

# PROSPECTION SISMIQUE

## Définition :

La sismique est une méthode de prospection qui permet de visualiser les structures géologiques en profondeur grâce à l'analyse des échos d'ondes sismiques. Il ne faut pas la confondre avec la sismologie, qui est l'étude des ondes sismiques et des séismes pour eux-mêmes.

Les ondes sismiques étudiées peuvent avoir des causes naturelles (tremblement de terre) ou artificielles (camion vibreur, explosif, canon à air, etc.) Dans tous les cas, elles suivent les mêmes lois que les ondes lumineuses. Les deux grandes techniques de sismique sont donc :

- La sismique réflexion.
- La sismique réfraction.

La sismique, dont le principe consiste à différencier les formations sur la base de la vitesse de propagation des ondes qui les traversent, est une méthode relativement coûteuse et lente avec cependant des résultats souvent excellents. On applique fréquemment cette méthode sur des sites alluvionnaires, lorsque l'on veut connaître l'épaisseur des roches meubles sur le socle (vitesse des sables: 600 m/s, vitesse du calcaire: 5000 m/s). En hydrogéologie, on utilise principalement la sismique réfraction. Cependant les progrès récents de l'informatique autorisent aujourd'hui l'utilisation de la sismique réflexion même pour les faibles profondeurs.

## 1 / La sismique réfraction :

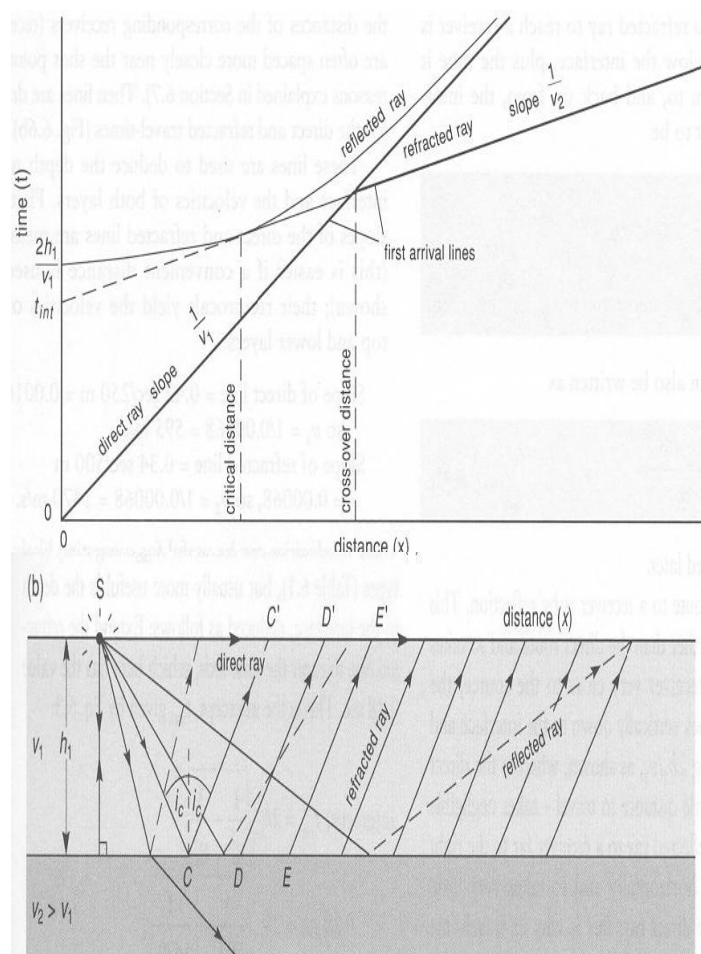
### 1.1 / Comportement d'une onde acoustique :

Lorsqu'on effectue un ébranlement à la surface, les ondes se déplacent à la vitesse  $V$  formant une demi-sphère de centre  $E$ , et au point  $S$  on enregistre qu'un seul train d'onde (onde directe).

En milieu stratifié, s'ajoute une onde réfléchi sur le 2<sup>ème</sup> dioptré (la surface de séparation de 2 milieux  $p$  et  $p+1$  et de vitesse respectives  $V_p$  et  $V_{p+1}$ ).

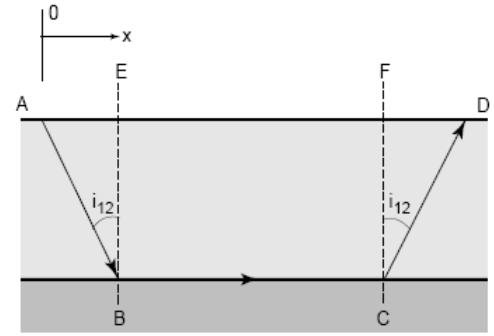
Selon le principe de Huygens, chaque point  $I$  de l'onde réfractée donnera lieu aux ondes de rayon  $I_1S_1, I_2S_2, I_3S_3, I_4S_4, I_5S_5$ , en effet chaque point se comporte comme une nouvelle source lumineuse ou acoustique. Toute particule qui entre en oscillations transmet son mouvement aux particules qui l'entourent. Rayons parallèles aux rayons réfléchis au point  $I$ , ce sont des rayons réfractés. Seul un rayon au point  $I$  est confondu au rayon réfléchi.

