

Partie3: Méthode du Géoradar

1 Introduction, Le radar géologique ou géoradar (GPR Ground Penetrating Radar) est une technique géophysique non destructive fondée sur l'analyse des phénomènes de propagation (réfraction, réflexion et diffraction) des ondes électromagnétiques de hautes fréquences (10 MHz à 2 GHz) dans le sous-sol. Un signal est envoyé dans le sous-sol et les ondes réfléchies sont mesurées par un système d'acquisition. Les échos successifs sont associés aux contrastes de permittivités ou de conductivités rencontrés par les ondes électromagnétiques au cours de leur propagation, qui témoignent de la stratifications du sous-sol. C'est le déplacement du radar à la surface qui permet d'acquérir des traces (coupes radar) sur une fenêtre temporelle et de former des radargrammes. Cette technique permet de connaître la géométrie du sous-sol et la détection d'objets enfouis avec une bonne résolution. Elle peut être utilisée avec des fréquences allant de 40 à 1500 MHz permettant des profondeurs de pénétration de plusieurs dizaines de mètres à quelques centimètres. On distingue les applications visant à détecter des objets ou des anomalies de celles ayant pour objectif la détermination des propriétés intrinsèques du sous-sol, en géologie, hydrologie, environnement, prospection minière, néotectonique, archéologie, génie civil...etc.

| Fréquence (MHz) | Profondeur (m) | Applications |
|-----------------|----------------|--|
| 40 | 15-20 | Géologie |
| 70 | 10-15 | Géologie, géotechnique |
| 400 | 0-5 | Génie Civil, réseaux enterrés, Archéologie |
| 900 | 0-1 | Chaussée, structures en béton |
| 1500 | 0-0,3 | Chaussée, structures en béton |

Tableau 1: Quelques ordres de grandeur par type d'application

2. Paramètres électromagnétiques, Les ondes électromagnétiques sont composées de champs électriques et magnétiques qui se propagent dans l'espace et le temps. Elles sont caractérisées par leur fréquence, qui est mesurée par le nombre de cycles par seconde (Hertz) des champs électriques et magnétiques. Elles sont régies par les équations de Maxwell qui utilisent trois paramètres : la perméabilité magnétique, la permittivité diélectrique et la conductivité électrique.

2.1 Perméabilité magnétique (μ), elle correspond à l'énergie stockée ou perdue dans le matériau suite aux phénomènes d'induction magnétique. C'est la capacité d'un milieu à se magnétiser sous l'effet d'un champ EM. La relation entre l'induction magnétique B et le champ magnétique H s'écrit :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

avec $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Henry/m , la perméabilité magnétique du vide.

2.2 Permittivité diélectrique, elle rend compte du pouvoir de polarisation d'un matériau sous l'influence d'un champ électrique, ce qui provoque le déplacement relatif de charges liées positives et négatives (Lutz, 2002). Alors que la résistivité peut être considérée comme constante sur toute la gamme de fréquences que l'on est amené à utiliser en prospection (0-1 GHz), la caractéristique principale de la permittivité est sa variation avec la fréquence. Deux phénomènes doivent être considérés : la rotation de la molécule d'eau et l'effet Maxwell-Wagner. La molécule d'eau étant une molécule polaire, les molécules d'eau libre vont s'aligner sur tout champ électrique appliqué selon un phénomène de relaxation :

$$\varepsilon_r(t) = \varepsilon_{rot}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

τ est la constante de temps caractérisant la vitesse à laquelle se réalise cet alignement. Dans le domaine fréquentiel la formule précédente correspond à :

$$\varepsilon_r(\omega) = \frac{\varepsilon_{rot}}{1 + i\omega\tau}$$

où ω est la pulsation. Cette rotation va se produire sur toute la gamme de fréquences considérée et donner à l'eau une permittivité relative très élevée ($\varepsilon_r = 81$), bien supérieure à celle de la fraction solide (2-5). La teneur en eau est déterminée avec des mesures Radar. Pour les fréquences inférieures à 1 MHz, il peut se produire l'effet Maxwell-Wagner, lorsque des ions se déplaçant sous l'effet d'un champ électrique se trouvent bloqués sur les parois des pores ou en bordure des plaquettes d'argile. Ces blocages vont créer une polarisation du milieu et faire intervenir des temps de relaxation variés dépendant du parcours des ions (taille des pores). Il en résulte une croissance de la permittivité alors que la fréquence décroît (1000 à quelques centaines de Hz dans les argiles). La permittivité relative est proportionnelle à la conductivité électrique, et le coefficient de proportionnalité dépend de l'organisation des pores.

