

Introduction générale

La **Terre** (figure 1) est une **planète tellurique** (planète largement composée de roches et de métal comprenant une croûte, un manteau et un noyau) : il s'agit de la **troisième planète** (par ordre d'éloignement à l'étoile) du **Système solaire** et la seule où la présence de vie a été démontrée dans l'Univers, même si certains scientifiques supposent que la vie peut / a pu / pourra exister ailleurs.

La **Terre** est ainsi une **boule rocheuse** caractérisée par :

- un **rayon moyen** de **6371 km**,
- un **périmètre** d'environ **40 000 km**,
- une **masse** globale de **5,973 • 10²⁴ kg** et une **densité** moyenne de **5,515**,
- une **vitesse de rotation** (à l'équateur) de **1 674 km • h⁻¹** et une **période de rotation** de **23 h 56 min 4 s [jour sidéral]** (mais comme la Terre autour du Soleil en même temps, le **jour effectif [jour solaire]** est bien proche de **24 h** en moyenne),
- une **période de révolution** (autour de Soleil) de **365,26 j**,
- un âge probable de la Terre d'environ **4,54 Ga**, proche de l'âge estimé du **Système solaire 4,567 Ga** (connu par l'âge des plus anciens constituants des **météorites**) formé seulement **quelques Ma** à **dizaines de Ma** en amont,
- une **température de surface moyenne** de **15 °C** (allant de – 93,2 °C à 56,7 °C à l'ombre pour les records enregistrés),
- la présence d'**enveloppes fluides** : une **atmosphère** (enveloppe gazeuse qui entoure une planète) et une **hydrosphère** (ensemble de l'eau d'une planète) où l'eau existe sous les **trois états physiques** courants, notamment l'état liquide.

La **présence massive d'eau liquide** à la **surface terrestre**, notamment sous forme d'un **gigantesque réseau d'océans** et de **mers** occupant **71 % de la surface** vaut à la **planète Terre** son surnom de « **planète bleue** ».

Par opposition aux **enveloppes fluides de la Terre** (**atmosphère** et **hydrosphère**), on peut appeler **géosphère** pour désigner **l'ensemble de la Terre solide**, **quoi ce terme ait varié dans ses acceptions au cours des temps**.

Notez que ce qu'on appelle la **Terre « solide »** ou **géosphère** inclut le **noyau externe** qui est pourtant... **liquide** !

- la présence d'un **champ magnétique** puissant (généré par des mouvements convectifs dans le noyau) et d'une **magnétosphère**, **région entourant un objet céleste où s'exerce son champ magnétique**.

La **magnétosphère** protège la surface de la **Terre** du **vent solaire** (**flux de plasma solaire** surtout composé d'**ions** et d'**électrons**).

Ce **chapitre** débute un morceau conséquent du **programme de sciences de la Terre** notamment consacré à la **géophysique**, **science qui applique les connaissances physiques à la compréhension de la planète Terre et de son fonctionnement**. Il s'agit ici de comprendre, après avoir posé les bases de la **sismologie** (**étude scientifique des séismes**), comment des études variées, basées sur des études géophysiques, géochimiques, pétrologiques... ont permis de comprendre **l'organisation verticale en couches concentriques de la Terre (modèle radial)**. Ce modèle sera à nuancer, notamment par l'étude de la **géodynamique interne** (**étude des processus et déplacements de matière qui affectent la géosphère**) qui sera surtout l'objet du **chapitre suivant**, ou encore de la **géodynamique externe** (**étude des processus et déplacements de matière qui affectent les enveloppes fluides**) abordée dans la **partie Biogéosciences** du **programme**.

ENSEIGNEMENT DE SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE (SVT)

°° SCIENCES DE LA TERRE °°

>> Cours <<

Chapitre 21

La structure de la planète Terre

Objectifs : extraits du programme

ST-B La structure de la planète Terre (BCPST 1)

La Terre est une planète tellurique dont l'organisation des enveloppes concentriques dépend des propriétés physico-chimiques des éléments les composant. Cette structure est mise en évidence grâce à des données de géologie historique, de géophysique et de géochimie. Il est important de relier la structure des enveloppes solides avec leur dynamique. La lithosphère joue un rôle central dans l'établissement du bilan énergétique de la Terre (« couche limite de la convection ») et il est donc nécessaire de faire le lien avec la partie ST-C portant sur la dynamique des enveloppes internes. Cette partie met l'accent sur l'analyse de multiples sources de données (géophysiques, géologiques et géochimiques) dans l'établissement d'un modèle radial de la planète Terre de premier ordre. Ce modèle sera mis en défaut par certaines observations qui requièrent l'introduction d'une dynamique dans le modèle Terre.

Savoirs visés	Capacités exigibles
La Terre est constituée d'enveloppes concentriques solides, liquides et gazeuses qui se distinguent par leur nature et leurs propriétés physico-chimiques. Croûtes, manteau et noyau sont définis sur la base de leur nature chimique et minéralogique ; lithosphère et asthénosphère sur la base de leurs propriétés rhéologiques et thermiques. La nature minéralogique du manteau varie avec la profondeur.	- Expliquer la construction d'un modèle radial de la Terre solide (modèle PREM). - Exploiter et relier des données géophysiques permettant d'établir des discontinuités physiques ou chimiques dans le globe. - Exploiter des données permettant la construction du géotherme. - Exploiter des données géophysiques et expérimentales montrant les transitions de phase dans le manteau

Précisions et limites :

Le modèle statique PREM et ses limites sont discutés dans la partie dynamique de la lithosphère. L'histoire des travaux ayant permis d'établir cette structure n'est pas exigible, même si des documents historiques peuvent être utilisés en enseignement.

Pour la minéralogie du manteau, on attend seulement périclase, spinelle, grenat, bridgmanite. La diversité des structures silicatées sera présentée dans la suite du programme lorsqu'elle se révèle nécessaire.

Pour l'atmosphère, on se limite à la troposphère et la stratosphère. Pour l'hydrosphère, on se limite aux 3 couches : couche de mélange, thermocline, océan profond.

Liens :

Les circulations atmosphériques et océaniques (BG-C2)
La carte géologique (ST-A)
La rhéologie de la lithosphère (ST-D-1)
Les séismes (ST-D-2)
Le magmatisme (ST-F)



Introduction

Si l'étude des **propriétés de surface** et la **dynamique externe** de la **Terre** sont aisément **accessibles à l'observation** et à l'**expérimentation**, il n'en est pas de même pour sa **structure** et sa **dynamique internes** dont la connaissance a beaucoup **progressé au XX^e siècle** grâce à des **méthodes géophysiques**.

L'**étude des séismes et de la propagation des ondes sismiques** (**sismologie**) a ainsi permis de **comprendre l'organisation profonde du globe terrestre** et il est apparu très vite que la Terre est un **corps hétérogène**, découpé **verticalement** en **enveloppes concentriques** de **taille et propriétés**, tant **physiques** que **chimiques**, variables.

Des **données complémentaires** de **géochimie** (**étude chimique des matériaux terrestres**), de **pétrologie** (**étude des roches**)... ont permis de comprendre la **composition lithologique, minéralogique et chimique** de ces couches.

Comment les données géophysiques, géochimiques, géologiques... permettent-elles de comprendre l'organisation et la composition de la planète Terre ?

▲ **FIGURE 1. La planète bleue ou Terre : le célèbre cliché de *La Bille Bleue (The Blue Marble)*.**

Célèbre cliché de la Terre pris par les Américains Harrison H. SCHMITT (1935) et/ou Ronald E. EVANS (1933-1990) le 7 décembre 1972 lors de la mission *Apollo 17*, à une distance d'environ 45 000 km, alors que la fusée allait vers la Lune. Le cliché original est « à l'envers » en lien avec la position initiale des astronautes. NASA (domaine public).

Capacités exigibles

- ✓ **Expliquer** la construction d'un modèle radial de la Terre solide (modèle PREM).
 - ✓ **Exploiter** et relier des données géophysiques permettant d'établir des discontinuités physiques ou chimiques dans le globe.
 - ✓ **Exploiter** des données permettant la construction du géotherme.
 - ✓ **Exploiter** des données géophysiques et expérimentales montrant les transitions de phase dans le manteau
- >> Voir le **TP ST BC (structure et dynamique de la Terre)** pour la **mise en application** de ces **capacités** dans le cadre d'**activités proposées sous forme d'exercices**.

I. De l'étude des séismes au modèle radial de la Terre solide

- La **Terre interne**, **Terre solide** ou **géosphère** est l'ensemble de la planète à l'exclusion de ses enveloppes fluides (atmosphère, hydrosphère). L'étude des séismes et de la propagation des ondes sismiques (**sismologie**, parfois « **séismologie** ») a permis d'en reconstituer la structure interne.

Redisons-le : au sein de la « **Terre solide** », il existe un **niveau liquide**, le **noyau externe**.

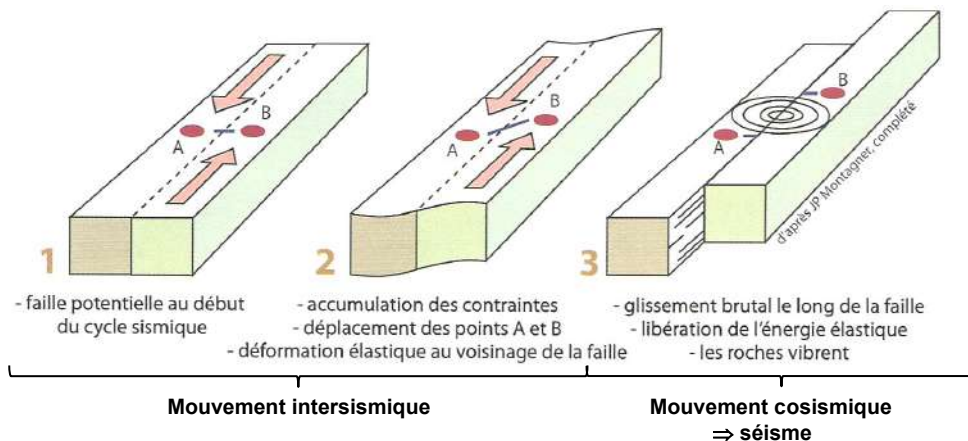
A. L'étude des séismes : la sismologie

Ces aspects seront **précisés** dans le chapitre consacré aux déformations de la lithosphère

1. La nature et les manifestations des séismes

a. Les séismes, ébranlements de la surface terrestre dus à une rupture rocheuse au sein de la lithosphère

- Comme nous allons le voir plus loin, la **couche superficielle rigide de la Terre solide** peut être appelée **lithosphère**.
- Suite à l'exercice de **contraintes anisotropes** (= réparties différenciellement dans l'espace) et à l'accumulation locale d'énergie, il est possible d'engendrer une **rupture brutale** et un **déplacement de masses rocheuses au sein de la lithosphère libérant une quantité importante d'énergie sous forme de vibrations** (figure 1), ce qui constitue la **manifestation profonde** d'un **séisme** ou **tremblement de terre**, ensemble de secousses de la surface de la Terre plus ou moins violentes qui sont la **manifestation sensible** du phénomène qui a eu lieu en profondeur.
- Les **séismes** ont souvent lieu au niveau de **failles existantes** mais peuvent aussi former de **nouvelles failles**.



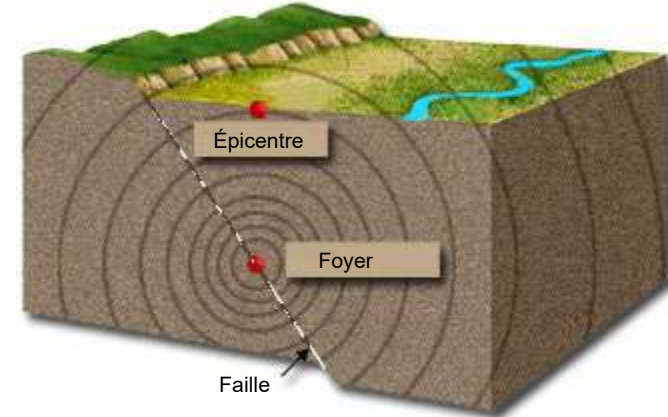
▲ FIGURE 1. **Origine d'un séisme et notion de cycle sismique.**

D'après LAGABRIELLE et al. (2013), adapté.

Le programme insiste sur le fait qu'un **séisme** (ou plutôt sa **cause profonde**) est une « **fracture avec glissement qui se propage dans un milieu élastique** », c'est-à-dire **affecté mécaniquement, de manière généralement réversible, par les ondes mécaniques qui en résultent**.

b. Les séismes, phénomènes naissant au niveau d'un foyer et ressentis maximale à la surface au niveau de l'épicentre

- On appelle (figure 2) :
 - Foyer** ou **hypocentre** le lieu où a eu lieu la rupture rocheuse en profondeur.
 - Épicentre** le lieu à l'aplomb du foyer en surface, soit la projection du foyer sur la surface. Il s'agit de l'endroit de la surface où la secousse est maximale et le premier point en surface atteint par les ondes sismiques.
 - Lignes isoséistes** des lignes fictives reliant les points où le séisme a eu la même intensité.



▲ FIGURE 2. **Séisme dans un bloc diagramme.** D'après Wikipédia (janvier 2022).

c. La possibilité de répliques sismiques... voire de séismes multiples

- Certains **séismes importants** sont suivis de **répliques (aftershocks)**, **séismes qui surviennent peu de temps après un séisme majeur mais de moindre intensité** (traduisant des ruptures secondaires qui accommodent la rupture principale ayant donné naissance au séisme principal). Elles ont lieu quelques secondes, heures à jours après la secousse principale.

Quelques mois peuvent s'écouler mais s'agit-il alors des répliques d'un même séisme ? Les auteurs varient sur ce point...

- Il peut aussi y avoir des **séismes doubles, triples... multiples (multiplet earthquakes)** lorsque **plusieurs séismes importants surviennent dans la même région de manière rapprochée**. Il s'agit des conséquences du mouvement des mêmes masses rocheuses. Le temps entre deux séismes peut alors être de quelques secondes... à quelques années ! Mais les auteurs ne sont alors pas tous d'accord pour dire que des **séismes aussi éloignés** sont à rapprocher sismologiquement.

d. Les séismes sont-ils cycliques et prévisibles ?

a. Notions de cycle sismique et de rebond élastique

- Les **séismes** ont **préférentiellement lieu** au niveau de **zones de sismicité précises**, notamment les **frontières de plaques lithosphériques (voir plus loin)**, et **surviennent régulièrement** dans ces zones.

- On a ainsi pu décrire un **cycle sismique**, c'est-à-dire une **alternance de phases où l'énergie s'accumule en profondeur et de séismes où l'énergie est brutalement libérée**. Ce cycle sismique peut être **décomposé** en (figure 1) :
 - Une **phase intersismique** (parfois appelée **phase asismique**) se caractérisant par un **mouvement continu** où **le système rocheux accumule lentement de l'énergie sous des contraintes tectoniques et se déforme sans rupture, de manière élastique (voire légèrement plastique)**. Cela peut durer entre quelques années et 1000 ans.
 - Une **phase cosismique** (= pendant le **séisme**) se caractérisant par un **mouvement discontinu et brutal** où **le système rocheux subit une rupture brève libérant l'énergie accumulée sous forme de vibrations**. Cela peut durer entre quelques secondes et quelques minutes.

Cette notion de **cycle sismique** se base sur la **théorie du rebond élastique**, proposée par l'Américain Harry F. REID (1859-1944) à la suite du terrible séisme de San Francisco en 1906, qui stipule qu'**un matériau soumis à une contrainte de cisaillement se déforme progressivement de manière élastique voire plastique puis finit par rompre**.

Une **contrainte de cisaillement** est une **contrainte mécanique appliquée parallèlement ou tangentiellement à la surface d'un matériau**, par opposition à une **contrainte normale** qui est une **contrainte mécanique appliquée perpendiculairement à la surface d'un matériau**.

β. La non-périodicité des séismes et leur imprédictibilité

- Si le **cycle sismique** conçu comme une **alternance de phases inter- et cosismiques** est une **réalité**, celui-ci semble **ne pas avoir de périodicité fixe et aucune étude n'a à ce jour pu, de manière convaincante, définir une périodicité dans la répétition des séismes** au sein d'une **région donnée**, tant les **paramètres** les contrôlant sont **multiples et difficilement modélisables** dans leur entièreté.

Des **modèles stochastiques** estiment néanmoins une **probabilité d'événement sismique** en fonction de paramètres variés, comme le **modèle EATS (Epidemic Type Aftershock Sequence, séquence épidémique type de répliques)** qui modélise la fréquence des répliques après un séisme majeur.

(!) « **Cyclique** » ne veut pas forcément dire « **périodique** » (!)

γ. Notions d'aléa, vulnérabilité et risque sismiques

- Si l'on ne peut pas prédire la date ou l'intensité d'un futur séisme, cela ne veut pas dire que l'on ne peut pas en **estimer le risque**.
- Il convient de distinguer :
 - L'**aléa sismique A**, **probabilité de survenue d'un séisme dans une zone donnée pendant un laps de temps donné**. Sa connaissance suppose une bonne connaissance de la **localisation** et de la **profondeur des foyers récents**, de la **périodicité approximative des séismes** et de l'**énergie déployée** lors des secousses.
 - La **vulnérabilité sismique V**, **susceptibilité qu'a un séisme de produire des victimes et des dégâts matériels en une zone donnée**. Cela dépend de la **densité de population**, du **sol**, du **type de bâti** (respectant ou non des **normes parasismiques**), de la **proximité de la mer** (risques de tsunamis, de submersion), du **relief**...
 - Le **risque sismique $R = A \times V$** , **combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité sismiques, soit les chances qu'en un lieu donné survienne un séisme qui fasse des victimes et des dégâts** (figure 3).



▲ FIGURE 3. Un immeuble, construit sur des **sédiments meubles, fracturé et effondré suite à un séisme (Chili, 2010)**. D'après Wikipédia (janvier 2022).

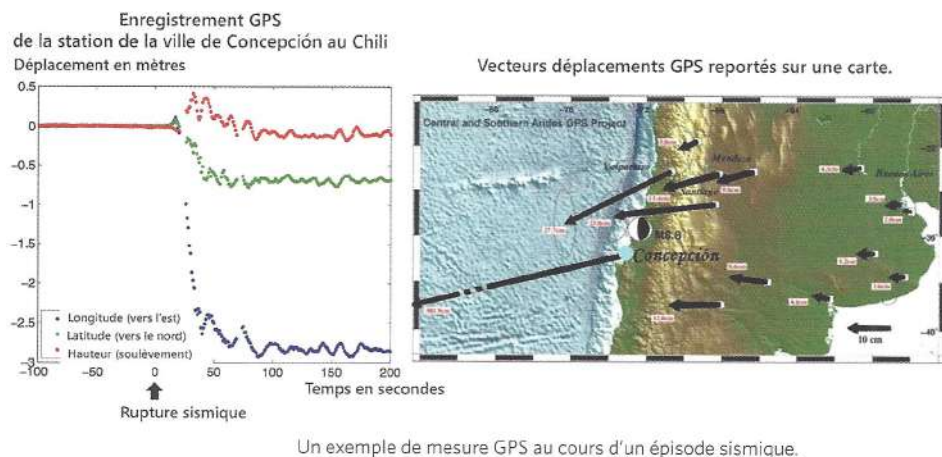
Le **dégât illustré** à la figure 3 est dû à un phénomène de **liquéfaction du sol** : il s'agit d'un **phénomène sismo-géologique où le passage d'un train d'ondes sismiques sur un sol peu consolidé et souvent saturé d'eau provoque la perte de sa consistance solide et de sa portance, provoquant potentiellement de graves dégâts matériels et humains**. En effet, lors du passage des **ondes de compression**, la **pression de l'eau présente dans les interstices du sol augmente** et lui fait **perdre sa cohésion**.

δ. Une estimation de l'aléa basée sur l'évaluation des déplacements instantanés de terrains et de plaques

- Une **évaluation de l'énergie mécanique accumulée localement par extrapolation des mouvements de plaques et de terrains en zone sismique**
 - À défaut de **prédire les séismes**, l'on peut seulement en **évaluer l'aléa**, soit la **probabilité**. L'une des méthodes est de **calculer/estimer l'énergie accumulée localement** par les **contraintes** grâce à des **modèles** intégrant de **multiples facteurs** : type de terrain, relief, contraintes connues, failles... et **déplacement** des plaques. On arrive alors à **estimer approximativement la zone d'un futur séisme** et même sa **magnitude** possible... **sans pouvoir néanmoins dire quand** il aura lieu.

ii. Un déplacement instantané des plaques qui peut être évalué par des mesures de géodésie spatiale par GPS ou interférométrie radar

- On parle de **géodésie spatiale** pour désigner les **méthodes satellitaires de cartographie de la planète, qu'il s'agisse de son relief, sa bathymétrie, de ses caractéristiques géophysiques...**



▲ FIGURE 4. Un enregistrement GPS et une carte cinématique vectorielle de déplacements instantanés (connus par GPS) correspondant à un séisme.

D'après DAUTEL et al. (2021).



▲ FIGURE 5. Stations GPS permanentes à Papano et Acapulco (Mexique). <https://newsroom.univ-grenoble-alpes.fr/sciences-et-technologies/les-seismes-lents-peuvent-declencher-des-secousses-103171.kjsp> (janvier 2022).

- En comparaison aux **géolocalisations grand-public**, dont la **précision** est de l'ordre de **plusieurs mètres**, les **géolocalisations** utilisées en **cinématique instantanée** sont de l'ordre **centimétrique** (voire **millimétrique** pour les plus performantes).
- Deux systèmes permettent notamment de **suivre le déplacement des plaques lithosphériques** (et l'éventuelle **variation de relief**) en suivant des **stations** dont on peut **mesurer l'éloignement** ou le **rapprochement progressif en continu** :

- Le **GPS** (*Global Positioning System*, **système de positionnement global**) (figure 4) est un **système de géolocalisation permis par un réseau de satellites américain** ; le **positionnement est déterminé par multilatération des signaux radio reçus de plusieurs satellites**. Des stations GPS permanentes (figure 5) tendant à être installées dans les **zones de forte sismicité** (ou de fort volcanisme aussi) et permettent de suivre très finement les **déplacements locaux de terrains**.

Les Américains ont longtemps brouillé leur signal (qui avait une importance militaire et géostratégique). C'est l'une des raisons de la naissance d'un **projet de réseau de satellites européens et civils** qui s'appelle le **projet Galileo** et devrait atteindre sa pleine capacité en 2024. D'autres **systèmes nationaux** existent.

- L'**interférométrie radar** (encadré A) est **basée sur l'envoi d'ondes radio sur le sol – découpé en surface élémentaires à l'origine des pixels – qui réverbère ces ondes vers le satellite, le positionnement étant estimé par comparaison de la différence de trajets parcouru par l'onde (raccourcissement ou allongement) en un point donné entre les passages successifs du satellite au même point**. Notons que le satellite est à une **altitude fixe** et passe au **même point** tous les **35 jours**. Les **résultats d'interférométrie** sont généralement **compilés annuellement** mais ils peuvent aussi être considérés **avant et après un événement géologique majeur**, comme un **séisme** typiquement. La **précision** est **centimétrique**, voire **millimétrique**.

Dans l'**interférométrie radar**, le **décalage de temps de retour du signal radio entre deux passages du satellite est converti en distance**. Le résultat apparaît sous forme de **franges de zones** ayant subi un **déplacement** : plus les **franges** sont **finies**, plus le **déplacement** est **important**.

e. La diversité des séismes : une typologie simple en fonction de l'origine du séisme

- En fonction de leur **origine**, on peut distinguer **plusieurs types de séismes**.

a. Les séismes tectoniques

- Les **séismes tectoniques** sont les **séismes provoqués par les mouvements et déformations des plaques lithosphériques**. Ce sont, de très loin, les **plus dévastateurs**.

β. Les séismes volcaniques

- Les **séismes volcaniques** sont les **séismes provoqués par les mouvements de magmas jusqu'à (et incluant l') éruption**.
- Leur **intensité**, ainsi que la **proximité de leurs foyers** avec la **surface**, ne cessent de **croître jusqu'à l'éruption**, ce qui est un **indice d'un réveil de volcan** et d'une **éruption imminente**. Les **sismographes volcaniques** sont un **outil majeur** pour **prévenir les populations proches d'un volcan actif**.

γ. Les séismes glaciaires

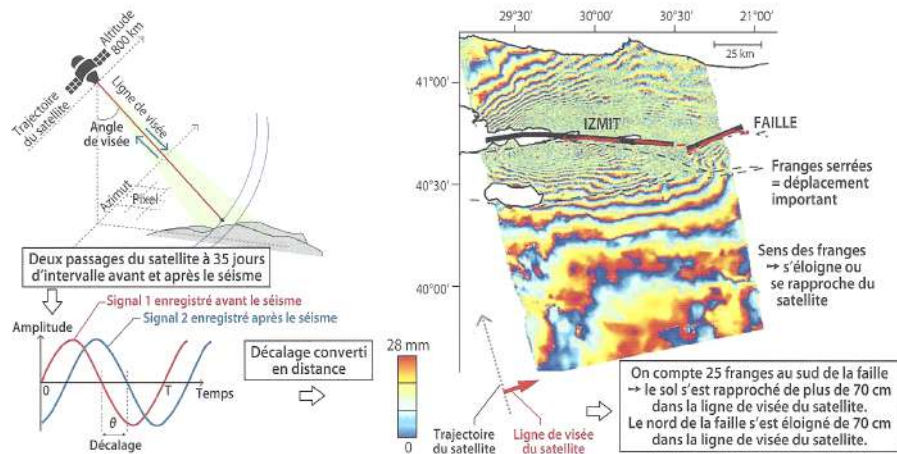
- Les **séismes glaciaires** sont des **séismes provoqués par la rupture et/ou l'avancée brutale d'un glacier**. Ils sont surtout importants au niveau des **calottes polaires**.

Encadré A L'interférométrie radar

D'après BORDI, SAINTPIERRE et al. (2021)

Le principe de la méthode

Un **satellite** envoie des ondes radio vers le sol « découpé » en surfaces élémentaires, qui donneront les « pixels » de l'image. Ces ondes se réfléchissent et chaque signal retour est enregistré par le satellite. Lors d'un deuxième passage du satellite, la même mesure est réalisée et comparée à la précédente : si la seconde onde est déphasée à son arrivée par rapport à la précédente, le **trajet parcouru par l'onde a été allongé ou raccourci** et la distance satellite/sol également, donc le sol s'est déplacé dans l'angle de visée du satellite. Les décalages sont représentés sur une carte sous la forme de franges d'interférences, reflétant les déplacements subis par le sol au cours de l'intervalle de temps séparant les deux enregistrements. En fonction de la longueur d'onde utilisée, chaque décalage peut être converti en distance avec une précision centimétrique.



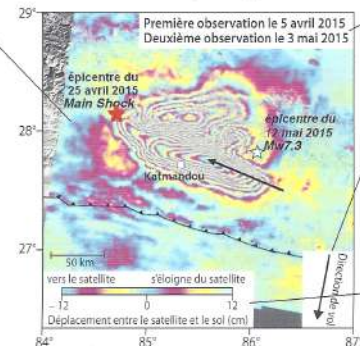
Principe de l'interférogramme et son analyse pour le séisme d'Izmit en Turquie, 1999.

Étude d'un exemple

Katmandou (Népal) a subi un fort séisme le 25 avril 2015. L'épicentre est localisé par une étoile rouge.

On trouve du cyan, bleu-vert, autour de la zone de déformation ou dans les franges d'interférence de la zone déformée ce qui correspond à 0 :
➡ les zones autour de la zone de déformation ne se sont pas déplacées.

Les neuf franges d'interférence qui « vont » vers Katmandou ont des couleurs qui sont d'ordre cyan, jaune, magenta, etc.
➡ La zone s'est rapprochée du satellite ;
➡ ce déplacement est de $9 \times 12 \text{ cm} = 108 \text{ cm}$ dans la ligne de visée de satellite.



Deux acquisitions sont nécessaires pour établir un interférogramme.
➡ On compare des acquisitions avant et après le séisme et on peut donc déterminer le déplacement provoqué par ce seul séisme.

On dispose de la direction du vol et de l'angle de visée du satellite.
➡ Les déplacements analysés sont relatifs à la ligne de visée du satellite et ne sont pas des déplacements absolus.

Les ondes utilisées sont des ondes radio.
➡ La longueur d'onde utilisée permet de dire que le déplacement est de 12 cm par frange.

Conclusion : l'interférométrie radar permet de déterminer des déplacements du sol dans la ligne de visée du satellite. Le nombre de franges permet de quantifier l'amplitude du déplacement. Il faut compléter ces données afin de préciser les composantes verticale et horizontale du déplacement.

5. Les séismes artificiels

- Un **séisme artificiel** est un **séisme produit par une activité et/ou une construction humaine**.
- Les **séismes artificiels** peuvent être de nature et d'origine extrêmement **variées** : **barrages, pompages profonds, explosions** souterraines / en surface / nucléaires, **bombardements, extraction minière**...

2. Des phénomènes caractérisés par la propagation de trains d'ondes sismiques

- On appelle **ondes sismiques** les **mouvements vibratoires et élastiques, de nature ondulatoire, qui se propagent dans les matériaux terrestres à partir du foyer d'un séisme**.

On rappelle qu'en physique, une **onde** est une **perturbation qui se propage régulièrement dans un milieu et produit, sur son passage, une variation à la fois périodique et réversible des propriétés physiques locales**.

Quand **une onde se propage à travers un milieu matériel qui subit une déformation associée à la propagation de l'onde**, il s'agit d'une **onde mécanique**. C'est le cas des **ondes sismiques**.

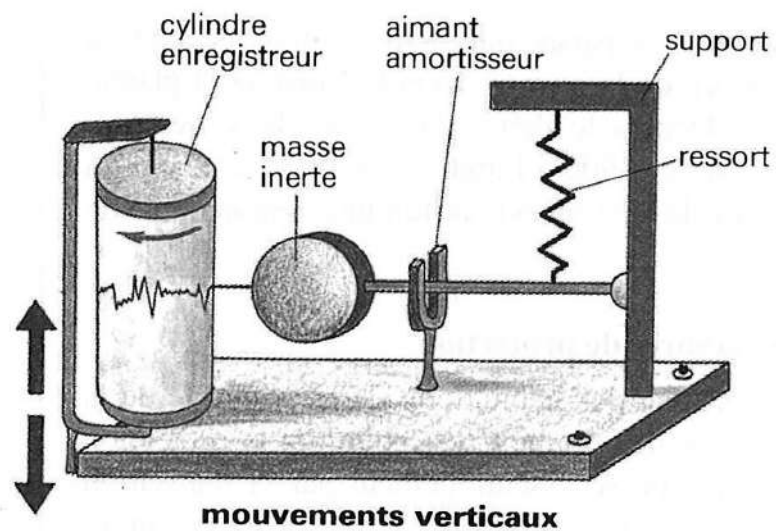
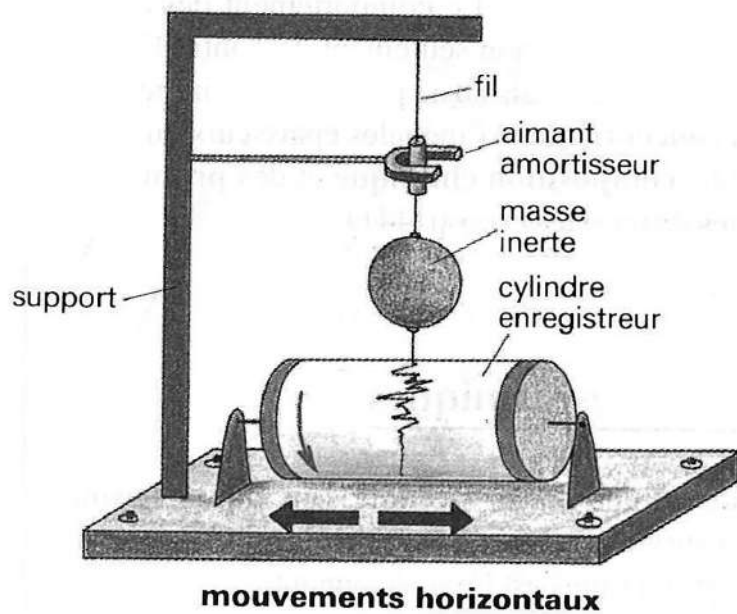
a. Des ondes enregistrables sur des sismogrammes produits par des sismographes au niveau de stations d'enregistrement

- Les **dispositifs d'enregistrement des ondes sismiques** s'appellent des **sismographes** ou **sismomètres**, alors que les **enregistrements des ondes sismiques qu'ils produisent** sont appelés des **sismogrammes** (voir figure 7 page suivante).

- Traditionnellement, il s'agissait de **dispositifs** posés à même le sol avec un **rouleau enregistreur** sur lequel un **stylet libre** effectuait un **tracé** (figure 6). Ces dispositifs, dont les ancêtres remontent au XIX^e siècle, sont **encore parfois utilisés** aujourd'hui.
- Aujourd'hui, ce sont plutôt des **dispositifs électroniques** qui convertissent en **signal électrique** le **signal sismique** perçu là encore grâce à un **contact avec le sol**. Un **dispositif d'acquisition informatique** est alors associé (figure 7). Des **stations d'enregistrements mobiles** peuvent envoyer par **satellite** en **temps quasi-réel** leurs données, par exemple depuis l'intérieur d'un **volcan**. D'autres au contraire peuvent être placés sur les **fonds océaniques** (figure 8) ; ils envoient souvent des **ondes radio**.

- Il existe de très nombreuses **stations d'enregistrements sismiques** réparties à travers le globe, notamment sur les **continents** et les **îles**, appartenant à de nombreux **centres de recherche** ou **Universités** à travers le monde. On peut citer le **réseau français Géoscope** par exemple (figure 9), géré par l'IPBG [Institut de Physique du Globe de Paris] à Paris et l'EOST [École et Observatoire des Sciences de la Terre] à Strasbourg (1).

(1) <https://www.ipgp.fr/fr/geoscope/observatoire-geoscope>, consultation janvier 2022



▲ FIGURE 6. Des sismographes mécaniques (traditionnels).
D'après TAVERNIER & LAMARQUE (1996).



▲ FIGURE 7. Une station moderne d'enregistrement.
<https://www.francebleu.fr/infos/sante-sciences/un-tremblement-de-terre-ressenti-dans-le-gard-1573471272> (consultation janvier 2022)



▲ FIGURE 8. Sismographe IFREMER de fonds océaniques. Wikipédia (janvier 2022)

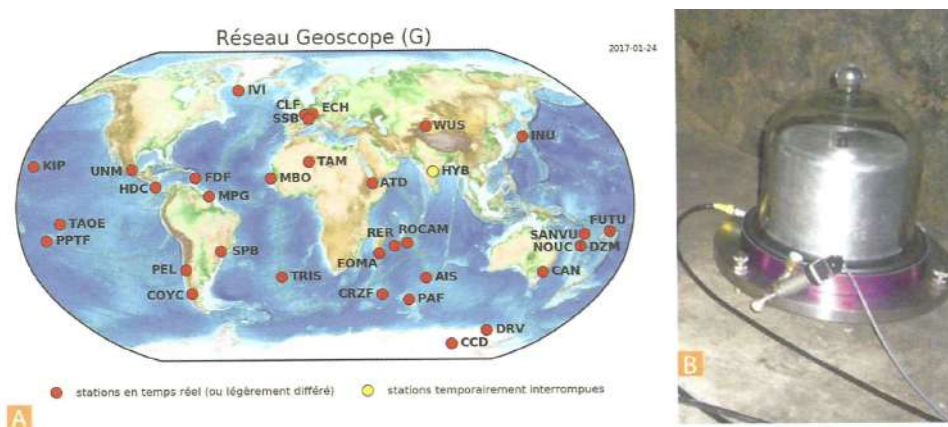


Figure 6.13 Les réseaux sismologiques.

A. Exemple du réseau d'observation sismique français Géoscope dans sa situation en 2018 (voir <http://geoscope.ipgp.fr>).