FIG : Hodochrones des ondes sismiques



## 1.2 / Principe de la sismique réfraction : (cas d'un seul plan réfracteur parallèle a la surface) :

La sismique réfraction utilise les premières arrivées, c'est-à-dire les trains d'ondes qui issue d'un point d'explosion E arrivent les premières au géophones, considérons une stratification suivante :



$$\text{Onde directe : } T_1 = \frac{ES_1}{V_1} = \frac{x}{V_1}$$

$$T_2 = \frac{EA}{V_1} + \frac{AB}{V_2} + \frac{BS_3}{V_1}$$

$$T_2 = 2 T_{EA} + T_{AB} \text{ avec : } 2T_{EA} = \frac{EA}{V_1} = \frac{2h}{V_1 \cos \alpha_1}$$

$$T_{AB} = (x - 2htg \alpha_1) \frac{1}{V_2}, \text{ on aura : } \frac{x}{V_2} - \frac{2h}{V_2} tg \alpha_1 = T_{AB}$$

$$T_2 = \frac{x}{V_2} + \frac{2h}{V_1 \cos \alpha_1} - 2htg \alpha_1 \frac{1}{V_2}$$

$$T_2 = \frac{x}{V_2} + 2h \left( \frac{1}{V_1 \cos \alpha_1} - \frac{tg \alpha_1}{V_2} \right)$$

$$\sin \alpha = \frac{V_1}{V_2}, T_2 = \frac{x}{V_2} + 2h \left( \frac{1}{V_1 \cos \alpha_1} - \left( \frac{V_1}{V_2} \right) \frac{1}{V_2 \cos \alpha} \right)$$

$$\text{, donc : } \cos^2 = 1 - \frac{V_1^2}{V_2^2}, \cos \alpha = \sqrt{\frac{V_2^2 - V_1^2}{V_2^2}} = \frac{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_2}$$

$$T_2 = \frac{x}{V_2} + \frac{2h}{\cos \alpha} \left( \frac{1}{V_1} - \frac{V_1}{V_2} \right), T_2 = \frac{x}{V_2} + \frac{2h}{\cos \alpha} \left( \frac{V_2^2 - V_1^2}{V_1 V_2^2} \right) = \frac{x}{V_2} + \frac{2h \cos^2 \alpha}{V_1 \cos \alpha} = \frac{x}{V_2} + \frac{2h_1 \cos \alpha}{V_1}$$

$$T_2 = \frac{x}{V_2} + \frac{2h_1 \cos \alpha}{V_1}$$

$$T_1 = T_2, \frac{x}{V_1} = \frac{x}{V_2} + \frac{2h_1 \cos \alpha}{V_1}, \frac{x}{V_1} - \frac{x}{V_2} = \frac{2h \cos \alpha}{V_1}$$

$$\boxed{x_c = 2h \frac{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_2 - V_1}}, x_c \text{ est appelé } x \text{ critique}$$

$$\boxed{h = \frac{x_c}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}}$$

●Dromochronique :

On appelle dromochronique la courbe de la fonction  $T = f(x)$ , elle nous renseigne sur le nombre de terrain, les pentes de ces droites nous donnent les vitesses  $V_1$ ,  $V_2$  ainsi que leur épaisseur  $h$  des deux terrains.

$$\boxed{T_1 = \frac{x}{V_1}} \text{ Onde directe, } \boxed{T_2 = \frac{x}{V_2} + \frac{2h_1 \cos \alpha}{V_1}} \text{ onde réfractée.}$$

1.2.1 / cas de 3 terrain horizontaux :

$$T_3 = 2T_{EC} + 2T_{CD} + T_{DE}$$

$$T_3 = 2 \frac{EC}{V_1} + 2 \frac{CD}{V_2} + T_{DE}$$

$$T_{DE} = T_x - T(2C_1D + 2C_1E')$$

$$T_{DE} = \frac{x}{V_3} - (2 \frac{C_1D}{V_3} + 2 \frac{C_1E'}{V_3})$$

$$T_3 = \frac{x}{V_3} + 2(\frac{EC}{V_1} - \frac{C_1E'}{V_3}) + 2(\frac{CD}{V_2} - \frac{C_1D}{V_3})$$

$$\boxed{T_3 = \frac{x}{V_3} + \frac{2h_1 \cos \beta_1}{V_1} + \frac{2h_2 \cos \beta_2}{V_2}}$$

