

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 du 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 °°

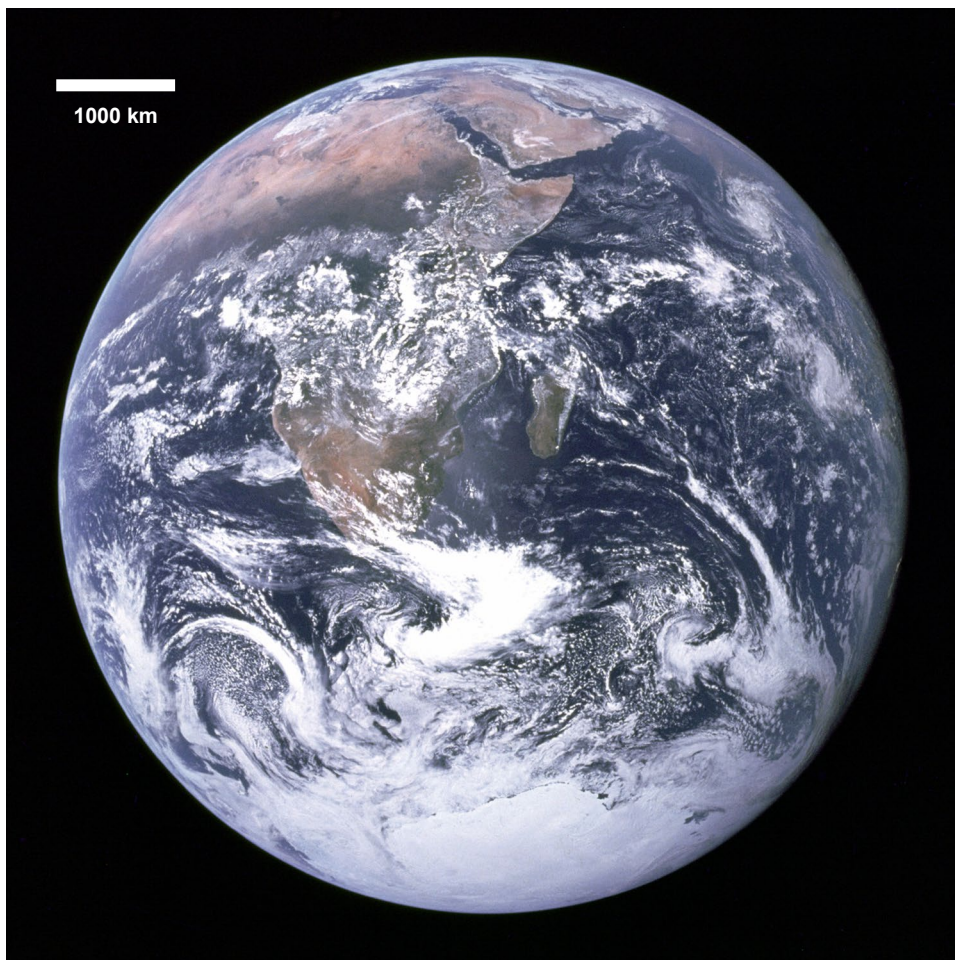
>> Cours <<

Chapitre 21

La structure de la planète Terre

Objectifs : extraits du programme

ST-B La structure de la planète Terre (BCPST 1)	
<p>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.</p>	
Savoirs visés	Capacités exigibles
<p>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.</p> <p>La nature minéralogique du manteau varie avec la profondeur.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 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
<p>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 péridotite à plagioclase, à spinelle, à grenat, à 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.</p>	
<p>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)</p>	



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**.

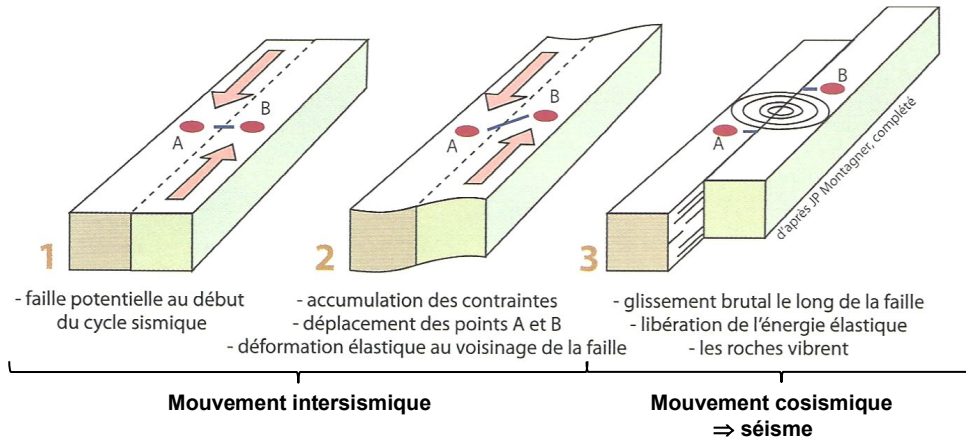
I. De l'étude des séismes au modèle radial de la Terre solide

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

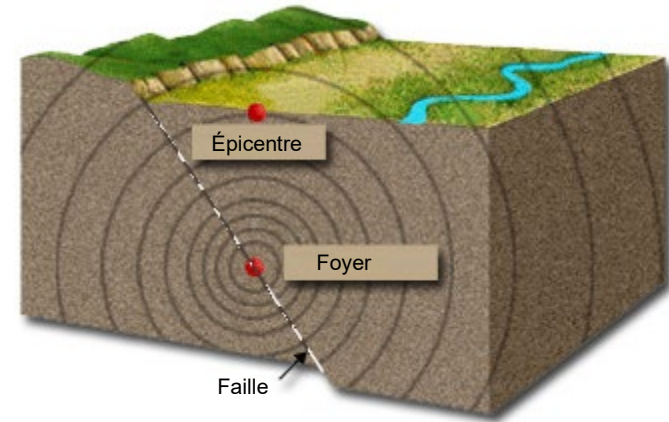
a. Les séismes, ébranlements de la surface terrestre dus à une rupture rocheuse au sein de la lithosphère



▲ 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



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

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

d. Les séismes sont-ils cycliques et prévisibles ?

α. Notions de cycle sismique et de rebond élastique

β. La non-périodicité des séismes et leur imprédictibilité

γ. Notions d'aléa, vulnérabilité et risque sismiques



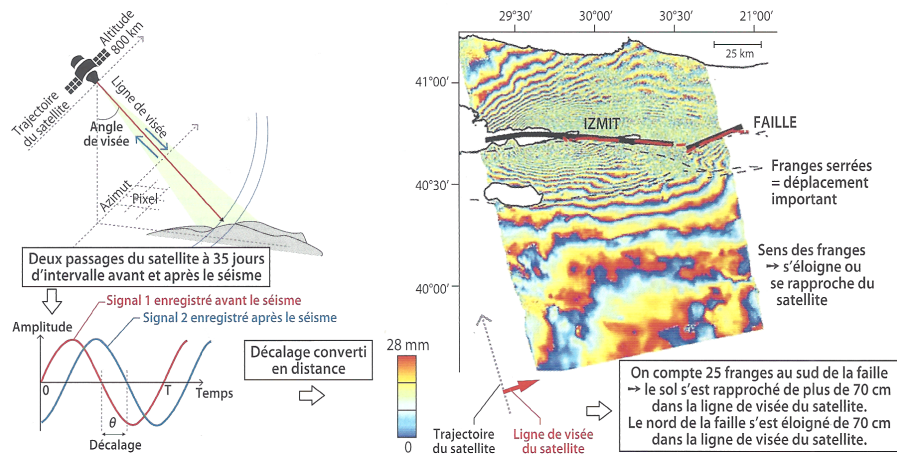
▲ FIGURE 3. Un immeuble, construit sur des sédiments meubles, fracturé et effondré suite à un séisme (Chili, 2010). D'après Wikipédia (janvier 2022).

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.

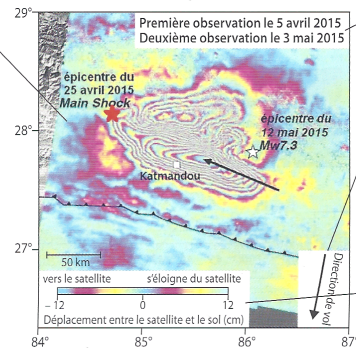
Étude d'un exemple

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.

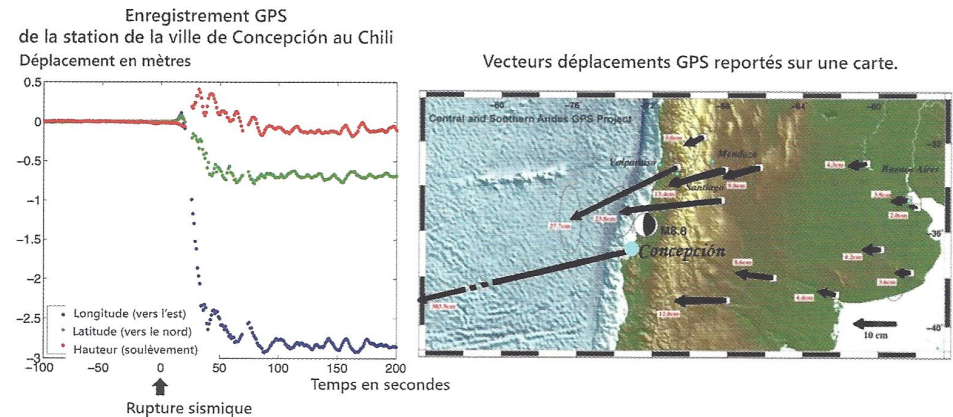
Les ondes utilisées sont des ondes radio. La longueur d'onde utilisée permet de dire que le déplacement est de 12 cm par frange.

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.

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.

5. 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
- Un déplacement instantané des plaques qui peut être évalué par des mesures de géodésie spatiale par GPS ou interférométrie radar



Un exemple de mesure GPS au cours d'un épisode sismique.

▲ 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).



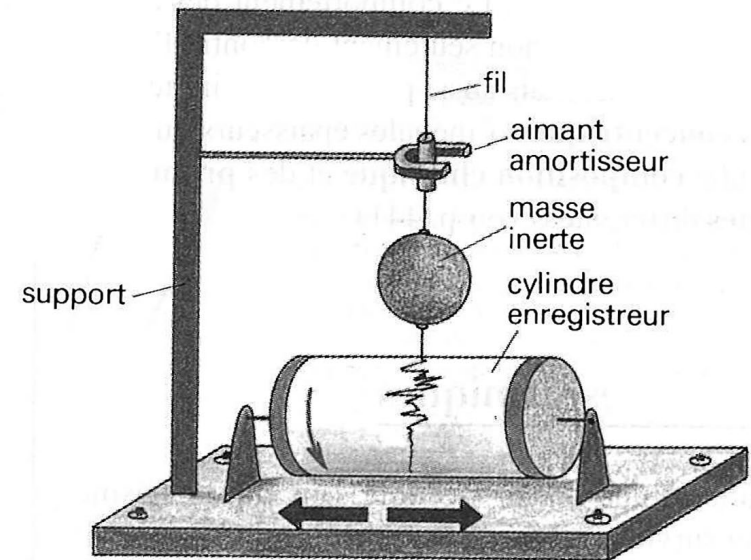
▲ FIGURE 5. Stations GPS permanentes à Papano et Acapulco (Mexique). <https://newsroom.univ-grenoble-alpes.fr/sciences-et-technologies/les-seismes-lents-peuvent-declencher-des-secousses-103171.kjsp> (janvier 2022).

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

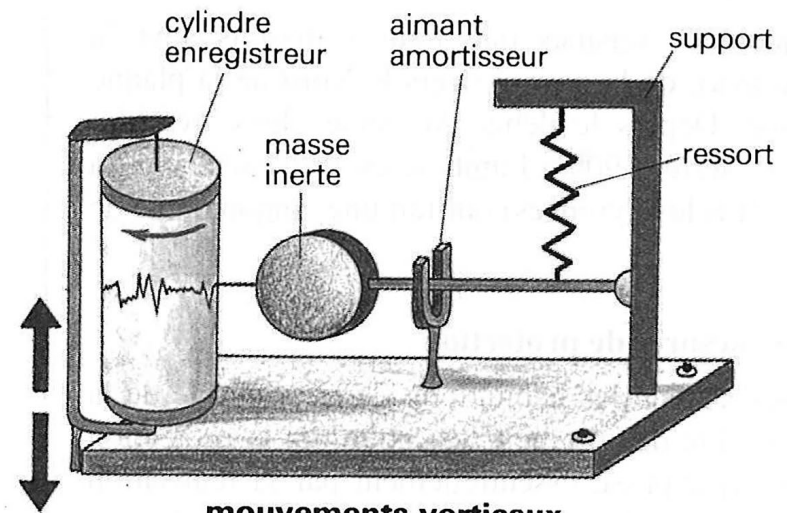
- α. Les séismes tectoniques
- β. Les séismes volcaniques
- γ. Les séismes glaciaires
- δ. Les séismes artificiels

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

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

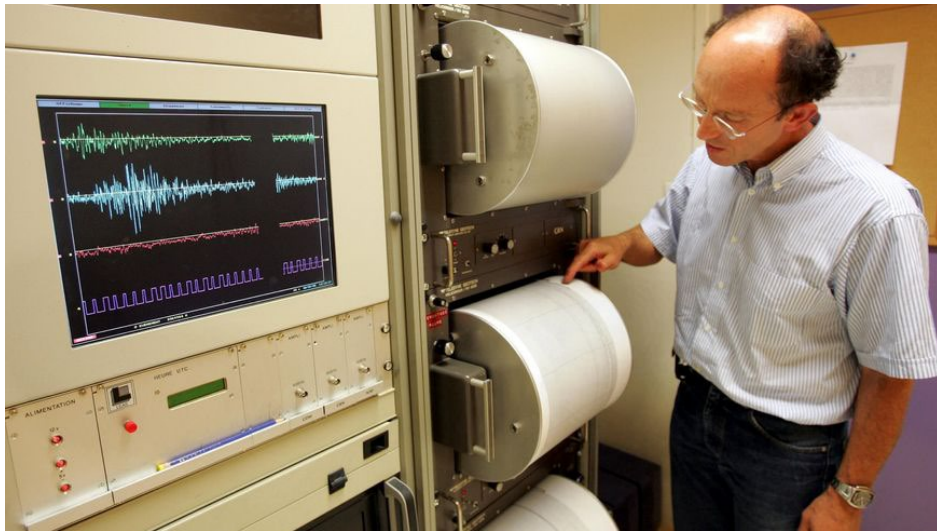


mouvements horizontaux



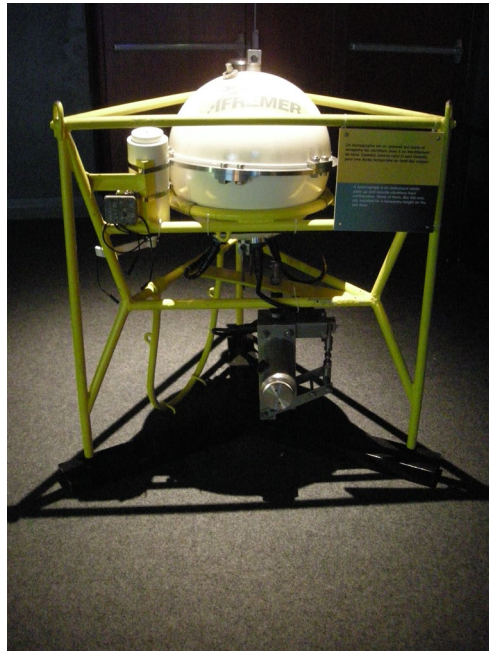
mouvements verticaux

▲ 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)

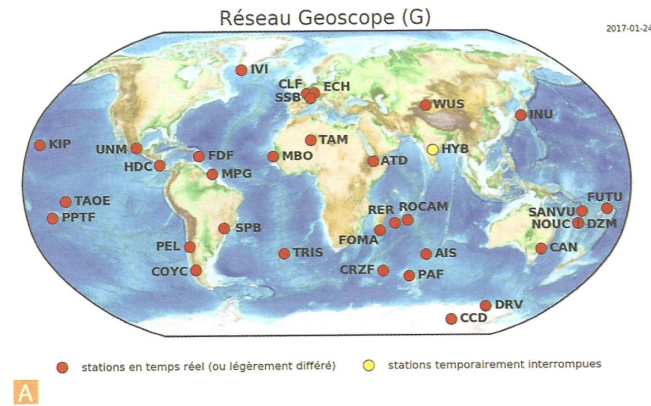
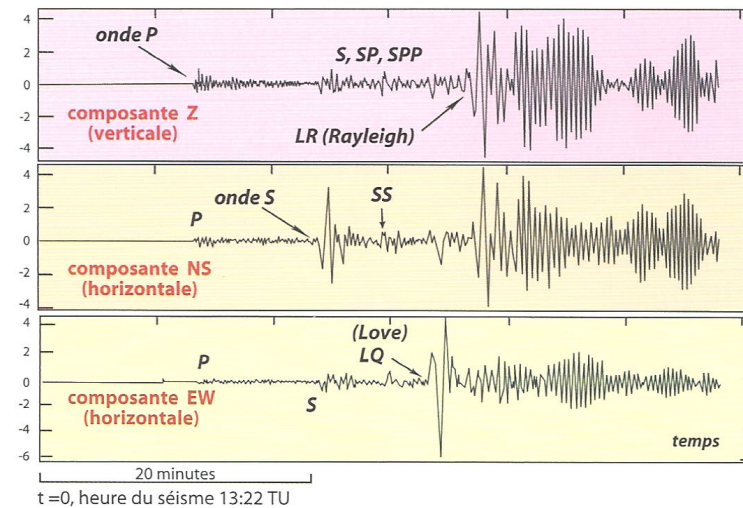


Figure 6.13 Les réseaux sismologiques.

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 : IPG.

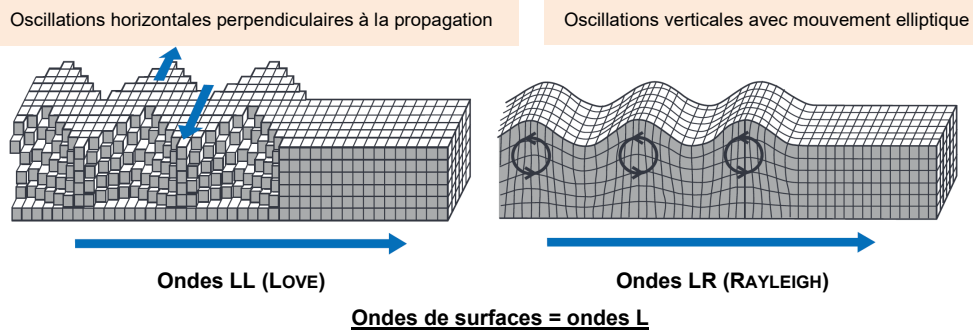
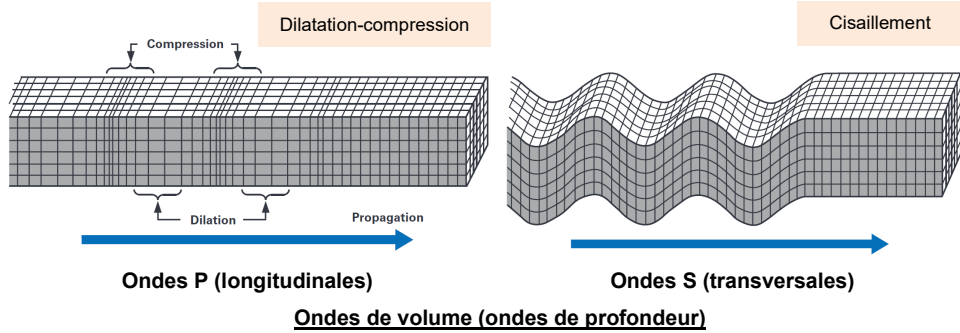
▲ FIGURE 9. Le réseau Géoscope. D'après RENARD *et al.* (2018).

