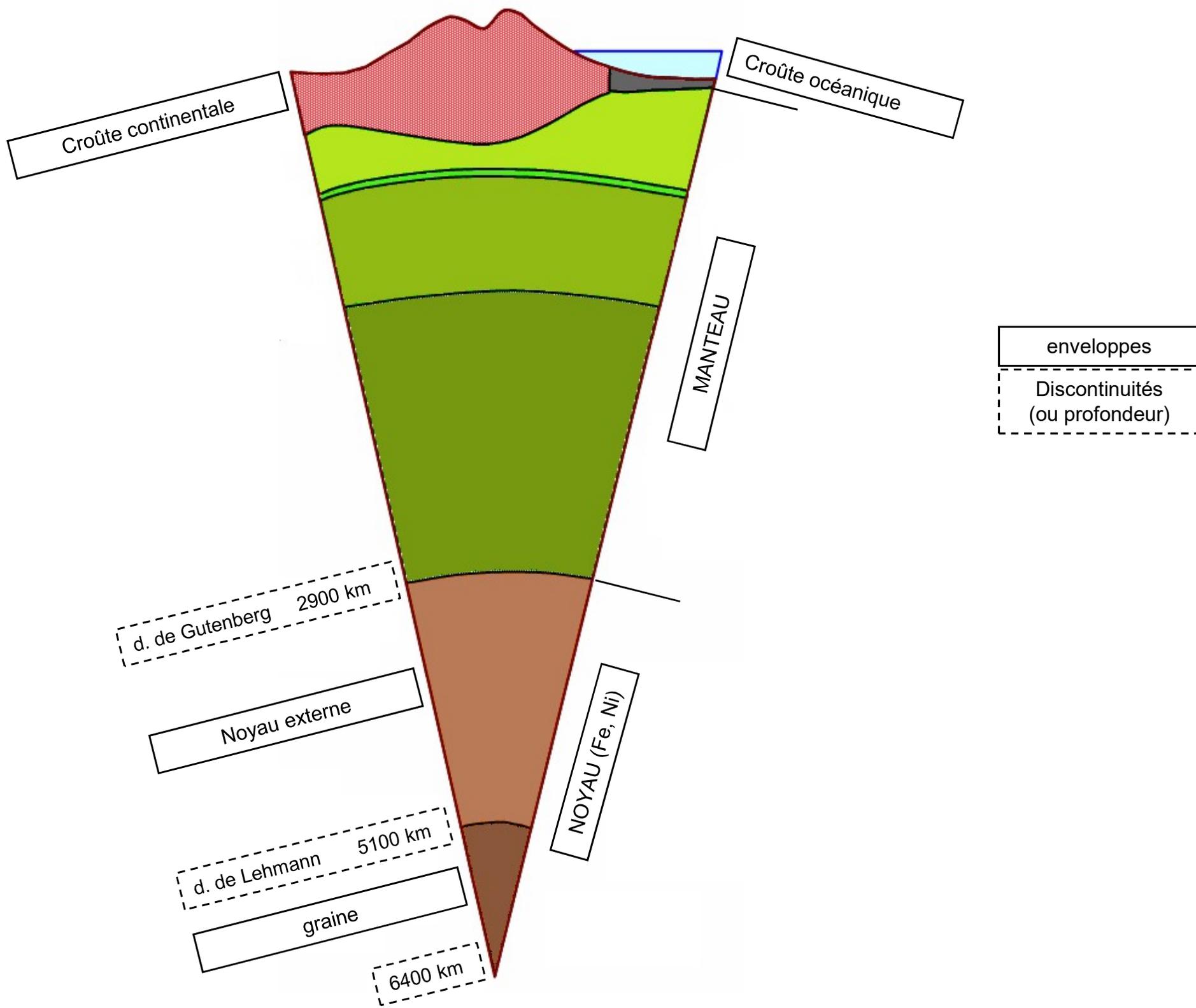
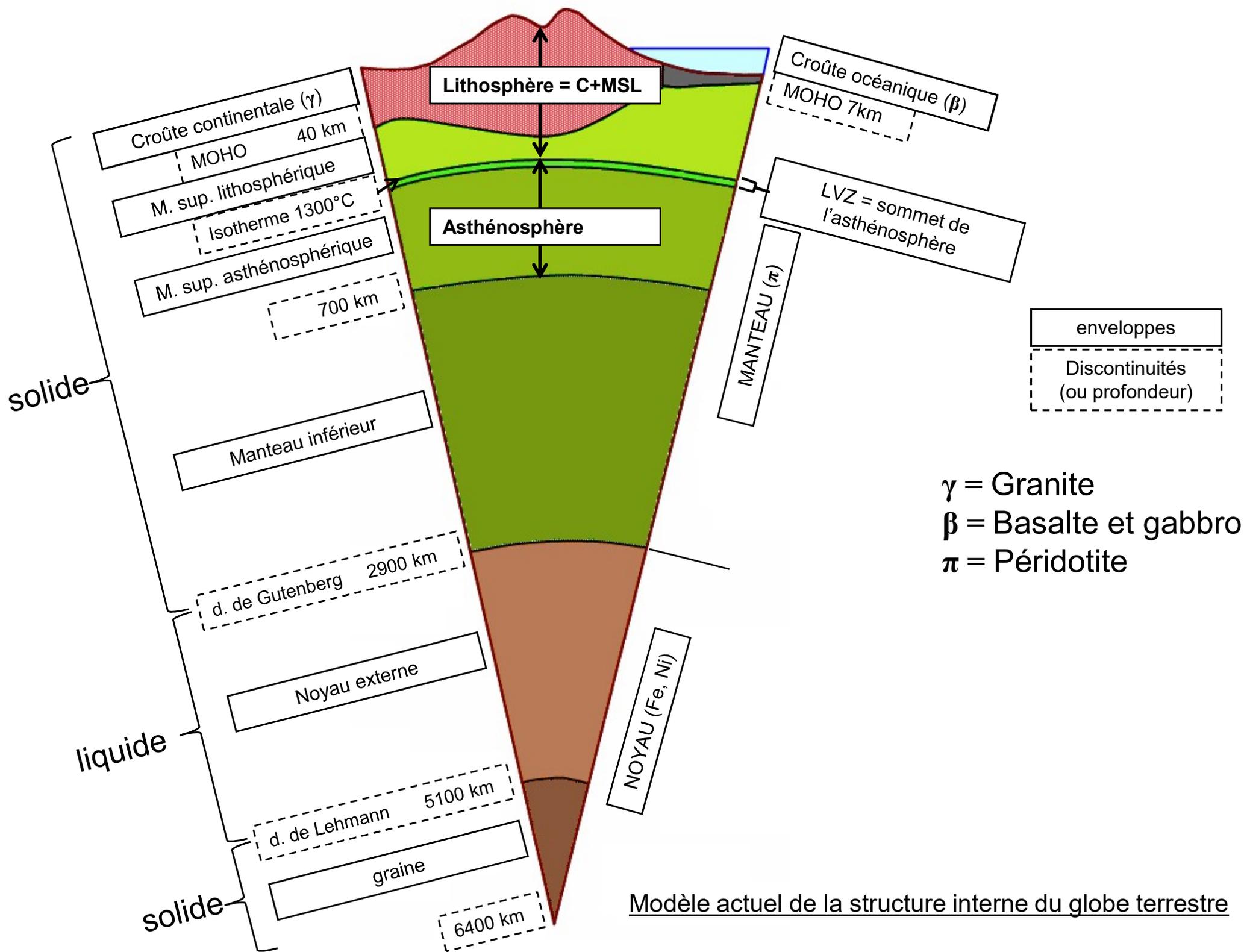


Thème : La dynamique interne de la Terre.

Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre

Introduction : état actuel des connaissances sur la structure et la composition du globe





Modèle actuel de la structure interne du globe terrestre

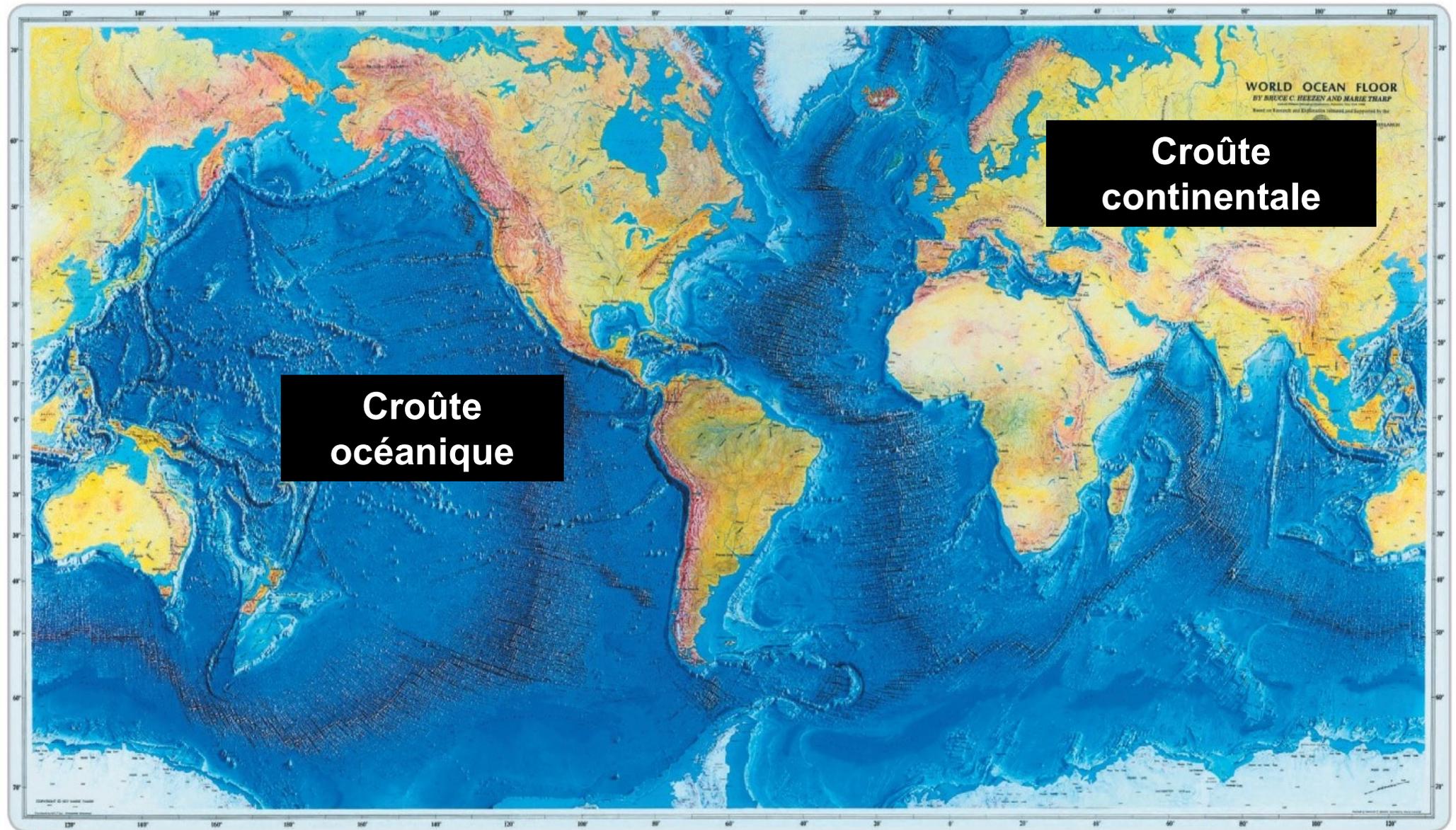
Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre

Problème : Alors que la majeure partie du globe est inaccessible à l'observation, comment les scientifiques ont-ils pu proposer ce modèle ?

Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre

I. Des observations directes de roches permettent de connaître la composition des couches les plus superficielles.

Des roches continentales et océaniques



a La carte des reliefs terrestres.

Des roches continentales peuvent être prélevées en surface



Des roches continentales peuvent être prélevées par forage

La profondeur de +/- 15 m atteinte, on remonte les tubes de forage



Une carotte de roche



Le forage le plus profond du monde



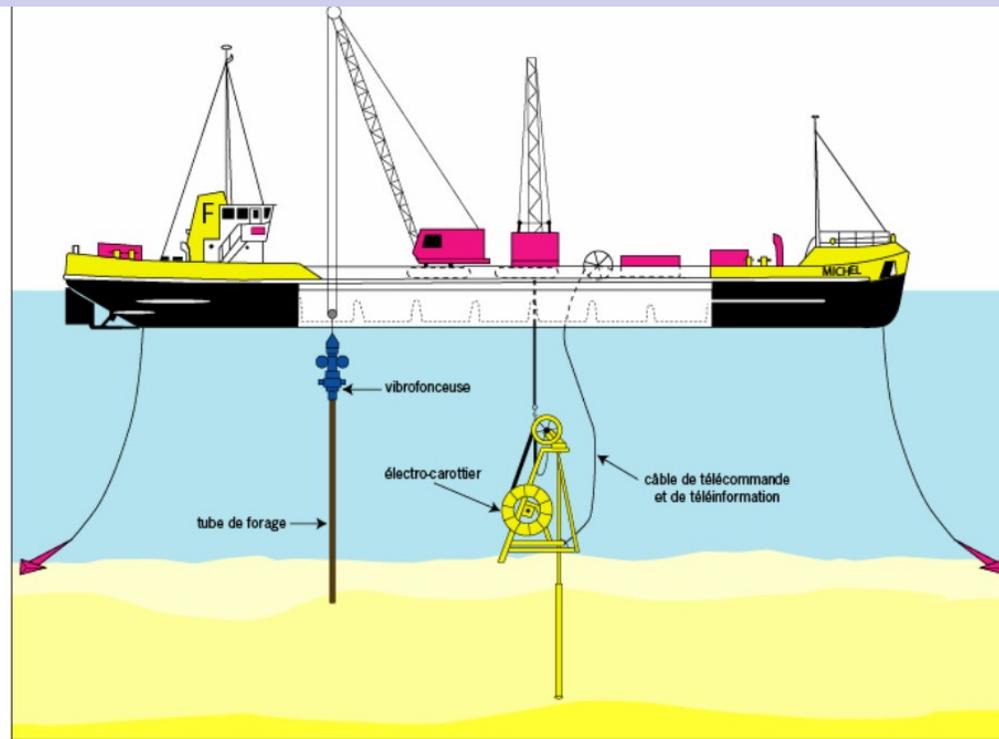
Des roches océanique peuvent être prélevées par dragage

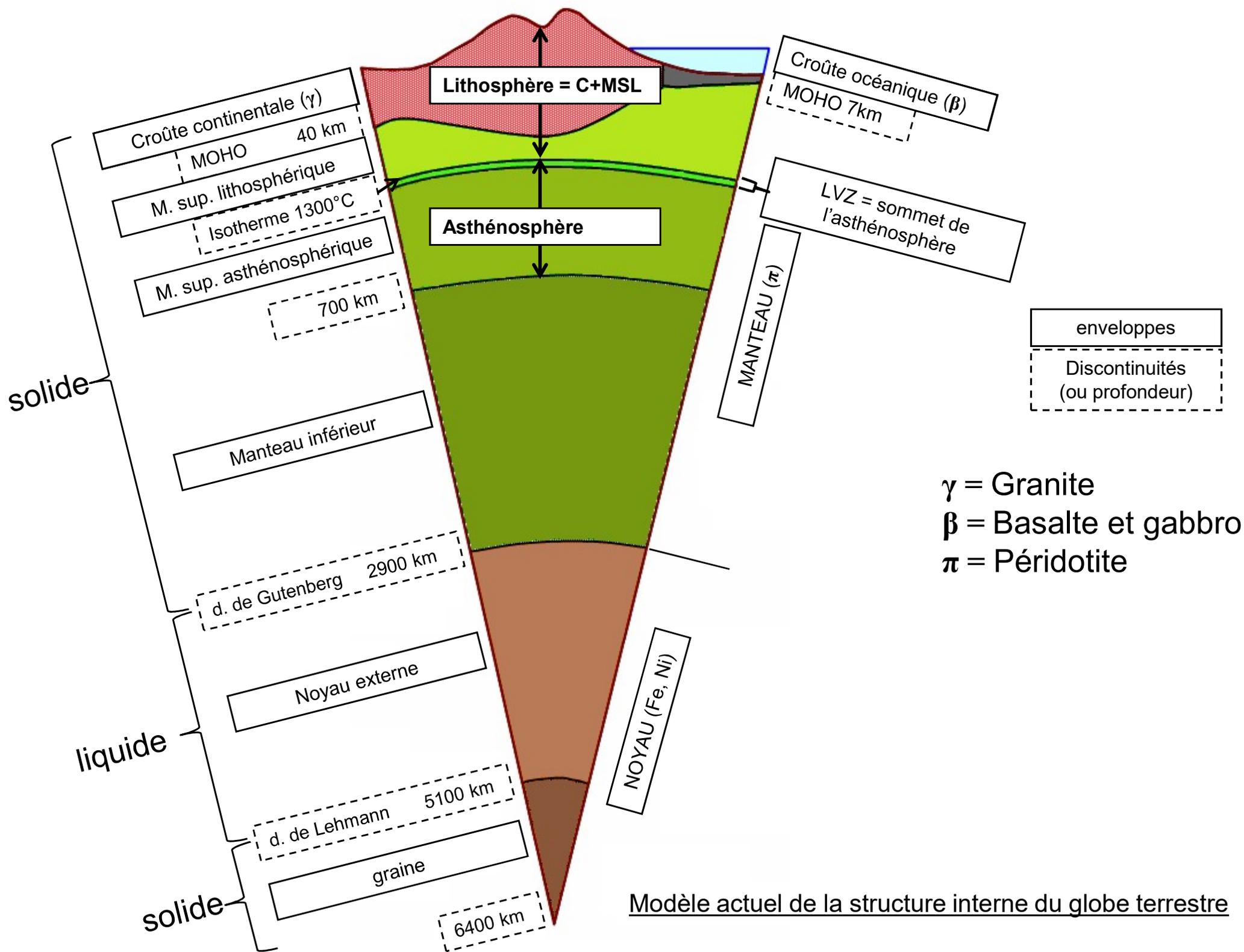


Basaltes en coussin



Des roches océaniques peuvent être prélevées par forage





Modèle actuel de la structure interne du globe terrestre

Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre

I. Des observations directes de roches permettent de connaître la composition des couches les plus superficielles

A. Méthodes d'étude des roches prélevées

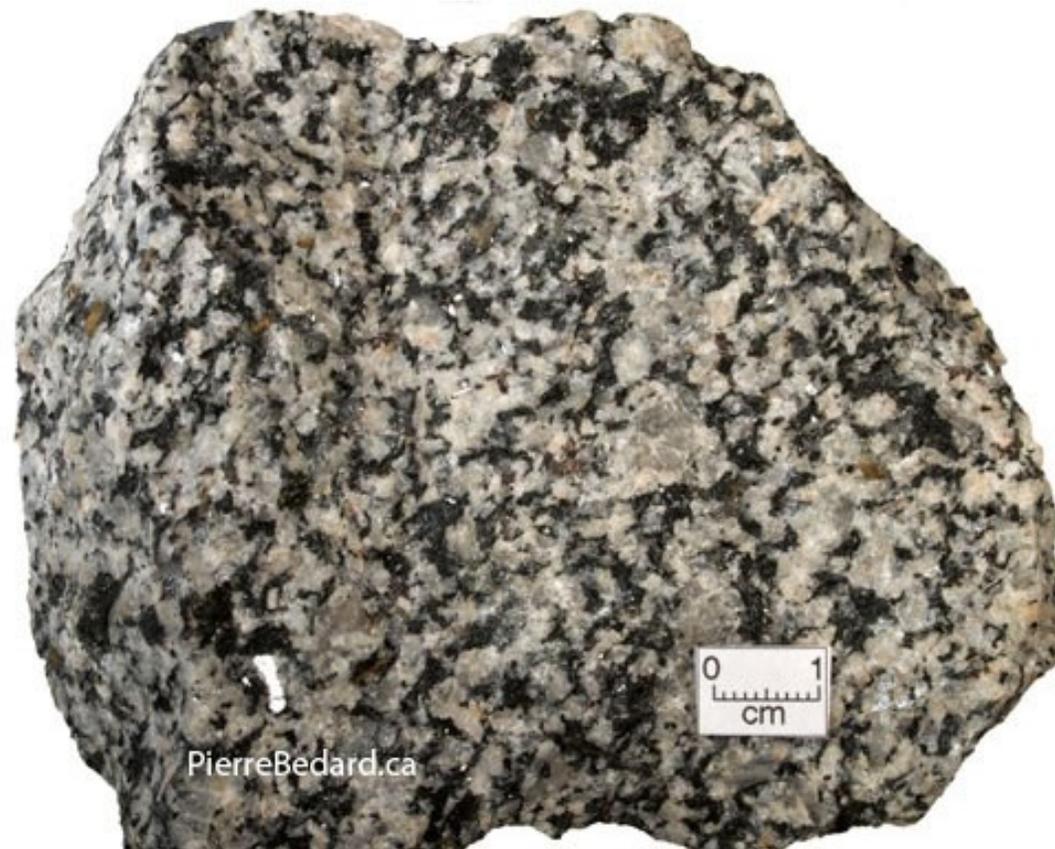
Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre

I. Des observations directes de roches permettent de connaître la composition des couches les plus superficielles

A. Méthodes d'étude des roches prélevées

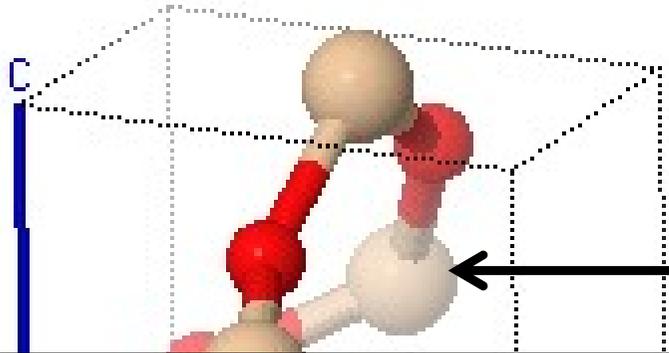
1. Observation macroscopique des roches.

Une roche est un ensemble de minéraux

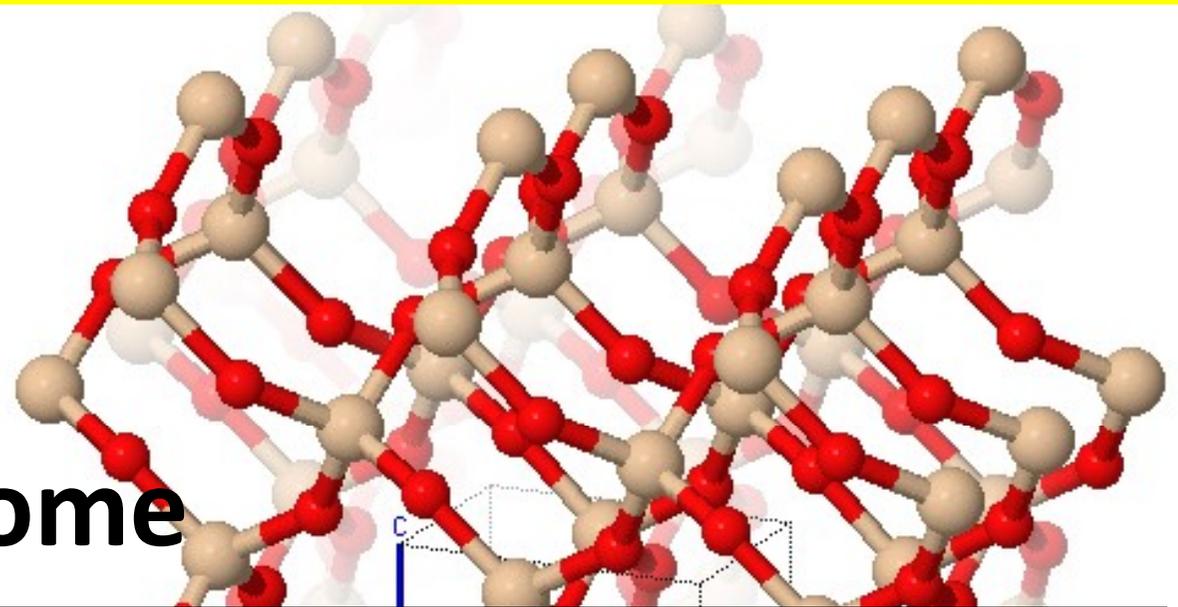


Le minéral, une molécule géologique (assemblage d'atomes)

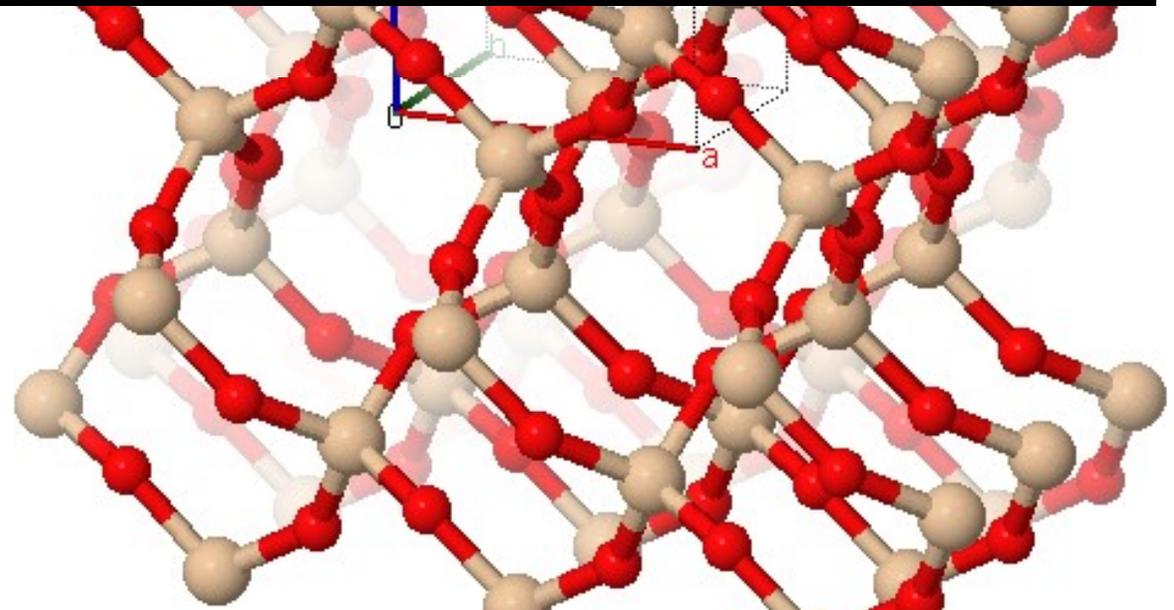
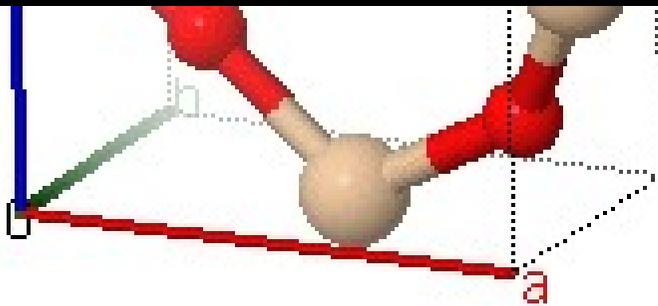
Ex. du Quartz SiO_2



← atome

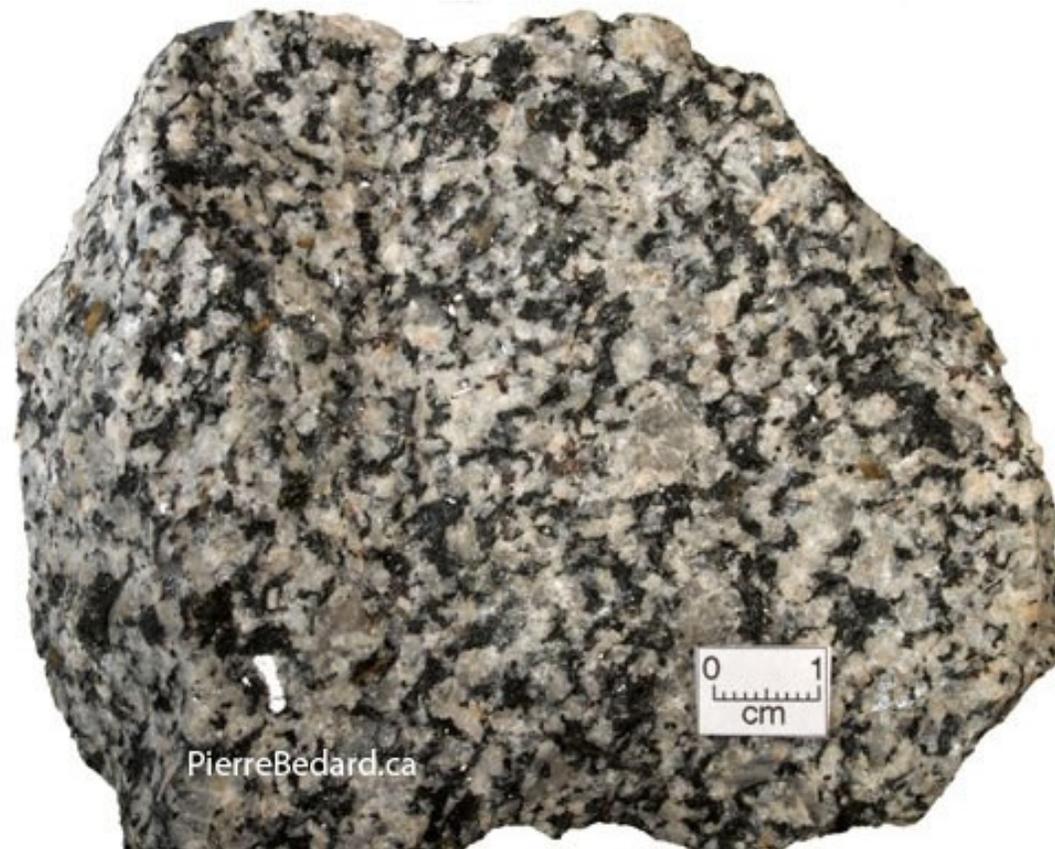


Agencement géométrique des atomes => propriétés particulières (couleur, reflet, plan de clivage, ...) => permettent d'identifier les minéraux



Atomes : O²⁻ Si⁴⁺

Une roche est un ensemble de minéraux



Deux exemples de structure de roches : basaltes et gabbros

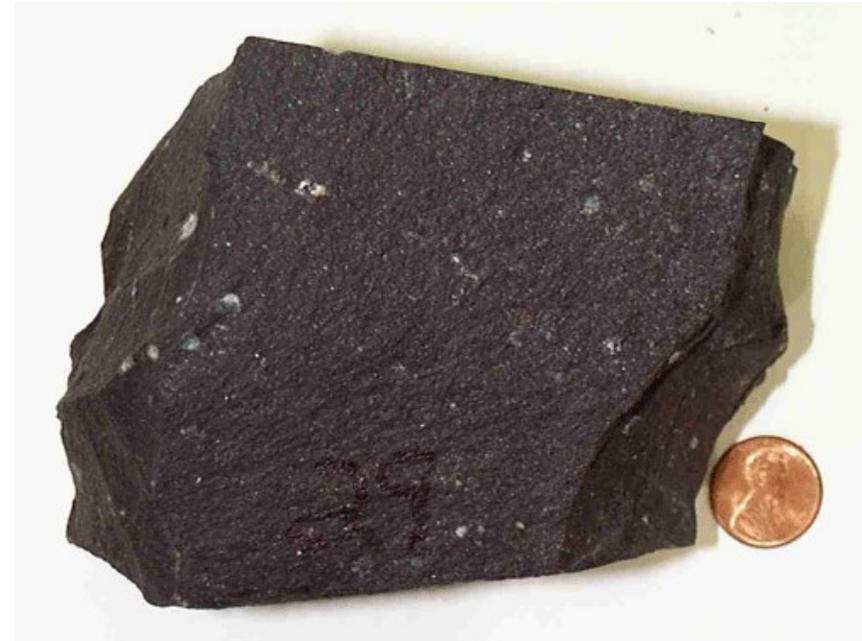
Gabbro



Structure grenue

Tous les minéraux sont visibles

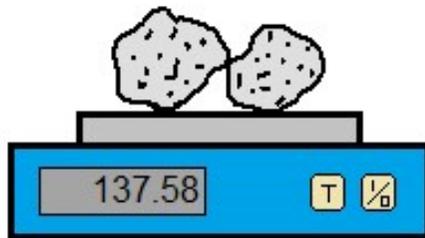
Basalte



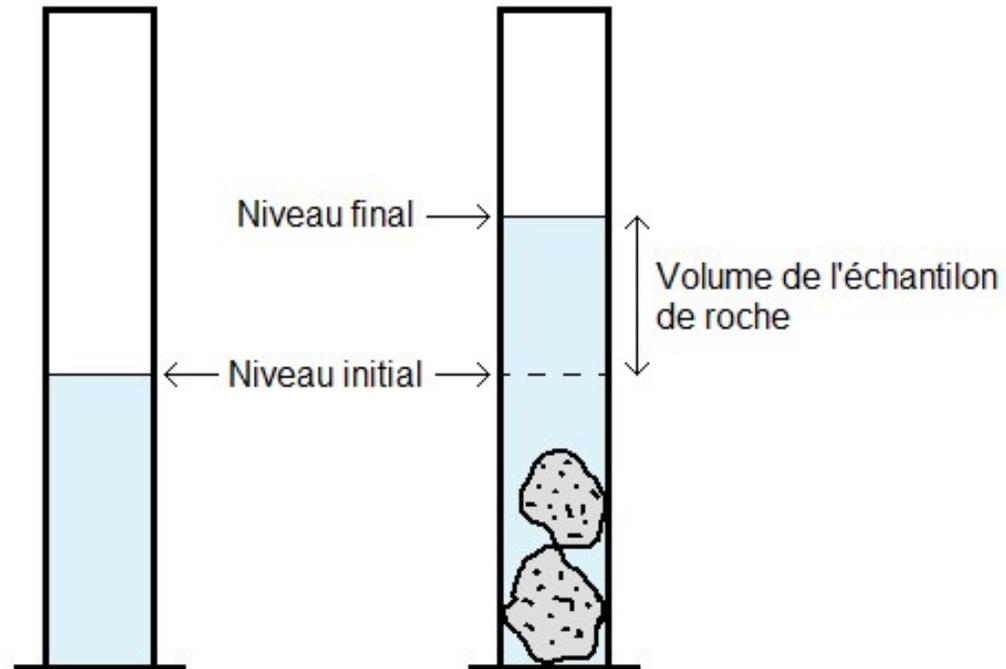
Structure microlithique

Tous les minéraux ne sont pas visibles

Etude macroscopique des roches : mesure de densité



Détermination de la masse des échantillons de roches



Détermination du volume des échantillons de roche

$$\rho_{\text{échantillon}} = \frac{m_{\text{échantillon}}}{V_{\text{échantillon}}} \quad \text{en g.mL}^{-1} \text{ c'est-à-dire g.cm}^{-3}$$

$$d_{\text{échantillon}} = \frac{\rho_{\text{échantillon}}}{\rho_{\text{eau}}} \quad \text{rapport sans unité !}$$

Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre

I. Des observations directes de roches permettent de connaître la composition des couches les plus superficielles

A. Méthodes d'étude des roches prélevées

1. Observation macroscopique des roches.
2. Observation microscopique des roches.

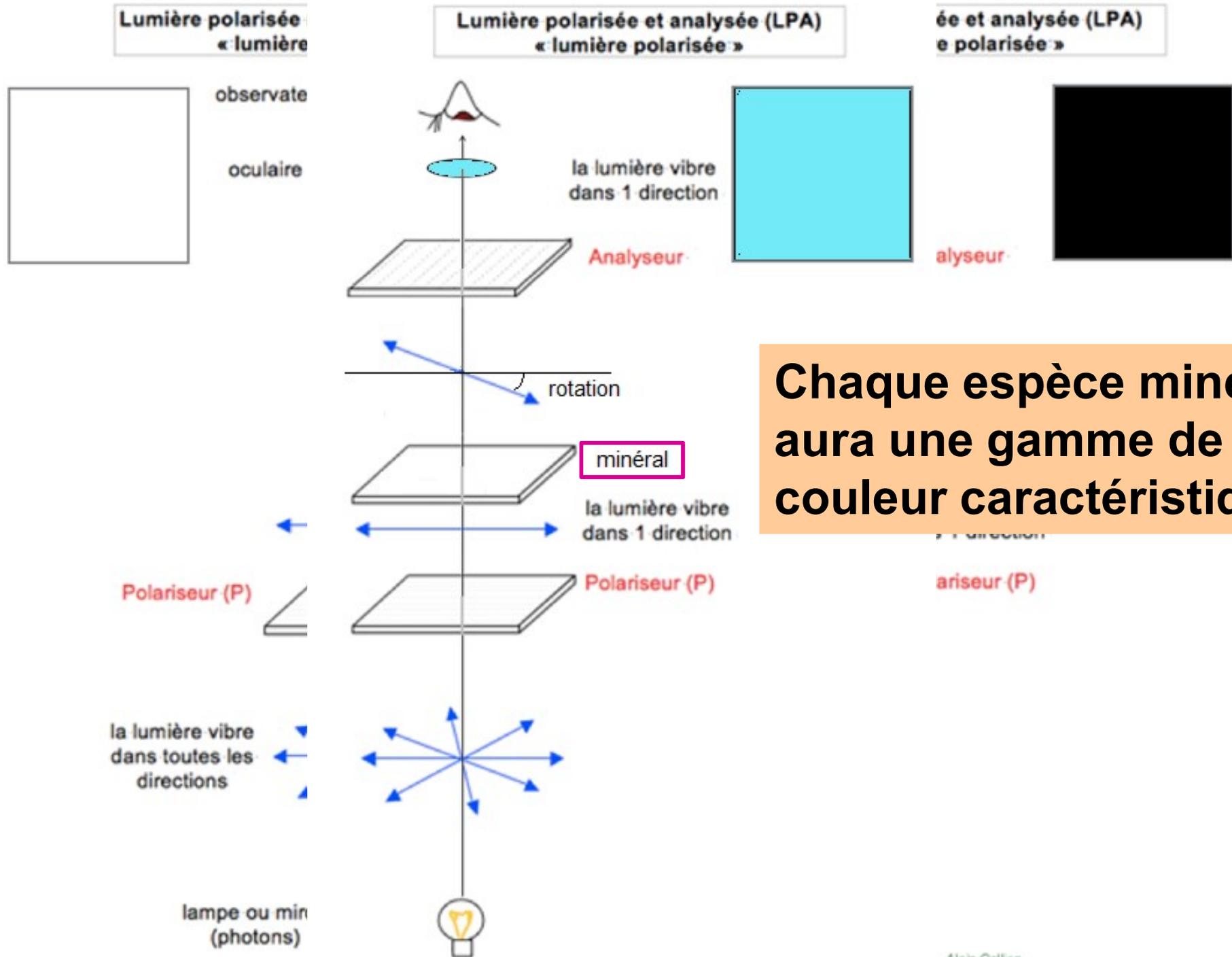
Préparation de lame mince de roche



microscope polarisant

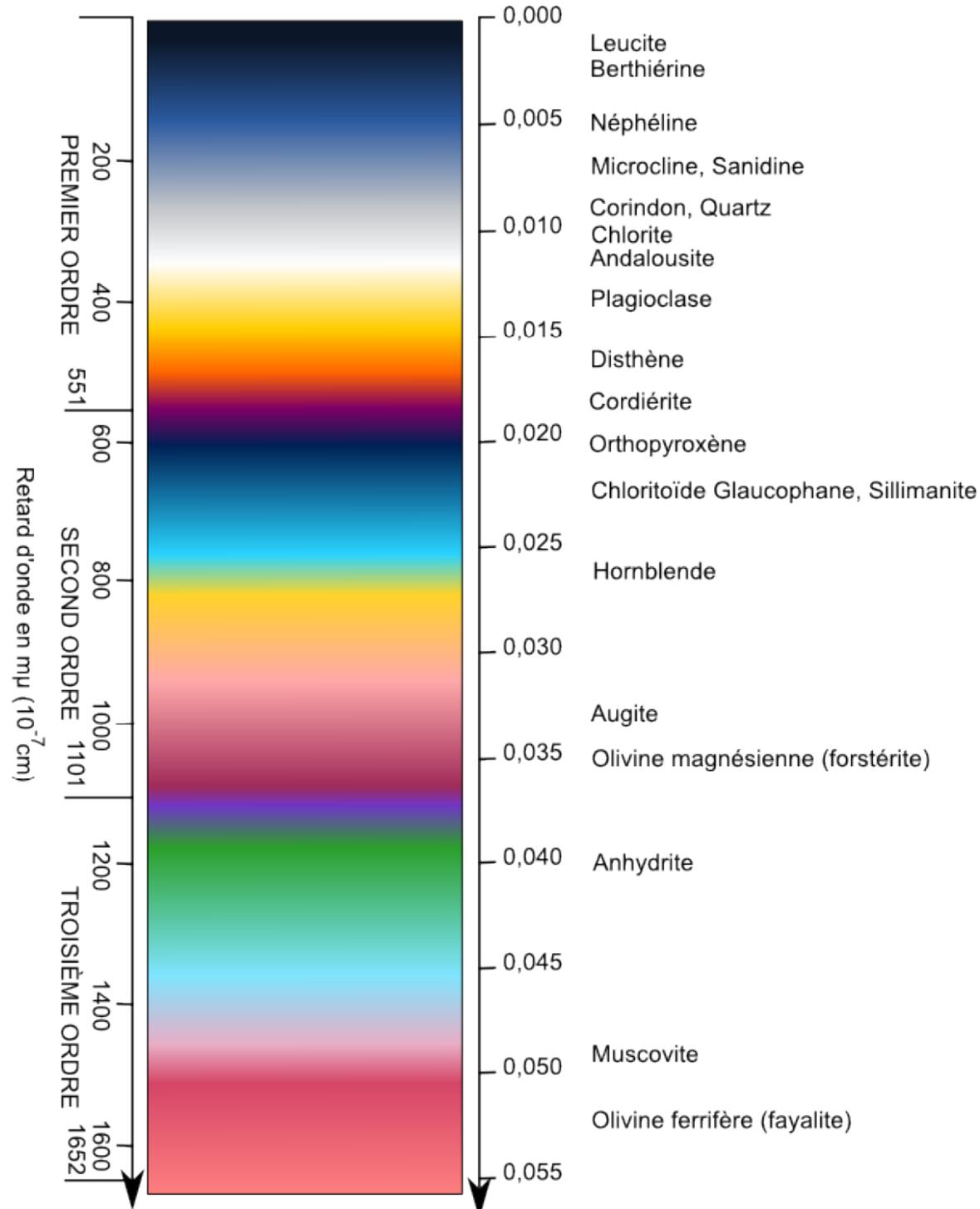


Principe du microscope polarisant



Chaque espèce minérale aura une gamme de couleur caractéristique !

Principe du microscope polarisant : Echelle de birefringence



Du quartz observé au microscope polarisant



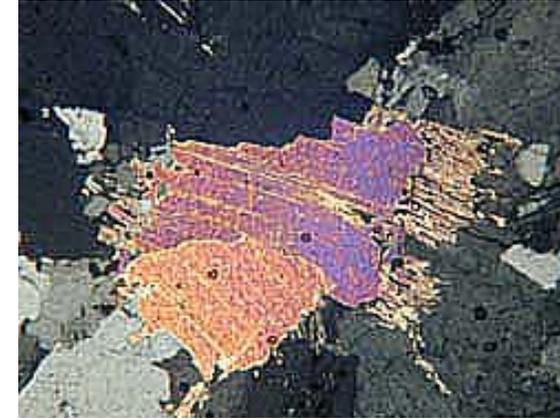
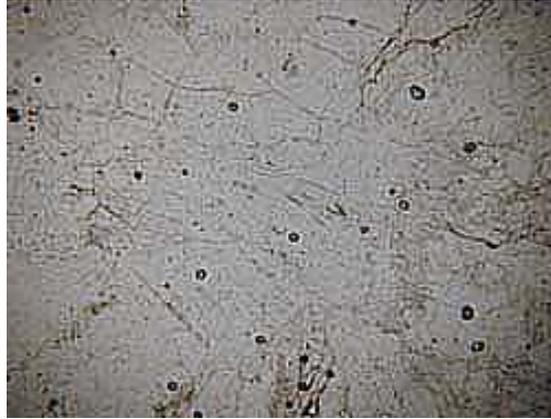
LPNA



LPA

Différents minéraux observés au microscope polarisant

Mica blanc



Plagioclase



Mica noir



LPNA

LPA

Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre

I. Des observations directes de roches permettent de connaître la composition des couches les plus superficielles

A. Méthodes d'étude des roches prélevées

1. Observation macroscopique des roches.

2. Observation microscopique des roches.

B. Composition de la croûte océanique

Les roches de la croûte océanique : gabbros et basaltes

Gabbro



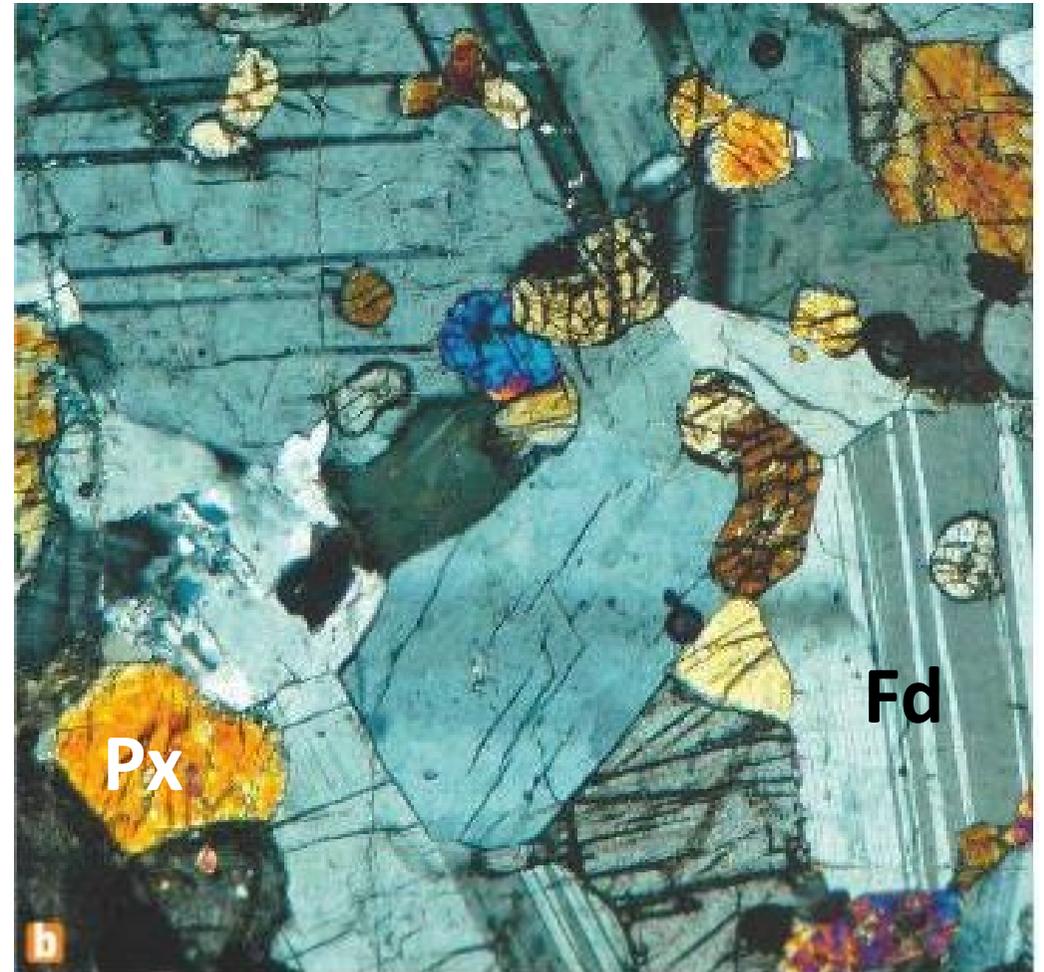
Roche grenue

Basalte



Roche microlithique

Composition des gabbros



Lame mince de gabbro observée en lumière polarisée analysée

O	Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K
43,5	23,7	7,4	8,3	3,8	7,4	1,6	0,6

Densité = 2,9

Composition des basaltes

Basalte



O	Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K
43,5	23,7	7,4	8,3	3,8	7,4	1,6	0,6

Densité = 2,9

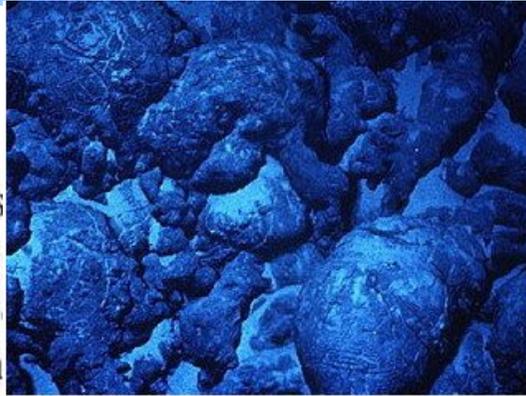


← verre

← Microlites (feldspath, pyroxène)

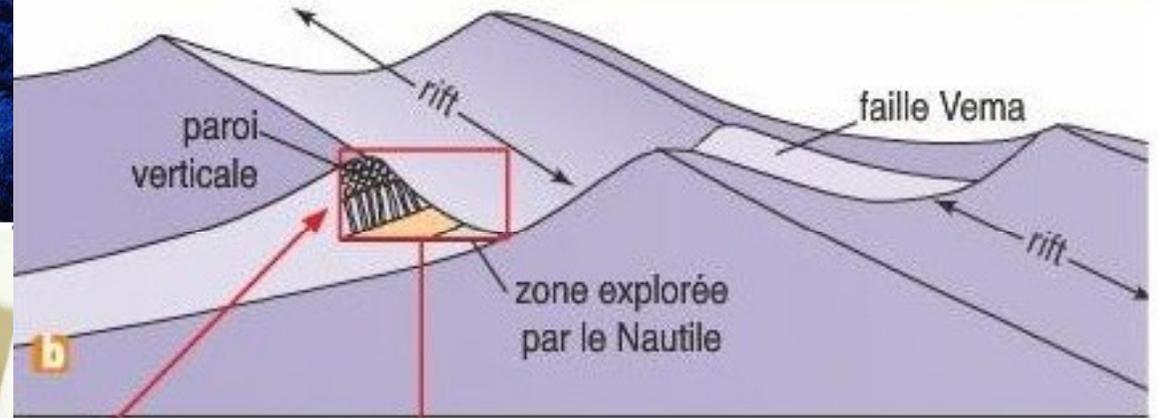
← Phénocristaux (pyroxène, olivine)

Les roches de la lithosphère océanique



Basaltes en pillow-lavas

En 1988, le submersible Alvin, lors de son passage sur la faille transformante de Vema, a permis l'observation de lithosphère océanique.



Basaltes en filons



50°

40°

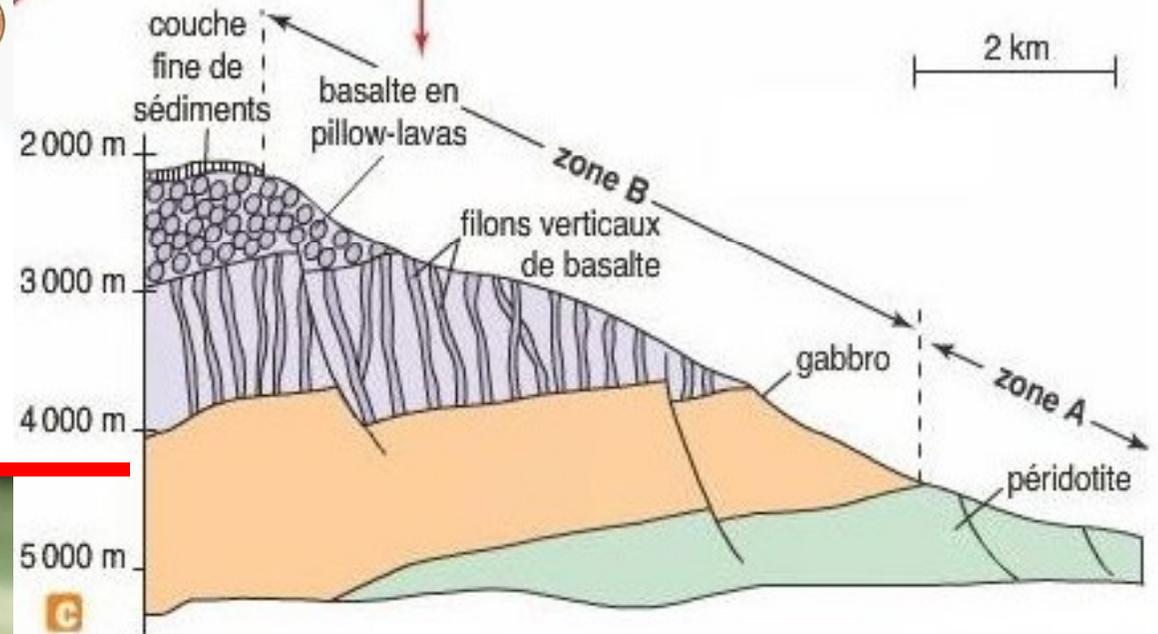
30°

20°

10°

0°

gabbros



Péridotites lithosphériques



Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre

I. Des observations directes de roches permettent de connaître la composition des couches les plus superficielles

A. Méthodes d'étude des roches prélevées

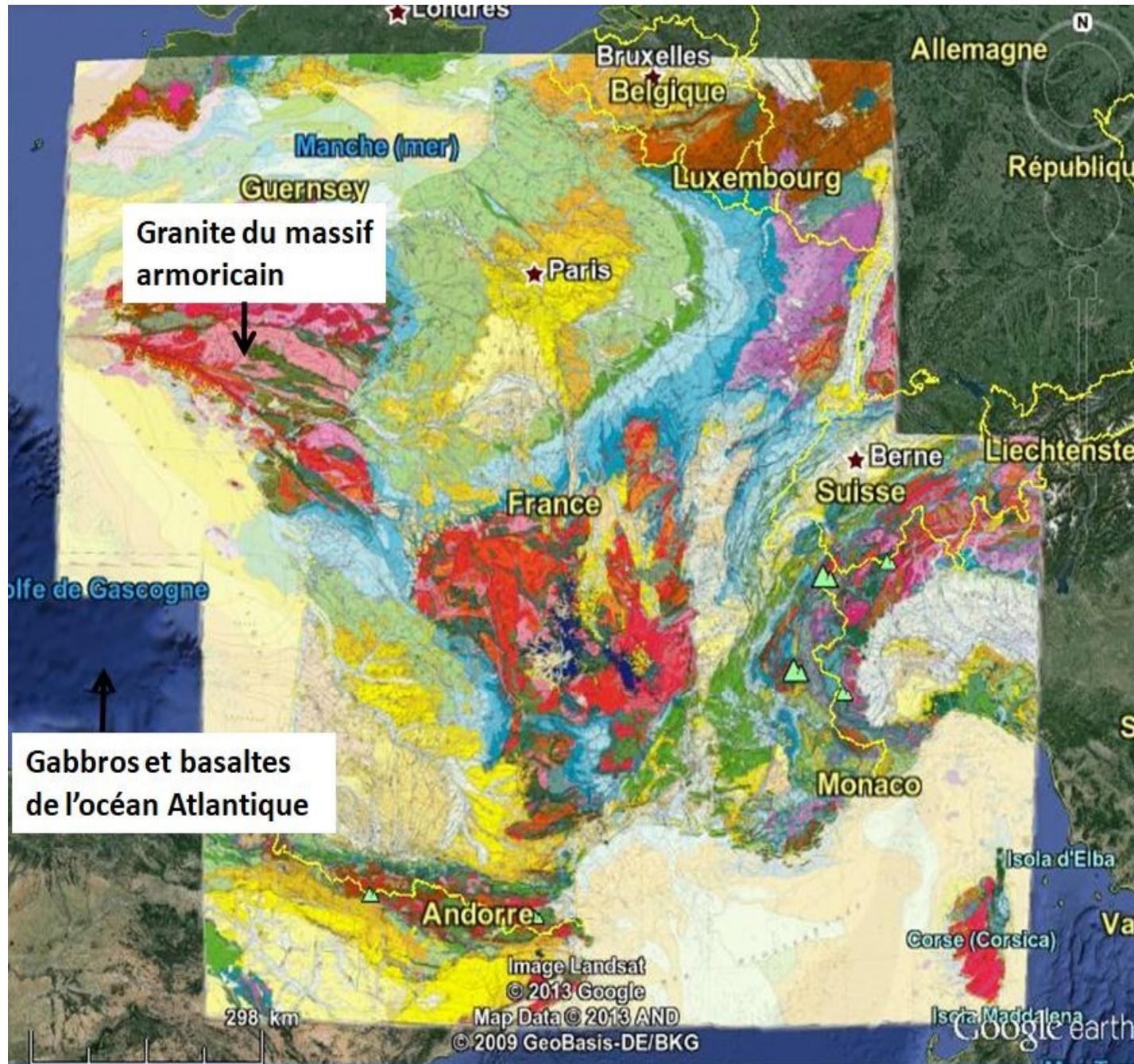
1. Observation macroscopique des roches.

2. Observation microscopique des roches.

B. Composition de la croûte océanique

C. Composition de la croûte continentale

Localisation des roches prélevées



Diversité des roches de la croûte continentale

3

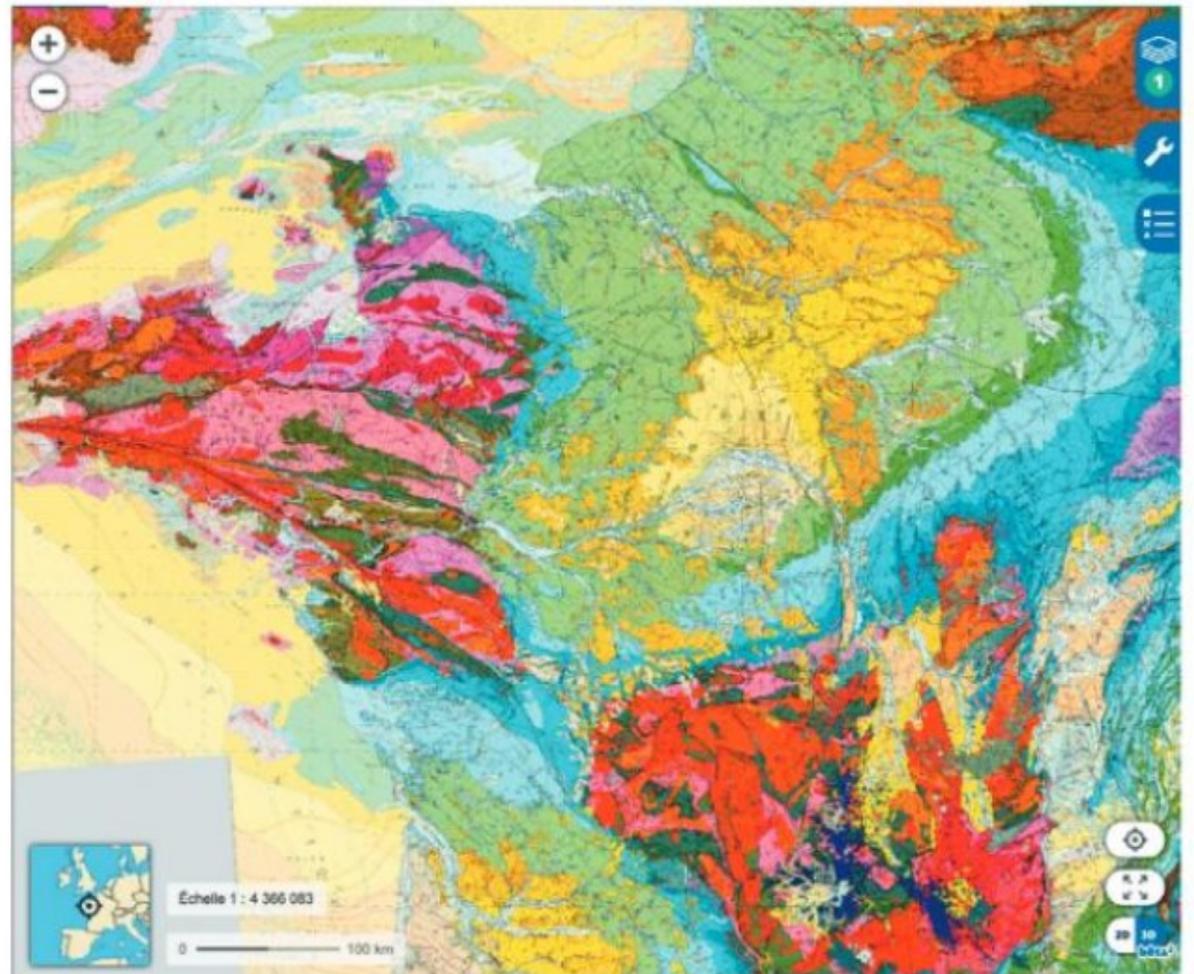
Les roches situées à la surface des continents

Les cartes géologiques indiquent les roches se trouvant à l'affleurement*, ou sous la couche du sol lorsqu'il y en a un.

Activité pratique

- Sur le site InfoTerre (BRGM) ou Geoportail (IGN), afficher la carte géologique de la France afin de localiser les trois grands types de roches présentes en surface.
- Schématiser cette répartition sous la forme d'une carte simplifiée.
- Émettre des hypothèses sur la répartition en profondeur de ces roches.

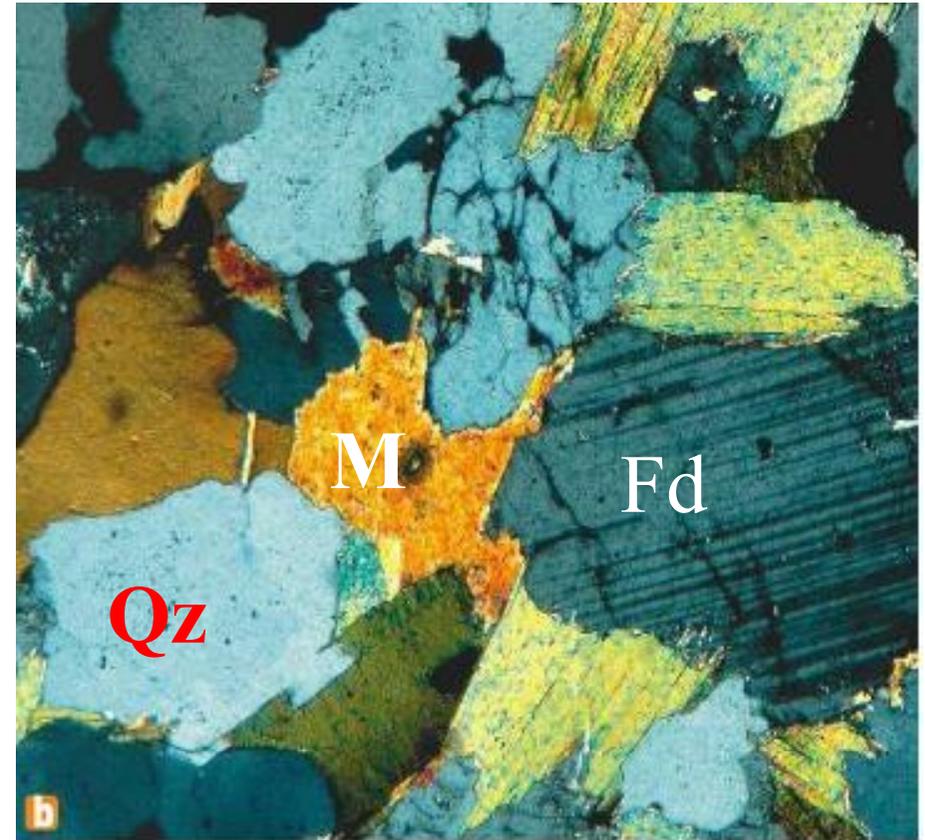
Roches sédimentaires*	Roches métamorphiques*	Roches magmatiques*
		volcaniques* 
		plutoniques* 
		
		



Roche caractéristique de la croûte continentale : le granite



Roche grenue



Lame mince de granite observée en lumière polarisée analysée

• Principaux éléments chimiques (en %) :

O	Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K
47,4	32,6	7,6	2,2	0,5	1,4	2,4	4,1

Densité = 2,7

Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre

I. Des observations directes de roches permettent de connaître la composition des couches les plus superficielles.

A. Méthodes d'étude des roches prélevées

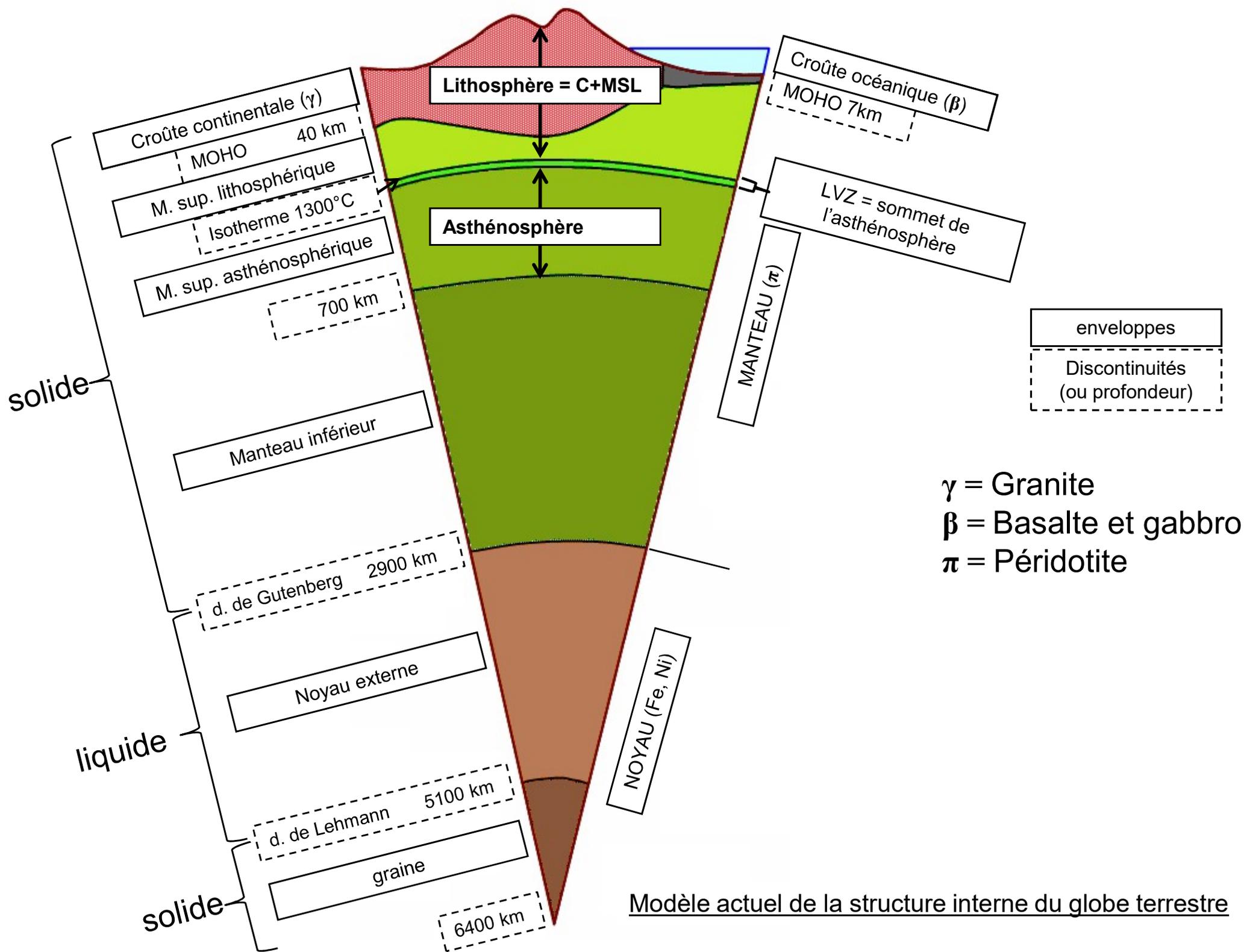
1. Observation macroscopique des roches.

