

LITHOSPHERE ET ASTHENOSPHERE

définitions

Pour bien comprendre la formation des Minéraux et des Roches il faut connaître la structure interne de la Terre:

La terre est constituée de couches aux propriétés physiques différentes :

1- *la croûte* ou écorce qui constitue moins de 2% du volume, elle est solide.

La croûte: la composition chimique de la croûte est connue par l'observation directe des roches (le plus grand forage jamais réalisé, celui de la presqu'île de Kola en Russie, atteint 12 kilomètres de profondeur) et par l'étude des ondes émises par les séismes proches ou par les séismes provoqués.

La croûte est divisée en deux parties : **la croûte continentale** et **la croûte océanique**.

La croûte continentale s'étend de 30 à 70 km (l'épaisseur maximale est atteinte sous les régions montagneuses). Elle possède près de la surface la composition moyenne **des granites**.

La croûte océanique est épaisse de 6 à 10 km et constitue le plancher des océans. Sa composition est **basaltique**.

La base de la croûte est caractérisée par un brusque changement de densité (2,9 à 3,3 g/cm³).

Un géologue croate, Andrija Mohorovicic a découvert en 1909 l'existence d'une discontinuité dans la propagation des ondes sismiques.

On appelle discontinuité de Mohorovicic ou Moho, la discontinuité sismique qui marque la limite entre la croûte et le manteau.

Le Moho est situé

**à environ 35 km (jusqu'à 70 km sous les grandes chaînes de montagnes) sous les continents,
à environ 10 km sous les océans.**

2- le "*manteau*" qui constitue 81 % du volume total de la terre et représente 67 % de sa masse. Il s'étend en profondeur jusqu'à environ 2900 km.

La composition moyenne du manteau est celle d'une roche nommée **péridotite** (roche ultrabasique riche en silicates de magnésium et de fer) composée d'olivine, de pyroxène et de grenat.

La composition chimique moyenne du manteau ne change pratiquement pas, mais la minéralogie du manteau varie en fonction de la profondeur (voir le paragraphe sur les couches de propriétés physiques différentes).

Le manteau : sous le **Moho**

il se divise en :

manteau supérieur, essentiellement plastique (plastique : adjectif, se dit d'une matière malléable, à laquelle on peut donner une forme. L'argile est plastique.), la partie supérieure est solide.

manteau inférieur, solide

Une ultime discontinuité située à 2900 km de profondeur, sépare le manteau inférieur du noyau. Elle se traduit par une augmentation de densité de 5,5 g/cm³ à 10 g/cm³:

c'est la discontinuité de Gutenberg, découverte en 1913.

3- au centre le "*noyau*" qui représente 17% du volume total, il se divise en :
noyau externe, liquide
noyau interne, solide

Le noyau: constitue la partie centrale de la Terre. Il est divisé en deux couches : le noyau externe (la brusque interruption de propagation des ondes S à la limite entre le manteau et le noyau indique que le noyau externe est liquide).

Le noyau interne ou graine (solide), séparé par une discontinuité (**discontinuité de Lehmann**) à 5150 km de profondeur.

A la limite entre ces deux couches, la densité passe de 12,3 g/cm³ à environ 13,3 g/cm³, et atteint 13,6 g/cm³ au centre de la Terre, soit à 6371 km.

Le noyau serait formé de fer et d'un peu de nickel. Cette hypothèse s'appuie sur la composition chimique d'une classe de météorites (les météorites de fer) considérées comme les restes des noyaux de petites planètes (astéroïdes) différenciées.

Il existe trois lignes de discontinuité importantes qui marquent des contrastes de densité :

1- entre la croûte et le manteau, **discontinuité de Mohorovicic (moho)**.

2- entre le manteau et le noyau, **discontinuité de Gutenberg**.

La couche plastique du manteau est appelée **asthénosphère**, et les couches solides qui se trouvent au dessus sont appelées la **lithosphère**.

