

X31G010

Géophysique appliquée

Éric Beucler

`eric.beucler@univ-nantes.fr`

Département STU - Laboratoire de planétologie et géosciences

Observatoire des sciences de l'univers Nantes Atlantique

Nantes Université

30 septembre 2021 (v1.5)

① Principes et notions fondamentales

② Nivellement

③ Sismique réfraction

④ Sismique réflexion

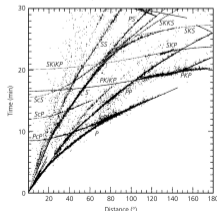
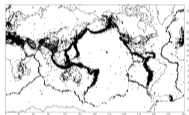
⑤ Prospection électrique

⑥ Prospection magnétique

⑦ Mesures gravimétriques

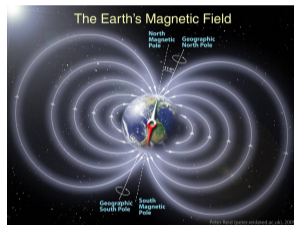
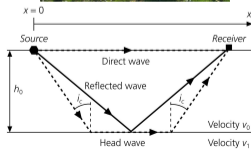
Géophysique

- fondamentale et/ou appliquée
- phénomènes naturels et/ou provoqués
- notion d'échelle
- théories communes



(Stein et Wyession, 2003)

dpt-stu univ-nantes.fr



www.nasa.gov



Notions de base

① Notion de modèle

- Problèmes direct et inverse, choix des paramètres, données et synthétiques
- Linéarité et non-linéarité du problème direct (linéarisation ?)
- Notion de représentativité des modèles

② Échelles et échantillonnage

- Résolutions temporelle et spatiale
- Critère de Nyquist-Shannon

③ Notion d'anomalie et de mesure

- Quel estimateur et quel domaine de validité (moyenne et écart-type vs médiane et quantiles)
- Notion de bruit et de rapport signal/bruit

① Principes et notions fondamentales

② Nivellement

③ Sismique réfraction

④ Sismique réflexion

⑤ Prospection électrique

⑥ Prospection magnétique

⑦ Mesures gravimétriques

Objectifs

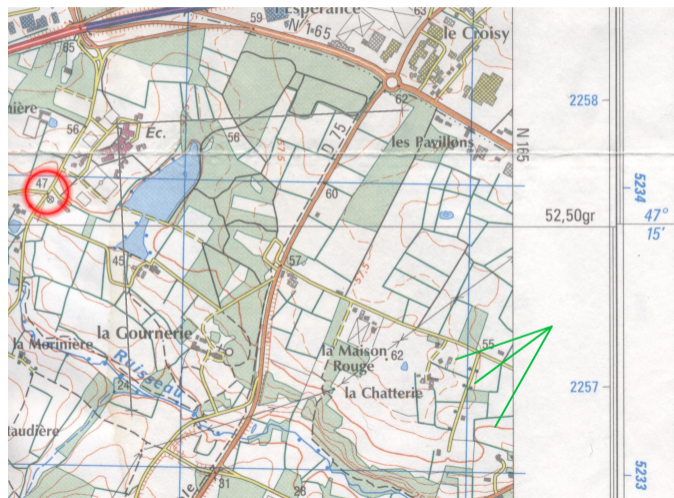
- Établir une carte altimétrique du terrain
- Connaître l'altitude absolue ou relative des points de mesure pour les éventuelles corrections d'observations géophysiques
- Étape nécessaire pour l'interprétation des données définies à partir d'une surface d'altitude constante



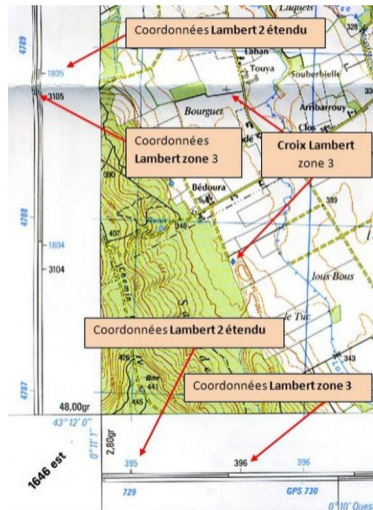
Carte : représentation d'une surface en 3D dans un système en 2D

Points importants

- Nords magnétique, géographiques et de la carte
- Échelle
- Repères altimétriques (relative, absolue?) sous forme de points et de courbes de niveaux
- Éléments géographiques (lieux-dits, routes, cours d'eau, limites des zones ou de parcelles. . .)