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

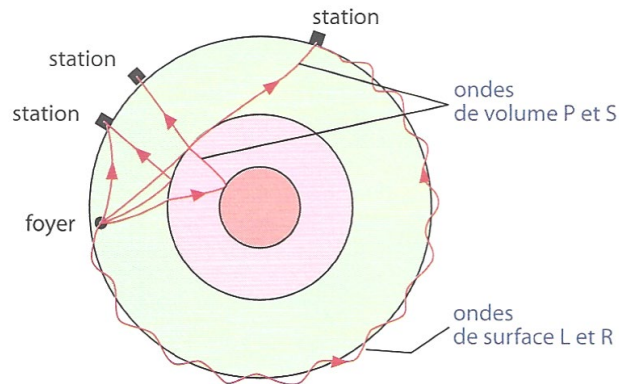


Sismogrammes
 Enregistrements d'un séisme lointain sur une station sismique (sismographe) à 3 composantes
 Séisme d'Hokaidō (Japon), le 4/10/1994 enregistré à Nouméa (Nouvelle-Calédonie) à 7 500 km de distance (réseau GEOSCOPE)

▲ FIGURE 10. Un sismogramme. D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).



▲ 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 **vitesse des ondes sismiques de volume** peuvent être données par les formules ci-dessous.

$$V_p = \sqrt{\frac{4/3\mu + K_s}{\rho}}$$

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

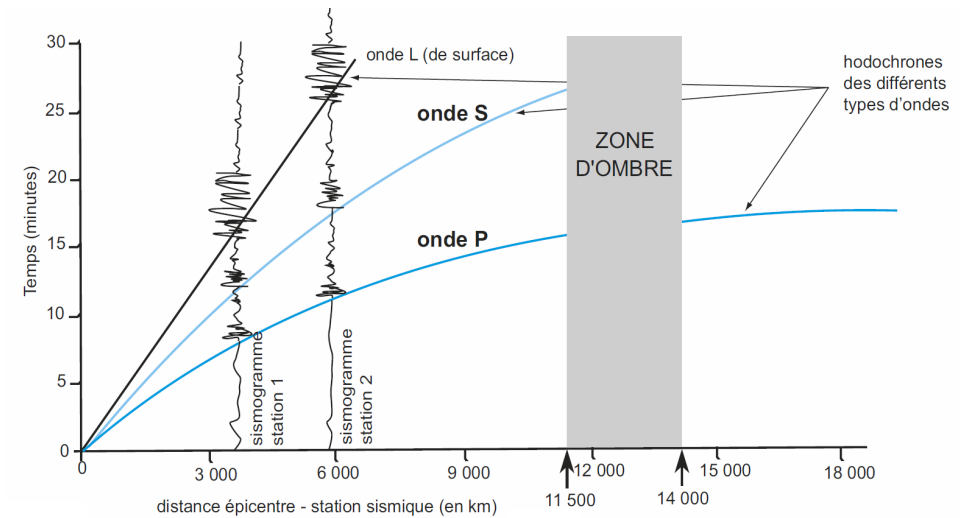
en km/s

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

LAGABRIELLE *et al.* (2008)

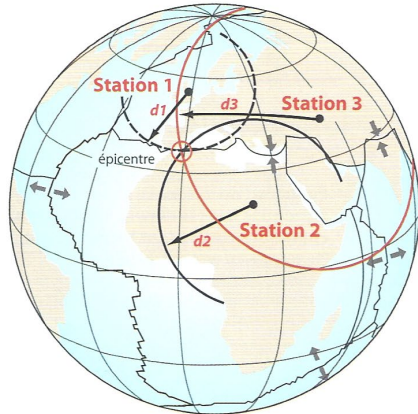
v_p : vitesse des ondes P
 v_s : vitesse des ondes S

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

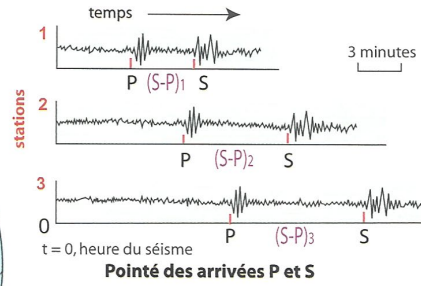


▲ FIGURE 13. **Hodochrone(s).** D'après PEYCRU *et al.* (2008).

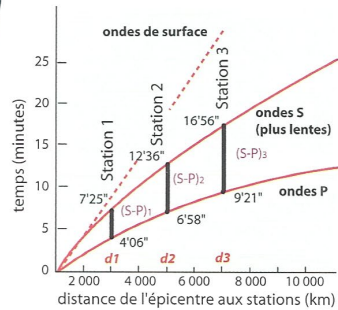
d. Une multilatération possible de l'épicentre d'un séisme à partir des enregistrements de plusieurs stations



Principe de la localisation de l'épicentre d'un séisme par la différence S-P
(séisme en Algérie et trois stations : Europe, Afrique et Asie)



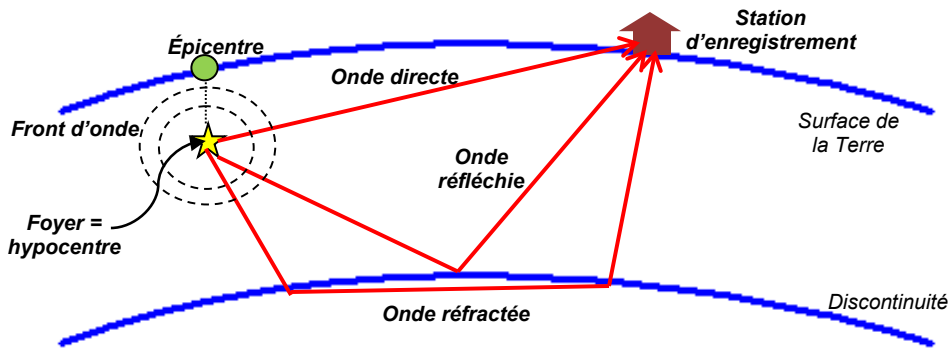
Pointé des arrivées P et S



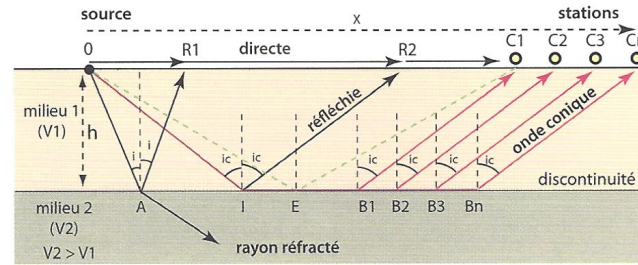
Hodographe

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

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)



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

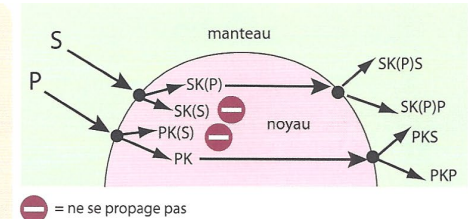


Ondes directes (vitesse V_1) : OR1, OR2, OC1...
Ondes réfléchies (vitesse V_1) : OIR2, OEC1...
Ondes coniques : OIB1C1, OIB2C2...
(vitesse V_2 sur le trajet IB1, IB2...)

Trajets des rais des ondes directe, réfléchies, réfléchies, et conique
à partir du foyer d'un séisme superficiel placé arbitrairement au point O

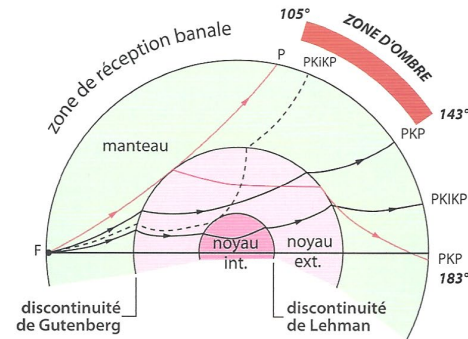
▲ **FIGURE 16. Ondes directes / réfléchies / coniques.** D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

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.

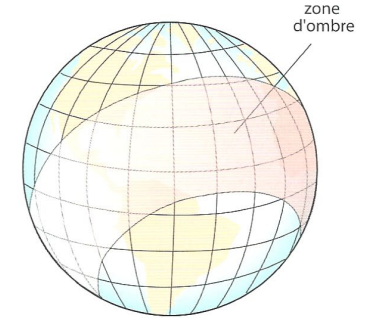


— = ne se propage pas

Propagation des ondes à travers le noyau
Chaque point de la discontinuité frappé par le front des ondes P et S devient un point source générant à son tour des ondes P et S.



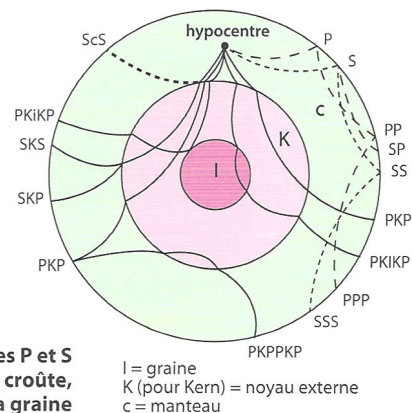
Zone d'ombre créée par le noyau
Absence d'ondes directes entre 105° et 143°
I = traversent le noyau interne (graine),
i = se réfléchissent sur la discontinuité de Lehman



Localisation de la zone d'ombre pour un séisme au Japon

▲ **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

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

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

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

▼ 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 senti 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. Bouleversements 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)

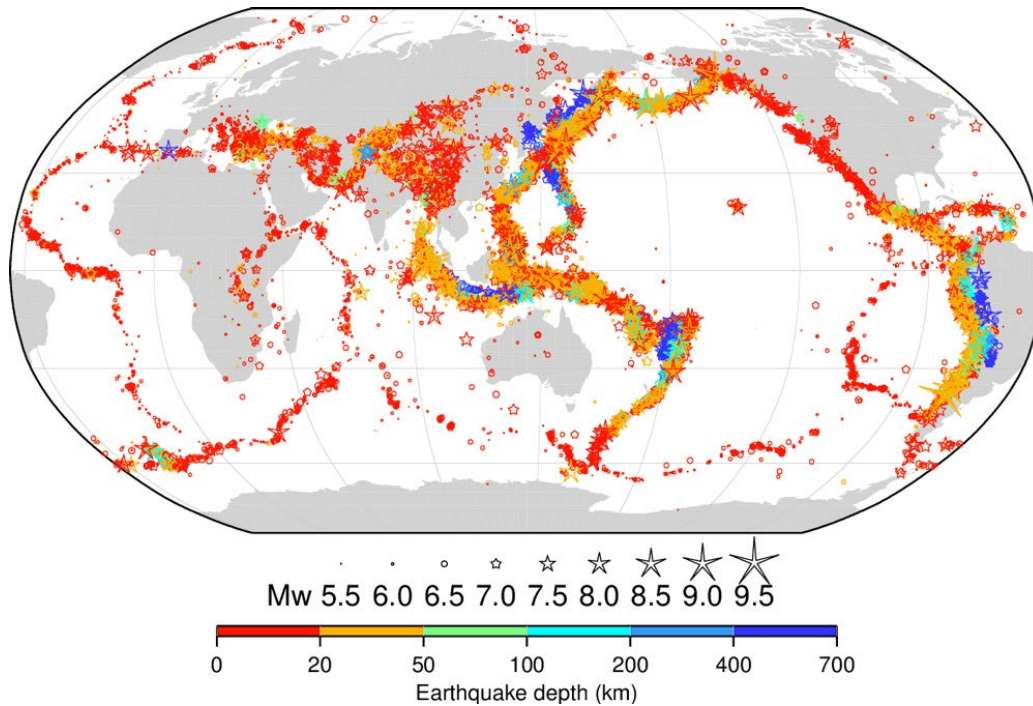
Le **record absolu mesuré à ce jour** est le **séisme de Valdivia (Chili) en 1960** à (**magnitude 9,5**) (foyer **33 km** de profondeur). La **ville fut complètement détruite**, le **trait de côte** du Chili **modifié** et un **tsunami** avec des **vagues submersives de 25 m** fut observé, touchant 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 senti.	8 000 par jour
Très mineur	2,0 à 2,9	Généralement non senti mais détecté/enregistré.	1 000 par jour
Mineur	3,0 à 3,9	Souvent senti 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

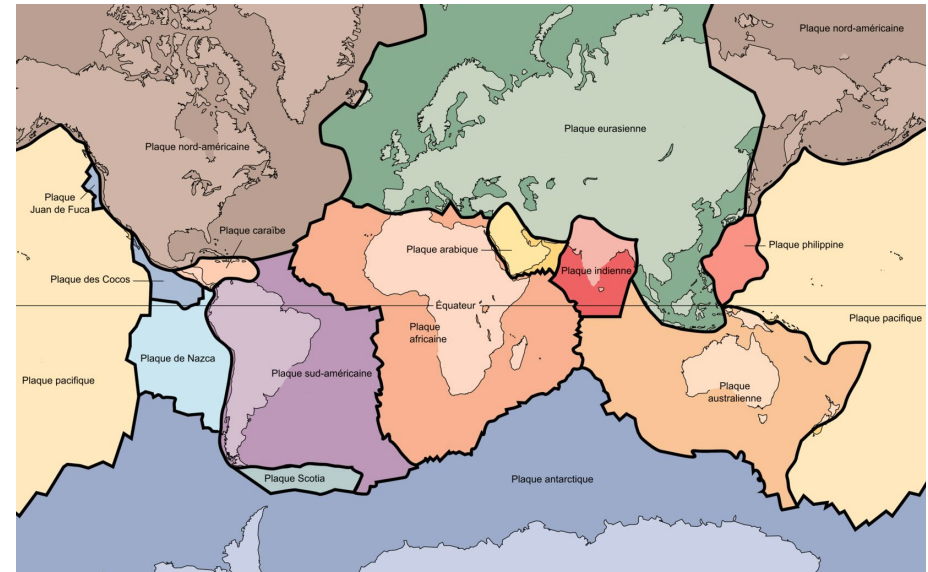
4. Répartition et mécanismes au foyer des foyers : un lien avec la géodynamique

a. La répartition des séismes et de leurs foyers

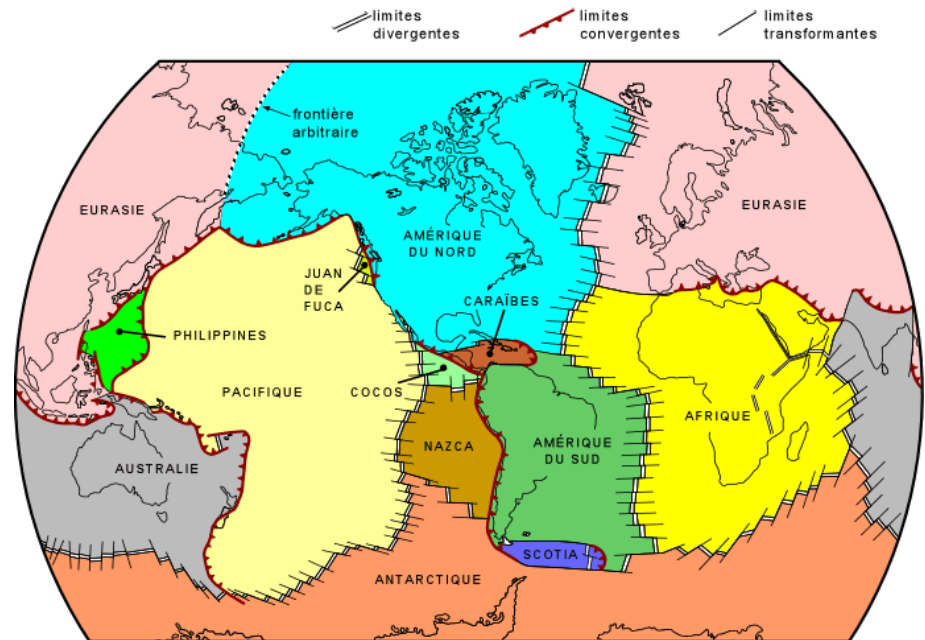
α. La répartition horizontale des séismes : une concentration aux limites des plaques lithosphériques



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

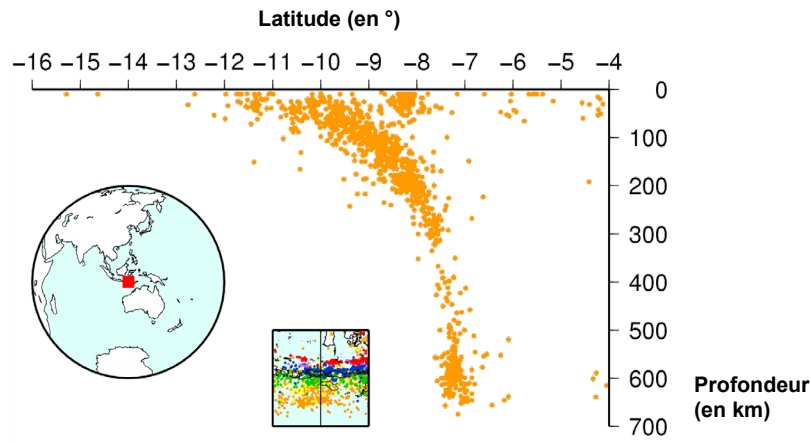


▲ FIGURE 20. Les principales plaques tectoniques. Wikipédia (janvier 2022).



▲ FIGURE 21. Les principales plaques tectoniques et la nature de leurs limites. <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s/1/1.17.gif> (janvier 2022).

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



▲ 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

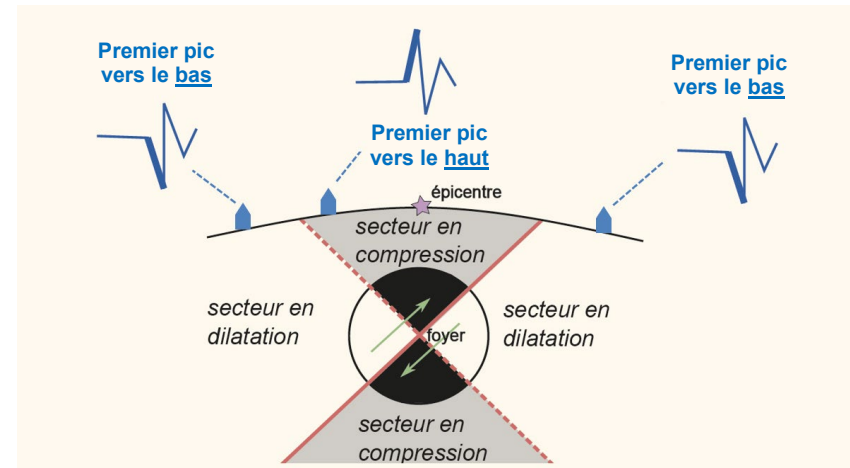
Encadré A La construction des mécanismes au foyer

La construction d'un mécanisme au foyer

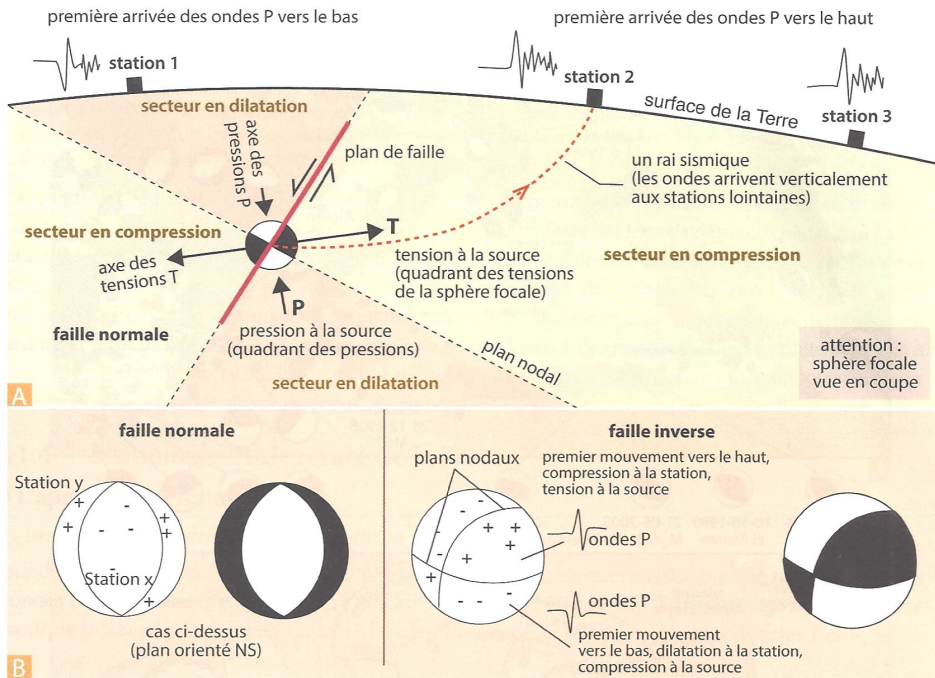
- La représentation d'un mécanisme au foyer se fonde sur une *sphère virtuelle centrée sur le foyer*, la *sphère focale*.
- Elle est divisée en quatre quadrants dont les limites sont *deux plans perpendiculaires qui se croisent au niveau du foyer* nommés *plans nodaux*. L'un de ces plans est le *plan 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*.

