

Génie électrique et électronique  
Microtechnique

**Cours MSE-101(b)**  
**Structure des matériaux I**

**Roland Logé (MX)**

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne**



# Table des matières

---

- Rappels sur les liaisons chimiques
- Les états de la matière (solide-liquide-gaz)
- Les niveaux de structuration des solides
- L'état cristallin (un peu de cristallographie)

# Rappels sur les liaisons chimiques

---

- **Le tableau périodique des éléments peut s'expliquer via les niveaux d'énergie des orbitales atomiques**, et notamment du *remplissage des couches s* avant les couches d et f de nombre quantique principal plus faible.
- **La capacité des atomes à former des liaisons de différents types dépend de sa configuration électronique**: les atomes avec des *couches s, d ou f non remplies* ont tendance à former des *liaisons métalliques*, alors que les atomes des *couches p non remplies* respectent plutôt la règle de l'octet et ont tendance à former des *liaisons ioniques ou covalentes*.
- **Liaison ionique: des  $e^-$  sont transférés d'un atome à l'autre**: caractère non directionnel, très fortes.
- **Liaison covalente: des  $e^-$  sont "partagés" entre atomes**: elles sont directionnelles, atomes d'électronégativité proche.
- **Liaison métallique: un bain d' $e^-$  baigne des ions  $+$** : non directionnelle, n'a de sens qu'au niveau du solide. La majorité des matériaux à l'état natif forment des liaisons métalliques.
- **L'hybridation des orbitales du Carbone** permet d'expliquer les liaisons trivalentes et tétravalentes observées dans le graphite, le diamant, ou les polymères.
- **Des liaisons faibles ( $< 40 \text{ kJ/mol}$ , pont hydrogène, van der Waals) lient des molécules entre elles**. De nature électrostatique, elles sont très influentes dans les polymères.

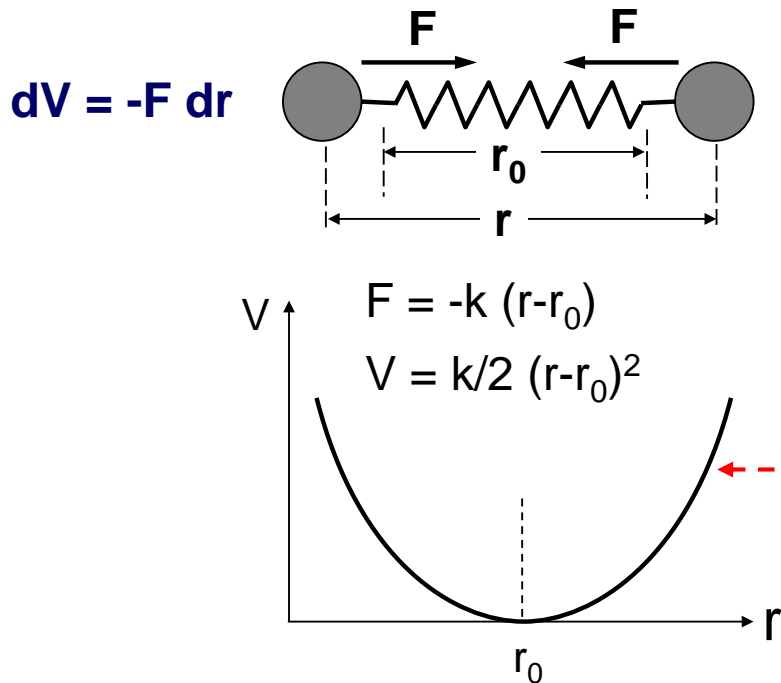
# Tableau périodique des éléments

Periodic table of the elements

group 1* Ia**	2 IIa											13 IIIa	14 IVa	15 Va	16 VIa	17 VIIa	18 0
1 H												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3 Li	4 Be											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
11 Na	12 Mg	3 IIIb	4 IVb	5 Vb	6 VIb	7 VIIB	8 VIIIb	9 VIIIb	10 VIIIb	11 Ib	12 IIb	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	113 *** (Uut)	114 *** (Uuq)	115 *** (Uup)	116 *** (Uuh)		118 *** (Uuo)
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cp						
lanthanide series		58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
actinide series		90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

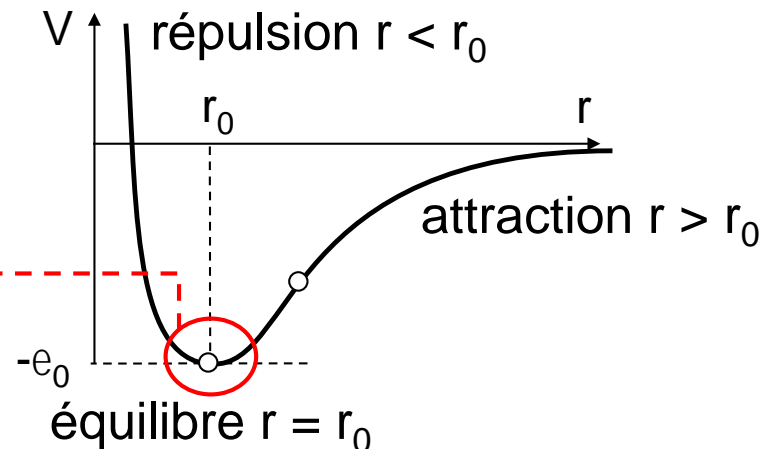
# Liaisons chimiques

- Un modèle simple d'interaction entre atomes consiste à considérer un **potentiel d'interaction  $V$** , qui représente l'énergie de deux atomes à **distance  $r$**  l'un de l'autre.
- On déduit la force  $F$  entre atomes à partir de  **$F = -dV/dr$**  (analogie : ressort)
- La position d'équilibre  $r_0$  dépend du type d'atome et de la liaison. Elle dépend aussi du niveau d'énergie interne (vibration) de l'atome, donc de la température