B. Dès 1982, Géoscope a utilisé des stations sismiques numériques associées à des sismomètres large-bande Streckeisen STS-1 à contre-réaction. Les appareils (un de ce type pour chacune des trois composantes d'une station) sont posés sur des dalles de granite parfaitement nivelées. Depuis 2009, de nouveaux systèmes électroniques Metrozet E-300 sont installés lors des visites de maintenance des stations. Source : IGP.

Figure 9. Le réseau Géoscope. D'après RENARD et al. (2018).

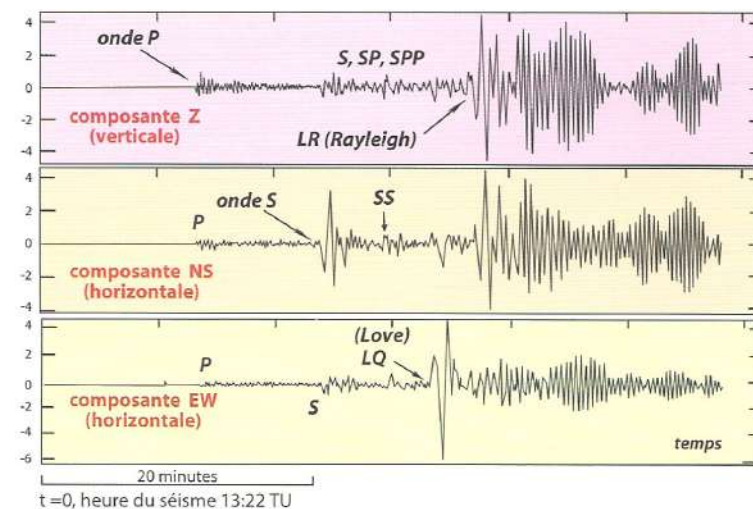
b. La propagation et l'arrivée séquentielle de trois trains d'ondes aux caractéristiques propres

- Les **sismogrammes** (figure 10) enregistrent l'arrivée successive de **trois trains d'onde** (figures 10-12) :
 - Deux trains successifs d'**ondes de volume** ou **ondes de profondeur** qui sont des **ondes se propageant au travers des différentes couches du globe**.
 - Les **ondes P (ondes premières)**, parfois dites **longitudinales**, sont des **ondes de compression-dilatation qui se propagent dans tous les milieux du globe**.
 - Les **ondes S (ondes secondes)**, parfois dites **transversales**, sont des **ondes de cisaillement qui se propagent uniquement dans les milieux solides**.
 - Un train final d'**ondes de surface**, les **ondes L**, qui **se propagent uniquement à la surface libre du globe**.

(!) Elles comprennent en réalité deux types principaux d'ondes : les **ondes de LOVE (LL : se déplacent comme les ondes S mais sans la composante verticale)** et les **ondes de RAYLEIGH (LR : au mouvement complexe intégrant une dimension circulaire)**.
- L'enregistrement d'un **sismogramme complet** suppose un **enregistrement dans chaque dimension de l'espace**, assurant la **reconstitution d'un repère orthonormé** (figure 10).

Pour reconnaître les ondes :

- Les **ondes P** sont les **plus rapides** et constituent donc le **premier train d'ondes enregistré**.
- Les **ondes S** sont souvent **plus amples** et constituent le **deuxième train d'ondes**.
- Les **ondes L** sont clairement les **plus amples**, mais aussi les **plus lentes**, et donc le **dernier train d'ondes**.



Sismogrammes

Enregistrements d'un séisme lointain sur une station sismique (sismographe) à 3 composantes

Séisme d'Hokaido (Japon), le 4/10/1994 enregistré à Nouméa (Nouvelle-Calédonie) à 7 500 km de distance (réseau GEOSCOPE)

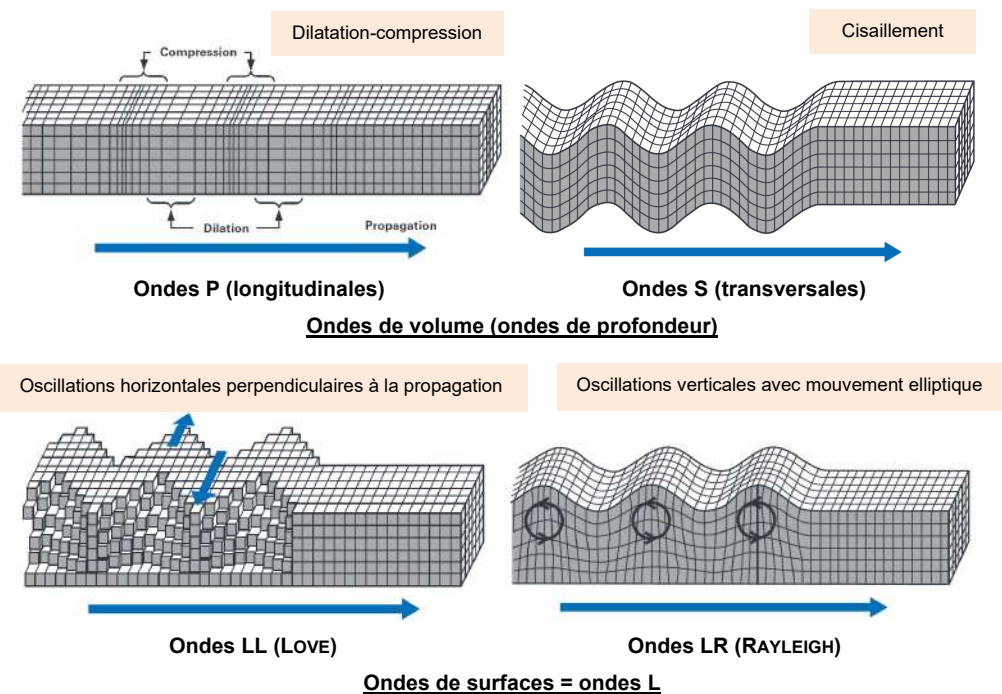
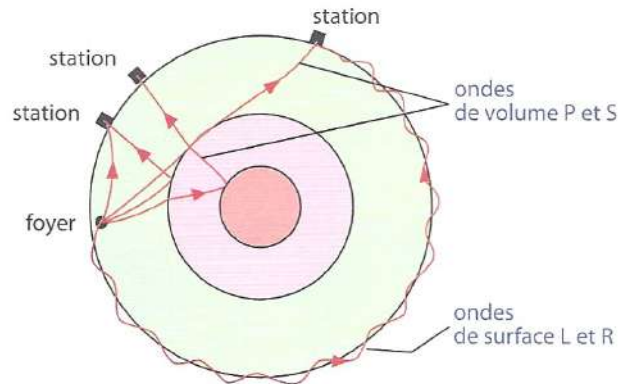


Figure 11. Les ondes sismiques et le mouvement des particules associé.

D'après SANTOS et al. (2019), adapté / complété.



▲ FIGURE 12. Ondes de volume vs. de surface. D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

c. Une vitesse des ondes de volume qui augmente lorsqu'elles traversent des couches profondes : l'enseignement des hodochrones

- Les vitesses des ondes sismiques de volume peuvent être données par les formules ci-dessous.

$$V_p = \sqrt{\frac{4/3\mu + K_s}{\rho}} \quad \text{en km/s}$$

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

μ et K_s , paramètres définissant l'élasticité ;
 ρ , densité du milieu traversé.

LAGABRIELLE *et al.* (2008)

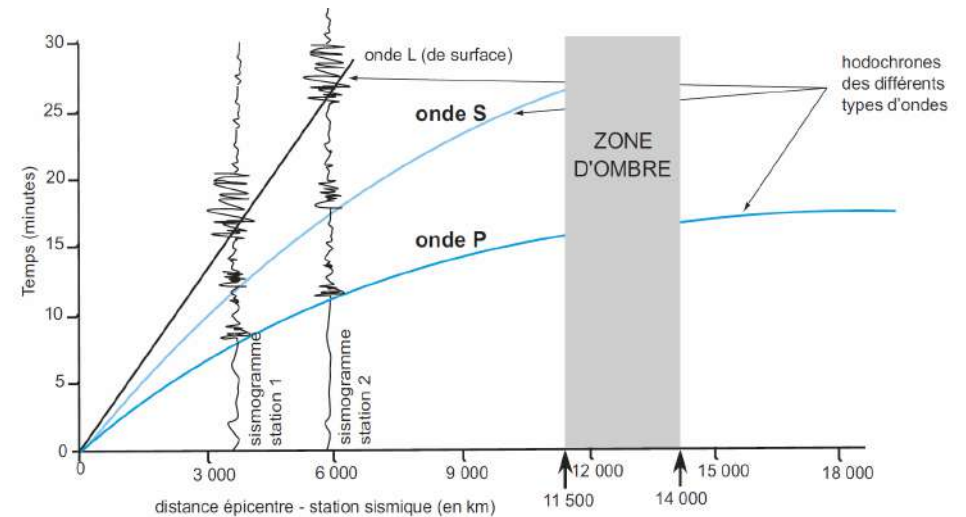
V_p : vitesse des ondes P
 V_s : vitesse des ondes S

K_s : module d'incompressibilité (quantifie la résistance à la compression)
 μ : module de cisaillement (quantifie la résistance au cisaillement)
 ρ : masse volumique

- Il est remarquable de constater que, quel que soit le séisme considéré, la **vitesse des ondes P et S augmente** à mesure que l'on s'éloigne de l'épicentre, donc que les ondes ont été en **profondeur** (figure 13). Pourtant, les **matériaux** sont de plus en plus **denses** avec la **profondeur** : la **masse volumique** étant au **dénominateur**, on s'attendrait au contraire à une **vitesse s'affaiblissant**... Comme ce n'est pas le cas, cela implique les **paramètres d'élasticité K_s et μ augmentent plus vite** que la **masse volumique** avec la profondeur.

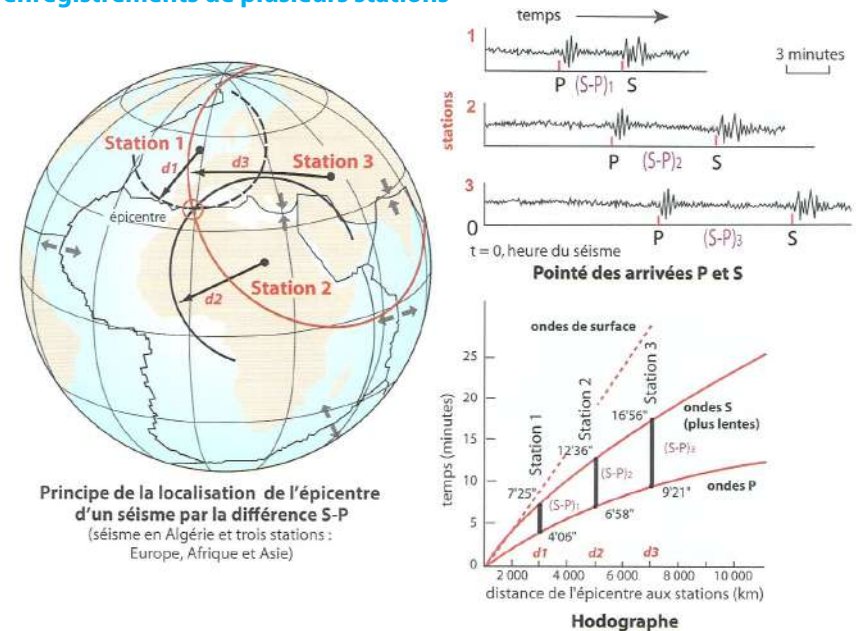
On appelle **hodochrone** (figure 13) **un graphique (1) ou une courbe donnant le temps d'arrivée d'une onde à une station sismologique en fonction de la distance épicentrale**.

(1) Le **graphique correspondant** est souvent appelé **hodographe** par les géologues mais, **rigoureusement**, un **hodographe** est une **représentation vectorielle de vitesses instantanées d'un corps en déformation**... un peu différent donc...



▲ FIGURE 13. Hodochrone(s). D'après PEYCRU *et al.* (2008).

d. Une multilatération possible de l'épicentre d'un séisme à partir des enregistrements de plusieurs stations

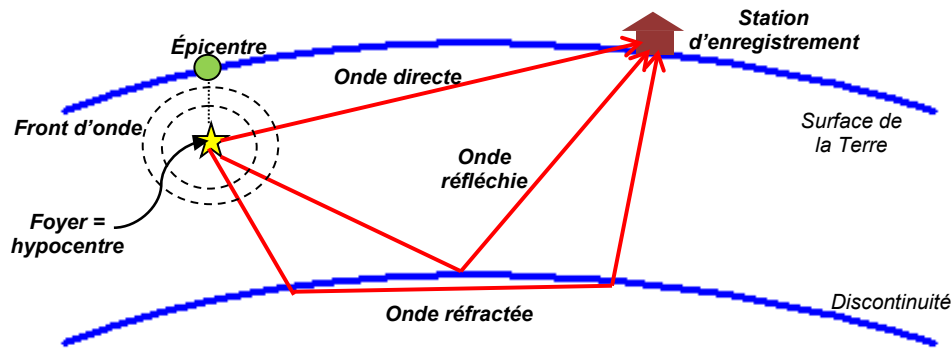


▲ FIGURE 14. Localisation d'un séisme. D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

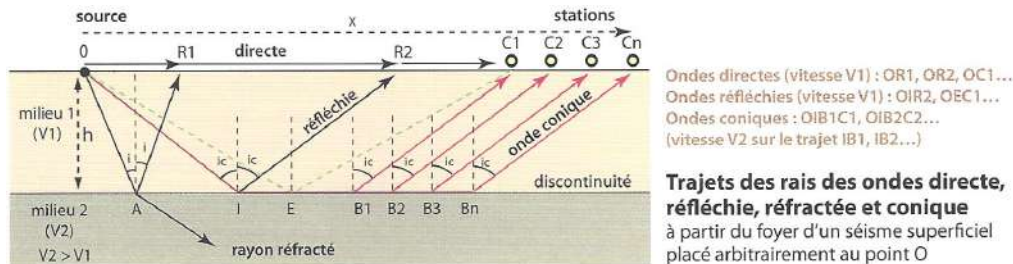
- La **triangulation** (voire **quadriangulation**, ou **plus**) des **trains d'arrivée** des **ondes sismiques** sur **plusieurs stations** permet, grâce au retard d'arrivée qui dépend de la **distance à l'épicentre**, de **situer l'épicentre d'un séisme** (figure 14).

e. Des ondes déviées par des discontinuités physiques et chimiques et enregistrables, avec atténuation, sur l'ensemble de la planète (sauf dans la zone d'ombre)

- Lorsqu'elles rencontrent des **discontinuités physico-chimiques**, les ondes sismiques subissent les **lois de l'optique** comme lorsque des rayons lumineux changent de **milieu de propagation**.
- Elles peuvent alors être (figures 15-16) :
 - réfléchies** : elles rebondissent sur la discontinuité.
 - réfractées** : elles sont déviées par la discontinuité lors du changement de milieu.
 - coniques** : elles suivent la discontinuité avant de revenir vers la surface.



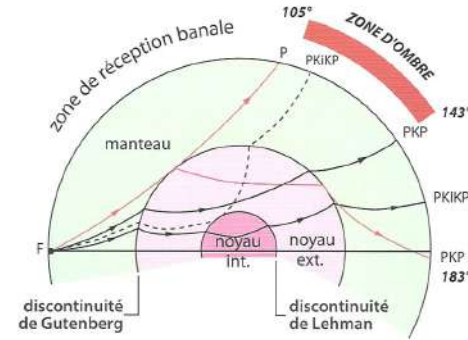
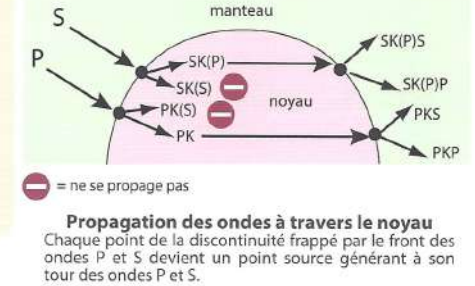
▲ FIGURE 15. Séisme et déviation des ondes sismiques (vision simplifiée).
Original 2011 (cours de Première S).



▲ FIGURE 16. Ondes directes / réfléchies / coniques. D'après LAGABRIELLE et al. (2013).

- Les **rais sismiques** peuvent subir de **multiples réfractions** et arriver en de nombreux endroits du globe. Leur **amplitude s'atténue** avec la **propagation**.
- On appelle **zone d'ombre** (figure 17) la **zone où aucune onde traversante directe P ou S n'est reçue**. Elle met en évidence le **noyau externe**. L'absence de propagation des ondes S dans ce milieu indique que son état est **liquide**.

Les **ondes S** ne traversent pas les liquides d'où la mise en évidence du **noyau externe**. Les **ondes P** sont ralenties dans les liquides. Une faible fusion partielle du manteau sous la lithosphère (LVZ : Low Velocity Zone ou zone à moindre vitesse) y explique le ralentissement des ondes (fiches 100 à 104). C'est la zone du manteau la plus facilement déformable permettant la mobilité de la lithosphère.

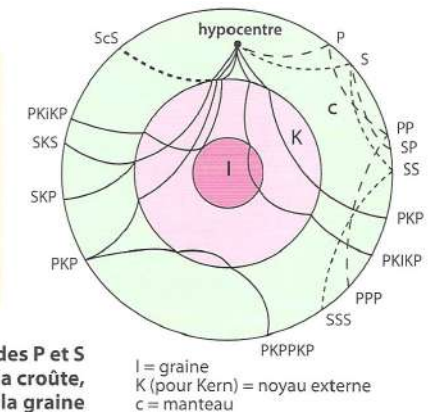


Zone d'ombre créée par le noyau
Absence d'ondes directes entre 105° et 143°
I = traversent le noyau interne (graine),
i = se réfléchissent sur la discontinuité de Lehman



▲ FIGURE 17. Une zone d'ombre entre 105° et 143° due au noyau externe.
Les **ondes directes disparaissent à 105°**, soit **11500 km** de distance à l'épicentre.
Les **ondes doublement réfractées réapparaissent à 143°**, soit **14500 km** de l'épicentre.
D'après LAGABRIELLE et al. (2013).

La vitesse des ondes P et S varie au sein du globe suivant la densité, la pression, la température et l'état solide ou liquide de la matière. L'étude des réflexions et réfractions des rais (trajets) sismiques permet de localiser des discontinuités majeures dues à des changements rapides de la vitesse des ondes sismiques P et S correspondant à des modifications de la minéralogie et des propriétés physiques des différentes enveloppes.



Exemples de rais suivis par les ondes P et S subissant réflexion et réfraction dans la croûte, le manteau, le noyau externe et la graine
I = graine
K (pour Kern) = noyau externe
c = manteau

▲ FIGURE 18. La multiplicité des trajets de rais sismiques. D'après LAGABRIELLE et al. (2013).

- Notons néanmoins que, par les biais de **réflexions et réfractions multiples**, des **ondes finissent par arriver partout** (figure 18)... Il y a même des **conversions d'ondes** lors provoquées par les changements de milieu (figures 17-18) !

3. Des séismes d'amplitude variable : notions d'intensité et de magnitude

- L'importance des séismes peut être quantifié selon deux modalités complémentaires mais assez différentes.

a. L'intensité d'un séisme : les échelles de MERCALLI (1903), MSK (1964)...

- On appelle **intensité** d'un séisme la **quantification des dommages provoqués par le séisme**.
- C'est un **paramètre qualitatif** qui se base sur le **ressenti** des secousses et l'**appréciation des dommages matériels** dus au séisme. Évidemment, une part de subjectivité existe dans :
 - La **définition des seuils de dommages**
 - Leur **appréciation** par le **géologue**
 - Les **différences d'appréciation** qui ressortent des **différences de bâti** ou de **terrain** entre **plusieurs lieux** donnés...
- Avant l'accès à la magnitude**, ces **échelles** étaient néanmoins les **seuls moyens accessibles** pour **estimer l'amplitude** d'un séisme. C'est aussi le **seul outil** pour les **séismes historiques**, connus seulement par des **descriptions** et non par des **mesures**.
- Plusieurs échelles** existent, dérivant les unes des autres : échelle de ROSSI-FOREL (XIXe siècle), échelle de MERCALLI (1883, 1902), échelle MCS MERCALLI-CANANI-SIESBERG, échelle MWN MERCALLI-WOOD-NEUMANN (1931), échelle MSK MEDVEDEV-SPONHEUER-KARNIK (1964) (tableau I), échelle macrosismique européenne (1998)...

▼ TABLEAU I. Un exemple d'échelle d'intensité de séismes : l'échelle MSK (1964).
Wikipédia (2022)

Degré	Dégâts observés
I	Seuls les sismographes très sensibles enregistrent les vibrations.
II	Secousses à peine perceptibles; quelques personnes au repos ressentent le séisme.
III	Vibrations comparables à celles provoquées par le passage d'un petit camion.
IV	Vibrations comparables à celles provoquées par le passage d'un gros camion.
V	Séisme ressenti en plein air; les dormeurs se réveillent.
VI	Les meubles sont déplacés.
VII	Quelques lézardes apparaissent dans les édifices.
VIII	Les cheminées des maisons tombent.
IX	Les maisons s'écroulent. Les canalisations souterraines sont cassées.
X	Destruction des ponts et des digues. Les rails de chemin de fer sont tordus.
XI	Les constructions les plus solides sont détruites. Grands éboulements.
XII	Les villes sont rasées. Bouversements importants de la topographie. Fissures visibles à la surface.

b. La magnitude d'un séisme : l'échelle (ouverte) de RICHTER (1930), la magnitude de moment (HANKS-KANAMORI, 1979)

- La **magnitude** est une **mesure de l'importance d'un séisme calculée à partir de l'amplitude des mouvements du sol et qui renseigne sur la quantité d'énergie libérée par un séisme**.

Ce concept a été inventé par l'Américain **Charles F. RICHTER** (1900-1985) (1930) et l'on emploie encore aujourd'hui l'**échelle de RICHTER**, parfois qualifiée d'**ouverte** car elle n'a **pas de niveau sommital**... C'est une **échelle logarithmique**, initialement adaptée à la **sismicité californienne**. Un **séisme de magnitude 7** libère ainsi **100 fois plus d'énergie** qu'un **séisme de magnitude 5** !

Notons néanmoins que **d'autres types de magnitudes existent** en réalité et sont **davantage utilisées par les sismologues** que la formule originale de RICHTER. On emploie ainsi beaucoup aujourd'hui l'**échelle de magnitude de moment**, introduite en 1979 par Thomas C. HANKS et Hiroo KANAMORI.

La **magnitude de moment**, notée M_w , est un **nombre sans dimension** défini par :

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10}(M_0) - 6,07$$

où M_0 est le **moment sismique** en $N \cdot m$:

$$M_0 = \mu S \Delta u$$

où μ est le **module de cisaillement** du milieu (en $Pa = N \cdot m^{-2}$), S la **surface rompue** durant le séisme (en m^2) et Δu le **déplacement moyen** ayant eu lieu sur la faille (en m).

Les constantes de la formule permettent une **cohérence avec l'échelle de RICHTER** pour les **petits et moyens séismes**

▼ TABLEAU II. Typologie des séismes en fonction de la magnitude. Wikipédia (2022)

Le **record absolu mesuré à ce jour** est le **séisme de Valdivia (Chili)** en **1960** à (**magnitude 9,5**) (foyer **33 km** de profondeur). La **ville** fut complètement **détruite**, le **trait de côte** du Chili **modifié** et un **tsunami** avec des **vagues submersives de 25 m** fut observé, touchant toutes les **côtes pacifiques** (**12 m** à Hawaï).

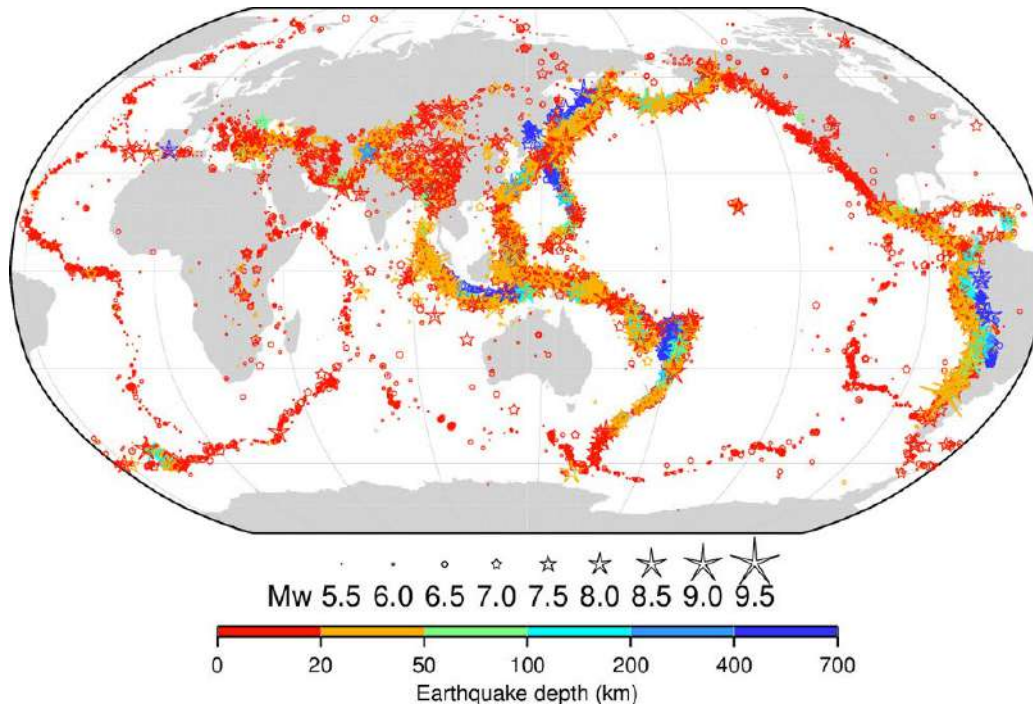
Description	Magnitude de moment	Effets	Fréquence moyenne à l'échelle du Globe
Micro	moins de 1,9	Micro tremblement de terre, non ressenti.	8 000 par jour
Très mineur	2,0 à 2,9	Généralement non ressenti mais détecté/enregistré.	1 000 par jour
Mineur	3,0 à 3,9	Souvent ressenti sans causer de dommages.	50 000 par an
Léger	4,0 à 4,9	Secousses notables d'objets à l'intérieur des maisons, bruits d'entrechoquement. Les dommages restent très légers.	6 000 par an
Modéré	5,0 à 5,9	Peut causer des dommages significatifs à des édifices mal conçus dans des zones restreintes. Pas de dommages aux édifices bien construits.	800 par an
Fort	6,0 à 6,9	Peut provoquer des dommages sérieux sur plusieurs dizaines de kilomètres. Seuls les édifices adaptés résistent près du centre.	120 par an
Très fort	7,0 à 7,9	Peut provoquer des dommages sévères dans de vastes zones ; tous les édifices sont touchés près du centre.	18 par an
Majeur	8,0 à 8,9	Peut causer des dommages très sévères dans des zones à des centaines de kilomètres à la ronde. Dommages majeurs sur tous les édifices, y compris à des dizaines de kilomètres du centre.	1 par an
Dévastateur	9,0 et plus	Dévaste des zones sur des centaines de kilomètres à la ronde. Dommages sur plus de 1 000 kilomètres à la ronde.	1 à 5 par siècle

4. Répartition et mécanismes au foyer des foyers : un lien avec la géodynamique

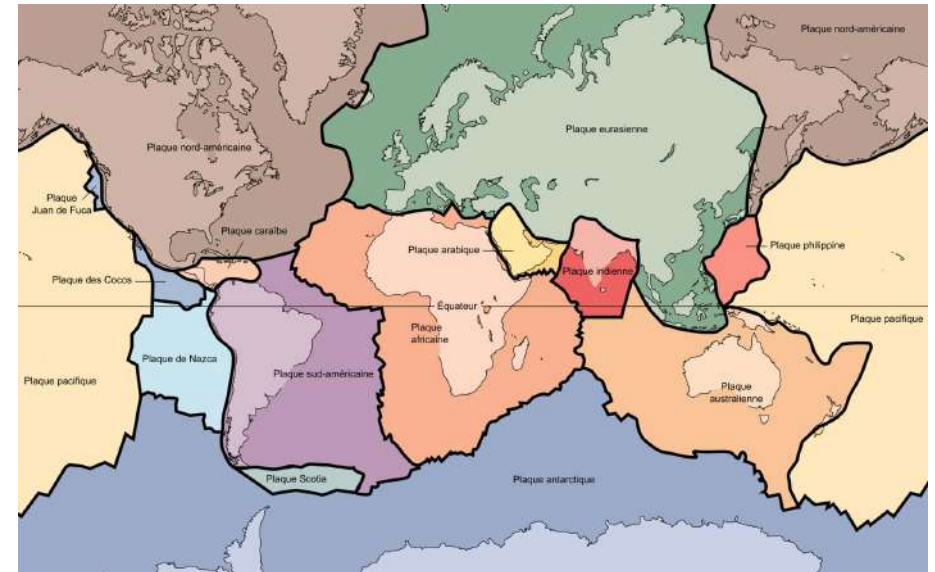
a. La répartition des séismes et de leurs foyers

α. La répartition horizontale des séismes : une concentration aux limites des plaques lithosphériques

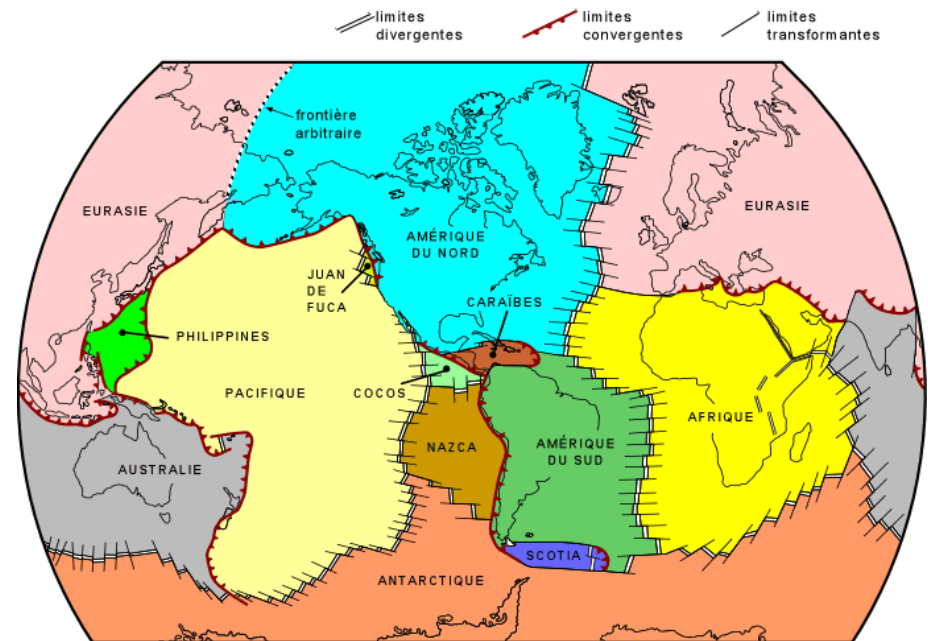
- Si l'on regarde la **répartition des épicentres de séismes** à l'échelle planétaire (figure 19), on constate qu'ils **découpent la surface terrestre** en plaques plus ou moins grandes. Ce sont les **plaques lithosphériques** ou **plaques tectoniques** (figures 20-21), **fragments de lithosphère plutôt stables en leur centre mais où les limites sont géodynamiquement très actives (failles, séismes, rifts, subductions, volcans...)**. Ces plaques sont mobiles.
- On peut distinguer des **plaques majeures** et des **micro-plaques**, voire des **plaques principales / secondaires / tertiaires...** Leur nombre varie selon les auteurs tant on peut **discuter des frontières** effectives de plaques dans **certaines zones** (pensons à la zone méditerranéenne par exemple !) ou des **critères** pour les séier.
- La **ceinture pacifique** libère **80 % de l'énergie sismique** annuelle.



▲ FIGURE 19. La sismicité mondiale : magnitude, profondeur de foyer, répartition (depuis 1904). International Seismological Center (06 avril 2021).



▲ FIGURE 20. Les principales plaques tectoniques. Wikipédia (janvier 2022).

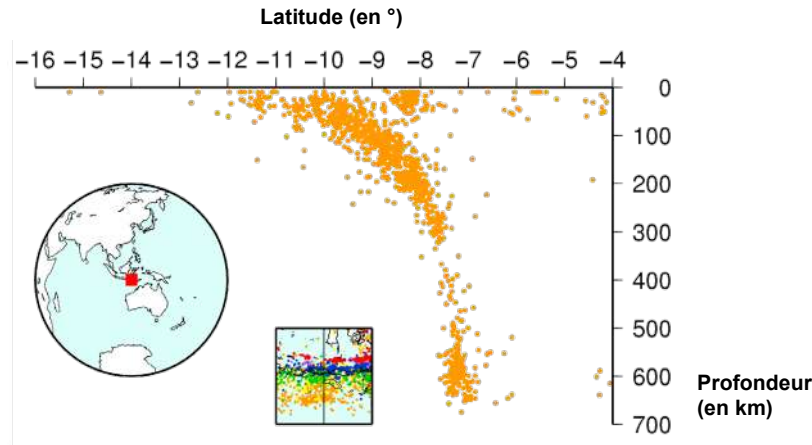


▲ FIGURE 21. Les principales plaques tectoniques et la nature de leurs limites. <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s1/1.17.gif> (janvier 2022).

β. La répartition verticale des foyers sismes : une profondeur des foyers dépendant du contexte géodynamique (+ notion de zone de WADATI-BENIOFF)

- On classe généralement les séismes en trois catégories en fonction de la profondeur de leur foyer :
 - Séismes superficiels** : foyer compris entre 0 et 33 km.
 - Séismes intermédiaires** : foyer compris entre 33 et 70 km.
 - Séismes profonds** : foyer situé au-delà de 70 km [on a déjà signalé des foyers à 700 km dans certaines zones de subduction].
- La plupart des séismes sont superficiels, en lien avec la faible épaisseur de la lithosphère et notamment de la croûte terrestre.
- Les séismes intermédiaires et profonds (figure 19) se rencontrent dans les **zones de convergence** (figures 21 et 22), principalement les zones de subductions où les plaques lithosphériques rigides peuvent descendre profondément.

Comme nous le verrons dans le chapitre suivant, dans les zones de subduction, les foyers de séismes s'alignent grossièrement sur un plan correspondant au panneau plongeant (froid) qui s'enfonce dans l'asthénosphère : c'est la **zone de WADATI-BENIOFF** (évitiez l'ancien terme « plan » de WADATI-BENIOFF car les foyers se répartissent en réalité sur une certaine épaisseur).



▲ FIGURE 22. La sismicité verticale (foyers) au niveau d'une zone de subduction : mise en évidence de la zone de WADATI-BENIOFF sous les Petites Îles de la Sonde. Wikipédia (janvier 2022).

b. Les mécanismes au foyer, des représentations sphériques des contraintes au niveau du foyer du séisme

- Un **mécanisme au foyer** (*focal mechanism*, parfois surnommé *beach ball*) de séisme est une **représentation sphérique du mouvement relatif des compartiments de roche au moment de la rupture le long du plan de faille séparant les blocs** (encadré A + figures 23-24).

