

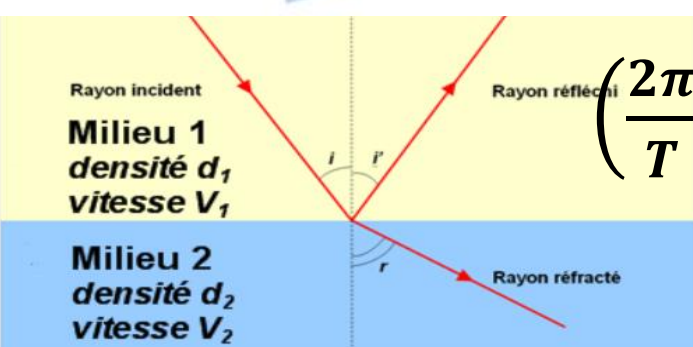
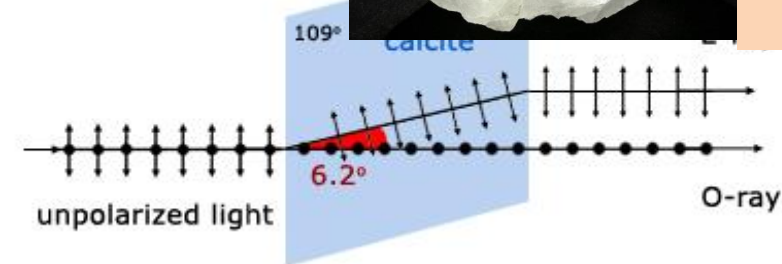
$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$



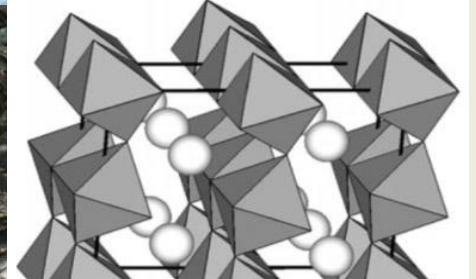
$$N_x = N_{0x} e^{-\lambda t} = N_{0x} e^{-\dots}$$



$$h_{max} = \frac{P_{max}}{\rho g}$$



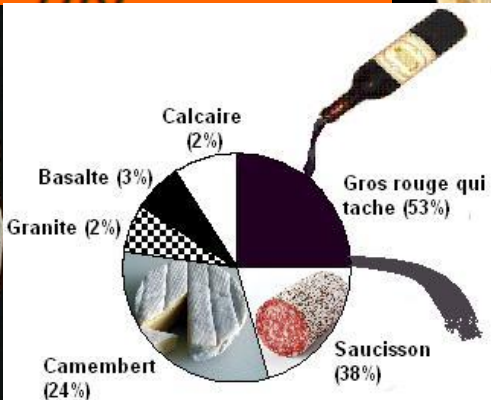
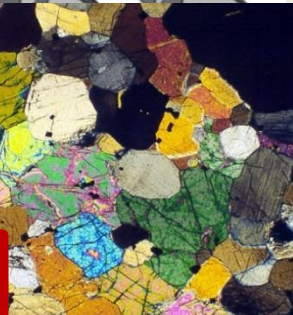
$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 . a^3 = k$$



$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$$



$$Ra = \frac{\propto . \Delta T . g . h^3}{K . \nu}$$



LA PHYSIQUE

AU SERVICE DE



AU SECOURS DE

LA GEOLOGIE

GEOLOGIE = ETUDE DE LA TERRE

A background image of the Earth as seen from space, showing the curvature of the planet, blue oceans, white clouds, and brownish-green landmasses.

Science qui traite de :

- la composition
- la structure
- l'histoire et l'évolution des couches internes et externes
- les processus qui façonnent la Terre

Mot formé par Diderot (1751)

Grec : γη- (gé-, « terre ») et λογος (*logos*, « discours raisonné »).

Quelles questions se sont posées nos « lointains ancêtres géologues » ?

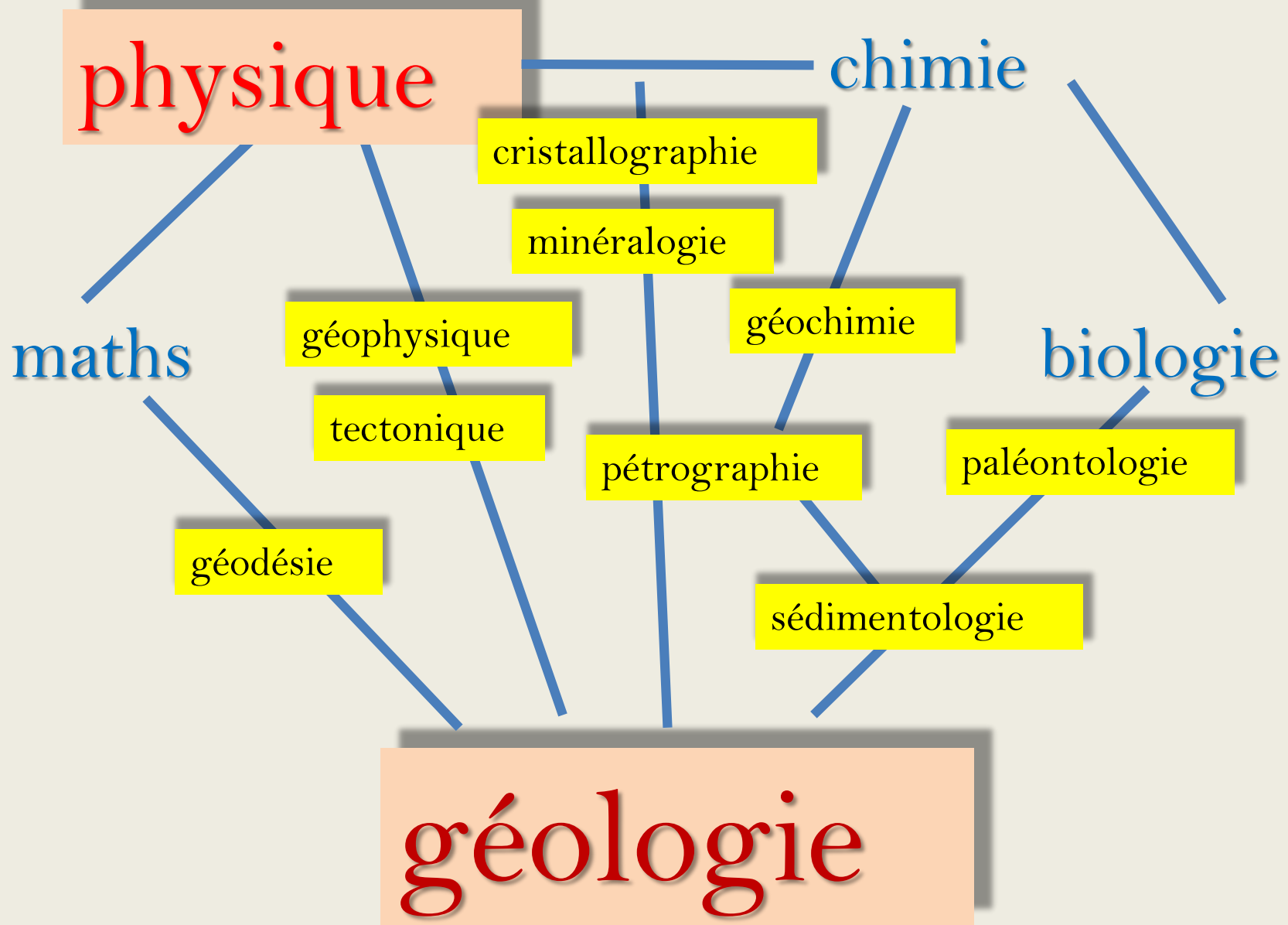
sachant que (pendant longtemps) :

- Les seuls instruments d'observation : les yeux

- Domaine observable : limité à la pellicule superficielle des roches entre les crêtes des montagnes et la mer (et quelques centaines de mètres sous terre dans les mines). Au-delà de cette pellicule ($\approx 1/1000$ du rayon terrestre), le géologue était réduit à des hypothèses et à des extrapolations.



Interdisciplinarité de la Géologie



LES QUESTIONS

A- La Terre

- 1) Quelle forme ? Quelle taille ? Quelle masse ?
- 2) Quel âge ? Quelle origine ?
- 3) Qu'y a-t-il à l'intérieur ?

B- Les Montagnes

- 1) Comment se forment-elles ?
- 2) Comment disparaissent-elles ?

C- Les Roches

- 1) Identifier et classer les roches ?
- 2) Comment identifier les minéraux ?

LES REPONSES *(variables selon l'époque...)*

- ✓ Comme dans toute science, la Géologie a progressé pas à pas : observer, relier les faits entre eux, établir une chronologie, essayer de remonter aux causes.
- ✓ Parfois, les réponses proposées n'étaient pas **fondées** ou devaient être **conforme** « à l'air du temps » : Bible, dogme de l'Eglise, ne pas heurter les idées d'un scientifique influent, être à la mode...

Quelques exemples :

- La Terre fut créée en 6 jours (Genèse) ; au milieu du XVIIe siècle, l'évêque Usher calcule que l'homme a été créé le 23 octobre de l'an 4004 avant J-C à 9h du soir .
- Pour Aristote, les continents peuvent devenir mers et vice-versa.
- Eratosthène explique la présence de fossiles en altitude par un niveau plus élevé de la Méditerranée en raison de la fermeture du détroit de Gibraltar .
- Pour Strabon, ce sont les tremblements de terre qui expliquent l'élévation des fonds marins et la présence de fossiles en altitude.

- Au Moyen-Age :

- les fossiles sont créés directement dans la pierre sans origine biologique
- les fossiles sont générés dans le sol par l'action des astres
- les montagnes résultent d'une forme d'attraction de la part des étoiles.
- les coquillages et les poissons fossiles sont des animaux pétrifiés et prouvent la véracité du Déluge décrit dans la Bible.

- Plus tard, Johannes Kepler (vers 1600) puis Newton, estiment l'âge de la Terre à 4000 ans avant notre ère en se basant ...sur les données bibliques.

Benoit de Maillet (vers 1700) estime l'âge de la Terre à plusieurs millions d'années mais en supposant une diminution progressive et continue du niveau de la mer laissant apparaître les montagnes et les sédiments sur les flancs

Objectifs de la conférence :

- présenter (et expliquer) les secteurs de la Physique qui ont permis à la Géologie de franchir des pas décisifs dans les réponses à certaines de ces questions.

A- La Terre

1) Quelle forme ?

Quelle taille ?

Quelle masse ?

2) Quel âge ? Quelle origine ?

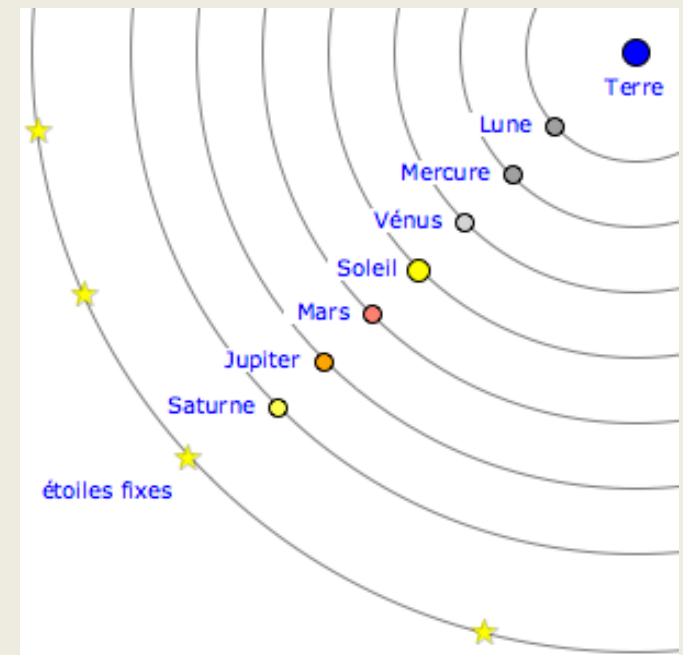
3) Qu'y a-t-il à l'intérieur ?

Très très brève histoire de l'astronomie

Selon **Thalès** (-625 ; -547), la Terre est un disque plat flottant sur l'océan

Parménide (-540 ; -450) a supposé que la Terre était sphérique car « la sphère est le volume le plus parfait ». Il imaginait aussi un univers sphérique

Pour **Aristote** (-384 ; -322), l'univers est sphérique et séparé en 2 domaines : un domaine sublunaire avec au centre la Terre puis l'eau, l'air et le feu, et un domaine extralunaire avec les planètes et les étoiles fixes



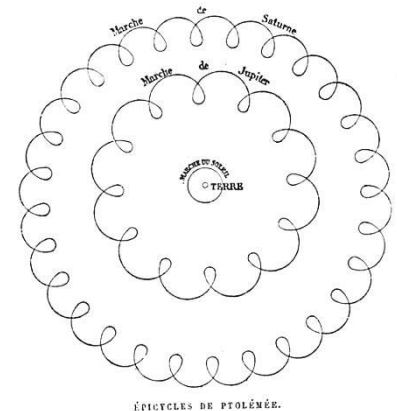
Le premier grand astronome de l'école d'Alexandrie est **Aristarque de Samos (-310 ; -230)**. 17 siècles en avance sur ses contemporains, il est le précurseur de Copernic : reprenant une proposition d'**Héraclide**, il affirme que la Terre, non seulement **tourne sur elle-même**, mais décrit également une **orbite circulaire** autour du Soleil. Mais son intuition extraordinaire n'aura guère de retentissement et c'est la théorie des épicycles qui marquera l'école d'Alexandrie.

Aristarque de Samos



Ptolémée (90 ; 168) ajoute des arguments supplémentaires à la vision de l'univers selon Aristote et développe la **théorie des épicycles**.

Cette vision du monde (Terre centre de l'univers) dura jusqu'à la fin du XVIe siècle. La contredire était considéré comme une hérésie par l'Eglise catholique et l'Inquisition ; tout contrevenant pouvait être brûlé vif (Giordano Bruno en 1600).



L'ouvrage de **Copernic** « *Des révolutions des sphères célestes* » replaçait le **Soleil au centre de l'Univers**. Sa publication le jour de sa mort en 1543, par un éditeur luthérien..., a été retardée de plusieurs années par crainte des réaction du Vatican.



Forme de la Terre ?

Sphère (en première approximation)

- **Parménide** (perfection de la sphère)
- **Aristote** : ombre de la Terre lors d'une éclipse de Lune
- **Strabon** (vers l'an 0) : quand un bateau sort du port, sa coque disparaît avant le mât.



Mais...

En 1659 **Huygens** découvre la force centrifuge (en v^2/r).
Newton en 1687 propose que la rotation de la Terre impose un renflement de la région équatoriale par rapport aux régions polaires. La sphère devient un :



Ellipsoïde (en première approximation)

En appliquant sa théorie de l'attraction universelle (en $1/r^2$), il calcule un aplatissement $(r_e - r_p) / r_p$ de 1/230. Des mesures précises actuelles donnent 1/298, c'est-à-dire $(r_e - r_p) = 21,4$ km.

Pour Newton, la déformation ellipsoïdale de la Terre n'a été possible que parce qu'elle a été fluide, donc beaucoup plus chaude dans le passé... information à relier plus loin à l'âge de la Terre !



Mais...

Des mesures récentes par satellite (radar, accéléromètre) ont permis de cartographier les ondulations de la surface (de la mer par exemple) et de définir un nouveau volume: le **géoïde**.

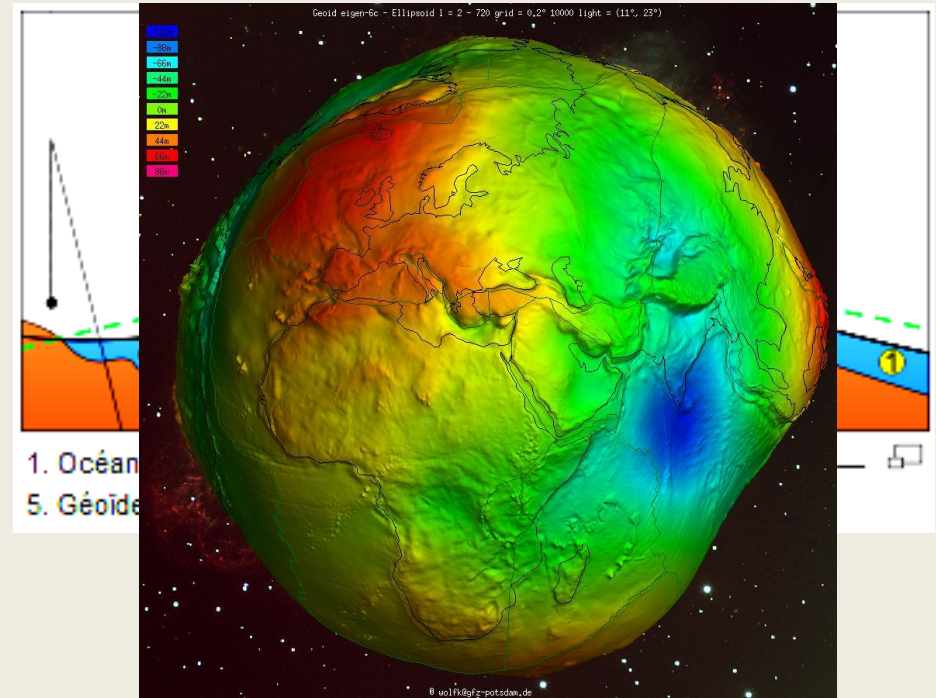
C'est la surface équipotentielle de pesanteur : le vecteur pesanteur (direction du « fil à plomb ») est en tout point perpendiculaire au géoïde. C'est la surface « horizontale » de référence.

Par rapport à l'ellipsoïde de référence, le **géoïde** présente des creux ou des bosses de + ou – 100 m env. C'est un :

« patatoïde »

L'irrégularité du géoïde révèle l'inhomogénéité de la répartition en densité des masses à l'intérieur de la Terre :

creux : roches mantelliques plus denses (plus froides)
bosses : roches mantelliques moins denses (plus chaudes)



} Cf : « voir »
sous la surface
par
gravimétrie
(voir plus loin)

A- La Terre

1) Quelle forme ?

Quelle taille ?

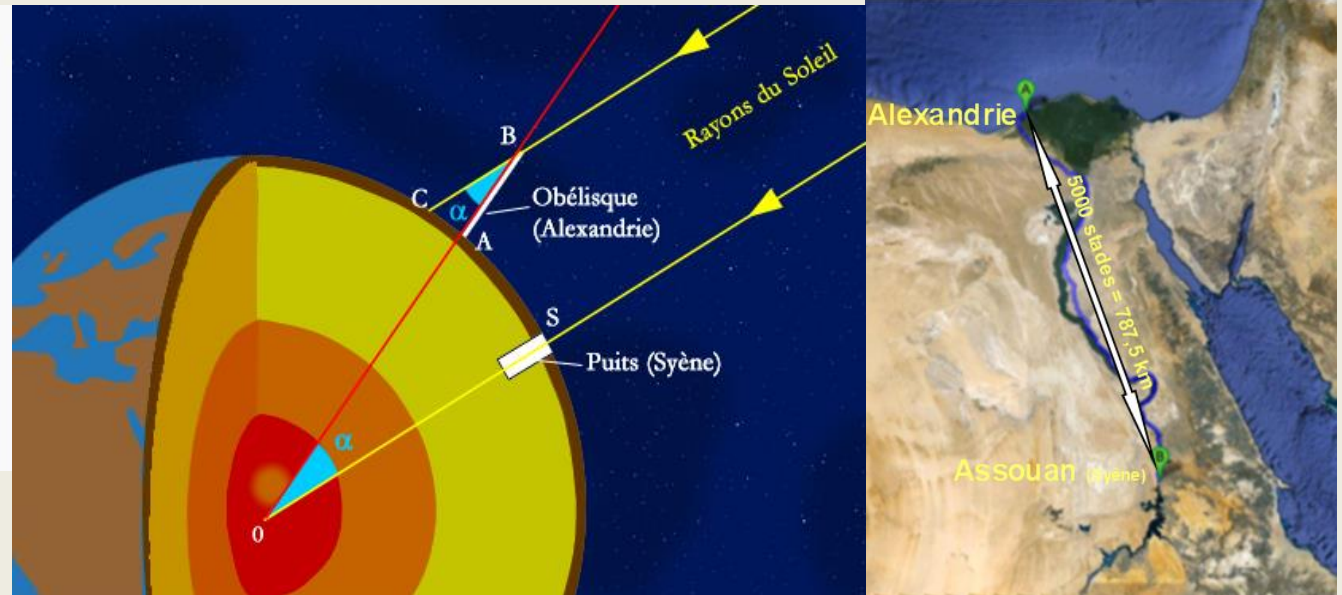
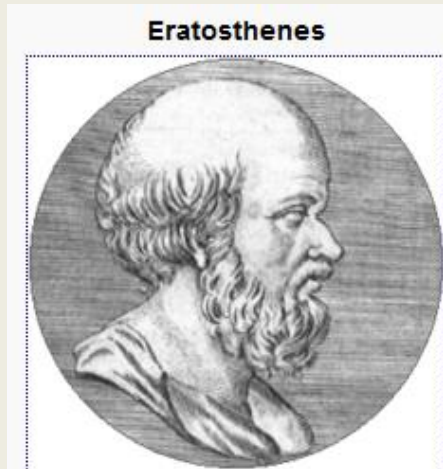
Quelle masse ?

2) Quel âge ? Quelle origine ?

3) Qu'y a-t-il à l'intérieur ?

Diamètre de la Terre ?

Calculé par Eratosthène (-276 ; -194)



Distance Alexandrie - Syène (Assouan) AS = 787,5 km (5000 "stades")

Au solstice d'été (21 juin) : Angle $\alpha = 7,20^\circ$ Périmètre $P = \pi D$

$P/AS = 360/7,20$; $P = 360/7,20 \times 787,5 = 39375$ km

et

$$D_T = P / \pi = 12532 \text{ km}$$

Valeur actuellement retenue : **12756 km** !!!

(L'erreur n'était que de 2% !!!)

Aristarque de Samos (-310 ; -230)

Calcul du diamètre de la Lune :

❑ En 1 heure, la Lune se déplace de son diamètre

❑ Une éclipse totale de Lune dure jusqu'à 2 heures
(Lune dans le cylindre d'ombre de la Terre)

Donc le diamètre de la Lune est le 1/3 de celui de la Terre : soit $D_{\text{Lune}} = 12532/3 = 4177 \text{ km}$

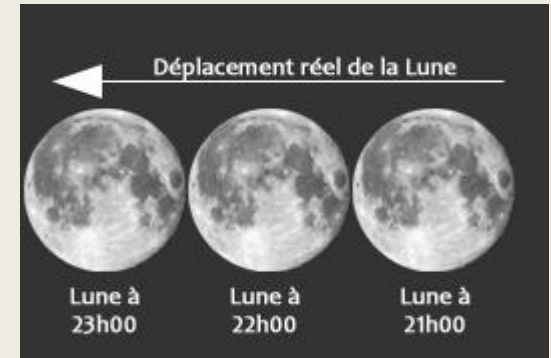
Valeur très acceptable pour les moyens de l'époque
Valeur moyenne actuelle : 3476 km

❑ En réalité, le Soleil n'est pas à l'infini

Ce n'est pas un point !

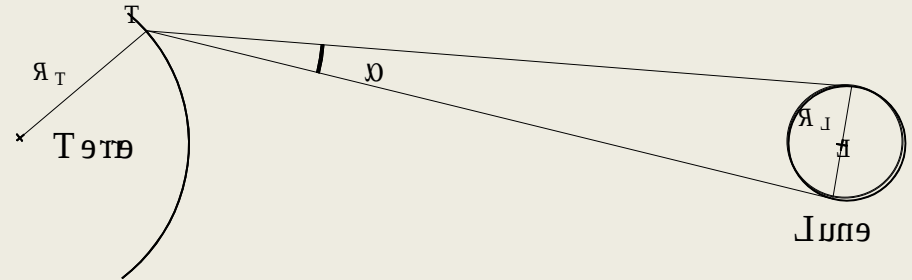
Le cylindre d'ombre est un **cône** d'ombre

et $D_{\text{Lune}} = D_{\text{Terre}} / 3,7$



Calcul de la distance Terre-Lune :

Si on connaît l'angle α :
 $\text{tg } \alpha \approx D_L / TL$



Selon **Aristarque** $\alpha \approx 2^\circ$ et $TL = D_L / \text{tg } \alpha = D_L / 0,03492 = 29 D_L \approx \textbf{120000 km}$

Correction d'**Hipparque** (-162 ; -126) :

- La Lune tourne autour de la Terre en 27,3 jours donc en 1 heure elle se déplace d'un angle : $\frac{360}{27,3 \times 24} = 0,55^\circ$
- Or en 1 heure, la Lune se déplace de son diamètre
- Donc $\alpha \approx 0,55^\circ$ et $TL = D_L / \text{tg } \alpha = D_L / 0,0096 = 104 D_L$

Distance **Terre-Lune $\approx 435000 \text{ km}$**

Valeur moyenne retenue actuellement : **384500 km**



A- La Terre

1) Quelle forme ?
Quelle taille ?
Quelle masse ?

2) Quel âge ? Quelle origine ?

3) Qu'y a-t-il à l'intérieur ?

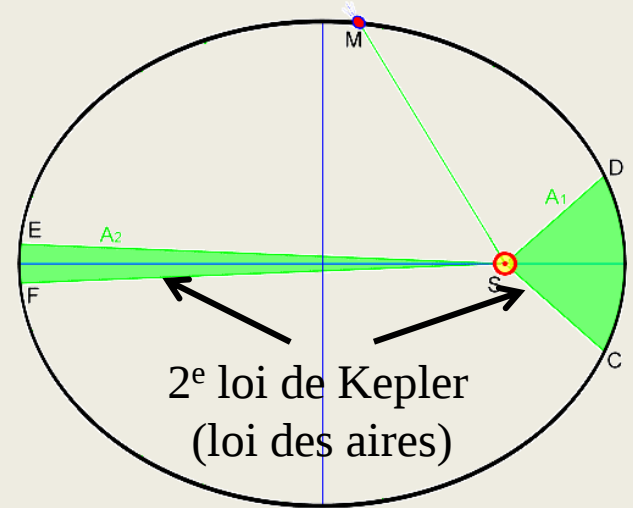
Masse de la Terre ?

Première mesure en 1798 par **Cavendish** à partir des lois de **Kepler** (1609 et 1618) et de **Newton** (1687)

1^{ère} loi de Kepler : les orbites des planètes sont des ellipses. Le Soleil est à l'un des foyers (loi des orbites)

3^e loi de Kepler : $\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot a^3 = k$
(loi des périodes)

avec **a**, demi grand-axe, **T** période de rotation et **k** constante



A partir de la 3^e loi de Kepler, Isaac Newton développa sa théorie sur la gravitation (pour une orbite circulaire $a = r$) :

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot r^3 = k \quad \longrightarrow \quad \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot r = \frac{k}{r^2}$$

$$\text{Mouvement circulaire : } v = \frac{2\pi r}{T} \longrightarrow \frac{v^2}{r} = \left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2 \cdot \frac{1}{r} = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot r$$

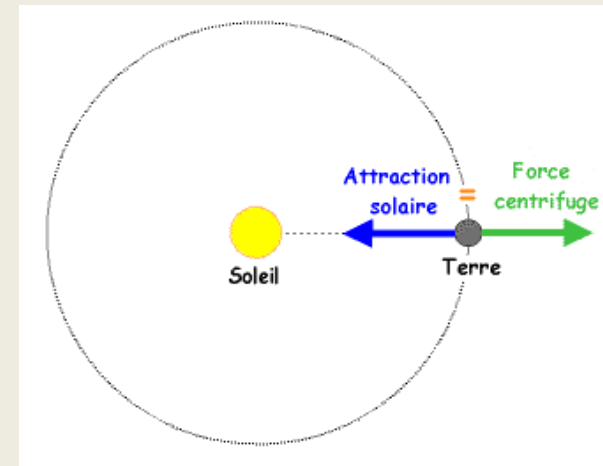
$$F_C = m_1 \frac{v^2}{r} = m_1 \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot r = m_1 \frac{k}{r^2}$$

A l'équilibre :

Force de gravitation = Force centrifuge

$$F_G = F_C$$

En posant : $k = G m_2$

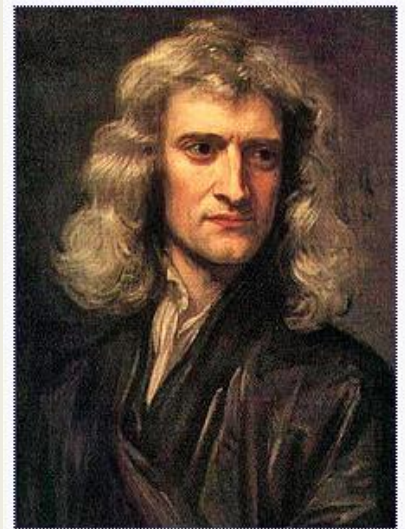


→ **Loi de gravitation de Newton :**

$$F_G = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

G : Constante de gravitation universelle

Isaac Newton



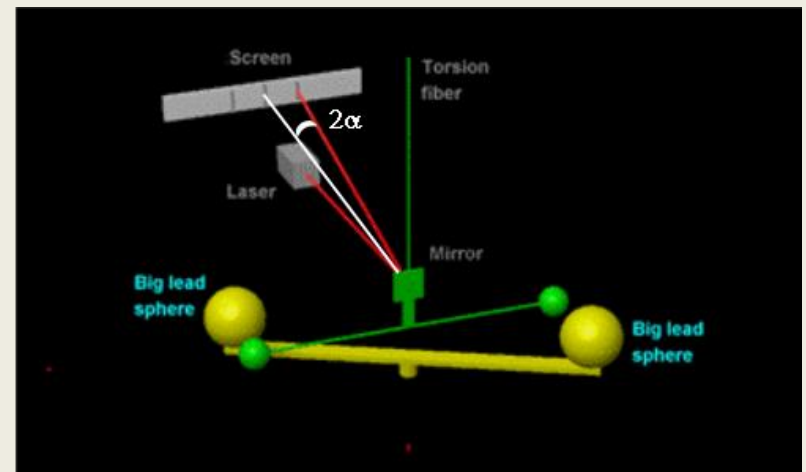
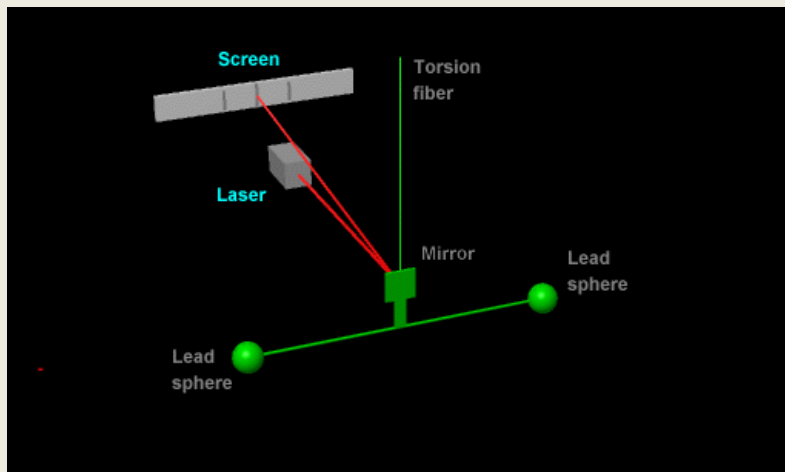
Dispositif de Cavendish pour «peser» la Terre (1797)

Principe de la mesure

- 2 petites masses m_1 fixées aux bouts d'une baguette (longueur $2a$) suspendue en son milieu à un fil de torsion (constante de torsion K) et munie d'un miroir
- 2 masses lourdes m_2 aux extrémités d'un support
- On approche les masses m_2 des masses m_1 (jusqu'à une distance D)
On observe une **rotation** de la baguette

➔ **Force gravitationnelle entre m_1 et m_2 compensée par la torsion du fil**

➔ **A l'équilibre : rotation de la baguette d'un angle α**



Physiquement, l'équilibre s'écrit : $2a.F_G = K\alpha$

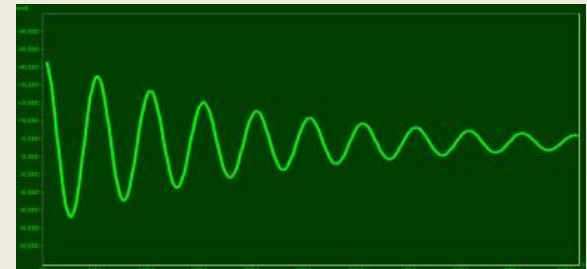
$$\frac{2a G m_1 m_2}{D^2} = K\alpha$$



$$G = \frac{K\alpha D^2}{2am_1m_2}$$

La constante de torsion **K** se calcule à partir de la période **T** des oscillations libres du pendule de torsion

$$K = \frac{8\pi^2 m a^2}{T^2}$$



Cavendish a calculé :

$$G = 6,754.10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$$

Erreur de seulement 1,2% (!!) par rapport à la valeur admise aujourd'hui

G connu, il est alors facile de calculer la masse de la Terre : $M \approx 6.10^{24} \text{ kg}$

De la connaissance du rayon (Eratosthène), on peut maintenant calculer la densité de la Terre (densité = masse/volume)

Cavendish trouve (oh! surprise) **5,45 (!)**

Valeur étonnante car :

- densité des roches de surface (croûte continentale) $\approx 2,8$
- densité des roches océaniques (croûte océanique) ≈ 3

POURQUOI CETTE DIFFERENCE ?

Il faudra attendre 1881 pour que Roche (!) propose la présence d'un **noyau ferreux**, découvert par Oldham en 1906 (sismologie)

Et la Lune alors !



Facile.... avec Kepler + Newton (Lune en orbite autour de la Terre)

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot a^3 = k = G m_{lune} \longrightarrow m_{lune} = \frac{4\pi^2 a^3}{GT^2}$$

a : distance Terre-Lune T : période rotation Lune (27,3 jours)

$m_{lune} \approx 7.10^{22} \text{ kg}$ et **densité_{lune} = 3,36**

densité voisine de celle de la croûte terrestre...

A- La Terre

1) Quelle forme ?

Quelle taille ?

Quelle masse ?

2) Quel âge ?

Quelle origine ?

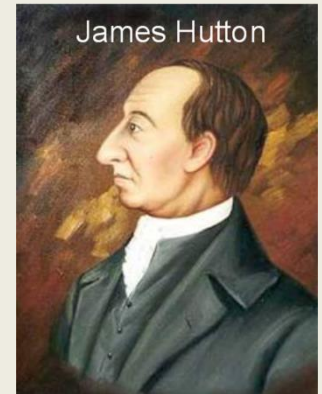
3) Qu'y a-t-il à l'intérieur ?

Age de la Terre ?

Pendant très longtemps : se fier à la Bible...

Selon **Ussher, Kepler, Newton ... environ 4000 ans avant J.C.**

D'après **James Hutton** (père de la géologie moderne) vers 1760 : la Terre est bien plus vieille que ce qu'on supposait : « le temps que les montagnes mettent à s'éroder, et le temps que mettent les sédiments à former de nouvelles roches doit se compter en **dizaines ou centaines de millions d'années** ».



Buffon (Georges Louis Leclerc, comte de Buffon, homme de salon, industriel et savant) fut impressionné par **l'épaisseur des couches sédimentaires** et la **lenteur des dépôts** formés par les océans. Avec des **vitesse de sédimentation** estimées (entre 0,1 et 1 cm pour 10 ans), il évalua l'âge de la Terre à environ **10 millions d'années** (résultat jamais publié!)

Georges Louis Leclerc
comte de Buffon



Première approche physique :

Vitesse de refroidissement de boulets

Vers 1755 par **Buffon** (père de la datation scientifique)

Hypothèse : la Terre était initialement « *dans un état de liquéfaction causé par le feu* » (naissance de la Terre) puis elle s'est refroidie jusqu'à la température actuelle

Boulets de différentes taille différentes (de 1/2 pouce à 5 pouces) ; évaluation du temps de refroidissement (chaud, tiède, température ambiante), puis extrapolation (linéaire...!) au diamètre de la Terre

Résultat: 74000 ans

« pour être compris de ses lecteurs »

« Quoiqu'il soit très vrai que plus nous nous étendrons dans le temps, plus nous approcherons de la vérité et de la réalité de l'emploi qu'en fait la nature, il faut le raccourcir autant qu'il est possible pour se conformer à la puissance limitée de notre intelligence. »

Il a été sommé de se rétracter par la faculté de théologie « *pour propositions contraires à la croyance de l'Eglise* ». Il répondit : « *mais enfin, comme disait quelqu'un, il vaut encore mieux être plat que pendu.* »

Deuxième approche physique :

Diffusion de la chaleur dans la matière

William Thomson (futur Lord Kelvin)

A partir des travaux de
Joseph Fourier sur
l'équation de diffusion de
la chaleur (1812) :

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

Lord Kelvin (vers
1862) en déduit la relation :

$$T(\text{âge Terre}) = \frac{T_i^2}{\pi \kappa g_0^2}$$

T_i : température initiale de la Terre (3800° C)

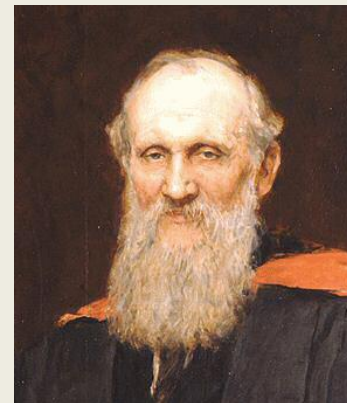
κ : diffusivité thermique (1,2 10⁶ m².s⁻¹)

g_0 : gradient géothermique (33°/km)

Il trouve : $T(\text{âge de la Terre}) = 100 . 10^6$ ans (au plus)

La Terre ne serait donc pas si vieille....

En 1863, il donna la fourchette : 20 - 400 millions d'années



Les idées de Kelvin sur l'âge du Soleil :

1. Le Soleil ne fonctionne pas par réaction chimique (combustion du carbone par exemple) car il n'aurait duré que quelques milliers d'années seulement.
2. Le rayon du Soleil diminue et l'énergie potentielle de gravitation perdue se transforme en chaleur.

Il obtient un âge du Soleil « **probablement inférieur à 100 millions d'années** », et la **Terre** étant nécessairement **plus jeune** que le Soleil

Charles Darwin (1859), estime que la Terre est **plus vieille** : au moins **300 millions d'années** « pour que des êtres complexes aient le temps d'évoluer par variation et par sélection »

Désaccord flagrant entre Kelvin et Darwin !

- ✓ **Kelvin** soupçonne les géologues et autres biologistes de ne pas accepter l'universalité des lois de la physique,
- ✓ et **Darwin** reste persuadé que quelque chose échappe aux physiciens.

La Physique serait-elle fausse ?

Qui va gagner le match ? : les Physiciens ou les Géologues - Naturalistes ?

Le problème demeura entier jusqu'au tout début du XXe siècle.

Réponse :

Kelvin s'est trompé !

Pourquoi ?

- ❑ Kelvin n'avait envisagé que la seule **conduction**, en ignorant le phénomène de **convection** (transport de matériaux dans le manteau). Le refroidissement par **convection** n'obéit pas à l'équation de diffusion de la chaleur de Fourier.
- ❑ Kelvin ignorait la **radioactivité** (découverte en 1896). La désintégration des éléments radioactifs contenus dans la Terre apporte en permanence de la chaleur.

Troisième approche physique :

L'«horloge absolue» : la méthode radioactive

1896 : découverte de la radioactivité (Henri Becquerel ; Pierre et Marie Curie)
L'Uranium émet un rayonnement « inconnu »

1899 : Ernest Rutherford découvre les rayonnements « **alpha** », « **beta** » et « **gamma** » émis par l'Uranium

1903 : E. Rutherford et F. Soddy découvrent comment les éléments radioactifs se désintègrent $\longrightarrow$ Concept de « **Période radioactive** ».
La désintégration de l'**Uranium** produit d'autres éléments chimiques dont **Ra** et **He**.

1^{ière} méthode de détermination radioactive de l'âge d'une roche :

On dose la quantité d' **Hélium** due à la désintégration de l' **Uranium**

1905 : Rutherford estime l'âge de la Terre à **497 millions d'années**. Il savait cette valeur sous-évaluée car une grande quantité d'**Hélium** s'était certainement échappée.

Par la même méthode (He), Lord Rayleigh a obtenu **1 milliard d'années** environ.

Autres méthodes radioactives dérivées :

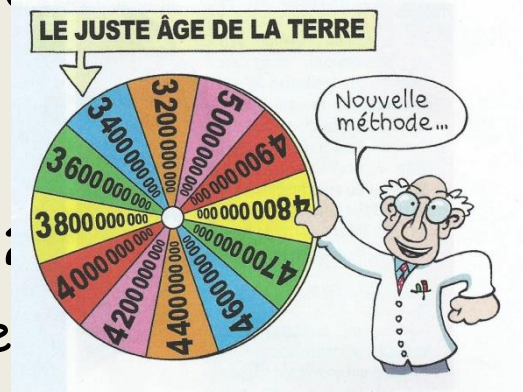
□ 1905 - Méthode **Uranium-Plomb** : Age 1,6 milliard d'années

□ 1935 - Alfred Nier développe la « Spectrométrie de masse » :

→ **séparation des isotopes**

Mise au point des

Age :



238/plomb 206

235/plomb 207

232/plomb 208

es

□ 1946 - Perfectionne

Age : entre 3 et 3,4 milliards d'années

précédente :

□ Années 50 - Méthodes Rubidium-Strontium et Potassium-Argon

On ne trouve pas de roches plus vieilles que 3,5 milliards d'années

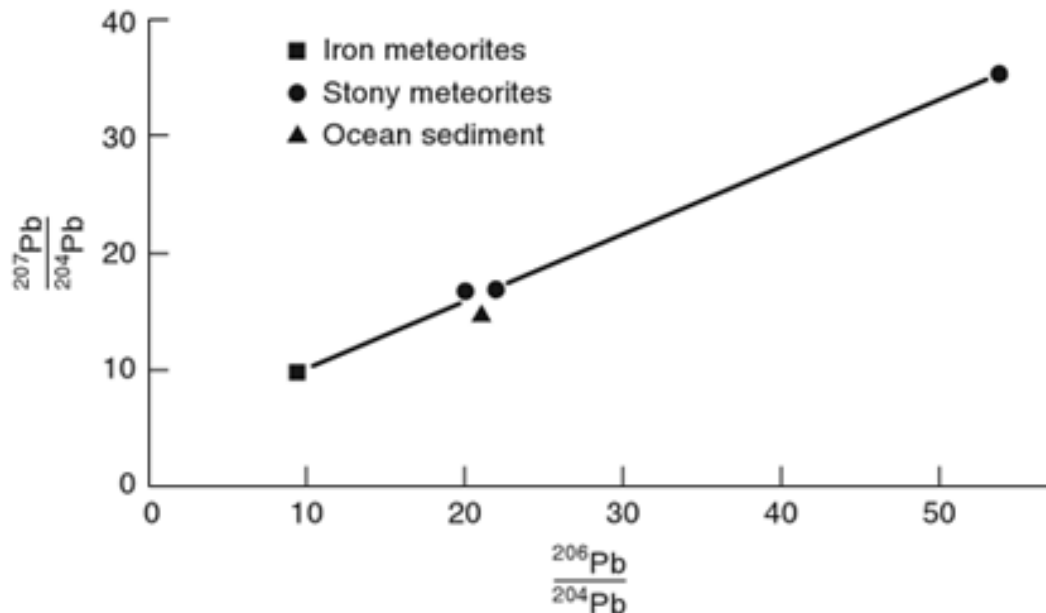
L'hypothèse des **mouvements de convection** dans le manteau venait d'être émise par Arthur Holmes en 1945.

Le jeu des processus géologiques (la Tectonique des Plaques) aurait-il remodelé la surface ?

- ❑ 1953 - Analyse de la composition isotopique en Pb des météorites (méthode U-Pb). Clair Patterson montre que la **Terre** et les **météorites** se sont formées en même temps à partir d'un réservoir identique. (Ex : météorite du Meteor Crater, Arizona)

Age de la Terre ?

Réponse : 4,55 milliards d'années (+- 70 millions)

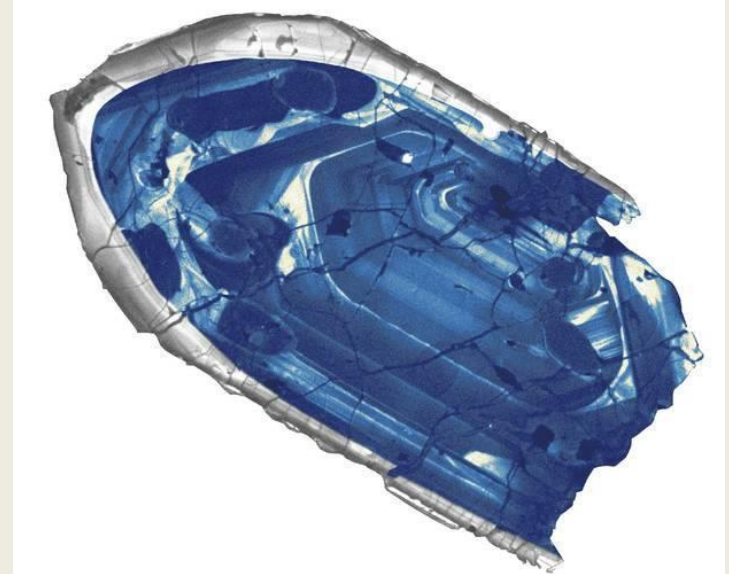


25. The lead isochron for ocean sediment and meteorites. The slope indicates an age of 4.55 ± 0.07 billion years

Cet âge a été ensuite confirmé par les méthodes **Potassium-Argon** et **Rubidium-Strontium** ainsi que par la datation des roches ramenées de la Lune dans les années 70.

Age de la première croûte terrestre ?

Utilisation de la méthode
U-Pb sur des Zircons de la
région de Jack Hills
(Australie)



Résultat : 4,374 milliards d'années

Il n'aura donc fallu que quelques 160 millions d'années au magma en fusion pour se refroidir et former une croûte terrestre.

