

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عنابة
Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana
Faculté des sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre
Département des sciences de la terre



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention de diplôme de **Master** en

Domaine: science de la terre et de l'univers

Filière: Géologie

Spécialité: Géologie de l'ingénieur et géotechnique

Caractérisation d'un sous-sol par méthode géoradar (GPR), Application pour le cas de la ville d'Alger.

Présenté par:

- *KARA Messaouda*
- *BOUZAR Sara*

Devant le jury :

Mr Bouderbala Abdelkader	MCA	Président	(U.D.B Khemis Miliana)
Mr Brahmi Ghanem	MAA	Promoteur	(U.D.B Khemis Miliana)
M ^{me} Hadjmohamed Nacera	MAA	Examinatrice	(U.D.B Khemis Miliana)

Année universitaire : 2020/2021

Dédicace

A Mes chers parents

Pour leurs efforts et leurs sacrifices durant toute

Ma vie, leurs encouragements et soutiens Pour persévérer jusqu'à l'aboutissement de ce
Travail. Qu'ils retrouvent, dans ce
Travail, L'expression de ma
Reconnaissance

A Mes chers frères et sœurs

A mes chers Amis

En souvenir de nos éclats de rire et des Bons moments, en souvenir de tout ce qu'on a vécu
ensemble, j'espère de tout mon cœur
Que notre amitié durera éternellement.

Remerciements

Au terme de ce travail, On tient à remercier **Dieu** le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour achever ce travail.

Nous avons l'honneur et le plaisir de présenter notre profonde gratitude ainsi que nos

Sincères Remerciements à Notre encadreur **Mr BRAHMI GHANEM**, pour sa précieuse aide, ces orientations et le temps qu'i Inous'a accordé afin de mener à bien le travail de ce mémoire.

On voudrait exprimer nos remerciements les plus sincères à Mr **BOUDERBALA**, qui nous a fait l'honneur de présider ce jury et merci pour ses précieuses recommandations.

Nous tenons à remercier Mme **HADJ MOHAMED**, qui nous a fait l'honneur de juger ce mémoire. Qu'elle Trouve ici l'expression de nos sincères remerciements.

Nos remerciements s'adressent également à tous le corps enseignants du département sciences de la terre, de la faculté SNV.

Nos remerciements vont aussi à tous ceux qui nous ont aidés et encouragées de près ou de loin.

Résumé

Les problèmes qui se posent en géotechnique sont divers, la spécificité de ces problèmes c'est qu'ils se situent en général dans les cents premières mètres du sous-sol. Cette sub-surface est caractérisée par une grande hétérogénéité. La caractérisation de ces sols par les méthodes géotechniques traditionnelles est cependant rendue très difficile. Les méthodes géophysiques appliquées intégrant des informations sur un volume de sol important apparaissent comme une alternative aux essais géotechniques in-situ. L'objectif de cette étude est la caractérisation du sous-sol (cavités, fissurations, discontinuités) par la méthode géoradar, qui est une méthode de prospection géophysique fondée sur l'analyse de la propagation, de la diffraction et de la réflexion des ondes électromagnétiques hautes fréquence, c'est une méthode rapide et facile à mettre en œuvre et largement appliquée dans divers domaines, entre autres la géotechnique.

Mots clé : méthodes géophysiques, géoradar, cavité, ondes électromagnétiques.

Abstract:

The problems that arise in very diverse geotechnics, the specificity of these problems is that they are generally located in the first hundred meters of the subsoil. This sub-surface is characterized by great heterogeneity. The characterization of these soils by traditional geotechnical methods is however made very difficult. Applied geophysical methods integrating information on a large volume of soil appear to be an alternative to in-situ geotechnical tests. The objective of this study is characterization of the subsoil (cavities, cracks, discontinuities). By the ground penetrating radar method, it is a method of geophysical prospecting based on the analysis of the propagation, diffraction and reflection of electromagnetic waves; it is a quick and easy method to implement.

Keywords: Applied geophysical methods, radar, cavity, electromagnetic waves.

ملخص: المشاكل التي تنشأ في المجال الجيوتقني متنوعة للغاية، وخصوصية هذه المشاكل هي أنها تقع بشكل عام في المائة متر الأولى من باطن الأرض. يتميز هذا السطح السفلي بعدم التجانس الكبير. ومع ذلك، فإن تبيين خصائص هذه التربة بالطرق الجيوتقنية التقليدية أصبح صعباً للغاية. يبدو أن الطرق الجيوفيزيائية التطبيقية التي تدمج المعلومات على حجم كبير من التربة هي بديل للاختبارات الجيوتقنية في الموقع. الهدف من هذه الدراسة هو تبيين خصائص باطن الأرض (تجاويف، شقوق، انقطاع). من خلال طريقة رادار الاختراق الأرضي، فهي طريقة للتنقيب الجيوفيزيائي تعتمد على تحليل انتشار وانعكاس الموجات الكهرومغناطيسية، وهي طريقة سريعة وسهلة التنفيذ.

الكلمات المفتاحية: الطرق الجيوفيزيائية التطبيقية، رادار، تجويف، الموجات الكهرومغناطيسية

Liste des figures

Figure I.1 : Géophone à gauche, ordinateur et enregistreur à droite

Figure I.2 : principe de la méthode sismique

Figure I.3 : Schéma de principe de la sismique Réfraction

Figure I.04 : Principe de la prospection électrique

Figure I.05 : présente plusieurs dispositifs de mesure différents et leur facteur géométrique associé

Figure I. 06 : Sondage électrique au-dessus d'un terrain à stratification horizontale

Figure I.07 : Principe de trainée électrique ; cas de Wenner

Figure I.08 : Variations des résistivités apparentes avec la profondeur

Figure I.09 : Principe du panneau électrique et exemple de résultats.

Figure I.10 : Schéma de principe de la méthode

Figure I.11 : Le champ magnétique terrestre

Figure II.1: Ondes électromagnétiques en fonction de leurs fréquences et leur utilisation dans la vie courante

Figure II.2: Schéma représentant les phénomènes de réflexion et de transmission

Figure II-3 : Influence des différentes polarisations en fonction de la fréquence

Figure II.4 : Parties réelle et imaginaire de la permittivité

Figure II.6 : Comparaison du fonctionnement d'une antenne de contact (a) et d'une antenne aérienne (b)

Figure II.7 : Influence du type d'antenne (aérienne (a) ou de contact (b)) sur la visualisation d'interfaces rugueuses

Figure II.8 : principe de fonctionnement de géoradar

Figure II.9 : Différentes géométries d'acquisition

Figure II.10: Schéma de l'acquisition à offset constant.

Figure II.11: trois tracés pour différents milieux géologiques

Figure II-12 : Image géoradar pour un milieu géologique

Figure II-13 : (a) signal radar, (b) exemple de radargramme interprété réalisée à une fréquence centrale $f_c = 200$ mhz

Figure II-14 : schéma numérique 3D de la maille élémentaire selon Yee.

Figure III.1 : Schéma synoptique du modèle couche I

Figure III.2a : Signaux des tracés du modèle couche I.

Figure III.2b : Le radar grammes du modèle couche I.

Figure III.3 : Schéma synoptique du modèle couches II

Figure III.4a : Signaux des tracés du modèle couche II.

Figure III.4b : Le radargramme du modèle couche II

Figure III.5a : Signaux des tracés du modèle cavité pleine d'argile

Figure III.5b : Le radar grammes du modèle cavité pleine d'argile

Figure III.6a : Signaux des tracés du modèle cavité pleine de sable-humide

Figure III.6b : Le radargramme du modèle cavité pleine de sable-humide

Figure III.7a : Signaux des tracés du modèle cavité pleine de sable-sec.

Figure III.7b : Le radargramme du modèle cavité pleine de sable-sec.

FigureIII.8 : Exemples de cavités dans le site d'AïnBenian

FigureIII.9 : Situation du secteur d'étude par rapport à AïnBenian

FigureIII.10: Carte géologique du secteur d'AïnBenian

Figure III.11 : Section d'affleurement de la terrasse tyrrhénienne dans le site d'étude.

FigureIII.12: Photo satellitaire Google Earth du site d'étude avec la disposition des profils GPR.

FigureIII.13 : Composition du matériel GPR GSSI utilisé.

FigureIII.14 : Calibration de vitesse

Figure III.15: (a) Profil 1, (b) Profil 2, (c) Profil 3

Figure III.16: (a) Profil 4, (b) Profil 5, (c) Profil 6.

FigureIII.17: (a) Profil 7, (b) Profil 8.

FigureIII.18 : (a) Profil 9, (b) Profil 10

FigureIII.19 : (a) Profil 11, (b) Profil 12.

FigureIII.20: (a) Profil 13, (b) Profil 14.

FigureIII.21: (a) Profil 15, (b) Profil 16.

Figure III.22: (a) Profil 17, (b) Profil 18.

FigureIII.23: (a) Profil 19, (b) Profil 20

FigureIII.24 : Profil 21.

Liste des tableaux

Table II.1: Valeur des paramètres électromagnétiques dans quelques milieux terrestres.

LISTE DES ABREVIATIONS

ρ_e :résistivité du matériau sec et de l'eaucontenuedans les pores.

Φ :est la porosité.

a , m , et n : des constantes.

k : le facteurgéométrique.

Ω : ohms.

g : la gravité.

ϵ^* :permittivitécomplexe.

ϵ' :déplacement des charges.

ϵ'' : partieimaginaire.

σ : La Conductivité

σ'' : La partieimaginaire de la conductivité.

f : la fréquence.

ω : la pulsation du signal.

R : Le coefficient de réflexion.

Z :l'impédanceélectromagnétique

T : coefficient de transmission dans le sol.

E_t :l'amplitude du champ E transmise

E_i : l'amplitude du champ E incident

E_r :L'amplitude du champs E réfléchi.

K : la constantediélectrique relative.

C : la célérité des ondesdansl'air.

V : La vitesse des ondes.

λ : la longueurd'onde.

P : la polarisation.

χ : susceptibilitéélectrique du diélectrique.

ϵ_0 : la permittivité du vide.

μ_0 :La constante magnétique.

C : la vitesse de la lumière dans le vides.

ϵ_0 :est la permittivitédiélectrique du vide

χ_e : est la susceptibilitéélectrique.

$\epsilon'_e(\infty)$: La valeur de permittivité effective

$\epsilon'_e(0)$: La valeur de la permittivité effective

τ : Le temps de la relaxation.

α : Exposant empirique $0 \leq \alpha \leq 1$

σ_{DC} : La conductivité du matériau lorsque $f \rightarrow 0$.

$\tilde{\epsilon}$: La permittivité apparente de l'ensemble.

$\tilde{\epsilon}_d$: La permittivité apparente des particules

$\tilde{\epsilon}_m$: La permittivité apparente du mélange

Φ : la fraction de volume de particules dans le mélange

e_t : efficacité de l'antenne d'émission

G_t : gain de l'antenne d'émission

P_f : puissance fournie à l'antenne d'émission.

α : l'atténuation du milieu.

d_{tc} : la distance entre l'antenne d'émission et la cible.

q : facteur de dépolarisation compris entre 0 et 1.

e_r : efficacité de l'antenne de réception.

G_r : gain de l'antenne de réception.

: étant l'ordre du filtre.

ω_c : La fréquence de coupure.

Sommaire

Dédicace

Remercement

Résumer

Liste des figures

Liste du tableaux

Liste des abréviations

Introduction général	1
Chapitre I.....	3
Généralités sur les méthodes géophysique appliquée à la géotechnique.....	3
I-1-Introduction	4
I-2- / Les méthodes géophysiques	5
I -2-1- Les méthodes actives:	5
I-2 -1- 1- les méthodes sismiques.....	5
I-2-1-2- Méthodes électrique	8
II-2-2 / les méthodes passive.....	14
II-2-2-1/ La gravimétrie.....	15
III -2-2-2 / Microgravimétrie	15
II-2 -2 -3 / Méthode magnétique	16
I-3 / CONCLUSION	17
chapitre II:Le Géoradar	18
II -1 -Introduction.....	19
II .2 . LE PRINCIPE PHYSIQUE	20
II .2 .1. Les propagations des ondes électromagnétiques :	20
II-2-2-Les phénomènes de diffraction, réflexion et transmission	21
II-2-3-Les vitesses radar	23
II-2-4-Équations de Maxwell	24
II-2-5- Équation de propagation d'ondes	24
II- 3-Les caractéristiques diélectriques des milieux	25
II-4-Modélisation des paramètres électromagnétiques	27
II-4-1-Modèle de Debye.....	27
II-4-2- Modèle de Cole-Cole.....	28
II-4-3- Modèle semi-disperse.....	28
II- 5-Le géoradar	29
II-5-1-L'appareillage	29
II-5-2-Le principe physique :	31

II-5-3-Le principe de fonctionnement de GPR.....	32
II-5-4-L'équation du radar.....	33
II-5-5- Acquisition et émission du GPR	34
II-7-Le radargramme :	38
II-7-1-Radargramme brut	39
II-8-Différences Finies dans le Domaine Temporel (F.D.T.D)	40
II-8-1-La méthode F.D.T.D	40
II-8-2-Principes de la F.D.T.D	40
II-9 -Conclusion :	40
Chapitre III.....	42
Applications des méthodes géoradar à la géotechnique	42
Simulation d'un modèle théorique.....	43
III- 1 Représentation	43
III-2 Effets des paramètres σ , ϵ et μ sur l'onde EM	43
III-3-Conclusion.....	46
Etude expérimentale.....	47
III- 1-Introduction	47
III-2- Présentation de la zone d'étude	47
III.2.1. Situation géographique	47
III.2.2. Contexte géologique géologique	48
III-3- Mise en œuvre	50
III-4 Appareillage utilisé.....	51
III-5-Traitement des données	52
III-6-Représentation et interprétation des radargrammes longitudinaux.....	53
III-7- Représentation et interprétation des radargrammes transversaux	54
III-8-Conclusion.....	65
Conclusion générale	67
Références bibliographiques	69

Introduction général

La géophysique applique les moyens de la physique à l'étude de la structure des terrains. C'est l'une des approches utilisées pour la reconnaissance géotechnique du site avant la construction d'un ouvrage (bâtiment, infrastructure urbaine ou infrastructure de transport, barrage...). La reconnaissance géotechnique consiste à déterminer la caractérisation de sous-sol, la nature et la répartition des matériaux dont il est composé et à déterminer leurs propriétés. (Mohamed Sow 2015) Au départ, La géophysique regroupe plusieurs méthodes pour l'étude de la caractérisation du sous-sol, à travers de notre mémoire de fin d'étude nous nous concentrerons sur la méthode géoradar à Pénétration de Sol (RPS) est une méthode de prospection géophysique non destructives basée sur la propagation des ondes électromagnétiques (EM) hautes fréquences. (Nerouzoubaki 2013). Le géoradar envoie des ondes électromagnétiques dans le sous-sol, par l'intermédiaire d'une antenne. Les ondes ainsi envoyées vont rencontrer différents milieux, plus denses par exemple, qui renverront une partie des ondes vers l'émetteur. L'antenne réceptrice, qui peut être la même que l'émettrice, va collecter les informations correspondantes à ces ondes. (Richard.L, 2007). Le radar à pénétration de sol est déplacé lentement au-dessus de la surface à sonder et le faisceau balaie ainsi une couche plus ou moins épaisse sous celui-ci. Selon le système et la nature des sols, un tel radar peut sonder jusqu'à quelques dizaines de mètres sous la surface et donner une série de tranches verticales. L'énergie réfléchi dépend des propriétés du matériau traversé et le radar peut ainsi détecter la profondeur, la conductivité, la perméabilité, la densité et la position d'objets enfouis. C'est le temps aller-retour du signal qui donne la profondeur de ceux-ci. (AGM Tec 2020)

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. Les applications sont multiples : géologie, géotechnique, génie civil... Parmi ces applications, on peut citer la localisation d'objets enfouis métalliques ou non métalliques tels que les câbles, les conduites, les fondations, les ferraillements, les cavités, les zones altérées, les mines et la caractérisation des propriétés intrinsèques des matériaux géologiques (sols, roches) ou artificiels (béton, l'asphalte ou le bois) (Techniques de L'ingénieur)

Le déplacement du radar génère une image brute d'une coupe verticale du sol. Comme la fréquence utilisée ne permet pas une faible ouverture du faisceau, tous les objets rencontrés lors du sondage renvoient des échos, même s'ils ne se trouvent pas exactement à la verticale du radar.

Tous les échos reçus sont quand même affichés comme si c'était le cas ce qui veut dire que ceux venant d'une direction latérale, et donc ayant parcouru une plus grande distance, sont positionnés à une plus grande profondeur qu'ils le sont en réalité. De plus, la forme d'un écho est hyperbolique et sa position réelle se trouve à l'apex de l'hyperbole. (Christian woff)

Dans l'image brute, au moins une ligne continue d'échos est affichée près de la surface. Celle-ci est causée par la réception du signal de l'antenne émettrice par l'antenne réceptrice dans l'air sous le radar. Elle est souvent désignée comme « le premier retour aérien » et sera éliminée plus tard par traitement du signal. Une seconde ligne est également notée, celle-ci provenant du retour par la réflexion au changement de milieu entre l'air et le sol. (Christian Woff). Avec un bon traitement des échos par filtres électroniques, il est possible de préciser la position réelle des objets sous la surface. Ces filtres réduisent les pertes par diffusion, les échos de bruit et ceux provenant de retour par les inhomogénéités de la couche traversée causant du fouillis radar. L'amplification du signal peut également être variée selon le temps de réception pour compenser l'atténuation du parcours dans le sol. La transposition du temps de parcours en distance/profondeur n'est cependant pas simple. La vitesse de propagation des ondes électromagnétiques varie avec le type de sol et celui-ci n'est pas homogène. Dans un sol sec la vitesse est la moitié de celle dans l'air, mais dans un sol mouillé ou dans la glaise, il est seulement entre le quart et le dixième. Il faut donc au moins avoir une idée de la composition du sous-sol avant de faire des mesures, ce qui peut être obtenu par des tests sismiques ou, encore mieux, par la prise de carottes.

Après cette introduction très détaillée, ce mémoire de projet de fin d'études autour de trois chapitres

Chapitre I : présente les méthodes géophysique appliquées à la géotechnique à savoir : Les méthodes actives (sismique, électrique, électromagnétique), Les méthodes passives dont la source est parfaitement naturelle (gravimétrie, magnétisme...)

Chapitre II : Il présente la méthode géoradar et expose les principes physiques (propagation des ondes électromagnétique, phénomène de diffraction réflexion, transmission...)

Chapitre III : Il est destiné pour l'application des méthodes géoradar à la géotechnique, étude expérimental d'une zone.

Chapitre I

Généralités sur les méthodes géophysique appliquées à la géotechnique

Chapitre I: Généralité sur les méthodes géophysique appliquée à la géotechnique

I-1-Introduction

La géophysique appliquée est la discipline qui consiste à étudier (observer, mesurer) un champ physique à la surface du sol ou dans des cavités creusées dans le sol (Richard L ; 2007) Ce champ physique, dont l'origine peut être naturelle ou provoquée, dépend d'un ou plusieurs paramètres caractéristiques des matériaux dont on cherche à déterminer la répartition dans le terrain. La reconnaissance géophysique, ou prospection géophysique, met en œuvre un ensemble de méthodes indirectes où l'on cherche, à partir d'une ou plusieurs propriétés physiques à déterminer la structure du milieu souterrain de manière non destructive (non-invasive) et avec un échantillonnage spatial suffisamment dense pour que les variations latérales et verticales en soient décrites aussi complètement que le permettent la propriété et la méthode de mesure utilisées. La résolution, c'est à dire le degré de finesse avec lequel le sous-sol va être décrit, est en effet variable selon la propriété choisie et la méthode utilisée. Certaines méthodes de grand rendement et capables de déterminer les grands traits de la structure géologique, sismique réflexion et méthodes électriques en particulier, seront mises en œuvre dès les premiers stades de l'étude du projet (faisabilité géotechnique). Ces mesures seront réalisées quasi obligatoirement pour les études de tracés linéaires (routes, autoroutes, voies ferrées). on va voir dans ce chapitre les principales méthodes de la géophysique appliquée utilisées à la géotechnique.

Chapitre I: Généralité sur les méthodes géophysique appliquée à la géotechnique

I-2- / Les méthodes géophysiques

Les méthodes géophysiques sont des méthodes de reconnaissance non destructives mises en œuvre à partir de la surface du sol dans le but de mesurer les valeurs et les variations de certains paramètres physiques. Nous verrons les principales méthodes utilisées en géophysique appliquée, classées dans deux catégories :

- Les méthodes actives
- Les méthodes passives

I -2-1- Les méthodes actives: appelées aussi provoquées, (elles créent un phénomène pour en mesurer les effets et répercussions) dont font partie les méthodes sismiques et les électriques.

I-2 -1- 1- les méthodes sismiques

Les méthodes géophysiques sismiques sont couramment utilisées en géophysique et en ingénierie pour de nombreuses applications (Karray 1999; Garotta, 2000). Les méthodes sismiques permettent de distinguer des couches possédant un contraste de vitesse/densité, et fait très important, les roches ou les masses en glissement ont pratiquement toujours des vitesses sensiblement plus lentes que le substratum en place non tectonisé.

Types d'ondes:

- ondes P (de compression ou longitudinales)
- ondes S (de cisaillement ou transversales)
- ondes de surface (ondes de Rayleigh ou ondes de Love) plus rapides Ces ondes obéissent aux lois de l'optique et sont en particulier sujettes à des réflexions et à des réfractions.

Les Vitesses des ondes P et S, dans les solides et les liquides ρ est la masse spécifique, μ et λ sont les coefficients de Lamé dans les solides seulement. (Guide technique lcpc, 2004)

Chapitre I: Généralité sur les méthodes géophysique appliquée à la géotechnique



Figure I.1 : Géophone à gauche, ordinateur et enregistreur à droite (Philippe Cote ,2007)

I-2-1-1-1 / Principe des méthodes sismiques

Le principe du sismique est d'envoyer des ondes dans le sol et d'enregistrer le retour en surface des ondes directes, réfléchies ou réfractées. Les ondes réfractées sont toujours les premières à atteindre les géophones. Sur un même enregistrement (figure I-2) tous les types d'ondes peuvent être visibles: réfléchies réfractées, ondes P, ondes S, ondes de surface, ceci explique l'aspect parfois complexe des enregistrements sismiques.

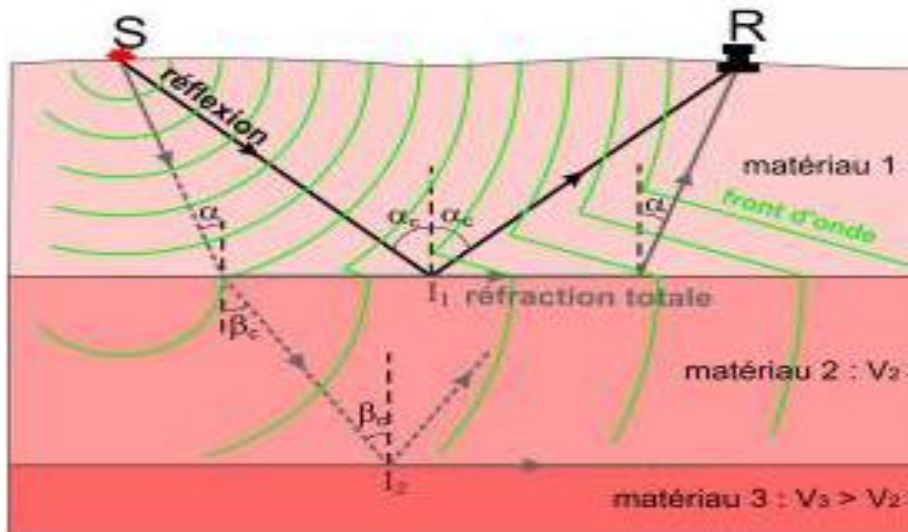


Figure I.2 : principe de la méthode sismique (crealp, 2013)

On distingue deux méthodes de prospection sismique : la sismique réflexion et la sismique réfraction.

I-2-1-1-2- La sismique Réfraction

A/ Le principe :

Les méthodes sismiques consistent à générer un ébranlement à la surface du sol et à analyser la propagation des différents types d'ondes émises, ainsi que la mesure de leur vitesse. Chaque type d'onde est le support d'une méthode particulière.

Chapitre I: Généralité sur les méthodes géophysique appliquée à la géotechnique

La sismique réfraction fait partie des méthodes de propagation d'ondes sismiques. Elle repose sur l'analyse des ondes de compression P, réfractées au toit des couches (Figure I-3). Les vitesses (V_p) sont calculées par la mesure du temps d'arrivée des premières ondes réfractées (au-delà des arrivées directes).

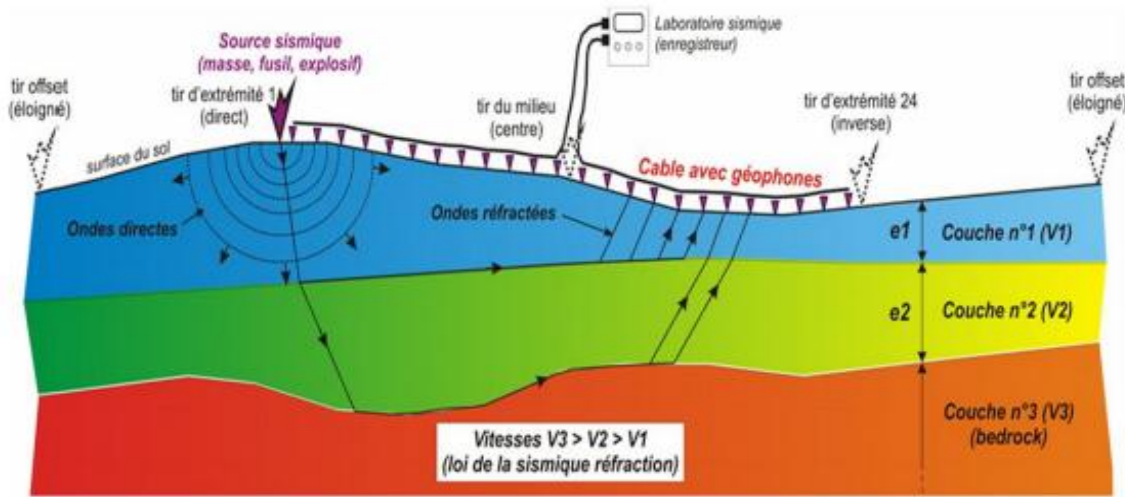


Figure I.3 : Schéma de principe (Document SOLDATA Géophysique)

B/ Le domaine d'application

La sismique réfraction en géotechnique est l'étude du terrain en surface altéré et du substratum rocheux. L'étude est quantitative puisqu'elle fournit l'épaisseur du terrain altéré et la vitesse des ondes mécaniques dans ce terrain ainsi que dans le substratum.