Systèmes de coordonnées et informations sur carte



Carte IGN 1/25000

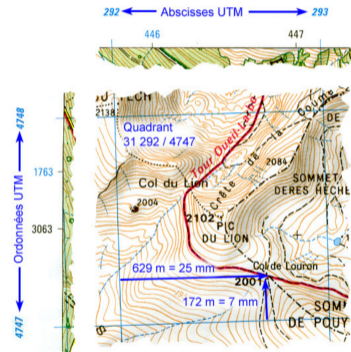
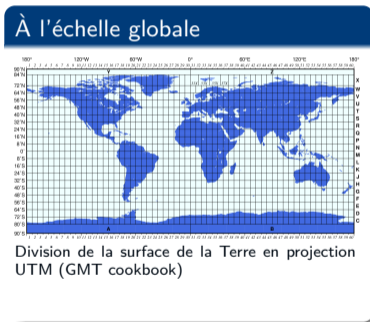
(gauche) Vers l'extérieur de la carte sont notées les coordonnées UTM *Universal Transverse Mercator* (6 zones pour la France, 30-32, U-T) en km dans le fuseau. La spécificité des cartes compatibles GPS est le carroyage kilométrique UTM en bleu.

(droite) Sur les bords (côté intérieur), sont notées en noir les coordonnées Lambert Carto de la zone (ici 3, sud-est de la France), en bleu les Lambert 2 étendu. Les petites croix Lambert 3 tapissent le fond de carte (tous les km).

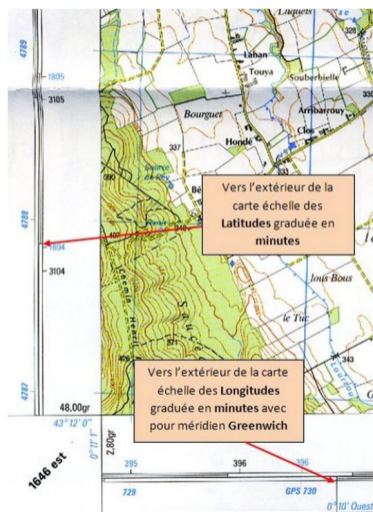
Universal Transverse Mercator



Le territoire français métropolitain est situé sur trois fuseaux en longitude (30,31 et 32) en deux en latitude (T et U)



Systèmes de coordonnées et informations sur carte



Carte IGN 1/25000

(gauche) Sur les bords (côté intérieur), sont notées en noir les coordonnées NTF (nouvelle triangulation de la France) en centièmes de grades avec Paris comme origine.

(droite) Sur les bords (côté extérieur), sont notées en bleu les coordonnées RGF93 (réseau géodésique français 1993, référence géographique légale depuis 2000) en degrés, minutes avec Greenwich comme origine. Un marquage clair bleu est présent toutes les 5 minutes d'angle en bordure de carte.

Quelle référence pour quel zéro ?

Nivellement Général de la France

- France métropolitaine : NGF/IGN69
Le NGF 0 est établi à partir des observations marégraphiques réalisées au marégraphe de Marseille entre le 1^{er} février 1885 et le 1^{er} janvier 1897
- Corse : NGF/IGN78
Le NGF 0 est établi à partir des observations marégraphiques réalisées au marégraphe d'Ajaccio entre 1912 et 1937
- Guadeloupe : IGN/1988
Le niveau de référence correspond au niveau moyen de la mer à Pointe-Fouillole (rade de Pointe-à-Pitre) observé du 1^{er} juillet 1947 au 30 juin 1948
- *etc*



Marégraphe de Marseille (promenade de la corniche).

