

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الجيلالي بونعامة خميس مليانة
Université Djilali Bounaâma de Khemis Miliana
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences de la Matière



Mémoire de fin d'étude
*En vue de l'obtention d'un diplôme de **Master** en physique*
Spécialité: Physique du Globe

Thème :

**Caractérisation des épaisseurs des argiles par les
méthodes sismique et électrique**

Devant le jury composé de:

- | | |
|----------------------------|-------------|
| - M. Salah Eddine BENTRIDI | Président |
| - Mme. Doria AIT ADJEDJOU | Encadreur |
| - Mme. Amel MAZOUZ | Encadreur |
| - M. Lamine HAMAI | Examinateur |

Présenté par :

M. Hocine TEMER
M. Redhouane CHERCHALI

Année universitaire : 2017 / 2018

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À Mon cher père qui a guidé mes pas depuis toujours ;

*À Ma très Chère mère, pour ses sacrifices tout au long de ma vie, qu'elle trouve
ici mes sincères excuses et remerciements ;*

À mes chères tantes ;

À mes oncles, en particulier : Aissa;

*À mes frères: Abdelkader et son épouse et leurs enfants, Mohamed Amin et
Lahcen;*

À mes sœurs ;

Toute ma grande famille ;

Tous mes amis, en particulier : Okba et Abdelhamid;

Toute la promotion 2017/2018 du Physique de Globe sans exception ;

À tous ceux que j'aime et ceux qui pensent à moi.

Hocine

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études, Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A ma chère sœur pour leur encouragement permanent, et leur soutien moral,

A mes chers frères, pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille et surtout mes amis sans exception pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire, que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien,

Merci d'être toujours là pour moi.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

Redhouane

Remerciements

Nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour mener à bien ce travail.

Nous tenons expressément et chaleureusement à remercier nos parents pour leurs soutiens et leurs encouragements tout au long de nos études.

Nous tenons particulièrement à remercier Mademoiselle Doria Aitadjedjou pour avoir dirigé ce travail, et nous avoir guidé et conseillé toute au long de notre mémoire. Nous la remercions pour l'attention qu'elle a portée à notre travail.

Nous exprimons aussi nos remerciements à l'ensemble des enseignants du Physique du Globe qui ont contribué à notre formation.

Un grand merci à toute personne ayant participé d'une façon ou d'une autre à la réalisation de ce travail. Nous citons en particulier Messieurs : Djilali KADI et Abdelkader TEMER.

Résumé :

L'objectif de cette étude est la caractérisation de la structure géologique et géométrique, particulièrement l'identification des couches d'argile dans la région de Tabeggart (W. Batna).

Nous utilisons les méthodes géophysiques telles que la méthode électrique (sondage électrique vertical) et la sismique réfraction (analyse des ondes de compression « P »).

Pour la sismique réfraction ont réalisé deux profils sismiques avec une extension de 120 m et un espacement de 5 m entre chaque géophone et chaque base, pour la méthode électrique nous avons réalisé cinq (05) sondages électriques verticaux (SEV), les mesures de résistivités ont été effectuées selon la configuration Wenner avec une longueur $AB = 200$ m, chacun ($AB = 200$ m).

Mots clés : Géophysique, Sismique réfraction, Ondes P, Sondage Electrique Vertical (SEV), Résistivité Electrique, Configuration Wenner, Argile.

Abstract :

The objective of this study is the characterization of the geological and geometric structure, particularly the identification of clay layers in the region of Tabeggart (W. Batna).

We use geophysical methods such as the electrical method (Vertical Electrical Sounding) and seismic refraction (compression waves analysis P).

For the seismic refraction realized two seismic profiles with an extension of 120 m and a spacing of 5 m between each geophone and each base, for the electrical method we realized five (05) Vertical Electrical Soundings (VES), the resistivity measurements were carried out according to the Wenner configuration with a length $AB = 200$ m, each one ($AB = 200$ m).

Key words: Geophysics, Seismic refraction, P waves, Vertical Electrical Sounding (SEV), Electrical Resistivity, Wenner Configuration, Clay.

Sommaire

I. Introduction :	9
II. Problématique :	10
III. Cadre géologique :	12
1. Contexte géologique régionale :	12
2. Contexte géologique local :	13
IV. Méthodes géophysiques utilisées:	16
1. Méthode électrique:	16
1.1. Introduction:	16
1.2. Principe de la méthode:	16
1.3. La mesure de la résistivité:	16
1.4. Les dispositifs de mesure :	18
1.5. Sondage électrique :	18
2. Méthodes Sismiques:	20
2.1. Introduction:	20
2.2. Les types des méthodes sismiques :	20
2.2.1. La sismique réflexion :	20
2.2.2. La sismique réfraction :	20
2.3. Différents types d'ondes sismiques :	20
2.3.1. Les ondes de volume :	21
a. Ondes primaires (ondes P) :	21
b. Ondes secondaires (ondes S) :	21
2.3.2. Les ondes de surface:	22
c. Ondes de Love :	22
d. Ondes de Rayleigh :	23
2.4. Principe de la méthode:	23
2.5. Mécanisme de la réfraction:	24
V. Présentation des données:	28
1. Les sondages électriques :	29
2. Les profils sismiques :	30
VI. Traitement des données :	33
1. Sondages électriques verticaux :	33
1.1. Traitement et interprétation analytique par abaque:	33

1.2. Méthode d'inversion (IPI2Win) :	35
2. Sismique réfraction :	36
2.1. Traitement par méthode d'intercepte :	36
2.1.1. Pointage des films:	36
2.1.2. Calcul de vitesse:	37
2.1.3. Calcul des épaisseurs:	40
VII. Interprétation des données électriques :	42
I. Méthode d'inversion (IPI2Win) :	42
1.1. Le sondage électrique SEV 01 :	42
1.2. Le sondage électrique SEV 02:	42
1.3. Le sondage électrique SEV 03:	43
1.4. Le sondage électrique SEV 04:	44
1.5. Le sondage électrique SEV 05:	45
VIII. Interprétation des données sismiques :	46
1. Le profil sismique PS1:	46
2. Le profil sismique PS2:	46
IX. Corrélations entre les sondages électriques et profils sismiques :	48
Conclusion :	50
Bibliographie :	51
Annexe :	53

Liste des figures

Figure 1: Image satellitaire de la région de Batna. Image Google Earth	10
Figure 2: Extrait de la carte géologique du nord l'Algérie 1/500 000.....	13
Figure 3: Extrait de la carte géologique de la région de N'Gaous 1/50 000	14
Figure 4: Distribution de courant créé par deux électrodes d'injections	16
Figure 5: Les différents dispositifs de mesure	18
Figure 6: Principe du sondage électrique (écartement progressif des électrodes)	19
Figure 7: Le dispositif Wenner.....	19
Figure 8: Description de L'onde P	21
Figure 9: Description de l'onde S	21
Figure 10: Onde de Love	23
Figure 11: Onde de Rayleigh	23
Figure 12: La Réfraction pour un terrain à deux couches	25
Figure 13: L'hodochrone d'un terrain horizontal à deux couches	25
Figure 14: Image satellitaire du site étudié et positions des sondages électriques et profils sismiques	29
Figure 15: Le matériel utilisé pour l'acquisition des sondages électriques verticaux (SEV).	30
Figure 16: Le matériel utilisé pour la réalisation des profils sismiques	31
Figure 17: Schéma d'acquisition d'un profil sismique	32
Figure 18: Abaque CH1	34
Figure 19: Quatre cas possibles d'un sondage sur trois terrains	35
Figure 20: Courbe du SEV04.....	36
Figure 21: Film sismique	37
Figure 22: Les hodochrones de la Base 01 du PS 01	37
Figure 23: Les hodochrones de la Base 02 du PS 01	38
Figure 24: Les hodochrones de la Base 03 du PS 02.....	38
Figure 25: Les hodochrones de la Base 04 du PS 02.....	39
Figure 26: Les hodochrones de la Base 05 du PS 02.....	39
Figure 27: La courbe de résistivité électrique de sondage SEV01	42
Figure 28: La courbe de résistivité électrique de sondage SEV02	43
Figure 29: La courbe de résistivité électrique de sondage SEV03	44
Figure 30: La courbe de résistivité électrique de sondage SEV04	45
Figure 31: La courbe de résistivité électrique de sondage SEV05	45
Figure 32: Modèle géo-sismique des variations des vitesses et des profondeurs (PS 01).....	46
Figure 33: Modèle géo-sismique des variations des vitesses et des profondeurs (PS 02).....	47
Figure 34: Corrélation du profil sismique PS01 avec les sondages électriques verticales, SEV04 et SEV05	48
Figure 35: Corrélation du profil sismique PS02 avec les sondages électriques verticales, SEV01 et SEV02.....	49

Liste des tableaux

Tableau 1: Les coordonnées des positions des sondages électriques et profils sismique (en UTM).....	28
Tableau 2: Les vitesses et les épaisseurs des profils sismiques.....	40

Liste des annexes

Annexe 1: Résistivité électrique de quelques roches	53
Annexe 2: Vitesses des ondes P et S de divers types de terrains.....	53

I. Introduction :

Les argiles sont des roches constituées essentiellement par des phyllosilicates d'alumine hydratés, les argiles contiennent des minéraux accessoires et des impuretés : grains de quartz, calcite, dolomite, gypse, oxydes et sulfures de fer, feldspaths, micas, sels solubles (chlorures et sulfates), titane (rutile ou ilménite), manganèse, minéraux lourds, matières organiques.

Les grands domaines d'application (argiles plastiques, réfractaires, smectiques, expansibles, colorantes...) ou plus précisément les utilisations dans un domaine restreint, par exemple en céramique (réfractaires, produits blancs, grès, terres cuites et faïences communes...)^[1].

Pour mettre en évidence l'existence de l'argile sur le territoire de la wilaya de Batna, une prospection géophysique a été entreprise.

La 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 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.

L'objectif de ce travail consiste à appliquer des méthodes géophysiques pour la caractérisation des épaisseurs des couches d'argile de la zone d'étude, sise le lieu-dit Tabaggart (N'Gaous). Cette région se trouve à l'Ouest de Batna, de laquelle elle est distante de 47 km.

Pour cela on a employé deux méthodes : la méthode électrique qui repose sur la mesure du paramètre « résistivité électrique » d'un terrain et la méthode sismique de réfraction qui mesure la vitesse de propagation des ondes acoustiques.

C'est l'interprétation de ces paramètres (résistivité électrique et la vitesse d'onde) qui nous a permis de proposer un modèle caractéristique du sous-sol de la zone d'étude.

II. Problématique :

Le sujet de notre master est proposé par le bureau d'études géophysiques GeoExplo (www.geoexplo.dz). Une étude géophysique a été réalisée dans la région de Tabeggart (W. Batna). L'objectif de notre mémoire est d'utiliser les connaissances acquises en master et les données géophysiques pour la caractérisation de la structure géologique et géométrique de notre site d'étude et particulièrement l'identification des couches d'argile dans. Pour cela, nous avons utilisé les méthodes géophysiques : électrique et sismique.

Nous utilisons la sismique réfraction des ondes de compression « P » et le sondage électrique vertical.



Figure 1: Image satellitaire de la région de Batna. Image Google Earth

Chapitre I

Problématique et Contexte géologique

III. Cadre géologique :

1. Contexte géologique régionale :

La wilaya de Batna s'inscrit presque entièrement, dans un ensemble physique constitué par la jonction des Atlas Tellien au Nord et Saharien au Sud.

Le contexte géologique est représenté dans la (**Figure 2**) est extraite de la carte géologique d'Algérie.

La région de Batna est caractérisée par une gamme variée de faciès allant du secondaire jusqu'à quaternaire. On distingue les fasciées suivantes : ^[2]

- **Trias (208 - 245 M.a)**: Il est constitué essentiellement de marnes bariolées contenant du gypse et des argiles.
- **Jurassique (14 - 208 M.a)** : Représentées par une série de formations, marnes, calcaires marneux, calcaire et marnes argileuse. Elles affleurent dans la partie Nord Est des Monts de Belezma.
- **Crétacé (66,4 - 144 M.a)** : Représente la nappe la plus étendue avec ses différents étages, inférieur, moyen et constitue les principaux affleurements, ce sont des formations généralement marines, d'une lithologie très variable (roche dure comme le calcaire, tendre comme les marnes) due à de fréquentes variations de faciès.
- **Le Crétacé inférieur (95 - 140 M.a)** : Affleure dans Djebel Kassrou et Djebel Azzeb. Les formations du crétacé inférieur à prédominance carbonatées sont principalement des calcaires, dolomies, marnes et argiles et grès. L'épaisseur des divers affleurements est généralement importante.
- **Le Crétacé moyen (65 - 95 M.a)** : S'étendant sur de vastes superficies notamment, sur le Djebel Bellezma, Ich Ali est caractérisé par des niveaux à prédominance calcaire et intercalations marneuses. Les épaisseurs sont très importantes.
- **Miocène (5,3 - 23,7 M.a)** : Localisé au Nord-ouest des Monts de Bellezma avec une série prédominante argileuse à intercalations de bancs de calcaire à épaisseur parfois importantes.
- **Quaternaire (1,6 M.a jusqu'au récent)** : La zone de la plaine est composée des formations quaternaires essentiellement des dépôts alluvionnaires récents (argiles, limon).