2. Observation microscopique des roches.

B. Composition de la croûte océanique

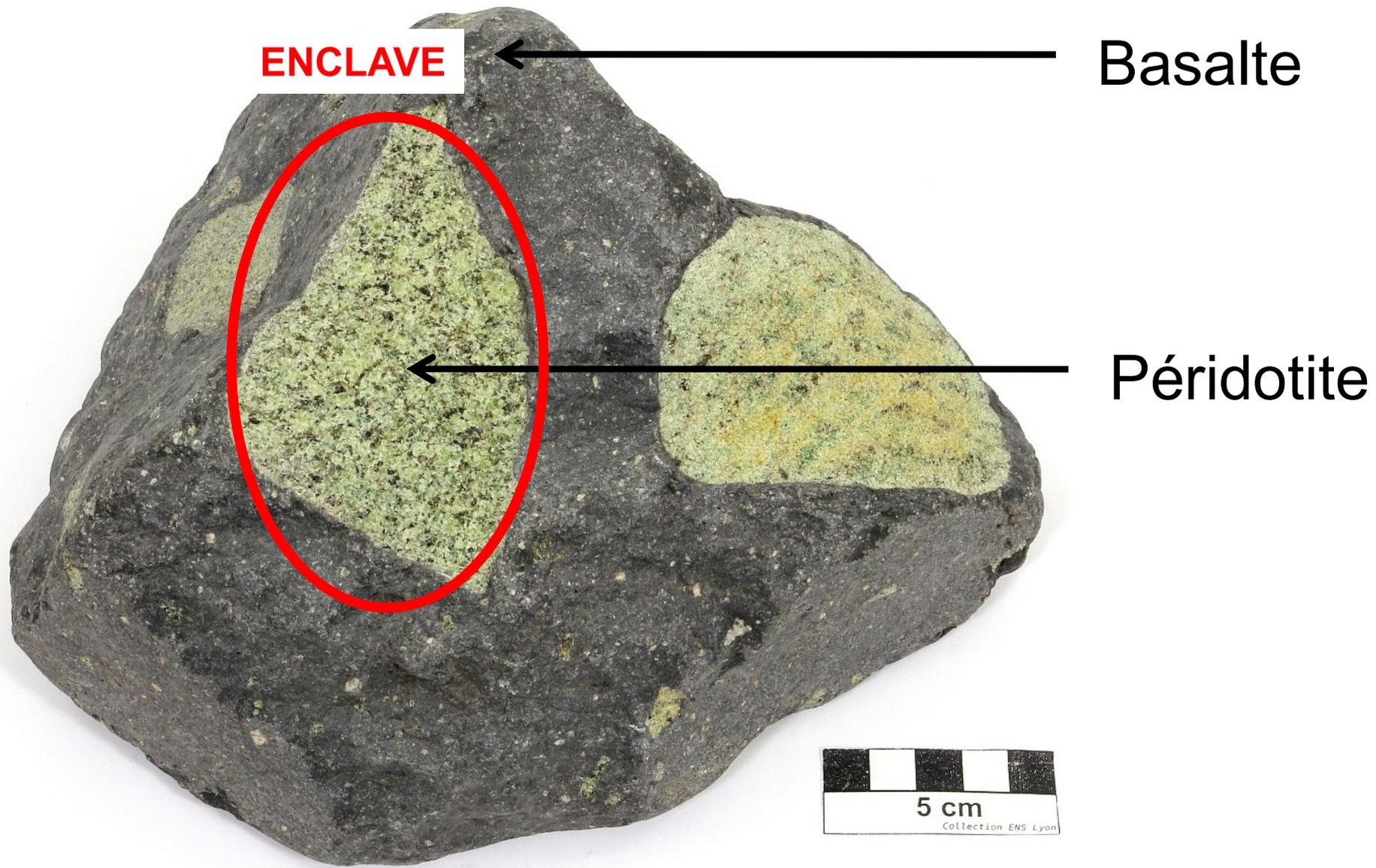
C. Composition de la croûte continentale

D. Composition du manteau

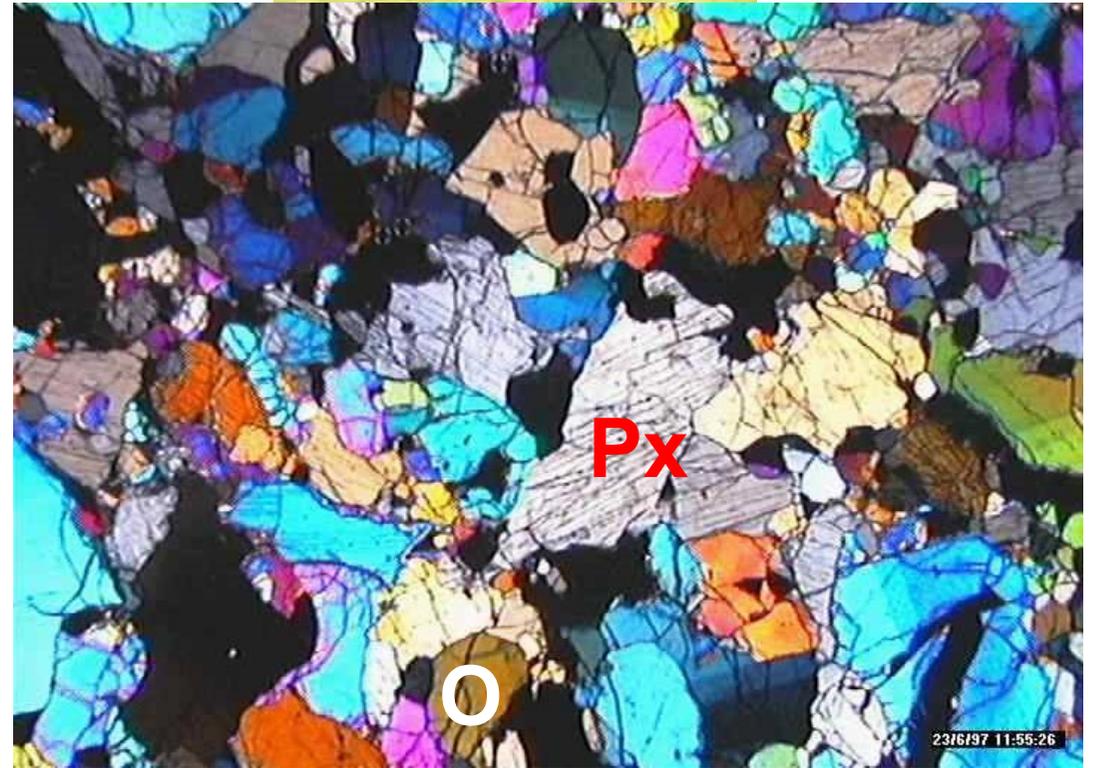


Modèle actuel de la structure interne du globe terrestre

Enclaves : des échantillons de manteau



Roches caractéristiques du soubassement : la péridotite



O	Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K
42,7	20,3	2,1	9,4	20,5	2,4	0,4	0,2

Densité = 3,2

Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre

I. Des observations directes de roches permettent de connaître la composition des couches les plus superficielles.

A. Méthodes d'étude des roches prélevées

1. Observation macroscopique des roches.

2. Observation microscopique des roches.

B. Composition de la croûte océanique

C. Composition de la croûte continentale

D. Composition du manteau

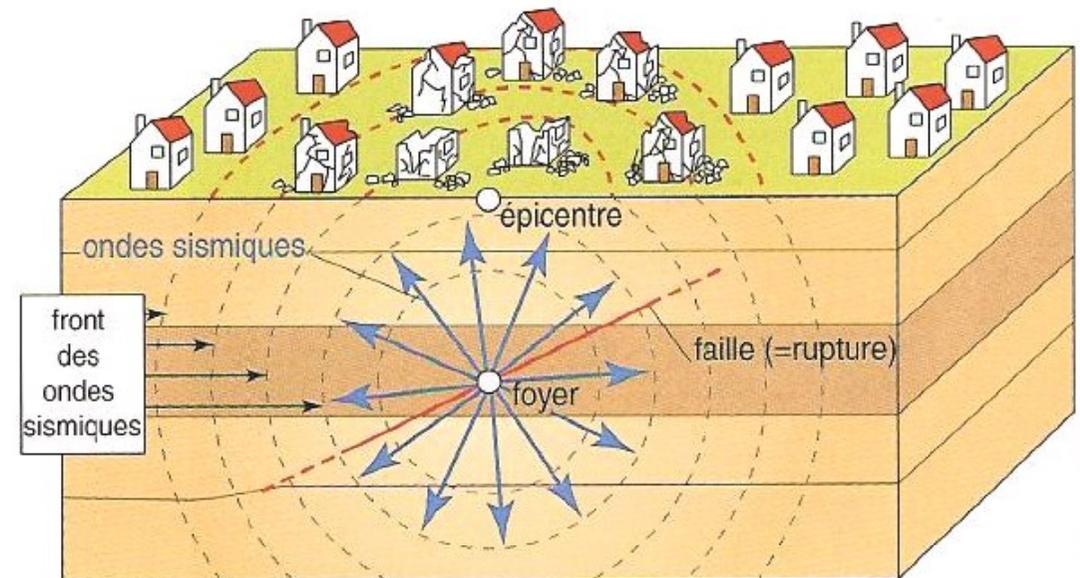
II. Des informations déduites de l'étude des ondes sismiques permettent de comprendre la structure interne du globe.

A. Méthode d'étude.

Naissance des ondes sismiques

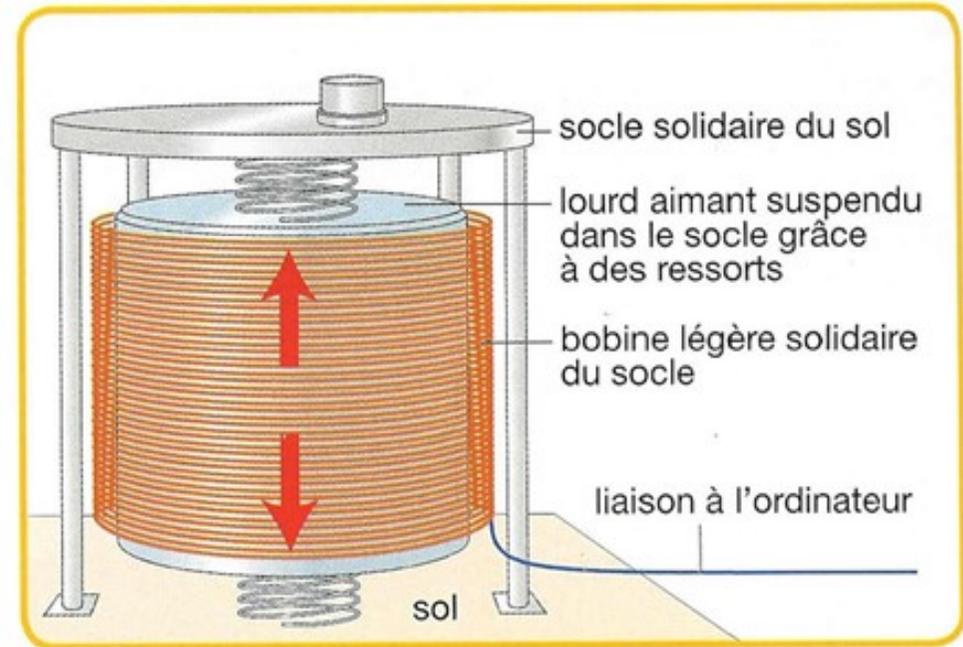
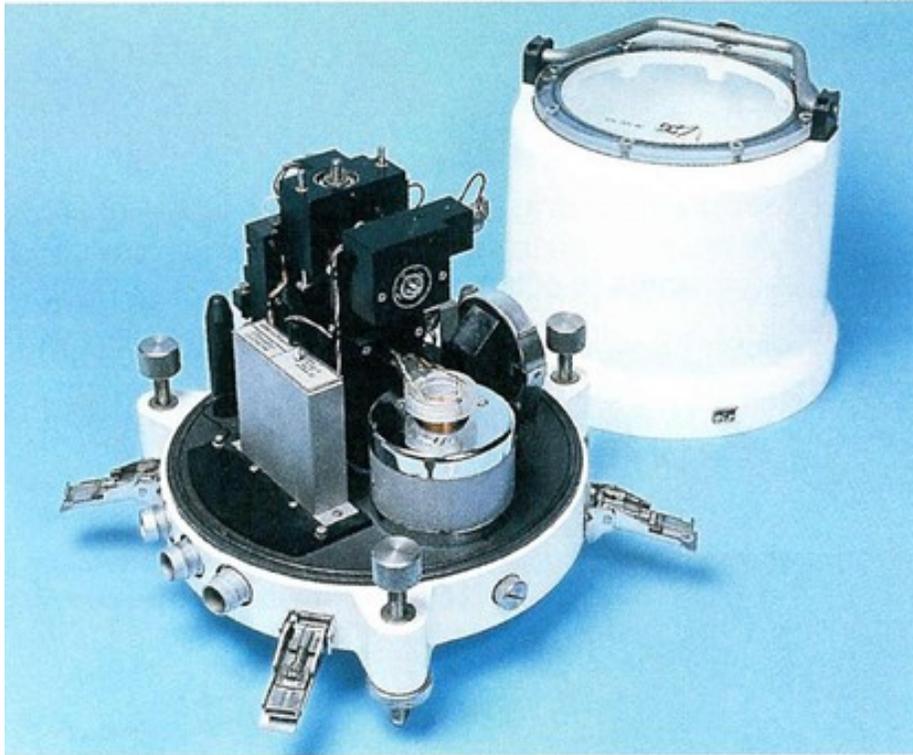


Effets en surface d'un séisme destructeur



Les foyers des séismes sont situés entre 1 et 700 km de profondeur, le plus souvent à moins de 30 km. Rappel : rayon de la Terre = 6 400 km.

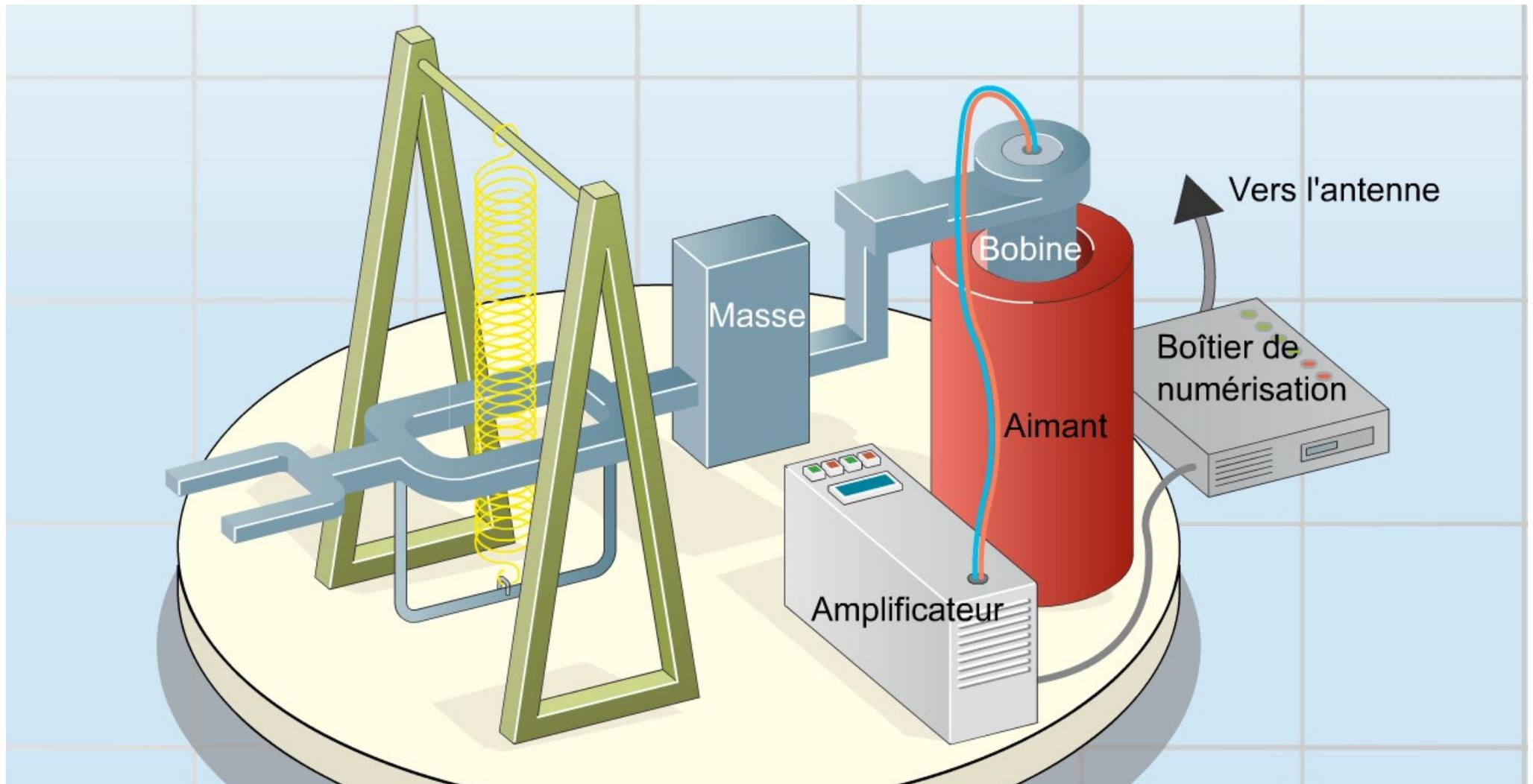
Principe du sismomètre ([animation en ligne](#))



Principe d'un sismomètre.

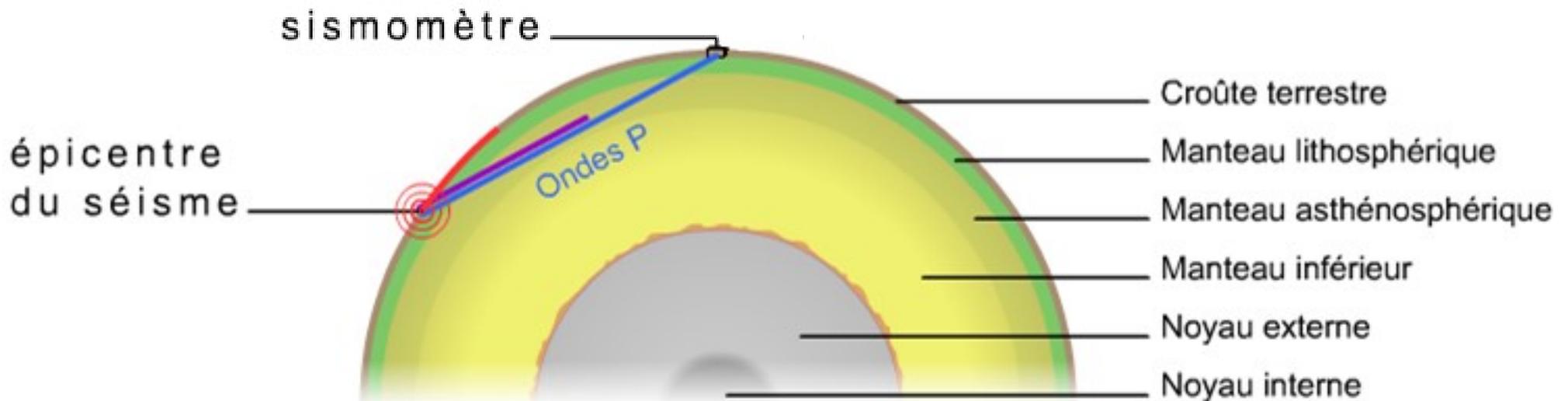
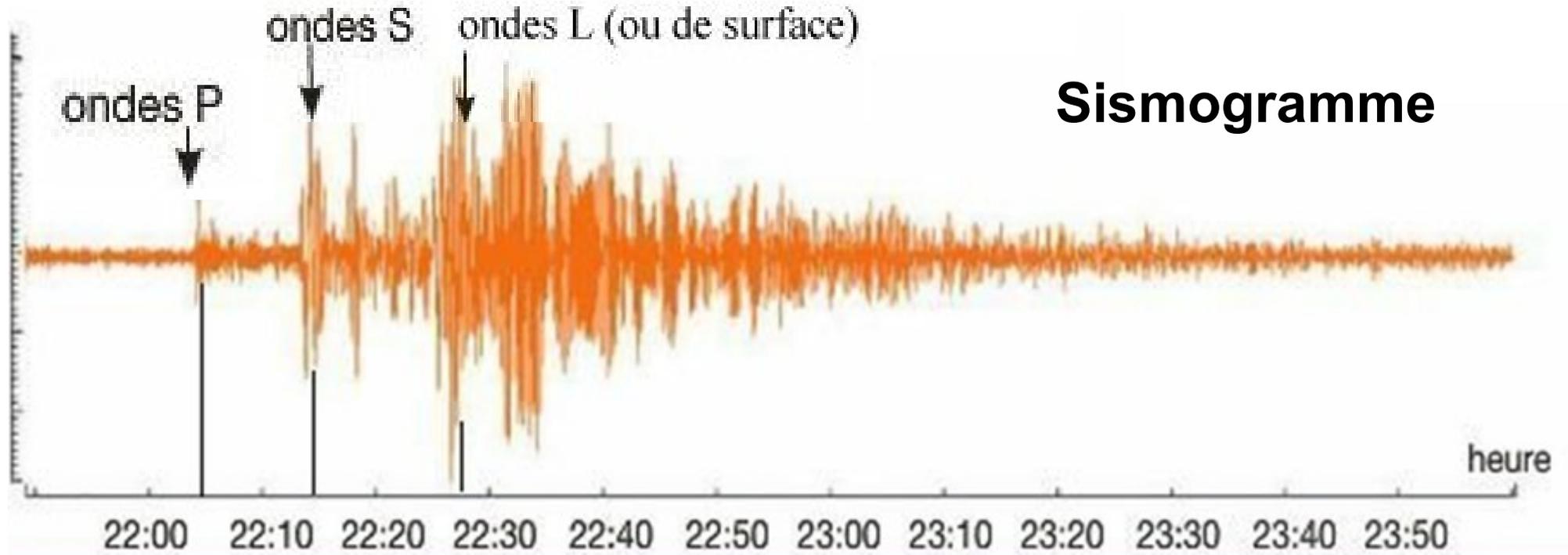
Quand des vibrations arrivent au sismomètre, la bobine légère, solidaire du socle, suit ces vibrations. L'aimant, plus lourd, bouge plus lentement que la bobine. Les mouvements relatifs de la bobine et de l'aimant génèrent de faibles courants électriques proportionnels aux vibrations. Ces signaux sont envoyés vers un ordinateur où ils sont traduits sous forme de graphique appelé sismogramme.

Principe du sismomètre

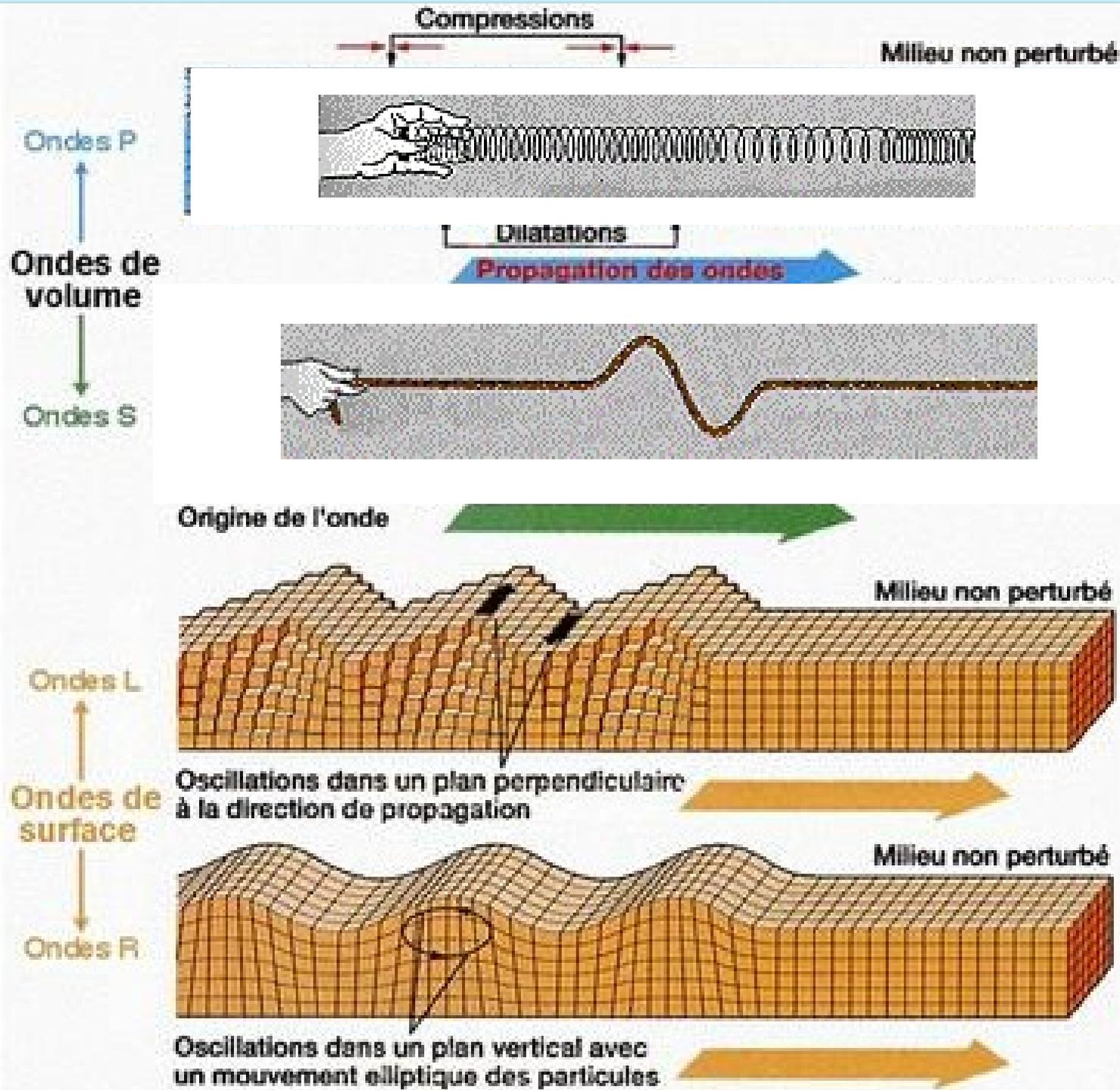


Une masse **assez lourde** est fixée sur un bras suspendu par un ressort au-dessus d'un bâti solidaire du sol. À l'autre extrémité du bras, une **bobine conductrice** est plongée dans un **aimant** qui repose sur le bâti.

Les différents types d'ondes sismiques



Les différents types d'ondes sismiques



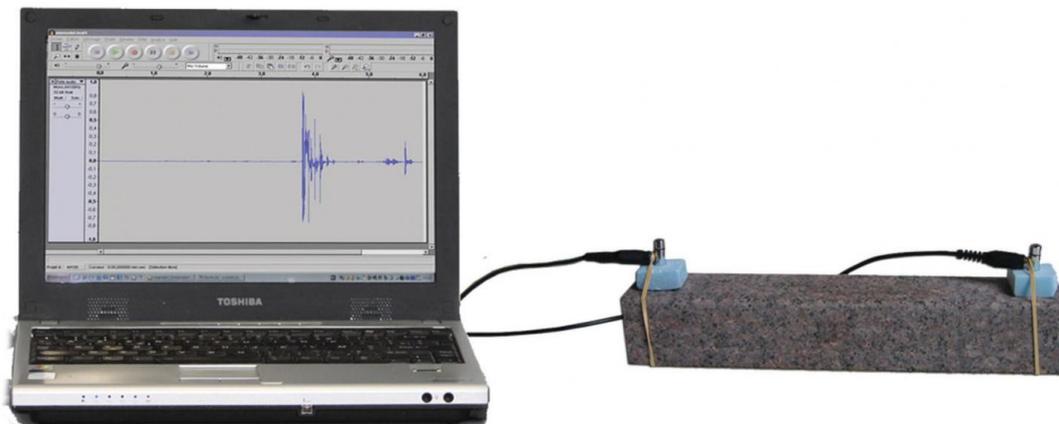
Seules utiles pour l'étude du globe (elles traversent le globe)

inutiles pour l'étude du globe

Mais destructrices !

Vitesse des ondes P et nature des roches

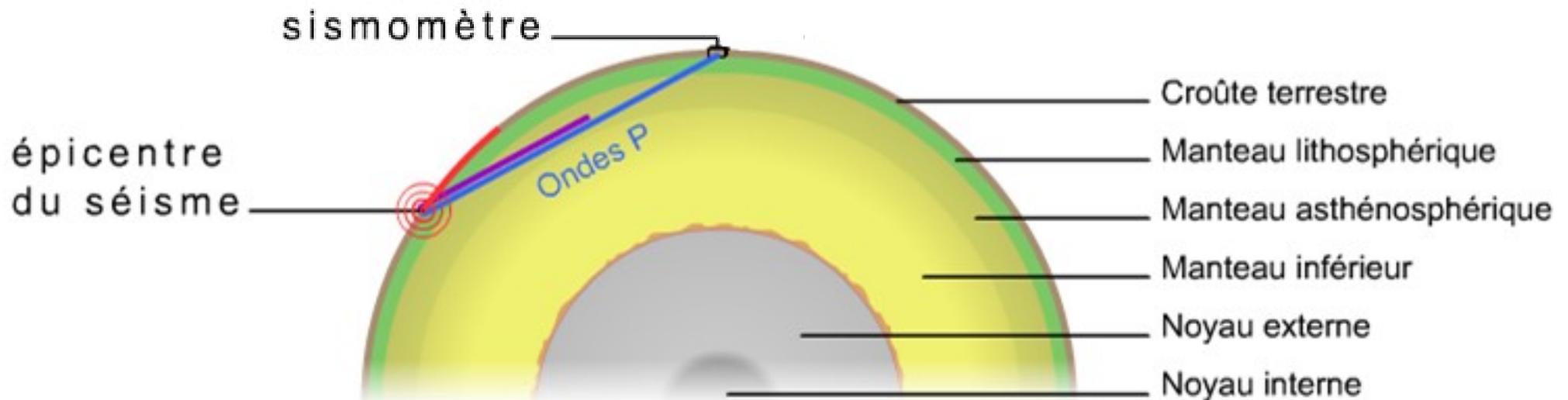
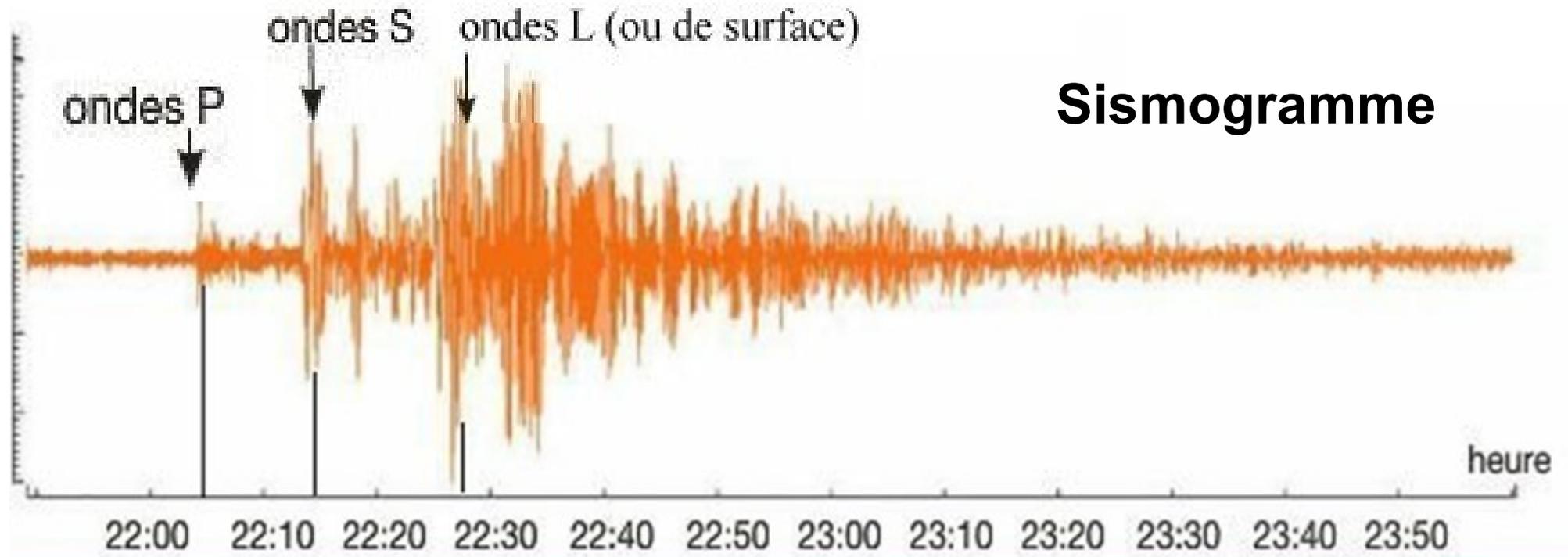
La vitesses des ondes dépend de la nature des roches :



Roches	Vitesse des ondes P (Km.s⁻¹)
granite	5,5 à 6,3
sédiments	2 à 5
basaltes	6,4 à 6,9
Gabbro	6,4 à 7,2
péridotites anhydres	7,9 à 12

Résultats d'études réalisées en laboratoire

La vitesse des ondes sismiques



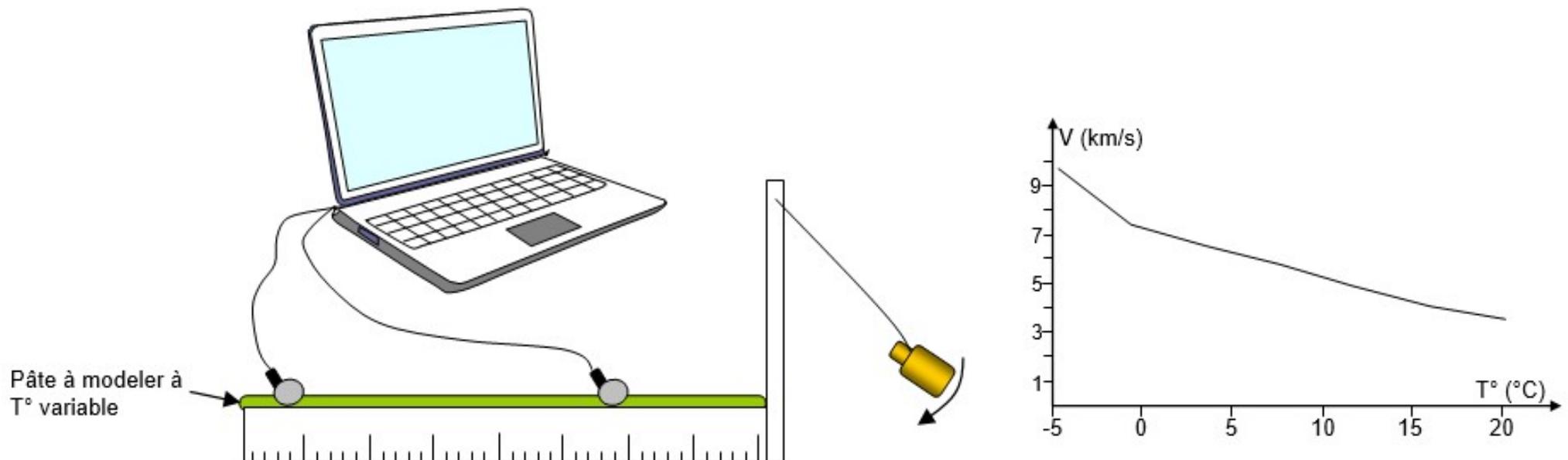
Vitesse des ondes P et propriétés du milieu

La vitesses des ondes dépend de la rigidité des roches :

La vitesse des ondes sismiques est plus importante dans les milieu rigides et plus faible dans les milieux ductiles

La vitesses des ondes dépend de température :

La vitesse des ondes sismiques diminue quand la température augmente



La loi de Snell-Descartes

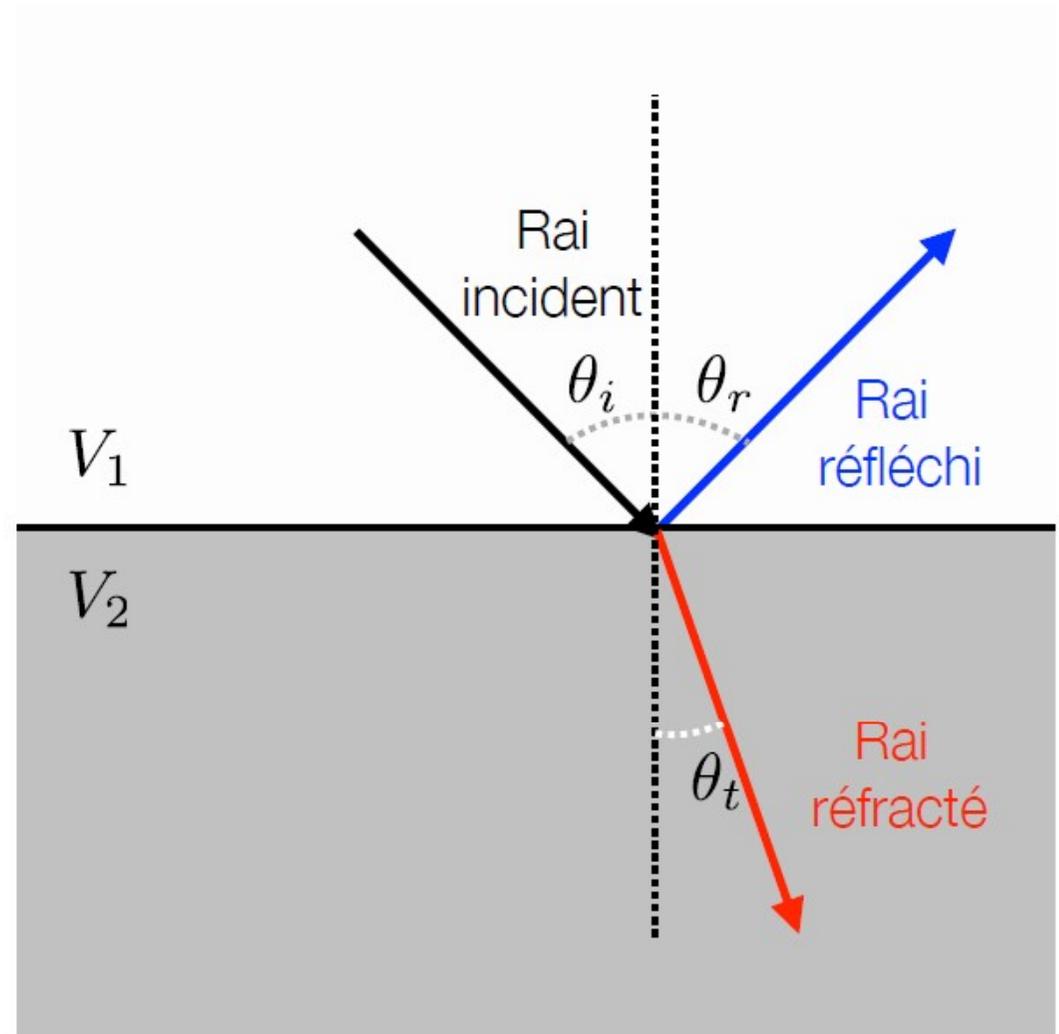
Il est possible de prédire le parcours des rais sismiques grâce à la loi de Snell-Descartes:

1. Loi de la réflexion:

$$\theta_t = \theta_r$$

2. Loi de la réfraction:

$$\frac{\sin \theta_i}{V_1} = \frac{\sin \theta_t}{V_2}$$



Connaître l'inaccessible



L'étude des sismogrammes permet de déduire le trajet et la vitesse des ondes sismiques à l'intérieur du globe

Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre

I. Des observations directes de roches permettent de connaître la composition des croûtes

A. Méthodes d'étude des roches prélevées

1. Observation macroscopique des roches.

2. Observation microscopique des roches.

B. Composition de la croûte océanique

C. Composition de la croûte continentale

D. Composition du manteau

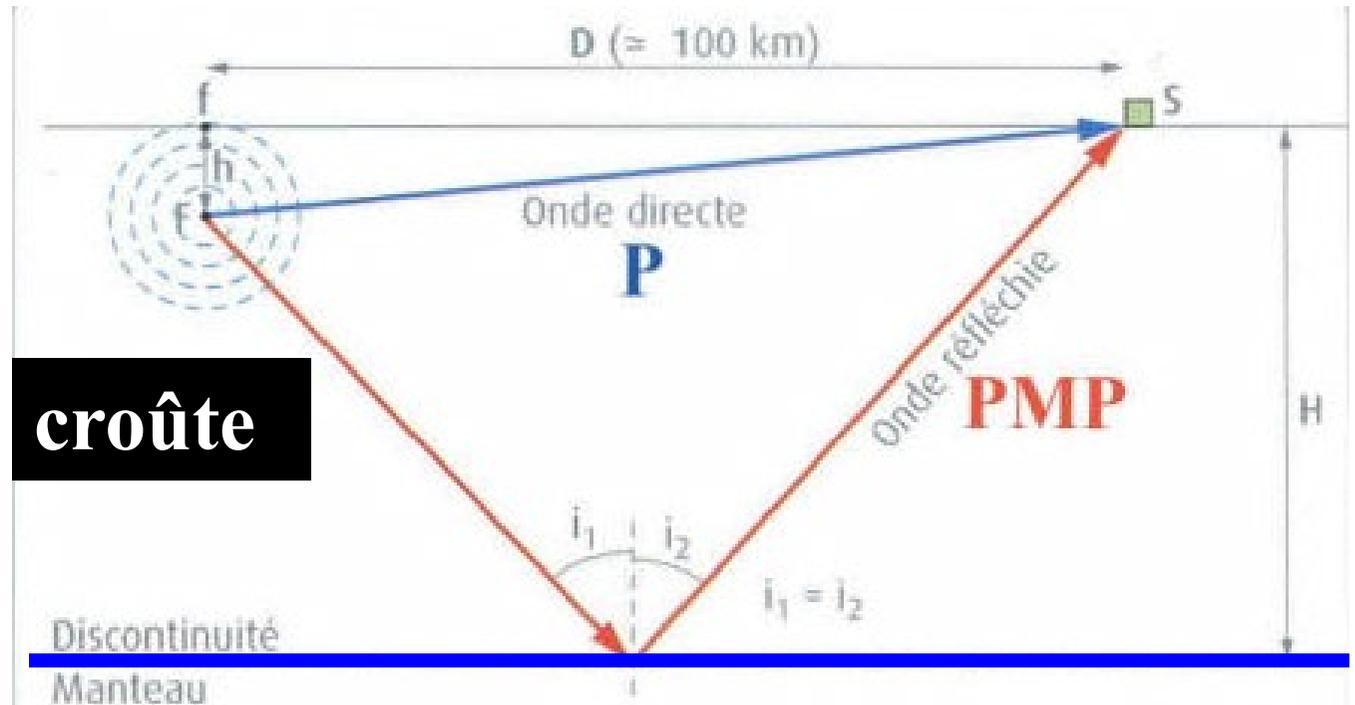
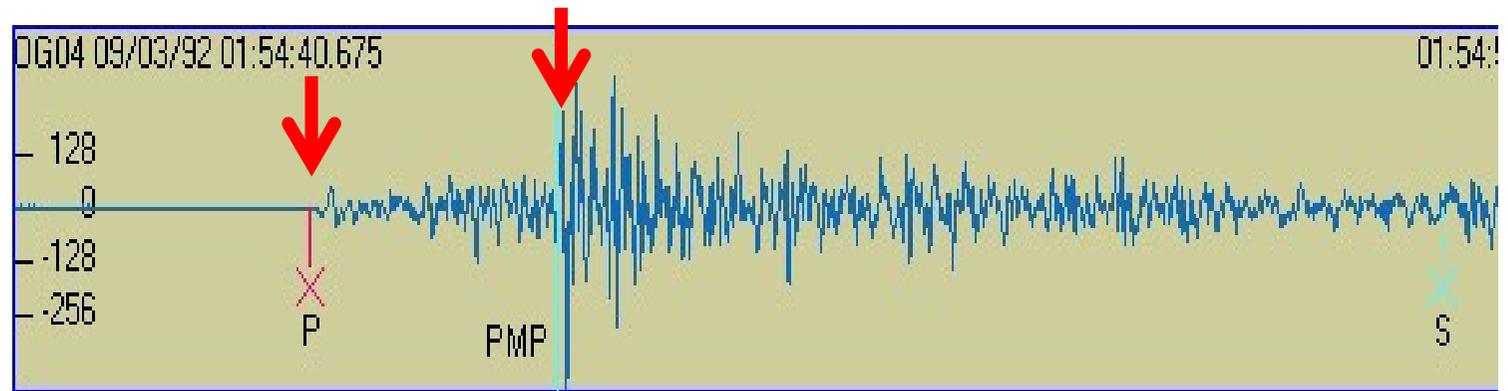
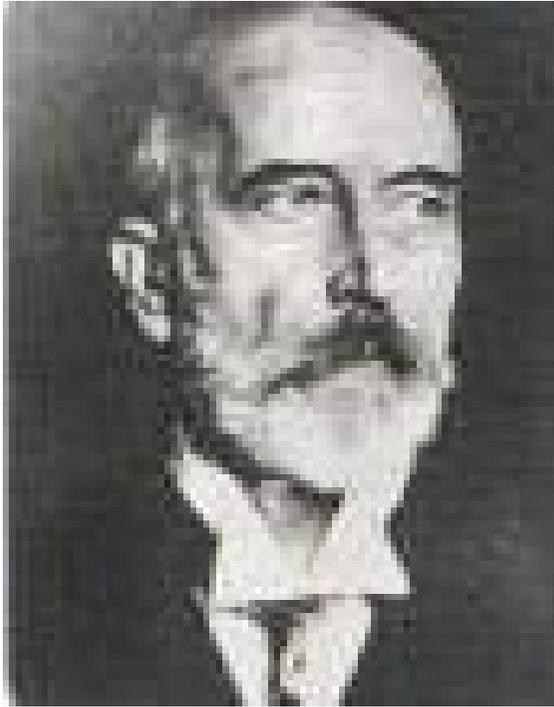
II. Des informations déduites de l'étude des ondes sismiques permettent de comprendre la structure interne du globe.

A. Méthode d'étude.

B. Ondes sismiques et mise en évidence de surfaces de discontinuité

1. La discontinuité de Mohorovicic

Les observations de Mohorovičić (1909)



Moho

croûte

manteau

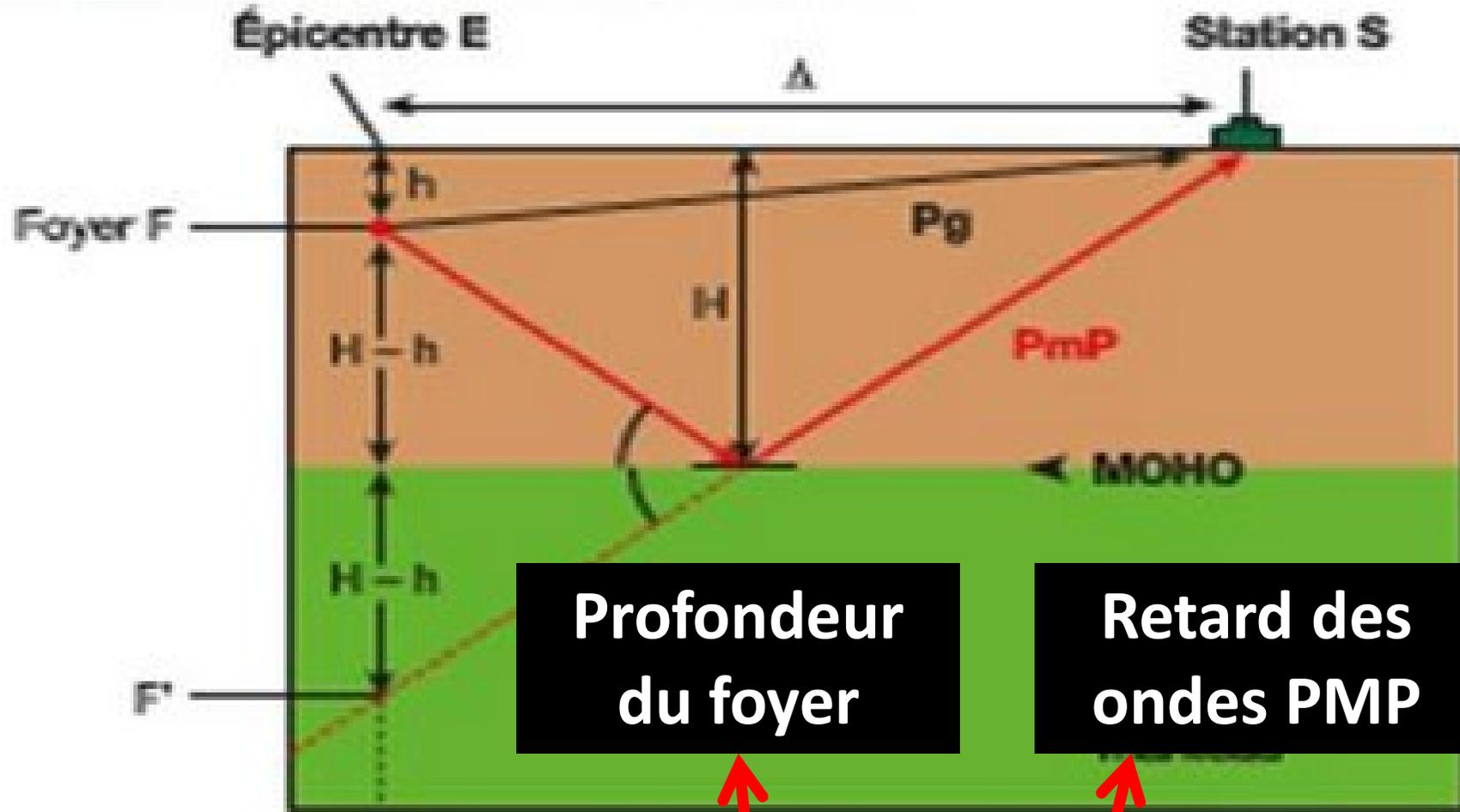
D : distance épicentre-sismographe

S : sismographe

F : épicentre
h : profondeur du séisme

H : profondeur de la discontinuité

Calcul de la profondeur du Moho

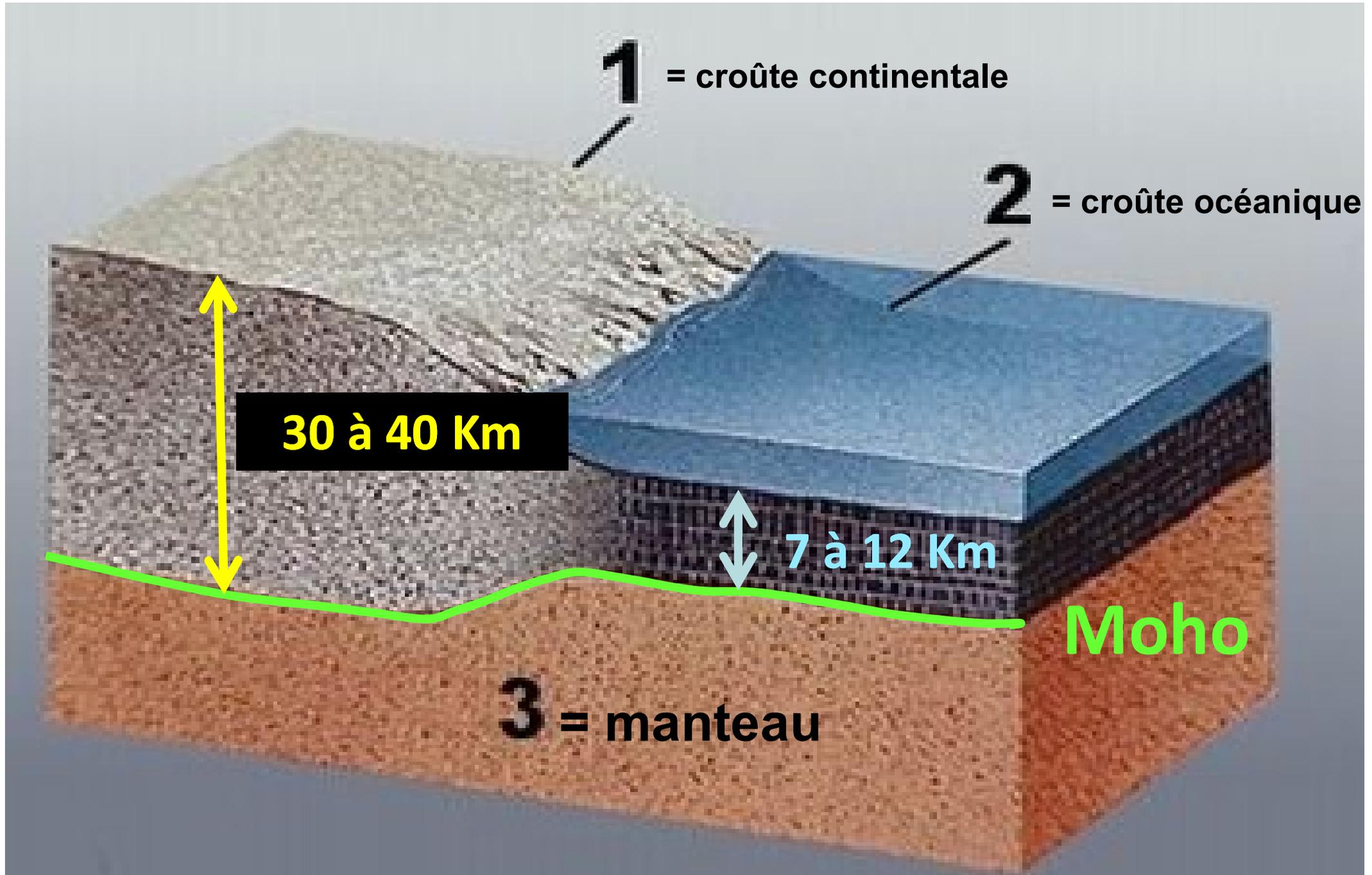


$$H = \frac{1}{2} \left[h + \sqrt{\left(V \cdot \delta t + \sqrt{h^2 + \Delta^2} \right)^2 - \Delta^2} \right]$$

Vitesse des ondes P

Distance à l'épicentre

Profondeur du Moho



Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre

I. Des observations directes de roches permettent de connaître la composition des croûtes

A. Méthodes d'étude des roches prélevées

1. Observation macroscopique des roches.

2. Observation microscopique des roches.

B. Composition de la croûte océanique

C. Composition de la croûte continentale

D. Composition du manteau

II. Des informations déduites de l'étude des ondes sismiques permettent de comprendre la structure interne du globe.

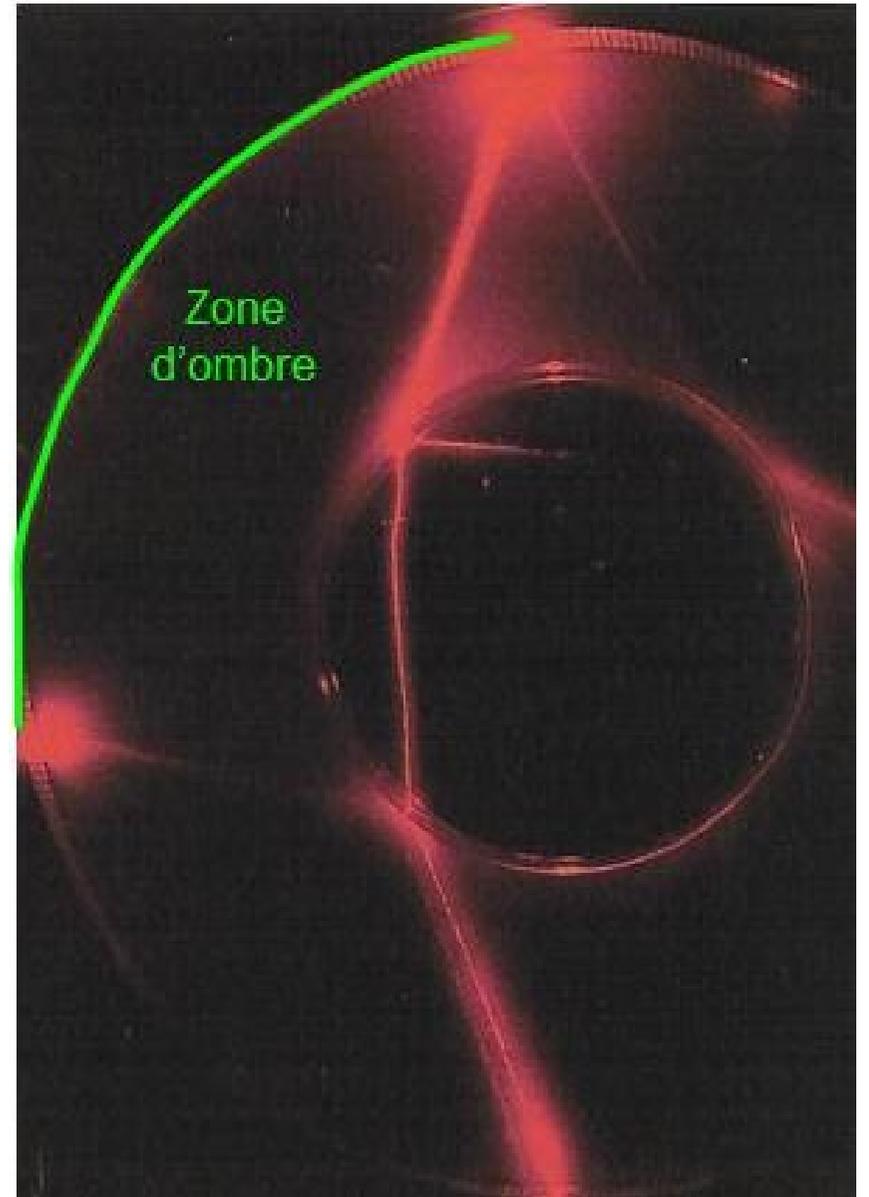
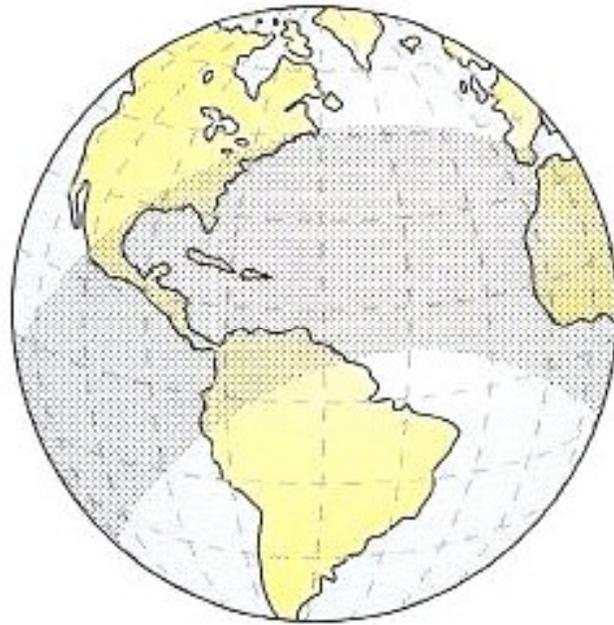
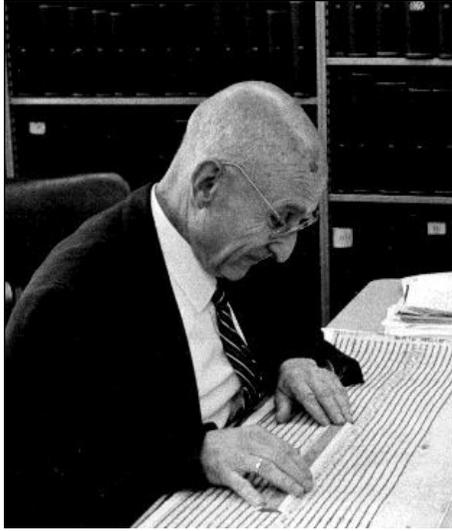
A. Méthode d'étude.

B. Ondes sismiques et mise en évidence de surfaces de discontinuité

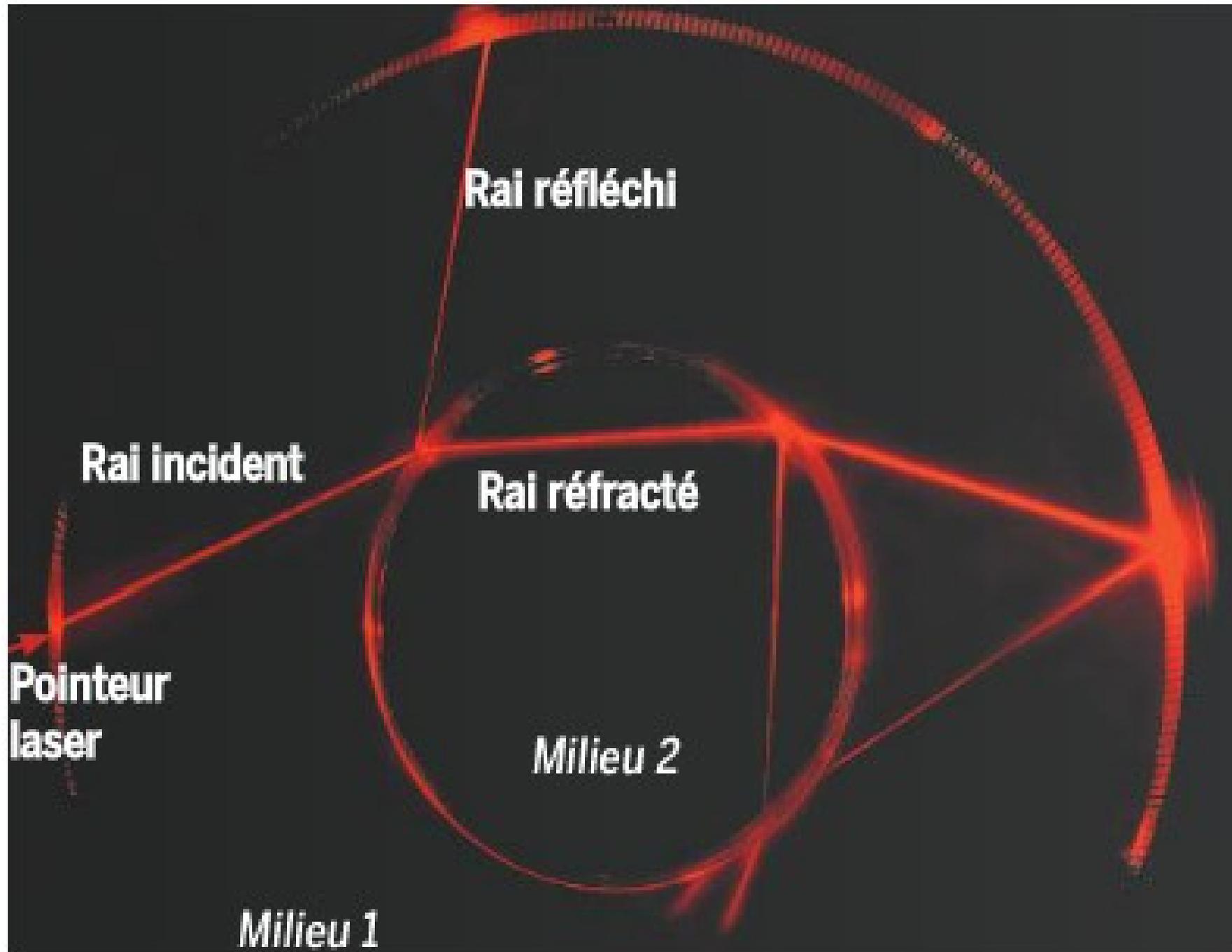
1. La discontinuité de Mohorovicic

2. La discontinuité de Gutenberg

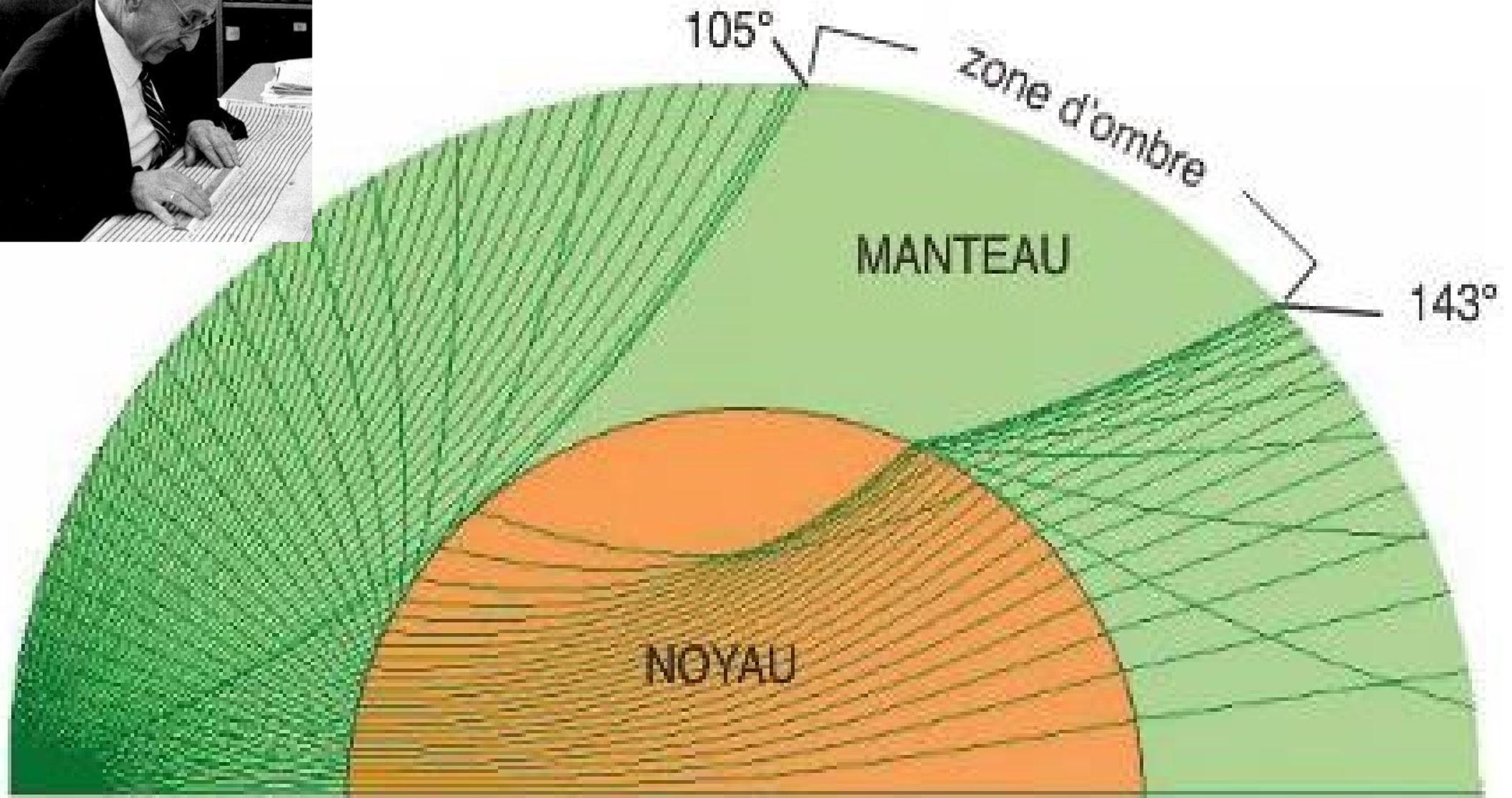
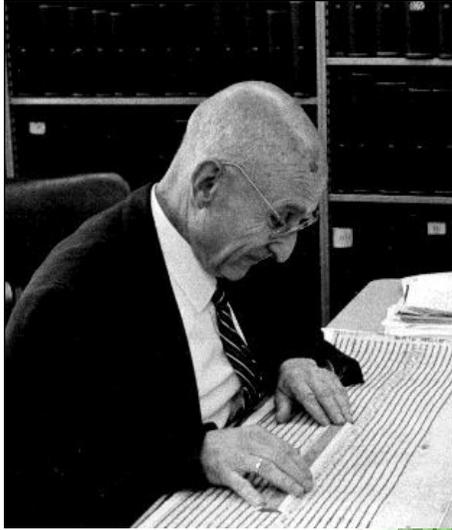
La zone d'ombre de Beno Gutenberg



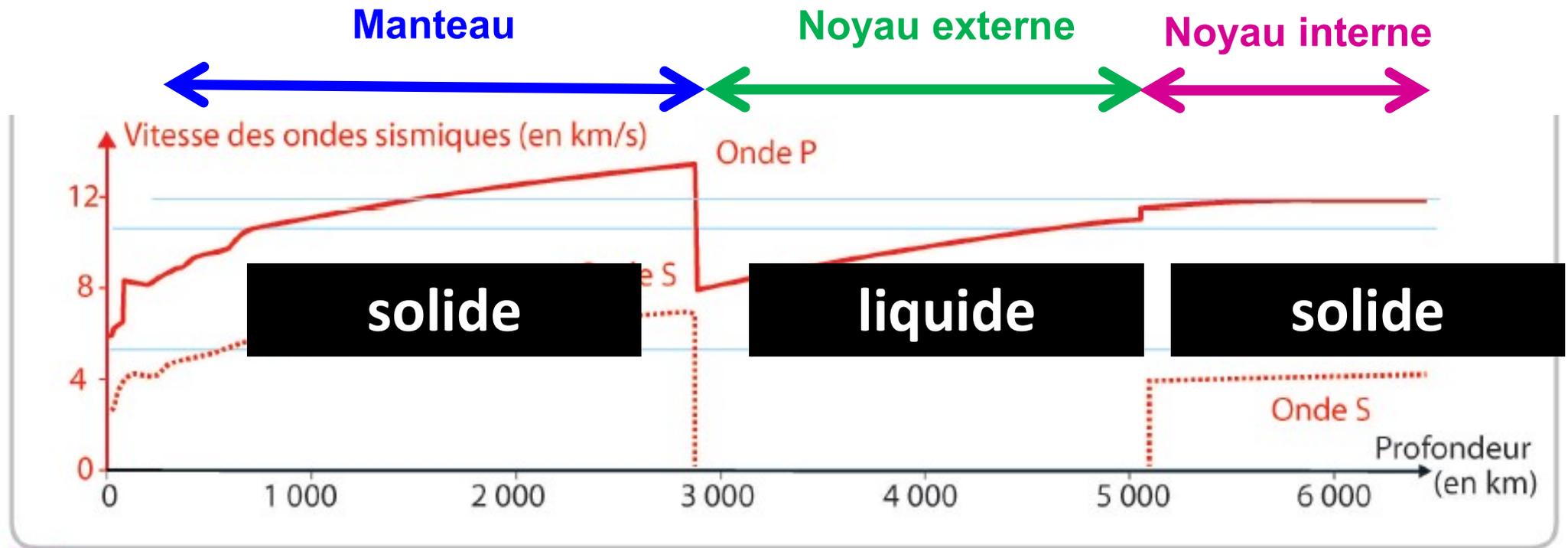
Modélisation pour comprendre le comportement des ondes sismiques à l'intérieur du globe.



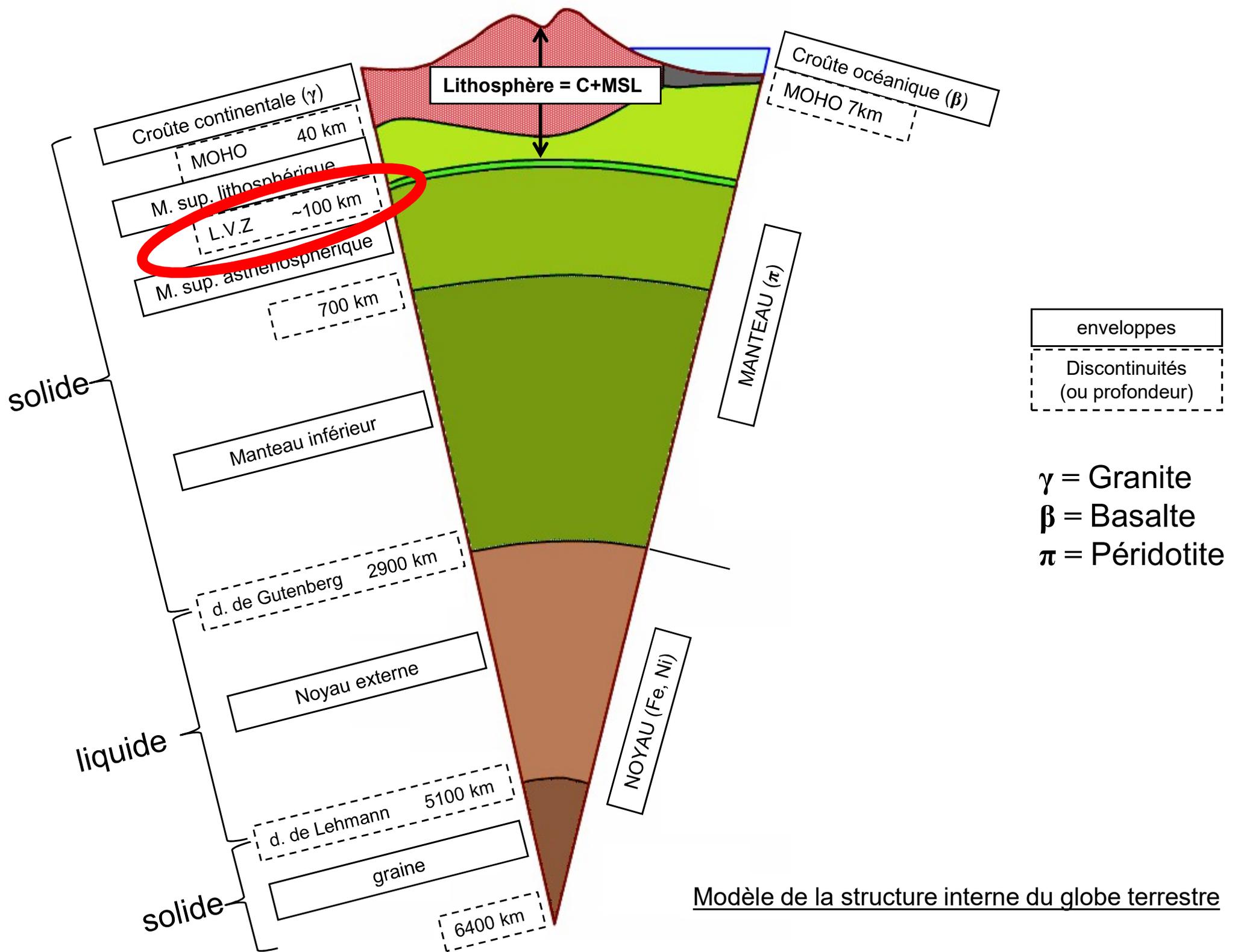
La zone d'ombre de Beno Gutenberg



Le modèle PREM



e **Une discontinuité au sein du noyau.** En 1936, Inge Lehmann repère sur des sismogrammes, des ondes P très atténuées qui, selon elle, ont traversé le noyau en subissant plusieurs réfractions. En s'enfonçant dans le noyau, à 5 150 km de profondeur, une onde P peut donner naissance à une onde S par réfraction, et inversement lorsqu'elle remonte vers la surface.