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=CKVlJV2pP1A>



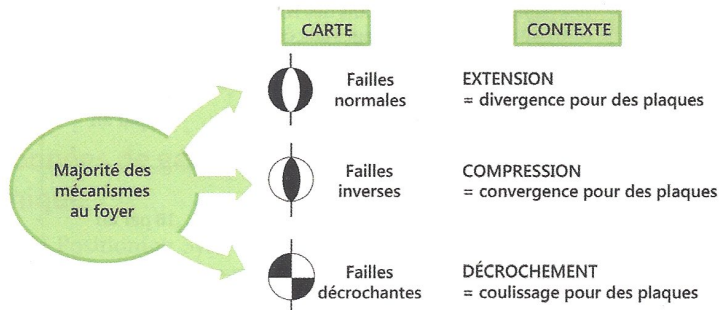
♥ FIGURE 23. Des sismogrammes au mécanisme au foyer : principe d'établissement.
D'après PERRIER, BEAUX et al. (2021), modifié.



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.

A 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)



A 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) :

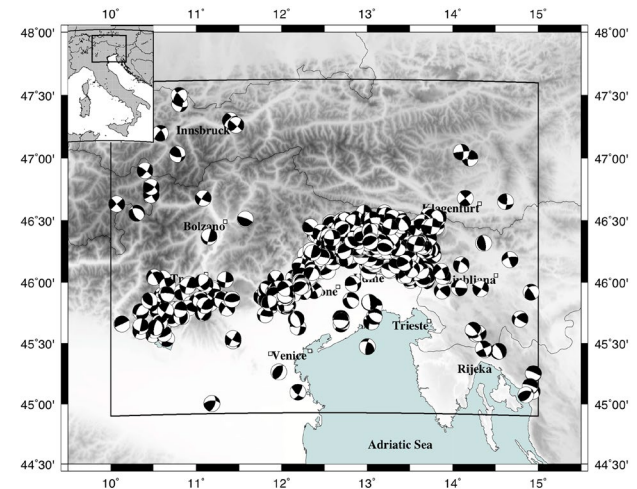
- Le **mécanisme au foyer** d'un **séisme** associé à une **faille inverse** présente **un I noir et des bordures blanches**.
- Le **mécanisme au foyer** d'un **séisme** associé à une **faille normale** présente **un I blanc et des bordures noires**.
- Le **mécanisme au foyer** d'un **séisme** associé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

type de faille	mécanisme au foyer	limite de plaque
faille inverse (compression)		convergente (fosse de subduction, chaîne de collision)
faille normale (extension)		divergente (dorsale, rift)
faille décrochante (ici sénestre)		coulissante (faille transformante)

Les mécanismes au foyer: types et signification géodynamique.

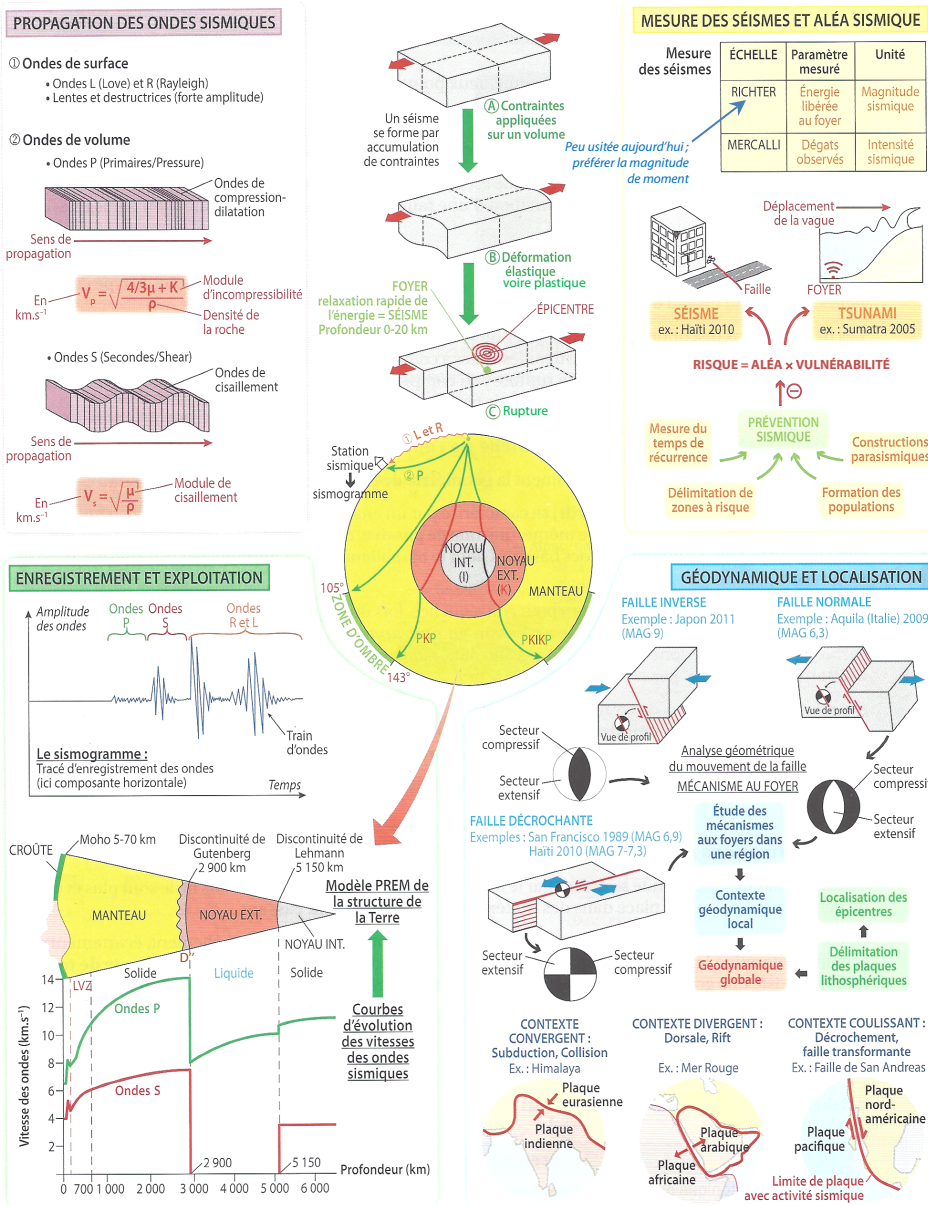
Types de mécanismes : **A : extension** (axe des dorsales) ; **B : décrochement** (faille transformante et faille intracontinentale décrochante dextre ou sénestre) ; **C : compression** (le long d'un plan de subduction) ; **D : compression** (chevauchement intracontinental) ; **E : extension** (rift intracontinental) ; **F : extension** (flexure avant-fosse, « bulge »).

A FIGURE 26. Quelques mécanismes au foyer les régions sismiquement actives.
D'après RENARD *et al.* (2018)



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

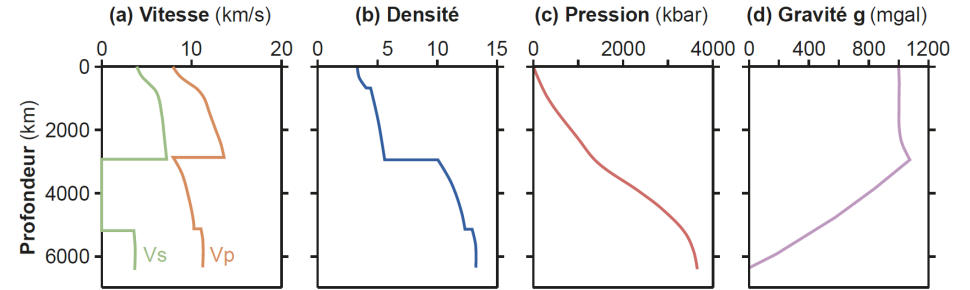
5. Bilan sur les séismes



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

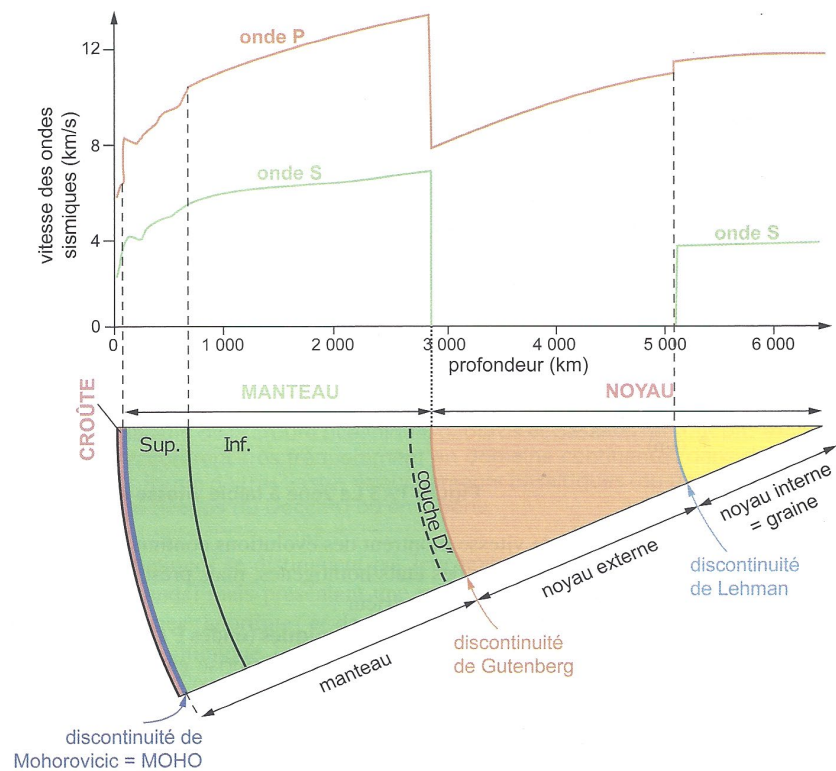
- (a) Profil de vitesse des ondes P et S ; (b) profil de densité ; (c) profil de pression ; (d) profil de l'accélération de la pesanteur (mgal = 10⁻⁵ m.s⁻²)

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

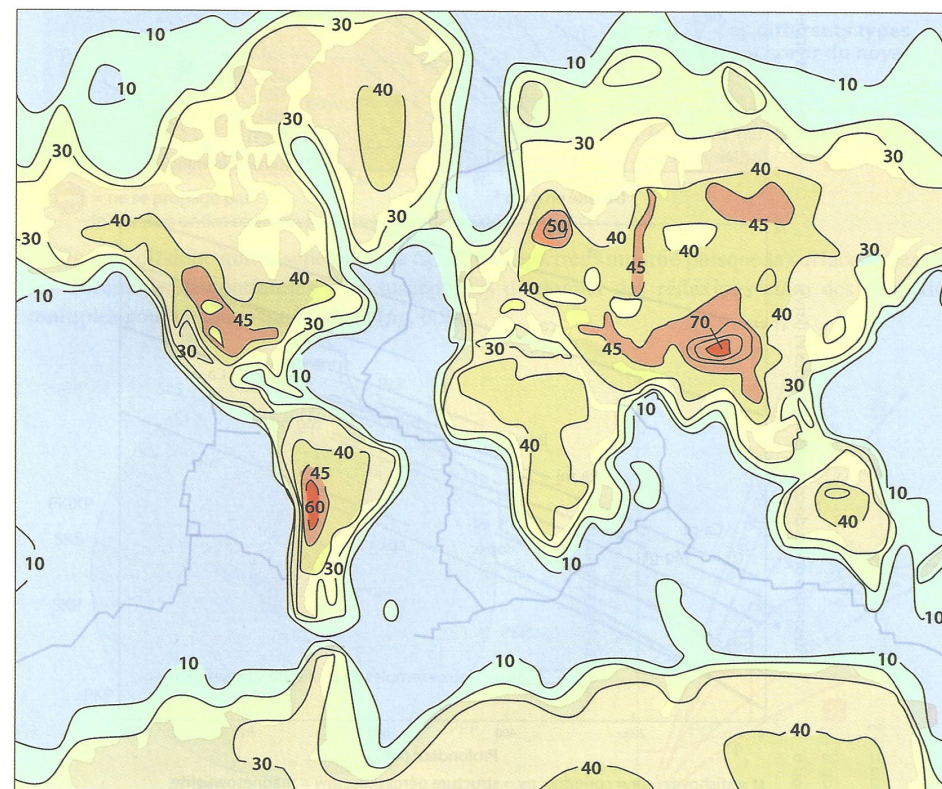
2. Trois discontinuités et quatre couches majeures

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

(!) 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).

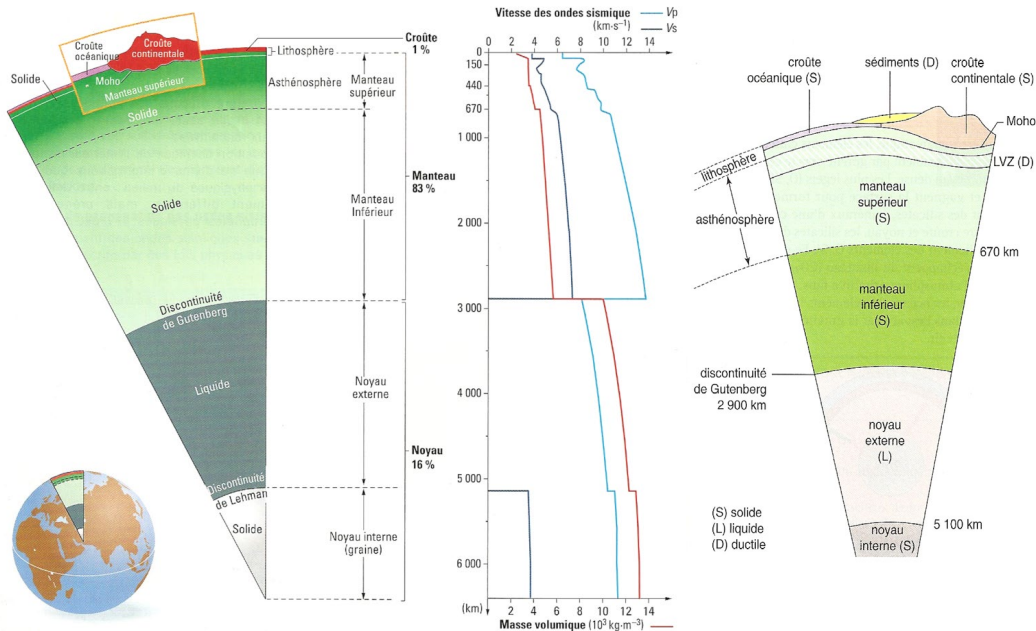


Carte du Moho à l'échelle globale.

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 réflexion et réfraction 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).

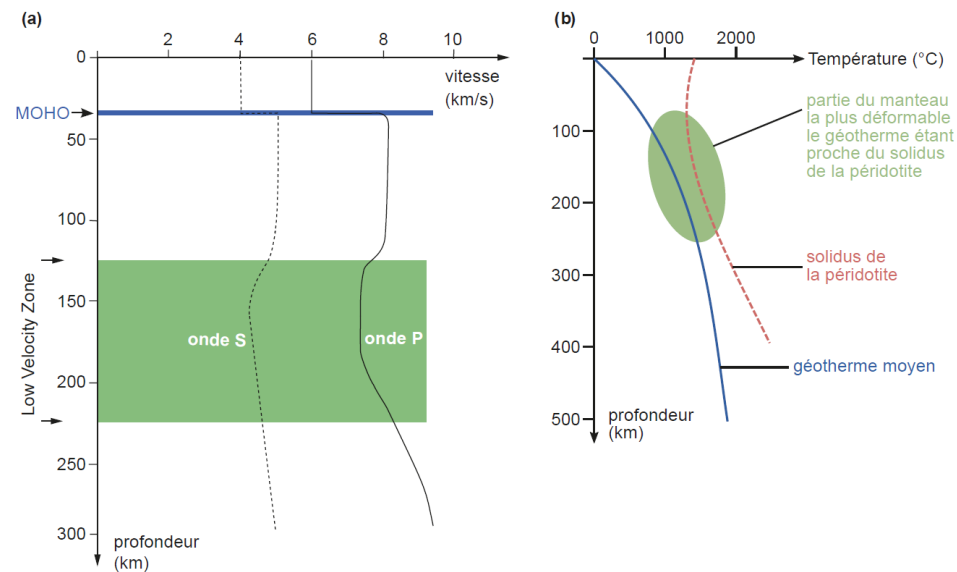
b. Les grandes couches ainsi séparées : croûte [solide], manteau [solide], noyau externe [liquide] et noyau interne (= graine) [solide]



▲ FIGURE 31. **Structure de la Terre interne.**
D'après DUCO *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

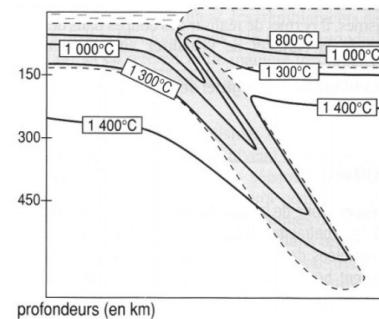


▲ FIGURE 32. **La LVZ (a) et son origine (b).** D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021).

b. Asthénosphère et lithosphère : trois définitions complémentaires

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

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



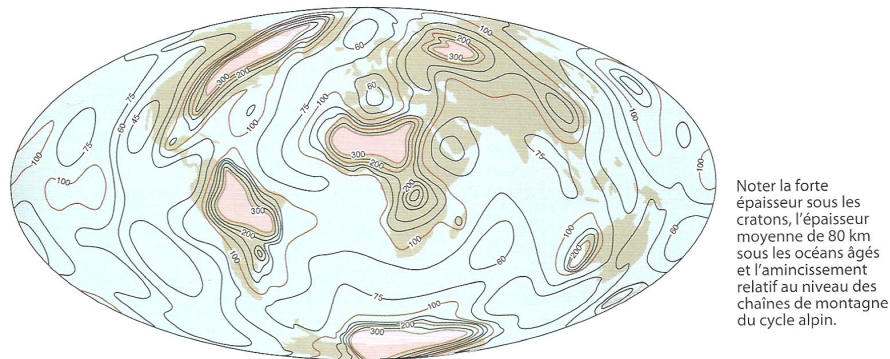
▲ FIGURE 33. **Répartition verticale des isothermes au niveau d'une zone de subduction.**
Source à préciser.