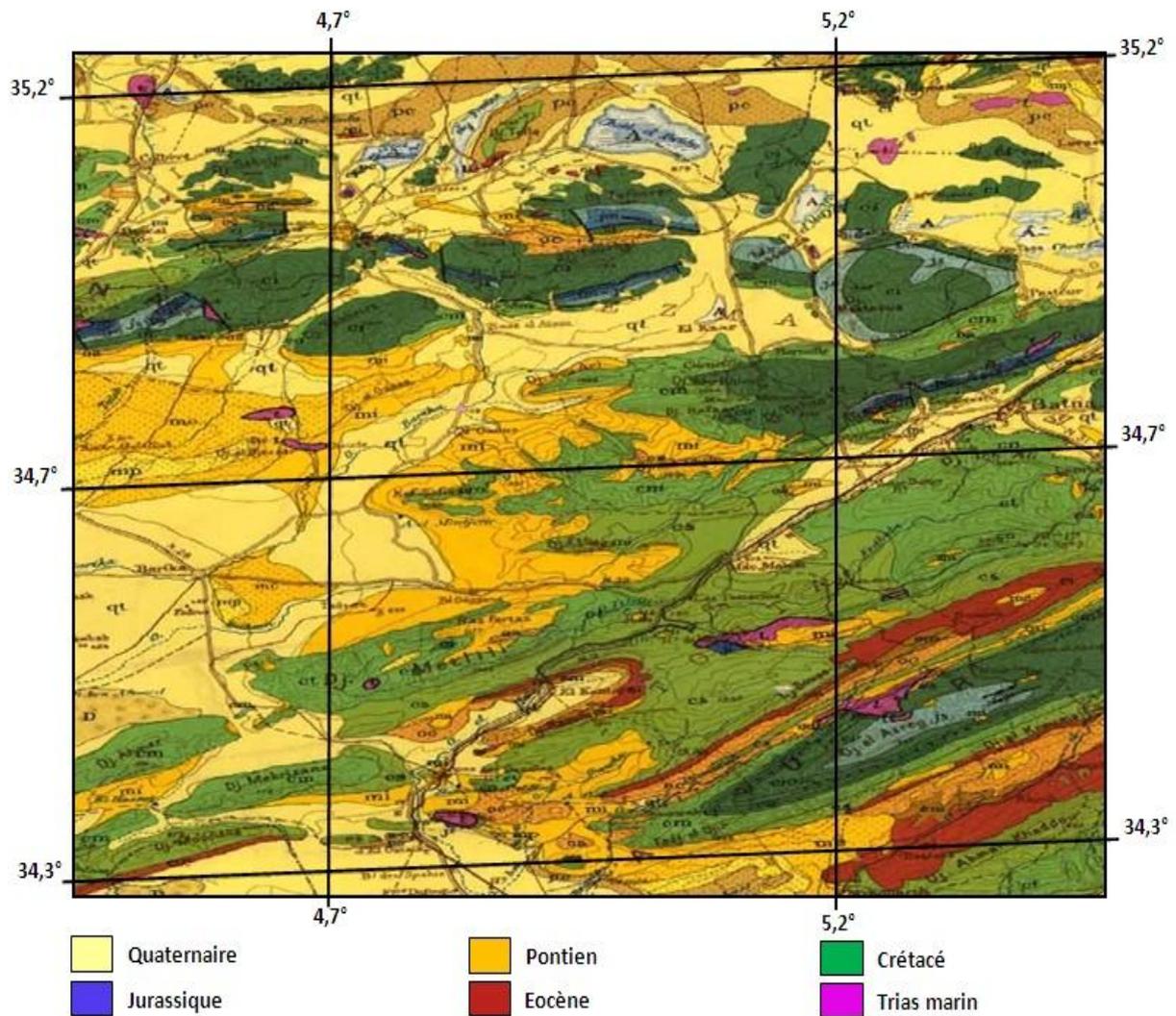


Figure 2: Extrait de la carte géologique du nord l'Algérie 1/500 000^[3]

2. Contexte géologique local :

D'après l'extrait de la carte géologique de l'Algérie (**Figure 2**) et la carte de N'GAOUS wilaya de BATNA (**Figure 3**), les formations géologiques existantes sont :

- Limons, conglomérats.
- Argiles sableuses à paupées calcaires.
- Dépôts carbonatés tendres jaunes ou gris.
- Calcaires poreux, pulvérulents blancs.

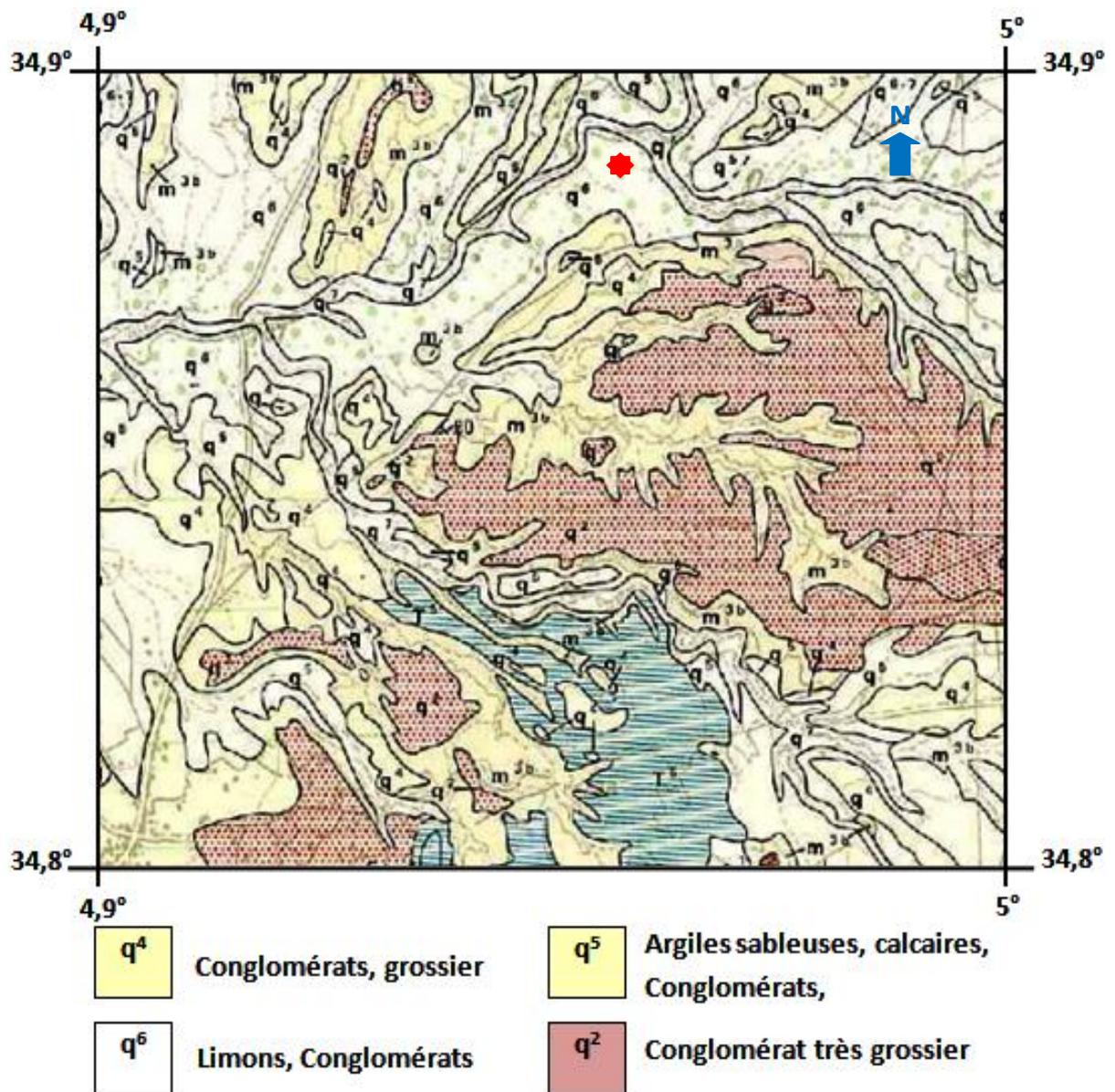


Figure 3: Extrait de la carte géologique de la région de N'Gaous 1/50 000^[4]

Chapitre II

Méthodes géophysiques utilisées

IV. Méthodes géophysiques utilisées:

1. Méthode électrique:

1.1. Introduction:

La prospection électrique est l'une des plus anciennes méthodes de prospection géophysique qui repose essentiellement sur la mesure de la résistivité électrique d'un terrain. Cette méthode appliquée surtout dans la recherche archéologique et la recherche hydrogéologique.

1.2. Principe de la méthode:

La mesure de la résistivité électrique se fait par injection d'un courant électrique continu dans le sol au moyen de deux électrodes A et B, qui engendre une différence de potentiel électrique que l'on mesure avec deux autres électrodes M et N. L'ensemble constitue un quadripôle. ^[5]

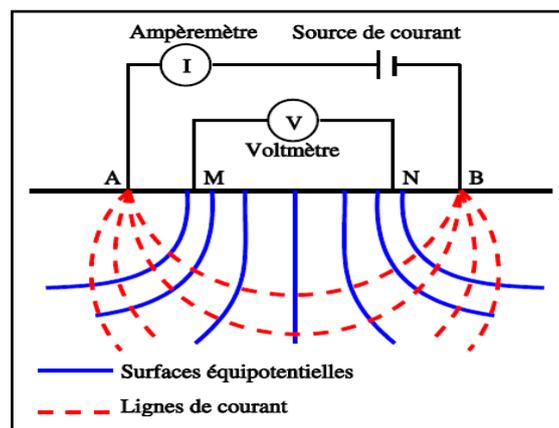


Figure 4: Distribution de courant créé par deux électrodes d'injections

1.3. La mesure de la résistivité:

La résistivité électrique ρ est une propriété intrinsèque, elle est définie comme étant la mesure de la difficulté qu'un courant électrique à passer au travers d'un conducteur.

Selon la loi d'Ohm:^[6]

$$\mathbf{J} = \sigma \quad (1)$$

Avec : J est la densité du courant (A / m^2) et σ est la conductivité électrique (S / m), tel que :^[6]

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

D'où

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (3)$$

ρ Est la résistivité électrique (en $\Omega.m$)

a. Dans un milieu homogène et isotrope :

Le potentiel crée aux points **N** et **M** se définit comme suit :^[6]

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] R_A I + R_B I \quad (4)$$

V_M : Le potentiel au point *M* (en volte),

I: L'intensité du courant injecté (en ampère),

AM: La distance entre les électrodes *A* et *M* (en mètre),

MB: La distance entre les électrodes *M* et *B* (en mètre),

R_A : La résistance de contact au point *A*,

R_B : La résistance de contact au point *B*.

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right] R_A I + R_B I \quad (5)$$

V_N : Le potentiel au point *N* (en volte),

AN: La distance entre les électrodes *A* et *N* (en mètre),

BN: La distance entre les électrodes *B* et *N* (en mètre).

Et la différence de potentielle est :

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] \quad (6)$$

$$D'où \quad \rho = K \frac{V_M - V_N}{I} \quad \text{tel que} \quad K = \frac{2\pi}{I \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \quad (7)$$

Où **K** est le facteur géométrique qui dépend de la disposition des électrodes d'injections et les électrodes de mesures.

b. Dans un milieu hétérogène :^[6]

$$\rho_a = K \frac{V_M - V_N}{I} \quad (8)$$

La résistivité apparente intègre la résistivité réelle des différents terrains traversés par le courant lors de la mesure.

1.4. Les dispositifs de mesure :

Un dispositif sert à mesurer la résistivité du sol, pour cela on utilise un quadripôle, formé d'un dipôle d'injection de courant (AB) et d'un dipôle (MN) pour la mesure de la différence de potentiel V . Et on a plusieurs configurations dont chacune a des caractéristiques différentes à l'autre.

Quel que soit le dispositif employé, il est caractérisé par une certaine profondeur d'investigation. Le tableau suivant donne pour quelques dispositifs les profondeurs d'investigation. ^[6]

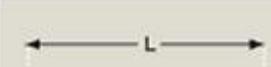
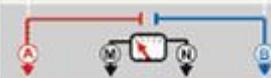
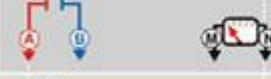
Dispositifs		Prof. d'investigation	
		Roy (1971)	Barker (1989)
Wenner		0.11L	0.17L
Schlumberger		0.125L	0.19L
Dipôle-Dipôle		0.195L	0.25L
Pôle-Pôle		0.35L	

Figure 5: Les différents dispositifs de mesure ^[7]

1.5. Sondage électrique :

En espaçant progressivement les électrodes AB en laissant MN fixe. Avec un certain nombre de mesure on espace MN, lorsque ΔV serait trop faible, la mesure englobe des terrains de plus en plus profonds.

On obtient un sondage électrique (**Figure 6**) dont l'objectif est d'obtenir la répartition verticale des résistivités apparentes [$\rho = f(z)$]. Cette méthode fait l'hypothèse que les terrains sont tabulaires, c'est-à-dire constitués de couches horizontales homogènes (elle ne prend donc pas en compte les variations latérales de résistivité). ^[8]

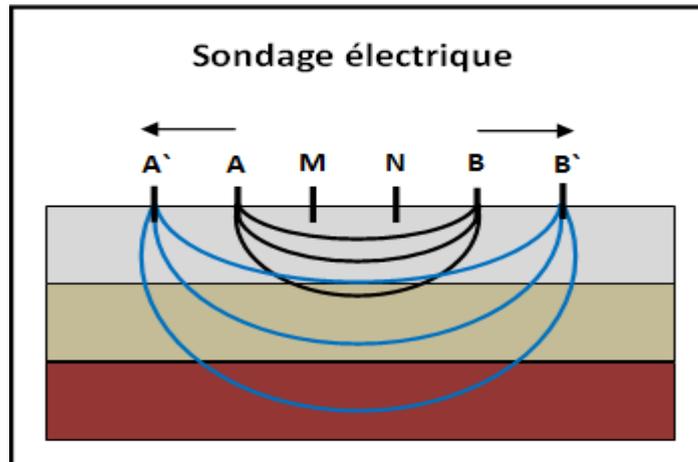


Figure 6: Principe du sondage électrique (écartement progressif des électrodes)

Le dispositif de mesure utilisé est le dispositif Wenner, Les quatre (4) électrodes sont disposées sur un même alignement et ($AM = MN = MB = a$). Les électrodes de mesure M et N sont disposées à l'intérieur des électrodes d'émission A et B. (**Figure 7**) Ce dispositif est utilisé pour des profondeurs d'investigations intermédiaires.

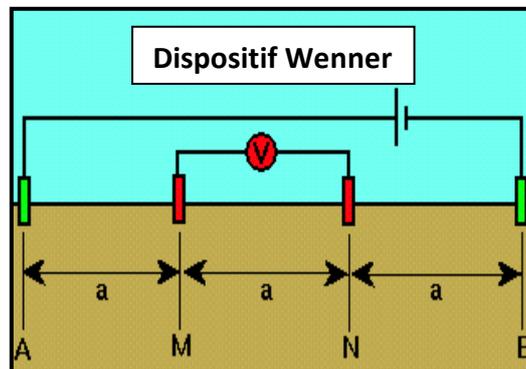


Figure 7: Le dispositif Wenner

2. Méthodes Sismiques:

2.1. Introduction:

La prospection sismique est une méthode de prospection géophysique qui permet de déterminer l'état physique des diverses couches lithologiques composant le sol et d'obtenir une estimation de leurs épaisseurs. Elle est couramment utilisée pour déterminer la profondeur d'un substratum ou pour estimer l'état mécanique des roches (altérations, fissurations, fracturation).^[9]

2.2. Les types des méthodes sismiques :

2.2.1. La sismique réflexion :

La méthode de sismique réflexion est l'une des plus développées en géophysique dû à son utilisation à grande échelle pour l'exploration de pétrole et de gaz. La sismique réflexion utilise la réflexion des ondes sur les interfaces entre plusieurs niveaux géologiques, cette méthode consiste à induire une onde sismique dans le sol puis enregistrer les ondes qui sont réfléchies par les diverses interfaces entre les horizons se trouvant sous la zone étudiée. La sismique réflexion est généralement utilisée pour des profondeurs de 50 m et plus.^[10]

2.2.2. La sismique réfraction :

La sismique réfraction fait partie des méthodes de propagation d'ondes sismiques au même titre que la sismique réflexion, la sismique par ondes de surface et la sismique en forages.