Pour comprendre : deux vidéos

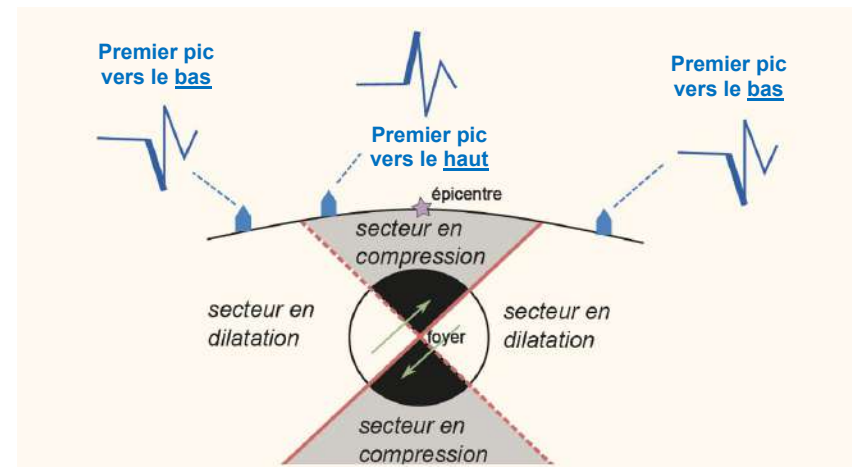
Une explication d'Alix HELME-GUIZON (BCPST2, LEGTA Angers le Fresne) et quelques exercices simples :

<https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=e7Dja7epxso&feature=youtu.be>
<https://www.youtube.com/watch?v=CKVijV2pP1A>

Encadré A La construction des mécanismes au foyer

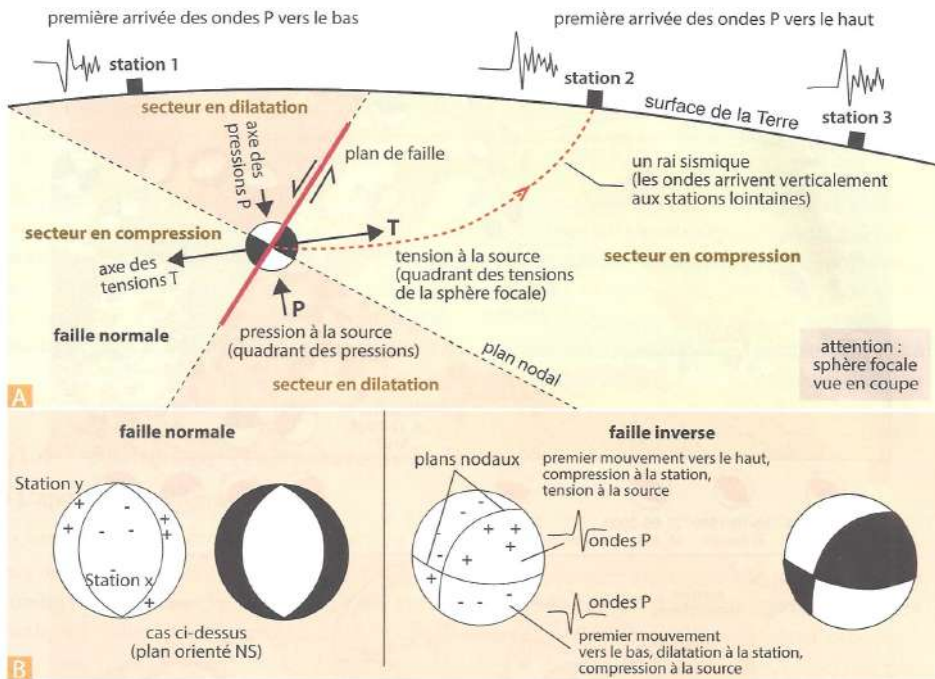
La construction d'un mécanisme au foyer

- La représentation d'un mécanisme au foyer se fonde sur une **sphère virtuelle centrée sur le foyer**, la **sphère focale**.
- Elle est divisée en quatre quadrants dont les limites sont **deux plans perpendiculaires qui se croisent au niveau du foyer** nommés **plans nodaux**. L'un de ces plans est le **plan de faille** ou **plan nodal principal**, l'autre est un **plan virtuel perpendiculaire au plan de faille** nommé **plan nodal auxiliaire**.
- La production du **mécanisme au foyer** repose sur de nombreux enregistrements du séisme localisés dans des **stations variées**.
- Sur chaque **sismogramme**, le **premier mouvement du sol** tracé par un **sismomètre vertical** (appelé **impetus des ondes P** chez PERRIER, BEAUX et al., 2021... terme peu fréquent ailleurs, semble-t-il) est considéré pour **déterminer** si le secteur est en **compression** ou **dilatation** :
 - Si le premier pic est dirigé vers le haut**, alors le sol a commencé par se soulever, donc par s'éloigner du foyer : le **secteur** est en **compression**. Ce secteur est conventionnellement coloré **en noir**.
 - Si le premier pic est dirigé vers le bas**, alors le sol a commencé par s'affaisser, donc par se rapprocher du foyer : le **secteur** est en **dilatation**. Ce secteur est conventionnellement coloré **en blanc**.



♥ FIGURE 23. Des sismogrammes au mécanisme au foyer : principe d'établissement. D'après PERRIER, BEAUX et al. (2021), modifié.

- Bien entendu, un **mécanisme au foyer** peut être **observé depuis n'importe quel point de vue**, mais **sur une carte** (exemple à la figure 26), ces mécanismes sont **vus du dessus**.
- Des **allures typiques de mécanismes au foyer** s'observent en fonction du **type de faille impliquée** dans le séisme (figure 25-26), même si évidemment, des **mécanismes au foyer intermédiaires et composites** existent, traduisant des **contraintes géodynamiques variées** à l'œuvre (figure 27).



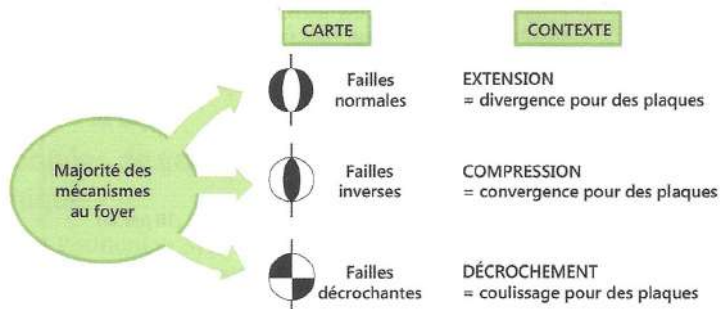
Construction des mécanismes au foyer.

A. Répartition des secteurs en compression et tension et correspondance avec les quadrants de la sphère focale dans le cas d'une faille normale (vue en coupe).

B. Construction du mécanisme au foyer et utilisation de la répartition des premiers mouvements d'ondes P pour une faille normale et une faille inverse.

▲ FIGURE 24. Un schéma un peu plus complet montrant l'importance de l'enregistrement de sismogrammes dans des lieux variés pour reconstituer la sphère focale.

D'après RENARD *et al.* (2018)

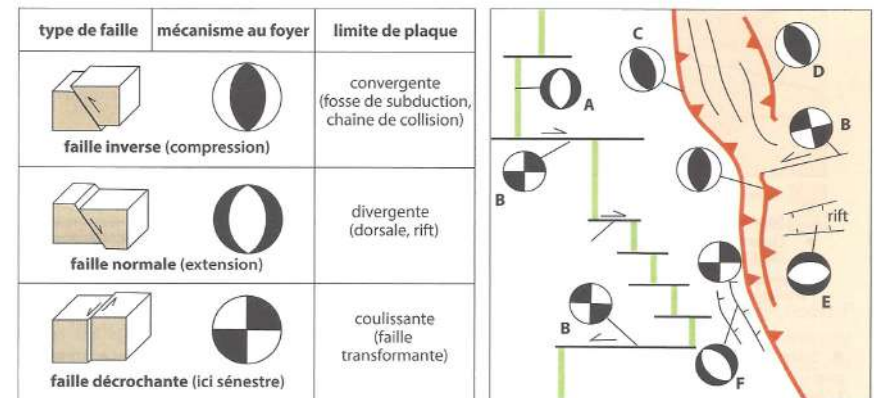


♥ ▲ FIGURE 25. Typologie des mécanismes au foyer et contexte géodynamique.

D'après DAUTEL *et al.* (2021)

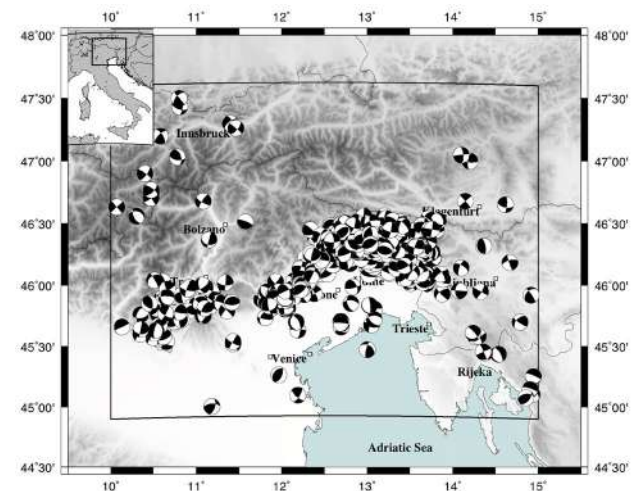
Typiquement en cartographie (en vision du dessus) (figures 25-26) :

- Le mécanisme au foyer d'un séisme associé à une faille inverse présente un I noir et des bordures blanches.
- Le mécanisme au foyer d'un séisme associé à une faille normale présente un I blanc et des bordures noires.
- Le mécanisme au foyer d'un séisme associé à une faille décrochante présente quatre quadrants (deux blancs, deux noirs).



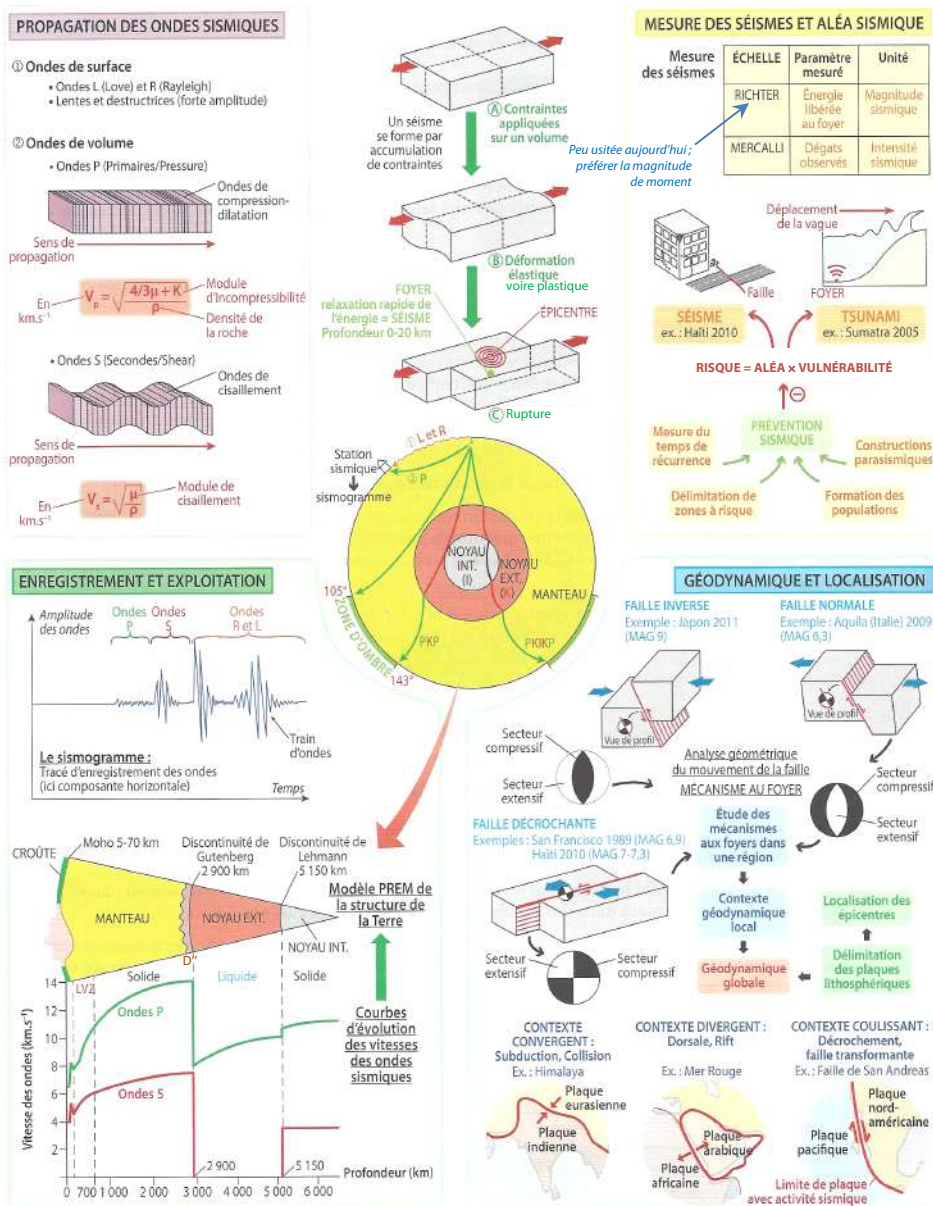
▲ FIGURE 26. Quelques mécanismes au foyer les régions sismiquement actives.

D'après RENARD *et al.* (2018)



▲ FIGURE 27. Sismicité près de la Mer adriatique. D'après SARAÒ *et al.* (2020)

5. Bilan sur les séismes

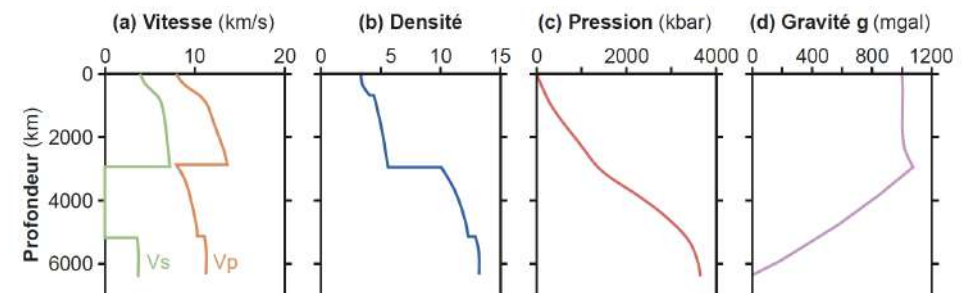


▲ **FIGURE 28. Synthèse sur les séismes.** D'après BORDI, SAINTPIERRE *et al.* (2021), corrigé.

B. Le modèle radial de la Terre solide (géosphère)

1. Le modèle PREM (1981), résultat de la compilation de très nombreuses données sismiques

- Les **résultats des études sismologiques** et les **discontinuités majeures mises en évidence** par ce biais ont permis d'établir le **modèle radial de la Terre**, c'est-à-dire la **structure verticale du globe en enveloppes concentriques**.
- Publié en 1981 par les Américains Adam M. DZIEWONSKI (1936-2016) et Don L. ANDERSON (1933-2014) en **compilant un très grand nombre de données sismiques** disponibles à l'époque, ce modèle fut appelé **modèle PREM** pour *Preliminary Reference Earth Model* (modèle préliminaire de référence de la Terre), les auteurs croyant vraiment à l'époque qu'un **meilleur modèle** serait **publié ensuite**... On utilise pourtant **encore celui-là** aujourd'hui !
- Ce modèle comprend, par **compilation des données sismiques et calculs physiques**, plusieurs **profils verticaux** (figure 28) dont les **principaux** sont :
 - Un profil vertical des **vitesse des ondes P et S** ;
 - Un profil vertical de **pression** ;
 - Un profil vertical de **densité** (initialement de **masse volumique**, dans l'article) ;
 - Un profil vertical de **gravité**.



Les informations du modèle PREM : paramètres calculés en fonction de la profondeur.

- (a) Profil de vitesse des ondes P et S ; (b) profil de densité ; (c) profil de pression ; (d) profil de l'accélération de la pesanteur ($\text{mgal} = 10^{-5} \text{ m.s}^{-2}$)

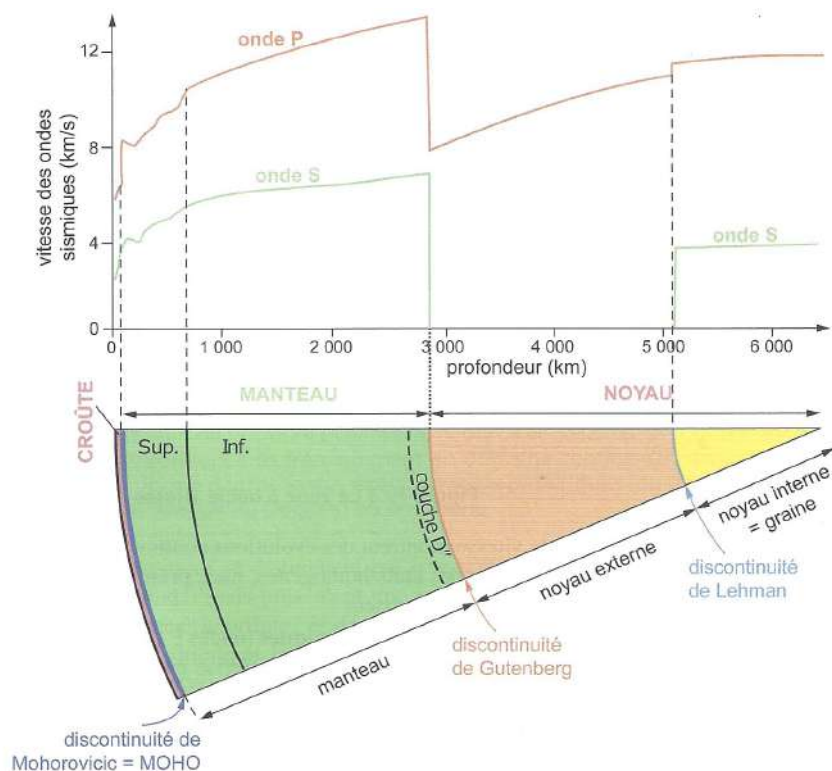
▲ **FIGURE 28. Le modèle PREM : les principaux profils publiés dans l'article de 1981.**
D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021).

2. Trois discontinuités et quatre couches majeures

a. Les grandes discontinuités : MOHOROVIČIĆ (Moho) (moy. 30 km), GUTENBERG (2900 km) et LEHMANN (5100 km)

- On peut appeler **discontinuité sismique** une **surface au niveau de laquelle les ondes sismiques sont réfléchies ou réfractées**. Elles sont interprétées comme des **discontinuités physico-chimiques**, marquant un **changement de milieu de propagation** des ondes.

(!) Si le **positionnement** (la **profondeur**) de ces **discontinuités** a été **précisé** par le modèle **PREM**, ces **discontinuités** sont en réalité **connues de plus longue date** (début du **XX^e siècle**).



▲ FIGURE 29. **Le modèle PREM : les principales discontinuités.**
D'après PERRIER, BEAUX et al. (2021).

- Le **modèle sismique de la Terre** (figures 28-29) met en évidence trois discontinuités majeures :
 - la **discontinuité de MOHOROVICIC (1909)** – qu'on appelle souvent le **Moho** – située en **moyenne à 30 km de profondeur**, en réalité de profondeur variable comprise **entre 0 et 80 km** (figure 30) :

Andrija MOHOROVICIC (1857-1936) était un météorologue devenu sismologue yougoslave (croate).

- en moyenne **30 km** sous les **continents** (épaisseur moyenne de la **croûte continentale**)
 - en moyenne **7 km** sous les **océans** (épaisseur moyenne de la **croûte océanique**).

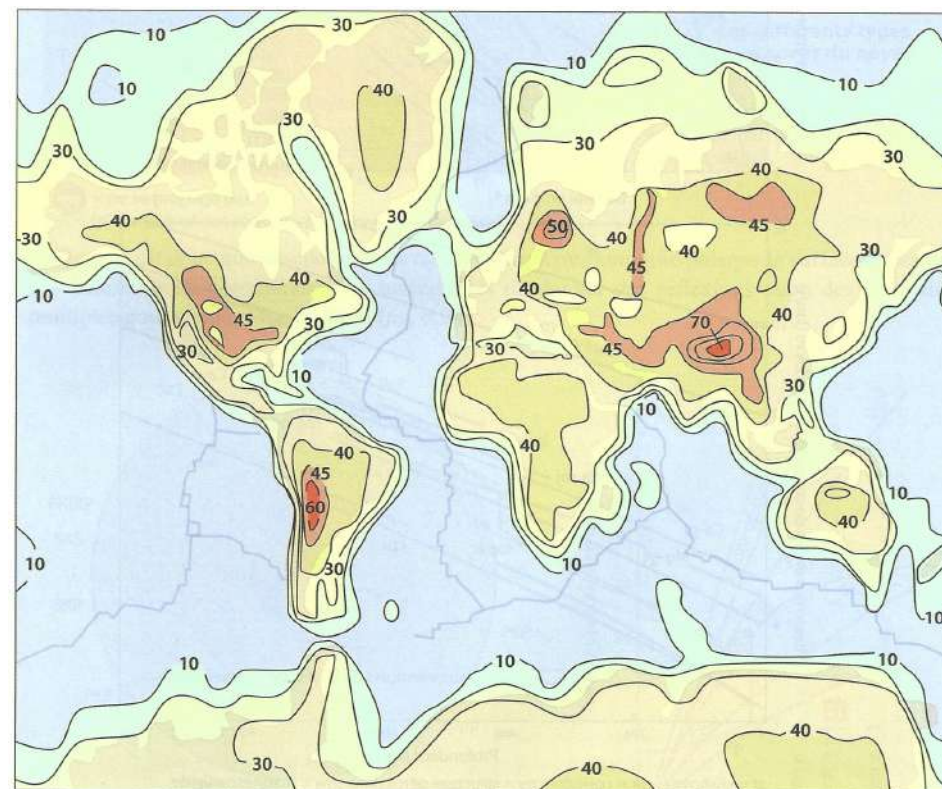
- Là où la **croûte s'amincit** et où **remonte le manteau**, le **Moho** peut être à **0 km de profondeur**...
 - À l'inverse, là où des **racines crustales importantes** existent **sous une montagne**, un **Moho** atteignant jusqu'à **80 km de profondeur** est envisageable.

- la **discontinuité de GUTENBERG (1912)** aussi appelée **CMB** (*core mantle boundary, frontière noyau-manteau*), à **2900 km de profondeur**,

Beno GUTENBERG (1889-1960) était un géologue et sismologue allemand.

- la **discontinuité de LEHMANN (1936)** à **5100 km de profondeur**.

Inge LEHMANN (1857-1936) était une géophysicienne danoise.



Carte du Moho à l'échelle globale.

Cette carte a été établie à partir des mesures de gravimétrie obtenues par le satellite GOCE de l'ESA en 2011. Il est intéressant de voir que les progrès de l'exploration satellitaire permettent maintenant d'obtenir une vision de l'intérieur de la Terre autrefois dévolue aux seuls sondages géophysiques à partir de la surface, notamment la sismique réfraction et réflexion dans le cas du Moho. Cette carte permet une vision globale de l'épaisseur de la croûte terrestre, mais elle ne remplace pas les études détaillées régionales.

▲ FIGURE 30. **Le carte de profondeur du Moho.** D'après RENARD et al. (2018).

b. Les grandes couches ainsi séparées : **croûte [solide], manteau [solide], noyau externe [liquide] et noyau interne (= graine) [solide]**

- Les **quatre couches principales** (figures 29 et 31) ainsi **délimitées** sont les suivantes :
 - La **croûte** ou **écorce**. Elle est **épaisse de 30-35 km en moyenne sous les continents** (*croûte continentale ; densité moyenne 2,7*) et de **7 km en moyenne sous les océans** (*croûte océanique ; densité moyenne 2,9*). Elle est à l'état **solide** et représente **1 % du volume de la planète**.

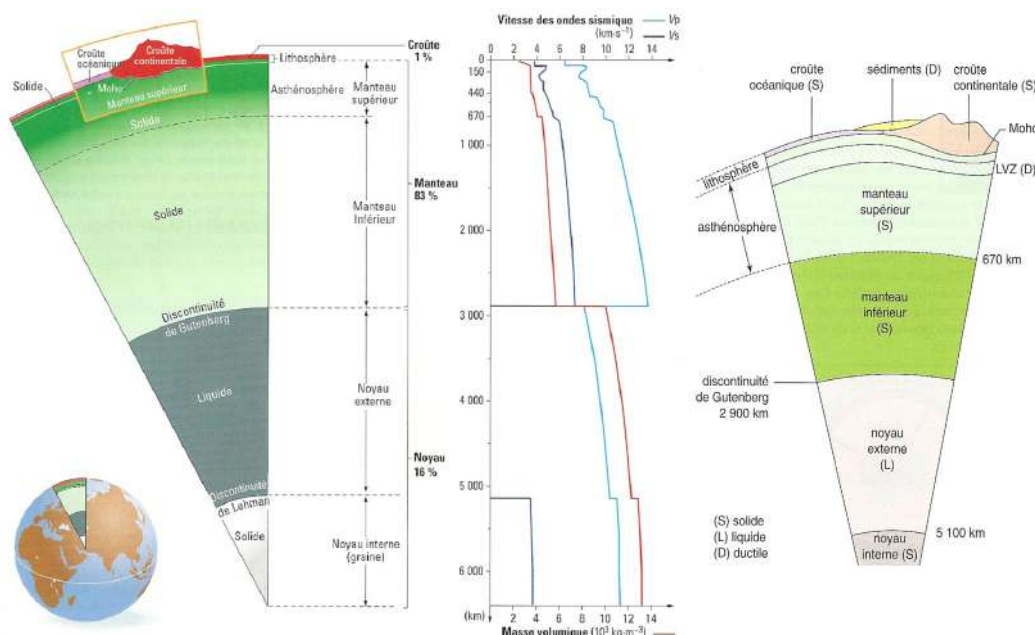
b) Le **manteau**. C'est la couche la plus importante en volume (83 % du volume de la Terre). Il présente des densités comprises entre 3 et 5,5. Il est compris entre le Moho et 2900 km de profondeur.

Remarque importante : si le manteau est globalement solide, cela ne l'empêche pas de subir localement une fusion de ses constituants ; environ 1 % du manteau est du magma (= roches fondues). La croûte présente également des zones localisées de fusion.

c) Le **noyau externe**. Il est liquide (c'est la seule partie liquide de la Terre interne) et s'étend de 2900 à 5100 km de profondeur.

d) Le **noyau interne** ou **graine**. Situé entre 5100 et 6370 km de profondeur (centre de la Terre), il est solide.

Le noyau représente 16 % du volume planétaire.... mais 31 % de la masse ! On peut noter qu'il présente des densités très supérieures aux autres couches terrestres (environ 12).



▲ FIGURE 31. Structure de la Terre interne.
D'après DUÇO et al. (2001) et LIZEAUX, BAUDE et al. (2007).

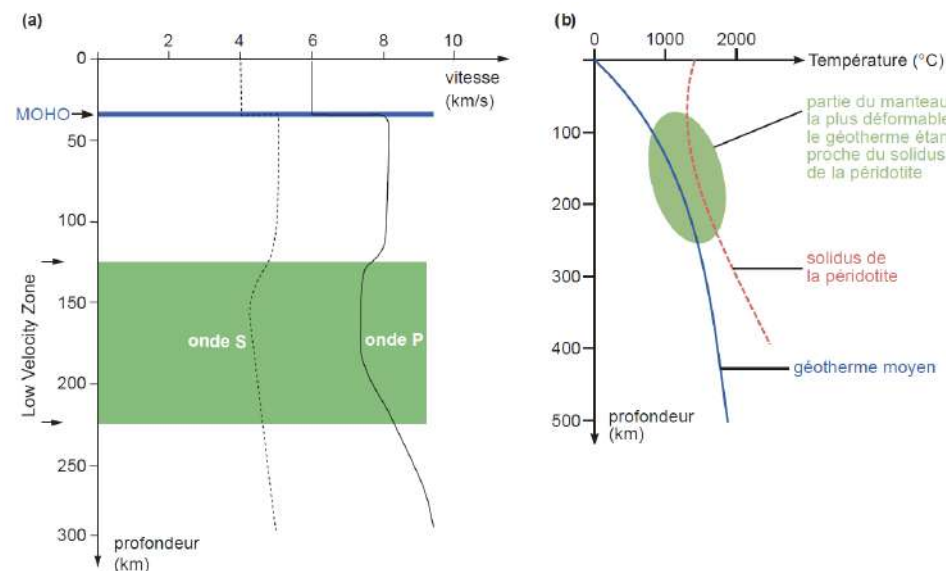
3. La LVZ et la distinction lithosphère-asthénosphère

a. La LVZ, zone de moindre vitesse des ondes sismiques qui s'explique par un rapprochement du géotherme et du solidus des roches

- On remarque dans le manteau, généralement entre 100 km et 250 km de profondeur une zone d'affaiblissement important des vitesses des ondes sismiques, notamment des ondes P (figure 32) : c'est la LVZ (Low Velocity Zone, zone de faible vitesse).

- On explique ce ralentissement des ondes par un changement d'état rhéologique des matériaux terrestres (en l'occurrence la péridotite) qui serait conséquent au rapprochement du géotherme (augmentation de la température de la Terre solide avec la profondeur / pression) [voir III] et du solidus (ligne d'un diagramme de phases séparant l'état solide et la coexistence des états solide et liquide ; c'est donc la limite d'apparition des premiers liquides) des roches, sans qu'il n'y ait écoulement des courbes (figure 32).

(!) De plus en plus auteurs avancent toutefois une légère fusion (à hauteur de 1 %) du manteau dans cette zone.



▲ FIGURE 32. La LVZ (a) et son origine (b). D'après PERRIER, BEAUX et al. (2021).

b. Asthénosphère et lithosphère : trois définitions complémentaires

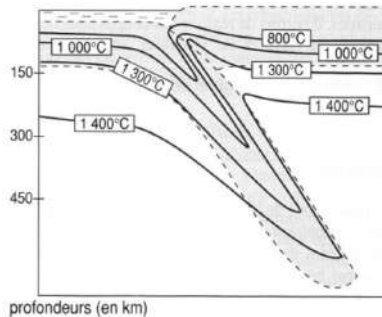
- La LVZ fait donc passer une limite au sein du manteau supérieur à l'origine de la définition de la lithosphère et de l'asthénosphère.

a. La définition sismique : croûte-manteau avant LVZ vs. LVZ et reste du manteau supérieur

- À partir de ce constat, on distingue deux zones :
 - la **lithosphère** située au-dessus de la LVZ (de 0 à environ 100 km de profondeur) qui comprend ainsi la croûte et une petite partie du manteau supérieur.
 - l'**asthénosphère** incluant la LVZ située au-dessous, comprenant le reste du manteau supérieur (incluant la LVZ), située entre environ 100 et 670 km de profondeur.

β. La définition thermique : au-dessus vs. au-dessous de l'isotherme 1300 °C

- On peut aussi définir (figure 33) :
 - la **lithosphère** comme la **portion de croûte et manteau supérieur située au-dessus de l'isotherme 1300 °C**,
 - et l'**asthénosphère** comme la **portion de manteau supérieur située au-dessous de l'isotherme 1300 °C**.
- Un **isotherme** est une **surface fictive reliant tous les points de même température**.



▲ FIGURE 33. **Répartition verticale des isothermes au niveau d'une zone de subduction.**
Source à préciser.

γ. La définition rhéologique : niveau rigide vs. niveau ductile

- La **rhéologie** est l'étude physique de la déformation des matériaux sous l'effet de contraintes mécaniques. Un matériau solide – et c'est bien solide, hein ! – peut avoir, suite à une déformation, un comportement :
 - Ductile** : la contrainte provoque une déformation du matériau sans rupture.
 - Élastique** : la contrainte provoque une déformation réversible du matériau.
 - Plastique** : la contrainte provoque une déformation irréversible du matériau sans rupture.
 - Rigide = fragile = cassant** : la contrainte provoque une rupture du matériau.
- On peut aussi définir :
 - la **lithosphère** comme la **portion de croûte et manteau supérieur qui a un comportement globalement rigide**,

Ce point sera précisé et affiné dans le chapitre consacré à la déformation.

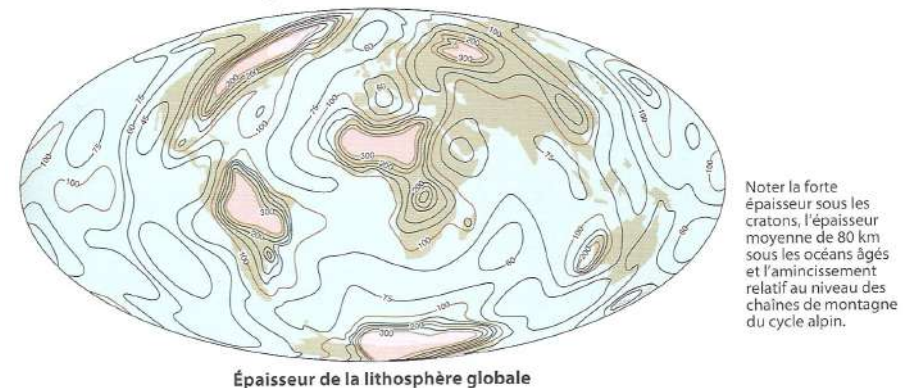
- et l'**asthénosphère** comme la **portion de manteau supérieur qui a un comportement ductile**.

δ. Bilan : tentative de définition croisée

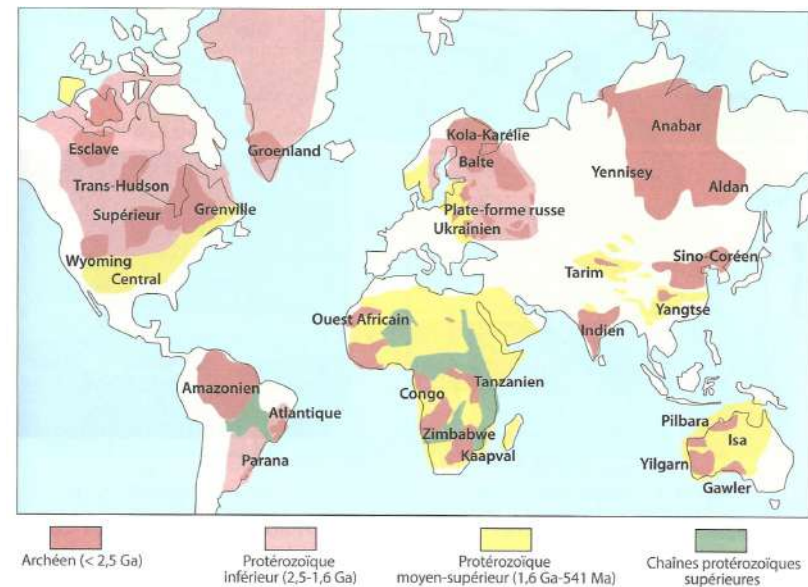
- Finalement, on peut proposer la **synthèse** suivante :
 - la **lithosphère** est la **couche superficielle de la Terre, profonde de 100 km en moyenne, correspondant à la croûte et à la partie sommitale du manteau supérieur, située au-dessus de la LVZ et de l'isotherme 1300 °C et ayant un comportement globalement rigide**,
 - et l'**asthénosphère** est la **couche superficielle de manteau supérieur, située entre 100 km environ et 670 km de profondeur, incluant la LVZ et le reste du manteau supérieur, localisée au-dessous de l'isotherme 1300 °C et ayant un comportement ductile**.

ε. Deux précisions

- La profondeur de la LVZ ou LAB (et donc de la lithosphère), une réalité très variable, notamment sous les continents



▲ FIGURE 34. **Profondeur de la LVZ (limite lithosphère-asthénosphère).**
D'après LAGABRIELLE et al. (2013).



Les premiers noyaux continentaux conservés se retrouvent au cœur des boucliers archéens et occupent une surface très inférieure à la surface actuelle des continents.

▲ FIGURE 35. **Carte de l'âge des continents.**
D'après LAGABRIELLE et al. (2013).

- La **profondeur de la LVZ** (parfois appelée **LAB** pour *Lithosphere-Asthenosphere Boundary*), et donc l'**épaisseur de la lithosphère**, est un paramètre très **variable** (figure 34) :
 - Plutôt **fine** sous les **océans** (en général entre 60 et 100 km)
 - Plutôt **épaisse** sous les **continents** (en général entre 100 km et jusqu'à 300 !).
- L'**explication de cette profondeur** a fait l'objet de **diverses modélisations explicatives**, notamment le FHS (*finite half-space model*). Sans rentrer dans le détail et **au premier ordre**, on peut s'accorder sur quelques éléments :
 - Il y a **décorrélation** entre l'**épaisseur de la croûte** (figure 30, **plus haut**) et l'**épaisseur de la LVZ** (figure 35) au sein des **continents**.
 - Les **boucliers* les plus anciens** ont (souvent) des **lithosphères très profondes** (figure 35), souvent en lien avec un très faible flux de chaleur d'origine mantellique dans ces zones.
 - Les **dorsales** (figure 35) ont des **lithosphères fines**, souvent en lien avec un **fort flux de chaleur** et une **remontée mantellique locale**.

