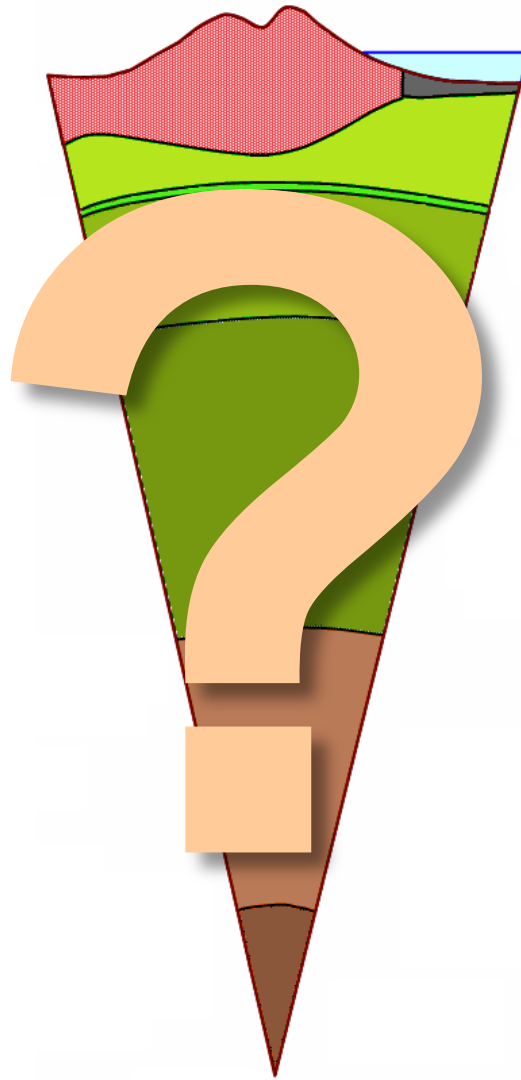


Thème : La dynamique interne de la Terre.

Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre



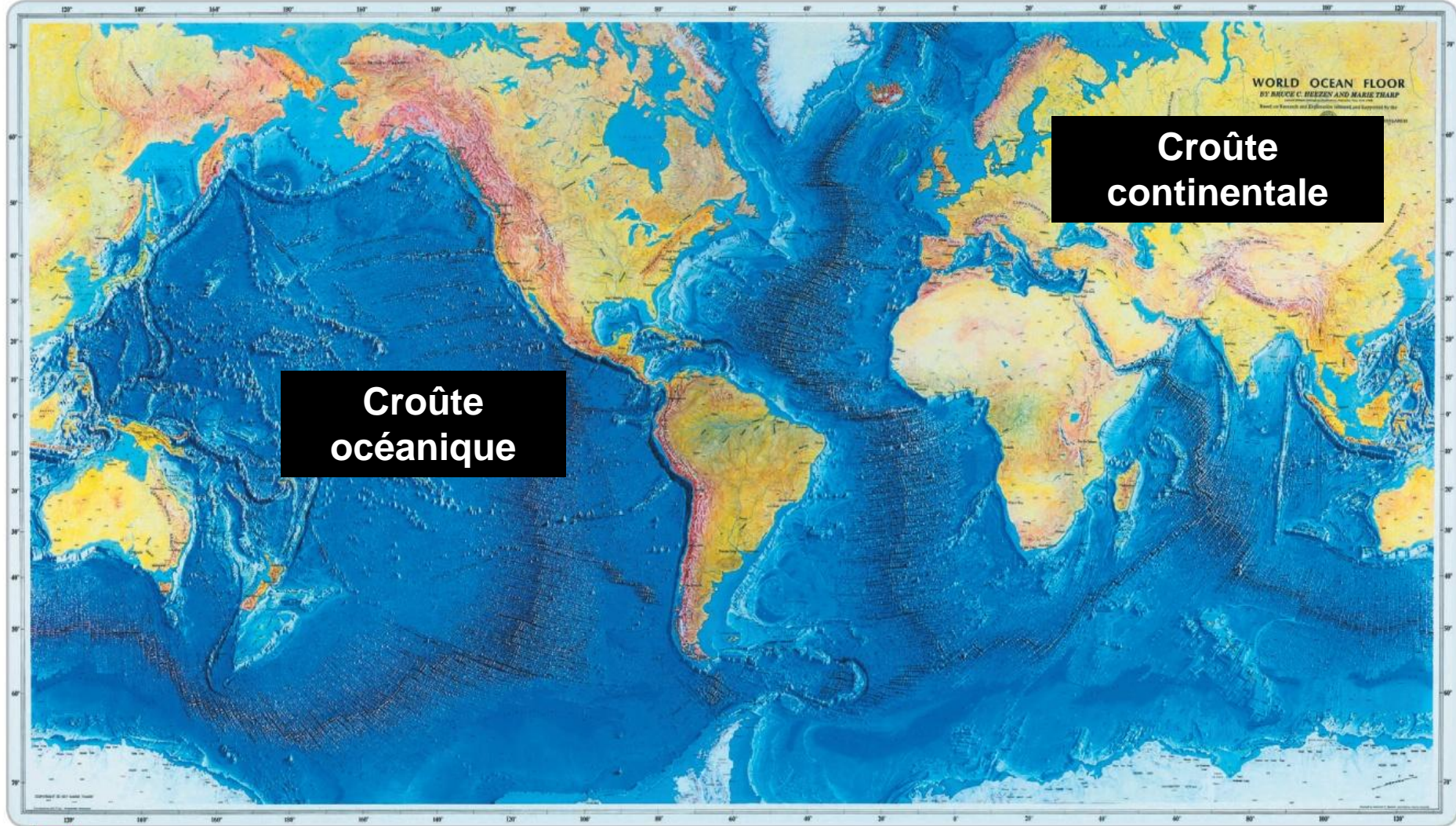
Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre

Problème : Alors que la majeure partie du globe est inaccessible à l'observation, comment les scientifiques ont-ils pu connaître sa structure et sa composition ?

Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre

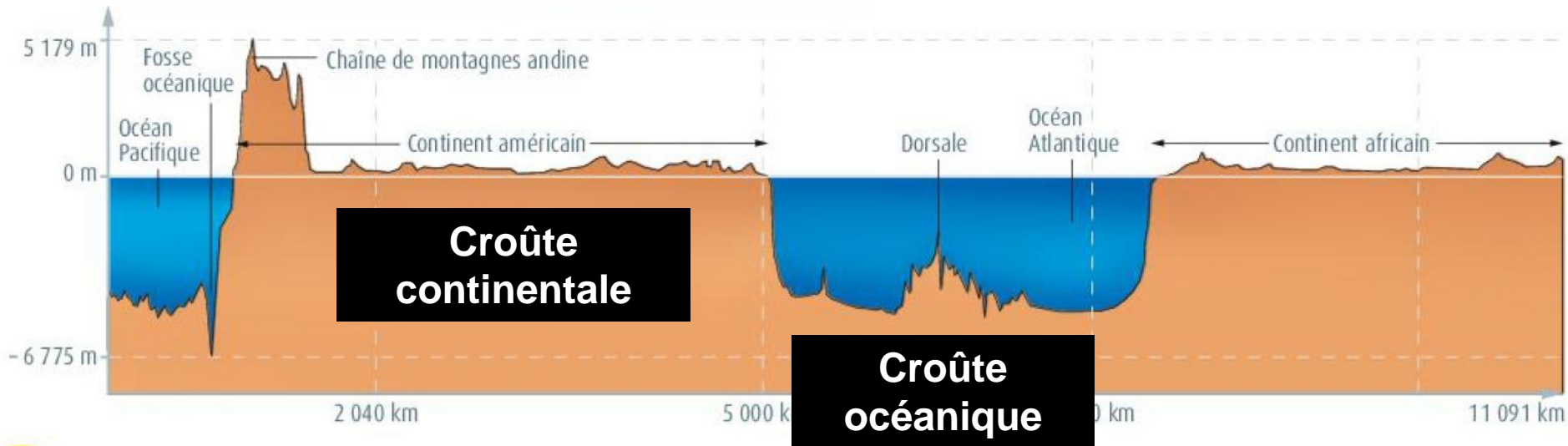
I. Des observations directes de roches permettent de connaître la composition des couches les plus superficielles.

Des roches continentales et océaniques



a La carte des reliefs terrestres.

Carte des reliefs terrestre



2 Carte et profil des altitudes terrestres, de l'Amérique du Sud à l'Afrique. La base de données des altitudes utilisée par *Google Earth* est précise à 1000 m près en distance horizontale et 90 mètres près en distance verticale.

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



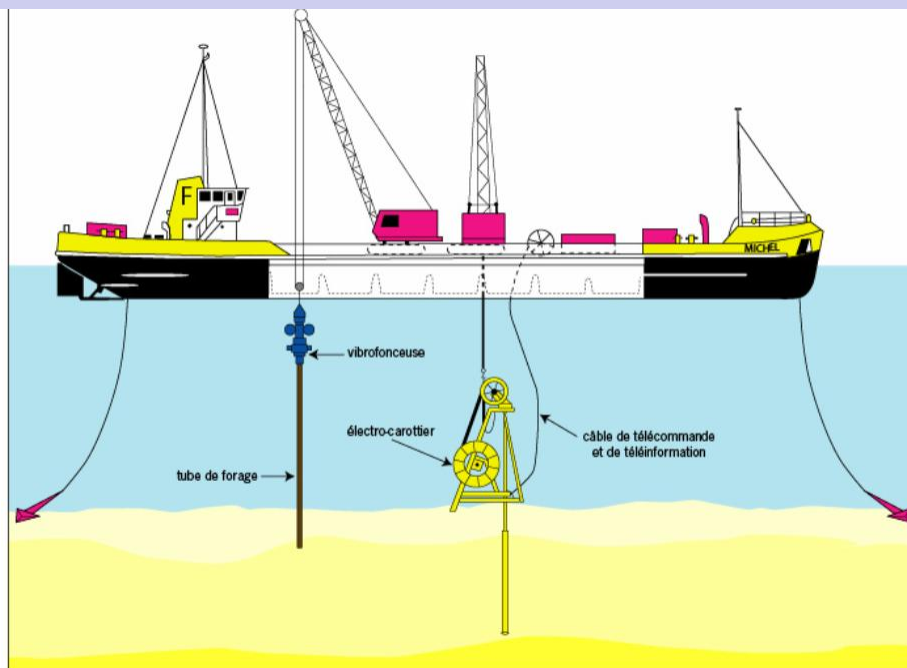
Le forage le plus profond du monde



Des roches océanique peuvent être prélevées par dragage



Des roches océaniques peuvent être prélevées par forage



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

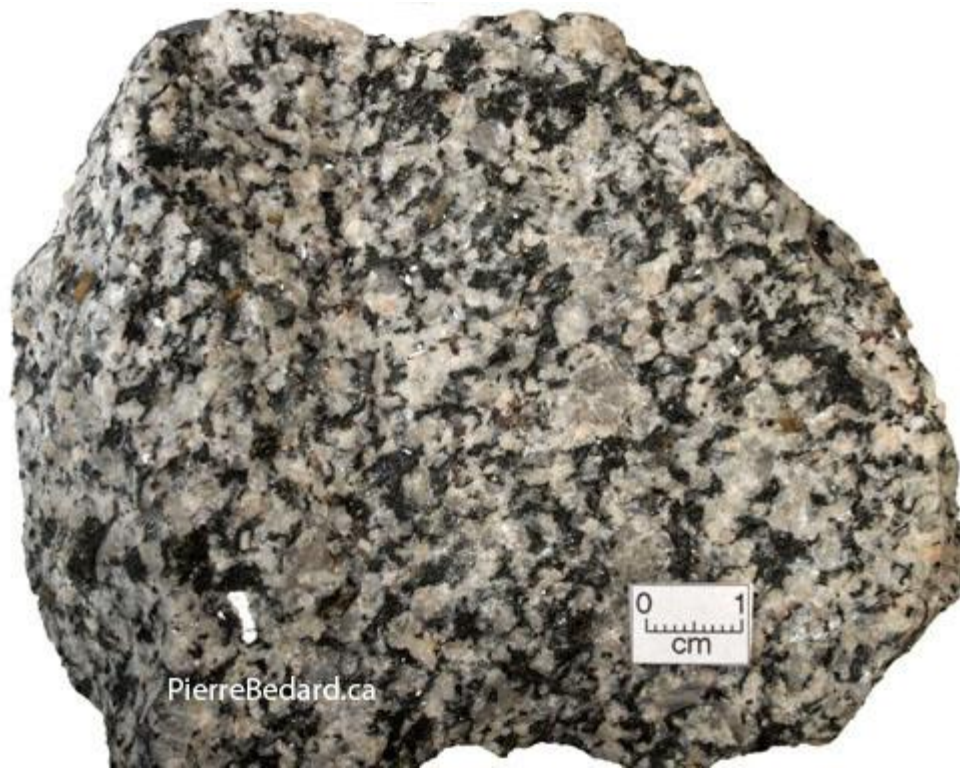
Chapitre 1. Structure et composition du globe terrestre

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

A. Méthodes d'étude des roches prélevées

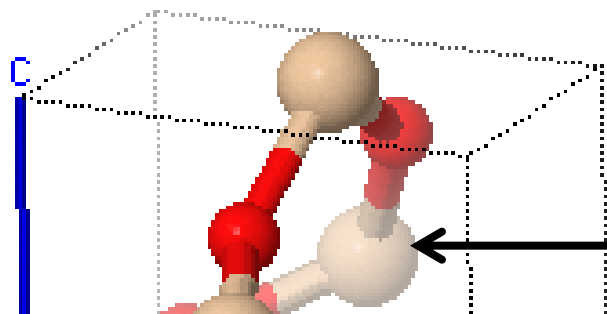
1. Observation macroscopique des roches.

Une roche est un ensemble de minéraux

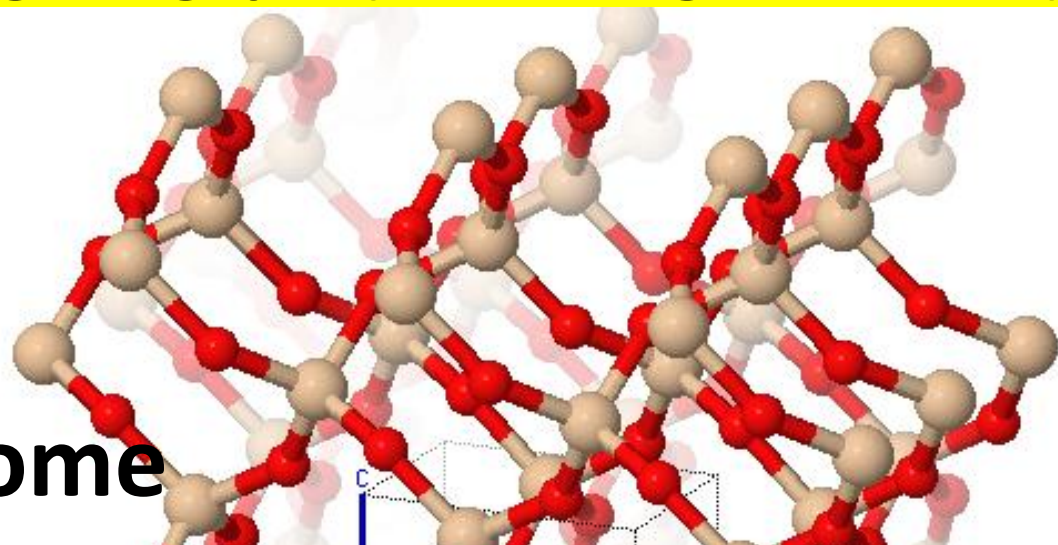


Le minéral, une molécule géologique (assemblage d'atomes)

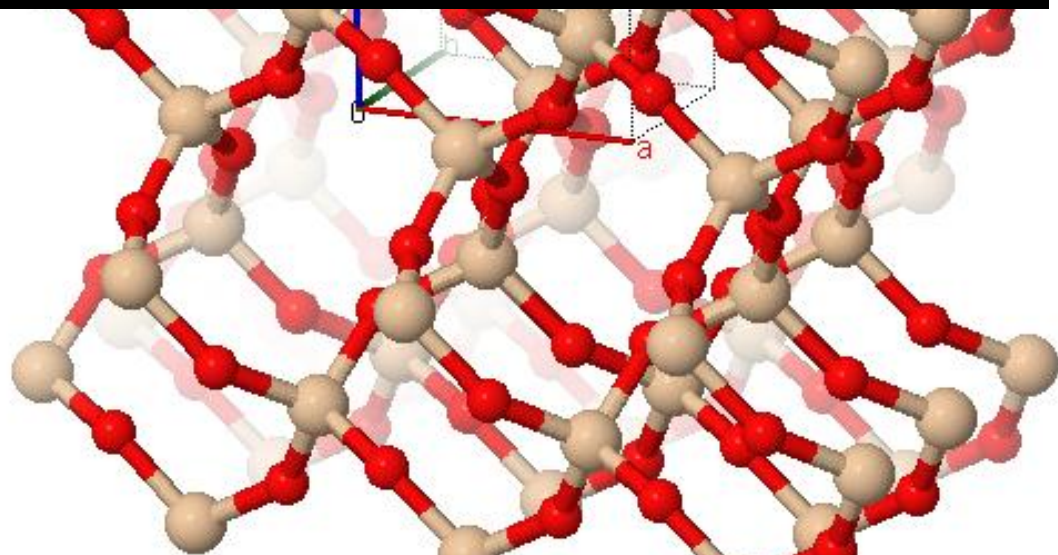
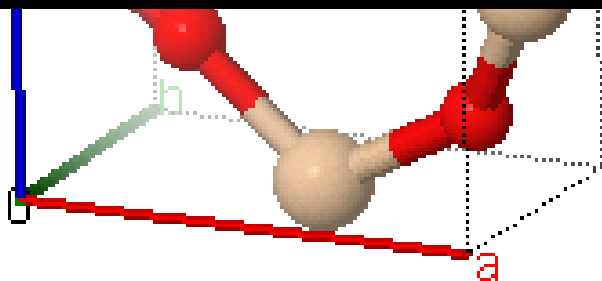
Ex. du Quartz SiO_2



atome

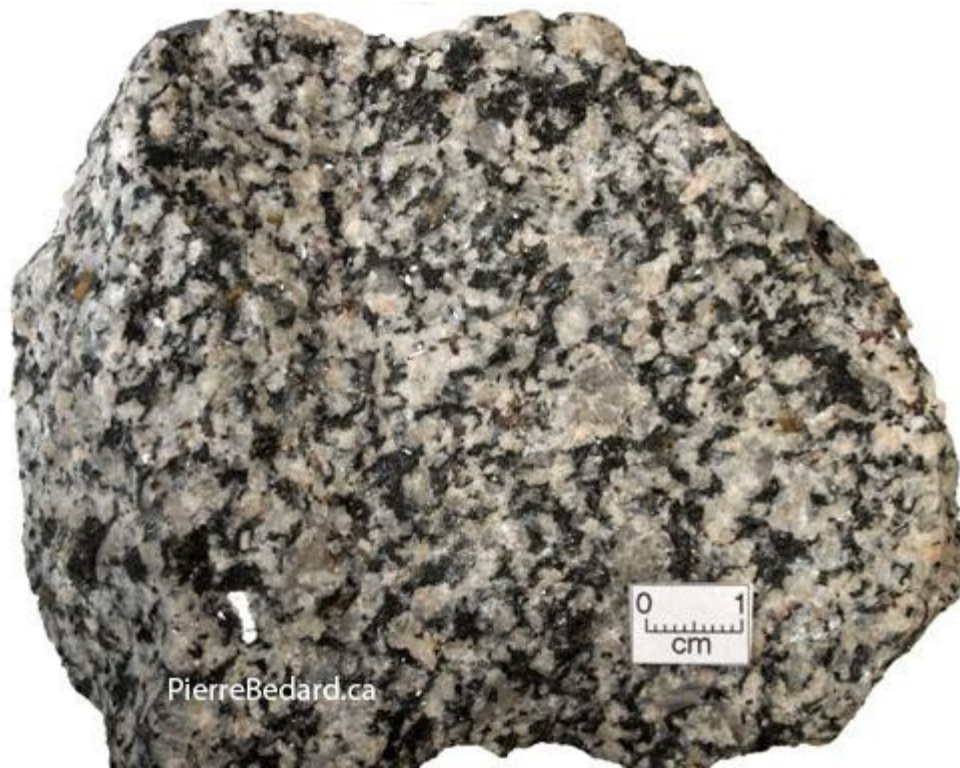


Agencement géométrique des atomes => propriétés particulières (couleur, reflet, plan de clivage, ...) => permettent d'identifier les minéraux



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


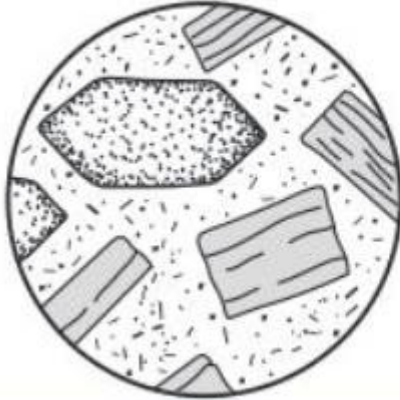
Basalte



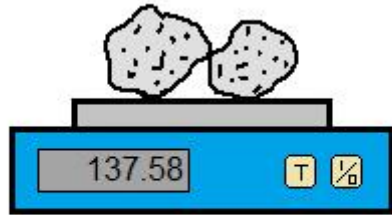
Structure microlithique

Tous les minéraux ne sont pas visibles

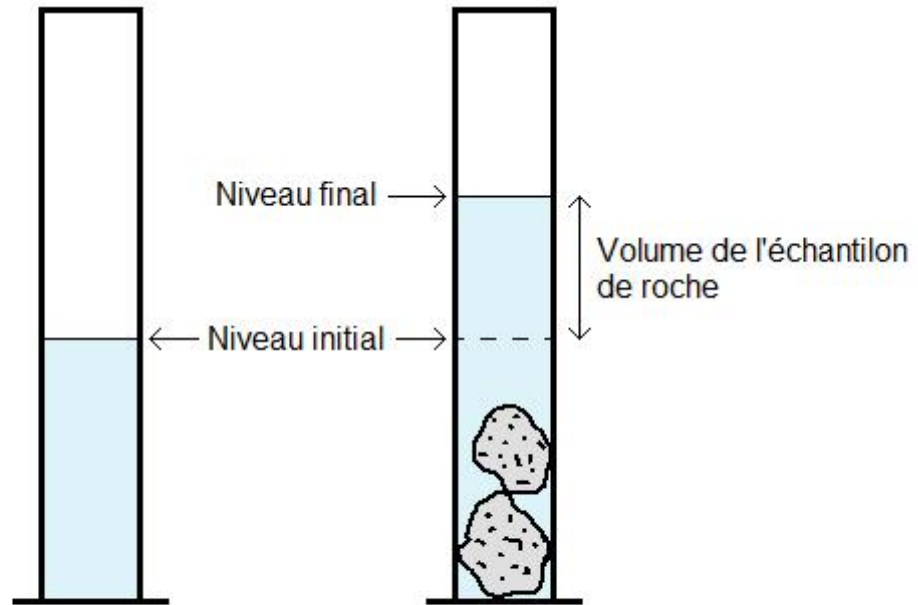
Deux exemples de structure de roches : basaltes et gabbros

Texture grenue	Texture microlitique
<p>À l'œil nu : on discerne de gros cristaux, assemblés les uns aux autres.</p>	<p>À l'œil nu : des cristaux, plus ou moins nombreux, peuvent être visibles mais la roche apparaît en grande partie constituée d'une "pâte" qui semble homogène.</p>
<p>Au microscope polarisant : Les cristaux sont jointifs (ils apparaissent comme les pièces d'un puzzle) ; il n'y a pas de zones non cristallisées séparant les cristaux.</p> 	<p>Au microscope polarisant : Quelques grands cristaux (phénocristaux*) sont visibles. Ils sont séparés par des zones non cristallisées, dans lesquelles on distingue de nombreux cristaux de très petite taille appelés microlites*.</p> 

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

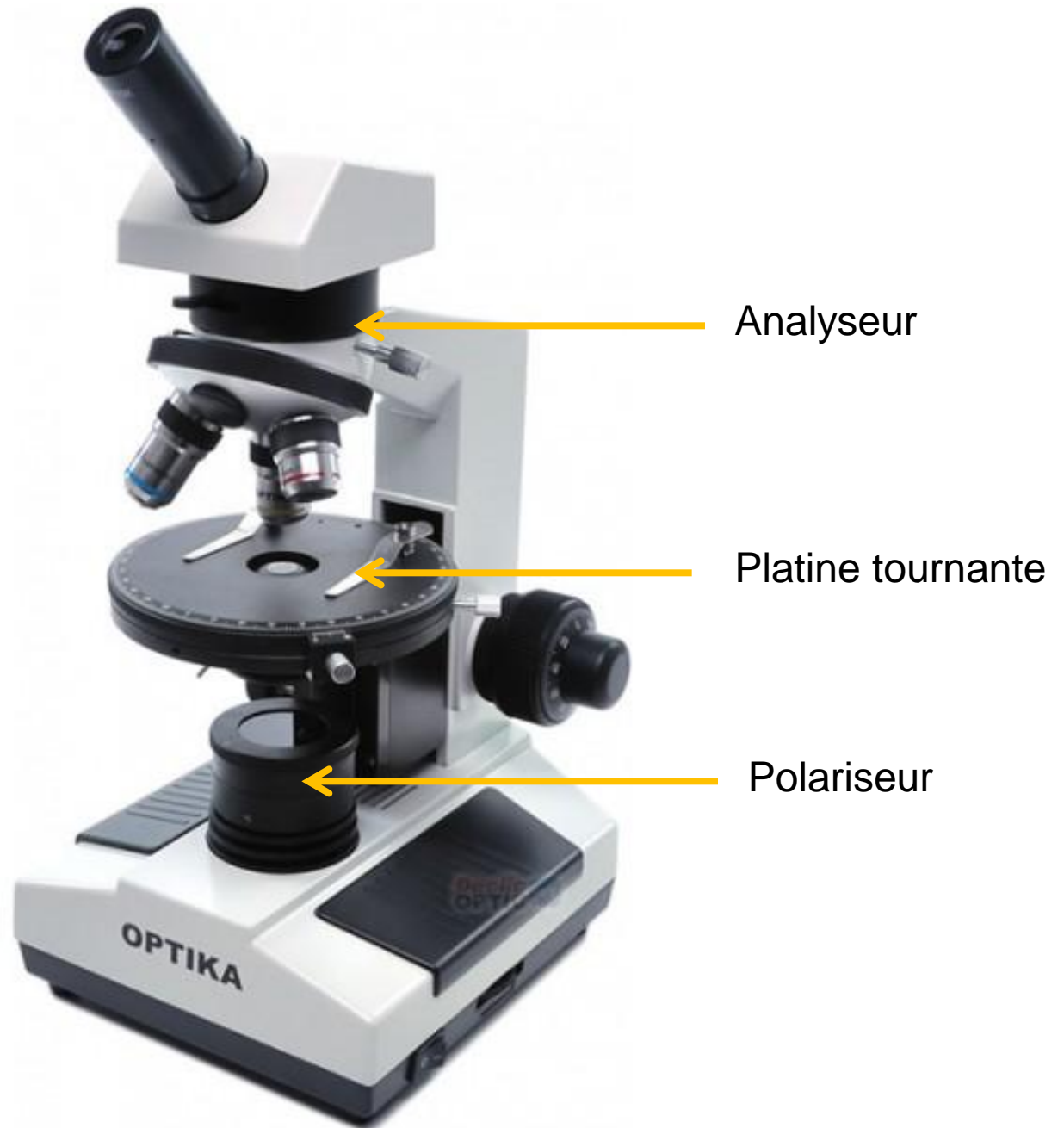
A. Méthodes d'étude des roches prélevées

