

Géophysique marine

Les Campagnes océanographiques Méthodes d'imagerie sismique

Elia d'Acremont

Institut des Sciences de la Terre de Paris

Sorbonne Université





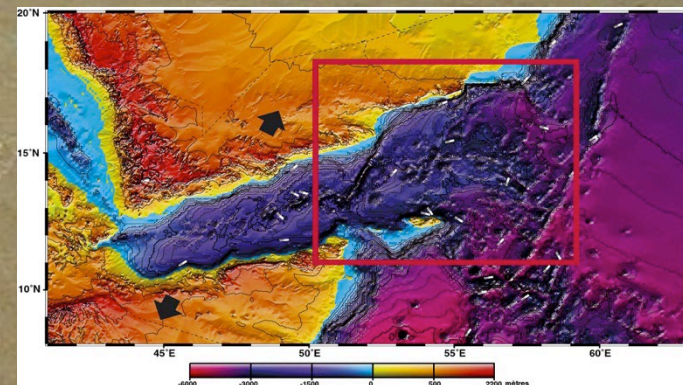
En Mer :

Les campagnes océanographiques

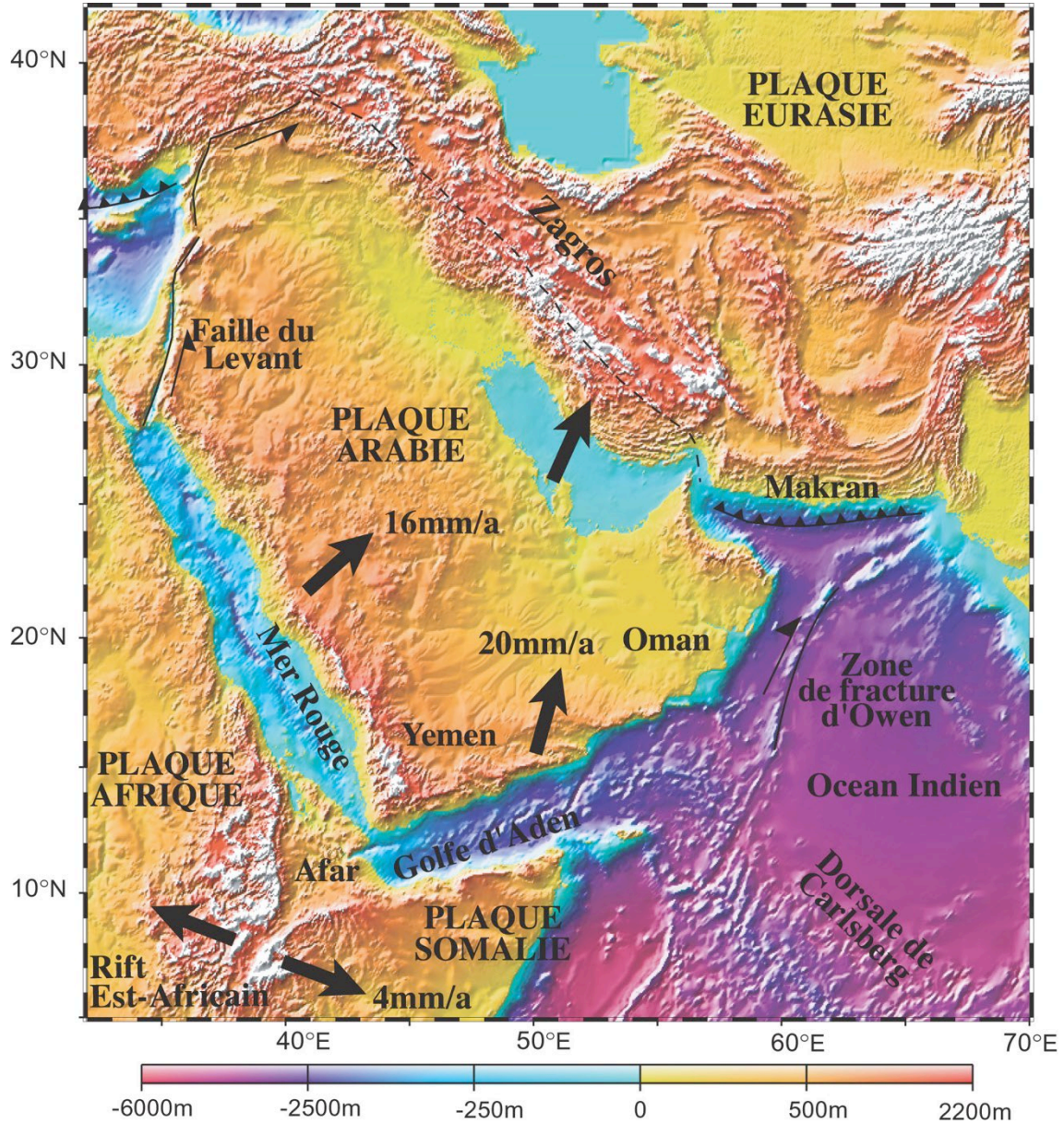
CAMPAGNE ENCENS-SHEBA



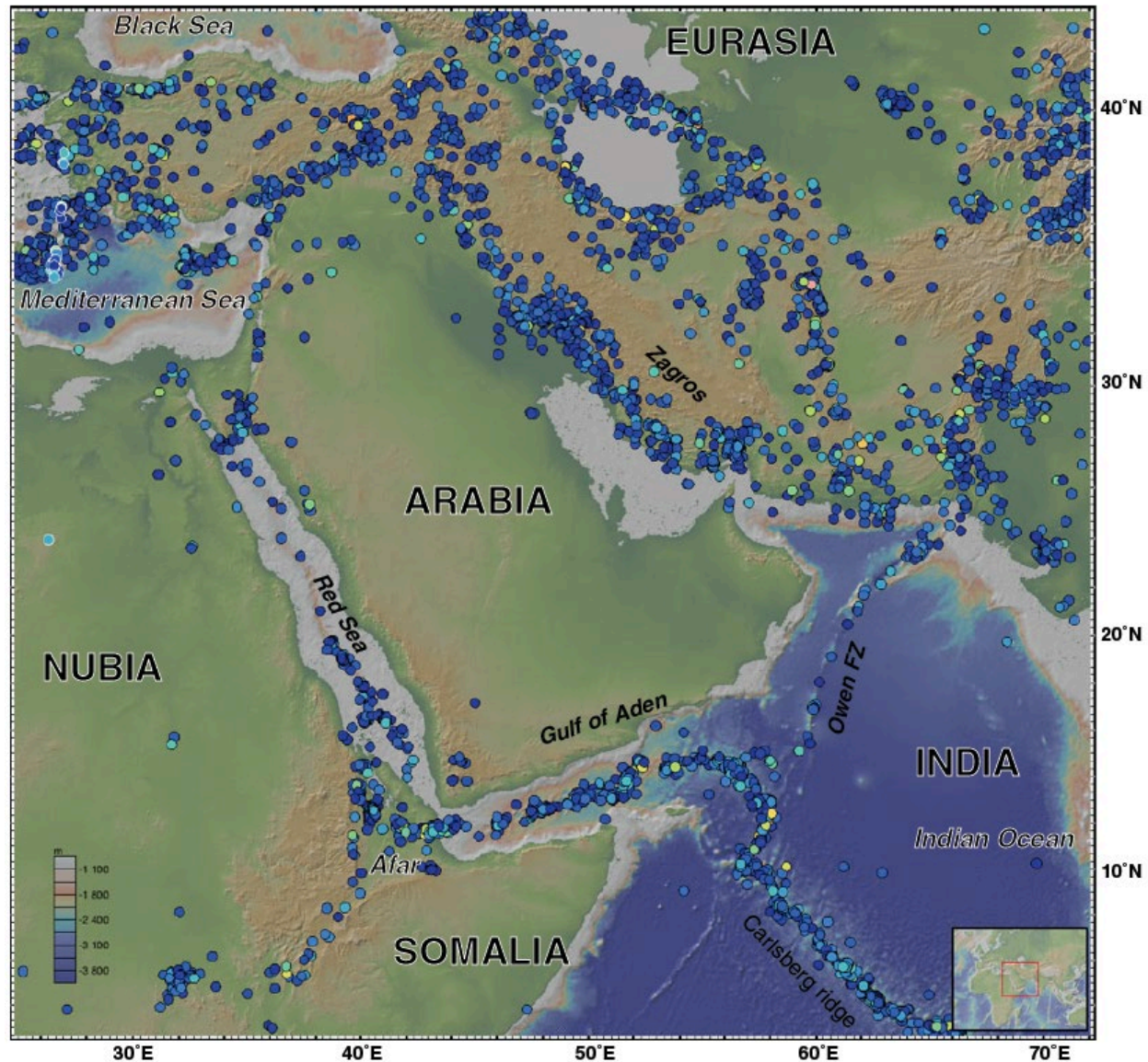
Leroy et al 2004



La plaque Arabe



La plaque Arabe



LES DONNÉES ACQUISES :

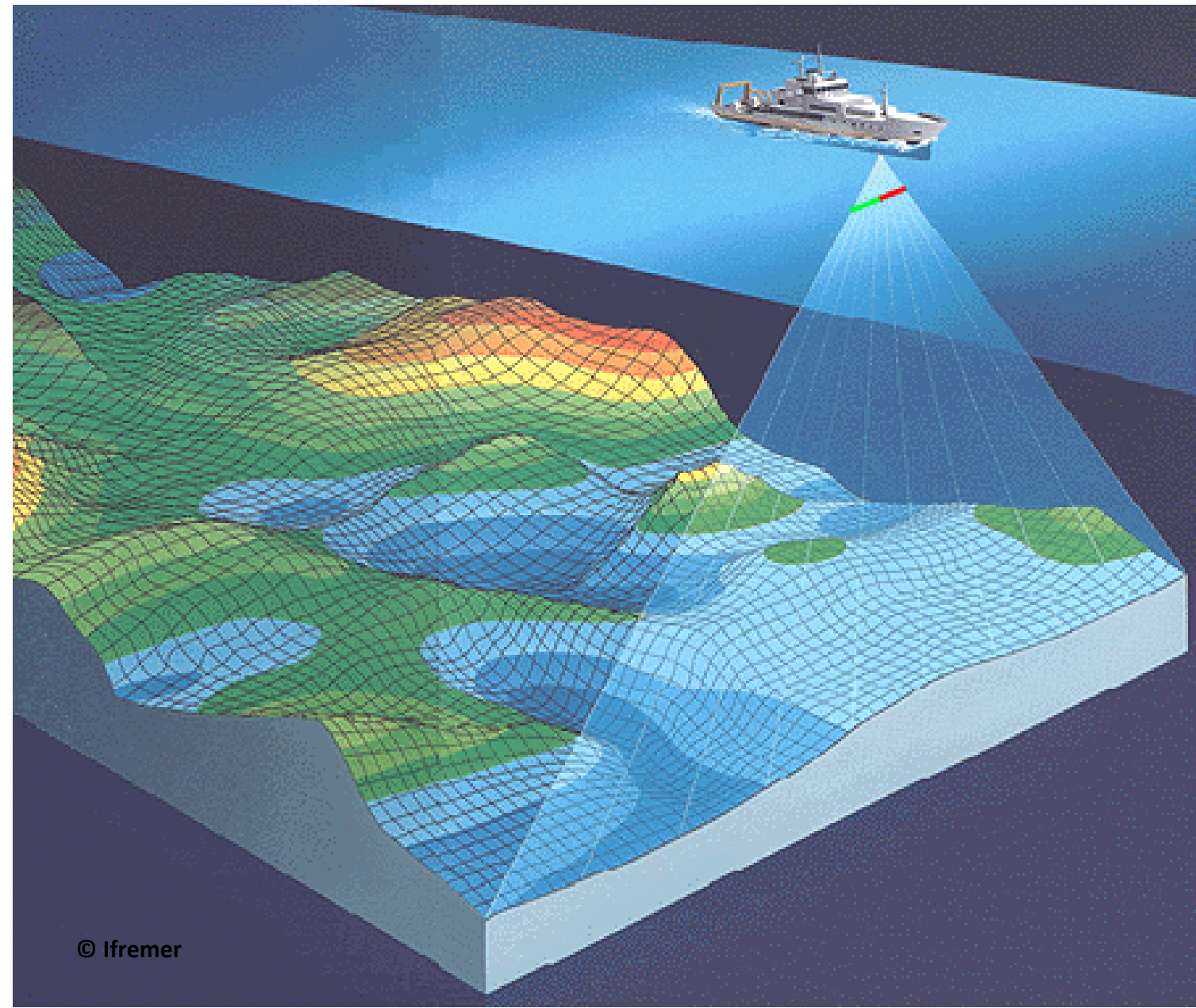
- ✓ Bathymétrie multifaisceaux
- ✓ Flux de Chaleur
- ✓ Magnétisme
- ✓ Echantillonnage des reliefs sous-marins
- ✓ Sismique Réflexion
- ✓ Sismique Réfraction

LES DONNÉES ACQUISES :

La Bathymétrie multifaisceaux

Cartographie du fond des océans

La Bathymétrie multifaisceaux

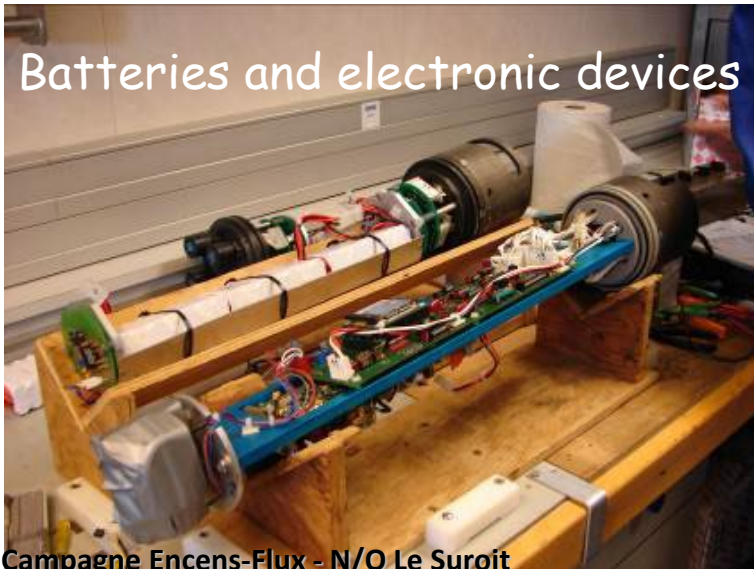
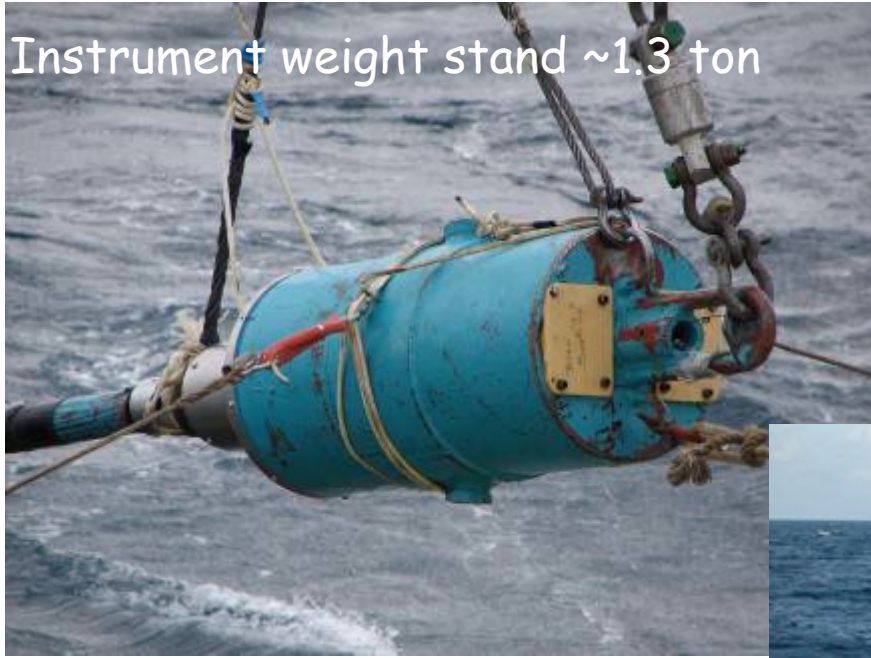


LES DONNÉES ACQUISES :

Les mesures de flux de chaleur

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

Instrument de mesure



Lucazeau et al 2007

LES DONNÉES ACQUISES :

Les anomalies magnétiques

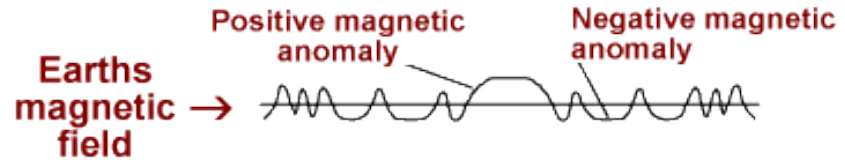
Dater les fonds des océans

Estimer les vitesses d'expansion océanique

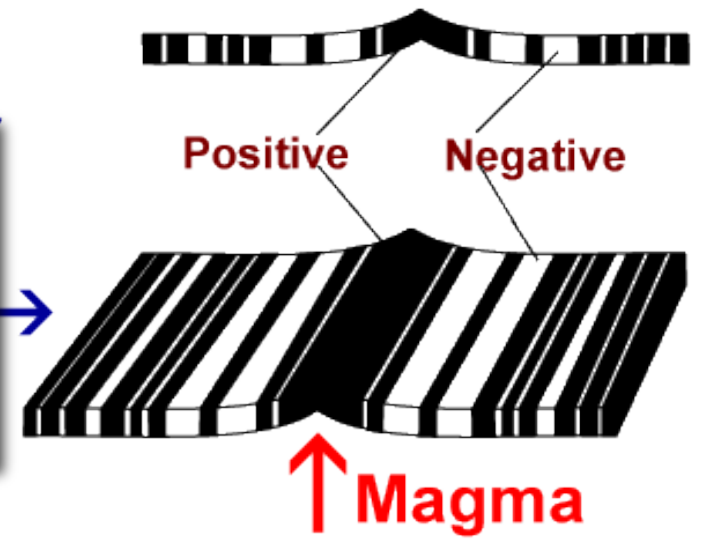
Instrument de mesure



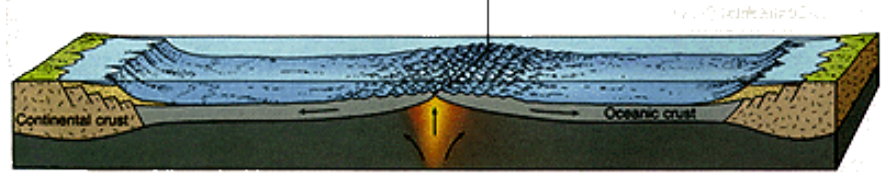
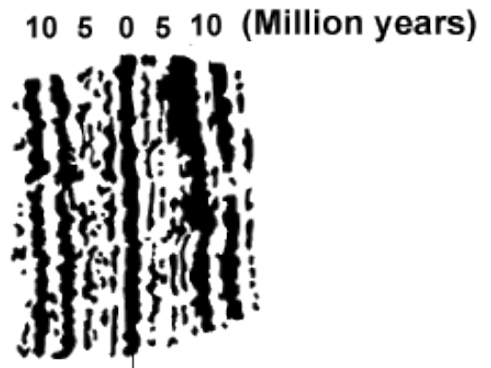
Les anomalies magnétiques



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



LES DONNÉES ACQUISES :

Echantillonnage des reliefs sous-marins

Connaître la nature et l'âge des reliefs sous-marins

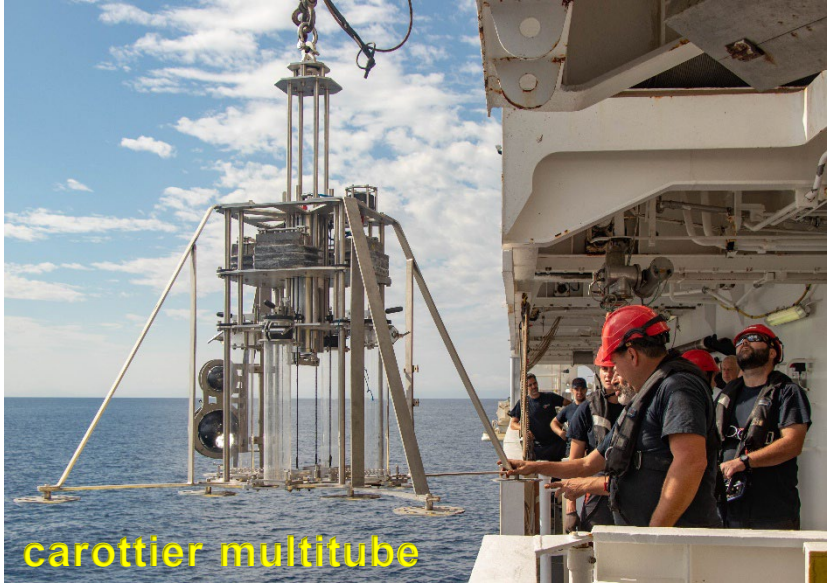
Echantillonnages et carottes sédimentaires



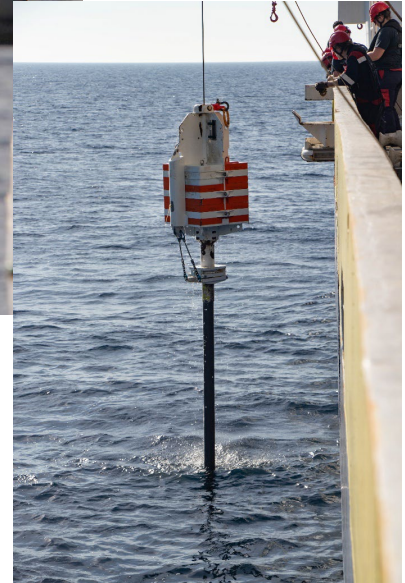
Dragage



Carottier

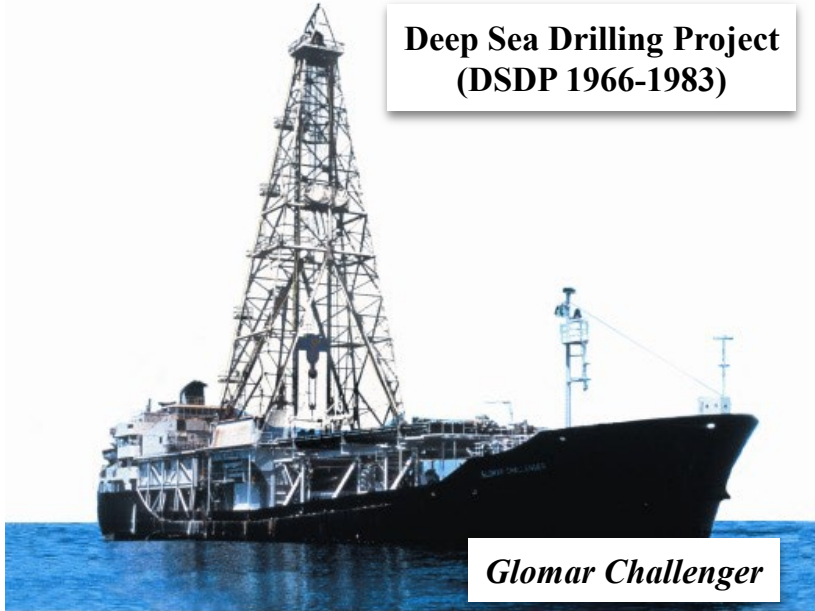


carottier multitube



50 ans de forage dans les océans

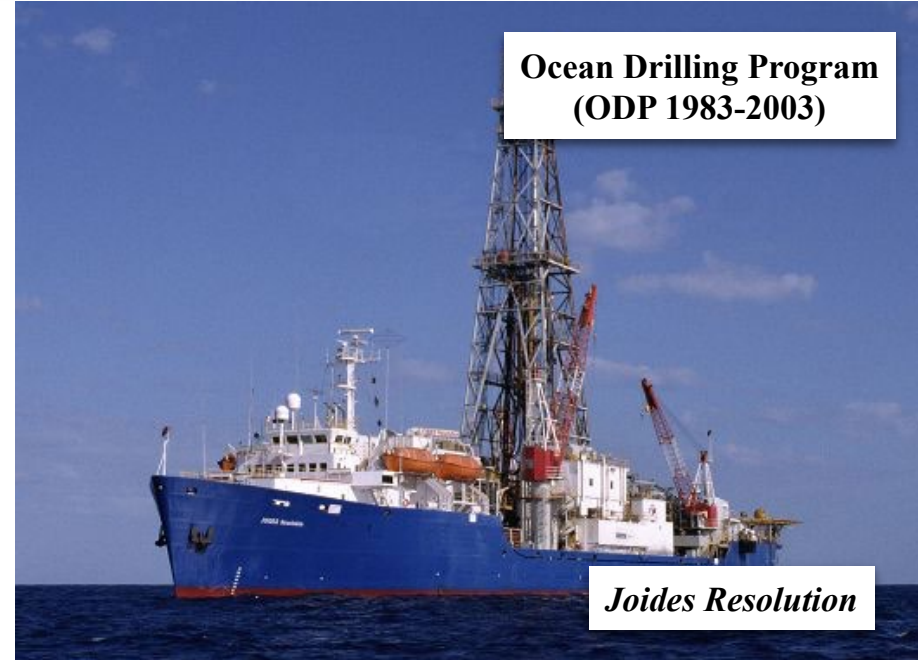
**Deep Sea Drilling Project
(DSDP 1966-1983)**



Glomar Challenger

SIO Archives/UCSD

**Ocean Drilling Program
(ODP 1983-2003)**



Joides Resolution

**Integrated Ocean Drilling Program
(IODP 2003-aujourd'hui)**

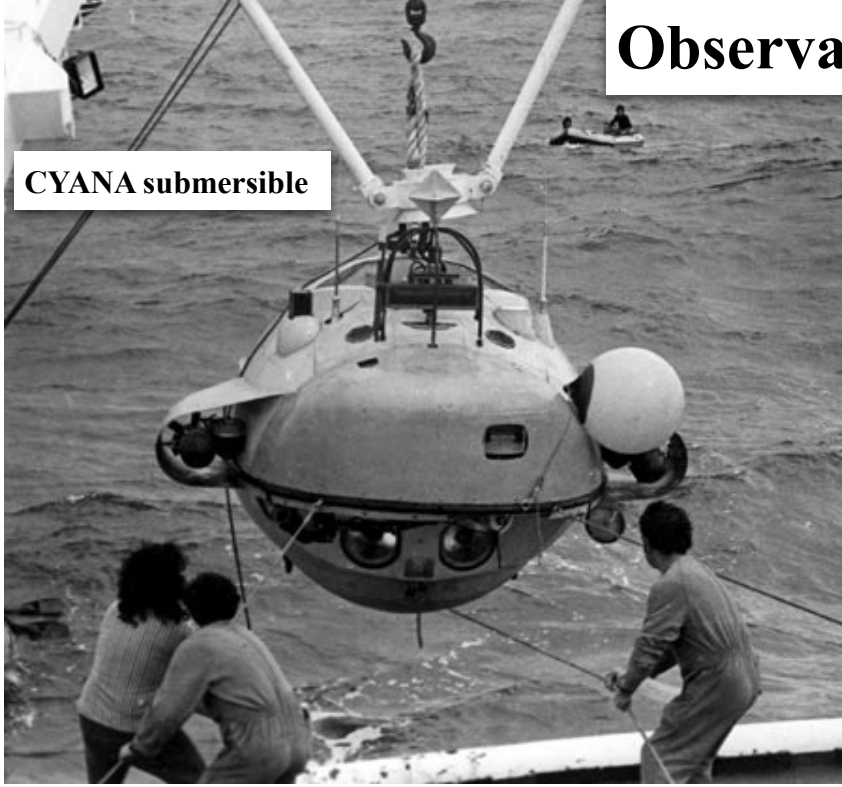


ちきゅう
CHIKYU

Chikyu + Joides Resolution

Observations sous-marine

CYANA submersible



ALVIN submersible



La campagne franco-américaine
« FAMOUS »
(French-American Mid Ocean Undersea
Survey) sur la dorsale médio-atlantique