Modèle de la structure interne du globe terrestre

Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre

I. Des observations directes de roches permettent de connaître la composition des croûtes

II. Des informations déduites de l'étude des ondes sismiques permettent de comprendre la structure interne du globe.

A. Méthode d'étude.

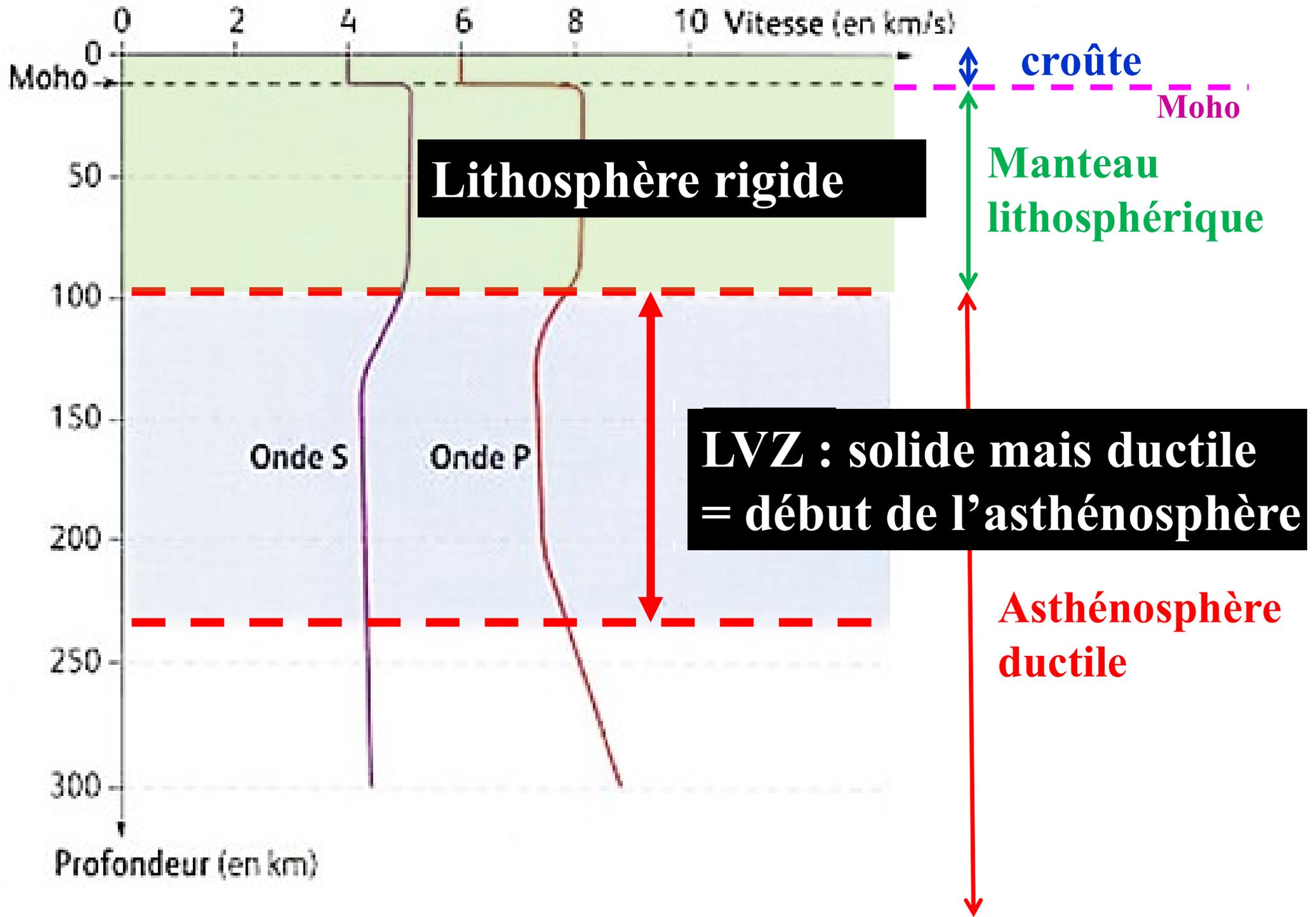
B. Ondes sismiques et mise en évidence de surfaces de discontinuité

1. La discontinuité de Mohorovicic

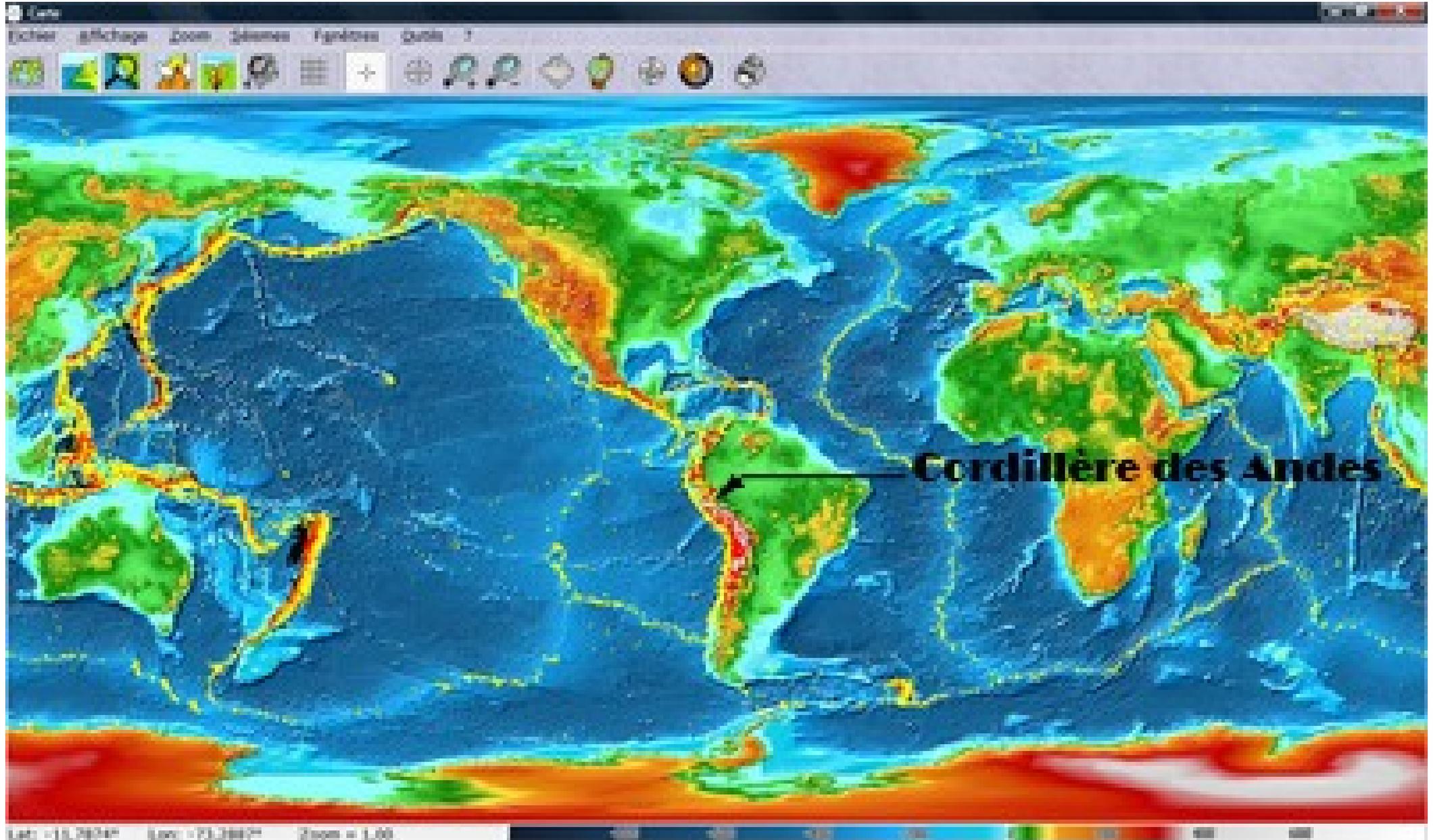
2. La discontinuité de Gutenberg

C. Ondes sismiques et distinction entre la lithosphère et l'asthénosphère

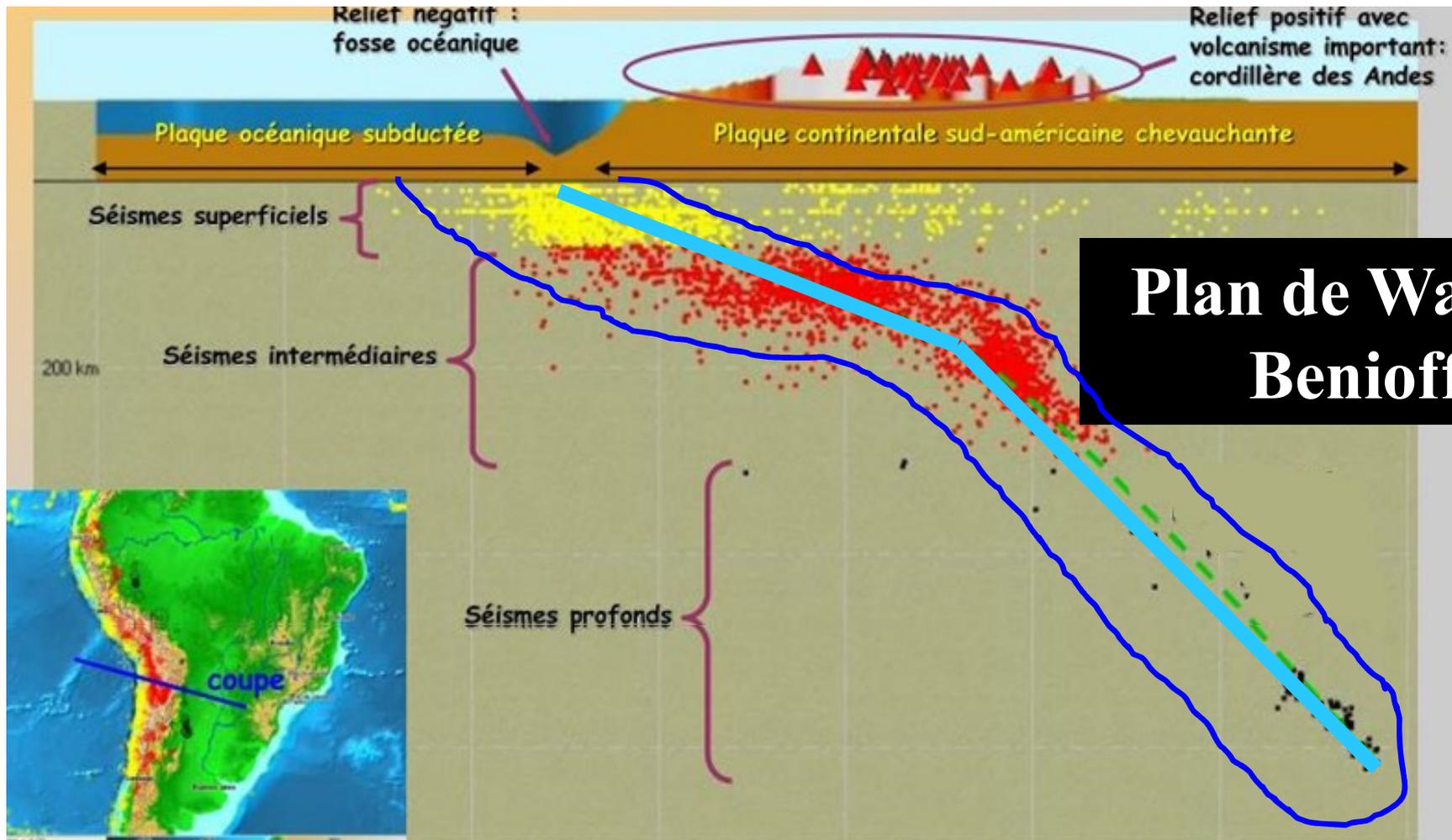
Distinction lithosphère rigide/asthénosphère ductile



Distinction lithosphère rigide/asthénosphère ductile au niveau des fosses océaniques

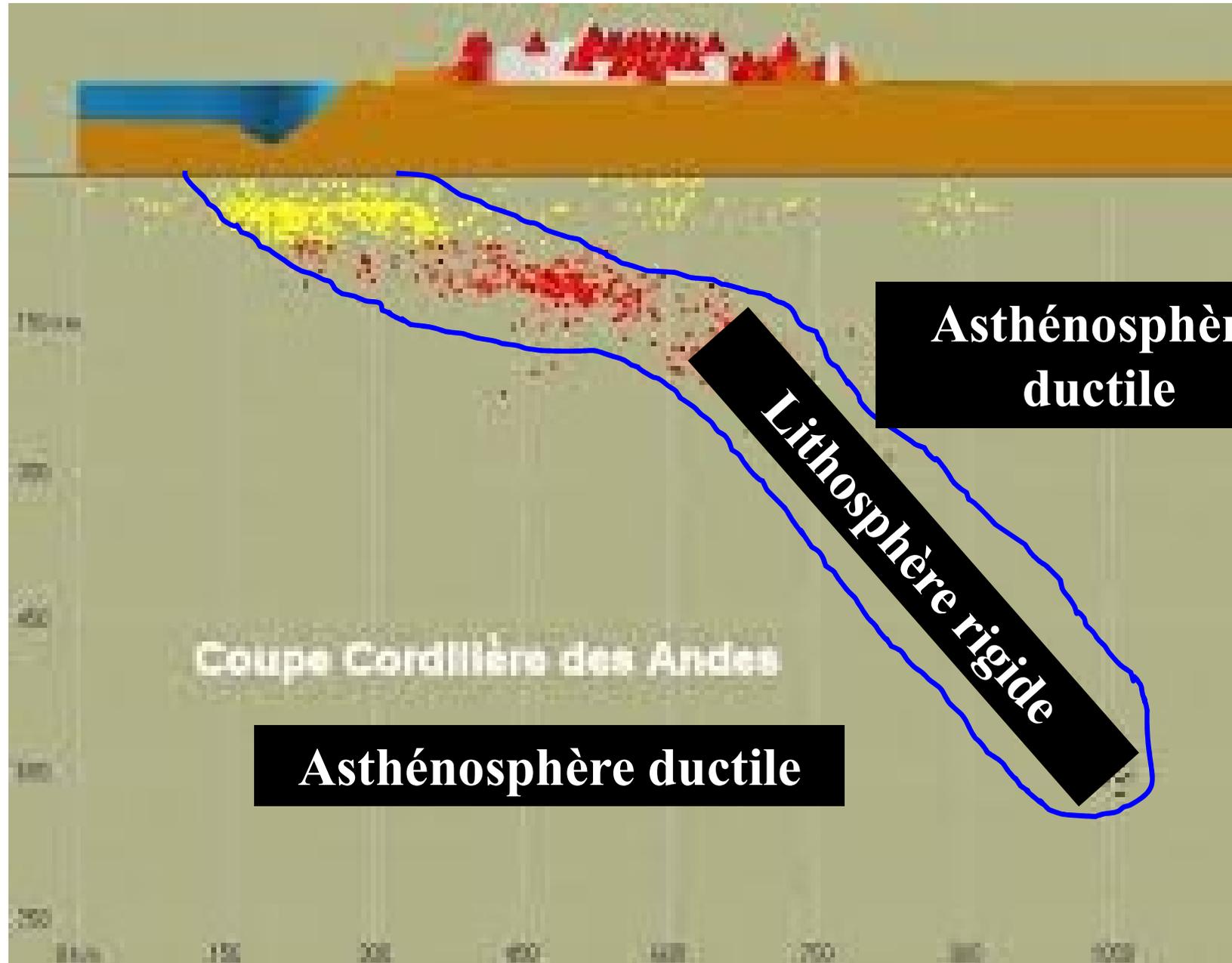


Distinction lithosphère rigide/asthénosphère ductile au niveau des fosses océaniques

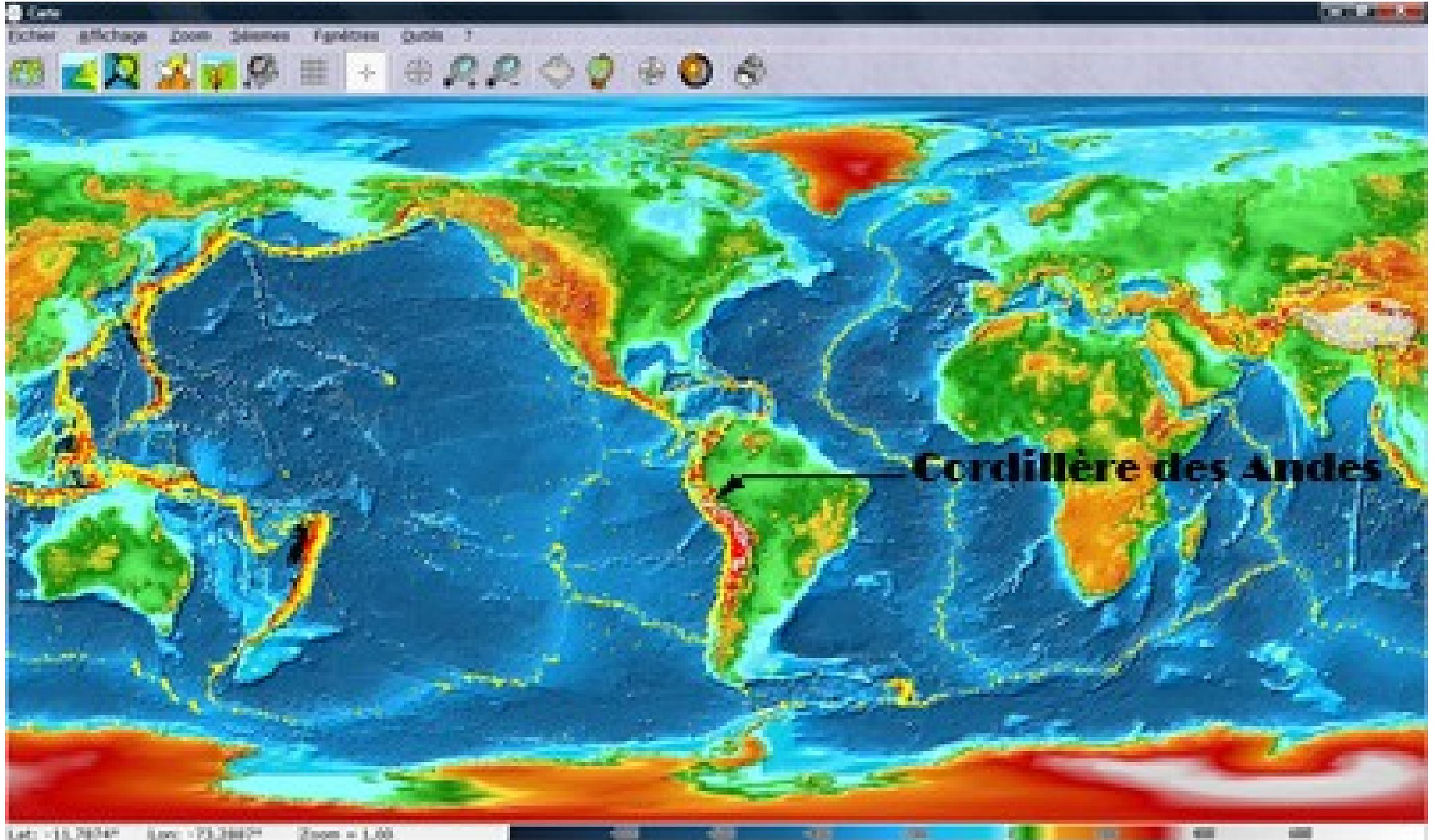


Coupe d'après SISMOLOG

Distinction lithosphère rigide/asthénosphère ductile au niveau des fosses océaniques



Distinction lithosphère rigide/asthénosphère ductile au niveau des fosses océaniques



Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre

I. Des observations directes de roches permettent de connaître la composition des croûtes

II. Des informations déduites de l'étude des ondes sismiques permettent de comprendre la structure interne du globe.

A. Méthode d'étude.

B. Ondes sismiques et mise en évidence de surfaces de discontinuité

1. La discontinuité de Mohorovicic

2. La discontinuité de Gutenberg

C. Ondes sismiques et distinction entre la lithosphère et l'asthénosphère

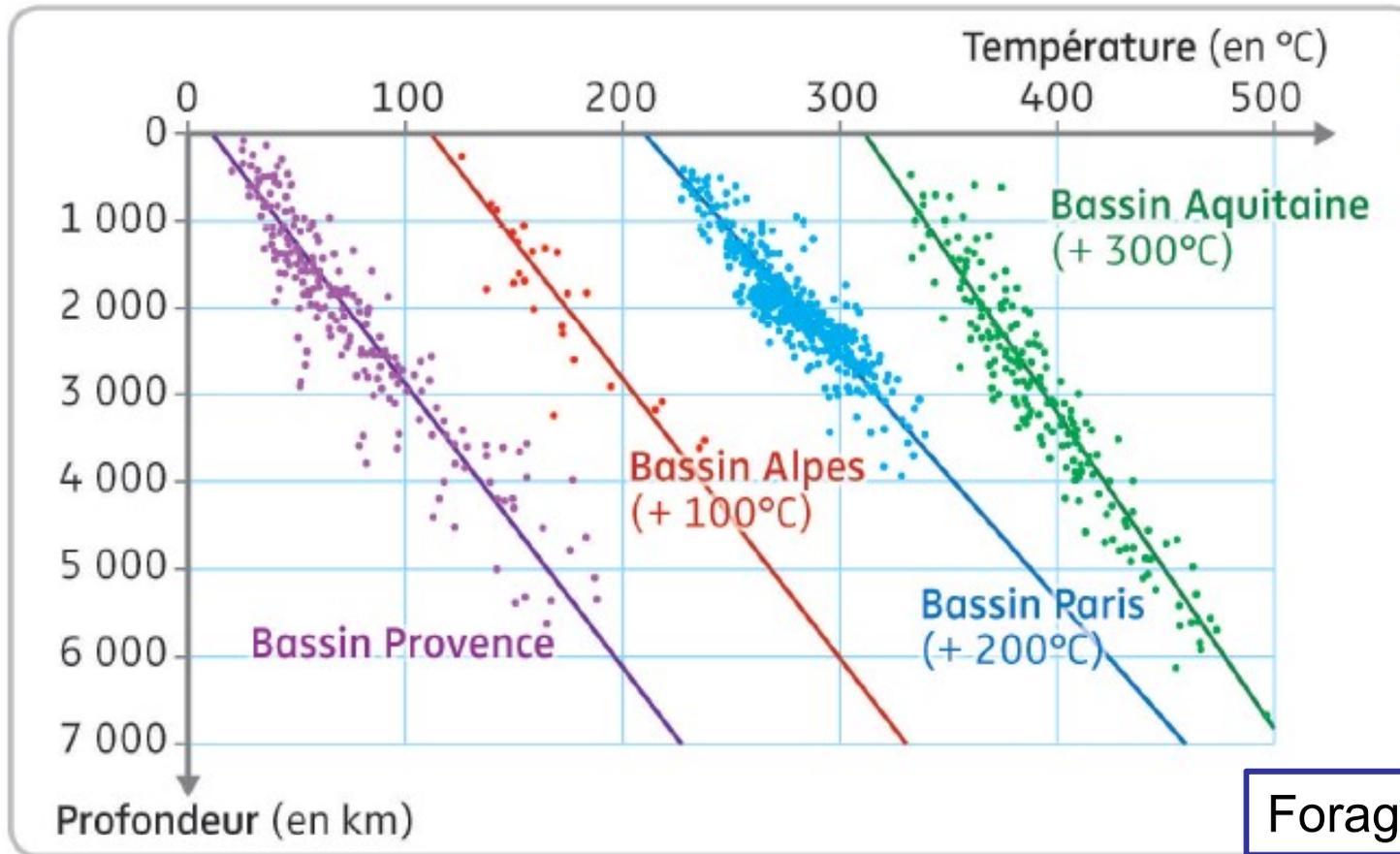
III. Des informations déduites des études thermiques.

A. Evolution des températures à l'intérieur du globe

Un constat... de la chaleur à l'intérieur du globe



Un constat... l'apport des forages



a

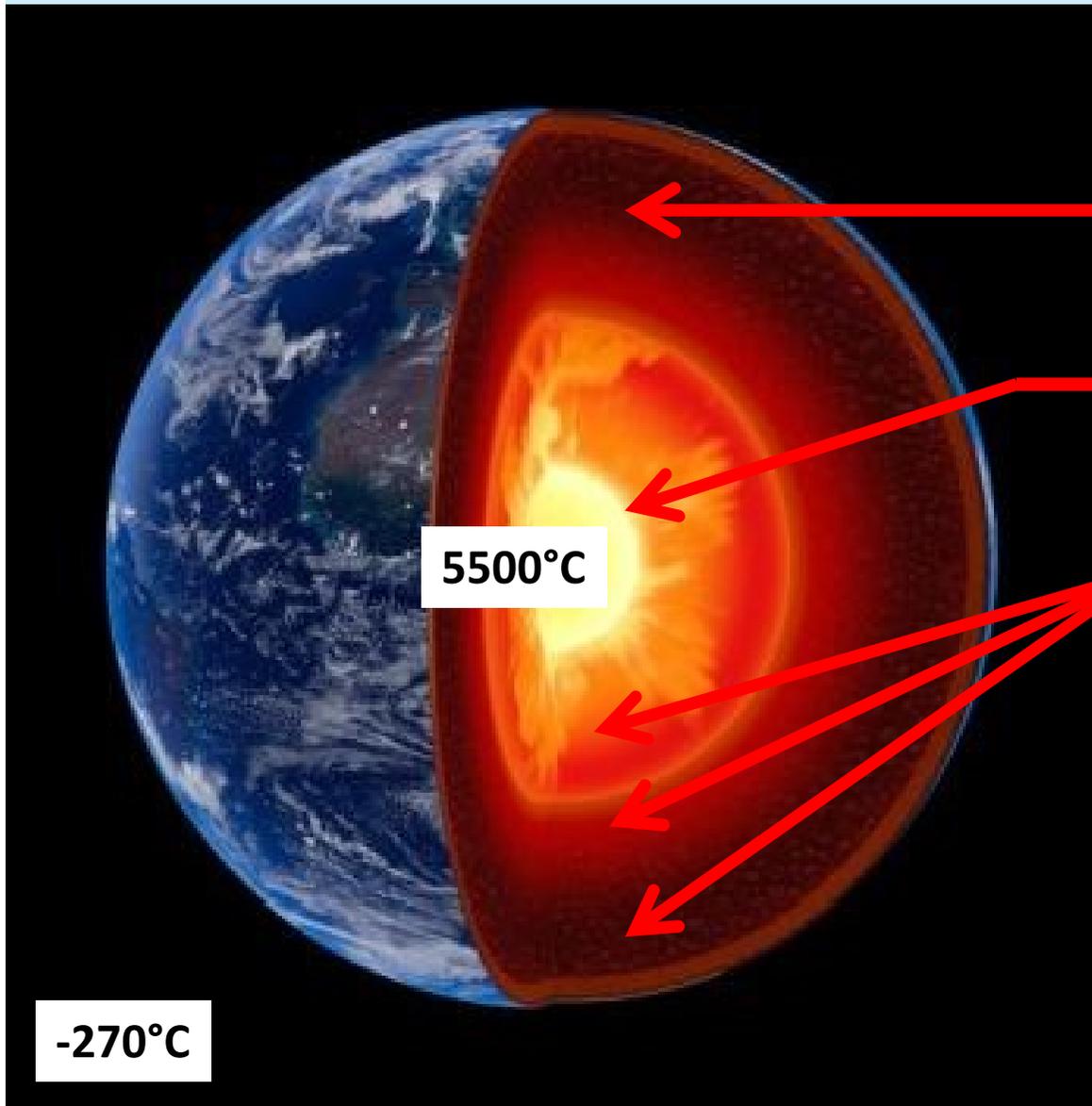


Forage le plus profond = 12 km !

=> Existence d'un gradient géothermique de 30 °C/km en moyenne

températures d'un bassin donnée sont décalées de 100 °C par rapport à celles du précédent bassin.

La chaleur de la Terre



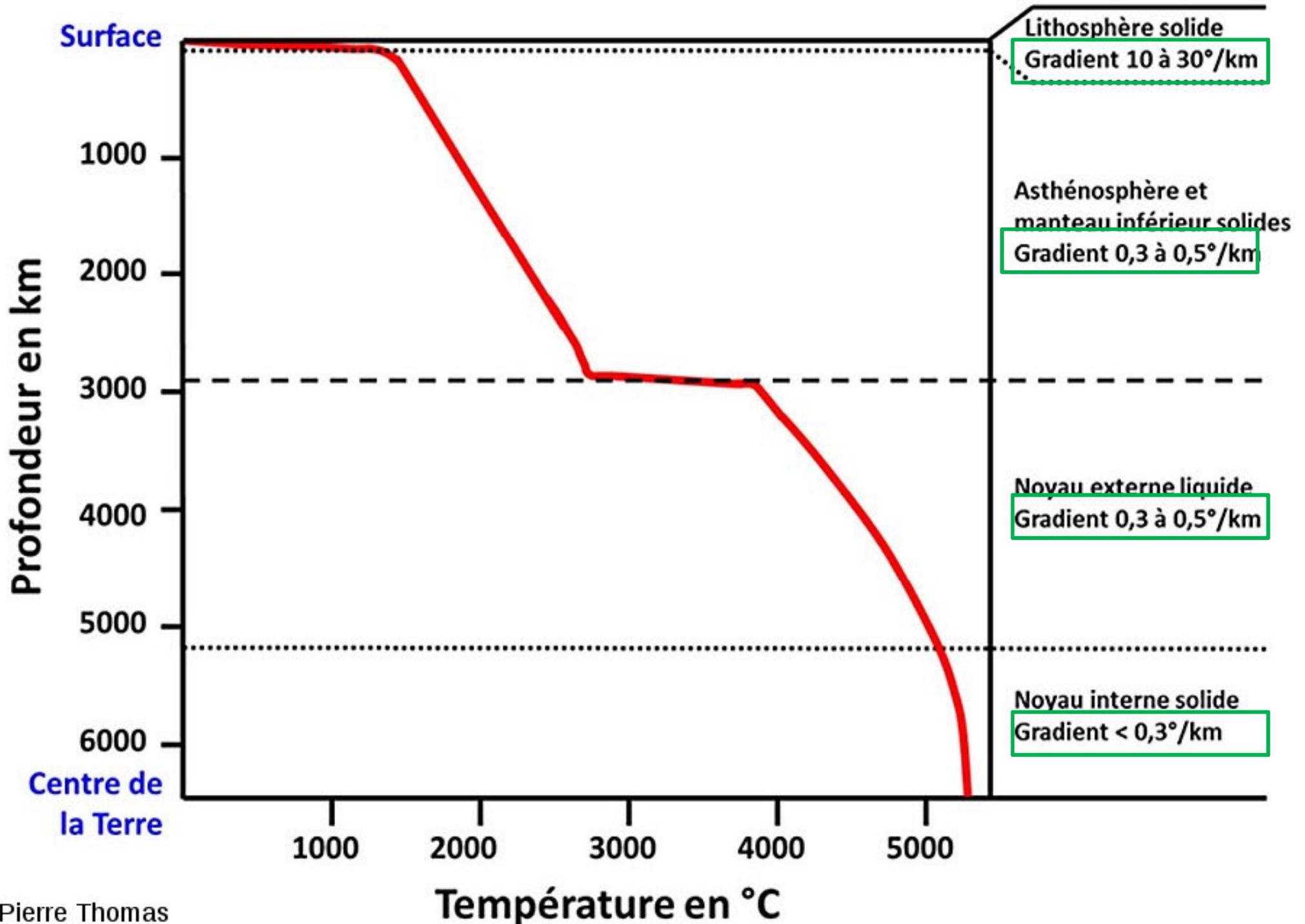
Désintégration d'éléments radioactifs du manteau

Chaleur latente de cristallisation de la graine

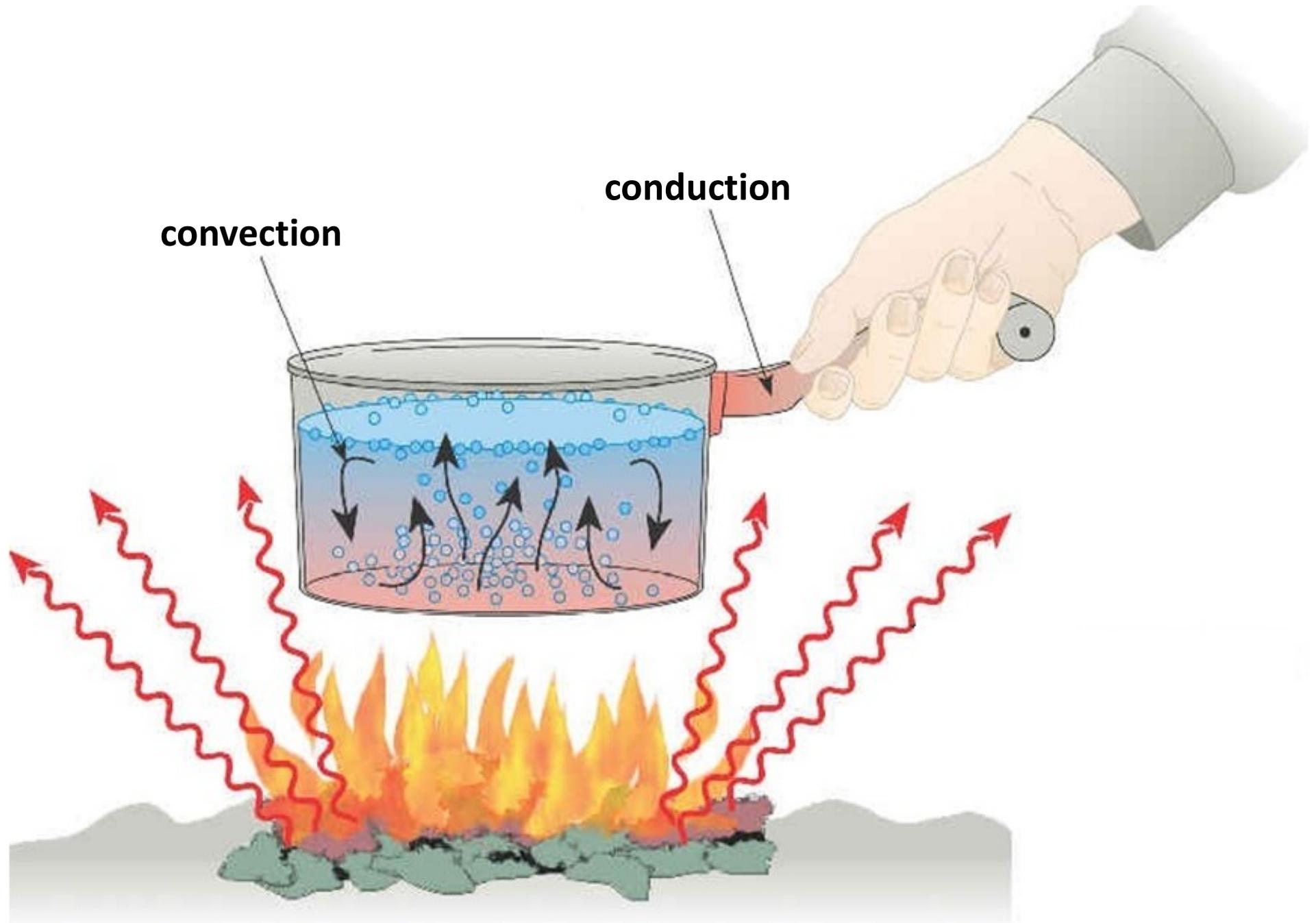
Chaleur accumulée lors de sa formation par agrégation de météorites