C/ Les Conditions d'application:

- Il faut que la vitesse des ondes sismiques croît avec la profondeur ($V_1 < V_2 < \dots < V_n$)
- Couches grossièrement parallèles à la surface du sol (pente $< 10^\circ$)
- Mouvement du sol enregistré lors des mesures résulte uniquement d'une impulsion Sismique créée par l'opérateur (absence d'autres sources : microséismes, circulation Automobile)
- La profondeur d'investigation dépend de la longueur des dispositifs de mesures mis en œuvre. Elle est en Géotechnique généralement inférieure à 20 m pour des dispositifs de moins de 200.

D/ Les applications de la sismique réfraction sont :

- Détermination de la ripabilité d'un terrain (relation directe avec la vitesse).
- Géométrie des glissements de terrain.
- Épaisseur de la couverture quaternaire, localisation du bedrock.

Chapitre I: Généralité sur les méthodes géophysique appliquée à la géotechnique

- Épaisseur de la couche filtrante d'un aquifère.
- Présence de zone altérée (fissurée).

I-2-1-1-3-La sismique réflexion

A/ Le principe :

La méthode de sismique réflexion consiste à induire une onde sismique dans le sol puis enregistrer les ondes qui sont réfléchies par les diverses interfaces entre les horizons se trouvant sous la zone étudiée. La sismique réflexion est généralement utilisée pour des profondeurs de 50 m et plus. (Richard L ; 2007)

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

B/ Les applications de la sismique réflexion

- Recherche de cavités.
- Imagerie de glissement de terrain.
- Imagerie de la couverture quaternaire.
- Recherche de gisements de substances utiles.
- génie civil pour l'implantation et les fondations des grands ouvrages: (retenues de barrage, tunnels ou galeries, tracé de chemin de fer ou routiers, bâtiment industriel...).

I-2-1-2- Méthodes électrique

I-2-1-2-1- La résistivité

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

La loi d'Archie (loi empirique (Reynolds, 2000) synthétise ces propriétés :

$$\rho = a \rho_e \Phi^{-m} S^{-n} \quad [01]$$

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

A/ Le principe de mesure des méthodes électriques :

Un courant continu I est injecté dans le sol par deux électrodes A et B. La différence de potentiel V est mesurée aux bornes de deux autres électrodes notées M et N. (Figure 4)

Chapitre I: Généralité sur les méthodes géophysique appliquée à la géotechnique

La résistivité apparente est «le rapport de la différence de potentiel mesurée sur le terrain à celle que l'on mesurerait avec le même dispositif et la même injection de courant sur un terrain homogène de résistivité $1\Omega.m$ ». Cette grandeur a les dimensions d'une résistivité (Richard L, 2007)

$$\text{Elle vaut } \rho_a = k \frac{VM-VN}{I} \text{ [02]}$$

Où k, le facteur géométrique est défini par:

$$k = 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right]^{-1} \text{ [03]}$$

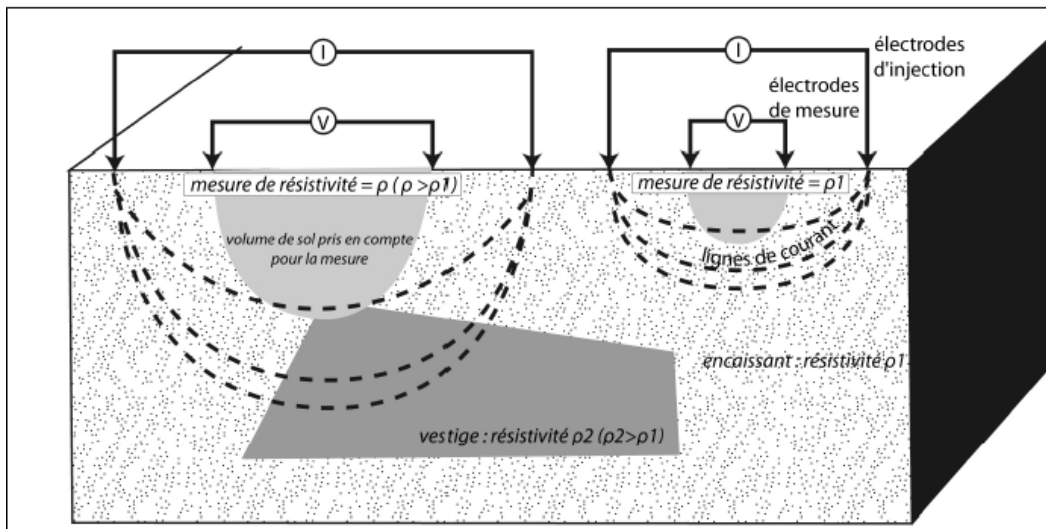


Figure I-04 : Principe de la prospection électrique (Dabas 2006)

Les principaux dispositifs sont présentés sur (Figure I-04). Ce sont tous des quadripôles. Les plus utilisés sont les dispositifs Wenner, Schlumberger, et le dipôle-dipôle. Leur profondeur d'investigation est une fonction croissante de la longueur du dispositif.

A/ Dispositifs d'acquisition

Il existe plusieurs dispositifs d'acquisition, associés à la configuration des dipôles d'injection et de mesure au cours d'une prospection électrique. Les plus couramment utilisés sont les dispositifs Wenner, Schlumberger, et Dipôle-Dipôle (Michel Chouteau ; Erwan Gloaguen -2014)

Chapitre I: Généralité sur les méthodes géophysique appliquée à la géotechnique

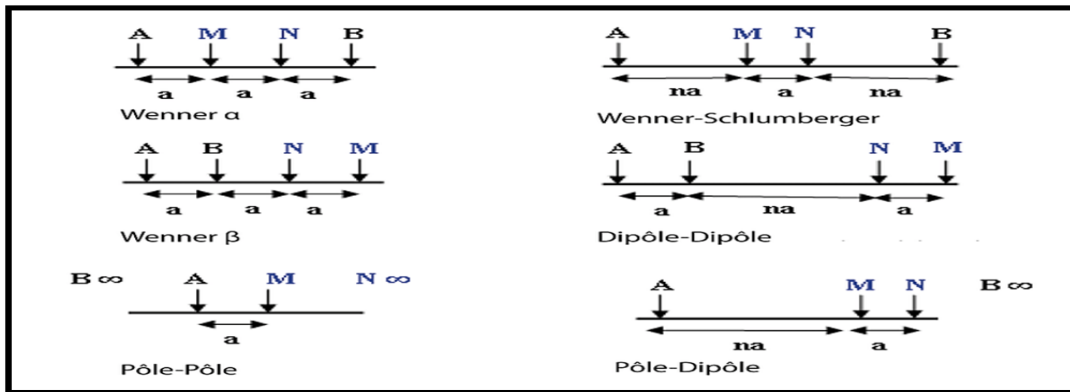


Figure I- 05 : présente plusieurs dispositifs de mesure différents et leur facteur géométrique associé. Les caractéristiques des plus couramment utilisés (Wenner α , dipôle-dipôle et Schlumberger pole-pole pole-dipôle (Dabas- 2006)).

- **Le dispositif Wenner**: recommandé pour les structures horizontales. Profondeur d'investigation plus faible que celle du Dipôle-Dipôle et du Wenner-Schlumberger. Le nombre de points à l'acquisition est inférieur à celui du Dipôle-Dipôle et du Wenner-Schlumberger; cet effet se fait surtout sentir sur les bords.

Géométrie du quadripôle ABMN symétriques (quatre électrodes alignées)

-Le dispositif Wenner : $AM = MN = NB = a \quad K = 2\pi a$ [04]

Le dispositif Wenner-Schlumberger: recommandé à la fois pour les structures horizontales et verticales. Profondeur d'investigation est d'environ 10 % plus élevée qu'avec le Wenner. Le nombre de points à l'acquisition est plus grand que pour le Wenner mais inférieur à celui du Dipôle-Dipôle (Michel Chouteau; Erwan gloaguen ; 2014) avec :

$$MN \ll AM \quad K = \frac{\pi AB^2}{4 MN} \quad [05]$$

- **Le dispositif Dipôle-Dipôle** : recommandé surtout pour les structures verticales. Profondeur d'investigation plus grande que pour le Wenner et Wenner-Schlumberger. Le nombre de points à l'acquisition est plus grand que pour le Wenner et le Wenner-Schlumberger nécessite des appareils sensibles et un bon couplage des électrodes avec le sol peut être utilisé pour de la 3D seulement pour des grilles de 12 x 12 électrodes (Michel chouteau ; Erwan gloaguen .2014)

Chapitre I: Généralité sur les méthodes géophysique appliquée à la géotechnique

- **Le dispositif Pôle-Dipôle:** dispositif asymétriques pouvant créer des artefacts. Profondeur d'investigation intermédiaire entre le Dipôle-Dipôle et le Pôle-Pôle. Sensible au bruit. Nécessité de mettre une électrode à l'infini. (Dr : Laurent Marescot ; 2008)
- **Le dispositif Pôle-Pôle :** profondeur d'investigation la plus profonde. Faible résolution. Nécessité de mettre deux électrodes à l'infini. Très sensible au bruit. Surtout utile en 3D, car grand nombre de points à l'acquisition. (Dr : Laurent Marescot ; 2008)

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

- le sondage électrique: en un point fixe en surface, les électrodes sont écartées,
- le traîné électrique: le dispositif est déplacé le long d'un profil, les distances entre les électrodes sont fixes,
- le panneau électrique qui est la combinaison des deux méthodes précédentes.

La méthode électrique utilisée pour la détection des cavités souterraines, pour la localisation de structures conductrices (poches, fractures, failles). Elle est très utilisée en milieu karst.

I-2-1-2-3 -Sondage électrique

Le SEV (sondage électrique vertical) est basé sur l'injection dans le sol d'un courant continu au moyen d'électrodes métalliques implantées en surface (quatre électrodes sont utilisées, deux pour l'injection du courant (A, B) et deux autres pour la mesure du potentiel (M, N)). (Driss, Kh ; 2013) L'augmentation de la distance séparant les électrodes permet d'atteindre des profondeurs croissantes. Le sondage électrique permet d'obtenir la succession verticale des résistivités. Les résistivités mesurées sur le terrain (résistivités apparentes) sont interprétées à l'aide d'abaques ou de logiciels pour obtenir des couches électriques caractérisées par leurs épaisseurs et résistivités. (INSA)

Chapitre I: Généralité sur les méthodes géophysique appliquée à la géotechnique

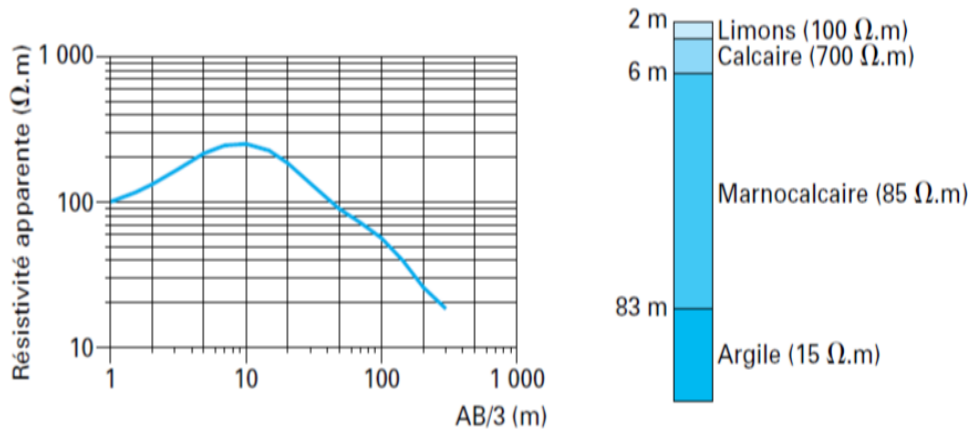


Figure I- 06 : Sondage électrique au-dessus d'un terrain à stratification horizontale

(INSA)

A/ Domaine d'Applications et conditions

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

I-2-1-2-4 Les traînés ou profils électriques

Permettent d'obtenir des profils et des cartes de résistivités apparentes indiquant la variation latérale de la résistivité à une profondeur donnée (plus la longueur du dispositif est grande, plus la profondeur d'investigation augmentera).

A/ Le principe

Le traîné électrique consiste à conduire les mesures avec un dispositif aux dimensions fixés le long d'un profil dirigé dans l'alignement des électrodes, le principe est illustré sur (FigureI-07).

Chapitre I: Généralité sur les méthodes géophysique appliquée à la géotechnique

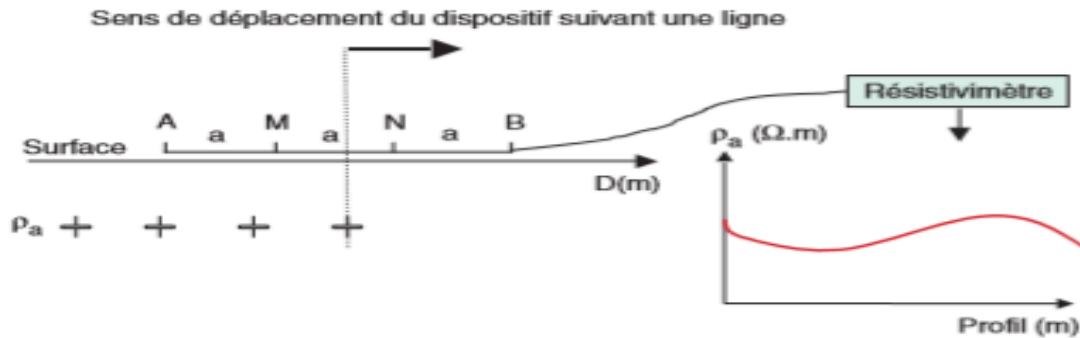
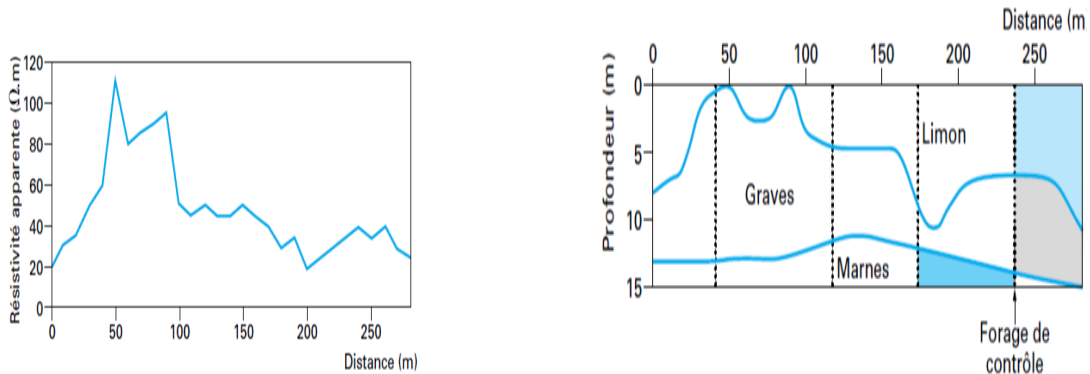


Figure I- 07 : Principe de trainée électrique ; cas de Wenner (Dabas- 2006).

B/ Domaine d'application

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

(Dr. Chapellier, Pr Jean-Luc Mari)



a- Profil trainée de résistivité apparente

b- Coupe du sou – sol

Figure I- 08 : Variations des résistivités apparentes avec la profondeur (INSA)

I-2-1-2-5- Panneaux électriques

Les dispositifs multi-électrodes (panneaux électriques, imagerie électrique ou Tomographie électrique) permettent de réaliser des profils à différents niveaux d'acquisition et obtenir une section de résistivité. (Driss Kh ;2013)

Chapitre I: Généralité sur les méthodes géophysique appliquée à la géotechnique

A/ Principe

Cette méthode combine le trainé électrique et le sondage électrique (Figure I-9), elle consiste à implanter un grand nombre d'électrodes à intervalle constant le long d'un profil rectiligne toutes les électrodes sont reliées à un dispositif de mesure de potentiel et d'injection de courant. Le système (l'injection de courant et la mesure du potentiel) est piloté par ordinateur. Les électrodes jouent alternativement le rôle d'électrodes d'injection et de mesure du potentiel. On réalise automatiquement pour un quadripôle de longueur donnée un trainé électrique, et on fait varier la longueur du quadripôle pour le combiner au sondage : on réalise alors les mesures pour toutes les longueurs possibles du dispositif.

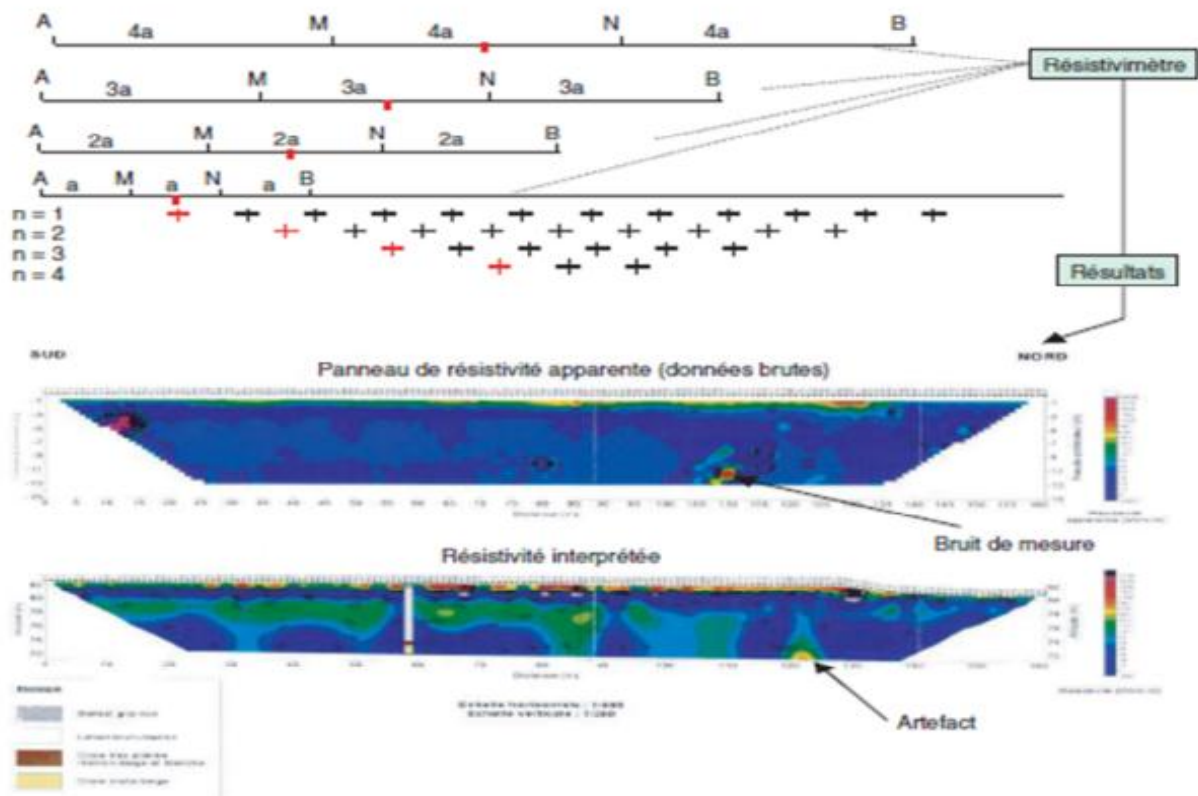


Figure I-09 : Principe du panneau électrique et exemple de résultats. En haut, l'anomalie rouge à 110 m est du bruit (Document SNCF)

II-2-2 / les méthodes passive

Appelées aussi naturelles, (elles mesurent un phénomène naturel) dont font partie la gravimétrie, la magnétométrie, la méthode tellurique, le scintillomètre, des méthodes électromagnétique.

Chapitre I: Généralité sur les méthodes géophysique appliquée à la géotechnique

II-2-2-1/ La gravimétrie

La gravimétrie est une discipline fondamentale de la géophysique et consiste à mesurer, en superficie, les petites variations spatiales et temporelles (ou anomalies) de l'accélération de la pesanteur en raison de la différence de densité des roches qui composent le sous-sol. C'est une méthode de champ naturel, rapide et relativement peu coûteuse, appliquée dans les phases préliminaires des études. La valeur de la pesanteur en un point est fonction de divers facteurs, c'est pour ça qu'au lieu de parler de la valeur absolue de la gravité, la valeur d'intérêt c'est l'anomalie de Bouguer, qui peut être défini comme la différence entre la valeur de la gravité mesurée par rapport à la valeur de la gravité normale ou espérée. (Richard L ; 2007)

III -2-2-2 / Microgravimétrie

En génie civil, c'est la seule technique de gravimètre qu'utilisée.

A/ Domaine d'application

En génie civil, la microgravimétrie sert à rechercher des cavités souterraines qu'elles soient d'origine naturelle (cavités karstiques principalement) ou artificielles (anciennes carrières souterraines, caves, citernes, galeries de drainage ou d'alimentation en eau...). Les cavités sont soit remplies d'air, soit plus ou moins remblayées ou noyées. Dans ces deux derniers cas, elles sont plus difficiles à détecter que s'il s'agit de vides francs. La méthode sont particulièrement adaptée au diagnostic géotechnique de risque de cavités souterraines. (Driss Kh ; 2013)

B/ Principe de la méthode

La méthode microgravimétrique consiste à étudier les variations du champ de pesanteur local par une mesure, à la surface du sol, en plusieurs points d'une zone donnée, en vue d'y établir la répartition de densité du sous-sol (excès et défauts de masse).

La mesure de variation du champ de pesanteur local, à la surface du sol, s'effectue à l'aide d'un gravimètre de précision, appareil dont le principe est la mise en équilibre d'un poids normé par allongement d'un ressort. L'allongement du ressort est proportionnel à la variation du champ de pesanteur sur l'axe vertical local (composante verticale de l'accélération de la pesanteur). Elle se distingue de la gravimétrie par l'échelle des mesures réalisées. L'unité couramment utilisée en microgravimétrie est le **µgal** (10^{-6} gal, 10^{-8} m/s²). (Richard L ; 2007)

Chapitre I: Généralité sur les méthodes géophysique appliquée à la géotechnique

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

$$F = (G m_1 m_2) / d^2 \quad [06]$$

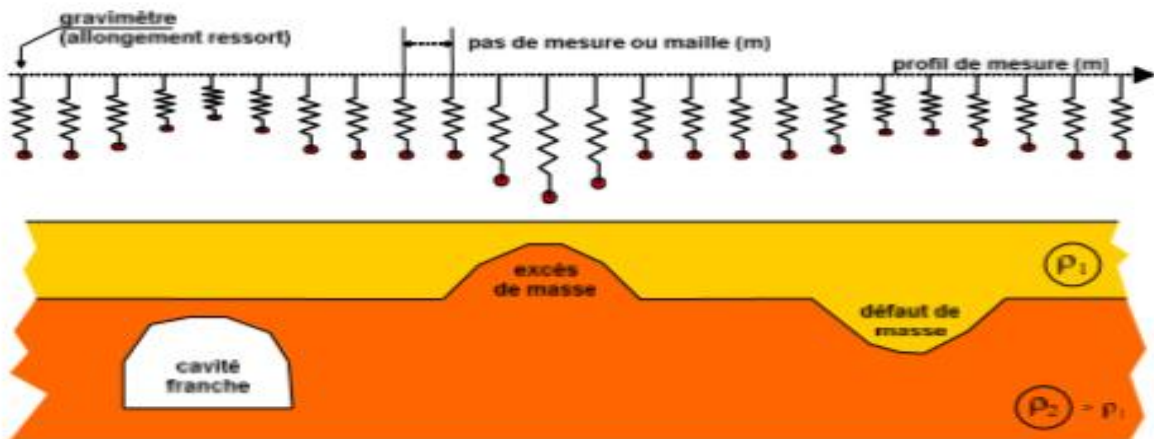


Figure I- 10 : Schéma de principe de la méthode (Fiche AGAP ; 2018)

II-2 -2 -3 / Méthode magnétique

Elle a pour objectif la détection des perturbations du champ magnétique terrestre par la présence de structures géologiques ou d'objets possédant une forte susceptibilité magnétique.

A/ Principe

L'appareil comprend une bobine placée autour d'une bouteille contenant un liquide riche en atome d'hydrogène. Le noyau d'un atome est comparable à une petite charge électrique positive tournant sur elle-même comme une petite toupie, à vitesse uniforme. Il est caractérisé par ses moments magnétique et cinétique qui ont même direction et même sens. Le noyau placé dans un champ magnétique H "précessionne" autour de celui-ci avec une vitesse angulaire ID tel que $ID = \gamma H$, $\gamma = \text{constante}$. Dans le cas du magnétomètre à proton on envoie dans la bobine durant quelques secondes le courant continu d'un accumulateur (batterie de 12 volts) de façon à créer un champ de quelques centaines d'ERSTED qui polarise les électrons selon une direction à peu près normale au champ terrestre. Après la coupure du courant les protons précessionnent autour du champ terrestre, créant dans la bobine une force électromotrice alternative de fréquence proportionnelle à ce dernier. Le signal ainsi induit est amplifié et envoyé dans un

Chapitre I: Généralité sur les méthodes géophysique appliquée à la géotechnique

fréquence. Les mesures sont rapides 1 à 2 mn par station et nécessite qu'un seul opérateur. Les mesures sont corrigées de l'effet diurne. Ceci est rendu possible par un retour à la base au bout d'une à deux heures de temps (cas d'un seul magnétomètre).