3- Entre le noyau externe et le noyau interne , **discontinuité de Lehmann**

LITHOSPHERE ET ASTHENOSPHERE

définitions

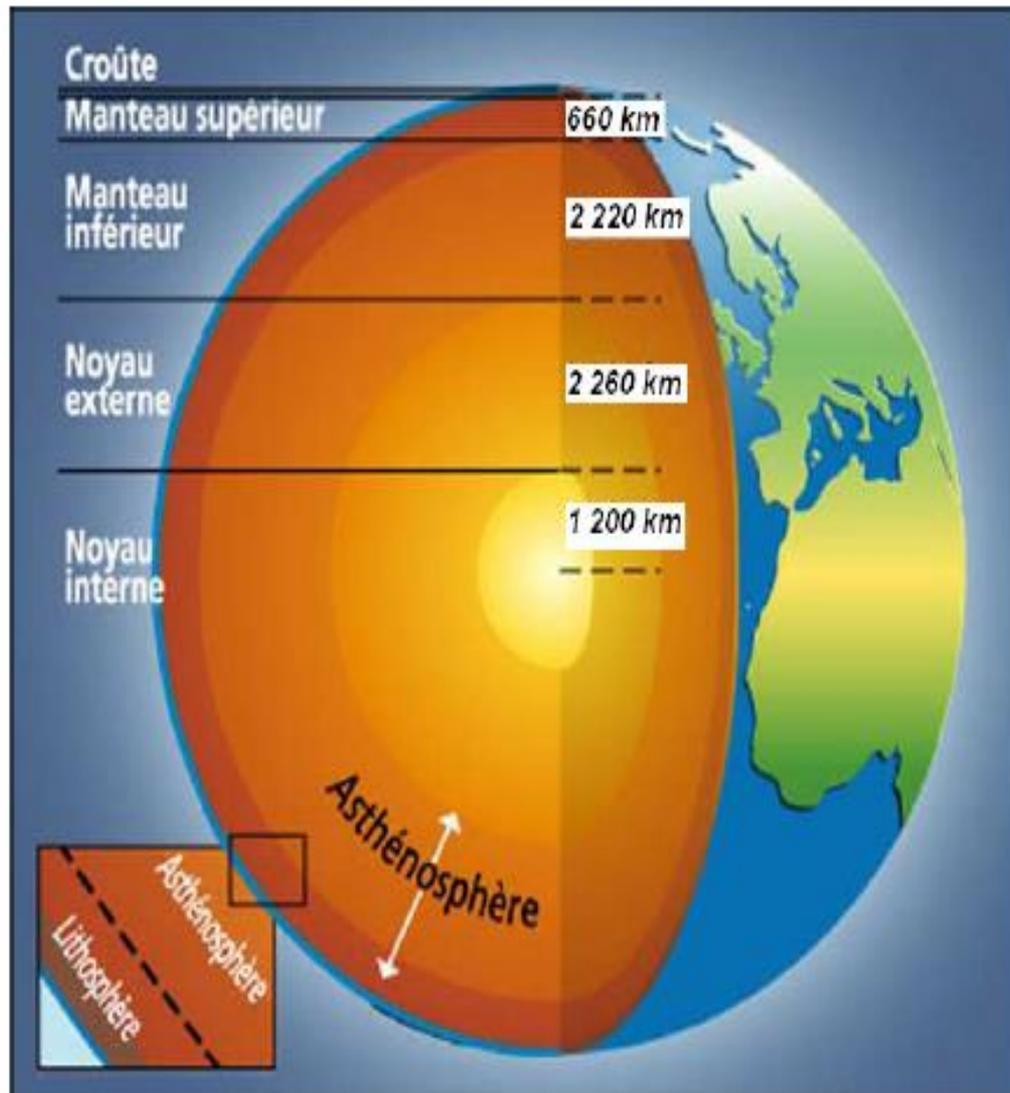
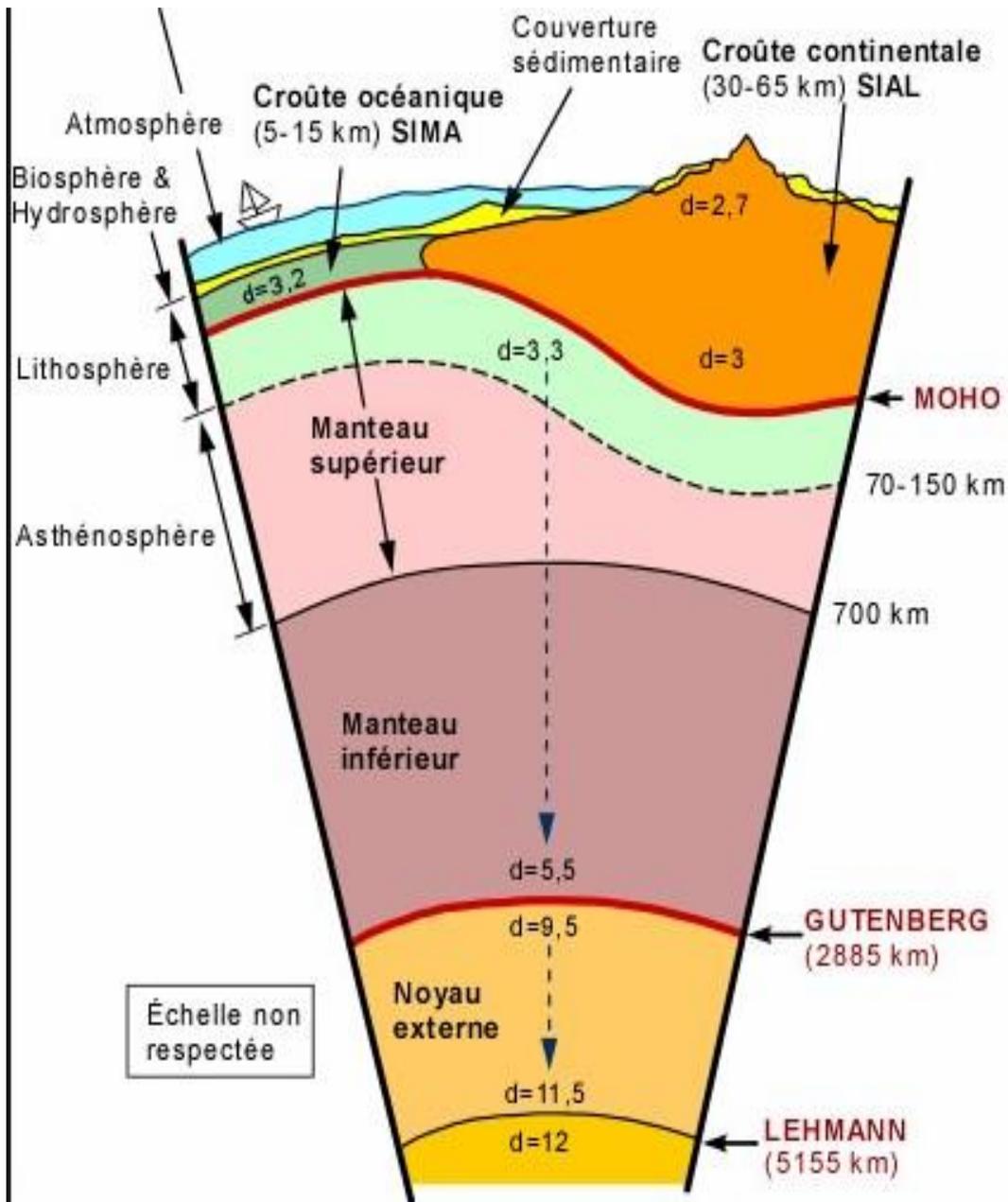
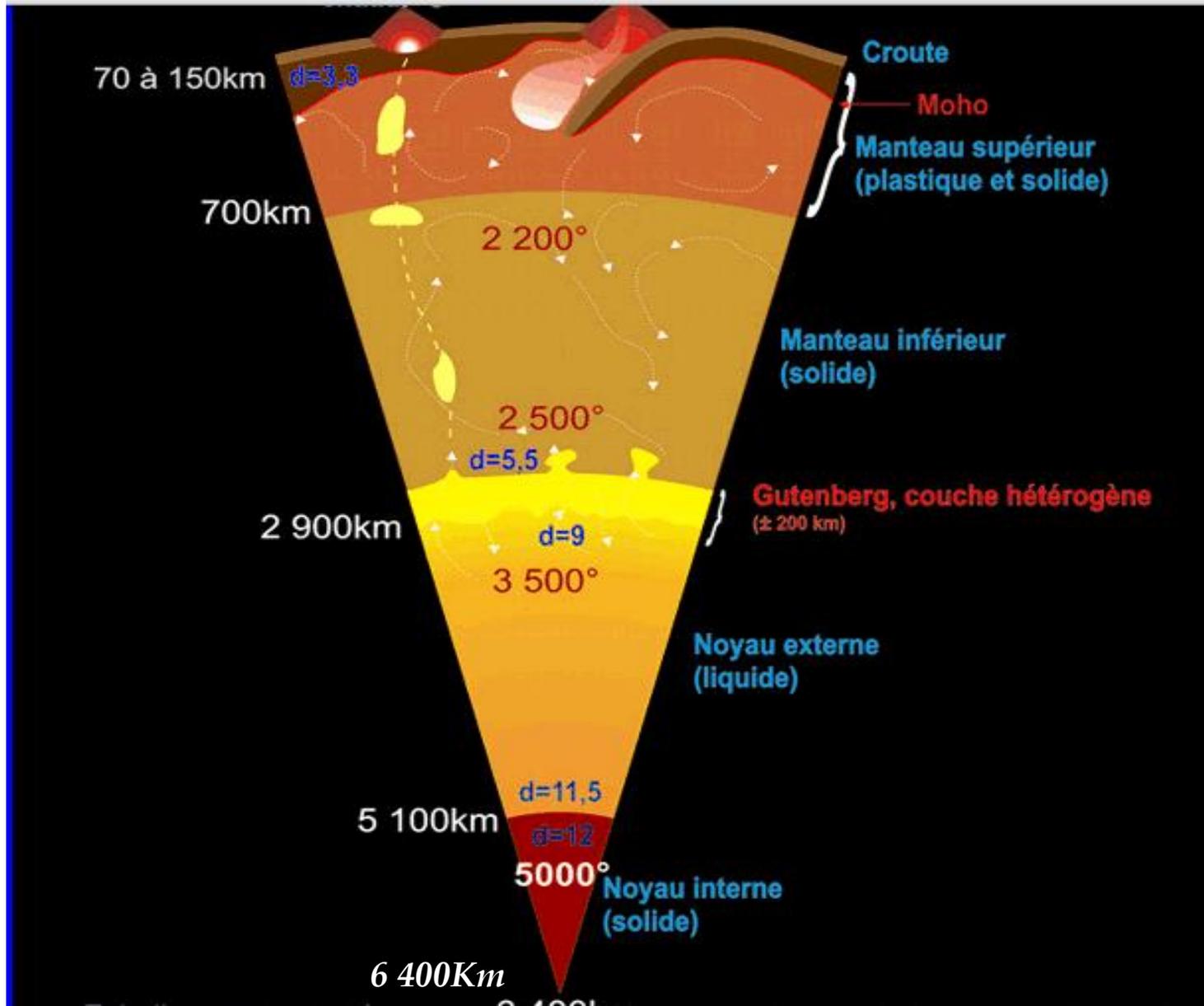


Figure 1 – Vue de la Terre en coupe (Source : Plaquette Séismes MEDD)



La terre est constituée de couches aux propriétés physiques différentes :

STRUCTURE INTERNE DE LA TERRE



CROÛTE

Continentale (silicium - aluminium)
régions granitiques $d=2.7$
régions i,termédiaires $d=3$

Plaine 30 à 35 km

Montagne 50 à 65 km

Océanique (silicium - magnésium)
basalte $d=3.2$

5 à 8 km

Discontinuité de Mohorovicie

MANTEAU

Supérieur

Solide

Continents 150 km

Océans 70 km

Visqueux

700 km

Inférieur

Solide

700 à 2 900 km

Discontinuité de Guttenberg

NOYAU

Externe

Liquide

2 900 à 5 100 km

Interne

Solide

5 100 à 6 400 km

En résumé ...

CROÛTE

CONTINENTALE (SIAL)

r. granitiques ($d=2,7$)

r. intermédiaires ($d=3$)

plaines continentales
(30-35 km)

montagnes (50-65 km)

OCÉANIQUE (SIMA) (5-15 km)

basaltes ($d=3,2$)

discontinuité de Mohorovicic (MOHO)

MANTEAU (péridotite)

SUPÉRIEUR: se divise en deux couches

- couche rigide dont la base se situe à 70 km, sous les océans à 150 km, sous les continents

