 1790                   | 416.34     | 2.90     | -9  |
| 88        | G145     | 61522091       | 378 849.7               | 3 175 459.3 | 423.8 | 47.0              | 35.0             | 2.9         | 1000 |      |      |      |      |     |     | 2589                   | 420.93     | 2.90     | -11 |
| 89        | G145     | 61522153       | 381 949.7               | 3 175 459.3 | 425.6 | 42.0              | 32.5             | 3.1         | 1667 | 18.4 | 2823 | 25.6 | 1515 |     |     | 2083                   | 378.53     | 47.10    | -17 |
| 90        | G145     | 61522210       | 384 799.6               | 3 175 459.1 | 387.7 | 69.0              | 60.0             | 8.4         | 1213 | 33.7 | 1613 |      |      |     |     | 2791                   | 345.55     | 42.10    | -6  |
| 91        | G145     | 61522271       | 387 849.7               | 3 175 459.3 | 442.7 | 50.0              | 40.0             | 2.6         | 1000 |      |      |      |      |     |     | 2475                   | 440.13     | 2.60     | -19 |
| 92        | G145     | 61522331       | 390 849.7               | 3 175 459.2 | 438.0 | 50.0              | 45.0             | 2.6         | 1154 |      |      |      |      |     |     | 2427                   | 435.41     | 2.60     | -16 |
| 93        | G145     | 61522391       | 393 849.7               | 3 175 459.3 | 442.6 | 60.0              | 55.0             | 5.8         | 883  | 10.3 | 1376 |      |      |     |     | 1812                   | 426.49     | 16.10    | -25 |
| 94        | G145     | 61522451       | 396 849.7               | 3 175 459.3 | 469.1 | 45.0              | 37.5             | 3.3         | 1132 |      |      |      |      |     |     | 2744                   | 465.83     | 3.30     | -29 |
| 95        | G145     | 61522511       | 399 849.7               | 3 175 459.3 | 468.9 | 43.0              | 37.5             | 4.8         | 1020 |      |      |      |      |     |     | 2293                   | 464.10     | 4.80     | -30 |
| 96        | G145     | 61522571       | 402 849.7               | 3 175 459.4 | 469.9 | 35.0              | 32.5             | 3.1         | 957  |      |      |      |      |     |     | 3136                   | 466.80     | 3.10     | -30 |
| 97        | G161     | 62802001       | 374 349.7               | 3 178 659.3 | 397.8 | 47.0              | 35.0             | 5           | 1142 |      |      |      |      |     |     | 2717                   | 392.79     | 5.00     | -1  |
| 98        | G161     | 62802060       | 377 299.7               | 3 178 659.3 | 401.3 | 47.0              | 35.0             | 2.3         | 1000 |      |      |      |      |     |     | 2427                   | 399.00     | 2.30     | -2  |
| 99        | G161     | 62802119       | 380 249.8               | 3 178 659.3 | 408.4 | 47.0              | 35.0             | 2.6         | 1500 |      |      |      |      |     |     | 2131                   | 405.76     | 2.60     | -4  |
| 100       | G161     | 62802178       | 383 199.7               | 3 178 659.2 | 375.9 | 62.0              | 52.5             | 10.2        | 1058 |      |      |      |      |     |     | 1747                   | 365.71     | 10.20    | 4   |
| 101       | G161     | 62802237       | 386 149.7               | 3 178 659.3 | 417.4 | 46.0              | 35.0             | 2.2         | 1071 |      |      |      |      |     |     | 2167                   | 415.23     | 2.20     | -8  |
| 102       | G161     | 62802296       | 389 099.7               | 3 178 659.3 | 425.3 | 47.0              | 35.0             | 4.2         | 1279 |      |      |      |      |     |     | 2308                   | 421.05     | 4.20     | -12 |
| 103       | G161     | 62802355       | 392 049.7               | 3 178 659.2 | 445.3 | 47.0              | 35.0             | 1.9         | 1071 |      |      |      |      |     |     | 1918                   | 443.36     | 1.90     | -19 |
| 104       | G161     | 62802414       | 394 999.7               | 3 178 659.2 | 448.3 | 48.0              | 37.5             | 3.5         | 1073 |      |      |      |      |     |     | 2377                   | 444.76     | 3.50     | -21 |
| 105       | G161     | 62802473       | 397 949.7               | 3 178 659.2 |       |                   |                  |             |      |      |      |      |      |     |     |                        |            |          |     |

## Interprétation des résultats :

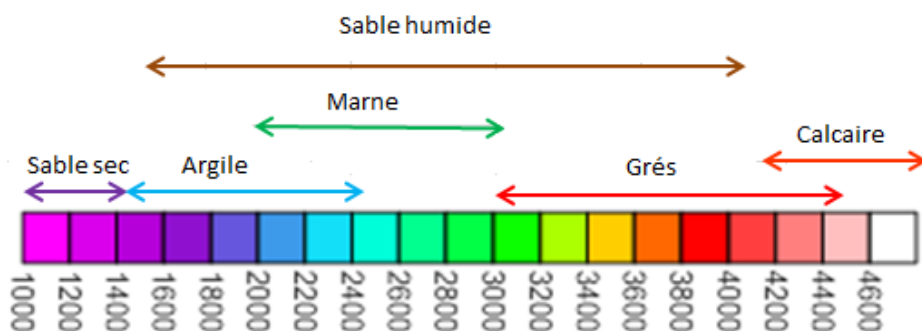
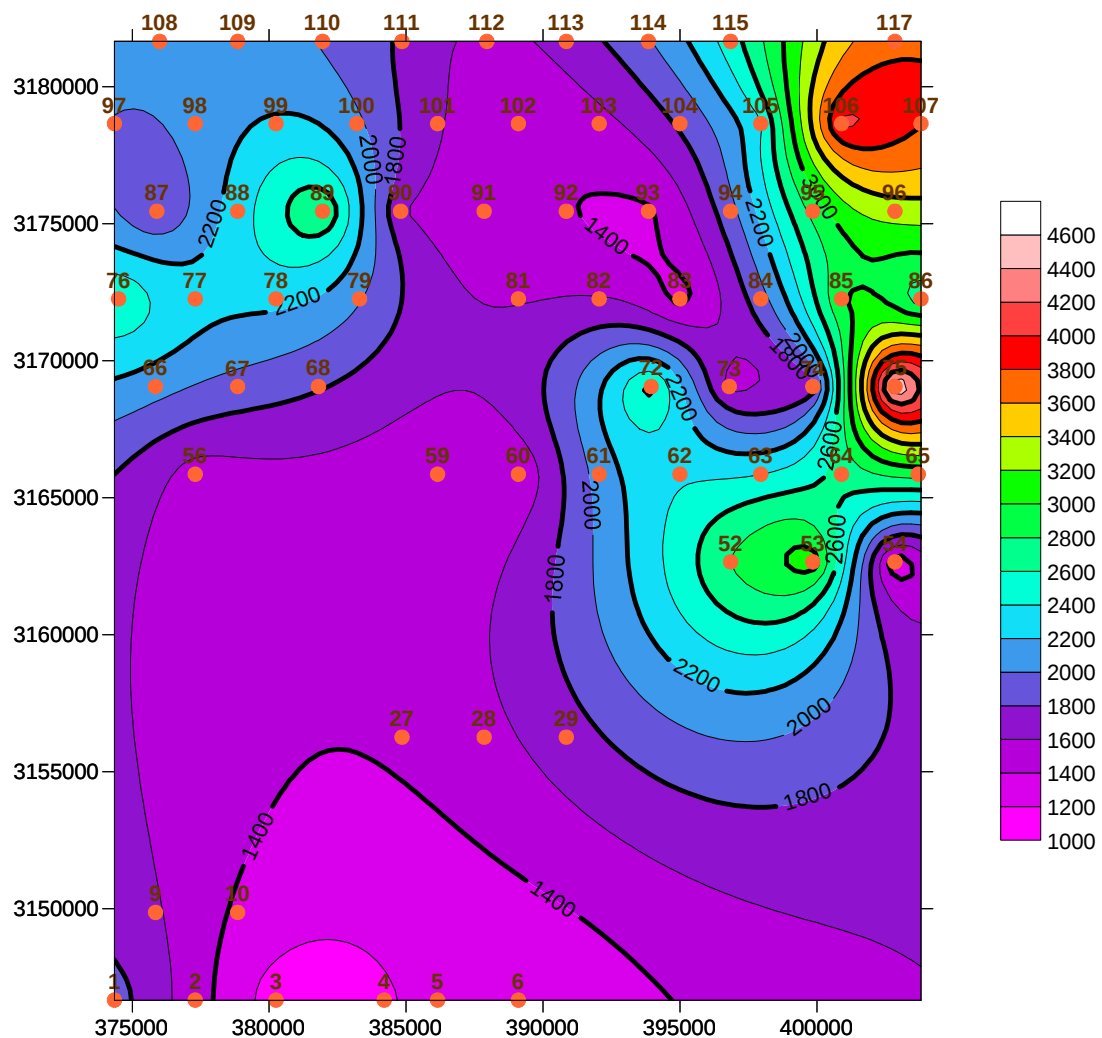
courbe en iso-valeur de la topographie de la zone d'étude Est-TFT



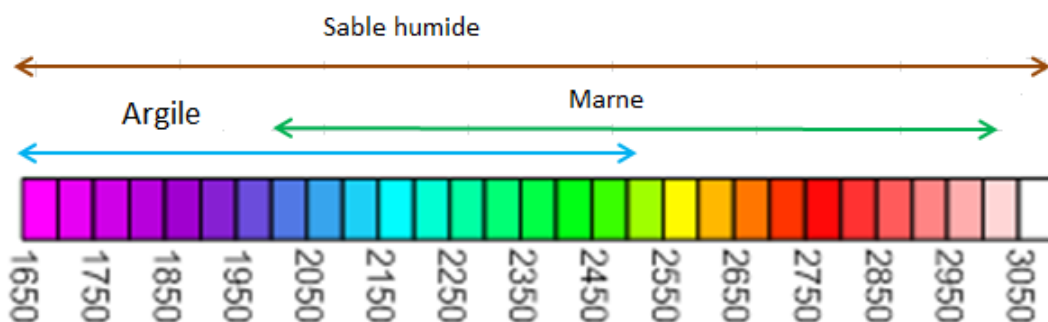
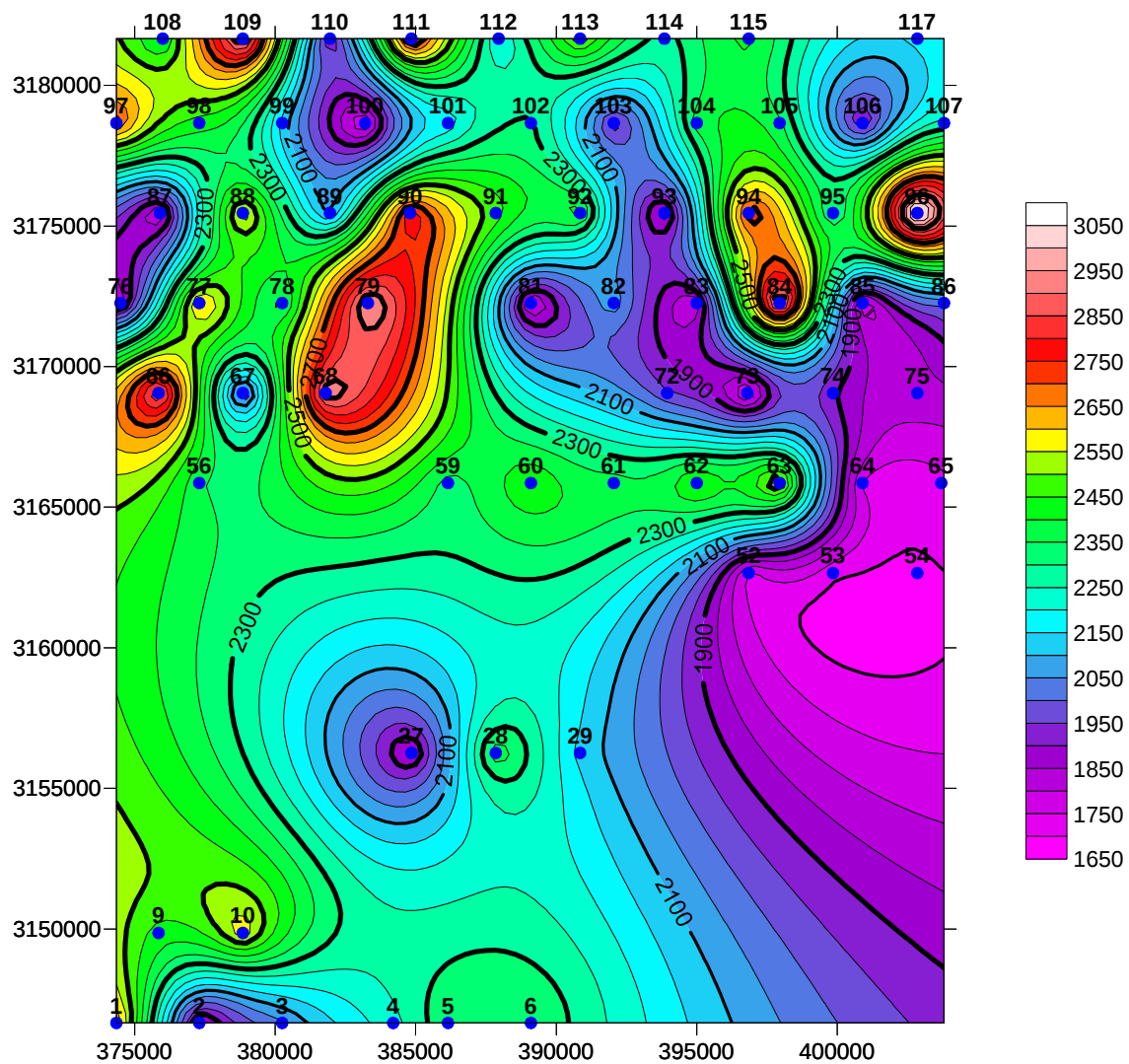
## Carte en isovitesse de la première couche de la zone d'étude Est-TFT



## carte en isovitesse de la deuxième couches de la zone d'étude Est-TFT



## Carte en isovitesse de milieu consolidé de la zone d'étude Est-TFT



La vitesse des ondes sismiques dépend de nombreux paramètres :

De manière simple, un changement dans la nature des roches provoque une variation brusque de la vitesse de propagation des ondes longitudinale.

l'interprétation des résultats des CVT réalisé dans la zone d'étude Est-TFT nous a permis de déduire qu'une variation brusque de vitesse de propagation des ondes sismiques correspond au passage d'un matériau à un autre de composition différente.

Les résultats de l'interprétation des **CVT** ont permis de mettre en évidence trois couches principales, une quatrième couche est présentée localement (observée sur le premier CVT).

- La première couche WZ à un épaisseur varie de 0 à 22.1 m et une vitesse varie de 553 à 1687m/s.

- La deuxième couche WZ à un épaisseur varie de 4.6 à 46 m et une vitesse varie de 1101 à 2809 m/s.

- La troisième couche WZ à un épaisseur varie de 7 à 25.6 m et une vitesse varie de 1456 à 2948 m/s.

L'épaisseur de la WZ varie de 0 à 47.10 m.

La vitesse de comblement varie de 1711 à 2992 m/s.

Des inversions de vitesse évidente sont observées sur quelque CVT.

Un exemple d'une dromochrone d'un carottage VT réalisés dans ce projet est présentés dans l'annexe A.

### **Référence bibliographique**

1. Gueham A.,2011, rapport de fin de campagne sismique. Sonatrach.

## Chapitre 05

## Sismique 3D : Etude d'un cas réel

## I. Introduction

L'Algérie est couverte par des anciennes études géophysiques (sismique, gravimétrie, électrique et magnétométrie) et géologique.

La sismique est la branche la plus développée de la géophysique, c'est un outil de prospection puissant alliant une grande profondeur d'investigation à une bonne résolution. Son coût est relativement plus élevé que celui des autres méthodes géophysiques, mais elle demeure très compétitive par la précision de son diagnostic et la finesse de ses informations. Devant la mauvaise imagerie de la sub-surface et par conséquent la difficulté d'interprétation des sections sismiques obtenues par les techniques d'acquisition 2D, La sismique 3D, représente le développement le plus remarquable en exploration géophysique de ces dernières années. Elle permet un recouvrement précis et quasi totale à tous les objectifs de la région à prospecter.

Elle a été introduite par les grandes compagnies pétrolières dans les phases d'évaluation et de développement des gisements d'hydrocarbures parce qu'elle permettait une restitution claire et continue des structures sub-surfaciques, principalement les interfaces délimitant les stratifications et présentant des variations en impédances acoustiques.