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

δ. Bilan : tentative de définition croisée

ε. Deux précisions

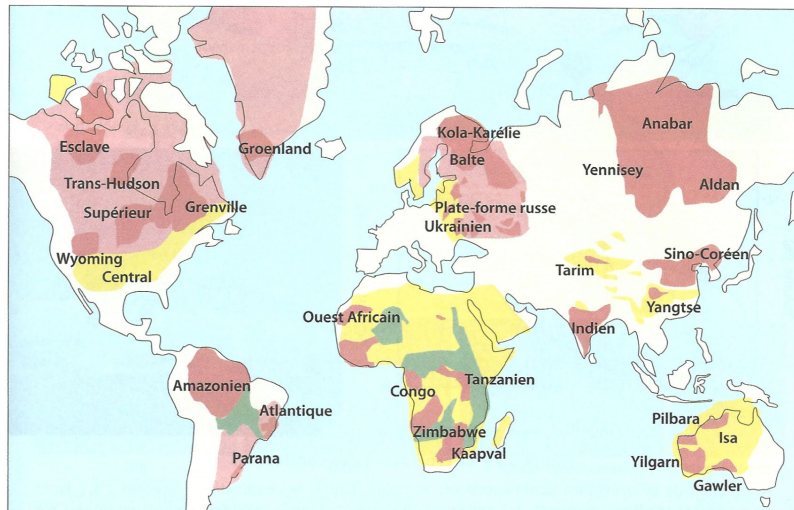
i. La profondeur de la LVZ ou LAB (et donc de la lithosphère), une réalité très variable, notamment sous les continents



Épaisseur de la lithosphère globale

Noter la forte épaisseur sous les cratons, l'épaisseur moyenne de 80 km sous les océans âgés et l'amincissement relatif au niveau des chaînes de montagne du cycle alpin.

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



Archéen (< 2,5 Ga) Protérozoïque inférieur (2,5-1,6 Ga) Protérozoïque moyen-supérieur (1,6 Ga-541 Ma) Chaînes protérozoïques supérieures

Carte de l'âge des continents.

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

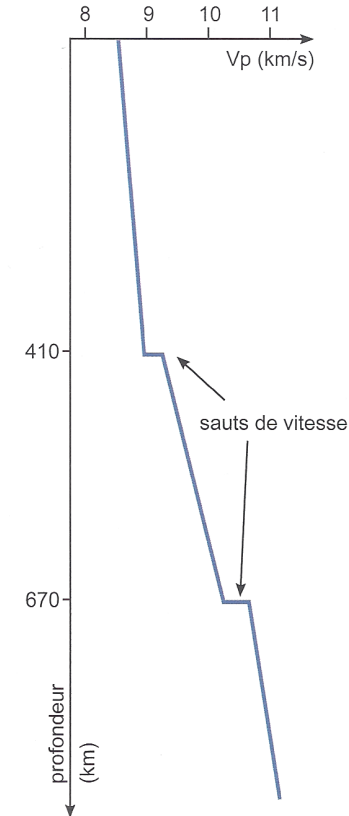
▲ FIGURE 35. Carte de l'âge des continents.
D'après LAGABRIELLE *et al.* (2013).

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

4. La structuration verticale du manteau

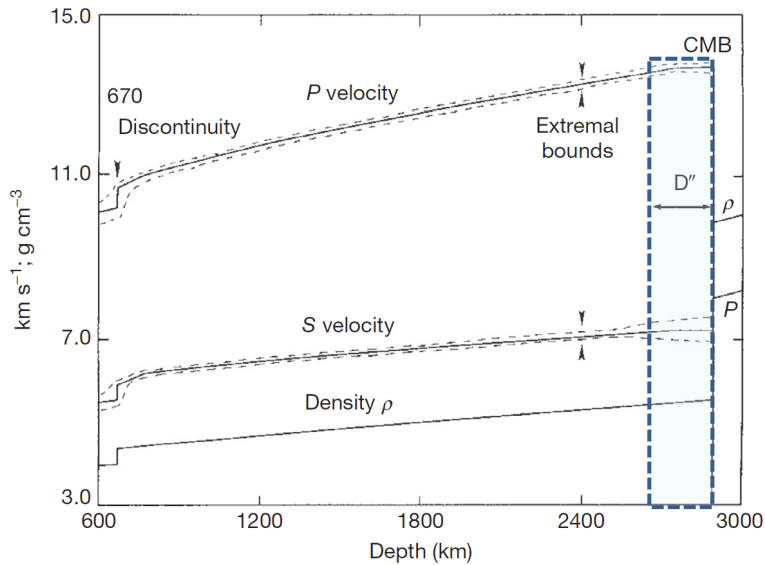
α. La LVZ et la distinction manteau lithosphérique-manteau asthénosphérique (voir 3.b)

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

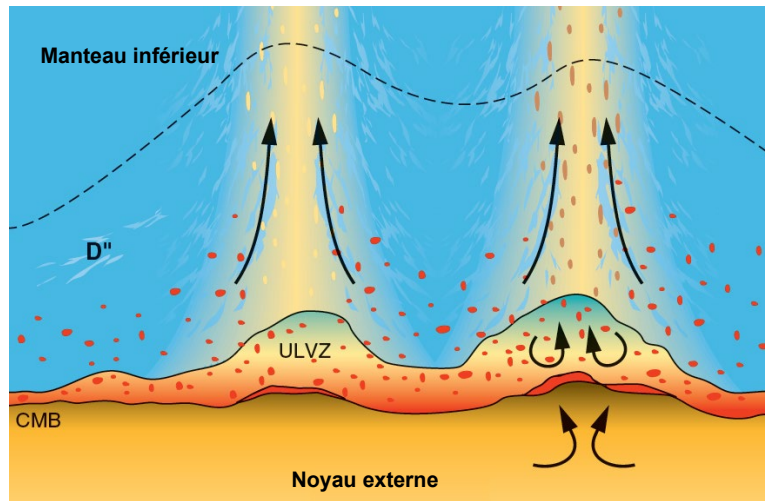


▲ FIGURE 36. Des sauts de vitesse dans le manteau.
D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021).

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)

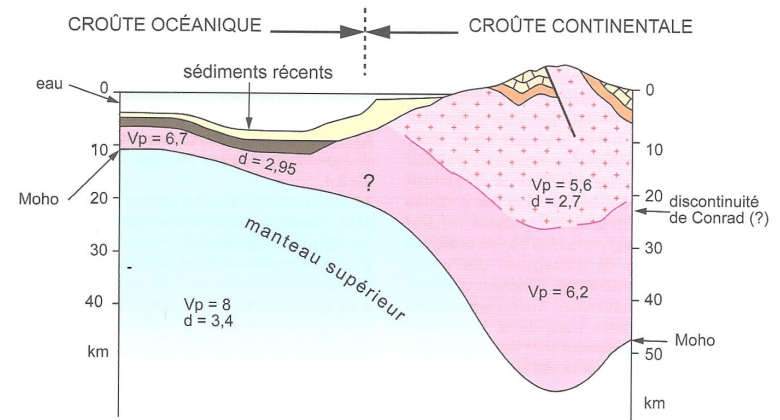


▲ FIGURE 37. **Modèle PREM revisité par LAY (2015).** D'après LAY (2015) avec encadrement de la couche D''.



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

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

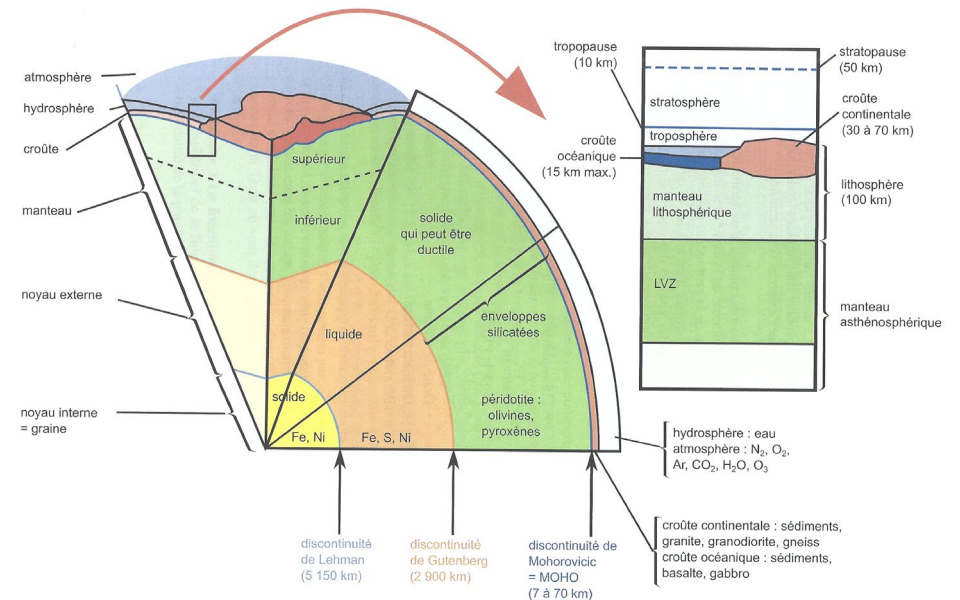


▲ FIGURE 38. **Un schéma récent où apparaît encore la discontinuité de CONRAD.** D'après FOUCAULT et al. (2014).

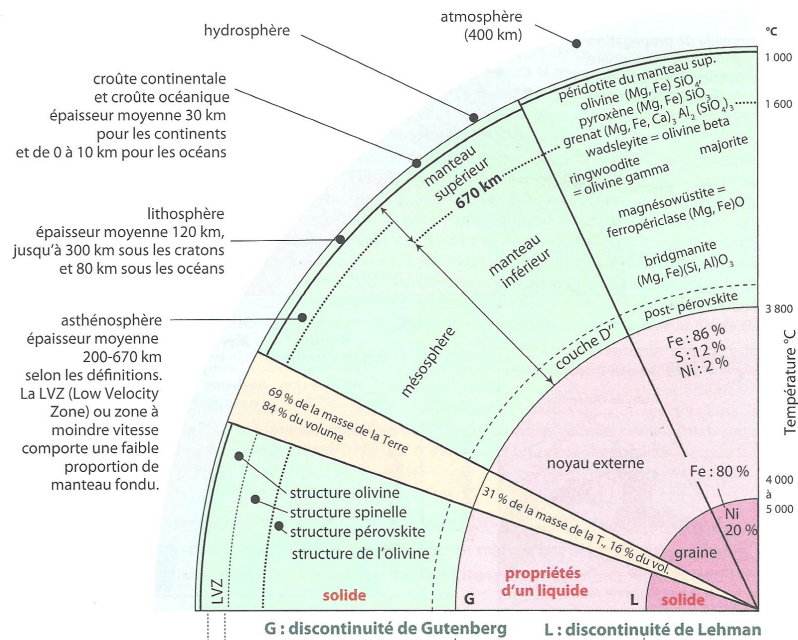
Sur ce schéma, vous pouvez néanmoins retenir les valeurs moyennes de vitesses des ondes P

6. Bilan sur la structure du globe

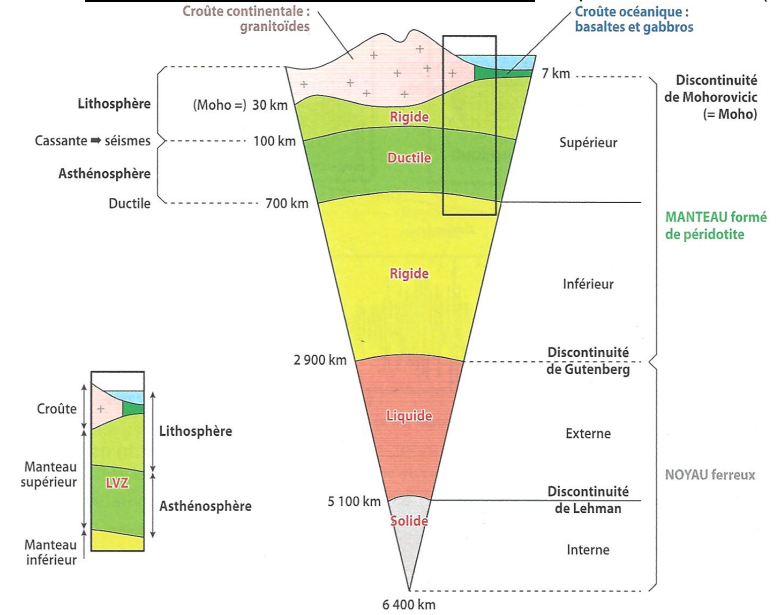
- Voir figures 39-42.
- (!) Ces documents anticipent un peu sur la partie II qui aborde la composition des couches.



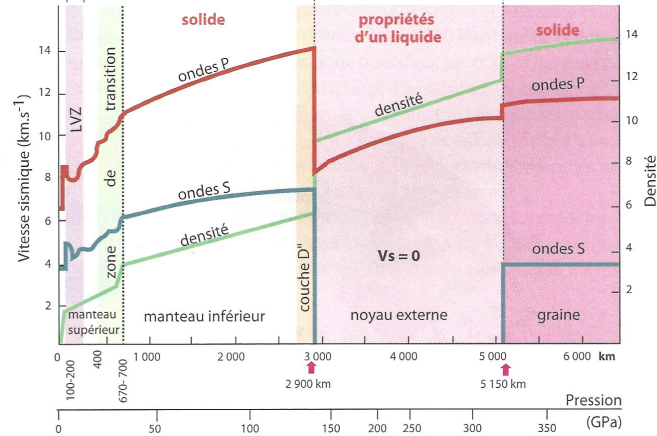
▲ FIGURE 39. **Un modèle radial de la Terre.** D'après PEYCRU et al. (2015).



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

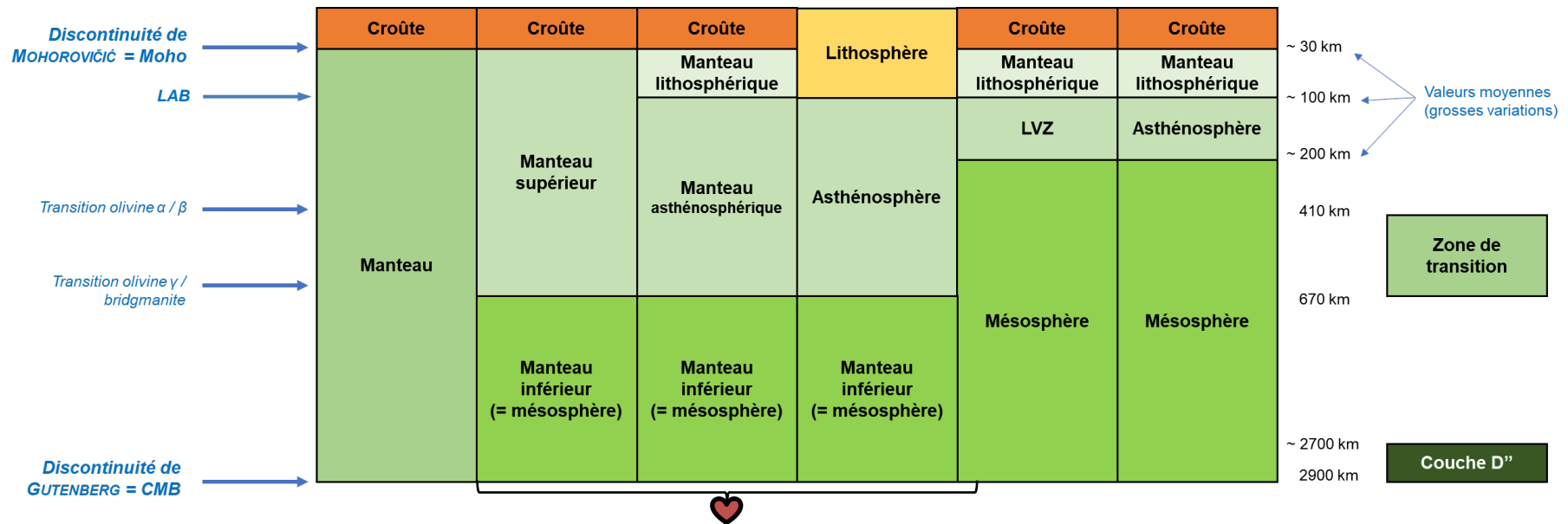


A FIGURE 41. Un autre modèle radial de la Terre plus simple. D'après DAUTEL et al. (2021).



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

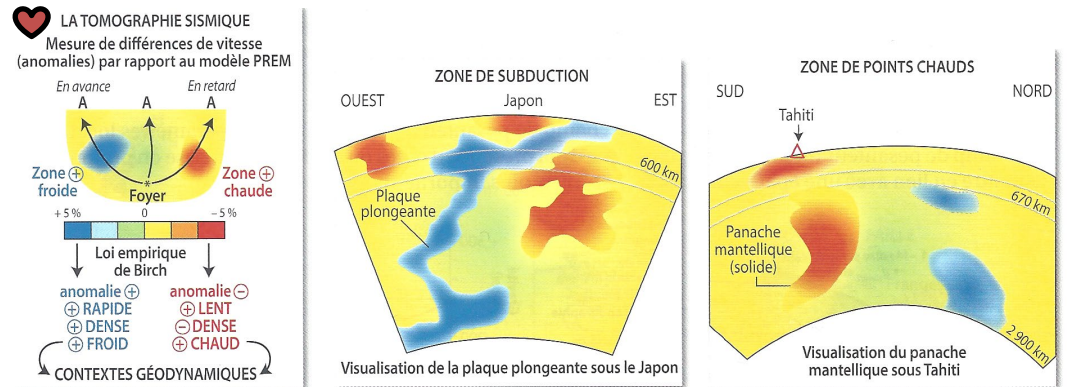
C. Une application des propriétés sismiques à la compréhension fine de l'organisation des niveaux géologiques

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

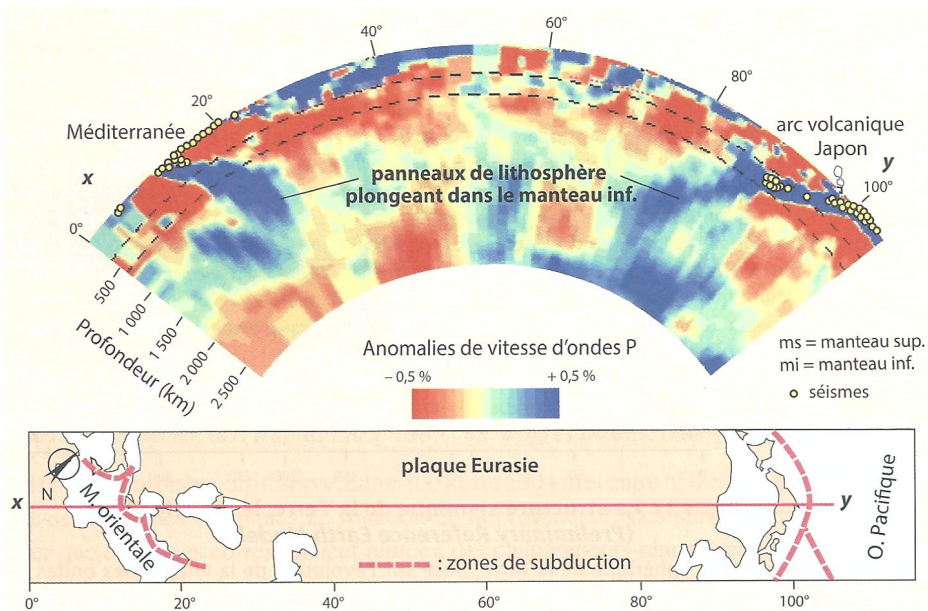
Voir le TD BC (Structure et dynamique du globe) et le chapitre 22 (Dynamique des enveloppes terrestres) pour des exemples concrets.

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

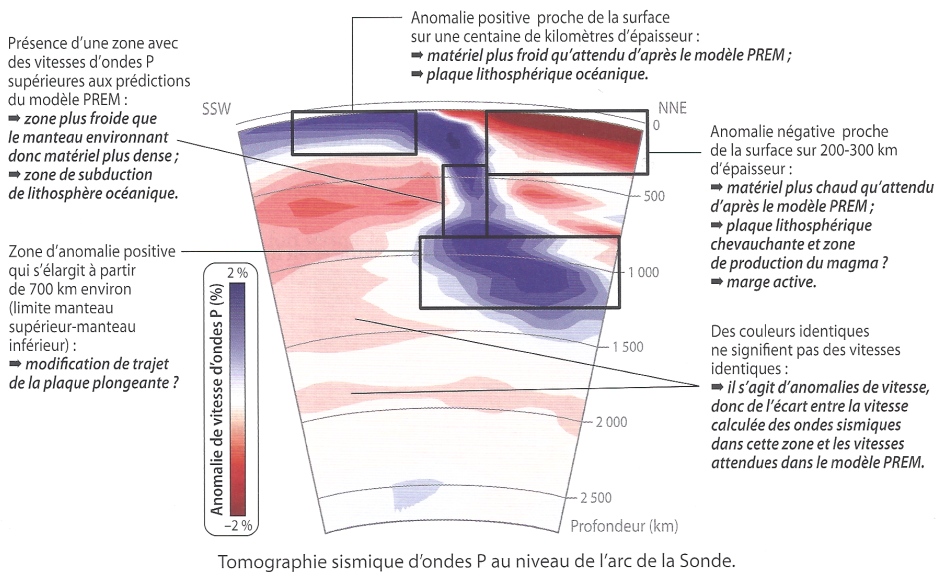
En géologie, une **anomalie** est un écart, pour un paramètre géologique, entre une valeur effectivement mesurée (éventuellement corrigée) et une valeur théorique attendue.



