

I. Structure interne de la Terre

I.1. Introduction

La Terre est constituée d'une série de couches concentriques de propriétés chimiques et/ou physiques différentes. La structure interne de la Terre a été mise en évidence en grande partie grâce à l'étude de **la propagation des ondes sismiques** émises pendant les grands tremblements de terre. Les autres informations concernant la structure et la composition interne de la terre proviennent de :

- l'échantillonnage direct de la croûte terrestre ;
- l'étude des morceaux de roches du manteau supérieur remontés par certains volcans ;
- l'étude des météorites ;
- et les travaux expérimentaux de laboratoire (étude du comportement des minéraux du manteau à haute pression–haute température grâce à l'utilisation de la cellule à enclumes de diamant).

I.2. Les couches de compositions chimiques différentes (Figure 1)

Selon la composition chimique, on distingue trois parties principales : la croûte, d'épaisseur allant de 10 à 70 kilomètres, puis le manteau, qui s'étend de la base de la croûte jusqu'à une profondeur de 2900 kilomètres et enfin le noyau.

- **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) et possède près de la surface la composition moyenne des **granites**.
 - La **croûte océanique** est épaisse de 8 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, et à environ 10 km sous les océans.

- **Le manteau** : sous le Moho s'étend le manteau qui occupe 83 % du volume 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).

Une ultime discontinuité située à 2900 km de profondeur, sépare le manteau inférieur du noyau. Elle se traduit par une augmentation de densité de $5,5 \text{ g/cm}^3$ à 10 g/cm^3 : c'est la discontinuité de **Gutenberg**, découverte en 1913.

- **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) et 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 $12,3 \text{ g/cm}^3$ à environ $13,3 \text{ g/cm}^3$, et atteint $13,6 \text{ g/cm}^3$ 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.

I.3. Les couches de propriétés physiques différentes (Figures 1 et 2)

Des discontinuités sismiques ont été mises en évidence dans le manteau de la Terre et sont dues principalement aux changements des propriétés physiques. Il est important de rappeler qu'il n'existe pas de changements majeurs de composition chimique dans le manteau. On distingue ainsi : la lithosphère, l'asthénosphère et la mésosphère. Cette division de la structure interne du globe est à la base de la théorie de la tectonique des plaques.

- **La lithosphère** : est caractérisée par sa rigidité et son élasticité. La vitesse des ondes sismiques est élevée. Son épaisseur est de 100 km en moyenne (70 km sous les océans et 130 km sous les continents). La lithosphère est composée de la **croûte terrestre** (océanique et continentale) et d'une **partie du manteau supérieur** (manteau lithosphérique).
- **L'asthénosphère** (J. Barrell, 1914, du grec *asthenos*, sans résistance): est située sous la lithosphère et se compose de roches qui ont une rigidité faible. Les roches de l'asthénosphère sont relativement malléables et peuvent être facilement déformées. Les températures dans cette région sont proches du point de début de fusion partielle de la péridotite. L'asthénosphère est divisée en deux parties :
 - **L'asthénosphère supérieure**, qui s'étend entre 120 km et 250 km, appelée **LVZ** (low velocity zone : zone à faible vitesse de propagation des ondes sismiques. La vitesse de propagation des ondes sismiques diminue dans cette région). C'est la couche où la péridotite subit une fusion très faible, ce qui lui permet de se déformer facilement. Dans cette zone à faible vitesse de propagation entre 100 à 250 km, il n'existe pas de diminution en densité ou en composition. Cette zone est de même composition que le reste du manteau,

mais elle est moins rigide, moins élastique et plus ductile que le manteau environnant.

- **L'asthénosphère inférieure**, qui s'étend de 250 km à 670 km de profondeur. Les roches redeviennent relativement rigides (malgré la température élevée, à cause des fortes pressions qui compriment les roches). Une discontinuité sismique a été mise en évidence dans cette couche à 400 km de profondeur. Elle est due à un changement de la structure de l'**olivine** (qui est l'un des principaux minéraux de la péridotite). Lorsqu'on comprime les cristaux d'olivine en laboratoire à une pression correspondant à 400 km de profondeur, les atomes se réarrangent en formant un polymorphe plus dense. Dans le cas de l'olivine, le réarrangement d'atomes ressemble à la **structure** que l'on trouve dans la famille de minéraux appelée **spinelle**. La densité d'olivine augmente de 10%. On appelle **discontinuité sismique à 400 km**, l'augmentation des vitesses des ondes sismiques due à la transition polymorphique olivine-**phase « spinelle »** (ne pas confondre avec le minéral spinelle, non silicaté).
- **La manteau inférieur ou mésosphère** (du grec *meso*, moyen ou milieu): qui s'étend de 670 km à 2900 km de profondeur. Cette couche est caractérisée par une nouvelle discontinuité sismique à une profondeur de 670 km. La densité du manteau augmente de 10%. Cette discontinuité serait due aux conditions de température et de pression à cette profondeur qui conduisent à une nouvelle transformation minéralogique, les minéraux de l'asthénosphère inférieure seraient remplacés par un assemblage de minéraux de type **perovskite silicatée** et d'**oxyde de magnésium**. La discontinuité de 670 km correspond aussi à la profondeur maximale des foyers des tremblements de terre.