Matériel



Visée optique + trépied



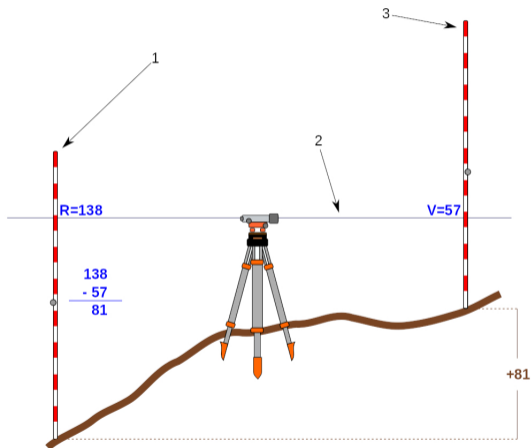
Mire(s)



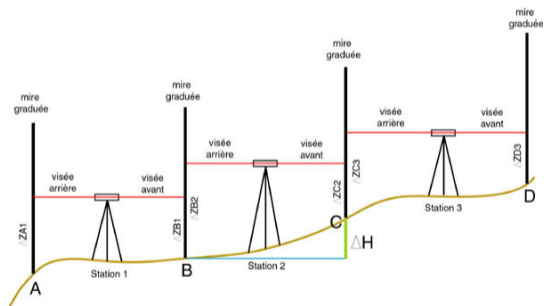
Système de mesure horizontale



Principe de la mesure relative de hauteurs



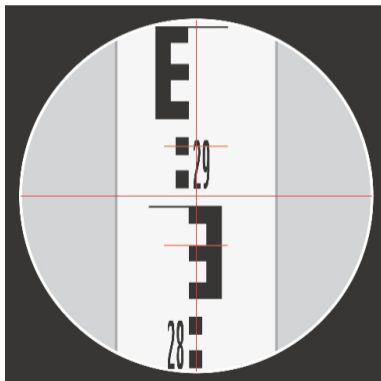
Mesure ponctuelle de la différence de hauteur entre deux mires



Afin d'obtenir plusieurs mesures (profil) → cheminement

Mesures altimétrique, stadimétrique et angulaire

Lecture d'une hauteur en dm



Deux fils composent le réticule : le fil pointeur (vertical) et le fil niveleur (horizontal au milieu) $\rightarrow h = 29,05$ dm

- La distance horizontale entre la visée (le réticule) et la mire est donnée par la différence de hauteurs entre les fils stadimétriques haut (FSH) et bas (FSB),

$$d = 100(FSH - FSB).$$

Ex : $29,35 - 28,8 = 0,55$ dm donc
 $d = 5,5$ m.

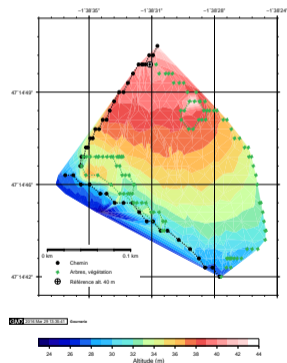
- Les angles dans le plan horizontal sont mesurés en **grades** ($2\pi = 400$ gon)

Mesures assistées



Théodolite numérique (précision de l'ordre du cm en z et du dm horizontalement)

GPS différentiel (précision de l'ordre du cm en x, y et z)



① Principes et notions fondamentales

② Nivellement

③ Sismique réfraction

④ Sismique réflexion

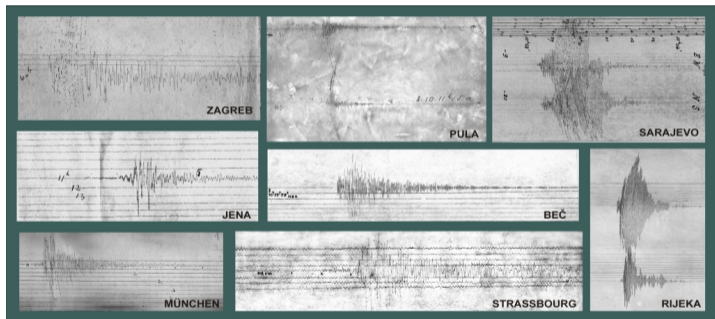
⑤ Prospection électrique

⑥ Prospection magnétique

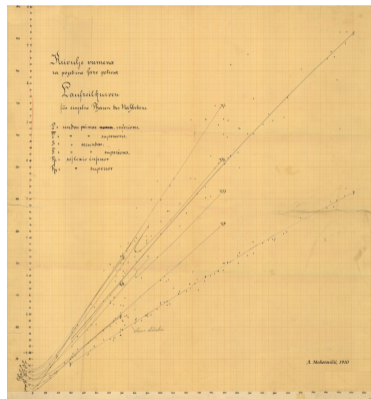
⑦ Mesures gravimétriques

Premières observations sismologiques (discontinuité de Mohorovičić)

Zagreb 8 oct. 1909

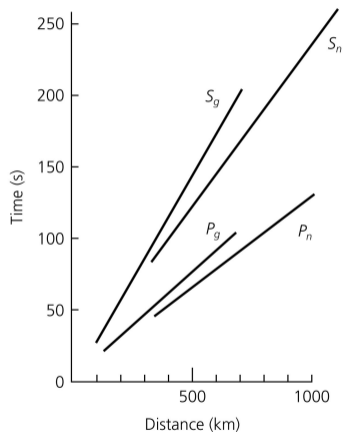


Sismogrammes enregistrés en différents observatoires en Europe.

