

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



## **Mémoire de Fin d'Etudes**

*En vue de l'obtention du Diplôme de Master*

*Thème*

# ***Cross well en géophysique***

**Présenté par :**

M<sup>elle</sup> DJELLOULI Imene.

M<sup>elle</sup> ZEMZEM Hanane.

**Encadré par : M. HACINE Rachid.**

### **Membres de jury**

**Examineur 1:** BENTRIDI Salah-Eddine.

**Examineur 2:** FARHI Walid.

**Encadreur :** HACINE Rachid.

**2019-2020**

# ***REMERCIEMENTS***

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*En second lieu, nous tenons à remercier très chaleureusement Mr. Hacine Rachid qui nous a permis de bénéficier de son encadrement. Les conseils qu'il nous a prodigué, la patience, la confiance qu'il nous a témoignés ont été déterminants dans la réalisation de notre travail de recherche.*

*Un grand merci aux membres de jury qui ont accepté d'examiner ce travail. Nous exprimons nos sincères gratitude à Mr. Bentriddi Salaheddine pour la qualité de son enseignement, ses conseils et son intérêt incontestable qu'il porte à tous les étudiants.*

*Nos sincères remerciements vont également à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.*

*Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, nous disons merci !*

*Imene, Hanane.*

# ***DEDICACE***

*Je dédie ce mémoire :*

*A mes parents qui sont mes premiers enseignants après Allah.*

*A chaque membre de ma merveilleuse famille.*

*A mon binôme Hanane.*

*A tous ceux qui m'ont fait confiance et qui m'ont aidé à atteindre mes objectifs.*

*Enfin, à mon inoubliable grand-mère,*

*qu'Allah ait son âme en paix.*

*Imene*

# ***DEDICACE***

*Avec les sentiments d'amour et gratitude les plus sincères je dédie*

*Ce modeste travail :*

*Les parents les plus chers au monde, Papa et Mama, que dieu les garde et les protège.*

*A mes chères sœurs.*

*A ma chère grand-mère.*

*A toute ma famille.*

*A mon binôme Imene.*

*A toutes mes chères amies, particulièrement: Houda, Sabrina.*

*A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.*

*Hanane*

## RESUME :

Pour obtenir des informations et faire une imagerie du sous-sol, le géophysicien utilise plusieurs méthodes, parmi ces méthodes la tomographie sismique et électromagnétique. Dans ce travail, nous avons essayé de donner des brefs aperçus sur la sismique et l'électromagnétisme, aussi les deux types de tomographies « sismique et électromagnétique ». Par la suite, nous avons fait une étude comparative entre ces deux méthodes pour montrer la meilleur méthode d'imagerie du sous-sol. Les résultats obtenus ont montrés que les deux méthodes ont une certaine efficacité et ont donné des résultats précis dans leurs domaines d'applications.

**Mots clés :** tomographie sismique, tomographie électromagnétique.

## ABSTRACT:

To obtain information and to make an imaging of the subsoil, the geophysicist uses several methods, among these methods seismic and electromagnetic tomography. In this work, we tried to provide information on seismic, well seismic, electromagnetic theory, and also the two types of “seismic and electromagnetic” tomography. Next, we did a comparative study between these two methods to show the best method of imaging the subsoil. The results obtained have shown that both methods are effective and have given specific results in their fields of application.

**Keywords :** seismic tomography , electromagnetic tomography .

## ملخص:

للحصول على المعلومات ولتصوير التربة الفرعية، يستخدم الجيوفيزيائي عدة طرق، من بين هذه الطرق التصوير المقطعي السيزمي والكهرومغناطيسي. وفي هذا العمل حاولنا تقديم معلومات عن النظرية السيزمية، والنظرية الكهرومغناطيسية، وأيضاً عن النوعين من التصوير المقطعي؛ السيزمي والكهرومغناطيسي بعد ذلك، قمنا بإجراء دراسة مقارنة بين هاتين الطريقتين لإظهار أفضل طريقة لتصوير التربة الفرعية. وقد أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن كلا الطريقتين فعاليتين وأحصلنا على نتائج محددة في مجالات تطبيقهما.

**كلمات مفتاحية:** التصوير المقطعي السيزمي، التصوير المقطعي الكهرومغناطيسي.

# LISTE DES MATIERES :

REMERCIEMENT

DEDICACE

DEDICACE

RESUME

ABSTRACT

ملخص

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : SISMIQUE ENTRE PUIITS.....	4
1. Bases physiques et théoriques de la sismique.....	5
1.1. Généralité.....	5
1.2. Principe de la sismique.....	5
1.3. Les ondes sismiques.....	6
1.3.1. Les ondes de volumes .....	6
1.3.2. Les ondes de surface.....	8
2. Sismique réfraction.....	9
2.1. Principe.....	10
2.2. Le mécanisme de la sismique réfraction.....	10
3. Sismique de puits.....	12
3.1. Introduction.....	12
3.2. Mise en œuvre.....	13
3.2.1. Tir en surface.....	13
3.2.2. Tir dans le puits .....	16
3.2.3. La sismique de puits à puits.....	16
4. La tomographie sismique.....	17
4.1. Introduction .....	17
4.2. Principe.....	17
CHAPITRE II : ELECTROMAGNETISME ENTRE PUIITS.....	25
1. La théorie d'élasticité.....	18
1.1. Le tenseur.....	18
1.1.1. Le tenseur de contrainte.....	18
1.1.2. Tenseur de déformations.....	20
1.2. La loi de Hooke (loi de comportement élastique).....	21
1.3. Les modules élastiques.....	22

2.	Aperçu de la théorie de l'électromagnétisme.....	26
2.1.	Les équations de Maxwell.....	26
2.2.	Les ondes électromagnétiques.....	27
2.3.	Différents types d'ondes électromagnétiques.....	28
2.4.	Propriétés électromagnétique des milieux géologiques.....	28
2.4.1.	Conductivité ( $\sigma$ en S/m) .....	28
2.4.2.	Permittivité électrique ( $\epsilon$ en F/m) .....	29
2.4.3.	Perméabilité magnétique ( $\mu$ en H/m) .....	29
3.	La tomographie électromagnétique.....	29
3.1.	Principe.....	29
<b>CHAPITRE III : ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES DEUX METHODES.....</b>		<b>31</b>
1.	Crosswell .....	32
1.1.	Crosswell par tomographie sismique .....	32
1.2.	Crosswell par tomographie électromagnétique .....	32
2.	Comparaison entre les deux types de Crosswell .....	33
3.	Exemple de Crosswell.....	34
3.1.	Application de la tomographie sismique Crosswell à Hanover.....	34
3.1.1.	Objectif .....	34
3.1.2.	Méthodologie.....	35
3.1.3.	Résultat.....	36
3.1.4.	Conclusion.....	38
3.2.	Exemple d'application de la méthode Crosswell EM .....	38
3.2.1.	Projet de Crosswell par tomographie électromagnétique a Ghawar .....	38
3.2.2.	L'objectif .....	40
3.2.3.	Modélisation de pré-acquisition .....	40
3.2.4.	L'évaluation de la formation .....	41
3.2.5.	Sondage de tomographie EM a HARADH .....	41
3.2.6.	Conclusion .....	42
<b>Conclusion générale.....</b>		<b>43</b>
<b>Bibliographie.....</b>		<b>44</b>

## LISTE DES FIGURES :

Figure I. 1. Exemple d'enregistrement montrant de belles réflexions (trait bleu) sous les premières arrivées (trait rouge), en vert l'onde sonore et jaune les ondes de surface (groundroll).....	5
Figure I. 2. Le principe de la sismique.....	6
Figure I. 3. Description de l'onde P .....	7
Figure I. 4. Description de l'onde S.....	7
Figure I. 5. Onde de Rayligh.....	9
Figure I. 6 : Onde de Love.....	9
Figure I. 7 : Présentation du rayon sismique.....	10
Figure I. 8: Loi de Snell-Descartes.....	10
Figure I. 9 : Principe de la sismique réfraction.....	11
Figure I. 10 : Principe de la sismique de puits.....	13
Figure I. 11: Schéma simplifié d'un PSV.....	14
Figure I. 12 : Exemple d'enregistrement PSV après traitement. L'axe horizontal représente les positions des géophones en profondeur et l'axe verticale les temps doubles.....	15
Figure I. 13: Schéma simplifié d'un PSO.....	15
Figure I. 14 :Schéma simplifié de Walkaway ou Ballade sismique.....	16
Figure I. 15 : Principe de la tomographie sismique.....	18
Figure II. 1. forces au sein d'un petit cube.....	20
Figure II. 2. Contraintes normales et tangentielles .....	21
Figure II. 3. Nature et propagation d'une onde électromagnétique.....	27
Figure II. 4 :Principe de la tomographie électromagnétique, E1...E4 sont les positions successives de l'émetteur, R1...R4 sont les positions successives du récepteur.....	30
Figure III. 1 :Affichage des données brutes (à gauche), des données traitées (à droite) du test de tomographie.....	35
Figure III. 2 : Affichage de l'écran TomoCheck pour le contrôle de la qualité du prélèvement. La douceur de la courbe est un indication que les choix ont été correctement attribués.....	36
Figure III. 3 :Affichage de la section transversale de vitesse entre les forages.....	37
Figure III. 4 :Péninsule arabique et champ de Ghawar. La zone d'intérêt se trouve dans le flanc sud-ouest de Ghawar, dans Haradh. Péninsule arabique et champ de Ghawar. La zone d'intérêt se trouve dans le flanc sud-ouest de Ghawar, dans Haradh.....	39
Figure III. 5:Emplacements relatifs des trois puits.....	39
Figure III. 6 : Modèle de résistivité pour un cas d'inondation d'eau, s'étendant jusqu'à un quart de la séparation à deux puits (500 m).....	40
Figure III. 7 : Inversion des données EM des puits transversaux synthétiques pour le cas d'inondation d'eau illustré à la figure III.7.....	41

## **LISTE DES TABLEAUX :**

Tablea I. 1: Vitesse des ondes P et S de divers types de terrains.....	8
Tableau II. 1 : module de Young et coefficient de Poisson pour les roches les plus usuelles (d'après Mestat 1993) [9].....	23
Tableau III. 1: Une comparaison entre les deux types de Crosswell.....	34

# **INTRODUCTION GENERALE**

### Introduction générale

Dans beaucoup de domaines comme la recherche de matière première mais aussi pour la gestion et la surveillance de notre environnement, il est nécessaire de connaître la structure interne du sous-sol dans le premier kilomètre de profondeur.

La prospection géophysique utilise des méthodes fondées sur des mesures de grandeurs physiques réalisées selon trois modes: à partir de la surface du sol, en forage (diagraphies différées, panneau électrique) ou entre forages (le crosswell). Ces mesures exploitent soit la diffusion des champs (naturels ou provoqués) soit la propagation des ondes. Idéalement, l'opérateur doit déduire de ces mesures, la forme, les dimensions, les propriétés physiques, de toutes les structures et hétérogénéités naturelles et artificielles situées sous la surface.

Il existe un grand nombre de méthodes utilisant les différentes théories de la physique : parmi elles, on peut citer les méthodes sismiques basées sur les lois de la mécanique , les méthodes électromagnétiques.

Les méthodes sismiques étudient la propagation d'une onde de choc dans le sol. Grâce à l'étude du temps de propagation de cette onde (sismique réfraction, tomographie sismiques), il est possible de déterminer la disposition géométriques des couches, et leurs caractérisations mécaniques. Utilisées entre des forages adjacents, elles permettent de réaliser des vues tridimensionnelles du terrain.

Les méthodes électromagnétiques permettent de mesurer les variations de résistivité du sous-sol jusqu'à une certaine profondeur , en utilisant les propriétés des ondes électromagnétiques.

Ce mémoire de fin d'étude porte sur l'imagerie du sous-sol par tomographies entre puits, en effet, les tomographies sismiques et électromagnétiques constituent des outils d'imagerie géophysique de haute résolution et très efficaces et de plus en plus utilisés en hydrogéologie et d'autres domaines comme la géotechnique.

### Choix du sujet et problématiques.

Un des problèmes qui peut surgir lors de l'étude des couches géologiques en profondeur est relatif à une mauvaise résolution en fonction des profondeurs à atteindre ou a cause de la présence d'ondes parasites (faille générant des diffractions, ondes multiples, etc..) qui viennent masquer les ondes utiles.

### **But de travail.**

L'objectif de notre travail est de déterminer la meilleure méthode d'imagerie de sous-sol de plus haute résolution en fonction de la profondeur selon : le rayon d'investigation, le coût, la rapidité des mesures.

Pour arriver à l'objectif cité ci-dessus, notre travail a été départagé en trois (03) chapitres qui sont orientés selon la méthodologie suivante :

**Premier chapitre :** une étude théorique de la sismique, et de la sismique de puits, afin de présenter la première méthode d'imageries de sous-sol entre puits (tomographie sismique).

**Deuxième chapitre :** Présentation de deuxième méthode d'imagerie du sous-sol (tomographie électromagnétique) après une étude théorique de l'électromagnétisme, et de théorie d'élasticité des roches.

**Troisième chapitre :** une étude comparative entre les deux méthodes d'imagerie de sous-sol. Et nous terminerons par une conclusion générale.