- **Loi de Wyllie** est une méthode empirique pour estimer ε_e d'un matériaux en utilisant la porosité, elle s'écrit :

$$\sqrt{\varepsilon_e} = (1 - \phi)\sqrt{\varepsilon_m} + \phi\sqrt{\varepsilon_f}$$

ε_e est la permittivité du matériaux, ϕ est la porosité, ε_s est la permittivité de la matrice solide et ε_f est la permittivité du fluide.

- **Relation empirique de Topp**, elle permet de déterminer la teneur en eau volumique θ d'un sol à partir de ε_e :

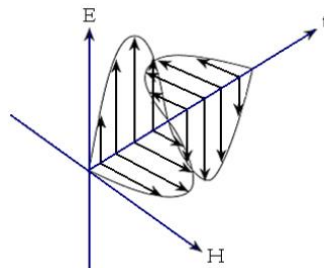
| Porosity (%) | Theory ϵ_r | Topp ϵ_r |
|--------------|---------------------|-------------------|
| 0 | 3.5 | 3.5 |
| 20 | 10.0 | 10.0 |
| 40 | 18.0 | 22.0 |
| 60 | 35.0 | 45.0 |
| 80 | 55.0 | 65.0 |
| 100 | 82.0 | 82.0 |

2.3 *Conductivité électrique* (σ), elle décrit le flux de charges électriques pendant le passage d'une onde électromagnétique et peut affecter la perte d'énergie ou l'atténuation du signal électromagnétique. C'est la Capacité d'un milieu à conduire un courant électrique sous l'effet d'un champ EM.

| Matériau | ϵ'_r [sans dimension] | σ [mS/m] | v [m/ns] | α_{db} [dB/m] |
|---------------|--------------------------------|-----------------|------------|----------------------|
| Air | 1 | 0 | 0.3 | 0 |
| Eau distillée | 80 | 0.01 | 0.033 | 0.002 |
| Eau douce | 80 | 0.5 | 0.033 | 0.11 |
| Eau de mer | 80 | $3 \cdot 10^4$ | 0.01 | 1000 |
| Sable sec | 3-5 | 0.01 | 0.15 | 0.01 |
| Sable saturé | 20-30 | 0.1-1 | 0.06 | 0.03-0.3 |
| Silt | 5-30 | 1-100 | 0.07 | 1-100 |
| Argile | 5-40 | 2-1000 | 0.06 | 1-300 |
| Calcaire | 4-8 | 0.5-2 | 0.12 | 0.4-1 |
| Schiste | 5-15 | 1-100 | 0.09 | 1-100 |
| Granite | 6 | 0.01-1 | 0.13 | 0.01-1 |
| Sel sec | 5-6 | 0.01-1 | 0.125 | 0.01-1 |
| Glace | 3-4 | 0.01 | 0.168 | 0.02 |

3. Equations de Maxwell, La propagation des ondes EM dans le vide est décrite par les équations de Maxwell :

où E est le champ électrique en V/m , H est le champ magnétique en A/m , D est l'induction électrique en $Coulomb/m^2$, B est l'induction magnétique en $Weber/m^2$, J_e est la densité de courant électrique en A/m^2 , J_m est la densité de courant magnétique en $Volt/m^2$, q_v est la densité volumique de charges libres en $Coulomb/m^3$ et t le temps en seconde. Ces équations décrivent les relations entre E et H qui sont dans le plan d'onde, perpendiculaires entre eux et à la direction de propagation.



2

Ces équations sont couplées et ne peuvent être découplées qu'au détriment d'élever leur ordre en obtenant une équation aux dérivées partielles d'ordre 2, appelée l'équation des ondes. En considérant un milieu homogène et isotrope, sans charges libres et amagnétique, les lois de propagation de l'onde s'écrivent:

$$\Delta \vec{E} - \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu_0 \epsilon^* \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \vec{0}$$

$$\Delta \vec{H} - \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu_0 \epsilon^* \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = \vec{0}.$$

2 Principe et mise en œuvre, Le système d'acquisition est contrôlé par une unité centrale permettant l'affichage des images générées lors du déplacement de l'antenne. Un profil vertical est généré en continu. Les géoradars sont composés :

- 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 et une antenne réceptrice.