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

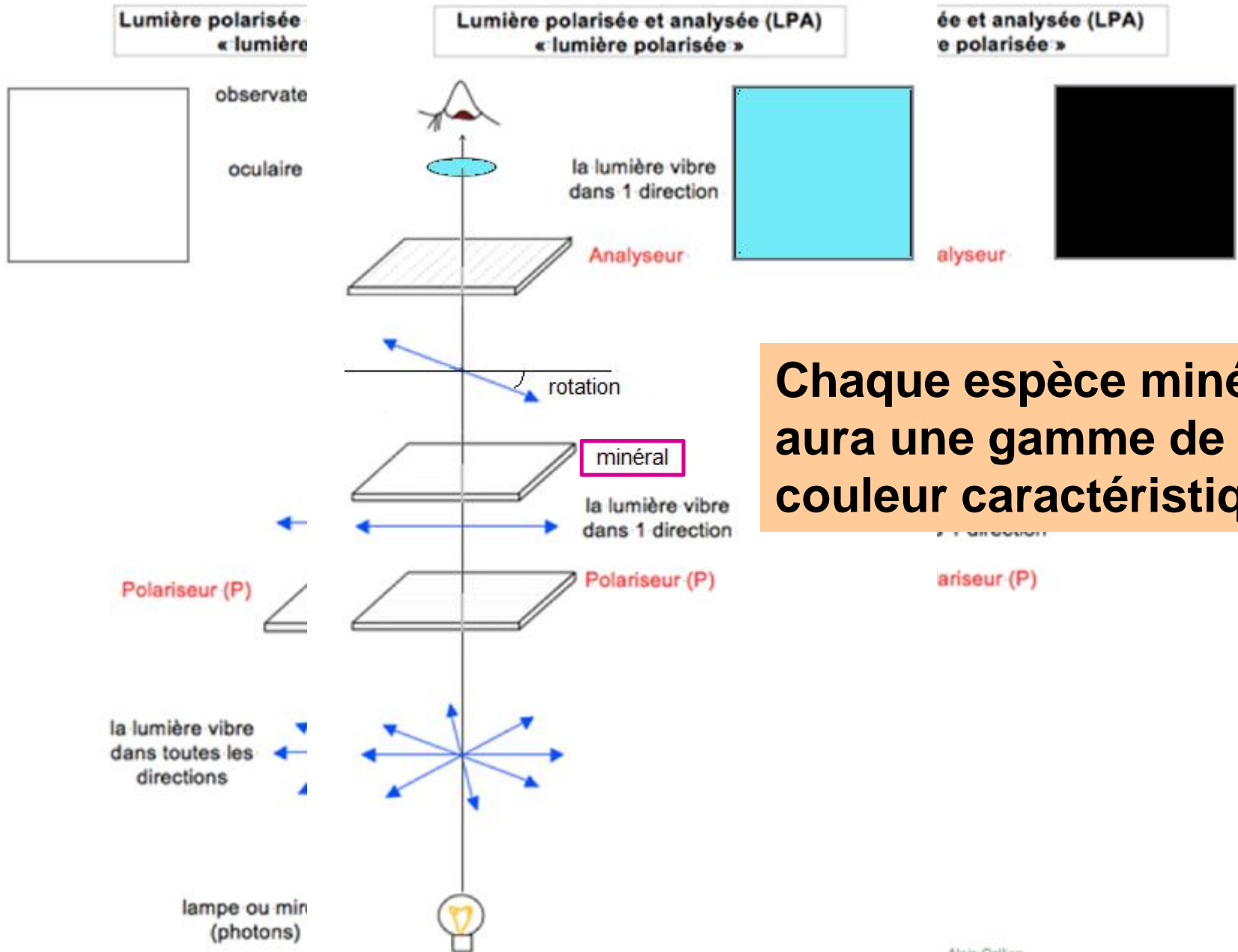
Préparation de plaque mince de roche



microscope polarisant

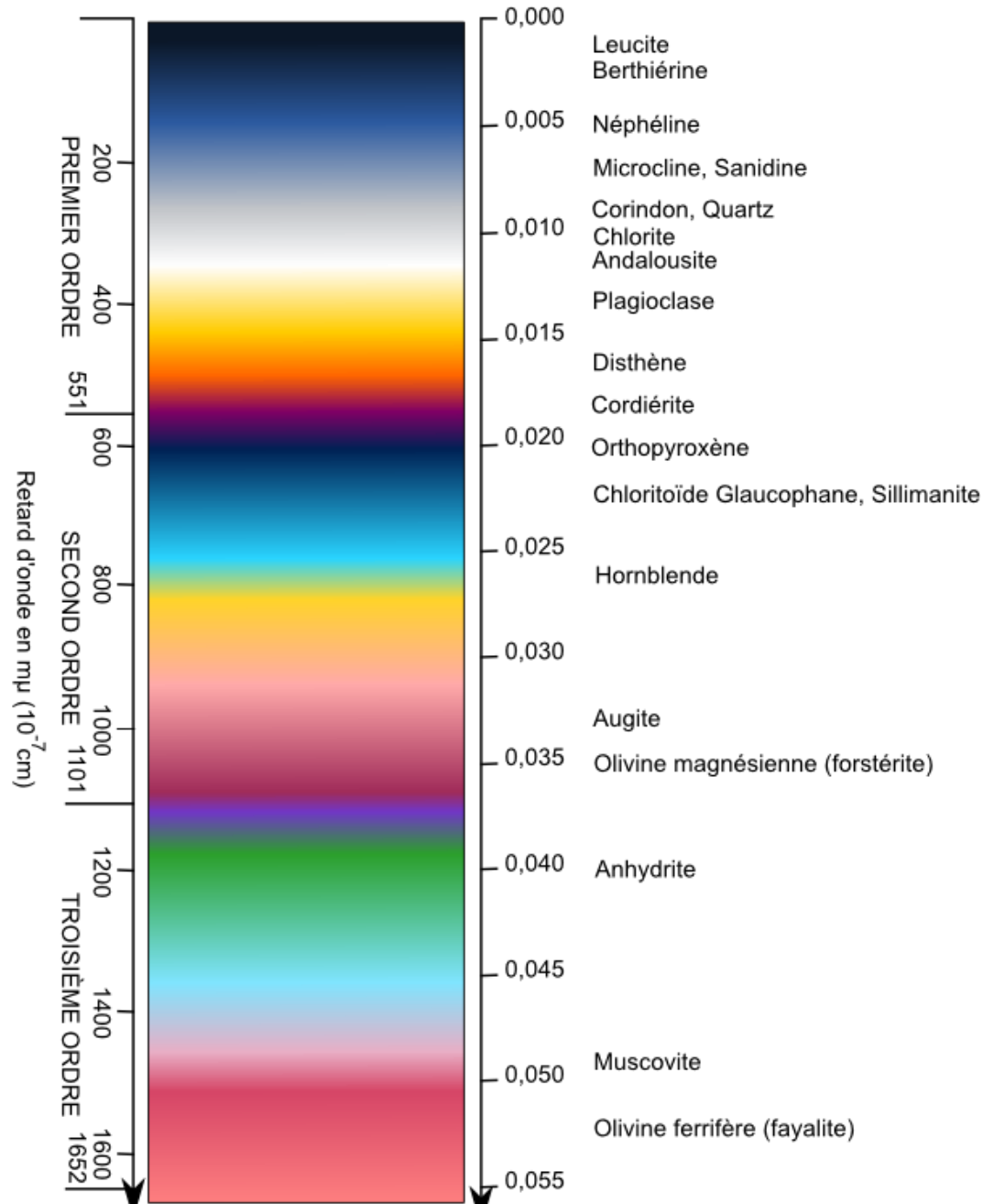


Principe du microscope polarisant



Chaque espèce minérale aura une gamme de couleur caractéristique !

Principe du microscope polarisant : Echelle de birefringence



Du quartz observé au microscope polarisant



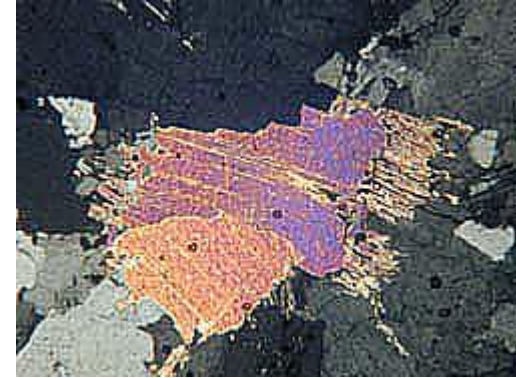
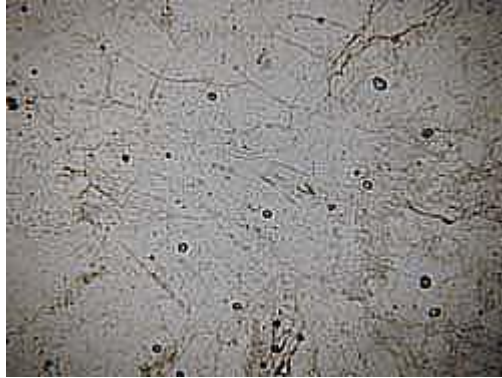
LPNA



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

Identification des roches de la lithosphère océanique

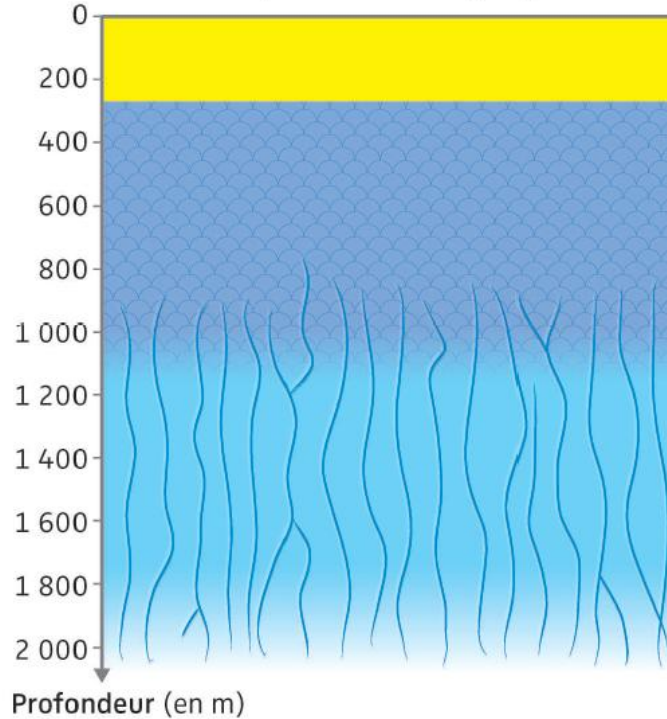
Localisation du forage



Légende

- Sédiments
- Basalte en coussins (pillow lavas)
- Basalte en filons

Colonne de plancher océanique prélevée



C Résultat d'un forage dans le Pacifique.

Identification des roches de la lithosphère océanique

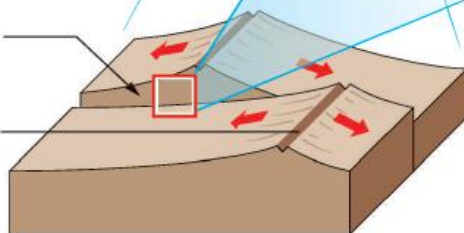


Localisation

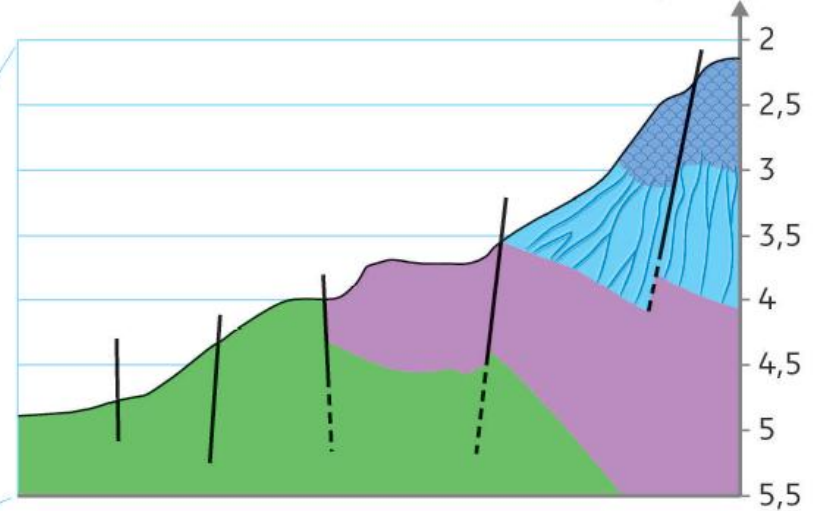


Faïlle transformante

Dorsale



Profondeur (en km)



Légende

● Péridotite du manteau

● Basalte en coussins

/ Faïlle

● Basalte en filons

● Gabbro

0 2 km

Les roches de la croûte océanique : gabbros et basaltes

Gabbro



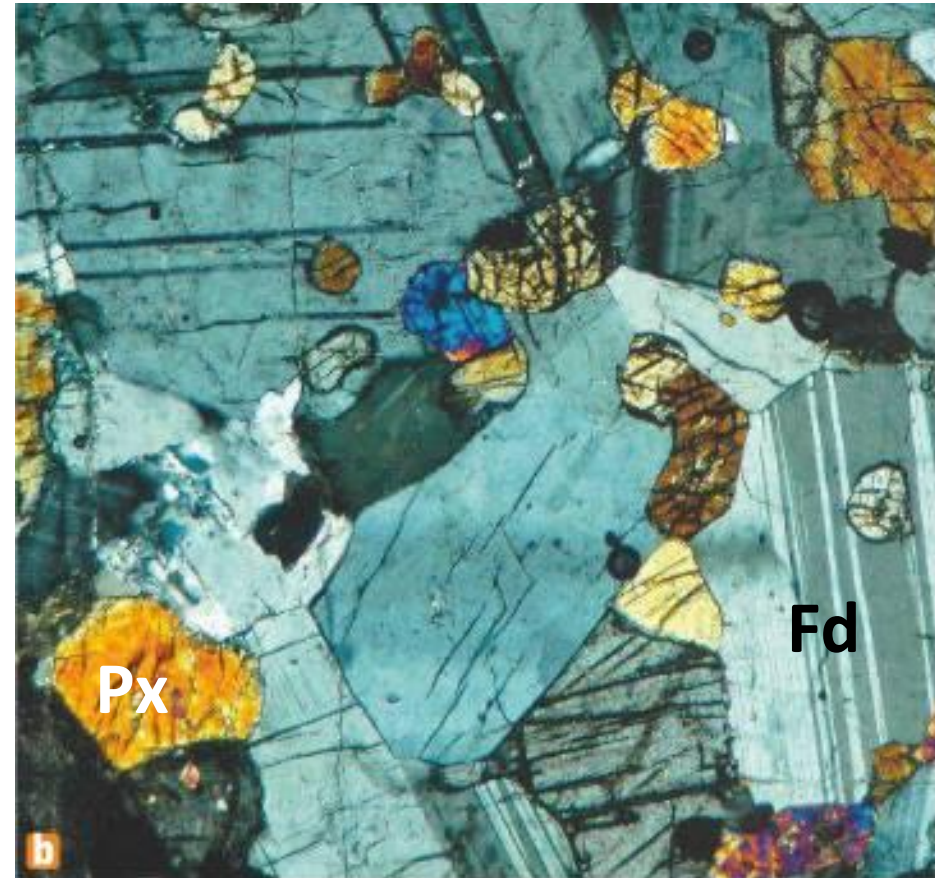
Roche grenue

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)

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

Diversité des roches de la croûte continentale

3

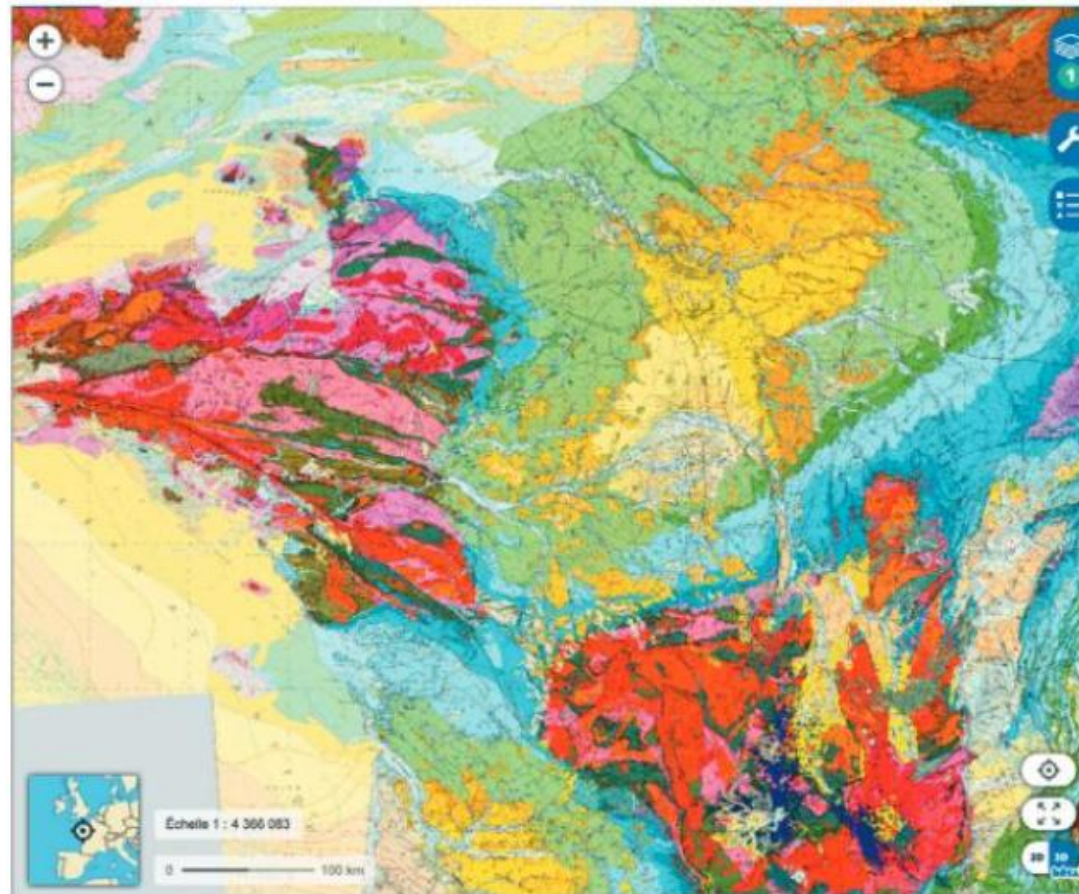
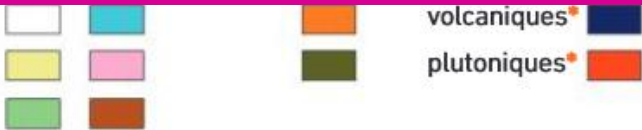
Les roches situées à la surface des continents

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

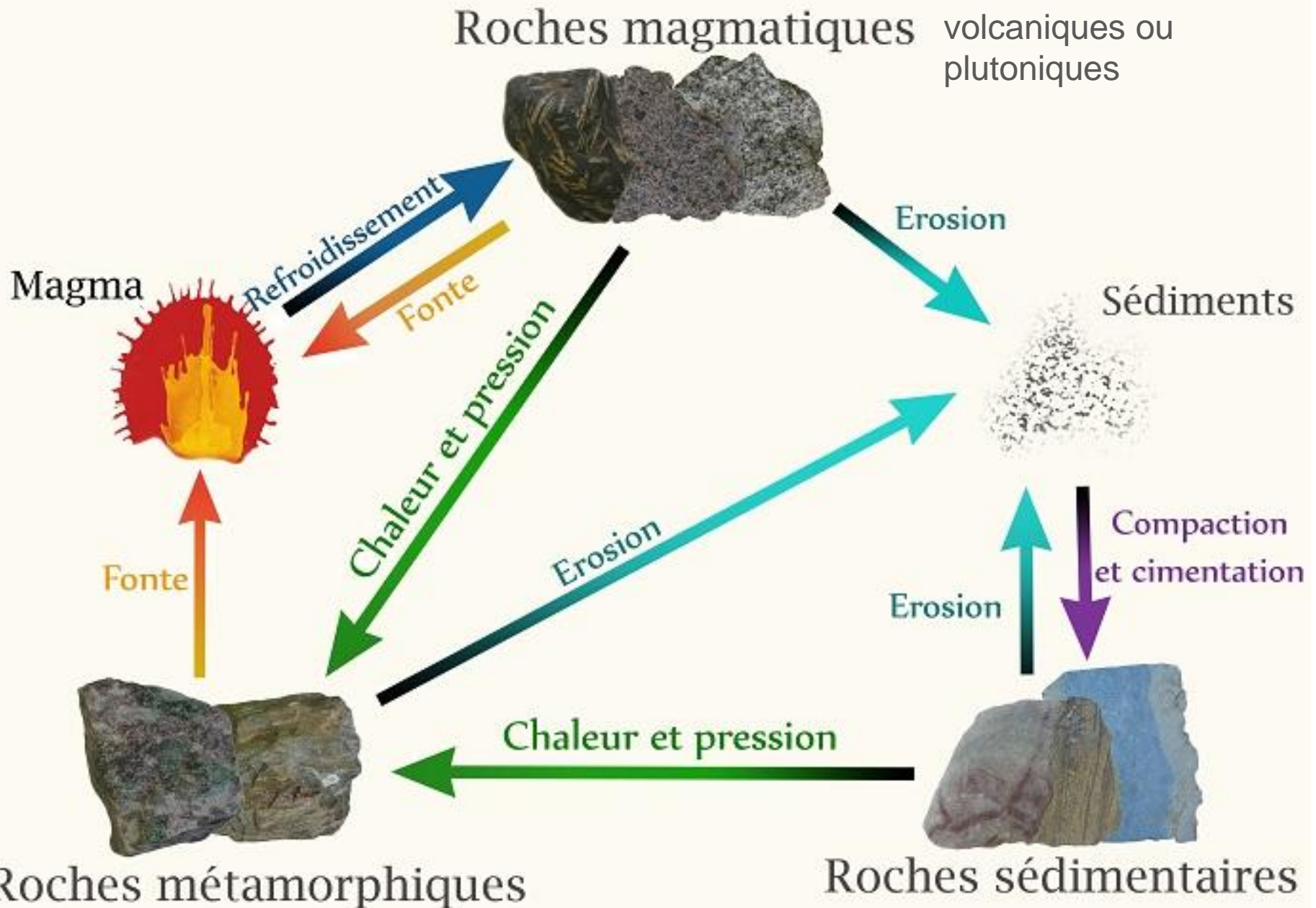
Activité pratique

- 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.

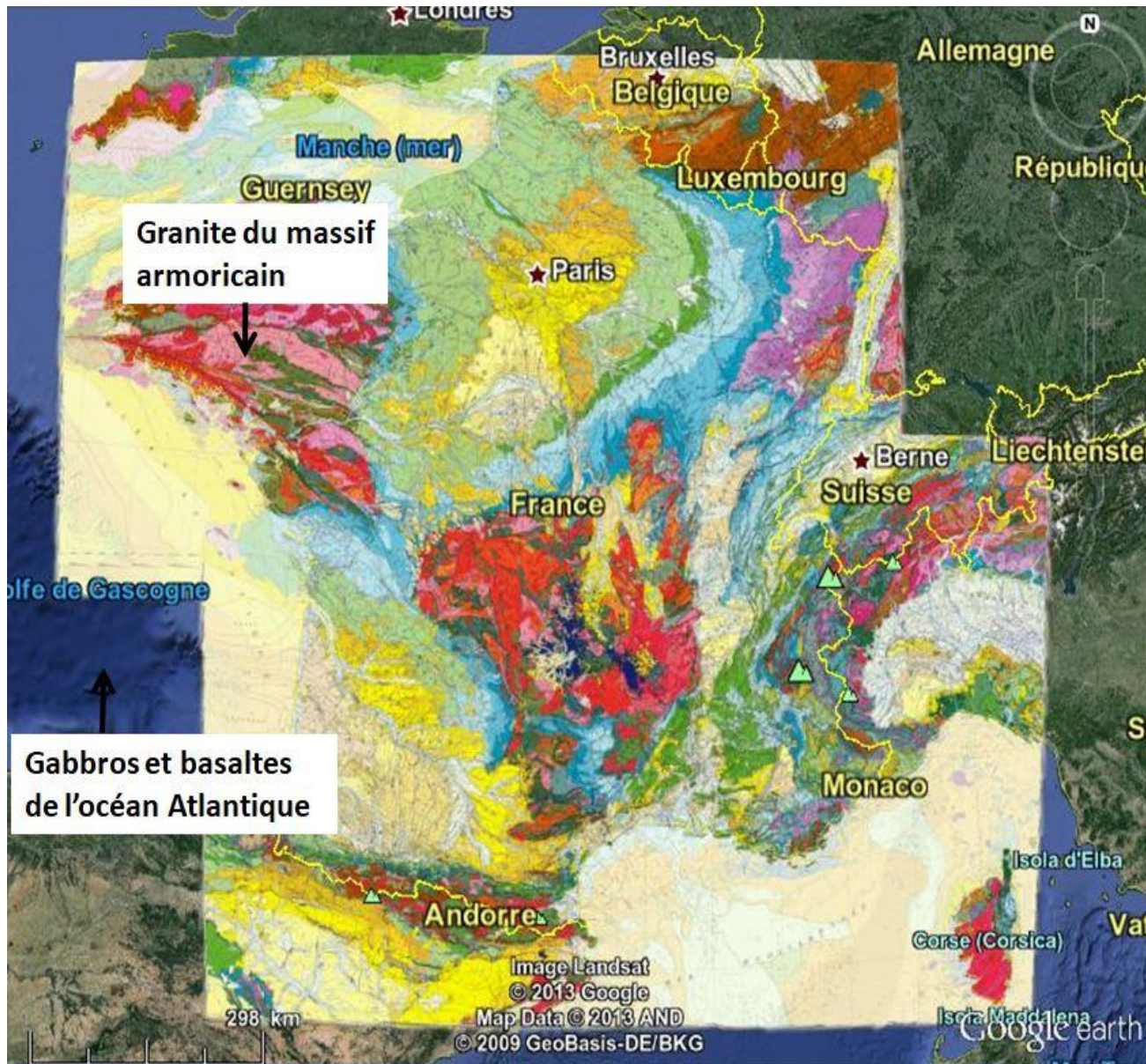
Roches sédimentaires*	Roches métamorphiques*	Roches magmatiques*
-----------------------	------------------------	---------------------



Diversité des roches de la croûte continentale



Localisation des roches prélevées



Diversité des roches de la croûte continentale











3

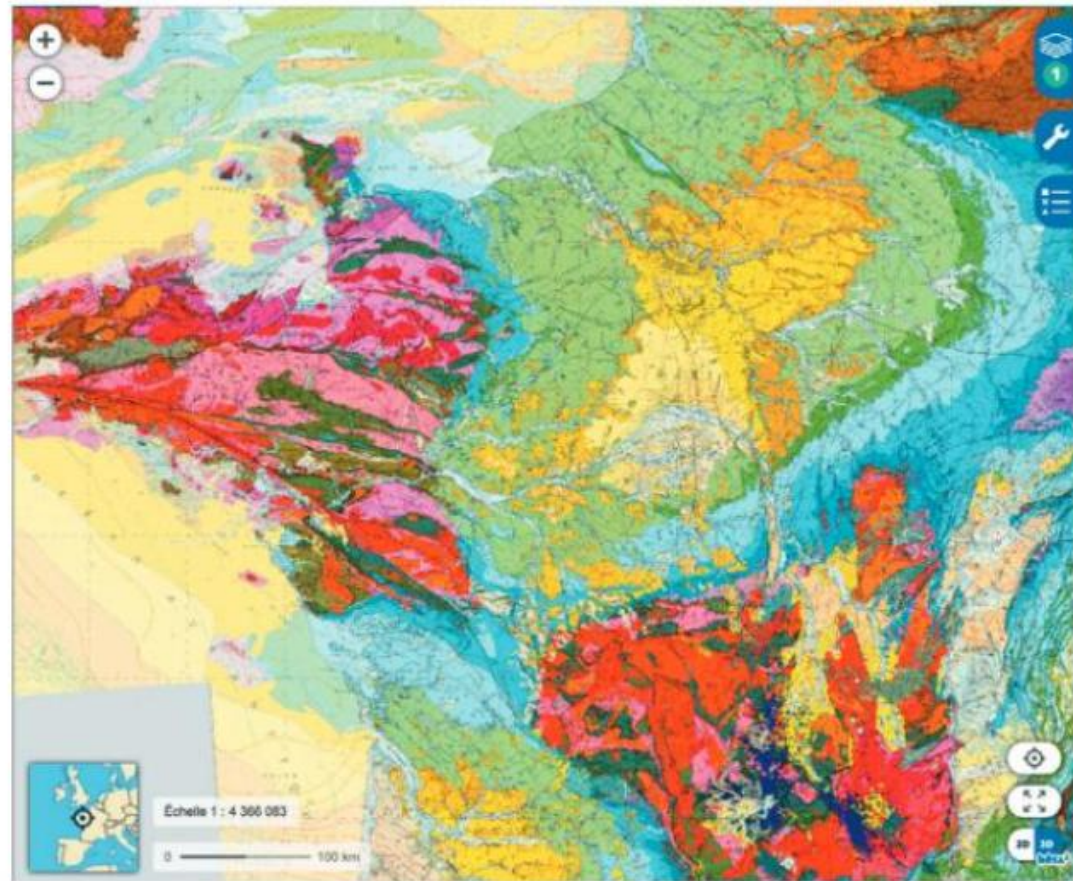
Les roches situées à la surface des continents