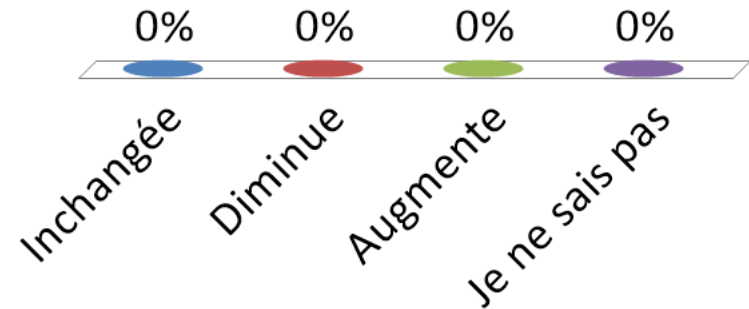
Potentiel de Lennard-Jones:

$$V = \varepsilon_0 \left[ \left( \frac{r_0}{r} \right)^{12} - 2 \left( \frac{r_0}{r} \right)^6 \right]$$



## Evolution de la position d'équilibre $r_0$ avec une augmentation de température ?

- A. Inchangée
- B. Diminue
- C. Augmente
- D. Je ne sais pas



# Etats de la matière

L'état de la matière dépend de la **température** et de la **pression** ambiante.  
Les différents états se distinguent d'abord par la **masse volumique**:

- **Gaz**
- **Liquide**
- **Solide amorphe**
- **Solide cristallin**

$$\rho_g \cong 1 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_\ell \cong 10^3 - 20 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_a \cong \rho_\ell$$

$$\rho_c \cong \rho_\ell + \Delta\rho$$

$$\Delta\rho/\rho = 0 \text{ à } +10\% \text{ pour la majorité des matériaux}$$

$$= -9\% \text{ pour la glace à } 0^\circ\text{C}$$

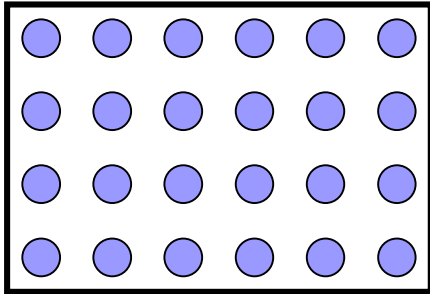
$$= -2.3\% \text{ pour Si à } 1'414^\circ\text{C}$$

- En général, le solide cristallin est le plus dense, car il est ordonné. Il a donc la masse volumique la plus élevée.
- Les phases condensées liquide et solide se distinguent ensuite par leurs **propriétés mécaniques**.



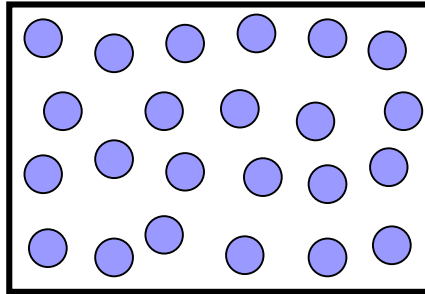
# Etats de la matière

La **densité** résulte des interactions entre atomes au niveau microscopique et de leur arrangement



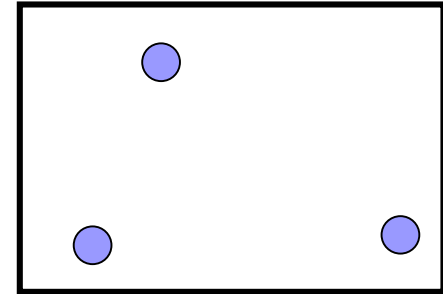
**Cristal parfait**

Arrangement régulier  
d'atomes - Ordre à  
longue distance



**Liquide (ou amorphe)**

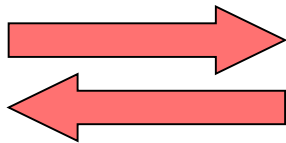
Ordre à courte distance  
avec fluctuations -  
Désordre à longue  
distance



**Gaz**

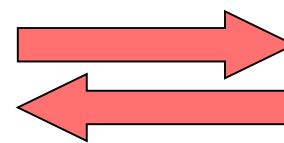
Distance entre  
atomes élevée –  
Désordre total

**Fusion**



**Cristallisation**  
**Solidification**

**Evaporation**



**Condensation**



# Etats de la matière

Fluide:

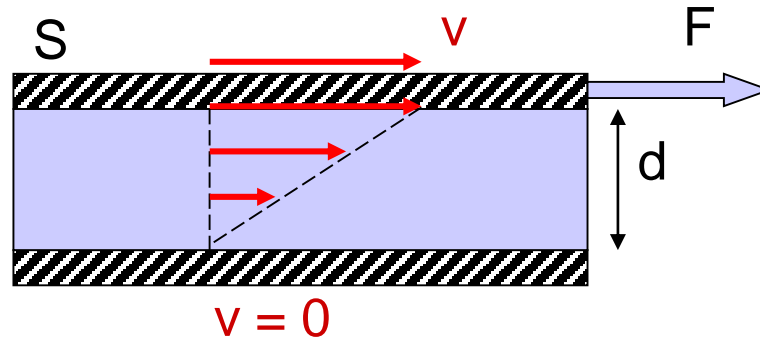
Viscosité  $\mu$  [Pa s]:

$$\mu_g \cong 2 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$$



$$\mu_l \cong 1 \times 10^{-3} \text{ Pa s}$$

$$\mu_s \cong 1.5 \times 10^{13} \text{ Pa s}$$



*Essai de cisaillement*

$$\frac{F}{S} = \mu \frac{v}{d}$$

$$v \propto \frac{F}{\mu}$$



$$\mu_l \cong 1 \times 10^{-2} \text{ Pa s}$$



$$\mu_l \cong 10 \text{ Pa s}$$



$$\mu_l \cong 100 \text{ Pa s}$$

# Etats des corps solides

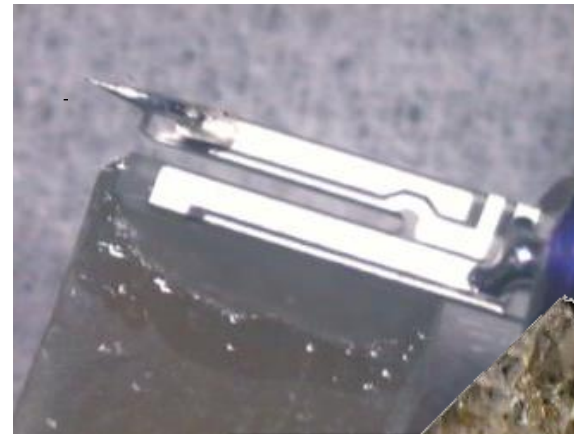
Mis à part les polymères (étudiés plus loin), les matériaux tels que les **métaux et céramiques** peuvent se présenter sous:

- Une **forme vitreuse**



Vitrail et verre  
(mélange de silice + autres oxydes)

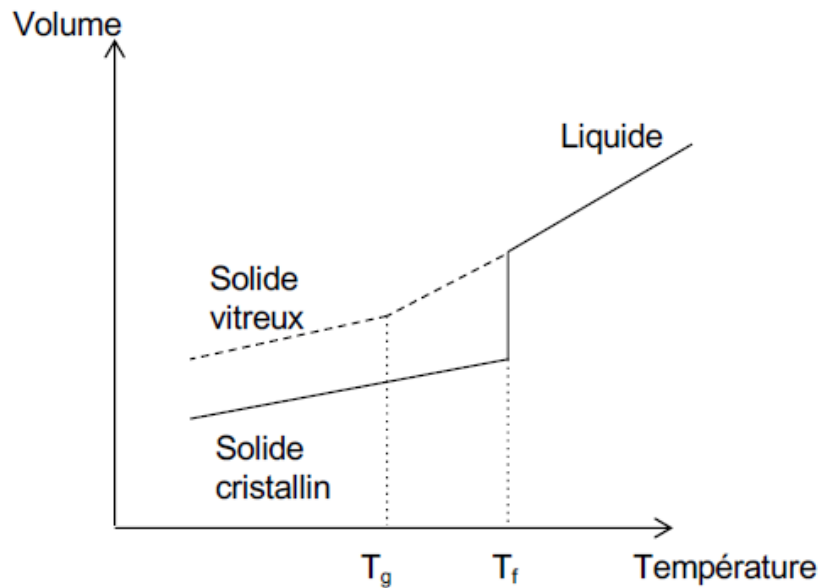
- Une **forme cristalline**



Résonateur en quartz (silice),  
quartz et cuillère en inox

# Etat vitreux

L'état vitreux correspond à un liquide très **visqueux** qui n'a pas pu s'organiser lors du refroidissement pour réduire son volume, et n'a donc pas pu cristalliser.



Variation de volume au refroidissement

$T_f$  température de fusion,

$T_g$  température de transition vitreuse



A 30-g ingot of the BMG Ti40Zr20Cu5Al5Be30 with a measured density of 4.76 g/cm<sup>3</sup>

Verres classiques, mais aussi verres métalliques (ici à base de Ti, Zr, Cu, Al, Be)

# Niveaux de structuration des solides

Si les liquides et les gaz peuvent être considérés comme des mélanges plus ou moins **homogènes** d'espèces chimiques, il n'en est rien des solides.

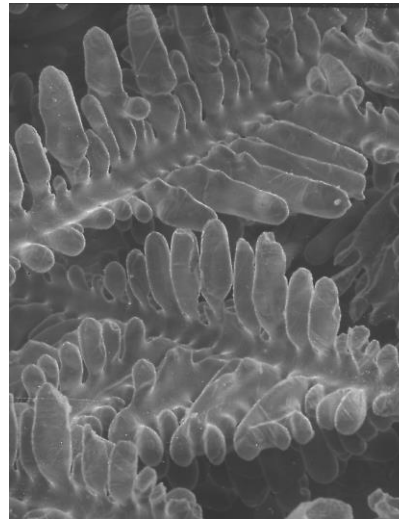
Pièce métallique - hétérogénéité



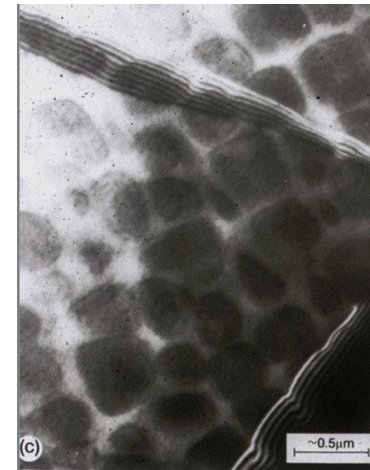
Aube de turbine Ni  
(10 cm)



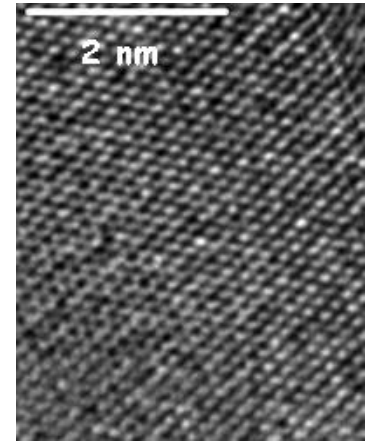
Grains  
(mm)



Dendrites  
(10-100  $\mu\text{m}$ )



Précipités  $\text{Ni}_3\text{Al}$   
(10-100 nm)