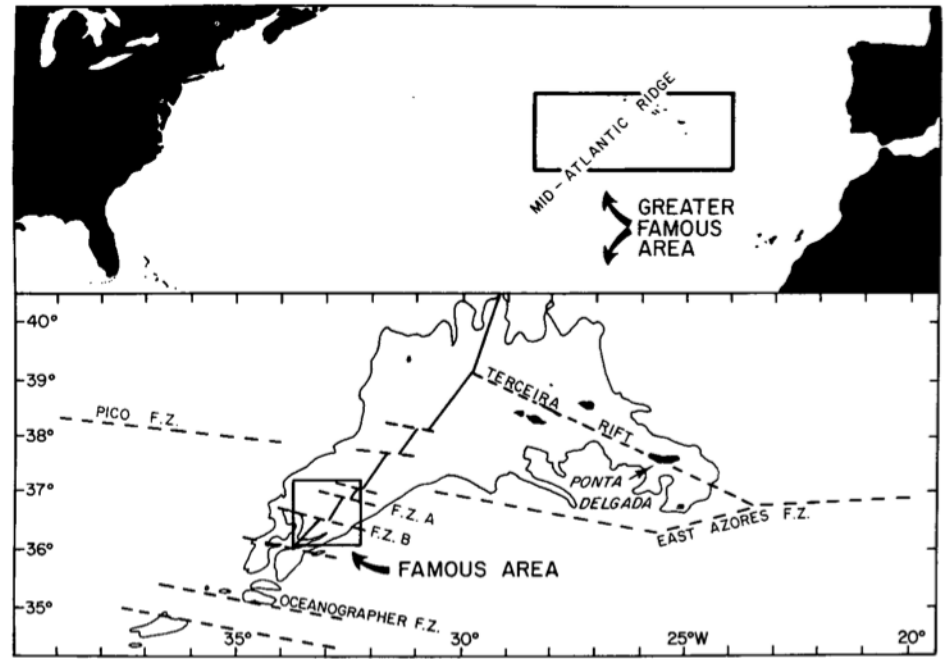
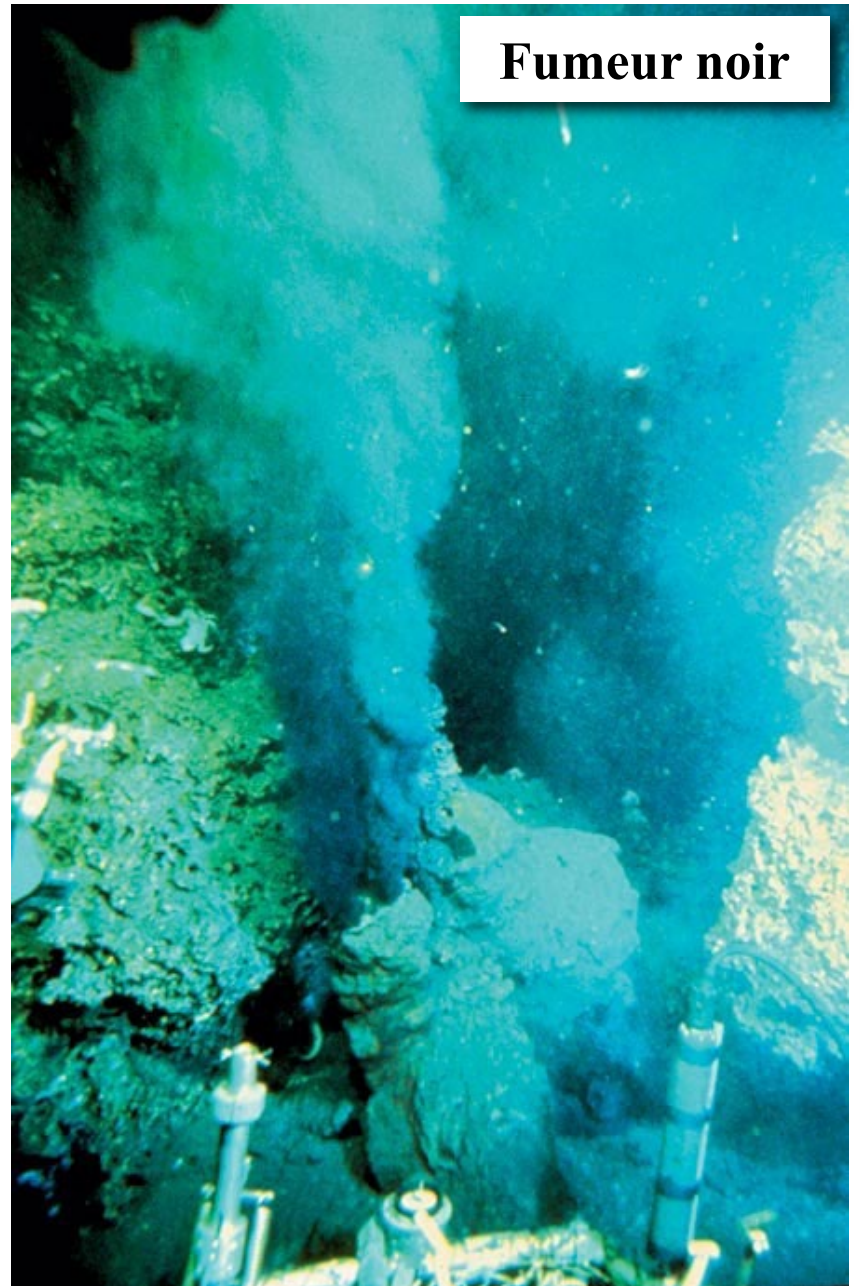


Figure 2. Greater FAMOUS and FAMOUS areas. The 2,000-m isobath is shown in the lower figure.

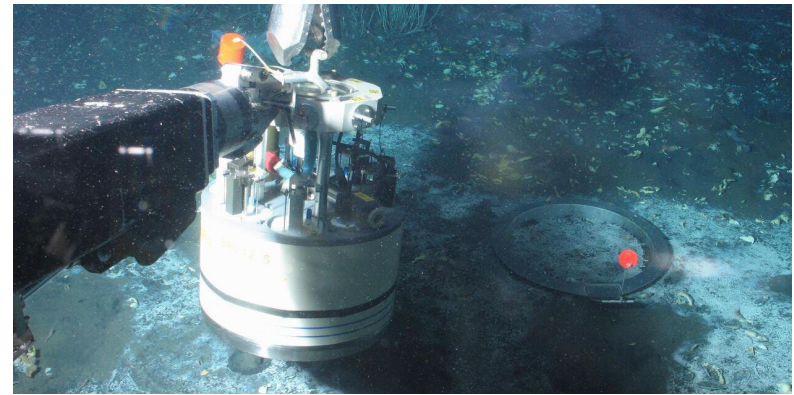
Pillows lavas



Fumeur noir



Observations sous-marine



LES DONNÉES ACQUISES :

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

IMAGERIE SISMIQUE

- ✓ Sismique Réflexion
- ✓ Sismique Réfraction

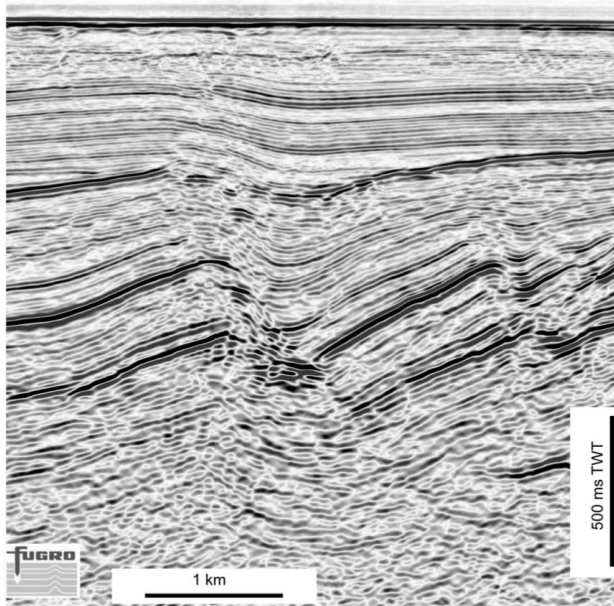
1) Principes

2) Dispositif d'acquisition sismique

3) Visualisation des données

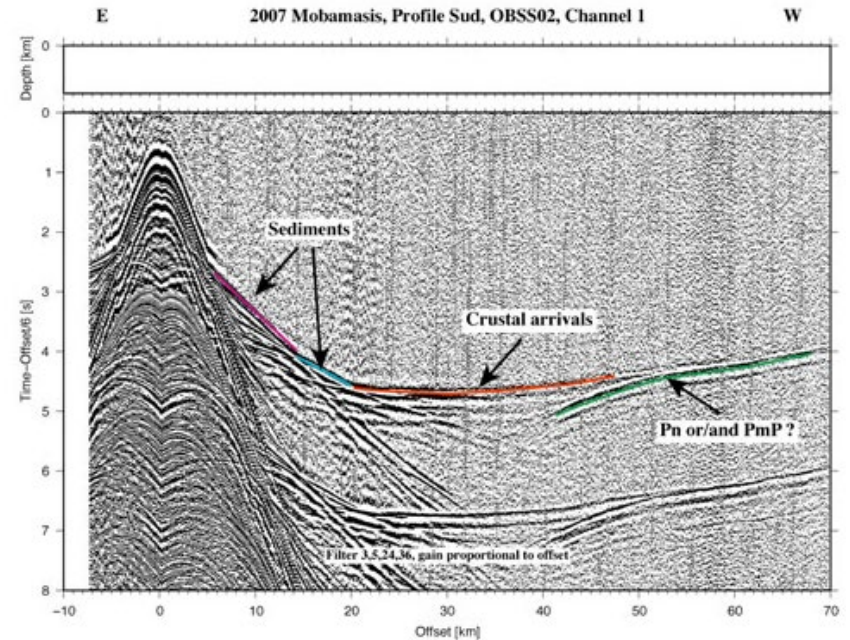
4) Exemples de profils

Ne pas confondre



Sismique réflexion

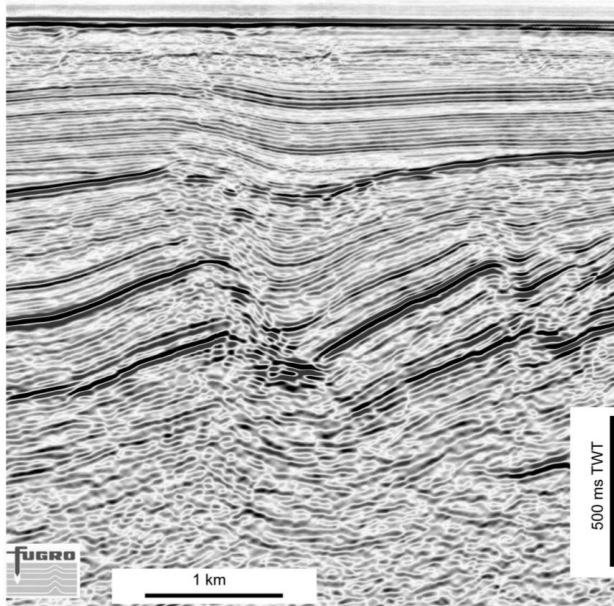
Source artificielle / active
Cible: Ecorce terrestre
superficielle (cm > 30km)



Sismique réfraction

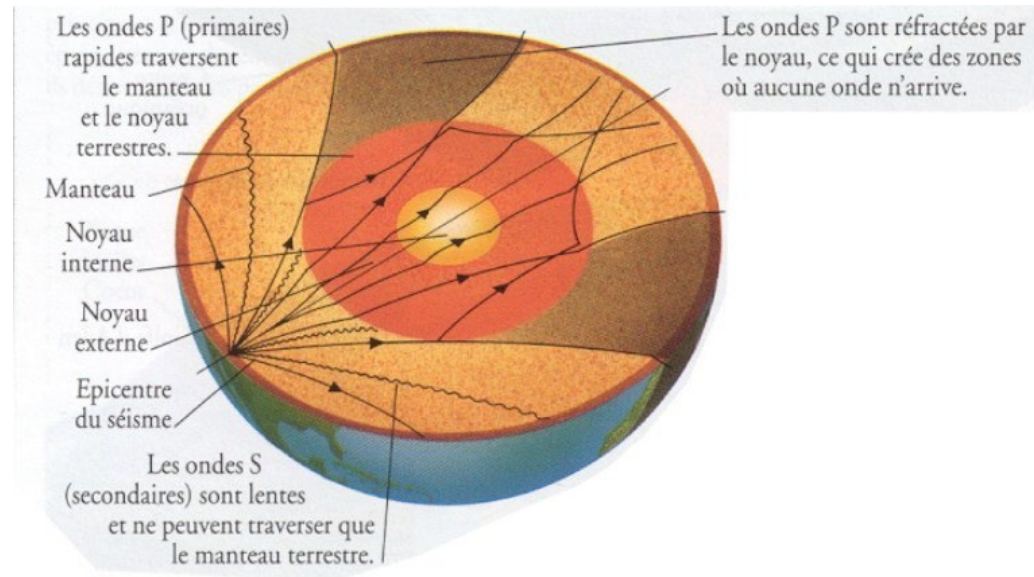
Source artificielle / active
Cible: échelle crustale
superficielle (1km > 30km)

Ne pas confondre



Sismique réflexion

Source artificielle / active
Cible: Ecorce terrestre superficielle (cm > 30km)

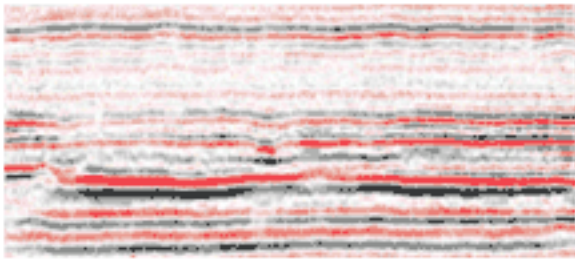


Sismologie

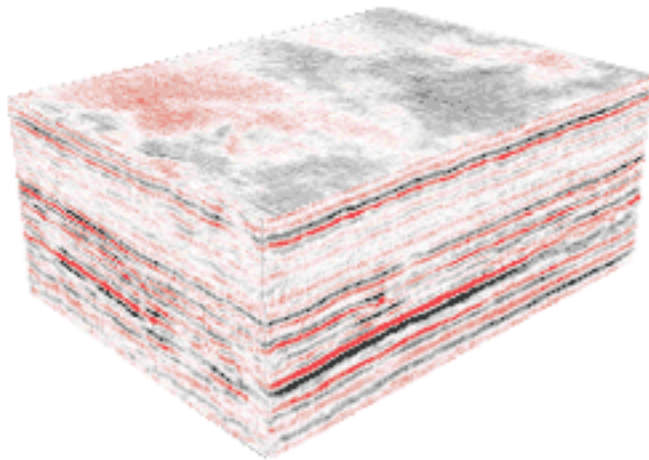
Source naturelle/ passive (séismes)
Cible: structure terrestre profonde (- > 6378 km)

IMAGERIE SISMIQUE

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



2D seismic reflection



3D seismic reflection

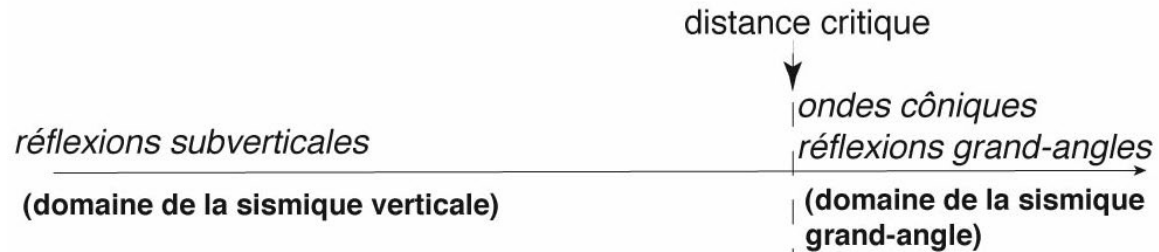
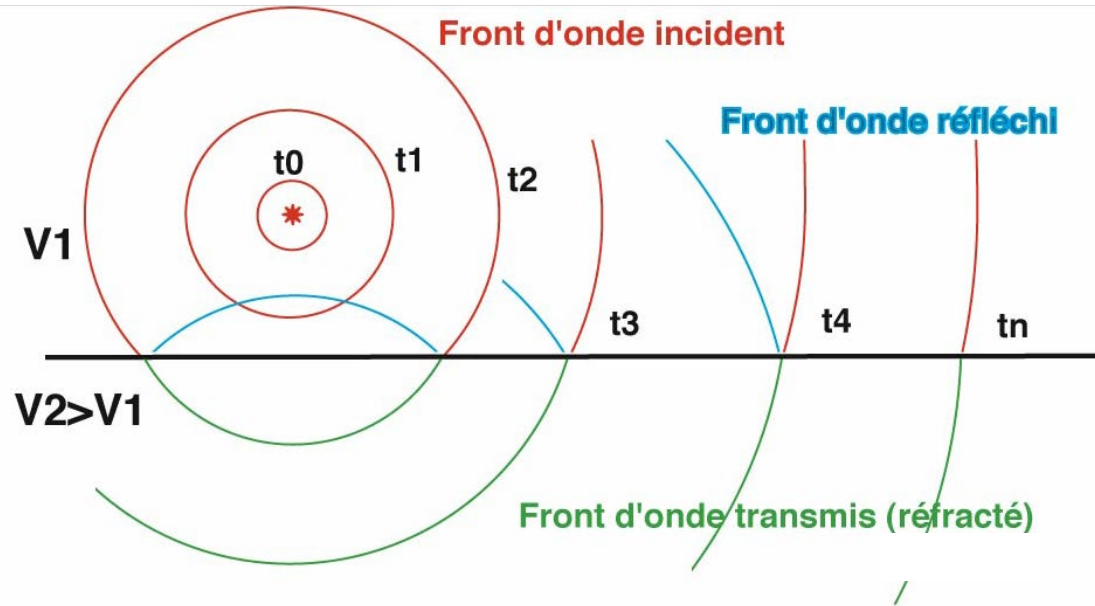
Intérêts académique et industriel:

- Topographie du socle
- Délinéation des zones fracturées
- Etude stratigraphique et structurale
- Recherche de réservoirs

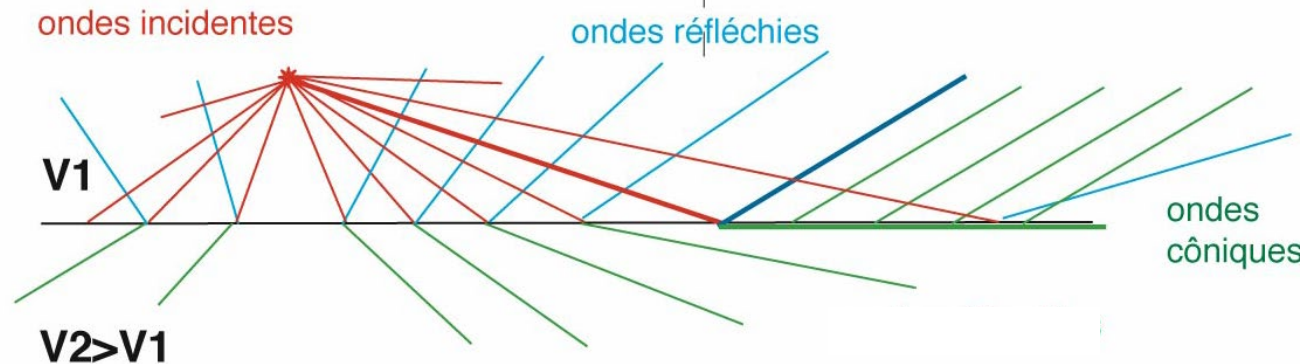
PRINCIPES DE LA SISMIQUE :

Réflexion / Réfraction

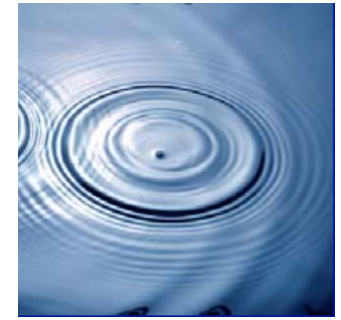
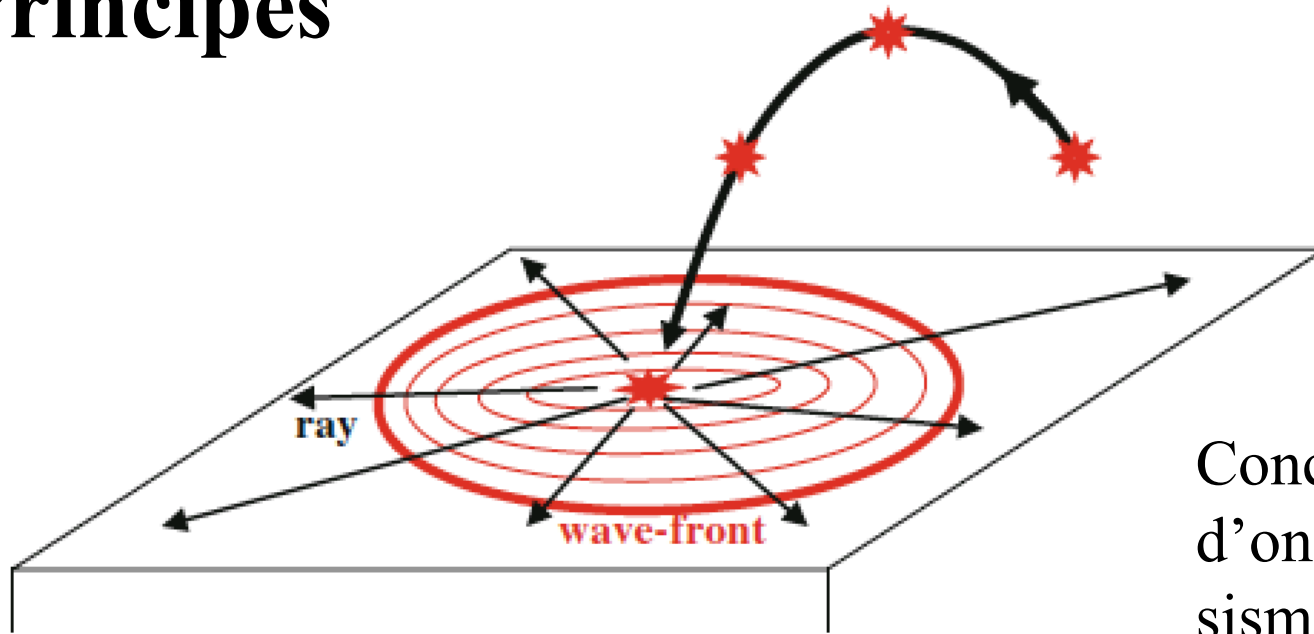
Principes



Les rais sismiques sont toujours orthogonaux au front d'onde

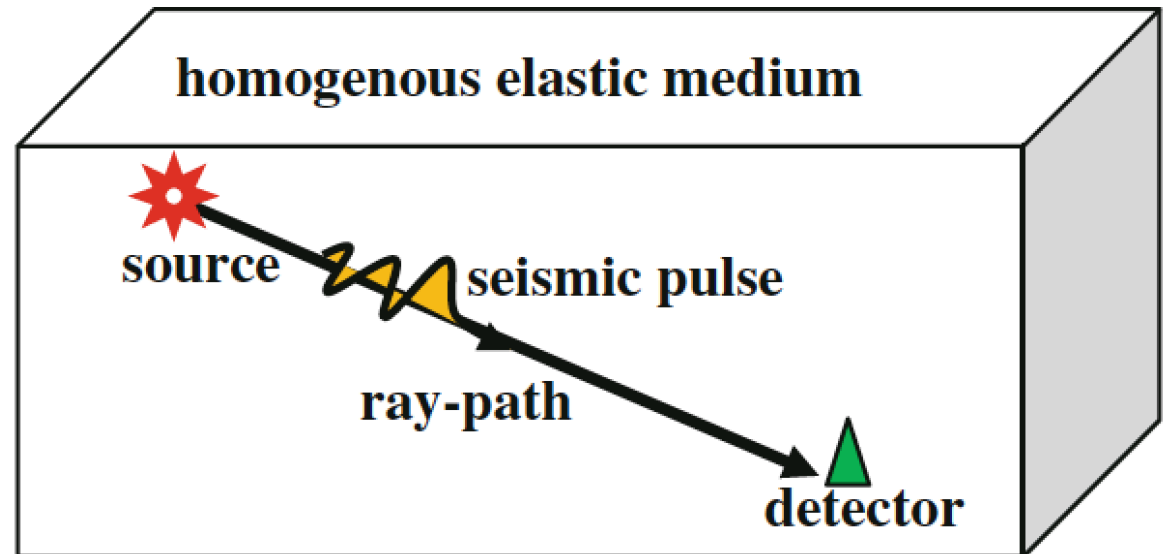


Principes



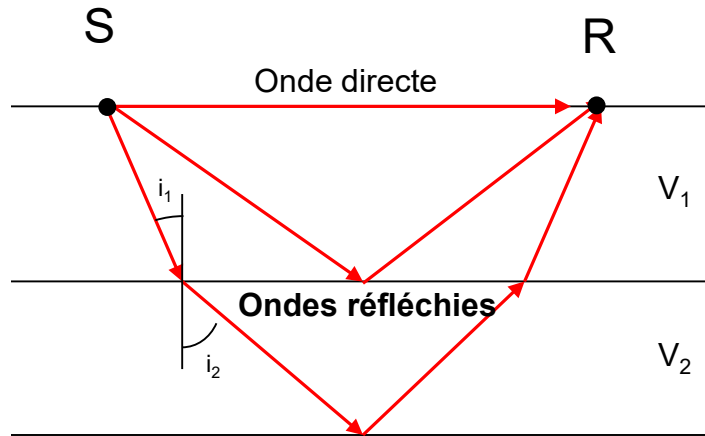
Concepts des fronts d'ondes et des raies sismiques

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

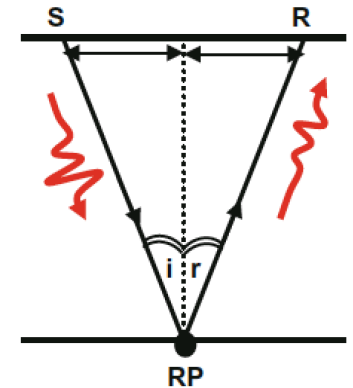


Principes

Loi de Snell-Descartes



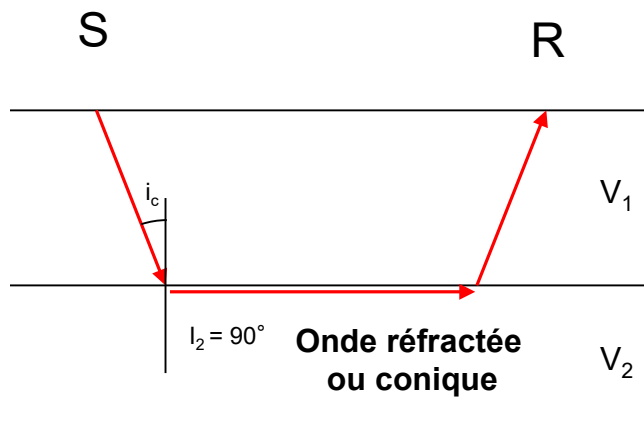
$$\frac{\sin i_1}{v_1} = \frac{\sin i_2}{v_2}$$