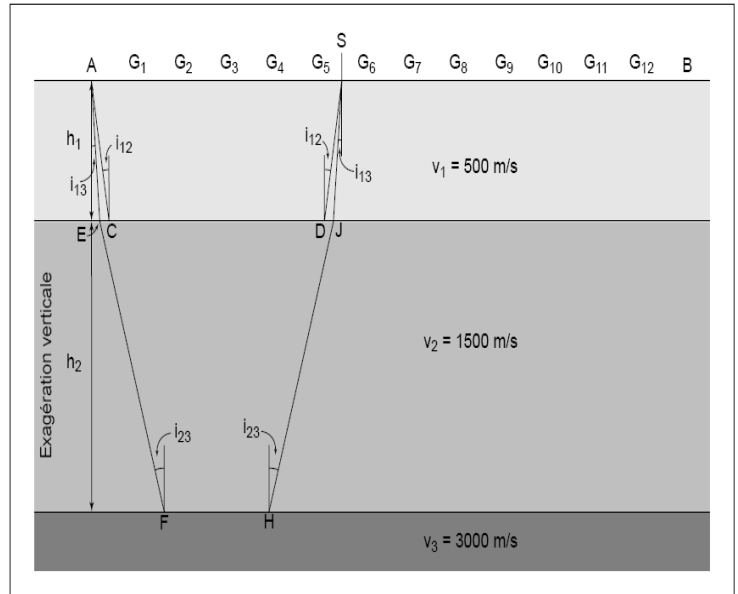


Figure 7.11 – Représentation schématisée des rais sismiques, pour un cas trois terrains horizontaux.

1.2.2 / Cas de n terrain :

$$\boxed{T_n = \frac{x}{V_n} + \frac{2h_1 \cos \gamma_1}{V_1} + \dots + \frac{2h_{n-1} \cos \gamma_{n-1}}{V_{(n-1)}}$$

1.3 / Delay Time (délai) :

En géophysique et en prospection sismique, le temps de délai (delay time) est un concept fondamental, particulièrement utilisé dans la méthode de sismique réfraction.

Le temps de parcours réel sur le rayon EC diminué du temps de parcours fictif sur la projection de EC sur le marqueur à la vitesse du marqueur.

Le temps de délai représente le temps supplémentaire mis par une onde pour traverser une couche superficielle (souvent lente) par rapport au temps qu'elle aurait mis si elle avait circulé directement à la vitesse de la couche profonde (plus rapide).

C'est, en quelque sorte, le "retard" accumulé lors du trajet vertical (ou quasi-vertical) entre la surface et le marqueur (l'interface réfractante).

## Expression Mathématique

Pour un dispositif avec une couche de vitesse  $V_1$  surmontant un substratum de vitesse  $V_2$ , le temps de délai  $D_t$  sous un point (source ou récepteur) est donné par la formule :

$$D_t = z \cdot \cos(i_c) / V_1$$

Où :

- $z$  : épaisseur de la première couche.
- $i_c$  : angle critique de réfraction, défini par  $\sin(i_c) = V_1/V_2$ .
- $V_1$  : vitesse de l'onde dans la couche de surface.

### 3. Relation avec le temps total

Dans la méthode des temps de délai, le temps de trajet total ( $T_{sr}$ ) entre une source (s) et un récepteur (r) séparés par une distance  $x$  est simplifié par l'équation :

$$T_{sr} = (x/V_2) + D_s + D_r$$

- $D_s$  : temps de délai sous la source.
- $D_r$  : temps de délai sous le récepteur.

### 4. Utilité Pratique

Le calcul du délai est crucial pour :

- **Calculer les profondeurs ( $z$ )** : Une fois  $D_t$  extrait des dromochrones, on peut isoler  $z$  pour cartographier le toit du substratum.
- **Corrections statiques** : En sismique réflexion, on utilise les temps de délai pour corriger les irrégularités de la zone altérée (WZ - *Weathered Zone*) afin de "recaler" les données sur un plan de référence.
- **Méthode Plus-Minus** : C'est la base de méthodes d'interprétation avancées comme celle de Hagedoorn, permettant de traiter des interfaces non horizontales.

3 terrain :  $T_3 = \frac{x}{V_1} + 2D_{ED} + 2D_{CD}$  avec  $D_{ED}$  est le délai relatif à ED et  $D_{CD}$  délai relatif à CD.

4 terrain :  $T_4 = \frac{x}{V_4} + 2D_1 + 2D_2 + 2D_3$ ,      n terrain :  $T_n = \frac{x}{V_n} + 2D_1 + \dots + 2D_{n-1}$

#### 1.4 / L'intercept :

L'intercept est par définition la continuité d'un tronçon de la dromochronique à l'origine, c'est donc l'ordonnée à l'origine du tronçon  $T_n$  considéré.

En sismique réfraction, l'**intercept** (souvent noté  $t_0$  ou  $T_i$ ) est le point où le prolongement de la droite de l'onde réfractée coupe l'axe des ordonnées (l'axe du temps, où la distance  $x = 0$ ).

C'est une donnée fondamentale pour calculer l'épaisseur des couches géologiques.