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

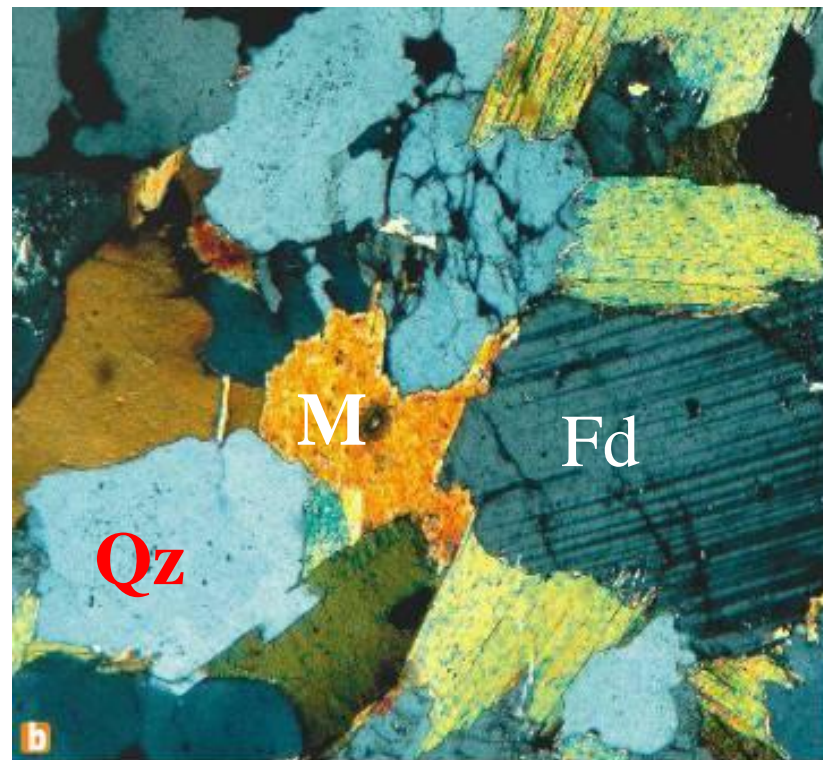


Roche grenue

• 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



Lame mince de granite observée en lumière polarisée analysée

Bilan partiel

Le relief terrestre présente une distribution bimodale

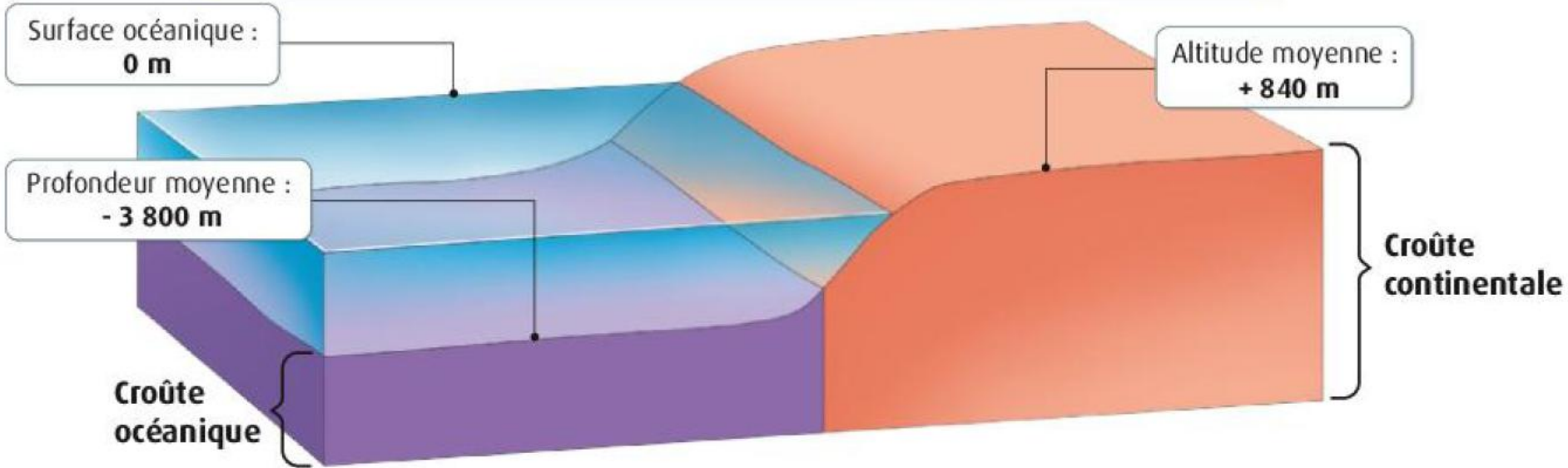
Surface océanique :
0 m

Profondeur moyenne :
- 3 800 m

Altitude moyenne :
+ 840 m

**Croûte
continentale**

**Croûte
océanique**



Bilan partiel

Roches de la croûte océanique

Roche représentative de la croûte continentale

Basalte



Gabbro



Granite



Structure

Microlitique

(la roche contient des minéraux invisibles à l'œil nu et du verre)

Grenue

(roche entièrement cristallisée dont tous les minéraux sont visibles à l'œil nu)

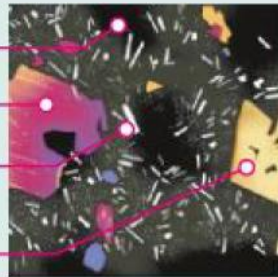
Composition minéralogique (lame mince)

Verre

Olivine

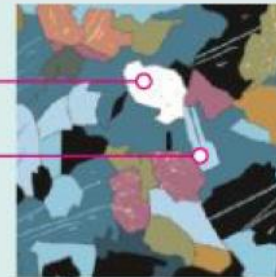
Feldspath plagioclase

Pyroxène



Pyroxène

Feldspath plagioclase



Feldspath plagioclase

Mica

Orthose

Quartz



Densité

> densité du granite

< densité du basalte et du gabbro

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

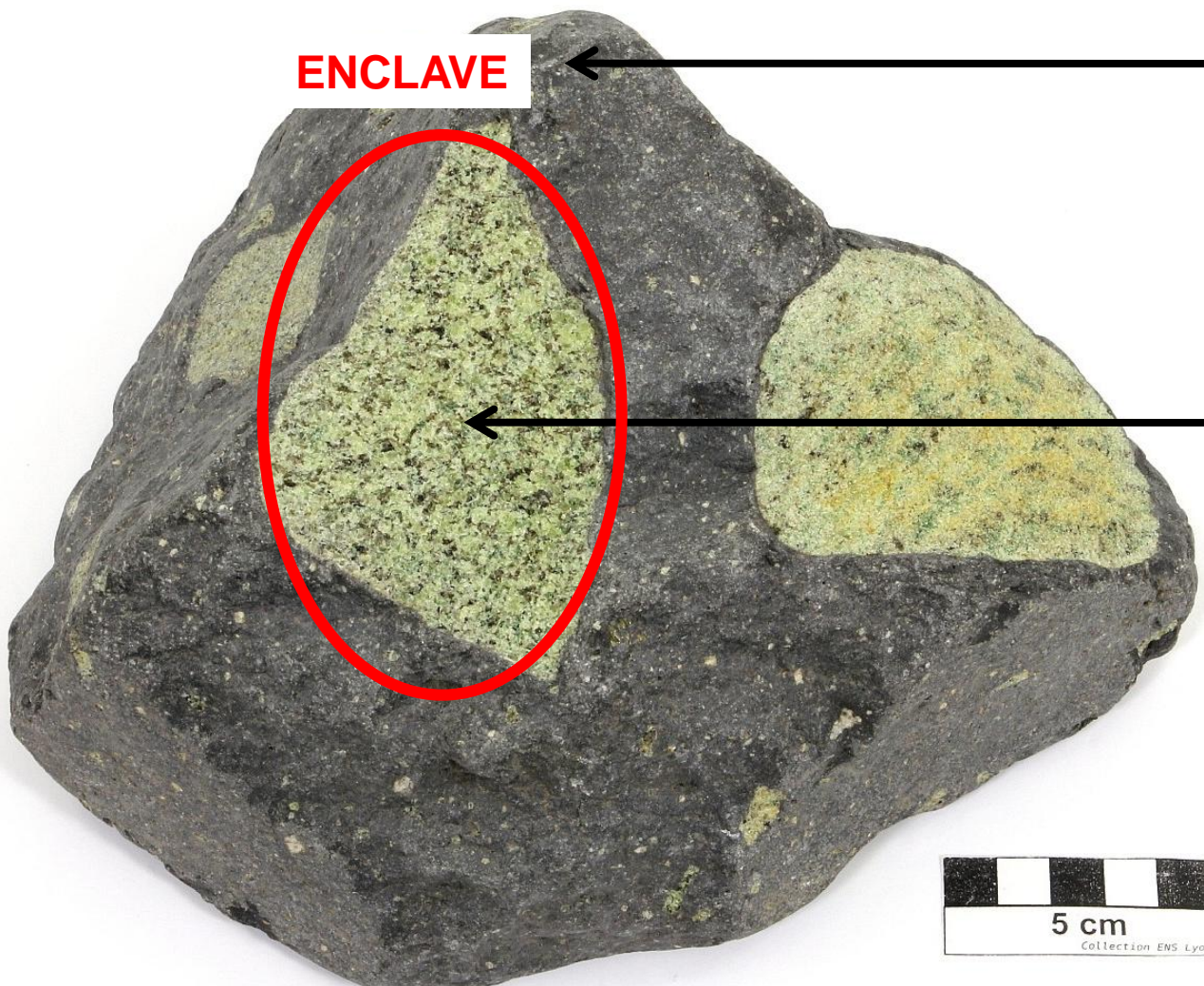
D. Composition du manteau

Enclaves : des échantillons de manteau

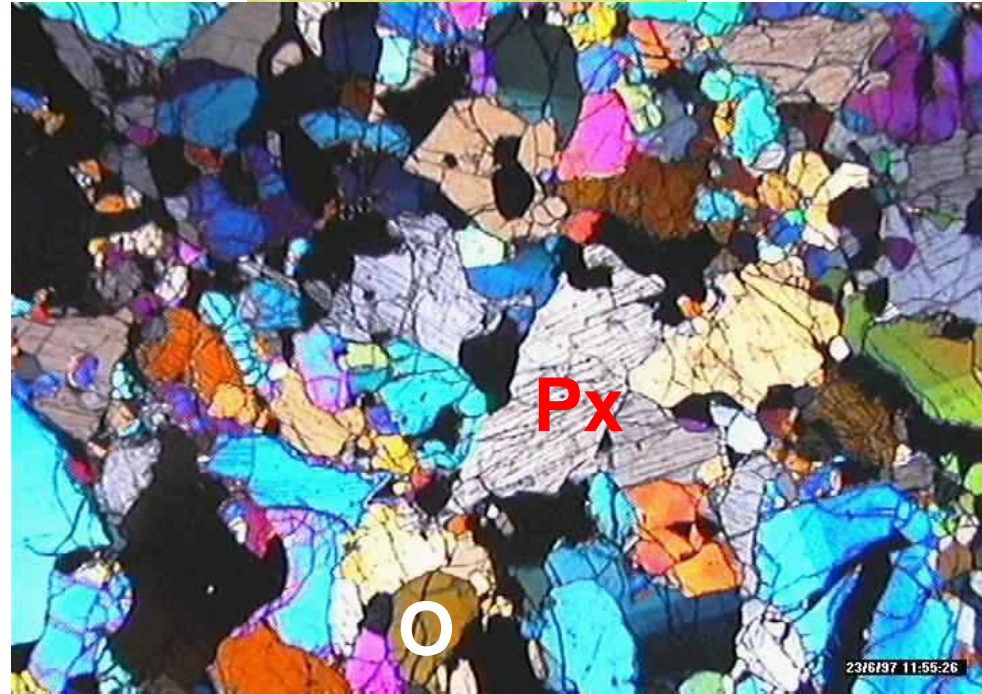
ENCLAVE

Basalte

Péridotite

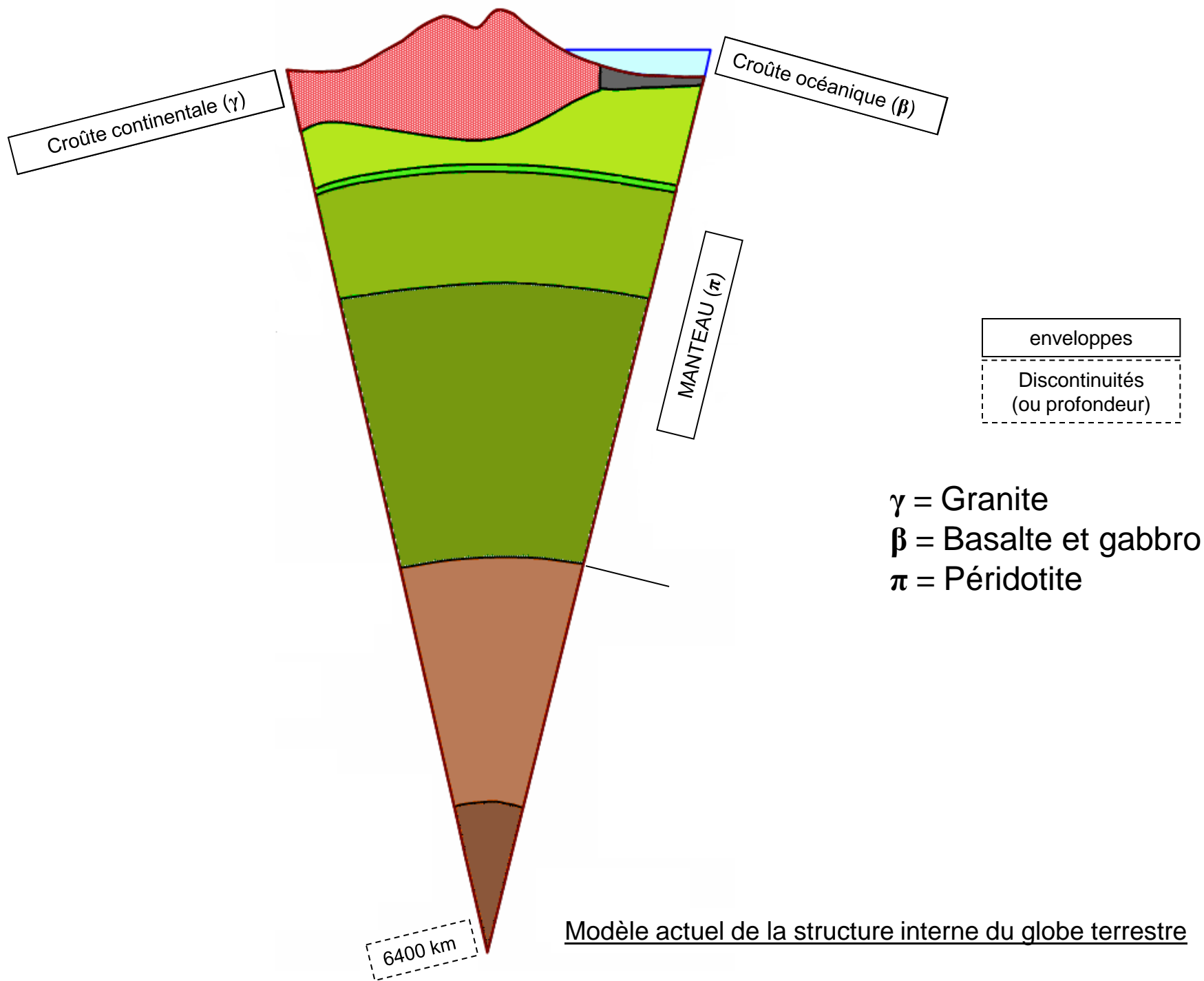


Roches caractéristiques du soubassement : la péridotite



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

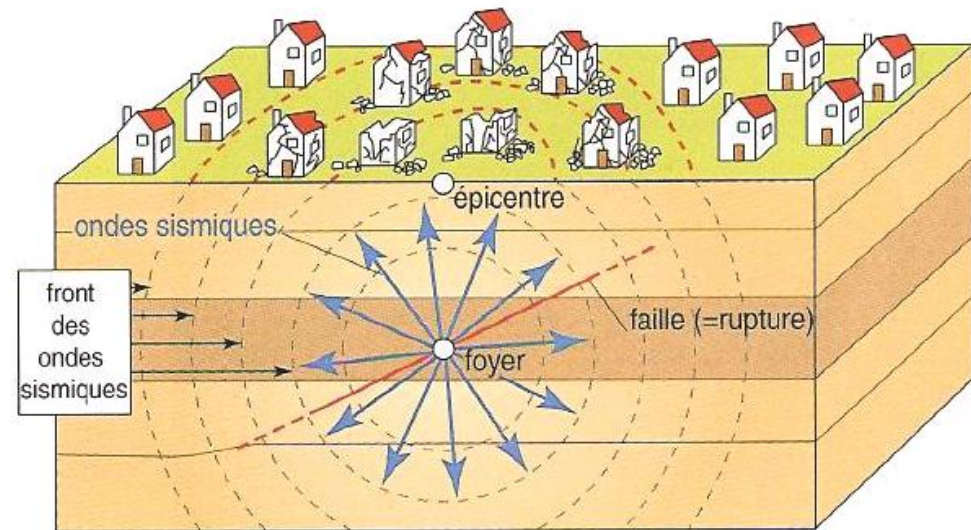
II. Des informations déduites de l'étude des ondes sismiques permettent de comprendre la structure interne du globe.

A. Méthode d'étude.

Naissance des ondes sismiques

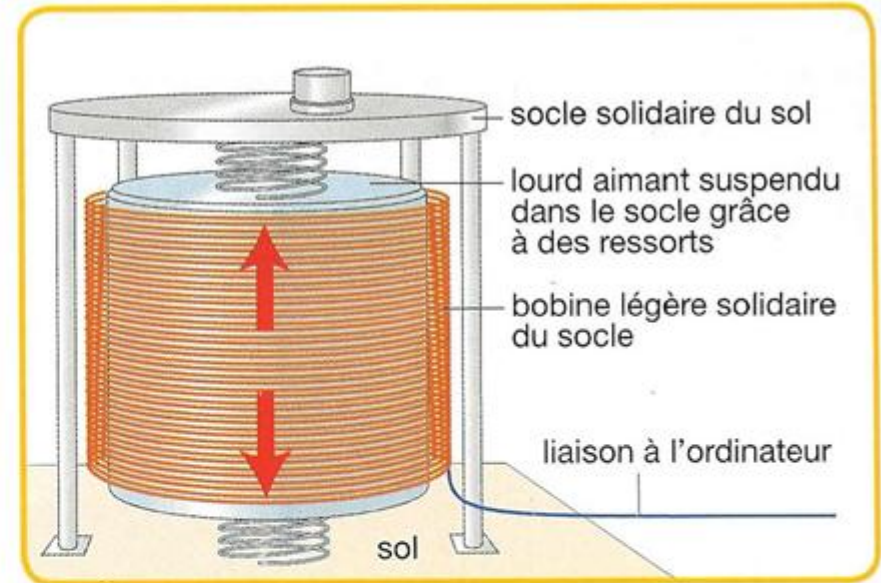


Effets en surface d'un séisme destructeur



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.

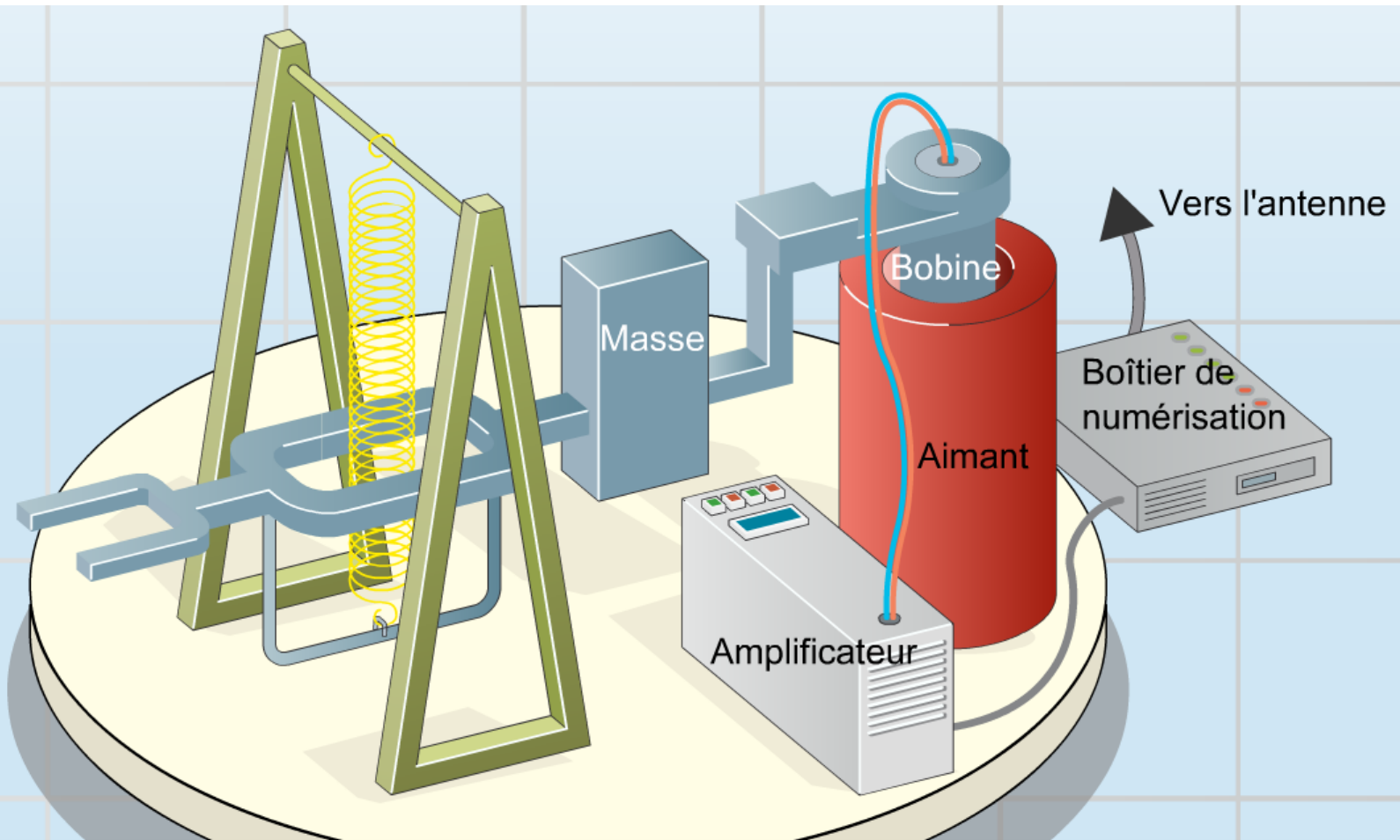
Principe du sismomètre ([animation en ligne](#))



Principe d'un sismomètre.

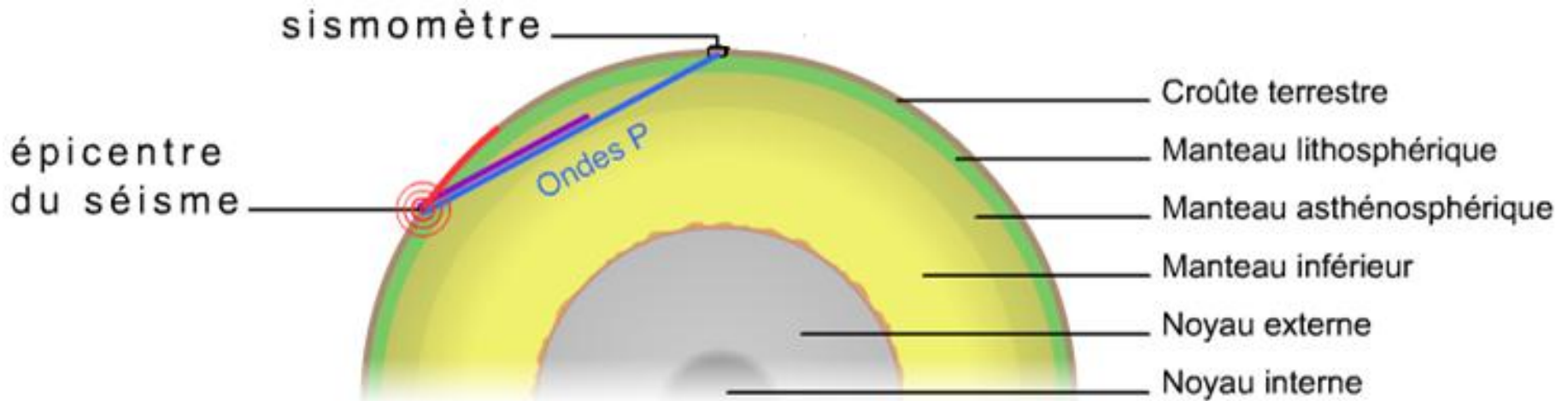
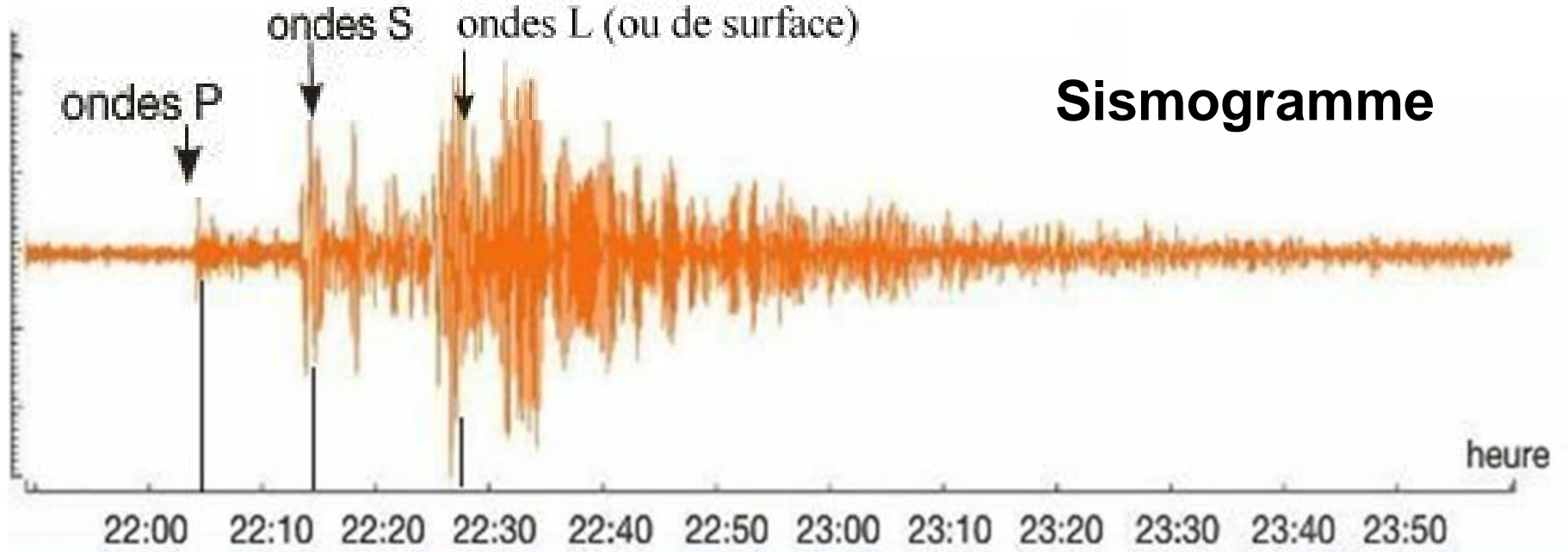
Quand des vibrations arrivent au sismomètre, la bobine légère, solidaire du socle, suit ces vibrations. L'aimant, plus lourd, bouge plus lentement que la bobine. Les mouvements relatifs de la bobine et de l'aimant génèrent de faibles courants électriques proportionnels aux vibrations. Ces signaux sont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

Principe du sismomètre

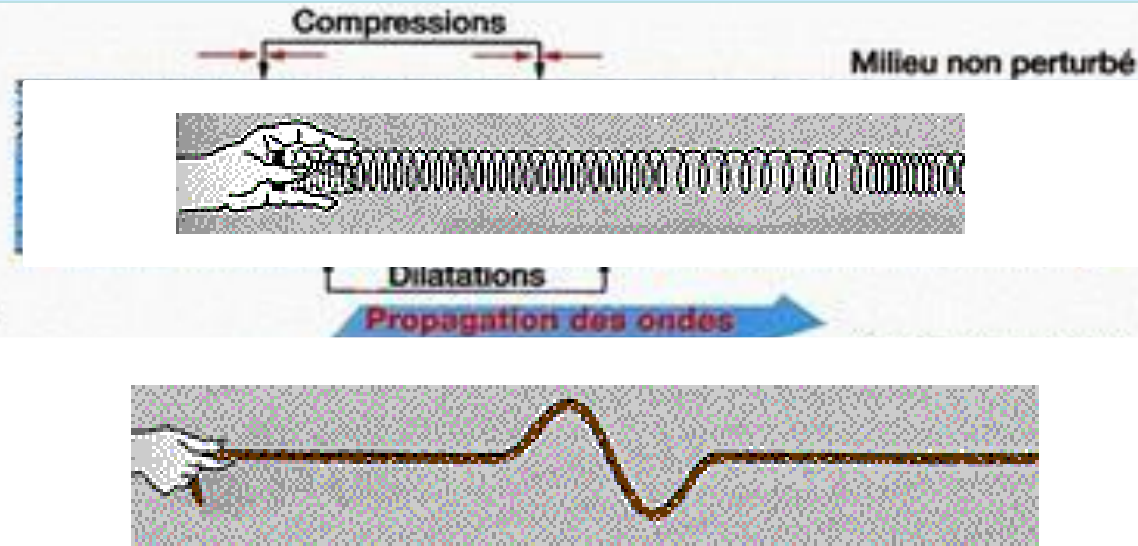


Une masse **assez lourde est fixée sur un bras** suspendu par un ressort au-dessus d'un bâti solidaire du sol. À l'autre extrémité du bras, une **bobine conductrice** est plongée dans un **aimant** qui repose sur le bâti.

