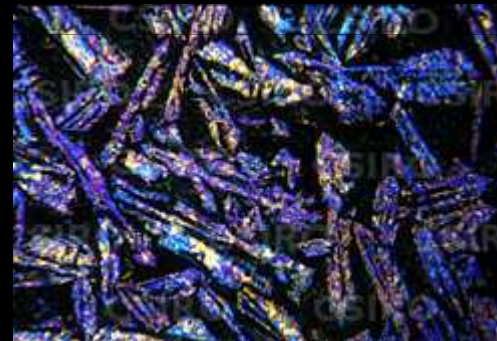
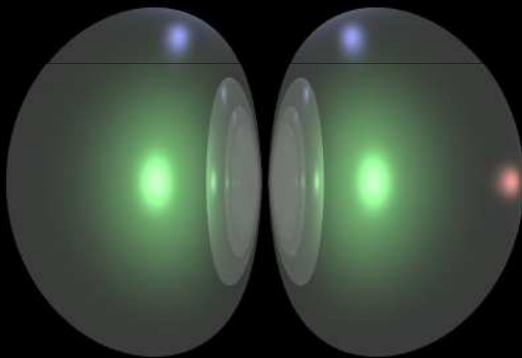


Cristallographie, minéralogie, pétrologie. Rappels?



En outre, la maîtrise du programme nécessite de connaître :

- les notions de physique et de chimie (thermodynamique, notamment) nécessaires à la compréhension des phénomènes biologiques et géologiques ;

Notions - Contenus	Précisions - Limites
1 - La Terre dans le système solaire	
1.1 Le fonctionnement du Soleil.	Seule une connaissance des grandes caractéristiques du système solaire est attendue.
1.2 Les différents types de corps du système solaire : planètes telluriques et non telluriques, astéroïdes, comètes, météorites.	Bien que le programme soit limité à la connaissance du système solaire, des bases concernant la nucléosynthèse sont attendues.
1.3 La spécificité de la Terre.	
2 - La structure interne de la Terre	
2.1 La masse de la Terre.	La masse de la Terre est présentée comme une donnée utile à la connaissance de la structure interne de la Terre.
2.2 La nature et les propriétés physico-chimiques des constituants (roches et minéraux) des enveloppes terrestres internes.	À partir des études sismiques, pétrographiques et expérimentales.
2.3 Les météorites et la différenciation chimique de la Terre.	
2.4 Le modèle radial de la Terre.	

- l'exploitation des images géophysiques de la Terre ;

- l'utilisation d'analyses géochimiques : éléments majeurs, traces, isotopes ;

1. Cristallographie, cristallographie

- La maille élémentaire
- Systèmes cristallins
- Macles et clivages
- dislocations
- Les solutions solides

2. Les grandes familles de silicates

- le tétraèdre SiO_4
- Exercice sur les formules structurales

- les péridots
 - pyroxènes et amphiboles
 - les feldspaths
 - les phyllosilicates
- Reconnaissance d'échantillons macros.

3. De la roche au minéral

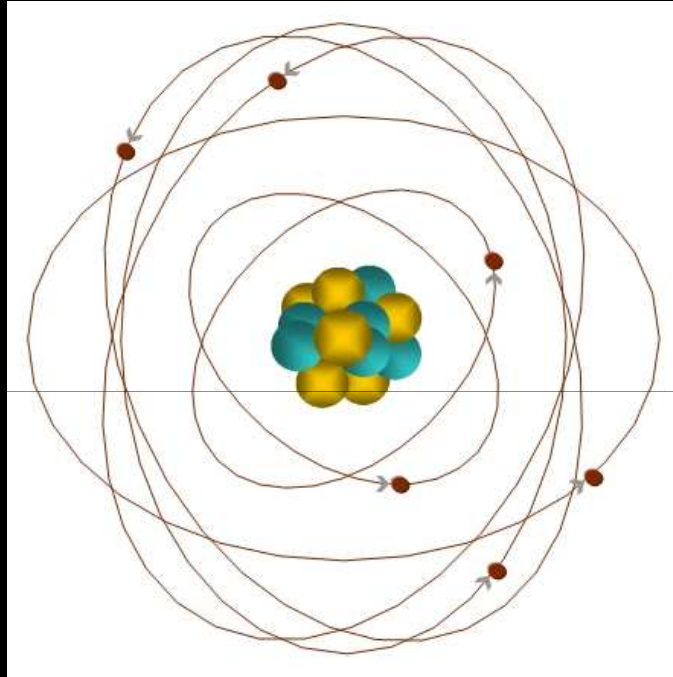
- La cristallisation
- Diagramme de phase
- Série de Bowen
- Les zonations

4. Minéraux et déformations

- La cristallisation
- Diagramme de phase
- Série de Bowen
- Les zonations

1. L'atome

Qu'est ce qu'un atome?



Atome=« ne peut pas être coupé »

Atome= noyau + électron

Noyau= proton + neutron

Les orbitales électroniques

$$\frac{\hat{\mathbf{p}}^2}{2m} |\Psi(t)\rangle + V(\hat{\mathbf{r}}, t) |\Psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle$$

Equation de Schrödinger.

Régit le mouvement d'un électron autour du noyau.

Ce qu'il faut retenir c'est qu'il y a des des fonctions mathématique qui répondent à cette équation.

Ce sont les orbitales électroniques.

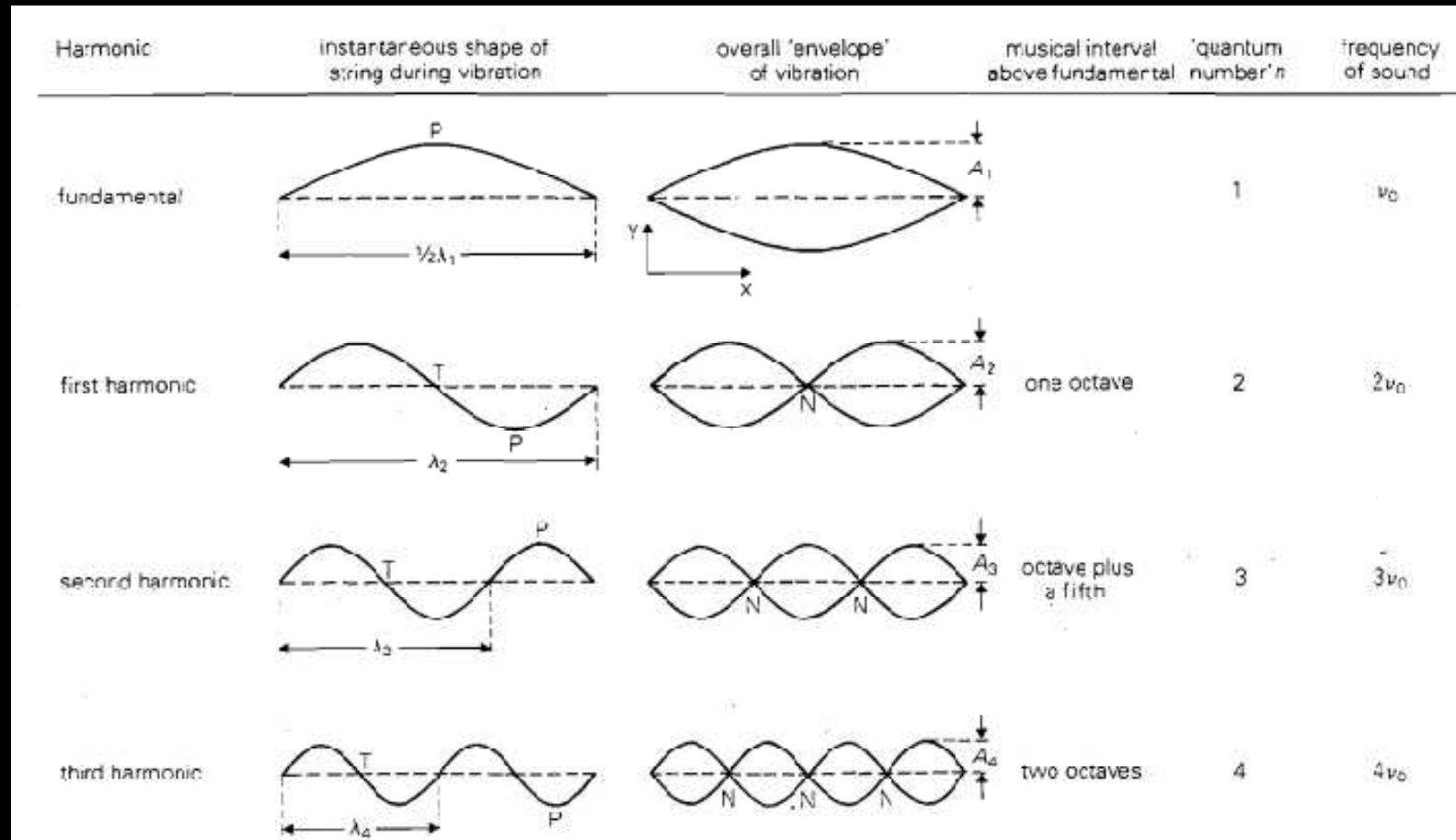
Qu'est ce qu'une orbitale?

Une orbitale est une solution de l'équation précédente.

Elle représente la position « moyenne » d'un électron autour du noyau.

Il en existe toute une flopée. Elles ont des énergies différentes.

Une analogie 1D, la corde de guitare



La valeur des fréquences sortant de la corde de guitare est quantifié.

C'est la même chose pour les électron mais en 3D: 3 nombres quantiques.

1 orbitale = 3 nombres quantiques

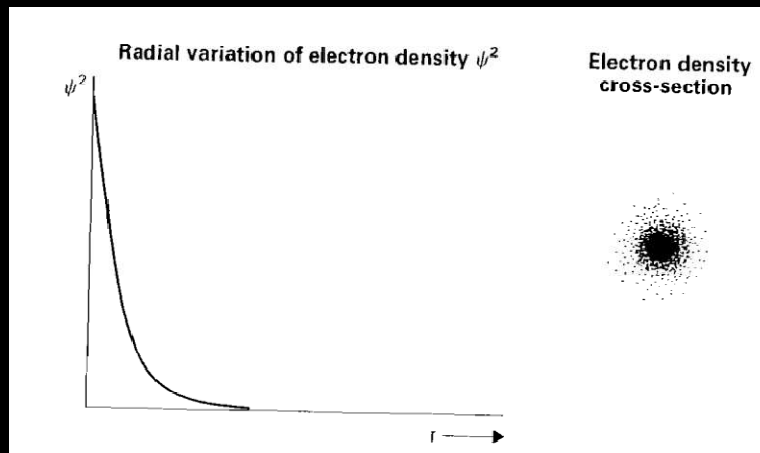
Electron in an atom				
Wave in <i>three dimensions</i> (around nucleus) Spatial extent of electron standing wave restricted by electrostatic pull of nucleus				
Four quantum numbers (n, l, m, s^*) are required in order to define all possible electron stationary states; n and l are the most important:				
	$l = 0$	$l = 1$	$l = 2$	$l = 3$
$n = 1$	1s	—	—	—
$n = 2$	2s	2p	—	—
$n = 3$	3s	3p	3d	—
$n = 4$	4s	4p	4d	4f
Wave function = ψ				
Physical significance: ψ^2 = probability of finding the electron at coordinates (x,y,z) . = 'electron density' at (x,y,z) .				

Les orbitales

$n \backslash l$	s	p	d	f	g
1	1 s				
2	2 s	2 p			
3	3 s	3 p	3 d		
4	4 s	4 p	4 d	4 f	
5	5 s	5 p	5 d	5 f	5 g

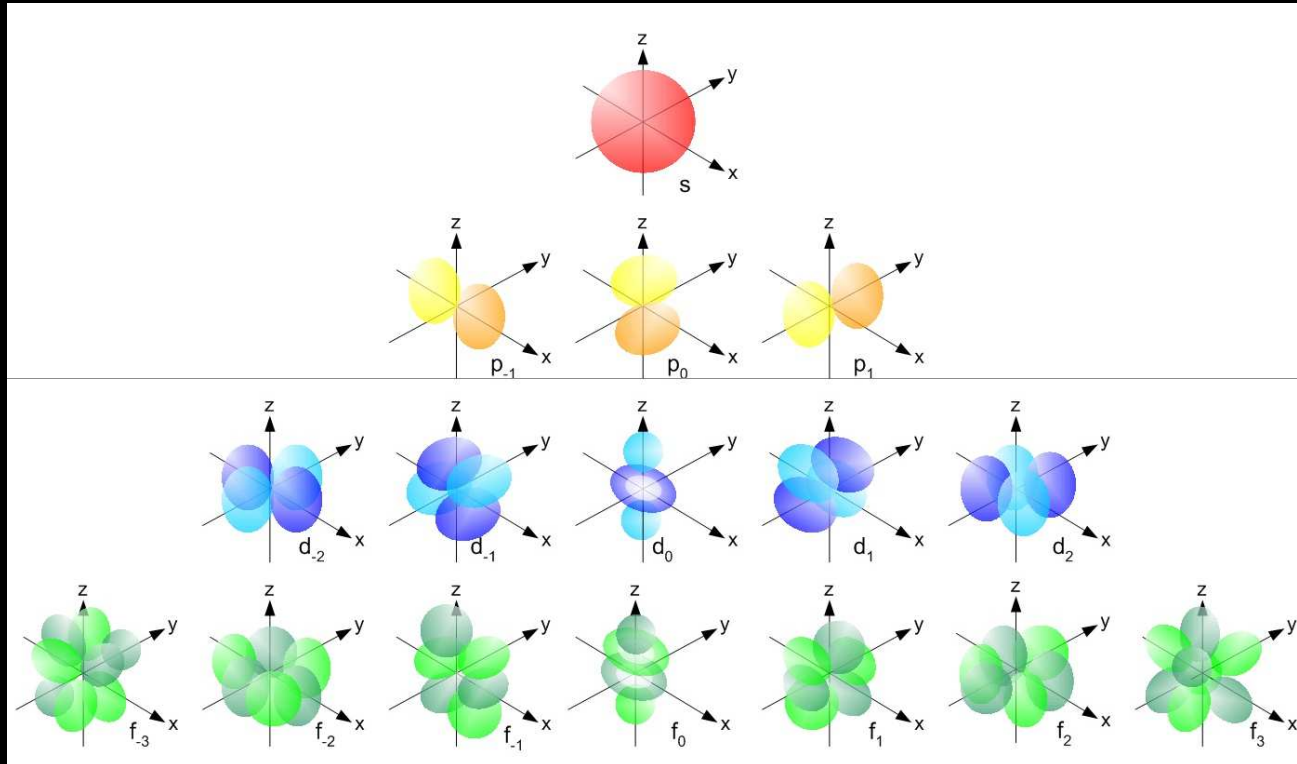
La forme des orbitales

L'orbitale 1s



La forme des orbitales

s
p
d
f



2 e⁻

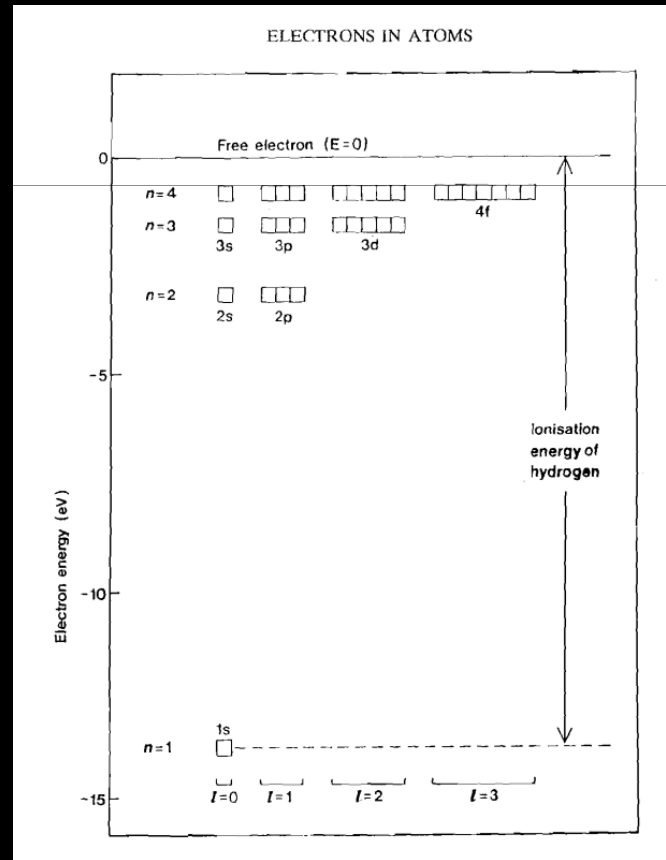
6 e⁻

10 e⁻

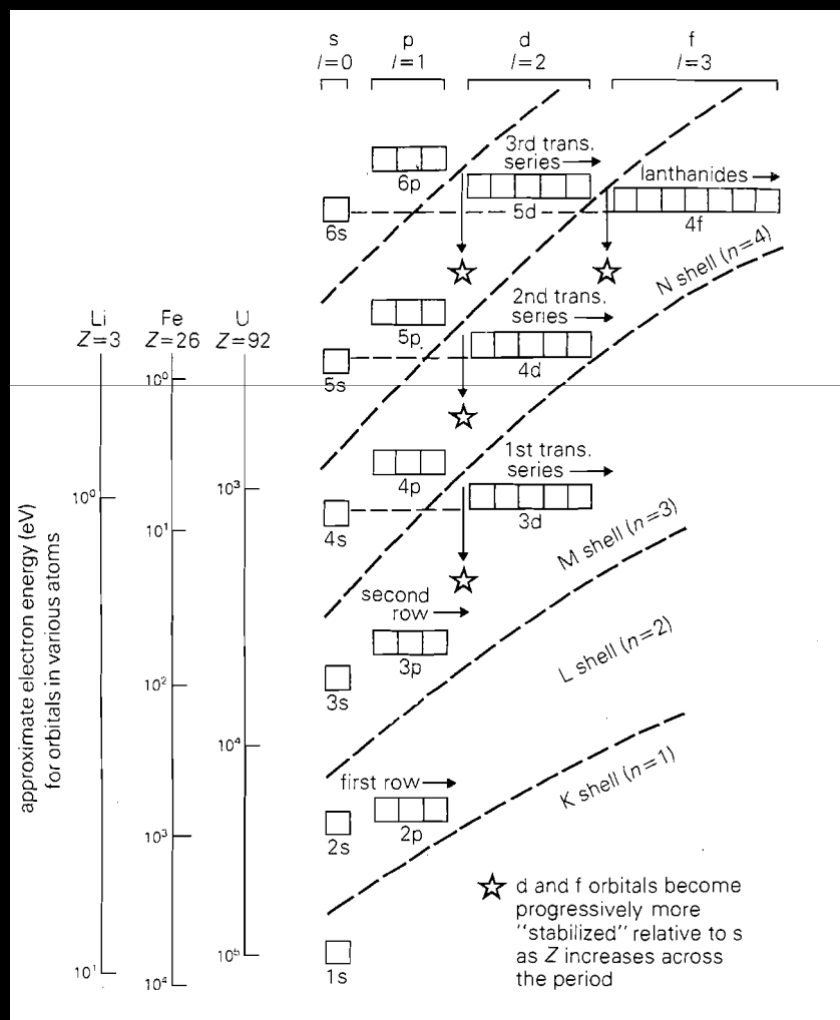
14 e⁻

L'énergie des électrons dans une orbitale

Elle va croissante de s, p, d dans le cas ou celle-ci n'interagissent pas, c'est le cas de l'électron isolé.

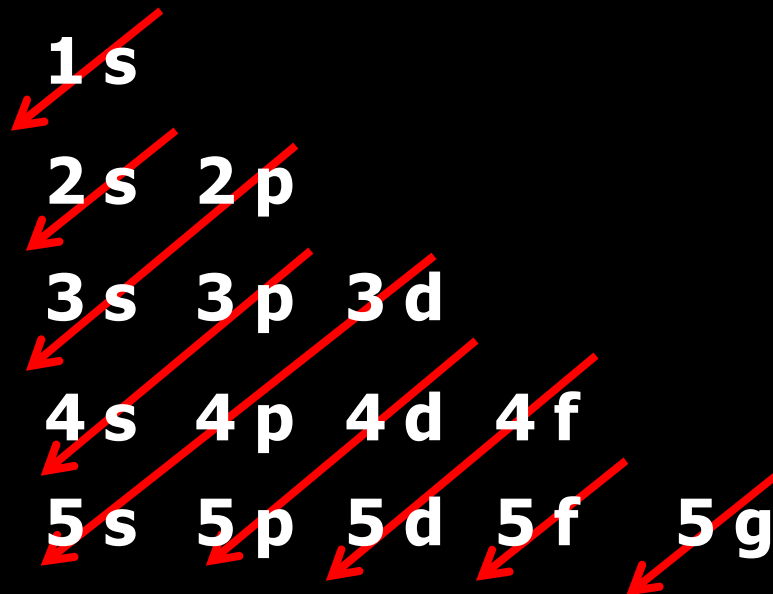


L'énergie des orbitales avec plusieurs électrons



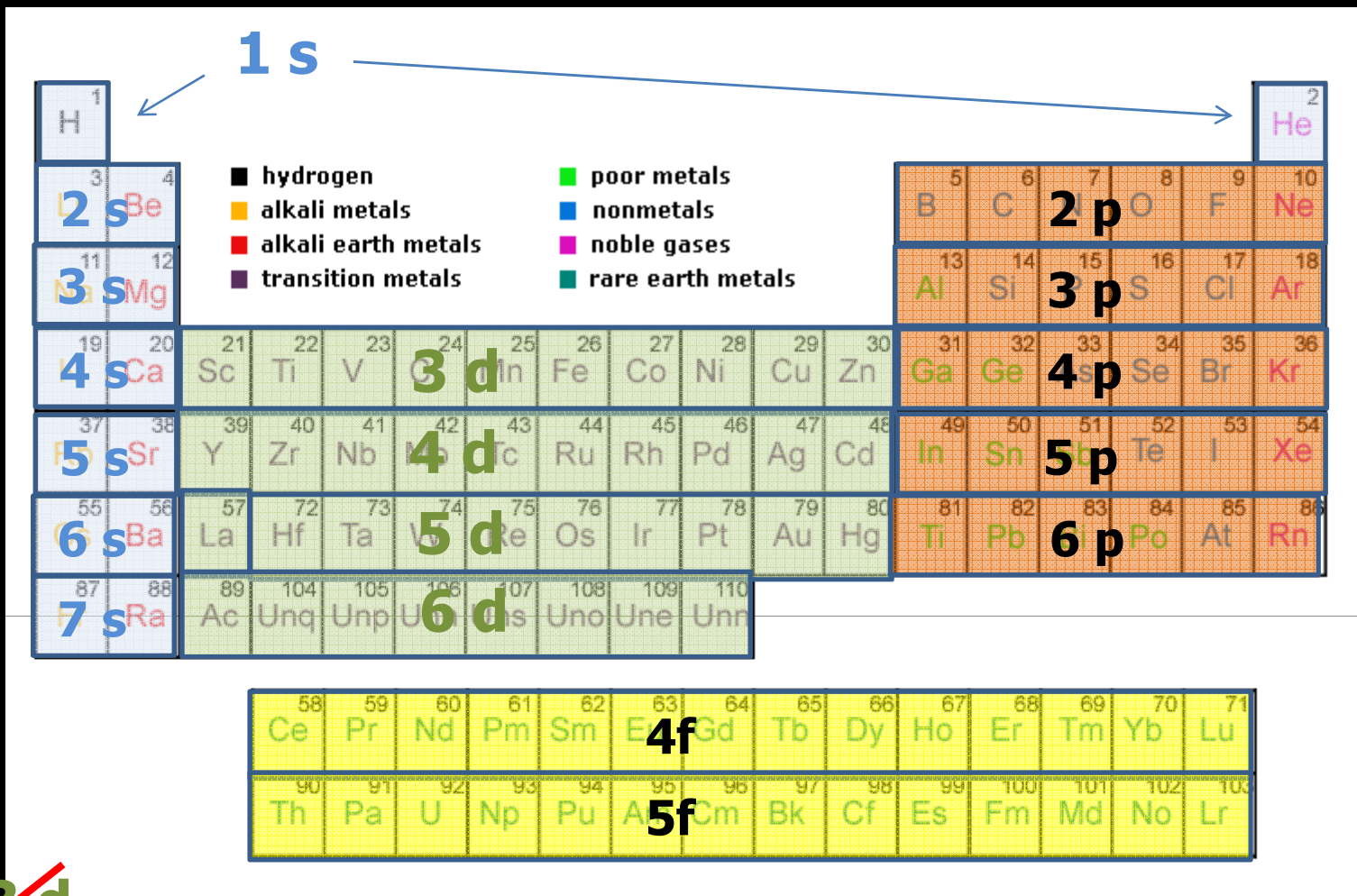
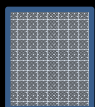
Le remplissage des orbitales: plusieurs électrons

Pour un atome donnée et donc un nombre d'électron donnée, on remplit les orbitales dans l'ordre s, p, d



PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

Editor: Aditya Vardhan (adivar@netlinx.com)



1 s

2 s **2 p**

3 s **3 p** **3 d**

4 s **4 p** **4 d** **4 f**

5 s **5 p** **5 d** **5 f** **5 g**

6 s **6 p** **6 d** **6 f** **6 g**

Les orbitales de valence

Les orbitales de valence sont les orbitales les plus externes, et donc de plus basse énergie.

Ce sont elles qui vont contrôler la chimie de l'élément.
Dans ces orbitales, 1 seul électrons, et donc capacité à céder ou accepter un électrons

Ex: le carbone, 6 électrons

Les électrons veulent occuper tout seul les orbitales

1 s



2 s



Orbitales de valence

2 p



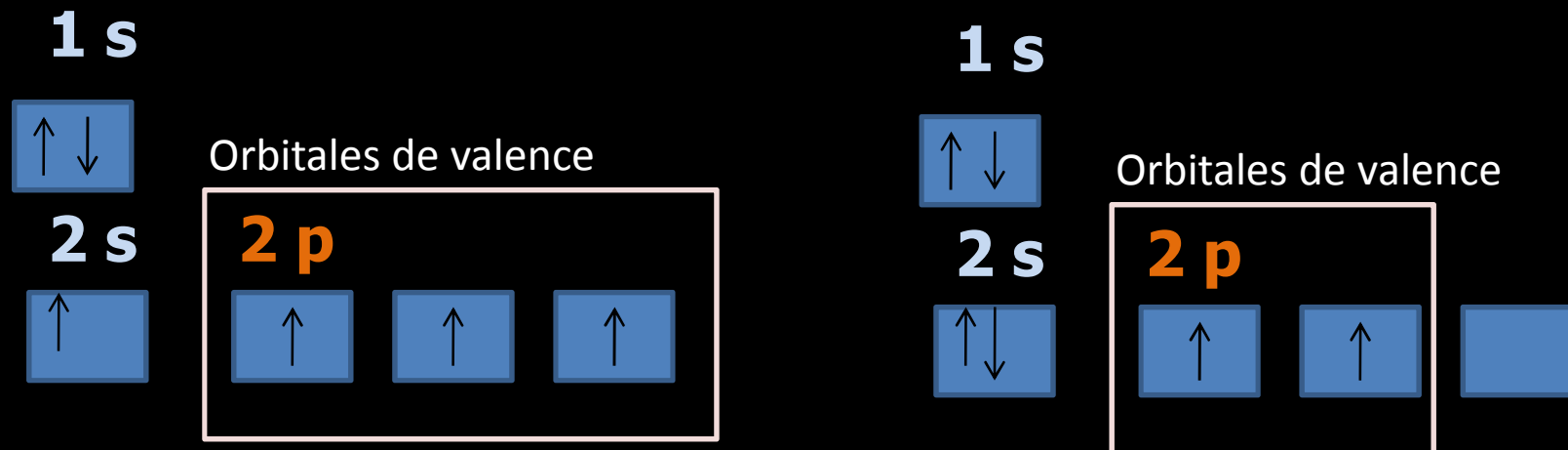
Les orbitales de valence

Les orbitales de valence sont les orbitales les plus externes, et donc de plus basse énergie.

