

Université De Djilali Bonaama
INSTITUT DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Département Des Siences De la Matière
PROJET DE FIN D'ETUDES



En vue de l'obtention d'un Master en Physique du Globe

THÈME

**Caractérisation d'un Site Archéologique par
la prospection Géoradar: Site de Cherchell**

Réalisé par:

ABDELKADER MEKKI Nafissa

KHELILI Noura

Devant le jury:

Mr.A.LAMALI Examineur

Mr. S.BENTRIDI Encadreur

Mr.M.KECILI Co-Encadreur

Remerciements

En fit avant tout, le grand et le vrai merci à Dieu qui m'a donné le moral et la vie pour accomplir mon projet.

*Nous tenons à remercier particulièrement notre promoteur Mr. **S.BENTRIDI**, Professeur à l'université de Djilali Bounaama Khemis Miliana, et nous remercions également Mr **M. KECILI**, Ingénieur GeoEXplo qui a toujours été présent durant notre stage et qui nous a aidé sans relâches malgré la masse de travail et la responsabilité énorme qu'il a.*

Nous exprimons notre gratitude à tous les membres du jury qui ont accepté de lire et d'examiner ce travail.

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 saisissons cette occasion pour remercier également l'équipe de GeoXplo pour leur aide.

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 aidé, et soutenu, durant notre stage.

Résumé

Le radar est un outil d'investigation géophysique, il est utilisé aujourd'hui dans divers domaines, dans les travaux publics, le génie civil, en archéologie, en hydrogéologie et également dans la tranche superficielle du sol.

La partie expérimentale de ce travail a été menée sur le site archéologique du Centre-ville de Cherchell connu sous le nom : « la placette », w .Tipaza et ce en collaboration avec GeoExplo.

L'objectif de cette étude est d'utiliser le GRP comme outil de prospection géophysique à des fins archéologiques, en essayant de délimiter une portion d'ancien rempart romain de la ville et de définir surtout les caractéristiques de ce site en vue d'une future campagne de fouille archéologique.

L'interprétation finale a permis de mettre en relief les différentes anomalies recherchées.

Mots-clés :

Radar géophysique (GPR), prospection, investigations, archéologie.

Abstract

Radar is a tool for geophysical investigation, it is used today in various fields, in public works, civil engineering, archeology, hydrogeology and also in the superficial section of the ground.

The experimental part of this work was carried out on the archaeological site of the town center of Cherchell known as "the plot", w .Tipaza and this in collaboration with GeoExplo.

The objective of this study is to use the GRP as a geophysical prospecting tool for archaeological purposes, trying to demarcate a portion of the ancient Roman rampart of the city and to define above all the characteristics of this site with a view to a Future archaeological excavation campaign.

The final interpretation made it possible to highlight the different anomalies sought.

Keywords:

Geophysical Radar (GPR), prospecting, investigations, archeology.

Table des matières

Introduction	1
1 Le géoradar (Ground Penetrating Radar ou GPR)	2
1.1 Introduction	2
1.2 Principe général	3
1.3 Base fondamentales de fonctionnement	4
1.3.1 Introduction	4
1.3.2 Propagation des ondes électromagnétiques	4
1.3.3 Vitesse et atténuation:	8
1.3.4 Transition: diffusion-propagation	10
1.3.5 Impédance électromagnétique	10
1.3.6 Coefficient de réflexion-cas du GPR	11
1.3.7 Prospection et caractéristiques instrumentales	14
1.3.8 Acquisition et interprétation de données GPR	25
1.3.9 Les contraintes d'utilisation d'un géoradar	26
2 Acquisition et exploitation des données	27
2.1 Matériels de la Prospection Géoradar	28
2.1.1 Unités de contrôle :	29
2.1.2 Unité de visualisation et logiciel GROUNDVISION	30
2.2 Principe d'utilisation	32
2.3 Acquisition des données	32

2.3.1	Description du site	32
2.3.2	Paramètres d'acquisition	34
3	Traitement et interprétation des données Géoradar	35
3.1	Traitements des données	35
3.2	Interprétation des Radargrammes	36
3.3	Discussion	41
	Conclusion	43

Introduction

Le Géoradar ou GPR (Ground Penetrating Radar) a fait son apparition au début du XXIème siècle. Loin des performances actuelles, le premier dispositif permettant de localiser des cibles enfouies est attribué aux allemands Leimbach et Lowy en 1910. Leur système reposait sur l'utilisation de dipôles enfouis verticalement et disposés en réseau. Hulsenbeck met en oeuvre la première méthode impulsionnelle en 1926 et obtient les premières mesures des caractéristiques diélectriques d'un sol. Toujours d'actualité, la méthode impulsionnelle doit son développement aux progrès de l'électronique, à sa facilité de mise en oeuvre et aux nombreuses applications du radar subsurface[1].

A ce jour, il existe plusieurs constructeurs commercialisant différents modèles de radar GPR qui sont optimisés en fonction des applications. Ces optimisations peuvent s'opérer sur la maniabilité de l'appareil mais aussi sur ses accessoires (chariot de transport, logiciel de visualisation, . . .). Toutefois, les performances du GPR sont limités en fonction de plusieurs paramètres d'origines diverses[2].

Le repérage de câbles, tuyaux ou citernes enfouis nécessite l'utilisation d'un géoradar. Egalement, divers programmes scientifiques pour l'exploration martienne ont suscité la présence d'un géoradar dans leur instrumentation, l'objectif étant la détection d'eau contenu dans le sol. Les nombreuses fouilles archéologiques ont également bénéficié de l'avantage incontestable de ce système de détection à la fois portable et mobile, non-destructif et rapide.

C'est dans le cadre d'un projet de prospection archéologique sollicitée par les autorités locales de la ville de Cherchell, auprès du bureau d'études spécialisé en Géophysique, en l'occurrence GeoExplo, que vient se placer notre étude présentée ici, dans le cadre de notre formation de physiciens du globe. En effet, le présent travail de projet de fin d'étude s'est intéressé à la caractérisation d'un site archéologique par la prospection géoradar.

Nous avons axé notre étude sur l'utilisation du GPR et de la propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu géologique particulier, qui est un site historique à proximité de la mer, où il s'agit essentiellement de repérer la délimitation d'une portion des remparts défensifs de l'ancienne ville romaine "Césarée", actuellement connue sous le nom de Cherchell.

Chapitre 1

Le géoradar (Ground Penetrating Radar ou GPR)

1.1 Introduction

le radar (Radar Detection & Ranging), de manière générale, joue un rôle grandissant par la prospection non destructive. Les 1^{ers} dispositifs permettant de localiser des cibles ont fait leur apparition au début du XX^e siècle.

A ses débuts, la technologie Radar a été appliquée dans la gamme de 2 GHz (radar de navigation, surveillance des sols, météorologie,...).

Puis (vers ~ 1960), elle a été appliquée dans la gamme de MHz au domaine de la prospection géophysique, mais l'atténuation des ondes dans le sol \gg a celle observée dans l'atmosphère, a surtout favorisé le développement du radar de sub-surface.

Le Géo-radar ou (GPR) (Grand Pénétrating Radar) est une méthode de prospection basée sur l'analyse de la propagation et la réflexion des ondes EM à hautes fréquences.

Actuellement, la plupart des Radars fonctionnent dans une gamme de fréquence de quelques dizaines de MHz à quelques GHz, tels ceux utilisés pour la géotechnique en génie civil, étude de revêtements des routes aux aéroports, surveillance de tunnels ou contrôle de maçonneries pour les ouvrages d'art (détection de cavités, des conduites métalliques, prospection archéologique,...)[3].

En géophysique, le GPR est comparable à la méthode sismique par le principe de la réflexion des ondes sur la discontinuité du sous-sol, et par les techniques de traitement de données à une différence dans l'utilisation de propriétés physiques du sous-sol par les deux méthodes.

1.2 Principe général

Le GPR mesure le temps de parcours et l'amplitude des ondes EM réfléchies, transmises, diffractées et/ou réfractées entre un émetteur et récepteur[4].

Les différents radars GPR existant reposent sur le même principe de fonctionnement. La figure 1 représente le schéma fonctionnel d'un GPR. L'antenne d'émission du dispositif est en contact avec le sol, elle émet une brève impulsion en direction du sol. L'onde électromagnétique générée se propage au sein du milieu. Si un obstacle est rencontré, une onde réfléchie revient vers la surface du sol et elle est détectée par l'antenne de réception. Cette onde récupérée constitue une trace du sous-sol en un point précis et à un instant donné. L'utilisateur déplace le radar et à nouveau, une autre impulsion est générée. Elle permet d'obtenir une nouvelle trace en ce nouveau point de mesure.

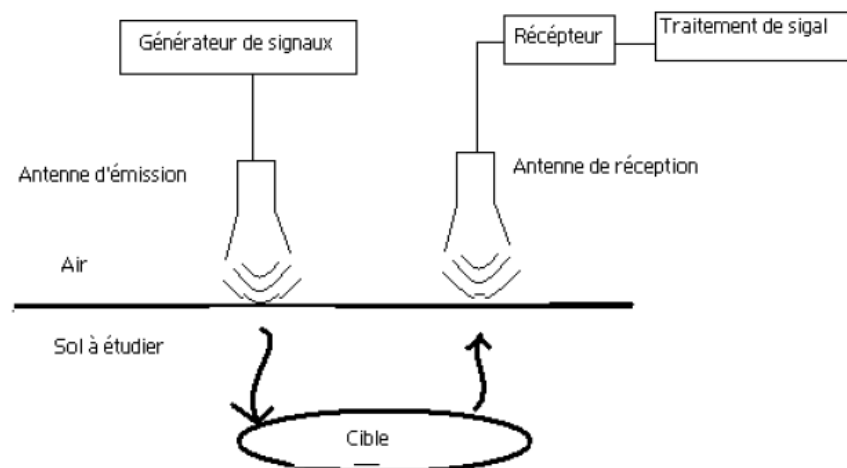


figure 1: Schéma de principe d'un GPR.

1.3 Base fondamentales de fonctionnement

1.3.1 Introduction

Dans cette partie il s'agit de bien cerner le principe fondamental de résolution/détection radar, en particulier dans le cas du GPR.

L'amplitude et la vitesse des ondes EM sont contrôlés par la permittivité, la conductivité et la perméabilité des milieux traversés.

L'amplitude des ondes EM réfléchies /diffractées mesurée au récepteur dépend de contrastes de permittivité.

1.3.2 Propagation des ondes électromagnétiques

La résolution de l'équation de Maxwell met en évidence l'existence d'une onde EM qui se déplace à la même vitesse que la lumière[4]

Formes intégrales:	Formes différentielles:
loi de Gauss : $\oint \oint \vec{E} \cdot \vec{n} ds = \frac{q}{\epsilon_0}$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
loi de Faraday: $\oint \vec{E} \cdot \vec{dl} = -\frac{d\Phi_Z}{dt}$	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
Créaire dipolaire: $\oint \oint \vec{B} \cdot \vec{n} dS = 0$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
Ampère: $\oint \vec{B} \cdot \vec{dl} = \mu_0 \left(i + \epsilon_0 \frac{d\Phi_Z}{dt} \right)$	$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \right)$

Les équations de Maxwell décrivent un ensemble couplé de champs électrique et magnétique lorsque les champs varient avec le temps la modification des champs électriques créant des champs magnétiques qui à leur tour induisent des champs électriques.

Mathématiquement: le caractère d'onde est vu par la réécriture des équations de Maxwell pour éliminer soit le champ électrique ou le champ magnétique.

Ceci se fait par découplage on notant que le caractère de circuit fermé du champ magnétique peut être exprimé en terme de champ électrique.

De la loi de Faraday:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \mu \vec{H}) \quad (1.1)$$

\vec{E} : Champ électrique

\vec{B} : Densité de flux magnétique.

