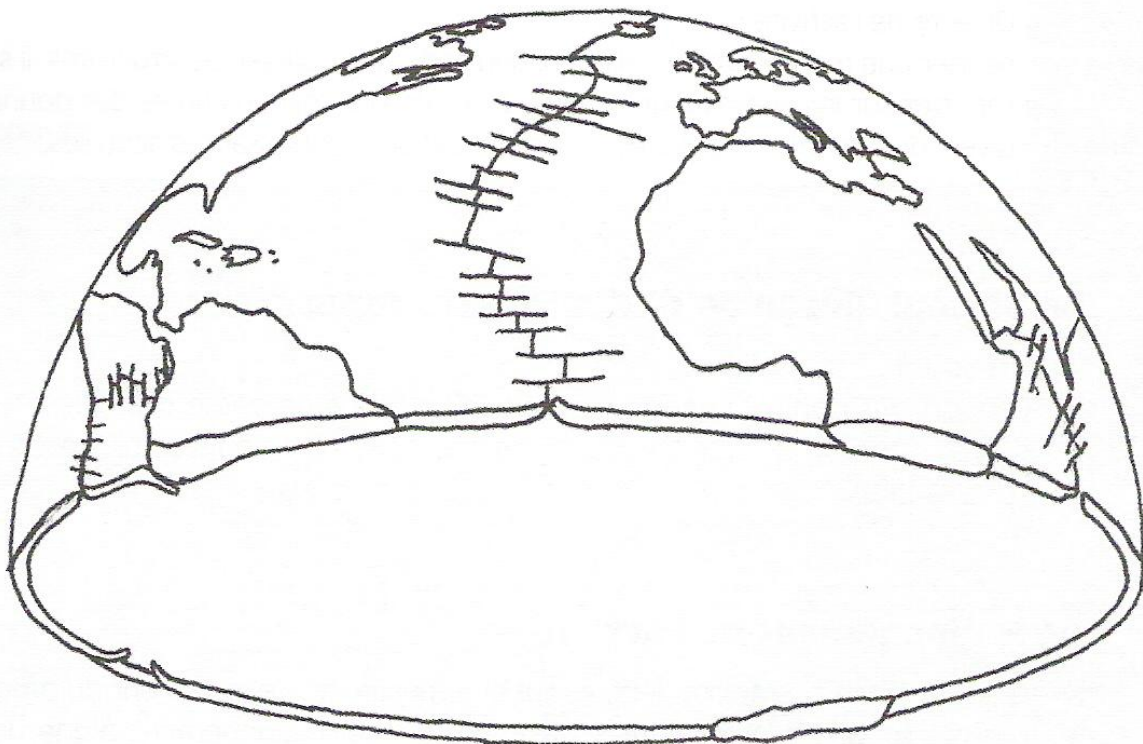


ST- B : STRUCTURE DE LA PLANÈTE TERRE

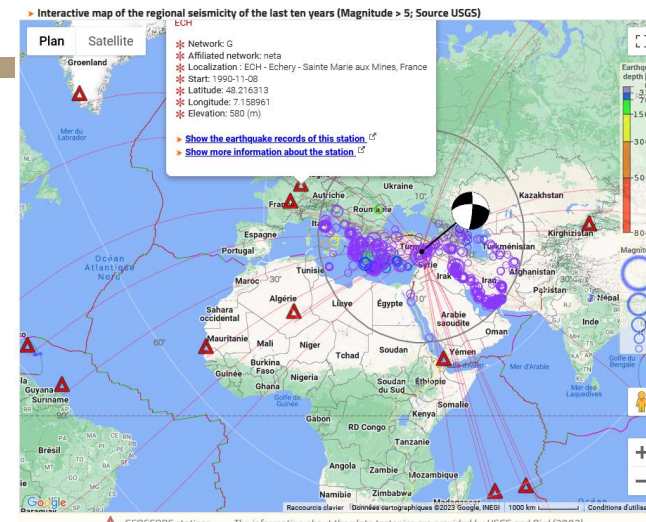


EXTRAIT DU B.O.

Savoirs visés	Capacités exigibles
<p>La Terre est constituée d'enveloppes concentriques solides, liquides et gazeuses qui se distinguent par leur nature et leurs propriétés physico-chimiques.</p> <p>Croûtes, manteau et noyau sont définis sur la base de leur nature chimique et minéralogique ; lithosphère et asthénosphère sur la base de leurs propriétés rhéologiques et thermiques.</p> <p>La nature minéralogique du manteau varie avec la profondeur.</p>	<ul style="list-style-type: none">- Expliquer la construction d'un modèle radial de la Terre solide (modèle PREM).- Exploiter et relier des données géophysiques permettant d'établir des discontinuités physiques ou chimiques dans le globe.- Exploiter des données géophysiques et expérimentales montrant les transitions de phase dans le manteau.



Padang (île de Sumatra, après le tremblement de terre de 2009)
(source: S. Dalaine)



DESCRIPTION CHANNELS SENSORS SEISMIC WAVE

Working station

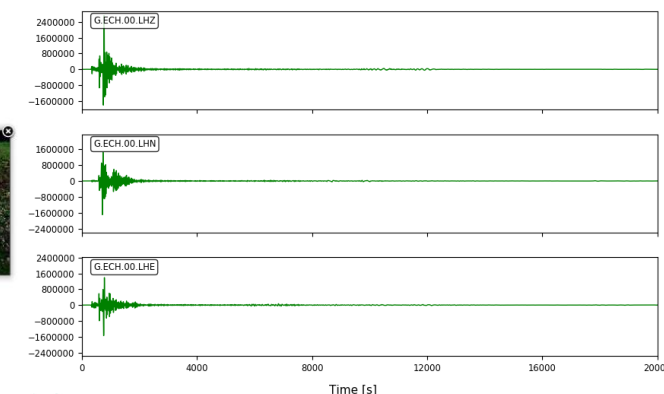
- Network: G
- Network description: GEOSCOPE - French Global Network of Seismological Broadband Stations
- Site name: Echery - Sainte Marie aux Mines, France
- Start: 1990-11-08T00:00:00
- End:
- Latitude: 48.215313°
- Longitude: 7.158961°
- Elevation: 580 (m)

See description

Site description not yet available

Station comments	Start	End
Maintenance in progress	2016-07-27 00:07:48	2016-08-01 00:08:00
Occasional data loss due to transmission issues	2016-08-24 10:08:00	2016-08-25 11:08:00
Station in down	2008-07-23 13:07:00	2008-07-28 07:07:00
Occasional data loss	1995-04-24 23:04:00	1995-11-12 10:11:00
Occasional data loss	1995-04-24 23:04:00	1995-11-12 10:11:00
Frequent data loss	1992-07-07 10:07:00	1992-10-09 07:00
Sensors responses contain nominal values	1990-11-08 00:11:00	
Error on sensors poles may reach 2 percent	1990-11-08 00:11:00	

Mw=7.7, TURKEY (Depth: 13 km), 2023/02/06 10:24:49 UTC
Seismograms of LH channels (velocity) from ECH station (GEOSCOPE)
Distance : 2672 km (23.98°) - Azi : 304.75°
Data are filtered between 0.003Hz and 0.03Hz



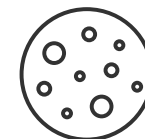
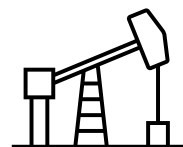
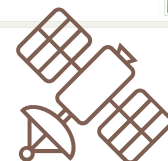
Created on: 2023-02-06 17:15:23

Download graph in PDF: graph-ECH-LH.pdf

<http://geoscope.ipgp.fr/index.php/en/catalog/earthquake-description?seis=us6000jlqa>



Comment connaît-on la structure interne du globe terrestre?





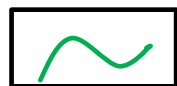
Croûte continentale + manteau lithosphérique

Lithosphère continentale



Croûte océanique + manteau lithosphérique

Lithosphère océanique



Manteau supérieur



Manteau inférieur



Noyau liquide



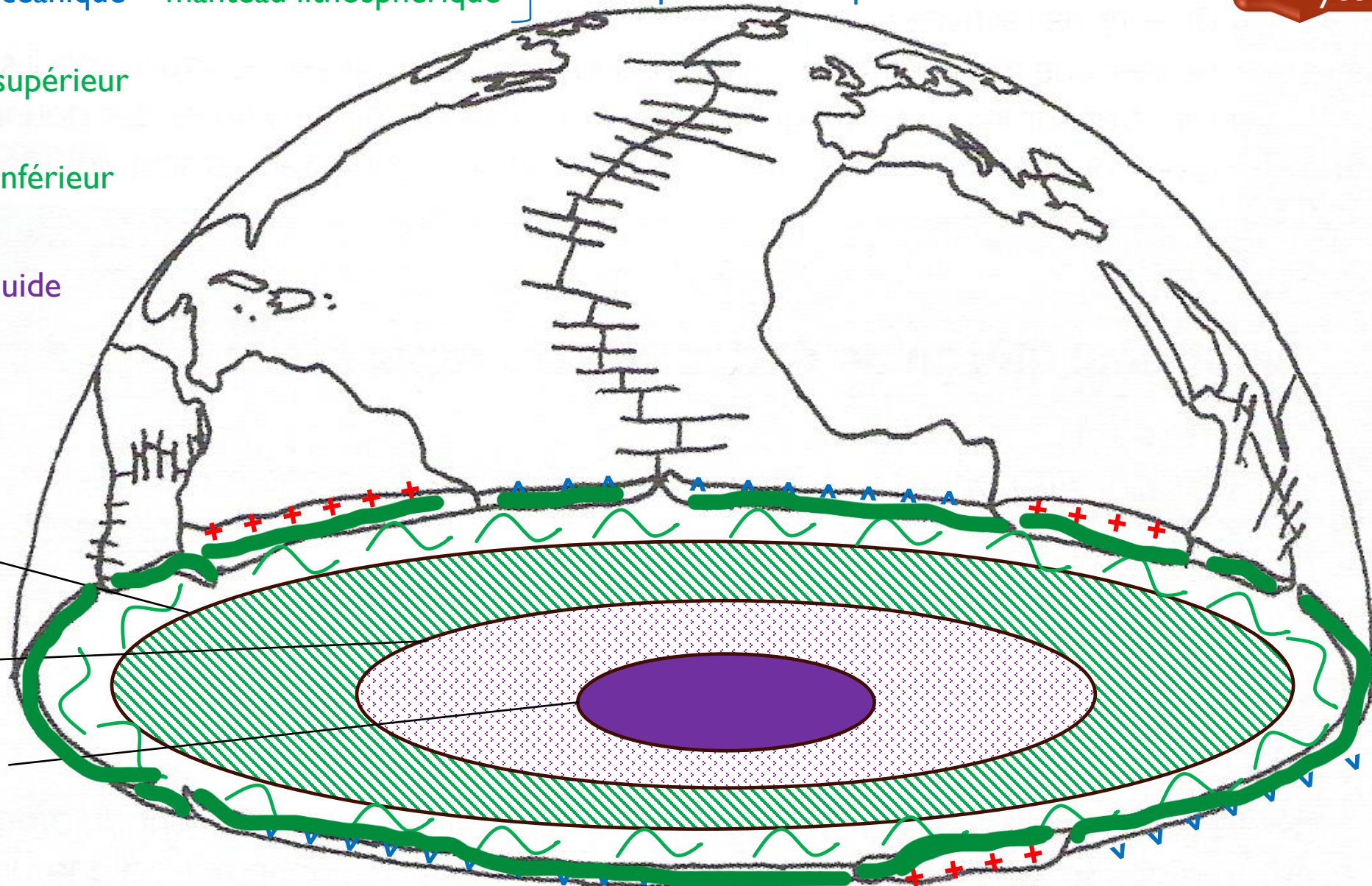
Graine

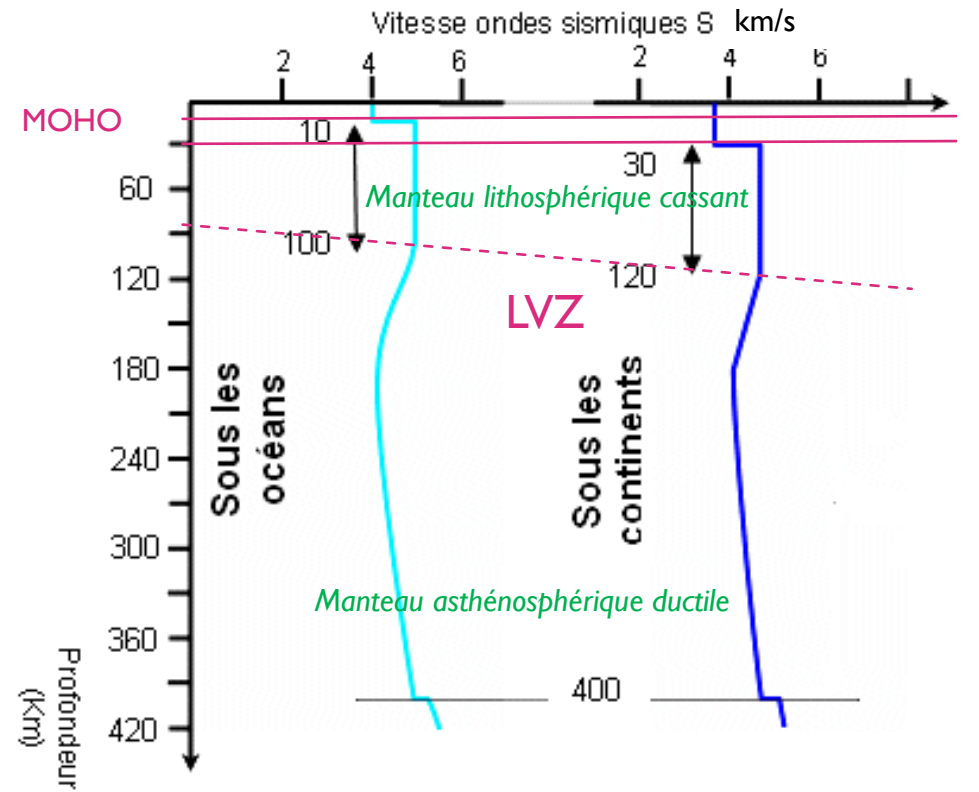
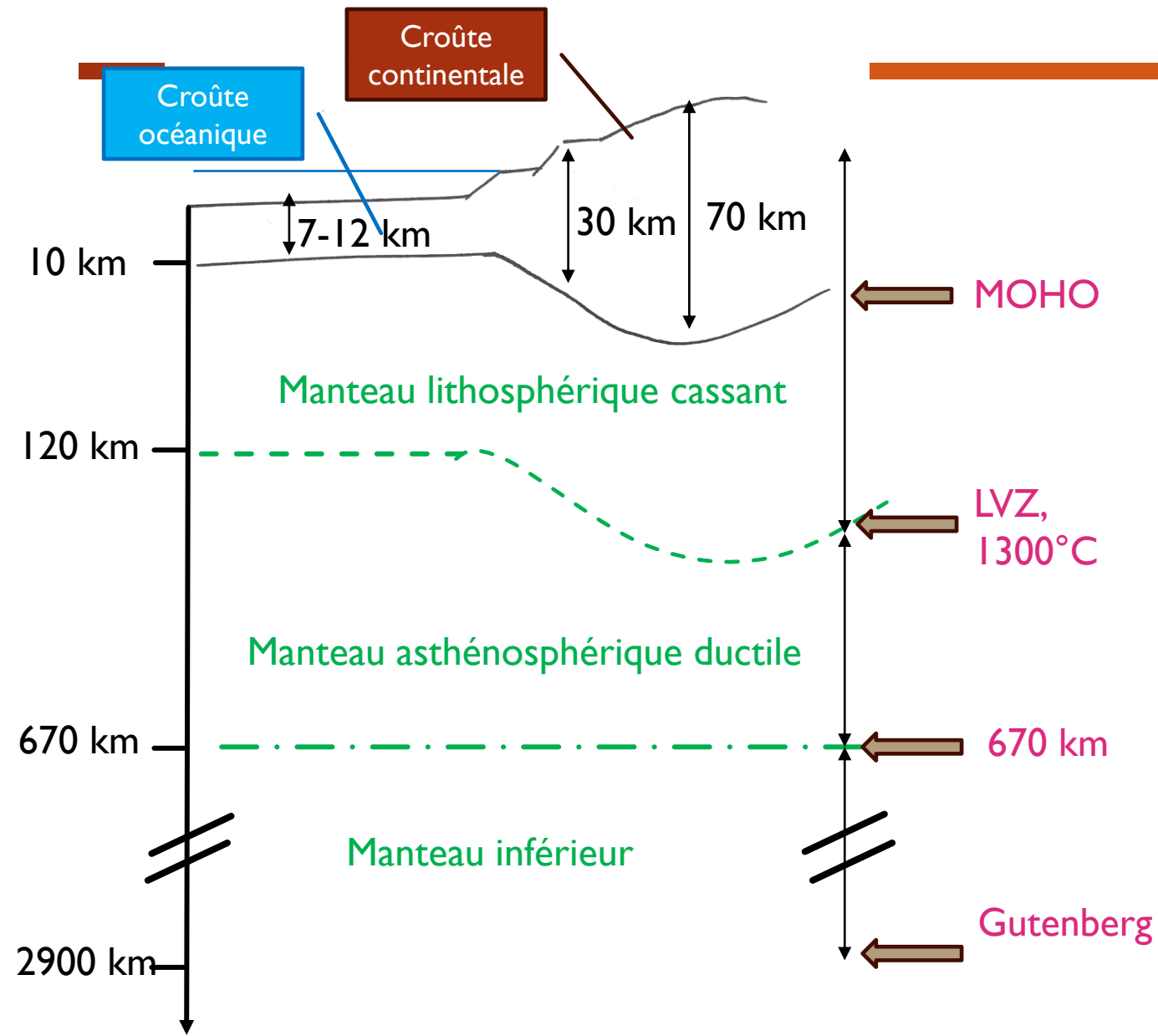
Rappels de lycée

670 km: Limite manteau sup-inf: accélération des ondes P et S

2900 km: Discontinuité de Gutenberg

5100 km: Discontinuité de Lehmann





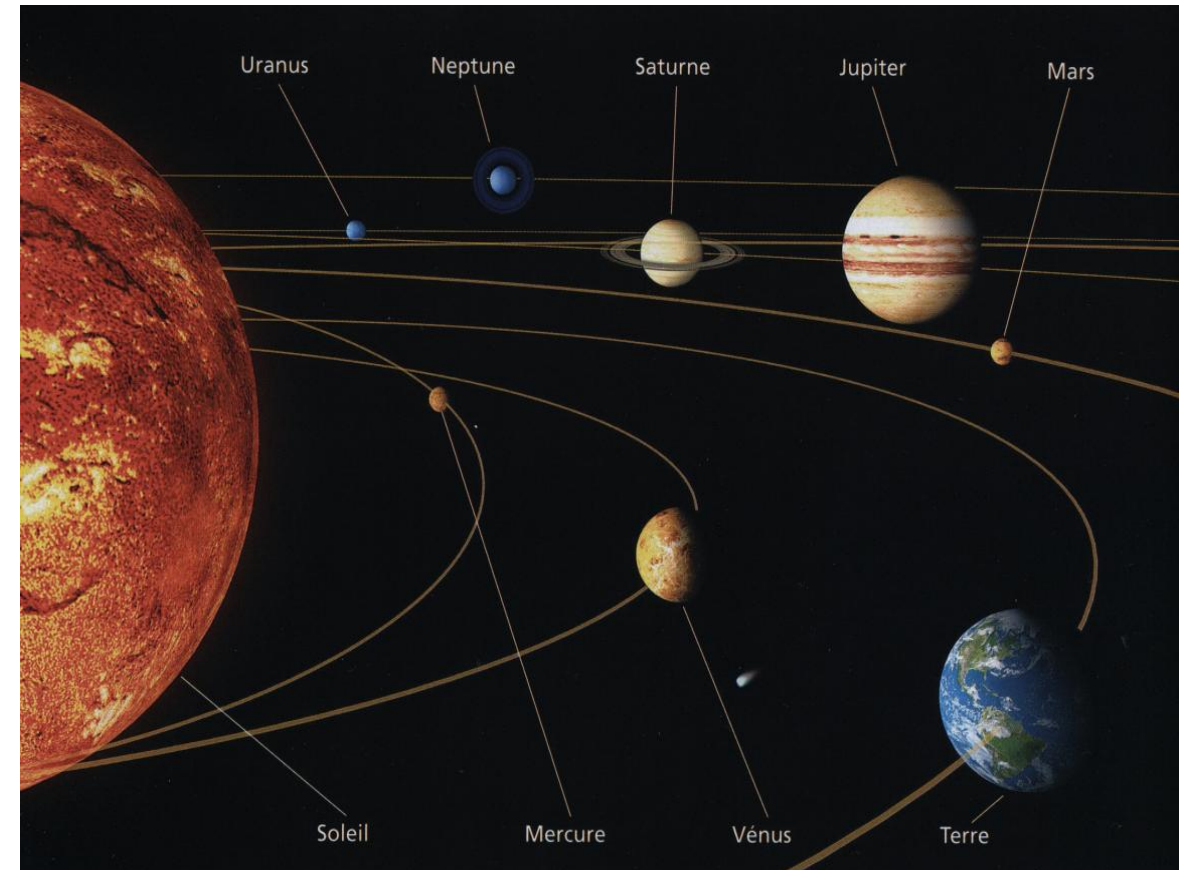
Vitesse des ondes sismiques S en fonction de la profondeur

Schéma d'une marge passive entre une lithosphère continentale et une lithosphère océanique

INTRODUCTION



- 9 planètes du système solaire
- planètes **telluriques**: Mercure, Vénus, Terre et Mars
- Terre: 4 enveloppes: l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et la géosphère
 - ⇒ **enveloppes concentriques solides, liquides et gazeuses**
 - ⇒ Seule planète du système solaire habitée
- **ellipsoïde de révolution** (Terre aplatie aux pôles).
 - ⇒ Rayon équatorial = 6378 km
 - ⇒ Rayon polaire = 6357 km
 - ⇒ Rayon **moyen** = **6370 km**
- **Densité moyenne: 5,52**



Quelle est la structure de la Terre ?

Quels outils et quelles méthodes ont permis de comprendre et **modéliser** cette structure ?

I. La Terre est formée d'enveloppes gazeuses, liquides et solides

A. L'atmosphère et l'hydrosphère forment des enveloppes fluides de surface stratifiées

1. Composition et structure de l'atmosphère

2. L'hydrosphère est stratifiée

B. Les données de sismologie mettent en évidence l'existence d'enveloppes concentriques

1. Séismes et ondes sismiques

2. L'étude des vitesses de propagation des ondes P et S met en évidence des surfaces de discontinuité

3. L'étude des trajectoires des ondes sismiques permet d'identifier des surfaces de discontinuité

4. Le Moho marque la base de la croûte

5. La surface de Gutenberg est à la base du manteau

6. La surface de Lehmann sépare les noyaux externe et interne

C. L'étude de la propagation des ondes permet également de déterminer les propriétés des matériaux.

1. Les vitesses des ondes P et S dépendent des propriétés des matériaux

2. Interprétation des hodochrones

3. Mise en évidence d'une zone de faibles vitesses : LVZ

4. Les données de laboratoire expliquent les sauts de vitesse entre 400 et 670 km : transitions de phase

D. Bilan : modèle PREM

1. Modèle PREM

2. Signification des discontinuités

II. Les échantillons nous renseignent sur les premières enveloppes solides

A. Les croûtes affleurent directement

1. La croûte continentale peut être échantillonnée

2. La lithosphère océanique est parfois directement accessible

B. Le manteau peut rarement être échantillonné

1. Certaines roches contiennent des enclaves de manteau (xénolithes)

2. Le manteau est formé de péridotites

3. Transitions de phases dans le manteau

C. Bilan : comparaison LO/LC

1. Différence de structure :

2. Différence de devenir :

III. Les enveloppes plus profondes ne sont connues que de façon indirecte

A. Le fer et le nickel doivent se concentrer dans le noyau

1. L'étude de la gravité montre que le cœur est dense

2. La comparaison avec des chondrites montre que croûte et manteau sont trop pauvres en Fer et nickel.

B. Le noyau doit comporter une partie liquide

1. Données sismiques

2. Etude du champ magnétique

C. Les limites supérieures et inférieures du noyau sont des zones de réaction

1. Couche D'' : interface péridotite/Fer Ni

2. Une graine qui grossit

Conclusion

I. La Terre est formée d'enveloppes gazeuses, liquides et solides

A. L'atmosphère et l'hydrosphère forment des enveloppes fluides de surface stratifiées

1. Composition et structure de l'atmosphère

2. L'hydrosphère est stratifiée

B. Les données de sismologie mettent en évidence l'existence d'enveloppes concentriques

1. Séismes et ondes sismiques

2. L'étude des vitesses de propagation des ondes P et S met en évidence des surfaces de discontinuité

3. L'étude des trajectoires des ondes sismiques permet d'identifier des surfaces de discontinuité

4. Le Moho marque la base de la croûte

5. La surface de Gutenberg est à la base du manteau

6. La surface de Lehmann sépare les noyaux externe et interne

C. L'étude de la propagation des ondes permet également de déterminer les propriétés des matériaux.

1. Les vitesses des ondes P et S dépendent des propriétés des matériaux

2. Interprétation des hodochrones

3. Mise en évidence d'une zone de faibles vitesses : LVZ

4. Les données de laboratoire expliquent les sauts de vitesse entre 400 et 670 km : transitions de phase

D. Bilan : modèle PREM

1. Modèle PREM

2. Signification des discontinuités

II. Les échantillons nous renseignent sur les premières enveloppes solides

A. Les croûtes affleurent directement

1. La croûte continentale peut être échantillonnée

2. La lithosphère océanique est parfois directement accessible

B. Le manteau peut rarement être échantillonné

1. Certaines roches contiennent des enclaves de manteau (xénolithes)

2. Le manteau est formé de péridotites

3. Transitions de phases dans le manteau

C. Bilan : comparaison LO/LC

1. Différence de structure :

2. Différence de devenir :

III. Les enveloppes plus profondes ne sont connues que de façon indirecte

A. Le fer et le nickel doivent se concentrer dans le noyau

1. L'étude de la gravité montre que le cœur est dense

2. La comparaison avec des chondrites montre que croûte et manteau sont trop pauvres en Fer et nickel.

B. Le noyau doit comporter une partie liquide

1. Données sismiques

2. Etude du champ magnétique

C. Les limites supérieures et inférieures du noyau sont des zones de réaction

1. Couche D'' : interface péridotite/Fer Ni

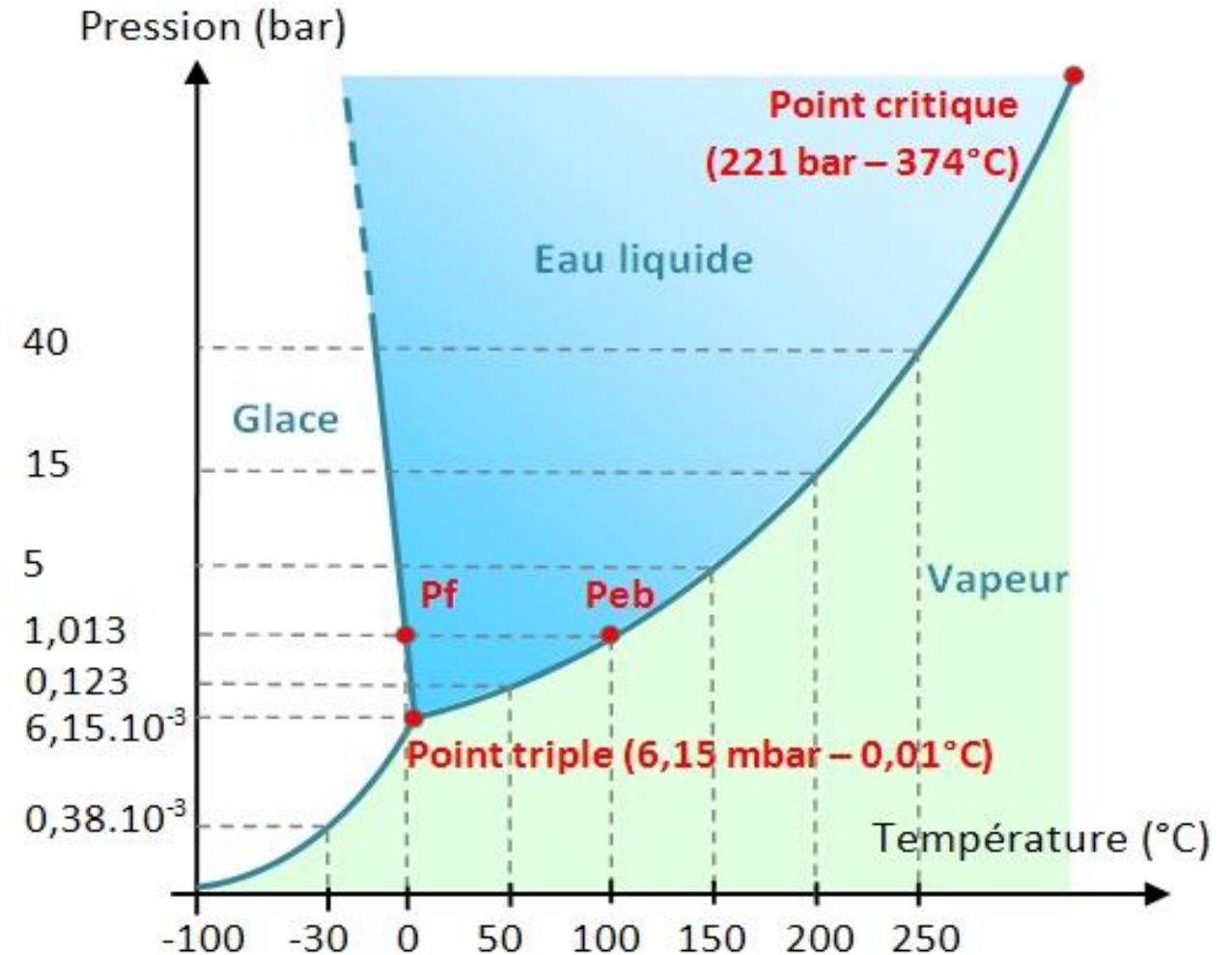
2. Une graine qui grossit

Conclusion

I. LA TERRE EST FORMÉE D'ENVELOPPES GAZEUSES, LIQUIDES ET SOLIDES



- Les conditions physico-chimiques régnant sur notre planète \Rightarrow seule planète à posséder de l'eau sous ses trois phases : solide, **liquide** et gazeuse.
- L'**hydrosphère**, enveloppe terrestre constituée d'eau (liquide ou solide), recouvre un peu plus de 70% de la surface de la Terre.
- La surface de la Terre est entourée d'une couche gazeuse appelée **atmosphère**.
- Atmosphère et hydrosphère forment les **enveloppes fluides** de la Terre.



A. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSPHERE FORMENT DES ENVELOPPES FLUIDES DE SURFACE STRATIFIEES

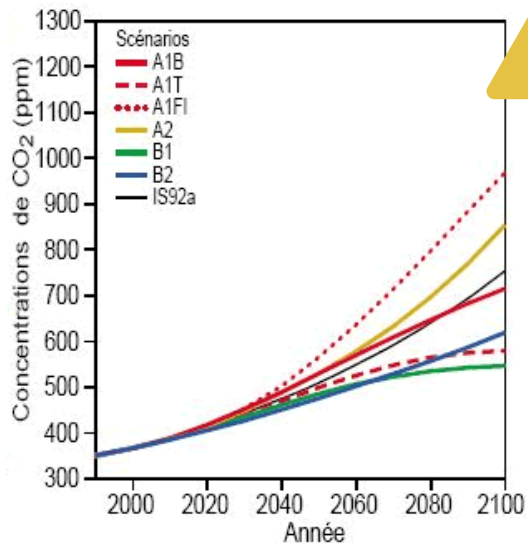
I. Composition et structure de l'atmosphère



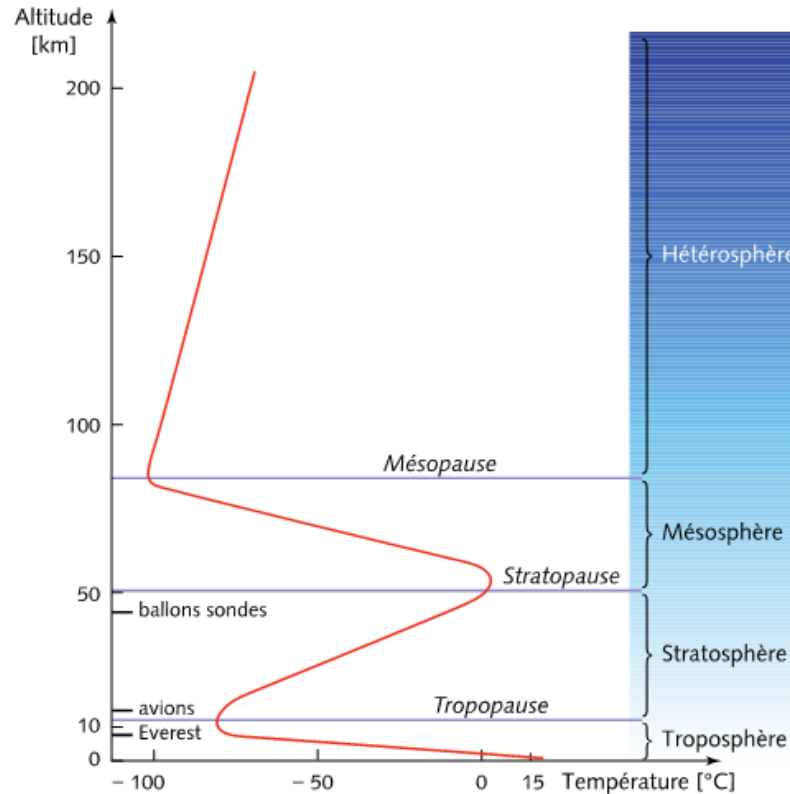
Gaz	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂
%	78	20	1	0,04



Figure 5 : composition globale de l'atmosphère



Divers scénarii de l'évolution du taux de CO₂ atmosphérique (GIEC)

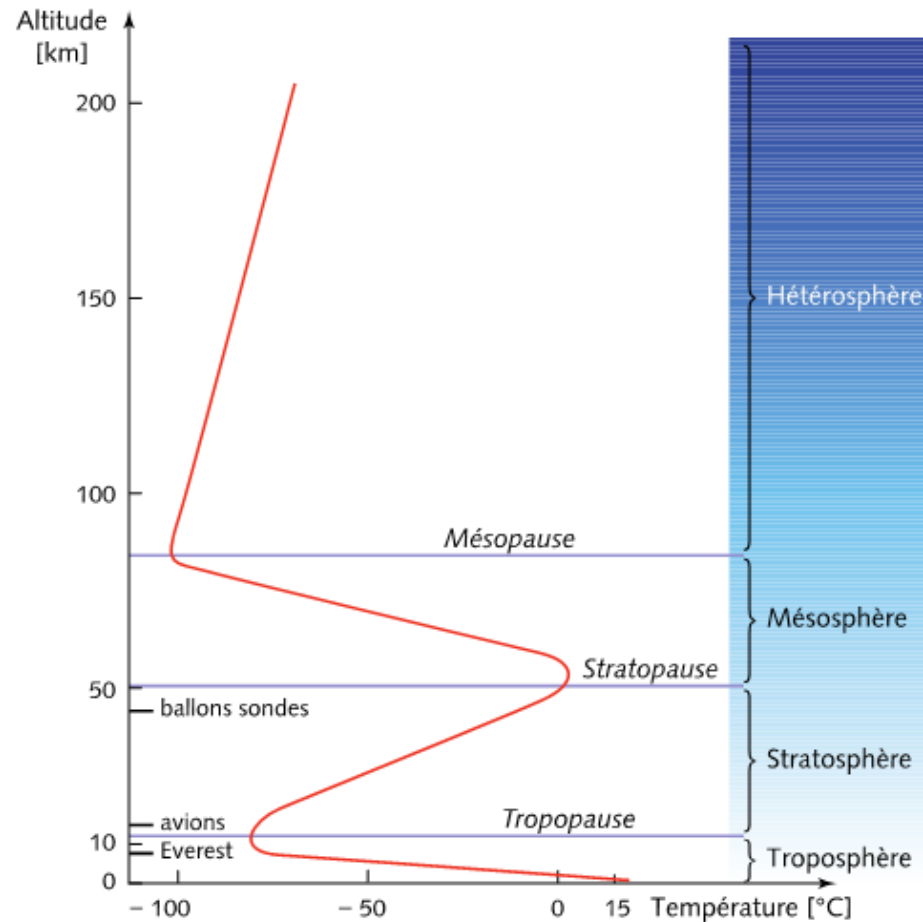


Stratification verticale de l'atmosphère

- P ↘ quand altitude ↗
- **Troposphère** (en grec tropos : tour) : **7 km** (régions polaires) à **18 km** (équateur)
 - **80% de la masse de l'atmosphère**
 - quasi-totalité de la vapeur d'eau
 - chauffée par le rayonnement du sol
 - ⇒ T°C ↘ quand altitude ↗ (6°C/km).
 - nombreux mouvements verticaux
 - **Tropopause**
- **Stratosphère** : jusqu'à **50 km**
 - absorption des UV par l'ozone
 - ⇒ ↗ T°C régulière → 0°C à 50 km

A. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSPHERE FORMENT DES ENVELOPPES FLUIDES DE SURFACE STRATIFIEES

I. Composition et structure de l'atmosphère



Stratification verticale de l'atmosphère

- **Mésosphère** : de **50 à 80 km** :
 - absence d'ozone donc plus d'absorption des UV!
 - ⇒ ↘ température jusqu'à -90°C
- **Thermosphère** : jusqu'à **500 km**
 - photodissociation du dioxygène
 - ⇒ ↗ température jusqu'à 1200°C

A. L'ATMOSPHERE ET L'HYDROSHERE FORMENT DES ENVELOPPES FLUIDES DE SURFACE STRATIFIEES

2. L'hydrosphere est stratifiée

- **L'hydrosphere (70% de surface terrestre): océans (97%) + eau douce (3%)** - glaciers, eau souterraine et eau de surface (rivières)
 - ⇒ Hydrosphere ~ eaux océaniques
 - ⇒ riches en sels dissous, en particulier le chlorure de sodium NaCl : **35g/L** en moyenne.

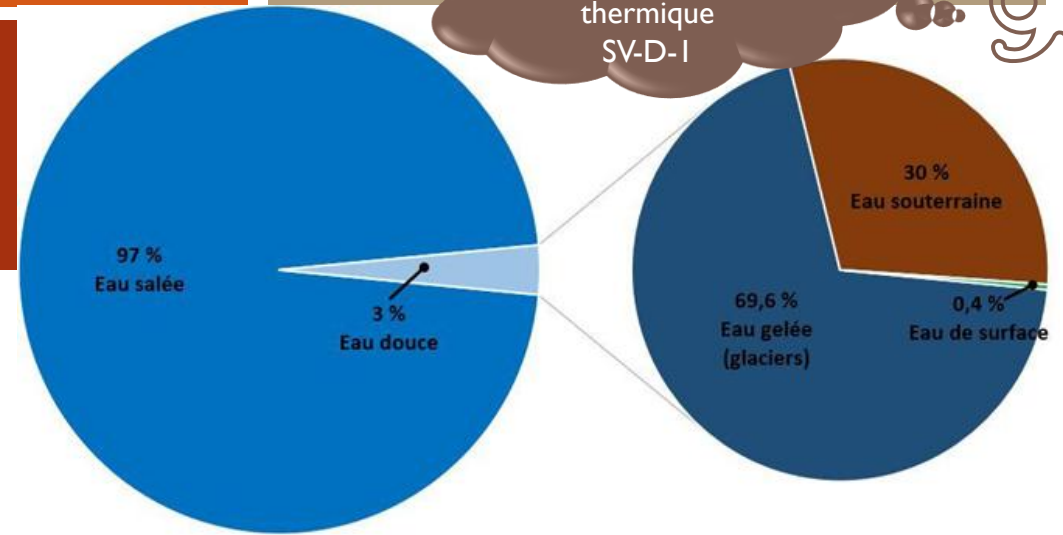
- **eaux de surface = couche de mélange** (entre 0 et 200 à 300m)

- fort **couplage** avec l'**atmosphère**
 - ⇒ T°C variables
 - ⇒ mouvements rapides (qq km /h) influencés par les vents
- 0 à 200 m: zone photique

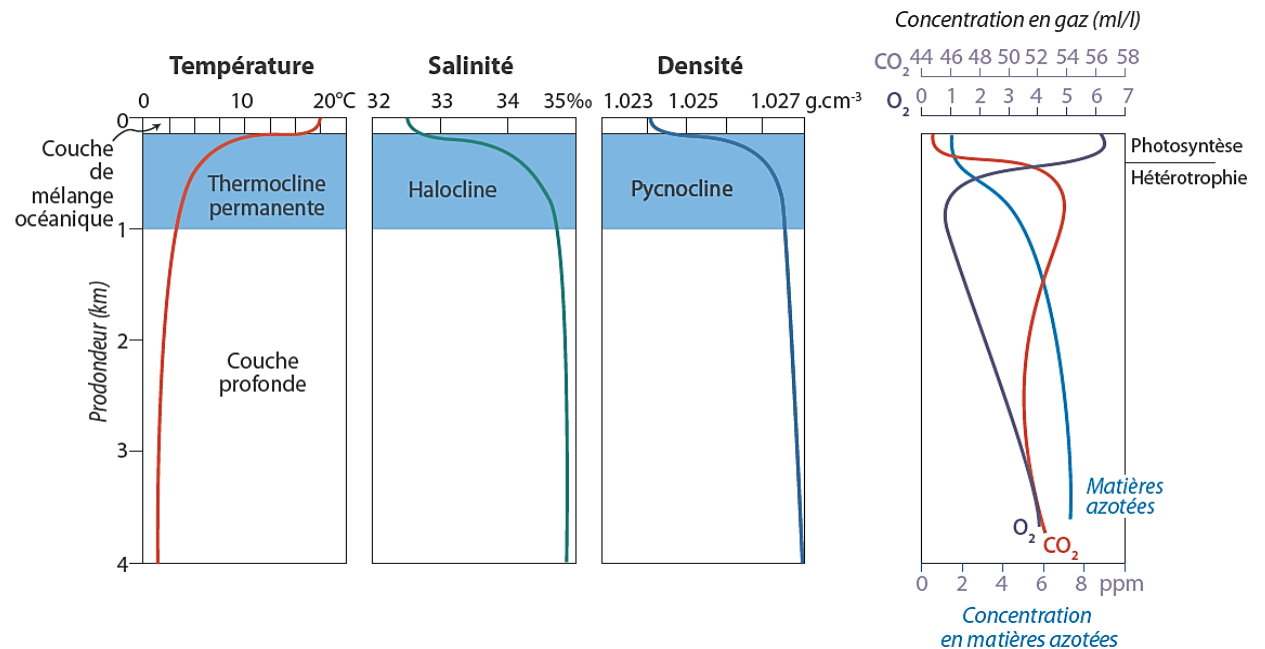
- **Thermocline permanente** : zone de transition située entre **200 et 1000m** = ↘ importante de T°C

- **Eaux profondes** :

- T°C stable ~4-5°C
- Déplacements lents (3-4 m/h).