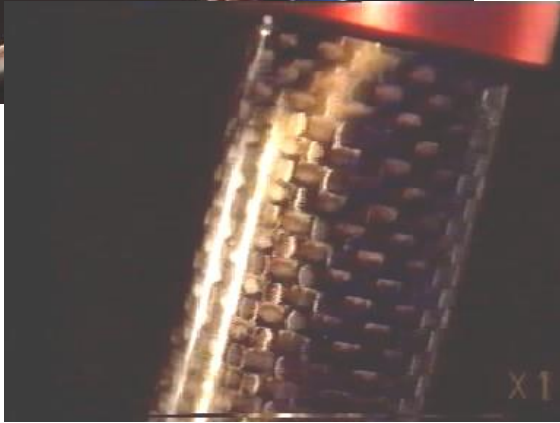


Atomes  
(0.1 nm)



# Niveaux de structuration des solides

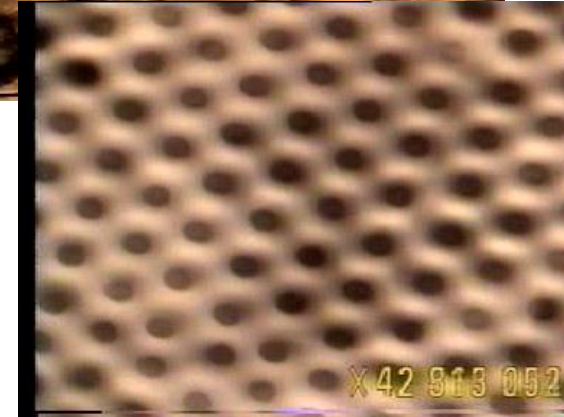
## Pièce composite à matrice polymère



Potence de vélo  
(10-100 cm)



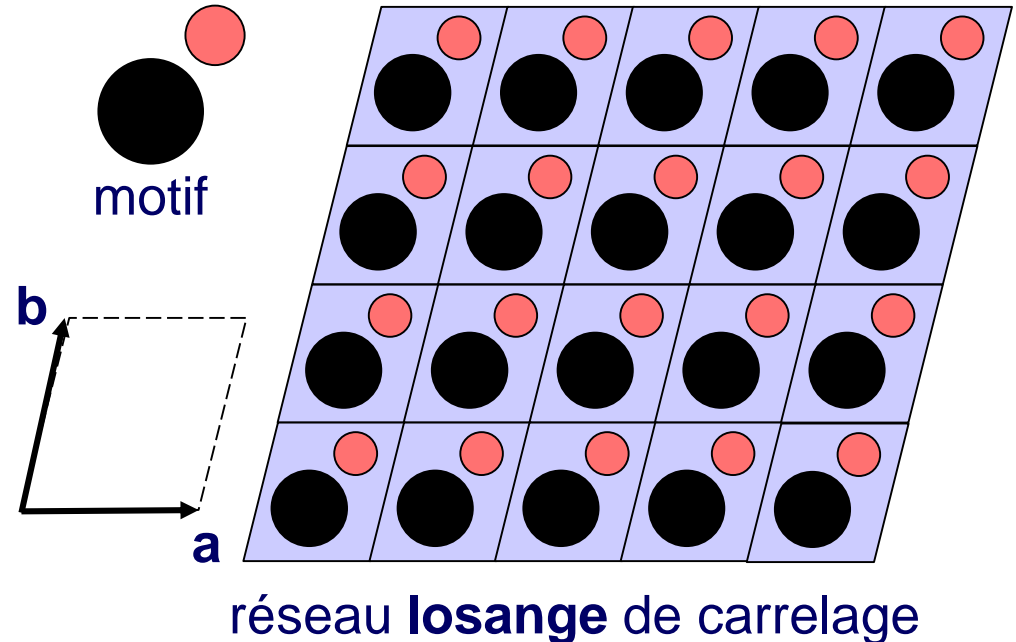
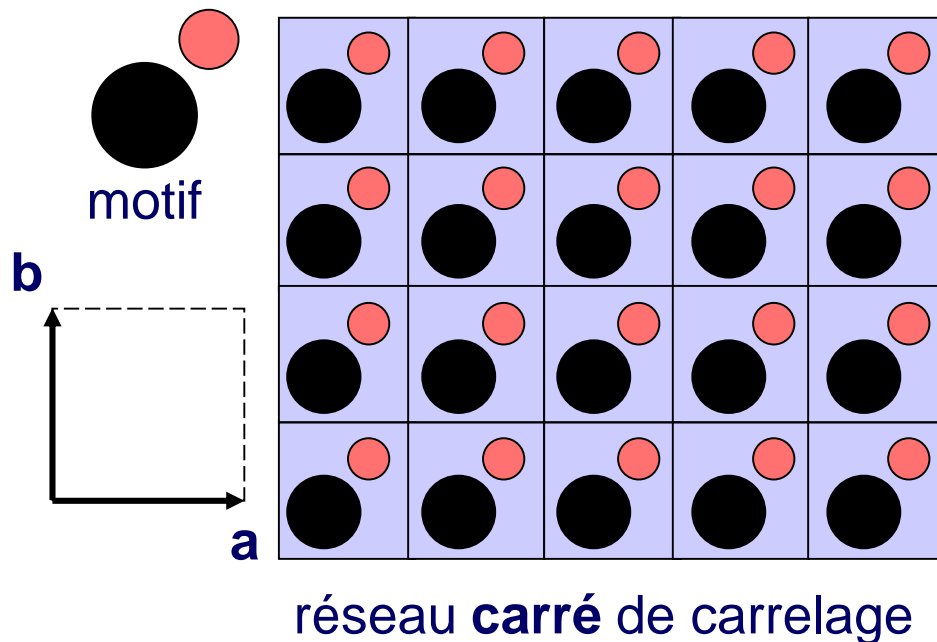
Fibres de carbone enrobées  
dans une matrice époxy  
(1-10  $\mu\text{m}$ )



Arrangement hexagonal  
des atomes de C,  
hybridation  $\text{Sp}^2$   
(0.1 nm)

# Etat cristallin

Contrairement à la phase amorphe où les atomes sont désordonnés (à longue distance), le cristal est **ordonné**. Il est décrit par un **motif**, constitué d'atomes, que l'on répète à chaque nœud d'un **réseau cristallin**.