- couche plastique jusqu'à 700 km

INFÉRIEUR

- couche solide: de 700 à 2885 km

discontinuité de Gutenberg

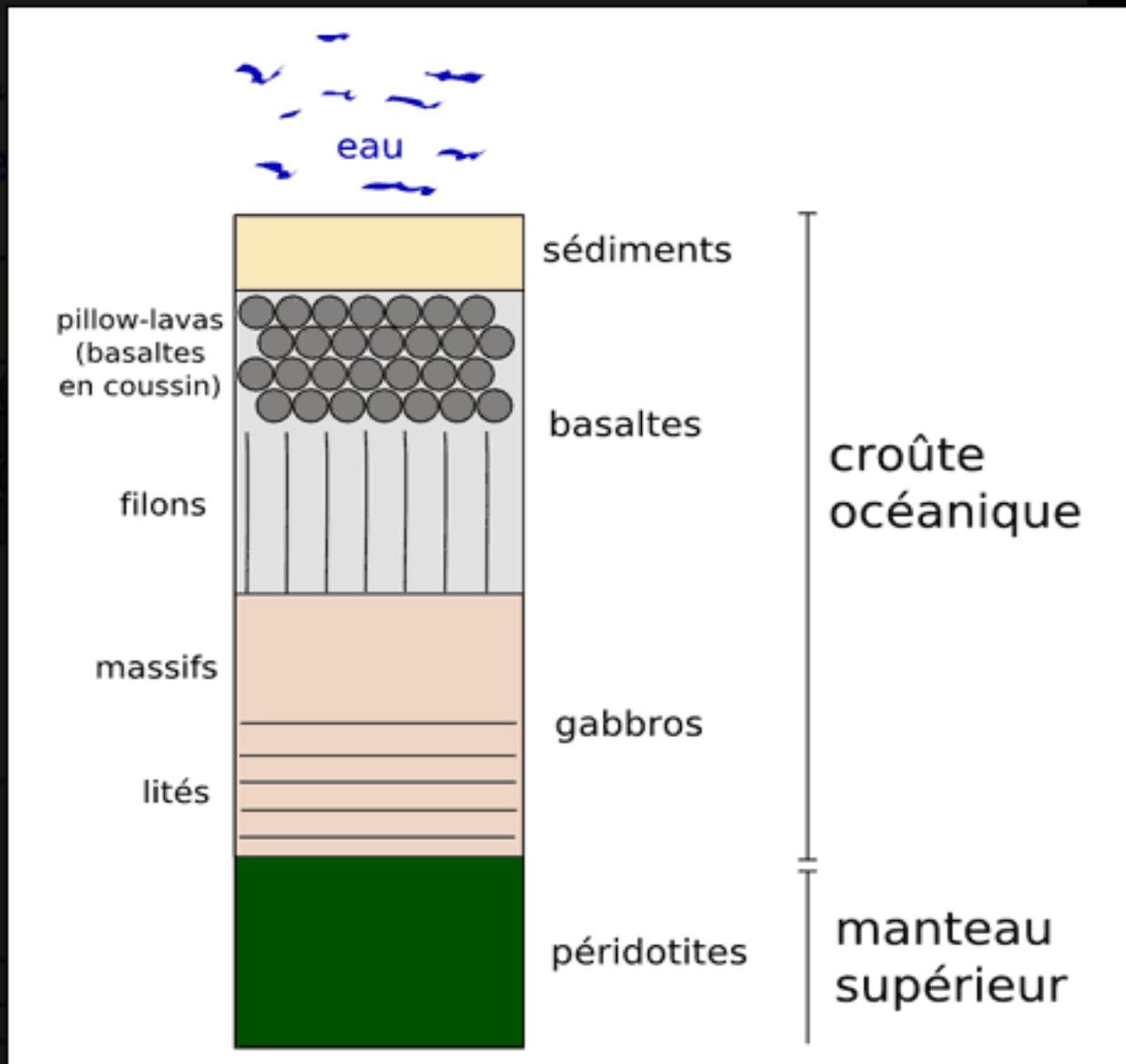
NOYAU (fer et nickel)

EXTERNE, liquide, de 2885 à 5155 km

discontinuité de Lehmann

INTERNE, solide, de 5155 à 6371 km

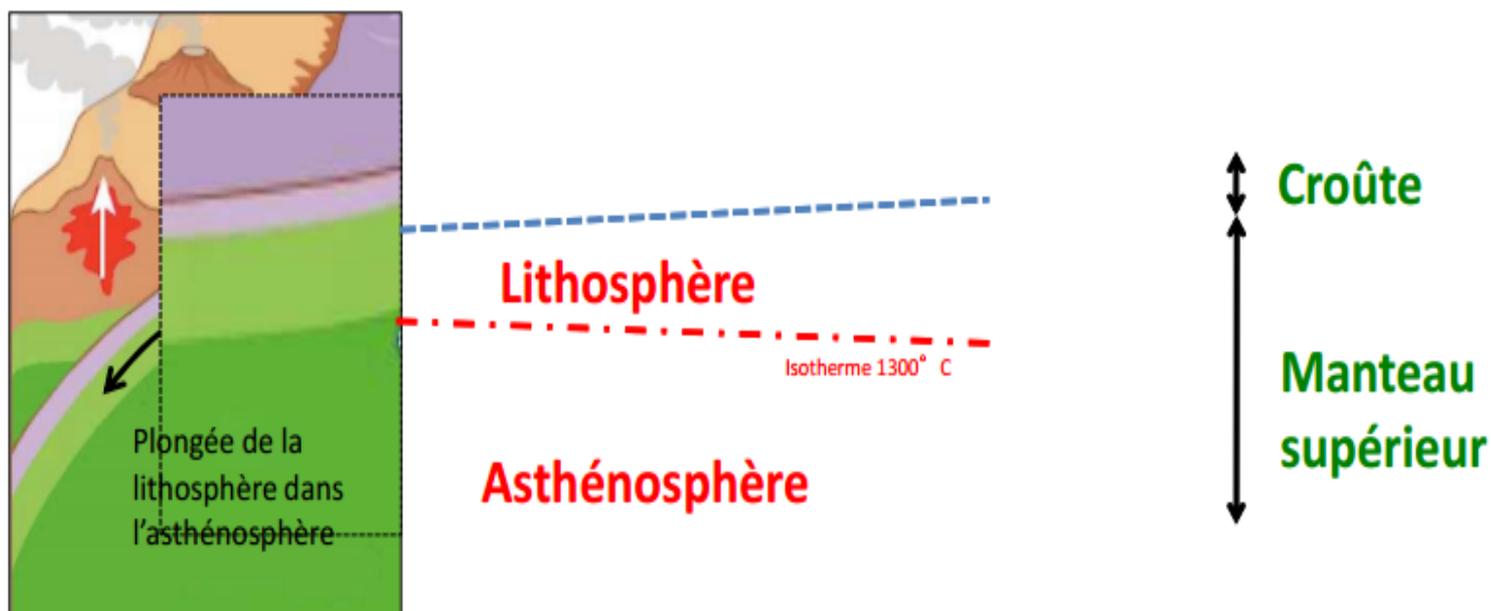
Enveloppe	Profondeur km	Densité g/cm ³	Pétrographie dominante	Éléments chimiques
Croûte continentale océanique	0 - 35	2,7- 3,0	Granite et gneiss Basalte, gabbro et péridotite	Si et Al
	0 - 10	2,9 -3,2		Si, Al et Mg
Mancheau supérieur lithosphérique et asthénosphère zone de transition	400 - 670	3,4 -4,4	<u>Olivine</u> , <u>Pyroxène</u> et <u>Grenat</u>	Si, Mg et Ca
			Wadsleyite <u>Ringwoodite</u> et <u>Grenat</u> <u>Mg₂SiO₄</u>	
Mancheau inférieur	670 - 2890	4,4 -5,6	<u>Pérovskite</u> et <u>Ferropériclase</u> MgSiO ₃ + MgO	Si, Mg, Fe et Ca
Croûte externe	2890 -5100	9,9 -12,2	—	Fe, Ni et S (état liquide)
Croûte interne	5100 -6378	12,8 - 13,1	—	Fe, Ni et S (état solide)



Structure de la lithosphère océanique

Attention à la confusion suivante !

Lithosphère \neq Croûte et Asthénosphère \neq Manteau



Lithosphère = croûte + partie supérieure du manteau supérieur

Asthénosphère = reste du manteau supérieur

Bilan : Actuellement, la Terre a une structure différenciée en enveloppes concentriques dont les principales sont : la croûte, le manteau et le noyau. La lithosphère comprend la croûte (continentale et océanique) et une partie du manteau supérieur, elle est caractérisée par un comportement rigide, cassant parce que froid.

L'asthénosphère sous-jacente est moins rigide et plus ductile parce que plus chaude.

- ❑ L'intérieur de la Terre a été établie à partir du comportement des ondes sismiques lors des tremblements de terre.
- ❑ Les sismologues Mohorovicic et Gutenberg ont réussi à déterminer l'état et la densité des couches par l'étude du comportement des ondes sismiques
- ❑ La vitesse de propagation des ondes sismiques est fonction de l'état et de la densité de la matière
- ❑ Il existe deux grands domaines de propagations des ondes :

les ondes de surface qui se propagent à la surface du globe

les ondes de fond qui se propagent à l'intérieur de la terre

les ondes de cisaillement ou ondes S, se propagent dans les solides

les ondes de compression ou ondes P, se propagent dans les solides, liquides et gaz

2. Le concept de lithosphère et d'asthénosphère

C'est l'étude des ondes sismiques au niveau des zones de subduction qui a permis de mettre en évidence la distinction entre la lithosphère et l'asthénosphère (des structures plus froides plongeant dans des structures plus chaudes).

a. La lithosphère

Il s'agit de l'enveloppe la plus superficielle du globe terrestre, d'une épaisseur moyenne de 100 km.

Elle comprend la croûte et la partie supérieure du manteau supérieur jusqu'à une zone très particulière appelée la **LVZ** (low velocity zone).

