

République Algérienne Démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الجيلالي بونعامة خميس مليانة

Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de science de la Matière



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention d'un diplôme de Master Physique

Spécialité physique du globe.

Thème :

**Caractérisation d'un site par les deux
méthode : Géoradar et Tomographie
Electrique**

Réalisé par :

-Amraoui Aicha

-Touati Soraya

Dirigé par :

Dr.S.Bentridi

Liste des figures

Figure 1.1 : Schéma d'une onde électromagnétique à l'instant t .

Figure 1.2 : Schématisation de la loi de Snell-Descartes.

Figure 1.3 : Schéma de principe du GPR.

Figure 1.4 : Signal émis par un radar impulsif.

Figure 1.5 : Evolution de la fréquence émise en fonction du temps.

Figure 1.6 : Mode réflexion à offset constant.

Figure 1.7 : Mode réflexion à offset variable.

Figure 1.8 : Mode réflexion à offset variable (WARR).

Figure 1.9 : Représentation d'un A-Scan.

Figure 1.10 : Présentation d'un B-Scan.

Figure 1.11 : Représentation d'un C-scan.

Figure 1.12 : Principe de la construction d'une pseudo-section de résistivité apparente.

Figure 1.13: Illustration de la pseudo-section.

Figure 1.14: Configuration du dispositif des électrodes.

Figure 1.15: Le logiciel type pour l'obtention du modèle inverse des données observées « *Res2Dinv* ».

Figure 2.1 : Localisation et disposition des profils de Tomographie électrique et du Georadar.

Figure 2.2 : Les valeurs aberrantes issues des profils réalisées avec le dispositif dipôle-dipôle.

Figure 2.3: Les blocs utilisés lors du processus d'inversion (dispositif dipôle-dipôle).

Figure 2.4: Présentation de l'inversion tomographie électrique 2D dipôle-dipôle.

Figure 2.5 : Les valeurs aberrantes issues des profils réalisées avec le dispositif Wenner.

Figure 2.6: Les blocs utilisés lors du processus d'inversion (dispositif Wenner).

Figure 2.7 : Présentation de l'inversion des données de tomographie électrique 2D Wenner.

Figure 3.1 : Illustration de l'anomalie (A) révélée par le profil 4.

Figure 3.2 : L'anomalie (B) révélée par le profil 5.

Figure 3.3 : L'anomalie (C) révélée par le profil 6.

Figure 3.4 : L'anomalie (D) révélée par le profil 7.

Figure 3.5 : L'anomalie (E) révélée par le profil 10.

Figure 3.6 : L'anomalie (F, G) révélée par le profil 11.

Figure 3.7 : Levés de profil 14.

Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu, de nous avoir donné la santé, volonté et la patience de terminé notre projet.

Nous tenons à exprimer nos profonds remerciements a notre encadreur Mr.S.BENTRIDI, Professeur à l'université de Djilali Bounaama Khemis Miliana, et nous remercions également Mr L .Hamai co-encadreur et Mr A. Lamali ingénieurs GeoExplo qui ont toujours été présente durant notre stage.

Nous exprimons toute notre reconnaissance à tous les enseignants de la faculté de Technologie de l'université de Djilali Bounaama Khemis Miliana qui ont contribué à notre formation.

Nous remercions nos familles, plus particulièrement nos chers parents qui ont tant donné pour notre réussite dans la vie.

Enfin, nous remercions également tous nos amis ainsi que tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aide, et soutenu.

Dédicace

C'est à l'aide d'Allah le clément, le tout puissant, que j'ai arrivé à recueillir le fruit de mes 5ans d'études, que je dédie ce travail à :

L'âme de mon père

Qui ne m'a rien épargné pour la durée de sa vie, je demande à dieu tout-puissant de couvrir votre âme et de faire de votre tombe une prairie de paradis et d'habiter le paradis suprême. Que dieu ait pitié de toi, mon père.

Ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme elle se doit, ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes cotes a toujours été ma source de force pour affronter les différentes obstacles.

*Mes très chères frère « **Ahmed, Cheikh, Nasser et Salim** »*

*Mes très chères sœurs «, **Nassima, Saida et Lalia** et son enfants **Djihane et M^{ed} Yassine**»*

*Mon mari « **Fateh** ».*

***Aicha**, chère amis avant d'être binôme, je la souhaiterai une vie pleine de bonheur et de Prospérité.*

*Toute ma famille « **Touati et belkouche** »*

A tous mes amis, mes copines de classe M2 physique de globe, tous mes enseignants, et tous qui ma connue

Je dis merci

soraya

Dédicace

*A l'homme, mon précieux offre du dieu, mon héros, qui doit ma vie, qui ma toujours poussé et motivé dans mes études, ma réussite et tout mon respect: mon cher père « **abd alkader** ».*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non a mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse: mon adorable mère « **kheira** ».*

*A ma deuxième maman, qui aucun dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour eternal et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être, ma sœur **yakouta**.*

*A mes frères « **Mohamed, Amine, Yassine** » et ma sœur « **Fatima Zehra** ».*

*À mon fiancé « **abd elkader** » qui ma toujours encouragé.*

*A mon binôme « **Soraya** ».*

*A tous mes proches et mes amis particulièrement : « **Noussaiba et kenza** » et tous mes amis que je les ai rencontré a l'université.*

Aicha.

Sommaire

Introduction

Chapitre01: Le géoradar (Ground penetrating radar) et La Tomographie Electrique.

Introduction	1
Partie 01 : Le géoradar (Ground Penetrating Radar).	
1.1 Introduction	1
1.2. Les bases fondamentales de fonctionnement	1
1.2.1. Propagation des ondes électromagnétiques	1
1.2.2. Célérité de propagation et atténuation	3
1.2.3. L'impédance électromagnétique	3
1.2.4. Les lois de Snell-Descartes	4
1.2.5. Coefficient de réflexion et transmission	4
1.3. Principe du GPR	5
1.4. Mise en œuvre de la propagation GPR	6
1.4.1. Les techniques de modulation	7
1.4.2. Les différentes configurations d'acquisition	8
1.4.3. Problématique de pénétration	9
1.4.5. Les enregistrements des signaux radars	10
1.4.6. Traitement des données du GPR	12
Partie 02 : Tomographie	14
1.1 Introduction	14
1.2 Définition	14
1.2.1 Procédure d'acquisition 2D	14
1.2.2 Une pseudo-section	15
1.2.3 Les dispositifs	16
1.2.4 Le modele d'invesion	17
1.3. la tomographie à haute résolution	17
Chapitre02: Tomographie: acquisition traitement et interprétation des données.	
2.1. Introduction	18
2.2. Discription de site	18
2.3. Materiel de tomographie electrique	18
2.4. Traitement des données	19

2.4.1. Dispositif dipole-dipole	19
2.4.2. Dispositif wenner.....	21
Chapitre03:acquisition et traitement des données du Géoradar.	
3.1 Materielle la prospection Géoradar.....	24
3.2 Traitement des données	24
3.3 Résultats des traitement	24
3.4 Discussion.....	28
Conclusion.	

Résumé

L'objectif de cette étude est l'utilisation de deux méthodes géophysiques : le géoradar et la tomographie électrique pour tenter la localisation, le tracé, ainsi que la profondeur d'un conduit de distribution de gaz dans l'ancien campus de l'université Djillali Bounaama khemis Miliana. La tomographie électrique (ERT) est une méthode récente constituée d'une technique d'investigation pertinente pour la caractérisation haute résolution de la résistivité. Le géoradar est une technique non destructive de prospection du sous-sol, utilisée pour de nombreuses applications (génie civil, archéologie, détection de mines, glaciologie). Les modèles directs et les méthodes d'inversion les plus utilisés en géoradar sont présentés avec leur domaine de validité, et des exemples d'applications.

Mots clés :

Géophysique, Géoradar, tomographie électrique.

Abstract

the objective of this study is the use of a two geophysical method: the georadar and the electrical tomography to try the localization, the trace as well as the depth of a gas distribution duct in the old campus of the Djillali Bounaama khemis Miliana university. Electrical resistivity tomography (ERT) is a recent method and a relevant investigative technique for the high resolution characterization of resistivity. Ground penetrating radar is a non-destructive underground prospecting technique Used for many applications (civil engineering, archeology, mine detection, glaciology). The direct models and inversion methods most used in ground penetrating radar are presented with their domain of validity, and examples of applications.

Keywords :

Geophysical, georadar, electrical tomography.

تلخيص

الهدف من هذه الدراسة هو استخدام طريقتين جيوفيزيائيتين: الجيورادار والتصوير المقطعي الكهربائي لتجربة التوطين والتتبع وكذلك عمق مجرى توزيع الغاز في الحرم القديم للجامعة. جامعة جيلالي بونعامه خميس مليانة. التصوير المقطعي الكهربائي هو طريقة (ERT) التصوير المقطعي بالمقاومة الكهربائية حديثة وتقنية استقصائية ذات صلة لتوصيف عالي الدقة للمقاومة. الرادار المخترق للأرض هو تقنية تنقيب تحت الأرض غير مدمرة تستخدم في العديد من التطبيقات (الهندسة المدنية، علم الآثار، كشف الألغام، علم الجليد). يتم تقديم النماذج المباشرة وطرق الانعكاس الأكثر استخدامًا في رادار اختراق الأرض مع مجال صلاحيتها، وأمثلة على التطبيقات

Introduction général :

Dans le présent travail, nous utiliserons deux techniques géophysiques pour tenter la localisation d'un gazoduc qui traverse une parcelle de terrain (susceptible e constituer à l'avenir une ferme pédagogique) apparentant a l'université Djilali Bounaama de Khemis- Miliana (ancien campus). L'acquisition des données s'est déroulée lors d'un stage d'instrumentation géophysique assuré communément entre l'université et le centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique (CAAG). Lors de cette campagne, deux méthodes ont été utilisé : Le Géoradar et la Tomographie Électrique.

Le GPR est un outil géophysique qui permet une prospection de la proche surface avec un large éventail d'application dans différents domaines : Géotechnique, Archéologie, Travaux publics, etc... .Son utilisation repose sur l'émission et la réflexion des ondes électromagnétiques a très haute fréquence (jusqu'à 2Ghz) offrent ainsi, une résolution et profondeur d'investigation en corrélation avec le fréquence utilisée.

La tomographie électrique est un mode de traitement assez distinct, qui utilise des acquisitions par transmission directe. Cette technique permet l'obtention d'une distribution spatiale en coupe verticale de la résistivité électrique du sous-sol.