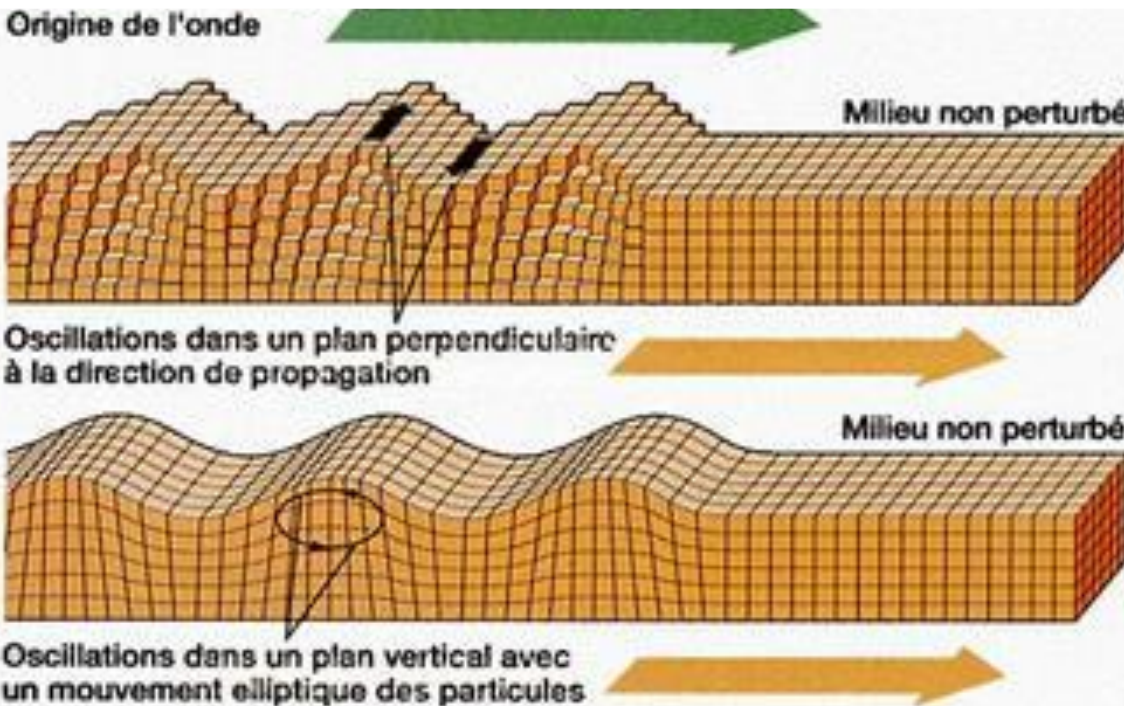
Les différents types d'ondes sismiques



Les différents types d'ondes sismiques



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



inutiles pour l'étude du globe

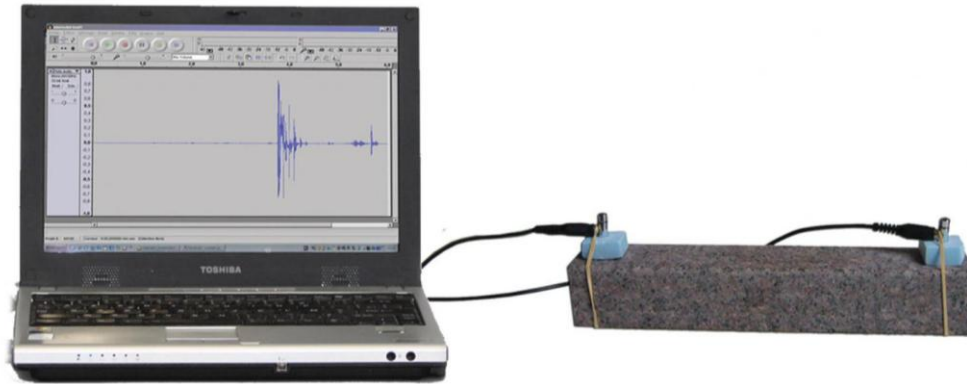
Mais destructrices !

Ondes P
↑
Ondes de volume
↓
Ondes S

Ondes L
↑
Ondes de surface
↓
Ondes R

Vitesse des ondes P et nature des roches

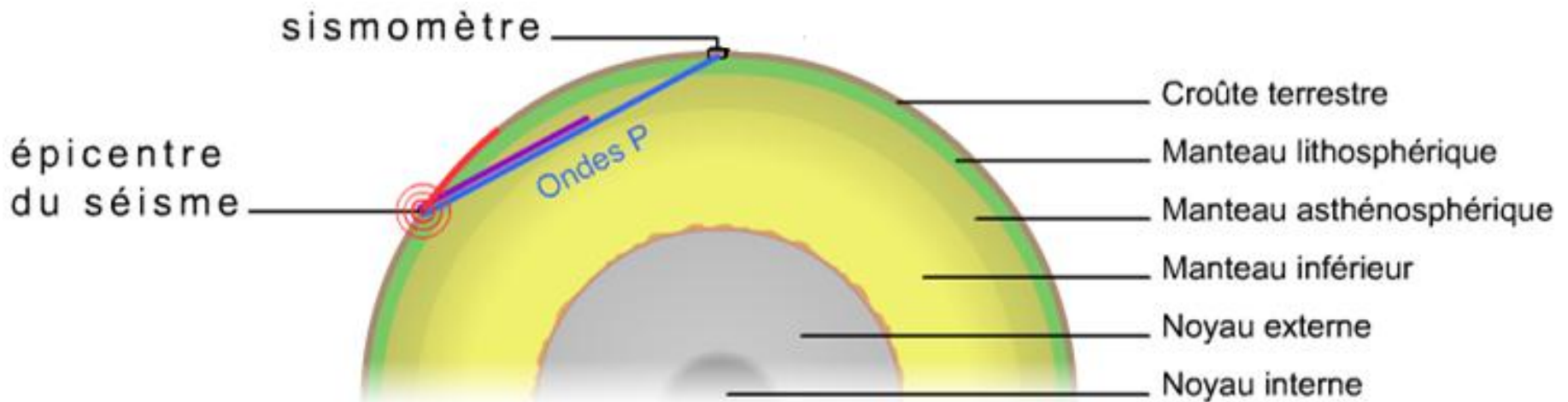
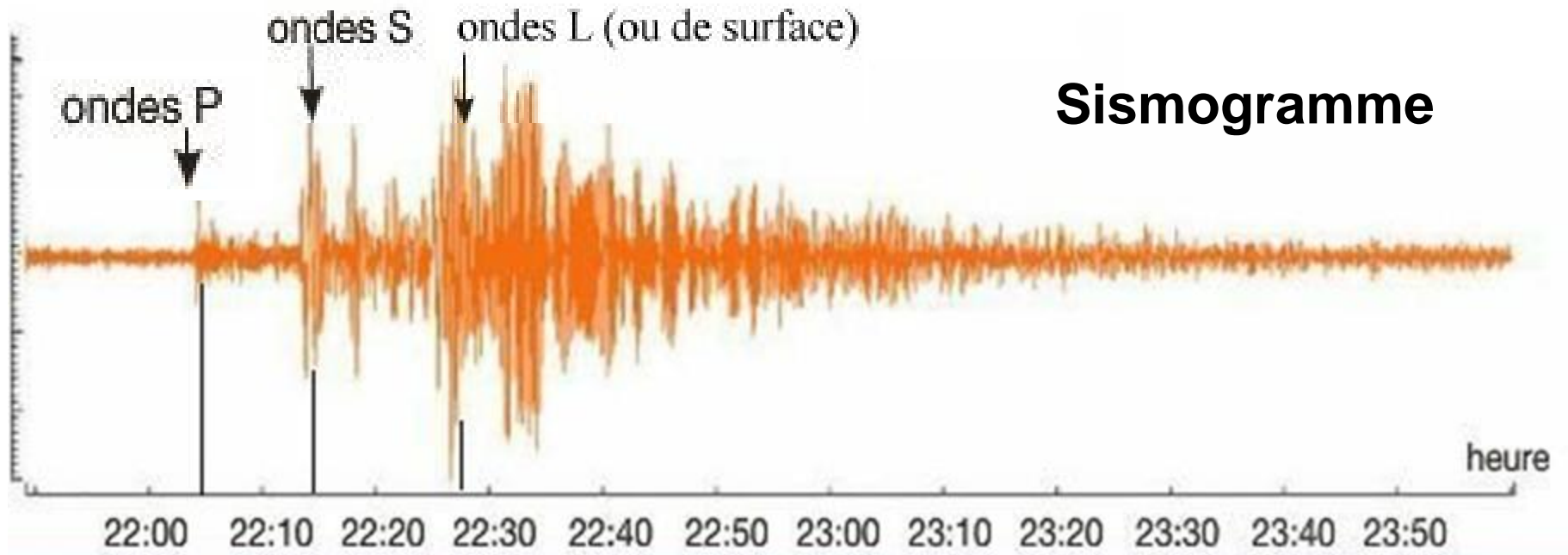
La vitesses des ondes dépend de la nature des roches :



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



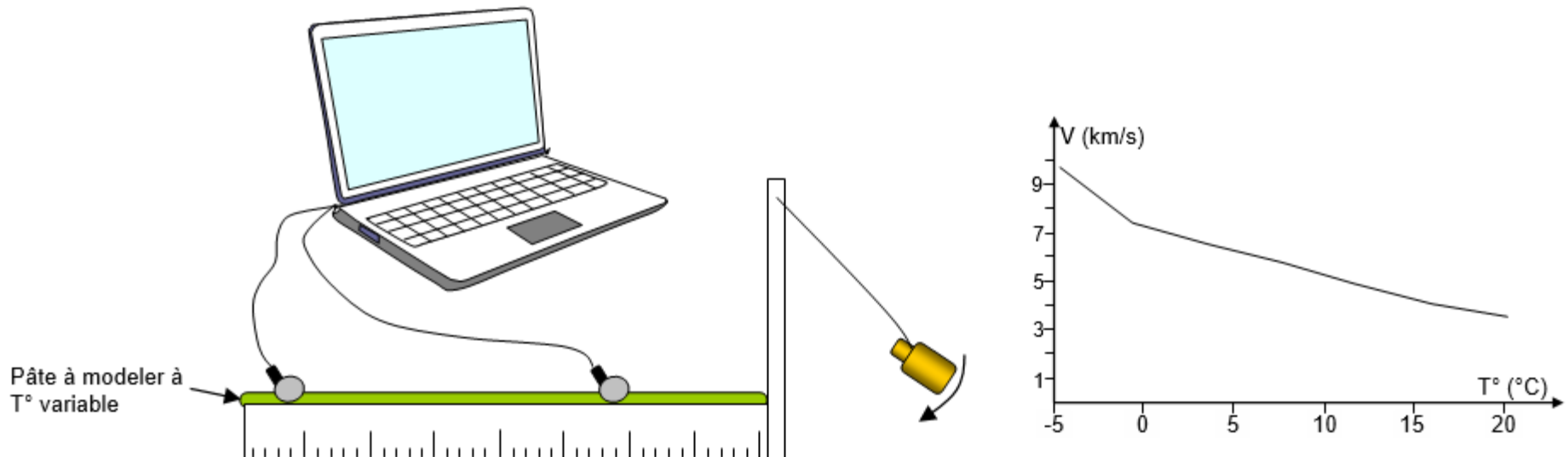
Vitesse des ondes P et propriétés du milieu

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

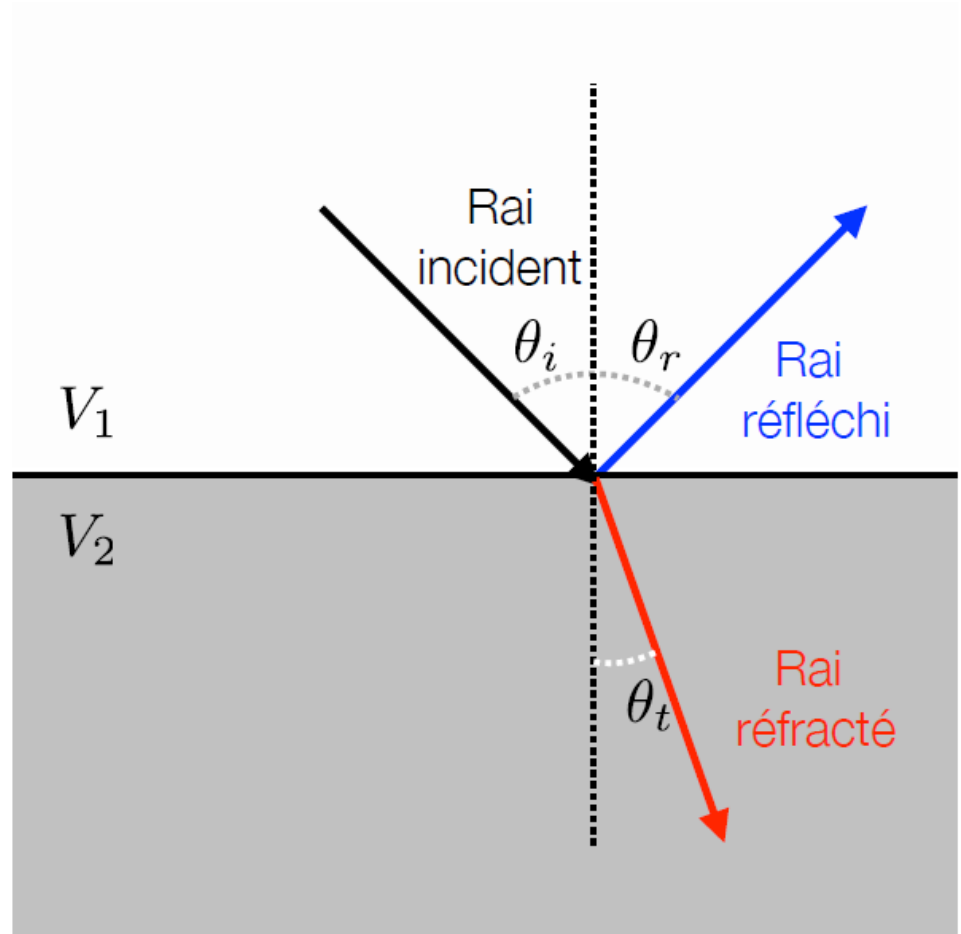
Il est possible de prédire le parcours des rais sismiques grâce à la loi de Snell-Descartes:

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

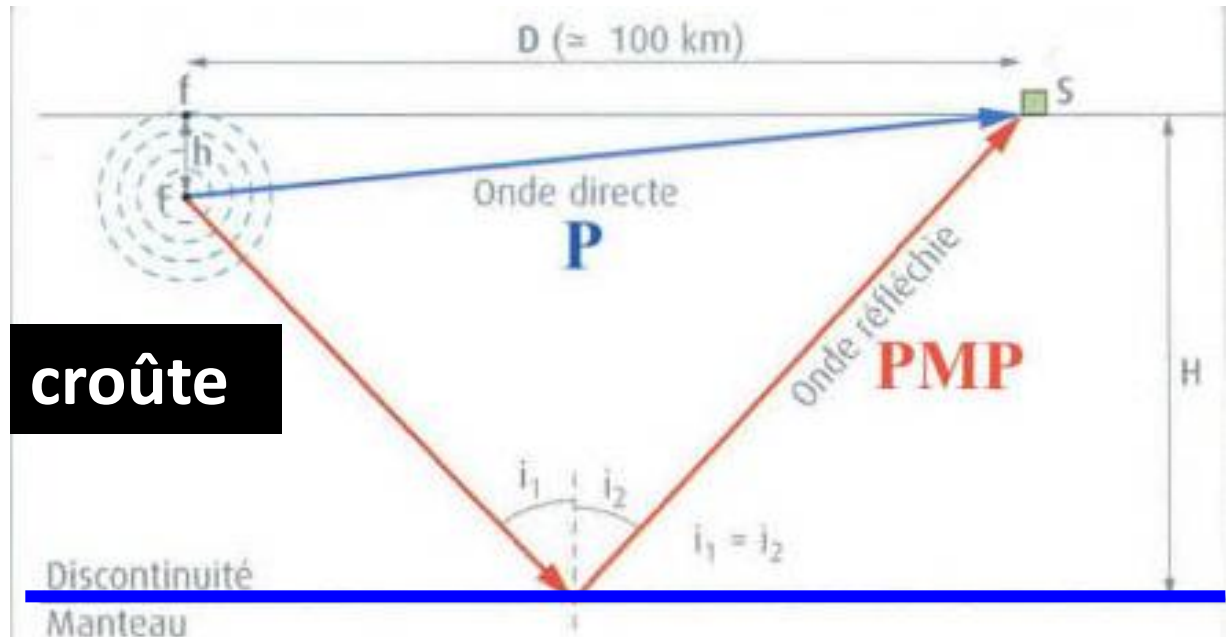
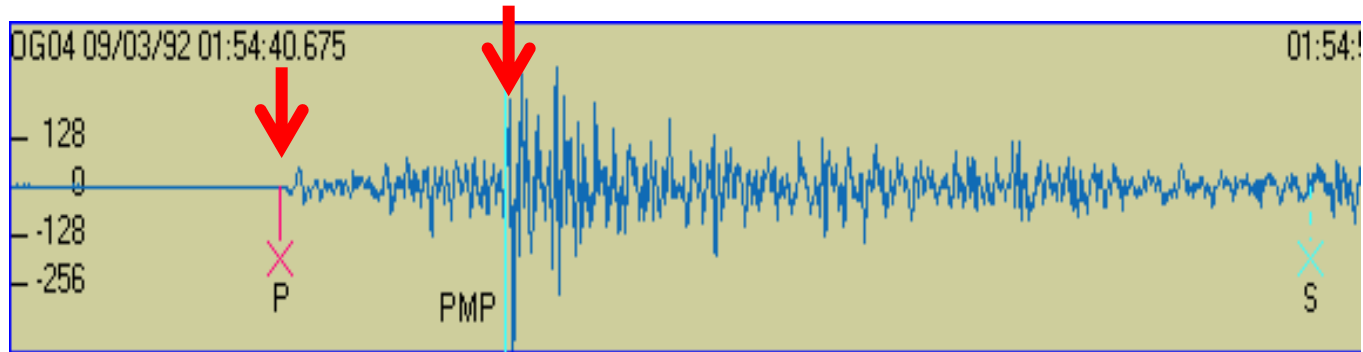
II. Des informations déduites de l'étude des ondes sismiques permettent de comprendre la structure interne du globe.

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)



croûte

Moho

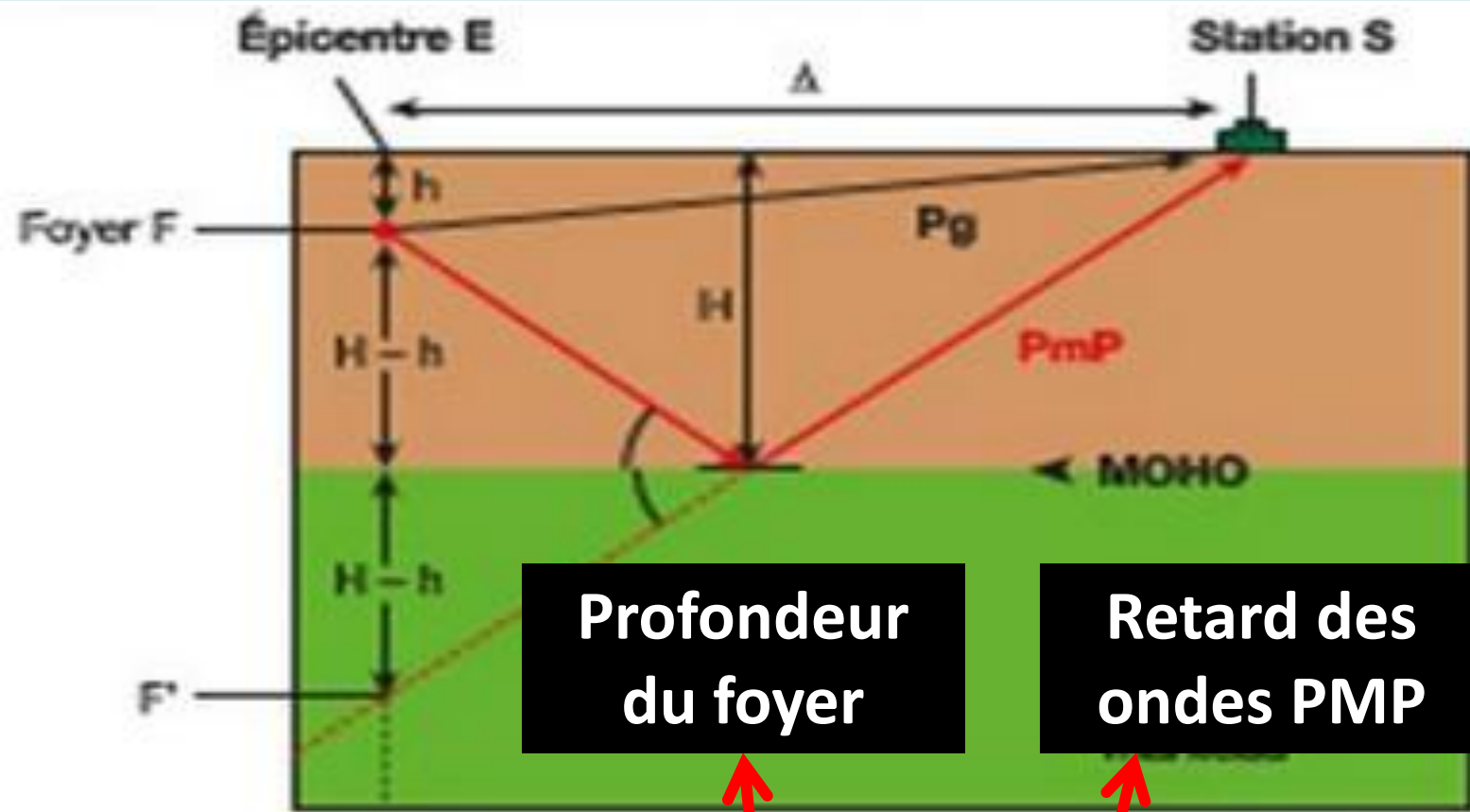
manteau

Discontinuité
Manteau

E : epicentre
h : profondeur du séisme

D : distance épicerentre-sismographe
S : sismographe
H : profondeur de la discontinuité