Relativement aux insuffisances de la sismique 2D et les erreurs d'identification ou d'interprétation pouvant résulter de cette dernière, l'introduction de la sismique 3D devient nécessaire pour résoudre la majorité de ces problèmes.

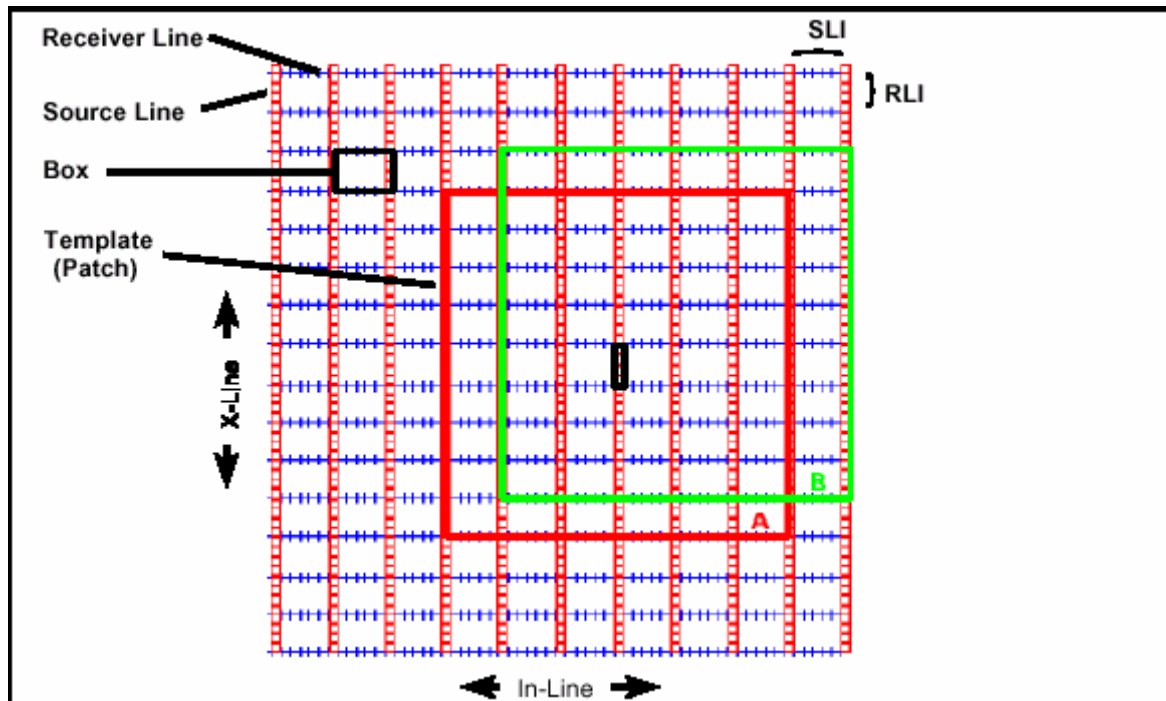
La sismique 3D, engendrant des coûts d'acquisition élevés, a été bien peu utilisée dans le passé; mais, avec la mise au point de programmes performants d'Interpolation de traces, elle a tendance à se généraliser même dans les phases de reconnaissance. Le principe dans l'acquisition sismique, est d'arriver à utiliser les meilleurs paramètres adaptables au terrain et qui permettent l'enregistrement de plus de signaux utiles que de bruits. La plus grande partie des bruits est atténuée dans le traitement par sommation, l'autre partie l'est sur les terrains.

Démarrer une étude sismique, c'est choisir des paramètres optimaux qui nous permettent d'avoir une meilleure qualité sismique. En d'autres termes, avoir un meilleur rapport signal sur bruit. Cette étape de choix des paramètres optimaux s'appelle le **DESIGN SISMIQUE**.



## II. Terminologie de la sismique 3D

Avant d'aller plus loin dans le détail, il est utile de définir quelques uns des termes les plus utilisés pour faciliter la compréhension de cette nouvelle méthodologie.



**Figure 5.1.** Illustrations de quelques termes de la sismique 3D.

### STRAIGHT LINE

Les lignes source et réception sont disposées orthogonalement les unes par rapport aux autres. Un tel arrangement est facile à réaliser par les équipes terrain.

### DIRECTION IN-LINE

Elle est parallèle à la direction des lignes d'enregistrement.

### DIRECTION X-LINE

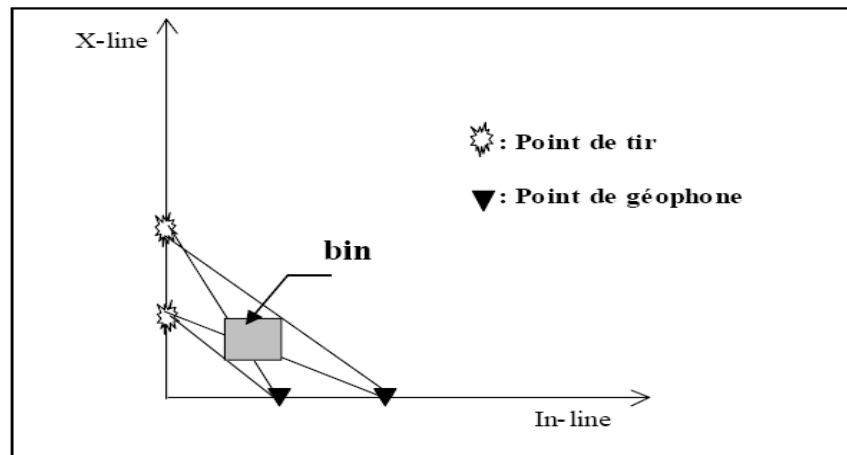
C'est la direction de disposition des lignes de tir.

### BIN

C'est un élément de volume assimilé à des points situés à mi-distance entre les couples "sources récepteurs" selon leurs azimuts respectifs. Le sous sol est donc décomposé en une grille de bins identiques où les informations sont regroupées. Généralement la dimension du bin dans le sens longitudinal est égale à  $(SLI/2 * RLI/2)$ ; dans la direction verticale c'est le pas d'échantillonnage temporelle.

La taille du bin est rectangulaire ou carré suivant la direction de résolution désirée. Le côté de petite dimension doit être orienté suivant la direction de résolution maximale à obtenir.

La figure suivante montre la géométrie du bin à partir de la ligne de sources et celle de réceptions (dispositif straight line).



**Figure 5.2.** La géométrie d'un bin.

### **Template**

C'est la surface élémentaire d'enregistrement. Il est constitué de plusieurs lignes de réceptions et d'un ensemble de points de tirs associés appelé "Salvo"

### **STATION ROLL**

C'est le déplacement du Template selon la direction In-line pour permettre la contribution des nouvelles stations.

### **LINE ROLL**

C'est le déplacement du dispositif (Template) selon la direction X-line pour brancher d'autres lignes.

### **LA LIGNE DE SOURCES**

C'est la ligne dans laquelle les sources (dynamite ou ensemble de vibrateurs) sont disposées d'une manière régulière. La distance entre deux points de sources adjacents est habituellement égale à deux fois la dimension du bin suivant la direction X-line. La distance entre deux sources adjacentes s'appelle l'intervalle de ligne de sources noté 'SLI'.

### **LA LIGNE DE RECEPTEURS**

Une ligne selon laquelle des récepteurs sont présentés à intervalles réguliers noté (RI) habituellement égale à deux fois la dimension de bin dans la direction de in-line. La distance entre une ligne de récepteurs et la suivante, est désignée généralement sous le nom d'intervalle de ligne-récepteur noté RLI).

### **SWATH**

Il est utilisé avec différentes significations dans l'industrie, l'une d'elles définissant le Swath comme étant la combinaison des lignes de sources avec des lignes de réception afin de créer une surface d'enregistrement. On peut définir aussi le Swath comme étant la bande de sous sol (balayée) en décalant les Templates dans le sens longitudinal.

#### **BOX**

Dans une étude 3D et à partir d'une Straight line le nom de box s'applique au secteur relié par deux lignes de sources adjacentes et deux lignes de réception. Ce qui est intéressant au sujet d'un box (Boite) est qu'il représente habituellement le plus petit secteur d'une étude 3D. Elle est utile pour définir la plus grande valeur de l'Offset minimum  $X_{min}$ . Qui doit être assez court pour permettre le calcul des corrections statiques par CVT et la cartographie des événements superficiels.

#### **PATCH**

Le patch se rapporte aux stations pour n'importe quel point source dans l'étude 3D. Il forme habituellement un rectangle de plusieurs lignes parallèles de récepteurs, le patch se déplace autour de l'étude pour occuper différentes positions du Template.

#### **OFFSET**

C'est la distance entre la source et la station de réception; il faut prendre en considération tous les Offsets. Ces derniers sont répartis régulièrement à cause de la disposition des points de réception par rapport aux points de tir. Une distribution uniforme des Offsets pour chaque bin doit se faire obligatoirement pour assurer une homogénéité de la couverture multiple à toutes les localisations.

#### **AZIMUT**

La couverture est déterminée par toutes les traces qui correspondent aux couples émetteurs-récepteurs, coïncidant avec la position du bin. Ces couples participent chacun par son Offset spécifique à l'estimation de la loi de vitesse en un point donné à partir de la distribution azimutale des offsets.

#### **LE SALVO**

Ensemble des points de tir d'un même Template.

#### **LE STRIPE**

La zone de la surface permettant l'enregistrement d'un Swath.

#### **RECIEVER PATCH**

Ensemble du récepteur actif pour un point de tir.

### **III. Avantages de la sismique 3D**

La sismique 3D, représente le développement le plus remarquable en exploration géophysique durant ces dernières années.

Elle permet un recouvrement précis et quasi-total de tous les objectifs de la région à prospector. Ainsi elle intervient pour surmonter certaines insuffisances rencontrées par la sismique 2D; telles que:

- Un volume d'information insuffisant ou simplifié (puisque le profil 2D est considéré par rapport à un plan vertical traversant les structures).
- La mauvaise estimation des pendages.
- Les diffractions provenant de la direction vertical aux profils et qui représente un bruit qu'il faut supprimer.

Pour pallier à ces inconvénients, ils ont introduit cette nouvelle technique dite « sismique 3D », dont les objectifs sont:

- Une meilleure définition des structures complexes ou de petites dimensions (Piège stratigraphique).
- La restitution claire et continue des structures de sub-surface par utilisation de la migration 3D.
- L'évaluation des paramètres pétrophysiques (l'utilisation des attributs sismiques 3-D intégré avec les données de puits).
- La diminution du nombre de puits inutiles et secs.

## IV. Procédures générales

La sismique 3D, engendrant des coûts d'acquisition très élevés, a été bien peu utilisée dans le passé; mais avec la mise au point de programmes très performants, elle a tendance à se généraliser même dans la phase de reconnaissance.

Il existe plusieurs méthodes d'acquisition en 3D, qui sont, en fait, des variantes plus ou moins bien combinées des deux principales communément appelées « in-line profiling et cross-line profiling » que nous traduirons respectivement par: profilage parallèle et profilage croisé.

Les qualifications caractérisant les profilages se rapportent à la disposition des lignes de tir par rapport à la disposition des lignes de réceptions.

Le profilage parallèle consiste à enregistrer une série de profils classiques 2D très proches les uns des autres jusqu'à recouvrir tout le prospect. Le profilage croisé consiste à enregistrer des données par blocs élémentaires d'acquisition; ces blocs élémentaires sont généralement composés d'une ou de plusieurs lignes de réception et d'une ligne de tir placée orthogonalement ou diagonalement par rapport aux lignes de réception.

Par chevauchement des blocs dans les deux directions longitudinale et transversal, il est possible de couvrir tout le prospect avec un degré de couverture prédéterminé.

Le volume du sous-sol balayé en décalant les blocs dans le sens longitudinal s'appelle «Swath», et la zone de surface permettant son enregistrement porte le nom de Stripe.

En sismique 2D, le sous-sol est divisé en élément de surface (x, t) assimilé à des points situés à mi-distance entre les sources et les récepteurs.

En sismique 3D, où nous nous occupons d'un volume de données, le sous-sol est divisé en éléments de volumes (x, y, t) appelés « **Bins** »; ils sont assimilés eux aussi à des points situés à mi-chemin entre les couples «sources–récepteurs» selon leurs azimuts respectives. Le sol est donc décomposé en une mosaïque de cellules où sont regroupées les informations communes pouvant subir les traitements nécessaires pour tirer des renseignements géologiques (structurales ou stratigraphiques).

## **V. Mise en œuvre**

### ***Préparation d'une étude 3D***

Les limites d'une zone d'étude pour la réalisation d'un programme sismique 3D sont tracées sur une ou plusieurs cartes contenant des études géophysiques antérieurs de manière à cerner les zones les plus prospectives. Une fois les limites sont déterminées, une analyse détaillée des données sismique disponibles est effectuée dans le but d'optimiser les paramètres de la méthode 3D qui sera utilisée. A l'aide du logiciel Mesa des simulations des paramètres des différentes méthodes 3D sont effectuées en tenant compte d'autres facteurs (comme le budget, nature du terrain, etc...), c'est ce qu'on appelle le Design sismique.

Après le choix de la méthode 3D à utiliser et ses paramètre, un calcul théorique des coordonnées des lignes d'émission et des lignes de réception est effectué à l'intérieur de la zone d'étude en utilisant le logiciel Mesa, puis envoyées sur l'équipe topographique d'une mission sismique pour son exploitation.

Cette opération se fait plusieurs semaines avant l'installation de l'équipe sismique sur le lieu de travail.

### ***Topographie***

#### **i. Réseau GPS**

Dans le but de faire le calage des lignes de réception et des lignes de tir et d'entamer l'implantation et le levé en temps réel du programme 3D Est-TFT 2011/12, un réseau GPS de 9 points GPS dont 3 nouveaux point GPS a été établi au niveau du département topographique de la division Exploration à Hassi Messaoud puis communiqué au département topographique de l'Enageo pour sa mise en œuvre.

Une équipe GPS s'est déplacée avant le démarrage de projet sur terrain ou elle a commencé au départ par une reconnaissance des points GPS déjà existant dans la région. Les 9 points GPS que comporte ce réseau sont répartis comme suit :

- 3 nouveaux points GPS ont été observés et monumentés.
- 6 anciens points GPS.

Un réseau secondaire est établi par l'équipe topographique de la mission pour assurer une bonne couverture de la zone d'étude et avoir des distances réduites au minimum (moins de 15 km entre la station de référence et les collecteurs de données).

Après la finalisation du réseau GPS, vient l'opération de l'implantation et du levé des lignes.

## **ii. Levé et implantation des lignes**

Cette étape consiste à l'implantation et le levé des lignes source et les lignes de géophones avec de piquet de 1m de longueur respectant la norme contractuelle dans ce genre de terrain. Sur les endroits rocailleux où il est impossible d'enfoncer convenablement ces piquets dans le sol, un modèle de taille réduite est utilisé à la place, en plus de la peinture des pierres avec du blanc à leurs emplacements afin de les rendre visible de loin.

La priorité était donnée pour les lignes source afin de permettre le démarrage des travaux de Layonnage, tout en assurant une avance satisfaisante de manière à garder les bulldozers occupés.

La méthodologie d'implantation et du levé des lignes se résume dans les points suivants:

- Calcul du pré-plot en Clarke 1880 par le Mesa
- Transformation des coordonnées en WGS 84 par la brigade Topo
- Implantation des profils en WGS 84
- Traitement des profils implantés en WGS 84
- Comparaison entre le pré- plot et le post-plot.
- Transformation des coordonnées en Clarke 1880.

Après l'implantation et le levé de chaque portion de ligne source, des travaux de Layonnage s'en suivent.

## **Layonnage**

Cette opération consiste à réaliser des Layons (pistes) le long des lignes sources suffisamment large afin de faciliter les déplacements des vibrateurs aux passages d'un VP à l'autre et aussi d'assurer un bon couplage de la base plate du vibrateur avec le sol afin qu'il ait une bonne transmission de l'énergie dans le sous sol.

Une bonne et durable avance des travaux Layonnage avec une bonne ouverture de Layons et la clé pour mener efficacement les opérations d'enregistrement dans les zones dunaires et difficile.

En plus des travaux de Layonnage, les Bulldozers sont utilisés pour les ouvertures d'accès dans les endroits accidentés.

L'équipe Layonnage est constituée de 7 Bulldozers répartis sur plusieurs lignes sources et supervisée par un chef d'équipe appelé Catpusher.