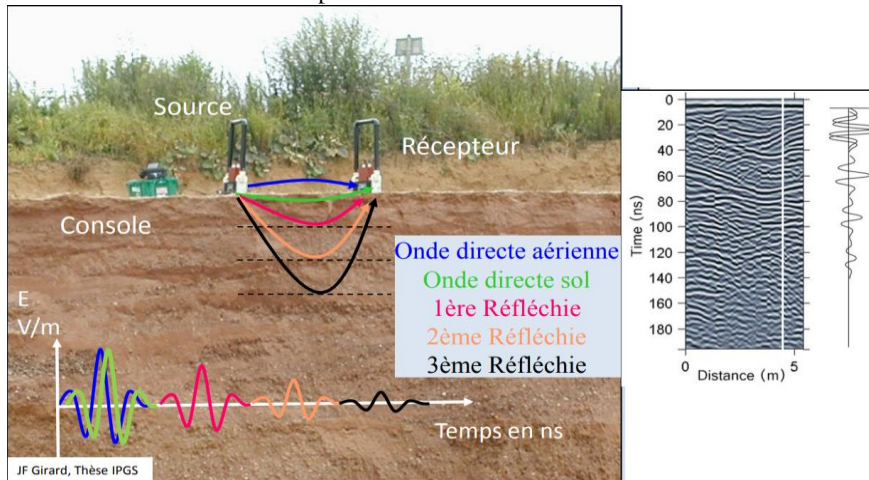


Figure 3 : Principe du géoradar

Les radars impulsionnels génèrent des signaux large bande, de durée très courte (nanoseconde). Ce signal est obtenu en générant un courant bref aux bornes de l'antenne d'émission. En outre, les radars à ondes synthétiques génèrent des signaux de longue durée, de forme sinusoïdale. La fréquence de ce signal est modifiée en fonction du temps. L'antenne émettrice/réceptrice est déplacée en ligne droite et sa fréquence (longueur d'onde λ) conditionne la profondeur d'investigation ainsi que la résolution horizontale et verticale. Une antenne basse fréquence (<100 MHz) permettra une profondeur de plusieurs mètres mais ne pourra détecter que des objets de plusieurs décimètres. A l'opposé, au delà de 1 GHz, on perd en pénétration (< 1 m) mais la résolution horizontale atteint $\lambda/2$, soit environ 5 cm dans le béton. La résolution verticale est meilleure ($\lambda/4$ à $\lambda/8$). Les basses fréquences sont adaptées aux milieux géologiques, alors que les hautes fréquences conviendront à l'auscultation des ouvrages d'art.

3. Modes d'acquisition

3.1 Modes réflexion, On distingue les profils réflexion à offset (distance émetteur/récepteur) constant et variable. Dans le premier cas, les deux antennes sont déplacées d'un même pas d'avancement sur la ligne de mesure. Le radargramme est obtenu en juxtaposant les différentes traces enregistrées. Différentes ondes sont alors identifiables : l'onde directe aérienne, l'onde directe souterraine, les ondes réfléchies et les ondes diffractées. L'analyse des temps d'arrivée des ondes réfléchies et diffractées permet l'interprétation structurale des discontinuités du milieu.

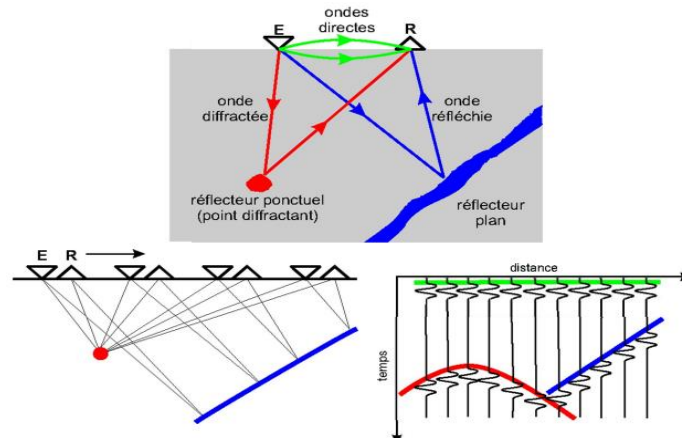


Figure 4 : Mode réflexion à offset (distance émetteur/récepteur) constant

3.2 Mode transmission, Les profils en transmission ont pour objectif l'enregistrement d'ondes directes propagées dans la roche. En utilisant des dispositifs de forage, ces acquisitions sont réalisées en positionnant les sondes dans deux puits. Il est possible d'interpréter le profil pour calculer une vitesse de propagation ou pour évaluer l'effet de la propagation sur le signal.

