

Les Campagnes océanographiques

Méthodes d'imagerie sismique



Quels sont les navires disponibles à l'échelle de la flotte océanographique française utilisés en géosciences marines ?

Navires côtiers

N/O Téthys II



© JEAN-CLAUDE BELLONNE

25m de long sur 7,5m large; Autonomie jusqu'à 10 jours

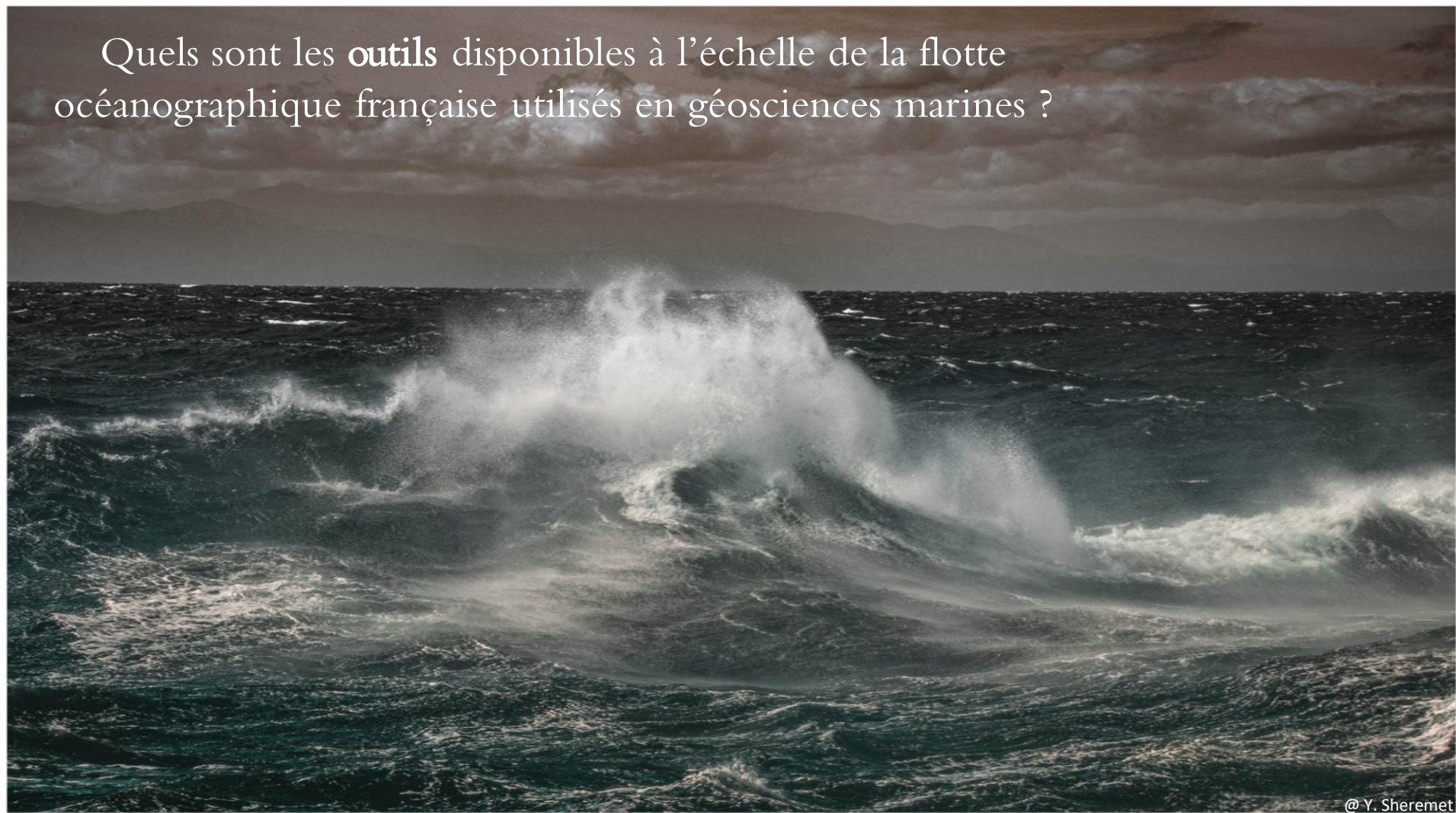
Navires hauturiers

N/O Pourquoi Pas ?



107m de long, 20m de large
64 jours d'autonomie, jusqu'à 70 personnes, 8 laboratoires

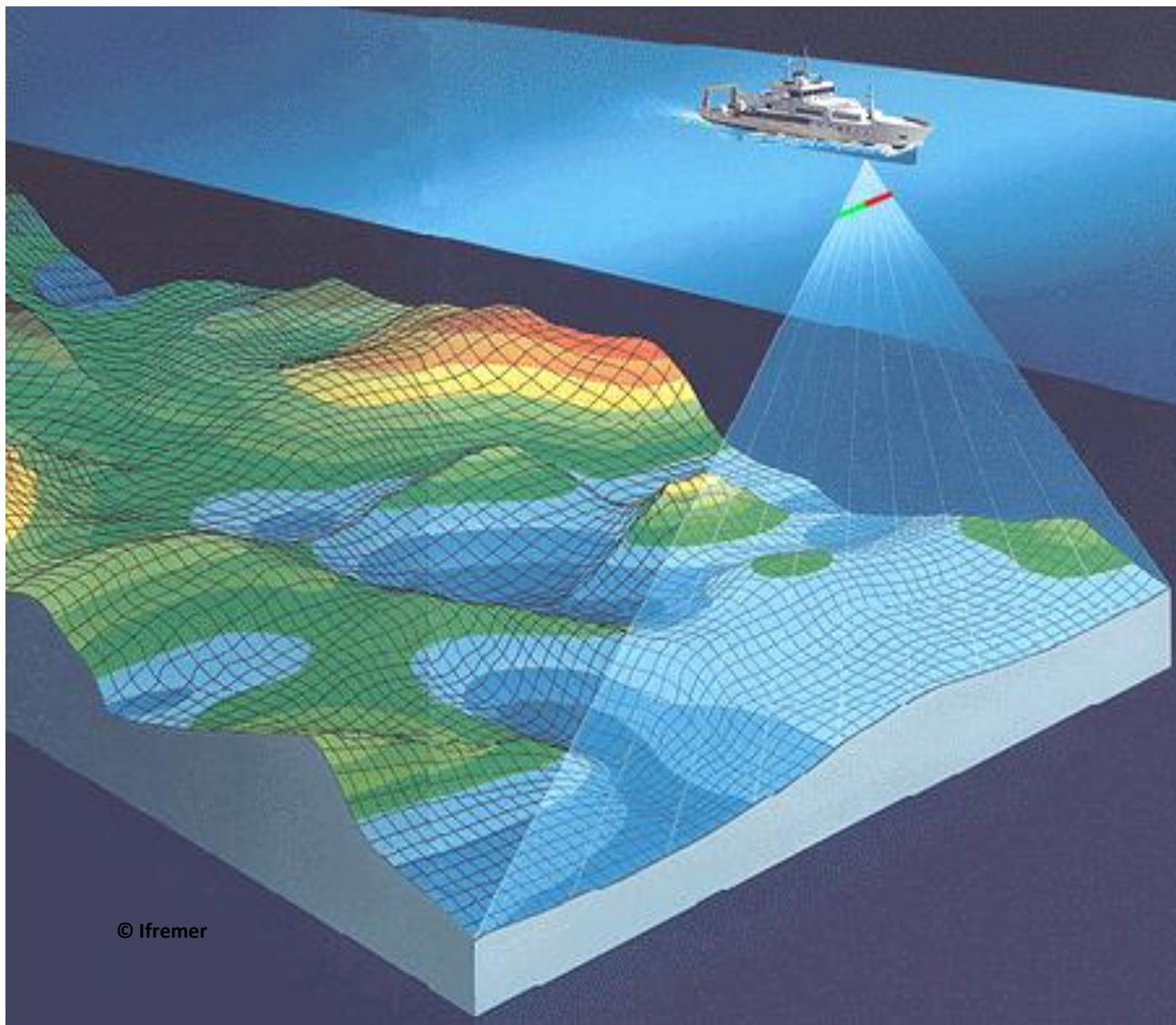
Quels sont les **outils** disponibles à l'échelle de la flotte océanographique française utilisés en géosciences marines ?



La Bathymétrie multifaisceaux

Cartographie du fond des océans

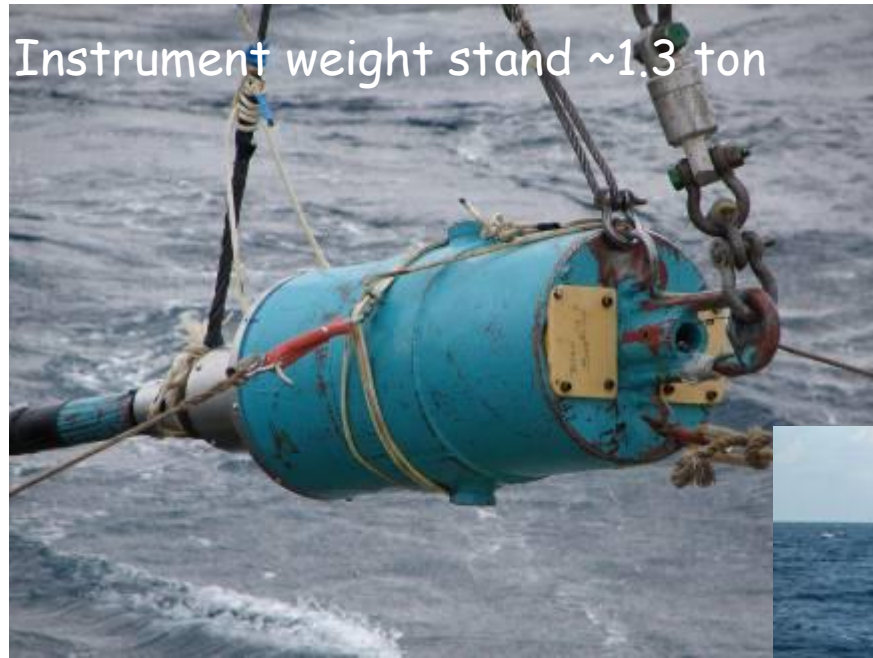
La Bathymétrie multifaisceaux



Les mesures de flux de chaleur

Préciser la nature de la croûte terrestre
Mettre en évidence des anomalies thermiques
Ex circulations de fluides

Instrument de mesure



Les anomalies magnétiques

Dater les fonds des océans

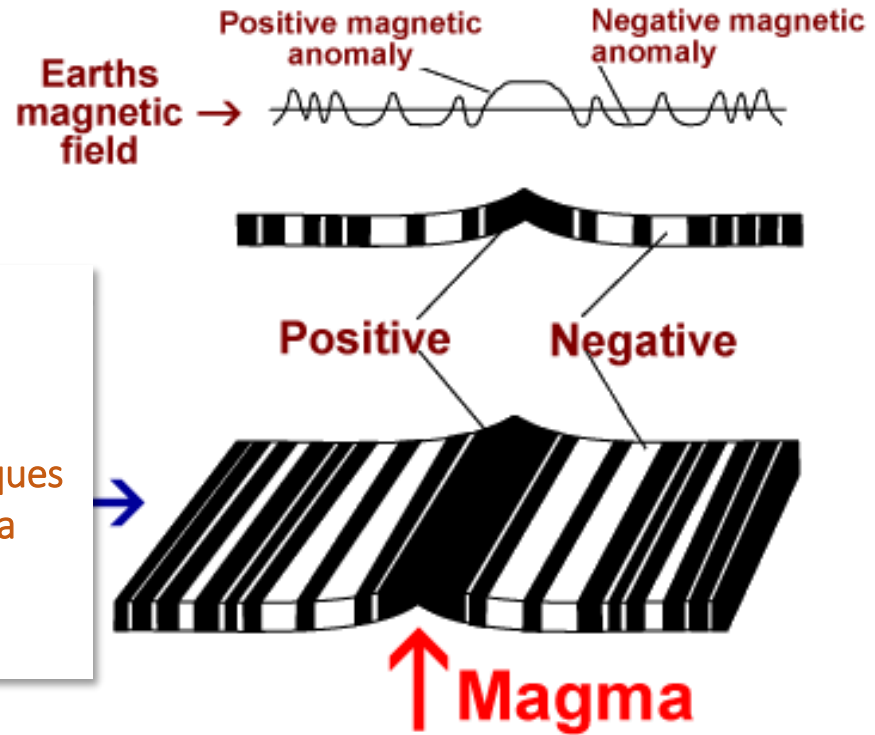
Estimer les vitesses d'expansion océanique

Instrument de mesure: magnétomètre



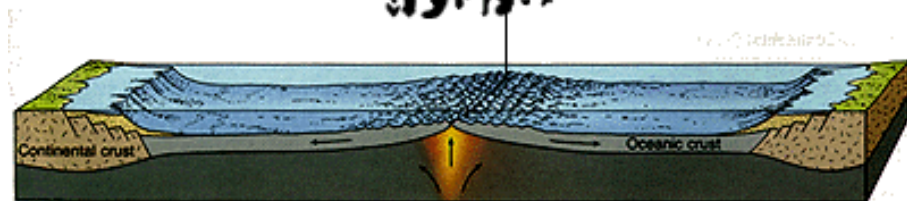
Les anomalies magnétiques

Expansion océanique
Présence de bandes
magnétiques symétriques
de part et d'autre de la
dorsale



Vue en carte et coupe d'une
zone de dorsale médio-
océanique.
Le noir correspond à une
polarité normale et les vides à
une polarité inversée

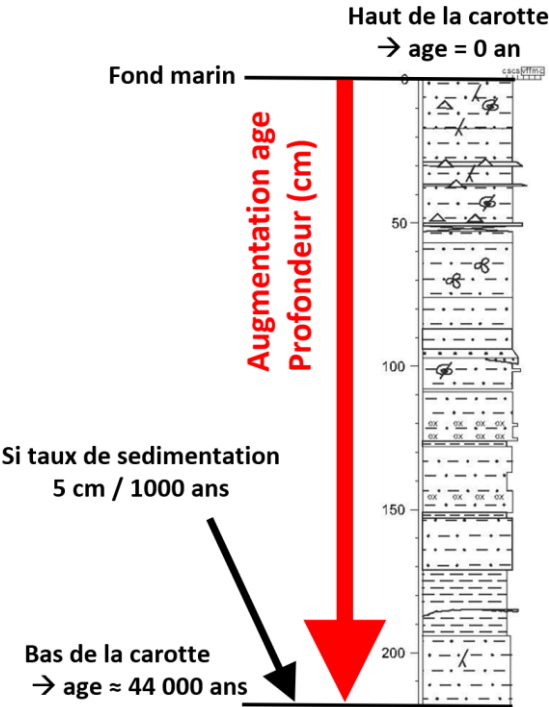
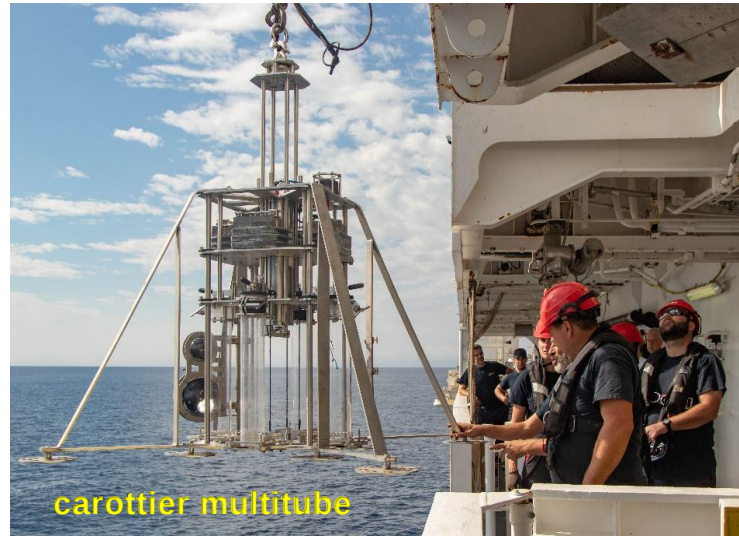
10 5 0 5 10 (Million years)



Echantillonnage des reliefs sous-marins et de la colonne sédimentaire

Connaître la nature et l'âge des reliefs sous-marins
et/ou des séries sédimentaires

Echantillonnages et carottes sédimentaires



Observations, échantillonnages et mesures sous-marines

Sous-marin habité



Nautilo

Système téléopéré

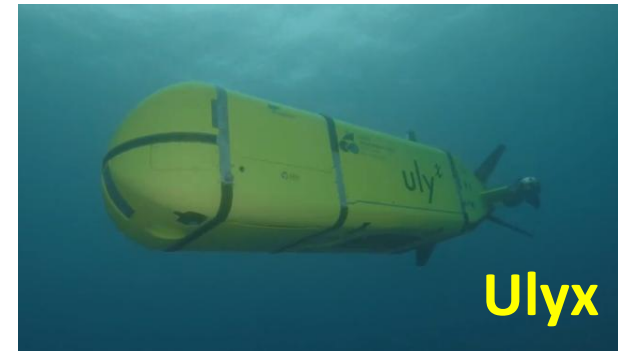


Victor 6000

AUV sans lien avec la surface,
programmés avant de plonger



Asterx et Idefx



Ulyx



Ariane

Robot très
mobile relié
par un
simple fil

Les méthodes d'imagerie sismique

exemple d'acquisition en mer

La sismique réflexion

Imager la colonne sédimentaire et
la croûte terrestre
sous les océans

La sismique réfraction

Préciser la nature de la croûte terrestre,
quantifier les vitesses
et obtenir la géométrie de
la base de la croûte

- ✓ Sismique Réflexion
- ✓ Sismique Réfraction

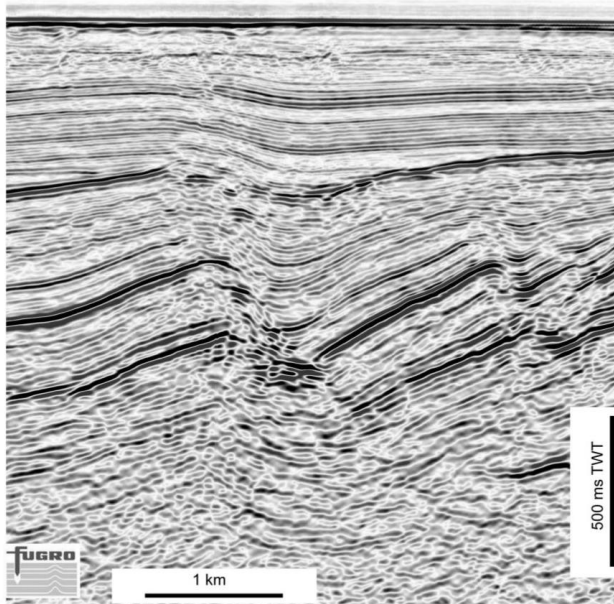
1) Principes

2) Dispositif d'acquisition sismique

3) Visualisation des données

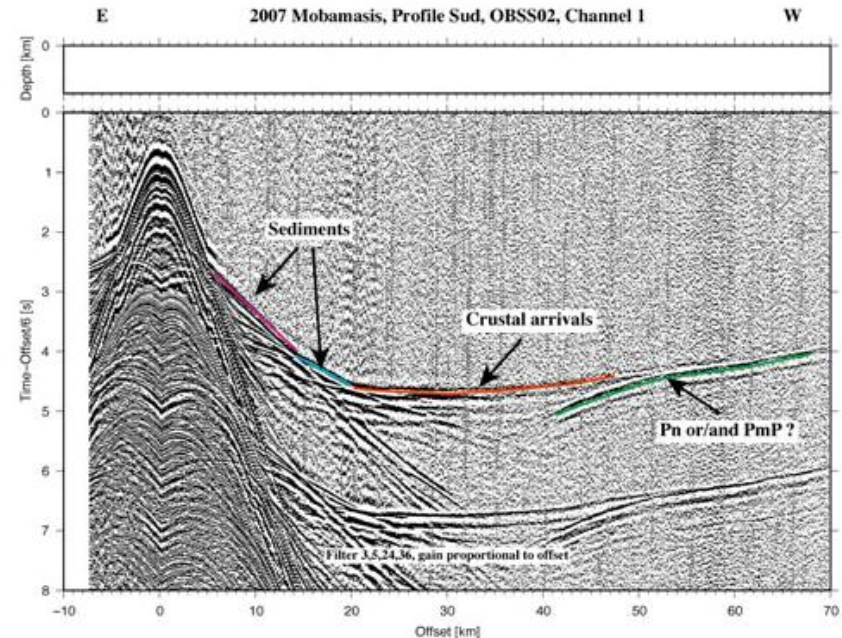
4) Exemples de profils

Ne pas confondre



Sismique réflexion

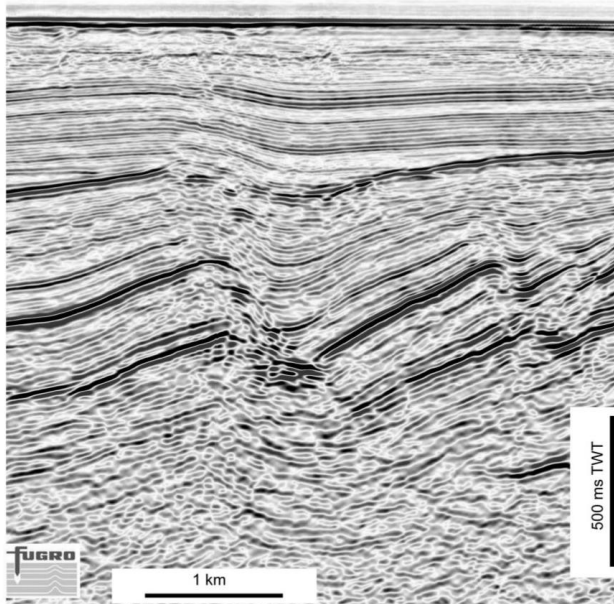
Source artificielle / active
Cible: Ecorce terrestre
Haute résolution verticale