Le catpusher a pour rôle de faire des reconnaissances sur les lignes source et diriger le Layonnage de manière à assurer des passages continus pour les vibrateurs. L'objectif principal de tout cela est de minimiser les VP déportés et les VP skipés (annulés), et de Layonner le plus proche possible des lignes sans compromettre les consignes de sécurité.

Une distance minimale devrait être préservée entre les bulldozers et la dernière ligne du dispositif d'enregistrement, au-delà duquel les bruits des bulldozers seront imperceptibles.

Les travaux de Layonnage ont débuté le 12/10/11 sur le programme Est-TFT et ont été achevés le 24/02/12.

Après l'implantation et le levé des lignes de réception et des lignes source et le Layonnage de ces dernières, des travaux d'enregistrement en sismique réflexion sont effectués une fois une avance satisfaisante est assurée.

## ***Enregistrement Labo réflexion***

L'équipe Labo réflexion est constituée en elle-même de quatre équipes distinctes et complémentaire auxquelles on a assigné une tâche bien déterminée, la combinaison de ces différentes tâches permet l'exploitation du programme sismique 3D :

### **a. Equipe Pose dispositif**

Cette équipe est formée de plusieurs groupes de manœuvre conduits par des chefs d'équipes, leurs rôle est d'implanter le dispositif d'enregistrement sur terrain, qui est constitué de grappes de géophones (récepteurs), de câbles et de boîtiers électroniques, il est directement relié au Labo réflexion par un câble en fibre optique qui servira pour le transfert rapide des données récoltées vers le labo pour le contrôle et le stockage.

### **b. Equipe Ramasse dispositif**

Cette équipe est formée aussi de plusieurs groupes de manœuvres dirigés par des chefs d'équipes, leurs tâche principale est de ramasser les équipements du dispositif d'enregistrement qui sont hors service (zone libérée après son exploitation) pour les envoyer à l'équipe pose dispositif.



**Figure 5.3.** Dispositif d'enregistrement : grappe de géophones.

### **c. Equipe Vibrateurs**

Cette équipe est constituée de 10 engins vibrateurs répartis en deux groupes de quatre vibrateurs plus deux vibrateurs de secours (utilisés en cas de panne), ces vibro sont suivis par deux techniciens prêts à intervenir à tout moment pour tout problème mécanique, hydraulique ou électronique. Cette équipe est sous les commandes du Labo réflexion.

Généralement les vibrateurs sont positionnés sur les lignes sources très proches des piquets topo à l'exception des endroits difficiles ou la présence des dunes, des falaises, des garas ou d'autres obstacles, ils sont shiftés (décalés) suivant la difficulté du terrain.

Quand il n'est pas possible de respecter les caractéristiques des nappes de vibrateur pour des raisons d'accès, des nappes alternatives (configuration du point d'émission) sont permises et notée dans le rapport observé.

Chaque vibrateur est doté d'un récepteur GPS (Trimble DSM GPS) qui permet la détermination de ses coordonnées (position sur terrain) avec la vibration.



**Figure 5.4.** Positionnement des vibrateurs dans la ligne source.

#### **d. Equipe Labo réflexion**

Cette équipe est constituée de deux observateurs opérant des terminaux à partir d'une cabine montée sur un camion et plusieurs assistants répartis sur terrain pour le dépannage des équipements sur terrain, toutes les équipes de laboratoire (équipe pose, équipe ramasse, équipe vibrateurs) sont sous le contrôle d'un chef Laboratoire.

Le Labo réflexion que dispose la mission sismique EGS 190 est un Labo télémétrique d'acquisition terrain de type Sercel SN 428 XL, il est doté d'un HCI (Human Control Interface), d'un corrélateur/stackeur, d'un SQCPro, des câbles télémétriques menus de six links FDU (Field digitisation unit) et un parc complet de grappes de géophone de type Sensor SM24.

Les instruments de périphériques inclus dans le labo réflexion sont un plotteur digital de type OYO DFM 480, deux lecteurs de bandes cartridges 3592, format SEG D 2.5 bytes, d'un générateur de sweep VE 464 DPG (Digital Pilot Generator) qui permet de contrôler en continu des paramètres de tous les sweeps (signal de l'énergie) envoyés dans le sous-sol en temps réel (phase, force, distorsion etc....). Quatre moniteurs sont disponibles au niveau du labo permettant de visualiser plusieurs paramètres et plusieurs graphes en relation avec la préparation, le contrôle et l'enregistrement des VP (positionnement des vibrateurs en post plot et DGPS, contrôle de la ligne, contrôle PSS, oscilloscope,...), un écran est réservé exclusivement pour le SQCPro qui permet de visualiser tous les VP exploités en temps réel en mettant en évidence les traces enregistrées avec des paramètres hors tolérances (Tilt, Résistance,.....), de simples opérations sont possibles à appliquer sur les films terrain (AGC, Filtre, rapport S/B,.....).

Chaque VP (point vibré) est enregistré en utilisant quatre vibrateurs positionné suivant une certaine configuration (nappe) fixée au préalable et centré sur le piquet VP.

Le VP est enregistré par un dispositif de récepteur (disposé en plusieurs portions de lignes de géophone parallèles et centrées sur le piquet VP), le déclenchement de la vibration des vibrateurs se fait directement à partir de la cabine Labo au moyen d'un signal radio. Les données récoltées par les récepteurs sont acheminées directement vers le Labo par câbles. Les données enregistrées sont envoyés à la station Promax pour leurs contrôle et traitements.

### **quality control**

Le premier objectif des équipes de contrôle de qualité et du pré-traitement est de s'assurer de la qualité et de l'exactitude du positionnement des géophones, des sources et de la géométrie du patch avant leurs inclusions dans les données SPS qui seront utilisés plus tard dans le traitement final.

### **MESA**

La complexité d'une étude sismique 3D, surtout au niveau du calcul et de la représentation de la distribution de couverture, offsets, azimuts, pendant la phase de design, nécessite l'utilisation de calculateurs ( micro-ordinateurs) capables de résoudre ce problème, en terme de capacité et de temps d'exécution. A cet effet la Compagne Britannique " GREEN MOUNTAIN GEOPHYSICS " a développé un logiciel de grande performance " MESA " qui assure les exigences d'un design d'une étude sismique 3D.

Les taches principales du MESA sont:

- ❖ Chargement des données pré plot et calcul de la couverture théorique
- ❖ Préparation des scripts files pour Labo réflexion
- ❖ Suivi de la production Labo réflexion
- ❖ Calcul de la couverture en post plot
- ❖ Planification et positionnement des VP de compensation
- ❖ Contrôle des données SPS tirées des headers des traces sismiques au niveau de la station Promax.
- ❖ Calcul de la couverture finale en utilisant des données DGPS fournies par le bureau Topo.
- ❖ Plot des cartes (Swath, plan de position, obstacles, couvertures, ....)

Le contrôle de la production Labo réflexion par le MESA se faisait par le calcul du nombre de traces et du nombre de stations actives durant une journée d'enregistrement puis comparer

à ceux calculer par la station Promax, le même contrôle est effectué à la fin de chaque Swath pour les données globales.

## **Promax**

Le bureau de traitement est doté d'une station de travail sur laquelle est installé le logiciel de traitement Promax.

Un contrôle minutieux de qualité des données sismique est effectué quotidiennement sur site à l'aide de la station de travail Promax pour déceler toute anomalie d'enregistrement susceptible d'affecter la qualité du stack final. A cet effet, les tests suivants sont entrepris:

- Lecture des deux copies de bandes cartridge terrain, vérification de leurs contenues et génération d'un listing qui va être comparé avec le rapport observer afin de s'assurer de leur concordance.
- Elimination des files voids et détection des files doublés
- Défilement et contrôle visuel de tous les VP enregistrés
- Détection des traces bruitées, des traces mortes et des traces inversées à partir du plot RMS et Receiver LMO
- Détection des Traces et des VP décalés à partir du Receiver LMO et Shot LMO
- Détection des VP à faible amplitude à partir du Shot LMO
- Contrôle des pilotes de tous les VP par l'analyse de leurs amplitudes, fréquences et phases à partir du plot Pilote
- Génération des données SPS à partir des headers des traces et les fournir au MESA pour le contrôle.
- Traitement des similarités câblées et tracé des graphes correspondant (sweep, phase, spectre d'amplitude) pour le contrôle.

### **▪ Pre-traitement**

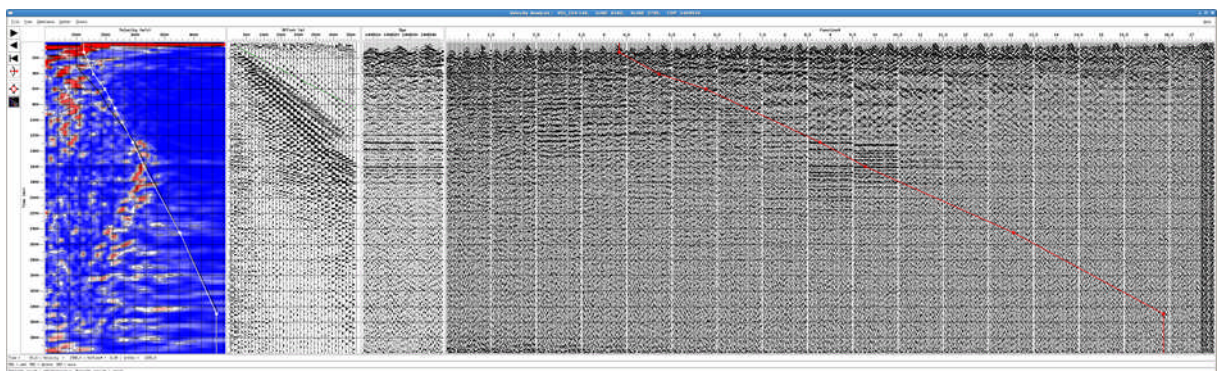
Les données sismiques des swaths sont chargées et traitées quotidiennement sur la station Promax, un brut stack dans la direction In-line en couverture complète représentatif de chaque Swath est ploté chaque jour pour l'évaluation de la qualité en utilisant la loi de vitesse du Swath précédent et des corrections statiques altimétrique, avant d'effectuer un traitement plus poussé à la fin de l'exploitation de chaque Swath.

Après l'enregistrement d'une quantité de données suffisante, des bruts stack dans la direction X-line sont aussi traités et plotés.

Avant d'entamer le traitement proprement dit, un picking des arrivées réfractées (réfracteur de vitesse : 3000 m/sec) dans la gamme d'Offset du 1600 à 2200 m est réalisé pour le calcul des corrections statiques (source et receiver).

La séquence de traitement utilisée pour ce projet a été déterminée après plusieurs tests des paramètres des modules en présence du représentant Sonatrach et d'un superviseur traitement d'Enageo, la séquence retenue est la suivante :

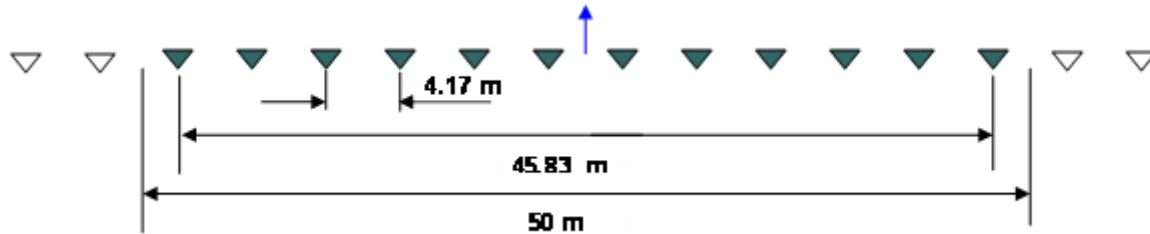
1. SEG D Input (from 3592 field tape);
2. Data re-sampling from 2 msec to 4 msec;
3. Geometry extraction to database using trace headers and surveyor coordinates;
4. Binning data using global grid;
5. Geometry loading using database information;
6. Automatic gain control window: 600 ms;
7. Trace editing (for noisy, dead and reversed traces) ;
8. apply refraction statics DP: 300 m, Vc: 2500 m/s;
9. Band-pass filter (8,12-50,60) ;
10. Minimum phase predictive deconvolution (opérateur length:190 msec, predictive distance: 24 msec) ;
11. Velocity analysis every 1km x 1km;
12. Applying NMO corrections with 85% stretching percentage;
13. Apply residual statics;
14. F-X L2 norm adaptive;
15. Band-pass filter (8,12-45,50) ;
16. Automatic gain control window: 600 ms;
17. Final stack;
18. Post-stack phase shift 3D migration.



**Figure 5.5.** Traitement des données par Promax.

## Paramètre d'exploitation terrain

### ➤ Geophone array:



**Figure 5.6.** Disposition des géophones – schéma de principe

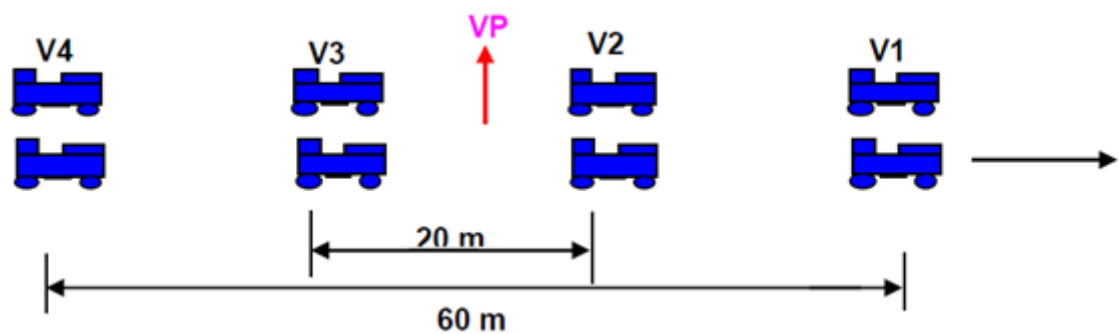
Geophone array length: 45.83 m

Array geometry: Linear (one string of 12 geophones)

Receiver station spacing: 50 m

Geophone spacing: 4.17 m.

### ➤ Vibrator source array:



**Figure 5. 7.** Disposition des vibrateurs : schéma de principe.

- Source array length: **60 m**

- Vibrator spacing: **20 m**

- Move up VP: **0 m (standing)**

- Number of Vibrators: **04**

-Number of Sweeps/VP: **02**

- VP station spacing: **70.71 m**

#### ▪ Paramètres du sweep:

- Sweep length: 10 seconds

- Sweep type: Linéaire

- Sweep frequency limits: 6-80 Hz

- Taper: 300 ms

### ➤ 3D Template

Les caractéristiques du Template et les autres paramètres de l'étude du programme sismique 3D global sont listés ci-dessous :

|                                                                                                                                                                       |                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
|   |                                         |
| <b>Survey Statistics</b><br><b>3D Land Seismic Acquisition (Est TFT &amp; Belhouda)</b>                                                                               |                                         |
| <b>Survey Site</b>                                                                                                                                                    | Horthogonal Shooting<br><b>Option-3</b> |
| <b>Template information</b>                                                                                                                                           |                                         |
| Number of receivers lines in template                                                                                                                                 | 20                                      |
| Number of receivers per line                                                                                                                                          | 120                                     |
| Number of receivers in template                                                                                                                                       | 2400                                    |
| Number of shots in Salvo                                                                                                                                              | 4                                       |
| Inline Template roll (m)                                                                                                                                              | 200                                     |
| Cross line Template roll (m)                                                                                                                                          | 250                                     |
| <b>Receiver information</b>                                                                                                                                           |                                         |
| Total Receiver lines                                                                                                                                                  | 176                                     |
| Receiver interval (m)                                                                                                                                                 | 50                                      |
| Receiver line interval (m)                                                                                                                                            | 200                                     |
| Total length (km)                                                                                                                                                     | 4833,25                                 |
| <b>Source information</b>                                                                                                                                             |                                         |
| Total Source lines                                                                                                                                                    | 118                                     |
| Inline Source interval (m)                                                                                                                                            | 50                                      |
| Source line interval (m)                                                                                                                                              | 250                                     |
| Live Shot density (shots/sq.km)                                                                                                                                       | 80,00                                   |
| Source line Orientation                                                                                                                                               | 0°                                      |
| Live shots                                                                                                                                                            | 77126                                   |
| Fired shots                                                                                                                                                           | 77126                                   |
| Total length for live Shoots                                                                                                                                          | 3856,30                                 |
| <b>Survey size information</b>                                                                                                                                        |                                         |
| Maximum X extend (m)                                                                                                                                                  | 29475,00                                |
| Maximum Y extend (m)                                                                                                                                                  | 35000,00                                |
| Acquisition Surface (sq.km)                                                                                                                                           | 964,075                                 |
| <b>Bin information</b>                                                                                                                                                |                                         |
| Bin width (m)                                                                                                                                                         | 25                                      |
| Bin height (m)                                                                                                                                                        | 25                                      |

Figure 5.8. Caractéristiques de Template.