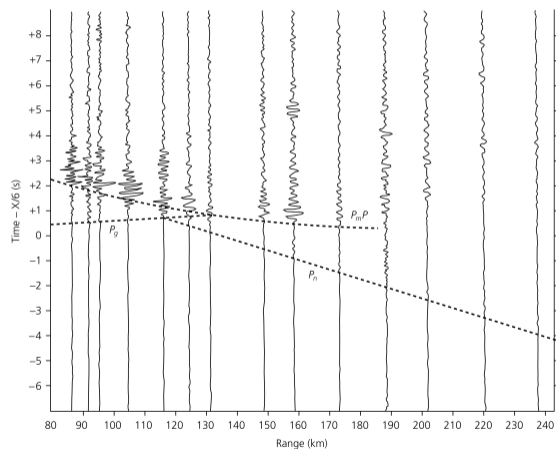
Croûte (P_g , S_g), manteau (P_n , S_n)

Temps de trajet en fonction de la distance (hodochrone).

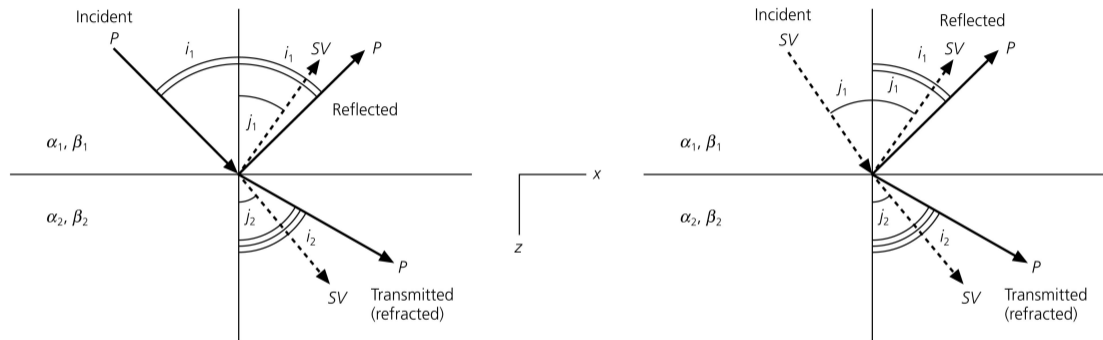
Premières observations (discontinuité de Mohorovičić)



(Stein et Wyession, 2003)



Rappels de sismologie (théorie des rais)

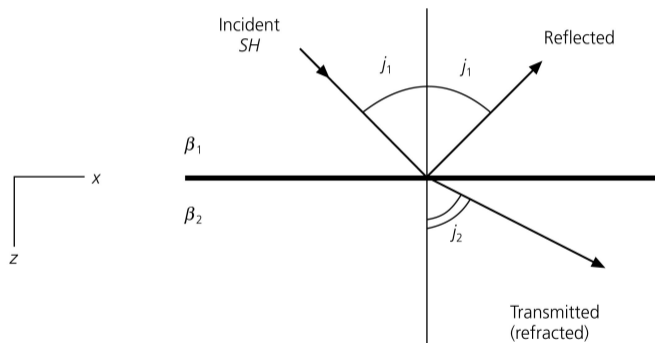


(Stein et Wysession, 2003)

À retenir

Lors du passage de l'énergie sismique à une interface, l'onde P se réfléchit et se transmet en P et S_V .

Rappels de sismologie (théorie des rais)



Loi de Snell-Descartes

$$\frac{\sin j_1}{\beta_1} = \frac{\sin j_2}{\beta_2}.$$

Le paramètre de rai se conserve sur tout le parcours le long du rai,

$$p = \frac{\sin i}{v}.$$

Valable pour les ondes P comme les ondes S , même si celles-ci sont plus basse fréquence.