Répartition des eaux de surface du globe



Stratification horizontale des eaux océaniques

I. La Terre est formée d'enveloppes gazeuses, liquides et solides

A. L'atmosphère et l'hydrosphère forment des enveloppes fluides de surface stratifiées

1. Composition et structure de l'atmosphère
2. L'hydrosphère est stratifiée

B. Les données de sismologie mettent en évidence l'existence d'enveloppes concentriques

1. Séismes et ondes sismiques
2. L'étude des vitesses de propagation des ondes P et S met en évidence des surfaces de discontinuité
3. L'étude des trajectoires des ondes sismiques permet d'identifier des surfaces de discontinuité
4. Le Moho marque la base de la croûte
5. La surface de Gutenberg est à la base du manteau
6. La surface de Lehmann sépare les noyaux externe et interne

C. L'étude de la propagation des ondes permet également de déterminer les propriétés des matériaux.

1. Les vitesses des ondes P et S dépendent des propriétés des matériaux
2. Interprétation des hodochrones
3. Mise en évidence d'une zone de faibles vitesses : LVZ
4. Les données de laboratoire expliquent les sauts de vitesse entre 400 et 670 km : transitions de phase

D. Bilan : modèle PREM

1. Modèle PREM
2. Signification des discontinuités

II. Les échantillons nous renseignent sur les premières enveloppes solides

A. Les croûtes affleurent directement

1. La croûte continentale peut être échantillonnée
2. La lithosphère océanique est parfois directement accessible

B. Le manteau peut rarement être échantillonné

1. Certaines roches contiennent des enclaves de manteau (xénolithes)
2. Le manteau est formé de péridotites
3. Transitions de phases dans le manteau

C. Bilan : comparaison LO/LC

1. Différence de structure :
2. Différence de devenir :

III. Les enveloppes plus profondes ne sont connues que de façon indirecte

A. Le fer et le nickel doivent se concentrer dans le noyau

1. L'étude de la gravité montre que le cœur est dense
2. La comparaison avec des chondrites montre que croûte et manteau sont trop pauvres en Fer et nickel.

B. Le noyau doit comporter une partie liquide

1. Données sismiques
2. Etude du champ magnétique

C. Les limites supérieures et inférieures du noyau sont des zones de réaction

1. Couche D'' : interface péridotite/Fer Ni
2. Une graine qui grossit

Conclusion

B. LES DONNÉES DE SISMOLOGIE METTENT EN ÉVIDENCE L'EXISTENCE D'ENVELOPPES CONCENTRIQUES

I. Séismes et ondes sismiques

Un séisme correspond à la **libération brutale d'une grande quantité d'énergie emmagasinée lors des mouvements de la croûte terrestre**. Le mouvement se traduit par la propagation d'ondes mécaniques à partir de la zone de rupture, appelée **foyer**, dont la projection orthogonale en surface est l'**épïcéntré**.

Onde: propagation d'une perturbation sans déplacement de matière dans un milieu matériel élastique

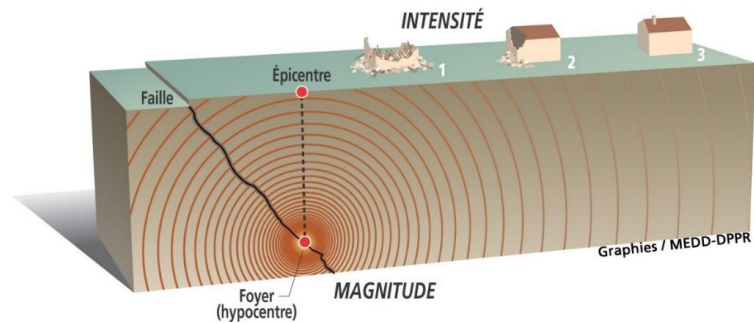
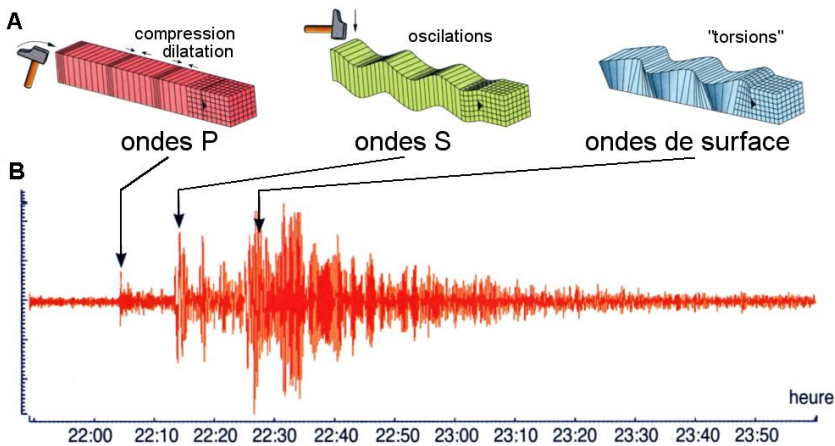


Schéma localisant le foyer, l'épicentre et les fronts d'onde d'un séisme



Sismogramme présentant les 3 ondes sismiques

- De compression (P= premières)

⇒ plus grande vitesse

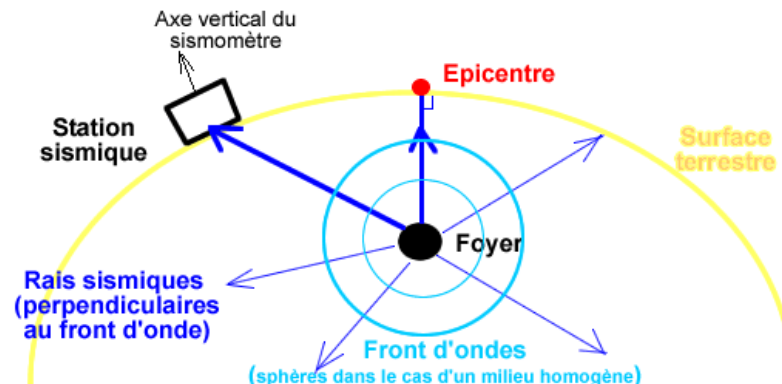
$$\Rightarrow V_p = \sqrt{(\kappa + (4/3)\mu)/\rho}$$

- De cisaillement (S = secondes)

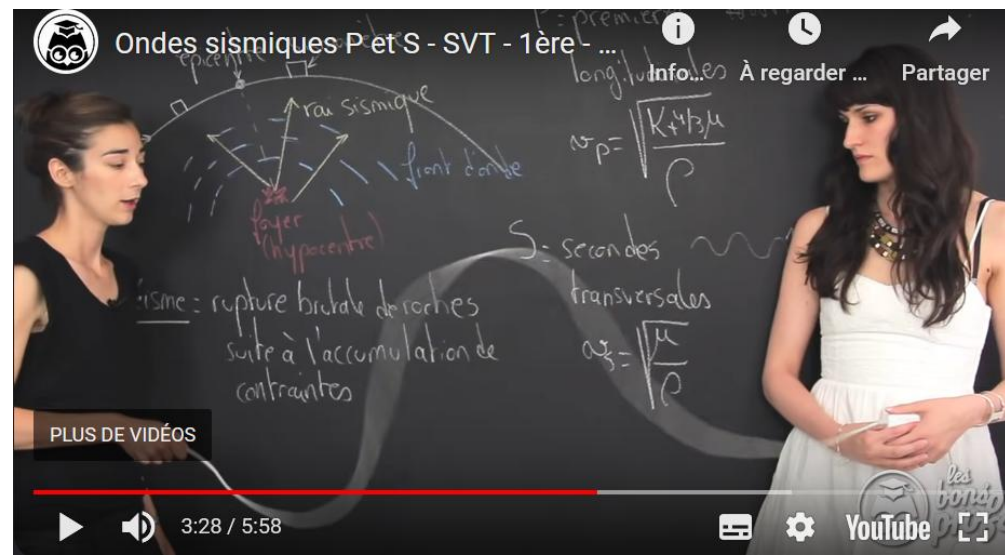
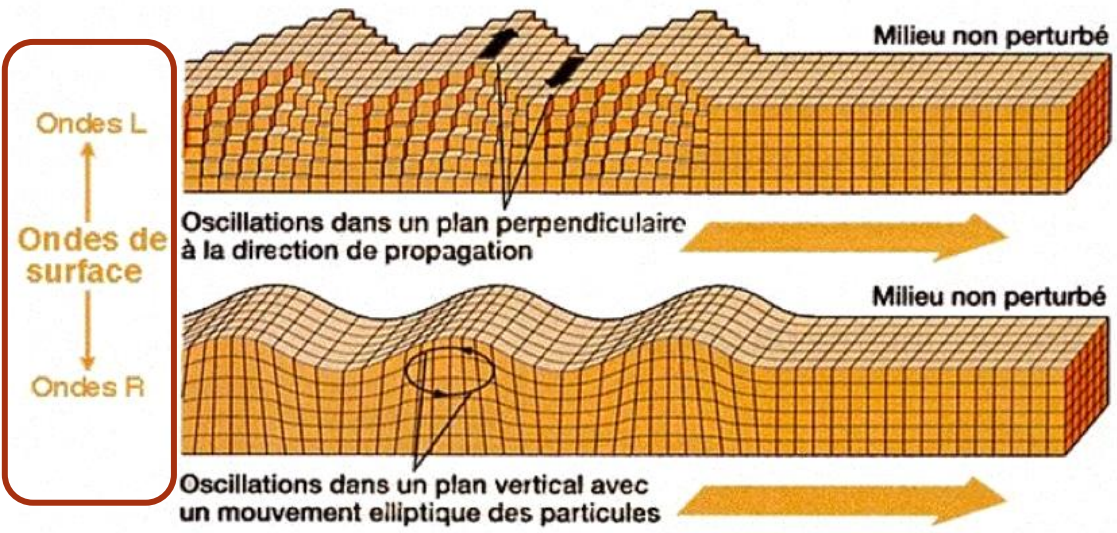
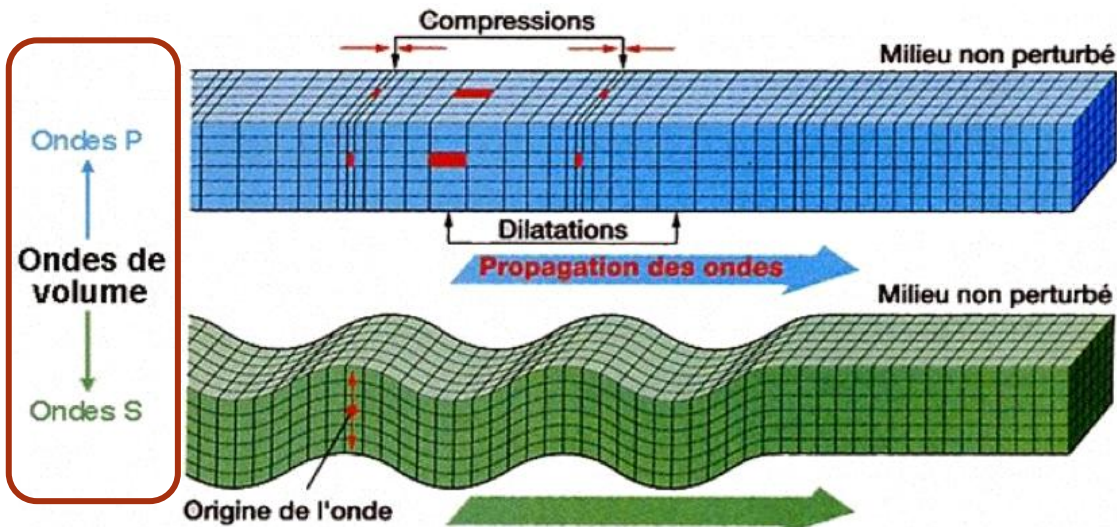
$$V_s = \sqrt{\mu/\rho}$$

Avec

- κ module d'incompressibilité
- μ Module de cisaillement (=0 dans les fluides)
- ρ Masse volumique



- Et de torsion (ondes de surface)



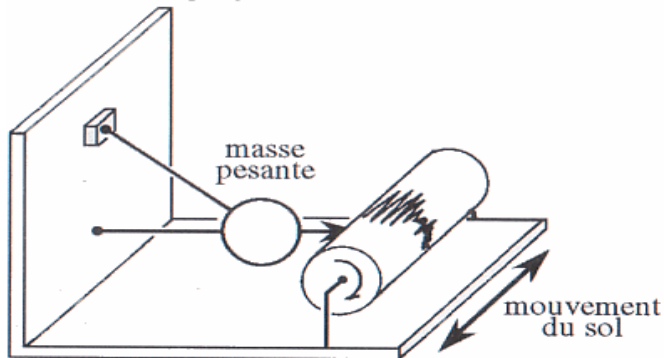
$$v_p = \sqrt{\frac{\kappa + 4/3\mu}{\rho}}$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

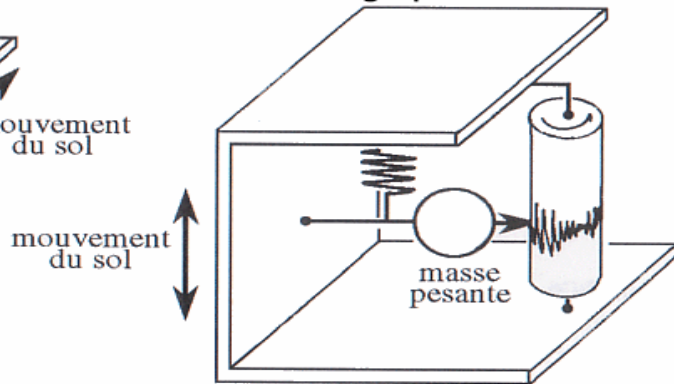
Ondes P: ondes de volume, de compression dilatation, ondes longitudinales

Ondes S: ondes de volume, de cisaillement, ondes transversales

Sismographe horizontal



Sismographe vertical



1. masse pesante, reliée à un ressort, forte inertie
⇒ masse considérée immobile
2. cylindre enregistreur suit les mouvements du sol
⇒ stylet fixé à la masse forme des tracés représentatifs des mouvements.
3. En combinant 3 sismomètres selon les 3 directions de l'espace on peut caractériser le séisme.

LES SISMOMETRES (ou SISMOGRAPHES)

- Un sismomètre est un détecteur de mouvements du sol qui comporte un capteur mécanique, un transducteur, un amplificateur et un enregistreur.
- Les premiers sismomètres étaient des capteurs à inertie ou des pendules. La masse d'inertie pouvait être très élevée : à la station historique de Strasbourg, devenue Musée de Sismologie et Magnétisme terrestre, l'un des sismomètres a une masse de 19 tonnes.
- Actuellement on utilise surtout des **sismomètres électromagnétiques**. Ils ne mesurent pas le mouvement du sol mais la vitesse de mouvement du sol.
- Un tracé de séisme s'appelle un "**sismogramme**".

DESCRIPTION CHANNELS SENSORS SEISMIC NOISE

Working station

- * Network: G
- * Network description: GEOSCOPE - French Global Network of Seismological Broadband Stations
- * Site name: Echery - Sainte Marie aux Mines, France
- * Start: 1990-11-08T00:00:00
- * End: -
- * Latitude: 48.216313 °
- * Longitude: 7.158961 °
- * Elevation: 580 (m)

Site description
Site description not yet available.

Station comments

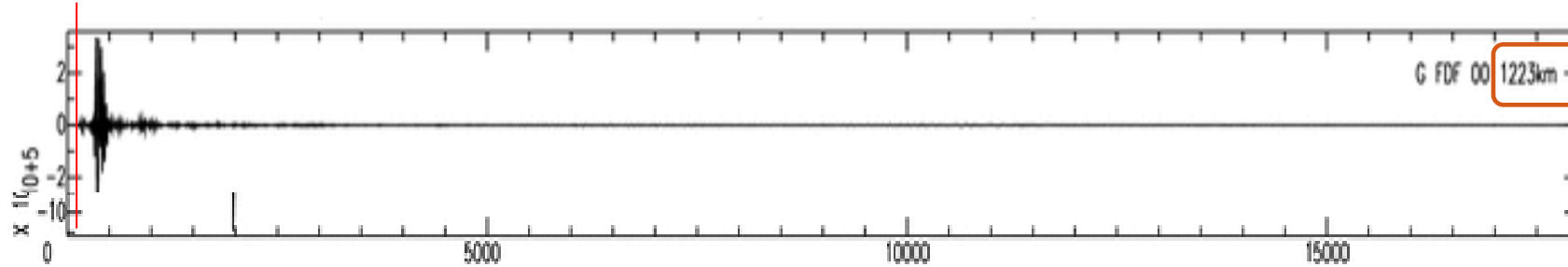
Station comments	Start	End
Maintenance in progress.	2015-07-27 00:07:40	2015-08-01 00:08:00
Occasional data loss due to transmission issues	2011-08-24 10:08:00	2011-08-25 11:08:00
Station is down.	2009-07-03 13:07:00	2009-07-08 07:07:00
Occasional data loss	1995-04-24 23:04:00	1995-11-12 10:11:00
Occasional data loss	1995-04-24 23:04:00	1995-11-12 10:11:00
Frequent data loss	1992-07-07 10:07:00	1992-07-10 09:07:00
Sensors responses contain nominal values.	1990-11-08 00:11:00	-
Error on sensors poles may reach 2 percent.	1990-11-08 00:11:00	-

Station pictures

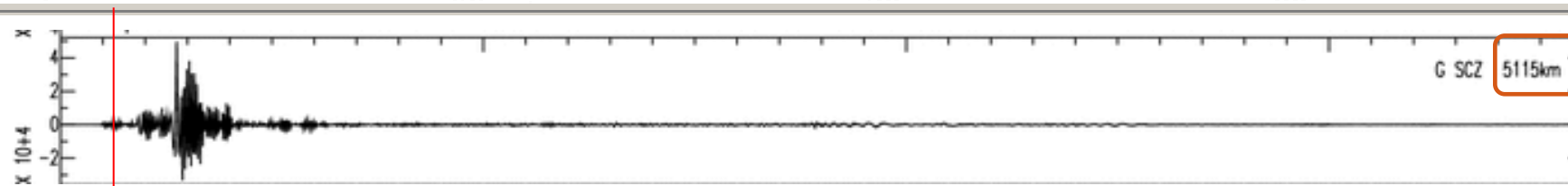


Étude de l'hodochrone* du séisme d'Haïti 2010

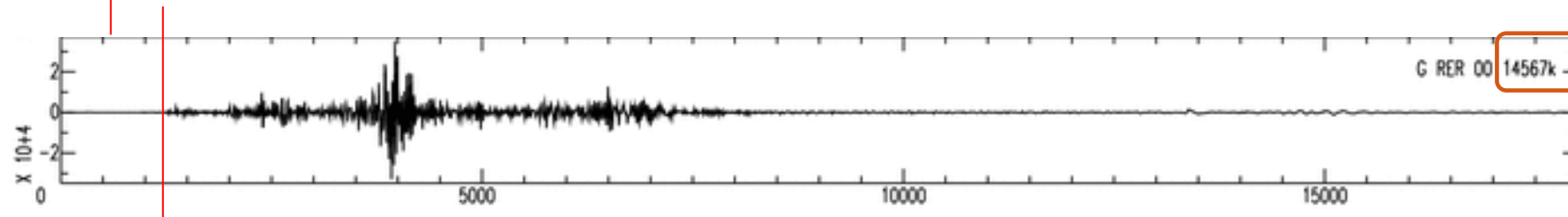
Hodochrone*: temps d'arrivée d'une onde en fonction de la distance épacentrale



250 s pour parcourir 1223 km =>
 $V_p = 1223/250$
 $V_p = 5 \text{ km/s}$



500 s pour parcourir 5 115 km =>
 $V_p = 5115/500$
 $V_p = 10 \text{ km/s}$



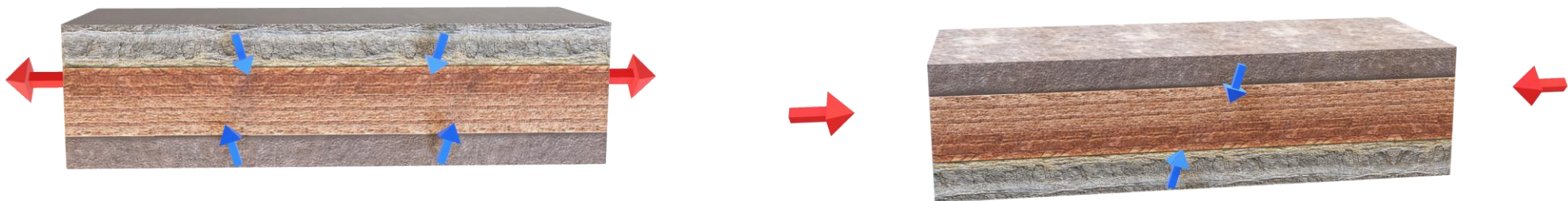
1250 s pour parcourir 14 567 km =>
 $V_p = 14\ 567/1250$
 $V_p = 12 \text{ km/s}$

- ⇒ On constate, que la **vitesse moyenne** des ondes P augmente avec la distance au foyer.
- ⇒ Comment expliquer cette augmentation de vitesses moy avec la distance à l'épicentre?



BILAN SUR LES ONDES

- Ondes P et S: **ondes de volume**
- Les **propriétés physiques** des matériaux traversés : solides, liquides, partiellement fondus
- La présence **d'interfaces** entre deux milieux aux propriétés différentes = discontinuités : cf. **sismique réflexion / sismique réfraction**
- Le **mouvement relatif** ayant lieu entre les deux compartiments : mécanismes au foyer cf SV-D



B. LES DONNÉES DE SISMOLOGIE METTENT EN ÉVIDENCE L'EXISTENCE D'ENVELOPPES CONCENTRIQUES

2. L'étude des vitesses de propagation des ondes P et S met en évidence des surfaces de discontinuité



- Les ondes se propagent à l'intérieur du globe = **ondes de volume P et S** étudiées
- Stations d'enregistrement réparties sur l'ensemble du globe
 - ⇒ bonne couverture spatiale
 - ⇒ Pour un séisme donné, construction de la courbe exprimant le **temps d'arrivée des ondes sismiques en fonction de la distance à la source : hodochrone**.

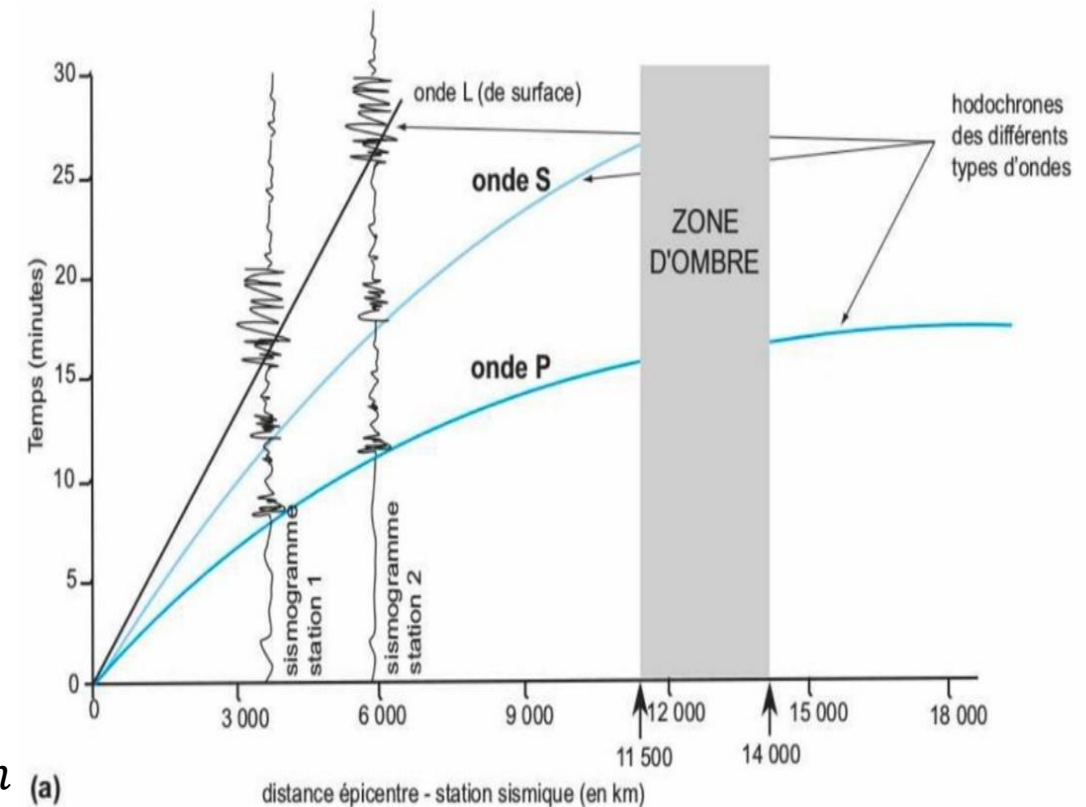
Que vaut, en km, un degré angulaire à la surface de la Terre?



On sait que $r_{moy} = 6370 \text{ km}$

On en déduit que $Périmètre_{Terre} = 2 \cdot \pi \cdot 6370 = 40\,023 \text{ km}$

On en déduit que $Distance_{longueur_{arc1^\circ}} = \frac{40\,023}{360} = 111 \text{ km}$



Géologie tout-en-un, Dunod

Hodochrones d'un séisme

2. L'étude des vitesses de propagation des ondes P et S met en évidence des surfaces de discontinuité

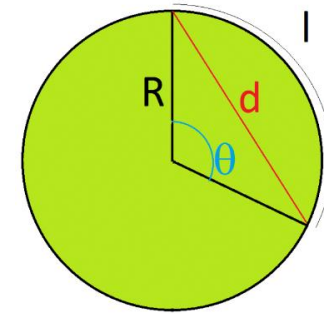
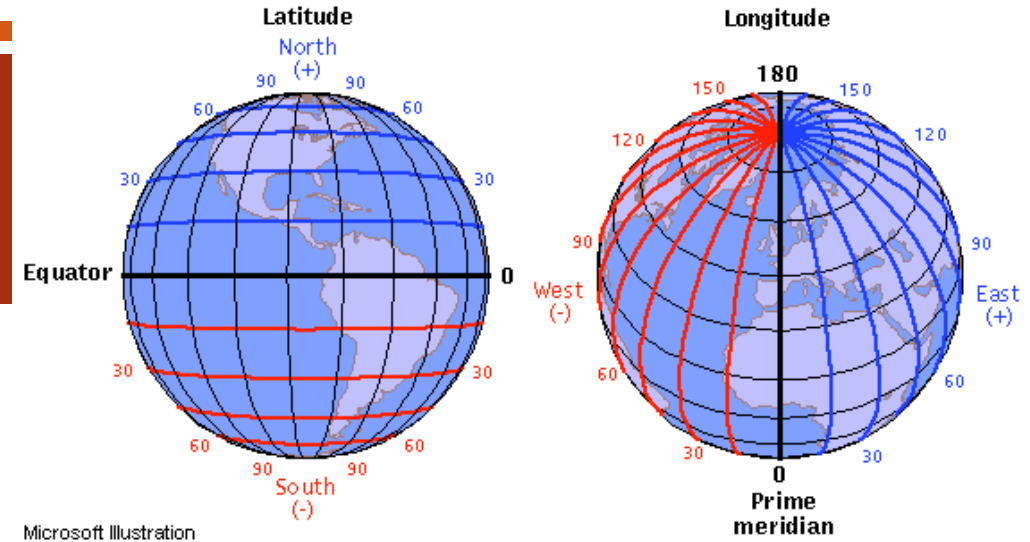
Que vaut, en km, un degré angulaire (latitudinal) à la surface de la Terre?



On sait que $r_{moy} = 6370 \text{ km}$

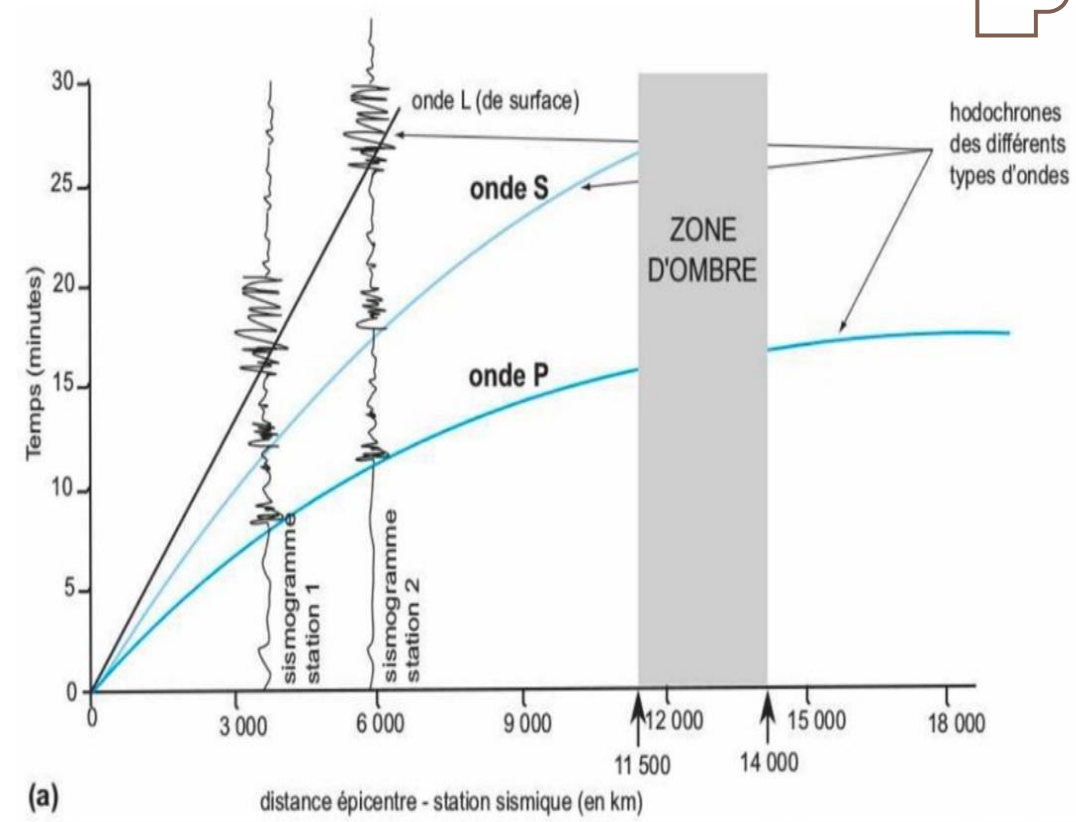
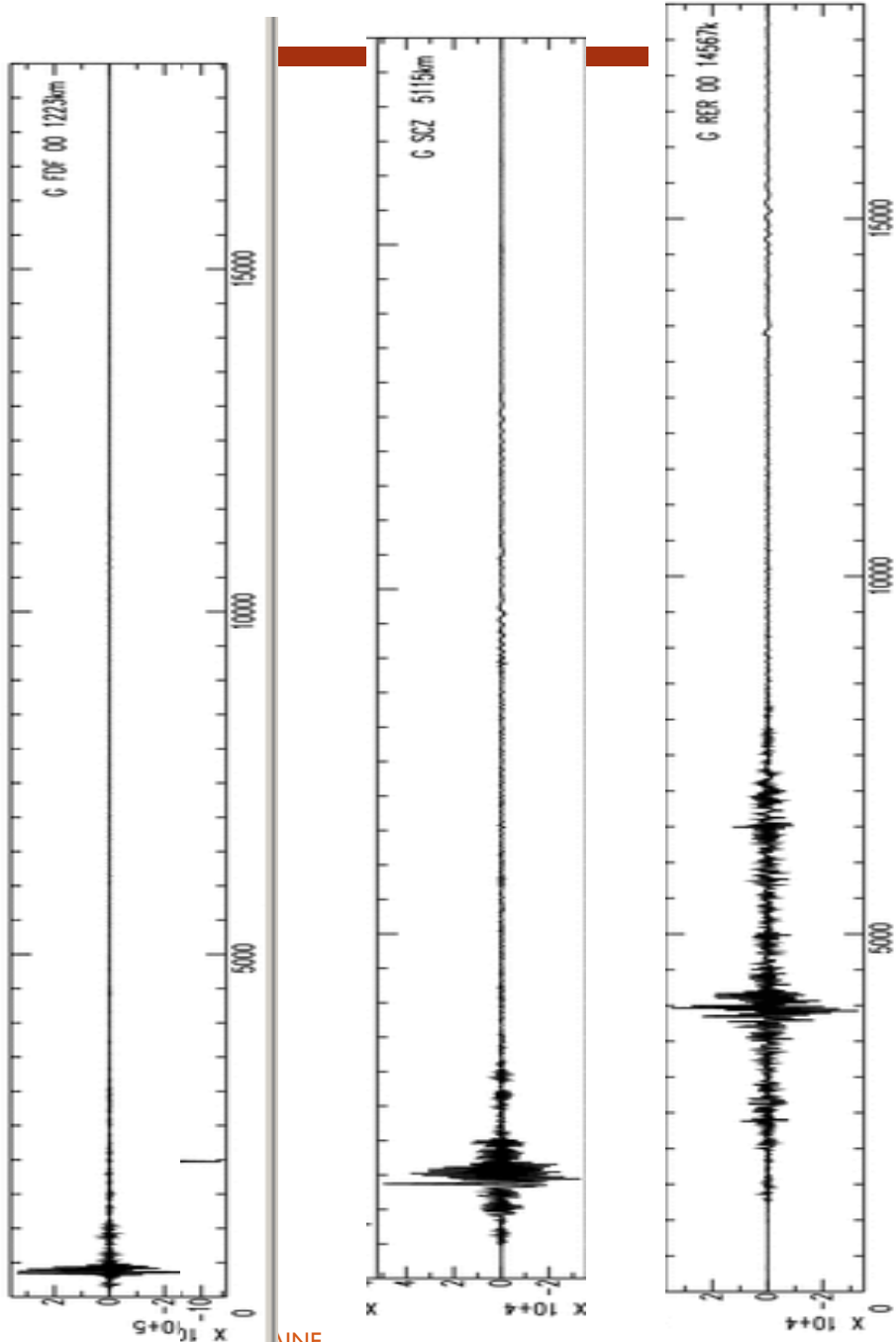
On en déduit que $PérimètreTerre = 2 \cdot \pi \cdot 6370 = 40\,023 \text{ km}$

On en déduit que $Distance \text{ longueur}_{arc1^\circ} = \frac{40\,023}{360} = 111 \text{ km}$



Cf SV-B-TDI

- On peut aussi raisonner avec les distances angulaires où longueur d'un arc $l = R \cdot \theta$ (en rad)
- $l = 6\,370 \cdot \frac{\pi}{180}$
- En effet $1^\circ = \frac{180}{\pi} \text{ rad}$



Hodochrones d'un séisme

Géologie tout-en-un, Dunod

B. LES DONNÉES DE SIMOLOGIE METTENT EN ÉVIDENCE L'EXISTENCE D'ENVELOPPES CONCENTRIQUES

3. L'étude des trajectoires des ondes sismiques permet d'identifier des surfaces de discontinuité

- Loi d'optique de Descartes sur la trajectoire des ondes lumineuses et leur réfraction:

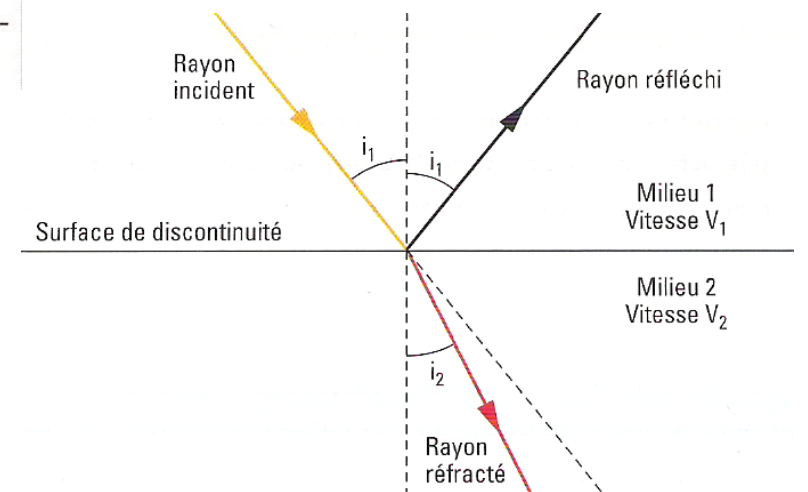
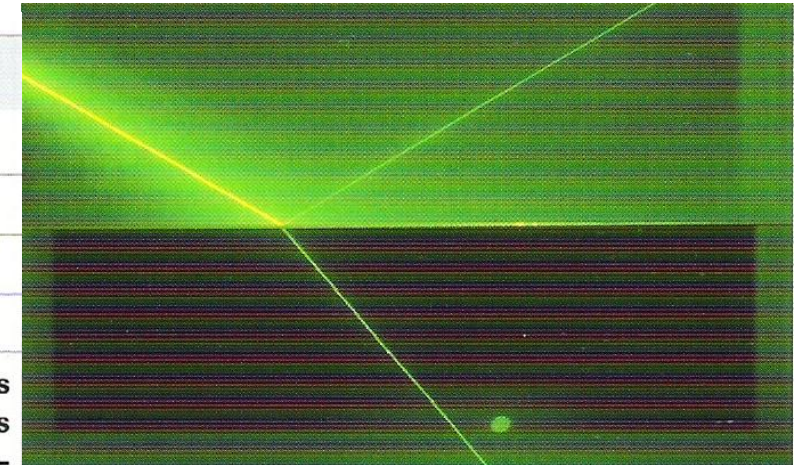
$$\frac{\sin(i_1)}{\sin(i_2)} = \frac{v_1}{v_2} \text{ soit } v_2 \cdot \sin(i_1) = v_1 \cdot \sin(i_2)$$

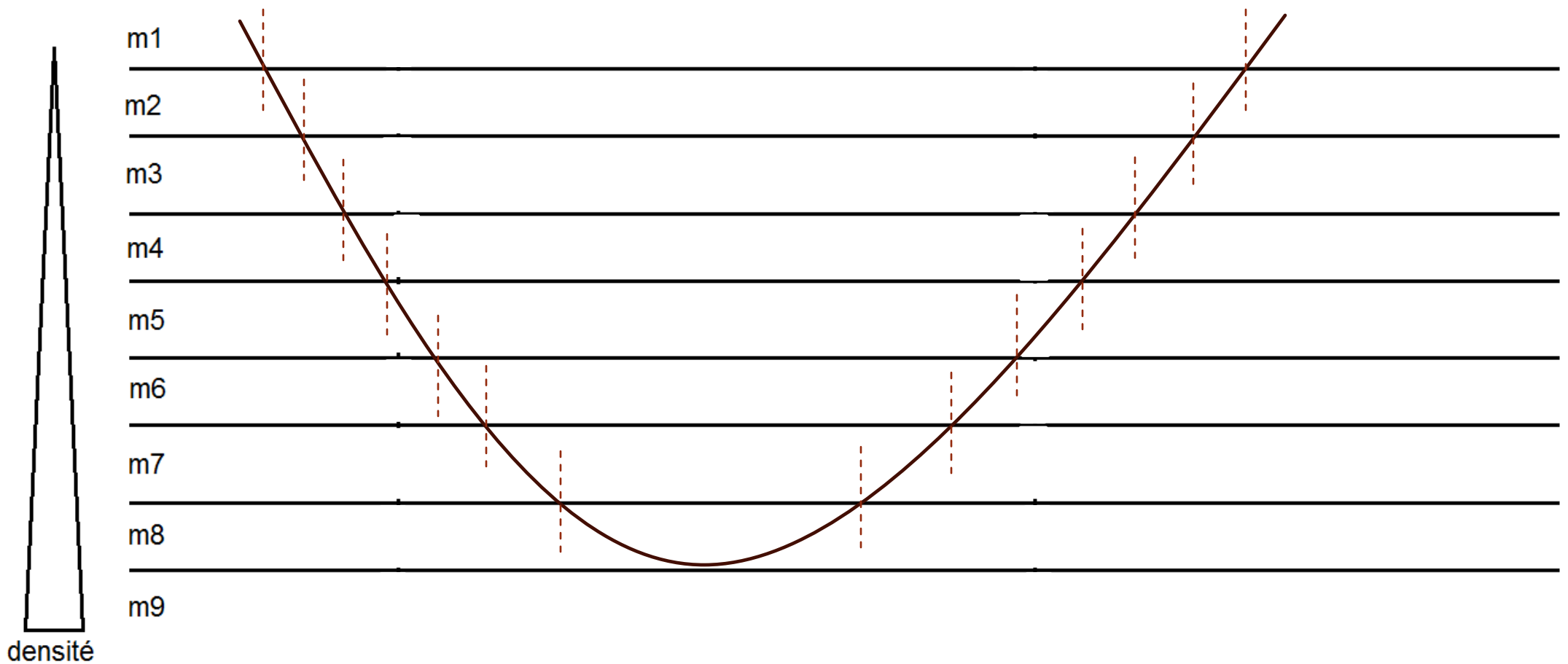
- Or les **ondes sismiques** peuvent être assimilées dans leur propagation à des **ondes lumineuses**
- Il existe un cas particulier, un angle d'incidence dit **angle limite** pour lequel la **réfraction se fait parallèlement à la surface de discontinuité** : le rayon réfracté se propage le long de la discontinuité et génère des **ondes dites coniques** dans le milieu 1 selon l'angle limite, cette angle i_c vaut 90° d'où $\sin i_c = 1$

Milieu traversé	Vitesse moyenne des ondes P (km.s ⁻¹)
Granite et gneiss	5,6
Basalte et gabbro	6,5
Péridotite	8,1
Eau	1,5

6 Vitesse de propagation des ondes sismiques P dans des milieux de composition chimique différente (mesures obtenues en laboratoire).