## VI Section sismique

La section sismique est le résultat du traitement sur station Promax des données sismiques enregistrées par le Labo réflexion. C'est une coupe en temps donnant une image exacte du sous-sol suivant une direction bien déterminée sur laquelle les différents niveaux géologiques en sub-surface sont mis en évidence. La reconnaissance des réflecteurs sismiques est possible par le calage d'une ou plusieurs sections sismiques à partir des VSP enregistrés au niveau des puits qui fournissent une combinaison d'information des emplacements des couches géologiques en fonction de la profondeur et du temps, à partir de ces points de calage l'identification des réflecteurs est étalée sur l'ensemble de la zone d'étude.

Le passage d'une section sismique en temps en une coupe en profondeur est faisable par l'application des vitesses d'intervalle calculées à partir des vitesses de Stack obtenues lors du traitement des données sismiques.

Aussi, des sections en attribut sismique peuvent être calculées, leurs interprétations permettent l'obtention d'informations lithologique de la sub-surface.

La cartographie des niveaux géologiques à partir des sections sismiques lors de la phase de l'interprétation permet l'implantation des forages au-dessus des pièges pétroliers avec une grande précision.

La sismique réflexion est un outil d'imagerie permettant de reconstituer la structure des couches géologiques ainsi que leur agencement structural. Il est communément admis que cette imagerie est d'autant plus complexe que la profondeur de la cible est faible. D'autre part, outre les considérations purement scientifiques, des problèmes d'ergonomie et d'économie peuvent émerger. Elle est la seule méthode géophysique qui permet de fournir une image continue de la succession des terrains et de leur agencement structural. Elle peut être utilisée dans le domaine de génie civil pour la reconnaissance et l'auscultation des ouvrages souterrains, pour la détection et la localisation des cavités souterraines, et la détection des zones effondrées ou remblayées et l'évaluation du risque d'effondrement des cavités. À ce titre elle joue un rôle majeur en génie civil (la détection de vides est obligatoire dans les zones périurbaines où on soupçonne la présence d'anciennes carrières qui représente un risque potentiel d'effondrement et donc de danger, particulièrement en milieu urbain).

Elle est aussi utilisée lors des études du tunnel dont l'objectif est de déterminer les structures géologiques et leurs éventuelles discontinuités, et pour l'implantation les fondations des grands ouvrages : retenues de barrage, tunnels ou galeries, tracé de chemin de fer ou routiers, bâtiment industrielle...

En fait, la sismique réflexion est employée pour la reconnaissance en mer pour les installations sous-marines (fondation de plate-forme pétrolière...) et certaines installations portuaires ou pour la reconnaissance de gisements de granulats.

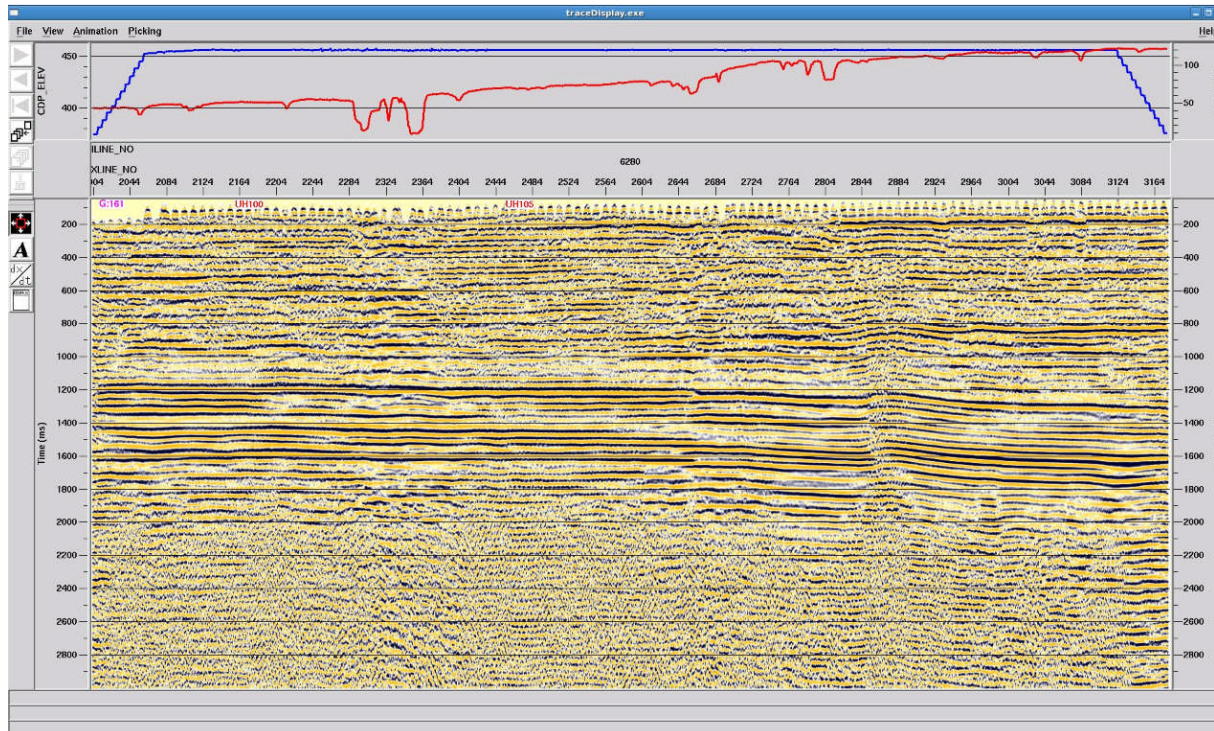
La profondeur d'investigation dans le domaine de génie civil est de quelques dizaines à quelques centaines de mètre tout dépend de type de projet, contrairement à la prospection pétrolière où la profondeur d'investigation est à une échelle kilométrique.

Quel que soit la profondeur d'investigation, la méthode sismique est toujours gouvernée par les mêmes principes. Cependant, la profondeur d'investigation influe de manière importante la procédure d'acquisition sismique aussi bien que le traitement du signal qui permet l'obtention de l'image sismique.

L'utilisation de la sismique dans le domaine de génie civil nécessite une mise en œuvre un peu particulière que la mise en œuvre utilisée en prospection pétrolière cité ci-dessus, il faut par exemple diminuer la distance entre les capteurs de signal (géophone) pour avoir les réflexions des couches superficielles, le coût est déjà élevé pour un dispositif de base (une source et un récepteur), mais si l'on veut utiliser, comme en prospection pétrolière, des

dispositif complexes on arrive sans doute à des coûts bien supérieurs aux budgets que les maîtres d'œuvres veulent bien consacrer à la reconnaissance. Le problème de coût élevé constitue la raison de non utilisation de cette méthode en génie civil terrestre.

## VII Présentation des résultats



**Figure 5.9.** Section-inline 6280 avec présentation des CVT 100 et 105.

### Exemples des vitesses d'intervalle des différentes couches de sous-sol :

#### **XLINE=2565**

|              |    |          |         |     |
|--------------|----|----------|---------|-----|
| TIME=0-270   | ms | VEL_INT= | 2262.42 | m/s |
| TIME=270-300 | ms | VEL_INT= | 2280.72 | m/s |
| TIME=300-330 | ms | VEL_INT= | 2308.85 | m/s |
| TIME=330-360 | ms | VEL_INT= | 2341.06 | m/s |
| TIME=360-390 | ms | VEL_INT= | 2377.18 | m/s |
| TIME=390-420 | ms | VEL_INT= | 2417.03 | m/s |
| TIME=420-450 | ms | VEL_INT= | 2460.43 | m/s |
| TIME=450-480 | ms | VEL_INT= | 2507.21 | m/s |
| TIME=480-510 | ms | VEL_INT= | 2557.16 | m/s |

#### **XLINE=2595**

|              |    |          |         |     |
|--------------|----|----------|---------|-----|
| TIME=0-150   | ms | VEL_INT= | 2259.06 | m/s |
| TIME=150-180 | ms | VEL_INT= | 2274.26 | m/s |
| TIME=180-210 | ms | VEL_INT= | 2356.60 | m/s |
| TIME=210-240 | ms | VEL_INT= | 2431.30 | m/s |
| TIME=240-270 | ms | VEL_INT= | 2499.03 | m/s |

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| TIME=270-300 ms | VEL_INT= 2560.36 m/s |
| TIME=300-330 ms | VEL_INT= 2615.74 m/s |
| TIME=330-360 ms | VEL_INT= 2665.53 m/s |
| TIME=360-390 ms | VEL_INT= 2710.04 m/s |
| TIME=390-420 ms | VEL_INT= 2749.54 m/s |
| TIME=420-450 ms | VEL_INT= 2784.23 m/s |
| TIME=450-480 ms | VEL_INT= 2814.28 m/s |
| TIME=480-510 ms | VEL_INT= 2839.86 m/s |

**XLINE=2625**

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| TIME=0-150 ms   | VEL_INT= 2238.89 m/s |
| TIME=150-180 ms | VEL_INT= 2242.14 m/s |
| TIME=180-210 ms | VEL_INT= 2325.26 m/s |
| TIME=210-240 ms | VEL_INT= 2401.85 m/s |
| TIME=240-270 ms | VEL_INT= 2472.51 m/s |
| TIME=270-300 ms | VEL_INT= 2537.74 m/s |
| TIME=300-330 ms | VEL_INT= 2597.95 m/s |
| TIME=330-360 ms | VEL_INT= 2653.47 m/s |
| TIME=360-390 ms | VEL_INT= 2704.60 m/s |
| TIME=390-420 ms | VEL_INT= 2751.58 m/s |
| TIME=420-450 ms | VEL_INT= 2794.62 m/s |
| TIME=450-480 ms | VEL_INT= 2833.91 m/s |
| TIME=480-510 ms | VEL_INT= 2869.58 m/s |

**XLINE=2655**

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| TIME=0-180 ms   | VEL_INT= 2289.30 m/s |
| TIME=180-210 ms | VEL_INT= 2323.05 m/s |
| TIME=210-240 ms | VEL_INT= 2389.03 m/s |
| TIME=240-270 ms | VEL_INT= 2451.27 m/s |
| TIME=270-300 ms | VEL_INT= 2510.03 m/s |
| TIME=300-330 ms | VEL_INT= 2565.56 m/s |
| TIME=330-360 ms | VEL_INT= 2618.06 m/s |
| TIME=360-390 ms | VEL_INT= 2667.72 m/s |
| TIME=390-420 ms | VEL_INT= 2714.68 m/s |
| TIME=420-450 ms | VEL_INT= 2759.08 m/s |
| TIME=450-480 ms | VEL_INT= 2801.05 m/s |
| TIME=480-510 ms | VEL_INT= 2840.70 m/s |

**XLINE=2685**

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| TIME=0-180 ms   | VEL_INT= 2346.42 m/s |
| TIME=180-210 ms | VEL_INT= 2363.75 m/s |
| TIME=210-240 ms | VEL_INT= 2398.75 m/s |
| TIME=240-270 ms | VEL_INT= 2433.23 m/s |
| TIME=270-300 ms | VEL_INT= 2467.21 m/s |
| TIME=300-330 ms | VEL_INT= 2500.71 m/s |
| TIME=330-360 ms | VEL_INT= 2533.74 m/s |
| TIME=360-390 ms | VEL_INT= 2566.33 m/s |
| TIME=390-420 ms | VEL_INT= 2598.49 m/s |
| TIME=420-450 ms | VEL_INT= 2630.24 m/s |
| TIME=450-480 ms | VEL_INT= 2661.59 m/s |
| TIME=480-510 ms | VEL_INT= 2692.56 m/s |

**XLINE=2715**

|              |    |          |         |     |
|--------------|----|----------|---------|-----|
| TIME=0-240   | ms | VEL_INT= | 2269.14 | m/s |
| TIME=240-270 | ms | VEL_INT= | 2327.15 | m/s |
| TIME=270-300 | ms | VEL_INT= | 2418.88 | m/s |
| TIME=300-330 | ms | VEL_INT= | 2499.19 | m/s |
| TIME=330-360 | ms | VEL_INT= | 2569.14 | m/s |
| TIME=360-390 | ms | VEL_INT= | 2629.57 | m/s |
| TIME=390-420 | ms | VEL_INT= | 2681.12 | m/s |
| TIME=420-450 | ms | VEL_INT= | 2724.29 | m/s |
| TIME=450-480 | ms | VEL_INT= | 2759.48 | m/s |
| TIME=480-510 | ms | VEL_INT= | 2786.99 | m/s |

**XLINE=2745**

|              |    |          |         |     |
|--------------|----|----------|---------|-----|
| TIME=0-240   | ms | VEL_INT= | 2289.30 | m/s |
| TIME=240-270 | ms | VEL_INT= | 2377.12 | m/s |
| TIME=270-300 | ms | VEL_INT= | 2487.63 | m/s |
| TIME=300-330 | ms | VEL_INT= | 2584.08 | m/s |
| TIME=330-360 | ms | VEL_INT= | 2667.99 | m/s |
| TIME=360-390 | ms | VEL_INT= | 2740.52 | m/s |
| TIME=390-420 | ms | VEL_INT= | 2802.55 | m/s |
| TIME=420-450 | ms | VEL_INT= | 2854.77 | m/s |
| TIME=450-480 | ms | VEL_INT= | 2897.71 | m/s |
| TIME=480-510 | ms | VEL_INT= | 2931.76 | m/s |

**XLINE=2775**

|              |    |          |         |     |
|--------------|----|----------|---------|-----|
| TIME=0-390   | ms | VEL_INT= | 2282.58 | m/s |
| TIME=390-420 | ms | VEL_INT= | 2373.23 | m/s |
| TIME=420-450 | ms | VEL_INT= | 2482.84 | m/s |
| TIME=450-480 | ms | VEL_INT= | 2585.11 | m/s |
| TIME=480-510 | ms | VEL_INT= | 2680.87 | m/s |

**XLINE=2805**

|              |    |          |         |     |
|--------------|----|----------|---------|-----|
| TIME=0-240   | ms | VEL_INT= | 2279.22 | m/s |
| TIME=240-270 | ms | VEL_INT= | 2290.62 | m/s |
| TIME=270-300 | ms | VEL_INT= | 2330.77 | m/s |
| TIME=300-330 | ms | VEL_INT= | 2373.48 | m/s |
| TIME=330-360 | ms | VEL_INT= | 2418.60 | m/s |
| TIME=360-390 | ms | VEL_INT= | 2466.00 | m/s |
| TIME=390-420 | ms | VEL_INT= | 2515.56 | m/s |
| TIME=420-450 | ms | VEL_INT= | 2567.16 | m/s |
| TIME=450-480 | ms | VEL_INT= | 2620.66 | m/s |
| TIME=480-510 | ms | VEL_INT= | 2675.95 | m/s |

**XLINE=2835**

|              |    |          |         |     |
|--------------|----|----------|---------|-----|
| TIME=0-180   | ms | VEL_INT= | 2245.61 | m/s |
| TIME=180-210 | ms | VEL_INT= | 2282.53 | m/s |
| TIME=210-240 | ms | VEL_INT= | 2379.60 | m/s |
| TIME=240-270 | ms | VEL_INT= | 2466.25 | m/s |
| TIME=270-300 | ms | VEL_INT= | 2543.55 | m/s |
| TIME=300-330 | ms | VEL_INT= | 2612.33 | m/s |
| TIME=330-360 | ms | VEL_INT= | 2673.25 | m/s |
| TIME=360-390 | ms | VEL_INT= | 2726.83 | m/s |

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| TIME=390-420 ms | VEL_INT= 2773.50 m/s |
| TIME=420-450 ms | VEL_INT= 2813.61 m/s |
| TIME=450-480 ms | VEL_INT= 2847.43 m/s |
| TIME=480-510 ms | VEL_INT= 2875.18 m/s |

**XLINE=2865**

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| TIME=0-150 ms   | VEL_INT= 2198.57 m/s |
| TIME=150-180 ms | VEL_INT= 2265.87 m/s |
| TIME=180-210 ms | VEL_INT= 2398.85 m/s |
| TIME=210-240 ms | VEL_INT= 2511.20 m/s |
| TIME=240-270 ms | VEL_INT= 2605.59 m/s |
| TIME=270-300 ms | VEL_INT= 2683.92 m/s |
| TIME=300-330 ms | VEL_INT= 2747.56 m/s |
| TIME=330-360 ms | VEL_INT= 2797.52 m/s |
| TIME=360-390 ms | VEL_INT= 2834.52 m/s |
| TIME=390-420 ms | VEL_INT= 2859.06 m/s |
| TIME=420-450 ms | VEL_INT= 2871.46 m/s |
| TIME=450-480 ms | VEL_INT= 2871.88 m/s |
| TIME=480-510 ms | VEL_INT= 2860.38 m/s |