**CHAPITRE I : SISMIQUE ENTRE  
PUITS**

## 1. Bases physiques et théoriques de la sismique :

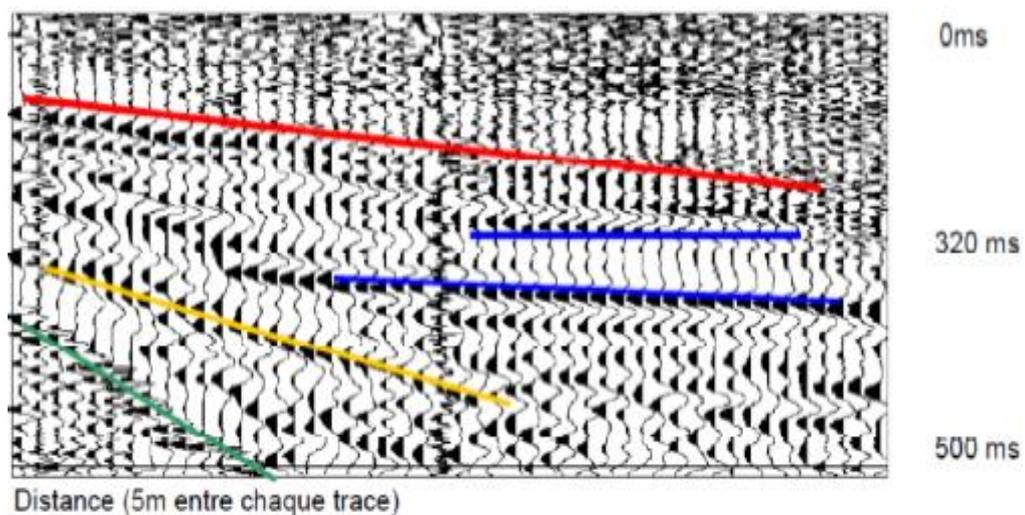
### 1.1. Généralité :

Les méthodes sismiques d'exploration sont des méthodes indirectes qui permettent de prospecter sur une vaste échelle et de localiser, à partir d'études de la surface ou subsurface, des structures géologiques du sous-sol profond. Ces méthodes fournissent des informations sur l'origine de ces structures, ainsi que sur leur géométrie.

Les méthodes sismiques sont basées sur l'étude de la propagation d'ondes acoustiques dans le géo-matériau investigué. Les vitesses de propagation des ondes impliquées, dépendent – entre autres – des modules élastiques et de la masse volumique du géo-matériau.

### 1.2. Principe de la sismique :

Le principe des méthodes sismiques est d'envoyer des ondes de type sonore dans le sol et d'enregistrer et analyser la propagation des différents types d'ondes émises, ainsi que la mesure de leur vitesse dans les différentes couches de terrain. L'analyse des temps d'arrivée des ondes réfléchies ou réfractées permet de calculer les vitesses sismiques et les épaisseurs des terrains. Les ondes réfractées seront toujours les premières à atteindre les géophones. Sur un même enregistrement (figure I-1), tous les types d'ondes peuvent être visibles : réfléchies, réfractées, ondes P, ondes S, ondes de surface, bruit aérien,... etc, ceci explique l'aspect parfois complexe des enregistrements sismiques. La figure I-2 résume le principe de la sismique. [1]



**Figure I. 1.** Exemple d'enregistrement montrant de belles réflexions (trait bleu) sous les premières arrivées (trait rouge), en vert l'onde sonore et jaune les ondes de surface (groundroll) [1].

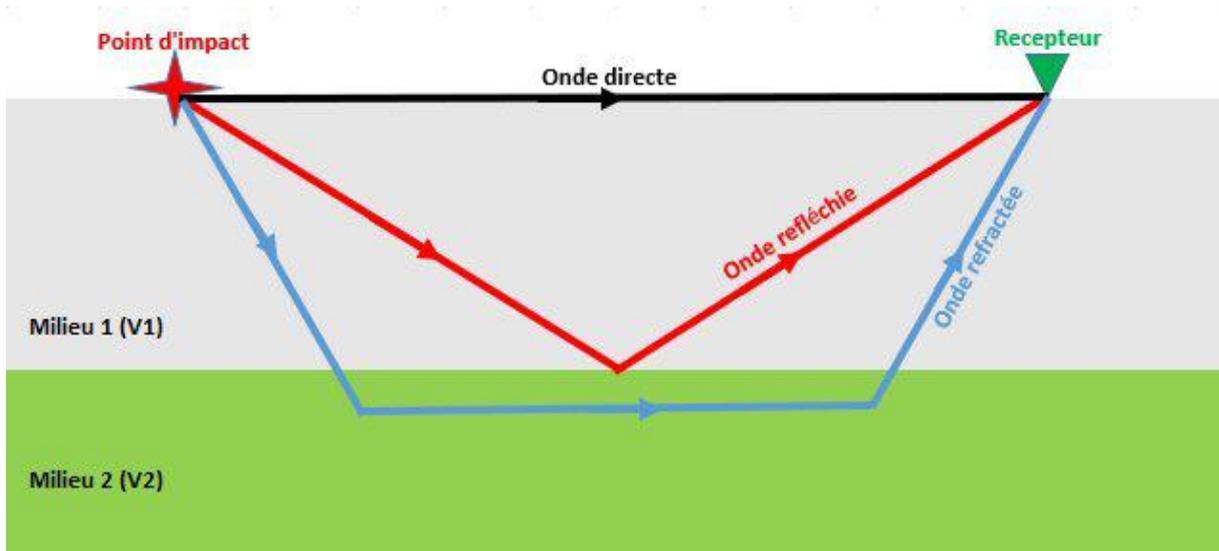


Figure I. 2. Le principe de la sismique.

### 1.3. Les ondes sismiques [3]:

Les ondes sismiques sont des ondes de choc qui se propagent dans le sous-sol à des vitesses différentes et selon des trajets qui suivent des lois analogues à celles de l'optique. Il se produit ainsi des réflexions, des réfractions et des guidages d'onde. Plusieurs types d'ondes se propagent simultanément : les ondes de volumes (ondes de compression dites ondes P et ondes de cisaillement dites ondes S) se distinguent des ondes de surface qui ne se propagent qu'au voisinage des interfaces séparant deux géo-matériaux de propriétés élastiques et de masse volumique différentes.

#### 1.3.1. Les ondes de volumes :

##### ➤ Les ondes P :

Le premier type d'onde est appelé ondes longitudinales, ondes de compression ou ondes primaires P car ce sont elles qui arrivent toujours en premier. Le mouvement des particules se fait selon un mouvement de compression et de dilatation. Le sens de vibration des particules est dans l'axe de propagation.

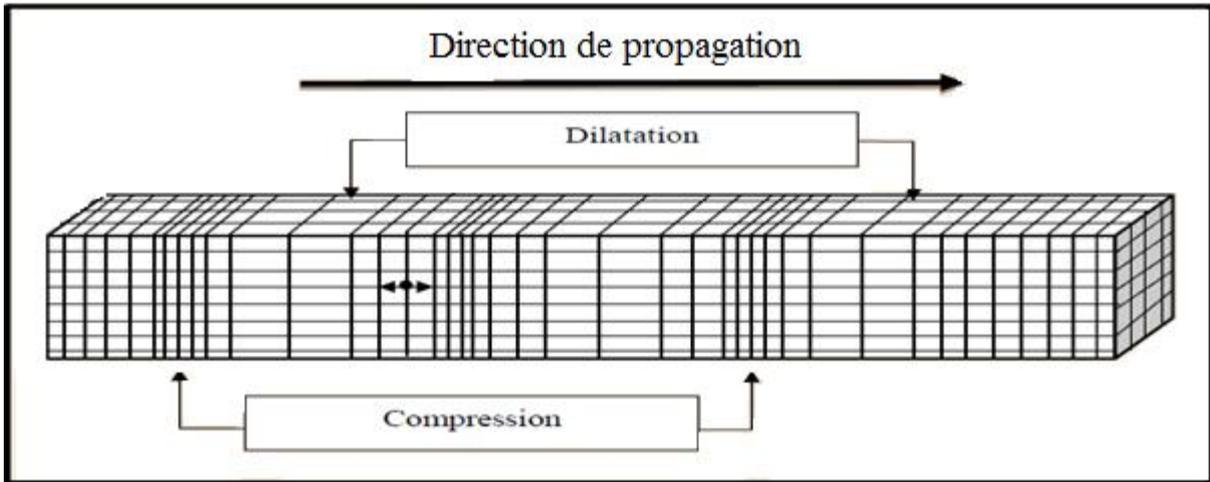


Figure I. 3. Description de l'onde P [2].

➤ **Les ondes S :**

Ce type d'ondes « S » correspond à un mouvement de cisaillement, on les appelle les ondes transverses, ondes de torsion ou ondes secondaires car ce sont elles qui arrivent en second. Dans ce cas le mouvement des particules se fait perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde.

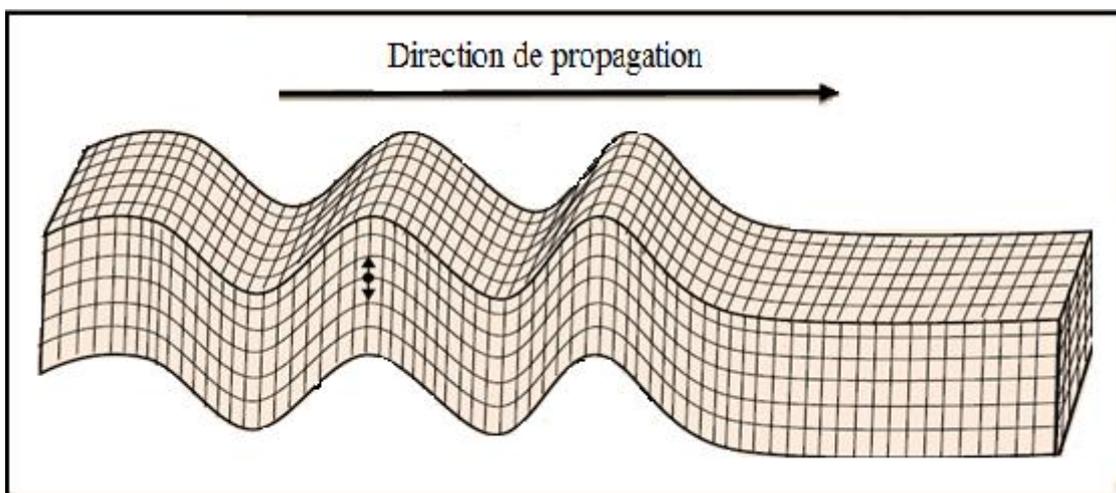


Figure I. 4. Description de l'onde S [2].

Les équations des vitesses des ondes **P** et **S** sont donnés par :

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (01)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (02)$$

Avec :

$\lambda$  et  $\mu$  sont deux coefficients appelés coefficient de Lamé (physicien français du XIX siècle).

$\rho$  : la densité.

Le rapport de vitesses longitudinales et transversales est ainsi donné [4]:

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} \times \sqrt{\frac{\rho}{\mu}} = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\mu}} \quad (03)$$

Le tableau ci-après donne des vitesses des ondes P et S de divers types de terrains :

**Tableau I. 1.** Vitesse des ondes P et S de divers types de terrains [5].

Natures des terrains	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)
Eau	1450 – 1500	–
Sable humide	1500 – 4000	400 – 1200
Sable sec	400 – 1200	100 – 5 00
Basalte	5000 – 6000	2800 – 3400
Grés	3000 – 4500	1200 – 2800
Calcaires	3500 – 6000	2000 – 3300
Argiles	1100 – 2500	200 – 800
Dolomie	3500 – 6500	1900 – 3600
Granite	4500 – 6000	2500 – 3300
Huile	1200 – 1250	–

### 1.3.2. Les ondes de surface [3]:

- **Ondes de Rayleigh** : se déplaçant dans le plan vertical de propagation et possédant à la fois une composante longitudinale et une composante transversale (assimilable à la houle).

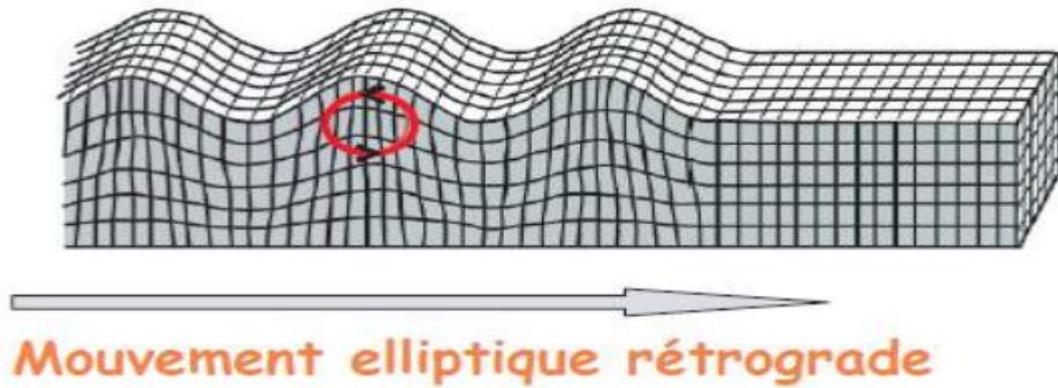


Figure I. 5. Onde de Rayleigh [6].

- **Ondes de Love** : qui n'existent que si le milieu n'est pas homogène, mais formés de couches superposées. Le mouvement n'a qu'une composante horizontale. Il faut donc disposer de capteurs horizontaux pour détecter ce type d'ondes.



Figure I. 6. Onde de Love [6].

## 2. Sismique réfraction :

La sismique réfraction est une méthode géophysique basée sur l'étude de la propagation des ondes de compressions (ondes P) dans le sous-sol. Ces ondes sont générées artificiellement par un ébranlement en surface (masse, chute, de poids,... etc.) et sont captées par un réseau linéaire de géophones.

La sismique réfraction, dont le fondateur est l'Allemand **Ludger Mintrop** (1880-1956), fut - dans le passé une méthode assez répandue en exploration sismique où elle a permis de découvrir d'importants gisements de pétrole. Elle fut supplantée par la sismique réflexion. Elle est de nos jours utilisée de temps en temps en méthode de grande reconnaissance avant l'emploi de la sismique réflexion, ou en hydrogéologie [7].