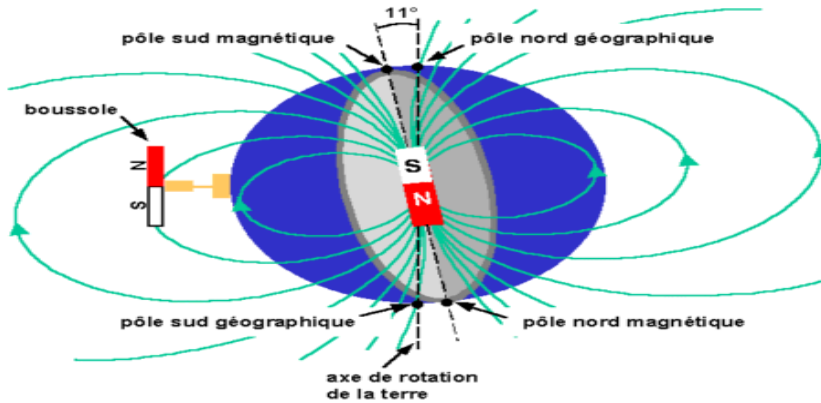


Figure I-11 : Le champ magnétique terrestre (Université Paul Sabatier, 2000)

B/ Domaines d'applications

La magnétométrie permet de réaliser des cartes d'anomalies magnétiques. A partir de ces cartes il est ensuite possible d'en déduire la nature du sol et la présence ou non d'un gisement.

I-3 / CONCLUSION

La géophysique applique les moyens de la physique pour l'exploration du sol et du sous-sol. C'est l'une des approches utilisées pour la reconnaissance géotechnique du site avant la construction d'un ouvrage. L'objectif de ce chapitre est de montrer l'avantage des mesures géophysiques, leur rapidité de mise en œuvre et leur capacité d'investiguer un grand volume de sol dans un temps relativement modéré, constituent une alternative intéressante aux essais géotechniques in-situ. Les reconnaissances indirectes par la géophysique rapides et assez économiques. Elles doivent toujours être complétées par des sondages qui permettent de caler les mesures géophysiques. Selon le paramètre physique mesuré, on distingue plusieurs méthodes de prospection, qu'elles soient passives ou actives, les méthodes géophysiques sont toutes sans exception soumises à des contraintes d'ordre physique, matériel ou financier.

Chapitre II

Le Géoradar

II -1 -Introduction

Le géoradar, aussi appelé radar sol ou GPR (GroundPenetrating Radar), est une méthode géophysique à haute résolution pour imager les sols de surface et de subsurface (Jean-F. Girard, 2002). Basée sur la propagation d'ondes électromagnétiques situées dans la bande de fréquence (1MHz 1.4 GHz), il est utile pour de nombreuses applications telles que la détection des objets enfouis dans le sol, il s'impose aussi comme un moyen incontournable pour l'auscultation et le diagnostic des ouvrages du génie civil et il est utilisé pour déceler les variations des propriétés diélectriques dans le sol. Le GPR fait partie des techniques électromagnétiques non destructives couramment utilisées. Cette technique est privilégiée par rapport aux autres méthodes car elle présente plusieurs avantages. En plus de son caractère non destructif, c'est une méthode rapide et facile à mettre en œuvre. Ce chapitre a pour objectif de décrire le principe de fonctionnement d'un radar GPR, les diverses techniques de prospections et les différentes techniques de signal émis (Fabrice Hollander.2004).

II .2 . LE PRINCIPE PHYSIQUE

II .2 .1. Les propagations des ondes électromagnétiques :

Les ondes électromagnétiques sont composées de champs électriques et magnétiques qui se propagent dans l'espace avec un temps. Ces ondes électromagnétiques sont caractérisées par leur fréquence, qui est mesurée par le nombre de cycles par seconde (Hertz, Hz) des champs électriques et magnétiques (FigureII-1). (NEROUZ BOUBAKI 2013)

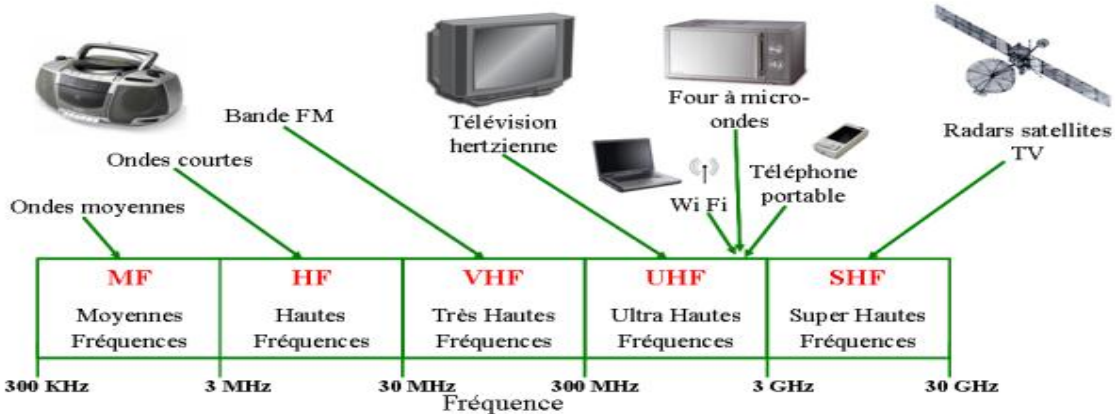


Figure II-1: Ondes électromagnétiques en fonction de leurs fréquences et leur utilisation dans la vie courante (NEROUZ BOUBAKI 2013)

II- 2-1-1 - Les paramètres des ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques sont régies par les équations de Maxwell (Maxwell, 1881). Ces quatre équations différentielles couplées fournissent les relations entre le champ électrique, le champ magnétique, le temps t et l'espace. Ces équations utilisent trois paramètres qui rendent compte des propriétés électromagnétiques du milieu qui sont la perméabilité magnétique, la permittivité diélectrique, et la conductivité électrique. (NEROUZ BOUBAKI 2013)

A / La perméabilité magnétique

La perméabilité magnétique correspond à l'énergie stockée ou perdue dans le matériau suite aux phénomènes d'induction magnétique. Elle est utilisée pour décrire le comportement électromagnétique de la matière soumise à un champ magnétique. Dans le vide, en absence de sources externes, la relation entre l'induction magnétique \vec{B} et le champ magnétique

$$\vec{H}: \vec{B} = \mu_0 \vec{H} \tag{07}$$

Avec $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$, la perméabilité magnétique du vide (NerouzBoubaki, 2013)

B/La permittivité diélectrique

La permittivité diélectrique d'un matériau rend compte de sa capacité à être polarisé sous l'influence d'un champ électrique, ce qui provoque le déplacement relatif de charges liées positives et négatives (Lutz, 2002). Nous utiliserons la notation usuelle en électromagnétisme en définissant la permittivité complexe ϵ^* , qui prend en compte le déplacement de charges électriques dans sa partie réelle, ϵ' et la dissipation associée au déplacement des charges et les pertes de conduction dans sa partie imaginaire, ϵ'' . Nous avons :

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \quad [08]$$

C/ La Conductivité σ

La conductivité permet de décrire la capacité d'un milieu à laisser mouvoir des charges sous l'influence d'un champ appliqué. Reliée à la densité de courant, la conductivité est une grandeur physique complexe. (Mohamed Sow. 2015)

$$\sigma = \sigma' + i\sigma'' \quad [09]$$

Où σ' et σ'' sont respectivement la partie réelle et la partie imaginaire de la conductivité électrique. Lorsque l'on considère uniquement les pertes ohmiques (*i.e.* uniquement la partie réelle de la conductivité), on peut écrire que la partie réelle de la conductivité électrique σ' est liée à la partie imaginaire de la permittivité diélectrique ϵ'' et à la fréquence f par :

$$\epsilon'' = \frac{\sigma'}{\omega} \quad [10]$$

Où $\omega = 2\pi f$ est la pulsation du signal.

II-2-2-Les phénomènes de diffraction, réflexion et transmission**II-2-2-1-Les phénomènes réflexion et transmission**

Dans un milieu naturel, la propagation des ondes électromagnétiques est liée à la perméabilité magnétique μ , la permittivité diélectrique ϵ et la conductivité électrique σ . Tout contraste d'un de ces trois paramètres peut provoquer une réflexion de l'onde ou une transmission. Soient deux milieux homogènes et isotropes caractérisés respectivement par les paramètres $\mu_1, \epsilon_1, \sigma_1$ et $\mu_2, \epsilon_2, \sigma_2$, séparés par une interface plane. L'onde incidente (Figure II-2)

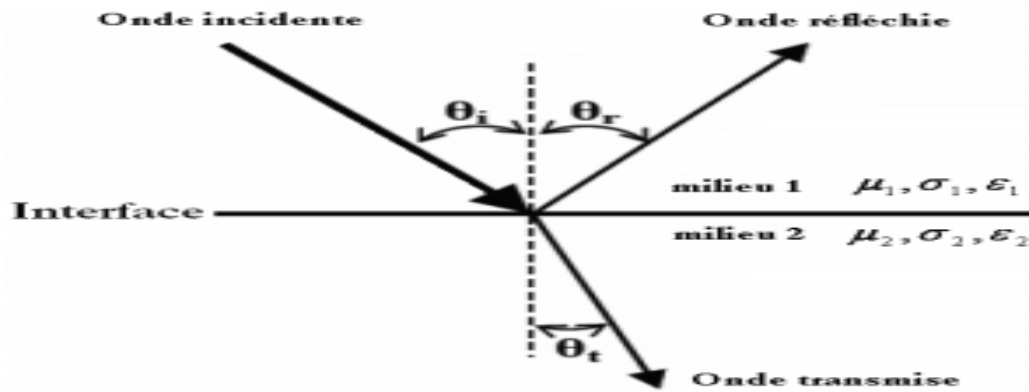


Figure II.2: Schéma représentant les phénomènes de réflexion et de transmission à l'interface entre deux milieux qui représentent des contrastes diélectriques différents. (Djedi .MK, 1995)

Sur l'interface des deux milieux est réfléchi dans le milieu 1 et transmis dans le milieu 2. Les directions des ondes incidente, réfléchi et transmis sont reliées par les lois de Snell-Descartes :

$$\frac{\sin\theta_i}{v_1} = \frac{\sin\theta_r}{v_2} = \frac{\sin\theta_t}{v_3} \quad [11]$$

Où θ_i est l'angle d'incidence, θ_r l'angle de réflexion et θ_t l'angle de transmission, v_1 est la vitesse du milieu 1 et v_2 la vitesse du milieu 2. (NEROUZ BOUBAKI 2013)

Les coefficients de réflexion et de transmission en incidence normale ont pour expression respectivement :

Le coefficient de réflexion:
$$\mathbf{R} = \frac{E_{or}}{E_{oi}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad [12]$$

Avec l'impédance électromagnétique
$$\mathbf{Z} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} [13]$$

Le coefficient de transmission dans le sol :
$$\mathbf{T} = \frac{E_{ot}}{E_{oi}} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad [14]$$

Avec : E_t : l'amplitude du champ E transmise

E_i : l'amplitude du champ E incident

E_r : l'amplitude du champ E réfléchi

Lorsque la vitesse $v_2 > v_1$, il y a un angle critique $\theta_c = \theta_t = 90^\circ$. On parle alors de réfraction critique de l'onde. L'onde réfractée se déplace le long de l'interface à la vitesse v_2 . Pour tous les cas où l'angle d'incidence $\theta_i > \theta_c$, il y a réflexion totale. La quantité d'énergie radar réfléchi est indiquée par le coefficient de réflexion r , qui est déterminé par le contraste des vitesses des ondes électromagnétiques, et plus fondamentalement, par le contraste de la permittivité diélectrique relative des médias adjacents (Knight, 2001; Sato, 2009).

II-2-2-2-Le phénomène de diffraction

Le problème de la diffraction est très similaire à celui du rayonnement. La différence essentielle tient au fait que, dans ce cas, l'excitation est loin de l'objet rayonnant (la cible) alors qu'elle est

en contact avec lui (l'antenne) dans le cas du rayonnement. Plus précisément, dans un problème de diffraction, on éclaire un objet avec un champ incident noté \vec{E}_{inc} (représentatif d'une excitation lointaine); celui-ci génère des sources induites \vec{J} (et éventuellement \vec{M}) qui produisent en retour un champ diffracté noté \vec{E}_{dif} . Comme pour le problème de rayonnement, le champ produit s'exprime à l'aide d'une intégrale de rayonnement à partir des sources induites. La détermination des sources induites s'opère en écrivant les conditions limites adéquates à la surface de l'objet diffractant pour le champ total (somme des champs incident et diffracté). Dans la plupart des cas, le champ incident peut être représenté par une onde plane compte tenu de la grande distance à laquelle se trouve l'excitation (le champ lointain rayonné par une antenne est assimilable à une onde plane localement). (Raphaël GILLARD, 2005)

Table II.1: Valeur des paramètres électromagnétiques dans quelques milieux terrestres usuels : la permittivité diélectrique relative ϵ_r , la conductivité électrique σ , la vitesse v et les atténuations α_{dB} d'une onde électromagnétique de fréquence 100 MHz (Davis et Annan, 1989)

Nature du terrain	Constante diélectrique	Conductivité électrique (ms/m)	Vitesse de l'onde (m/ns)
Air	1	0	0.3
eau distillé	80	0.1	0.033
Eau de mer	80	3*10³	0.01
Sable sec	3-5	0.01	0.15
Sable saturé	20-30	0.1-1	0.06
Calcaire	4-8	0.5-2	0.12
Granite	4-6	0.01-1	0.13
argile	5-40	2-1000	0.06
schiste	5-15	1-100	0.09
glace	3-4	0.01	0.16

1.1.1 II-2-3-Les vitesses radar

La vitesse des ondes radar dans les terrains géologiques est inversement proportionnelle à la constante diélectrique de ces terrains, selon la relation:

$$V = \frac{c}{\sqrt{k}} [15]$$

Où c est la célérité des ondes dans l'air: $c = 0,3 \text{ m/ns}$, K la constante diélectrique relative du milieu, $K = \epsilon'$. Le constant diélectrique, la conductivité électrique et la vitesse des ondes radar dans les principaux terrains géologiques sont données dans le tableau au-dessus (Annan, 1993).

II-2-4-Équations de Maxwell

Les relations et variations des champs électrique et magnétique, des charges et courants associés aux ondes électromagnétiques dans un milieu quelconque, sont régis par des lois physiques.

Ces lois ont été mises sous forme d'un système d'équations par Maxwell. Dans un milieu homogène, non chargé, non dispersif et isotrope, pour une fréquence donnée, le système d'équations de Maxwell s'exprime ainsi :

$$\text{rot} \vec{E}(\vec{r}, t) + \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}(\vec{r}, t) = \vec{0} \quad [16]$$

$$\text{rot} \vec{H}(\vec{r}, t) + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}(\vec{r}, t) = \vec{0} \quad [17]$$

$$\text{div} \vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{0} \quad [18]$$

$$\text{div} \vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{0} \quad [19]$$

Avec :

\vec{r} Le vecteur des coordonnées du point d'observation ;

ϵ et μ respectivement la permittivité et la perméabilité du milieu de propagation.

(Émilie MASSON 2010).

II-2-5- Équation de propagation d'ondes

En combinant correctement les équations de Maxwell, on obtient l'équation de propagation d'ondes ou équation d'Helmholtz (Balanis, 1989) :

$$\nabla^2 \vec{U}(\vec{r}, t) + k^2 \vec{U}(\vec{r}, t) \quad [20]$$

Avec :

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad [21]$$

Qui représente l'opérateur nabla dans un repère cartésien

$\vec{U}(\vec{r}, t)$ la grandeur qui se propage, à savoir $\vec{E}(\vec{r}, t)$ ou $\vec{H}(\vec{r}, t)$;

$$\mathbf{k} = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad [22]$$

Avec v la vitesse de propagation de l'onde (3.10^8 m.s^{-1} dans l'air), ω sa pulsation et

$\lambda = \frac{v}{f}$ est la longueur d'onde, f étant la fréquence de l'onde. (Émilie MASSON 2010).

II- 3-Les caractéristiques diélectriques des milieux

II-3-1-Un milieu diélectrique

Il ne contient pas de charges électriques susceptibles de se déplacer de façon macroscopique Le milieu ne peut donc pas conduire le courant électrique, et est souvent un isolant électrique. (Florence. S, Fayçal .R ; 2016)

II-3-1-1 -Le rôle du diélectrique

Elle décrit le facteur par lequel le champ électrique entre les charges est diminué par rapport au vide et par définition est toujours supérieure à 1. Plus le constant diélectrique est élevé, plus la force entre les deux charges électriques séparées par ce diélectrique est faible.

(M. Gouy ; 1896)

II-3-1-2- La constante diélectrique

Le constant diélectrique se définit comme le rapport entre la permittivité ϵ du matériau considéré et la permittivité du vide.

Les constantes diélectriques apparaissent dans les expressions pour la polarisation P :

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E} \quad [23]$$

χ : susceptibilité électrique du diélectrique

$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ [As/Vm] Est la permittivité du vide. et pour le déplacement électrique D:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \epsilon_0 (1 + \chi) \mathbf{E} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mathbf{E} \quad [24]$$

D'où l'on déduit que $\epsilon_r = 1 + \chi$

ϵ_r : Constante diélectrique (ou permittivité relative par rapport au vide).

On définit parfois une constante diélectrique absolue $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} \quad [25]$$

Où : μ_0 :est la constante magnétique

C : la vitesse de la lumière dans le vide.

Il ne s'agit pas à proprement parler d'une valeur approchée : les valeurs de μ_0 et c étant parfaitement déterminées, il est possible de connaître celle de ϵ_0 avec autant de chiffres significatifs que désiré. (Alia HAMADI ; 2010)

II-3-2-La permittivité électrique

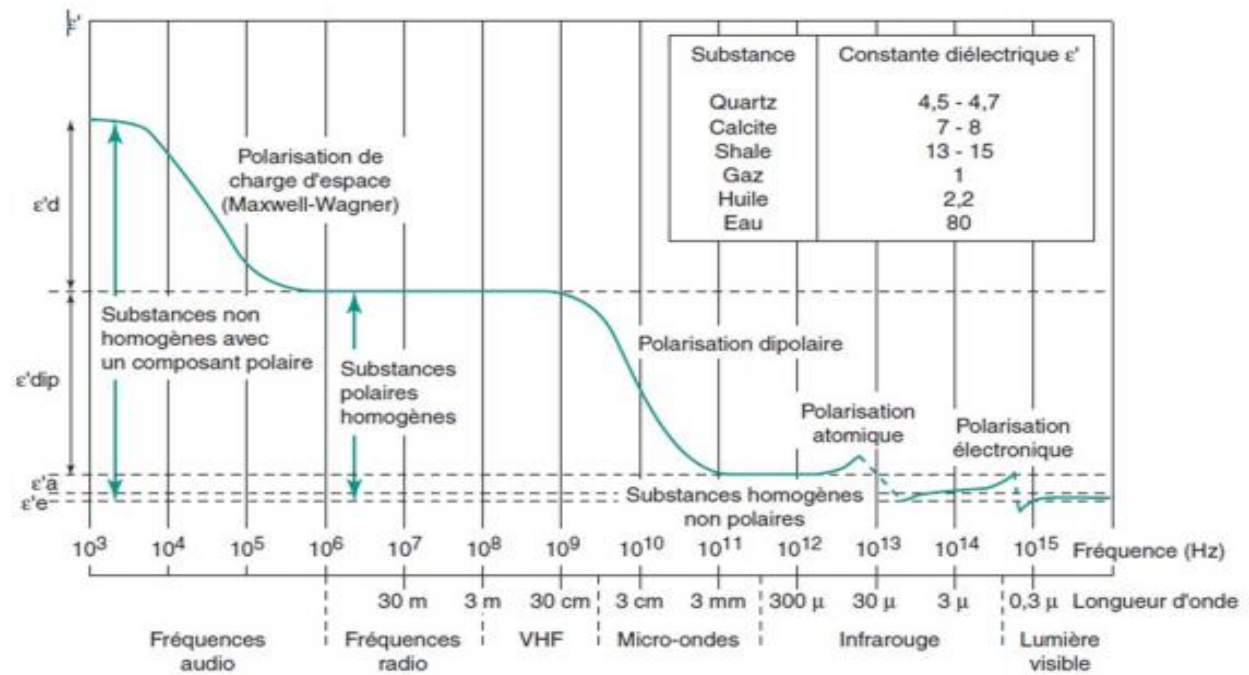
C'est la capacité d'un matériau à se polariser sous l'effet d'un champ électrique. Lorsqu'un champ variable est appliqué, les particules constituant le matériau tendent à changer de position d'équilibre afin de compenser l'effet du champ. C'est la polarisation. Ce phénomène de polarisation se produit pendant un temps minimum donné. Ce temps est dit de «relaxation». Mais

si le champ varie trop rapidement ce temps est très court et les particules n'ont pas le temps de se mouvoir. Dans le cas du GPR, c'est la polarisation dipolaire qui est prépondérante (Guegen et Palciauskas, 1992). De façon mathématique la permittivité diélectrique et s'exprime par la valeur :

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \quad [25]$$

ϵ_0 :est la permittivité diélectrique du vide

χ_e : est la susceptibilitéélectrique



FigureII-3 : Influence des différentes polarisations en fonction de la fréquence (Tillard, 1991)

II-3-2-1-Méthode pour mesurer la permittivité du sol

L'évaluation d'un paramètre physique du sol à partir des données radar impose de prendre en compte l'ensemble des propriétés du sol (diélectriques et géométriques). En effet, lorsque les paramètres du radar sont fixes et si la distance radar-sol ne change pas, l'équation du radar montre que la puissance reçue après rétrodiffusion dépend uniquement de la nature de la cible qui est le sol. Plus clairement, de nombreux paramètres interviennent dans le phénomène de rétrodiffusion. Ces paramètres peuvent être séparés en deux grandes catégories : les paramètres géométriques comme la forme ou l'état de surface et les paramètres diélectriques liés à la nature du sol comme la permittivité diélectrique ou la conductivité

On présentera les méthodes les plus couramment utilisées pour connaître la permittivité du milieu :

- **Calcul de la permittivité à partir d'une source ponctuelle ou calibration sur objet test :**

Cette méthode permet de connaître les paramètres du sol. Cette procédure consiste à placer un objet test à une profondeur connue (elle peut varier entre 5 et 10 cm). On déplace le radar suivant une direction donnée et on enregistre le B-Scan qui montre une hyperbole. Connaissant les valeurs des paramètres (x_0, z_0) qui sont fixes par rapport à un point de référence choisi au départ, il est facile d'en déduire la vitesse de l'onde électromagnétique et par conséquent la permittivité du milieu par le calcul du signal réfléchi par le point ponctuel en utilisant cette équation :

$$v = \frac{2\sqrt{(x-x_0)^2 + z^2}}{t} \quad [26]$$

- **Calcul de la permittivité à partir de l'onde de sol :**

Lorsque le radar est en contact avec le sol, une partie de l'énergie est transmise directement de l'émetteur vers le récepteur sous l'interface air-sol. Connaissant la distance (d) entre l'émetteur et le récepteur et le temps d'arrivée de l'écho (τ) de cette onde, on calcule la vitesse de l'onde dans le milieu de propagation et par conséquent on en déduit la permittivité diélectrique : (MouhamedSow, 2015)

$$v = \frac{d}{\tau} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r} u_0} \quad [27]$$

II-4-Modélisation des paramètres électromagnétiques

Afin de rendre compte du comportement diélectrique d'un milieu de propagation, plusieurs modèles ont été proposés et découlent des théories de Maxwell, Wagner, Debye et Cole - Cole. Ces différents auteurs ont mis en place au cours de la première moitié du XXème siècle des approches encore utilisées à ce jour qui permettent la modélisation des différents milieux rencontrés. (J.C. Maxwell, 1881)

II-4-1-Modèle de Debye (P. Debye, 1929) Le modèle de Debye constitue la base des modèles utilisés actuellement. Il assimile la relaxation dipolaire à un système mécanique du premier ordre où les forces s'opposant à la réorientation des dipôles sont purement visqueuses, c'est à dire qu'il n'y a pas de force élastique de rappel. La variation de permittivité du matériau entre une valeur maximale ($\epsilon'_{e(0)}$) mesurée en statique et une valeur minimale ($\epsilon'_{e(\infty)}$) observée à une fréquence infinie est décrite par l'équation :

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon'_{e(\infty)} + \frac{\epsilon'_{e(0)} - \epsilon'_{e(\infty)}}{1 + j\omega\tau} \quad [28]$$

Avec : $\epsilon_e(\infty)$: La valeur de permittivité effective lorsque $f \rightarrow \infty$

$\epsilon_e(0)$: La valeur de la permittivité effective lorsque $f \rightarrow 0$

τ : Le temps de la relaxation.

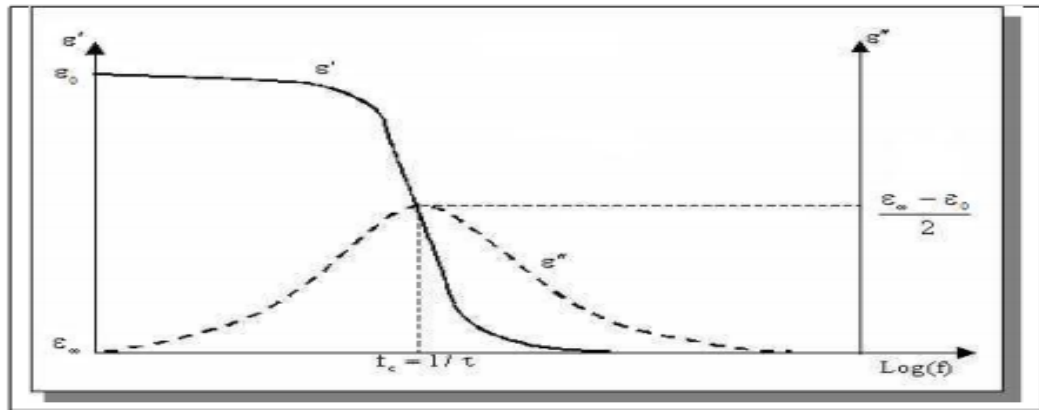


Figure II.4 : Parties réelle et imaginaire de la permittivité (k.s, cole ; R.h, cole, 1941)

II-4-2- Modèle de Cole-Cole

Une modification des équations de Debye, développé par Cole - Cole (K.S. Cole, R.H. Cole, ,1941), introduit la notion de dispersion, au sens où les constantes de temps sont réparties suivant une distribution gaussienne autour d'une constante de temps moyenne τ_c . Lorsque la conductivité statique est prise en compte, l'équation de Cole-Cole est donnée par :

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon_e(\infty) + \frac{\epsilon_e(0) - \epsilon_e(\infty)}{(1 + j\omega\tau_c)^{1-\alpha}} j \frac{\sigma_{DC}}{\omega\epsilon_0} \quad [29]$$

Avec $\epsilon_e(\infty)$: la valeur de la permittivité effective lorsque $f \rightarrow \infty$

$\epsilon_e(0)$: La valeur de la permittivité effective lorsque $f \rightarrow 0$

α : Exposant empirique $0 \leq \alpha \leq 1$

σ_{DC} : La conductivité du matériau lorsque $f \rightarrow 0$

Le paramètre α permet d'ajuster la largeur de la dispersion. Lorsque $\alpha = 0$, il n'y a pas de dispersion et on retrouve l'équation de Debye. Le tracé de la partie imaginaire de cette équation en fonction de sa partie réelle dans le plan complexe montre que cette nouvelle formulation permet de rendre compte de faits expérimentaux non retrouvés avec le modèle de Debye. Le modèle de Cole-Cole permet de définir correctement la plupart des sols rencontrés.