Depuis sa formation la Terre perd de la chaleur

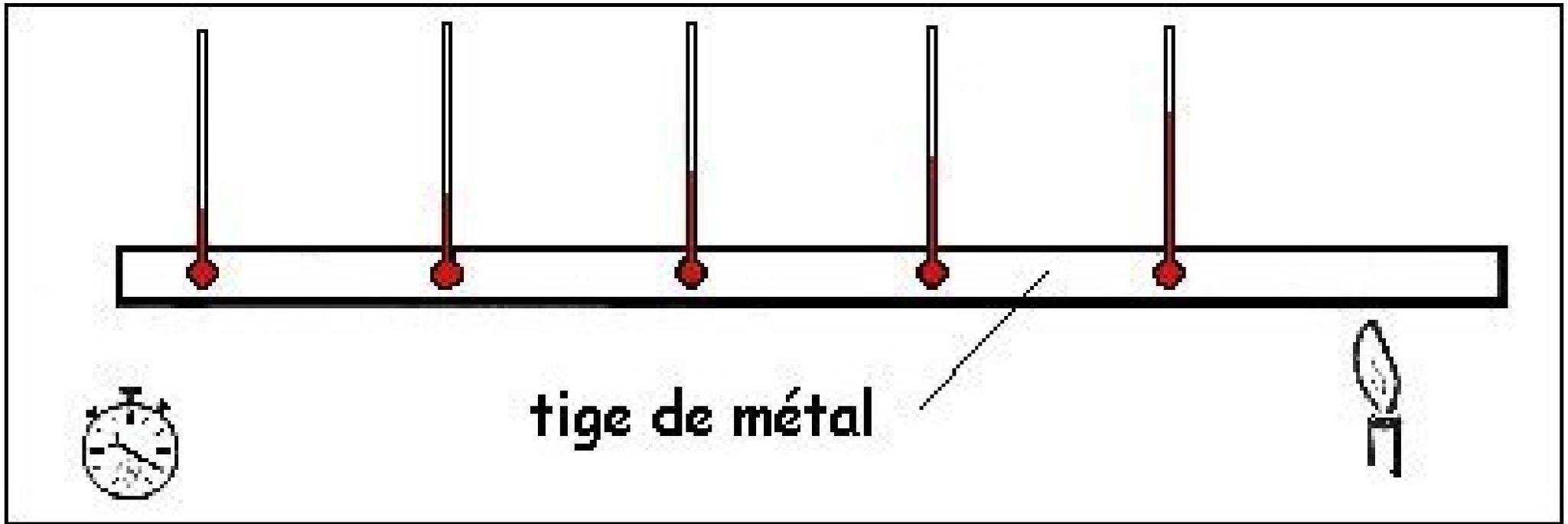
Le géotherme



Les transferts thermiques



Transfert de chaleur par conduction

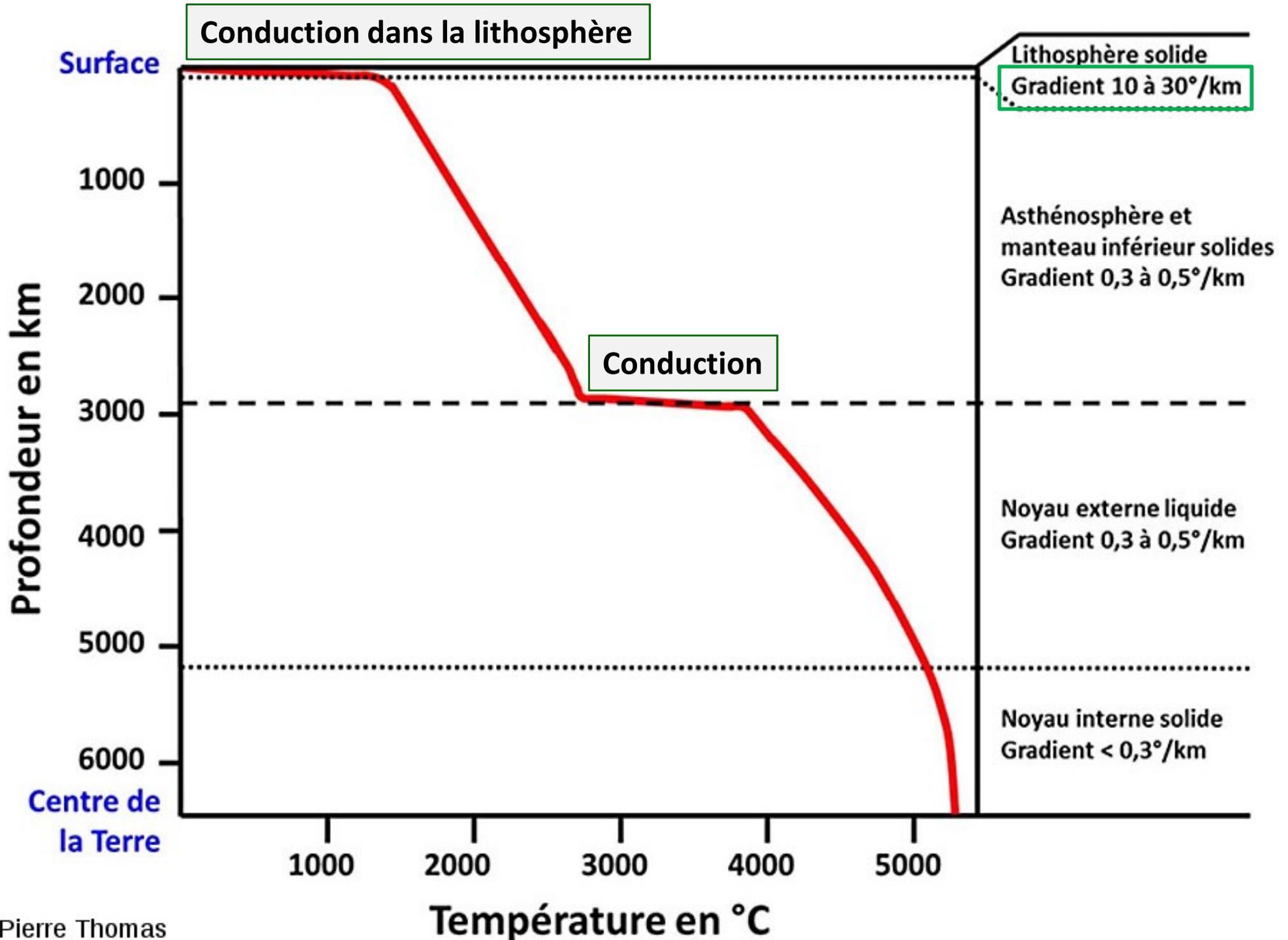


Transfert de chaleur de proche en proche sans mouvement de matière

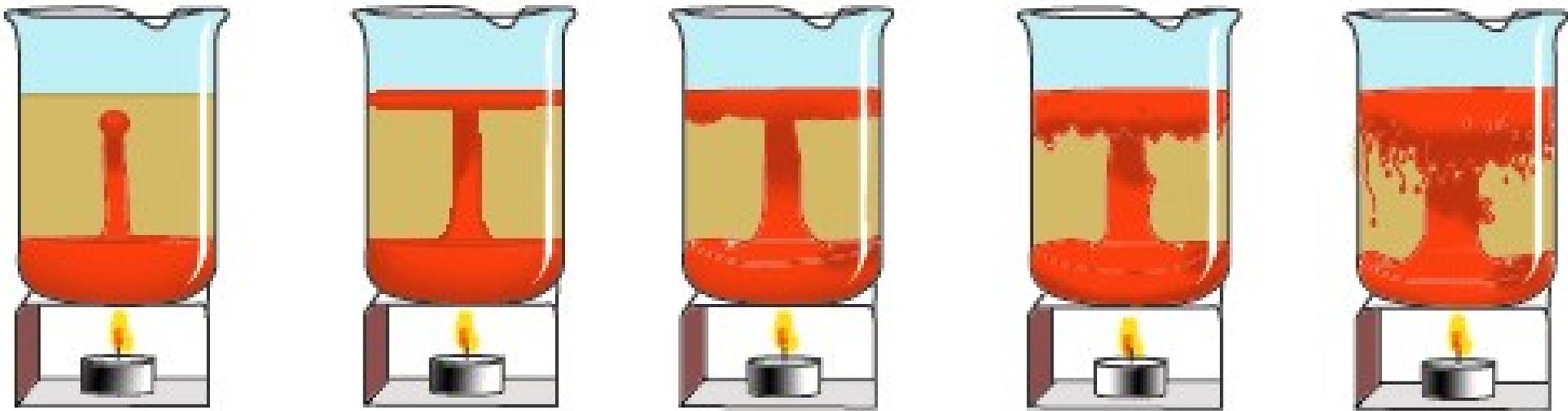
Peu efficace

Milieu rigide → lithosphère

Le géotherme



Transfert de chaleur par convection



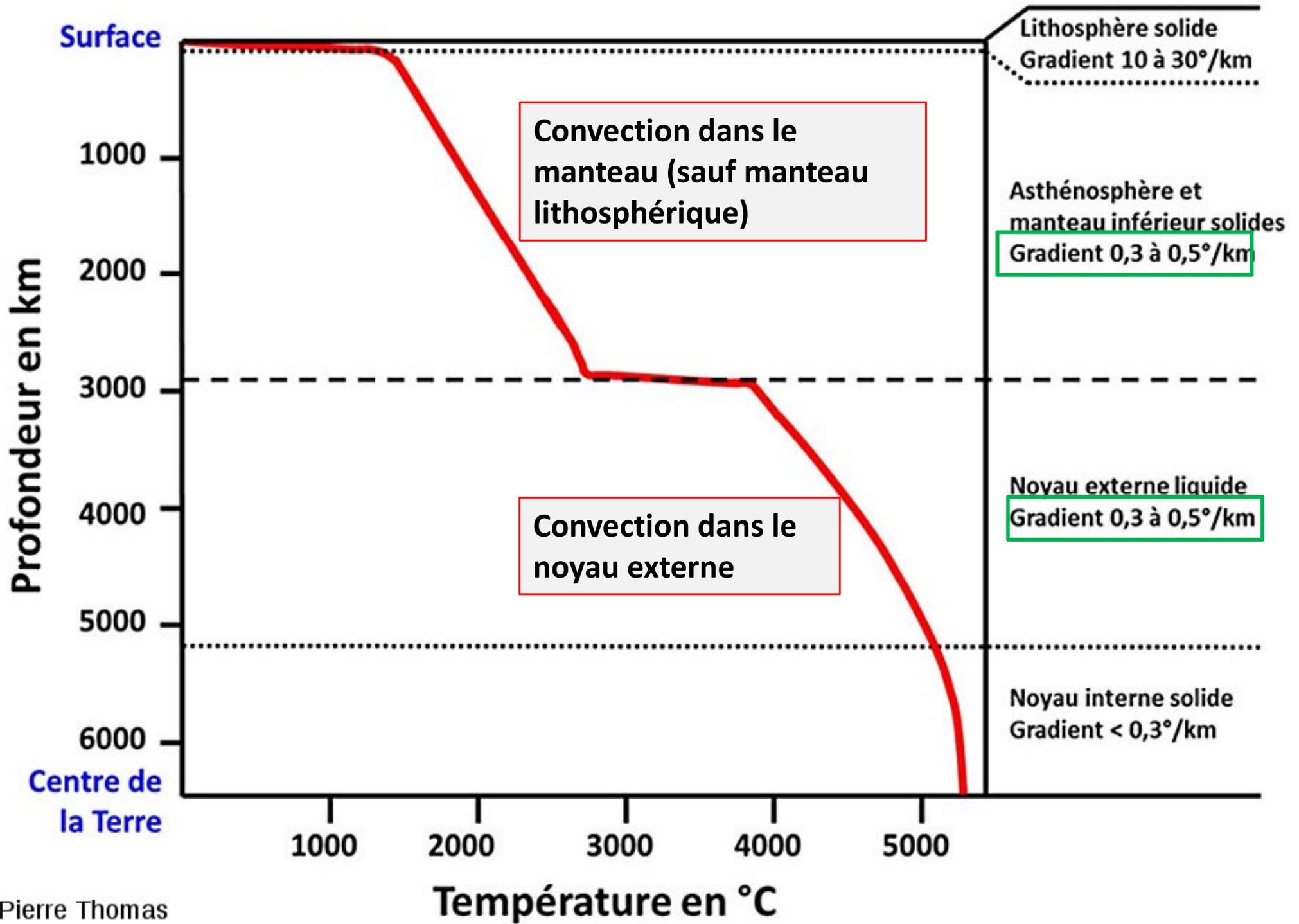
Simulation d'un mouvement de convection

Le transfert de chaleur s'accompagne d'un mouvement de matière

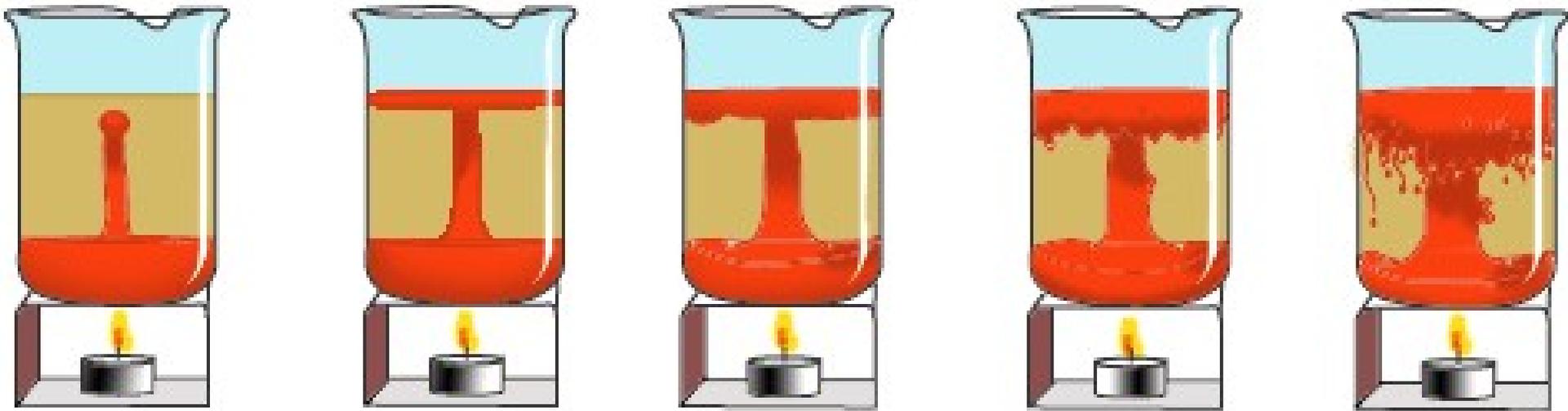
très efficace

Milieu ductile → manteau, noyau externe

La température augmente avec la profondeur : gradient géothermique



Transfert de chaleur par convection



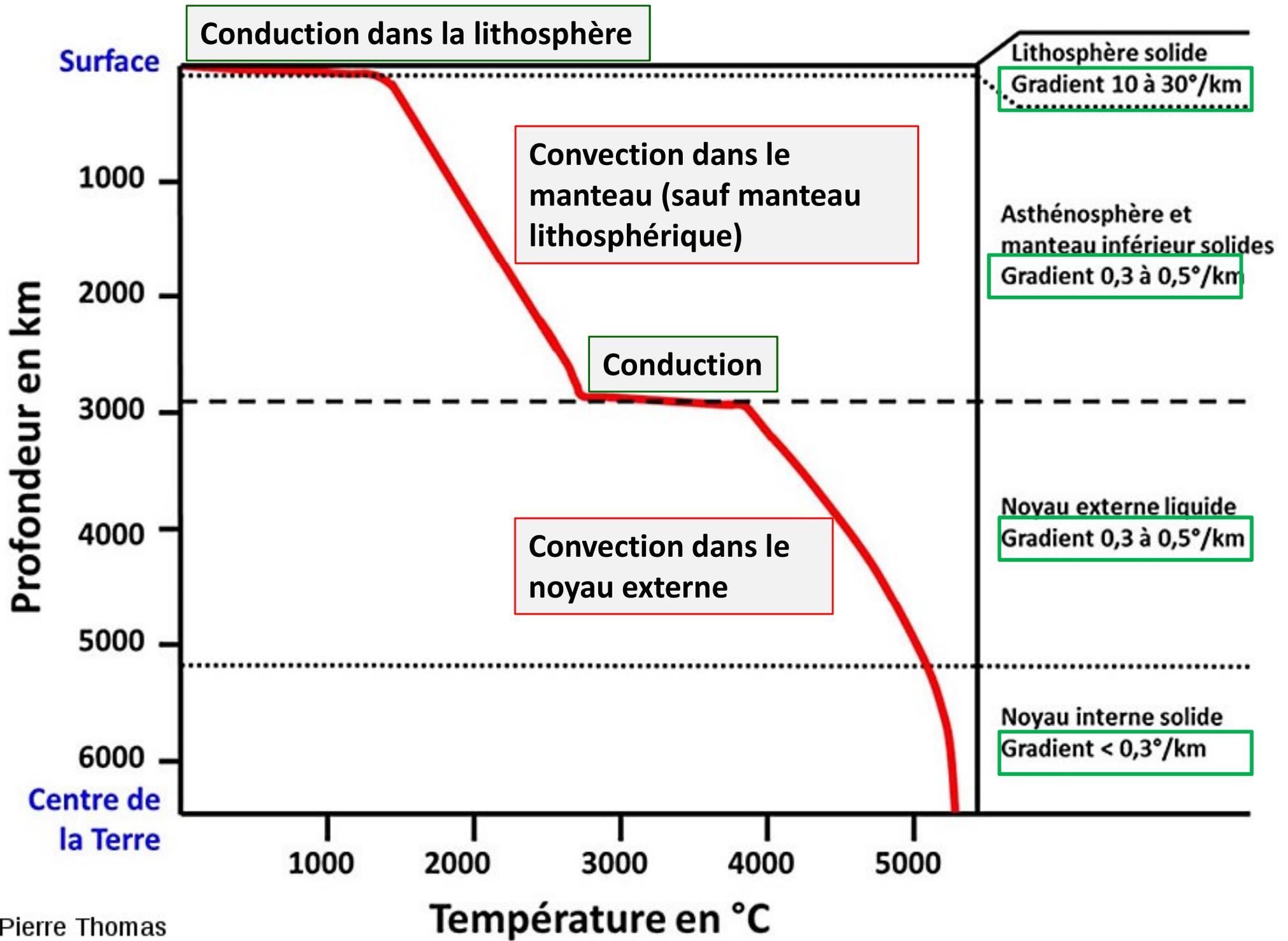
Simulation d'un mouvement de convection

Le transfert de chaleur s'accompagne d'un mouvement de matière

très efficace

Milieu ductile → manteau, noyau externe

La température augmente avec la profondeur : gradient géothermique



Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre

I. Des observations directes de roches permettent de connaître la composition des croûtes

II. Des informations déduites de l'étude des ondes sismiques permettent de comprendre la structure interne du globe.

A. Méthode d'étude.

B. Ondes sismiques et mise en évidence de surfaces de discontinuité

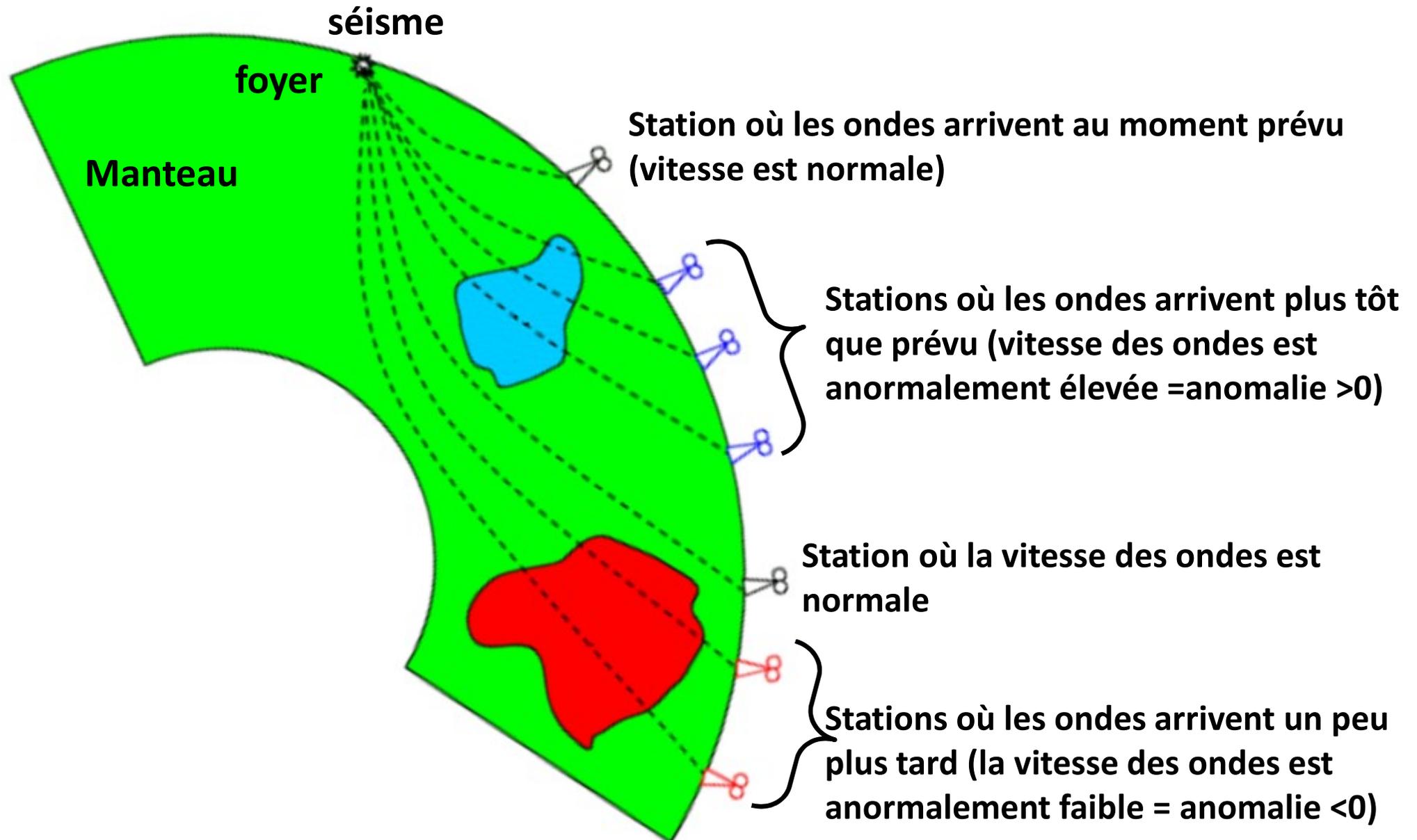
C. Ondes sismiques et distinction entre la lithosphère et l'asthénosphère

III. Des informations déduites des études thermiques.

A. Evolution des températures à l'intérieur du globe

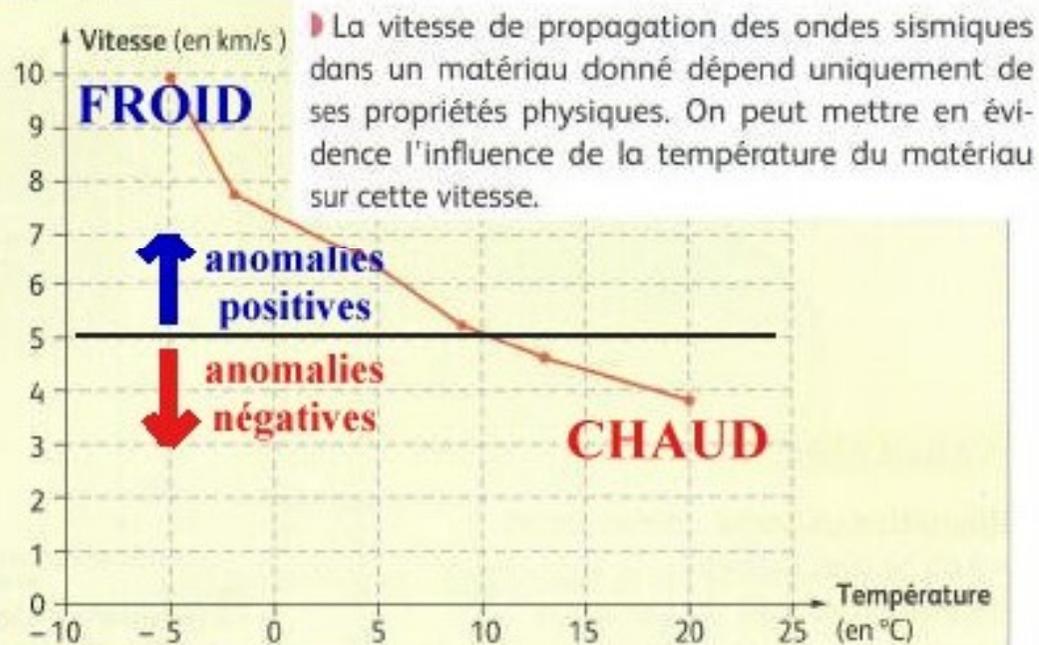
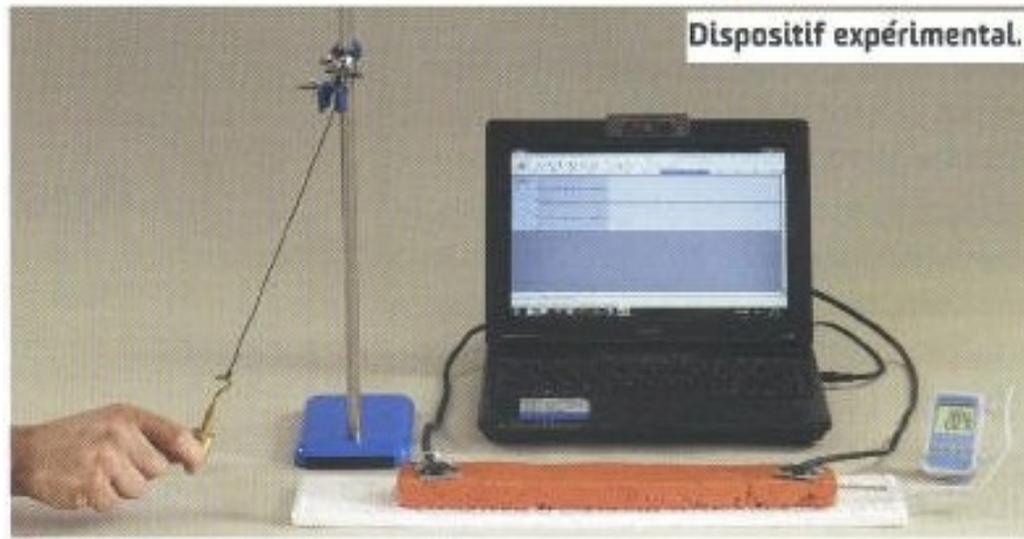
B. Anomalies thermiques et leur interprétation

La tomographie sismique : principe



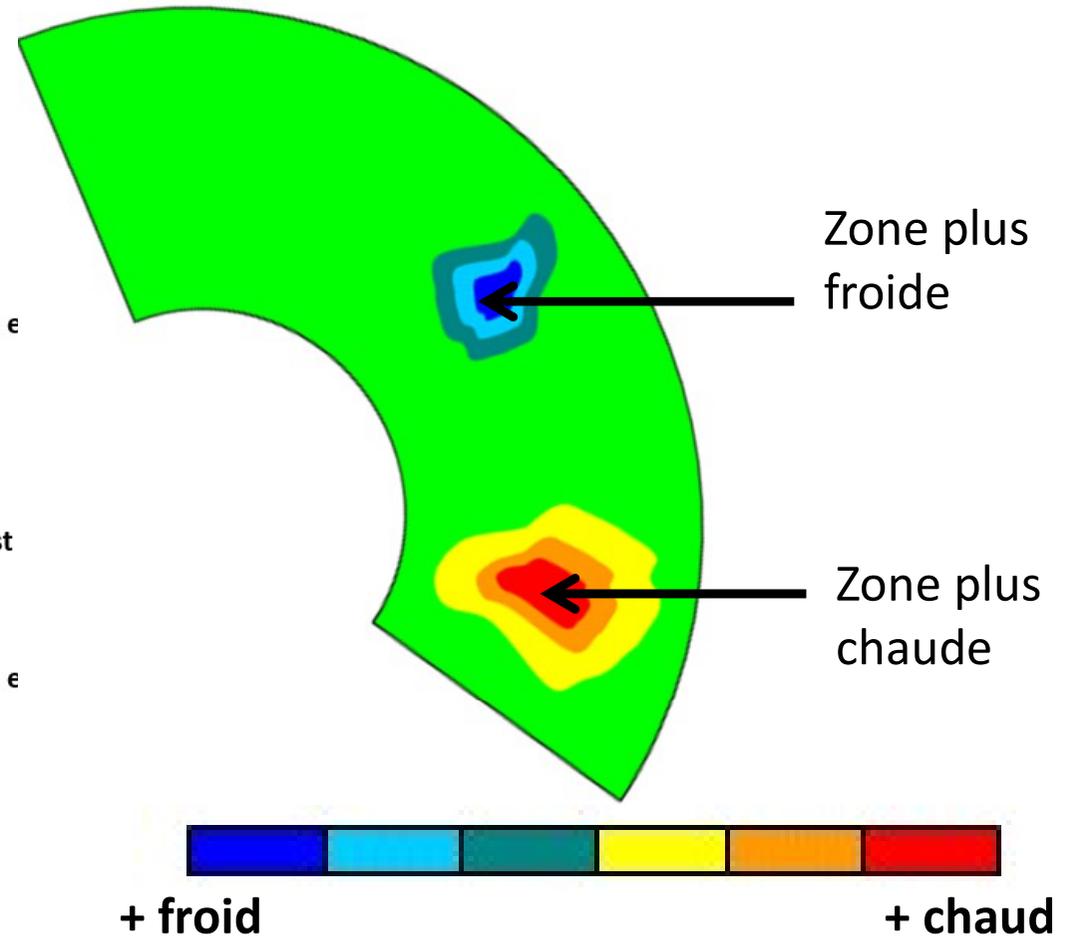
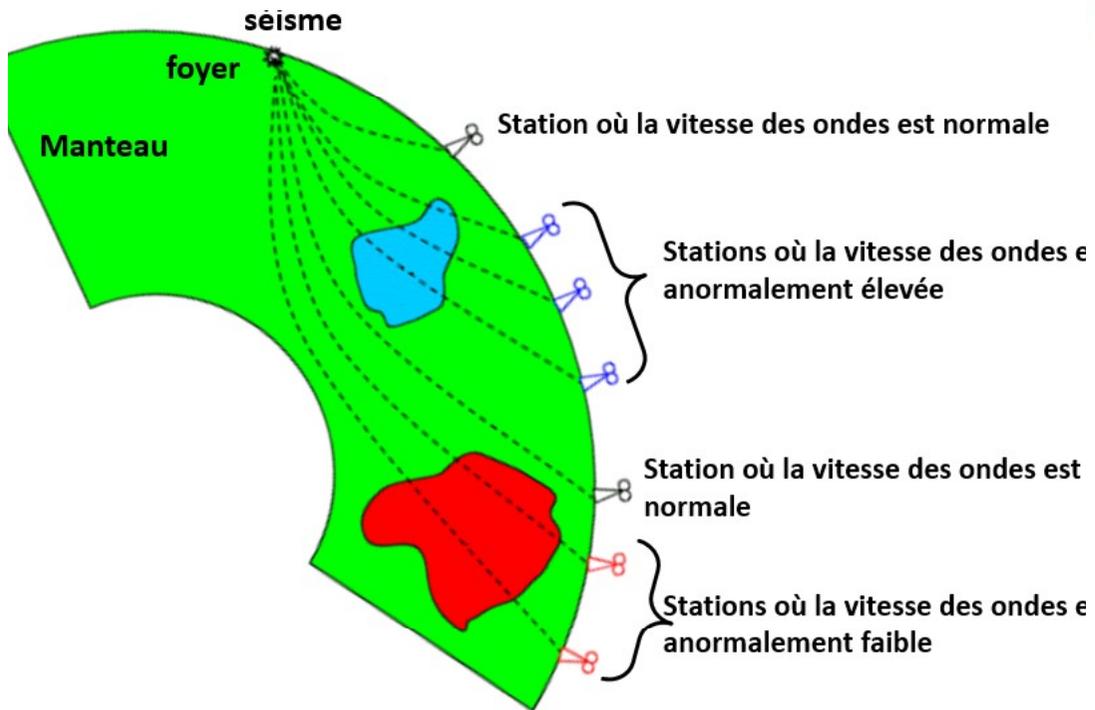
Principe de la tomographie sismique

Modélisation analogique

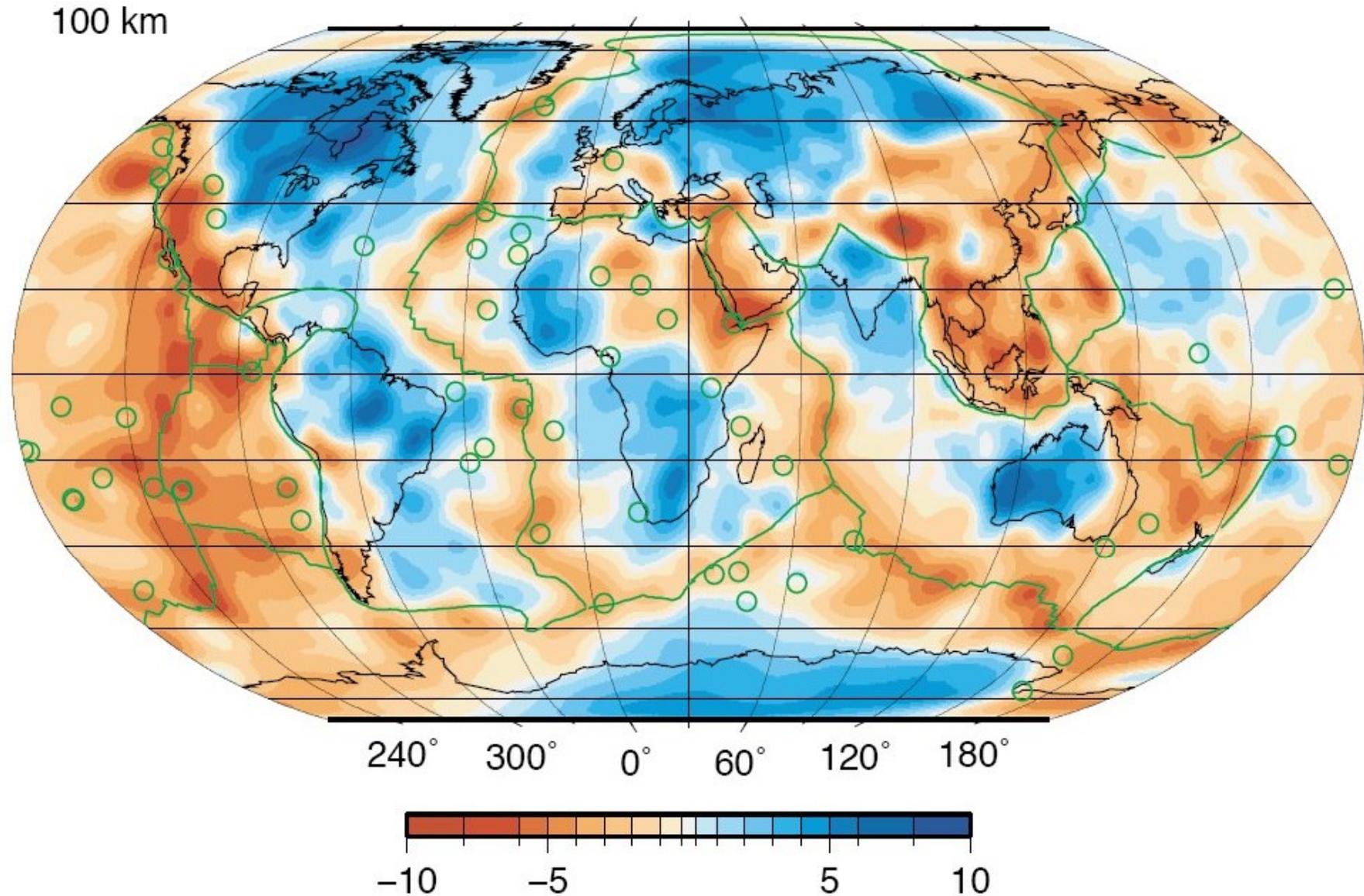


Représentation graphique des résultats expérimentaux.