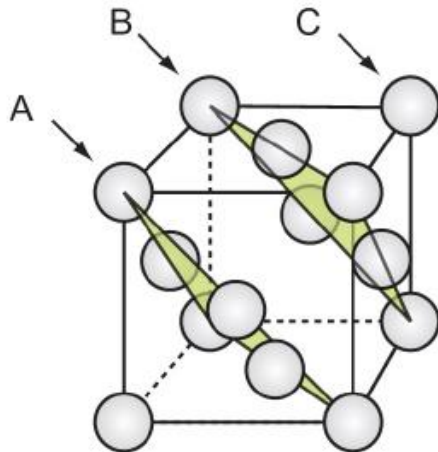


Ainsi, un carrelage à 2 dimensions peut être un "réseau" carré ou en losange. Chaque carreau porte un motif, ici 2 cercles ("atomes") rose et noir.

# Etat cristallin

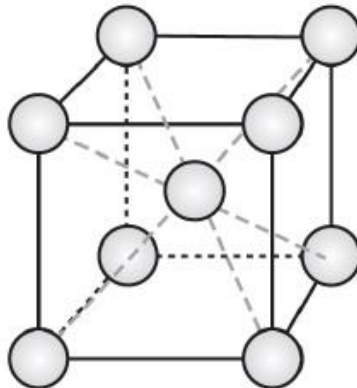
La plupart des **solides** solidifient sous forme cristalline. Il en existe de nombreuses formes (voir plus loin), mais la plupart des métaux adoptent une des **3 structures** ci-dessous.

**Cubique Faces Centrées**



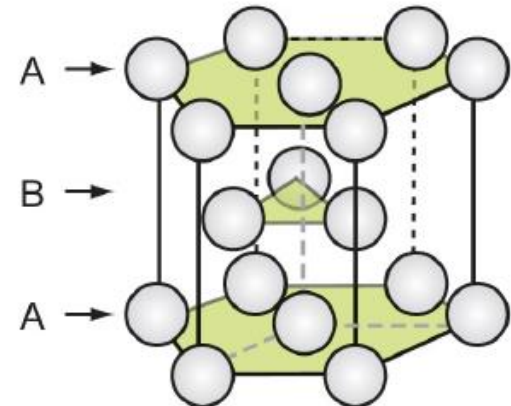
CFC

**Cubique Centré**



CC

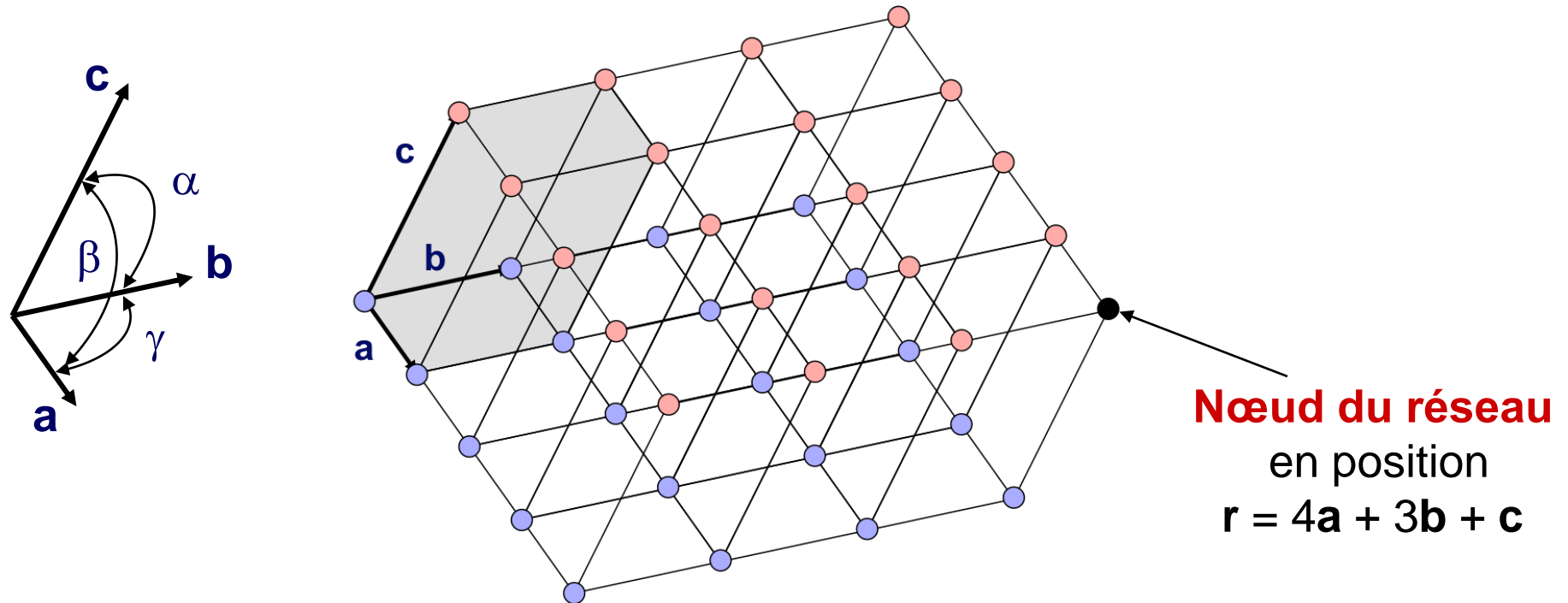
**Hexagonal Compact**



HC

# Etat cristallin

Un **réseau cristallin** en 3 dimensions requiert 3 vecteurs **a**, **b** et **c** qui permettent de répéter une **maille** dans l'espace



Sur chaque nœud du réseau, le cristal apparaît exactement identique  
On dit qu'il y a une invariance par translation le long des trois vecteurs **a**, **b** et **c**

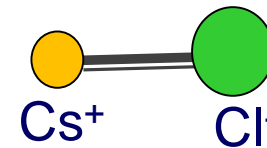
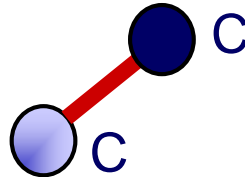
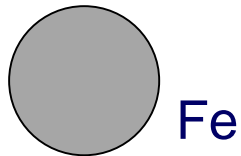


# Etat cristallin

On distingue **7 systèmes cristallins**, reflétant la **symétrie** du cristal, et **14 réseaux de Bravais** (= **arrangements atomiques**, voir diapositive suivante).