LVZ : Cette zone sépare le manteau supérieur en 2 parties. Elle se trouve vers 100 km de profondeur et s'étend jusqu'à 230 km de profondeur. La vitesse des ondes sismiques y est fortement réduite, d'où son nom. Dans cette zone de moindre vitesse, les matériaux sont plus **ductiles** et confèrent ainsi une mobilité aux plaques lithosphériques sur une zone plus rigide : l'asthénosphère

b. L'asthénosphère

Elle est comprise entre 100 km et 670 km de profondeur. C'est la partie inférieure du manteau supérieur. Les matériaux sont de nouveau plus rigides, la vitesse des ondes y est plus importante.

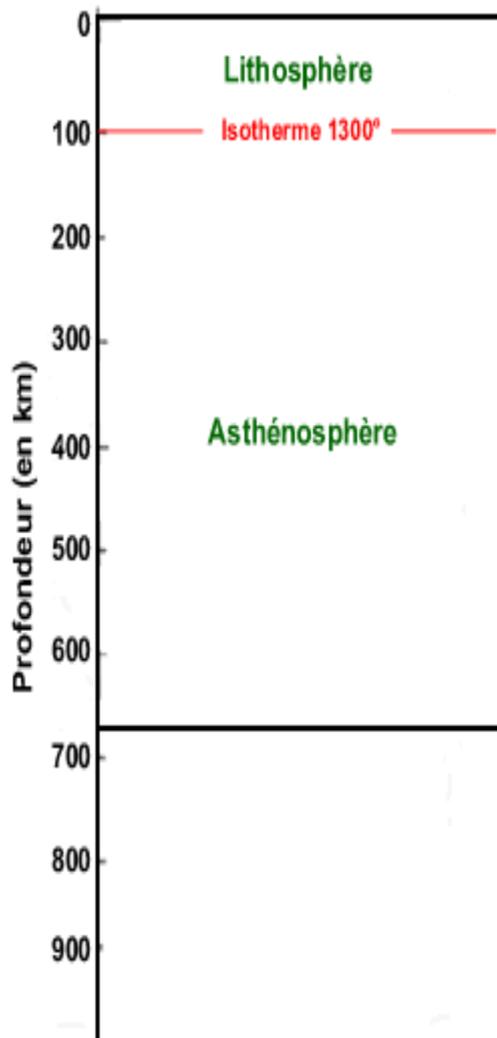
Définition de la lithosphère par rapport à l'asthénosphère

Les définitions de la lithosphère et de l'asthénosphère sont beaucoup plus débattues.

La première définition a d'abord été une définition sismologique, puis mécanique. La plus communément admise actuellement est une définition "thermique".

Dans la lithosphère, la chaleur se propage par conduction, alors que dans l'asthénosphère la chaleur est transmise par conduction mais aussi par convection.

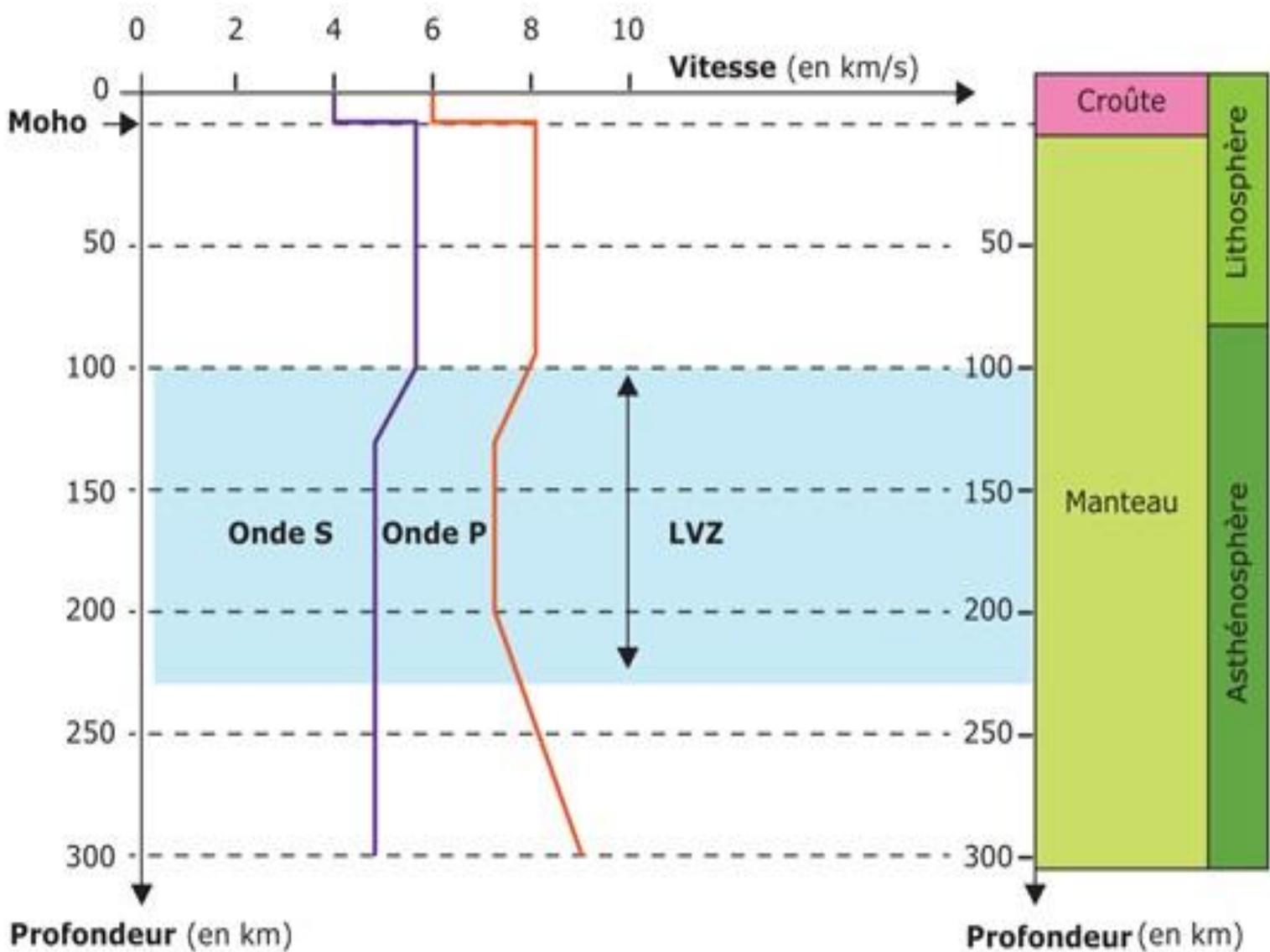
La lithosphère est donc ce que les physiciens appellent la « *couche limite thermique* » supérieure du système convectif mantellique.



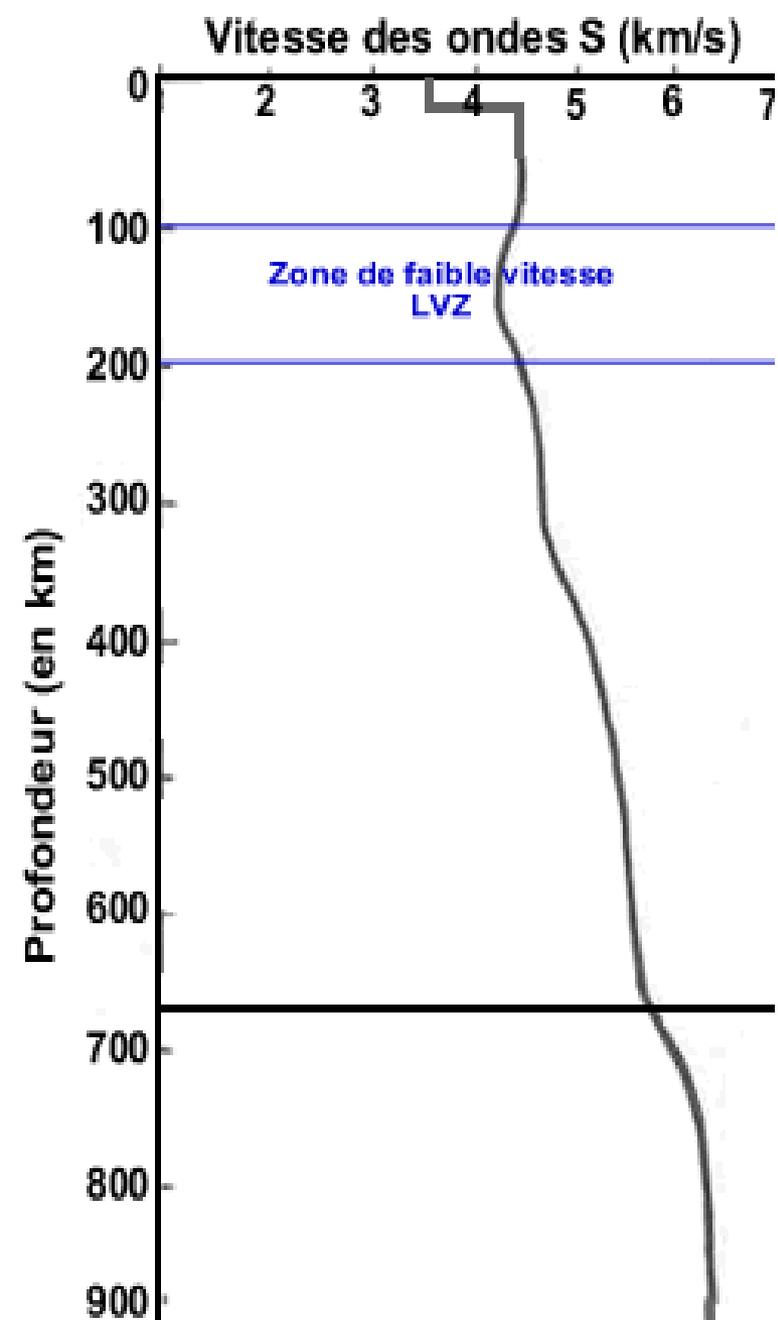
Pour simplifier, on peut dire que la lithosphère, c'est ce qui est suffisamment rigide et "cassant" parce que froid, alors que l'asthénosphère correspond à la part du manteau supérieur sous-jacent, moins rigide et plus ductile parce que plus chaud.