- Propagation des ondes acoustiques

Ces lois sont celles de l'optique

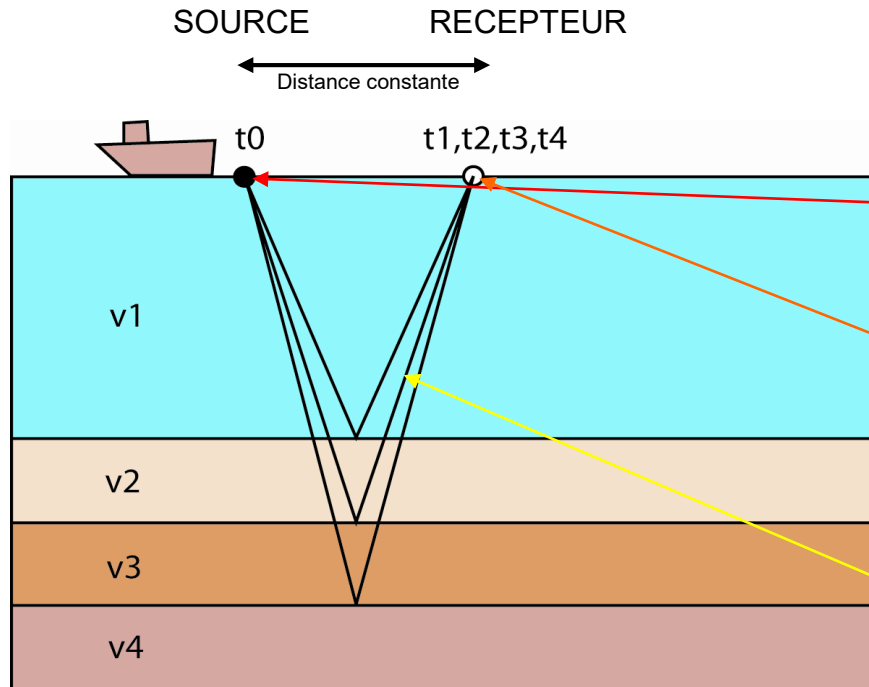
Cas particulier :



$$i_2 = 90^\circ$$
$$i_1 = i_c \text{ (incidence critique)}$$

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

La sismique réflexion



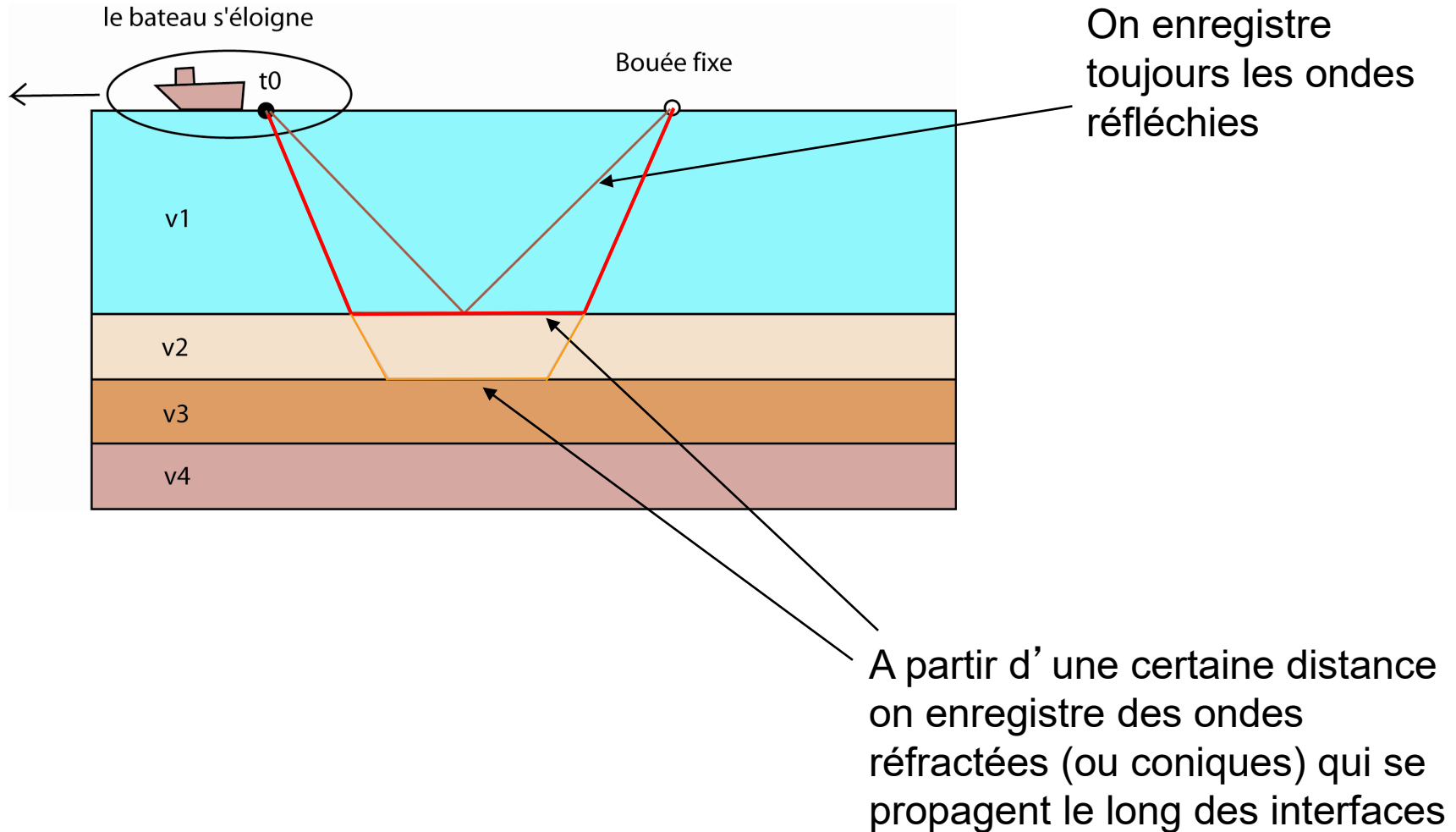
La source (un canon à air le plus souvent) émet une **onde acoustique** au temps t_0 .

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



ACQUISITION SISMIQUE :

*Les Campagnes
Océanographiques*

Navires côtiers

N/O Côtes de la Manche



Navires semi-hauturier

N/O Antéa



© IFREMER

Navires hauturiers

N/O Pourquoi Pas ?



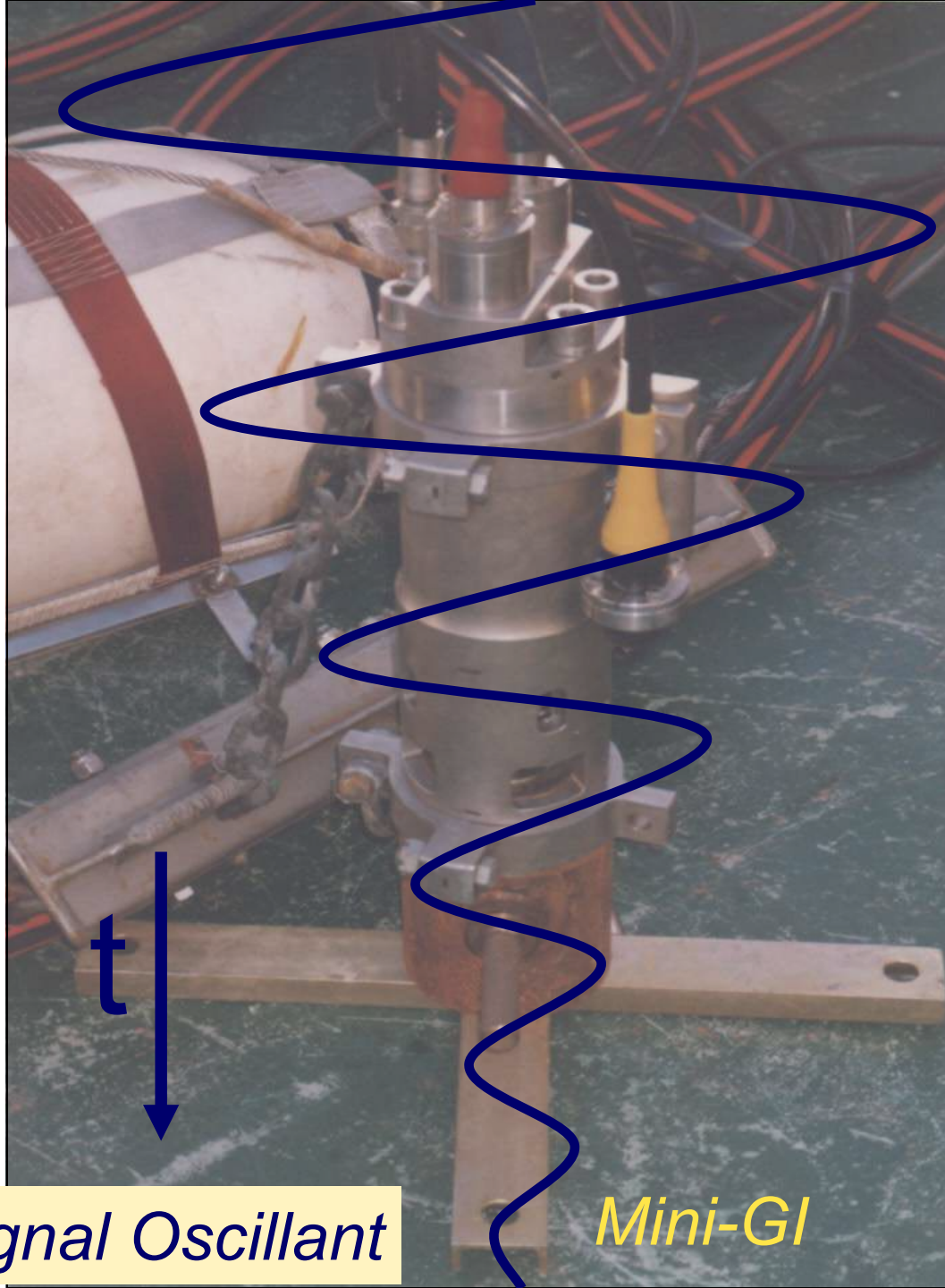
Navires hauturiers

N/O Marion Dufresne



La Source:
le canon à air

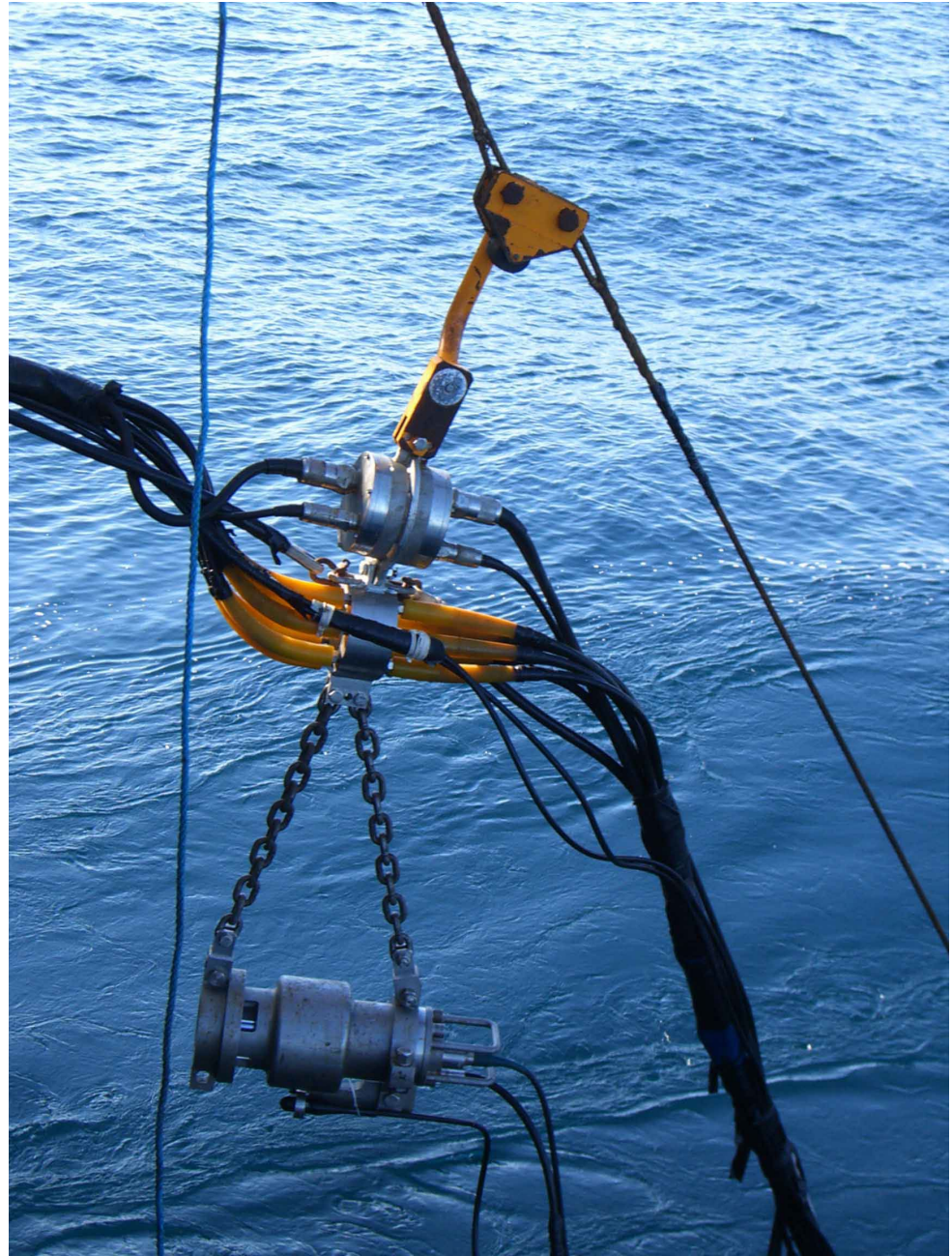
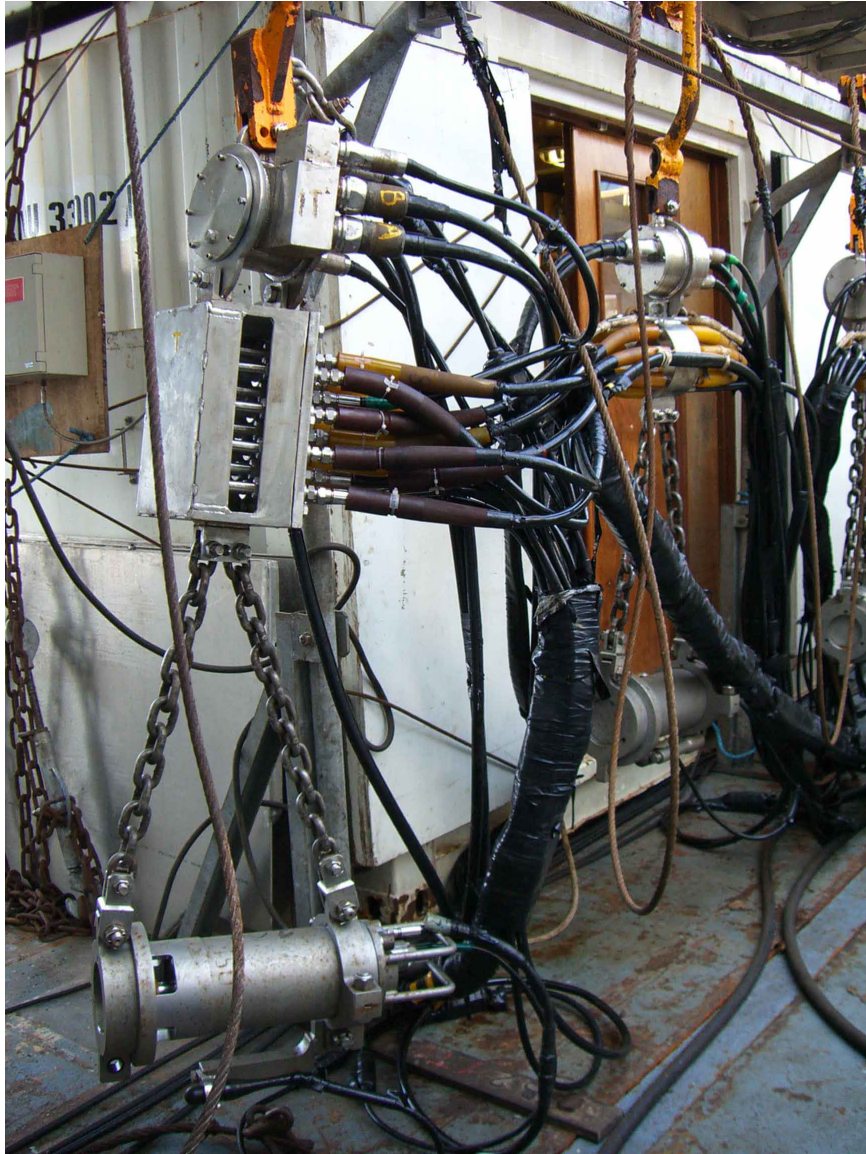
La Source :
Le Canon à Air



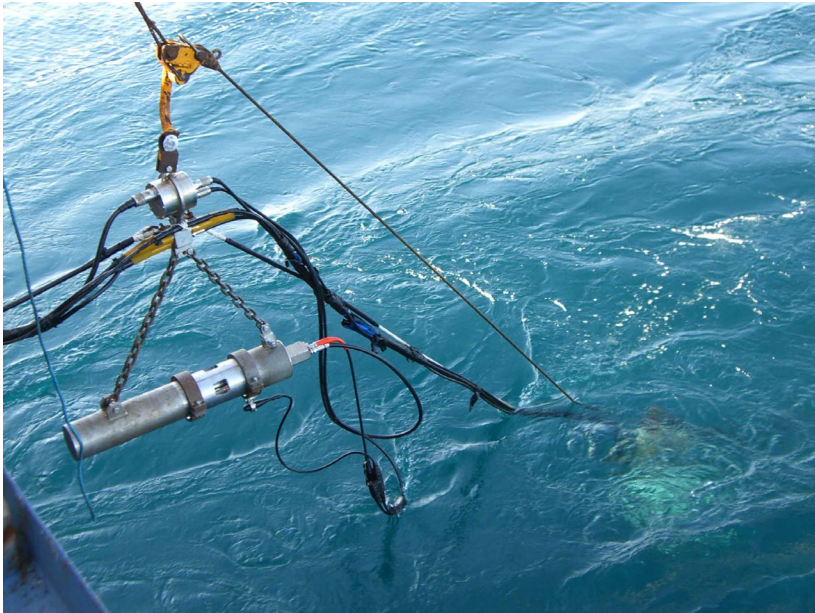
Signal Oscillant

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



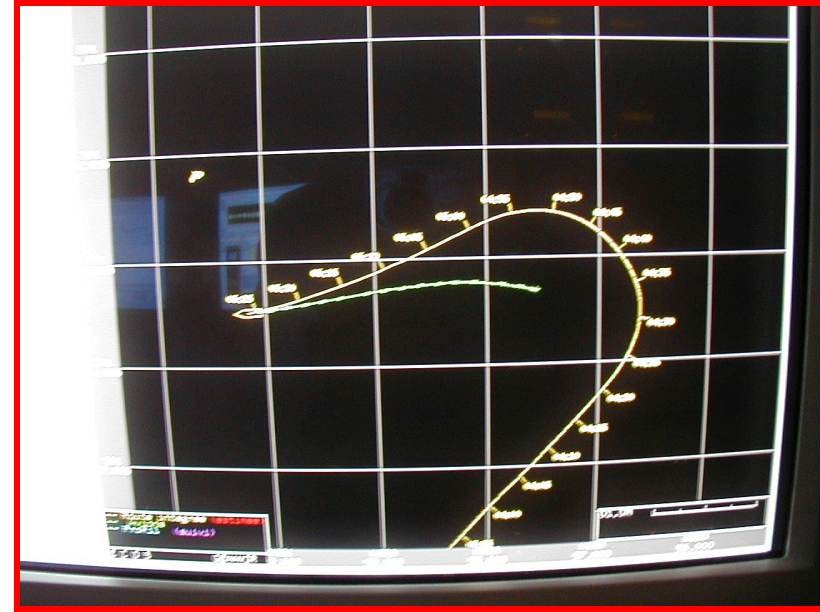
Flûte multitraces

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



Position de la flûte

- Contrôle en temps réel
- Corrections



Le récepteur:

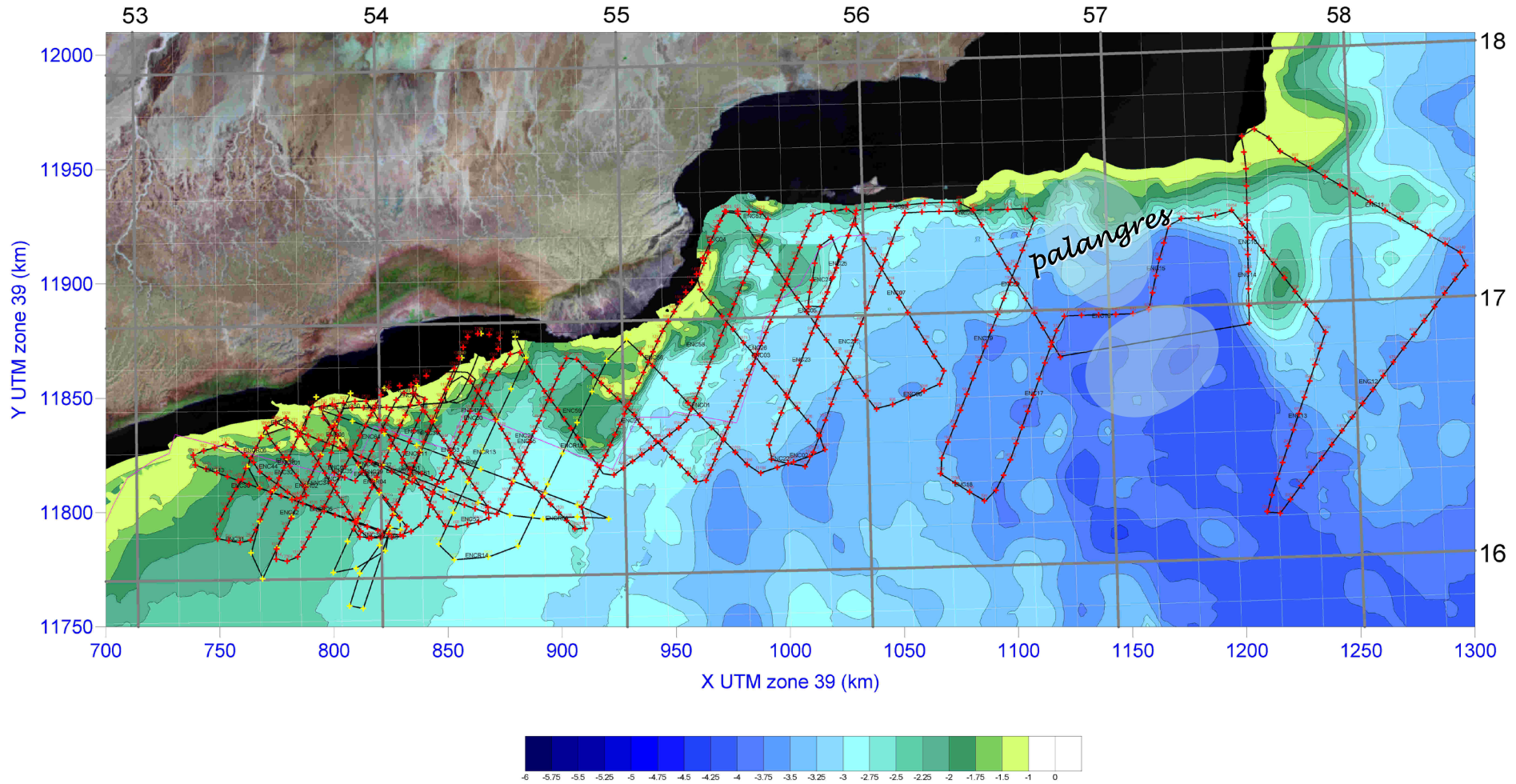
Sismique réfraction

Récepteur : OBS (Ocean Bottom Seismometers)

Tirs avec l'Atalante

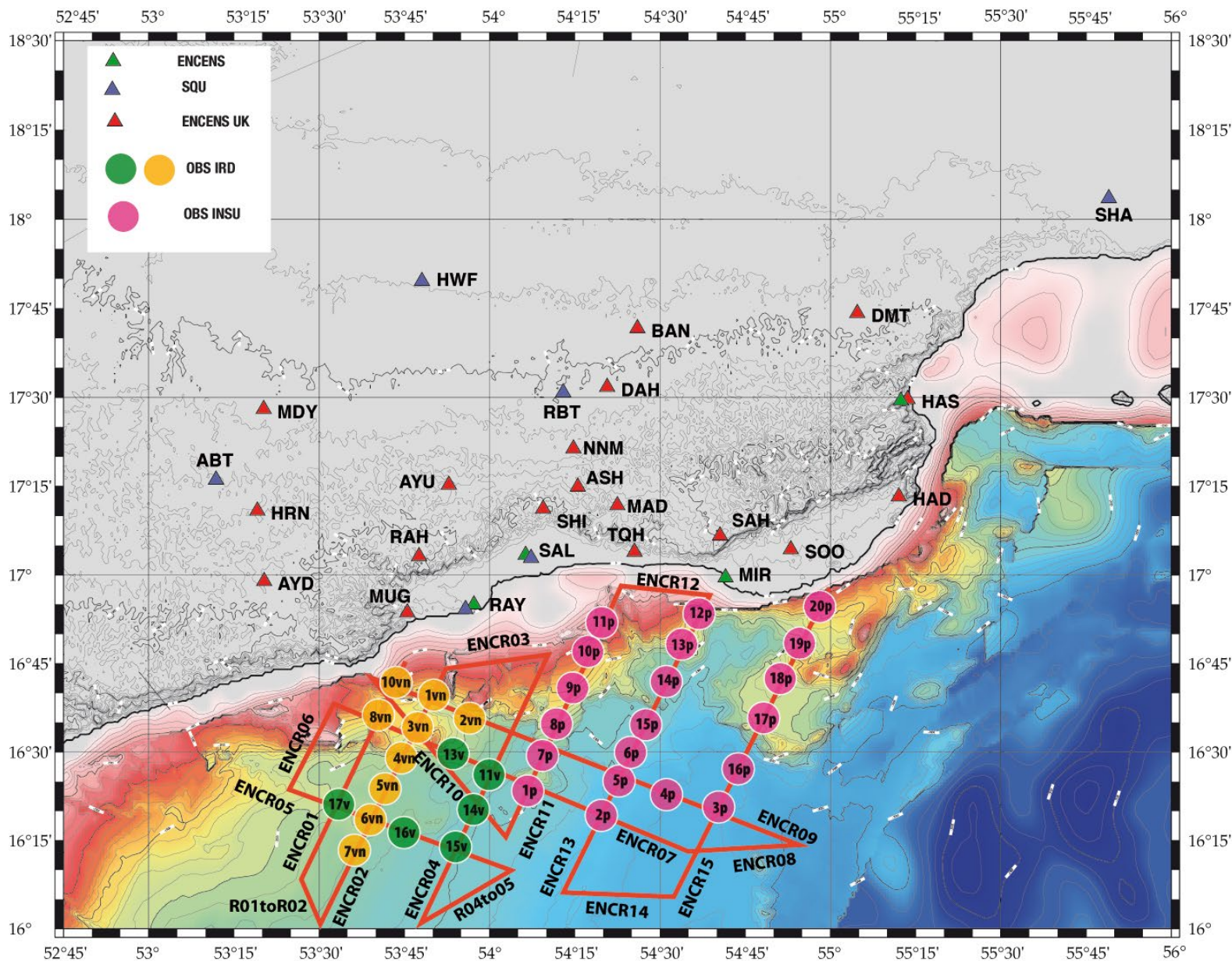


Acquisition des données: sismique réflexion



Acquisition des données: sismique réfraction

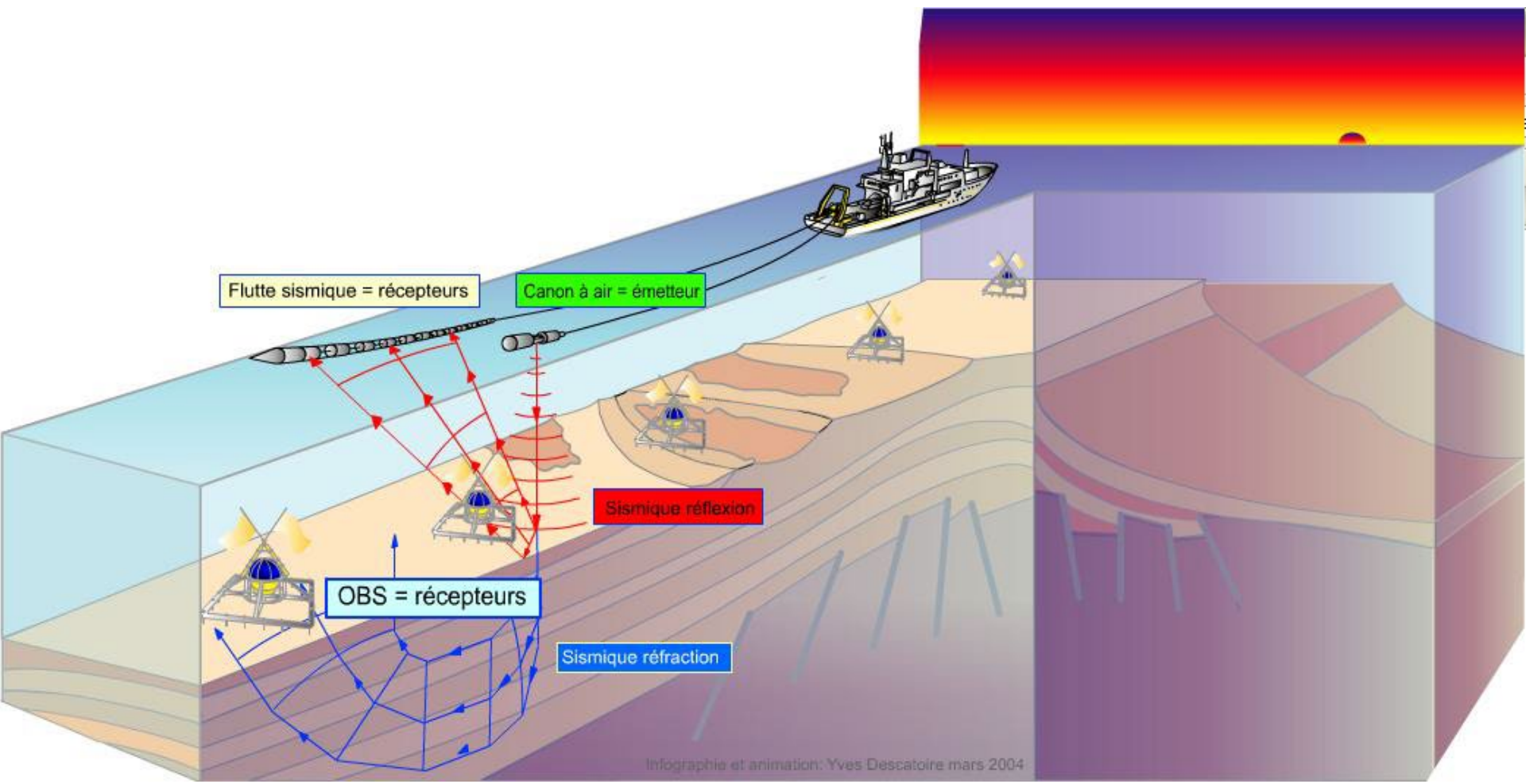
Plan de position
des instruments
et
des profils de la
campagne Encens