\vec{D} : Déplacement électrique.

\vec{H} : Champ magnétique.

\vec{J} : Densité de courant électrique.

q : Densité des charges électrique.

$\mu = \mu_0 \mu_r$: Perméabilité magnétique.

$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$: Permittivité électrique.

σ : Conductivité électrique.

μ_0, ε_0 : Paramètres du vide.

μ_r, ε_r : Paramètres relatives.

Utilisant la loi d'Ampère:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) = - \left(\mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \right) \quad (1.2)$$

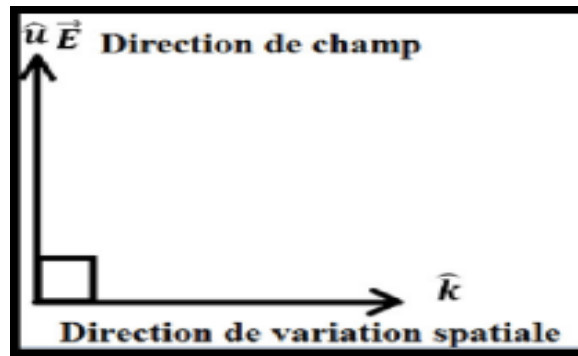
Ce qui donne l'équation d'onde pontée par un vecteur transversal tel que:

$$\underbrace{\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E}}_A + \underbrace{\mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}}_B + \underbrace{\mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}}_C = 0 \quad (1.3)$$

Les termes B et C expriment le fait que le courant générer un champ magnétique puis on variant le temps dans sa direction créé un champ électrique qu'il est exprimé par A .

L'essence de l'onde transversale réside dans sa forme de base de solution.

Mathématiquement: un vecteur de position et une paire de vecteurs unitaires orthogonaux ($u^{\rightarrow}, k^{\rightarrow}$) sont nécessaires pour caractériser une solution simple à l'équation des ondes EM.



Pour l'équation d'onde radar les équations de Maxwell conduisent dans un milieu homogène et isotrope à ce qui aussi connu comme l'équation d'Helmholtz:

$$\nabla^2 \vec{E} = \underbrace{\mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}}_{\text{terme de diffusion}} + \underbrace{\mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}}_{\text{terme de propagation}} \quad (1.4)$$

Remarque 1.3.1 *le champ magnétique vérifie cette équation (1.4).*

En domaine fréquentielle:

$$\begin{aligned}
 F(\omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \\
 f(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

Ce qui implique:

$$TF\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right) = i\omega TF(t).
 \tag{1.6}$$

Si on introduit cela dans les équations de Maxwell dans les milieux diélectriques, elles deviennent donc:

$$\begin{cases}
 \overrightarrow{Rot} \overrightarrow{E} + i\mu\omega \overrightarrow{H} = 0 \\
 \overrightarrow{Rot} \overrightarrow{H} - (\sigma + i\omega\varepsilon) \overrightarrow{E} = 0
 \end{cases}
 \tag{1.7}$$

On montre à nouveau que dans une région vide de charges libres et homogènes, E et H sont solution d'une même équation l'équation d'Helmholtz (1.4):

$$\Delta \overrightarrow{E} + K^2 \overrightarrow{E} = \overrightarrow{0}
 \tag{1.8}$$

K : nombre d'onde caractérise l'interaction du champ électromagnétique avec le milieu, et fait intervenir les propriétés du milieu et la fréquence.

$$K^2 = \mu\varepsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega
 \tag{1.9}$$

Si on considère pour l'instant ε, σ réels, on peut définir pour leurs valeurs rencontrées généralement dans des milieux géologiques, de domaines fréquentiels où la nature des courants électriques dominants diffèrent.

- Domaine diffusif si $f < 10^5 \text{ Hz}$: les courants de conduction dominent

$$\mu\epsilon\omega^2 \ll i\mu\sigma\omega \ \& \ K^2 = -i\mu\sigma\omega \quad (1.10)$$

- Domaine propagatif si $f > 10^5 \text{ Hz}$ les courants déplacement dominant

$$\mu\epsilon\omega^2 \gg i\mu\sigma\omega \ \& \ K^2 = \mu\sigma\omega^2 \quad (1.11)$$

Exemple: dans les métaux ($\sigma \gg \epsilon\omega$) nous sommes bien dans le cas où les courants de conduction dominant.

Matériaux diélectriques et HF:

$\alpha = 0$ et $\beta = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \implies \sigma = 0$ Propagation domine.

Matériaux conducteurs et BF:

$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu\epsilon\sigma}{2}} \implies$ Diffusion domine.

La propagation d'une onde dans un milieu homogène et isotrope est régit par:

$$\begin{aligned} \Delta \vec{E} + K^2 \vec{E} = \vec{0} &\implies \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial Z^2} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \\ E(Z, t) &= E_0 e^{-\alpha Z} e^{i(\omega t - \beta z)} \\ \left\{ \begin{array}{l} (\alpha + i\beta)^2 = i\mu\sigma\omega + \mu\epsilon\omega^2 \\ \alpha^2 - \beta^2 = -\mu\epsilon\omega^2 \\ 2\alpha\beta = \mu\sigma\omega \end{array} \right. &\quad (1.12) \end{aligned}$$

1.3.3 Vitesse et atténuation:

Le terme \mathbf{K} décrit la vitesse d'atténuation de l'onde peut être réécrit pour isoler ces deux caractéristiques

$$K^2 = \mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega \iff K = \beta - i\alpha \quad (1.13)$$

β : la phase , α : l'atténuation

Les termes α, β permet s'écrire en fonction des paramètres effectifs:

$$\alpha = \omega \left[\frac{\varepsilon_e \mu}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_e}{\omega \varepsilon_e} \right)^2} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{la phase})$$

$$\beta = \omega \left[\frac{\varepsilon_e \mu}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_e}{\omega \varepsilon_e} \right)^2} + 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{l'attenuation})$$

ε_e, σ_e : Paramètres effectifs que l'on mesure dans le laboratoire.

L'onde EM se déplace par la vitesse de phase: $v = \frac{\alpha}{\beta}$.

Aperçu sur les paramètres effectifs:

Le courant total dans le sol est la somme des courants de conduction et de déplacement

$$J = J_c + J_d = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1.14)$$

Dans le domaine de **Fourier**: $J = (\sigma + i\omega\varepsilon) E$

ε, σ sont des variables complexes en fonction de $f(2\pi f)$.

$$\left. \begin{array}{l} \sigma = \sigma' + i\sigma'' \\ \varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \end{array} \right\} \Rightarrow J = (\sigma_e + i\omega\varepsilon_e) E \quad (1.15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_e = \sigma' + \omega\varepsilon'' \\ \varepsilon_e = \varepsilon' + \sigma''/\omega \end{array} \right.$$

Pour simplifier et sous certaines conditions physiques du milieu le terme de α et β

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \omega \left[\frac{\varepsilon_e \mu}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_e}{\omega \varepsilon_e} \right)^2} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \\ \beta = \omega \left[\frac{\varepsilon_e \mu}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_e}{\omega \varepsilon_e} \right)^2} + 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \end{array} \right. \text{ tel que } \tan \delta = \left(\frac{\sigma_e}{\omega \varepsilon_e} \right) \ll 1.$$

Il faut que l'angle de perte ($\tan \delta$) soit faible.

La vitesse de phase devient: $v = \frac{3.10^8}{\sqrt{k}} [m/s]$

De même l'atténuation devient: $\alpha = 1.69 \frac{\sigma_e}{\sqrt{k}} [dB/m]$

où $k = \varepsilon_e/\varepsilon_0$. et $\sigma_e = [mS/m]$.

1.3.4 Transition: diffusion-propagation

Les équations de Maxwell décrivent un couple de champs électrique et magnétique qui varient dans le temps. Cependant, la variation de l'un entraîne la variation de l'autre et ainsi de suite[5].

Cette succession répétée fait que les champs sont déplaçant dans l'espace.

Selon l'importance des pertes, les champs se déplacent:

- En mode diffusive (pertes non négligeables)
- En mode propagatif (faibles pertes).

On définit la transition au point $J_c = J_d$.

La transition se fait à une fréquence qui est fonction des propriétés du sol.

1.3.5 Impédance électromagnétique

L'impédance électromagnétique est utilisée pour décrire le milieu dans lequel se propage, l'onde EM à cet effet, l'impédance EM est définie comme le rapport du champ électrique ou magnétique tel que

$$Z = \frac{E}{H} \quad \text{relation d'impédance 1}$$

Elle est liée aux propriétés de milieu:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon + i\frac{\sigma}{\omega}}} \quad \text{relation d'impédance 2}$$

L'admittance est l'inverse de l'impédance

$$Y = \sqrt{\frac{\varepsilon + i\frac{\sigma}{\omega}}{\mu}} \quad \text{(L'admittance)}$$

1.3.6 Coefficient de réflexion-cas du GPR

Propriété de l'onde EM:

Rappelons qu'en mode propagatif les champs électromagnétiques se propagent comme des ondes et peuvent être décrits par:

- Un front d'onde qu'est la surface sur laquelle le champ est en phase.
- Un rai qu'est perpendiculaire au front d'onde et représente le parcours de l'onde entre deux points.
- L'approximation du rai est très utile pour illustrer les concepts de réflexion et réfraction.

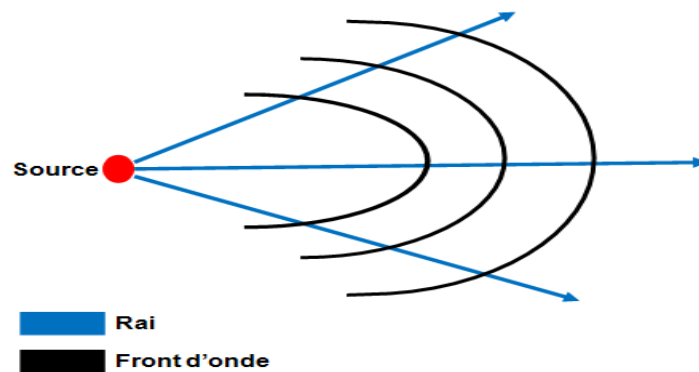


Figure 2: Propriété de l'onde EM

Loi de Snell-Descartes[5]

Comme dans le cas de l'optique, si l'onde radar rencontre une interface:

- Une partie de l'énergie est réfléchiée.
- Une partie de l'énergie est réfractée.

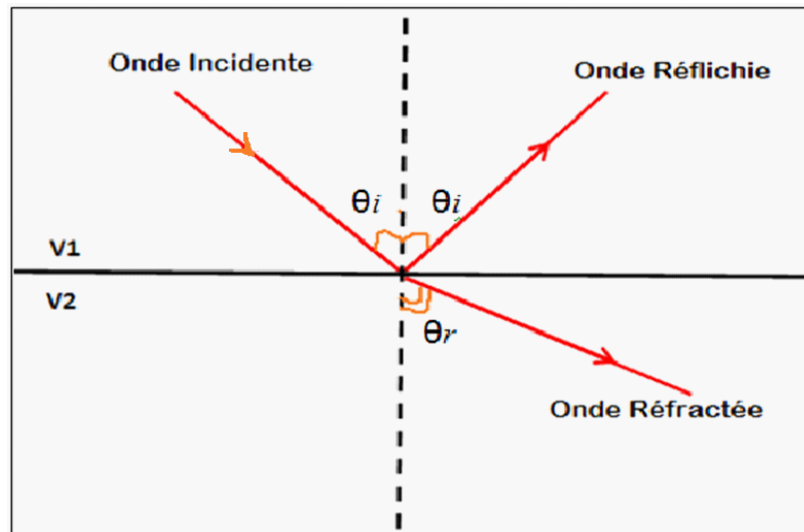


figure 3: les différentes ondes: incidente, réfléchie, et réfractée avec les angles de réflexion (θ_i) et de réfraction (θ_r).