II-4-3- Modèle semi-disperse

La modélisation consiste à représenter le milieu comme un ensemble de particules solides dispersées dans un second milieu appelé texture. Il s'applique aux milieux dilués. Si les

permittivités apparentes de chaque milieu sont connues et si les proportions de chaque milieu sont connues, alors la permittivité du milieu résultant peut être donnée par l'équation de Hanai (J.L. Davis, A.R. Annan, 1989):

$$\frac{\tilde{\epsilon} - \tilde{\epsilon}_d}{\tilde{\epsilon}_m - \tilde{\epsilon}_d} \sqrt{\frac{\tilde{\epsilon}_m}{\tilde{\epsilon}}} = 1 - \Phi \quad [30]$$

Avec :

$\tilde{\epsilon}$: La permittivité apparente de l'ensemble

$\tilde{\epsilon}_d$: La permittivité apparente des particules

$\tilde{\epsilon}_m$: La permittivité apparente du mélange

Φ : la fraction de volume de particule dans le mélange

II- 5-Le géoradar

Le Géoradar est un appareil géophysique utilisant le Principe d'un radar que l'on pointe vers le sol ou les ouvrages pour en étudier la composition et la structure. Le fonctionnement du Géoradar est basé sur l'émission d'impulsion électromagnétique de durée inférieure à une nanoseconde. La méthode géoradar est essentiellement utilisée en géotechnique elle permet d'obtenir des images des structure et d'évaluer l'état de santé des ouvrages d'art, de localiser le toit des nappes phréatiques pour en détecter les mouvements verticaux, de détecter les conduits métalliques. (J.DUBOIS et M.DIAMANT 2005)

II-5-1-L'appareillage

Le géoradar est constitué de deux antennes, l'une servant à l'émission d'ondes électromagnétiques, et l'autre à la réception de ces mêmes ondes. Les deux antennes sont reliées à une console, elle-même reliée à un ordinateur portable qui permet une visualisation des données en cours d'acquisition ou encore de configurer la console. L'énergie est délivrée par des batteries de type batterie automobile (FigureII.5). L'émetteur envoie dans le sol une ondelette électromagnétique centrée sur une fréquence variant de 10 MHz à 1 GHz.

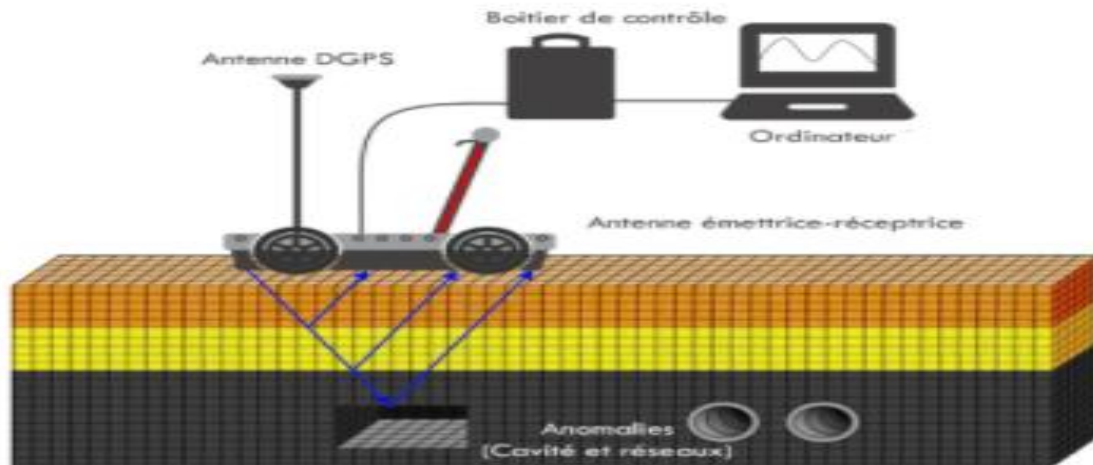


Figure II-5: Présentation schématique d'un système géoradar (GEXPLORE 2000)

II-5-1-1-Les types d'antenne: on distingue

- Les antennes cornet ou aériennes : qui sont suspendues à plusieurs dizaines de centimètres au-dessus du sol
- Les antennes de contact (ground-coupled antennas), tractées à même la surface.
- Les antennes de forage, pouvant être insérées dans le sol après un carottage

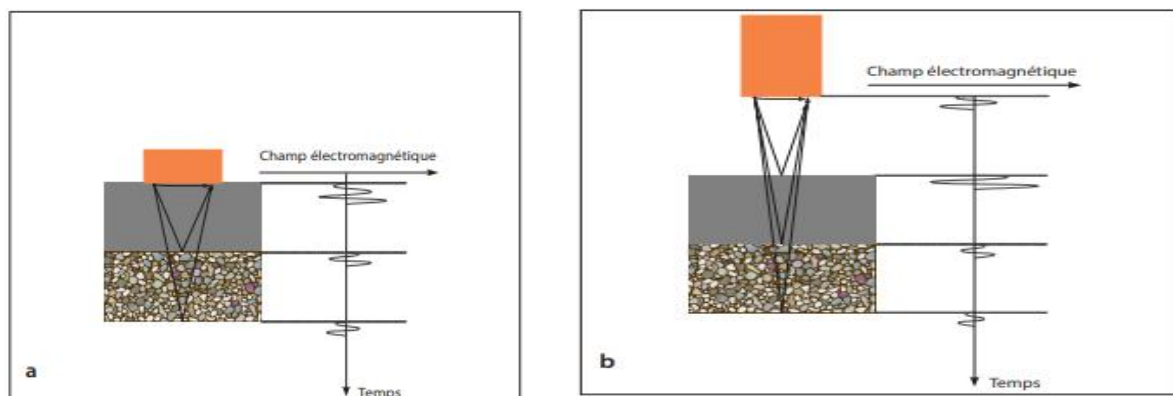


Figure II-6 : Comparaison du fonctionnement d'une antenne de contact (a) et d'une antenne aérienne (b) (colette, geem ; 1947)

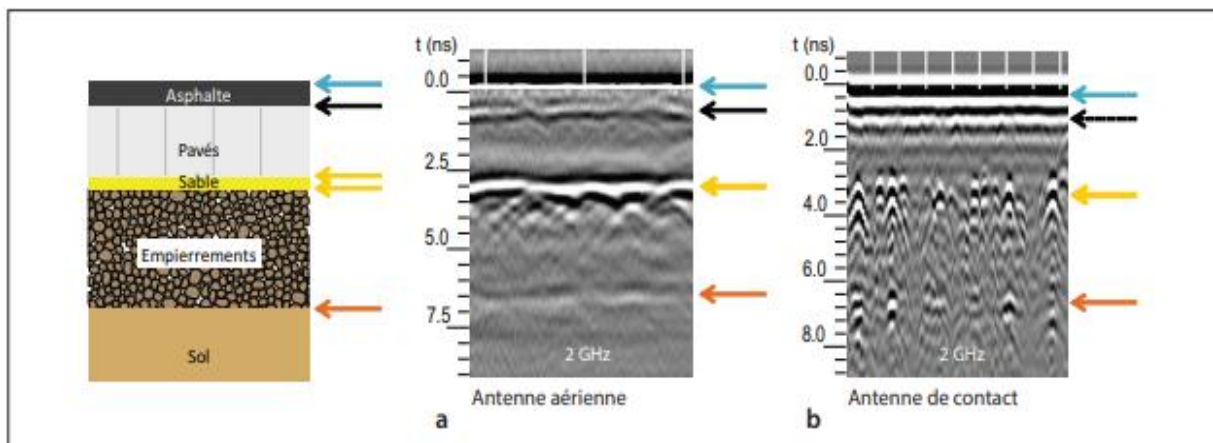


Figure II-7 : Influence du type d'antenne (aérienne (a) ou de contact (b)) sur la visualisation d'interfaces rugueuses (colette, geem ; 1947)

II-5-2-Le principe physique :

La propagation d'une onde radar dépend essentiellement des propriétés électriques du matériau et de la fréquence de l'impulsion EM (Arulan, 2009). La constante diélectrique, ou permittivité diélectrique relative, est liée à la capacité d'un corps à emmagasiner et à relâcher l'énergie électromagnétique (Cassidy, 2009 a). Elle constitue la propriété ayant l'influence la plus importante sur la propagation et la réflexion de l'onde (van Dam et al. 2002). L'eau liquide est le matériau qui possède la plus haute valeur de constant diélectrique. Dans un milieu poreux, la teneur en eau influence donc grandement la constante diélectrique globale (Davis et Arulan, 1989). La conductivité électrique décrit la facilité d'un milieu à transmettre un courant, c'est-à-dire à permettre le déplacement de charges sous l'effet d'un champ électrique. L'interaction entre les charges et le milieu cause une perte d'énergie, et ultimement une atténuation du signal émis (Cassidy, 2008). Dans les sédiments, la conductivité augmente proportionnellement à celle de la teneur en eau, la salinité ou le contenu en argile (Doolittle et Butnor, 2009). La quantité, la distribution, la chimie (concentration en sels dissous) et la phase (i.e. liquide, gazeux ou solide) de l'eau influencent sa conductivité électrique (Doolittle et Butnor, 2009). L'équivalent magnétique de la constante diélectrique, soit la pénéabilité magnétique, représente la capacité d'un matériau à se magnétiser sous l'effet d'un champ magnétique externe (Neal, 2004). Les sédiments organiques possèdent une variation de pénéabilité magnétique plutôt négligeable, ainsi son influence sur la propagation de l'onde est plutôt minime (van Dam et al, 2002; Neal, 2004). Seuls les matériaux à haute teneur en oxyde de fer se distinguent par une forte valeur de pénéabilité magnétique (Cassidy, 2008). La propagation de l'onde à travers un matériau est assujettie aux différentes sources d'atténuation qu'elle rencontre. Une forte atténuation aura comme incidence de diminuer la pénétration du signal, et ainsi réduire la profondeur sondée

(Davis et Arulan, 1989; Cassidy, 2008). L'atténuation est principalement due à la fréquence de l'onde et à la conductivité électrique des matériaux sondés (Cassidy, 2008). L'argile, le sel, le limon (Jol et Bristow, 2003); Doolittle et Butnor, 2009) et les sols saturés (Cassidy, 2008) sont des sources d'atténuation du signal EM. Par ailleurs, pendant la collecte des données, les antennes doivent être à plat et en position parallèle sur la surface sondée afin de maximiser le couplage avec le sol.

II-5-3-Le principe de fonctionnement de GPR

Les méthodes de la reconnaissance radar GPR en géophysique sont basées sur l'analyse de propagation des ondes électromagnétiques dans le sous-sol. Ces ondes sont émises par une antenne d'émission de dispositif qui est en contact avec un point de surface et émet une brève impulsion en direction du sous-sol. L'onde électromagnétique générée se propage au sein d'un milieu de type diélectrique. C'est un obstacle rencontré, une onde réfléchie revient vers la surface du sol et est détectée par l'antenne de réception (Figure II-8). Cette onde récupérée constitue une trace de sous-sol en un point précis et à l'instant donné (Davis, 1989; Daniels, 1996). 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'acquisition d'un ensemble de traces de sol suivant une direction de prospection rectiligne permet d'établir un B-scan (ou radargramme) du milieu sondé (Milsom, 2003).

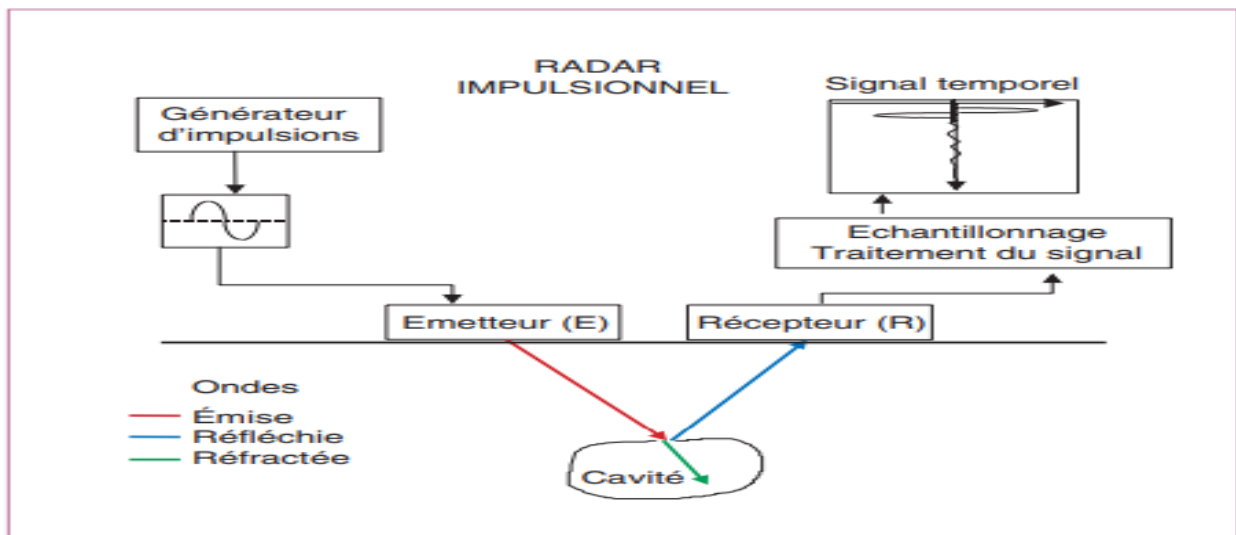


Figure II-8 : principe de fonctionnement de géoradar (Cyrile et al, 2004)

II-5-4-L'équation du radar

Est un bilan de puissances sur le trajet aller-retour d'une onde émise par un radar. Cette équation traduit l'influence de phénomènes physiques sur la puissance rayonnée, la propagation de l'onde jusqu'à la réception du signal réfléchi. Celle-ci dépend des caractéristiques du radar (antenne, circuits électroniques, pertes de signal...), de celles de la cible et du milieu traversé le long du trajet. L'équation sert à déterminer quelle puissance le système radar doit générer afin d'obtenir une image avec un certain rapport signal/bruit. Cette puissance est fonction des paramètres du système radar, y compris le gain d'antenne, la puissance du bruit. L'équation du radar permet de réaliser une estimation des performances d'un système radar. (Alia HAMADI, 2010)

Considérons un radar émettant une puissance P_t en direction d'un objet, cette puissance vaut :

$$P_t = e_t G_t P_f \quad [31]$$

Avec :

e_t : efficacité de l'antenne d'émission

G_t : gain de l'antenne d'émission

P_f : puissance fournie à l'antenne d'émission

La densité de puissance au niveau de l'objet sera :
$$P_a = P_t \frac{e^{-2\alpha d_{tc}}}{4\pi d_{tc}^2} \quad [32]$$

Avec : α : l'atténuation du milieu

d_{tc} : la distance entre l'antenne d'émission et la cible

La puissance reçue par la cible est égale au produit de la densité de puissance par la surface équivalente de la cible (S_c), c'est-à-dire :

$$P_{rc} = S_c \cdot P_a \quad [33]$$

La densité de puissance au niveau de l'antenne de réception vaut :

$$P_{tc} = P_{rc} \frac{e^{-2\alpha d_{cr}}}{4\pi d_{cr}^2} \quad [34]$$

Avec : d_{cr} la distance entre la cible et l'antenne de réception

La puissance P_r captée par l'antenne de réception dont la surface effective S_r vaut :

$$P_r = q \cdot e_t \cdot P_{tc} \cdot S_r \quad \text{avec} \quad S_r = G_r \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad [35]$$

q : facteur de dépolarisation compris entre 0 et 1

e_t : efficacité de l'antenne de réception

G_r : gain de l'antenne de réception

λ : longueur d'onde dans le milieu

A ce stade de calcul il est possible de relier la puissance transmise par l'antenne d'émission P_t à la puissance reçue P_r par l'antenne de réception pour obtenir l'équation du radar :

$$\frac{p_r}{p_t} = p_f \cdot e_t \cdot e_r \cdot G_t \cdot G_r \cdot q \cdot S_c \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{e^{-2\alpha(d_{tc}+d_{cr})}}{(4\pi d_{tc}d_{cr})^2} \quad [36]$$

L'équation radar est fonction de plusieurs constantes et variables. Du côté radar, on a la puissance transmise, le gain de l'antenne G_t et G_r et la longueur d'onde utilisé. En outre, la surface équivalente de la cible est fonction de la forme de la cible. Elle vaut :

$S_c = \Gamma^2 \cdot \pi \cdot a^2$ dans le cas où la cible est sphérique de rayon a

$S_c = \Gamma^2 \cdot \pi \cdot R^2$ dans le cas d'une interface plane lisse

$S_c = \Gamma^2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot R/2$ dans le cas d'une interface plane rugueuse

Avec : Γ le coefficient de réflexion au niveau de la cible et R la profondeur à laquelle la cible est enterrée.

II-5-5- Acquisition et émission du GPR

Le GPR est basé sur des principes semblables à ceux de la méthode de prospection sismique réflexion. Son emploi est fondé sur l'émission, la propagation, la réflexion, l'enregistrement des ondes électromagnétiques, le traitement et l'interprétation. La qualité des données enregistrées dépendra fortement d'un choix optimal des paramètres acquisition sur le terrain. Le choix des paramètres d'acquisition est déterminant. Ils dépendent de l'objectif et des propriétés électromagnétiques du terrain à explorer. Les paramètres les plus importants sont la fréquence d'émission, l'espacement des antennes.

L'émission se fait par un dipôle. Elle n'est pas ponctuelle, du fait du diagramme d'émission des antennes en forme de lobes. L'ouverture des lobes dépend de la nature du terrain : plus la constante diélectrique est petite, plus les lobes sont ouverts donc l'énergie émise par unité de surface diminue. Par conséquent, l'émission touche une faible profondeur de terrain lorsque la constante diélectrique est petite. (Violaine LAMY, 1995)

II-5-5-1-Mode d'acquisition :

L'acquisition des données géoradar est faite à l'aide de différentes géométries. Les modes d'acquisition plus fréquents sont :

- Profil réflexion à déport constant L'opérateur se déplace le long du profil géoradar et effectue les mesures en maintenant la distance (offset) entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception constante. C'est le mode d'acquisition le plus coutumier. (djedi.MK, 1995)
- Profil réflexion à déport variable L'opérateur enregistre en se déplaçant le long du profil géoradar uniquement avec des antennes en gardant l'autre antenne fixe ou symétriquement par rapport à un point milieu (FigureII-9).
- Mesures en transmission

Les acquisitions en transmission se réalisent quand les antennes émettrice et de réceptrice sont placées de part et d'autre d'un milieu à inspecter.

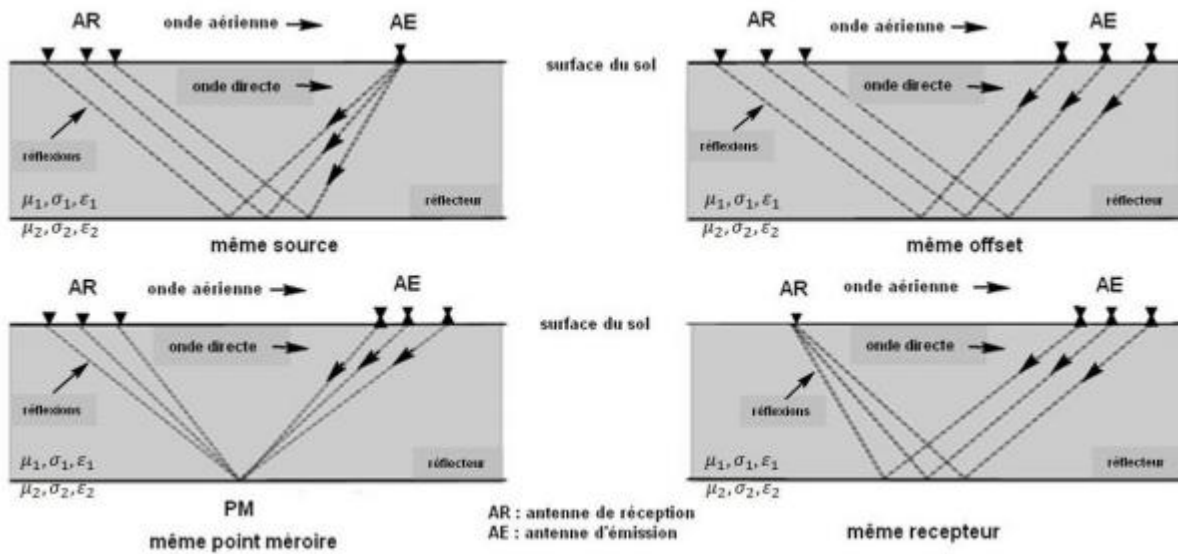


Figure II-9 : Différentes géométries d'acquisition (Djeddi. Mk,1995)

II-5-5-2- Les types d'acquisition

II-5-5-2-A-L'acquisition à offset constant

On nomme offset la distance séparant les deux antennes. Celles-ci sont utilisées parallèles entre elles au cours de l'acquisition et perpendiculairement au profil (Figure II-10). Les antennes sont déplacées simultanément après chaque point de mesure. Ce point de mesure est en fait un enregistrement plus ou moins long des ondes pendant un temps de l'ordre de la centaine de nanosecondes ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s.}$). Cet enregistrement est appelé une trace. A offset constant, un réflecteur plan dans le sous-sol apparaîtra comme un plan sur la coupe radar, un angle ou une arête de mur, considéré comme un point diffractant, sera visible comme une demi-hyperbole. (Bano, and Girard, J. F., 2000b)

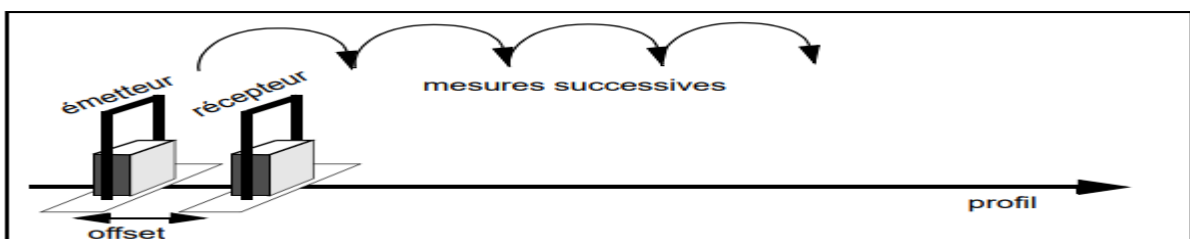


Figure II-10: Schéma de l'acquisition à offset constant. Chaque mesure successive donne lieu à une trace (Bano, and Girard, J. F., 2000b)

II-5-5-2- B- L'acquisition en point milieu

Cette méthode d'acquisition consiste cette fois à écarter les deux antennes au fur et à mesure, de part et d'autre d'un même point milieu. Les réflecteurs horizontaux apparaissent alors comme des hyperboles dont la courbure est corrélée à la vitesse du milieu surmontant par la formule:

$$t^2 = t_0^2 + \frac{4h^2}{v^2} \quad [37]$$

Où t est le temps sur l'hyperbole, t_0 le temps à offset nul ou encore le temps du sommet de l'hyperbole, h l'offset (la demi-distance séparant les deux antennes) et V la vitesse moyenne des ondes EM du milieu surmontant.

II-6-Traitement des données

Traitement des données GPR La séquence de traitement est un enchaînement de traitements qui permet d'obtenir à partir des données brutes de géoradar enregistrées sur le terrain, un document définitif interprétable appelé radar gramme ou section géoradar en 2D. L'acquisition des données brutes en géoradar est généralement entachée de bruits. Elles nécessitent un traitement pour améliorer le rapport signal sur bruit en vue d'assurer une meilleure interprétation afin d'obtenir une image structurale du sous-sol, montrant notamment l'agencement des réflecteurs le long du profil. La séquence de traitement GPR est aussi semblable à celle de la sismique réflexion, avec bien entendu des spécificités et varie selon l'objectif assigné étant donné que l'on utilise le champ vectoriel et polarisé. Comme en sismique, la séquence de traitement en géoradar comprend un traitement classique mais elle peut faire l'objet de traitements spéciaux. Nous définirons dans ce qui suit très succinctement les étapes classiques les plus courantes sans tenir compte de l'ordre de leurs exécutions dans la pratique. (Djeddi, MK ; 1995)

II-6-1-Correction du temps zéro

Selon les systèmes, un fichier de calibration d'antennes (mesure particulière réalisée sur une surface métallique ou dans l'air selon spécifications) est utilisé pour certaines étapes du traitement. Par exemple, pour les antennes aériennes GSSI, le fichier de calibration (plaque métallique à plusieurs distances de l'antenne) est utilisé pour supprimer une partie des résonances et mettre à zéro la réflexion. L'information contenue est utilisée pour l'analyse de vitesse de propagation des ondes.