## 2.1. Principe :

En sismique réfraction, on ne s'intéresse qu'au temps de parcours de la première onde reçue (les arrivées premières) les ondes P qui mène à définir les vitesses sismiques et à caractériser les structures multi couches. La condition incontournable pour avoir une réfraction des ondes au contact de deux formations est d'avoir une vitesse de propagation de la couche inférieure ( $V_2$ ) plus élevée que la vitesse du terrain supérieur ( $V_1$ ).

## 2.2. Le mécanisme de la sismique réfraction: [8]

Pour un modèle simple à deux couches et de vitesses différentes ( $V_1$  et  $V_2$ ), on utilise la loi de Snell-Descartes pour voir une onde arrivant à l'interface entre ces deux couches:

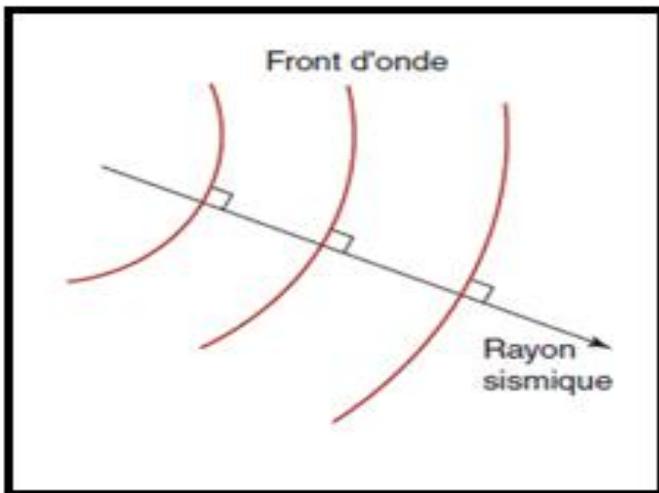


Figure I. 7. Présentation du rayon sismique [1].

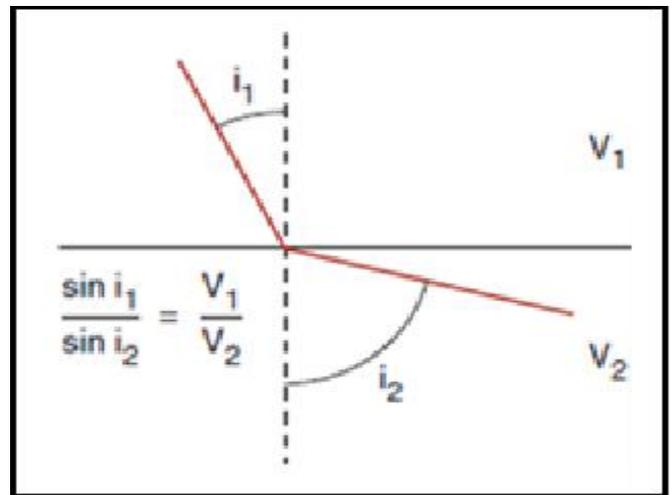


Figure I. 8. Loi de Snell-Descartes [1].

La loi de Snell-Descartes est définie comme suite :

$$\frac{\sin i_1}{V_1} = \frac{\sin i_2}{V_2} \quad (04)$$

Avec :

$V_1$  : la vitesse du premier milieu [m/s].

$V_2$  : la vitesse du deuxième milieu [m/s].

$i_1$  : l'angle d'incidence [°].

$i_2$  : l'angle de la réfraction [°].

Dans le cas où :

- La vitesse de la deuxième couche «  $V_2$  » est supérieure à la vitesse de la première couche «  $V_1$  »

- l'angle de réfraction dans le milieu 2 «  $i_2$  » est supérieur à l'angle d'incidence dans le milieu 1 «  $i_1$  »,
- pour une valeur incidence critique ( $i_c$ ), l'angle atteindra  $90^\circ$  dans le milieu 2 ( $i_r$ ).

Donc la condition de réfraction totale devient :

$$i_c = \sin^{-1} \left( \frac{v_1}{v_2} \right) \quad (05)$$

L'onde réfractée se propagera alors horizontalement au toit de la couche la plus rapide (milieu 2 dans ce cas). Ce qui veut dire que l'onde glissera sur la surface de séparation des deux couches.

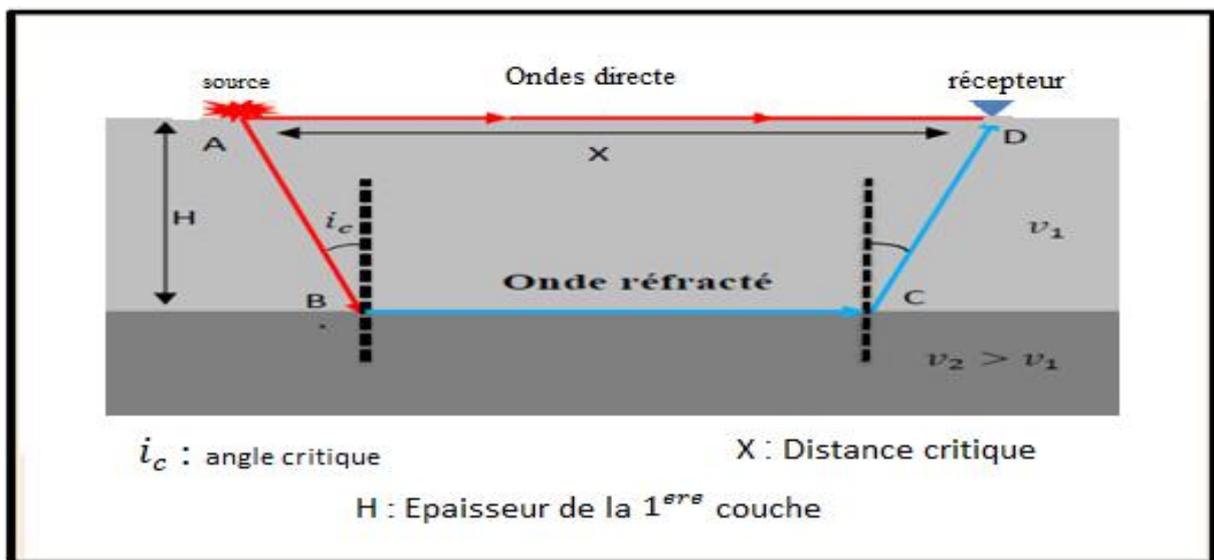


Figure I. 9. Principe de la sismique réfraction [2].

Les temps d'arrivées sont estimés de la façon suivante :

- Pour l'onde directe :

$$t_d = \frac{x}{v_1} \quad (06)$$

Le temps de propagation de l'onde réfractée ( $t_r$ ) sur le trajet ABCD (figure I.9) est obtenu par le développement de cette équation :

$$t_r = \frac{AB}{v_1} + \frac{BC}{v_2} + \frac{CD}{v_1} \quad (07)$$

$$AB = CD = \frac{H}{\cos i_c} \quad (08)$$

$$BC = x - 2H \cdot \tan i_c \quad (09)$$

$$t_r = \frac{x}{v_2} + \frac{2H}{v_1} \cos i_c \quad (10)$$

Si l'on fixe arbitrairement  $x=0$ , on prend alors les temps sur l'axe des points de tir, temps appelé intercept times  $I_t$ , donné par l'équation :

$$I = \frac{2H}{v_1} \cos i_c \quad (11)$$

Nous pouvons généraliser l'équation pour un modèle à  $n$  couches horizontales :

$$t_n = \frac{x}{v_n} + \sum_{p=1}^n \frac{H_p}{v_p} \cos I_{pn} \quad (12)$$

D'où on obtient l'intercepte de  $n$  couches :

$$I_{n-1} = \sum_{p=1}^n \frac{H_p}{v_p} \cos I_{pn} \quad (13)$$

### 3. Sismique de puits :

#### 3.1. Introduction :

La sismique de puits est utilisée pour une meilleure connaissance du gisement en phase d'exploration, mais peut être également utilisée en phase d'exploitation en sismique répétitive pour l'étude du gisement au cours du temps. [11]

La sismique de puits est, comme son nom l'indique, une méthode qui se base sur les principes fondamentaux de la sismique réflexion, à savoir: la génération d'un champ d'ondes acoustiques, puis l'enregistrement des réflexions provenant des couches du sous-sol par des récepteurs (hydrophones ou géophones).

La différence entre la sismique de puits et la sismique de surface réside dans la disposition des récepteurs et de l'émetteur. En effet, en sismique de puits les récepteurs sont placés à l'intérieur du puits et l'émetteur (la source) en surface, tandis qu'en sismique de surface, les deux sont placés à la surfaces du sol [9]. La figure I.10 montre schématiquement le principe de la sismique de puits.

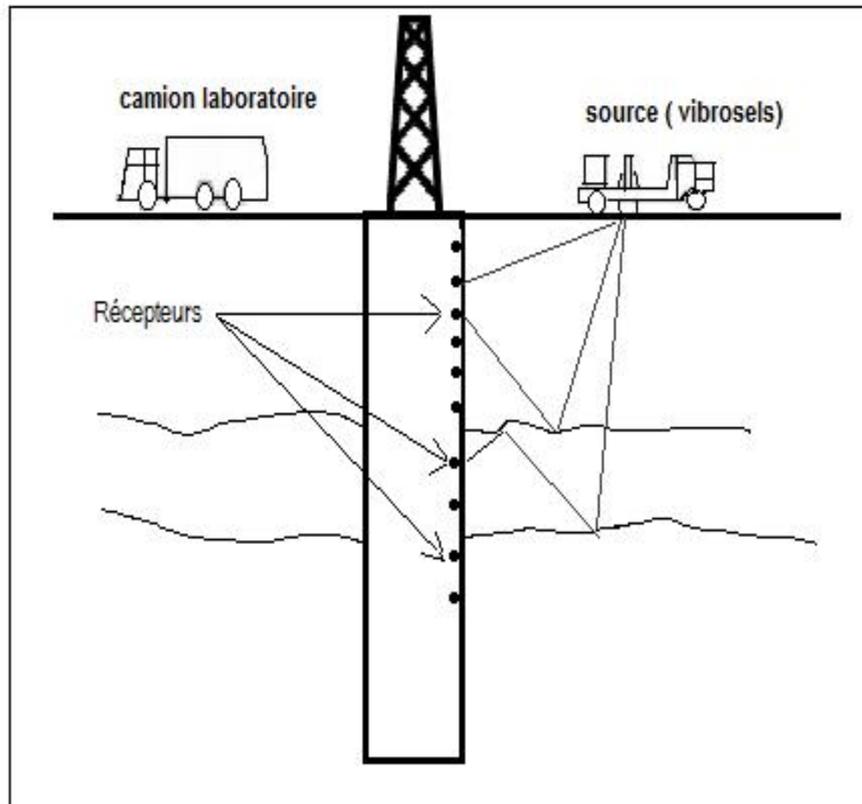


Figure I. 10. Principe de la sismique de puits.

### 3.2. Mise en œuvre :

La sismique de puits, dont la mise en œuvre la plus couramment utilisée est celle du profil sismique vertical (PSV) [10], la plus ancienne mesure de sismique de puits est le sismo-sondage, réalisé pour mesurer les temps de propagation entre la surface et différentes côtes d'un puits. De là, on peut distinguer trois types de sismique de puits : tir en surface avec récepteur dans le puits, tir dans le puits avec récepteur en surface, **tir dans un puits avec récepteur dans un autre puits** (ce qui est notre cas).

L'ensemble des différentes mises en œuvre de sismique de puits peut être regroupé sous le terme général du profil sismique de puits (PSP). [11]

#### 3.2.1. Tir en surface : [10]

Le PSV est une opération de sismique de puits pour laquelle la source et le capteur sont considérés comme étant sur la même verticale. Cette mise en œuvre nécessite une source sismique située en surface, un géophone de puits ancré successivement à différentes côtes ou profondeurs. La source a une position fixe. Elle est en général située à l'aplomb du géophone de puits quelle que soit sa profondeur (Figure I.11).