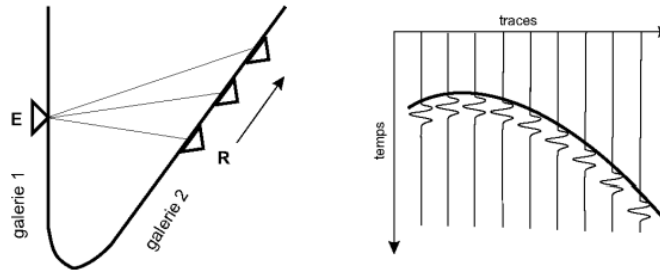


Figure 5 : Mode transmission

4. Champs d'ondes enregistrées:

- **Onde directe:** elle se propage dans la surface du sol. Le temps de propagation $t = x/V_1$ avec x l'offset est la distance entre l'antenne d'émission et celle de réception.
- **Onde aérienne;** elle se propage dans l'air avec une vitesse de 0.3 m/ns ($1\text{ns}=10^{-9}\text{s}$)
- **Ondes réfléchies,** lorsque l'onde EM atteint une interface séparant deux milieux de différentes constantes diélectriques, une partie de son énergie se réfléchit. Son temps de parcours s'écrit:

$$t = \frac{1}{V_1} \sqrt{x^2 + 4H^2}$$

- **Ondes latérales;** L'onde incidente se réfléchit sur l'interface, lorsque elle atteint la surface de séparation entre le milieu I et l'air, elle subit une réfraction critique. Elle tombe sur cette surface de séparation avec un angle i_c et glisse le long de cette discontinuité avec une vitesse C .

$$i_c = \arcsin \frac{V_1}{C}$$

L'antenne de mesure captera le signal de l'onde réfractée à un temps t :

$$t = \frac{x}{C} + 2H \sqrt{\frac{1}{C^2} - \frac{1}{V_1^2}}$$

- **Ondes multiples réfléchies;** ce sont des ondes ayant subies des réflexions multiples dues à de forts contrastes d'impédance et peuvent masquer les réflexions simples.

- **Ondes réfractées,** elles traversent le milieu I avec V_1 et glisse le long de l'interface à la vitesse V_2 et se réfracte vers le haut avec V_1 en mettant le temps calculé comme suit :

$$t = \frac{x}{V_1} + 2H \sqrt{\frac{1}{V_2^2} - \frac{1}{V_1^2}}$$

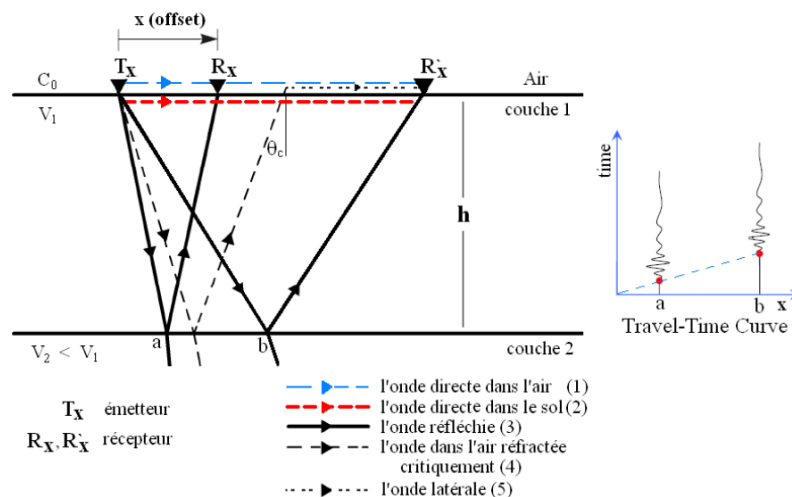


Figure 6 Représentation de la transmission des ondes. La vitesse du second milieu V_2 est inférieure à celle du milieu supérieure V_1 . La courbe des temps de parcours montre que le temps d'arrivée de l'onde au point a est inférieur à celui au point b .

