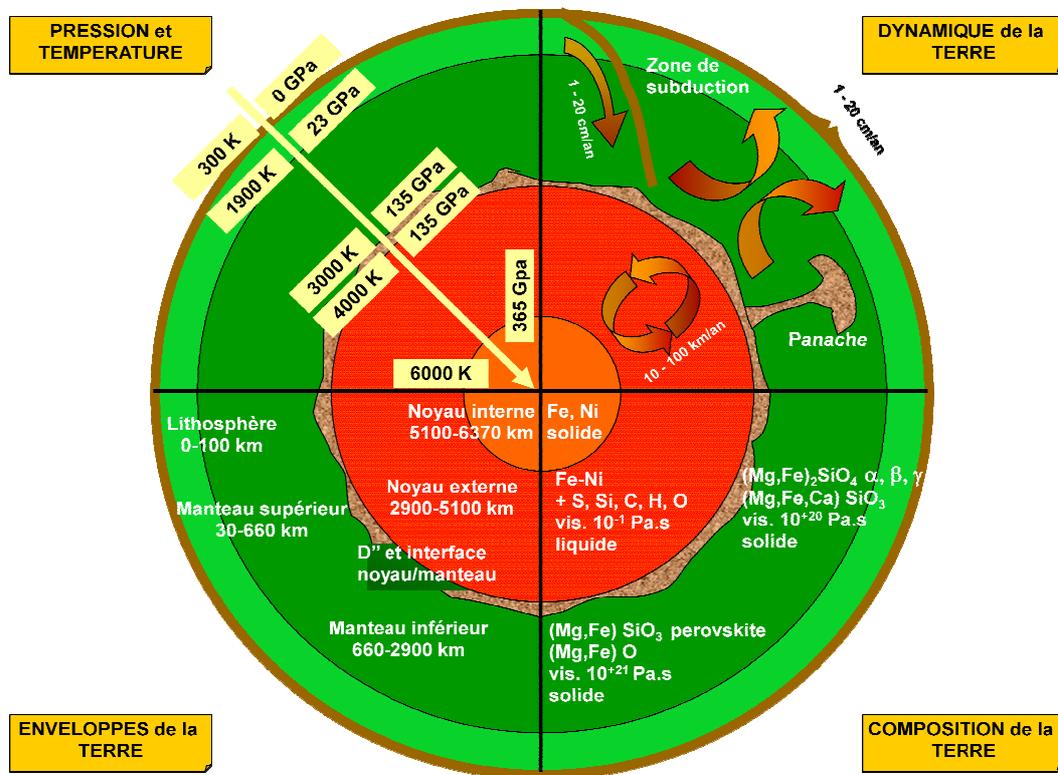


ANNEXE 1 CE QU'IL FAUT COMPRENDRE ET APPRENDRE

MODELE ACTUEL. PRÉSENTATION. DIMENSIONS PHYSICO-CHIMIQUES



Forme = ellipsoïde, (sphère aplatie aux pôles),

Rayon moyen de 6370km

Masse volumique = 5,5

Composition chimique totale : O>30%, Si>15%, Mg<14%, S, Ni, Ca, Al, Na, K,).

Composition chimique du noyau : fer (<90%), nickel (<6 %), soufre (4,5 %), < 1 % autres

Structure : 3 discontinuités physique majeures = Mohorovicic, Gutenberg, et Lehmann séparant 4enveloppes minéralogiques, croûte, manteau, noyau externe et noyau interne

Compositions minéralogiques : Basalte, gabbro, granite, dans la croûte au dessus de la discontinuité du MOHO, péridotite sous le MOHO, Fer sous la discontinuité de Gutenberg

Formes minéralogiques : *cristallisée* dans la lithosphère, le manteau et la graine du noyau, forme *liquide* dans le noyau externe et les laves en fusion, amorphes dans volcanisme effusif,

Comportement rhéologique des enveloppes

Lithosphère rigide (100km) = croûte + partie rigide du manteau supérieure ;

Manteau plastique de très grande viscosité (2900km),

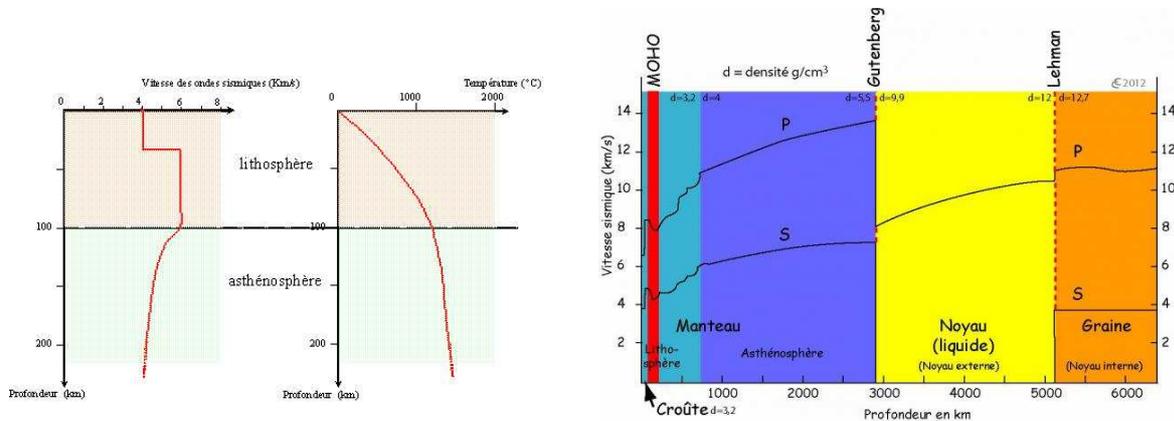
Limite Noyau externe liquide = 5100 km ; noyau interne ou graine solide = 6370 km

Géodynamique : mouvements horizontaux et de plaques tectoniques en surface

Mouvements verticaux de matière mantellique par convections cellulaires dans le manteau

CE QU'IL FAUT COMPRENDRE ET APPRENDRE

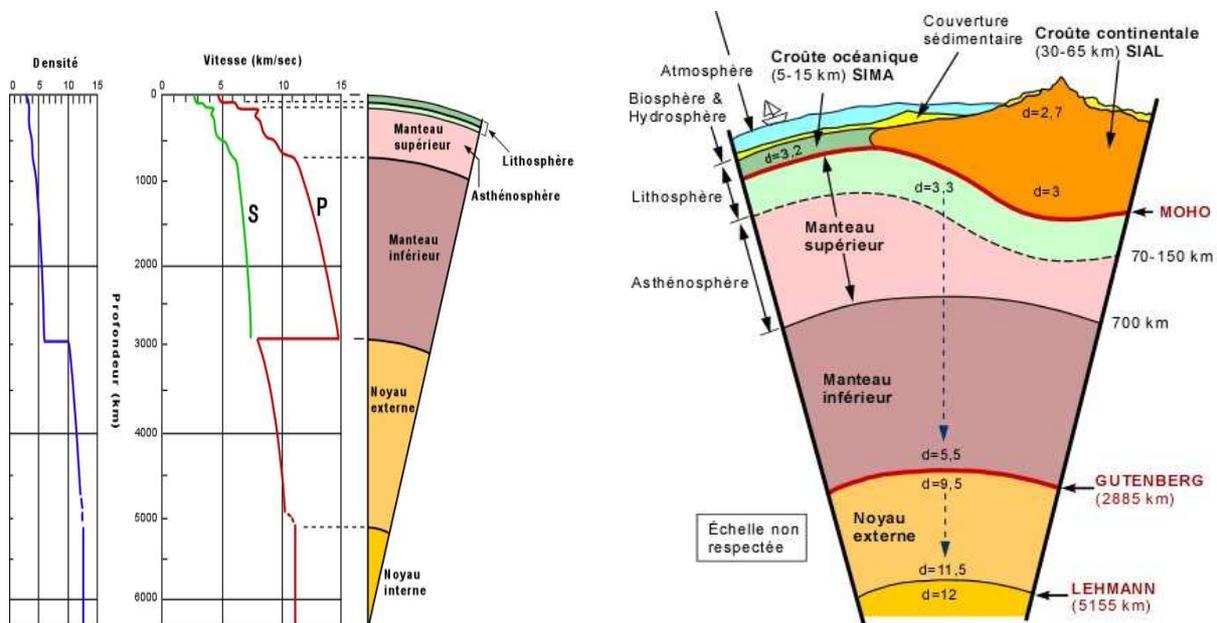
MODELE ACTUEL ARGUMENTÉ. PROFILS SISMIQUE, THERMIQUE ET DENSITES



Les ondes sismiques se déplacent au sein du globe à une vitesse qui dépend de différents paramètres physiques : la, la chaleur, densité du milieu traversé etc.

Les **ondes P** se propagent dans les solides, les liquides et les gaz, alors que les **ondes S** ne se propagent que dans les solides. On sait aussi que la **vitesse** de propagation des ondes sismiques est **proportionnelle à la densité** du matériel dans lequel elles se propagent.

MODELE ACTUEL ARGUMENTÉ : DISCONTINUITES. ENVELOPPES



4 discontinuités, 5 enveloppes

4 discontinuités, 5 enveloppes

MOHO : INTERFACE CROÛTE / MANTEAU SUPERIEUR RIGIDE

Entre 5km sous les océans et **35 km** en moyenne sous les continents : discontinuité de Mohorovicic, dite **MOHO**, correspond à un changement minéralogique séparant les granites ($V_p=6$ km/s) et les basaltes ($V_p=6,5$ km/s) de la croûte de la péridotite ($V_p=8$ km/s) du manteau supérieur 35km : MOHO = changement minéralogique

CONRAD : INTERFACE MANTEAU SUP. RIGIDE / SUP. PLASTIQUE

Entre 70 et 150km : discontinuité de Conrad = contact lithosphère-asthénosphère, on note une légère chute des vitesses de propagation des ondes P et S correspondant au changement rhéologique des péridotites qui deviennent plus plastiques dans l'asthénosphère = **faible pourcentage est à l'état liquide**, d'où baisse du gradient géothermique et de la vitesse de propagation des ondes.

Croûte + Manteau supérieur Rigide = Lithosphère = plaque rigide mobile

Conrad = surface de découplage des forces de cisaillement permettant la subduction

Entre 100 et 2900 km, l'augmentation progressive de la vitesse des ondes P et S dans le manteau, indique une augmentation de densité du matériel à mesure qu'on s'enfonce dans ce manteau avec une légère baisse à la base de la lithosphère due à un changement de phase de la péridotite.

GUTENBERG : INTERFACE MANTEAU INF. PLASTIQUE / NOYAU SUP. LIQUIDE

A 2900km : limite entre le manteau et le noyau, on note une brusque **interruption** de propagation des **ondes S** qui indique qu'on passe d'un solide (manteau inférieur) à un liquide (noyau externe).

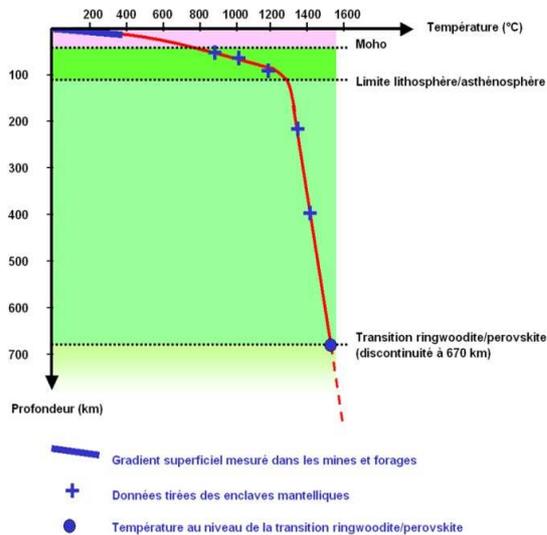
De 2900 à 5150km, la chute subite de la vitesse des ondes P au contact manteau-noyau est reliée au changement d'état de la matière (de solide à liquide), mais les vitesses relatives continuent d'augmenter, indiquant une augmentation des densités (donc de Pression) dans le noyau externe.

LEHMANN : INTERFACE NOYAU METALLIQUE SUP. LIQUIDE / GRAINE SOLIDE

A 5150km : la pression dans le noyau est suffisamment élevée pour que la matière cristallise et que les ondes P réfractent dans la graine confirmant sa nature solide

CE QU'IL FAUT COMPRENDRE ET APPRENDRE

MODELE ACTUEL ARGUMENTE. CONSTRUCTION DU GEOTHERME



Gradient de $T^{\circ}\text{C}$ de 0 à 670 km

CE QUI EST ADMIS

A la surface de la Terre Le gradient thermique moyen varie de 10 à 30 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ → 100 km
1300 $^{\circ}\text{C}$ (= base de la Lithosphère)

Au MOHO, entre 30 et 40 km de profondeur, la base de la croûte continentale, l'étude des roches métamorphiques donne T° entre **500 et 600 $^{\circ}\text{C}$**

A **400 km** de profondeur = origine des *enclaves de manteau les plus profondes*, remontées par les volcans, $T^{\circ} \approx$ **1400 $^{\circ}\text{C}$**

A **670 km**, la transformation de l'olivine et la sismologie donne $T^{\circ} \approx$ **1550 $^{\circ}\text{C}$** et pression $P =$ 23,5 Gpa

A **5150 km**, = **interface noyau externe / graine**, on estime la T° comme étant la T° de cristallisation du fer à ces pressions → **5 000 $^{\circ}\text{C}$** .

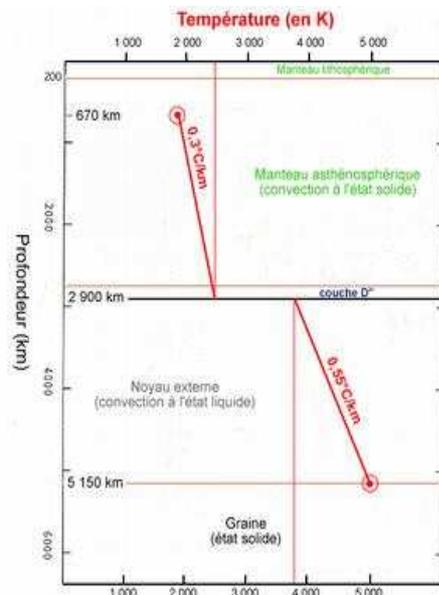
CE QUI EST DEDUIT

A **2900 km**, coté base du manteau : calcul de T° à partir du gradient adiabatique donné par la thermodynamique (0,4-0,3 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$) → **2 000 $^{\circ}\text{C}$**

A **2900 km**, coté noyau extérieur liquide : calcul de T° à partir du gradient adiabatique donné par la thermodynamique (0,55 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$) → **3 800 $^{\circ}\text{C}$** au sommet du noyau externe

Or, nous n'avons aucune information directe sur la T° à la base du manteau, ni T° ni d'échantillons ; il faut donc déduire T° de données indirectes.

Dans ce cas, comment détermine-t-on le saut thermique de 2000 $^{\circ}\text{C}$ de la base du manteau (2900 km) à 3800 $^{\circ}\text{C}$ à la limite supérieure du noyau toujours à 2900km? Grâce à la thermodynamique et à deux point de T° bien connues qui vont servir de points d'ancrage



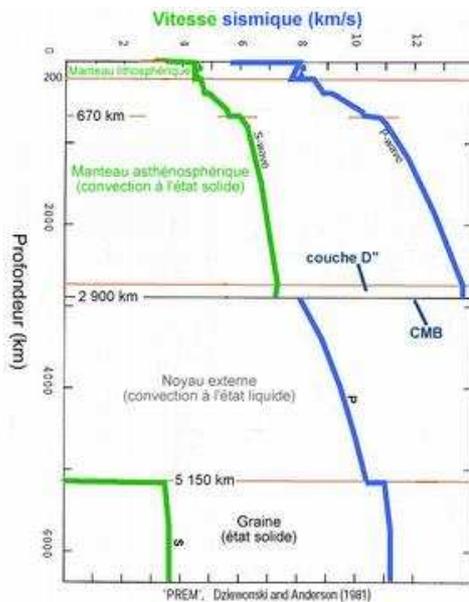
Gradient de T° de 670 à 5150 km

Les 2 points d'ancrage dont on est assuré de connaître les T° sont :

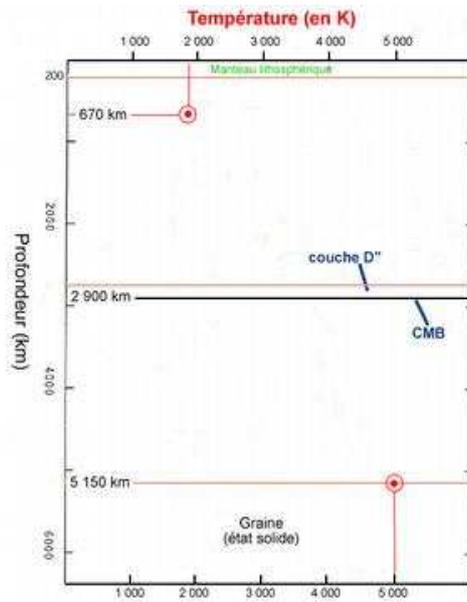
A **670 km** de profondeur : $T^\circ = 1\ 600^\circ\text{C}$ et à

A **5 150 km** de profondeur, limite noyau-graine: $T^\circ = 5\ 000\ \text{K} = 4\ 700^\circ\text{C}$

Si on part de l'hypothèse d'un gradient uniforme entre ces 2 points nous aurions une différence de température de $3\ 100^\circ\text{C}$ ($4\ 700 - 1\ 600$) entre 670 et 5 150 km de profondeur, soit un **gradient moyen** d' environ **$0,7^\circ\text{C}$ par km**.