### 1.4 .1. Signification Physique

L'intercept représente le **temps de trajet vertical aller-retour** (théorique) à travers la première couche, corrigé par l'angle critique.

Contrairement à l'onde directe qui passe par l'origine (0,0), l'onde réfractée ne commence à apparaître sur le terrain qu'à partir de la "distance critique". Cependant, mathématiquement, on prolonge sa pente vers l'arrière pour obtenir  $t_0$ .

### 1.4 .2. Expression Mathématique

Pour un modèle à deux couches horizontales, l'équation de la droite de l'onde réfractée est :

$$t = (x / V_2) + t_0$$

L'intercept  $t_0$  est lié à l'épaisseur de la première couche ( $z$ ) par la formule :

$$T_0 = 2z \cdot \cos(i_c) / V_1$$

En isolant l'épaisseur  $z$ , on obtient :

$$z = t_0 \cdot V_1 / 2 \cdot \cos(i_c) = (t_0 / 2) \cdot (V_1 \cdot V_2) / \sqrt{V_2^2 - V_1^2}$$

### 1.4 .3. Relation avec le Temps de Délai (*Delay Time*)

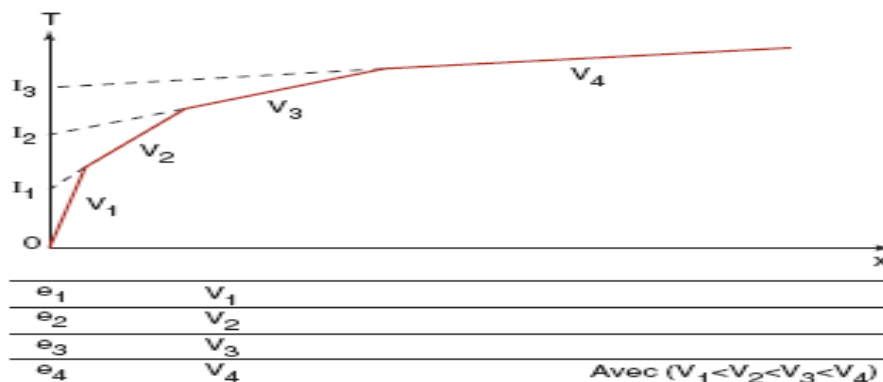
L'intercept est directement lié au concept de temps de délai que nous avons vu précédemment. Dans un cas de couches horizontales :

- $T_0$  est le délai total (sous la source + sous le récepteur).
- Comme les épaisseurs sont identiques sous la source et le récepteur dans ce modèle théorique :
- $T_0 = 2 \cdot D_t$

### 1.4 .4. Application au Terrain

Lors de l'interprétation d'une dromochrone :

- Pente de la droite** : Donne l'inverse de la vitesse du substratum ( $1/V_2$ ).
- Point d'intersection avec l'axe T** : Donne la valeur de  $t_0$ .
- Calcul** : Avec  $V_1$  (pente de l'onde directe),  $V_2$  et  $t_0$ , vous pouvez calculer la profondeur du marqueur (le toit de la roche saine ou de la nappe).