*** Un peu de vocabulaire**

On appelle (en français, car les mots peuvent avoir un sens variable en anglais ou allemand) :

- Craton** : une vaste portion **stable** du domaine **continental**, largement composée de roches magmatiques et métamorphiques, souvent située au milieu des plaques lithosphériques, loin de la plupart des contraintes géodynamiques.
- Bouclier** : un craton d'âge souvent largement **précambrien** qui n'est **pas recouvert** par des sédiments récents.
- Socle** ou **substratum** : formation géologique, par exemple de type craton, sur laquelle repose une autre formation géologique, par exemple des sédiments plus récents.

ii. L'**asthénosphère** ne correspond qu'à la LVZ pour certains auteurs (minoritaires)

- Enfin, notons que **certains auteurs** invitent à ne considérer comme **asthénosphère** que la **seule LVZ**, couche **la plus ductile** (**le reste du manteau supérieur avec le manteau inférieur** formant alors la **mésosphère au sens de ces auteurs**). Cette position est toutefois **minoritaire** et l'on pourra noter que, en termes de **dynamique mantellique**, cette zone ainsi définie ne correspond pas forcément à un **concept très opérationnel**.

4. La structuration verticale du manteau

- Au sein du manteau, on peut noter la présence des **variations** dans la **propagation des ondes sismiques**.

a. La LVZ et la distinction manteau lithosphérique-manteau asthénosphérique (voir 3.b)

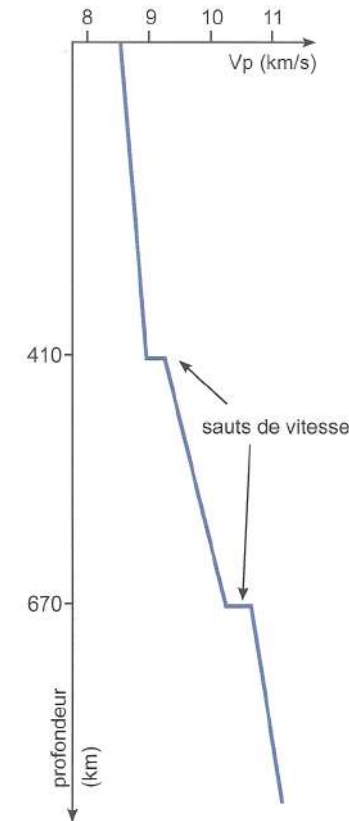
- Ces aspects **viennent juste d'être abordés**.

β. Des sauts de vitesse à 410 km et 670 km de profondeur ; notions de manteau supérieur (incl. zone de transition), manteau inférieur (= mésosphère)

- On peut noter la présence de **deux sauts de vitesse**, notamment des **ondes P**, à **410 km et 670 km de profondeur** (figure 36). On peut appeler **zone de transition du manteau** la **région située entre 410 et 670 km de profondeur**. La **profondeur de 670 km définit la limite** entre **manteau supérieur** et **manteau inférieur**, ce dernier étant aussi appelé **mésosphère** (faisant le pendant à l'**asthénosphère** et la **lithosphère**).
- Ces **sauts de vitesse** s'expliquent, comme nous le verrons **plus loin**, par des **changements d'état minéralogique et cristallin** des roches mantelliques.

(!) Sur le mot « **mésosphère** » :

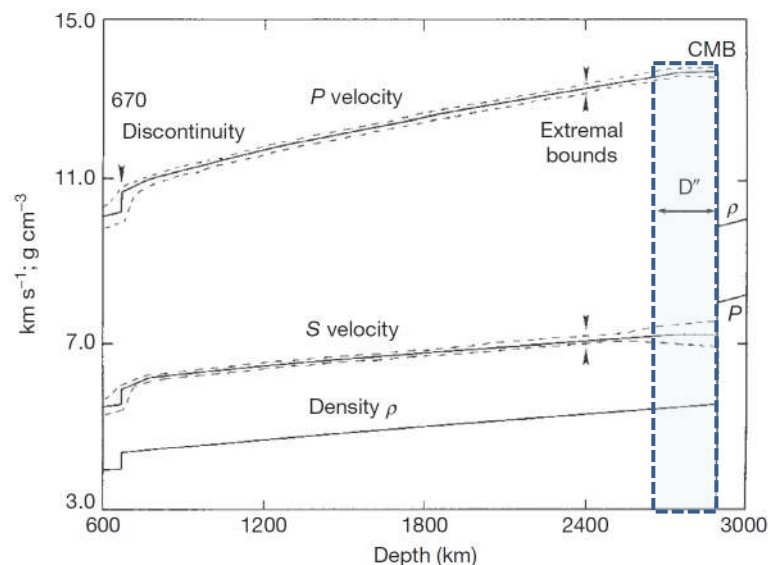
- Pour certains **auteurs minoritaires**, le terme désigne **l'ensemble du manteau après la LVZ**, notamment les **auteurs pour lesquels l'asthénosphère se réduit à la LVZ**.
- Le terme est aussi utilisé pour désigner la **couche de l'atmosphère située entre la stratosphère et la thermosphère (50-85 km d'altitude)**.



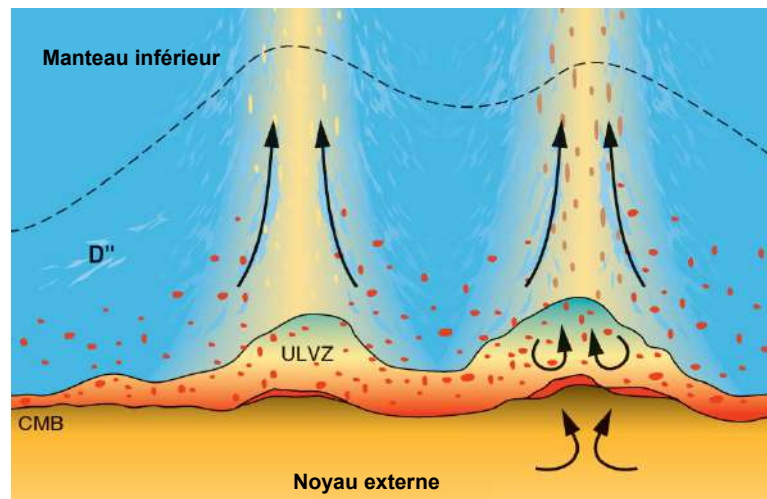
▲ FIGURE 36. **Des sauts de vitesse dans le manteau.**
D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021).

γ. Une cessation de la hausse de vitesse moyenne (avec forts hétérogénéités latérales) dans les 200 derniers km, définissant la couche D'' (cimetière de plaques subduites, couche d'ancrage des panaches, interface avec le noyau)

- Les **200 derniers km (environ) du manteau**, formant la **couche D''**, sont caractérisés par une relative **stabilité de la vitesse des ondes sismiques**, notamment des **ondes P** (figure 37), même si, en réalité, cela masque d'**importantes variations de vitesses latéralement** et donc des **hétérogénéités latérales importantes** dans la **composition** de cette couche.



▲ FIGURE 37. Modèle PREM revisité par LAY (2015).
D'après LAY (2015) avec encadrement de la couche D''.



▲ FIGURE 37bis. Couche D'' [pour information]. D'après PLUMMER et al. (2016).

Des études sismiques et géodésiques récentes redéfinissent la limite entre les **200 kilomètres inférieurs du manteau (couche D'')** et le **noyau externe**. Des « **sédiments** » de **silicate de fer** (représentés en **marron**) peuvent **s'élever** du **noyau liquide sous-jacent** et remplir les cellules convectives ou assurer des **échanges** à la **limite noyau-manteau (CMB)**. Par ailleurs, le **matériau du noyau externe** (représenté en **jaune**) peut faire **fondre** le **manteau le plus bas** (représenté en **rouge**) qui forme alors la zone d'**ultra-faible vitesse (ULVZ, Ultr Low Velocity Zone)**.

- Cette **couche** a fait et fait encore l'objet de nombreuses **études géophysiques et géochimiques** mais les **travaux récents** s'accordent pour y voir les éléments suivants (**figure 37bis**) :
 - Les **roches** présenteraient notamment un **type minéral** nommé **post-pérovskite** attesté par les études de **pétrologie expérimentale** (voir **plus loin**).
 - Les **panaches mantelliques (mantle plumes)**, **remontées chaudes et localisées de manteau prenant généralement naissance au niveau de la couche D''**, s'y **ancrent** et y **prennent** en effet **naissance**, qu'il s'agisse des **petits panaches** ou des **gros** (« **superpanaches** » ou « **superplumes** »).
 - De **nombreuses lithosphères ayant subi jadis une subduction s'accumuleraient au niveau de la couche D''**, ce qu'on appelle parfois un **cimetière de slabs** ou **slab graveyard**.
 - Il est probable que ces **cimetières de plaques** soient ce qui apporte les **éléments subissant un chauffage** et nourrissant les **panaches mantelliques** en matière.

LAY (2015) résumé d'ailleurs cette idée (pas très ancienne) par ces mots : « *One decade's 'superplumes' become the next decade's 'superpiles,' with major shifts in perception of the roles played by seismically detected heterogeneities* ». On peut traduire cela ainsi : « *Les 'superpanaches' d'une décennie deviennent les 'superamas' [de lithosphères subduites] de la décennie suivante, avec des changements majeurs dans la perception des rôles joués par les hétérogénéités détectées sismiquement* ».

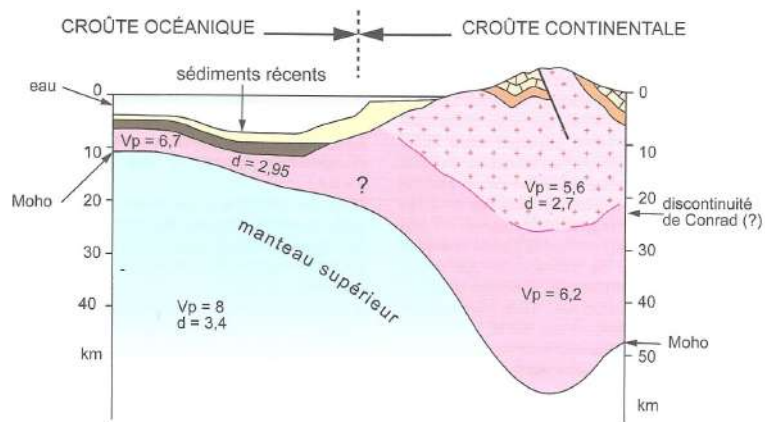
- Des **liens thermiques voire chimiques**, encore largement à **préciser**, existeraient **avec le noyau externe liquide sous-jacent**, sans toutefois qu'un **mélange des couches** n'intervienne. Le mécanisme expliquant que certaines **zones** de la **couche D''** soient **plus chauffées** que d'autres reste largement discuté (pour ne pas dire incompris).
- Il y aurait très **probablement, localement**, une **fusion partielle** de la **matière** au niveau de la **couche D''**. Des **zones de fort ralentissement des vitesses des ondes**, nommées **ULVZ (Ultra Low Velocity Zones)**, sont ainsi détectées à la **base des superpanaches**. On suppose qu'elles présentent une **fusion partielle** et bénéficient d'un **enrichissement métallique** par le **noyau sous-jacent**.

5. Pour finir par une anecdote : la discontinuité de CONRAD séparant croûte continentale « supérieure » et « inférieure », un concept discutable

- Certains auteurs signalent que la **croûte continentale présenterait une discontinuité sismique légère, vers 15-20 km de profondeur, pas toujours observable, divisant la couche en une croûte inférieure et une croûte supérieure** : c'est la **discontinuité de CONRAD**. L'existence et la pertinence de cette **distinction** sont relativement **remises en cause** aujourd'hui, même si **quelques auteurs** continuent d'y voir un intérêt.

Cette **discontinuité (figure 38)**, très **discutée** et apparemment surtout **présente en Europe**, a été **interprétée historiquement** comme :

- Une **séparation entre les deux niveaux qu'on pensait jadis** (au XX^e siècle jusque dans les années 1960 voire 1970) **composer la croûte**, le **Sial** (**composée surtout de silicates avec une certaine richesse en aluminium**) et le **Sima** (**composée surtout de silicates avec une certaine richesse en magnésium**)
- Une **séparation entre une croûte supérieure plutôt magmatique acide (granites...)** et une **croûte inférieure plutôt métamorphique (amphibolites, granulites...) ou magmatique basique (basaltes, gabbros...)**.
- Une **limite entre un niveau très rigide et un niveau plus ductile de la croûte continentale** (potentiellement en lien avec le point précédent).

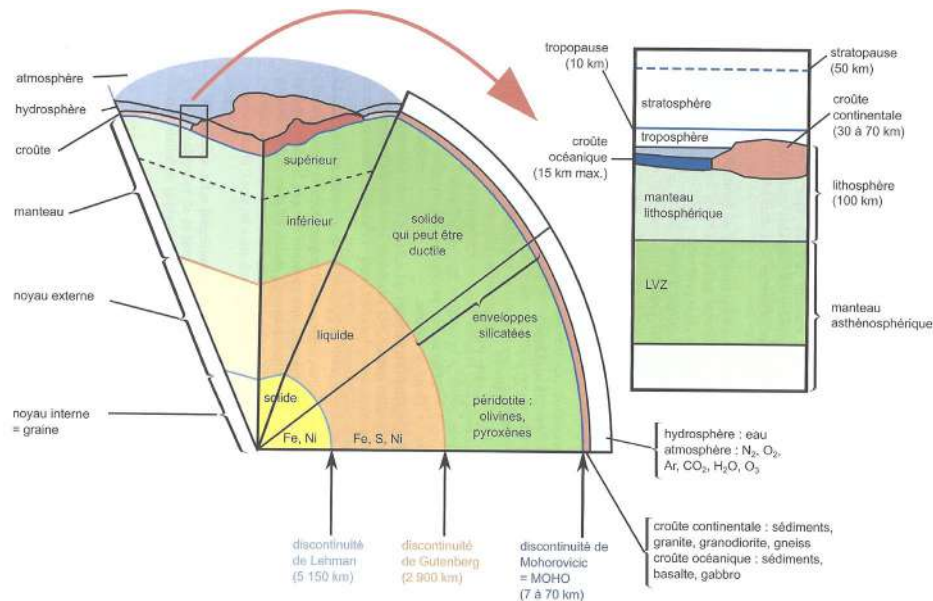


▲ FIGURE 38. Un schéma récent où apparaît encore la discontinuité de CONRAD.
D'après FOUCAULT et al. (2014).

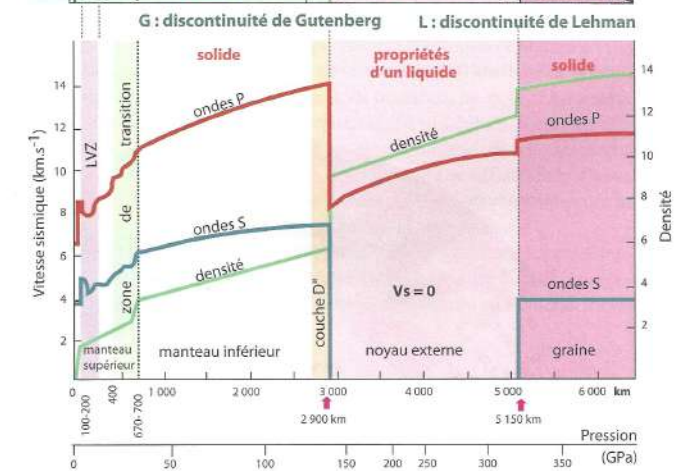
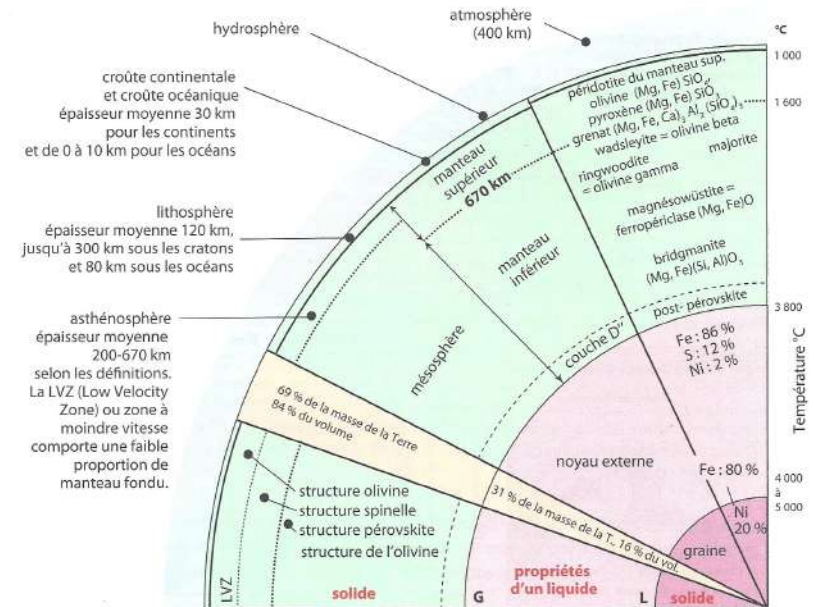
Sur ce schéma, vous pouvez néanmoins retenir les valeurs moyennes de vitesses des ondes P

6. Bilan sur la structure du globe

- Voir figures 39-42.
- (!) Ces documents anticipent un peu sur la **partie II** qui aborde la composition des couches.



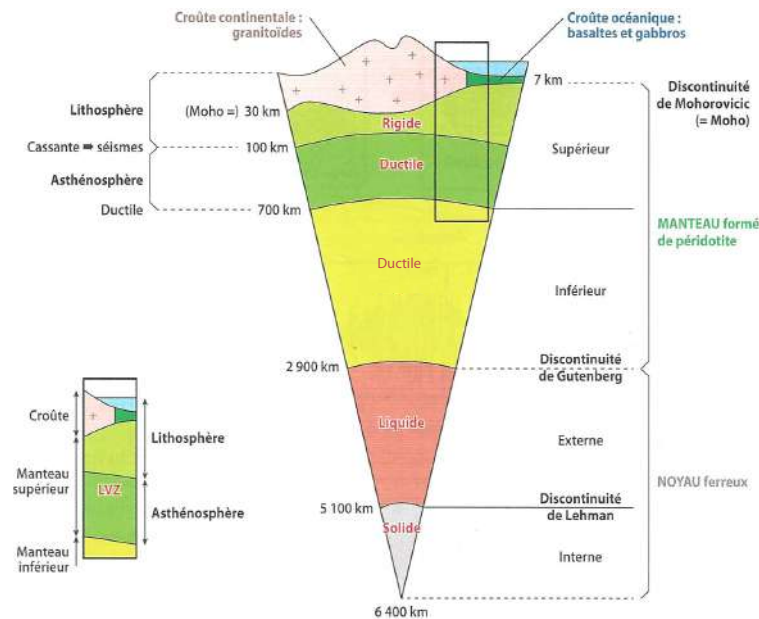
▲ FIGURE 39. Un modèle radial de la Terre. D'après PEYCRU et al. (2015).



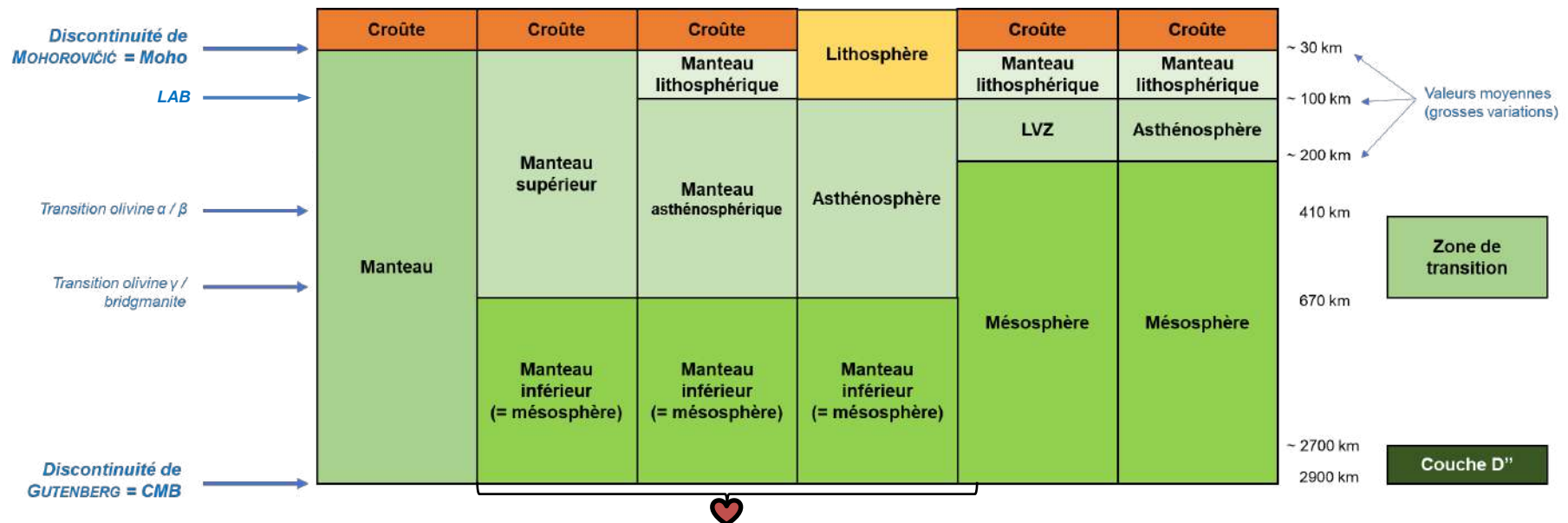
La structure sismique de la Terre, le modèle PREM (Preliminary Reference Earth Model).

C'est un modèle à symétrie sphérique de la Terre, basé sur l'évolution de la vitesse des ondes sismiques (B). On a complété le modèle avec une coupe schématisée du globe (A) montrant quelques caractéristiques essentielles (données minéralogiques, densité, température, nature des différentes enveloppes). La diminution des vitesses observée dans l'intervalle 100-200-300 km (très variable en fonction des régions du globe, voir figure 6.31) permet de définir l'asthénosphère (LVZ pour Low Velocity Zone). La zone de vitesses croissantes ensuite rapidement avant 670 km définit la zone de transition avec le manteau inférieur. Notez la disparition des ondes S dans le noyau (modifié d'après plusieurs sources : Poirier 1996, Brahic et al. 1999, Caron et al. 2003).

▲ FIGURE 40. Un modèle PREM plus précis avec le graphe. D'après RENARD et al. (2018).



▲ FIGURE 41. Un autre modèle radial de la Terre plus simple.
D'après DAUTEL *et al.* (2021).



▲ FIGURE 42. Une tentative de synthèse comparative de la terminologie variable utilisée pour les couches supérieures de la Terre. Original 2022.

C. Une application des propriétés sismiques à la compréhension fine de l'organisation des niveaux géologiques

1. Une mise en évidence d'hétérogénéités dans le manteau par l'étude des anomalies de vitesses des ondes sismiques : la tomographie sismique

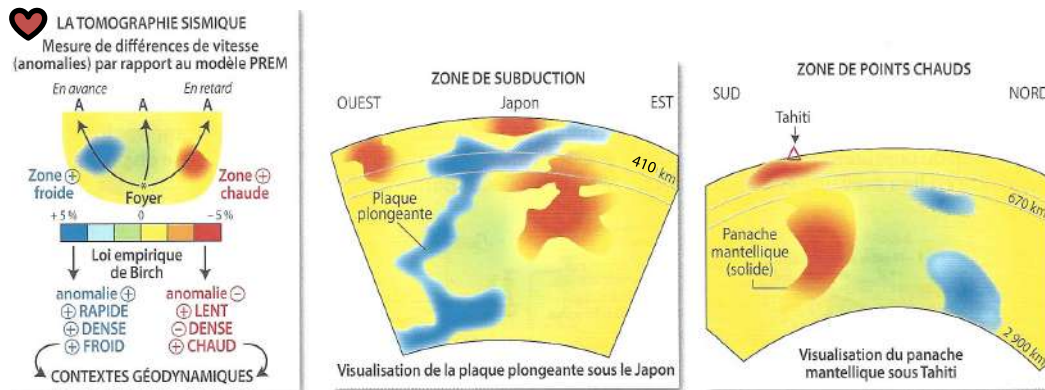
Voir le TD BC (Structure et dynamique du globe) et le chapitre 22 (Dynamique des enveloppes terrestres) pour des exemples concrets.

- La **tomographie sismique** (figures) est une **cartographie en deux ou trois dimensions des anomalies* de propagations des vitesses d'ondes sismiques dans le globe, principalement dans la croûte et surtout le manteau**.
- Les **anomalies* de vitesses des ondes sismiques** sont des **écarts entre la vitesse effectivement calculée (à partir de nombreux séismes) en un point donné et la vitesse moyenne des ondes attendue à la profondeur considérée (soit la vitesse du modèle PREM)**.

*** Très important : la notion d'anomalie en géologie**

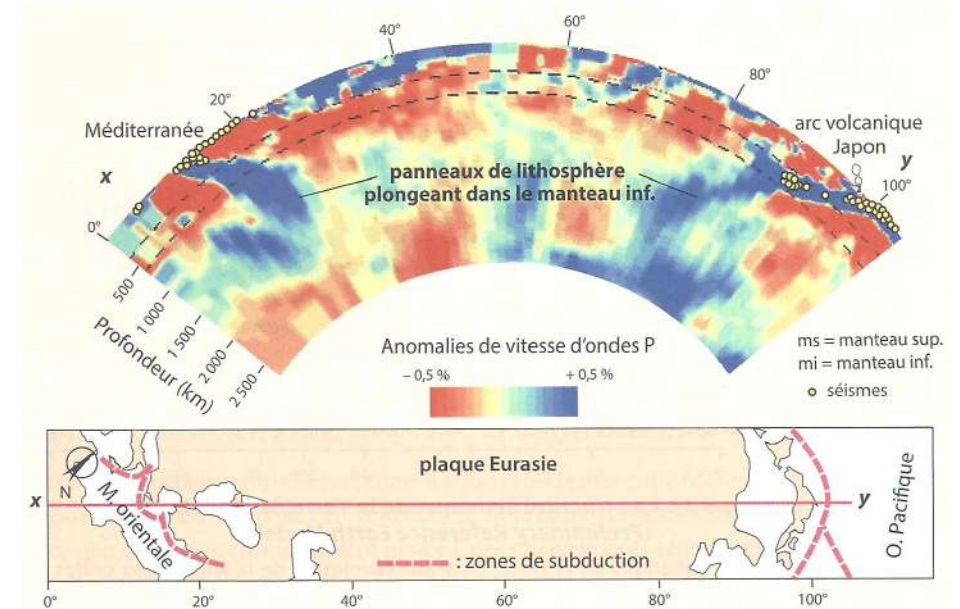
En géologie, une **anomalie** est un écart, pour un paramètre géologique, entre une valeur effectivement mesurée (éventuellement corrigée) et une valeur théorique attendue.

- On applique alors, dans l'interprétation, la **loi empirique de BIRCH** qui stipule que la **vitesse des ondes sismiques dépend de la densité des roches**. $v = A + B \rho$ où A et B sont des constantes.
- Et l'on considère que la **densité** est, elle, reliée la **température** et donc qu'un **écart à la densité attendue** dans une zone est un **écart de température** par rapport à la température moyenne des matériaux à la même profondeur.

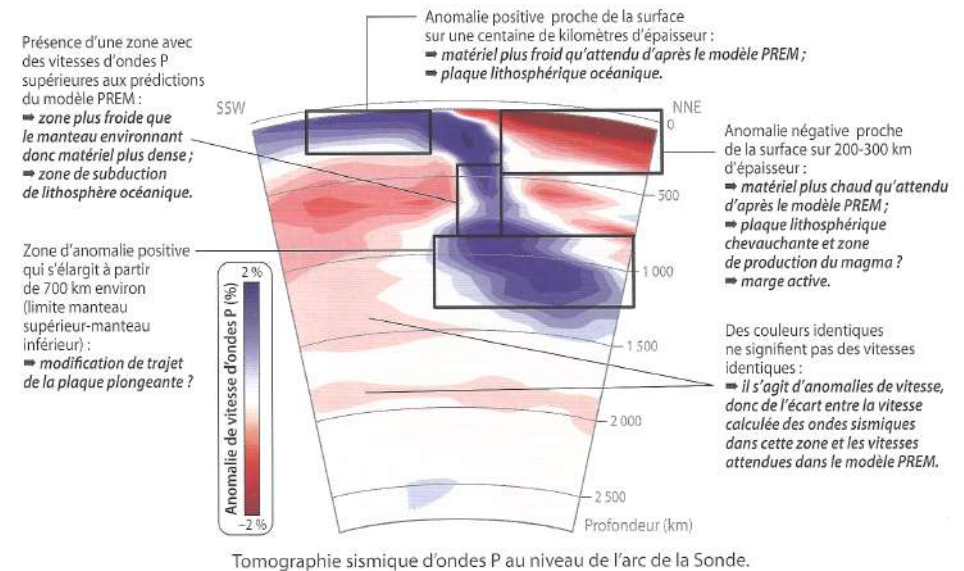


▲ FIGURE 43. **Principe de la tomographie sismique.** D'après BORDI, SAINTPIERRE *et al.* (2021).

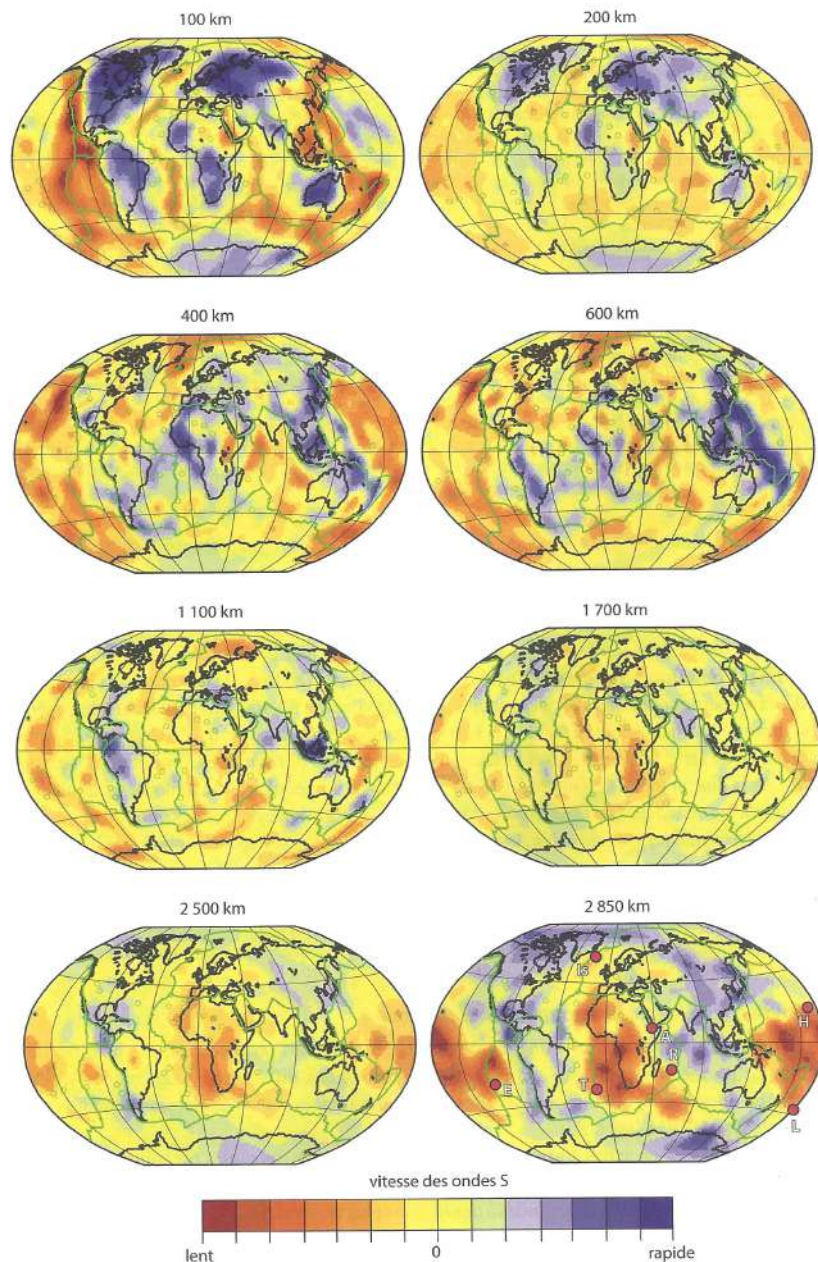
- En clair, on considère le plus souvent que :
 - Le **ralentissement** des ondes (par rapport au modèle) indique du **matériel plus chaud (moins dense)** que ne l'est en moyenne le matériel à cette profondeur ;
 - L'**accélération** des ondes (par rapport au modèle) indique du **matériel plus froid (plus dense)** que ne l'est en moyenne le matériel à cette profondeur.



▲ FIGURE 44. **Coupe au niveau de la plaque eurasiennne en tomographie sismique.**
D'après RENARD *et al.* (2018).



▲ FIGURE 45. **Un autre profil de tomographie sismique, ici interprété.**
D'après BORDI, SAINTPIERRE *et al.* (2021).



▲ FIGURE 46. Tomographie sismique du manteau, ici horizontale, à diverses profondeurs.
D'après RENARD *et al.* (2018).

2. Une mise en évidence de l'organisation des couches géologiques par des ondes sismiques artificielles : la sismique

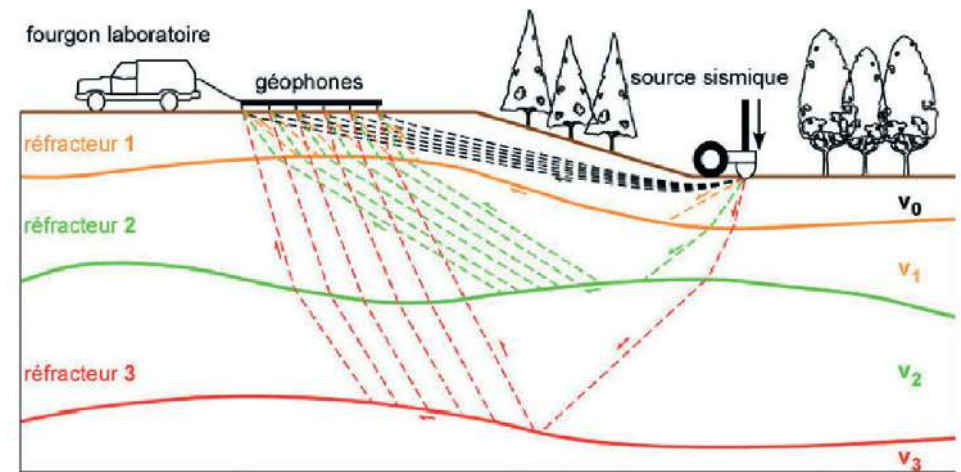
a. Une méthode de prospection géophysique basée sur l'émission et la réception d'ondes sismiques artificielles pour reconstituer l'organisation de terrains géologiques

- On appelle **sismique**, ou **imagerie sismique**, ou **prospection sismique** une **technique de génération et d'enregistrement d'ondes sismiques artificielles** visant à reconstituer l'organisation géométrique des couches composant un terrain géologique.

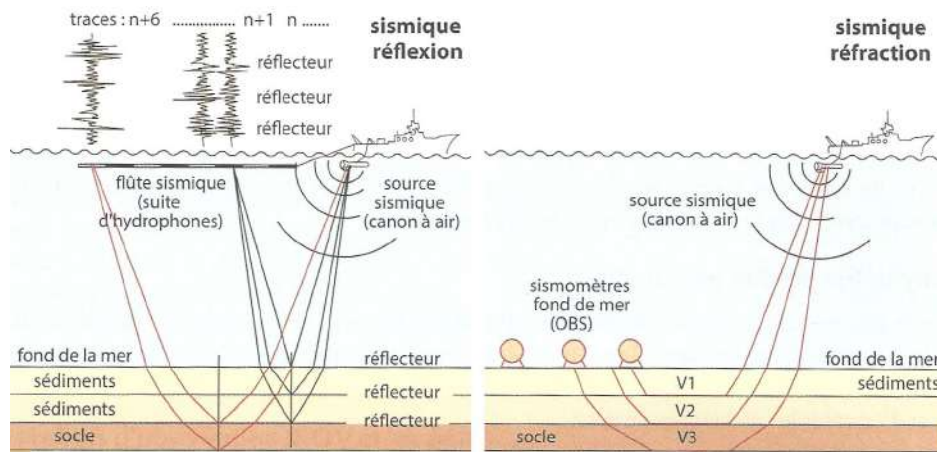
Ne pas confondre la sismologie et la sismique !