**XLINE=2895**

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| TIME=0-150 ms   | VEL_INT= 2252.34 m/s |
| TIME=150-180 ms | VEL_INT= 2254.91 m/s |
| TIME=180-210 ms | VEL_INT= 2321.76 m/s |
| TIME=210-240 ms | VEL_INT= 2385.03 m/s |
| TIME=240-270 ms | VEL_INT= 2444.99 m/s |
| TIME=270-300 ms | VEL_INT= 2501.87 m/s |
| TIME=300-330 ms | VEL_INT= 2555.89 m/s |
| TIME=330-360 ms | VEL_INT= 2607.22 m/s |
| TIME=360-390 ms | VEL_INT= 2656.02 m/s |
| TIME=390-420 ms | VEL_INT= 2702.42 m/s |
| TIME=420-450 ms | VEL_INT= 2746.54 m/s |
| TIME=450-480 ms | VEL_INT= 2788.50 m/s |
| TIME=480-510 ms | VEL_INT= 2828.39 m/s |

**XLINE=2925**

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| TIME=0-150 ms   | VEL_INT= 2322.90 m/s |
| TIME=150-180 ms | VEL_INT= 2349.06 m/s |
| TIME=180-210 ms | VEL_INT= 2379.69 m/s |
| TIME=210-240 ms | VEL_INT= 2410.53 m/s |
| TIME=240-270 ms | VEL_INT= 2441.56 m/s |
| TIME=270-300 ms | VEL_INT= 2472.79 m/s |
| TIME=300-330 ms | VEL_INT= 2504.19 m/s |
| TIME=330-360 ms | VEL_INT= 2535.78 m/s |
| TIME=360-390 ms | VEL_INT= 2567.53 m/s |
| TIME=390-420 ms | VEL_INT= 2599.44 m/s |
| TIME=420-450 ms | VEL_INT= 2631.51 m/s |
| TIME=450-480 ms | VEL_INT= 2663.74 m/s |
| TIME=480-510 ms | VEL_INT= 2696.11 m/s |

**XLINE=2955**

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| TIME=0-210 ms   | VEL_INT= 2289.30 m/s |
| TIME=210-240 ms | VEL_INT= 2327.94 m/s |

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| TIME=240-270 ms | VEL_INT= 2395.64 m/s |
| TIME=270-300 ms | VEL_INT= 2456.98 m/s |
| TIME=300-330 ms | VEL_INT= 2512.45 m/s |
| TIME=330-360 ms | VEL_INT= 2562.42 m/s |
| TIME=360-390 ms | VEL_INT= 2607.20 m/s |
| TIME=390-420 ms | VEL_INT= 2647.06 m/s |
| TIME=420-450 ms | VEL_INT= 2682.22 m/s |
| TIME=450-480 ms | VEL_INT= 2712.86 m/s |
| TIME=480-510 ms | VEL_INT= 2739.14 m/s |

**XLINE=2985**

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| TIME=0-240 ms   | VEL_INT= 2285.94 m/s |
| TIME=240-270 ms | VEL_INT= 2348.93 m/s |
| TIME=270-300 ms | VEL_INT= 2449.76 m/s |
| TIME=300-330 ms | VEL_INT= 2539.68 m/s |
| TIME=330-360 ms | VEL_INT= 2619.83 m/s |
| TIME=360-390 ms | VEL_INT= 2691.07 m/s |
| TIME=390-420 ms | VEL_INT= 2754.10 m/s |
| TIME=420-450 ms | VEL_INT= 2809.47 m/s |
| TIME=450-480 ms | VEL_INT= 2857.63 m/s |
| TIME=480-510 ms | VEL_INT= 2898.93 m/s |

**XLINE=3015**

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| TIME=0-360 ms   | VEL_INT= 2269.14 m/s |
| TIME=360-390 ms | VEL_INT= 2295.91 m/s |
| TIME=390-420 ms | VEL_INT= 2431.49 m/s |
| TIME=420-450 ms | VEL_INT= 2554.40 m/s |
| TIME=450-480 ms | VEL_INT= 2666.41 m/s |
| TIME=480-510 ms | VEL_INT= 2768.83 m/s |

**XLINE=3045**

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| TIME=0-270 ms   | VEL_INT= 2329.62 m/s |
| TIME=270-300 ms | VEL_INT= 2348.38 m/s |
| TIME=300-330 ms | VEL_INT= 2381.56 m/s |
| TIME=330-360 ms | VEL_INT= 2417.73 m/s |
| TIME=360-390 ms | VEL_INT= 2456.75 m/s |
| TIME=390-420 ms | VEL_INT= 2498.51 m/s |
| TIME=420-450 ms | VEL_INT= 2542.86 m/s |
| TIME=450-480 ms | VEL_INT= 2589.66 m/s |
| TIME=480-510 ms | VEL_INT= 2638.80 m/s |

**XLINE=3075**

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| TIME=0-180 ms   | VEL_INT= 2252.34 m/s |
| TIME=180-210 ms | VEL_INT= 2327.88 m/s |
| TIME=210-240 ms | VEL_INT= 2403.73 m/s |
| TIME=240-270 ms | VEL_INT= 2471.87 m/s |
| TIME=270-300 ms | VEL_INT= 2532.91 m/s |
| TIME=300-330 ms | VEL_INT= 2587.36 m/s |
| TIME=330-360 ms | VEL_INT= 2635.62 m/s |
| TIME=360-390 ms | VEL_INT= 2678.03 m/s |
| TIME=390-420 ms | VEL_INT= 2714.87 m/s |
| TIME=420-450 ms | VEL_INT= 2746.35 m/s |

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| TIME=450-480 ms | VEL_INT= 2772.66 m/s |
| TIME=480-510 ms | VEL_INT= 2793.95 m/s |

**XLINE=3105**

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| TIME=0-150 ms   | VEL_INT= 2201.93 m/s |
| TIME=150-180 ms | VEL_INT= 2282.06 m/s |
| TIME=180-210 ms | VEL_INT= 2369.92 m/s |
| TIME=210-240 ms | VEL_INT= 2447.87 m/s |
| TIME=240-270 ms | VEL_INT= 2516.84 m/s |
| TIME=270-300 ms | VEL_INT= 2577.54 m/s |
| TIME=300-330 ms | VEL_INT= 2630.56 m/s |
| TIME=330-360 ms | VEL_INT= 2676.35 m/s |
| TIME=360-390 ms | VEL_INT= 2715.27 m/s |
| TIME=390-420 ms | VEL_INT= 2747.61 m/s |
| TIME=420-450 ms | VEL_INT= 2773.61 m/s |
| TIME=450-480 ms | VEL_INT= 2793.44 m/s |
| TIME=480-510 ms | VEL_INT= 2807.24 m/s |

**XLINE=3135**

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| TIME=0-210 ms   | VEL_INT= 2255.70 m/s |
| TIME=210-240 ms | VEL_INT= 2267.98 m/s |
| TIME=240-270 ms | VEL_INT= 2316.86 m/s |
| TIME=270-300 ms | VEL_INT= 2367.10 m/s |
| TIME=300-330 ms | VEL_INT= 2418.61 m/s |
| TIME=330-360 ms | VEL_INT= 2471.31 m/s |
| TIME=360-390 ms | VEL_INT= 2525.14 m/s |
| TIME=390-420 ms | VEL_INT= 2580.01 m/s |
| TIME=420-450 ms | VEL_INT= 2635.87 m/s |
| TIME=450-480 ms | VEL_INT= 2692.65 m/s |
| TIME=480-510 ms | VEL_INT= 2750.29 m/s |

**XLINE=3165**

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| TIME=0-210 ms   | VEL_INT= 2296.02 m/s |
| TIME=210-240 ms | VEL_INT= 2324.88 m/s |
| TIME=240-270 ms | VEL_INT= 2361.99 m/s |
| TIME=270-300 ms | VEL_INT= 2400.40 m/s |
| TIME=300-330 ms | VEL_INT= 2440.03 m/s |
| TIME=330-360 ms | VEL_INT= 2480.82 m/s |
| TIME=360-390 ms | VEL_INT= 2522.74 m/s |
| TIME=390-420 ms | VEL_INT= 2565.71 m/s |
| TIME=390-450 ms | VEL_INT= 2609.68 m/s |
| TIME=450-480 ms | VEL_INT= 2654.62 m/s |
| TIME=480-510 ms | VEL_INT= 2700.46 m/s |

## Références bibliographiques

1. Aklil A., Selmi K., 2009. Design et contrôle de qualité des données sismique 3D (sur Promax et Mesa). Mémoire d'ingénieur spécialisé en géophysique. Institut Algérien du pétrole. 92pp.
2. Bouterai A., Mezahdia M., 2005. Desing et controle de qualité en sismique 3D (sur Geoland et Promax). Mémoire d'ingénieur spécialisé en géophysique. Institut Algérien du pétrole. 199 pp.
3. Documentation intérieur de Sonatrach.

## Chapitre 06

## Application des diagraphies pour la caractérisation des sols

**I. Introduction**

Les diagraphies et la géophysique de forage font partie de la panoplie des méthodes auxquelles on a recours pour reconnaître le terrain sur lequel on a des projets de construction d'ouvrage de génie civil. Elles sont caractérisées par un mode particulier de mise en œuvre puisqu'elles sont employées en forage.

Une diagraphie représente l'enregistrement continu en fonction de la profondeur, d'un ou plusieurs paramètres du sol. Elle peut être obtenue:

- ❖ Pendant la réalisation d'un forage; il s'agit d'une diagraphie instantanée ou diagraphie de forage;
- ❖ Après réalisation d'un forage; il s'agit d'une diagraphie différée, généralement d'une diagraphie géophysique;

Les diagraphies différées, essentiellement employées, à l'origine, dans le domaine pétrolier, sont de plus en plus utilisées en hydrogéologie pour la recherche d'aquifère et en reconnaissance géotechnique. En effet, les informations qu'elles apportent sur les caractéristiques physiques des sols et des roches, in situ, sont particulièrement riches. Cet apport est à deux échelles: l'échelle de l'unité lithologique et l'échelle de l'intercalation ou de la discontinuité dans cette unité. Toutefois, pour un apport d'information optimal, il convient de traiter les mesures diagraphiques.

Une transformation de la structure des supports de mesure (volumes investis) des diagraphies différées permet d'obtenir, par rapport à une interprétation classique de ces mesures, une détermination plus précise des caractéristiques mesurées, un meilleur positionnement des limites de couches en profondeur et une meilleure estimation de la variabilité de la caractéristique mesurée.

On utilise pour ces diagraphies un appareil constitué d'un treuil muni d'un câble à plusieurs conducteurs, à l'extrémité duquel on fixe les différentes sondes qui effectuent les mesures, et par une valise électronique, qui traite les signaux reçus et les enregistre.

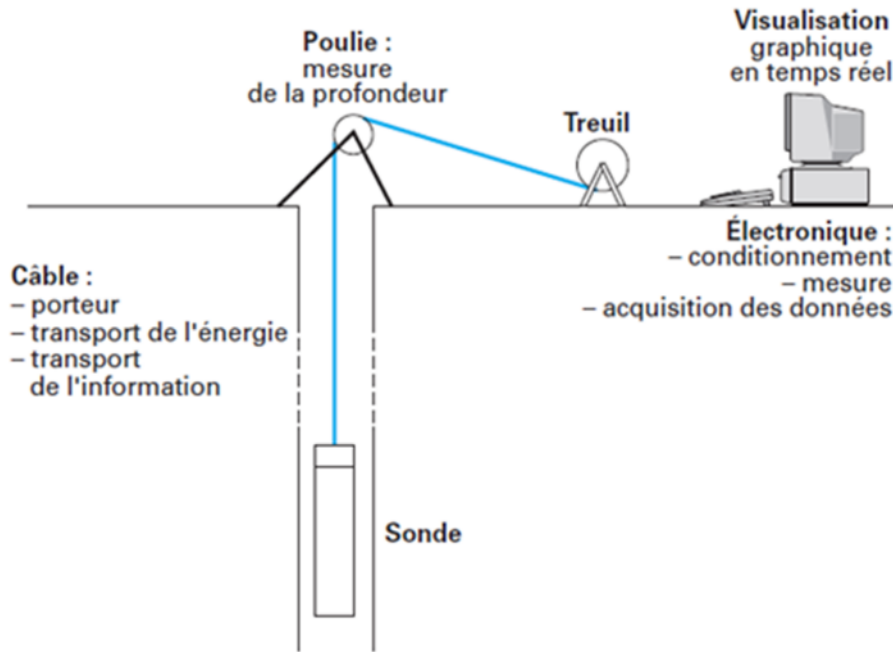
Lorsque les sondages mécaniques, carottés ou non, donnent des renseignements insuffisants, les diagraphies permettent d'identifier les roches, d'en préciser la nature, de les comparer entre elles, de préciser les profondeurs des contacts entre roches différentes et d'établir des corrélations entre les sondages effectués dans un même site. Elles permettent aussi de comparer les coupes d'anciens sondages à celles de sondages d'une nouvelle campagne.

En outre, elles permettent l'étalonnage des essais en place, grâce à des corrélations multiples et des analyses en composantes principales. Et ceci à des prix bas, en permettant de localiser des accidents particuliers ou de préciser le détail de structures. Les sondages nécessaires à leur exécution ne sont pas carottés, donc d'un coût peu élevé.

Ce dernier point incite à l'utilisation des diagraphies pour des études de détail où il est nécessaire de définir une structure complexe par un grand nombre de points. Ce chapitre est une contribution dans ce sens, il s'agit donc un travail purement expérimental en place.

De surcroît, les diagraphies ne nécessitent qu'un matériel aisément transportable (véhicule léger) et peuvent être effectuées très rapidement (plusieurs centaines de mètres de log par jour).

La définition verticale d'un outil de diagraphie peut être directement définie par le pas d'échantillonnage de la mesure le long du forage. La recherche d'un transfert d'information entre les mesures diagraphiques et les paramètres géotechniques de calculs permettrait aux diagraphies différées de devenir un complément indispensable aux forages destructifs dans toute reconnaissance géotechnique.



**Figure 6.1.** Schéma général d'un matériel de diagraphie.

## II. Diagraphies géophysiques

On utilise généralement les diagraphies de résistivité électrique, de radioactivité naturelle, soniques et de radioactivité induite.

Les diagraphies de résistivité électrique et soniques ne peuvent être réalisées que dans des forages non tubés, soit secs pour la résistivité ou la sonique, soit pleins de boue ou d'eau pour la résistivité, ou la sonique. Les diagraphies de radioactivité naturelle ou induite peuvent être exécutées dans les trous tubés ou non, secs ou pleins de boue ou d'eau. Ces dernières sont donc particulièrement adaptées à l'utilisation géotechnique. Néanmoins l'utilisation d'une source radioactive artificielle tend à diminuer, au vu des risques inhérents à sa manipulation.

Les principales informations données par des logs radioactifs, électriques et soniques sont:

- ❖ La nature lithologique des formations (argiles, sables, grès, calcaires,...) données permettant d'identifier les terrains et de déterminer les épaisseurs et l'extension latérale des différentes couches;
- ❖ La mesure relative de grandeurs physiques telles que la porosité, la densité, la compacité, la fracturation, etc. ;
- ❖ Moyennant un étalonnage précis de l'outil par échantillonnages prélevés, il est possible de traduire ces valeurs mesurées en données quantitatives.

## II.1 Diagraphie de radioactivité naturelle (RAN)

Les diagraphies font un usage intensif de la mesure de la radioactivité dans les forages. Les logs nucléaires ont en effet un grand avantage, ils peuvent être enregistrés en trous ouverts ou tubés, vides ou remplis de n'importe quel type de fluide.

Les plus couramment utilisés sont: le gamma ray, qui est une mesure de la radioactivité naturelle, Le log gamma-gamma et le log neutron qui sont des mesures de radioactivité provoquée.

Le log nucléaire le plus simple, le gamma ray, est une mesure de la radioactivité naturelle existant dans certaines roches.

Ce log apporte des informations lithologiques; il met bien en évidence les charbons, les évaporites et surtout les niveaux d'argiles qui constituent souvent les limites des réservoirs dans le sous-sol.

D'autre part, le log gamma permet d'estimer le pourcentage d'argile dans les formations sableuses.