En effet la loi de Snell-Descartes stipule:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1.16)$$

A cette effet toute l'énergie est réfractées si est supérieure à: $\theta_c = \sin^{-1} \frac{v_1}{v_2}$.

Coefficient de réflexion:

Ainsi pour une incidente normale à l'interface entre deux unités, l'amplitude de l'onde réfléchie est donnée par le coefficient de réflexion:

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{Z}_1 - \mathbf{Z}_2}{\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2} \quad (1.17)$$

Résolution et Détection

Définition:

- Le pouvoir de **résolution** est la capacité de séparer en profondeur deux horizons, moyennement de l'ordre de $\lambda/4$ à $\lambda/2$ selon la largeur de bande et le niveau de bruit.

- Le pouvoir de **détection** se limite à la plus petite couche qui puisse donner naissance à une réflexion celle-ci pourrait se situer entre $\lambda/30$ et $\lambda/10$.
- **La résolution latérale** est forcément liée à la zone de Fresnel (voir la figure 4), elle est la capacité d'individualiser latéralement deux événements.

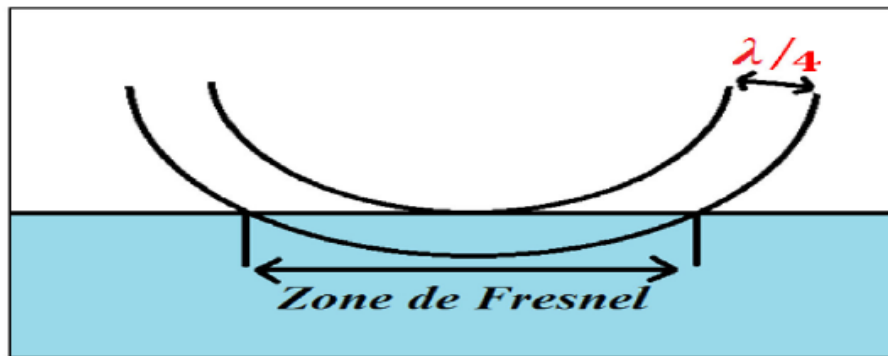


figure 4: un schéma montre la zone de Fresnel.

- En définitive plus la longueur d'onde est courte (et la fréquence élevée), meilleure est la résolution.

Réflexion et Réfraction:

Soit un sol à couche qu'on prospecte avec de antennes l'une est émettrice et l'autre est réceptrice $v_0 = 0.3m/ms$

La vitesse dans l'air est plus élevée que la vitesse dans le sol (contrairement à qu'on observe en sismique).

La vitesse dans la couche vadose est plus élevée que dans la couche saturée.

Selon la distance entre les deux antennes, on mesure:

- Une onde aérienne.
- Une onde directe.
- Une onde réfléchie.
- Une onde réfléchie et réfractée en surface.

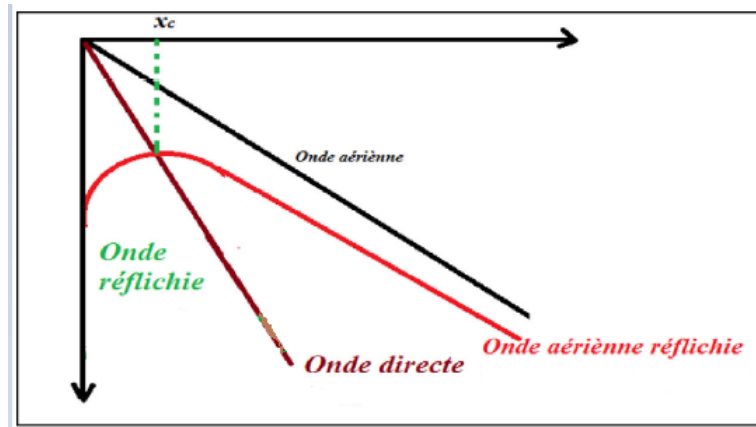


Figure 5: le temps de parcours pour chaque onde.

Vitesse de propagation de l'onde électromagnétique: $\mathbf{V} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$.

Profondeur d'une onde électromagnétique: $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} m$.

Résolution spatiale: $\mathbf{r} = \frac{\lambda}{4} = \frac{v}{4f} = \frac{1}{4f\sqrt{\mu\epsilon}}$.

1.3.7 Prospection et caractéristiques instrumentales

Introduction

Les différents GPRs existant représentent sur le même principe de fonctionnement.

L'antenne TX est en contact avec le sol, et émet une brève impulsion en direction du sol.

L'onde EM générée se propage au sein d'un milieu de type diélectrique.

Si une discontinuité est rencontrée une onde réfléchie revient vers la surface du sol et est détectée par l'antenne de réception.

Cette onde récupérée constitue une trace de sous sol en un point précis et à un instant donné.

L'utilisateur déplace le radar et à nouveau, une autre impulsion est générée. Elle permet d'obtenir une nouvelle trace en ce nouveau point de mesure.

L'affichage des radargrammes se fait au moyen d'une unité de traitement de signal.

La plupart des GPRs permettent une visualisation instantanée des B-scans. Voir même l'application immédiate de filtre.

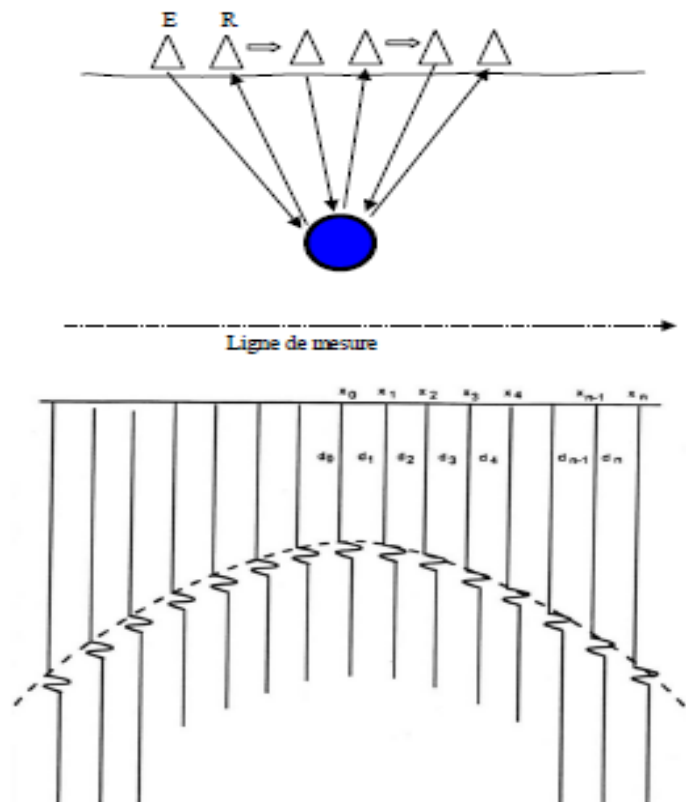


Figure 6: Principe d'acquisition du radar GPR et Bscan associé

Les géoradars sont en général composés des éléments suivants (voir la figure 7) :

- Une unité de commande et de stockage des données (micro-ordinateur)
- Une unité de contrôle, chargée de synchroniser et de servir d'interface entre les différents éléments
- Une électronique d'émission, chargée de générer le courant qui est appliqué à l'antenne d'émission
- Une électronique de réception, chargée d'amplifier et de numériser le signal mesuré Par l'antenne réceptrice.
- Une antenne émettrice.

- Une antenne réceptrice.

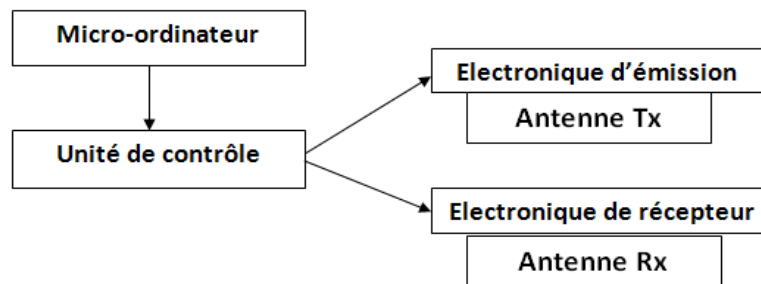


figure 7: Composantes du système géoradar

Les connexions entre électronique d'émission (ou de réception) et l'unité de contrôle se font par fibres optiques ou par câbles coaxiaux. Les électroniques d'émissions (ou de réception) sont en général connectées directement aux antennes. Pour la plupart des dispositifs existants, il existe plusieurs jeux d'antennes pouvant fonctionner avec les mêmes électroniques d'émission (ou de réception) et la même unité de contrôle.

Les différents types de radar

La forme du signal émis par l'antenne dépend de l'utilisation du GPR et du type d'objet recherché, chaque type de signal possède ses avantages et ses inconvénients. Il s'agit donc d'établir un compromis entre les performances, l'encombrement, la facilité d'utilisation, la modularité, le coût,...

Les modes d'émission les plus couramment employés sont:

- Le mode impulsionnel (également appelé modulation d'amplitude FMCW).
- La modulation de fréquence.
- Les sauts de fréquence.

Le mode impulsionnel Elle est basée sur l'utilisation d'interrupteur radiofréquence large bande et une forte puissance afin d'émettre des impulsions de courte durée (<1 ns).

L'acquisition est le point le plus délicat puisqu'il faut généralement échantillonner à quelques Ghz. A cet effet, des convertisseurs de type "flash" sont utilisés afin de numériser le signal jusqu'à $2 \cdot 10^9$ échantillons par seconde, mais uniquement sur 8 bits.

L'antenne émet une série d'impulsions et capte les échos provenant du sous-sol. Ils opèrent donc le domaine temporel en reliant la profondeur des cibles au temps écouté entre l'émission et réception. Afin d'obtenir une large bande passante, les impulsions sont extrêmement courtes, de l'ordre de nanosecondes ou moins.

Le transmetteur ne module pas en fréquence l'onde porteuse mais plutôt générer une impulsion d'amplitude, typiquement (de 20 à 200 **V**) dite de bande de base, la forme de ces impulsions ressemble à un "sombbrero mexicain" décrit mathématiquement par une dérivée négative normalisée de seconde ordre d'une courbe gaussienne.

Principaux avantages:

- La simplicité du traitement de système.
- La mesure directe de la réponse impulsionnelle sans traitement complémentaire.
- Ces systèmes sont rapides et très bien adaptés aux applications embarquées.

Principaux inconvénients:

- La complexité de l'étage amplificateur à gain variable lorsqu'on s'intéresse à des objectifs faiblement entrés.
- Le comportement de l'antenne à une impulsion de courte durée est principale difficulté et pour palier, on recourt à l'usage à une distribution de charge le long des antennes pour réduire les effets de ringing, mais au détriment du rendement.
- Il n'est pas envisageable d'utiliser les antennes indépendantes de la fréquence dont ne peut corriger dans ce cas les dispersions de phase.
- Enfin, comme la bande d'analyse est large, cette méthode est sensible au bruit.

Modulation linéaire de fréquence (modulated continuous waves) La fréquence d'émission est modulée linéairement sur une large bande de fréquence $\Delta f = f_{\text{Max}} - f_{\text{Min}}$ en un temps T (chirp).

Evolution de la fréquence émise en fonction de temps pour un radar fonctionnant en FMCW.