**Un cristal = Motif + un réseau de Bravais**

**Motif:** représente la nature du matériau, l'entité chimique à répéter dans l'espace pour former le cristal (atome(s), molécules...)



**Réseau de Bravais:** construction mathématique d'un ensemble infini de points invariant par translation selon trois axes non colinéaires appelés vecteurs de bases.

$$B(0, \vec{a}, \vec{b}, \vec{c}) = \left\{ M / \overrightarrow{OM} = l\vec{a} + m\vec{b} + n\vec{c}, (l, m, n) \in \mathbb{Z}^3 \right\}$$

# Les 14 réseaux de Bravais (pour information)

Cubique

$$a = b = c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

Tétragonal

$$a = b \neq c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

Orthorhombique

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

Hexagonal

$$a = b \neq c$$

$$\alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$$

Monoclinique

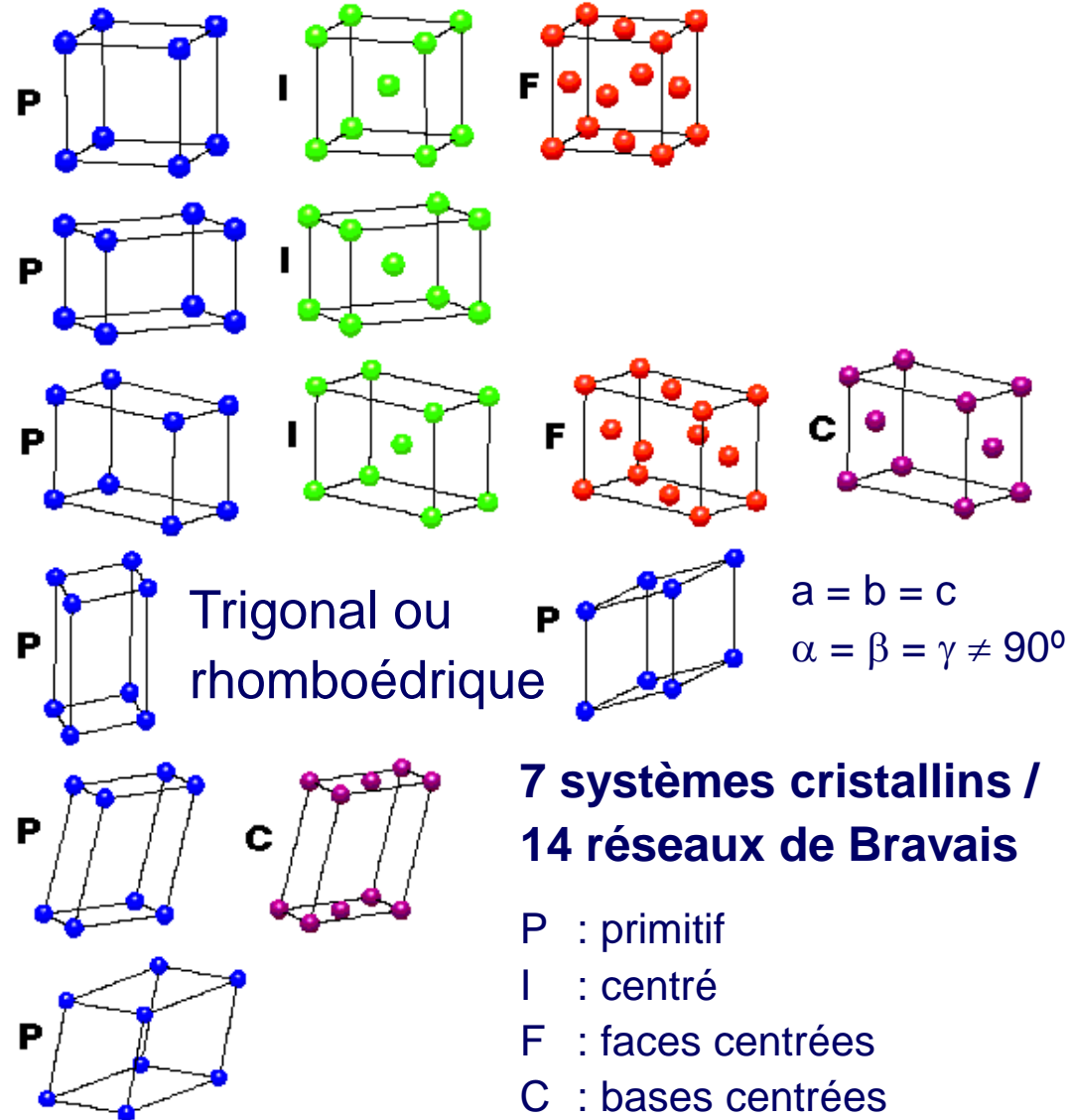
$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$$