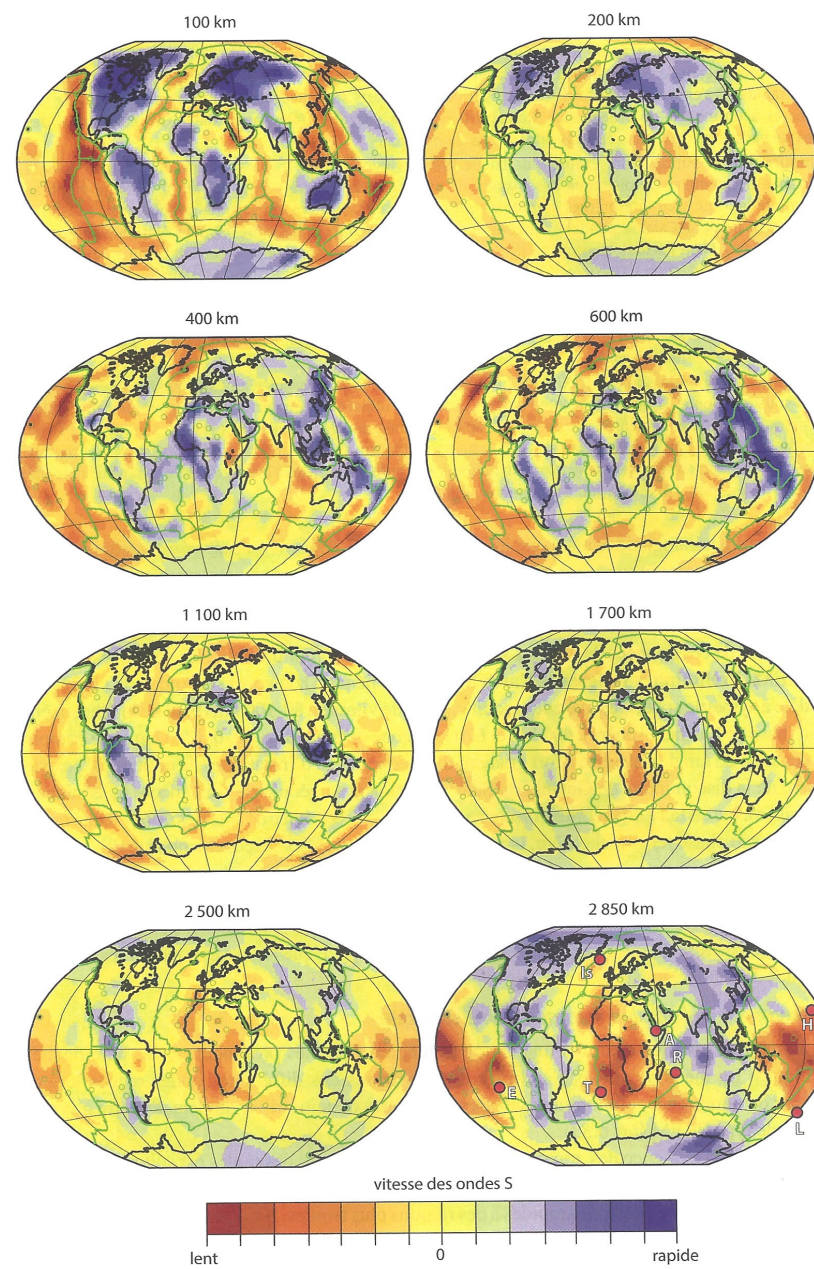
▲ FIGURE 43. Principe de la tomographie sismique. D'après BORDI, SAINTPIERRE *et al.* (2021).



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



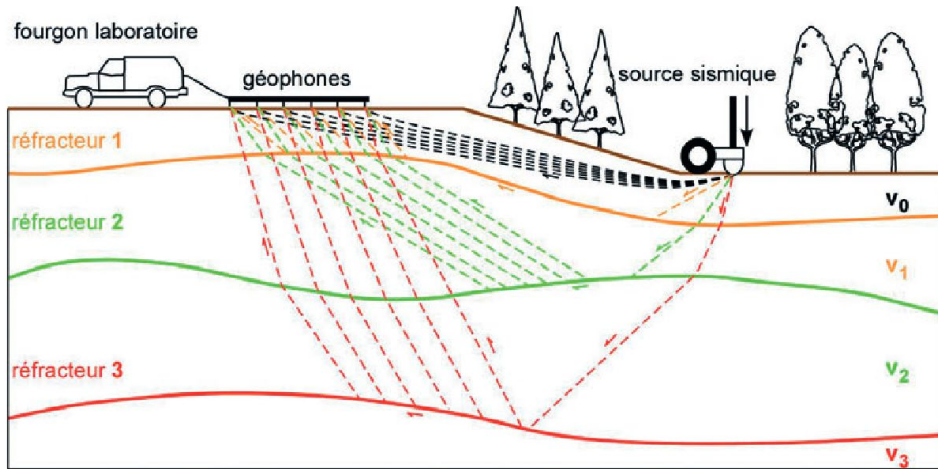
▲ FIGURE 45. Un autre profil de tomographie sismique, ici interprété.
D'après BORDI, SAINTPIERRE *et al.* (2021).



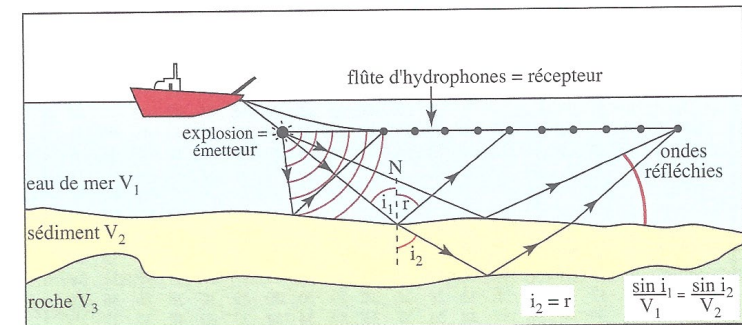
▲ FIGURE 46. Tomographie sismique du manteau, ici horizontale, à diverses profondeurs.
D'après RENARD *et al.* (2018).

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

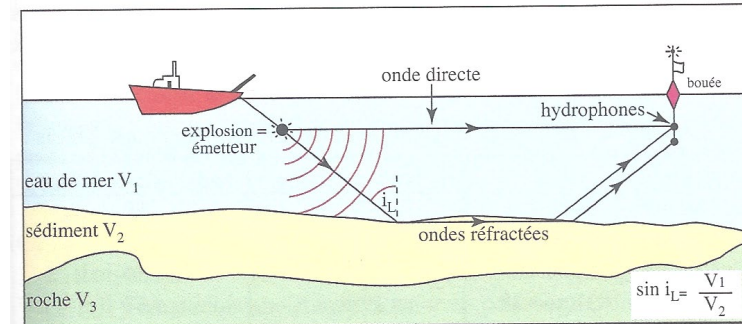
a. Une méthode de prospection géophysique basée sur l'émission et la réception d'ondes sismiques artificielles pour reconstituer l'organisation de terrains géologiques



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

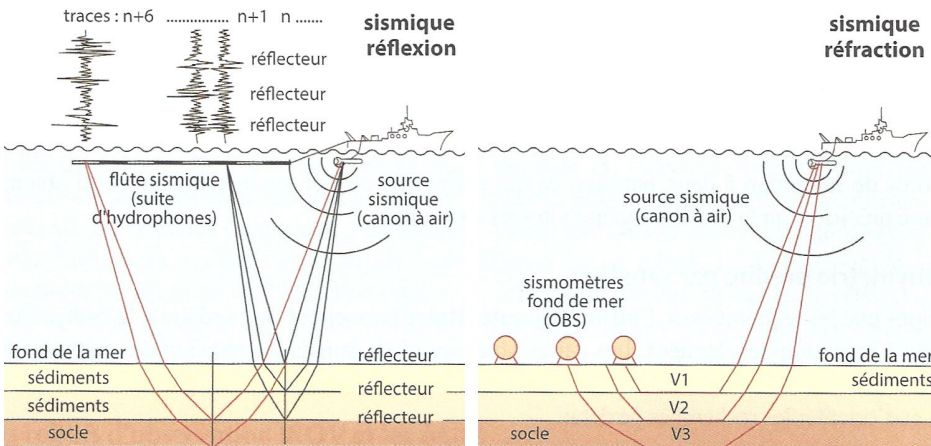


Principe de la sismique réflexion



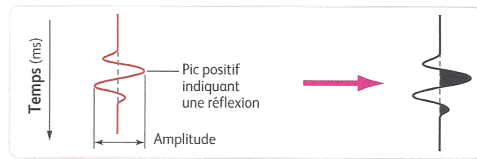
Principe de la sismique réfraction.

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

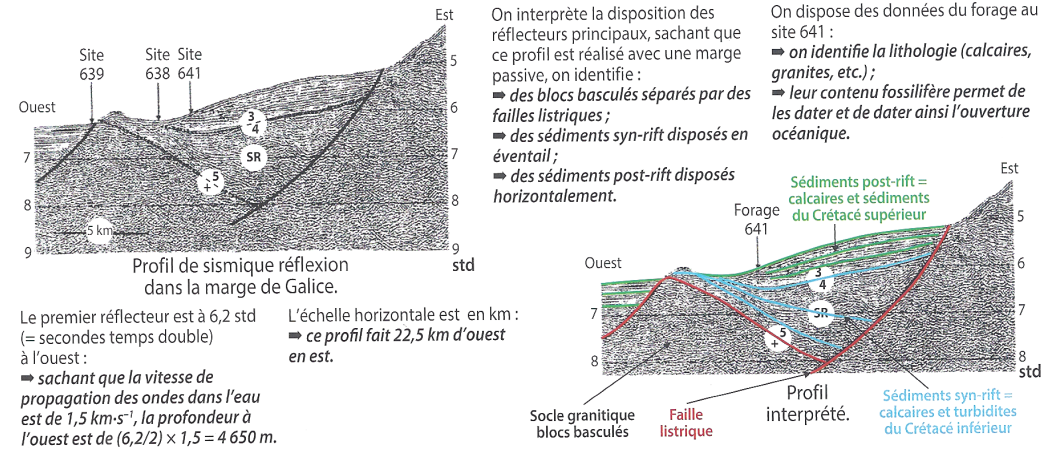


▲ FIGURE 49. **Un camion vibreur.** <https://www.lemoniteur.fr/article/des-camions-vibreurs-echographient-la-ville-de-strasbourg.812829> (consultation janvier 2022)

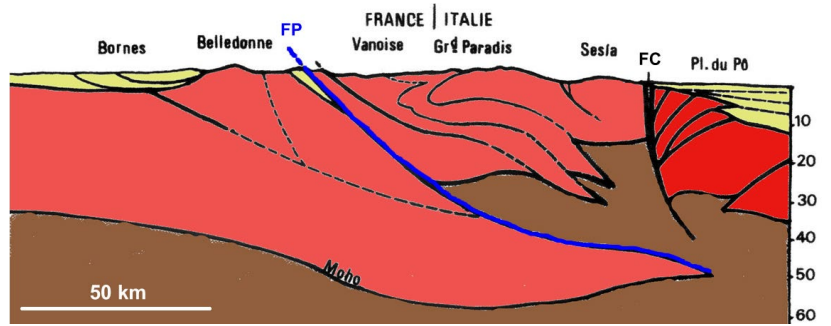
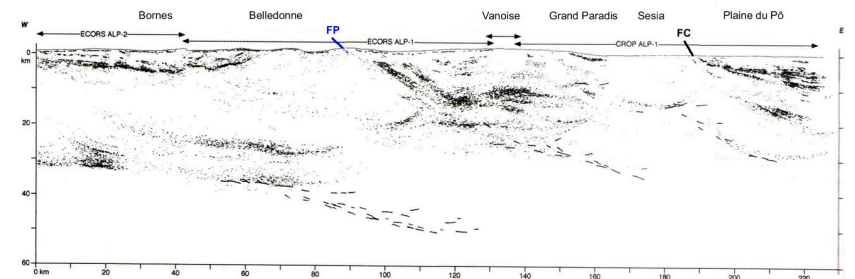
b. La sismique réflexion : l'usage de la réflexion d'ondes sismiques pour reconstituer la disposition globale des terrains jusqu'à 50 km



b Interprétation de la trace sismique enregistrée par un capteur.



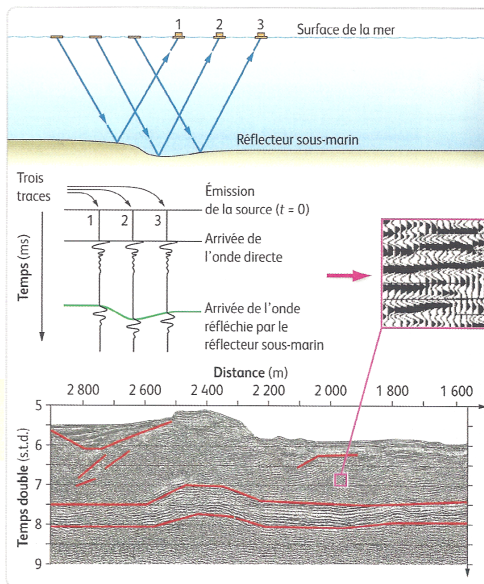
▲ FIGURE 51. Un exemple de profil de marge passive interprétée (marge de Galice, à l'ouest de la Péninsule ibérique). D'après BORDI, SAINTPIERRE *et al.* (2021).



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

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.

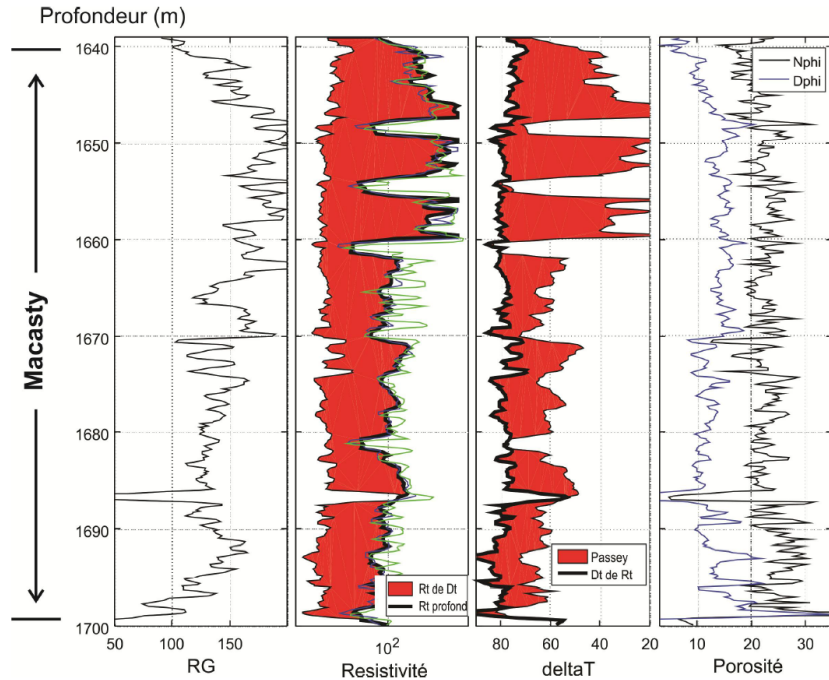
▲ FIGURE 50. Principes de la sismique réflexion. D'après GUILLERME, JUBAULT *et al.* (2019).

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.

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

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



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

D. L'origine de la structure terrestre

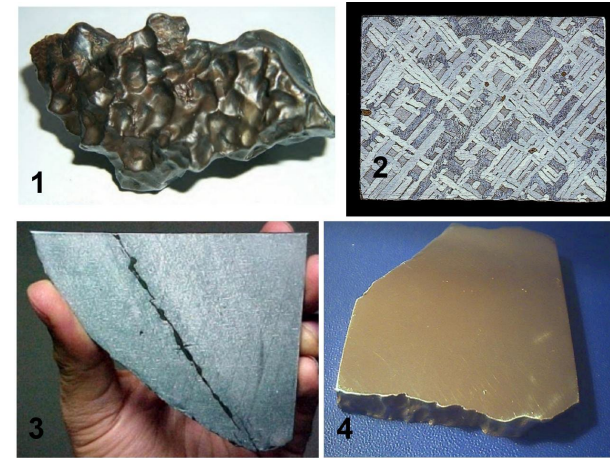
1. Les météorites, des indices pour comprendre la formation de la Terre

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

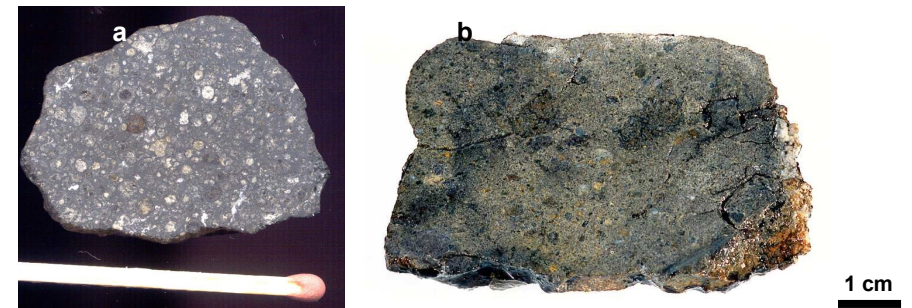
b. Les principales catégories de météorites : météorites pierreuses ou aérolithes (chondrites + achondrites) vs. météorites ferreuses ou sidérites

▼ 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	
Sidérites (5,1 %)	Essentiellement constituées de fer et de nickel	

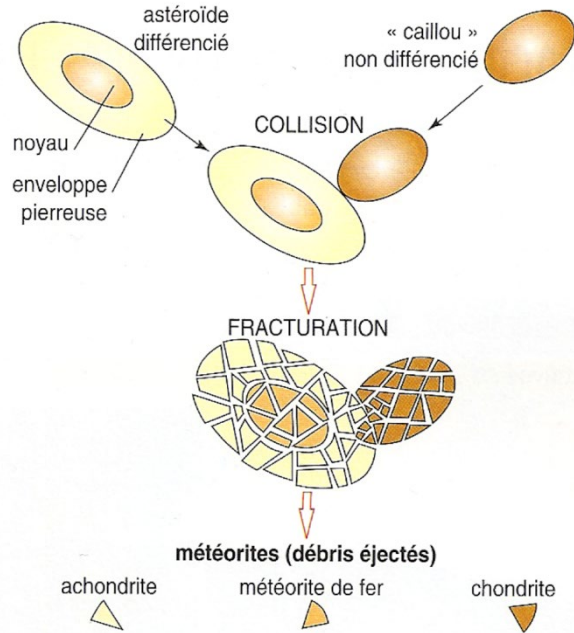


▲ FIGURE 54. Météorites ferreuses = sidérites. [Site Internet disparu : astronomy.meta.org, 2007] 1. Forme typique. 2. Sidérite montrant des figures de WIDMANNSTÄTTEN (cas de la plupart des sidérites) 3. Sidérite montrant des lignes de NEUMANN (fine striation). 4. Autre type de sidérite.



▲ 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).