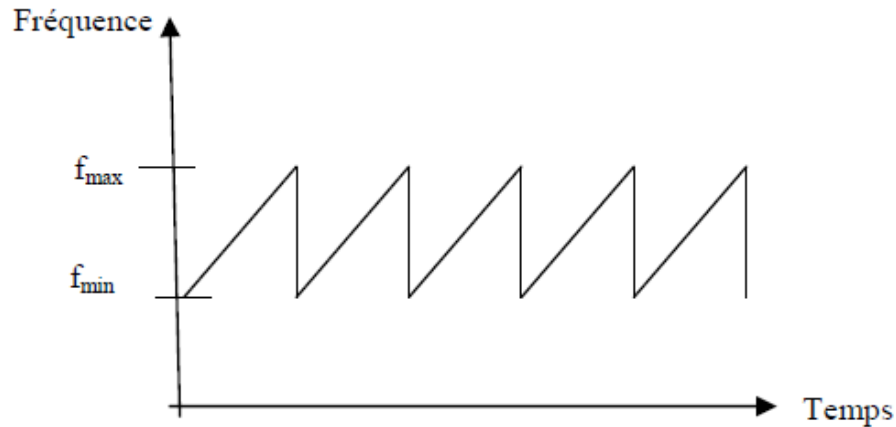


figure 8: Evolution de la fréquence émise en fonction du temps pour un radar FMCW

Le spectre du produit du signal reçu avec le signal émis présente alors des rôles dont la fréquence est proportionnelle à la distance radar-cible et inversement proportionnelle au temps de balayage.

La résolution de ce radar est inversement proportionnelle à Δf .

Principaux avantages:

- Le rapport signal à bruit est multiplié par le rapport de compression $T \cdot \Delta f$.
- La puissance crête nécessaire est divisée par le rapport de compression $T \cdot \Delta f$.
- Les systèmes peuvent être rapides.
- La possibilité de balayer une très large bande et obtenir ainsi une résolution importante.

Principaux inconvénients:

- Comme ces radars reçoivent en même temps qu'ils émettent, la principale limitation provient du couplage entre antennes.
- Pour réduire la vitesse d'échantillonnage et limiter la bande de bruit, un filtre est généralement disposé en fin de réception. Ce filtre limite alors la gamme de distance observable et fige le système.
- Enfin, l'évolution de ces radars est complexe.

Radar à sauts de fréquence (step frequency ground-penetrating radar): Cette modulation est une version dérivée du radar FMCW. Le radar balaye une large bande de fréquence et passe d'une fréquence à une autre par pas de fréquence Δf .

Comme pour les radars FMCW, la puissance émise est réduite et la réception est réalisée en bande étroite, ce qui réduit le bruit et la vitesse d'échantillonnage.

Comme aussi elle s'appuie sur le balayage d'une large bande de fréquence, une mesure de l'amplitude et de la phase du signal reçu est réalisée pour chaque fréquence balayage.

De cette façon, le spectre complexe du signal rétrodiffusé est mesuré, et on peut alors retrouver la réponse impulsionnelle par une transformée de Fourier inverse.

Principaux avantages:

- Pouvoir pondérer les mesures complexes pour chaque fréquence du balayage de manière à corriger des effets gênants comme l'atténuation du sol ou encore les réponses des antennes.

Principaux inconvénients:

- Du fait que ces radars émettent et reçoivent simultanément la couplage entre antennes entraîne des limitations de dynamique.
- Comme une mesure est réalisée pour chaque fréquence du balayage, la durée de l'opération est plus importante. Cette méthode est donc plus lente et plus difficilement utilisée dans des applications embarquées sur véhicules ou aéroportées.
- Enfin, le système est complexe relativement aux autres types de radars.

Les différents modes d'acquisition[5]

Afin d'obtenir des radargrammes exploitables différemment d'acquisition peuvent être mise en œuvre:

Le mode réflexion: Dans la plupart des applications les radars sont mis en œuvre en mode réflexion, le radargramme est obtenu en juxtaposant les différents signaux (ou trace) ainsi enregistrés.

C'est ainsi que différentes ondes sont alors identifiables:

- Onde directe aérienne.
- Onde directe souterraine.
- Onde réfléchie.
- Onde diffractée.

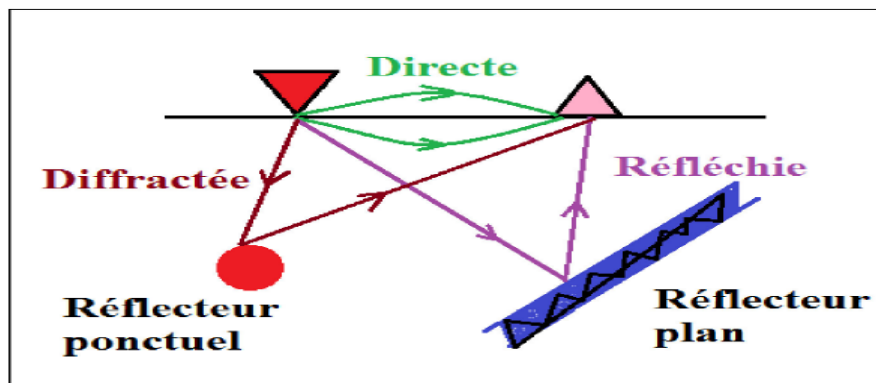


figure 9: Mise en œuvre des georadar en mode réflexion

L'analyse de temps d'arrivée des ondes réfléchies et diffractées permet l'interprétation de la structure des discontinuités du milieu.

Dans les modes de réflexion on distingue les profils réflexion à offset constant, des profils réflexion à offset variable.

Le terme **offset**: désigne la distance entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception.

a. Offset constant:

Dans ce cas les deux antennes positionnées proches l'une de l'autre sont déplacées d'un même pas d'avancement sur la ligne de mesure.

Cette configuration est la plus utilisée par les radars commercialisés.

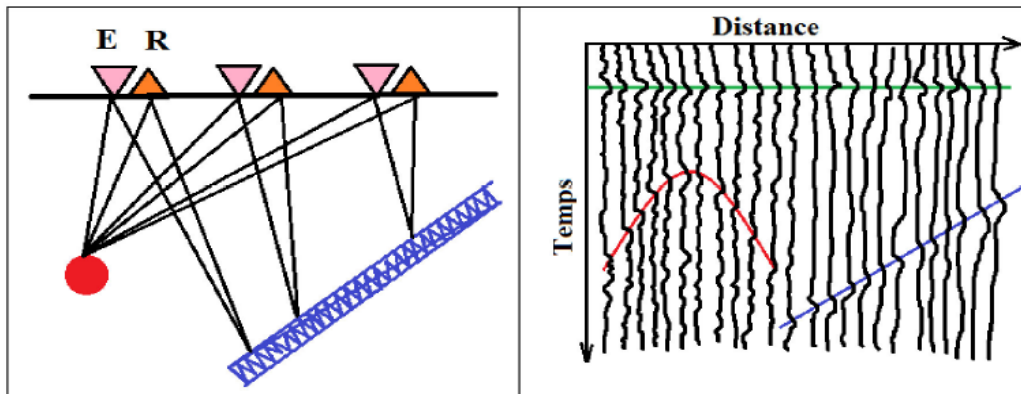


figure 10: Mode d'acquisition à offset constant

b. Offset variables:

Dans ce cas la distance entre les antennes (offset) est progressivement augmentée, soit en laissant une antenne fixe, soit en éloignant symétriquement les deux antennes par rapport à un point centrale. On parle alors de profil CMP (Common-Mid-Point).

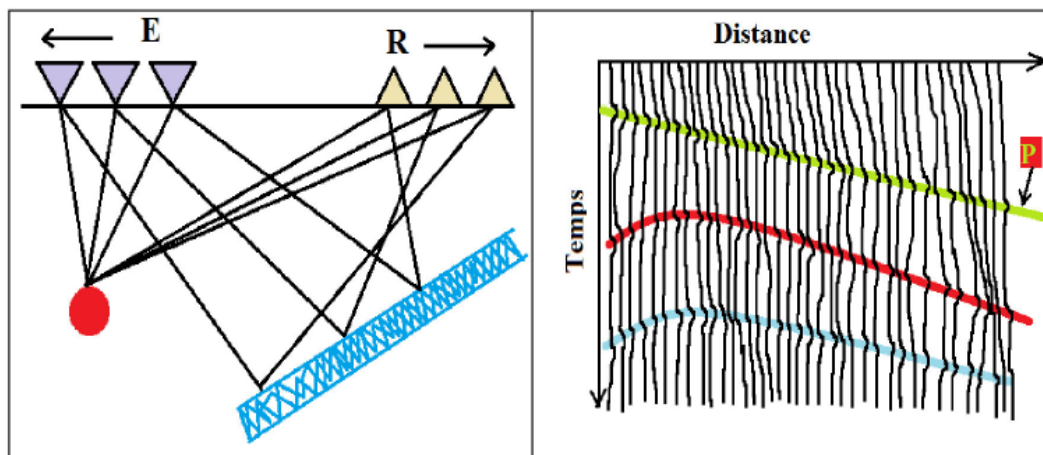


figure 11: Acquisition en CMP

P : Pente de l'onde directe souterraine, permet d'obtenir la vitesse de propagation du milieu à proximité de la ligne de mesure (surface).

Ce type d'acquisition est souvent associé à une acquisition réflexion à offset constant afin d'obtenir des informations sur les vitesses de propagation caractéristique du milieu.

La généralisation de l'acquisition de CMP permet de réaliser un traitement en couverture multiple afin d'augmenter le rapport signal à bruit et donc la profondeur d'investigation.

Si ce principe de traitement s'est généralisé en sismique, peu de travaux de ce type ont été réalisés avec les géo-radars.

Le mode transmission: Ce mode a pour objectif l'enregistrement d'ondes directes qui se propagent dans un volume représentatif de roche. Ceci peut se faire par exemple, lors d'une configuration possible de galeries souterraines ou entre deux puits de forage.

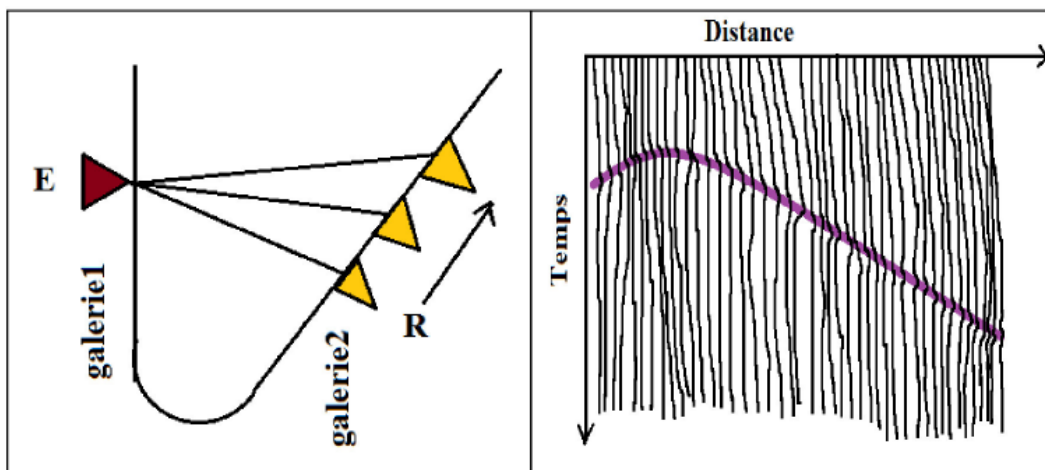


figure 12: Mise en œuvre des géoradars en mode « transmission »

Il est alors possible d'interpréter le profil obtenu pour calculer une vitesse de propagation, ou plus généralement, pour évaluer l'effet de la propagation sur le signal.

L'enregistrement d'un profil transmission unique est rare dans le cadre d'une investigation géophysique.

Par contre, l'acquisition autour d'un volume de roche donné peut permettre de réaliser la tomographie.