D'après Belin, 1^{ère} S, ed. 2007



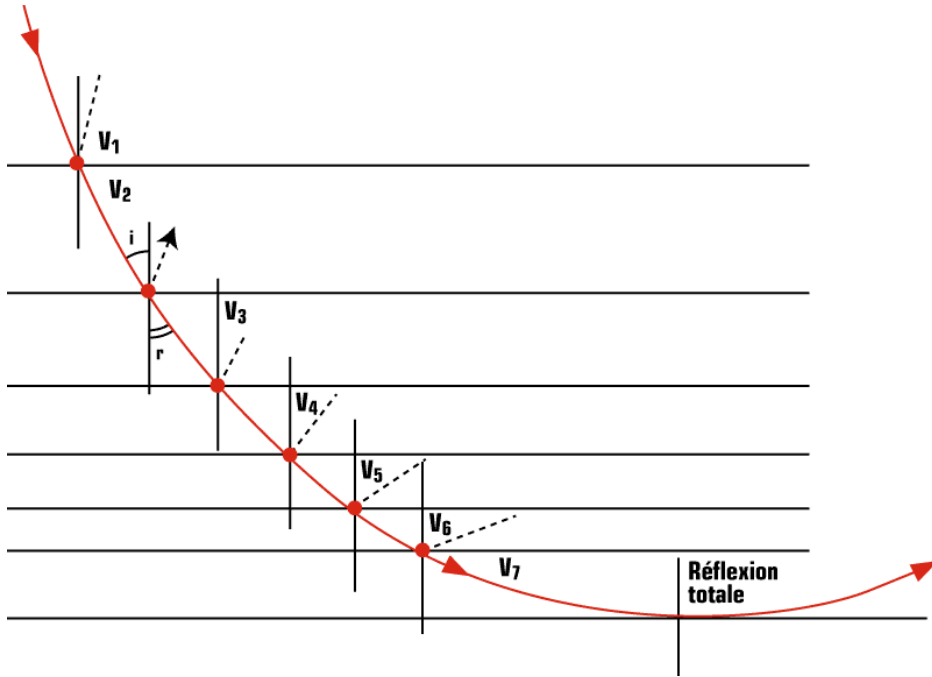


Modalités de propagation des ondes sismiques dans la Terre interne

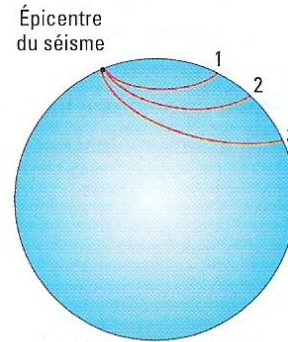
Un **rai sismique** traversant des discontinuités successives subit des **réfractions successives**, et a **une trajectoire courbe** car la vitesse augmente avec la profondeur.

Généralisation aux enveloppes terrestres : la **Terre peut être assimilée à une succession de discontinuités** séparant des milieux de plus en plus denses (donc d'indice de réfraction et une vitesse des ondes croissants avec la profondeur).

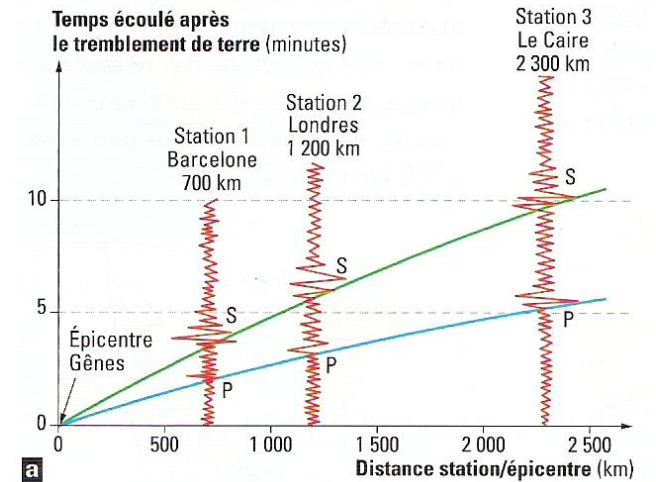
LA LOI DE DESCARTES APPLIQUÉE AU TRAJET DES ONDES SISMQUES POURRAIT EXPLIQUER UNE **TRAJECTOIRE COURBE** ET UNE AUGMENTATION DE **LA VITESSE MOYENNE** DES ONDES AVEC L'ÉLOIGNEMENT À L'ÉPICENTRE.



Apport des trajectoires des ondes



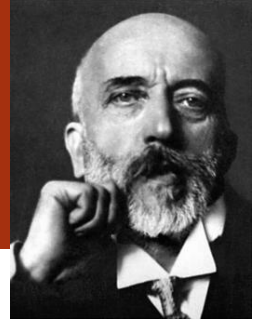
b
7 a. Temps de parcours des ondes sismiques jusqu'à des stations d'enregistrement situées à des distances croissantes de l'épicentre. b. Trajet des ondes sismiques.



Apport des vitesses des ondes

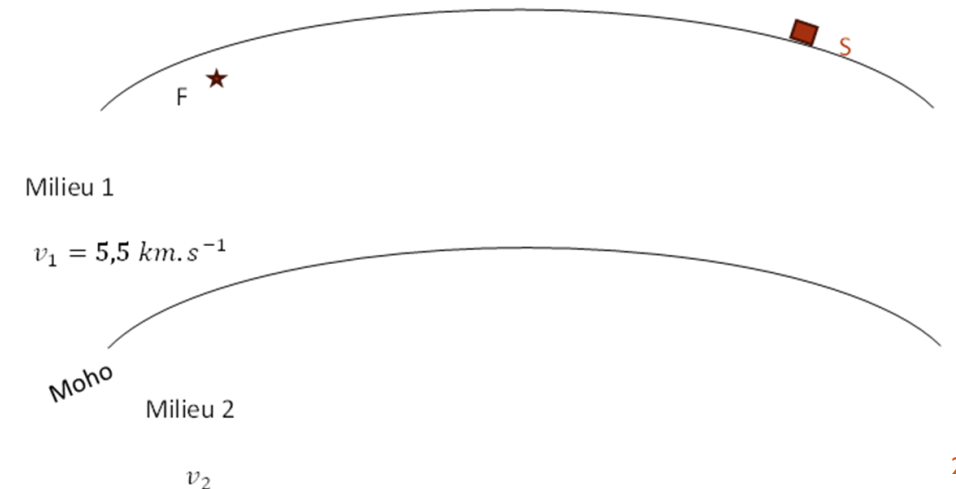
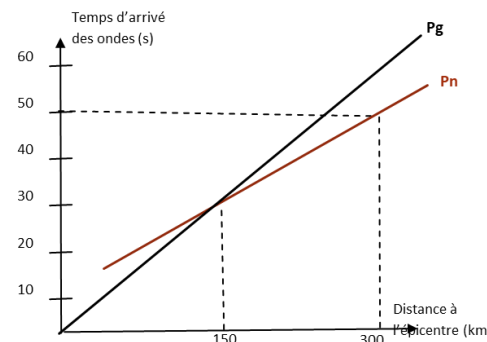
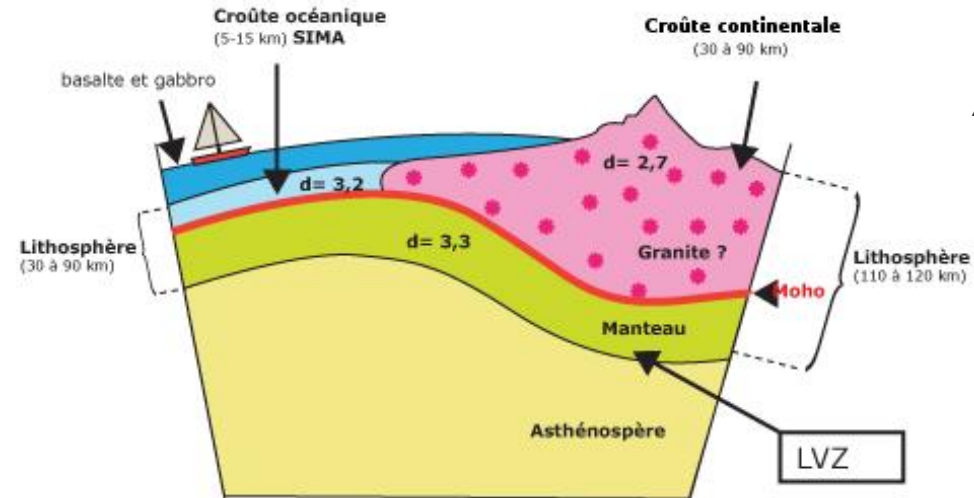
B. LES DONNÉES DE SISMOLOGIE METTENT EN ÉVIDENCE L'EXISTENCE D'ENVELOPPES CONCENTRIQUES

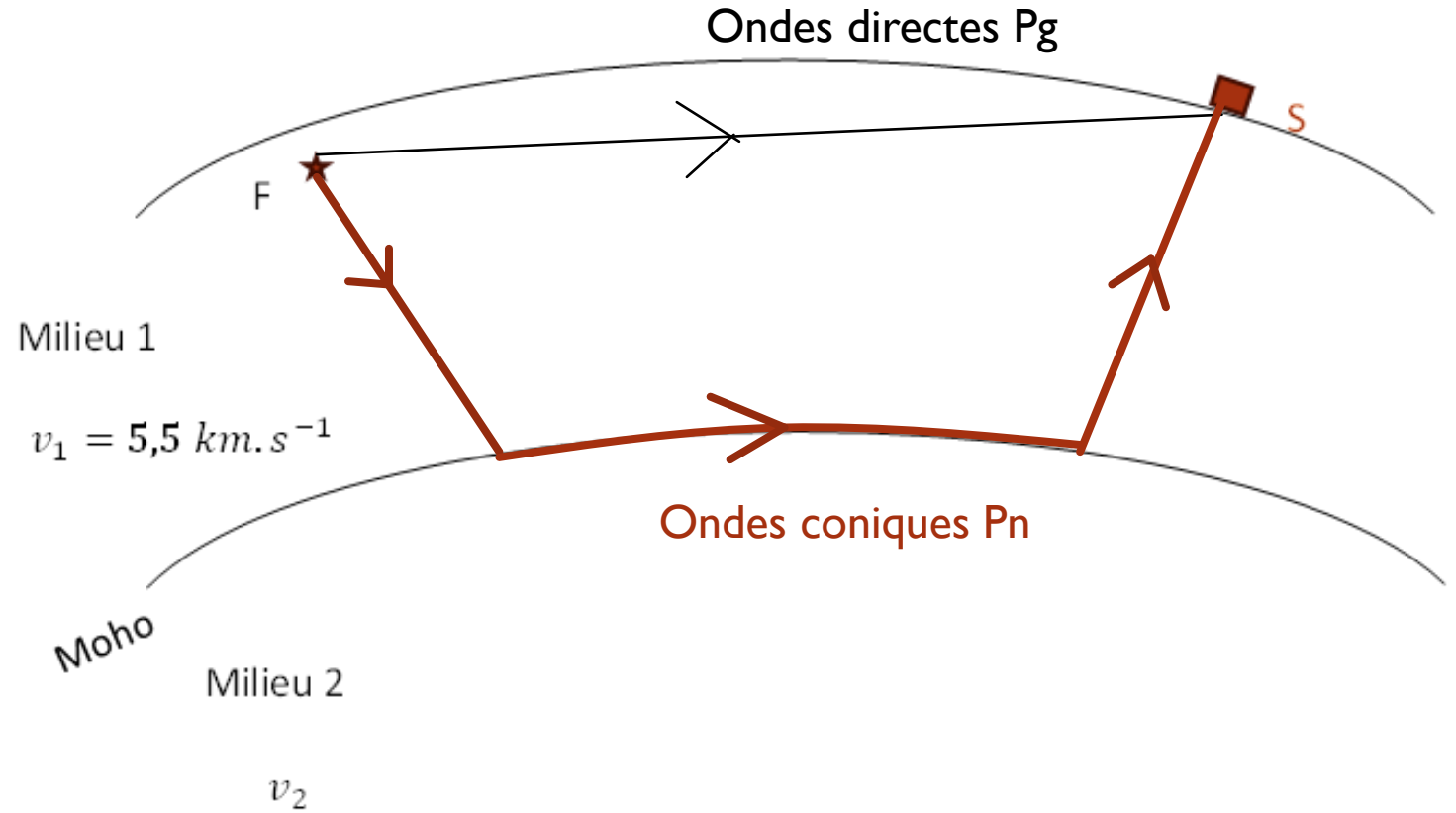
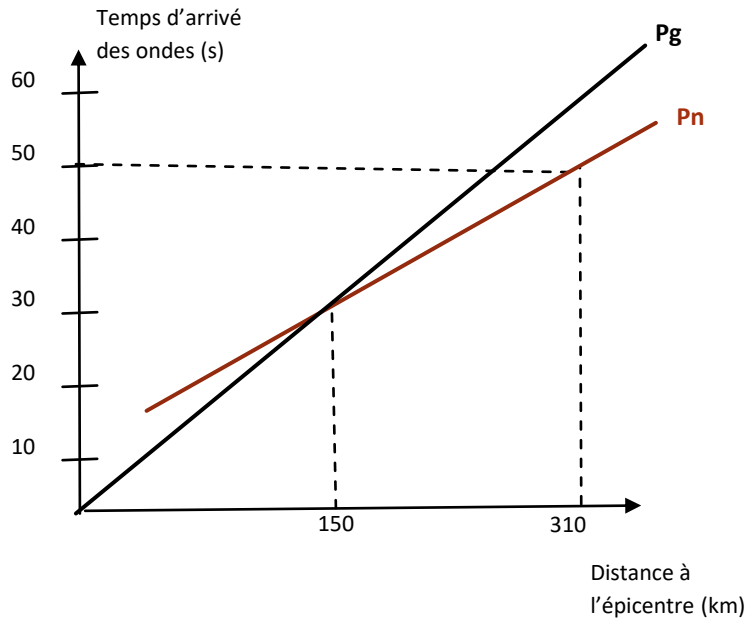
4. Le Moho marque la base de la croûte



Andrija Mohorovicic
(1890-1936)

- Etude des ondes sismiques P et S générées lors du séisme du 8 octobre 1909 en Croatie: l'hypothèse de l'existence d'une surface de discontinuité croûte-manteau.
- Observations :
 - À proximité du séisme (<50km), enregistrement d'un seul train d'ondes P (P_g)
 - à partir d'une distance $50\text{km} < D < 600\text{km}$, enregistrement d'ondes P directes (P_g), coniques (P_n) et réfléchies (P_mP)
 - ⇒ hypothèse: surface de discontinuité, située à une cinquantaine de kilomètres de profondeur
- Conventions d'écriture:
 - Ondes directes P_g (du foyer à la station)
 - Ondes coniques: P_n (réfractées sur le Moho donc plus rapide que P_g au-delà d'une certaine distance)
 - Ondes réfléchies: P_mP (réfléchies sur le Moho)

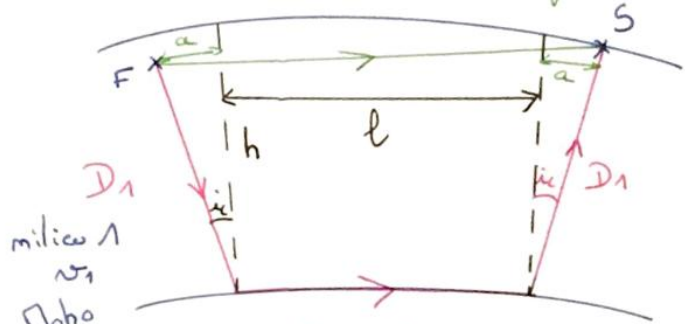




Un exemple d'application des lois de propagation des ondes : la découverte du Moho.

Calcul de la profondeur du Noho

P_g = onde directe



P_n : onde conique

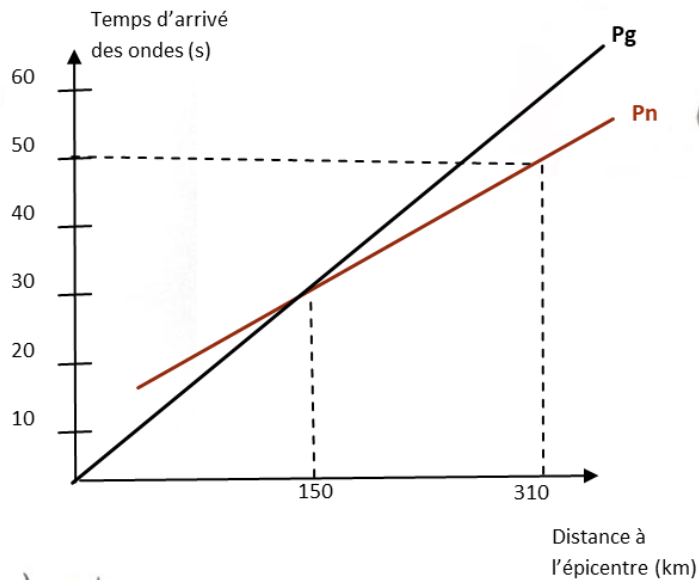
h est notre inconnue = profondeur du Noho

Ondes P_n : $t_{P_n} = \frac{2D_1}{v_1} + \frac{l}{v_2}$

avec $l = FS - 2a$

d'après Snell-Descartes, on a $\frac{\sin i_c}{v_1} = \frac{\sin 90^\circ}{v_2}$

soit $\sin i_c = \frac{v_1}{v_2}$



Grâce à l'hodographe on peut écrire :

$$\left. \begin{aligned} \textcircled{1} \quad 30 &= \frac{2D_1}{v_1} + \frac{150-2a}{v_2} \\ \textcircled{2} \quad 50 &= \frac{2D_1}{v_1} + \frac{310-2a}{v_2} \end{aligned} \right\} \textcircled{2} - \textcircled{1} \Rightarrow 20 = \frac{310-150}{v_2} \Rightarrow v_2 = 8 \text{ km.s}^{-1}$$

On peut alors déduire $i_c = \text{Arcsin}\left(\frac{5,5}{8}\right) = 44^\circ$

Avec $\textcircled{1}$ $30 = \frac{2D_1}{v_1} + \frac{150-2a}{v_2}$

or $\sin i_c = \frac{a}{D_1} \Rightarrow D_1 = \frac{a}{\sin i_c}$

$$30 = \frac{2 \cdot a}{5,5 \times 0,7} + \frac{150-2a}{8}$$

A.N 30 = $0,52 \cdot a + 18,75 - 0,25 \cdot a$

A.N a = 41,7 km

Enfin $t_{\text{arr}} = \frac{a}{h}$

A.N. $h = 43 \text{ km}$

Exprimer H en fonction de v , δt et Δ

1- d'après Pythagore $\left(\frac{d}{2}\right)^2 = \left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 + H^2$

$$\text{Soit } H = \sqrt{\frac{1}{4}(d^2 - \Delta^2)} \quad (1)$$

$$2- \delta t = t_{PmP} - t_{pg}$$

$$\delta t = \frac{d}{v} - \frac{\Delta}{v}$$

$$\text{Soit } v \cdot \delta t = d - \Delta$$

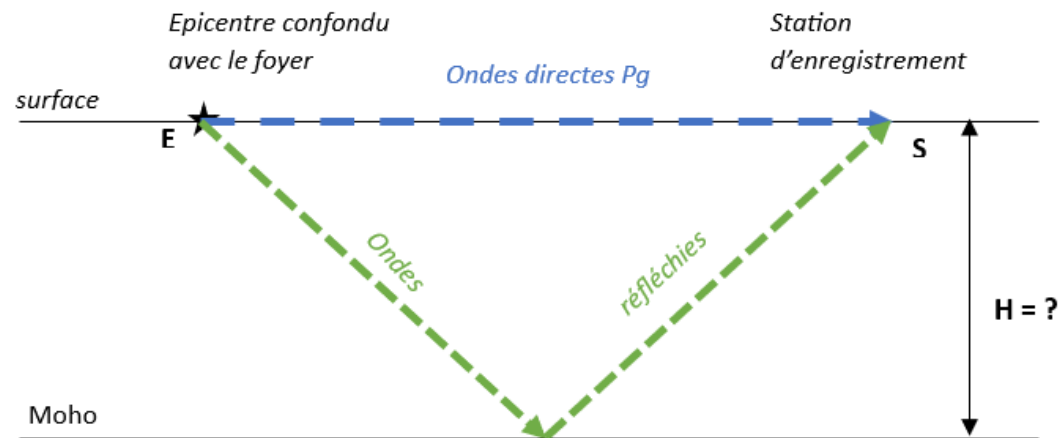
$$\text{Donc } d = v \cdot \delta t + \Delta \quad (2)$$

3- Avec (1) et (2) on a:

$$H = \sqrt{\frac{1}{4}[(v \cdot \delta t + \Delta)^2 - \Delta^2]}$$

En développant on a:

$$H = \sqrt{\frac{1}{4}[(v \cdot \delta t)^2 + 2 \cdot v \cdot \delta t \cdot \Delta + \cancel{\Delta^2} - \cancel{\Delta^2}]}$$



On donne :

- E : épicentre du séisme confondu avec le foyer
- S : station d'enregistrement
- Δ : distance épicentrale (ES)
- d : distance parcourue par les ondes réfléchies (PmP)
- δt : écart de temps entre l'arrivée des 2 trains d'onde
- v : vitesse des ondes P dans la croûte continentale
- H : profondeur du Moho

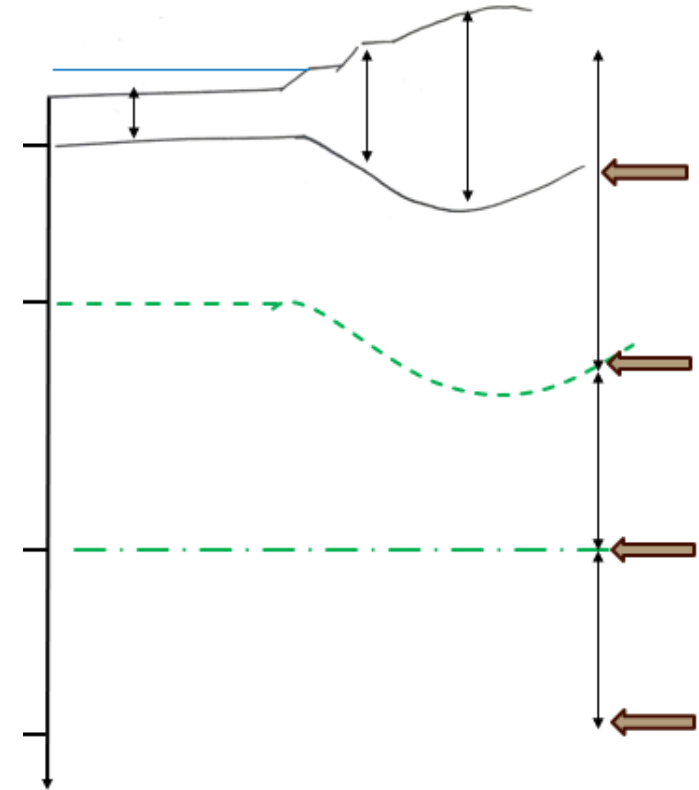
3- Soit

$$H = \sqrt{\frac{1}{4}[(v \cdot \delta t)^2 + 2 \cdot v \cdot \delta t \cdot \Delta]}$$





- La discontinuité mise en évidence est le Moho qui sépare la **croûte** où la vitesse des ondes P est relativement faible : $\pm 6 \text{ km.s}^{-1}$, du **manteau lithosphérique** dans lequel la vitesse est plus élevée ($> 8 \text{ km.s}^{-1}$).
- La **profondeur** du Moho est variable : plus importante sous les continents (notamment sous les chaînes de montagnes) que sous les océans.
- **Continents : 25 à 70 km.**
- **Océans : environ 6-10 km**



B. LES DONNÉES DE SISMOLOGIE METTENT EN ÉVIDENCE L'EXISTENCE D'ENVELOPPES CONCENTRIQUES



5. La surface de Gutenberg est à la base du manteau

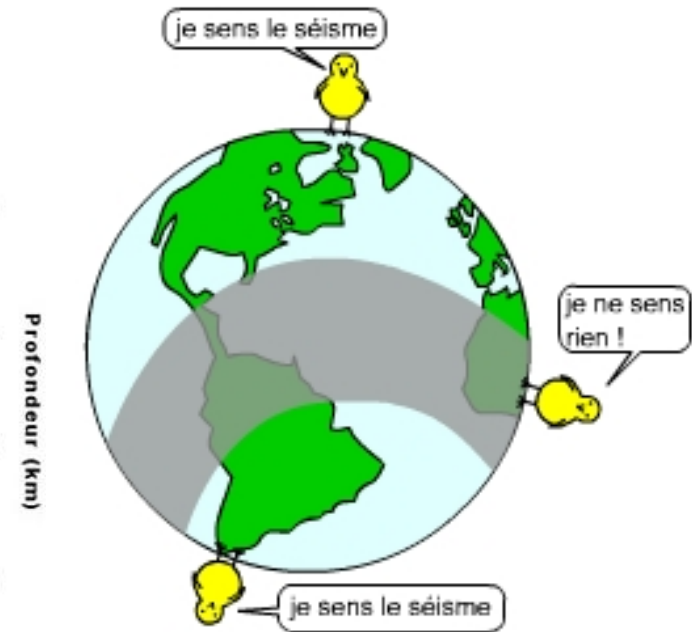
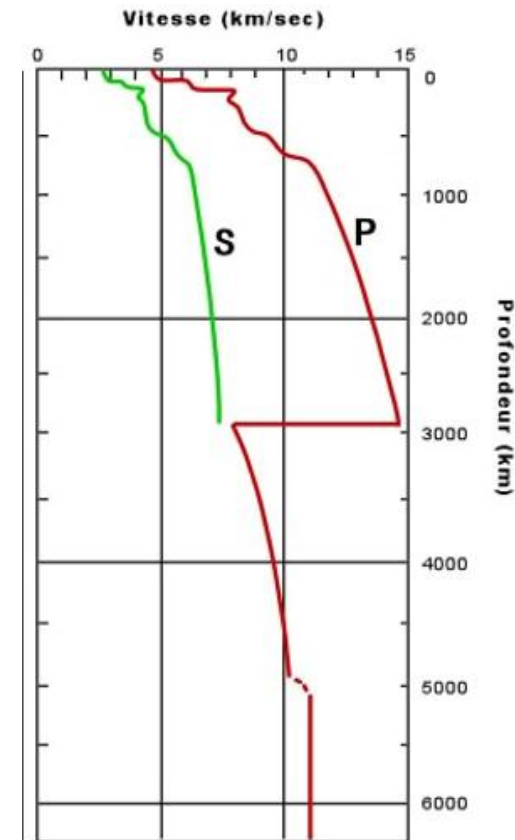
L'étude des vitesses des ondes P et S ainsi que les sismogrammes à la surface du globe révèle

- à 2900 km de profondeur
 - Un net **fléchissement** de la vitesse des **ondes P**
 - Une **disparition des ondes S** dès **105°**,

$$\text{or on sait que } v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

On en déduit qu'à 2900 km de profondeur, zone liquide, mais possible discontinuité liée aussi à une modification chimique

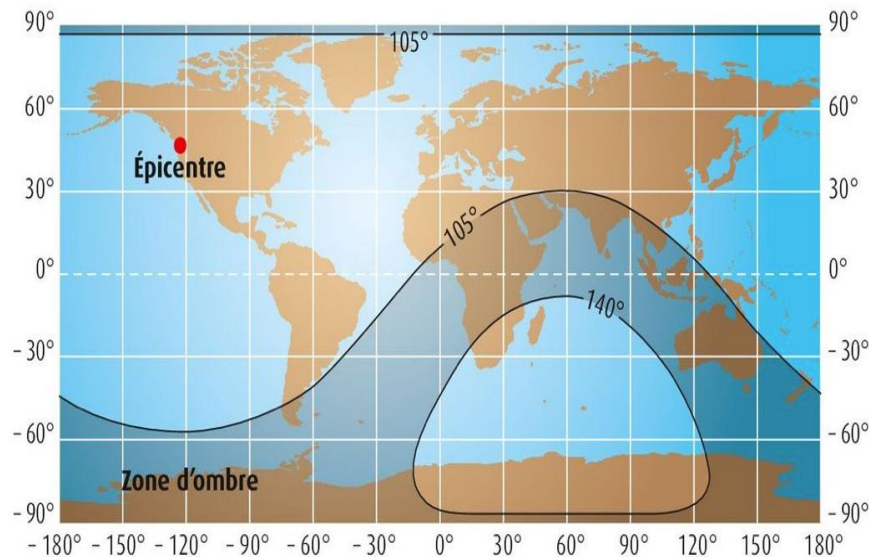
- **L'absence de réception d'ondes P entre 105° et 142°** (angle entre le foyer et la station en passant par le centre du globe)
 - A plus grande distance, on enregistre une **plus grande diversité d'ondes**
- ⇒ ces observations suggèrent l'existence d'autres **surfaces de discontinuité** plus en profondeur



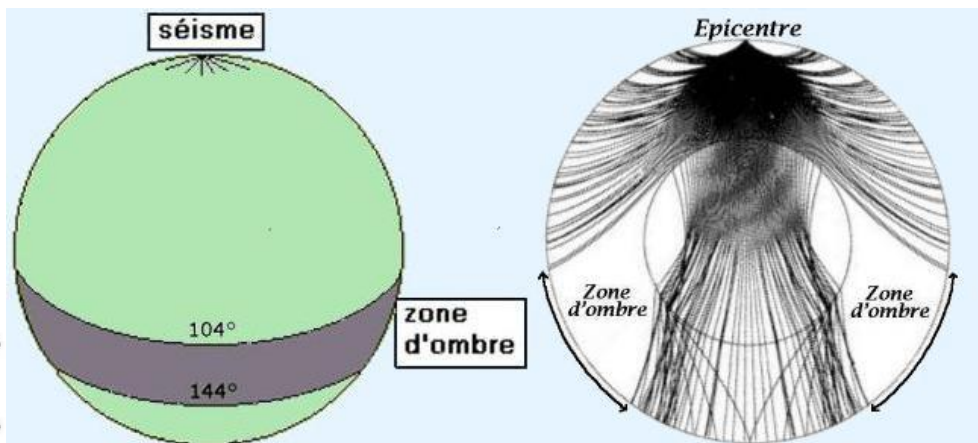
Tout séisme présente une "zone d'ombre", zone du globe où il n'est pas perçu.

Voici la zone d'ombre pour un séisme ayant eu lieu au Japon.

ZONE D'OMBRE SISMIQUE ET DISCONTINUITÉS



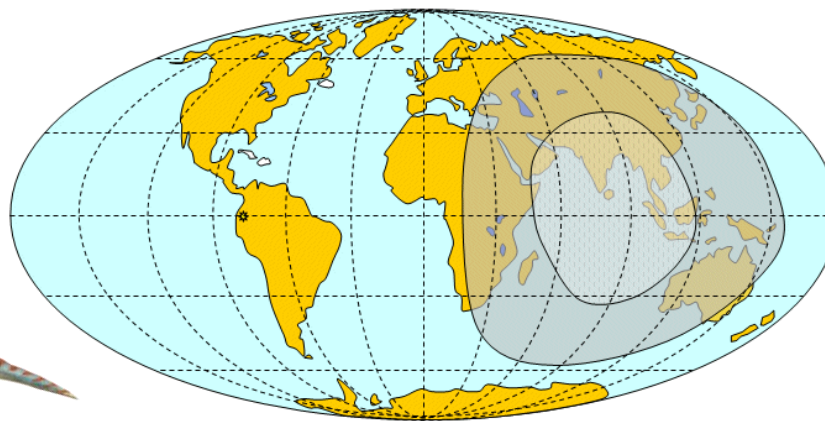
© Belin Éducation/Humensis, 2019 SVT 1re enseignement de spécialité
© Coll. Archives Belin



Interprétation de la zone d'ombre en termes de rais sismiques.

Tout séisme présente une "zone d'ombre", zone du globe où il n'est pas perçu.

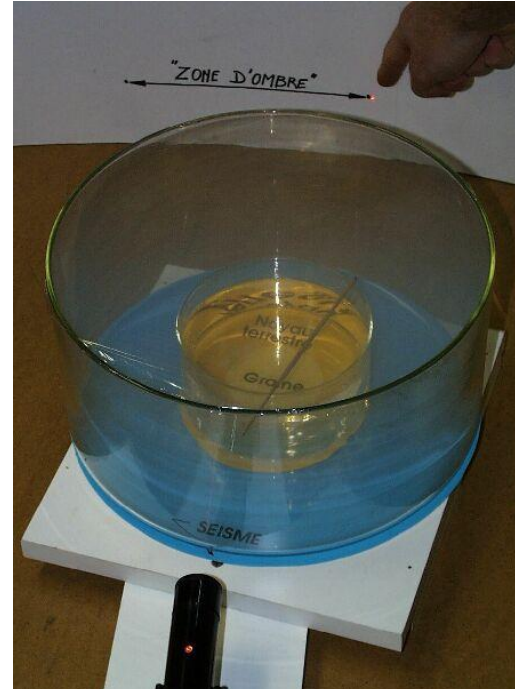
Voici la zone d'ombre pour un séisme ayant eu lieu au Japon.



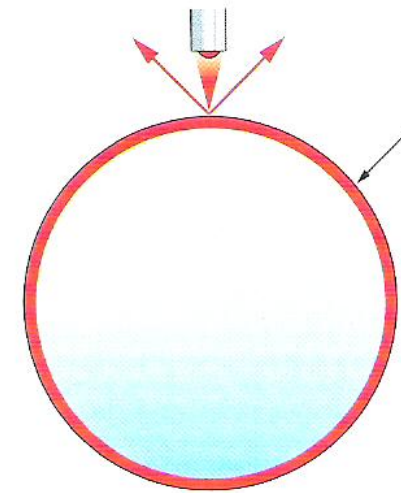
- absence d'ondes P et d'ondes S
- absence d'ondes S
- épicentre

Zones d'ombre sismiques pour un séisme andin

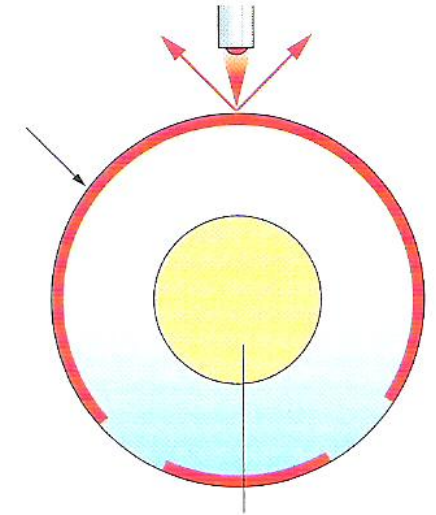
MODÉLISATION DE LA ZONE D'OMBRE



Expérience 1



Expérience 2



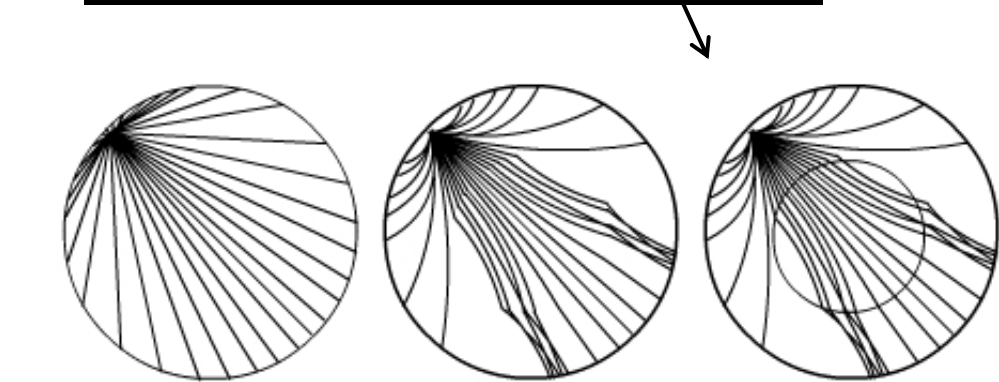
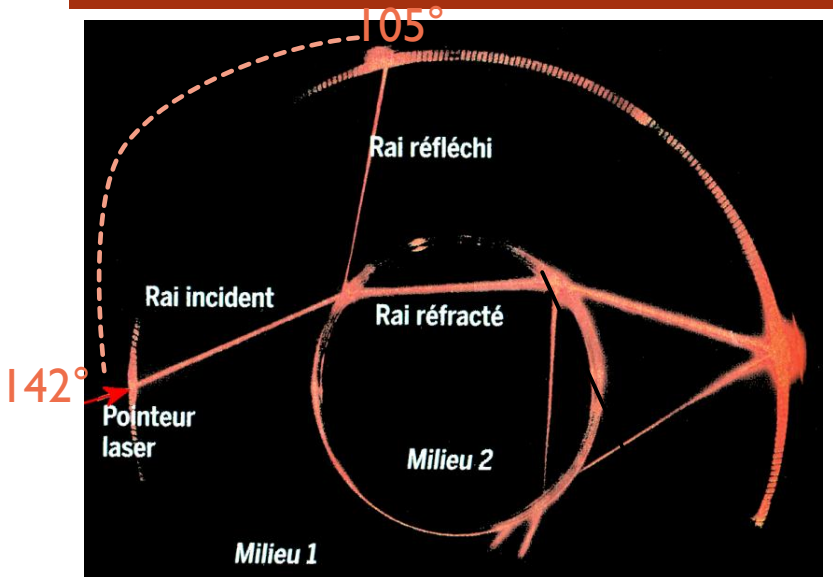
▶ Point d'entrée du rayon laser lors de la rotation

— Zone touchée par les rayons au cours de la rotation du laser

Modèle analogique de la structure en enveloppe concentrique du globe terrestre



1. Dénombrer les surfaces de discontinuité dans ce modèle.
2. Quel fluide (eau, huile, fumée) placer dans le grand cristalliseur?
3. Même question dans le petit cristalliseur.
4. Dans ce modèle on a voulu tester l'absence d'onde P entre 105° et 142° ou l'absence d'ondes S à partir de 105° angulaire?

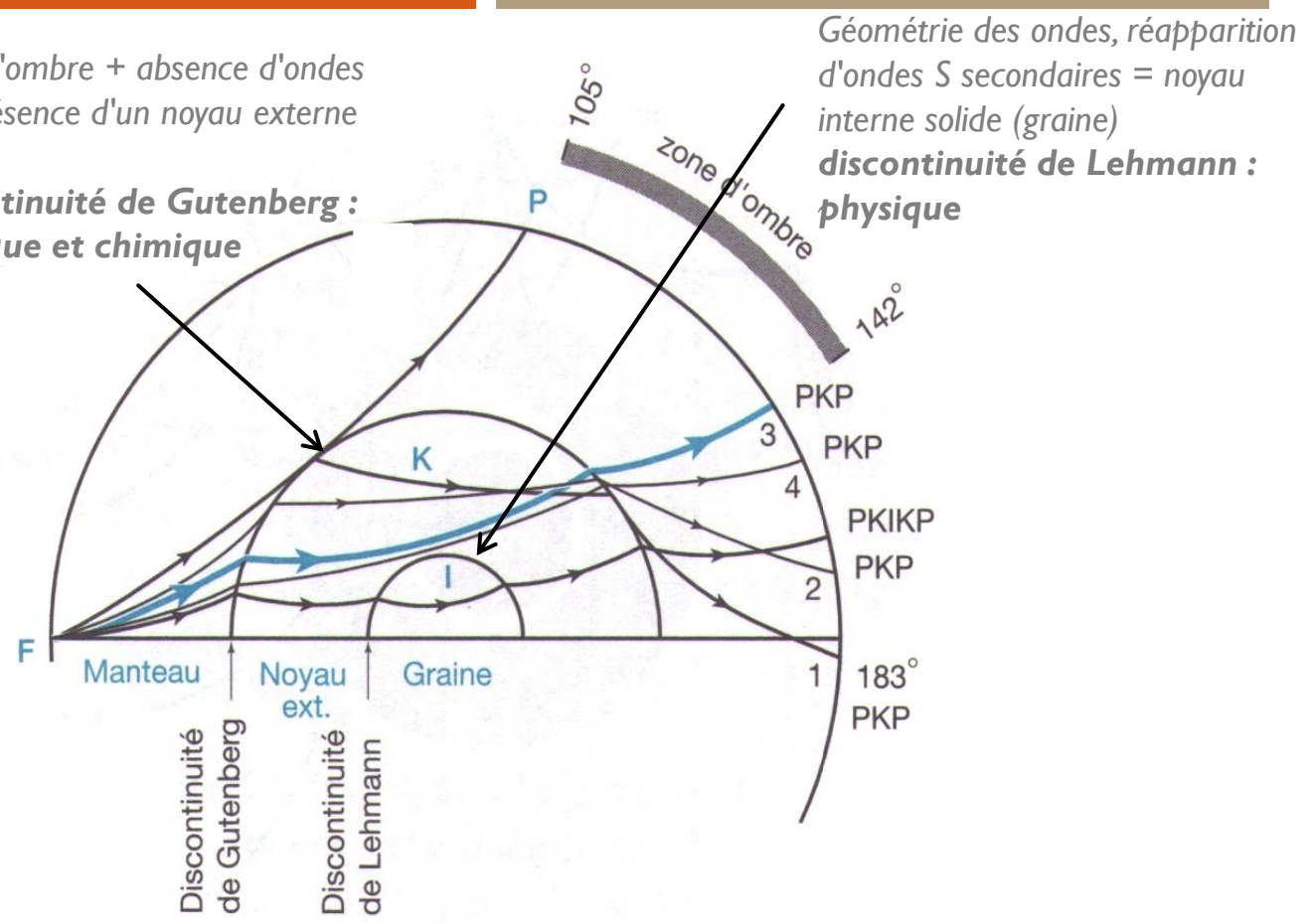


A partir du foyer, on s'attend à ce que les vibrations partent dans toutes les directions et que tous les points à la surface du globe soient touchés.

Si on étudie le trajet réel des ondes on peut localiser les points de déviation qui expliquent les zones ne percevant pas le séisme.