Sismique réfraction

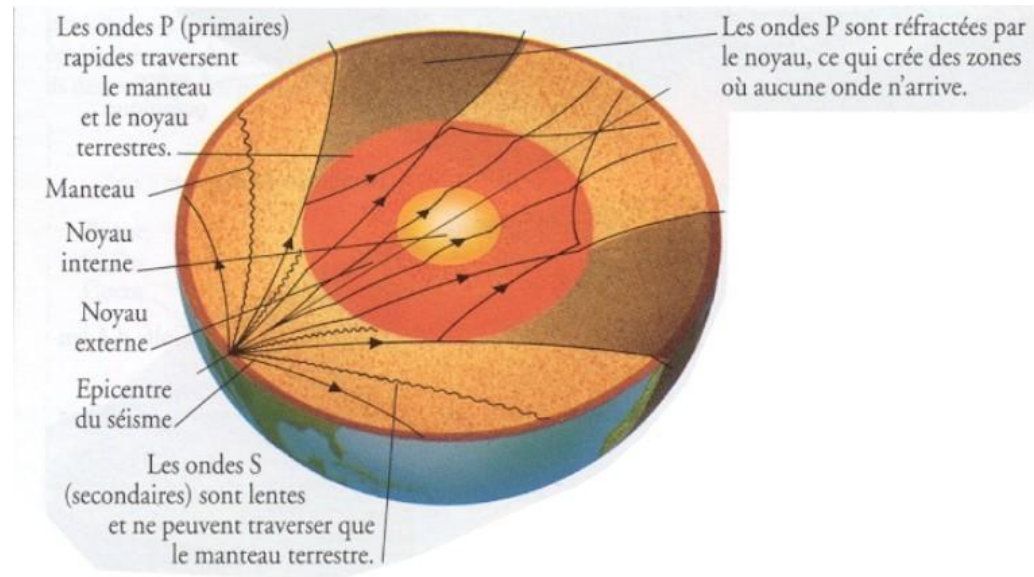
Source artificielle / active
Cible: crustale
Basse résolution verticale

Ne pas confondre



Sismique réflexion

Source artificielle / active
Cible: Ecorce terrestre
Haute résolution verticale

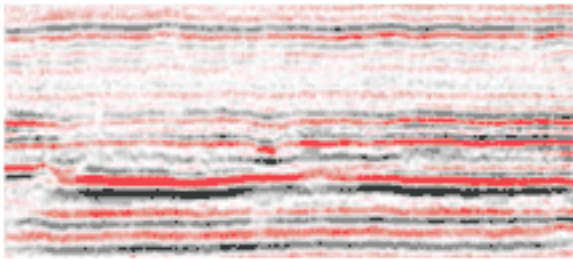


Sismologie

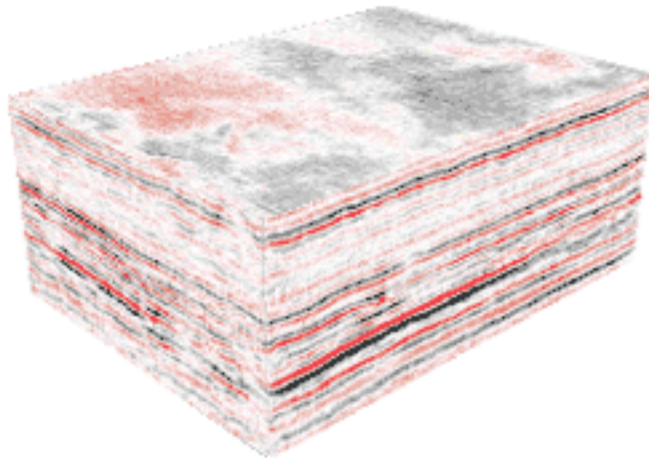
Source naturelle/ passive (séismes)
Cible: structure terrestre profonde
(- > 6378 km)

✓ Sismique Réflexion

Ondes élastiques réfléchies par des structures présentant un contraste d'impédance (produit densité-vitesse)



2D seismic reflection



3D seismic reflection

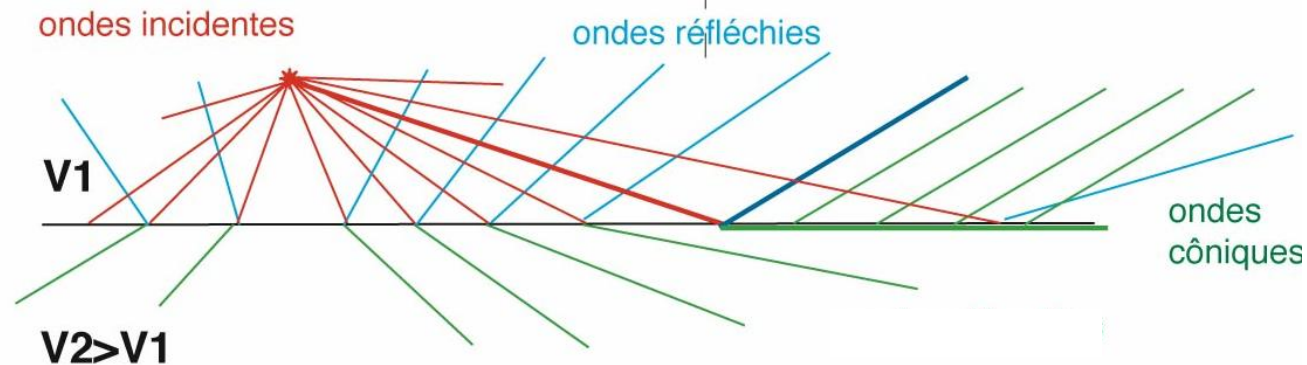
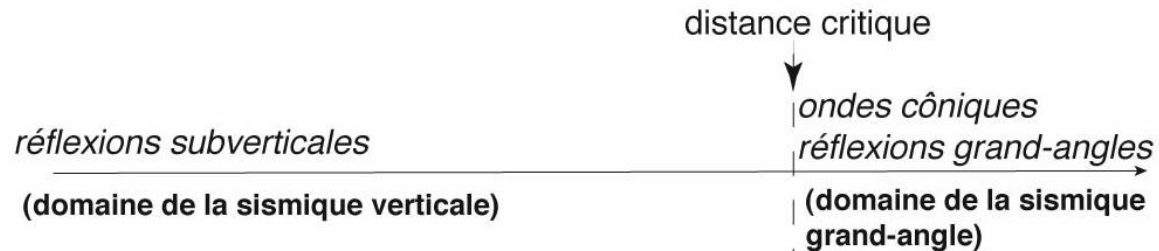
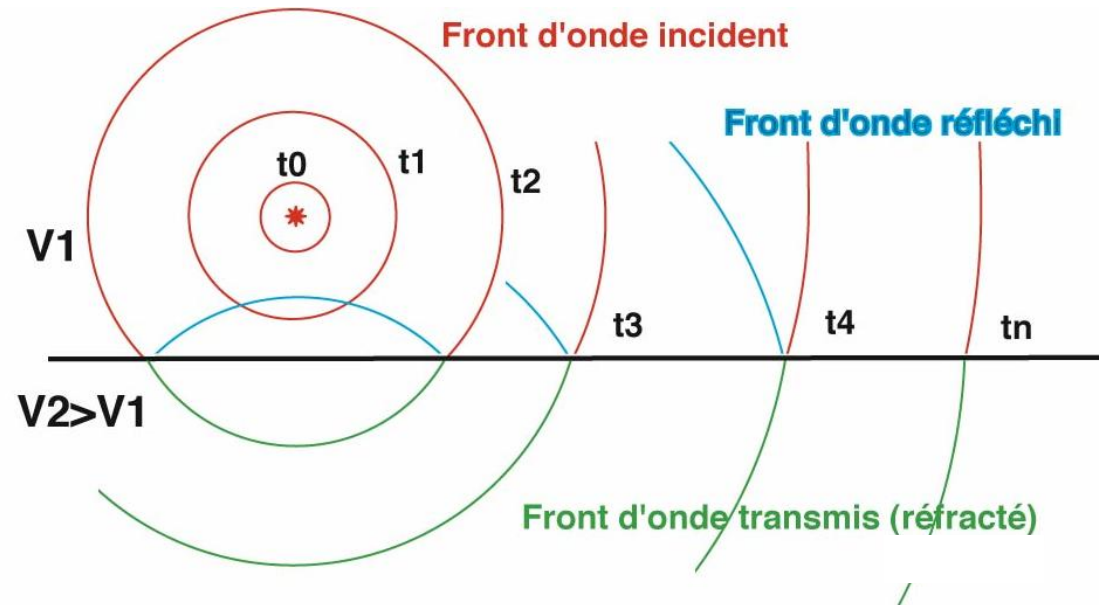
Intérêts académique et industriel:

- Etude stratigraphique et structural
- Identifications d'aléas géologiques : failles actives, glissements gravitaires
- Recherche de réservoirs
- Topographie du socle
- Délinéation des zones fracturées

PRINCIPES DE LA SISMIQUE :

Réflexion / Réfraction

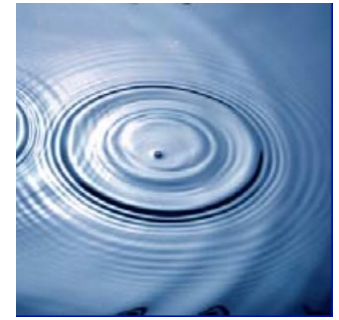
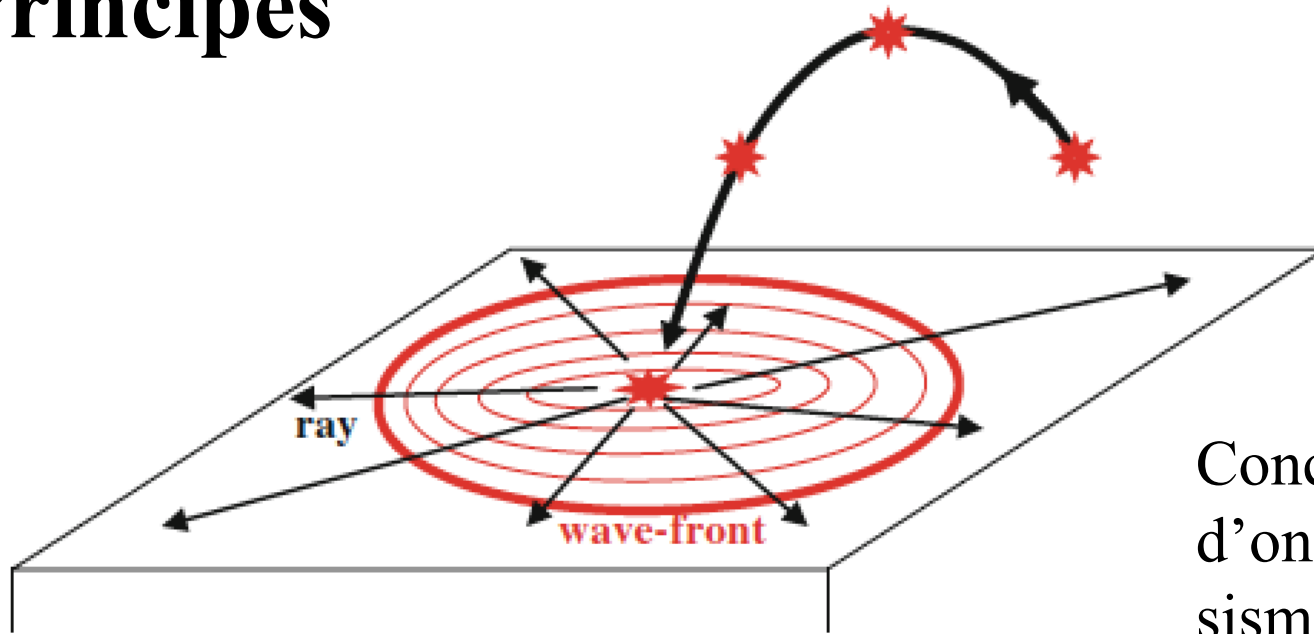
Principes



Les rais sismiques
sont toujours
orthogonaux au
front d'onde

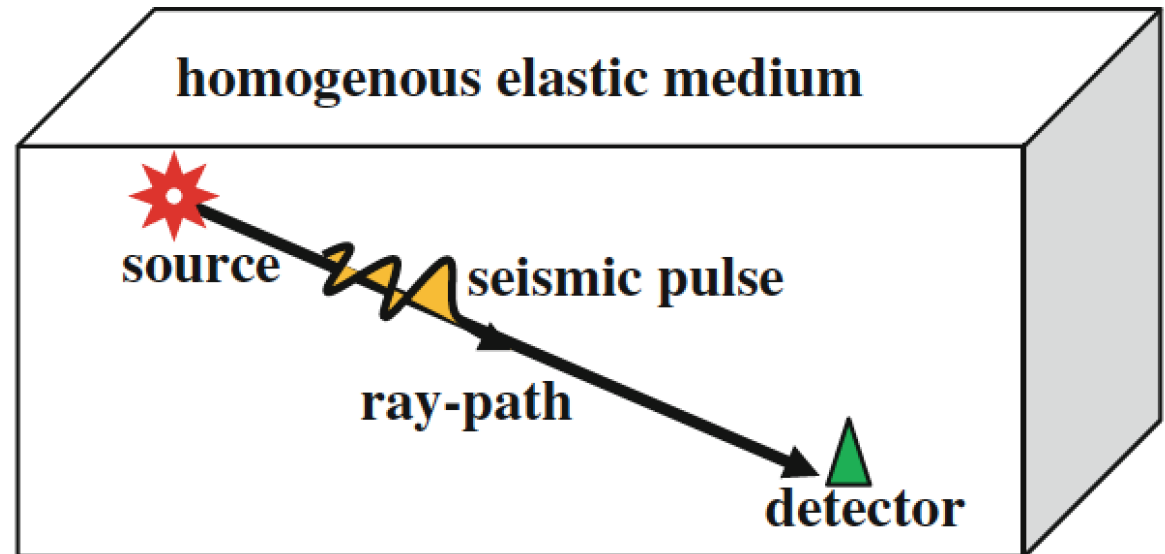
- Trajet des ondes sismiques
- Front d'onde
- Rais sismiques

Principes



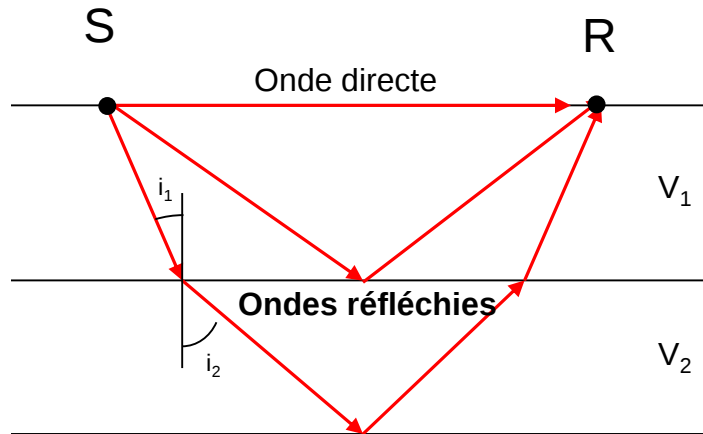
Concepts des fronts
d'ondes et des raies
sismiques

Vague d'eau créée par la chute
d'un galet dans un étang immobile

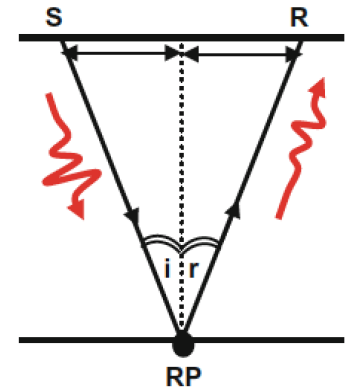


Principes

Loi de Snell-Descartes



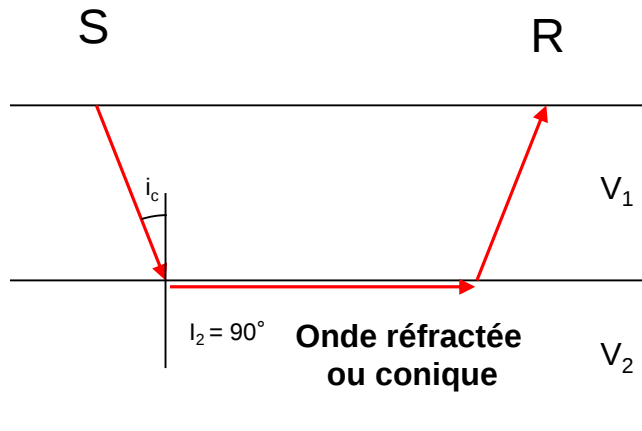
$$\frac{\sin i_1}{v_1} = \frac{\sin i_2}{v_2}$$



- Propagation des ondes acoustiques

Ces lois sont celles de l'optique

Cas particulier :

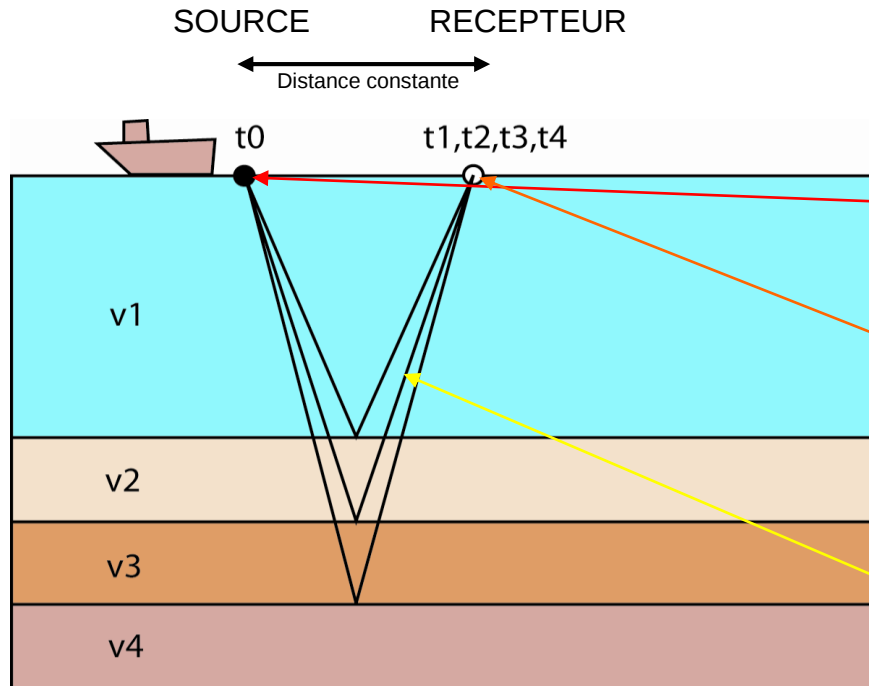


$$i_2 = 90^\circ$$

$$i_1 = i_c \text{ (incidence critique)}$$

$$\sin(i_{c1}) = \frac{v_1}{v_2}$$

La sismique réflexion



La source (un canon à air le plus souvent) émet une **onde acoustique** au temps t_0 .

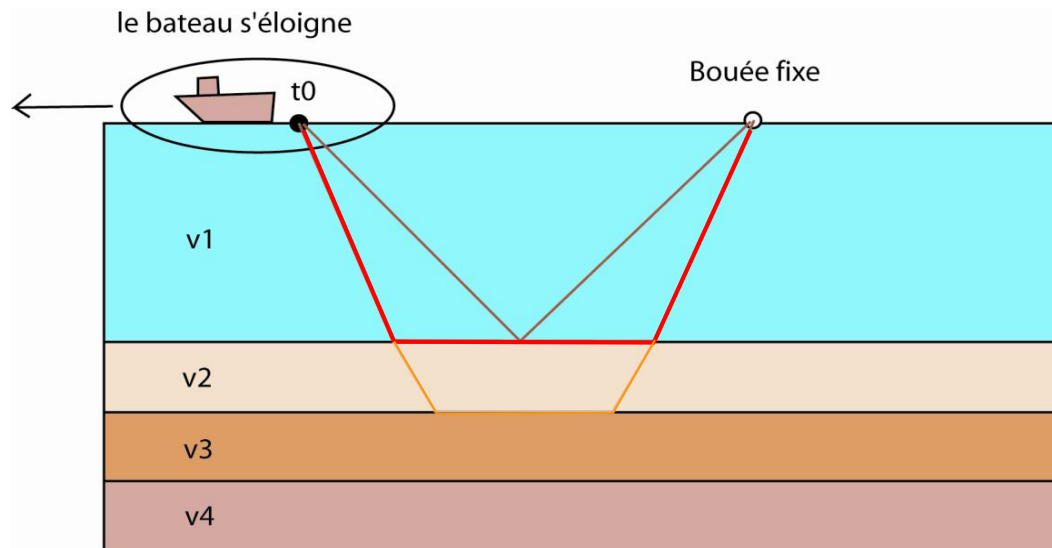
On enregistre les réflexions de cette onde sur les différentes « couches ».

Les trajets des rais sismiques sont presque verticaux car la distance source-récepteur est faible, **ET CONSTANTE**.