Dans un milieu homogène les rais sont des lignes droites.

De la sismologie à la sismique - sur les traces de Mohorovičić

- $h_0 = 30$ km ;
- $v_0 = 5500$ m/s ;
- $v_1 = 8000$ m/s ;
- faire un schéma permettant de visualiser le trajet des ondes directe, refractée (*head-wave*) et réfléchie ;
- faire un graphe ayant un axe horizontal (x) allant de 0 à 250 km et un axe vertical (t) allant de 0 à 50 s ;
- calculer les temps de trajet de l'onde directe dans la croûte et reporter l'hodochrone sur le graphe ;
- calculer les temps de trajet de l'onde réfléchie et reporter l'hodochrone sur le graphe.
- calculer les temps de trajet de l'onde refractée (*head-wave*) et reporter l'hodochrone sur le graphe ;

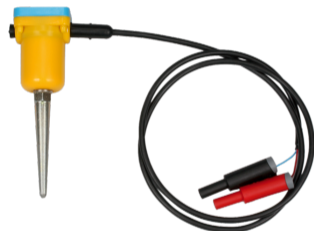
Sismométrie

Ordres de grandeur et types de mesures

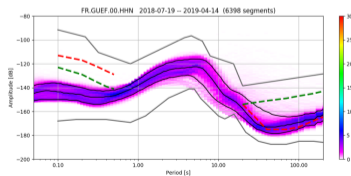
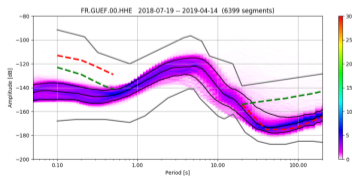
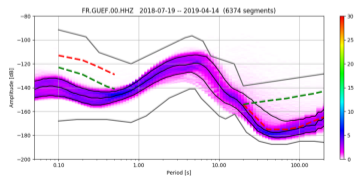
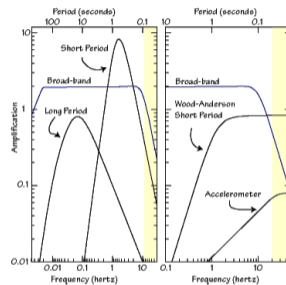
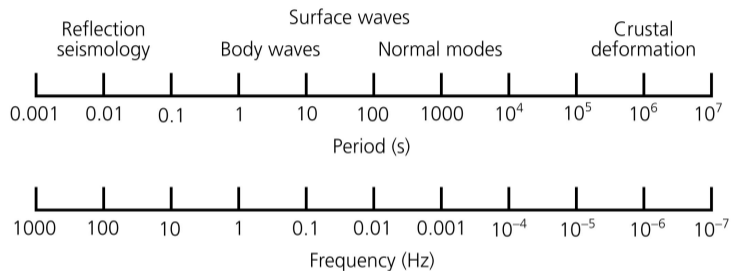
Région	durée	accélération	déplacement
proche	0,01-150 s	$0,5-20 \text{ ms}^{-2}$	du cm au m
lointaine	min. à h	$0,01-10^{-6} \text{ ms}^{-2}$	du nm au mm

Complémentarité des appareils en fonction de l'objet étudié

- capteurs accélérométriques ;
- capteurs vélocimétriques courte période ;
- capteurs vélocimétriques longue période.



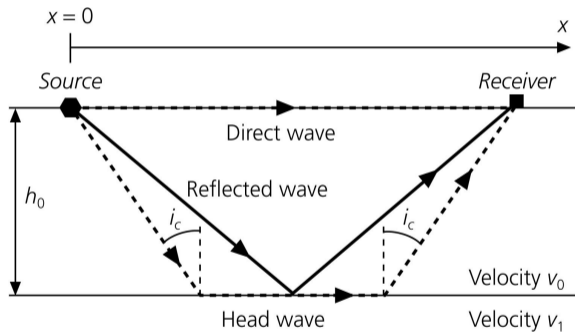
Sismique réfraction vs sismique réflexion