**1.5 / Cas de deux terrains non horizontaux :**

$$T_2 = T_{EA} + T_{AB} + T_{CS}$$

$$T_2 = T_{EA} + (T_{AB'} - T_{BB'}) + T_{B'C} + T_{CS}$$

$$T_2 = T_{EA} + T_{AB'} + T_{B'C} + (T_{CS} - T_{CC'})$$

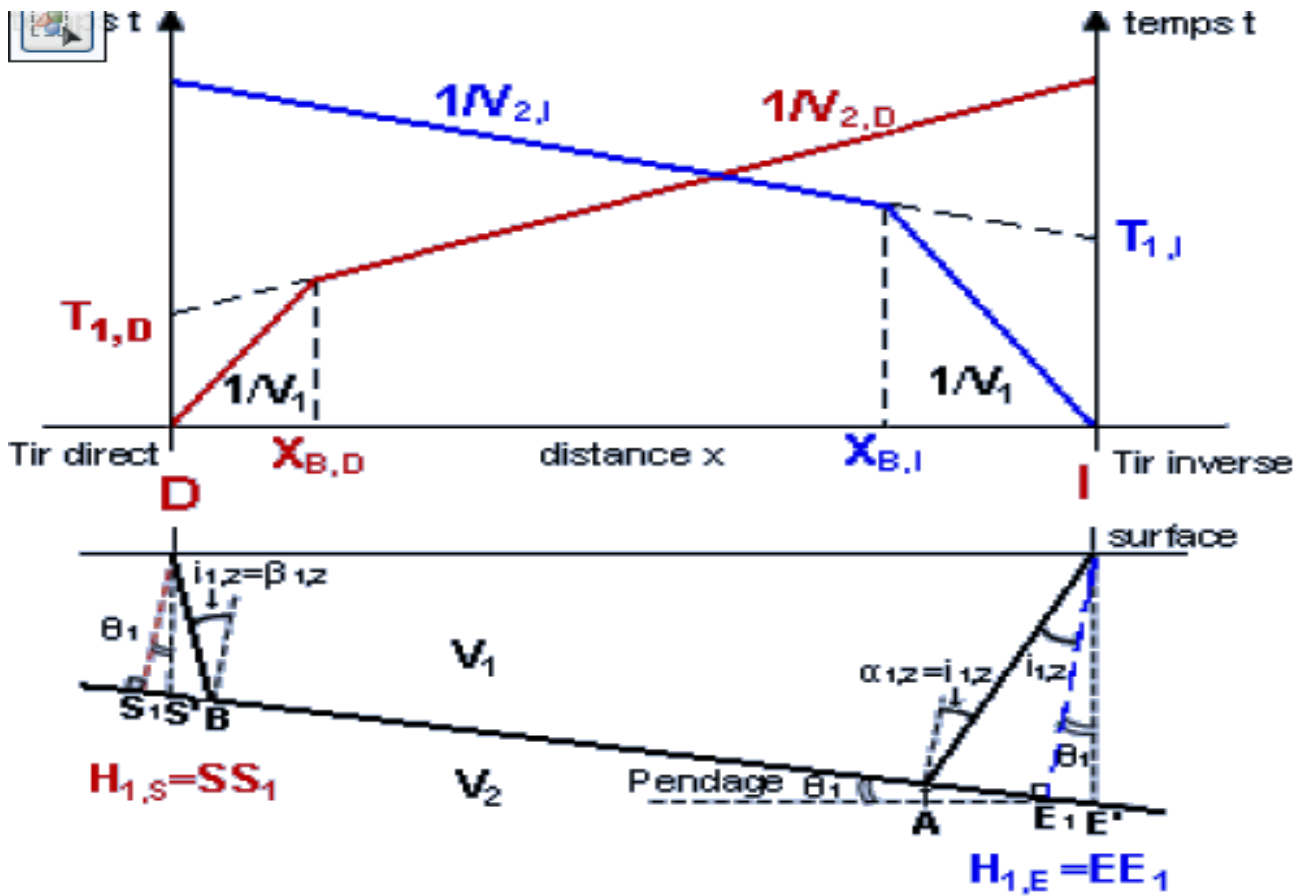
$$T_2 = T_{EA} + T_{AB'} + T_{B'C} + \frac{\Delta Z \cos \alpha}{V_1}$$

$$T_2 = \frac{x}{V_2} + \frac{2h_1 \cos \alpha}{V_1} + \frac{\Delta Z \cos \alpha}{V_1}$$

$$T_2 = \frac{x}{V_2} + \frac{(2h_1 + \Delta Z) \cos \alpha}{V_1}$$

$$T_2 = \frac{x}{V_2} + \frac{P_E + P_S}{V_1} \cos \alpha$$

**1.6 / Cas d'un plan réfracteur incliné (tir direct et tir inverse) :**



**FIG :** Cas d'un seul marqueur plan incliné

Pour la méthode d'intercept, il est nécessaire d'effectuer un tir direct et un tir inverse pour avoir les dromochroniques en sens opposés, et ainsi obtenir les vitesses, les pendages et les profondeurs des réflecteurs. Cette méthode peut s'utiliser pour un modèle géologique de plusieurs couches, mais normalement est appliquée par le cas de bicouches. Ici on va établir les équations en considérant le cas particulier d'une bicouche.

Les équations des temps de parcours sont les suivantes :

$$T_A = \frac{2h_A \cos \alpha}{V_1} + \frac{x}{V_1} \sin(\alpha + \theta) \quad \text{et} \quad T_D = \frac{2h_D \cos \alpha}{V_1} + \frac{x}{V_1} \sin(\alpha - \theta)$$

$h$  : distance prise perpendiculairement au marqueur.

$\alpha$  : l'angle critique.

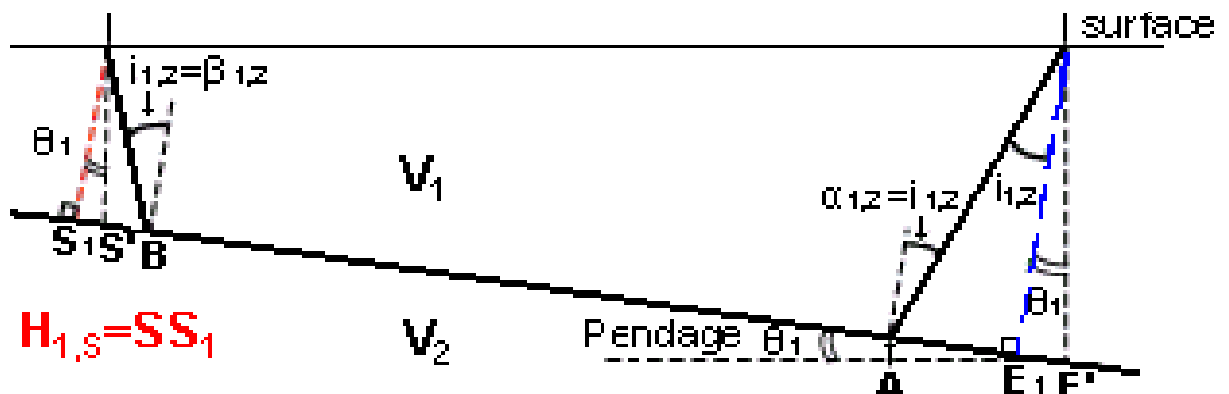
$\theta$  : la pente du marqueur par rapport a la surface.