Acquisition des données:

sismique réflexion

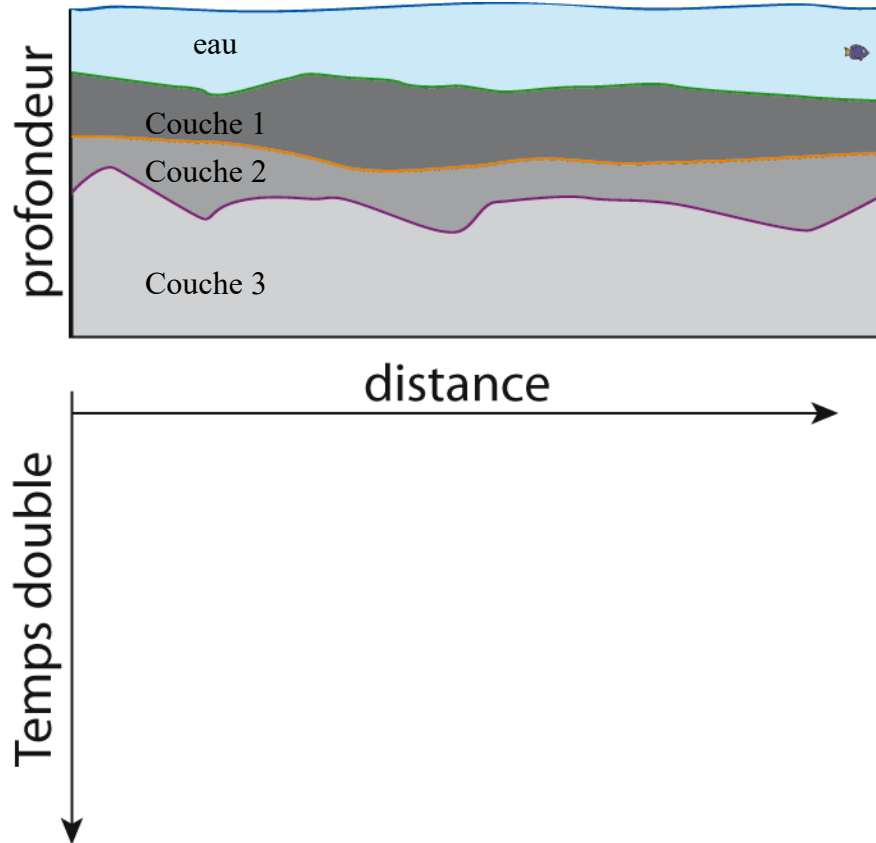
sismique réfraction



SISMIQUE REFLEXION:

Visualisation des données

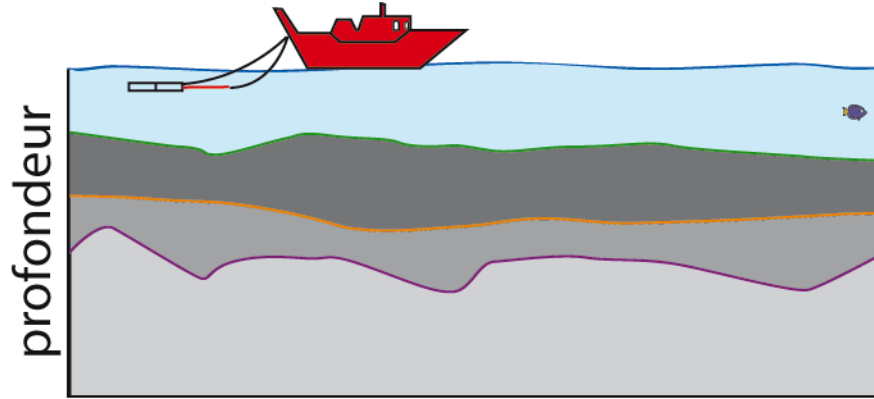
Sismique réflexion



Acquisition

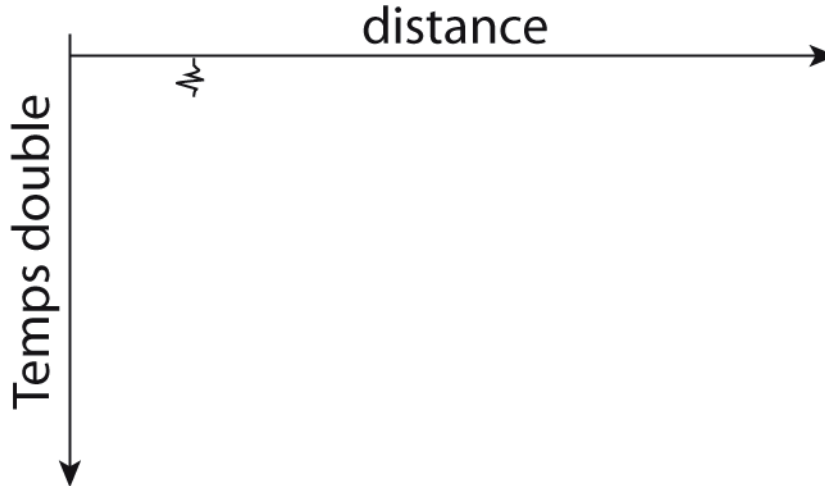
Sismique réflexion

TIR n° 1



Acquisition

ONDE DIRECTE

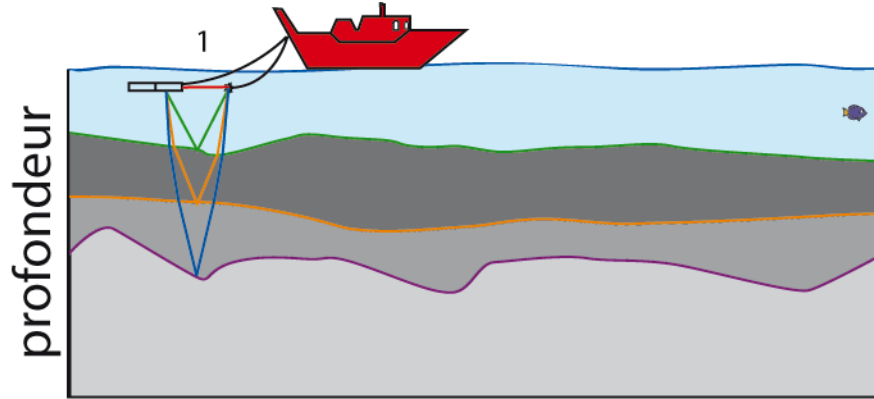


**Représentation
graphique**

TRACE SISMIQUE

Sismique réflexion

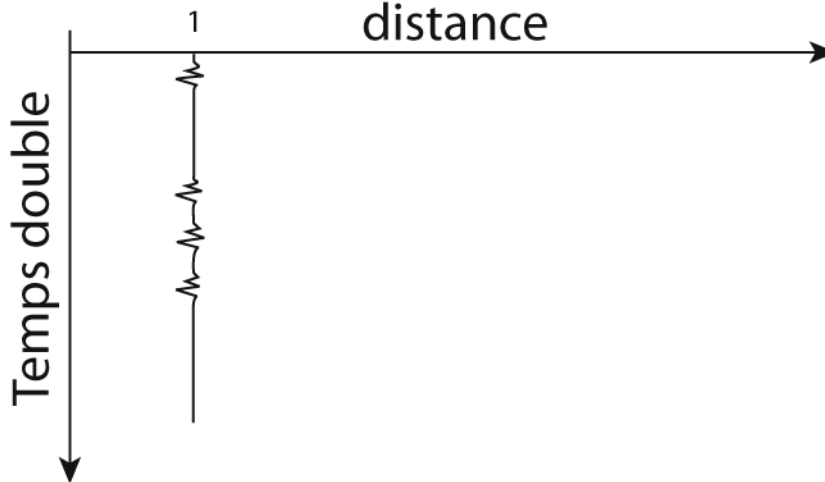
TIR n° 1



Acquisition

ONDE DIRECTE

**ONDES
REFLECHIES**

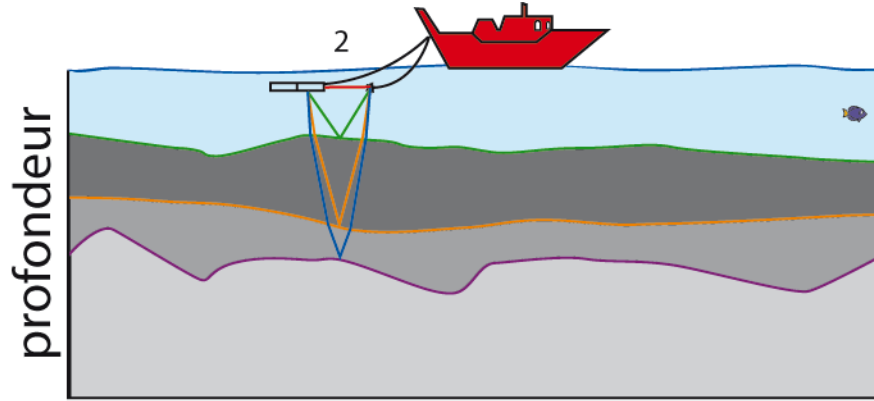


**Représentation
graphique**

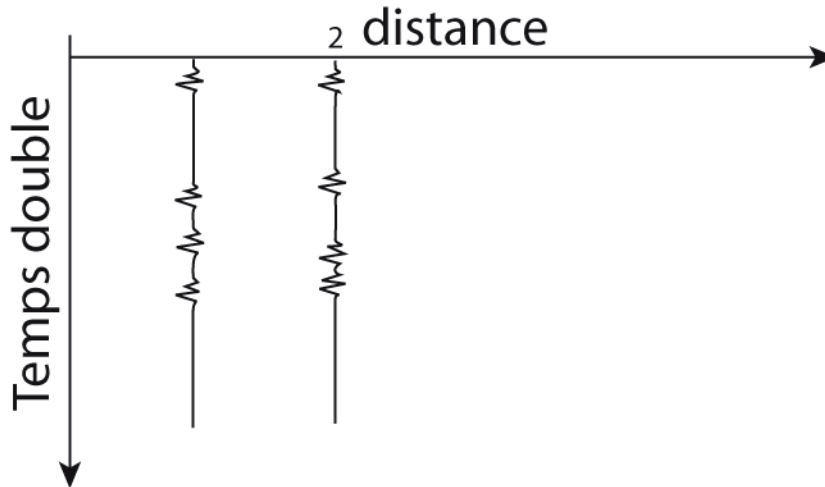
TRACE SISMIQUE

Sismique réflexion

TIR n° 2



Acquisition



ONDE DIRECTE

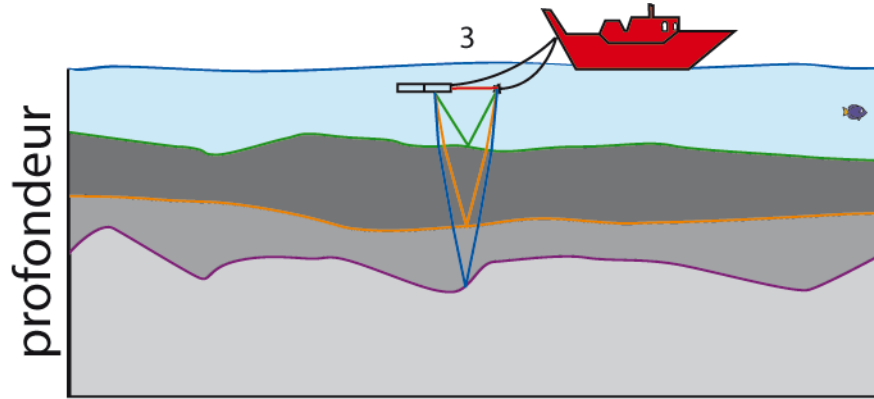
**ONDES
REFLECHIES**

**Représentation
graphique**

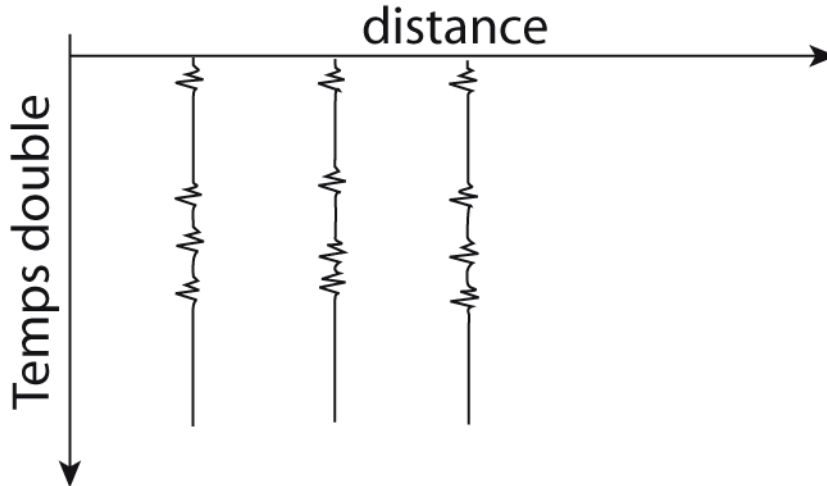
TRACES SISMIQUE

Sismique réflexion

TIR n° 3



Acquisition



**Représentation
graphique**

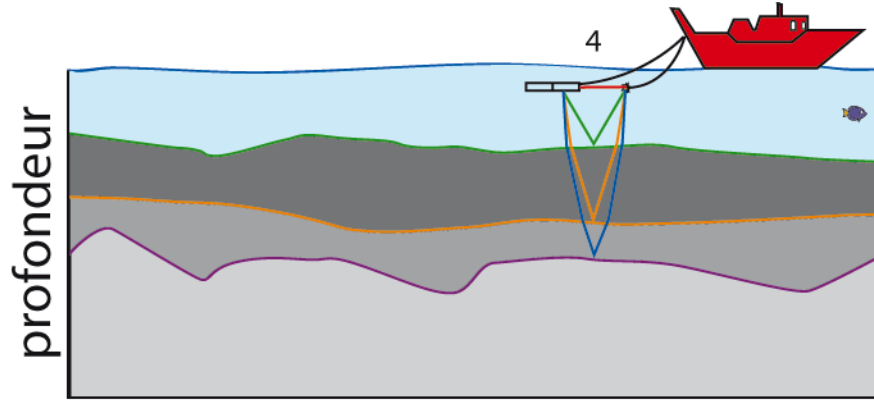
ONDE DIRECTE

**ONDES
REFLECHIES**

TRACES SISMIQUE

Sismique réflexion

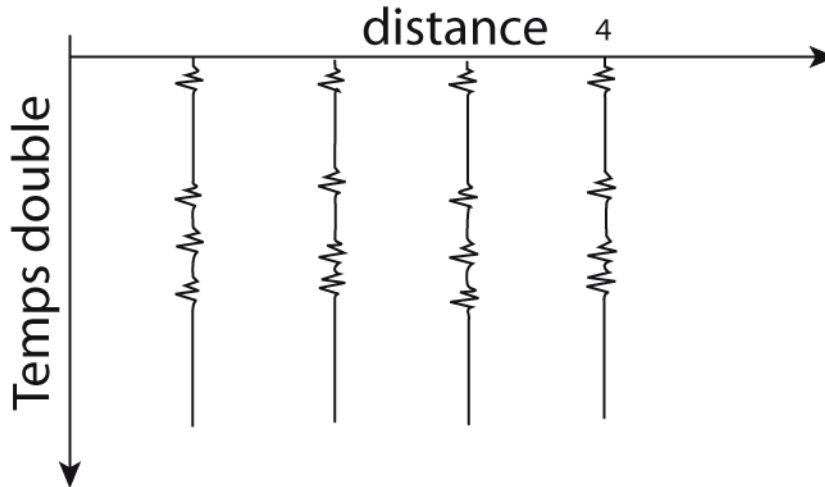
TIR n° 4



Acquisition

ONDE DIRECTE

**ONDES
REFLECHIES**

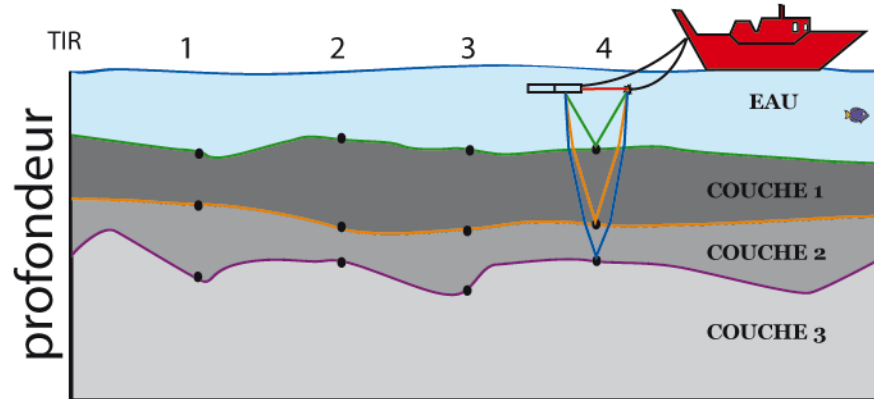


**Représentation
graphique**

TRACES SISMIQUE

Sismique réflexion

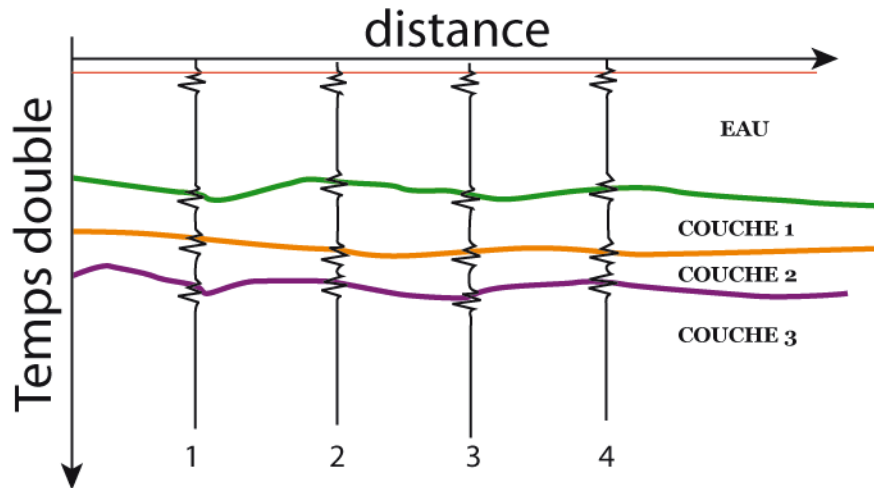
TIR n° 4



Acquisition

ONDE DIRECTE

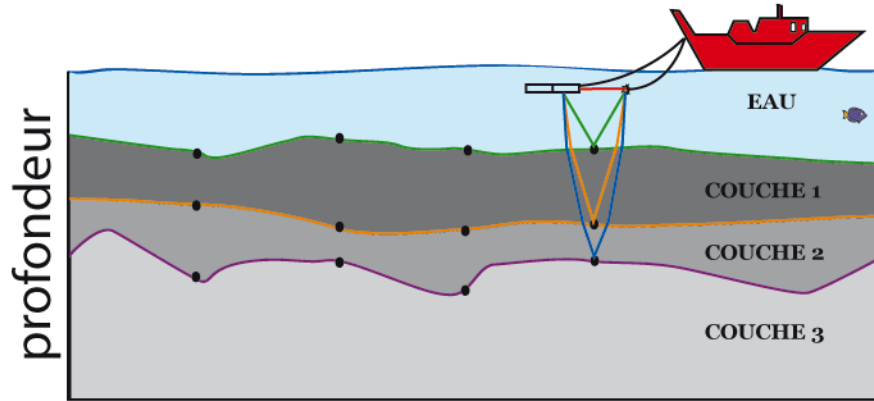
ONDES
REFLECHIES



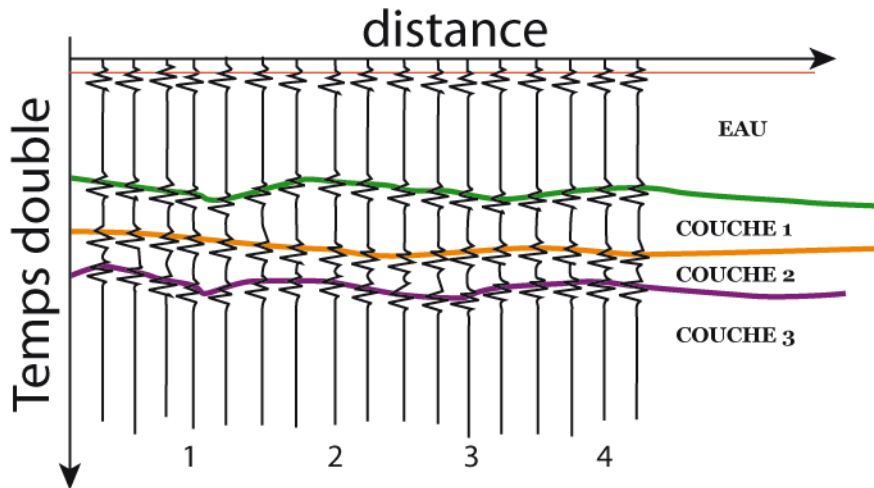
Représentation
graphique

TRACES SISMIQUE

Sismique réflexion



Acquisition



**Représentation
graphique**

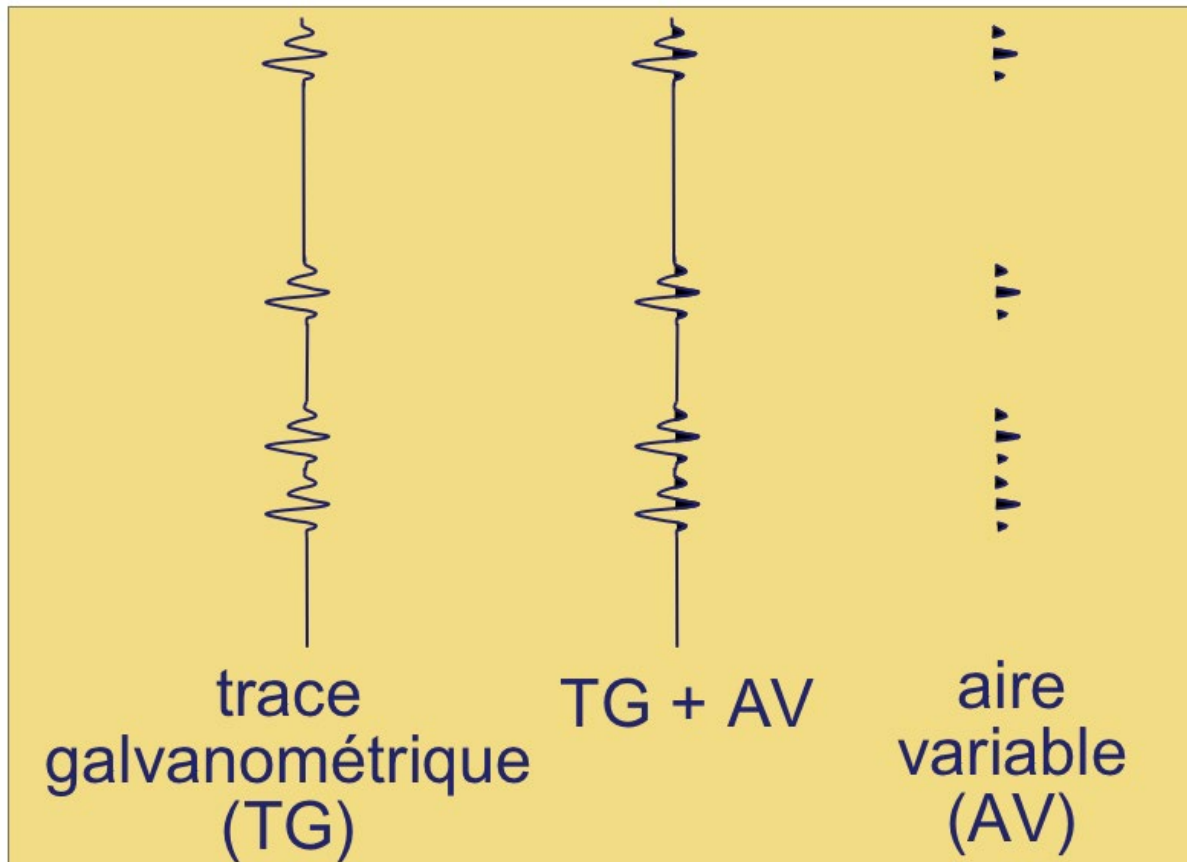
ONDE DIRECTE

**ONDES
REFLECHIES**

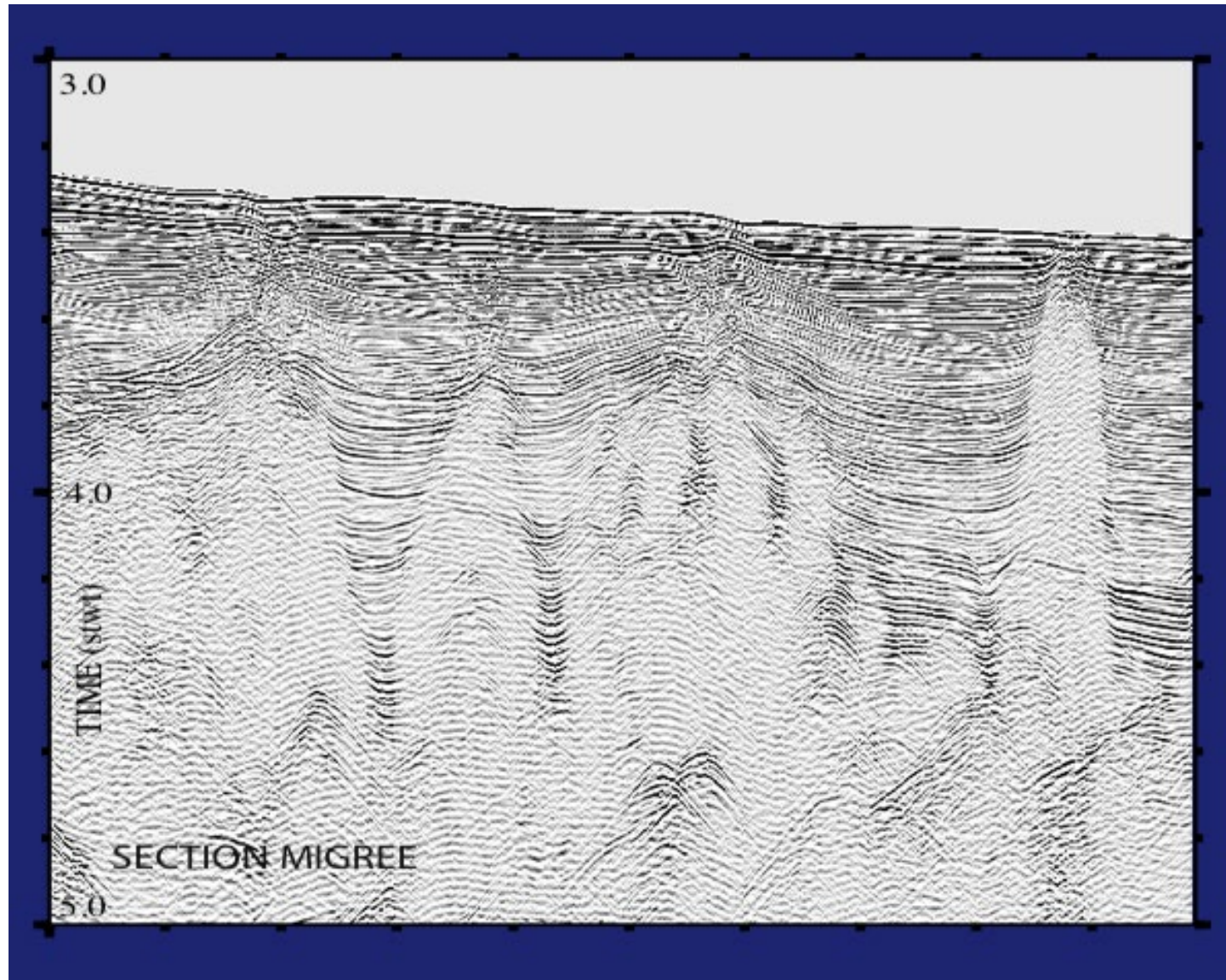
TRACES SISMIQUE

Interprétation

Représentation Graphique

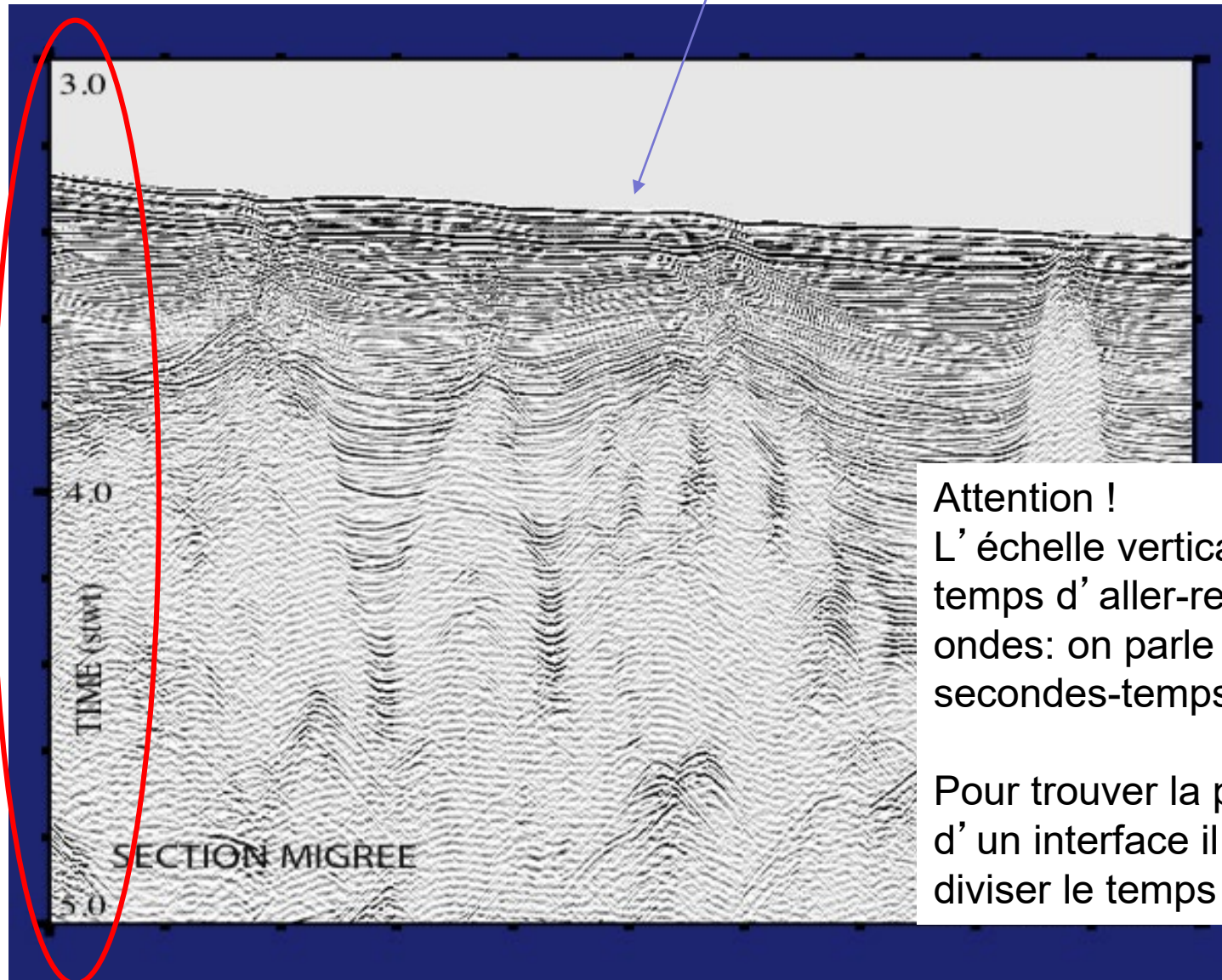


Représentation Graphique



Représentation Graphique

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



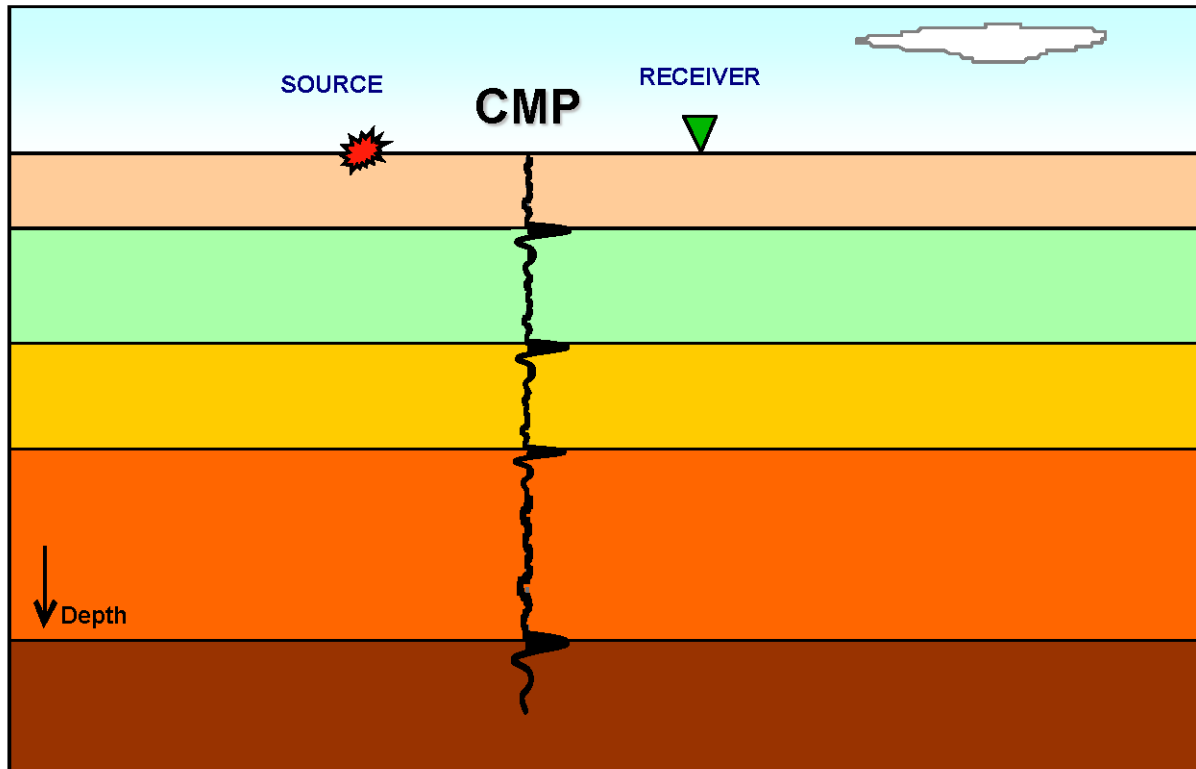
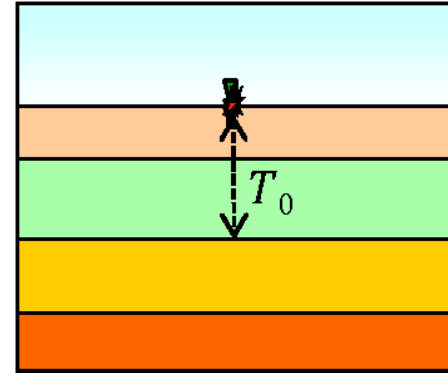
Attention !

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

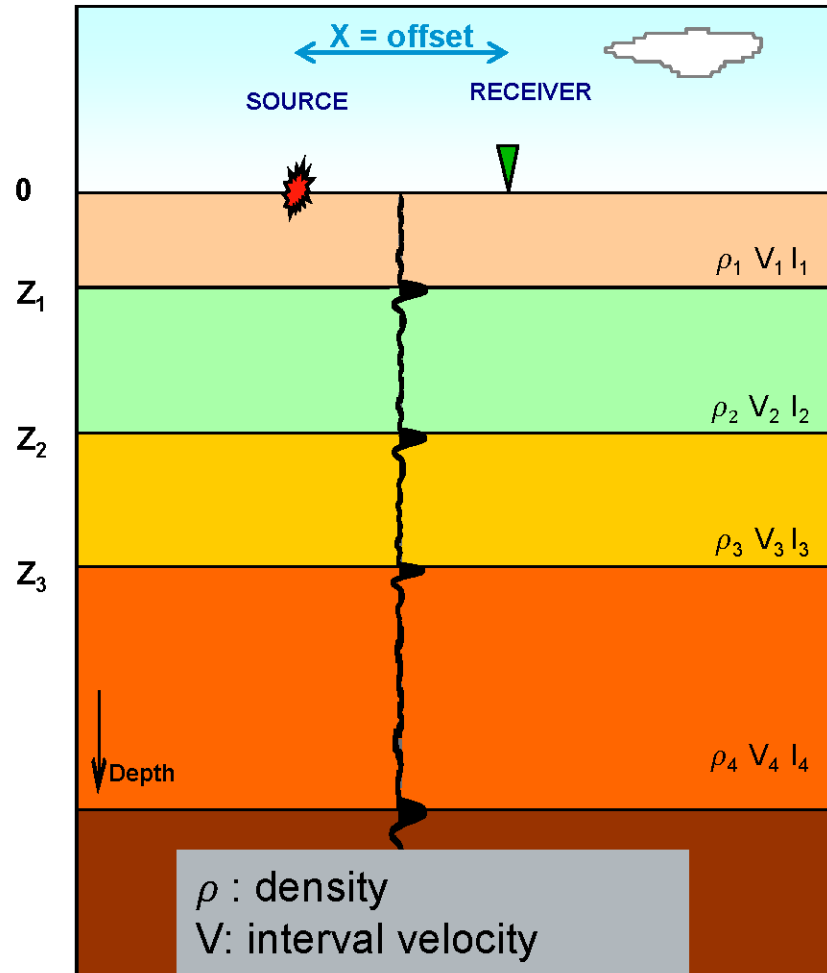
- Vitesse constante entre chaque interface
- Les réflecteurs sont horizontaux



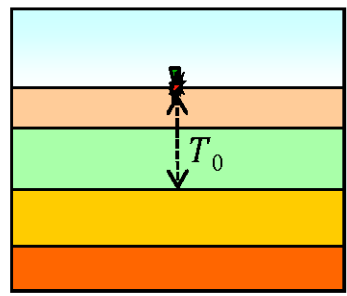
On ramène à
SR confondu

CMP = Common mid point

Quelles informations donnent la trace sismique ?



ρ : density
 V : interval velocity
 l : acoustic impedance
 Rc : reflectivity coefficient
 $Z = \rho * V$



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

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

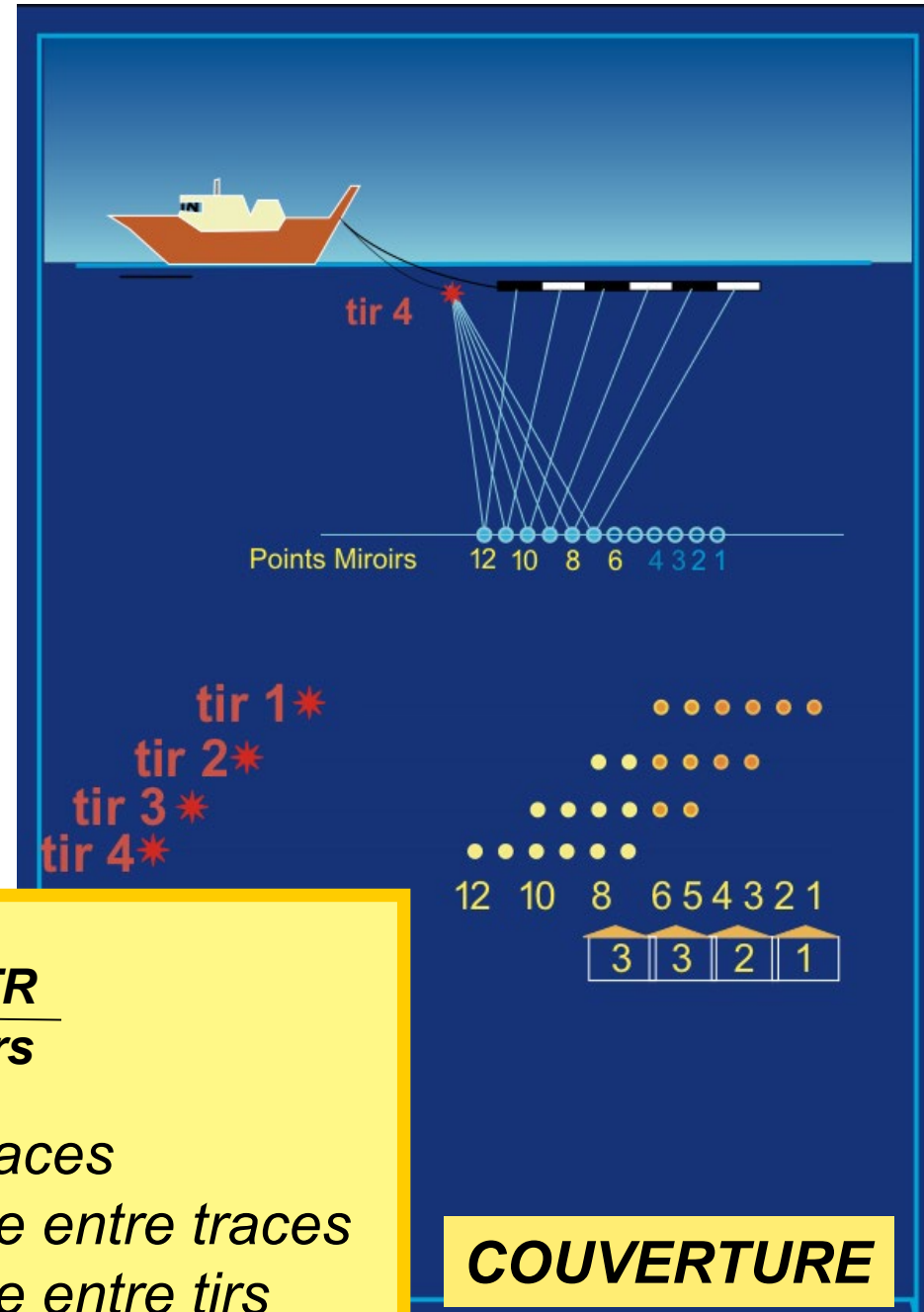
- L'amplitude des événements de réflexions sismiques est proportionnelles aux coefficients de réflectivité