Bien sur l'adjectif de ce qui **se rapporte à un séisme** soit « **sismique** », **la sismique** est bien une **technique géophysique basée sur la propagation d'ondes générées artificiellement**, alors que **la sismologie** est l'investigation des séismes naturels et de la propagation des ondes qu'il génère.

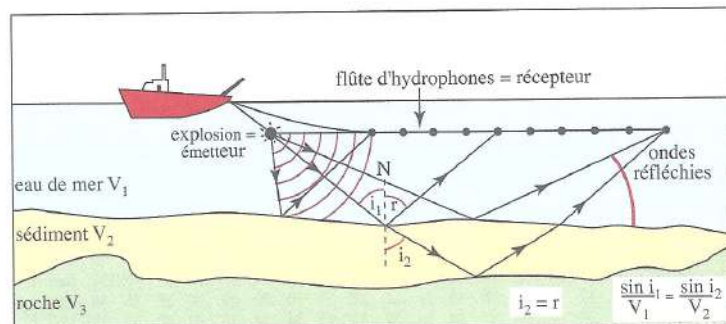
- Ces **techniques** peuvent être mises en œuvre en **domaine continental** (figure 47) ou **océanique** (figure 48).
- Les **ondes** sont émises par :
 - Un **camion vibreur** (figure 49), ou des **explosions de petite charge**, pour la prospection en domaine **océanique** en **domaine continental**
 - Des **explosions** générées par un **canon à air** embarqué dans un **bateau** pour la prospection en **domaine océanique** (figure 48).
- La **réception des ondes réfléchies** ou **réfractées** est opérée par des **capteurs**, soit **embarqués sur le bateau** et **souvent trainés dans l'eau à sa suite, voire parfois sous associés à une bouée (hydrophones)** (figure 48), soit **posés à même le sol / sur le fond océanique** (figure 48), ou bien **trainés par un camion récepteur** (figure 47) (**géophones**).



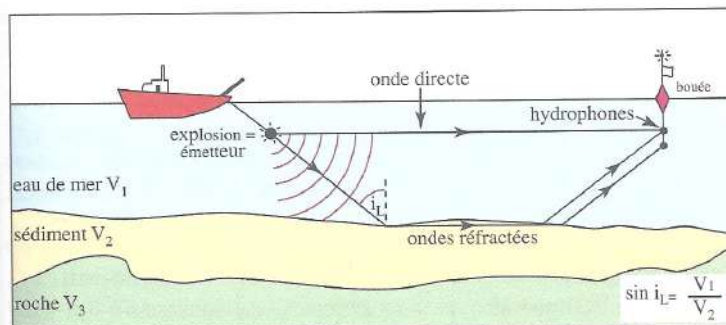
▲ FIGURE 47. Sismique en domaine continental.
D'après CORBOZ & FREI (2013).



▲ FIGURE 49. Un camion vibreur. <https://www.lemoniteur.fr/article/des-camions-vibreurs-echographient-la-ville-de-strasbourg.812829> (consultation janvier 2022)



Principe de la sismique réflexion



Principe de la sismique réfraction.

▲ FIGURE 48. Sismique réflexion et réfraction en domaine océanique. D'après RENARD *et al.* (2018) et CARON *et al.* (2003).

- Les ondes enregistrées sont **réfléchies** ou **réfractées** sur des **discontinuités dans l'agencement des terrains** qu'on appelle **réflecteurs** ou **réfracteurs** respectivement. Il y a ensuite **traitement** (jadis **manuel**, aujourd'hui **informatique**). Les vitesses de retour des ondes sismiques sont estimées en **temps double**, c'est-à-dire **comptant l'aller depuis l'émetteur et le retour jusqu'au capteur**.
- Les **enregistrements produits par la sismique** sont appelés **profils sismiques**.

b. La sismique réflexion : l'usage de la réflexion d'ondes sismiques pour reconstituer la disposition globale des terrains jusqu'à 50 km

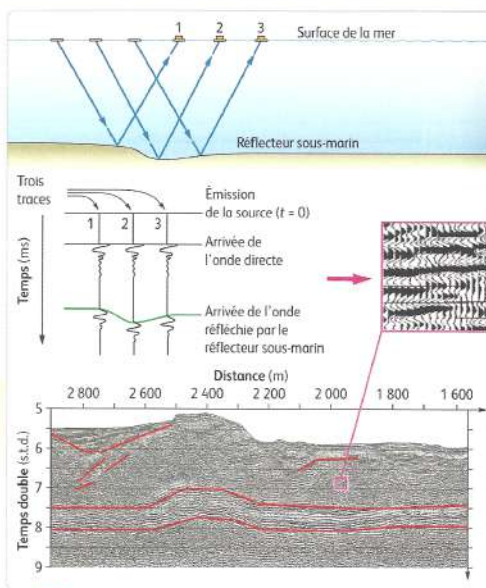
- La **sismique réflexion** est **fondée sur la réception d'ondes sismiques réfléchies par des réflecteurs** (figure 50).
- Elle se décline selon **différentes approches** qui permettent aussi bien de reconstituer la **stratification de dépôts sédimentaires superficiels** (généralement sur **quelques km**) (figure 51), beaucoup utilisée en **prospection pétrolière** ou **gazière**, que de comprendre l'**organisation plus profonde de la géométrie de terrains** pouvant aller jusqu'à 50 km de profondeur.
- Pour ce deuxième point, on peut citer l'exemple de la **campagne ECORS** (**Étude de la Croûte continentale et océanique par Réflexion sismique**), une **grande campagne de prospection sismique des années 1980-1990** visant à **comprendre l'organisation géométrique profonde des terrains composant les grands massifs géologiques français**.



b Interprétation de la trace sismique enregistrée par un capteur.

Obtention du profil sismique

- Une fois traitées par des filtres mathématiques, les données obtenues pour un capteur (**document b**) sont juxtaposées avec celle des autres capteurs. On obtient ainsi un **profil sismique (document c)**.
- Ce profil montre des discontinuités, des réflecteurs d'ondes, mais ne correspond pas à une coupe géologique des structures.
- L'échelle horizontale est **en mètre ou kilomètre**. L'échelle verticale est en **temps double** : on mesure le temps d'aller et retour des ondes, c'est-à-dire la durée entre le moment de leur émission et le moment de leur enregistrement après leur réflexion et/ou leur réfraction sur une discontinuité.

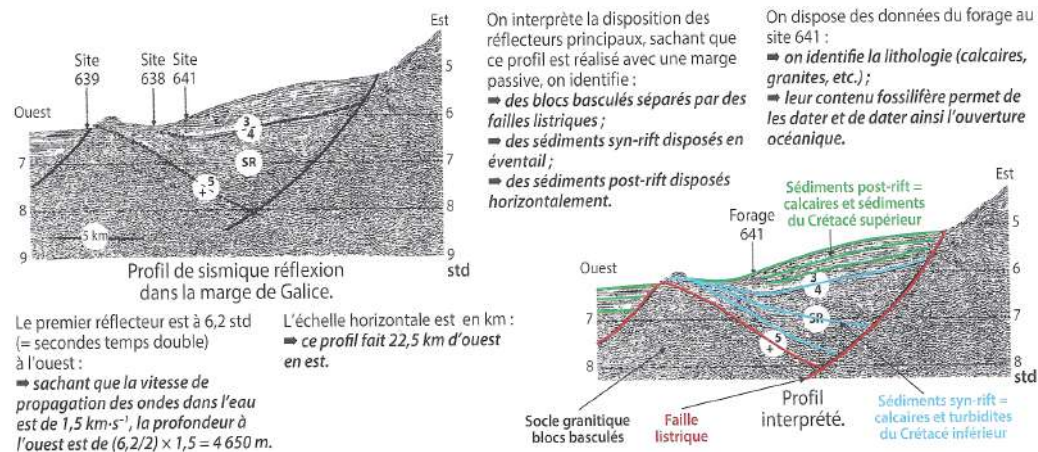


c Obtention du profil sismique. Les traits rouges indiquent les discontinuités. Pour distinguer des surfaces de réflecteur, il faut parfois regarder le profil de loin.

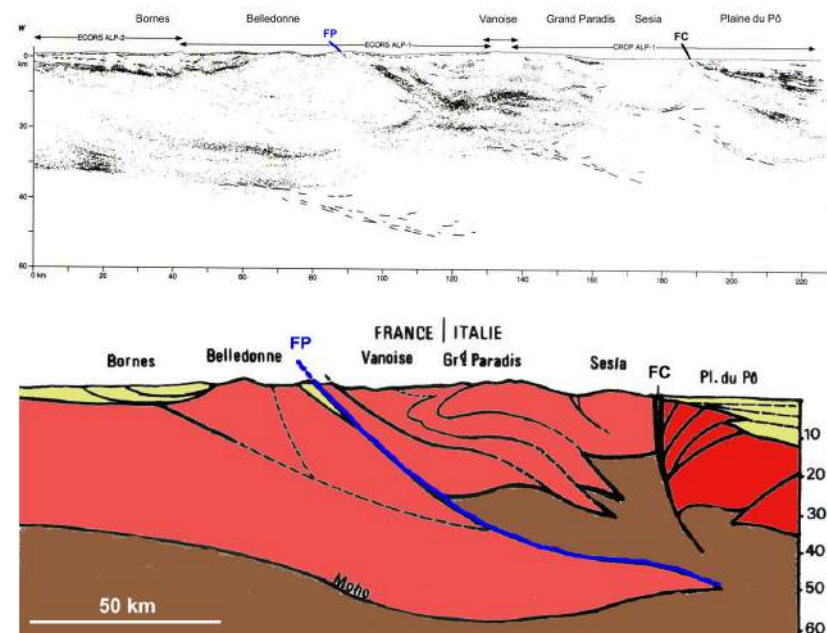
Interprétation des résultats

- À partir des profils sismiques et des résultats de forages qui permettent de déterminer la nature des roches du sous-sol, les géologues évaluent la vitesse des ondes dans les structures.
- La vitesse des ondes étant estimée, il est possible de déterminer la profondeur des discontinuités et de construire une image des structures en profondeur.

▲ FIGURE 50. Principes de la sismique réflexion.
D'après GUILLERME, JUBAULT *et al.* (2019).



▲ FIGURE 51. Un exemple de profil de marge passive interprétée (marge de Galice, à l'ouest de la Péninsule ibérique). D'après BORDI, SAINTPIERRE *et al.* (2021).



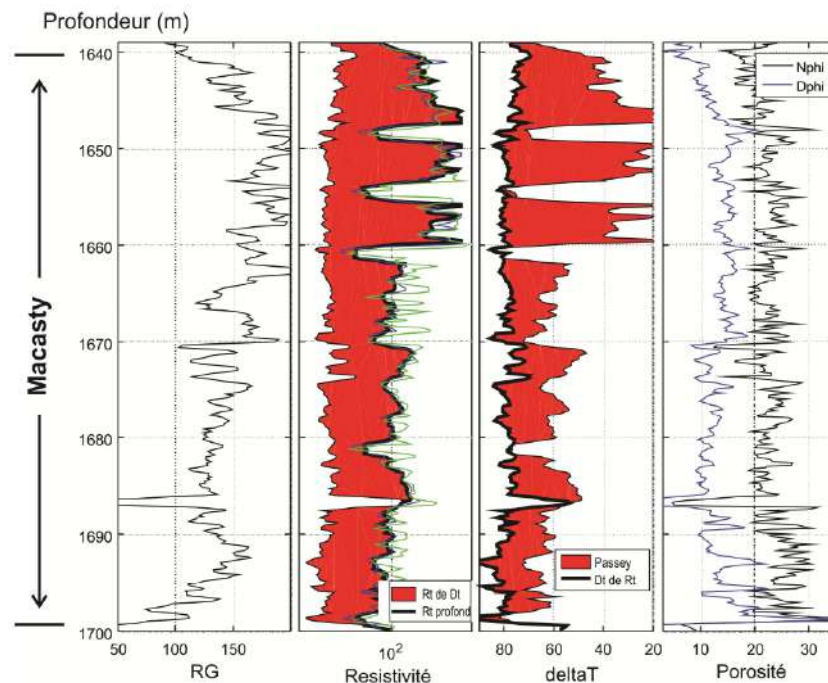
▲ FIGURE 52. Un profil ECORS-CROP ouest-est des Alpes et son interprétation.
© Lithothèque Académie Aix-Marseille (consultation janvier 2022)

c. La sismique réfraction : l'usage de la réfraction d'ondes sismiques pour reconstituer la disposition fine de couches sédimentaires sur quelques mètres à centaines de mètres

- La **sismique réfraction** est fondée sur la **réception d'ondes sismiques réfractées par des réfracteurs**. Elle permet de sonder surtout des **terrains sédimentaires** voire des **sols** sur **quelques m à centaines de m**.

3. Pour information : les diagraphies, enregistrements de paramètres physiques par des sondes au sein d'un forage

- Produire une **diagraphie** consiste à **faire passer dans un puits de forage une sonde mesurant un ou plusieurs paramètres physiques caractérisant les couches traversées**. Les **paramètres mesurés** peuvent être de **nature très variée** : la résistivité, la radioactivité, la constante diélectrique, la vitesse du son, la porosité, la densité...
- La **concomitance d'indices physiques** ainsi **mesurés** permet d'ingérer la **nature** et les **caractéristiques** des **roches traversées**.
- Très **utiles** et **riches d'enseignement**, les **diagraphies** sont néanmoins **limitées** en termes de **profondeur**, tant par le **sondage** que la **longueur des câbles**. Elles coûtent assez **cher**.



▲ FIGURE 53. Un enregistrement diagraphique [pour information]. D'après CHEN et al. (2016)
RG : rayonnement gamma. deltaT : temps de transit sonique.

D. L'origine de la structure terrestre

- L'organisation interne de la Terre s'explique par l'histoire précoce de notre planète et les modalités de sa formation.

1. Les météorites, des indices pour comprendre la formation de la Terre

a. Les météorites, fragments d'objets célestes pénétrant dans l'atmosphère et frappant la surface de la planète

- Les **météorites** sont des **fragments de corps célestes tombés sur une planète et ayant atteint sa surface**. Au niveau de la Terre, la **plupart** de ces corps sont **désintégrés** par **échauffement** lors de leur pénétration dans l'**atmosphère** (produisant des étoiles filantes) mais certains résidus **atteignent la surface** de notre planète.
- En entrant en **contact** avec la **surface** de la **planète**, les météorites produisent un **cratère d'impact**, **dépression plus ou moins circulaire résultant de la collision de la météorite avec la surface de la planète** (dont l'importance est fonction de la **vitesse d'arrivée** et de la **taille de la météorite**). On pourra parler d'**astroblème** pour désigner les **cratères d'impact anciens érodés mais rendus détectables par l'érosion**.

Notons que **les roches à la surface de la Terre qui subissent un impact météoritique connaissent une augmentation très importante et brutale des conditions de pression et de température** : on parle de **métamorphisme d'impact**. Ces roches sont ainsi profondément **transformées** et on les appelle **impactites**.

b. Les principales catégories de météorites : météorites pierreuses ou aérolithes (chondrites + achondrites) vs. météorites ferreuses ou sidérites

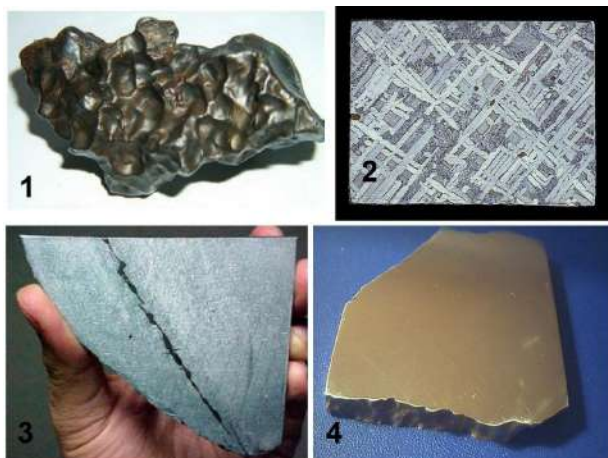
- On dénombre **deux catégories principales** de **météorites** (**tableau III**) :
 - les **météorites pierreuses** ou **aérolithes** qui **composées de silicates*** et **comprennent moins de 35 % de fer (94 % des météorites trouvées)** (**figure 55**).
(!) Le terme **aérolithe**, dans le **langage courant**, désigne **n'importe quel type de météorite**.
 - On y distingue :
 - les **chondrites** : **météorites silicatées avec une proportion variable de fer*** et **présentant des chondres**, **petites sphérules finement cristallisées surtout constitués de silicates** (**environ 85 % des météorites recensées**).
* de 3 à 35 % (en moyenne 7 à 15 %)
 - les **achondrites** : **météorites pauvres en fer et constituées de silicates (olivine et pyroxènes surtout)** (**environ 9 % des météorites recensées**). Elles ne présentent **pas de chondres**.
 - les **météorites ferreuses** ou **sidérites** qui sont **surtout composés de métaux, notamment du fer et du nickel (5 % des météorites trouvées)** (**figure 54**).

Remarque : il existe aussi des **météorites ferro-pierreuses** (**lithosidérites** ou **sidérolithes**) qui **comprennent des portions ferreuses et des portions silicatées en proportions semblables**. Ce type de météorite est très rare (environ 1 % des météorites rencontrées) et très prisé des collectionneurs.

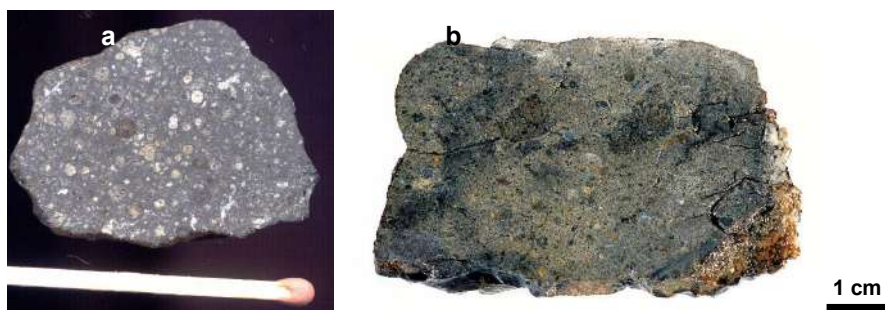
* **silicate** : **composé minéral à base de silicium** ; la plupart des minéraux des roches sont des silicates. Voir plus loin

▼ TABLEAU III. **Typologie des météorites**. Original 2011 (cours de Première S).

Aérolithes (93,6 %) (composés majoritairement de minéraux silicatés)	Chondrites (84,8 %)	Présence de chondres (faits d'olivine et/ou de pyroxène surtout)
	Achondrites (8,8 %)	Absence de chondres, structure souvent proche de roches magmatiques basiques à ultrabasiques terrestres (péridotites, basaltes...)
Sidérolithes (1,3 %)	Proportions analogues de minéraux silicatés et de fer nickélifère	
Sidériles (5,1 %)	Essentiellement constituées de fer et de nickel	



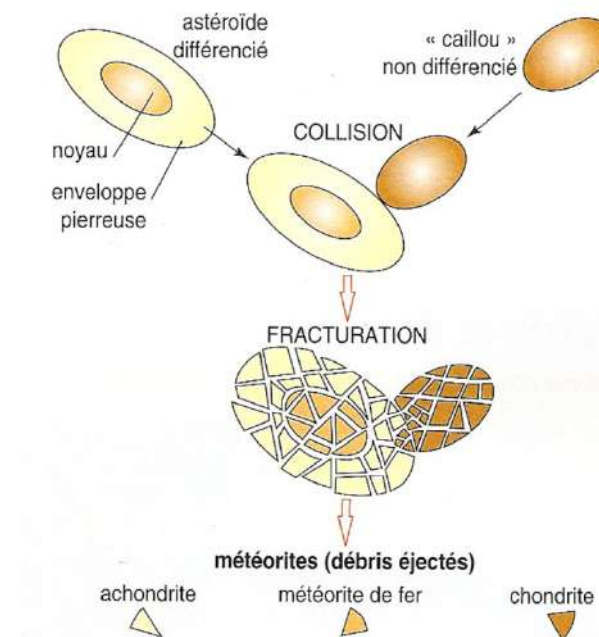
▲ FIGURE 54. **Météorites ferreuses = sidériles**. [Site Internet disparu : astronomy.meta.org, 2007]
1. Forme typique. 2. Sidérile montrant des **figures de WIDMANNSTÄTTEN** (cas de la plupart des sidériles) 3. Sidérile montrant des **lignes de NEUMANN** (fine striation). 4. Autre type de sidérile.



▲ FIGURE 55. **Météorites pierreuses = aérolithes**. a. **Chondrite carbonée** (Allende, Mexique).
Météorite : Ph. GILLET. Photographie : P. THOMAS. b. **Achondrite** de Lybie. Découverte en 2002 à Dar al Gani (Lybie centrale) (Université de Hambourg, Allemagne).

c. Origine des météorites

- On admet généralement que les **météorites** sont des **astéroïdes ou fragments d'astéroïdes (météoroïdes) entrés en collision avec la Terre**. Ces corps existent depuis la naissance du **Système solaire (figure 56)**.
- On considère que les **chondrites** sont les **représentants de corps inchangés depuis la formation du Système solaire**.
- D'autres **astéroïdes** (plus volumineux) ont vu **migrer leurs éléments lourds** vers leur **centre** et ont **accumulé les silicates (moins denses)** dans leur **périphérie** (les **éléments volatils** s'échappent **dans l'espace**) : cela forme respectivement les **météorites ferreuses** et les **achondrites** ; elles traduisent une **différenciation du corps d'origine**. Ce **modèle de formation des météorites** est généralement extrapolé à la formation de la Terre (**point 2.**)



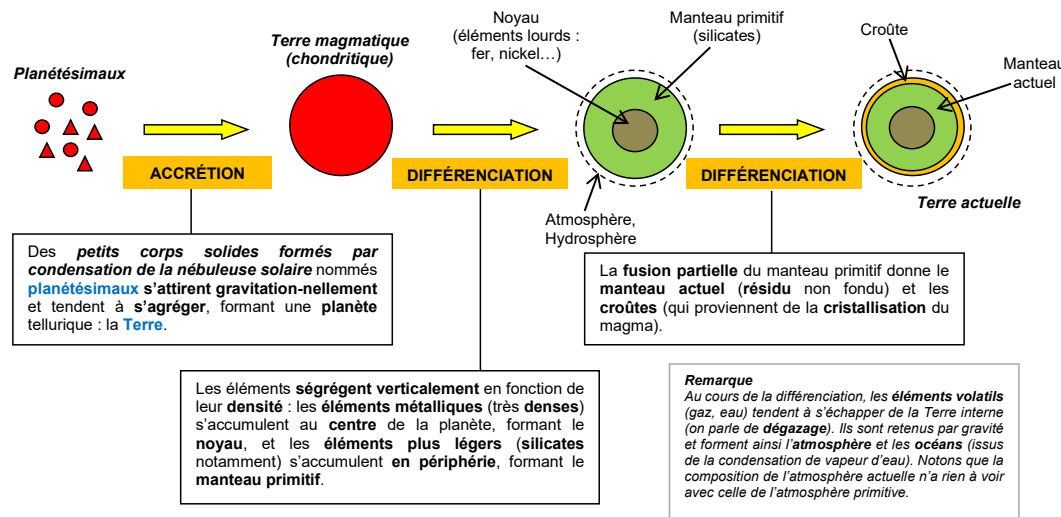
▲ FIGURE 56. **Origine des météorites**. D'après LIZEAUX, BAUDE et al. (2007)

2. Origine de la structure interne du globe : accréation et différenciation de la Terre

- Les **étapes de formation de la Terre** sont synthétisées à la figure 57 dans une version **extrêmement simplifiée**.

a. Origine des planétésimaux

- La **Terre** s'est formée il y a **environ 4,5 milliards d'années** lors de la **formation du Système solaire** qui **résulte de la condensation gravitationnelle d'une nébuleuse (ensemble de poussières et de gaz)**. Cette condensation a abouti localement à la **formation de petits corps protoplanétaires** nommés **planétésimaux**.



▲ FIGURE 57. Origine de la structure de la Terre. Original 2011 (cours de Première S)

b. Accrétion des planétésimaux

- À partir d'une certaine masse, les planétésimaux attirent gravitationnellement tous les corps qui les approchent, c'est ainsi qu'ils croissent de plus en plus jusqu'à former une planète ; c'est l'accrétion.

Le modèle ici présenté est celui de l'accrétion homogène (accrétion de planétésimaux de composition chondritique). Le modèle de l'accrétion hétérogène (accrétion de planétésimaux ferreux, puis de planétésimaux silicatés) est très rarement défendu aujourd'hui.

- Cette accrétion cesse quand la Terre a quasiment « nettoyé » son voisinage, c'est-à-dire attiré la quasi-totalité des corps alentour. La planète ainsi obtenue, très chaude et riche en magma, est nommée Terre magmatique (sa température y est en effet très élevée, à cause du bombardement par les planétésimaux). Cette opération se réalise probablement en quelques dizaines de millions d'années.

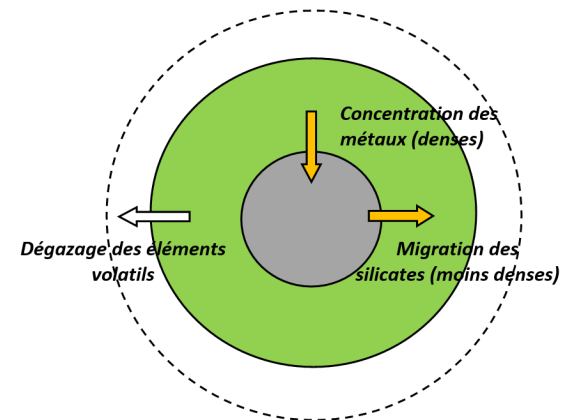
c. Différenciation des enveloppes terrestres

- Rapidement, en moins de 100 millions d'années, la Terre voit s'individualiser deux grandes enveloppes : le noyau qui concentre les éléments métalliques (surtout le fer et le nickel), très denses, et le manteau où s'accumulent notamment les silicates, moins denses que les éléments lourds. Il y a donc ségrégation* verticale des éléments chimiques selon leur densité. Cette étape porte le nom de différenciation (figure 58).

* ségrégation = séparation et migration de corps ou éléments auparavant rassemblés

- La différenciation se poursuit par la fusion partielle du manteau primitif. Le résidu qui n'a pas fondu donne le manteau actuel et le magma cristallisé donne la croûte. La croûte primitive, probablement de type continental, a dû être achevée vers 2 Ga.

- Il est à noter que la différenciation s'accompagne d'un dégazage des éléments volatils contenus dans la Terre interne. Retenus par l'attraction gravitationnelle de la planète, ces gaz forment l'atmosphère et l'hydrosphère.



▲ FIGURE 57bis. Principe de la différenciation. Original 2011 (cours de Première S)

II. La composition des couches de la Terre solide (géosphère)

- Les **discontinuités** observées dans le **modèle radial de la Terre** ne sont pas que des **discontinuités physiques**, ce sont aussi des **discontinuités chimiques** qui correspondent à des **changements de matériaux**. Quels sont les roches, minéraux et éléments chimiques composant les couches du globe ?

A. L'étude des matériaux des terrestres

- On s'intéresse ici aux diverses **approches** qui ont permis de **comprendre** la **composition des couches terrestres**, y compris les plus **profondes non accessibles** à l'observation.

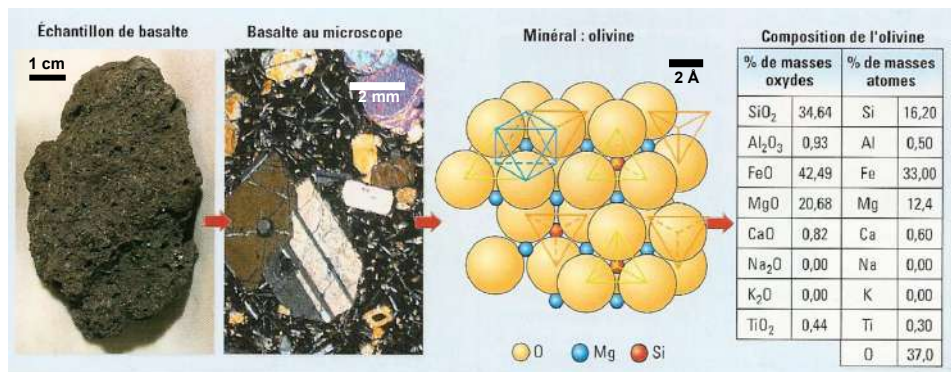
1. Les notions d'élément chimique, minéral et roche

Revoir le TP A2 (Roches) + figure 58

- On appelle **élément chimique** l'**ensemble des atomes (et ions) possédant le même numéro atomique, c'est-à-dire le même nombre de protons**.
- Un **minéral** (**encadré B**) est un **constituant des matériaux terrestres correspondant à une formule chimique donnée et se présentant le plus souvent sous la forme d'un solide cristallin dont un même motif périodique de base (la maille) se répète dans toutes les directions de l'espace**.
- Une **roche** est un **ensemble naturel et relativement homogène de minéraux (et/ou de morceaux de roches)**.

Certaines roches peuvent contenir des fossiles (restes d'êtres vivants).

Remarque : l'étude des roches s'appelle **pétrologie**. La partie descriptive (notamment microscopique) de la pétrologie s'appelle **pétrographie**.



▲ FIGURE 58. **Roches, minéraux et éléments chimiques**. D'après Duco et al. (2001)

2. Les principaux éléments et minéraux du globe

- La **composition chimique des enveloppes de la Terre** est dominée par un **nombre limité d'éléments** dits **majeurs** : **silicium Si, oxygène O, magnésium Mg, fer Fe, calcium Ca, sodium Na, potassium K, aluminium Al et titane Ti** (tableaux IV-V et figure 59). Ces éléments forment **98 % de la masse des enveloppes** l'échantillonnables.

Encadré B Minéralogie et minéraux : un panorama

Pour information – d'après CARON et al. (2003)

Les minéraux sont les constituants de base des roches, de la même manière qu'en Biologie les cellules constituent les tissus. Ils résultent de l'assemblage par différents types de liaisons, d'atomes ou d'ions agencés pour la plupart en édifices géométriques périodiques : les cristaux. Leur étude se situe au carrefour des Sciences de la Terre et de la Physique des matériaux.

Dans les minéraux, les liaisons entre atomes peuvent être de quatre types : ionique, covalente, métallique ou par forces de Van der Waals. Généralement, ces quatre types coexistent, mais l'un ou l'autre peut prédominer selon les minéraux.

CRISTALLOCHIMIE

Les liaisons entre atomes

Type de liaison	IONIQUE	COVALENTE	METALLIQUE	VAN DER WAALS
Nature	Attraction électrostatique entre des ions de charge différente	Mise en commun d'une paire d'électrons	Mise en commun d'électrons libres	Liaisons faibles entre atomes neutres
Propriétés structurales	Non dirigée, coordination élevée entre les ions, structure dense	Liaison dirigée entre atomes, coordination faible, structure peu dense	Non dirigée, coordination très élevée, structure très dense	Mêmes propriétés que la liaison métallique
Propriétés mécaniques	Liaison forte	Liaison forte	Liaison variable	Liaison faible
Propriétés thermiques	Température de fusion assez élevée. A l'état fondu, ions	Température de fusion élevée. A l'état fondu, molécules	Température de fusion variable	Température de fusion basse
Propriétés électriques	Isolants moyens	Isolants	Conducteurs	Isolants
Exemples	Halite : NaCl	Diamant : C	Sodium métal : Na	Gaz rares condensés : He

Les polyèdres de coordination

Dans un édifice cristallin, les ions peuvent être assimilés à des sphères qui se touchent. Le nombre d'anions pouvant entourer un cation central définit la coordination ou coordinance de ce cation. Elle dépend du rapport des rayons du cation et des anions qui l'entourent (un gros cation central pourra être entouré par plusieurs petits anions, mais un petit cation n'aura autour de lui que peu de gros anions).

Rayons ioniques de quelques ions courants et coordinances les plus communes :

Cations	Rayon ionique (en Å)	Coordinance	Anions	Rayon ionique (en Å)
Si ⁴⁺	0,40	IV	O ²⁻	1,40
Al ³⁺	0,49	IV	OH ⁻	1,40
	0,51	VI	F ⁻	1,36
Fe ³⁺	0,64	VI	Cl ⁻	1,81
Mg ²⁺	0,66	VI		
Fe ²⁺	0,74	VI		
Na ⁺	0,97	VI		
Ca ²⁺	0,99	VI		
	1,03	VIII		
K ⁺	1,33	VI		
	1,42	X		

Les polymorphes

Une même composition chimique globale peut donner lieu à la formation d'édifices cristallins différents. Ce sont alors essentiellement les conditions de pression et de température qui entraînent la cristallisation de l'un ou l'autre de ces polymorphes. L'exemple le plus connu est celui des silicates d'alumine, de formule globale Al₂SiO₅. En fonction des conditions de pression et de température, Al peut avoir la coordinance IV et se trouver alors au centre de tétraèdres (Al^{IV}) ou posséder la coordinance VI et occuper le centre d'octaèdres (Al^{VI}). Les principales propriétés de ces polymorphes seront alors différentes.

Les quatre arrangements tridimensionnels (polyèdres de coordination) les plus fréquents dans les minéraux sont les suivants :

Polyèdre	Coordination de l'ion	Rapport optimal des rayons
Tétraèdre	IV	0,225
Octaèdre	VI	0,414
Cube	VIII	0,732
Cubooctaèdre	XII	1,0

	Formule structurale	Système cristallin	Densité
Andalousite	Al ^{IV} Al ^{VI} O(SiO ₃)	Orthorhombique	3,1
Sillimanite	Al ^{IV} Al ^{VI} O(SiO ₃)	Orthorhombique	3,25
Disthène	Al ^{IV} Al ^{VI} O(SiO ₃)	Triclinique	3,6

LES SILICATES

O et Si sont les éléments les plus abondants de la croûte et du manteau. Ils s'associent pour former des édifices dans lesquels Si est entouré de 4 O, le tétraèdre $[\text{SiO}_4]^{4-}$.

NÉOSILICATES

Tétraèdres isolés
 $[\text{SiO}_4]$



Péridots

Forstérite	Mg_2SiO_4	O	Mag bas
Fayalite	Fe_2SiO_4	O	et ultrabas

Silicates d'alumine

Andalousite		O	Met
Sillimanite	Al_2SiO_5	O	Met
Disthène		T	Met

Staurolite	$(\text{Al}_2\text{OSiO}_3)_2\text{Fe}(\text{OH})_2$	M	Met
Chloritoïde	$(\text{Fe,Mg})_2\text{Al}_2\text{Si}_2(\text{SiO}_3)_2(\text{OH})$		Met
Grenats	$\text{R}^{3+}_2\text{R}^{2+}_2[\text{SiO}_4]_3$	C	Mct, Mag ultrabas

où $\text{R}^{2+} = \text{Fe}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Mn}^{2+}, \text{Ca}^{2+}$
 $\text{R}^{3+} = \text{Fe}^{3+}, \text{Al}^{3+}, \text{Cr}^{3+}$

SOROSILICATES

Tétraèdres groupés par deux $[\text{Si}_2\text{O}_7]^{6-}$



Épidote	$\text{R}^{2+}\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})$		
Pistachite	$\text{R}^{2+} = \text{Fe}^{2+}$	M	Met
Zoisite	$\text{R}^{2+} = \text{Al}^{3+}$	O	Met
Clinozoisite		M	Met

Lawsonite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	O	Met
Pumpellyite	$[\text{Al,Fe}^{2+},\text{Ti}]_2\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe}^{2+})_2[\text{SiO}_3]_4(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	M	Met

CYCLOSILICATES

Tétraèdres en anneaux de 3, 4, 6 ou plus.