Profil sismique de la Terre



Géotherme estimé à partir de deux points d'ancrage

Or dans le **manteau**, le **gradient adiabatique** est correctement estimé à **$0,3^\circ\text{C}/\text{par km}$** , valeur très différente du gradient théorique moyen ($0,7^\circ\text{C} / \text{km}$).

De même dans le **noyau extérieur**, il est de l'ordre de **$0,55^\circ\text{C} / \text{km} < 0,7^\circ\text{C}/\text{km}$**

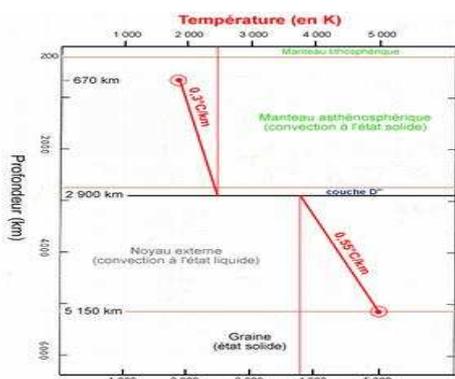
Sur la base de ces estimations, on peut donc extrapoler la T° en tout point du manteau, à partir des points d'ancrage.

En remontant depuis 5 150 km ($4\ 700^\circ\text{C}$) dans le noyau liquide, et en descendant depuis 670 km ($1\ 600^\circ\text{C}$) dans le manteau, on calcule la T° à la **limite manteau-noyau (2 900 km)**.

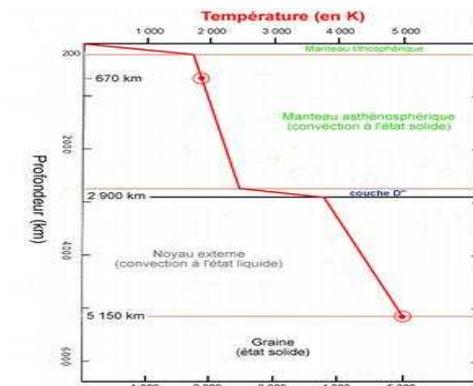
On arrive ainsi aux valeurs suivantes :

- côté manteau : $1\ 600 + (2\ 900 - 670) \times 0,3$ soit **$2\ 200^\circ\text{C}$**
- côté noyau : $4\ 700 - (5\ 150 - 2\ 900) \times 0,55$ soit **$3\ 450^\circ\text{C}$**

On peut donc tracer le géotherme terrestre ci-dessous.



Géotherme estimé à partir de deux points d'ancrage



Géotherme estimé à partir de deux points d'ancrage

Avec le gradient moyen de $0,7^{\circ}\text{C}/\text{km}$, on arrive à une température de **3100°C** à 2 900 km de profondeur, soit des différences de **900°C** côté **manteau** et **350°C** côté **noyau**

Il faut donc **affecter plus de $1\ 200^{\circ}\text{C}$** à des sauts de température dans certaines parties du géotherme dans le manteau, soit à 670 km soit à 2 900 km .

Sachant que le manteau est totalement solide jusqu'à 2900 km, et que les expérimentations de minéralisation à très hautes T° et P , indiquent 130 GPa, on en déduit que la T° de fusion ne doit pas être atteinte avant cette limite, ce qui exclut tout saut thermique important

Sachant que *le noyau externe, est liquide* et donc que sa température doit être supérieure à $3\ 800^{\circ}\text{C}$ dans les conditions de pression auxquels il est soumis,

Sachant que le léger saut de T° 670 km, est du à une simple transformation minéralogique de l'olivine,

il ne reste que la limite noyau-manteau pour expliquer l'important écart de T°

Sachant par ailleurs *l'importante activité géologique de la couche D" (90 km)*, il est plus simple d'affecter **la totalité du saut de T°** à cette discontinuité des 2 900 km

CQFD

CE QU'IL FAUT COMPRENDRE ET APPRENDRE

MODELE ACTUEL. T° ET CONVECTION = MOTEUR DE LA TECTONIQUE

CONDUCTION, CONVECTION: DEFINITIONS

Conduction : un **corps non déformable** (solide) chauffé, transfère la chaleur par transmission de vibrations de proche en proche, des parties chaudes vers les parties froides, sans déplacement de matière

exple: une brique froide sur une plaque chauffante.

Convection: un corps **déformable** (liquide) **chauffé**, se **dilate** quand sa température augmente, et sa masse volumique (densité), devient plus faible.

CAS1: Si le corps est **refroidi par le bas et chauffé par le haut** (casserole d' eau chaude posée **sur** de la **glace**), les zones denses seront en bas, les régions moins denses en haut = **situation stable**, qui n'engendrera **aucun mouvement**.

CAS2: Si un corps est **chauffé par le bas et refroidi par le haut** (casserole d' eau froide posée **sur** une **plaque** chauffante), les zones denses seront en haut, et les légères en bas = **situation instable** → la **matière froide du haut aura tendance à descendre** et la matière **du bas aura tendance à monter**. Ces déplacements simultanés = **convection thermique**.

Dans un système **refroidi par le haut et chauffé par le bas**, il peut donc y avoir, **soit conduction** (corps non déformable), **soit convection** (corps déformable).

1916: Lord Rayleigh : paramètres de la convection

Le **moteur de la convection thermique est la poussée d'Archimède**, due à la différence de masse volumique $\Delta\rho$ entre deux zones d'un même système **et** à la pesanteur **g**

$\Delta\rho$ d'un système dépend elle-même de : ΔT = l'écart de température et de

α = coefficient de dilatation thermique

La **poussée d'Archimède** dépend ainsi du produit $\Delta T \cdot \alpha \cdot g$.

2 paramètres physiques s'opposent à la convection thermique :

- la **viscosité cinématique ν** qui **s'oppose aux mouvements**; **plus** un corps est visqueux, **moins** il se déformera.
- la **diffusivité thermique κ** qui **limite les écarts de T°**: **plus** la **diffusivité thermique** d'un corps est **élevée**, **moins** les gradients de T° et de masse volumique seront importants et plus la conduction sera favorisée

Un **3^{ème} paramètre favorise la convection** = hauteur **h** d'un système : **plus** un système est **épais**, **plus** les mouvements de **convection** « ont de la place » pour s'établir; **plus** il est mince, mieux la chaleur s'évacue par conduction

Rayleigh a montré que la « conveCtabilité », = capacité d'un système à entrer en convection dépend de ces 6 facteurs : α , ΔT , **g** , **h** , κ et ν .

Et en particulier du rapport $Ra = \alpha * \Delta T * g * h^3 / \kappa * \nu$ = nombre de Rayleigh avec

$Ra = 103$ = valeur critique

$Ra > 103$ → il y a convection thermique.

$Ra < 103$ → pas de convection thermique mais seulement de la conduction

ELEMENTS ET ILLUSTRATIONS DE LA CONVECTION

Modèle idéal de système convectif: **source unique de chaleur en bas**, et $Ra > 10^3$ (réservoir rempli d'eau, avec une plaque métallique refroidie en haut et une plaque métallique chauffante en bas.)

L'eau au contact de la plaque froide supérieure se refroidit par simple conduction, → s'établit une **mince couche d'eau froide en haut**, contre la plaque froide. Plus cette couche d'eau refroidit, plus elle devient épaisse et dense et au **bout d'un certain temps, elle devient suffisamment dense pour plonger vers le bas**.

Alors, elle perd contact avec la source de froid et reste à température constante tout au long de sa plongée.

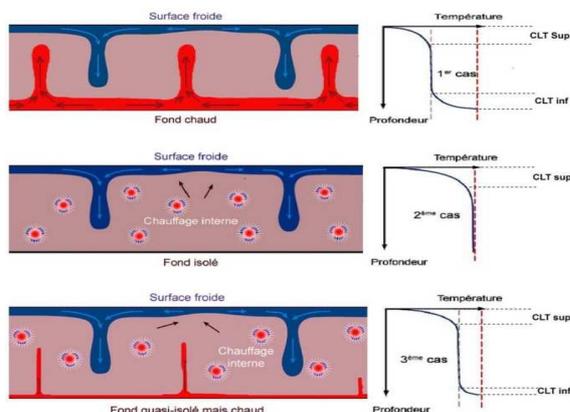
La situation est exactement **symétrique au voisinage de la plaque chaude du bas**: l'eau qui se réchauffe par conduction au contact de la plaque chaude, devient moins dense, et se met à monter en restant alors à température constante.

Si on mesure la température en fonction de la profondeur, on constate qu'elle varie très rapidement dans les **minces couches qui se refroidissent ou se réchauffent** (par conduction) au contact des plaques métalliques supérieure et inférieure.

Dans ces minces couches d'eau froide ou chaude, il y a un fort gradient thermique, dit **conductif**.

Ces **2 couches minces qui échangent de la chaleur par conduction** avec l'extérieur et qui se mettent en mouvement à cause des différences de masse volumique sont dites **couches limites thermiques (CLT)**. Ces deux CLT sont le « moteur » de la convection et font bien sûr partie des cellules de convection

EXEMPLES DE CONVECTION



CAS1: milieu est refroidi par le haut et chauffé par le bas = 2 couches limites thermiques (CLT) sup/inf. Le haut plus dense car refroidi plonge activement ; le bas, monte activement. Entre les 2 CLT, très peu de mouvements et une T° quasi constante.

CAS2: pas de source de chaleur inférieure, mais production de chaleur dans la masse. Le haut plus dense car refroidi plonge activement ; le bas peut remonter passivement, par compensation Il y a alors une CLT supérieure, mais pas de CLT inf.

CAS3: est intermédiaire : c'est celui qui se rapproche le plus de la Terre : une CLT sup. froide forte + CLT inf. chaude → mouvements descendants actifs + ascendants passifs compensatoires + quelques panaches ascendants actifs

APPLICATION A LA TECTONIQUE DES PLAQUES

LITHOSPHERE OCEANIQUE = CLT supérieure

EPAISSEUR : $h = 100\text{km}$

$AT = 1300\text{ T}^\circ\text{C}$

La CLT se refroidit essentiellement par conduction

Lorsque cette CLT sup. est suffisamment refroidie et épaissie, sa **masse volumique devient** ($\approx 3\ 300\ \text{kg.m}^{-3}$) **supérieure** à celle de *l'asthénosphère sous-jacente* ($\approx 3\ 250\ \text{kg.m}^{-3}$)

→ **plongée** de la lithosphère = **subduction**.

Les remontées de matière profonde, chaude et peu dense de l'asthénosphère, se font au **niveau des dorsales**.

La **CLT va des dorsales à la subduction**, et ce modèle permet de calculer la **variation de température et d'épaisseur de la CLT**.

Les plaques lithosphériques (*fragments de CLT*) sont animées de mouvements de *translation, de la dorsale vers les subductions*.

S'il y a toujours refroidissement par le haut, il existe **2 cas théoriques extrêmes** de convection thermique:

- le **système est totalement chauffé par le bas (noyau)**,
- le **système produit et/ou libère également de la chaleur dans sa masse**.

On sait que ces deux sources de chaleur coexistent

D'un point de vue toujours théorique, dans aucun de ces deux cas, la CLT supérieure (la lithosphère) n'est mise en mouvement par des mouvements sous-jacents.

Dans le 1^{er} cas (chauffage par le noyau), l'arrivée active de matériel chaud venu des profondeurs rajoutera un gradient thermique horizontal décroissant de la dorsale vers la zone de subduction qui va augmenter la dynamique spontanée à « couler », de la CLT.

On parlera de « **poussée aux dorsales** » (*ridge push*).

Dans le 2^{ème} cas (**chauffage dans la masse**), la CLT supérieure (la lithosphère) n'est mise en mouvement que par sa tendance « spontanée » à couler du fait de sa plus forte densité. On parlera de « **traction des subductions** » (*slab pull*).

Ce modèle avec double action a remplacé le modèle ancien de tapis roulant et est lui-même en passe d'être remplacé par celui de seule force de traction dans les fosses

ORIGINE DE LA CHALEUR DE LA TERRE.

Le manteau représente 85% du volume de la Terre et 70% de sa masse

La majorité de l'énergie dégagée par la Terre est libérée par **4 noyaux radioactifs**: ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U et ^{40}K , ainsi que par le « refroidissement continu depuis 4,4 Ga années ». Or ces trois éléments chimiques radioactifs **sont concentrés dans les silicates**.

Le noyau de fer, **pauvre en sources radioactives, et qui ne représente que 30%** de la masse de la Terre se refroidissant, ne fournit *qu'une faible part de l'énergie de la Terre (20 à 25% d'après les dernières estimations)*. Cela suggère que le **manteau terrestre est davantage un système produisant et libérant de la chaleur dans sa masse qu'un système chauffé par le bas**.

En première approximation, **une plaque lithosphérique** (CLT supérieure) serait **tirée** par la **subduction** et non pas poussée par la dorsale.

Les **subductions** représenteraient les **seuls** mouvements **actifs**, alors que les **dorsales** seraient simplement des **remontées passives**.

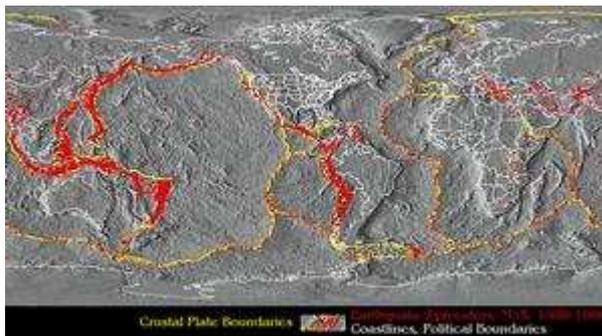
FORMULATION DE LA TECTONIQUE DES PLAQUES

La théorie de la tectonique des plaques naquit de la synthèse de l'hypothèse de l'expansion des fonds océaniques, et de l'observation de l'activité tectonique du globe.

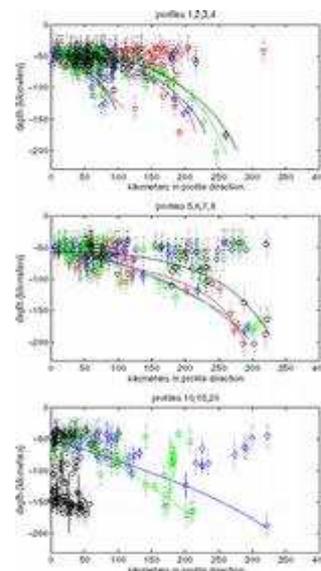
Observation et superposition des cartes

Dès la fin du XIX^e siècle, on avait remarqué que les chaînes de montagnes et les volcans se répartissaient suivant des bandes étroites sur les continents.

La carte de la répartition des séismes océaniques établie par **Beno Gutenberg** et **Charles Francis Richter** en 1954 montre que les séismes étaient confinés dans des régions précises correspondant aux dorsales, aux fosses, aux failles transformantes et aux chaînes montagneuses.



Carte mondiale de localisation des séismes



Localisation des séismes en fonction de la profondeur sur des coupes perpendiculaires aux fosses océaniques.

A l'exception des fosses où les tremblements de terre existaient jusqu'à 700 km de profondeur, les séismes étaient également restreints à la partie superficielle du globe, à une profondeur inférieure à 100 km. Cette partie superficielle constituait la lithosphère, couche au comportement rigide, qui surmontait l'asthénosphère, couche au comportement ductile.

Wadati en 1930 et **Benioff** en 1955 avaient remarqué que les séismes profonds situés sous les fosses se localisaient suivant des plans inclinés.

En 1967, Jack Oliver et Bryan Isacks interprétèrent ces plans comme la trace de la lithosphère océanique retournant dans le manteau. Ces lieux de disparition de la lithosphère océanique (on dira plus tard « zones de subduction ») étaient nécessaire dans la logique du « sea floor spreading » si on ne voulait pas supposer l'expansion de la Terre ; ils étaient désormais démontrés.

En 1967, **Jason Morgan** synthétisa ces différentes approches en développant la première hypothèse « plaquiste ». Il supposa que la lithosphère était découpée en une série de « blocs » parfaitement rigides, se déplaçant les uns par rapport aux autres. Le mouvement d'un bloc pouvait être décrit par une simple rotation entre sa position initiale et sa position finale, rotation définie par un axe passant par le centre de la Terre (axe eulérien) et une vitesse

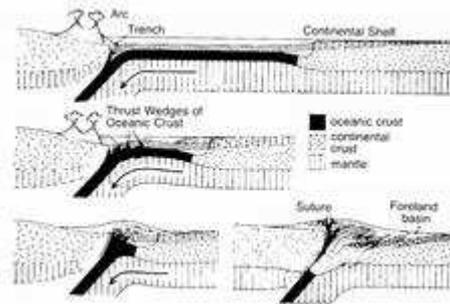
angulaire. Les failles transformantes correspondaient à des petits cercles centrés sur l'axe eulérien, permettant d'en déterminer la position.