Les enregistrements radars

Il est possible de distinguer trois types de représentation de ces enregistrements: le A-scan (1D), B-scan (2D), et le C-scan (3D).

Le A-scan: Le radar est placé à la surface du sol (les mesures sont effectuées en $z=0$). Dans le cas d'un radar impulsif, une impulsion de très courte durée est émise puis l'écho du sol est enregistré au niveau du récepteur.

Pour les antennes ayant un lobe large, les échos observés ne reflètent pas seulement les traces des inhomogénéités situées à l'aplombe du radar mais des échos provenant de directions différentes.

Le signal enregistré contient toutes ces réflexions qui apparaissent comme étant à la verticale de cette antenne.

Cependant, à ce signal viennent s'ajouter des signaux parasites comme le couplage entre les antennes, l'écho de surface provenant de la réflexion à la surface du sol.

Le signal peut être modélisé de la manière suivante:

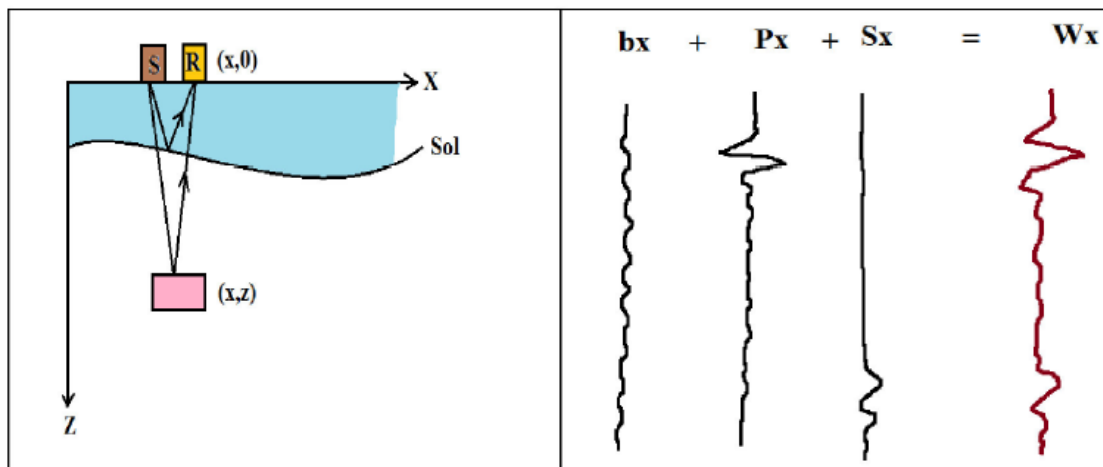


figure 13: Enregistrement de type A-scan

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

p_x : l'écho de surface.

b_x : le bruit supposé gaussienne et blanc.

w_x : le A-scan formé de la surface de différentes contributions.

Pour la qualité des enregistrements, il faudrait éliminer l'écho de surface ainsi que le couplage direct entre les antennes et ainsi conserver uniquement le signal utile.

Le A-scan est représenté en 1D, de l'amplitude du signal reçu pour une position X du radar en fonction du temps.

Le B-scan: Le A-scan ne permet de localiser la position d'un objet, il indique uniquement le temps parcouru par l'onde entre les différents objets et l'antenne de réception.

Il est alors nécessaire d'effectuer différentes mesures, le radar est donc déplacé à la surface suivant une direction donnée.

L'enregistrement se fait par un pas régulier suivant une direction X.

Pour chaque position de radar, une mesure est réalisée. Tous ces A-scans sont ensuite mis bout à bout ce qui permet d'obtenir un B-scan (également appelé radargramme).

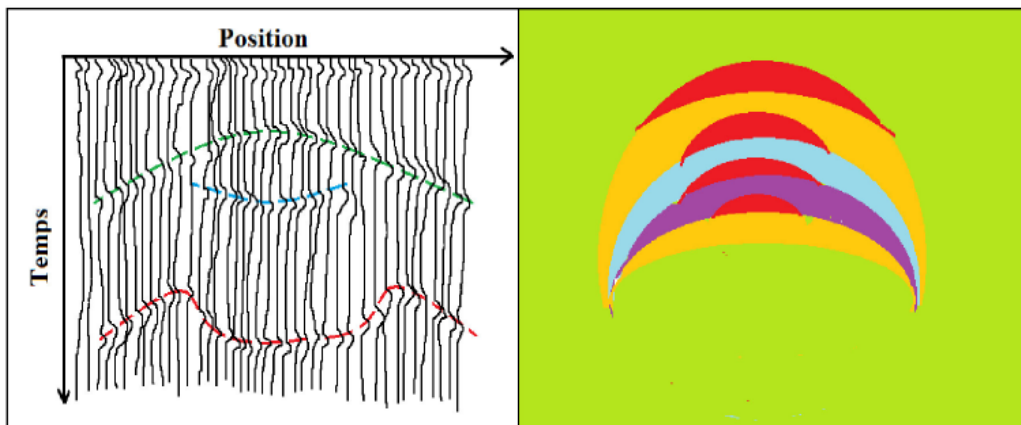


figure 14: Enregistrement de type B-scan

Sur les enregistrements de type B-scan les différents objets apparaissent sous la forme d'une hyperbole.

Ces hyperboles caractéristiques sont dues à la juxtaposition des différents enregistrements effectués pour différentes positions à la surface du sol.

Le B-scan est la représentation en 2D de l'amplitude de signal reçu en fonction de la position et de temps. Très utilisée et elle donne une image du sol et de la position des différents objets.

Le C-scan: Afin de réaliser la topographie d'un sol, plusieurs mesures sont effectuées en déplaçant le radar parallèlement à l'axe des X pour obtenir une série de B-scan représentant des couples parallèles du milieu sondé. La juxtaposition de ces B-scan forme alors un C-scan.

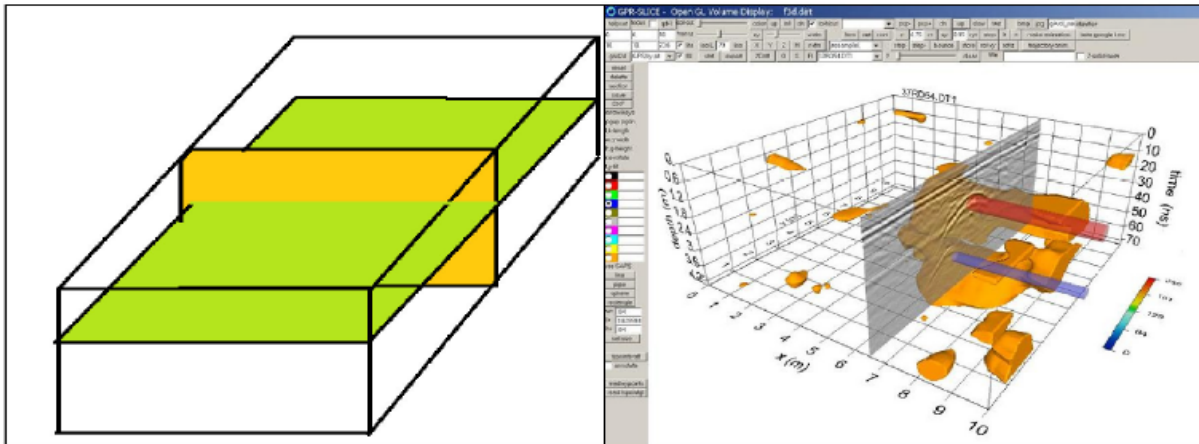


figure 15: enregistrement de type C-scan

Cette représentation en 3D permet une visualisation directe de la scène.

Elle donne d'avantage de renseignements sur la forme, la taille et surtout l'orientation des différents objets contenus dans la scène.

Les caractéristiques d'un système radar

Plusieurs paramètres influence la performance d'un système radar et les principaux sont:

- Le facteur de performance.
- La fréquence centrale de l'ondelette.
- La largeur de la bande.
- Le diagramme de rayonnement.

Certains de ces paramètres sont influencés par les conditions de terrain. Ces paramètres ont une incidence sur l'interprétation qu'il sera possible de faire à partir des mesures radar.

1.3.8 Acquisition et interprétation de données GPR

Processus de traitement des données acquises par le GPR

Ce processus repose sur les étapes suivantes:

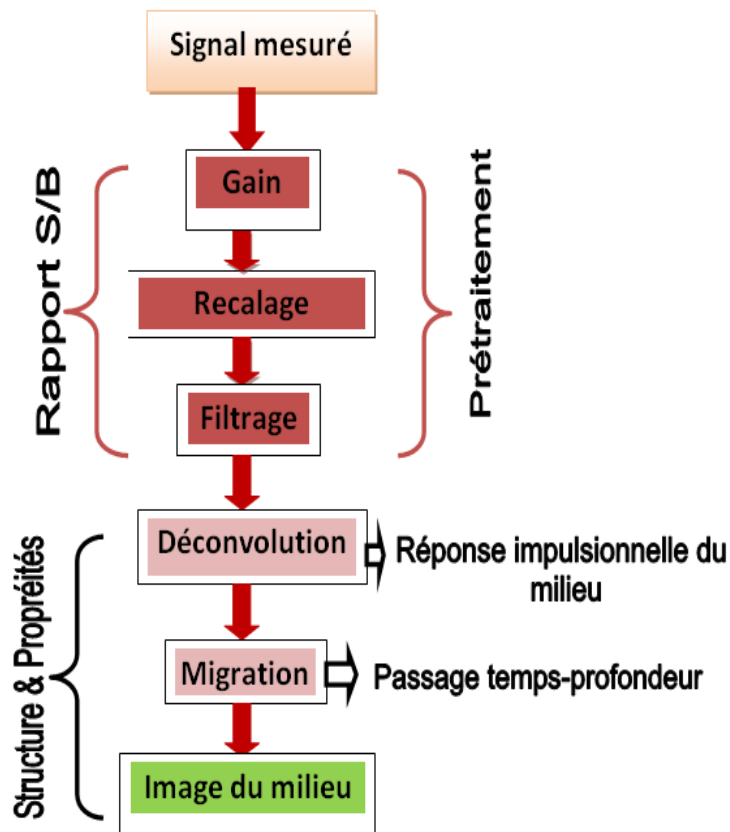


figure 16: processus de traitement des données acquises par le GPR

1.3.9 Les contraintes d'utilisation d'un géoradar

Un radar de sol ne s'utilise pas aussi simplement qu'un détecteur de métaux. En effet, il y a un certain nombre de contraintes à respecter:

- Le terrain doit être parfaitement sec, même en profondeur, car l'humidité contenu dans le sol provoque une baisse très importante de la profondeur de détection.
- Le terrain doit être parfaitement plat, et ne doit pas comporté de cailloux ou de rochers à sa surface, car avec un terrain accidenté il devient très difficile voir impossible de trainer le radar sur le sol, et de nombreux faux signaux apparaissent.
- Un géoradar ne pourra détecter en profondeur que des objets de taille relativement importante (diamètre d'au moins 30 centimètres), alors que de nombreux trésors, comme les pots de monnaies par exemple, ont un diamètre inférieur à 30 centimètres.

Chapitre 2

Acquisition et exploitation des données

Ce chapitre a pour objectif de décrire le principe de fonctionnement d'un radar GPR dans son environnement et l'acquisition de données durant une campagne de prospection GPR.

A l'occasion d'une étude archéologique réalisée par le bureau d'étude GeoEXplo -spécialisé dans la prospection géophysique une campagne de mesure au niveau de centre ville de Cherchell a été réalisé dans le but de localiser avec la plus grande précision d'une structure romaine enfoui dans sous-sol, tout en se reportant à un ancien plan de l'époque coloniale (voir la figure 17). Dans le cadre de notre PFE, nous avons participés à une partie de cette étude à cette campagne, sous la supervision de Mr. Mohand KECILI Ingénieur géophysicien principal à GeoEXplo.