Cordiérite	$(\text{Fe,Mg})_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$	O	Met, Mag
Tourmaline	$\text{Na}(\text{Mg,Fe,Mn})_3\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{18}$	R	Met, Mag
	$(\text{BO}_3)_3(\text{OH,F})_4$		
Beryl	$\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_6)_3$	H	Mag, Met

INOSILICATES

Tétraèdres en chaînes

Pyroxènes

Chaîne simple de tétraèdres $[\text{SiO}_3]^{2-}$

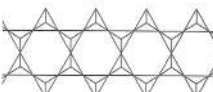


Orthopyroxènes			
Enstatite	$\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$		
Hypersthènes	composition intermédiaire		
Orthoferrosilite	$\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_6$	O	Mag, Met

Clinopyroxènes			
Diopside	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$		
Augites	composition intermédiaire		
Hedenbergite	$\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$		
Aegyrine	$\text{NaFeSi}_2\text{O}_6$		
Jadéite	$\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$	M	Mag, Met

Amphiboles

Chaîne double de tétraèdres période 2 : $[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{6-}$



Anthophyllite	$(\text{Mg,Fe})_4(\text{Si}_4\text{O}_{11})_2(\text{OH})_2$	O	Mag
Trémolite	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})_2(\text{OH})_2$	M	

Hornblendes	$\text{NaCa}_3(\text{Mg,Fe}^{2+})_4(\text{Al,Fe}^{3+})_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{11})_2(\text{OH})_2$	O	Met, Mag
Glaucophane	$\text{Na}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	O	Met, Mag
Riébeckite	$\text{Na}_2\text{Fe}_3\text{Fe}_2\text{Si}_4\text{O}_{22}(\text{OH,F})_2$	O	Met, Mag

PHYLLOSILICATES

Tétraèdres en couches

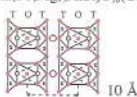
Pyrophyllite	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	M	Met
Talc	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	M	Met



T = Tétraèdre
O = Octaèdre

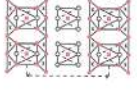
Micas

Muscovites	$\text{KAl}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	M	Met, Mag
Biotites	$\text{K}(\text{Fe,Mg})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$		



Chlorites

	$(\text{Mg,Fe,Al})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{Mg}(\text{OH})_2$	M	Mag, Met
--	---	---	----------

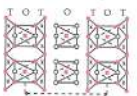


Argiles

Kaolinite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	M	Sed
-----------	---	---	-----



Illites	$\text{K}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_2$	M	Sed
Montmorillonites	$\text{Al}_{1-3}\text{R}_x\text{Si}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_2(\text{Na,Ca,Mg,K})_x \cdot n\text{H}_2\text{O}$		
Vermiculites	$\text{Al}_2(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_2(\text{Mg,Ca})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$		



Serpentines	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	M-O	Mag
-------------	---	-----	-----

TECTOSILICATES

Tous les tétraèdres sont liés à d'autres tétraèdres

Quartz	SiO_2	O-H	Mag, Met, Sed
Tridymite		H	Mag
Cristobalite		C	Mag, Met

Feldspaths

Feldspaths alcalins			
Orthose	KAlSi_3O_8	T	Mag, Met, Sed
Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	T	

Plagioclases			
Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	T	Mag, Met, Sed
Anorthite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	T	Mag, Met

Feldspathoides

Néphéline	$\text{Na}_4\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{16}$	H	Mag
Leucite	$\text{KAISi}_4\text{O}_{12}$	H	Mag

Zéolites

Laumontite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	O-M-C	Mag, Met, Sed
Analcime	$\text{NaSi}_2\text{AlO}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$	C	Mag

LES NON-SILICATES

CARBONATES

Calcite	CaCO_3	R	Sed, Met
Aragonite	CaCO_3	O	Sed
Dolomite	$\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)_2$	R	Sed, Met
Magnésite	MgCO_3	R	Sed
Sidérite	FeCO_3	R	Sed, Met
Smithsonite	ZnCO_3	R	
Cérusite	PbCO_3	O	

SULFATES

Gypse	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	M	Sed
Anhydrite	CaSO_4	O	
Barytine	BaSO_4	O	

PHOSPHATES

Apatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH,F,Cl})$	H	Mag, Met
Autunite	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Q	
Chalcolite	$\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	Q	
Monazite	$(\text{Ce, La, Th}) \text{PO}_4$	M	

SULFURES

Pyrite	FeS_2	C	
Marcassite		O	
Chalcopryrite	CuFeS_2	Q	
Molybdénite	MoS_2	H	
Mispickel	Fe AS S	O	
Galène	PbS	C	
Blende	ZnS	C	

TUNGSTATES

Wolframite	$(\text{Fe,Mn})\text{WO}_4$	M	
Scheelite	CaWO_4	Q	

OXYDES ET HYDROXYDES

Spinelles			
Magnétite	$\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$		
Chromite	$\text{Fe}^{3+}\text{Cr}^{3+}_2\text{O}_4$	C	Met, Mag
Spinelle s.s	MgAl_2O_4		

Hématite	Fe_2O_3	R	Sed
Goethite	$\text{FeO}(\text{OH})$	O	Sed
Iménite	FeTiO_3	R	Mag
Rutile	TiO_2	Q	Mag
Uraninite	UO_2	C	
Cassitérite	SnO_2	Q	
Corindon	Al_2O_3	R	
Gibbsite	$\text{Al}(\text{OH})_3$	M	

HALOGÉNURES

Chlorures			
Halite	NaCl	C	
Sylvite	KCl	C	

Fluorures

Fluorite	CaF_2	C	
----------	----------------	---	--

ÉLÉMENTS NATIFS

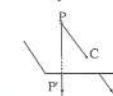
Or	Au	C	
Argent	Ag	C	

LES 7 SYSTÈMES CRISTALLINS

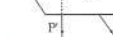
Tous les minéraux cristallisent dans 7 systèmes cristallins caractérisés par leurs éléments de symétrie : centre, plans et axes.



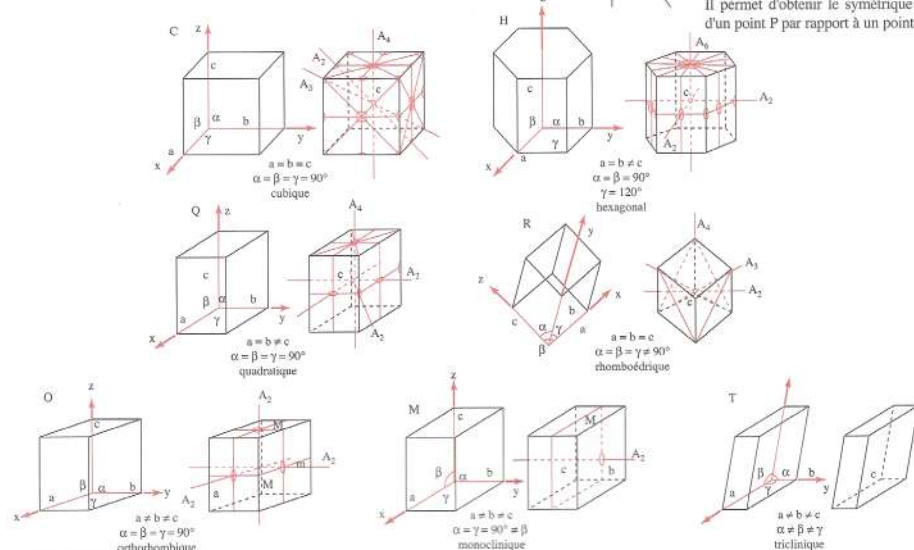
Axe de symétrie directe (A).
Ils permettent d'obtenir l'image d'un objet après une rotation de 180° (A_2), 120° (A_3), 90° (A_4), 60° (A_6).



Plan de symétrie (M).
Il permet d'obtenir le symétrique P' d'un point P par rapport à un plan.



Centre de symétrie (C).
Il permet d'obtenir le symétrique P'' d'un point P par rapport à un point.



Remarques : Dans la classification des roches :

Met = métamorphiques; Mag = magmatiques; Sed = sédimentaires; bas = basiques; ultrabas = ultrabassiques.

Les 7 systèmes cristallins dans lesquels cristallisent tous les minéraux sont :

C = cubique; H = hexagonal; Q = quadratique; R = rhomboédrique; O = orthorhombique; M = monoclinique; T = triclinique.

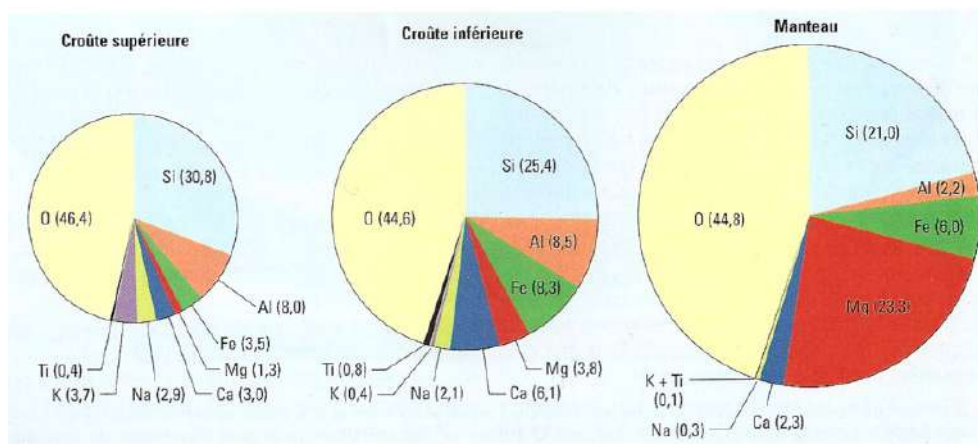
Remarque : on donne le plus souvent la **composition d'une roche** ou d'un **minéral** en **pourcentage massique d'oxydes**, c'est-à-dire qu'on **répartit l'élément oxygène avec les autres éléments chimiques en présence**.

▼ **TABLEAU IV. Quelques compositions de roches continentales et océaniques.**
D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2007)

	O	Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K
Granite	47,40	32,67	7,61	2,23	0,49	1,41	2,40	4,11
Granodiorite	47,17	31,21	8,29	2,94	0,95	2,54	2,85	2,55
Diorite ou andésite	45,21	26,83	8,79	4,93	2,53	4,79	3,26	1,66
Basalte ou gabbro	43,53	23,72	7,45	8,35	3,82	7,44	1,65	0,68

▼ **TABLEAU V. Compositions chimiques comparées de la croûte et du manteau.**
D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2007)

oxydes (%)	croûte continentale	croûte océanique	manteau
SiO ₂	60	50	43 à 48
Al ₂ O ₃	15,6	17,3	3 à 3,9
FeO	4	7	13 à 9,3
MgO	3,6	7,3	31 à 38
CaO	5	12	2,3 à 3,7
Na ₂ O	4	3	1,1 à 1,8
K ₂ O	3,2	0,2	0,13

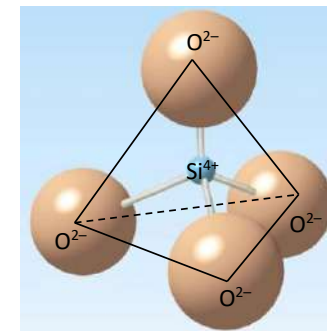


▲ **FIGURE 59. Composition chimique de la lithosphère continentale.** D'après DUCCO *et al.* (2001)

▼ **TABLEAU VI. Principaux minéraux composant la lithosphère, et formules chimiques correspondantes.** D'après NOUGIER (2000b)

Croûte continentale	Quartz	SiO ₂
	Feldspath orthose	(Si ₃ AlO ₈)K
	Feldspaths plagioclases	$\left\{ \begin{matrix} (Si_3 AlO_8) Na \\ (Si_2 Al_2 O_8) Ca \end{matrix} \right.$
(d = 2,7)		
Croûte océanique	Feldspaths plagioclases	$\left\{ \begin{matrix} (Si_3 Al O_8) Na \\ (Si_2 Al_2 O_8) Ca \end{matrix} \right.$
	Pyroxènes	$\left\{ \begin{matrix} (Si O_3) Fe, Mg \\ (Si O_3) Ca, Mg \end{matrix} \right.$
(d = 2,9)		
Manteau supérieur	Olivine	(Si O ₄) (Fe, Mg) ₂
(d = 3,3)		

- Les **principaux minéraux** qui hébergent ces **éléments** sont des **silicates**. Les **silicates** sont fondamentalement **constitués d'un assemblage tridimensionnel d'oxyde de silicium, généralement du tétraoxyde de silicium SiO₄⁴⁻ qui forme le tétraèdre de coordination des silicates** (figure 60).
- La **diversité des silicates** (**encadré B**) est issue de la **diversité des modalités d'agencement spatial des tétraèdres** et de la **nature des ions piégés** dans le réseau cristallin.



♥ **▲ FIGURE 60. Tétraèdre de coordination des silicates.** Adapté d'un site internet disparu (2007).

- Les **principaux silicates** entrant dans la **composition des roches** de la **croûte** et du **manteau** sont : **olivines, pyroxènes, feldspaths, quartz, amphiboles et micas**. (revoir TP A2).

3. Méthodes d'étude des constituants terrestres

a. Méthodes directes : échantillonnage, observation en submersible, enclaves, forages...

- Les **méthodes directes** d'étude des **constituants terrestres** reposent sur l'**échantillonnage**. Seuls les **matériaux de la croûte** sont **observables** à la **surface** de la **Terre**.
- Des **études en submersible** peuvent permettre d'**observer** la **croûte océanique**.
- Quant au **manteau supérieur** ou aux **parties inférieures de la croûte**, on peut en trouver des **morceaux emprisonnés dans les laves de volcans** ; ces morceaux nommés **enclaves** sont **arrachés** et **piégés** lors de l'**ascension des magmas**.
- Les **forages** permettent d'**extraire des roches jusqu'à des profondeurs limitées (guère plus de 10 km)** ; ils peuvent être considérés comme une **forme d'échantillonnage**, ou bien comme une **méthode indirecte**.

Les **forages les plus profonds** qui ont eu lieu sont :

- Dans la **croûte continentale** : le **forage KTB** atteint **9,8 km** en **Allemagne** et le **forage sg3** atteint **12 km** dans la Péninsule de Kola en **Russie**.
- Dans la **croûte océanique** : les **forages américains** sont allés jusqu'à **2 km** environ.

On détermine la **composition des enveloppes superficielles** de la **Terre** à partir de l'étude de **roches représentatives** (dont les **propriétés physiques**, notamment la **densité**, coïncident avec les **données sismiques**). Des **études en laboratoire de propagation des ondes sismiques** ont aussi permis de **mesurer les vitesses des ondes** attendues (**tableau VIII**).

▼ **TABLEAU VII. Vitesse des ondes P dans quelques constituants crustaux et mantelliques.**
D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021)

	Sédiments argileux non consolidés	Sédiments argileux compacts	Granites, granodiorites	Basaltes	Gabbros	Gneiss	Péridotites
Vitesse des ondes P (km/s)	1,5 à 2,7	3,9 à 5,5	4,6 à 6,3	4,0 à 6,6	6,5 à 6,8	6,5 à 7,6	7,8 à 8,4

Et dans l'eau : $1,5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$

b. Méthodes indirectes : données sismiques, données expérimentales, données chimiques (et pétrologiques) des météorites

- Les **matériaux** du **manteau profond** et du **noyau** sont **inaccessibles**.
- On dispose néanmoins de :
 - données sismiques** (qui nous renseignent sur la **densité** des matériaux en profondeur),
 - de **données expérimentales** (on place les **roches** dans les **conditions de pression** et de **température** régnant en **profondeur**)
 - et de **données** issues des **météorites** (processus de **formation** de la **Terre**, **composition** de la **Terre globale**) qui permettent de **retrouver la composition** de ces **enveloppes**.

B. Composition pétrologique et minéralogique des enveloppes terrestres

1. Croûte

a. Croûte continentale

- On appelle **continent** :
 - Soit une **terre émergée de grande superficie** [définition géographique]
 - Soit une **zone du globe caractérisée par la composition (plutôt magmatique acide en majorité) de sa croûte terrestre** [définition géologique].

a. Origine des données : échantillonnage, exhumation dans les montagnes, enclaves

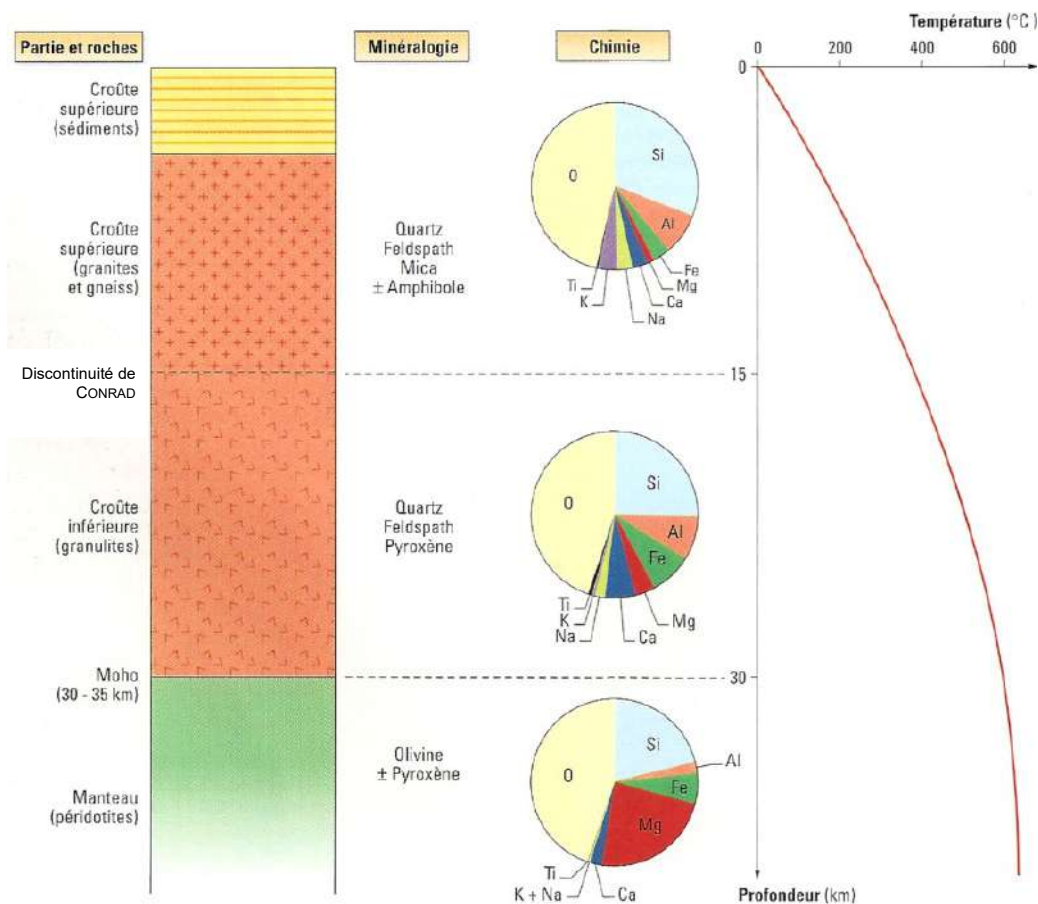
- La **croûte supérieure** est directement **échantillonnable**.
- La **croûte inférieure** est **localement exhumée** dans les **zones de montagne** ou bien se retrouve dans les **laves des volcans continentaux** sous forme d'**enclaves**.

β. Grande diversité des roches rencontrées

- On trouve une **grande diversité de roches** constituant la **croûte continentale** :
 - Roches magmatiques** : **roches issues de la solidification d'un magma (par refroidissement)**.
 - Roches plutoniques** : **roches formées en profondeur, par refroidissement lent du magma et possédant une texture grenue (la roche est holocristalline sans orientation préférentielle des minéraux)**.
Ex. granites, granodiorites...
 - Roches volcaniques** : **roches formées en surface, par refroidissement rapide du magma et possédant une texture microlitique (la roche comprend des phénocristaux mais aussi des microlites et une pâte amorphe, le verre)**.
Ex. rhyolites, andésites...
 - Roches métamorphiques** : **roches formées par enfouissement d'une roche préexistante (nommée protolithe) dont l'assemblage minéralogique est modifié (à l'état solide) sous l'effet de la modification des conditions de pression, température et hydratation**.
Ex. gneiss, micaschistes...
 - Roches sédimentaires** : **roches formées par induration de particules de roches dégradées (sédiments détritiques) ou cristallisation d'ions**.
Ex. grès, argillites, calcaires...

γ. Composition globale de l'enveloppe : granitoïdes et roches métamorphiques

- La **croûte continentale** mesure en moyenne environ **30 km d'épaisseur (jusqu'à 80 km ou plus sous les chaînes de montagne récentes)** et a longtemps été divisée en **deux sous-couches principales** dont l'existence est discutée (**figure 61**) :
 - la **croûte continentale supérieure** majoritairement constituée de **granitoïdes**, c'est-à-dire de **roches magmatiques acides*** (**figure 62**), **roches grenues constituées essentiellement de quartz et feldspaths**.
 - la **croûte continentale inférieure** varisemblablement **composée de roches moins acides et métamorphisées**. Sa **composition** est celle d'une **granulite, roche foliée et constituée essentiellement de feldspaths, quartz et pyroxènes (éléments riches en fer et magnésium)**.



▲ FIGURE 61. Lithologie « type » de la croûte continentale selon la conception traditionnelle.
D'après DUCO *et al.* (2001), modifié

Un point important de vocabulaire

* Le terme **acide** est un terme géologique, sans aucun rapport avec le sens chimique lié au pH ; il désigne le **fait qu'une roche soit riche en silice SiO_2 , c'est-à-dire qu'au moins 66 % de sa masse soit de la silice.**

Entre 52 et 66 % de silice, une roche est dite **intermédiaire**.

Entre 45 et 52 %, une roche est **pauvre en silice** et est dite **basique** (cas des roches de la croûte océanique).

Enfin, à **moins de 45 % de silice**, une roche est dite **ultrabasique** (cas des roches mantelliques).

- La limite entre **croûtes supérieure et inférieure** est située aux alentours de **15 km de profondeur** où se situe une **discontinuité sismique** nommée **discontinuité de CONRAD**. Nous l'avons déjà dit, l'**existence de cette discontinuité** est toutefois **discutée** car on ne la retrouve **pas systématiquement**.



▲ FIGURE 62. Le granite, roche type de la croûte continentale (supérieure) : un granitoïde à mica. D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2007)

5. Des âges très variables (jusqu'à 4 Ga dans les vieux boucliers)

- Au sein de la **croûte**, on trouve des **roches de tous les âges**, y compris des **roches très anciennes** dans les **vieux boucliers** (**ce terme a été défini plus haut ; revoir la figure 35 page 18**). Ainsi, les **gneiss d'Ataca** au Canada ont **3,98 Ga**...
- On connaît même des **minéraux**, des **zircons**, datés de **4,2 à 4,1 Ga**.

b. Croûte océanique

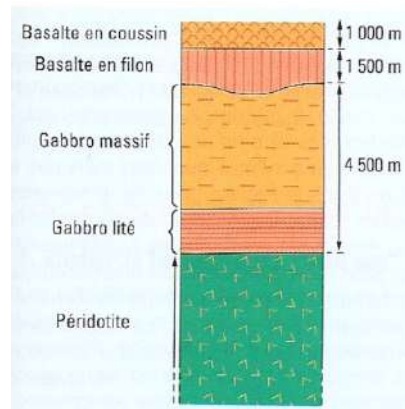
- On appelle **océan** :
 - Soit une **vaste étendue d'eau salée entre les continents** [définition géographique]
 - Soit une **zone du globe caractérisée par la composition (plutôt magmatique basique en majorité) de sa croûte terrestre** [définition géologique].

a. Origine des données : ophiolites, (forages), observation par submersible, observations à l'air libre (Islande)

- Les **roches** composant la **croûte océanique** ont été connues par **différents moyens** :
 - l'étude des **ophiolites** (figure 63), **portions de lithosphère océanique ancienne charriées sur les continents lors de processus tectoniques**, permettant de retrouver des **séquences verticales** plus ou moins complètes de **lithosphère océanique**.

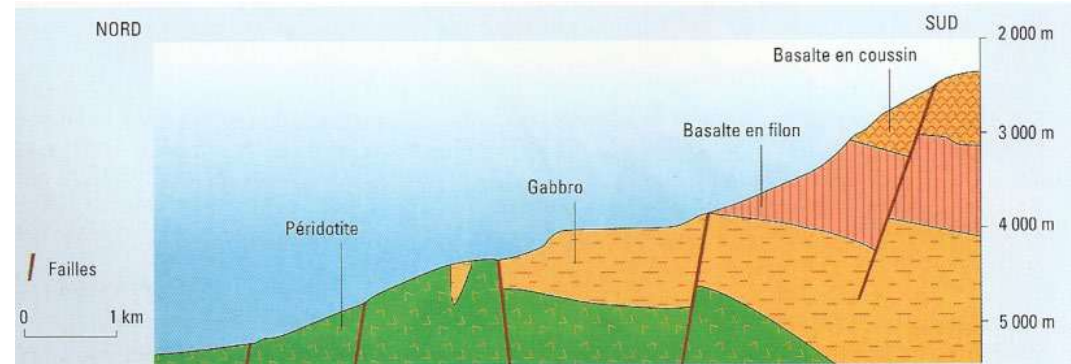
Remarque : le **processus tectonique par lequel une lithosphère océanique passe au-dessus d'une lithosphère continentale** porte le nom d'**obduction**.

- quelques **forages** mais qui permettent **difficilement d'aller très profondément** dans la **croûte** (ils doivent notamment percer la **couche de sédiments**, parfois **épaisse**).
- l'**observation de la lithosphère océanique** au niveau de **failles transformantes** grâce à des **submersibles**, comme au niveau de la **faille de Véma** (figure 64) ou le fossé *Hess Deep* dans le Pacifique.
- l'**observation de la lithosphère océanique** en Islande où la **dorsale atlantique** est **émergée** (figure 64).



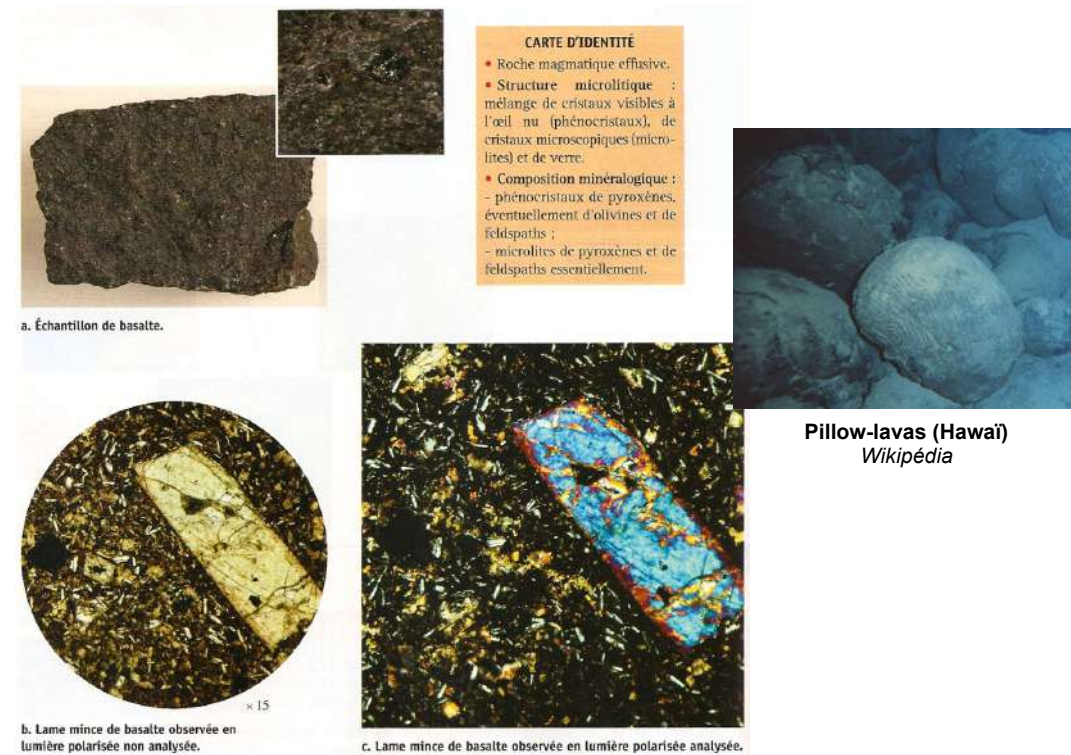
Les roches constituant les ophiolites. En explorant systématiquement la région de l'Oman, les géologues ont reconstitué la succession verticale de cet ensemble de roches. Le nom « ophiolite » vient du grec *ophis*, serpent, à cause de l'aspect de la roche qui rappelle la peau de ce reptile.

▲ FIGURE 63. **Les ophiolites.** D'après Duco *et al.* (2001)



▲ FIGURE 64. **Profil géologique au niveau de la faille transformante de Véma.** D'après DUCO *et al.* (2001)

β. Composition type de l'enveloppe : basaltes en coussins, complexe filonien, gabbros



▲ FIGURE 65. **Le basalte, roche typique de la croûte océanique.** D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2007)



▲ FIGURE 66. Le gabbro, roche typique de la croûte océanique.
D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2007)

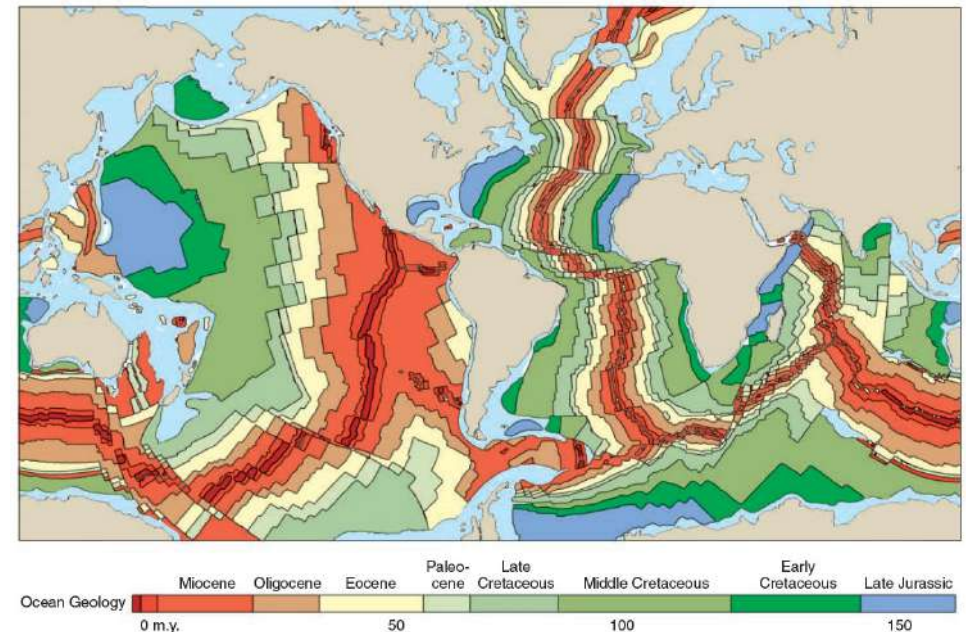
- La **croûte océanique** mesure en moyenne 7 km d'épaisseur. Si l'on **excepte les sédiments**, elle est typiquement **composée verticalement** (du sommet vers les parties les plus profondes) des **couches suivantes** (typique d'une **dorsale rapide**) :
 - une couche de **basaltes en coussins** ou **pillow-lavas**, ainsi nommés à cause de leur **allure en forme de gros oreillers**, **roches volcaniques (microlitiques)** composées de verre, de **microlites** (petits cristaux invisibles à l'œil nu) et de **phénocristaux** de **pyroxènes**, **olivines** et **feldspaths** (figure 65);
 - un **complexe filonien** où les **basaltes** se trouvent sous forme de **filons intrudant des gabbros**, avec souvent la présence de **dolérite** (= **microgabbro**, **roche microgrenue basique**) ;
 - une couche de **gabbros** (figure 66) massifs, des **roches plutoniques (grenues)** composées de **pyroxènes** et de **feldspaths**, avec parfois de l'**olivine**.

Remarque : **basaltes**, **gabbros**... sont des **roches basiques** (pauvres en silice).

y. Des âges plutôt récents (jusqu'à 180 Ma)

- Les **croûtes océaniques** sont plutôt **jeunes**. Les **plus âgées** sont **180 Ma** (Méditerranée, Pacifique Ouest, à l'ouest de l'Atlantique central), ce qui est **peu** par rapport à l'**âge de la Terre** et aux âges possibles de la croûte continentale.
- Cela suggère un mécanisme de disparition de la croûte avant son vieillissement, à savoir la **subduction**. Ce mécanisme est compensé par l'**accrétion** au niveau des dorsales.

Voir le chapitre suivant sur la **dynamique du globe**



▲ FIGURE 67. Âges des fonds océaniques (daté par forage de la base des dépôts sédimentaires). D'après PLUMMER *et al.* (2016)

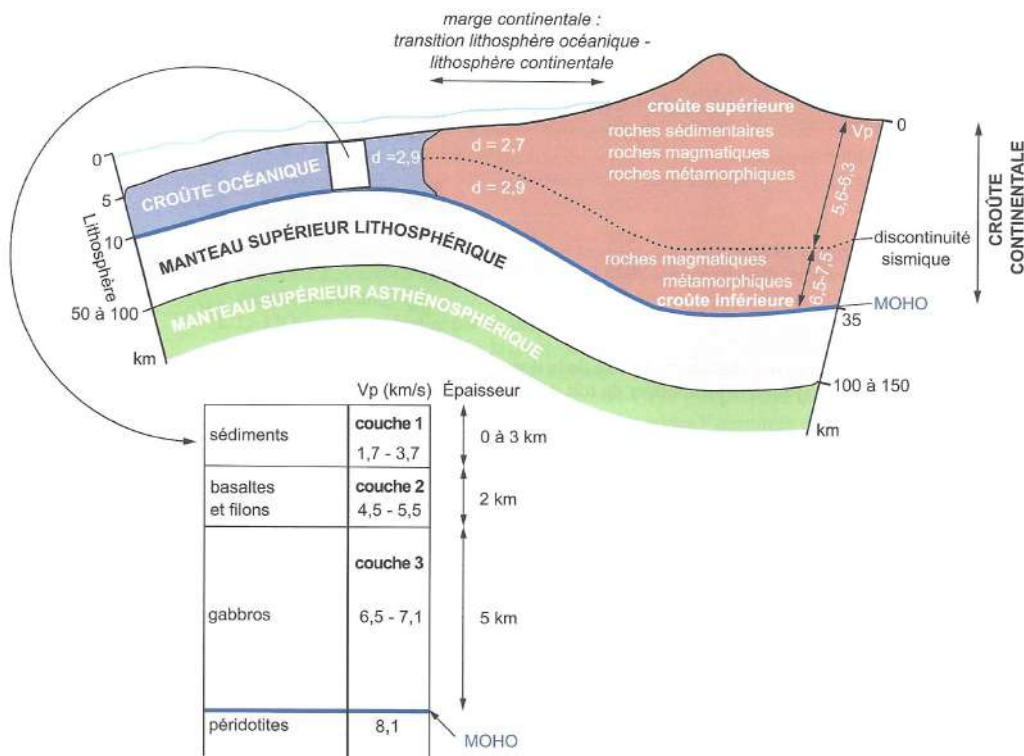
c. Et les roches sédimentaires ?

- Les **roches sédimentaires** représentent un **faible volume de la croûte** et, de ce fait, peuvent être **négligées** quand on établit une **composition globale de la Terre**. Elles occupent néanmoins **jusqu'à plusieurs km de profondeur** dans les **océans** ou certains **bassins sédimentaires continentaux**.

Attention ! Les **roches sédimentaires** constituent néanmoins des **enregistrements privilégiés** de l'**histoire de la Terre**, de la **tectonique des plaques** et des **changements de l'environnement terrestre**.

d. Bilan sur les croûtes

- Voir figure 68.