Ce sont elles qui vont contrôler la chimie de l'élément.
Dans ces orbitales, 1 seul électrons, et donc capacité à ceder ou accepter un électrons

Ex: le carbone, 6 électrons

Les électrons veulent occuper tout seul les orbitales



Lorsque toutes les orbitales sont remplies, plus d'orbitales de valence, et donc pas de chimie possible... Ce sont les gaz rares.

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

<http://www.kkf-split.hr/periodni/en/>

PERIOD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H HYDROGEN 1.0079																	2 He HELIUM 4.0026
2	3 Li LITHIUM 6.941	4 Be BERYLLIUM 9.0122																
3	11 Na SODIUM 22.990	12 Mg MAGNESIUM 24.305											13 B BORON 10.811	14 C CARBON 12.011	15 N NITROGEN 14.007	16 O OXYGEN 15.999	17 F FLUORINE 18.998	18 Ne NEON 20.180
4	19 K POTASSIUM 39.098	20 Ca CALCIUM 40.078	21 Sc SCANDIUM 44.956	22 Ti TITANIUM 47.867	23 V VANADIUM 50.942	24 Cr CHROMIUM 51.996	25 Mn MANGANESE 54.938	26 Fe IRON 55.845	27 Co COBALT 58.933	28 Ni NICKEL 58.693	29 Cu COPPER 63.546	30 Zn ZINC 65.39	31 Al ALUMINIUM 26.982	32 Si SILICON 28.086	33 P PHOSPHORUS 30.974	34 S SULPHUR 32.065	35 Cl CHLORINE 35.453	36 Ar ARGON 39.948
5	37 Rb RUBIDIUM 85.468	38 Sr STRONTIUM 87.62	39 Y YTRIUM 88.906	40 Zr ZIRCONIUM 91.224	41 Nb NIOBIUM 92.906	42 Mo MOLYBDENUM 95.94	43 Tc (98)	44 Ru RUTHENIUM 101.07	45 Rh RHODIUM 102.91	46 Pd PALLADIUM 106.42	47 Ag SILVER 107.87	48 Cd CADMIUM 112.41	49 In INDIUM 114.82	50 Sn TIN 118.71	51 Sb ANTIMONY 121.76	52 Te TELLURIUM 127.60	53 I IODINE 126.90	54 Xe XENON 131.29
6	55 Cs CAESIUM 132.91	56 Ba BARIUM 137.33	57-71 La-Lu Lanthanide	72 Hf HAFNIUM 178.49	73 Ta TANTALUM 180.95	74 W TUNGSTEN 183.84	75 Re RHENIUM 186.21	76 Os OSMIUM 190.23	77 Ir IRIDIUM 192.22	78 Pt PLATINUM 195.08	79 Au GOLD 196.97	80 Hg MERCURY 200.59	81 Tl THALLIUM 204.38	82 Pb LEAD 207.2	83 Bi BISMUTH 208.98	84 Po POLONIUM (209)	85 At ASTATINE (210)	86 Rn RADON (222)
7	87 Fr FRANCIUM (223)	88 Ra RADIUM (226)	89-103 Ac-Lr Actinide	104 Rf RUTHERFORDIUM (261)	105 Db DUBNIUM (262)	106 Sg SEABORGIUM (266)	107 Bh BOHRIUM (264)	108 Hs HASSIUM (277)	109 Mt MEITNERIUM (268)	110 Uun UNUNNIUM (281)	111 Uuu UNUNUNIUM (272)	112 Uub UNBIBIUM (285)		114 Uuq UNUNQUADIUM (289)				

(1) Pure Appl. Chem., 73, No. 4, 667-683 (2001)

Relative atomic mass is shown with five significant figures. For elements having no stable nuclides, the value enclosed in brackets indicates the mass number of the longest-lived isotope of the element.

However three such elements (Th, Pa, and U) do have a characteristic terrestrial isotopic composition, and for these an atomic weight is tabulated.

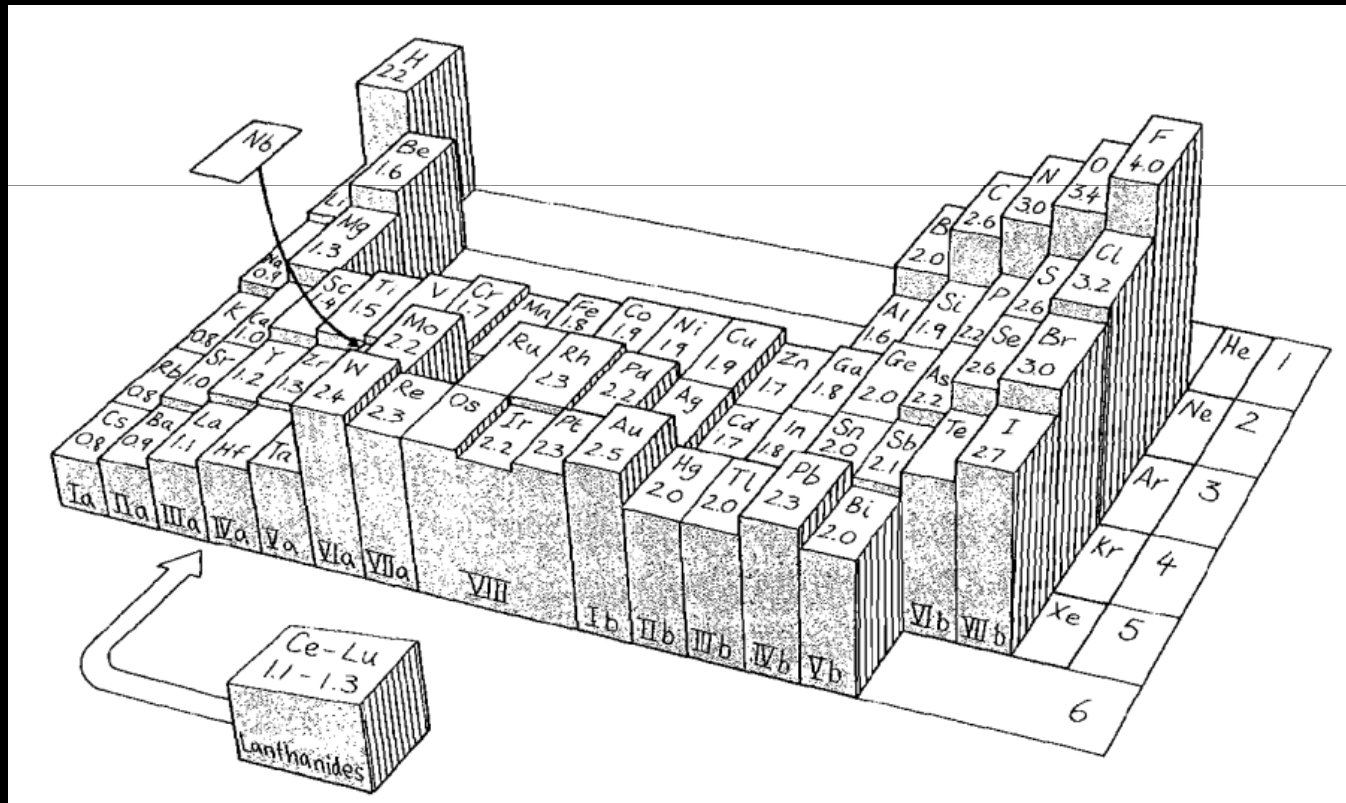
Editor: Aditya Vardhan (advan@netline.com)

LANTHANIDE

57 138.91	58 140.12	59 140.91	60 144.24	61 (145)	62 150.36	63 151.96	64 157.25	65 158.93	66 162.50	67 164.93	68 167.26	69 168.93	70 173.04	71 174.97
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
LANTHANUM	CERIUM	PRASEODYMIUM	NEODYMIUM	PROMETHIUM	SAMARIUM	EUROPIUM	GADOLINIUM	TERBIUM	DYSPROSIUM	HOLMIUM	ERBIUM	THULIUM	YTTERIUM	LUTETIUM

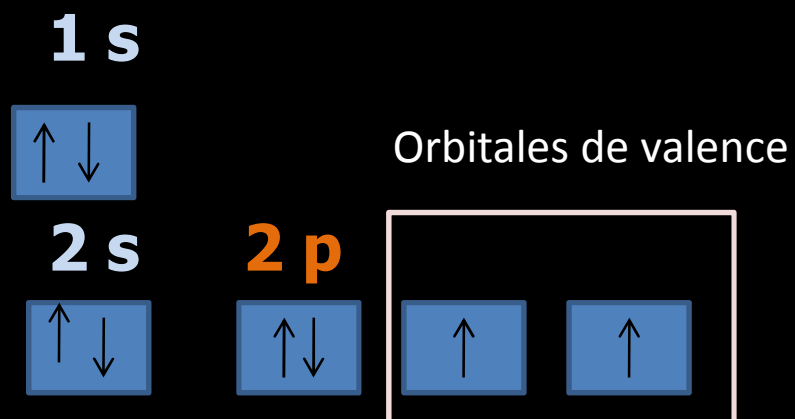
L'électronégativité

C'est l'affinité d'un élément chimique à attirer un électron.
Un élément a tendance à remplir ses couches électroniques.



La valence

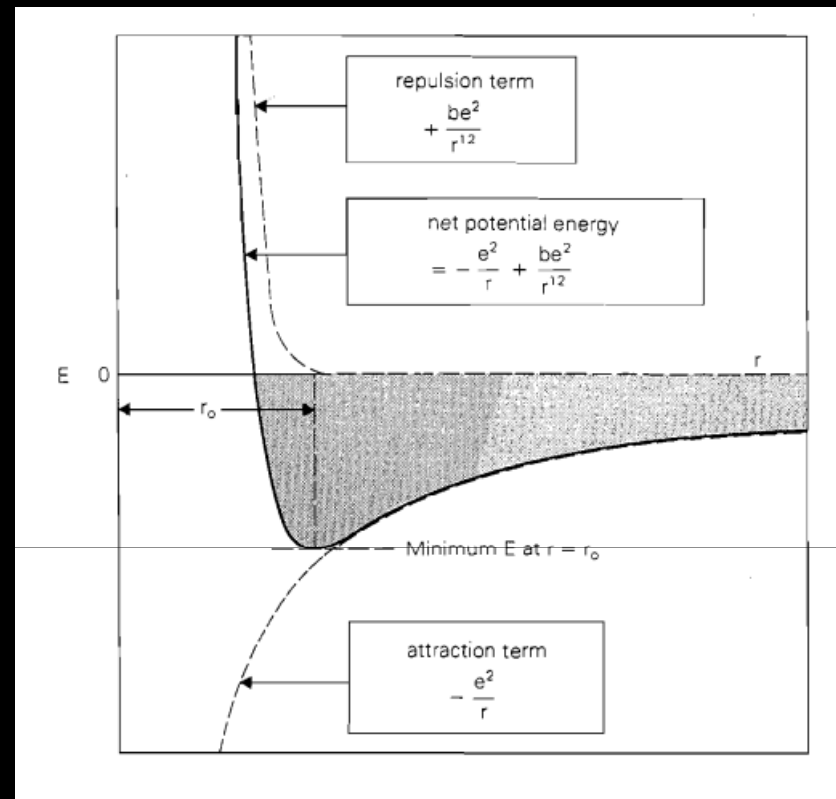
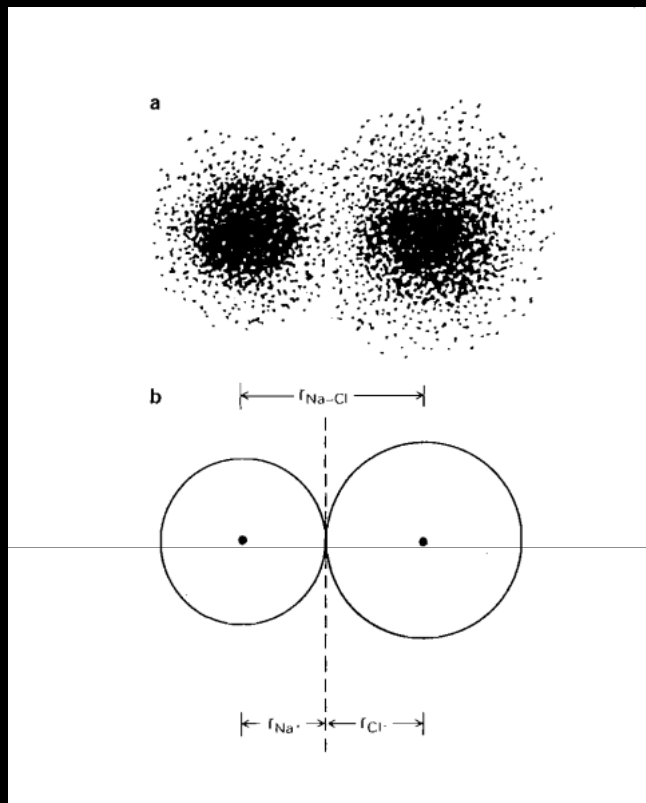
Prenons l'exemple de l'oxygène.
Sa structure électronique est la suivante (8 electrons)



Tendance à gagner 2 electrons, O^{2-}

2. La liaison chimique

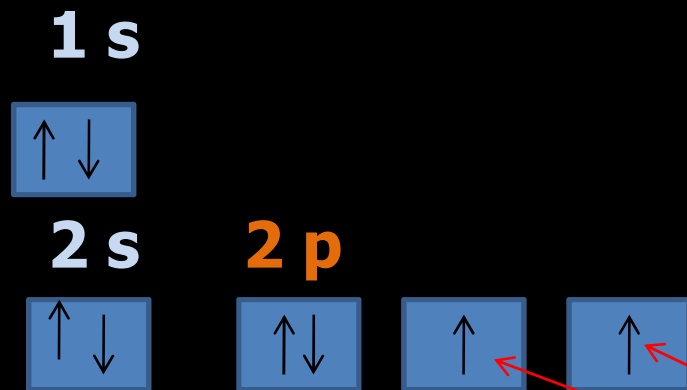
La liaison ionique



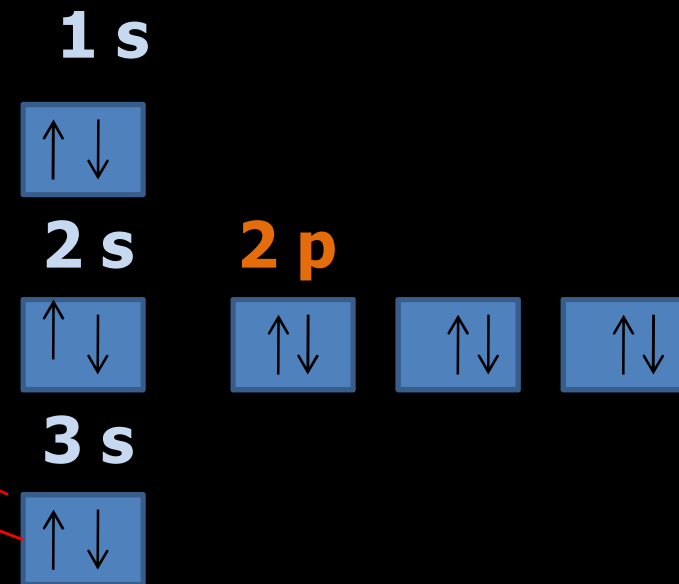
Elle se fait entre un donneur (cation) et un accepteur d'e⁻
Dans une liaison ionique, les atomes se comportent
comme deux charges isolées. Les orbitales électroniques
sont identiques à celle des ions isolées.

La liaison ionique

Oxygène (8 électrons)

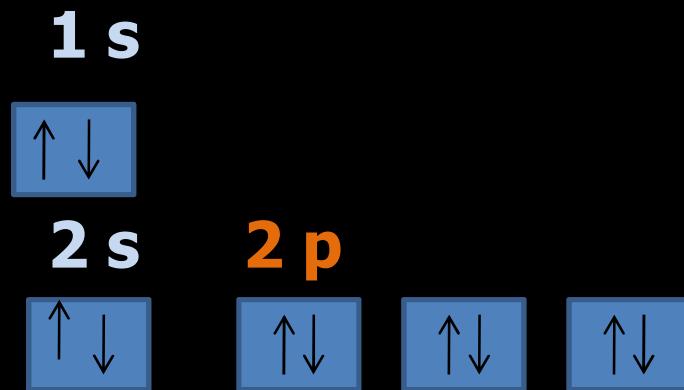


Magnésium (12 électrons)

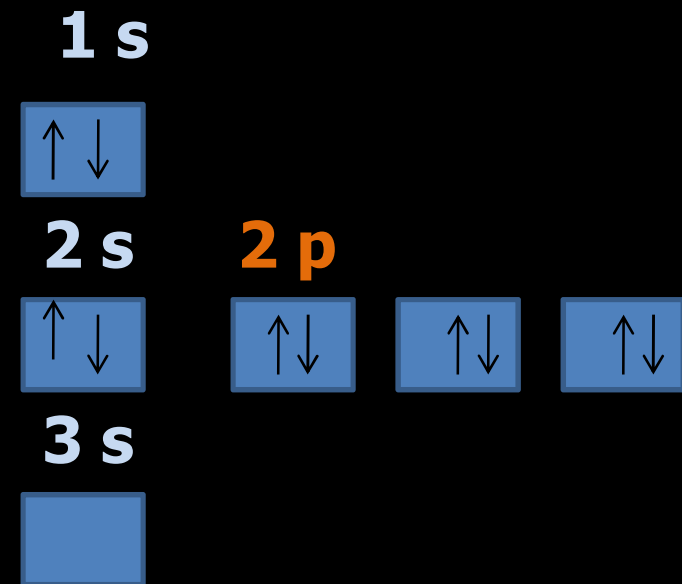


La liaison ionique: MgO

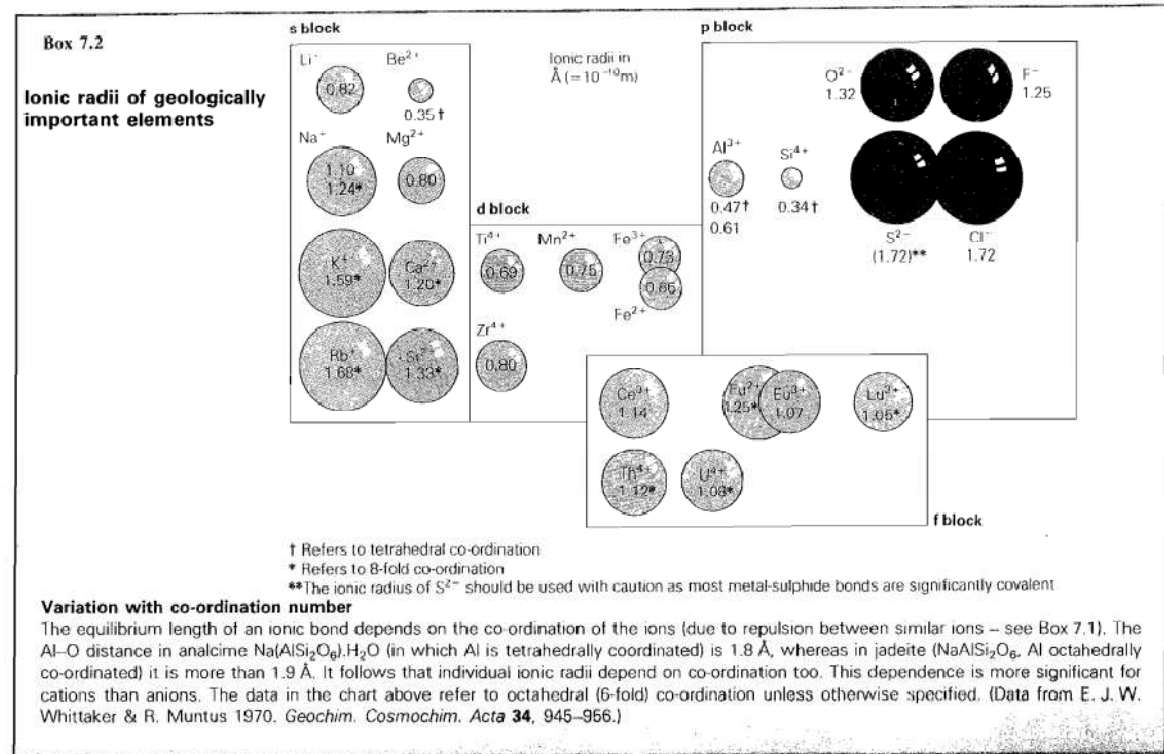
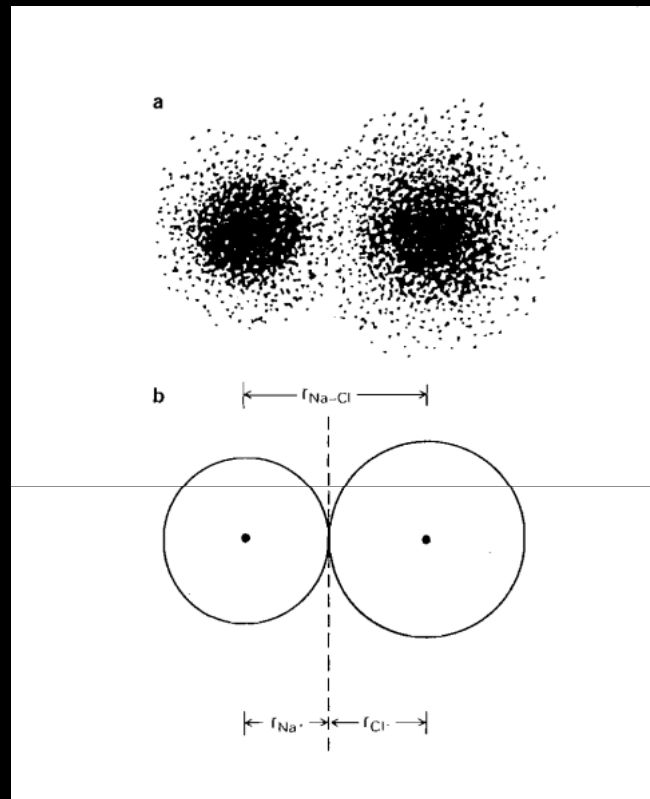
Oxygène (8
électrons)



Magnésium (12 électrons)



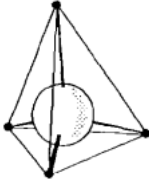
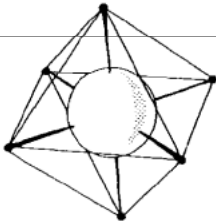
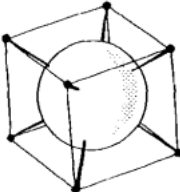
Le rayon ionique



En théorie on peut uniquement le définir pour les solides ioniques. Mesuré par diffraction des rayons X. Important car va Controller l'empilement.

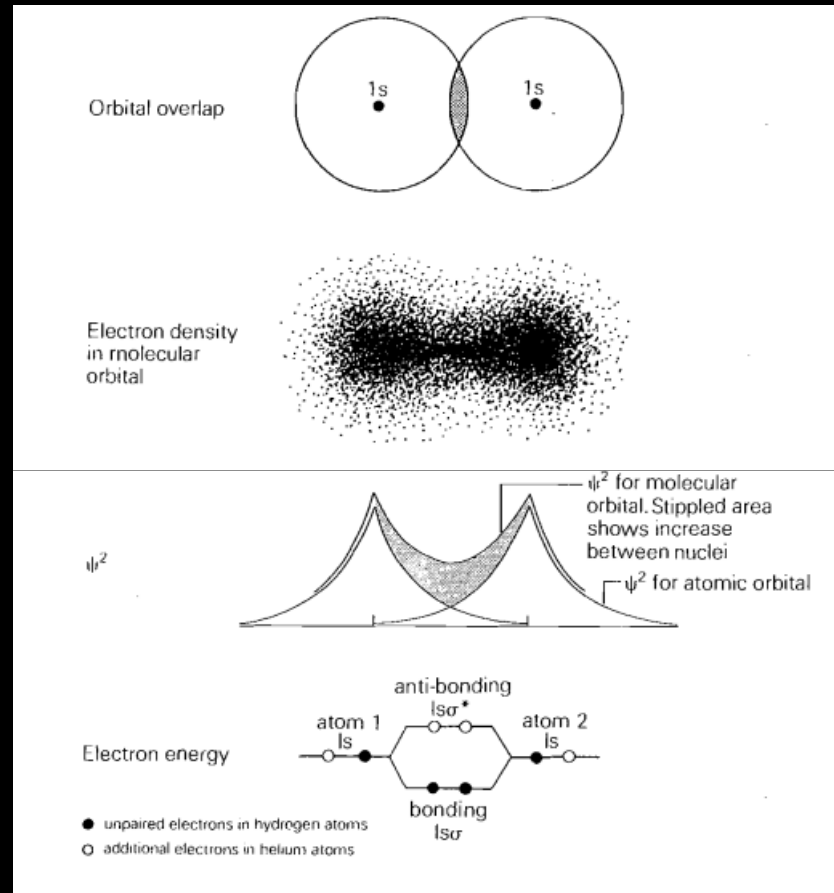
Rayon ionique et empilement

Table 7.1 Co-ordination polyhedra.