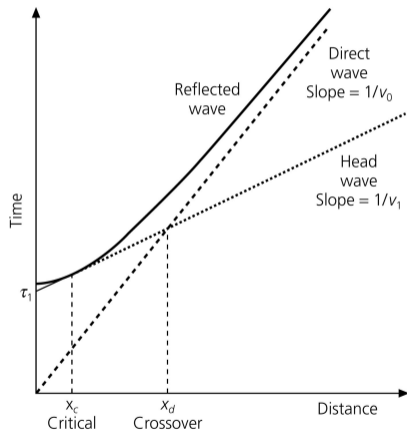
Sismique réfraction vs sismique réflexion

	Réfraction	Réflexion
Cibles	contrastes de vitesse (impédance sismique) dans des couches sub-horiz. ; $z < \sim 30$ m	idem mais plus localisées spatialement (cavité, tunnel, réservoir...); $z \geq 15$ m
Conditions terrain	zone accessible pour ~ 5 fois la prof. visée (sol meuble)	
Résolution z	$\sim 10 - 20\%$ de la prof.	$\sim 5 - 10\%$ de la prof.
Résolution x	~ 0.5 espacement géophones	~ 0.5 espacement géophones
Profondeur effective	$\sim 0.2 - 0.25$ de la distance tir-géophone	$z \geq 15$ m
Coût	n	$3n - 5n$

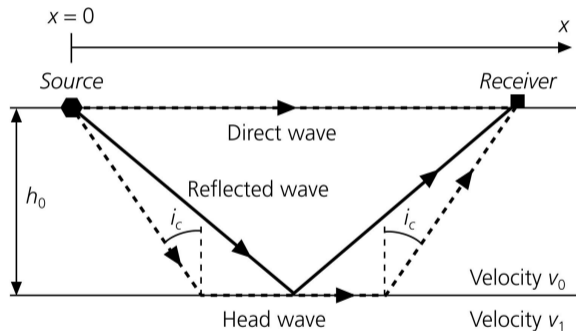
Sismique réfraction (1 couche + espace semi-infini, interface horiz.)



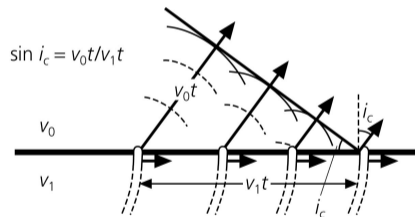
(Stein et Wysession, 2003)



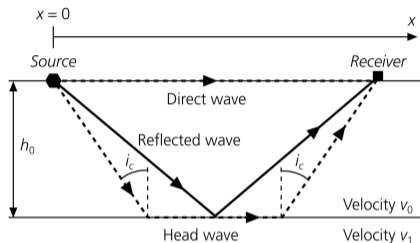
Sismique réfraction (1 couche + espace semi-infini, interface horiz.)



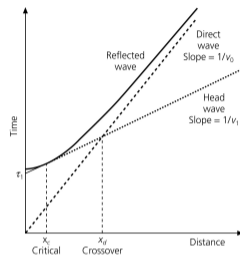
(Stein et Wysession, 2003)



Sismique réfraction (1 couche + espace semi-infini, interface horiz.)



(Stein et Wysession, 2003)



- x_c : distance critique, pour laquelle l'angle d'incidence atteint la valeur i_c , $x_c = 2h_0 \tan i_c$;
- x_d : distance de croisement, au-delà de laquelle l'onde réfractée arrive avant l'onde directe, $x_d = 2h_0 \sqrt{\frac{v_1 + v_0}{v_1 - v_0}}$;
- en $x = 0$, $\tau_1 = 2h_0 \sqrt{\frac{1}{v_0^2} - \frac{1}{v_1^2}}$.

À retenir

- Onde directe

$$t_D = \frac{x}{V_0} ;$$

- Onde réfractée (*head-wave*)

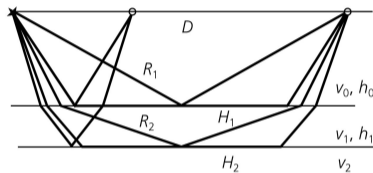
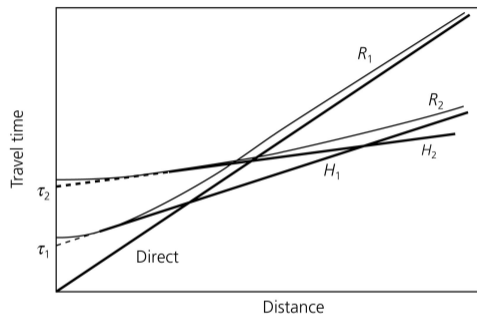
$$t_{H_1} = \frac{x}{V_1} + \frac{2h_0 \cos i_c}{V_0} ;$$