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

* 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

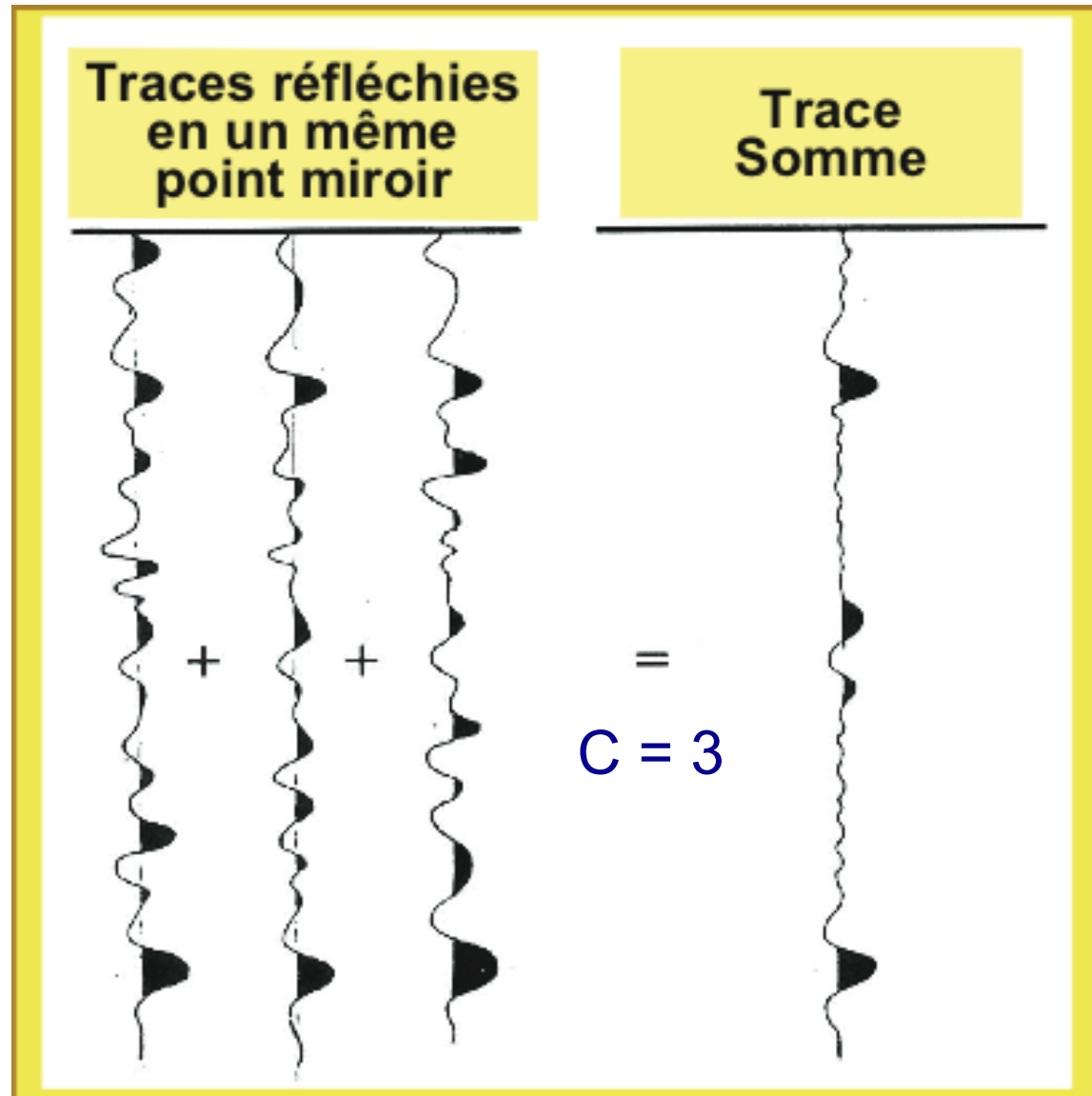
dTR = distance entre traces

$dtirs$ = distance entre tirs

Intérêt d'avoir une longue flûte

Sommation des traces

Amélioration du rapport Signal/Bruit

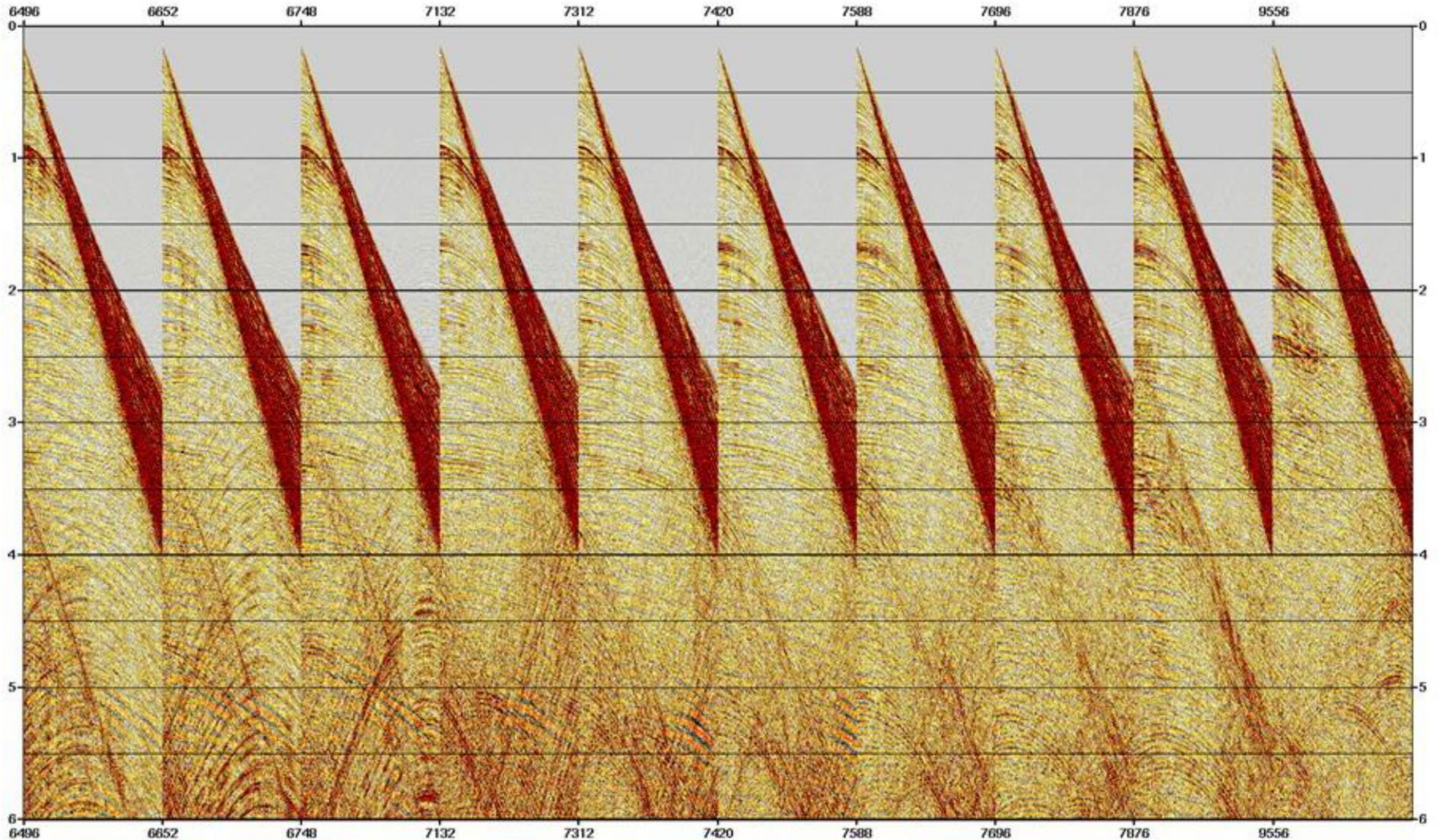


$$S/B = \sqrt{C}$$

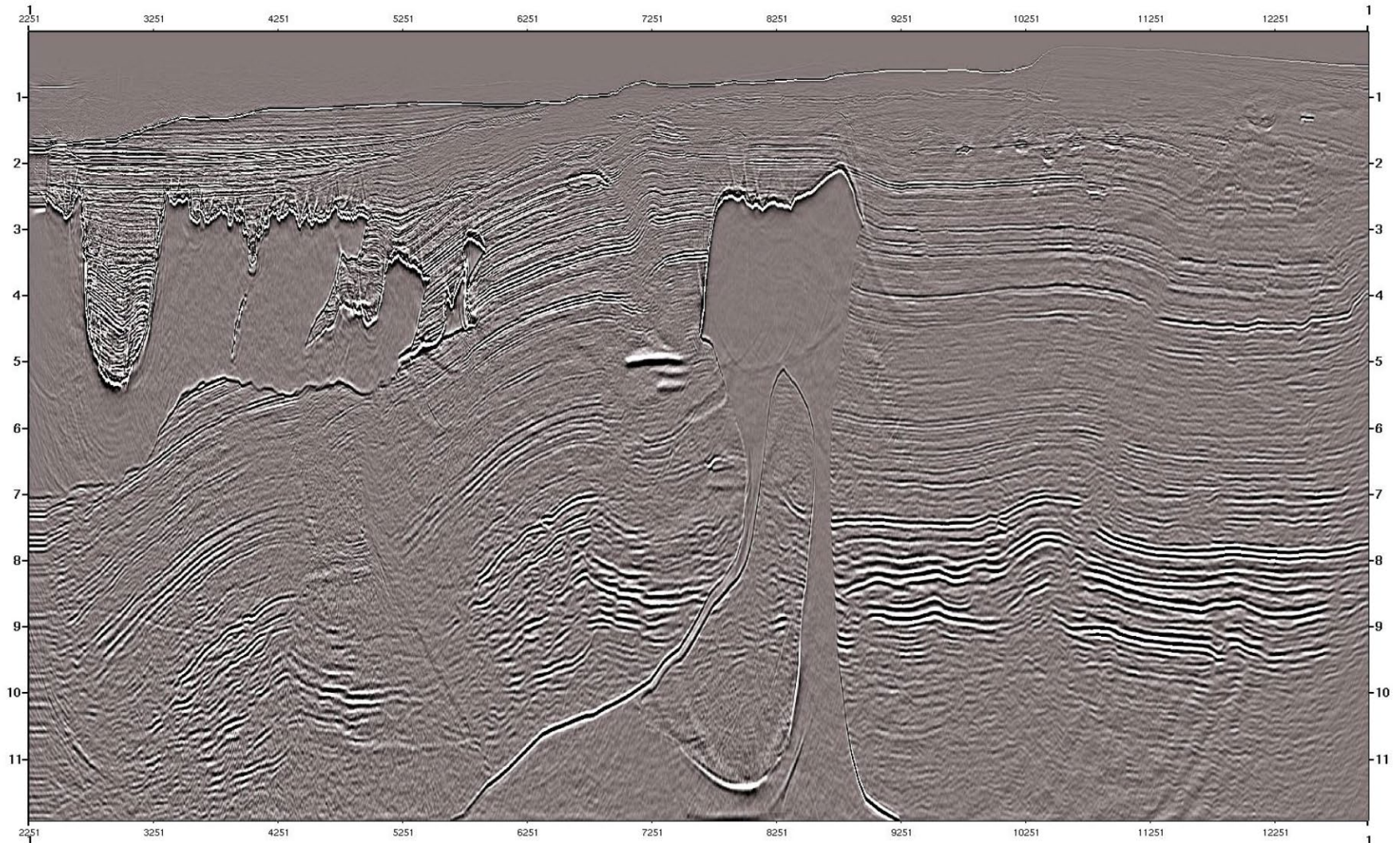
SISMIQUE REFLEXION

Traitement des données

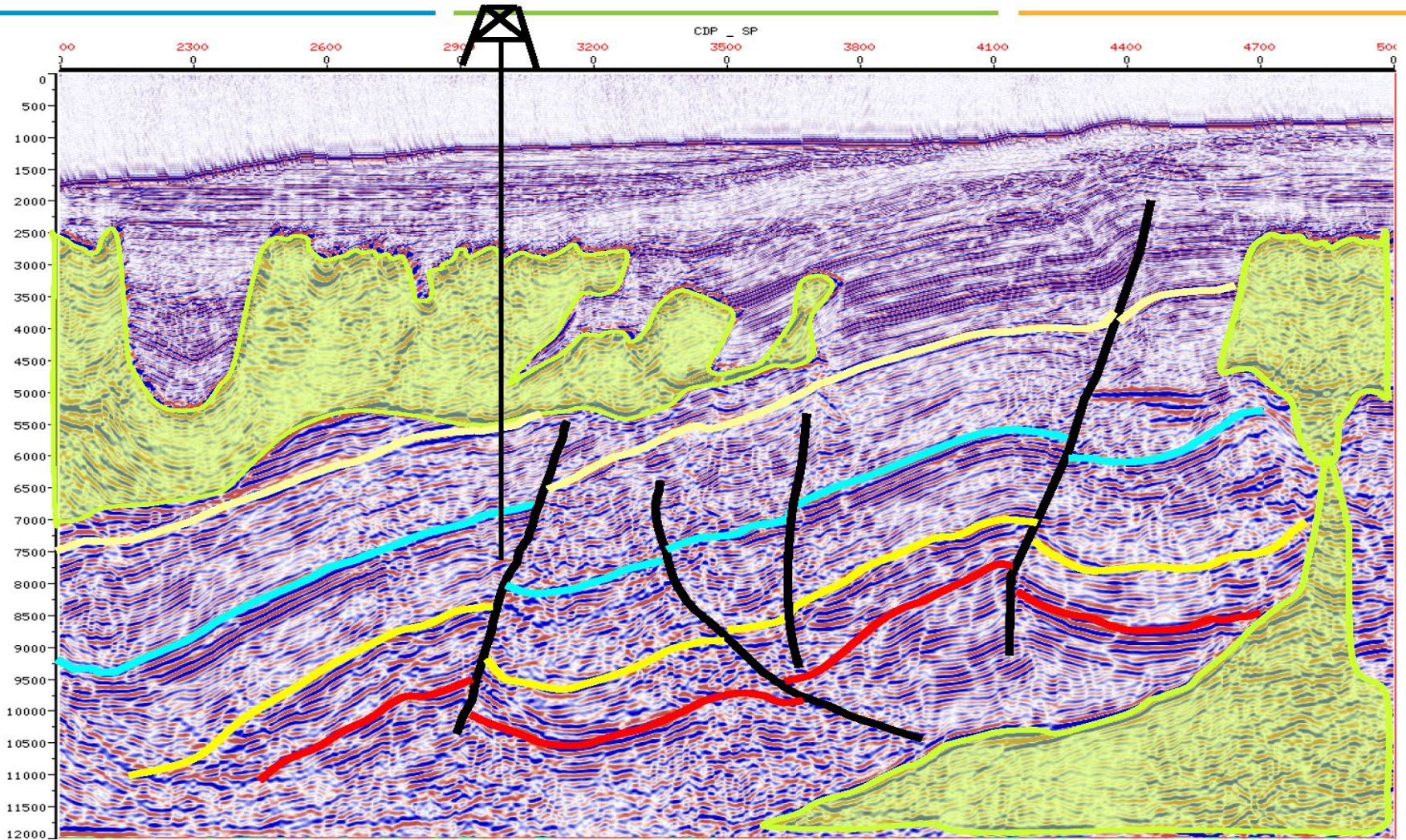
Turn raw field data to ...



...into final seismic image (Migration)



Interpretation of processed image



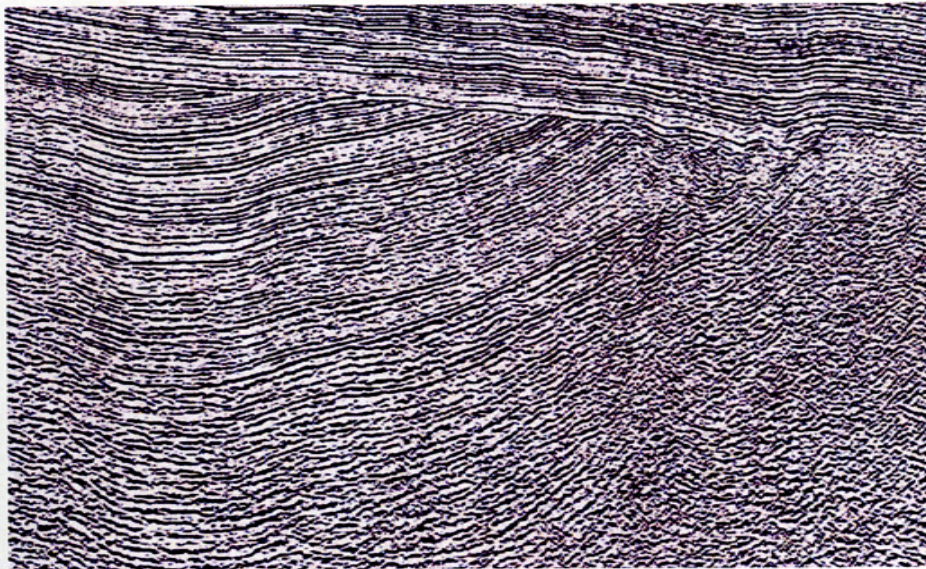
Data courtesy of BP

SISMIQUE REFLEXION:

Exemples

profils de sismique réflexion

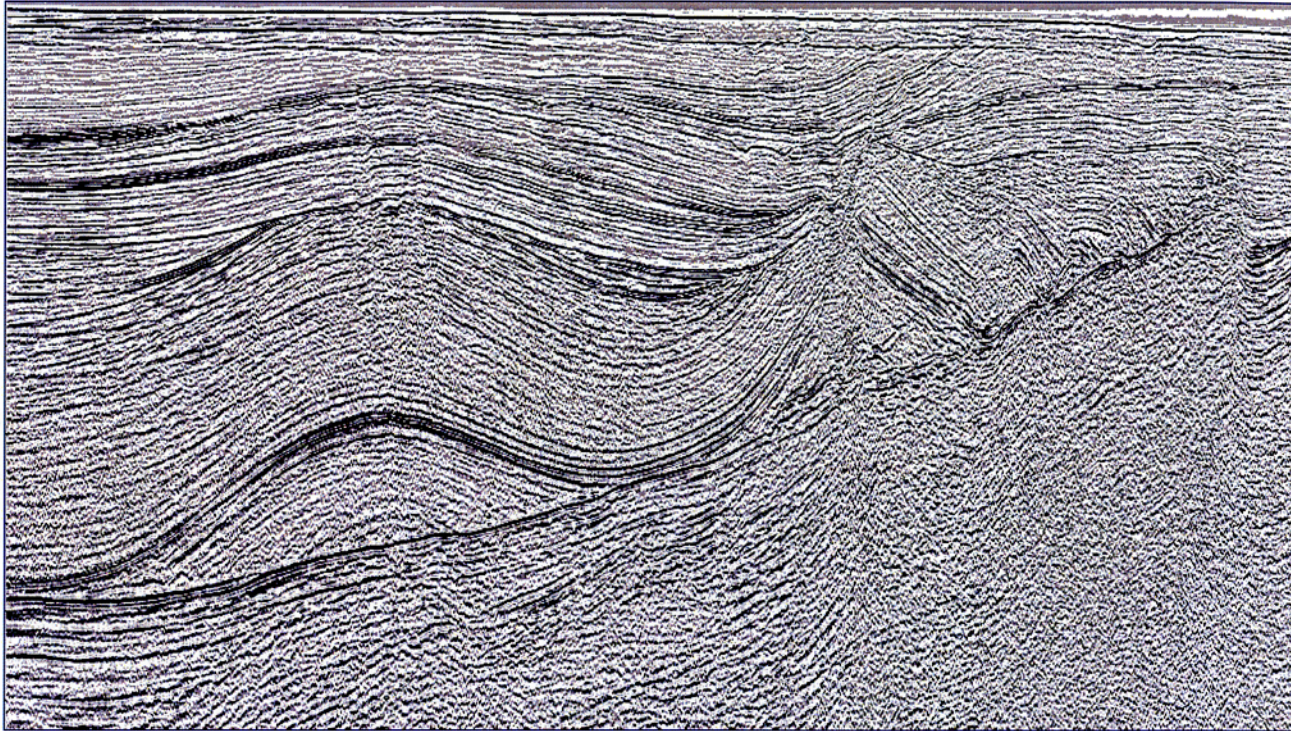
DISCORDANCE



East Greenland - Courtesy from Nuna Oil

DECOUPLAGE DES DEFORMATIONS

niveau de décollement

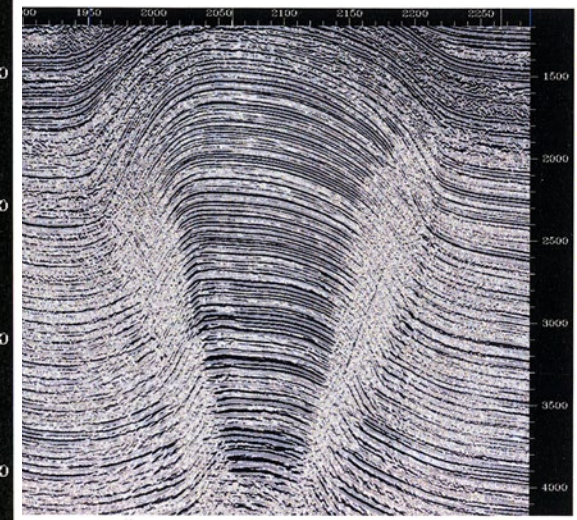
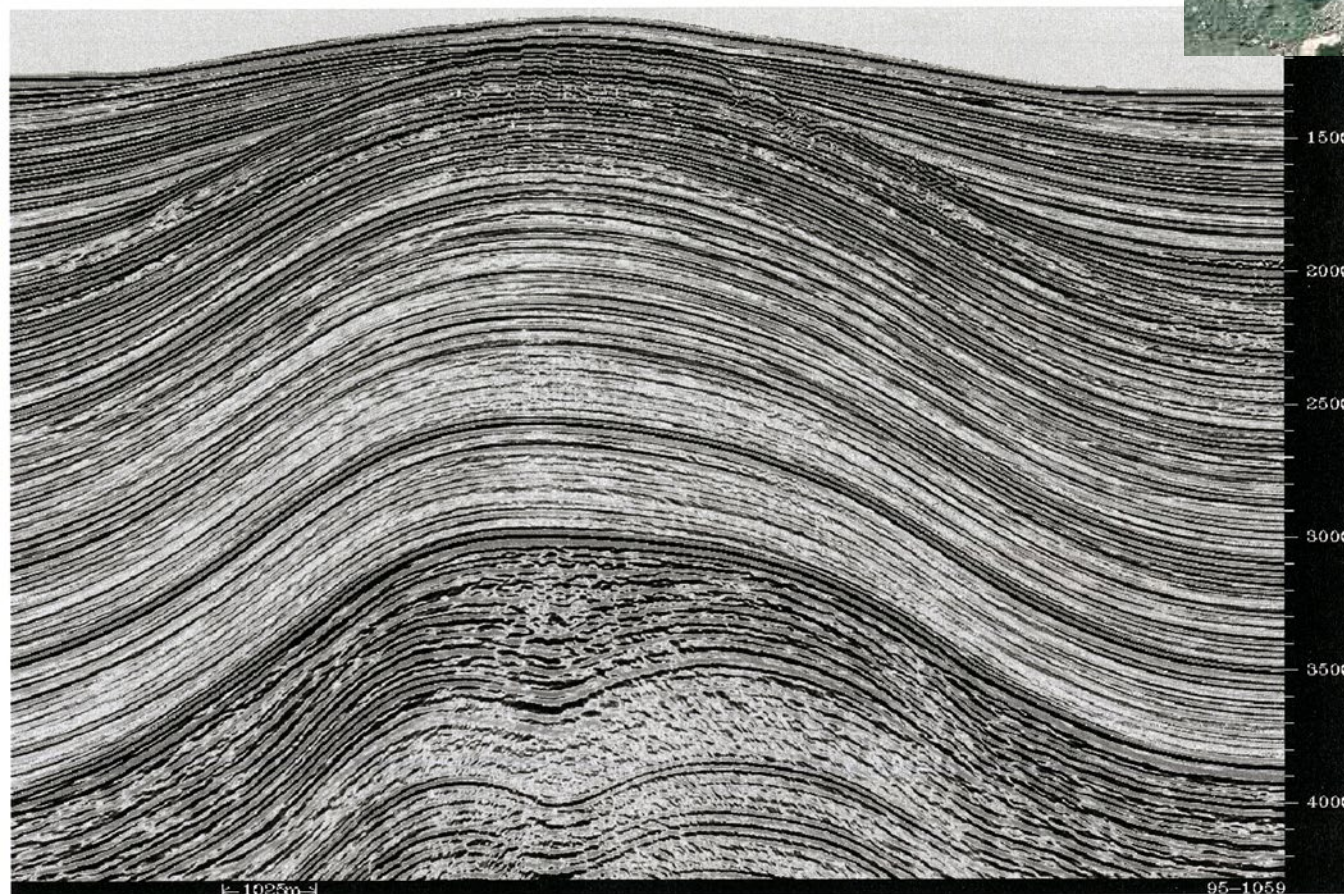


Interprétation Sismique - Extension --
Ecole Polytechnique Universitaire Pierre et Marie Curie

Ph. Werner, Total

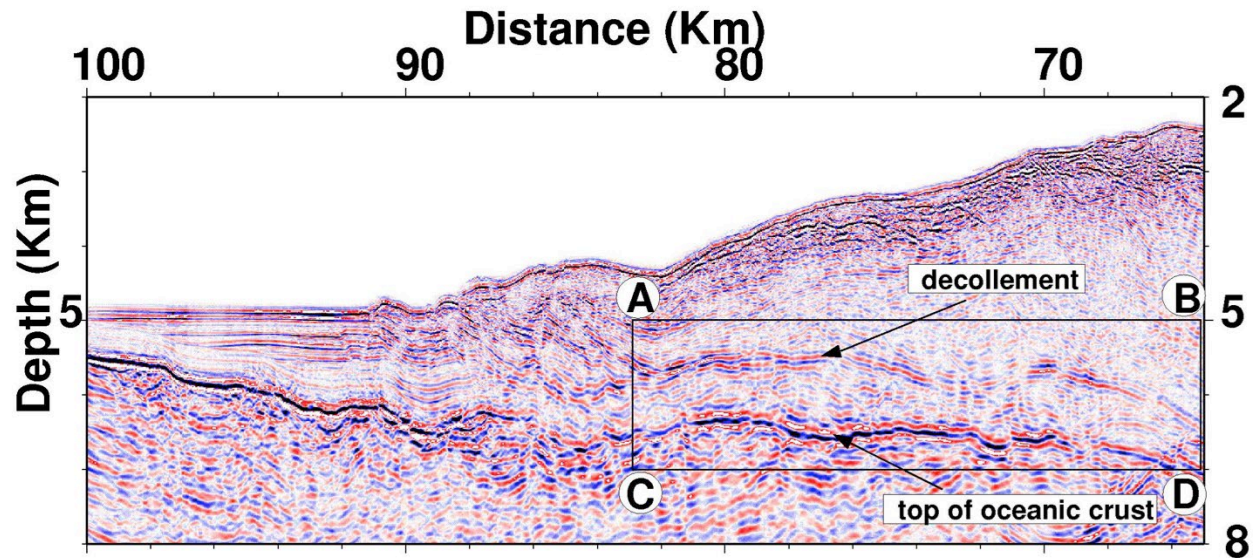
CONTEXTE COMPRESSIF :

Plis

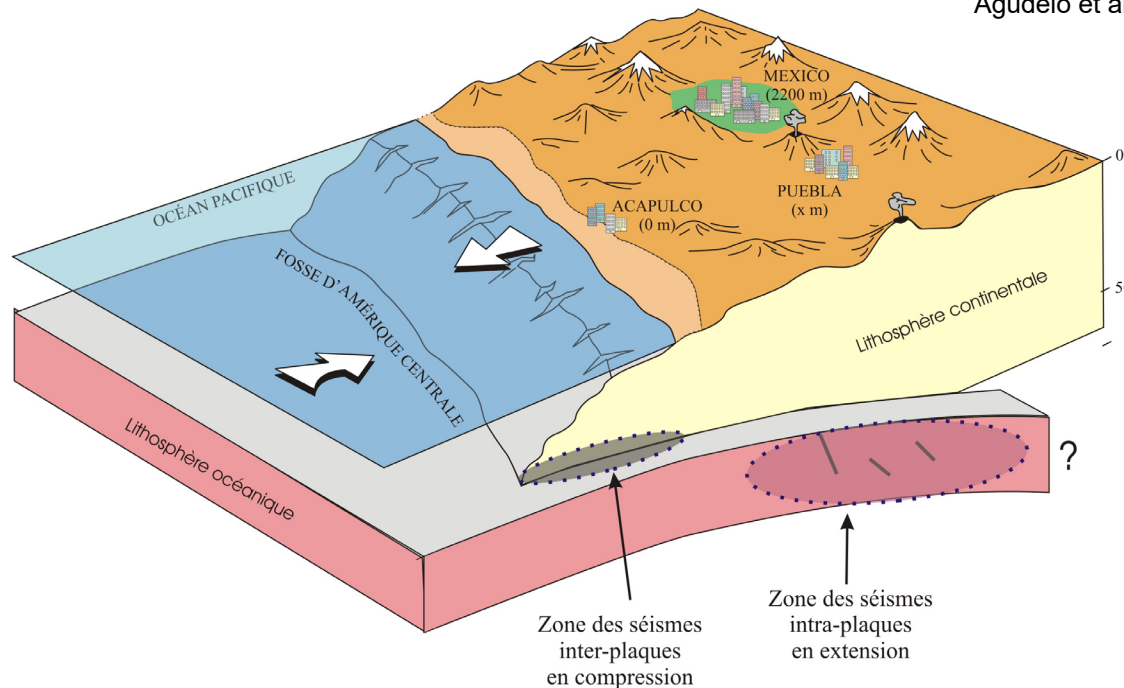


CONTEXTE COMPRESSIF :

Zone de subduction

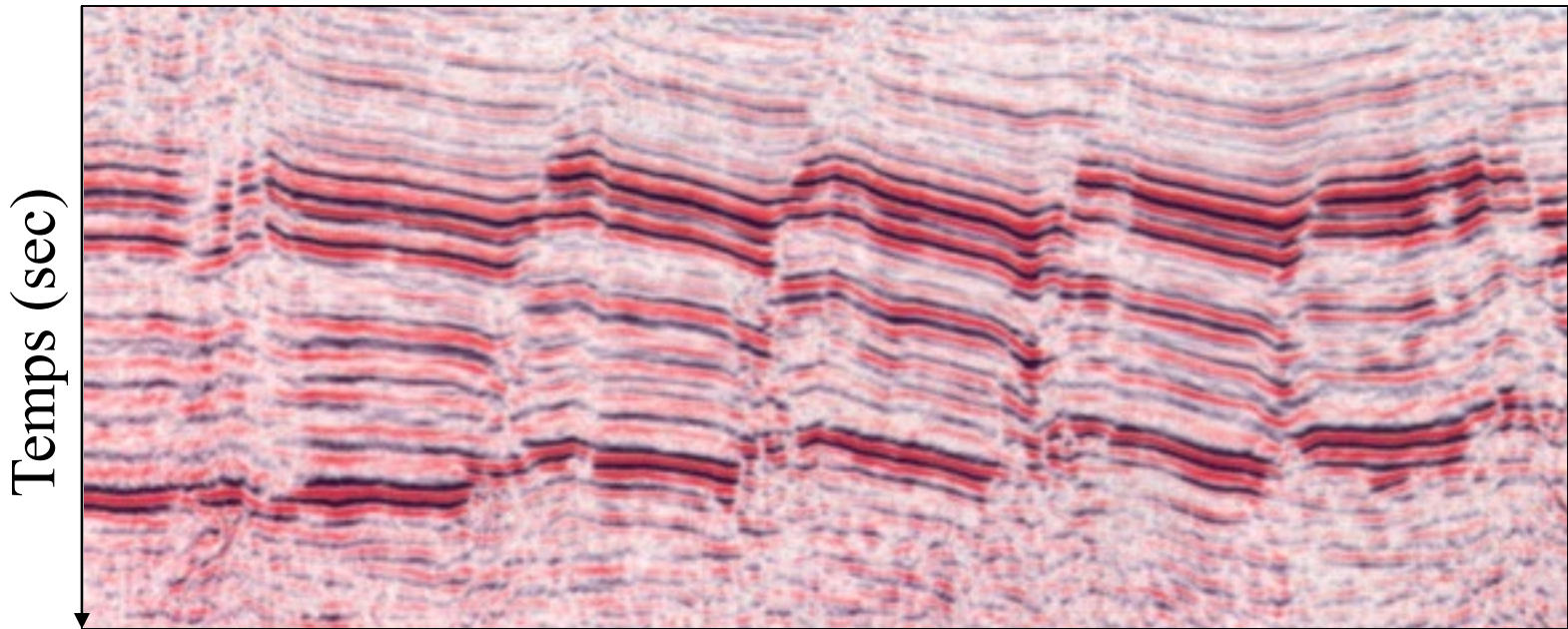
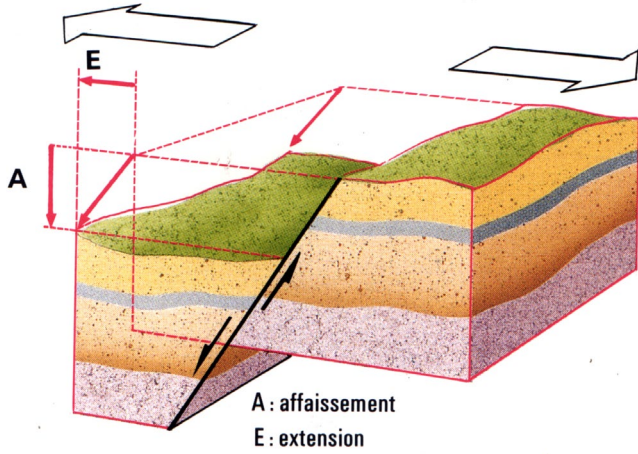


Agudelo et al. EAGE 2005



CONTEXTE EXTENSIF : Failles normales

faille normale

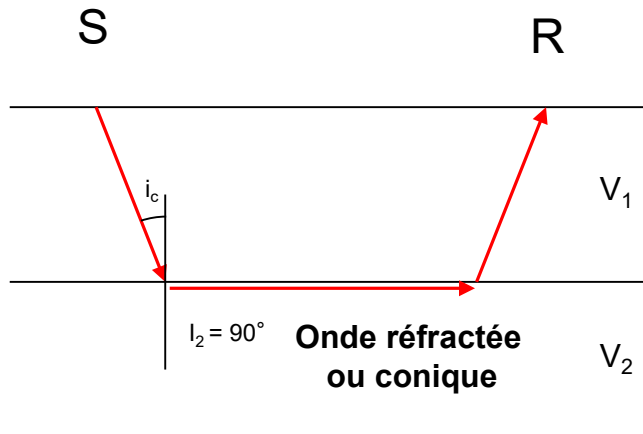


SISMIQUE REFRACTION:

Visualisation des données

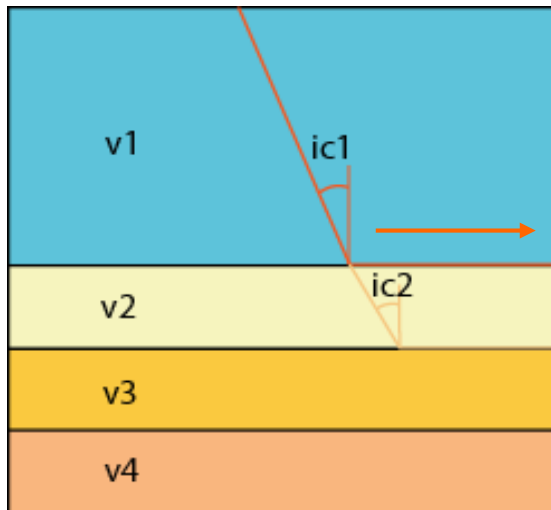
- Pointé des premières arrivées
- Modèle de vitesse et structure profonde