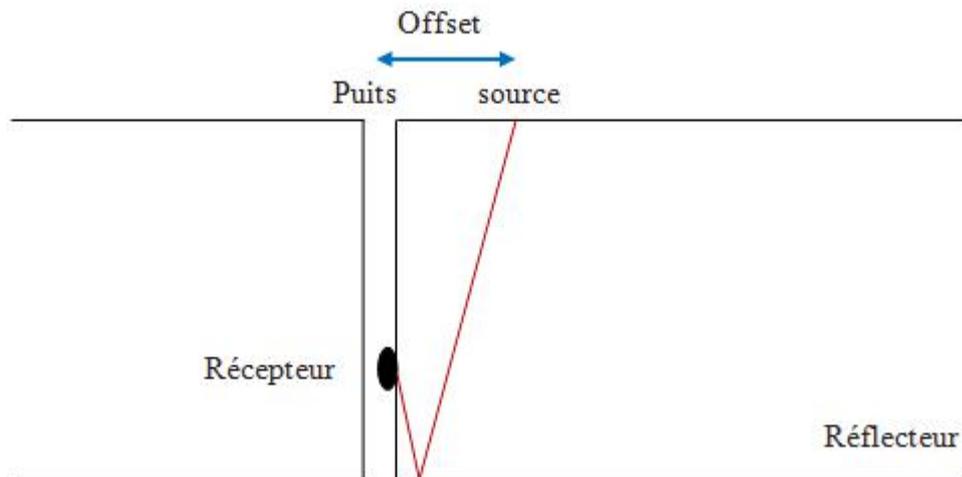
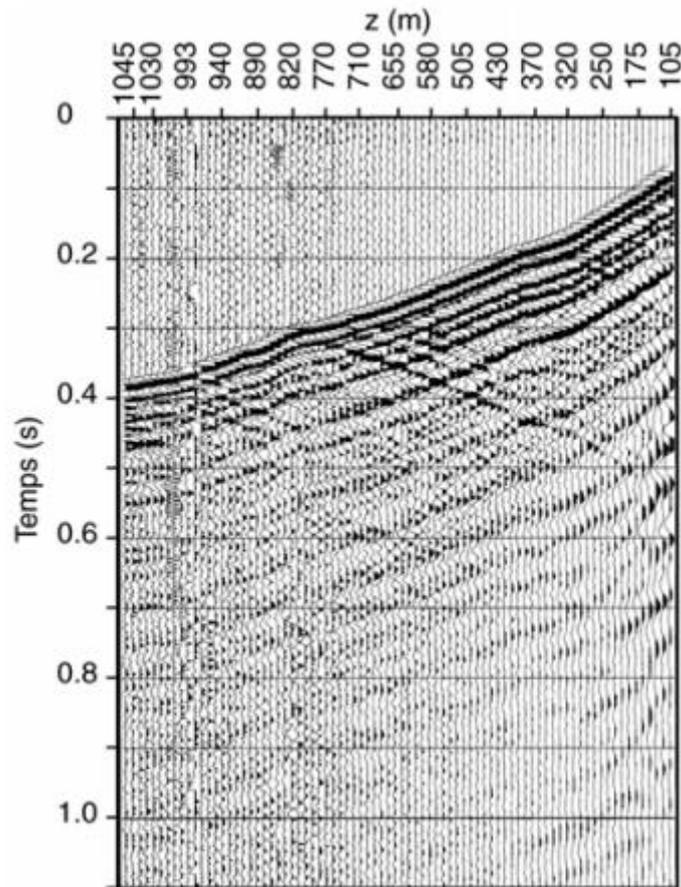


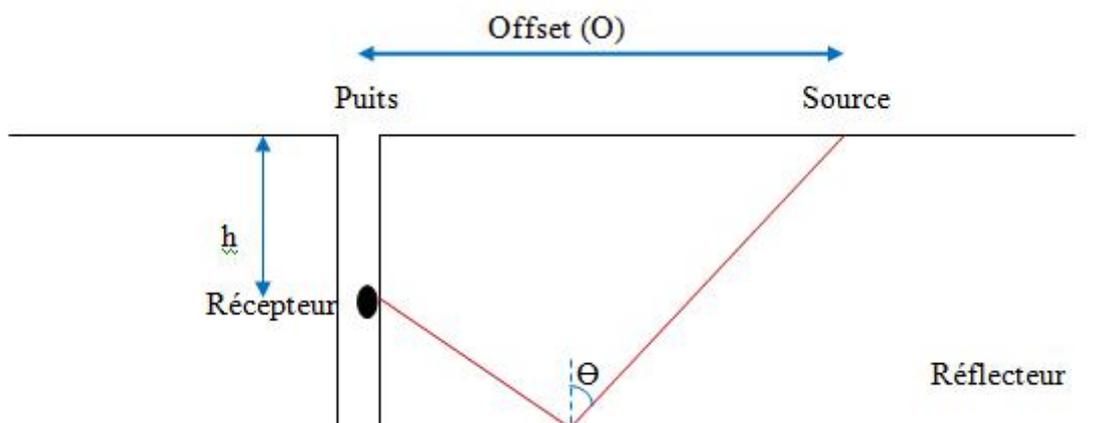
Figure I.11. Schéma simplifié d'un PSV.

Le PSV a une résolution verticale métrique à décimétrique et une investigation latérale de quelques dizaines de mètres. Après traitement, le PSV fournit une trace sismique sans multiples directement comparable à la section sismique de surface passant au voisinage du puits. Comparée aux données diagraphiques (sonique et densité) elle fournit au puits et sous le fond du puits un log d'impédance acoustique (Figure I.12).



**Figure I. 12.** Exemple d'enregistrement PSV après traitement. L'axe horizontal représente les positions des géophones en profondeur et l'axe verticale les temps doubles. [9]

Une façon d'augmenter l'investigation latérale du PSV consiste à déporter la source par rapport au puits. Cette mise en œuvre est appelée Profil Sismique Vertical Déporté (Offset VSP) ou Profil Sismique Oblique (PSO), (Figure I-13).



**Figure I.13 :** Schéma simplifié d'un PSO.

L'offset (O) dépend de la profondeur de l'objectif (h), dans la pratique on choisit :

$$O < \frac{3}{4}h$$

De plus, on appelle « walkaway » ou ballade sismique un ensemble de PSV déportés, la source occupant successivement plusieurs positions correspondant à des déports croissants par rapport à la tête du puits, l'image obtenue après traitement est une section sismique en couverture multiple de faible degré. Dans cette mise en œuvre, le nombre de positions du géophone de puits est généralement limité. La figure suivante illustre sa mise en œuvre.

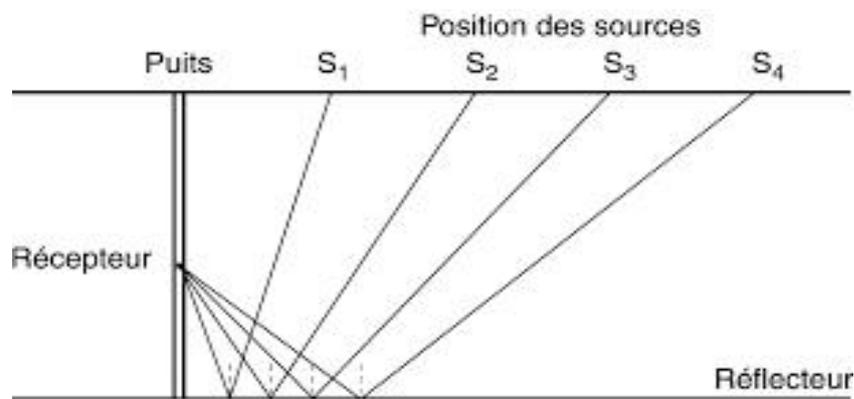


Figure I. 14. Schéma simplifié de Walkaway ou Ballade sismique [12].

### 3.2.2. Tir dans le puits :

Un PSV classique est généralement mis en œuvre avec une source de surface et un géophone de puits. Il peut être enregistré en utilisant une source de puits et un géophone en surface. On parle alors de PSV transposé ou de sismique de puits transposée. Les PSV ou PSO (Profil Sismique Oblique) permettent d'obtenir une image de l'espace ou du réservoir en dessous du puits. En cours de forage on peut utiliser comme source de puits l'outil de forage lui-même, ce qui permet d'obtenir au fur et à mesure de l'avancement une image des formations non encore forées (prédiction sous le puits).[11]

### 3.2.3. La sismique de puits à puits :

La sismique de puits à puits est mise en œuvre avec une émission des ondes acoustiques dans un puits émetteur, la réception de ces mêmes ondes se faisant dans un autre puits équipé de récepteurs (géophones ou hydrophones lorsque le forage est rempli d'eau [12]).

Elle peut fournir des images des formations entre les puits sous forme de sections en sismique réflexion donnant les contrastes d'impédance acoustique ou des modèles de vitesses obtenus par inversion des temps de première arrivée [11], c'est une sorte de **tomographie sismique**.

## **4. La tomographie sismique :**

### **4.1. Introduction :**

La tomographie sismique est très utilisée dans la description des réservoirs pétroliers, ou la détection des hétérogénéités importantes entre puits, événements tectoniques, etc. Elle permet également d'obtenir, par inversion, des modèles complexes impossibles à calculer par les méthodes traditionnelles du traitement de la sismique réflexion. Cette méthode récente est possible grâce à la puissance actuelle des ordinateurs. [1]

### **4.2. Principe :**

Le principe de la tomographie sismique consiste à provoquer un ébranlement dans un forage qui donne naissance à une onde grâce à un vibreur, qui se propage dans toutes les directions, Puis à enregistrer dans un autre forage l'arrivée de certaines ondes à différentes profondeurs.

Après avoir fourni à l'ordinateur le temps des premières arrivées aux géophones ainsi que la localisation de tous les géophones et des tirs. L'ordinateur recherchera ensuite, au moyen d'algorithmes complexes, un modèle de vitesses, théorique, qui fourniraient une dromochronique la plus proche possible des données expérimentales. Cela permet d'avoir une image (carte 2D) du sous-sol entre les deux puits (figure I.15).[1] [13]

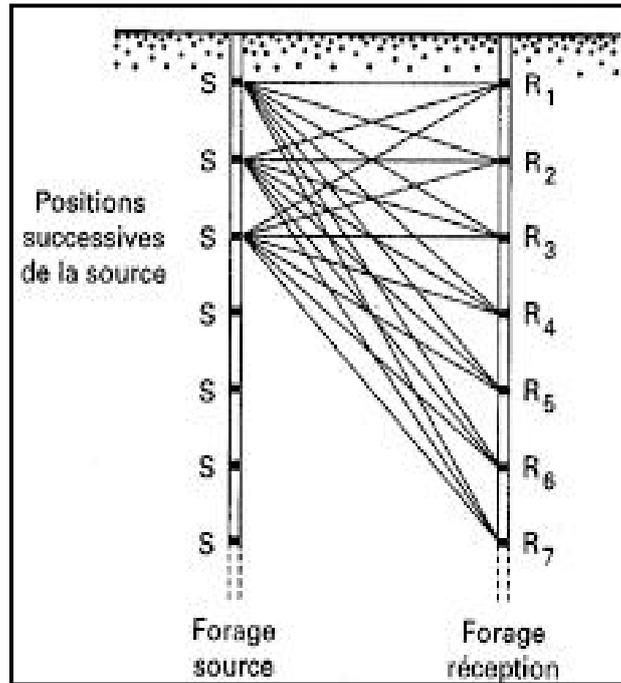


Figure I. 15. Principe de la tomographie sismique.

## 5. La théorie d'élasticité :

La théorie de l'élasticité des matériaux est à la base de la propagation des ondes sismiques à travers le sol et donc les méthodes d'exploration sismique et la sismologie tirent parti de cette théorie.

La théorie d'élasticité classique repose sur deux hypothèses sont [14] :

- ✓ La réversibilité déformations en fonction des contraintes dans un domaine de contrainte : c'est-à-dire les corps sont supposés parfaitement élastiques.
- ✓ La linéarité : les corps sont supposés élastiques linéaires, les déformations sont proportionnelles au forces appliquées ces corps satisfont à la loi de expérimentale de Hooke.

### 5.1. Le tenseur :

Les matériaux homogènes, isotropes et élastiques soumis à des faibles contraintes subissent des déformations, ils se comportent alors comme des matériaux élastiques et ils se caractérisent par une relation linéaire entre le tenseur de contraintes et le tenseur de déformations.

#### 5.1.1. Le tenseur de contrainte :

Si un corps se trouve sous l'action des forces extérieures, en chacun de ses points apparaissent des contraintes mécaniques. On dit alors que le corps se trouve à l'état de contrainte. Une contrainte est une mesure de la force exercée par unité de surface [15].

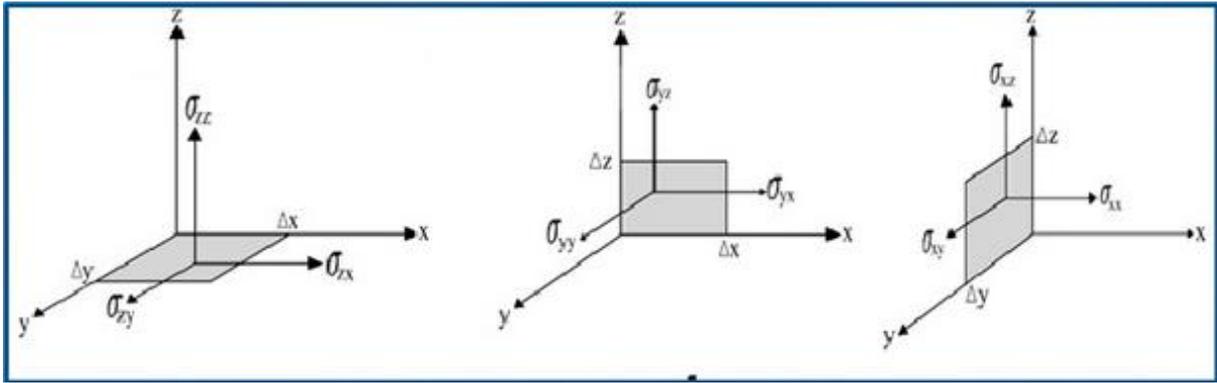


Figure II. 1. forces au sein d'un petit cube [16].

Pour un petit cube élémentaire (figure II.1.), le tenseur de contraintes éprouvées par ses forces  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  et  $\Delta z$  est exprimé par la matrice (tenseur) suivante :

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yx} & \sigma_{yy} & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Tel que :  $i, j = x, y, z$ .

La contrainte en un point du matériau est définie par six composantes forment un tenseur. Alors,  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$  sont des contraintes normales (traction ou compression)  $T_{xy}=T_{yx}$ ,  $T_{zx}=T_{xz}$ ,  $T_{yz}=T_{zy}$  des contraintes tangentielles(cisaillement). Ces six informations suffisent à caractériser l'état des contraintes en un point de matériau [16].