- **Trace géoradar:** L'amplitude d'une réflexion est proportionnelle au coefficient de réflexion qui exprime un contraste d'impédance électromagnétique Z de deux terrains. La trace géoradar $S(t)$ est réalisée en convoluant la série des coefficients de réflexion $R(t)$ par le signal émis $W(t)$:

$$S(t) = W(t) * R(t) + B(t)$$

$B(t)$ est un bruit additif. La convolution correspond à une multiplication des spectres d'amplitude et une addition des spectres de phase.

5. Traitement des données GPR, L'acquisition des données est entachée de bruits, un traitement est essentiel pour améliorer le rapport signal sur bruit. Le radargramme obtenu passe par les étapes suivantes :

- *Correction topographique*, elle permet de localiser t_0 de l'enregistrement. La correction statique est une correction de temps due aux différences d'altimétrie et la variation des vitesses dans la couche supérieure. Elles introduisent des retards sur les temps d'arrivées des ondes réfléchies.
- *Filtrage séquentiel*, il permet de supprimer le bruit et d'augmenter la visibilité des signaux faibles. On applique un filtre linéaire passe bande qui permet d'éliminer dans la partie du radargramme où les hautes fréquences sont affectées par les bruits. Par ailleurs, le filtrage passe haut laisse passer les hautes fréquences et atténue les basses fréquences.
- *Application d'un gain*, pour compenser l'effet de l'atténuation géométrique, on y applique un gain linéaire en fonction de la profondeur.
- *Amplification du signal GPR*, elle sert à multiplier chaque trace géoradar par une fonction de gain G . La courbe de gain correspond à l'inverse de la courbe des amplitudes moyennes.
- *Analyse des vitesses*, la permittivité diélectrique affecte la vitesse de propagation et l'amplitude des ondes EM alors que la conductivité affecte le facteur de damping (atténuation).
- *Corrections dynamiques (NMO)*, elles permettent de compenser l'effet d'obliquité des trajets des ondes réfléchies. Pour y parvenir, il faut connaître la courbure de l'indicatrice ce qui amène à faire intervenir la vitesse de propagation.
- *Migration partiel (DMO)*, C'est une opération qui remet aux réflexions de la couverture multiple leur emplacement réel. Lorsque la couche est inclinée, la correction de pendage est nécessaire pour compenser l'effet de ce pendage.