Range of radius ratio $r_{\text{cation}}/r_{\text{anion}}$	Co-ordination number N	Coordination polyhedron
0.225 to 0.414 ($1.5^{1/2}-1$) ($2^{1/2}-1$)*	4	tetrahedron 
0.414 to 0.732 ($3^{1/2}-1$)	6	octahedron 
0.732 to 1.000 ($4^{1/2}-1$)	8	cube 
> 1.0	> 12	various

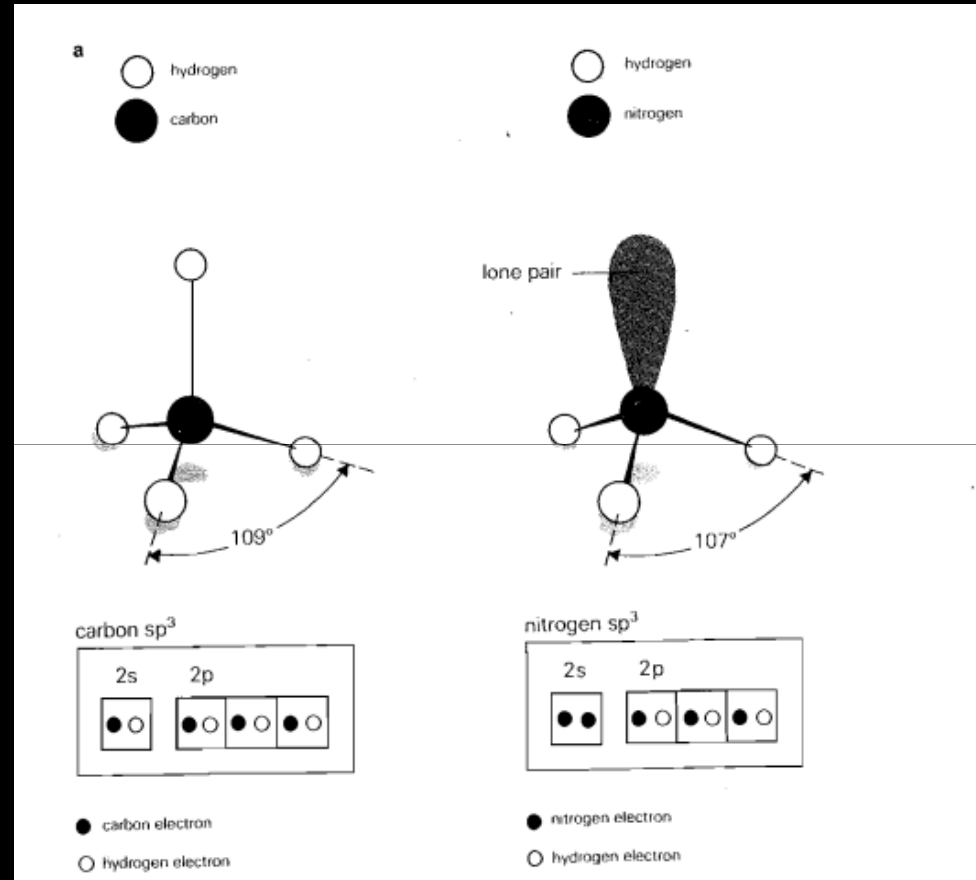
* The upper limit appropriate to co-ordination number N is given by $(N/2)^{1/2}-1$.

La liaison covalente

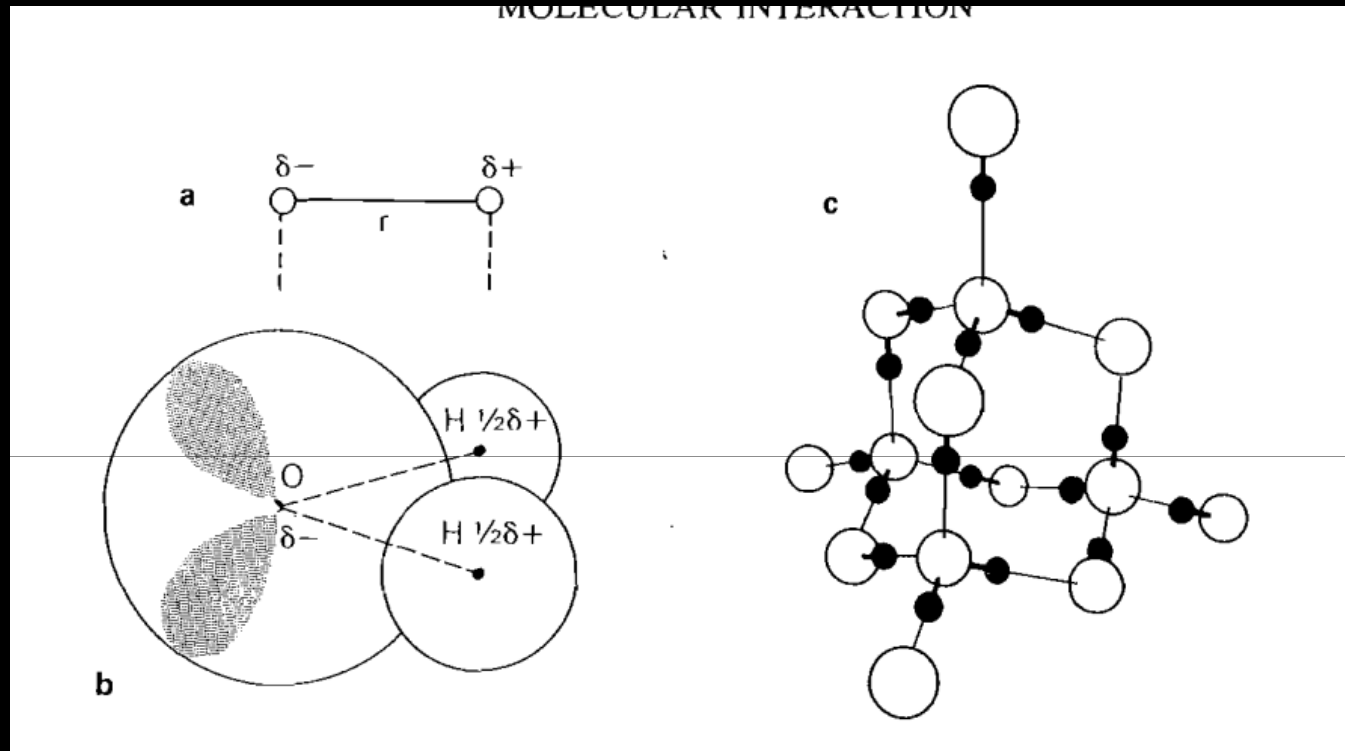


**Dans une liaison covalente, les orbitales sont partagées.
Il n'y a pas vraiment un don ou un gain d'électrons**

La liaison covalente et l'hybridation

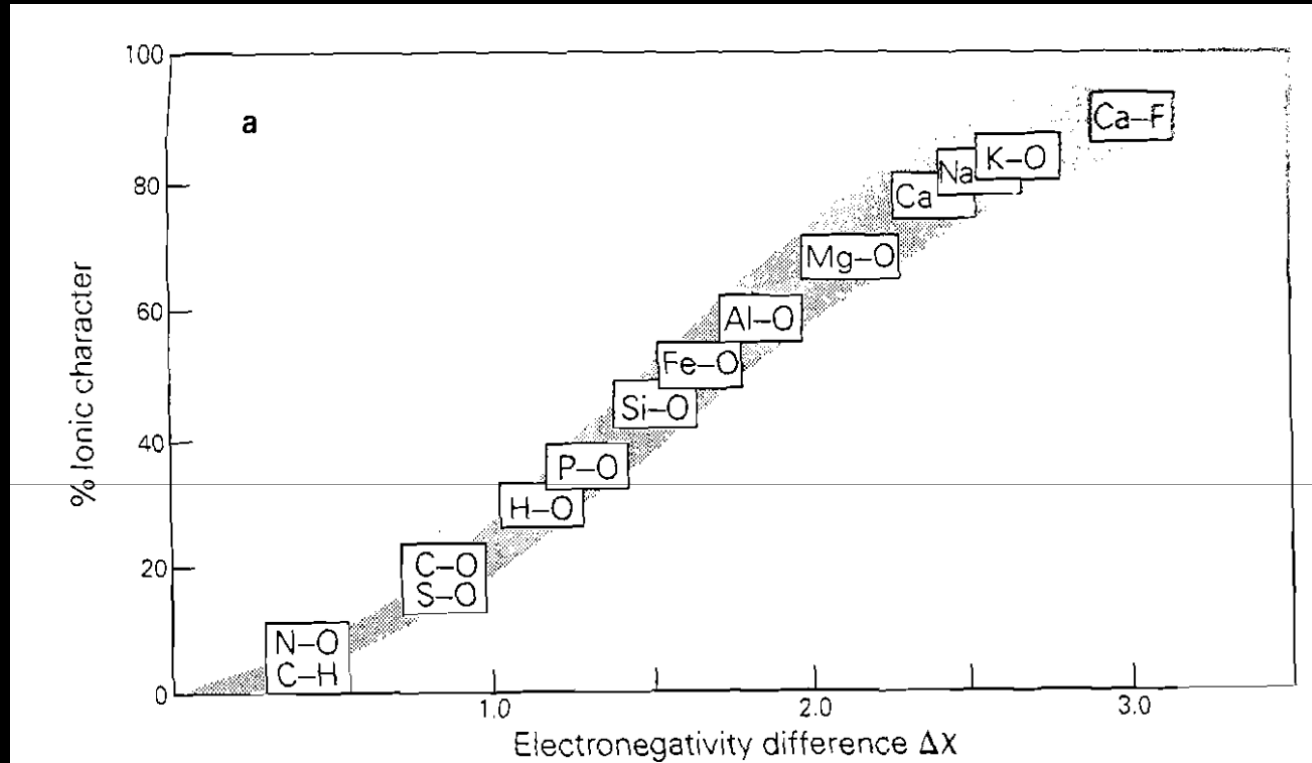


L'eau et la liaison hydrogène



Autre type de liaison. Liée à la grande électronégativité de l'oxygène. Responsable de nombreuses propriétés chimiques particulières de l'eau (glace qui flotte), température d'évaporation.

La liaison chimique dans les minéraux



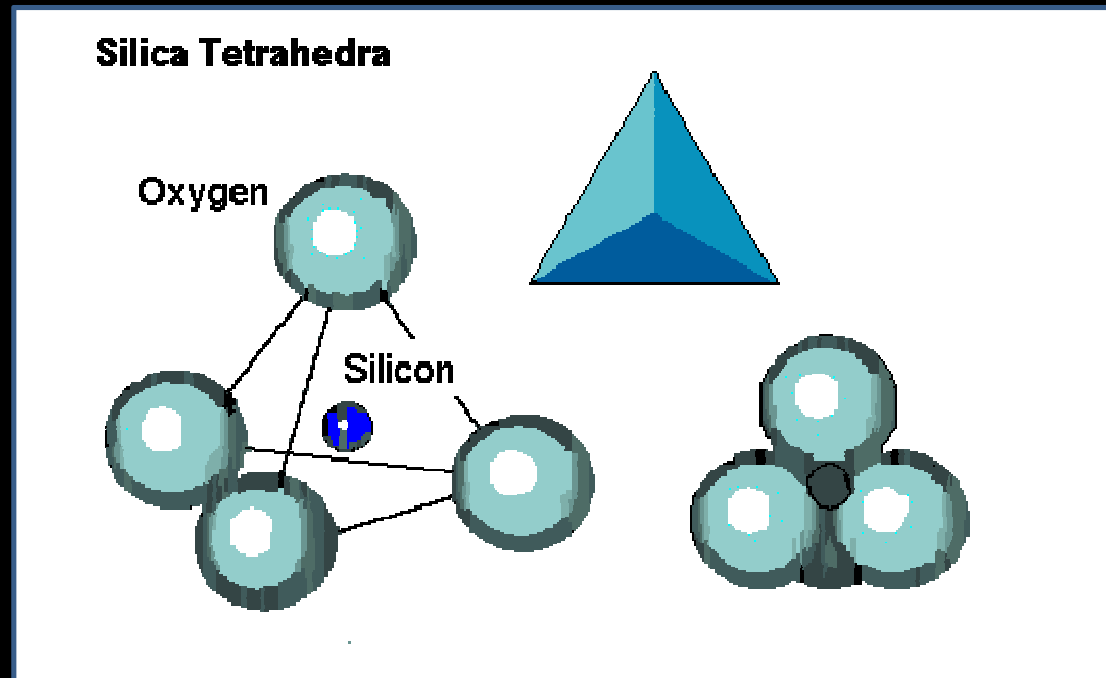
Les liaisons sont mixtes. On remarque le caractère très covalent de Si-O par rapport à Al-O, Fe-O, Mg-O, K-O, Na-O et Ca-O

C'est pour cela que l'on parle de tétraédre SiO_4

3. Un type de polymère: les silicates

Le tétraédre SiO₄

Caractérisés par le motif élémentaire tétraédrique [SiO₄]⁴⁻ comportant un atome de Silice au centre et des atome d'oxygène aux quatre sommets. Ces tétraèdres sont reliés entre eux soit par des cations, soit par un ou plusieurs atomes d'Oxygène, commun de ce fait à 2 tétraèdres.



[SiO₄]⁴⁻

Cette liaison est très covalente: on identifie le tétraèdre qui va être relié aux cations via des liaisons ioniques.

Le degré de polymérisation



Si tous les oxygènes sont partagés, on arrive à SiO_2 . C'est la formule du quartz, Minéral « très polymérisé ».

Si tous les tétraèdres sont isolés, il faut 4 charge positive pour compenser.

Ex: 2 ion Mg^{2+}

On arrive à Mg_2SiO_4 , c'est l'olivine.

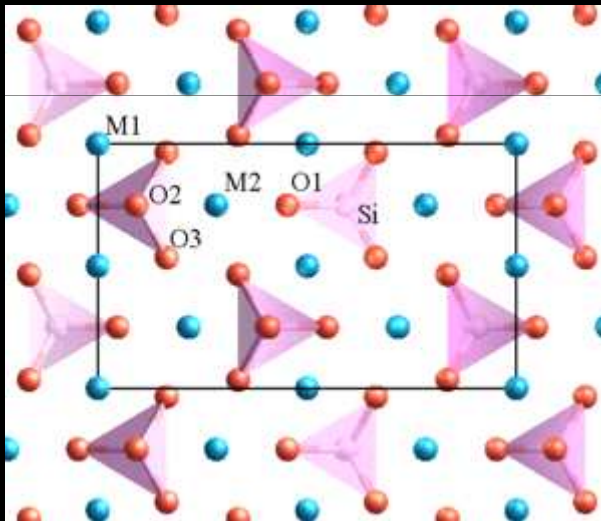
Dans l'olivine, le tétraèdre est présent sous la forme de monomère. Dans le quartz, il est complètement polymérisé.

On parle souvent du Nombre d'oxygène non pontant (NBO) qui quantifie le degré de ramification. Pour l'olivine, il vaut 4, pour le quartz, il vaut 0.

Les orthosilicates

Dans les orthosilicates, tous les tétraèdres sont isolés. C'est le cas de l'olivine.

Le lien entre le tétraèdre et les cations est assuré par des liaisons ioniques, qui peuvent être facilement hydrolysées. L'olivine est donc peu résistante à l'altération.



Les péridots: l'olivine



Mg_2SiO_4 =forstérite (verte)

Fe_2SiO_4 =fayalite (noire)

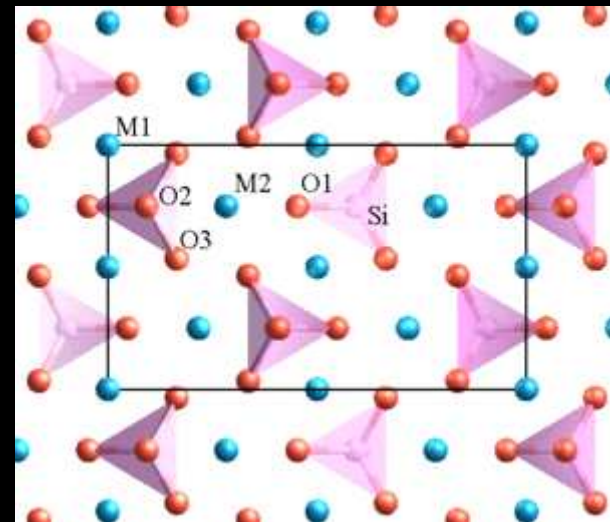


Elle est présente dans les péridotites
(roche avec >50% de péridots).

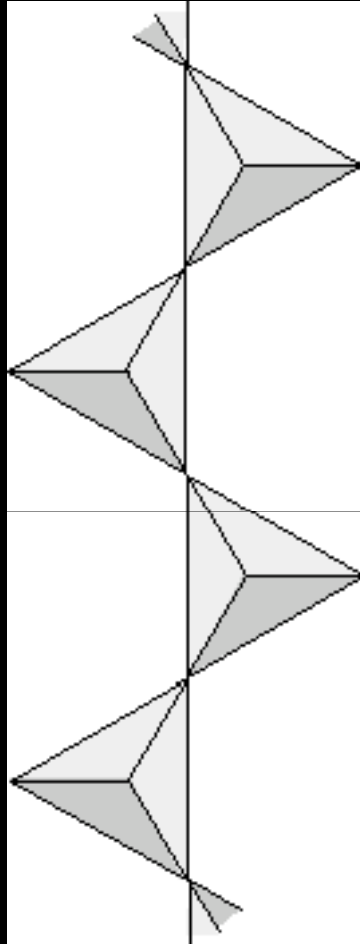
Parfois dans les basaltes et gabbros en
phénocristal.

Dans les chondrites

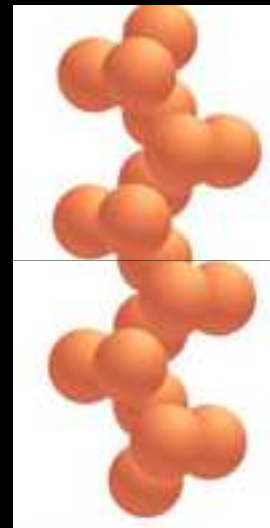
S'altère très facilement
(dissolution, serpentine, iddingsite)



Les silicates en chaîne



Exercice: calculer sa formule.

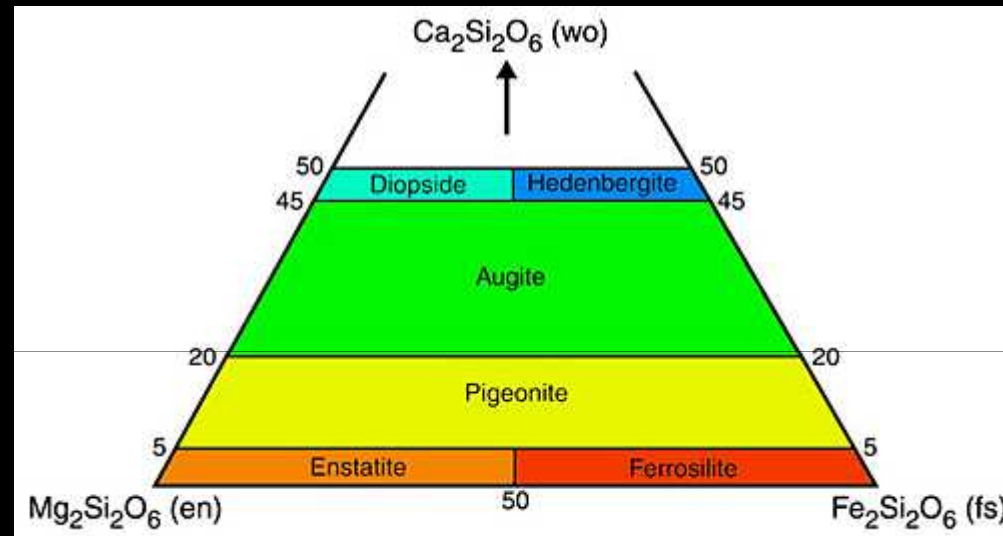


FAMILLE DES INOSILICATES EN CHAÎNE SIMPLE

Chaîne de tétraèdres

Exemple : famille des pyroxènes

Un silicate en chaine: le pyroxène

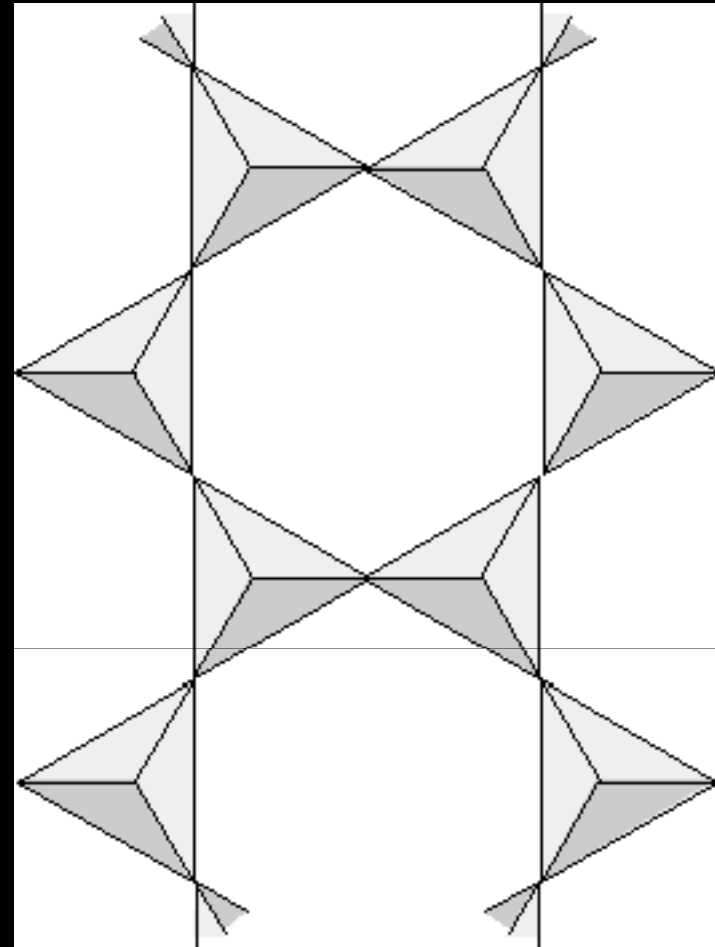
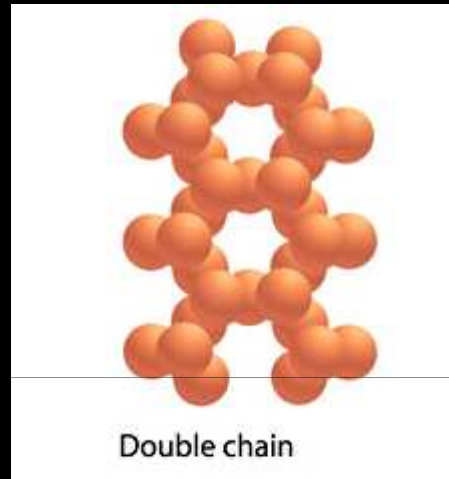


Enstatite = $(\text{Mg})\text{SiO}_3$

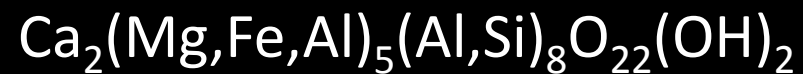
Augite/Pigeonite: Cpx, pyroxène calciques

Exsolution Cpx /Opx

Les silicates en double chaîne



Hornblende



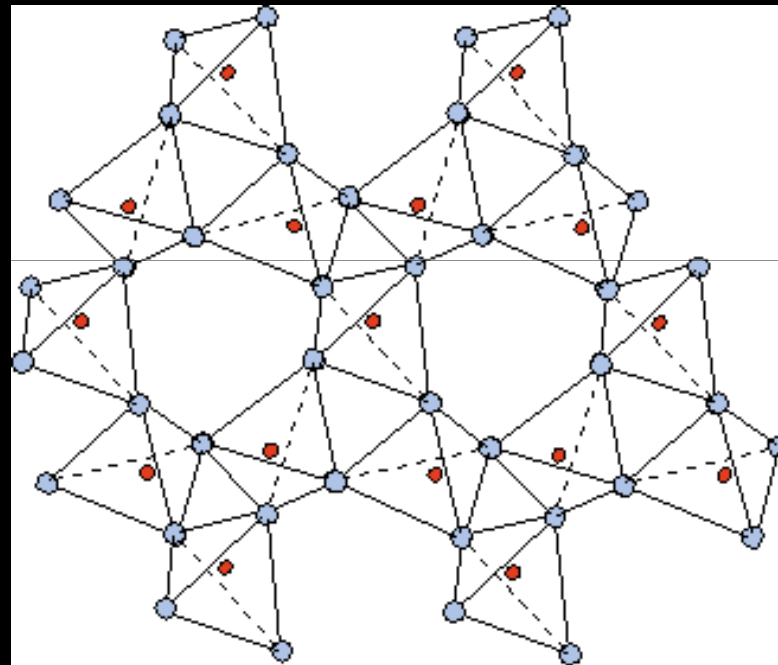
FAMILLE DES INOSILICATES EN CHAÎNE DOUBLE ou RUBANS
Exemple : famille des amphiboles

Les téctosilicates

Tout les tétraèdres sont
ramifiés.
Le quartz est « inaltérable ».



3-dimensional network
of tetrahedrons



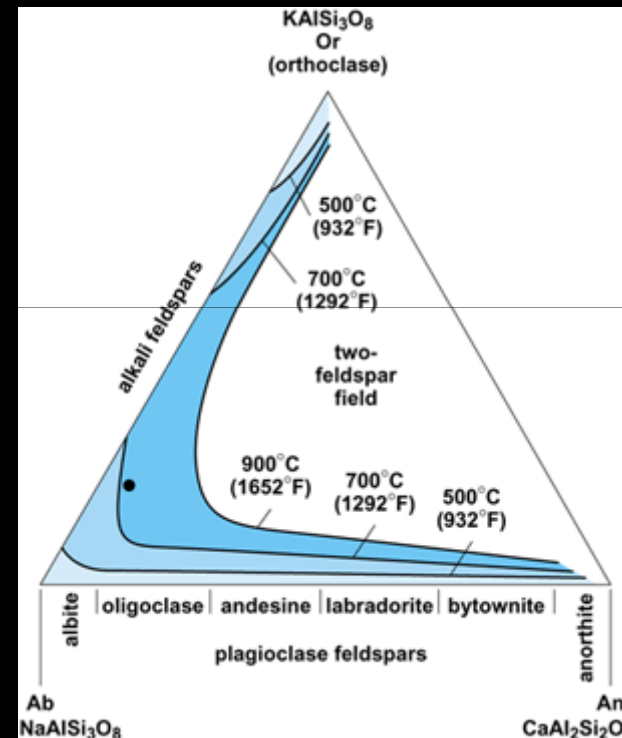
Un tectosilicate: le feldspath

Minéral le plus abondant à la surface de la Terre et de la Lune.