Contrairement au log P.S. qui a la même fonction, il peut être utilisé dans les forages tubés, en présence de boues résistantes et dans les forages remplis d'air.

### ➤ Les éléments radioactifs dominants

De très nombreux isotopes naturels sont radioactifs. Seuls trois d'entre eux jouent un rôle notable dans la radioactivité naturelle des minéraux et des roches. Les autres sont extrêmement peu stables ou extrêmement rares.

Alors, La radioactivité naturelle (RAN) des sols ou des roches est due à la présence en quantité infime de trois radio-éléments naturels de longue période, l'Uranium 238, le Thorium 232, le Potassium 40 et du Radium. Elle peut être mesurée au moyen d'un compteur à scintillation.

### **Roches à radioactivité élevée**

- ❖ Granites potassiques et roches en décaissant,
- ❖ Certains sables et grès riches en minéraux accessoires à uranium et thorium,
- ❖ Phosphate,
- ❖ Evaporites potassiques,
- ❖ La plupart des argiles,
- ❖ Schistes noirs.

**Roches à radioactivité moyenne :**

- ❖ grès et sables,
- ❖ gneiss.

**Roches à radioactivité faible :**

- ❖ Calcaires et dolomies,
- ❖ Charbons en général,
- ❖ Evaporites sans potassium, halite, anhydrite, roches basiques et ultrabasiques.

**Domaine et conditions d'application**

La diagraphie de radioactivité naturelle met en évidence les matériaux plus ou moins radioactifs naturellement.

Parmi les matériaux cristallins, le granite (ou la rhyolite) est le plus radioactif. La RAN permet alors de distinguer le granite d'autres matériaux et, par exemple, lors de la reconnaissance d'un gisement de roches massives destinées à être exploitées en carrière, de distinguer entre différents types de granites.

Dans les séries sédimentaires de type alternances de calcaires, marnes, marno-calcaires, argiles, etc., les différentes couches sont caractérisées par un profil de radioactivité particulier (signature), que l'on retrouve d'un forage à l'autre à l'intérieur du massif. La juxtaposition des diagraphies dans les différents forages aide à comprendre la structure géologique du massif (variation de l'épaisseur des couches, etc.).

L'exploitation de gisements de granulats alluvionnaires peut aussi être guidée par la mesure de la RAN, qui peut servir d'indicateur en «propreté» de granulats.

Dans les massifs rocheux fissurés, les fissures sont ou non remplies d'argile. Lorsqu'elles le sont, la RAN les met bien en évidence; lorsqu'elles ne le sont pas, elles sont mises en évidence par d'autres types de diagraphies (résistivité ou microsismique), qui sont donc complémentaires pour l'étude des massifs rocheux.

Concernant les conditions d'application, la diagraphie de radioactivité naturelle est très originale, car elle ne présente aucune contre-indication. Naturellement, elle ne donnera des résultats contrastés que si le terrain présente des contrastes de radioactivité, mais cette absence de contraste est déjà un renseignement utile.

Les forages peuvent être ou ne pas être tubés et le tubage peut être métallique ou en matière plastique.

De même, les forages peuvent être noyés ou secs ; ils peuvent être de très faible diamètre intérieur, puisqu'il existe des sondes de diagraphies RAN de 2,5 cm de diamètre. Ainsi, la diagraphie RAN peut être mise en œuvre dès la fin de la foration par l'intérieur du train de tige avant que celui-ci ne soit enlevé.

### Principe et résultat fourni

Le résultat d'une diagraphie de radioactivité naturelle se présente, comme toutes les diagraphies, sous la forme d'une courbe dans un système d'axes où la profondeur est portée sur l'axe vertical et la radioactivité mesurée, en nombre de coups par seconde (cps), est portée sur l'axe horizontal (figure 6.1). Cette valeur est relative, et dépend de la vitesse de remontée de la sonde dans le forage (plus cette vitesse est grande, moins la courbe est contrastée), de la nature du tubage s'il existe et du caractère sec ou noyé du forage, ainsi que de la taille du cristal qui constitue l'élément sensible du capteur.

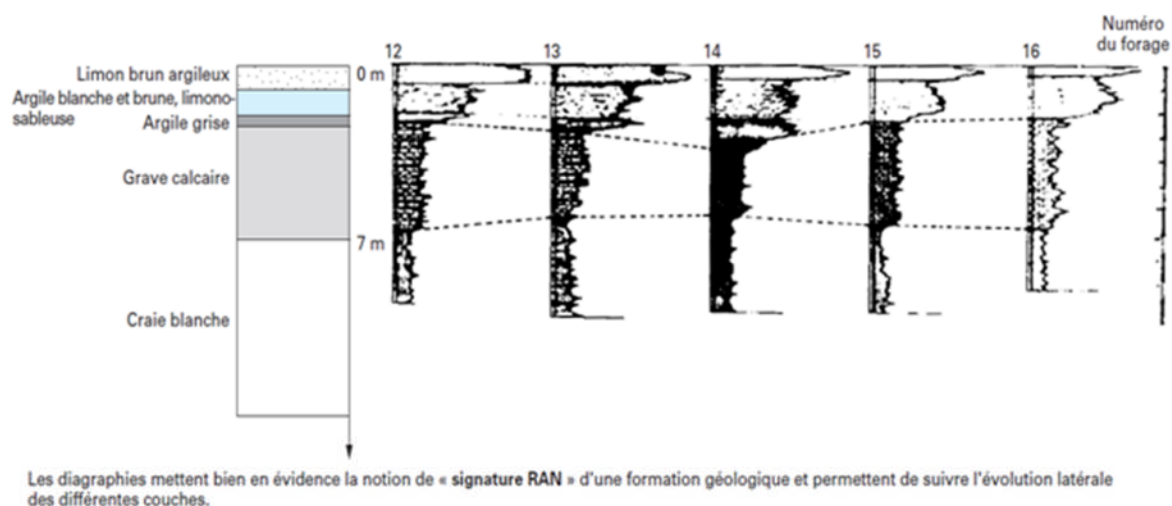
Une sonde de diagraphie de radioactivité naturelle comporte en effet un capteur constitué d'un cristal qui transforme les impacts de photons gamma en signal électrique et d'un circuit électronique associé. C'est donc une sonde essentiellement passive. Du diamètre de la sonde dépend celui du cristal ; plus le diamètre est faible, moins le capteur est sensible et plus la vitesse de remontée doit être faible afin que le capteur reste assez longtemps à une profondeur donnée pour recevoir suffisamment d'impacts gamma pour que le signal soit mesurable (rappelons que la radioactivité est un phénomène aléatoire et qu'il faut donc effectuer un grand nombre de « tirs » pour obtenir un signal stable).

L'interprétation se fait au vu de la courbe ou des courbes obtenues sur plusieurs forages dans la même campagne de mesure. Elle consiste (figure 6.2):

- ❖ A identifier les terrains traversés par le forage à partir de leurs « signatures » RAN et de la connaissance globale que l'on a de la géologie,
- ❖ A comparer les différentes couches pour suivre d'un forage à l'autre l'évolution de la stratigraphie,
- ❖ A détecter d'éventuels accidents tectoniques.

On détecte les fissures dans les massifs rocheux et, en confrontant différents types de diagraphies dans le même forage, on identifie les fissures remplies d'argile ou non.

À ces identifications qualitatives sont associées des déterminations quantitatives, comme la profondeur des couches ou des fissures et leurs épaisseurs.



**Figure 6.2.** Exemple de diagraphies de radioactivité naturelle sur plusieurs forages.

## II.2 Diagraphie sonique

Le log sonique est basé sur l'étude de la propagation dans les roches d'ondes acoustiques générées par l'outil de diagraphie.

La mesure de la vitesse de propagation de ces ondes et de leur atténuation apporte des renseignements sur les propriétés mécaniques des roches traversées. La propagation d'ondes acoustiques dépend en effet des propriétés élastiques des formations composant le sous-sol.

Le paramètre mesuré est la vitesse de propagation des ondes P.

### Domaine et conditions d'application

La diagraphie sonique est une excellente méthode pour l'étude détaillée des massifs rocheux. Elle consiste à mesurer en place la vitesse de l'onde mécanique de compression, celle-ci étant très sensible à l'état du rocher et à ses propriétés mécaniques en général.

La diagraphie sonique permet, en outre, de détecter les fractures.

On s'en sert donc pour prévoir l'aptitude au terrassement des massifs rocheux, pour préparer les plans de tir pour leur minage et pour régler ces plans de tir en fonction de la taille des blocs que l'on désire extraire.

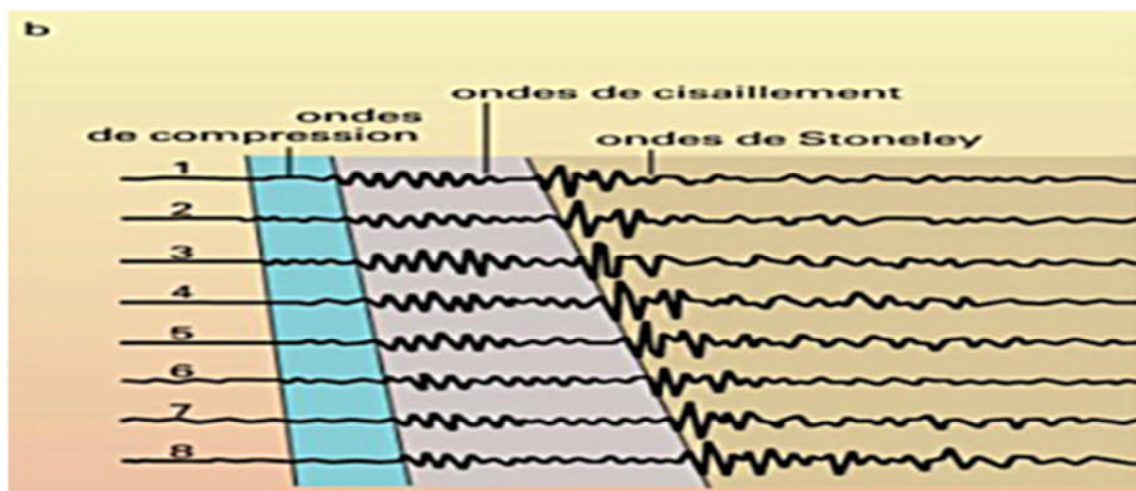
Les applications principales sont la préparation de la réalisation de déblais rocheux et l'exploitation des carrières de roches massives, soit pour fabriquer des granulats, soit pour fabriquer des enrochements.

Les forages ne doivent pas être tubés, car un bon contact mécanique est nécessaire entre les sources sismiques, les capteurs et le rocher. Les forages peuvent ou non contenir un fluide.

### Principe de la mesure et résultat

On enregistre le temps mis par la composante longitudinale d'une onde sonore - dont la fréquence est de l'ordre de 20 à 40 kilo hertz - pour parcourir la distance entre un émetteur et un récepteur situé, en général, à une distance de 60 centimètres. Le temps étant mesuré à la première arche de l'onde sonore, cette arche appartient à l'onde longitudinale (ou de compression) qui est la plus rapide. Un système complexe à deux émetteurs et quatre récepteurs permet d'éliminer l'effet perturbateur de la colonne de boue.

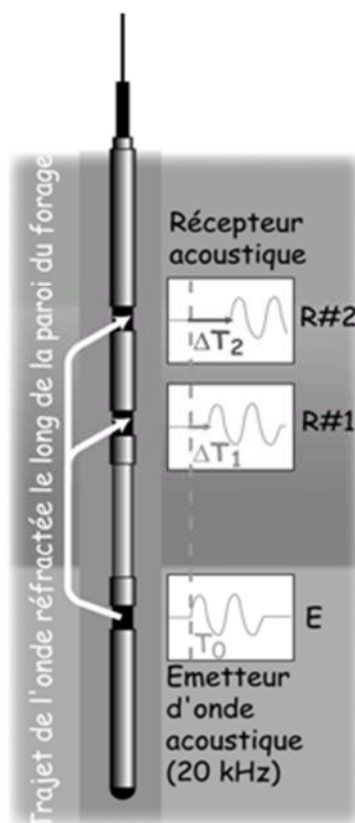
Dans les dispositifs modernes, on procède à l'enregistrement numérique du train d'onde complet reçu par une série de récepteurs. L'instrument de mesure comprend toujours deux émetteurs d'ondes sonores. Ce dispositif permet de déterminer le temps de trajet des ondes de compression, de cisaillement, et de Stoneley.



**Figure 6.3.** Exemple type de dispositif d'enregistrement des ondes.

Ces temps de trajet dépendent: de la nature de la roche, par l'intermédiaire de sa masse volumique et des paramètres d'élasticité de ses constituants; de la nature des fluides présents dans la roche; de la texture (taille et forme des grains et des pores, nature des contacts entre grains ou cristaux, répartition et connexion des pores); de la structure (homogénéité ou hétérogénéité, présence de fractures, pendage des couches et des fractures); de la pression et de la température.

Une étude des propriétés mécaniques des roches peut donc être entreprise à l'aide de ces différentes données. La mesure des temps de trajet des ondes de compression et de cisaillement, combinée à celle de la masse volumique, conduit notamment à la détermination des modules d'élasticité de la roche.



**Figure 6.4.** Principe de fonctionnement de la sonde sonique.

### II.3 Diagaphie de résistivité

Parmi les paramètres mesurés par les outils de diagaphies il en est un qui intervient à maintes reprises: la résistivité électrique des roches.

La résistivité électrique des roches  $R$ , est dans la plupart des cas de type électrolytique, c'est-à-dire que les roches conduisent le courant électrique grâce au fluide qu'elles contiennent.

On peut dire que la résistivité électrique d'une roche dépend essentiellement:

- ❖ De la qualité de l'électrolyte, c'est à dire de la résistivité du fluide d'imbibition  $R_w$  et, par conséquent, de la quantité de sels dissous,
- ❖ De la quantité d'électrolyte contenue dans l'unité de volume de la roche, c'est-à-dire de la porosité  $\phi$ ,
- ❖ Du mode de distribution de l'électrolyte.

### **Domaine et conditions d'application**

En génie civil, la diagraphie de résistivité est indiquée lorsque l'on veut préciser la lithologie du terrain traversé par un forage. Elle sert aussi à l'étude de la fracturation d'un massif rocheux. Elle est également un complément aux campagnes de prospection électrique de surface, en donnant des informations précises sur la répartition locale des résistivités des matériaux en fonction de la profondeur; on peut ainsi caler l'interprétation des mesures de surface en levant les ambiguïtés.

Comme avec la radioactivité naturelle, la juxtaposition de diagraphies de résistivité réalisées dans un ensemble de forages dans un même massif géologique renseigne sur la structure de ce massif, tant du point de vue de la stratigraphie que des accidents tectoniques qui peuvent l'affecter.

Dans un massif rocheux, une fracture remplie de fluide ou d'argile apparaît comme une hétérogénéité conductrice et peut être mise en évidence par la résistivité, tandis que la radioactivité naturelle ne détectera que la fracture remplie d'argile. Les deux types de diagraphies sont donc complémentaires.

### **Principe de la mesure et résultat**

Une source émettrice (électrode ou sonde) envoie un signal (courant électrique, champ électromagnétique).