Lors de ce travail, nous avons pu nous familiariser avec le traitement et l'interprétation des données géophysiques (électrique et GPR), dans la mesure du possible, vu que la situation qui a manqué la période de réalisation du PFE (COVID-19) et les restrictions qui l'ont accompagné, nous ont empêché de tirer le meilleur profit de l'expérience riche et conséquente qu'aurait pu s'offrir dans les conditions ordinaires, par nos enseignants et formateurs exerçants au niveau du CRAAG. Malgré cela, nous espérons pouvoir accompli une phase préliminaire qui nous mettra sur la bonne direction dans notre apprentissage.

Chapitre 01 : Le georadar
(Ground penetrating radar
ou GPR) et La
Tomographie Electrique.

Introduction :

Le Géoradar ou GPR (Ground Penetrating Radar) trouve un grand nombre d'applications liées à la détection et à l'imagerie des cibles et d'anomalies dans le sous sol.

En générale les données du GPR sont analysées et interprétées en fonction d'une analyse « visuelle » du radar gramme. Toutefois, cette analyse ne peut fournir une interprétation fiable que dans des scénarios simples. [1]

Afin, d'améliorer des données GPR on joint d'autre techniques de prospection, tel que la tomographie électrique est la combinaison de la technique du sondage électrique verticale (SEV) et du trainé électrique.

Partie 01 : Le Géoradar (GroundPenetrating Radar)

1.1. Introduction :

Le Géoradar (ou GPR pour l'abréviation anglaise de Ground Penetrating Radar) est le terme général appliqué aux techniques qui utilisent les ondes radio, fondée sur l'analyse des phénomènes de propagation (réfraction, réflexion et diffraction) des ondes électromagnétiques à hautes fréquences (10 MHz à 2 GHz) dans le sous-sol.

Historiquement, l'utilisation du GPR dans des environnements non-glaciers a commencé au début des années 1970. Puis, cette technique a été utilisé pour l'étude des propriétés diélectriques du pergélisol [2].

Plus récemment, le GPR est utilisé également dans les essais non destructifs de structures non métalliques, pour cartographier les anomalies liées à des défauts en mise en œuvre et/ou a des micro-fissures occasionnées postérieurement à la mise en place. [1]

1.2. Les bases fondamentales de fonctionnement :

1.2.1 Propagation des ondes électromagnétiques :

Une onde électromagnétique se propageant dans un milieu donné, interagit par l'intermédiaire de trois paramètres : la conductivité σ , la permittivité électrique \mathcal{E} et la perméabilité magnétique μ . Ces trois paramètres apparaissent clairement dans les équations de Maxwell :

$$\text{Equation 1: } \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\text{Equation 3: } \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{Equation 2: } \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\text{Equation 4: } \vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j}$$

Avec l'équation de conservation de charges électrique $\frac{\partial \rho(t)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0$

En associant les propriétés diélectriques des matériaux aux équations de Maxwell, les relations suivantes sont obtenues :

Equation 5: $\vec{B} = \mu \vec{H}$

Equation 6: $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$

Equation 7 : $\vec{j} = \sigma \vec{E}$

\vec{E} : Le vecteur du champ électrique (v/m).

\vec{H} : Le vecteur du champ du magnétique (A/m).

\vec{B} : L'induction magnétique (Tesla).

ρ : La densité de charge (C/m^2).

\vec{j} : La densité de courant (A/m^2).

ϵ : La permittivité constante du milieu (F/m).

μ : La perméabilité constante du milieu (H/m).

σ : La conductivité constante du milieu (S/m).

La résolution des équations (3)-(7) permet d'établir les relations liant les champs électrique et magnétique aux grandeurs physiques du milieu de propagation. D'une part :

L'équation d'Helmholtz dans une région ou domaine vide de charge libre et homogène:

$$\vec{\Delta} \vec{E} + \gamma^2 \vec{E} = 0$$

Ou $\gamma = \sqrt{\omega^2 \mu (\epsilon - i \frac{\sigma}{\omega})} = \alpha + i\beta$ désigne le nombre d'onde (rad/m).

ω : Pulsation (fréquence angulaire)

Et d'autre part :

L'équation d'ondes dans un milieu homogène et isotrope est:

Équation 8

$$\Delta \vec{E} = \underbrace{\mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}} + \underbrace{\mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2}}$$

Terme de diffusion terme de propagation

Remarque : Le champ magnétique vérifie lui aussi l'équation d'Helmholtz et l'équation d'onde.

1.2.2 Célérité de propagation et atténuation :

Dans le cas d'une onde plane progressive à une dimension, se propageant selon l'axe OZ et polarisée suivant OX, la résolution de l'équation (8) permet d'exprimer le champ électrique E en fonction des paramètres de propagation.

$$E_x(\omega, z) = E_0(\omega, z = 0) \cdot e^{-\alpha z} \cdot e^{j(\omega t - \beta z)}$$

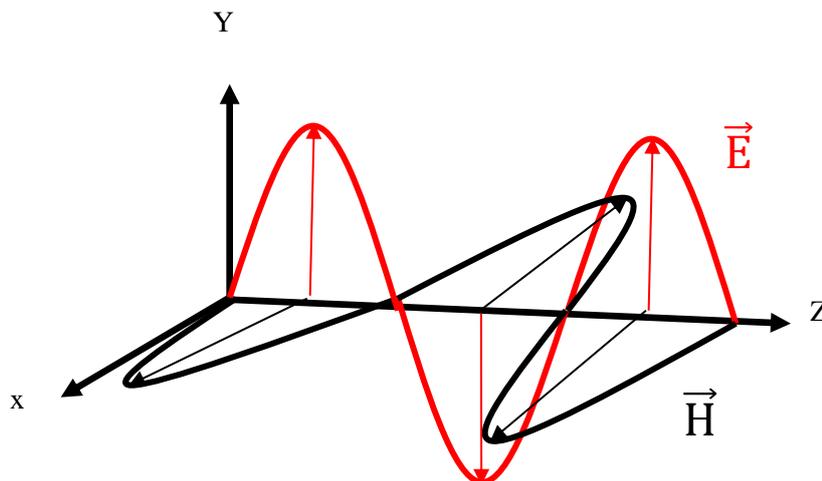


Figure 1.1 : Schéma d'une onde électromagnétique à l'instant t

Avec :

E_0 : représente l'amplitude du champ électrique à l'origine ($z=0$).

β : Le facteur de phase $\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon''}{2} [\sqrt{1 + (\frac{\sigma}{\omega \varepsilon})^2} + 1]}$.

α : Le facteur d'atténuation $\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2} [\sqrt{1 + (\frac{\sigma}{\omega \varepsilon})^2} - 1]}$.

V : La vitesse de phase de l'onde $V = \frac{\omega}{\beta}$.

Donc la vitesse d'onde radar est donnée par: $V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$.

1.2.3 L'impédance électromagnétique :

L'équivalente de la résistance en courant alternatif est une résistance complexe appelée impédance et elle est noté Z .

L'impédance d'un dipôle est le rapport de la valeur de tension par la valeur de l'intensité du courant $Z = \frac{U}{I}$. On peut écrire aussi en fonction des propriétés des milieux

$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon + \frac{\sigma}{\omega}}}$, celle-ci est l'impédance électromagnétique au sens large.

1.2.4 Les lois de Snell-Descartes :

Les lois de Snell-Descartes permettent de décrire le comportement d'une onde électromagnétique à l'interface entre deux milieux. Cette onde incidente sur cette discontinuité se divise en onde réfléchie et onde réfractée.

La loi de réflexion donnée : $i_1 = r_1$

La loi de réfraction au niveau de l'interface : $\frac{\sin i_1}{v_1} = \frac{\sin i_2}{v_2}$

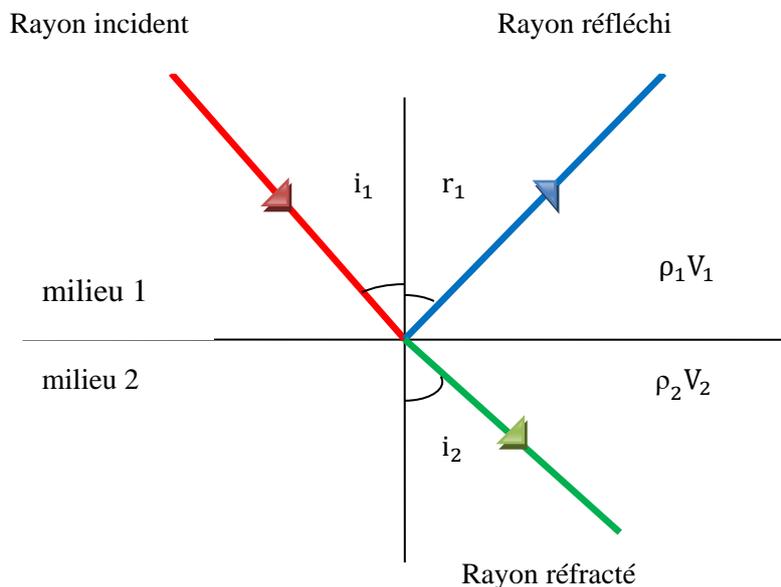


Figure 1.2 : Schématisation de la loi de Snell-Descartes

Si : $v_1 < v_2$, et pour avoir une réfraction totale il existe un angle critique ou limite $i_1 = i_c$ pour lequel $i_2 = \frac{\pi}{2}$. C'est-à-dire : $\sin i_c = \frac{v_1}{v_2}$. [3]

V : La vitesse du milieu.

1.2.5 Coefficient de réflexion et transmission :

Le coefficient de réflexion relie l'amplitude de pression de l'onde réfléchie à l'amplitude de pression de l'onde incidente.

$$C_R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{Et} \quad Z = \rho \cdot V.$$

Z : c'est l'impédance électrique.

Le coefficient de transmission est donné par : $C_T = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}$ tel que : $C_R + C_T = 1$.

1.3 Principe du GPR :

La technique Géoradar est employée pour obtenir une image de la sub-surface à haute résolution. Une impulsion électromagnétique est envoyée par le biais d'une antenne du dispositif qui est en contact avec le sol, à une fréquence centrale déterminée. Cette impulsion se propage en s'atténuant dans les matériaux ou les sols, si un obstacle est rencontré, une partie de son énergie est réfléchie vers la surface.

Les échos successifs sont enregistrés en fonction du temps par l'antenne de réception. L'utilisateur déplace l'antenne émettrice du radar et à nouveau, une autre impulsion est générée.