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



$$i_2 = 90^\circ$$

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



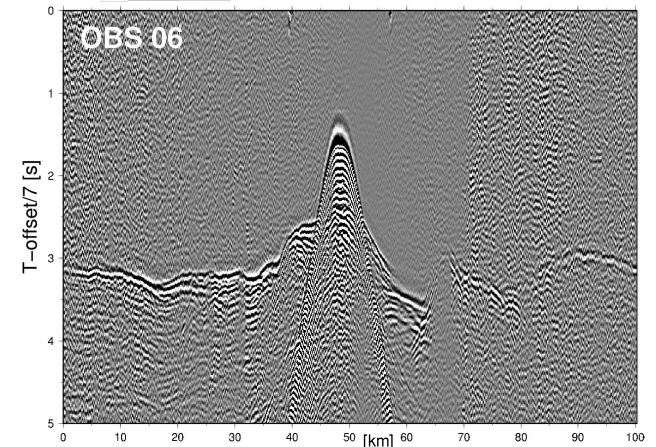
$$\sin(ic_1) = \frac{v_1}{v_2}$$

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

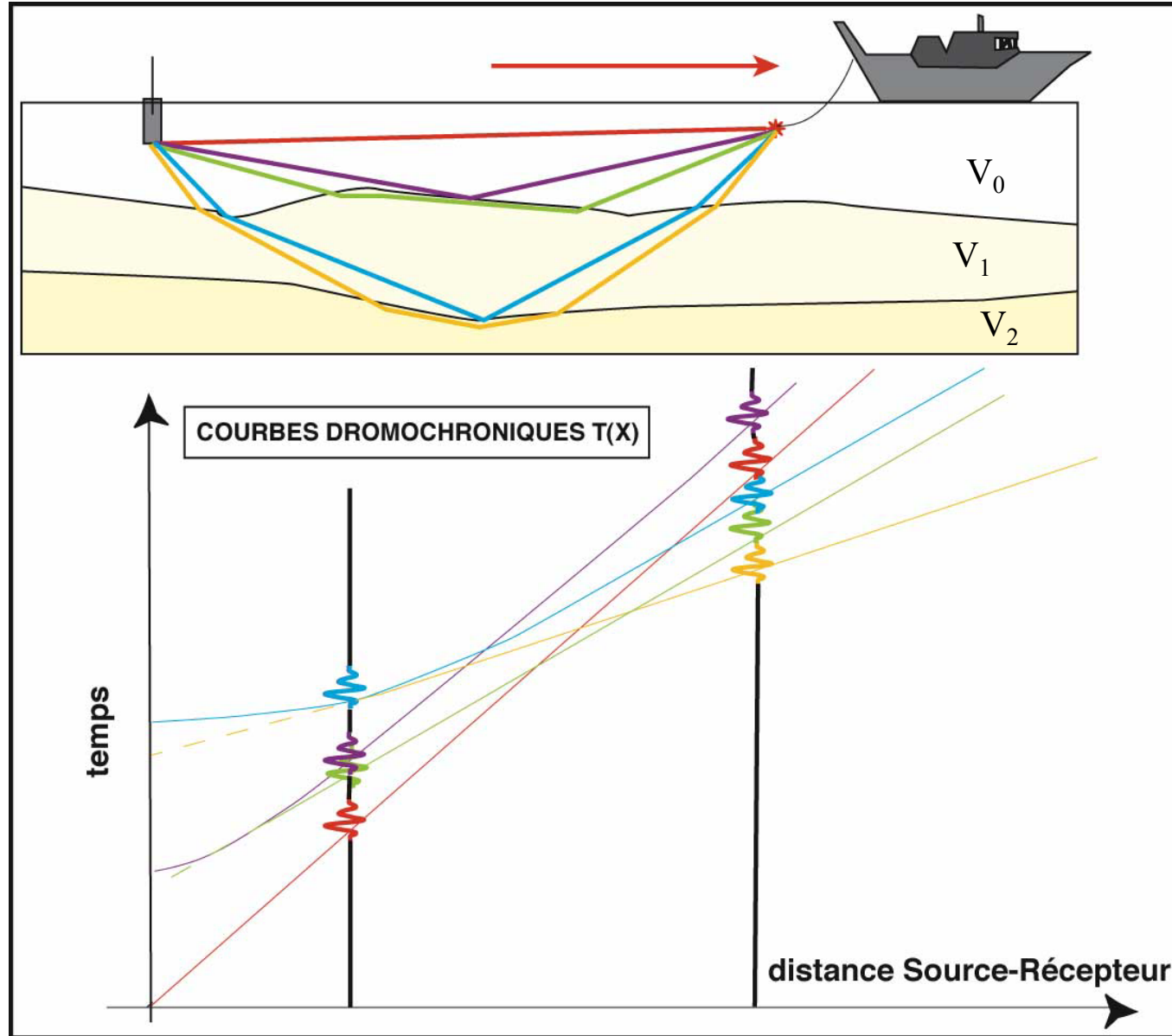
Objectif de la sismique réfraction

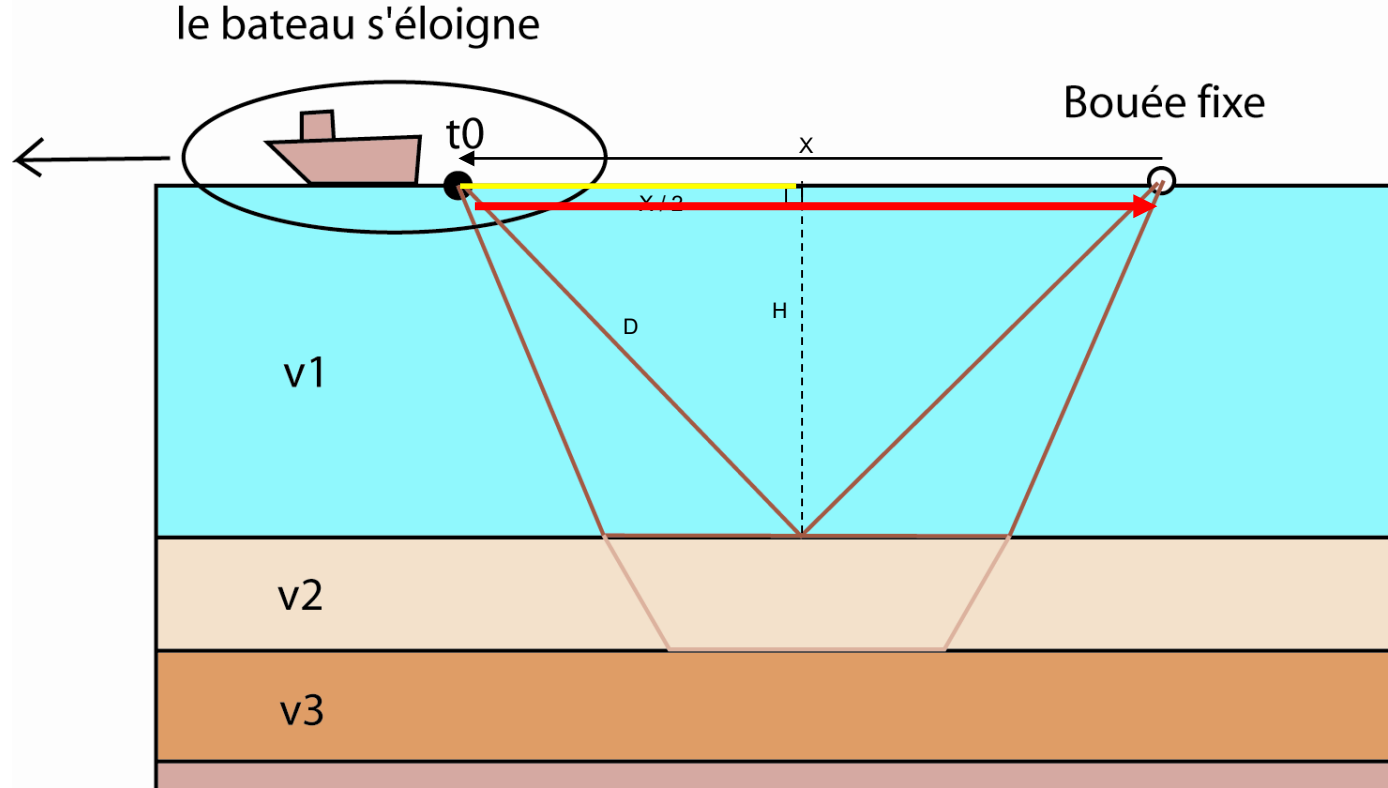
On obtient non pas une image du sous-sol « *interprétable directement* » mais des vitesses et des épaisseurs de couches, résolution plus faible.

- 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



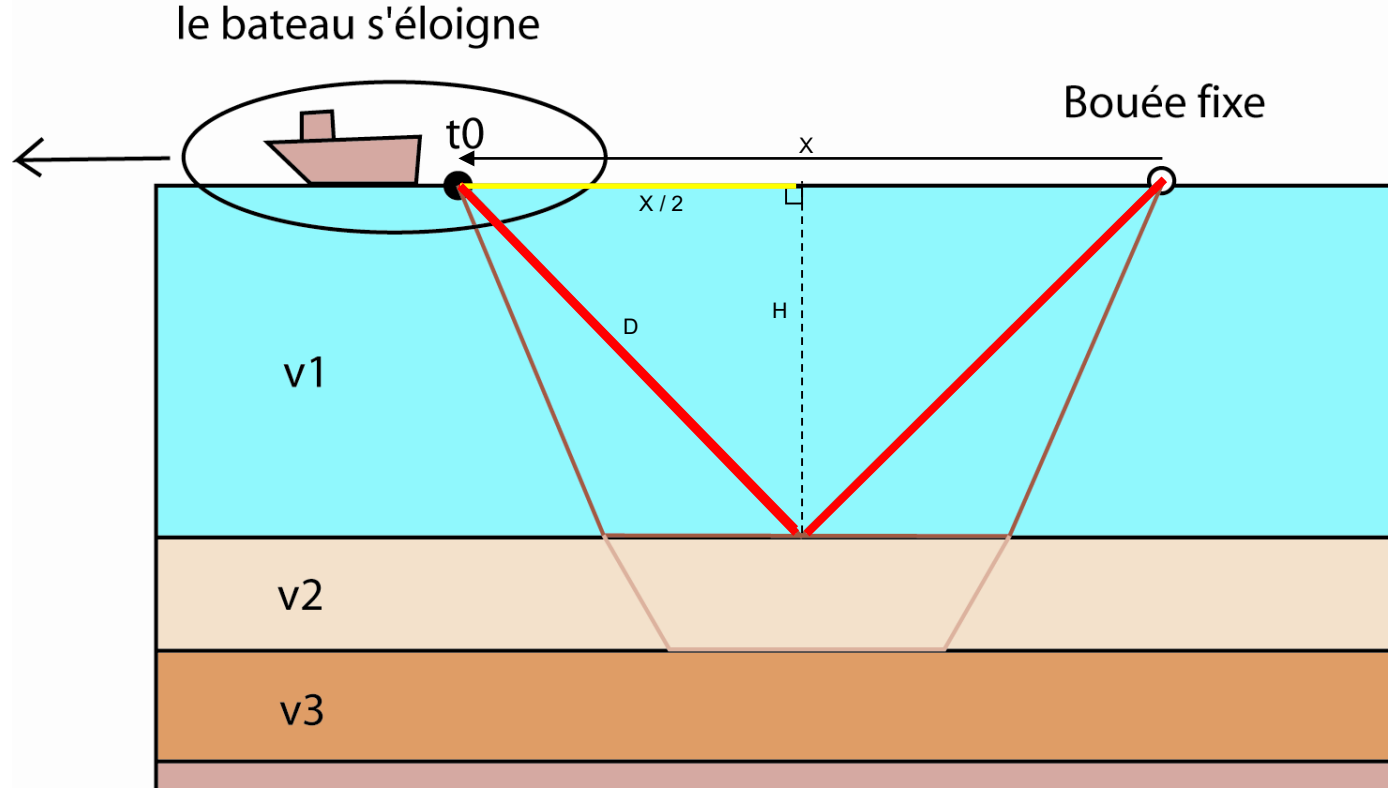


Pour l'**onde directe**, la distance et le temps de parcours sont:

$$d(X) = V_1 \times t$$

$$t = \frac{d(X)}{V_1}$$

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



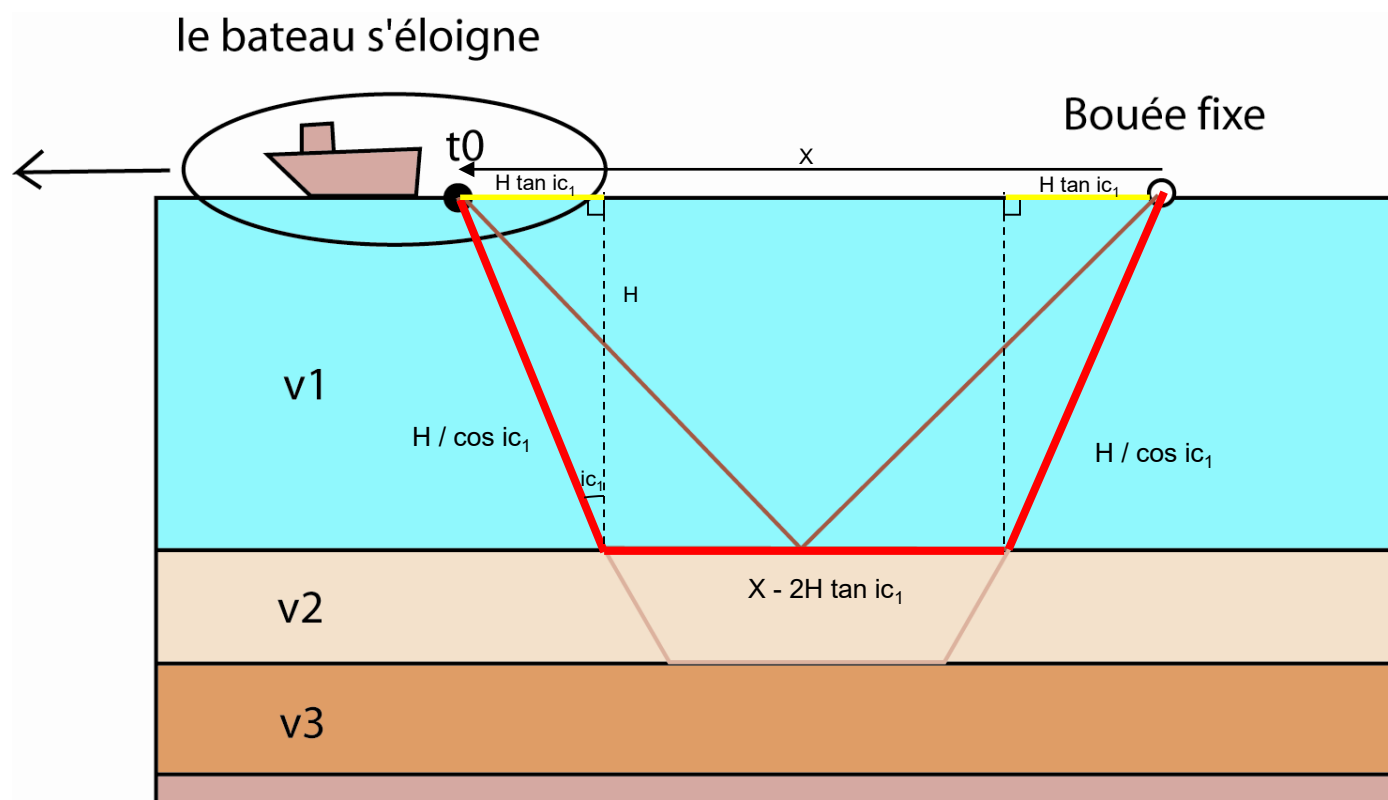
Pour les **ondes réfléchies**, la distance et le temps de parcours sont:

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

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

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

$$T = \frac{1}{V_1} \sqrt{X^2 + 4H^2}$$



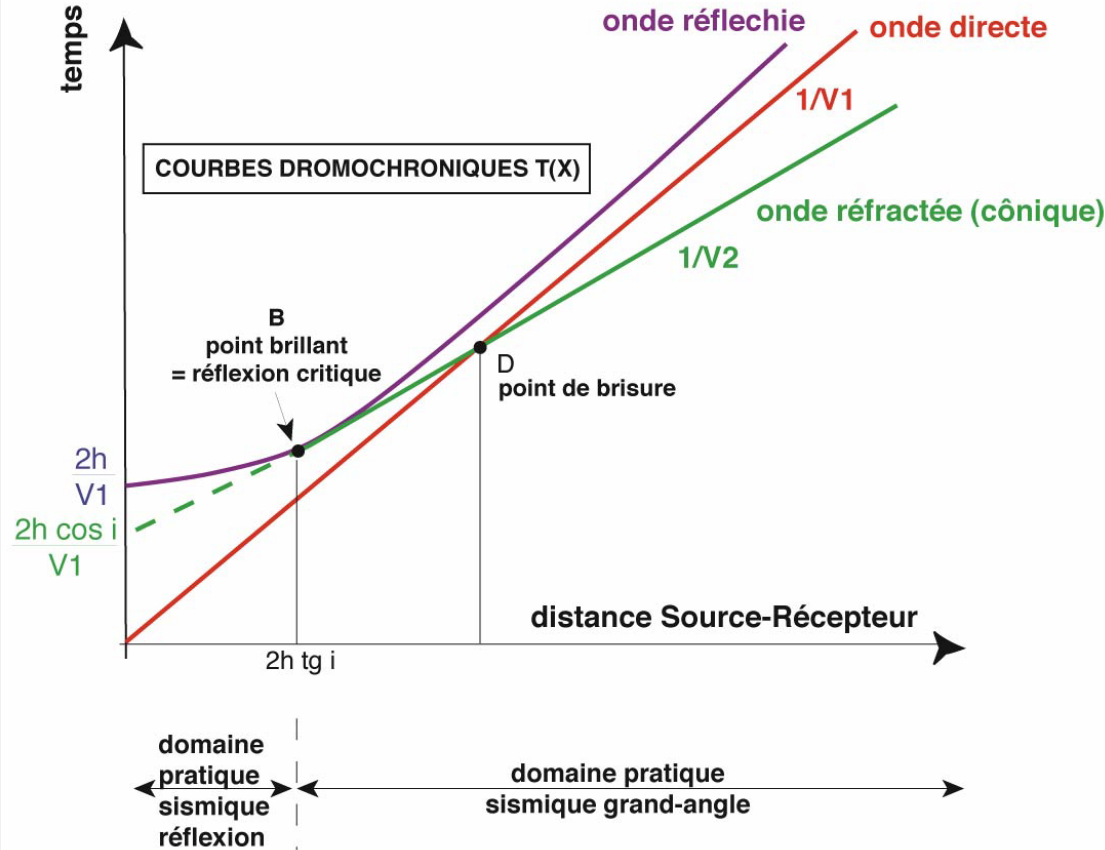
Pour la **première réfractée**, le temps de parcours est :

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

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

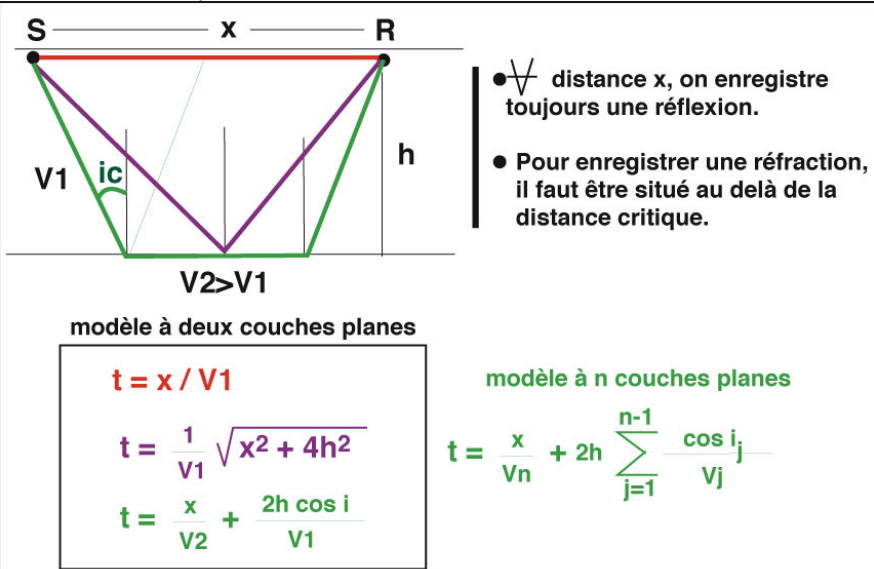
C' est donc une droite, dont la pente est $1/v_2$

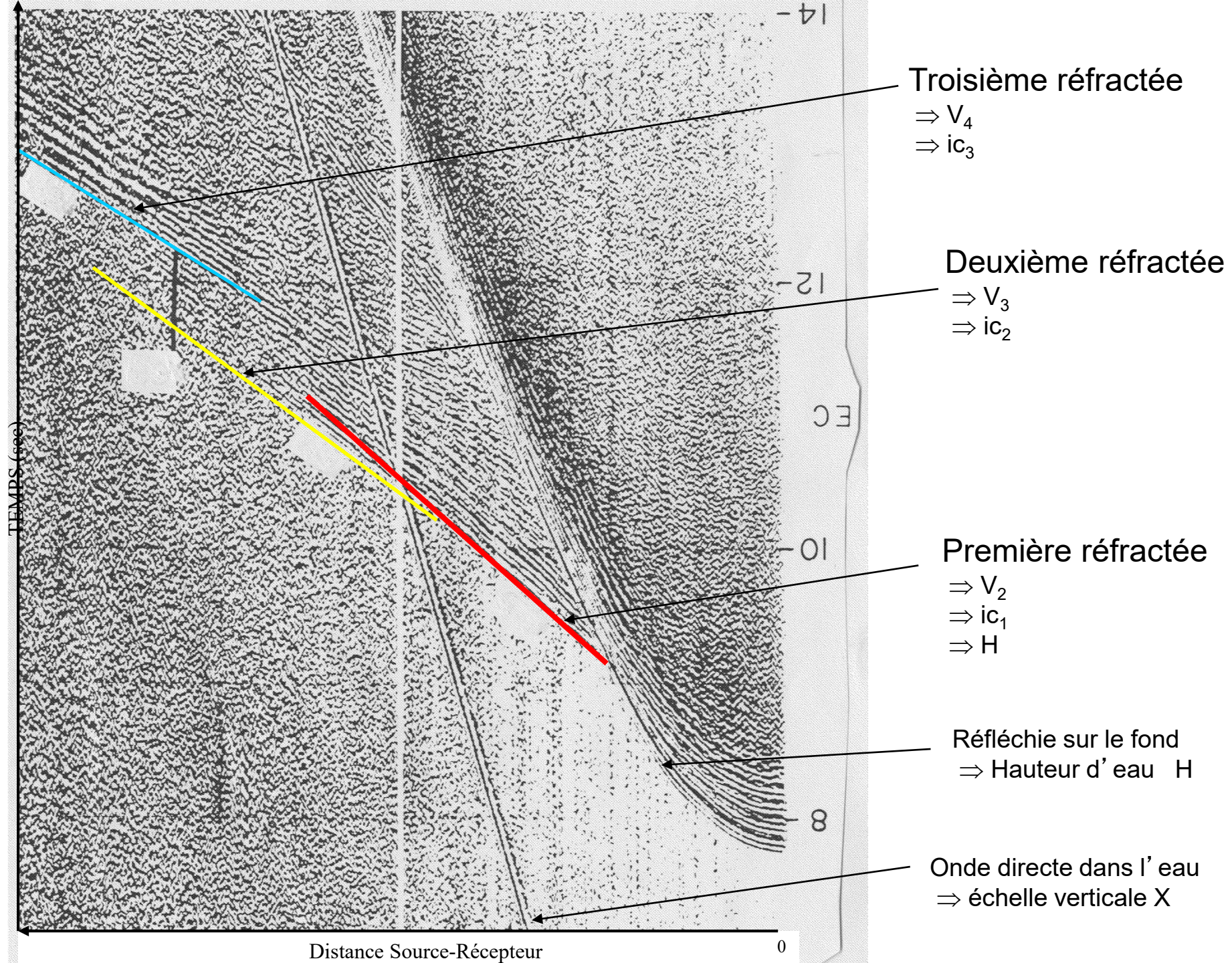
Présentation des données



Equations des ondes

- Onde directe
- Onde réfléchie
- Onde conique





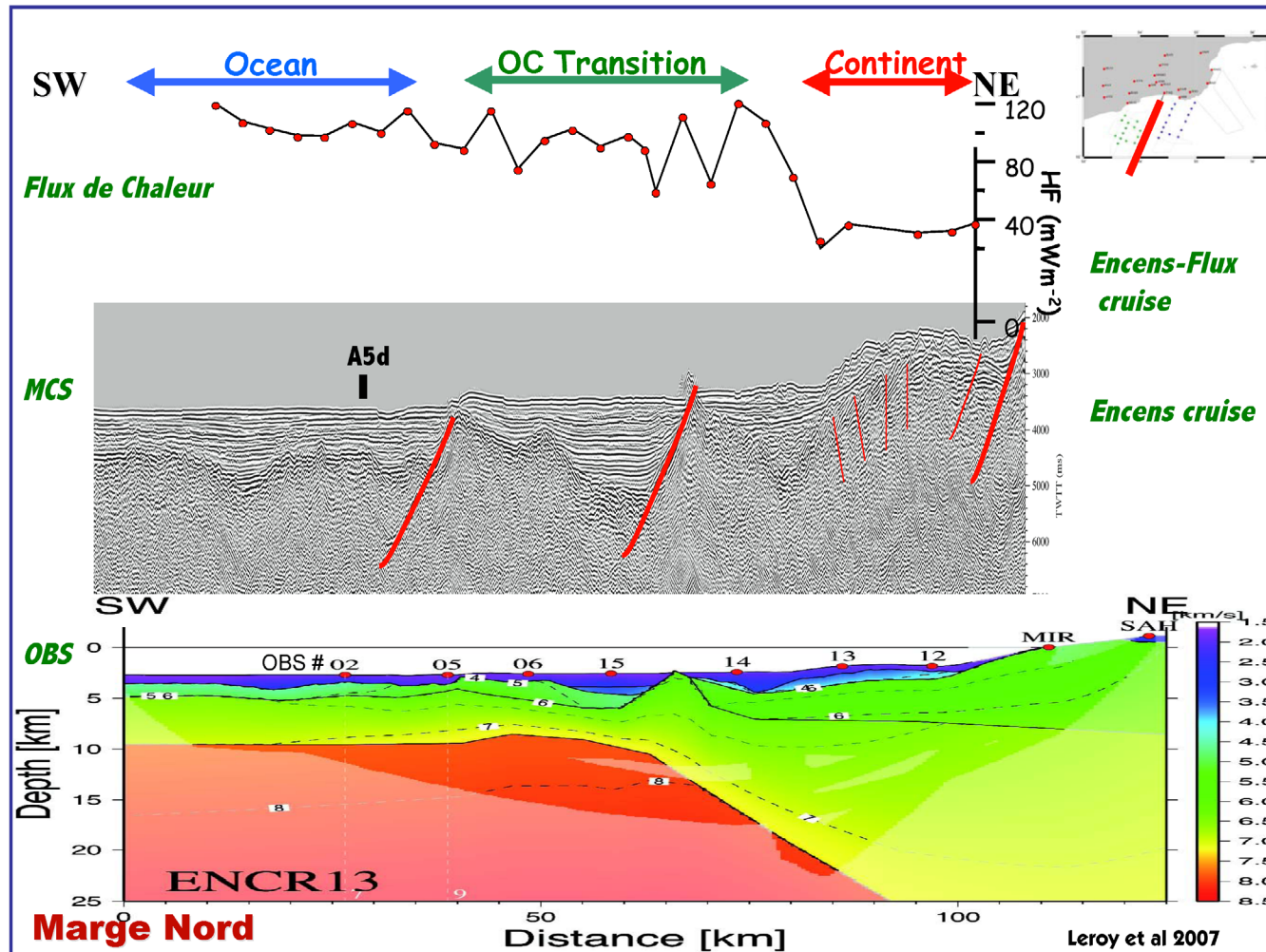
CONCLUSION

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.