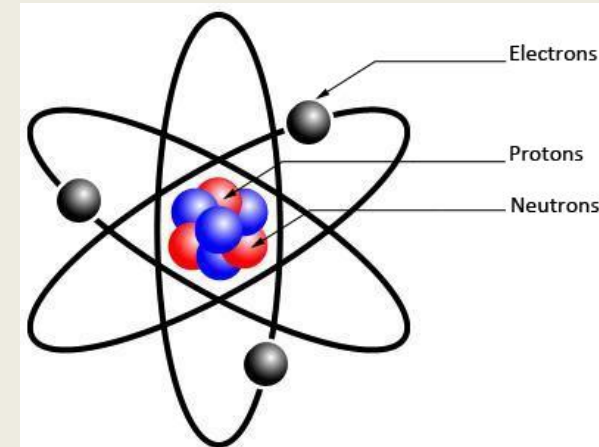
Détermination de l'âge d'une roche par la méthode radioactive :

Rappels: ELEMENTS - NOYAUX - ISOTOPES

Classification périodique des éléments (Mendeleïev–1869)

Classification des éléments :

- Non-métaux (jaune)
- Métaux alcalino-terreux (vert)
- Autres métaux (bleu clair)
- Actinides (gris)
- Gaz rares (violet)
- Métaux alcalins (orange)
- Éléments de transition (bleu foncé)
- Halogènes (rouge)
- Lanthanides (vert clair)



Atome : noyau + électrons

Noyau : Z protons + N neutrons

Classification périodique des éléments (Mendeleïev–1869)

Composition schématique du noyau :

Z protons + N neutrons

nombre de nucléons du noyau : $A = Z + N$

Isotopes d'un élément chimique X : le nombre de neutrons N est différent

On note : ${}^A_Z\text{X}_N$ ou encore plus simplement : ${}^A_Z\text{X}$

Tableau des Isotopes :

Les isotopes du Carbone :

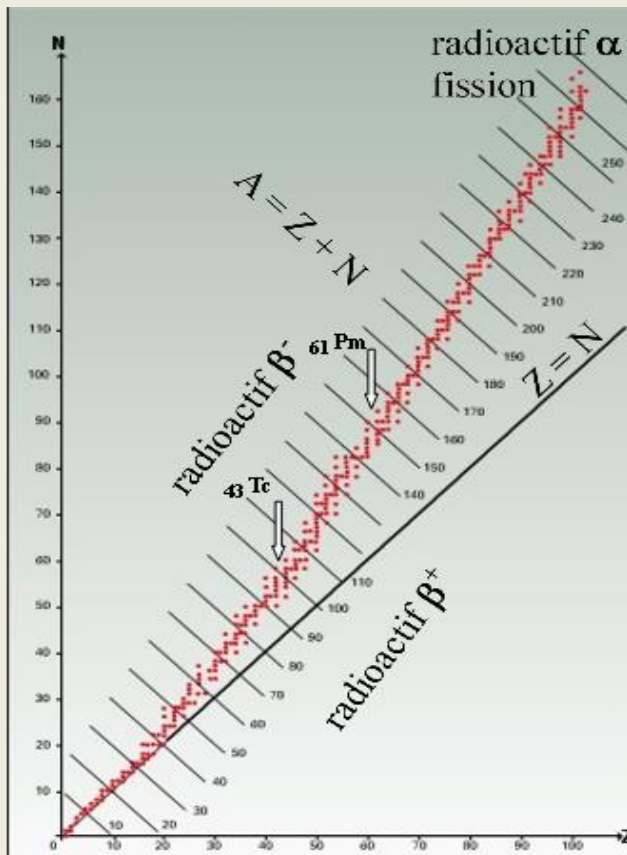
${}^{10}\text{C}$ 19s β^+	${}^{11}\text{C}$ 20,5m β^+	${}^{12}\text{C}$ 98,89%	${}^{13}\text{C}$ 1,11%	${}^{14}\text{C}$ 5730a β^-	${}^{15}\text{C}$ 2,25s β^-	${}^{16}\text{C}$ 0,74s β^-
---------------------------------------	---	-----------------------------	----------------------------	---	---	---

Les isotopes stables du Plomb :

${}^{204}_{92}\text{Pb}$	${}^{206}_{92}\text{Pb}$	${}^{207}_{92}\text{Pb}$	${}^{208}_{92}\text{Pb}$
1,4%	24,1%	22,1%	52,4%

Les isotopes de l'Uranium naturel :

${}^{234}_{92}\text{U}$	${}^{235}_{92}\text{U}$	${}^{238}_{92}\text{U}$
0,0056%	0,72%	99,28%

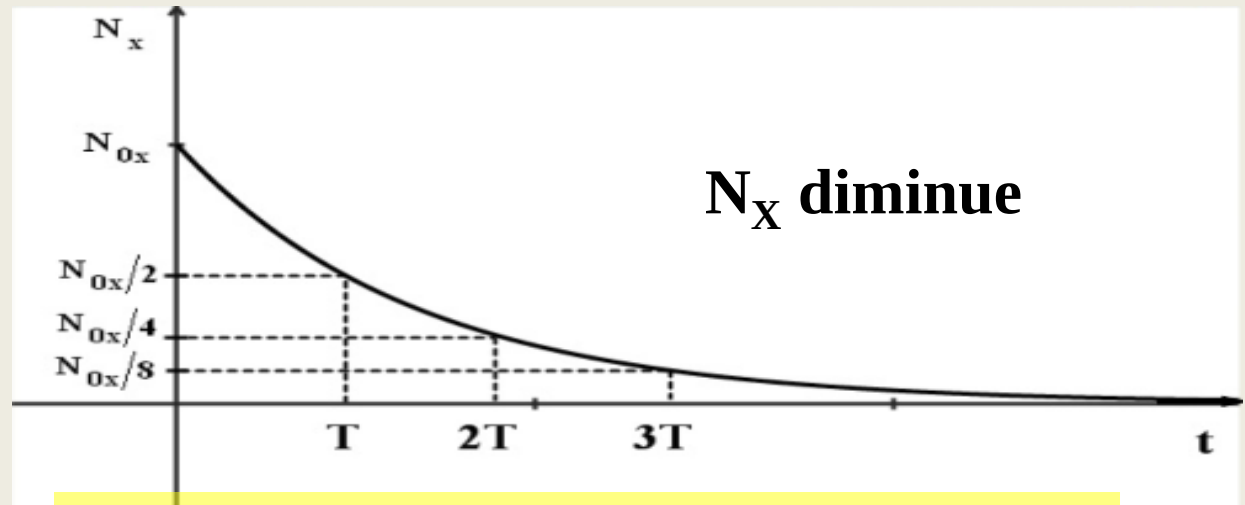


Désintégration radioactive :

- α : ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + {}^4_2\text{He} + (\gamma) + \text{énergie}$ $Z \rightarrow Z-2$
- β^+ : ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{Y} + {}^0_{+1}\text{e} + \nu + (\gamma) + \text{énergie}$ $Z \rightarrow Z-1$
- β^- : ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{Y} + {}^0_{-1}\text{e} + \bar{\nu} + (\gamma) + \text{énergie}$ $Z \rightarrow Z+1$
- γ : ${}^A_Z\text{X}^* \rightarrow {}^A_Z\text{X} + \gamma$

Période radioactive :

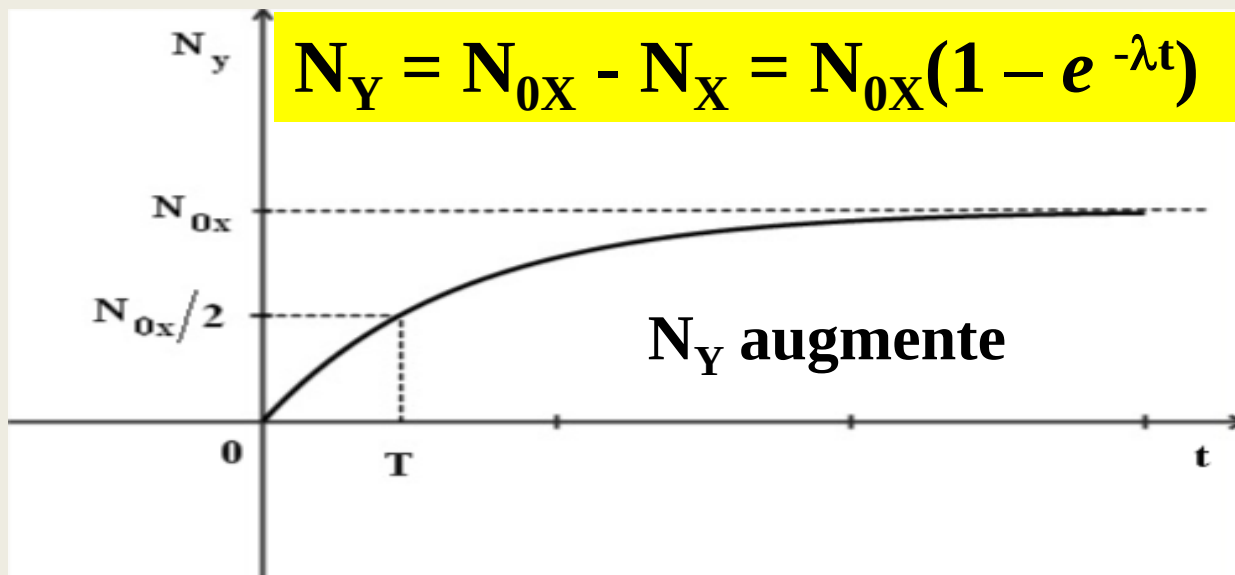
Temps T nécessaire pour que le nombre de noyaux N_X présents à un instant donné soit divisé par 2.



Loi de variation :

$$N_X = N_{0X} e^{-\lambda t} = N_{0X} e^{-\text{Ln}2 \frac{t}{T}} = N_{0X} e^{-0,693 \frac{t}{T}}$$

λ : constante radioactive



Quelques valeurs de Périodes :

$$^{238}\text{U} : T = 4,47 \cdot 10^9 \text{ ans}$$

$$^{40}\text{K} : T = 1,28 \cdot 10^9 \text{ ans}$$

$$^{232}\text{Th} : T = 13,9 \cdot 10^9 \text{ ans}$$

$$^{235}\text{U} : T = 0,04 \cdot 10^9 \text{ ans}$$

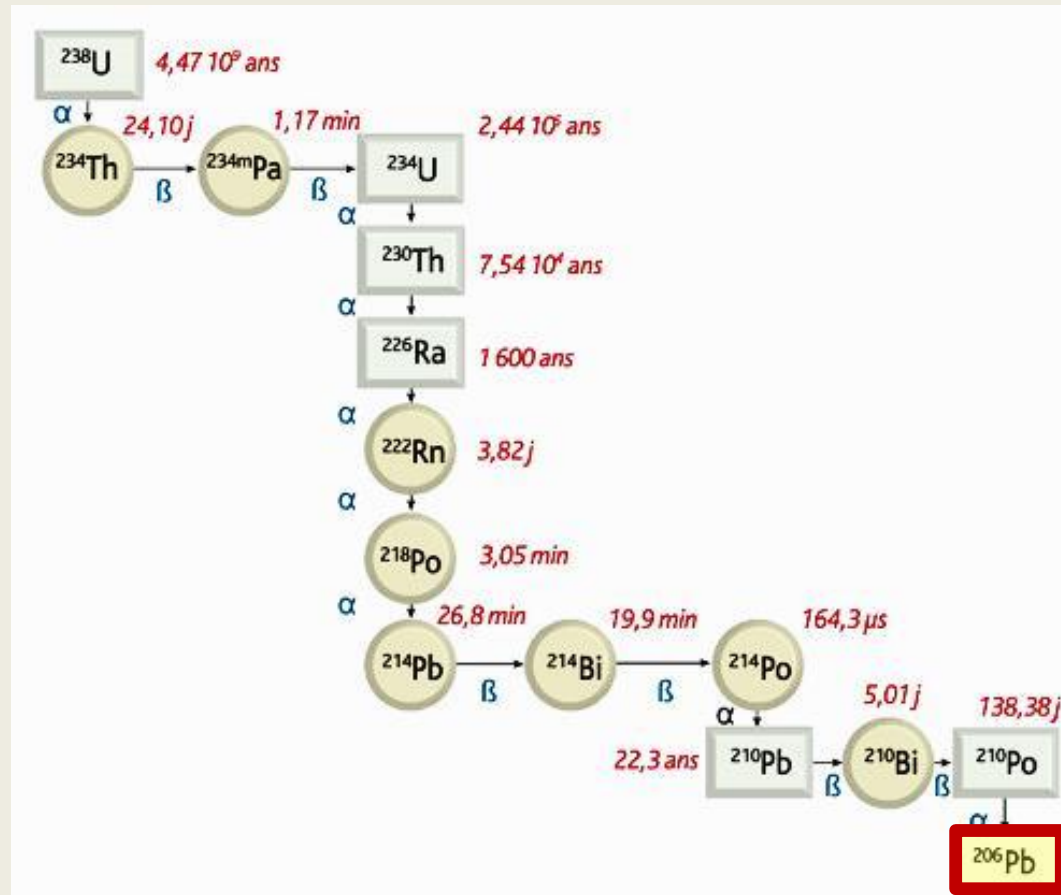
$$^{14}\text{C} : T = 5730 \text{ ans}$$

Filiation radioactive

- famille $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$

- famille $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$

- famille $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$



Comment calculer l'âge ?

Plusieurs méthodes

Un exemple simple : la méthode du couple Père – Fils

Père : ^{238}U Fils : ^{206}Pb

Père : ^{87}Rb Fils : ^{87}Sr

Père : ^{235}U Fils : ^{207}Pb

Père : ^{147}Sm Fils : ^{143}Nd

On mesure les quantités au temps t :

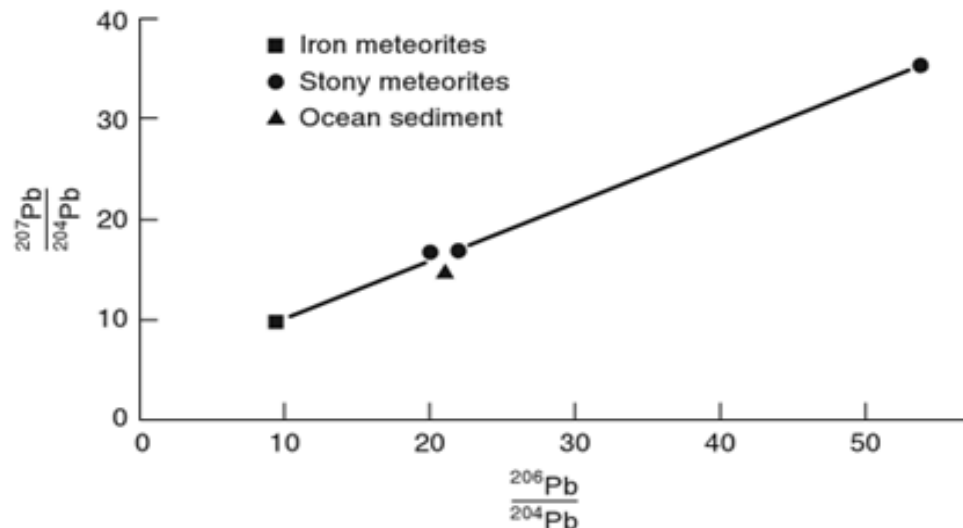
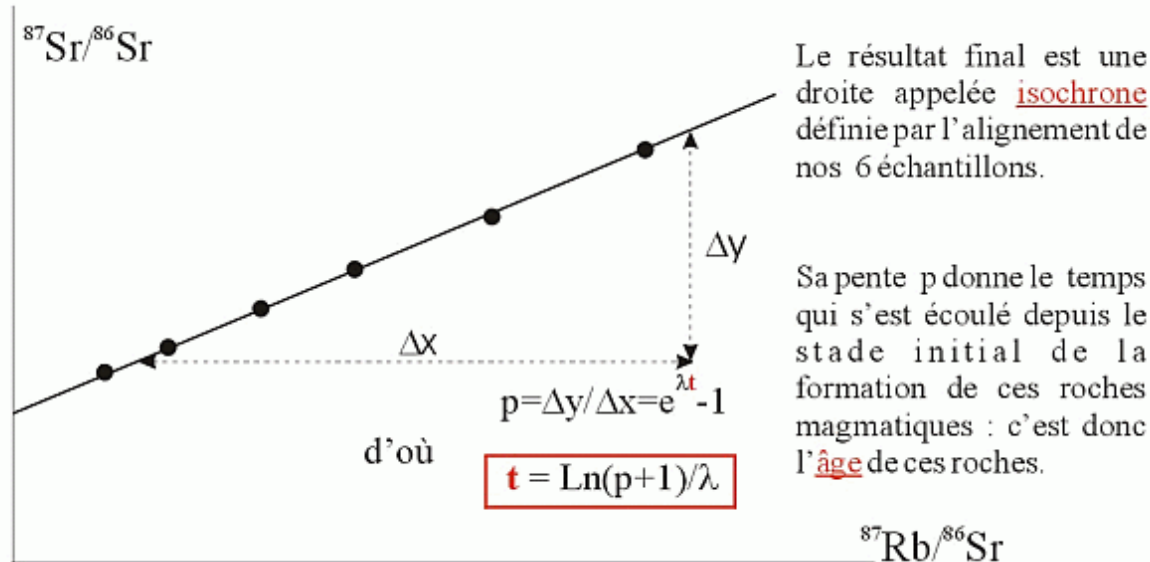
- de l'isotope « père » radioactif $P(t)$
- et de l'isotope « fils » non-radioactif $F(t)$ contenues dans l'échantillon

(F_0 est la quantité éventuelle du « Fils » à l'origine).

On montre que :

$$\text{Age} = t = \frac{1}{\lambda} \text{Ln} \left(\frac{F(t) - F_0}{P(t)} + 1 \right)$$

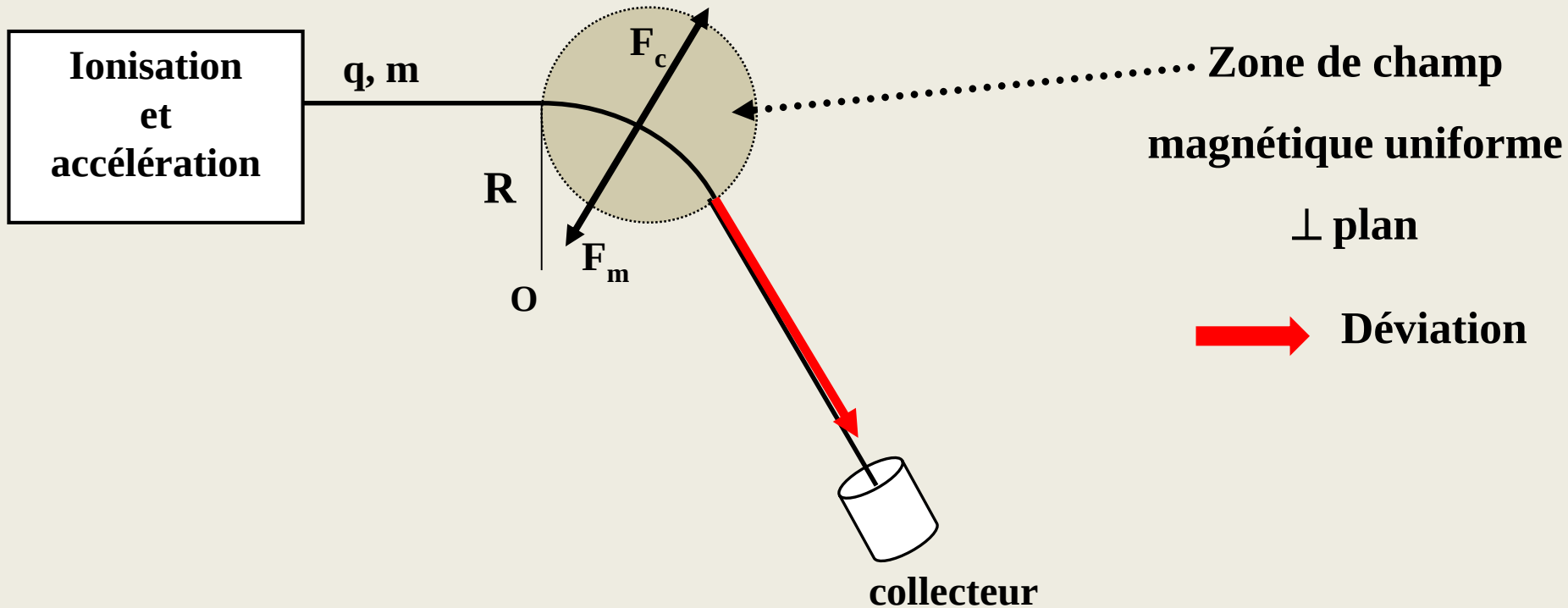
Méthode dérivée : la méthode « isochrone »

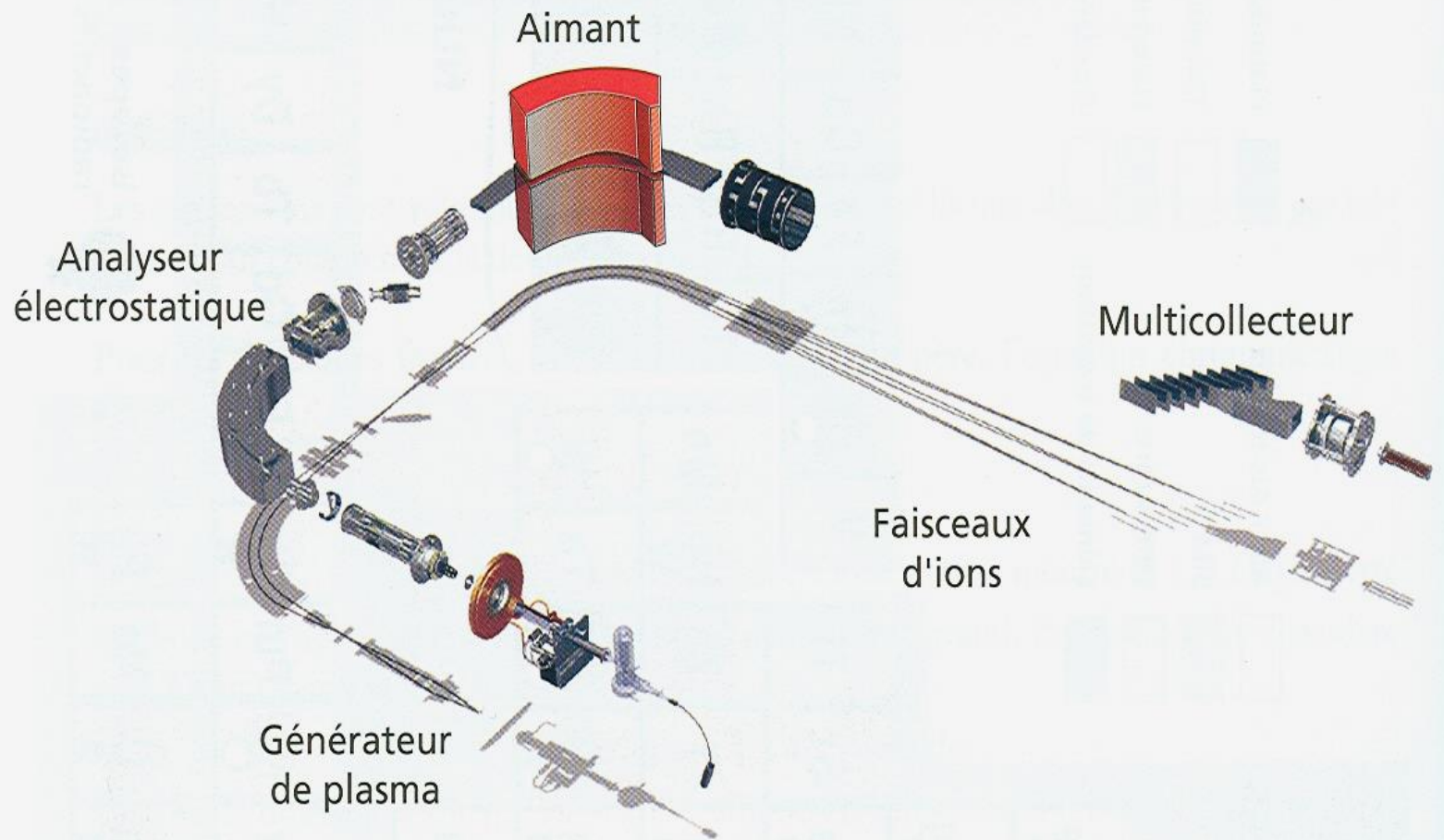


25. The lead isochron for ocean sediment and meteorites. The slope indicates an age of 4.55 ± 0.07 billion years

Comment calculer les quantités $P(t)$ et $F(t)$?

Spectromètre de masse appelé aussi Séparateur d'isotopes
(développé par Alfred Nier à partir de 1935)





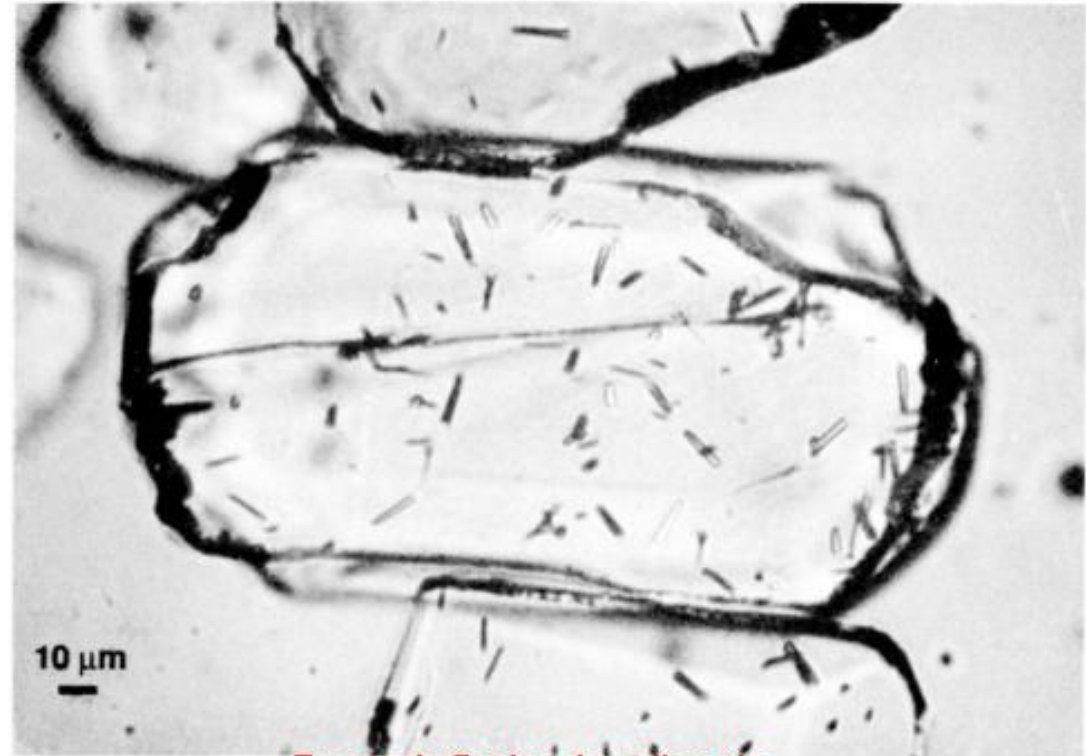
3 autres méthodes de datation des roches :

- Traces de fission
- Thermoluminescence
- Résonance paramagnétique
électronique (RPE)

➤ Traces de fission

Fission spontanée de certains noyaux lourds (essentiellement ^{238}U).
Les 2 noyaux de recul issus de la fission détruisent le réseau cristallin sur leur parcours (de quelques microns).

- Révélation de la trace par une attaque acide sur une lame mince de l'échantillon,
- Comptage à l'aide d'un microscope du nombre de traces de fission,
- Détermination par une méthode nucléaire de la concentration en ^{238}U
($T_{\text{fission},238} = 9,9 \cdot 10^{15} \text{ a}$)
(fission ^{235}U par neutrons)



Traces de fission dans l'apatite

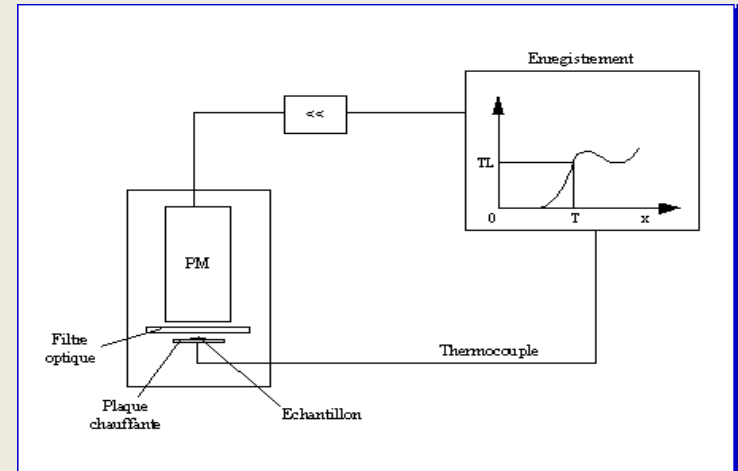
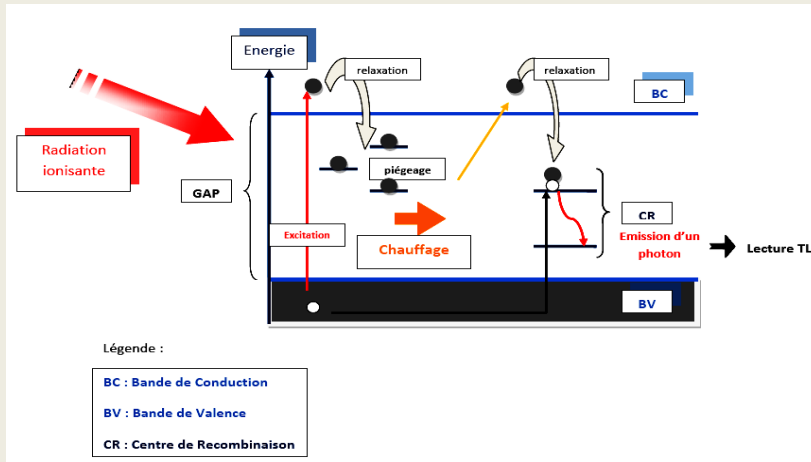
➔ Age du minéral

Un chauffage du minéral atténue, voire fait disparaître selon la température atteinte, la lisibilité des traces (histoire thermique).



Thermoluminescence

Certains cristaux (ex : quartz, feldspath, zircon , ...) émettent de la lumière lorsqu'on les chauffe, à condition qu'ils aient été au préalable soumis à une irradiation naturelle ou artificielle.



L'intensité de cette émission de «thermoluminescence» est proportionnelle à la « paléodose » Q : dose totale de rayonnement déposée depuis l'instant initial par les radioéléments (familles de l'uranium et du thorium et potassium 40) contenus dans cet échantillon et le sol environnant.

$$\text{Age} = \frac{Q}{d}$$

d : dose annuelle d'irradiation

Roches ignées, calcite, lœss, dunes, cratères de météorites

Mesures possible de 100 ans à 800000 ans env.

Méthode idéale entre 20000 ans et 600000 ans env. (entre ^{14}C et ^{40}K)

Précision : 5 à 15%

➤ Résonance paramagnétique électronique (RPE)

Principe :

Mesure de « l'aimantation » (concentration de spins électroniques) due à des électrons non appariés (célibataires) piégés dans des défauts d'un cristal qui a été soumis à l'irradiation naturelle (rayonnements α , β et γ).

Remarque : Les porteurs de l'aimantation (les spins des électrons) ressemblent aux centres thermoluminescents vus auparavant.

- Carbonates, coraux, dents fossiles, coquilles , sédiments, silex, quartz ...
- Méthode non destructive
- De quelques milliers à plusieurs millions d'années

A- La Terre

1) Quelle forme ?
Quelle taille ?
Quelle masse ?

2) Quel âge ?
Quelle origine ?

3) Qu'y a-t-il à l'intérieur ?

Origine de la Terre ?

(On «oubliera» la version Biblique)

La réponse qu'on en donne aujourd'hui, vient du développement en parallèle :

- de la **Mécanique relativiste** (Einstein-1905) : plus on regarde « loin » dans l'Univers, plus on le voit « jeune » et plus on le voit « chaud ».
- de la **Mécanique Quantique**, base de la Physique Nucléaire et des Particules (Rutherford, Chadwick, Heisenberg, Louis de Broglie...) : plus on regarde des objets « petits », plus leur composition est « simple ».

L'**Astrophysique** réunit ces 2 types de Physique.

Les instruments utilisés :

- télescopes et radiotélescopes de plus en plus performants (Hubble, VLT-Atacama-Chili)
- accélérateurs, synchrotrons, LHC(CERN)

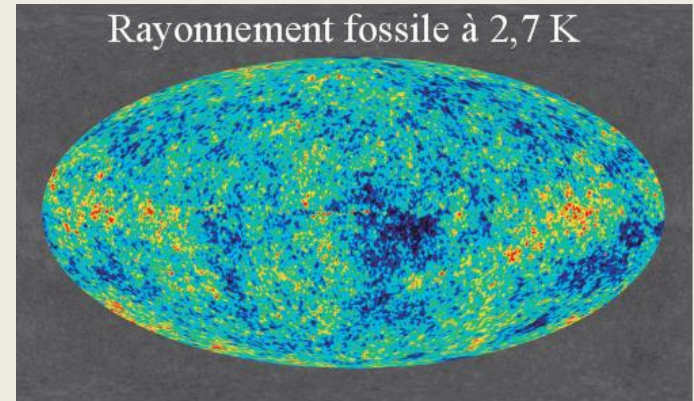
Histoire de l'Univers en **TRES TRES** bref...

1 seconde : quarks, électrons, neutrinos, gluons, bosons et gammas (+ antiparticules)

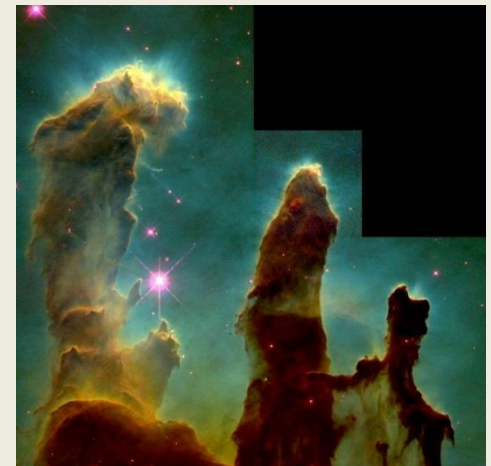
qq secondes : protons, neutrons, neutrinos, électrons et gammas (+ antiparticules)

10 secondes : nucléosynthèse primordiale : $\longrightarrow$ fusion de 2 protons
univers formé de $\approx 75\%$ ${}^1_1\text{H}$ et $\approx 25\%$ ${}^4_2\text{He}$ (+ ε)

380000 ans : recombinaison électrons-noyaux,
formation des **atomes** H, He, Li, Be
et émission du rayonnement fossile

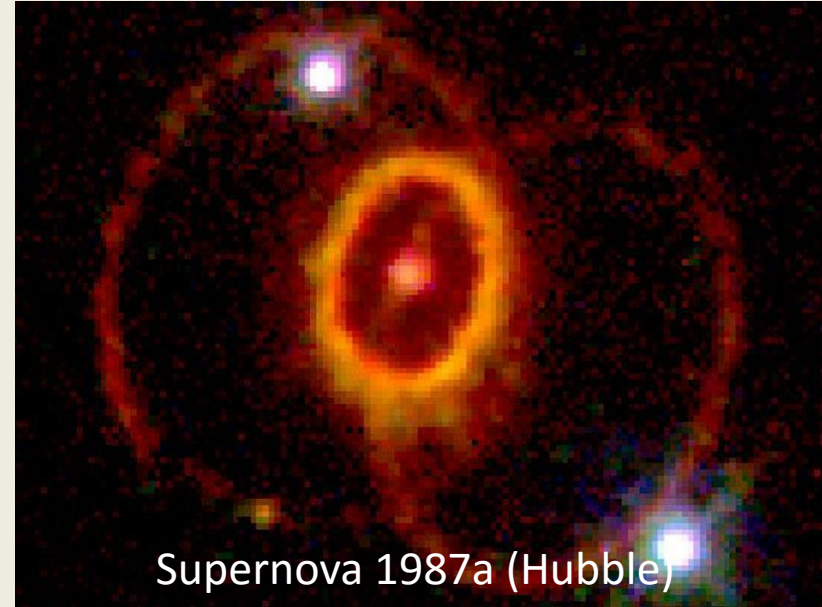


100 millions d'années : formation des **galaxies**
et des premières **étoiles** par contraction
gravitationnelle : nucléosynthèse stellaire
 $\longrightarrow$ formation des **éléments** jusqu'au Fe.



Pour les étoiles de plus de 3 à 5 M_{soleil} :
→ super ou hypernova.

- Formation des **éléments jusqu'à l'Uranium**.
- Dispersion dans l'espace
- Le gaz interstellaire (essentiellement H et He) s'enrichit en éléments lourds.
- **Condensation** gravitationnelle locale des « nuages » de gaz pour former **étoiles et systèmes planétaires**.



Supernova 1987a (Hubble)

Le Soleil a **4,567 milliards d'années**
La Terre est un peu plus jeune : **4,55 milliards d'années**,
mais chacun des atomes est bien plus « vieux » :
jusqu'à 13,7 milliards d'années

A- La Terre

1) Quelle forme ?

Quelle taille ?

Quelle masse ?

2) Quel âge ?

Quelle origine ?

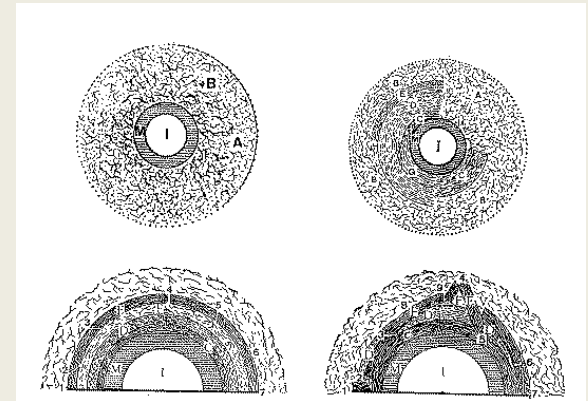
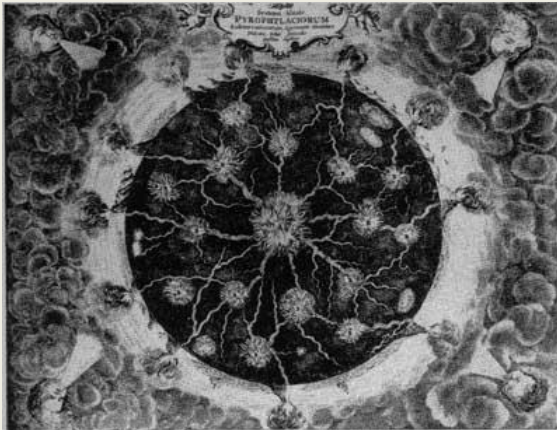
3) Qu'y a-t-il à l'intérieur ?

Intérieur de la Terre ?

Evolution des idées

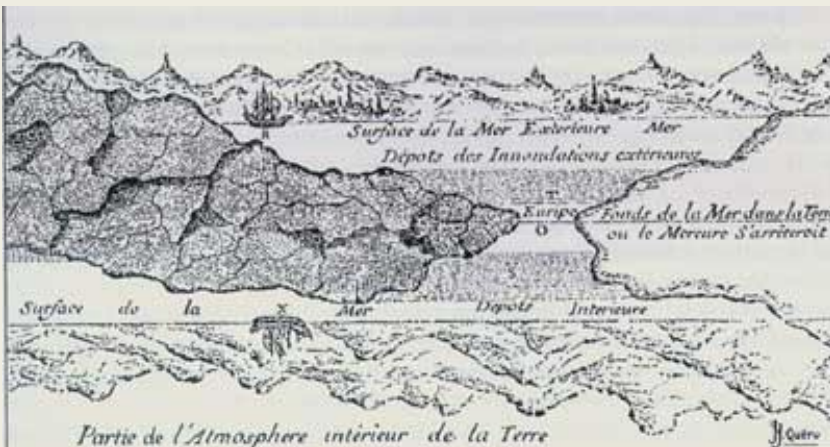
JUSQU'AU DEBUT DU XIX^e SIECLE :
PURES SPECULATIONS

Descartes (1664) : Terre creuse. Au centre, un noyau de matière solaire entouré d'une couche d'eau puis d'une couche d'air et enfin d'une couche de terre plus légère séchée par le soleil et qui se fendille.

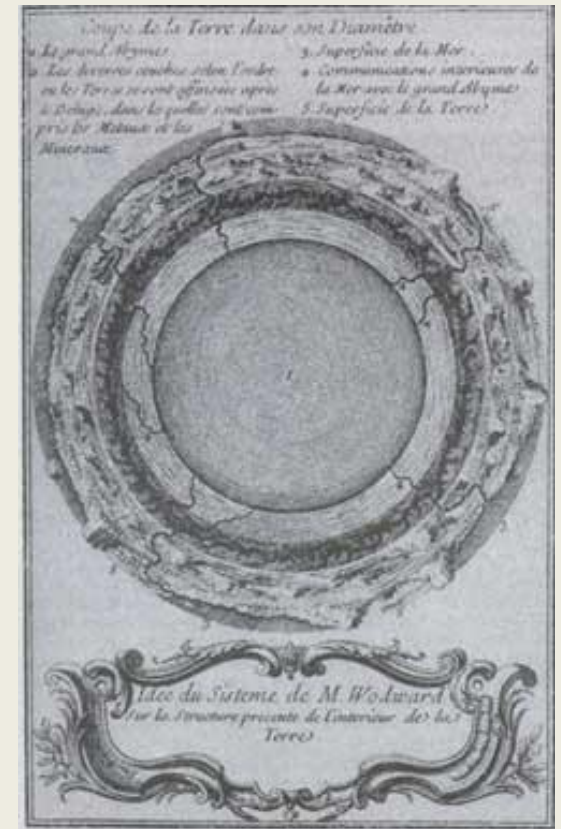


Kirchner (1665) : La Terre est un ancien soleil refroidi. Au centre, un foyer relié aux volcans par des conduits de feu

Halley (1693) : La Terre est formée de couches sphériques magnétiques tournant lentement les unes par rapport aux autres. Il fut à l'origine de la première carte magnétique de l'océan atlantique.



Woodward (1695) : Les roches ont été dissoutes au Déluge puis se sont redéposées autour d'une sphère aqueuse



Gauthier (1721) : La Terre est creuse. La couche externe a 5 km d'épaisseur. Les 2 côtés sont symétriques. Ainsi des effondrements et des soulèvements de la croûte sont possibles

Buffon (1749) : La Terre est pleine et était initialement entièrement fondue

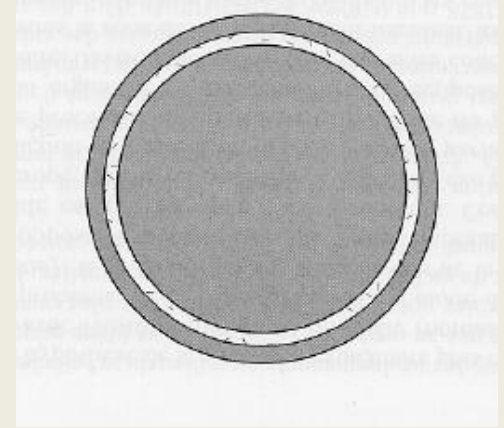
PREMIERES APPROCHES PHYSIQUES

Cordier (1827) : Il observe que la température dans les mines **augmente de 1° tous les 25 mètres**. Donc à 2,5 km l'eau bout et à 50 km toute les roches sont fondues (1600°C). Donc la Terre est une **grosse masse en fusion** recouverte d'une mince écorce solide.

Ce modèle explique les volcans, les tremblements de terre et la formation des montagnes (contraction de la croûte par refroidissement, failles et plissements).

Lord Kelvin (1862) : La Terre est entièrement solide. Si elle était en fusion, les marées internes devraient soulever et abaisser le sol, ce qui n'est pas observé. Ses propriétés de solide élastique ressemblent à celles de l'acier. Les seules parties en fusion sont les réservoir de magma sous les volcans. Il rejette le modèle de la Terre fluide proposée par les Géologues.

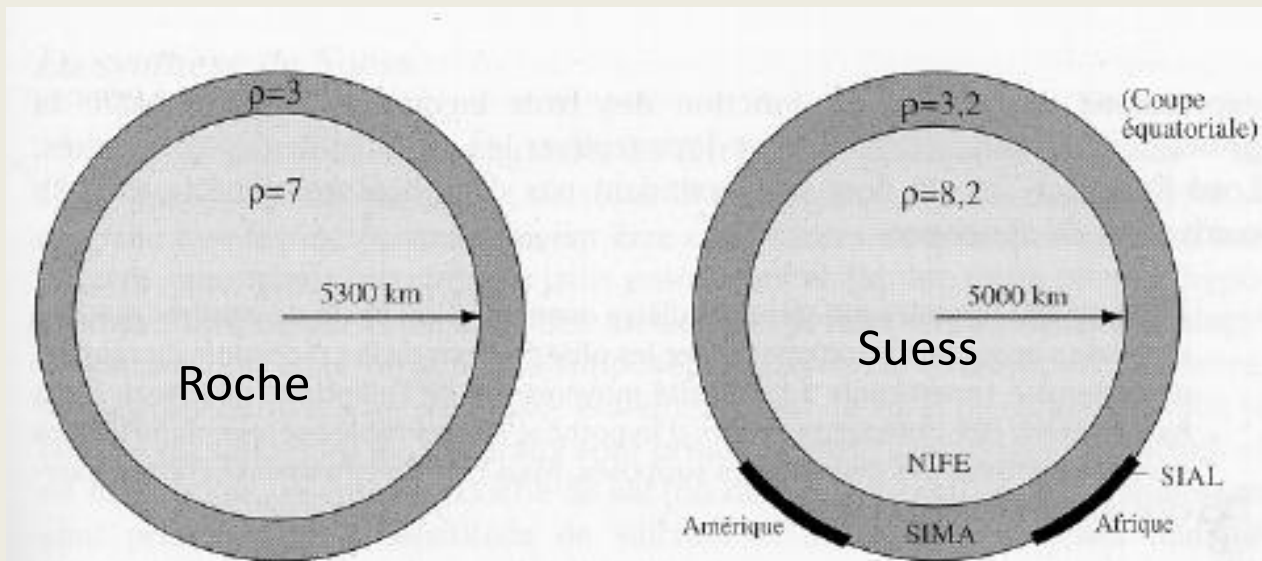
Fischer (années 1870-80) propose un compromis entre la Géologie et la Physique : la Terre est composée d'une **croûte solide** (faible épaisseur), d'une **couche** intermédiaire **fluide** (faible épaisseur), et d'un **noyau solide**. Ce modèle vérifie la condition de lord Kelvin d'un globe possédant en moyenne les propriétés élastiques de l'acier, tout en permettant de conserver les explications habituelles des phénomènes géologiques.



Edouard Roche (1881) : De l'analyse des météorites, il propose un modèle à **2 couches** :

a) - enveloppe pierreuse ($d \approx 3$) b) - noyau ferreux ($d \approx 7$) de rayon ≈ 5300 km

Eduard Suess (1909) : Il affine les calculs de Roche et propose un modèle à 3 couches avec les noms de **SiAl**, **SiMa** et **NiFe**.



LES GÉOLOGES BUTAIENT SUR UN PROBLÈME ESSENTIEL

COMMENT « VOIR » SOUS LA SURFACE ?

➡ QUELQUES MÉTHODES PHYSIQUES

- I- La révolution sismologique
- II- Mesures gravimétriques de précision
- III- Mesures électriques
- IV- Mesures par écho radar
- V- Tomographie avec des muons
(technique récente et ... particulière)

COMMENT « VOIR » SOUS LA SURFACE ?

I- LA « REVOLUTION » SISMOLOGIQUE

An 132 , 1^{er} sismomètre du chinois Chang Heng



Indication du sens de la secousse donc de la direction de l'épicentre

Felippo Cecchi (1875) construit le **premier sismomètre** capable d'enregistrer les mouvements du sol en fonction du temps.

*L'analyse des mouvements du sol est décomposé en **onde P** (de pression), **onde S** (de cisaillement) et **ondes de surface**. La présence d'onde S prouve que la Terre est un corps solide élastique.
Le modèle d'une Terre dont l'intérieur est fluide doit être rejeté (modèle des Géologues)!*

Oldham (1906) : premier modèle sismologique de la Terre. Il croit observer une **discontinuité** vers 3800 km de profondeur.