Si la calibration sur la plaque n'a pas été effectuée, la remise à zéro du temps de réflexion sur la surface peut néanmoins être faite approximativement sur base de la recherche du pic principal de la réflexion. Dans ce cas, les différents signaux sont simplement décalés dans le domaine temporel, sans suppression des résonances au sein de l'antenne. (Colette Grégoire.1947)

Pour les antennes de contact, l'opérateur détermine le décalage en temps à appliquer aux traces pour ajuster le zéro. Contrairement aux antennes aériennes, le fait de considérer le premier pic de la réflexion de surface comme temps zéro risque d'engendrer une sous-estimation non négligeable de la profondeur des interfaces. En effet, cette réflexion est en fait la superposition de plusieurs ondes, dont les principales sont: une première qui sepropage directement dans l'air d'une antenne à l'autre, une deuxième qui voyage dans l'air mais se réfléchit sur la surface avant d'atteindre l'autre antenne et une troisième qui se propage dans le matériau de surface. La somme de ces composantes varie donc en fonction de nombreux paramètres (rugosité de surface, matériau, chariot, etc.) difficiles à quantifier.

II-6-2-Filtrage fréquentiel

Le filtrage est un procédé qui laisse passer ou non l'information en fonction de la discrimination quantitative, ce critère est en générale la fréquence, le filtre modifie les spectres d'amplitudes ou de phase ou bien les deux, des signaux qui le traverse. (Daniel et al ,1988).

Le filtre passe bande laisse passer qu'une bande ou intervalle de fréquences compris entre une fréquence de coupure basse et une fréquence de coupure haute du filtre .Cette transformation a pour fonction d'atténuer les fréquences à l'extérieur de la bande passante. Il est appliqué souvent un filtre linéaire passe bande de type Butterwoth qui permet d'éliminer dans la partie du radargramme brut là où les hautes fréquences sont fortement affectées par les bruits (Djeddi .MK, 1995).Il possède généralement un gain plus au moins constant dans sa bande passante, dont le gain (module de sa fonction de transfert) est décrit par la relation :

$$G(\omega) = |H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega^{2n}}{\omega_c^{2n}}}} \quad [38]$$

: étant l'ordre du filtre

ω_c : La fréquence de coupure

II-6-3-Un filtre passe-haut

Est une transformation mathématique appliquée à des données brut du georadar pour les transformer d'un domaine temporel en un domaine fréquentiel par la transformée de Fourier bidimensionnelle.Il laisse passer les hautes fréquences et atténue les basses fréquences. (Leparoux ,1997)

II-6-4-Application d'un gain

Une fonction de gain est une fonction temporelle (constante, linéaire ou exponentielle), définie par un ou plusieurs points, avec laquelle chaque trace va être multipliée. Une fonction linéaire/exponentielle compense les atténuations dues à la distance et à l'atténuation dans le milieu de propagation, la fonction exponentielle permettant une amplification plus importante de

la fin du signal. Le gain automatique AGC (Automatic Gain Control) amplifie les parties du signal de faible amplitude et atténue les parties du signal trop importantes. Pour calculer le gain, l'opérateur entre le nombre de points (gain calculé le long de la trace) et le nombre de scans à considérer. (Djeddi.Mk, 1995)

II-6-5-Amplification du signal GPR.

Elle est indispensable et permet de multiplier chaque trace georadar par un terme G appelé fonction de Gain qui peut être linéaire ou exponentielle en fonction du temps t ou encore utiliser un gain à contrôle automatique (AGC). La courbe de gain pour une trace georadar correspond à l'inverse de la courbe des amplitudes moyennes de cette trace. Cette courbe a donc la même allure que la courbe de variation d'énergie en fonction de la profondeur. (Djeddi.Mk, 1995)

II-6-6-La migration

Est l'opération de traitement qui remet aux réflexions de la couverture multiple, l'emplacement réel qu'elles occupent dans l'espace. Elle permet donc de mettre les événements en leur vrai endroit, de focaliser les hyperboles de diffractions à leurs sources, et éliminer les singularités provoquées par les modifications latérales des vitesses des ondes électromagnétiques. (Djeddi.Mk, 1995)

II-7-Le radargramme: L'acquisition d'un ensemble de traces (Figure II-11) du sol suivant une direction de prospection rectiligne permet d'établir un radargramme (image géoradar ou B-scan) du milieu sondé. En fonction du type de cibles rencontrées (tuyaux, citernes enfouies, strates géologiques...), chaque image est différente et unique. Le B-scan permet d'établir une cartographie du sol. Le manipulateur aura la tâche d'interpréter les résultats. (Figure II-12) est une représentation réelle d'un radargramme. (Mehennaoui.N ; 2012). L'affichage des radargrammes se fait au moyen d'une unité de traitement du signal. La plupart des radars commercialisés actuellement permettent une visualisation instantanée des B-scans, voir même l'application immédiate de filtres.

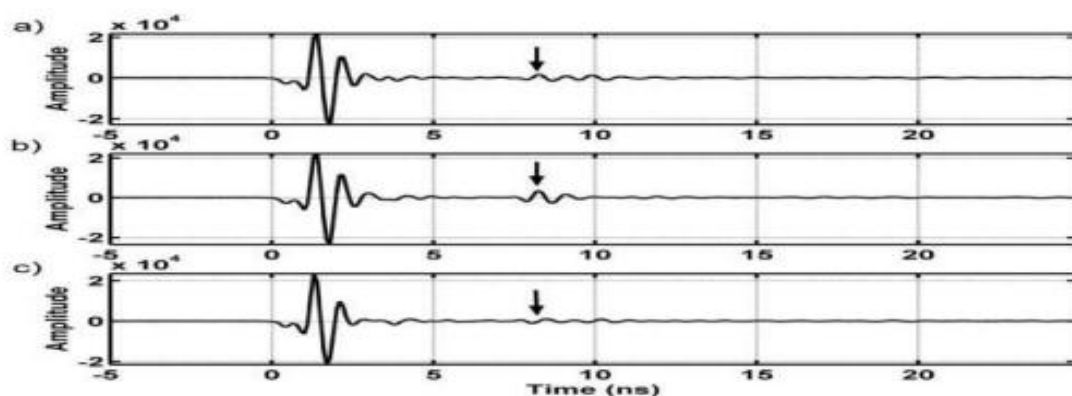


Figure II-11: trois tracés pour différents milieux géologiques (Mehennaoui.N ; 2012)

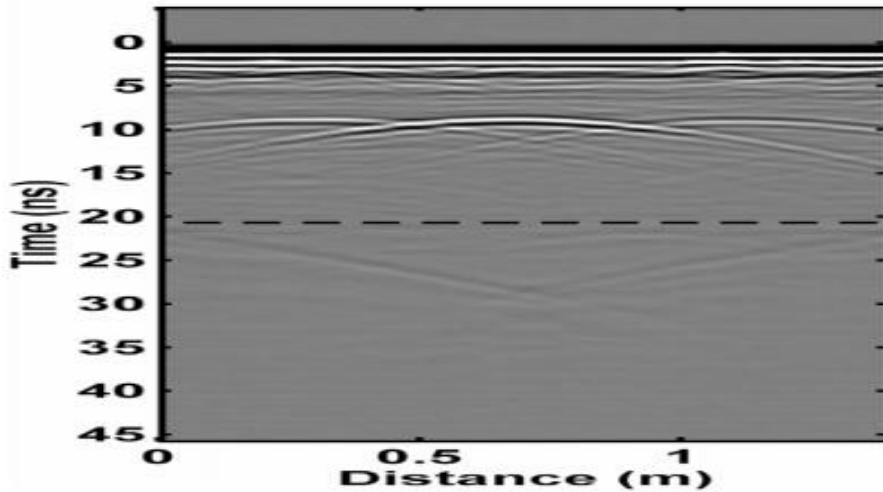


Figure II-12 : Image géoradar pour un milieu géologique (Mehennaoui.N ; 2012).

On distingue deux types :

II-7-1-Radargramme brut (ou coupe temps) :

il est similaire aux représentations obtenues en sismique : l’amplitude de chaque signal (FigureII-13), graduée en niveau de couleur, est donnée en fonction du temps de propagation (ns) et les signaux sont juxtaposée en fonction de la position en surface. (Cyrille .F et Pierre .P, 2004)

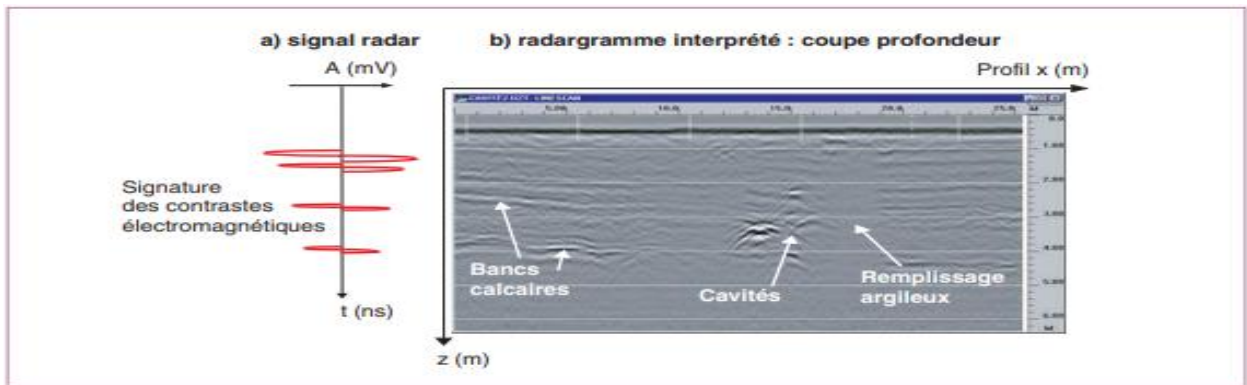


Figure II-13 : (a) signal radar, (b) exemple de radargramme interprété réalisée à une fréquence centrale $f_c=200$ mhz (Document LRPC de Saint-Brieuc).

II-7-2-Le radargramme interprété (ou coupe profondeur)

La connaissance des vitesses dans le milieu permet de représentée les signaux en fonction de la profondeur la grandeur traduisant ces pertes est notée $\tan \delta$, (Cyrille .F et Pierre .P ,2004) elle est définie par :

$$\tan \delta = \frac{\sigma'}{\omega \epsilon' \epsilon_r} \quad [39]$$

Aux fréquences d'utilisations radar, les milieux à faibles pertes sont tels que : $\tan\delta \ll 1$

La profondeur de pénétration est définie par : $d = \frac{2}{\sigma'} \sqrt{\frac{\epsilon' r}{\mu_0}}$ (m) [40]

II-8-Différences Finies dans le Domaine Temporel (F.D.T.D)

II-8-1-La méthode F.D.T.D

Est devenue la méthode numérique la plus répandue pour résoudre directement les équations de Maxwell. En 1966, Yee (Figure II-14) proposa les bases de cette dernière (Fayçal Rejiba, 2002). La F.D.T.D appliquée aux équations de Maxwell permet la modélisation des phénomènes de propagation et d'interactions des ondes électromagnétiques au sein d'un milieu quelconque. Grâce à une formulation exacte qui consiste en un maillage, dans lequel les valeurs des champs électrique et magnétique sont calculées en fonction des valeurs des champs dans les cellules voisines par différences finies (Figure II-14),

II-8-2-Principes de la F.D.T.D

La méthode F.D.T.D se fonde sur la formulation standard des équations de Maxwell. Dans un milieu continu, isotrope et linéaire, les composantes des champs électrique et magnétique, des équations de Maxwell à 3D. (Mehennaoui, N)

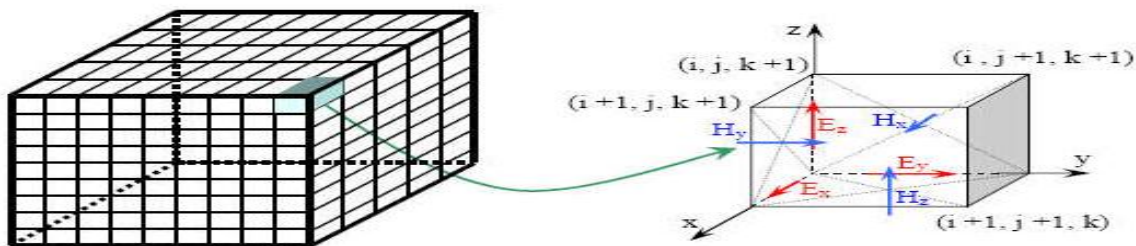


Figure II-14 : schéma numérique 3D de la maille élémentaire selon Yee.

II-9 -Conclusion :

Les principes physiques sont fondés sur les phénomènes d'interactions des ondes électromagnétiques avec la matière, et concernent la réflexion, la diffraction, et la réfraction. La stratégie de prospection doit être élaborée avec le plus grand soin en fonction de l'application visée : le choix des antennes (bande de fréquences), le mode d'émission (fréquentiel ou temporel) et la géométrie d'acquisition (échantillonnage spatial, écartement entre antennes) sont les paramètres majeurs à définir de façon optimale. Le géoradar apparaît doté d'un potentiel

considérable pour de très nombreuses problématiques de prospection en proche surface. Cependant son utilisation reste limitée dans un milieu où la conductivité électrique est élevée. Lorsque l'environnement est favorable à son utilisation, la richesse des informations qui peuvent être extraites des traces géoradar peut conduire à de la « surinterprétation ». Il est donc nécessaire de recourir à divers types de traitements des données (amplification, filtrage, déconvolution, migration et inversion de données) en choisissant préalablement des approximations physiques ou mathématiques. La calibration des mesures géoradar ne peut être assurée que par une connaissance directe des contrastes diélectriques dans quelques zones du site prospecté. La réalisation de forages reste le seul moyen d'acquérir des connaissances a priori pour interpréter correctement les données.

Chapitre III

Applications des méthodes géoradar à la géotechnique

Simulation d'un modèle théorique

III- 1 Représentation

Le but de cette partie consiste à réaliser une étude théorique par simulation de la propagation des ondes électromagnétiques du radar sol dans les milieux géologiques hétérogènes. Le phénomène de la propagation sera étudié à travers les ondes réfléchies : principe sur lequel travail le géoradar. Cette simulation a été réalisée par des physiciens sur le logiciel GPRMAX2D/3D.

III-2 Effets des paramètres σ , ϵ et μ sur l'onde EM

La modélisation de la permittivité est basée sur le modèle de Debye avec conduction pour des milieux non dispersifs. Le modèle de Debye pour les milieux non dispersifs est caractérisé par un temps de relaxation $\tau = 0$.

III-2-1- Profil 1

Ce profil est destiné à étudier la propagation des ondes électromagnétiques par l'intermédiaire des radargrammes. La simulation de ce profil se fait sur deux modèles : le premier modèle est le modèle (couches) constitué de trois couches homogènes (sable sec, sable saturé et calcaire) pour former un milieu hétérogène, ce modèle peut se trouver dans la nature dans les montagnes ou les massifs et le deuxième modèle est le modèle « cavité », ce dernier modèle est constitué d'une cavité , suivant le matériau avec lequel la cavité est pleine et la matière du milieu dans lequel elle se trouve, ce modèle donne une idée sur plusieurs forme de milieux géologiques.

III-2-1-1-Modèle couches II est constitué de trois couches intercalées entre elles sur une parcelle de sol.

Les trois couches sont placées selon l'ordre suivant :

1) Modèle couches I : (Figure III-1).

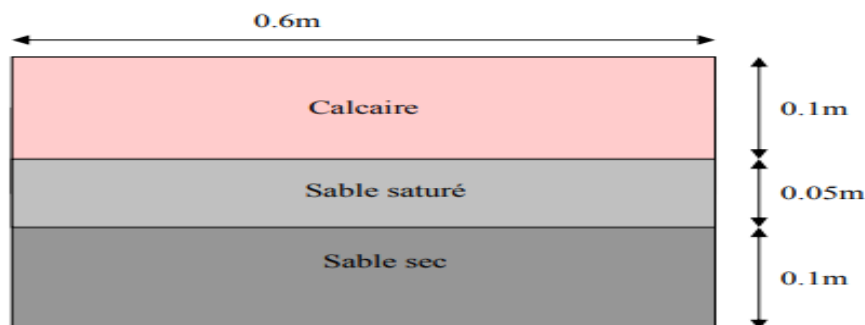


Figure III-1 : Schéma synoptique du modèle couches I

Le radargrammes et les signaux des tracés de ce dernier sont donnés par (figure III.2) a et b.

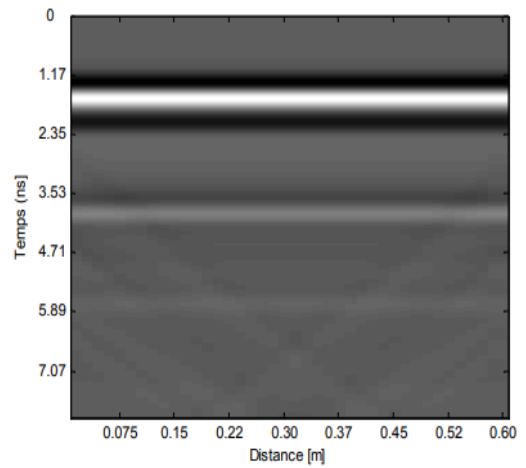
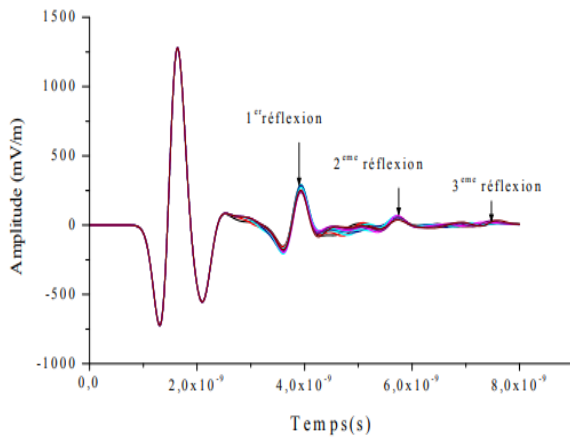


Figure III-2.a : Signaux des tracés du modèle couches I.

Figure III-2b : Le radar grammes du modèle couche I.

2) Modèle II (Figure III-3)

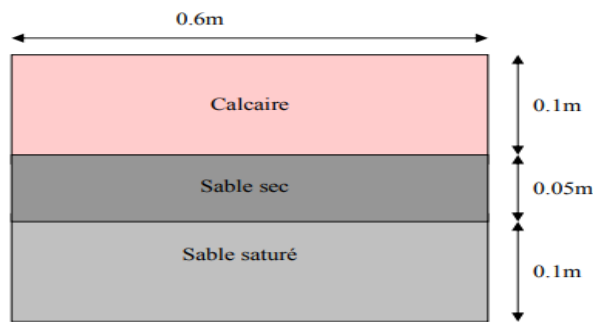


Figure III-3 : Schéma synoptique du modèle couches II

Le radar grammes et les signaux des tracés pour ce modèle sont donnés par les figures III-3 a et b.

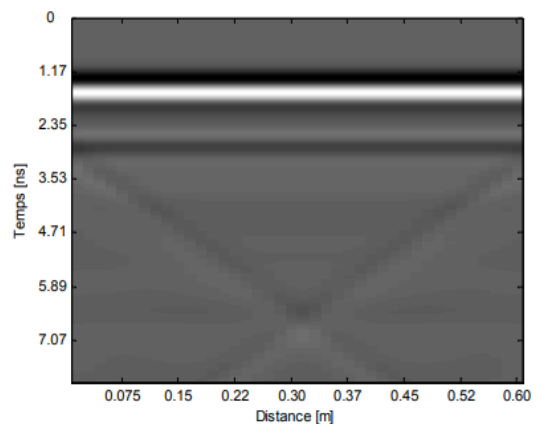
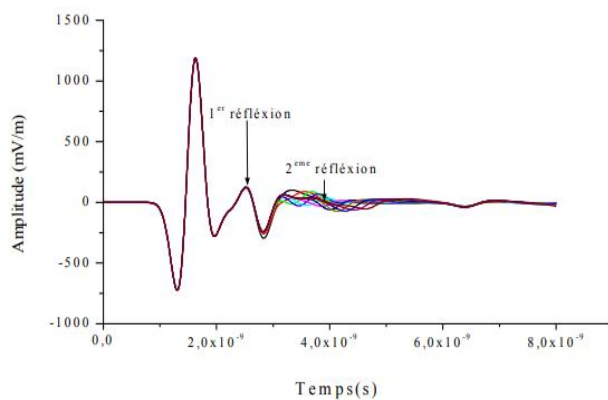


Figure III-4a : Signaux des tracés du modèle couches II.

Figure III-4b : Le radargramme du modèle couche II

Le radargramme de la figure (III-2b) montre que le modèle I est constitué de 3 couches distinctes obtenues à l'aide des impulsions réfléchies de la figure (III-2a). Le contraste de couleurs entre le foncé et le clair dans les deux dernières couches est le résultat du phénomène de conduction dans le sable que ce soit sec ou saturé tandis que la couche de calcaire ne présente rien. Le radargramme de la figure (III-4b) du modèle II montre 2 couches au lieu de 3. La présence du contraste des couleurs dans les couches de sable est due au phénomène de conduction dans ces dernières.

III-2-2-1- Modèle cavité

Ce modèle est un milieu géologique. Il est constitué d'une cavité circulaire à l'intérieur du sol .

1-Cavité pleine d'argile

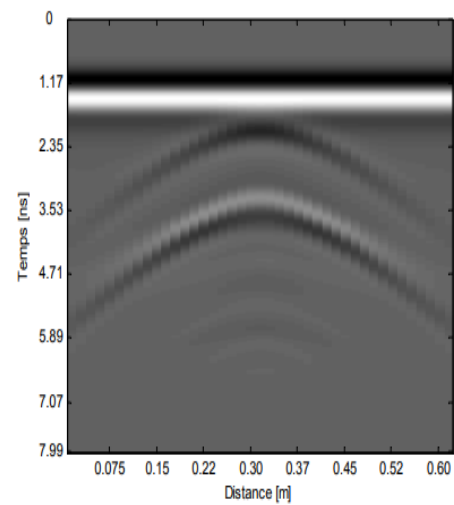
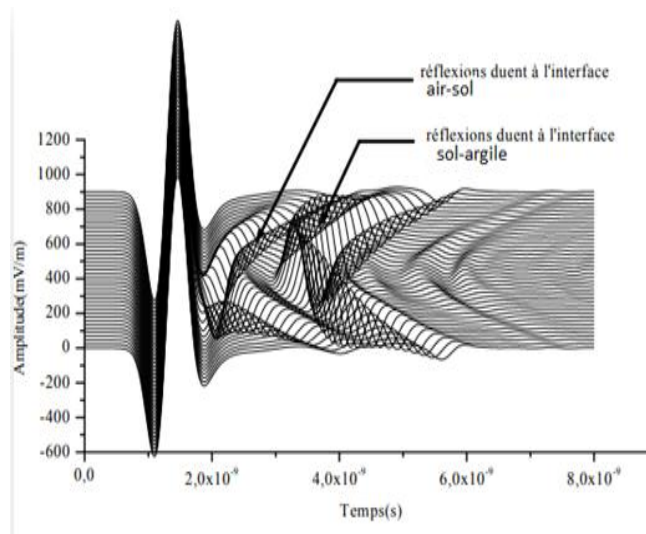


Figure III-5a : Signaux des tracés du modèle cavité pleine d'argile

Figure III-5b : Le radar gramme du modèle cavité pleine d'argile.

2-Cavité pleine de sable - humide

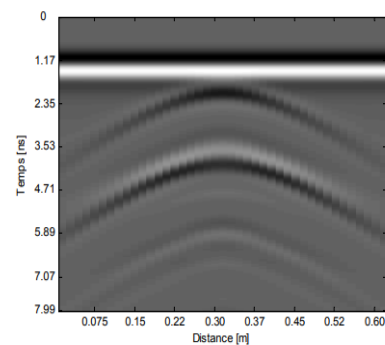
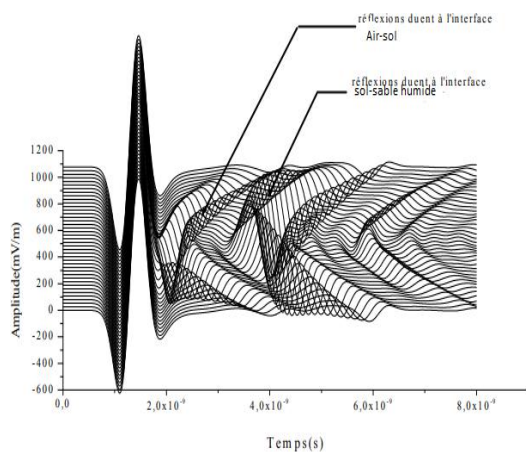


Figure III-6a : Signaux des tracés du modèle cavité pleine de sable-humide

Figure III-6b : Le radar gramme du modèle cavité pleine de sable-humide

3-Cavité pleine de sable-sec

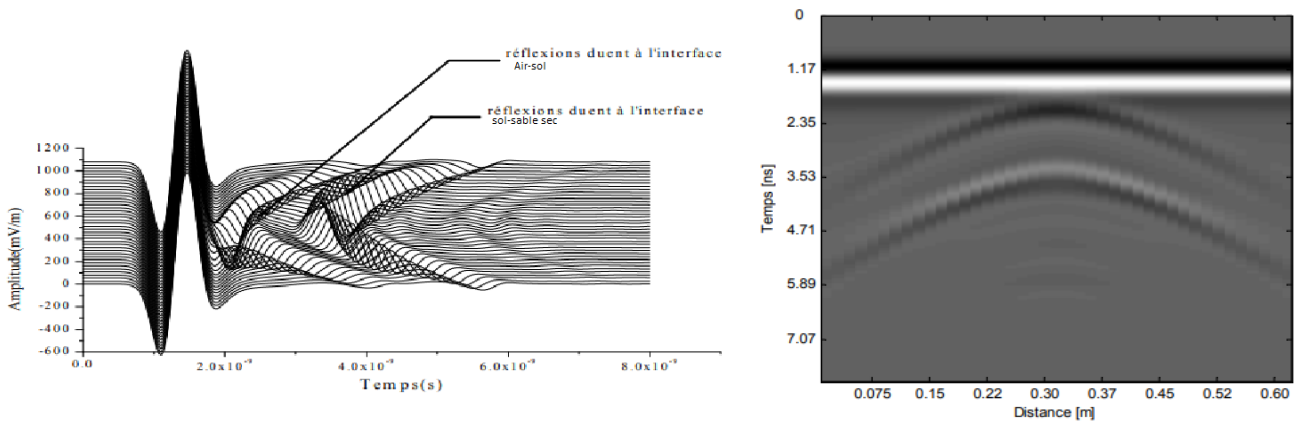


Figure III-7a : Signaux des tracés du modèle cavité pleine de sable-sec.