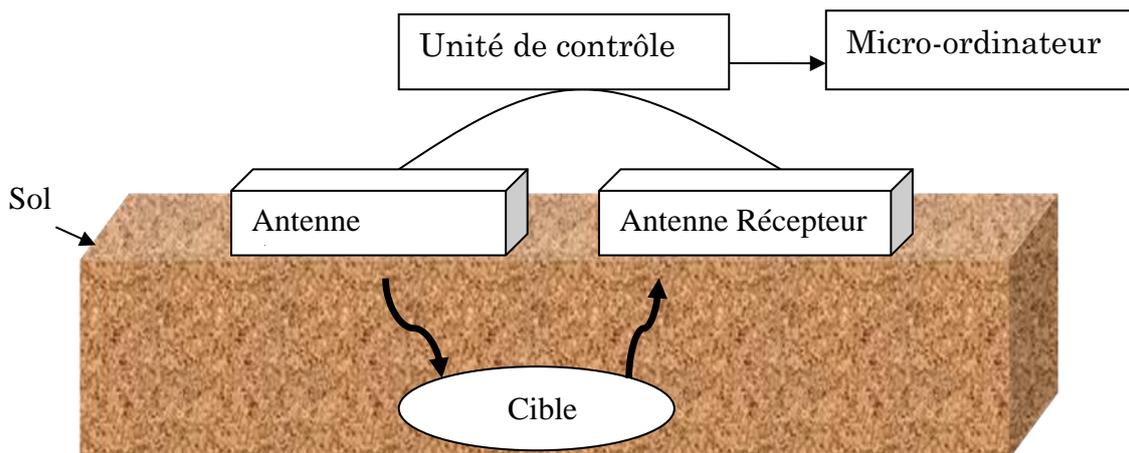


Figure 1.3 : Schéma de principe du GPR.

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.[4]

1.4 Mise en œuvre de la propagation GPR :

1.4.1 Les techniques de modulation :

a. La méthode impulsionnelle :

Afin d'émettre des impulsions de courte durée ($<1\text{ns}$), des commutateurs radiofréquences large bande sont utilisés en association avec une forte puissance sur un instant bref.

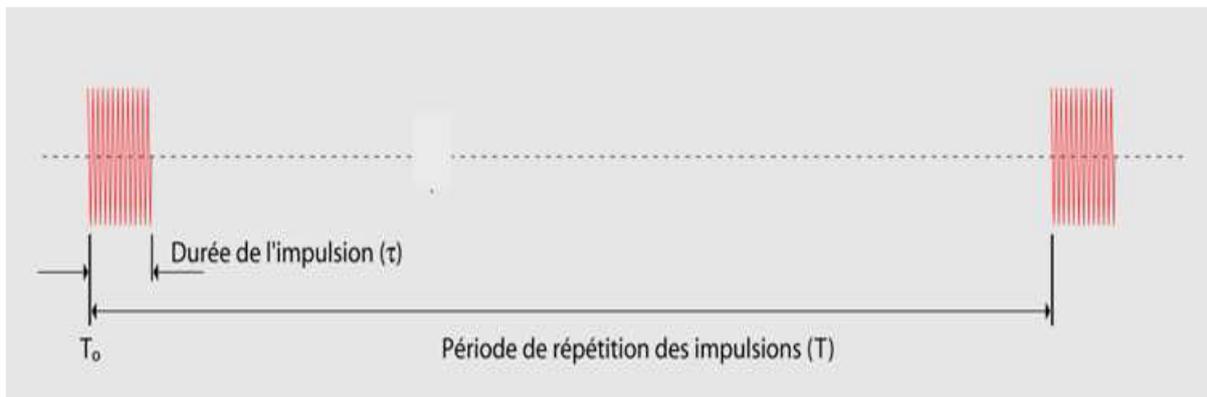


Figure 1.4 : Signal émis par un radar impulsionnel.

Les principaux avantages d'une telle méthode sont : la mesure directe de la réponse impulsionnelle sans traitement complémentaire, la simplicité et la rapidité du système qui est très bien adapté aux applications embarquées. [4]

Les inconvénients sont : la complexité de l'étage amplificateur à gain variable et le comportement des antennes à une impulsion de courte durée. Dans le cas où une distribution de charge est utilisée pour amortir l'antenne et réduire les résonances, cela entraîne une diminution du rendement. De plus, la bande d'analyse étant large, la méthode est sensible au bruit. [5]

b. La modulation linéaire de fréquence (Frequency Modulated Continuous Wave FMCW) :

La fréquence d'émission est modulée linéairement sur une large bande de fréquence $\Delta f = f_{max} - f_{min}$ en un temps. La résolution d'un tel radar est inversement proportionnelle à Δf .

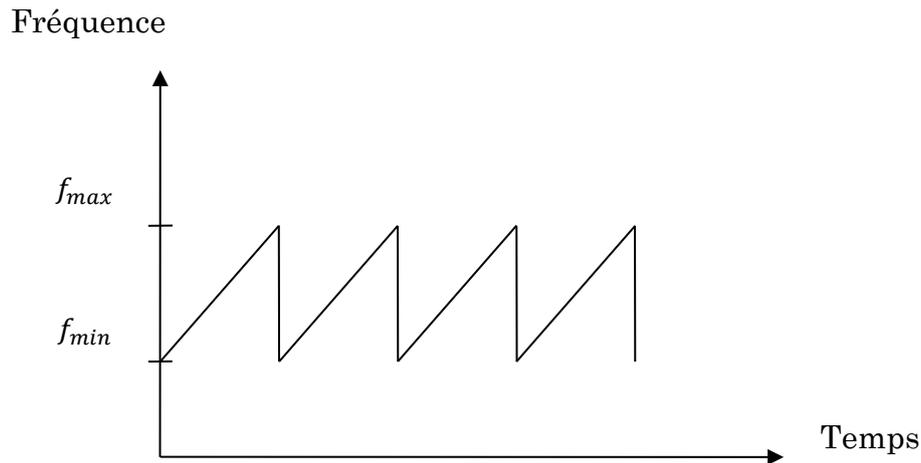


Figure 1.5 : évolution de la fréquence émise en fonction du temps.

Les avantages de la FMCW sont le bon rapport du signal par rapport au bruit. La puissance crête nécessaire est divisée par le rapport de compression $T\Delta f$.

Les inconvénients sont : un couplage entre antennes émettrice et réceptrice ainsi que l'électronique complexe. De plus, pour réduire la vitesse d'échantillonnage et limiter la bande de bruit, un filtre est généralement disposé en fin de réception. [4]

c. Radars à sauts de fréquence :

Cette méthode est une variante de la méthode FMCW Elle s'appuie aussi sur le balayage d'une large bande de fréquence.

Le principal avantage du radar à sauts de fréquence est de pouvoir pondérer les mesures complexes pour chaque fréquence du balayage de manière à corriger des effets gênants comme l'atténuation du sol.

Par contre quand une mesure est réalisée pour chaque fréquence du balayage, la durée de l'opération est plus importante. Il existe un couplage entre les antennes émettrice et réceptrice qui limite la dynamique. [4]

1.4.2 Les différentes configurations d'acquisition :

1.4.2.1 Mode réflexion :

a. Mode à offset constant :

Dans ce mode, l'espacement entre les antennes réceptrices (T_X) et réceptrices (R_X) est fixe. Le couple émetteur-récepteur est déplacé suivant une distance constante le long d'un profil horizontal (Figure 1.6). Pour chaque position, une acquisition est enregistrée. Le radar

gramme obtenu présente l'amplitude mesurée en fonction du temps et de la position du centre du couple émetteur-récepteur.

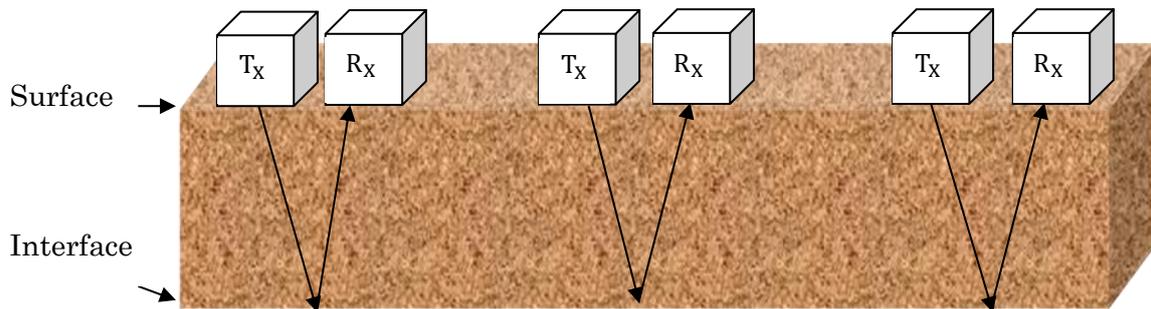


Figure 1.6 : Mode réflexion a offset constant.

b. Mode à offset variable :

Les sondages de vitesse sont désignés sous les noms de « Common Middle Point » (CMP) et « Wide Angle Réflexion and Réfraction » (WARR). La vitesse est évaluée à partir des variations des temps de propagation des ondes radar obtenues pour différents écartements entre antenne émettrice et antenne réceptrice.

- En mode à offset variable on distingue deux cas.

Mode CMP : dans ce cas la distance entre les antennes émettrices et réceptrice varie. Les antennes T_x et R_x sont écartées à pas constant autour d'un point milieu (Figure 1.7). On obtient une courbe à allure hyperbolique pour chacun des réflecteurs. La pente de cette courbe donne accès à la vitesse moyenne entre la surface et le réflecteur.

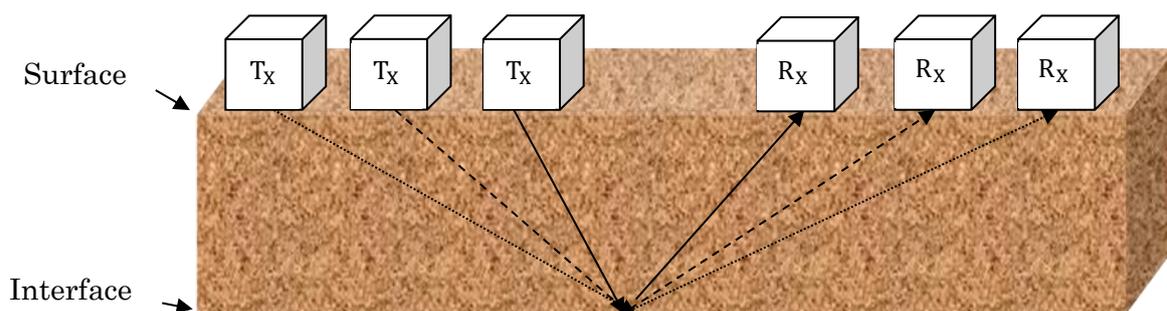


Figure 1.7: Mode réflexion a offset variable (CMP).