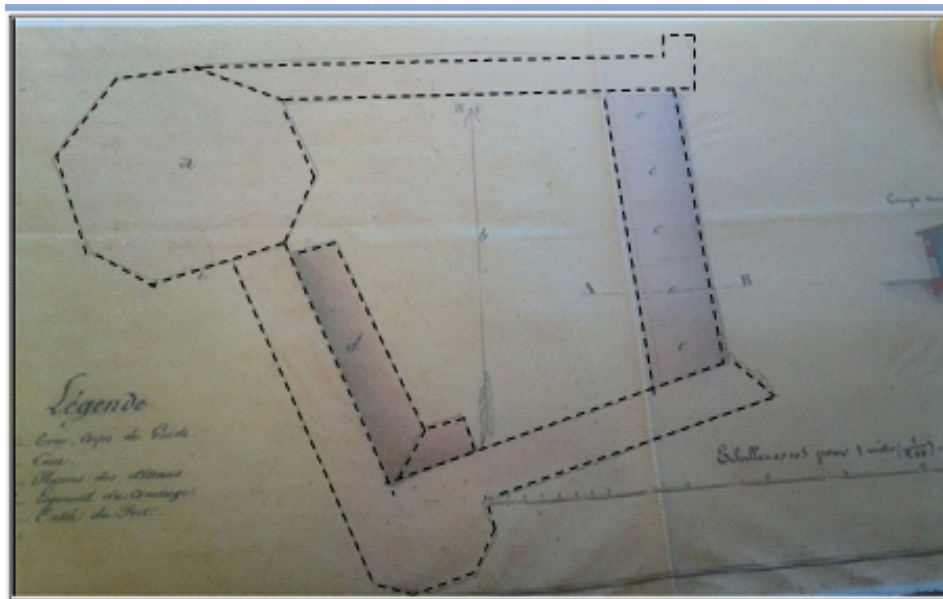


figure 17: le plan de la structure romaine recherchée.

2.1 Matériels de la Prospection Géoradar

Le matériel utilisé pour la prospection Géoradar est de type MALA ProEx (figure 18) avec les accessoires suivants :

- ProEx control unit et module optique
- Batteries 12V
- MonitorXV11, câbles
- Chariot avec l'odomètre.
- Antenne blindé de 250 MHz
- Antenne blindé de 500 MHz



Figure 18: Photo du GeoRadar : antenne 250 MHz dans le chariot.

2.1.1 Unités de contrôle :

Actuellement, deux unités de contrôles sont disponibles pour le RAMAC [?](figure 19):

- L'unité CU2
- L'unité ProEx.



figure 19: unité de contrôle

L'unité de contrôle ProEx est une version beaucoup plus compacte mais moins performante que l'unité de contrôle CU2. Elle ne peut être connectée à toutes les antennes 76 disponibles. Le module électronique CU2 est adaptable à toutes les antennes et offre la possibilité de connecter quatre antennes. Le CU2 se positionne entre les antennes d'émissions et de réception et l'unité de visualisation. La communication entre le CU2 et les antennes s'opère par fibre optique. Hormis la fragilité des connecteurs des fibres, l'utilisation de signaux optiques permet de s'affranchir de potentielles perturbations liées aux impulsions émises[6].

2.1.2 Unité de visualisation et logiciel GROUNDVISION

le RAMAC permet la visualisation instantanée des radargrammes. Deux modèles sont proposés [6]:

- Le RAMAC Monitor XV11,
- Le RAMAC CX11

Le RAMAC Monitor XV11 (figure 20) est une nouvelle unité proposée par Mala géosciences. Il s'agit d'un écran LCD léger à fort contraste et peu encombrant.



figure 20: RAMAC Monitor XV11

Le radar CX11 utilise et associe les technologies radar et électromagnétique pour localiser et identifier les câbles électriques sous tension et les ferrallages dans le béton[6].

Un système CX11 se compose des éléments suivants :

- L'unité de contrôle CX11,
- Une antenne blindée 1.2 ou 1.6 GHz,
- Un capteur EM en option.

Le logiciel intégré 2.5 D du CX11 guide pas à pas pendant l'acquisition. Il traite les données pour permettre une lecture rapide des résultats et une détection d'objets métalliques et non métalliques dans le béton

- contrôle qualité
- localisation des câbles 50/60 Hz
- détection des vides et des conduites métalliques ou non métalliques

Les deux unités décrites ci-dessus sont totalement compatibles avec le logiciel GROUND-VISION fonctionnant sous Windows (2000 ou XP), livré avec le radar GPR RAMAC. Il permet de paramétrer le dispositif en précisant l'antenne utilisée, le type d'acquisition et la fenêtre temporelle[6]. Cet utilitaire donne une représentation du sous-sol immédiate et offre la possibilité d'effectuer des post-traitements sur le terrain (application de filtres, suppression de la composante continue,...).

2.2 Principe d'utilisation

Une antenne émettrice envoie dans le sol des impulsions de très brève durée, à des fréquences variant de 20 MHz à 2 GHz, en fonction de l'antenne utilisée. Ces impulsions provoquent un front d'ondes qui se propage à travers le milieu investigué. Quand les ondes rencontrent un contact entre deux milieux présentant des propriétés diélectriques différentes (contact entre deux couches, cavité, objet enterré, fracture, ...) une partie de leur énergie est réfléchiée, tandis que l'autre pénètre plus profondément. Les ondes réfléchies sont captées en surface par l'antenne réceptrice capte et mesure l'onde réfléchiée qui témoigne du contraste de l'impédance électrique qui forme ce que l'on nomme un réflecteur.

2.3 Acquisition des données

2.3.1 Description du site

Le site archéologique est situé au centre-ville de Cherchell (w. Tipaza) exactement à la placette au sud de port (voir la figure 21: le site encadré en rouge), un terrain est pratiquement plat boiser avec quelques arbres et ses coordonnées géographiques UTM sont comme suit (4051702 m) N et (427606 m) E.



figure 21: Situation de terrain du travail

La mission d'acquisition des données sur terrains a été réalisée le 18 Avril 2017 en deux étapes:

- La première étape est un essai du matériel pour le choix des paramètres les plus adéquats.
- La deuxième étape consiste en la couverture systématique de la parcelle avec les antennes 250 MHz et 500 MHz avec les paramètres sélectionnés lors de la 1ère étape.

Au total, 22 profils de GéoRadar ont été réalisés, 15 Longitudinales (p1, p2,...p15 au direction Nord-Sud) et 7 transversales (Pa, Pb,...Pg au direction Ouest-Est) comme montre la figure suivante (figure 22)



figure 22: disposition des profils Géoradar sur une image googleEarth.

L'espacement entre les profils du GéoRadar est de 4 m pour chaque antenne (250MHz et la 500MHz)

Tous les profils Géoradar ont été effectués sur des terrains pratiquement plat. Grâce au système « avant-arrière » du Géoradar, il était possible de marquer très précisément la position d'un objet détecté au sol par une marque peinture.

2.3.2 Paramètres d'acquisition

Antenne utilisée	500 Mhz	250 Mhz
Fréquence d'échantillonnage	5392.5 Mhz	2516.5 Mhz
Nombres d'échantillons	216	208
Nombre de stack	2	2
Distance entre antenne	0.18m	0.31m
Temps d'écoute	40.01ns	82.7ns
Intervalle entre traces	0.048 m	0.039m

Tableau 1: paramètres d'acquisition pour chaque antenne utilisé.

Chapitre 3

Traitement et interprétation des données Géoradar

3.1 Traitements des données

Après l'acquisition des données, il est nécessaire de faire un traitement en utilisant les différents filtres pour mieux visualiser les anomalies à l'aide de logiciel de MALA (Ground-vision)

Ces filtres sont :

DC-filtre Il y'a souvent un décalage constant dans l'amplitude de la trace enregistrée, ceci est connu comme le niveau DC (Direct Current) ou du décalage DC. Ce filtre élimine la composante continue à partir des données. La composante continue est calculée individuellement et retiré pour chaque trace. Ce filtre se déroule avec l'acquisition pour ramener le signal de la trace au niveau zéro.

Delete mean trace: Ce filtre est utilisé pour supprimer des caractéristiques horizontales et presque horizontales dans le radargramme en soustrayant une trace moyenne calculée à partir de toutes les traces, échantillon par échantillon.

FIR (Finite Impulse Response): un filtre passe-bande est exécuté en deux étapes. Premièrement les faibles fréquences sont atténuées en soustrayant la moyenne des données brutes au centre de train d'ondes.

Puis les hautes fréquences sont atténuées par le remplacement de chaque échantillon avec la moyenne calculée dans le plus court train d'onde.

Time-Gain Filtre : Le filtre Time-Gain applique pour compenser la perte d'amplitude due à la diffusion et à l'atténuation. La trace est multiplié par une fonction gain de combinaison linéaire et un gain exponentiel, avec des coefficients.

3.2 Interprétation des Radargrammes

Les radargrammes sont des enregistrements avec deux échelles horizontale et verticale (figure 23) qui nous renseignent sur les différentes couches constituant le sol en profondeur et qui permettent de bien suivre leur étendue verticalement et latéralement. Dans notre cas, on a réalisé des enregistrements avec deux antennes la 500 MHz et la 250MHz impliquant une profondeur d'investigation d'environ 2 mètres et 4m respectivement.

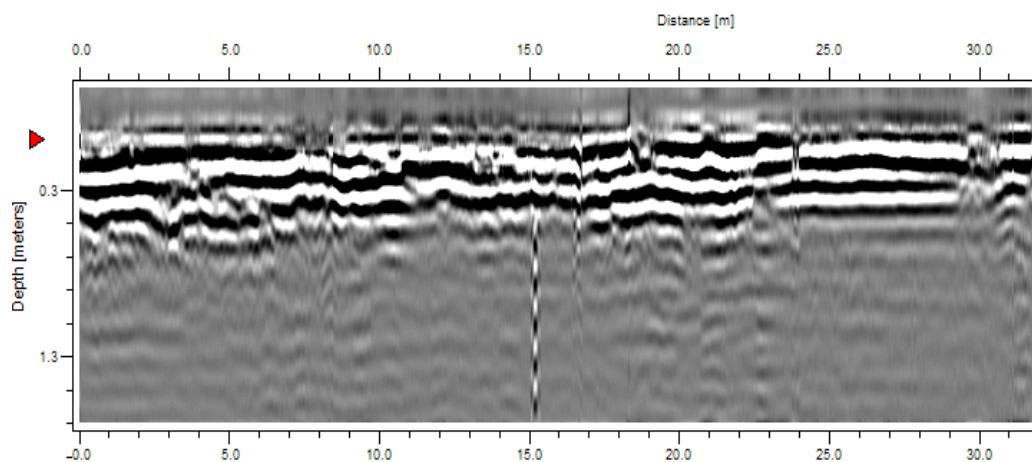


figure 23: exemple d'un radargramme.

Notre objectif principal était de mettre en évidence les structures enfouies avec leur profondeur et leur extension latérales.

Les amplitudes fortement réfléchissantes correspondent à des interfaces soit conductrices soit assez compactes. Les amplitudes faiblement réfléchissantes correspondent à des terrains absorbants le signal. Ces résultats sont organisés selon l'ordre des profils. Les anomalies qui sont mises en évidence sont encerclées dans les radargrammes avec la couleur rouge.

la profondeur d'investigation de l'antenne 500 MHz semble atteindre 1.5 m alors que l'antenne 250 MHz semble atteindre 2m. Or, nous n'avons pas détecté d'anomalie dans les dix premiers profils (longitudinale).

Les radargrammes les plus significatifs sont fournis ci-après.