Calcul de la profondeur du Moho



**Profondeur
du foyer**

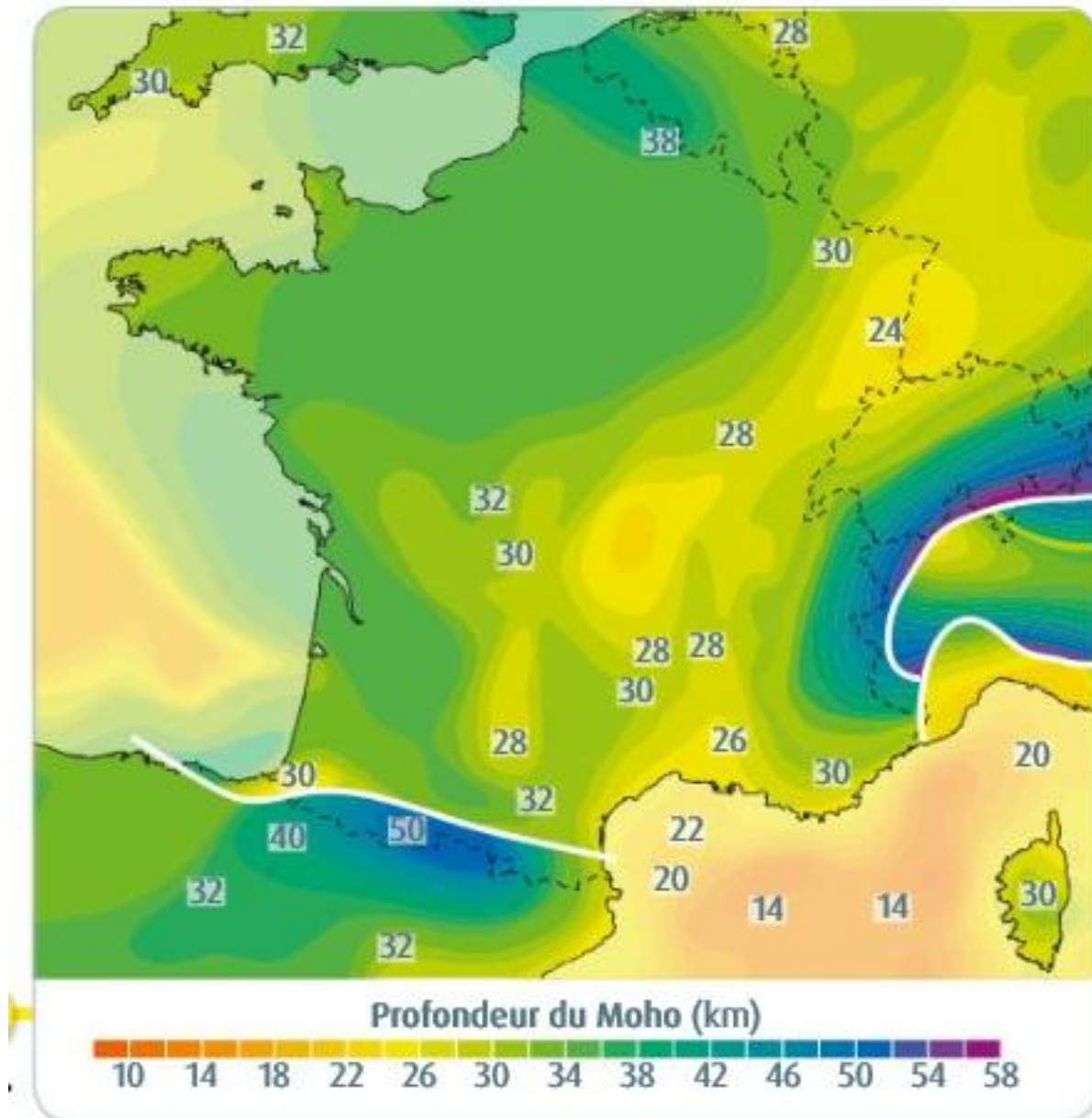
**Retard des
ondes PMP**

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

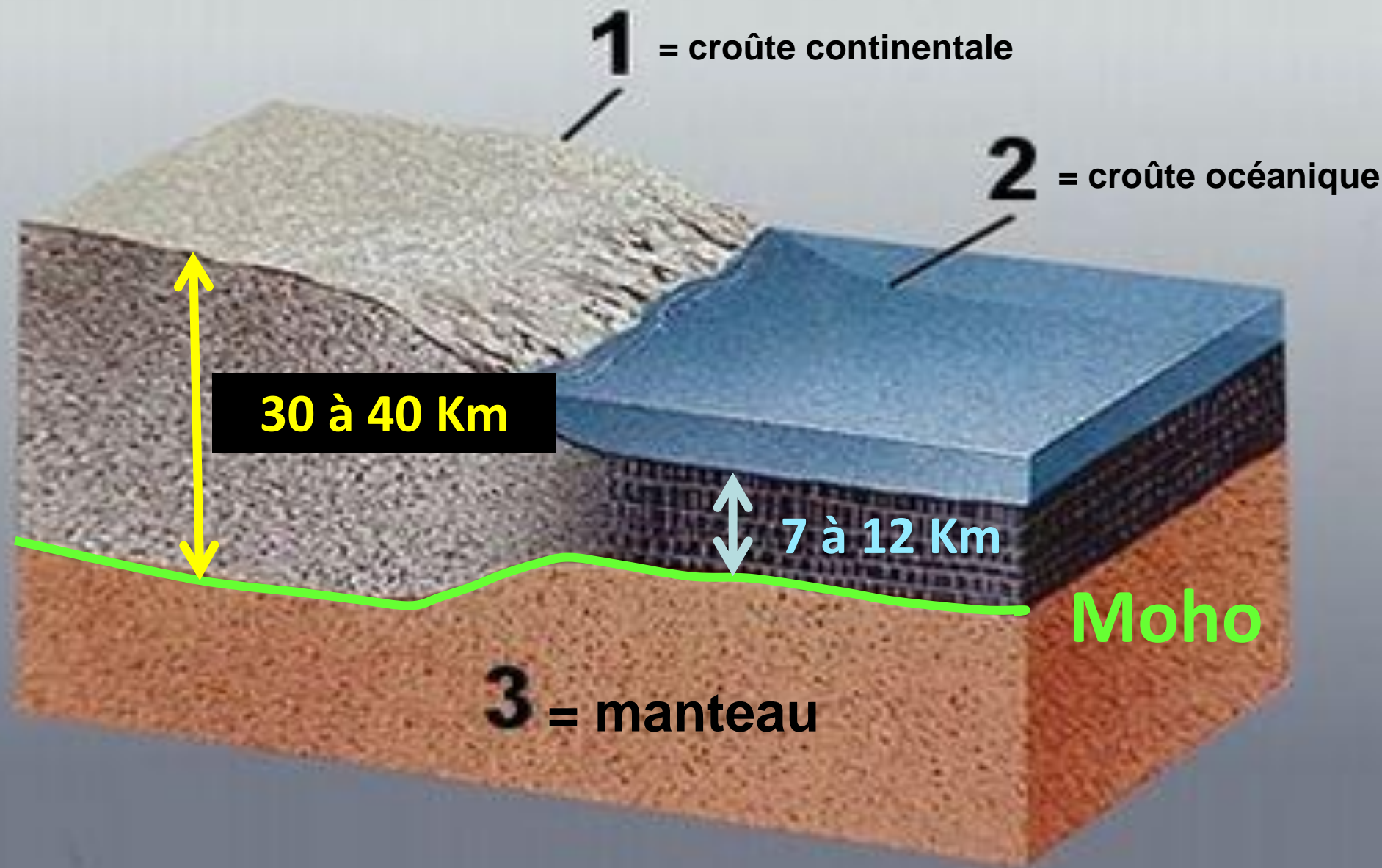
Vitesse des ondes P

**Distance à
l'épicentre**

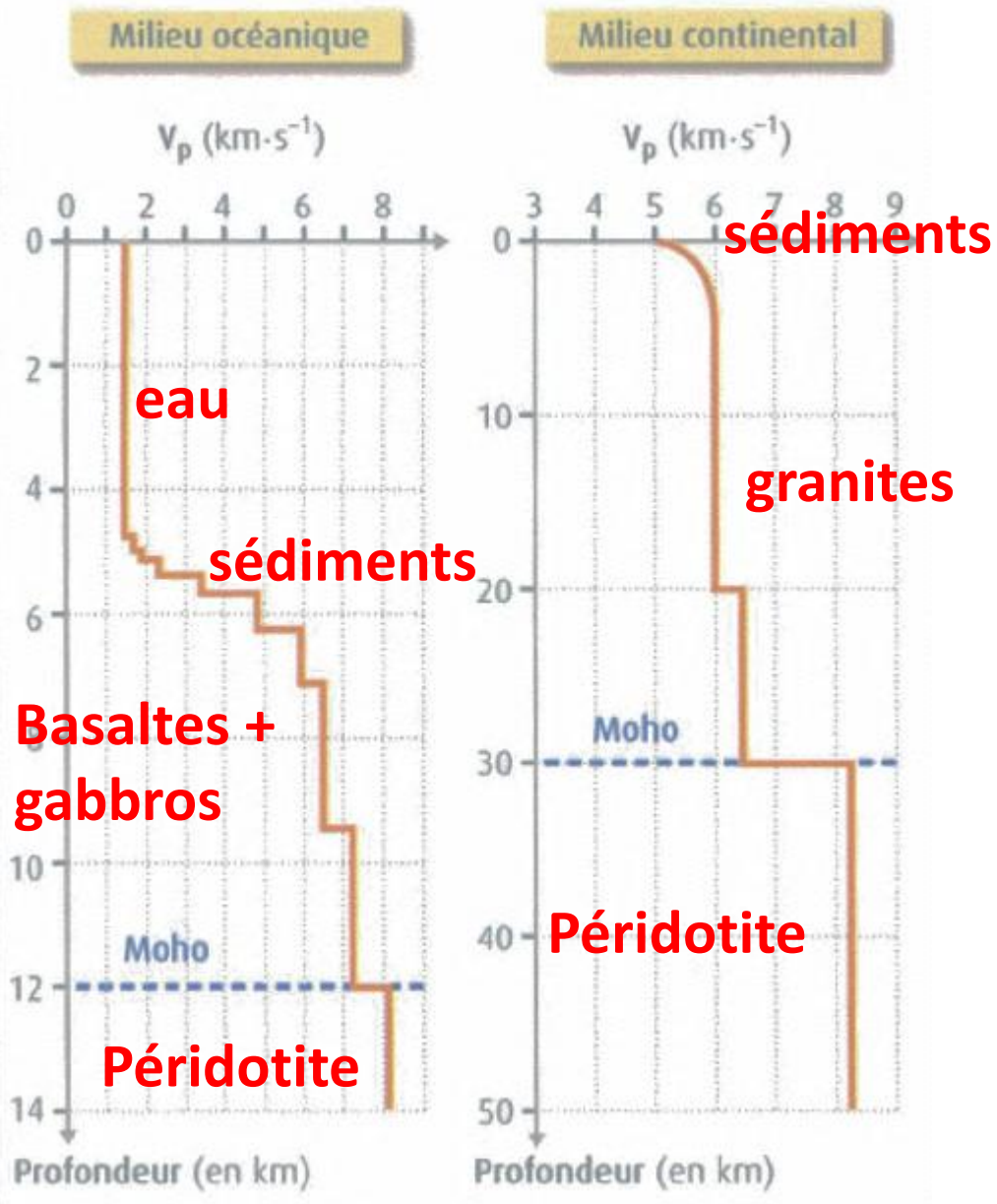
Profondeur du Moho sous la France



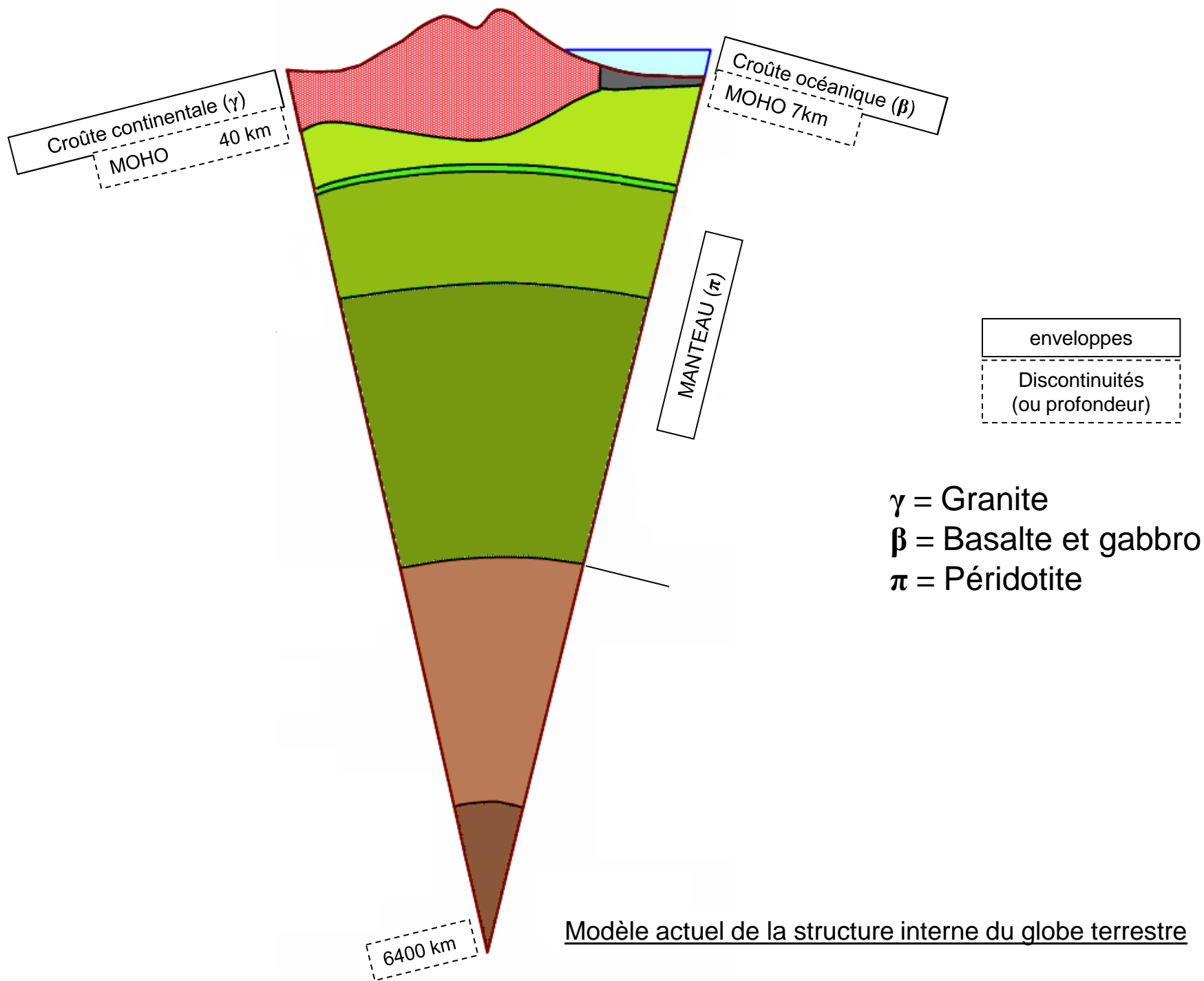
Profondeur du Moho



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



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 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.

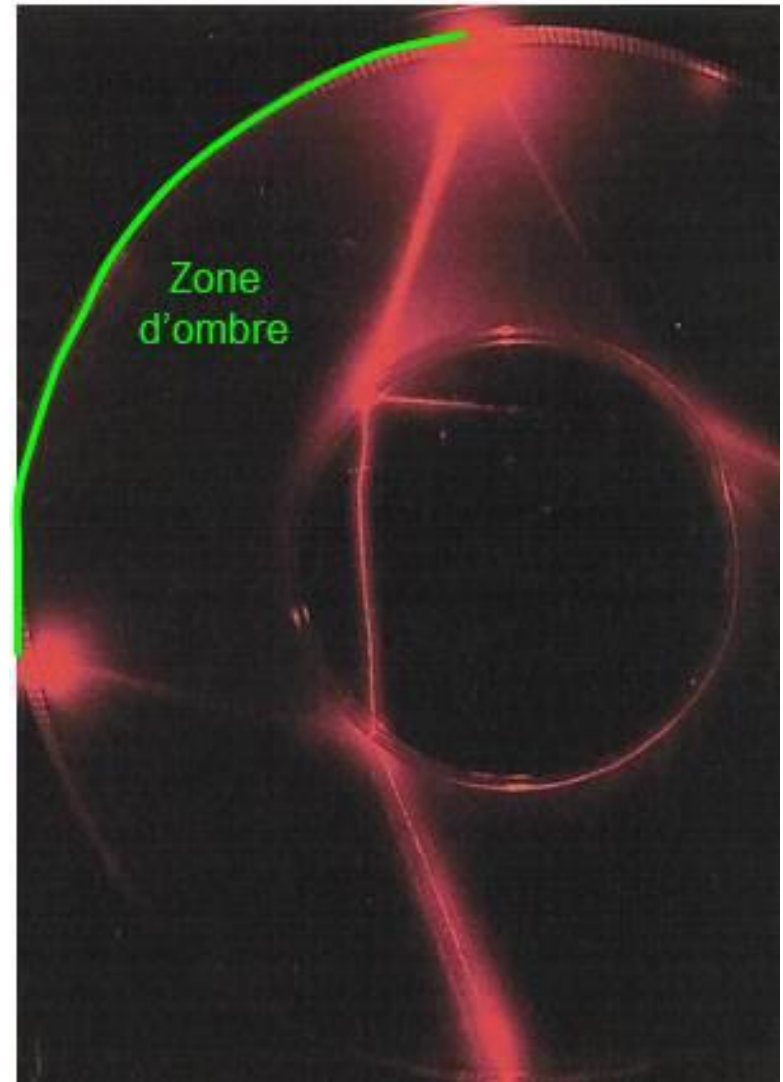
A. Méthode d'étude.

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

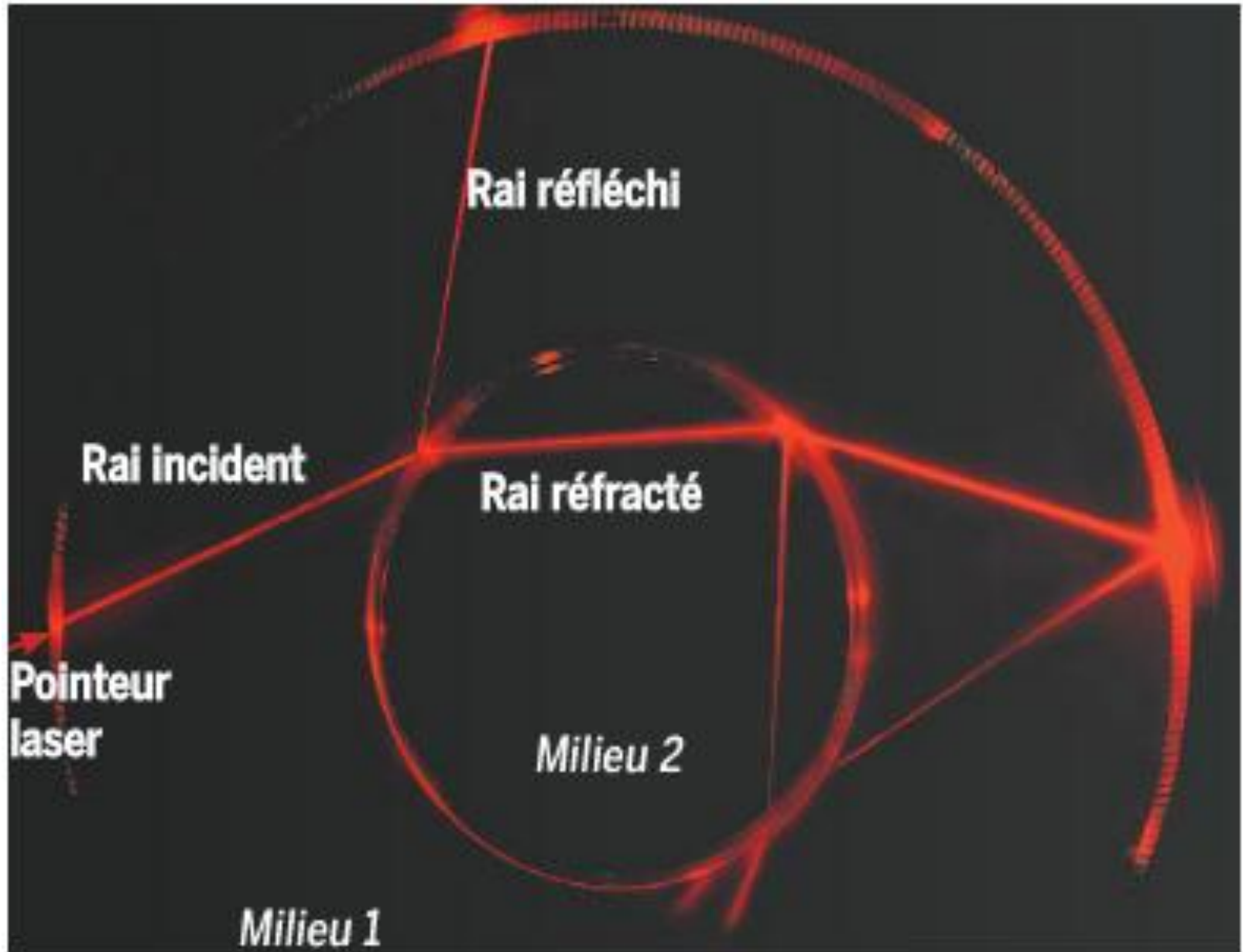
1. La discontinuité de Mohorovicic

2. La discontinuité de Gutenberg

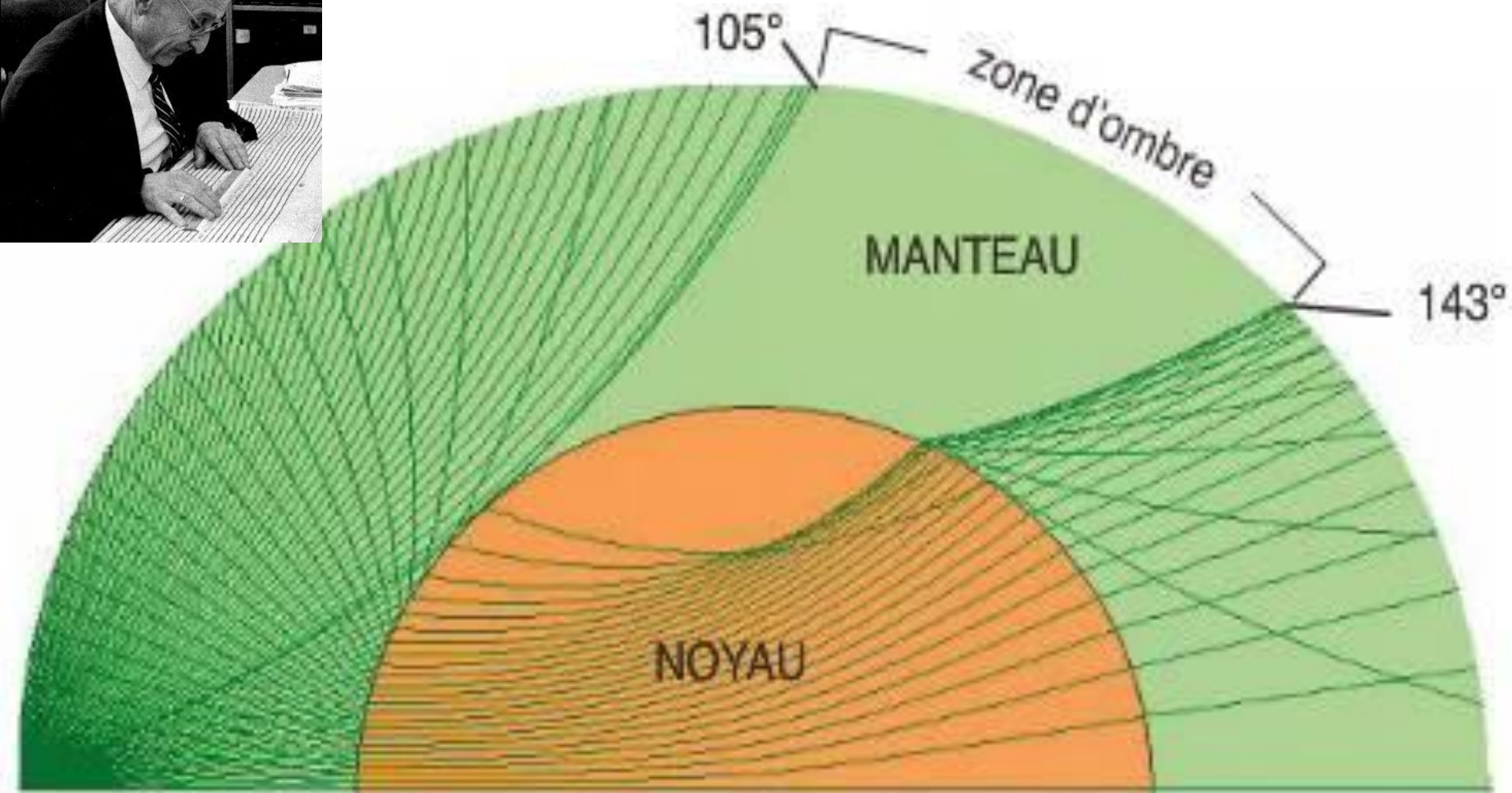
La zone d'ombre de Beno Gutenberg

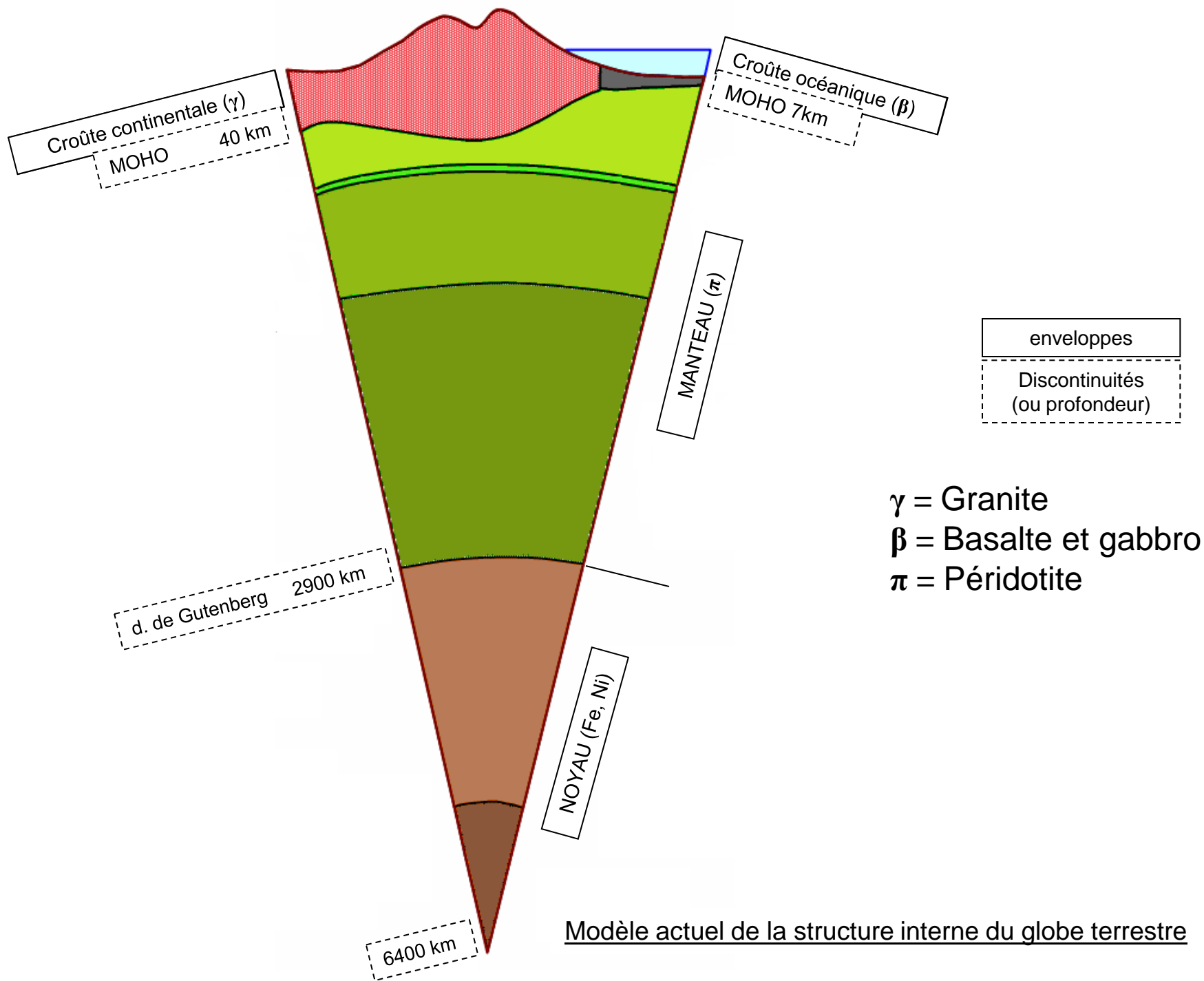


Modélisation pour comprendre le comportement des ondes sismiques à l'intérieur du globe.



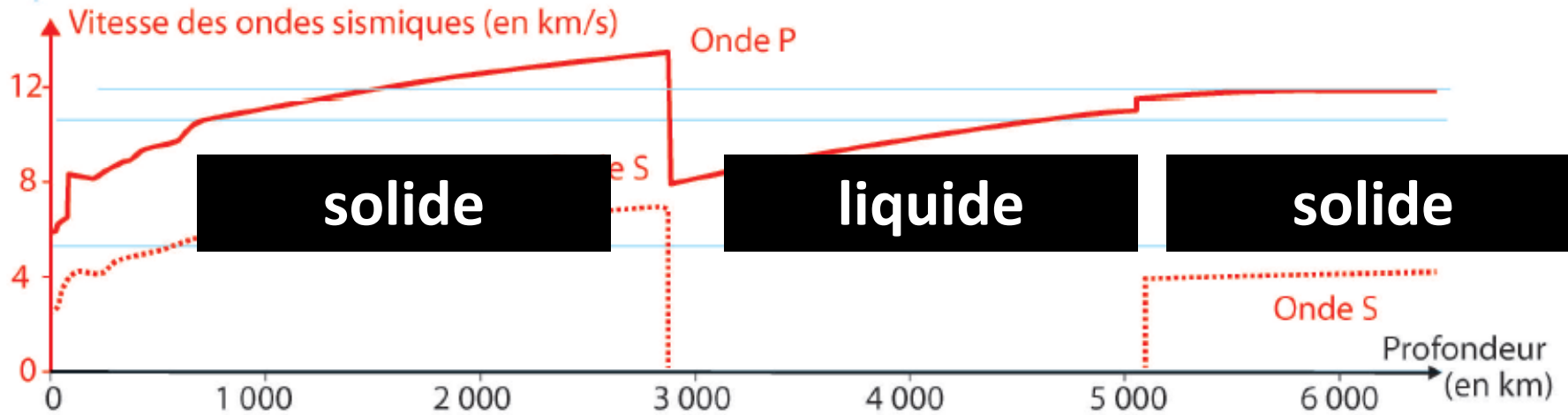
La zone d'ombre de Beno Gutenberg



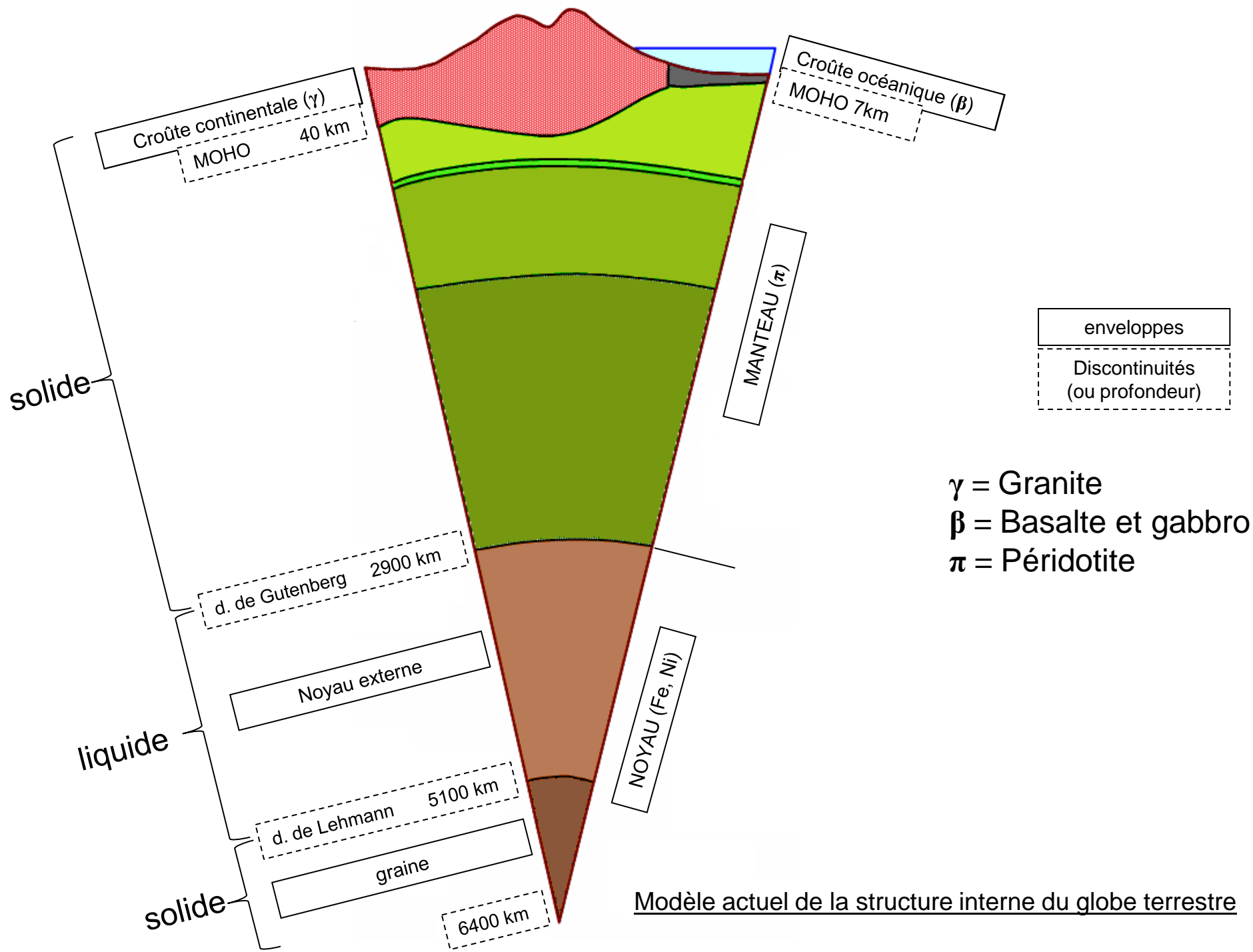


Modèle actuel de la structure interne du globe terrestre

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 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 croûtes

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

A. Méthode d'étude.

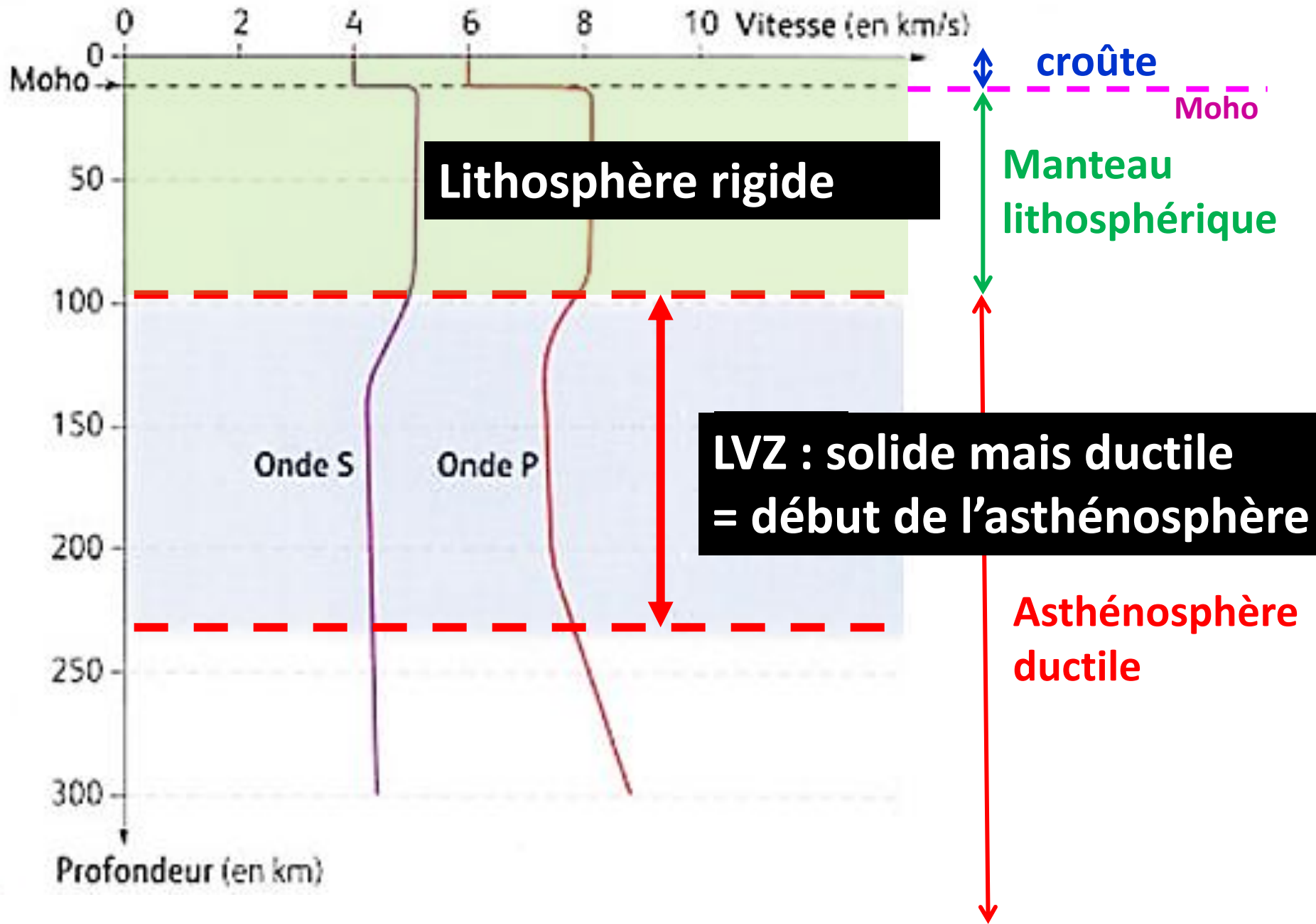
B. Ondes sismiques et mise en évidence de surfaces de discontinuité