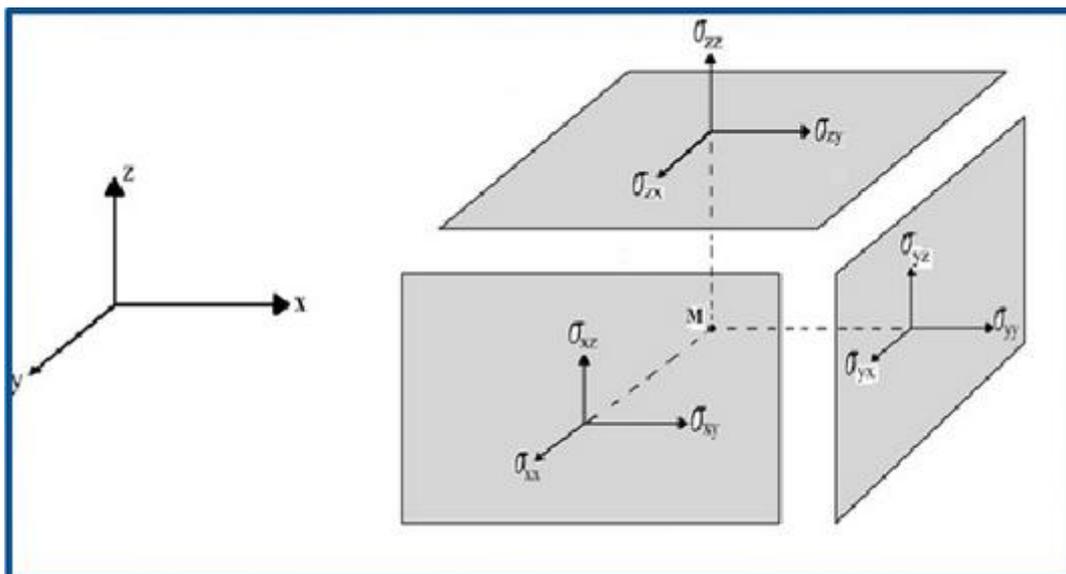


Figure II. 2. Contraintes normales et tangentielles [16].

### 5.1.2. Tenseur de déformations :

La déformation est une modification du volume ou de la forme d'un corps sous l'action de la force extérieure sans que sa masse change. C'est donc un processus dans lequel varie la distance entre certains points du corps. Les formes les plus simples de la déformation sont : la traction, la compression, la flexion, le cisaillement, la torsion [15].

Un point **M** (figure II.2) de coordonnées  $(x, y, z)$  situé sur un cube élémentaire soumis à des contraintes subit un déplacement  $\vec{U}$  de composantes  $u, v, w$ , le cube subit alors sous l'action des contraintes un changement relatif de forme qui peut être décrit par le tenseur (matrice) des déformations [16].

$$\epsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Les déformations  $\epsilon_{ij}$  s'expriment à partir des déplacements  $u_i$  par l'expression :

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.3)$$

Les termes de compressions s'expriment par la relation suivante :

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}$$

Avec :

$$\text{div} \vec{U} = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.4)$$

Les termes de cisaillement ont pour expressions :

$$\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.5)$$

$$\epsilon_{yz} = \epsilon_{zy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.6)$$

$$\epsilon_{zx} = \epsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2.7)$$

Comme le tenseur des contraintes, celui des déformations locales est symétriques :

$$\epsilon_{i,j} = \epsilon_{j,i} \text{ et } \sigma_{i,j} = \sigma_{j,i}$$

## 5.2. La loi de Hooke (loi de comportement élastique) :

La déformation subie par un corps homogène, isotrope et parfaitement élastique est proportionnelle à la force ou à la contrainte appliquée. Cette relation entre contraintes et déformations a été annoncée en 1678 et porte le nom de la loi de Hooke (Astronome et Mathématicien Britannique). Cette loi de comportement élastique réversible est valable tant que les sollicitations subies par les matériaux restent assez faibles [16].

La loi de Hooke s'écrit alors :

$$\sigma_{ij} = \lambda \cdot \theta \cdot \delta_{ij} + 2 \cdot \mu \cdot \epsilon_{ij} \quad (2.8)$$

Avec :

$\mu, \lambda$  : Les constantes de Lamé.

$\delta_{ij}$  : Symbole de Kronecker, tel que :

$$\delta_{ij} = 1, \quad \text{si } i=j.$$

$$\delta_{ij} = 0, \quad \text{si } i \neq j.$$

$\theta$  : Dilatation volumique.

$$\theta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div. } \vec{U}$$

Les développements de l'équation de Hooke fournissent 6 relations entre les contraintes et les déplacements qui sont :

$$\sigma_{xx} = \lambda \theta + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} = \lambda \cdot \text{div. } \vec{U} + 2\mu \cdot \epsilon_{xx} \quad (2.9)$$

$$\sigma_{yy} = \lambda \theta + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} = \lambda \cdot \text{div. } \vec{U} + 2\mu \cdot \epsilon_{yy} \quad (2.10)$$

$$\sigma_{zz} = \lambda \theta + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} = \lambda \cdot \text{div. } \vec{U} + 2\mu \cdot \epsilon_{zz} \quad (2.11)$$

$$\sigma_{xy} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) = 2\mu \cdot \epsilon_{xy} \quad (2.12)$$

$$\sigma_{yz} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) = 2\mu \cdot \epsilon_{yz} \quad (2.13)$$

$$\sigma_{zx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) = 2\mu \cdot \epsilon_{zx} \quad (2.14)$$

### 5.3. Les modules élastiques :

Les modules élastiques sont des coefficients intrinsèques à chaque type de matériau qui permettent de faire le lien entre la contrainte au taux de déformation d'un milieu soumis respectivement à une compression ou à un cisaillement. Les principaux paramètres les plus utilisés sont :

➤ **Les paramètres de Lamé :**

Le premier paramètre a pour expression :

$$\lambda = \frac{E\sigma}{(1-2\sigma)(1+\sigma)} \quad (2.15)$$

Le deuxième paramètre est appelé aussi module de cisaillement ou de rigidité, il mesure le rapport entre la contrainte tangentielle au cisaillement correspondant et a pour expression :

$$\mu = G = \frac{\delta_{xy}}{2\varepsilon_{xy}} = \frac{E}{2(1+\sigma)} \quad (2.16)$$

Ces deux paramètres de Lamé  $\lambda$  et  $\mu$  définissent complètement le comportement de matériau élastique linéaire et isotrope [16].

➤ **Module de Young ou module d'élasticité :**

Le module de Young (noté  $E$ ) ou module d'élasticité longitudinale ou encore module de traction, est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et la déformation pour un matériau élastique isotrope. Tant que la limite d'élasticité est la loi de Hooke [15]:

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (2.17)$$

Où :

- $\sigma$  : est la contrainte(en unité de la pression).
- $E$  : est le module de Young(en unité de la pression).
- $\varepsilon$  : est l'allongement relatif.

➤ **Coefficient de contraction ou coefficient de Poisson :**

Le coefficient principal de Poisson permet de caractériser la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué. Ce coefficient a été mis en évidence analytiquement par Daniel Poisson, mathématicien Français (1781-1840) ce paramètre caractérisant, comme le coefficient de Young, une propriété intrinsèque du matériau, appelé coefficient de Poisson.

$$\frac{\Delta l}{l} = - \frac{1}{\sigma} \frac{\Delta d}{d} \quad (2.18)$$

Avec :

**d** : épaisseur[m].

**Δd** : Rétrécissement [m].

**σ** : Coefficient de poisson [msans dimension ].

Le coefficient de poisson est théoriquement égal à **0.25** pour un matériau parfaitement isotrope il est habituellement compris entre **0.2** et **0.3** et ne dépasse pas **0.5**.

Le module de Young et le coefficient de poisson ne dépendent ni de la forme ni de la direction des matériaux [17].

Le tableau ci-après donne le module de Young et le coefficient de Poisson pour les roches usuelles :

**Tableau II. 1.** Module de Young et coefficient de Poisson pour les roches les plus usuelles (d’après Mestat 1993) [17].

Matériau	Module d’Young E [GPa ]	Coefficient de Poisson σ
Granite	10 – 80	0.25 – 0.35
Basalte	20 – 70	0.25 – 0.35
Quartzite	30 – 90	0.12 – 0.15
Gneiss	10 – 60	0.25 – 0.35
Schiste	7 – 50	0.15 – 0.20
Calcaire très compact	60 – 80	0.25 – 0.35
Calcaire compact	30 – 60	0.25 – 0.35
Calcaire peu compact	10 – 30	0.25 – 0.35
Calcaire tendre	2 – 10	0.25 – 0.35
Marne	0.05 – 1	0.25 – 0.25
Grés	5 – 60	0.25 – 0.35
Molasse	1.5 – 5	0.25 – 0.35
Marbre	80 – 110	0.27 – 0.3
Gypse	2 – 6.5	0.27 – 0.3

➤ **Module d’élasticité isostatique :**

Le module d’élasticité isostatique ou module d’incompressibilité (bulkmodulus en anglais) est la constante qui relie la contrainte au taux de déformation d’un matériau isotrope soumis à une compression isostatique. Généralement noté K (ou B), il permet de mesurer la résistance de la substance à la compression uniforme. Il représente donc, la résistance à la surface. Son unité de base est le pascal. Il est défini par la relation [15] :

$$K = -v \frac{\partial p}{\partial v} \quad (2.19)$$

$\frac{1}{K}$  : est appelé compressibilité.

**CHAPITRE II :**  
**ELECTROMAGNETISME ENTRE**  
**PUITS**

## 1. Aperçu de la théorie de l'électromagnétisme :

### 1.1. Les équations de Maxwell :

L'électromagnétisme est fondé sur les équations de Maxwell, elles permettent de calculer les expressions des champs électriques  $\vec{E}$  et des champs magnétiques  $\vec{B}$  à partir des sources de charges qui leur donnent naissance et que l'on peut représenter par leur densité volumique de charge  $\rho$  et de courant  $\vec{j}$ . Elles s'énonçant comme suit :

#### L'équation de Maxwell-Gauss

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.20)$$

#### L'équation de Maxwell-Thomson

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.21)$$

#### L'équation de Maxwell-Faraday

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.22)$$

#### L'équation de Maxwell-Ampère

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.23)$$

Paramètre :

$\vec{E}$ : Champ électrique en V/m.

$\vec{B}$ : Champ magnétique en T.

$\rho$ : Densité volumique de charge en C/m<sup>3</sup>.

$\vec{j}$ : Densité de courant électrique en A/m<sup>2</sup>.

$\mu_0$ : La perméabilité magnétique du vide  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  SI.

$\epsilon_0$ : La permittivité diélectrique du vide  $\epsilon_0 = 1/\mu_0 \cdot c^2$  C/V/M.

La première équation exprime la manière dont les charges électriques sont à l'origine de champ électrique.

La deuxième équation on l'appelle aussi l'équation de flux magnétique, elle exprime qu'il n'existe pas de monopole magnétique (nord ou sud) [18], en effet tous les aimants possède deux pôles.

La troisième équation traduit sous forme mathématique la découverte de Faraday : un champ magnétique variable dans le temps induit un champ électrique, c'est le phénomène d'induction. [18]

La quatrième équation fait référence au travail d'Ampère, elle exprime la manière dont un courant

électrique est à l'origine d'un champ magnétique. On remarquera qu'un champ électrique dépend du temps crée lui aussi un champ magnétique.

### 1.2. Les ondes électromagnétiques :

Ces deux équations montrent que  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont couplés. Cela a abouti à un nouveau champ : le champ électromagnétique. Donc, une onde électromagnétique est le résultat de la vibration couplé d'un champ électrique  $\vec{E}$  et d'un champ magnétique  $\vec{B}$  dont les amplitudes varient de façon sinusoïdale au cours du temps.

L'amplitude d'une onde électromagnétique varie donc de façon sinusoïdale au cours de sa propagation [19] (figure ci-dessous).

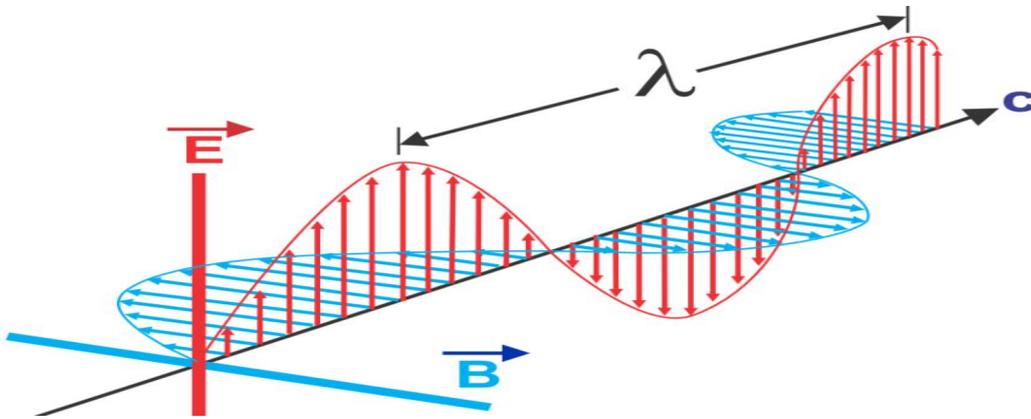


Figure II. 3. Nature et propagation d'une onde électromagnétique.

Une onde électromagnétique est caractérisée par plusieurs grandeurs physiques :

- **La longueur d'onde ( $\lambda$ )** : elle exprime le caractère oscillatoire périodique de l'onde dans l'espace [19]. C'est la longueur d'un cycle d'une onde, la distance séparant deux crêtes successives, elle est mesurée en mètre.
- **La période (T)** : elle représente le temps nécessaire pour que l'onde effectue un cycle. L'unité est la seconde.
- **La fréquence (f)** : inverse de la période (T), elle traduit le nombre de cycles par unité de temps. Elle s'exprime en Hertz (Hz) - un Hz équivaut à une oscillation par seconde.

La longueur d'onde et la fréquence sont inversement proportionnelles par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Où

- $\lambda$  : longueur d'onde de l'onde électromagnétique.
- $c$  : vitesse de la lumière ( $3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ).
- $f$ : la fréquence de l'onde.

Par conséquent, plus la longueur d'onde est petite, plus la fréquence est élevée, et réciproquement.

La propagation de ces ondes s'effectue à une vitesse qui dépend du milieu considéré. Dans le vide, la vitesse de propagation est égale à  $3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .

### 1.3. Différents types d'ondes électromagnétiques :

Les conducteurs parcourus par des courants variant en fonction du temps rayonnent donc un champ électromagnétique, intentionnellement ou non intentionnellement.