▲ FIGURE 68. Organisation comparée des croûtes. D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2007)

2. Manteau

a. Origine des données : ophiolites, enclaves et cellule à enclumes de diamant

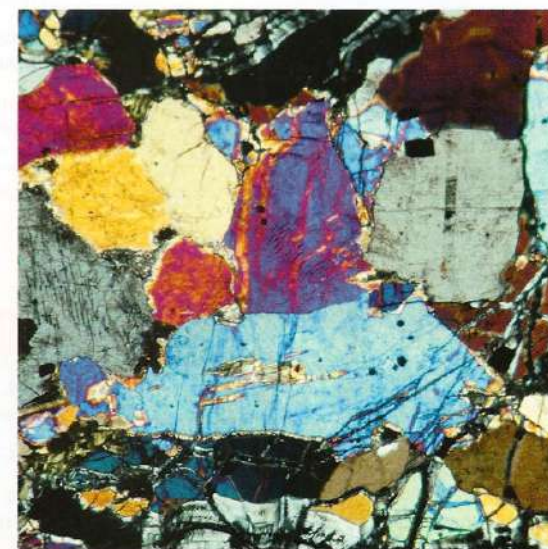
- Le manteau supérieur est accessible dans les **ophiolites** ou dans des **enclaves** ; la **roche composant le manteau, riche en olivine et pyroxène** est la **péridotite** (figure 69).
- Le **manteau profond** n'est pas accessible à l'échantillonnage.
- On constate que le **manteau** ne présente pas de saut majeur de discontinuités (cf. **profil sismique de la Terre**) mais des **discontinuités mineures** (figure 36 page 19). On en déduit que la **nature du manteau** varie peu en profondeur, les **petites discontinuités de vitesse sismique** étant interprétées par des **variations de nature minéralogique**.
- Cela est confirmé par les **études expérimentales** utilisant la **cellule à enclumes de diamant** (figure 70). Ce **dispositif permet de recréer des conditions très importantes de pression** grâce à un **système d'enclumes de diamant** (matériau le plus résistant qu'on trouve sur Terre) et de **pistons**. Les **températures élevées sont recréées par chauffage à l'aide d'un laser**.



a. Échantillon : une inclusion de péridotite dans un basalte.



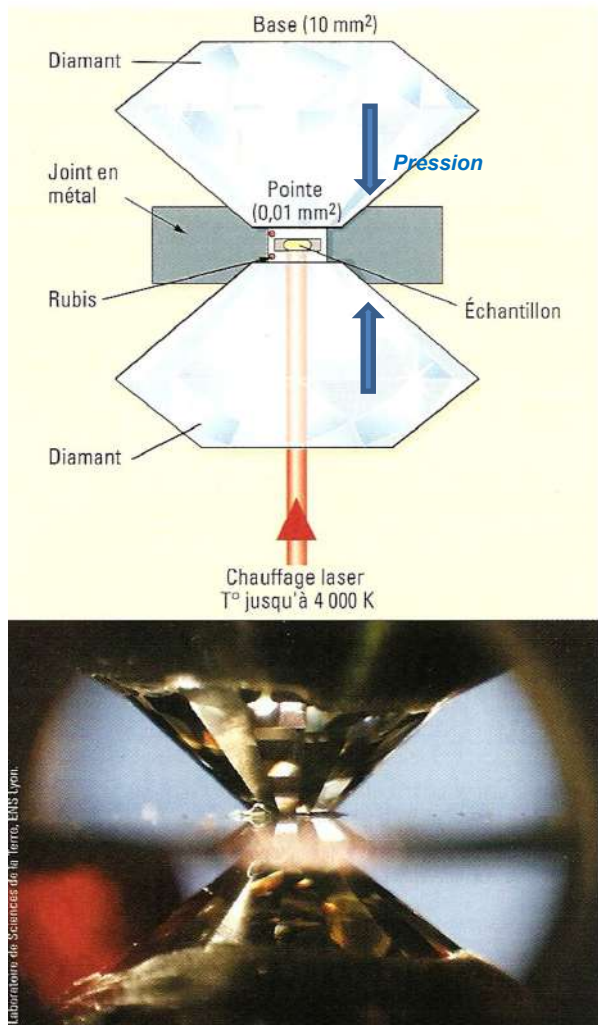
b. Lame mince de péridotite observée en lumière polarisée non analysée.



c. Lame mince de péridotite observée en lumière polarisée analysée.

▲ FIGURE 69. La péridotite, roche du manteau. D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2007)

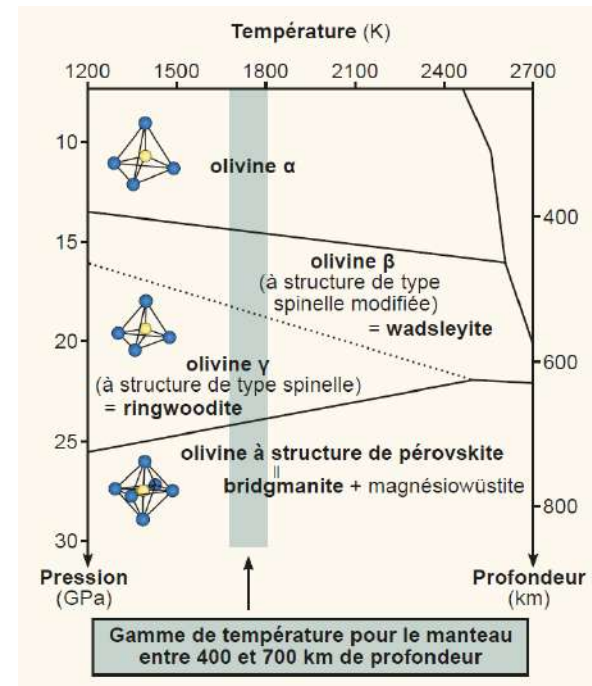
- On peut ainsi **soumettre l'olivine** (**principal minéral de la péridotite**) aux conditions de **pression** et de **température** régnant en **profondeur** ; on obtient ainsi le **diagramme de phase de l'olivine** (figure 71).



Une cellule à enclume de diamant. Elle est constituée de 2 diamants à faces parallèles. Leur compression imprime à l'échantillon une pression considérable. Un laser chauffe l'échantillon (plusieurs milliers de degrés). On suit le comportement de l'échantillon en analysant les variations de ses propriétés optiques.

▲ FIGURE 70. Cellule à enclume(s) de diamant. D'après Duco *et al.* (2002)

La fluorescence du rubis, déclenchée par le laser, permet de mesurer la pression. Des rayons X émis sur l'échantillon permettent, par l'étude de leur diffraction, d'évaluer l'évolution du réseau cristallin de l'échantillon.



▲ FIGURE 71. Diagramme de phases de l'olivine. D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021)

b. Composition globale de l'enveloppe : de la péridotite sous différentes configurations cristallines

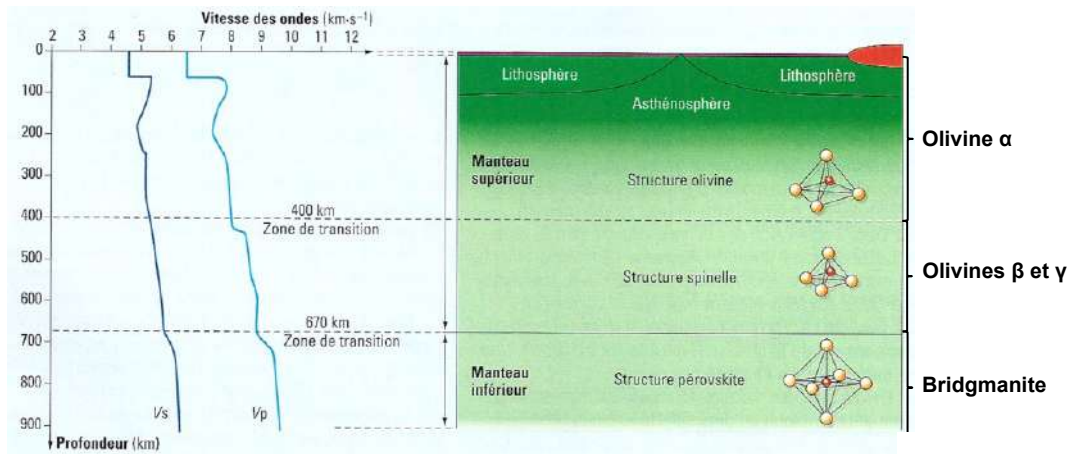
- Le manteau est composé de **péridotite** (figure 69), *roche grenue composée majoritairement d'olivines et présentant une petite proportion (variable) de pyroxènes, voire de plagioclase, spinelle, grenat...* Il s'agit d'une **roche ultrabasique**, donc *très pauvre en silice*.
- Des **minéraux** comme le **plagioclase**, le **spinelle** et le **grenat** accompagnent souvent l'**olivine de faible profondeur typique du haut du manteau supérieur** ou **olivine α**.
- L'**olivine** subit des **réarrangements atomiques** avec l'augmentation de la profondeur (figures 72-73) :
 - elle adopte une **structure spinelle** correspondant aux **olivines β et γ** (les **tétraèdres de coordination deviennent plus resserrés**) vers 410 km de profondeur.

(!) Le **spinelle** est un **minéral différent** de l'olivine à structure spinelle !

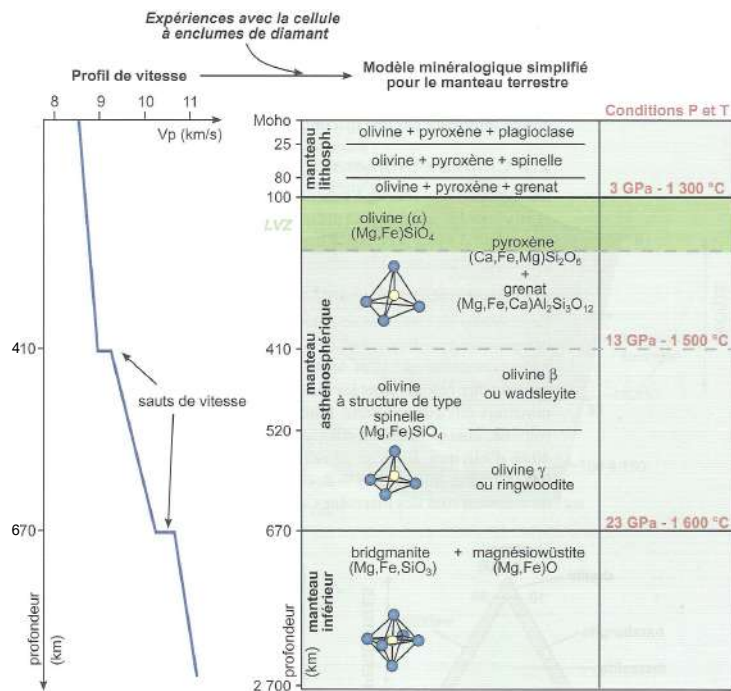
- et une **structure pérovskite** nommée aussi **bridgmanite** (les **tétraèdres se rassemblent en octaèdres**) vers 670 km.

(!) La **pérovskite** est un **minéral différent** de l'olivine à structure pérovskite !

- Enfin, des travaux attestent qu'une **structure post-pérovskite** (**agencement différent des octaèdres**) est adoptée par la **péridotite** au sein de la **couche D''**.



♥ ▲ FIGURE 72. Correspondance entre les légers sauts de vitesse des ondes (P surtout) et les phases de l'olivine dans le manteau. D'après DUCO *et al.* (2002)



▲ FIGURE 73. Une version un peu plus complète / complexe du modèle minéralogique du manteau déduit des études sismiques et pétro-expérimentales (sans les ondes S). D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021)

3. Noyau

a. Origine des données : des raisonnements indirects notamment à partir de la composition des météorites et des données sismiques

- Le **noyau** n'est **absolument pas accessible** à l'échantillonnage et on en connaît la composition par des **raisonnements indirects**.
- On connaît la **composition chimique globale de la Terre** qui est celle des **chondrites**. On connaît en outre à présent la **composition du manteau** ; on peut donc **déduire la composition du noyau par différence**. Enfin, on sait que la **densité du noyau (en moyenne 8 à 10)** est **très supérieure** à celle des autres enveloppes. En **croisant** ces informations, on arrive à reconstituer la **composition du noyau (tableau VIII)**.

▼ TABLEAU VIII. COMPOSITION CHIMIQUE D'UNE CHONDRITE ET MODÈLE DE COMPOSITION CHIMIQUE POUR LE NOYAU ET LE MANTEAU PRIMITIF.

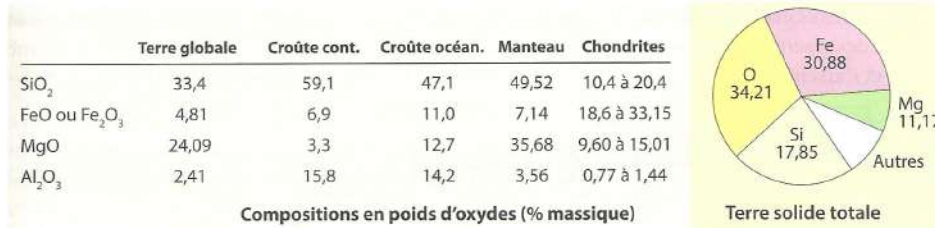
Élément	% massique dans le manteau primitif	% massique pour la Terre globale déduit de l'étude d'une chondrite	% massique déduit pour le noyau
O	44,76	31,29	8,99
Fe	5,89	27,79	85,62
Si	21,35	16,28	–
Mg	23,21	14,65	–
S	0,01	4,80	(i)
Ni	0,25	1,65	5,16
Al	2,13	1,33	–
Ca	2,32	1,45	–

(i) : compte tenu du modèle de chondrite considéré, on suppose que la totalité du soufre s'est volatilisé lors de la différenciation de la Terre, de sorte que nous n'avons plus à considérer sa très faible présence dans le manteau comme une donnée renvoyant à sa forte concentration dans le noyau.

b. Composition globale de l'enveloppe : un corps ferreux allié à du nickel

- Le **noyau** est constitué en **grande proportion** d'un **alliage de fer et de nickel**, et d'autres éléments ; le noyau possède une composition proche de celle des météorites ferreuses (dont on suppose qu'elles proviennent d'un **processus de différenciation**, comme le **noyau**).
- Remarque : les **études fines** montrent la **nécessité de la présence d'un élément plus léger en proportions assez importantes** (de l'ordre de **10 %**) pour expliquer les **propriétés du noyau** ; selon les auteurs, ce pourrait être du **soufre** et/ou de l'**oxygène**.

C. Composition chimique des enveloppes terrestres



leur **composition chimique**. Les **principaux éléments** qui composent **chaque enveloppe** sont les **suivants** (tableaux IV-VI page 32 + tableau VIII page précédente) :

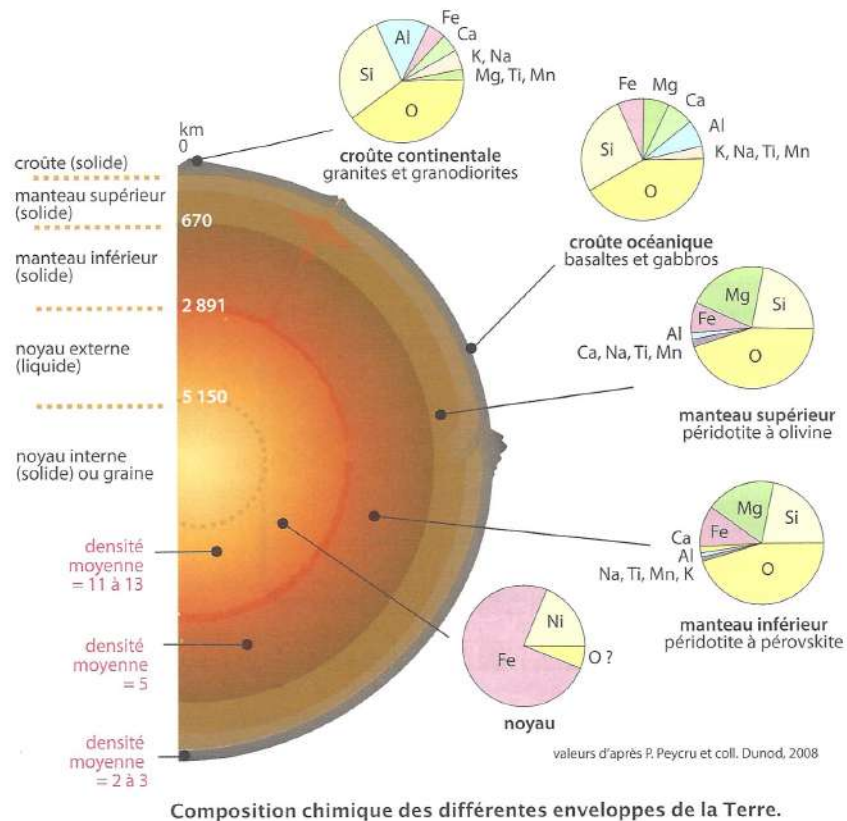
- **croûte continentale** : O, Si (*roches acides*), Al, Fe, K / Na
 - **croûte océanique** : O, Si (*roches basiques*), Fe, Mg, K / Na, Ca, Al ;
 - **manteau** : O, Si (*roches ultrabasiques*), Mg, Fe ;
 - **noyau** : Fe, Ni.
- Au fur et à mesure qu'on s'enfonce en profondeur, on notera un appauvrissement en silice et un enrichissement en minéraux ferro-magnésiens (figure 74).

D. Importance massique des enveloppes terrestres

- Les **importances volumiques** des **enveloppes terrestres** ont été données **plus haut**. Les **différences de densité** et de **composition** entre les **enveloppes** impliquent une **importance massique différente**.
- Ainsi, le **manteau** ne concentre que **67 % de la masse** (alors qu'il constitue **84 % du volume**) et le **noyau**, par sa **nature métallique**, représente **33 % de la masse** (contre **16 % du volume**).
- L'**importance massique** de la **croûte** est **négligeable** par rapport aux autres enveloppes.

E. Bilan

- Voir la **figure 75**.



▲ **FIGURE 74. Principaux éléments chimiques dans les enveloppes terrestres.**
D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021)

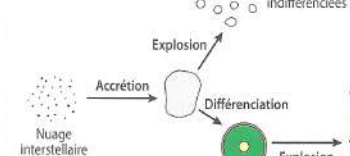
- Eu égard à la **composition minéralogique dominante** des **enveloppes terrestres**, mais aussi grâce aux **météorites** (tableau VIII page précédente), on peut estimer

► Échantillonnage, analyse des enclaves

ex. : Basalte
Enclave de péridotites

► Analyse des météorites

Formation :



Loi d'attraction universelle

$$F = G \frac{M_1 m}{R_1^2}$$

$$R_1 = 6370 \text{ km}$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2 \text{ kg}^{-2}$$

$$M_1 = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$



LE MODÈLE PREM : DES ENVELOPPES CONCENTRIQUES DÉLIMITÉES PAR DES DISCONTINUITÉS

MOHO

30 km

100 km

670 km

Zone à moindre vitesse

ASTHÉNOSPHERE

670 km

MOHO

30 km

100 km

670 km

Zone à moindre vitesse

ASTHÉNOSPHERE

670 km

MOHO

30 km

100 km

670 km

Zone à moindre vitesse

ASTHÉNOSPHERE

670 km

MOHO

30 km

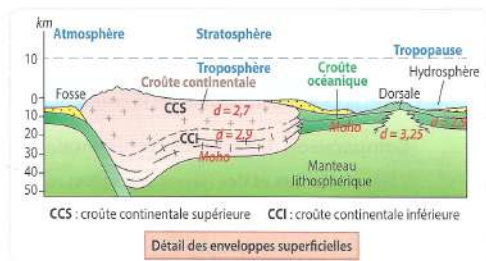
100 km

670 km

Zone à moindre vitesse

ASTHÉNOSPHERE

670 km



CCS : croûte continentale supérieure CCI : croûte continentale inférieure

Détail des enveloppes superficielles

DES COMPOSITIONS DIFFÉRENTES

DES DENSITÉS VARIABLES

3,3 < d < 4,2

4,3 < d < 5,4

8 < d < 13

Fe, Ni, S

LIQUIDE

NOYAU

interne = graine

6370 km

5150 km

2900 km

Discontinuité de Gutenberg

Discontinuité de Lehmann

Discontinuité de Moho

Zone de transition

670-700 km

100 km

30 km

MOHO

30 km

100 km

670 km

Zone à moindre vitesse

ASTHÉNOSPHERE

670 km

MOHO

30 km

100 km

670 km

Zone à moindre vitesse

ASTHÉNOSPHERE

670 km

MOHO

30 km

100 km

670 km

Zone à moindre vitesse

ASTHÉNOSPHERE

670 km

MOHO

30 km

100 km

670 km

Zone à moindre vitesse

ASTHÉNOSPHERE

III. Une hausse de température avec la profondeur avec des sauts marquant une stratification thermique du globe : le géotherme

A. Notions de géotherme et gradient géothermique

- Comme nous le verrons dans le **chapitre suivant**, la **planète** présente une **chaleur interne** qui a **plusieurs origines**.
- Le **géotherme** désigne la **courbe d'évolution de la température en fonction de la profondeur (ou de la pression, liée à la profondeur) dans le globe terrestre (figures 76 + 78)**.
- On appelle **gradient géothermique** la **hausse de température (en K ou °C) par km de profondeur**.
- La **construction du géotherme** s'appuie sur des **mesures directes** pour les parties les plus **superficielles** et sur des **données géophysiques** pour les **parties profondes**.

B. Une construction basée sur des points d'ancrage

1. Une mesure de température dans les forages continentaux profonds permettant d'inférer un gradient lithosphérique de 30 K • km⁻¹

- Les **forages profonds** dans la **croûte continentale** ont permis d'y mesurer la température par sonde. Considérant la **lithosphère** comme **homogène** dans ses **propriétés thermiques**, il devient possible de déterminer un **gradient lithosphérique** ainsi évalué à **30 K • km⁻¹**.

2. Une limite lithosphère-asthénosphère (LAB) à 1300 °C (1600 K) environ à 100 km

- La **limite lithosphère-asthénosphère** est placée, comme nous l'avons vu, à **1300 °C**, soit environ **1600 K**. Elle est située en moyenne à **100 km de profondeur**.

3. Des points d'ancrage découlant de la minéralogie expérimentale sur l'olivine : 1750 K à 410 km et 1900 K à 670 km

- Par des expériences avec la cellule à enclumes de diamant, on peut déterminer que :
 - La **transition de phase de 410 km** nécessite une température de **1750 K**,
 - La **transition de phase de 670 km** nécessite une température de **1900 K**.

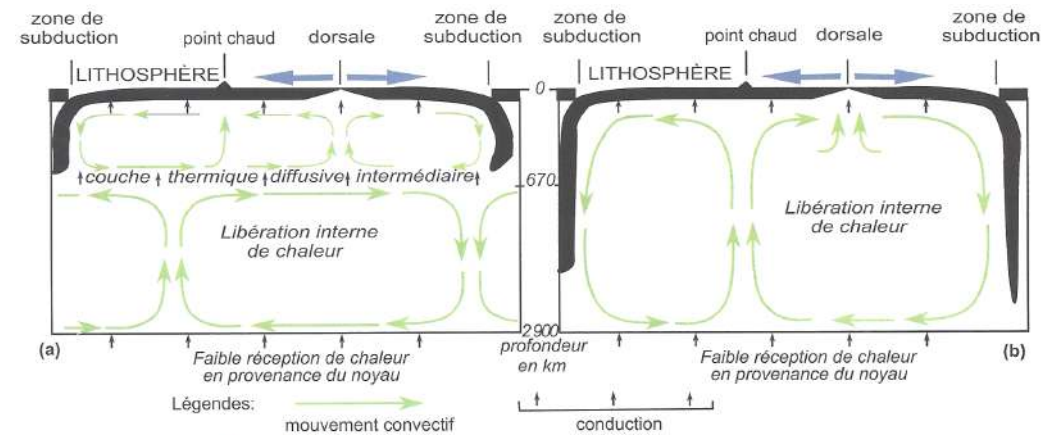
4. Une température de fusion du fer (5000 K) proposée pour le noyau à la profondeur de la discontinuité de LEHMANN

- La **température de fusion du fer (5000 K)** est proposée pour le **noyau** à la **profondeur de la discontinuité de LEHMANN**.

▲ FIGURE 75. Le modèle radial de la Terre. D'après BORDI, SAINTPIERRE et al. (2021)

Concernant le manteau, a rétention d'un **modèle convectif à une couche** ou d'un **modèle à deux couches** (figure 77) impacte le **tracé du géotherme** (figure 76).

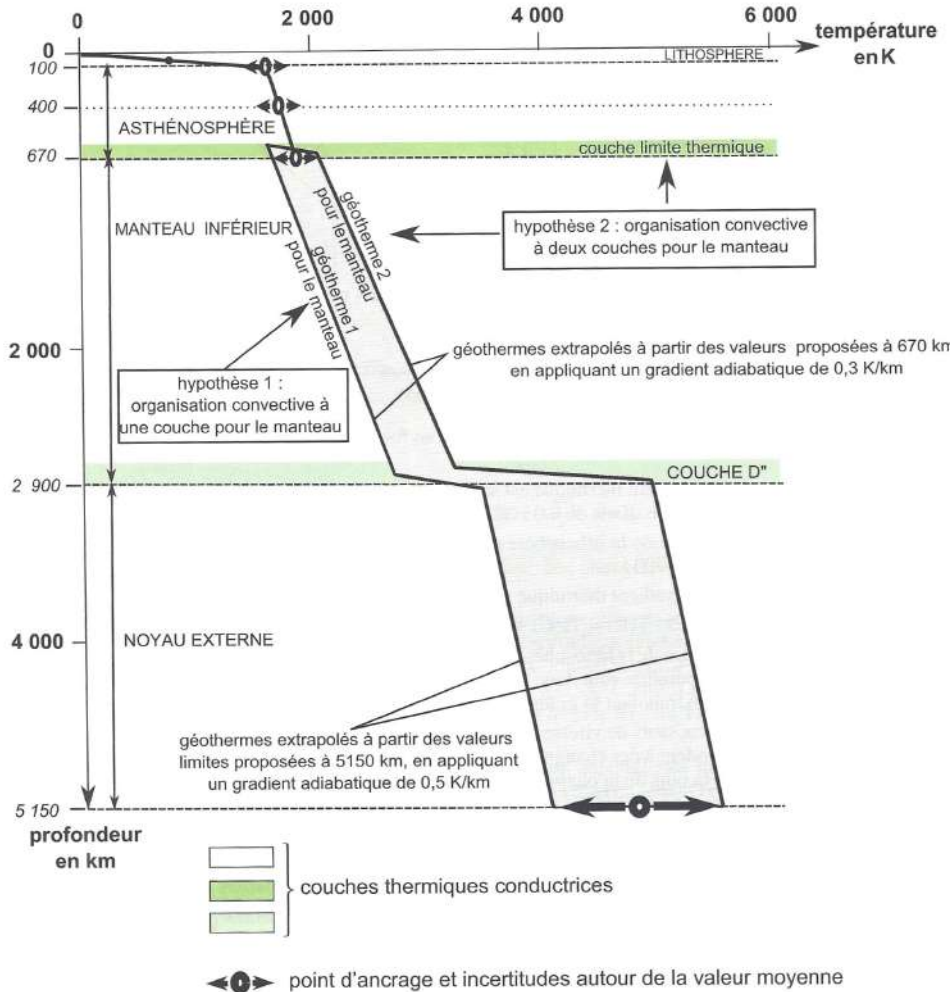
- La **couche D''** est marquée par un **saut de température** entre **noyau** et **manteau**.



Deux modèles convectifs pour le manteau terrestre et transferts de chaleur interne associés : convection à deux couches (a) et à une couche (b).

Dans le cas du modèle à deux étages convectifs, la conduction opère entre les deux étages convectifs puis entre l'étage convectif supérieur et la lithosphère. Dans le cas d'une convection à une couche, la conduction n'opère qu'entre le sommet de la couche convective et la lithosphère.

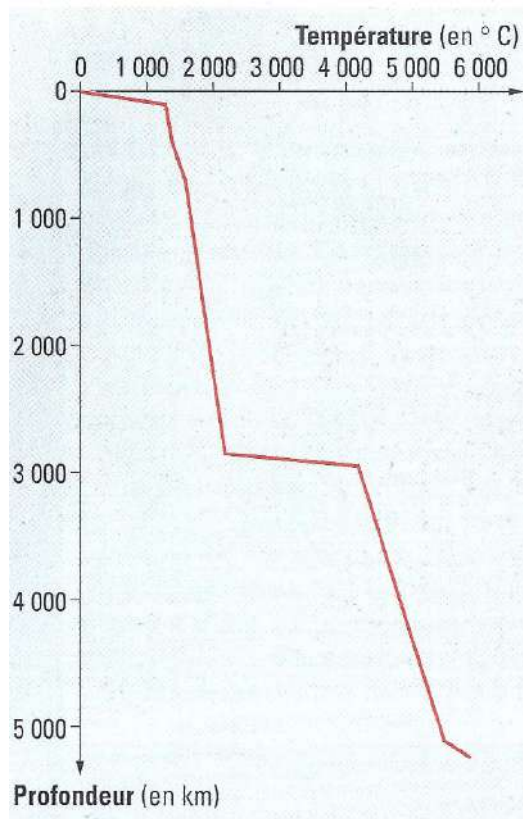
▲ FIGURE 77. **Deux modèles convectifs pour le manteau.** D'après PEYCRU *et al.* (2015)



▲ FIGURE 76. **Le géotherme construit (entre 0 et 5150 km).** D'après PEYCRU *et al.* (2015)

C. Une extrapolation entre les points d'ancrage fonction du modèle convectif du manteau retenu

- Entre les **points d'ancrage**, on prend en compte :
 - Les **régimes d'échange de chaleur** (rayonnement / conduction / convection) sont pris en compte pour l'établissement d'un gradient. Des valeurs comprises entre 0,3 et 0,5 K, inférées des **données sismiques** et **expérimentales**, sont données pour le **noyau externe** et le **manteau** qui l'un comme l'autre sont des lieux de convection.



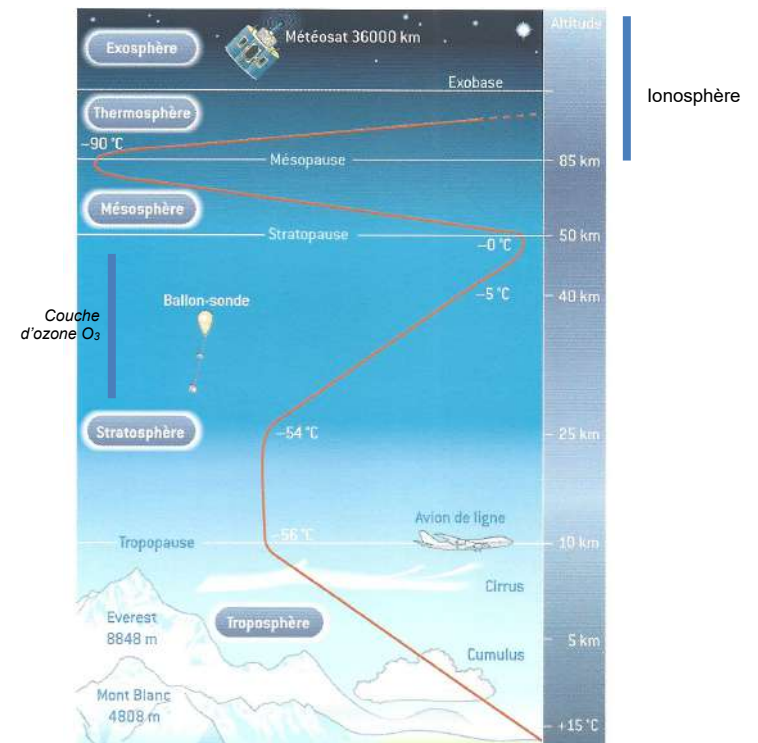
▲ FIGURE 78. Un géotherme simplifié. D'après DUCO *et al.* (2002)

IV. Des enveloppes fluides superficielles également stratifiées verticalement

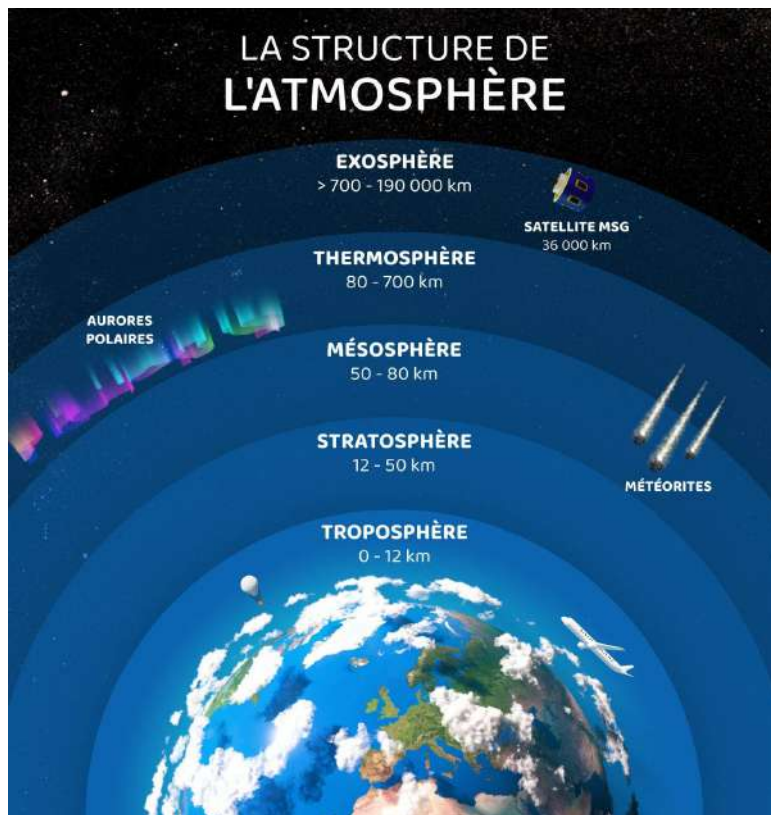
- Les **enveloppes fluides** de la planète sont les **enveloppes liquides ou gazeuses situées dans la partie la plus superficielle de la planète**.
- Ces **enveloppes** sont **ici à peine évoquées** ; on s'intéresse uniquement à leur **stratification** basique. Elles font l'objet central d'un gros morceau du **programme de Biogéosciences**. Nous renvoyons donc aux **chapitres concernés** pour plus de précision.

A. L'atmosphère : une stratification thermique que l'on peut mesurer avec un ballon sonde puis des capteurs embarqués

- On appelle **atmosphère** l'**enveloppe gazeuse qui entoure une planète**. Elle comprend, sur la Terre, **78 % de diazote N_2** , **21 % de dioxygène O_2** et **1 % d'autres gaz dont 0,04 % de dioxyde de carbone CO_2** .
- L'envoi d'un **ballon sonde** dans l'**atmosphère** ou la réalisation de mesures par des **aéronefs** ou des **satellites artificiels** permet de mesurer des **fluctuations de températures** (figures 79-81) et de distinguer les **couches** suivantes (du sol vers l'espace) :



▲ FIGURE 79. Stratification thermique verticale de l'atmosphère terrestre. D'après DELMAS *et al.* (2007)

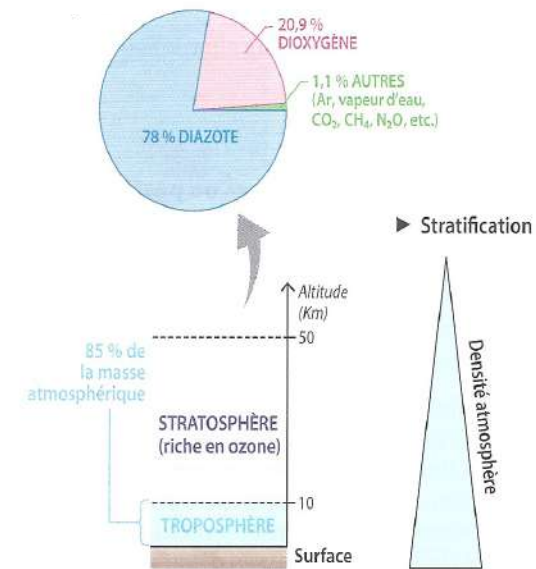


▲ FIGURE 80. Stratification thermique verticale de l'atmosphère terrestre.
Météo-France (consultation janvier 2022)

- La **troposphère**, couche la plus basse de l'atmosphère où la température décroît avec l'altitude. Elle est épaisse de 7-8 km aux pôles mais 13-16 km à l'équateur. On y trouve l'ensemble de la surface terrestre émergée (même les plus hautes montagnes), presque tous les nuages, l'essentiel des mouvements convectifs atmosphériques...
---- Limite : **tropopause** ~ 10 km
- La **stratosphère**, couche de l'atmosphère superposée à la troposphère où la température est constante puis croît avec l'altitude (10-50 km).
---- Limite : **stratopause** ~ 50 km
- La **mésosphère**, couche de l'atmosphère située entre 50 et 80 km d'altitude en moyenne et où la température décroît fortement avec l'altitude.
---- Limite : **mésopause** ~ 80 km
- La **thermosphère**, couche de l'atmosphère située entre 80 et 700 km d'altitude en moyenne où la température croît avec l'altitude avec l'altitude.
---- Limite : **thermopause** = **exobase** ~ 700 km
- L'**exosphère**, dernière couche de l'atmosphère aux frontières floues où la densité de gaz extrêmement faible.