Mode WARR : Dans ce cas l'émetteur reste fixe et le récepteur s'éloigne de l'émetteur.

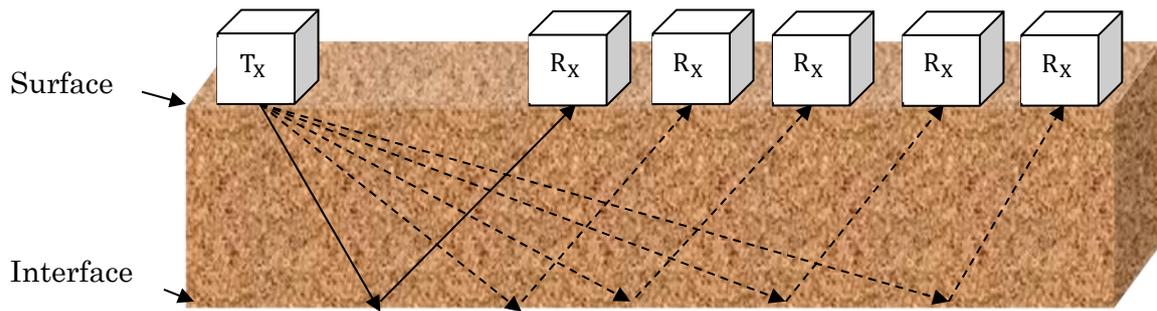


Figure 1.8 : Mode réflexion à offset variable (WARR).

1.4.2.2 Mode transmission :

Ce type d'acquisition peut se faire avec des antennes de surface. Pour chaque position de l'antenne émettrice, une trace est enregistrée pour une série de positions de l'antenne réceptrice. L'antenne émettrice est ensuite déplacée, et la séquence d'acquisition répétée. Le traitement de ce type de radar gramma n'est pas direct et nécessite l'utilisation de méthodes d'inversion numériques.

Cette méthode est très utilisée avec des antennes de forage, en déplaçant les antennes émettrices et réceptrices dans des puits parallèles. [4]

1.4.3 Problématique de pénétration :

-La profondeur de pénétration des ondes dans un sol homogène de résistivité ρ est

$$\text{donnée par : } P = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

-La capacité d'un radar GPR à distinguer différentes cibles proches est communément appelée la résolution en profondeur. Elle est définie comme étant la distance minimale entre deux cibles apparaissant distinctement lors d'une prospection.

-La profondeur de pénétration et la résolution sont principalement les deux critères de qualification d'un GPR.

-La profondeur de pénétration et la résolution pour cette technique d'imagerie dépendent essentiellement de la bande de fréquence d'émission du radar GPR, ainsi que des propriétés du milieu.

1.4.4 Les enregistrements des signaux radars :

A-Scan : dans le cas du radar impulsif, une impulsion est émise par l'antenne émettrice puis le signal se propage dans le milieu, il rencontre un objet et se réfléchit vers l'antenne réceptrice.

Cependant le signal reçu contient outre la partie réfléchi par l'objet, des signaux parasites.

Ces signaux parasites sont dus à l'effet du couplage des deux antennes émettrice et réceptrice (T_X)(R_X), ainsi qu'à la réflexion à l'interface. Or il est nécessaire d'éliminer ces signaux parasites puisqu'ils masquent la réponse de l'objet.

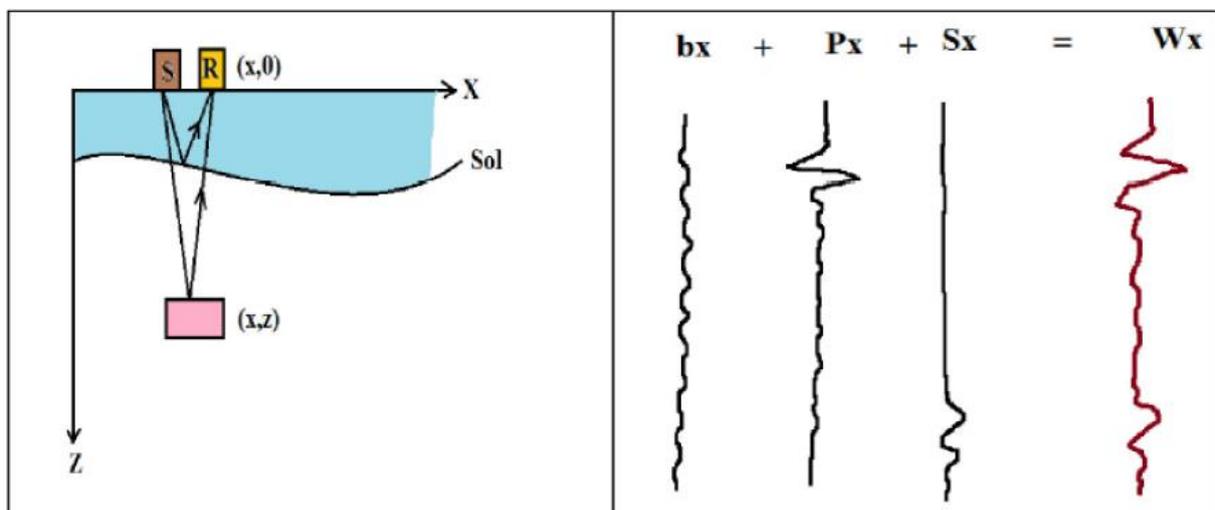


Figure 1.9 : Représentation d'un A-Scan.

b_x : le bruit supposé gaussien et blanc.

P_x : l'écho de surface.

S_x : le signal utile issu de l'objet à détecter.

W_x : le A-Scan formé de la somme de différentes contributions.

B-Scan : pour que le radar puisse localiser un objet enfoui il est nécessaire de déplacer le radar suivant une direction donnée avec un pas de déplacement donné, Pour chaque déplacement radar un enregistrement est effectué.

Ensuite les données enregistrées sont combinées pour produire une image bidimensionnelle. On peut convertir le temps en profondeur connaissant la vitesse de propagation des ondes dans le milieu.

Avec ce type d'enregistrement, l'objet apparaît sous forme d'une hyperbole de diffraction. Lorsque l'antenne d'émission est située directement à la cible, l'onde effectue le trajet le plus court. Puis en s'éloignant, la distance parcourue par l'onde jusqu'à la cible augmente. La cible est donc identifiée par une hyperbole.[3]

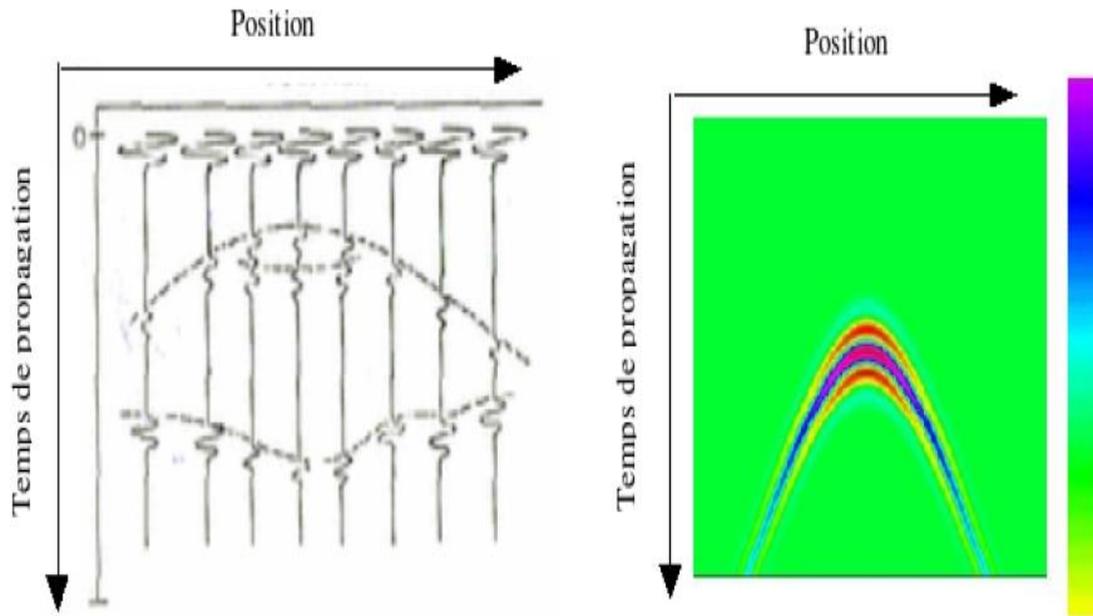


Figure1.10 : présentation d'un B-Scan

C-Scan: dans ce mode, on effectue plusieurs B-scan de façon parallèle. Ensuite ces B-scan sont combinés ce qui produit une vue 3D de l'objet cherché.[3]

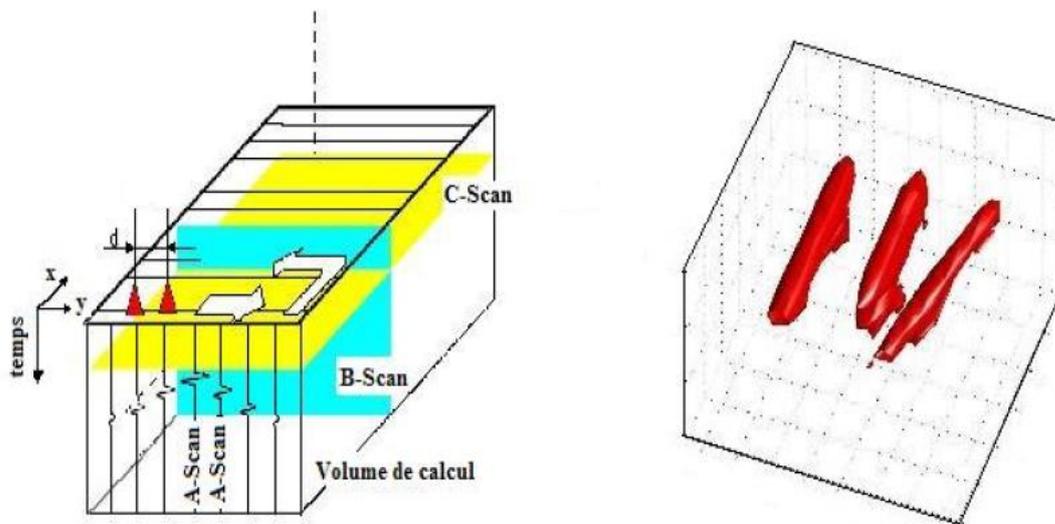


Figure 1.11 : Représentation d'un C-scan.