ON PARLE DONC AUSSI DE SISMIQUE VERTICALE

La sismique réfraction

←→
La distance augmente

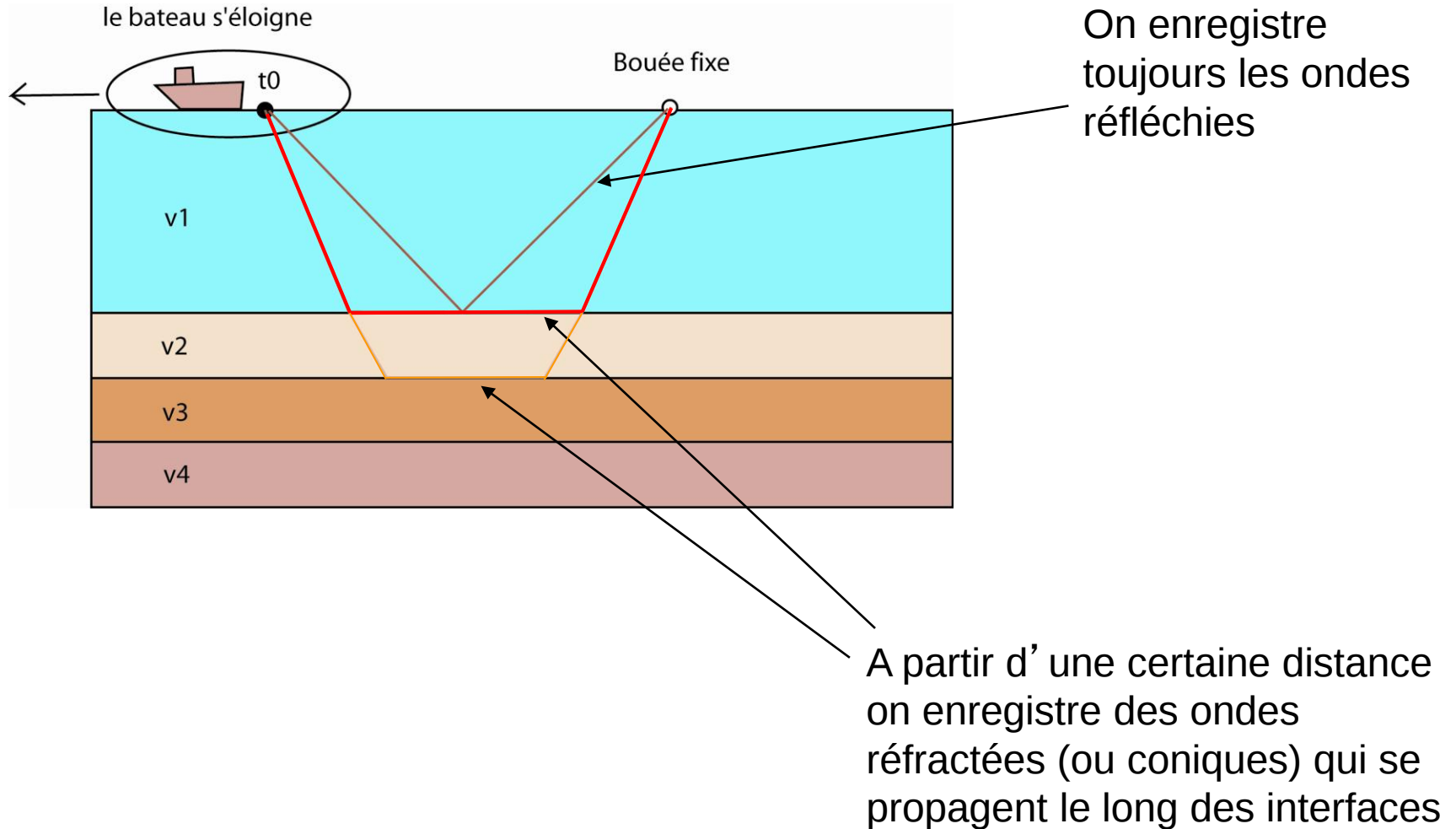


Cette fois la distance source-récepteur augmente car le bateau s'éloigne de la bouée.

Connaissance de la structure profonde: propagation des ondes P et S.

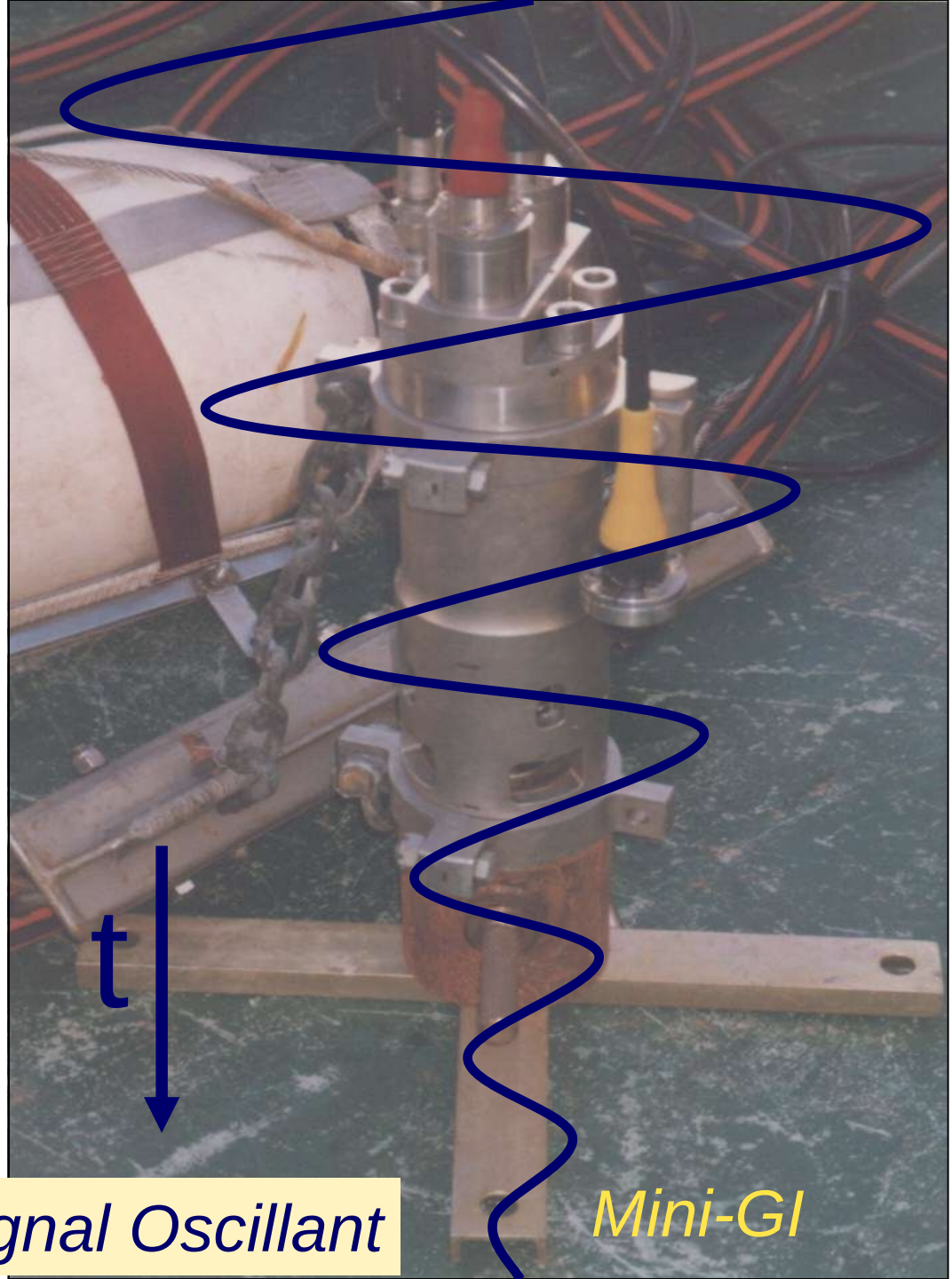
ON PARLE DONC AUSSI DE SISMIQUE GRAND ANGLE

La sismique réfraction



La Source:
le canon à air

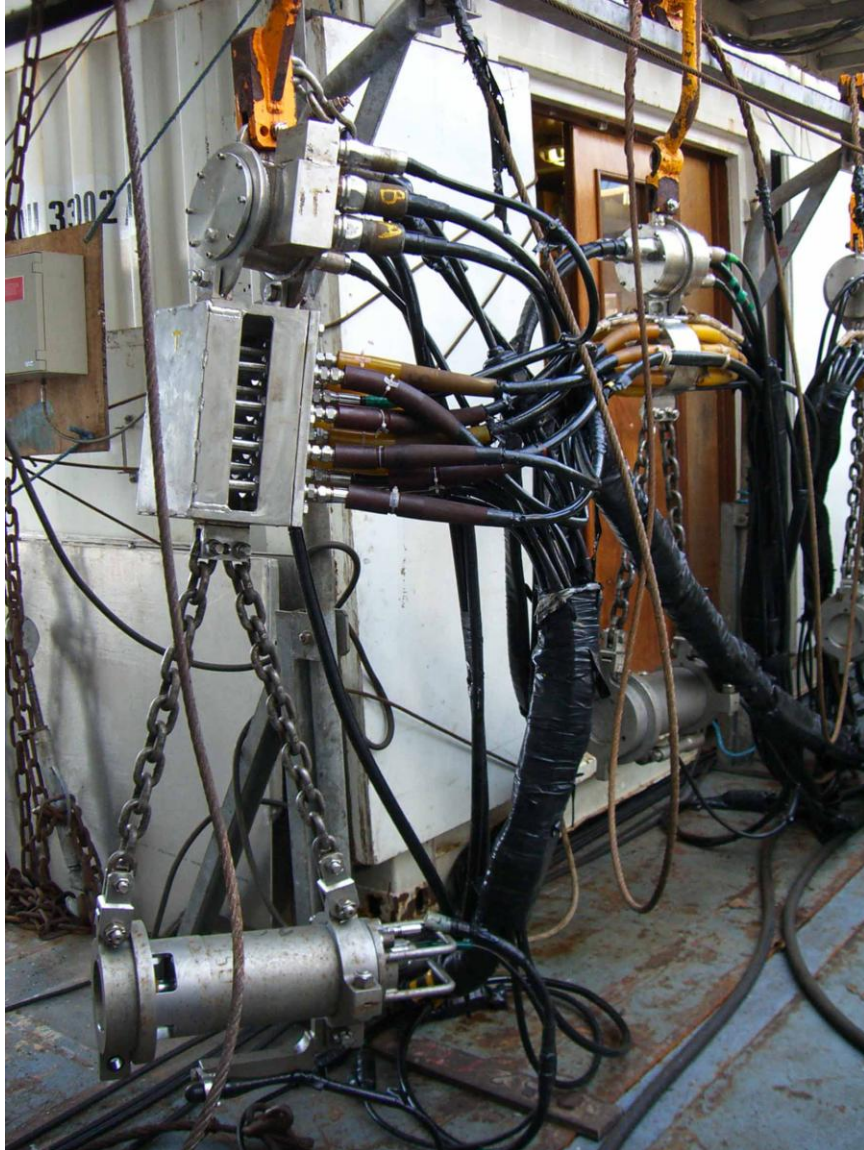
La Source : Le Canon à Air



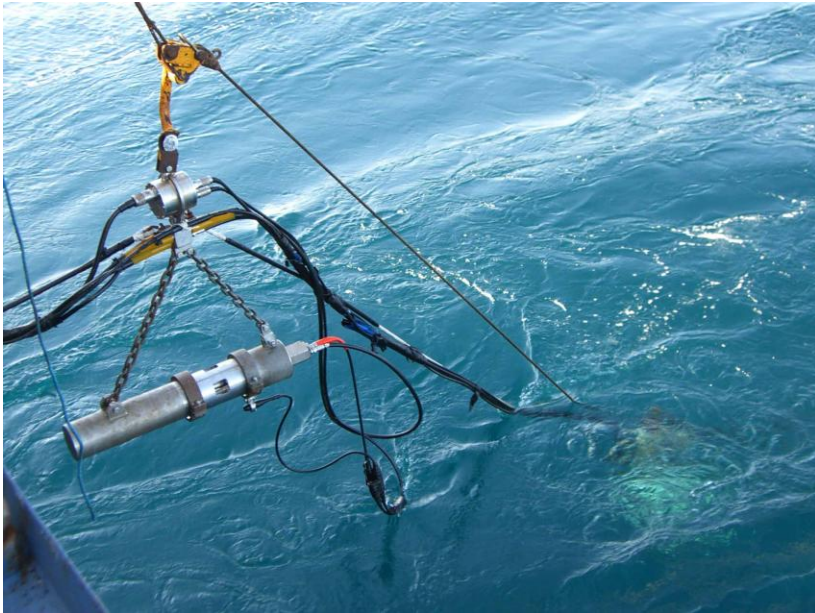
Signal Oscillant

Mini-G1

La Source: canon à air



La Source: mise à l'eau





Le récepteur:

Sismique réflexion

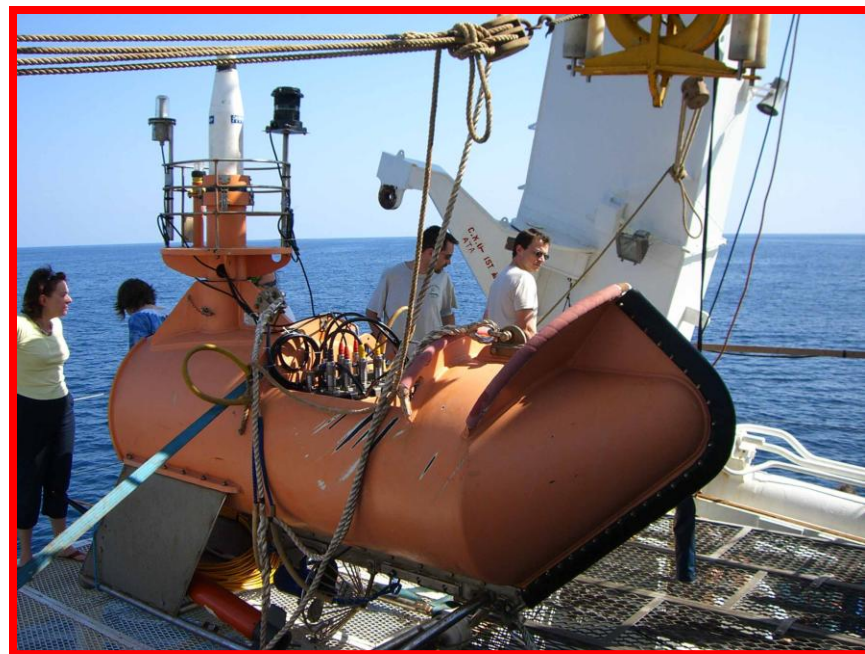
Flûte multitraces

- Flûte IFREMER: 960 T, 6 km
- Flûte GéoAzur: 8-14 T, ~300 m
- Flûte « contracteurs » : 12 flûtes, 640 T, 8km



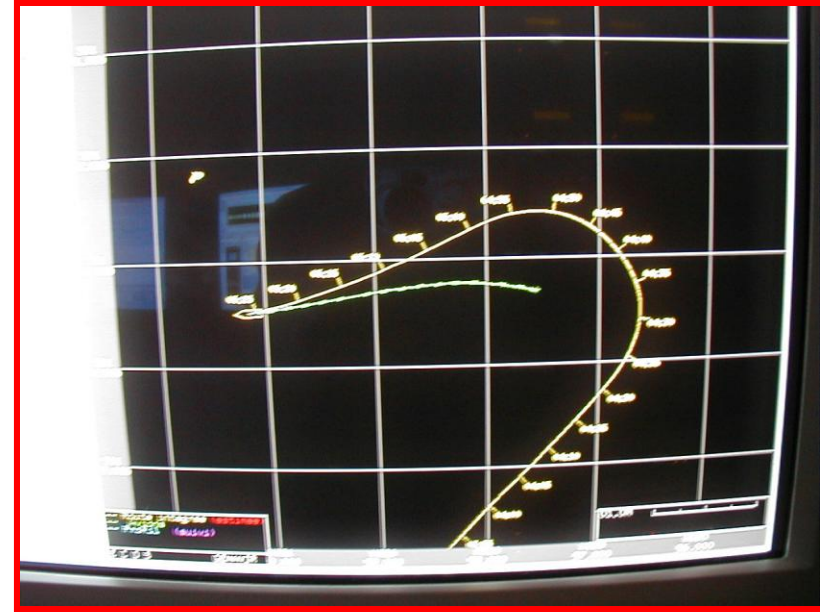
Flûte multitraces

- Mise en œuvre: bouée de queue, avions, connexions



Position de la flûte

- Contrôle en temps réel
- Corrections



Le récepteur:

Sismique réfraction

Récepteur : OBS (Ocean Bottom Seismometers)