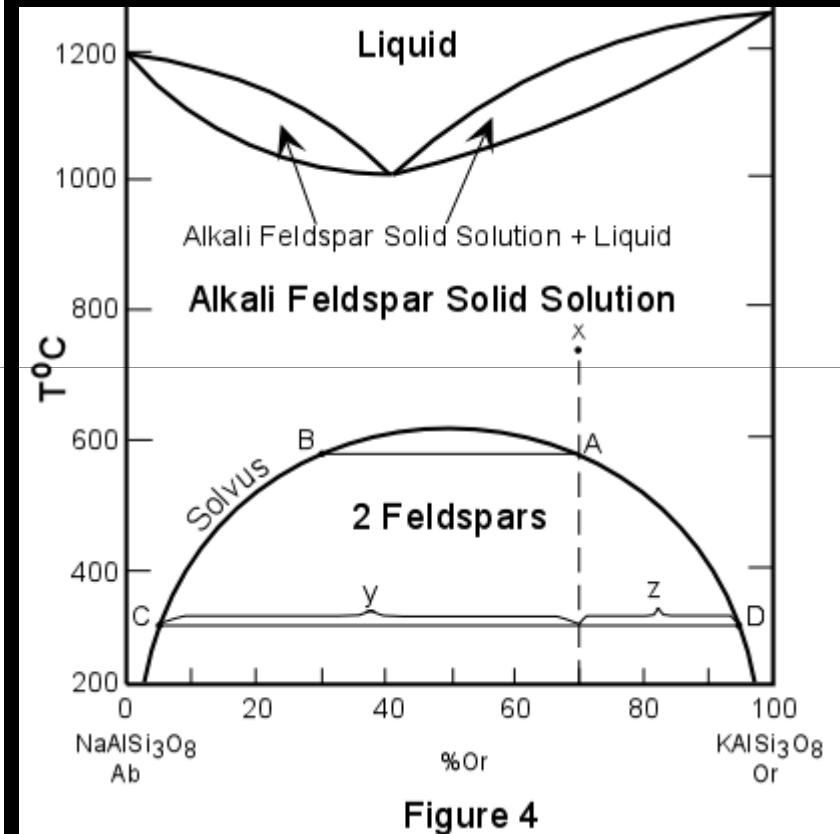
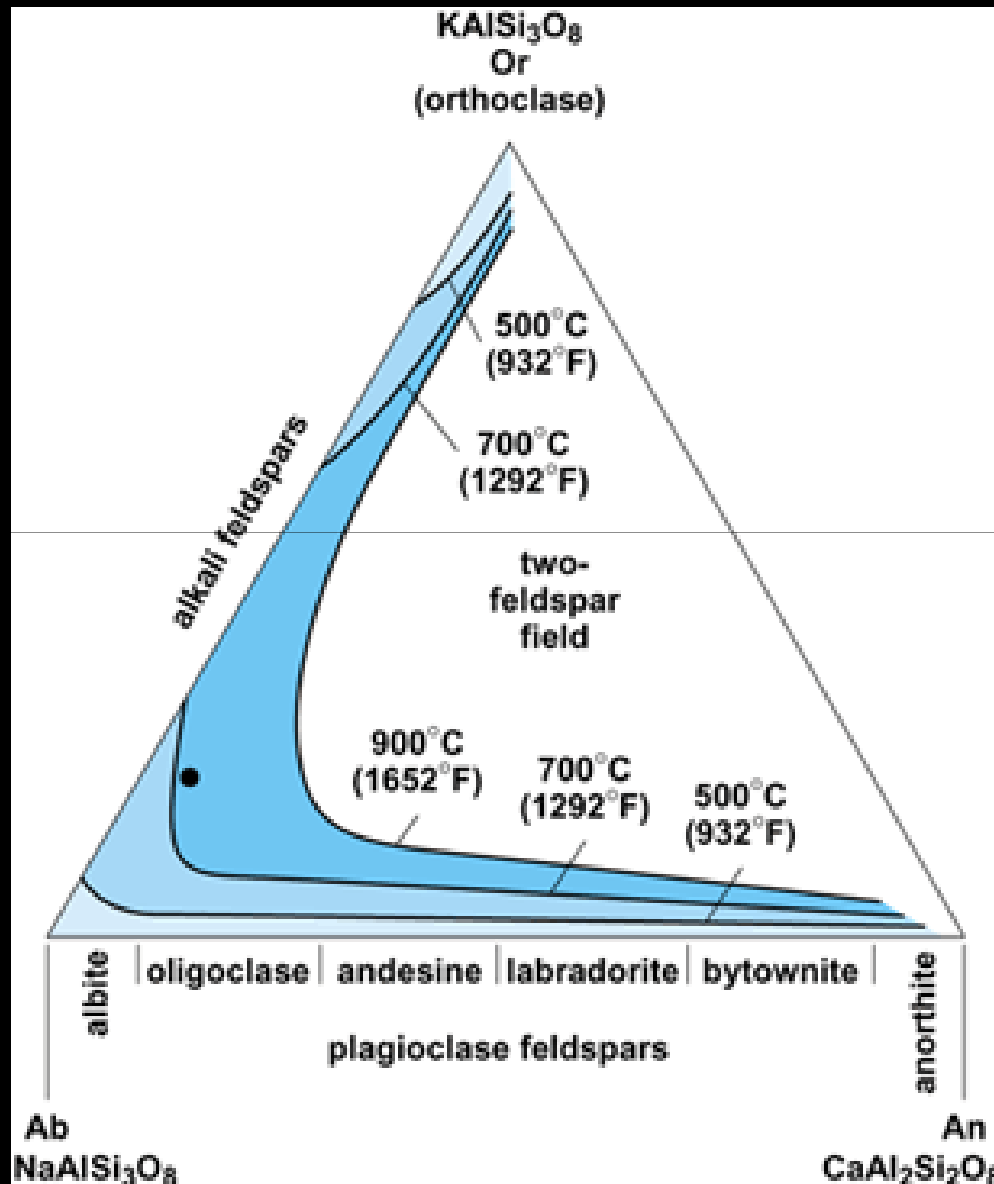
C'est le « porteur de l'aluminium »

Substitution de Al^{3+} a Si^{4+}

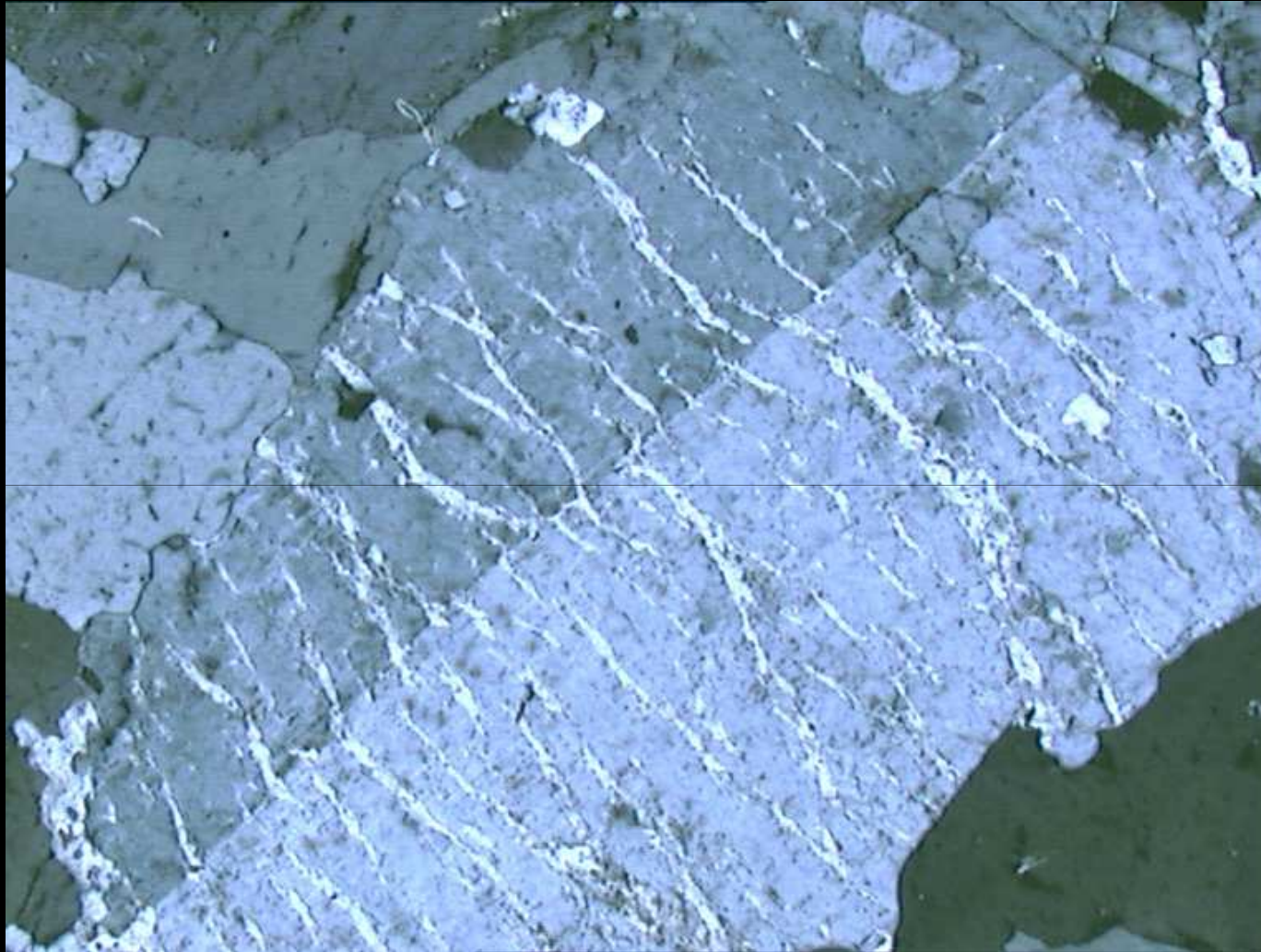
On compense par un cation:
 Ca^{2+} , K^{+} ou Na^{+}



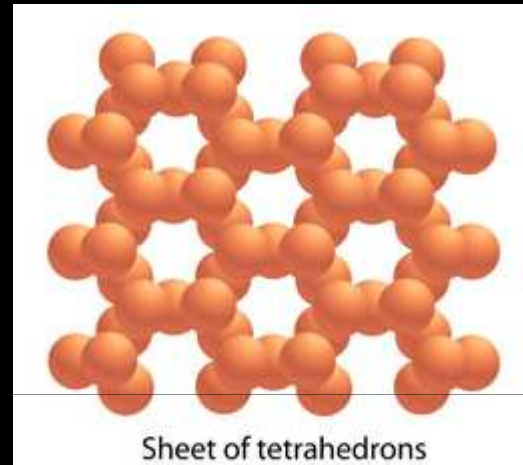
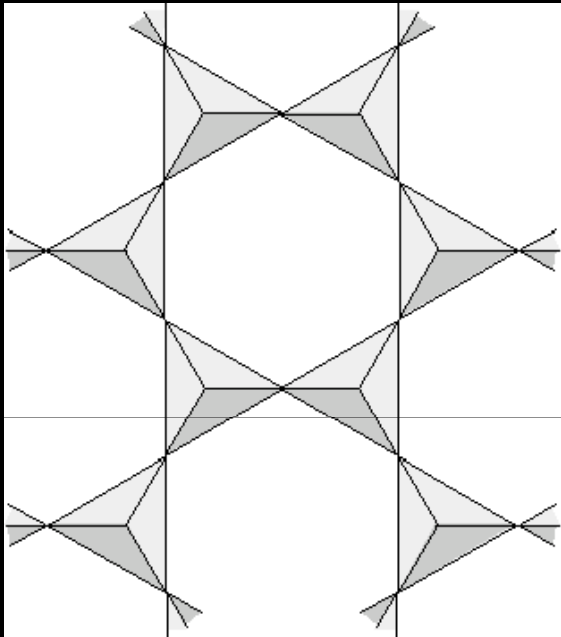
Exsolution dans les feldspaths



Exsolution dans les feldspaths



Les silicates en feuillets



FAMILLE DES PHYLLOSILICATES

Tétraèdres en feuillets

Exemple : famille des micas, famille des argiles, chlorite, serpentine

Le stockage de l'eau dans les minéraux



1 kg de serpentine = 1 grand verre d'eau

Le stockage de l'eau dans les minéraux

Dans les argiles, les micas, les amphiboles...

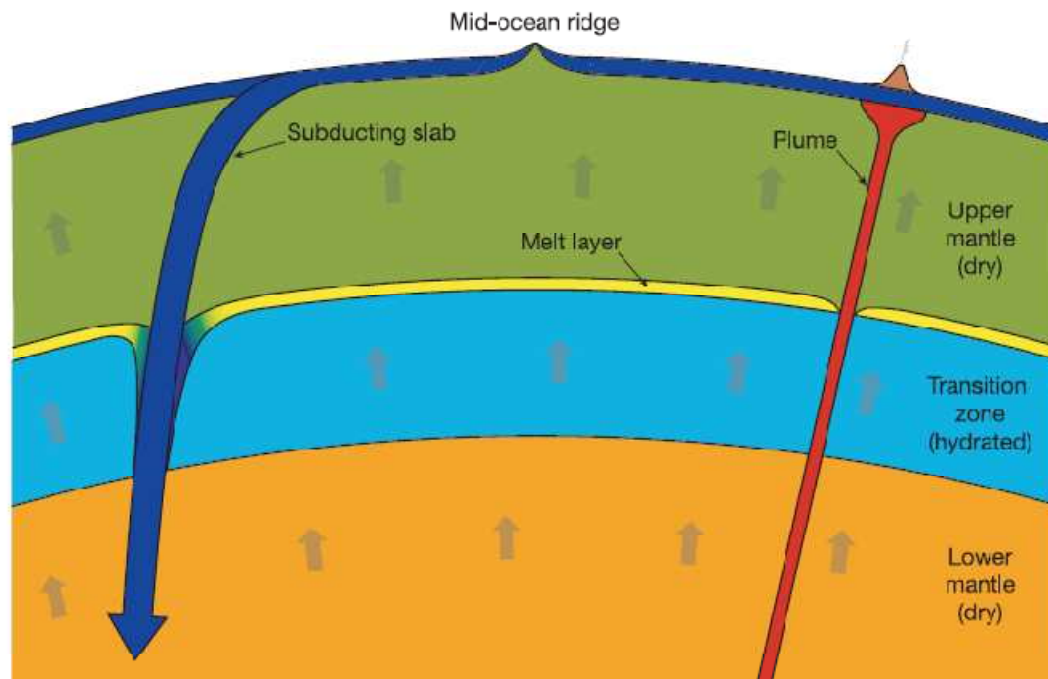


L'eau est présente sous forme de groupement hydroxyles ou de molécule d'eau interfoliaire.



Aussi dans certains minéraux évaporitiques (ex: Gypse)

Des océans dans le manteau?



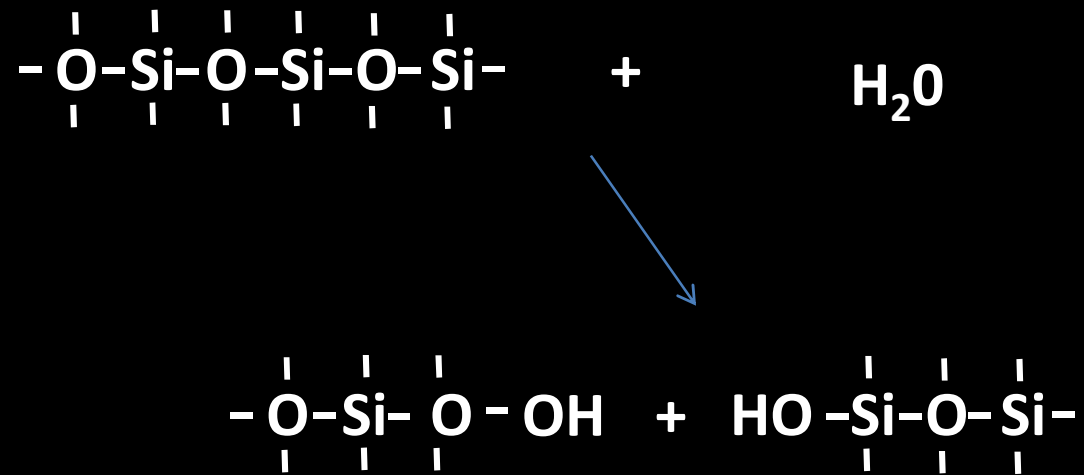
**Wadsleyite et ringwoodite
peuvent contenir plusieurs
pourcent d'eau.**

10 océans sous nos pieds?

Les liquides silicatés

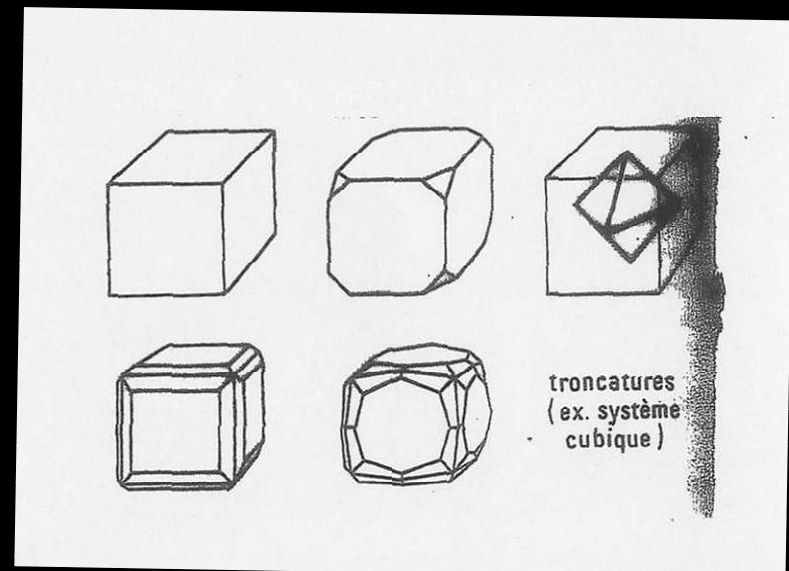
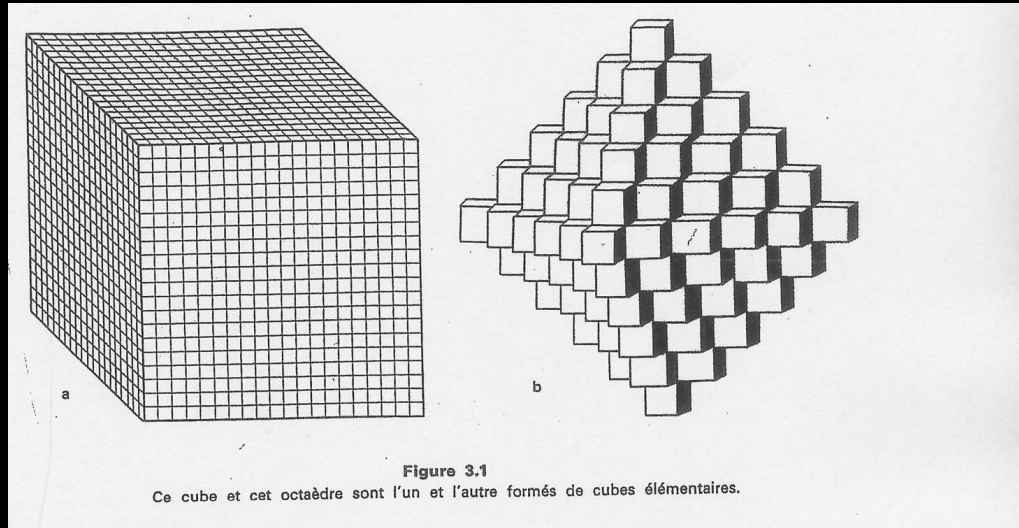


Les liquides silicatés: effet de l'eau

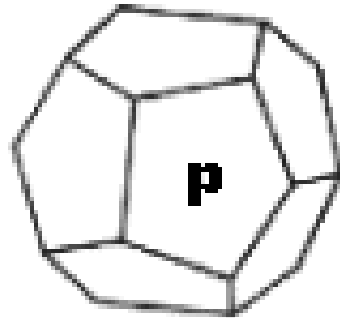


5. Propriétés physique des cristaux

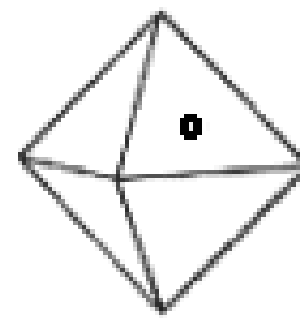
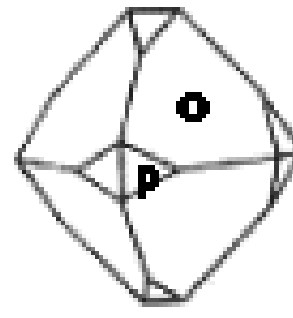
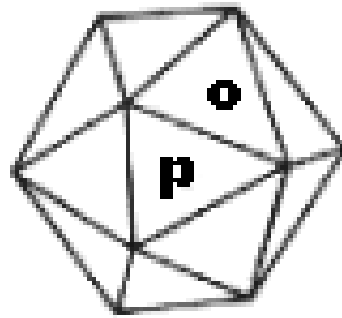
L'habitus et les troncatures



L'habitus et les troncatures



**dodécaèdre
pentagonal**



octaèdre



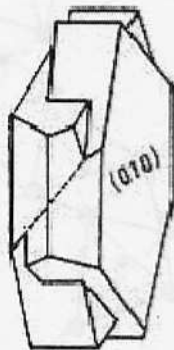
Diamant

Les macles



- Macles

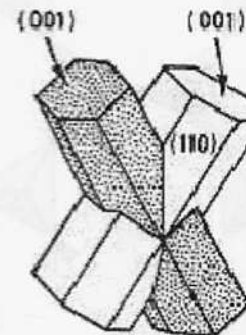
Ce sont des associations de plusieurs individus de la même espèce, orientés selon des lois cristallographiques strictes. Il y a en fait croissance de minéraux dans plusieurs directions différentes.



Macle de Carlsbad

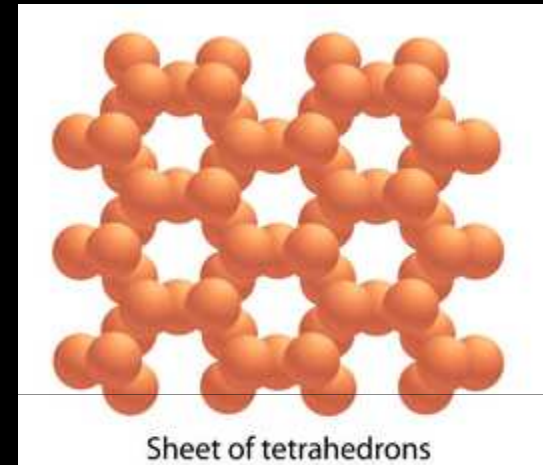


Macle Polysynthétique



Macle en croix

Les clivages



**Les plans cristallographiques n'ont pas tous la même densité atomique.
Il peut exister des plans de fractures préférentiels.**

La biréfringence



De la même façon la lumière se propage plus ou moins rapidement suivant les directions cristallographiques. Formation d'un rayon extraordinaire, c'est la biréfringence.

Effets de la pression sur les minéraux

La densité de la Terre

Masse = 6×10^{24} kg

Rayon=6400 km

Densité moyenne=5.5 (5500 kg/m³)

Densité de la péridotite 3.3 (3200 kg/m³)

Il faut quelque chose plus lourd...

La densité de la Terre

On prend de la péridotite et du fer

En condition ambiante la densité est respectivement 3.2 et 7.5

La densité moyenne est alors :

3.9 (3900 kg/m³)

Pourquoi ??? Qu'est-ce qui nous manque?

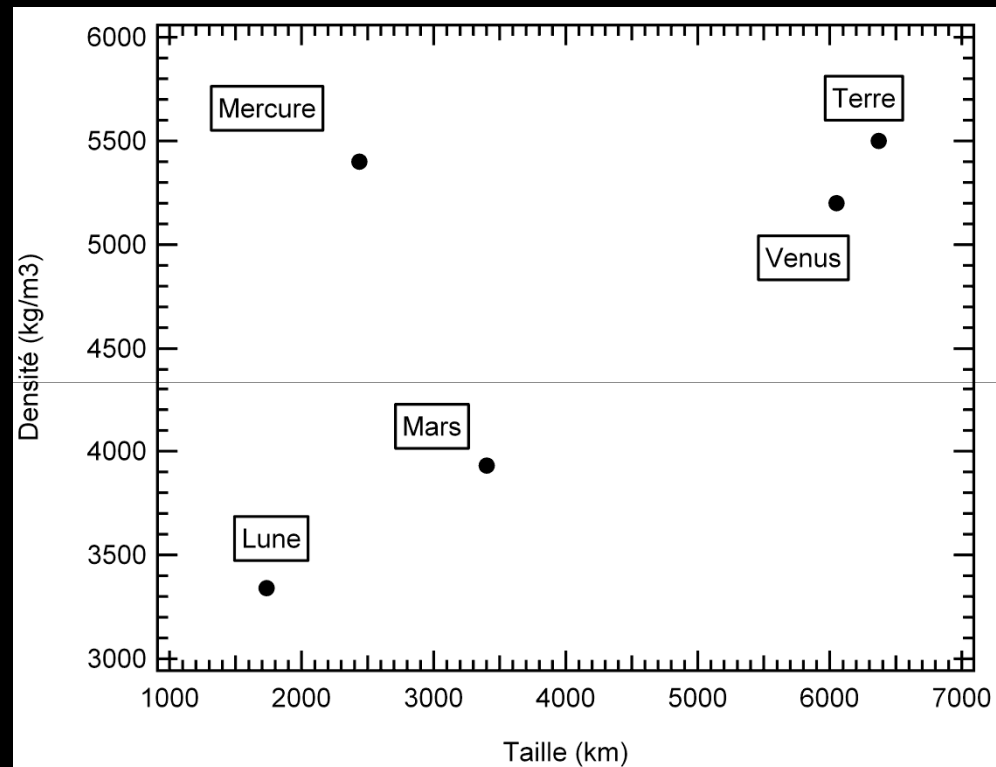
La densité de la Terre

La densité va augmenter avec la pression, via une déformation élastique et via des transitions de phase

Pour les pressions du noyau, la densité moyenne du fer est de 12 (12000 kg/m³)

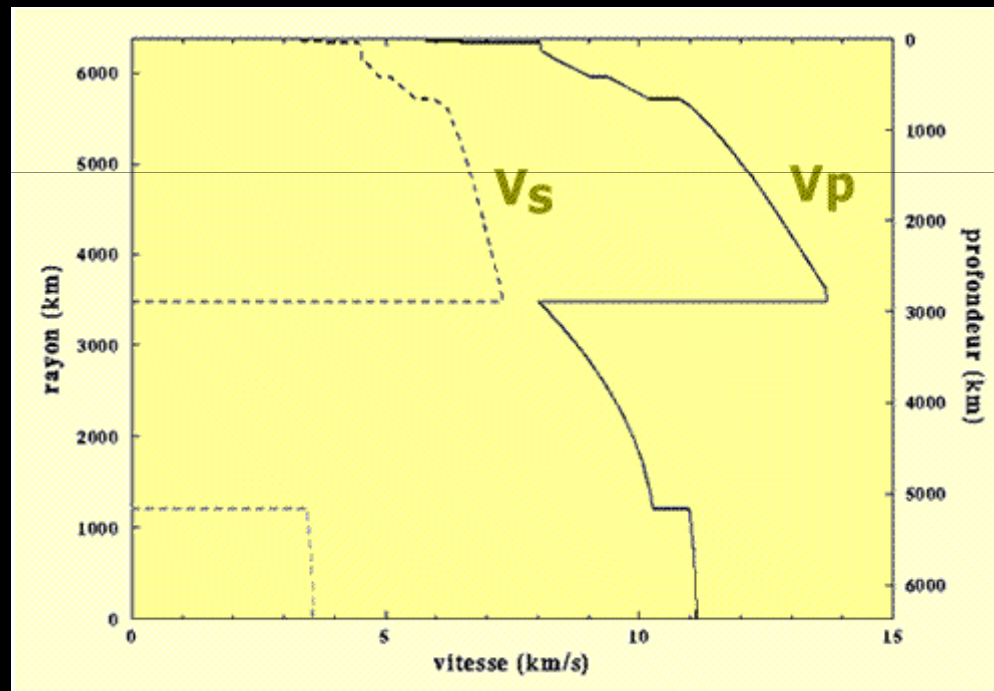
La densité moyenne du manteau est alors de 4.3...cette augmentation est liée au transition de phase et à une déformation élastique.