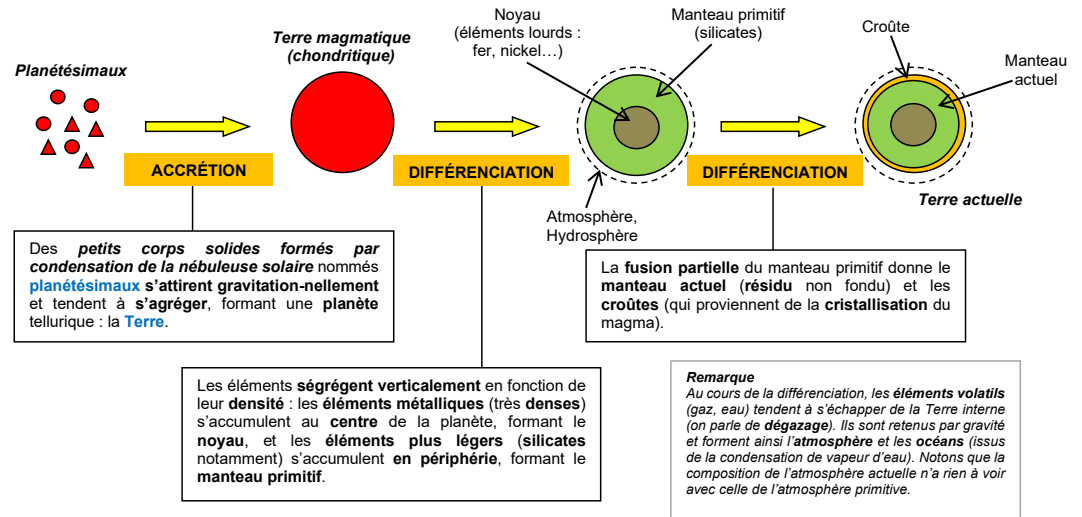
c. Origine des météorites



▲ 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

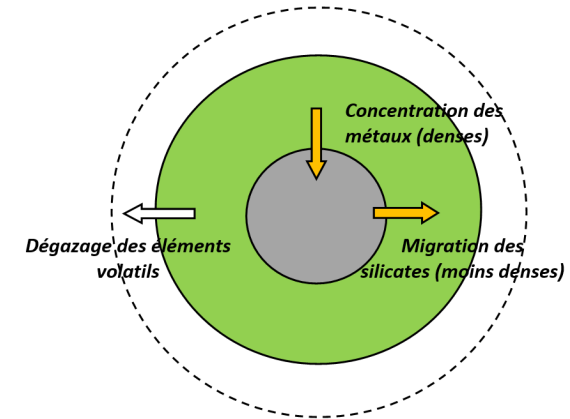
a. Origine des planétésimaux



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

b. Accréation des planétésimaux

c. Différenciation des enveloppes terrestres



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

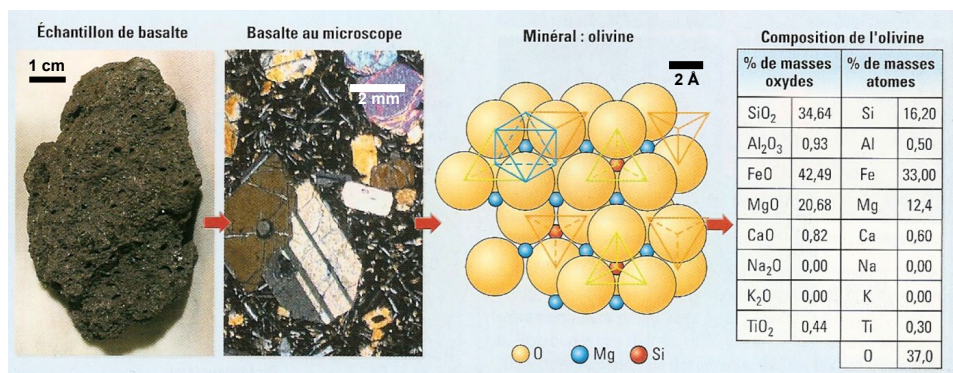
II. La composition des couches de la Terre solide (géosphère)

A. L'étude des matériaux des terrestres

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

Revoir le TP A2 (Roches) + figure 58

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

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 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 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

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.

	Formule structurale	Système cristallin	Densité
Andalousite	Al ^{VI} Al ^{IV} O(SiO ₄)	Orthorhombique	3,1
Sillimanite	Al ^{IV} Al ^{IV} O(SiO ₄)	Orthorhombique	3,25
Disthène	Al ^{VI} Al ^{VI} O(SiO ₄)	Triclinique	3,6

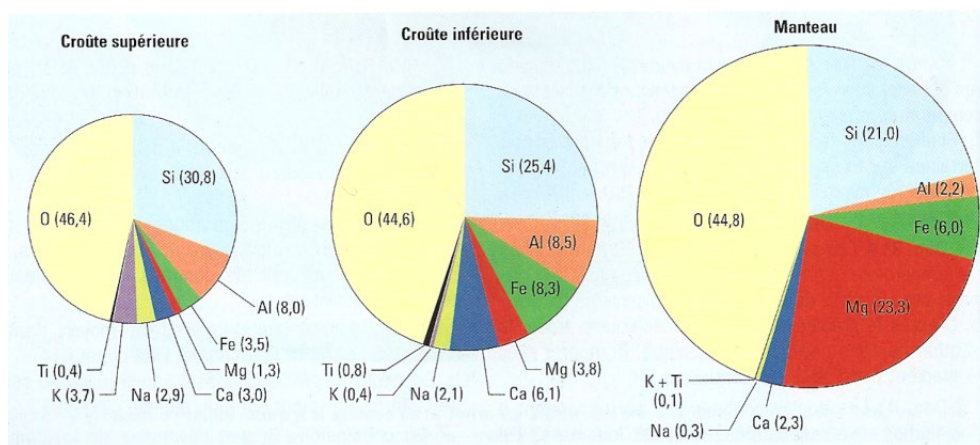
Remarque : on donne le plus souvent la **composition d'une roche** ou d'un **minéral** en **pourcentage massique d'oxydes**, c'est-à-dire qu'on **répartit l'élément oxygène avec les autres éléments chimiques en présence**.

▼ **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

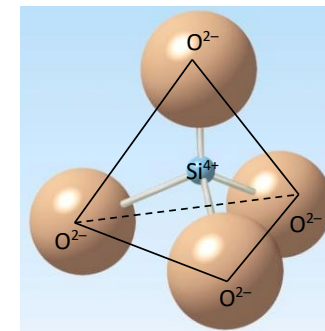


▲ **FIGURE 59. Composition chimique de la lithosphère continentale.** D'après Duco *et al.* (2001)

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

Croûte continentale (d = 2,7)	Quartz Feldspath orthose Feldspaths plagioclases	SiO ₂ (Si ₃ AlO ₈)K {(Si ₃ AlO ₈) Na {(Si ₂ Al ₂ O ₈) Ca
Croûte océanique (d = 2,9)	Feldspaths plagioclases Pyroxènes	{(Si ₃ Al O ₈) Na {(Si ₂ Al ₂ O ₈) Ca {(Si O ₃)Fe, Mg {(Si O ₃)Ca, Mg
Manteau supérieur (d = 3,3)	Olivine	(Si O ₄) (Fe, Mg) ₂

- 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...

▼ 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

B. Composition pétrologique et minéralogique des enveloppes terrestres

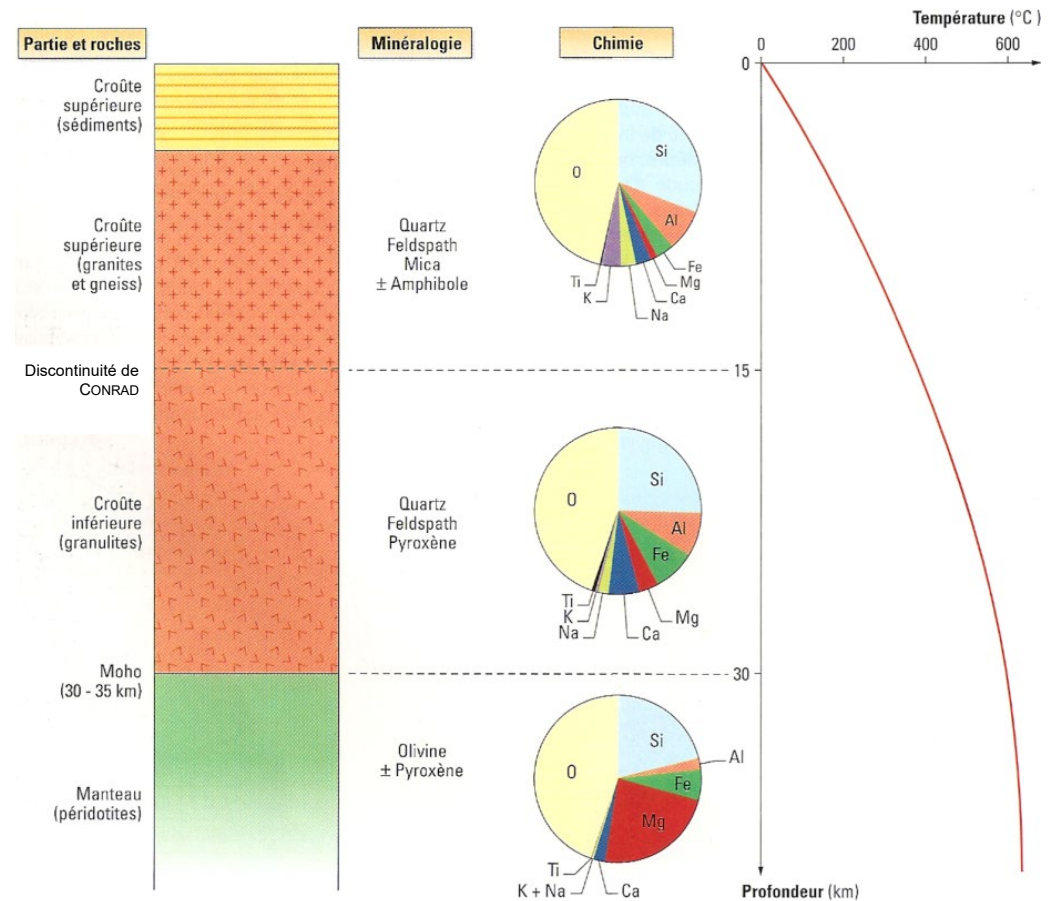
1. Croûte

a. Croûte continentale

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

β. Grande diversité des roches rencontrées

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



▲ 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).



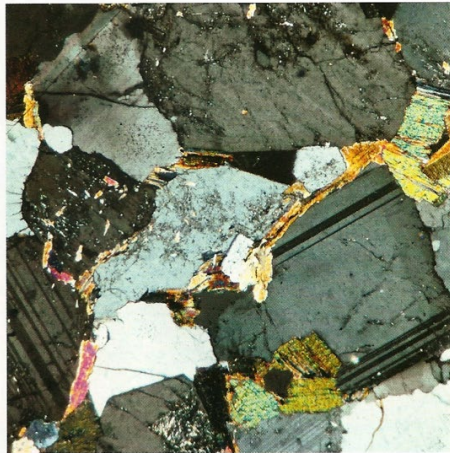
CARTE D'IDENTITÉ

- Roche magmatique plutonique.
- Structure grenue : assemblage de cristaux visibles à l'œil nu.
- Composition minéralogique : quartz et feldspaths (80 %), micas, éventuellement amphiboles.

a. Échantillon de granite.



b. lame mince de granite observée en lumière polarisée non analysée.



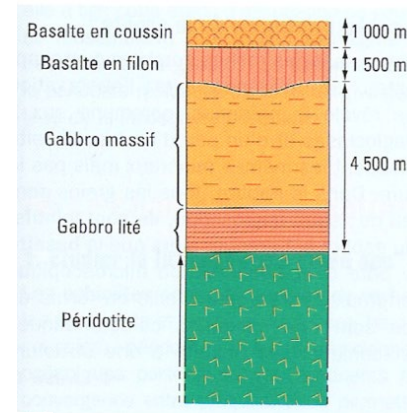
c. lame mince de granite observée en lumière polarisée analysée.

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

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

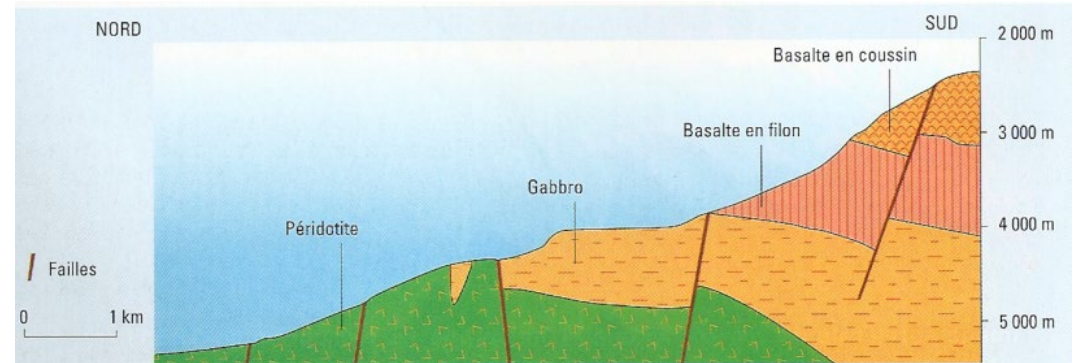
b. Croûte océanique

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



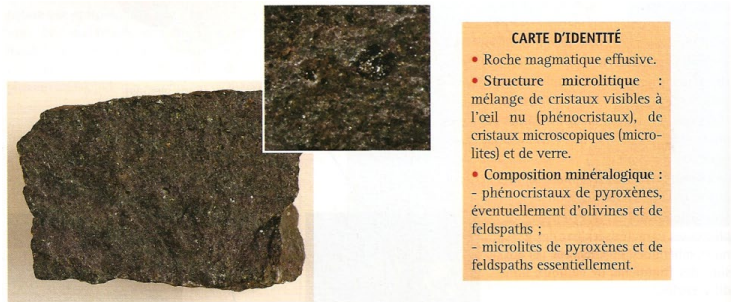
Les roches constituant les ophiolites. En explorant systématiquement la région de l'Oman, les géologues ont reconstitué la succession verticale de cet ensemble de roches. Le nom « ophiolite » vient du grec *ophis*, serpent, à cause de l'aspect de la roche qui rappelle la peau de ce reptile.

▲ 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



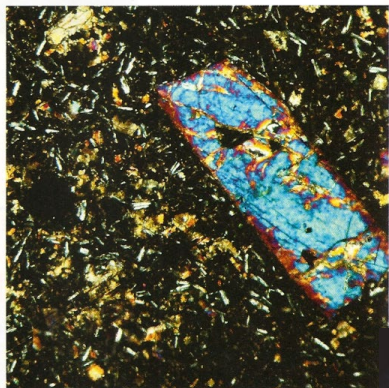
CARTE D'IDENTITÉ

- Roche magmatique effusive.
- Structure microlitique : mélange de cristaux visibles à l'œil nu (phénocristaux), de cristaux microscopiques (microlites) et de verre.
- Composition minéralogique :
 - phénocristaux de pyroxènes, éventuellement d'olivines et de feldspaths ;
 - microlites de pyroxènes et de feldspaths essentiellement.

a. Échantillon de basalte.



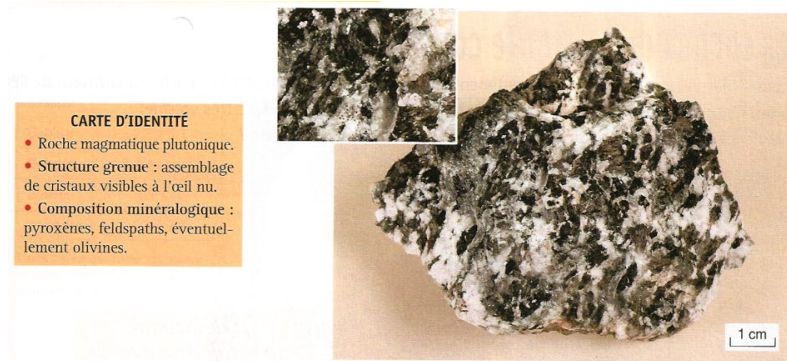
b. Lame mince de basalte observée en lumière polarisée non analysée.



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

▲ **FIGURE 65. Le basalte, roche typique de la croûte océanique.** D'après

Pillow-lavas (Hawaï)
Wikipédia



CARTE D'IDENTITÉ

- Roche magmatique plutonique.
- Structure grenue : assemblage de cristaux visibles à l'œil nu.
- Composition minéralogique : pyroxènes, feldspaths, éventuellement olivines.

a. Échantillon de gabbro.



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

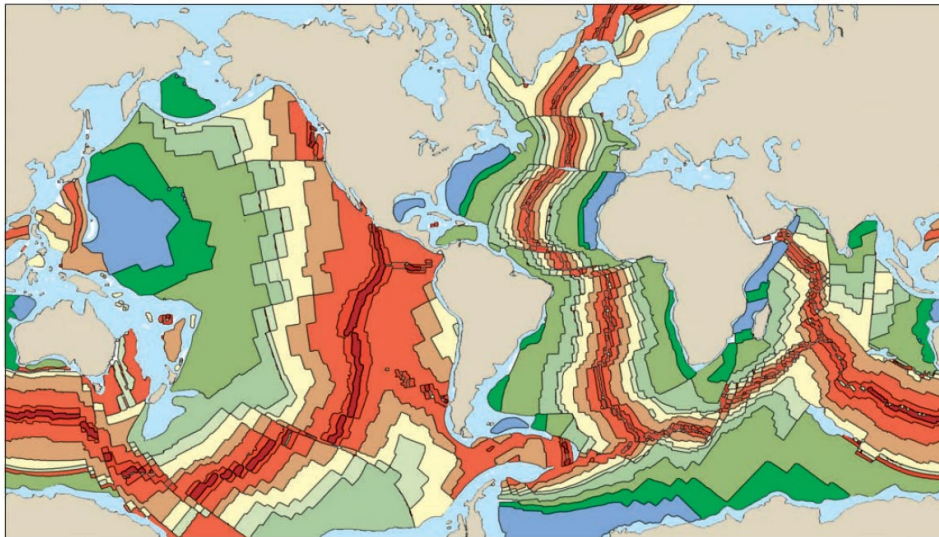


c. Lame mince de gabbro observée en lumière polarisée analysée.

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

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

[Voir le chapitre suivant sur la dynamique du globe](#)



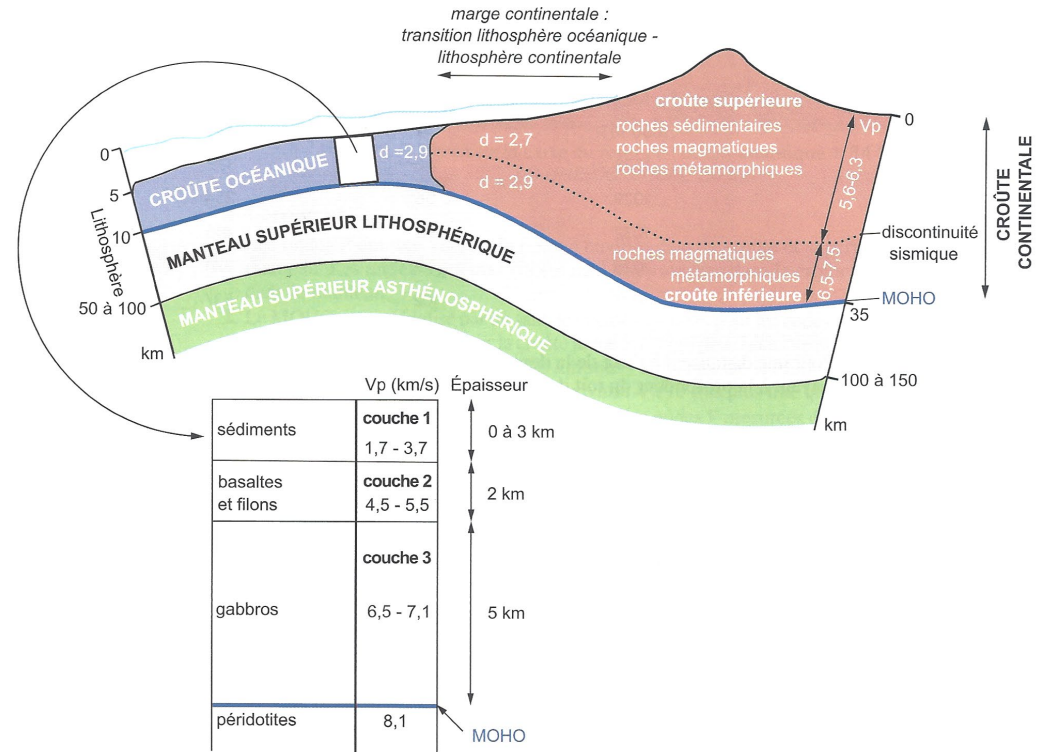
Ocean Geology
 0 m.y. 50 100 150
 Miocene Oligocene Eocene Paleocene Late Cretaceous Middle Cretaceous Early Cretaceous Late Jurassic

▲ 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 ?