1.4.5 Traitement des données du GPR :

Cette opération est basée sur les étapes suivantes :

- Mise à zéro.
- Dewow : enlève les basses fréquences induites par la mutuelle inductance lors du couplage des deux antennes via les champs électromagnétique parasites.
- Filtrage temporel PB et PH : Permet d'éliminer des composantes basses et hautes fréquences indésirables.
- Gain : c'est l'amplification de certaines amplitude des signaux utiles masqués, un bon Gain correspond à une bonne visualisation du signal.
- Conversion des profondeurs temps en profondeurs mètres : on utilise la relation $D = \frac{v.t}{2}$.
- La déconvolution : consiste à éliminer les effets du signal émis par l'antenne et qui sont convolutés aux signaux composant la trace radar final.
- La migration: pour corriger les effets géométrique liée à l'acquisition des données, remettant ainsi les anomalies à l'aplomb de la zone de détection.

Partie 02 : La Tomographie Electrique.

1.1 Introduction :

La tomographie ou l'imagerie électrique (2D) est une méthode d'exploration du sous-sol, non invasive ; consiste à mesurer la résistivité apparente à partir d'un dispositif multi-électrodes. Elle permet d'obtenir une coupe 2D de la distribution latérale et verticale de résistivité apparente du sous-sol.

1.2 Définition :

La tomographie électrique est la combinaison de la technique du sondage électrique verticale (SEV) et du trainé électrique. Elle permet d'appréhender la structure et la lithologie du sous-sol.

1.2.1 Procédure d'acquisition 2D :

Une tomographie 2D nécessite un certain nombre d'électrodes connectées à un câble multiconducteurs et placées selon un profil. Un ordinateur portable, dans lequel est programmée la séquence de mesure ; est relié avec une boîte de commutation et sélectionne automatiquement les électrodes utilisées pour l'injection du courant et le mesure de potentiel.

Chaque électrode possède une adresse numérique unique dans le dispositif.[5]

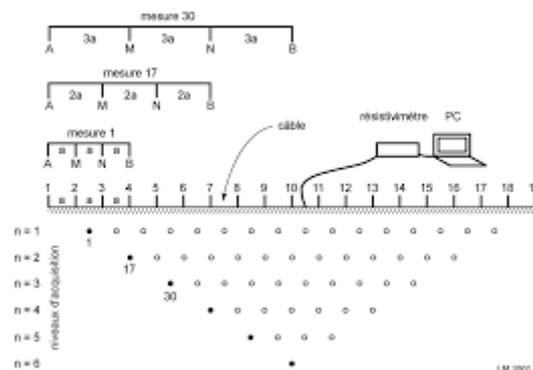


Figure1.12 : principe de la construction d'une pseudo-section de résistivité apparente.

1.2.2 Une pseudo-section :

Une pseudo-section est une carte de résultat qui présente les valeurs des résistivités apparentes calculées à partir de la différence de potentiel ainsi que la valeur du courant injecté entre les deux électrodes d'injections.

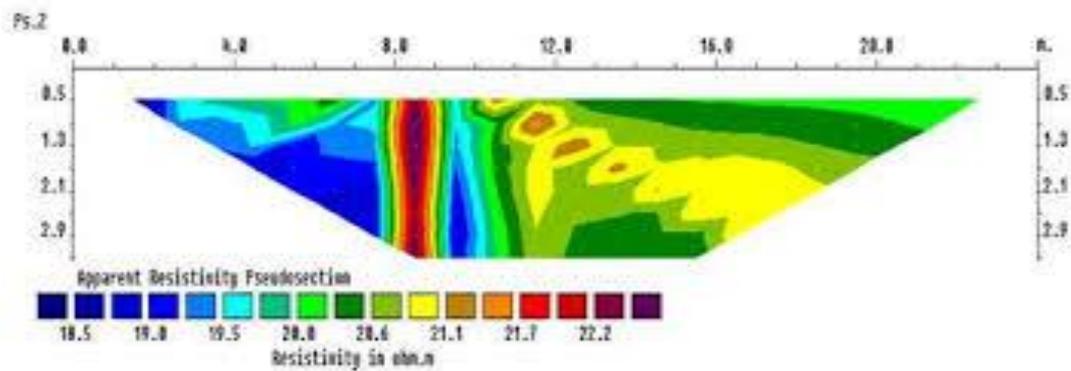


Figure 1.13: Illustration de la pseudo-section

Une pseudo-section (panneau électrique) donne une image distordue du sous-sol car cette image dépend de la répartition des résistivités dans le sol mais également du dispositif utilisé (concept de résistivité apparente).

1.2.3 Les dispositifs :

En sondage électrique SEV ou en imagerie ERT, les mesures des résistivités apparentes sont toujours réalisées à l'aide d'un dispositif quadripôle ABMN (Figure 1.12). Pour une même prospection, l'agencement du dipôle de mesure AB par rapport au dipôle d'injection MN est fixe, seuls les écartements inter-électrodes changent tout en maintenant les mêmes proportions dans la géométrie du dispositif.

Parmi les dispositifs classiquement utilisés en SEV comme en ERT, on retiendra les dispositifs Wenner (α et β), Schlumberger, dipôle-dipôle, pôle-dipôle, pôle-pôle.

- **Le dispositif Wenner- α ($W\alpha$)** est le plus largement utilisé en ERT. Les quatre électrodes sont disposées à équidistance avec le dipôle de mesure situé à l'intérieur du dipôle d'injection : $AB = 3 MN$, . Sa couverture 2D est parfaitement homogène et sa profondeur d'investigation moyenne. Le $W\alpha$ possède toutefois une assez faible résolution spatiale des structures mais relativement une bonne détermination en profondeur en comparaison avec d'autres dispositifs. Le $W\alpha$ est particulièrement adapté à l'imagerie des structures horizontales, telles que les milieux sédimentaires, mais beaucoup moins pour les structures verticales.[6]
- **Le dispositif Schlumberger (SC)** correspond à un $W\alpha$ modifié où l'écartement du dipôle d'injection est de taille supérieure ou égale à celui du $W\alpha$ (c'est-à-dire que $AB \geq 3 MN$). Ses caractéristiques sont proches de celles du $W\alpha$, une couverture spatiale moins homogène, mais une profondeur d'investigation et une résolution

plus importante ainsi qu'une meilleure sensibilité aux structures obliques ou verticales. Le SC est beaucoup utilisé en hydrogéologie dans les milieux complexes. [6]

- **Le dispositif Wenner- β ($W\beta$)** possède, comme le $W\alpha$, quatre électrodes équidistantes, mais les deux dipôles de mesure et d'injection sont disjoints. Sa couverture spatiale est homogène mais sa profondeur d'investigation faible. Sa résolution spatiale est importante, en particulier pour la détection des structures verticales ou obliques. Le $W\beta$ est adapté à l'imagerie des milieux fracturés ou basculés.[6]
- **Le dispositif Dipôle-Dipôle (DD)** correspond à un $W\beta$ pour lequel on agrandit la distance de séparation entre les deux dipôles AB et MN. Ses propriétés sont proches du $W\beta$ avec une meilleure résolution spatiale (bien que faible en profondeur) et une plus grande profondeur d'investigation. Le DD est particulièrement adapté à l'imagerie des structures verticales ou obliques (p. ex. les milieux fracturés) et des structures 3D.[6]
- **Le dispositif Pôle-Dipôle (PD)** est un dispositif dissymétrique avec une électrode d'injection disposée à l'infini (c'est-à-dire à grande distance du dispositif). Les trois électrodes mobiles ont une configuration proche de celle du DD. Sa couverture peu homogène mais sa résolution spatiale est assez bonne et sa profondeur d'investigation élevée. Le PD est adapté à l'imagerie des structures verticales et 3D. [6]
- **Le dispositif Pôle-Pôle (PP)** possède deux électrodes disposées à l'infini (injection B et mesure N). Seules les électrodes A et M sont déplacées sur le site. Malgré une couverture homogène, sa résolution spatiale des structures est assez faible, avec une profondeur d'investigation élevée.
Le PP est plutôt adapté pour la prospection profonde et pour les structures 3D. [6]

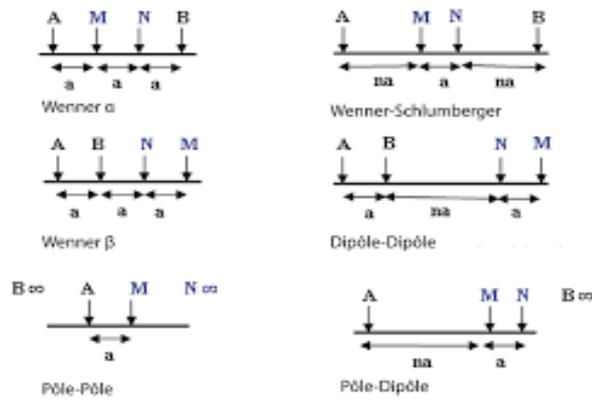


Figure1.14: Configuration des électrodes.

1.2.3 Le modèle inverse:

Toutes les méthodes d'inversion tentent essentiellement de déterminer un modèle de subsurface qui se rapproche aux mieux de la réalité. Un modèle est une représentation mathématique idéalisée d'une portion du sous-sol.

La logiciel Res2Dinv permet d'inverser les données de l'ERT pour obtenir des modèles à partir des données mesurées. Le programme d'inversion peut être utilisé pour différentes configurations d'électrodes notamment celles décrites dans le paragraphe (1.2.3) (Wenner ; Schlumberger ; dipôle-dipôle...).



Figure1.15: Logiciel pour modèle d'iversion *Res2Dinv*.

Chapitre 02 :

Tomographie : acquisition
traitement et
interprétation des
données.

2.1. Introduction :

Dans le cadre pédagogique de la formation pour obtenir le diplôme du master 2 physique de globe et grâce à la collaboration de centre de recherche en astronomie et astrophysique et géophysique (CRAAG) ; une campagne de mesure a été programmée au niveau de la ferme pilote dans l'ancien campus de l'université Djillali Bounaama khemis Miliana (UDBKM). En plus du but pédagogique de cette campagne, il est également question de tenter la localisation; le tracé ainsi que la profondeur d'un conduit de distribution de gaz qui traverse la ferme pilote et qui est indiqué par deux balises aux extrémités diagonales du site. Deux méthodes géophysique différentes ont été utilisées :

-GPR

- Tomographie électrique.