La même année en 1967 et indépendamment, **Dan Mc Kenzie** et **Robert Parker** développèrent des idées analogues en introduisant le terme de « plaque ».

1968, L'année suivante, **Xavier Le Pichon**, en fit une première application. Il divisa la surface du globe en 6 plaques lithosphériques dont il détermina les frontières à partir de l'activité tectonique et calcula les pôles de rotation de leur mouvement relatif depuis 120 millions d'années. Par la suite, ces mêmes procédés permirent par simple « fermeture » des océans de reconstruire les positions successives des continents depuis 200 millions d'années.



Les plaques et leurs mouvements actuels



Disparition des océans et formation des montagnes

En 1968, **Isaks**, **Jack Oliver** et **Lynn Sykes** parlèrent de « nouvelle tectonique globale » en vérifiant qu'elle était conforme aux phénomènes sismiques, et **Vine** et **Hess** introduisirent l'expression « tectonique des plaques ».

TECTONIQUE DES PLAQUES ET GEOLOGIE

La théorie de la tectonique des plaques fut rapidement acceptée par la communauté des géophysiciens car elle leur permit d'interpréter l'ensemble de leurs nouvelles observations. Elle se heurta par contre à une forte opposition de la part des géologues qui la considéraient avant tout comme une *théorie des océans*. Son application à la géologie continentale posait, il est vrai, de sérieuses difficultés :

- comment l'utiliser pour comprendre le passé géologique ?
- Les plaques étaient-elles vraiment rigides alors qu'on observait des séismes intra-plaques par exemple en Asie ?
- Comment définir une frontière entre deux continents alors que les séismes se répartissaient sur une large bande ?

John Dewey et **John Bird**, en 1969-70, furent les premiers à montrer la fécondité de la théorie de la tectonique des plaques pour comprendre les formations géologiques. Remettant à plat toutes les anciennes conceptions, ils définirent les marges continentales passives, les marges continentales actives, les chaînes de collision. Ils affirmèrent également que les *montagnes anciennes résultaient d'anciennes collisions et étaient donc le témoins d'océans aujourd'hui disparus*. La tectonique des plaques pouvait donc avoir une application antérieure à 200 millions d'années.

MISE A JOUR DU MODELE CLASSIQUE DE LA POUSSEE AUX DORSALES

Raisonnement

Argument 1 : Les plaques africaine et antarctique sont presque entièrement bordées de dorsales

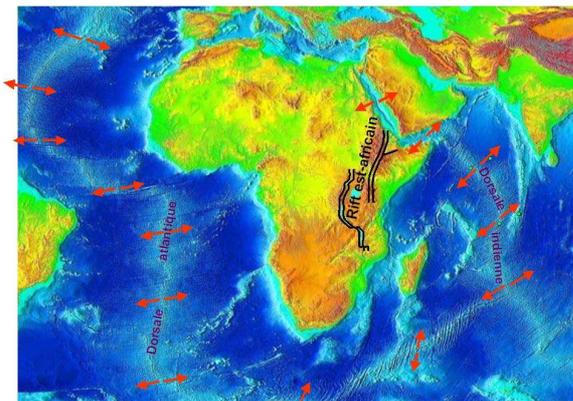
Si les dorsales exerçaient une « poussée » notable, la plaque Afrique serait soumise à une compression Est-Ouest, car poussée vers l'Est par la dorsale atlantique et poussée vers l'Ouest par la dorsale indienne.

Or ce n'est pas le cas, puisqu'au contraire elle est soumise à une extension Est-Ouest comme en témoigne le Grand Rift Africain

Argument 2 : Mécanismes au foyer → extension DANS CLT

Les mécanismes au foyer des séismes profonds dans la lithosphère plongeante en dessous de 100 km de profondeur, indiquent le plus souvent un *mécanisme en extension*.

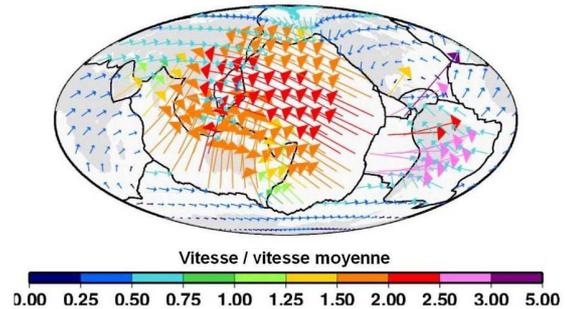
Si la plaque était mise en mouvement par la dorsale, et si l'enfoncement au niveau de la subduction était dû à la poussée des dorsales, ces mécanismes seraient en compression.



La plaque Afrique, bordée de dorsales à l'Est et à l'Ouest

Vitesse mesurée « absolue » des plaques au Quaternaire

$V_{\text{plaques qui subduisent}} / V_{\text{plaques qui ne subduisent pas}} = 3,9$



Vitesse « absolue » des plaques

La longueur des flèches est proportionnelle à leur vitesse. Leur couleur indique le rapport entre cette vitesse et la vitesse moyenne ; les plaques rapides sont celles qui subduisent

Le rapport entre la vitesse des plaques qui subduisent et celle qui ne subduisent pas est ≈ 4

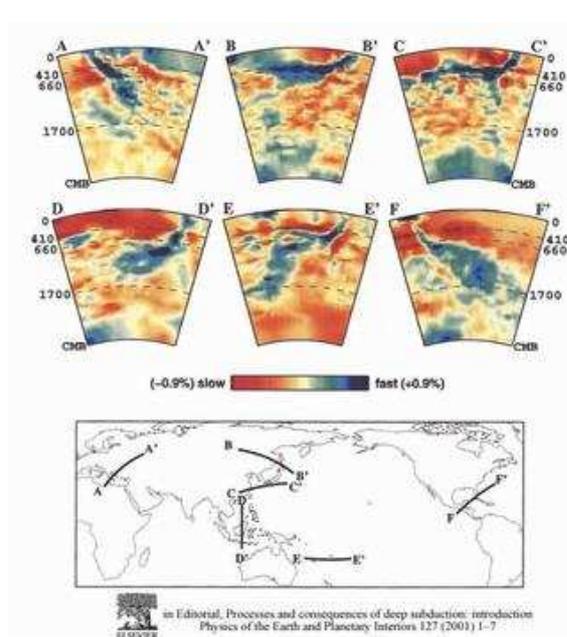
Argument 3 : vitesse des plaques Vitesse des plaques

Aux frontières de plaques, les anomalies magnétiques, les mesures GPS, etc., permettent de mesurer des mouvements relatifs.

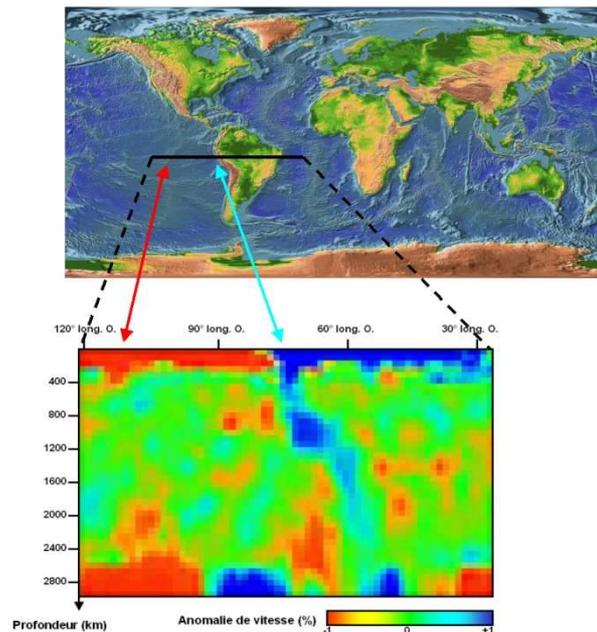
En utilisant le repère des points chauds, il est possible de déterminer les mouvements dits « absolus » des plaques. Par rapport à ces repères supposés fixes, il existe des plaques **rapides** avec une vitesse de déplacement $> 6 \text{ cm/an}$, tandis que d'autres sont **lentes** avec une vitesse $< 4 \text{ cm/an}$.

Les plaques **rapides** sont celles qui **subduisent** (comme la *plaque Pacifique*) et les plaques **lentes** sont celles qui ne subduisent pas (comme la *plaque Eurasie*).

Et il n'y a aucune relation entre la vitesse des plaques et la longueur des dorsales qui les bordent.



Coupes tomographiques des subductions:
 Mer Egée : coupe A-A'; îles Kouriles : coupe B-B'
 Izu Bonin : coupe C-C'; Java : coupe D-D',
 Tonga : coupe E-E'; Amérique centrale : coupe F-F'.
 Source : D.C. Rubie & R.D. Van der Hilst (2001).
 On constate que le panneau plongeant (slab) semble s'étaler sur la zone de transition pour la zone des Iles Kouriles (coupe B-B'), alors qu'il pénètre dans le manteau inférieur sous l'Amérique centrale (coupe F-F').



Coupe tomographique entre le Pacifique et l'Atlantique central: la subduction andine (flèche bleue) est « visible » quasiment jusqu'à l'interface noyau-manteau. Aucune anomalie chaude profonde sous la dorsale pacifique (flèche rouge),

Argument 4 : Anomalies thermiques

Depuis les années 1980, les progrès de l'informatique et la généralisation des réseaux sismologiques mondiaux permettent la tomographie sismique, équivalent géologique des scanners en médecine. Cette tomographie permet de localiser des anomalies de vitesse de propagation des ondes sismiques. Ces anomalies de vitesse correspondent à un écart de température, (une accélération de vitesse correspondant à une T° plus basse par rapport à la moyenne de référence à cette profondeur)

La tomographie sismique aux frontières de plaques indique:

- que la majorité des zones de subduction montrent un plongement de **matière froide** quasiment jusqu'à l'**interface** noyau-manteau, et
- qu'il **n'y a pas, d'anomalie thermique** sous les dorsales s'enracinant à une profondeur supérieure à 400 km, ni de **remontée de manteau chaud** provenant de la base du manteau

Le **modèle de convection mantellique est intermédiaire** entre les deux cas de convection thermique de chauffage par le bas et chauffage dans la masse.

Le **noyau n'est pas** la source principale de chaleur de la Terre, mais il en produit une fraction, non négligeable = **origine théorique probable** des remontées actives de manteau profond, à partir du voisinage de l'interface noyau-manteau = **panaches**

Les points chauds = traces en surface de **ces panaches**, = remontées mantelliques profondes et actives.

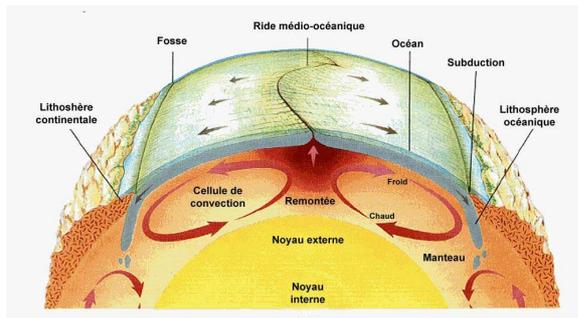
La **géochimie** (rapports isotopiques du plomb, de l'hélium...) permet de confirmer que le **manteau à l'aplomb des points chauds est contaminée par la lithosphère** océanique (manteau supérieur + croûte basaltique + sédiments) ayant subducté jusqu'à ces profondeurs est **différent** de celui sous les dorsales

Sous les dorsales, le manteau est **d'origine superficielle** et monte passivement pour compenser le vide laissé par les deux plaques qui s'écartent.

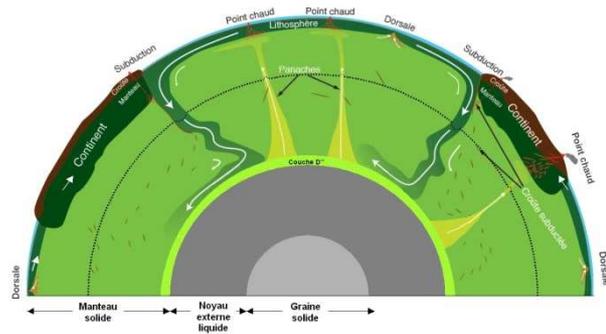
C'est le manteau solide qui convecte, et **non le magma** = infime % du volume de la Terre.

Le magma = **fusion partielle** par **décompression**, est produit très localement entre 100 et 10 km de profondeur, au sommet des **zones de manteau qui remonte**, soit de la base du manteau (les panaches des points chauds) soit de la zone sous les dorsales.

Il se produit aussi une **fusion partielle dans les zones de subduction**, à l'aplomb de la lithosphère océanique plongeante **par hydratation** du manteau sus-jacent



Modèle *ancien* de la convection mantellique



Modèle *actualisé* de la convection mantellique

Modèle *actualisé* de la convection mantellique. Schéma de droite

Les deux tiers droits de cette coupe pourraient correspondre très schématiquement à un trajet allant de l'ensemble Australie-Nouvelle Zélande (simplifié ici comme un seul continent) à la dorsale Atlantique (à droite) en passant par le Pacifique (l'océan au centre).

Le schéma met en valeur l'importance des subductions, moteur des mouvements de la lithosphère et le rôle superficiel et passif des dorsales, qui ne font que combler l'écartement engendré par le mouvement des plaques.

La taille des flèches blanches est proportionnelle à la vitesse des mouvements. La petite taille des flèches sous-lithosphériques indique que **c'est la lithosphère** qui met le manteau asthénosphérique en **mouvement**, et non l'inverse.

Le manteau est représenté en vert (couleur de la péridotite), vert foncé pour le manteau froid (lithosphérique), vert « moyen » pour la partie principale du manteau, et vert plus clair pour le manteau chaud des panaches.

La transition ringwoodite/perovskite correspond au cercle fin noir.

La couche D'' et tout ce qui se passe à l'interface noyau-manteau, sont ici volontairement hyper-simplifiés, et sont représentés comme une coque sphérique très claire, sans structure dessinée. Les croûtes sont représentées en brun, le noyau en gris (couleur du métal). Les épaisseurs relatives des différentes couches ont été modifiées pour en assurer la visibilité. Les très rares parties magmatiques (liquides) du manteau ainsi que les volcans aériens sont représentés en rouge. La part extrêmement limitée de ces magmas montre bien combien l'idée d'une Terre « sphère magmatique » est erronée.

CONCLUSIONS

Subductions = plongements très profonds de la lithosphère

Subductions = moteur des mouvements des plaques lithosphériques (au moins plaques rapides).

Les dorsales = remontées superficielles, passives, initiées par le déplacement des lithosphères, simplement pour compenser leur écartement relatif. Les dorsales : ne participent pas (ou peu) à la mise en mouvement des plaques.

ET LES CROUTES ?

La **croûte océanique** de composition basaltique a une masse volumique ρ_c de 2 800 à 2 900 kg.m^{-3} . Cette croûte moins dense que le manteau (lithosphère et asthénosphère) et a un rôle de flotteur mince et donc peu efficace

Pour subduire, la lithosphère océanique (croûte + manteau lithosphérique) doit acquérir une masse volumique > à celle de l'asthénosphère, et le manteau lithosphérique (refroidi) doit être suffisamment épais effacer le rôle de flotteur de la croûte.

Or quand la lithosphère océanique subducte, sa **croûte basaltique se métamorphose** et le **basalte devient éclogite**, roche très dense (**3 400 kg.m^{-3}**), **plus dense** que le manteau.

→ La croûte non métamorphosée qui était un obstacle à l'initiation de la subduction, devient un accélérateur de cette subduction une fois celle-ci amorcée.

De plus, les croûtes subductées sont très peu miscibles au manteau

La **croûte continentale** plus épaisse (30 à 40 km) et une **densité** encore plus faible (**2 700 kg.m^{-3}**), le rôle de flotteur fonctionne et la subduction est quasiment impossible, ou du moins beaucoup plus limitée.

VISCOSITE DE LA LITHOSPHERE ET DE L'ASTHENOSPHERE

Dans une casserole d'eau, la CLT a la même viscosité que l'eau interne, l'eau superficielle n'a pas de rhéologie indépendante de l'eau profonde.

Par contre, la **lithosphère** (rôle de CLT) a une **viscosité** très **différente** de celle de l'**asthénosphère** > **1 000 à 10 000 fois supérieure**

La lithosphère présente donc une individualité mécanique, bien différente de celle de l'asthénosphère ; elle peut **transmettre des forces** sur de très grandes distances, par exemple sur les **10 000 km** qui séparent la subduction japonaise de la dorsale est-pacifique.

On est loin de savoir modéliser ce **saut de viscosité** lithosphère/asthénosphère. Ce que l'on sait, c'est que lorsque, pour une raison ou une autre, ce saut de viscosité est faible ou très progressif sur des planètes actives (Vénus ou Io par exemple), la convection mantellique existe, mais avec un autre mode (encore mal compris) que la tectonique des plaques.

DETERMINATION DE LA VISCOSITE DU MANTEAU

Le rebond glaciaire = effet de l'élasticité donc de la viscosité du manteau car la lithosphère, elle, est rigide

Il y a 20 000 ans, la Scandinavie était recouverte de 3 000 m de glace, dont le poids avait enfoncé la lithosphère dans l'asthénosphère. Depuis que les grands glaciers ont disparu (depuis 10 000 ans,) la Scandinavie allégée, s'est soulevée = rebonds post glaciaire. Elle remonte encore de 1 cm/an. Le délai pris par cette remontée, et sa vitesse sont mesurables (mesures géodésiques, altitude de plages soulevées d'âges connus).