La limite lithosphère/asthénosphère correspond approximativement à l'isotherme 1300°C. La lithosphère comprend évidemment dans la plupart des cas une part mantellique et une part crustale.

La limite inférieure de l'asthénosphère est à 670 km de profondeur.



Vitesse de ondes P et S au niveau permettant d'identifier la LVZ



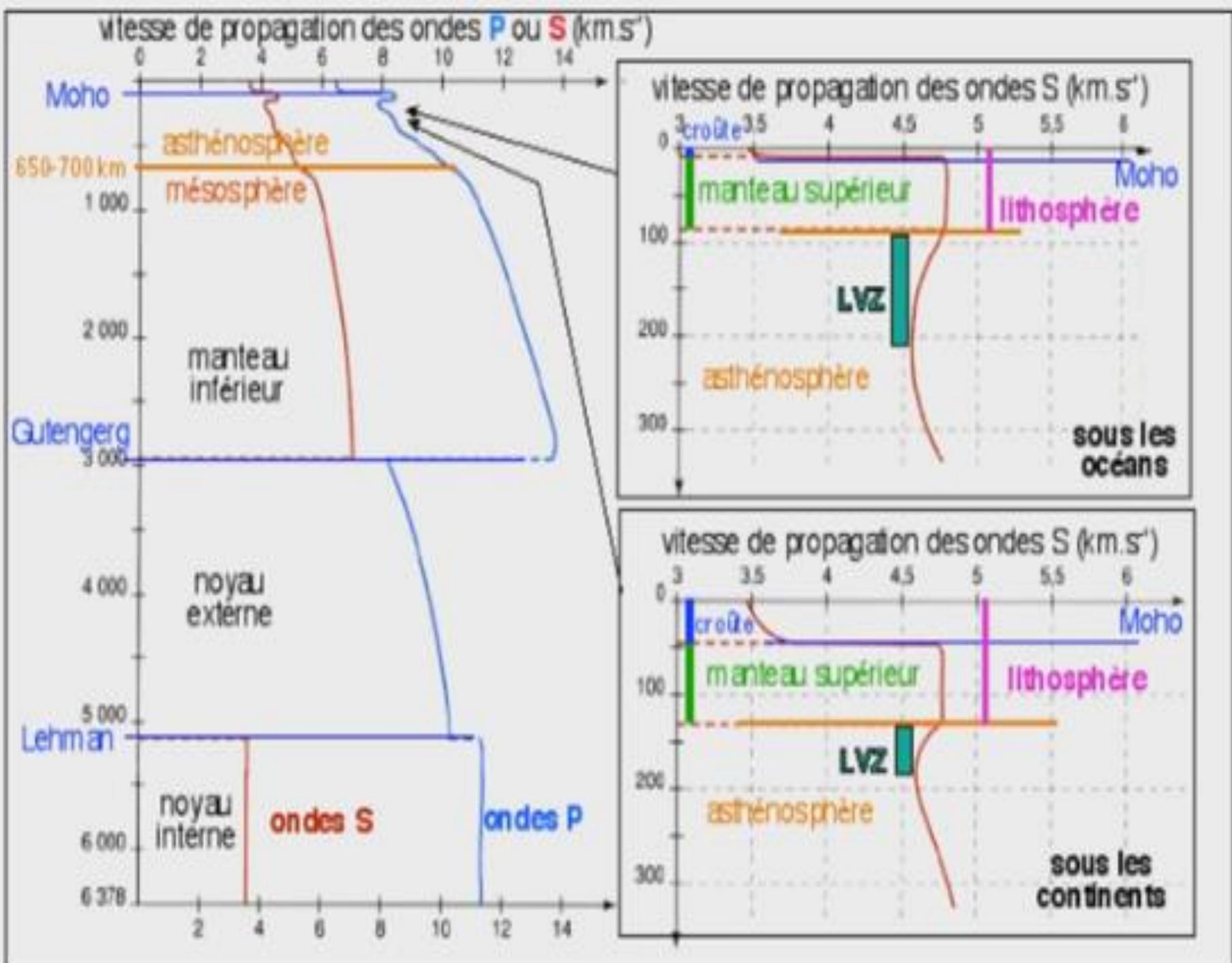
Cette partie supérieure de l'asthénosphère où les vitesses sont plus lentes (4,5 km/s au lieu de 5 km/s pour les ondes S) est appelée *Low Velocity Zone* (LVZ).

Les vitesses sismiques sont plus lentes dans cette couche (relativement fine) car les conditions de température et de pression sont voisines de celles nécessaires à la fusion de la péridotite mantellique. Il s'agit donc d'un manteau « *presque fondu* », et c'est pour cela que les ondes sismiques sont légèrement ralenties.

Le sommet de cette LVZ correspond à peu près à l'isotherme 1300°C.

La LVZ fait donc partie de l'asthénosphère, qui fait partie du manteau supérieur.

Définition thermique de la limite lithosphère/asthénos



COMPOSITION DU MANTEAU

Le manteau est constitué d'un agrégat de cristaux d'olivine, de pyroxènes et d'autres composants basiques. Avec la profondeur, la pression et la température augmentent et les minéraux évoluent au cours de transitions de phases.

Vers 400 km, l'olivine se transforme en wadsleyite :

c'est l'entrée de la **zone de transition** observée par les sismologues, du fait du saut de vitesses sismiques.

Vers 500 km, une nouvelle phase se met en place, la ringwoodite mais est difficilement observée.

Ensuite, **à 670 km**, apparaît la pérovskite, qui est le constituant majeur du manteau.

Il existe aussi d'autres transitions, notamment pour les pyroxènes ou le passage à la phase de très haute pression qu'est la post-pérovskite.

La pyrolite est une roche théorique considérée comme étant proche de la composition vraie du manteau.

Les processus de déformations de ces minéraux sont encore mal connus, surtout à grande profondeur. Cependant, il est raisonnablement admis que l'olivine se déforme suivant des plans cristallins entraînant des dislocations multiples.