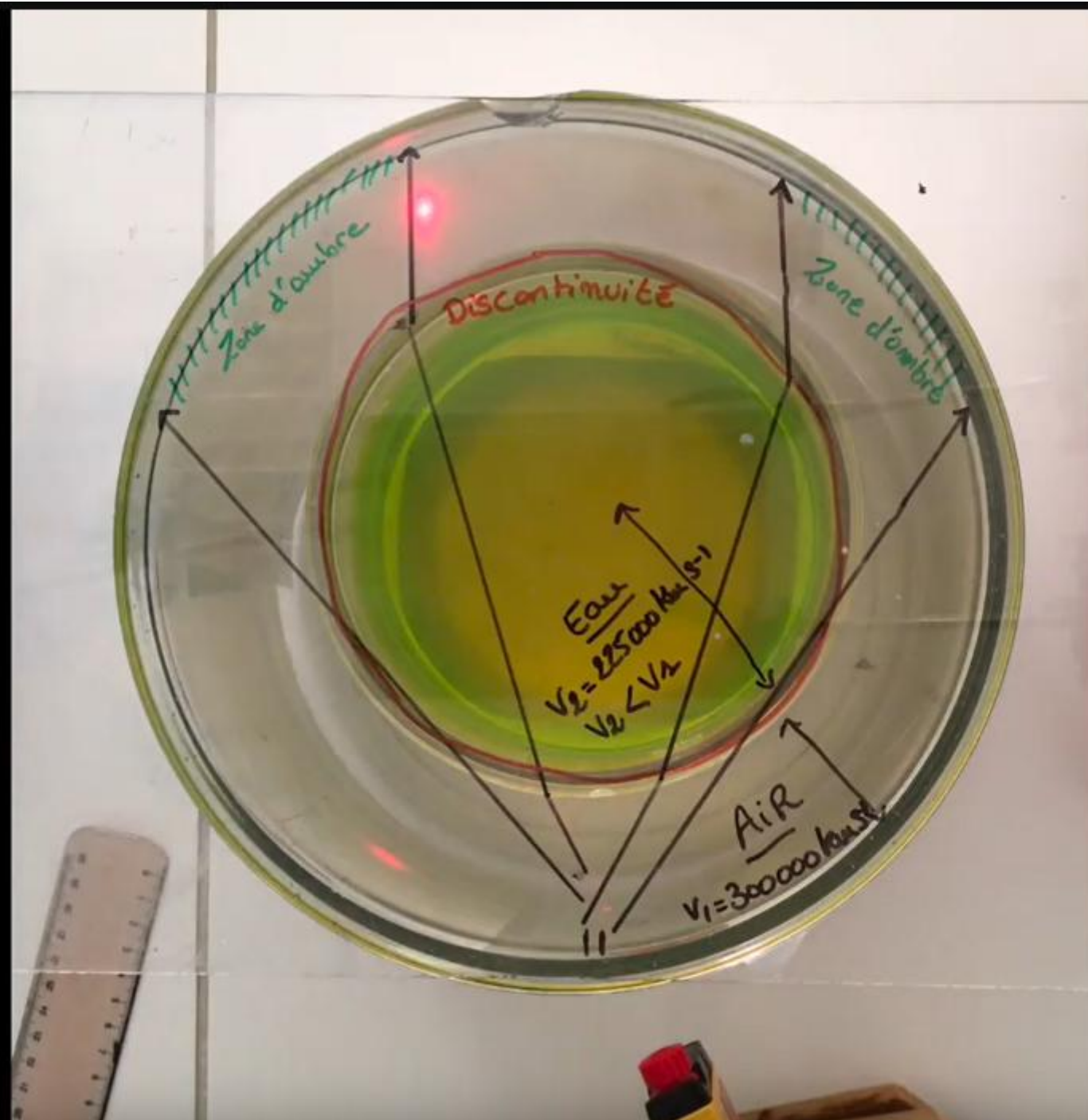
On en déduit que ces déviations sont dues à des surfaces particulières, les "discontinuités".

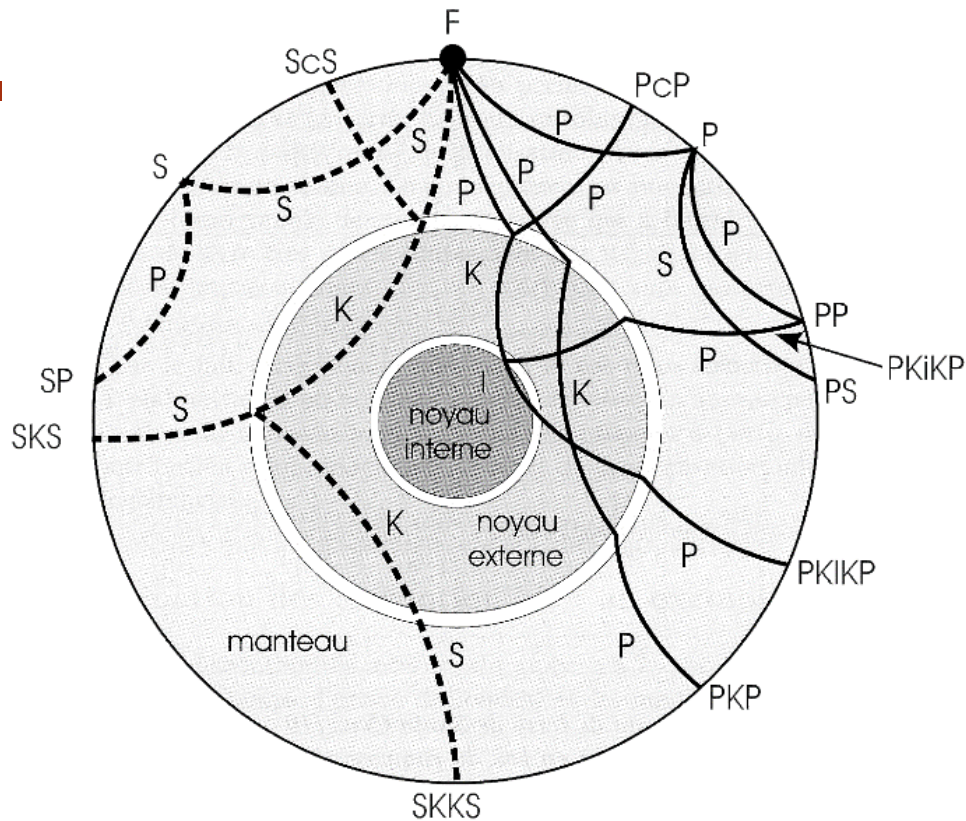
Zone d'ombre + absence d'ondes S = présence d'un noyau externe liquide
discontinuité de Gutenberg : physique et chimique



Géométrie des ondes, réapparition d'ondes S secondaires = noyau interne solide (graine)
discontinuité de Lehmann : physique

FIGURE 10.20. ZONE D'OMBRE CRÉÉE PAR LE NOYAU TERRESTRE.
 F : foyer du séisme. Les rais sismiques des ondes P émergents sont désignés par les lettres conformément à la logique indiquée sur la figure 10.18. Commentaire dans le texte.





1. Signification de PcP
2. Signification de PP
3. Signification de PKP
4. Signification de PKIKP
5. Signification de PKiKP
6. Signification de ScS
7. Signification de SS
8. Signification de SKS

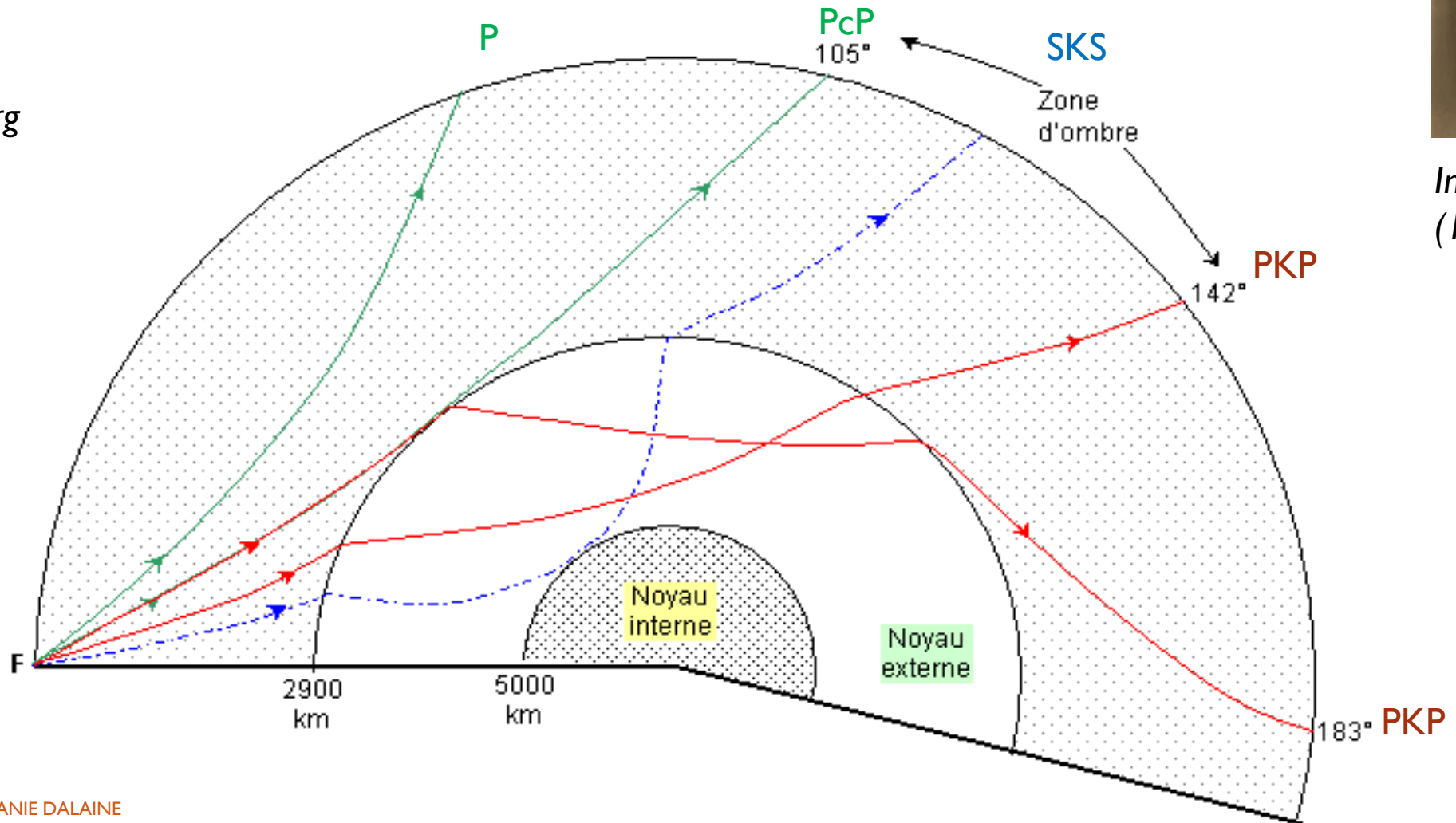
Trajet des rayons sismiques à l'intérieur de la Terre. Les rayons sont désignés par une première lettre indiquant le type d'ondes (pour plus de commodité dans la lecture du schéma on a séparé arbitrairement les ondes P: en trait continu sur la partie droite et les ondes S: en trait pointillé sur la partie gauche). Les réflexions à la surface du globe sont indiquées par des répétitions de lettres (PP, PPP), les réflexions à la surface noyau-manteau sont indiquées par la lettre c (PcP), la traversée du noyau externe est notée K et celle du noyau interne I (PKP, PKIKP), les réflexions à la surface du noyau interne sont notées par la lettre i (PKiKP). Les ondes P et S peuvent se convertir respectivement lors d'une réflexion ou réfraction sur une surface de discontinuité (SP). Les lettres SKS désignent une onde S qui se convertit en P à la frontière manteau-noyau (les ondes S ne traversent pas le noyau externe), puis traverse le noyau externe et se reconvertit en onde S à la sortie.

Trajet des ondes sismiques à l'intérieur de la Terre (in Larroque et Vireux, GB, 2001)



Beno Gutenberg
(1889-1960)

DISCONTINUITÉ GUTENBERG ET LEHMANN



Inge Lehmann
(1888-1993)

I. La Terre est formée d'enveloppes gazeuses, liquides et solides

A. L'atmosphère et l'hydrosphère forment des enveloppes fluides de surface stratifiées

1. *Composition et structure de l'atmosphère*
2. *L'hydrosphère est stratifiée*

B. Les données de sismologie mettent en évidence l'existence d'enveloppes concentriques

1. *Séismes et ondes sismiques*
2. *L'étude des vitesses de propagation des ondes P et S met en évidence des surfaces de discontinuité*
3. *L'étude des trajectoires des ondes sismiques permet d'identifier des surfaces de discontinuité*
4. *Le Moho marque la base de la croûte*
5. *La surface de Gutenberg est à la base du manteau*
6. *La surface de Lehmann sépare les noyaux externe et interne*

C. L'étude de la propagation des ondes permet également de déterminer les propriétés des matériaux.

1. *Les vitesses des ondes P et S dépendent des propriétés des matériaux*
2. *Interprétation des hodochrones*
3. *Mise en évidence d'une zone de faibles vitesses : LVZ*
4. *Les données de laboratoire expliquent les sauts de vitesse entre 400 et 670 km : transitions de phase*

D. Bilan : modèle PREM

1. *Modèle PREM*
2. *Signification des discontinuités*

II. Les échantillons nous renseignent sur les premières enveloppes solides

A. Les croûtes affleurent directement

1. *La croûte continentale peut être échantillonnée*
2. *La lithosphère océanique est parfois directement accessible*

B. Le manteau peut rarement être échantillonné

1. *Certaines roches contiennent des enclaves de manteau (xénolithes)*
2. *Le manteau est formé de péridotites*
3. *Transitions de phases dans le manteau*

C. Bilan : comparaison LO/LC

1. *Différence de structure :*
2. *Différence de devenir :*

III. Les enveloppes plus profondes ne sont connues que de façon indirecte

A. Le fer et le nickel doivent se concentrer dans le noyau

1. *L'étude de la gravité montre que le cœur est dense*
2. *La comparaison avec des chondrites montre que croûte et manteau sont trop pauvres en Fer et nickel.*

B. Le noyau doit comporter une partie liquide

1. *Données sismiques*
2. *Etude du champ magnétique*

C. Les limites supérieures et inférieures du noyau sont des zones de réaction

1. *Couche D'' : interface péridotite/Fer Ni*
2. *Une graine qui grossit*

Conclusion

C. L'ÉTUDE DE LA PROPAGATION DES ONDES PERMET ÉGALEMENT DE DÉTERMINER LES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX

I. Les vitesses des ondes P et S dépendent des propriétés des matériaux



Les vitesses des ondes P et S dépendent des propriétés élastiques de matériaux

- $v_P = \sqrt{[(\frac{4}{3}\mu + \kappa_s) / \rho]}$
- $v_S = \sqrt{(\mu / \rho)}$
- κ_s : module d'incompressibilité adiabatique (en GPa)
- μ : le module de cisaillement (en GPa).

A partir des formules, caractériser les vitesses des ondes P et S

- Module de cisaillement \pm résistance au cisaillement (dépend de ρ)
 - ⇒ plus le milieu résiste au cisaillement, plus l'onde se déplace rapidement. $\mu = 0$ dans les liquides
 - ⇒ **ondes S** ne se propagent pas dans les liquides
- κ_s : **incompressibilité adiabatique** \pm résistance au changement de volume quand P varie
 - ⇒ plus le milieu résiste, plus l'onde se déplace rapidement
($\kappa_s = A \rho^2$)
- Dans un milieu donné, la $v_P > v_S$
 - ⇒ Ondes P arrivent toujours avant ondes S
- **si ρ augmente, v ne diminue pas car κ_s et μ dépendent aussi de ρ (ils augmentent avec ρ)**

C. L'ÉTUDE DE LA PROPAGATION DES ONDES PERMET ÉGALEMENT DE DÉTERMINER LES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX

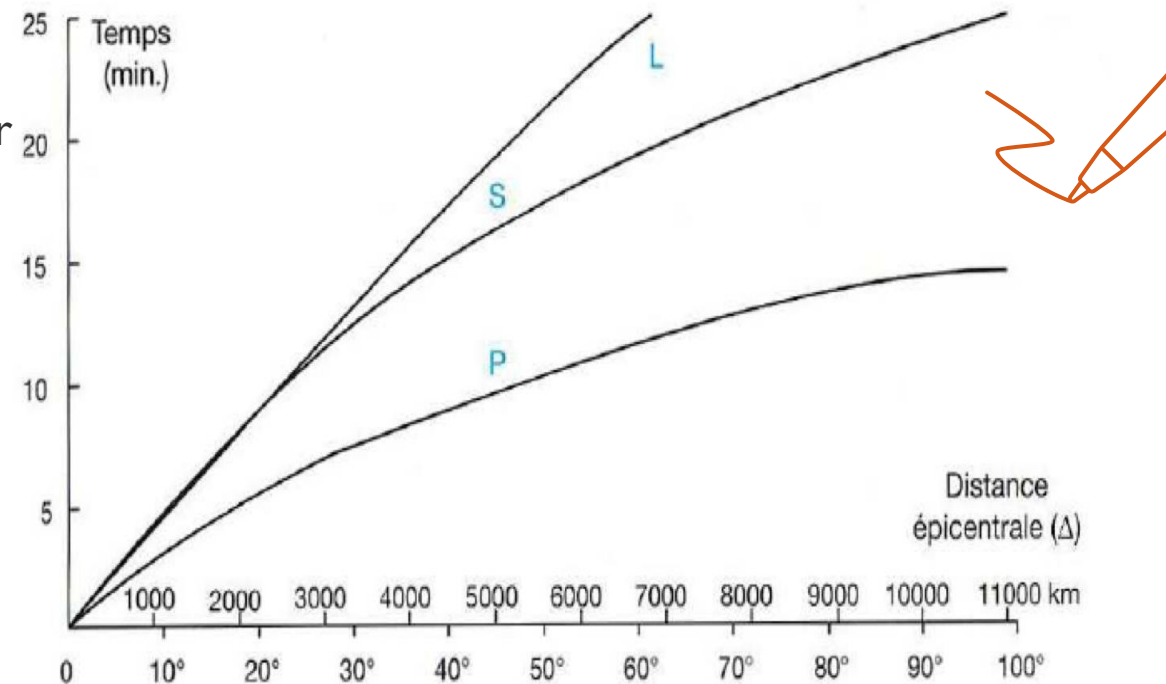
2. Interprétation des hodochrones observation d'hodochrones

CfTD

- Vitesse des ondes P et S augmente avec la distance au foyer
- $v_p > v_s$
- $v_P = \sqrt{[(\frac{4}{3}\mu + \kappa_s) / \rho]}$
- $v_S = \sqrt{(\mu / \rho)}$

κ_s : module d'incompressibilité adiabatique (en GPa)

μ : le module de cisaillement (en GPa).



Hodochrones d'un séisme

C. L'ÉTUDE DE LA PROPAGATION DES ONDES PERMET ÉGALEMENT DE DÉTERMINER LES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX

2. Interprétation des hodochrones expérience de Birch



- (1961) Birch met en évidence une relation empirique linéaire entre **la vitesse v_P des ondes P** dans de nombreuses roches et minéraux (mesurée au laboratoire par ultrasons) et leur **densité** :

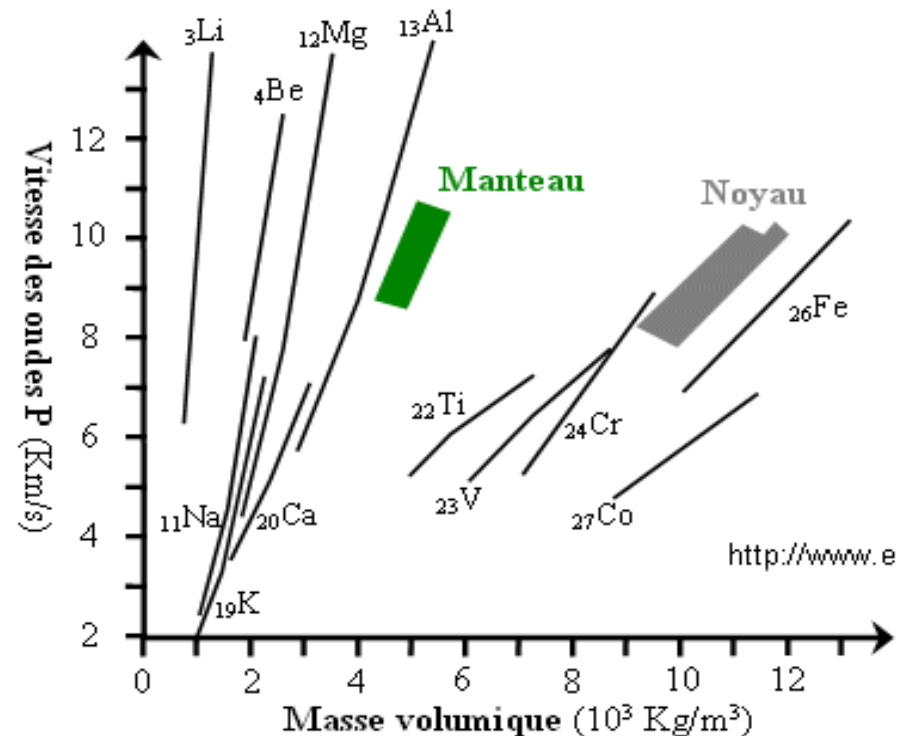
$$v_P = a\rho + bM$$

ρ : densité

M : cste qui dépend de la masse atomique moyenne

⇒ Vitesse de l'onde P dans un même minéral dont densité varie (en fonction de P et T)!

- **Étude des hodochrones ⇒ ondes traversent des milieux de + en + denses**



Approche de la composition chimique du noyau issu des travaux de Birch

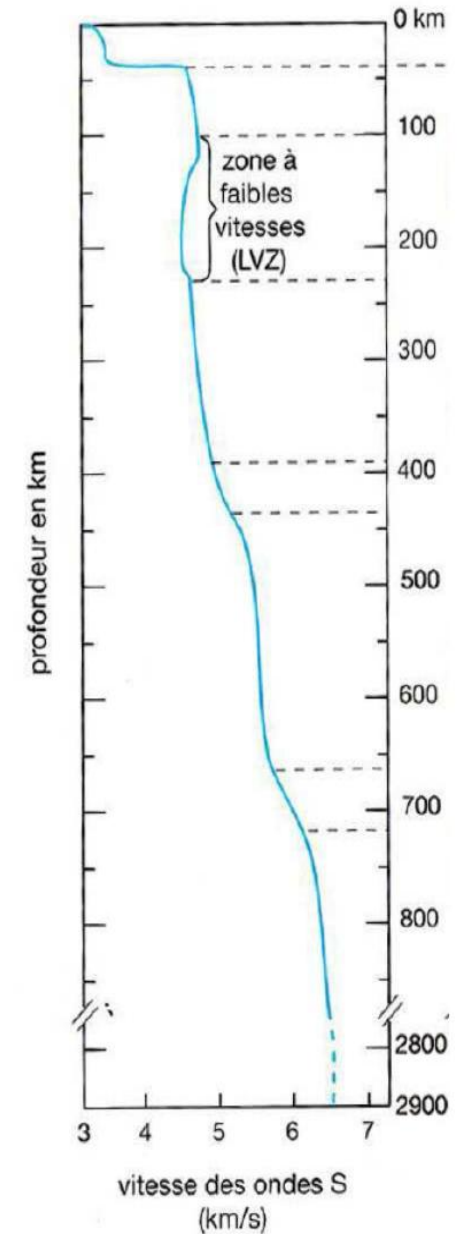
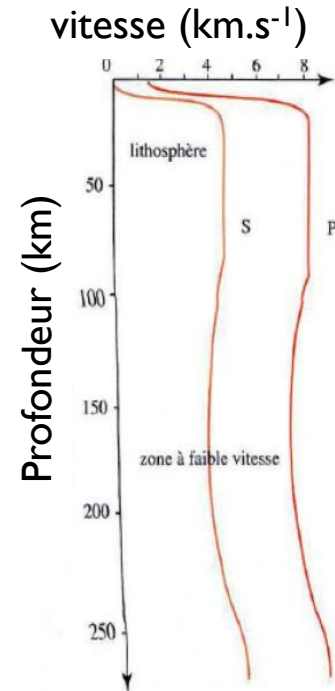
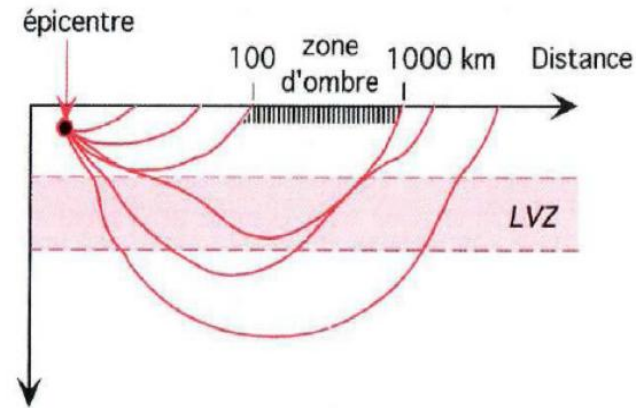
C. L'ÉTUDE DE LA PROPAGATION DES ONDES PERMET ÉGALEMENT DE DÉTERMINER LES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX

3. Mise en évidence d'une zone de faibles vitesses : LVZ



Entre 150 et 220 km : net fléchissement de la vitesse des ondes P et S

- **LVZ** = Low Velocity Zone
- Au-dessus: : manteau lithosphérique rigide
- Au-dessous: asthénosphère qui se déforme ductilement sur des Ma en raison d'une \searrow de sa viscosité liée à \nearrow de sa $T^{\circ}\text{C}$



Mise en évidence de la LVZ (in Pomerol et al., Dunod 2005, Jy et al., Vuibert 2006)

Encart sur la viscosité

- La viscosité de l'asthénosphère est d'environ 10^{18} à 10^{19} Pa.s
- La viscosité de la lithosphère est de trois ordres de grandeur plus élevée : 10^{21} à 10^{22} Pa.s
- La viscosité du manteau inférieur, mal connue, est d'environ 10^{23} à 10^{24} Pa.s, d'après les modèles les plus récents. Le manteau inférieur est donc plus visqueux que le manteau supérieur.
- La viscosité de la glace à -20°C (calotte antarctique) est de 10^{13} Pa.s
- La viscosité de la glace à 0°C (glacier alpin) est de 10^{11} Pa.s
- La viscosité d'une lave basaltique (hawaïenne) est de 400 Pa.s
- La viscosité de l'huile d'olive à 20°C est de 1 Pa.s
- La viscosité de l'eau est de 10^{-2} Pa.s

Viscosité: résistance à l'écoulement



Manteau inférieur 10^{23} à 10^{24} Pa.s

lithosphère 10^{21} à 10^{22} Pa.s

asthénosphère : 10^{18} à 10^{19} Pa.s



calotte antarctique 10^{13} Pa.s



glacier alpin 10^{11} Pa.s

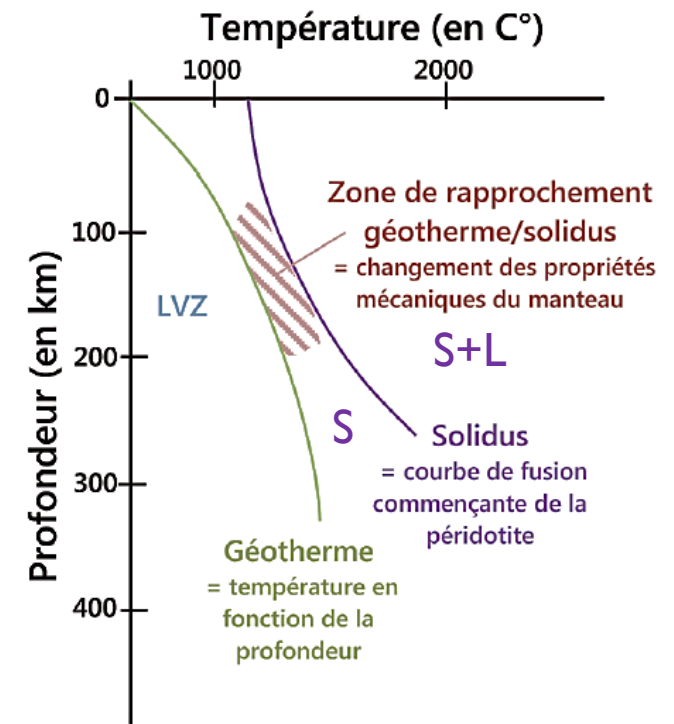
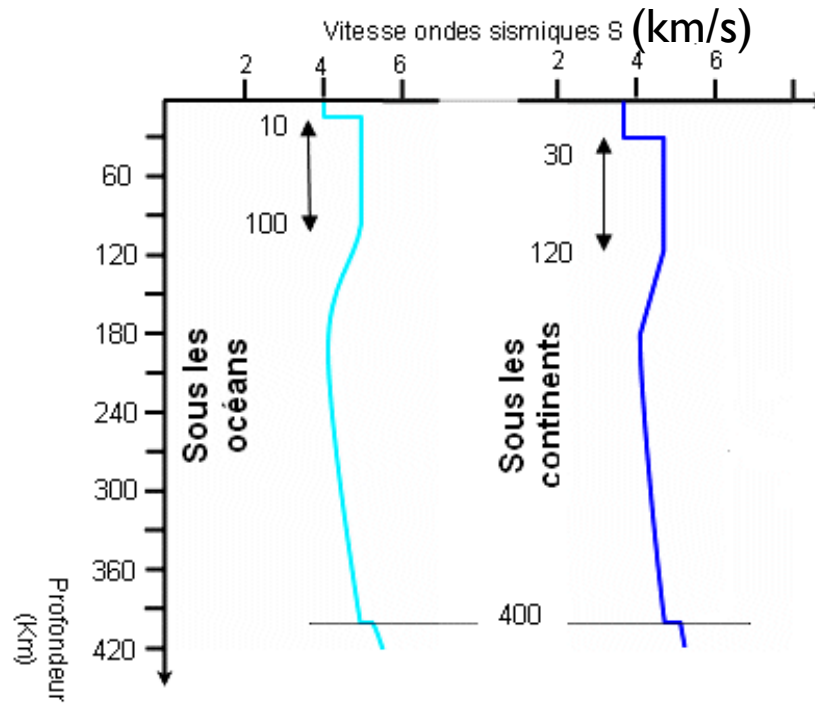


eau de 10^{-2} Pa.s

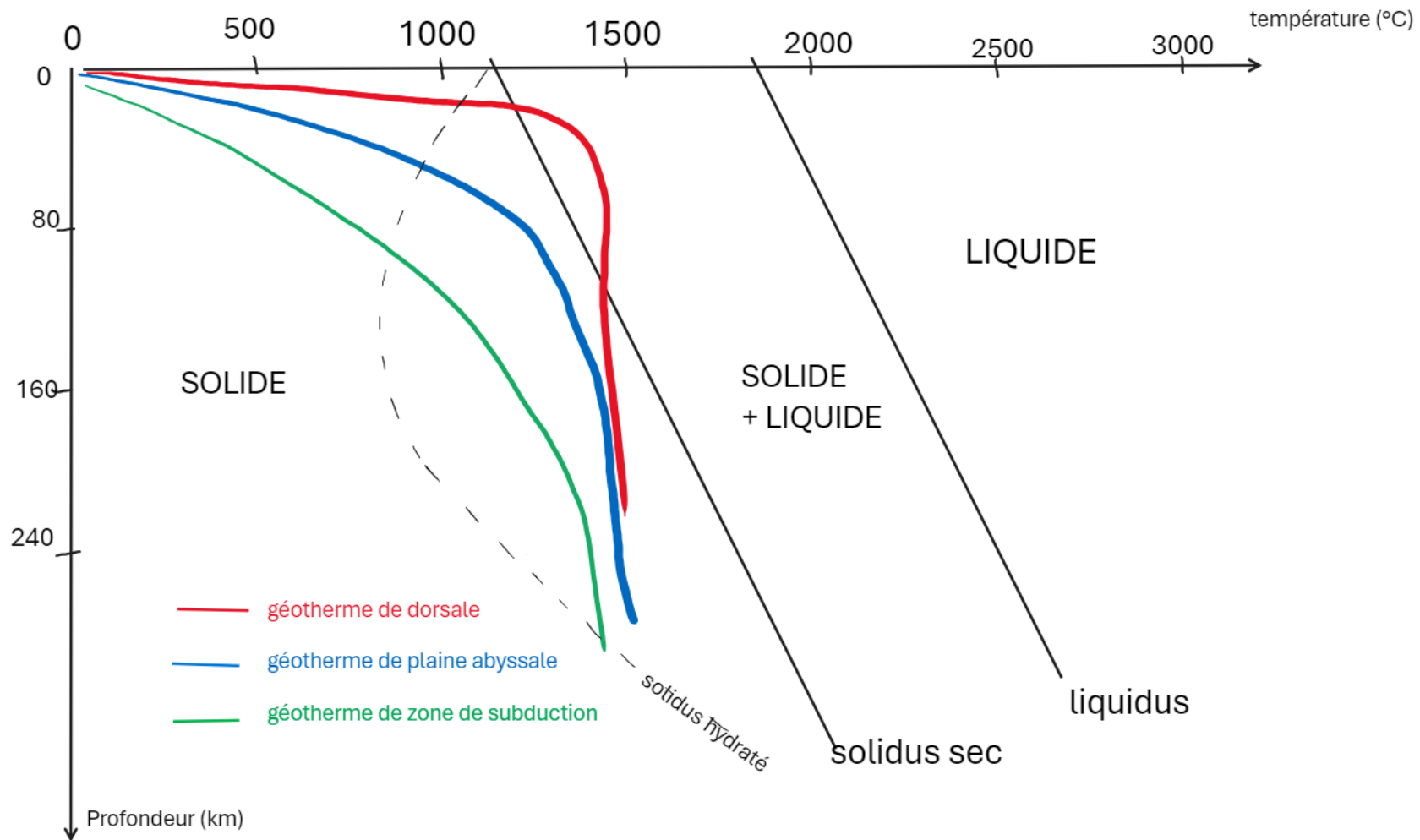


I. Comment expliquer la ductilité de l'asthénosphère sous la LVZ?

↘ de viscosité liée à ↗ de température cf géotherme
⇒ La **péridotite** mantellique approche du **point de fusion** change de viscosité et devient ductile



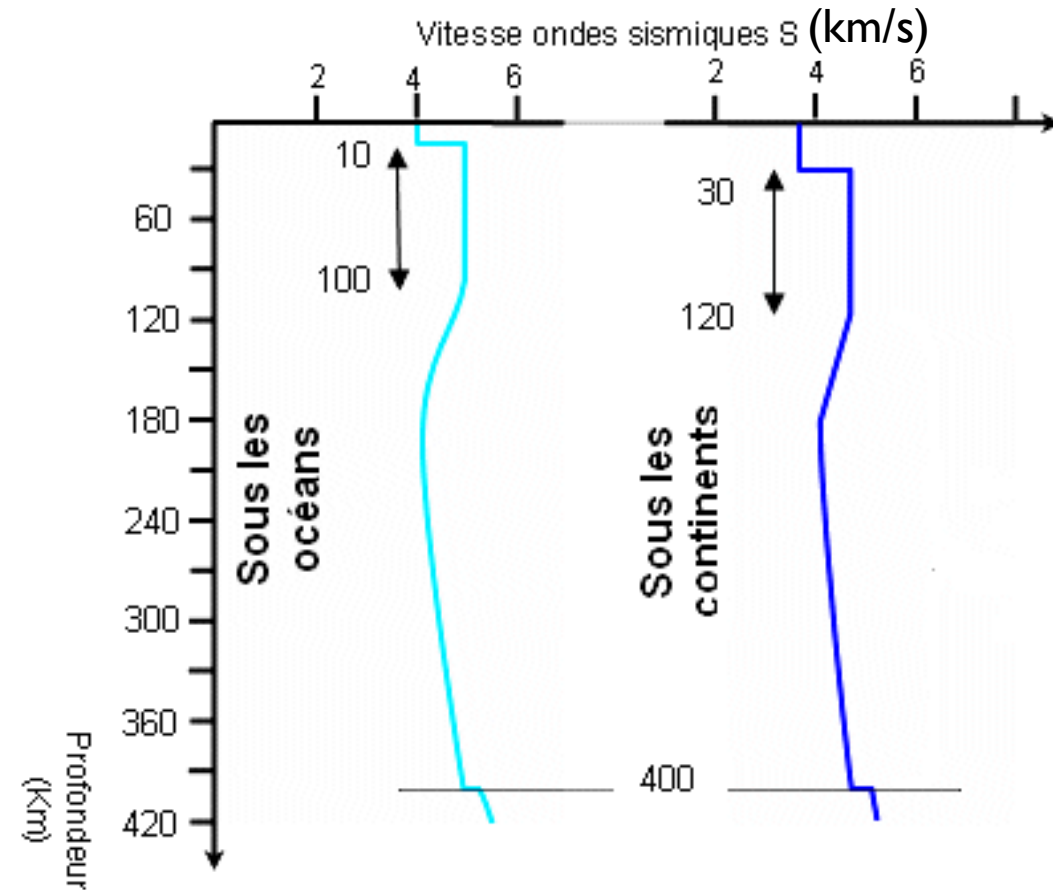
Des discontinuités dans le manteau supérieur : LVZ et ZT



Géothermes et solidus de la péridotite

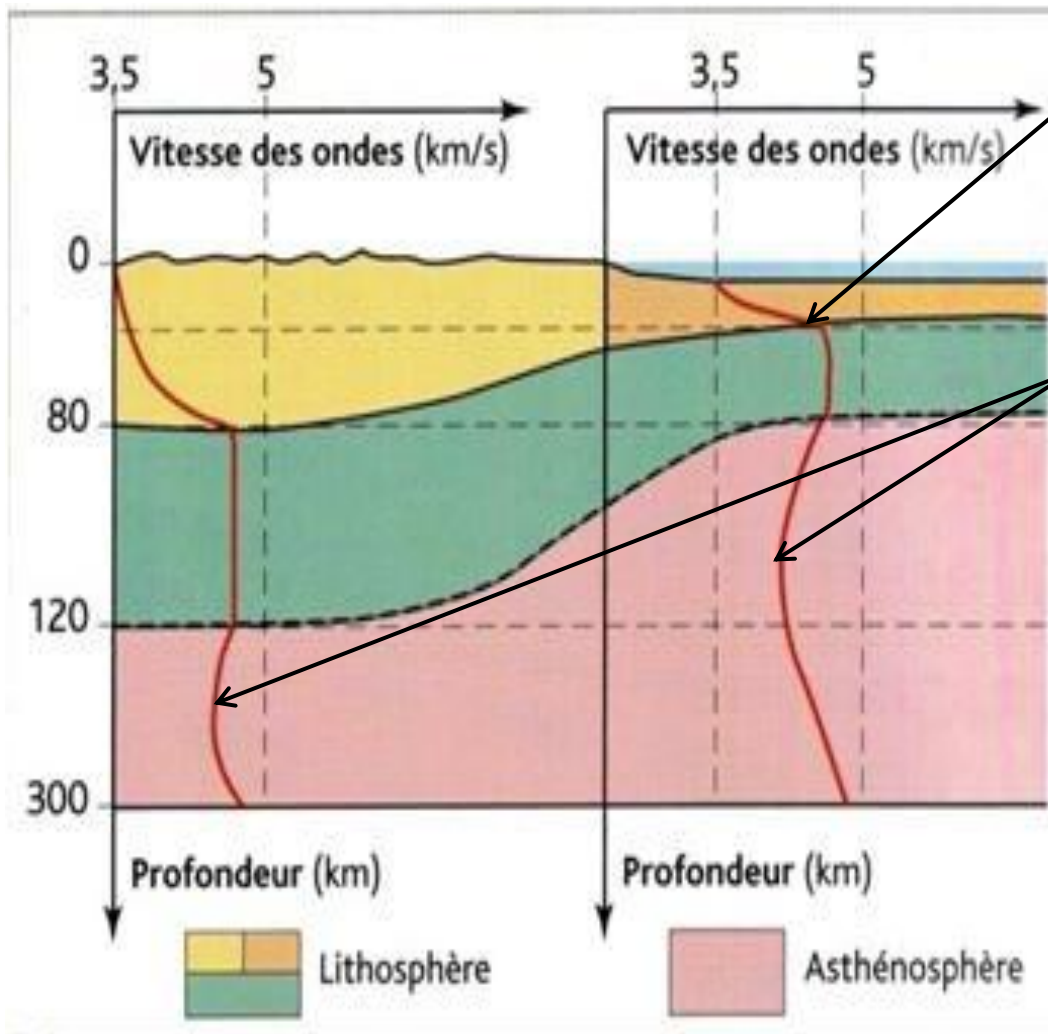


- Le **ralentissement des ondes dans la LVZ** s'explique par un **comportement ductile** du matériel mantellique, proche des conditions de sa fusion.
- La **LVZ** correspond donc à **l'isotherme 1300 °C**, elle fait donc partie de **l'asthénosphère**, qui elle-même fait partie du manteau supérieur.
- **3 définitions de l'asthénosphère (dans l'ordre historique) :**
 - **Sismique** : elle commence avec la LVZ
 - **Mécanique** : ductile par rapport à lithosphère rigide
 - **Thermique** : limite lithosphère / asthénosphère = isotherme 1300°C. Dans la lithosphère, la chaleur se propage par conduction, alors que dans l'asthénosphère la chaleur est transmise par conduction mais aussi par convection.
- La lithosphère est donc ce que les physiciens appellent la **couche limite thermique** supérieure du système convectif mantellique