Mohorovicic (1909) : accroissement des vitesses sismiques sous la Croatie à 54 km env. de profondeur. Interprétation : interface entre croûte et manteau (varie entre 7 et 30 km).

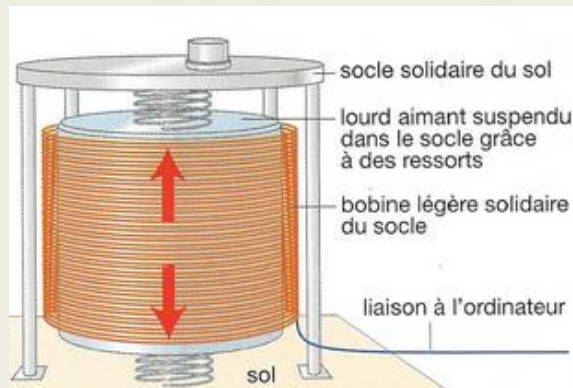
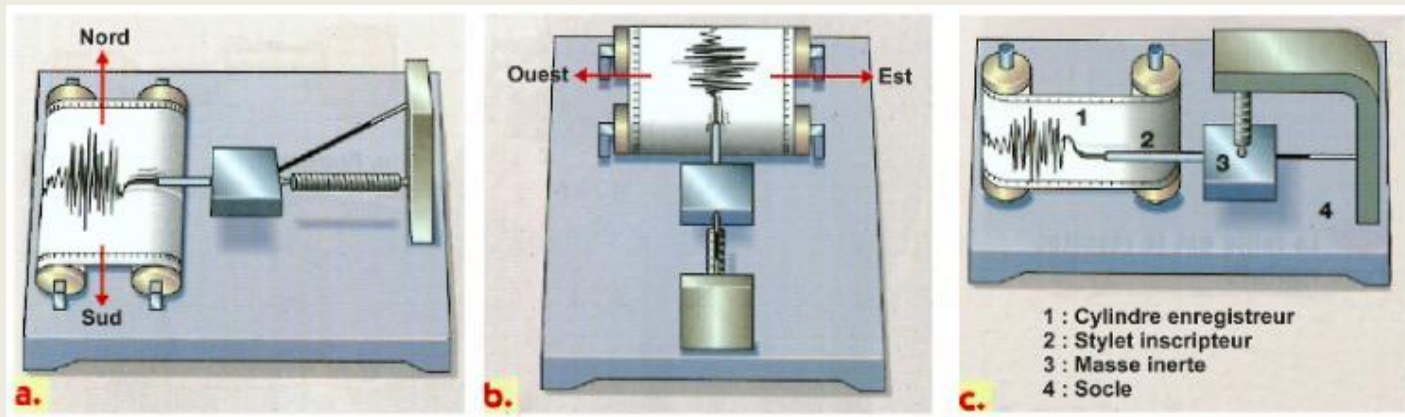
Gutenberg (1912) : observation d'une « zone d'ombre » pour des distances épacentrales entre 105° et 142°. C'est la **discontinuité d'Oldham** vers 2900 km de profondeur (**frontière manteau-noyau**).

Inge Lehmann (1936) : La « zone d'ombre » n'est pas complètement déserte. On y observe des ondes P réfléchies sur une partie centrale : la **Graine solide** dont la dimension est évaluée entre 1200 et 1250 km (dimension actuelle : 1221 km). —————> **Discontinuité de Lehman**

Onde sismique : Comment ça marche

Principe du sismographe

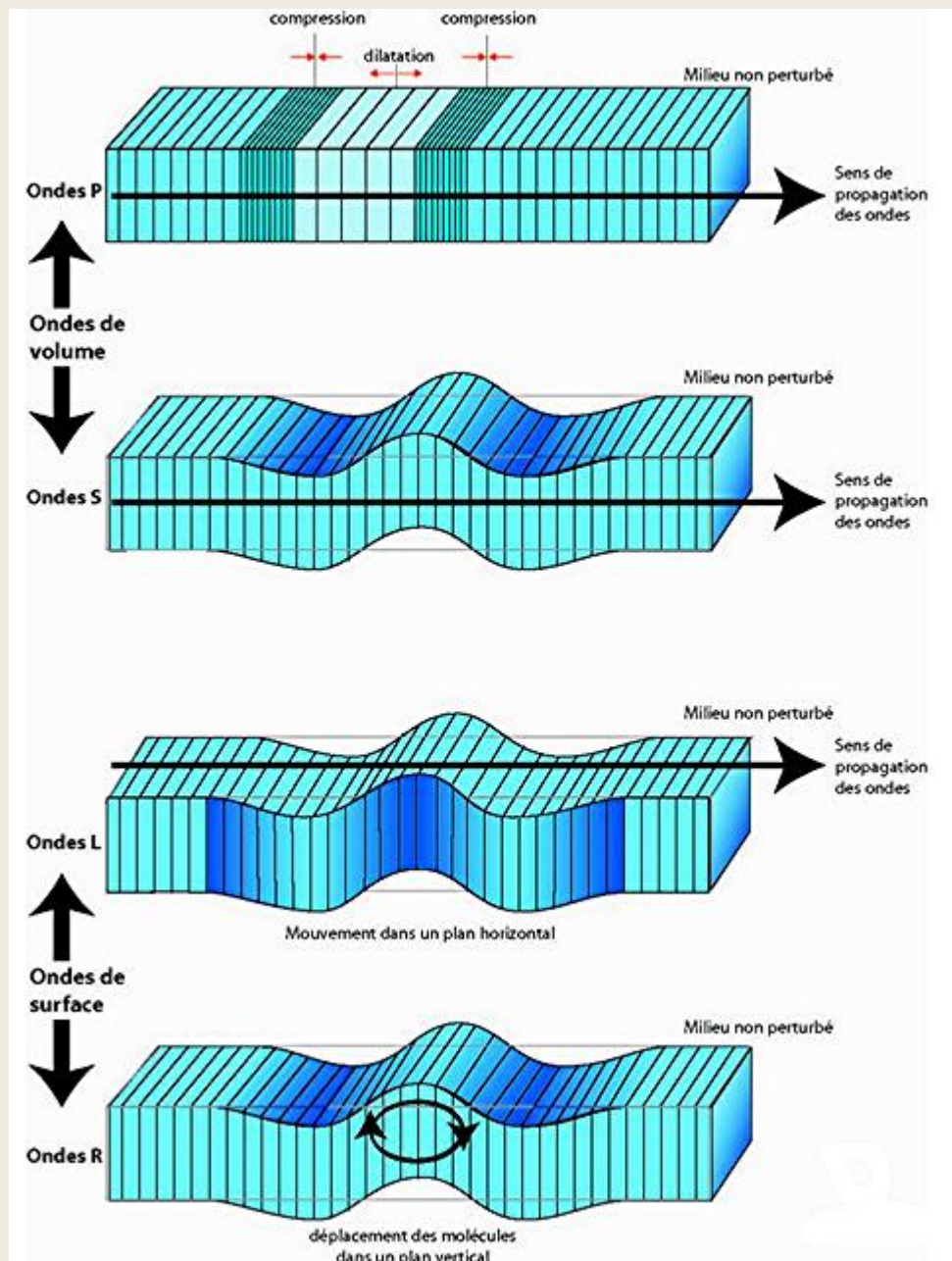
Enregistrement des 3 composantes de l'onde sismique



Enregistrement
électronique de
l'information

Les ondes sismiques

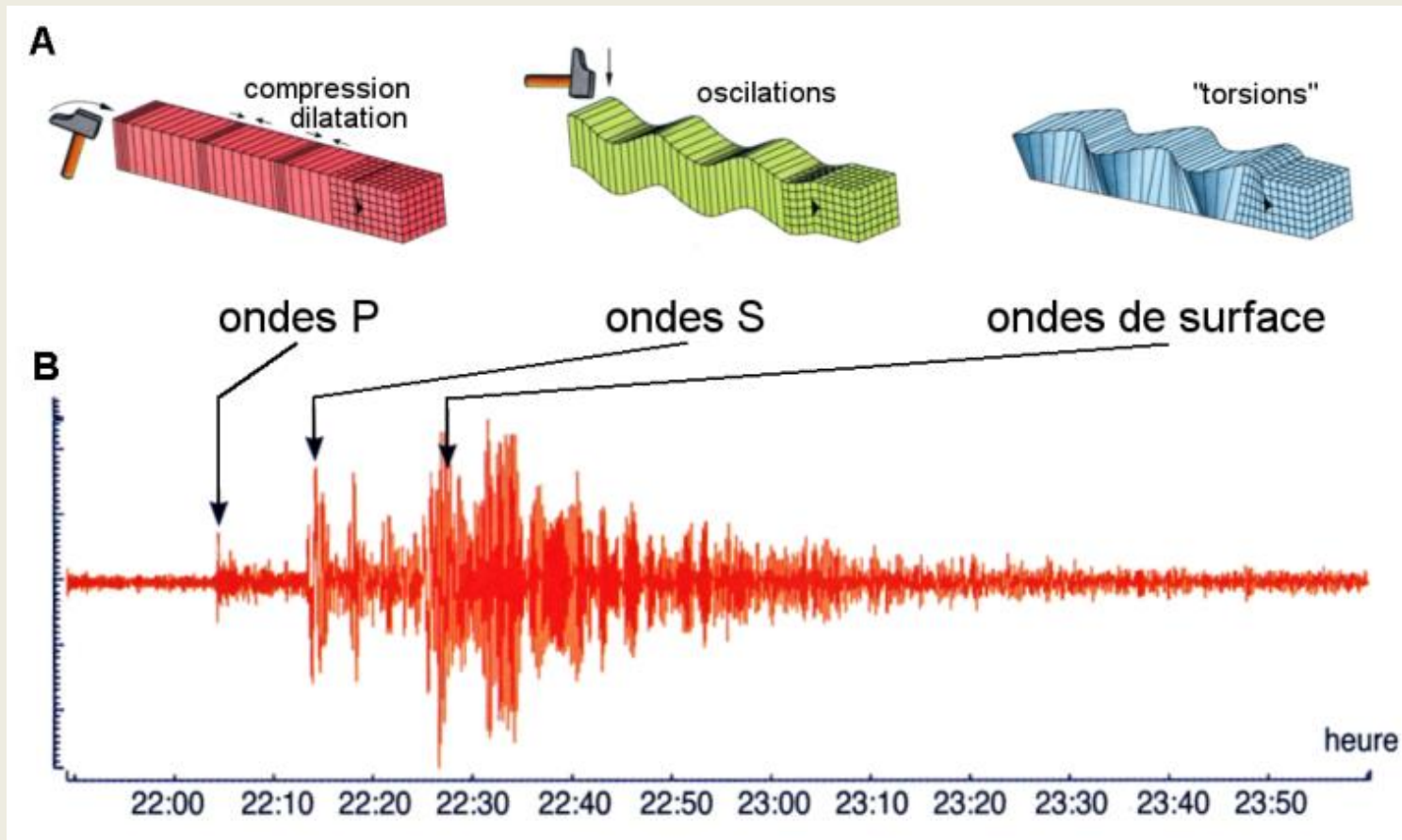
- **Onde P** : onde longitudinale ou onde de pression. Se propage dans les milieux solides ou fluides (ondes sonores)
- **Onde S** : onde transversale de cisaillement (angl. *shear*) à composante verticale. Ne se propage pas à travers les fluides (liquides ou gaz).
- **Onde L** : onde de Love. Onde transversale de cisaillement dans le plan horizontal. Ne se propage pas à travers les liquides ou gaz.
- **Onde R** : onde de Raleigh. Onde comparable à une « vague » de matière.



Ondes P et S : ondes de volume (intérieur de la Terre) ---- Ondes L et R : ondes de surface

Exemple

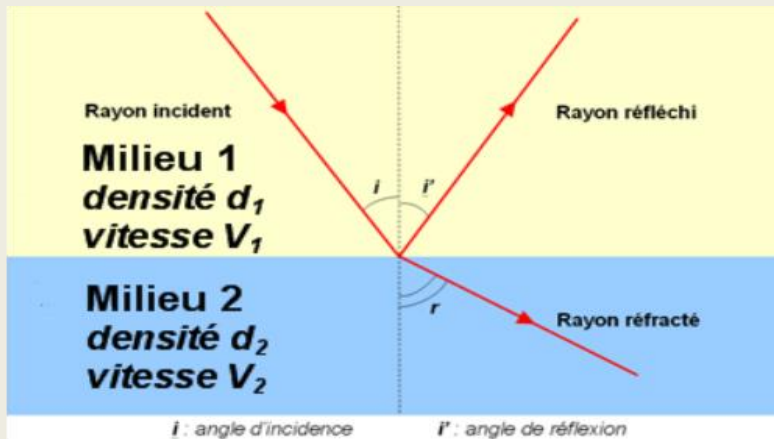
Enregistrement réalisé en Allemagne lors du séisme survenu en Haïti le 12 janvier 2010 à 21 h 53 (heure GMT)



Réflexion - Réfraction

La vitesse de propagation d'une onde (mécanique ou électromagnétique) dépend des propriétés du milieu.

A la surface entre 2 milieux solides différents : **réflexion** et **réfraction**



Lois de Descartes-Snell : $i = i'$

(1637)

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_1}{V_2}$$

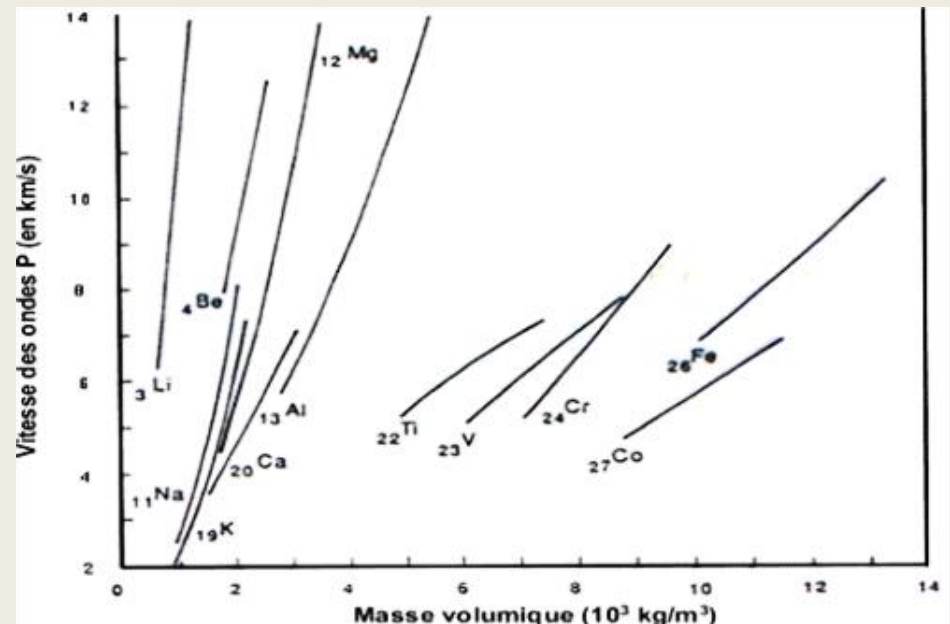
Si $d_2 > d_1 \rightarrow V_2 > V_1$ et **$r > i$**

Loi de Birch (1961) :

(Loi empirique)

La vitesse V_p d'une onde P varie linéairement avec la densité d

$$V_p = a \cdot d + b$$



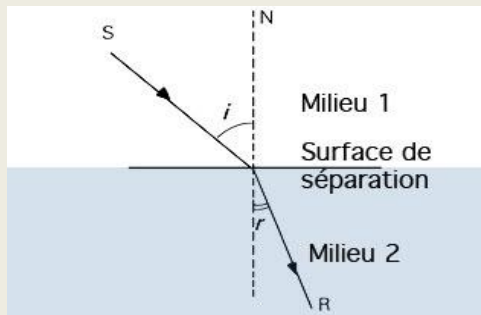
D'autre part, la densité augmente avec la profondeur

→ **la trajectoire est courbe**

On observe :

- entre 0° et 105° : **ondes P et S**
- entre 105° et 143° : **pas d'onde P ou S**
- au-delà de 143° : **uniquement onde P**

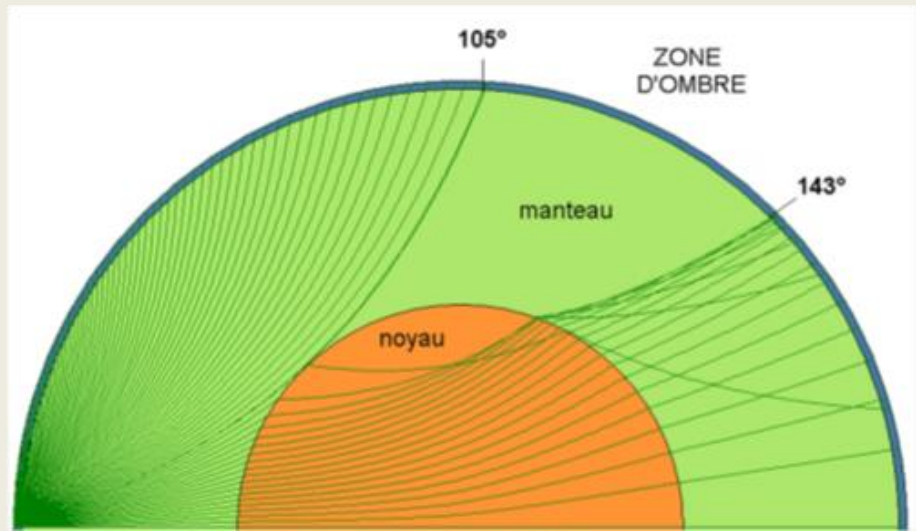
La **zone d'ombre** ne peut s'expliquer que par une **brusque diminution de la vitesse** de propagation de l'onde P en traversant la **surface manteau-noyau**.



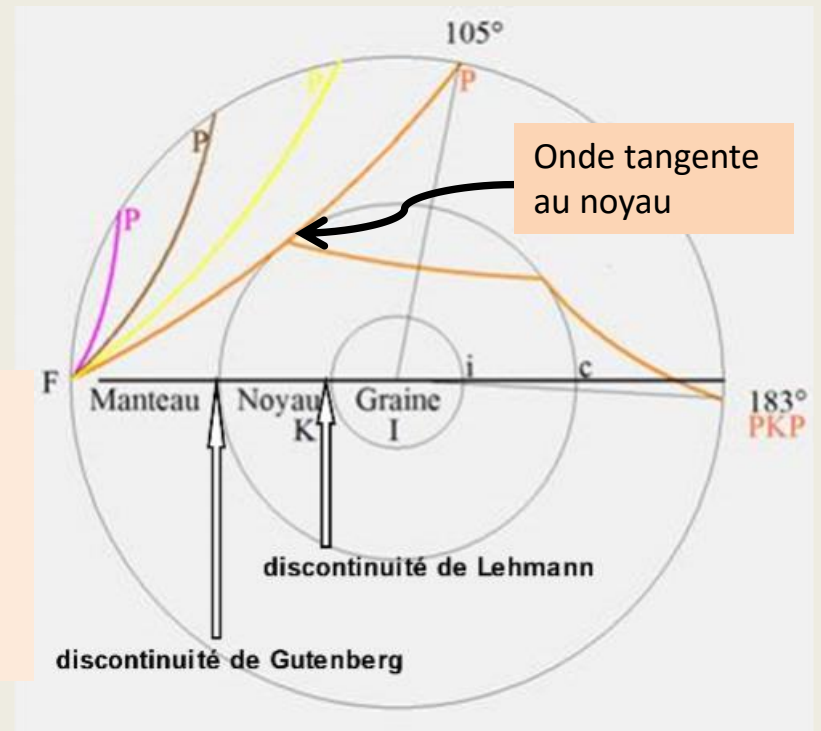
$$r < i$$

↓

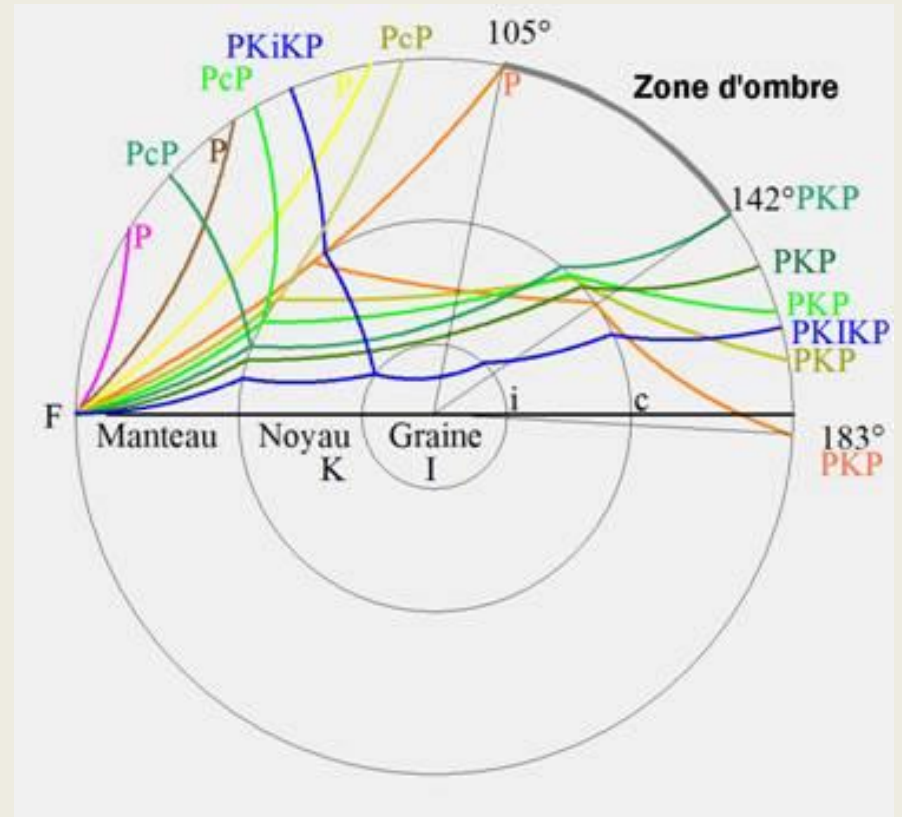
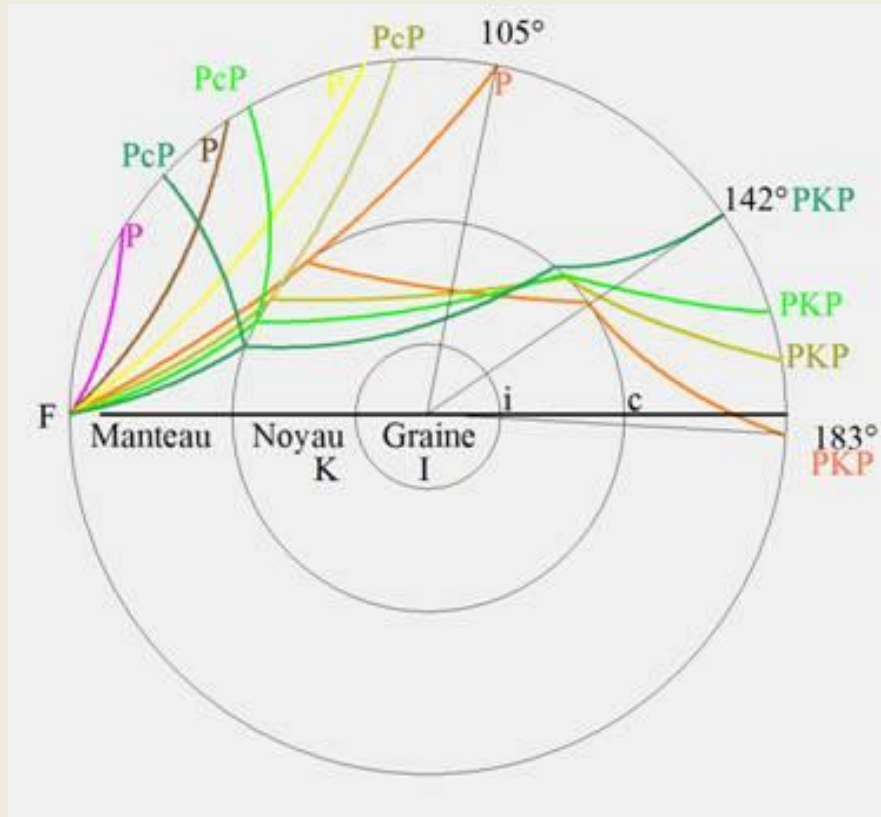
$$V_{\text{noyau}} < V_{\text{manteau}}$$



Onde P et PKP

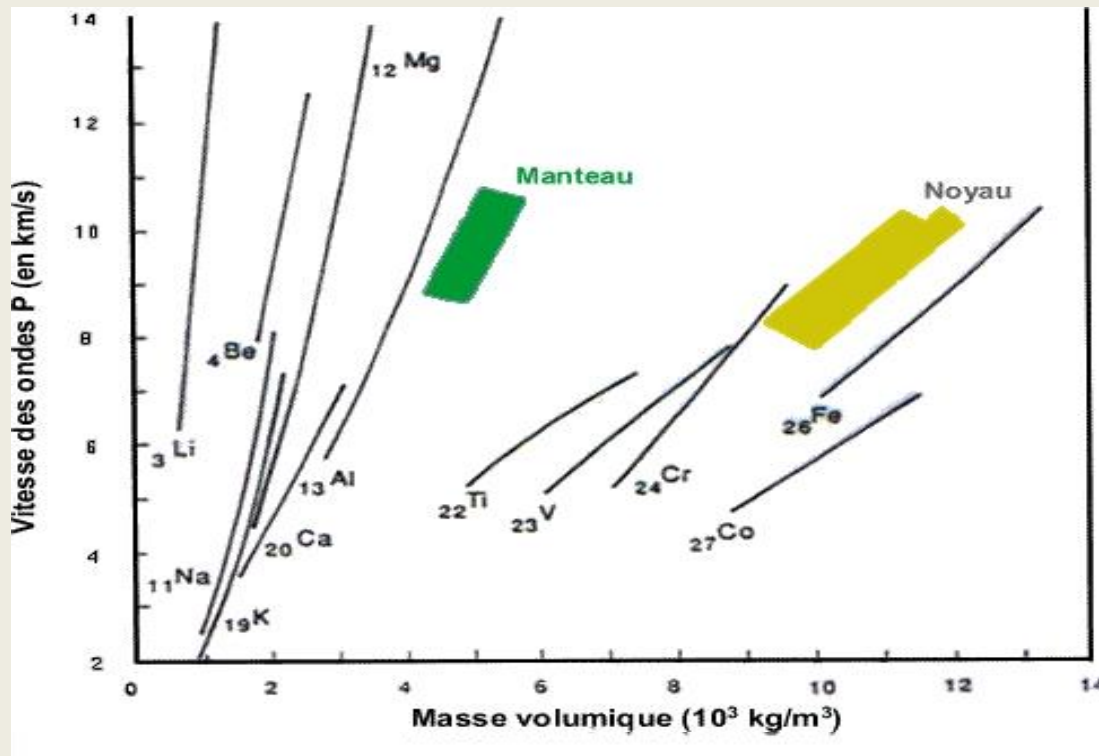


Onde P , PKP, PKIKP , ...



Quelques résultats physiques issus des analyses sismographiques

- 1)- Pas d'onde S à travers le noyau : noyau liquide
- 2)- Dans le manteau : Al, Mg (feldspath, spinelle, grenat, pérovskite).
Dans le noyau : Fe (essentiellement)

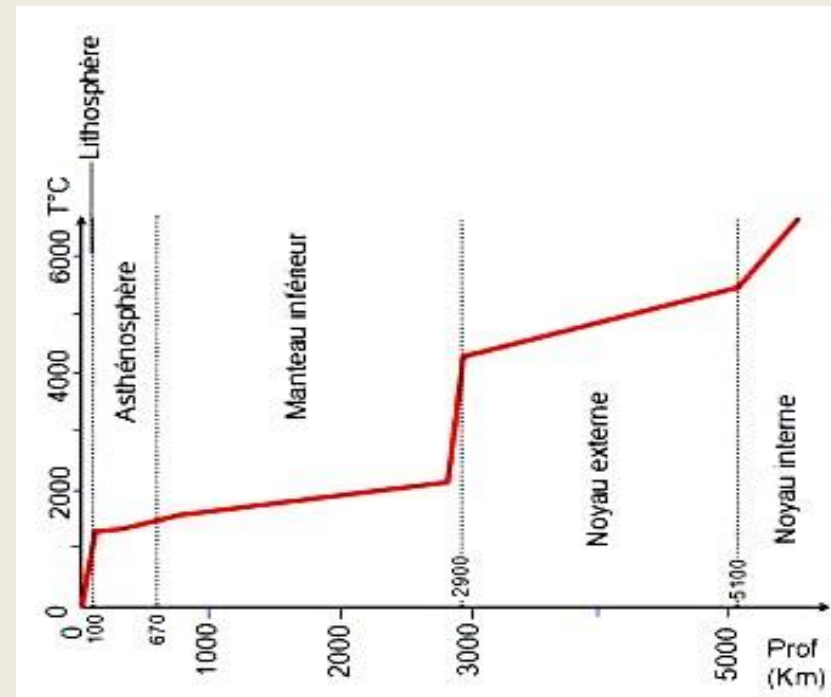
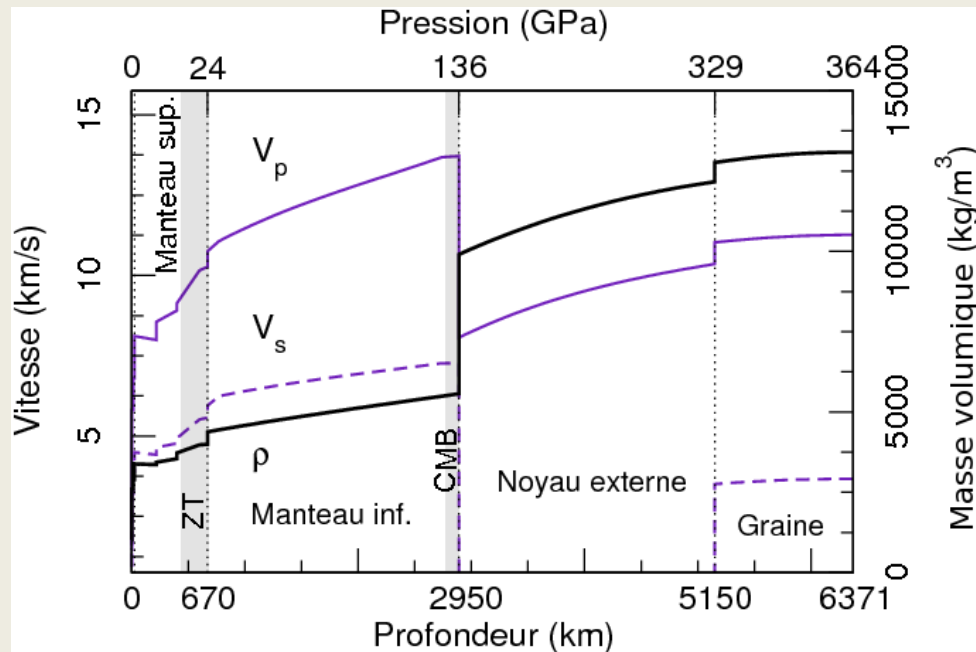


3)- Discontinuités

i) des vitesses

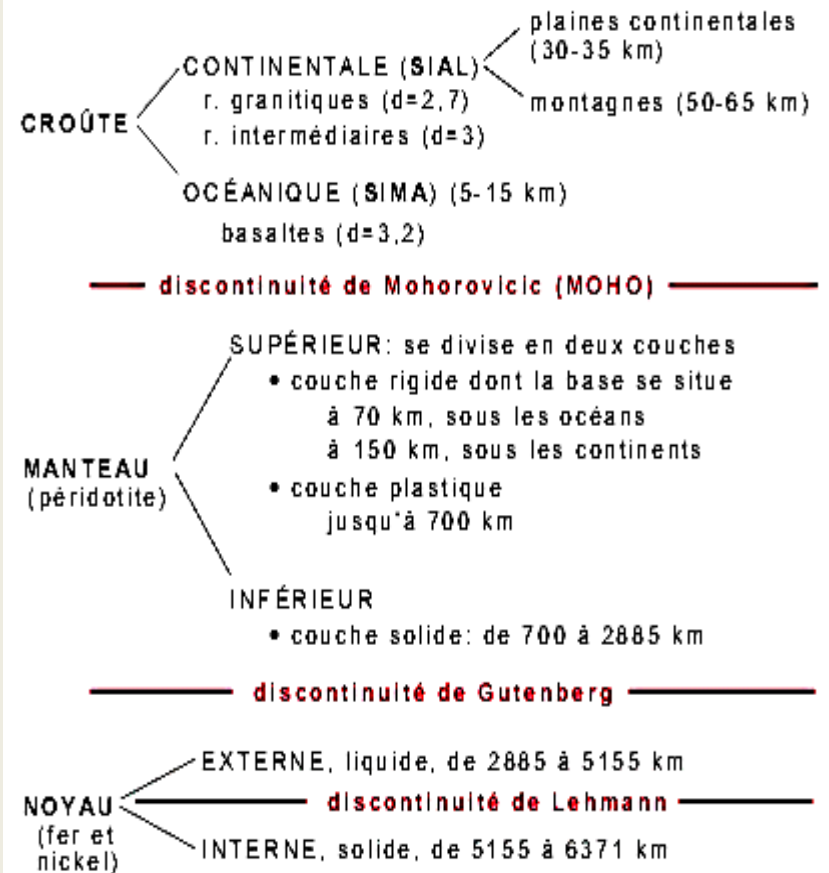
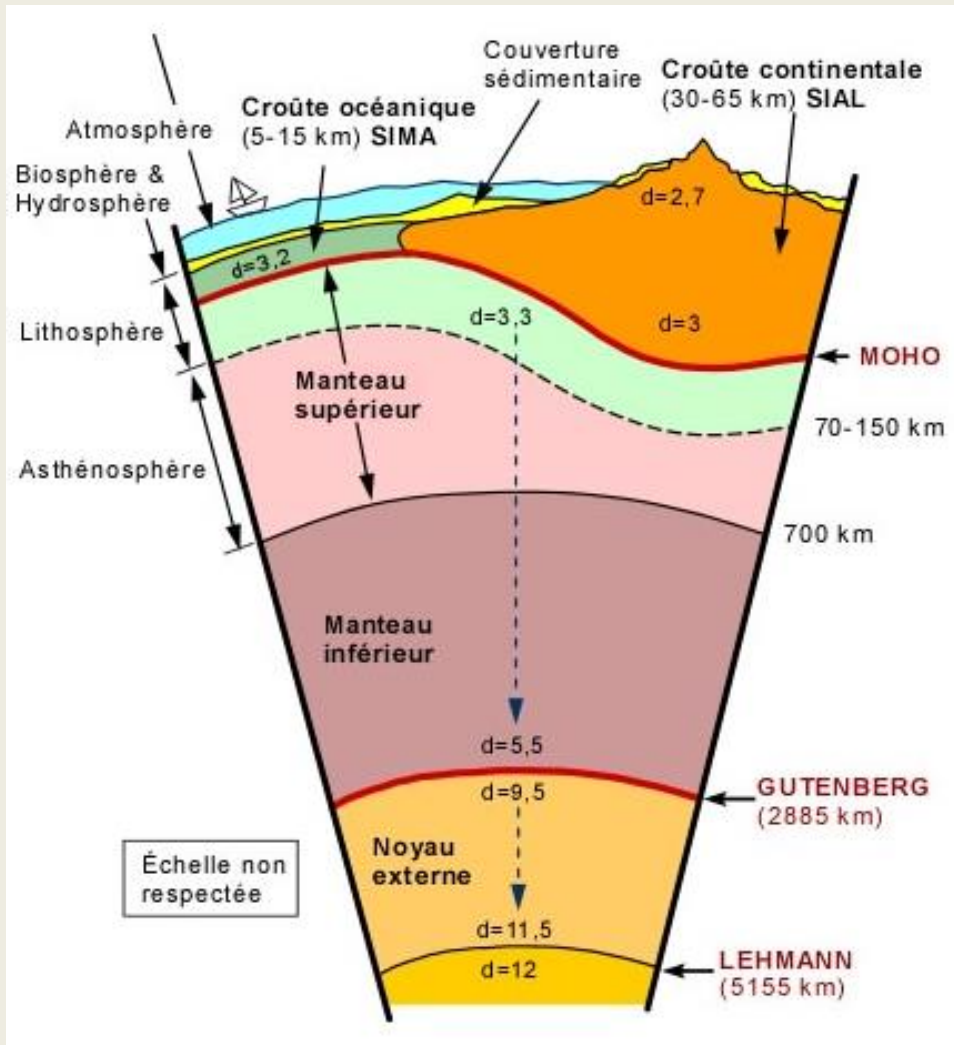
ii) de la densité

iii) de la température



- ➔ manteau supérieur : discontinuités dues à des changements de phase cristallines avec la pression et la température (olivine, pyroxène). **Couche « plastique »** (asthénosphère).
- ➔ manteau inférieur : plus **homogène** et plus **solide** (mésosphère)

Un résumé



Découverte et conséquences de la plasticité de l'asthénosphère

➤ Modèle de la Dérive des Continents

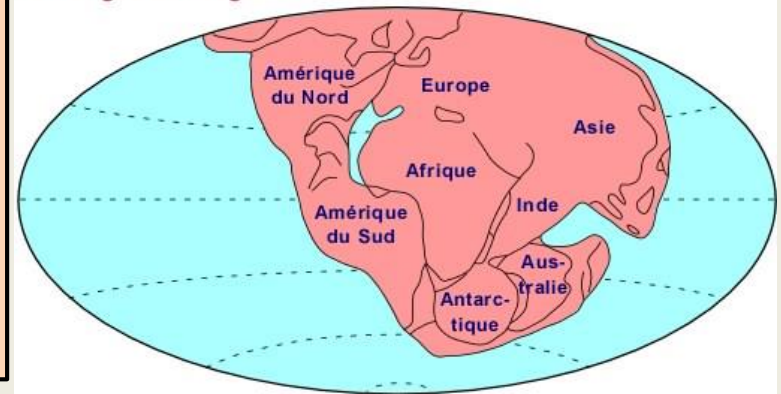
Wegener (1912) : un megacontinent (la Pangée) s'est fractionné le long de failles. Les blocs ont dérivé les uns par rapport aux autres (correspondance des côtes, des structures géologiques, des fossiles, traces d'anciennes glaciations) en flottant sur un milieu mal défini. Mécanisme responsable : la force centrifuge et la précession des équinoxes.



Pb : 1) Comment les continents peuvent-ils dériver alors que la Terre est solide jusqu'à au moins 2900 km de profondeur (conclusions de la sismologie de l'époque) ?

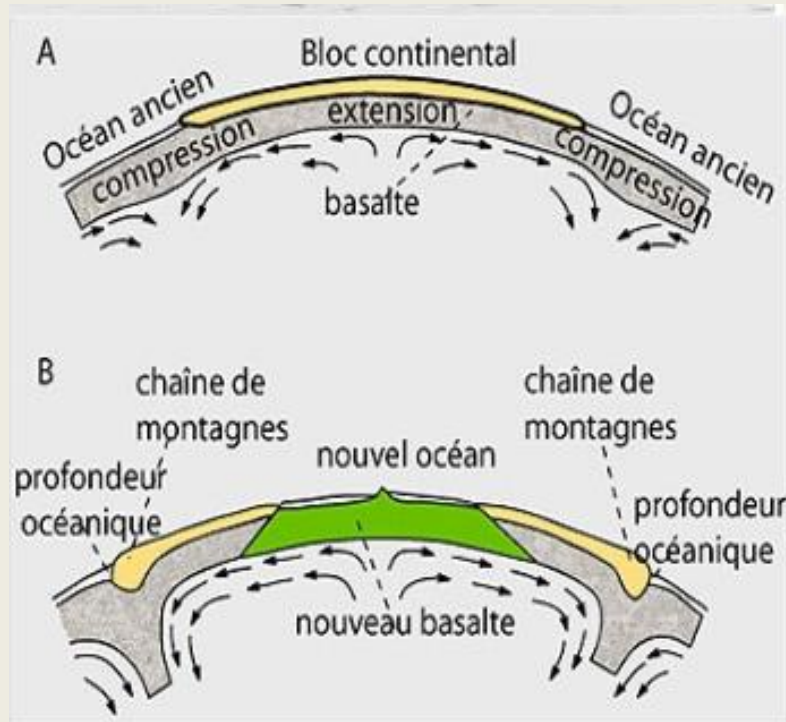
2) La force centrifuge est faible ; de plus, elle aurait du répartir les continents au niveau de l'équateur.

La Pangée de Wegener



Géologues et Physiciens de l'époque ne croyaient pas à ce modèle

- L'évacuation de la chaleur interne de la Terre (produite en particulier par la radioactivité) reste un problème pour beaucoup de physiciens.
- A partir de 1928, Holmes et d'autres proposent **la convection** comme mécanisme. Mais comment justifier la plasticité du manteau ?
- On ne croit pas que la Terre puisse se comporter comme un fluide visqueux. A la fin des années 1950, on ne peut pas décider si les courants de convection dans le manteau existent ou non !



Modèle de convection de Holmes

Parallèlement on découvre la LVZ (Low Velocity Zone), zone de net ralentissement des ondes sismiques entre 100 et 200 km.

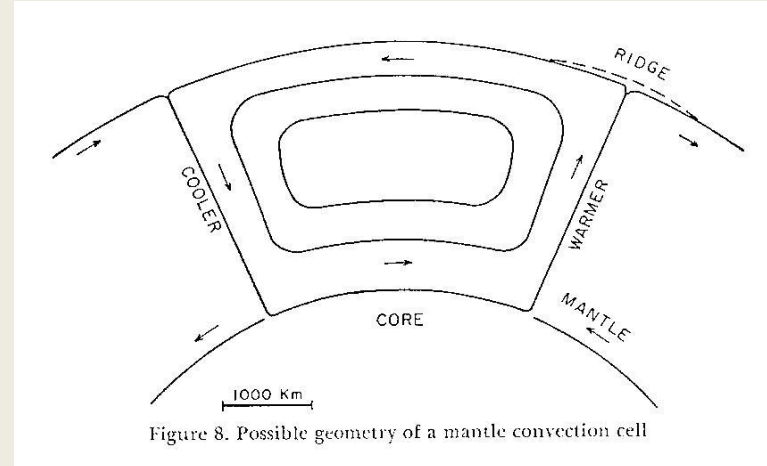
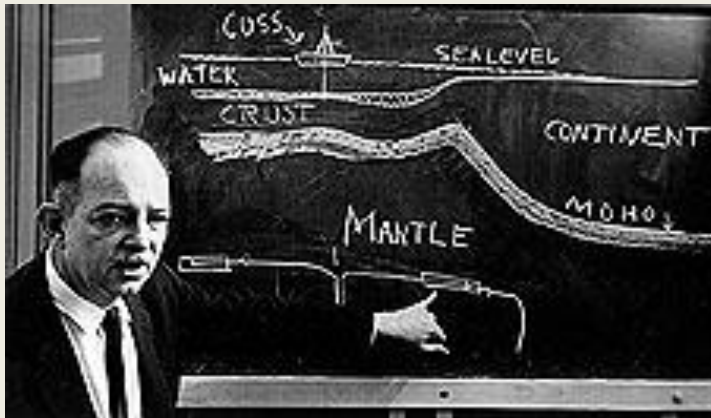
➔ zone plus « molle » ($T \approx 1300^\circ\text{C}$) qui correspond à la limite entre lithosphère et asthénosphère



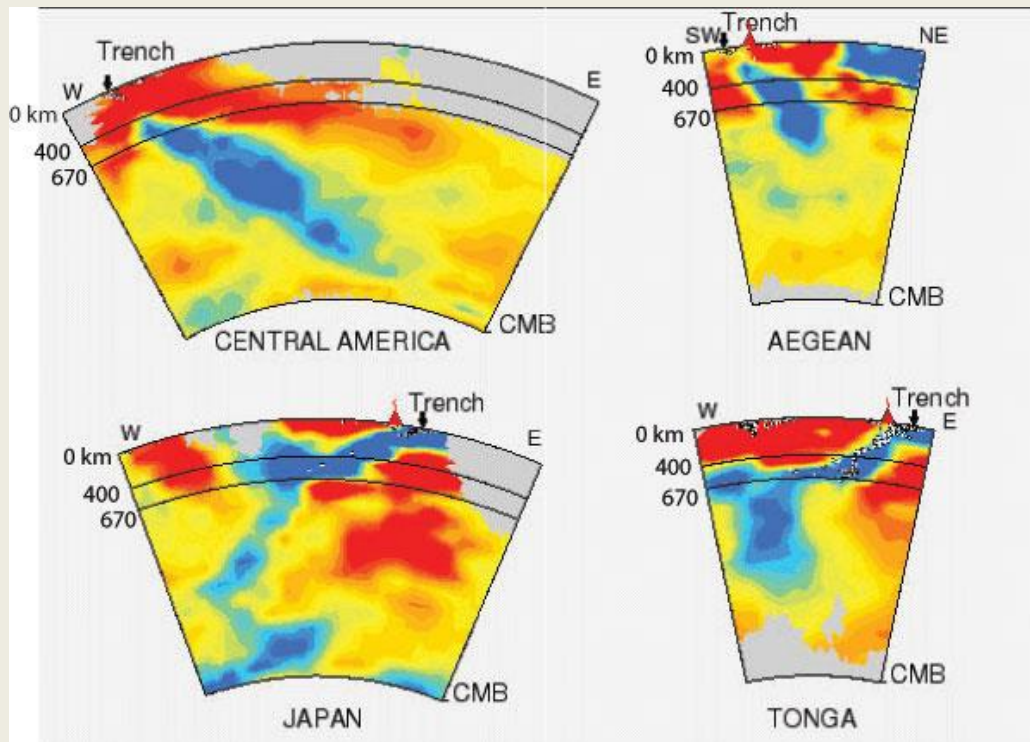
➤ Théorie de la Tectonique des Plaques

- A partir de 1952, on découvre les **fonds océaniques**, les **dorsales médio-océaniques**, les **fosses océaniques** (zone de grande sismicité).
- La croûte océanique, de faible épaisseur (5-10 km), est composée de roches basaltiques (entièrement différentes de la croûte continentale).
- Selon Hess (1962), les dorsales sont la manifestation en surface des branches ascendantes de cellules de convection et les fosses océaniques sont les témoins des branches descendantes.

On est obligé d'accepter une forme de convection thermique.