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

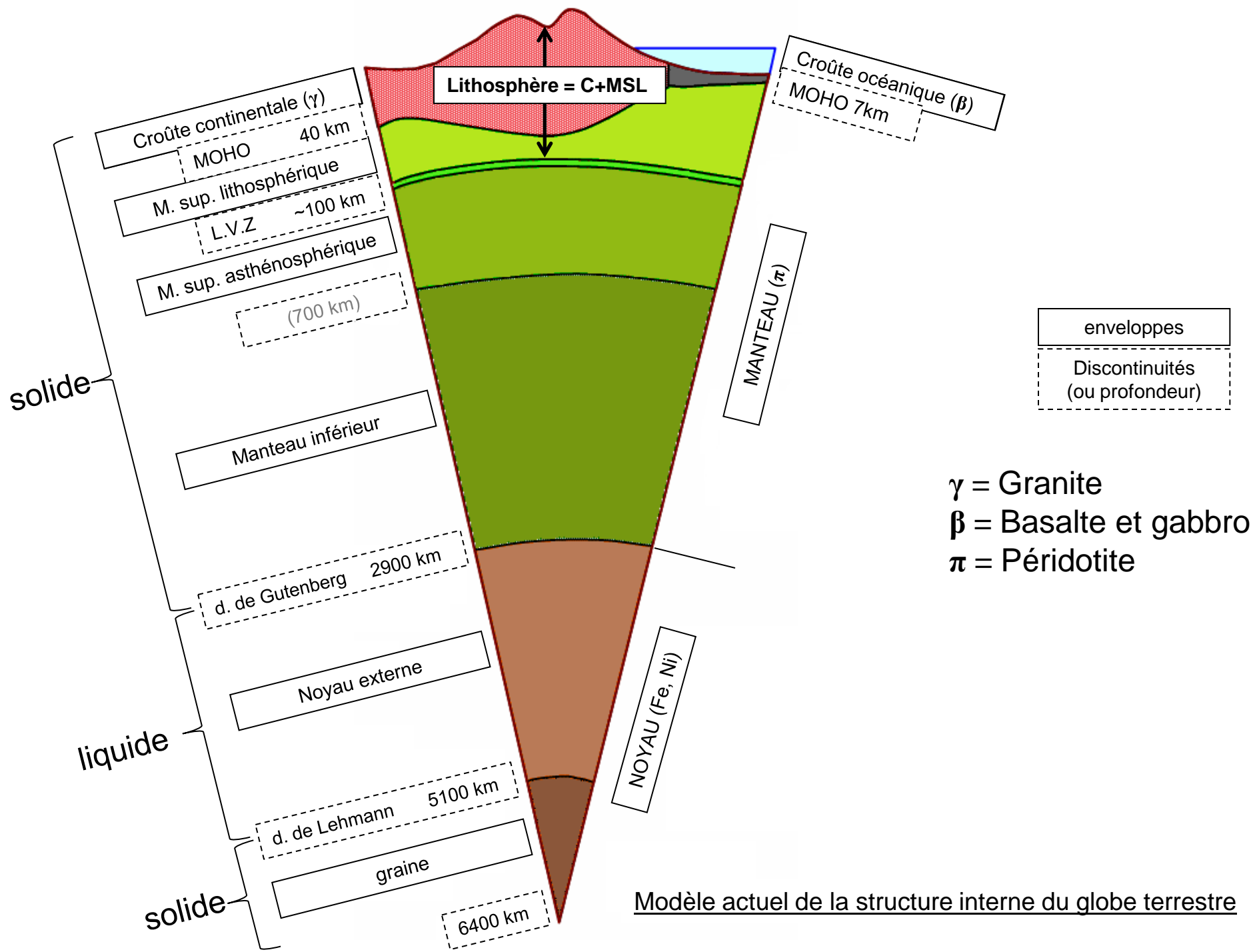


La Low Velocity Zone

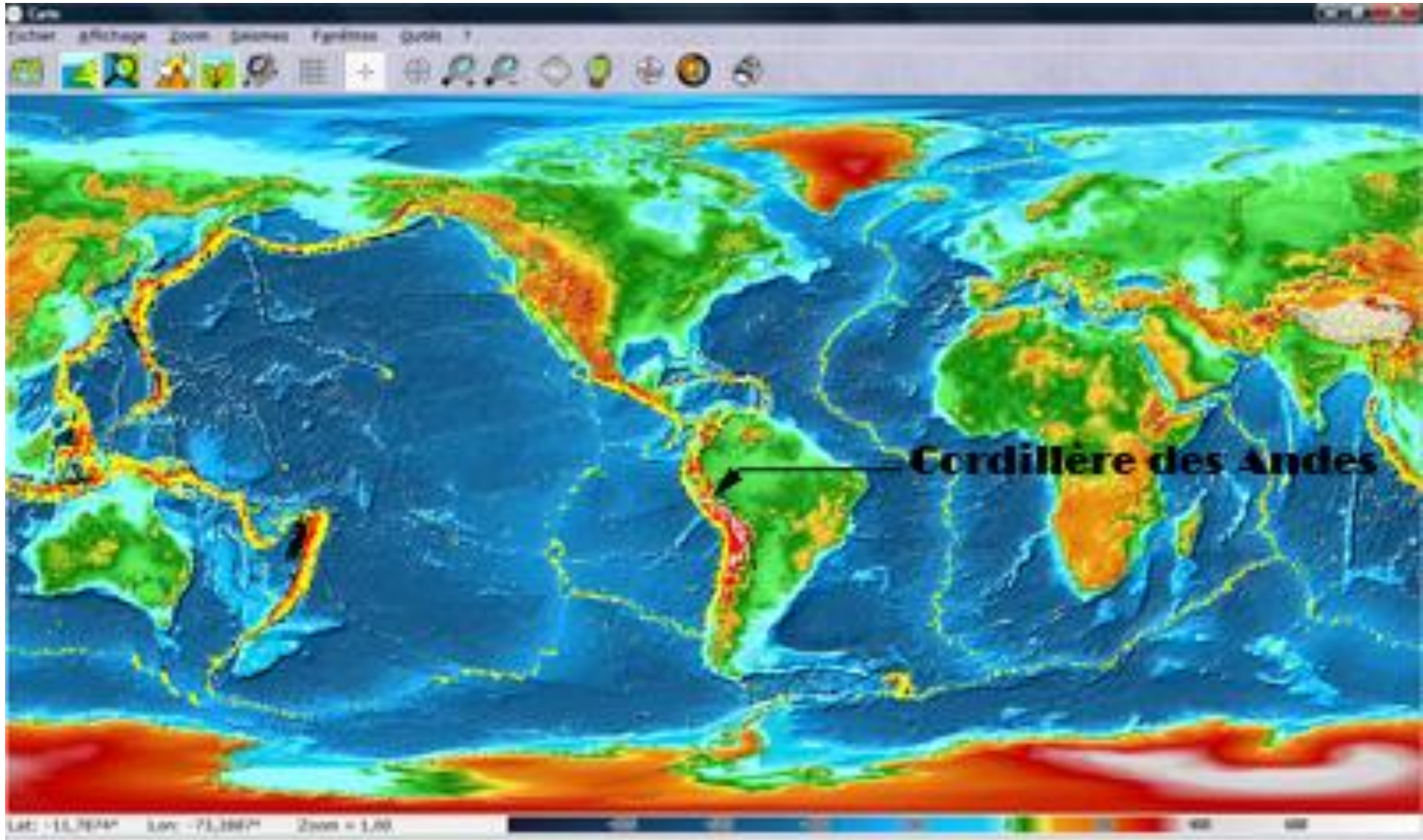
Matériaux	Viscosité (en Pa.s)
Lithosphère	10^{21} à 10^{22}
LVZ	10^{18} à 10^{19}
Glace à 0 °C	10^{11}
Huile d'olive à 20 °C	1
Eau liquide	10^{-2}

g Propriétés mécaniques de quelques matériaux.

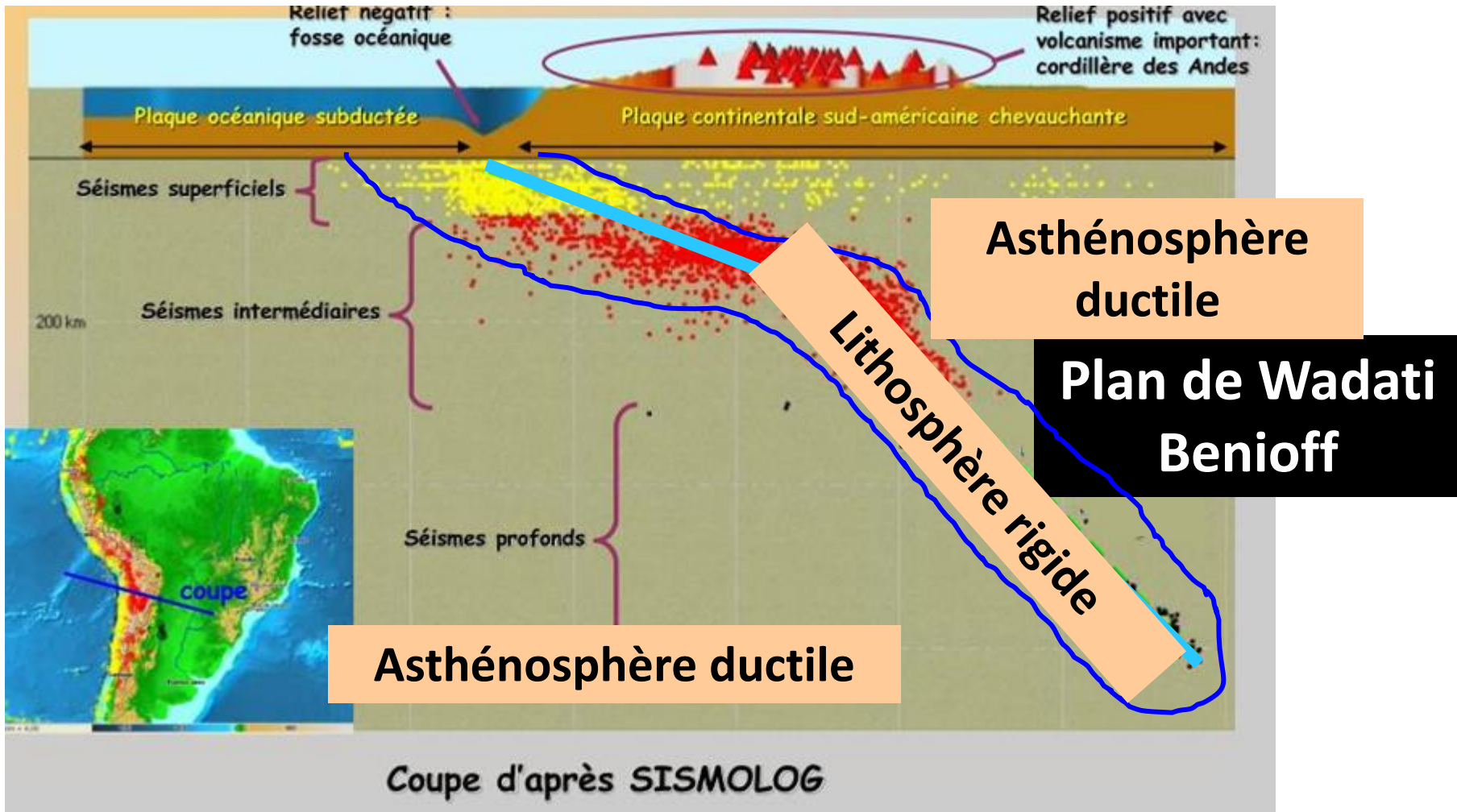
Un matériau est ductile s'il se déforme sans se casser. Le caractère déformable d'un corps peut se quantifier en calculant sa viscosité (plus la viscosité est faible, plus la déformation ductile/plastique est facile).



Distinction lithosphère rigide/asthénosphère ductile au niveau des fosses océaniques

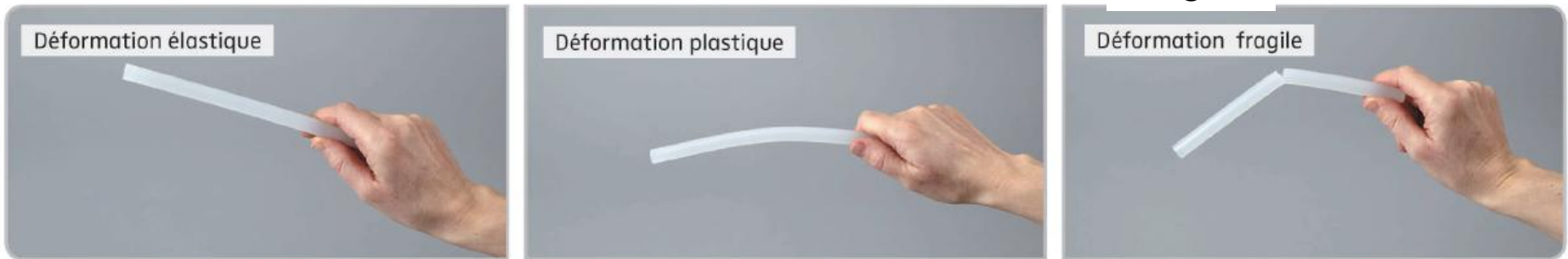


Distinction lithosphère rigide/asthénosphère ductile au niveau des fosses océaniques



Comportement **rhéologique** des matériaux terrestres

Branche de la mécanique qui étudie la résistance des matériaux aux contraintes et aux déformations



ASTHENOSPHERE

LITHOSPHERE

Les séismes ne se produisent que dans la lithosphère

NOYAU EXTERNE = LIQUIDE = comportement fluide

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

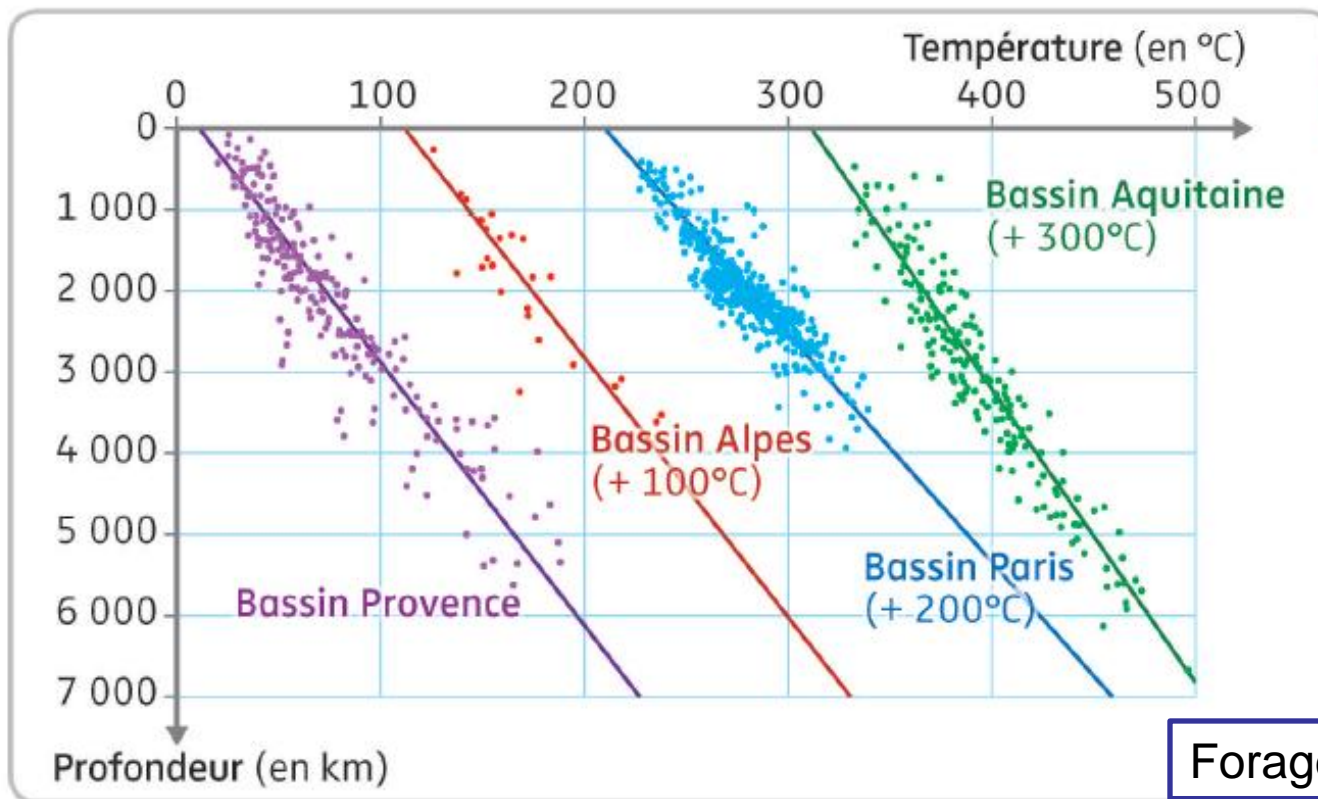
III. Des informations déduites des études thermiques.

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

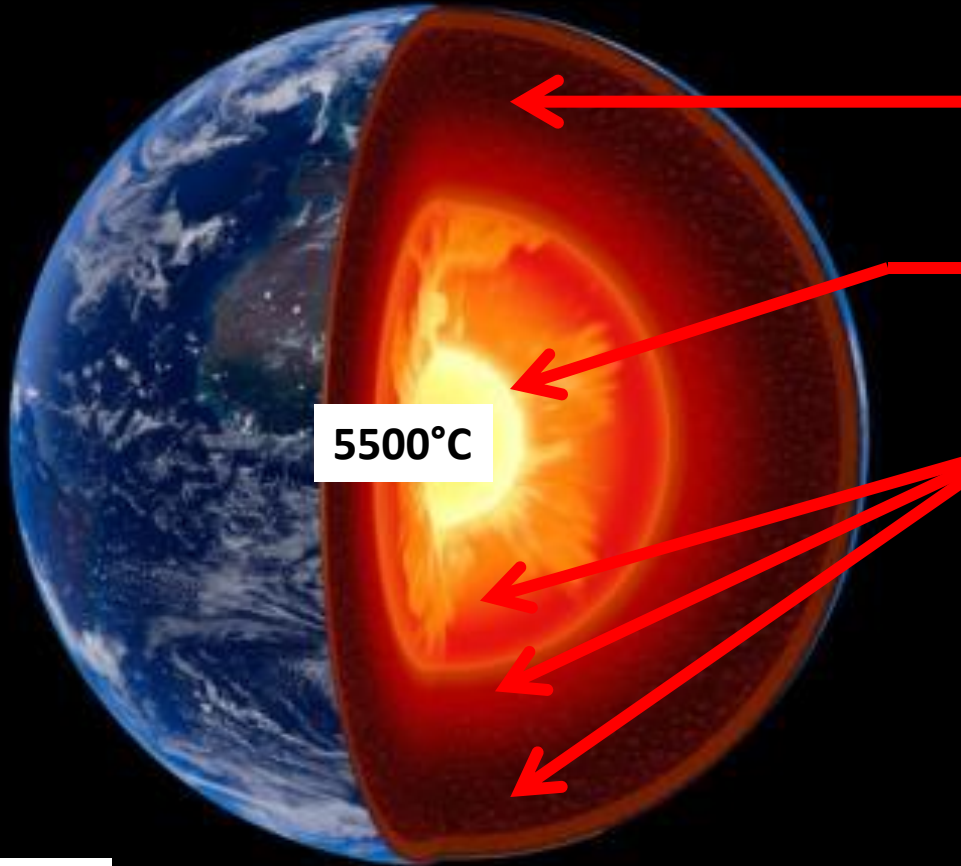


Forage le plus profond = 12 km !

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

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

La chaleur de la Terre



-270°C

5500°C

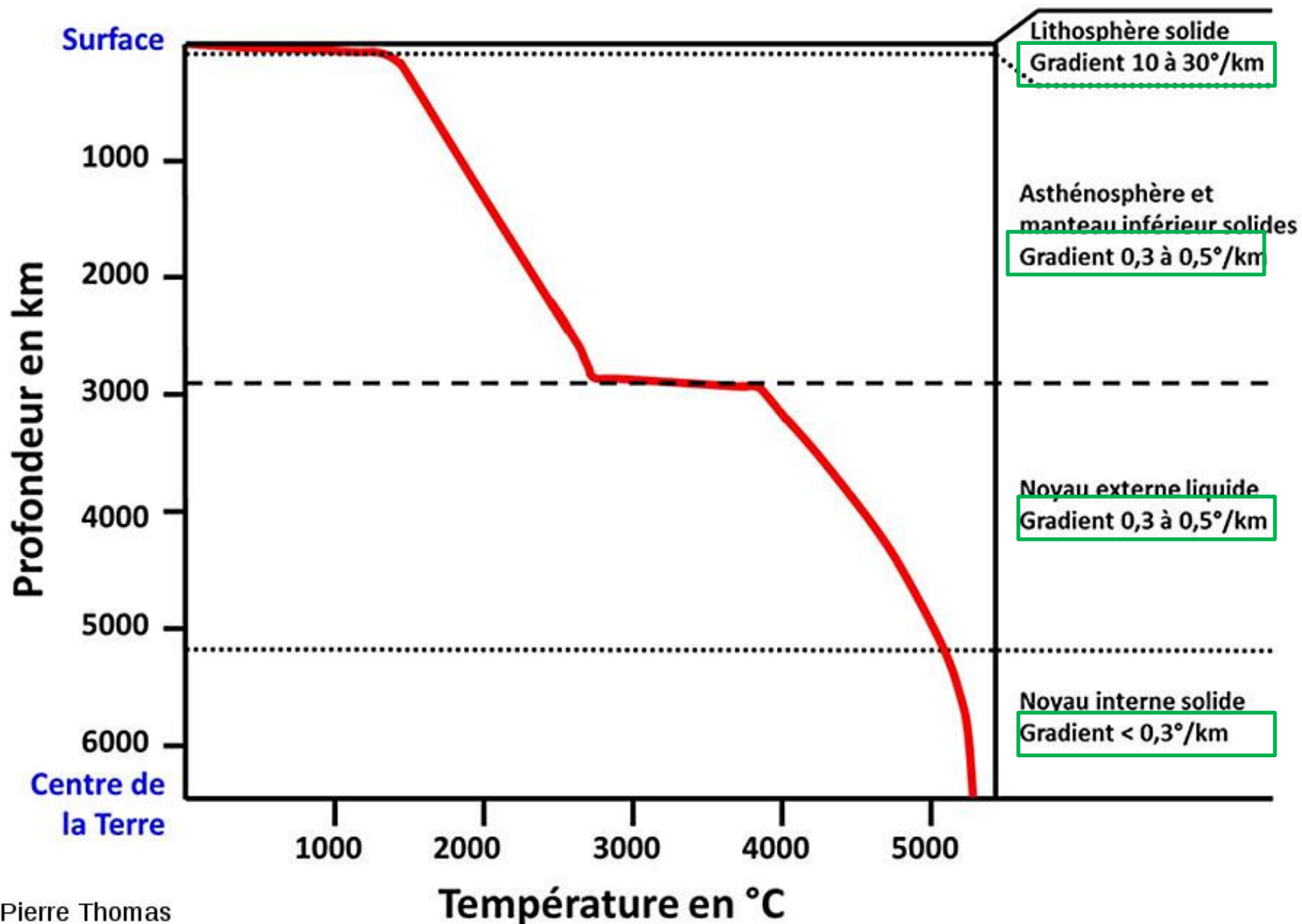
Désintégration d'éléments radioactifs du manteau

Chaleur latente de cristallisation de la graine

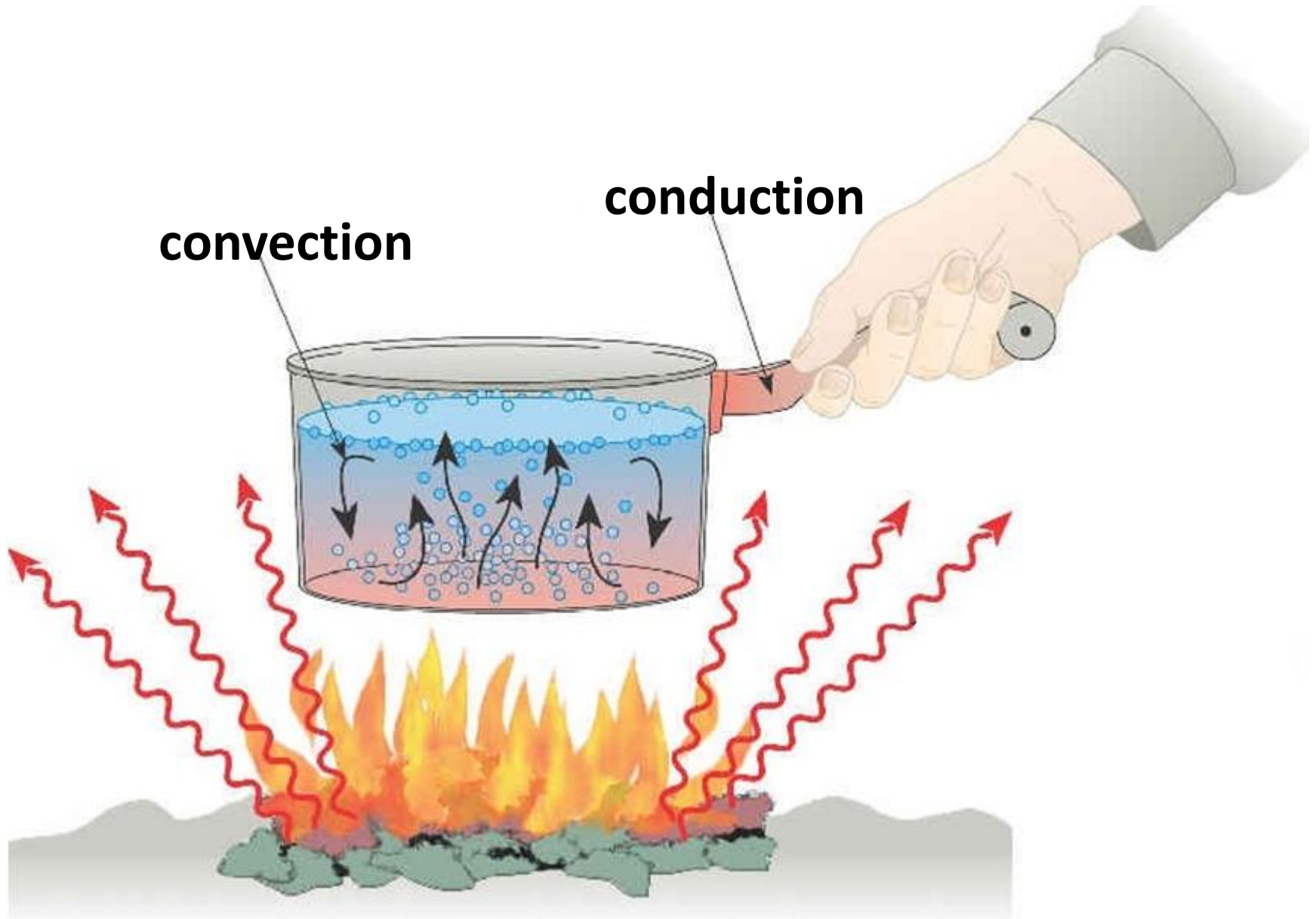
Chaleur accumulée lors de sa formation par agrégation de météorites