Les calculs donnent une viscosité du manteau → $\nu \approx 10^{17} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$

ORDRE DE GRANDEUR DES VISCOSITES ET DEPLACEMENTS

viscosité de l'asthénosphère : $\nu = 10^{17} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$. → déplacement = *quelques cm/an*

viscosité de l'eau à 20°C : $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, → quelques **cm/s**

viscosité de la glace d'un glacier : $\nu = \text{de } 10^9 \text{ à } 10^{10} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ → une centaine de **m/an**,

viscosité des roches usuelles à la surface : $\nu = \text{de } 10^{20} \text{ à } 10^{21} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ (> asthénosphère)

viscosité du basalte d'une coulée de lave (fluide) : $\nu = 1 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$

VITESSE DES DEPLACEMENTS DES PLAQUES

V des plaques qui subduisent $\approx 10 \text{ cm/an}$

V des plaques qui ne subduisent pas $\approx 1 \text{ cm/an}$

V de l'ascension des panaches des points chaud > 10 cm/an

→ les subductions vont plus vite que la dorsale dans l'océan central qu'elles bordent

→ cet océan réduit donc de taille et les subductions dérivent donc lentement vers le centre du schéma.

→ Ce retrait des subductions vers le centre de l'océan entraîne une migration des 2 plaques qui les bordent et l'ouverture de nouveaux océans (lents).

Les données tectoniques, sismologiques, tomographiques, cinématiques confirment bien les modèles théoriques:

QUESTIONS EN SUSPENS

MOUVEMENTS DE L'ASTHENOSPHERE SOUS LES PLAQUES RAPIDES

Le manteau sous-lithosphérique est vraisemblablement entraîné par le mouvement propre de la plaque, mais jusqu'à quelle profondeur ? Y a-t-il des mouvements indépendants, et quelle en sont les géométries ? Des études tomographiques et gravimétriques devraient apporter des débuts de réponses, mais le problème est loin d'être résolu.

Les subductions de lithosphères jeunes .

En quelques endroits du globe, en particulier au Nord-Est du Pacifique et au Sud de la Cordillère des Andes, des lithosphères jeunes et même des dorsales subduisent.

Sont-elles entraînées par la plaque mise en mouvement par la subduction de lithosphère âgée située latéralement ?

Possèdent-elles d'importants fragments de lithosphère âgée déjà subduite dans le manteau profond et exerçant encore une traction ?

BILAN DES QUANTITES SUBDUCTEES ET REMONTEES

Il y a **environ** 50 000 km de zones de subduction qui atteignent la base du manteau, ce qui produit un "débit descendant" très important.

Les panaches remontent de cette base du manteau. Mais la somme de tous ses panaches doit avoir un débit ascendant bien inférieur au débit descendant des subductions. **Comment remonte la matière des subductions** quand elle ne fait pas partie des quelques panaches ? Il doit y avoir une remontée généralisée, diffuse et très lente du manteau profond. En a-t-on des évidences ?

Les dorsales lentes posent aussi des problèmes.

Les dorsales rapides (essentiellement Pacifique et Est-indienne) = $\frac{1}{2}$ de la longueur totale des dorsales, et évacuent plus des $\frac{3}{4}$ de la chaleur de la Terre sont directement liées à des subductions,

Ces dorsales rapides sont mises en mouvement par les subductions.

Mais les dorsales lentes (dorsales Atlantique et Ouest-indienne), sont rattachées à des plaques qui ne subduisent pas. Quel est le moteur de leur mouvement ? Un mouvement de la plaque engendré par le retrait d'une subduction ? Une très faible poussée aux dorsales (effet de « plan incliné ») ? L'ascension active de panaches ? Et, même si on suppose que la faible poussée des dorsales est suffisante, comment ces dorsales lentes se sont-elles initiées ? L'accumulation de chaleur sous un épais « couvercle continental » a certainement un effet, et des points chauds ont sans doute joué un rôle.

CE QU'II FAUT LIRE POUR DECOUVRIR COMPRENDRE

ANNEXE : HISTOIRE DES MODELES DE STRUCTURES DE LA TERRE.

Depuis Aristote, philosophes, érudits, savants, puis géologues et géophysiciens se sont interrogés à de nombreuses reprises sur la nature et la composition du globe terrestre. Feux intérieurs, vastes cavités, gigantesque sphère aqueuse, et plus récemment réservoirs de magma en fusion et modèles multicouches les plus variés, l'histoire est riche de spéculations parfois audacieuses sur les profondeurs de la Terre.

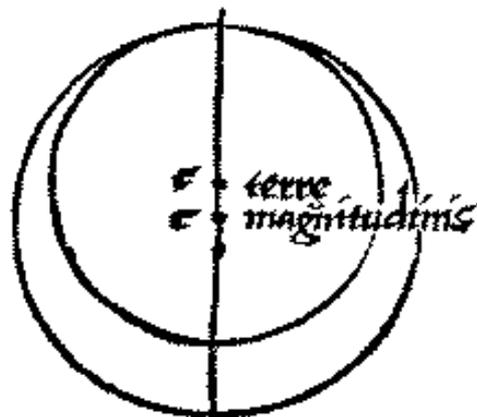
La vision des Anciens

Tout commence au VI^{ème} siècle avant Jésus-Christ, lorsque les premiers philosophes vivant sur le pourtour de la Méditerranée, tels Thalès (v.625-v.547 av. J.-C.), Anaximandre (v.610-v.547 av. J.-C.), Pythagore (v.570-v.480 av. J.-C.), puis Platon (428-348 av. J.-C.) et Aristote (384-322 av. J.-C.), s'interrogent sur le fonctionnement de la nature. Pour eux, la Terre est ronde et se maintient en équilibre, sans aucun support physique, au centre du Ciel lui aussi sphérique.

Pour Aristote, au IV^{ème} siècle av. J.-C., la Terre est exclusivement formée de l'élément terre ; elle est entourée d'eau, puis d'air et enfin d'une couche de feu. Au delà, c'est le monde des astres et de l'éternité. La partie superficielle du globe contient des cavités internes et des canaux. Le vent (ou souffle interne), sortant des cavités, provoque des tremblements de terre. Lorsqu'il est broyé en petites particules, il prend feu et donne des volcans.

Cette vision de la Terre perdure pendant toute l'Antiquité et le Moyen-Âge.

Fig. 1. La stratification du monde d'Aristote Fig. 2. Buridan sphères d'eau et de terre de centres décalés



Source : Gallica - BnF

Les voyages de découverte

Au XIV^{ème} siècle, le monde connu est encore très peu étendu. Il se limite à l'Europe, au nord de l'Afrique et à l'Asie, ne couvrant qu'un quart du globe. Mais, que contiennent les autres quartiers de la Terre, ont-ils également des terres émergées ou sont-ils purement océaniques ?

Buridan (1300-1358) explique que la terre et l'eau forment deux sphères de centres distincts : la terre domine donc la mer sur un seul quartier et est entièrement recouverte dans les autres.

La découverte de l'Amérique par Christophe Colomb (1450-1506) en 1492, puis les explorations maritimes de Vasco De Gama (1469-1524), d'Amerigo Vespucci (1454-1512) et de Magellan (1480-1521) montrent que la thèse de Buridan est fautive : dans toutes les parties du globe, il existe des terres

émergées et des habitants. Les océans ne font que combler les dépressions les plus profondes du relief terrestre et l'ensemble terres-mers reçoit le nom de globe terraqué remplacé ensuite par globe terrestre.

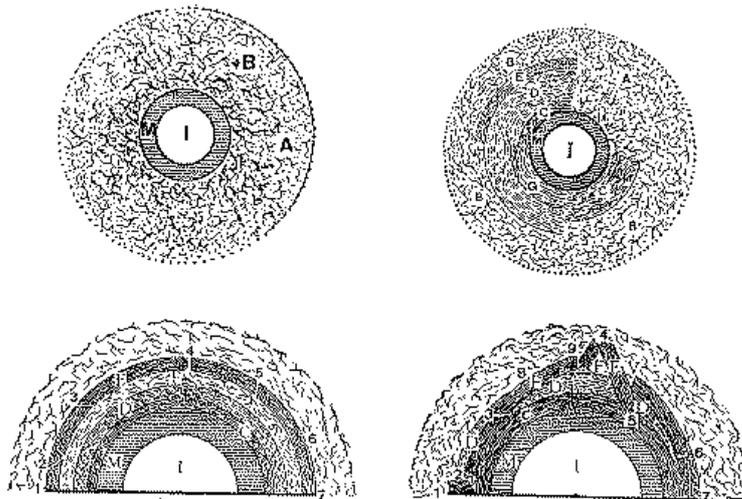
Les premières représentations des profondeurs

Avec la révolution astronomique de Nicolas Copernic (1473-1543), les idées des Anciens sur la Terre sont rejetées. Une nouvelle représentation émerge.

René Descartes (1596-1650), qui est philosophe, est le premier en 1644 à imaginer le monde souterrain. Pour lui, la Terre est un ancien Soleil qui a subi une évolution particulière. Au centre, on trouve un noyau de matière solaire, recouvert d'une couche compacte de la même matière que les taches solaires. Ensuite vient une couche de terre dense, une couche d'eau, une couche d'air et une nouvelle couche de terre plus légère qui se maintient au dessus du vide comme une voûte.

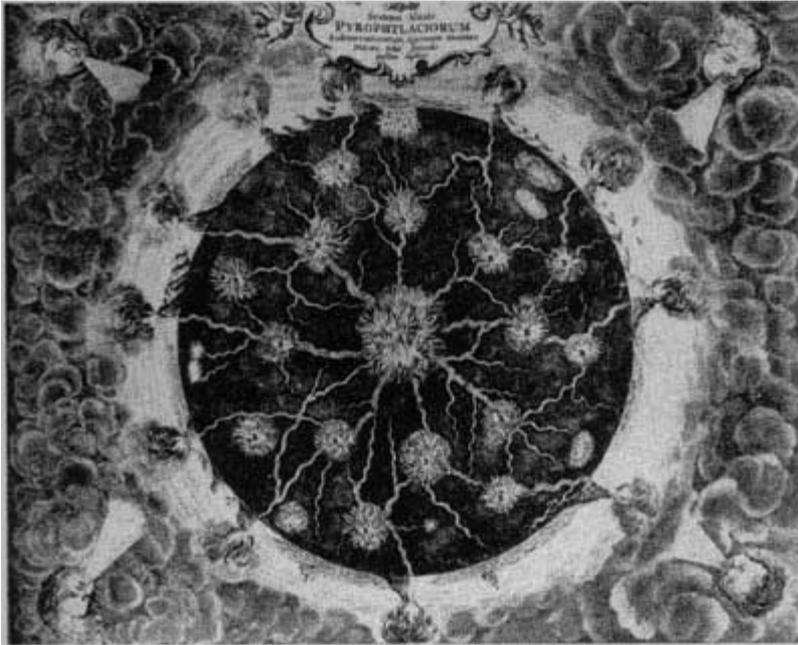
La Terre de Descartes est donc creuse ! La couche externe est toutefois en équilibre instable. Séchée par le Soleil, elle se fendille, et finit par s'écrouler d'une manière inégale dans les couches internes, expulsant l'eau qui forme les océans. Descartes décrit ainsi à la fois la genèse de la Terre et sa structure interne. Il raconte comment les montagnes se sont formées, par effondrement, lors d'une immense catastrophe planétaire originelle

Figure 3. La formation de la Terre selon Descartes



Athanasius Kircher (1602-1680), un père jésuite, donne en 1665 la deuxième représentation de la Terre, tout à fait différente de celle de Descartes. Pour lui aussi le globe est un ancien Soleil refroidi, mais il cherche à expliquer les éruptions volcaniques. La Terre possède un foyer central impétueux, à peine dompté, relié aux volcans de la surface par des conduits de feu avec des réserves intermédiaires, les « pyrophyllacies ». Les volcans manifestent l'activité interne du globe, ce sont des soupiroux par lesquels s'échappe le feu intérieur.

Figure 4. Le monde souterrain de Kircher

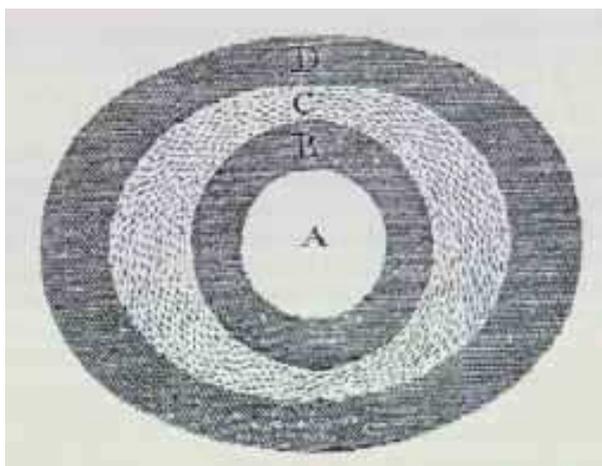


Peut-on expliquer le Déluge biblique ?

Après Descartes et Kircher, les visions du monde souterrain se multiplient rapidement, avec une grande liberté. Une des motivations est de raconter la formation de la Terre et de proposer une explication scientifique du Déluge biblique.

En 1681, Burnet (1635-1715), qui est un théologien réputé, pense que le globe était initialement un chaos fluide de tous les éléments qui s'est mis en ordre par l'effet de la gravité : les parties lourdes descendant vers le centre, les parties légères remontant vers la surface.

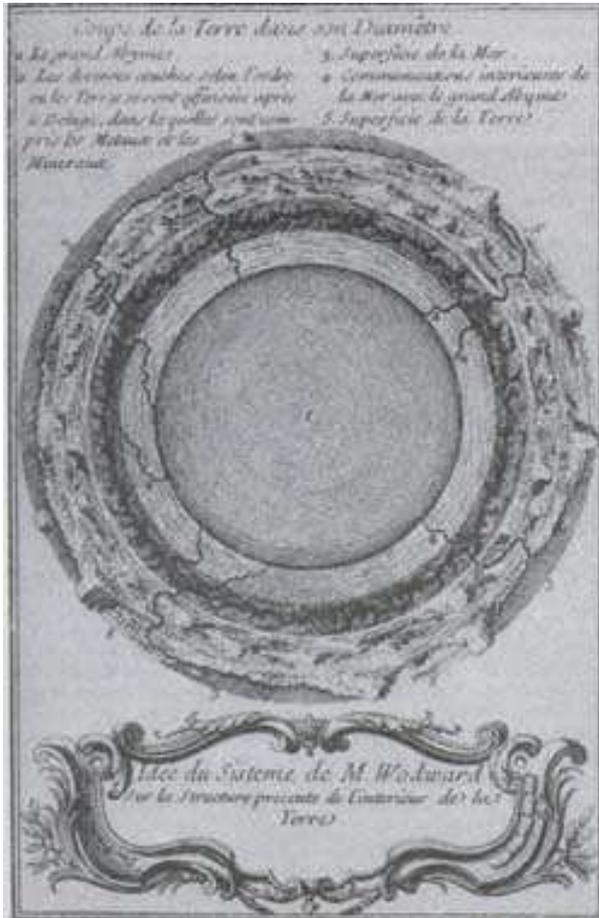
Figure 5. L'intérieur de la Terre selon Burnet



La Terre est constituée d'une couche interne de terre, puis d'une couche fluide, puis d'une nouvelle couche de terre. Il ajoute au centre un noyau de feu. La couche externe, fissurée par la chaleur du Soleil, s'effondre, provoquant la sortie des eaux et le Déluge. C'est lors de cet épisode que la surface terrestre est façonnée avec ses montagnes et ses bassins océaniques.

Woodward (1665-1728), grand naturaliste de terrain, est marqué par la superposition des couches géologiques, qui forment souvent de véritables empilements. Il suppose en 1695 que toutes les roches ont été dissoutes dans l'eau du Déluge, puis se sont redéposées en couches concentriques par ordre de gravité. La Terre est formée d'une immense sphère aqueuse, recouverte des couches de terrains disposées par ordre des densités. Des fentes ou des ouvertures établissent une communication entre la sphère d'eau interne et le fond des océans.

Figure 6. La sphère aqueuse de Woodward



Whiston (1667-1752), qui est chapelain, imagine en 1696 que la Terre est une ancienne comète. Elle possède un noyau solide chaud, une couche de fluide dense, puis une couche de terre en équilibre sur le fluide : le relief est créé par la différence de densité des parties de la croûte qui s'enfoncent différemment dans le fluide.

Le Déluge survient lors du passage d'une nouvelle comète. Celle-ci abandonne la vapeur d'eau de sa queue à la Terre, ce qui crée les pluies diluviennes, et fissure la couche externe du globe à cause des forces de marées qu'elle exerce, d'où l'irruption des eaux internes. Lorsque la comète s'éloigne, une partie de l'eau du Déluge s'évapore, une autre regagne les profondeurs et une dernière forme les mers : la Terre a acquis son aspect actuel.