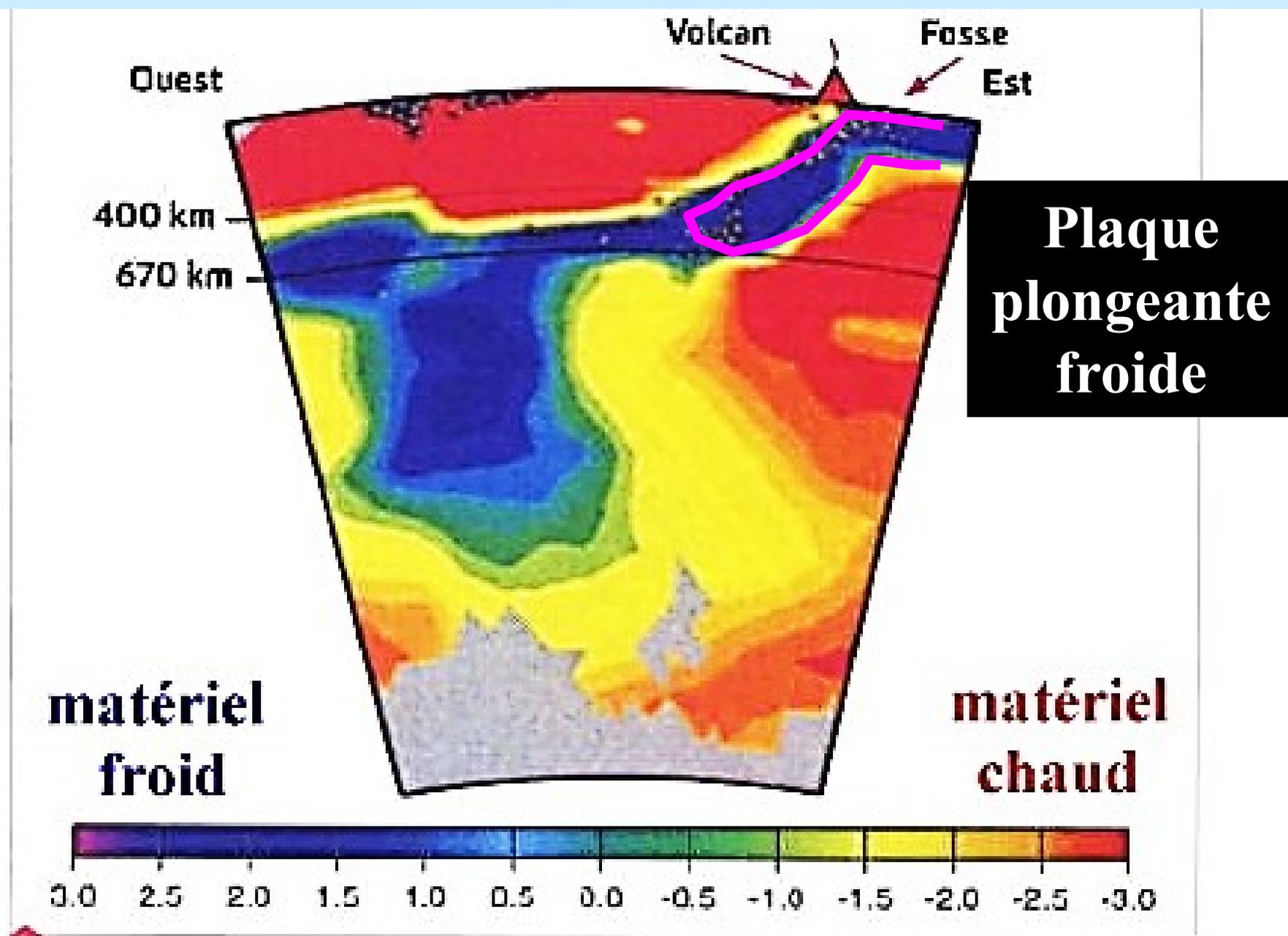
La tomographie sismique : interprétations



Tomographie sismique à 100 km de profondeur mise en évidence de remontée de roches chaudes

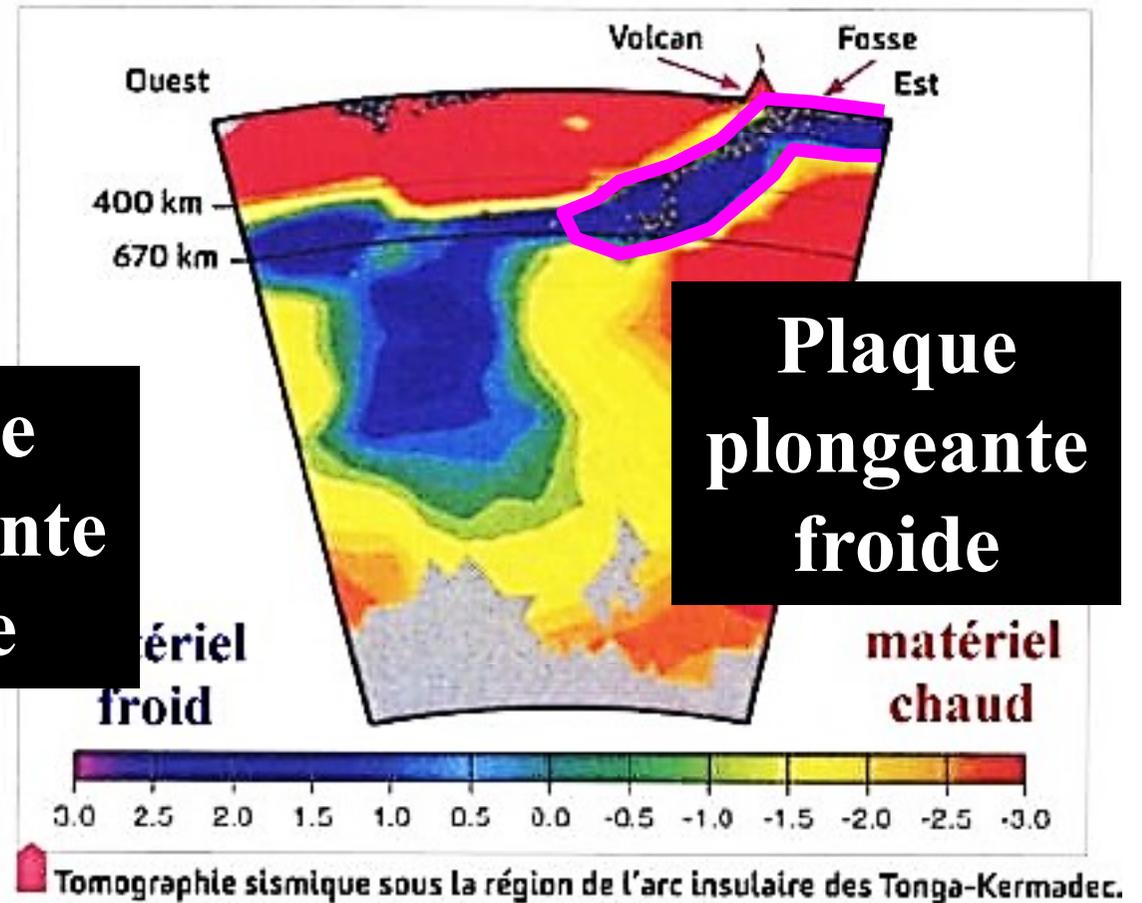
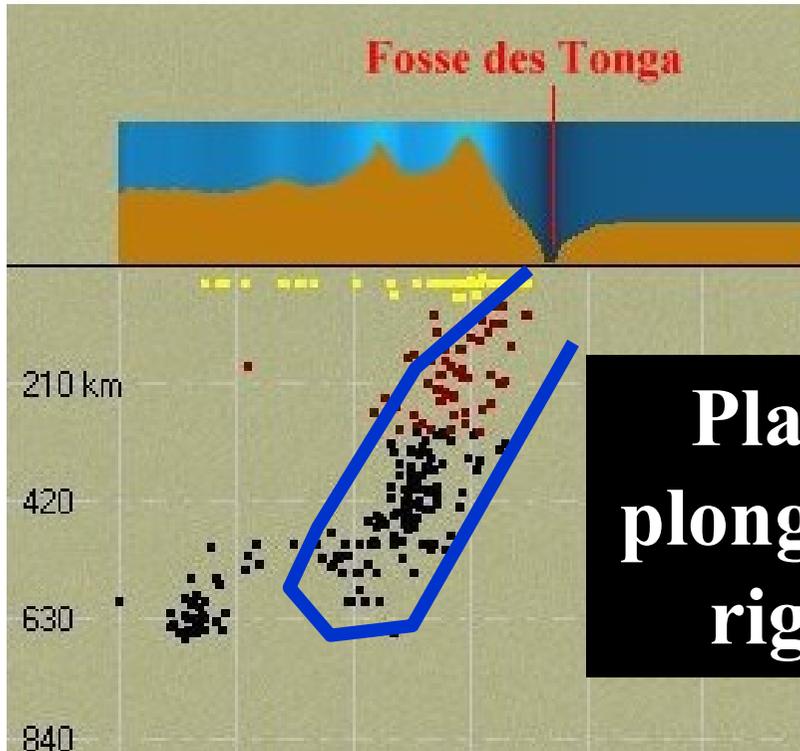


Tomographie sismique et mise en évidence des branches descendantes des mouvements de convection



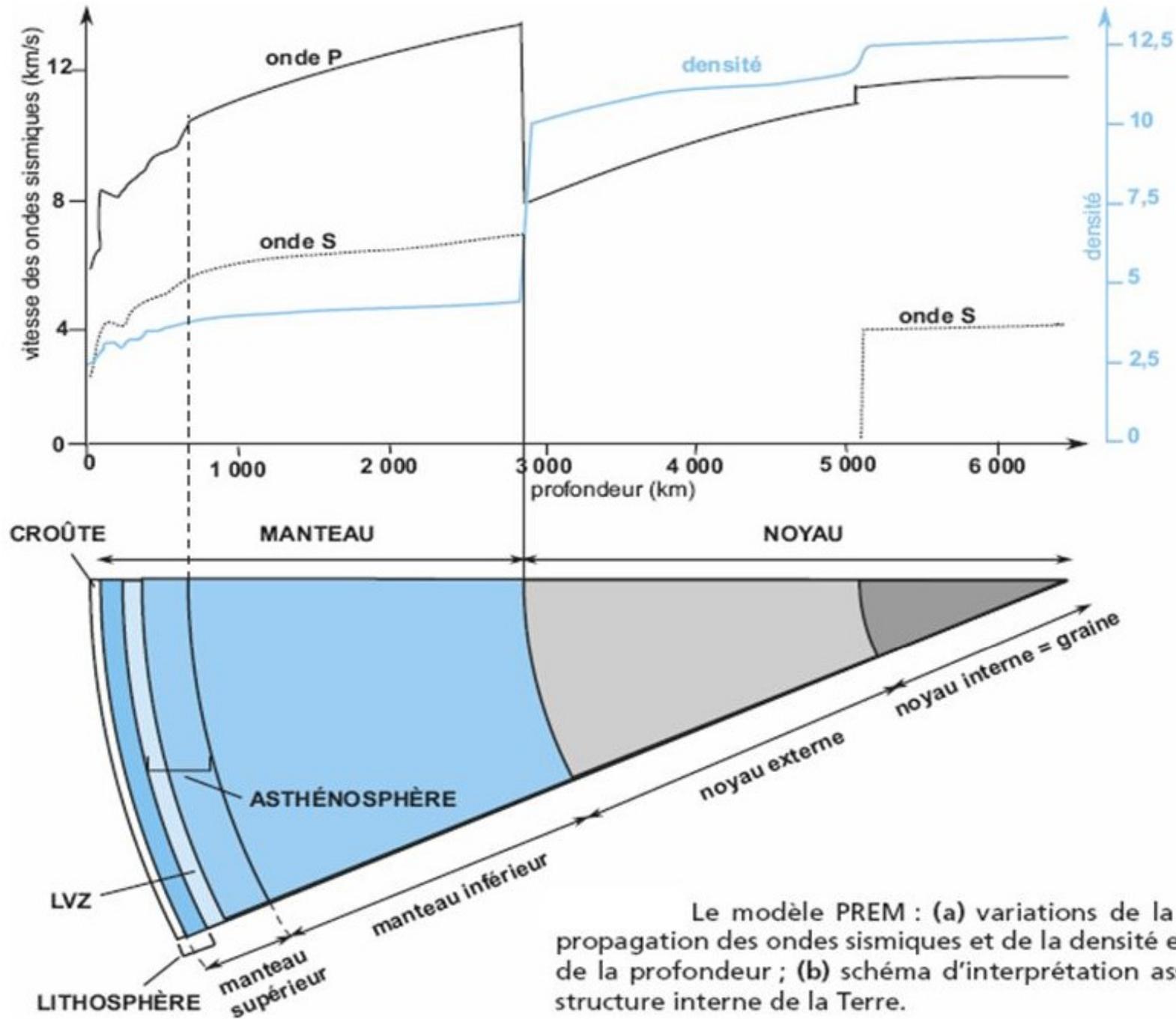
Tomographie sismique sous la région de l'arc insulaire des Tonga-Kermadec.

Interprétation des données sismiques



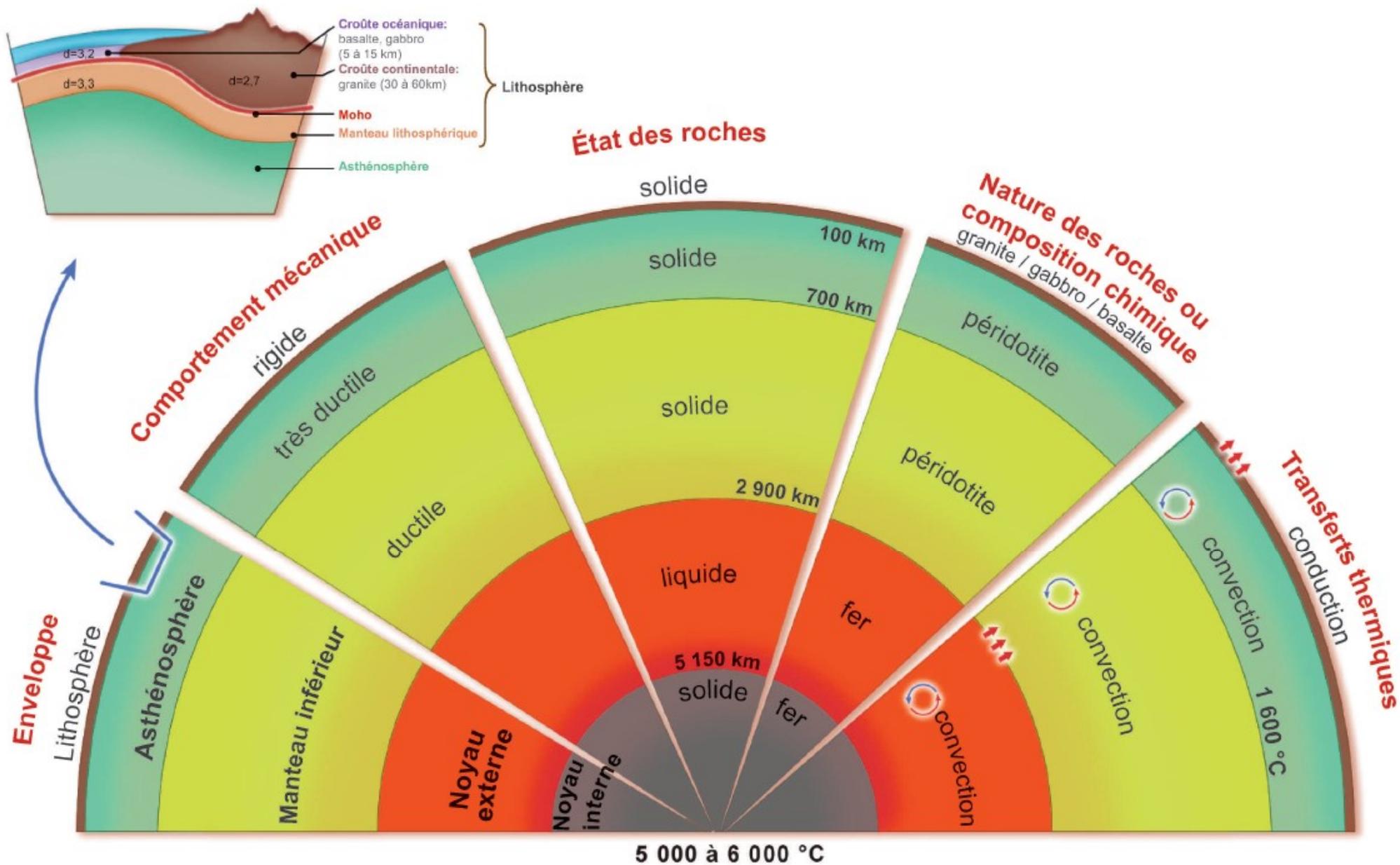
Conclusion

Un modèle sismique de la Terre

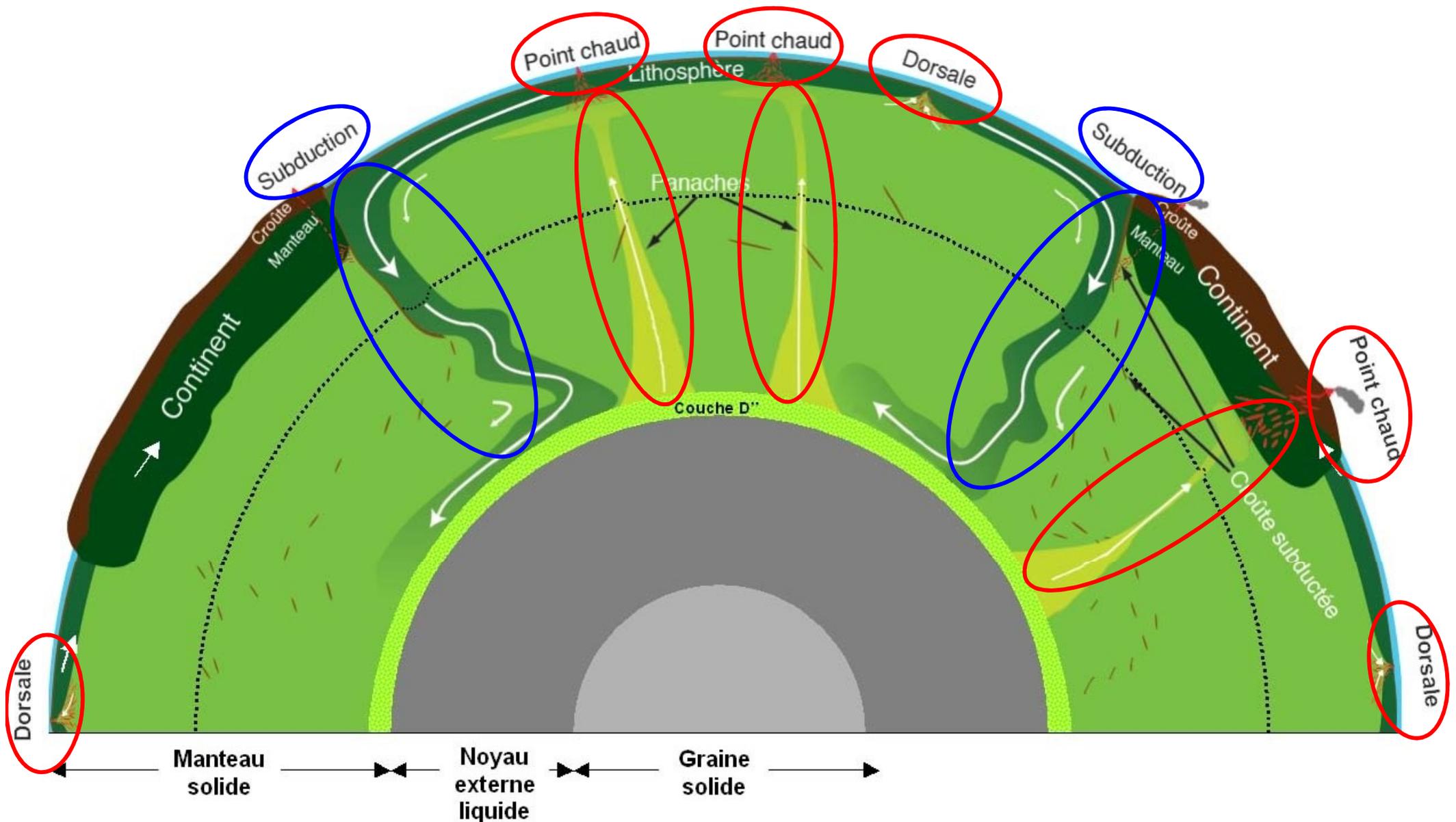


Le modèle PREM : (a) variations de la vitesse de propagation des ondes sismiques et de la densité en fonction de la profondeur ; (b) schéma d'interprétation associé de la structure interne de la Terre.

Conclusion

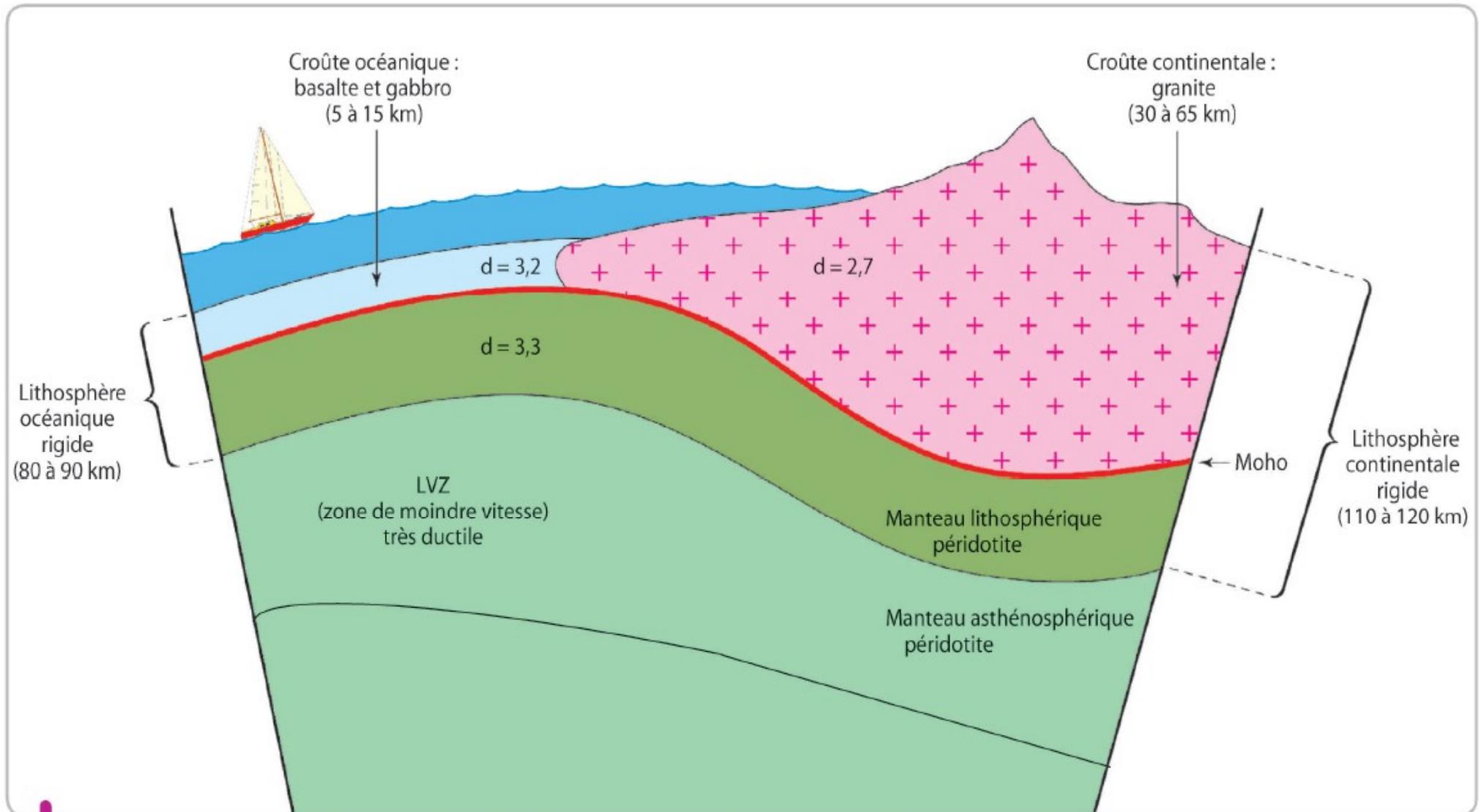


Modèle de Terre (ENS Lyon 2011-2014)



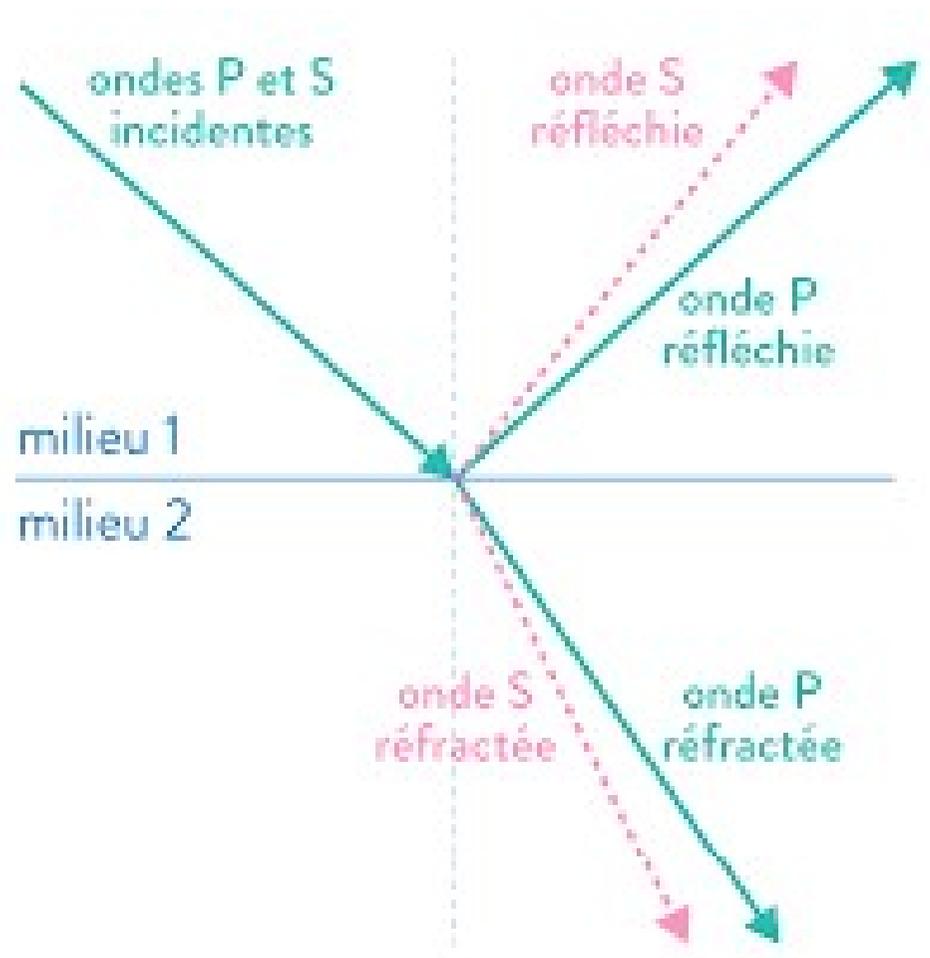
Les anomalies thermiques sont dues à des mouvements de matière

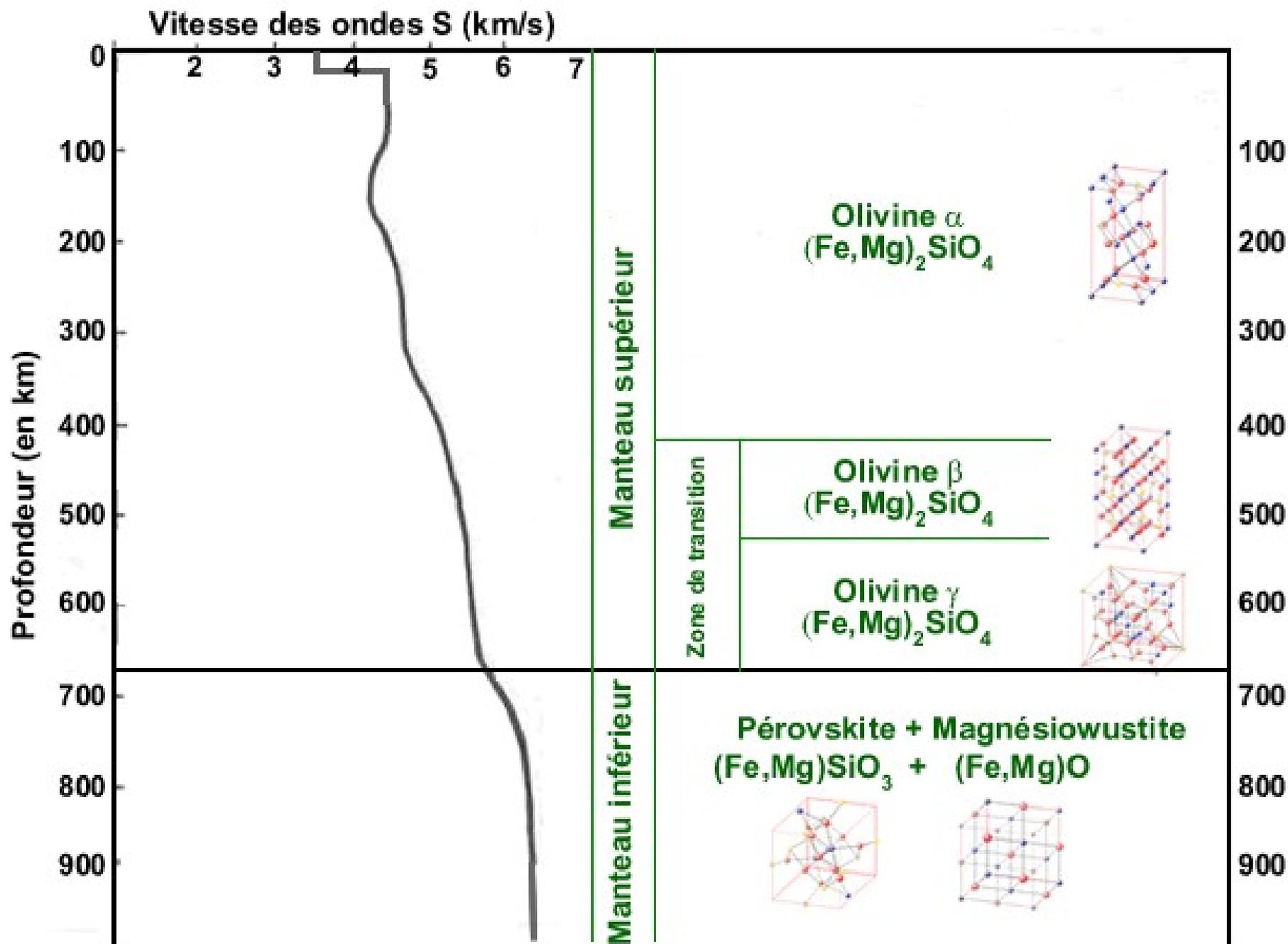
Conclusion

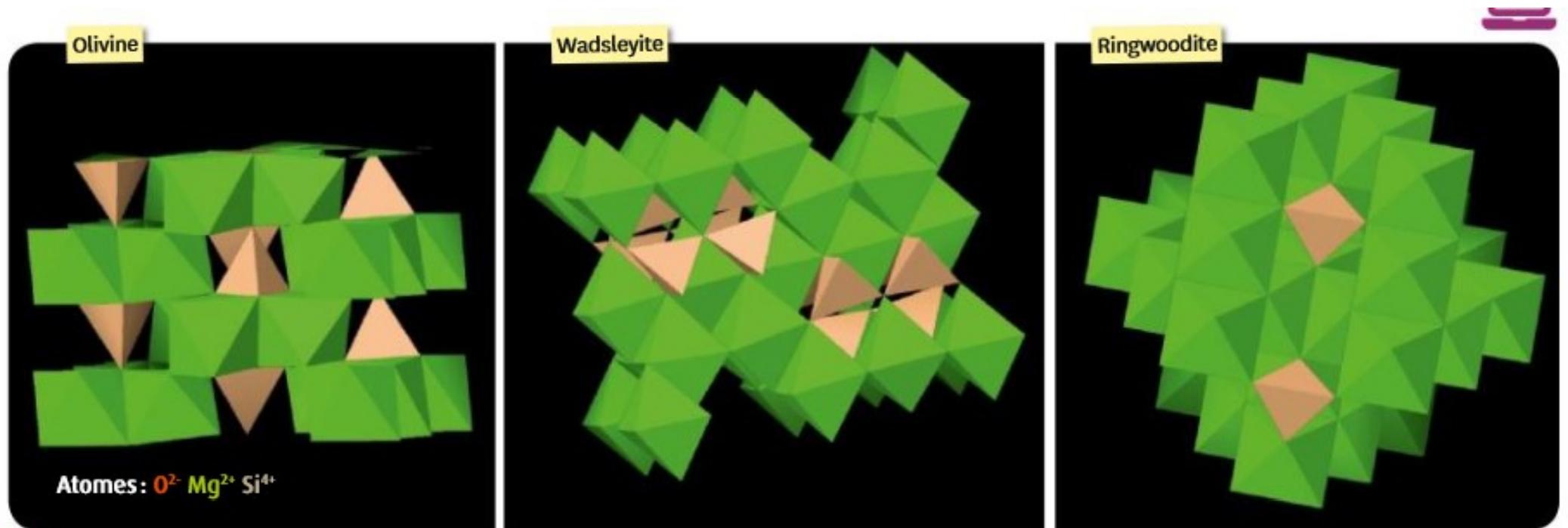


Principales enveloppes de la partie superficielle du globe (les échelles de profondeur ne sont pas respectées).