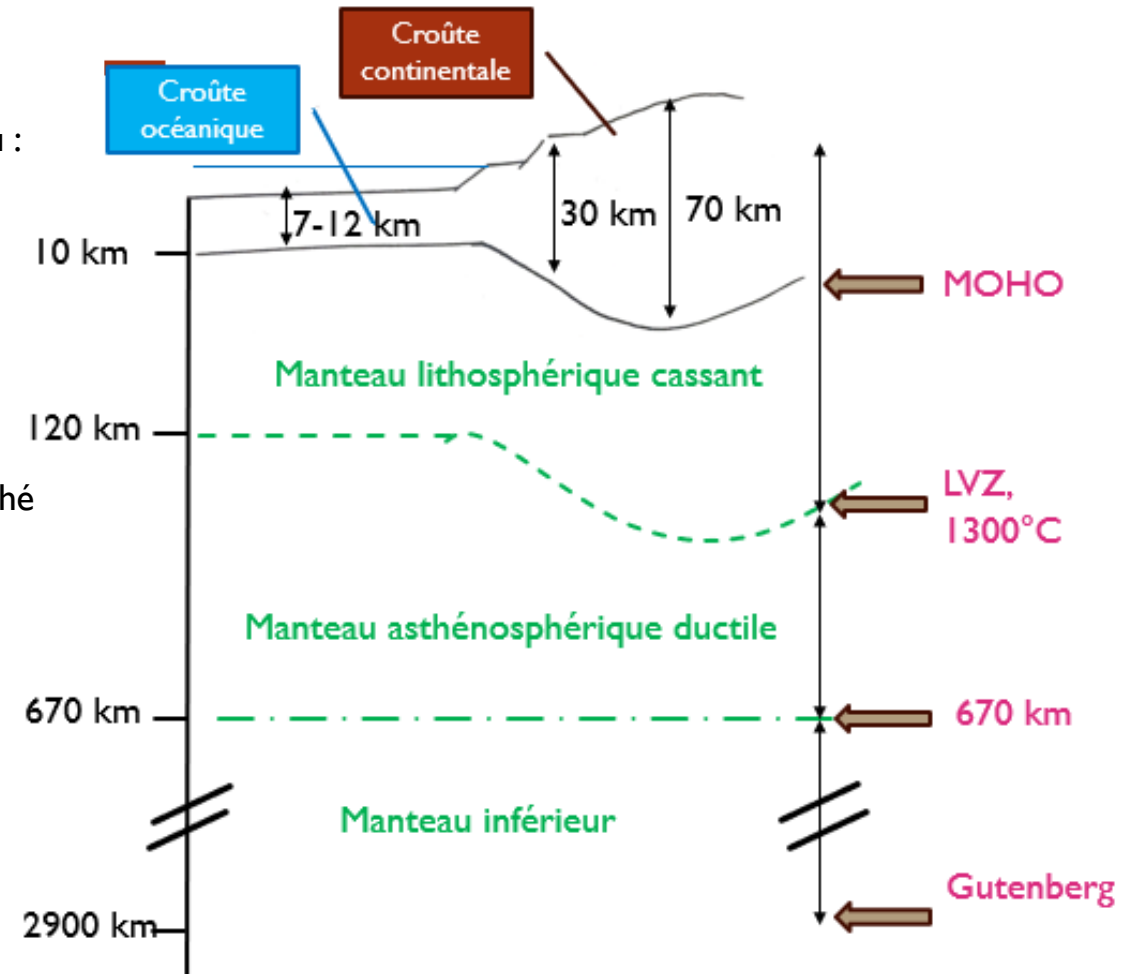
LC

LO



Moho : limite croûte/manteau : discontinuité chimique

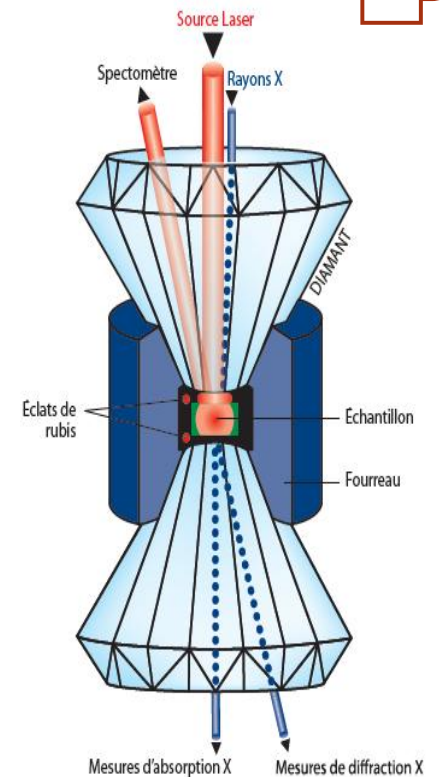
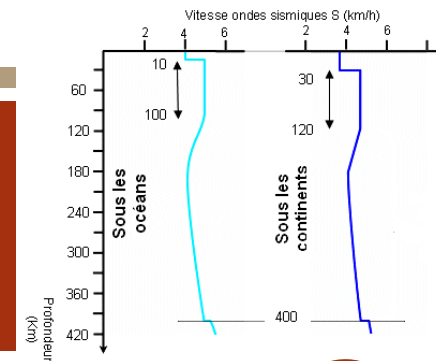
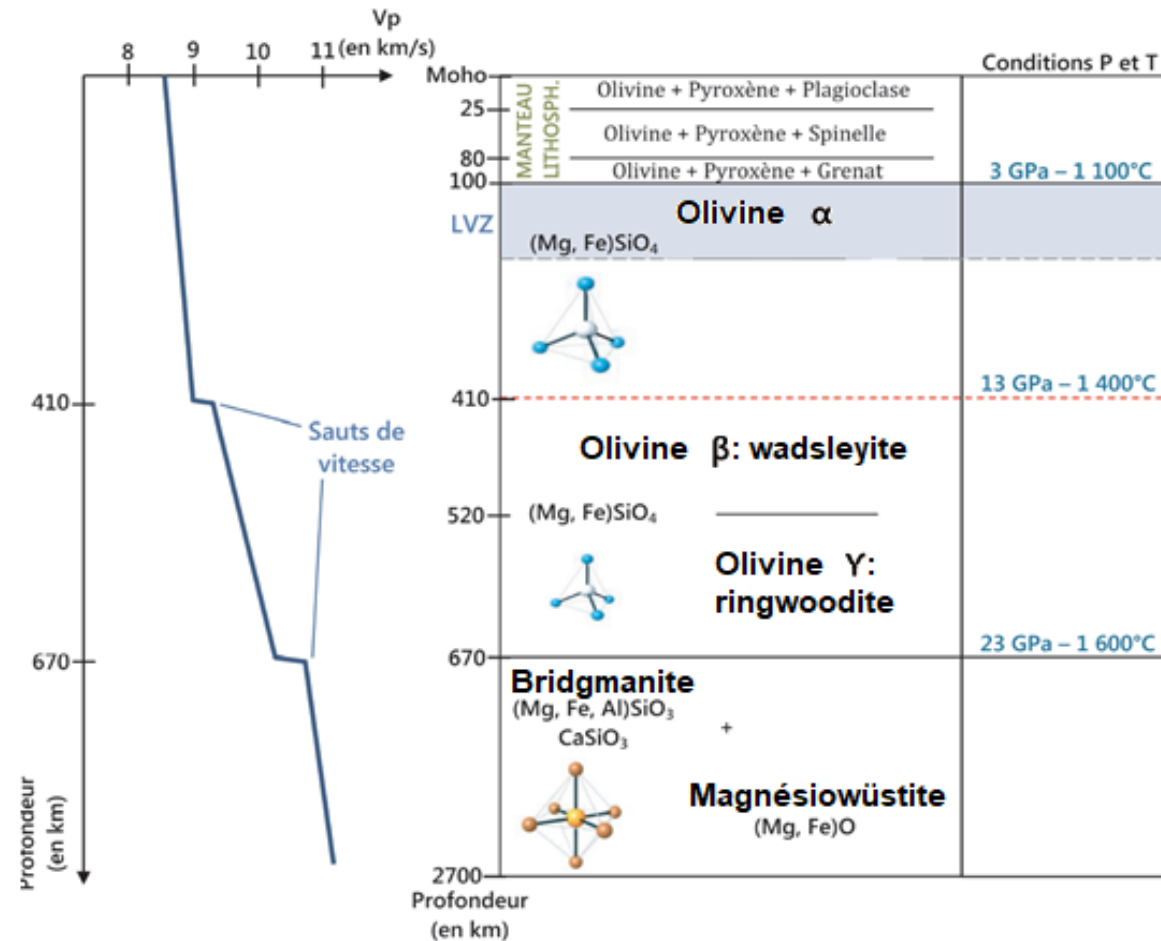
LVZ : limite lithosphère/Asthénosphère : discontinuité physique



C. L'ÉTUDE DE LA PROPAGATION DES ONDES PERMET ÉGALEMENT DE DÉTERMINER LES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX

4. Les données de laboratoire expliquent les sauts de vitesse entre 400 et 670 km : transitions de phase

- Entre 410 et 670 km:
 - ↗ de v_P et v_S à 410 et 670 km de profondeur
 - Rupture de pente
 - **zone de transition** du manteau.
 - ✓ **transitions de phase** = des transformations des composants du manteau.
 - ✓ réorganisation des atomes dans la matière, en raison de modification de P et T.



Les transitions de phase dans le manteau

Cellule à enclume de diamant

I. La Terre est formée d'enveloppes gazeuses, liquides et solides

A. L'atmosphère et l'hydrosphère forment des enveloppes fluides de surface stratifiées

1. Composition et structure de l'atmosphère
2. L'hydrosphère est stratifiée

B. Les données de sismologie mettent en évidence l'existence d'enveloppes concentriques

1. Séismes et ondes sismiques
2. L'étude des vitesses de propagation des ondes P et S met en évidence des surfaces de discontinuité
3. L'étude des trajectoires des ondes sismiques permet d'identifier des surfaces de discontinuité
4. Le Moho marque la base de la croûte
5. La surface de Gutenberg est à la base du manteau
6. La surface de Lehmann sépare les noyaux externe et interne

C. L'étude de la propagation des ondes permet également de déterminer les propriétés des matériaux.

1. Les vitesses des ondes P et S dépendent des propriétés des matériaux
2. Interprétation des hodochrones
3. Mise en évidence d'une zone de faibles vitesses : LVZ
4. Les données de laboratoire expliquent les sauts de vitesse entre 400 et 670 km : transitions de phase

D. Bilan : modèle PREM

1. Modèle PREM
2. Signification des discontinuités

II. Les échantillons nous renseignent sur les premières enveloppes solides

A. Les croûtes affleurent directement

1. La croûte continentale peut être échantillonnée
2. La lithosphère océanique est parfois directement accessible

B. Le manteau peut rarement être échantillonné

1. Certaines roches contiennent des enclaves de manteau (xénolithes)
2. Le manteau est formé de péridotites
3. Transitions de phases dans le manteau

C. Bilan : comparaison LO/LC

1. Différence de structure :
2. Différence de devenir :

III. Les enveloppes plus profondes ne sont connues que de façon indirecte

A. Le fer et le nickel doivent se concentrer dans le noyau

1. L'étude de la gravité montre que le cœur est dense
2. La comparaison avec des chondrites montre que croûte et manteau sont trop pauvres en Fer et nickel.

B. Le noyau doit comporter une partie liquide

1. Données sismiques
2. Etude du champ magnétique

C. Les limites supérieures et inférieures du noyau sont des zones de réaction

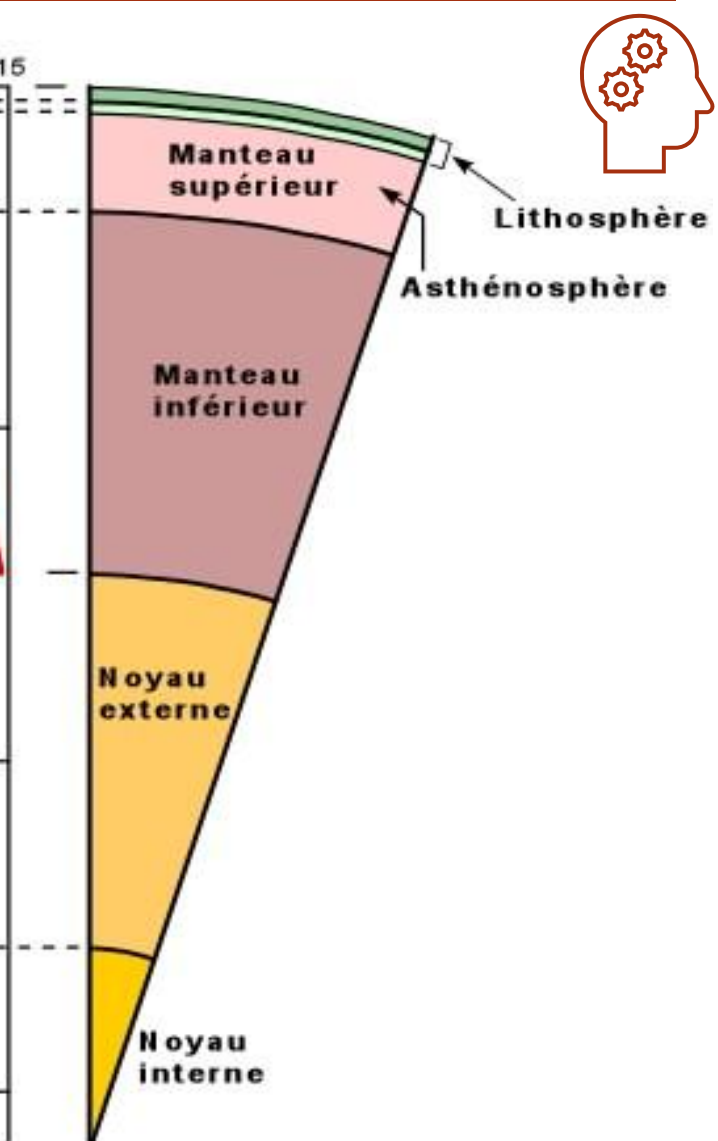
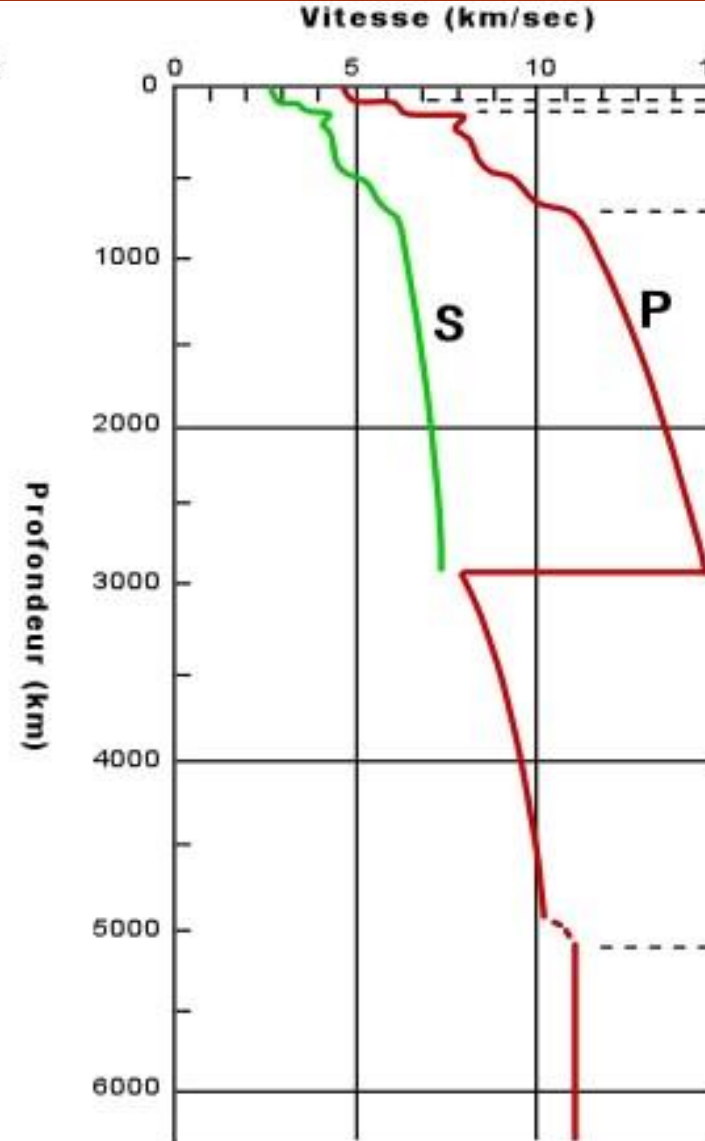
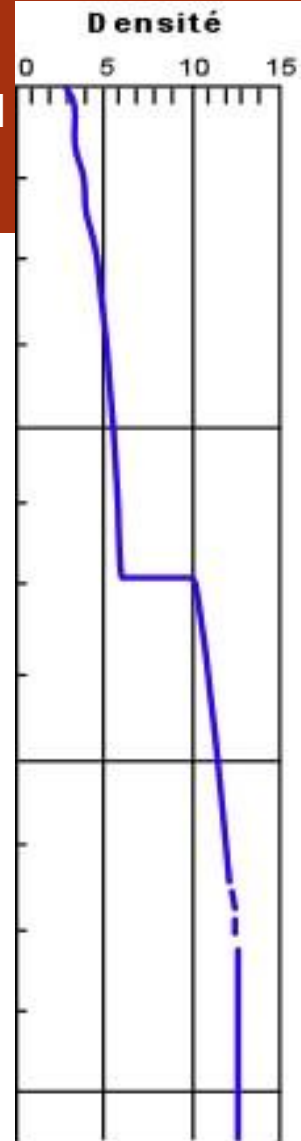
1. Couche D'' : interface péridotite/Fer Ni
2. Une graine qui grossit

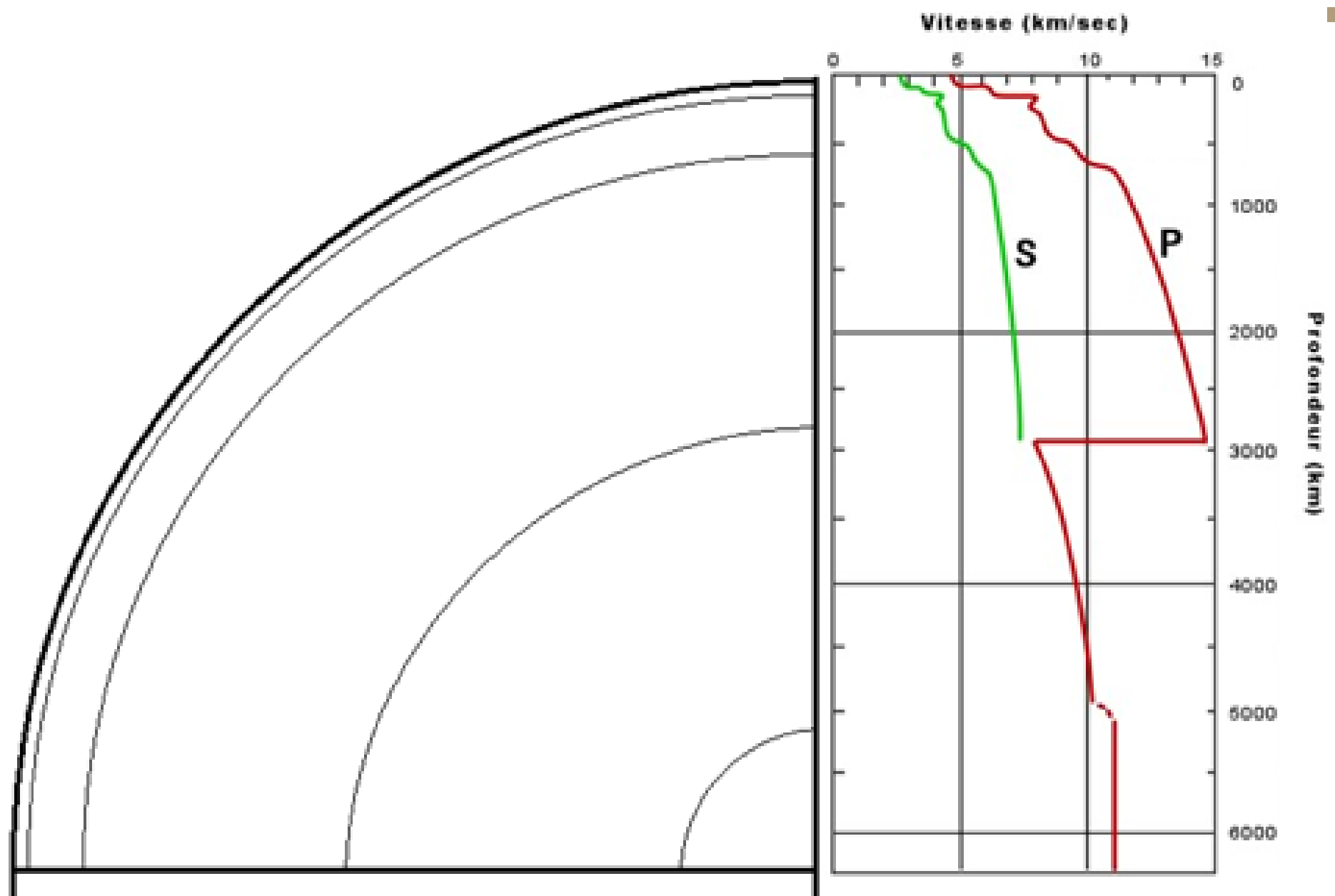
Conclusion

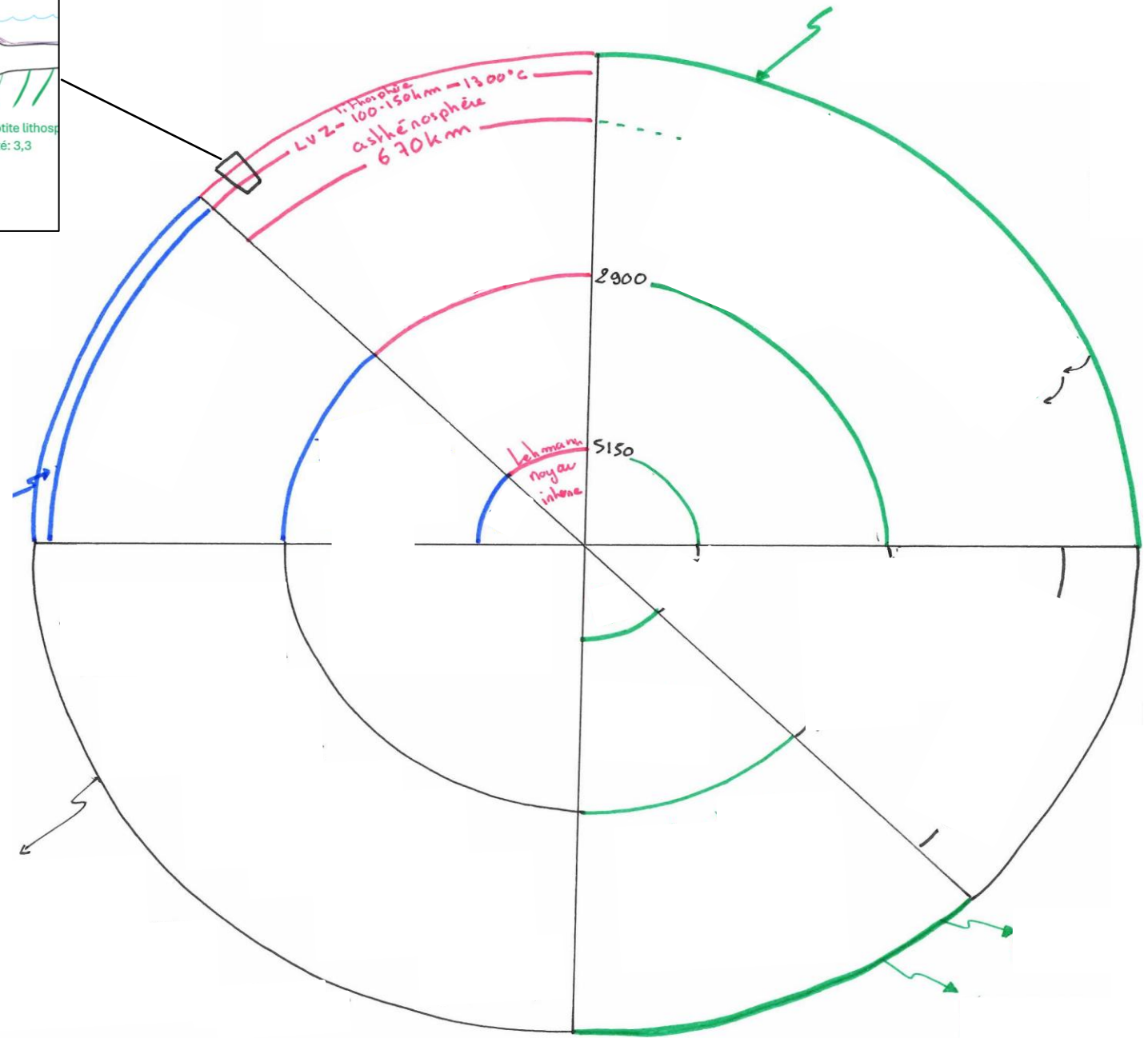
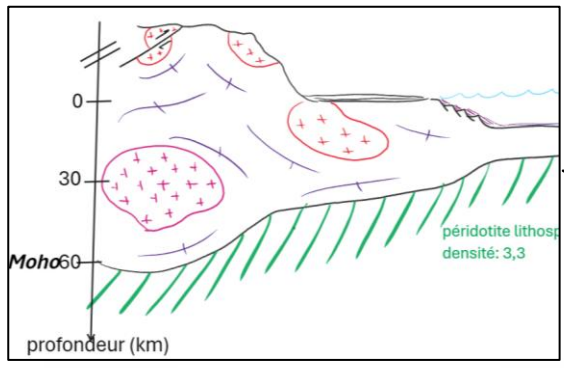
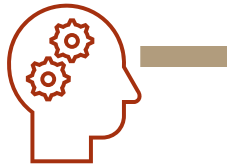
D. BILAN : MODÈLE PREM

I. Modèle PREM

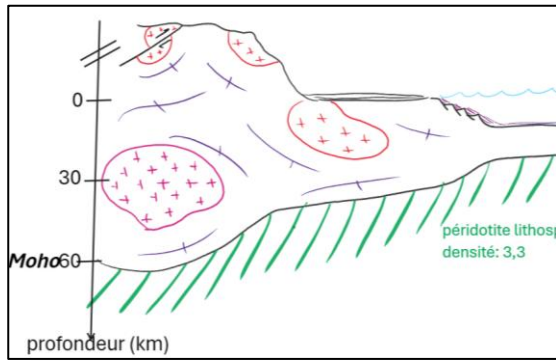
- Preliminary Reference Earth Model
- **Discontinuité de Mohorovicic** : en moyenne **30 km** sous les continents, **10 km** sous les océans.
- **LVZ** : 150/200km, zone des faibles vitesses
- **Zone de transition** : 410-670 km
- **Discontinuité manteau supérieur/inferieur** à **670 km**
- **Discontinuité de Gutenberg** : **2900 km**,
- **Discontinuité de Lehmann** à **5150 km**







Lithosphère



Enveloppes physiques

CC: quartz – feldspath – micas- calcite – minéraux du métamorphisme
 CO: olivine – pyroxènes – feldspaths



minéralogie

Propriétés physiques et dynamiques

Solide cassant
 ⇒ Conduction
 ⇒ Sismogène

Ductile
 ⇒ Convection

Liquide
 ⇒ Convection
 ⇒ Champ magnétique

Méthodes d'étude

Sismique → 150 km
 Xénolithes → 300 km
 tomographie

Sismologie
 Presse à enclume
 de diamant
 météorites

gravimétrie
 Presse gros volume
 (manteau sup)

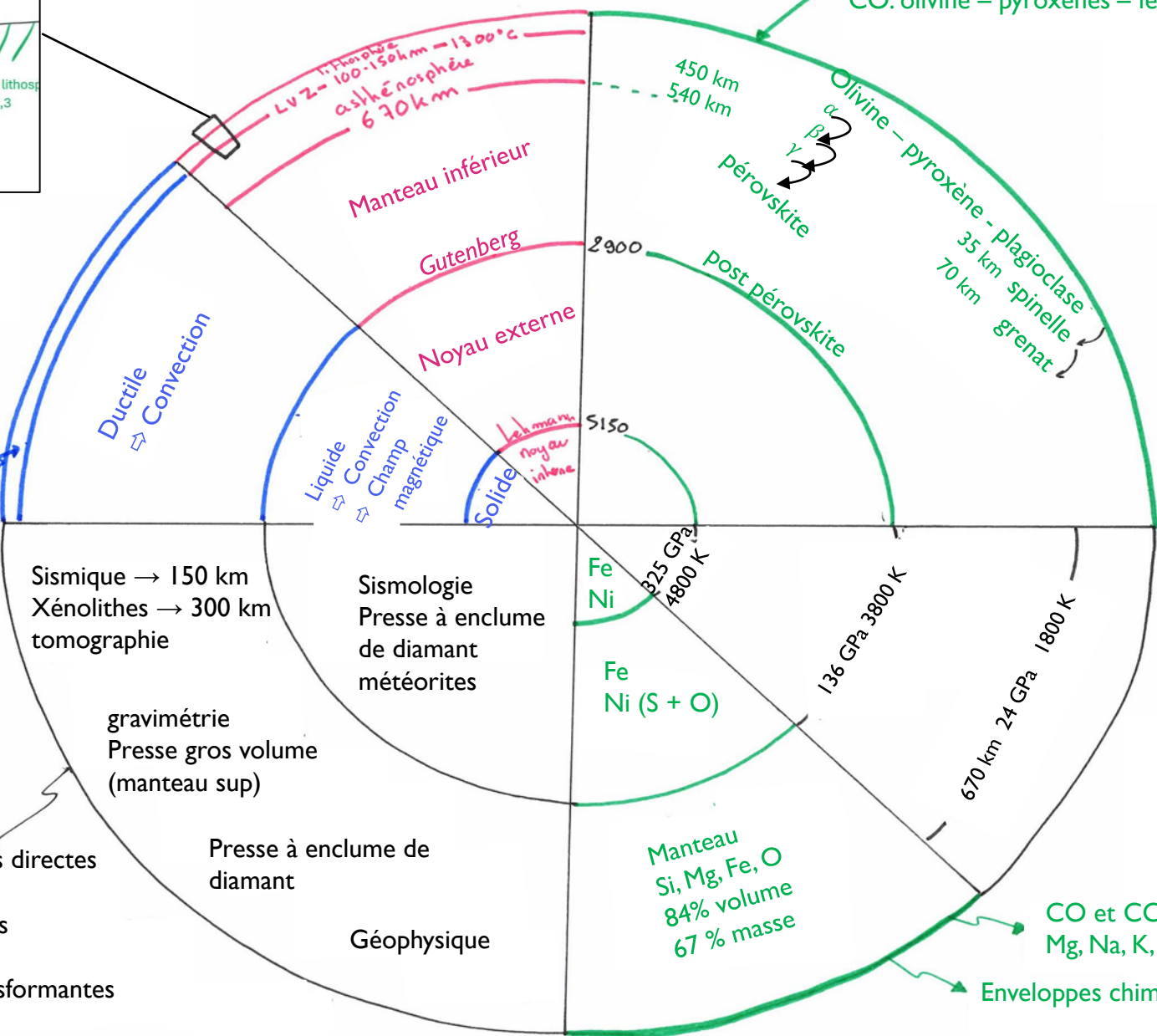
Presse à enclume de
 diamant

Géophysique

CC: affleurement
 forages

CO: forages
 Ophiolites
 Failles transformantes

Observations directes



Conditions de P et T

CO et CC: Si, Al, Fe, Ca,
 Mg, Na, K, O

Enveloppes chimiques

I. La Terre est formée d'enveloppes gazeuses, liquides et solides

A. L'atmosphère et l'hydrosphère forment des enveloppes fluides de surface stratifiées

1. Composition et structure de l'atmosphère

2. L'hydrosphère est stratifiée

B. Les données de sismologie mettent en évidence l'existence d'enveloppes concentriques

1. Séismes et ondes sismiques

2. L'étude des vitesses de propagation des ondes P et S met en évidence des surfaces de discontinuité

3. L'étude des trajectoires des ondes sismiques permet d'identifier des surfaces de discontinuité

4. Le Moho marque la base de la croûte

5. La surface de Gutenberg est à la base du manteau

6. La surface de Lehmann sépare les noyaux externe et interne

C. L'étude de la propagation des ondes permet également de déterminer les propriétés des matériaux.

1. Les vitesses des ondes P et S dépendent des propriétés des matériaux

2. Interprétation des hodochrones

3. Mise en évidence d'une zone de faibles vitesses : LVZ

4. Les données de laboratoire expliquent les sauts de vitesse entre 400 et 670 km : transitions de phase

D. Bilan : modèle PREM

1. Modèle PREM

2. Signification des discontinuités

II. Les échantillons nous renseignent sur les premières enveloppes solides

A. Les croûtes affleurent directement

1. La croûte continentale peut être échantillonnée

2. La lithosphère océanique est parfois directement accessible

B. Le manteau peut rarement être échantillonné

1. Certaines roches contiennent des enclaves de manteau (xénolithes)

2. Le manteau est formé de péridotites

3. Transitions de phases dans le manteau

C. Bilan : comparaison LO/LC

1. Différence de structure :

2. Différence de devenir :

III. Les enveloppes plus profondes ne sont connues que de façon indirecte

A. Le fer et le nickel doivent se concentrer dans le noyau

1. L'étude de la gravité montre que le cœur est dense

2. La comparaison avec des chondrites montre que croûte et manteau sont trop pauvres en Fer et nickel.

B. Le noyau doit comporter une partie liquide

1. Données sismiques

2. Etude du champ magnétique

C. Les limites supérieures et inférieures du noyau sont des zones de réaction

1. Couche D'' : interface péridotite/Fer Ni

2. Une graine qui grossit

Conclusion

II. LES ÉCHANTILLONS NOUS RENSEIGNENT SUR LES PREMIÈRES ENVELOPPES SOLIDES

A. LES CROÛTES AFFLEURENT DIRECTEMENT

I. La croûte continentale peut être échantillonnée

- Roches **sédimentaires** = exogènes (formées à la surface de la terre, voir cours sur la sédimentation) → calcaires du Vercors etc.
 - Roches **magmatiques** : roches issues de la cristallisation d'un magma : granite du massif du Mont blanc
 - Roches **métamorphiques** : roches issues de transformations à l'état solide suite à des modifications de P et T : éclogites de Dora Maira, gneiss, schistes, marbre etc... et granulite dans les zones les plus profondes (Sézia).
- Études de terrain à l'affleurement : exemple dans les Alpes
- Forages pour la croûte supérieure : le plus profond, à Kola en Sibérie, a atteint 12 km.
- Profil ECORS

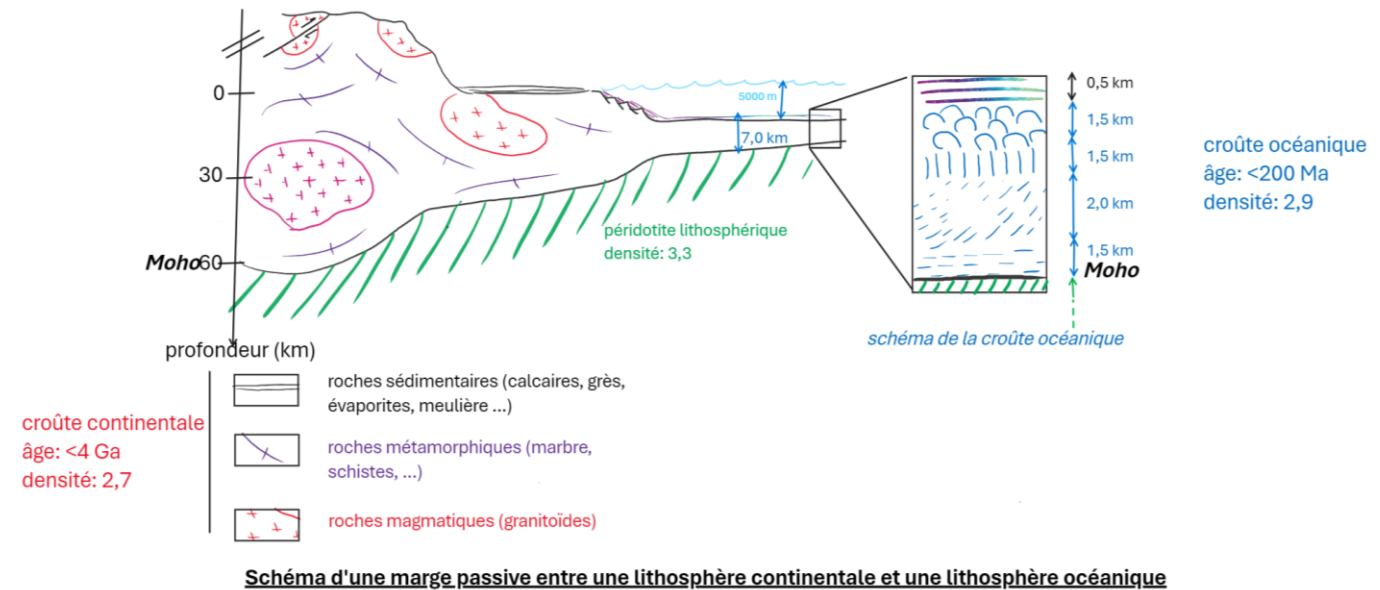
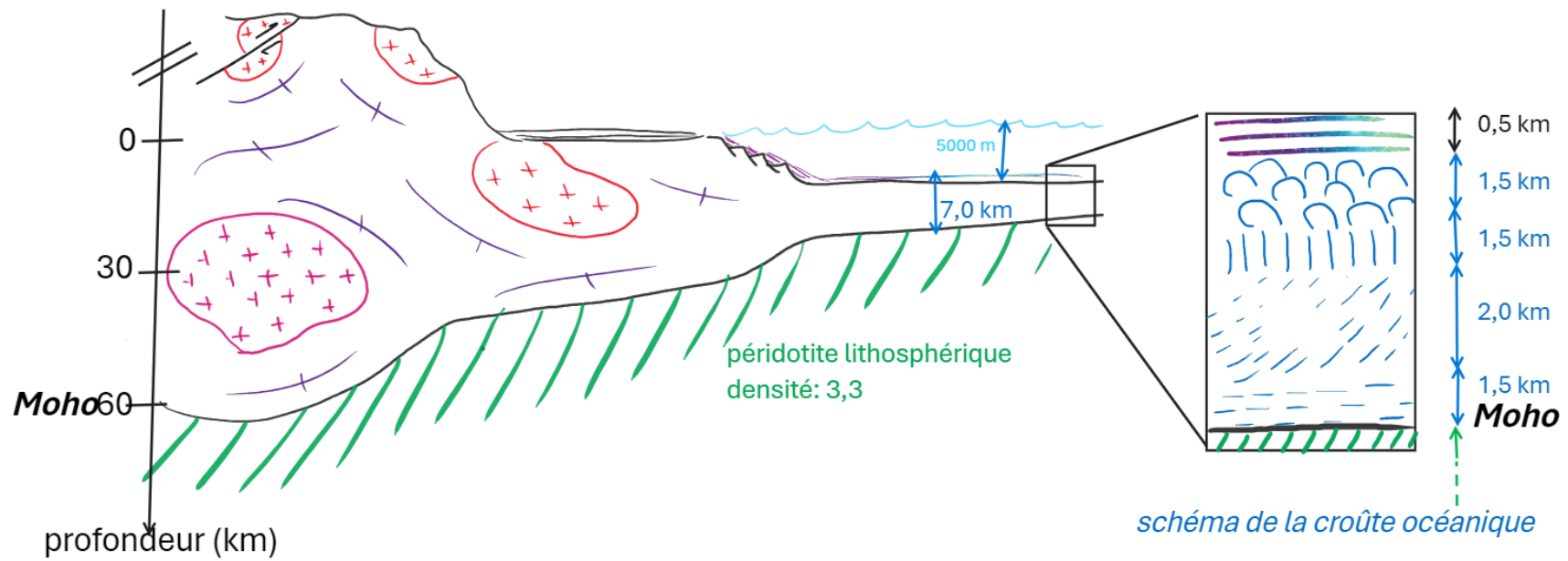
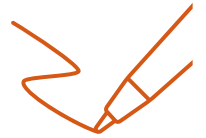


Schéma d'une marge passive entre une lithosphère continentale et une lithosphère océanique



croûte océanique
âge: <200 Ma
densité: 2,9

croûte continentale
âge: <4 Ga
densité: 2,7

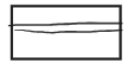
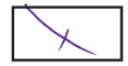
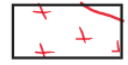
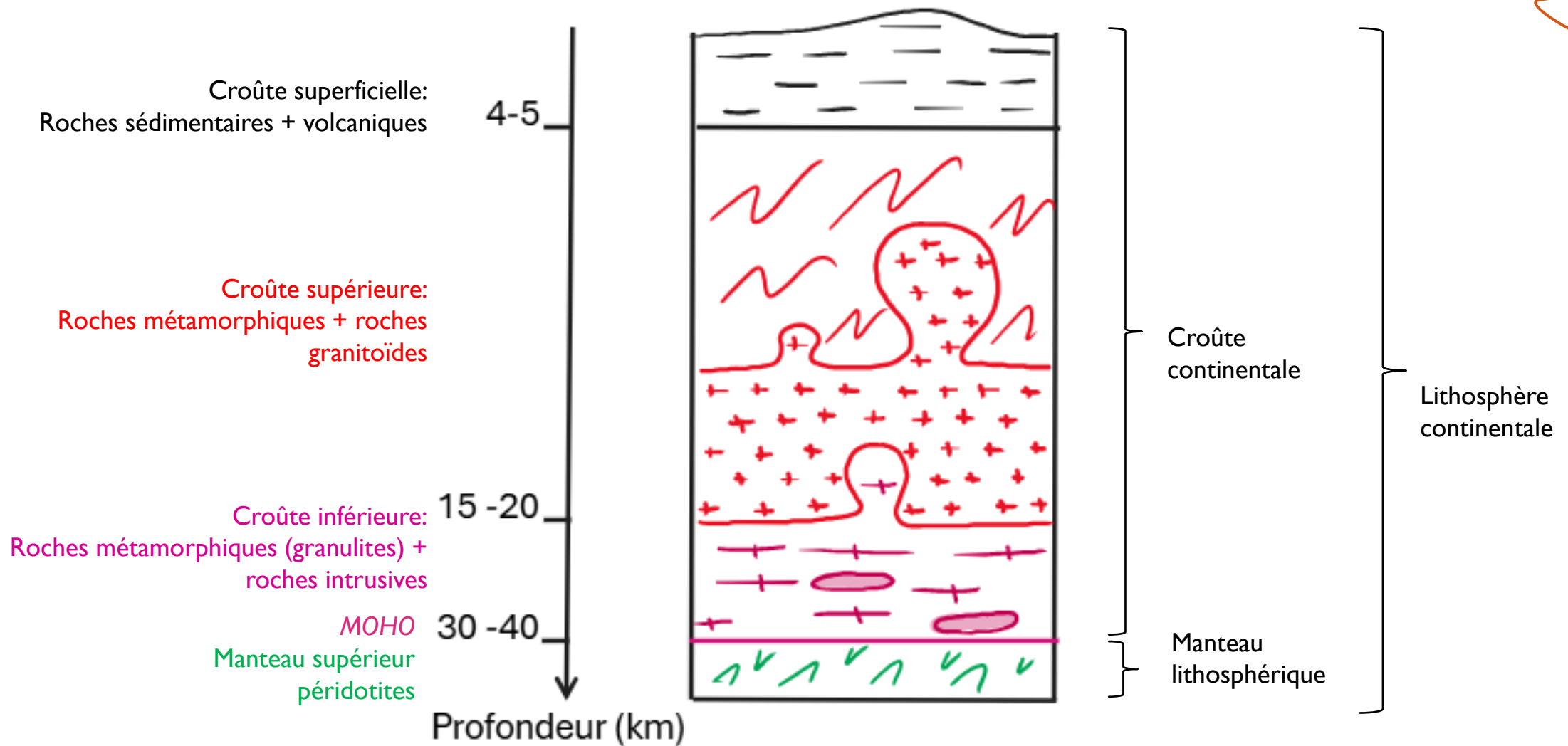
-  roches sédimentaires (calcaires, grès, évaporites, meulière ...)
-  roches métamorphiques (marbre, schistes, ...)
-  roches magmatiques (granitoïdes)

Schéma d'une marge passive entre une lithosphère continentale et une lithosphère océanique



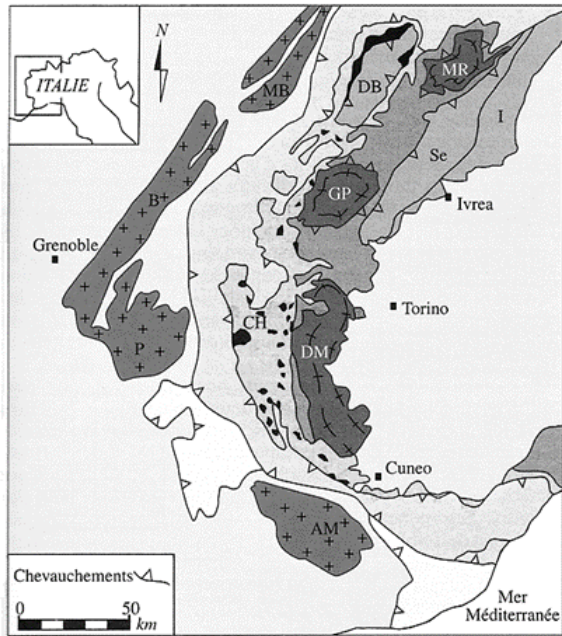
Représentation schématique de la croûte continentale

II. LES ÉCHANTILLONS NOUS RENSEIGNENT SUR LES PREMIÈRES ENVELOPPES SOLIDES

A. LES CROÛTES AFFLEURENT DIRECTEMENT

2. La lithosphère océanique est parfois directement accessible

ophiolite : ce n'est pas une roche mais **une association de roches** (vertes, qui évoque une peau de serpent d'où leur nom). On les trouve dans les chaînes de montagne : Chenaillet, Oman, Himalaya...).