La sismique réfraction repose sur l'analyse des ondes de compression, P, réfractées au toit des couches. Les vitesses (V_p) sont calculées par la mesure du temps d'arrivée des premières ondes réfractées (au-delà des arrivées directes).^[11]

2.3. Différents types d'ondes sismiques :

Il existe deux grands types d'ondes : Les ondes de volume (ondes P et S) et les ondes de surface (ondes de Rayleigh et de Love).

2.3.1. Les ondes de volume :

a. Ondes primaires (ondes P) :

Les ondes de compression qui sont plus rapide que les ondes S, elles se propagent dans les solides et les fluides en créant successivement des zones de dilatation et de compression. La vitesse de l'onde P est comprise entre 6 et 8 km/s.

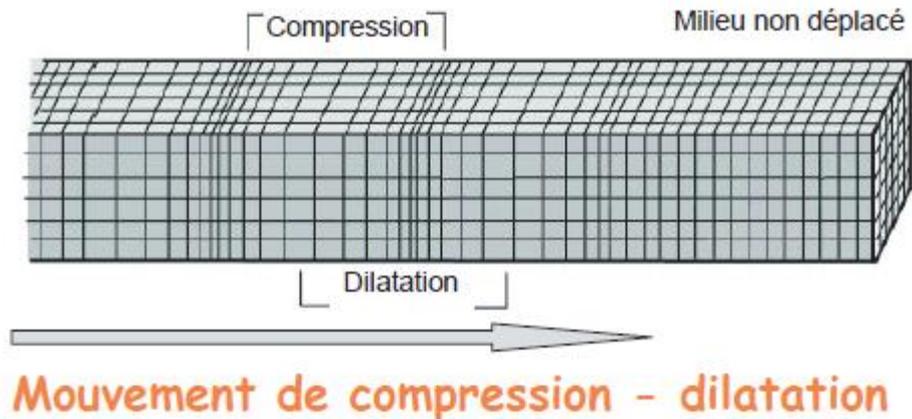


Figure 8: Description de L'onde P ^[12]

b. Ondes secondaires (ondes S) :

Les ondes S sont des ondes de cisaillement qui ne se propagent que dans les solides. Les particules oscillent dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

La vitesse de l'onde S est comprise entre 3 et 5 km/s.

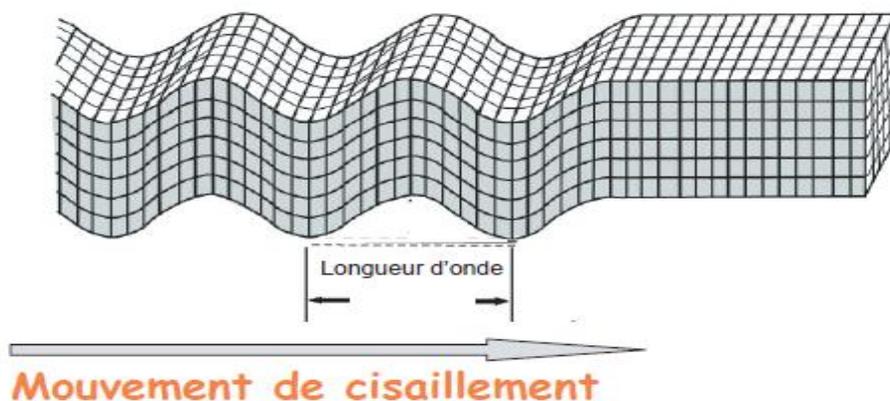


Figure 9: Description de l'onde S ^[12]

Les équations des vitesses P et S sont les suivants :

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} \quad (9)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (10)$$

Avec :

V_P : La vitesse de propagation de l'onde P [m/s] ;

V_S : La vitesse de propagation de l'onde S [m/s] ;

ρ : La densité de milieu [g/m³] ;

λ et μ sont deux coefficients appelés coefficients de Lamé (Physicien Français du XIX siècle).

Le rapport des vitesses longitudinales et transversales est ainsi de :

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} * \sqrt{\frac{\rho}{\mu}} = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\mu}} \quad (11)$$

λ et μ étant positif, ce rapport vaut au moins égale $\sqrt{2}$.

En règle générale, dans les solides, λ et μ sont très voisins ; le rapport vaut alors $\sqrt{3}$.

Dans les fluides il n'y a pas de cisaillement, $\mu = 0$. [13]

2.3.2. Les ondes de surface:

c. Ondes de Love :

Les ondes de Love sont des ondes de cisaillement. Le mouvement des particules est contenu dans un plan horizontal (ondes SH). Les ondes de Love ont une vitesse inférieure à celle des ondes P et des ondes S.



Figure 10: Onde de Love ^[14]

d. Ondes de Rayleigh :

Formées par l'interaction d'ondes P et S à la surface, les ondes de Rayleigh provoquent un déplacement complexe, à la fois horizontal et vertical, et même des mouvements elliptiques. Leur amplitude décroît exponentiellement à mesure que l'on s'éloigne du point de perturbation.

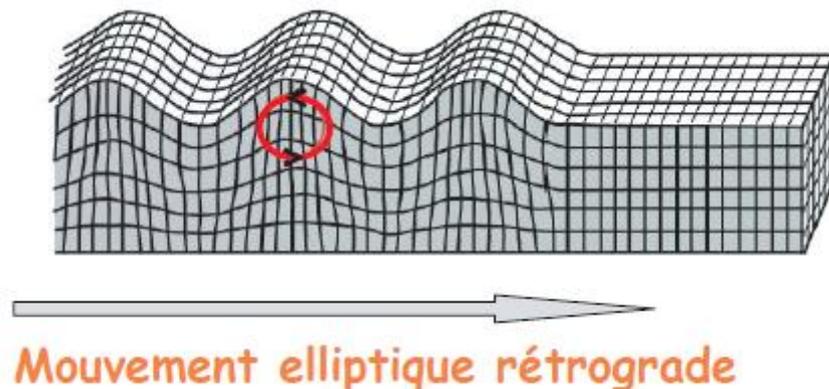


Figure 11: Onde de Rayleigh ^[14]

2.4. Principe de la méthode:

Le principe de la sismique réfraction est d'envoyer un train d'ondes de type sonore dans le sol à l'aide d'une source (masse, fusil, explosif,.....) puis d'enregistrer le retour en surface des ondes sismiques (ondes directes et ondes réfractées) à intervalle de distance régulier. L'onde de choc émise le long du profil se propage dans le sol et les vibrations induites sont captées puis converties en signal électrique par des géophones. L'analyse des temps de trajet (arrivées premières) des ondes sismiques selon les principes de propagation direct et réfractée conduit à définir les vitesses sismiques et les géométries des différentes couches du sous-sol. ^[15]

2.5. Mécanisme de la réfraction:

Le mécanisme de la sismique réfraction se résume comme suit : considérons deux milieux de caractéristiques physiques différentes séparés par une interface plane et horizontale dans lesquels les vitesses de propagation des ondes sont respectivement égales à V_1 et V_2 avec $V_2 > V_1$.

Dans de telles conditions, l'angle d'incidence i_1 est plus petit que l'angle de réfraction i_2 (**Figure 12**).

D'après la loi de Snell-Descartes, nous avons : ^[16]

$$\frac{\sin i_1}{V_1} = \frac{\sin i_2}{V_2} \quad (12)$$

Tel que :

V_1 : La vitesse du premier milieu [m/s] ;

V_2 : La vitesse du deuxième milieu [m/s] ;

i_1 : L'angle d'incidence [°] ;

i_2 : L'angle de la réfraction [°].

Pour une valeur de l'angle d'incidence critique (i_c), l'angle atteindra 90° dans le milieu 2 (i_r).

Nous aurons alors la condition de réfraction totale : ^[16]

$$\sin i_c = \frac{V_1}{V_2} \quad (13)$$

L'onde réfractée se propagera horizontalement vers la couche la plus vite (milieu 2 dans ce cas). ^[16]

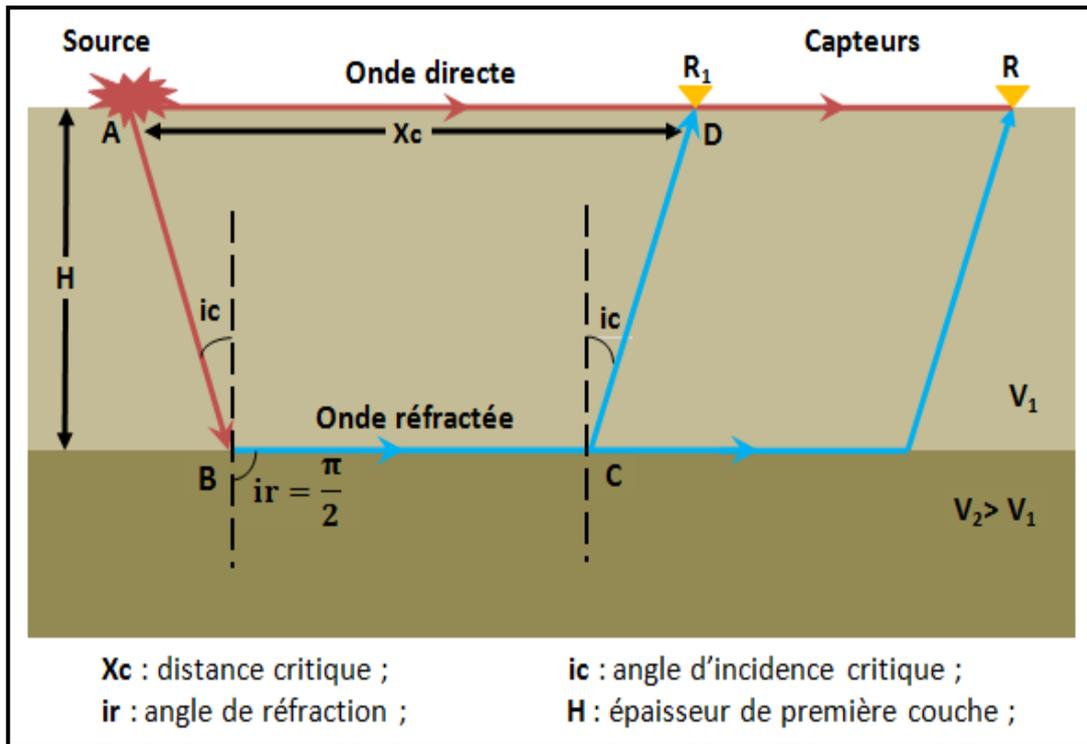


Figure 12: La Réfraction pour un terrain à deux couches

Le graphe ci-dessous représente les droites d'hodochrones tracés des ondes, directe et réfractée d'un milieu à deux couches parallèles (vitesses V_1 , V_2).

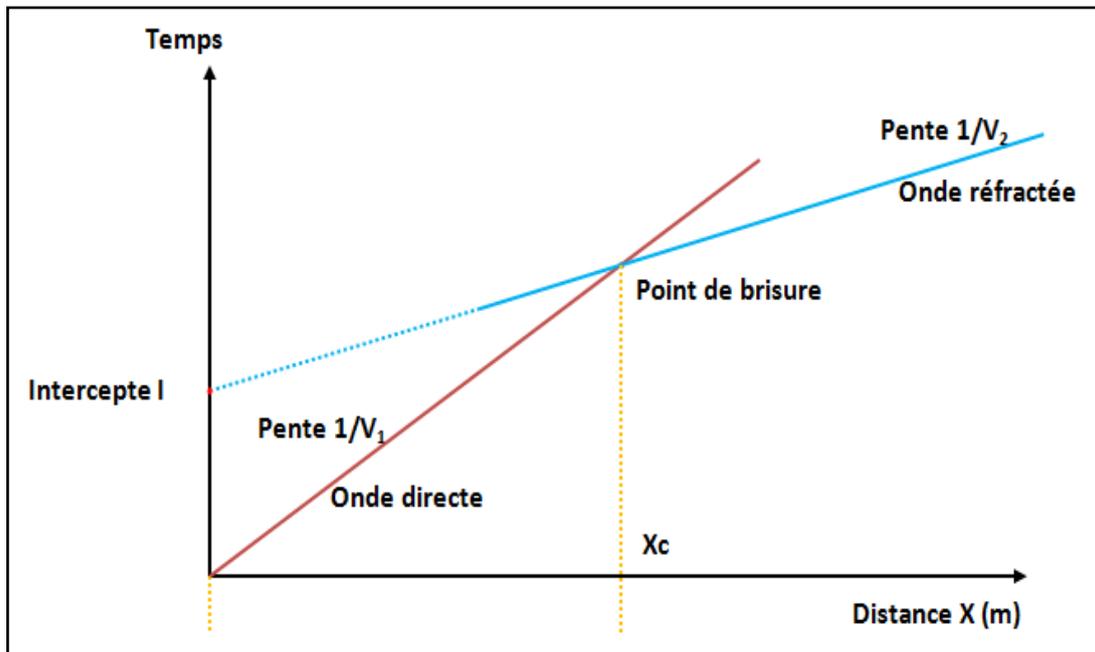


Figure 13: L'hodochrone d'un terrain horizontal à deux couches

Où l'intercepte (ms) : est la projection d'une droite sur l'axe du temps (t) ;

X_c (m) : distance critique;

Point de brisure : c'est le point de passage d'un milieu (V1) à un autre milieu (V2).

L'expression du temps de propagation de l'onde directe : ^[16]

$$T_d = \frac{X}{V_1} \quad (14)$$

Le temps de propagation de l'onde réfractée (T_r) sur le trajet ABCD (**Figure 12**): ^[16]

$$T_r = \frac{AB+CD}{V_1} + \frac{BC}{V_2} \quad (15)$$

$$AB = CD = \frac{H}{\cos ic} \quad (16)$$

$$BC = Xc - 2H \tan ic \quad (17)$$

$$T_r = \frac{Xc}{V_2} + \frac{2H}{V_1} \cos ic \quad (18) \quad \text{avec: } \cos ic = \sqrt{1 - \frac{V_1^2}{V_2^2}} \quad (19)$$

(T_r) Pour un modèle de plusieurs « n » couches horizontal ^[16]

$$T_n = \frac{X}{V_n} + \sum_{p=1}^{n-1} \frac{2H_p}{V_p} \quad (20)$$

Intercepte times I_i , donne par l'équation suivant : ^[16]

$$I_i = \frac{2H \cos ic}{V_1} \quad (21)$$

L'intercepte I_i pour « n » couches est : ^[16]

$$I_{n-1} = \sum_{p=1}^{n-1} \frac{2H_p}{V_p} \cos i_{pn} \quad (22)$$

La distance critique X_c : ^[16]

$$X_c = 2H \sqrt{\frac{V_2+V_1}{V_2-V_1}} \quad (23)$$

Chapitre III

Présentation et traitement des données

V. Présentation des données:

Les méthodes géophysique utilisées pour la caractérisation des argiles sont:

- méthode électrique: sondage électrique vertical (SEV)
- méthode sismique: sismique réfraction

Les paramètres mesurés pour les deux techniques sont respectivement la résistivité électrique et la vitesse sismique.