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



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

CARTE D'IDENTITÉ

- Roche magmatique (issue du magmatisme initial).
- **Structure grenue** : roche entièrement cristallisée constituée d'un assemblage de cristaux visibles à l'œil nu.
- **Composition minéralogique** : essentiellement, olivines et pyroxènes.
- **Composition chimique** en pourcentage de la masse totale :

O	Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K
42,74	20,32	2,11	9,42	20,51	2,47	0,42	0,2

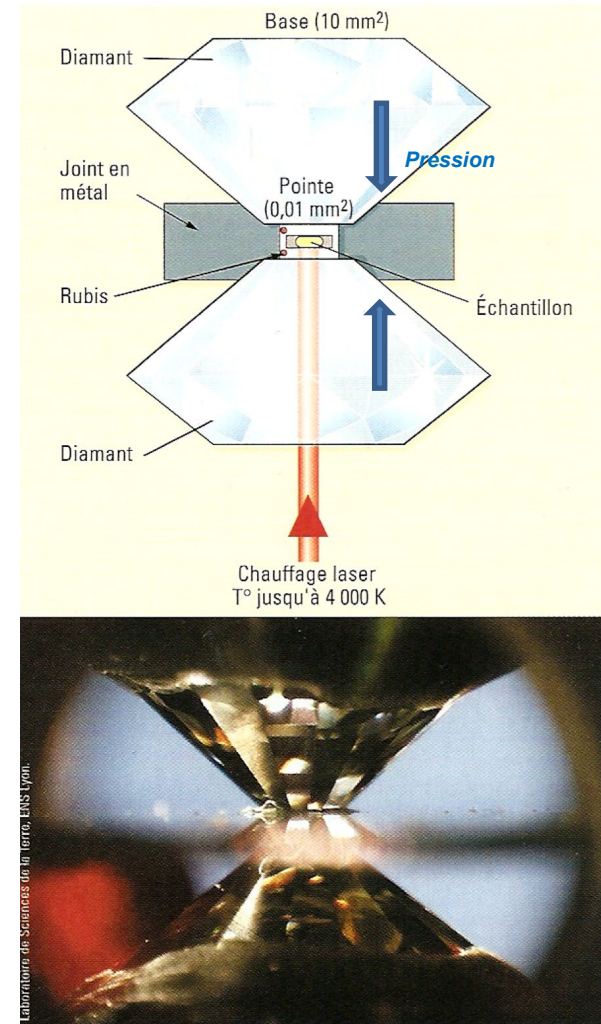


b. Lame mince de péridotite observée en lumière polarisée non analysée.



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

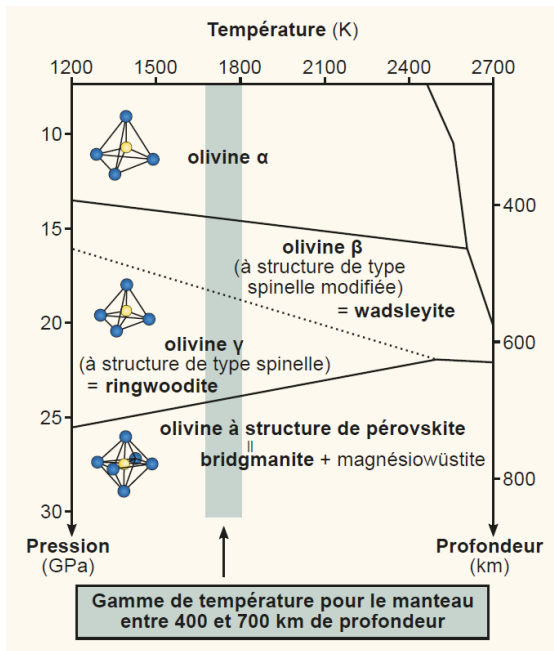
▲ **FIGURE 69. La péridotite, roche du manteau.** D'après LIZEAUX, BAUDE *et al.* (2007)



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.

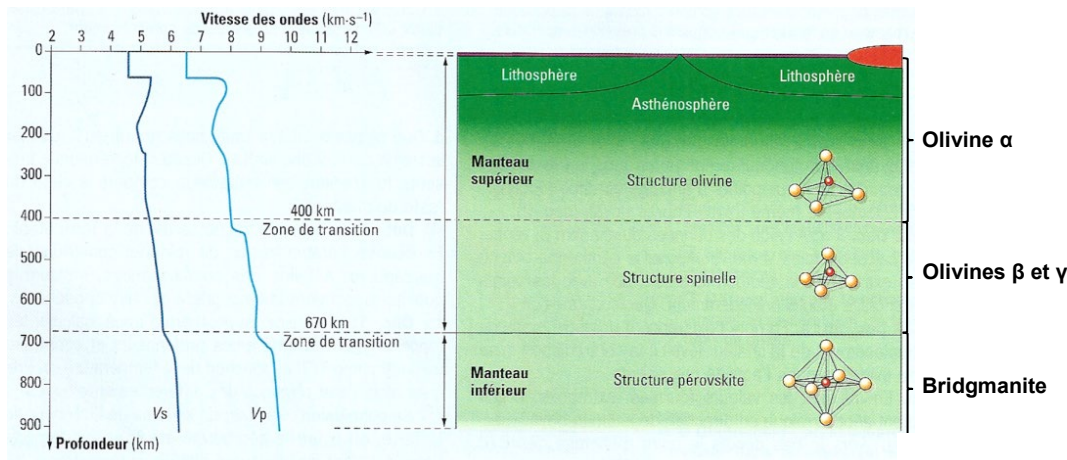
▲ **FIGURE 70. Cellule à enclume(s) de diamant.** D'après Duco *et al.* (2002)

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.

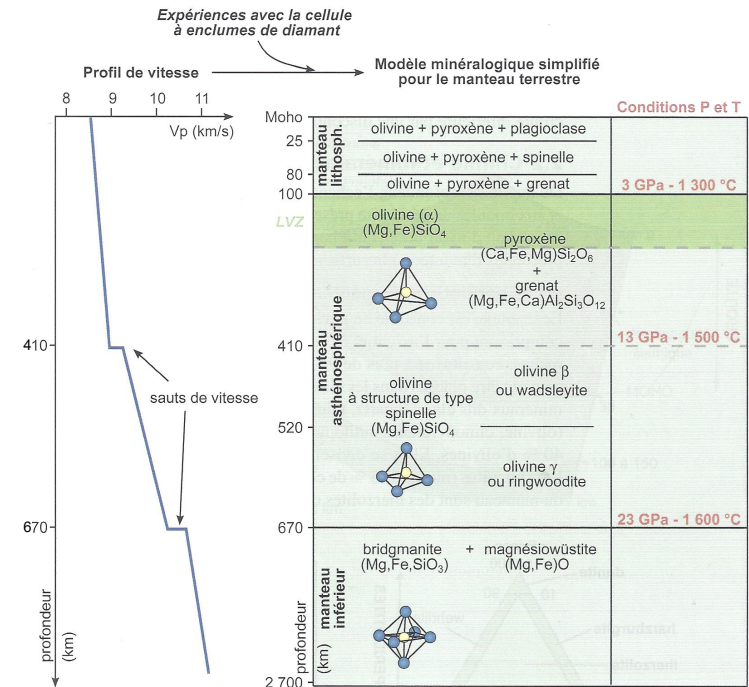


▲ FIGURE 71. Diagramme de phases de l'olivine. D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021)

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



♥ ▲ 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

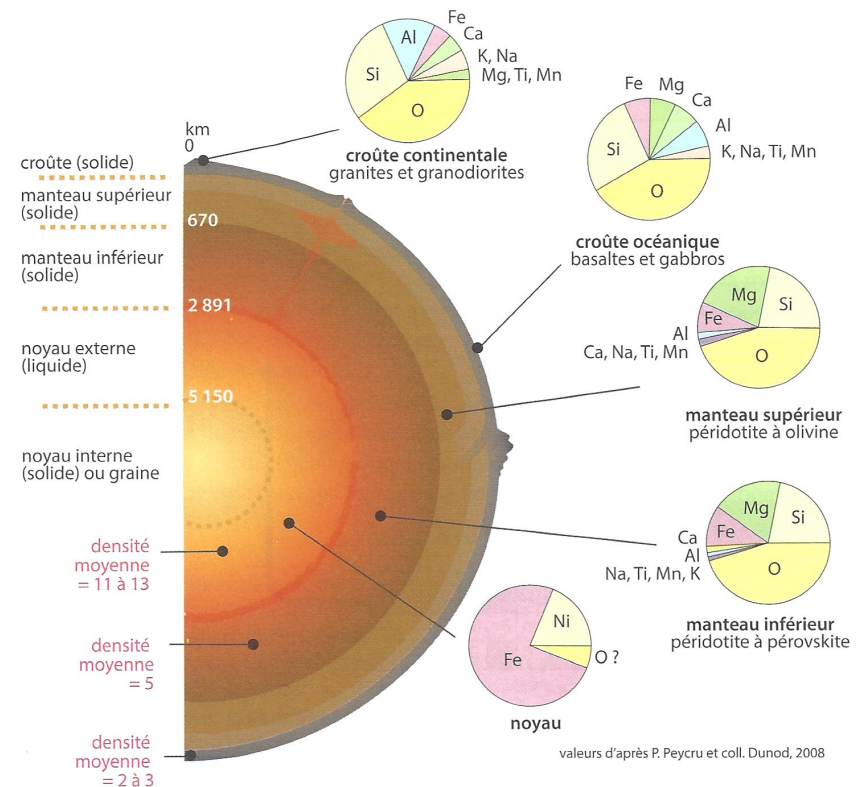
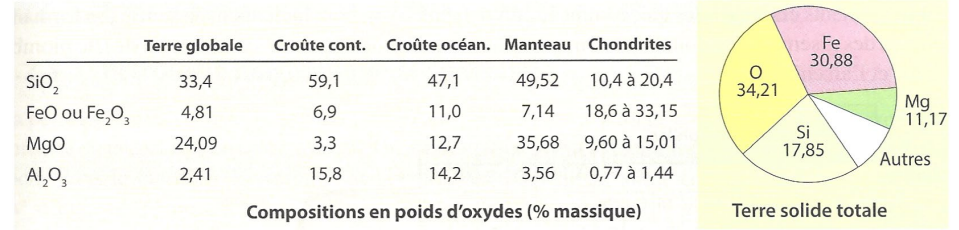
▼ **TABLEAU VIII.** COMPOSITION CHIMIQUE D'UNE CHONDRITE ET MODÈLE DE COMPOSITION CHIMIQUE POUR LE NOYAU ET LE MANTEAU PRIMITIF.

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

C. Composition chimique des enveloppes terrestres



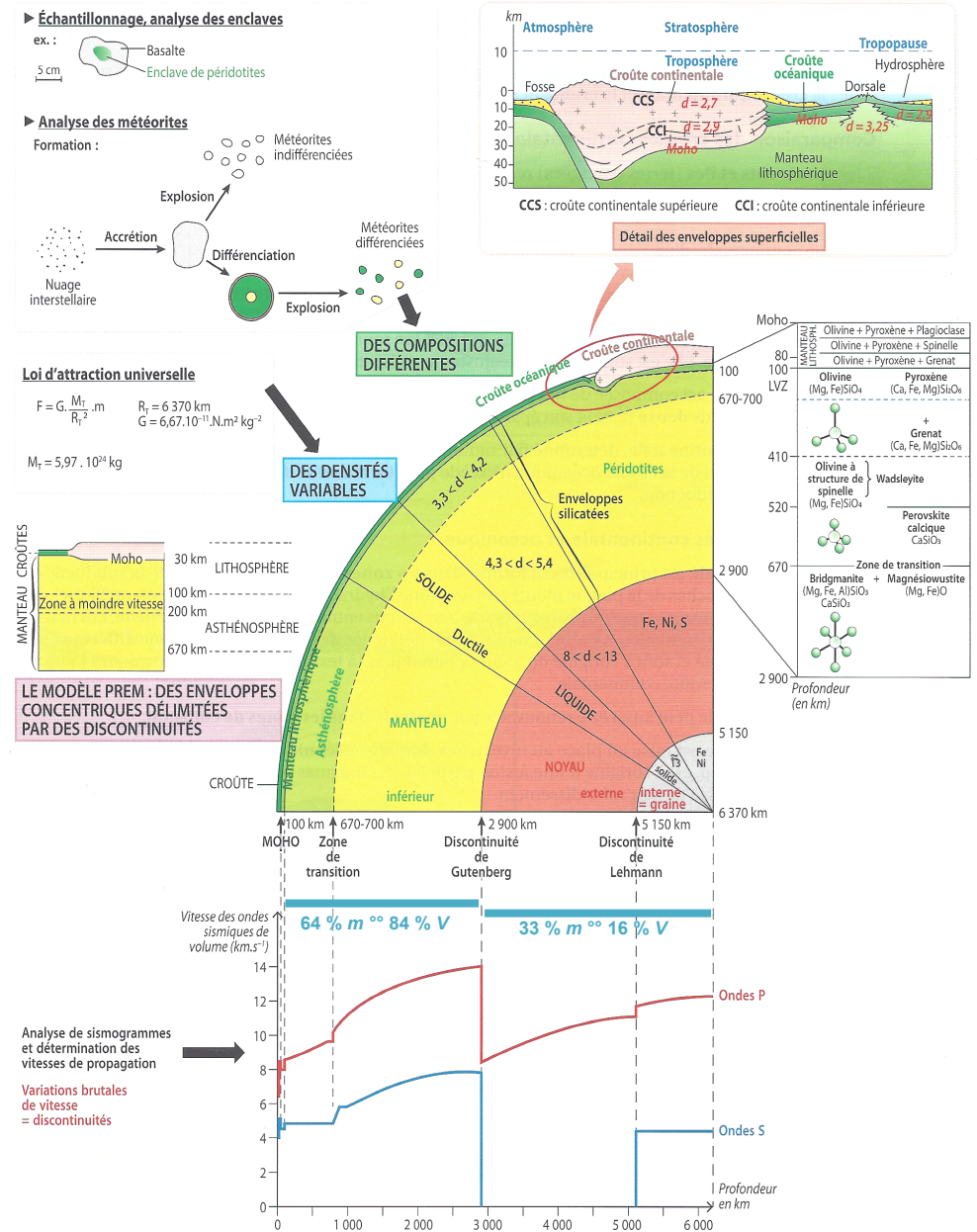
Composition chimique des différentes enveloppes de la Terre.

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

D. Importance massique des enveloppes terrestres

E. Bilan

- Voir la figure 75.



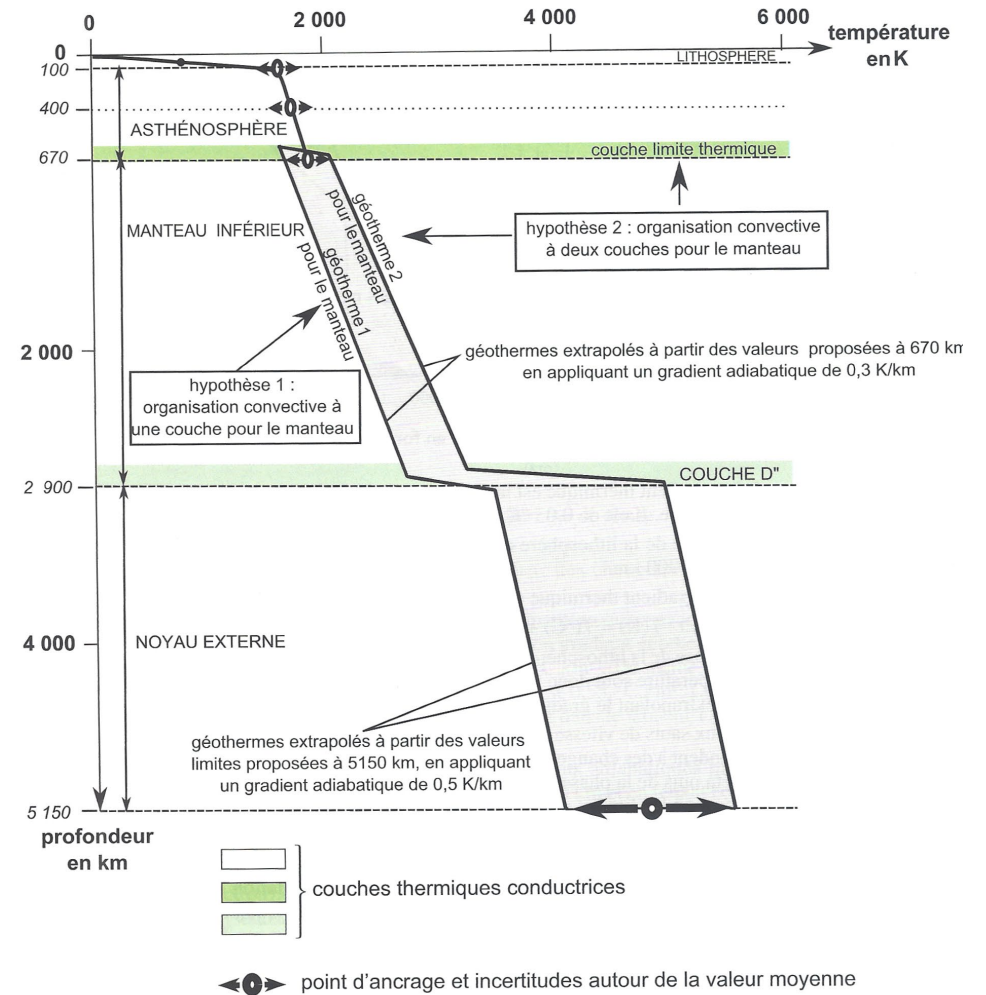
▲ FIGURE 75. Le modèle radial de la Terre. D'après BORDI, SAINTPIERRE et al. (2021)

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

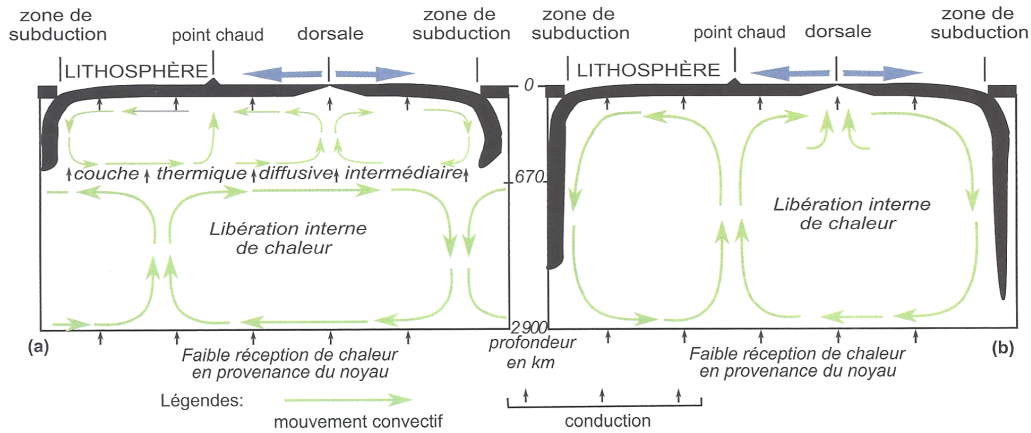
B. Une construction basée sur des points d'ancrage

1. Une mesure de température dans les forages continentaux profonds permettant d'inférer un gradient lithosphérique de $30 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$
2. Une limite lithosphère-asthénosphère (LAB) à $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ (1600 K) environ à 100 km
3. Des points d'ancrage découlant de la minéralogie expérimentale sur l'olivine : 1750 K à 410 km et 1900 K à 670 km
4. Une température de fusion du fer (5000 K) proposée pour le noyau à la profondeur de la discontinuité de LEHMANN



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

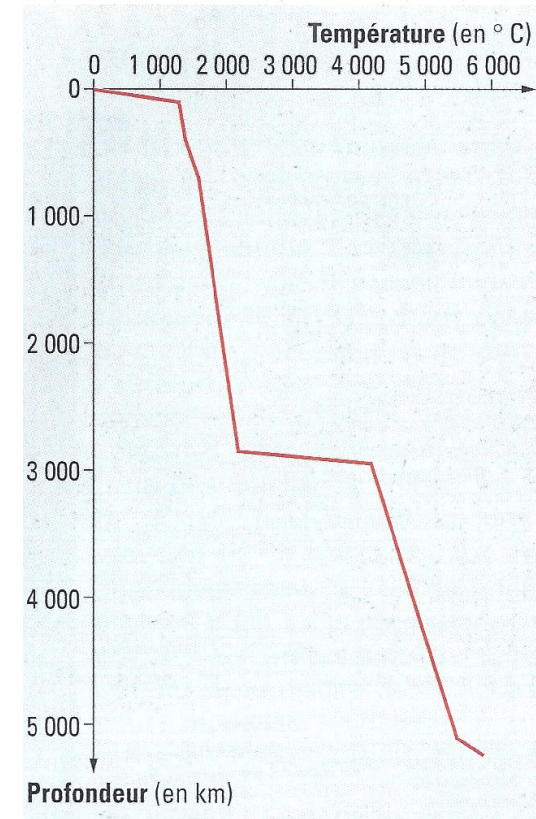
C. Une extrapolation entre les points d'ancrage fonction du modèle convectif du manteau retenu



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.