La densité de la Terre



Déformations élastique

Une déformation élastique est par définition réversible.
Contrôlée par le module de compressibilité.
Les potentiels inter-atomiques se resserrent.



Définition de l'équation d'état

Une équation d'état est une relation entre les variables Pression, Volume et Température:

$$V = f(P, T)$$

**On définit alors:
Le module de compressibilité:**

$$K = -V \frac{\partial P}{\partial V}$$

L'expansion thermique:

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T}$$

Equations d'état pour les silicates



Equation de Birch-Murnaghan

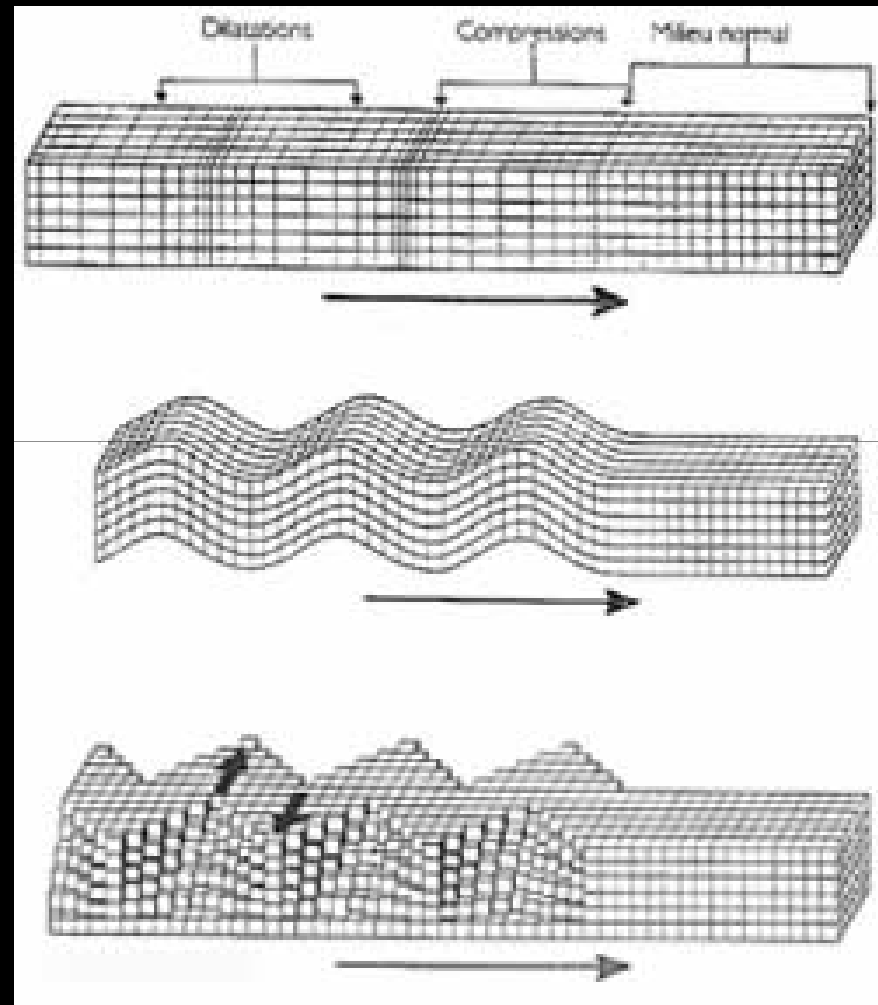
$$P(V) = \frac{3K}{2} \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^{\frac{7}{3}} - \left(\frac{V_0}{V} \right)^{\frac{5}{3}} \right] \left\{ 1 + \frac{3}{4} (K' - 4) \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^{\frac{2}{3}} - 1 \right] \right\}$$

Equation isotherme, V_0 est le volume pour $P=0$ Pa

$$K' = \frac{dK}{dP}$$

Propriétés acoustiques

Le son se propage dans les minéraux sous forme d'onde de compression comme dans l'air et de cisaillement.



Propriétés acoustiques

Les atomes oscillent, compression extension. La vitesse du son est leur vitesse de résonance.

Elle est contrôlée par leur compressibilité et leur capacité à être cisailé. C'est donc a la base une propriiétés liée à l'échelle atomique et donc caractéristique d'une phase minérale.

$$c_l = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}}$$

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

Les transitions de phase

H: c'est l'**enthalpie**. C'est l'énergie stockée dans la phase.
(agitation des atomes, potentiels électriques, organisation,...)

Seule une partie de cette énergie peut être échangée. C'est ce qu'on appelle l'**énergie libre** de Gibbs, nommé **G**.

Une phase peut-être plus ou moins organisée. C'est la notion d'**entropie**, nommé **S**. L'apparition de désordre n'est pas « réversible ». Il faut de l'énergie pour faire la transformation inverse.

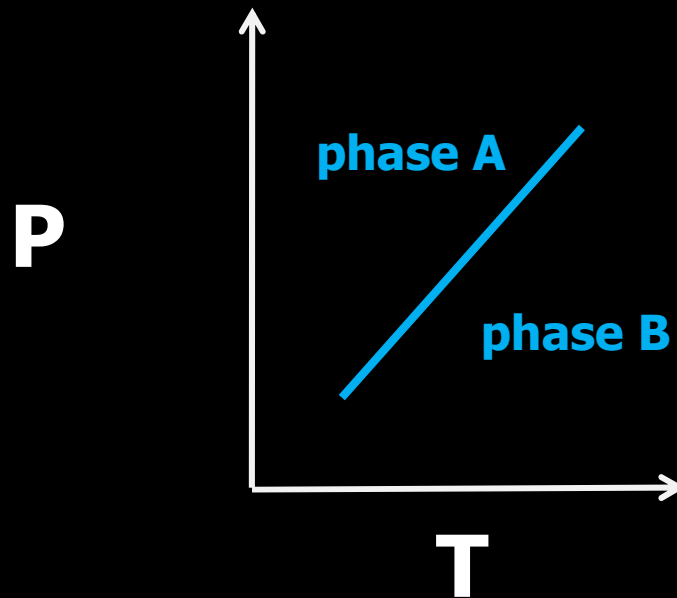
Ces grandeurs sont reliées par:

$$H=G+TS$$

Les transitions de phase

Les équilibres chimiques sont contrôlés par G , l'énergie libre donc échangeable.

La notion de stabilité



Les minéraux ont une gamme de pression et de température dans laquelle ils sont stables. Celles-ci sont déterminées à partir d'expérience en laboratoire. C'est la pétrologie expérimentale.

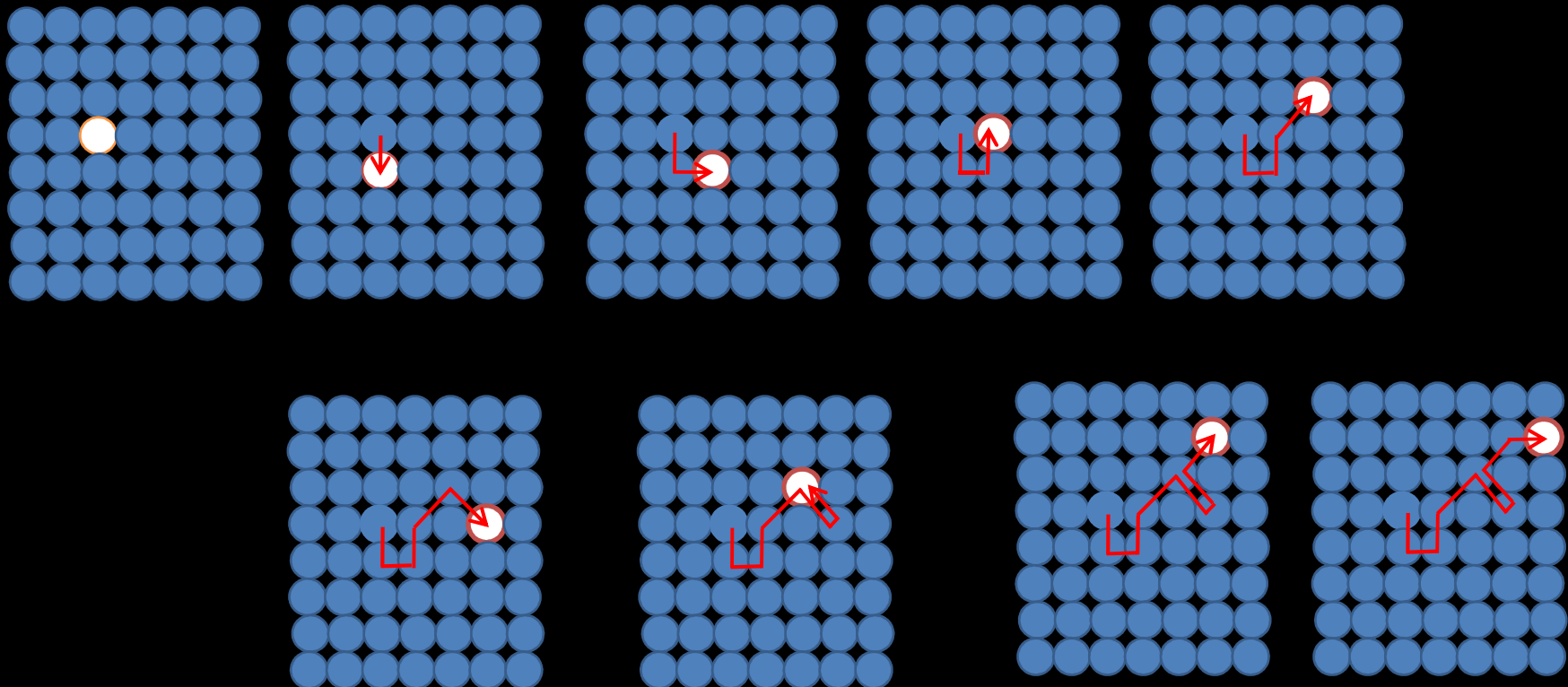
La notion d'équilibre

Prenons l'exemple d'une olivine plongée dans un magma. Il va y avoir des échanges chimiques entre celle-ci et le magma. Au bout d'un certain temps les échanges s'arrêtent, on a atteint l'équilibre.

Ce qui contrôle la vitesse pour atteindre l'équilibre c'est la diffusion chimique (donc la température) et la surface de réaction.

La diffusion chimique

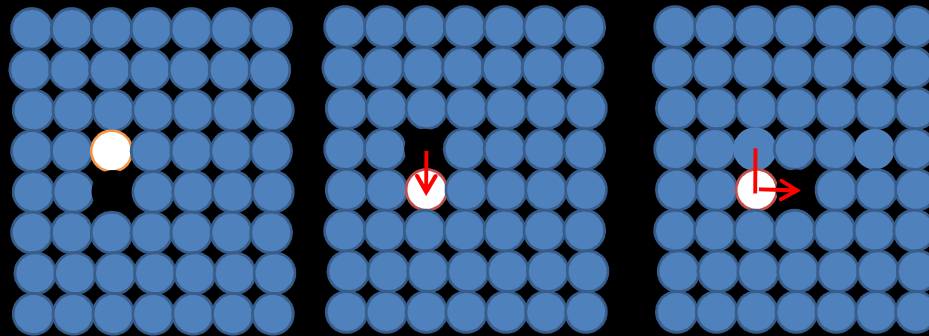
La diffusion est une marche aléatoire. Saut couplé entre deux éléments chimiques.



La diffusion chimique

La diffusion est une marche aléatoire. Elle tends à homogénéiser les compositions chimiques.

Saut couplé avec le déplacement d'une « vacance »

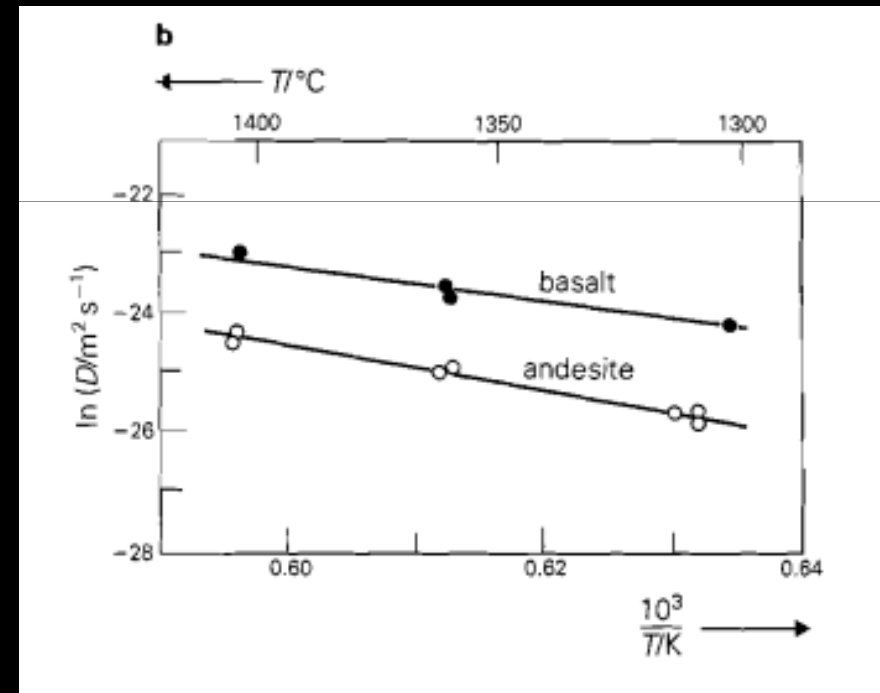


La diffusion chimique

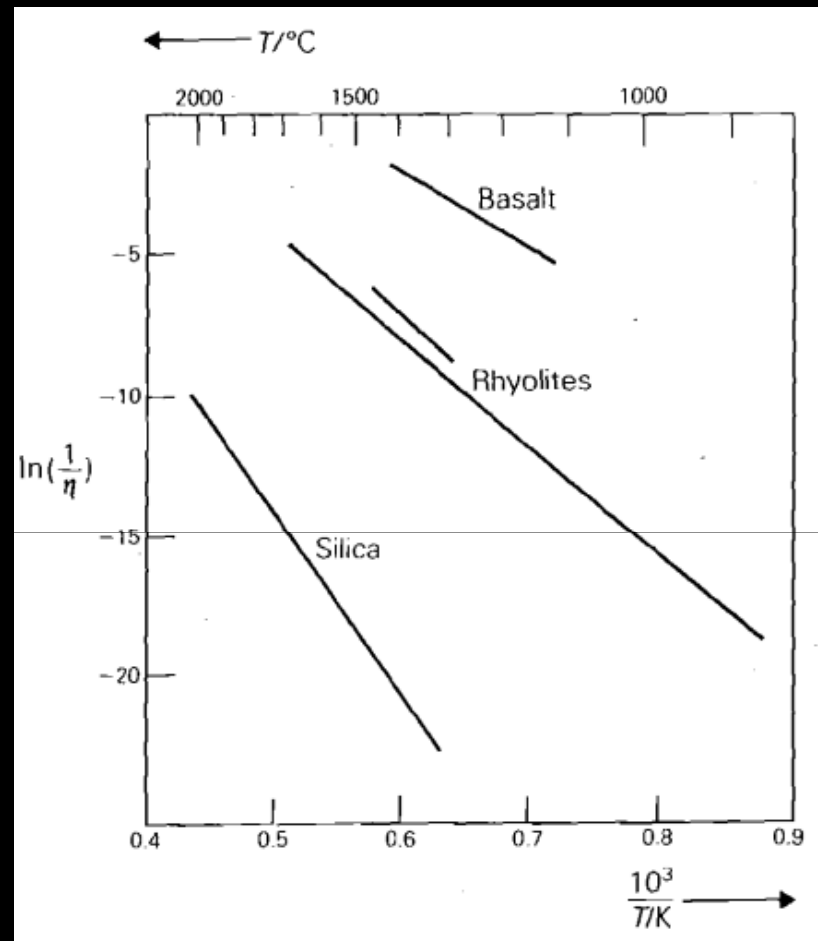
$$D = D_0 e^{-E_a/RT}$$

$$\ln D = -\frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln D_0$$

**Phénomène activé
thermiquement.**

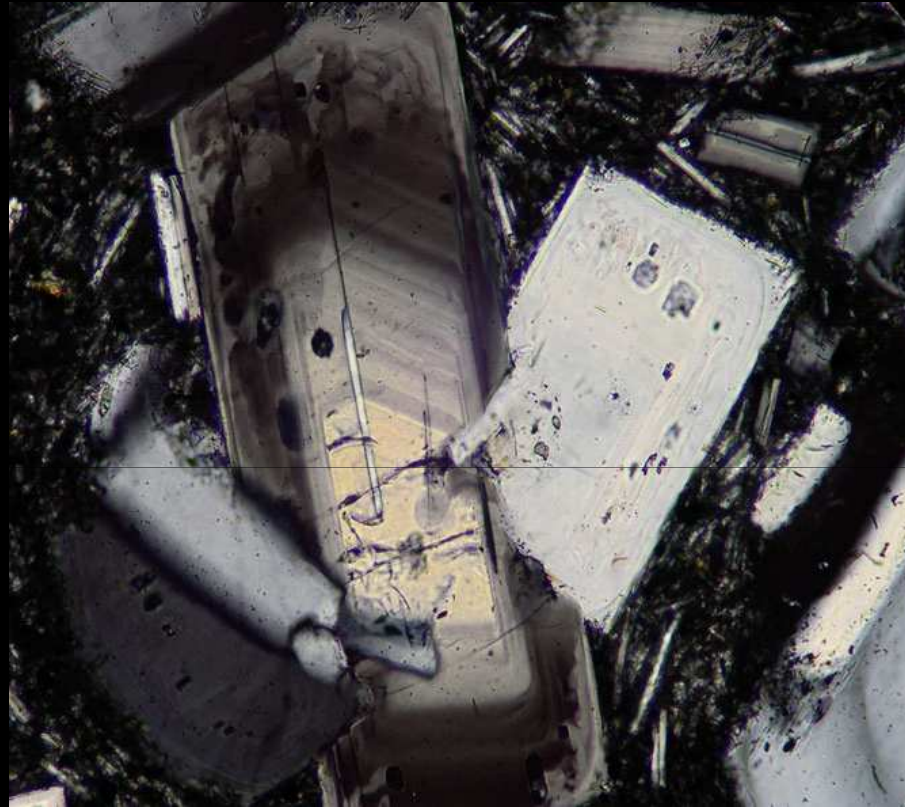


La viscosité des magmas



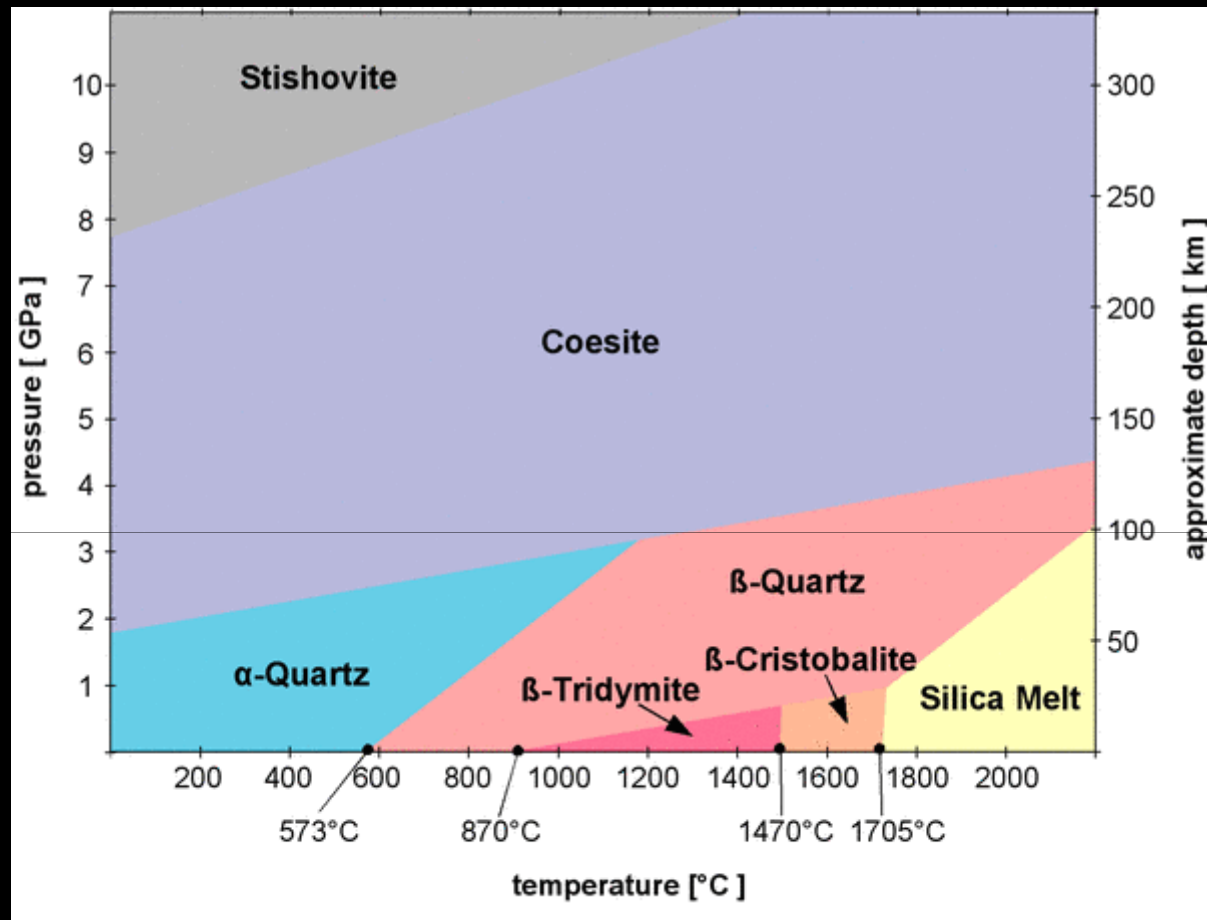
La propriété liée à la diffusion chimique du Si des tétraédres

La diffusion chimique



Diffusion rapide ou lente?

Transformations isochimique



Pas de modification chimique lors de la transition de phase.

Les transitions de phase

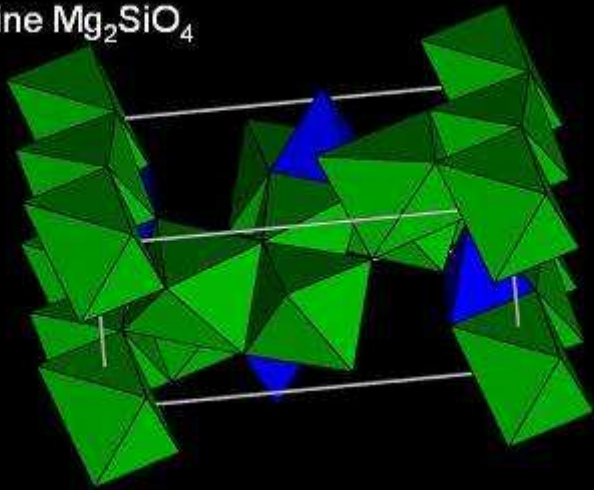
Deux grands types:

**-displacive: déplacements relatifs entre premier voisins;
quasi-instantanées.**

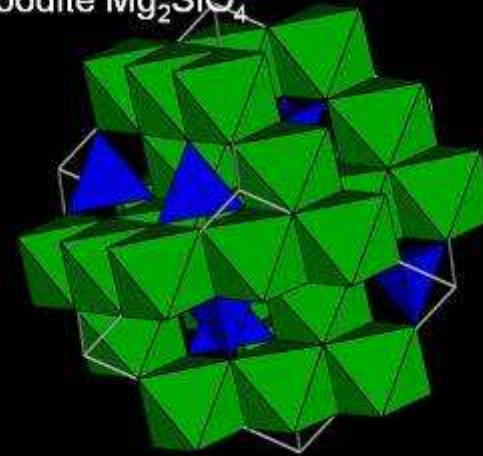
**-reconstructives: on reconstruit une nouvelle structure;
notion de cinétique.**

Les transitions de phase reconstructives

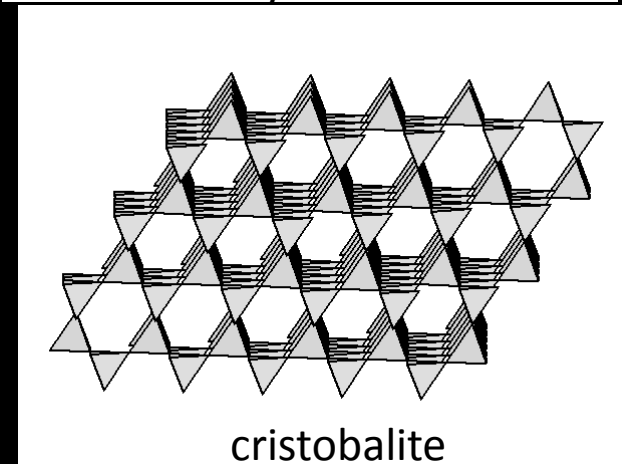
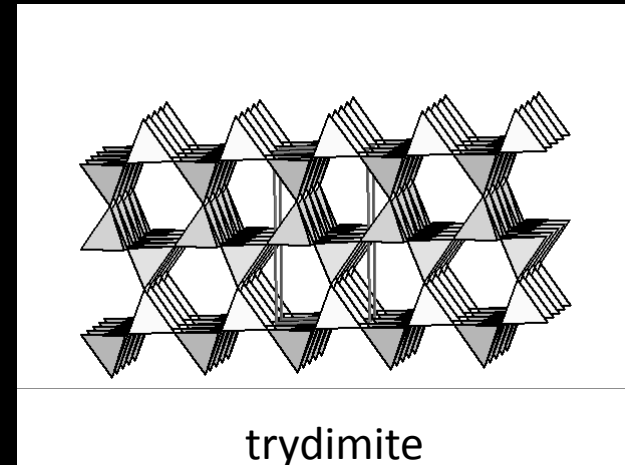
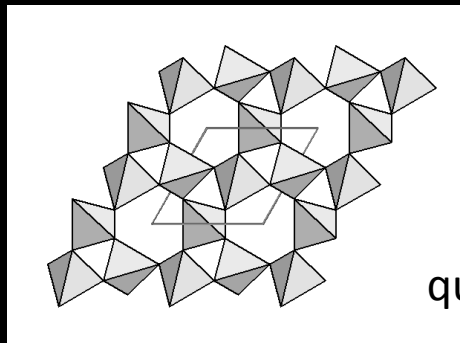
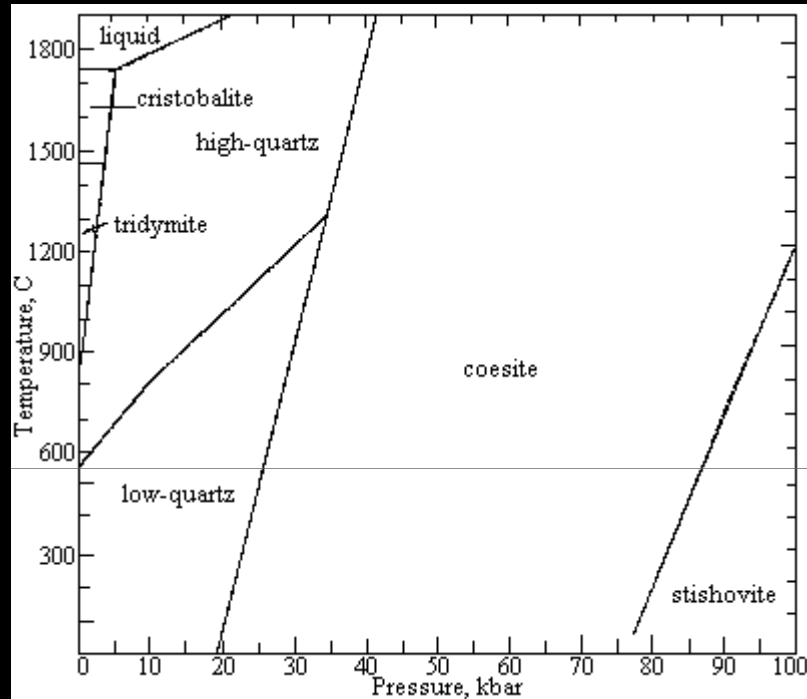
Olivine Mg_2SiO_4



Ringwoodite Mg_2SiO_4



Les transitions de phase displacives



Mesures expérimentales des équations d'état et transitions de phase

Comment générer les pressions du centre de la Terre?