Les coordonnées des limites du site étudié, sondages électriques, et les profils sismiques(bases sismiques) sont présentés dans le tableau suivant :

		Cordonnées (UTM) - Zone : 31S				
Méthodes	Nom du profil / point		X (m)	Y(m)	Observation / Orientation	
Les Bornes du site	Repère 1		739577 E	3941484 N	Nord-ouest	
	Repère 2		740466 E	3941451 N	Nord-est	
	Repère 3		740472 E	3940898 N	Sud-ouest	
	Repère 4		739570 E	3940970 N	Sud-est	
Les SEV	1		739647 E	3941234 N	Nord-ouest, Sud-est	
	2		739796 E	3941181 N	Nord-ouest, Sud-est	
	3		740002 E	3941103 N	Nord Ouest, Sud-est	
	4		740291 E	3941116 N	Sud-Nord	
	5		740294 E	3941285 N	Sud-Nord	
Bases Sismique	PS01	Base 1	A	740303 E	3941063 N	Sud-Nord
			B	740301 E	3941181 N	
		Base 2	B	740301 E	3941181 N	
			C	740301 E	3941303 N	
	PS02	Base 3	D	739653 E	3941233 N	Nord Ouest -Sud Est
			E	739710 E	3941210 N	
		Base 4	E	739710 E	3941210 N	
			F	739766 E	3941190 N	
		Base 5	F	739766 E	3941190 N	
			G	739824 E	3941172 N	

Tableau 1: Les coordonnées des positions des sondages électriques et profils sismiques (en UTM)

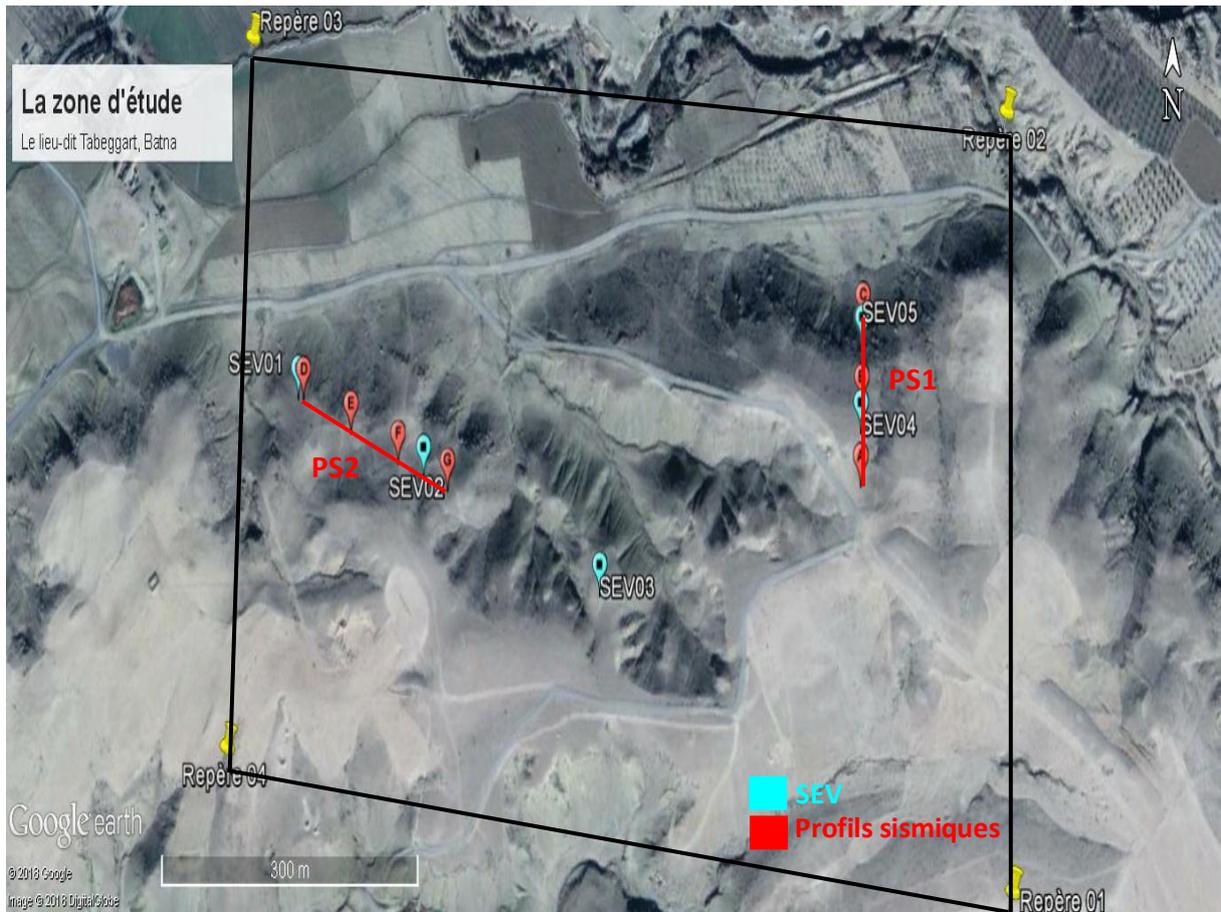


Figure 14: Image satellitaire du site étudié et positions des sondages électriques et profils sismiques

1. Les sondages électriques :

Nous avons réalisé 05 sondages électriques verticaux (SEV), les mesures des résistivités ont été effectuées selon la configuration Wenner avec une longueur $AB = 200$ m, chacun ($AB = 200$ m).

- Le SEV01 a été réalisé au même point D du deuxième profil sismique.
- Le SEV02 a été réalisé entre les points F et G du deuxième profil sismique.
- Le SEV03 a été réalisé après le point G du deuxième profil sismique environ de 190 m.
- Le SEV04 a été réalisé entre les points A et B du premier profil sismique
- Le SEV05 a été réalisé au même point C du premier profil sismique.

Le matériel utilisé pour l'acquisition des sondages électriques verticaux (SEV) est:

- Un résistivimètre SARIS (Scintrex Automated Resistivity Imaging System) de la société canadienne Scintrex.
- Des bobines avec des Câbles électriques.
- Des marteaux.
- Des électrodes métalliques.
- Un GPS.
- Un décamètre.



Figure 15: Le matériel utilisé pour l'acquisition des sondages électriques verticaux (SEV).

2. Les profils sismiques :

Nous avons réalisé 02 profils de la sismique réfraction, le premier est constitué de 02 bases (AB et BC) orientés Sud-Nord, le deuxième profil comprend 03 bases (DE,EF et FG) orientés Nord Ouest -Sud Est, chaque base contient 24 géophones espacés de 5 m, dans chaque base on a effectué 05 points de tirs.

- Le PS1 a été réalisé sur le même alignement que les SEV 04 et SEV 05.
- Le PS2 a été réalisé sur le même alignement que les SEV 01 et SEV 02

Le matériel utilisé pour la réalisation des profils sismiques est :

- 24 géophones verticaux de fréquence 12 Hz.
- Deux câbles sismiques.
- Unité de contrôle (SUMMIT X STREAM Pro de DMT).
- Une alimentation (batterie 12V).
- Un déclencheur (trigger) relié à la source sismique.
- Une plaque métallique.
- Une masse de 10 kg.



Figure 16: Le matériel utilisé pour la réalisation des profils sismiques

Chaque base sismique a une longueur de 120m et 5 points de tirs :

- Tir direct à - 2.5 m du géophone 1.
- Tir fenêtre entre les géophones 6 et 7.
- Tir fenêtre centre les géophones 12 et 13.
- Tir fenêtre entre les géophones 18 et 19.
- Tir inverse à + 2.5 m du géophone 24.

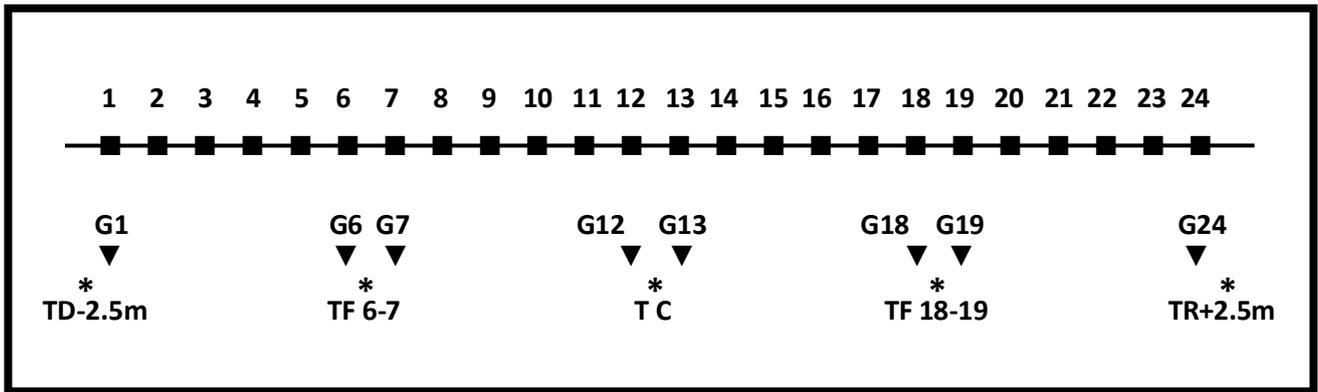


Figure 17: Schéma d'acquisition d'un profil sismique

VI. Traitement des données :

1. Sondages électriques verticaux :

1.1. Traitement et interprétation analytique par abaque:

Les valeurs de la résistivité apparente sont reportées sur le papier bilogarithmique en fonction de la distance $AB/2$. La courbe du Sondage Electrique vertical (SEV) ainsi obtenue est interprétée soit par la méthode des abaques de façon manuelle, soit par le traitement informatique à l'aide du logiciel approprié. [17]

Par cette méthode, on essaie de coïncider la courbe de SEV mesurée avec une autre calculée (modèle), parmi les courbes de l'abaque. Les abaques utilisés sont les diagrammes à deux terrains plus les courbes auxiliaires. La procédure d'interprétation par abaque est comme suit:

- a. Report de la courbe du SEV sur un support transparent, en échelle bilogarithmique.
- b. Estimer le nombre de couches à partir de la courbe ou d'un sondage étalon.
- c. La première branche de la courbe, prise comme une courbe à deux terrains, est superposée à l'abaque; par translation suivant les axes des abscisses et des ordonnées, on compare cette branche à l'une des courbes, la meilleure est celle qui se confond avec cette branche.
- d. Lorsque la coïncidence est établie, on reporte la croix de l'abaque sur la feuille bilogarithmique.
- e. Les coordonnées de ce point nous donnent les valeurs de ρ_2 , h_1 (résistivité du 2^{ème} terrain et l'épaisseur du premier terrain)
- f. Identifier la courbe du SEV comme étant du type " H, Q, K, A " et choisir le diagramme correspondant.
- g. Reporter la courbe du diagramme auxiliaire à la valeur: $u=\rho_2/\rho_1$ et à partir de la première croix.
- h. Remettre la feuille sur l'abaque à deux terrains, en gardant les axes parallèles, déplacer de façon à faire coïncider la partie droite de la courbe avec une courbe de l'abaque à deux terrains; durant cette opération, il est nécessaire de garder l'origine de l'abaque continuellement sur la courbe auxiliaire précédemment tracée.

- i. Sur la feuille transparente, on marque la seconde croix correspondante à l'origine de l'abaque; Quand la coïncidence est obtenue, la résistivité peut être estimée.
- j. Replacer la feuille du SEV sur le diagramme auxiliaire: le second point ou "croix" se trouve sur l'intersection des lignes. " ρ_2 / ρ_1 et h_2 / h_1 "
- k. Connaissant $(\rho_2 / \rho_1, \rho_1)$ et $(h_2 / h_1, h_1)$, on peut déduire : ρ_2, h_2
- l. Refaire la même procédure pour le reste de la courbe du S.E.V
- m. On constate déjà, le temps relativement long pour l'interprétation d'une partie seulement de la courbe, ainsi que le manque de précision sur l'estimation des paramètres : ρ_i, h_i .^[18]

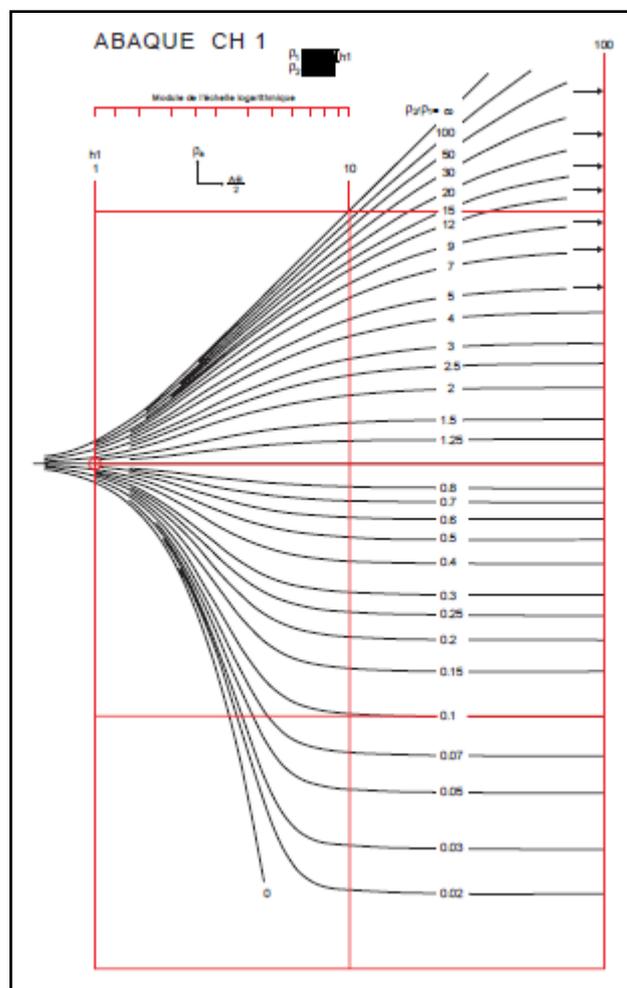


Figure 18: Abaque CH1

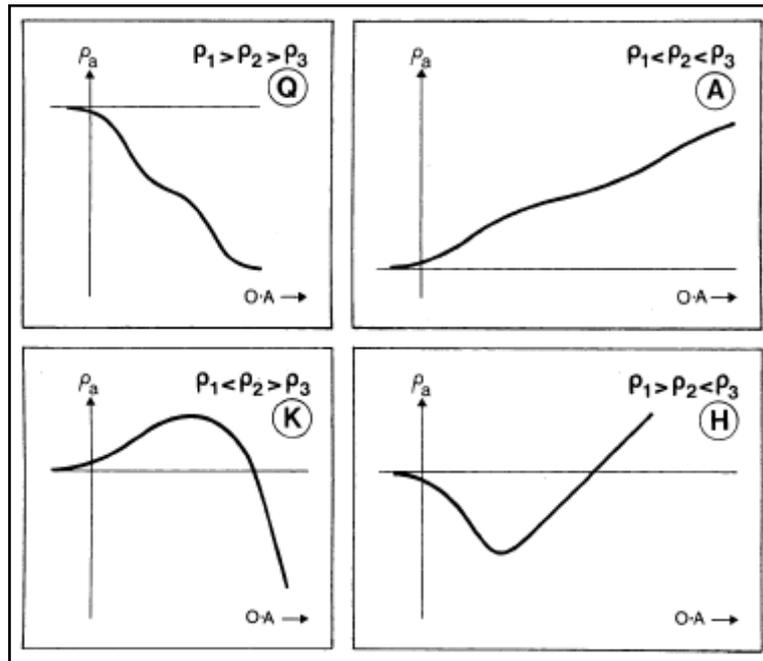


Figure 19: Quatre cas possibles d'un sondage sur trois terrains

1.2. Méthode d'inversion (IPI2Win) :

Le traitement des données de sondage électrique vertical se fait à l'aide du programme IPI2Win de l'Université de Moscou.