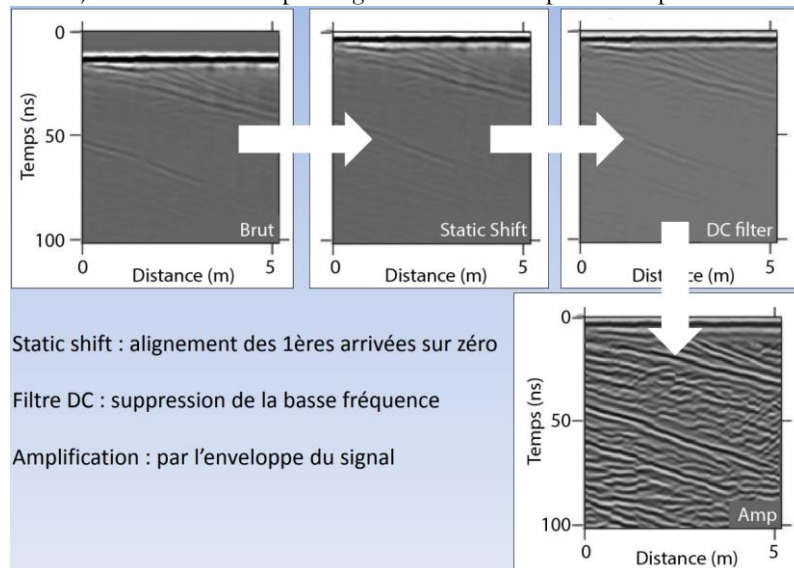


Figure 8 : Traitement des enregistrements GPR

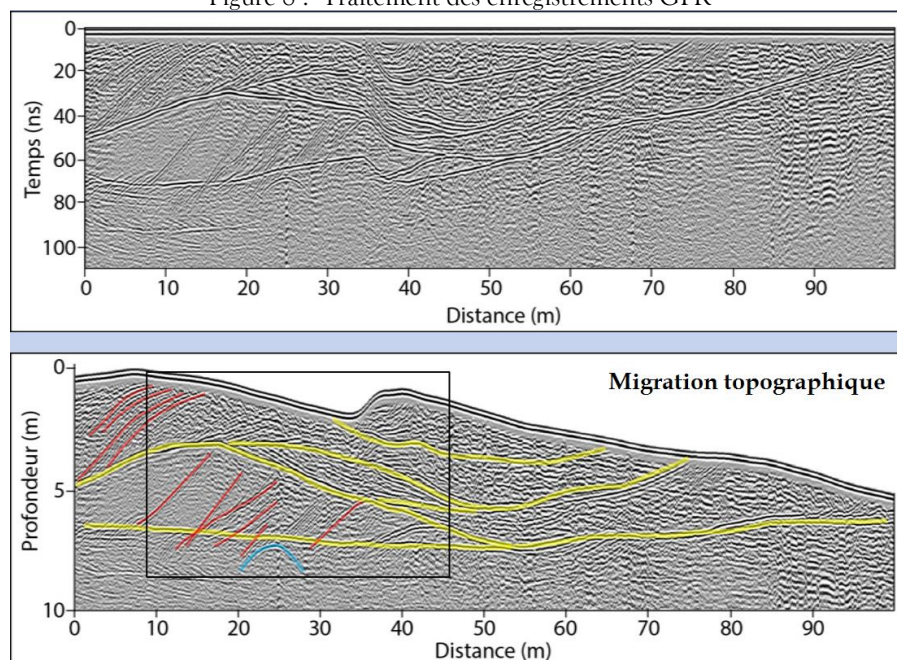
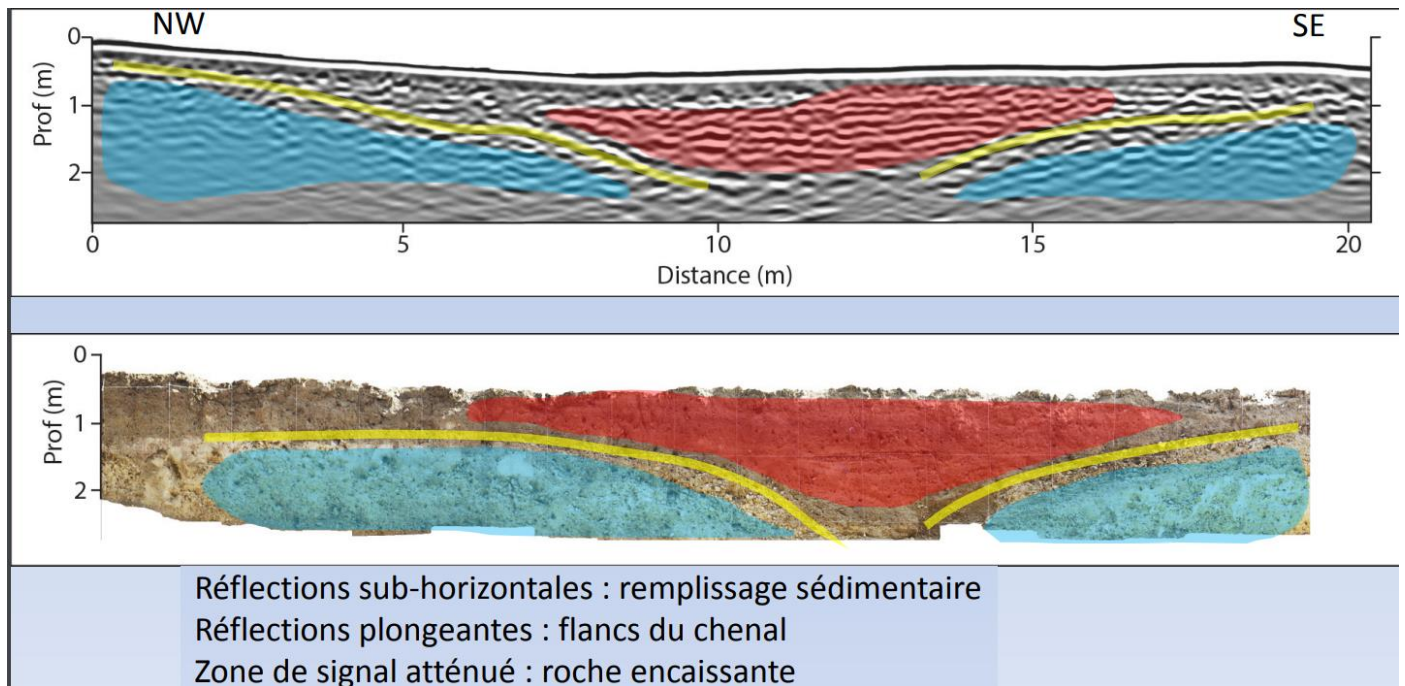