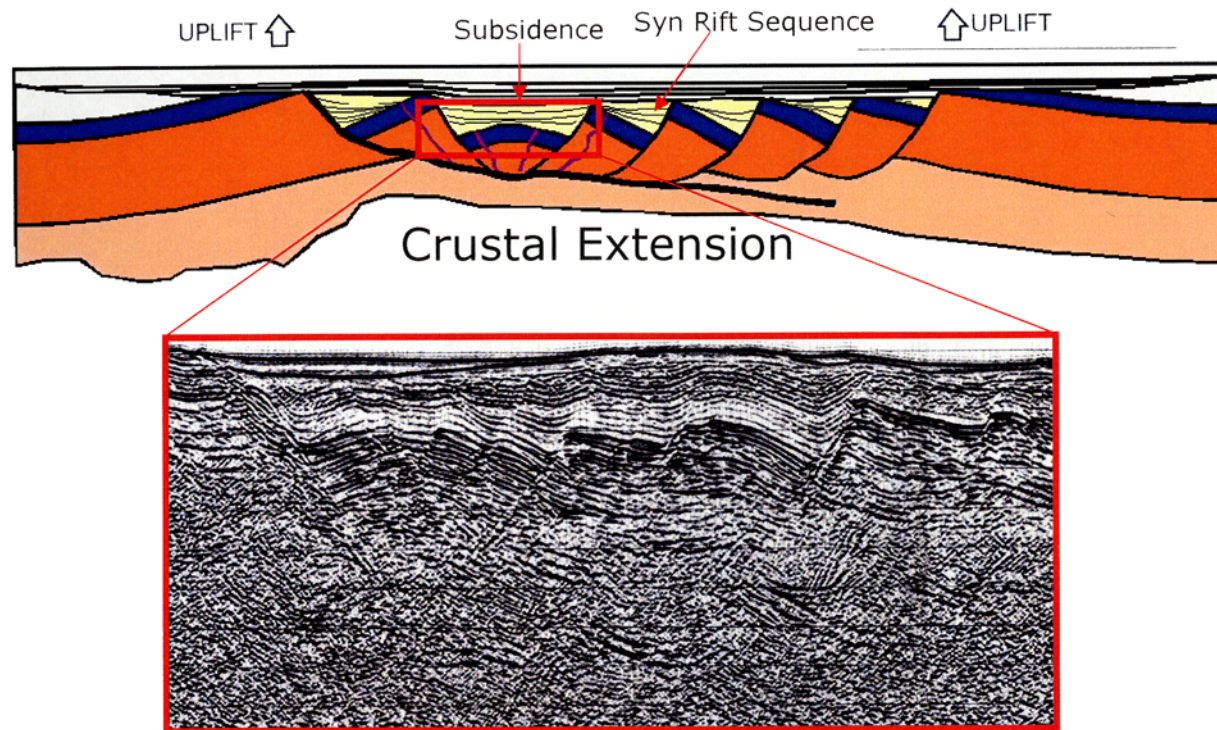
IMAGERIE GEOPHYSIQUE

Nécessité de combiner le maximum d'outils géophysiques (Bathymétrie, Sismique réflexion, réfraction, gravimétrie, magnétisme,...) afin d'imager au mieux les objets géologiques



CONTEXTE EXTENSIF :

Rift continental



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

La Convolution

Signal x Log de réflectivité

Cas idéal : signal incident = 1 dirac $d(t)$

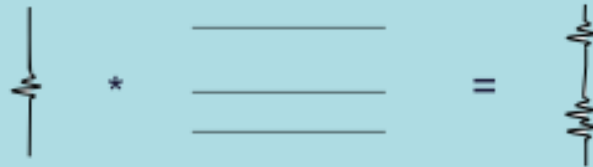
$$d(t) * r(t) = T(t)$$



Cas réel :

Signal incident non impulsionnel $S(t)$

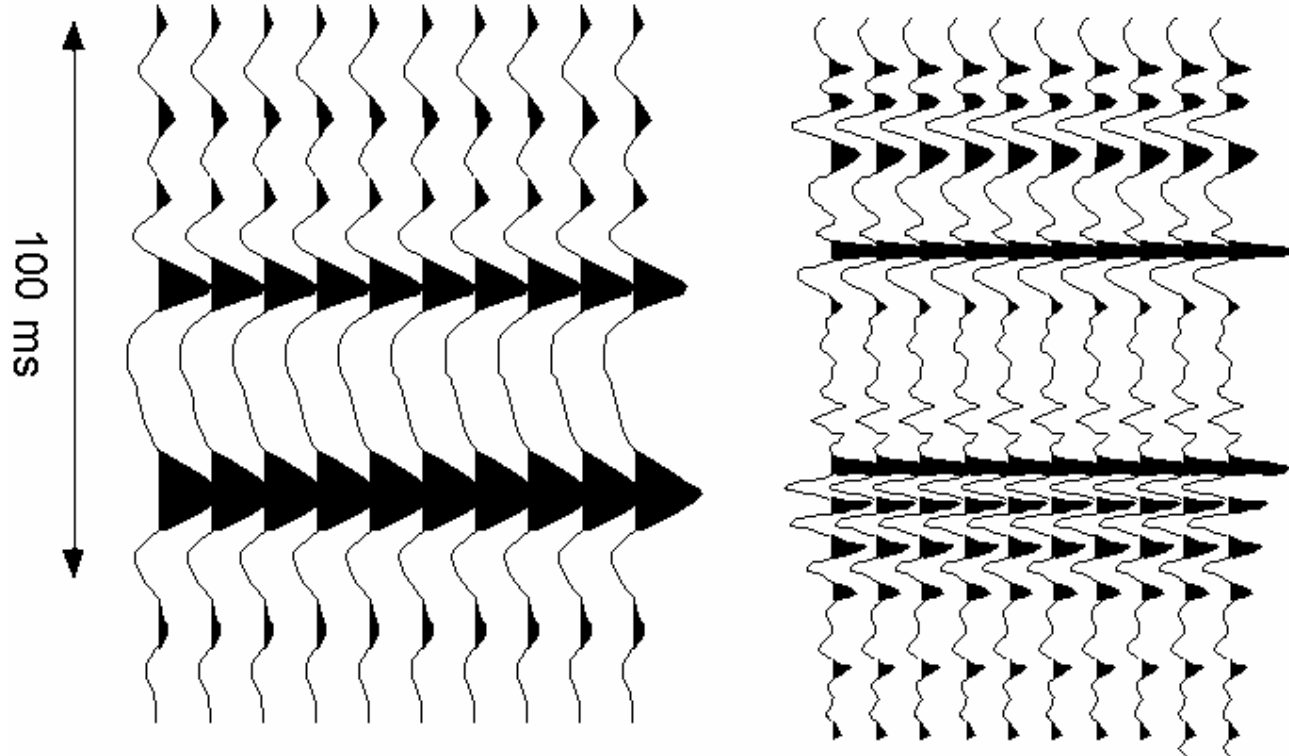
$$S(t) * r(t) = T(t)$$



Fréquence du signal

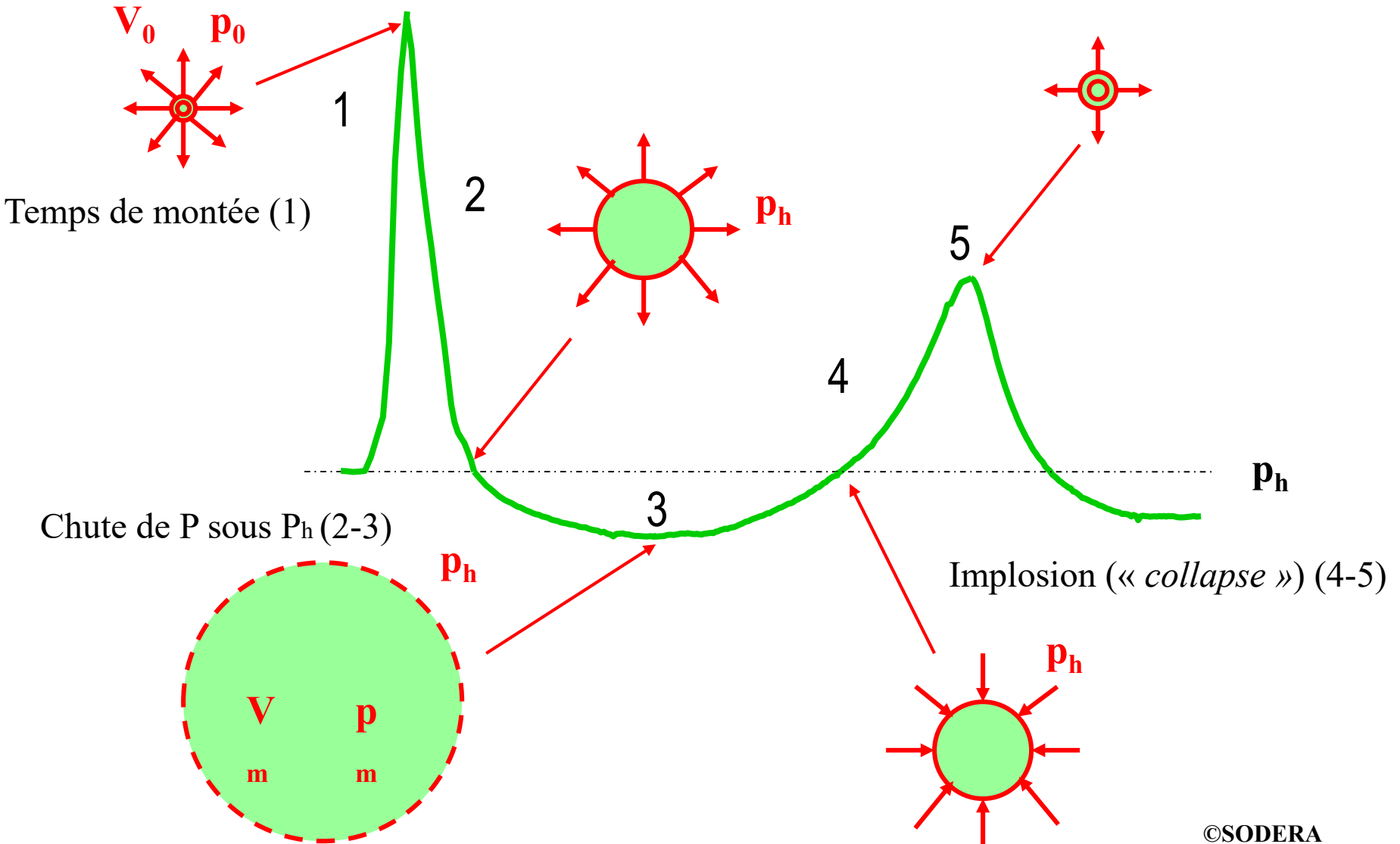
30 Hz data

80 Hz data



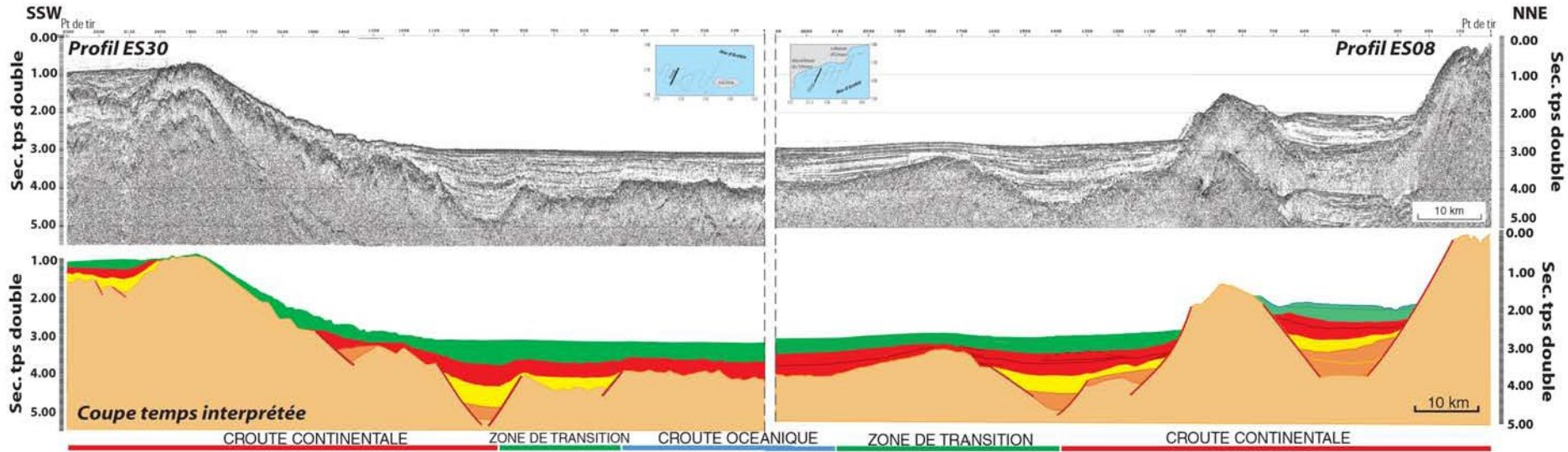
multiple traces of the same wiggle

Signal émis par le canon à air & Oscillation de bulle

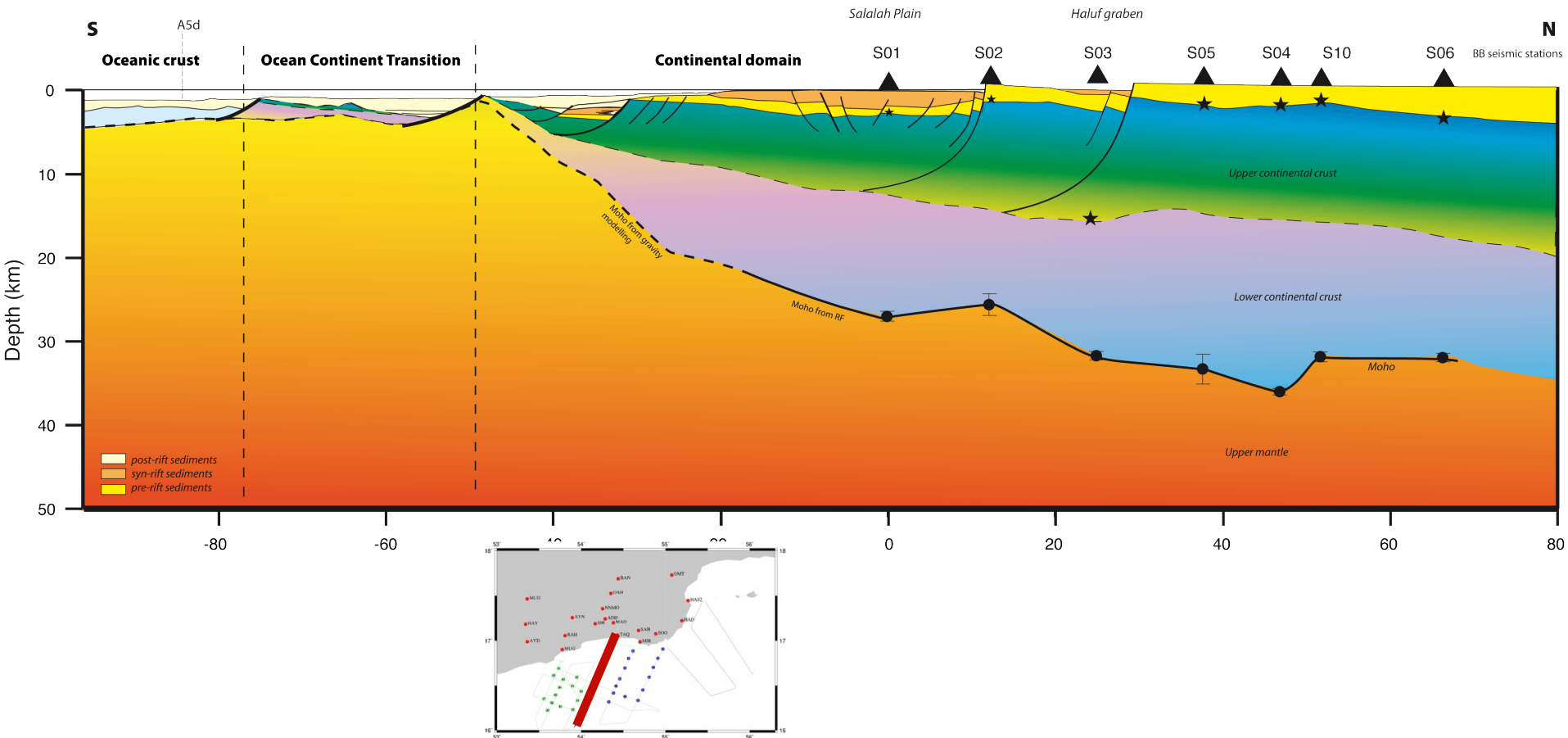


Marge Sud

Marge Nord



Coupe à l'échelle crustale d'une marge passive



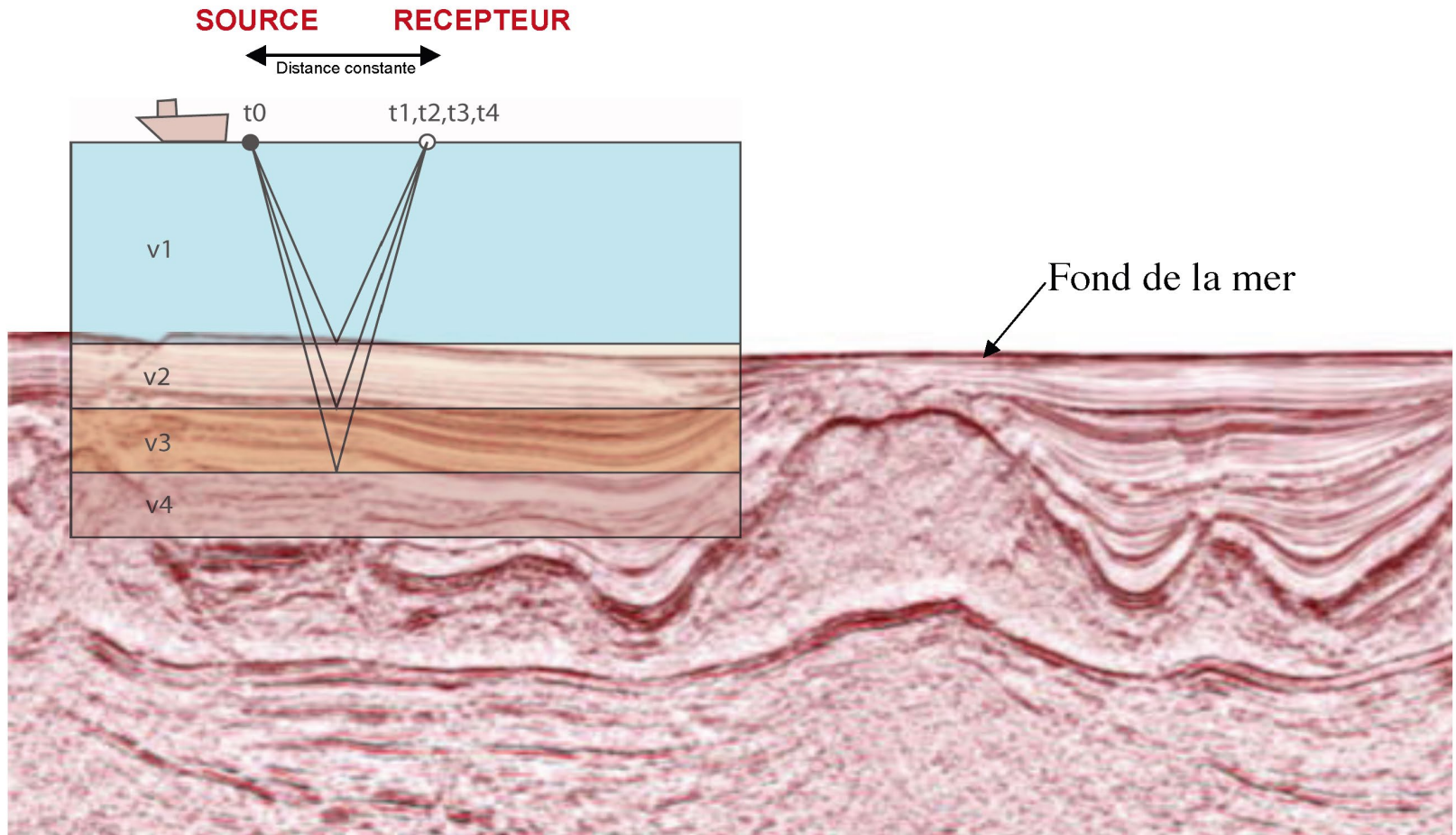
Source: Quelles exigences?

- Pouvoir de pénétration
- Pouvoir de résolution (verticale et horizontale)
- Cadence de tir
 - Puissance: P, V
 - Distance entre tirs
- Fidélité de l'émission
500 000 tirs (50 000 il y a 10 ans)
- Facilité d'emploi
- Prix



Un compresseur: Hamworthy, 300 m³/h

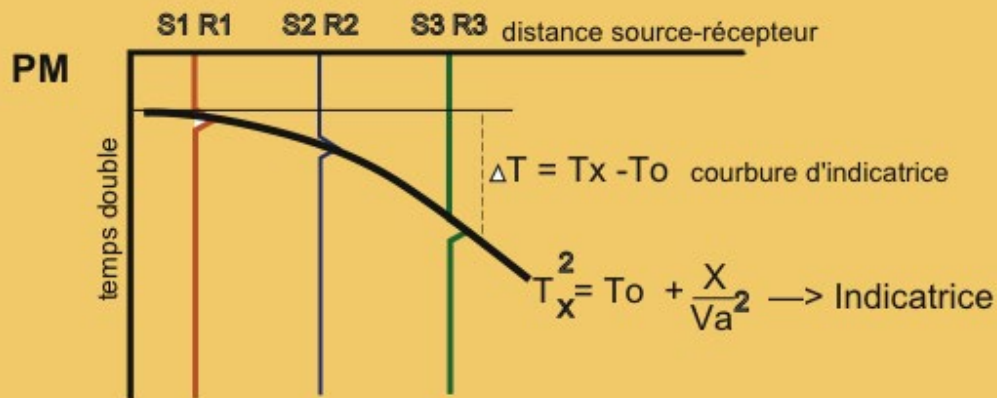
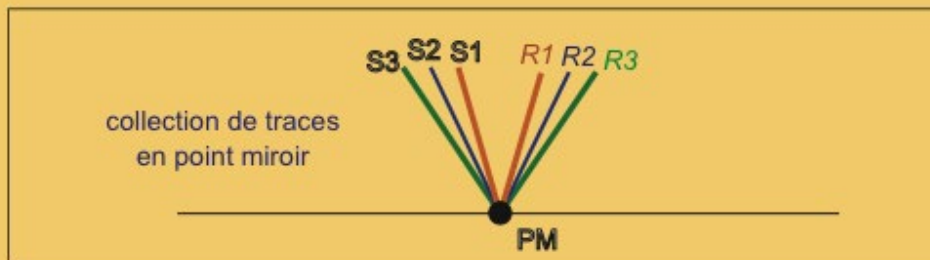
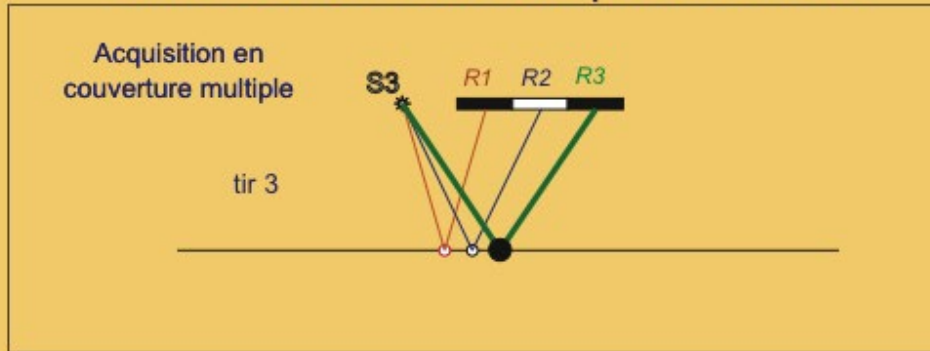
La sismique réflexion



La correction dynamique

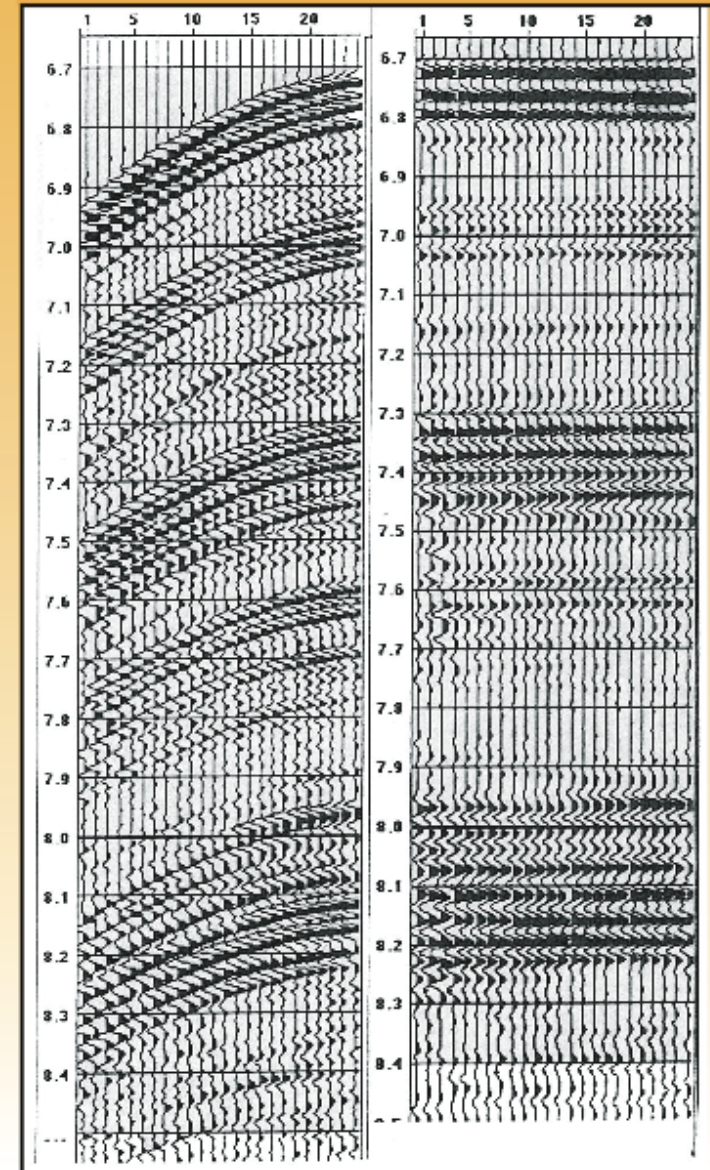
Correction NMO (Normal Move Out)

Collecte des traces en points miroirs



CMP enregistré

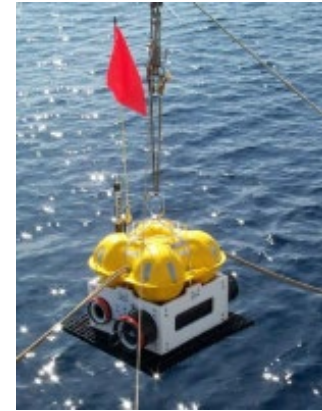
CMP corrigé NMO



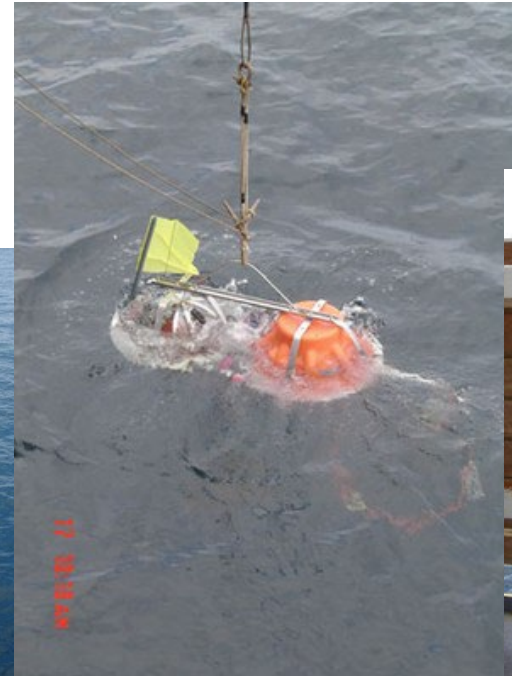
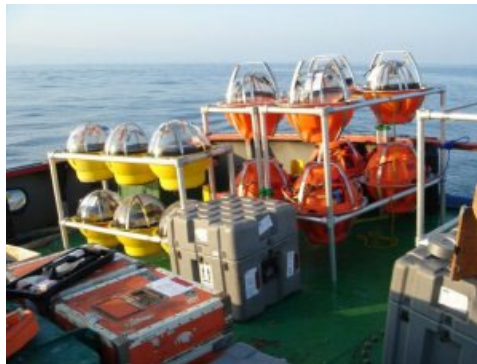
Préparation des instruments à terre



- ✓ OBS (Ocean Bottom Seismometers)
- ✓ Sismographe faible consommation
- ✓ Conteneur étanche en verre



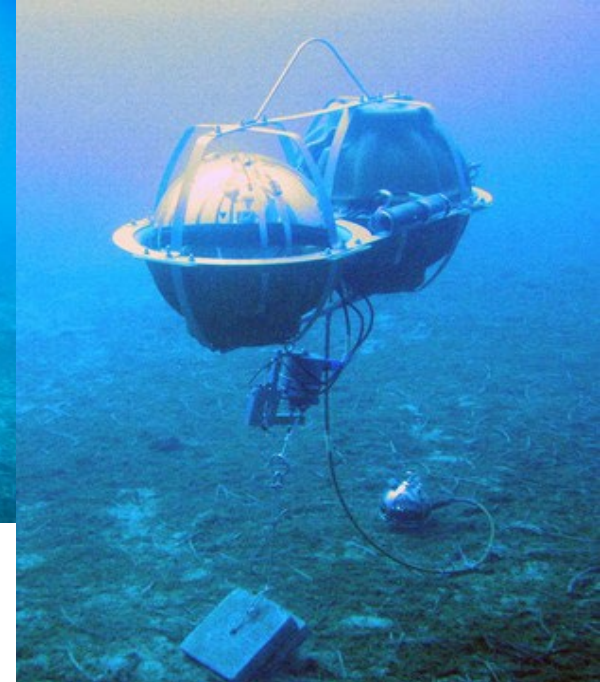
Mise à l'eau des OBS



Tirs avec l'Atalante



Remontée des OBS



Récupération des OBS