Notons que les 300 derniers kilomètres du manteau inférieur forment une zone fortement hétérogène sur les plans thermique et chimique. On pense que la base du manteau est le siège d'importantes réactions chimiques entre les silicates du manteau et le fer liquide du noyau. Cette couche a reçu le nom de **couche D''**.

- Enfin, le noyau est divisé en deux couches selon les propriétés physiques : un noyau externe liquide et un noyau interne ou graine (solide) séparé par une discontinuité (discontinuité de **Lehmann**) à 5150 km de profondeur.

Remarques :

- La température augmente avec la profondeur et atteint 1200°C à la base de la lithosphère, 4500°C à la limite entre le manteau et le noyau et dépasse probablement 6600°C au centre de la Terre.
- La Terre est essentiellement **solide**. La seule zone liquide à l'intérieur de la Terre est le noyau externe (entre 2900 et 5100 km de profondeur). La LVZ dans le manteau supérieur est une zone où existe un début de fusion très faible, mais n'**est pas liquide**. Enfin, il existe près de la surface, au dessous des volcans actifs, des chambres magmatiques où existent des magmas liquides. L'état solide à l'intérieur de la Terre malgré des températures élevées est dû aux fortes pressions qui y règnent et qui empêchent la fusion des roches.

- Le noyau externe liquide est responsable du champ magnétique externe de la Terre. Les courants de convection qui agitent le fer liquide produisent un effet dynamo qui engendre le champ magnétique.
- Dans l'asthénosphère, les courants de convection sont responsables du mouvement des plaques tectoniques (lithosphère).