Fiche
d'identification
de l'Olivine

à l'œil nu et au microscope polarisant



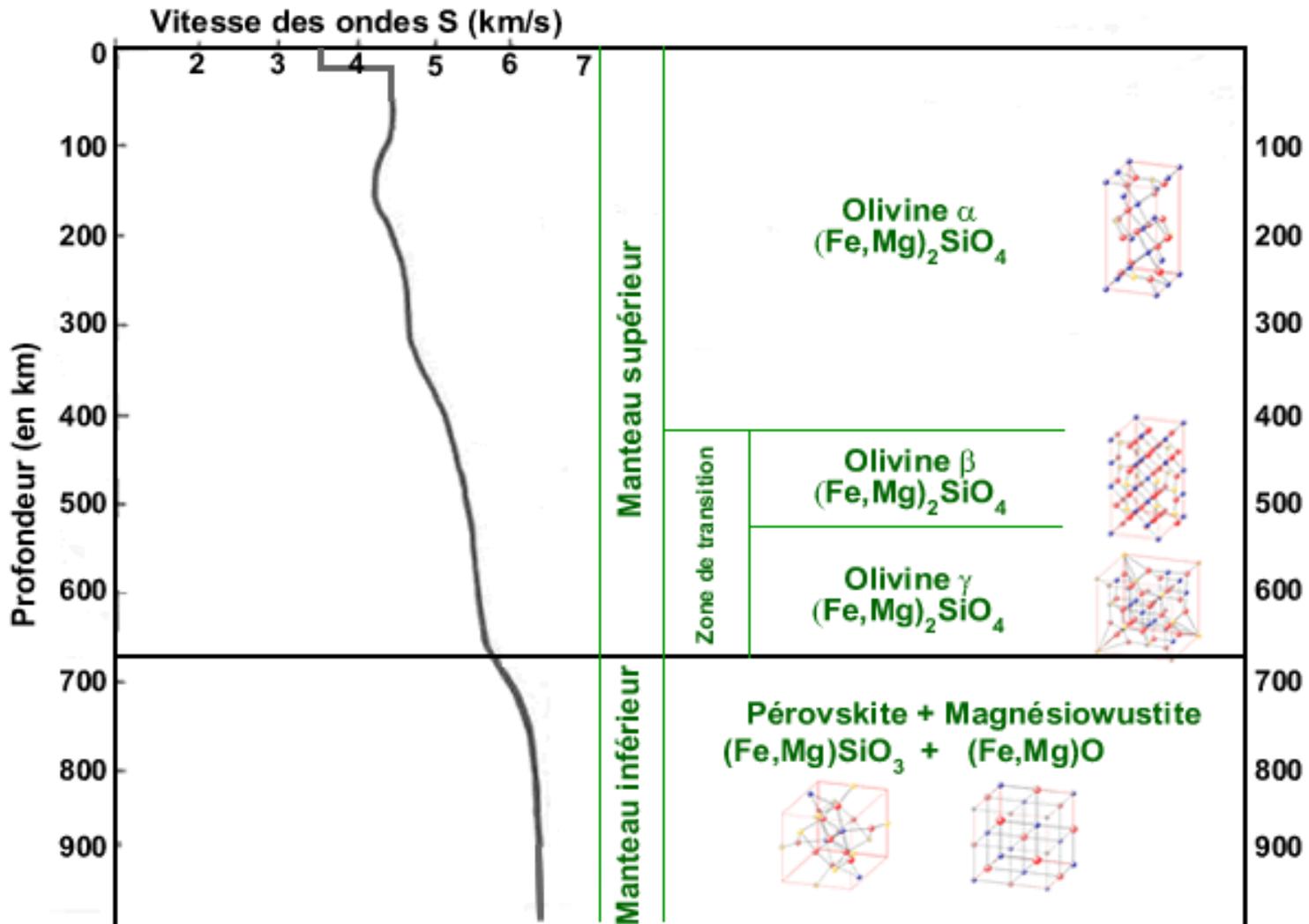
Olivine	Formule chimique	Système de cristallisation
	$\text{SiO}_4 (\text{Fe}, \text{Mg})_2$ Nésosilicate <i>(tétraèdres isolés)</i>	<i>Orthorhombique</i> $a \neq b \neq c$
Caractères macroscopiques	Éclat : vitreux. Forme : grains arrondis, rarement en cristaux. Cassure : conchoïdale. Dureté : 6,5 à 7. Flexibilité : aucune.	Couleur : vert olive à vert jaunâtre. Densité : 3,2 à 3,6. Caractère au toucher : rien de particulier. Magnétisme : aucun.
Caractères microscopiques	 Lumière polarisée non analysée (LPNA = « lumière naturelle » des géologues)	Caractères cristallographiques <ul style="list-style-type: none"> - Forme : sections souvent automorphes dans les roches volcaniques, plutôt xénomorphes dans les roches grenues. - Cristaux massifs parfois allongés suivant (100). - Clivages rarement visibles : (001) bon et (010) imparfait. Caractères optiques <ul style="list-style-type: none"> - Relief fort : 1,67 à 1,84. - Parfaitement incolores. - Pleochroïsme absent. - Craquelures fréquentes.
	Lumière polarisée analysée (LPA)	<ul style="list-style-type: none"> - Biréfringence : 0,036. - Teintes de polarisation : teintes vives (jaïs bleus, verts, rouges, violets) du 2^{ème} ordre. - Extinction et Allongement : extinction droite et allongement positif.
Altération	<ul style="list-style-type: none"> - Par rubéfaction : les bords et les craquelures des cristaux sont embranchés de produits ferrugineux (surtout dans les basaltes). - Par serpentinisation : formation de bandes de serpentine $(\text{Si}_2\text{O}_5)_2(\text{Mg}_2\text{OH})_2$ dans le cristal et cristallisation du fer sous forme de magnétite ou d'oligiste. Ceci peut intéresser tout l'ensemble de la roche (péridotite par exemple). - Altération hydrothermale. 	
Gisement	Roches magmatiques basiques (gabbros) et ultrabasiques (péridotites), dolomies de métamorphisme de HP et HT.	
Espèces voisines	Les termes extrêmes de la famille des péridots, l'olivine représentant le terme moyen : Fayalite $\text{SiO}_4 (\text{Fe})_2$: pôle ferreux des péridots ; diffère de l'olivine par un relief et une biréfringence plus forts. Forstérite $\text{SiO}_4 (\text{Mg})_2$: pôle magnésien des péridots ; relief et biréfringence un peu moins forts que pour l'olivine.	
Observations personnelles		

Limite manteau supérieur-manteau inférieur

Il y a un saut de vitesse sismique assez brusque vers 670 km de profondeur, saut qui correspond à un changement de phase de l'olivine, avec passage de minéraux silicatés à structure tétraédrique (olivine gamma de formule générale $(\text{Fe},\text{Mg})_2\text{SiO}_4$ ou Mg_2SiO_4 pour le pôle magnésien qui est dominant dans le manteau) à un mélange de 2 minéraux silicatés sans structure tétraédrique : la pérovskite (Pv, MgSiO_3) et la magnésiowustite (Mw, MgO), soit :



Au-dessus de cette limite de 670 km, c'est le manteau supérieur ; en dessous, c'est le manteau inférieur.

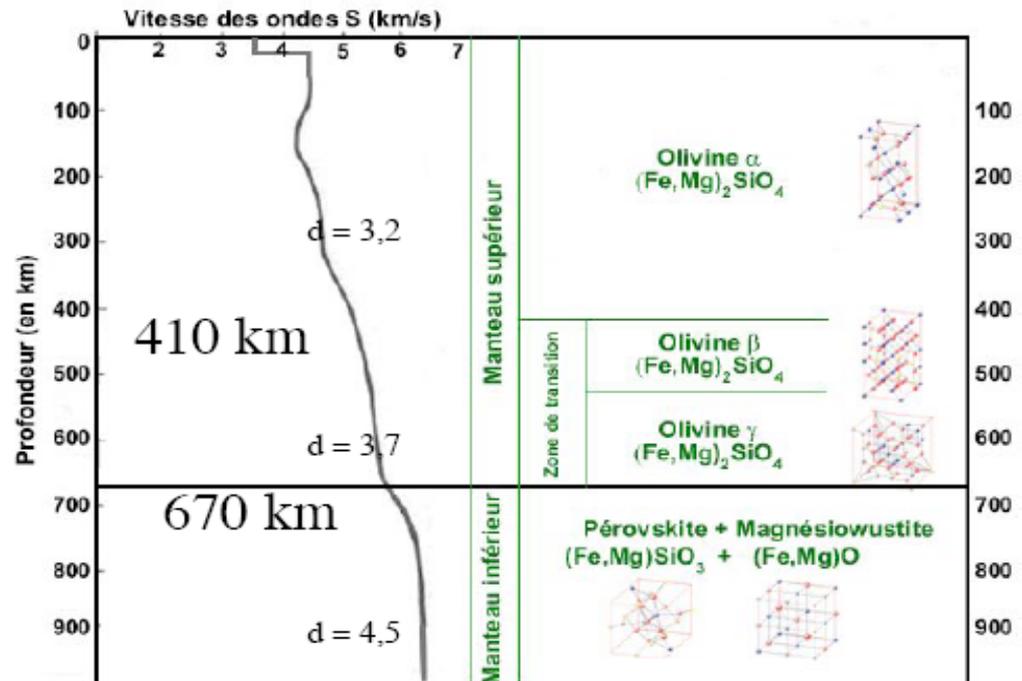


Phases de l'olivine et vitesses des ondes S dans le manteau supérieur

- L'asthénosphère: composition et limite inférieure

Le manteau supérieur (lithosphérique et asthénosphérique) est composé de péridotite, un assemblage de minéraux majoritairement d'olivine et minoritairement de pyroxènes et grenats.