Ce stage d'instrumentation s'est déroulé sous la direction et la supervision du Monsieur A. Lamali pour GPR et Monsieur L .Hamai pour la Tomographie.

2.2 Description de site :

Le site est situé à la ville de Khemis Miliana (W. Ain defla) exactement dans UDBKM au niveau de l'ancien campus. Ses coordonnées géographiques sont : $36^{\circ}15'28.01''N$; $2^{\circ}13'56.18''E$; Élévation 290 m.



Figure 2.1 : Localisation et disposition des profils Tomographie et Georadar.

Le 28/01/2020 nous avons fait les deux méthodes sur le terrain en trois(3) étapes :

1^{er} étape: La mise en marche et l'essai du matériel pour le choix des paramètres les plus adéquats.

2^{ème} étape : Prospection GPR. On a fait 5 profils (figure 2.1: les lignes en bleu).

3^{ème} étape : Prospection avec tomographie électrique. On a fait 2 profils (figure16 : les lignes en noir) avec les deux dispositifs dipôle-dipôle et wenner ou avec 24 électrodes avec une interdistance de 2m, on été utilisé pour chaque profil.

Dans ce chapitre on décrira l'acquisition des données puis le traitement et l'interprétation.

2.3 Matériel de tomographie électrique :

Le matériel utilisé est de type ABEM avec les accessoires suivants:

- Unité d'acquisition (ABEM terrameter LS 2).
- Batterie extérieur 12V.
- Câble multiconducteur.
- Les câbles sweetch.
- Les électrodes.
- Un décamètre.
- Marteau.





2.4 Traitement et interprétation des données :

Après l'acquisition des données, il est nécessaire de faire un traitement des données à l'aide des logiciels Res2Dinv.

2.4.1 Dispositif dipôle-dipôle : pour profil 2

- Importer des données
- Eliminer les mauvaises données : les points sont représentés selon le différent niveau d'acquisition et avec une échelle restreinte et en cliquant sur chacune des mesures qu'on désire supprimer.

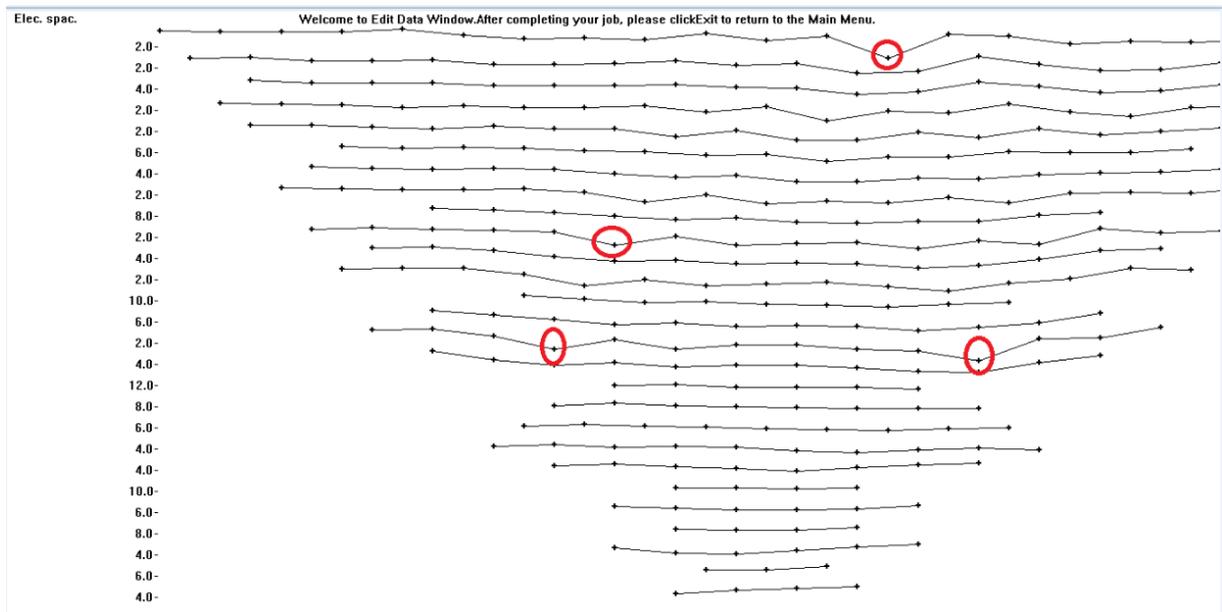


Figure2.2 : Les valeurs aberrantes de profil (dispositif dipôle-dipôle).

- Une fois que les points singuliers sont éliminés et que les données sont jugées valides, on lance la procédure d'inversion dans le logiciel utilisé.

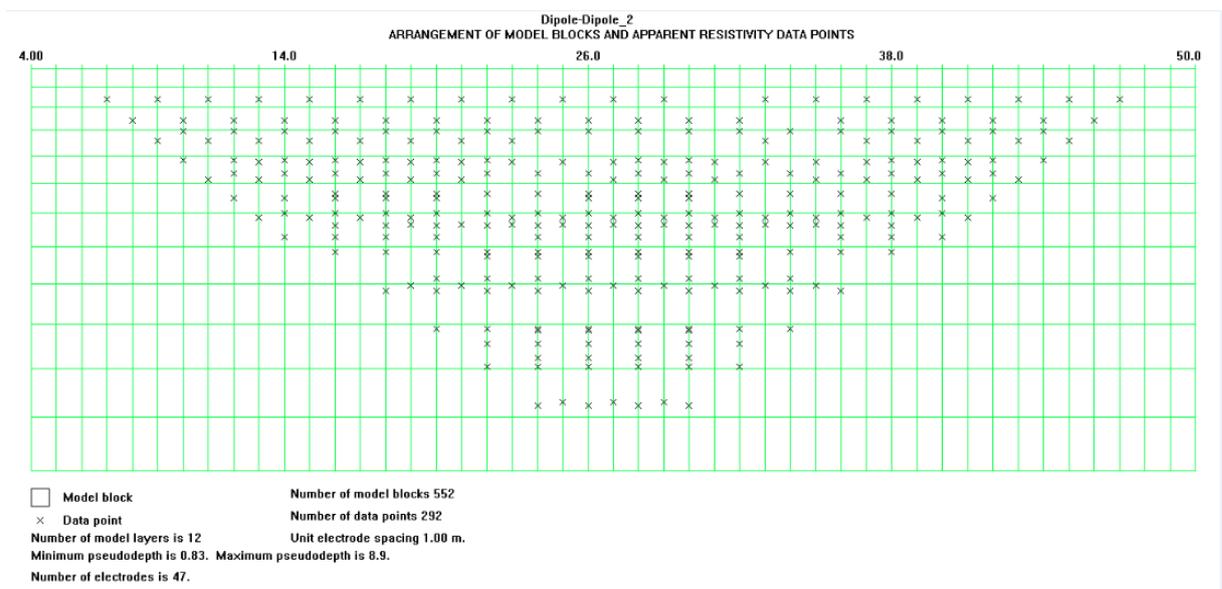


Figure2.3 : Les blocs utilisés lors du processus d'inversion (dispositif dipôle-dipôle).

- On obtient le résultat suivant après que l'inversion soit terminée avec succès.

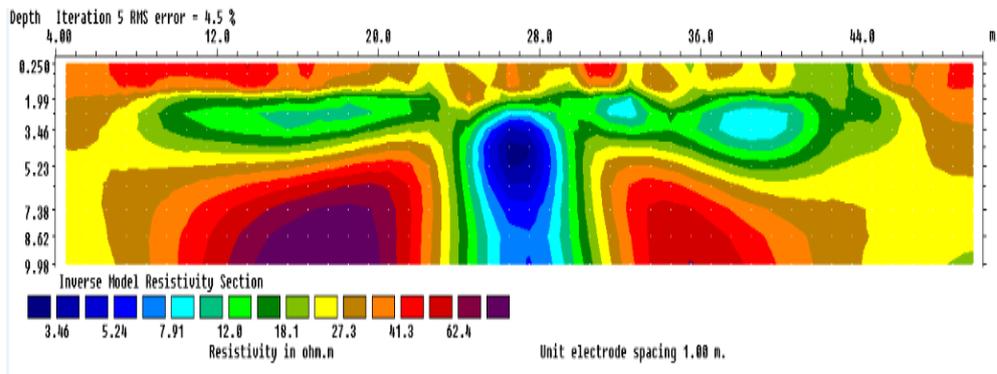


Figure 2.4: Présentation de l'inversion tomographie 2D dipôle-dipôle.

Interprétation :

- On a une élévation de la valeur de résistivité dans la partie ouest et est de profondeur 5 jusqu'à 9 mètres. La résistivité est comprise entre 41 et 63 $\Omega.m$.
- Il y a une diminution de la valeur de résistivité qui est de profondeur 2 jusqu'à 9 mètre compris entre 3 et 7 $\Omega.m$.

C'est ce contraste de résistivité qui permet de bien observer une zone de conductivité plus élevée relativement au reste du terrain, indiquant éventuellement la section du conduit de gaz.

2.4.2. Dispositif Wenner :

Les mêmes étapes et procédures sont également appliquées sur la seconde acquisition sur le même profil avec le dispositif Wenner cette fois. Les points singuliers sont éliminés et une fois les données sont jugées valides, l'inversion est lancée via le logiciel Res2DInv, comme c'est montré sur les figures ci-dessous.