- Dans le premier cas (intentionnel), ces conducteurs sont des antennes qui émettent de l'énergie électromagnétique afin d'établir des communications sans fil avec des récepteurs radioélectriques. Les antennes ont diverses formes suivant les fréquences utilisées et les applications associées.
- Dans le second cas (non-intentionnel), ce sont des conducteurs parcourus par des courants alimentant des circuits électriques ou électroniques. Pratiquement, tout conducteur ou appareil électrique ou électronique actuel est une source de rayonnement électromagnétique non intentionnel dès lors que circule un courant variable dans le temps. [20]

### 1.4. Propriétés électromagnétique des milieux géologiques :

Les propriétés électromagnétiques d'un sol permettent de décrire le comportement d'un sol sous l'influence d'un champ électromagnétique. Une onde électromagnétique et un milieu interagissent par l'intermédiaire de trois paramètres: la conductivité  $\sigma$ , la permittivité électrique  $\epsilon$  et la perméabilité magnétique  $\mu$ .

#### 1.4.1. Conductivité ( $\sigma$ en S/m) :

La conductivité électrique (et son inverse la résistivité électrique en ohm.mètre) représente la capacité de la matière à mettre en mouvement les charges libres sous l'action d'un champ électrique.

En général, la conductivité des milieux géologiques est faible. Par contre, la présence des fluides dans les pores et les fissures de ces milieux augmente relativement la conductivité électrique.[21]

La conductivité se traduit par la présence et le déplacement d'ions à l'intérieur des fluides. Sous l'effet d'un champ électrique, le mouvement des charges libres est caractérisé par la conductivité électrique  $\sigma$ (S/m) selon la loi d'Ohm :

$$j_c = \sigma E$$

#### **1.4.2. Permittivité électrique ( $\epsilon$ en F/m) :**

La permittivité diélectrique caractérise la redistribution locale des charges liées sous l'action d'un champ électrique et traduit la capacité d'un milieu à se polariser sous cette action. On distingue quatre types principaux de polarisation :

- La polarisation électronique.
- La polarisation dipolaire (d'orientation).
- La polarisation ionique.
- La polarisation interfaciale (polarisation de charges).[22]

#### **1.4.3. Perméabilité magnétique ( $\mu$ en H/m) :**

Elle correspond à l'énergie stockée ou perdue dans le matériau suite aux phénomènes d'induction magnétique, de même que la permittivité vis à vis du déplacement de charge.

La superposition des moments magnétiques orbitaux (dus à la rotation des électrons autour du noyau), et des spins (dus à la rotation des électrons sur eux-mêmes) caractérisent le diamagnétisme si la résultante est nulle et le paramagnétisme existant.

En présence d'un champ magnétique extérieur, le matériau diamagnétique développe un moment induit dans le sens opposé au champ appliqué, alors que dans un matériau paramagnétique les moments existant tendent à s'aligner suivant le champ d'excitation. Il arrive dans certains matériaux que les spins soient naturellement orientés dans la même direction : ils sont dits Ferromagnétiques. [22]

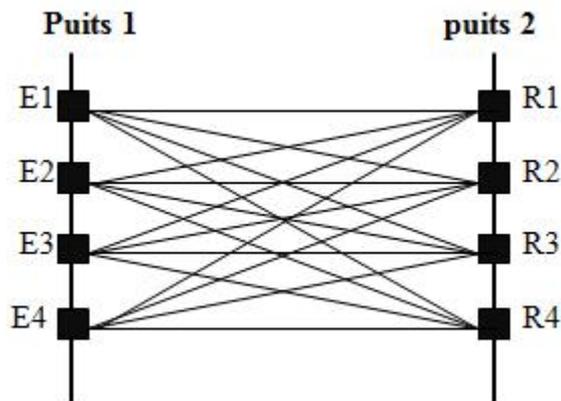
## **2. La tomographie électromagnétique :**

La tomographie électromagnétique entre puits est une méthode de prospection géophysique, permettant l'investigation des terrains présents entre deux puits.

### **2.1. Principe :**

Le principe de la tomographie EM est d'utiliser une antenne émettrice localisée dans un puits, cette dernière émet un signal électromagnétique. L'onde émise se propage dans le milieu avec une vitesse

v, et se retrouve ensuite enregistrée par une antenne réceptrice située dans un autre puits à une distance connue. L'émetteur et le récepteur sont déplacés à fin d'avoir le maximum de combinaisons possibles de couplage émetteur-récepteur (figure II.4).



**Figure II.4.** Principe de la tomographie électromagnétique, E1...E4 sont les positions successives de l'émetteur, R1...R4 sont les positions successives du récepteur.

Ce signal est enregistré sous forme de trace. La trace contient l'onde transmise arrivée au temps  $t$  au récepteur ainsi que d'autres ondes produites par d'éventuelles réflexions ou réfractions émises par le signal. Au niveau du signal, on pointe le temps de première arrivée en considérant qu'il correspond à l'onde transmise, et on mesure l'amplitude du signal reçu. [21]

**CHAPITRE III : ETUDE  
COMPARATIVE ENTRE LES  
DEUX METHODES.**

## 1. Crosswell :

C'est une technique de mesure d'un signal transmis d'un émetteur ou d'une source situé dans un puits, à un réseau de récepteurs situé dans un autre puits voisin. Cette technique est utilisée pour créer un affichage des propriétés de formation telles que la vitesse acoustique et l'atténuation, **la réflectivité sismique**, ou **la résistivité électromagnétique** dans la zone entre les puits, et donc cartographier cette zone.

Deux types de Crosswell sont présentés dans notre travail de recherche : Crosswell par tomographie sismique et Crosswell par tomographie électromagnétique.

### 1.1. Crosswell par tomographie sismique :

Crosswell par tomographie sismique est une méthode de prospection du sous-sol, elle a été développée dans les années 1980 [23].

C'est une technique de levé qui mesure le signal sismique transmis d'une source, située dans un puits, à un réseau de récepteurs dans un puits voisin. Les données résultantes sont traitées pour créer une image de réflexion ou pour cartographier la vitesse acoustique ou d'autres propriétés (vitesses des ondes P et S, par exemple) de la zone entre les puits. Le placement du réseau source et récepteur dans les puits adjacents permet non seulement de surveiller la formation entre les puits, mais aussi d'éviter la propagation du signal sismique par des formations près de la surface atténuantes. Un autre avantage est qu'il place la source et le récepteur près de la zone du réservoir d'intérêt, obtenant ainsi une meilleure résolution que celle qui est possible avec les levés sismiques de surface conventionnels. Cette technique est souvent utilisée pour la caractérisation des réservoirs à haute résolution.

### 1.2. Crosswell par tomographie électromagnétique :

Crosswell par tomographie électromagnétique a d'abord été mise au point dans les années 1990, puis commercialisée par Schlumberger en 2005 [25].

C'est une technique de mesure de la résistivité des formations géologiques entre deux puits, elle mesure le signal entre un émetteur d'induction électromagnétique dans un puits, et un réseau de récepteurs situé dans un autre puits, elle utilise les principes de l'induction électromagnétique et de la tomographie pour fournir une image de la distribution de résistivité entre ces deux puits.

## 2. Comparaison entre les deux types de Crosswell :

Avec l'avènement de la technologie de Crosswell par tomographie sismique dans les années 1980, une nouvelle génération d'outils géophysique à haute résolution est devenue disponible pour la caractérisation des réservoirs. La principale amélioration réside simplement dans le fait que les outils sont déployés dans des forages à fin que les mesures se fassent beaucoup plus près de la zone d'étude.

Un système électromagnétique à base fréquence a été développé, capable de représenter la résistivité électrique dans les champs pétrolifères aux séparations de puits jusqu'à 1 km.

Les résultats EM à basse fréquence donnent des données de réservoir différentes et très complémentaires par rapport à la sismique. Alors que la vitesse sismique et l'atténuation sont plus sensibles aux variations de la matrice de roche ; la distribution de résistivité électrique, dérivée des données EM, est plus sensible aux variations du fluide présent dans le milieu poreux.

Les deux méthodes d'imagerie de sous sol sont coûteuses, la première (tomographie sismique) est très coûteuse en argent, et la deuxième (tomographie électromagnétique) en temps.

D'autre part, la mise au point de méthode de surveillance géophysique à faible coût est une priorité des sociétés d'exploitation depuis un certain temps. Les techniques sismiques ont été appliquées avec succès, mais de nombreux développeurs hésitent à les utiliser en raison du coût élevé du forage, par contre, Crosswell par tomographie EM est une excellente méthode pour surveiller un entraînement de vapeur en raison de la sensibilité élevée de la résistivité aux changements de température et de saturation de la vapeur. [26]

Le tableau ci-dessous montre une comparaison entre les deux types de Crosswell présentés.

**Tableau III. 1.** Une comparaison entre les deux types de Crosswell. [23] [24]

	<b>Crosswell par tomographie sismique</b>	<b>Crosswell par tomographie électromagnétique</b>
<b>Objectif</b>	Détermination de la géométrie d'un élément de fondation profonde.	Crée une carte de la distribution de résistivité entre deux puits
<b>Principe</b>	émettre une onde sismique dans un des puits à différentes profondeurs et à mesurer le temps de parcours dans l'autre puits par des capteurs placés à différentes profondeurs.	Au premier puits, l'antenne émettrice émet des signaux électromagnétiques, à différentes profondeurs, au deuxième puits, les signaux EM sont détectés par les récepteurs.
<b>Caractère destructive de la méthode</b>	Non destructive	Non destructive
<b>Rayon d'investigation</b>	Jusqu'à 5m	Jusqu'à 1km
<b>Coût</b>	Très Élevé	Elevé
<b>délais de disponibilité des résultats</b>	Quelques jours (interprétation au bureau)	Quelques jours
<b>Outils utilisés</b>	Matériel nécessaire aux forages préalables et à leur équipement (tubage). Sur place : <ul style="list-style-type: none"> <li>• source sismique et son câble (avec repères de profondeur) à déplacer dans le forage.</li> <li>• chaîne de récepteurs en forage.</li> <li>• système d'acquisition.</li> </ul>	Matériel nécessaire aux forages préalables et à leur équipement (tubage). Sur place : <ul style="list-style-type: none"> <li>• source électromagnétique et son câble (avec repères de profondeur) à déplacer dans le forage.</li> <li>• chaîne de récepteurs en forage.</li> <li>• système d'acquisition.</li> </ul>

### **3. Exemple de Crosswell :**

#### **3.1. Application de la tomographie sismique Crosswell à Hanovre:[27]**

##### **3.1.1. Objectif :**

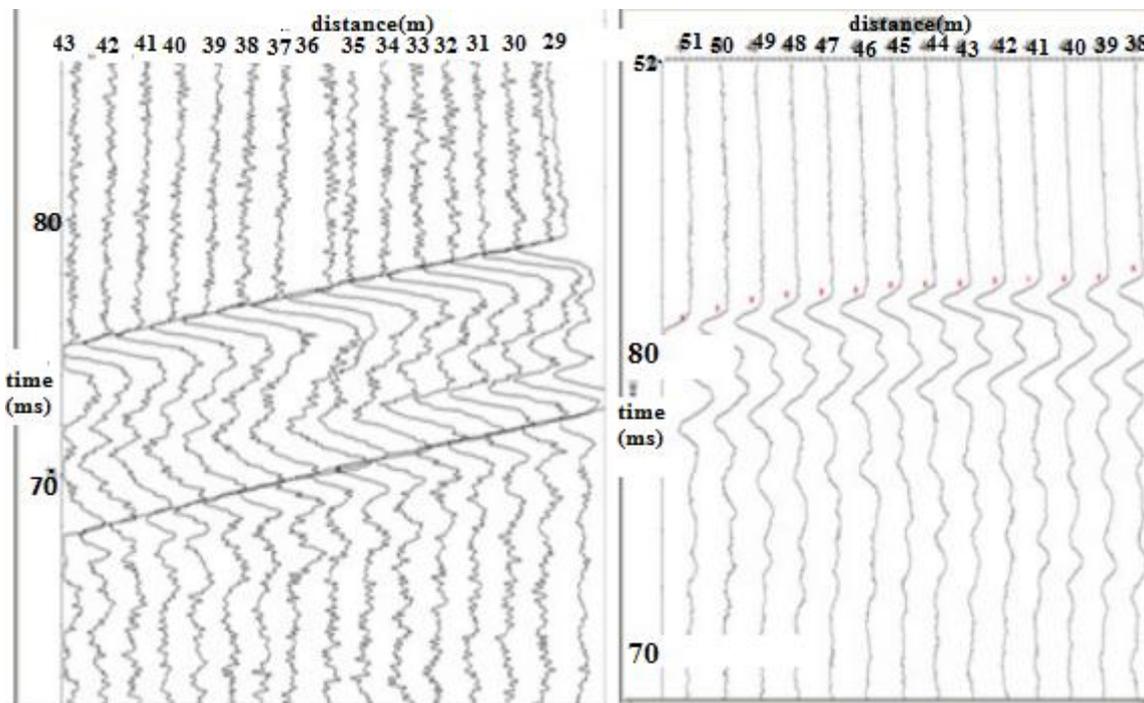
Dans cette étude, on présente un cas d'application de la tomographie sismique Crosswell pour une caractérisation à haute résolution du site d'essai sur le terrain de Prakla-Seismos à Hanovre.

Les distributions de vitesse détaillées sont corrélées avec les données géologiques disponibles pour mieux délimiter l'hétérogénéité du sous-sol, ce qui fournit des informations utiles pour améliorer le débit des eaux souterraines et la modélisation du transport des contaminants dans la région.