On peut calculer la profondeur du marqueur en utilisant la formule suivante :

$$h = \frac{X_B}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad \text{ou } V_1 \text{ est tiré de la dromochronique ; } V_2 \text{ est égale a } \frac{V_{2a} + V_{2D}}{2} \text{ et } X_B \text{ est égale à}$$

$$\frac{X_{BA} + X_{BD}}{2}.$$

• **Tir Aval :( down Dip)**



L'équation s'écrit :  $T_A = \frac{2h_A \cos \alpha}{V_1} + \frac{x}{V_1} \sin(\alpha + \theta)$  , la vitesse apparente s'écrit :  $V_{2A} = \frac{V_1}{\sin(\alpha + \theta)}$

• **Tir Amont :( Up Dip)**

$$T_D = \frac{2h_D \cos \alpha}{V_1} + \frac{x}{V_1} \sin(\alpha - \theta)$$

La vitesse apparente s'écrit :  $V_{2D} = \frac{V_1}{\sin(\alpha - \theta)}$

$$\text{Avec : } \alpha = \frac{1}{2} \left( \arcsin \frac{V_1}{V_{2A}} + \arcsin \frac{V_1}{V_{2D}} \right) \quad \text{et} \quad \theta = \frac{1}{2} \left( \arcsin \frac{V_1}{V_{2A}} - \arcsin \frac{V_1}{V_{2D}} \right)$$

$$\text{Donc : } h_A = \frac{1}{2} \frac{t_{iA} V_1}{\cos \alpha} \quad \text{et} \quad h_D = \frac{1}{2} \frac{t_{iD} V_1}{\cos \alpha}$$

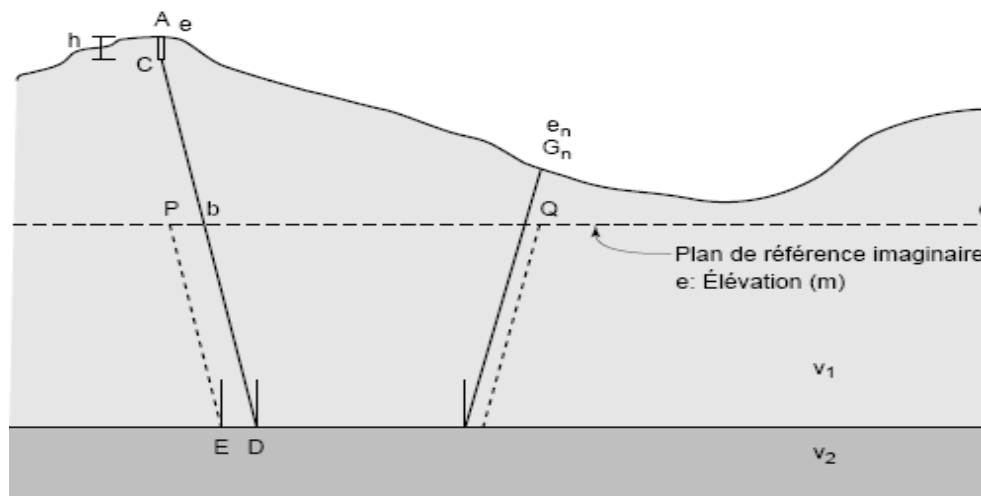
$$\text{On obtient alors : } \frac{V_1}{V_A} + \frac{V_1}{V_D} = \sin(\alpha + \theta) + \sin(\alpha - \theta) = 2 \sin \alpha \cos \theta = 2 \frac{V_1}{V_2} \cos \theta$$

$$\frac{1}{V_{2A}} + \frac{1}{V_{2D}} = \frac{2 \cos \theta}{V_2}$$

Dans le cas où  $\theta$  est faible : ( $\theta \leq 15^\circ$ ,  $\cos \theta = 0.97 \cong 1$ ), on a donc :

$$\frac{1}{V_{2A}} + \frac{1}{V_{2D}} = \frac{2}{V_2}, \quad V_2 = \frac{2V_{2A}V_{2D}}{V_{2A} + V_{2D}}$$