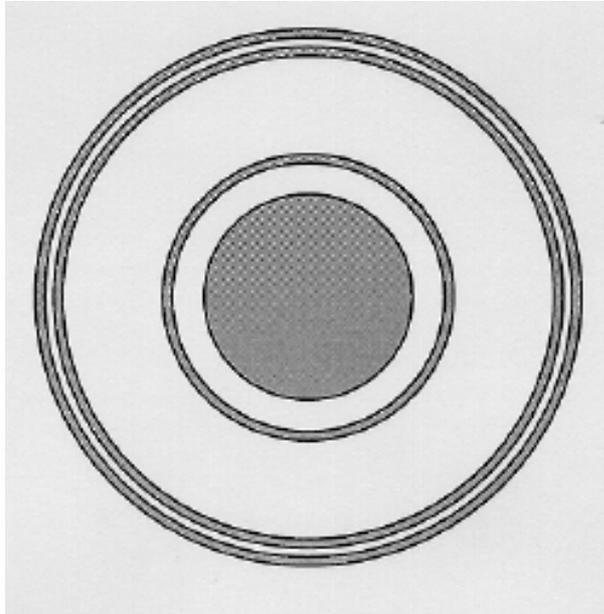
Des modèles étonnants

D'autres modèles, qui peuvent paraître plus extravagants, sont proposés.

En 1693, Halley (1656-1743), astronome contemporain de Newton, est intrigué par la variation temporelle du champ magnétique de la Terre observée au cours du siècle. Pour l'expliquer, il suppose que la Terre est creuse et qu'elle contient un noyau aimanté en rotation libre. Plus tard, il émet des

propos plus audacieux : la Terre serait formée de trois arches (ou coquilles) et d'un noyau aimantés tournant avec des vitesses différentielles. Les dimensions des sphères internes correspondent aux rayons de Mercure, Mars et Vénus ! Les arches se tiennent en équilibre grâce à la force magnétique qu'elles génèrent et qui s'oppose à la gravitation. Elles sont supposées habitées et séparées les unes des autres par des milieux raréfiés.

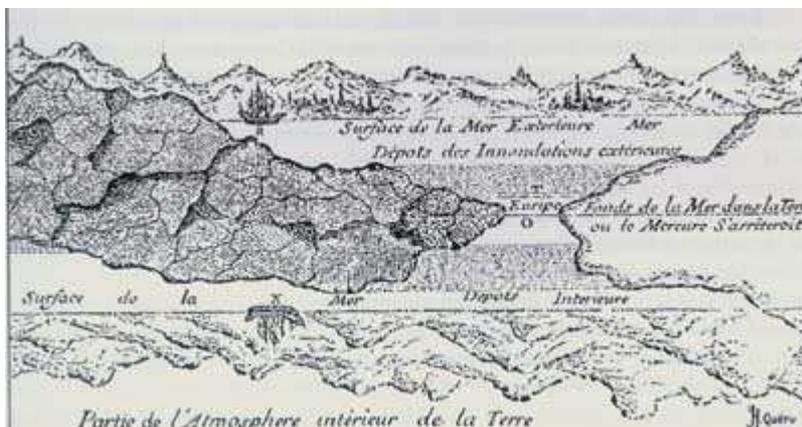
Figure 7. Les trois arches et le noyau du modèle de Halley



En 1721, Gautier (1660-1737), un ingénieur des Ponts et chaussées, pense que la Terre est entièrement creuse et qu'elle est comparable à un ballon ou à une vessie pleine d'air ! La mince couche externe, qui a moins de 5 km d'épaisseur en moyenne, est maintenue par deux forces opposées : la gravité et une force provenant de la rotation de la Terre.

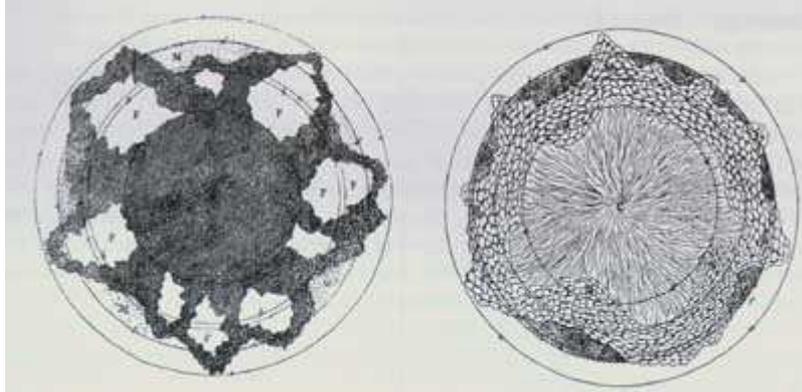
Les deux côtés de la croûte sont parfaitement symétriques et ainsi un monde est également possible sur la face interne avec ses mers et ses montagnes ! Le modèle curieux de Terre creuse de Gautier est fondé sur des intuitions géologiques pénétrantes. Gautier explique ainsi les soulèvements et les effondrements de la croûte, ce qu'il ne pouvait pas faire en supposant une Terre pleine.

Figure 8. La Terre creuse de Gautier



En 1740, Moro (1667-1740), abbé à Venise, affirme que tous les reliefs ont une origine volcanique. Il a été impressionné par la surrection d'une île nouvelle dans l'archipel grec, près de Santorin et pense que les soulèvements de la croûte forment des cavités internes, soit remplies de substances ignées enflammées, soit moulées par un noyau igné déformable.

Figure 9. Les cavités enflammées ou le noyau igné de Moro



De l'imagination aux investigations scientifiques

La panoplie des représentations du monde souterrain est donc impressionnante au milieu du XVIIIe siècle. Toutes sont judicieuses mais laquelle est juste ?

En 1749 puis en 1778, **Buffon** (1707-1787), intendant au Jardin du Roi, se propose de développer une théorie de la Terre qui repose sur des arguments solides, durement éprouvés, acceptables pour tous.

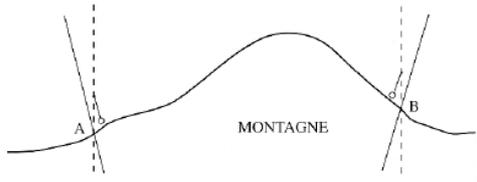
Figure 10. Georges-Louis Leclerc, Comte de Buffon (1707-1788)



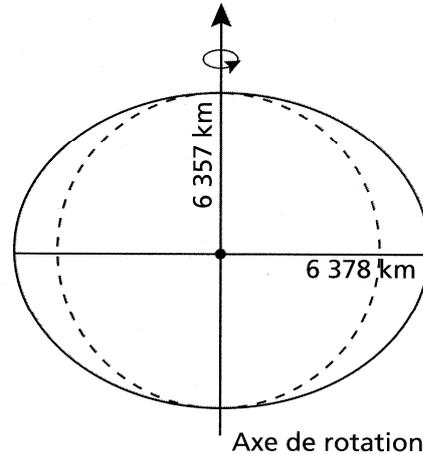
Il affirme que la Terre est pleine, en s'appuyant sur la direction que prend un fil à plomb dans le voisinage d'une montagne. Il avance également, en donnant trois arguments, que le globe a été entièrement fondu au début de son histoire. Le premier est la forme aplatie de la Terre qui n'a pu être acquise que si le globe a été à un moment de son histoire malléable, donc en fusion. Le deuxième est les mesures de température dans les mines qui montrent que la Terre possède une chaleur propre. Le troisième est la nature des roches des régions montagneuses qui sont le résultat d'une fusion.

Figure 11. La déviation de la verticale

Figure 12. La forme aplatie de la Terre



Aux stations A et B, les verticales (direction du fil à plomb) sont données par les lignes pleines alors qu'en l'absence de la montagne (qui possède une capacité d'attraction), elles seraient données par les lignes pointillées. Si la Terre est creuse, la montagne représente une masse importante par rapport à la masse totale de la Terre et la déviation doit être grande. Si au contraire la Terre est pleine, la montagne ne représente plus qu'une masse insignifiante et la déviation engendrée est très faible. C'est ce qui est observé.



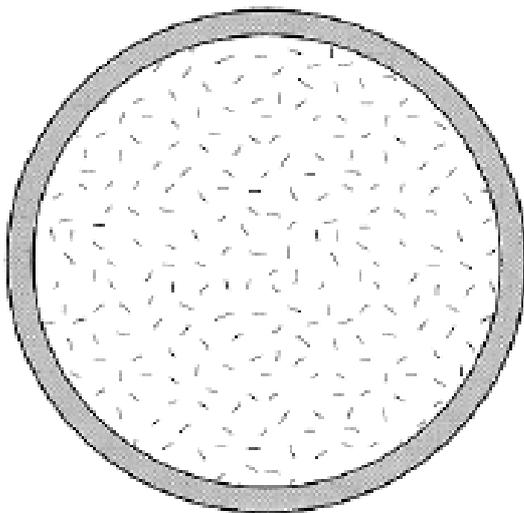
La forme aplatie de la Terre résulte de la force centrifuge développée par la rotation terrestre, qui chasse les particules vers l'équateur et qui augmente le rayon équatorial de 20 km par rapport au rayon polaire.

L'« océan de magma » interne

Aux alentours de 1800, la géologie prend son essor et la vision de la Terre se modifie encore. Les savants qui s'interrogent sur la Terre ne sont plus des philosophes ou des théologiens mais des géologues de terrain.

Cordier (1777-1861), en poursuivant les travaux de **Fourier** (1768-1830), observe en 1827 que la température dans les mines augmente de 1 degré tous les 25 mètres de descente. Si la progression se poursuit, la température de l'eau bouillante est atteinte à 2,5 km de profondeur (ce qui est confirmé, le croît-on à l'époque, par les sources d'eau chaude) et dès 50 km de profondeur, on trouve une température de 1600°C, température à laquelle toutes les roches de la surface sont fondues.

Figure 13. La Terre en fusion de Cordier



Le globe serait donc constitué d'une énorme masse en fusion, recouvert d'une mince écorce solide ! L'idée est séduisante car elle permet d'expliquer les volcans (communications directes entre la surface et la masse fondue sous-jacente), les tremblements de terre (conséquences des mouvements internes du fluide), mais aussi la formation des montagnes (la Terre en se refroidissant se contracte, ce qui crée des ruptures et des plissements).

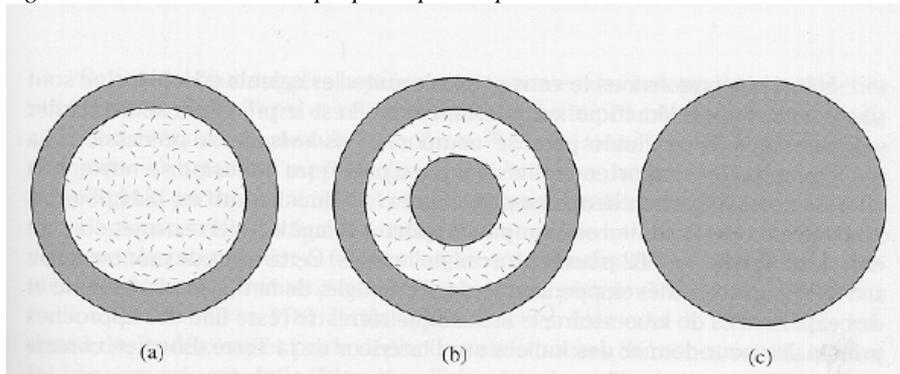
La Terre, fluide ou solide ?

L'idée d'un globe en fusion satisfait la majorité des géologues car elle permet une explication unifiée du globe. Des objections s'élèvent cependant et une polémique s'engage.

Certains, tels **Davy** (1778-1829), **Ampère** (1775-1836), **Poisson** (1781-1840) ou **Lyell** (1794-1875), prétendent que la chaleur intérieure de la Terre ne provient pas d'une fusion originelle mais de réactions thermiques exothermiques, dues à l'oxydation des métaux alcalins. **Jules Verne** (1828-1905), dans son roman *Voyage au centre de la Terre* paru en 1865, reprendra les arguments.

Hopkins (1793-1866) remarque en 1839 que les affirmations de Cordier sur la fusion interne ne sont pas justifiées car la température de fusion des roches dépend de la pression. Si une roche fond à 1000°C en surface, il lui faut une température bien plus élevée pour entrer en fusion à 100 km de profondeur, où la pression est bien plus importante. Pour connaître l'état des roches internes, il faut donc savoir qui, de la température ou de la pression, a la plus grande influence, et seuls des expériences de laboratoire, impossibles à réaliser à l'époque, pourraient lever l'indétermination. Devant l'insuffisance et l'incertitude des données, Hopkins s'en tient à trois hypothèses remarquables.

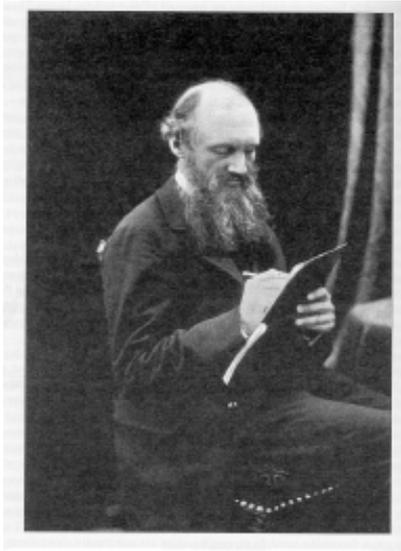
Figure 14. Les trois modèles proposés par Hopkins



- a) si la température s'accroît suffisamment avec la profondeur pour dépasser l'influence de la pression, le globe est en fusion sous une croûte dont on ne peut pas connaître directement l'épaisseur.
- b) si l'influence de la pression augmente plus rapidement que celle de la température, la solidification a commencé au centre, et comme en même temps le refroidissement créait une croûte en surface, le globe est formé d'une enveloppe solide, d'une couche intermédiaire en fusion et d'un noyau solide.
- c) si le refroidissement est complet, le globe est entièrement solide.

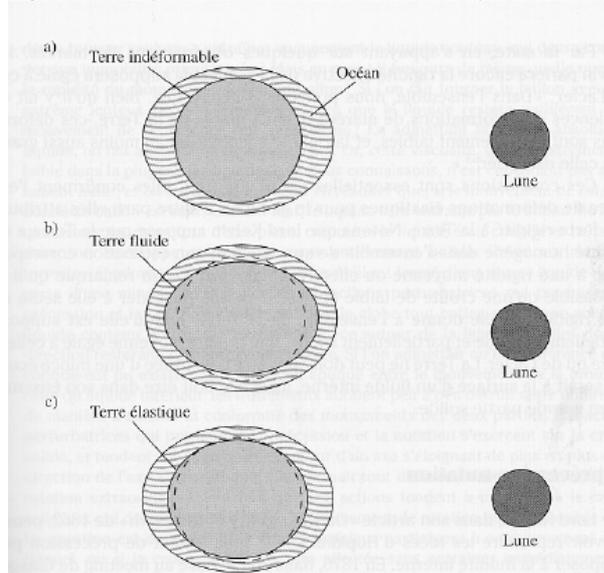
Lord **Kelvin** (1824-1907), en 1862, défend avec vigueur une Terre entièrement solide. Il argumente que si la Terre était en fusion, la masse fluide interne devrait subir des marées importantes, exactement comme les océans de la surface. Ces marées internes devraient déformer intensément le sol, le soulever et l'abaisser alternativement, ce qui n'arrive pas.

Figure 15. William Thomson Lord Kelvin (1824-1907)



Lord Kelvin observe cependant que les marées océaniques sont légèrement réduites par rapport aux prédictions théoriques. Ceci montre que la Terre se comporte comme un solide élastique, dont les propriétés sont sensiblement les mêmes que celles de l'acier. Le globe est donc solide et les seules parties en fusion sont les réservoirs de magmas sous les volcans. Il s'oppose donc énergiquement au modèle fluide défendu par les géologues.

Figure 16. Déformation de la Terre sous l'influence des forces de marées



a) Si la Terre est absolument indéformable, seule l'eau des océans est mise en mouvement par les forces de marées.

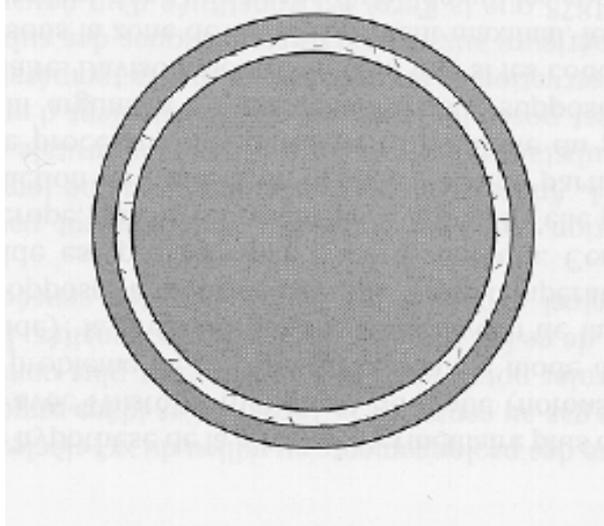
b) si la Terre est fluide, elle se déforme complètement sous l'influence des forces de marées et l'eau des océans ne fait que suivre les mouvements du sol : les marées océaniques n'existent plus.

c) si la Terre se comporte comme un solide élastique, les marées océaniques correspondent à la différence entre la déformation fluide des océans et la déformation élastique du sol.