Données VES entrées dans IP2 Win:

1. **Exécutez** le programme IP2 Win
2. Ensuite, cliquez sur **Fichier > Nouveau point VES**
3. Indiquer le choix du dispositif et entrer les données. Par exemple la configuration des électrodes choisie a été la configuration Wenner.
4. Introduire les valeurs d'AB/2, MN et de la résistivité apparente. Ensuite, les points seront tracés dans un graphique à côté de la colonne SEV, puis cliquez sur le **bouton OK**.
5. Cliquez sur **Fichier > Enregistrer sous**, une boîte de dialogue apparaît permettant de choisir le dossier dans lequel le fichier données VES sera enregistré, nommez le, puis cliquez sur le **bouton Enregistrer**.
6. Les courbes et la table seront affichées à partir du fichier VES enregistré.
7. L'erreur de données est affichée sur la barre de titre du tableau. L'erreur de données peut être corrigée automatiquement en cliquant sur Point > Inversion.

8. Le résultat de la correction des données est apparu dans le graphique et la valeur d'erreur sur la barre de titre du tableau comme.

La figure ci-dessous représente le résultat de traitement du SEV 04 à l'aide de logiciel IPI2win:

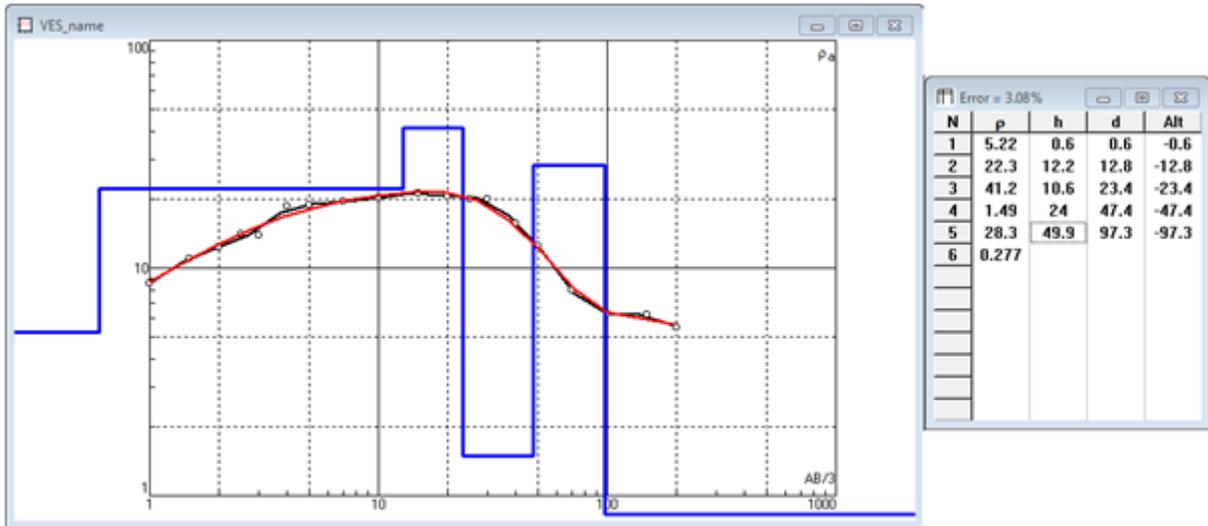


Figure 20: Courbe du SEV04

Remarque:

- La colonne AB / 2 est utilisée pour l'entrée de données AB / 2 (distance entre deux électrodes qui injectent du courant électrique au sol),
- la colonne MN est utilisée pour l'entrée de données MN (distance entre deux électrodes qui captent le courant électrique injecté).
- La colonne Rho est une colonne de données de résistivité apparente (Rho est le résultat de la résistivité électrique et de la valeur de calcul du facteur géométrique).^[19]

2. Sismique réfraction :

2.1. Traitement par méthode d'intercepte :

Le traitement des données sismique réfraction se passe par trois étapes principaux "pointage des films, calcul des vitesses et calcul des épaisseurs".

2.1.1. Pointage des films:

La première étape du traitement consiste alors à pointer le temps des premières arrivées des ondes sismiques à chaque géophone et pour chaque tir, dont la géométrie a été précédemment renseignée.

Cette étapes donne un nuage des points sur un diagramme distance-temps (dromochronique), En abscisse les distance en mètre (m) et en ordonnée les temps (millisecondes).

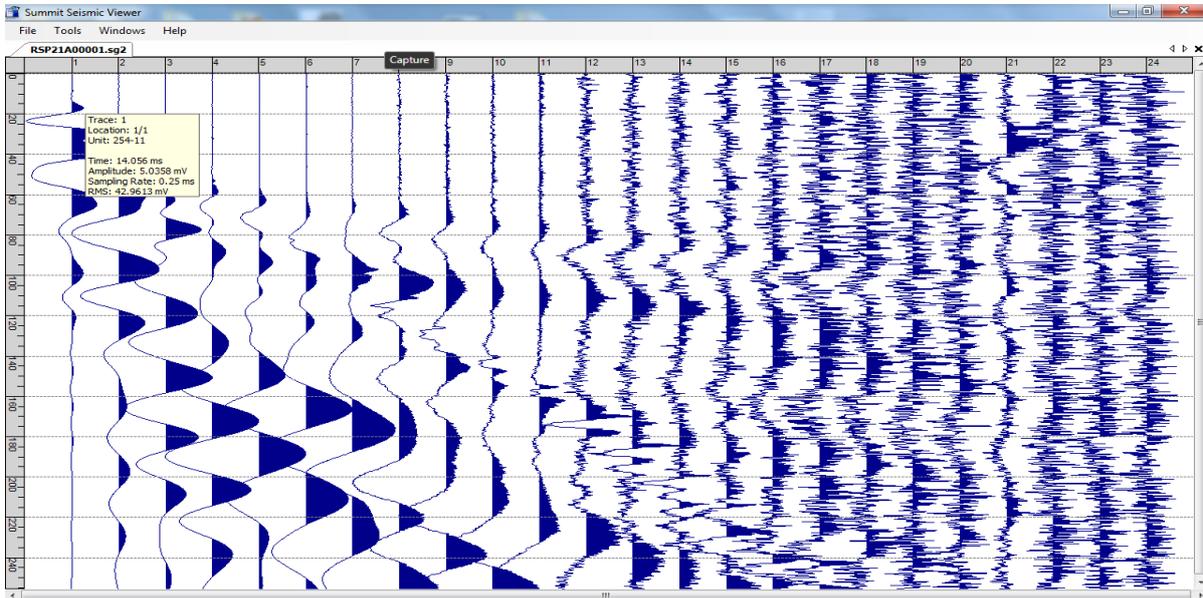


Figure 21: Film sismique

NB : on a seulement utilisé logiciel pour la lecture des temps des premières arrivées par rapport la position des géophones.

2.1.2. Calcul de vitesse:

Pour calculer La vitesse (m/s) de chaque couche nous devons calculer l'inverse de la pente de la dromochronique (temps-distance) pour chaque droite.