Figure III-7b : Le radargramme du modèle cavité pleine de sable-sec.

En ce qui concerne l'argile, les images des signaux et de radar (Figures III-5a et III-5b) montrent deux arcs, le premier arc marque la réflexion de l'onde EM par l'interface (air – sol) et le deuxième l'interface (sol–argile), les interférences induites par la conductivité de l'argile dans le corps de la cavité présentent des contrastes de couleurs entre le foncé et le clair.

Le sable sec présente aussi deux arcs suite aux changements de la permittivité et de la conductivité entre les différents matériaux qui composent le modèle cavité (Figure III-7a et III-7b). Le premier arc correspond à la transition air–sol et le deuxième à celle du sol– sable sec, la conductivité de ce dernier se traduit par un contraste de couleurs au sein de la cavité.

En fin, le sable saturé dans la cavité induit trois arcs faussant ainsi la logique des lois de Snell-Descartes. Ceci est causé par la teneur en eau du sable qui a fait que la permittivité de ce dernier soit graduelle, formant ainsi une anomalie se traduisant par le troisième arc. De ce fait, on voit bien que l'eau ou plutôt le taux d'humidité d'un milieu géologique a une grande influence sur les résultats des radars géologiques.

III-3-Conclusion

La dépendance de l'onde EM aux paramètres électromagnétiques dans le milieu géologique, engendre la distorsion du signal, l'atténuation et la dispersion lors des phénomènes de propagation et de réflexion. De manière générale, ces mécanismes agissent sur la forme des ondes. Cette étude a fait l'objet de plusieurs simulations avec différents milieux géologiques pour faire comprendre le phénomène de la propagation des ondes EM dans le sol.

Etude expérimentale

III- 1-Introduction

Nous abordons dans ce chapitre la partie appliquée de notre travail, en utilisant la méthode GPR (GroundPenetrating Radar) pour étudier la caractérisation du sous-sol, les hétérogénéités de subsurface (cavités, fissurations., discontinuités .) dans un site situé au niveau de l'agglomération algéroise (AïnBenian), à l'aide des radargrammes de données traitées, c'est-à-dire améliorées en qualité d'enregistrement, récoltées lors d'une campagne d'investigation géophysique menée conjointement par des équipes du CRAAG et de l'université USTHB. Au préalable le site était destiné à la construction d'habitat, dont l'intervention de la géotechnique était impérative. Durant une exploration rapides des lieux avoisinants, plusieurs cavités ont été localisées (FigureIII-8). Dans ce présent travail nous essayons de suivre leur extension en subsurface par l'intermédiaire de l'outil Géoradar.

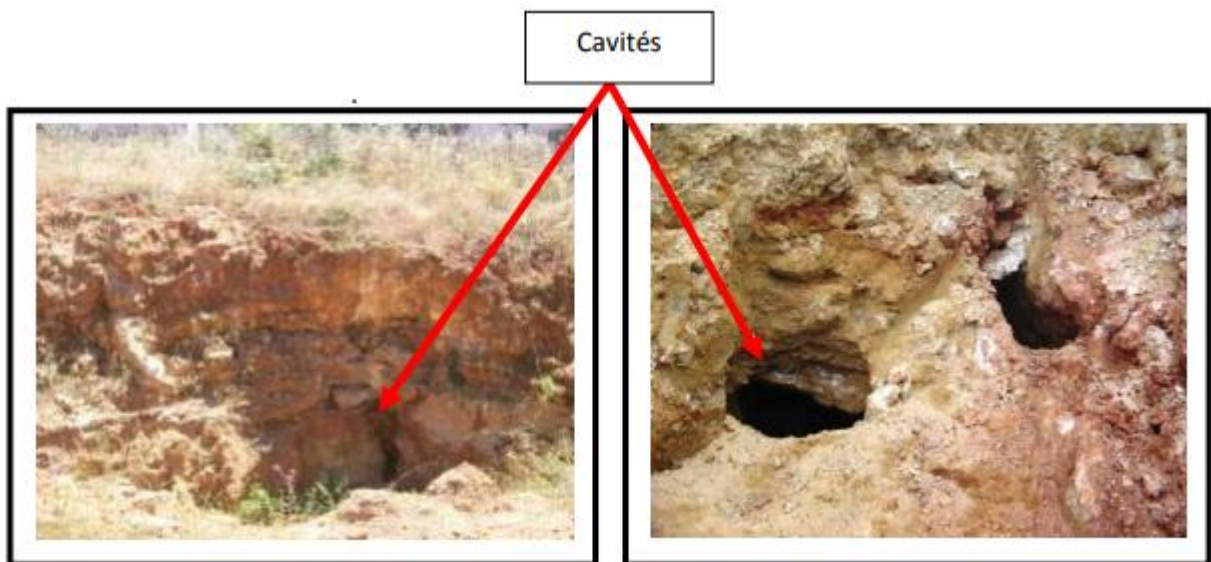


Figure. III-8 : Exemples de cavités dans le site d'AïnBenian.

III-2- Présentation de la zone d'étude

III.2.1. Situation géographique

Le secteur d'étude est situé au Sud de la ville d'AïnBénian exacte en Guyotville, à l'extrémité ouest du massif d'Alger. Cette ville est limitée au Nord par la mer Méditerranée, au Sud par l'oued Beni Messous, à l'Ouest par la baie de Bousmail et à l'Est par la forêt de Bâinem (FigureIII-9a). Le site d'étude a une superficie d'environ 1400 m² (20 m × 70 m), avec une pente générale à faible plongement Nord. Il est limité au Nord et à l'Est par un surplus de terrain et au Sud et à l'Ouest par des habitations précaires (FigureIII-9b).

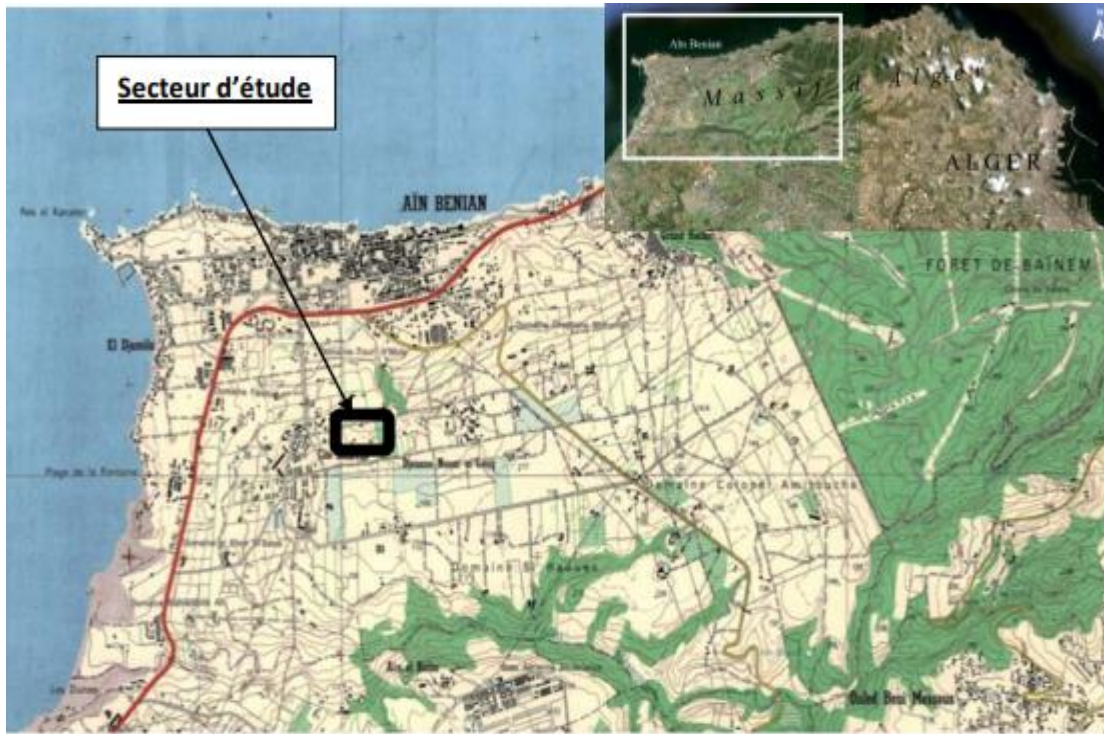


Figure III-9 : Situation du secteur d'étude par rapport à Aïn Benian (extrait de la carte topographique de Chéraga au 1/25'000).

III.2.2. Contexte géologique géologique

D'une manière générale, la région d'Alger appartient au domaine tellien d'Algérie du nord. Elle est dominée par un massif métamorphique primaire, bordé par des assises sédimentaires tertiaires et quaternaires. Sans établir une description lithologique exhaustive des terrains à l'affleurement dans l'Algérois, qui sortirait d'ailleurs du cadre de notre étude, il apparaît néanmoins utile de rappeler que le Primaire est représenté par un complexe métamorphique composé essentiellement de schistes, micaschistes, gneiss et calcaires métamorphiques. Tandis que le Secondaire semble être absent dans la région d'Alger (lacune sédimentaire probablement liée à une érosion), le Tertiaire constitue la principale couverture sédimentaire, discordante sur le substratum métamorphique. Dans l'Algérois, il est marqué par deux principales formations : les marnes bleues du Plaisancien et la molasse de l'Astien.

Le Quaternaire est représenté par des dépôts détritiques reposant en discordance sur les terrains primaires et tertiaires. Il est notamment marqué par des terrasses marines étagées le long du flanc Nord sur le Sahel d'Alger (Saoudi, 1989), où elles forment un système en gradin (le Calabrien au sommet, le Sicilien puis le Tyrrhénien vers le rivage).

Dans notre site d'étude, les terrains géologiques sont précisément dominés par la terrasse tyrrhénienne.

Chapitre III: Applications des méthodes géoradar à la géotechnique

Celle-ci correspond à un niveau marin représenté par une lumachelle à Pectoncles, pouvant renfermer localement des poudingues.

L'épaisseur demeure homogène et varie entre 0.5 et 2 m.

Son âge oscille entre [-140,000] ans et [-31,000] ans (Saoudi, 1989). D'après la carte géologique de Chéraga au 1/50'000 (Aymé, 1961), les principaux terrains à l'affleurement sont (Figure III-10) :

- Des dunes lapidifiées (q^{2bd}) correspondant à une phase de régression postérieure à la terrasse marine q^{2bm}
- des sables rouges avec ou sans galets (as), produits d'altération superficielles des couches gréseuses, argilo-gréseuses et des calcaires.

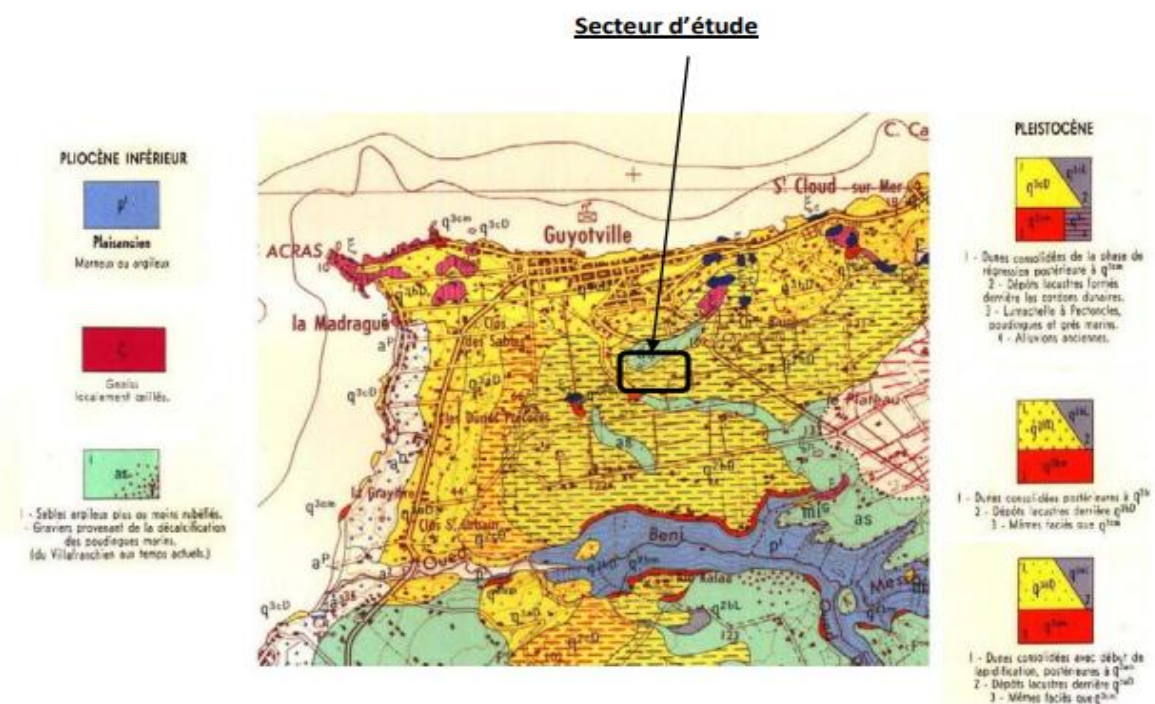


Figure III-10 : Carte géologique du secteur d'Aïn Benian (extrait de la carte géologique de Chéraga au 1/50'000, Aymé, 1961).

Les investigations réalisées in situ nous ont permis d'observer sur une section d'affleurement, des sables grésifiés pouvant inclure à la base des graviers de silice. Une cavité importante est visible à la base de cette section (Fig III-11).

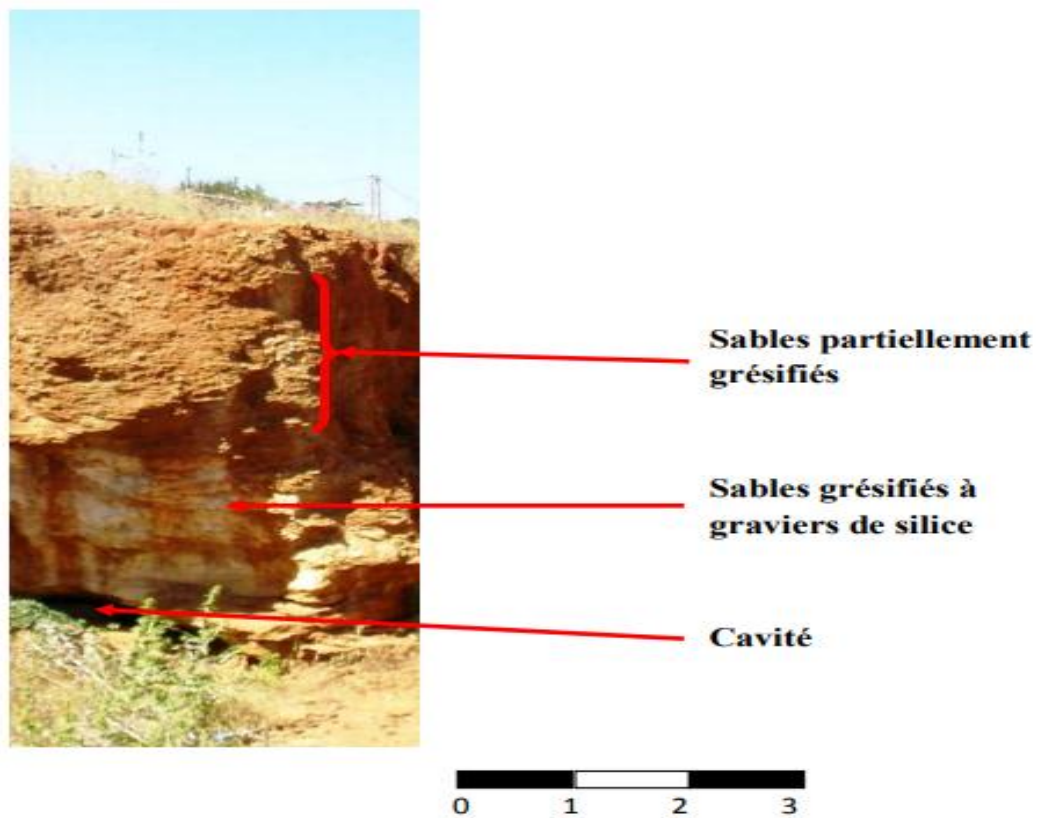


Figure III-11 : Section d'affleurement de la terrasse tyrrhénienne dans le site d'étude.

III-3- Mise en œuvre

Les mesures GPR ont été réalisées en utilisant le mode offset-constant. 21 profils ont été dressés (Figure III-12), dont :

- 6 profils longitudinaux, orientés ENE-WSW, longs d'environ 70 mètres chacun et espacés d'environ 2.5 m ;
- 15 profils transversaux, orientés NNW-SSE, longs entre 11 et 20 m et espacés d'environ 5 m.



FigureIII-12:Photo satellitaire Google Earth du site d'étude avec la disposition des profils GPR.

III-4 Appareillage utilisé

Le matériel GPR utilisé est composé de :

- une unité d'acquisition de données radar SIR20 GSSI ;
- une antenne basse fréquences (200 MHz), autorisant une profondeur d'investigation de 08 mètres environ ;
- un GPS



FigureIII-13 : Composition du matériel GPR GSSI utilisé.

Les paramètres d'acquisition lors de cette campagne sont les suivants :

- Nombre de scans / mètre : 40

Chapitre III: Applications des méthodes géoradar à la géotechnique

- Nombre de scans / seconde : 100
- Nombre d'échantillons de chaque scan : 512
- Temps d'écoute : 100 ns
- Constante diélectrique : 3.5

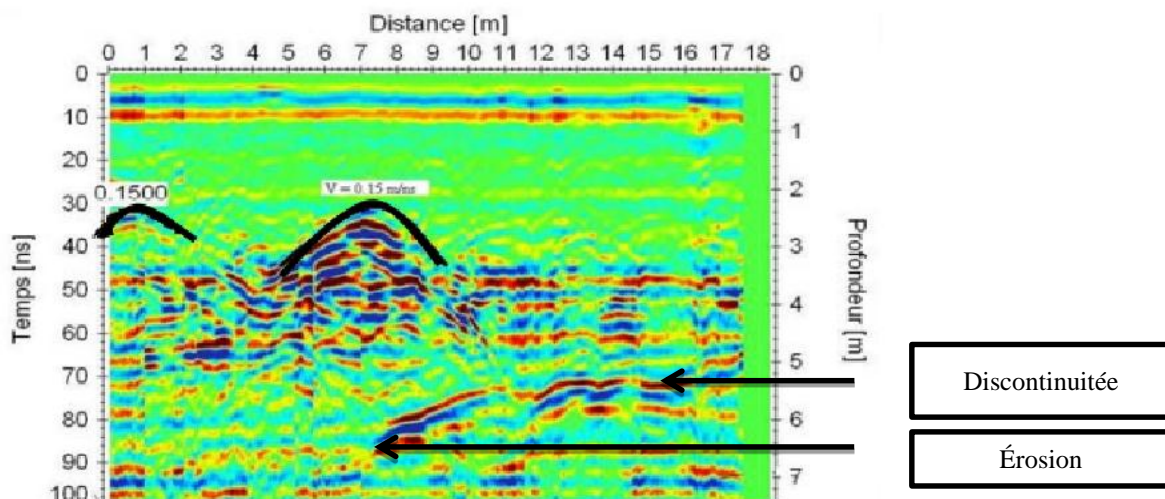
III-5-Traitement des données

Pour le traitement des données GPR, nous avons effectué les étapes successives suivantes :

- Shifter les premières arrivées afin de caller la profondeur $Z=0$ m avec la première arrivée (onde directe aérienne et onde directe du sous-sol) ;
- enlever une composante diffusives dû aux basses fréquences en appliquant le « Dewow » ;
- appliquer un filtre passe bas et passe haut en utilisant un intervalle d'échantillonnage = 0.2 ns qui donne une fréquence de Niquist F_{nyq} Le filtre passe bas a été appliqué à 30% de $F_{nyq} = 2500$ MHZ et le filtre passe haut à 10% de F_{nyq}
- appliquer un gain exponentiel afin de compenser l'atténuation du signal ;
- convertir les profondeurs temps en profondeurs mètres.

La vitesse moyenne appliquée a été obtenue par le logiciel de traitement qui intègre un module de calibration de la vitesse en fonction des hyperboles de diffraction (FigIII-14).

Celle-ci est estimée à 0,15 m/ns, correspondant aux sables secs qui caractérisent notre terrain d'étude.



FigureIII-14- Calibration de vitesse.

III-6-Représentation et interprétation des radargrammes longitudinaux

Les figures (III-15-1) et (III-15-2) mettent en évidence les profils (1), (2), (3), (4), (5) et (6).

Ces profils Longitudinaux ont une orientation ENE-WSW, leur longueur varie entre 70 et 77 m, ayant un nombre de traces variant de 2815 à 3103 au total, représentés en échelles de distance, de profondeur en temps (ns) et de profondeur en mètres.

On peut faire quelques premières observations sur certains événements présents sur les différents profils : Nous remarquons sur les 6 profils un contraste horizontal, séparant deux milieux diélectriquement différents à une profondeur qui varie de 1 m à 3 m. La profondeur de ce contraste diminue en allant du profil (1) vers le profil (6), c'est-à-dire du Sud vers le Nord.

Le premier milieu supérieur est relativement homogène, contrairement au second. D'après la géologie du terrain et nos observations effectuées sur le site d'étude, ce contraste correspond probablement à une discontinuité séparant deux milieux différents qui correspondent aux sables partiellement grésifiés et aux grès consolidés respectivement.

Un autre contraste important qui correspond à une réflexion, apparait également sur les 6 profils (en noir). Il débute à une profondeur d'environ 1 m pour tous les profils et atteint une profondeur maximale d'environ 7 m, néanmoins de façon moins évidente sur les profils (5) et (6). En plus, ce contraste a une inclinaison en allant vers l'Est. Il met en évidence une très grande différence de permittivité diélectrique pouvant correspondre éventuellement à une formation très compacte (conglomérat).

D'autres contrastes importants (cercles en rouge) qui correspondent à des diffractions mettant en évidence des anomalies sont observables. Certaines d'entre elles sont récurrentes sur les 6 profils à la même position ; la première anomalie se trouve à une distance d'entre 20 m et 30 m et une profondeur d'environ 4 m. La deuxième anomalie est située à une distance de 35 m et une profondeur de 4 m. La troisième anomalie enfin se trouve à 45 m et une profondeur de 4 m. Ces hétérogénéités peuvent correspondre à des zones de dissolution plus ou moins importantes formant ainsi des cavités. D'autres anomalies sont observées localement comme sur le profil (1) à $54\text{m} < x < 59\text{m}$ à une profondeur de 4m, pour le profil (3) à $x=67\text{m}$ à une profondeur de 6m, pour le profil (5) et (6) à $x=65\text{m}$ et $x=63\text{m}$ respectivement à une profondeur de 3m. Ces anomalies désignent des zones de diffractions peu étendues indiquent des zones altérées. Pour le profil (5) à la position $x=34\text{m}$ nous observons aussi une anomalie dont la réponse est allongée en profondeur qui probablement correspond à une fracture ou encore à une zone de dissolution.

III-7- Représentation et interprétation des radargrammes transversaux

Les figures de (III-16-1) à (III-16-8) illustrent les radargrammes des 15 profils transversaux orientés NNW-SSE, dont la longueur varie entre 11 et 20m, leur nombre de traces est compris entre 479 et 831, ils révèlent comme pour les profils longitudinaux un contraste séparant deux milieux superposés. Le premier étant relativement homogène contrairement au second, avec une épaisseur faiblement variable d'environ 2m. Ces deux milieux comme constaté pour les profils longitudinaux correspondent respectivement aux sables partiellement grésifiés et aux grés consolidés.

Le contraste le plus visible (En noir) correspondant à une réflexion, est présent sur tous les profils. Il s'étale le long des profils situés à l'Ouest du profil (7) au profil (11), en étant relativement horizontal. Par contre sur le reste des profils se situant à l'Est (de 12 à 21) il est discontinu, et a une inclinaison de plus en plus marquée vers le Sud. Par ailleurs, ce contraste s'approfondit en allant vers l'Est, et subit de très fortes atténuations par endroits qu'il devient difficile à visualiser. La grande différence de permittivité diélectrique nous a permis d'interpréter ce contraste comme étant une formation très compacte localement karstifiée.

En outre, ce contraste présente des réverbérations avec de fortes amplitudes, comme pour le profil (9), a la position $x=5,5m$ et $8m < x < 10m$.

Pour le profil (10), a la position $x=5m$.

Pour le profil (11), a la position $x=3m$ et $10m < x < 13m$

Pour le profil (13), a la position $10m < x < 14m$.

Pour le profil (14), a la position $x=3m$.

Pour le profil (15), a la position $x=4m$ et a $x=8m$

Et pour le profil (18), a la position $10m < x < 14m$. Ces réverbérations correspondent à des zones d'altérations et de dissolution issues d'infiltration des eaux par capillarité.