Expériences dynamiques: ondes de choc

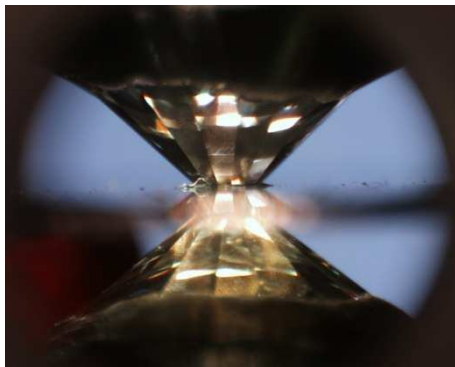


Shockgun



Choc laser

Expériences statiques:



*Cellule à
enclume de
diamant*



*Presse multi-
enclume*

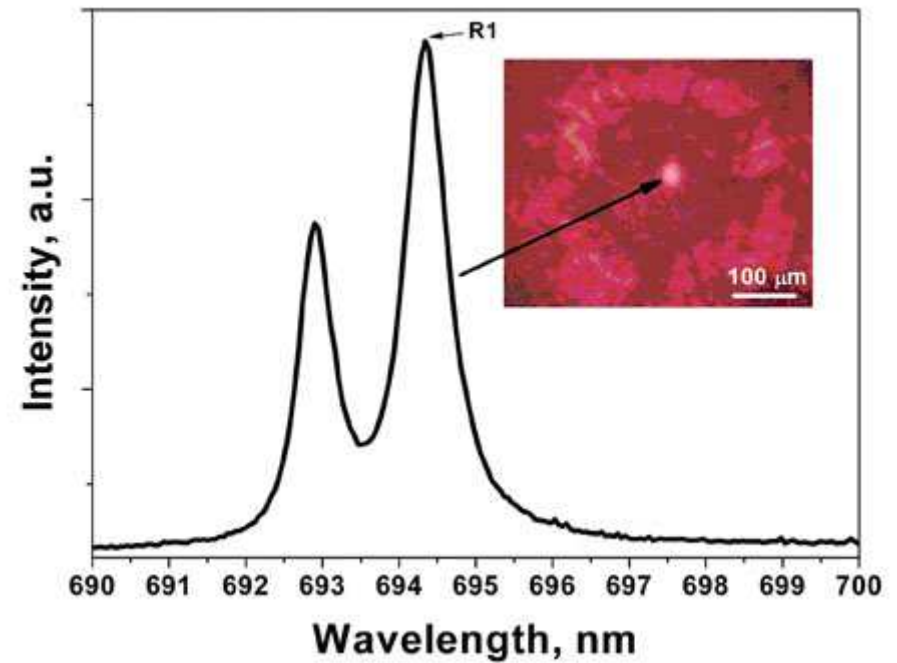
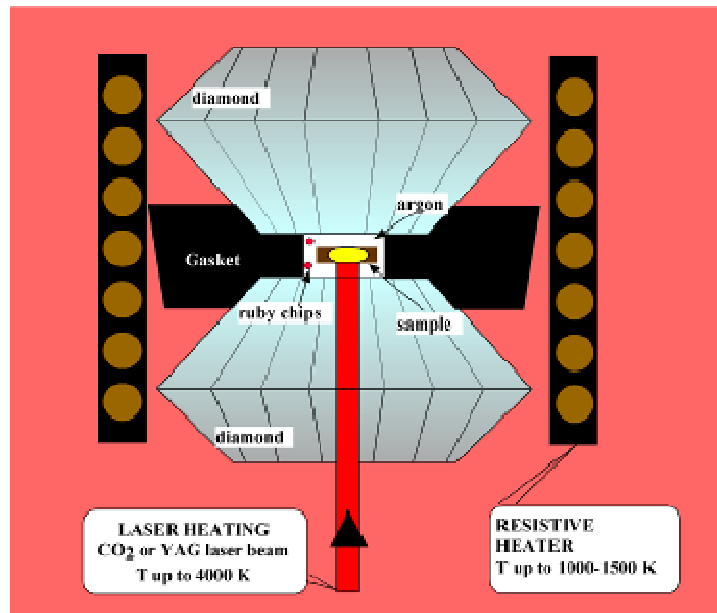
La cellule à enclume de diamant



$$P = \frac{F}{S} \quad \mathbf{S=500-30 \mu m}$$

On atteint les pressions du centre de la Terre en serrant manuellement avec des vis.

La cellule à enclume de diamant

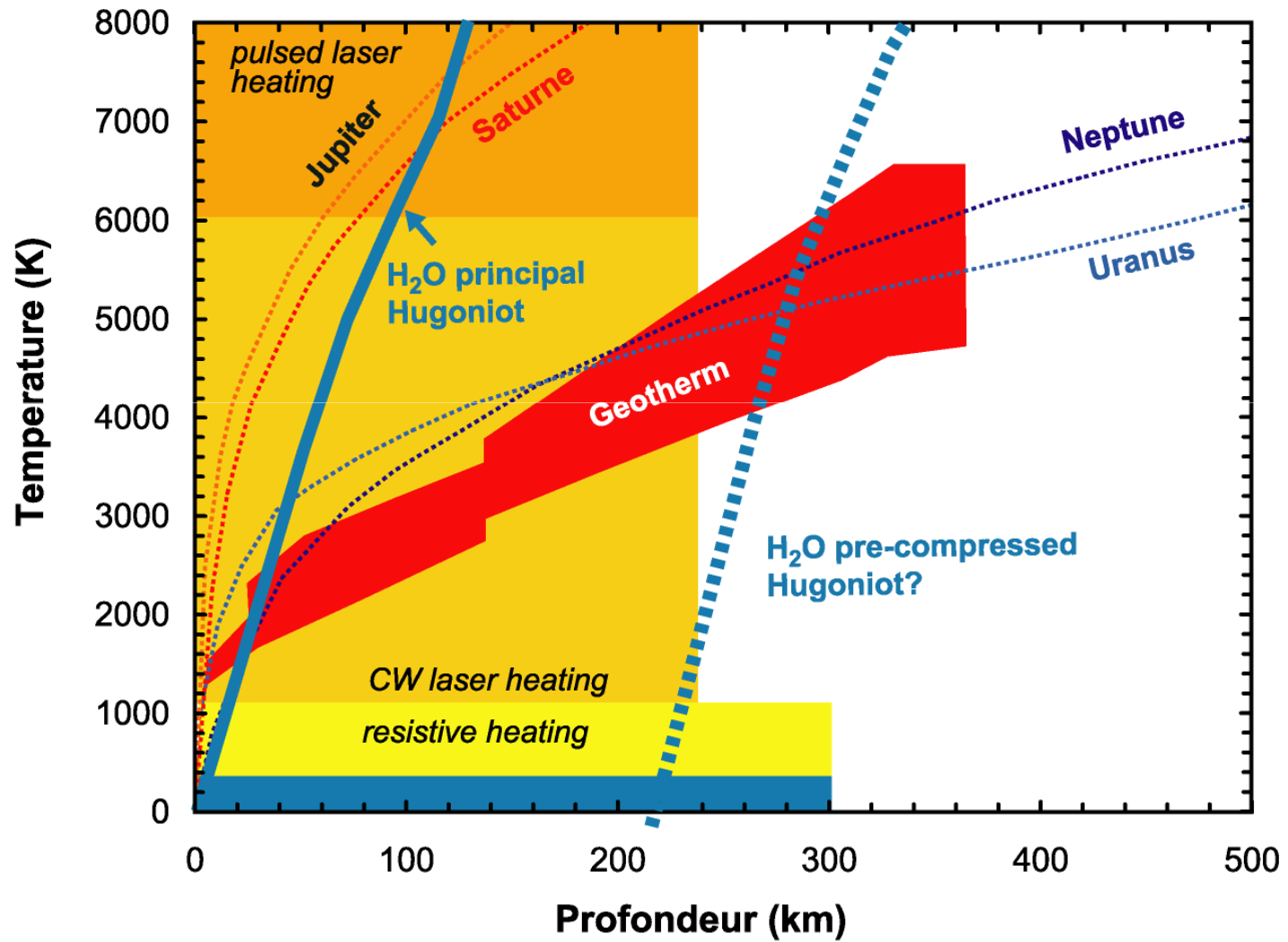


Pression mesurée via fluorescence du rubis.

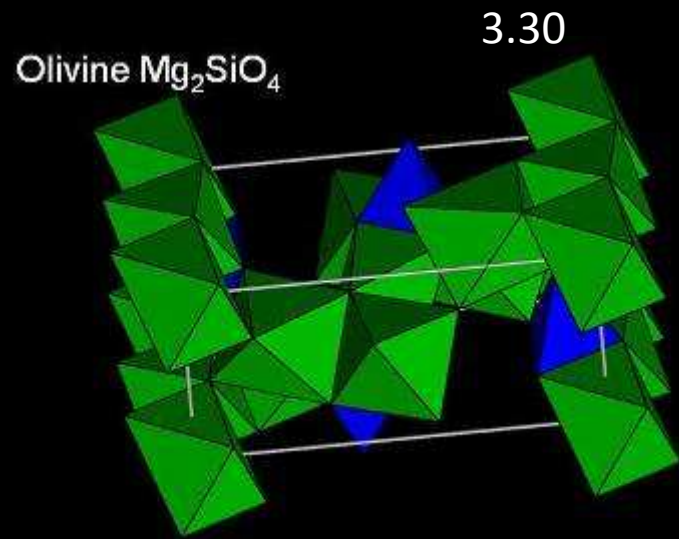
Chauffage dans la cellule à enclume de diamant



La cellule à enclume de diamant

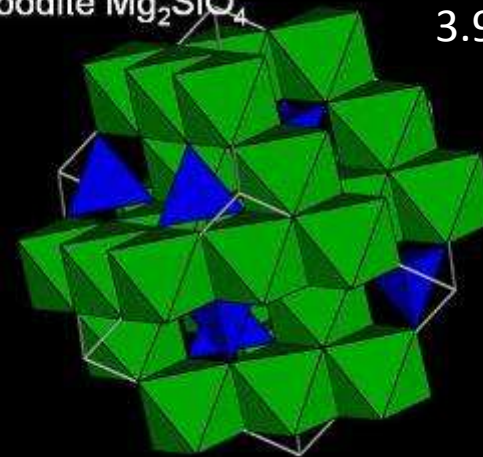
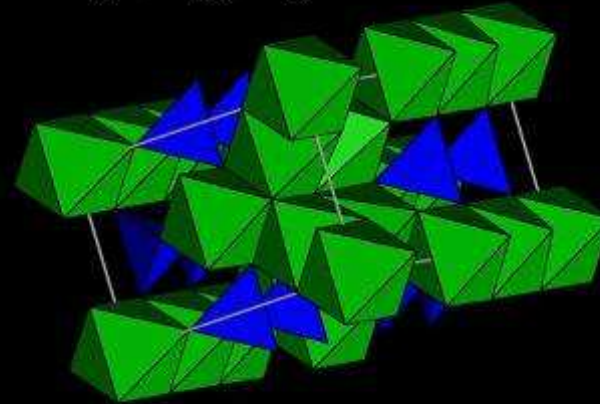


Résultats: le système $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$

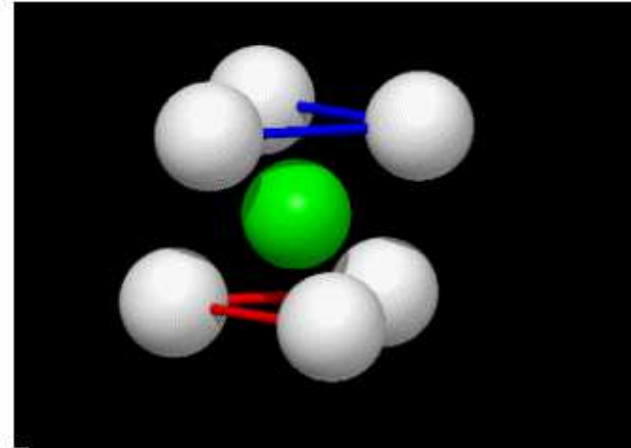
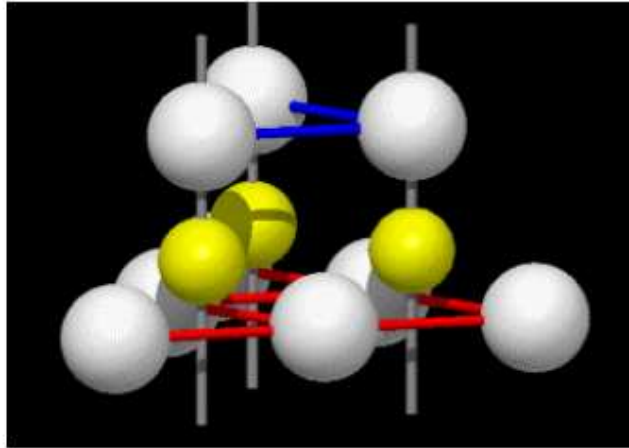


Bleu=tétraèdres SiO_4

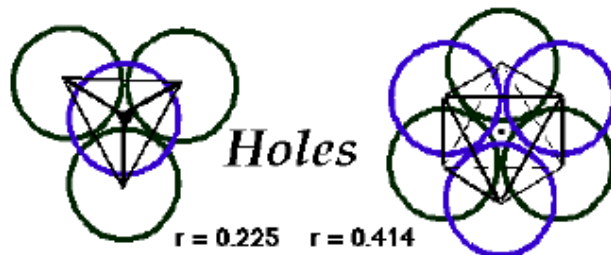
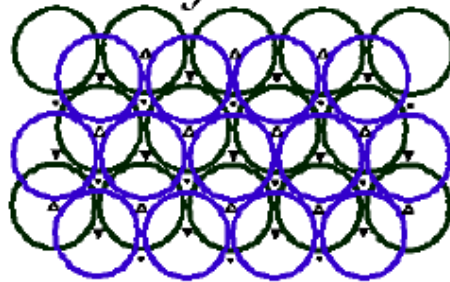
Vert=octaèdres (Fe ou Mg)



Résultats: la perovskite (Mg,Fe)SiO₃



2 layers



Tetrahedral

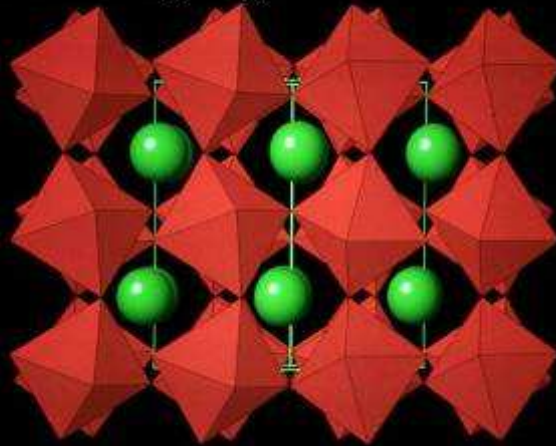
Octahedral

Changement de
la structure des
silicates :
augmentation de
la coordination
du silicium

58

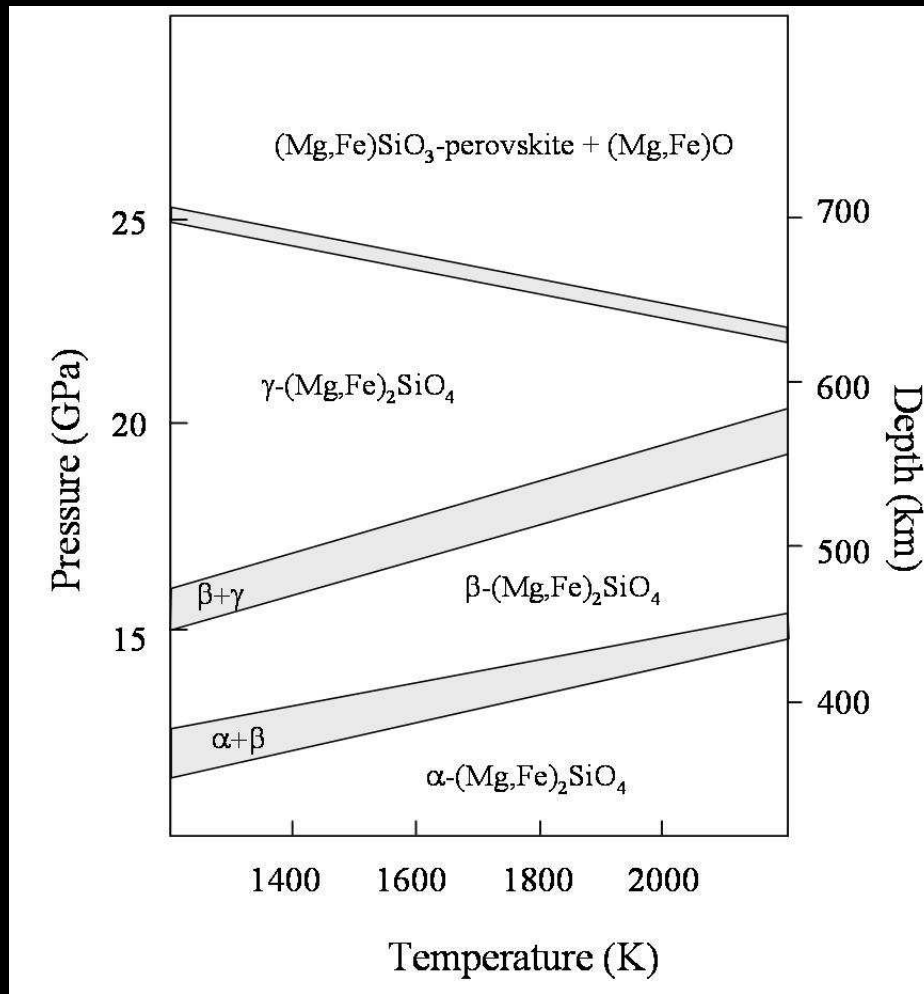
Résultats: la perovskite (Mg,Fe)SiO₃

Perovskite MgSiO₃



Vert= Mg

Rouge= octaèdres SiO₆



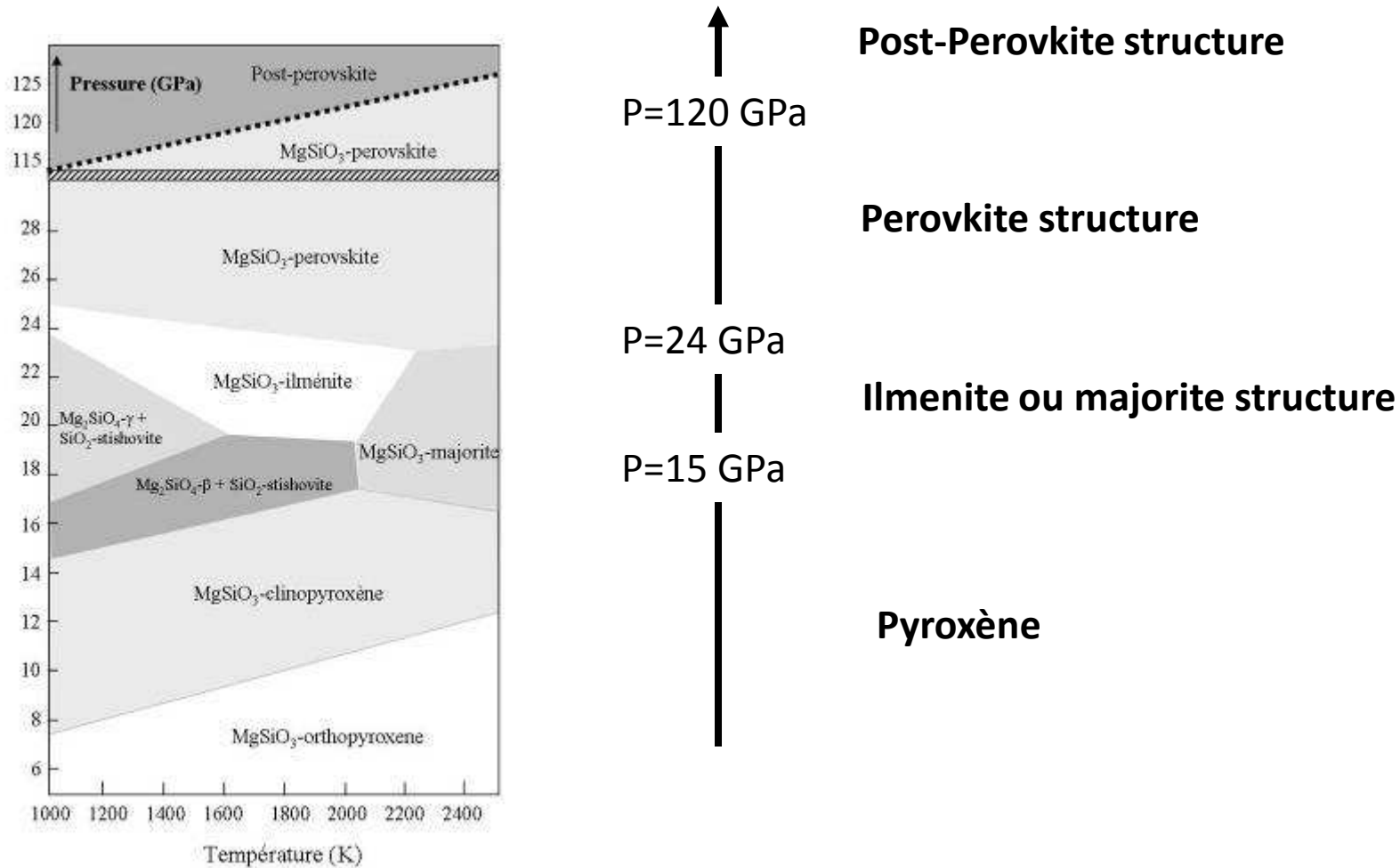
P=120 GPa

P=24 GPa

P=18 GPa

P=13 GPa

Résultats: le système $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$



La post-perovskite

Découverte assez récente (2004).

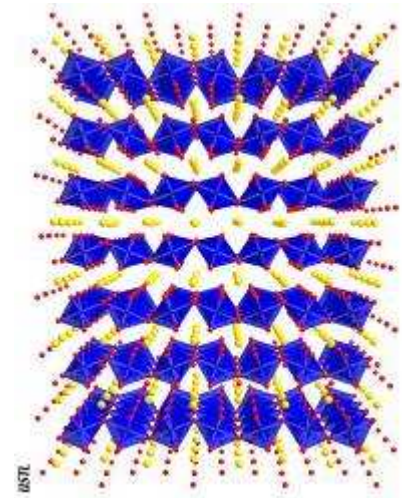
Prédite par les calculs abinitio.

$P > 120$ GPa

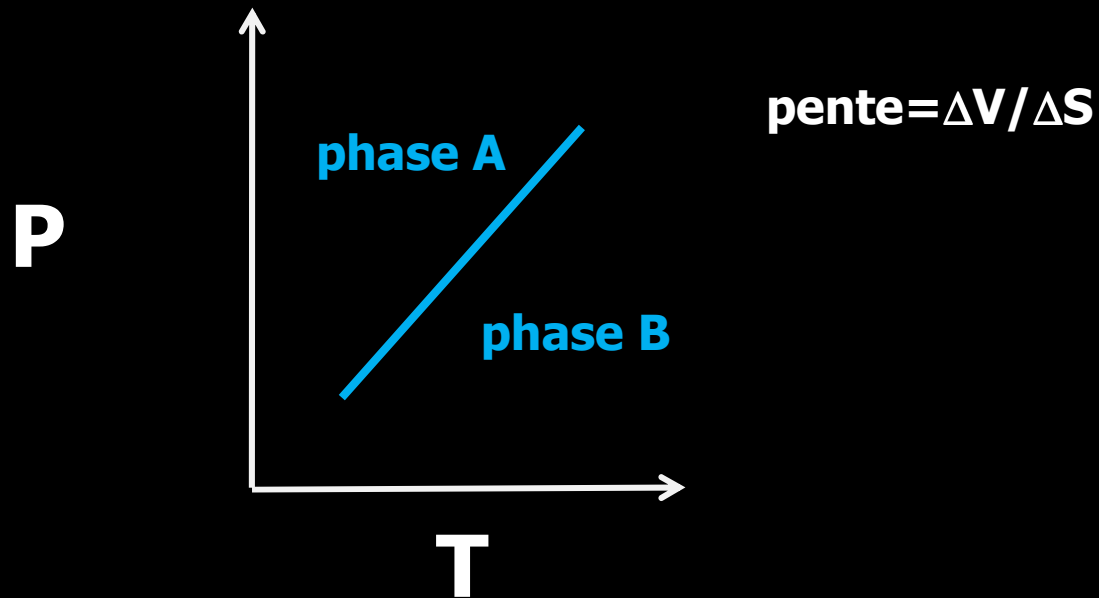
Pourrait correspondre à la D''

anisotropie pas forcément en accord...