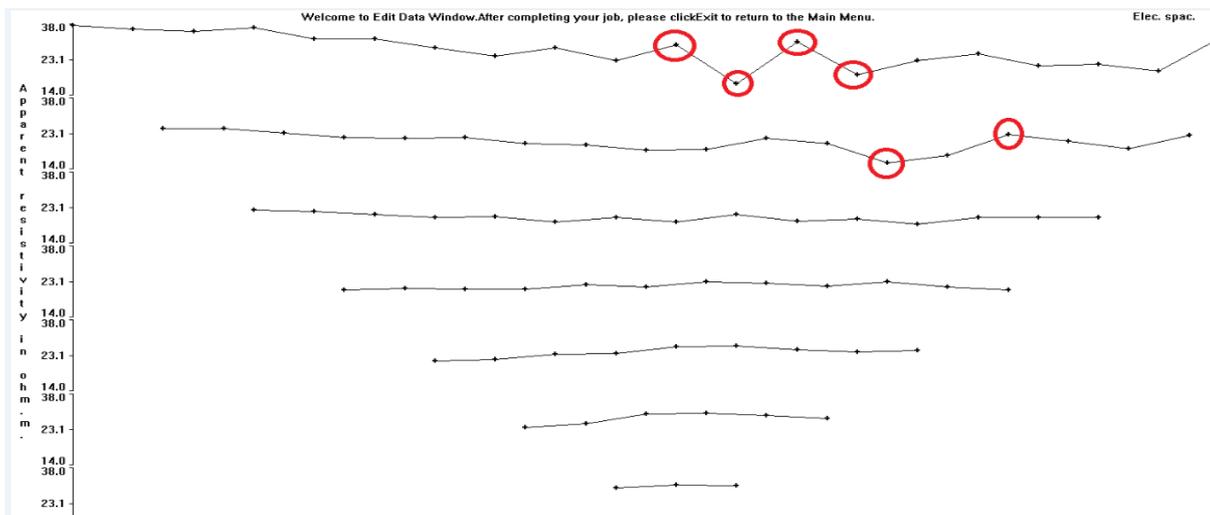


Figure 2.5 : Les valeurs aberrantes de profil (dispositif wenner).

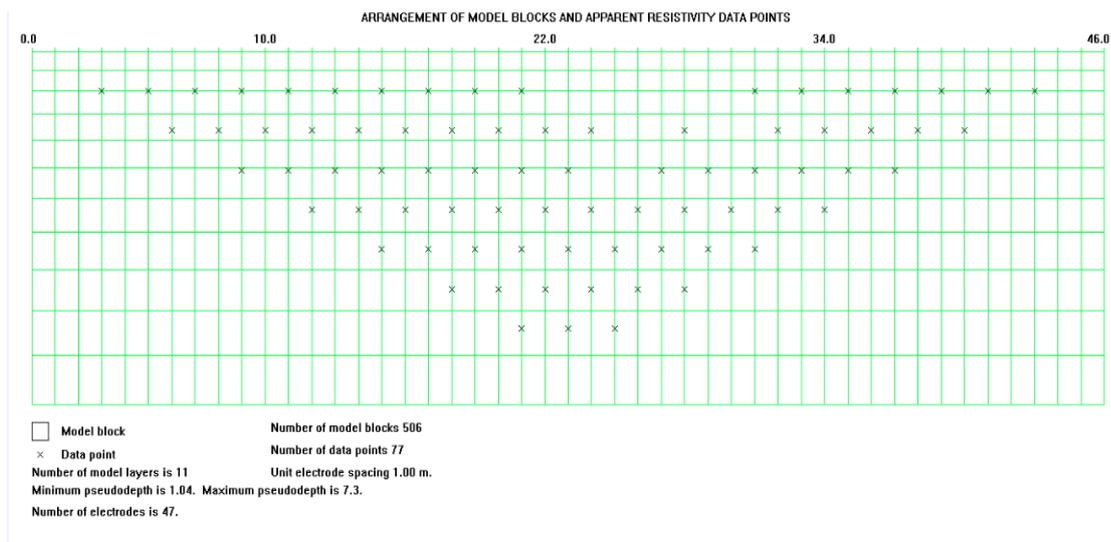


Figure2.6 : Les blocs utilisés lors du processus d'inversion (dispositif wenner).
Enfin, on obtient une pseudo-section 2D de la distribution spatiale de la résistivité du terrain comme c'est montré sur la figure 22.

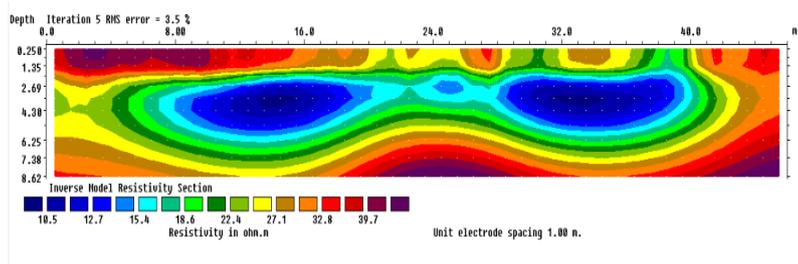


Figure2.7 : Présentation de l'inversion des données de tomographie électrique 2D Wenner.

Interprétation :

- On remarque qu'il y a une élévation de la valeur de résistivité à une profondeur de 1.5m et dans la partie de profondeur allant de 12.7 jusqu'à 15 m, avec une valeur comprise entre 32 et 40Ω.m
- D'autre part y a une diminution de la valeur de résistivité à une profondeur de 9 jusqu'à 15m compris entre 7et 13Ω.m.

Chapitre 03 : acquisition et Traitement des données du Géoradar.

Dans ce chapitre, on présentera le logiciel de traitement des radargrammes obtenus via le GPR ainsi que les résultats du traitement.

Les données GPR ont été acquises le 28 janvier 2020 au niveau de la ferme pilote au sein de l'ancien campus de l'Université Djilali BOUNAAMA de Khemis-Milianadans le cadre d'un stage de terrain d'instrumentation géophysique. Il était question de tenter la localisation du conduit de gaz traversant la parcelle en question.

3.1 Matériels de la prospection Géoradar :

- Antenne 500MHZ blindée.
- Unité de contrôle.
- Un câble en fibre optique pour transfert des données

Le tout est ensuite relié à un ordinateur portable qu'on place sur un support pour le déplacer avec le chariot transportant les antennes et l'unité de contrôle. Il est possible ainsi de procéder à l'acquisition et la visualisation des enregistrements en temps réel.



3.2 Traitement des données :

Pour traiter les données GPR, on utilisera le logiciel Reflexw de sandmeier-geo pour analyser et traiter les radar-grammes enregistrés lors de la campagne de mesure.

Une série de filtres et traitement est appliquée sur les radar-grammes bruts afin d'améliorer la visibilité des anomalies dans la mesure du possible, si elles existent et dans le cas échéant identifier l'anomalie recherchée. Le détail des procédures et étapes est donné dans l'annexe 1.

3.3. Résultats des traitements :

En tout, sept(07) profils ou radar-grammes ont été traité et analysé via le logiciel ReflexW. Les résultats obtenus sont présentés ci-après.

a. Radar-gramme01 :

Sur le premier radar-gramme et après application du nettoyage et filtrage des signaux, l'ensemble montre juste une anomalie qui correspond à une réverbération à l'abscisse $x \cong 20m$ qui correspond à un objet réfléchissant qui se trouvait sous l'antenne au moment de l'acquisition, et il y a une autre anomalie visible.

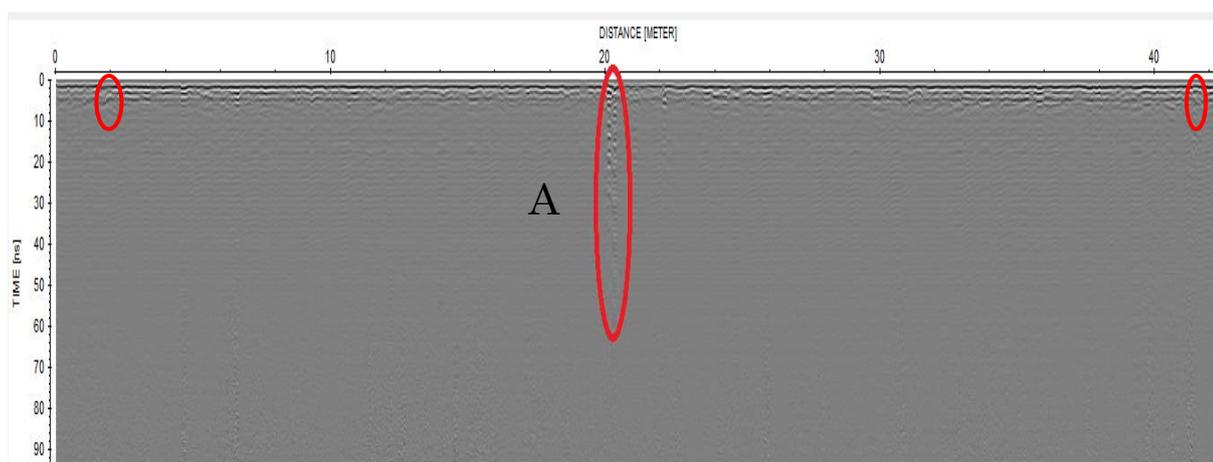


Figure3.1: Illustration de l'Anomalie (A) révélé par le profil 01.

b. Radar-gramme02 :

La même chose a été observée sur le radar-gramme 02 et au même emplacement.

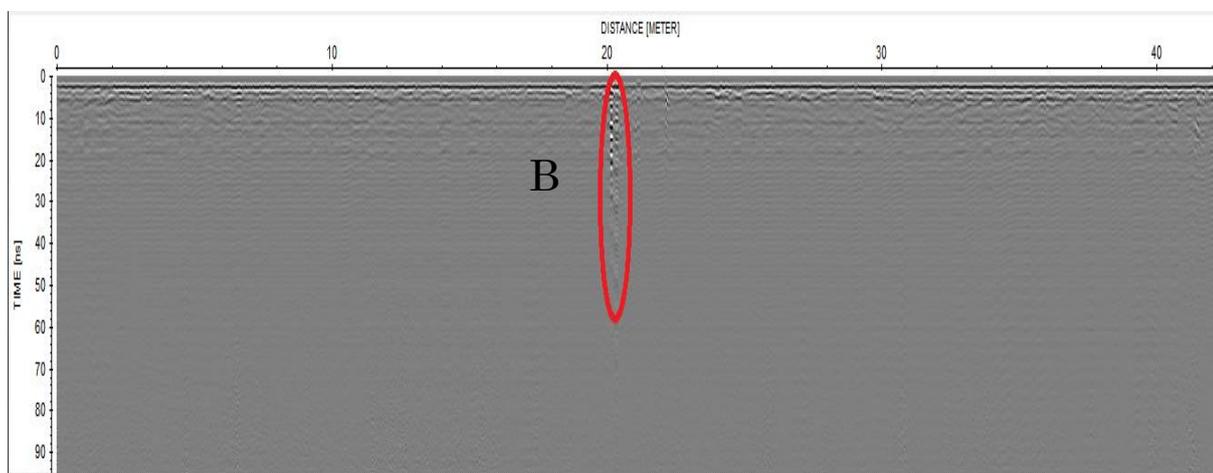


Figure3.2: Illustration de l'anomalie (B) révélé par le profil 02.

c. Radar-gramme03 :

Egalement sur ce radargramme, la même anomalie de réverbération a été observée.