Dans les années 1870-1880, la controverse sur la fluidité intérieure de la Terre reste vive. **Fischer** cherche à réaliser un compromis en supposant que la Terre est composée d'une croûte solide d'une faible épaisseur, d'une couche intermédiaire fluide également de faible épaisseur, et d'un noyau solide. Ce modèle vérifie la condition de lord Kelvin d'un globe possédant en moyenne les propriétés

élastiques de l'acier, tout en permettant de conserver les explications habituelles des phénomènes géologiques.

Figure 17. Le modèle de Terre consensuel des années 1880



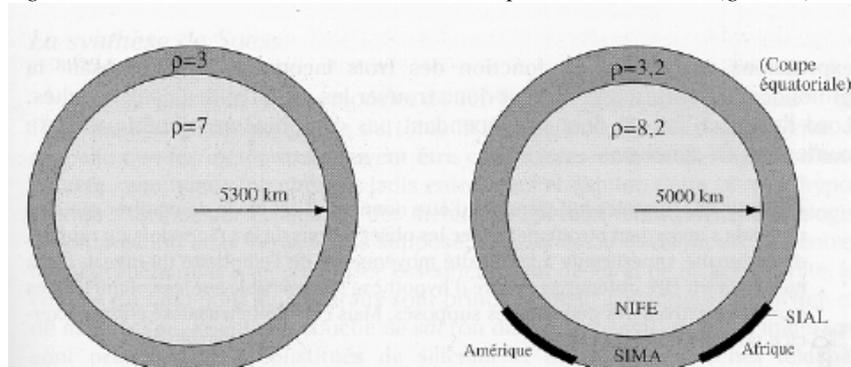
Un noyau de fer

Parallèlement à la polémique sur l'état physique de l'intérieur du globe, des recherches sont effectuées sur la répartition interne des densités. En s'appuyant sur l'observation des météorites, **Édouard Albert Roche** (1820-1883) présente en 1881 un modèle de Terre à deux couches : un noyau ferreux dont la densité est voisine de 7, recouvert d'une couche pierreuse de densité 3, dont l'épaisseur n'atteint pas 1/6 du rayon entier.

La densité de l'enveloppe est déterminée grâce aux relevés géologiques alors que la densité et la dimension du noyau sont déterminées par le calcul pour satisfaire deux conditions : la densité moyenne de la Terre égale à 5,5 et son aplatissement qui dépend de la répartition interne des densité.

En 1897, **Emil Wiechert** (1861-1928) propose un modèle semblable et en 1909, **Eduard Suess** (1831-1914) nomme le noyau *nife* (composé de fer et de nickel), l'enveloppe *sima* (essentiellement composé de silicium et de magnésium), et les continents *sial* (essentiellement composée de silicium et d'aluminium). Les valeurs numériques retenues par Roche et Wiechert ne sont pas exactes : en sous-estimant l'influence de la compressibilité, ils obtiennent des valeurs de densités trop faibles et par compensation une dimension du noyau trop grande. Ces modèles sont toutefois cohérents et serviront de référence pour les premières interprétations des sismogrammes.

Figure 18. Modèle de Terre en densité calculé par Roche en 1881 (gauche) et Wiechert en 1897 (droite)



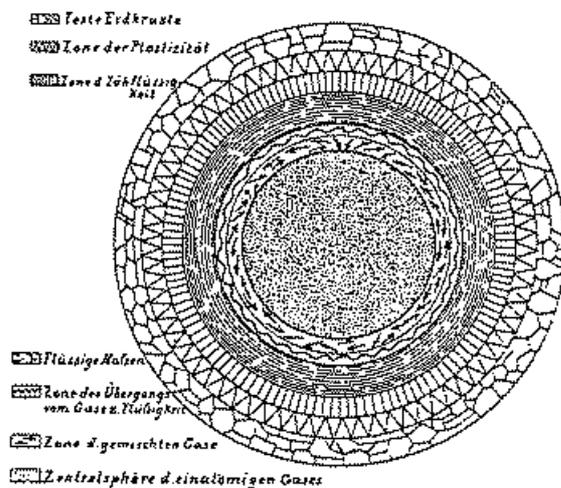
ρ est la densité.

Un noyau de gaz ?

Ritter suppose en 1878 que la Terre est constituée d'un noyau de gaz et d'une croûte solide. Il observe en effet que la température à l'intérieur de la Terre doit dépasser la température critique des substances connues, température à partir de laquelle il n'y a plus de transition brutale entre le liquide et le gaz mais une transition continue. De plus le dégazage des volcans ne montre-t-il pas la présence de gaz à l'intérieur du globe ?

Gunther amplifie en 1884 les idées de Ritter et avance que la Terre est composée d'une croûte solide, d'une couche en fusion et d'un noyau de gaz. Le modèle devient populaire lorsqu'un scientifique de renom, **Arrhenius** (1859-1927), l'adopte en 1900. Il sera néanmoins éclipsé par le développement de la sismologie.

Figure 19. Le modèle de Gunther avec un noyau de gaz, des couches intermédiaires en fusion et des couches externes solides

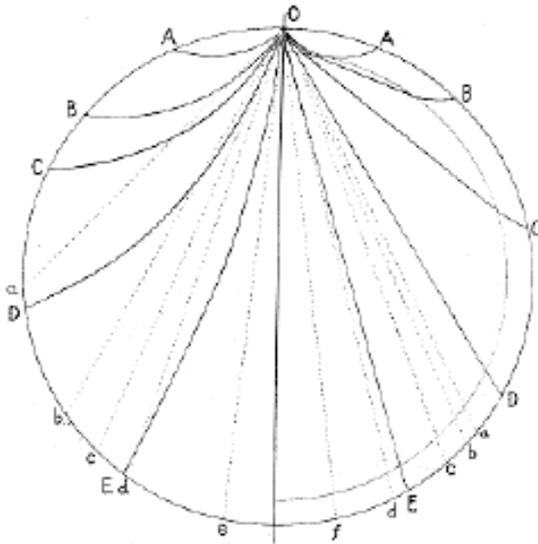


Le modèle sismologique

L'auscultation sismologique permet à partir du début du XX^{ème} siècle de renouveler entièrement les modèles de Terre. La détection des ondes de cisaillement (qui ne se propagent pas dans les liquides) montre que le globe se comporte comme un corps solide élastique, du moins dans toute sa partie supérieure. Les géologues doivent donc revoir leur copie et reprendre leurs explications des volcans et de la formations des montagnes !

Oldham (1858-1936) construit en 1906 un premier modèle de Terre sismologique. Sur les courbes temps-distances qu'il vient de tracer, il remarque que les ondes S subissent un retard d'une dizaine de minutes pour des distances épacentrales supérieures à 120-130°. Il l'explique en disant que ces ondes traversent une région centrale où la vitesse est sensiblement inférieure à celle existant dans l'enveloppe extérieure et il pense ainsi mettre en évidence une discontinuité sismologique majeure vers 3800 km de profondeur.

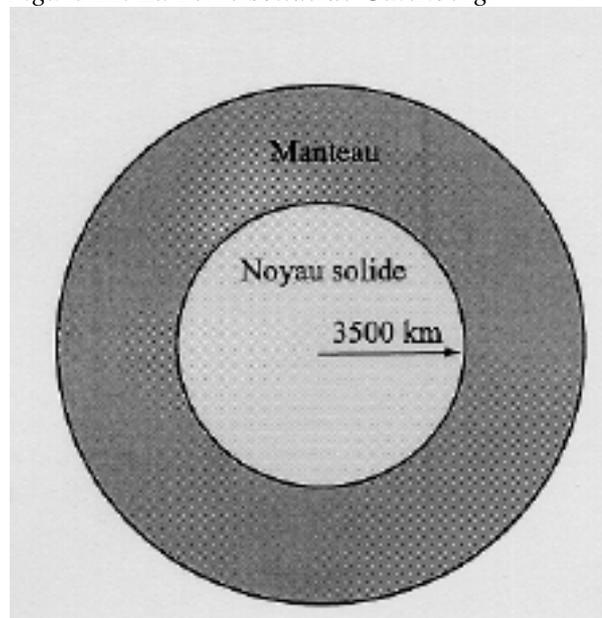
Figure 20. Le trajet des ondes sismiques dans la Terre selon Knott en 1908



En 1909, **Mohorovicic** observe un accroissement des vitesses sismiques sous la Croatie à environ 54 km de profondeur. Cet accroissement est ensuite confirmé par d'autres sismologues dans différentes régions du monde; il est interprété comme l'interface entre la croûte et le manteau.

En 1912, **Gutenberg** (1889-1960) repositionne la discontinuité d'Oldham vers 2900 km de profondeur (qui est la valeur adoptée de nos jours). Il observe que les ondes P émises par un séisme sont enregistrées normalement jusqu'à la distance épacentrale de 105°.

Figure 21. Beno Gutenberg (1889-1960) Figure 22. La Terre solide de Gutenberg



Les dimensions du noyau de fer ont été considérablement réduites depuis les modèles de Roche et de Wiechert.

Entre 105 et 142°, les ondes P ne sont plus observées, puis à 142°, elles réapparaissent. C'est le phénomène de « zone d'ombre » que Gutenberg explique comme le résultat de la réfraction des ondes P à travers une discontinuité marquant une chute brutale de la vitesse des ondes. En 1923, il interprète cette discontinuité comme l'interface entre le noyau et l'enveloppe de Wiechert.

Un noyau fluide ?

Pour une grande majorité de sismologues du début du siècle, le globe est entièrement solide et le noyau possède même une rigidité supérieure à celle de l'enveloppe. Si les ondes S traversant le noyau ne sont pas directement observées, c'est parce que la qualité des sismogrammes n'est pas encore suffisante pour les détecter mais leur existence n'est pas mise en doute....

En 1926 **Jeffreys** (1891-1989) prouve la fluidité du noyau métallique. Il ne s'appuie pas sur l'absence de transmission des ondes S (qui est aujourd'hui le critère habituel de la fluidité) mais sur un raisonnement indirect, en montrant que la rigidité déduite de la propagation des ondes dans l'enveloppe est supérieure à la rigidité déduite de l'étude de la déformation élastique de la Terre sous l'influence des marées. L'opinion de Jeffreys est rapidement adoptée par la communauté scientifique.

Figure 23. Harold Jeffreys (1891-1989)

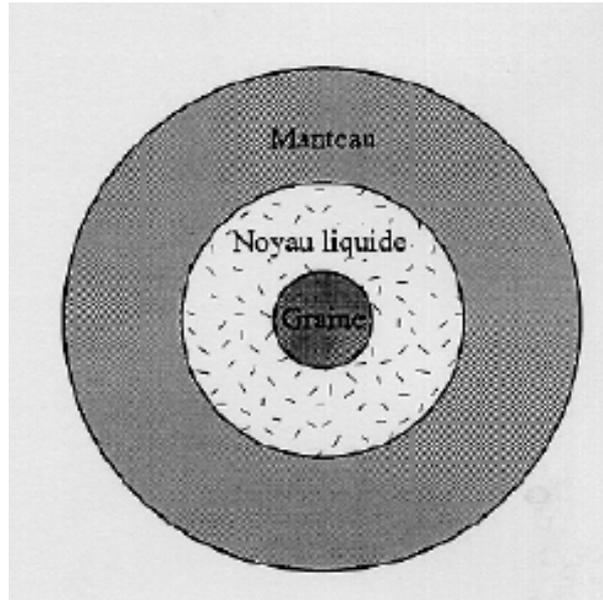


La découverte de la graine

En 1936, **Inge Lehmann** (1888-1993) découvre que le noyau liquide de la Terre contient une partie centrale distincte : la graine. La « zone d'ombre » entre 105 et 142° n'est pas entièrement vide mais on y observe l'arrivée d'ondes P, interprétées comme des ondes diffractées à la frontière du noyau. Lehmann montre que ces ondes reçoivent une explication bien plus satisfaisante si l'on suppose qu'elles ont été réfléchies à la surface d'une partie centrale. L'interprétation est reçue avec enthousiasme et les dimensions de la graine sont fixées par Gutenberg en 1938 et par Jeffreys en 1939 entre 1200 et 1250 km (la détermination actuelle est de 1221 km).

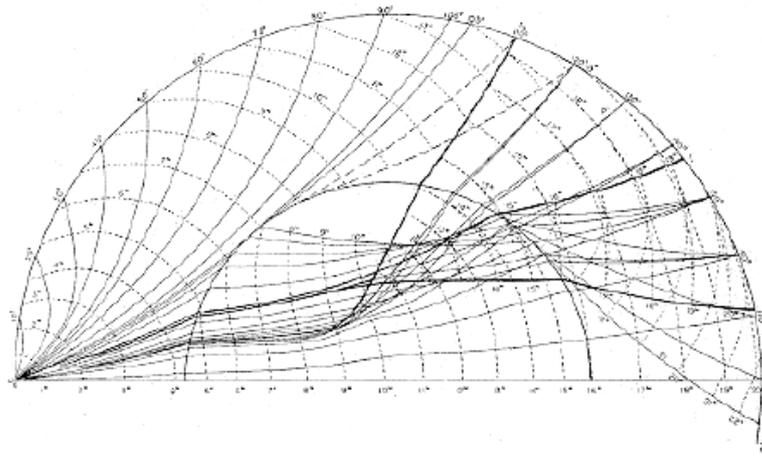
Figure 24. Inge Lehmann (1888-1993)

Figure 25. La graine solide de la Terre découverte par Lehmann



Birch affirme en 1940 que la graine est solide mais l'assertion n'est vraiment confirmée que dans les années 1960 par l'analyse des oscillations propres de la Terre. Les grandes structures de la Terre sont reconnues.

Figure 26. Le trajet des ondes sismiques selon Gutenberg et Richter en 1939



On notera l'évolution des conceptions depuis le schéma de Knott en 1908.

Les premiers profils de densité

Pour déterminer la variation de la densité avec la profondeur à partir des vitesses sismiques, il est nécessaire de posséder une équation d'état reliant les différents paramètres élastiques entre eux. En 1923, **Adams** et **Williamson** franchissent l'étape essentielle en établissant leur équation, qui permet de calculer les variations de la densité due à la compression dans les régions homogènes du globe. En 1936, **Bullen** en fait la première application à la Terre et établit le premier profil de densité en supposant le globe constitué de différentes enveloppes concentriques homogènes. Il n'aura ensuite de cesse de le perfectionner.

En 1952, **Birch** montre que l'équation d'Adams-Williamson est valable dans le manteau inférieur et le noyau mais qu'elle ne peut pas être appliquée dans la partie supérieure du manteau. Pour pallier ce défaut, il développe une équation d'état empirique reliant la vitesse des ondes P à la densité. L'équation d'Adams-Williamson et la loi de Birch sont à la base des calculs modernes du profil de densité.

Bibliographie

V. DeParis et H. Legros, Voyage à l'intérieur de la Terre. De la géographie antique à la géophysique actuelle. Une histoire des idées. Paris, CNRS Editions, 2000.

CE QU'II FAUT LIRE POUR DECOUVRIR COMPRENDRE

ANNEXE MODELE HISTORIQUEMENT CONSTRUIT

Sources:

De la pierre à l'étoile, Claude Allègre, Fayard, 1985

Enseigner la géologie, collège-lycée, Nathan, 1993

Sciences de la terre et de l'univers, André Brahic, Michel Hoffert, André Schaaf et Marc Tardy, Vuibert, 2000

Manuels scolaires, classe de 1ère S, Nathan étant le manuel de référence à mon avis

L'histoire de la Terre, Dossier La Recherche, 25, nov 2006 - janv 2007

COMMENT EST-ON ARRIVE A UN MODELE DE TERRE A COUCHES CONCENTRIQUES

* la terre n'est pas plate

Les grecs anciens (**Ératosthène**, au **IIIème** siècle avant Jésus-Christ) avaient établi que la terre était une **sphère** dont la **circonférence avait été estimée à 40.000 km, ce qui est très proche de la réalité (voir dans le site associé la méthode)**.

Par la suite, la plupart du temps la **mesure était sous estimée**, comme les quelques kilomètres publiés par Ptolémée, au IIe siècle après J.-C., dans sa *Syntaxe mathématique*, plus **30 000** connue au Moyen Âge sous le nom arabisé d'*Almageste*.