La tectonique des plaques s'impose enfin en 1967-68

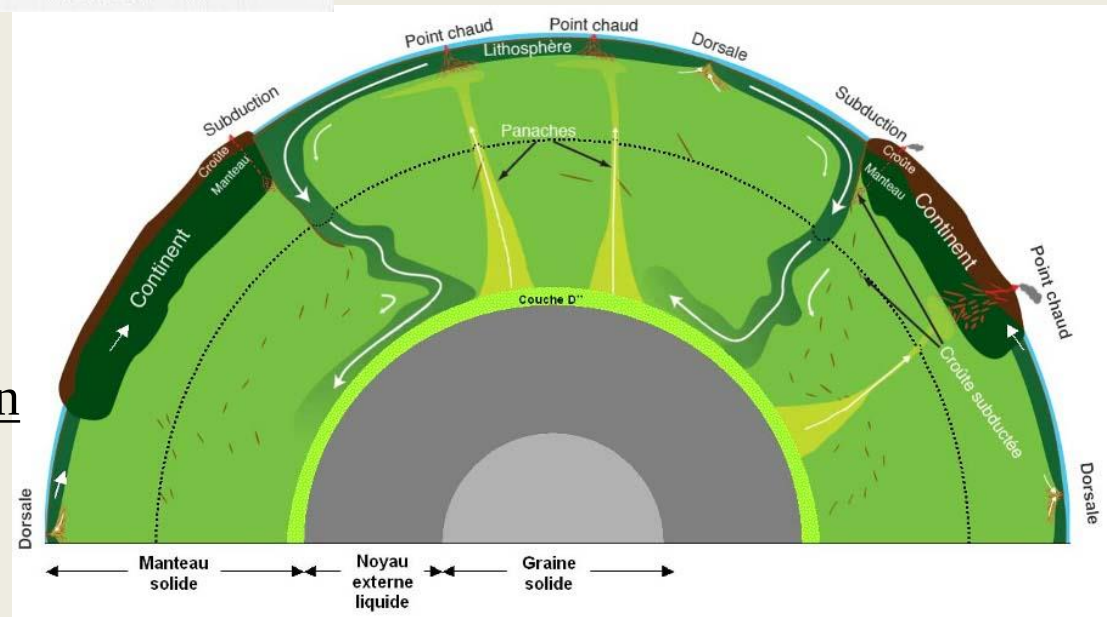


Tomographie sismique

Mise en évidence de la subduction des plaques océaniques qui **traversent le manteau inférieur**

CMB : Core Mantle Boundary
 Bleu : vitesse rapide (plus froid)
 Rouge : vitesse lente (plus chaud)

Vision moderne de la subduction



Description physique de la convection

Dans un système chauffé par le bas et refroidi par le haut, le **transfert de chaleur** peut se faire selon 2 mécanismes : la **conduction** ou la **convection**. Comment passe-t-on d'un mécanisme à l'autre ?

Lord Rayleigh (1916) a montré que cela dépend :

- i) **de la poussée d'Archimède** (le « bas » moins dense (plus chaud) va tendre à monter)
- ii) **de la résistance à l'ascension** (la « rigidité » du milieu tend à s'y opposer : diffusion de la chaleur et frottement visqueux)

6 paramètres entrent en jeu : g (accélération de la pesanteur), ΔT (écart de température), α (coefficient de dilatation thermique), h (hauteur du système), κ (diffusivité thermique) et ν (viscosité cinématique).

Rayleigh a montré que le mécanisme observé dépend de la valeur d'un nombre **Ra** (nombre de Rayleigh) :

$$Ra = \frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot g \cdot h^3}{\kappa \cdot \nu}$$

Si $Ra < 1000$: mécanisme de **conduction**

Si $Ra > 1000$: mécanisme de **convection**

Application au manteau

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$; $h = 2,9 \cdot 10^6 \text{ m}$ (épaisseur du manteau)
 $\alpha \approx 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ et $\kappa \approx 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (valeurs mesurées en laboratoire pour la péridotite)

ΔT : environ 3200°C - $\approx 1300^\circ\text{C}$ vers 150 km (limite lithosphère - asthénosphère)
- $\approx 4500^\circ\text{C}$ vers 2900 km (limite manteau - noyau)

Mais comment estimer ν (viscosité du manteau) ?



Principe d'isostasie

Une chaîne de montagne, qui "flotte" sur l'asthénosphère ductile, s'enfonce dans celle-ci (épaississement de la lithosphère). Elle remonte ensuite (poussée d'Archimède) lorsqu'elle est allégée par l'érosion, comme un bateau qu'on décharge

Le Canada et la Scandinavie étaient recouverts de 3000 m de glace il y a 20000 ans. La fonte de la glace depuis plus de 10000 ans entraîne la remontée de la Scandinavie vers un nouvel équilibre avec une vitesse de $\approx 1 \text{ cm/an}$.

Avec un modèle mécanique simple, on peut estimer ν : $\nu \approx 10^{17} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.



Calcul du Nombre de Rayleigh : $Ra \approx 500$ millions !!!

Conclusion :

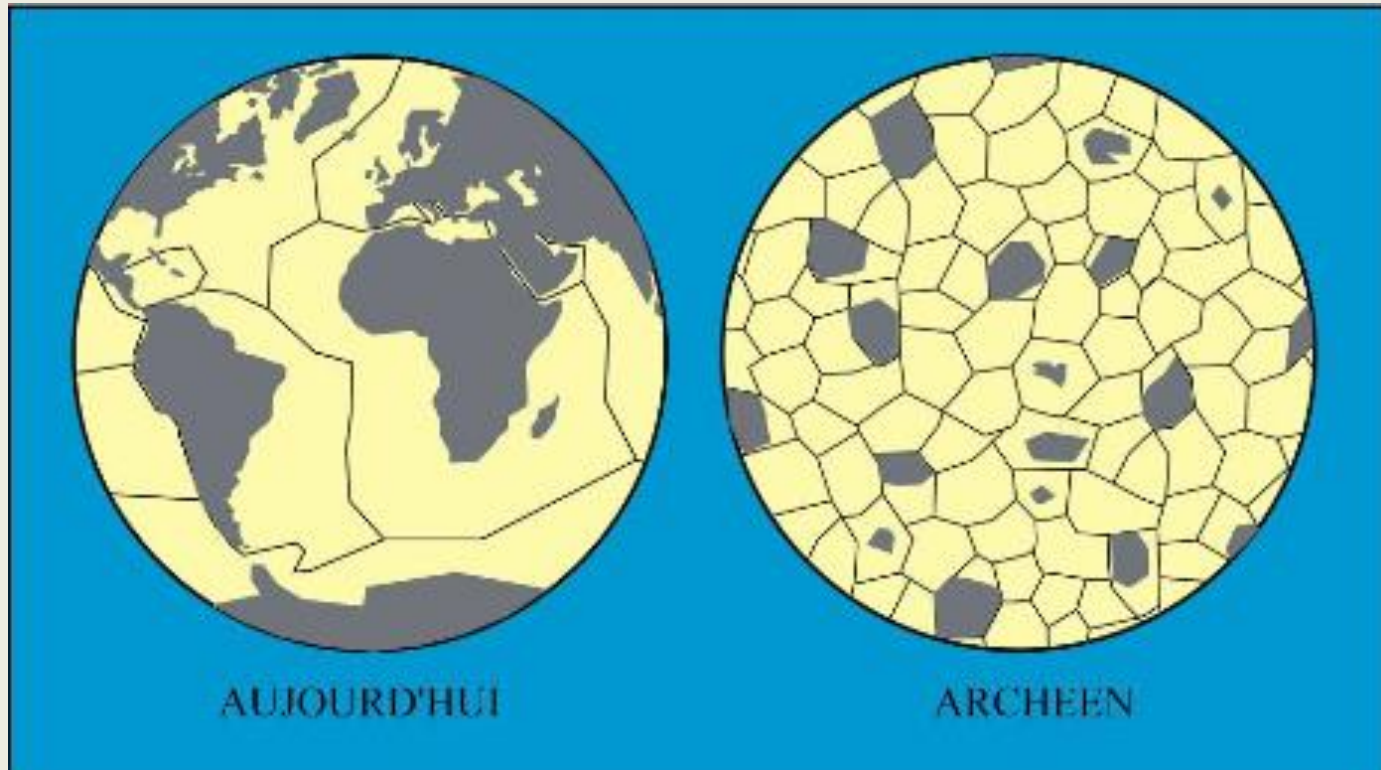
**Bien que constitué de roches « solides », le manteau convecte...
... probablement jusqu'au noyau !**

« Préhistoire » possible de la tectonique ...

A l'Archéen (≈ 4 Ga) la tectonique des plaques devait déjà fonctionner. La production interne de chaleur était alors plus importante.

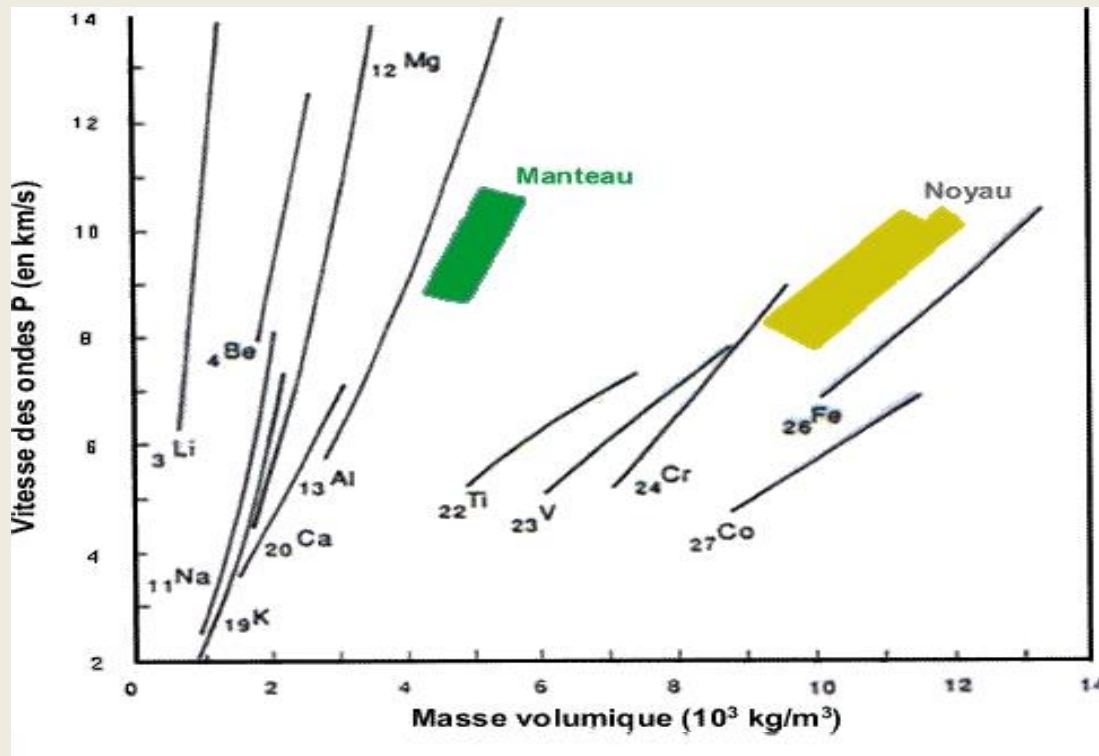
Pour évacuer efficacement la chaleur, la longueur totale des dorsales devait être bien plus grande qu'aujourd'hui.

→ existence probable d'une mosaïque de plaques beaucoup **plus petites et plus rapides**.



Quelques résultats physiques issus des analyses sismographiques

- 1)- Pas d'onde S à travers le noyau : noyau liquide
- 2)- Dans le manteau : Al, Mg (feldspath, spinelle, grenat, pérovskite).
Dans le noyau : Fe (essentiellement)



Conséquences de la présence d'un noyau de fer liquide

➤ Création du champ magnétique terrestre

Quelques noms :

William Gilbert (1544-1603) : La Terre est un aimant géant qui oriente la boussole dans la direction N-S

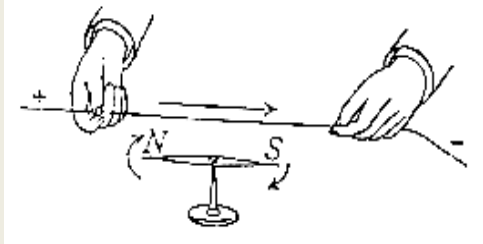
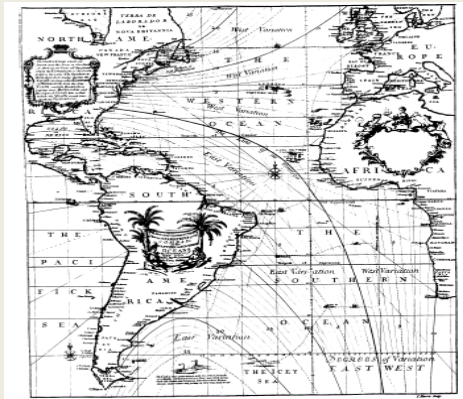
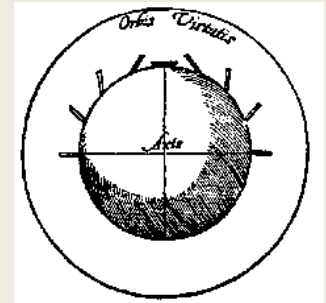
Edmond Halley (1692): à l'origine de la première carte magnétique de l'océan atlantique

Charles Coulomb (1777) : La force magnétique varie comme l'inverse du carré de la distance ($1/r^2$)

Oertsted (1820) : le passage d'un courant dans un conducteur fait dévier l'aiguille d'une boussole

Ampère (1820) : un courant électrique produit un champ magnétique qui agit sur une boussole

Gauss (1830) : premier appareil pour mesurer l'intensité du champ magnétique terrestre



Pour l'apparition d'un champ magnétique planétaire il faut :

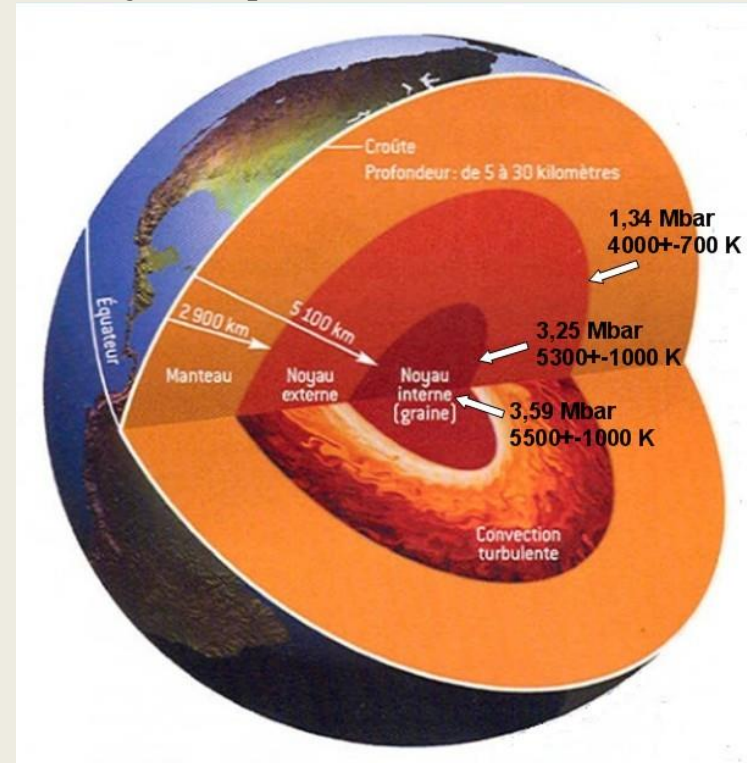
a) un grand volume de fluide conducteur de l'électricité : Noyau liquide de 2900 à 5100 km sous nos pieds constitué à 80% de Fer conducteur.

b) une source d'énergie qui met le fluide en mouvement :

- différence de température et de pression (4000 K, 1,34 Mbar ; 5300 K, 3,25 Mbar) est une source de mouvement. Le Fer liquide est plus chaud (donc moins dense) près de la graine solide

- refroidissement très lent du noyau externe donc libération d'énergie (température) par cristallisation du Fer sur la graine qui grossit.

Cet océan de Fer liquide (qui a la viscosité de l'eau $\nu \approx 10^{-6}$) est animé de mouvements turbulents de convection. Exemple : casserole d'eau chauffée.



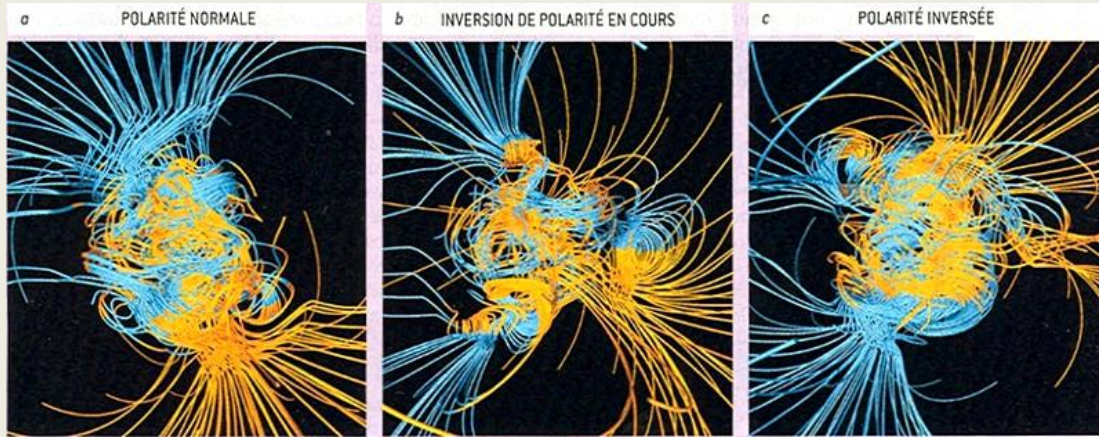
La Dynamique des Fluides fait intervenir le **nombre de Reynolds** (Re) qui décrit si le fluide est **laminaire** ($Re < 3000$) ou **turbulent** ($Re > 3000$).

Ici $Re = VL/\nu = 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^6 / 10^{-6} = \mathbf{2 \cdot 10^8}$ donc : **MOUVEMENT TURBULENT**

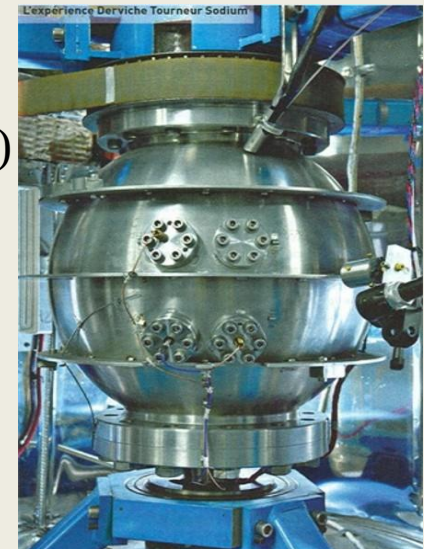
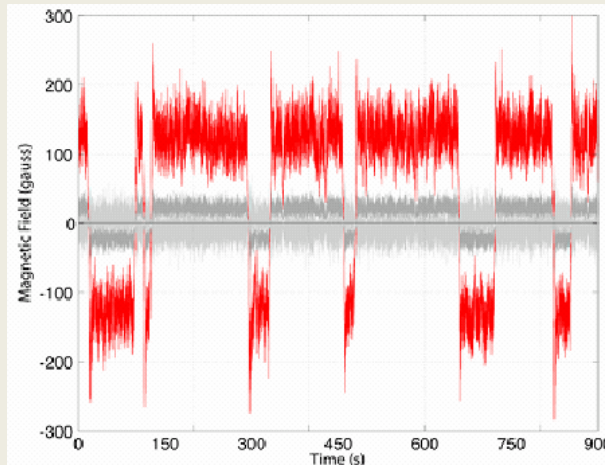
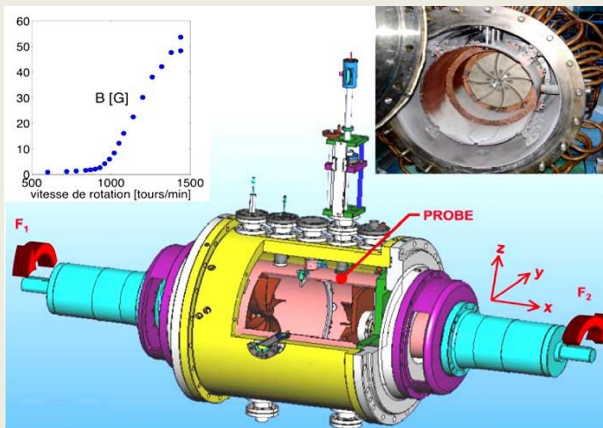
c) rotation de la Terre sur elle-même. La rotation, par la force de Coriolis ($\vec{F}_c = 2\mathbf{m}\vec{\omega} \wedge \vec{v}$), dévie les mouvements ascendants du fluide et leur impose une trajectoire hélicoïdale (courants marins ou les tempêtes tropicales...).

- Expérimentation numérique

Simulation (un an de calcul sur un Cray),
réalisée par Glatzmaier et Robert (2010):
la polarité s'inverse en 9000 ans (ce qui
est compatible avec les observations).



- Expérimentation en laboratoire (Galium ou Sodium liquide)



« Derviche » Grenoble, UJF
Philippe Cardin *et al.*

➤ Enregistrement magnétique de l'histoire terrestre

1) Dans les laves et sédiments

Des grains fins magnétiques (magnétite, ilménite, greigite, chromite...) peuvent conserver la **mémoire de la direction, du sens et de l'intensité** du champ magnétique $\vec{B}$ qui existait à une époque passée (paléomagnétisme). On les trouve fréquemment dans les laves et les sédiments.

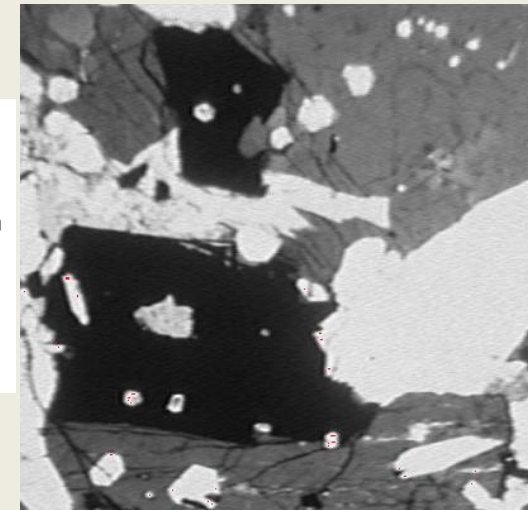
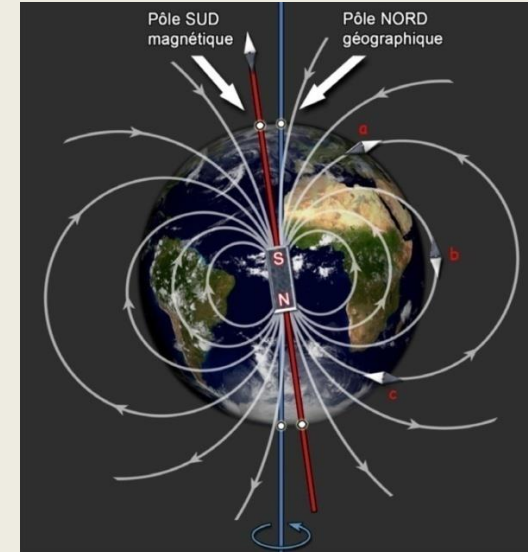
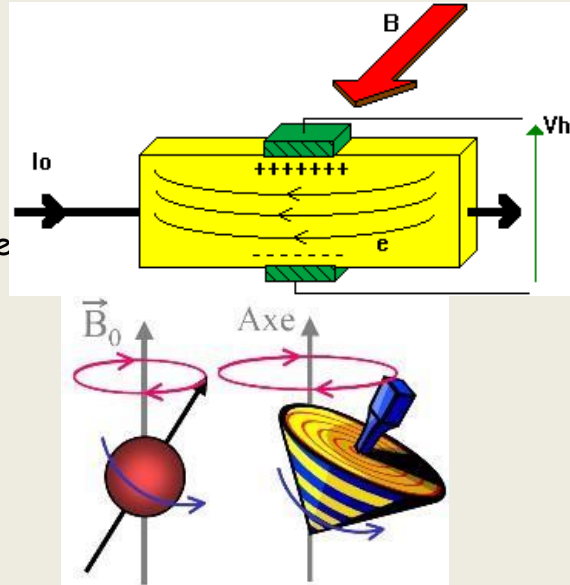
Il faut mesurer soigneusement l'aimantation des grains (par rapport au repère terrestre) et dater l'échantillon :

a) Mesure de l'aimantation :

- sonde à effet Hall
- magnétomètre à proton
- SQUID (Superconducting Interference Device)

b) Age de l'échantillon :

- datation avec les isotopes radioactifs



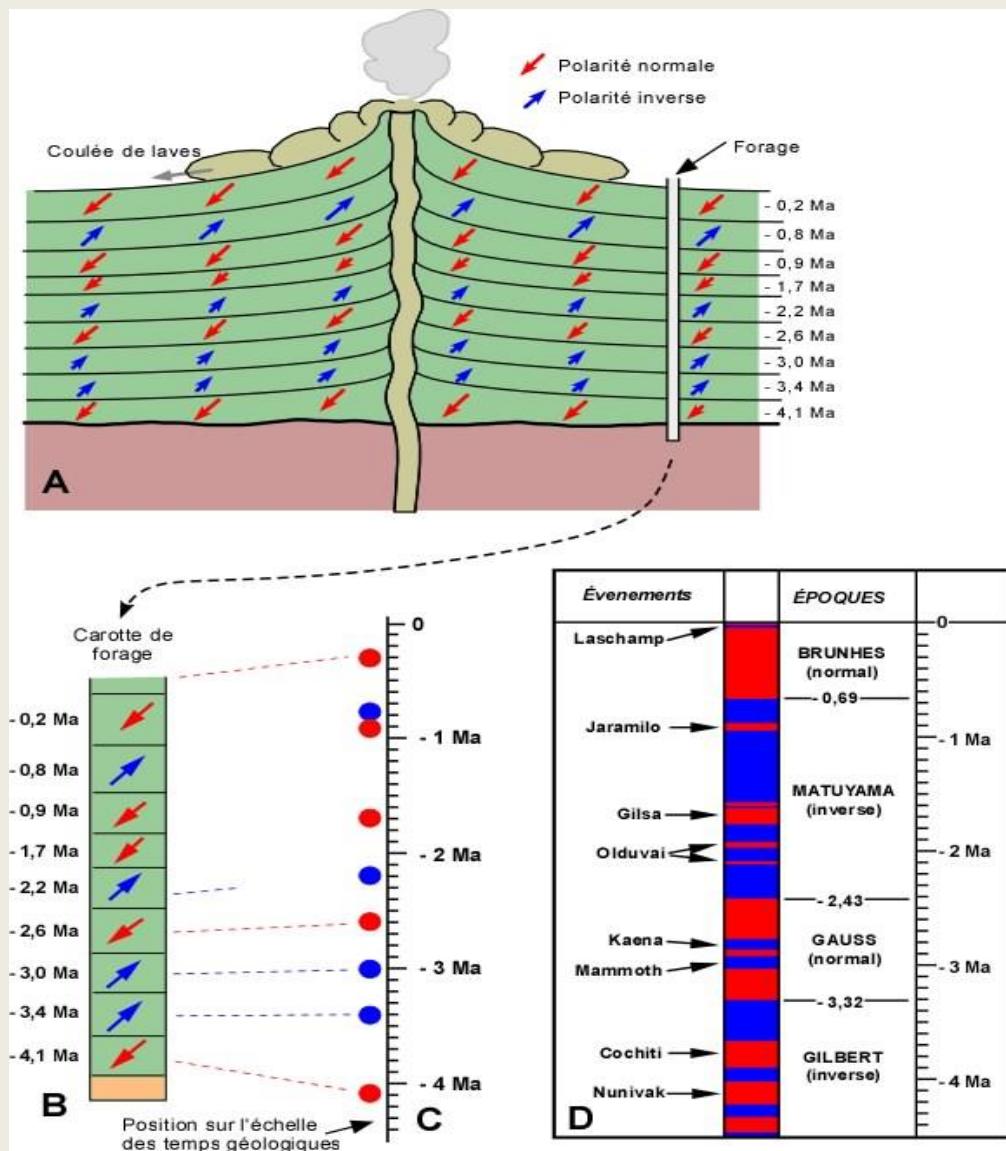
Grains de magnétite dans un gabbro (+ amphibole et feldspath)

Brunhes (1906) : des échantillons de laves présentent une aimantation inversée relativement à d'autres.

Matuyama (1929) confirme cette observation et date des échantillons de laves.

Mise en évidence de nombreuses inversions qu'il attribue à des inversions du champ magnétique terrestre. Cette découverte tomba dans l'oubli pendant plus de 50 ans.

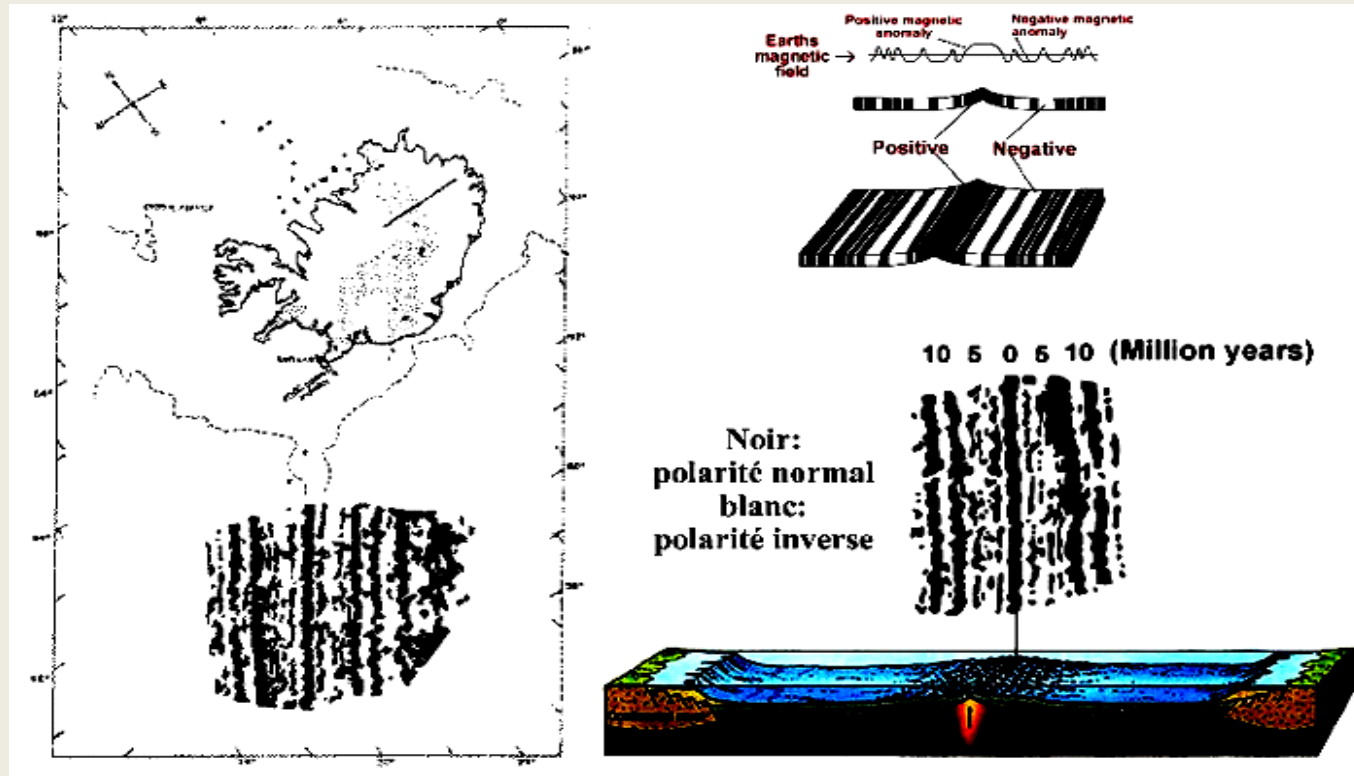
La dernière inversion s'est produite il y a environ 700000 ans. La durée d'une inversion semble assez courte de 1000 à 10000 ans. **A quand la prochaine ?**



Excursion de Laschamp (41000 ans) : inversion ratée

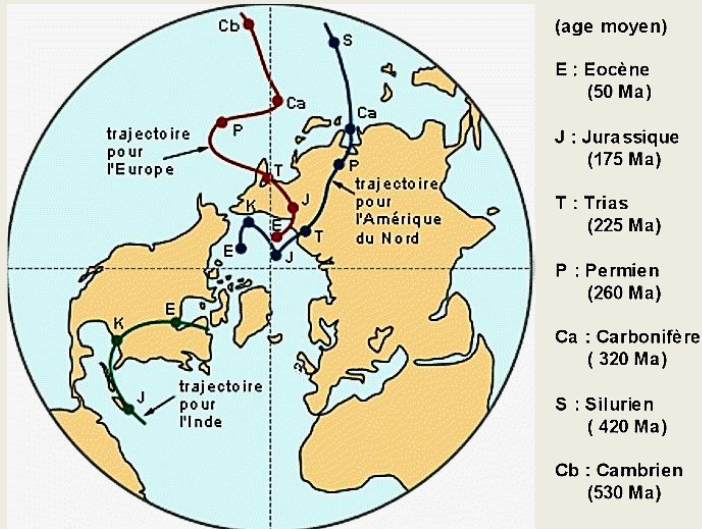
2) Dans le plancher océanique

Enregistrement du **profil magnétique** (magnétomètre à proton) dans une direction perpendiculaire à une dorsale : **→** succession **d'inversions magnétiques** symétriques par rapport à la dorsale.



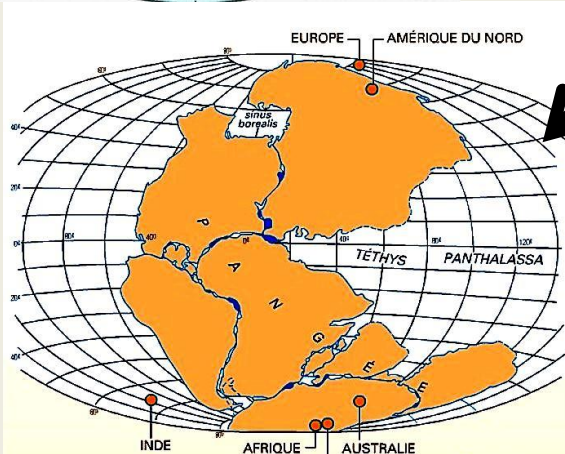
L'alternance des polarités est semblable à celle observée sur les échantillons des carottes de laves qui ont été datés. C'est ainsi qu'on a pu mesurer la vitesse d'expansion des planchers océaniques qui varie selon les dorsales entre **1 et 4,5 cm/an**.

Variation de la position du pôle magnétique depuis environ 500 Ma mesuré depuis les continents européen, nord-américain et indien



Les trajectoires sont différentes. Il ne peut y avoir 3 pôles magnétiques à la même période ! Il a fallu se rendre à l'évidence :
- les continents se sont **déplacés** pour leur propre compte,
- en ajustant la position des pôles aux différentes époques géologiques, on peut ainsi **reconstituer la position relative des continents dans le passé.**

Reconstitution de Pangée à la fin du Carbonifère ; les pôles sont dans la position attendue proche de l'axe de rotation.



Ces résultats, obtenus à partir des années 1950, ont conforté l'idée de Wegener de la dérive des continents, puis donné une assise solide vers 1968 à la théorie naissante de la **tectonique des plaques.**

CONCLUSION :
CONFIRMATION DE LA THEORIE DE LA TECTONIQUE DES PLAQUES

COMMENT « VOIR » SOUS LA SURFACE ?

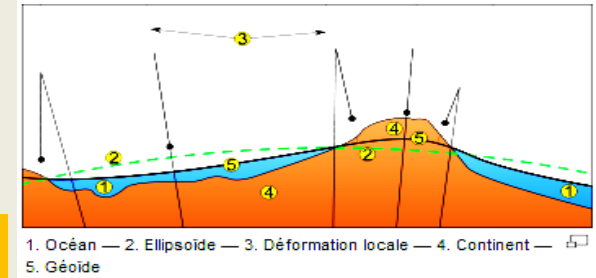
II- MESURES GRAVIMETRIQUES DE PRECISION

La détermination très précise du géoïde permet de remonter à :

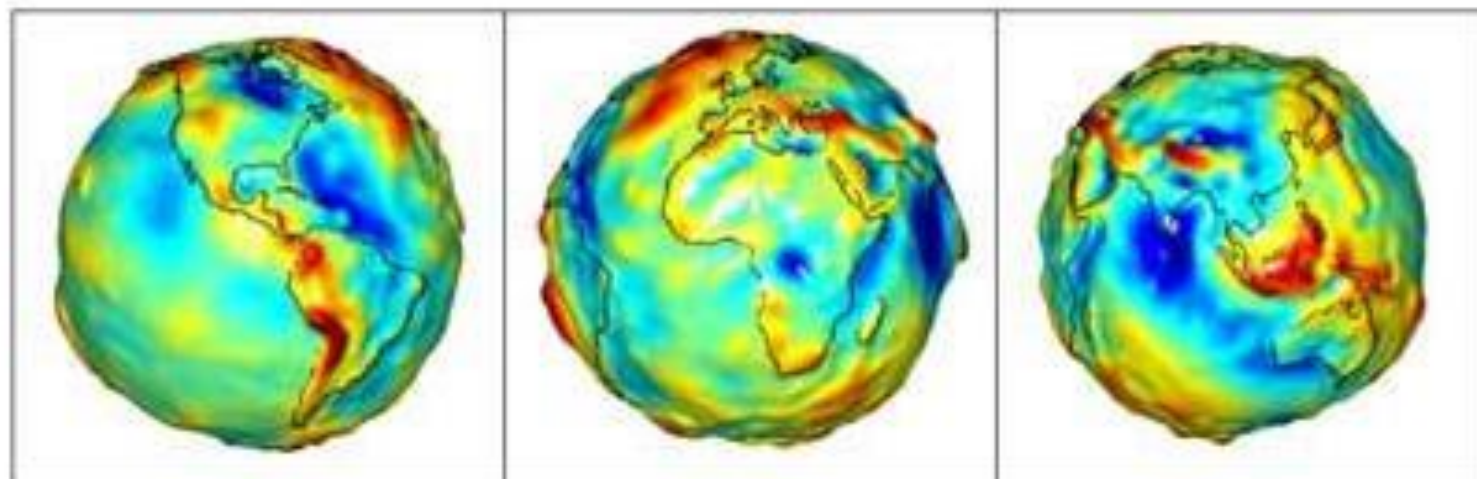
- la structure interne du globe
- aux reliefs sous-marins
- aux courants océaniques

Par quels moyens ? : mesure de la gravitation

- Depuis l'espace : satellite GOCE (2009-2013)
 - orbite polaire proche de la Terre (268 km)
 - 3 paires d'accéléromètres de haute précision
➡ la variation d'accélération du satellite permet de mesurer la variation du champ de gravité g
sensibilité atteinte : jusqu'à $\approx 10^{-12} \text{ ms}^{-2}$
(g sur Terre $\approx 10 \text{ ms}^{-2}$ sous-unités : $\text{mgal} = 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$)
 - permet la détermination du géoïde à 2 cm près !
- Au sol :
 - gravimètre absolu
 - gravimètre à supraconducteur (sensibilité 1 micro gal env.)
 - autres (gravimètres à ressort ...)

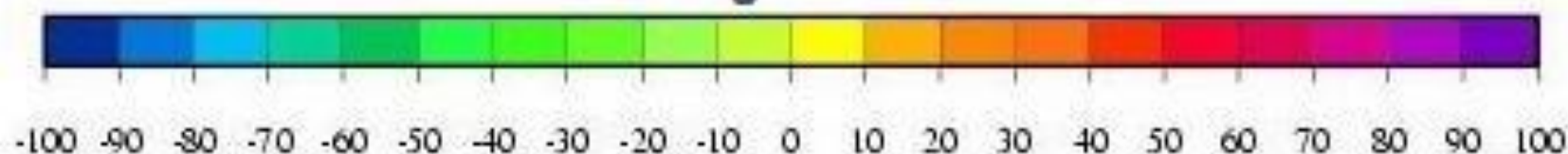


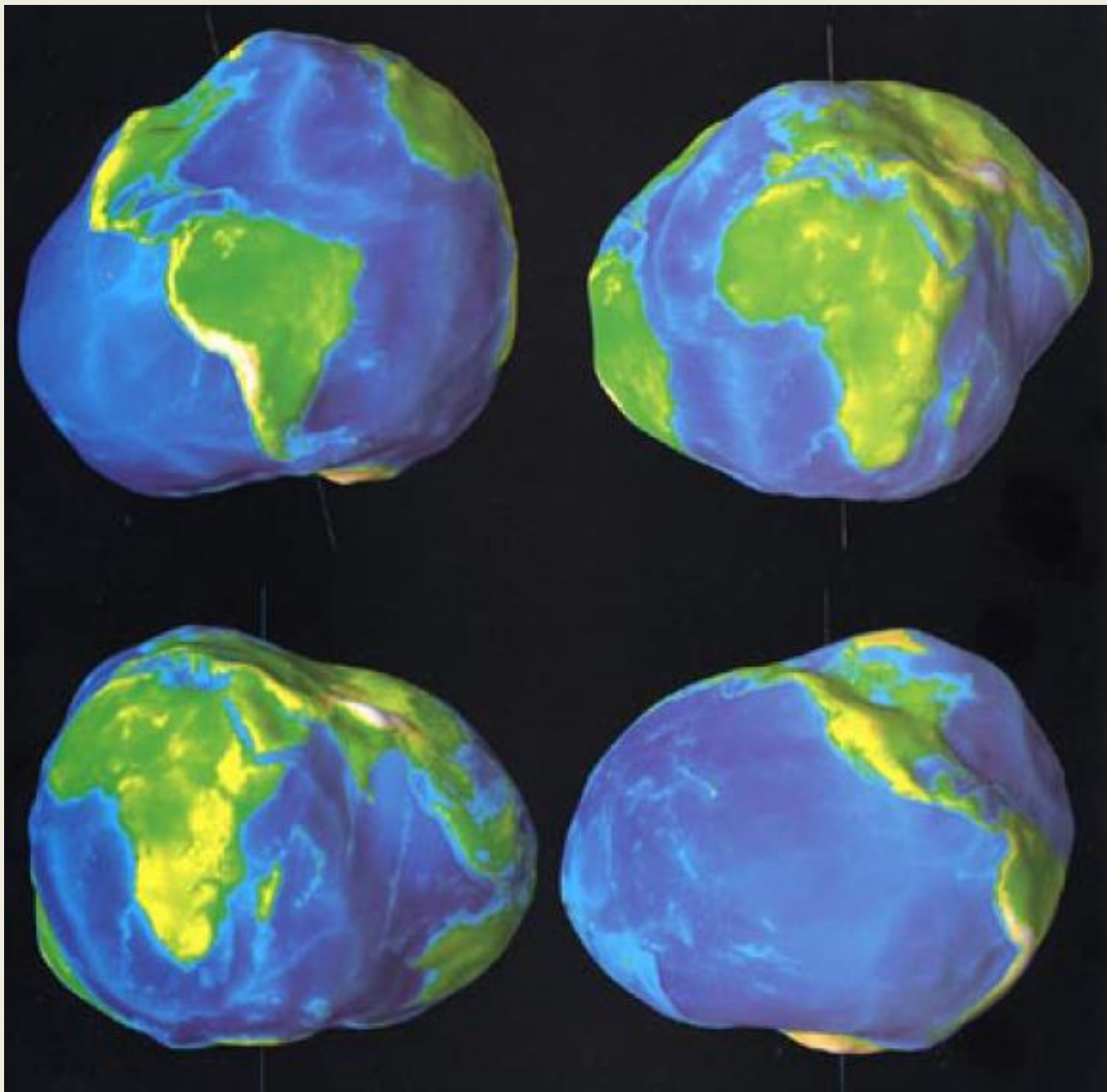
REPRÉSENTATION DU GÉOÏDE TERRESTRE



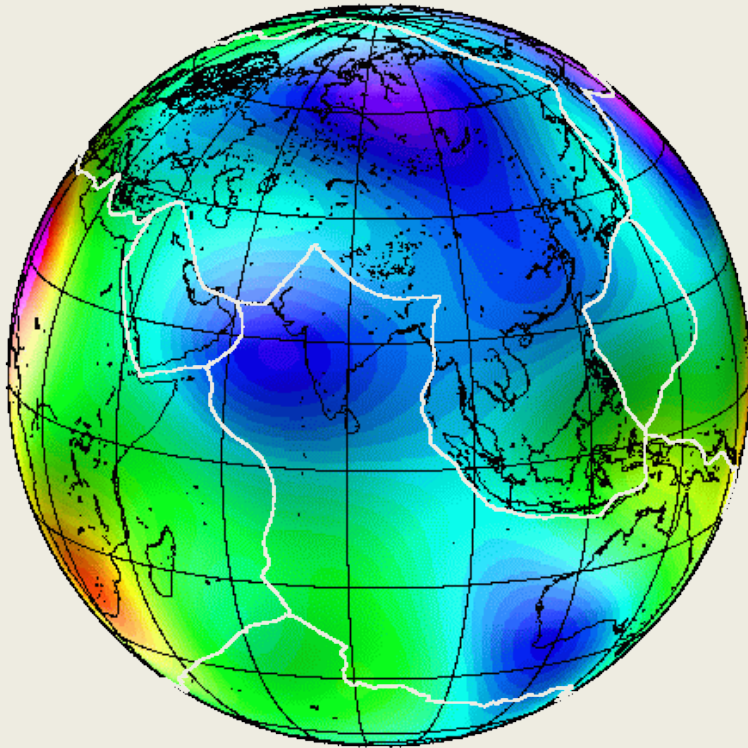
Représentation du géoïde terrestre issue du modèle GGM01
(l'échelle des couleurs s'étend de -70 mgal en bleu foncé, à +70 mgal en rouge foncé)

Hauteurs de géoïde en mètres

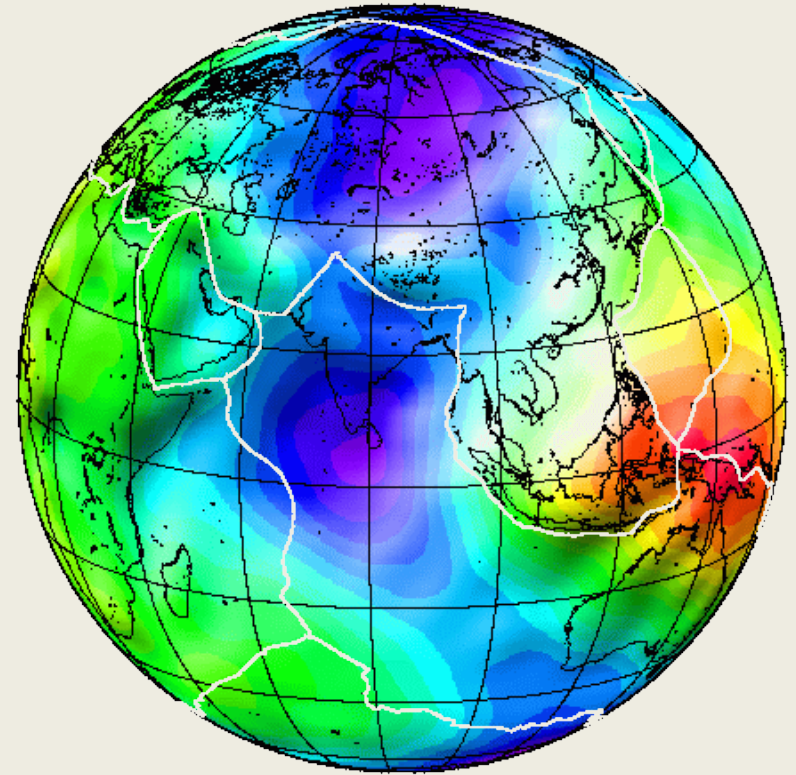




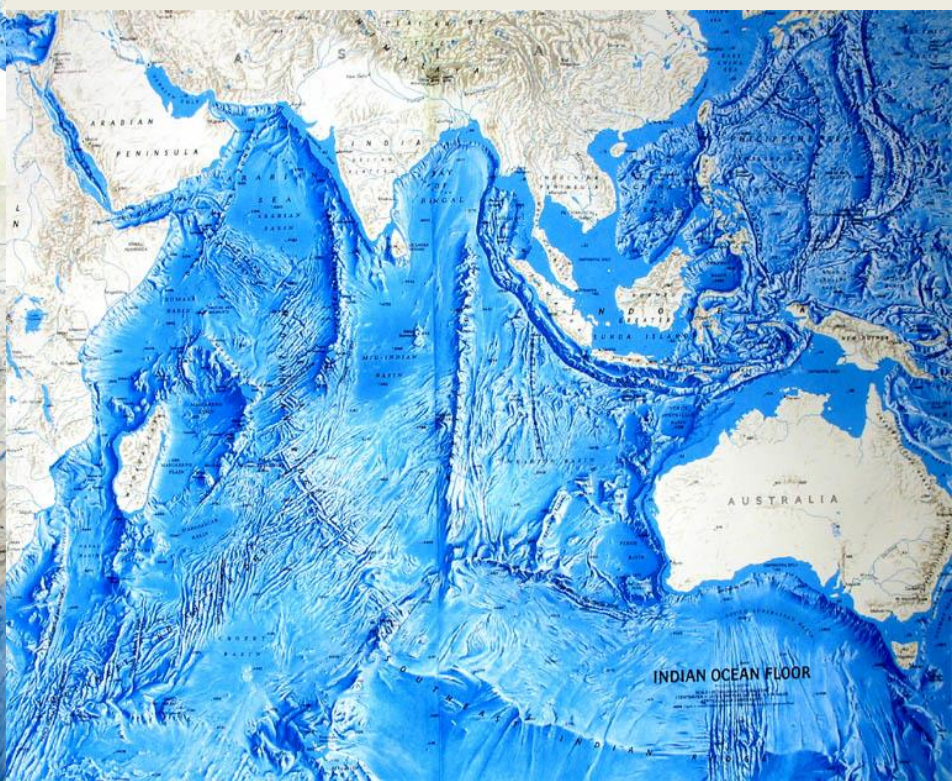
La géodynamique interne modèle le Géoïde



Tomographie sismique
Vitesse des ondes sismiques
Rouge = lent ; bleu = rapide

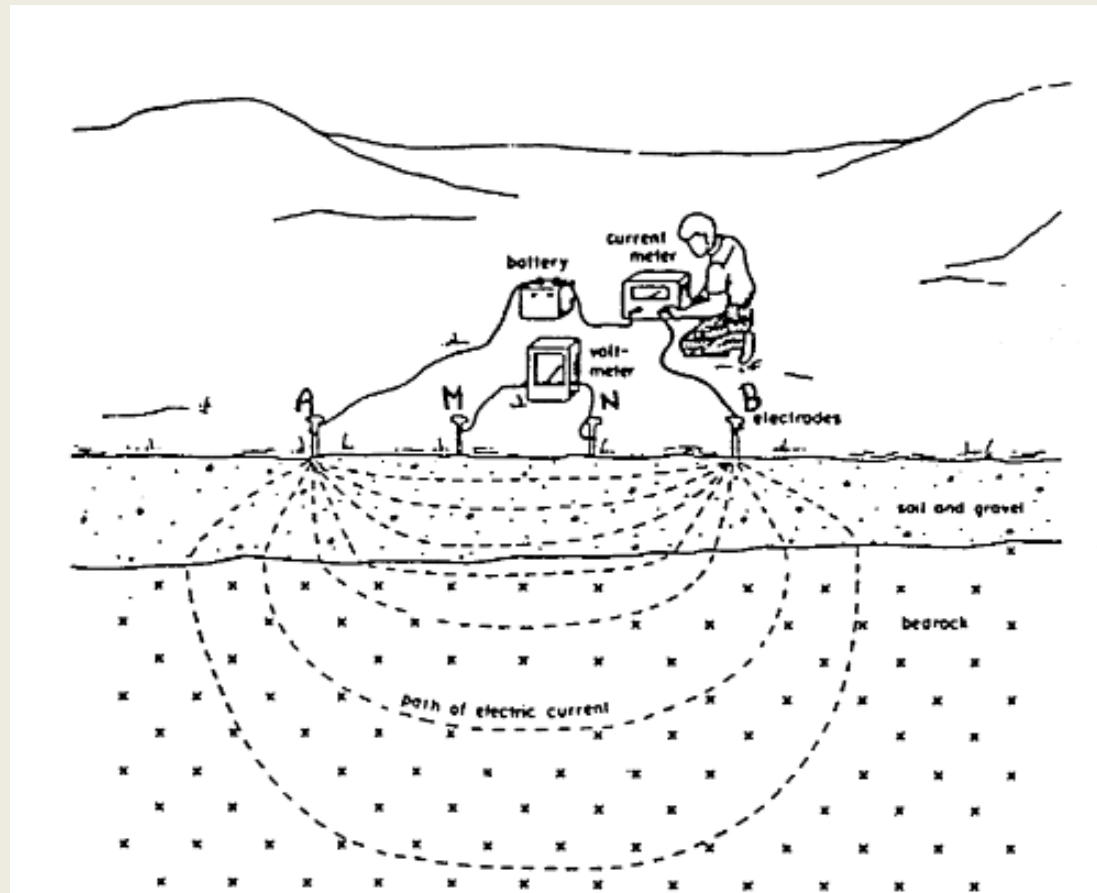


Géoïde
Rouge = bosse ; bleu = creux



COMMENT « VOIR » SOUS LA SURFACE ?