Depuis sa formation la Terre perd de la chaleur

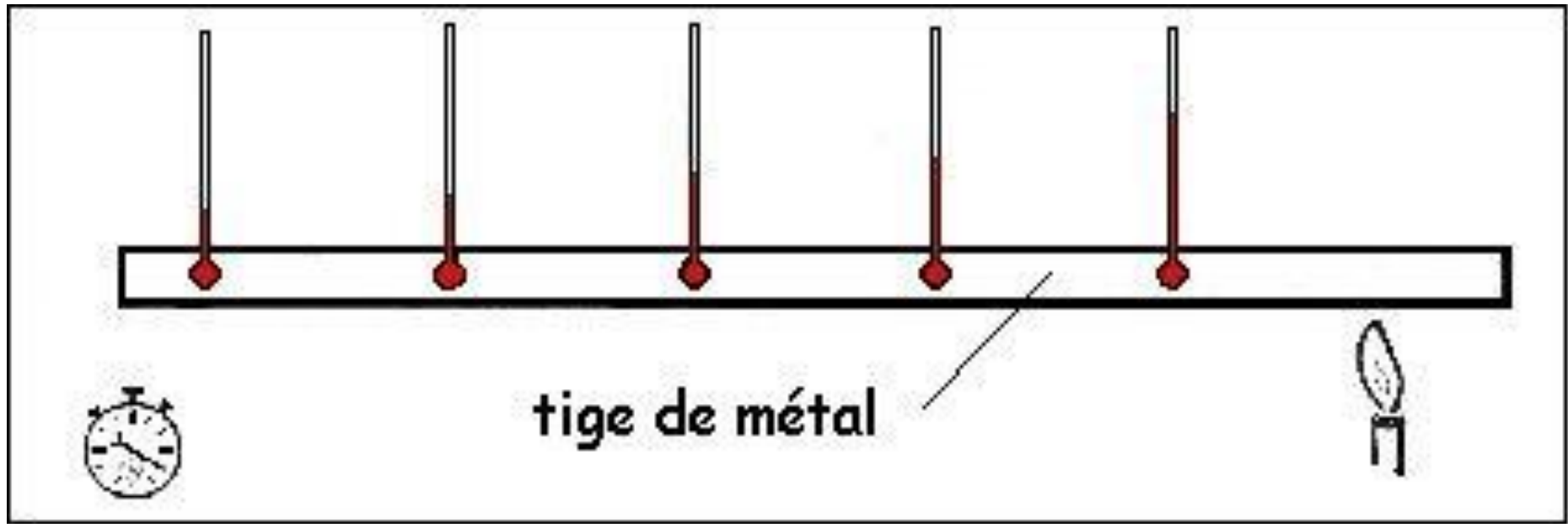
Le géotherme



Les transferts thermiques



Transfert de chaleur par conduction

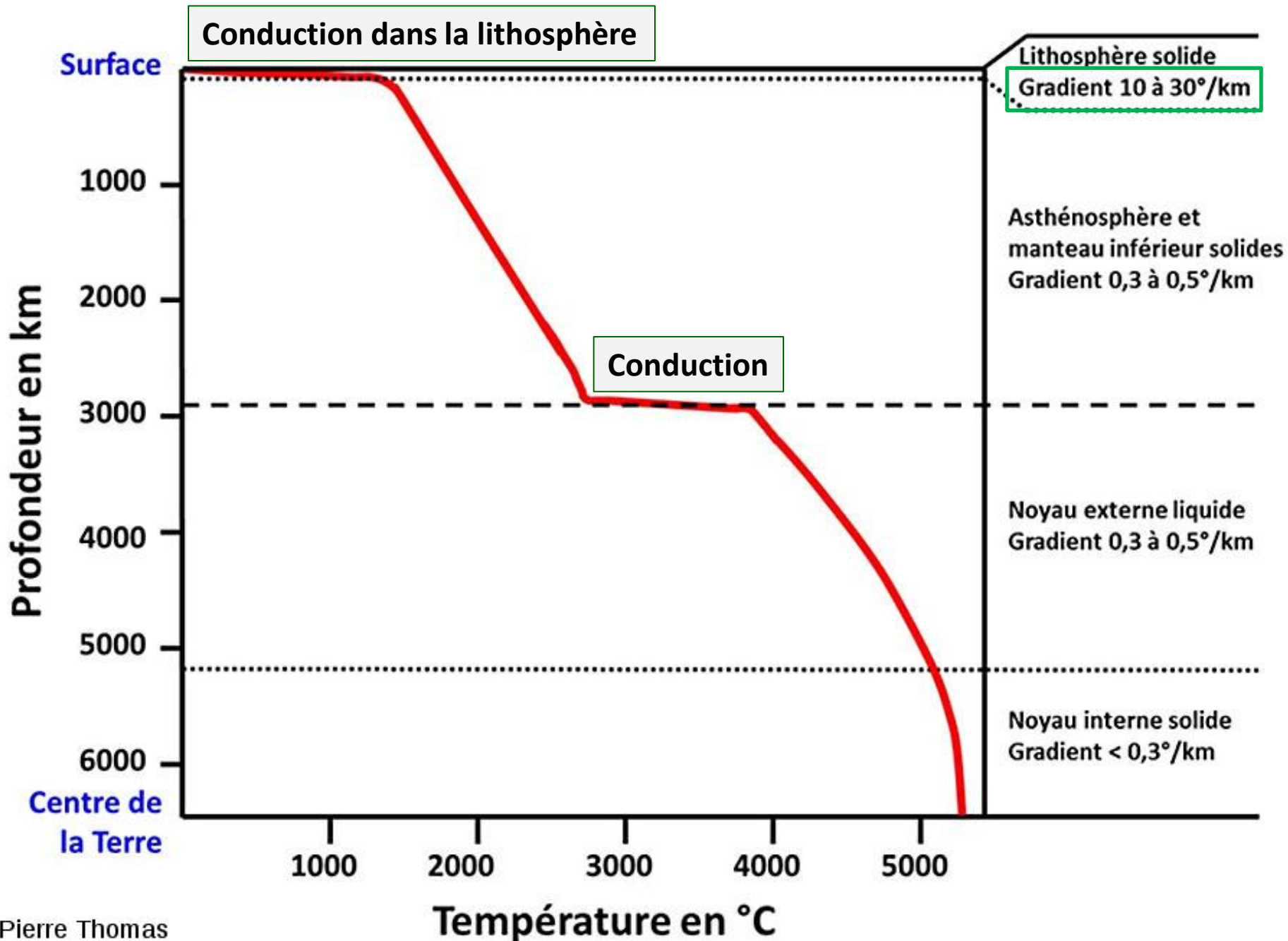


Transfert de chaleur de proche en proche sans mouvement de matière

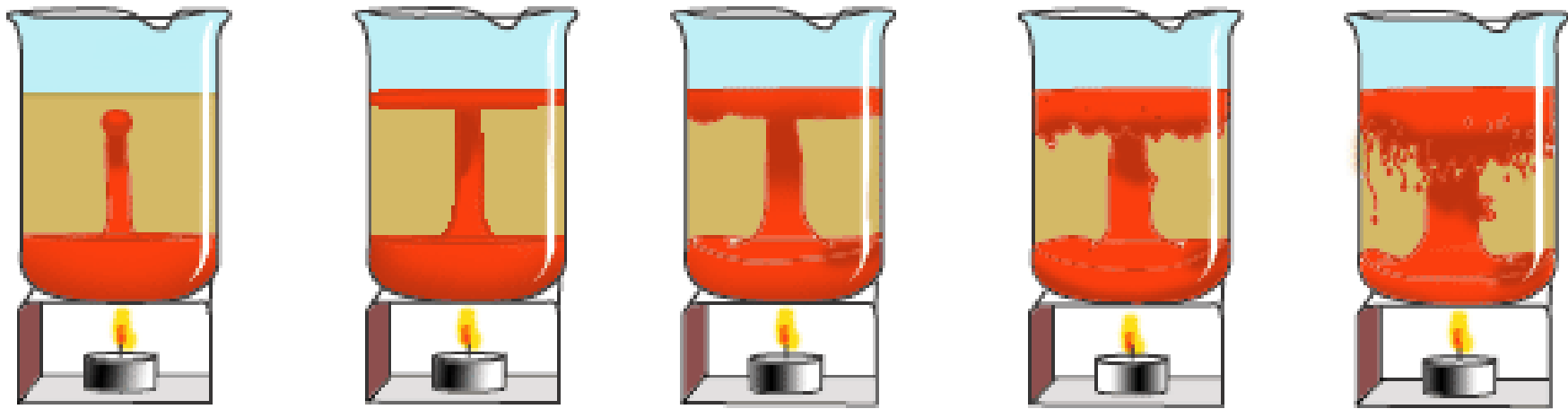
Peu efficace

Milieu rigide → lithosphère

Le géotherme



Transfert de chaleur par convection



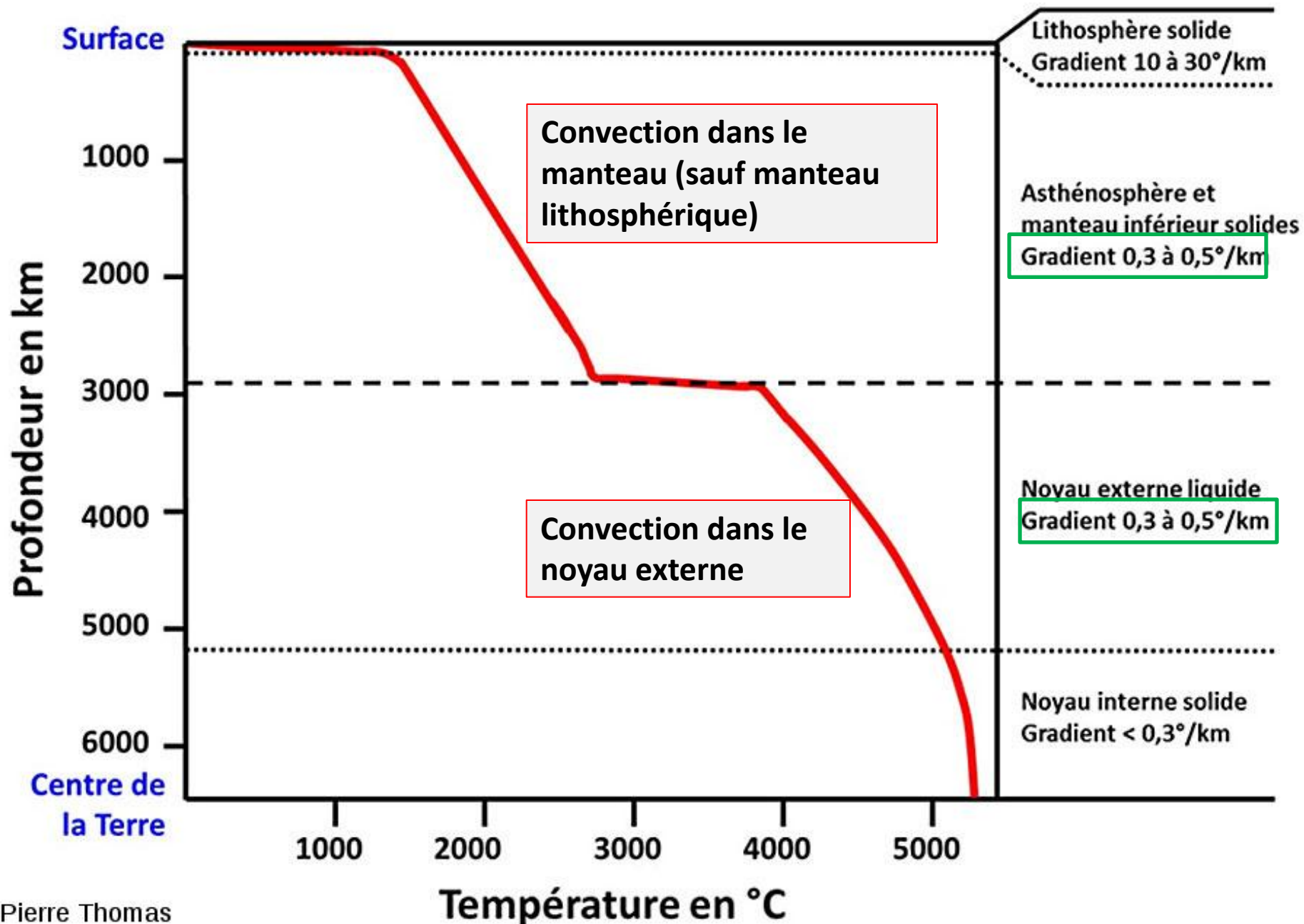
Simulation d'un mouvement de convection

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

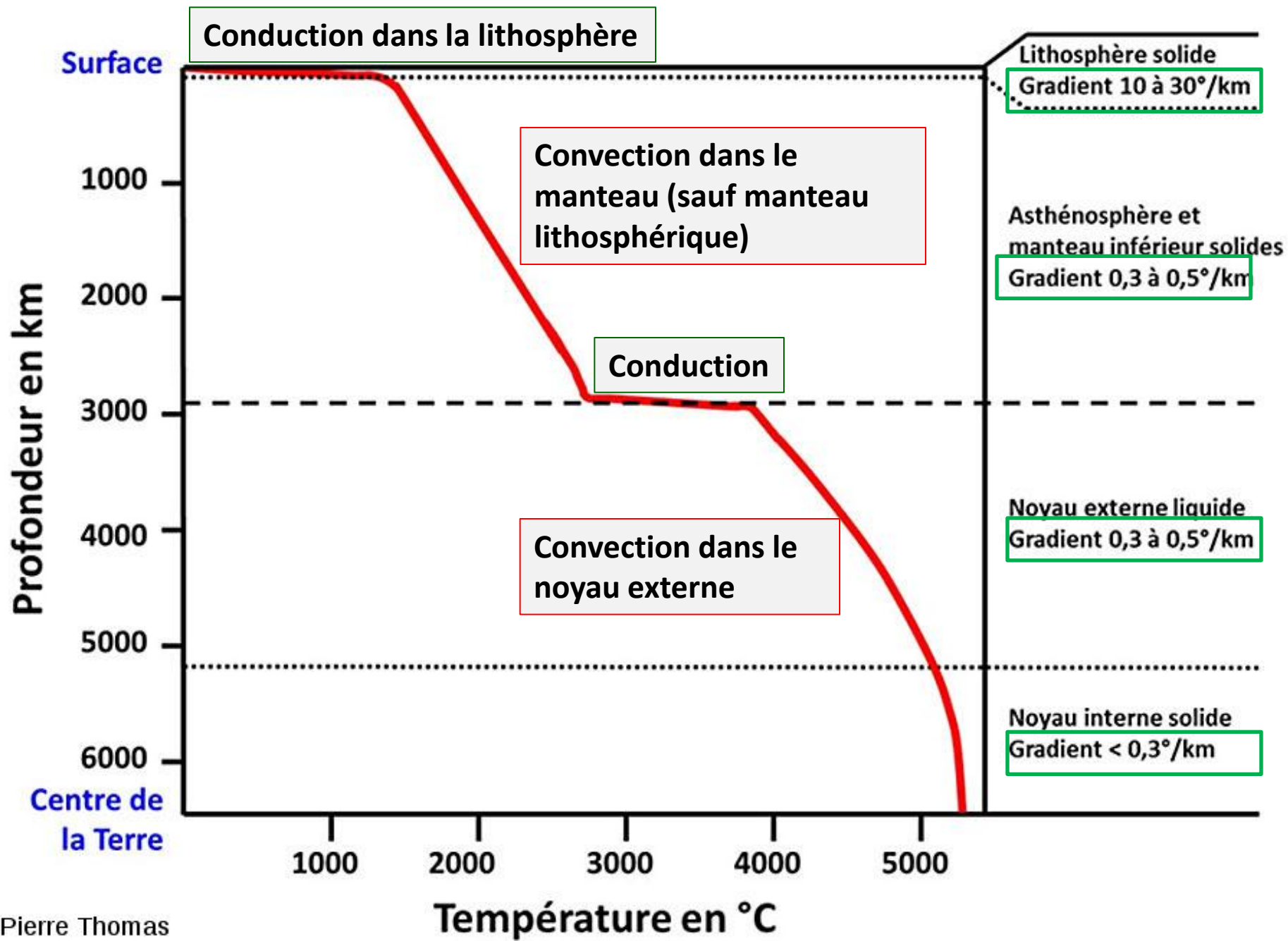
très efficace

Milieu ductile → manteau, noyau externe

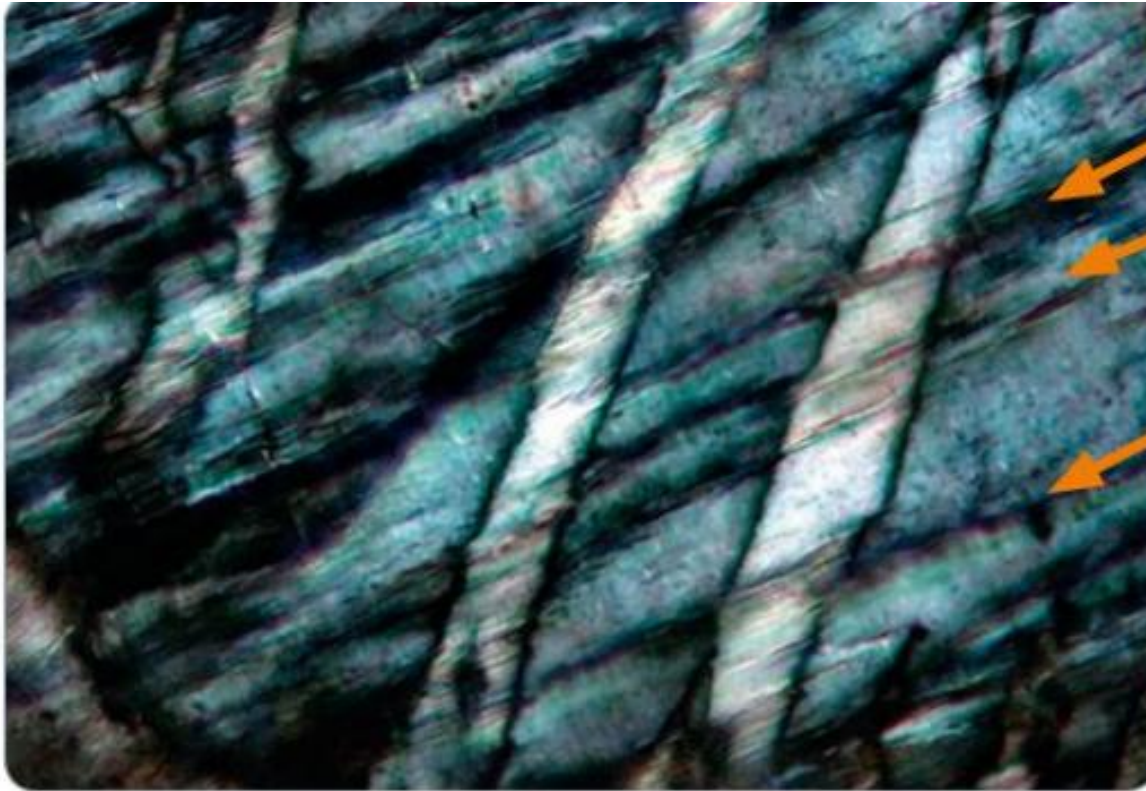
La température augmente avec la profondeur : gradient géothermique



La température augmente avec la profondeur : gradient géothermique



Preuves expérimentales de la déformation des péridotites



4

La déformation d'une péridotite du manteau rigide.

Le manteau est animé de mouvements de convection, mais ces mouvements se réalisent bien plus lentement et selon des modalités différentes de celles des doc. 2 et 3. Ils impliquent des cisaillements des minéraux les uns contre les autres (flèches orange), lentement mais inexorablement aux cours des temps géologiques. Ces cisaillements sont vus ici au microscope sur une roche soumise à des pressions de 25 GPa et une température de 1400 °C.

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

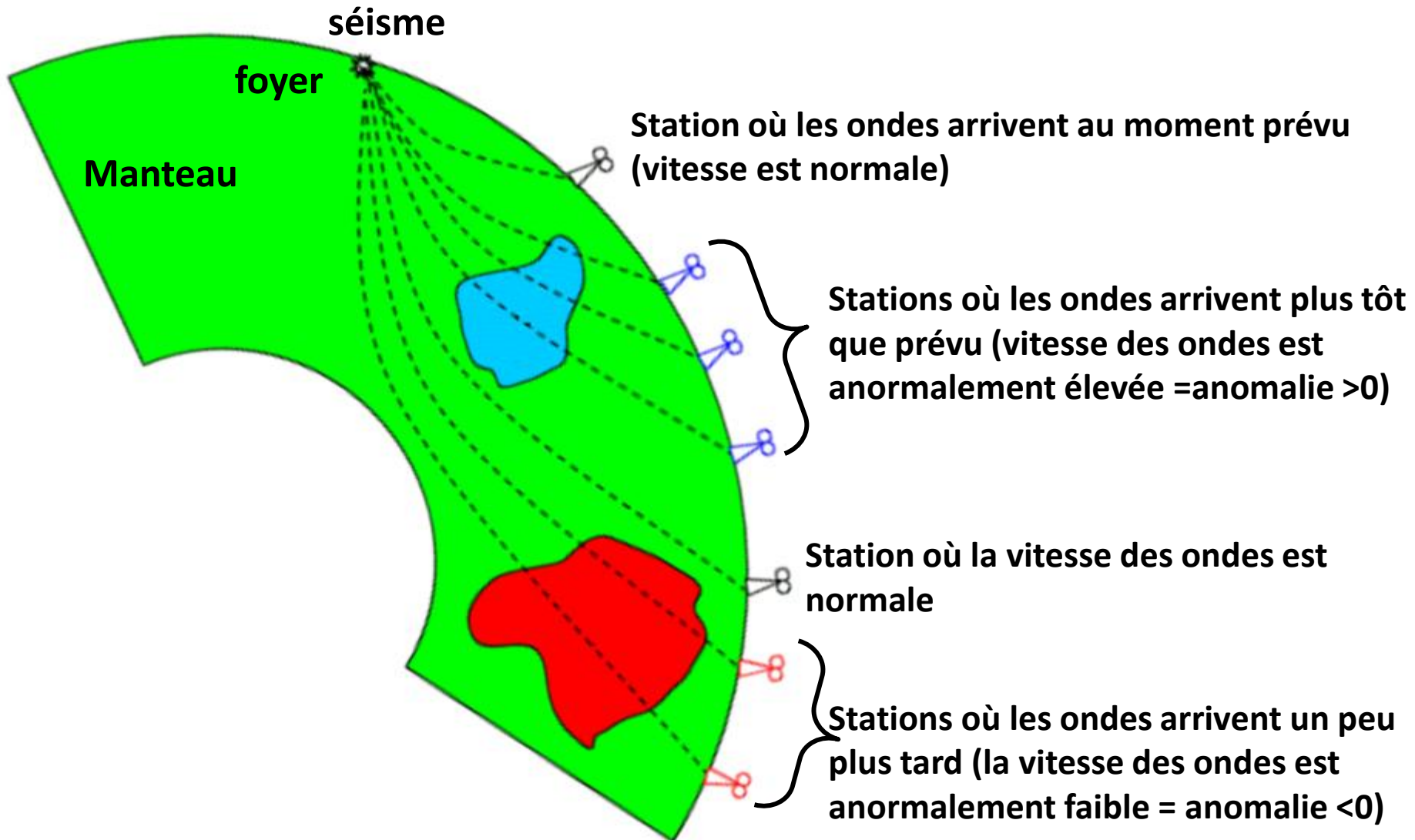
C. Ondes sismiques et distinction entre la lithosphère et l'asthénosphère

III. Des informations déduites des études thermiques.

A. Evolution des températures à l'intérieur du globe

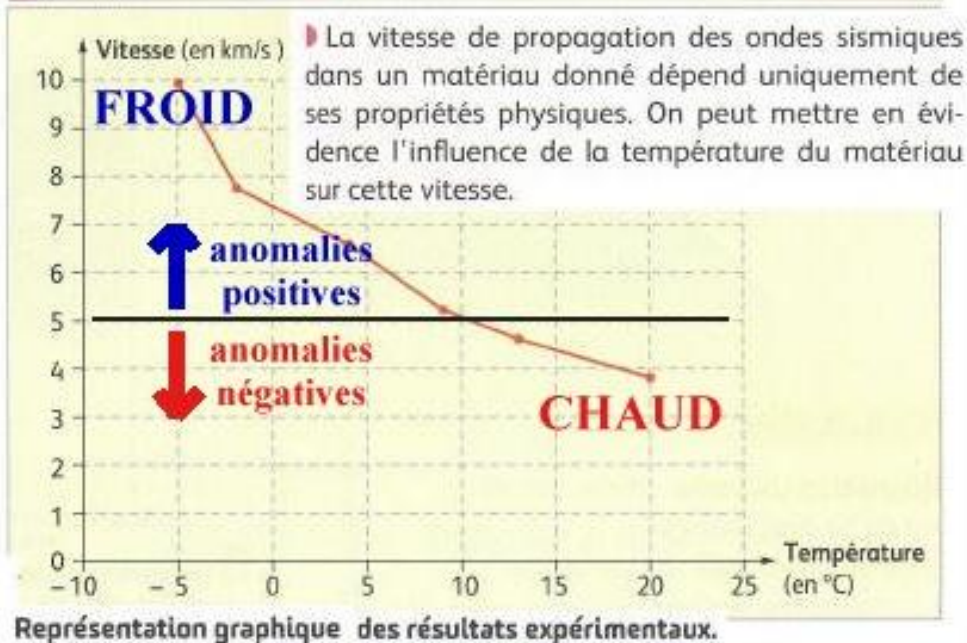
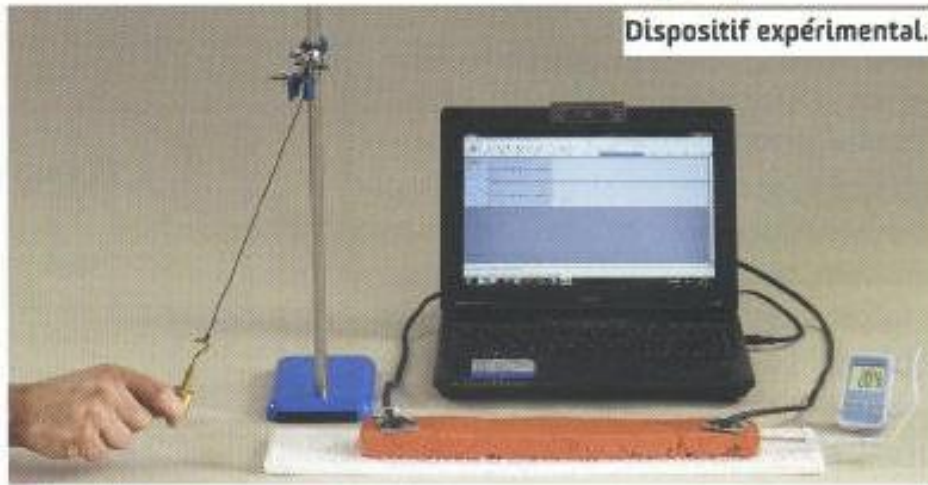
B. Anomalies thermiques et leur interprétation

La tomographie sismique : principe

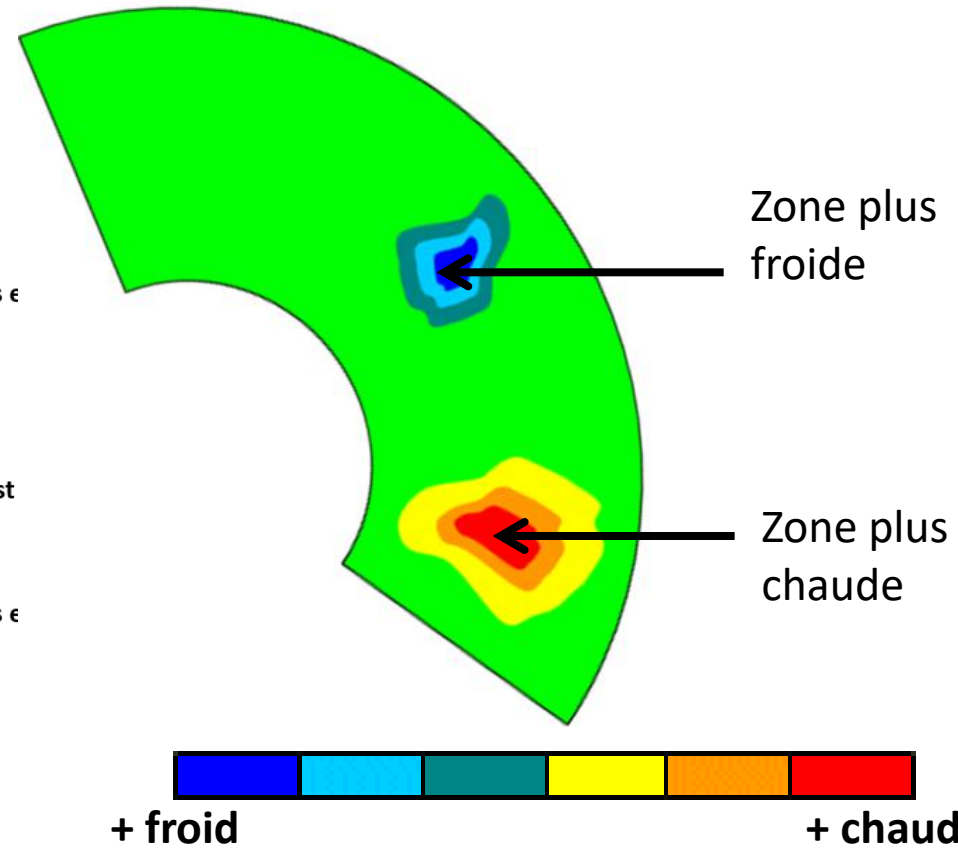
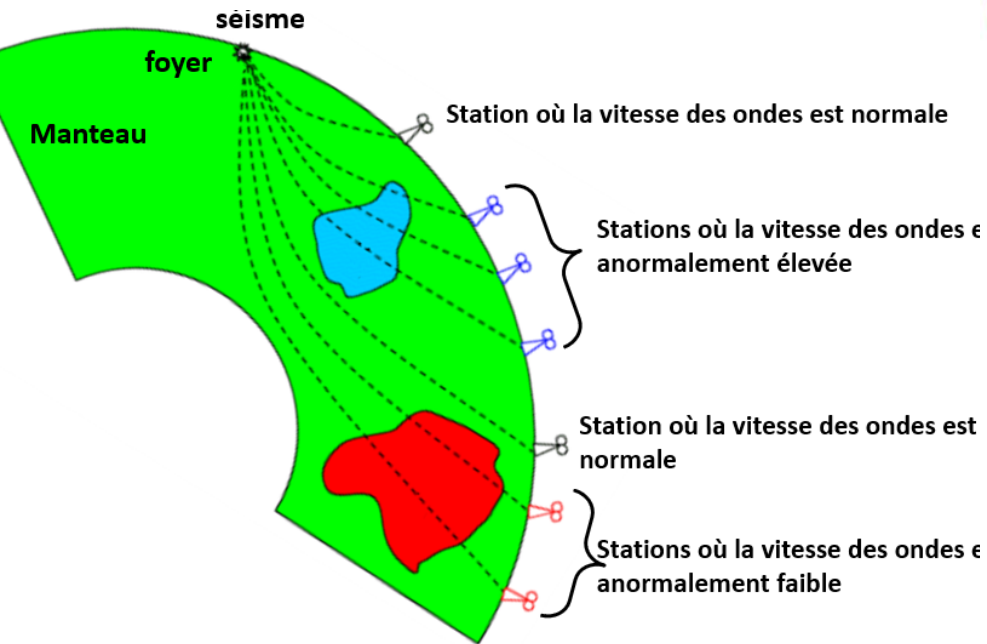