Les discontinuités dans le manteau sont dues aux transitions de phases minérales de l'olivine qui engendre un accroissement net de la densité:



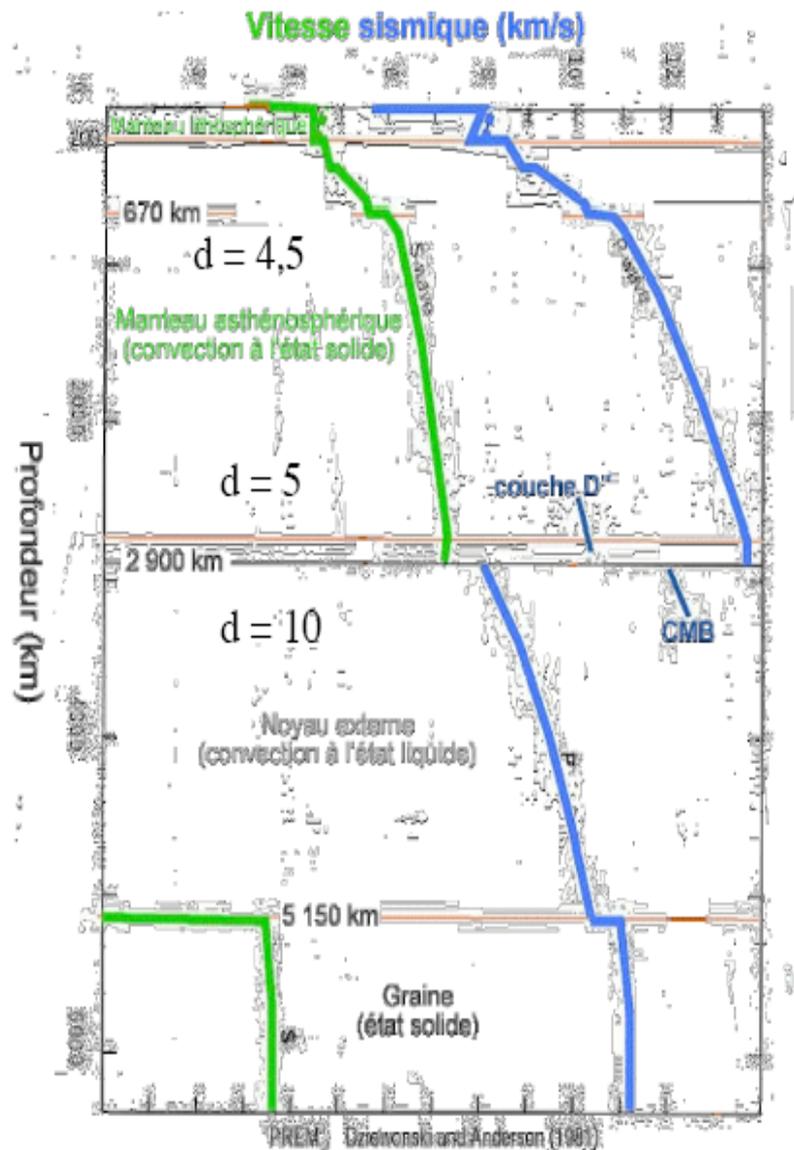
- A 410 km de profondeur, l'olivine devient du spinelle
- A 670 km, la base de l'Asthénosphère et du manteau supérieure, le spinelle devient Pérovskite

- Le Manteau inférieure

Le manteau inférieure est une masse dont les propriétés sont au premier ordre homogènes.

Sa base est marquée par la discontinuité la plus importante de la Terre qui oppose le noyau au manteau. Elle est caractérisée par un très fort accroissement de densité.

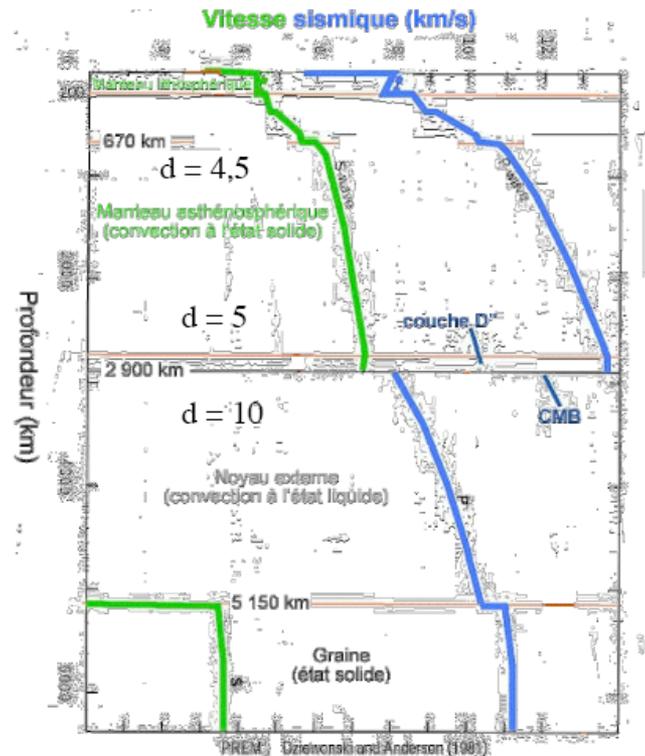
La couche D'' représente une zone de diminution de vitesse des ondes P et S à la base du manteau. Son origine est débattue.