$$t_{H_1} = \frac{x}{V_1} + 2h_0 \sqrt{\frac{1}{V_0^2} - \frac{1}{V_1^2}} ;$$

- Onde réfléchi

$$t_{R_1} = \frac{2\sqrt{(\frac{x}{2})^2 + h_0^2}}{V_0} .$$

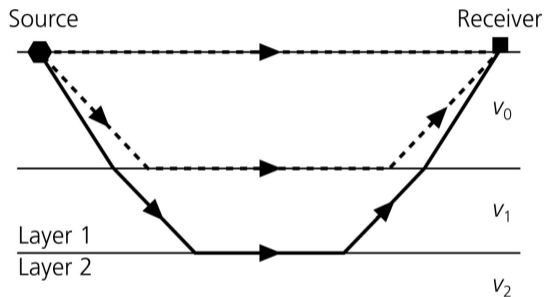
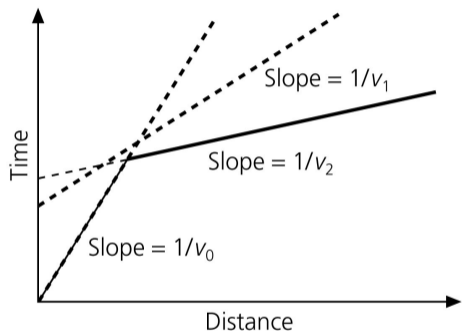
Sismique réfraction (2 couches + espace semi-infini), interfaces horiz.



$i_{c1,2}$ est l'angle d'incidence au niveau de l'interface 1 qui correspond à l'angle critique au niveau de l'interface 2 (Figures from Stein et Wyssession, 2003).

$$t_{H_2} = \frac{x}{V_2} + \frac{2h_0 \cos i_{c1,2}}{V_0} + \frac{2h_1 \cos i_{c2}}{V_1}.$$

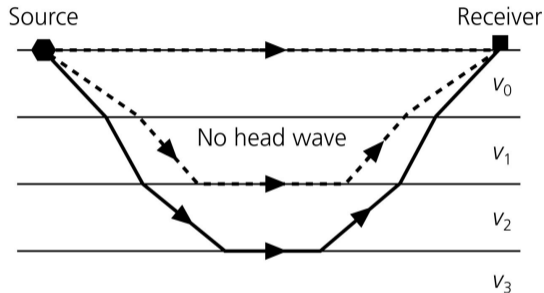
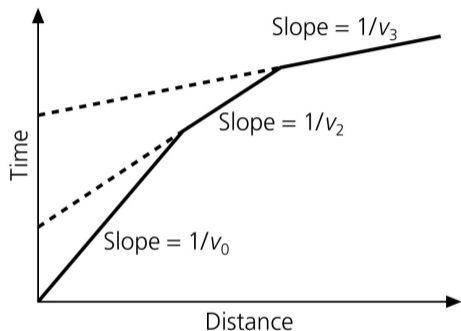
Sismique réfraction (2 couches + espace semi-infini) - cas particulier



(Stein et Wysession, 2003)

Si h_1 est trop faible, l'onde réfractée sur la première interface est invisible en surface en tant que première arrivée.

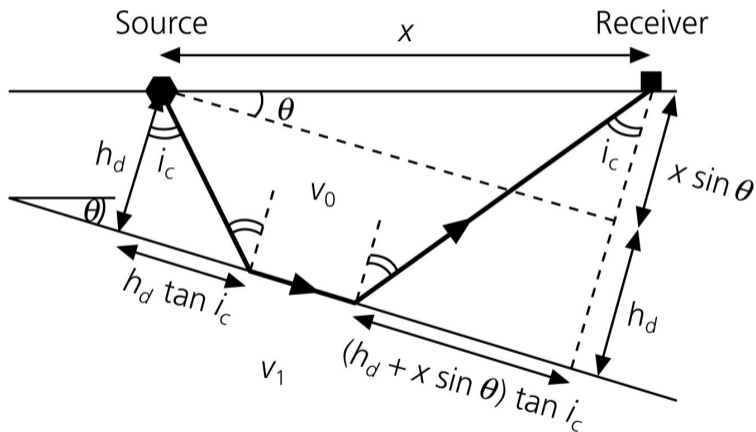
Sismique réfraction (3 couches + espace semi-infini) - cas particulier



(Stein et Wysession, 2003)

Si une couche possède une vitesse plus faible, que celle au-dessus il n'y a pas d'onde réfractée.