OBS

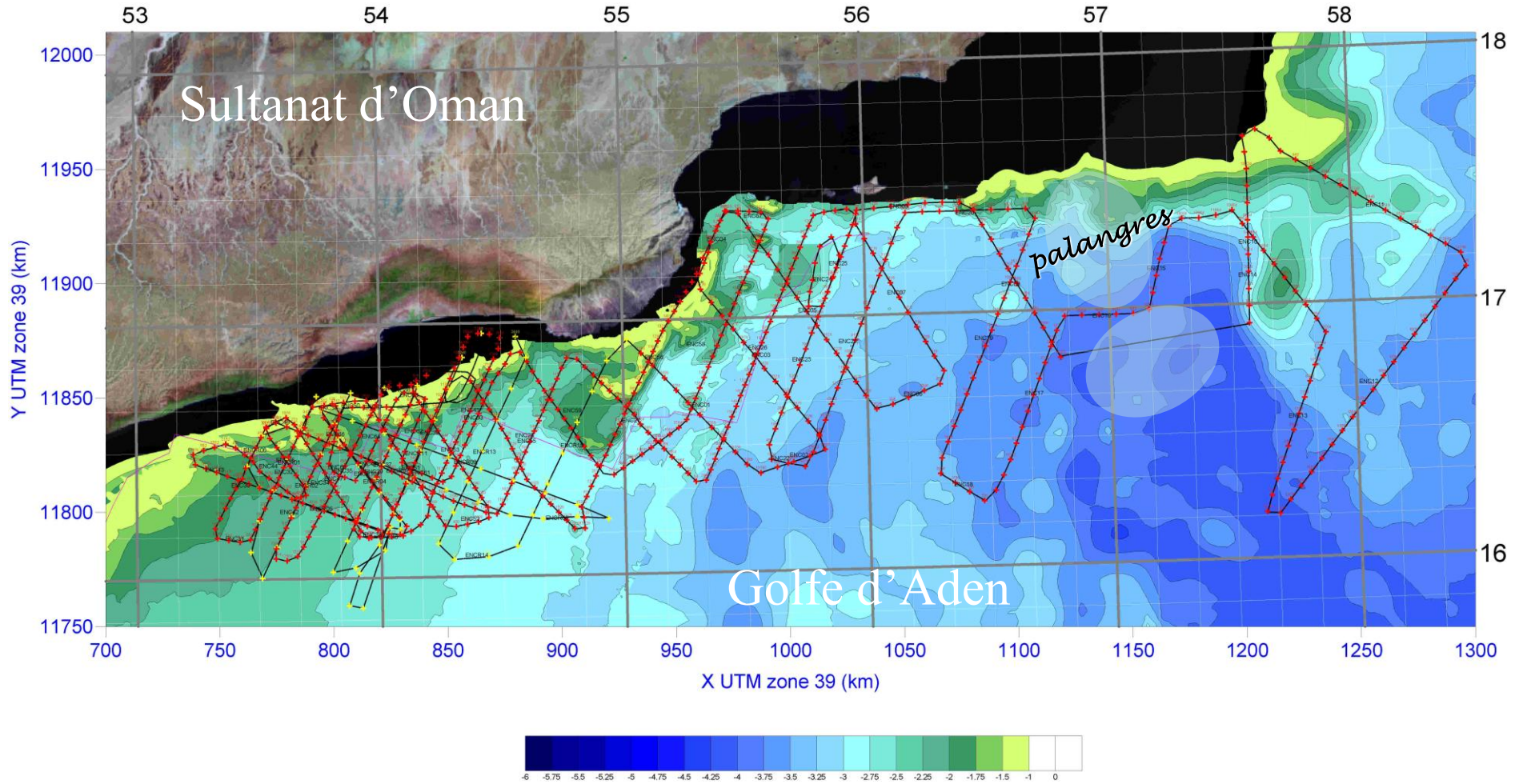
Tirs avec le N/O



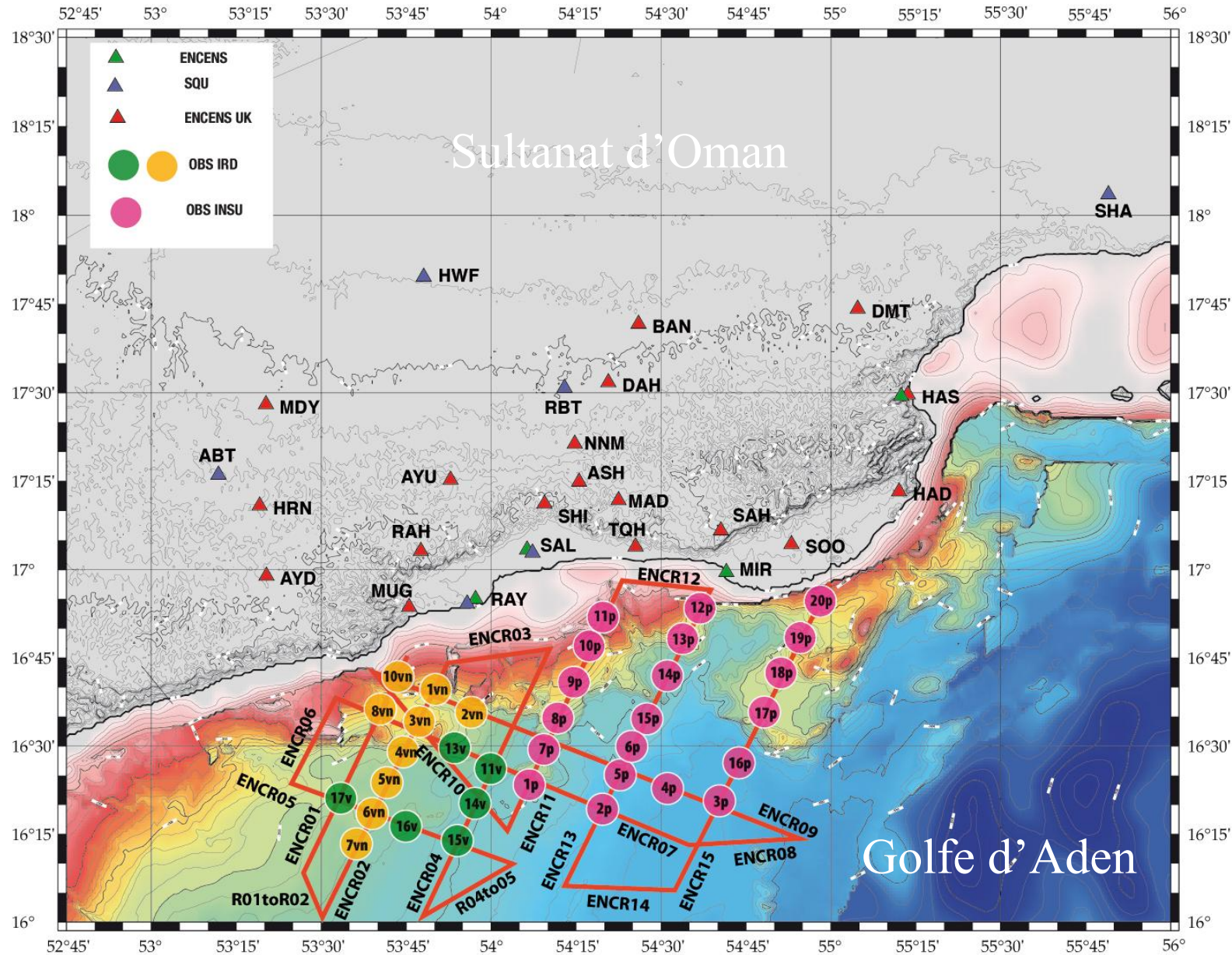
Récupération



Acquisition des données: plan de position des lignes de sismique réflexion



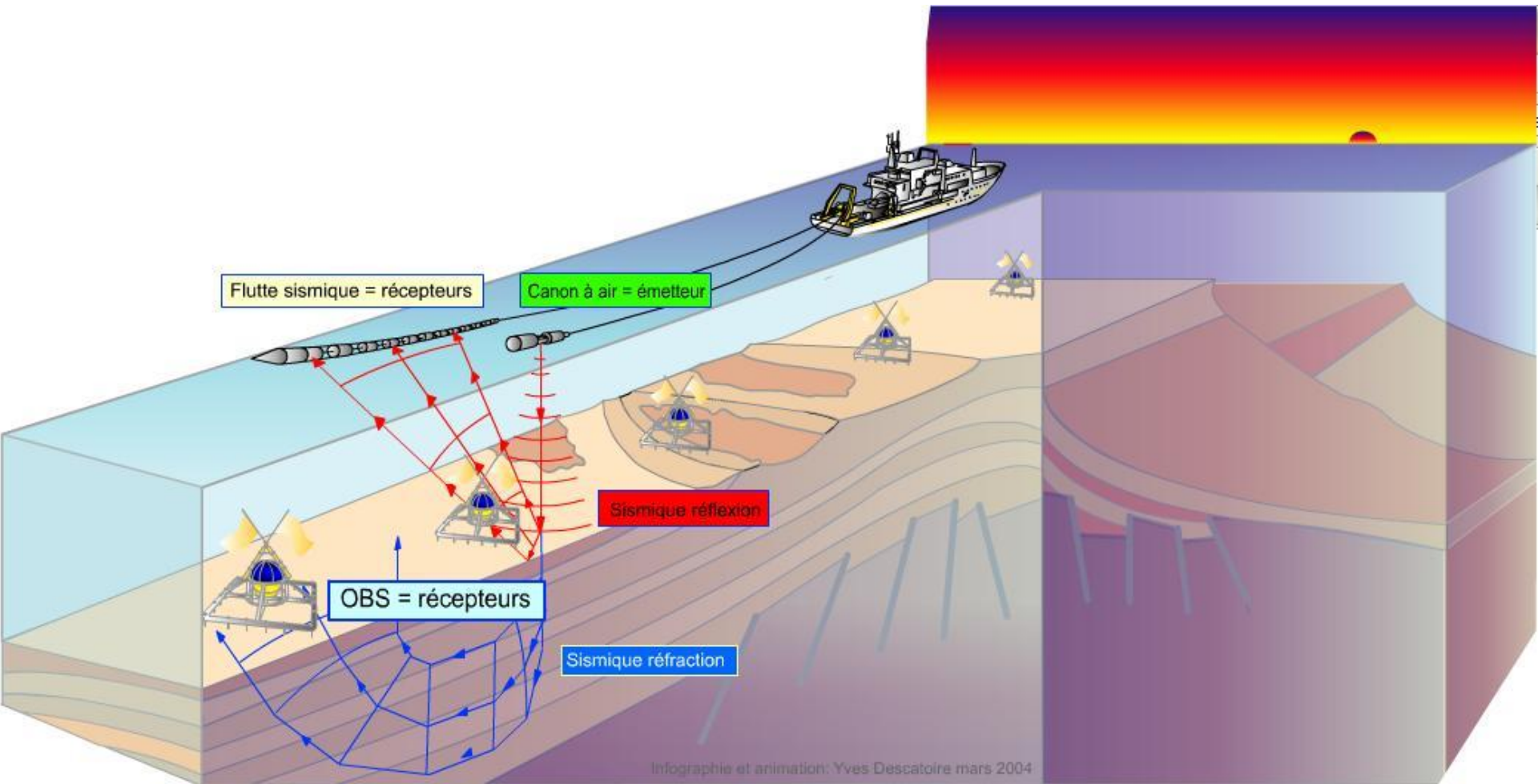
Acquisition des données: position des OBS et profils de sismique réfraction



Acquisition des données:

sismique réflexion

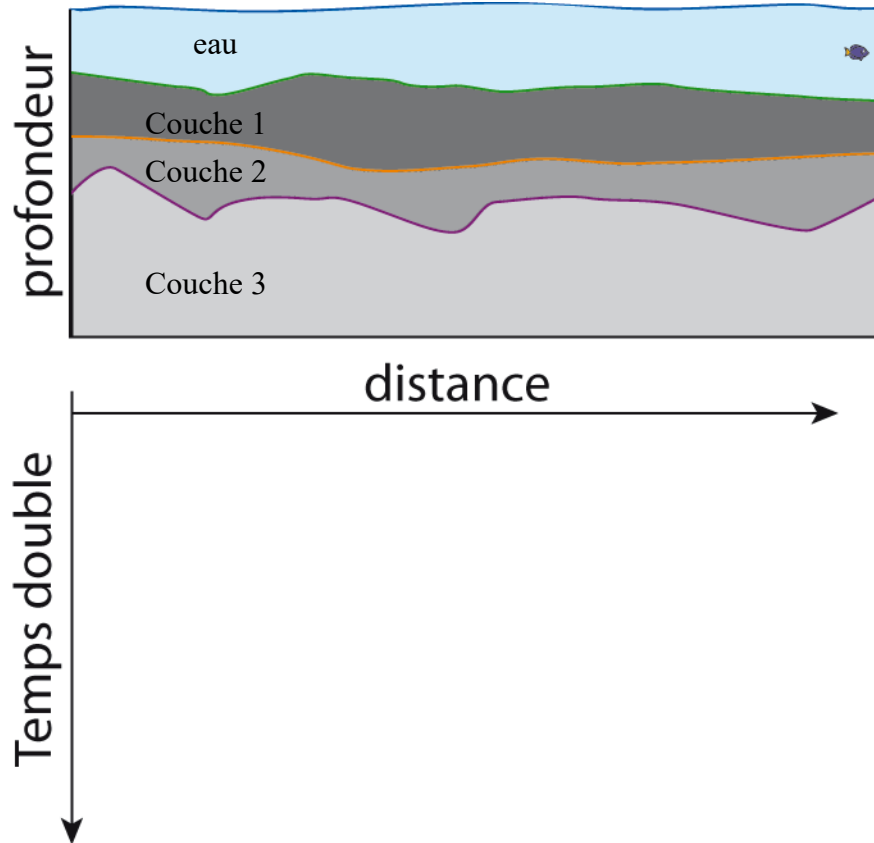
sismique réfraction



SISMIQUE REFLEXION:

Visualisation des données

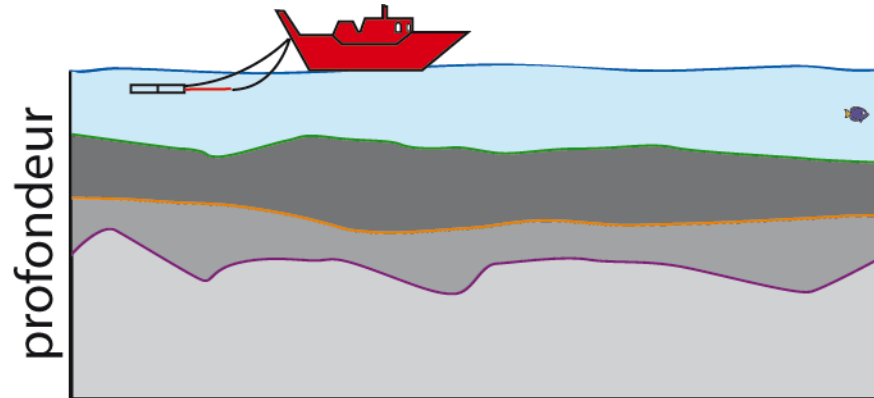
Sismique réflexion



Acquisition

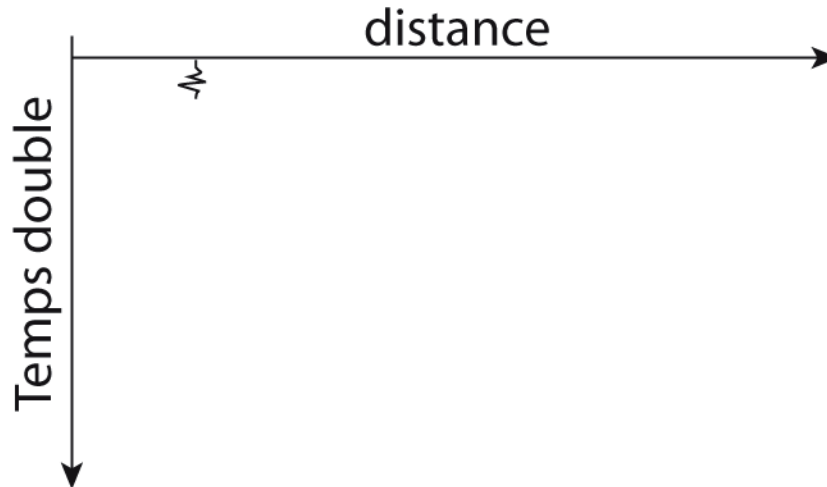
Sismique réflexion

TIR n° 1



Acquisition

ONDE DIRECTE

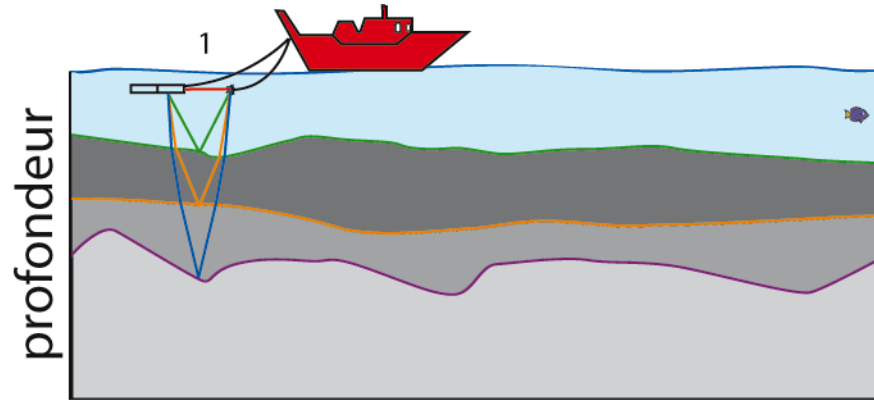


**Représentation
graphique**

TRACE SISMIQUE

Sismique réflexion

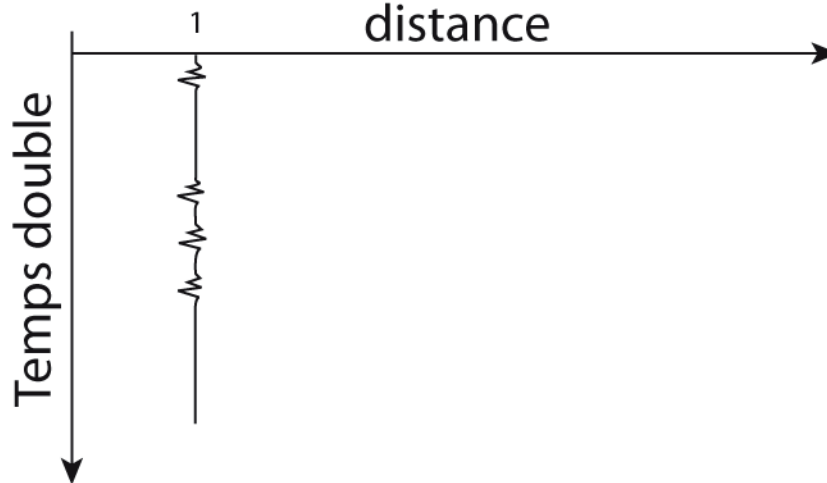
TIR n° 1



Acquisition

ONDE DIRECTE

**ONDES
REFLECHIES**

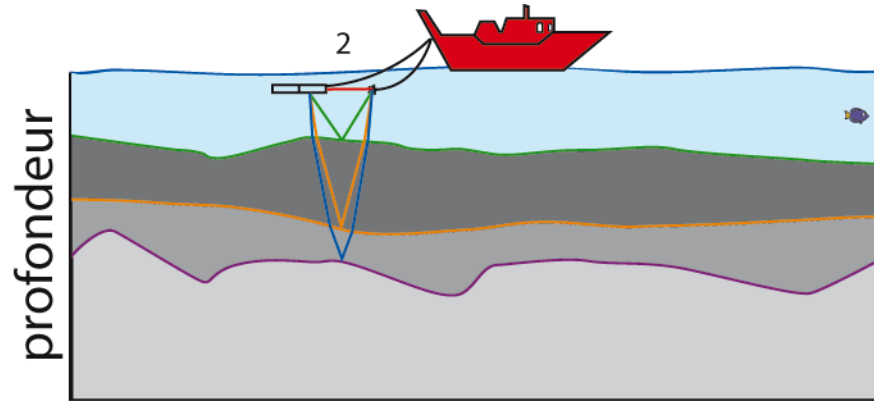


**Représentation
graphique**

TRACE SISMIQUE

Sismique réflexion

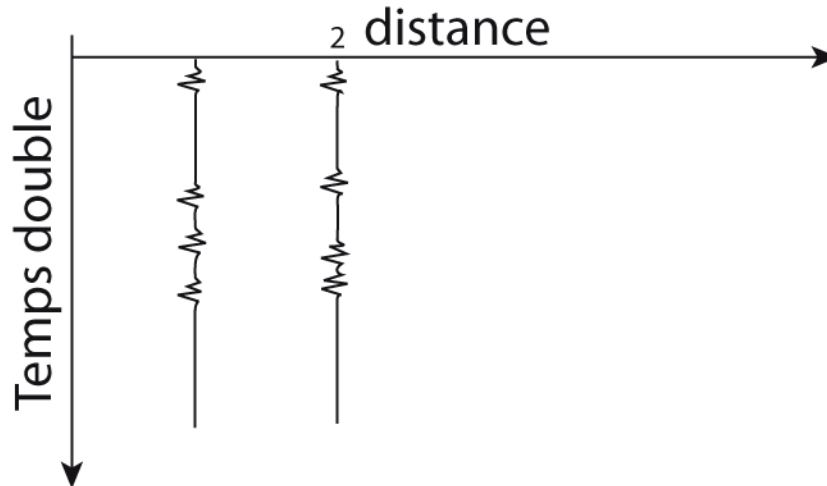
TIR n° 2



Acquisition

ONDE DIRECTE

**ONDES
REFLECHIES**

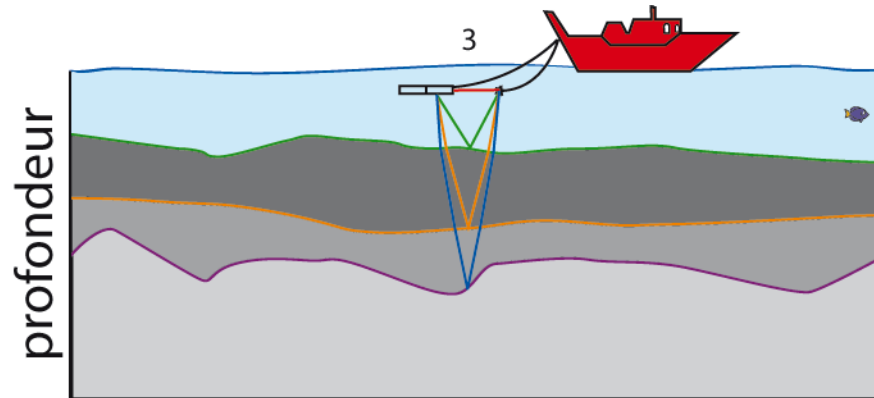


**Représentation
graphique**

TRACES SISMIQUE

Sismique réflexion

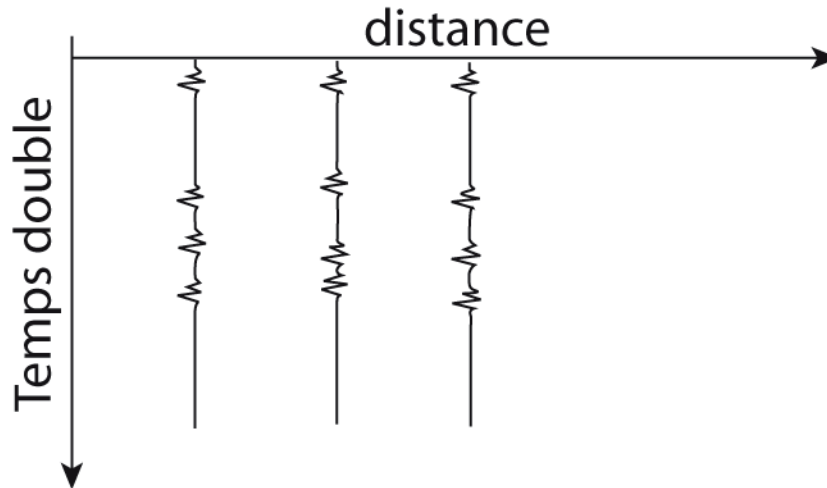
TIR n° 3



Acquisition

ONDE DIRECTE

**ONDES
REFLECHIES**

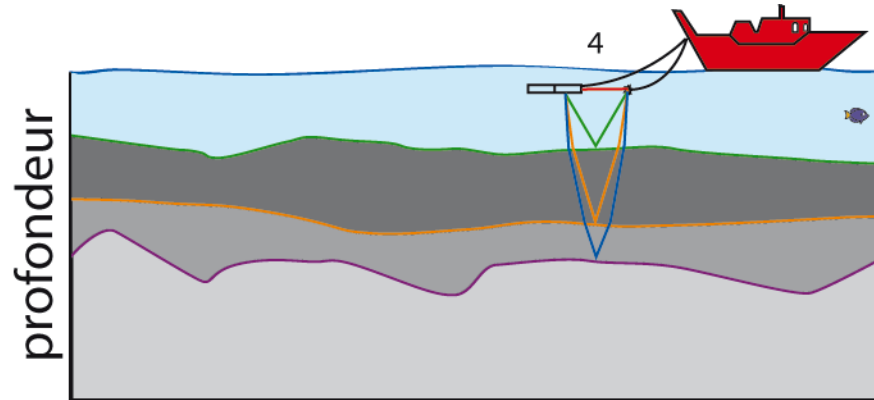


Représentation
graphique

TRACES SISMIQUE

Sismique réflexion

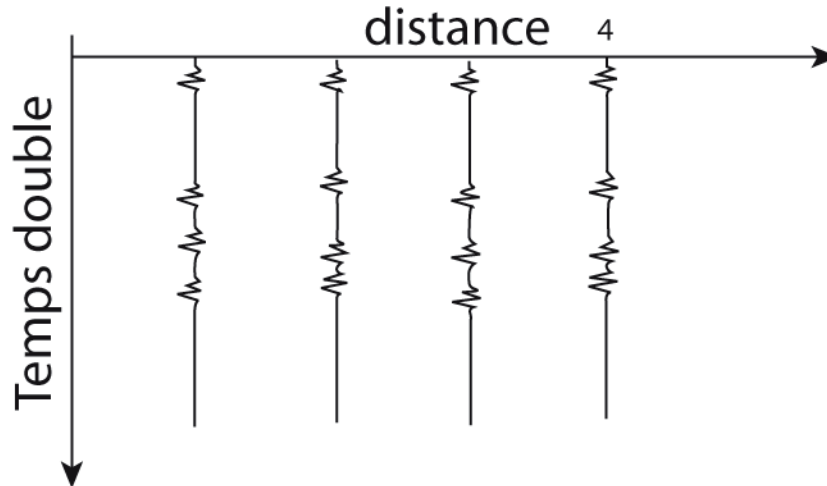
TIR n° 4



Acquisition

ONDE DIRECTE

**ONDES
REFLECHIES**

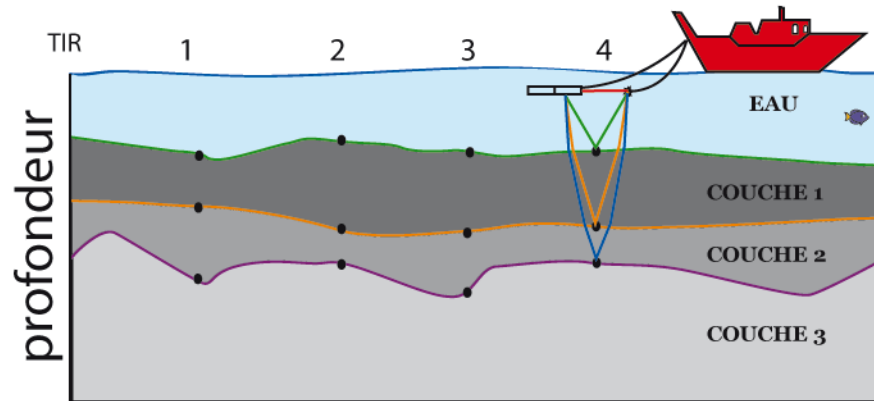


**Représentation
graphique**

TRACES SISMIQUE

Sismique réflexion

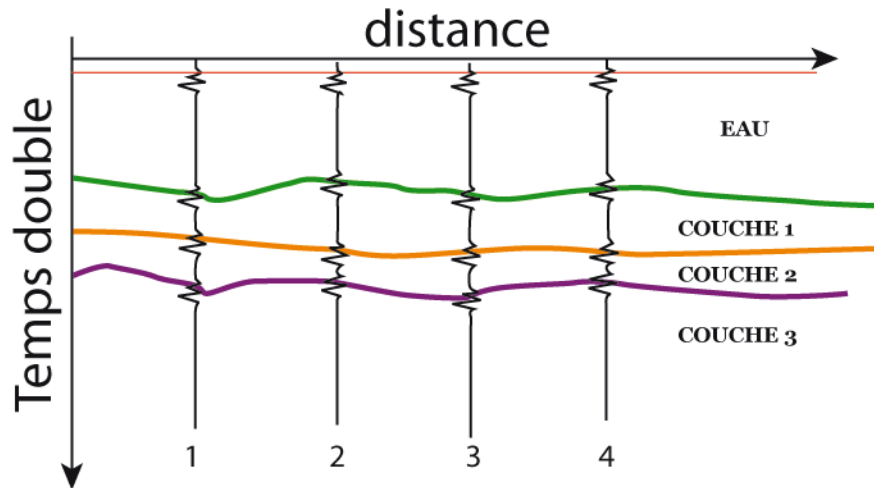
TIR n° 4



Acquisition

ONDE DIRECTE

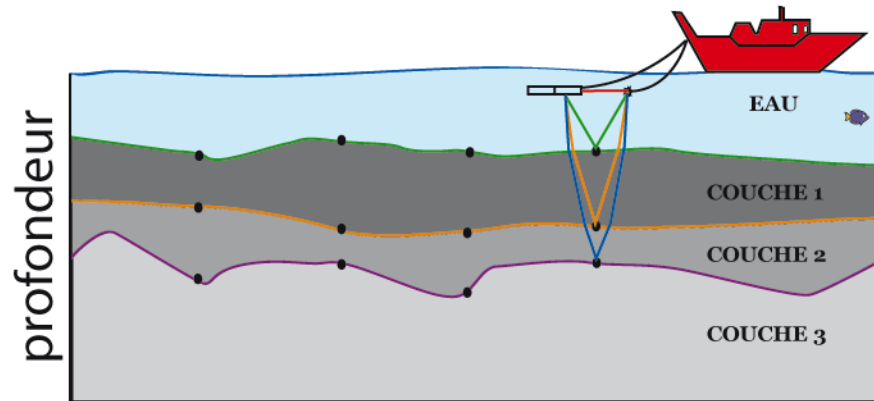
ONDES
REFLECHIES



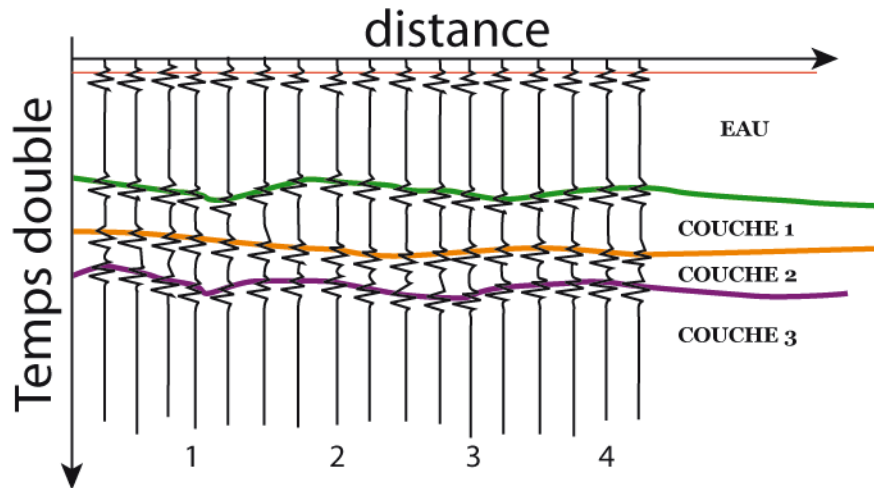
Représentation
graphique

TRACES SISMIQUE

Sismique réflexion



Acquisition



ONDE DIRECTE

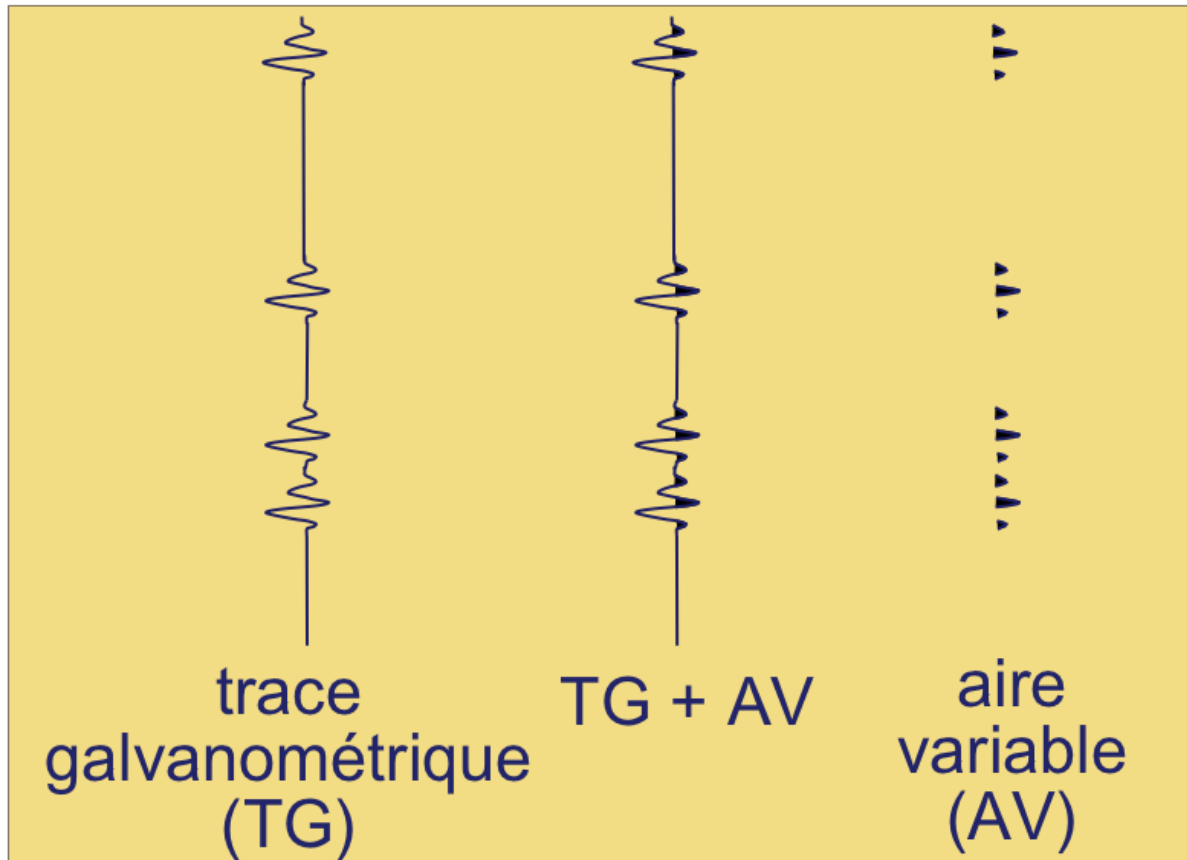
**ONDES
REFLECHIES**

**Représentation
graphique**

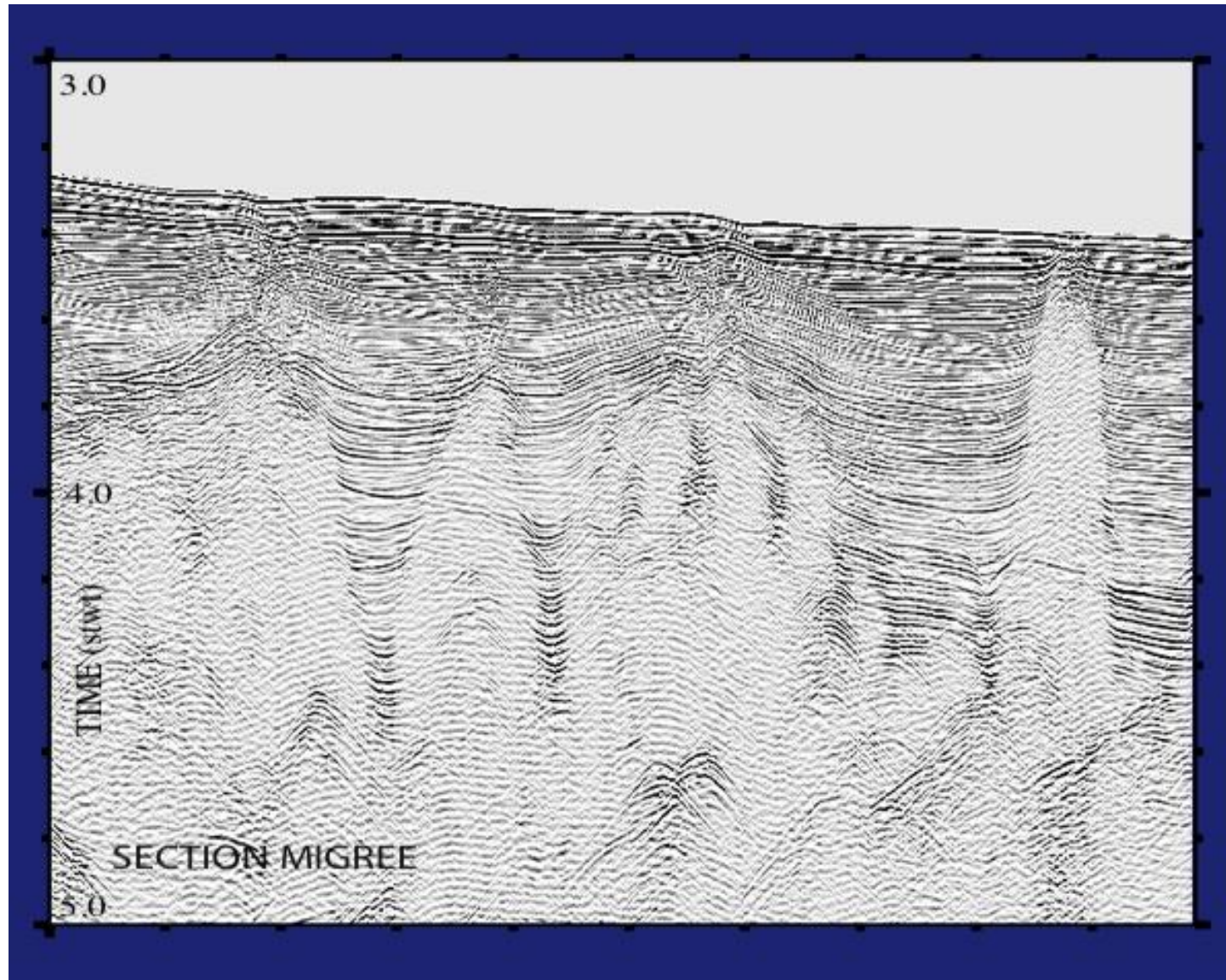
TRACES SISMQUE

Interprétation

Représentation Graphique

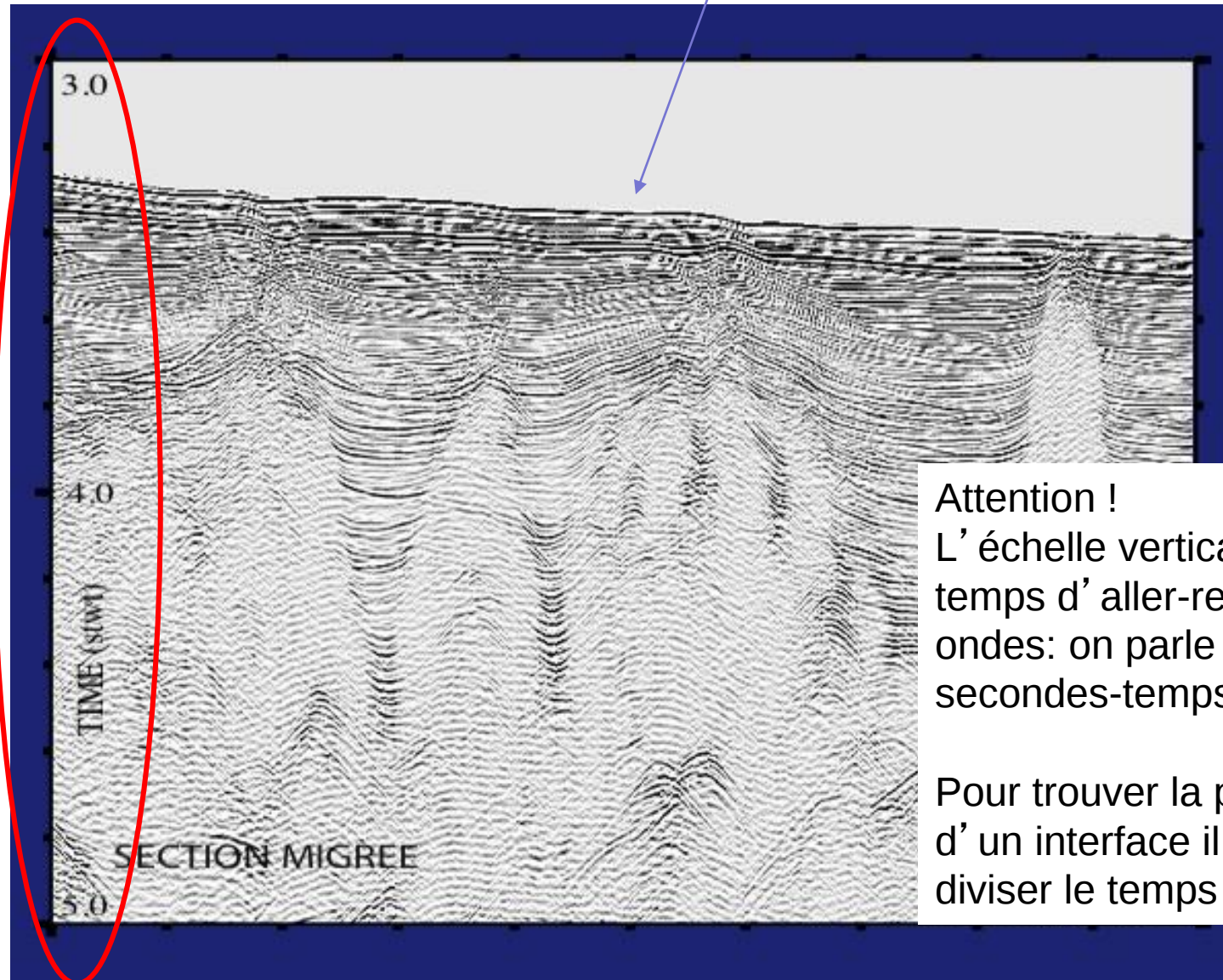


Représentation Graphique



Représentation Graphique

On obtient ce qui ressemble à une « échographie » du sous-sol



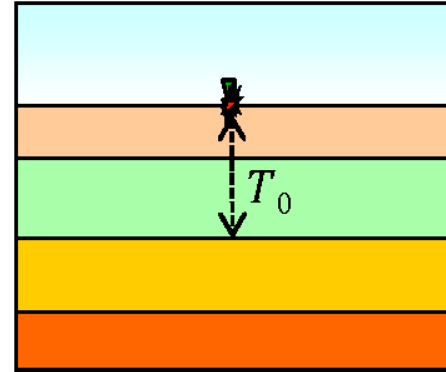
Attention !

L' échelle verticale est le temps d' aller-retour des ondes: on parle de secondes-temps-double.

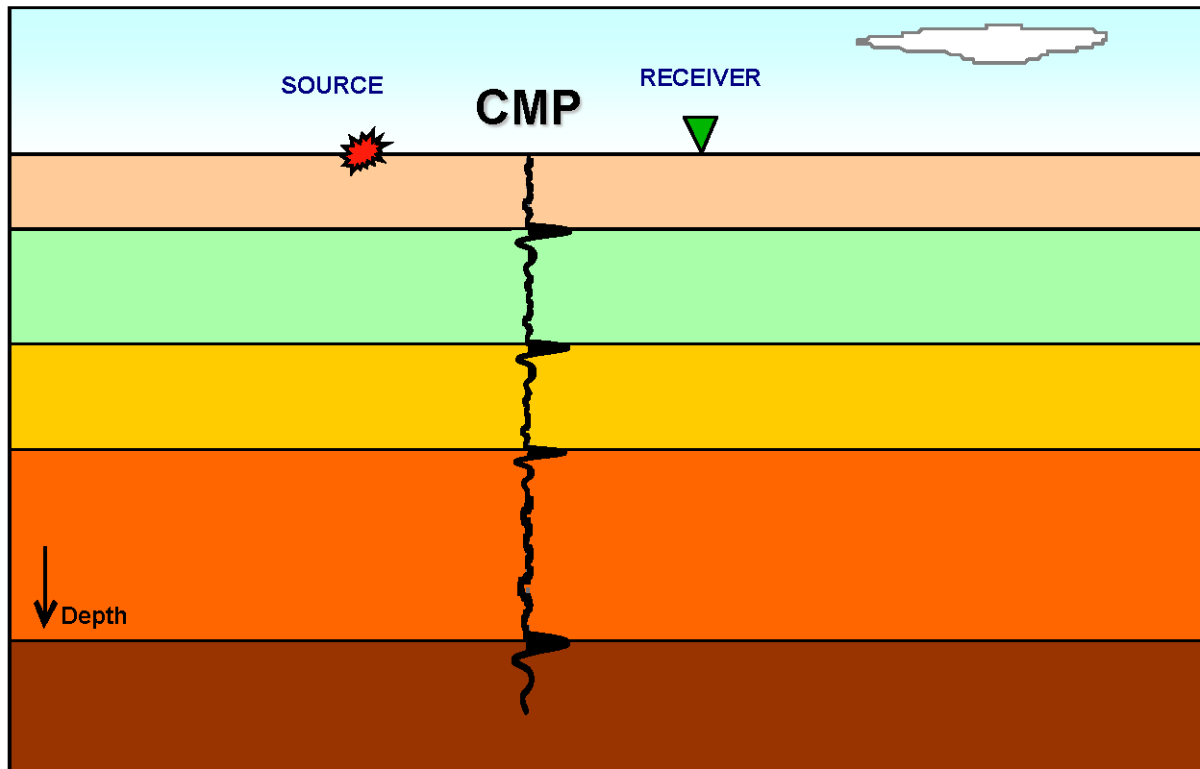
Pour trouver la profondeur d' un interface il faut donc diviser le temps par 2.