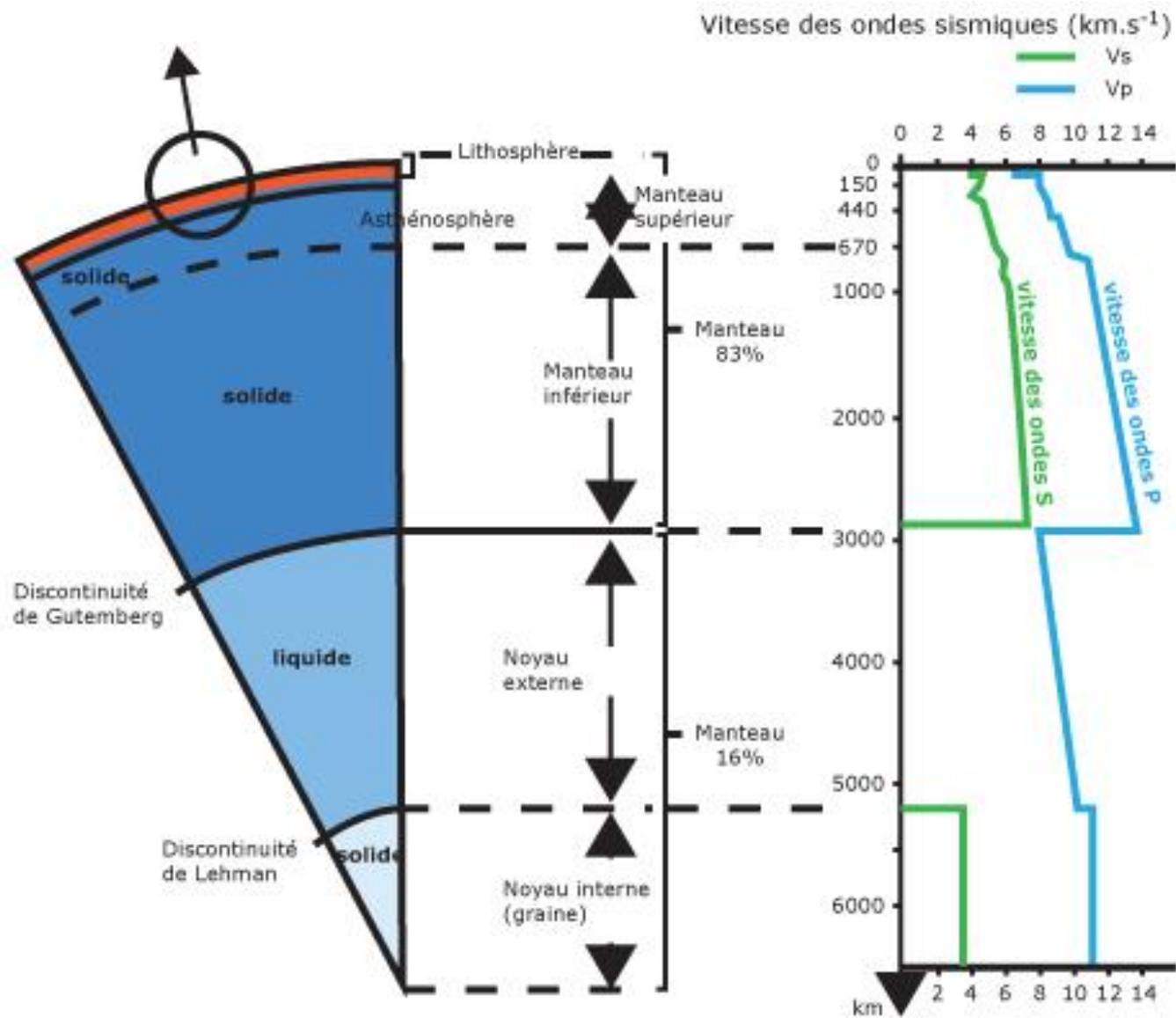


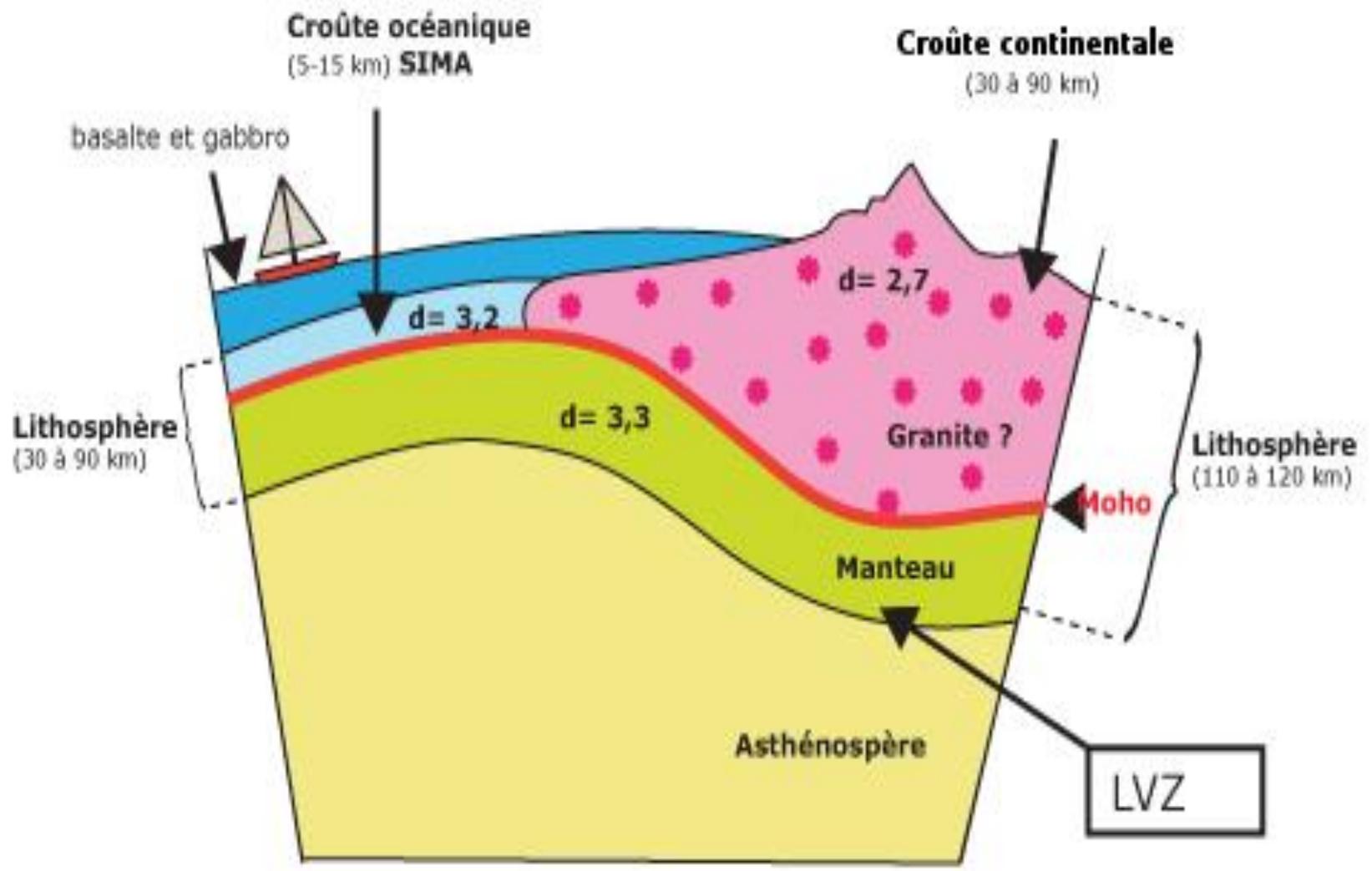
- Le Noyau

Le noyau externe est constitué de fer liquide associé à quelques éléments mineurs (Ni, Si, S, O, C).

Le noyau interne est solide. L'accès à sa structure est rendu difficile par l'atténuation des ondes dans le noyau externe et par la couche D''.







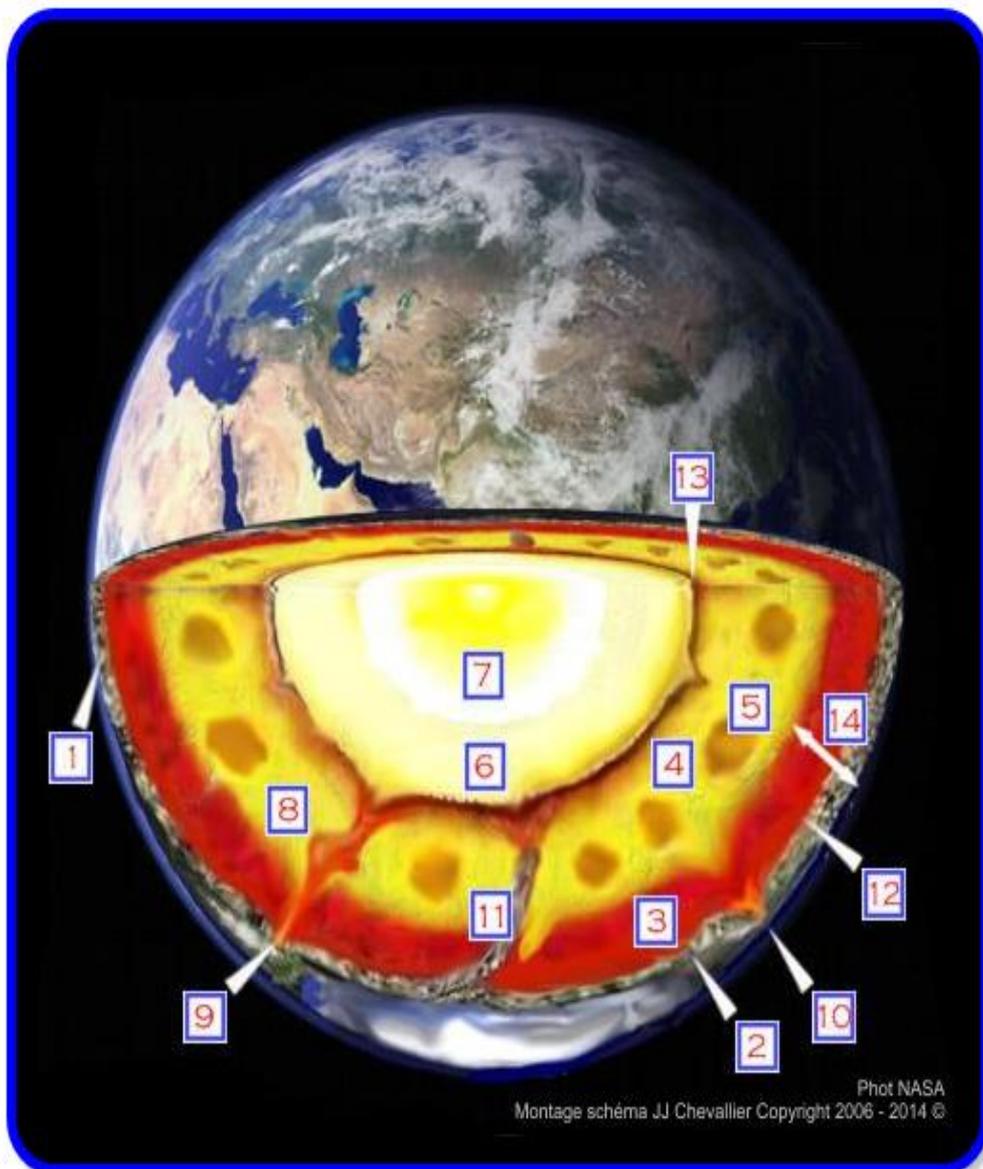
Bilan : Actuellement, la Terre a une structure différenciée en enveloppes concentriques dont les principales sont : la croûte, le manteau et le noyau. La lithosphère comprend la croûte (continentale et océanique) et une partie du manteau supérieur, elle est caractérisée par un comportement rigide, cassant parce que froid. L'asthénosphère sous-jacente est moins rigide et plus ductile parce que plus chaude.

La limite lithosphère/ asthénosphère correspond à l'isotherme 1300°C.

Le sommet de la LVZ correspond à peu près à l'isotherme 1300°C.

Les vitesses sismiques plus lentes dans la LVZ, s'expliquent par des conditions de pression et température voisines de celles nécessaires à la fusion des matériaux du manteau, il s'agit donc d'un manteau presque fondu et c'est pour cela que les ondes sismiques sont légèrement ralenties.

la zone de transition observée par les sismologues, du fait du saut de vitesses sismiques



Légende	
1	Croûte continentale
2	Croûte océanique
3	Manteau supérieur
4	Manteau inférieur
5	Zone de convection
6	Noyau externe
7	Noyau interne
8	Panache ou plume remontant vers un point chaud
9	Point chaud [volcan non lié à la plaque tectonique, ne se déplace pas]
10	Volcan
11	Zone de subduction, un plaque s'enfonce sous une autre très profondément dans le manteau.
12	Discontinuité de Mohorovicic
13	Discontinuité de Guttenberg
14	Lithosphère, plaque tectonique plus une partie du manteau supérieur.

2) – La convection

Fig. 9 : Deux modèles possibles de la circulation de la matière au niveau du manteau
(Philpots, 1990)