Le site d'essai PRAKLA-SEISMOS où l'étude a été réalisée est situé au nord-est de Hanovre, au nord de l'Allemagne. Le site d'essai est caractérisé par du sable fin quaternaire et du gravier grossier, reposant sur de l'argile calcaire. Il y a deux puits sur le site d'essai, chacun ayant une profondeur totale de forage de 100m, séparés l'un de l'autre par une distance de 90m.

### 3.1.2. Méthodologie :

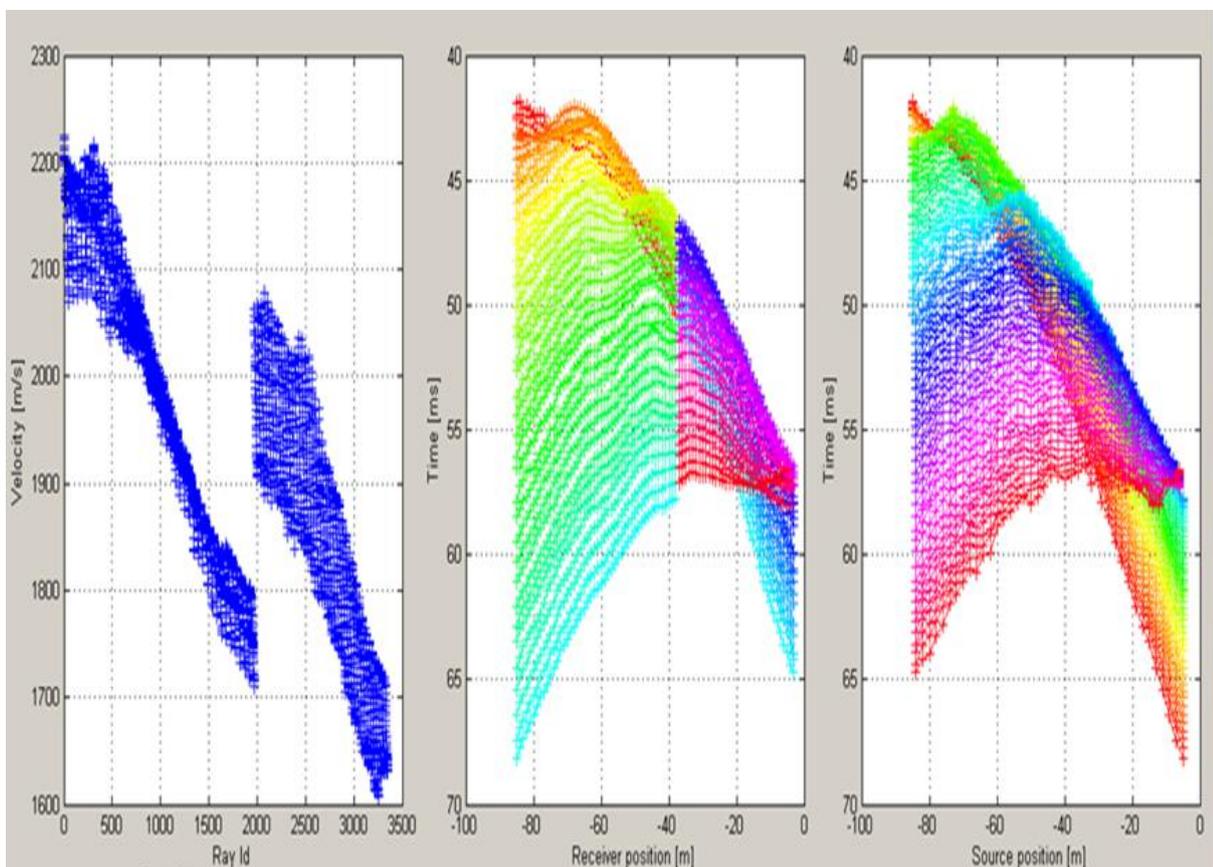
Des relevés tomographiques sismiques transversaux ont été effectués pour reconstituer la distribution de la vitesse de l'onde P entre les deux forages. La collecte de données sismiques croisées a été réalisée avec une source d'étincelle en fond de trou SBS-42 et un système hydrophone BHC-2 (Geotomographie, Allemagne) utilisant un sismographe d'exploration à 24 canaux SUMMIT II Compact (DMT, Allemagne), à un taux d'échantillonnage de 1/16KHz et une longueur record de 256ms. L'espacement entre les positions de prise de vue était de 2 m, tandis que l'espacement entre les hydrophones était de 1 m, ce qui a donné lieu à plus de 1 000 traces pour chaque relevé par trou croisé.



**Figure III.1.** Affichage des données brutes (à gauche), des données traitées (à droite) du test de tomographie.

Les temps de déplacement des ondes P ont été calculés à partir des premières arrivées identifiées sur la trace sismique pour chaque paire d'hydrophones à grenailles et utilisées avec la distance connue entre les trous de forage de grenailles/récepteurs pour calculer les vitesses (P) pour chaque intervalle de profondeur. Un grand nombre de temps de déplacement de l'onde p (plus d'un millier) a été enregistré. Les données ont été contrôlées et les fichiers formatés pour s'adapter à un logiciel d'inversion de tomographie qui calcule une image de vitesse 2D basée sur les temps de déplacement 1D.

Après avoir correctement choisi le temps de déplacement pour chaque trace sismique enregistrée dans différents fichiers, ces fichiers d'enregistrement ont été combinés ensemble à l'aide d'un simple classeur. TomoCheck a été utilisé pour assigner la géométrie réelle du forage et aussi pour vérifier la qualité des pics.

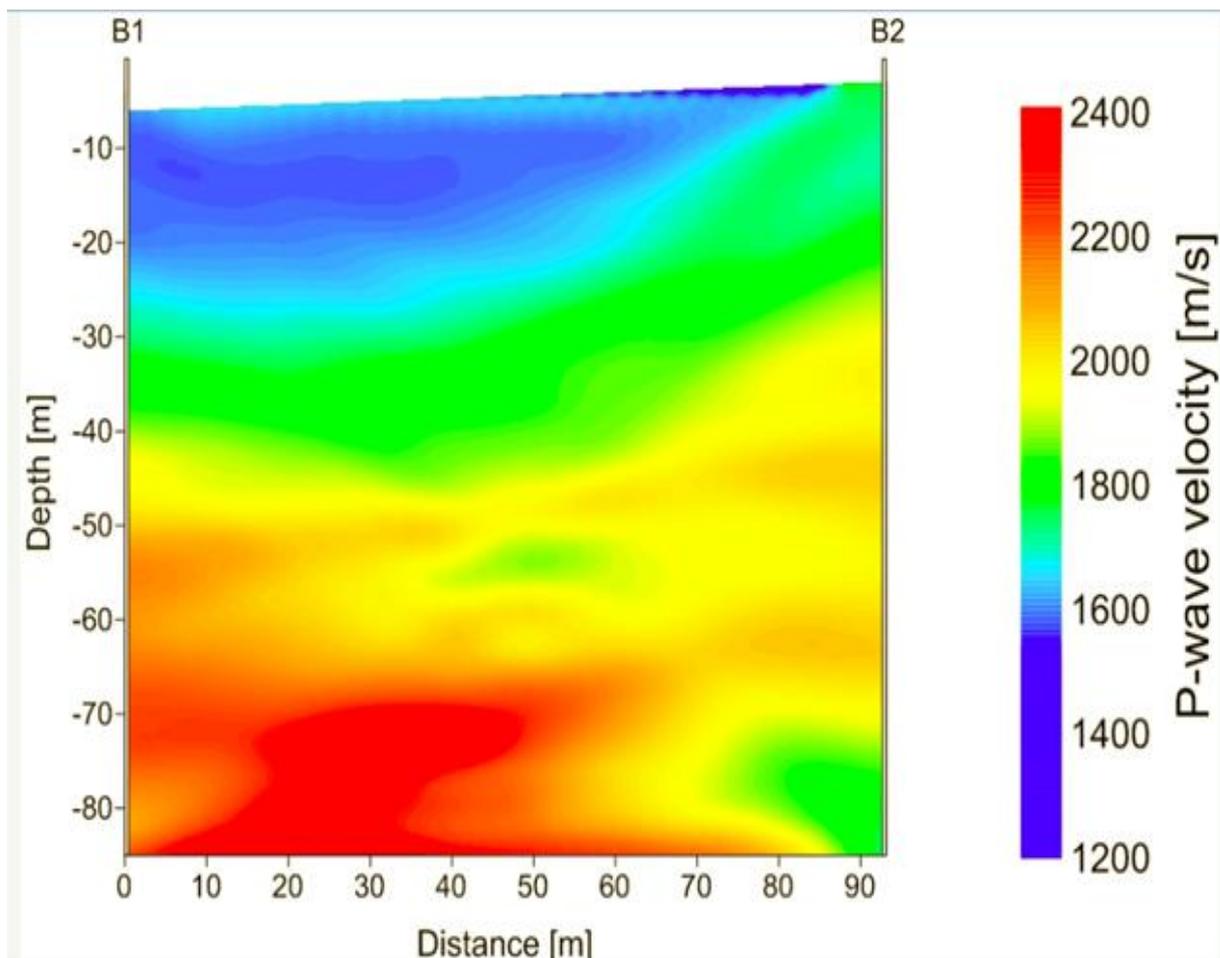


**Figure III. 2.** Affichage de l'écran TomoCheck pour le contrôle de la qualité du prélèvement. La douceur de la courbe est unindication que les choix ont été correctement attribués.

### 3.1.3. Résultat :

L'inversion tomographique a été réalisée à l'aide d'un logiciel GeotomCG de Geotomographie, en Allemagne. L'algorithme d'inversion utilisé est la technique de reconstruction itérative simultanée

(SIRT). Le tomogramme produit a montré quatre zones de vitesse distinctes, avec une vitesse comprise entre 1200 et 2400m/s, comme le montre la fig III.3 ci-dessous. La première et la plus basse zone de vitesse, a été observée à la profondeur de 6m-26m, et la gamme de vitesse de 1700-1900m/s, avec quelques taches qui est une indication de l'hétérogénéité. La deuxième zone de vitesse a été observée à une profondeur de 27m-40m, la troisième zone varie de 40m-70m et la quatrième zone a été observée à une profondeur de 70m et plus. La vitesse p-onde du sable et du gravier saturés en eau se situe dans la plage de 1500 à 2000m/s, ce qui indique que les aquifères de la zone d'étude se situent dans les zones de vitesse 1 à 3, avec une plage de profondeur de 6 à 60m. Le résultat montre également quelques taches claires dans la première et la troisième zone de vitesse, ce qui est une indication forte de l'hétérogénéité dans la composition structurale des matériaux aquifères. Il y a également une variation significative dans les zones de vitesse proches du puits B2 par rapport au puits B1.



**Figure III.3.** Affichage de la section transversale de vitesse entre les forages.

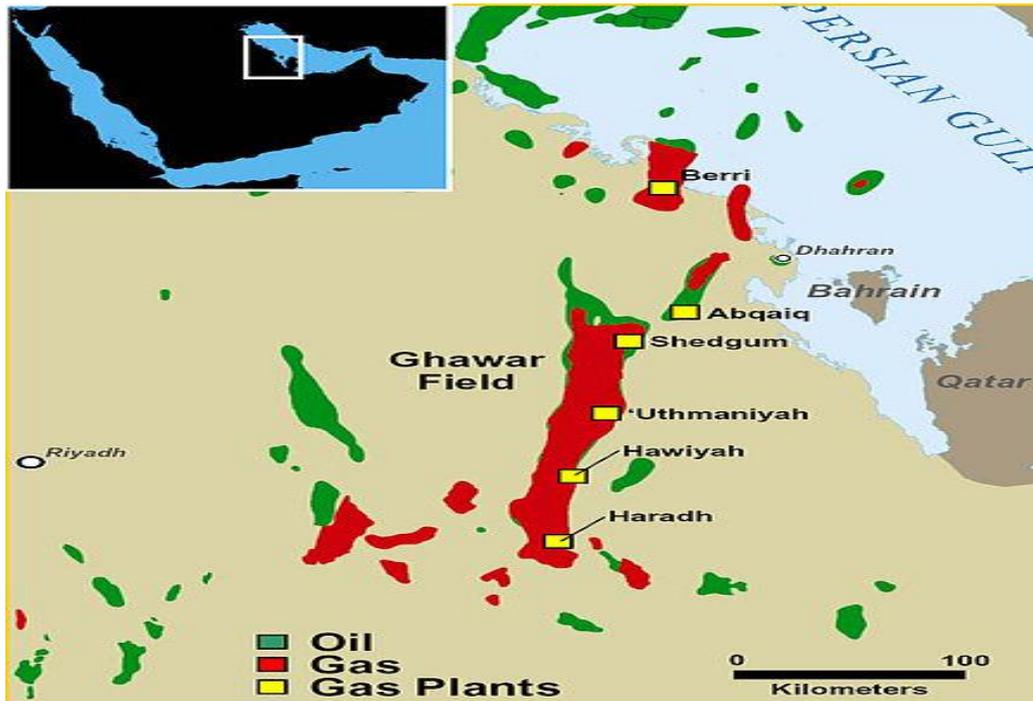
### **3.1.4. Conclusion**

Le résultat montre que les aquifères de la zone se situent entre 6 m et 60 m comme indiqué dans le tomogramme. On a également observé que la verticalité du forage est très importante pour améliorer la précision des données de tomographie sismique, ce qui est indiqué par la section à faible vitesse en bas à droite près du forage B2, qui est une erreur due à la déviation du forage. Cela peut être amélioré en mesurant les écarts de forage et en corrigeant les données avant l'inversion finale. Ces travaux ont montré que la tomographie sismique peut être un outil utile pour les études hydrogéologiques, car elle fournit des informations supplémentaires sur l'hétérogénéité de l'aquifère qui n'ont pu être obtenues à partir d'un seul forage 1D, améliorant ainsi la modélisation du transport de flux et de solutés dans la zone d'étude.