Sismique réfraction (1 couche + espace semi-infini, interface inclinée)



Le pendage (angle avec l'horizontale) de l'interface entre les milieux 0 et 1, est noté θ (Stein et Wysession, 2003)

Sismique réfraction (1 couche + espace semi-infini, interface inclinée)

Temps de trajets

- Onde réfractée descendante (*down*)

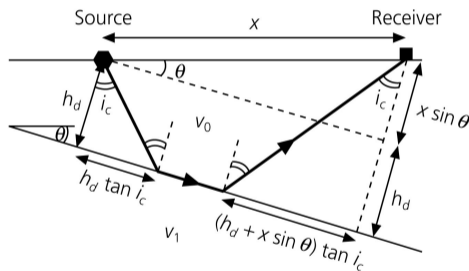
$$t_{H_d} = \frac{x \sin(i_c + \theta)}{V_0} + \frac{2h_d}{V_0} \cos i_c = \frac{x}{V_d} + \frac{2h_d}{V_0} \cos i_c,$$

avec V_d , la vitesse apparente des ondes dans le sens descente.

- Onde réfractée montante (*up*)

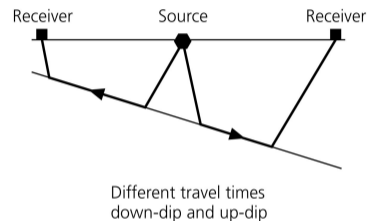
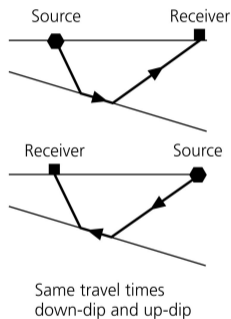
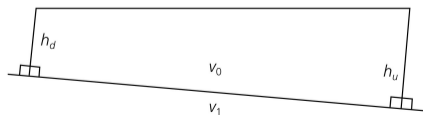
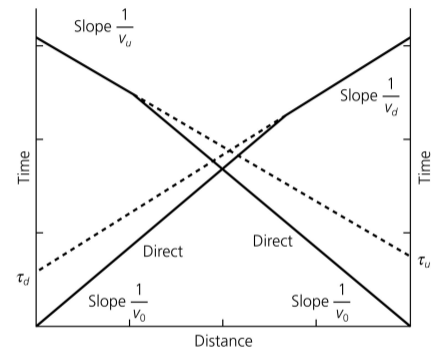
$$t_{H_u} = \frac{x \sin(i_c - \theta)}{V_0} + \frac{2h_u}{V_0} \cos i_c = \frac{x}{V_u} + \frac{2h_u}{V_0} \cos i_c,$$

avec V_u , la vitesse apparente des ondes dans le sens montée.



$$h_u = h_d + x \sin \theta.$$

Sismique réfraction (1 couche + espace semi-infini, interface inclinée)



(Stein et Wyession, 2003)

Importance d'effectuer des tirs aller et retour. Les temps de trajet max. $S \rightleftharpoons R$ sont les mêmes

Stein, S. et M. E. Wysession (2003). *An introduction to seismology, earthquakes, and Earth structure*. Oxford (UK) : Balckwell Scientific Publications. ISBN 0-86542-078-5.

- 1 Principes et notions fondamentales
- 2 Nivellement
- 3 Sismique réfraction
- 4 Sismique réflexion
- 5 Prospection électrique
- 6 Prospection magnétique
- 7 Mesures gravimétriques

① Principes et notions fondamentales

② Nivellement

③ Sismique réfraction

④ Sismique réflexion

⑤ Prospection électrique

⑥ Prospection magnétique

⑦ Mesures gravimétriques

① Principes et notions fondamentales

② Nivellement

③ Sismique réfraction

④ Sismique réflexion

⑤ Prospection électrique

⑥ Prospection magnétique

⑦ Mesures gravimétriques

① Principes et notions fondamentales

② Nivellement

③ Sismique réfraction

④ Sismique réflexion

⑤ Prospection électrique

⑥ Prospection magnétique

⑦ Mesures gravimétriques