D'autres anomalies (Cercles en rouge) peuvent être visibles sur ces 15 profils. Le profil (7) ne présente aucune anomalie à part les deux contrastes, le profil (8) montre une anomalie localisée à une distance $x=11.5m$ et à une profondeur de 3.5m, le profil (9) présente une anomalie à une distance $x=11m$ et à une profondeur de 4m, le profil (10) présente une anomalie $x=10m$ à une profondeur de 6m, le profil (11) montre deux anomalies localisée en profondeur de 2m situées à des distances $x=3.5m$ et $x=6.5m$, le profil (12) présente à la même profondeur c'est-à-dire égale à 2m, trois anomalies à $x=1m$, $x=4.5m$ et $x=7m$, le profil (13) met en évidence une hétérogénéité au-dessus du contraste en noir, le profil (14) montre deux anomalies situées a $x=3.5m$ et $x=10m$ a une profondeur de 4m, le profil (15) met en évidence une anomalie $5m < x < 9m$, à une profondeur de 4m, le profil (16) une anomalie importante a une distance $x=7m$ et une profondeur

Chapitre III: Applications des méthodes géoradar à la géotechnique

d'environ 3m, le profil (17) montre une petite anomalie a $x=6m$ d'une profondeur de 2.5m, le profil (18) montre deux anomalies, la première située a $x=2m$ a une profondeur de 1m étant plus importante que la deuxième située a $x= 11.5m$ a une profondeur de 2m, le profil (19) met en évidence quatre anomalies situées à une profondeur de 2m situées a $x=3m$, $x=5.5m$, $x=8.5m$ et $x=17m$, le profil (20) présente deux anomalies situées à une profondeur de 3.5m et à une distance $x=2m$ et $x=13m$ enfin le profil (21) met en évidence deux petites anomalies a une profondeur de 2m situées a $x=3.5m$ et $x=7m$. Toutes ces anomalies désignent des zones de dissolution due à la présence d'eau capillaire ou de saturation qui a dissous le ciment (silice) provoquant des vides.

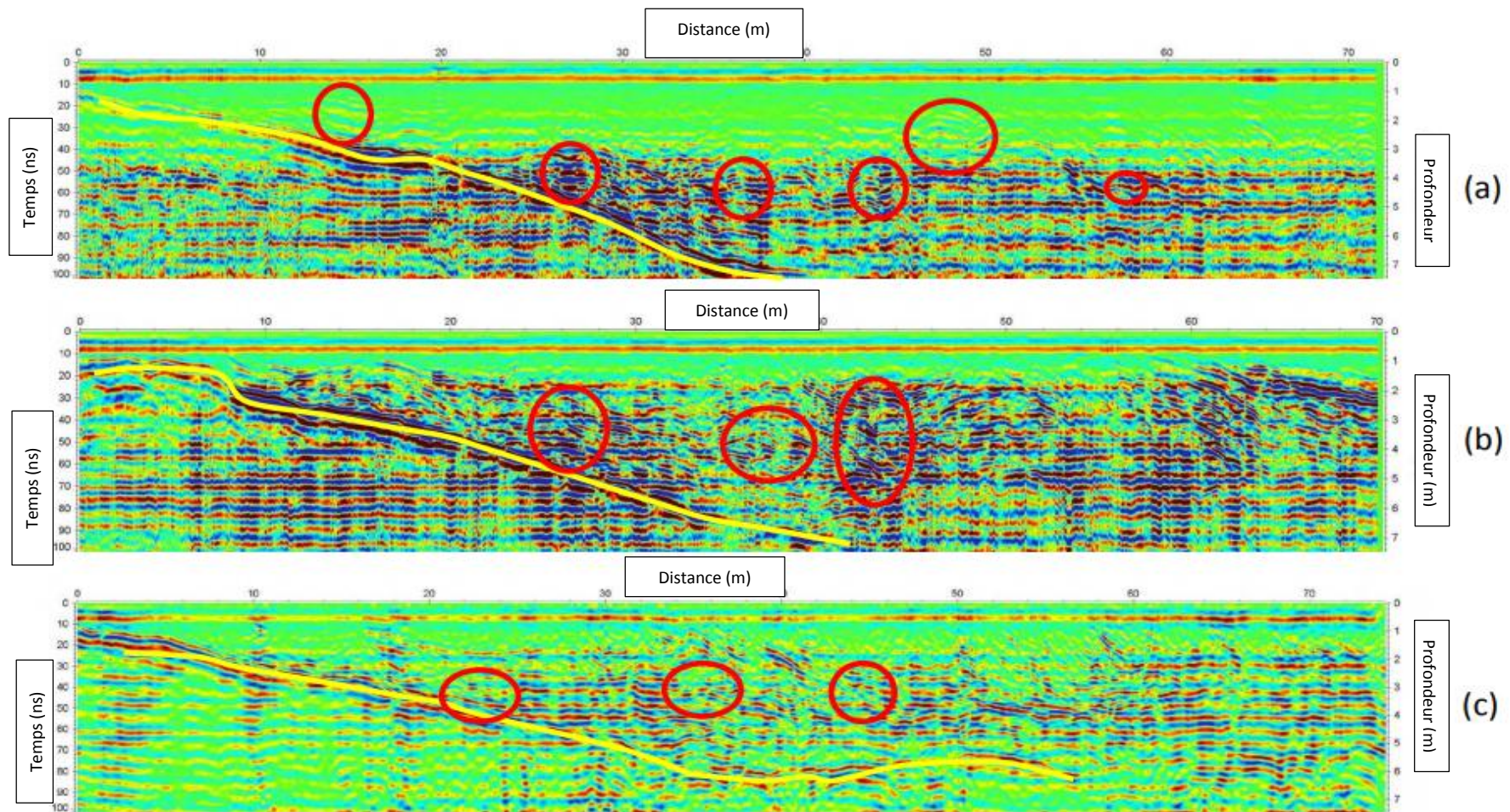


Figure III-15: (a) Profil 1, (b) Profil 2, (c) Profil 3.

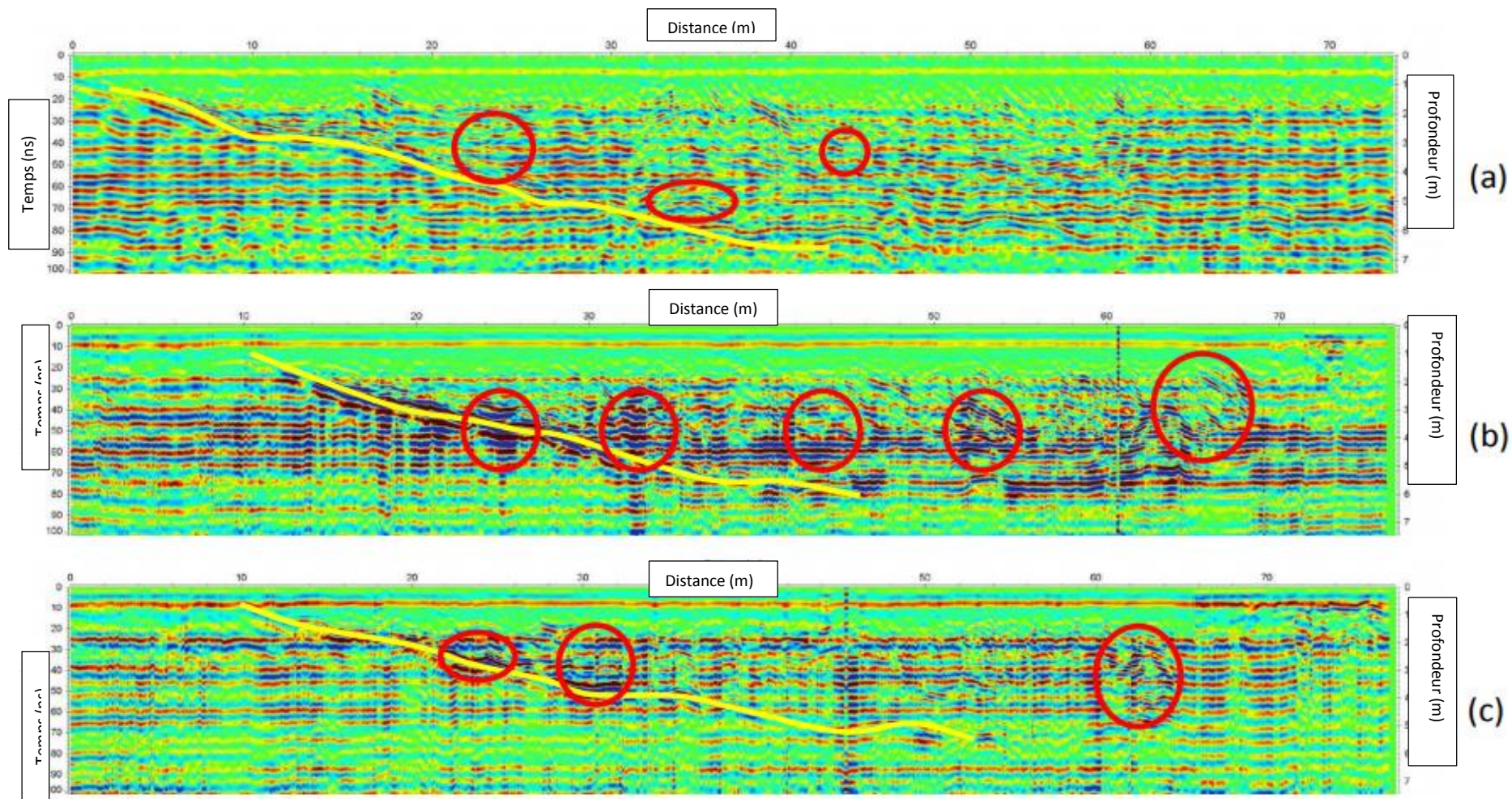
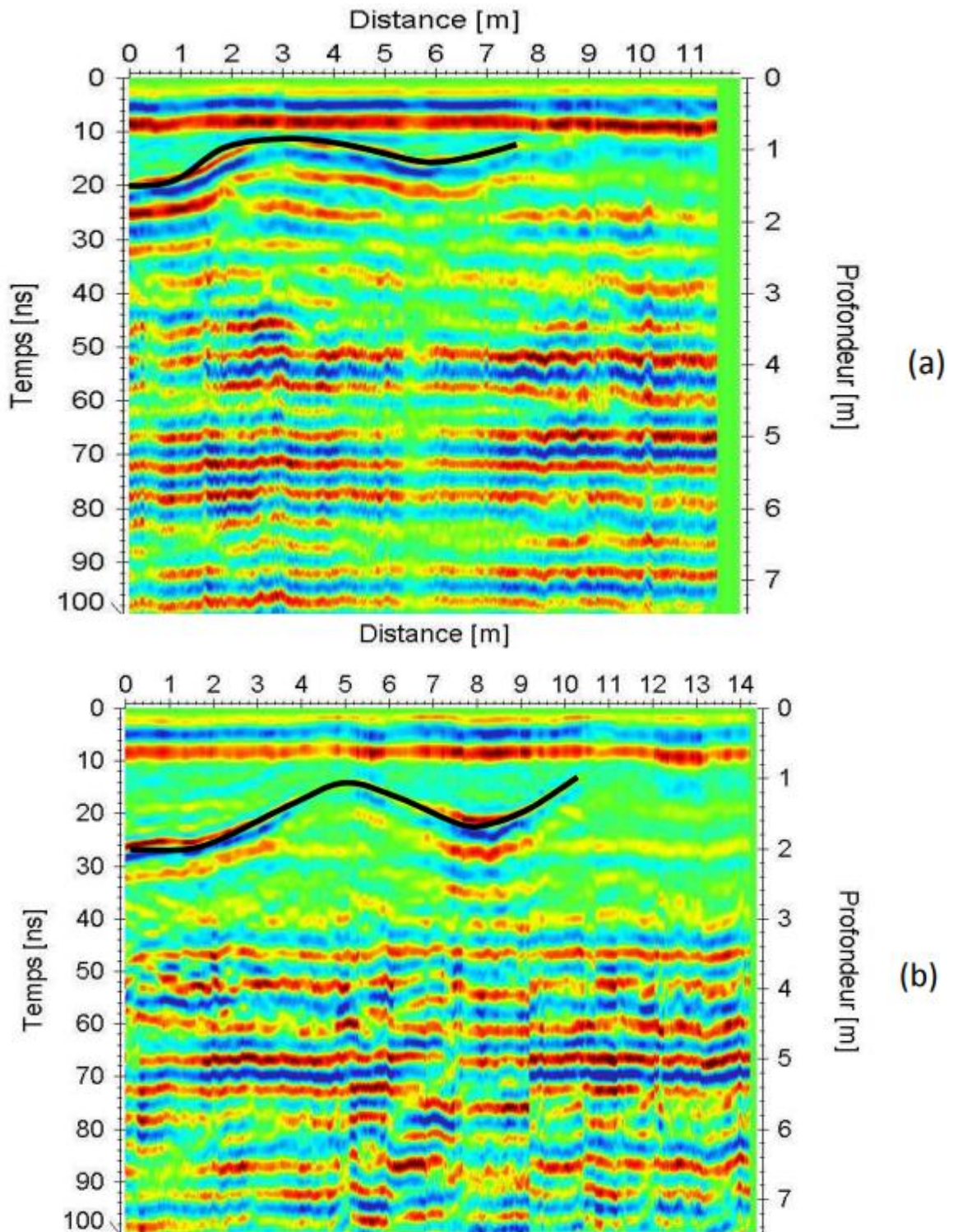


Figure III-16 : (a) Profil 4, (b) Profil 5, (c) Profil 6.



FigureIII-17 : (a) Profil 7, (b) Profil 8.

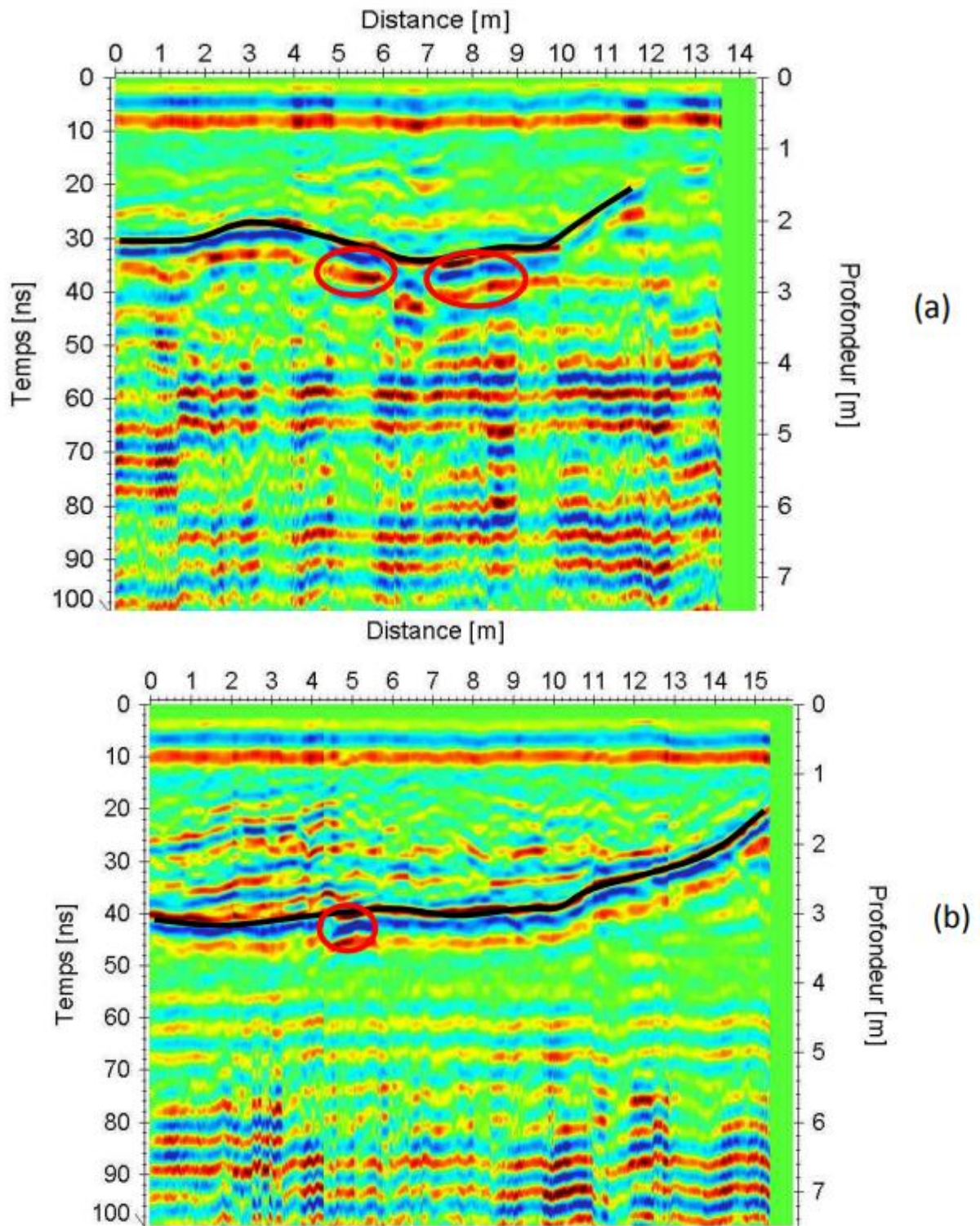


Figure III-18 : (a) Profil 9, (b) Profil 10.

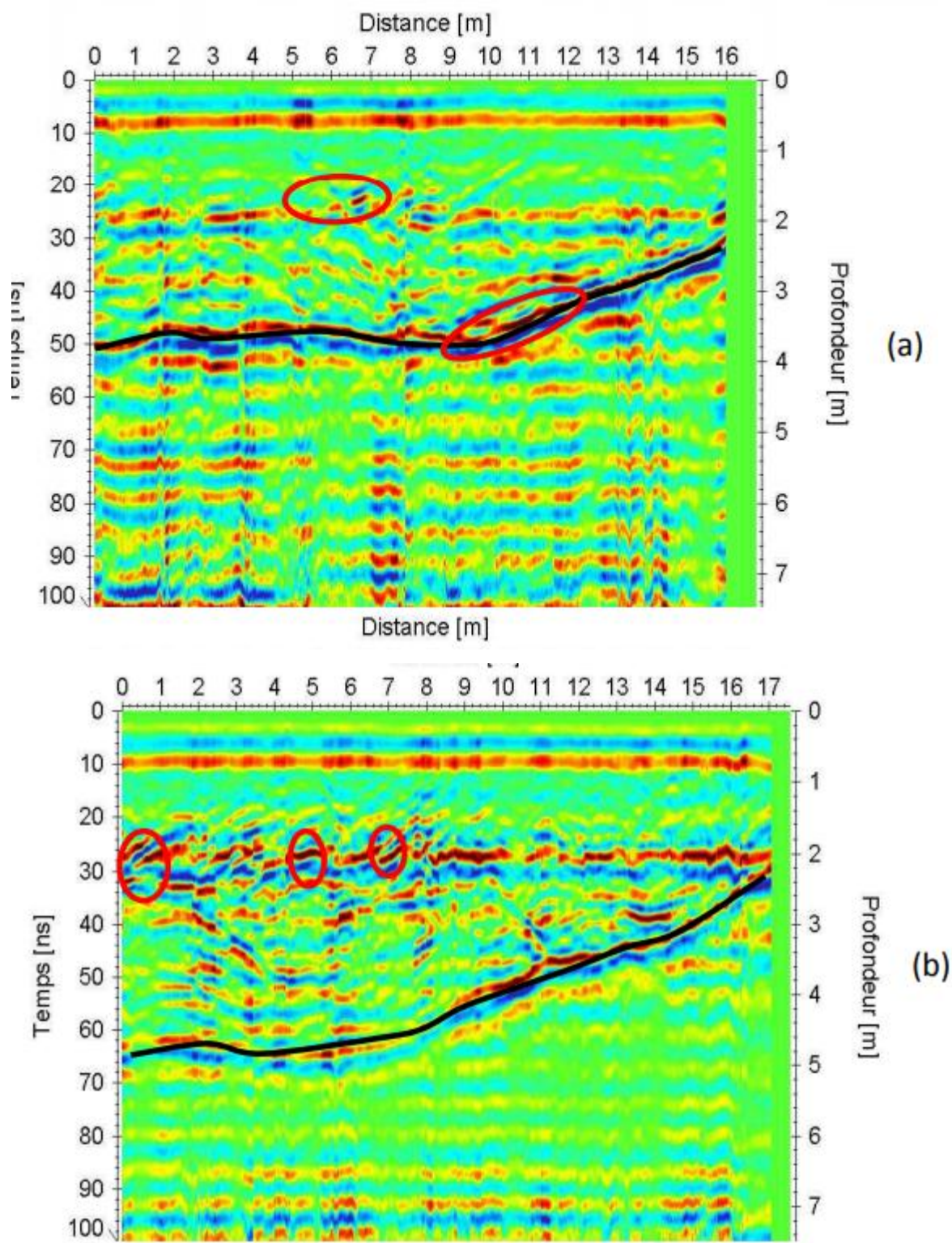
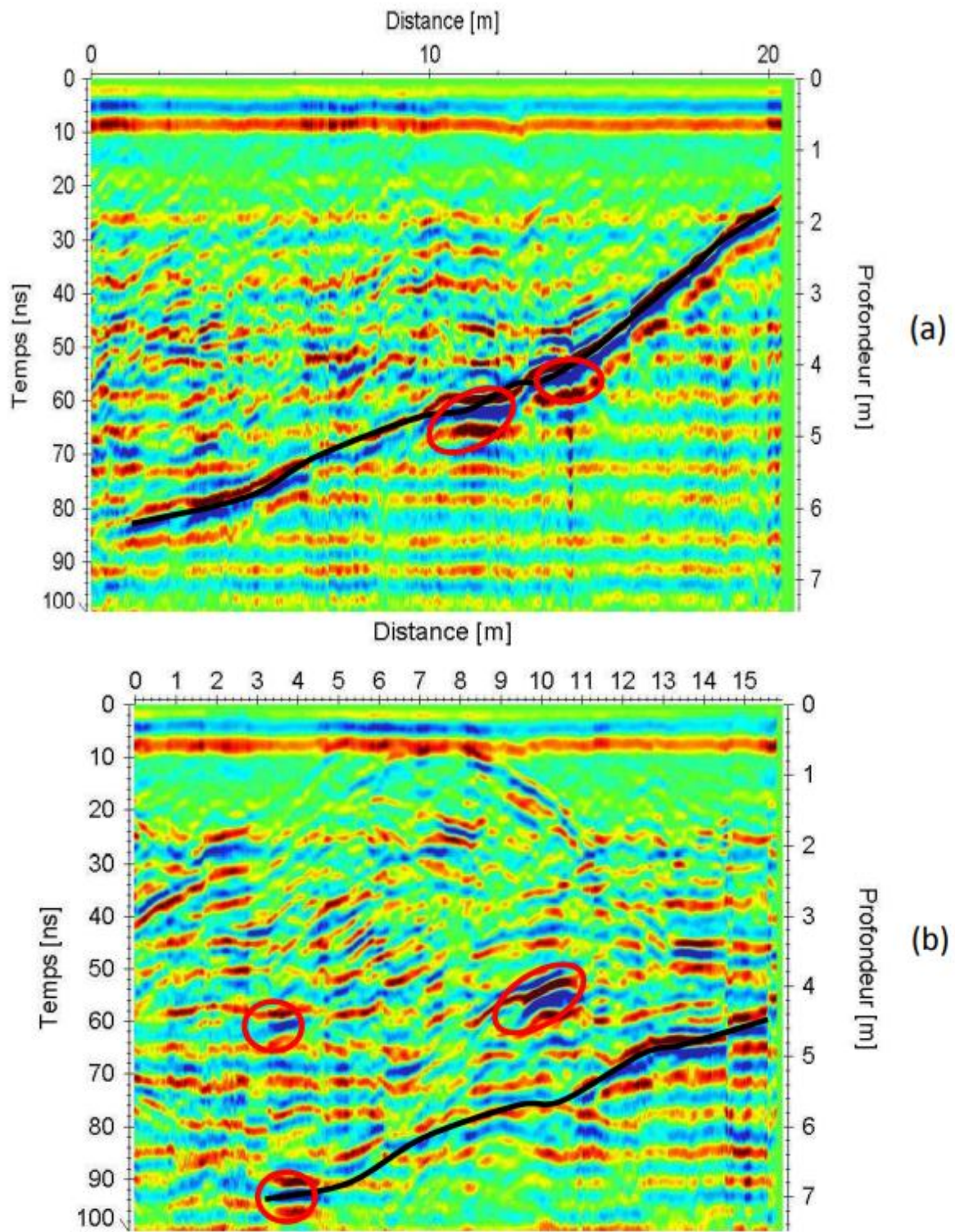
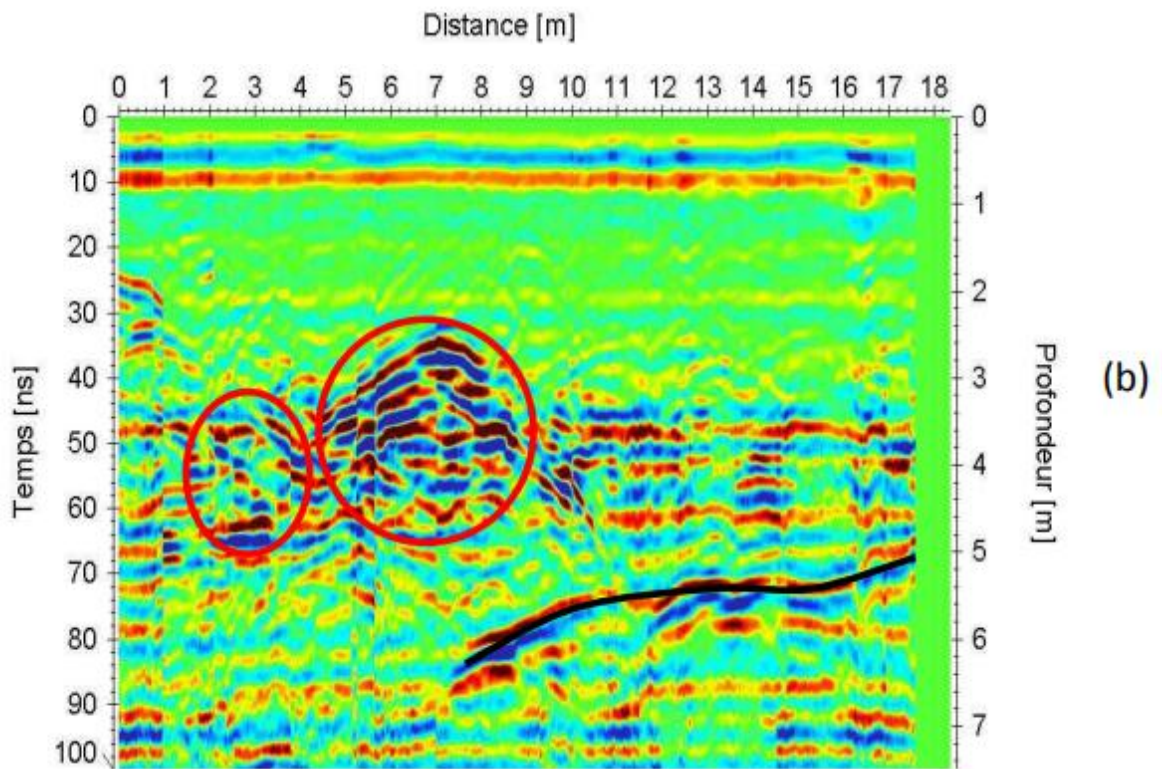
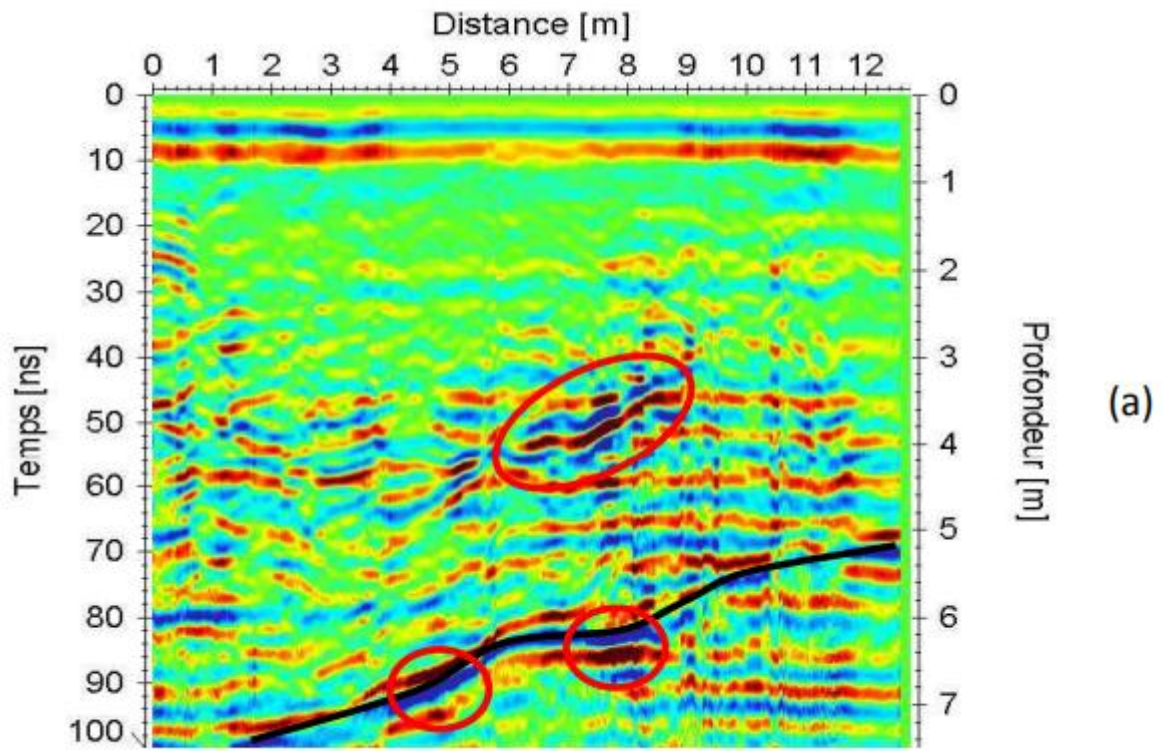


Figure III-19: (a) Profil 11, (b) Profil 12.