Mais: -l'amplitude du saut de vitesse observé est faible par rapport à celui-ci attendu.

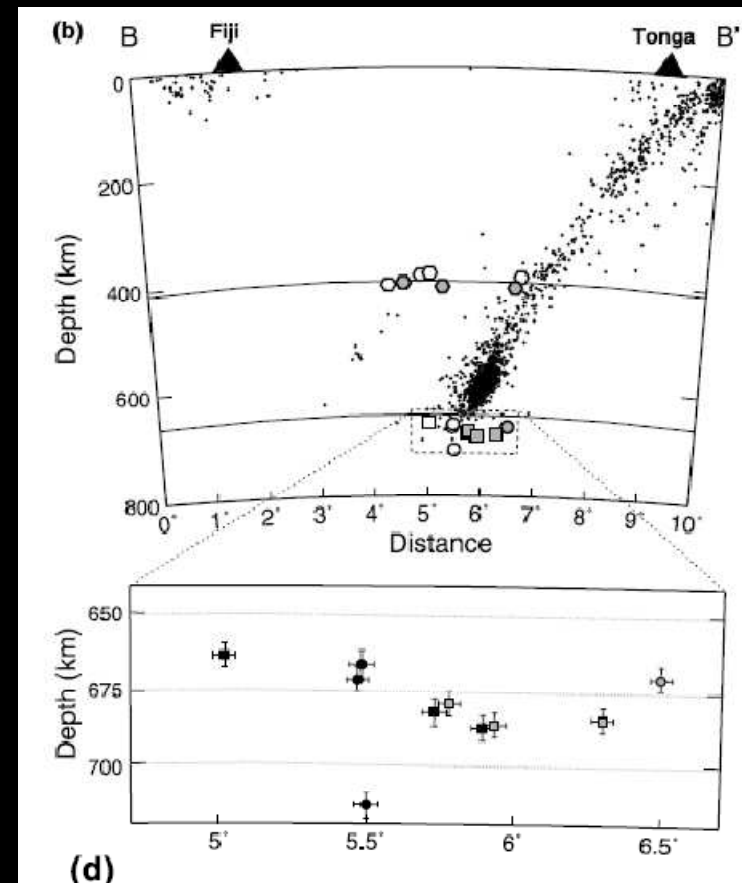
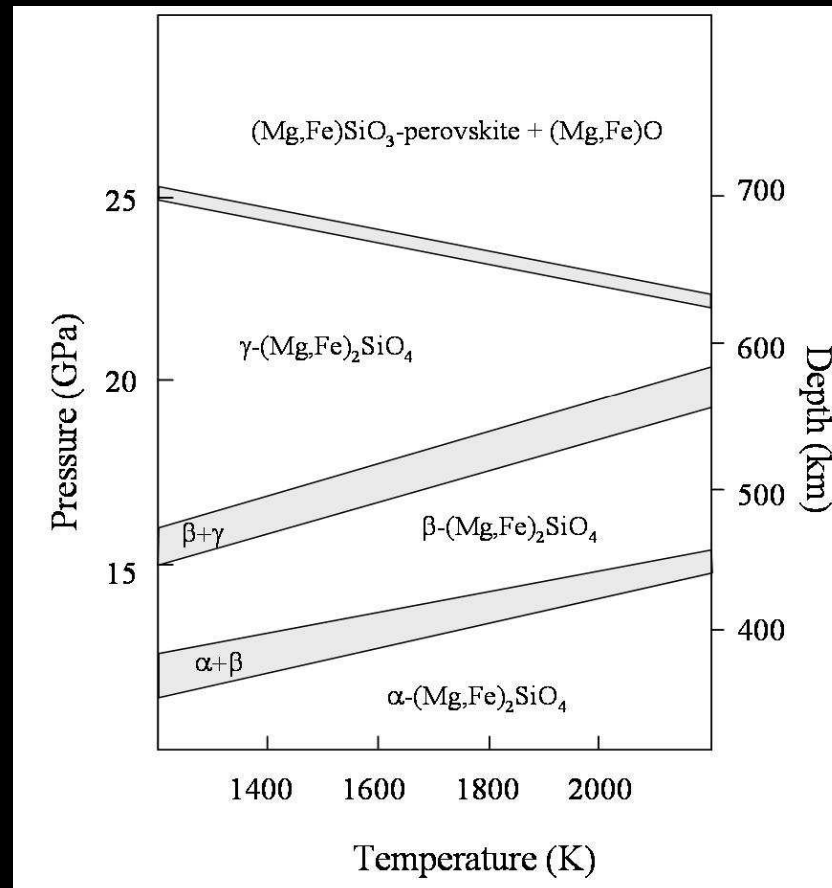


La pente des transitions de phase

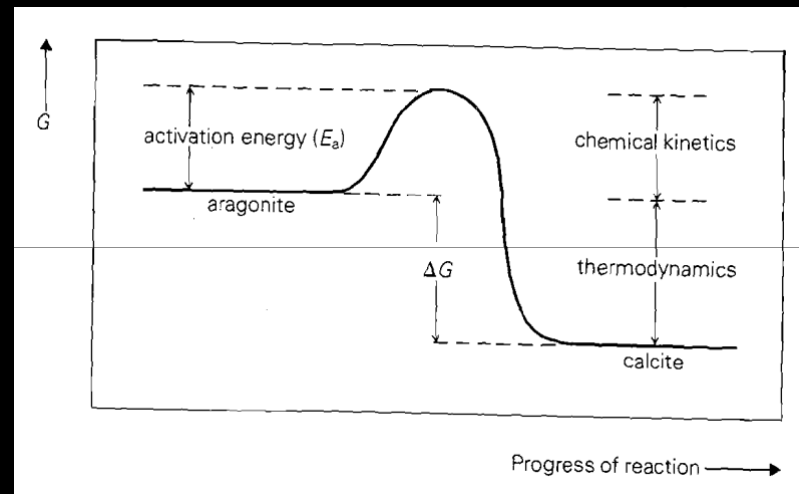
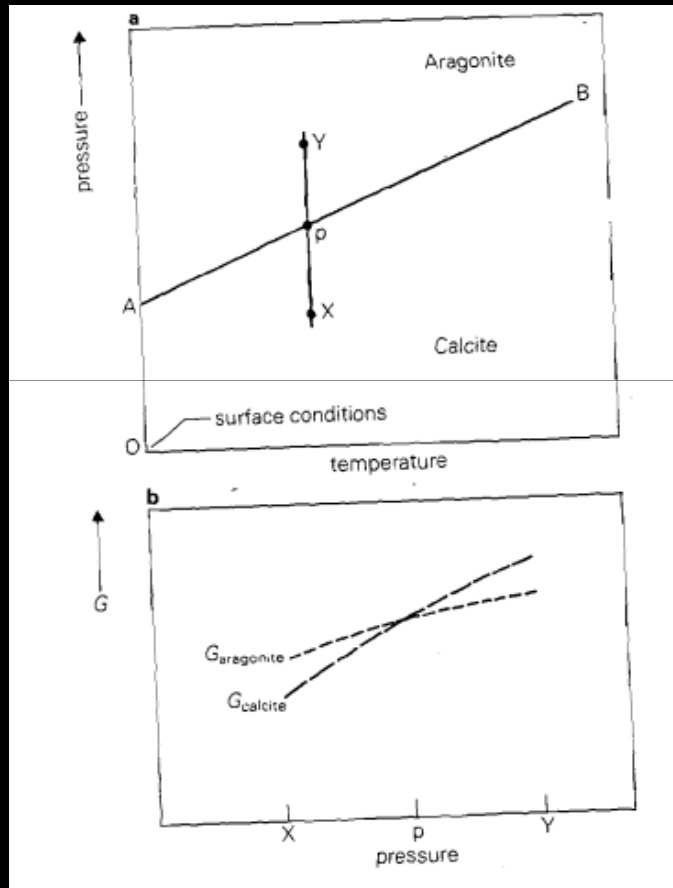


Pente en générale positive. Pente négative liées à des variations d'entropie.

La pente des transitions de phase



Vitesse des transitions de phase et métastabilité



Il faut gravir une montagne avant de pouvoir descendre

La déformation des minéraux

La déformation plastique

Celle-ci est non réversible.

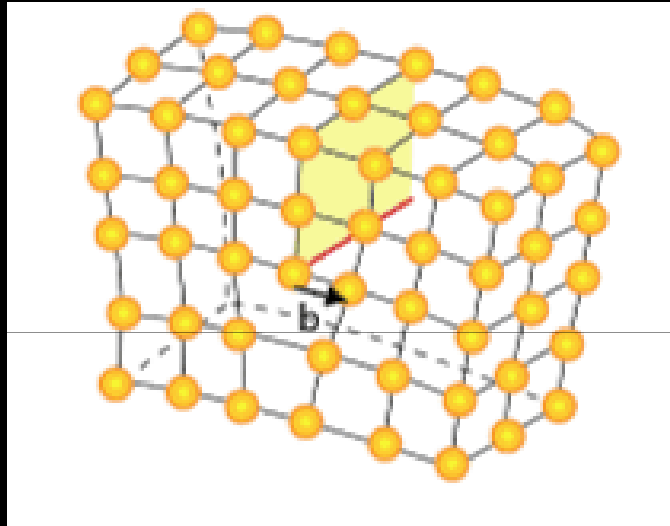
Elle est accommodée par des mécanismes à l'échelle du cristal.

C'est la migration de dislocations.

**Parfois phénomènes de dissolution
recristallisations en présence de
fluides.**



Dislocations et plasticité



Celles-ci peuvent se déplacer sous l'effet de contraintes. Elles permettent la plasticité et donc la déformation à l'état solide.

Propriétés acoustiques: anisotropie

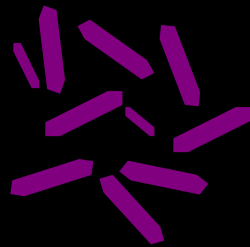
Il existe des directions préférentielles au sein desquelles les vitesses sismiques sont plus rapides.

Ex: olivine: 25 % de différence entre l'axe a et l'axe c.

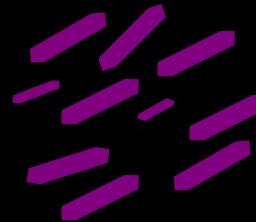
L'observation d'anisotropie sismique fixe donc des contraintes sur les matériaux constitutifs de la Terre

Propriétés acoustiques: anisotropie

Si les roches ont une orientation préférentielle, les ondes acoustiques vont se propager à des vitesses différentes suivant la direction de propagation.



Isotrope

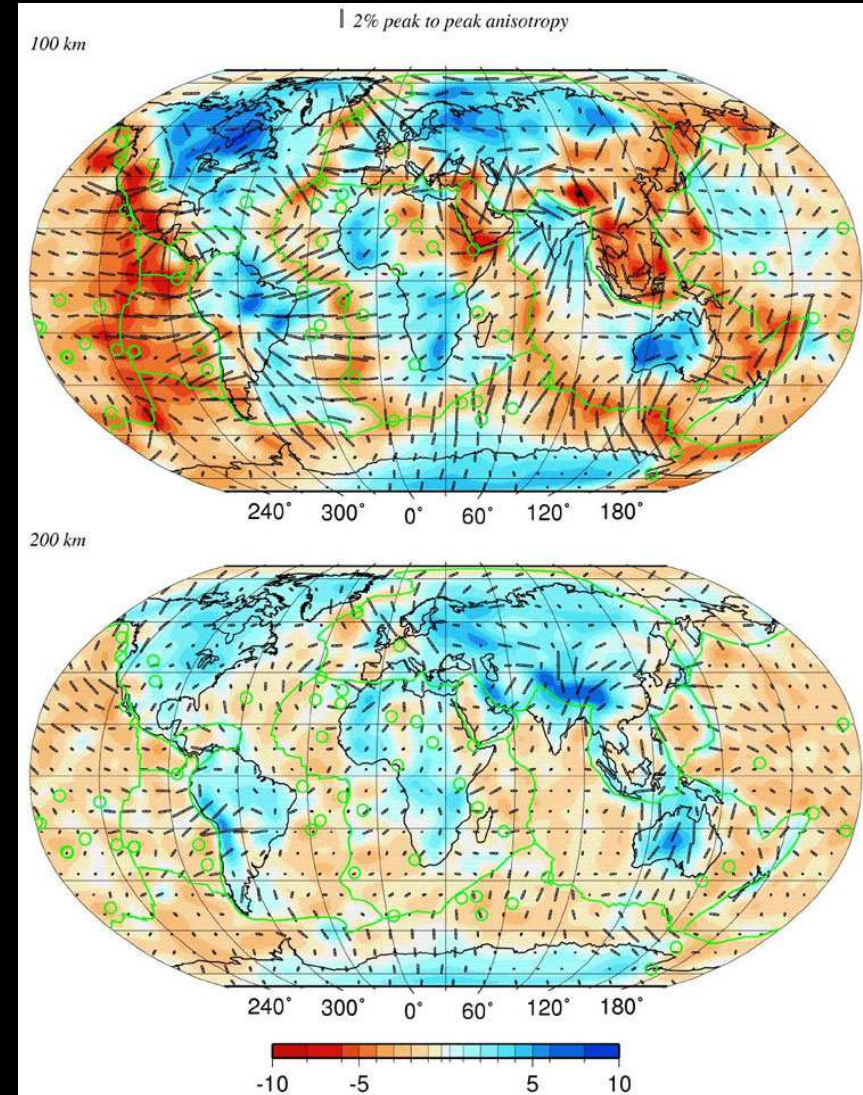
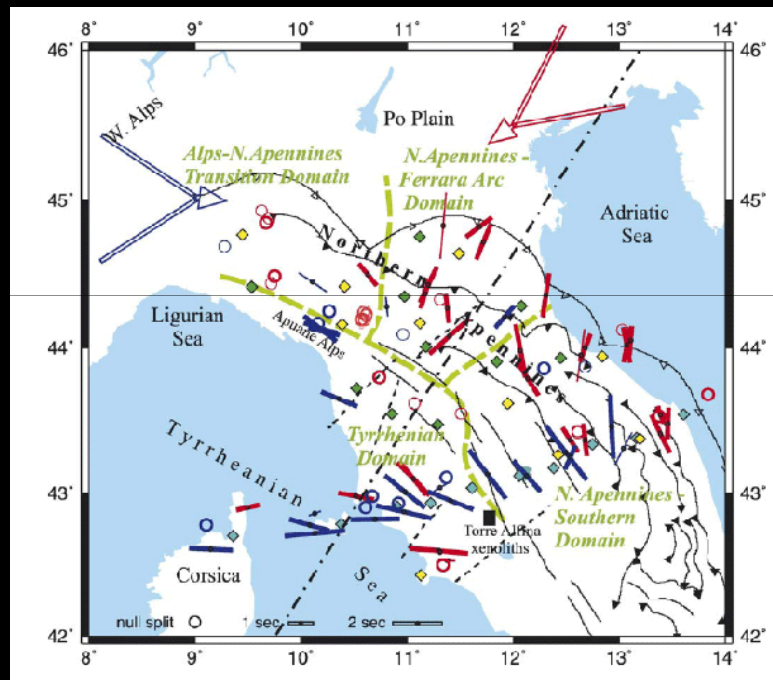


Anisotrope

Splitting des ondes S dans milieu anisotrope (cf biréfringence)

Ex: le manteau supérieur est parfois anisotrope.
 la couche D'' est anisotrope.
 la graine solide est anisotrope.

Propriétés acoustiques: anisotropie



7. La cristallisation d'un magma

Cristaux et vitesse de cristallisation

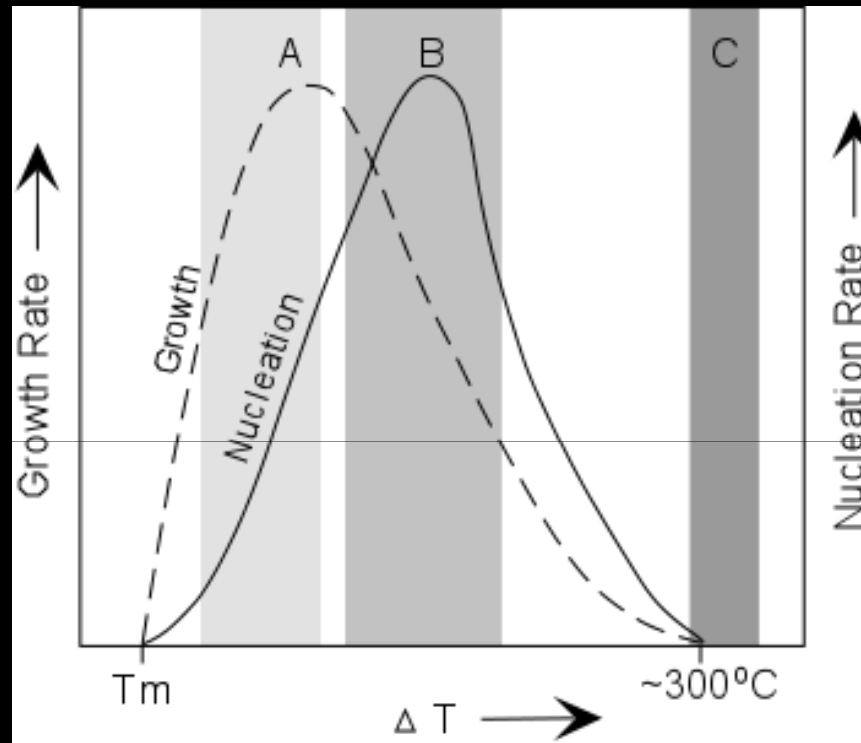
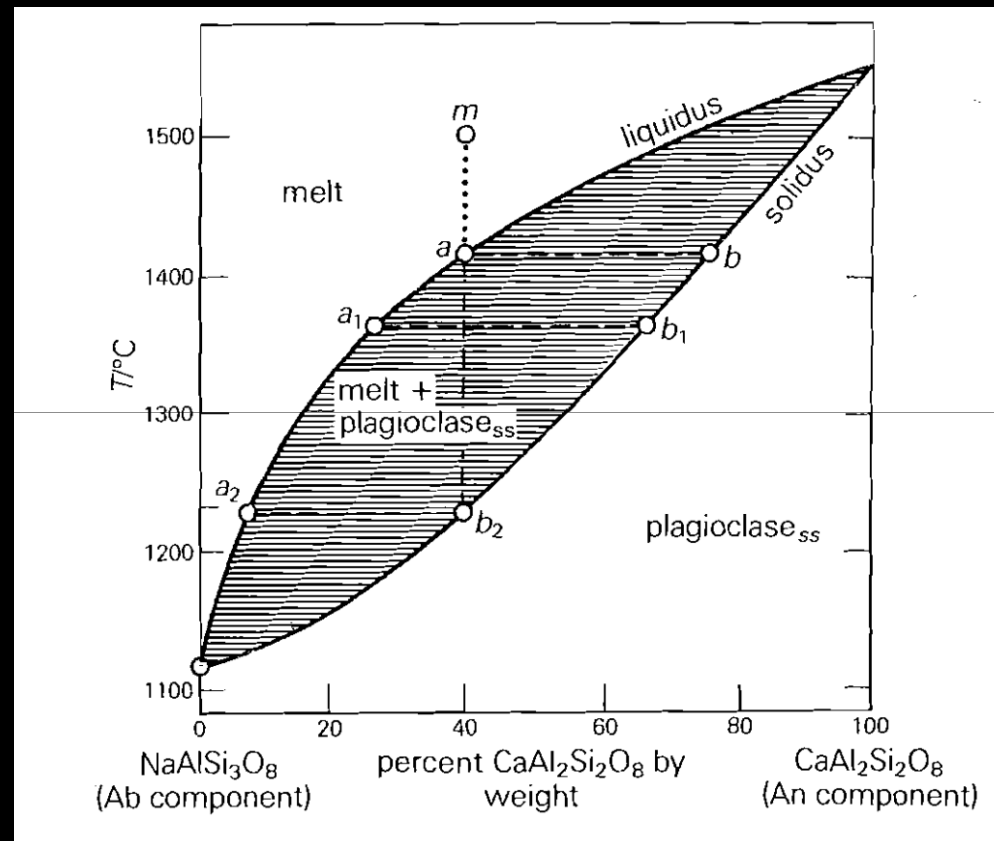
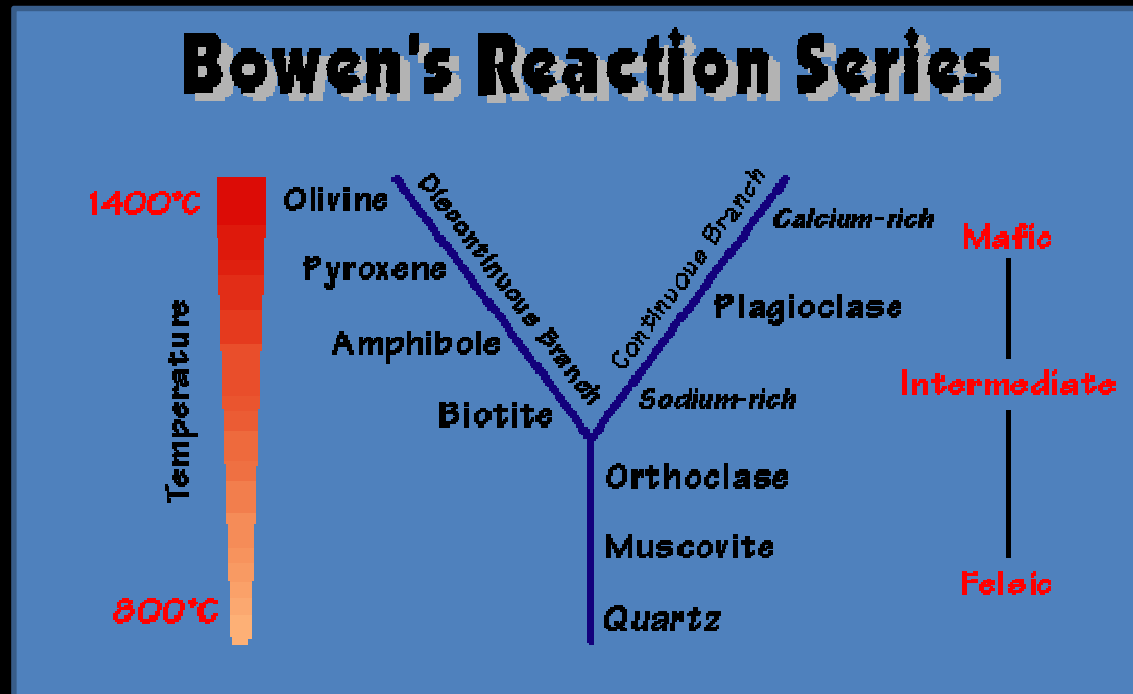


Diagramme binaire



Les séries de Bowen

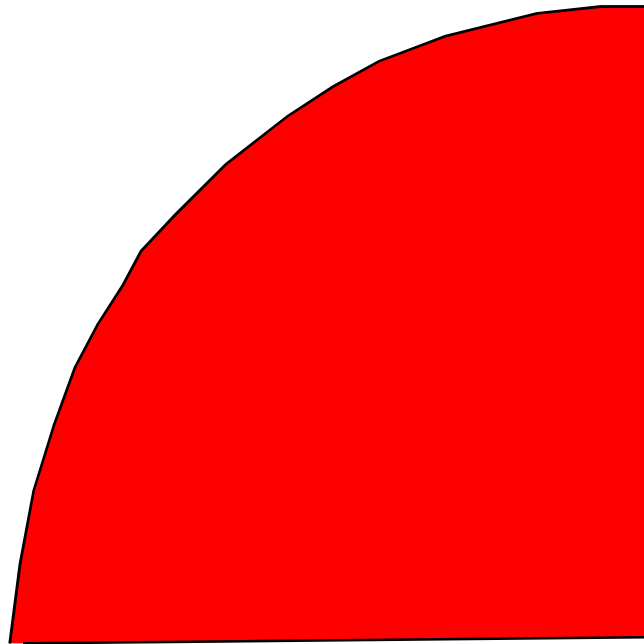


Rmq: Opx puis Cpx

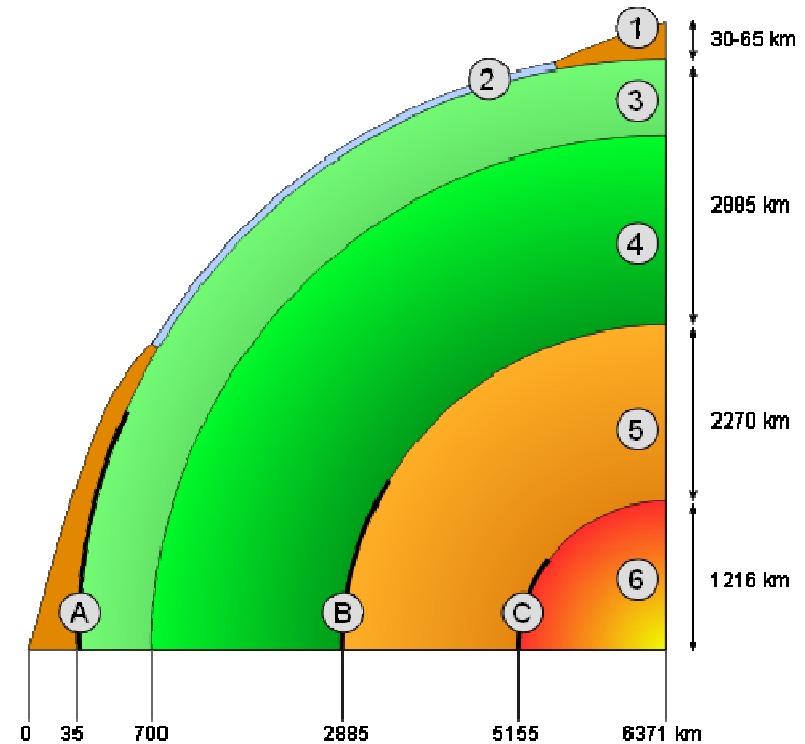
7. Pétrologie du manteau profond

Introduction:

La Terre est une planète différenciée



Non-différencié
Ex: Astéroïde



Différencié:
Ex: Terre, Mars,

Introduction:

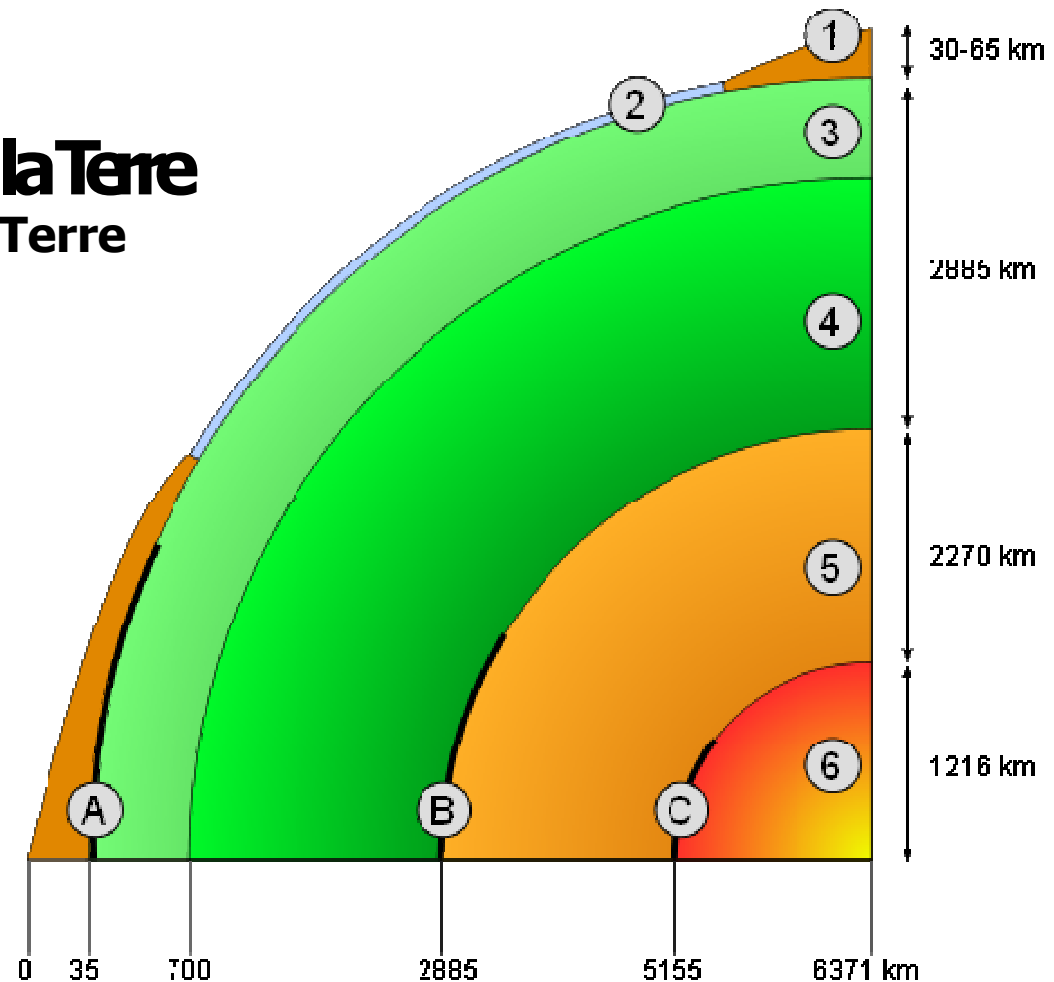
Les grands traits de la structure interne

Manteau $\sim 80\%$ du volume de la Terre
 $\sim 70\%$ masse de la Terre

Entre 35 km et 2885 km.