### 1.7 / Correction topographique :



On fixe la référence comme l'élevation  $d$  dans le 1 terrain, soient un tir A au point  $p$  et au géophone G au point  $q$  sur le plan de référence.  $\Delta T$  (temps de délai associé entre le fond du tir et le plan de référence) pour trajet vrai  $CD$  et fictif  $PED$  :

$$\Delta T = \frac{CD}{V_1} - \frac{PE}{V_1} - \frac{ED}{V_2}, \quad \Delta T = \frac{Cb}{V_1} - \frac{Pb}{V_2}$$

Le temps de délais de au tir :

$$\Delta T = \frac{(e-h-d)\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 V_2}, \quad \Delta T_n = \frac{(e_n - d)\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 V_2}$$

La correction à appliquer à chacun des temps d'arrivée est de :

$$\Delta T + \Delta T_n = \frac{(e-h+e_n-2d)\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 V_2}$$

## 1.8 / Mise en œuvre de la sismique réfraction :

### • Exécution des mesures :

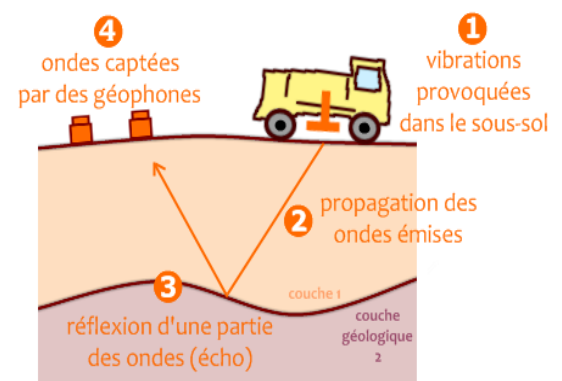
on procède à un tir qui est enregistré sur le dispositif d'enregistrement, le tir est soit réellement un tir d'explosif (de l'ordre de 1 kilo d'explosif, réparti en plusieurs charges), soit, plus fréquemment, un tir non explosif : chute de poids (le poids pouvant être propulsé sur le sol pour l'accélérer et augmenter l'importance du choc) ou vibreur (vibroscist), Le dispositif d'enregistrement en terrestre est habituellement constitué de 48 géophones de part et d'autre du tir (96 au total). Chaque géophone est en réalité constitué d'une grappe d'environ 12 géophones enregistrés en parallèle, ce qui améliore le rapport signal à bruit, par la suite nous utiliserons le terme de géophone pour "grappe de géophones". La distance entre géophones est de l'ordre de 100 m. La distance entre le tir et le premier géophone est soit aussi 100 m soit un multiple de cette distance (tir avec offset).

### • Sources sismique :

Le choix de la source est un des éléments important dans dépend la qualité de l'étude réalisée. Celle-ci doit être adaptée à la nature des terrains auscultés et à la longueur du dispositif effectué. Une charge enterrée, en explosant, va produire, si l'enfouissement est faible, un cratère. Si l'enfouissement est plus important, il n'y aura pas de cratère, mais une cavité restant souterraine, un camouflet. Pour 1 kg d'explosif, la limite entre le cratère et le camouflet est d'environ 1.5 mètre, L'effet sismique enregistré dépend de la profondeur.

### • Interprétation des résultats :

Aux différentes étapes du traitement, les coupes film sont fournies à l'interpréteur qui décide des nouveaux traitements devant être effectués jusqu'à obtention d'une interprétation satisfaisante. Les traitements évoqués ci-dessus sont "géométriques", permettant de définir et de positionner les réflecteurs. D'autres traitements, par la suite, permettent de se rapprocher de la géologie du sous sol : nature des dépôts (stratigraphie sismique) et détermination de la suite des séquences de dépôts.



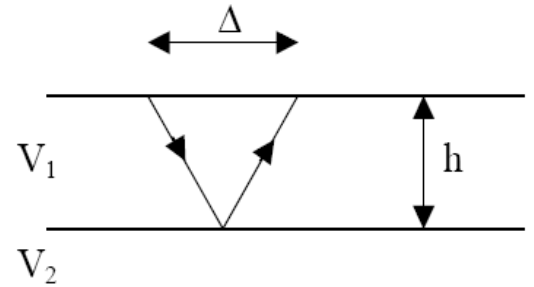
## 2 / Sismique réflexion :

La sismique réflexion est une méthode de prospection géophysique dans laquelle une source émet des ondes élastiques qui pénètrent dans le sol, s'y propagent et se réfléchissent sur les interfaces séparant des milieux dans lesquels les vitesses des ondes sont différentes (par exemple des couches géologiques). On recueille les signaux réfléchis de façon à établir la vitesse des ondes dans ces milieux et la géométrie des milieux traversés. Cette technique de prospection géophysique représente le domaine où les investissements de la prospection (pétrolière essentiellement) sont les plus élevés.

La propriété des ondes sismiques de pénétrer en profondeur dépend de la longueur du signal émis, plus la longueur d'onde est grande, plus la pénétration est importante.