FigureIII-20 (a) Profil 13, (b) Profil 14.



FigureIII-21: (a) Profil 15, (b) Profil 16.

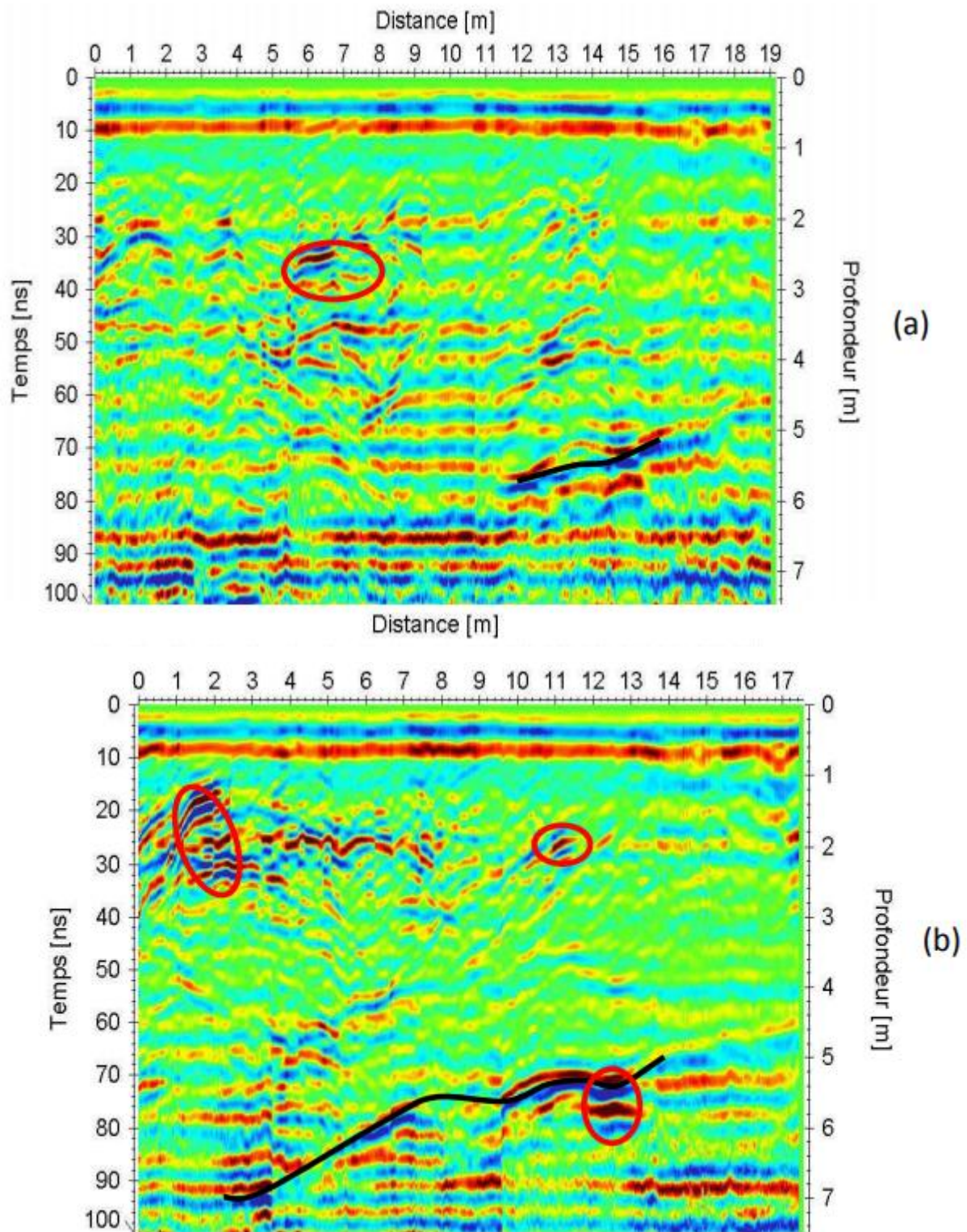
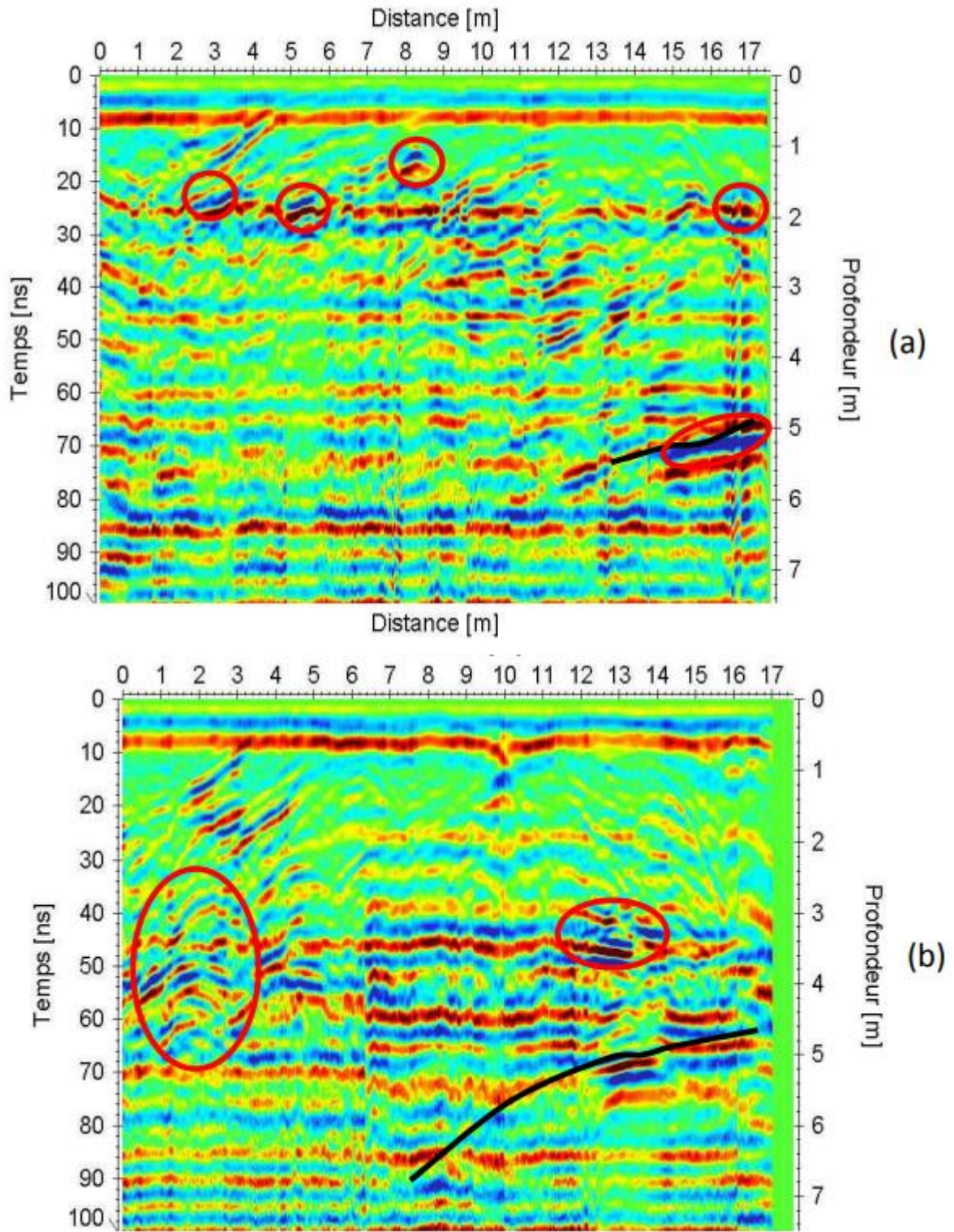
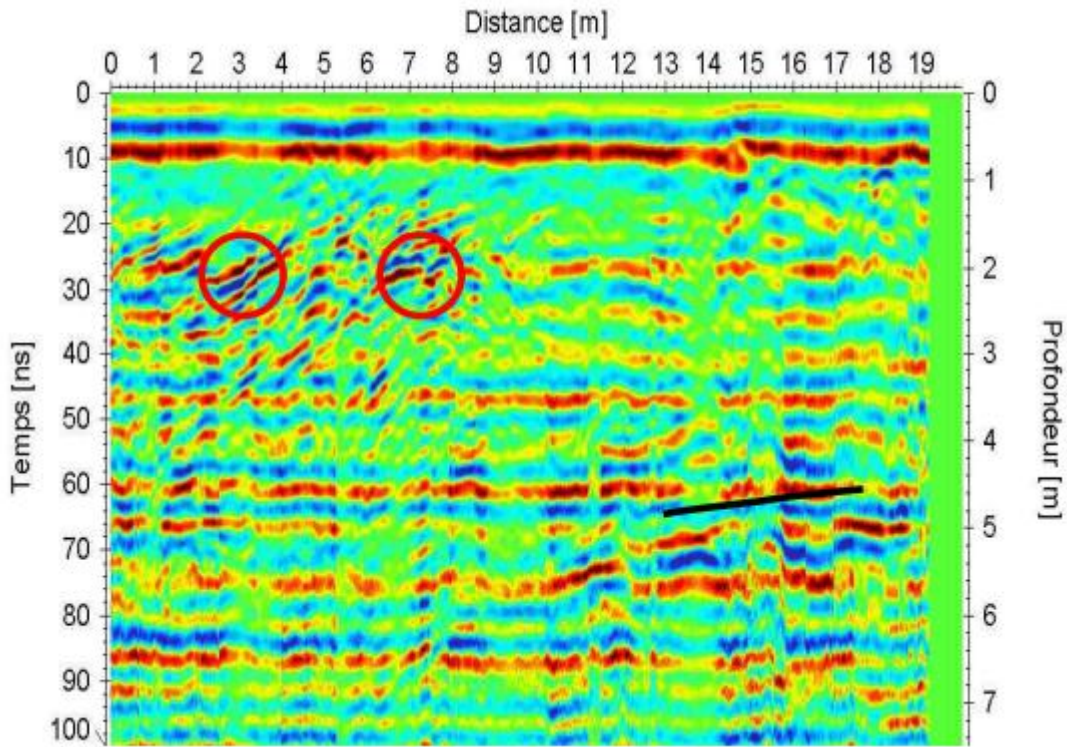


Figure III-22: (a) Profil 17, (b) Profil 18.



FigureIII-23: (a) Profil 19, (b) Profil 20



FigureIII-24 Profil 21.

III-8-Conclusion

La reconnaissance par le système géoradar réalisée a permis de localiser les zones présentant des anomalies.

Globalement, l'utilisation du géoradar permet d'écarter la présence des cavités ou autres discontinuités importantes car aucune anomalie de ce type n'a été détectée.

Nous remarquons sur les 6 profils un contraste horizontal, séparant deux milieux diélectriquement différents à une profondeur qui varie de 1 m à 3 m.

Le contraste le plus visible dans tous les profils correspond à une réflexion.

Les contrastes discontinuité séparant de deux milieux différents, des ondes de diffraction, dissolution, altération et l'infiltration des eaux par capillarité, toutes ces anomalies correspondent formant ainsi des cavités.

Conclusion général

Conclusion générale

L'implantation des édifices nécessite en principe la connaissance détaillée du sous-sol, et la connaissance des propriétés mécaniques des terrains susceptibles de les recevoir. La caractérisation de sous-sols par les méthodes géotechniques traditionnelles est cependant rendue très difficile, voire impossible vu à la présence de grandes hétérogénéités. L'objectif visé dans le travail engagé dans ce mémoire de fin d'études, est de montrer l'avantage des mesures géophysiques, leur rapidité de mise en œuvre et leur capacité d'investiguer un grand volume de sol dans un temps relativement modéré, constituent une alternative intéressante aux essais géotechniques in-situ. Parmi les méthodes géophysiques, nous avons choisi la méthode géoradar, que nous utiliserons pour déterminer les caractérisations du sous-sol.

Le radar sol est un outil de mesure performant, qui a prouvé son efficacité, ses domaines d'utilisations sont multiples (génie civil, exploration spatiale, déminage...). Le fonctionnement du GPR ne peut échapper aux lois fondamentales de l'électromagnétisme. En effet, les ondes électromagnétiques sont le support des informations concernant la composition du milieu géologique sondé. Il revient donc à résoudre les équations de Maxwell en tenant éventuellement compte des différents paramètres électromagnétiques (μ , σ et ϵ), nécessaires à la caractérisation du milieu ainsi que l'angle d'incidence qui joue un rôle très important dans le phénomène de propagation. Le manipulateur d'un tel dispositif est amené à modéliser ces paramètres qui sont complexes et fonctions de la fréquence. Les modèles qu'on a vu sont les plus adaptés pour étudier les milieux géologiques. Nous avons constaté que le modèle de Debye, vu qu'il présente la propriété d'un seul temps de relaxation, trouve son application dans les milieux géologiques.. Par ailleurs, même ces modèles sont en développement permanent pour de meilleurs résultats dans la modélisation de n'importe quel milieu. Le choix du radar demeure un choix important souvent difficile à effectuer. Les caractéristiques techniques varient d'un radar à un autre d'où la nécessité d'avoir une idée sur la profondeur maximale d'investigation, la résolution et sur le type d'antennes dont le dispositif est équipée. La modélisation par FDTD permet la résolution des équations de Maxwell dans un espace constitué d'un ensemble de cellules, dans ces dernières les propriétés du milieu sont constantes.

Enfin les méthodes électromagnétiques haute fréquence, qui se limitent ici au radar géologique, sont des méthodes à proscrire si le terrain de surface est conducteur (argiles, limons, etc.). Elle est en revanche bien indiquée pour des milieux relativement résistants ($> 100 \Omega.m$) pour la détection de vides et de cavités ennoyées ou comblées de matériaux conducteurs. Son rendement peut être moyen à grand. La profondeur d'investigation est de l'ordre d'une vingtaine de mètres dans le meilleur des cas. L'interprétation est tout d'abord qualitative. Elle se fait en termes de

Conclusion général

contraste d'amplitude et reflète les caractéristiques diélectriques du sous-sol. Si les vitesses sont connues, la profondeur et l'extension de la cavité sont quantifiables. Pour toutes les méthodes, les anomalies soupçonnées d'être des cavités doivent être nécessairement contrôlées par des sondages.

En Algérie, la méthode GPR est timidement utilisée. Compte tenu de son grand apport dans la caractérisation et la localisation d'anomalies en proche subsurface, tel que nous avons tenté de démontrer dans ce travail, le géoradar sera un moyen de recours inéluctable pour résoudre les problèmes géotechniques dans l'avenir.

Références bibliographiques

1. **Richard LAGABRIELLE 10mai 2007**.Article (géophysique appliquée au génie civil)
2. **Université de Lausanne, 2006** sine data. Cours de Géophysique [En ligne],
3. **RobertGaroute, 1999** books (SHEAR WAVES FROM ACQUISITION TO INTERPRETATION)
4. **Fabiano WEIL, 2010** (L'UTILISATION DES ONDES DE SURFACE POUR LA CARACTÉRISATION NON INTRUSIVE DES STRUCTURES EN BÉTON)
5. **Michel Chouteau ; Bernard Giroux (2005)** Géophysique appliquée II GLQ 3202 méthodes électriques. Ecole Polytechnique
ENS [http://yon-geologie .Fr rmster](http://yon-geologie.fr/rmster) PDF (La géologie appliquée)
6. **Driss khattach, 2013** filière génie civil ENAO (la géophysique appliquée à la géophysique a la géotechnique)
7. **HAMLAOUI MAHMOUD ;** prospection (sismique réflexion et réfraction).
8. **BOUTELDJA Fetehe 2017** cours de la géophysique applique
9. **MCHOURAK 2016**, géologies de l'ingénieur.
10. **Fauchard C, Pothérat P, 2004**. Détection des cavités souterraines par méthodes géophysiques. Guide technique. Techniques et méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées.
11. **Sismique réflexion. mars 2017**.[www_abemfrance eu](http://www.abemfrance.eu). www.iris-instruments.com
- 12.<http://moodle.insa-toulouse.fr> ...PDF web mesures géophysiques-Moodle
- 13.<https://dspace.univ-guelma.dz> ;cours géophysique appliquée.PDF
14. **PHILIPPE COTE, Jan 2017** (Guide des Méthodes géophysique pour la détection d'objet enfouis sur les pollués).
15. **Dominiquechapellier et jean- Luc Mari**. Cours online de géophysique (principe de base)
16. Service communication institut national des sciences appliquées Toulouse (INSA)
17. **Elia d'Acremont, ISTEP**, Imagerie sismique réflexion et réfraction Principes et méthodes

Références bibliographiques

18. **Jean-François GIRARD, 2002.** (Imagerie géoradar et modélisation des diffractions multiples); de l'Université de Strasbourg.
19. **Fabrice Hollander. 2004.** Caractérisation de la discontinuité par l'inversion du contenu spectral des réflexions du géoradar (GPR) - Application du modèle de Jonscher.
20. **NEROUZ BOUBAKI, 2013, Détection** de cavités par deux méthodes géophysiques: radar de sol et mesures de résistivités électriques, thèse de doctorat en Géophysique
21. **F. Rejiba, 2002** "Modélisation de la propagation des ondes électromagnétiques en milieux hétérogènes: Application au Radar Sol.", thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
22. **Mohamed Sow. 2015,** Contribution à la conception de radars géologiques impulsions fonctionnant dans un milieu complexe. Thèse DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LIMOGES.
23. **R. W. P. King and G. Smith, 1981** "Antennas in Matter", Fundamentals, theory, and applications. NASA STI/Recon Technical Report A, vol.
24. **SATO, M., 2009,** Principles of mine detection by Ground-penetrating Radar: Springer London
25. **Knight, R., 2001,** Ground penetrating radar for environmental applications: Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 229.
26. **Djeddi Mabrouk., 1995** .Georadar (ground Penetrating Radar) .Radar géologique, Département de Géophysique (FHC), Université M'Hamed Bougara de Boumerdes. Algérie
27. **Raphaël GILLARD, janvier 2005,** PROPAGATION des ONDES ELECTROMAGNETIQUES, Département ESC
28. **Davis, J. L., and Annan, A. P., 1989,** Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy: Geophysical Prospecting.
29. **ANNAN, A.P:** Practical processing of GPR data. SEI\JSORS & SOFTWARE Technical Manuel, 1993.
30. **Emilie Masson, 2010, Etude** de la propagation des ondes électromagnétiques dans les tunnels courbes de section non droite pour des applications métro et ferroviaire. THÈSE pour l'obtention du Grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS.
31. **Alia HAMADI ; 2010,** Analyse et prédiction comportementales du radar GPR polarimétrique de la mission spatiale EXOMARS, THESE Pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES.
32. **Sylvie Tillard , 1991,** Evaluation des performances de la technique radar en prospection géophysique

Références bibliographiques

33. **J.C. Maxwell, 1881**, A treatise on electricity and magnetism, 2^{ème} édition, Edition Oxford.
34. **P. Debye, 1929**, Polar molecules, Edition New York: The chemical catalog.
35. **K.S. Cole, R.H. Cole, 1941**, Dispersion and absorption in dielectrics, alternating current characteristics, Journal of Chemical Physics, pp. 341-351
36. **J.L. Davis, A.R. Annan, 1989**, Ground Penetrating Radar for high-resolution mapping of rock stratigraphy, Geophysical Prospecting,
37. **J.DUBOIS et M.DIAMENT 2005**, Géophysique cours, exercice corrigée, 3^{ème} édition
38. **GEXPLORE 2000**, principe de fonctionnement de géoradar
39. **Colette Grégoire, Audrey Van der Wielen, Carl Van Geem, Jean-Pierre Drevet ; 1947**, Méthodologies pour l'utilisation du géoradar en auscultation de routes. Centre de recherches routières Bruxelles.
40. **Lutz, P., 2002**, Acquisition multi-modes en radar géologique de surface : Ph.D. thesis, Université de Pau et des pays de l'Adour
41. **Cassidy, N. J. 2009 a.** «Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids». In Ground Penetrating Radar: Theory and Applications, Harry M. Jol, Amsterdam: Elsevier.
42. **Van Dam, R. L., E. H. van den Berg, S. van Heteren, C. Kasse, I. AM. Kenter et K. Groen. 2002.** «Influence of organic matter in soils on radar-wave reflection: sedimentological implications». Journal of Sedimentary Research. .
43. **Davis, I. L. et A.P. Annan. 1989.** «Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy». Geophysical Prospecting.
44. **Cassidy, N. J. 2008.** «Introduction to GPR (Workshop 1)». Ln 12th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR08). University of Birmingham, Birmingham, Angleterre.
45. **Doolittle, A. et J. R. Butnor. 2009.** «Soils, Peatlands, and Biomonitoring». In Ground Penetrating Radar: Theory and Applications, Harry M.
46. **Neal, A. 2004.** «Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress». Earth-Sciences Reviews.
47. **DANIELS D.J. 1996**, Surface Penetrating Radar, IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics séries 6.
48. **Alia HAMADI, 2010**, Analyse et prédiction comportementales du radar GPR polarimétrique de la mission spatiale EXOMARS, THESE Pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LIMOGES

Références bibliographiques

- 49. Violaine LAMY, 1995, UNE EVALUATION DE LA METHODE RADAR POUR LA DESCRIPTION DE STRUCTURES PEU PROFONDES: APPLICATIONS MINIERES ET HYDROGEOLOGIQUES AU SENEGAL ET EN TUNISIE.**
- 50. MaksimBano, 2000, Imagerie de la proche surface par géoradar. L'Université Louis Pasteur - Strasbourg I**
- 51. FayçalRejiba, 2002 « Modélisation de la propagation des ondes électromagnétiques en milieux hétérogènes - Application au Radar Sol » thèse de doctorat, université Pierre et Marie Curie - PARIS VI27 mars 2002.**
- 52. MehennaouiNaziha, Etude théorique de la propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux hétérogènes - Application au radar Sol, UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF UFAS (ALGERIE)**
- 53. Guide technique Lcpc octobre 2004, Détection de cavités souterraines par méthodes géophysiques**
- 54. Saoudi, N. 1989, Pliocène et Pleistocène inférieur et moyen du Sahel d'Alger. ENAL, Alger**
- 55. Pierre_ Luc Dallaire 2010, utilisation D'un géoradar afin de caractériser la stratigraphie de la tourbe et estimer le carbone organique accumulé dans une tourbière boréale, région, D'eastmain, baie james, Québec.**
- 56. Guegen et palciauskas, 1992, L'utilisation de géoradar.**
- 57. A. B. BELMECHERI, S. BEN AHMED, Application de la technique géophysique "Géoradar" pour la caractérisation des hétérogénéités de subsurface; Mémoire de fin d'études USTHB, FSTGAT, 2010.**