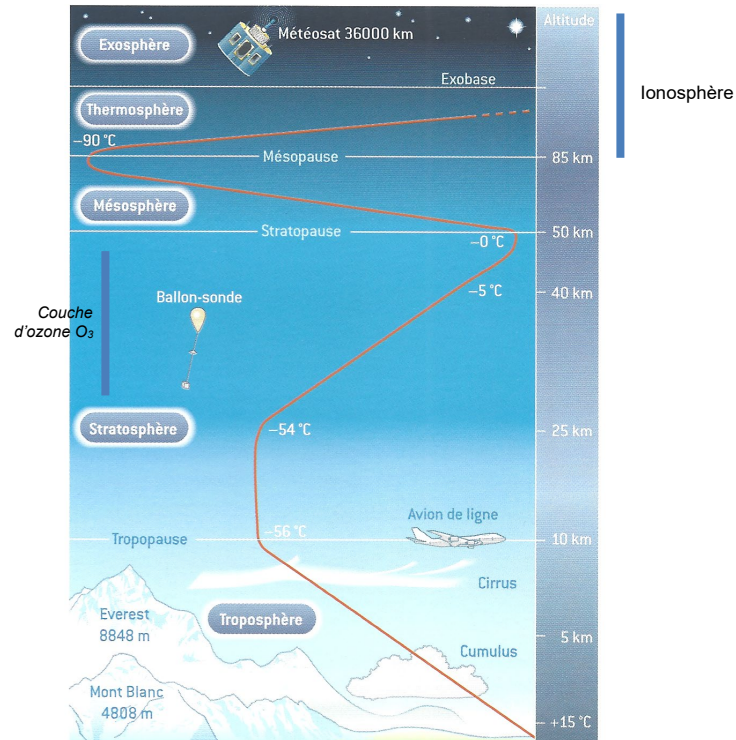
▲ FIGURE 77. Deux modèles convectifs pour le manteau. D'après PEYCRU *et al.* (2015)



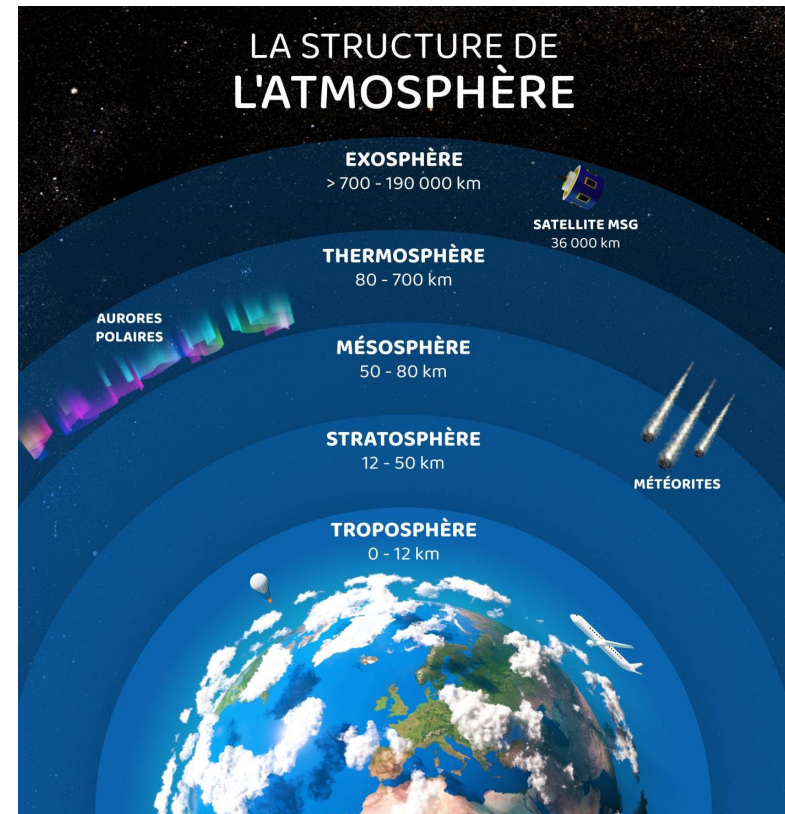
▲ FIGURE 78. Un géotherme simplifié. D'après DUÇO *et al.* (2002)

IV. Des enveloppes fluides superficielles également stratifiées verticalement

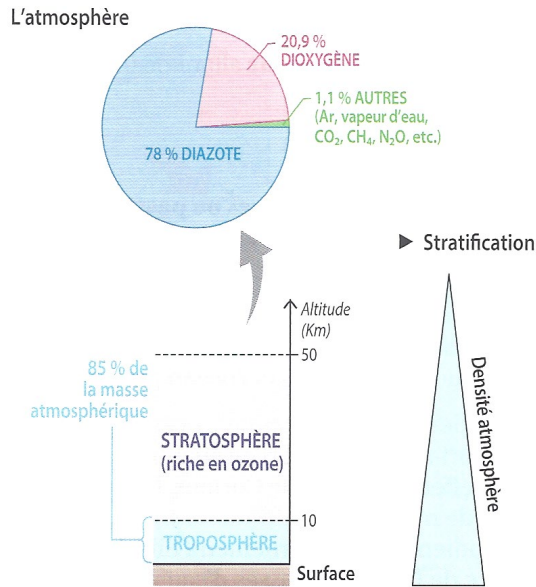
A. L'atmosphère : une stratification thermique que l'on peut mesurer avec un ballon sonde puis des capteurs embarqués



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

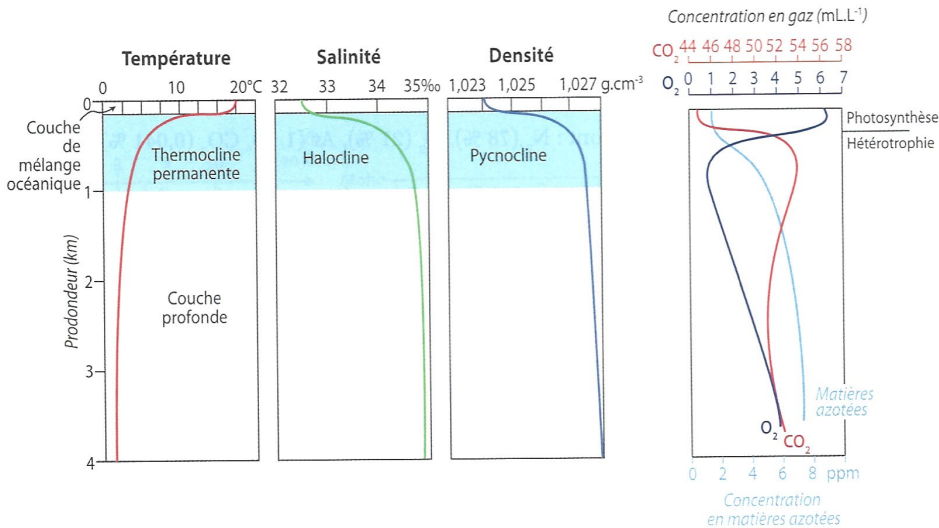


▲ FIGURE 80. Stratification thermique verticale de l'atmosphère terrestre.
Météo-France (consultation janvier 2022)

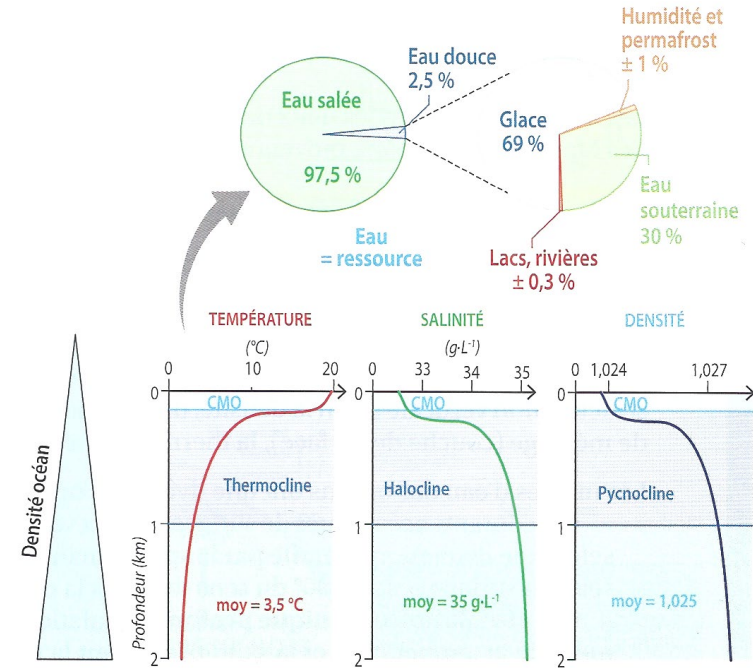


▲ FIGURE 81. « L'atmosphère pour les nuls ». D'après BORDI, SAINTPIERRE *et al.* (2021)

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



▲ 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)

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. CAILLAULT, 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. T^{re}. 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. GOUGUENHEIN, 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. WOZNIK (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. TEYSSÈDRE-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.
- DENÈUD, 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.
- DENÈUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2013). *Biologie-Géologie BCPST-véto 1^{re} année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DENÈUD, 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^{er} édition 1997), 330 pages.
- DERCOURT, J., J. PAQUET, P. THOMAS & C. LANGLOIS (2006). *Géologie. Objets, méthodes et modèles*. Dunod, Paris, 12^e édition (1^{er} 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. MSHIH, 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^{er} édition 1980).
- FOUCAULT, A., J.-F. RAOULT, F. CECCA & B. PLATEVOET (2014). *Dictionnaire de Géologie*. Dunod, Paris, 8^e édition (1^{er} édition 1980).
- GODINOT, C., H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2010). *Biologie-Géologie 1^{re} année BCPST-véto*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- GUILLEMER, 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. GUTJAHN, 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. GUTJAHN, 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^{er} 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^{er} édition 1993).
- PERRIER, C. & J.-F. BEAUX (dir.), A. BOUFFIER, L. BOUGEIOIS, 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. CARIU, 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. CARIU, J.-M. DUPIN, J.-L. SCHNEIDER, M. TARDY & C. VAN DER REST (2015). *Géologie tout-en-un BCPST 1^{er} et 2^e années*. Dunod, Paris.
- PEYCRU, P., C. PERRIER, J.-F. FOGELGESANG (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, F. CARIU, 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^{er} 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^{er} 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	3
γ. Notions d'aléa, vulnérabilité et risque sismiques	3
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	4
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	5
2. Des phénomènes caractérisés par la propagation de trains d'ondes sismiques	5
a. Des ondes enregistrables sur des sismogrammes produits par des sismographes au niveau de stations d'enregistrement	5
b. La propagation et l'arrivée séquentielles de trois trains d'ondes aux caractéristiques propres	6
c. Une vitesse des ondes de volume qui augmente lorsqu'elles traversent des couches profondes : l'enseignement des hodochrones	7
d. Une multilatération possible de l'épicentre d'un séisme à partir des enregistrements de plusieurs stations	7
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)	8
3. Des séismes d'amplitude variable : notions d'intensité et de magnitude	9
a. L'intensité d'un séisme : les échelles de MERCALLI (1903), MSK (1964)...	9
b. La magnitude d'un séisme : l'échelle (ouverte) de RICHTER (1930), la magnitude de moment (HANKS-KANAMORI, 1979)	9
4. Répartition et mécanismes au foyer des foyers : un lien avec la géodynamique	10
a. La répartition des séismes et de leurs foyers	10
α. La répartition horizontale des séismes : une concentration aux limites des plaques lithosphériques	10
β. La répartition verticale des foyers séismes : une profondeur des foyers dépendant du contexte géodynamique (+ notion de zone de WADATI-BENIOFF)	11
b. Les mécanismes au foyer, des représentations sphériques des contraintes au niveau du foyer du séisme	11
5. Bilan sur les séismes	13

B. Le modèle radial de la Terre solide (géosphère)	13
1. Le modèle PREM (1981), résultat de la compilation de très nombreuses données sismiques	13
2. Trois discontinuités et quatre couches majeures	13
a. Les grandes discontinuités : MOHOROVIČIĆ (Moho) (moy. 30 km), GUTENBERG (2900 km) et LEHMANN (5100 km)	13
b. Les grandes couches ainsi séparées : croûte [solide], manteau [solide], noyau externe [liquide] et noyau interne (= graine) [solide]	14
3. La LVZ et la distinction lithosphère-asthénosphère	15
a. La LVZ, zone de moindre vitesse des ondes sismiques qui s'explique par un rapprochement du géotherme et du solidus des roches	15
b. Asthénosphère et lithosphère : trois définitions complémentaires	15
α. La définition sismique : croûte-manteau avant LVZ vs. LVZ et reste du manteau supérieur	15
β. La définition thermique : au-dessus vs. au-dessous de l'isotherme 1300 °C	15
γ. La définition rhéologique : niveau rigide vs. niveau ductile	15
δ. Bilan : tentative de définition croisée	15
e. Deux précisions	16
i. La profondeur de la LVZ ou LAB (et donc de la lithosphère), une réalité très variable, notamment sous les continents	16
ii. L'asthénosphère ne correspond qu'à la LVZ pour certains auteurs (minoritaires)	16
4. La structuration verticale du manteau	16
α. La LVZ et la distinction manteau lithosphérique-manteau asthénosphérique (voir 3.b)	16
β. Des sauts de vitesse à 410 km et 670 km de profondeur ; notions de manteau supérieur (incl. zone de transition), manteau inférieur (= mésosphère)	16
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)	16
5. Pour finir par une anecdote : la discontinuité de CONRAD séparant croûte continentale « supérieure » et « inférieure », un concept discutable	17
6. Bilan sur la structure du globe	17
C. Une application des propriétés sismiques à la compréhension fine de l'organisation des niveaux géologiques	19
1. Une mise en évidence d'hétérogénéités dans le manteau par l'étude des anomalies de vitesses des ondes sismiques : la tomographie sismique	19
2. Une mise en évidence de l'organisation des couches géologiques par des ondes sismiques artificielles : la sismique	21
a. Une méthode de prospection géophysique basée sur l'émission et la réception d'ondes sismiques artificielles pour reconstituer l'organisation de terrains géologiques	21
b. La sismique réflexion : l'usage de la réflexion d'ondes sismiques pour reconstituer la disposition globale des terrains jusqu'à 50 km	22
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	23
3. Pour information : les diagraphies, enregistrements de paramètres physiques par des sondes au sein d'un forage	23
D. L'origine de la structure terrestre	23
1. Les météorites, des indices pour comprendre la formation de la Terre	23
a. Les météorites, fragments d'objets célestes pénétrant dans l'atmosphère et frappant la surface de la planète	23
b. Les principales catégories de météorites : météorites pierreuses ou aéroolithes (chondrites + achondrites) vs. météorites ferreuses ou sidérites	23
c. Origine des météorites	24
2. Origine de la structure interne du globe : accréation et différenciation de la Terre	24
a. Origine des planétésimaux	24

b. Accrétion des planétésimaux	24
c. Différenciation des enveloppes terrestres	24
II. La composition des couches de la Terre solide (géosphère)	25
A. L'étude des matériaux des terrestres	25
1. Les notions d'élément chimique, minéral et roche	25
2. Les principaux éléments et minéraux du globe	25
3. Méthodes d'étude des constituants terrestres	28
a. Méthodes directes : échantillonnage, observation en submersible, enclaves, forages...	28
b. Méthodes indirectes : données sismiques, données expérimentales, données chimiques (et pétrologiques) des météorites	28
B. Composition pétrologique et minéralogique des enveloppes terrestres	28
1. Croûte	28
a. Croûte continentale	28
α. Origine des données : échantillonnage, exhumation dans les montagnes, enclaves	28
β. Grande diversité des roches rencontrées	28
γ. Composition globale de l'enveloppe : granitoïdes et roches métamorphiques	28
δ. Des âges très variables (jusqu'à 4 Ga dans les vieux boucliers)	29
b. Croûte océanique	29
α. Origine des données : ophiolites, (forages), observation par submersible, observations à l'air libre (Islande)	29
β. Composition type de l'enveloppe : basaltes en coussins, complexe filonien, gabbros	29
γ. Des âges plutôt récents (jusqu'à 180 Ma)	30
c. Et les roches sédimentaires ?	31
d. Bilan sur les croûtes	31
2. Manteau	31
a. Origine des données : ophiolites, enclaves et cellule à enclumes de diamant	31
b. Composition globale de l'enveloppe : de la péridotite sous différentes configurations cristallines	33
3. Noyau	33
a. Origine des données : des raisonnements indirects notamment à partir de la composition des météorites et des données sismiques	33
b. Composition globale de l'enveloppe : un corps ferreux allié à du nickel	34
C. Composition chimique des enveloppes terrestres	34
D. Importance massique des enveloppes terrestres	35
E. Bilan	35
III. Une hausse de température avec la profondeur avec des sauts marquant une stratification thermique du globe : le géotherme	36
A. Notions de géotherme et gradient géothermique	36
B. Une construction basée sur des points d'ancrage	36
1. Une mesure de température dans les forages continentaux profonds permettant d'inférer un gradient lithosphérique de $30 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$	36
2. Une limite lithosphère-asthénosphère (LAB) à $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ (1600 K) environ à 100 km	36
3. Des points d'ancrage découlant de la minéralogie expérimentale sur l'olivine : 1750 K à 410 km et 1900 K à 670 km	36
4. Une température de fusion du fer (5000 K) proposée pour le noyau à la profondeur de la discontinuité de LEHMANN	36
C. Une extrapolation entre les points d'ancrage fonction du modèle convectif du manteau retenu	36

IV. Des enveloppes fluides superficielles également stratifiées verticalement	38
A. L'atmosphère : une stratification thermique que l'on peut mesurer avec un ballon sonde puis des capteurs embarqués	38
B. L'hydrosphère : stratification de base de l'océan selon des critères de température, salinité et densité	39

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	40
Références	40
Plan du chapitre	42

© 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 2023.
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.