Limite
programme

- Notons que le programme n'exige la connaissance que de la **troposphère** et de la **stratosphère** (figure 81). La **troposphère**, rien qu'à elle, correspond à **84 % en masse** de l'atmosphère.



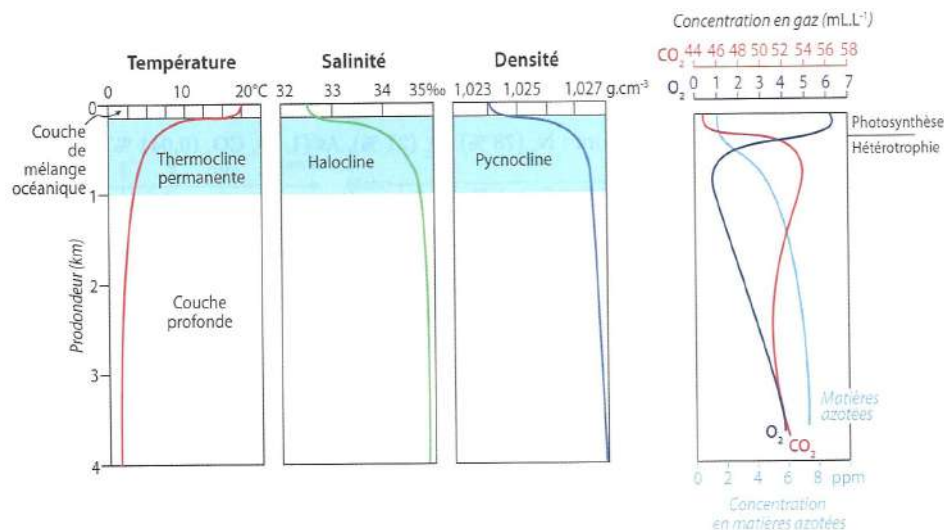
▲ FIGURE 81. « L'atmosphère pour les nuls ». D'après BORDI, SAINTPIERRE *et al.* (2021)

- Notons aussi que la **pression atmosphérique** ne cesse de **diminuer** à mesure que l'on s'éloigne du sol puisque la **densité de particules diminue**.

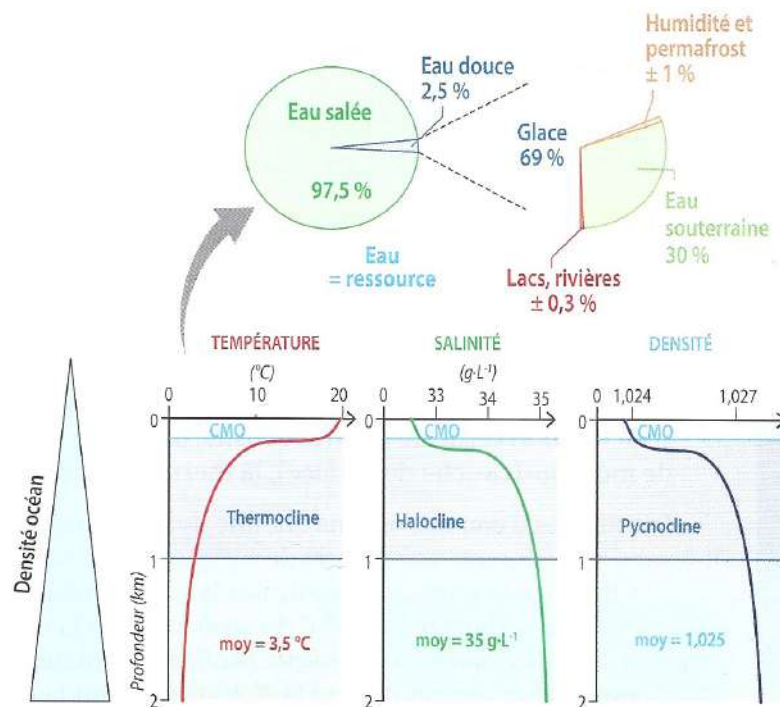
B. L'hydrosphère : stratification de base de l'océan selon des critères de température, salinité et densité

- On appelle **hydrosphère** l'ensemble de l'eau d'une planète. Sur Terre, l'eau existe sous les **trois états physiques courants**, notamment l'état liquide.
- Pour **près de 98 %**, il s'agit d'eau salée constituant un ensemble de mers et océans qu'on peut appeler l'**océan mondial**.
- Très **schématiquement**, on note (figures 82-83) que l'océan peut être structuré par la **température**, la **salinité** et la **pression** qui définissent une **discontinuité** de variation entre 300 m et 1000 m.

- La **zone de transition thermique rapide** entre 300 et 1000 m peut être appelée **thermocline** (permanente).
 - La **zone de transition de salinité rapide** entre 300 et 1000 m peut être appelée **halocline**.
 - La **zone de transition de densité rapide** entre 300 et 1000 m peut être appelée **pycnocline**.
- Ces trois zones de transition se superposent dans les faits.



▲ FIGURE 82. L'océan : stratification simple. D'après DAUTEL *et al.* (2021)



▲ FIGURE 83. « L'océan pour les nuls ». D'après BORDI, SAINTPIERRE *et al.* (2021)

- On peut ainsi définir **trois couches océaniques** :
 - La **couche de mélange**, **couche superficielle de l'océan (0-300 m)**.
 - La **thermocline / halocline / pycnocline**, **couche moyenne de l'océan (300-1000 m)** où la température / la salinité / la densité varient rapidement avec la profondeur.
 - L'**océan profond**, **couche profonde de l'océan (au-delà de 1000 m)**.
- Notons enfin que la **répartition verticale du dioxygène**, du **CO₂**, des **matières azotées**... est influencée par la **stratification océanique** (figure 82).

Bilan (adapté du programme)

- ✓ La **Terre** est une **planète tellurique** dont l'organisation des **enveloppes concentriques** dépend des **propriétés physico-chimiques** des **éléments** les composant. Cette **structure** est mise en évidence grâce à des **données** de **géologie historique**, de **géophysique** et de **géochimie**. Il est important de relier la **structure** des **enveloppes solides** avec leur **dynamique**.
- ✓ La **Terre** est constituée d'**enveloppes concentriques solides, liquides et gazeuses** qui se distinguent par leur **nature** et leurs **propriétés physico-chimiques**.
- ✓ **Croûtes**, **manteau** et **noyau** sont définis sur la base de leur **nature chimique** et **minéralogique** ; **lithosphère** et **asthénosphère** sur la base de leurs **propriétés rhéologiques** et **thermiques**.
- ✓ La **nature minéralogique** du **manteau** varie avec la **profondeur**.
- ✓ La **lithosphère** joue un **rôle central** dans l'établissement du **bilan énergétique** de la Terre (« **couche limite de la convection** ») et il est donc nécessaire de faire le **lien** avec la **partie ST-C** portant sur la **dynamique des enveloppes internes**. [Le présent chapitre] met l'accent sur l'analyse de **multiples sources de données** (**géophysiques, géologiques et géochimiques**) dans l'établissement d'un **modèle radial de la planète Terre** de premier ordre. Ce modèle sera **mis en défaut** par certaines **observations** qui requièrent l'introduction d'une **dynamique** dans le **modèle Terre**.

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes

Il est conseillé de maîtriser les **grandes lignes du plan**

Le plan ne doit pas être perçu comme un carcan figé, ou comme un modèle de plan de dissertation à ré-utiliser en devoir, mais bien comme un outil d'apprentissage et de structuration des concepts importants. Vous pouvez en recopier les grandes lignes ou annexer le plan du polycopié directement.

Il est conseillé de réaliser un **lexique des principales définitions**.

Il est conseillé de reproduire les **schémas (et tableaux) majeurs** :

Liste indicative.

- **Séismes, structure du globe**
- ° **Origine d'un séisme / cycle sismique**
- [° Principe de l'**interférométrie**]
- ° **Sismogramme**
- [° **Types d'ondes sismiques** à savoir expliquer]
- ° **Hodochrones**
- ° **Séisme** (foyer / épicentre) et **déviations** des ondes sismiques
- ° **Mécanismes au foyer** : principe d'établissement + typologie en fonction des **contextes géodynamiques**
- ° **Modèle PREM** : variation de **vitesse des ondes**
+ **couches / discontinuités / pétrologie / chimie...**
[+ variation de **densité**]
- ° **LVZ**
- ° Équivalences et diversité des **termes des enveloppes superficielles**
- ° Principe de la **tomographie sismique**
- [° Principe de la **sismique réflexion**]
- [° Typologie des **météorites**]
- ° **Origine de la structure** de la Terre
- **Composition du globe**
- ° **Tétraèdre de coordination**
- ° **Quelques vitesses d'ondes P** typiques
- ° Structure de la **croûte continentale**
- ° Un modèle de **croûte océanique** : exemple des **ophiolites d'Oman**
- [° Les **roches majoritaires** = à connaître]
- ° Correspondance **ondes P (manteau) / transitions de phases** de l'olivine
- **Géotherme**
- ° Géotherme + arguments de sa construction
- **Enveloppes fluides**
- ° **Stratification atmosphérique**
- ° Triple **stratification océanique**

Vous devez en outre **savoir / pouvoir** (voir le **TD correspondant**) :

- ° **Expliquer** la construction d'un **modèle radial de la Terre solide** (modèle PREM).
- ° **Exploiter** et relier des **données géophysiques** permettant d'établir des **discontinuités physiques** ou **chimiques** dans le globe.
- ° **Exploiter** des données permettant la **construction du géotherme**.
- ° **Exploiter** des **données géophysiques** et **expérimentales** montrant les **transitions de phase** dans le **manteau**

Références

- AUBOIN, J., J. DERCOURT & B. LABESSE (1970). *Manuel de travaux pratiques de cartographie. 1^{er} cycle et maîtrise*. Dunod, Paris.
- BARD, J.-P. (1990). *Microtextures des roches magmatiques et métamorphiques*. Masson, Paris, 2^e édition (1^e édition 1980).
- BARDINTZEFF, J.-M. (2006). *Volcanologie*. Dunod, Paris, 3^e édition (1^e édition 1991).
- BAROIS, P. (2004). *Guide encyclopédique des volcans*. Delachaux et Niestlé, Paris.
- BAUDE, D., Y. JUSSEURAND (dir.), A. ANDRÉ, V. CAILLAUD, A. CAILLETTE, P. CHAUVEL, A. DE QUILLACQ, F. EL AZIZ KHALIL, I. GASPERINI, V. JOYEUX, F. LABAUNE, P. DE MARCHI, A. MÉNARD-PARROD, B. MERLANT, M. PAULHIAC-PISON, P. PILLOT, S. RABOUIN, P. ROGER & R. TOURRET (2019). *Sciences de la Vie et de la Terre. 1^{re}. Enseignement de spécialité*. Bordas, Paris.
- BAUDE, D., Y. JUSSEURAND (dir.), A. ANDRÉ, X. BERTHON, A. CAILLETTE, P. CHAUVEL, P. COSENTINO, I. GASPERINI, M. GAUJOUX, V. JOYEUX, F. LABAUNE, P. DE MARCHI, A. MÉNARD-PARROD, B. MERLANT, P. PILLOT, S. RABOUIN, P. ROGER & R. TOURRET (2020). *Sciences de la Vie et de la Terre. 7^e. Enseignement de spécialité*. Bordas, Paris.
- BEAUX, J.-F. & A. MAMECIER (2012). *Les sciences de la Terre*. Nathan, Paris, 2^e édition (1^e édition 2010).
- BEAUX, J.-F., J.-F. FOGELGESANG, P. AGARD & V. BOUTIN (2011). *Atlas de Géologie Pétrologie. BCPST 1^{re} et 2^e années*. Dunod, Paris.
- BIJU-DUVAL, B. (1999). *Géologie sédimentaire. Bassins. Environnements de dépôts. Formation du pétrole*. Technip, Paris, Institut français du pétrole (École du Pétrole et des Moteurs), Rueil-Malmaison (92).
- BISHOP, A. C., W. R. HAMILTON, A. R. WOOLEY (2001). *Guide des minéraux, roches et fossiles*. « Les Guides du naturalistes », Delachaux et Niestlé, Paris, 336 pages.
- BORDI, C., F. SAINTPIERRE (dir.), M. ALGRAIN, R. BOUDJEMAI, H. CLAUCE, O. GUIPPONI & Y. KRAUSS (2018). *Mémento Géologie BCPST 1^{re} et 2^e années*. Vuibert, Paris.
- BORDI, C., F. SAINTPIERRE (dir.), M. ALGRAIN-PITAVY, R. BOUDJEMAI, H. CLAUCE, O. GUIPPONI & Y. KRAUSS (2021). *Mémento Géologie BCPST 1^{re} et 2^e années*. Vuibert, Paris.
- BOTTINELLI, L., A. BRAHIC, L. GOUQUENHEIN, J. RIPERT & J. SERT (1993). *La Terre et l'Univers. Sciences de l'Univers*. Hachette, Paris.
- CAMPY, M. & J.-J. MACAIRE (2003). *Géologie de la surface*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^e édition 1989).
- CARON, J.-M., A. GAUTHIER, J.-M. LARDEAUX, A. SCHAAF, J. ULYSSE & J. WOZNIAK (2003) (2^e édition, 1989). *Comprendre et enseigner la planète Terre*. Ophrys, Gap – Paris, 303 pages.
- CHAMLEY, H. (2000). *Bases de sédimentologie*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^e édition 1987).
- CHANTRAINE, J., A. AUTRAN, C. CAVELIER (dir.) et collaborateurs (2003). *Carte géologique de la France à l'échelle du millionième*. Service géologique national, Bureau de Recherches géologiques et minières, Orléans, 6^e édition.
- CHEN, Z., D. LAVOIE, C. JIANG, M. J. DUCHESNE & M. MALO (2016). *Caractéristiques géologiques et évaluation des ressources pétrolières de la Formation de Macasty, Ile d'Anticosti, Québec, Canada*. Geological Survey of Canada, Open File 8019. <https://doi.org/10.4095/297893>
- COJAN, I. & M. RENARD (2006). *Sédimentologie*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^e édition 1999).
- CORBOZ, P. & W. FREI (2013). Application de la sismique hybride dans les sous-sols instables. *Mémoires de la Société vaudoise des Sciences naturelles*, 25 : 331-340.
https://wp.unil.ch/risk/files/2013/11/27_Corboz_MemSVSN2013_C_Li.pdf (consultation janvier 2022)
- CORDIER, P. & H. LEROUX (2008). *Ce que disent les minéraux*. Belin, Paris.
- COUVET, D. & A. TEYSSÈRE-COUVET (2010). *Écologie et biodiversité. Des populations aux socioécosystèmes*. Belin, Paris.
- DANIEL, J.-Y. (dir.), A. BRAHIC, M. HOFFERT, R. MAURY, A. SCHAAF & M. TARDY (2006). *Sciences de la Terre et de l'Univers*. Vuibert, Paris, 2^e édition (1^e édition 1999).
- DAUTEL, O. (dir.), A. PROUST, M. ALGRAIN, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, F. SAINTPIERRE, M. VABRE & C. BOGGIO (2017). *Biologie Géologie BCPST 1^{re} année*. Vuibert, Paris.
- DAUTEL, O. (dir.), C. BORDI, F. SAINTPIERRE, M. ALGRAIN-PITAVY, M. QUERTINIEZ, A. PROUST, M. VABRE A. HELME-GUIZON & B. MOLLIER (2019). *Biologie Géologie BCPST 2^e année*. Vuibert, Paris.
- DAUTEL, O. (dir.), M. ALGRAIN-PITAVY, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, B. MOLLIER, A. PROUST, M. QUERTINIEZ, F. SAINTPIERRE & M. VABRE (2021). *Prépas scientifiques BCPST 1^{re} année. Biologie Géologie. Tout-en-un*. Vuibert, Paris.
- DELMAS, R., S. CHAUZY, J.-M. VERSTRAETE & H. FERRÉ (2007). *Atmosphère, océan et climat*. Belin, Paris.
- DENCEUD, J., T. FERROIR, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2011). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2^e année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DENCEUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2013). *Biologie-Géologie BCPST-véto 1^{re} année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DENCEUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2014). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2^e année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

- DERCOURT, J. (2002). *Géologie et géodynamique de la France. Outre-mer et européenne*. « Sciences Sup », Dunod, Paris, 3^e édition (1^{re} édition 1997), 330 pages.
- DERCOURT, J., J. PAQUET, P. THOMAS & C. LANGLOIS (2006). *Géologie. Objets, méthodes et modèles*. Dunod, Paris, 12^e édition (1^{re} édition 1974).
- DUCO, A. (dir.), A. CARPENTIER, F. CELLE, G. DAOUST, N. DEWITZ, C. ETNER, H. FROISSARD, C. LAVILLE, A.-M. LE MOINE, L. LOISON, C. MÉMETEAU, B. MSIHID, J.-M. PICOCHÉ, S. REBULARD, P. REY, A. TASSEL, P.-O. THÉBAULT, E. SALGUEIRO, A. SEGUIN & S. VIGIER, 2010. *Sciences de la Vie et de la Terre Seconde*. Belin, Paris.
- FOUCAULT, A. & J.-F. RAOULT (2005). *Dictionnaire de Géologie*. Dunod, Paris, 6^e édition (1^{re} édition 1980).
- FOUCAULT, A., J.-F. RAOULT, F. CECCA & B. PLATEVOET (2014). *Dictionnaire de Géologie*. Dunod, Paris, 8^e édition (1^{re} édition 1980).
- GODINOT, C., H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2010). *Biologie-Géologie 1^{re} année BCPST-véto*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- GUILLERME, D., M. JUBAULT-BREGLER (dir.), O. AVISSEAU, S. BIHEL, N. BIHEL, Y. BOURVEN, V. BOUTIN, P. COMBEMOREL, P. DELHOUME, J.-M. DUPIN, A. FLORIMOND, V. GUILI, É. LE BRIS, M. MAHÉ, A. MÉRAH, É. RAINOUARD, M. RAUCHENBACH & F. SAINTPIERRE (2019). *Sciences de la Vie et de la Terre 1^{re}. Enseignement de spécialité*. Nathan, Paris.
- JAUJARD, D. (2015). *Géologie. Géodynamique. Pétrologie. Études de terrain*. Maloine, Paris.
- JOLIVET, L. & H.-C. NATAF (1998). *Géodynamique*. Dunod, Paris.
- JUNG, J. (1958). *Précis de pétrographie. Roches sédimentaires, métamorphiques et éruptives*. Masson et Cie, Paris.
- JUTEAU, T. & R. MAURY (2008). *La croûte océanique. Pétrologie et dynamique endogènes*. Vuibert, Paris.
- KRÉMEUR, A.-S., A. VINCENT & N. COLTICE (2019). *Géologie*. Dunod, Paris.
- LACOSTE, A. & R. SALANON (1969). *Éléments de biogéographie et d'écologie*. Nathan, Paris.
- LAGABRIELLE, Y., R. MAURY & M. RENARD (2013). *Mémo visuel de Géologie. L'essentiel en fiches. Licence. Prépas. CAPES*. Dunod, Paris.
- LAY, T. (2015). Chapter 1.22. Deep Earth Structure: Lower Mantle and D". In G. SCHUBERT (dir.). *Treatise on Geophysics (Second Edition). Volume 1. Deep Earth Seismology*. Elsevier, Amsterdam, pp. 638-723. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00019-1>
- LIZEAUX, C., D. BAUDE (dir.), V. AUDEBERT, C. BRUNET, G. GUTJAHR, Y. JUSSEURAND, A. MATHEVET, P. PILLOT, S. RABOUIN & A. VAREILLE, 2007. *SVT Sciences de la Vie et de la Terre Première*. S. Bordas, Paris.
- LIZEAUX, C., D. BAUDE (dir.), C. BRUNET, A. CHASLEIX, B. FORESTIER, G. GUTJAHR, Y. JUSSEURAND, A. MATHEVET, P. PILLOT, S. RABOUIN & A. VAREILLE, 2010. *Sciences de la Vie et de la Terre Seconde*. Bordas, Paris.
- LOWRIE, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics. Second Edition*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- MACKENZIE, W. S. & A. E. ADAMS (2005). *Initiation à la pétrographie*. Dunod, Paris, 3^e édition (1^{re} édition 1992), 192 pages.
- MARSHAK, S. (2010). *Terre, portrait d'une planète*. Traduction O. ÉVRAD. De Boeck, Bruxelles (3^e édition américaine 2008).
- MASCLE, G. (2008). *Les roches, mémoire du temps*. EDP Sciences, Les Ulis (91).
- MATTAUER, M. (1998). *Ce que disent les pierres*. Belin – Pour la Science, Paris.
- MEHIER, B. (1995). *Magmatisme et tectonique des plaques*. Ellipses, Paris.
- NOUGIER, P. (2000a). *Déformation des roches et transformation de leurs minéraux. Initiation à la tectonique*. Ellipses, Paris.
- NOUGIER, P. (2000b). *Structure et évolution du globe terrestre*. Ellipses, Paris, 2^e édition (1^{re} édition 1993).
- PERRIER, C. & J.-F. BEAUX (dir.), A. BOUFFIER, L. BOUGEOIS, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J. DÉMARET-NICOLAS, A. EMOND, S. MAURY, O. MONNIER, T. SOUBAYA, A. VERGNAUD & A. WOEHRLÉ (2021). *Biologie-Géologie BCPST 1. Tout-en-un*. Dunod, Malakoff (F).
- PEYCRU, P. (dir.), J.-M. DUPIN, J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, C. VAN DER REST, F. CARIOU, C. PERRIER & B. AUGÈRE (2008). *Géologie tout-en-un 1^{re} et 2^e années BCPST*. Dunod, Paris.
- PEYCRU, P., J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, C. BECK, F. CARIOU, J.-M. DUPIN, J.-L. SCHNEIDER, M. TARDY & C. VAN DER REST (2015). *Géologie tout-en-un BCPST 1^{re} et 2^e années*. Dunod, Paris.
- PEYCRU, P., C. PERRIER, J.-F. FOGELGESANG (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, F. CARIOU, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN & C. VAN DER REST (2019). *Biologie et géologie. BCPST 1 et 2. Tout-en-fiches*. Dunod, Paris.
- POMEROL, C., Y. LAGABRIELLE & M. RENARD (2003) (12^e édition, 1965). *Éléments de géologie*. « Masson Sciences », Dunod, Paris, 746 pages.
- POMEROL, C., Y. LAGABRIELLE, M. RENARD & S. GUILLOT (2011). *Éléments de géologie*. Dunod, Paris, 14^e édition (1^{re} édition 1965).
- PLUMMER, C. C., D. H. CARLSON & L. HAMMERSLEY (2016). *Physical Geology. Fifteenth Edition*. McGraw-Hill Education, New York (NJ), USA.
- PREVOT, C., S. REBULARD (dir.), A. BIELLE, C. BORDONADO, A. CARPENTIER, J. FAIVRE, S. FRAYON, G. GEHIN, B. PERIC, L. SALOMON, R. SEYED, É. TREHIOU, M. TREIBER, A. VAN PRAET & I. VELTZ (2019). *SVT 1^{re} enseignement de spécialité*. Belin, Paris.
- PREVOT, C., S. REBULARD (dir.), G. BARTHOLE, C. BORDONADO, R. CADET, S. FRAYON, R. SEYED, É. TREHIOU, M. TREIBER & I. VELTZ (2020). *SVT 1^{re} enseignement de spécialité*. Belin, Paris.
- PROVOST, A. & C. LANGLOIS (2011). *Mini manuel de Géologie – Roches et géochimie*. Dunod, Paris.
- RENARD, M., Y. LAGABRIELLE, E. MARTIN & M. DE RAFÉLIS (2018). *Éléments de géologie. 16^e édition du « Pomerol »*. 1^{re} édition 1965 (Armand Colin). Dunod, Paris.
- ROBERT, C. & R. BOUSQUET (2013). *Géosciences. La dynamique du système Terre*. Belin, Paris.
- SANTOS, J. A. N. CATAPANG & E. D. REYTA (2019). Understanding the Fundamentals of Earthquakes signal Sensing Network. *AnalogDialogue*, **53**(3): 11 pp. <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-53/number-4/understanding-the-fundamentals-of-earthquake-signal-sensing-networks.pdf> (consultation janvier 2022).
- SARAÒ, A., M. SUGAN, G. BRESSAN, G. RENNER & A. RESTIVO (2021). A focal mechanism catalogue of earthquakes that occurred in the southeastern Alps and surrounding areas from 1928–2019. *Earth System Science Data*, **13** (5): 2245–2258. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2245-2021>
- TAVERNIER, R. & J. LAMARQUE (1996). *Enseigner la biologie et la géologie à l'école élémentaire*. Bordas, Paris.
- VIDAL, P. (1994). *Géochimie*. Dunod, Paris.

Plan du chapitre

Objectifs : extraits du programme	1
Introduction générale	1
Introduction	2
I. De l'étude des séismes au modèle radial de la Terre solide	3
A. L'étude des séismes : la sismologie	3
1. La nature et les manifestations des séismes	3
a. Les séismes, ébranlements de la surface terrestre dus à une rupture rocheuse au sein de la lithosphère	3
b. Les séismes, phénomènes naissant au niveau d'un foyer et ressentis maximalement à la surface au niveau de l'épicentre	3
c. La possibilité de répliques sismiques... voire de séismes multiples	3
d. Les séismes sont-ils cycliques et prévisibles ?	3
α. Notions de cycle sismique et de rebond élastique	3
β. La non-périodicité des séismes et leur imprédictibilité	4
γ. Notions d'aléa, vulnérabilité et risque sismiques	4
δ. Une estimation de l'aléa basée sur l'évaluation des déplacements instantanés de terrains et de plaques	4
i. Une évaluation de l'énergie mécanique accumulée localement par extrapolation des mouvements de plaques et de terrains en zone sismique	4
ii. Un déplacement instantané des plaques qui peut être évalué par des mesures de géodésie spatiale par GPS ou interférométrie radar	5
e. La diversité des séismes : une typologie simple en fonction de l'origine du séisme	5
α. Les séismes tectoniques	5
β. Les séismes volcaniques	5
γ. Les séismes glaciaires	5
δ. Les séismes artificiels	6
2. Des phénomènes caractérisés par la propagation de trains d'ondes sismiques	6
a. Des ondes enregistrables sur des sismogrammes produits par des sismographes au niveau de stations d'enregistrement	6
b. La propagation et l'arrivée séquentielles de trois trains d'ondes aux caractéristiques propres	8
c. Une vitesse des ondes de volume qui augmente lorsqu'elles traversent des couches profondes : l'enseignement des hodochrones	9
d. Une multilatération possible de l'épicentre d'un séisme à partir des enregistrements de plusieurs stations	9
e. Des ondes déviées par des discontinuités physiques et chimiques et enregistrables, avec atténuation, sur l'ensemble de la planète (sauf dans la zone d'ombre)	10
3. Des séismes d'amplitude variable : notions d'intensité et de magnitude	11
a. L'intensité d'un séisme : les échelles de MERCALLI (1903), MSK (1964)...	11
b. La magnitude d'un séisme : l'échelle (ouverte) de RICHTER (1930), la magnitude de moment (HANKS-KANAMORI, 1979)	11
4. Répartition et mécanismes au foyer des foyers : un lien avec la géodynamique	12
a. La répartition des séismes et de leurs foyers	12
α. La répartition horizontale des séismes : une concentration aux limites des plaques lithosphériques	12
β. La répartition verticale des foyers séismes : une profondeur des foyers dépendant du contexte géodynamique (+ notion de zone de WADATI-BENIOFF)	13
b. Les mécanismes au foyer, des représentations sphériques des contraintes au niveau du foyer du séisme	13
5. Bilan sur les séismes	15

B. Le modèle radial de la Terre solide (géosphère)	15
1. Le modèle PREM (1981), résultat de la compilation de très nombreuses données sismiques	15
2. Trois discontinuités et quatre couches majeures	15
a. Les grandes discontinuités : MOHOROVIČIĆ (Moho) (moy. 30 km), GUTENBERG (2900 km) et LEHMANN (5100 km)	15
b. Les grandes couches ainsi séparées : croûte [solide], manteau [solide], noyau externe [liquide] et noyau interne (= graine) [solide]	16
3. La LVZ et la distinction lithosphère-asthénosphère	17
a. La LVZ, zone de moindre vitesse des ondes sismiques qui s'explique par un rapprochement du géotherme et du solidus des roches	17
b. Asthénosphère et lithosphère : trois définitions complémentaires	17
α. La définition sismique : croûte-manteau avant LVZ vs. LVZ et reste du manteau supérieur	17
β. La définition thermique : au-dessus vs. au-dessous de l'isotherme 1300 °C	18
γ. La définition rhéologique : niveau rigide vs. niveau ductile	18
δ. Bilan : tentative de définition croisée	18
ε. Deux précisions	18
i. La profondeur de la LVZ ou LAB (et donc de la lithosphère), une réalité très variable, notamment sous les continents	18
ii. L'asthénosphère ne correspond qu'à la LVZ pour certains auteurs (minoritaires)	19
4. La structuration verticale du manteau	19
α. La LVZ et la distinction manteau lithosphérique-manteau asthénosphérique (voir 3.b)	19
β. Des sauts de vitesse à 410 km et 670 km de profondeur ; notions de manteau supérieur (incl. zone de transition), manteau inférieur (= mésosphère)	19
γ. Une cessation de la hausse de vitesse moyenne (avec forts hétérogénéités latérales) dans les 200 derniers km, définissant la couche D'' (cimetière de plaques subduites, couche d'ancrage des panaches, interface avec le noyau)	19
5. Pour finir par une anecdote : la discontinuité de CONRAD séparant croûte continentale « supérieure » et « inférieure », un concept discutable	20
6. Bilan sur la structure du globe	21
C. Une application des propriétés sismiques à la compréhension fine de l'organisation des niveaux géologiques	23
1. Une mise en évidence d'hétérogénéités dans le manteau par l'étude des anomalies de vitesses des ondes sismiques : la tomographie sismique	23
2. Une mise en évidence de l'organisation des couches géologiques par des ondes sismiques artificielles : la sismique	24
a. Une méthode de prospection géophysique basée sur l'émission et la réception d'ondes sismiques artificielles pour reconstituer l'organisation de terrains géologiques	24
b. La sismique réflexion : l'usage de la réflexion d'ondes sismiques pour reconstituer la disposition globale des terrains jusqu'à 50 km	25
c. La sismique réfraction : l'usage de la réfraction d'ondes sismiques pour reconstituer la disposition fine de couches sédimentaires sur quelques mètres à centaines de mètres	27
3. Pour information : les diagraphies, enregistrements de paramètres physiques par des sondes au sein d'un forage	27
D. L'origine de la structure terrestre	27
1. Les météorites, des indices pour comprendre la formation de la Terre	27
a. Les météorites, fragments d'objets célestes pénétrant dans l'atmosphère et frappant la surface de la planète	27
b. Les principales catégories de météorites : météorites pierreuses ou aérolithes (chondrites + achondrites) vs. météorites ferreuses ou sidérites	27
c. Origine des météorites	28
2. Origine de la structure interne du globe : accréation et différenciation de la Terre	28
a. Origine des planétésimaux	28

b. Accrétion des planétésimaux	29
c. Différenciation des enveloppes terrestres	29
II. La composition des couches de la Terre solide (géosphère)	30
A. L'étude des matériaux des terrestres	30
1. Les notions d'élément chimique, minéral et roche	30
2. Les principaux éléments et minéraux du globe	30
3. Méthodes d'étude des constituants terrestres	33
a. Méthodes directes : échantillonnage, observation en submersible, enclaves, forages...	33
b. Méthodes indirectes : données sismiques, données expérimentales, données chimiques (et pétrologiques) des météorites	33
B. Composition pétrologique et minéralogique des enveloppes terrestres	33
1. Croûte	33
a. Croûte continentale	33
α. Origine des données : échantillonnage, exhumation dans les montagnes, enclaves	33
β. Grande diversité des roches rencontrées	33
γ. Composition globale de l'enveloppe : granitoïdes et roches métamorphiques	33
δ. Des âges très variables (jusqu'à 4 Ga dans les vieux boucliers)	34
b. Croûte océanique	35
α. Origine des données : ophiolites, (forages), observation par submersible, observations à l'air libre (Islande)	35
β. Composition type de l'enveloppe : basaltes en coussins, complexe filonien, gabbros	35
γ. Des âges plutôt récents (jusqu'à 180 Ma)	36
c. Et les roches sédimentaires ?	36
d. Bilan sur les croûtes	36
2. Manteau	37
a. Origine des données : ophiolites, enclaves et cellule à enclumes de diamant	37
b. Composition globale de l'enveloppe : de la péridotite sous différentes configurations cristallines	38
3. Noyau	39
a. Origine des données : des raisonnements indirects notamment à partir de la composition des météorites et des données sismiques	39
b. Composition globale de l'enveloppe : un corps ferreux allié à du nickel	39
C. Composition chimique des enveloppes terrestres	40
D. Importance massique des enveloppes terrestres	40
E. Bilan	40
III. Une hausse de température avec la profondeur avec des sauts marquant une stratification thermique du globe : le géotherme	41
A. Notions de géotherme et gradient géothermique	41
B. Une construction basée sur des points d'ancrage	41
1. Une mesure de température dans les forages continentaux profonds permettant d'inférer un gradient lithosphérique de $30 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$	41
2. Une limite lithosphère-asthénosphère (LAB) à 1300°C (1600 K) environ à 100 km	41
3. Des points d'ancrage découlant de la minéralogie expérimentale sur l'olivine : 1750 K à 410 km et 1900 K à 670 km	41
4. Une température de fusion du fer (5000 K) proposée pour le noyau à la profondeur de la discontinuité de LEHMANN	41
C. Une extrapolation entre les points d'ancrage fonction du modèle convectif du manteau retenu	42

IV. Des enveloppes fluides superficielles également stratifiées verticalement	43
A. L'atmosphère : une stratification thermique que l'on peut mesurer avec un ballon sonde puis des capteurs embarqués	43
B. L'hydrosphère : stratification de base de l'océan selon des critères de température, salinité et densité	44

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	46
Références	46
Plan du chapitre	48

© Tanguy JEAN. Les textes et les figures originales sont la propriété de l'auteur. Les figures extraites d'autres sources restent évidemment la propriété des auteurs ou éditeurs originaux.
Document produit en janvier 2022 • Dernière actualisation : décembre 2025.
Contact : Tanguy.Jean4@gmail.com
Adresse de téléchargement : <https://www.svt-tanguy-jean.com/>



Ces données sont placées sous licence *Creative Commons Attribution – Pas d'Utilisation commerciale 4.0 CC BY NC* qui autorise la reproduction et la diffusion du document, à condition d'en citer explicitement la source et de ne pas en faire d'utilisation commerciale.