La tomographie sismique : principe

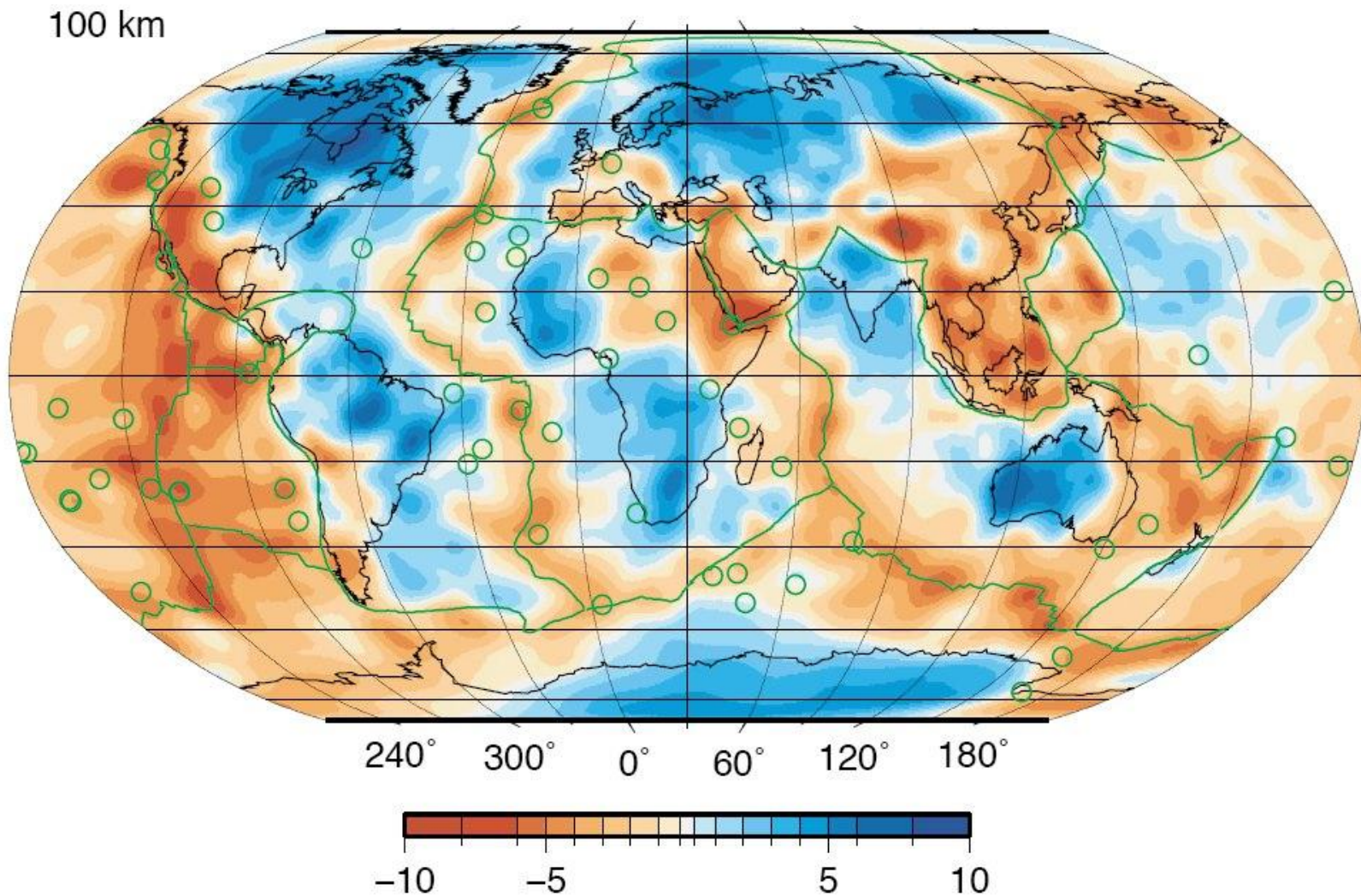
Modélisation analogique



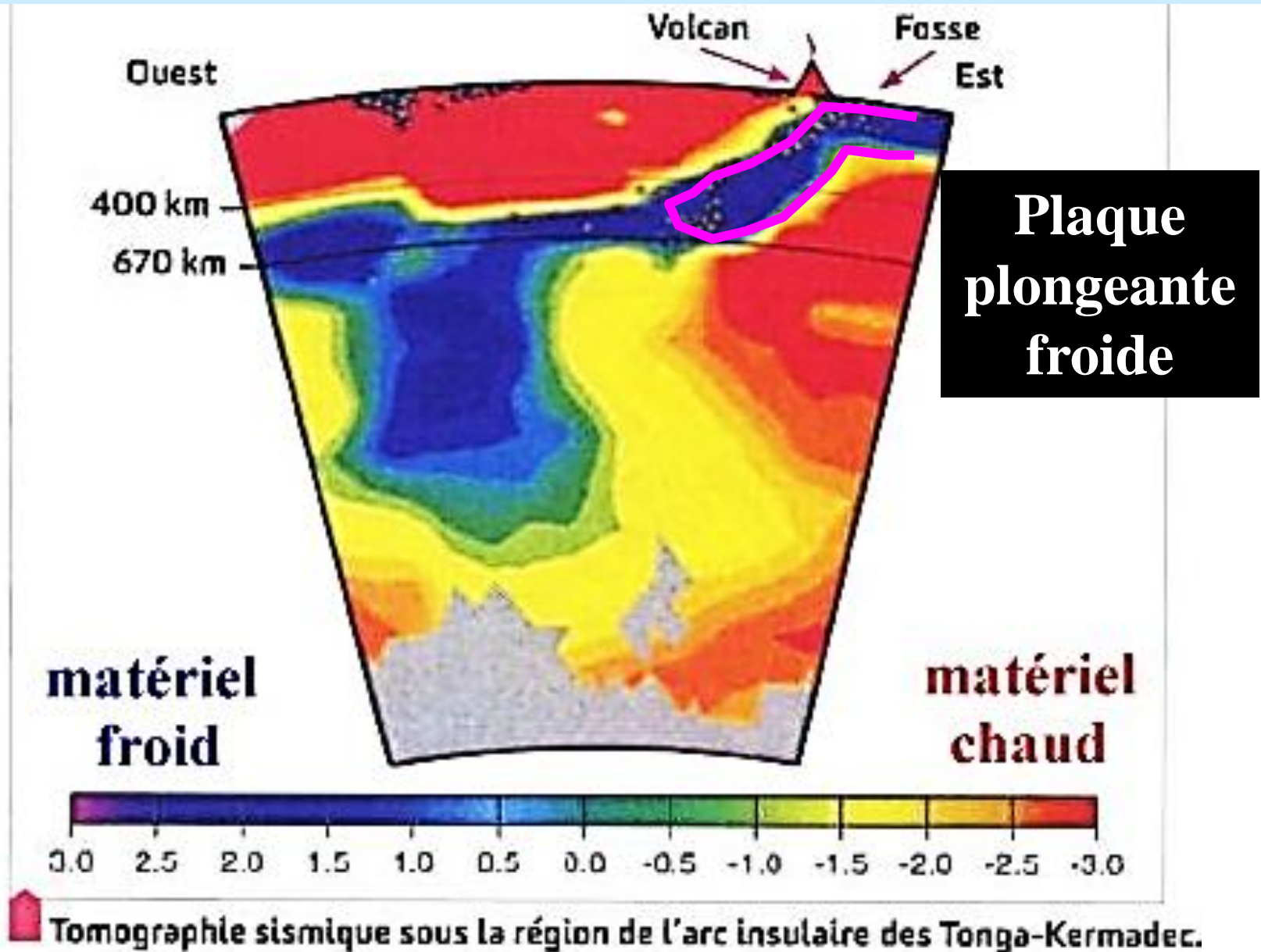
La tomographie sismique : interprétations



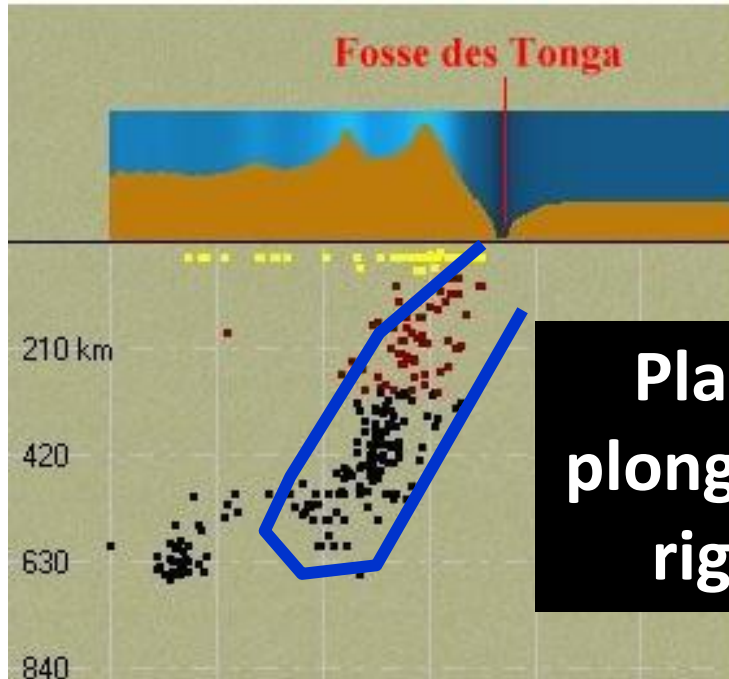
Tomographie sismique à 100 km de profondeur mise en évidence de remontée de roches chaudes



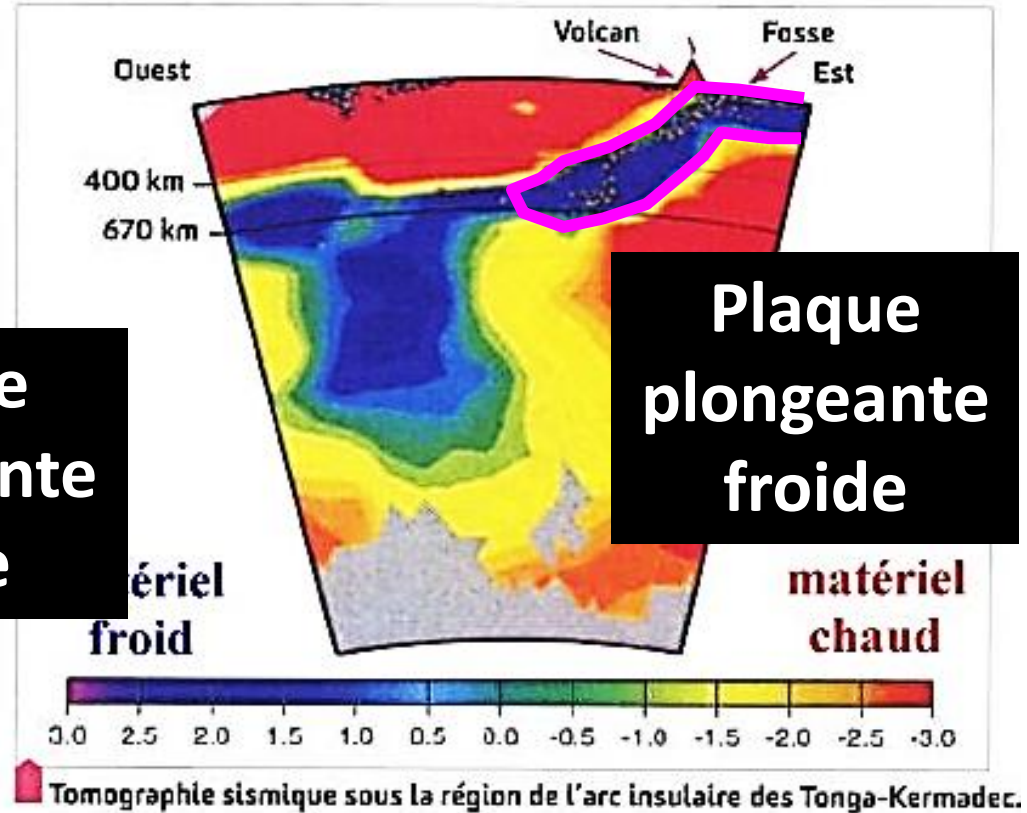
Tomographie sismique et mise en évidence des branches descendantes des mouvements de convection



Interprétation des données sismiques

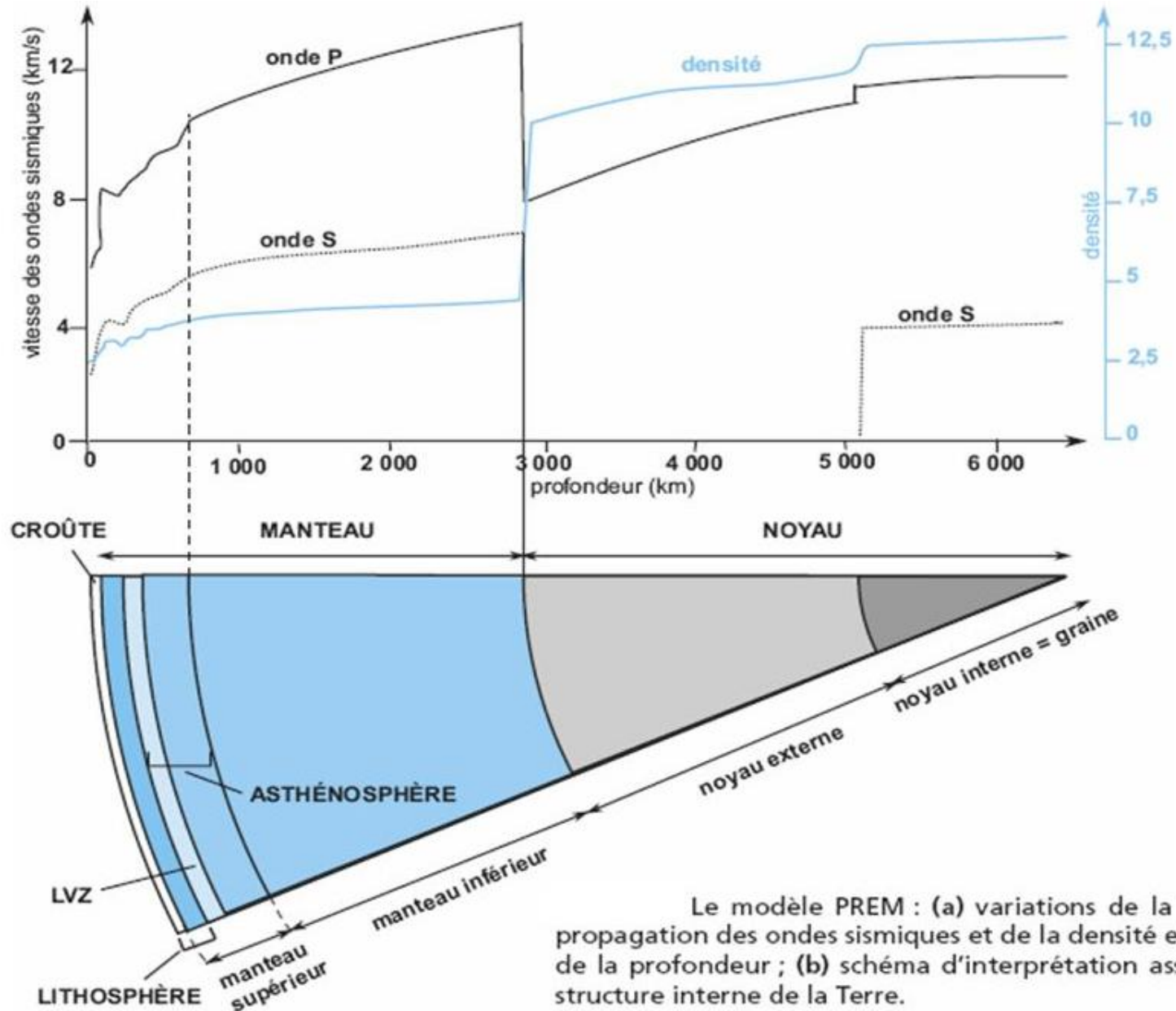


**Plaque
plongeante
rigide**



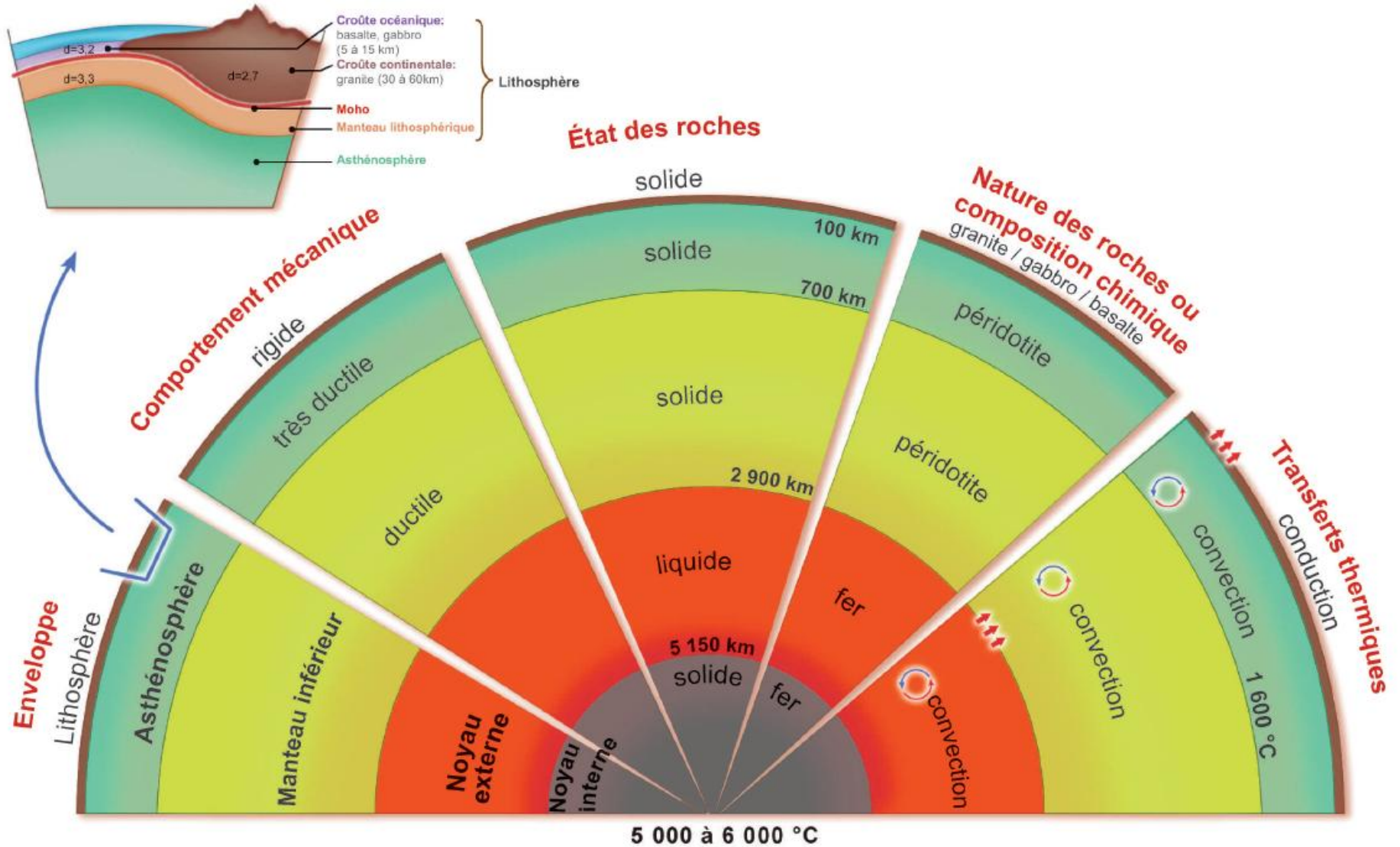
Conclusion

Un modèle sismique de la Terre

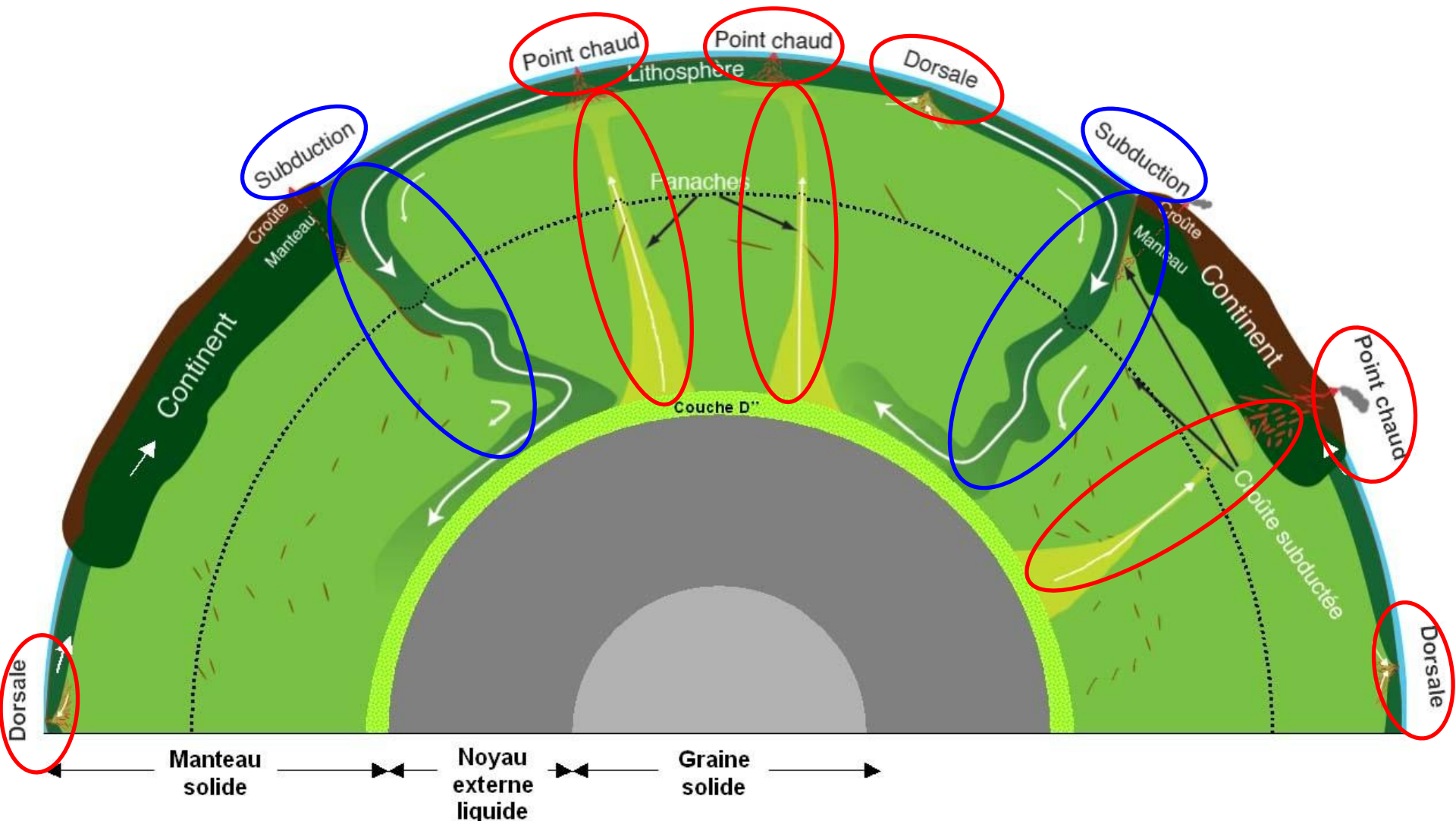


Le modèle PREM : (a) variations de la vitesse de propagation des ondes sismiques et de la densité en fonction de la profondeur ; (b) schéma d'interprétation associé de la structure interne de la Terre.

Conclusion

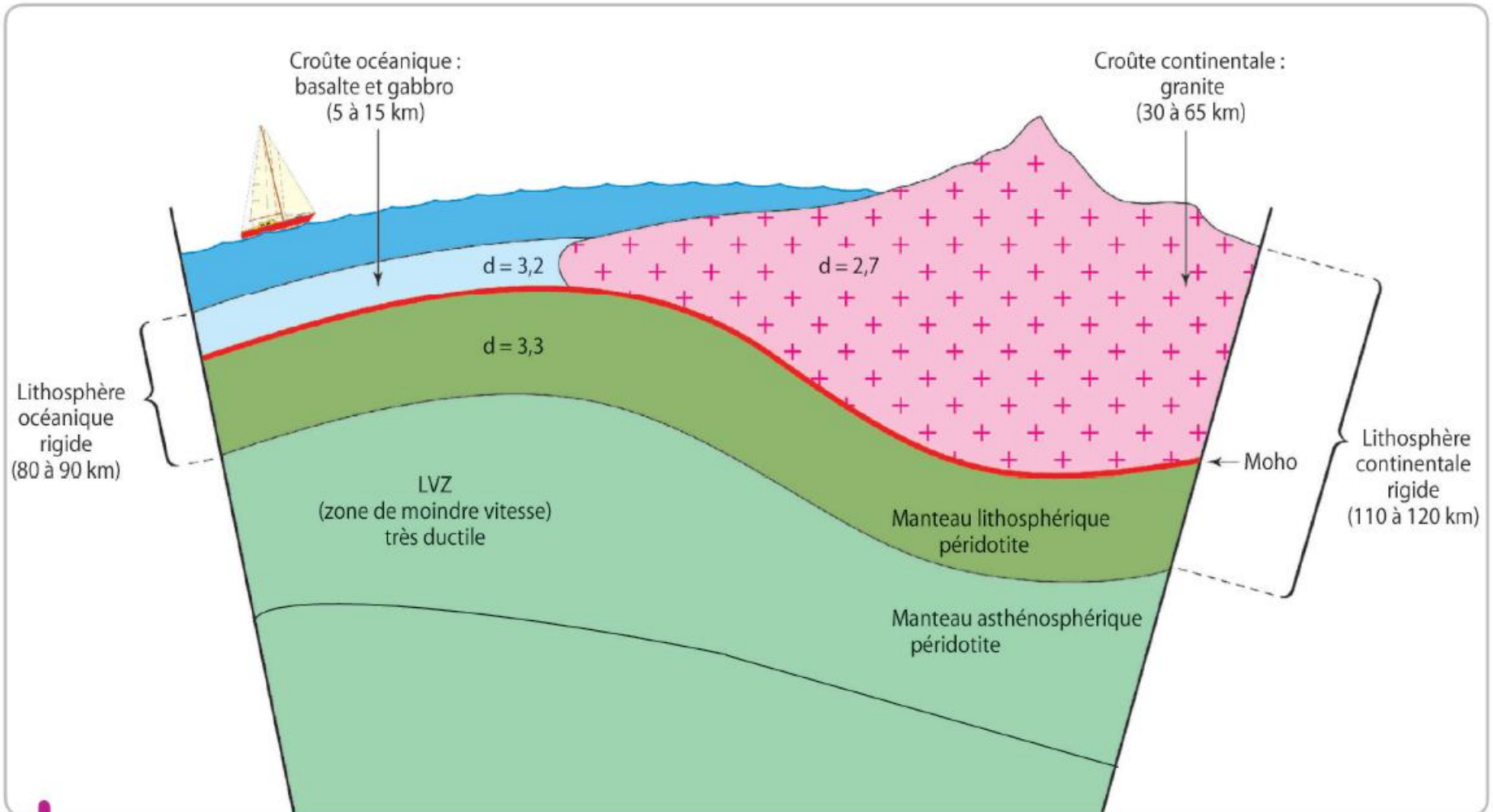


Modèle de Terre (ENS Lyon 2011-2014)



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).