Figure 9 : Exemple de migration topographique dans un profil GPR

5. Quelques exemples d'application

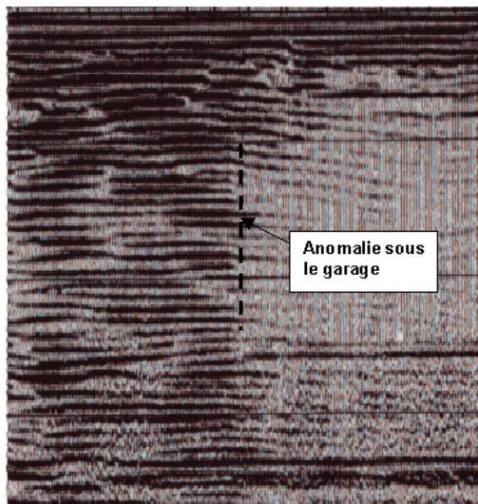
5.1 Etude paléosismologique en Mongolie (Dujardin, année!)



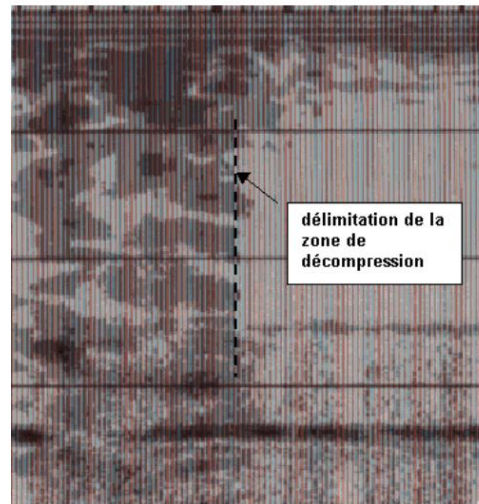
- Présence de vides

*Vide dans une craie entre 6 et 14 m de profondeur
(ancienne carrière souterraine de grande hauteur)*

Le même signal filtré par traitement numérique ; la silhouette de la paroi verticale délimitant la cavité apparaît clairement