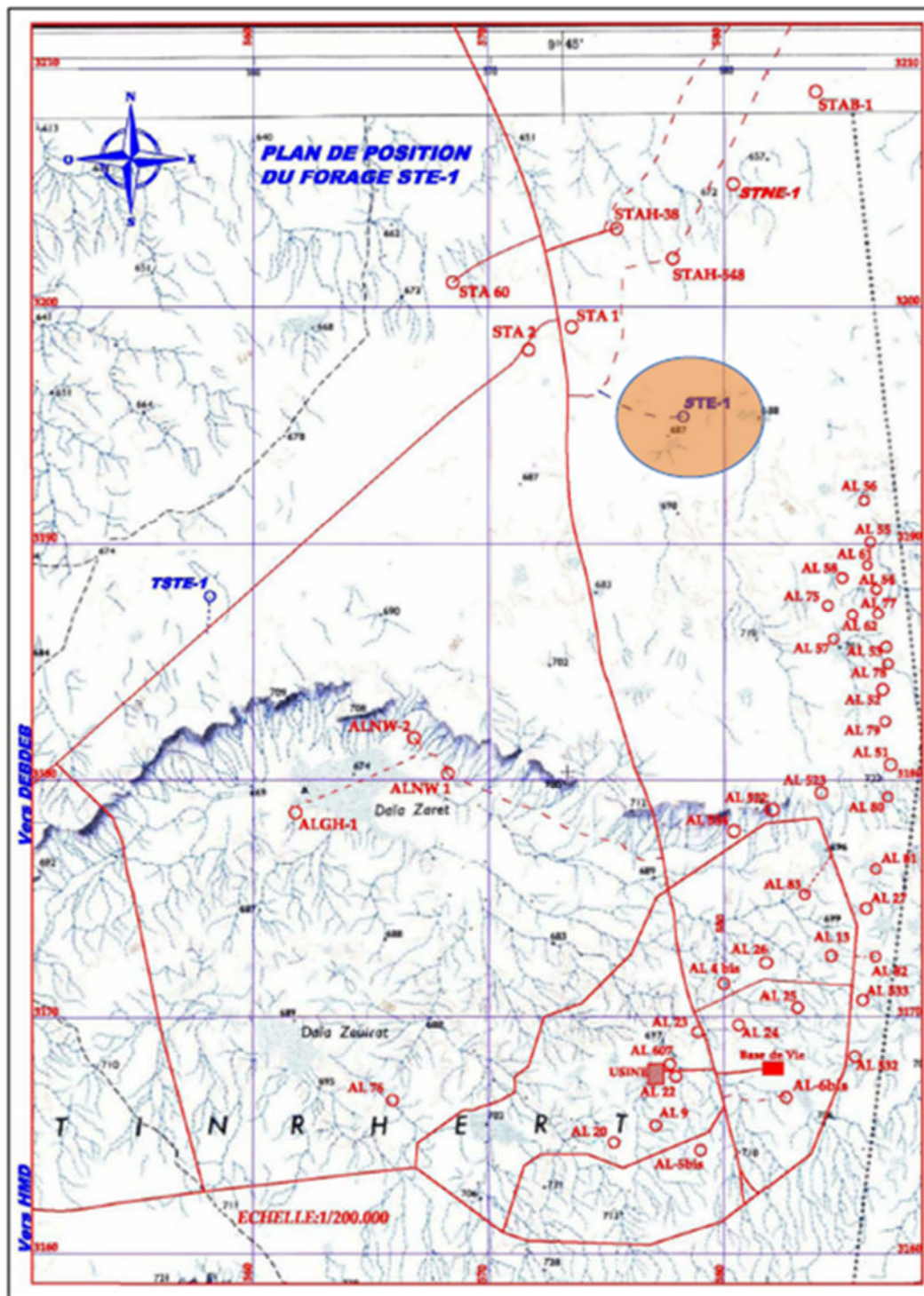
Un dispositif de mesure (récepteur) situé à une certaine distance de la source, appelée "espacement", enregistre les réactions du terrain à ce signal.

Plus la distance entre l'émetteur et récepteur est grande, plus l'investigation est profonde.

## **III. Application des diagraphies au puits STE**

### **a. Localisation de puits**

Le puits **STE-1** est situé dans le bloc 239a au Nord-est du périmètre Tinrhert, à environ 32km de la base de vie Alrar (Figure 6.5). Pour le support logistique In Amenas se situe à 150km avec toute l'infrastructure d'une grande ville.



**Figure 6.5.** Plan de Position du forage STE#1 sur Fond Topographique

### b. Cadre géologique

Le Tinnhert est limité au Nord par le môle d'Ahara, à l'Ouest par le périmètre de Gara Tesselit, à l'Est par la frontière Algéro-Libyenne et au Sud par les périmètres de Bourarhet et

In Amenas. Le puits d'exploration STE#1 est implanté suite à l'interprétation de la sparse 3D qui a mis en évidence la structure de Stah Est.

### c. Prévisions litho-stratigraphiques

La série stratigraphique traversée par les forages dans la zone d'étude est constituée comme suivant :

- du surface à 71m ép.= 71m

Calcaire dolomitiques, jaune, claire à jaune pâle, compacte, cryptocristallin avec des passées de marne, jaune, claire et trace de gypse.

- De 71 à 151m ép.= 80m

Calcaire dolomitique finement grenu jaune à crème. Passant localement à une dolomie calcarifère de même teinte.

- de 151 à 291m ép.= 140m

Argiles bariolées à bancs ou nodules de gypse fibreux. Rares petits bancs de dolomie beige.

- de 291 à 328m ép.= 37m

Argile gris vert à verte, indurée à tendre, silteuse avec passées de dolomie gris beige à blanche. Fines passées de grés gris blanc, fin à moyen, friable.

- de 328 à 380m ép.= 52m

Sable blanc, translucide, moyen à grossier, localement très grossier avec passées d'argile gris verdâtre. Alternance de dolomie gris beige à blanche, sable blanc translucide.

- de 380 à 550m ép.= 170m

Alternances d'argiles orange, gris-verdâtre, gris-clair et rouge, parfois plastique, dolomitique, avec sable blanc grossier à moyen parfois dur.

- de 550 à 896m ép.= 346m

Argiles bariolées brun-rouge, verdâtres et gris clair. Légèrement sableuses avec des fines et nombreuses intercalations de dolomie blanchâtre, parfois de grés dolomitique très fin, brun-rouge légèrement ferrugineux, de sable moyen à grossier et de grains de quartz translucides.

➤ de 896 à 1053m ép.= 157m

Alternance de grès gris-clair, fin, argileux, d'argile versicolore, indurée, légèrement dolomitique et de dolomie gris-beige, microcristalline, compacte, dure.

| SONATRACH<br>Division Forage<br>Direction Régionale Hassi Messaoud                                       |             |       |                           |       | PREVISION DE FORAGE<br>Stah Est -1 [STE#1]                                                                                                                               |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------|---------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Coordonnées UTM (fuseau 32) :<br>X = 578 328.756 m<br>Y = 3 195 251.748 m<br>Zs = 677,766m, Zt= 685,766m |             |       |                           |       |                                                                                                                                                                          |  |
| AGE                                                                                                      | PROF<br>/Zt | EPAIS | ETAGE                     | STRAT | LITHOLOGIE                                                                                                                                                               |  |
| Crétacé                                                                                                  | Surface     | 71    | Sénonien                  |       | Calcaire dolomitique jaune, blanc beige, microcristallin à cryptocristallin compact avec des intercalations de marne grise.                                              |  |
|                                                                                                          | 71          | 80    | Turonien                  |       | Argiles et Gypses                                                                                                                                                        |  |
|                                                                                                          | 151         | 140   | Cénomaniens Argiles &     |       | Argiles bariolée, brun rouge, verte, ôcre ou beige claire, finement sableuse.                                                                                            |  |
|                                                                                                          | 291         | 37    | In Akamil                 |       | sables et argiles avec rares dolomies                                                                                                                                    |  |
|                                                                                                          | 328         | 52    | Taouratine Sup & Moy.     |       | argiles plastiques avec intercalations de sables moyen                                                                                                                   |  |
|                                                                                                          | 380         | 170   | Taouratine Inf.           |       | alternance de sables et argiles et de calcaire dolomitique                                                                                                               |  |
| Trias<br>Juras<br>siliceux                                                                               | 550         | 346   | Zarzaitine Sup.           |       | sables intercalé d'argiles et de dolomie                                                                                                                                 |  |
|                                                                                                          | 896         | 157   | Zarzaitine Inf.           |       | argiles silteuse carbonatée                                                                                                                                              |  |
| CARBONIFERE                                                                                              | 1053        | 130   | Tiguentourine             |       | Calcaire dolomitique, grès argilo-siliceux avec des passés de calcaire gréseux                                                                                           |  |
|                                                                                                          | 1183        | 115   | Westphalien F             |       | Grès argileux avec intercalations d'argiles                                                                                                                              |  |
|                                                                                                          | 1298        | 190   | Westpha.-Namurien E       |       | argiles gréseuse avec intercalations de calcaire                                                                                                                         |  |
|                                                                                                          | 1488        | 145   | Namurien D                |       | Grès avec des niveaux argileux                                                                                                                                           |  |
|                                                                                                          | 1633        | 225   | Viséen C                  |       | Argiles avec rares passées de calcaire                                                                                                                                   |  |
|                                                                                                          | 1858        | 240   | Viséen B                  |       | Grès blanc à gris à ciment siliceux localement argileux                                                                                                                  |  |
| DEVONNIEN                                                                                                | 2098        | 320   | Tournaisien A             |       | Argiles gris clair à rares fines passées de calcaire et de grès                                                                                                          |  |
|                                                                                                          | 2418        | 58    | Strunien Réservoir F2     |       | Grès gris blanc, fin argileux                                                                                                                                            |  |
|                                                                                                          | 2476        | 228   | Famenien Frasnien         |       | Argiles gris clair à rares fines passées de calcaire et de grès                                                                                                          |  |
|                                                                                                          | 2704        | 45    | Givetien F3               |       | Argiles                                                                                                                                                                  |  |
|                                                                                                          | 2749        | 17    | Argiles                   |       | Argiles gris clair à rares fines passées de calcaire et de grès                                                                                                          |  |
|                                                                                                          | 2766        | 26    | Emsien Réservoir F4       |       | Grès gris blanc, fin argileux                                                                                                                                            |  |
|                                                                                                          | 2792        | 19    | Argiles                   |       | Argiles gris clair à rares fines passées de calcaire et de grès                                                                                                          |  |
|                                                                                                          | 2811        | 28    | Unit C3                   |       | Ensemble grés-argileux par des grès fin, beige à gris claire, siliceux avec de rares débris de charbon, pouvant alterner avec des niveaux argileux,                      |  |
|                                                                                                          | 2839        | 8     | Unit C2                   |       | complexe grés-ferrugineux constitué par des grès gris clair à ciment kaolinique                                                                                          |  |
|                                                                                                          | 2847        | 28    | Unit B1                   |       | Grès gris clair fin à grossier siliceux avec passées d'argiles                                                                                                           |  |
| SILURIEN                                                                                                 | 2875        | 35    | Unit A                    |       | Ensemble argileux gréseux, ciment siliceux à tendance quartzitique                                                                                                       |  |
|                                                                                                          | 2910        | 45    | Unit M2                   |       | Ensemble gréseux - argileux à ciment kaolinique à fines passées d'argiles                                                                                                |  |
|                                                                                                          | 2955        | 70    | Unit M1                   |       | Argiles noires, schisteuse, silteuse, micacée avec quelques fines intercalations gréseuses ou argilo gréseuse                                                            |  |
|                                                                                                          | 3025        | 248   | Westphalien<br>Llandovery |       | Argiles noires, schisteuse, silteuse, micacée avec quelques fines intercalations gréseuses ou argilo gréseuse                                                            |  |
|                                                                                                          | 3025        | 248   | Silurien Argileux         |       | Argiles noires, schisteuse, silteuse, micacée avec quelques fines intercalations gréseuses ou argilo gréseuse                                                            |  |
| Ordovicien                                                                                               | 3273        | 21    | Unité IV-3                |       | Ensemble argilo-gréseux, formé par des grès fin, gris clair à ciment siliceux, qui s'alternent avec des argiles noires micacées                                          |  |
|                                                                                                          | 3294        | 125   | Unité IV-2                |       | Grès noir très fin à fin, argilo-siliceux, très compact, passant progressivement à une argile noire micacée légèrement gréseuse.                                         |  |
|                                                                                                          | 3419        | 72    | Unité III-3               |       | Grès gris beige à gris sombre, fin à très fin, argilo-siliceux, intercalé par des argiles moyennement consolidé, gris noir, indurée, silteuse, micacée traces de pyrite. |  |
|                                                                                                          | 3491        | 115   | Unité III-1               |       |                                                                                                                                                                          |  |
|                                                                                                          | 3606        | 10    | Unité II                  |       |                                                                                                                                                                          |  |
| Précamb                                                                                                  | 3616        | >35   | Socle                     |       | Roches métamorphiques altérées, formées par des argiles schisteuse, gris verdâtre, à gris foncé brunâtre à éléments blanc, transclide et vert foncé.                     |  |
| Profondeur Finale 3650m                                                                                  |             |       |                           |       | Puits de ref. ALNW-2, STNE-1, STA-1bis & STAB-1                                                                                                                          |  |

Figure 6.6. Prévisions des forages.

- de 1053 à 1183m ép.= 130m

Argiles brun-rouge, parfois verte, passant localement à de la marne de même teinte et comportant de très rares et minces niveaux de calcaire et plus rarement de dolomie beige ou gris-beige.

- de 1183 à 1298m ép.= 115m

Formé d'alternances de calcaire gris-clair, blanchâtre, jaunâtre, dolomitique, cristallin à microcristallin, bioclastique avec argile marron, rouge-brique, dolomitique.

- de 1298 à 1488m ép.= 190m

Caractérisé par des marnes et des argiles versicolores, parfois gréseuses de couleur gris - foncé à noirâtre avec des passées de calcaire gris - blanc à jaune. Présence de niveaux de dolomie blanchâtre microcristalline.

- de 1488 à 1633m ép.= 145m

Alternance de grés blanc à gris, fin à moyen, d'argiles foncées, silteuses et de rares passées de calcaire, gris - gris beige, fossilifère tendre, à traces de pyrite.

- de 1633 à 1858m ép.= 225m

Argiles schisteuse, gris-foncé à noire parfois verdâtre, plus au moins sableuse finement micacée, pyriteuse avec des zone argilo-gréseuses peu développées à petits bancs de calcaire gréseux.

- de 1858 à 2098m ép.= 240m

Argiles gris-foncé à noire, finement gréseuse et micacée, avec des niveaux de grés fin, blanc ou gris clair, argilo-siliceux ou légèrement calcaire, localement pyriteuse.

- de 2098 à 2418m ép.= 320 m

Représenté par des argiles gris - noires, indurées à rares passées de grés gris, fin à très fin argilo-siliceux. Présence de traces de pyrite.

- de 2418 à 2476m ép.= 58 m

Grés beige, gris blanc, fin à moyen, sub arrondi à sub anguleux avec des passées d'argile noire, indurée, silteuse, trace de pyrite.

- de 2476 à 2704m ép.= 228m

Argile gris - clair à gris - foncé avec rares et fines passées de calcaire et de grés gris-brun, silteux et micacé.

- de 2704 à 2749m ép.= 45m

Grès blanc translucide, fin à grossier, sub arrondi à sub anguleux, silico argileux, moyennement dur à friable avec passées d'argile gris claire, gris foncée, indurée, silteuse.

- de 2749 à 2766m ép.= 17m

Argile gris - clair à gris - foncé avec rares et fines passées de calcaire et de grés gris brun, silteux et micacé.

- de 2766 à 2792m ép.= 26m

Alternance de grés gris blanc à gris clair, beige, très fin à fin, siliceux à silico argileux, friable et d'argile grise foncée, micacée, silteuse à silico sableuse.

- de 2792 à 2811m ép.= 19m

Argiles schisteuse noire, finement micacée et gréseuse avec rares strates ou inclusion d'argiles sidéritique brune, rares strates de grés fin siliceux gris-clair, des nodules de pyrite dans un grés fin.

- de 2811 à 2847m ép.= 36m

Ensemble argilo gréseux, caractérisé par des grés fins, gris- clair, beige, avec de rares débris de charbon, pouvant alterner avec des niveaux argileux, verdâtres parfois rougeâtres. Le sommet de cet ensemble passe à des grés gris fins fluviaux à estuariens à influence marine marquant ainsi le début de la transgression du Dévonien inférieur.

- de 2875 à 2910 ép.= 35m

Grès blanc à beige clair, fin à grossier, à ciment siliceux à silico argileux, localement quartzitique, dur avec passées d'argile gris foncé silteux sableuse, micacée, indurée, feuilletée.

- de 2910 à 3025m ép.= 115m

Ensemble gréseux - argileux à argilo – gréseux. Cette unité est représentée par des grés beiges à blanchâtres, moyens à grossiers avec de fines passées d'argile grise - claire.

- de 3025 à 3368m ép.= 248m

Argiles gris noir à noire, indurée silteuse, micacée, pyriteuse avec rares passées de grés gris blanc à blanc, fin à très fin, siliceux à silico-argileux, moyennement consolidé.

- de 3273 à 3294m ép.= 21m

Grés quartzitique gris blanc, fin à moyen, localement grossier, sub anguleux à sub arrondi, compact dur, présence de films d'argile gris foncé à gris noir, induré silteuse et traces de pyrite.

- de 3294 à 3419m ép.= 125m

Grés quartzitique gris blanc, parfois beige, fin à moyen, silico quartzitique, sub anguleux à sub arrondi compacte dur, d'argile grise foncée dure à indurée, silteuse.

- de 3419 à 3491m ép.= 72m

Grés gris blanc à gris sombre fin, localement moyen, sub arrondi, siliceux à silico argileux, bien consolidé avec fines passées d'argile gris noir à gris sombre, indurée, silteuse, micacée, légèrement feuilletée.