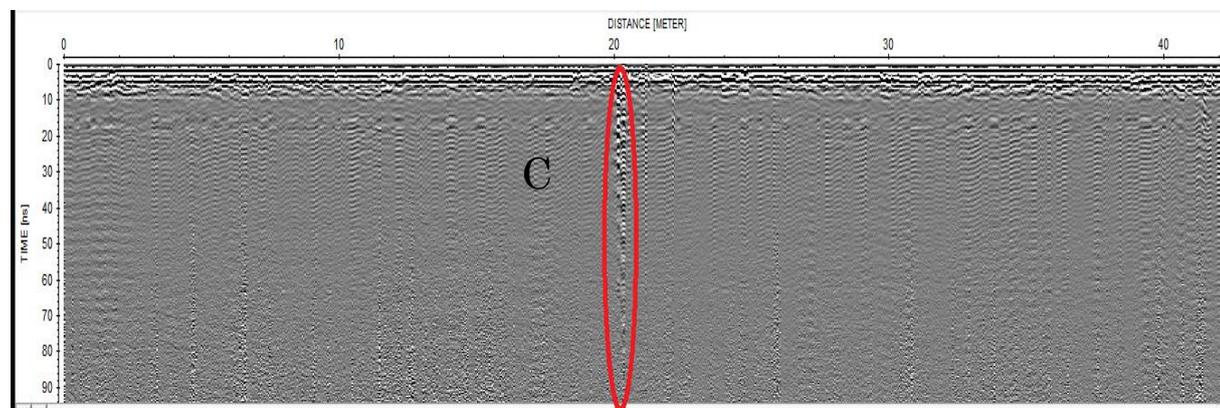


Figure3.3 : Illustration de l'anomalie (C) révélé par le profil 03.

A partir de ces 3trois précédants radargrammes et vu que l'anomalie est localisée toujours au même niveau, nous pouvons supposer qu'il pourrait s'agir d'un câble électrique traversant tout ces profils.

d. Radar-gramme04 :

Sur le radar-gramme 04, une anomalie à l'abscisse $X \cong 13m$ est éventuellement observée avec une durée de 6ns et une anomalie visible à l'abscisse $X \cong 06m$.



Figure3.4: Illustration de l'anomalie (D) révélé par le profil 4.

e. Radar-gramme05 :

Sur le radar-gramme 05, une anomalie située à $X = 26m$ avec une durée de 2 ns, peut représenter éventuellement un enfouissement peu profond.

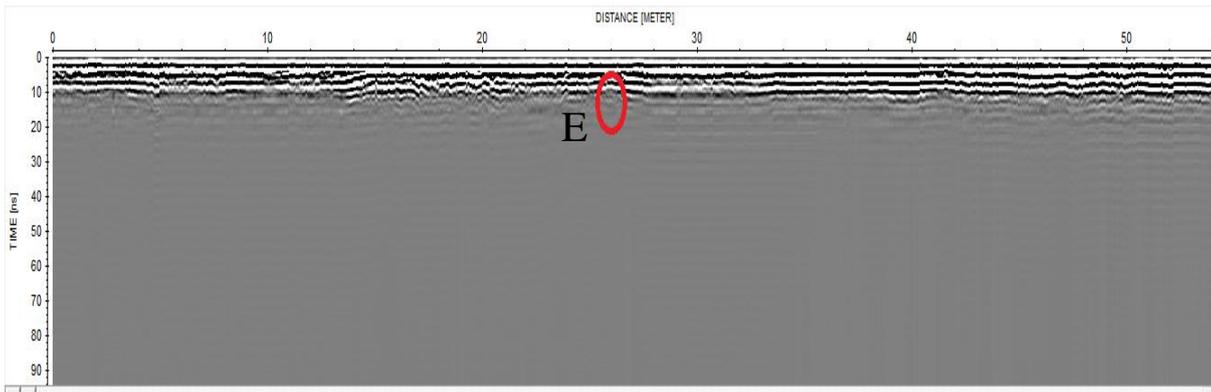


Figure3.5 : Illustration de l'anomalie (E) révélé par le profil 05.

f. Radar-gramme06 et 07:

Sur les deux derniers radar-grammes, le nettoyage et le filtrage n'était pas bien réussi. Probablement il est nécessaire de modifier les paramètres des filtres utilisés pour avoir une meilleure qualité et résultat.

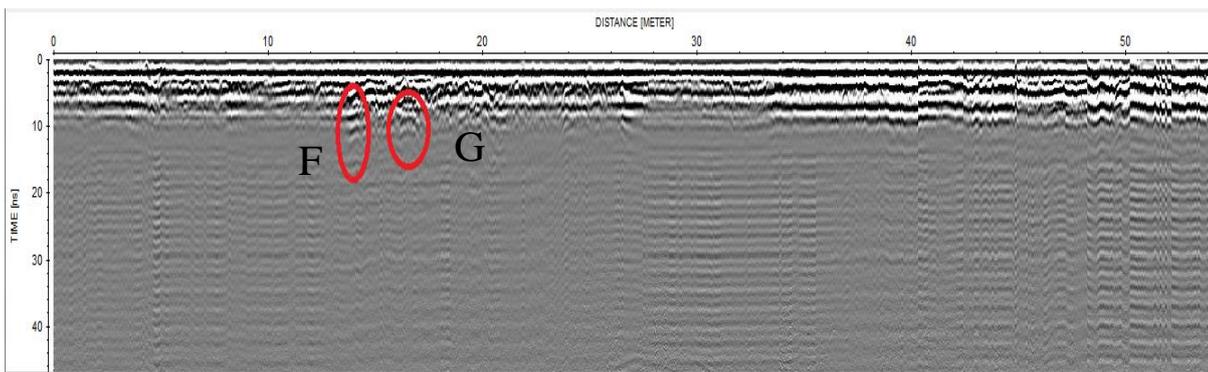


Figure3.6 : Illustration de l'anomalie (F, G) révélé par le profil 06.

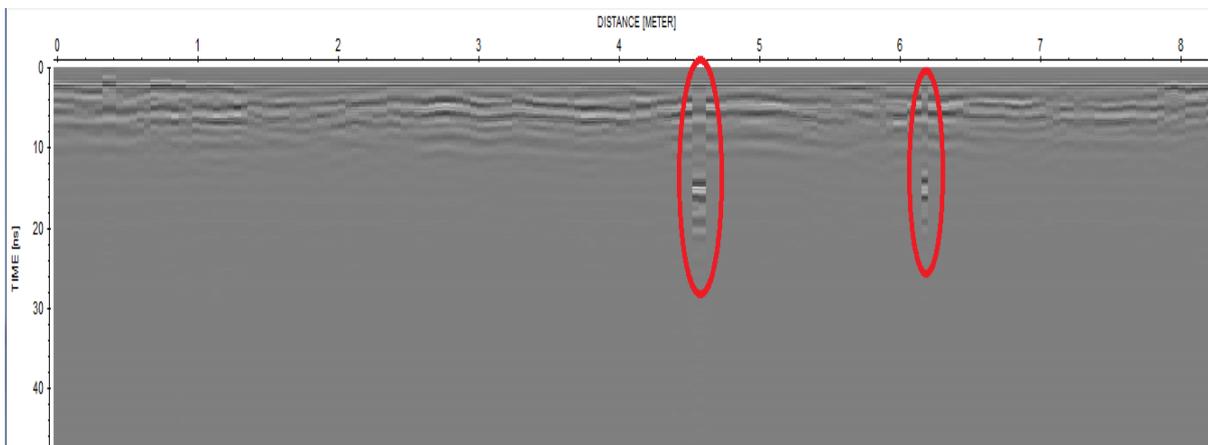


Figure 3.7: Les levés du profil 07.

3.4. Discussion :

Vu la qualité du traitement de ces radargrammes, il est très difficile de se prononcer sur quoique ce soit concernant cette campagne de mesure et traitement. Il est très probable qu'une analyse plus experte doit être effectuée.

Au regard radargrammes obtenus, nos tentative de traitement n'ont pas permis de mettre en evidence l'anomalie principale recherché qui est, en l'occurrence. Il s'agit probablement d'une dissipation importante du signal vu la fréquence de l'antenne utilisée. En effet, la longueur d'onde mise a contribution n'atteignait pas le recouvrement souhaité. Il faudrait peut etre descendre un en frequence et/ou se contenter de la methode ERT et/ou faire appel a une autre technique, genre ultrasonique.

Conclusion

Le Georadar est un excellent outil pour cartographier la surface souterraine de la Terre dans les études géologiques et géophysiques modernes même si elle reste limitée en termes de profondeur d'investigation, il est toujours possible d'obtenir des résultats concluants sur les œuvres de travaux publics et les objets enfouis dans le cadre du génie civil et VRD.

D'autre part, l'utilisation de la tomographie électrique permet de mieux appréhender la structure du sous-sol et déterminer la présence et l'emplacement des structures recherchées comme ce fut le cas dans notre étude, ou il a été possible de situer moyennant une inversion des données ERT, la section du gazoduc qui traverse la ferme pédagogique située dans l'ancien campus de l'université.

Malgré cela, nous pensons qu'il a été très bénéfique d'exercer nos connaissances en matière de traitement et analyse de données géophysiques avec ces deux méthodes et très probablement de meilleurs résultats auraient pu être obtenus si les conditions étaient plus favorables que la situation qui règne depuis l'apparition de la pandémie qui a réduit les contacts et les échanges pédagogiques avec nos enseignants et formateurs pour mieux appréhender les données et leur traitement.

Bibliographies

- [1] **Survey design**, «Ground Penetrating Radar», Sensors & software inc, 1992-1999.
- [2] **Annan, A.P.and Davis, J.L**, 1976. «Impulse Radar Sounding in Permafrost.Radio Science, Vol. 11,p. 383-394».
- [3]**Alain Reineix** «Analyse et prédiction comportementales du radar GPR polarimétrique de la mission spatiale EXOMARS», thèse de doctorat.
- [4] **GuénoyéeBauchet**, «Etude théorique et validation expérimentale de l'analyse électromagnétique d'un radar destiné au sondage du sous-sol martien», Thèse soutenue à l'Université de Limoges, 2004.
- [5] **Laurent Mares**, «Imagerie électrique pour géologue acquisition, traitement, interprétation». comte 2008.
- [6] **Jean-Christophe**,« Apport de la tomographie électrique à la modalisation des écoulements densitaires dans les aquifères côtiers »; Comte 2008.