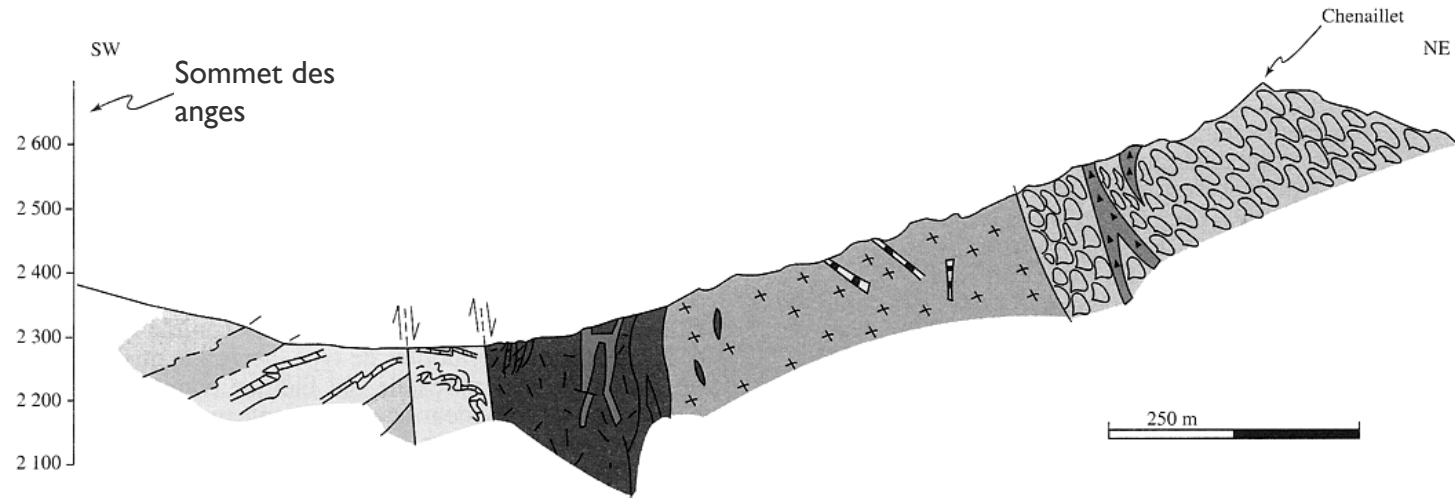


Le massif ophiolitique du Chenaillet (Hautes Alpes) (in Caron et al., <http://planet-terre.ens-lyon.fr>)

A : localisation du Chenaillet

B : coupe dans le massif du Chenaillet

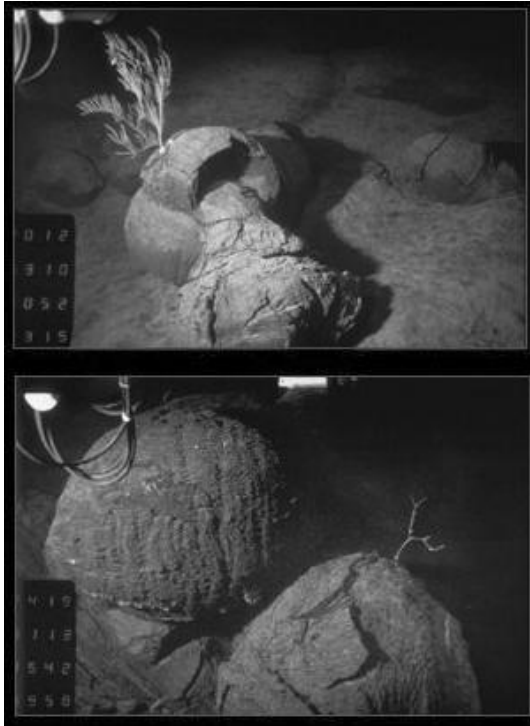
Basaltes en coussins au sommet du Chenaillet



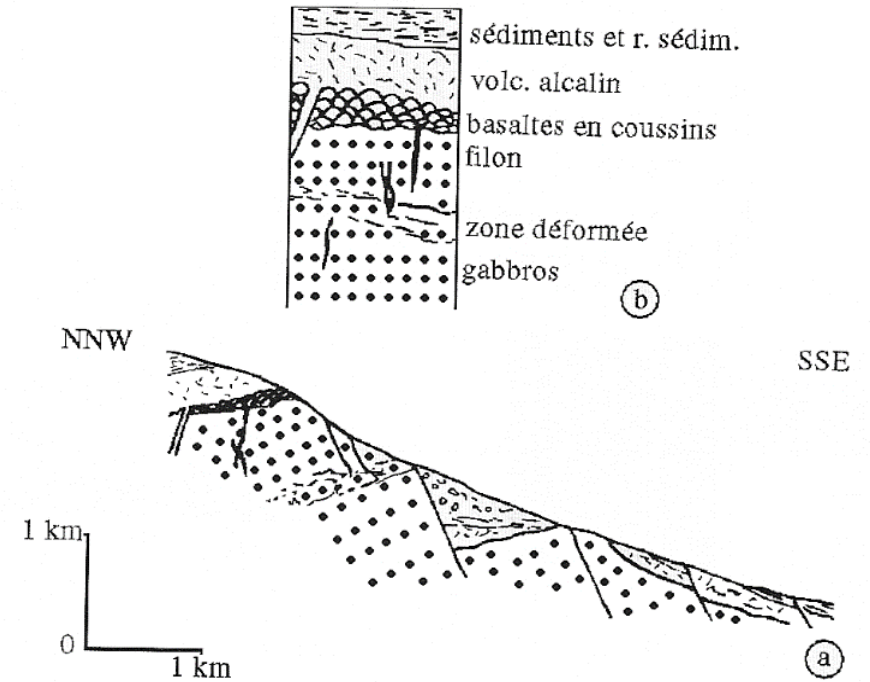
- a b Zone piémontaise externe : a -schistes lustrés, b- ophiolites (CH : Chenaillet)
- Zone piémontaise interne (ophiolites et sédiments associés)
- Massifs cristallins internes (DM : Dora Maira ; GP : Grand Paradis ; MR : Monte Rosa)
- Massifs cristallins externes (P : Pelvoux ; B : Belledonne ; MB : Mont Blanc ; AM : Argentera-Mercantour)
- Unités austro et sud-alpines (DB : Dent Blanche ; S : Sésia ; I : Ivree)
- Flyschs
- Unités Briançonnaises
- Zone dauphinoise et sédiments tertiaires de la plaine du Pô

- Sédiments du Crétacé
- Brèches magmatiques
- Cumulats gabbroïques
- Radiolarites
- Filons de basalte
- Serpentinites dérivant de lherzolites
- Sédiments du Jurassique
- Filons de plagiogranites
- Coulées de basaltes en pillow lava
- Méta gabbros

Coupe dans le massif ophiolitique du Chenaillet, vers Briançon (d'après Spalla, Ledru et Lardeaux).

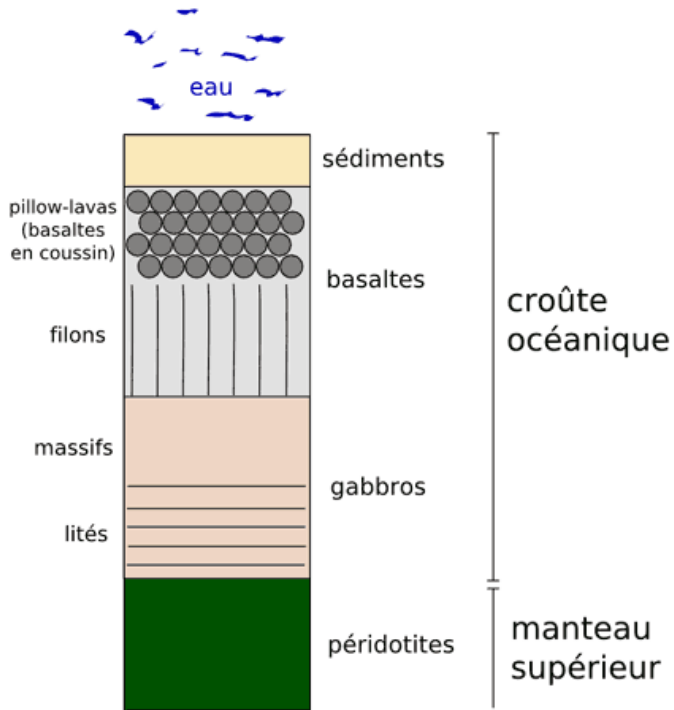


Basaltes de type MORB (Mid-Ocean Ridge basalt)

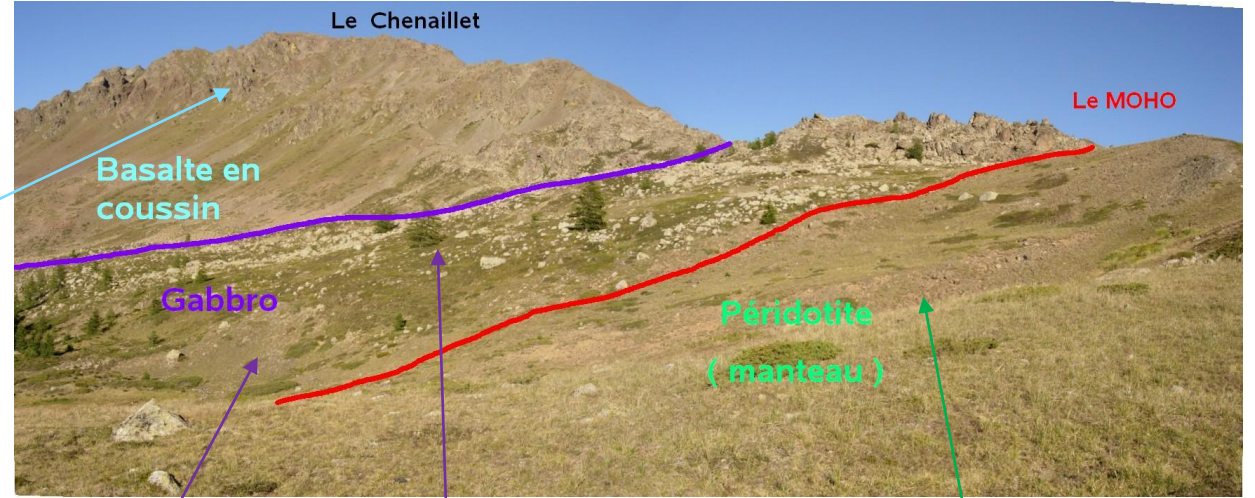


Banc de Goringe (d'après Mevel).
 a. Coupe schématique au bord SE du banc.
 b. Colonne schématique correspondant à la coupe a (les sédiments, les roches sédimentaires et le volcanisme alcalin correspondent à des événements ultérieurs).

Le banc de Goringe, un panneau de lithosphère océanique basculé (in Caron et al., Ophrys 2003)



Basalte en coussin au sommet du Chenaillet (source planet-terre.ens-lyon)



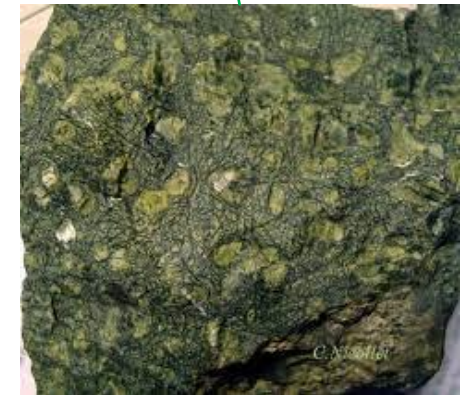
Lithosphère océanique à l'affleurement dans le massif du Chenaillet (source Wikipédia)



Gabbro lité du Chenaillet (source S. Dalaine)



Gabbro traversé par un filon basaltique dans le massif du Chenaillet (source S. Dalaine)



Serpentinite (productrice d'H₂!)
<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/lmg822-2024-06-24.xml>

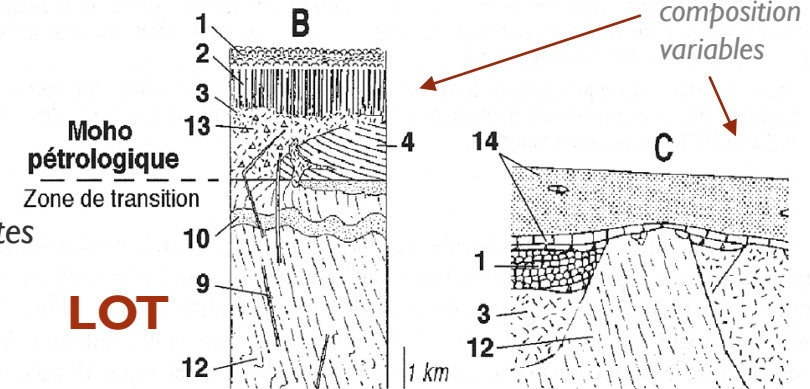
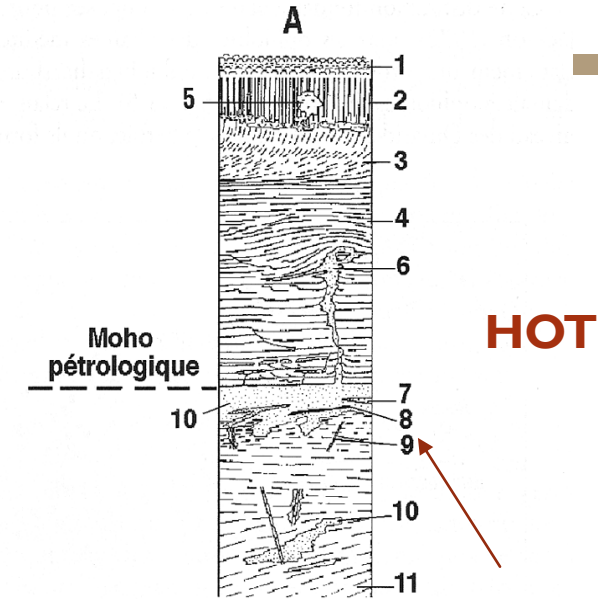
EXEMPLE DES OPHIOLITES (RAPPELS DE IÈRE S SPÉCIALITÉ)

- **Péridotites serpentinisées** = manteau métamorphisé
- Ensemble **gabbroïque** :
 - gabbros lités (lits clairs riches en plagioclases / lits foncés riches en ferro magnésiens)
 - gabbros isotropes
- **Complexe filonien** : les gabbros (ou les basaltes) recoupés par des filons de basalte de plus en plus nombreux vers le haut de la séquence
- **Basaltes en coussin** = pillow lavas qui résultent de l'épanchement de magma dans l'eau

- les pyroxènes vert émeraude
 - le spinelle noir
 - l'olivine qui donne la couleur verte.



Lherz dans les Pyrénées (Iherzolites Cocorico !)



Ophiolites de type HOT et ophiolites de type LOT.

A) Log- type de l'ophiolite d'Oman (type harzburgitique, à croûte épaisse et continue).
 B) Log-type de l'ophiolite de Trinity (type Iherzolitique, à croûte mince et continue).
 C) Log-type des ophiolites liguro-piémontaises (type Iherzolitique à croûte discontinue).
 1. Pillow-lavas basaltiques. 2. Complexe filonien. 3. Gabbros supérieurs, isotropes ou foliés. 4. Gabbros lités. 5. Plagiogranites. 6. Intrusions wehrilitiques. 7. Sills gabbroïques. 8. Chromites podiformes. 9. Dykes gabbroïques. 10. Dunites résiduelles. 11. Harzburgites foliées. 12. Lherzolites foliées. Adapté de Boudier et Nicolas (1985), Nicolas (1989) et Lagabrielle (1987).

Deux types d'ophiolites (in Juteau et Mory, Dunod, 1999)

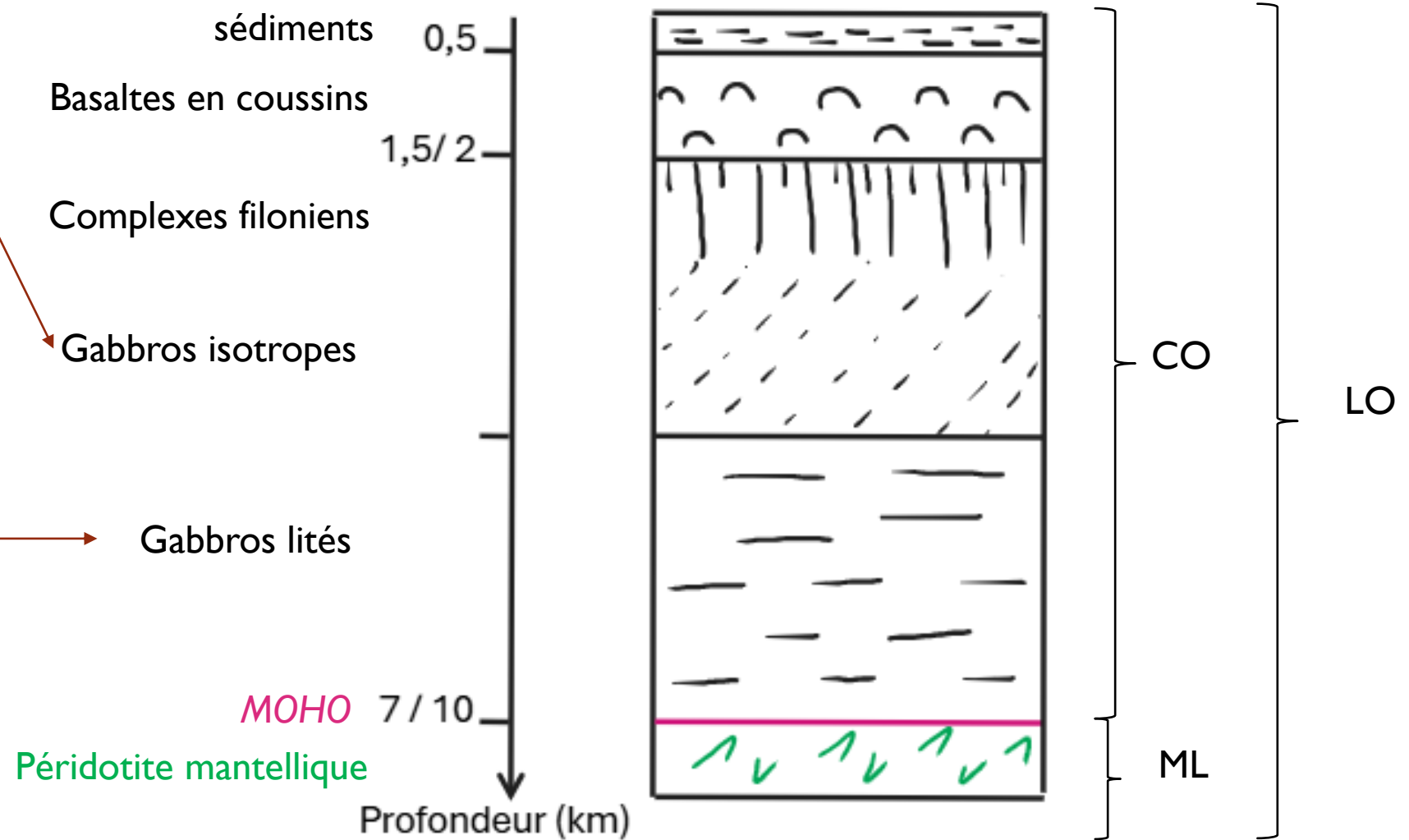
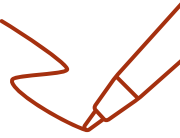


Source - © 2018 Pierre Thomas
Morphologie en boules des gabbros isotropes de l'ophiolite de Chypre, Chandria



Source - © 1997 Pierre Thomas
Zoom sur des gabbros lités (ophiolite d'Oman)
Lits sombres riches en pyroxènes
Lits clairs riches en plagioclases

Les gabbros de la croûte océanique sont grenus, mais pas plutoniques au sens strict, car ils ne forment pas de pluton, mais une couche plus ou moins continue. Par abus de langage, on parle souvent des gabbros comme la version plutonique des basaltes.



Représentation schématique de la croûte océanique

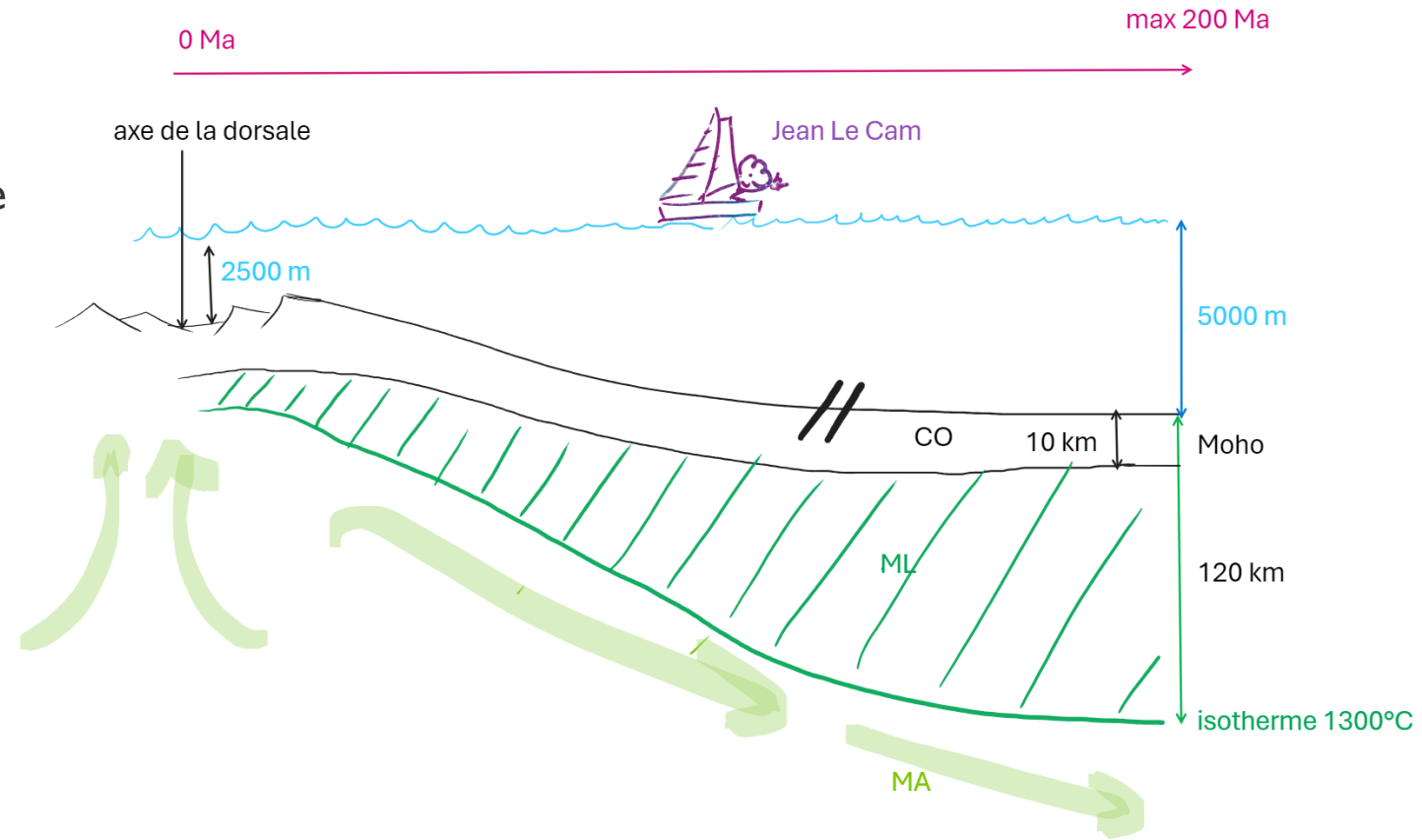
II. LES ÉCHANTILLONS NOUS RENSEIGNENT SUR LES PREMIÈRES ENVELOPPES SOLIDES

A. LES CROÛTES AFFLEURENT DIRECTEMENT

BILAN LITHOSPHERE, CROÛTE...

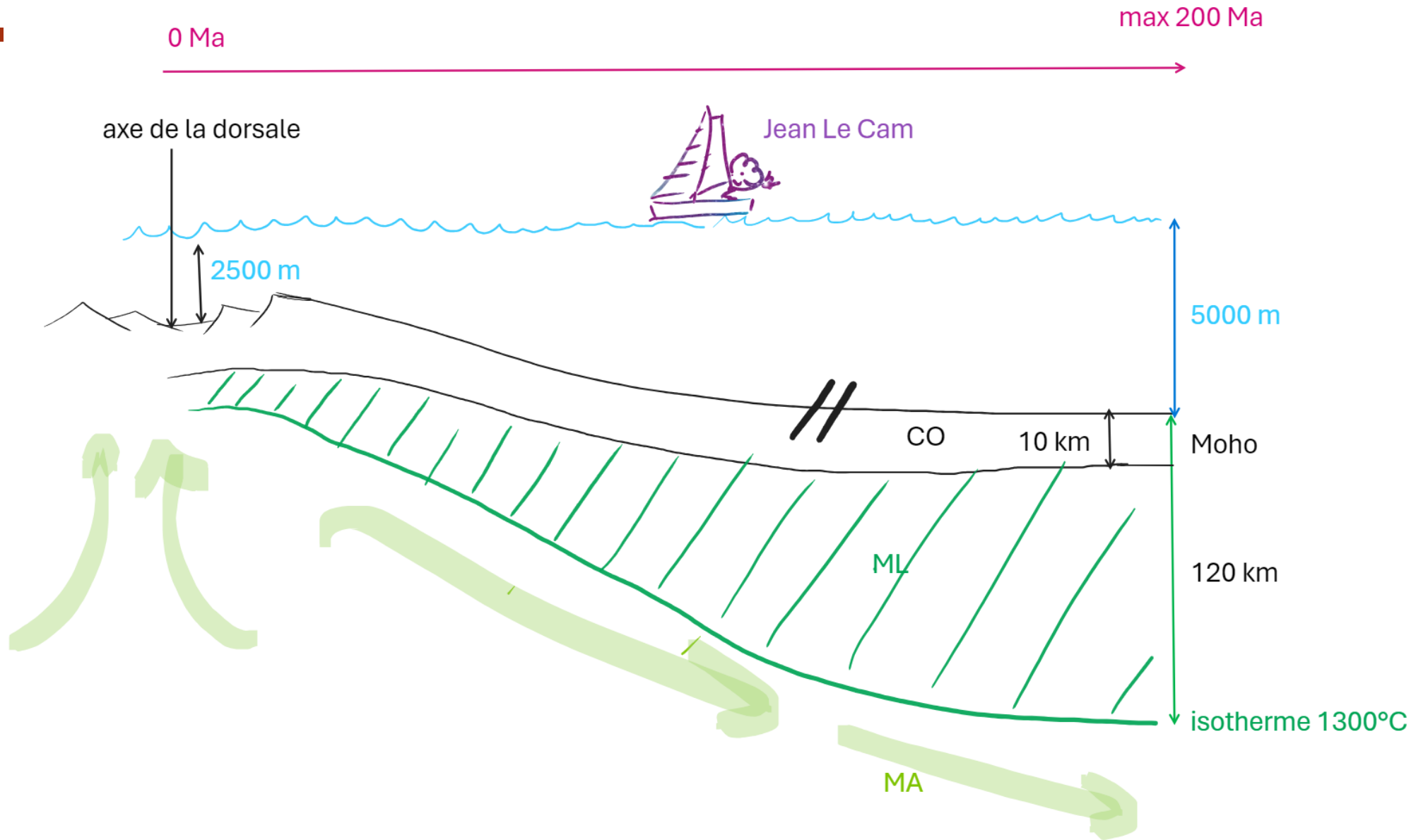


- Lithosphère: croûte + partie supérieure rigide du manteau
- Lithosphère: limite inférieure marquée par l'isotherme 1300°C
- Lithosphère océanique: épaisseur variable de 0 (à l'aplomb de la dorsale) à 120 km
- Lithosphère océanique formée à la dorsale et recyclée au niveau des zones de subduction



Variation d'épaisseur de la lithosphère océanique en fonction de son âge

d'après A. Nicolas "Les montagnes sous la mer"



Variation d'épaisseur de la lithosphère océanique en fonction de son âge

I. La Terre est formée d'enveloppes gazeuses, liquides et solides

A. L'atmosphère et l'hydrosphère forment des enveloppes fluides de surface stratifiées

1. Composition et structure de l'atmosphère

2. L'hydrosphère est stratifiée

B. Les données de sismologie mettent en évidence l'existence d'enveloppes concentriques

1. Séismes et ondes sismiques

2. L'étude des vitesses de propagation des ondes P et S met en évidence des surfaces de discontinuité

3. L'étude des trajectoires des ondes sismiques permet d'identifier des surfaces de discontinuité

4. Le Moho marque la base de la croûte

5. La surface de Gutenberg est à la base du manteau

6. La surface de Lehmann sépare les noyaux externe et interne

C. L'étude de la propagation des ondes permet également de déterminer les propriétés des matériaux.

1. Les vitesses des ondes P et S dépendent des propriétés des matériaux

2. Interprétation des hodochrones

3. Mise en évidence d'une zone de faibles vitesses : LVZ

4. Les données de laboratoire expliquent les sauts de vitesse entre 400 et 670 km : transitions de phase

D. Bilan : modèle PREM

1. Modèle PREM

2. Signification des discontinuités

II. Les échantillons nous renseignent sur les premières enveloppes solides

A. Les croûtes affleurent directement

1. La croûte continentale peut être échantillonnée

2. La lithosphère océanique est parfois directement accessible

B. Le manteau peut rarement être échantillonné

1. Certaines roches contiennent des enclaves de manteau (xénolithes)

2. Le manteau est formé de péridotites

3. Transitions de phases dans le manteau

C. Bilan : comparaison LO/LC

1. Différence de structure :

2. Différence de devenir :

III. Les enveloppes plus profondes ne sont connues que de façon indirecte

A. Le fer et le nickel doivent se concentrer dans le noyau

1. L'étude de la gravité montre que le cœur est dense

2. La comparaison avec des chondrites montre que croûte et manteau sont trop pauvres en Fer et nickel.

B. Le noyau doit comporter une partie liquide

1. Données sismiques

2. Etude du champ magnétique

C. Les limites supérieures et inférieures du noyau sont des zones de réaction

1. Couche D'' : interface péridotite/Fer Ni

2. Une graine qui grossit

Conclusion

II. LES ÉCHANTILLONS NOUS RENSEIGNENT SUR LES PREMIÈRES ENVELOPPES SOLIDES

B. LE MANTEAU PEUT RAREMENT ÊTRE ÉCHANTILLONNÉ

I. Certaines roches contiennent des enclaves de manteau (xénolithes)

- roches des volcans d'Auvergne (basaltes) : **enclaves** de roches **vertes**
- **fragments de manteau arrachés à l'encaissant (= la roche dans laquelle se trouve le magma= xénolithe ou pierre étrangère)** lors de la remontée du magma.
- Etude de composition de ces enclaves révèle de la **péridotite**.
- Olivine ($Mg_{1-x}, Fe_x)_2SiO_4$
 - pôle pur magnésien Mg_2SiO_4 = forstérite / Fe_2SiO_4 = fayalite
- Orthopyroxène: $(Mg_{1-x}, Fe_x)SiO_3$
- Clinopyroxène: $(Mg_{1-x-y}, Fe_x, Ca_y)SiO_3$
- Plagioclases: minéraux alumineux



orthopyroxène

olivine

clinopyroxène

Photo d'enclave de manteau (péridotite) dans un basalte

II. LES ÉCHANTILLONS NOUS RENSEIGNENT SUR LES PREMIÈRES ENVELOPPES SOLIDES

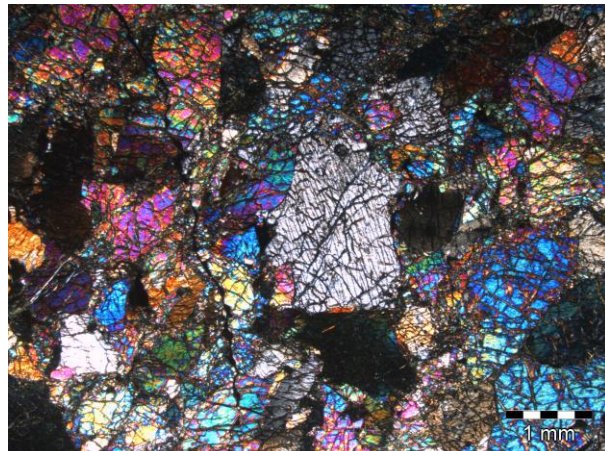
B. LE MANTEAU PEUT RAREMENT ÊTRE ÉCHANTILLONNÉ

I. Certaines roches contiennent des enclaves de manteau (xénolithes)

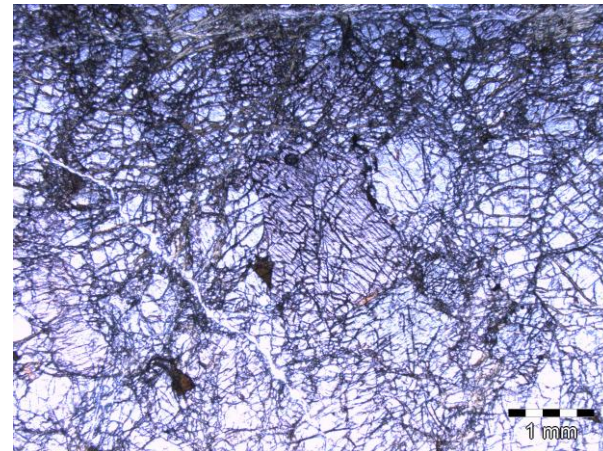


Photo d'enclave de manteau dans un basalte

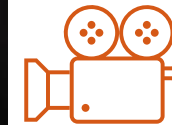
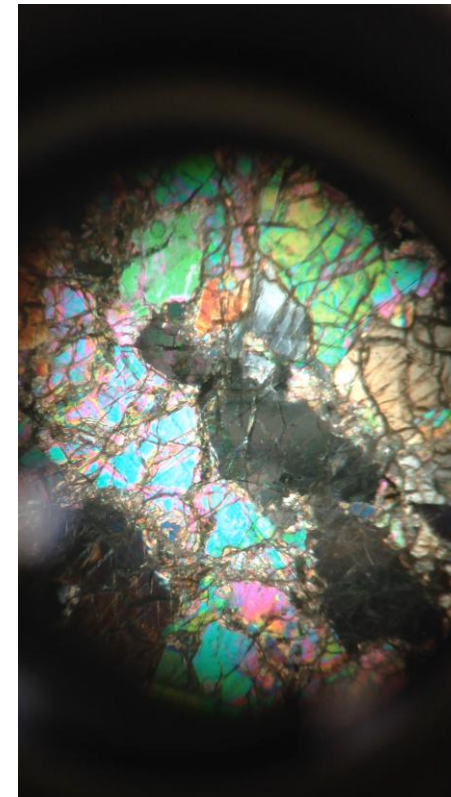
- Olivine ($\text{Mg}_{1-x}\text{Fe}_x)_2\text{SiO}_4$.
- Orthopyroxène: $(\text{Mg}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{SiO}_3$
- Clinopyroxène: $(\text{Mg}_{1-x-y}\text{Fe}_x\text{Ca}_y)\text{SiO}_3$.
- Plagioclases: minéraux alumineux

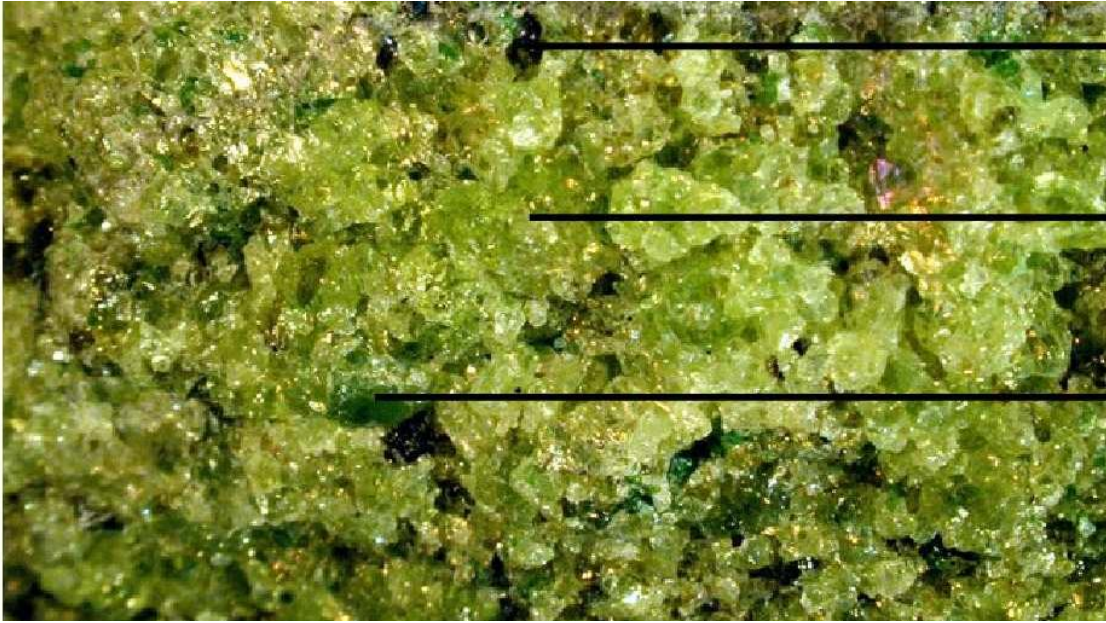


Péridotite MO LPA (S. Dalaine)



Péridotite MO LPNA (S. Dalaine)

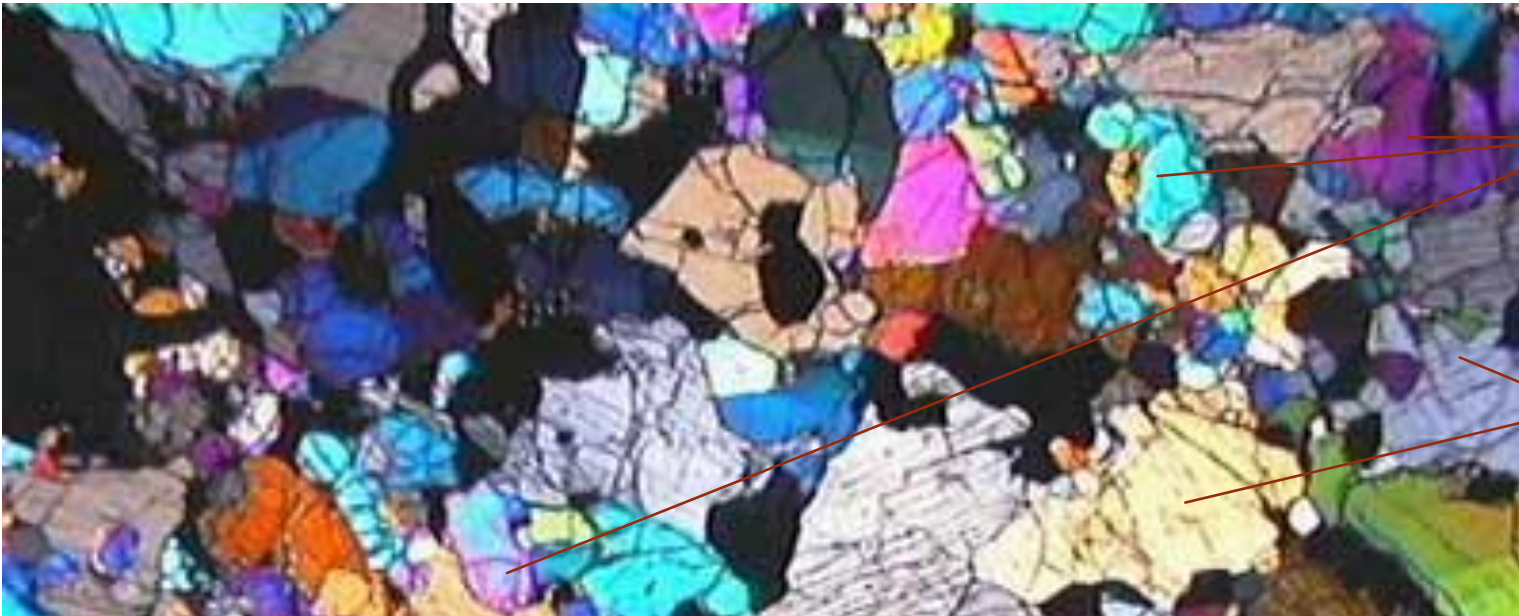




Pyroxène couleur
brun noir

Olivine

Pyroxène de
couleur vert
émeraude



Olivine } Biréfringence
de 3^e ordre

Pyroxène } Biréfringence
de 2^e ordre

II. LES ÉCHANTILLONS NOUS RENSEIGNENT SUR LES PREMIÈRES ENVELOPPES SOLIDES

B. LE MANTEAU PEUT RAREMENT ÊTRE ÉCHANTILLONNÉ

3. Transitions de phases dans le manteau

- Constat : pas d'enclave de péridotite ni d'affleurement au-delà de 300 km
- ⇒ Mesures directes limitées à 300km
- ⇒ >300 km données de minéralogie à HP et HT au laboratoire
- ✓ Cellule à enclume de diamant
- ✓ **conditions de P et T sont extrapolées de l'étude des vitesses des ondes P et S**

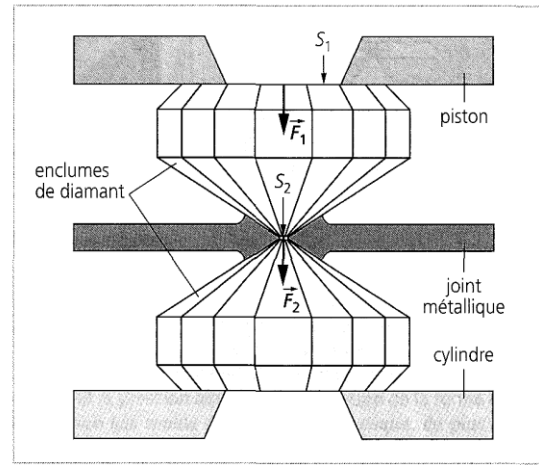


Schéma de principe d'une cellule à enclumes de diamant. On applique une force \vec{F}_1 sur la surface arrière S_1 d'un des diamants, qui applique au niveau de sa tête de surface S_2 une force \vec{F}_2 sur l'échantillon, placé entre les deux diamants et inclus dans un joint métallique.