- de 3491 à 3606m ép.= 115m

Alternance argilo gréseuse, formée d'argile grise à gris noir indurée silteuse et des intercalations de fin films de grés clair à gris blanc fin à très fin, silico quartzitique, présence de pyrite.

- de 3606 à 3616m ép.= 10m

Grés gris, gris blanc, fin quartzitiques. Grés grossier micro conglomératique, gris blanc avec intercalation de fin films d'argile verte, présence de pyrite.

- 3616m

Roche leucocrate, chloriteuse, entrecoupée de filaments de calcite. Présence notable d'oxyde de fer remarquable par sa teinte brune. Texture grenue type.

#### **IV. Présentation des résultats**

Les résultats des mesures faite au puits STE#1 des diagraphies de gamma ray, de résistivité, de densité et sonique, et le calcul des paramètres géodynamique de sol à savoir le module de cisaillement G, le module d'incompressibilité K, le module de Young E et coefficient de poisson  $\nu$ , sont présentées dans l'annexe B vu la taille est la quantité de ces paramètres.

## V. Interprétation des résultats

### • Détermination de la lithologie de terrain

La lithologie de terrain a été déterminée pendant le forage, durant le processus même du forage des mesures sont réalisées dont le résultat est fonction de la profondeur de l'outil de forage.

Le suivi des paramètres de forage dans une "cabine géologique" concernait uniquement la vitesse d'avancement qui permettait au géologue de faire des corrélations et positionner ainsi les tops des formations traversées. Elle est assimilée à la rotation d'une organe mécanique en supposant un lien direct entre l'outil et le mouvement observé en surface, d'où le terme de "surveillance géologique" attribué à l'activité qui est exercée dans ces cabines.

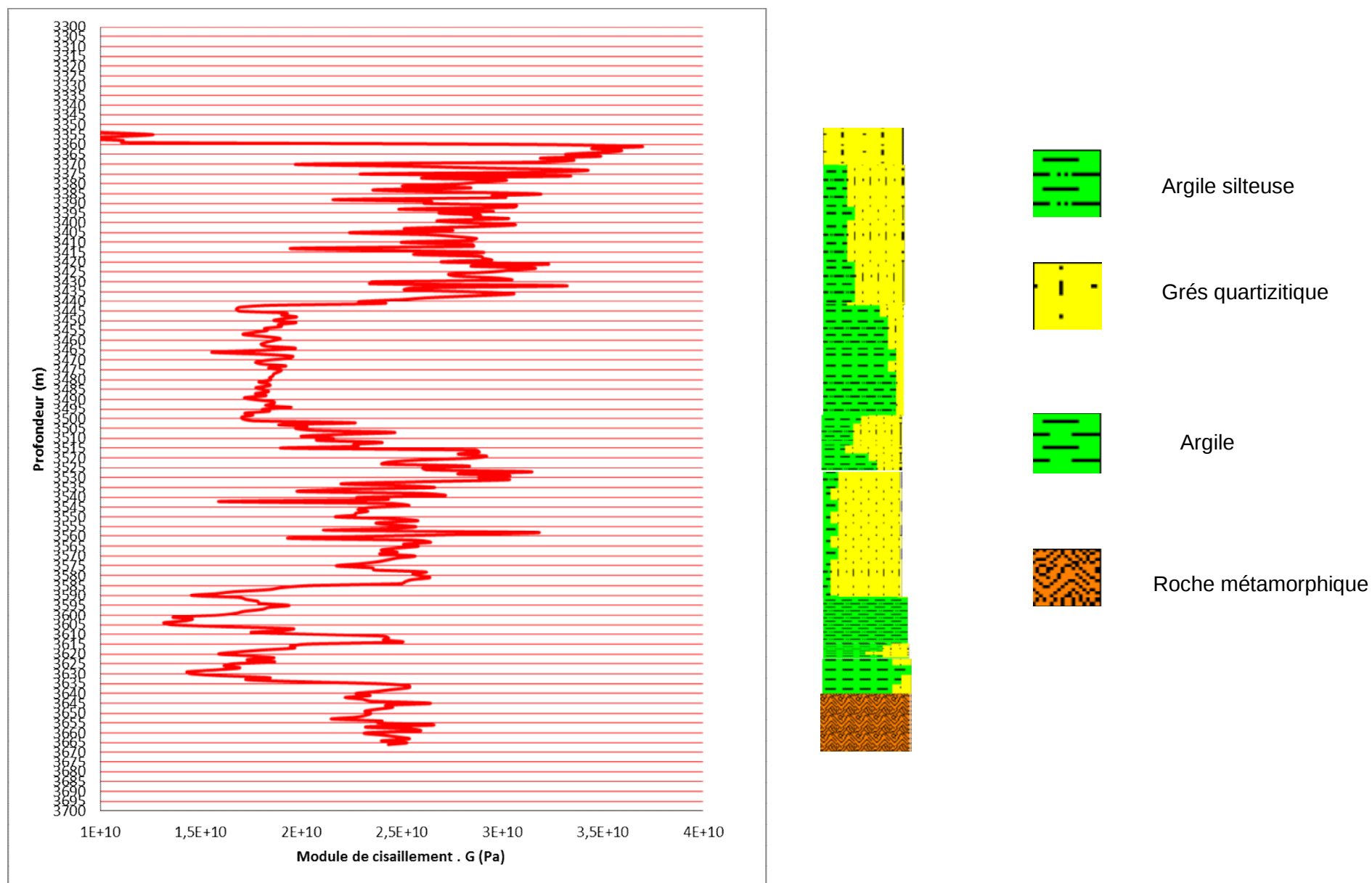
Le reste de cette activité est en effet, purement géologique et se résume en :

- ✓ l'échantillonnage (prélèvement des échantillons tous les 5m en début de forage, 2 ou 3m dans les terrains inconnus et tous les mètres dans le réservoir).
- ✓ la description des cuttings (nature, constituants, couleur, forme, dureté, différenciation des retombées avec les réels) et des carottes (présence d'indices importants ou carottage stratigraphique pour datation).
- ✓ la calcimétrie et la fluorescence.

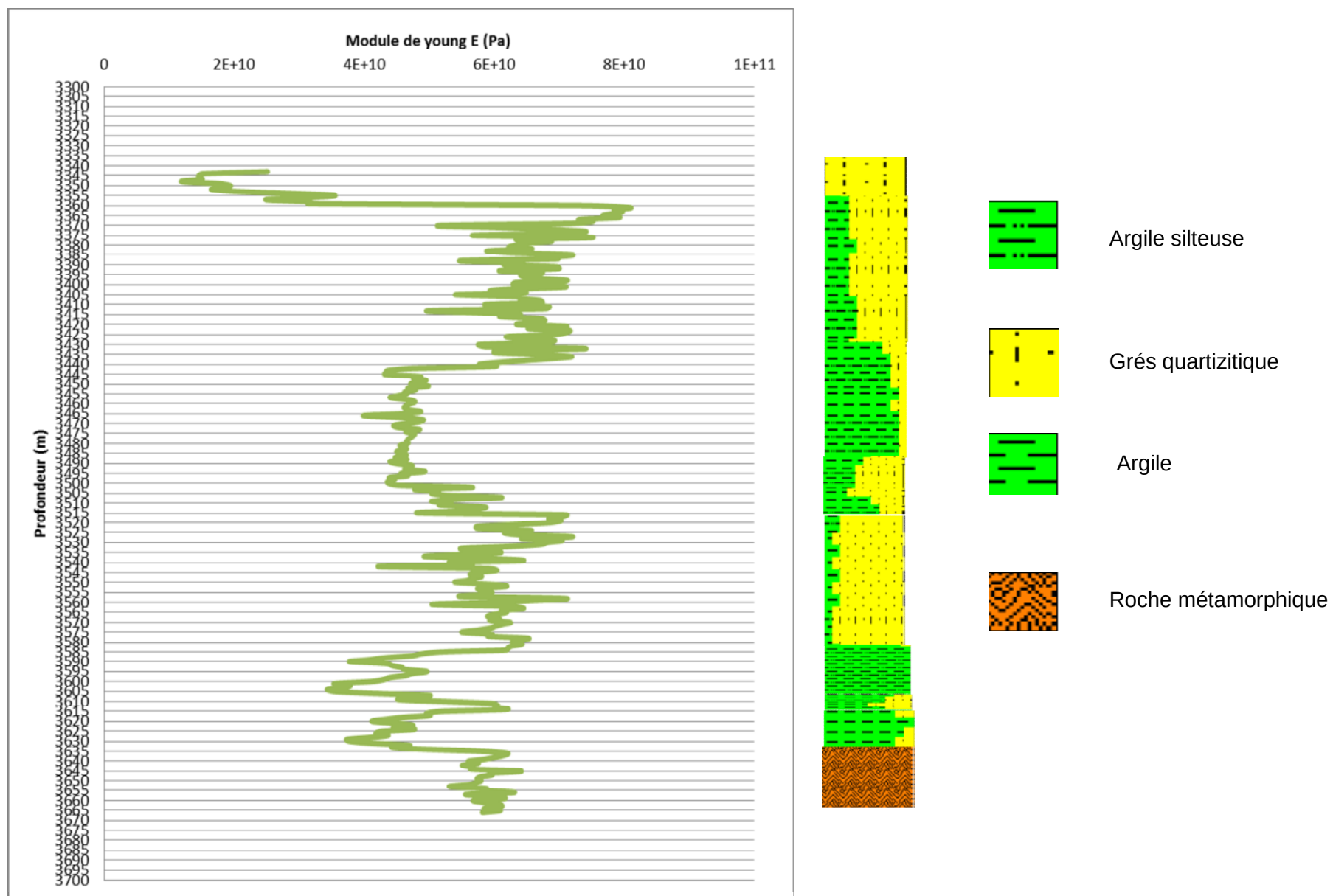
Le forage de puits STE-1 a traversé une série de dépôt représentée par :

- De 3246 à 3344m: Argile gris-noir à noire, indurée, silteuse avec traces de Grès gris-blanc et gris-sombre, très fin à fin, argileux. Traces de Calcite blanche, microcristalline, moyennement dure.
- De 3352 à 3370 m: Grès blanc à gris-blanc, fin à moyen, parfois grossier, subanguleux à subarrondi, siliceux à silico-quartzitique, compact, dur, avec de fin films d'Argile noire à gris-noire, indurée, micacée.
- De 3370 à 3400 m : Grés blanc à gris-blanc, translucide, fin à moyen, parfois grossier, subanguleux à subarrondi, siliceux à silico-quartzitique, compact, dur, localement très fin, friable, avec passées d'Argile noire à gris-noire, indurée, silteuses.

- De 3400 à 3415 m : Grès gris claire à blanc, translucide, très fin à fin, subanguleux à subarrondi, silico-quartzitique à siliceux, pyriteux, compact, dur, avec rares passées millimétriques à centimétriques d'Argile noir à gris-noir, indurée, silteuse, présence de quelque fissures subverticales fermées à semi-ouvertes
- De 3415 à 3433m: Grès gris claire à blanc, translucide, très fin à fin, subanguleux à subarrondi, siliceux à silico-quartzitique, compact, dur, avec rares passées millimétriques à centimétriques d'Argile noir à gris-noir, indurée, micacées, localement silteuse, traces de pyrite.
- De 3433 à 3510 m : Argile gris-noir à noir, indurée, silteuse avec passées de Grés blanc, translucide, très fin à fin, subanguleux à subarrondi, siliceux, compact, dur, localement moyen, friable.
- De 3510 à 3570 m : Grès blanc à gris-blanc, translucide, très fin à fin, localement moyen à grossier, subanguleux à subarrondi, siliceux à silico-quartzitique, compact, dur avec fine opassées d'Argile noir à gris sombre, indurée, silteuse, micacée.
- De 3578 à 3590 m : Argile grise à gris-noir, tendre à indurée, silteuse avec rares fines passées de Grés blanc à gris-clair, fin à moyen, siliceux à silico-quartzitique, moyennement dur à dur. traces de Pyrite.
- De 3592 à 3650 m : Complexe argilo-gréseux, composé d'Argile noire, indurée, silteuse, rarement pyriteuse et de Grés gris clair à gris-blanc et translucide, fin à très fin, subarrondi, siliceux à silico-quartzitique, moyennement dur.
- De 3650 à 3680 m : Roche métamorphique grise à gris sombre rarement gris verdâtre avec inclusion de minéraux leucocrates, du blanc au blanc laiteux, jaunes, rosâtres, verts et noirs. Présence de Quartz blanc, translucide, moyen à aplatis, de texture grenue, de Calcite et des minéraux ferrugineux de teinte brune et riche en micas noirs.



**Figure 6.7.** Variation de module de cisaillement en fonction de la profondeur de forage



**Figure 6.8.** Variation de module de young en fonction de la profondeur de forage



L'interprétation des courbes de module de cisaillement et module de young en fonction de la profondeur présente une variation de ce module lié à la lithologie de terrain, ils augmentent dans le cas des grés quartizitique et les roches métamorphique et cela revient à la rigidité et la dureté de ces roches par contre dans le cas des argiles en remarque une diminution de ces modules et cela revient à la plasticité de cette roche.

## Références bibliographiques

1. Chapellier D., Diagraphie aquifères. Cours en ligne de géophysique.
2. Denis A et al., 1999, Traitements et analyse des mesures de diagraphies différées pour la reconnaissance géotechnique, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, volume 58, pp 309-319.
3. Documentations intérieurs de Sonatrach.
4. Lagabrielle R ., Diagraphies et géophysique de forage. Rapports des laboratoires des ponts et chaussées.
5. Mari J.et al., 1998. Géophysique de gisement et de génie civil. Ed. Technip, Paris, 468 pages.

## Conclusion Générale

L'implantation des ouvrages d'art nécessite en principe la connaissance détaillée de sous-sol, et la connaissance des propriétés mécaniques des terrains susceptibles de les recevoir.

La caractérisation de ces sols par les méthodes géotechniques traditionnelles est cependant rendue très difficile, voire impossible, par la présence de grandes hétérogénéités.

L'objectif du travail engagé dans ce mémoire de fin d'études, est de montrer l'avantage des mesures géophysiques, leur rapidité de mise en œuvre et leur capacité d'investiguer un grand volume de sol dans un temps relativement modéré, constituent une alternative intéressante aux essais géotechniques in-situ.

Les résultats de ce travail ont permis de résoudre un certain problème posé aux géotechniciens :

- La méthode Carottage Vitesse Temps –CVT- utilisée pour effectuer les recherches préliminaire d'un site de construction nous a permis d'avoir la vitesse des ondes de compression, qui nous permis de connaître la profondeur de la roche saine, identifier la lithologie de terrain et caractériser le degrés de ripabilité des roches...mais on peut aussi avoir la vitesse des ondes de cisaillement pour déterminer les paramètres dynamique de sous-sol et cela en changeant le capteur de signal utilisé en un capteur tridimensionnels.
- Malgré les grands avantages qu'elle apporte la sismique 3D dans la prospection pétrolière mais elle reste très chers pour les projets de génie civil, de mise en œuvre très compliqué et l'interprétation des résultats demande des ingénieurs spécialisé donc elle est peu utilisé dans le domaine de génie civil.
- Le cout élevé des forages carottés a incité les ingénieurs à tirer le plus de parti possible des forages destructifs en s'inspirant des techniques de prospection pétrolière. Ceci les a conduits à adapter à la reconnaissance en génie civil et plus généralement dans tous les domaines d'étude du sous-sol.

Les diagraphies constituent un outil très précieux permettant la caractérisation des matériaux en place, et mesurer directement en place des grandeurs utiles aux ingénieurs (paramètres mécanique de terrain, densité,...).

On ne peut pas techniquement employer directement le même matériel et les mêmes méthodes que les prospecteurs pétroliers car les problèmes se posent de manière différente. La principale différence est dans la profondeur des trous (quelques kilomètres dans le domaine pétrolier, rarement plus de vingt mètres en génie civil).

Ces résultats permettent de voir la possibilité d'interpréter rapidement un très grand nombre de données recueillir sur le terrain dans un temps relativement modéré, l'enregistrement sous forme numérique des signaux est très rapide, il permet de réaliser un grand nombre de mesures correspondant à des dispositifs variés. Les résultats peuvent être interprétés au laboratoire en faisant rejouer les enregistrements et en utilisant des méthodes d'interprétation sur ordinateur élaborées, ou encore directement sur le terrain avec des méthodes plus simples afin de décider immédiatement s'il convient ou non de réaliser des mesures supplémentaires.

Ceci conduit à une nouvelle manière d'envisager la mise en œuvre des méthodes traditionnelles.

Finalement nous espérons que ce travail de projet de fin d'étude pour l'obtention de diplôme de master en génie civil peut être utile pour d'autres projets dans le proche avenir.