III-MESURES ELECTRIQUES



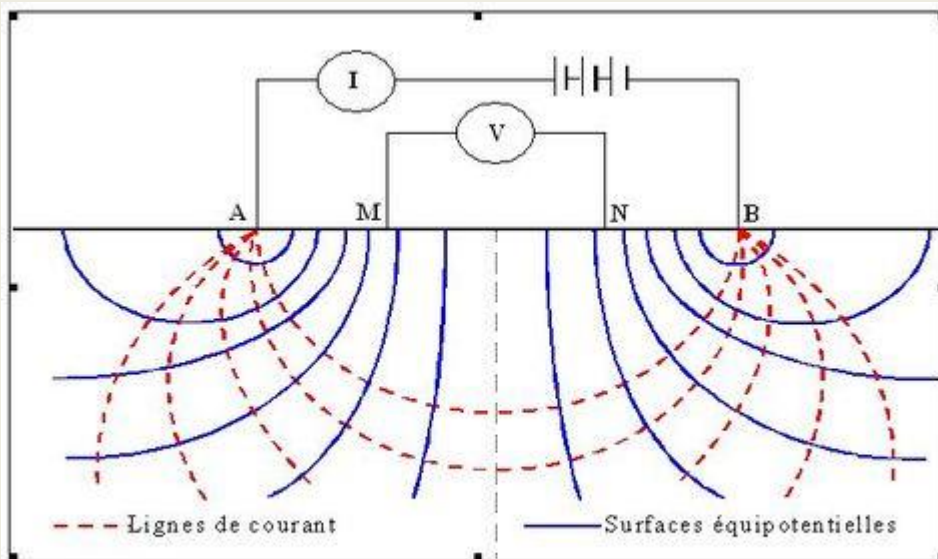


Figure 22 : Principe de la prospection électrique par courant continu

Entre A et B : injection du courant I
Entre M et N : mesure de la tension

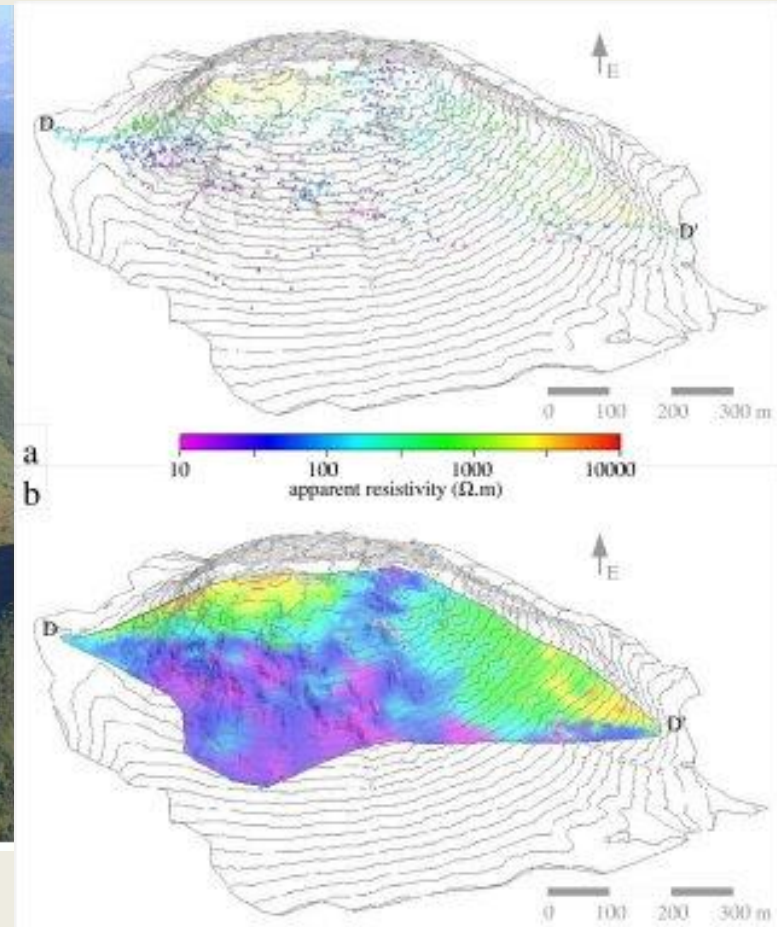
$$\rho_a = k \frac{V_M - V_N}{I}$$

La résistivité ρ dépend du milieu

Tableau A.3: Résistivités de différentes roches

Type de roche	Gamme de résistivité (Ωm)
Granite	$3 \times 10^2 - 10^6$
Granite porphyre	4.5×10^3 (humide) – 1.3×10^6 (sec)
Feldspath porphyre	4×10^3 (humide)
Albite	3×10^2 (humide) – 3.3×10^3 (sec)
Syénite	$10^2 - 10^6$
Diorite	$10^4 - 10^5$
Diorite porphyre	1.9×10^3 (humide) – 2.8×10^4 (sec)
Porphyrite	$10 - 5 \times 10^4$ (humide) – 3.3×10^3 (sec)
Porphyre Carbonaté	2.5×10^3 (humide) – 6×10^4 (sec)
Quartz porphyre	$3 \times 10^2 - 9 \times 10^5$
Quartz diorite	$2 \times 10^4 - 2 \times 10^6$ (humide) – 1.8×10^5 (sec)
Porphyre (divers)	$60 - 10^4$
Dacite	2×10^4 (humide)
Andésite	4.5×10^4 (humide) – 1.7×10^2 (sec)
Diabase porphyre	10^3 (humide) – 1.7×10^5 (sec)
Diabase (divers)	$20 - 5 \times 10^7$
Laves	$10^2 - 5 \times 10^4$
Gabbro	$10^3 - 10^6$
Basalte	$10 - 1.3 \times 10^7$ (sec)
Olivine norite	$10^3 - 6 \times 10^4$ (humide)
Péridotite	3×10^3 (humide) – 6.5×10^3 (sec)
Cornéenne	8×10^3 (humide) – 6×10^7 (sec)
Schists (calcaire et mica)	$20 - 10^4$
Tufs	2×10^3 (humide) – 10^5 (sec)
Graphite schist	$10 - 10^2$
Ardoises (diverses)	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$
Gneiss (divers)	6.8×10^4 (humide) – 3×10^6 (sec)
Marbre	$10^2 - 2.5 \times 10^8$ (sec)
Skarn	2.5×10^2 (humide) – 2.5×10^8 (sec)
Quartzites (diverses)	$10 - 2 \times 10^8$
Shales consolidés	$20 - 2 \times 10^3$
Argilites	$10 - 8 \times 10^2$
Conglomérés	$2 \times 10^3 - 10^4$
Grès	$1 - 6.4 \times 10^8$
Calcaires	$50 - 10^7$
Dolomie	$3.5 \times 10^2 - 5 \times 10^3$
Argile humide non consolidée	20
Marnes	3 – 70
Argiles	1 – 100
Alluvions et sables	10 – 800
Sables bitumineux	4 – 800

Document :



Volcan de la Soufrière

1 km de câble ; 64 électrodes espacées de 15 m
 $I = 100 \text{ mA env.}$ V de qq Volts à qq mV

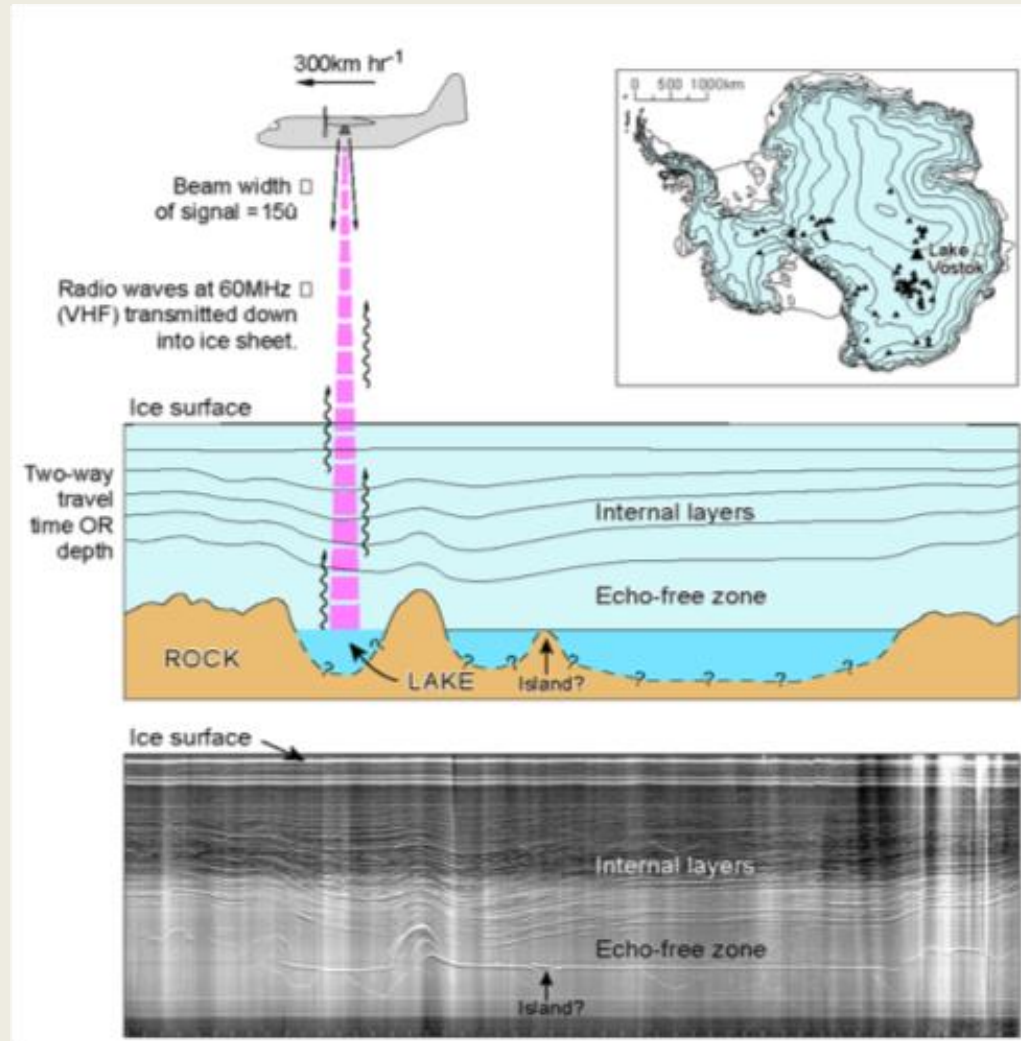
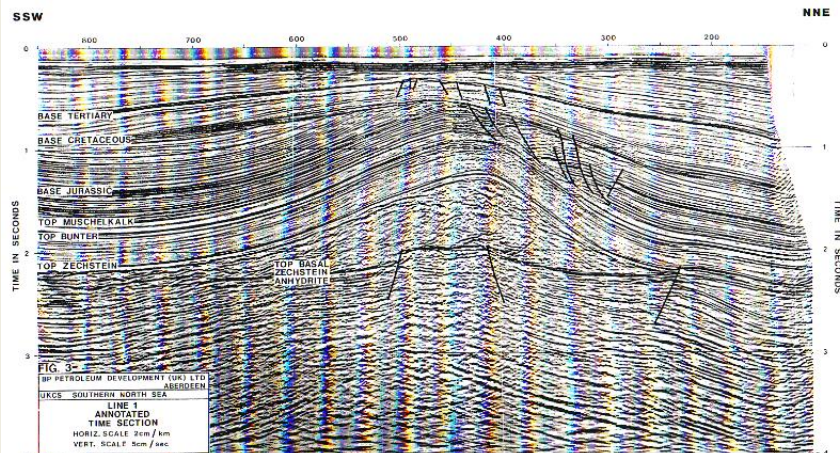
COMMENT « VOIR » SOUS LA SURFACE ?

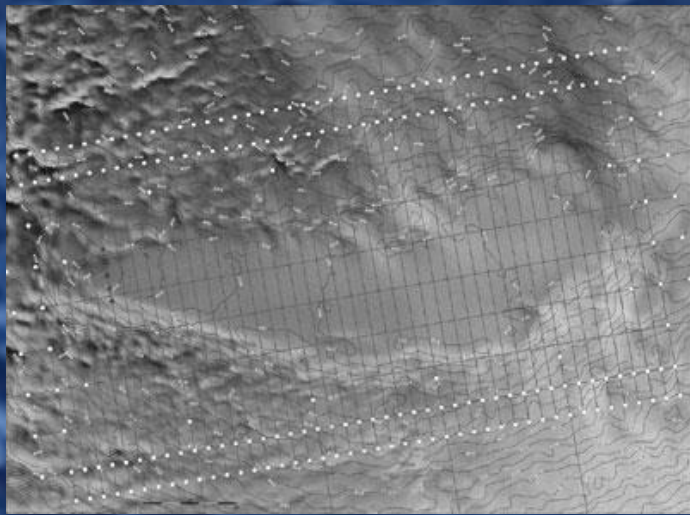
VI-MESURES PAR ECHO-RADAR

Emission d'onde électromagnétique
Gamme de fréquences : des micro-ondes aux ondes VHF (de 3 GHz à 60 MHz env.) selon le milieu.

Quand le milieu change (changement d'impédance) une partie de l'onde est réfléchiée puis enregistrée

Equivalent à la sismique-réflexion (onde acoustique)





- Conf. Cuesta janvier 2014
- Jean Robert PETIT
- *Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement*
- CNRS-UJF

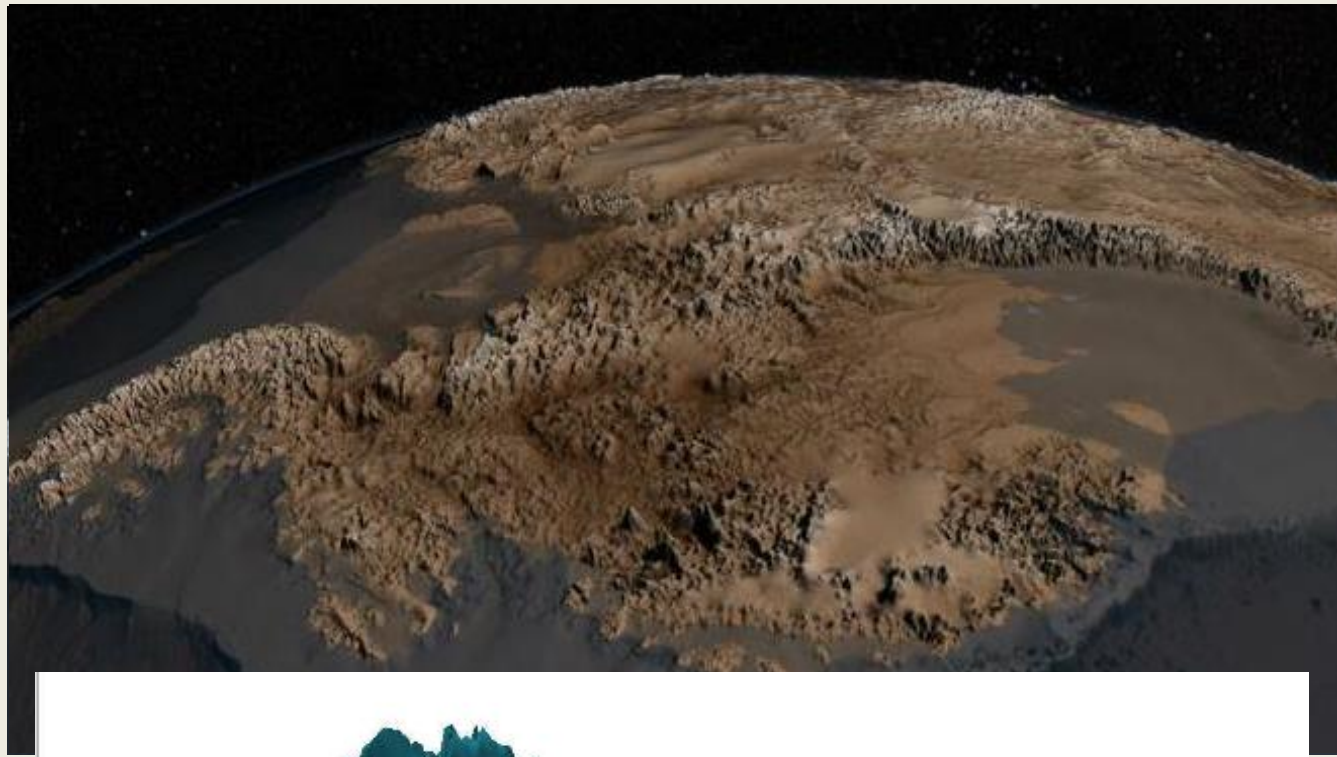
★ Vostok (Russia)

50 km

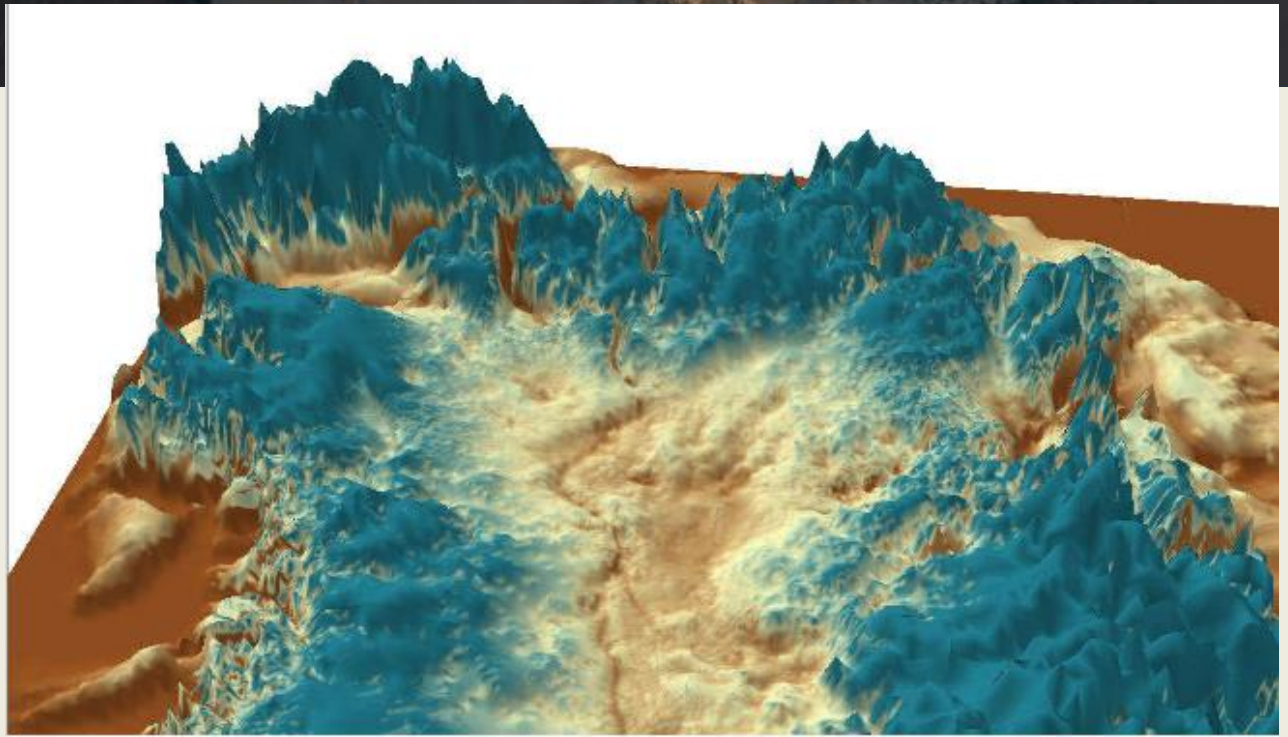
250km

RADARSAT image of Lake Vostok in East Antarctica

Les montagnes
de l'Antarctique



Les canyons
du Groenland



COMMENT « VOIR » SOUS LA SURFACE ?

V-TOMOGRAPHIE AVEC DES MUONS

Voir l'intérieur d'un volcan

Exemple : Tomographie du volcan de la Soufrière en Guadeloupe

Muon découvert en 1935 dans les rayons cosmiques. Instable (période ≈ 2 ms)

Interaction dans la haute atmosphère des **rayons cosmiques primaires** très énergétiques (H 50% ; He 25% ; Fe, O, C,...) avec un nucléon atmosphérique

→ Gerbe de particules avec production de pions $\pi(+ \text{ ou } -)$ et kaons $K(+ \text{ ou } -)$

$\pi(+ \text{ ou } -) \rightarrow$ Muon $\mu(+ \text{ ou } -)$ (+ neutrinos muoniques)

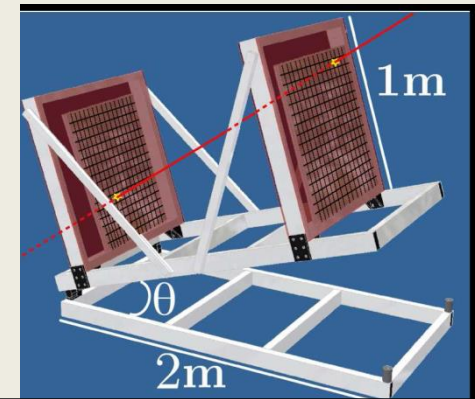
$K(+ \text{ ou } -) \rightarrow$ Muon $\mu(+ \text{ ou } -)$ (+ neutrinos muoniques)

Puis désintégration du Muon :

$\mu(+ \text{ ou } -) \rightarrow$ électron ou positron (+ neutrinos)

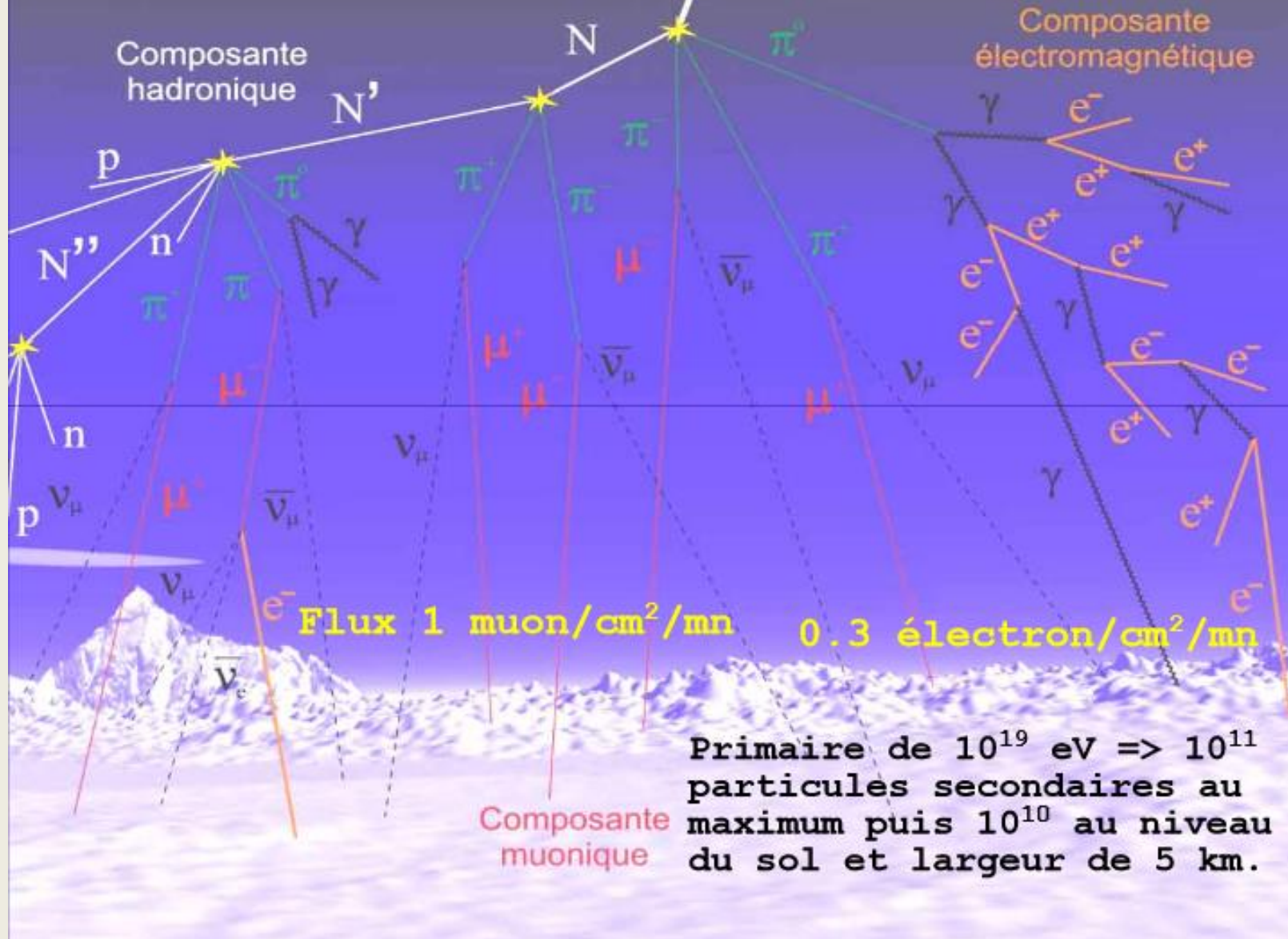
Principe : les muons traversent l'atmosphère et qq km de croûte. Le flux est atténué par la traversée de la roche ce qui permet de remonter à la masse volumique du milieu et à sa nature.

Thèse de N. Lesparre (2011)

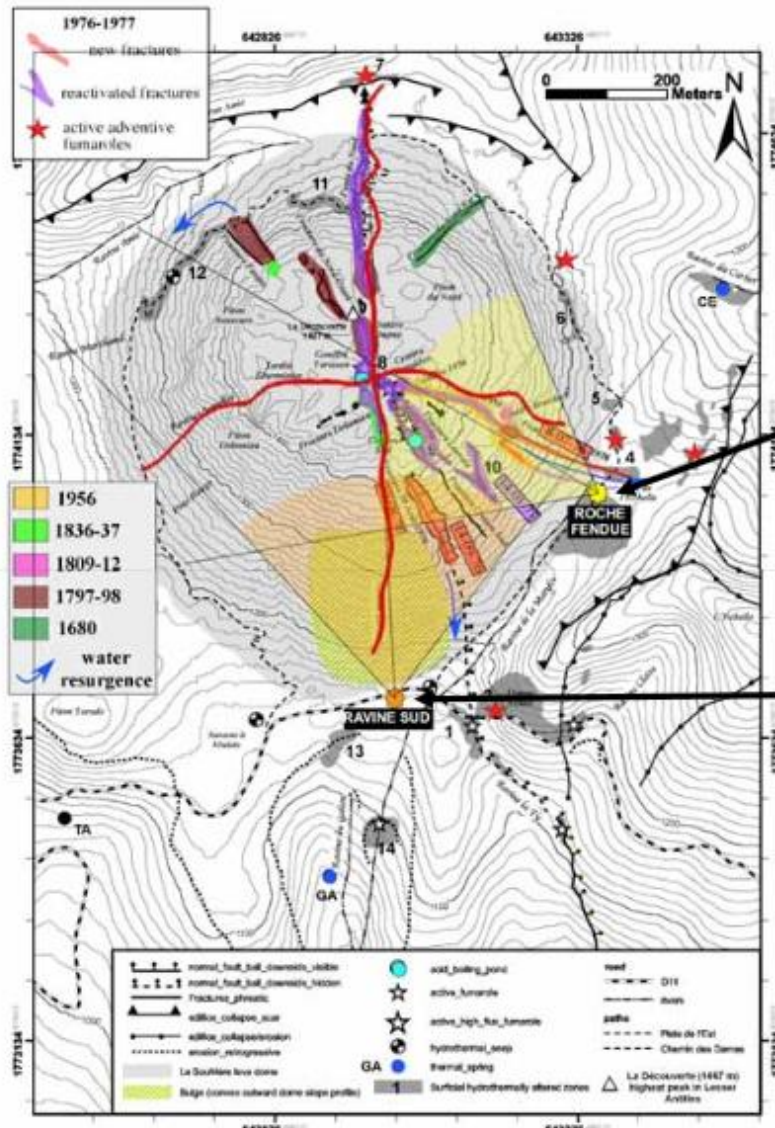


- Détection par coïncidence ou triple coïncidence avec scintillateurs
- de 10 à 100 événements par jour
- résolution 30 m

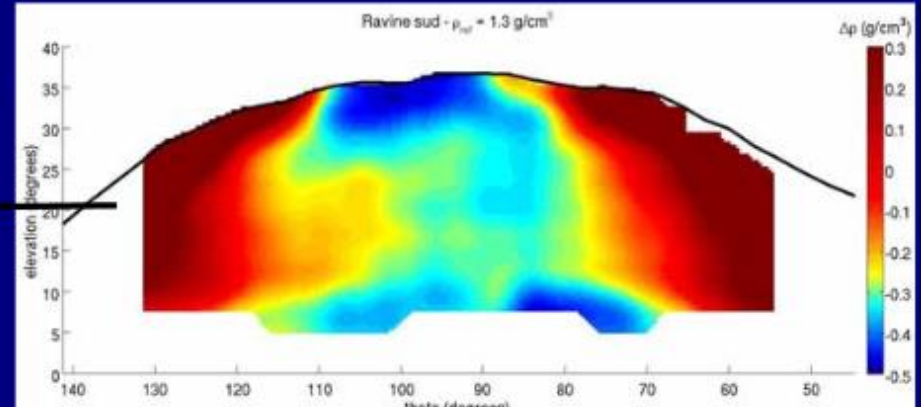
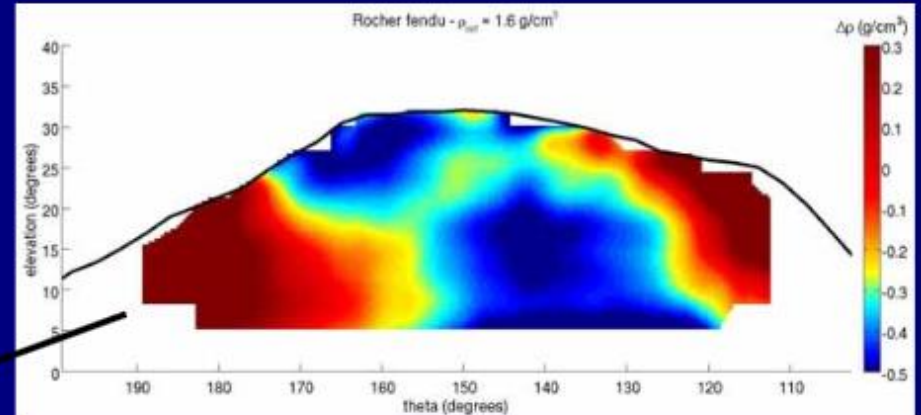
Rayonnement cosmique
primaire
Noyau, photon gamma, neutrino



Radiographies de la Soufrière



Synthèse structurale: J.-C. Komorowski



Résultats :

- * structure très hétérogène et dissociée
- * présence très probable d'importantes cavités

B- Les Montagnes

1) Comment se forment-elles ?

2) Comment disparaissent-elles ?

Formation des montagnes ?

Le modèle physique de la convection mantellique :

————→ Tectonique des plaques et formation des reliefs

Convergence de 2 plaques tectoniques :

- Chaîne de subduction (Andes) : lithosphère océanique sous continent
- Arc insulaire (Japon) : lithosphère océanique sous autre lithosphère océanique
- Chaîne de collision (Himalaya) : deux lithosphères continentales en collision
- Chaîne d'obduction (Oman) : croûte océanique sur croûte océanique
- Chaîne intracontinentale (Pyrénées) : compression à l'intérieur d'un continent dans une zone distendue

Disparition des montagnes ?

- Pendant et après la surrection tectonique :
 - **érosion** mécanique et chimique (diminution d'altitude)
 - **réajustement isostatique** de la croûte surépaissie, accompagné d'un étalement (amincissement crustal) lorsque la contrainte horizontale devient inférieure à la contrainte verticale.

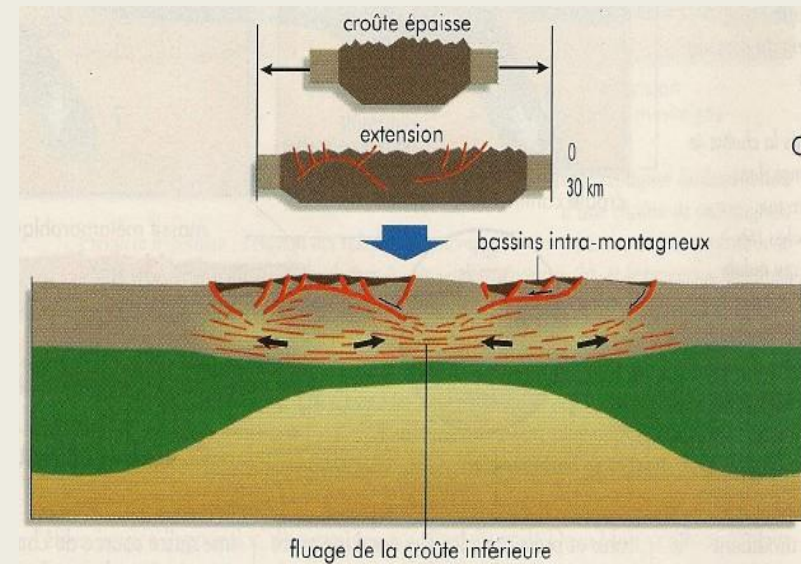
- Par **fluage et extension**

Dans les zones les plus profondes, la croûte est soumise à des températures et pression plus élevées (chaleur due à la désintégration de éléments radioactifs ^{238}U , ^{235}U , ^{40}K).

La croûte s'échauffe :

remontée de l'isotherme $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (limite lithosphère - asthénosphère).

La fusion partielle des matériaux en profondeur devient possible et on peut avoir la mise en place de granites.



Déformation par fluage et extension

Mesures au labo de la résistance mécanique des roches.

Compression uniaxiale maximale :

(1 MPa = 10 bars)

Modèle physique :

Calcul de la hauteur maximale h_{max} d'une montagne faite de roches de masse volumique ρ et pouvant résister à sa base à une pression maximale P_{max} (g accélération de la pesanteur terrestre) :

Avec $P_{max} \approx 250 \text{ MPa}$, $\rho = 2,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ et $g = 9,81$

m/s^2 : **$h_{max} \approx 10000 \text{ m}$ soit $\approx 10 \text{ km}$**

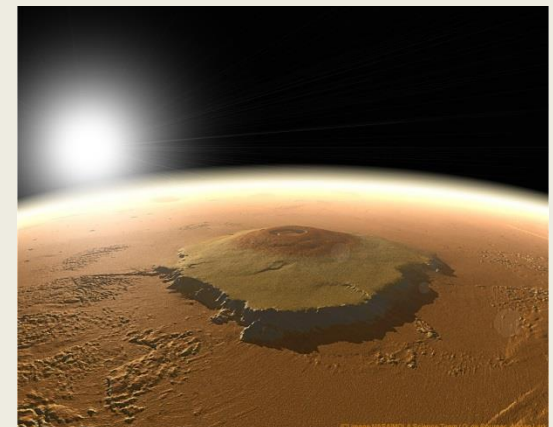
(du bon ordre de grandeur : Everest 8850 m)

Sur Mars $g = 3,80$ (2,6 fois moins que sur terre), la hauteur peut atteindre $2,6 \times 10000 = 26000 \text{ m}$ env. (Olympus Mons)

Roches	Résistance à la compression (MPa)
GRANITE	100-280
GRES	40-110
CALCAIRE	50-60
QUARTZITE	150-600
MARBRE	100-125



$$h_{max} = \frac{P_{max}}{\rho g}$$



Pression + Température = Métamorphisation des roches



GEOCHIMIE

C- Les Roches

1) Identifier et classer les roches ?

2) Comment identifier les minéraux ?

Identifier et classer les roches ?

Origine de toutes les roches : les **chondrites** issues de la nébuleuse primitive

❑ **Terre primitive non différenciée**, formée par l'accrétion de chondrites :

- ordinaire (silicate avec 7 à 25% de métal) (très abondantes)
- à enstatite ($\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$) + 25 à 35% de métal (Fe)
- carbonée (silicate et C de 1 à 3%)

Température environ 4700 °C (accrétion, radioactivité) :

➡ **Terre en fusion**

Tableau 4 : Formule des minéraux des chondres.

Minéraux	Formule
Olivine	$(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$
Orthopyroxène	$(\text{Fe}, \text{Mg})\text{SiO}_3$
Clinopyroxène	$(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Ca})\text{SiO}_3$
Plagioclase	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
Spinelle	MgAl_2O_4
Kamacite	Fe-Ni
Chromite	FeCr_2O_4
Troïlite	FeS

❑ **Début de l'Hadéen** (4,5 Ga env.) : première différenciation

- ✓ **Par gravitation**, les éléments lourds forment le noyau (Fe, Ni, Co, Pt, autres métaux...) et les plus légers remontent vers la surface (Si, Al,...). Les solides silicatés ont formé le manteau supérieur, et le magma appauvri en silicium forme le manteau inférieur.
- ✓ **Par affinités chimiques** des éléments (chalcophiles, lithophiles, sidérophiles)

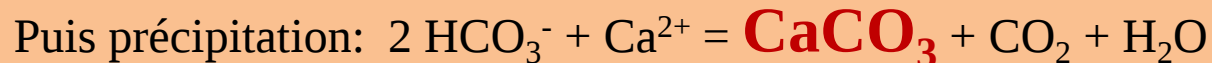
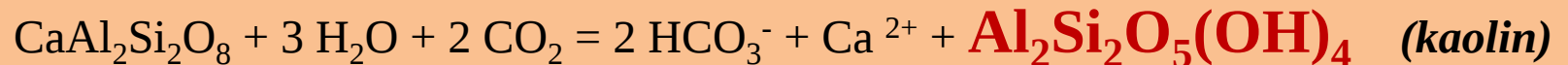
❑ Formation de la **proto-croûte continentale** à partir d'un magma de type granitique. Les roches de cette époque ont disparu (altérées, érodées), sauf des Zircons (certains datés de 4,4 Ga – par radioactivité) plus résistants retrouvés sous forme détritique dans des roches archéennes

❑ A l'**Archéen** (vers 4 Ga), un **grand volume de croûte** (les $\frac{3}{4}$) se forme à partir du magma du manteau : essentiellement granitoïdes transformés en gneiss par métamorphisme.

❑ **Depuis le Protérozoïque** (2,5 Ga), la dynamique terrestre est semblable à celle d'aujourd'hui.

Augmentation de la quantité d'oxygène $\longrightarrow$ formation des Oxydes

Altération des silicates. Exemple : **anorthite**



❑ Formation des premiers **bassins sédimentaires** vers 2,5 Ga

Le Géologue a longtemps été limité à l'étude des roches de « surface »

❖ *Roches de la croûte continentale :*

- Roches **sédimentaires** : basse P et basse T
(sables , grès, calcaires, silex, argiles, sels, gypse, ...)
- Roches **magmatiques** : basse ou moyenne P, haute ou moyenne T
(granites, basaltes, gabbro, phonolites, rhyolite, trachyte, ...)
- Roches **métamorphiques** : formées à partir de roches préexistantes sous l'effet de modification de P et/ou T à des T inférieures à T fusion
(cristallisation de nouveaux minéraux et acquisition de structures différentes)
(marbres, schistes, gneiss, amphibolites, quartzites, ...)
- Roches **hydrothermales** (entre roches magmatiques et métamorphiques)
(recristallisations minérales)

❖ *Accès plus difficile aux roches de la croûte océanique :*

- roches **ophiolitiques** (basalte , filons, gabbro) **charriées** sur le continent par obduction (Oman, Chamrousse, Viso...)
- **draguées** ou (exceptionnellement) **forées** (campagne de forage dans le Pacifique 2012-13 CNRS)

❖ Pas d'accès direct aux roches du manteau mais ...

... on trouve des roches remontées à la surface :

- péridotites à la base des ophiolites
- enclaves de péridotites dans des basaltes



- ➡ Roches identifiées dans la partie supérieure du manteau (jusque vers 100 km env.) :
- de 90 à 95% de **péridotite** : association de 2 minéraux
 - **olivine** (largement majoritaire) $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ { Si Mg : forstérite ; Si Fe : fayalite }
 - **pyroxène** (ortho- et clino-) XYSi_2O_6 (X et Y = Na, Ca, Mg, Fe, Al, Cr,...)
 - de 5 à 10% de
 - **plagioclase** $(\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ (jusqu'à 30 km)
 - **spinelle** $(\text{MgAl}_2\text{O}_4, \text{MgFe}_2\text{O}_4, \text{MgCr}_2\text{O}_4)$ (de 30 à 60 km)
 - **grenat** $((\text{Mg,Fe})_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12})$ (au-delà de 60 km)

Problème :

Quelles sont les roches qui constituent le reste du manteau?