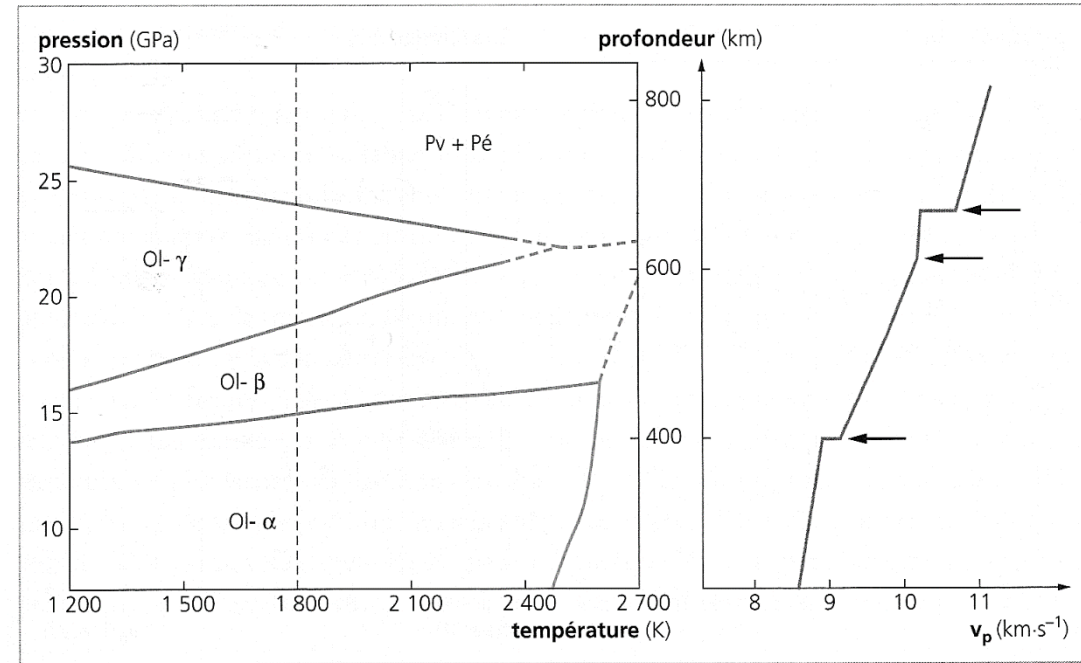


Diagramme de phase de la forstérite Mg_2SiO_4 . Le profil de vitesse sismique v_p du modèle PREM, en fonction de la profondeur correspondant à la pression, est donné pour comparaison. La ligne verticale indique la température de 1800 K, température approximative du manteau à ces profondeurs. Ol- α : Mg_2SiO_4 phase α , Ol- β : Mg_2SiO_4 phase β (structure spinelle modifiée), Ol- γ : Mg_2SiO_4 phase γ (structure spinelle), Pv : $MgSiO_3$ -pérovskite, Pé : périclase MgO . Flèches : principales discontinuités des vitesses sismiques. Inspiré de S.-H. Shim et coll., 2001, et J.-P. Poirier, 1991b.

Diagramme de phase de la forstérite (Mg_2SiO_4) olivine magnésienne) (in Dewaele et Sanloup, Belin, 2005)

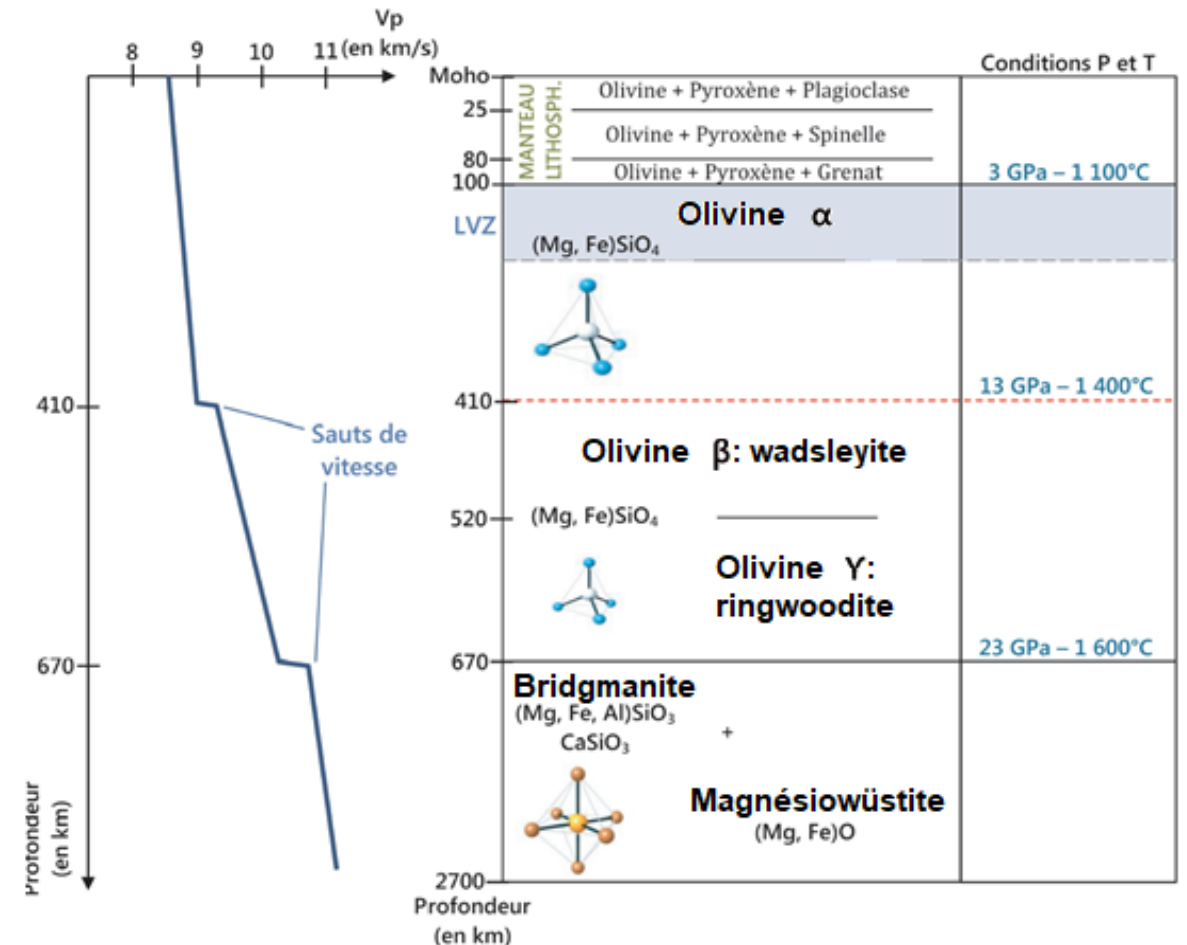
II. LES ÉCHANTILLONS NOUS RENSEIGNENT SUR LES PREMIÈRES ENVELOPPES SOLIDES

B. LE MANTEAU PEUT RAREMENT ÊTRE ÉCHANTILLONNÉ

3. Transitions de phases dans le manteau

- Jusqu'à 410 km : minéral olivine (**phase- α**), les pyroxènes (orthopyroxène, clinopyroxène) et le grenat sont les minéraux majeurs
- De 410 à 520 km : minéral olivine change de nom (wadsleyite), et de structure cristalline : **spinelle modifiée**, dite **phase- β** = TRANSITION DE PHASE
- De 520 km à 670 km : la wadsleyite devient ringwoodite à **structure spinelle**, de même composition, c'est la **phase- γ** = TRANSITION DE PHASE
- A partir de 670 km : La ringwoodite se transforme en un assemblage de **perovskite** silicatée et MgO = REACTION DE METAMORPHISME

Les changements minéralogiques observés dans les péridotites en laboratoire sont en accord avec l'existence des grandes discontinuités que les sismologues ont mis en évidence à 410 et 670 km de profondeur dans le manteau.

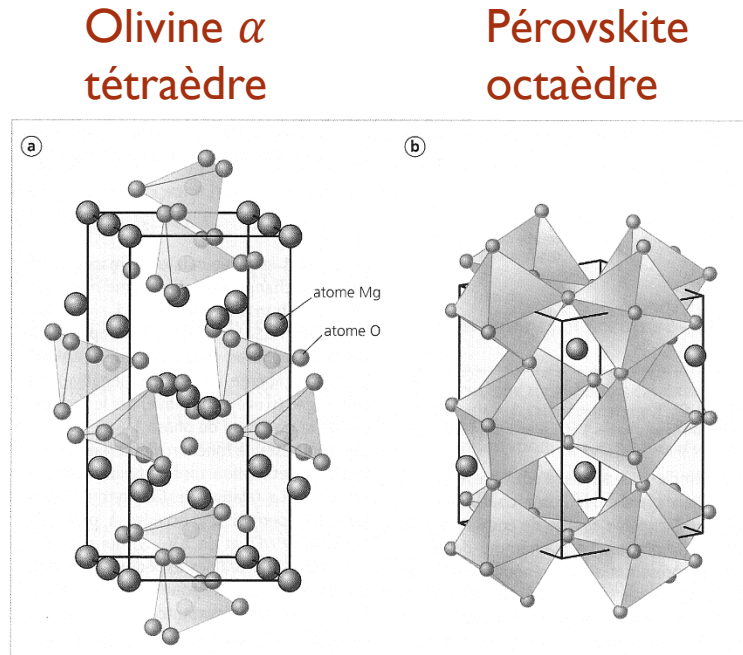


II. LES ÉCHANTILLONS NOUS RENSEIGNENT SUR LES PREMIÈRES ENVELOPPES SOLIDES

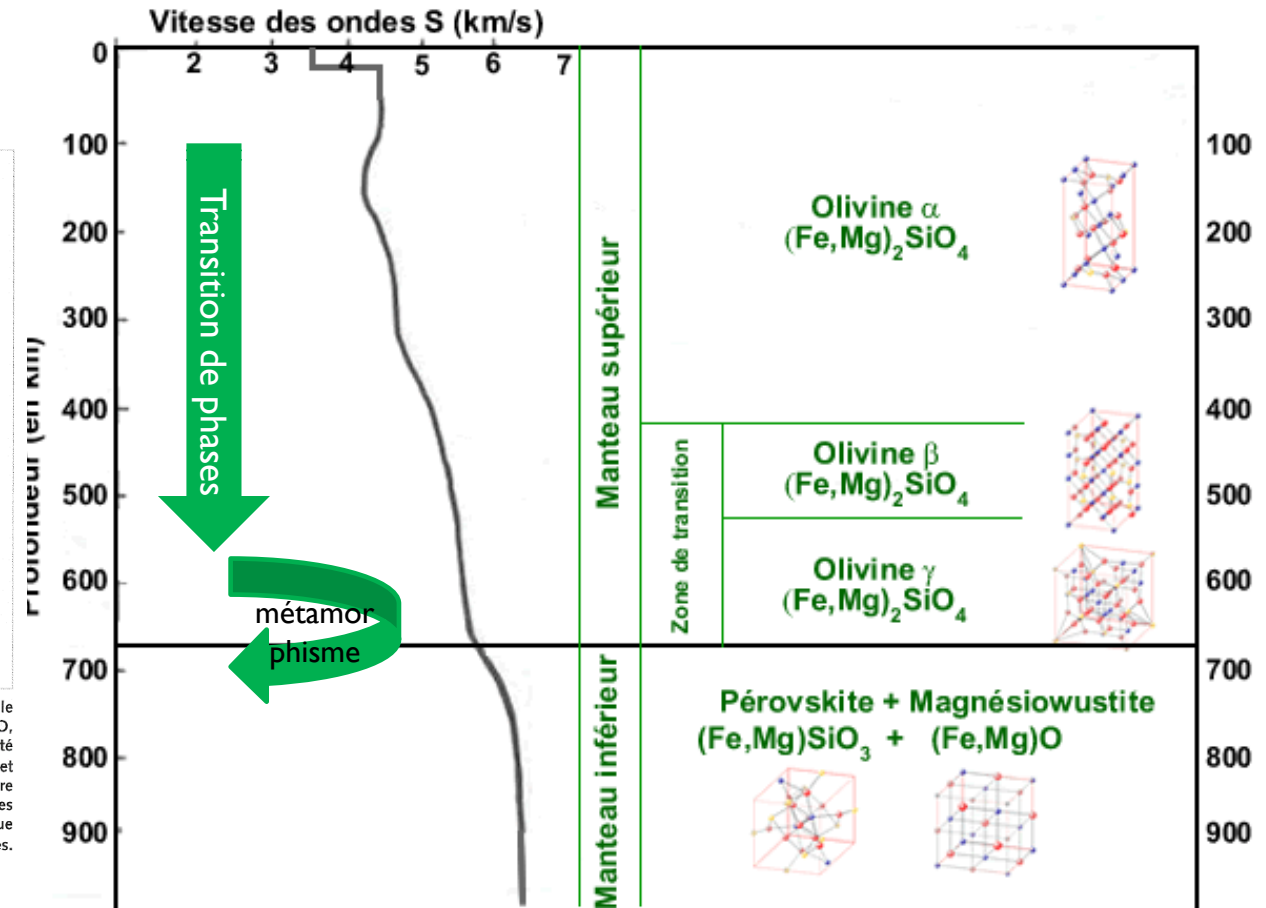
B. LE MANTEAU PEUT RAREMENT ÊTRE ÉCHANTILLONNÉ

3. Transitions de phases dans le manteau

- Olivine forstérite: tétraèdre
 - si tétracoordonnée
 - Densité 3,3
- Pérovskite : octaèdres de Si (Si entouré de 6 O)
 - si hexacoordonné
 - Densité 4,3 > 3,3 de la forstérite en phase α



Deux minéraux majeurs du manteau. a. Structure cristalline de la forstérite phase α (pôle pur magnésien de l'olivine). Les grosses boules sont des atomes Mg, les petites boules des atomes O, les atomes Si (non représentés) sont au centre des tétraèdres. Tous les tétraèdres SiO_4 n'ont pas été matérialisés. La maille élémentaire, orthorhombique ($a = 4,78 \text{ \AA}$, $b = 6,30 \text{ \AA}$, $c = 10,25 \text{ \AA}$ à pression et température ambiantes) est matérialisée par les lignes. Image mise à disposition par L. Lemelle. b. Structure cristalline de la MgSiO_3 -pérovskite. Les grosses boules sont des atomes Mg, les petites boules des atomes O, les atomes Si (non représentés) sont au centre des octaèdres. La maille élémentaire, orthorhombique ($a = 4,78 \text{ \AA}$, $b = 4,93 \text{ \AA}$, $c = 6,91 \text{ \AA}$ à pression et température ambiantes) est matérialisée par les lignes. D'après Merkel, 2004.

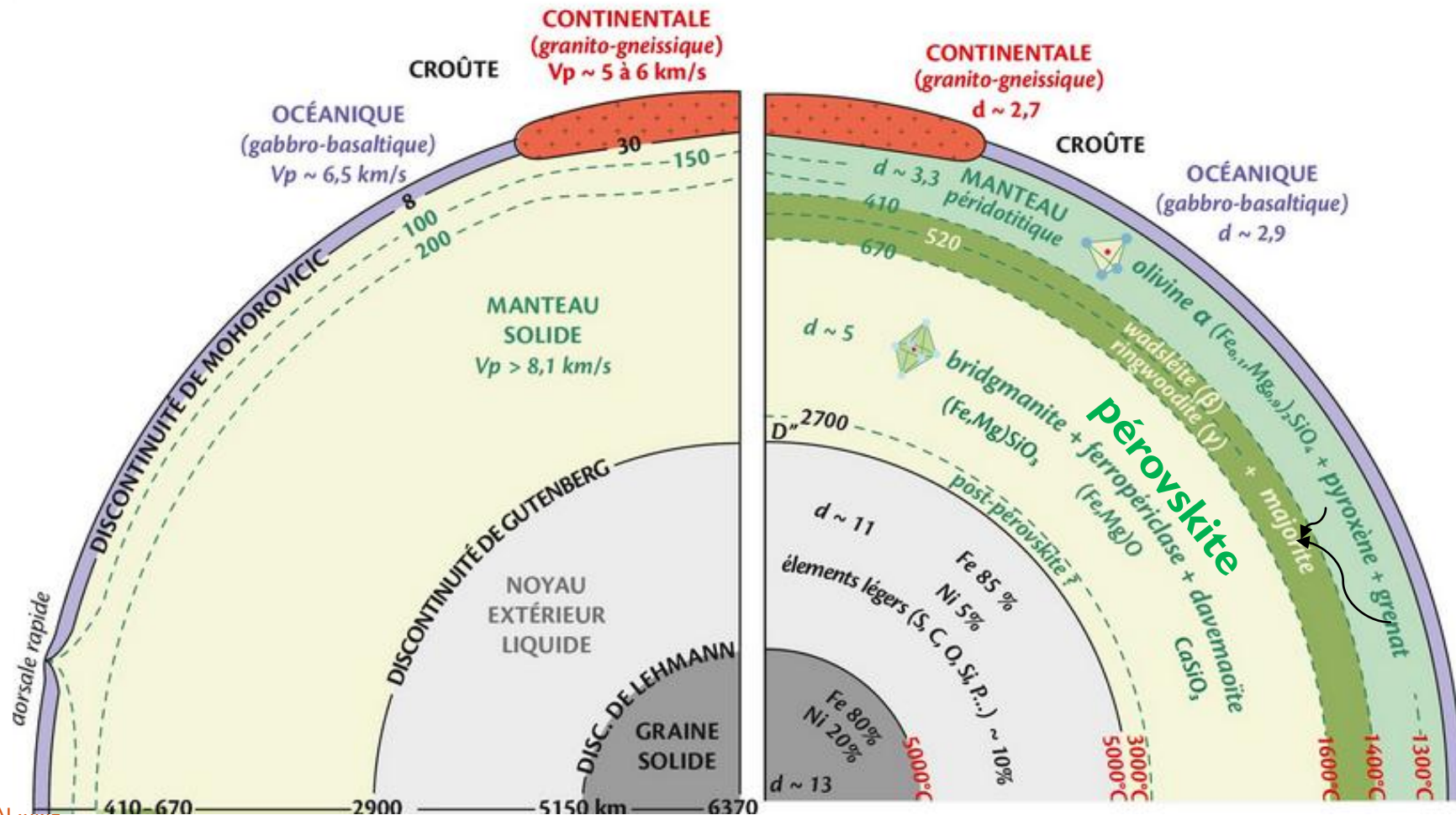


Comparaison de la structure de la forstérite phase alpha et de la MgSiO_3 -pérovskite (in Dewaele et Sanloup, Belin, 2005)

II. LES ÉCHANTILLONS NOUS RENSEIGNENT SUR LES PREMIÈRES ENVELOPPES SOLIDES

B. LE MANTEAU PEUT RAREMENT ÊTRE ÉCHANTILLONNÉ

3. Transitions de phases dans le manteau

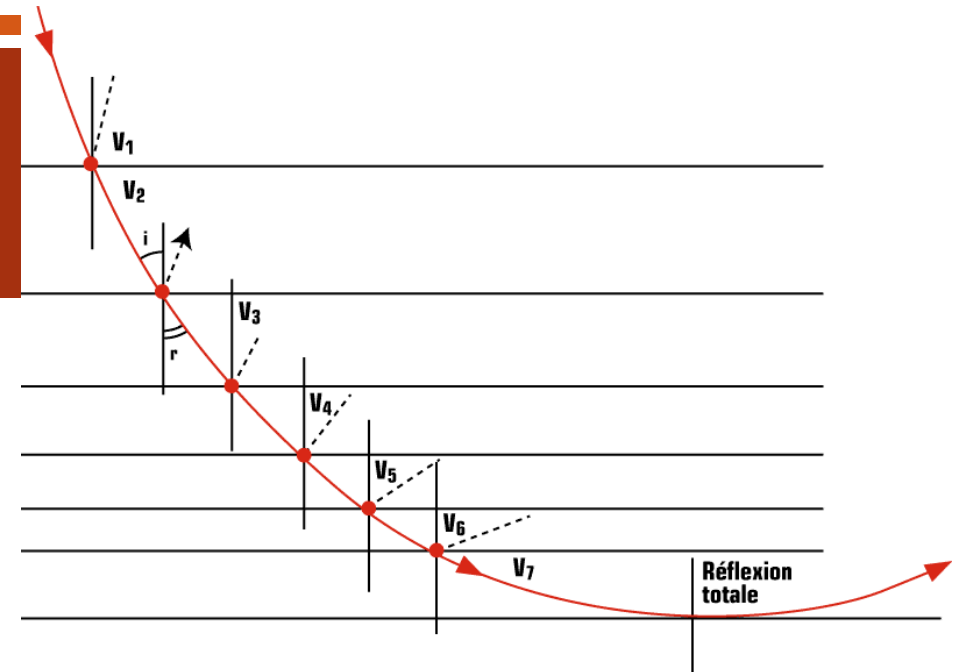
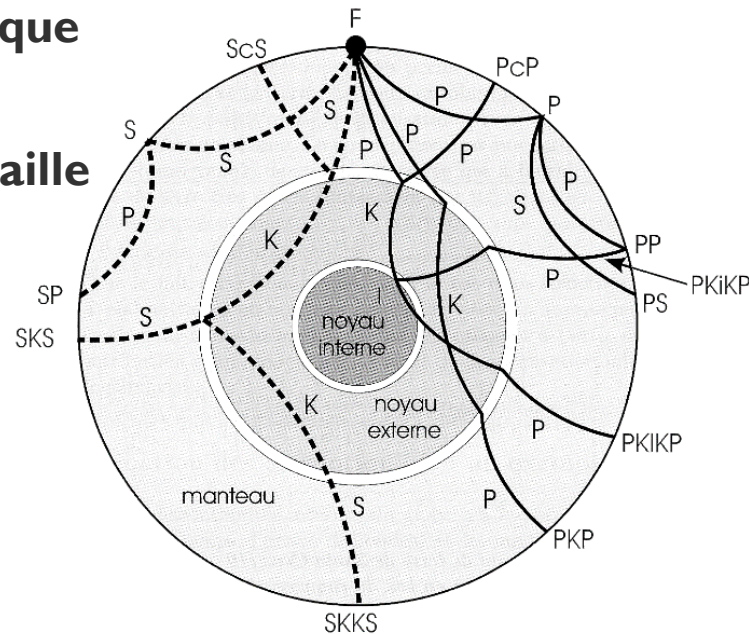


II. LES ÉCHANTILLONS NOUS RENSEIGNENT SUR LES PREMIÈRES ENVELOPPES SOLIDES

B. LE MANTEAU PEUT RAREMENT ÊTRE ÉCHANTILLONNÉ

BILAN

- Transitions de phase observées au laboratoire coïncident avec sauts de vitesse observés pour les ondes de volume P et S
- ⇒ Manteau = milieu de **composition chimique homogène**
- ⇒ Manteau = milieu avec des minéraux de **maille cristalline hétérogène**, de plus en plus « denses »



Trajet des rayons sismiques à l'intérieur de la Terre. Les rayons sont désignés par une première lettre indiquant le type d'ondes (pour plus de commodité dans la lecture du schéma on a séparé arbitrairement les ondes P: en trait continu sur la partie droite et les ondes S: en trait pointillé sur la partie gauche). Les réflexions à la surface du globe sont indiquées par des répétitions de lettres (PP, PPP), les réflexions à la surface noyau-manteau sont indiquées par la lettre c (PcP), la traversée du noyau externe est notée K et celle du noyau interne I (PKP, PKIKP), les réflexions à la surface du noyau interne sont notées par la lettre i (PKiKP). Les ondes P et S peuvent se convertir respectivement lors d'une réflexion ou réfraction sur une surface de discontinuité (SP). Les lettres SKS désignent une onde S qui se convertit en P à la frontière manteau-noyau (les ondes S ne traversent pas le noyau externe), puis traverse le noyau externe et se reconvertit en onde S à la sortie.⁷³

I. La Terre est formée d'enveloppes gazeuses, liquides et solides

A. L'atmosphère et l'hydrosphère forment des enveloppes fluides de surface stratifiées

1. Composition et structure de l'atmosphère
2. L'hydrosphère est stratifiée

B. Les données de sismologie mettent en évidence l'existence d'enveloppes concentriques

1. Séismes et ondes sismiques
2. L'étude des vitesses de propagation des ondes P et S met en évidence des surfaces de discontinuité
3. L'étude des trajectoires des ondes sismiques permet d'identifier des surfaces de discontinuité
4. Le Moho marque la base de la croûte
5. La surface de Gutenberg est à la base du manteau
6. La surface de Lehmann sépare les noyaux externe et interne

C. L'étude de la propagation des ondes permet également de déterminer les propriétés des matériaux.

1. Les vitesses des ondes P et S dépendent des propriétés des matériaux
2. Interprétation des hodochrones
3. Mise en évidence d'une zone de faibles vitesses : LVZ
4. Les données de laboratoire expliquent les sauts de vitesse entre 400 et 670 km : transitions de phase

D. Bilan : modèle PREM

1. Modèle PREM
2. Signification des discontinuités

II. Les échantillons nous renseignent sur les premières enveloppes solides

A. Les croûtes affleurent directement

1. La croûte continentale peut être échantillonnée
2. La lithosphère océanique est parfois directement accessible

B. Le manteau peut rarement être échantillonné

1. Certaines roches contiennent des enclaves de manteau (xénolithes)
2. Le manteau est formé de péridotites
3. Transitions de phases dans le manteau

C. Bilan : comparaison LO/LC

1. Différence de structure :
2. Différence de devenir :

III. Les enveloppes plus profondes ne sont connues que de façon indirecte

A. Le fer et le nickel doivent se concentrer dans le noyau

1. L'étude de la gravité montre que le cœur est dense
2. La comparaison avec des chondrites montre que croûte et manteau sont trop pauvres en Fer et nickel.

B. Le noyau doit comporter une partie liquide

1. Données sismiques
2. Etude du champ magnétique

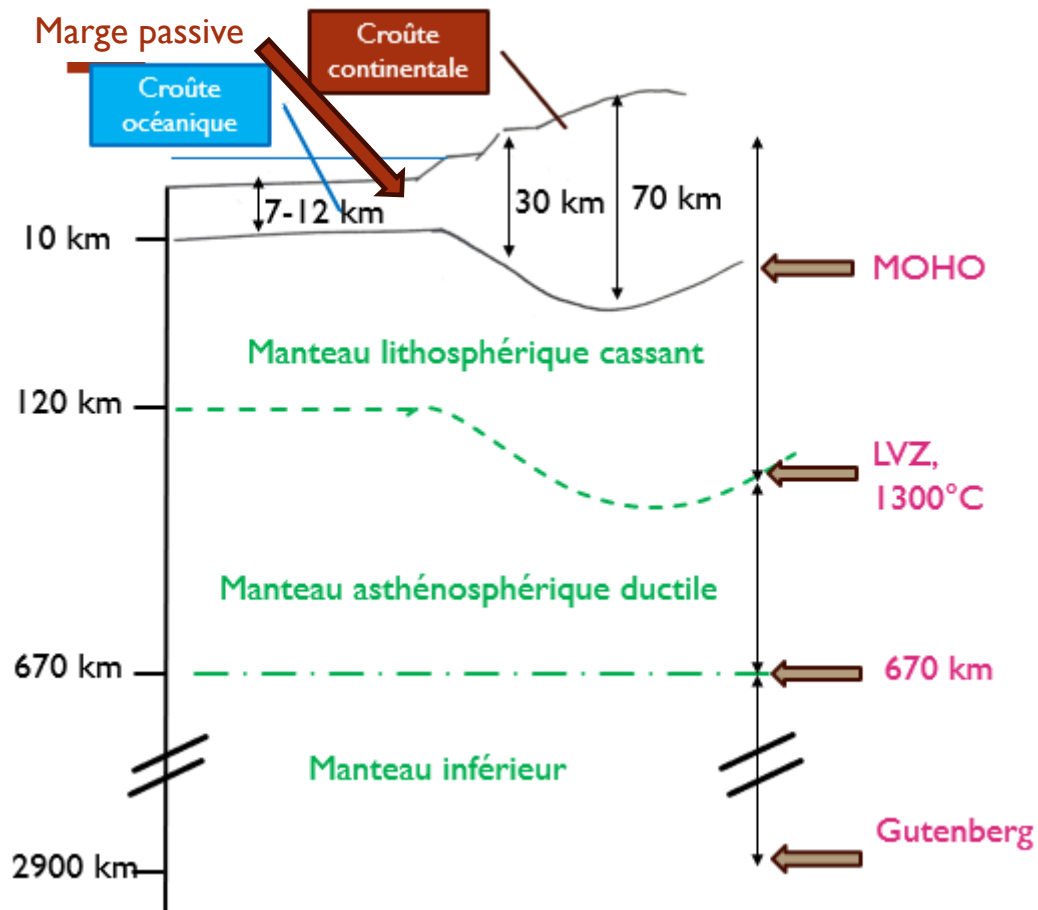
C. Les limites supérieures et inférieures du noyau sont des zones de réaction

1. Couche D'' : interface péridotite/Fer Ni
2. Une graine qui grossit

Conclusion

II. LES ÉCHANTILLONS NOUS RENSEIGNENT SUR LES PREMIÈRES ENVELOPPES SOLIDES

C. BILAN : COMPARAISON LO/LC



Type de lithosphère	Lithosphère continentale	Lithosphère océanique
Épaisseur de la croûte	30 km	10 km
Densité moyenne de la croûte	2,7	2,9
Roche dominante de la croûte	Granitoïdes, r. métamorphiques	Gabbro, basalte
Âgée/jeune	Âgée (jusqu'à 3Ga)	Jeune (<200 Ma)

Comparaison de la LO et de la LC

I. La Terre est formée d'enveloppes gazeuses, liquides et solides

A. L'atmosphère et l'hydrosphère forment des enveloppes fluides de surface stratifiées

1. Composition et structure de l'atmosphère

2. L'hydrosphère est stratifiée

B. Les données de sismologie mettent en évidence l'existence d'enveloppes concentriques

1. Séismes et ondes sismiques

2. L'étude des vitesses de propagation des ondes P et S met en évidence des surfaces de discontinuité

3. L'étude des trajectoires des ondes sismiques permet d'identifier des surfaces de discontinuité

4. Le Moho marque la base de la croûte

5. La surface de Gutenberg est à la base du manteau

6. La surface de Lehmann sépare les noyaux externe et interne

C. L'étude de la propagation des ondes permet également de déterminer les propriétés des matériaux.

1. Les vitesses des ondes P et S dépendent des propriétés des matériaux

2. Interprétation des hodochrones

3. Mise en évidence d'une zone de faibles vitesses : LVZ

4. Les données de laboratoire expliquent les sauts de vitesse entre 400 et 670 km : transitions de phase

D. Bilan : modèle PREM

1. Modèle PREM

2. Signification des discontinuités

II. Les échantillons nous renseignent sur les premières enveloppes solides

A. Les croûtes affleurent directement

1. La croûte continentale peut être échantillonnée

2. La lithosphère océanique est parfois directement accessible

B. Le manteau peut rarement être échantillonné

1. Certaines roches contiennent des enclaves de manteau (xénolithes)

2. Le manteau est formé de péridotites

3. Transitions de phases dans le manteau

C. Bilan : comparaison LO/LC

1. Différence de structure :

2. Différence de devenir :

III. Les enveloppes plus profondes ne sont connues que de façon indirecte

A. Le fer et le nickel doivent se concentrer dans le noyau

1. L'étude de la gravité montre que le cœur est dense

2. La comparaison avec des chondrites montre que croûte et manteau sont trop pauvres en Fer et nickel.

B. Le noyau doit comporter une partie liquide

1. Données sismiques

2. Etude du champ magnétique

C. Les limites supérieures et inférieures du noyau sont des zones de réaction

1. Couche D'' : interface péridotite/Fer Ni

2. Une graine qui grossit

Conclusion

III. LES ENVELOPPES PLUS PROFONDES NE SONT CONNUES QUE DE FAÇON INDIRECTE

A. LE FER ET LE NICKEL DOIVENT SE CONCENTRER DANS LE NOYAU

I. L'étude de la gravité montre que le cœur est dense

- Densité CC: 2,9; densité CO: 2,7
- Densité manteau : de 3,25 à 5
- Or profondeur des surfaces de discontinuité connues

⇒ Volume de chaque enveloppe connue

Vol croûte: <1%

Volume manteau: 84%

Volume noyau: 16%

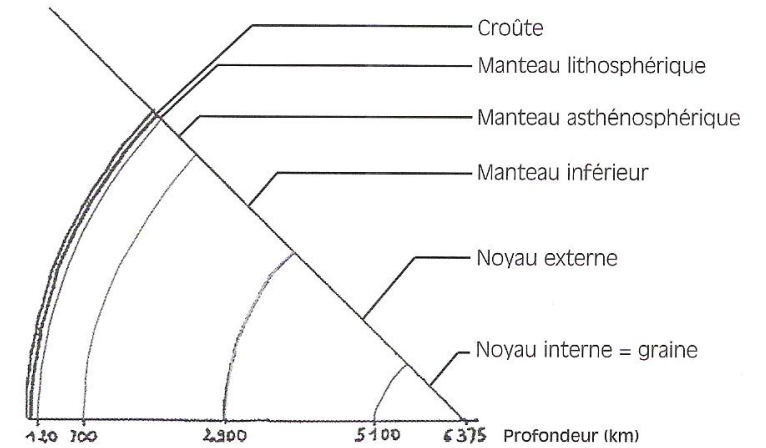
- Densité moyenne Terre= 5,5

⇒ Le noyau est très dense !

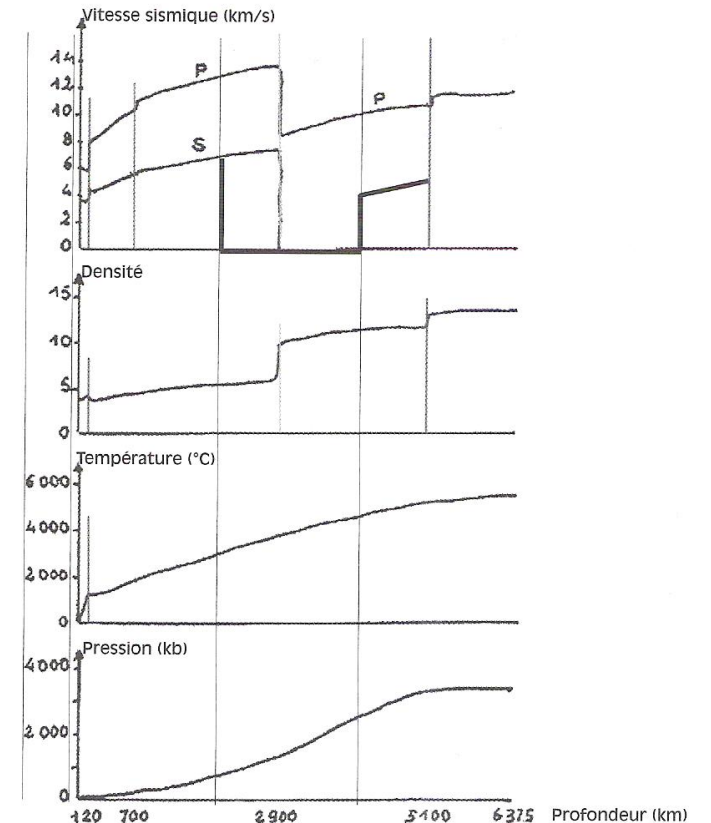


Retrouvez ces valeurs!