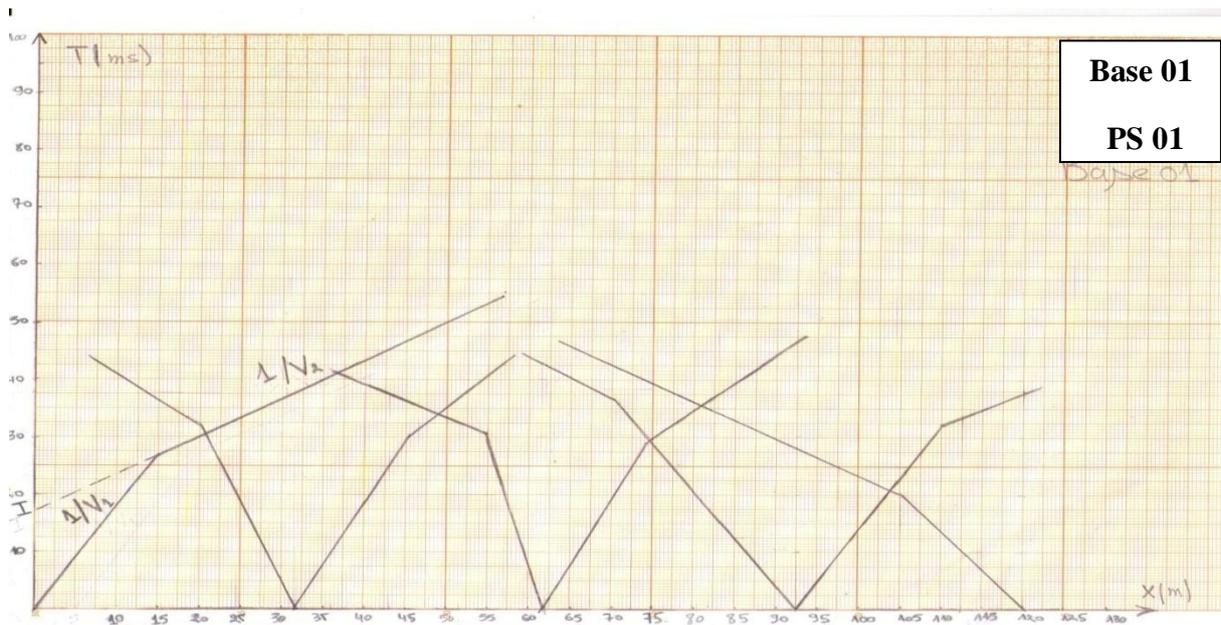


Figure 22: Les hodochrones de la Base 01 du PS 01

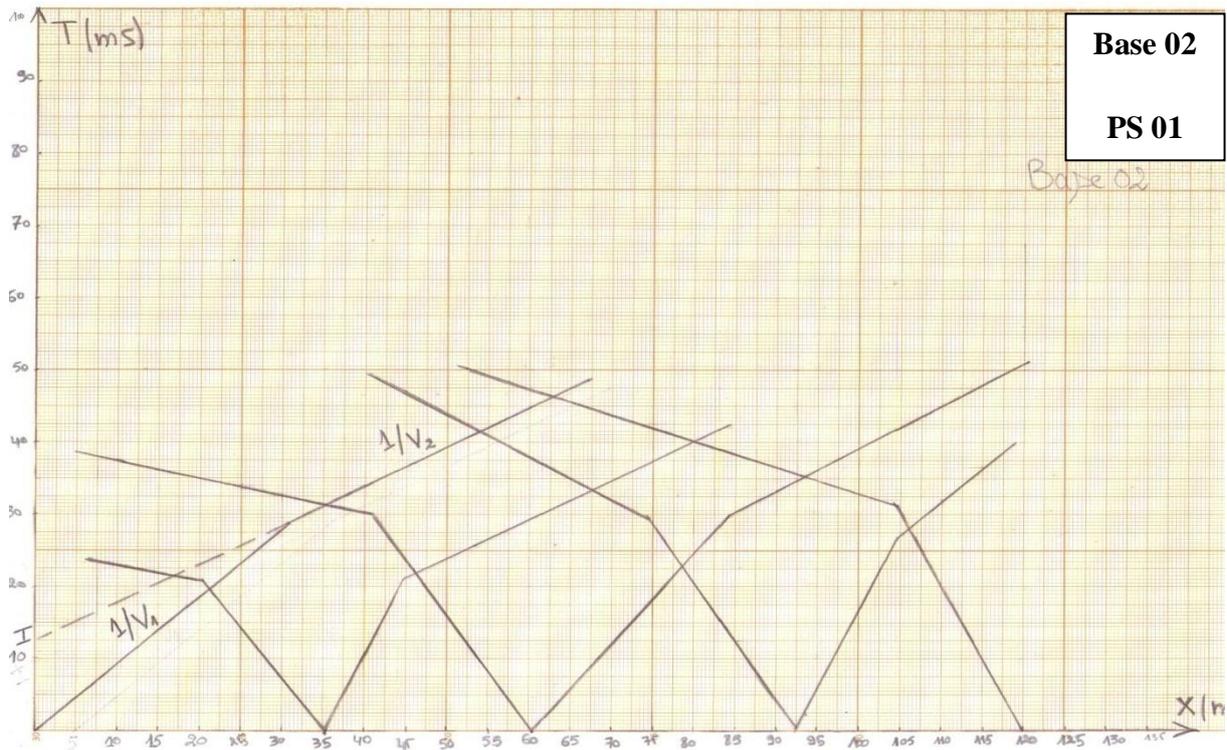


Figure 23: Les hodochrones de la Base 02 du PS 01

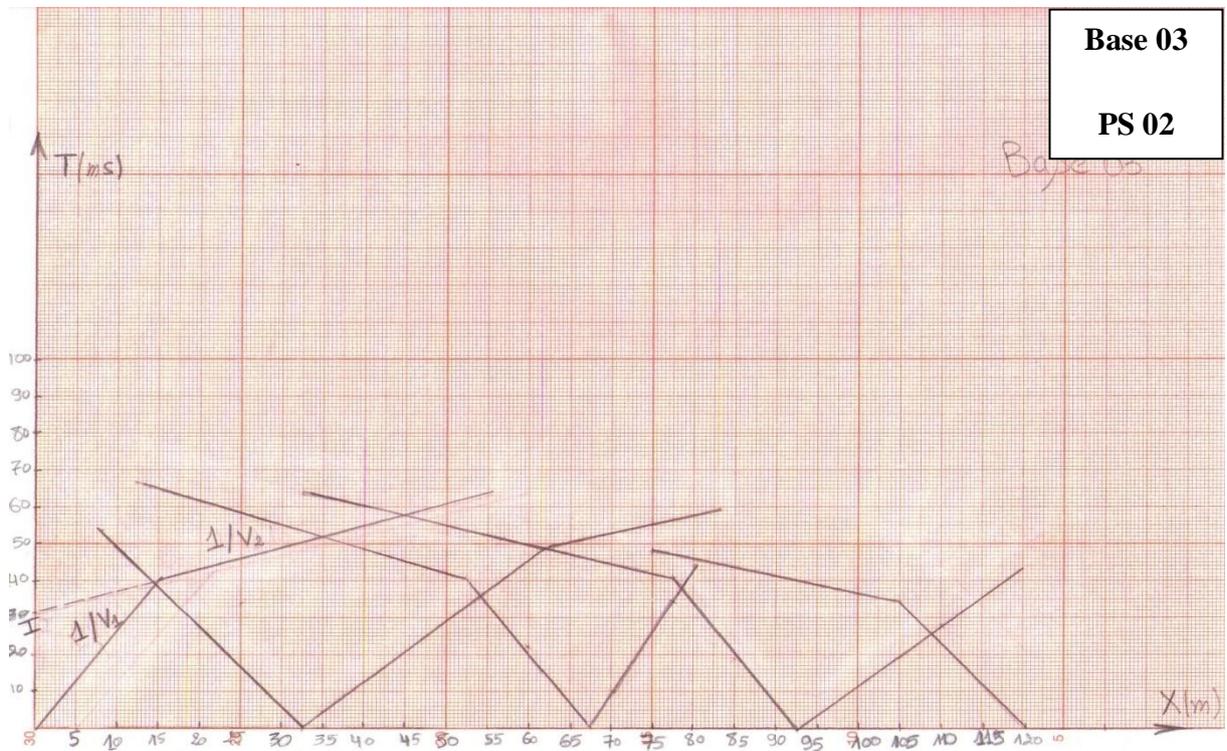


Figure 24: Les hodochrones de la Base 03 du PS 02

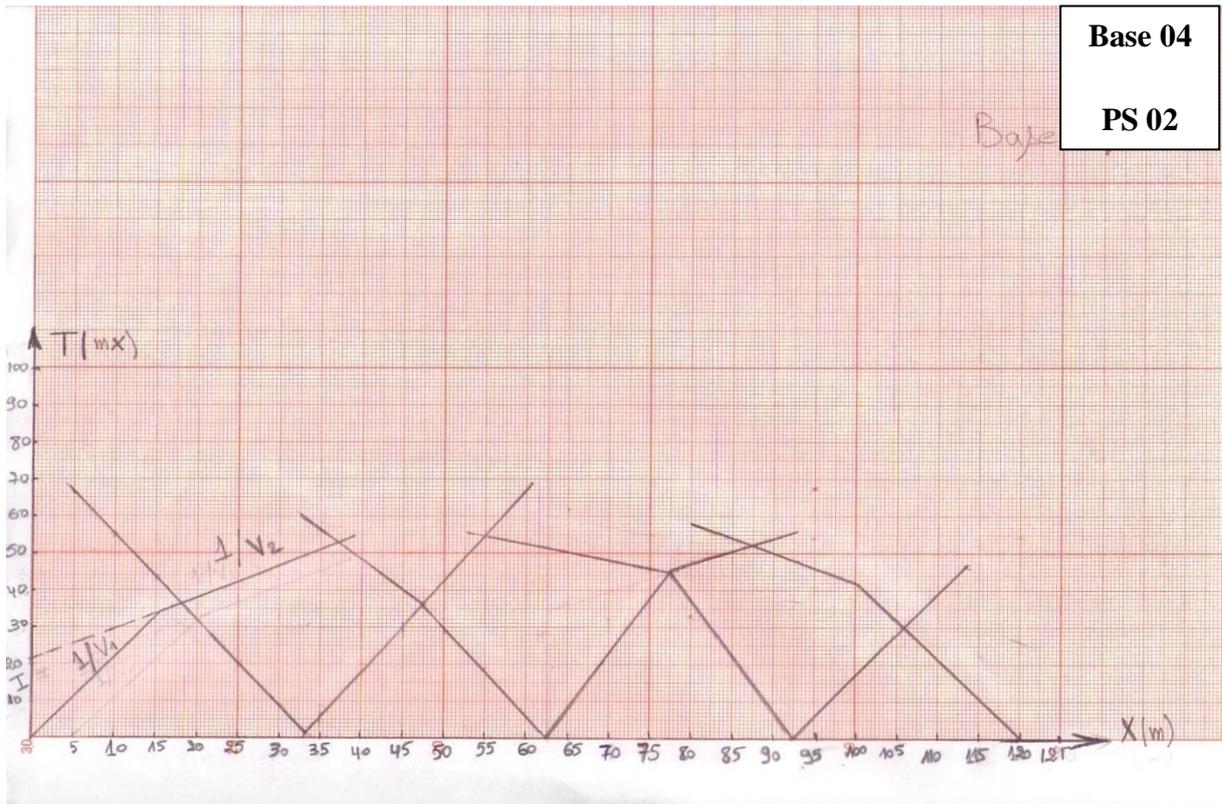


Figure 25: Les hodochrones de la Base 04 du PS 02

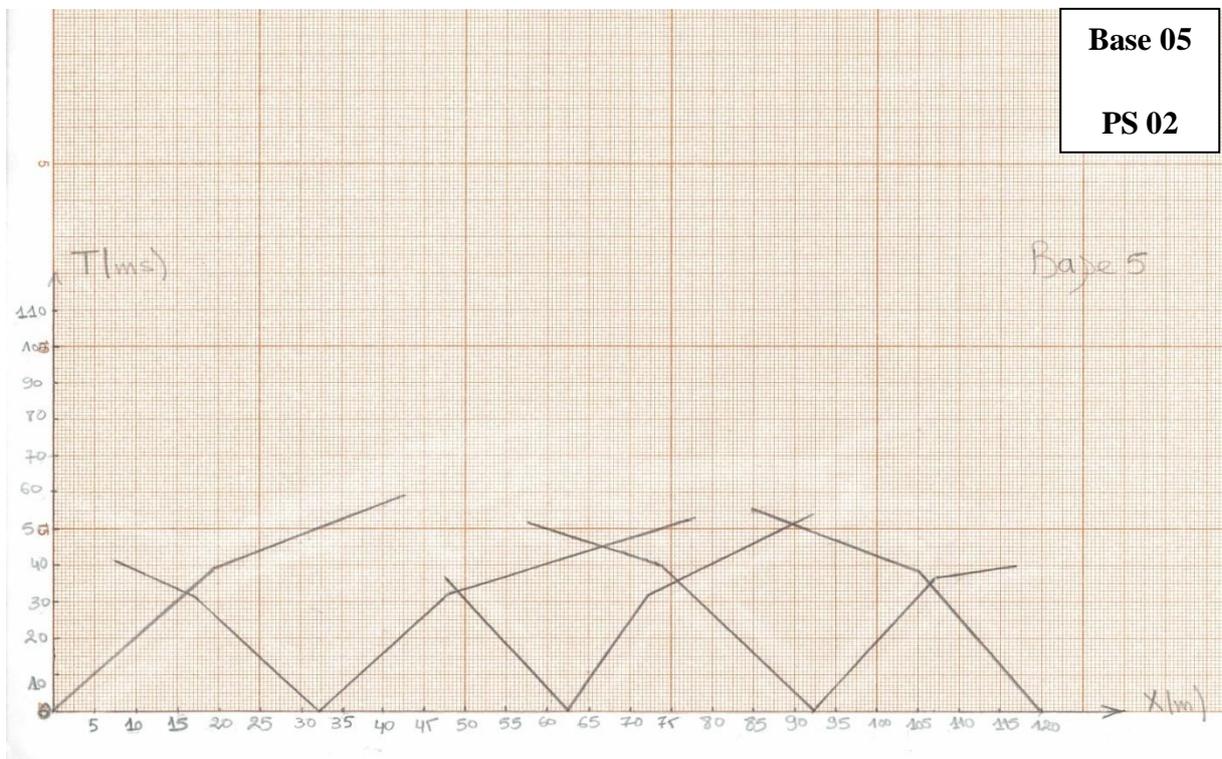


Figure 26: Les hodochrones de la Base 05 du PS 02

2.1.3. Calcul des épaisseurs:

Le calcul des épaisseurs se fait selon la méthode d'intercepte, Si l'on connaît les vitesses (V1 et V2, ...), les interceptes de chaque droite et d'après l'équation (21) ont déduire les épaisseurs.

Les résultats des calculs des vitesses et des épaisseurs des couches de chaque profil sont représentés sur le tableau suivant :

Bases		V (m/s)	Tir directe à -2.5m	Tir Fenêtre 1		Tir au centre		Tir Fenêtre 2		Tir inverse à + 2.5m
		H (m)		G	D	G	D	G	D	
PS01	Base 01	V1	500	349,929	467,29	239,81	429,18	598,8	555,56	751,88
		V2	1492,54	1098,9	1000	1694,92	1000	1369,86	1886,79	1538
		H1	4,52	4,14	3,85	3,21	4,05	6,65	6,51	4,32
	Base 02	V1	1075,27	735,29	450,45	666,67	769,23	598,8	454,55	500
		V2	1754,39	5000	1785,71	4166,67	1724,14	1666,67	1111,11	2666,67
		H1	7,15	6,5	3,48	8,42	6,7	5,96	3,87	6,5
PS02	Base 03	V1	375	453.70	604.16	375	555.55	375	625	428.57
		V2	1666.66	/	1954.54	1538.46	/	1875	/	2142.85
		H1	5,99	/	10.8	5.85	/	6.28	/	5,47
	Base 04	V1	441.17	400	400	416.66	326.08	340.9	436.17	476.19
		V2	1250	/	/	625	1500	2045	/	1250
		H1	4,93	/	/	3,37	5,88	6,6	/	7,76
	Base 05	V1	500	454.54	500	384.61	312.5	428.5	375	375
		V2	1250	1000	1500	/	952.38	1545.45	/	1176.47
		H1	6.5	4.08	5.45	/	3.49	5.57	/	7.1

Tableau 2: Les vitesses et les épaisseurs des profils sismiques

CHAPITRE IV

Interprétation des résultats

VII. Interprétation des données électriques :

I. Méthode d'inversion (IPI2Win) :

1.1. Le sondage électrique SEV 01 :

Le SEV 01 a été réalisé au même point D du deuxième profil sismique. Sa longueur est $AB = 200$ m. La coupe électrique de SEV 01 indique un milieu à cinq (05) couches.

La première couche a une faible résistivité $3.93 \Omega.m$ et son épaisseur 0.4 m. La seconde couche a une résistivité de $128 \Omega.m$ et une épaisseur d'environ $0,4$ m. la troisième couche a une résistivité $12.5 \Omega.m$, et épaisseur de 11.7 m. Au-delà de 12.6 m de profondeur, la résistivité électrique augmente pour atteindre presque de $48 \Omega.m$, à la dernière couche la résistivité électrique diminue pour atteindre $5.86 \Omega.m$.

Les trois dernières couches (03, 04 et 05) correspondent probablement à une formation argileuse, sa profondeur débute à $12,6$ m.

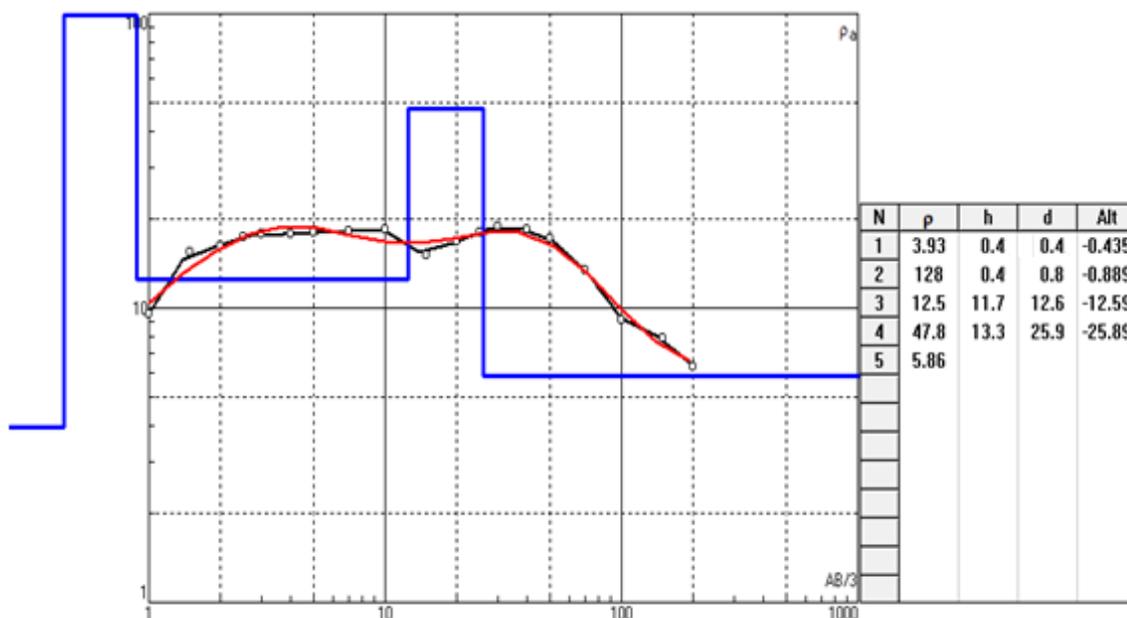


Figure 27: La courbe de résistivité électrique de sondage SEV01

1.2. Le sondage électrique SEV 02:

Le SEV 02 a été réalisé avec une longueur $AB = 200$ m entre les points F et G du deuxième profil sismique.

La courbe du sondage SEV 02 montre 4 couches, la première couche d'une résistivité $4.5 \Omega.m$ et d'épaisseur presque de 1 m. La deuxième couche a une résistivité $12 \Omega.m$ et

d'épaisseur de 23 m. La troisième couche a une résistivité électrique relativement très basse de $0.78 \Omega.m$. De 34.5 m de profondeur, une légère augmentation de la résistivité qui atteint la valeur de $7.95 \Omega.m$.

Le sondage présente un milieu très conducteur. Comme on n'a pas d'information sur la géologie, On ne peut pas dire avec certitude qu'il s'agit des argiles.

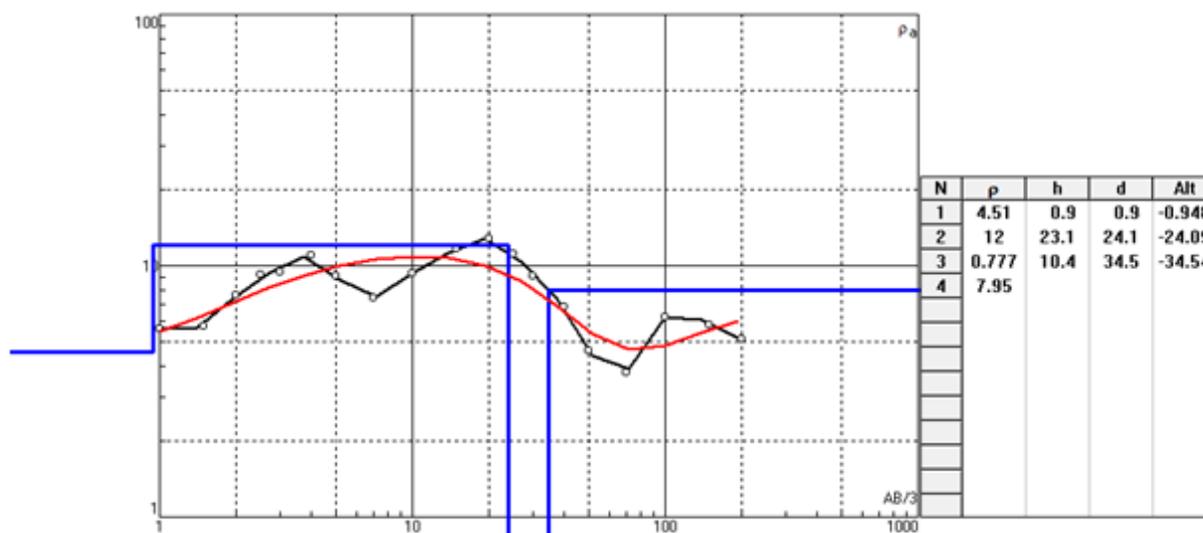


Figure 28: La courbe de résistivité électrique de sondage SEV02

1.3. Le sondage électrique SEV 03:

Le SEV 03 a été réalisé après le dernier point G du deuxième profil sismique environ de 190 m.