Pour répondre :

Il faut expliquer les discontinuités dans les vitesses de propagation des ondes sismiques S (et P)



On suit l'évolution de la **structure cristallographique** de l'olivine par des mesures de diffraction des RX sous **haute pression** et **haute température** dans des cellules à enclumes en diamant

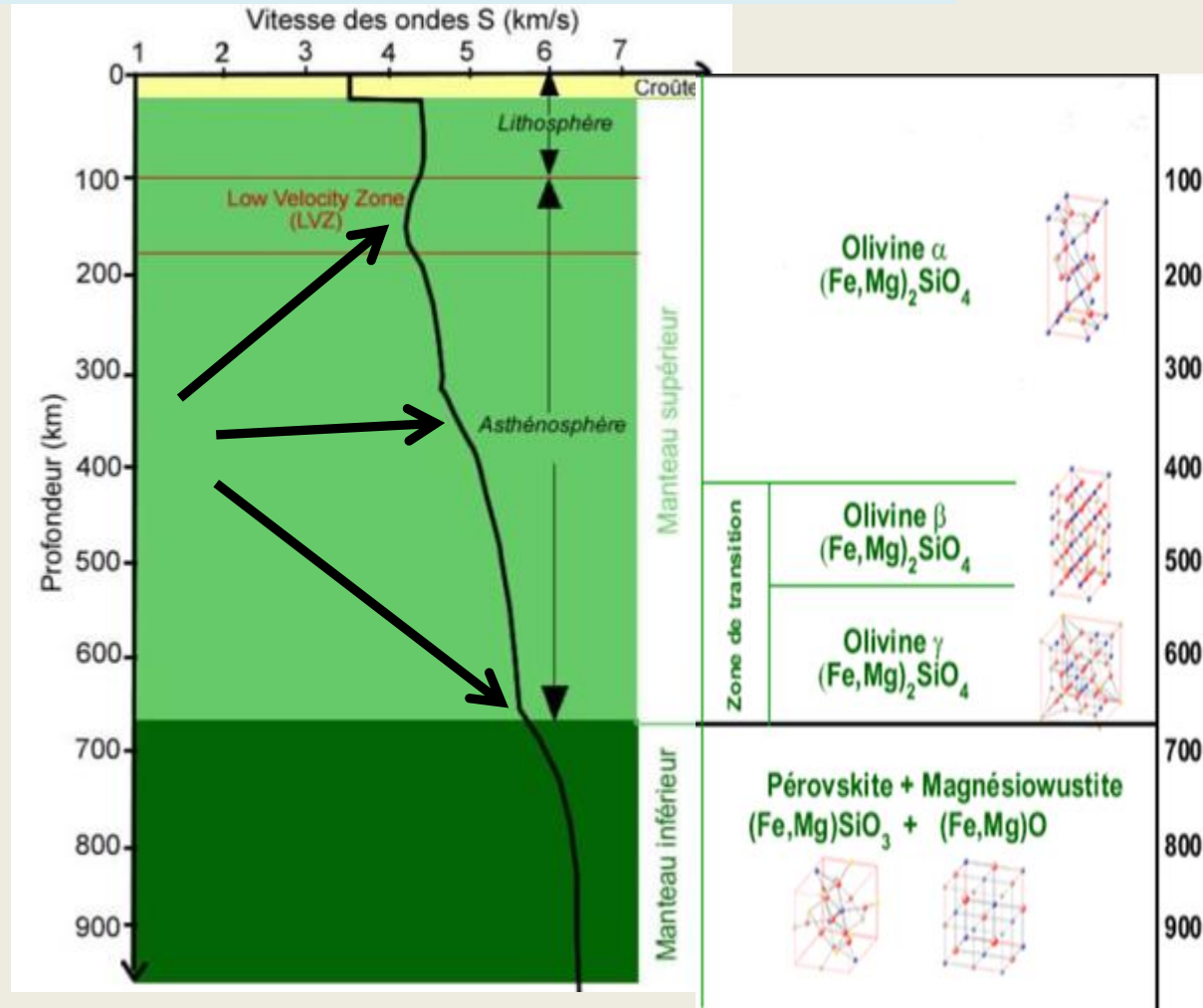
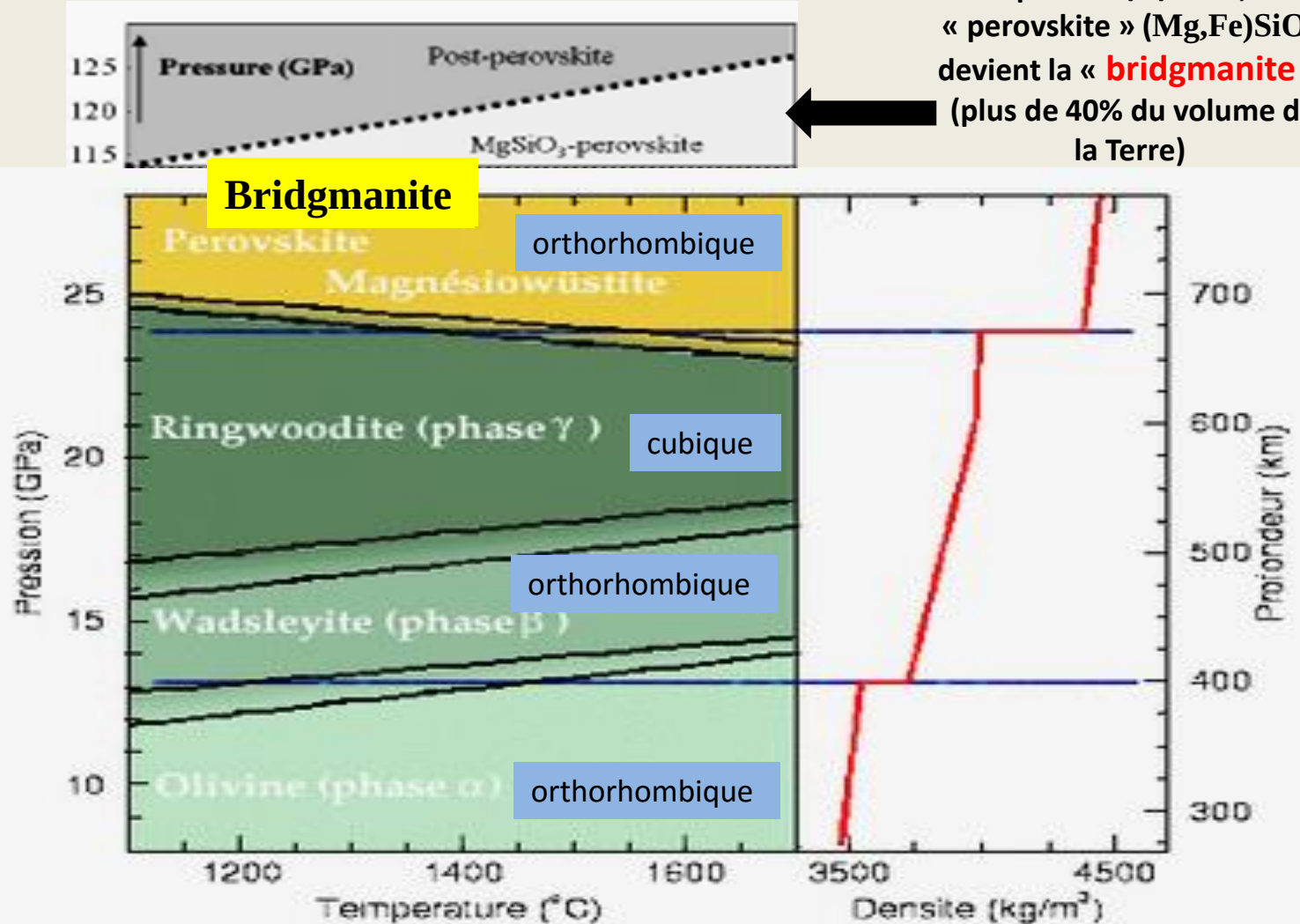


Diagramme de phase de l'olivine

*Post-perovskite
(couche D'')*

Depuis le 2/6/2014, la
« perovskite » $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$
devient la « **bridgmanite** »
(plus de 40% du volume de
la Terre)

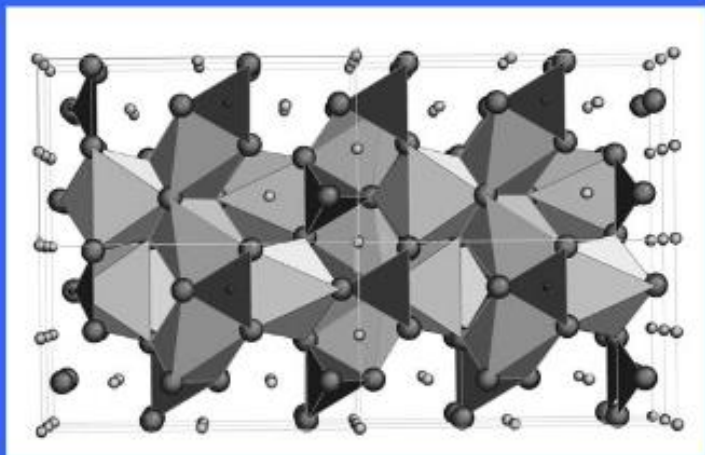


Olivine usuelle (= Olivine α) $\longrightarrow$ Wadsleyite (= Olivine β) (vers 410 km)

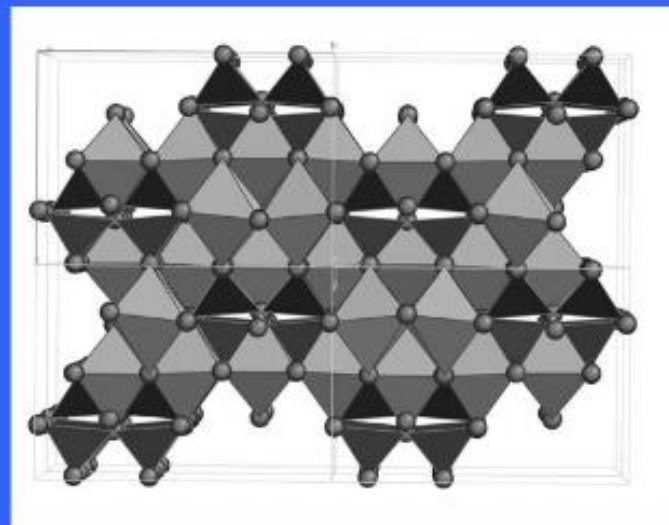
Wadsleyite $\longrightarrow$ Ringwoodite (= Olivine γ) (vers 520 km)

Ringwoodite $\longrightarrow$ Perovskite $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$ + Magnésioiwustite MgO (vers 660 km)

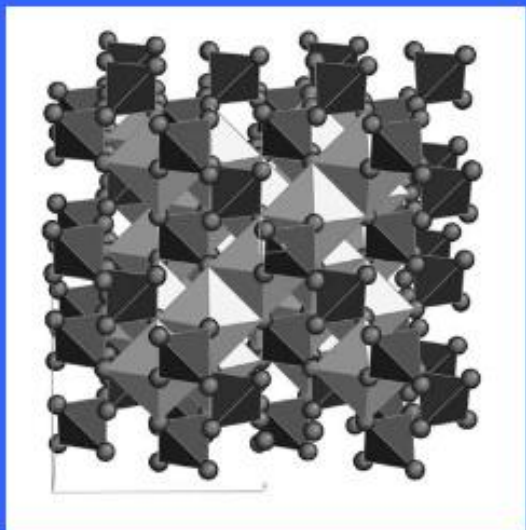
Olivine $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$



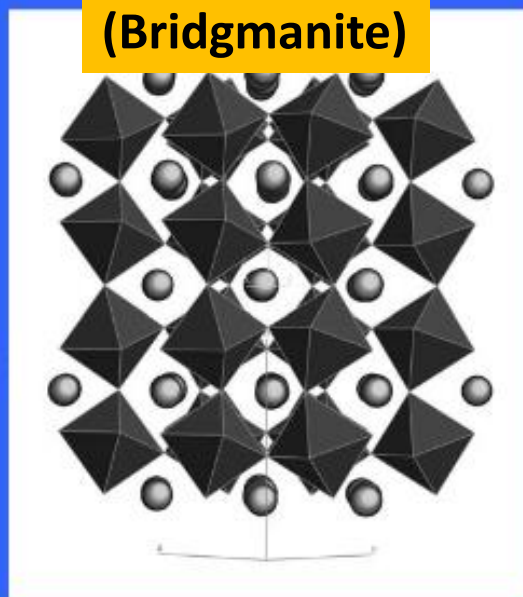
Wadsleyite $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ modified spinel



Ringwoodite $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ spinel structure



Perovskite structure $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$



+
 $(\text{Mg,Fe})\text{O}$

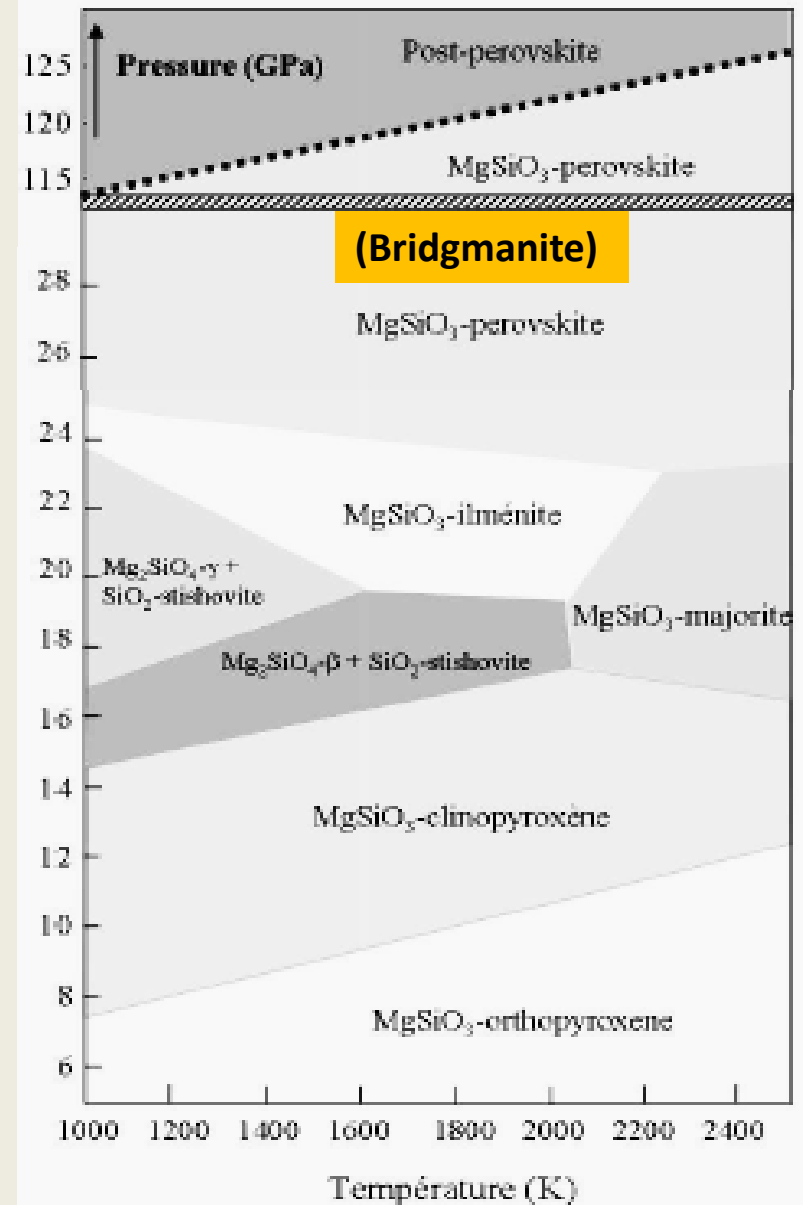
Diagramme de phase du Pyroxène

Post-perovskite
(couche D'')

(Bridgmanite)
**Structure
Perovskite**
(«vraie» Perovskite : CaTiO_3)

Ilménite
ou Majorite

Pyroxène



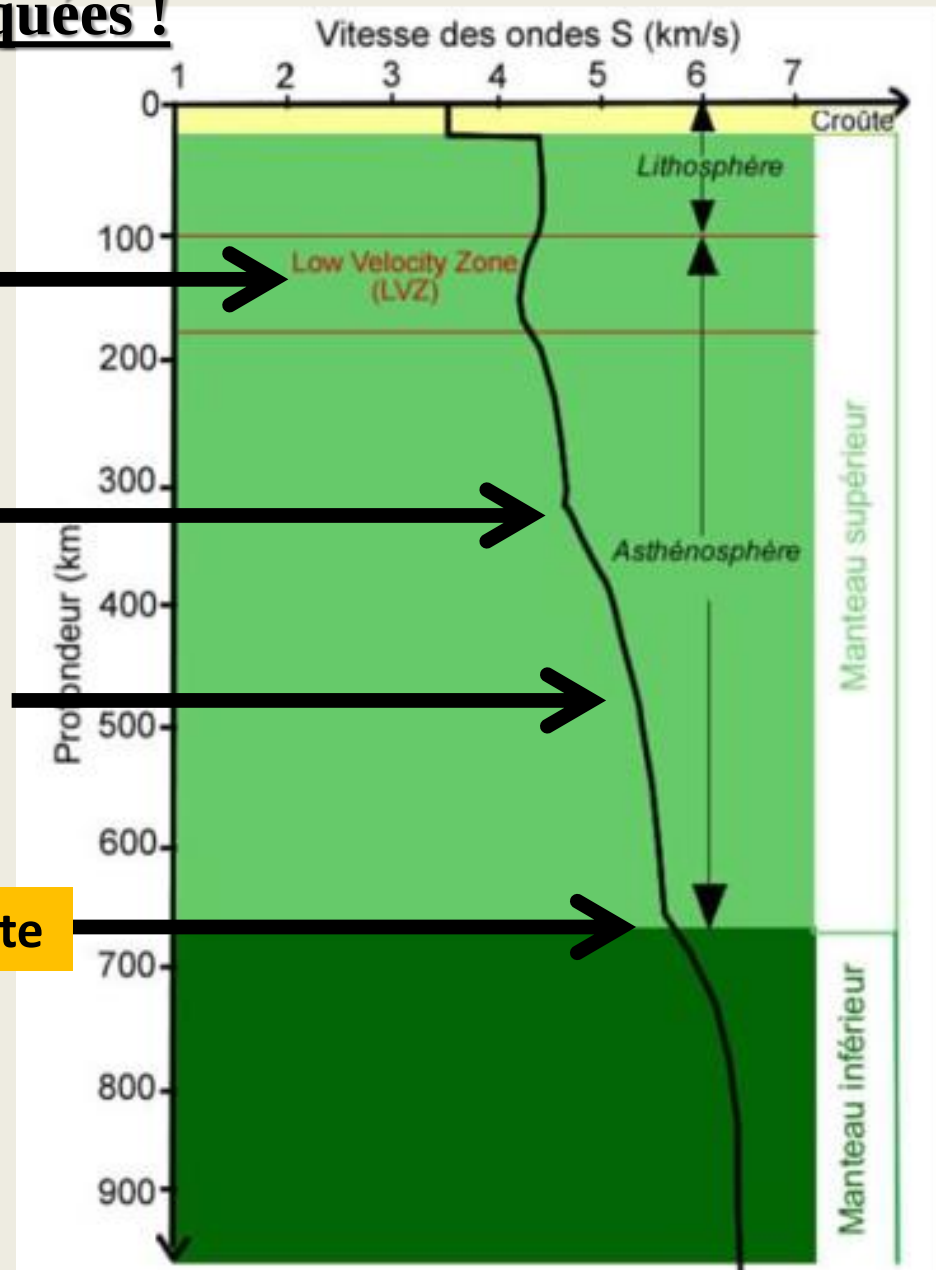
Les discontinuités sont expliquées !

Isotherme 1300°C : LVZ
fusion partielle des péridotites

Transition Olivine-Wadsleyite

Transition Wadsleyite-Ringwoodite
peu marquée

Transition Ringwoodite-**Bridgmanite**

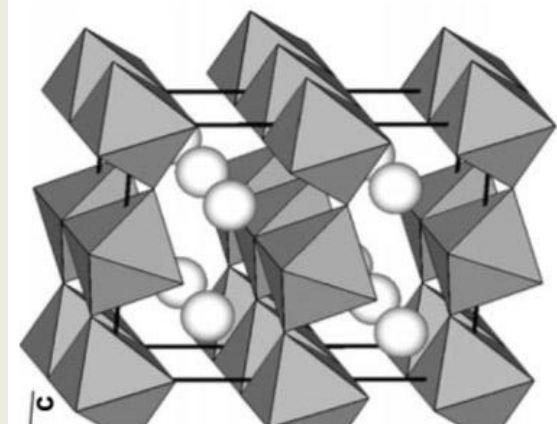
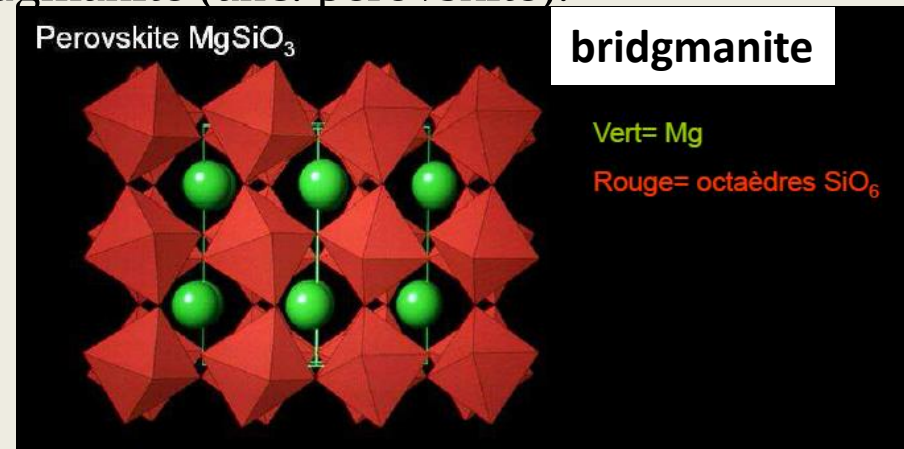
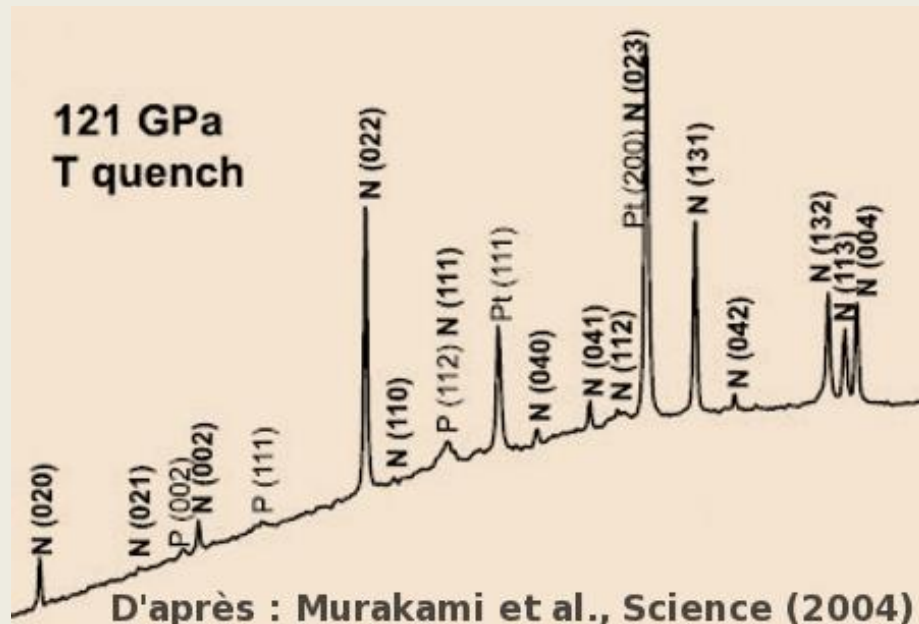


Découverte de la couche D''

- Dans les années 60, découverte d'une anomalie sismique entre 2600 km et 2900 km de profondeur (accélération de la vitesse 3% env. pour S, avec polarisation)
- En 1983, l'anomalie devient une discontinuité. Quelle en est l'origine ?

Hirose *et al.* synthétisent en 2002 le nouveau minéral : la **post-perovskite** un peu plus dense encore (1,5%) que la bridgmanite (anc. perovskite).

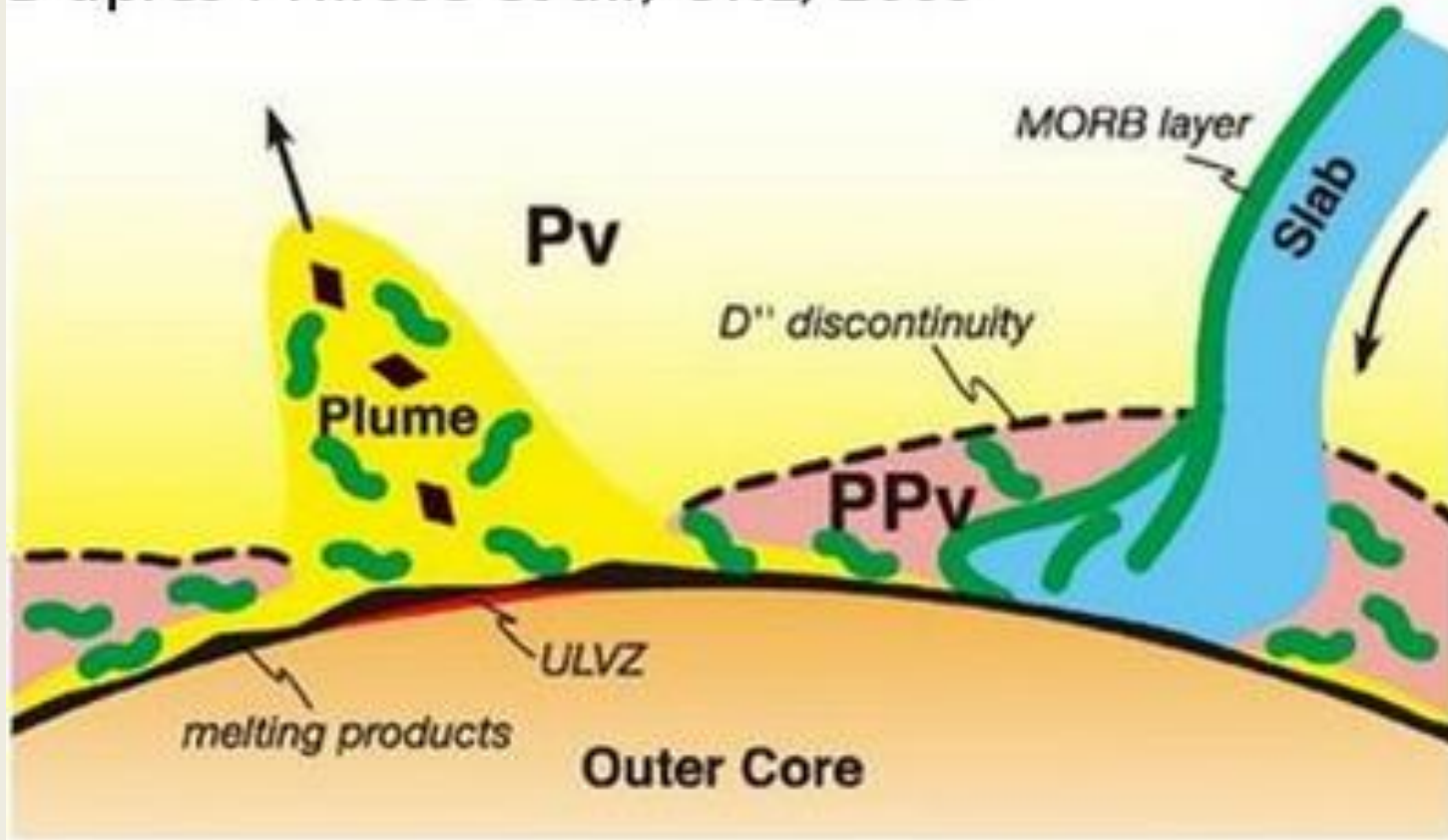
Méthode : cellule à enclumes diamant
 $P = 120 \text{ GPa}$; $T = 2500 \text{ K}$;
système orthorhombique



Post-perovskite (ou post-bridgmanite ?)

La transition Perovskite (Bridgmanite)/post-perovskite est fortement exothermique. Ce grand dégagement de chaleur pourrait être à l'origine de grands panaches à la base du manteau et d'une zone à très basse vitesse (ULVZ).

D'après : Hirose et al., GRL, 2005



Comment identifier les minéraux ?

De 4500 à 5000 minéraux différents ...

❖ Par des moyens optiques

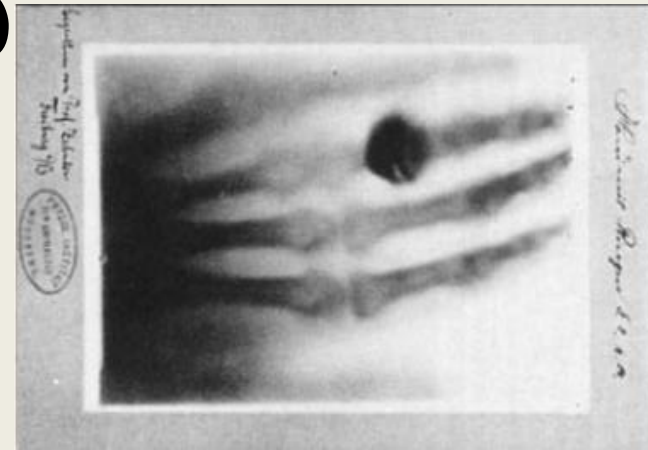
- Observation à la **Loupe** (XIVème siècle), puis au **Microscope** : Jansen (1590) ; Galilée (1609)
- Découverte de la **double réfraction** (biréfringence) de Rasmus Bartholin (1669), suivie celle de la **lumière polarisée** (1808) et de la **polarisation chromatique** : Arago et

➔ **Microscope polarisant**

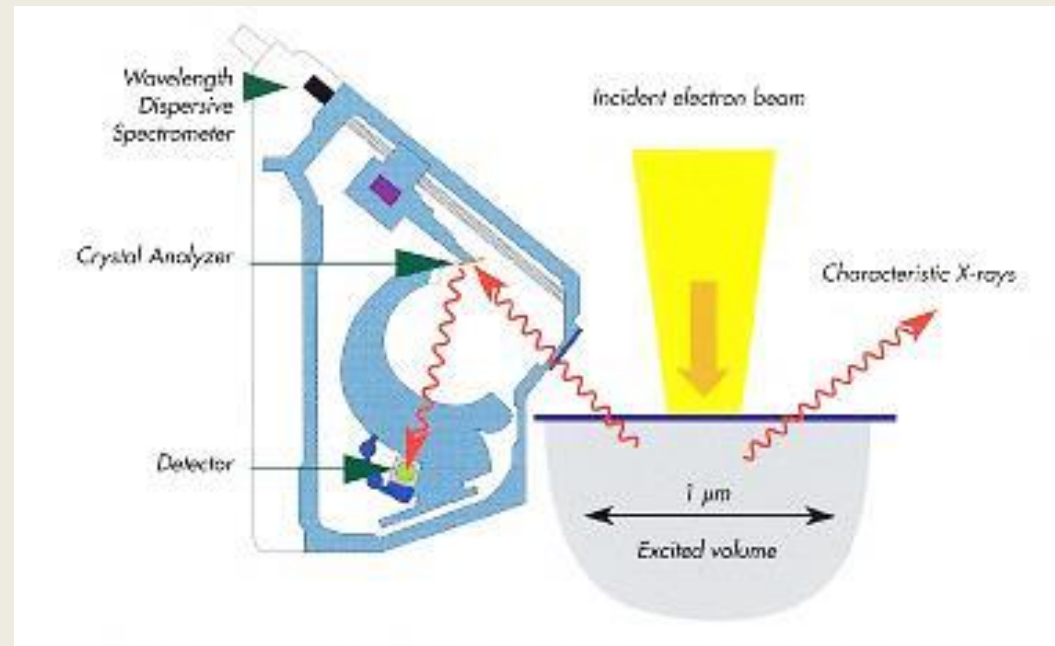


❖ Par la détermination de la structure cristalline (diffraction des Rayons X)

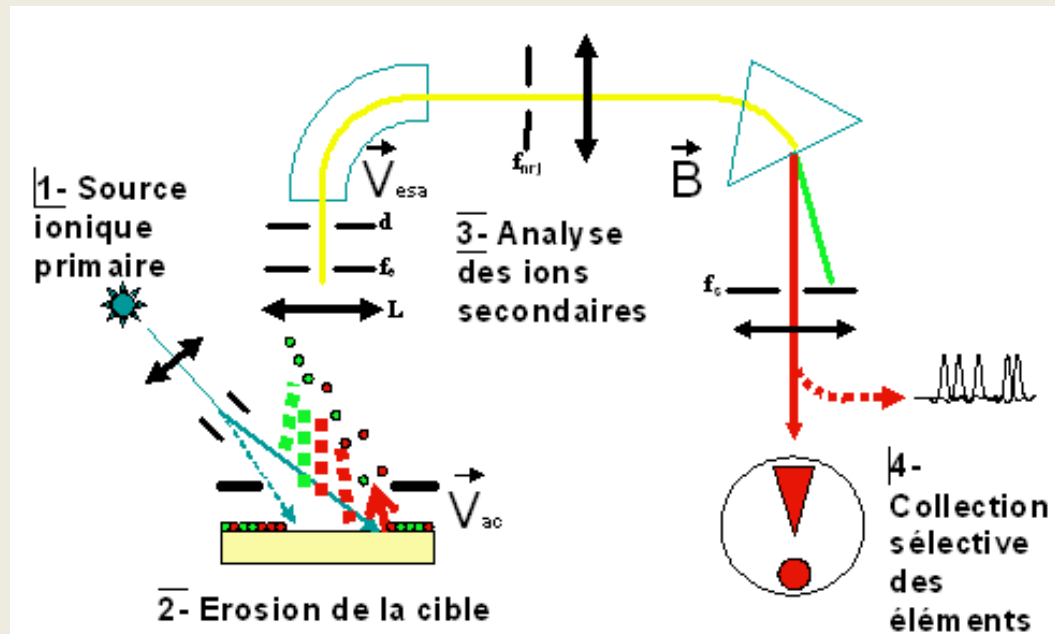
- Découverte des **Rayons X** : Röntgen (1895)
Première radio (main Mme Röntgen)
- Découverte de la **diffraction RX**: Laüe (1912)
- Détermination de la première **structure cristalline** de NaCl : Bragg (1913)



❖ Par la microsonde électronique (ou sonde de Castaing-1951)



❖ Par la microsonde ionique (sorte de spectromètre de masse)



Microscope polarisant

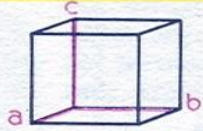
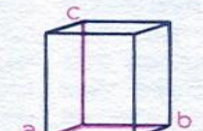
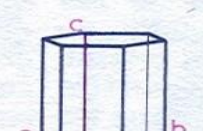
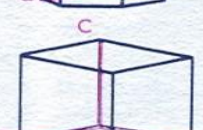
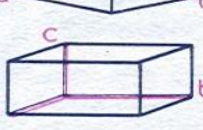
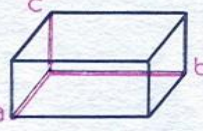
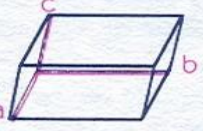
ANISOTROPIE DES CRISTAUX

Cristal : arrangement régulier des atomes dans l'espace.

Tout cristal appartient à l'un des 7 systèmes cristallins.

Olivine
Orthopyroxène

Clinopyroxène

Système	Constantes cristallographiques	Polyèdre fondamental	Caractéristiques de symétrie
Cubique	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $a = b = c$		Quatre axes ternaires
Tétragonal	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $a = b \neq c$		Un axe quaternaire
Hexagonal	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ $a = b \neq c$		Un axe senaire
Rhomboédrique	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ $a = b = c$		Un axe ternaire
Orthorhombique	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $a \neq b \neq c$		Trois axes binaires
Monoclinique	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$ $a \neq b \neq c$		Un axe binaire
Triclinique	$[\alpha \neq \beta \neq \gamma] \neq 90^\circ$ $a \neq b \neq c$		Pas d'axe

Tous les systèmes cristallins autres que le système cubique sont **optiquement anisotropes**.

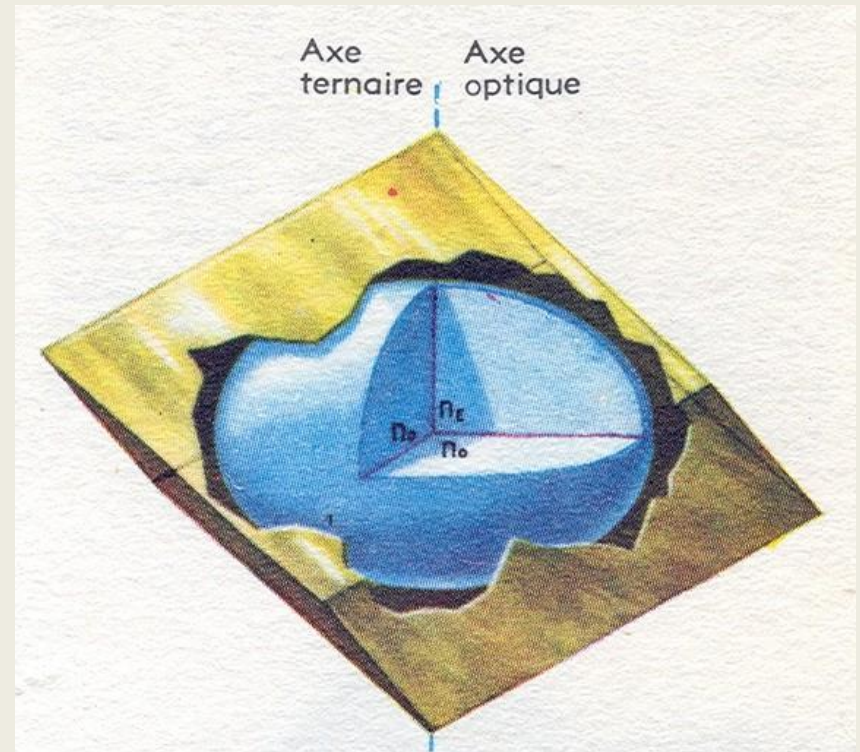
Optiquement anisotrope ?

- La vitesse de propagation de la lumière V dépend de l'indice de réfraction n du milieu (ex : verre, milieu isotrope, $n = 1,52$)

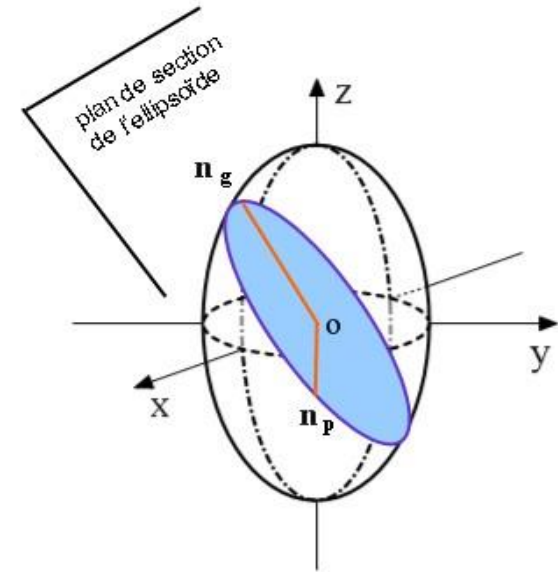
$$V = \frac{c}{n}$$

- Dans un milieu biréfringent (optiquement anisotrope) il existe 2 (ou 3) valeurs de l'indice de réfraction : N_g (grand) , N_p (petit) (et N_m (moyen))
➡ Ellipsoïde des indices

- Ex : représentation de l'ellipsoïde des indices dans un cristal rhomboédrique de Calcite



- Tailler une lame dans un monocristal revient à couper l'ellipsoïde des indices. La section est (en général) une ellipse dont les 2 demi-axes (orthogonaux) sont n_g (grand) et n_p (petit).



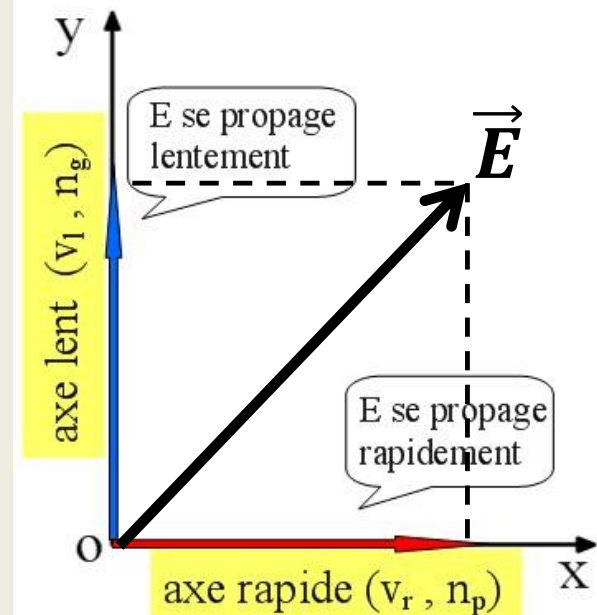
- A ces 2 indices différents vont correspondre 2 vitesses de propagation différentes :

n_g (grand)	$\Rightarrow$	v_l (lente)
n_p (petit)	$\Rightarrow$	v_r (rapide)

- A la surface de la lame : 2 axes
 - un axe « lent » (v_l , n_g)
 - un axe « rapide » (v_r , n_p)

$\Rightarrow$ lignes neutres

- La lumière polarisée incidente $\vec{E}$ se décompose ($\vec{E}_l$ et $\vec{E}_r$) selon ces 2 axes



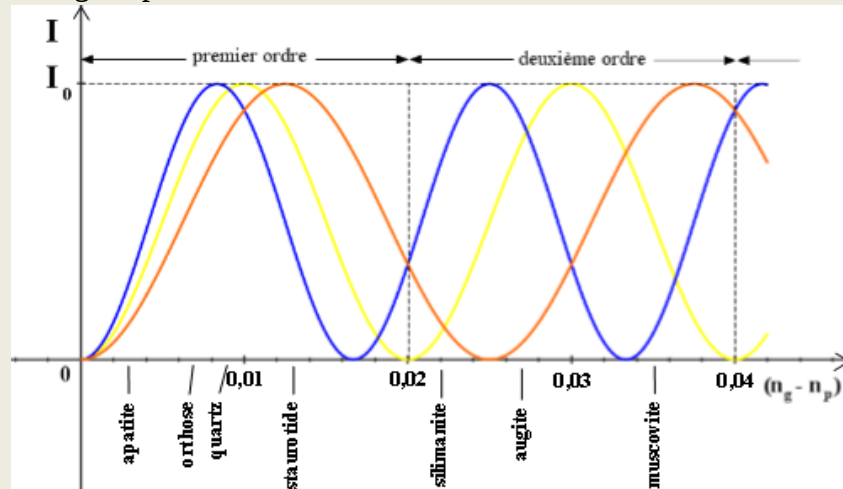
- A la sortie de la lame (d'épaisseur e), $\vec{E}_l$ arrive après $\vec{E}_r$:
 déphasage φ entre ces vecteurs
- On montre que (P et A croisés, lignes neutres à 45°) :

$$I = I_0 \sin^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right) = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi e (n_g - n_p)}{\lambda} \right)$$

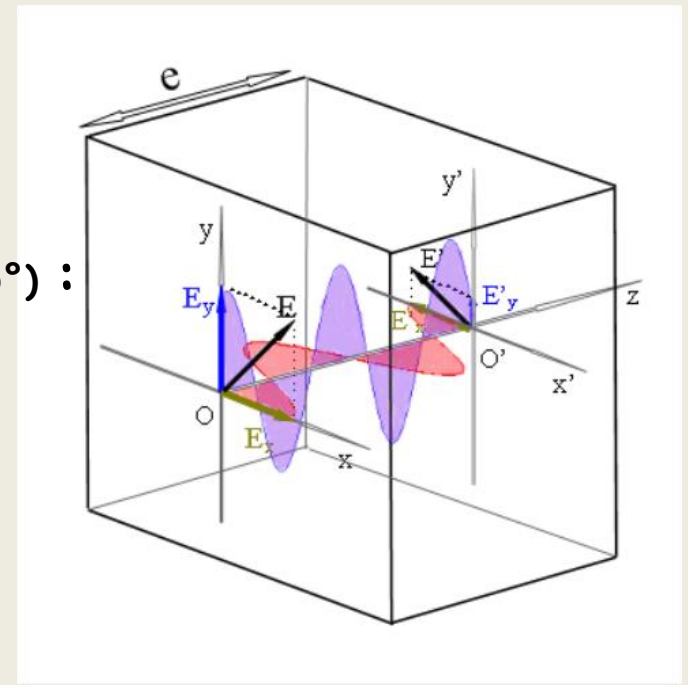
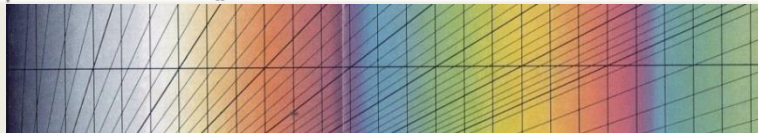
e : épaisseur de la lame (30 μ standard)