Pour l'antenne 500 Mhz:

Anomalies A, B, et C:

A, B, et C sont des anomalies qui ont été observées sur les profils 11, 12, et 13 respectivement à la même distance 10 m (voir les figures 24,25, et 26) et à une faible profondeur. Environ de 60cm de profondeur.

Ces anomalies sont dans le même endroit ceci implique que c'est une anomalie continue, en effet la disparition de cette anomalie le long de tout profils 10 et 14, implique que cette anomalie est limitée (entre le profil 11 et 13 presque 8 m).

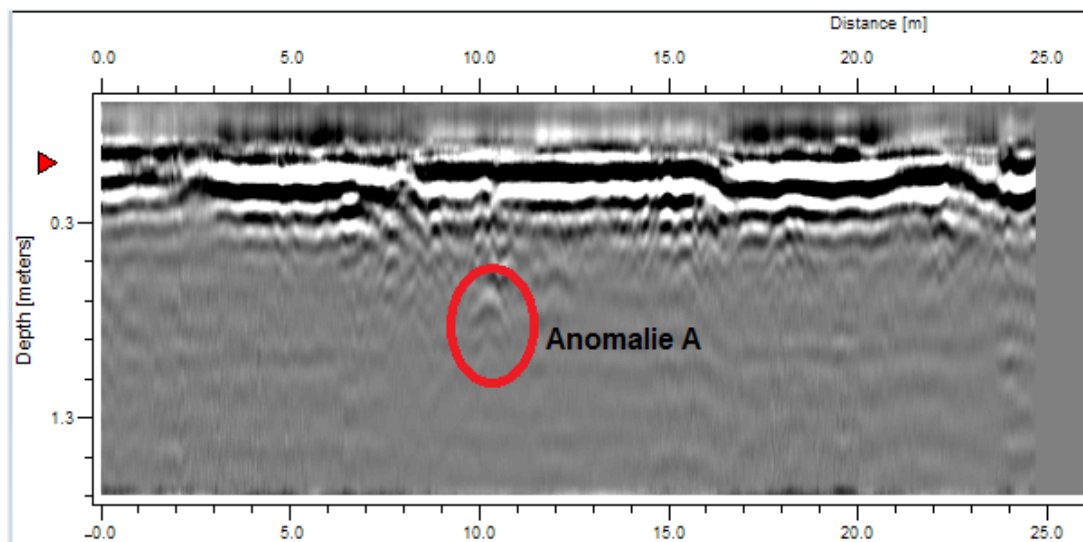


Figure 24: anomalie (A), P11 avec 500 Mhz.

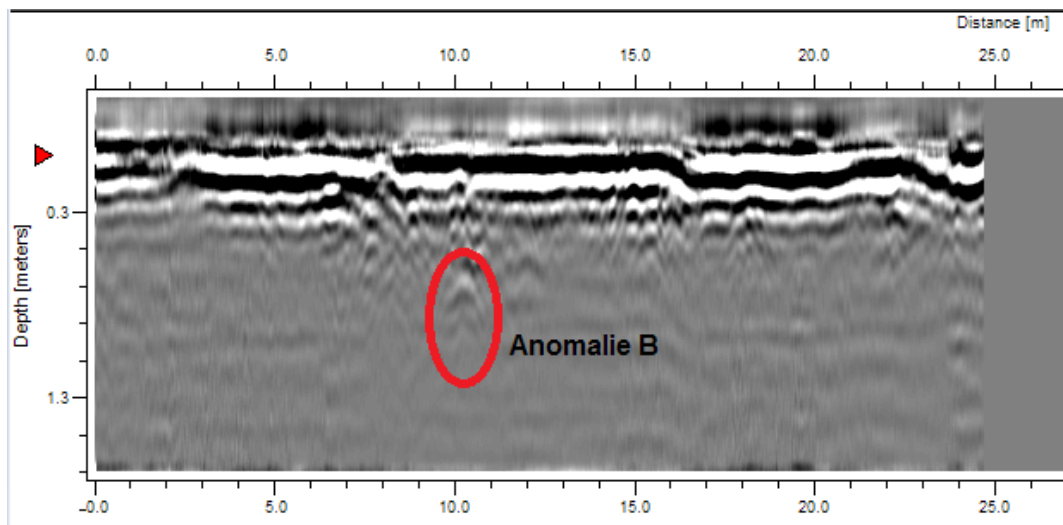


Figure 25: Anomalie (B), Profil 12 avec 500Mhz.

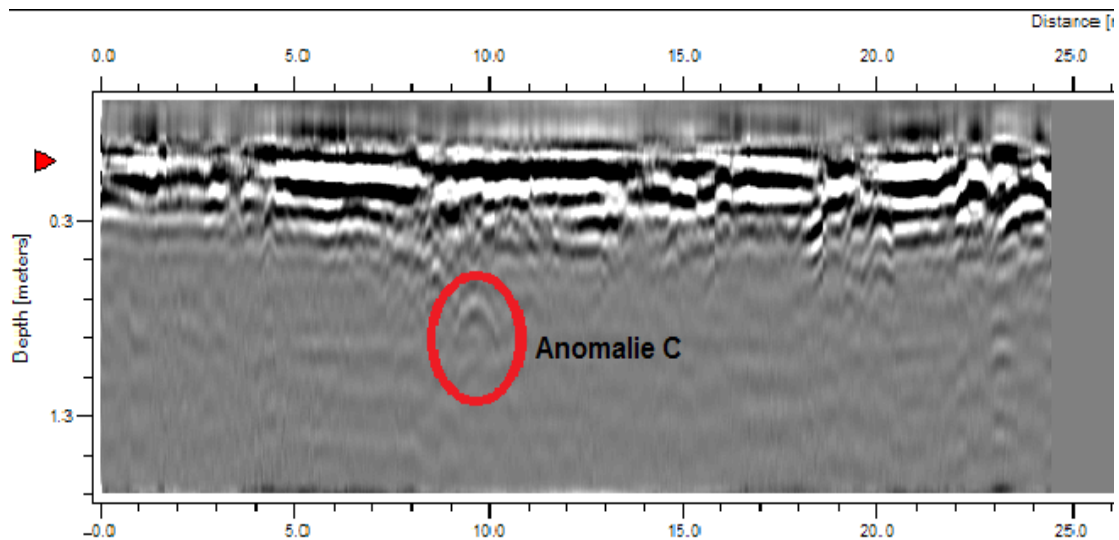


Figure 26: anomalie (C) Profil 13 avec 500 Mhz.

Anomalie D:

Une anomalie superficielle a été observée sur le profil 15 (voir la figure 27). Elle commence aux environs de 30 cm de profondeur. Son extension en profondeur ne peut être prouvée. Le signal en profondeur au-delà de 1,3 m n'est qu'une réverbération. Cette anomalie est très proche d'une trace linéaire en surface qui semble être celle d'un conduit d'électricité (car elle est au voisinage d'un poteau d'électricité).

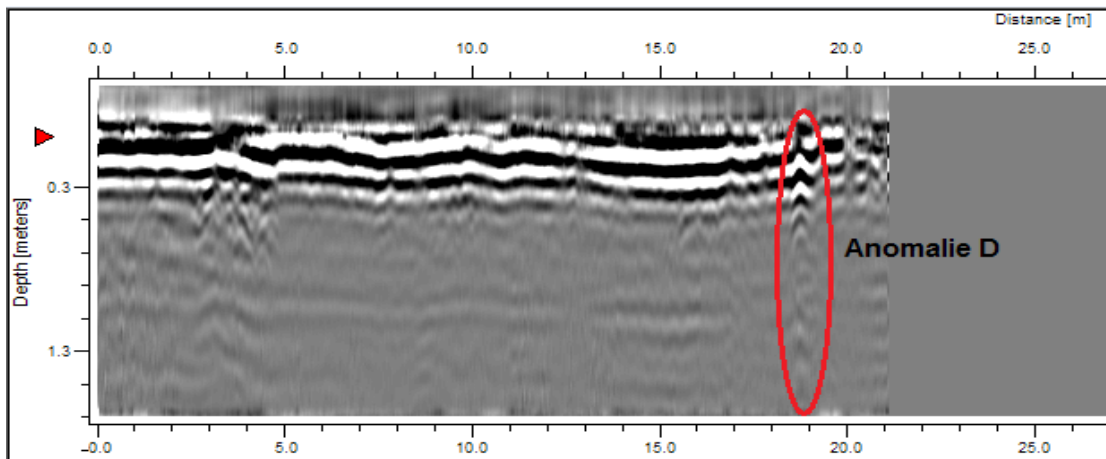


Figure 27: anomalie D, Profil 15 avec 500Mhz.

Pour l'antenne 250 Mhz:

Anomalie E:

Une anomalie a été observée sur le profil Pc (voir la figure 28) à une distance de 6m et de profondeur presque 1m.

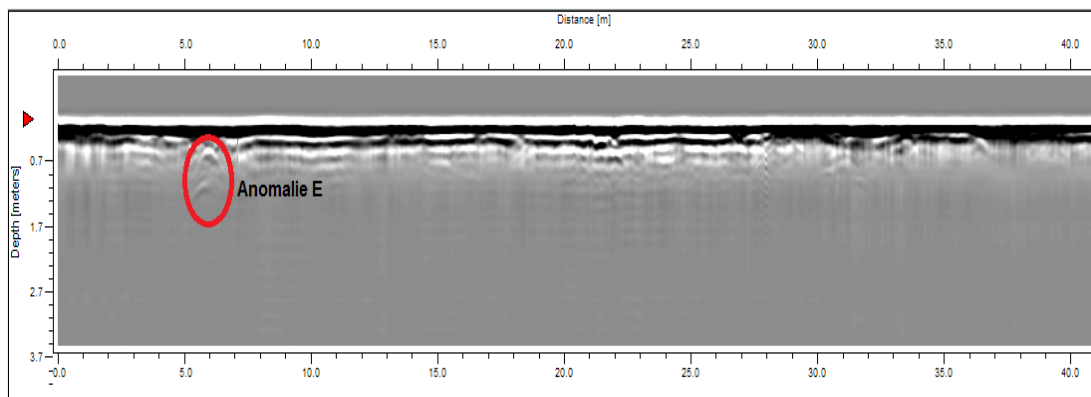


Figure 28: anomalie E, Profil Pc avec 250Mhz.

Anomalies F1 et F2:

F1 et F2 sont des anomalies a été observées sur même profil (Pd) à différente distance l'une à 21 m (F1) et l'autre à 31 m (F2) (voir la figure 29) , presque à la même profondeur . Elles commencent aux environs de 70 cm de profondeur .mais l'anomalie F1 plus claire et importante par rapport a l'anomalie F2.

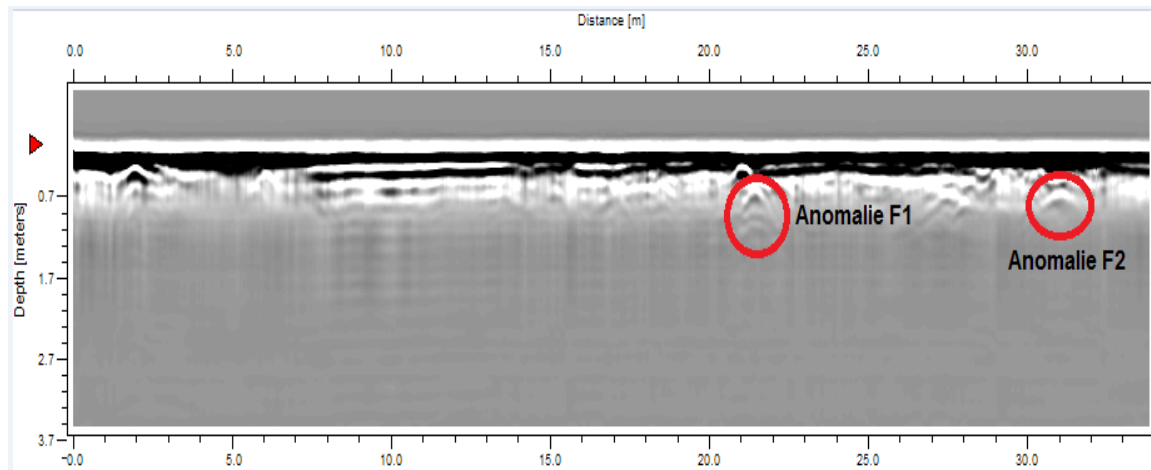


Figure 29: anomalie F, Profil Pd avec 250Mhz.