La coupe électrique du SEV 03 indique un milieu à quatre couches. La première couche a une résistivité électrique de $21.6 \Omega.m$ et une épaisseur de 0,4 m, cette couche peut caractériser des argiles. La seconde couche à une très faible résistivité électrique de $0.43 \Omega.m$ est d'épaisseur de 0.2 m. La troisième couche à une grande résistivité électrique de $418 \Omega.m$, cette couche est caractérisée par une épaisseur de 0.8 m. Au-delà de 1.5 m de profondeur, la résistivité électrique diminue à $14 \Omega.m$.

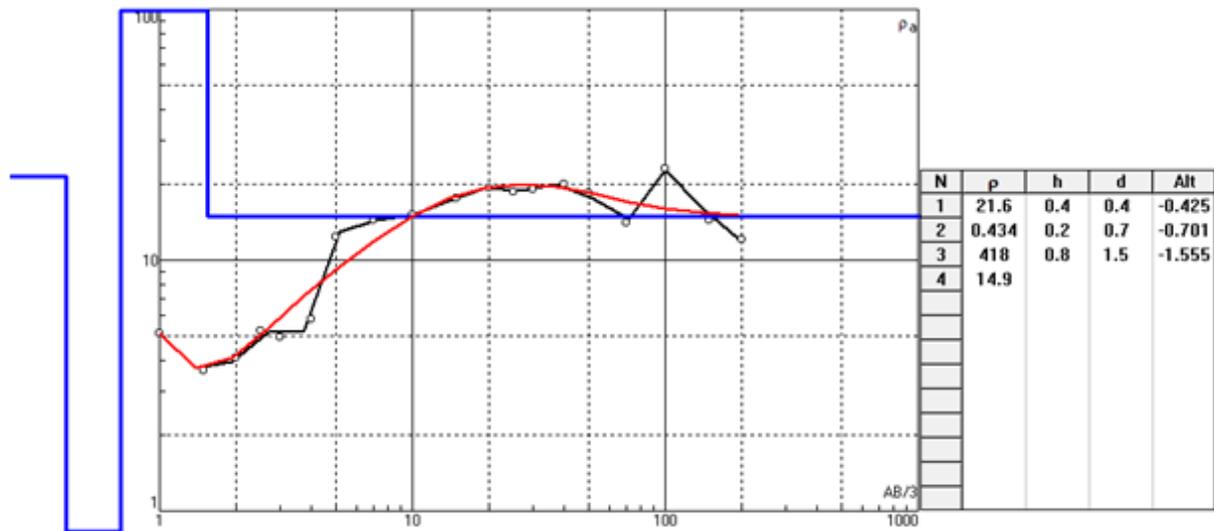


Figure 29: La courbe de résistivité électrique de sondage SEV03

1.4. Le sondage électrique SEV 04:

Le SEV 04 a été réalisé avec une longueur $AB = 200$ m, entre les points A et B du premier profil sismique.

La courbe du sondage SEV 04 montre un milieu à six couches, la première couche a une résistivité $5.22 \Omega.m$ et d'épaisseur de 0.6 m. La seconde couche est caractérisée par une résistivité électrique de $22 \Omega.m$ et une épaisseur de 12.2 m, cette couche correspond probablement à des argiles. La troisième couche a une résistivité électrique de $41.2 \Omega.m$ et est de 10.6 m d'épaisseur, cette formation peut aussi caractériser des argiles. La quatrième couche a une résistivité électrique de $1.5 \Omega.m$ et d'épaisseur de 24 m. Après 47.4 m de profondeur, la résistivité électrique augmente à la valeur de $28.3 \Omega.m$, cette formation correspond probablement à des argiles d'une épaisseur presque de 50 m.

De presque 100 m de profondeur, la résistivité électrique diminue pour atteindre $0.27 \Omega.m$.

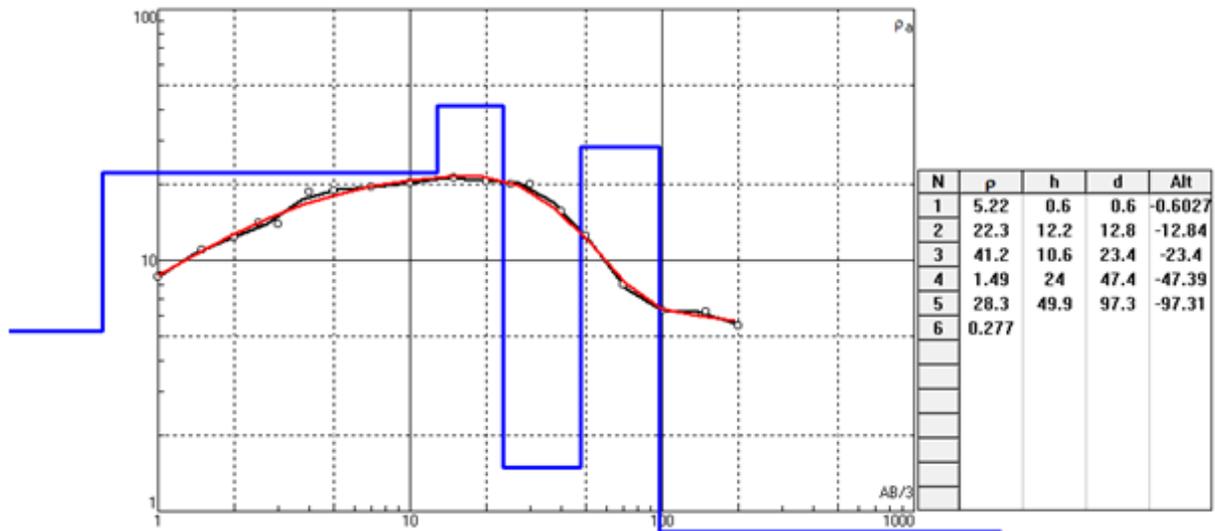


Figure 30: La courbe de résistivité électrique de sondage SEV04

1.5. Le sondage électrique SEV 05:

Le SEV 05 a été réalisé avec une longueur $AB = 200$ m à la même point C de profile sismique 01.

La courbe du sondage SEV 05 indique un milieu à quatre couches.

La première couche a une résistivité $14.5 \Omega.m$ et d'épaisseur de 0.6 m. La seconde couche a une résistivité élevée de $259 \Omega.m$ et une épaisseur d'environ 1.4 m. La troisième couche a une résistivité électrique de $30.3 \Omega.m$ se trouvant à 2 m de profondeur cette couche peut correspondre à des argiles. L'épaisseur de cette dernière est égale 19.3 m. Au-delà de 21.4 m de profondeur, la résistivité électrique diminue à la valeur de $7.23 \Omega.m$.

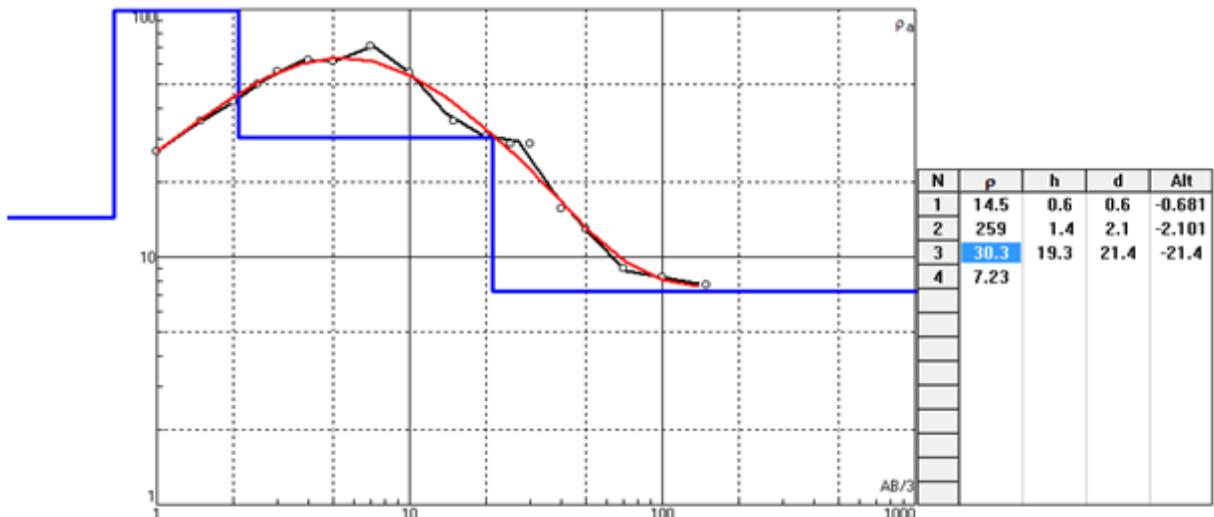


Figure 31: La courbe de résistivité électrique de sondage SEV05

VIII. Interprétation des données sismiques :

1. Le profil sismique PS1:

On constate l'existence de deux couches qui sont les suivantes (**Figure 32**).

L'épaisseur de la première couche varie entre 3,6 m et 7.5 m et sa vitesse varie entre 334 m/s – 750 m/s. Cette couche peut caractériser une formation argileuse (**Annexe 2**). La deuxième couche est caractérisée par une gamme de vitesse assez élevée qui varie entre 1049 m/s et 3392 m/s, elle correspond à un milieu très compact.

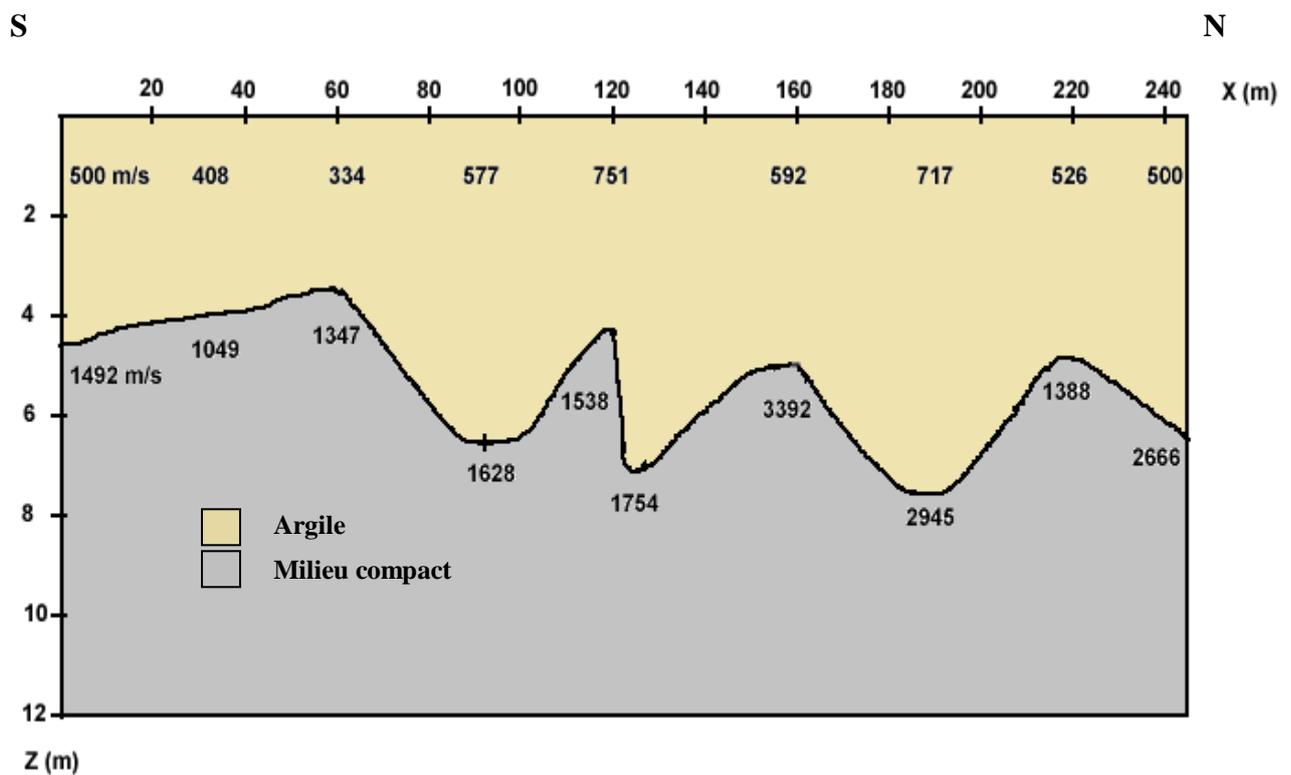


Figure 32: Modèle géo-sismique des variations des vitesses et des profondeurs (PS 01)

2. Le profil sismique PS2:

On constate qu'il existe deux couches (**Figure 33**) :

La vitesse de la première couche varie dans l'intervalle [348 m/s – 528 m/s], son épaisseur varie entre 3,5 m et 10 m, cette couche peut correspondre à une formation argileuse (**Annexe 2**) de surface. Au-dessous de cette dernière on trouve une formation définie par une vitesse qui varie entre 952 m/s et 2142 m/s.