λ : longueur d'onde de la lumière

$(n_g - n_p)$: biréfringence du cristal



30 μ



Méthode de mesure de la biréfringence d'un minéral

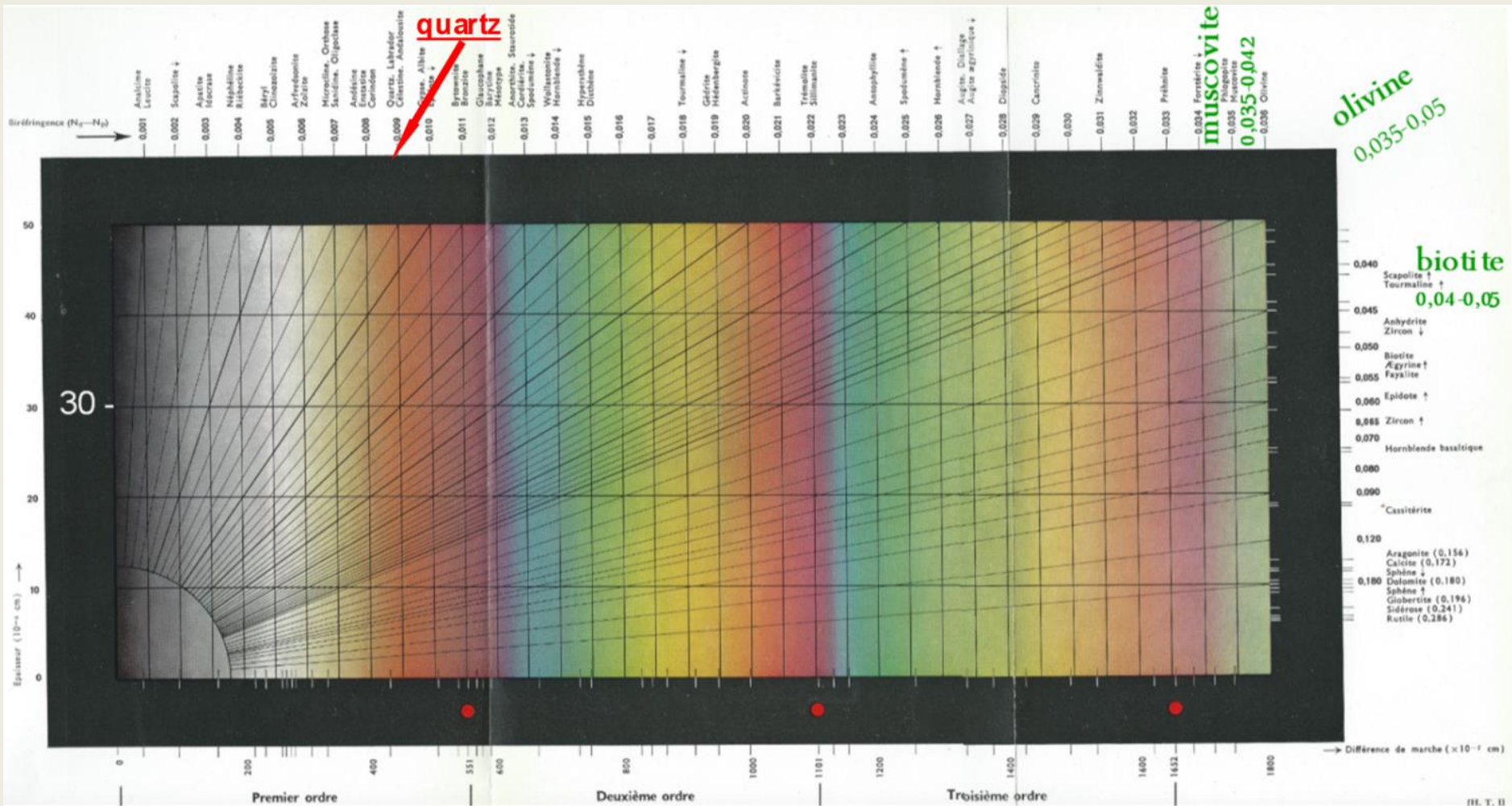
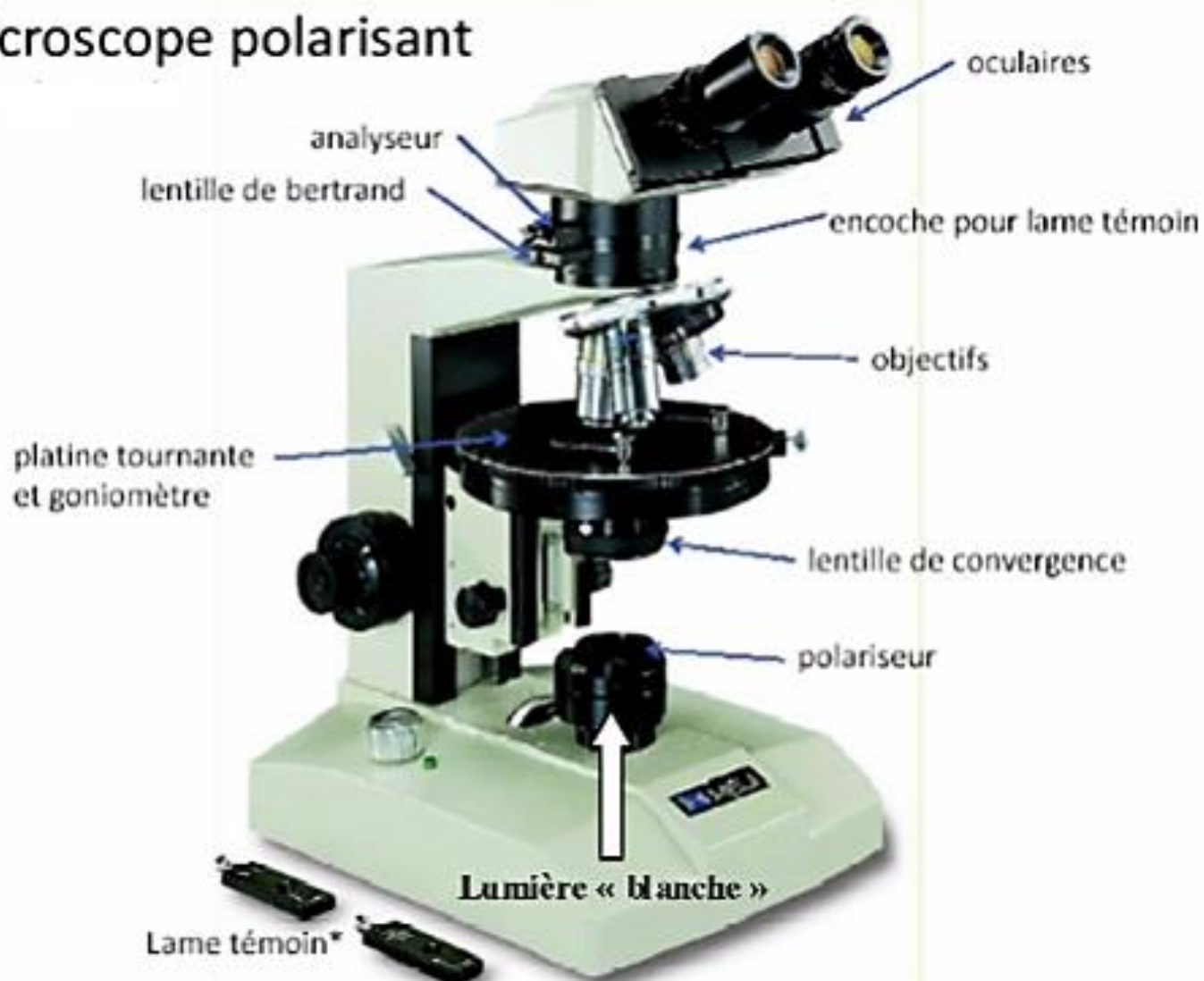
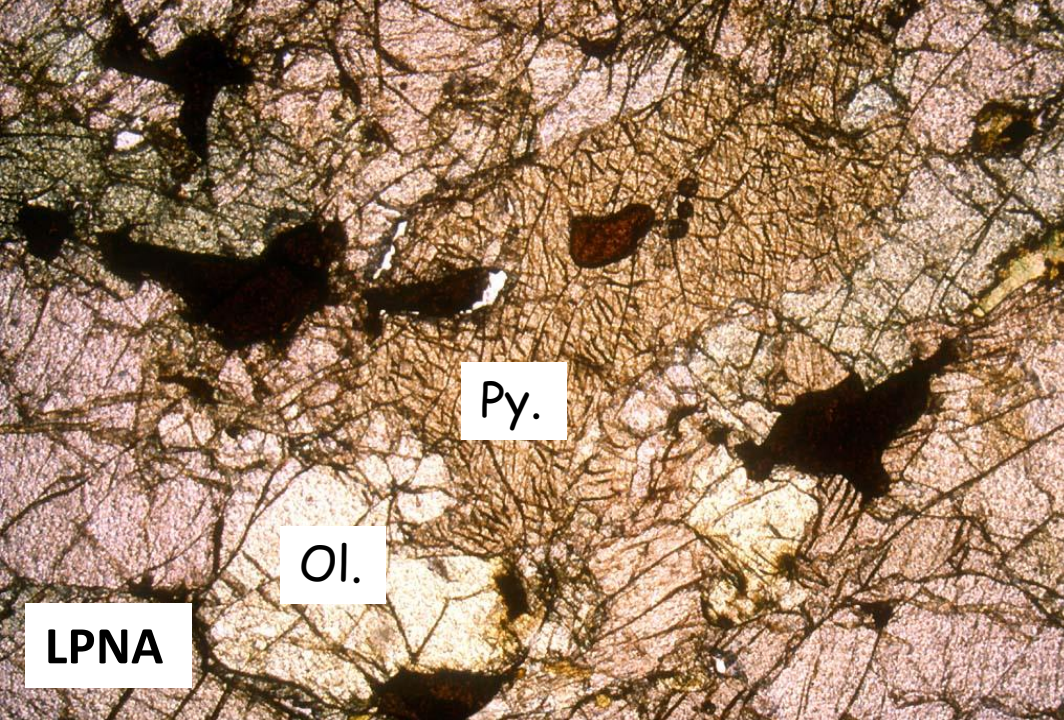


Illustration de l'observation de lames de géologie avec des filtres polarisants

<https://vimeo.com/66594488>

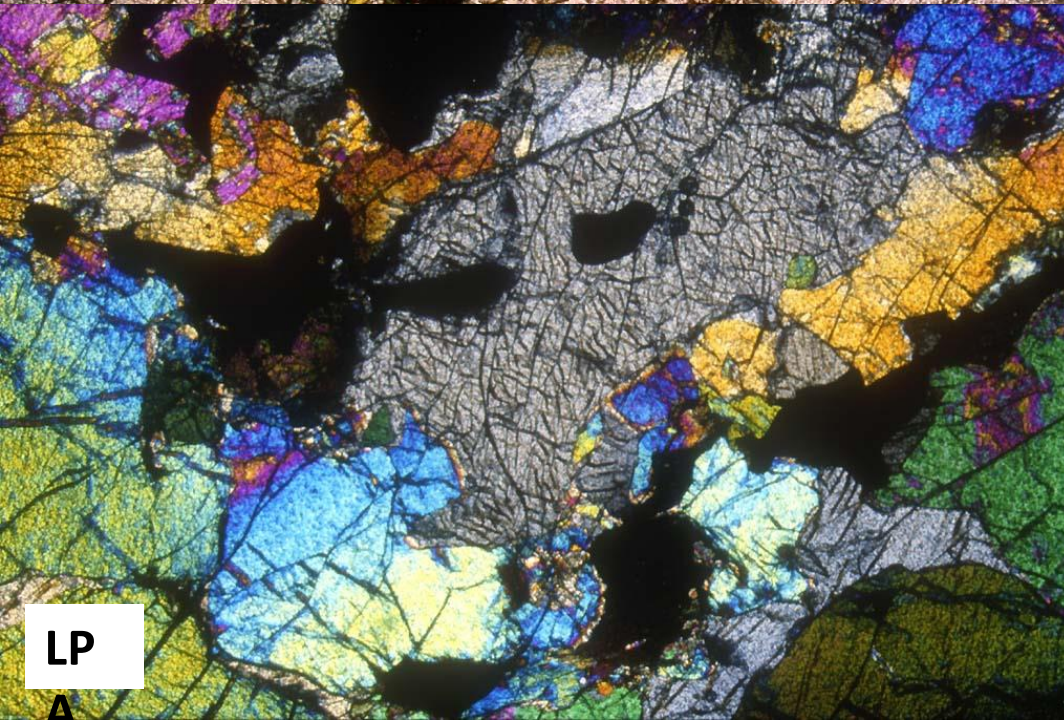
Le microscope polarisant





Les minéraux craquelés, incolores et présentant un fort relief en LPNA correspondent à des **olivines**. Elles polarisent dans des teintes vives (bleu, orangé, vert) en LPA.

Les minéraux gris en LPNA et gris soutenu en LPA correspondent à du **pyroxène**.



Conclusion :

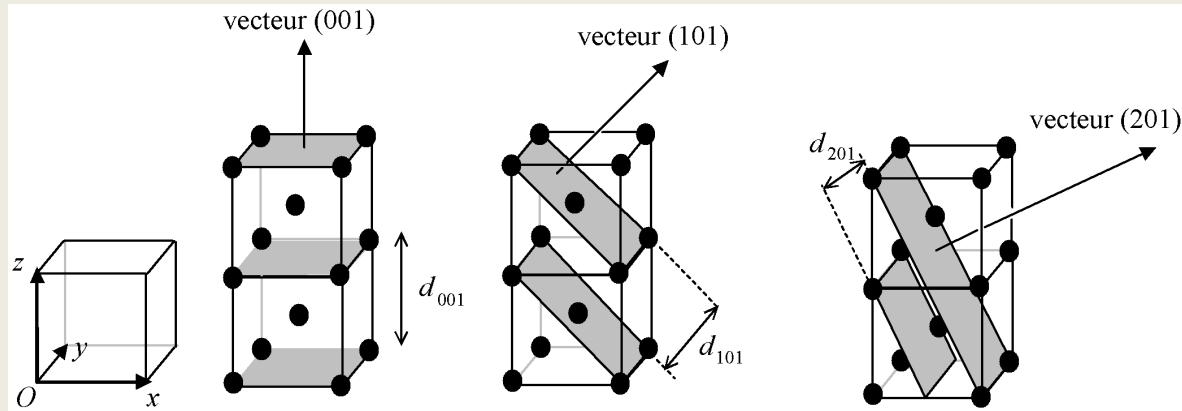
Cette roche grenue est une roche mantellique, il s'agit d'une péridotite.

LPNA : Lumière Polarisée Non Analysée

LPA : Lumière Polarisée et Analysée

Détermination de la structure cristalline par RX

❖ Plan réticulaire. Ex. : Système cubique centré



❖ Diffraction sur les plans

Interférences constructives si :

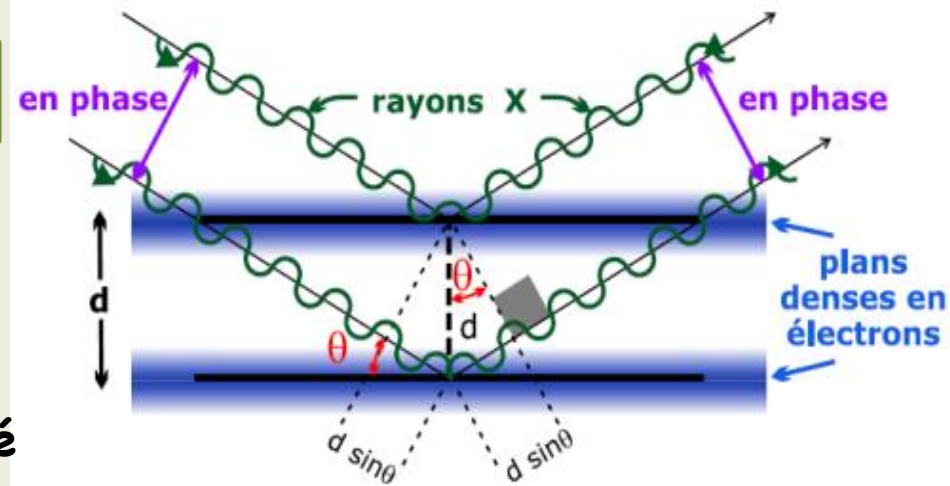
$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$$

connu

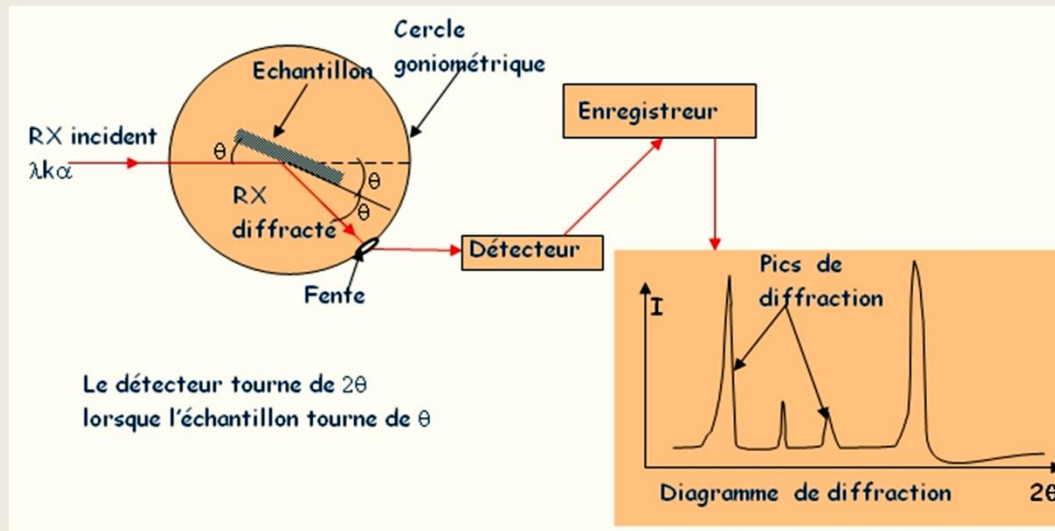
calculé

mesuré

Relation de Bragg



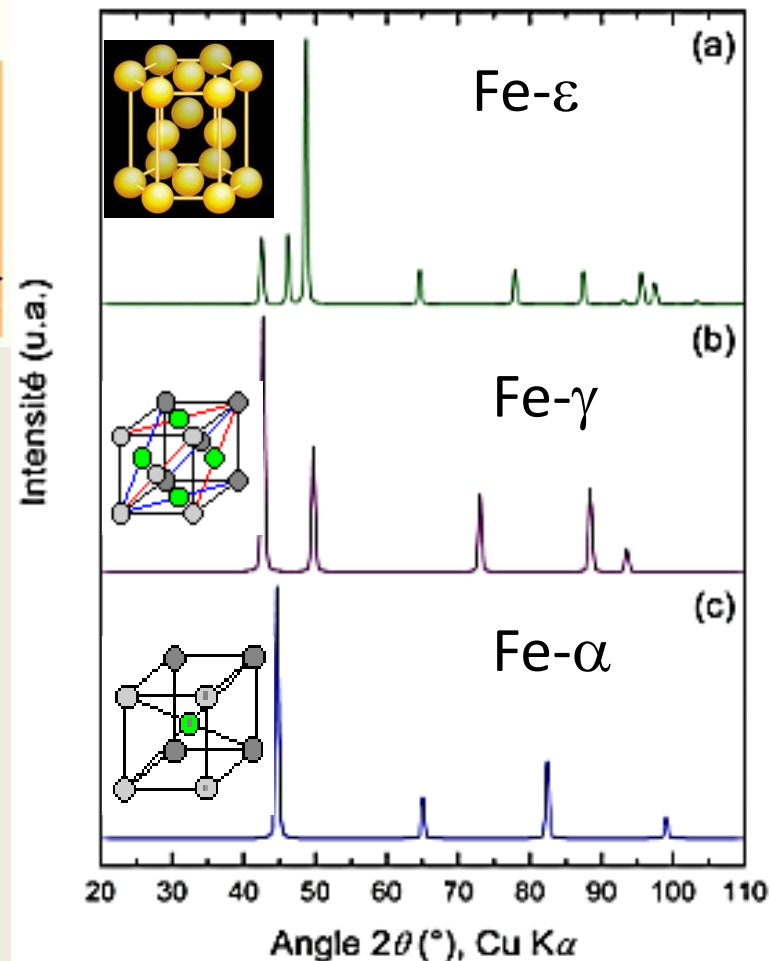
❖ Spectre de diffraction



A partir de la position et de l'intensité des pics de diffraction, on peut remonter à :

- la structure du cristal
- la position des atomes dans la maille

Exemple 1

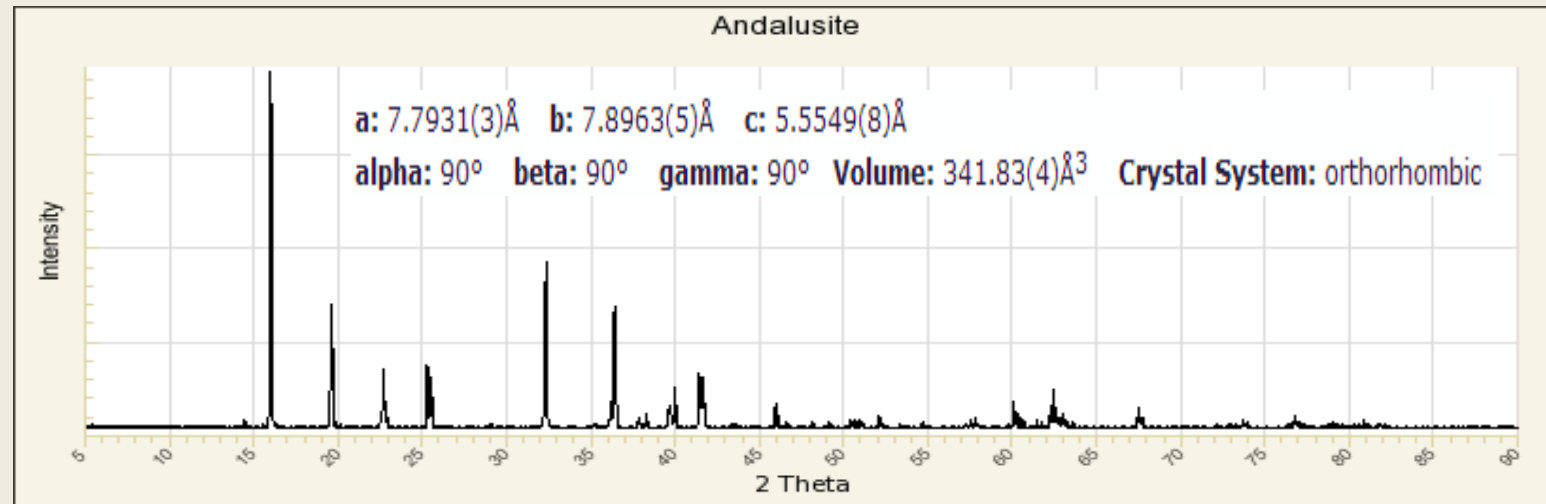
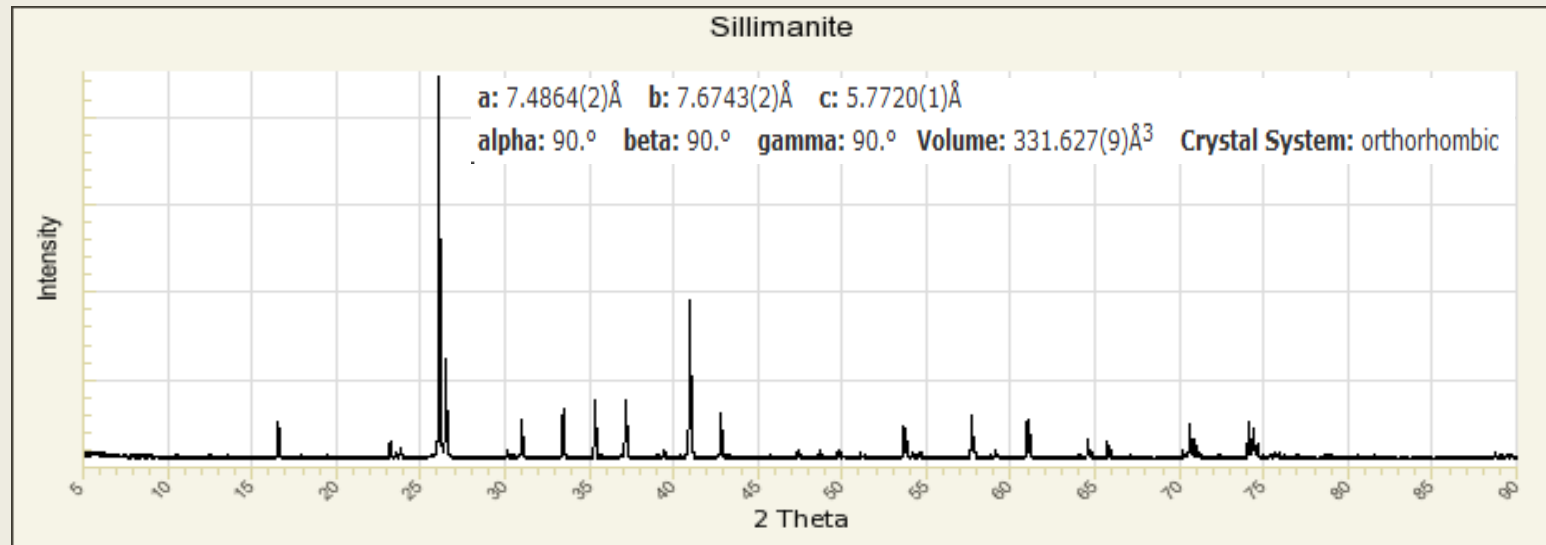


Exemple 2

Distinguer entre **Sillimanite** et **Andalousite** : Al_2SiO_5

Même formule chimique : Al_2SiO_5

Même système cristallin : Orthorhombique



Comment déterminer les propriétés des cristaux soumis aux conditions « géologiques » ?

(Structure cristalline, propriétés électriques et magnétiques)

Il faut les soumettre à :

- ✓ (très) hautes pressions
- ✓ et/ou (très) hautes températures

Pression :

$$P = \frac{\text{Force}}{\text{Surface}}$$

Quelques exemples :

- pression atmosphérique $P_{\text{atm}} \approx 1 \text{ kg/cm}^2 = 1 \text{ bar}$
- pression sous 10 m d'eau $P = 1 \text{ kg/cm}^2$ (« 1 atmosphère »)
- femme 60 kg, talon aiguille 1 cm^2 ; $P = 60 \text{ kg/cm}^2 = 60 P_{\text{atm}} = 60 \text{ bars}$ (aïe !)

Unités :

$1 \text{ bar} \approx 1 \text{ atmosphère} \approx 1 \text{ kg/cm}^2 = 10^5 \text{ Pascal (Pa)}$ (système international)

$1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa} = 10 \text{ kbar} = 10000 \text{ bars}$

1 - Appliquer la pression :

➤ Enclumes de Bridgman

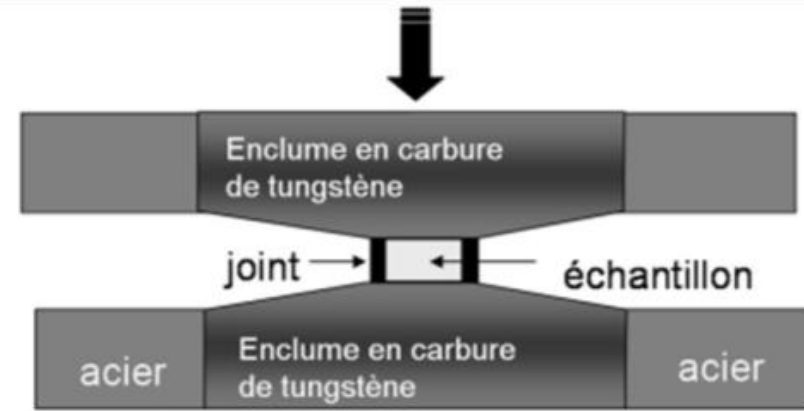
WC (carbure de tungstène)

$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (saphir)

Diamètre utile : 5 à 15 mm env.

Pression max. : 15 GPa env.

Cellule dans une presse hydraulique



➤ Enclumes de diamants

Diamètre utile : de 20 à 200 μm
(selon la gamme de pression voulue)

Hauteur utile : 20 μm env.

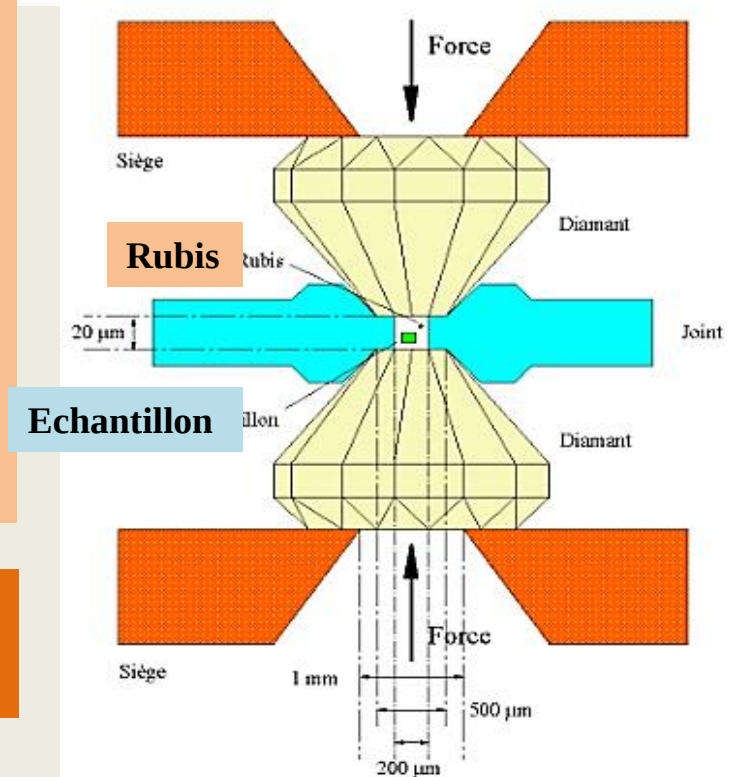
Joint métallique

Serrage mécanique (piston, vis en Invar)

Milieu transmetteur (hydrostaticité) :

alcool, NaCl, Ar, Ne, He

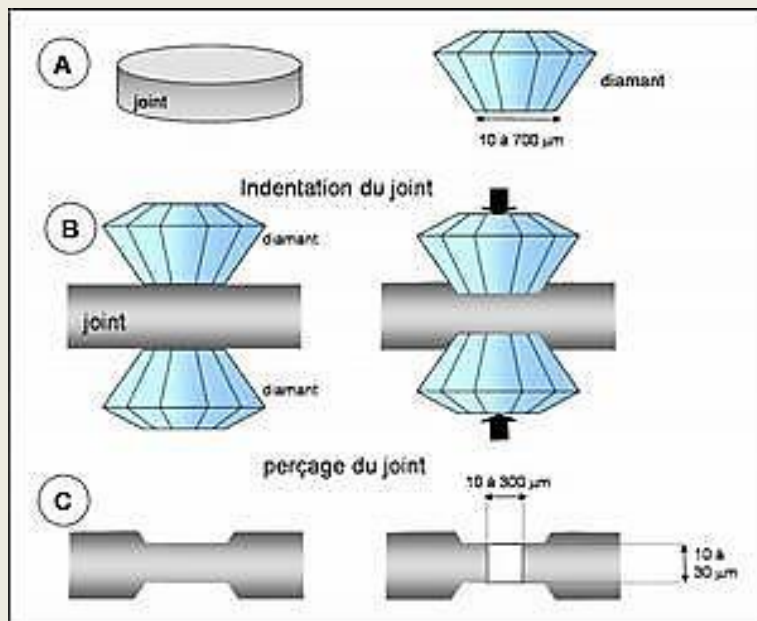
Pression max. : 300 GPa env.



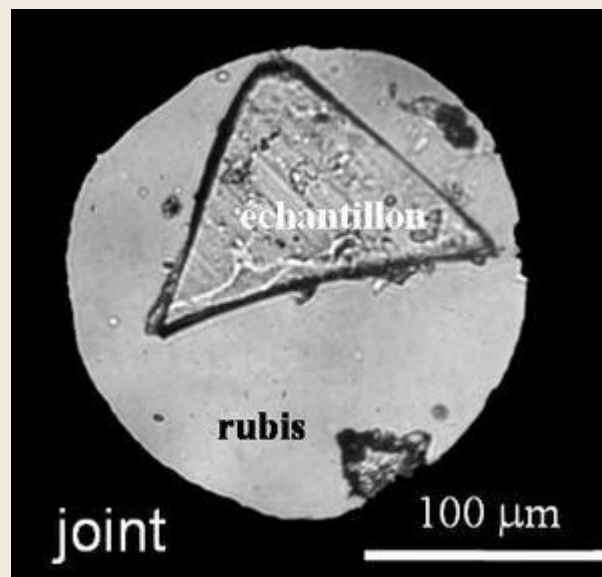
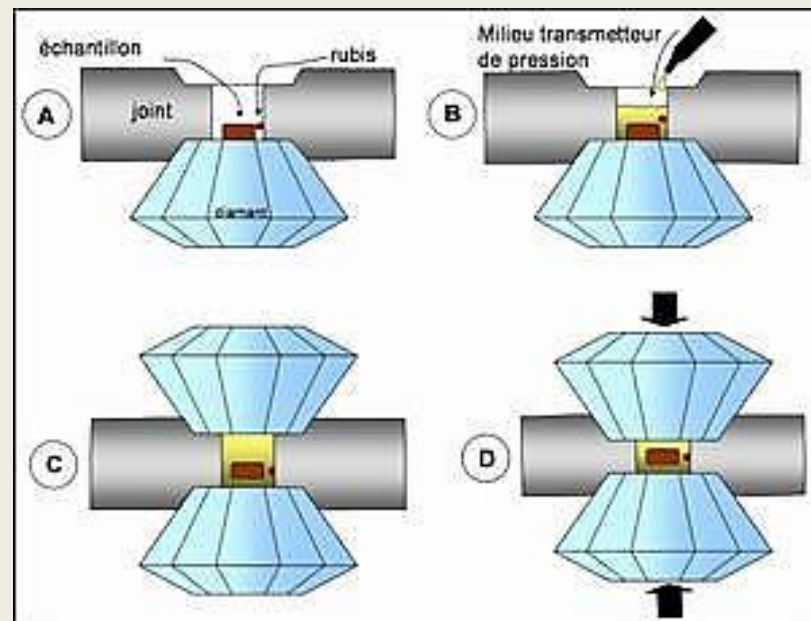
➤ Onde de choc : canon à gaz ; tir Laser

Pression : 1000 à 2000 GPa env.

Préparation du joint

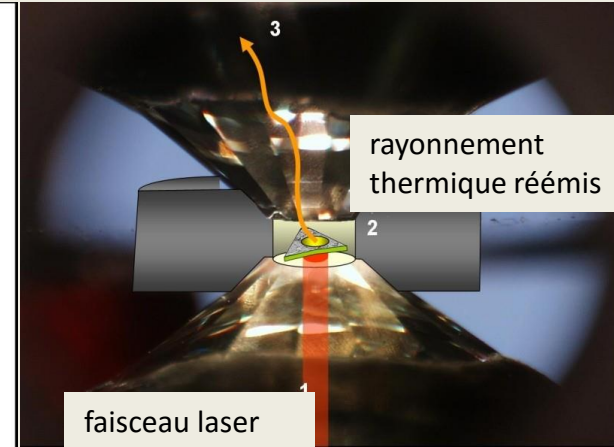
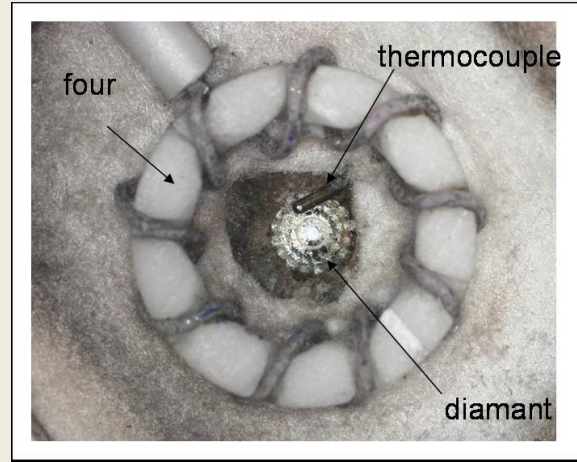


Montage de la cellule



2-Chauffer :

- Résistif (autour des diamants) $\approx 1000^{\circ}\text{C}$ max.
- Laser infra-rouge YAG : max. 5500°C env.

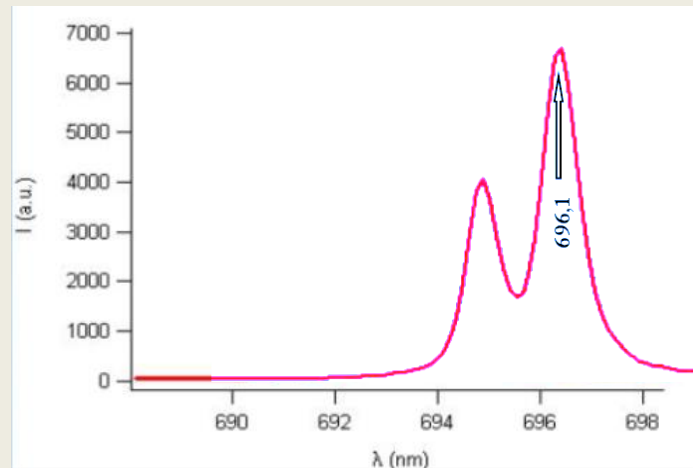
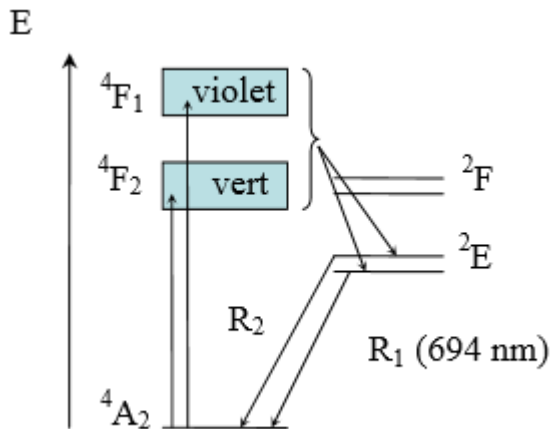


3-Mesurer la pression (cellule diamant) :

... avec le laser He-Ne (632,8 nm) sur le rubis ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Cr}$)

$$\begin{aligned} P(\text{GPa}) &= 2,75 \Delta\lambda \text{ (nm)} \\ &= 2,75 \cdot 1,8 = 4,95 \text{ GPa} \end{aligned}$$

Fluorescence du rubis

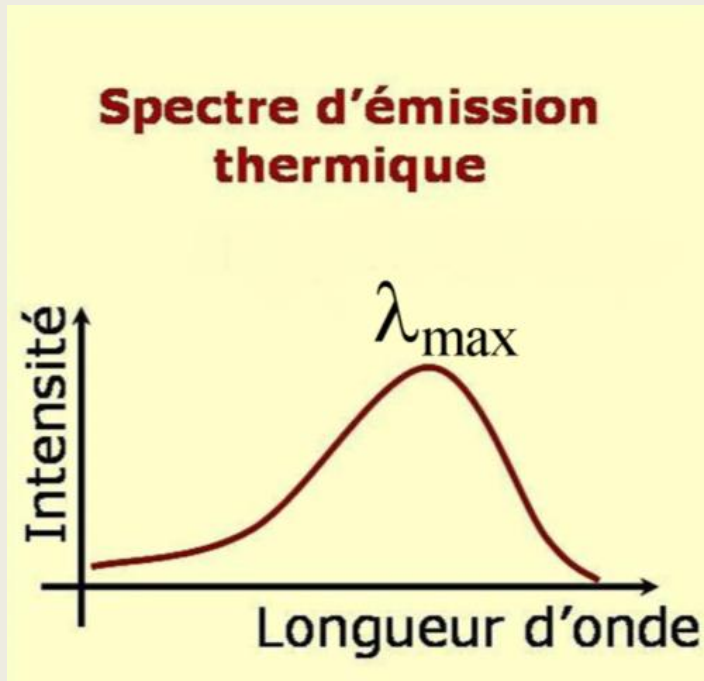


$$\Delta\lambda = 1,8 \text{ nm}$$

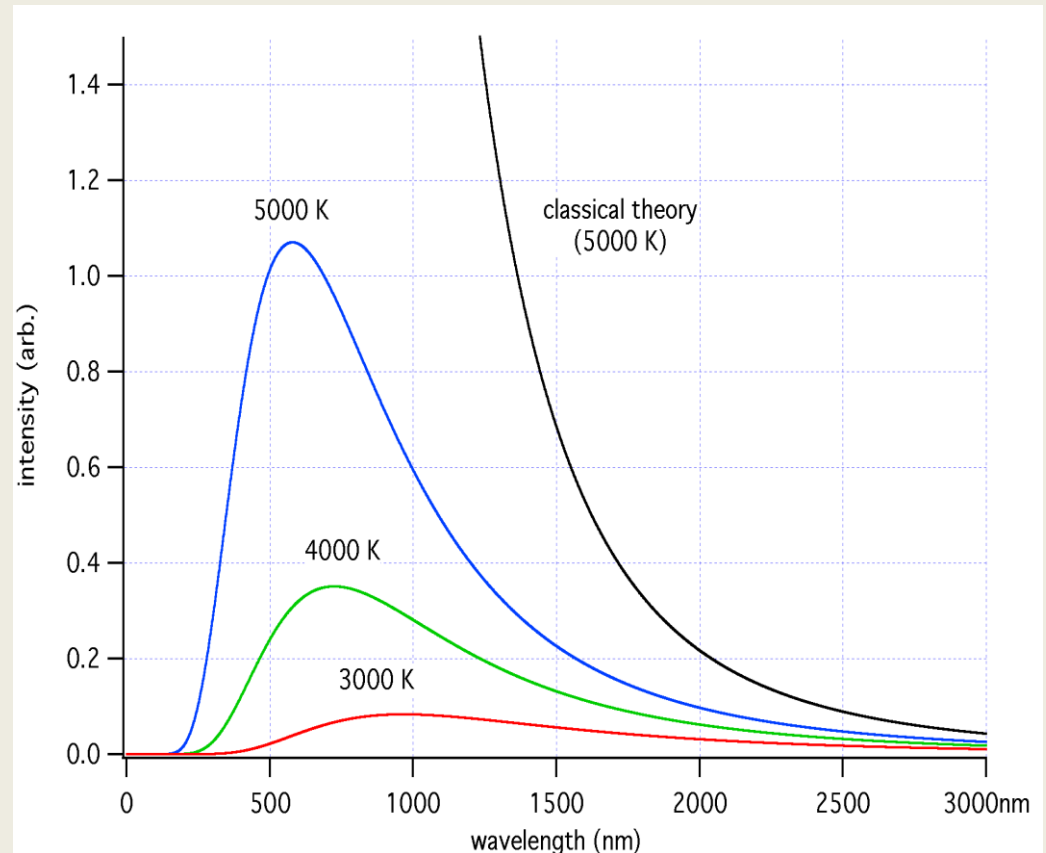
4- Mesurer la température :

- Chauffage résistif : sonde (thermocouple)
- Chauffage laser : analyse du rayonnement réémis

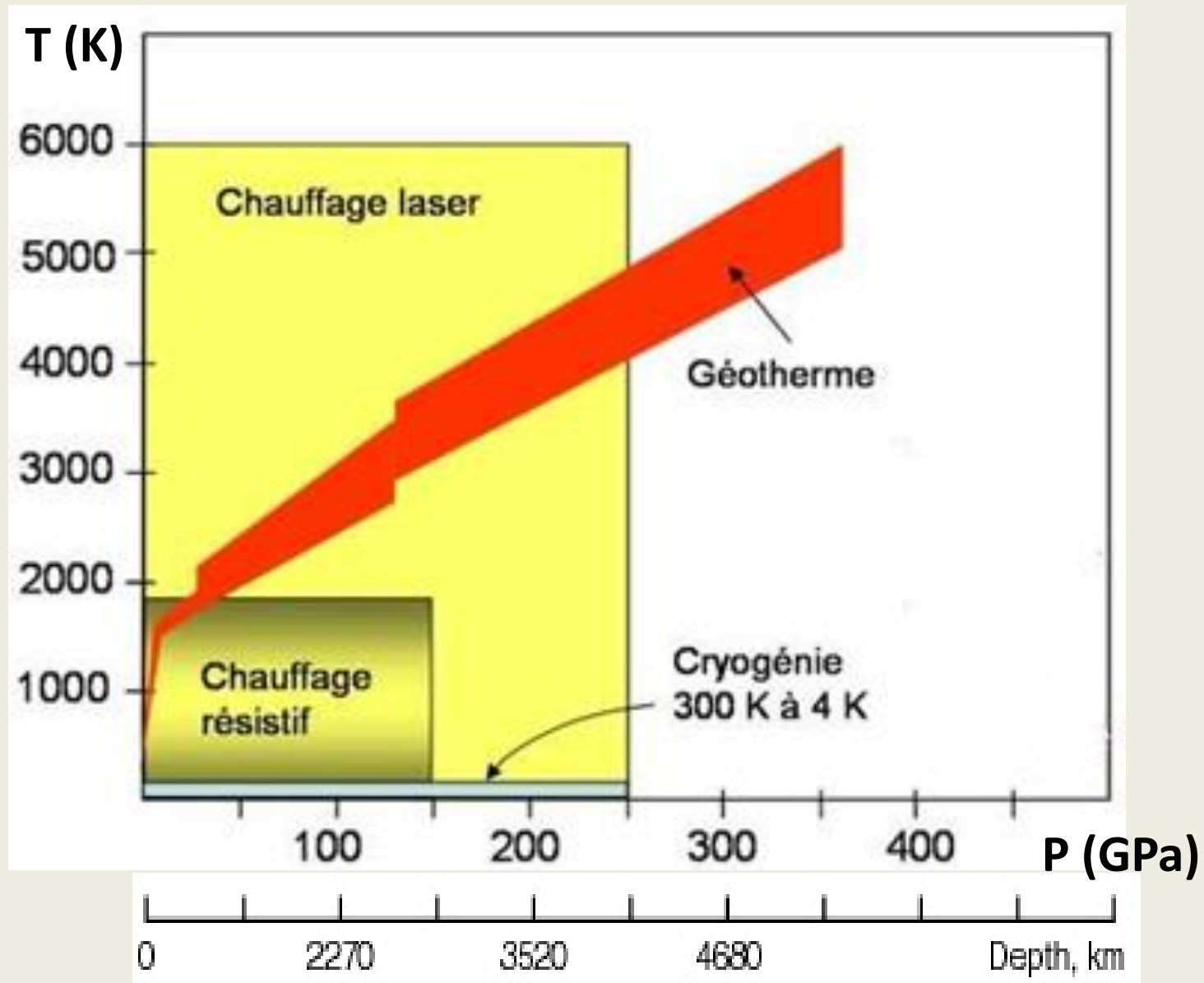
Modèle du « corps noir » : la forme du spectre électromagnétique ne dépend que de la température (Planck)



Loi de Wien : $T = \frac{\text{Constante}}{\lambda_{\text{max}}}$

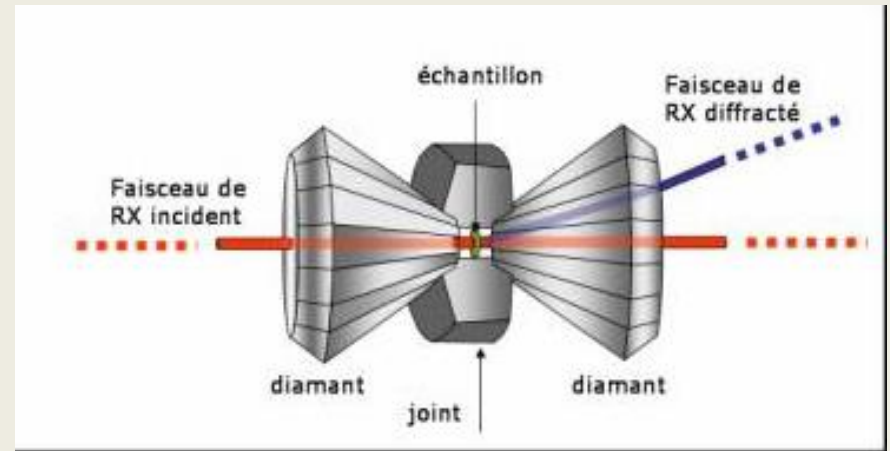


Domaine accessible avec une cellule à enclumes en diamant



5-Enregistrer le spectre de diffraction :