Anomalie G:

Une anomalie a été observée sur le profil Pf (voir figure 30) à une distance de 32m et de profondeur presque 1m.

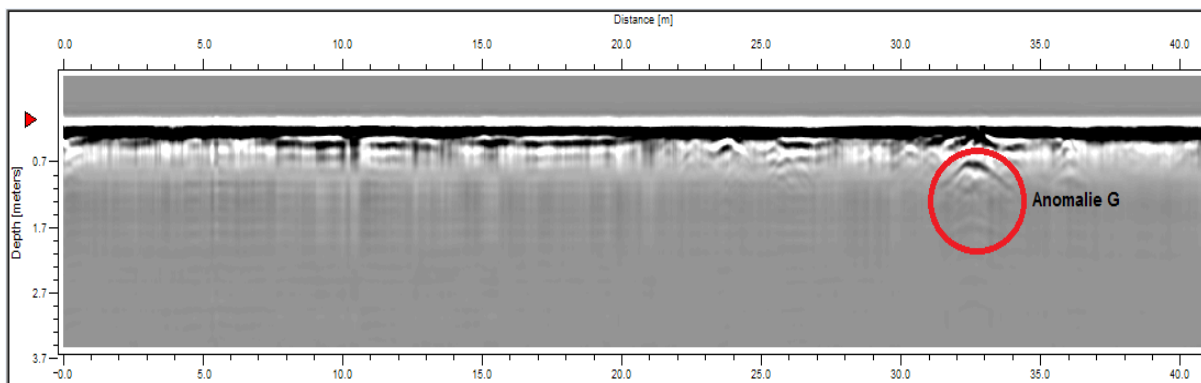


Figure 30: anomalie G, Profil Pf avec 250Mhz.

Anomalie H:

Une anomalie a été observée sur le profil Pd (voir figure 31) à une distance de 32m. Elle commence aux environs de 1m de profondeur. Son extension en profondeur ne peut être prouvée.

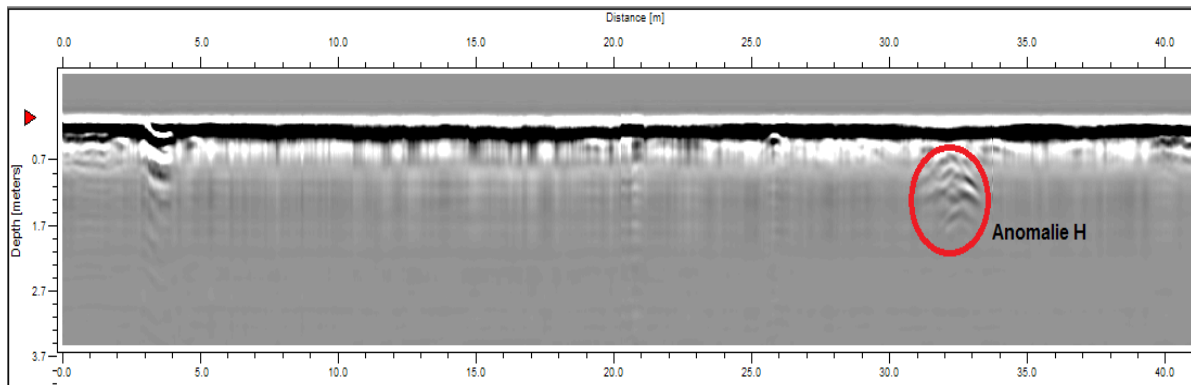


Figure 31: anomalie H, Profil Pg avec 250Mhz.

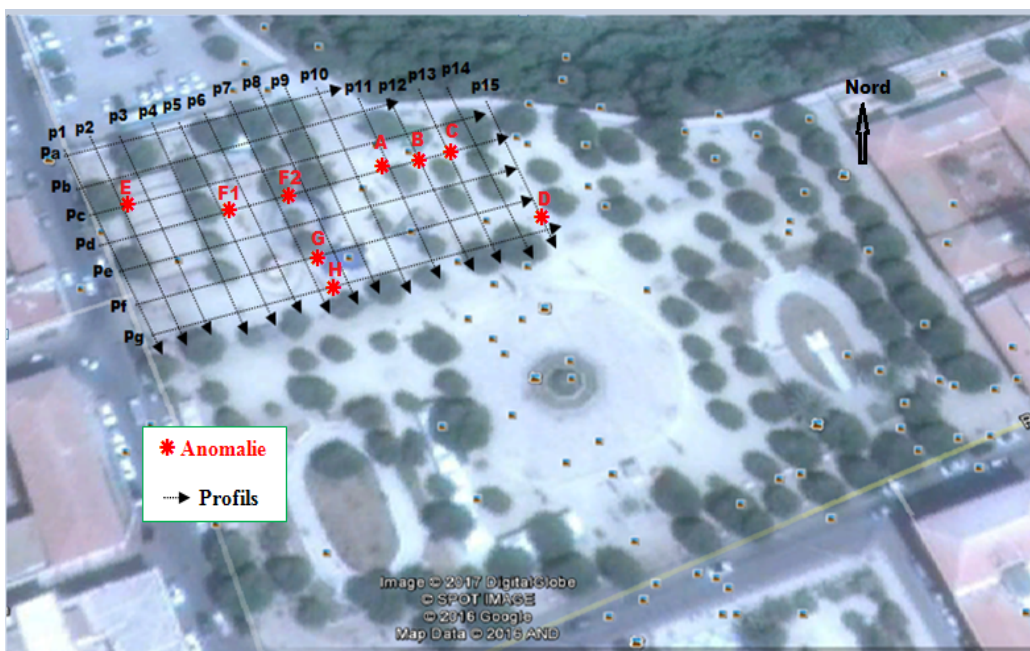


Figure 32: positions schématiques des anomalies observées.

3.3 Discussion

Une prospection GéoRadar avec des antennes de 500, et 250 MHz a été menée sur le site de la placette de Cherchell. Elle a montré que le terrain sur les trois premiers mètres est formé essentiellement de deux couches mais à partir de 2 m il y a une source d'atténuation du signal EM, qui peut être une formation argileuse, ce qui bloqué le passage en profond (2m au maximum).

Après la localisation des anomalies avec leur profondeurs respectives et leur extension latérales, et en les comparant avec le plan de la structure recherchée (figure 31) on peut déduire que:

- L'anomalie continue discuté plus haut (les anomalies A, B, et C) qui est assez clair, peut en fait représenter la partie supérieure de la structure enfouies. Ainsi, les anomalies E, F1 et F2 peuvent être la suite de la même structure.
- les anomalies G et H est un mur situé dans la partie sud-ouest du site d'étude.

On peut ainsi conclure qu'une première délimitation a été réalisée suite à cette campagne de prospection archéologique et probablement il serait nécessaire de renforcer ce premier travail par une autre méthode géophysique qui permettra une meilleure définition et une meilleure résolution pour repérer cette structure historique, pour permettre ainsi aux fouilles archéologiques de déterrer ce monument et le rendre visible comme patrimoine national et international de la civilisation humaine.

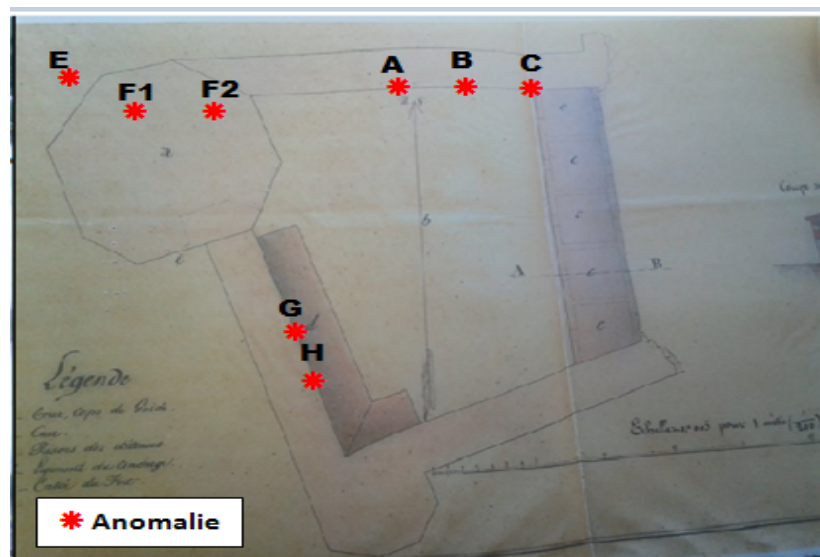


figure 33: positions des anomalies observées sur le plan

conclusion

Le géoradar GPR est un outil de mesure précieux et ses domaines d'utilisations sont multiples (génie civil, exploration spatiale, déminage. . .). Il s'agit d'une méthode particulièrement facile de mise en œuvre et qui est relativement économique. Très mobile, elle est facilement applicable en milieu urbain (bien que l'interprétation puisse être alors plus difficile). Ainsi, Le choix du géoradar demeure un choix important mais il peut être difficile à effectuer selon la situation et l'emplacement. De plus, comme les caractéristiques techniques varient d'un radar à un autre il est important d'avoir une idée sur la profondeur maximale d'investigation, la résolution et sur le type d'antennes dont le dispositif est équipée.

La présente étude peut être considérée comme une étude pilote de sites archéologiques. En effet, Il s'agit de mettre en évidence les signaux géophysiques des structures archéologiques. La nature des terrains ainsi que le choix des saisons jouent un rôle important et conditionnent le choix des méthodes géophysiques à appliquer.

Dans notre étude, une seule méthode géophysique a été utilisée: le géoradar est la méthode que nous avons utilisée sur le site de la placette. Il est prévu que ce travail de prospection soit renforcé par une autre campagne de prospection de tomographie électrique afin de contraster les résultats pour obtenir une meilleure reproduction du site archéologique enfoui.

Le géoradar quant à lui ne nous a permis de voir que les anomalies superficielles, de l'ordre de 3 mètre de profondeur au maximum. Cela est certainement dû à la haute conductivité des argiles et à une forte permittivité diélectrique.

Bibliographie

- [1] **Rafael Perez**, « Contribution à l'analyse théorique et expérimentale de radargrammes GPR. Performances des antennes : apports d'une configuration multistatique », thèse de doctorat, université de Limoges, 10 octobre 2005.
- [2] **Jean-François Girard**, « Imagerie géoradar et modélisation des diffractions multiples » thèse de doctorat, université Louis Pasteur–Strasbourg 1, 18 décembre 2002.
- [3] **Antonios Giannopoulos**, « The investigation of transmission-line matrix and finite-difference time-domain methods for the forward problem of ground probing radar », thèse de doctorat, université de York, Island, mars 1997.
- [4] **Tillard S.**, "Evaluation des performances de la technique radar en prospection géophysique", Thèse, Université de Strasbourg, (1991).
- [5] **Mari J-L.**, Arens G., Chapellier D., Gaudiani P., "Géophysique de Gisement et de Génie civil", Editions Technip, (1998).
- [6] **le manuel et les documents du GPR MALA:** MalaGrandvision Software, Mala ProEx System, Mala shielded Antennas.