### 2.1 / Cas d'un réflecteur horizontal :

On prend le cas très simple d'un réflecteur horizontal à la profondeur  $h$ , sous un milieu homogène où la vitesse des ondes  $p$  est  $V$ . une source en  $E$  émet des ondes qui sont enregistrées par un capteur situé en  $S$  à une distance  $x$  de  $E$ .



Le temps de propagation de l'onde réfléchi :

$$t = \frac{2}{V} [h^2 + (\frac{x}{2})^2]^{1/2}.$$

On peut aussi exprimer l'épaisseur  $h$  du milieu, si l'on se donne  $V$  et si l'on mesure  $t$  :

$$h = \frac{1}{2} [(Vt)^2 - x^2]^{1/2}$$

La relation entre le temps de parcours et la distance source récepteur est connue sous le nom *d'hodochrone* sous forme d'hyperbole. On remarque que seul le premier terme dépend de la distance  $x$ . le second terme ne dépend que des paramètres de la couche, notre hodochrone devient donc :

$$t^2 = (\frac{x}{V_1})^2 + t_0^2$$

### 2.1 / Cas d'une interface pentée :

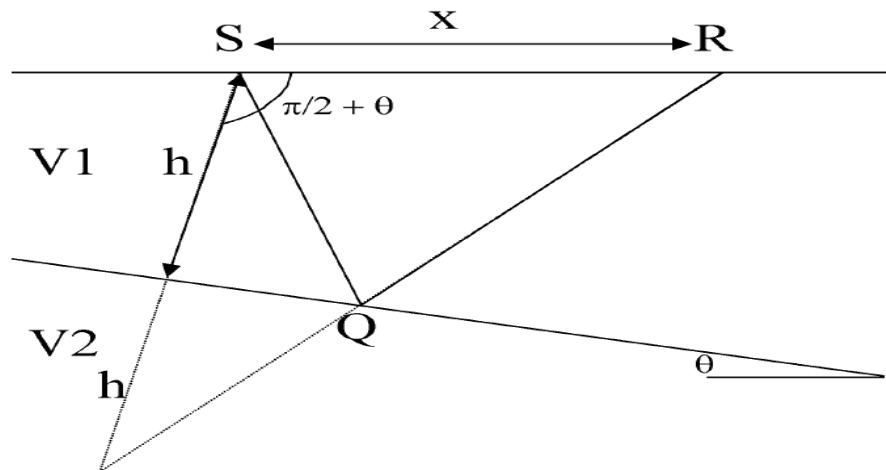


FIG : sismique réflexion pour une couche pentée d'un angle  $\theta$

On remarque que dans ce cas le point de réflexion ( $Q$ ) n'est pas exactement à mi-chemin entre la source et le récepteur.

Pour résoudre ce problème, on procède comme dans le cas précédent, c'est-à-dire qu'on détermine la distance parcourue que l'on divise par la vitesse du milieu. Pour se faciliter les choses, on tourne le parcours  $SQ$  par rapport au plan réflecteur: le trajet total est alors du

Croisement des deux lignes pointillées ( $P$ ) au point  $R$ . On trouve cette distance  $PR$  en appliquant la Loi des Cosinus, car le triangle  $SPR$  ne contient pas d'angle droit.

$$(PR)^2 = d^2 = x^2 + (2h)^2 - 4hx \cos(\pi/2 + \theta)$$

$$d^2 = x^2 + 4h^2 + 4hx \sin \theta$$

$$d^2 = x^2 + 4hx \sin \theta + 4h^2 x \sin^2 \theta + 4h^2 \cos^2 \theta$$

$$d^2 = (x + 2h \sin \theta)^2 + (2h \cos \theta)^2$$

D'où on tire le temps de parcours :

$$t^2 = \left(\frac{x + 2h \sin \theta}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{2h \cos \theta}{V_1}\right)^2$$

On voit que l'hodochrone décrit encore une hyperbole. Regardons le second terme:

Comme dans le cas précédent, il ne dépend pas de  $x$ . On voit qu'en fait ce terme n'est autre que le  $t_0$  du cas précédent divisé par  $\cos \theta$ ; autrement dit, il s'agit du  $t_0$  pour une vitesse de Propagation  $V_v = V_1 / \cos \theta$ .  $V_v$  est la *vitesse apparente verticale* plus élevée que  $V_1$ . L'analyse d'une hodochrone nous donne donc des informations sur la vitesse de la couche et sur son épaisseur.

L'amplitude d'une onde réfléchie dépend essentiellement du contraste d'*impédance* entre les deux milieux. L'impédance est définie comme le produit de la vitesse et de la densité  $Z = \rho V$ . Le *coefficient de réflexion*  $R$ , pour une onde incidente normalement sur un interface est donné par :

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1}$$

Donc, plus la différence entre deux milieux est grande, plus  $R$  sera important. Notez aussi que  $R$  est positif d'un milieu lent vers un milieu rapide et vice-versa.