## **3.2. Exemple d'application de la méthode Crosswell EM : [28]**

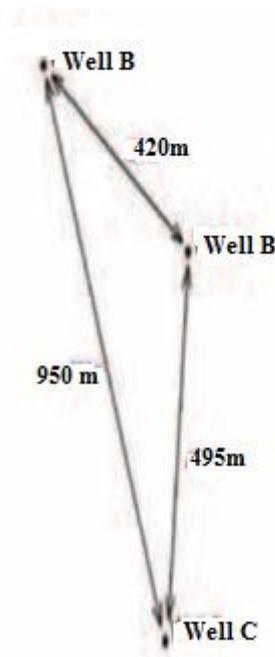
### **3.2.1. Projet de Crosswell par tomographie électromagnétique a Ghawar :**

Un projet d'essai entre Saudi Amarco et Schlumberger de la technologie de tomographie électromagnétique de Crosswell est en cours dans un réservoir de carbonate du Jurassique supérieur, au champ de Ghawar en Arabie Saoudite, pour surveiller le mouvement du front d'inondation d'eau injectée et cartographier la distribution des fluides, Le site du projet se trouve dans la région sud de Ghawar, champ de Haradh le plus grand champ de pétrole au monde,( figure III.5).



**Figure III. 5.** Péninsule arabique et champ de Ghawar. La zone d'intérêt se trouve dans le flanc sud-ouest de Ghawar, dans Haradh. Péninsule arabique et champ de Ghawar. La zone d'intérêt se trouve dans le flanc sud-ouest de Ghawar, dans Haradh.

Le site du projet se compose de trois puits dans la zone de contact pétrole-eau où l'eau d'injection périphérique a pu produire une distribution inégale du front d'inondation (figure III.6).



**Figure III. 6.** Emplacements relatifs des trois puits.

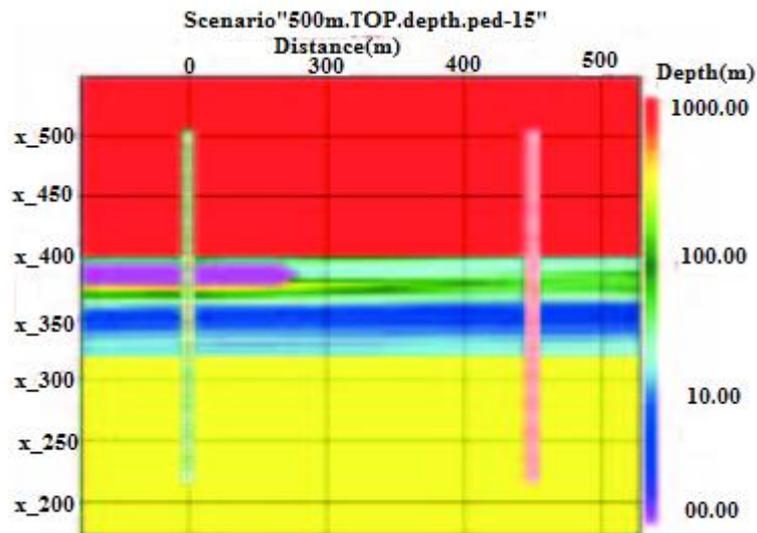
### 3.2.2. L'objectif :

L'objectif du projet était d'évaluer la distribution des fluides entre les puits à l'aide d'une tomographie de résistivité EM de Crosswell combinée à une suite sophistiquée de journaux filaires et d'outils d'évaluation de la formation. Ces technologies combinées ont le potentiel de surveiller l'efficacité du balayage macroscopique, d'identifier les contacts de fluides actuels et de localiser l'huile contournée.

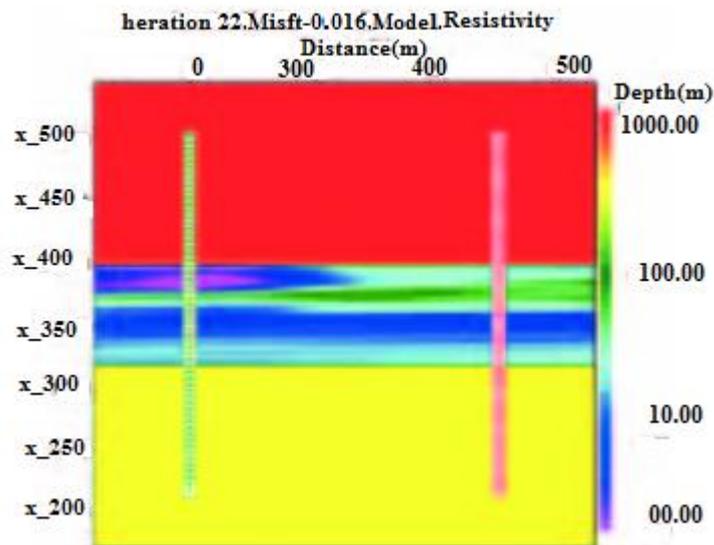
### 3.2.3. Modélisation de pré-acquisition :

Des travaux de forage et d'approfondissement importants ont été nécessaires avant le déploiement des outils dans le triangle à trois puits.

On a modélisé plusieurs scénarios de mouvement de front d'inondation, comme l'eau de bordure due, l'empiètement de l'eau du fond, etc. (voir les figures III.7 et III.8).



**Figure III. 7.** Modèle de résistivité pour un cas d'inondation d'eau, s'étendant jusqu'à un quart de la séparation à deux puits (500 m).



**Figure III.8.** Inversion des données EM des puits transversaux synthétiques pour le cas d'inondation d'eau illustré à la figure III.7.

La modélisation a montré que dans presque tous les cas, le système de puits croisés (Crosswell) fournirait un signal adéquat, mais la résolution latérale des images est dégradée si le rapport d'aspect (intervalle de journalisation vertical par rapport à la distance entre puits) est trop faible.

En fait, un nouveau puits A à été foré jusqu'à 200m sous le réservoir et deux autres puits (B et C) ont été approfondis de plus de 200 m, de sorte qu'une bonne couverture volumétrique a pu être obtenue à la zone de contact pétrole-eau. On a également procédé à d'importants essais de rondins, de carottes et de formation pour obtenir des profils de saturation déterministes dans la région proche du puits.

### 3.2.4. L'évaluation de la formation :

L'évaluation de la formation dans la zone du projet indique que l'un des puits a été entièrement balayé alors qu'un deuxième puits, situé à quelque 400 m, ne l'a pas été.

### 3.2.5. Sondage de tomographie EM a HARADH :

En théorie, la tomographie EM soit utile à des séparations de puits de 1 km ou plus, il s'agit jusqu'à présent de la plus grande séparation de puits essayée par EM Crosswell.

Le travail de Crosswell EM dans le champ de Haradh a été effectué en juillet 2007. Le couple de trois puits a nécessité environ sept jours pour l'installation et la collecte des données.

On remarque que même si les signaux étaient faibles (comme prévu), les données sont répétables. De plus, le bruit de fond s'est révélé très faible, ce qui est de bon augure pour les futurs sondages.

Chacun des trois relevés consistait en 3 000 à 4 000 mesures qui seront traitées conjointement pour fournir les cartes de résistivité inter-puits 2D. En plus des données de tomographie, on a également recueilli des données sur le bruit de fond pour évaluer l'influence de l'acier et du boîtier en chrome sur le bruit ambiant.

La prochaine étape du processus consiste à terminer les inversions de données et à comparer les cartes de résistivité entre puits aux premières réalisations de résistivité bien dérivées.

### **3.2.6. Conclusion :**

La tomographie EM de Crosswell en Arabie saoudite a produit des résultats intéressants et utiles. La technique a démontré une portée et une sensibilité adéquates pour la surveillance des réservoirs et a probablement un avenir prometteur dans ce sens.

### Conclusion générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire de fin d'étude en physique du globe consiste à faire une étude comparative entre deux méthodes d'imagerie de sous sol (tomographie sismique et électromagnétique). Après cette étude, il s'est avéré que les deux méthodes ont des résultats d'imagerie fiables dans des différents domaines, et comme pour toutes les méthodes géophysiques, ces deux méthodes présentent des avantages et des inconvénients.

La tomographie sismique est une méthode non destructive, la plus répandue dans le domaine de l'exploration pétrolière, elle permet d'imager des réservoirs situés à plusieurs kilomètres de profondeur, alors que la profondeur d'investigation n'est plus un problème, même s'il existe des failles.

D'autre part, cette méthode est très coûteuse, le rayon d'investigation entre deux puits est très petit (quelque mètre) donc, elle nécessite des trous relativement rapprochés, l'acquisition et le traitement des données sont assez long.

La tomographie électromagnétique est une méthode non destructive, elle n'est pas très coûteuse en comparant à la tomographie sismique, le rayon d'investigation entre puits est très grand (environ 1km et plus).

Mais cette méthode reste très coûteuse en temps, tel que il faut environ deux semaines pour avoir une image.

#### Recommandations

La géophysique propose plusieurs outils efficaces testés sur de nombreux sites. Le choix de la méthode doit se faire au cas par cas par le géophysicien ou sur ses conseils.

L'étude comparative des deux méthodes montre que la méthode sismique présente une meilleure résolution et une grande efficacité dans les cas où la tectonique est calme ou complexe (faille), par contre, l'autre méthode reste utilisable uniquement si la tectonique est calme.

D'autre part, la tomographie électromagnétique est une excellente méthode dans le domaine de l'hydrogéologie à cause de l'eau sous terrain. De plus, la tomographie sismique donne des résultats fiables dans plusieurs domaines comme la géotechnique, la sismologie et la géophysique pétrolière. Alors, le bon choix de la bonne méthode dépend de domaine d'application.

## Bibliographie

- [1] **J.JENNY**. «Glissement de terrain et Zones instables apports de la géophysique : Méthodes sismiques ».
- [2] **I.BENDIR, N.KARA**. Thèse de master de l'Université Djilali Bounaama Khemis de Miliana, 2018/2019.
- [3] **H.BELDJOUDI**. Cours de sismologie, univ, 2015/2016.
- [4] **O.MAGNIN, Y.BERTRAND**. Cours «Sismique réfraction, Les cahiers de l'AGAP n°2 », Mars 2005.
- [5] **B.GIROUX**. Techniques géophysiques de haute résolution sismique réflexion
- [6] **H. TEMER, R.CHERCHALI**. mémoire de master de l'université Djilali Bounaama de Khemis Miliana, 2017/2018.
- [7] **D.MABROUK**. Cours de sismique réfraction, université M'Hamed Bougara de Boumerdes, Mars 2017.
- [8] **S.OUDAFUL**. Cours de sismique, université Djilali Bounaama de Khemis Miliana, 2018/2019
- [9] **Jalal FERAHTIA** ; cours méthode de prospection sismique, Boumerdes 2020.
- [10] **Jean-Luc Mari, Christophe Vergniault**. Sismique en forage et diagraphies acoustiques: État de l'art du domaine géotechnique et transferts méthodologiques possibles du domaine pétrolier. EDP science, 2018, (ebook):978-2-7598-2262-1. fihal-01810758f
- [11] **Jean-Luc Mari**, sismique de puits, cours en ligne de géophysique, université de Lausanne
- [12] **Mari et al**, 1998
- [13] <https://www.geoexplo.dz/>
- [14] **M.LEDRA**. 'étude de la déformée d'une poutre cantilever', centre universitaire Abdelhafid boussouf, 2018.
- [15] **Rachida Haichour**. Thèse de magister de l'Université Ferhat Abbas de Sétif, 13 Janvier 2011.
- [16] **Djeddi Mabrouk**. Cours de propagation sismique « propagation des ondes sismiques », université M'Hamed Bougara de Boumerdes, Avril 2016.
- [17] **Djeddi Mabrouk**. Paramètres élastiques des roches, université M'Hamed Bougara de Boumerdes, Mai 2014.
- [18] **J.M, Courty** ; 2007/08, électromagnétisme dans la matière Note de cours .
- [19] <https://e-cours.univ-paris1.fr/>
- [20] **Alain Azoulay** - SPS n° 285, avril 2009, ondes et champs électromagnétique.
- [21] **Madeleine Mangué**. Tomographie radar en milieux stratifié à fort contrastes de vitesse.

Géophysique [physics.geo-ph]. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2008. Français. fftel-00286583f.

[22] **Mehennaoui naziha**, Etude théorique de la propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux hétérogènes - Application au radar Sol - , thèse de magister , université Ferhat Abbas-Sétif .

[23] **Cote P., Lagabrielle R.** – La Tomographie sismique comme méthode de reconnaissance détaillée du sous-sol – Exemple d'application au contrôle des injections. – Revue Française de Géotechnique, N°36 , 1986, pp 47-53.

[24] **Lagabrielle R.** – Diagraphies et géophysique de forage. Techniques de l'Ingénieur, Référence C225, Chapitre 7, mai 2007.

[25] **Michael wilt ,Pingzhang, Muhammad safdar**, January 2011 , Crosswell electromagnetic tomography in unconventional geometries .

[26] **MICHAEL WILT, H.F. MORRISON, ALEX BECKER and HUNG-WEN TSENG, KIHA LEE ,DAVID ALUMBAUGH, CARLOS TORRES-VERDIN** ,MARCH 1995 the leading edge, Crosshole electromagnetic tomography: A new technology for oil field characterization.

[27] **S.EHOSIOKE**. Application de la tomographie sismique à trous croisés à la caractérisation des aquifères hétérogènes, septembre 2014.

[28] **Dr. Alberto F. Marsala, Dr. Saleh Al-Ruwaili, Dr. Shouxiang Mark Ma, ModiuSanni, Zaki Al-Ali, Jean-Marc Donadille**, SAUDI ARAMCO JOURNAL OF TECHNOLOGY WINTER 2007,Crosswell Electromagnetic Tomography in Haradh Field: Modeling to Measurements.