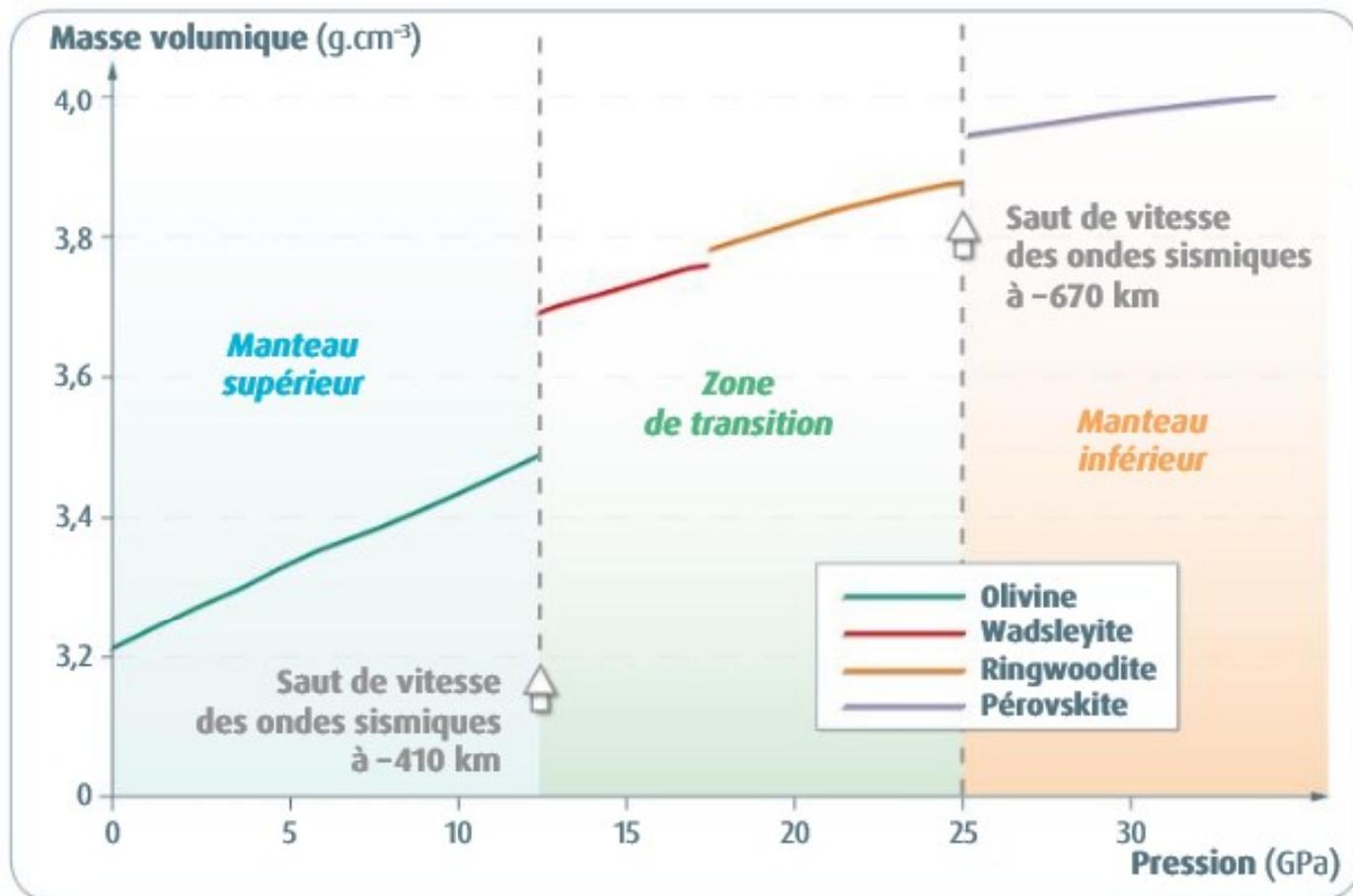
Au cas où





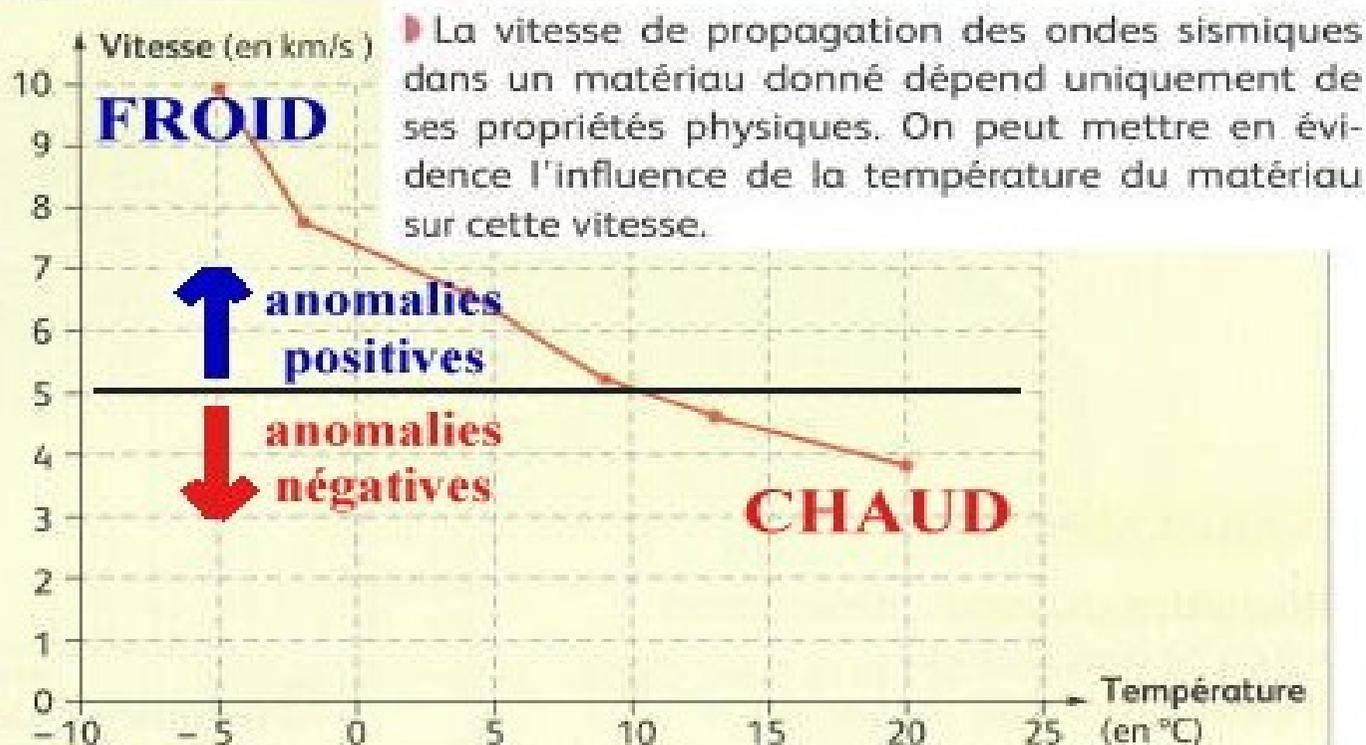
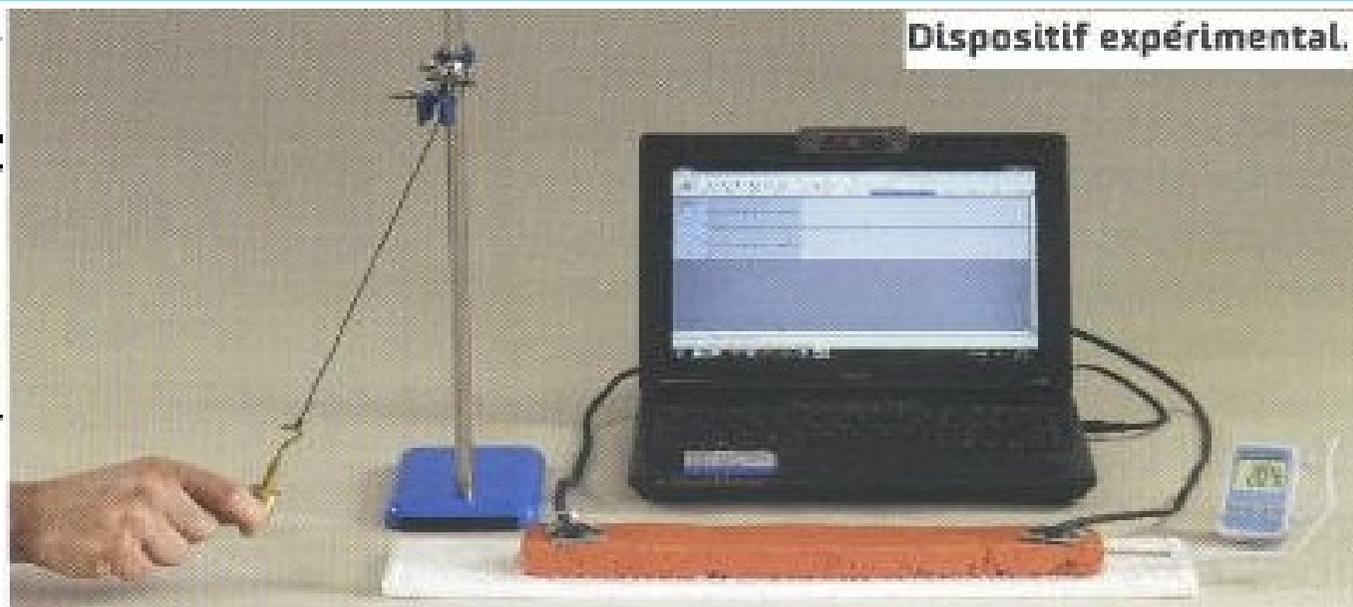


3 Évolution de la structure cristalline de l'olivine en fonction de la pression (logiciel Minusc). Des travaux réalisés dans des cellules à enclume de diamant (où de très hautes pressions sont atteintes) permettent d'observer le réarrangement des atomes qui conduit à une structure plus compacte et compatible avec les hautes pressions.



4 **Évolution de la masse volumique et des structures cristallines de l'olivine en fonction de la pression.** Chaque changement de structure cristalline provoque une augmentation de la masse volumique du minéral. Ces changements d'état apparaissent à des conditions de pression qui correspondent aux profondeurs où l'on observe des discontinuités des vitesses des ondes sismiques dans le manteau. La pérovskite est une structure cristalline de l'olivine encore plus compacte que la ringwoodite.

Apports de la tomographie sismique



mat
fr

3.0



Tomog. Représentation graphique des résultats expérimentaux.

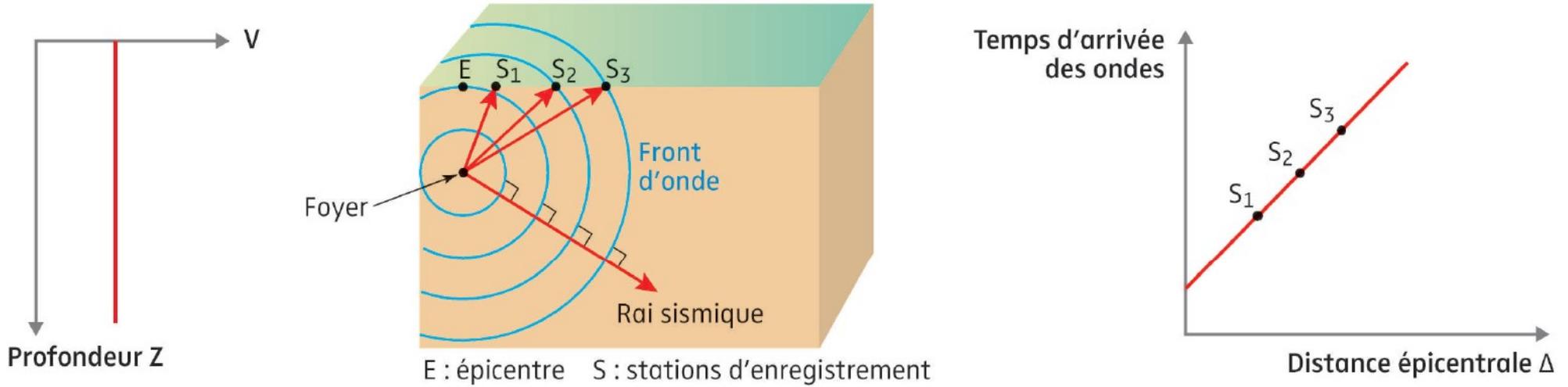
al

0

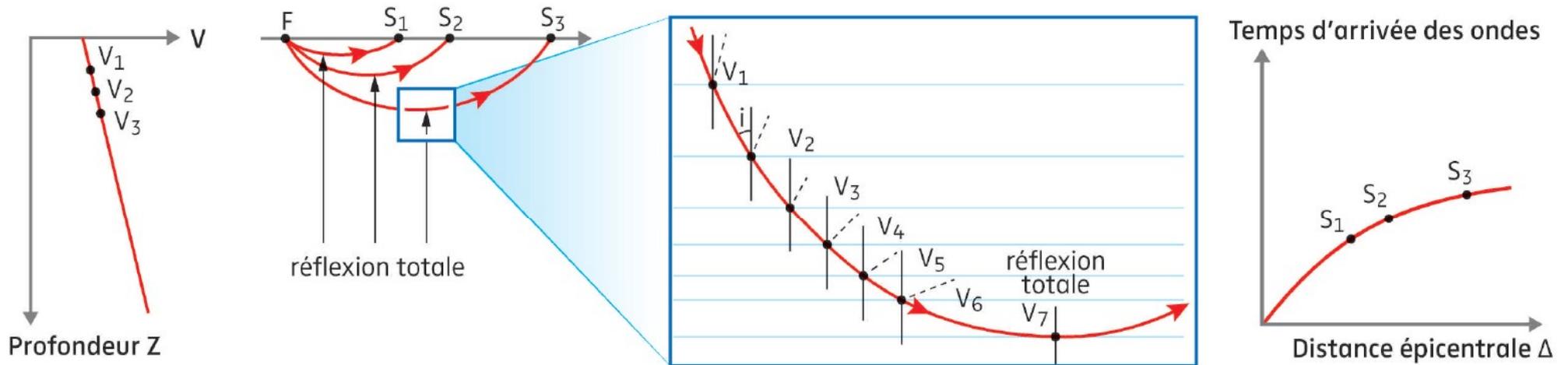
nadec.

La vitesse des ondes sismiques augmente avec la profondeur Oldham (1906)

Hypothèse A : hypothèse d'un globe constitué d'un même matériau aux propriétés homogènes.

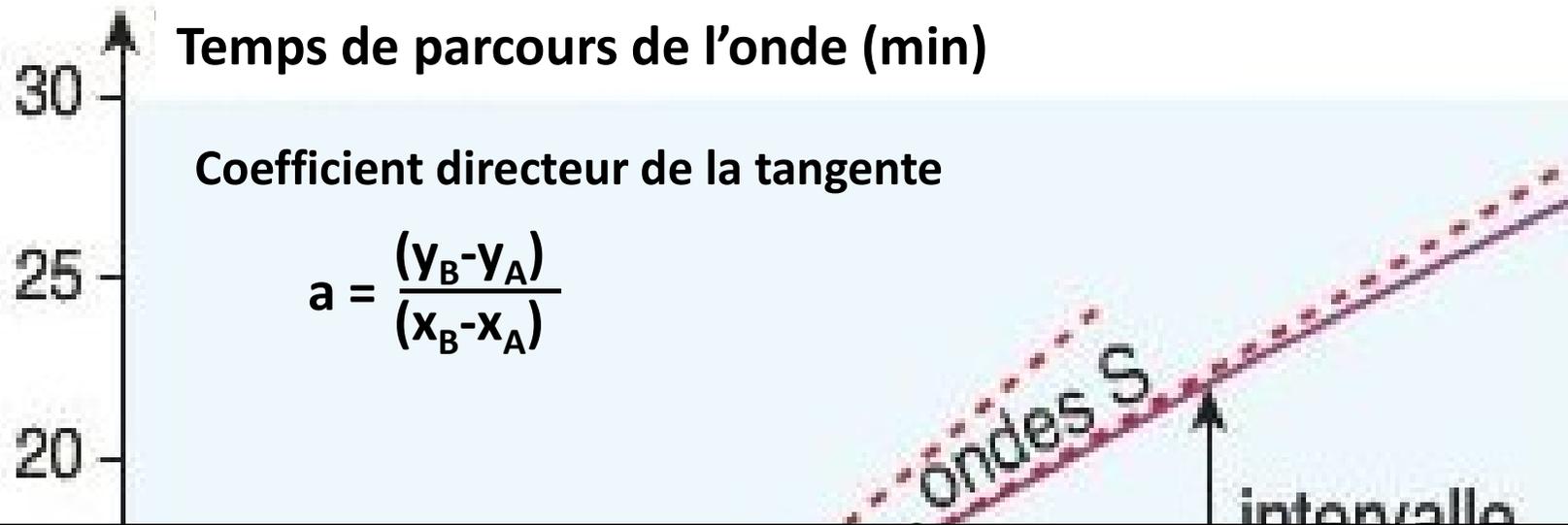


Hypothèse B : hypothèse d'un globe constitué de matériaux différents et/ou ayant des propriétés différentes.



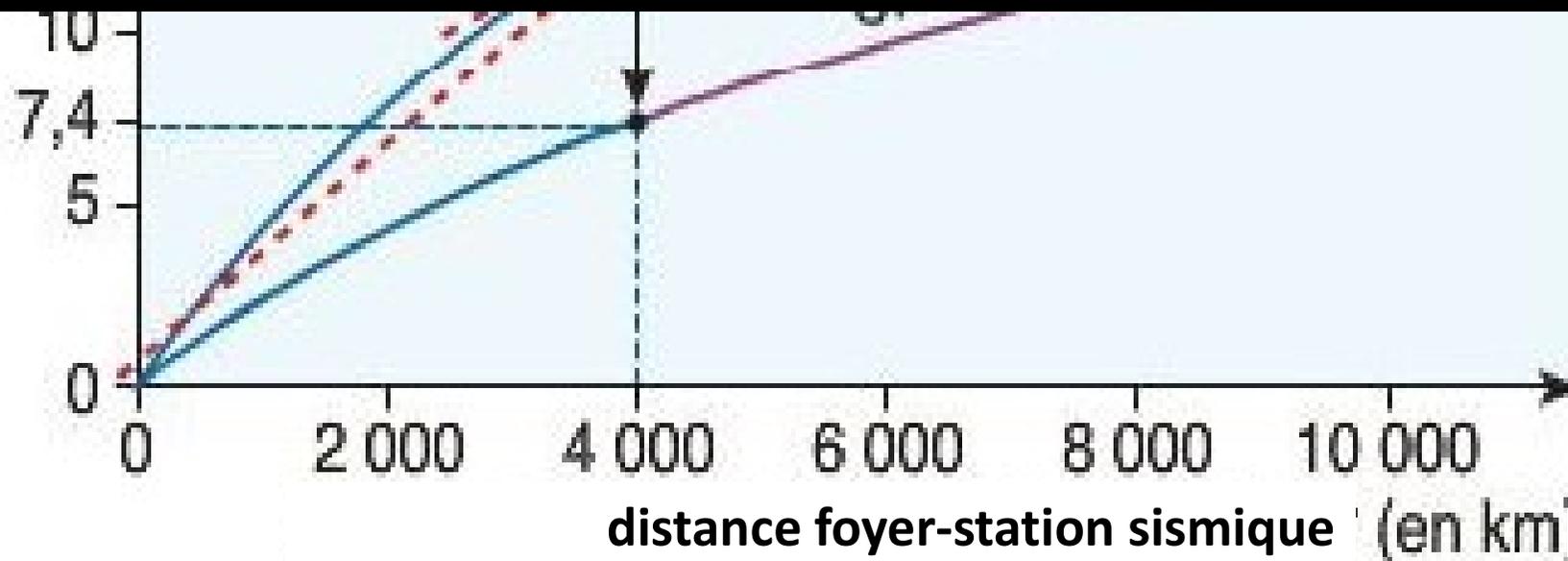
f **Hodochrones des ondes de volume.** Un hodochrone est une courbe obtenue en représentant graphiquement le temps d'arrivée d'une onde à la station en fonction de la distance épacentrale. Si la constitution du globe entraîne l'augmentation de la vitesse des ondes en fonction de la profondeur, alors les rais sismiques sont courbes avec une concavité dirigée vers la surface et l'hodochrone correspondant tend vers l'horizontale.

La vitesse des ondes sismiques augmente avec la profondeur Oldham (1906)



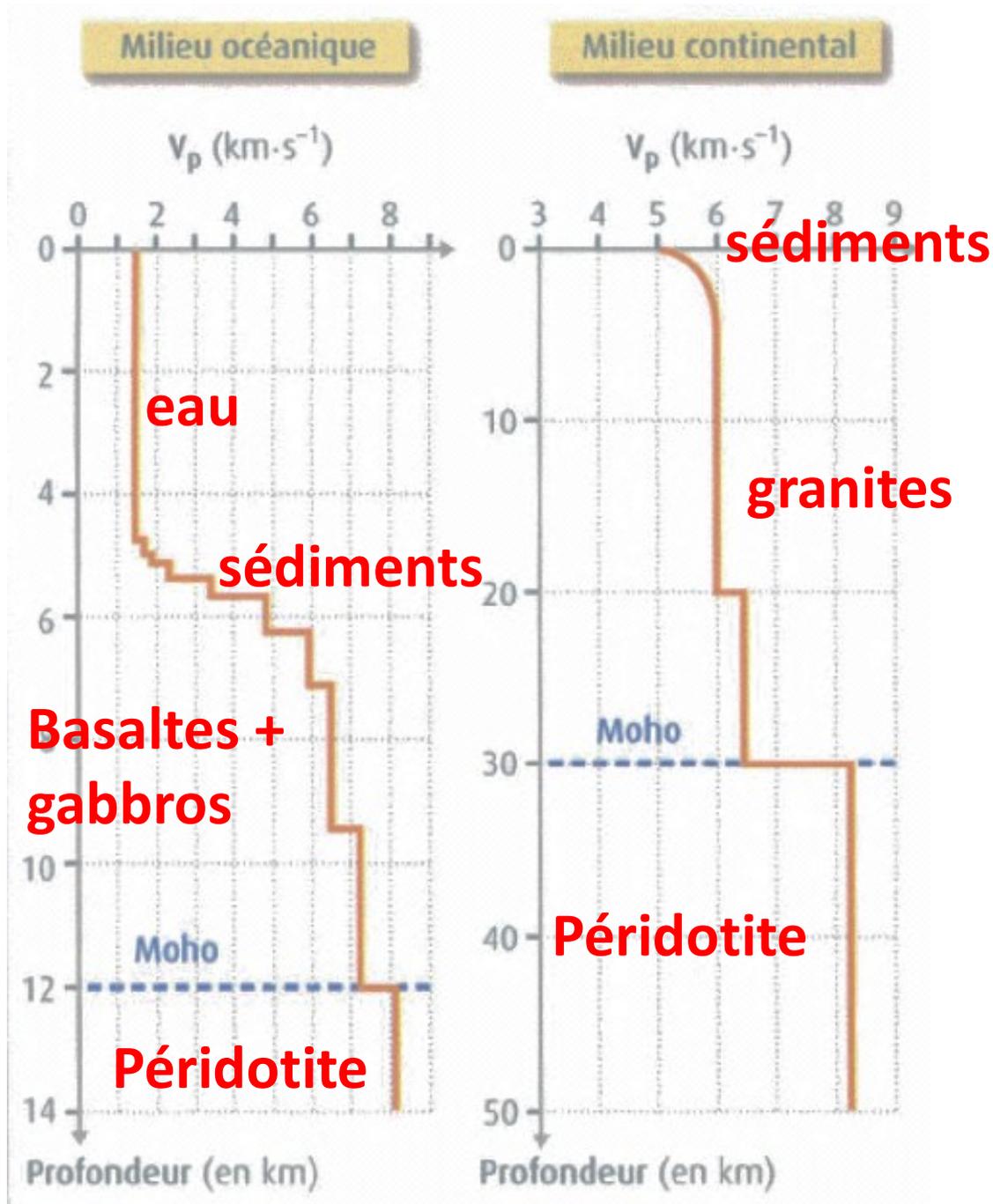
Avec « a »
de la forme
t/d

l'intérieur du globe est rigide, de plus en plus rigide jusque vers 2900 km de profondeur...



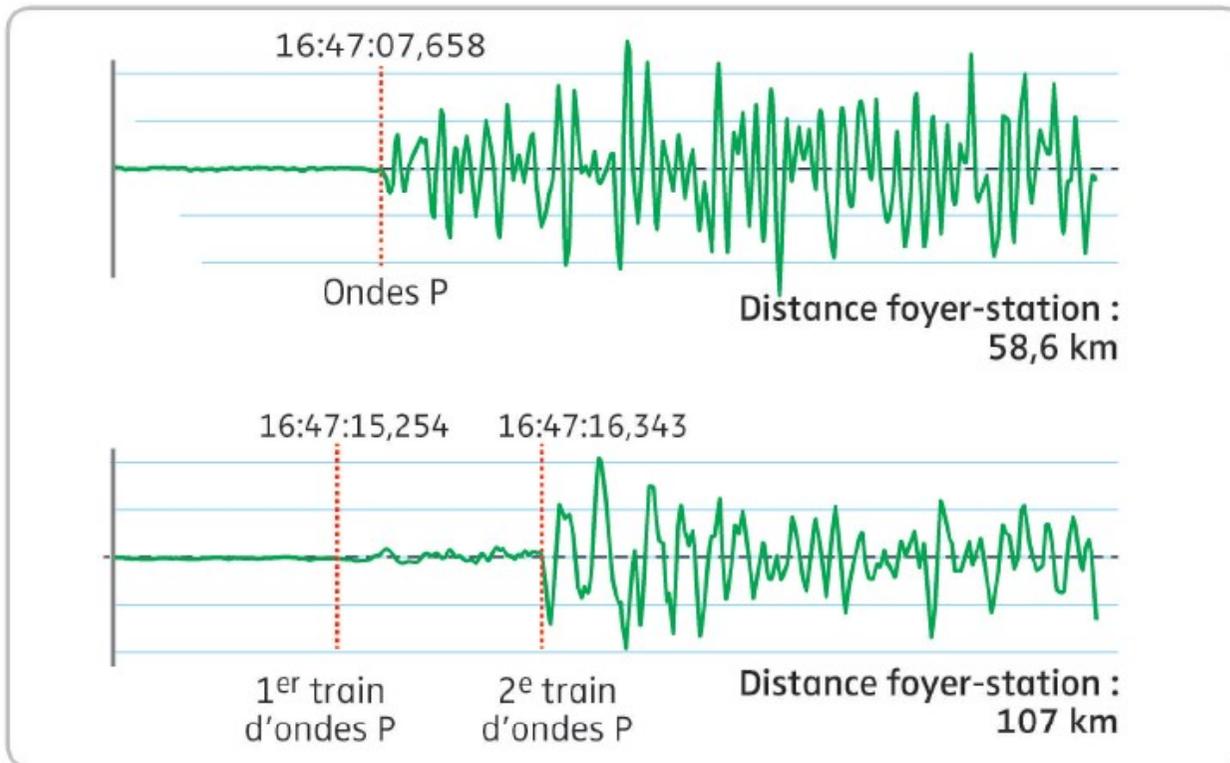
Donc V
augmente
avec la
profondeur

Vitesse des ondes P et nature des roches



Roches	Vitesse des ondes P ($\text{Km}\cdot\text{s}^{-1}$)
granite	5,5 à 6,3
sédiments	2 à 5
basaltes	6,4 à 6,9
Gabbro	6,4 à 7,2
péridotites anhydres	7,9 à 12

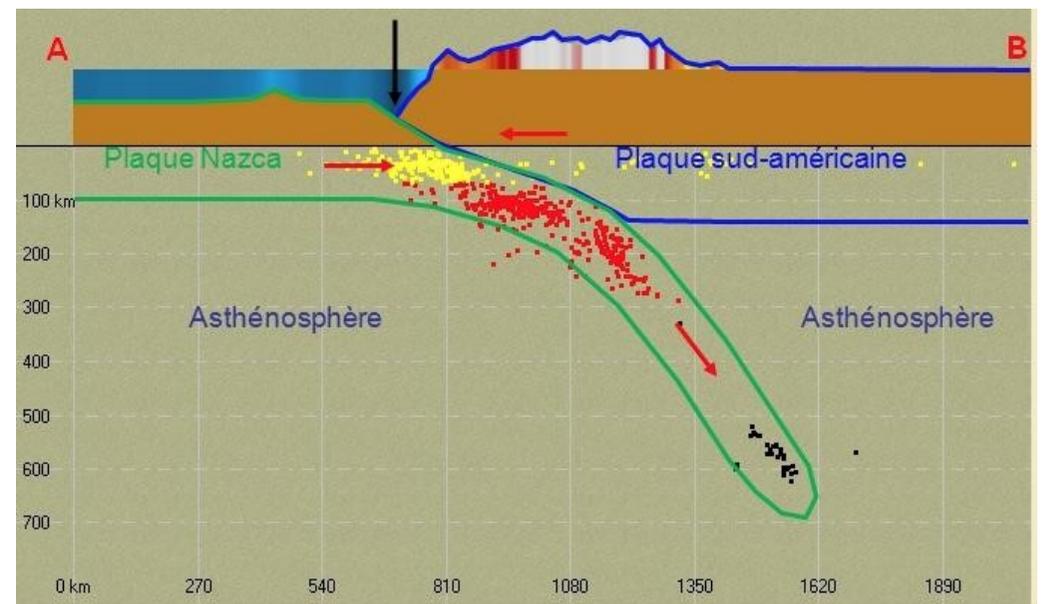
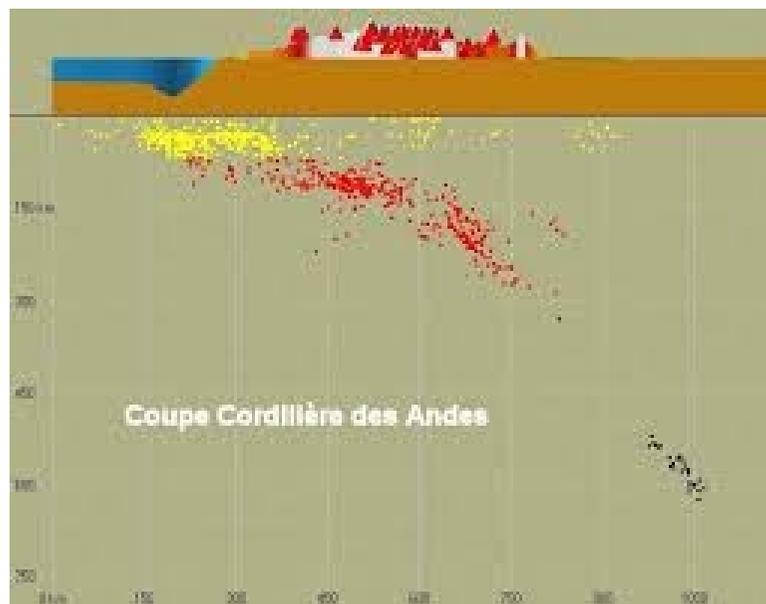
Les observations de Mohorovičić (1909)



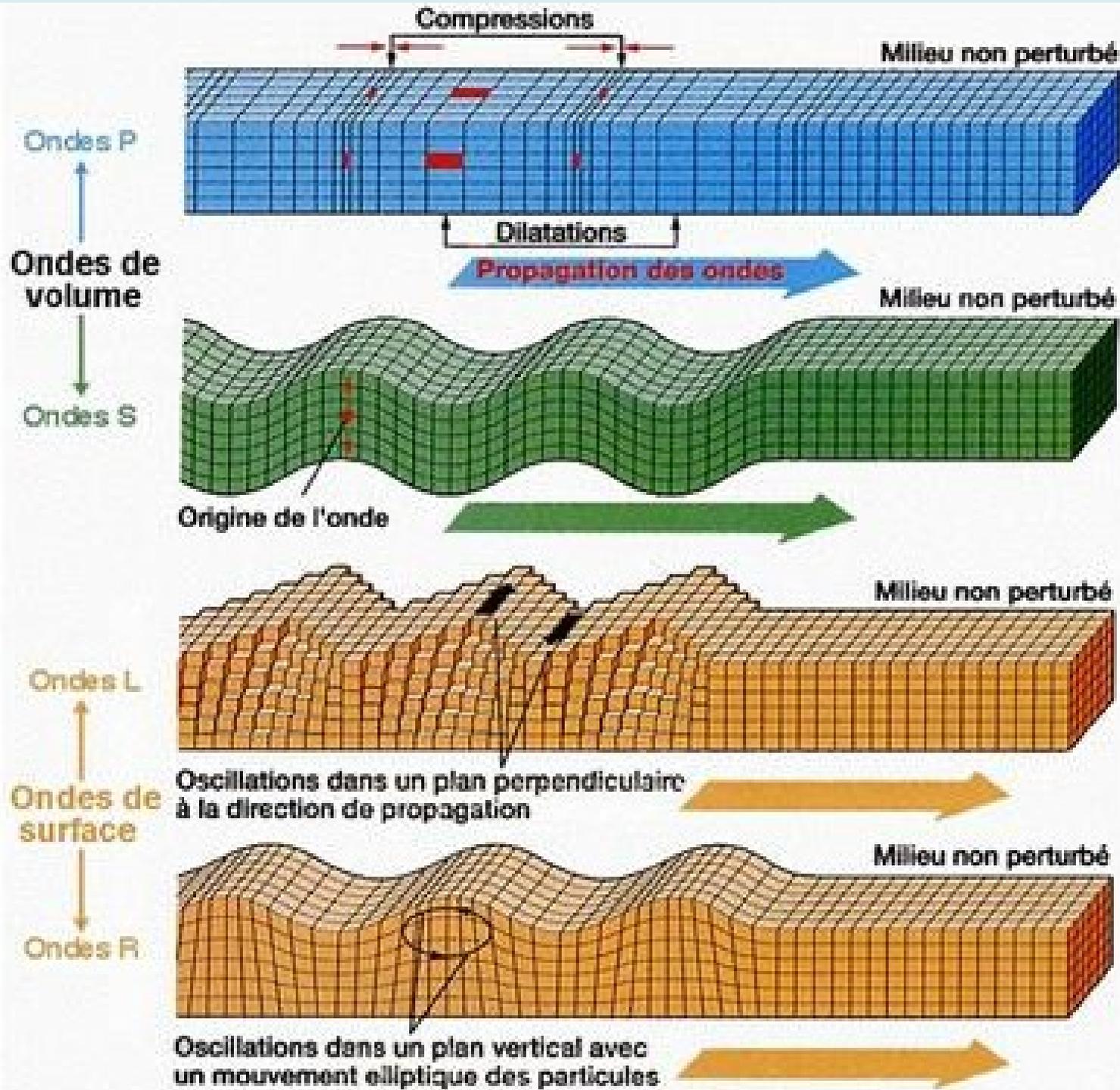
a Le problème posé par le séisme de Zagreb

(Croatie, 8 octobre 1909).

Suite à ce séisme, André Mohorovicic constate sur des sismogrammes enregistrés dans différentes stations, qu'à une certaine distance de l'épicentre, on enregistre deux trains d'ondes P et deux trains d'ondes S, comme si les ondes avaient suivi des cheminements différents. D'après ses calculs, le deuxième train d'ondes enregistré correspond à des ondes directes, c'est-à-dire ayant cheminé dans la croûte et n'ayant subi ni réflexion ni réfraction. Ce qui a été observé par Mohorovicic en Croatie peut aussi s'observer sur les sismogrammes enregistrés lors d'un séisme en Savoie en 1991 dans deux stations OG09 et OG03.



Les différents types d'ondes sismiques



Seules utiles pour l'étude du globe (elles traversent le globe)

inutiles pour l'étude du globe

Mais destructrices !

Profondeur du Moho sous la France