NO

SE

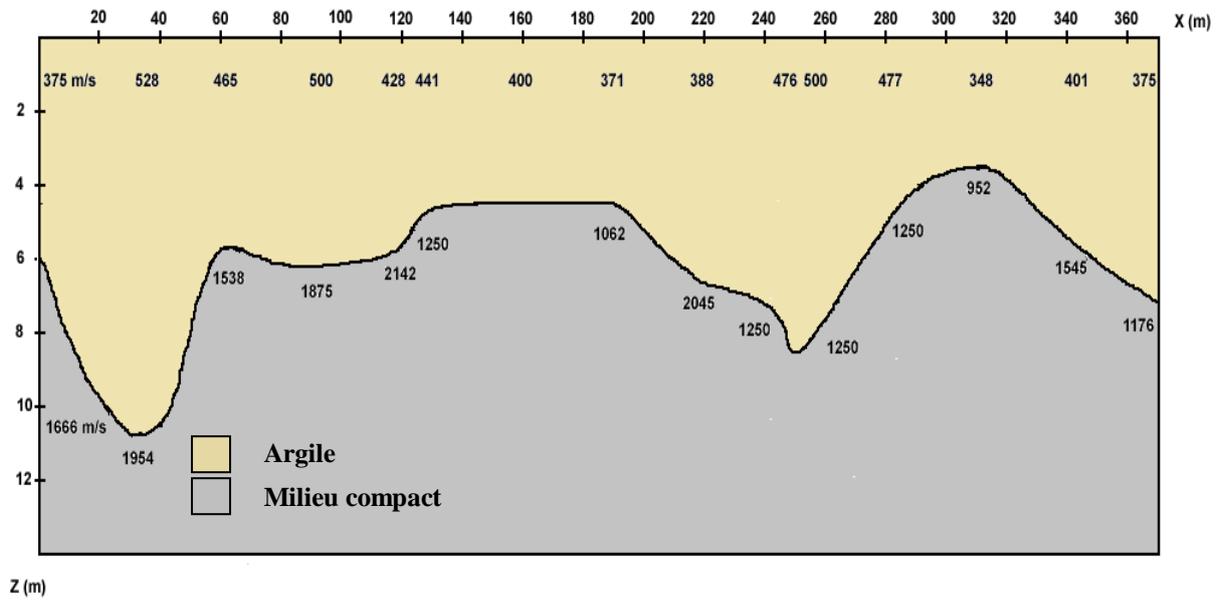


Figure 33: Modèle géo-sismique des variations des vitesses et des profondeurs (PS 02)

IX. Corrélations entre les sondages électriques et profils sismiques :

La méthode sismique réfraction montre qu'il y a deux couches dans chaque profil sismique. Le résultat du premier profil (PS 01) montre l'existence de deux couches, la première couche représente les argiles dont son épaisseur varie entre 3,6 m et 7.56 m, la corrélation de cette couche avec les couches obtenues au sondage électrique 04 (SEV 04) paraît, dans la deuxième couche de celui-ci qui a une épaisseur de 3.4 m et dans la troisième couche au sondage électrique 05 (SEV 05), qui a une épaisseur d'environ 4 m. Par contre la deuxième couche du profil sismique (PS1) n'a aucune corrélation avec les couches obtenues aux sondages électriques SEV 04 et SEV 05. Cette couche est plus compacte cependant les résultats des deux sondages SEV 04 et SEV 05 montrent une formation argileuse. (Figure 34)

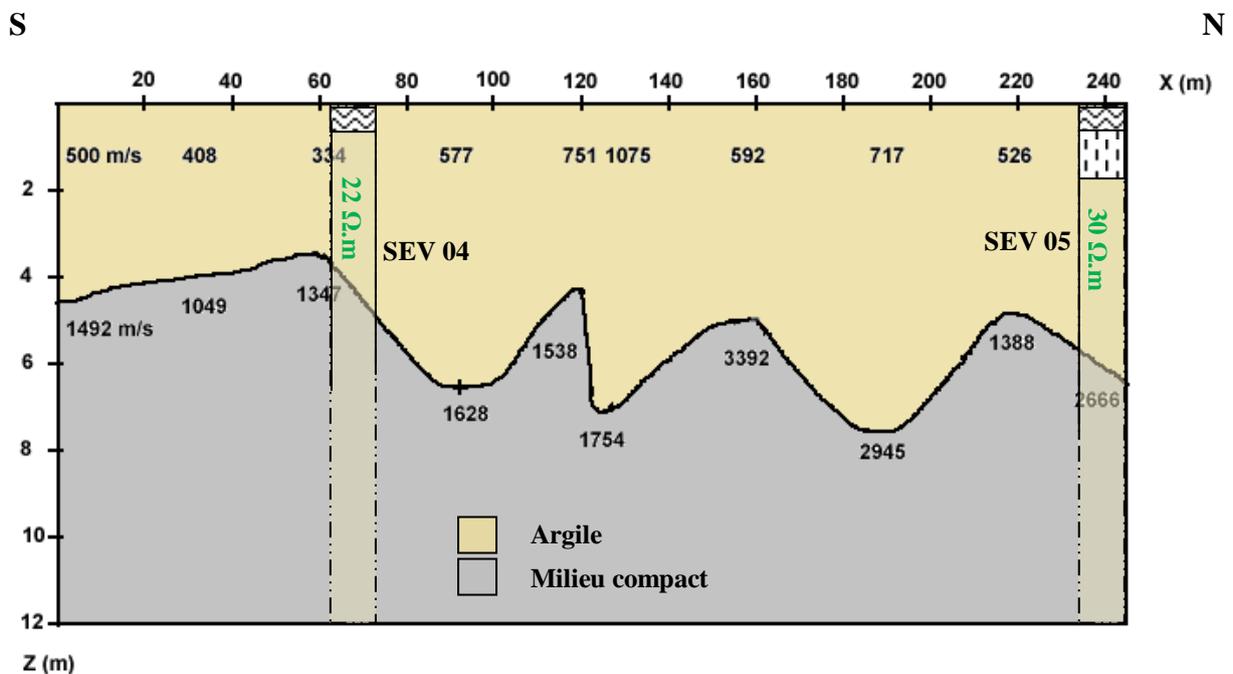


Figure 34: Corrélation du profil sismique PS01 avec les sondages électriques verticaux, SEV04 et SEV05

Le deuxième profil sismique (PS 02) montre aussi qu'il y a deux couches. La première c'est de l'argile, d'une épaisseur varie entre 3,5 m et 10 m, la corrélation de cette couche avec les couches obtenues au sondage électrique (SEV 01) paraît dans la troisième couche de celui-ci, d'une épaisseur presque de 7 m et dans la deuxième couche au sondage électrique (SEV 02), d'une épaisseur de 2.5m. Par contre la deuxième couche du profil sismique (PS2) n'a aucune corrélation avec les couches obtenues au sondage électrique SEV 01 et SEV 02. Cette couche

est plus compacte cependant les résultats des deux sondages SEV 01 et SEV 02 montrent une formation argileuse. (Figure 35)

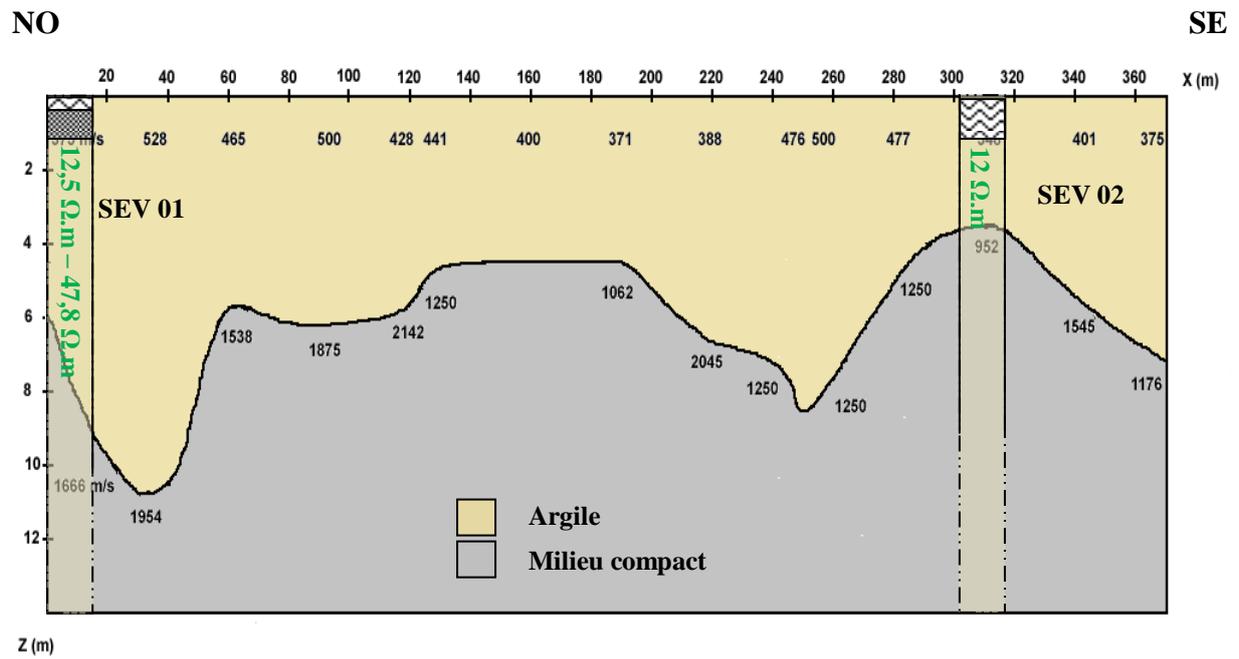


Figure 35: Corrélation du profil sismique PS02 avec les sondages électriques verticaux, SEV01 et SEV02

Conclusion :

L'étude géophysique entreprise sur le site d'étude a permis d'améliorer la compréhension de sa structure et de donner une image approximative du sous-sol.

Avec la méthode électrique (SEV01, SEV02, SEV03, SEV04, SEV05) :

Six (06) couches ont été mises en évidence. La couche argileuse est caractérisée par une épaisseur de l'ordre, de 13,3 m (quatrième couche) dans le SEV01, de 0,5 m (première couche) dans le SEV03, de 12,2 m (deuxième couche), de 10,6 m (troisième couche) et de 49,9 m (cinquième couche) dans le SEV04 et de 19,3 m (troisième couche) dans le SEV05.

Avec la méthode sismique réfraction (PS01 et PS02):

Deux (02) couches ont été mises en évidence. La couche argileuse (la première) est caractérisée par une épaisseur, varie entre 3,6 m et 7,5 m dans le premier profil (PS 01), et entre 3,5 m et 10 m dans le deuxième profil (PS 02). La deuxième couche de chacun des profils sismiques (PS 01) et (PS 02), montre un milieu compact.

L'utilisation de deux méthodes géophysiques (électrique et sismique réfraction) a permis de caractériser avec précision les épaisseurs des couches d'argile dans notre site d'étude.

Bibliographie :

- [1] J.-P. CLÉMENT et P. DADET, RECHERCHE D'ARGILES EN BRETAGNE, 76 SGN 342 BPL, BRGM, P06 ;
- [2] Touati Wahiba, année 2013-2014, mémoire de L'incohérence de la dynamique périurbaine entre les sollicitations urbanistique et la nécessité de transition équilibrée ville compagne, cas de la ville de Batna ;
- [3] Carte Géologique de l'Algérie 1 / 500 000, 2^{ème} édition, année 1951 – 1952 ;
- [4] Carte Géologique de l'Algérie – N'Gaous (Ras El Aioun) 1 / 50 000, 2^{ème} édition, année 1987 ;
- [5] Djeddi Mabrouk, Prospection Electrique, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, Algérie ;
- [6] Cours Electrique méthodes électriques, Master 1 physique du globe. Université Djillali Bounaama de Khemis Miliana, Algérie.
- [7] Barker R.D., année 1989, Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays, Geophysics VOL. 54. NO. 8, 1031-1037 Roy, A., and Apparao. A., 1971, Depth of investigation in direct current methods: Geophysics, 36.943-959.
- [8] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (<http://www.ademe.fr/mediatheque>), Guides des méthodes géophysique ;
- [9] Sismique réfraction, Mesures Expertises Instrumentation Informatique ;
- [10] Chouteau M., Giroux B.; année, notes de cours Géophysique appliquée II GLQ 3202, méthodes sismiques, université de Montréal, nombre pages (15p.)
- [11] Informations extraites du site web de l'association de la géophysique appliquée non pétrolière « AGAP Qualité ». <http://www.agapqualite.org/>
- [12] EOST Strasbourg - Les ondes sismiques, <https://eost.unistra.fr/>;
- [13] Olivier Magnin, Yves Bertrand, guide sismique réfraction, laboratoire central des ponts et chaussés ;
- [14] EOST Strasbourg - Les ondes sismiques, <https://eost.unistra.fr/>;
- [15] Document public, - Aout 2001, détermination par sismique réfraction et sismique transparence de la structure du massif crayeux en bordure de la falaise d'Ault 80 ;
- [16] DJEDDI Mabrouk, année 2017, sismique réfraction : Principe, Acquisition, Traitement et Interprétation. Département de Géophysique – FHC -, université M'Hamed Bougara de Boumerdes, Algérie ;

[17] Adama Mariko, Année 1993-1994, Mémoire de D.E.S.S de Géophysique Appliquée, Université Pierre et Marie-Curie, Paris VI, France.

[18]https://elearn.univouargla.dz/20132014/courses/NV2014/document/geophysique_tome1.pdf?cidReq=NV2014 LAGEOPHYSIQUE POUR LES GEOLOGUES Tome 1 ;

[19] Alva Kurniawan, année 2009, IP2Basic Wine Tutorial.

Annexe :

Type de roche	Gamme de résistivité [$\Omega \cdot m$]
Granite	$3 * 10^2$
Schiste (calcaire et mica)	$20 \cdot 10^4$
Tufs	$2 * 10^3$ (humide) - 10^5 (sec)
Graphie schiste	$10 \cdot 10^2$
Ardoises (diverses)	$6 * 10^2$ - $4 * 10^7$
Gneiss (divers)	$6.8 * 10^4$ (humide) - $3 * 10^6$ (sec)
Marbre	10^2 - $2.5 * 10^8$ (sec)
Quartzites (diverses)	10 - $2 * 10^8$
Shales consolidés	20 - $2 * 10^3$
Argilites	10 - $8 * 10^2$
Conglomérés	$2 * 10^3$ - 10^4
Grés	1 - $6.4 * 10^8$
Calcaires	50 - 10^7
Dolomie	$3.5 * 10^2$ - $5 * 10^3$
Argile humide non consolidée	20
Marnes	3 - 70
Argiles	1 - 100
Alluvions et sables	10 - 800
Sables bitumineux	4 - 800

Annexe 1: Résistivité électrique de quelques roches

Nature des terrains	Vitesse des ondes P [m/s]	Vitesse des ondes S [m/s]
Eboulis, terre végétale	300 - 700	100 - 300
Sable sec	400 - 1200	100 - 500
Sable humide	1500 - 4000	400 - 1200
Argiles	1100 - 2500	200 - 800
Marnes	2000 - 3000	750 - 1500
Grés	3000 - 4500	1200 - 2800
calcaires	3500 - 6000	2000 - 3300
Craie	2300 - 2600	1100 - 1300
Sel	4500 - 5500	2500 - 3100
Anhydrite	4000 - 5500	2200 - 3100
Dolomie	3500 - 6500	1900 - 3600
Granite	4500 - 6000	2500 - 3300
Basalte	5000 - 6000	2800 - 3400
charbon	2200 - 2700	1000 - 1400
Eau	1450 - 1500	-
Glace	3400 - 3800	1700 - 1900
Huile	1200 - 1250	-

Annexe 2: Vitesses des ondes P et S de divers types de terrains