Echantillon très petit $\longleftrightarrow$ faisceau RX très intense



Spring-8, Japon

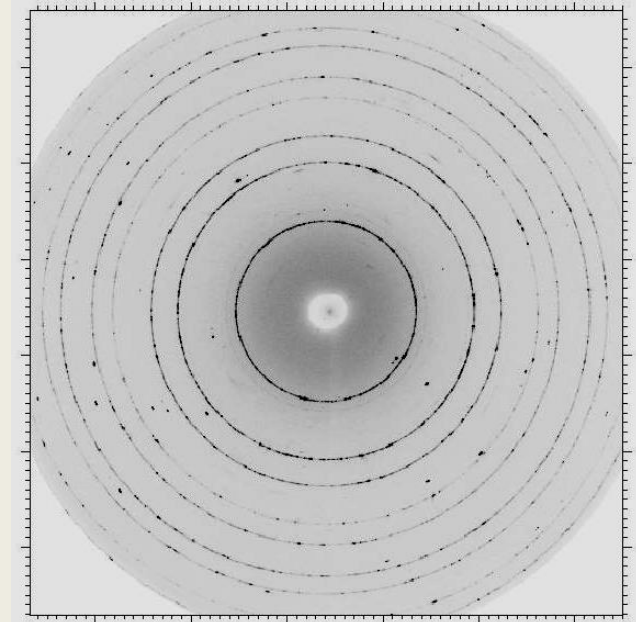
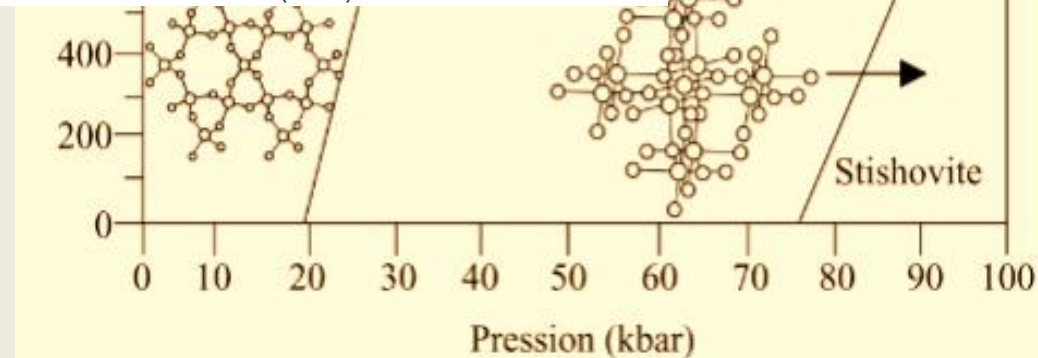
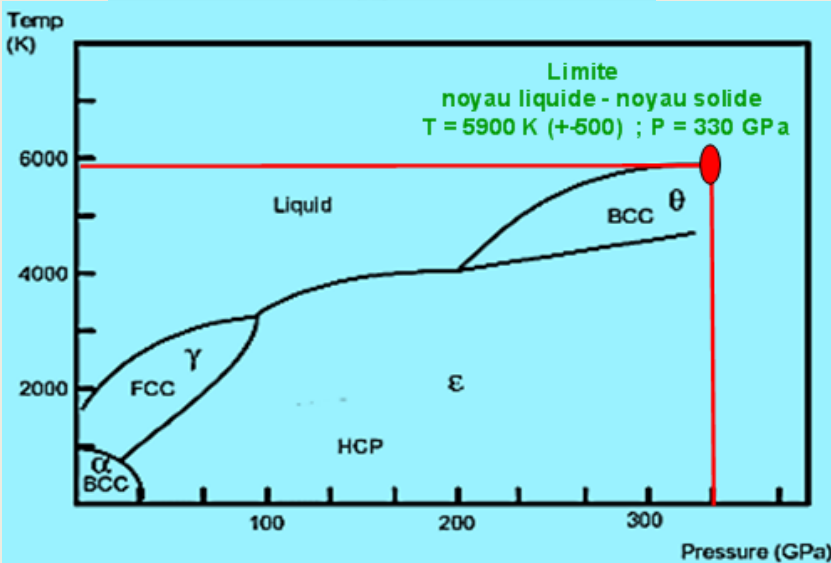
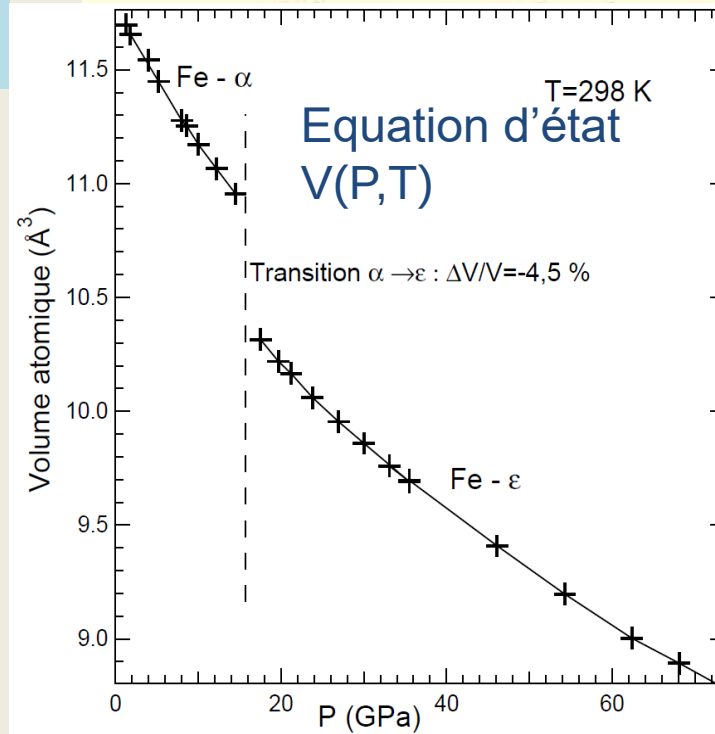
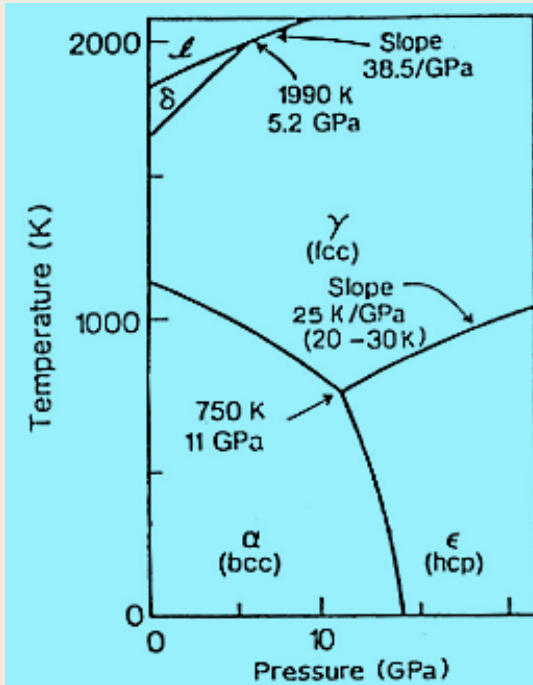


Diagramme de phase du Fer

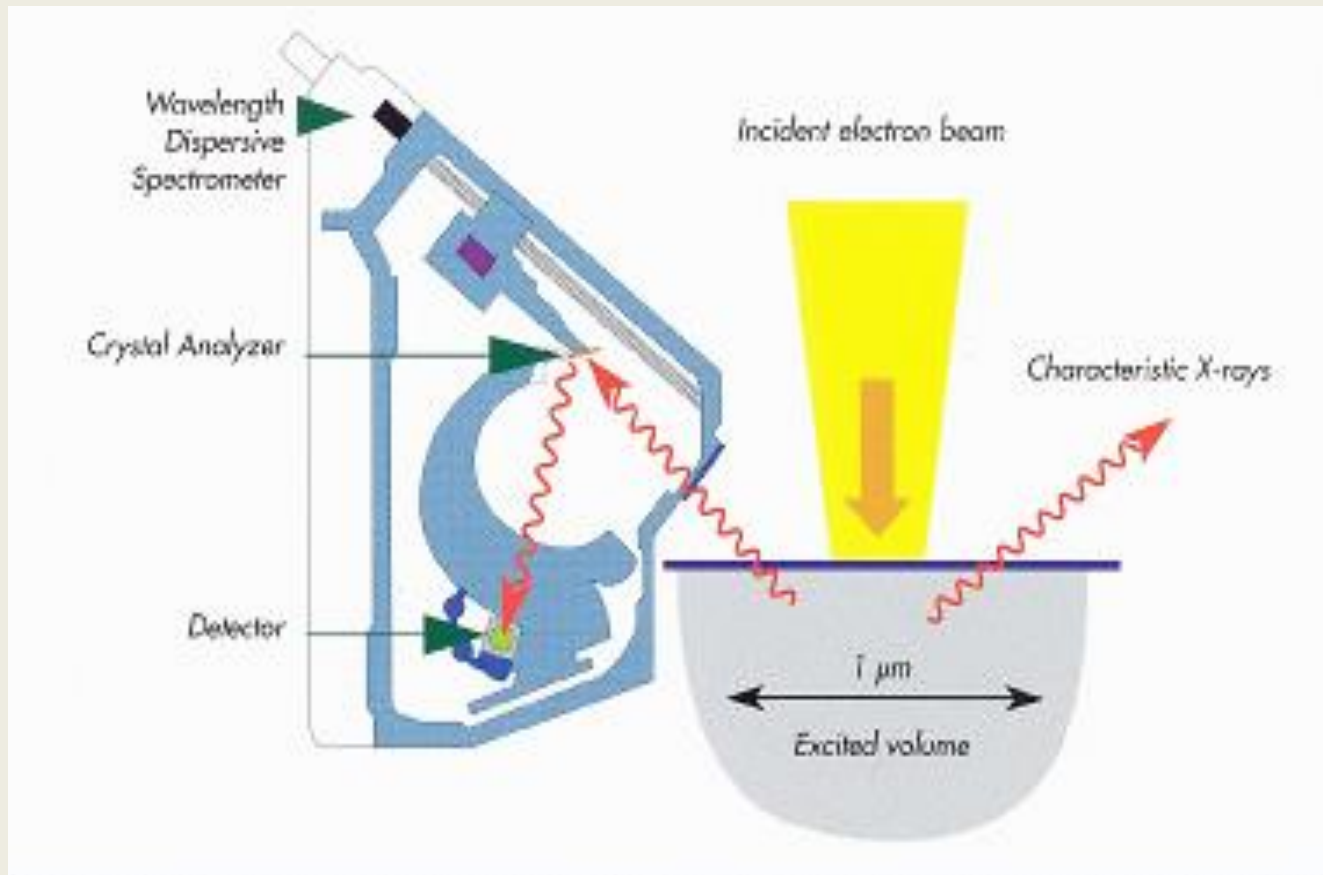


minéral	P.sp.	minéral	P.sp.
trydimite	2.26	quartz α	2.65
cristobalite	2.32	coesite	2.93

Microsonde électronique

Echantillon bombardé avec des électrons (ou des rayons X) :

- émission de rayonnements X **caractéristiques des éléments** du matériau.
- permet la détermination de la **nature chimique** et de la **composition** de la zone étudiée.

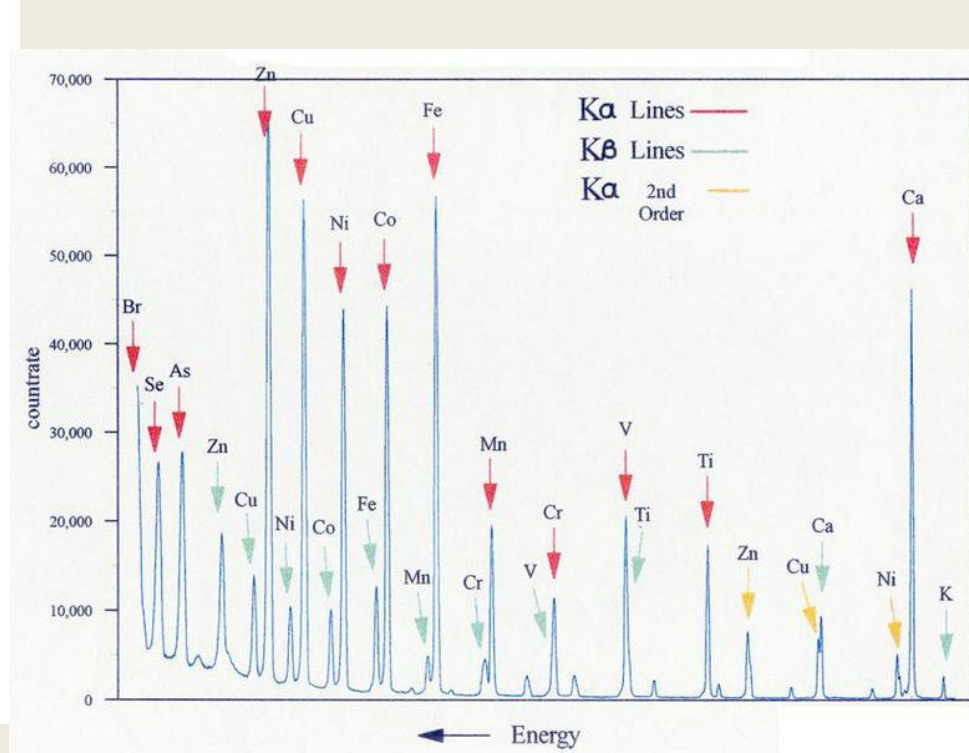
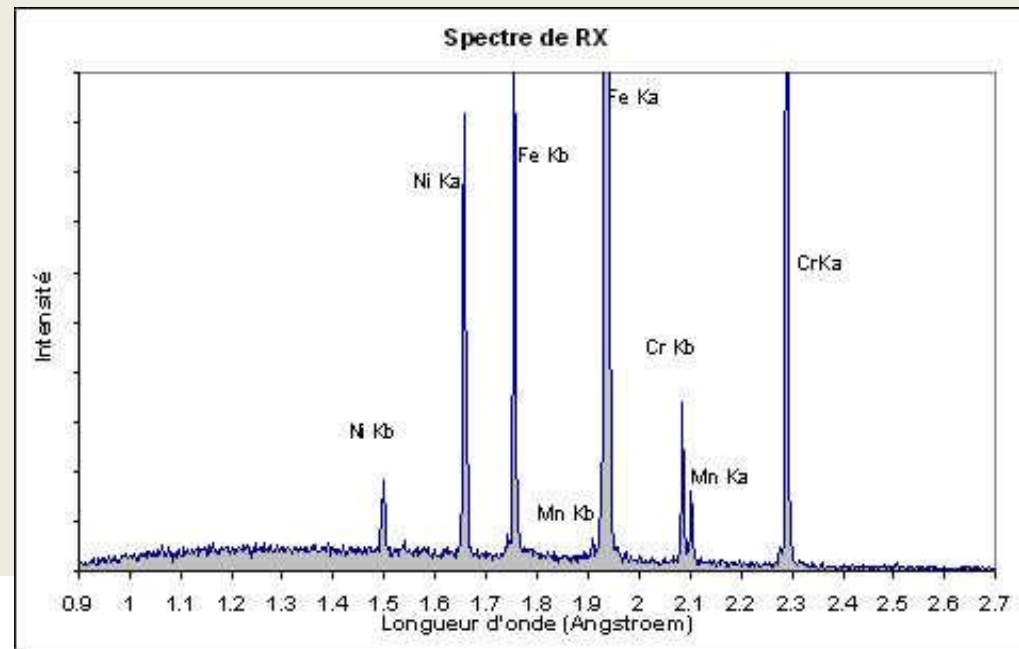
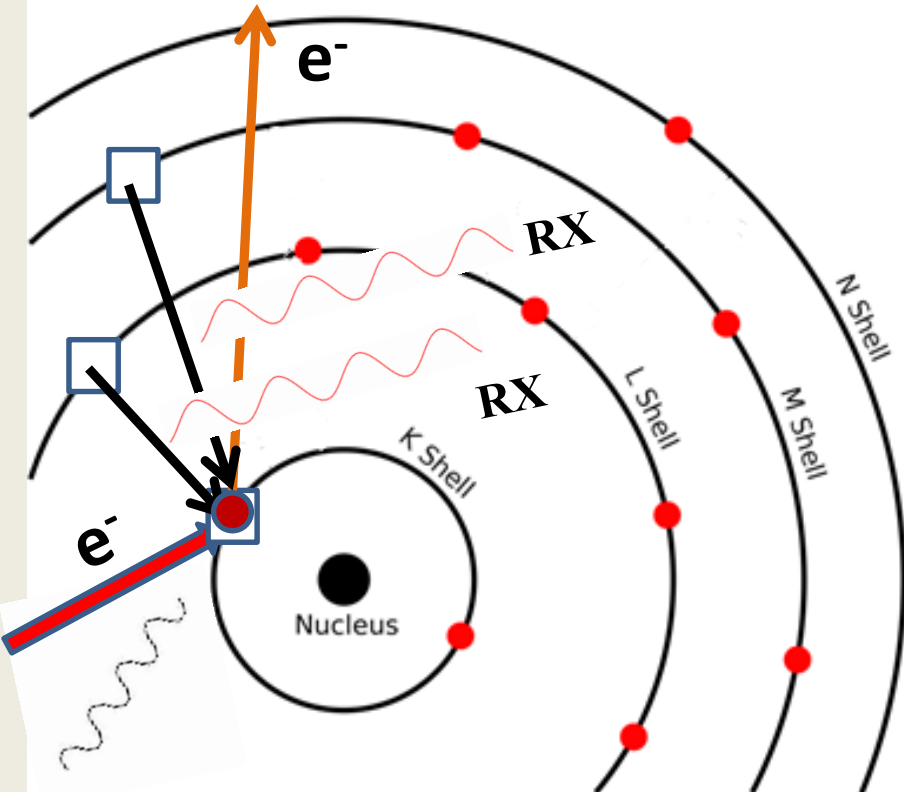


1- Interaction entre 1 électron (ou 1 rayon. é.m.) et 1 électron couche K

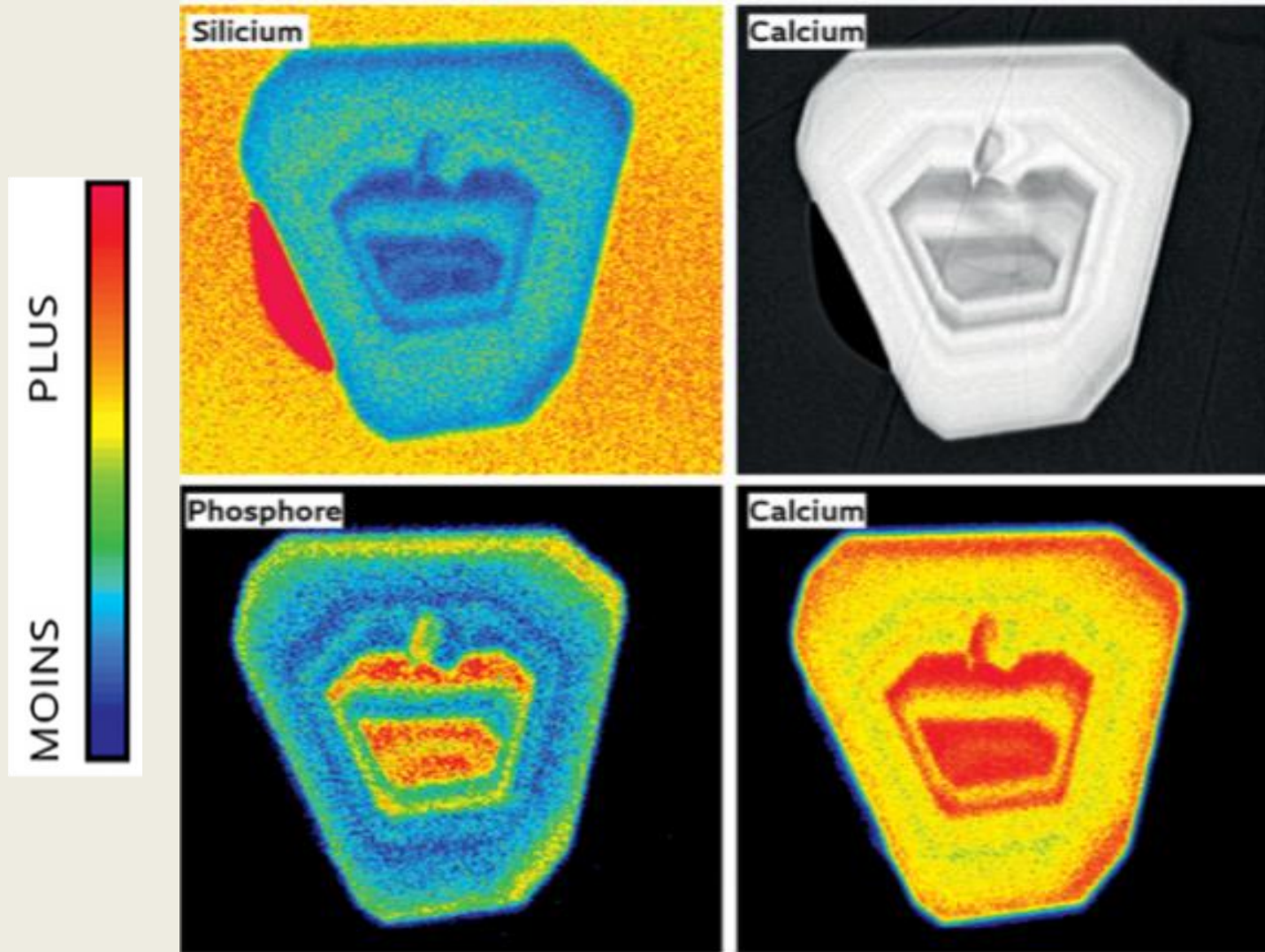
2- éjection de l'électron K
création d'une lacune

3- **comblement de la lacune** par 1 électron de la couche L ou M

4- **émission du rayonnement X** de longueur d'onde caractéristique de l'élément : $L \rightarrow K$ ou $M \rightarrow K$



Exemple 1 : La Britolite $(\text{Ca,Th,TR})_5(\text{SiO}_4,\text{PO}_4)_3$ (une pegmatite)

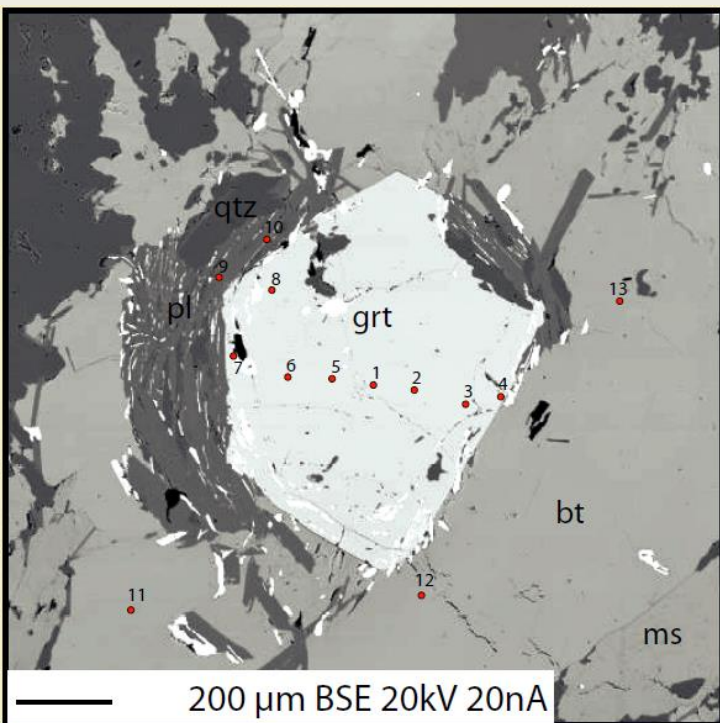


➡ Informations sur les conditions de croissance (P, T) des cristaux

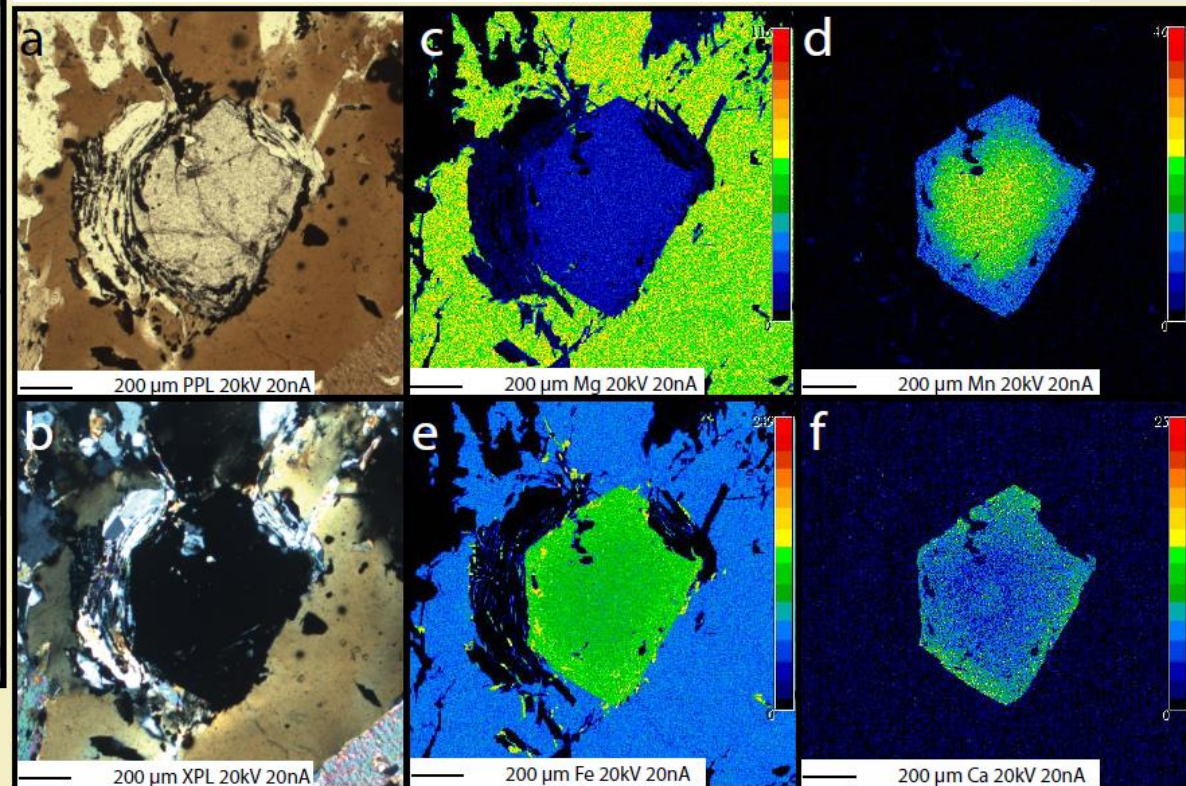
Exemple 2 : Détermination des conditions P-T du métamorphisme d'une roche formée de grenat, biotite, muscovite, sillimanite, plagioclase et quartz

Zonation des éléments Fe, Ca, Mn et Mg dans le Grenat $X_3Y_2(SiO_4)_3$

	Garnet Spot 1	Garnet Spot 2	Garnet Spot 3	Garnet Spot 4	Garnet Spot 5	Garnet Spot 6	Garnet Spot 7	Biotite	Muscovite	Plagioclase	Ilmenite
SiO ₂	37.234	36.917	37.118	37.000	37.104	37.183	37.295	35.461	45.875	65.499	0.170
TiO ₂	0.024	0.018	0.022	0.115	0.000	0.025	0.113	1.791	0.909		51.451
Al ₂ O ₃	20.952	20.868	20.990	20.635	20.791	20.813	20.890	19.397	35.969	22.046	0.054
Cr ₂ O ₃	0.012	0.034	0.030	0.012	0.018	0.017	0.052				0.018
MgO	2.366	2.379	2.285	2.231	2.386	2.316	2.160	9.465	0.492		0.021
CaO	0.562	0.754	0.880	1.390	0.587	0.765	0.960	0.047	0.000	2.721	0.000
MnO	8.808	7.526	5.914	1.499	8.682	7.731	3.882	20.264	1.063		0.776
FeO	31.544	32.242	34.037	35.719	31.288	32.010	35.958	0.285	0.931	0.008	46.293
Na ₂ O	0.053	0.027	0.001	0.034	0.009	0.027	0.013	8.718	9.519	10.329	0.024
K ₂ O	0.004	0.004	0.000	0.014	0.008	0.007	0.013	3.948	4.506	0.052	0.074
Σ	101.359	100.767	101.277	100.649	100.873	100.894	101.316	99.376	99.264	100.655	98.881

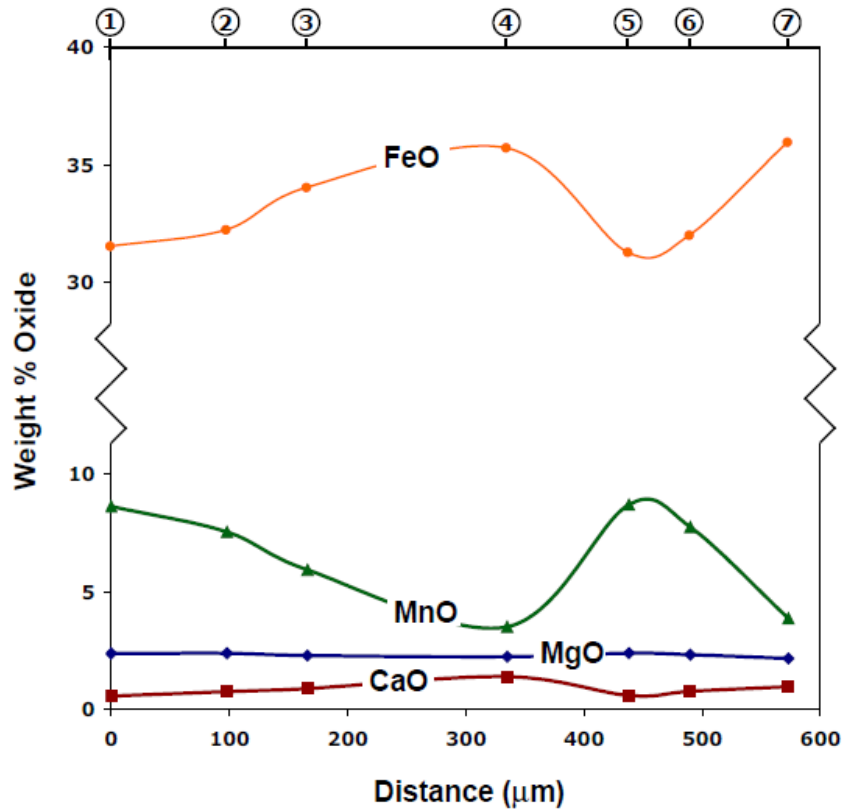


Back-scattered electron (BSE) image of sample 07FMN01. Quantitative spot analyses of various mineral phases have been labeled (grt=garnet; sil=sillimanite; ms=muscovite, bt=biotite, qtz=quartz; pl=plagioclase).

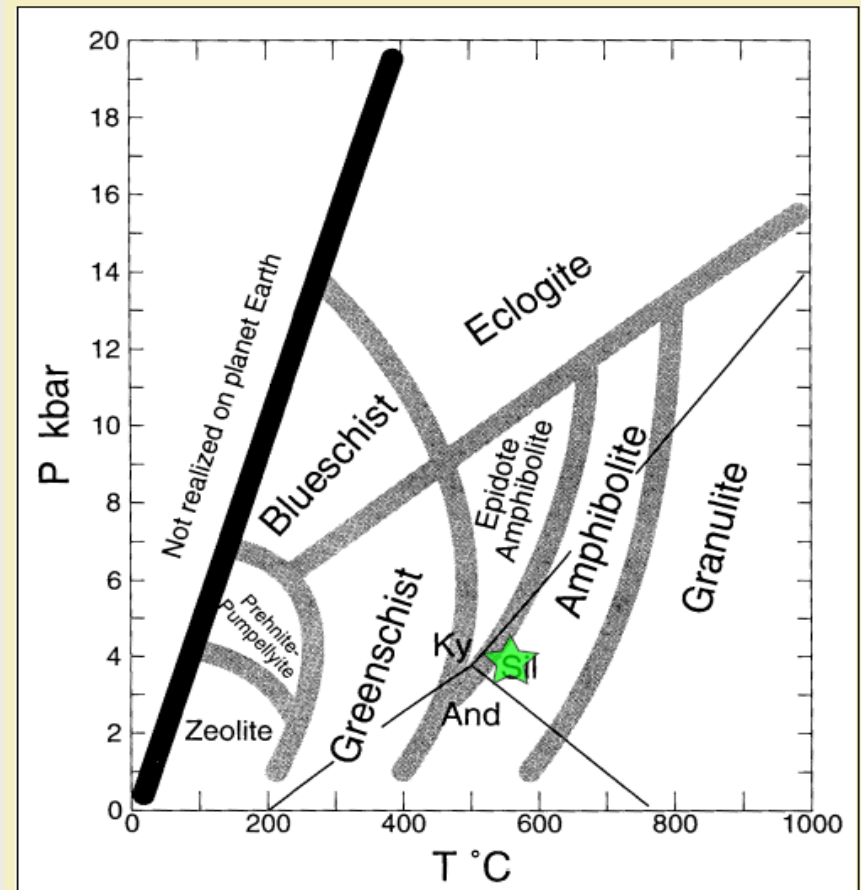


Garnet zoning in sample FMN0701. a) Plane-polarized light; b) Cross-polarized light; c-f) Garnet zoning observed using X-ray maps for various elements.

Garnet Traverse Spot Location



Elemental zoning profile for sample 07FMN01

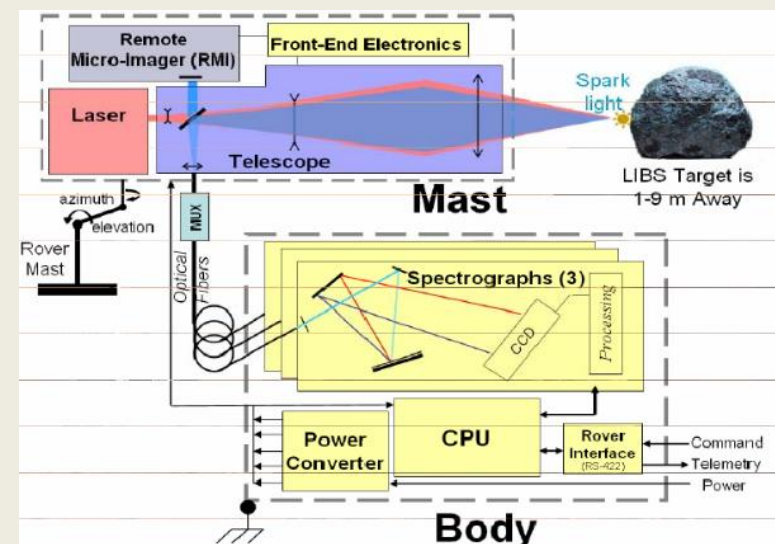
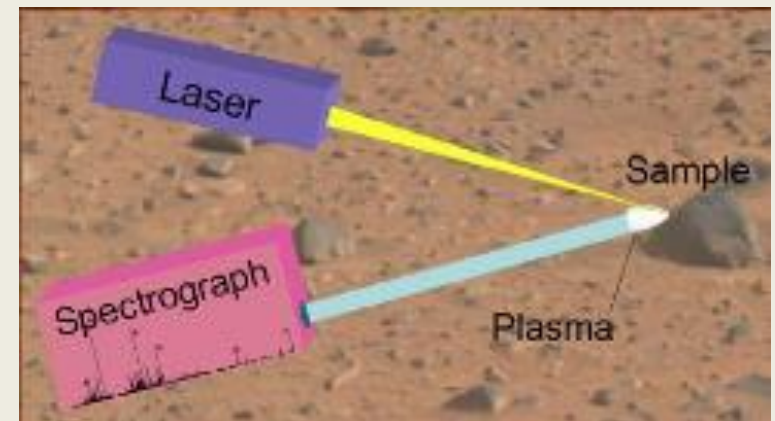
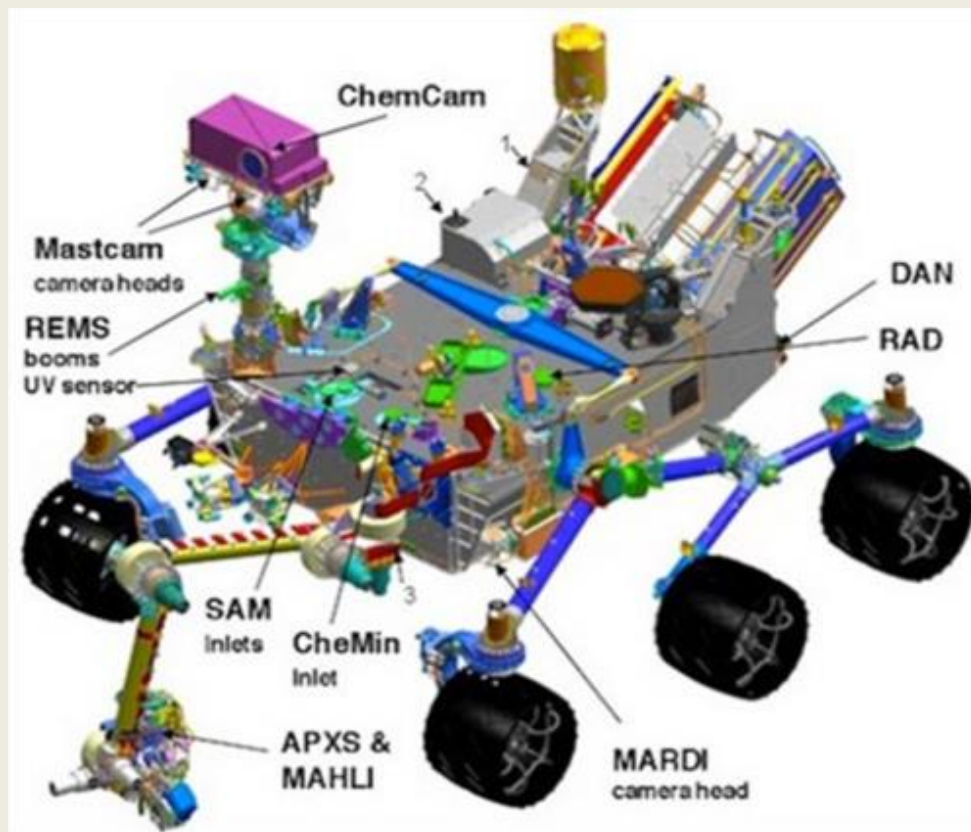


General metamorphic facies diagram showing the determined location of sample 07FMN01

Conclusion : $P = 3,0- 3,5 \text{ kbar}$ $T = 500 - 600^{\circ}\text{C}$

Exemple 3 : Roches martiennes analysées par le spectromètre ChemCam de la sonde Curiosity

- Tirs « laser » à 7-8 m de distance (5 ns , 30 mJ) (plus de 100000 tirs à ce jour)
- Formation d'un plasma, création de lacunes électroniques puis émission des RX caractéristiques des éléments

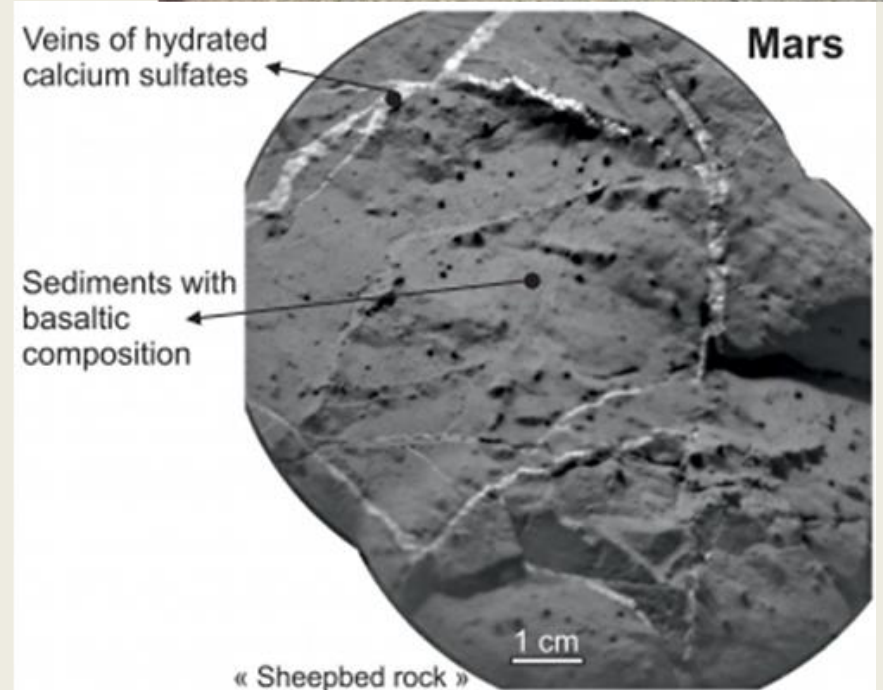
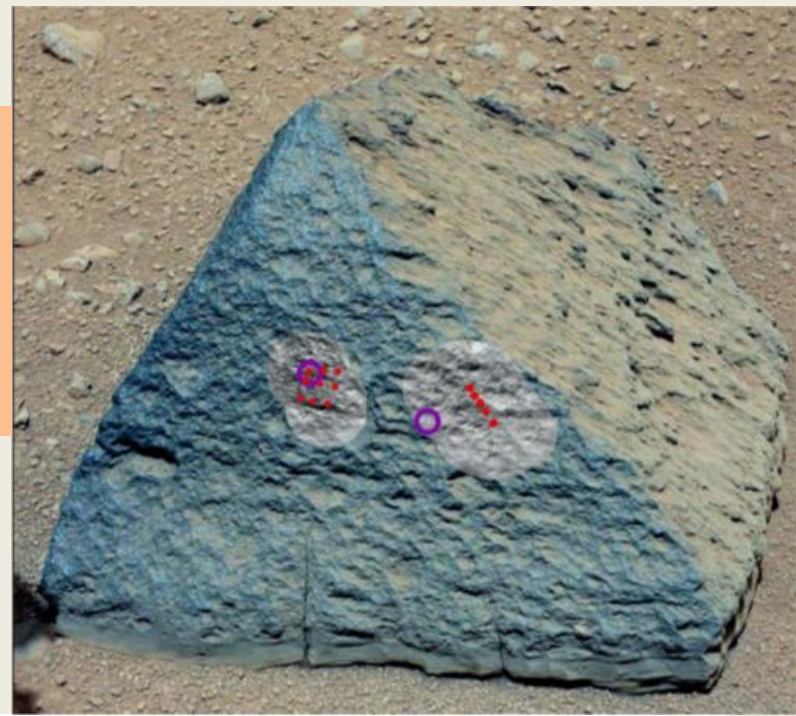


❑ Découverte d'une roche (20 cm env.) constituée d'un basalte alcalin (pauvre en silice et riche en Na et K)
→ vient d'un magma HP et HT

❑ Présence de Silicium, Aluminium et Alcalins dans des graviers de quelques mm

❑ Découverte de grains plus fins riches en Fer et Magnésium

❑ Découverte de Sulfate de Calcium (gypse) : présence passée d'eau dans un contexte volcanique (eau peu acide)



Les « myrtilles » de Mars



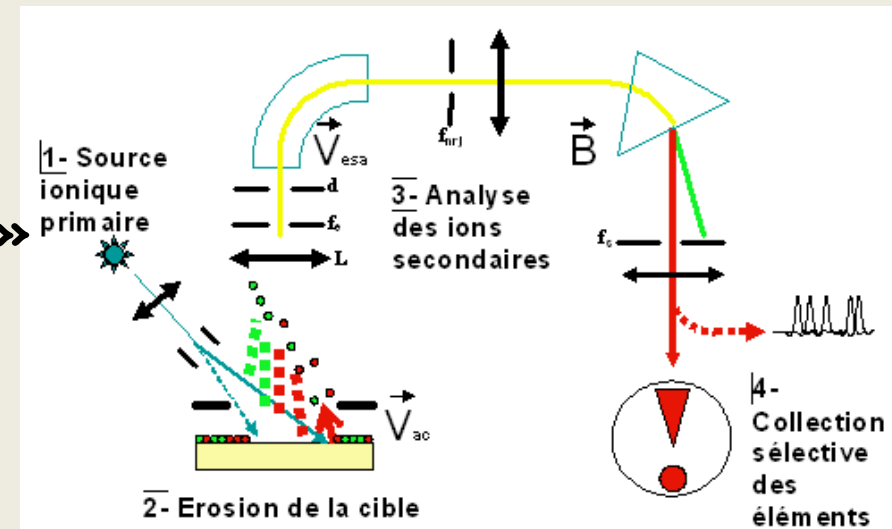
Concrétions d'hématite cristalline (diamètre 5 mm environ)
dues à des circulations d'eau souterraine

Microsonde ionique

1- Echantillon bombardé par un faisceau d'ions « primaires »

2- Production d'ions « secondaires » arrachés à l'échantillon

3- Ces ions « secondaires » sont analysés et identifiés dans un spectromètre de masse



✓ Permet des analyses *in situ* sur des échantillons solides

✓ Résolution spatiale micrométrique :

- diamètre d'analyse de 0,2 à 100 μ
- profondeur d'analyse inférieure à 0,1 μ

Un exemple d'analyse : les Zircons (ZrSiO_4) de la formation de Jack Hills (ouest de l'Australie)

- Mesure des proportions relatives de ^{235}U , ^{238}U , ^{206}Pb et ^{207}Pb :

 **âge** (méthode U-Pb)

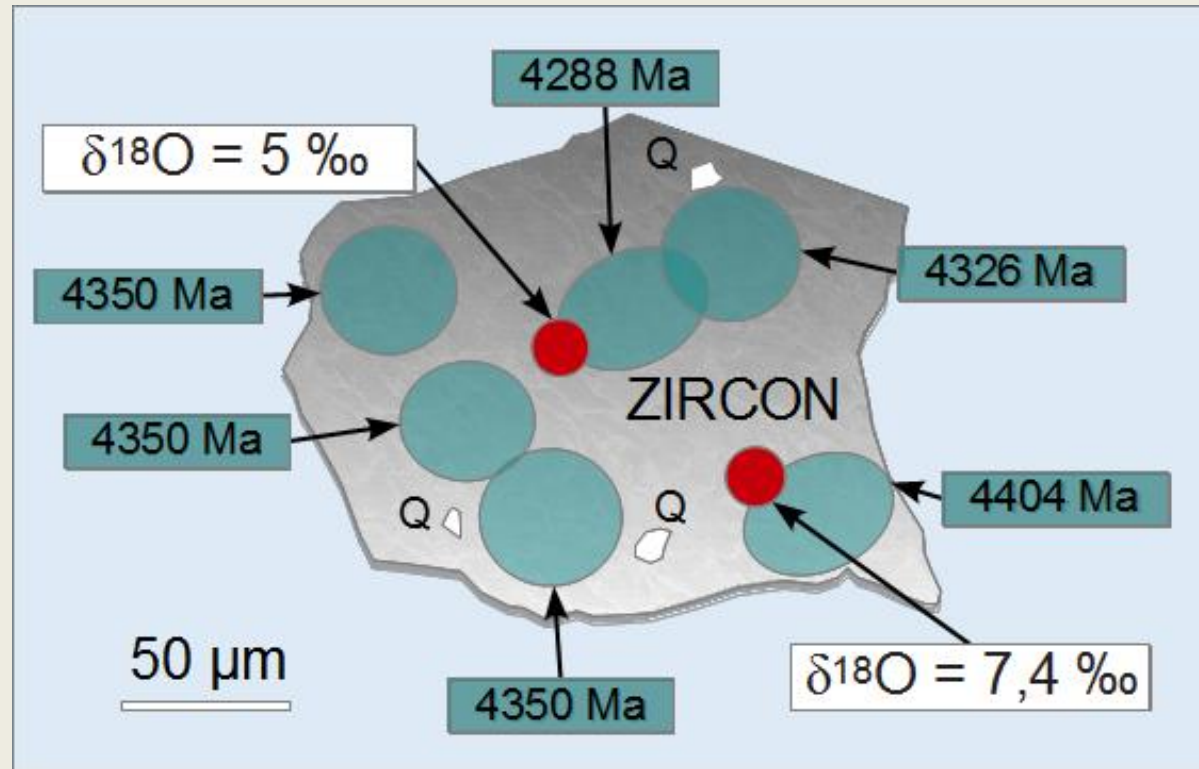
- Mesure des proportions relatives ^{18}O , ^{16}O :

mesure du déplacement isotopique $\delta^{18}\text{O}$ (géologie isotopique)

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{échantillon}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (\text{unité : } \text{‰})$$

 **conditions de formation**

Échantillon
W74/2-36



Résultats :

- ✓ Échantillon zoné; âge compris entre 4,29 et 4,40 milliards d'années
- ✓ Zone centrale formée à partir d'un magma sec car $\delta^{18}\text{O} = 5 \text{ ‰}$
- ✓ A la périphérie la cristallisation s'est terminée dans un magma granitique refroidissant au contact d'eau liquide car $\delta^{18}\text{O} = 7,4 \text{ ‰}$

Ce zircon témoigne de la présence d'une croûte continentale et d'un océan sur la Terre il y a 4,4 Ga .





Merci pour votre patience