Pas d'échantillons > 400 km.

Modèle minéralogique.

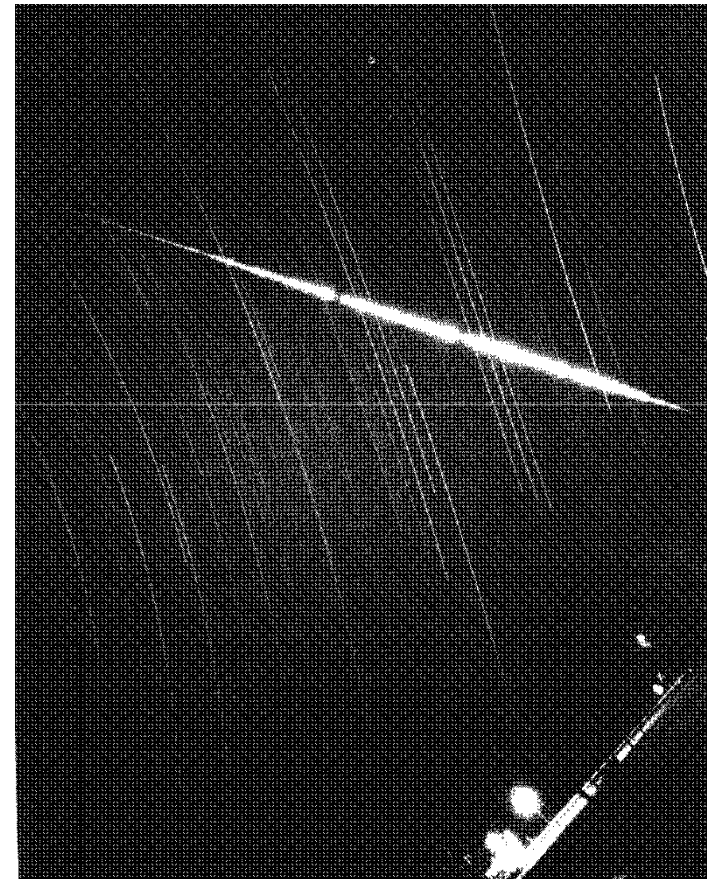


Introduction: Comment construire le modèle minéralogique

- **Quels éléments chimiques?**
- **Quels sont les minéraux stables?**
 - **P dans le manteau**
 - **T dans le manteau**
- **Quelles sont les observations permettant de valider le modèle?**
 - **Echantillons**
 - **Sismologie**
 - **Gravimétrie**

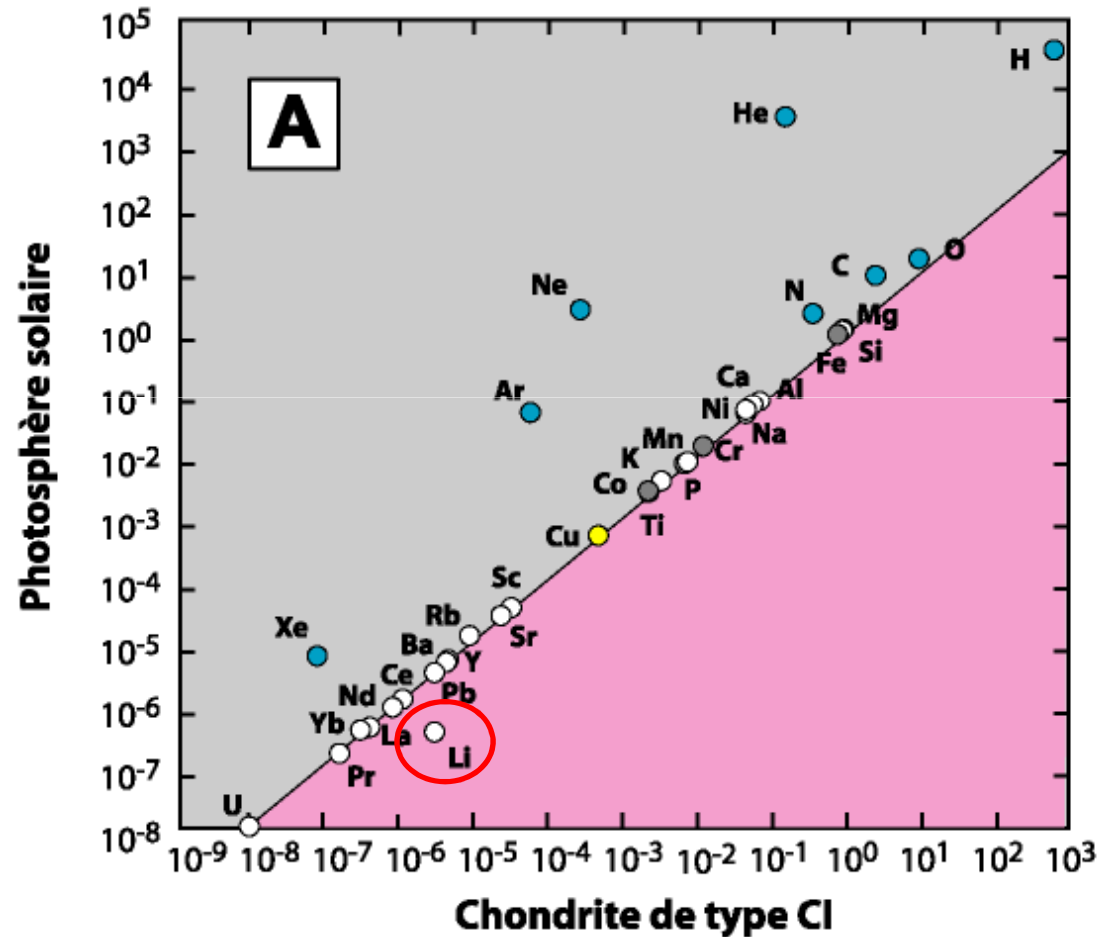
1. Composition chimique du Manteau

Les chondrites: « fossiles » du Système Solaire primitif.

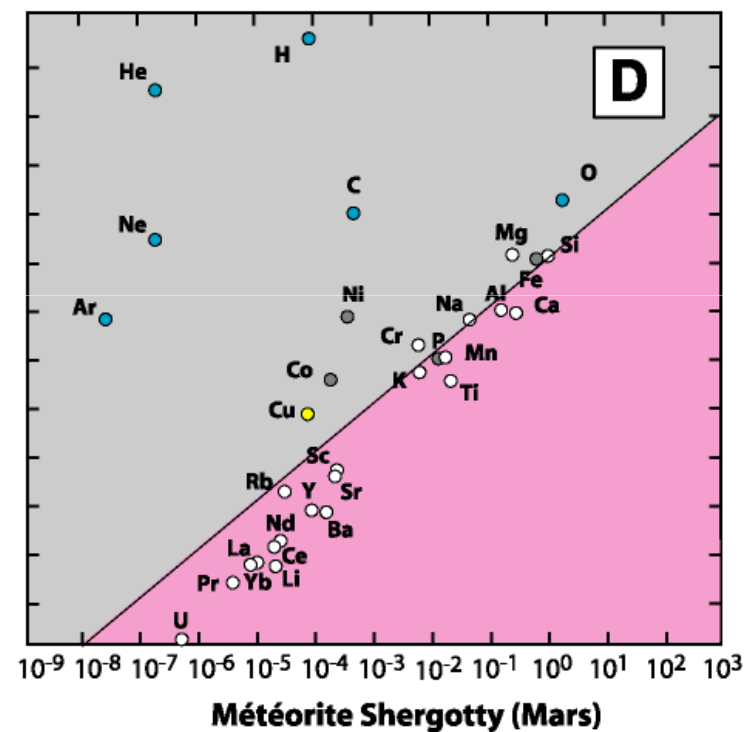
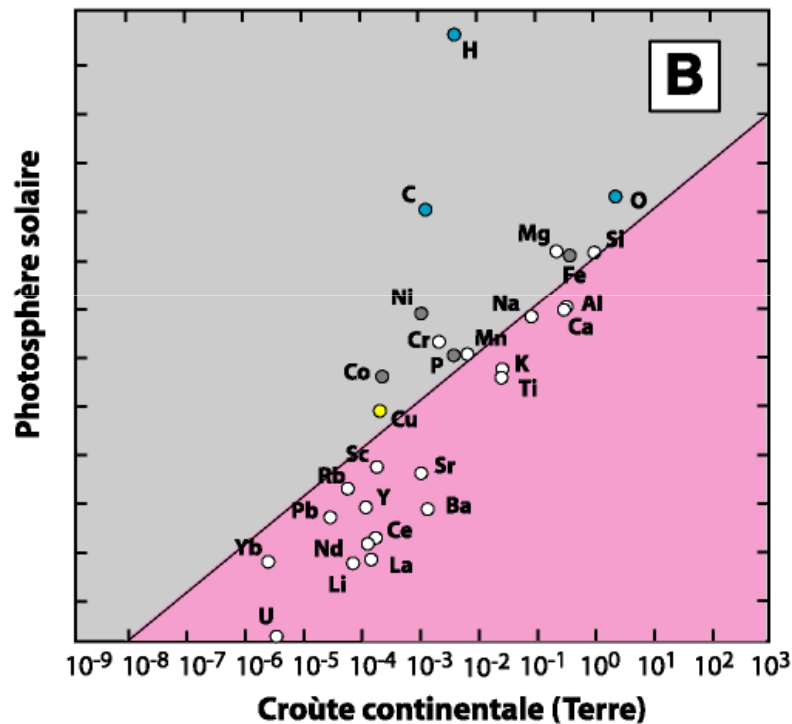


Roches « sédimentaires » des matériaux primitifs.

Composition chimique des chondrites



Composition chimique de la croute terrestre

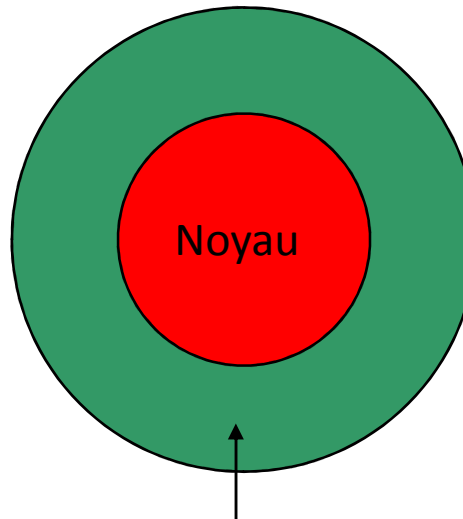


Composition chimique de la Terre Globale

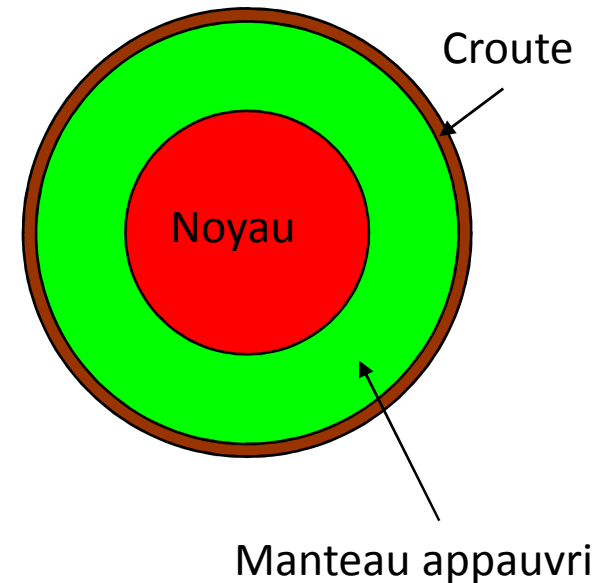
Chondrites=Terre Globale



Terre primitive



Terre différenciée

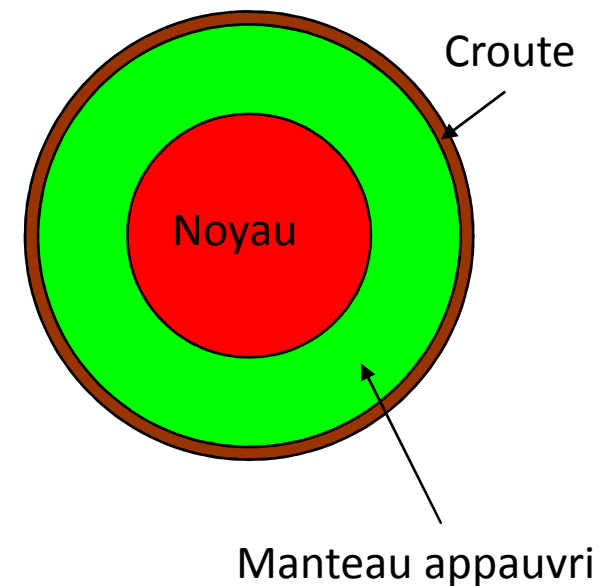


Moteur de la différenciation: - contraste de densité
- affinité des éléments chimiques,
- fusion.

Composition chimique de la Terre Globale

Quel élément va ou?

Terre différenciée



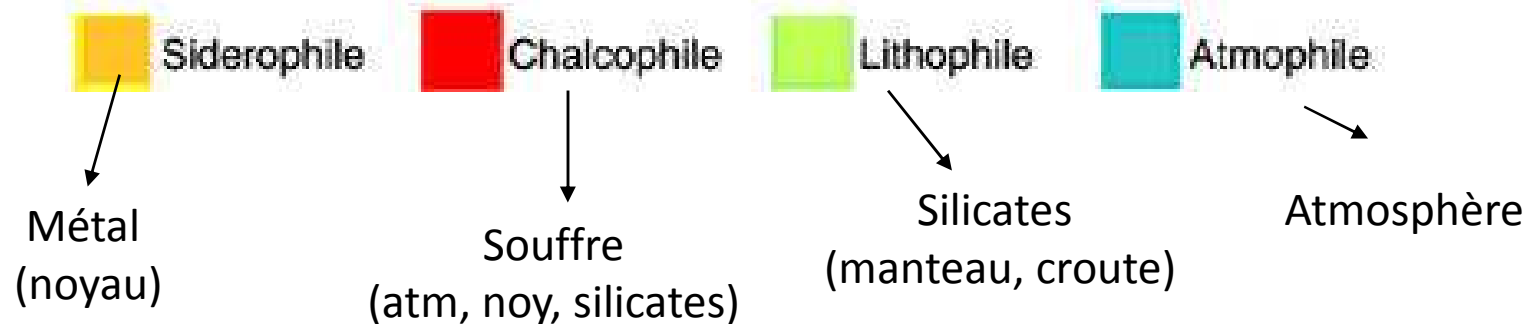
La classification de Goldschmidt



H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

Th	U
----	---

Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----



Classification des éléments chimiques

Compatibilité

$$D_i^{C/M} = \frac{C_i^C}{C_i^M}$$

Plus l'éléments est incompatible plus il sera dans la croute

Sidérophile/Lithophile

$$D_i^{N/MP} = \frac{C_i^N}{C_i^{MP}}$$

Plus l'éléments est sidérophile plus il sera dans le noyau...

Volatile/Réfractaire

$$D_i^{fluid} = \frac{C_i^A}{C_i^N \cdot \frac{m_N}{m_{Terre}} + C_i^{MP} \cdot \frac{m_{MP}}{m_{Terre}}}$$

Plus l'éléments est volatile plus il sera dans l'atmosphère...

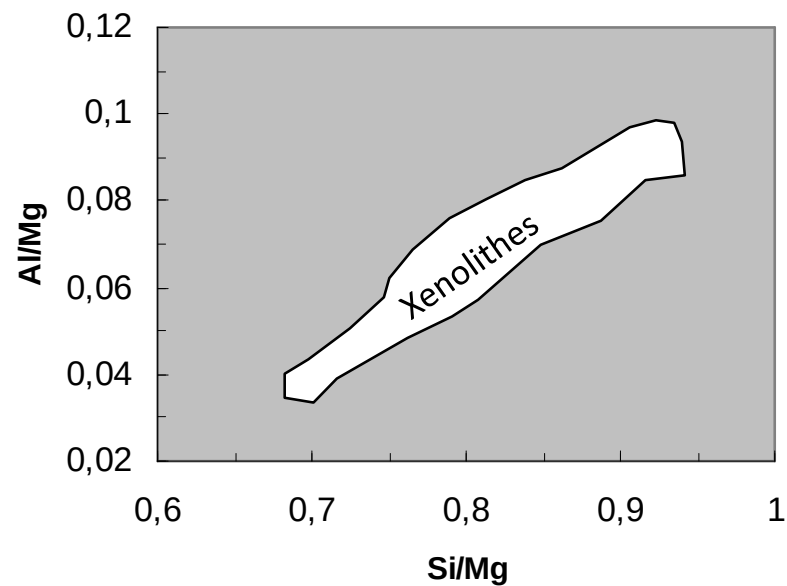
Quelle chondrite pour la Terre

Chondrite de type CI? *Pas assez de volatile.*

Chondrite ordinaire? *Pas bon isotopes oxygène.*

Chondrite à enstatite (+ réduite)? *Pas bon rapport Fe/Si*

Exercice: Calcul de la composition du manteau terrestre



Exercice: Calcul de la composition du manteau terrestre

I) Le manteau primitif

1.a) Sur la figure 1, localiser les échantillons les plus primitifs.

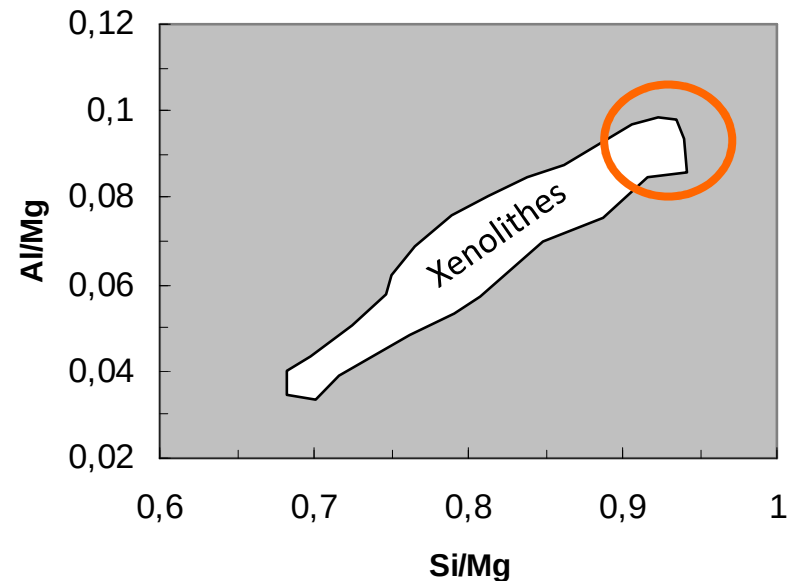
Mg = incompatible
Si, Al = compatible

1.b) Si l'on suppose que ces échantillons sont représentatifs du manteau primitif, déterminer $(Al/Mg)_{MP}$ et $(Si/Al)_{MP}$.

$(Al/Mg)_{MP} = 0.09$ et $(Si/Mg)_{MP} = 0.92$

1.c) Sachant que le rapport Ca/Al vaut 1.07 dans les météorites, que vaut ce rapport pour le manteau primitif et la Terre globale ?

$(Ca/Al)_{MP} = 1.07$



Exercice: Calcul de la composition du manteau terrestre

II) La Terre Globale

2.a) Que vaut le rapport $(\text{Al}/\text{Mg})_{\text{TG}}$ de la Terre globale ?

$$(\text{Al}/\text{Mg})_{\text{TG}} = (\text{Al}/\text{Mg})_{\text{MP}} = 0.09$$

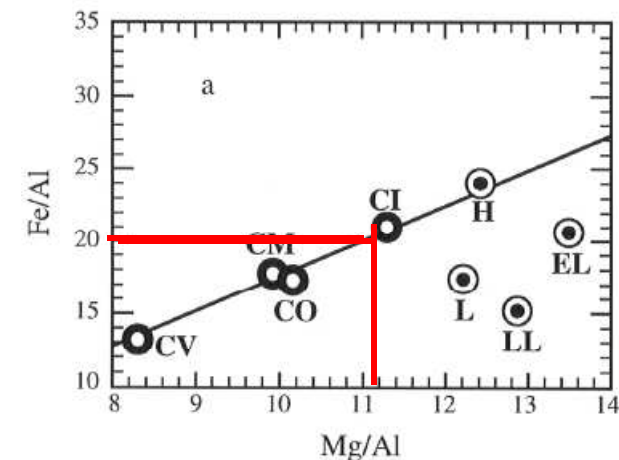
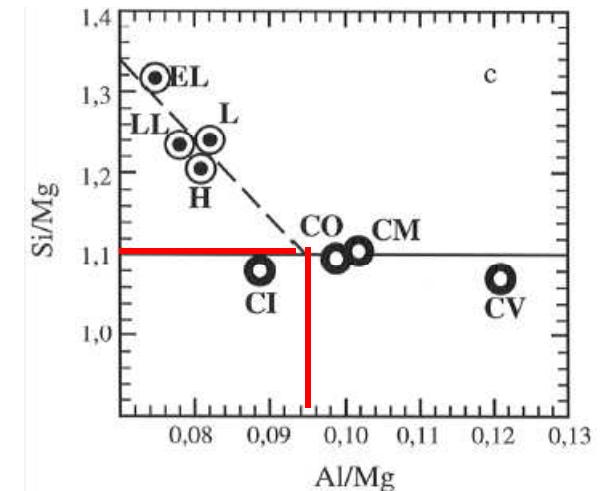
2.b) A l'aide de la figure 2, estimer le rapport $(\text{Fe}/\text{Al})_{\text{TG}}$ de la terre Globale.

$$(\text{Fe}/\text{Al})_{\text{MP}} = 20.5$$

2.c) A l'aide de la figure 3, estimer le rapport $(\text{Si}/\text{Al})_{\text{TG}}$ de la terre Globale ?

$$(\text{Si}/\text{Mg})_{\text{TG}} = 1.10 \text{ et } (\text{Al}/\text{Mg})_{\text{TG}} = 0.09$$

On a donc $(\text{Si}/\text{Al})_{\text{TG}} = 12.2$



Exercice: Calcul de la composition du manteau terrestre

2.d) En supposant un manteau composé de Si, Mg, Fe, Al et O calculez les abondances relatives de ces éléments.

$$O = Mg + Fe + 3/2 * Al + 2 * Si$$

$$(O/Al) = (Mg/Al) + (Fe/Al) + 3/2 + 2 * (Si/Al)$$

$$100 = Al + Si + O + Mg + Fe$$

$$100 = Al + (Si/Al) * Al + (O/Al) * Al + (Mg/Al) * Al + (Fe/Al) * Al$$

$$100 = Al(1 + 11,76 + 47,5 + 12,6 + 9,9)$$

$$Al = 100 / (82.76)$$

Exercice: Calcul de la composition du manteau terrestre

	(Si/Al)	(Fe/Al)	(Mg/Al)	(O/Al)	
en poids	12,20	20,50	11,20		
atomique	11,76	9,88	12,60	47,5	
	Al	Si	Fe	Mg	O
Atome %	1,2	14,2	11,9	15,2	57,4
Poids %	1,4	16,7	28,1	15,3	38,5

Exercice: Calcul de la composition du manteau terrestre

3) Quantité de Fer dans le noyau.

3.a) Que vaut le rapport Fe/Mg pour les roches du manteau ? On supposera que cette valeur est celle du manteau primitif.

$$(Fe/Mg)_{MP}=0.25$$

3.b) Les observations du moment d'inertie de la Terre donnent : $m_N=1,85.10^{24}$ kg et $m_{MP}=4,023.10^{24}$ kg (en supposant que $m_{MP}=m_M+m_C$). Si on prends les rapports obtenus dans la partie 2 et que l'on suppose un manteau primitif constitué uniquement de O, Mg, Si, Ca, Al et Fe, on obtient : $[Fe]_{MP}=0,23$ kg/kg
En déduire la concentration en Fe du noyau Terrestre.

$$[Fe]_N=0.80 \text{ kg/kg}$$

3.c) Quels éléments suggérez vous pour compléter ?

Ni, O, N, C, Si,