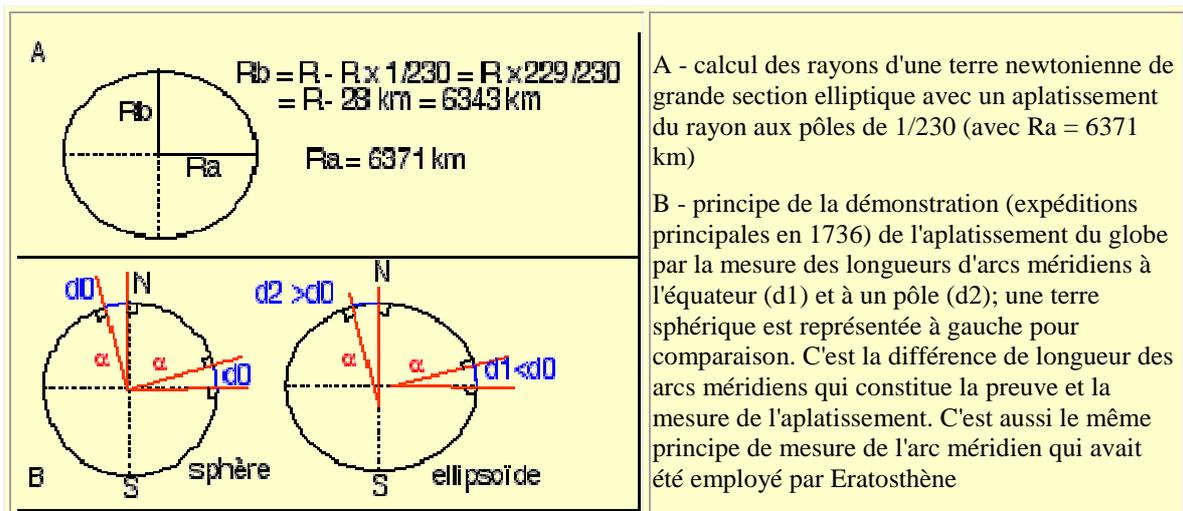
(Cette sous-estimation décida du voyage de Christophe Colomb en **1492**, dans lequel il ne se serait sans doute pas engagé, avec les moyens de navigation de l'époque, s'il avait su devoir affronter 10 000 kilomètres de plus pour atteindre l'Asie par l'Ouest; heureusement, l'Amérique était là qui sauva son entreprise en lui donnant une signification inattendue...).

La preuve définitive fut donnée par la 1^{ère} circumnavigation commencée en **1519 par Magellan et terminée en 1522** (sans Magellan qui mourût pendant le voyage dans l'île de Cebu aux Philippines).

* la terre est un ellipsoïde de révolution

La forme **elliptique**, proposée **par Newton en 1687** (aplatissement de 1/230 du rayon au pôle d'un ellipsoïde de révolution - voir fig A ci-dessous) ne trouva de confirmation expérimentale que lors d'expéditions de mesure des arcs méridiens aux différentes latitudes menées entre 1718 et 1744 (voir figure B ci-dessous).

La forme précise du **géοïde** terrestre est maintenant mesurée à la fraction de centimètre en continu grâce à des satellites.



LA TERRE N'EST PAS UNE BOULE DE FEU A CROUTE SOLIDE

Ou "comment imaginer une terre solide mais déformable et qui peut produire des roches liquides en surface ?"

* CROUTE SOLIDE ET FEU INTERNE

Les idées des grecs sur la structure interne du globe sont mal connues. Sous une mince couche solide, la **croûte**, la référence à l'existence d'un **feu profond** d'où viendraient les laves volcaniques semble être une image constante. Pour les grecs, *Héphaïstos*, divinité du feu mais aussi de la métallurgie, utilisait les volcans comme ses ateliers. Les Romains le nommeront *Vulcain*.

* UNE TERRE BIEN LOURDE POUR ETRE HOMOGENE

Tous les ouvrages "historiques" citent Jules Verne dans son "*Voyage au centre de la terre*" (1864) qui, selon l'interprétation moderne, n'aurait fait que présenter les vues scientifiques de son époque d'une terre percée de cavités remplies d'eaux ou de magmas.

Ces deux éléments font référence aux deux modèles de formation des roches:

le **modèle neptunien** (des roches déposées dans des mers: granites, gneiss, porphyres des *mers chaudes*, calcaires grès, basaltes argiles et sables des *mers froides*... dont un des pères fût Abraham Gottlob **Werner**, vers **1750**; et

le **modèle plutonien** (*Pluton*, surnom d'*Hadès*, divinité grecque des enfers) avec les **roches primaires** issues d'un **magma chaud** (granite et basaltes) et les **roches secondaires, déposées dans les mers**; défendu notamment par James **Hutton**, vers **1795** mais qui ne sera admise que vers 1810. Ces modèles sont donc nettement antérieurs au livre de Jules Verne.

En 1864 les géologues admettent un scénario plutonien depuis fort longtemps et sont plus préoccupés par la question de la **densité du globe**.

En effet, la connaissance de la **masse de la terre estimée par Newton à partir d'un modèle cinématique** (6.10^{21} tonnes voisine de la valeur reconnue actuellement) lui avait permis de conjoncturer une **densité comprise entre 5 et 6**.

A la suite des mesures réalisées par **Bouguer en 1748**, c'est Lord **Cavendish** ("*le plus riche des savants et le plus savant des riches*") qui détermina expérimentalement en **1798** (*Experiences to Determine the Density of the Earth*, in *Philosophical Transactions*) la **constante gravitationnelle g** ($6,67.10^{-11} \text{N.kg}^{-1}.\text{m}^2$) à l'aide d'un pendule de torsion. Il en déduisit la masse et la densité de la terre (il trouva **5,45** au lieu des **5,52** retenus **actuellement**). Cette valeur est sensiblement **plus élevée** que la densité moyenne des roches superficielles, égale à **2,7**.

Ainsi en ce milieu du XIX^{ème} siècle, les géologues se dirigeaient-ils vers des modèles à couches de densité différente (**modèles géophysiques de Pratt et Airy en 1855**) et non vers une vision tout à fait dépassée présentée par Jules Verne. Mais il est tout à fait possible qu'il y ait eu un énorme décalage entre les idées du grand public (que recouvrait ce mot à cette époque ?) et les idées du petit cercle d'érudits ou scientifiques géologues.

* ausculter la structure du globe par des ondes élastiques

La grande avancée dans la connaissance de la structure interne du globe vint des résultats de **sismologie qui se situent à la fin du XIX^{ème} et au début du XX^{ème}**. Elle permet une véritable sismographie de la terre.

Le **1^{er} enregistrement sismique** est daté du **17 avril 1889** (**von Reben Paschwitz**) qui enregistra à **Postdam et Wiilhelmshaven (en Allemagne)** les signaux émis par un gros tremblement de terre dont l'épicentre était voisin de Tokyo, au Japon. Il eu la **géniale** idée de relier les mouvements de ses pendules horizontaux à un séisme situé à près d'une dizaine de milliers de kilomètres. **L'étude de ces enregistrements** fut suivie de beaucoup d'autres qui permirent d'établir les **lois de la propagation des ondes sismiques** mais aussi la **structure** du globe.

Les **ondes sismiques** sont des déplacements de **solide (ondes élastiques)**. Ce sont en quelque sorte l'équivalent de déplacement d'air pour les ondes acoustiques (on parle d'échographie terrestre ou de radiographie, quand on parle de rayons X) mais qui se rapprochent plus fortement des lois de propagation des rayons lumineux et donc des lois de l'optique géométrique. **Le trajet d'une onde est ainsi appelé rai sismique**. Les lois de la réflexion-refraction des rais sismiques sont **identiques à celles des rai optiques**.

La mise en évidence d'un noyau au centre du manteau terrestre (de rayon voisin de 0,4 fois le rayon terrestre, soit 2550 km) est rapportée par Oldham en 1906.

En 1914, Beno Gutenberg, travaillant en Allemagne, affine la limite noyau-manteau et la place à 0,545 R soit 2900 km de profondeur.

En 1909 Andreja Mohorovicic, travaillant à l'observatoire de Zagreb en Yougoslavie, met en évidence une discontinuité majeure (appelé maintenant "le Moho") qui court sous les continents entre 30 et 40 km de profondeur.

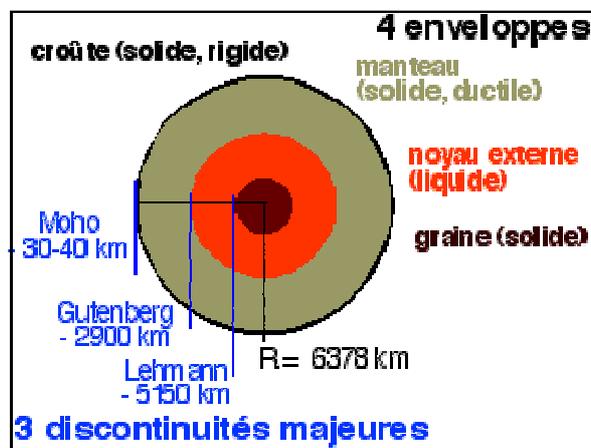
En 1936, la sismologue danoise I. Lehman met en évidence une discontinuité à 5150 km de profondeur entre un **noyau externe**, liquide et un noyau interne (graine), solide.

* LA DEFORMATION DE LA TERRE A L'ETAT SOLIDE

Mais une des plus grandes difficultés dans notre compréhension de la structure du globe est sans aucun doute venue de **l'apparente incompatibilité** entre un modèle **solide** (où se propagent les **ondes sismiques**) et la **nécessaire déformation** afin de rendre compte de phénomènes aussi variés que la forme de l'ellipsoïde, le volcanisme ou le mouvement des plaques (bref: la dynamique terrestre).

La compréhension ne vint que vers **1950**, pour les physiciens, avec les **progrès de la physique du solide** qui, en **rhéologie**, admettaient le **fluage d'un solide sous contrainte, sans passer par un état liquide**.

Il ne faut pas oublier que la **terre est plus rigide que l'acier** (une terre liquide, entourée d'une mince croûte aurait des "marées terrestres"(c'est-à-dire qui déformeraient la surface terrestre) de plusieurs kilomètres d'amplitude); cette remarque avait été faite par Ampère au tout début du XIXème siècle. En tout cas pour nous il est absolument indispensable de bien comprendre que la terre est UN **SOLIDE**. Certaines couches sont **rigides** et ne peuvent être déformées que très lentement (sur des milliers d'années) avec des contraintes et des températures très élevées. D'autres couches sont **ductiles**, c'est-à-dire facilement déformables, à haute pression, à haute température, sur des durées de temps faibles (déplacements visibles sur des durées inférieures à l'année).



Le modèle de départ vers le milieu du XXème siècle

2. DU MODELE SISMOLOGIQUE AU MODELE GEODYNAMIQUE

Les données sismiques fournissent une estimation des vitesses et donc de la densité des matériaux inaccessibles des couches internes. On effectue donc des comparaisons avec des matériaux accessibles.

* LA COMPOSITION DU GLOBE AU SEIN DU MODELE CLASSIQUE DE FORMATION DU SYSTEME SOLAIRE

L'**analyse des météorites** est le premier élément, utilisé depuis le XIXème siècle. Si l'on pense que la système solaire, avec ses planètes, s'est formé à partir de l'accrétion de poussières, puis de petits corps, les météorites représentent des fragments de ces corps qui se sont brisés puis sont tombés sur terre. On distingue deux types de météorites:

- les **chondrites** (météorites chondritiques) qui contiennent, dans une **matrice ferreuse**, des petites

sphères (les **chondres**, du grec *chondrion* = "petit grain") de silicates de type périclites ou pyroxènes - les **achondrites** (ou non-chondritiques) qui peuvent être métalliques, péridotitiques ou basaltiques et gabbroïques, par ordre de fréquence croissante.

On rapporte les météorites **achondritiques** aux différentes **enveloppes du globe**, croûte basaltique ou gabbroïque, manteau péridotitique et noyau ferreux, et les **chondrites à des corps stellaires initiaux indifférenciés**.

En effet, les **chondrites** ont la même composition chimique globale que la terre, si l'on considère les masses et compositions respectives des 3 enveloppes principales. On pense donc qu'elles **correspondraient à des fragments d'un corps stellaire initial non différencié** de même composition que la terre. Les météorites chondritiques sont donc dites indifférenciées.

Certains de ces corps stellaires initiaux auraient alors fondu, tout comme la terre et, en se différenciant, auraient présenté les 3 enveloppes citées. L'enveloppe ferreuse la plus dense au centre et l'enveloppe basaltique et gabbroïque la moins dense, vers l'extérieur, la péridotitique entre les deux. Les météorites issues de ces corps différenciés tardifs sont qualifiées de météorites **différenciées ou = achondritiques**.

* L'ETAT DES ROCHES AUX GRANDES PROFONDEURS

Les densités des minéraux et leurs assemblages dans les roches ne suffisent pas à évaluer leur comportement à haute pression et haute température.

Depuis la fin des années 1980 on utilise, notamment en France, des presses à enclumes de diamant, qui permettent d'atteindre des pressions phénoménales:

en fait la pression que l'on pense régner à l'interface manteau-noyau (**1200kbar** \approx 120.000 MPa = 120 GPa soit 1,2 G atm

avec 1bar \approx 1 atm = 0,1 MPa);

ces cellules permettent aussi, du fait de la transparence du diamant de **chauffer le minéral (jusqu'à 3000°C)** que l'on soumet à cette pression. On est ainsi parvenu à **simuler notamment la transition** que l'on pense se réaliser dans l'asthénosphère entre des structures cristallines **tétraédriques** (type **olivine** : $(Mg,Fe)SiO_4$, puis **spinelle** : le minéral étant la *wadsleyite*), vers 400 km (zone de transition) et **octaédriques** (type pérovskite : $(Mg,Fe)SiO_3$), à la base de l'asthénosphère. L'idée étant que plus la structure est soumise à forte pression plus elle est dense et l'espace occupé pour une masse donnée est faible, à composition atomique égale. L'espèce minérale de la zone de transition est nommée *ringwoodite* (à **partir de 410 km**). Elle se décompose en pérovskite silicatée et en *magnésioiwüstite* dans le manteau inférieur (**limite 660 km**). Une nouvelle structure minérale, la *postpérovskite* serait présente au niveau d'une **couche D'' au relief chahuté (au moins 100 km d'amplitude)** située à la limite manteau-noyau vers 2600-2700 km.

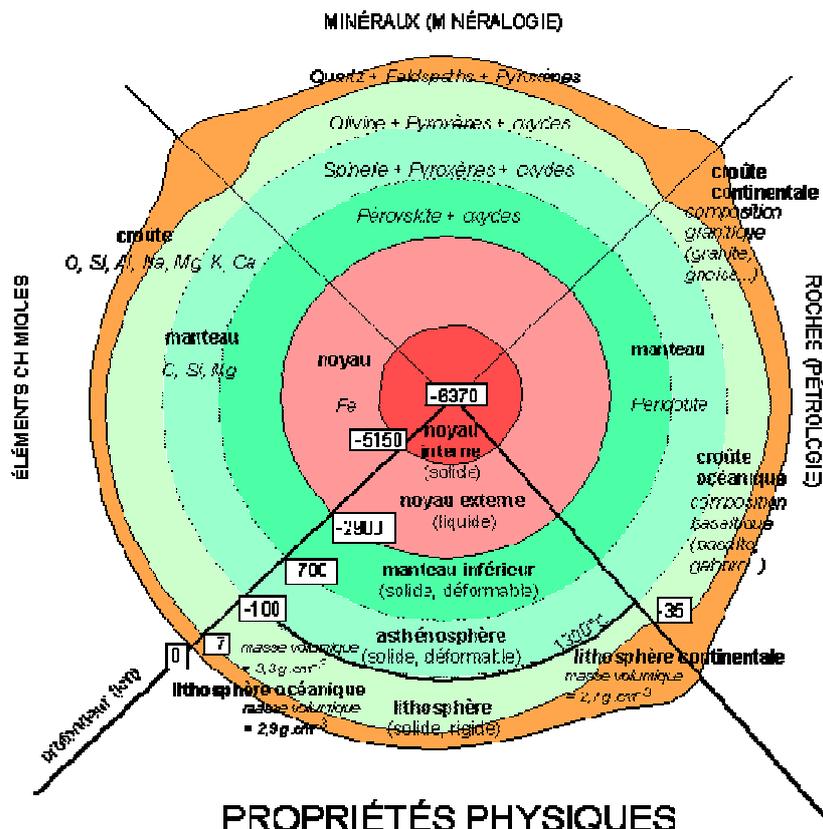
* LE MODELE DESORMAIS CLASSIQUE

1. La **croûte continentale** serait donc de composition globalement **granitique** (ou gneissique), la **croûte océanique basaltique et gabbroïque**,
2. **manteau** serait **péridotitique** avec les transitions de phase évoqués.
3. Le **noyau externe** enfin serait constitué essentiellement de **fer, associé au nickel** et quelques éléments légers comme le soufre, l'hydrogène et l'oxygène.

La discontinuité de Lehman serait due à la cristallisation d'un alliage fer-nickel solide qui constituerait la graine.

Ces éléments sont résumés sur ce diagramme :

COMPOSITION CHIMIQUE



Compositions minéralogique et chimique de la Terre

HISTOIRE DE LA CONSTRUCTION DU MODELE ACTUEL

Note

Avertissement : les images disponibles dans ce dossier ne sont pas libres de droits. Elles proviennent du site de l'[USGS](#), et de la [bibliographie](#).

La théorie de la tectonique des plaques a vu le jour à la fin des années 1960. Reprenant les conceptions mobilistes de Wegener, elle les développe et leur fournit une assise théorique solide en s'appuyant sur l'hypothèse alors toute récente de l'**expansion des fonds océaniques**.

Universellement adoptée aujourd'hui, elle constitue le nouveau paradigme des Sciences de la Terre.

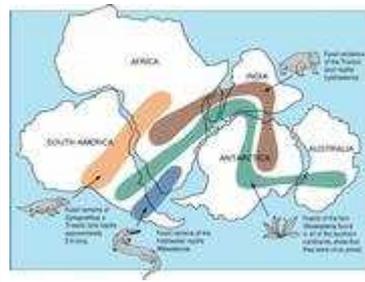
L'hypothèse de l'expansion des fonds océaniques

L'hypothèse de la dérive des continents fut présentée par **Alfred Wegener** en janvier 1912, mais malgré les arguments regroupés et faute d'un mécanisme explicatif satisfaisant, il ne convainquit pas.