La trace sismique – hypothèses fondamentales

- Vitesse constante entre chaque interface
- Les réflecteurs sont horizontaux

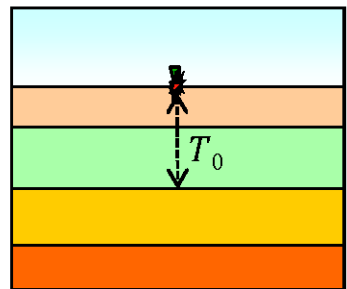
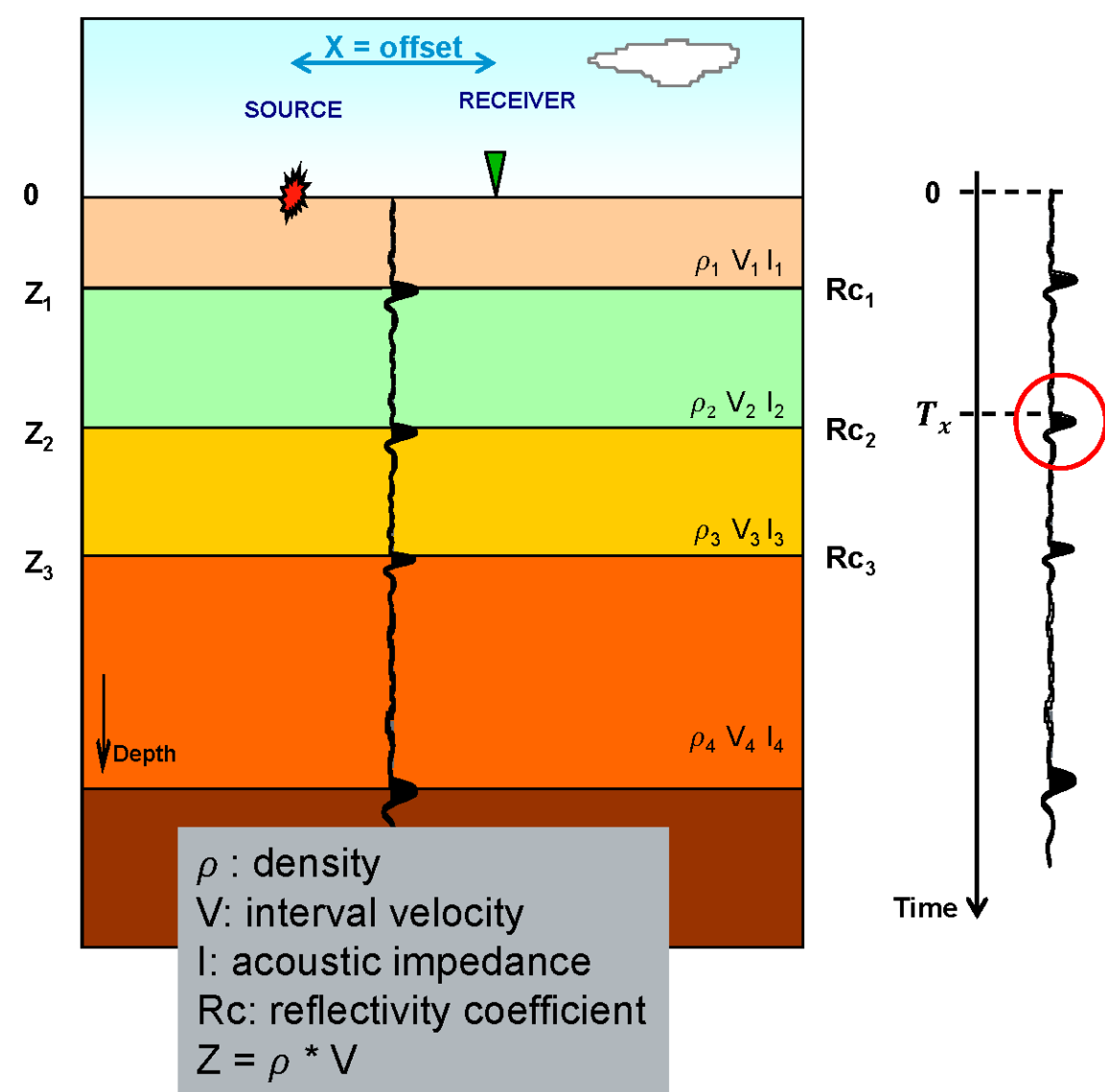


On ramène à
SR confondu



CMP = Common mid point

Quelles informations donnent la trace sismique ?



- Le temps de trajet double de l'onde sismique réfléchie.

$$T_x^2 = T_0^2 + \frac{X^2}{V^2}$$

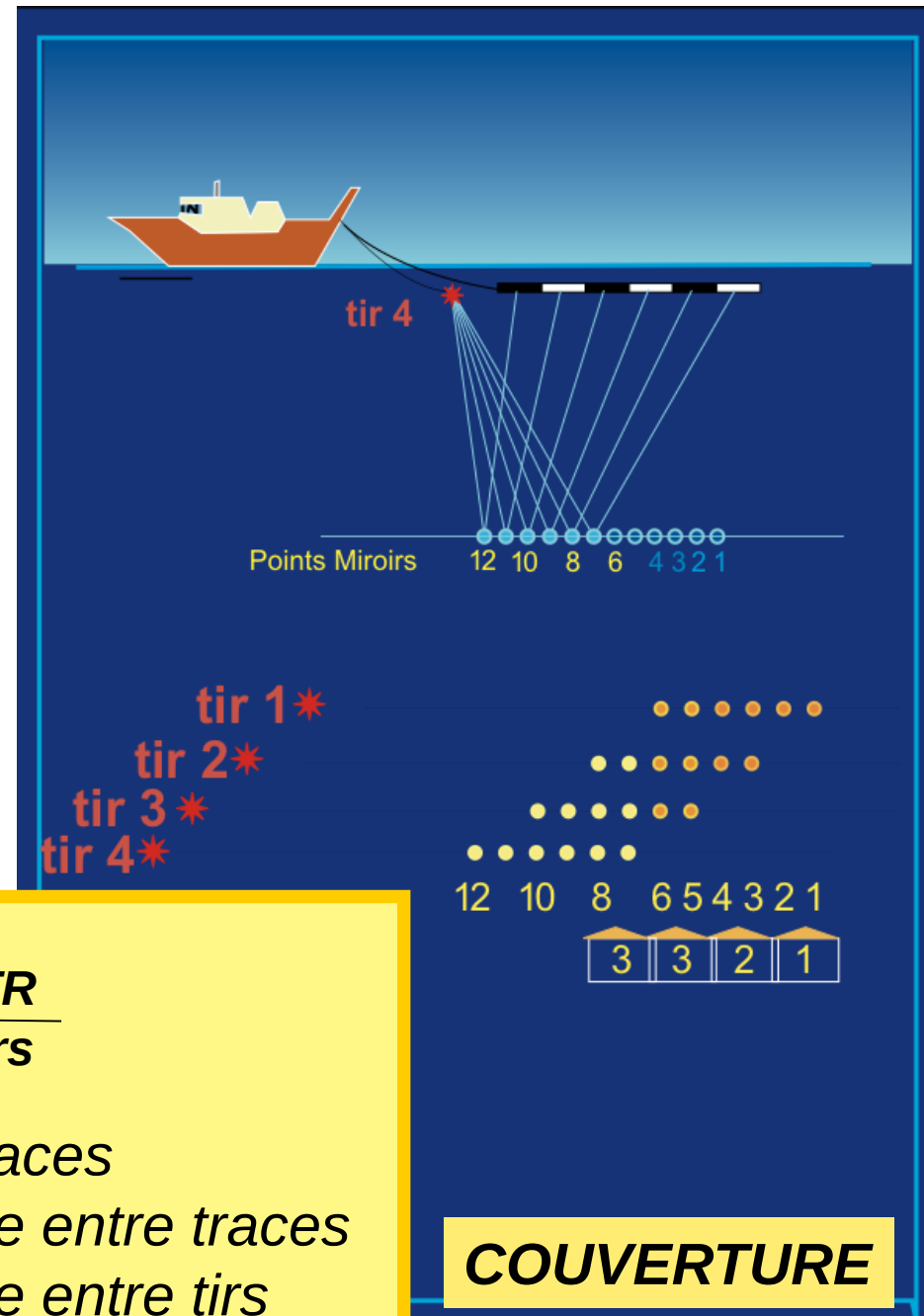
- L'amplitude des évènements de réflexions sismiques est proportionnelles aux coefficients de réflectivité

$$^* Rc_2 = \frac{\rho_3 V_3 - \rho_2 V_2}{\rho_3 V_3 + \rho_2 V_2} = \frac{\Delta Z}{\Sigma Z}$$

* Valid at normal incidence

Intérêt d'avoir une longue flûte

Principe de la couverture multiple



$$C = \frac{N \times dTR}{2 \times dtirs}$$

N = nbre de traces

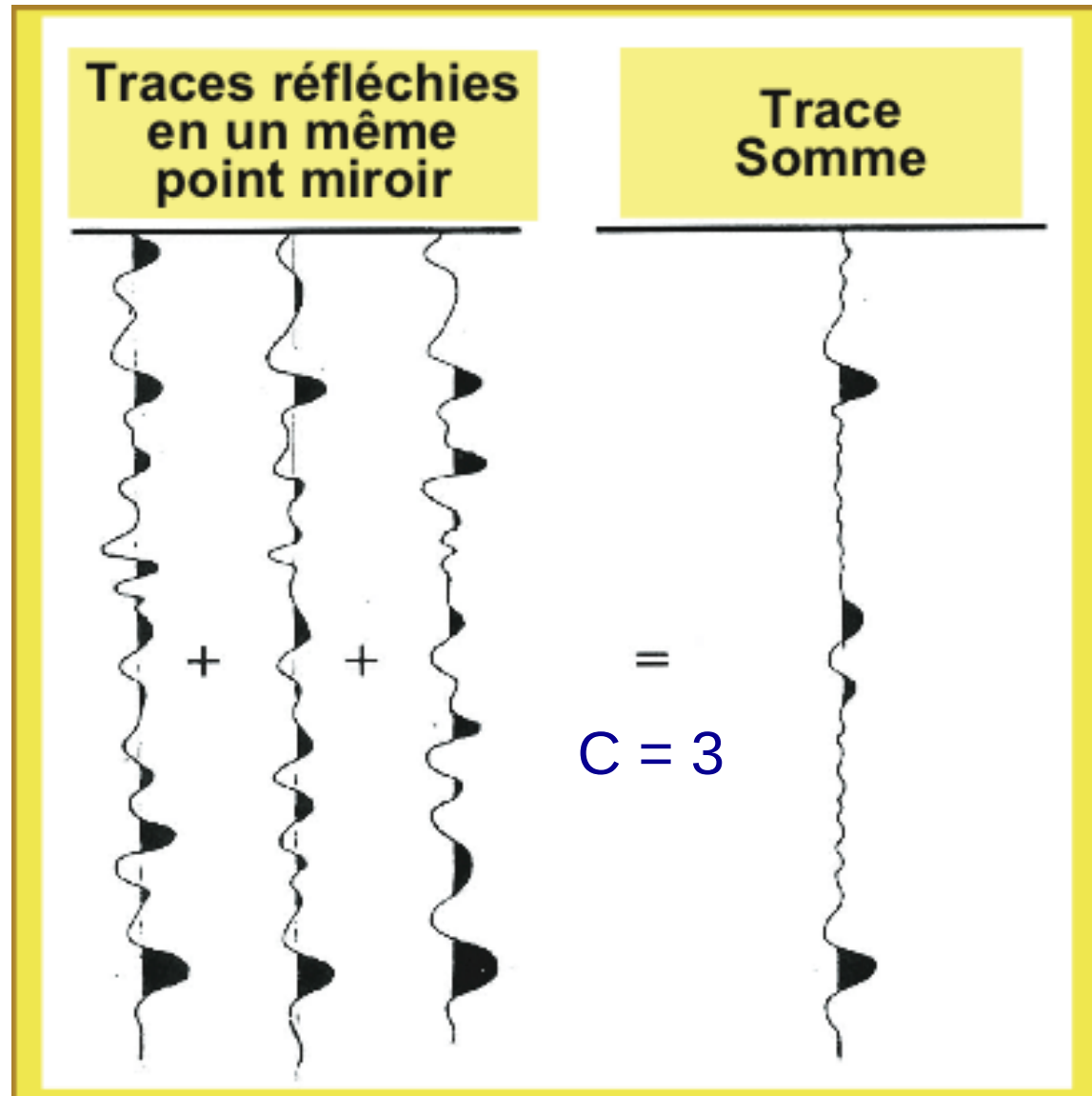
dTR = distance entre traces

dtirs = distance entre tirs

Intérêt d'avoir une longue flûte

Sommation des traces

Amélioration du rapport Signal/Bruit

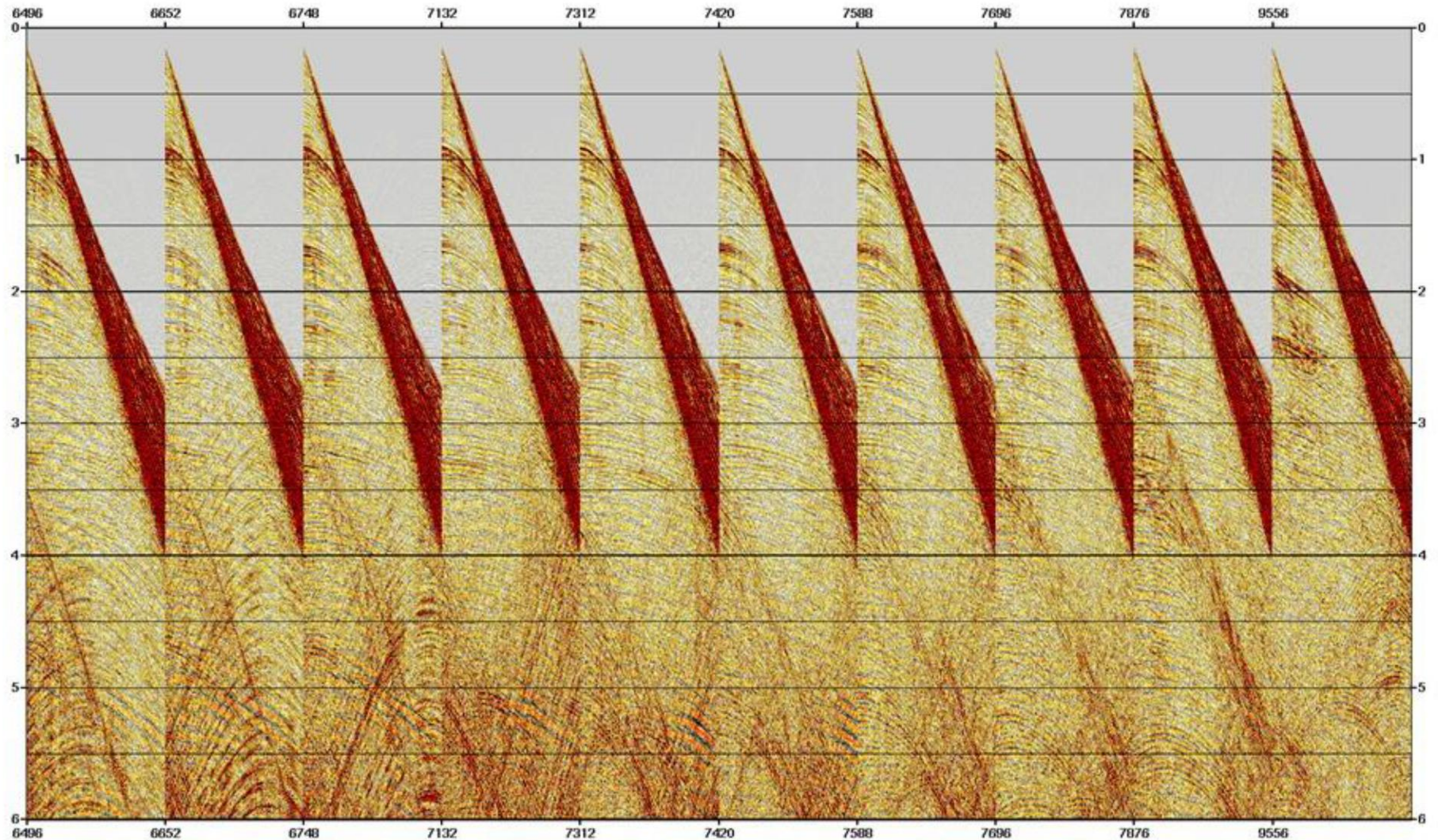


$$S/B = \sqrt{C}$$

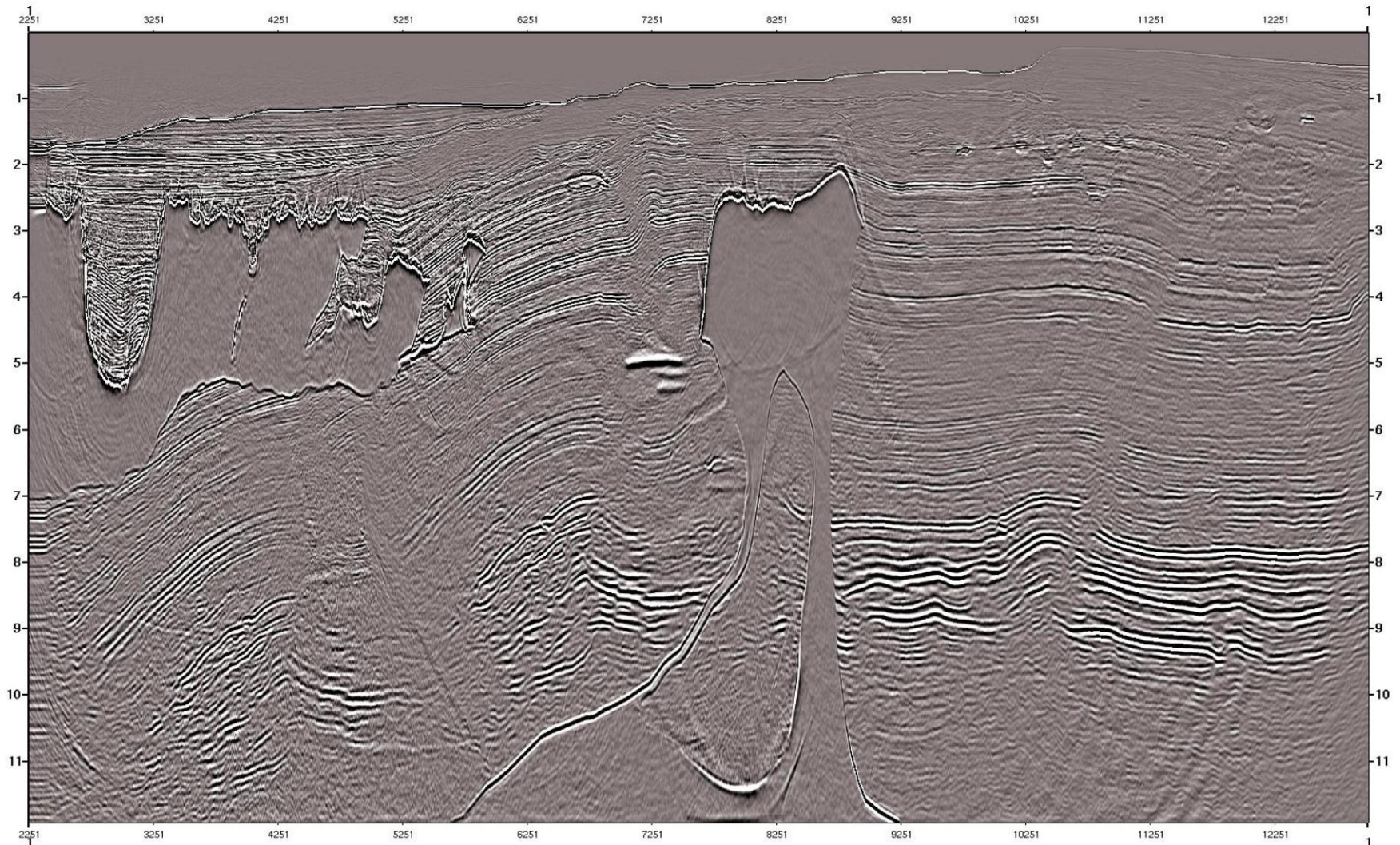
SISMIQUE REFLEXION

Traitement des données

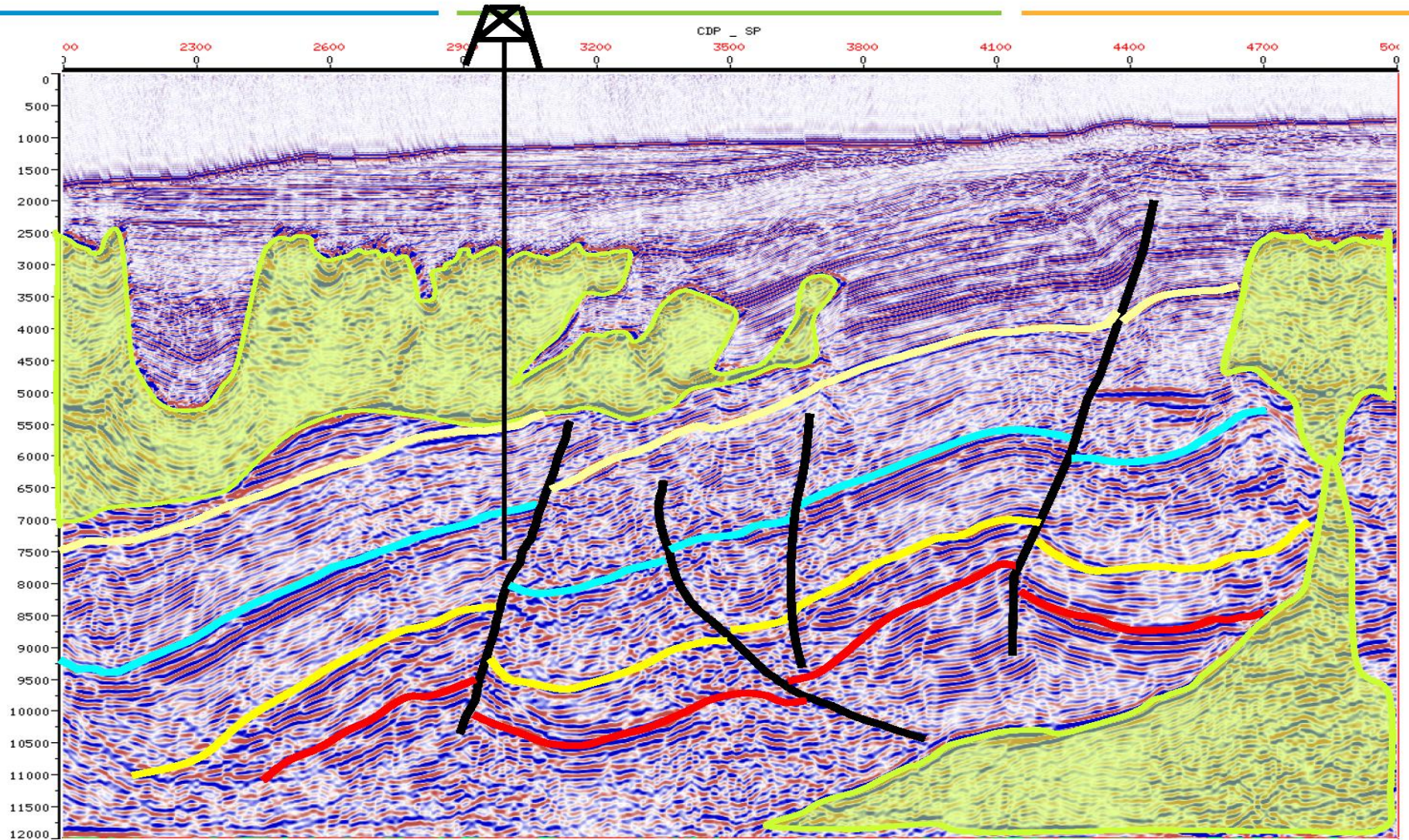
Turn raw field data to ...