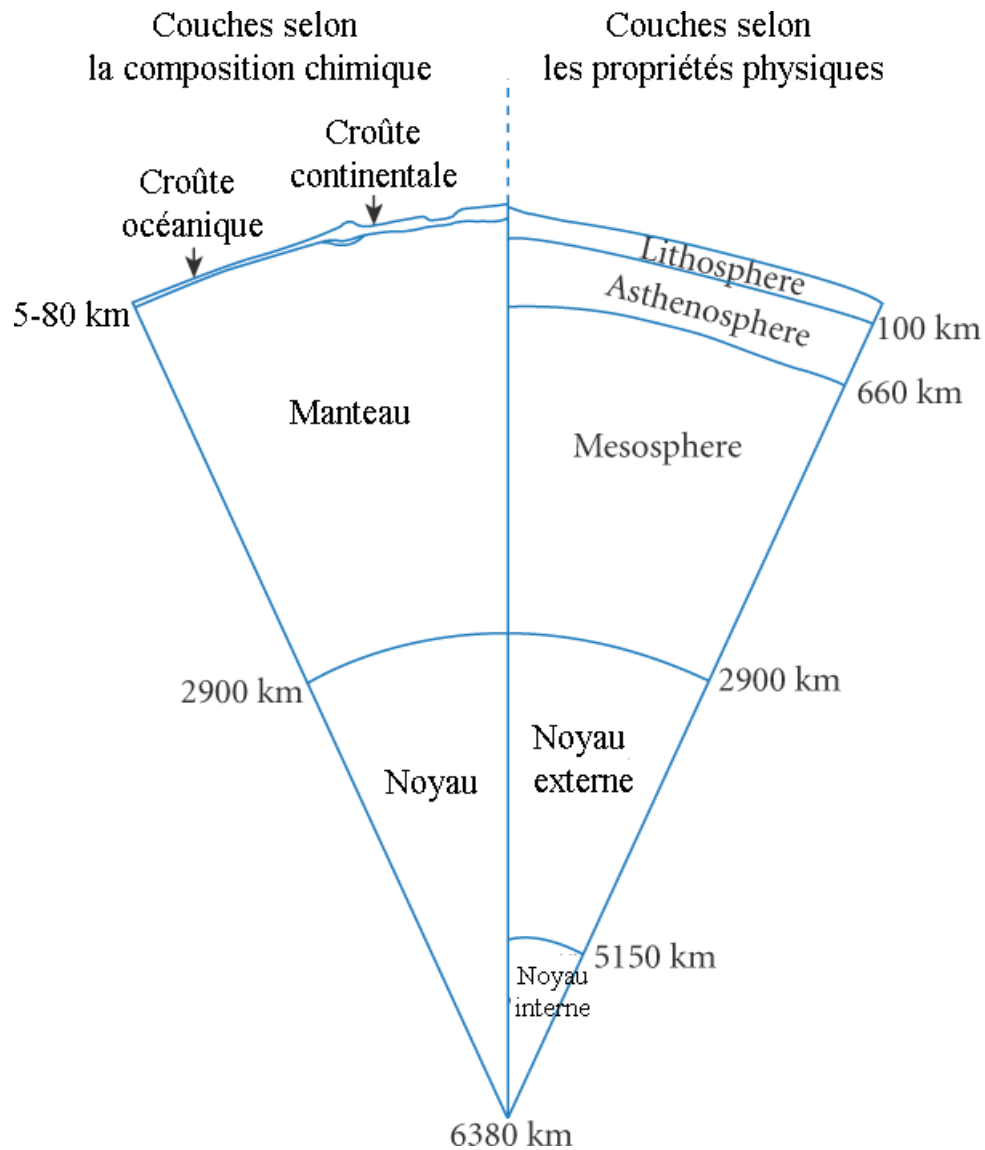


Figure 1 : Structure interne de la Terre selon la composition chimique (à gauche) et les propriétés physiques des couches (à droite)
(D'après Hefferan et O'Brien, 2010, Earth Materials)

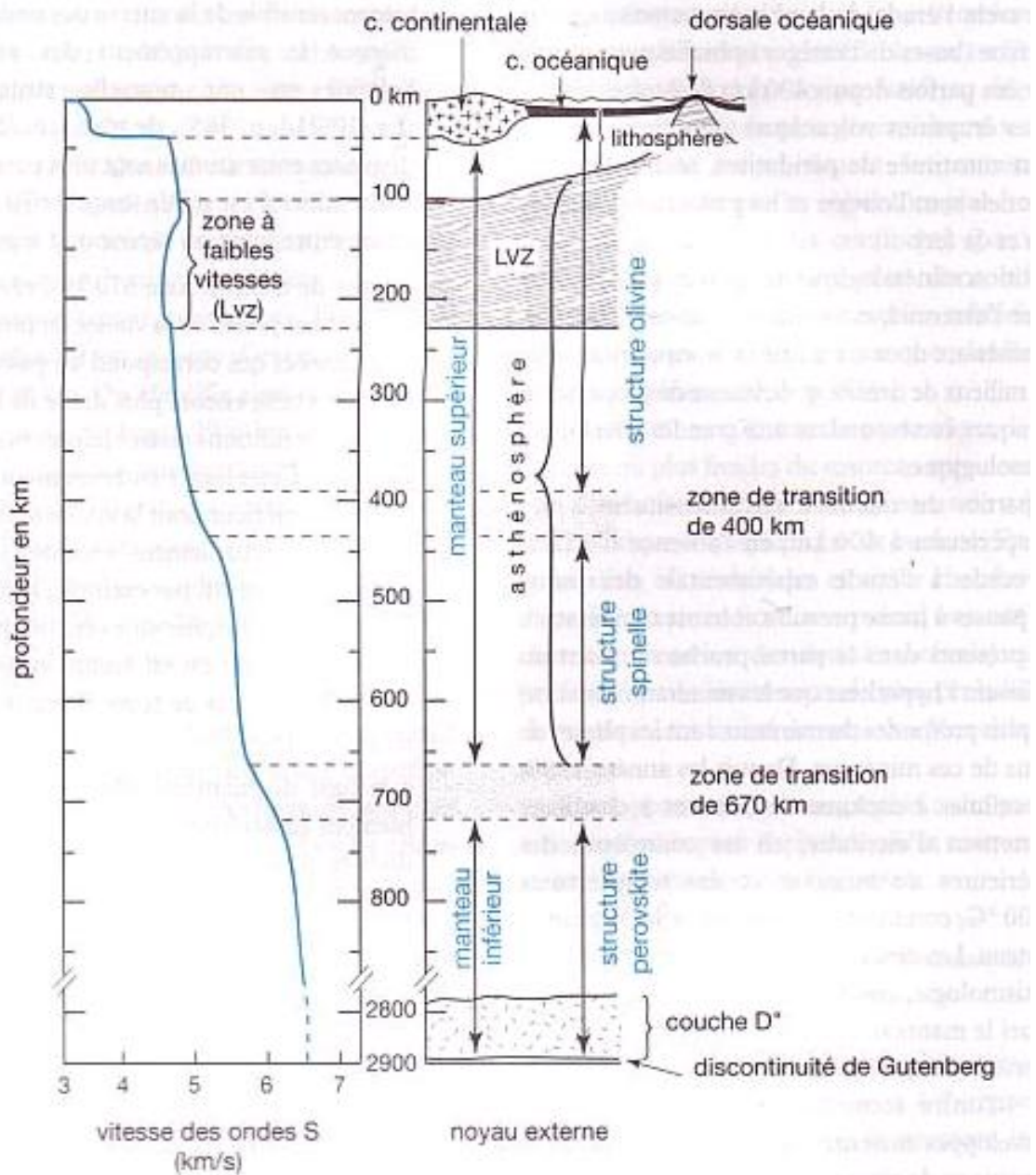


Figure 2 : Détails de la structure interne de la Terre selon les propriétés physiques. A gauche : variation des vitesses des ondes sismiques transversales (S). (D'après Brahic et al., 1999, Sciences de la Terre et de l'Univers)