Portion du globe terrestre



Paramètres physiques

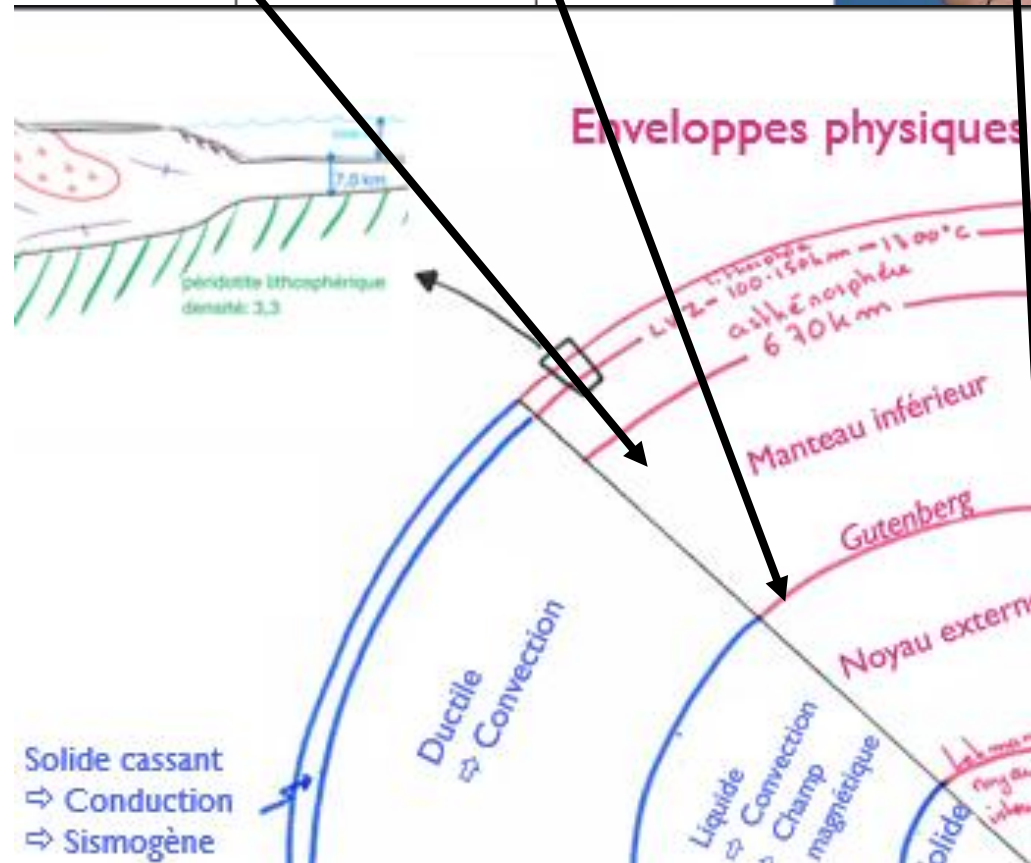


2. La comparaison avec des chondrites montre que croûte et manteau sont trop pauvres en fer et nickel.



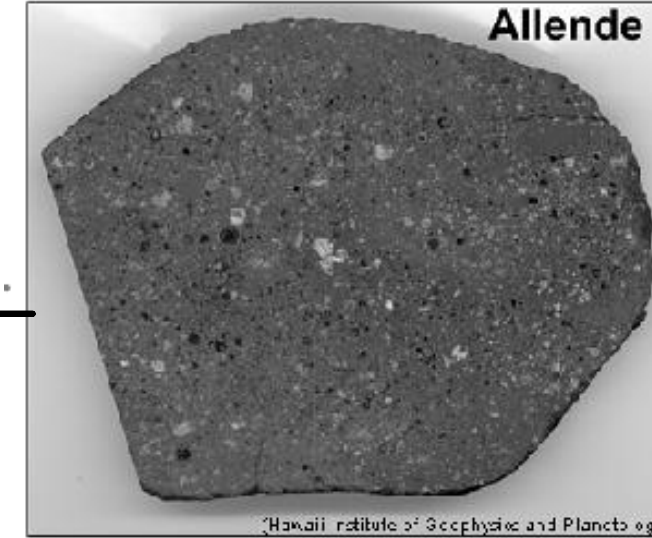
■ Apport des météorites:

- Composition du noyau
 - ✓ Météorite différenciée ferreuse sidérite
- Transition manteau-noyau
 - ✓ Pallasite
- Croûte/manteau
 - achondrite
- Retracer les étapes de la formation de la Terre
 - ✓ Avant différenciation: Terre global : Chondrite



Chondrite

Allende



(Hawaii Institute of Geophysics and Planetary Science)

III. LES ENVELOPPES PLUS PROFONDES NE SONT CONNUES QUE DE FAÇON INDIRECTE

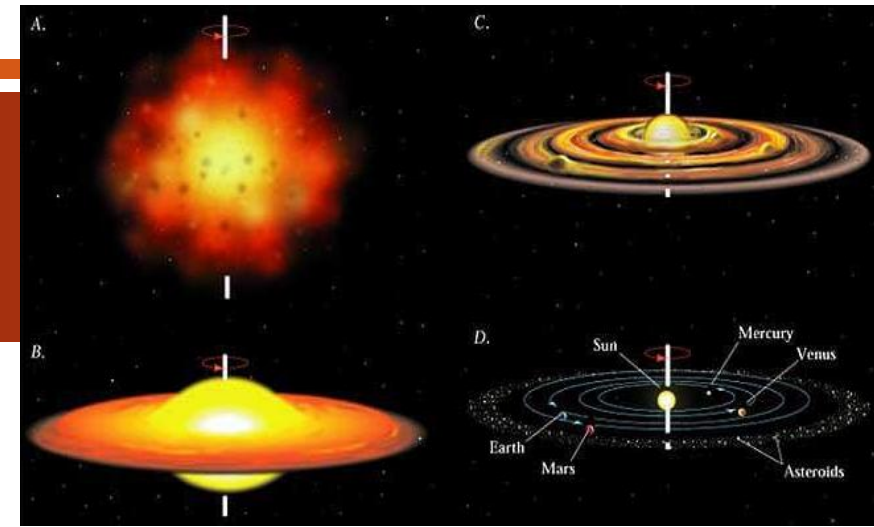
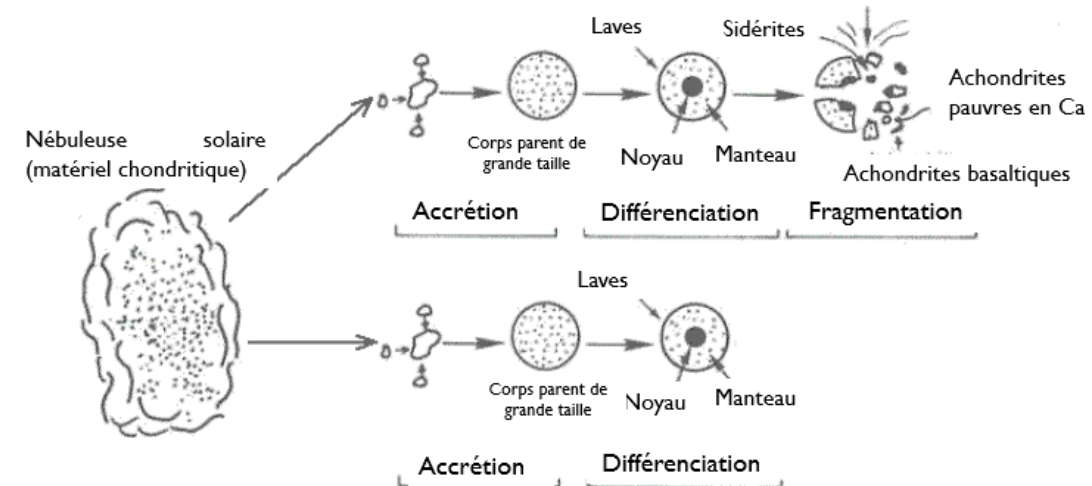
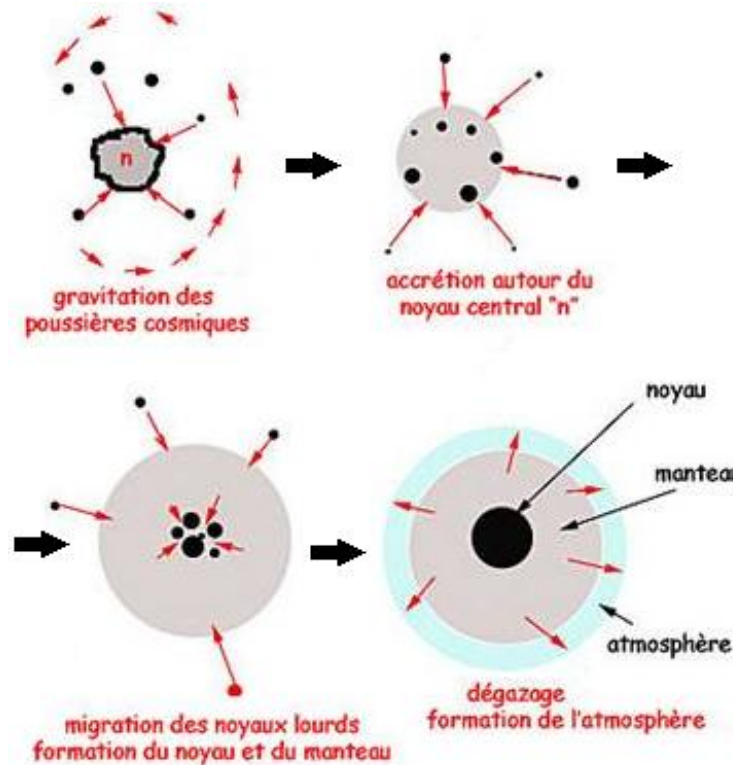
A. LE FER ET LE NICKEL DOIVENT SE CONCENTRER DANS LE NOYAU

Un scénario pour la formation du système solaire et des planètes

■ Un modèle pour la formation de la Terre:

➤ **Accrétion planétaire :** accumulation de particules sous l'effet de la gravité formant une **protoplanète** homogène à l'état liquide

➤ **Différenciation :** l'état liquide autorise les mouvements de particules selon leur **densité**. Les éléments les plus denses se retrouvent au centre et les plus légers en périphérie.



III. LES ENVELOPPES PLUS PROFONDES NE SONT CONNUES QUE DE FAÇON INDIRECTE

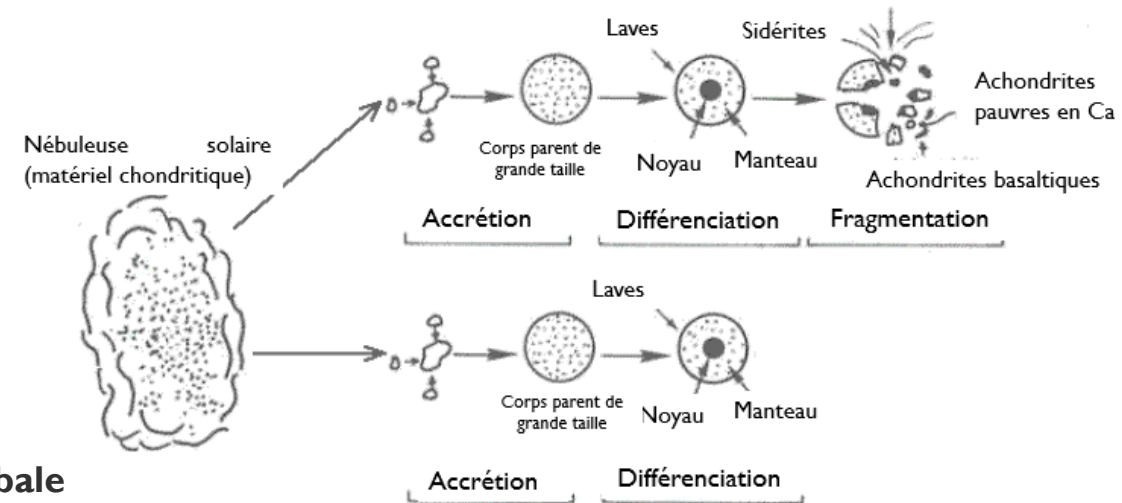
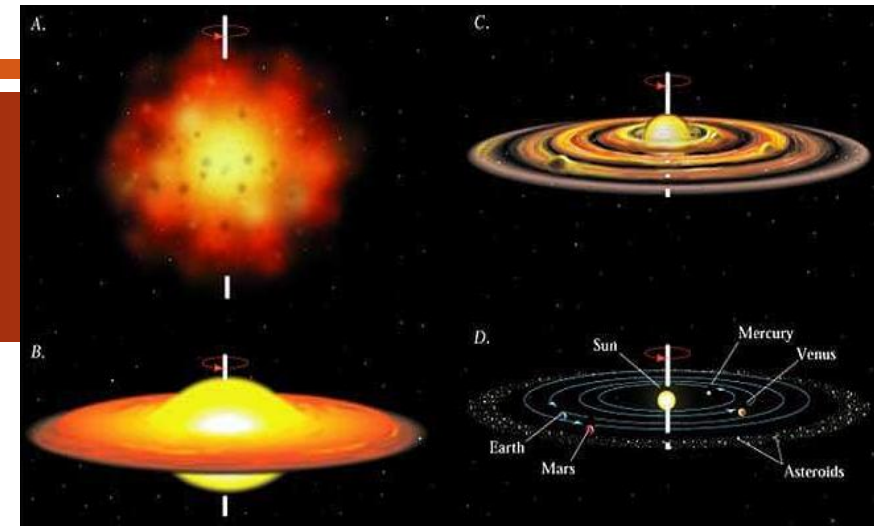
A. LE FER ET LE NICKEL DOIVENT SE CONCENTRER DANS LE NOYAU

Les différentes chondrites

	Chondrite ordinaire	Croûte continentale	Croûte océanique	Manteau terrestre	Noyau terrestre	Moyenne de la Terre
SiO ₂	36	60	47	44		35-40
Fe (et FeS)	21	0	0	0	>80	20-25
FeO	10	4	11	10		7-10
MgO	24	3	12	36		20-25
Al ₂ O ₃	2	15	14	4		2-3
CaO	2,5	5	9	3		2-3
Na ₂ O + K ₂ O	1	6	2,5	1		1

Comparaison de la composition des chondrites et des différentes enveloppes de la Terre (in Dercourt et al., Dunod 2006)

- **Chondrites:** météorites non différenciées, âge entre -4,560 et -4,555 Ga
 - ⇒ histoire précoce du système solaire composition chimique de la **Terre globale**
- Achondrites: silicates → analogues de croûte ou du manteau
- Sidérites: alliage de Fer → analogue du noyau
- Pallasite: silicate et alliage de fer → zone de transition manteau-noyau

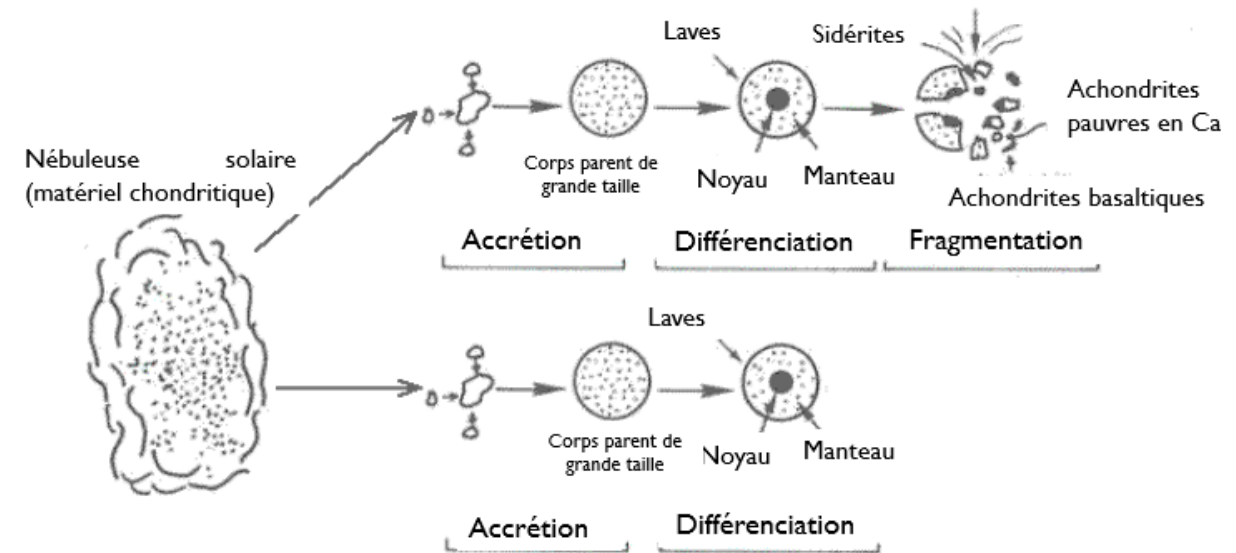


III. LES ENVELOPPES PLUS PROFONDES NE SONT CONNUES QUE DE FAÇON INDIRECTE

A. LE FER ET LE NICKEL DOIVENT SE CONCENTRER DANS LE NOYAU

Bilan sur la composition du noyau

- Différentes compositions des météorites car comportement différent des éléments:
 - Éléments **volatils** : éléments dont la T° de condensation est $<$ à 700K pour une P de 10 Pa : H, He, C, N et gaz rares
 - Éléments **lithophiles** : forte affinité pour les silicates (Mg, Ca et Al)
 - Éléments **sidérophiles** : forte affinité pour le Fer (S, Ni et Co)
 - ⇒ Choisir une chondrite représentative de la Terre globale riche en éléments volatils (C): météorite d'Orgueil
 - ⇒ Estimation de la composition globale de Terre
 - ⇒ Estimation de composition manteau et croûte
 - ⇒ Estimation composition chimique du noyau



- **Noyau externe** : Fe : 80 à 85%, Ni : 2 à 5% et éléments légers : 5 à 15% (O, S et Si)
densité = 10 à 12
- **Noyau interne = graine** : Fe 80% et Ni 20%
densité = 12

I. La Terre est formée d'enveloppes gazeuses, liquides et solides

A. L'atmosphère et l'hydrosphère forment des enveloppes fluides de surface stratifiées

1. Composition et structure de l'atmosphère
2. L'hydrosphère est stratifiée

B. Les données de sismologie mettent en évidence l'existence d'enveloppes concentriques

1. Séismes et ondes sismiques
2. L'étude des vitesses de propagation des ondes P et S met en évidence des surfaces de discontinuité
3. L'étude des trajectoires des ondes sismiques permet d'identifier des surfaces de discontinuité
4. Le Moho marque la base de la croûte
5. La surface de Gutenberg est à la base du manteau
6. La surface de Lehmann sépare les noyaux externe et interne

C. L'étude de la propagation des ondes permet également de déterminer les propriétés des matériaux.

1. Les vitesses des ondes P et S dépendent des propriétés des matériaux
2. Interprétation des hodochrones
3. Mise en évidence d'une zone de faibles vitesses : LVZ
4. Les données de laboratoire expliquent les sauts de vitesse entre 400 et 670 km : transitions de phase

D. Bilan : modèle PREM

1. Modèle PREM
2. Signification des discontinuités

II. Les échantillons nous renseignent sur les premières enveloppes solides

A. Les croûtes affleurent directement

1. La croûte continentale peut être échantillonnée
2. La lithosphère océanique est parfois directement accessible

B. Le manteau peut rarement être échantillonné

1. Certaines roches contiennent des enclaves de manteau (xénolithes)
2. Le manteau est formé de péridotites
3. Transitions de phases dans le manteau

C. Bilan : comparaison LO/LC

1. Différence de structure :
2. Différence de devenir :

III. Les enveloppes plus profondes ne sont connues que de façon indirecte

A. Le fer et le nickel doivent se concentrer dans le noyau

1. L'étude de la gravité montre que le cœur est dense
2. La comparaison avec des chondrites montre que croûte et manteau sont trop pauvres en Fer et nickel.

B. Le noyau doit comporter une partie liquide

1. Données sismiques
2. Etude du champ magnétique

C. Les limites supérieures et inférieures du noyau sont des zones de réaction

1. Couche D'' : interface péridotite/Fer Ni
2. Une graine qui grossit

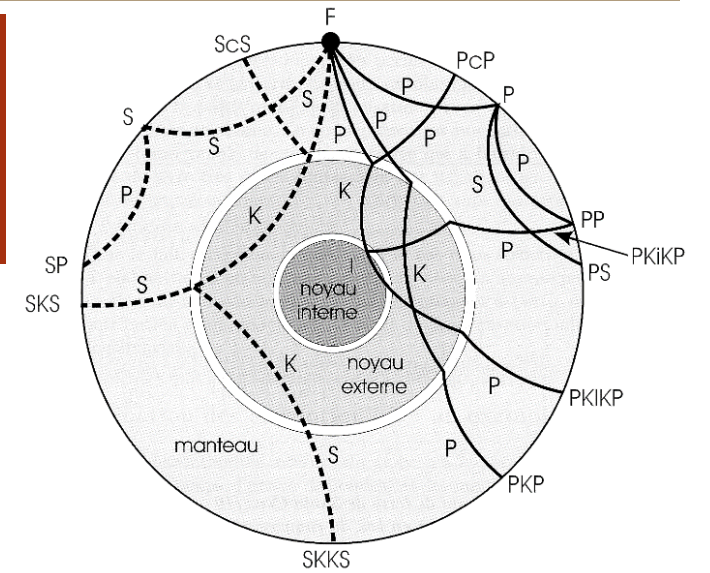
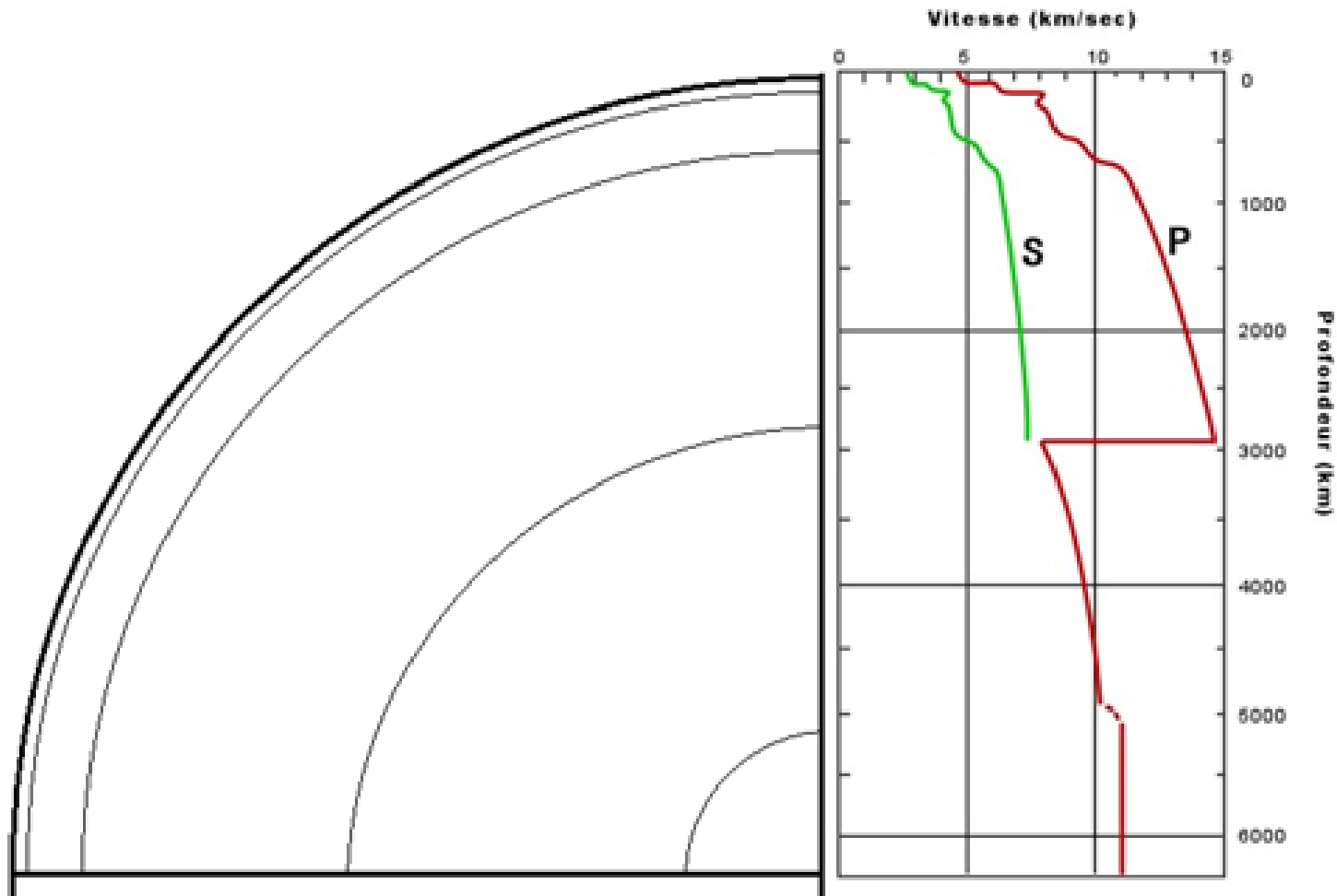
Conclusion

B. LE NOYAU DOIT COMPORTER UNE PARTIE LIQUIDE

I. Données sismiques

I.1. Diminution de la vitesse

I.2. Conversion des ondes S

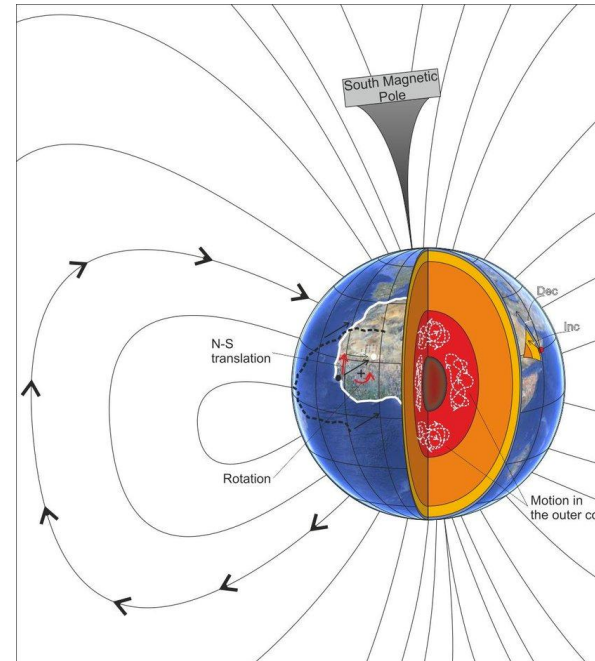


Trajet des rayons sismiques à l'intérieur de la Terre. Les rayons sont désignés par une première lettre indiquant le type d'ondes (pour plus de commodité dans la lecture du schéma on a séparé arbitrairement les ondes P: en trait continu sur la partie droite et les ondes S: en trait pointillé sur la partie gauche). Les réflexions à la surface du globe sont indiquées par des répétitions de lettres (PP, PPP), les réflexions à la surface noyau-manteau sont indiquées par la lettre c (PcP), la traversée du noyau externe est notée K et celle du noyau interne I (PKP, PKiKP), les réflexions à la surface du noyau interne sont notées par la lettre i (PKiKP). Les ondes P et S peuvent se convertir respectivement lors d'une réflexion ou réfraction sur une surface de discontinuité (SP). Les lettres SKS désignent une onde S qui se convertit en P à la frontière manteau-noyau (les ondes S ne traversent pas le noyau externe), puis traverse le noyau externe et se reconvertit en onde S à la sortie.

B. LE NOYAU DOIT COMPORTER UNE PARTIE LIQUIDE

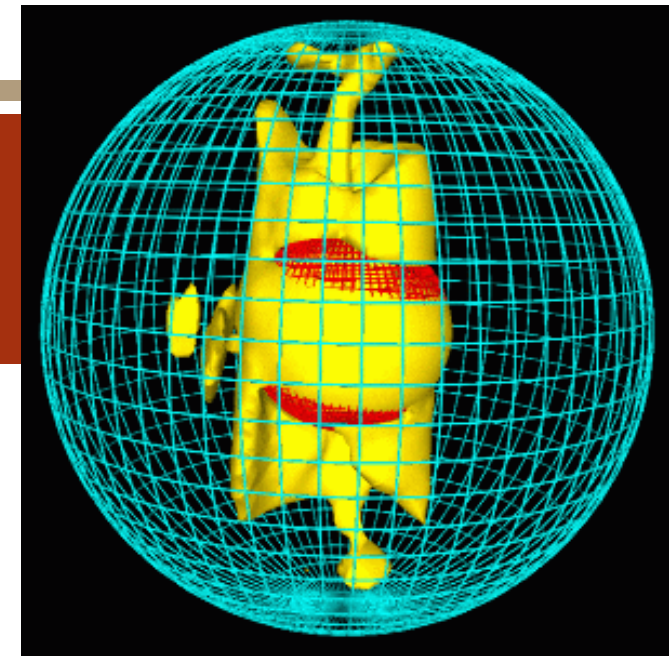
2. Etude du champ magnétique

- champ magnétique terrestre = **champ dipolaire** créé par un **aimant** placé au centre du globe
 - Aimant au centre impossible car T graine est trop élevée ($T > T_{\text{Curie}}$ donc pas d'aimantation possible)
 - ⇒ **courants électriques générés dans le noyau externe liquide**
 - ⇒ courants électriques responsables d'un champ magnétique → courants électriques ⇔ champ magnétique = **effet dynamo**
- ✓ Remarque : l'existence d'un tel effet suggérée dès 1950 pour expliquer l'existence du champ magnétique terrestre. Mais l'observation, au laboratoire en 1999
- ✓ Des études réalisées depuis 20 ans, ont permis de cartographier le champ magnétique terrestre : ces études ont permis de calculer et modéliser les mouvements de fluides à la surface du noyau.



Thèse Sonette, 2012

Le champ magnétique résulte d'un effet dynamo



Source - © 2001 G.A. Glatzmaier.

Principaux mouvements dans le noyau externe

En maillage bleu : la limite noyau externe-manteau ; en maillage rouge : la limite graine-noyau externe.

Le champ magnétique sépare les charges en mouvement

Une différence de potentiel engendre un courant électrique

Un courant électrique engendre un champ magnétique

I. La Terre est formée d'enveloppes gazeuses, liquides et solides

A. L'atmosphère et l'hydrosphère forment des enveloppes fluides de surface stratifiées

1. Composition et structure de l'atmosphère
2. L'hydrosphère est stratifiée

B. Les données de sismologie mettent en évidence l'existence d'enveloppes concentriques

1. Séismes et ondes sismiques
2. L'étude des vitesses de propagation des ondes P et S met en évidence des surfaces de discontinuité
3. L'étude des trajectoires des ondes sismiques permet d'identifier des surfaces de discontinuité
4. Le Moho marque la base de la croûte
5. La surface de Gutenberg est à la base du manteau
6. La surface de Lehmann sépare les noyaux externe et interne

C. L'étude de la propagation des ondes permet également de déterminer les propriétés des matériaux.

1. Les vitesses des ondes P et S dépendent des propriétés des matériaux
2. Interprétation des hodochrones
3. Mise en évidence d'une zone de faibles vitesses : LVZ
4. Les données de laboratoire expliquent les sauts de vitesse entre 400 et 670 km : transitions de phase

D. Bilan : modèle PREM

1. Modèle PREM
2. Signification des discontinuités

II. Les échantillons nous renseignent sur les premières enveloppes solides

A. Les croûtes affleurent directement

1. La croûte continentale peut être échantillonnée
2. La lithosphère océanique est parfois directement accessible

B. Le manteau peut rarement être échantillonné

1. Certaines roches contiennent des enclaves de manteau (xénolithes)
2. Le manteau est formé de péridotites
3. Transitions de phases dans le manteau

C. Bilan : comparaison LO/LC

1. Différence de structure :
2. Différence de devenir :

III. Les enveloppes plus profondes ne sont connues que de façon indirecte

A. Le fer et le nickel doivent se concentrer dans le noyau

1. L'étude de la gravité montre que le cœur est dense
2. La comparaison avec des chondrites montre que croûte et manteau sont trop pauvres en Fer et nickel.

B. Le noyau doit comporter une partie liquide

1. Données sismiques
2. Etude du champ magnétique

C. Les limites supérieures et inférieures du noyau sont des zones de réaction

1. Couche D" : interface péridotite/Fer Ni
2. Une graine qui grossit

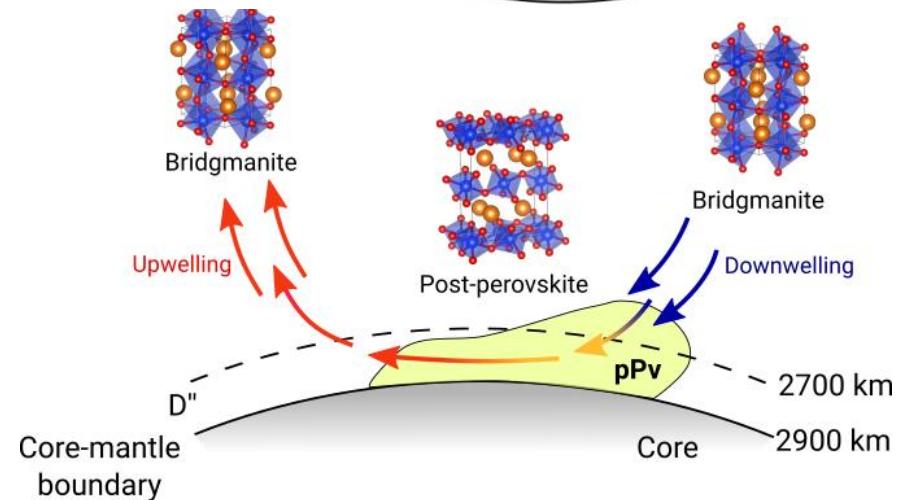
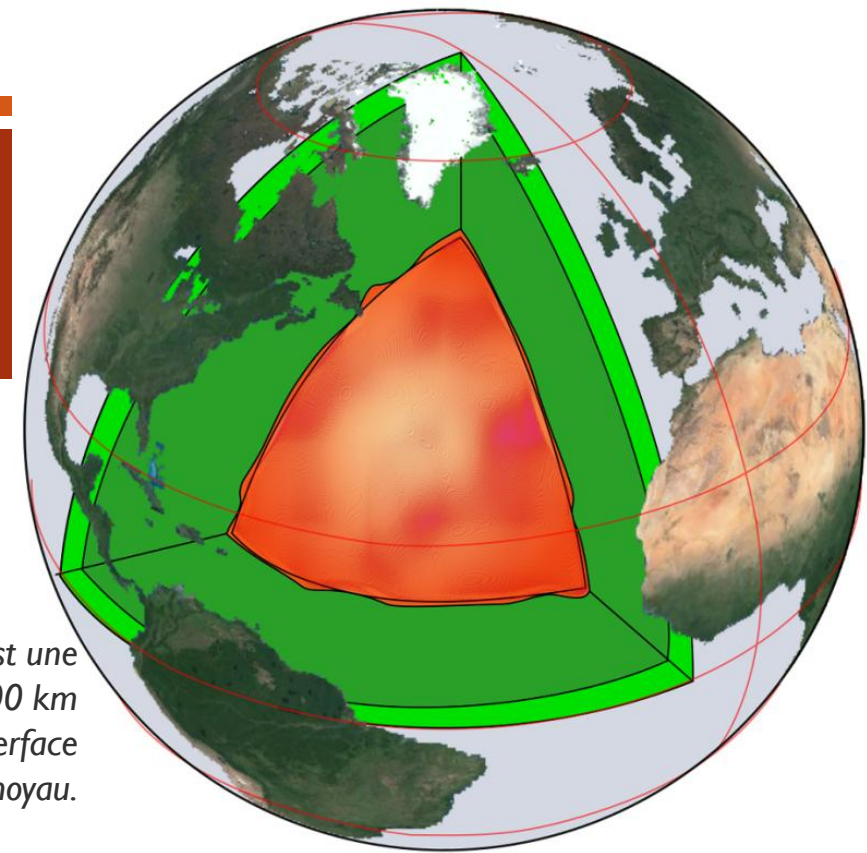
Conclusion

C. LES LIMITES SUPÉRIEURES ET INFÉRIEURES DU NOYAU SONT DES ZONES DE RÉACTION

I. Couche D'' : interface péridotite/ Fer + Ni

- **Frontière noyau/manteau (2900 km): anomalies de vitesse des ondes sismiques**
 - zone de **200 à 300km d'épaisseur = couche D''**
 - ✓ chute de 1,6 à 2,4% de la vitesse des ondes S.
 - ✓ parfois absente
 - ✓ études de tomographie → **zone de transition de phase de silicates du manteau**
 - Etudes en cellule à enclumes de diamant → « pérovskite » peut réagir avec le Fer
 - ✓ Il existerait donc une zone au niveau de laquelle **des échanges** auraient lieu.
 - ✓ D'après les modèles, cette zone n'excéderait pas la centaine de mètres, ce qui est très inférieur à l'épaisseur de l'ordre de la centaine de km.

La couche D'' (ici en orange) est une couche hétérogène d'environ 200 km d'épaisseur au-dessus de l'interface entre le manteau et noyau.



C. LES LIMITES SUPÉRIEURES ET INFÉRIEURES DU NOYAU SONT DES ZONES DE RÉACTION

2. Une graine qui grossit



- Depuis sa formation, la **Terre se refroidit**. Le **fer se solidifie** donc et par conséquent la **graine grossit au détriment du noyau externe liquide**.
 - ⇒ libération de chaleur (chaleur latente de solidification)
 - ⇒ contraction dans la mesure où la densité du fer solide est supérieure à celle du fer liquide
 - ⇒ diminution de l'énergie gravitationnelle.

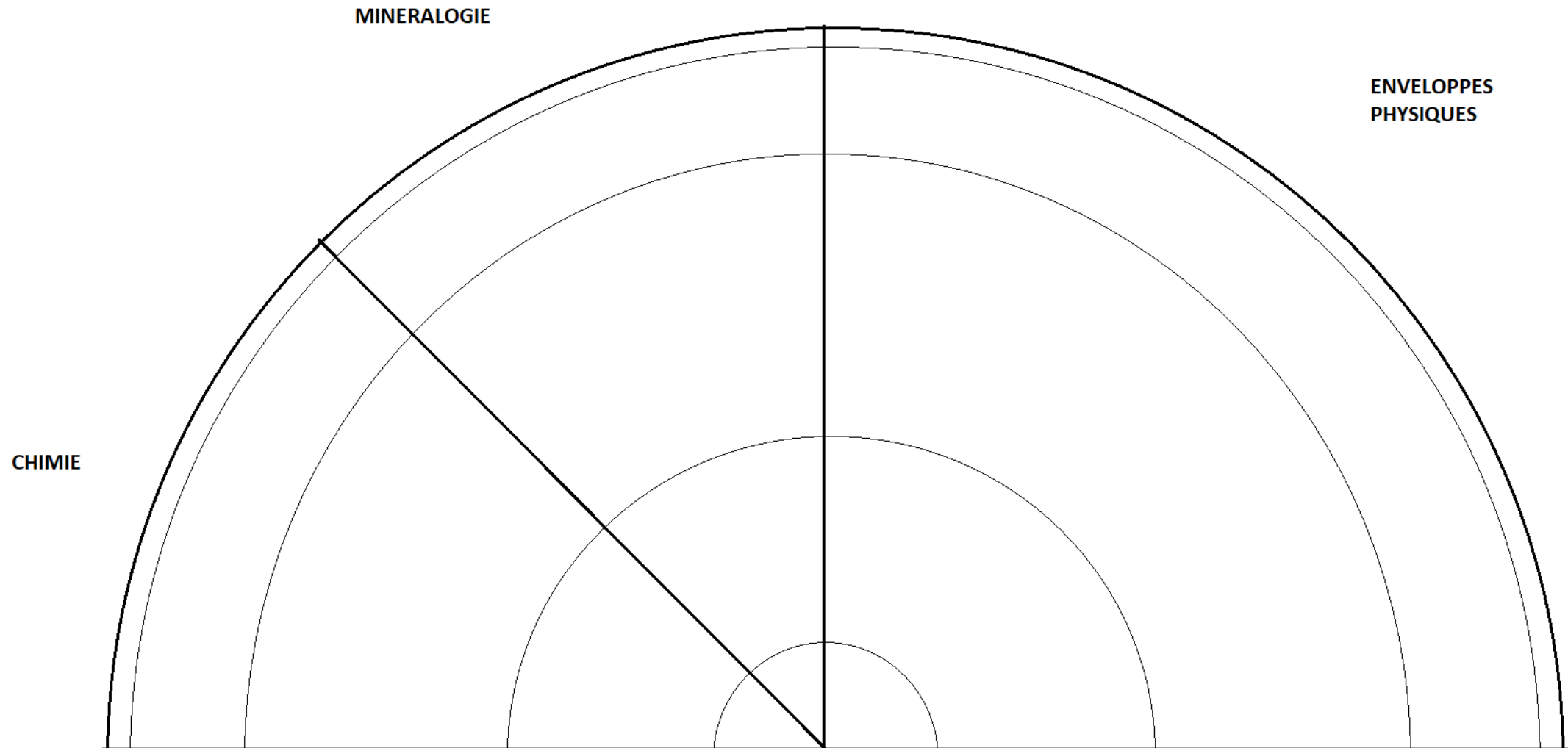
CONCLUSION

- Données issues de:
 - vitesse des ondes sismiques et de leur trajectoire
 - échantillonnage
 - composition des météorites
 - champ magnétique
- **Croûtes, manteau et noyau sont définis sur la base de leur nature chimique et minéralogique ; lithosphère et asthénosphère sur la base de leurs propriétés rhéologiques et thermiques.**
- Tomographie sismique → Hétérogénéités au sein du manteau → zones +/- chaudes
- Libération continue de chaleur par Terre → flux de chaleur
- Activité tectonique → mouvements de plaques lithosphériques

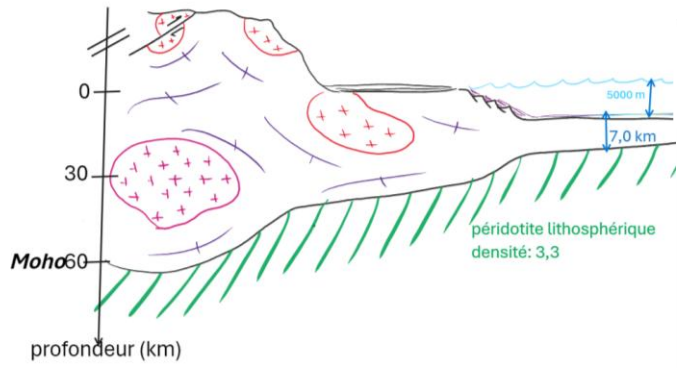
Modèle PREM

Peut-on faire un lien entre cette libération d'énergie et l'activité géologique du globe ?

CONCLUSION



Asthénosphère Lithosphère



Propriétés physiques et dynamiques

Solide cassant
 ⇒ Conduction
 ⇒ Sismogène

Ductile
 ⇒ Convection

Liquide
 ⇒ Convection
 ⇒ Champ magnétique

Méthodes d'étude

CC: affleurement forages

CO: forages
 Ophiolites
 Failles transformantes

Observations directes

gravimétrie
 Presse gros volume (manteau sup)

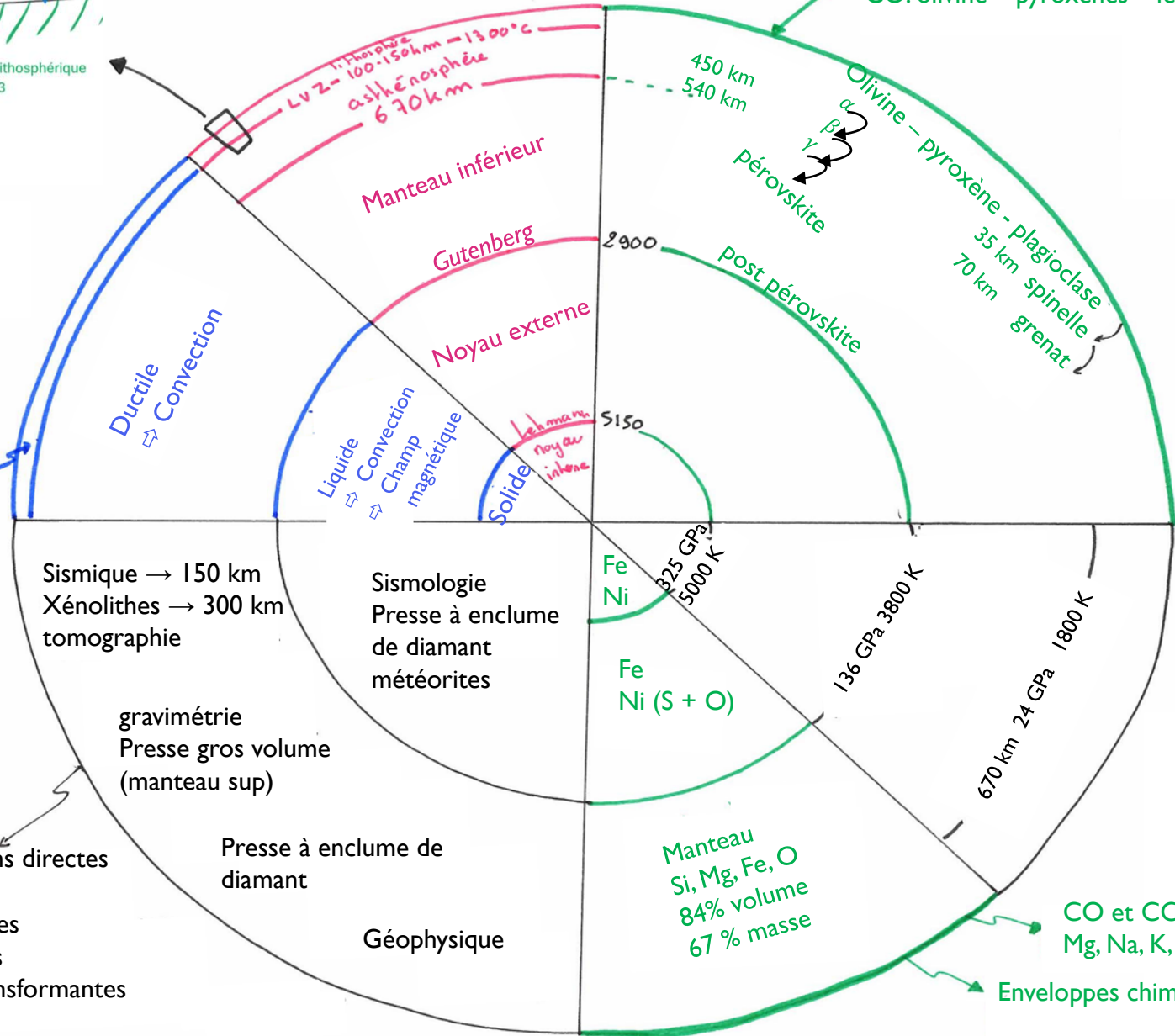
Presse à enclume de diamant

Géophysique

Sismique → 150 km
 Xénolithes → 300 km
 tomographie

Sismologie
 Presse à enclume de diamant
 météorites

Enveloppes physiques



CC: quartz – feldspath – micas- calcite – minéraux du métamorphisme
 CO: olivine – pyroxènes – feldspaths



minéralogie

Conditions de P et T

CO et CC: Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, O

Enveloppes chimiques