...into final seismic image (Migration)



Interpretation of processed image



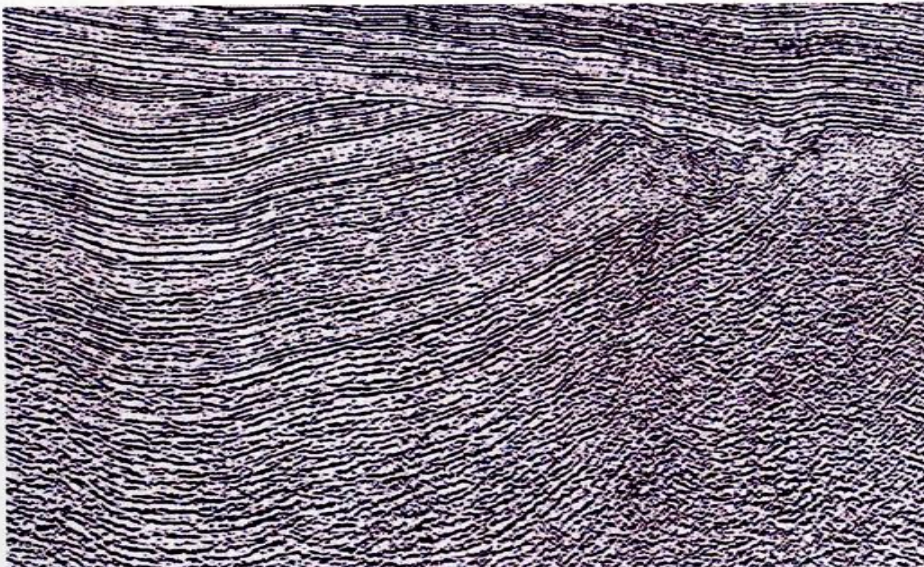
Data courtesy of BP

SISMIQUE REFLEXION:

Exemples

profils de sismique réflexion

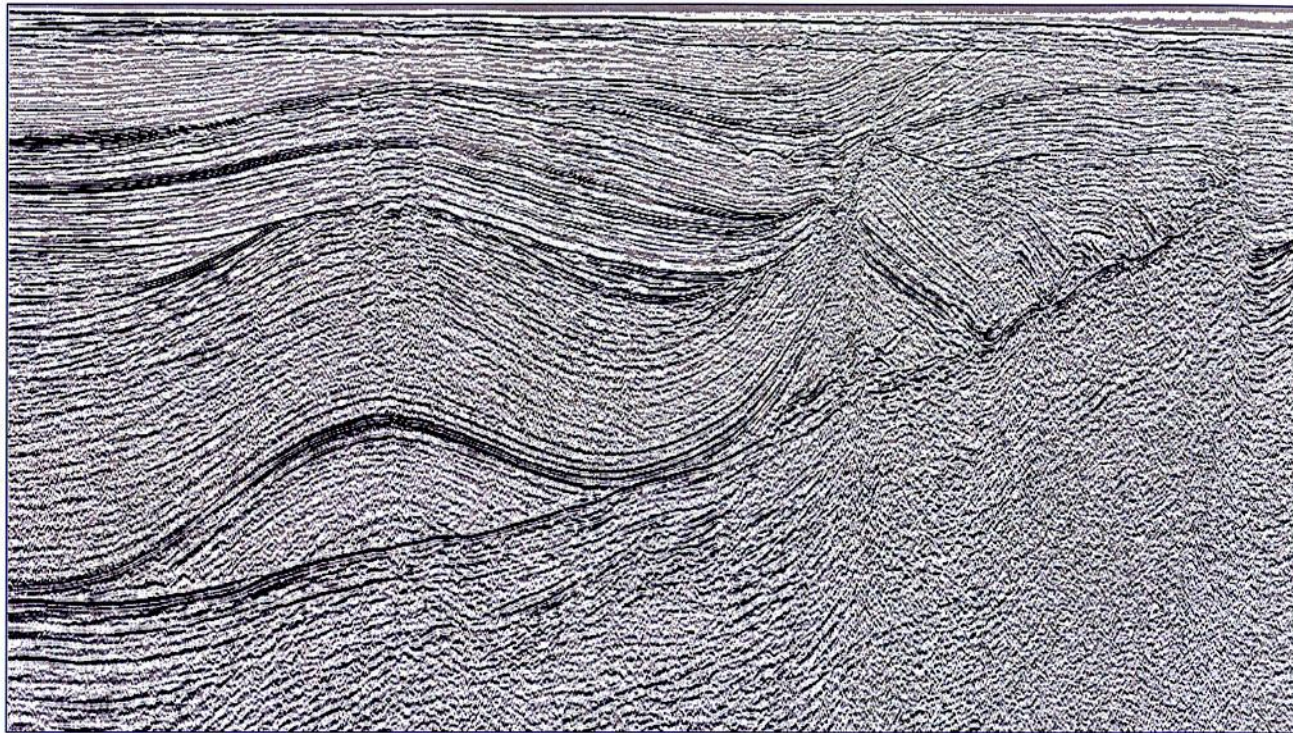
DISCORDANCE



East Greenland - Courtesy from Nuna Oil

DECOUPLAGE DES DEFORMATIONS

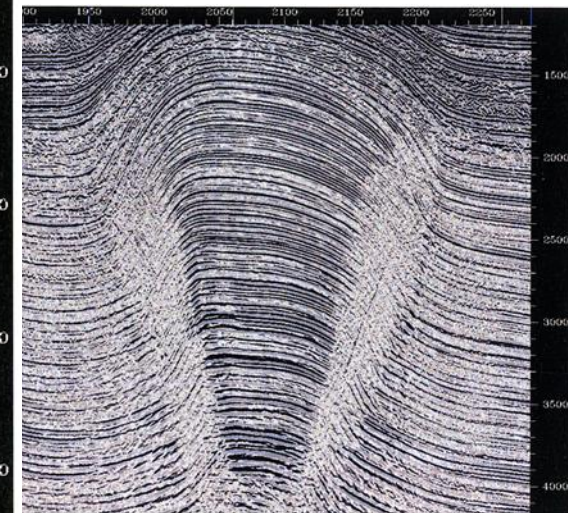
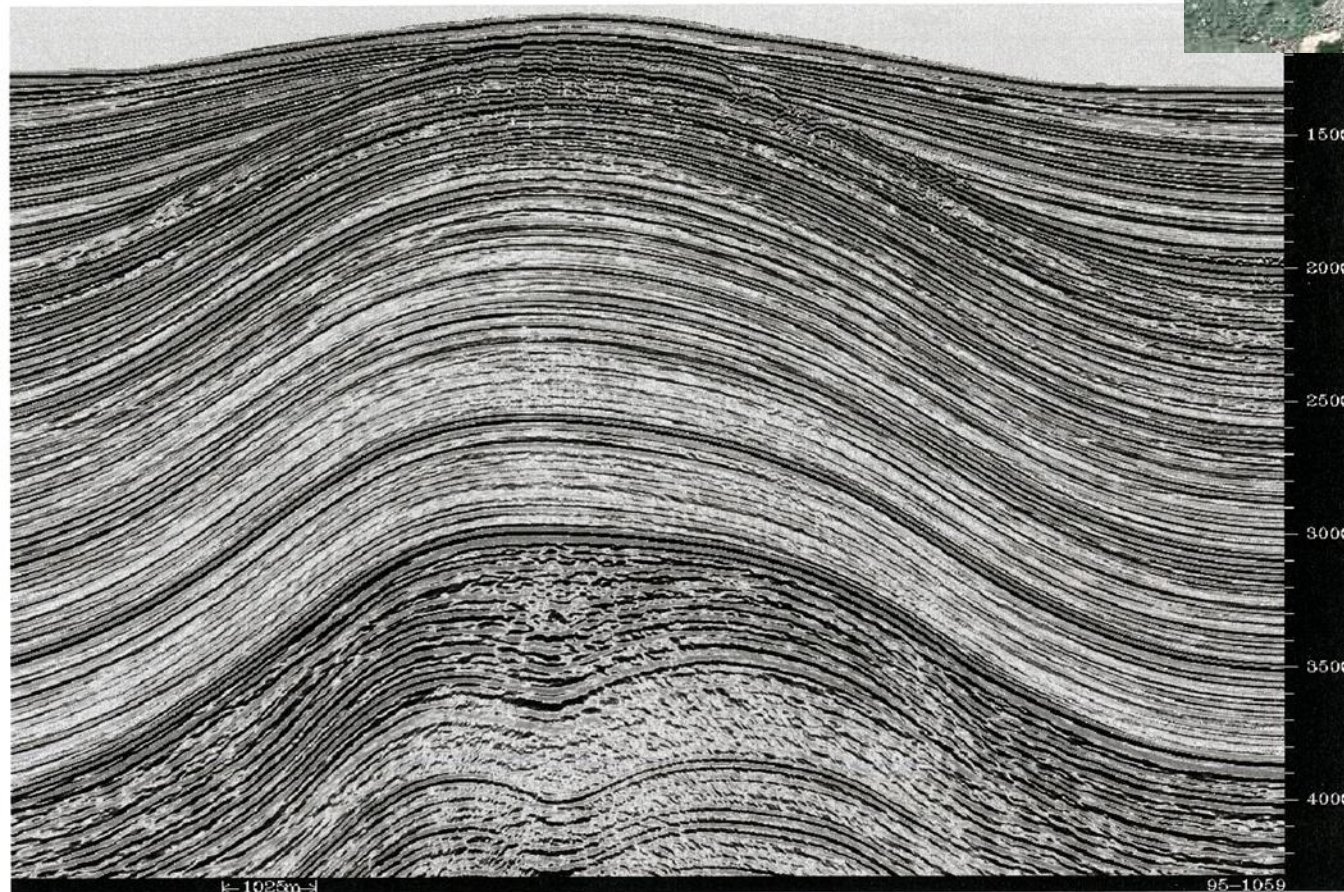
niveau de décollement



Interprétation Sismique - Extension --
Ecole Polytechnique Universitaire Pierre et Marie Curie

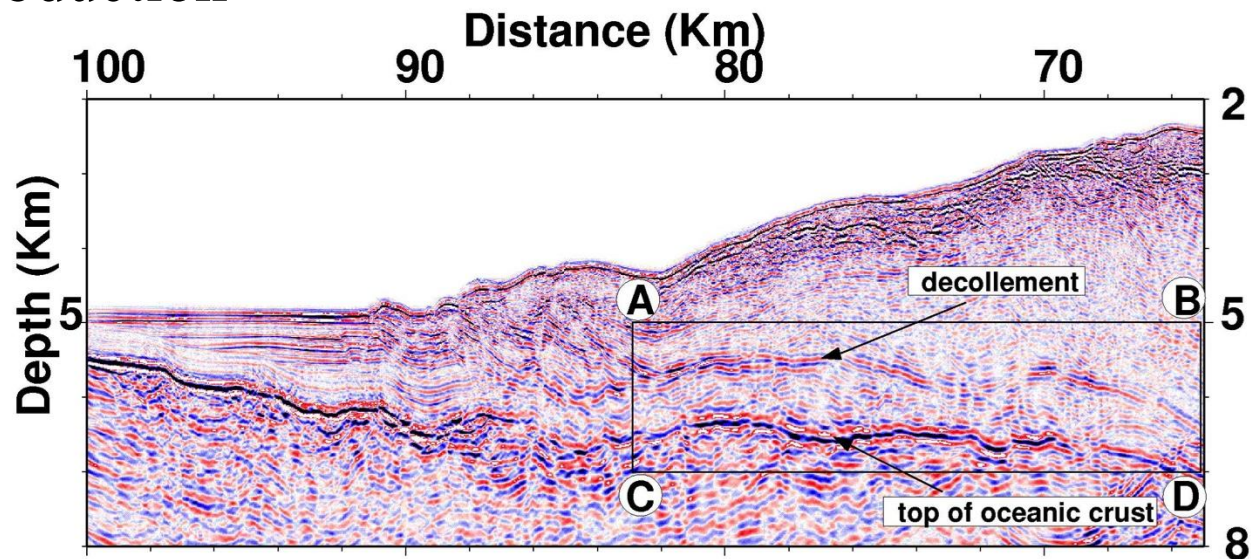
Ph. Werner, Total

CONTEXTE COMPRESSIF : Plis

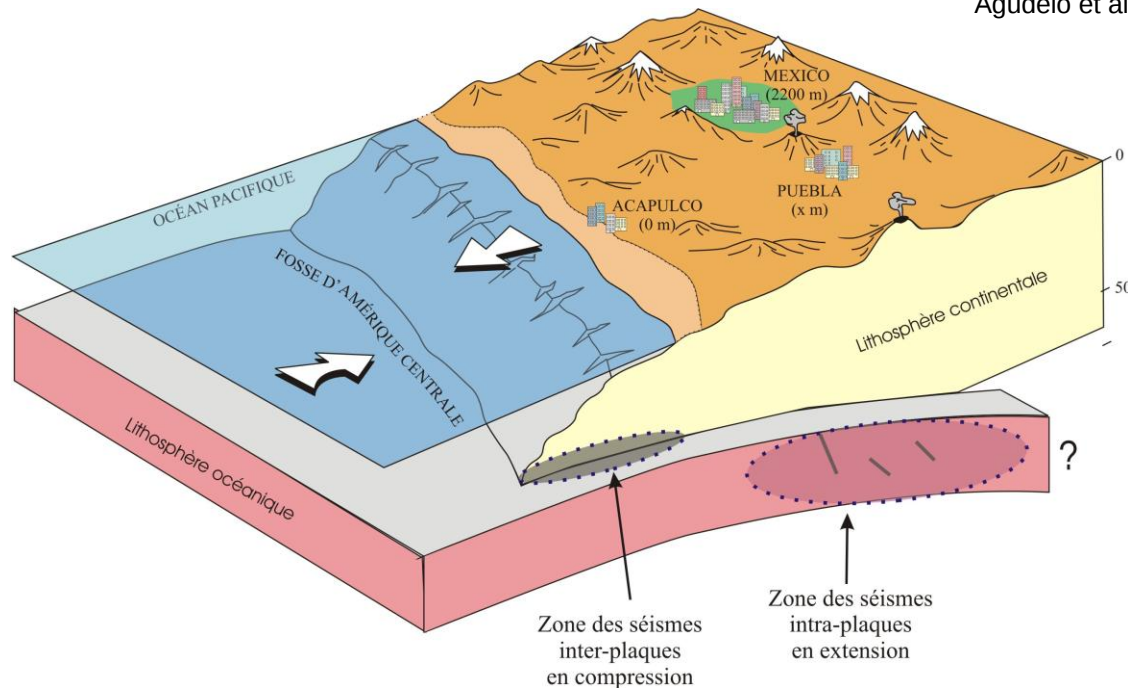


CONTEXTE COMPRESSIF :

Zone de subduction



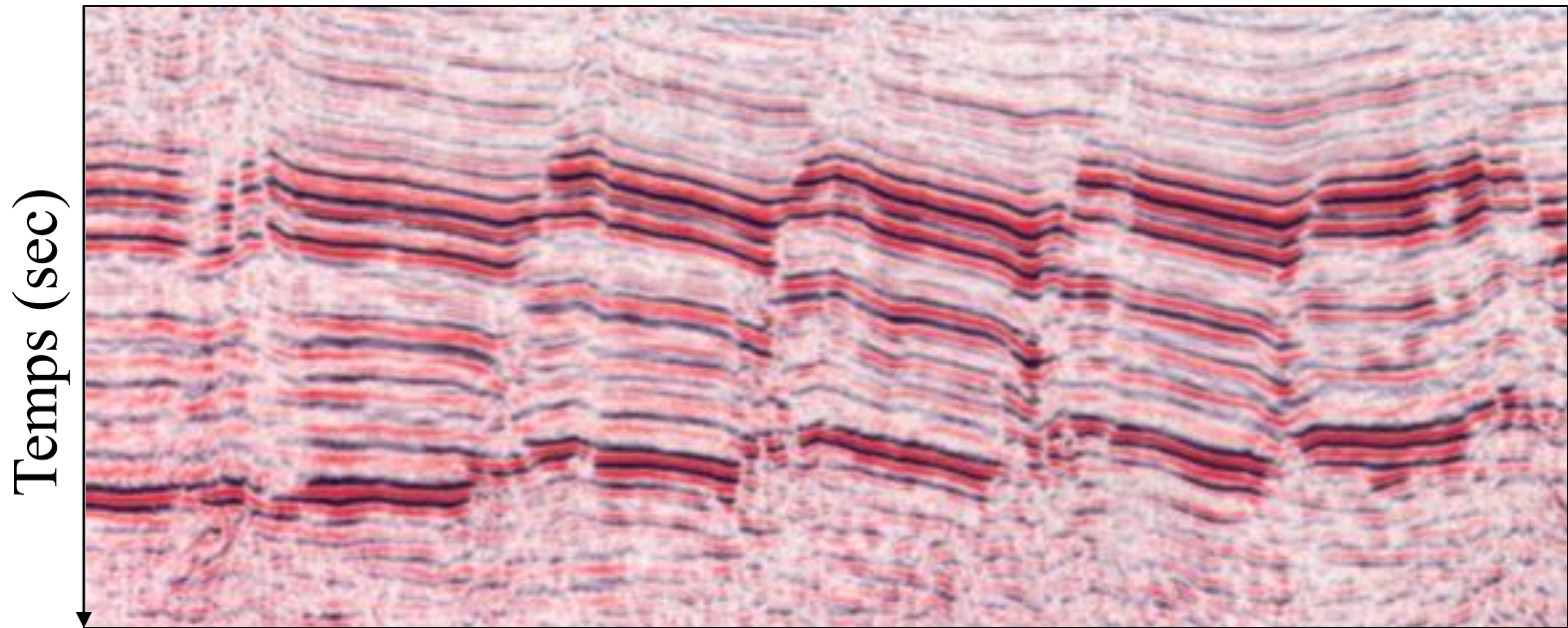
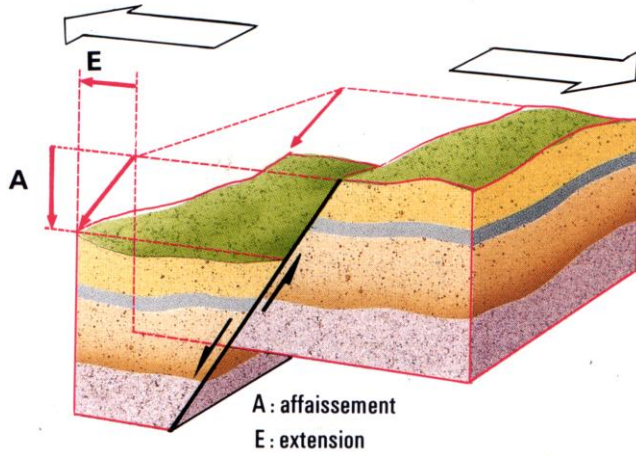
Agudelo et al. EAGE 2005



CONTEXTE EXTENSIF :

Failles normales

faille normale

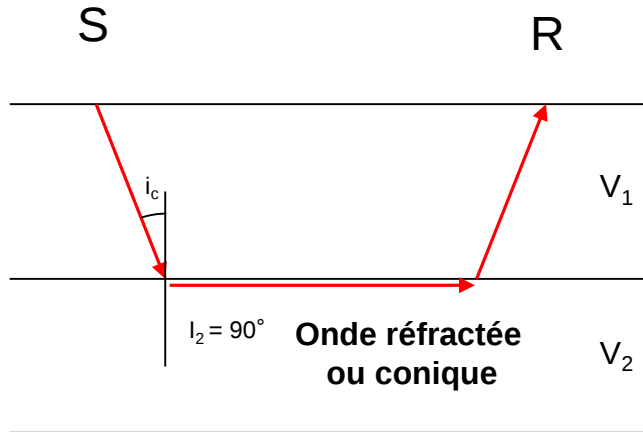


SISMIQUE REFRACTION:

Visualisation des données

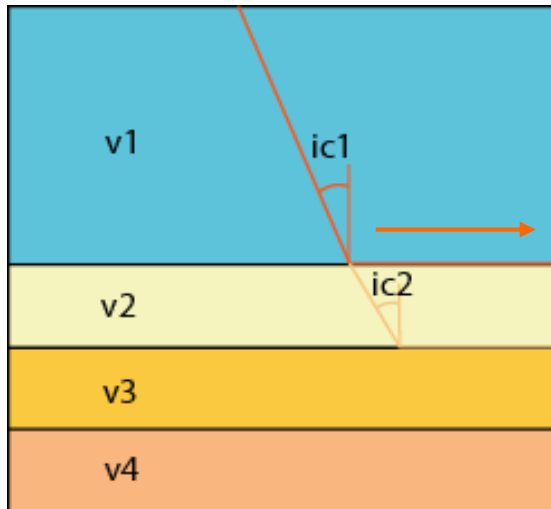
- Pointé des premières arrivées
- Modèle de vitesse et structure profonde

La réfraction se fait selon un angle critique qui obéit à la loi de Snell-Descartes:



$$i_2 = 90^\circ$$

$$i_1 = i_c \text{ (incidence critique)}$$



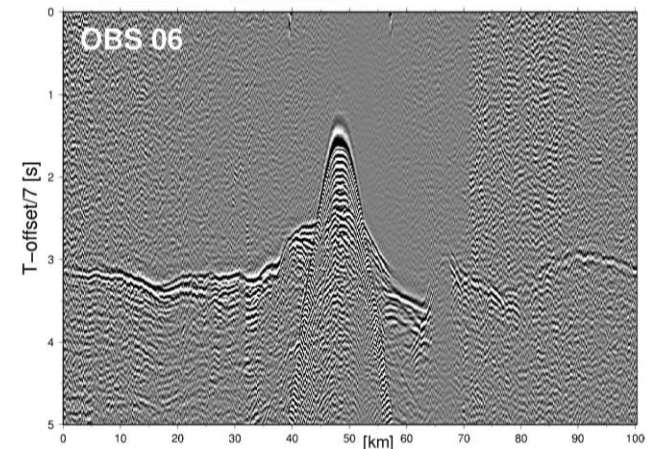
$$\sin(ic_1) = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\sin(ic_2) = \frac{v_2}{v_3}$$

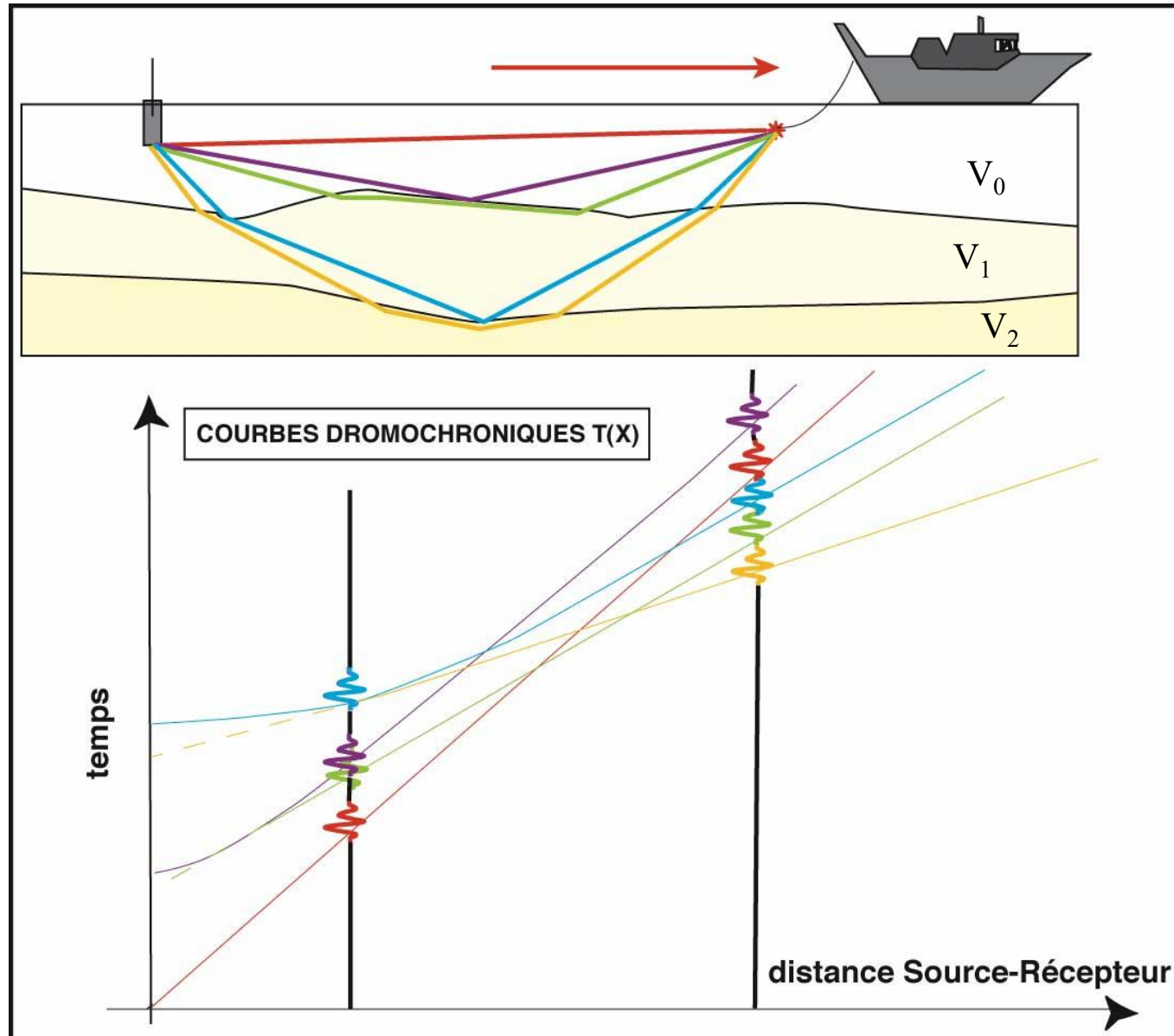
Objectif de la sismique réfraction

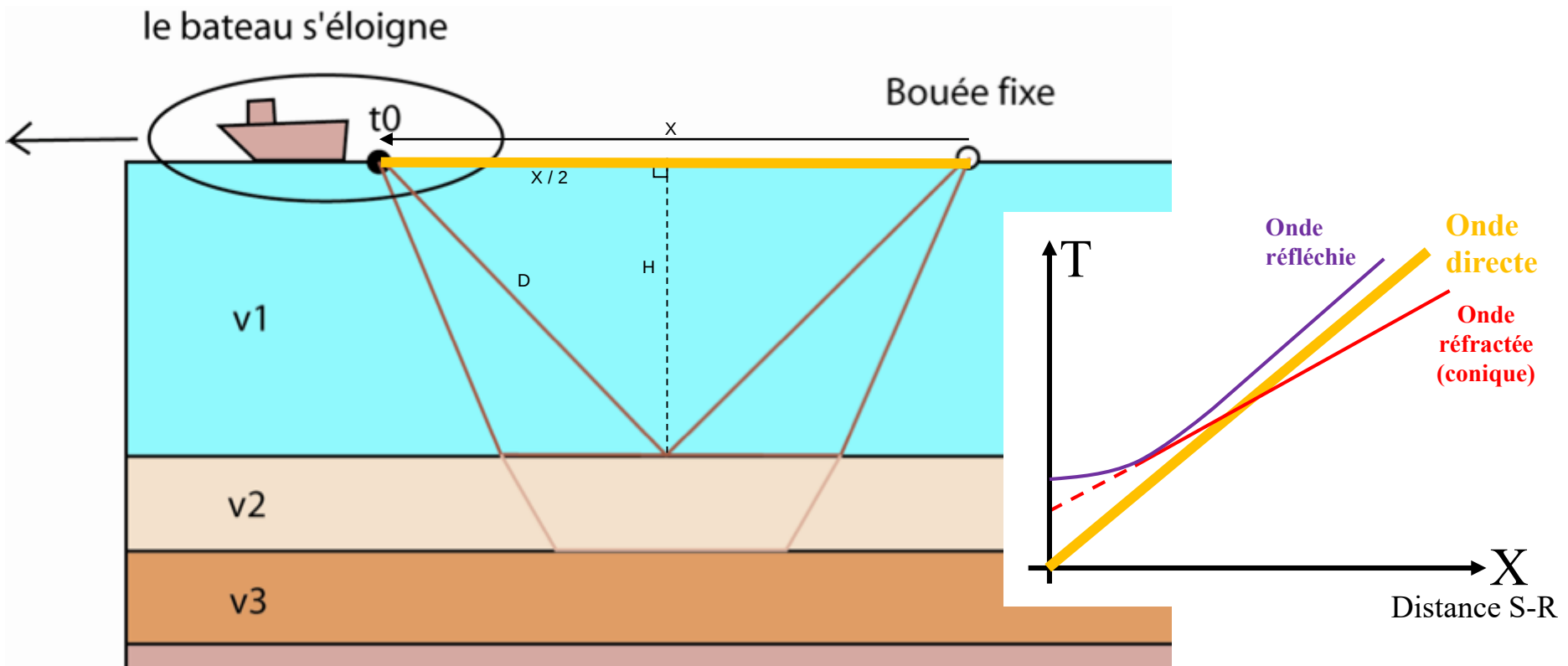
On obtient non pas une image du sous-sol « *interprétable directement* » mais des vitesses et des épaisseurs de couches, résolution plus faible.

- Structure de la croûte (épaisseurs, géométrie)
- « nature » des roches
- Autres propriétés des roches (anisotropie, poisson, ect...)
- En synergie avec MCS, gravimétrie, magnétisme, ect...



Acquisition et représentation des données de réfraction

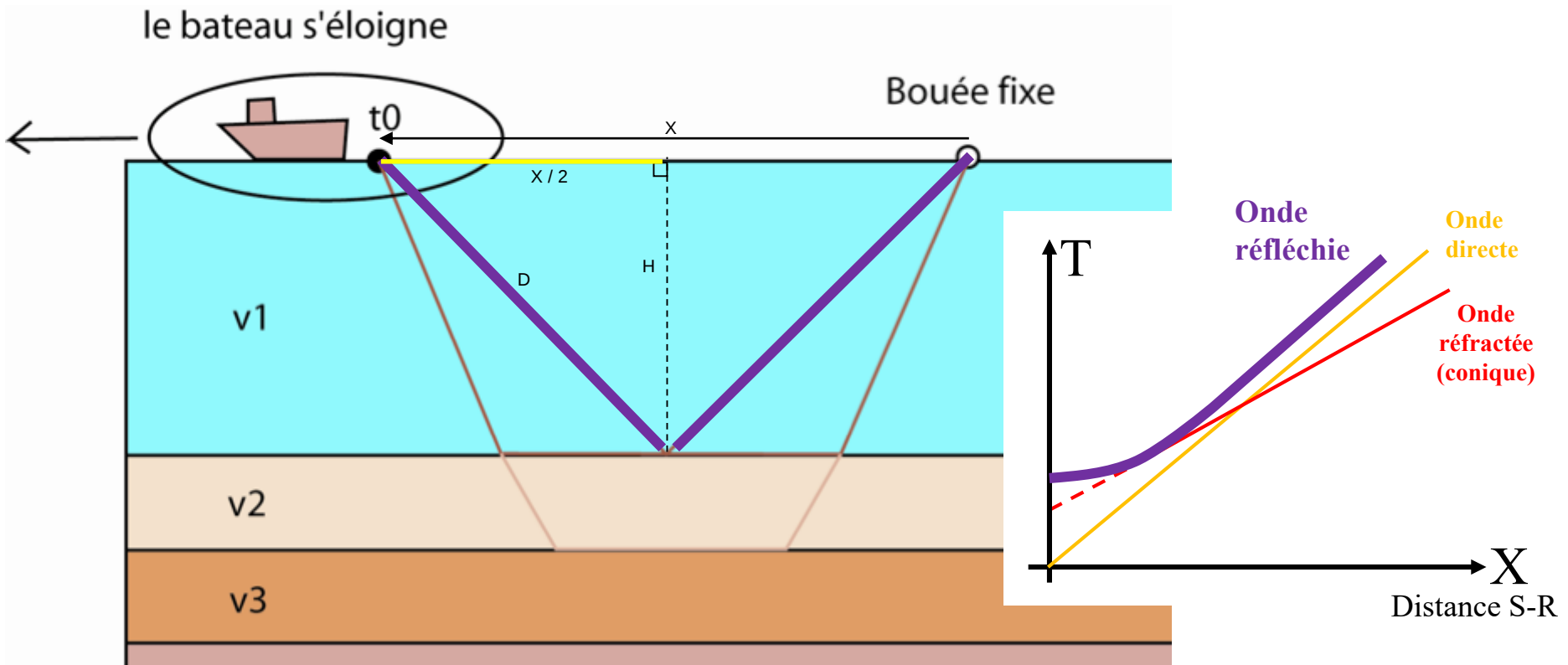




Pour l'onde directe, la distance et le temps de parcours sont:

$$T = X / V_1$$

C'est donc une droite passant par l'ordonnée à l'origine, dont la pente est $1/V_1$



Pour les **ondes réfléchies**, la distance et le temps de parcours sont:

$$D^2(X) = \left(\frac{X}{2}\right)^2 + H^2$$

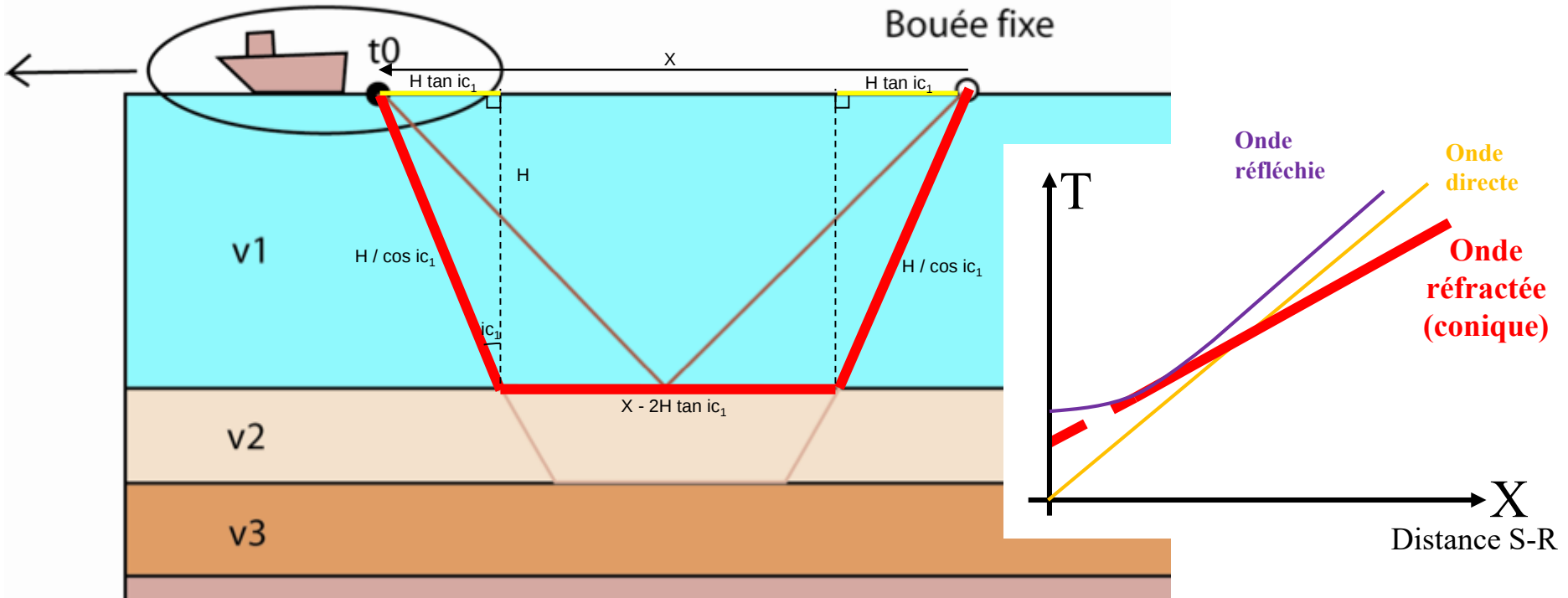
$$T^2(X) = \frac{X^2}{v^2} + \frac{4H^2}{v^2}$$

C' est donc une hyperbole, dont l' asymptote est $T = X / v$.

$$T = \frac{1}{v_1} \sqrt{X^2 + 4H^2}$$

le bateau s'éloigne

Bouée fixe

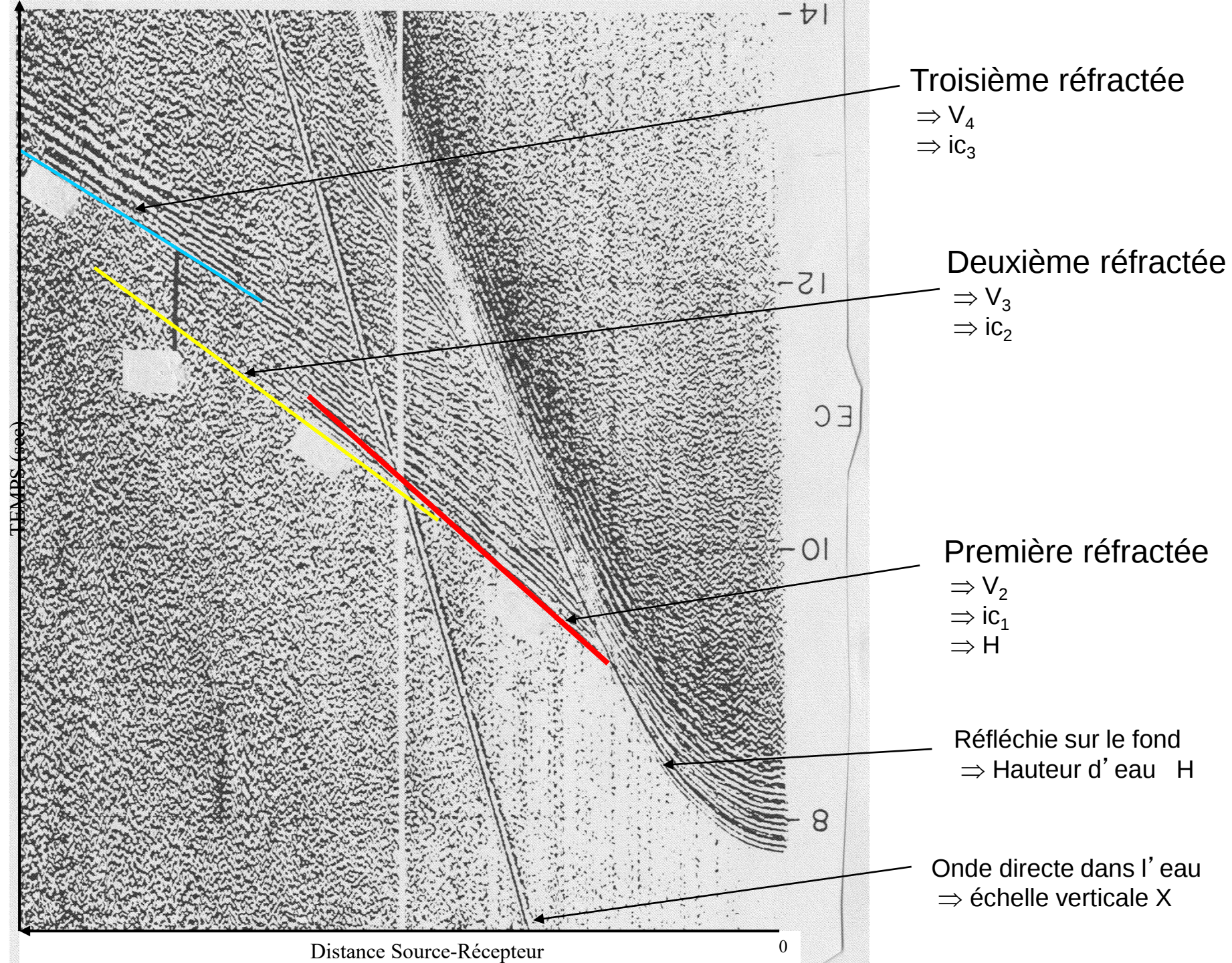


Pour la **première réfractée**, le temps de parcours est :

$$T(X) = \frac{2H}{v_1 \cos(ic_1)} + \frac{X}{v_2} - \frac{2H \tan(ic_1)}{v_2}$$

$$T(X) = \frac{2H \cos(ic_1)}{v_1} + \frac{X}{v_2}$$

C' est donc une droite, dont la pente est $1/v_2$



CONCLUSION

Deux méthodes bien différentes mais complémentaires:

- **Sismique réflexion:** distance S-R fixe, obtention d'un profil sismique s'apparentant à une « échographie du sous-sol ». Interprétation des formations et structures superficielles à profondes.
- **Sismique réfraction:** distance S-R augmente, obtention d'un diagramme « dromochronique » permettant d'obtenir les vitesses de propagation des ondes et les épaisseurs des formations traversées. Objectif plus profond, résolution plus faible.