Ce fut la découverte progressive des fonds marins (découverte des dorsales, des fosses océaniques, des grandes fractures, de la différence géologique entre la croûte océanique et la croûte continentale, de la faible épaisseur de la série sédimentaire : que sont devenus les sédiments entassés depuis l'origine du globe ?) au lendemain de la seconde guerre mondiale qui permit le retour des idées mobilistes.

Figure 2. Alfred Wegener Figure 3. Agrandir l'image

Figure 1. Agrandir l'image



Le pas décisif fut franchi par **Harry Hammond Hess** en 1960. Avec une grande analogie avec le modèle de **Arthur Holmes** présenté trente ans auparavant, il affirma que le manteau terrestre était animé de mouvements de convection : les **dorsales** mettaient en évidence les **courants ascendants** et les fosses océaniques les courants descendants. La croûte océanique, créée au niveau des dorsales et enfouie au niveau des fosses océaniques, était continuellement recyclée alors que la croûte continentale, à cause de sa légèreté, était condamnée à dériver à la surface de la Terre.

Figure 4. Harry Hammond Hess

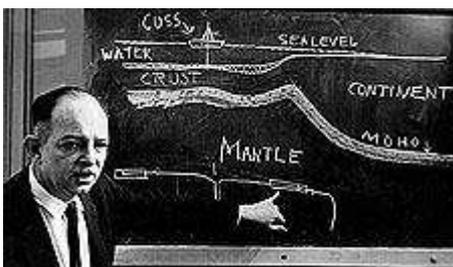
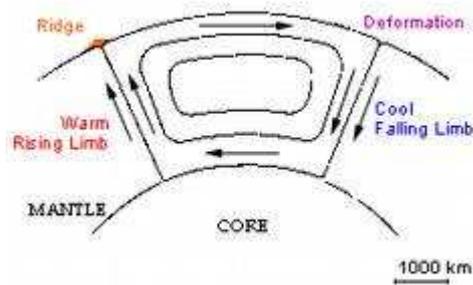


Figure 5. Modèle de Convection de Hess (1960)



Les continents se déplaçaient non pas en fendant les fonds océaniques comme le supputait Wegener, mais en étant passivement transportés sur une sorte de tapis roulant.

En 1961, Robert Dietz reprit les visions de Hess et introduisit l'expression « sea floor spreading » (expansion des fonds océaniques).

En 1963, Lawrence Morley, Fred Vine et Drumond Matthews confirmèrent les idées de Hess et de Dietz en interprétant les anomalies magnétiques découvertes sur le plancher océanique comme des marqueurs de l'expansion. Ces anomalies se traduisent formaient des bandes alternativement positives et négatives, disposées parallèlement et symétriquement par rapport aux dorsales. Elles provenaient de l'aimantation propre de la croûte océanique, acquise lors de sa création à l'axe de la dorsale, et leur signe dépendait de l'orientation normale ou inverse du champ magnétique au moment de l'aimantation. Les indices de la dérive n'étaient donc plus uniquement continentaux mais également océaniques.

Figure 6. [Agrandir l'image](#)

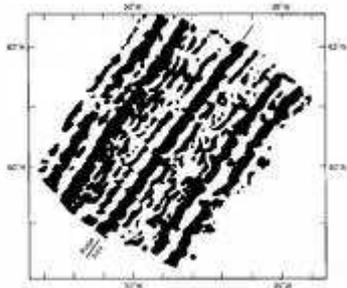


Figure 7. [Agrandir l'image](#)

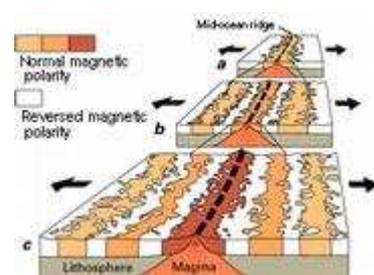
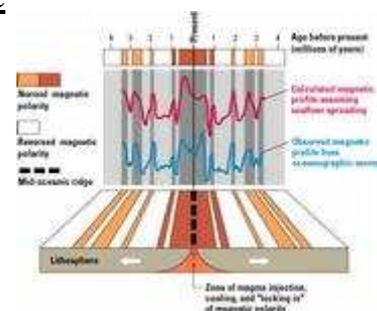


Figure 8. [Agrandir l'image](#)



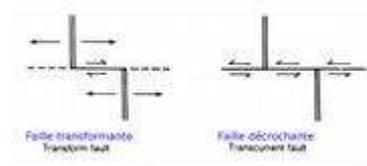
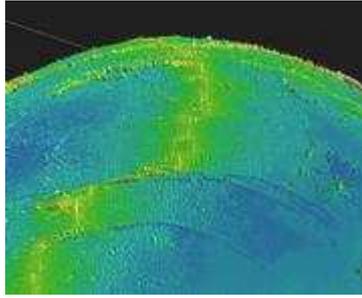
En 1966, Vine et Tuzo Wilson montrèrent que l'explication de Morley, Vine et Matthews n'était pas seulement qualitative mais également quantitative. En se servant de l'échelle chronologique des inversions du champ magnétique qui venait d'être établie, et en associant chaque anomalie magnétique à son inversion correspondante, ils calculèrent le taux d'ouverture des océans et datèrent la croûte océanique. Cette datation fut confirmée par des forages réalisés en 1968.

Une autre observation surprenante à propos des bandes magnétiques faisait état de discontinuités, de décalages horizontaux de plusieurs centaines de kilomètres au niveau de zones de fractures. En 1965, Wilson interpréta ces décalages en introduisant le concept de faille transformante. Les failles transformantes reliaient des segments de dorsales ou de fosses en permettant à deux morceaux de croûte de coulisser l'un contre l'autre. La sismologie apporta une preuve éclatante de ce nouveau concept mais aussi de l'ouverture des océans.

Figure 9. [Tuzo Wilson](#)

Figure 10. [Faille transformante](#)

Figure 11. [Modèles](#)



L'analyse des ondes émises par un tremblement de terre permettait de déterminer si celui-ci provenait d'un mécanisme d'étirement (faille normale), de fermeture (faille inverse) ou de glissement (décrochement). Lynn Sykes montra en 1966 que les séismes des failles transformantes correspondaient bien à des cisaillements et que ceux des dorsales traduisaient bien une ouverture. La conversion des géophysiciens à l'hypothèse du « sea floor spreading » fut alors massive.

La formulation de la théorie de la tectonique des plaques

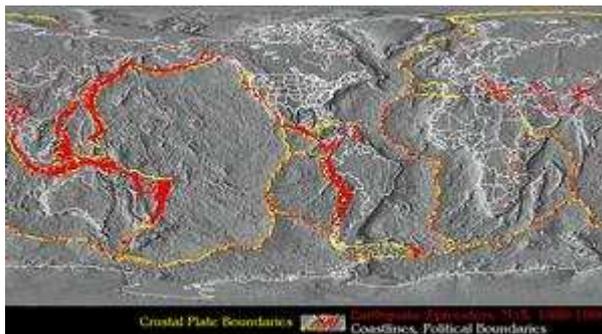
La théorie de la tectonique des plaques naquit du mariage d'une hypothèse, celle de l'expansion des fonds océaniques, et d'une observation, la localisation de l'activité tectonique du globe.

Observation et superposition des cartes

Dès la fin du XIX^e siècle, on avait remarqué que les chaînes de montagnes et les volcans se répartissaient suivant des bandes étroites.

La carte de la répartition des séismes établie par **Beno Gutenberg** et **Charles Francis Richter** en 1954 renforça cette idée en montrant que les séismes étaient confinés dans des régions précises correspondant aux dorsales, aux fosses, aux failles transformantes et aux chaînes montagneuses.

Figure 12. Carte mondiale de localisation des séismes



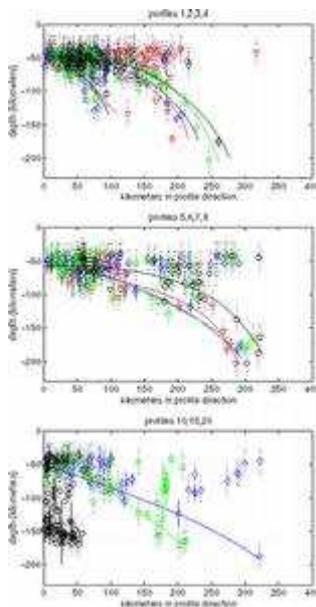
A l'exception des fosses où les tremblements de terre existaient jusqu'à 700 km de profondeur, les séismes étaient également restreints à la partie superficielle du globe, à une profondeur inférieure à 100 km. Cette partie superficielle constituait la lithosphère, couche au comportement rigide, qui surmontait l'asthénosphère, couche au comportement ductile.

Wadati en 1930 et **Benioff** en 1955 avaient remarqué que les séismes profonds situés sous les fosses se localisaient suivant des plans inclinés.

En 1967, Jack Oliver et Bryan Isacks interprétèrent ces plans comme la trace de la lithosphère océanique retournant dans le manteau. Ces lieux de disparition de la lithosphère océanique (on dira plus tard « zones de subduction ») étaient nécessaire dans la logique du « sea floor

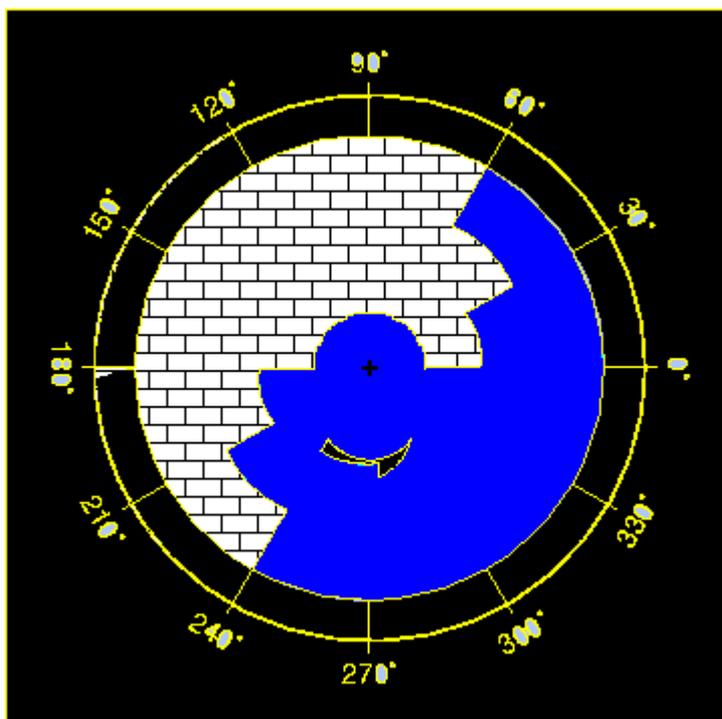
spreading » si on ne voulait pas supposer l'expansion de la Terre ; ils étaient désormais démontrés.

Figure 13. Localisation des séismes en fonction de la profondeur sur des coupes perpendiculaires aux fosses océaniques.



En 1967, Jason Morgan synthétisa ces différentes approches en développant la première hypothèse « plaquiste ». Il supposa que la lithosphère était découpée en une série de « blocs » parfaitement rigides, se déplaçant les uns par rapport aux autres. Le mouvement d'un bloc pouvait être décrit par une simple rotation entre sa position initiale et sa position finale, rotation définie par un axe passant par le centre de la Terre (axe eulérien) et une vitesse angulaire. Les failles transformantes correspondaient à des petits cercles centrés sur l'axe eulérien, permettant d'en déterminer la position.

Figure 14.



La même année en 1967 et indépendamment, **Dan Mc Kenzie** et **Robert Parker** développèrent des idées analogues en introduisant le terme de « plaque ».

1968, L'année suivante, **Xavier Le Pichon**, en fit une première application. Il divisa la surface du globe en 6 plaques lithosphériques dont il détermina les frontières à partir de l'activité tectonique et calcula les pôles de rotation de leur mouvement relatif depuis 120 millions d'années. Par la suite, ces mêmes procédés permirent par simple « fermeture » des océans de reconstruire les positions successives des continents depuis 200 millions d'années.

Figure 15. Xavier Le Pichon



Figure 16. Agrandir l'image



En 1968, **Isaks**, **Jack Oliver** et **Lynn Sykes** parlèrent de « nouvelle tectonique globale » en vérifiant qu'elle était conforme aux phénomènes sismiques, et **Vine** et **Hess** introduisirent l'expression « tectonique des plaques ».

La tectonique des plaques et la géologie

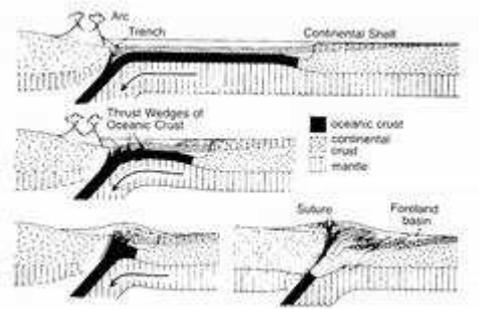
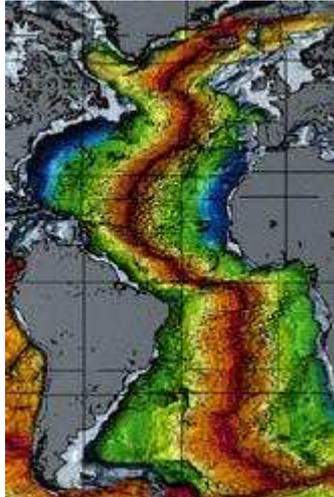
La théorie de la tectonique des plaques fut rapidement acceptée par la communauté des géophysiciens car elle leur permit d'interpréter l'ensemble de leurs nouvelles observations. Elle se heurta par contre à une forte opposition de la part des géologues qui la considéraient avant tout comme une *théorie des océans*. Son application à la géologie continentale posait, il est vrai, de sérieuses difficultés :

- comment l'utiliser pour comprendre le passé géologique ?
- Les plaques étaient-elles vraiment rigides alors qu'on observait des séismes intra-plaques par exemple en Asie ?
- Comment définir une frontière entre deux continents alors que les séismes se répartissaient sur une large bande ?

John Dewey et **John Bird**, en 1969-70, furent les premiers à montrer la fécondité de la théorie de la tectonique des plaques pour comprendre les formations géologiques. Remettant à plat toutes les anciennes conceptions, ils définirent les marges continentales passives, les marges continentales actives, les chaînes de collision. Ils affirmèrent également que les *montagnes anciennes résultaient d'anciennes collisions et étaient donc le témoins d'océans aujourd'hui disparus*. La tectonique des plaques pouvait donc avoir une application antérieure à 200 millions d'années.

Figure 17. Carte des fonds océaniques en fonction de leur âge.

Figure 18. Disparition d'un océan par subduction et formation d'une chaîne de montagnes.



Les travaux de Dewey et Bird marquèrent une étape essentielle.

Leur classification des formations géologiques restait encore rudimentaire, mais ils montraient que la tectonique des plaques pouvait être un cadre unificateur, un schéma général dans lequel les investigations géologiques pouvaient être reprises, les faits observés réinterprétés, l'histoire du globe et des continents redécouverte.

Ils permirent à une *nouvelle géologie de se développer où il allait s'agir, en association avec les études chimiques, thermiques et dynamiques*, de définir et de comprendre la genèse et l'évolution des différentes structures de la surface du globe, tant océaniques que continentales.

La tectonique des plaques et la Terre

La tectonique des plaques est née comme une *théorie cinématique* des mouvements à grandes échelles à la surface du globe. Mais elle est bien plus qu'une simple théorie cinématique. Elle *met d'abord en évidence les échanges de matière entre l'intérieur et l'extérieur de la planète et la nécessité de l'existence de courants de convection dans le manteau*. Elle définit surtout un nouveau cadre pour expliquer les formations géologiques. Elle permet ainsi une compréhension entièrement renouvelé de la surface du globe en *lui redonnant son unité* et en révélant une Terre en plein dynamisme, en pleine évolution.

Lectures et illustrations complémentaires

Courant de convection, Dérive des continents, Tectonique des plaques, in Lecourt D. (sous la direction de), *Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, PUF, 1999.

V. DeParis et H. Legros, *Voyage à l'intérieur de la Terre. De la géographie antique à la géophysique actuelle. Une histoire des idées*, Paris, CNRS Editions, 2000.

A. Hallam, *Une révolution dans les Sciences de la Terre*, Ed. Points Science, 1976.

C. Allègre, *L'écume de la Terre*, Ed. Fayard, 1999.

Article de X. Le Pichon, *Sea floor spreading and continental drift*, J. Geophys. Res., 73, p.3661-3697, 1968 : vous y trouverez une carte (p.3663) qui montre les quelques structures des fonds océaniques connues en 1960 et une carte de ses 6 plaques (p.3675).

Article de Dewey J. F. et Bird ., *"Mountain belts and the new global tectonics*, J. Geophys. Res., 75, p.2625-2647, 1970, vous y trouverez les premières coupes géologiques explicatives : général (p.2627), rupture d'un continent (p.2629), subduction (p.2638), collision continent-continent (p.2642).