signal brut - zone décomprimée sous un garage

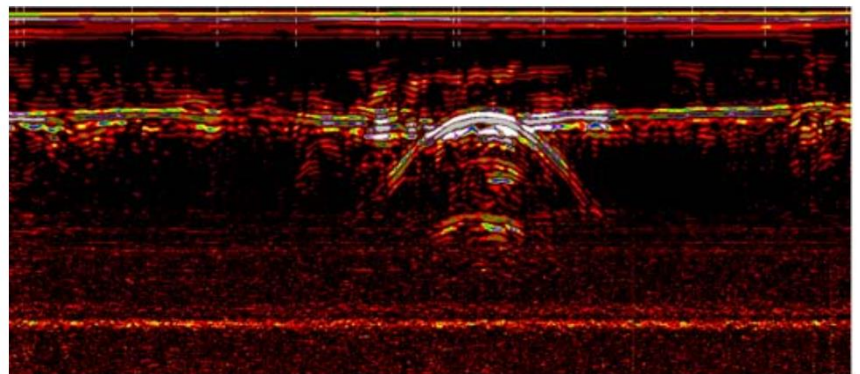


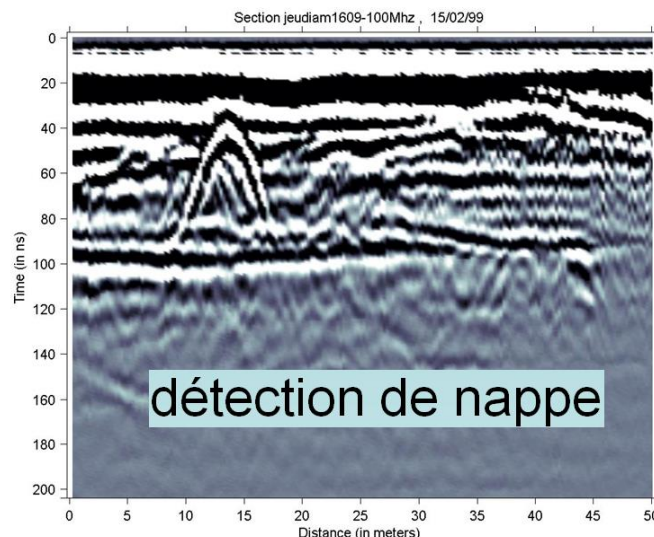
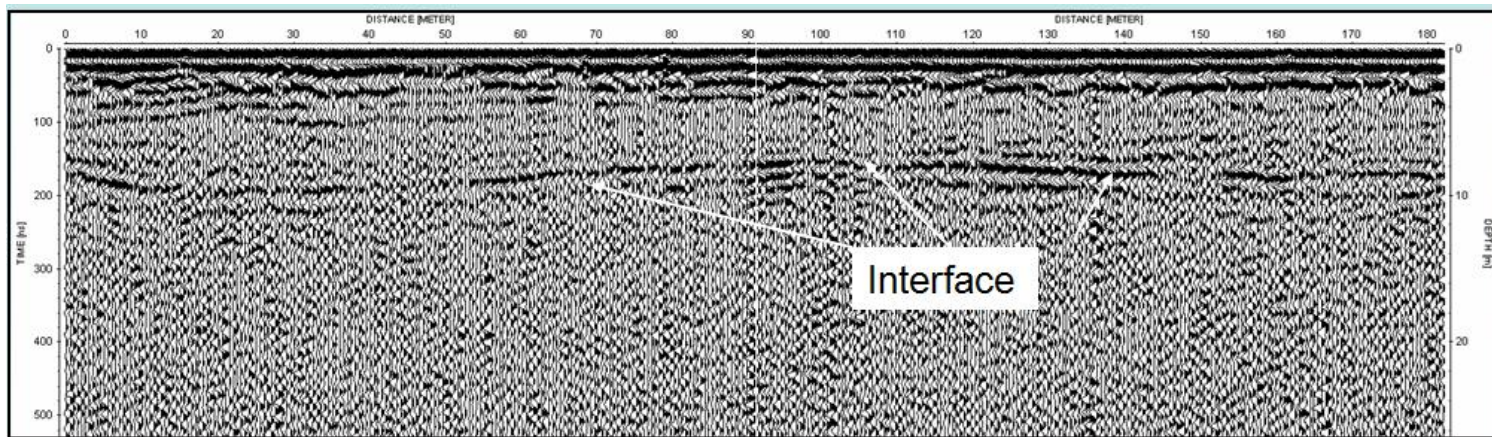
signal filtré

*Conduite de 600 mm en acier
à 1 m de profondeur, et
nappe à 3 m de profondeur*

0m

-3,5m





6. Limites du géoradar :

- *Profondeur de pénétration* est déterminée par la fréquence de l'antenne et les propriétés intrinsèques du sol. Les antennes à basse fréquence (80 MHz) peuvent pénétrer jusqu'à 40 m mais offrent une résolution plus faible. Les antennes à haute fréquence (100 MHz) ont une portée plus limitée mais offrent une résolution supérieure.

- *Type de sol et teneur en humidité*, Les matériaux très conducteurs, comme les sols riches en argile ou salins, absorbent l'énergie des ondes émises par le géoradar, ce qui réduit la profondeur de pénétration et la précision des images. Par contre, les sols secs, sableux ou rocheux permettent aux signaux de se propager plus loin et de produire des images plus claires. Si un peu d'humidité peut améliorer la clarté du signal dans les sols secs, la saturation en eau entraîne une perte de signal.

- *Dimensions de la cible et limites de résolution*, le géoradar peut détecter des objets dont le diamètre représente au moins 10 % de la profondeur à laquelle ils sont enterrés. Pour détecter un tuyau de 10 cm, celui-ci ne doit être enterré à 1m.

- *Conditions de surface et interférences*, L'état et la composition de la surface peuvent limiter les capacités du géoradar. Le béton armé avec des barres d'armature peut disperser les ondes radar. De même, les surfaces inégales, la végétation dense, le gravier compacté ou les terrains rocheux peuvent introduire du bruit ou même bloquer le signal. L'asphalte est plus facile à étudier, tandis que les pavés, les dalles et le gazon humide peuvent nuire aux performances.

Références

Djeddi M- Cours de géoradar ou radar géologique, <https://fr.scribd.com/document/251662892/GEORADAR-Ground-Penetrating-Radar-Radar-Geologique>
<https://www.mcours.net/cours/pdf/hascl1/hasssbcla990.pdf>