Triclinique

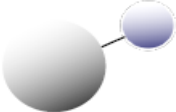
$$a \neq b \neq c$$

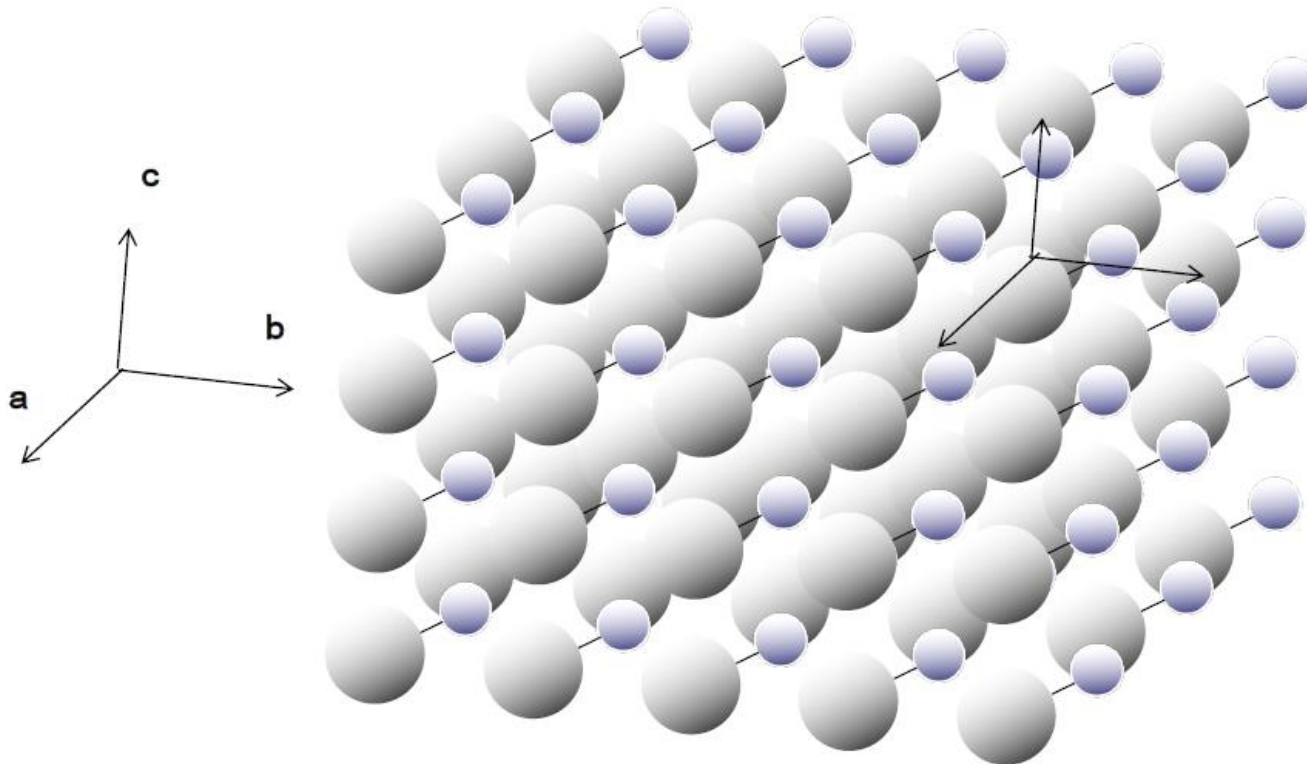
$$\alpha \neq \beta \neq \gamma$$



# Cristal = repetition du motif suivant a, b, c

---

- On repère le motif; 
- On le positionne dans la maille élémentaire du réseau de Bravais
- On translate cette maille selon les vecteurs **a**, **b** et **c**



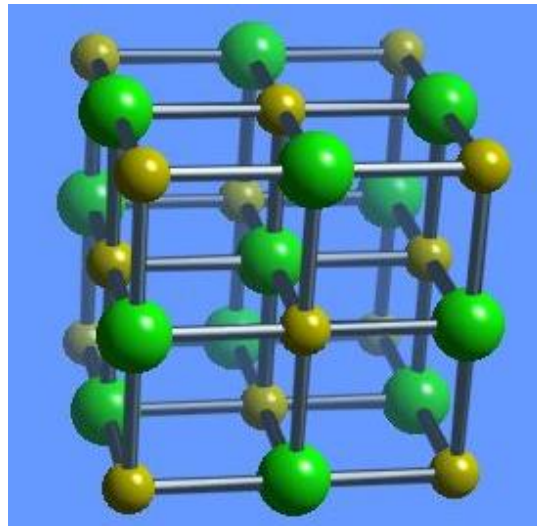
# Etat cristallin: Système cubique

3 exemples de même **réseau cristallin** mais de **motifs** différents

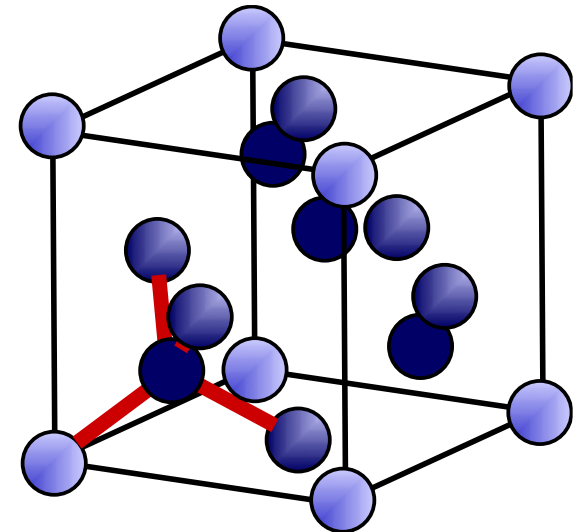
Réseau: **Cubique à Faces Centrées (CFC)** c-a-d Cubique F en slide 18



Aluminium

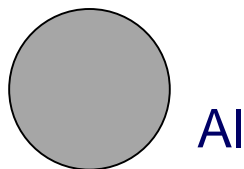


NaCl

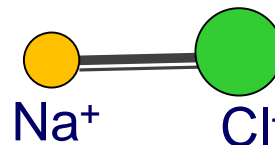


Diamant

Motifs:

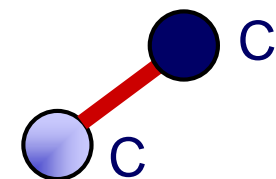


Al



Na<sup>+</sup>

Cl<sup>-</sup>



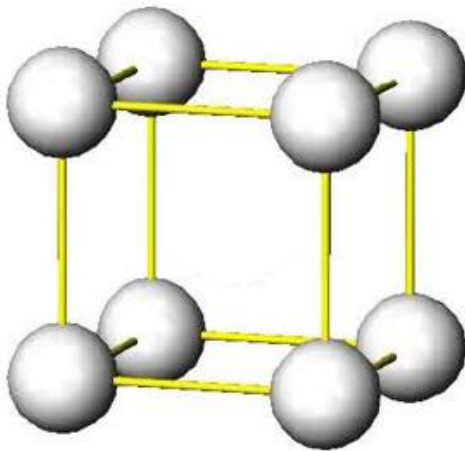
C

C

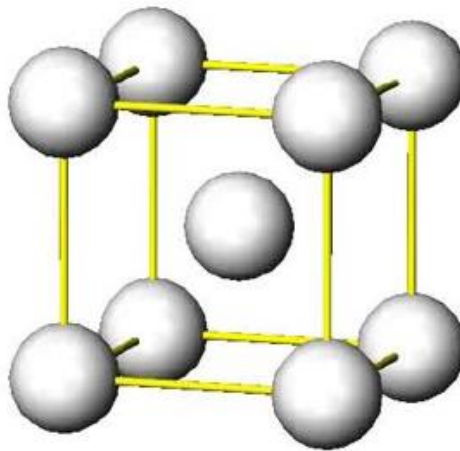
# 3 réseaux de Bravais du système cubique

On considérera principalement le système cubique dans ce cours, avec ses trois réseaux de Bravais.

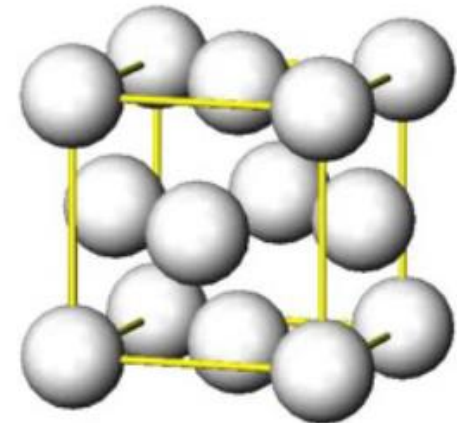
**Cubique Simple  
(P)**



**Cubique Centré - CC  
(I)**



**Cubique Faces  
Centrées - CFC  
(F)**



Dans chaque maille cubique:

1 atome en propre  
 $(8 \times 1/8)$

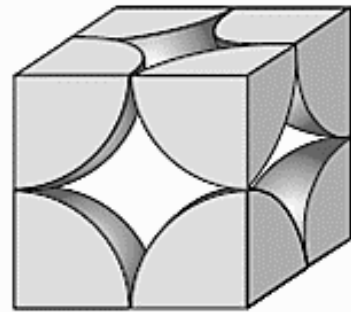
2 atomes en propre  
 $(8 \times 1/8) + 1$

4 atomes en propre  
 $(8 \times 1/8) + (6 \times 1/2)$

# 3 réseaux de Bravais du système cubique

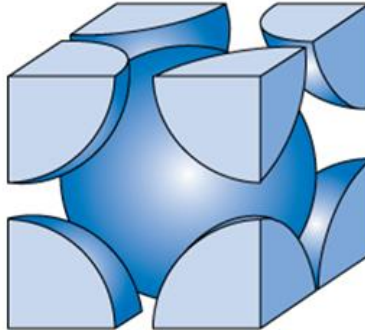
Le **taux d'occupation** de la matière est lié à la **compacité** du réseau, c.-à-d. le pourcentage de volume occupé par la matière (atomes  $\approx$  sphères dures qui se touchent). Il influe sur la **densité**.

**Cubique Simple  
(P)**



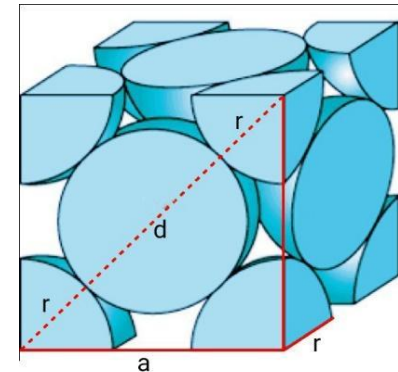
52.4 %

**Cubique Centré  
(I)**



68 %

**Cubique Faces  
Centrées  
(F)**



74 %

Taux d'occupation:

→ compacité

# Expérience de changement de phase

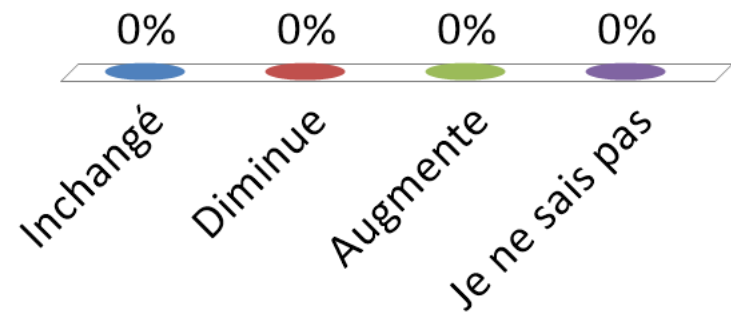
Le fer passe d'une structure cubique centrée (CC) à une structure cubique faces centrées (CFC) autour de **910° C**.

- Lors de ce passage, sa densité et son volume changent.
- Aux autres températures, le matériau subit de la simple dilatation thermique



Si on refroidit le fil de fer depuis  $1100^{\circ}\text{C}$ , comment évolue sa longueur au passage de  $T = 910^{\circ}\text{C}$  ?

- A. Inchangé
- B. Diminue
- C. Augmente
- D. Je ne sais pas

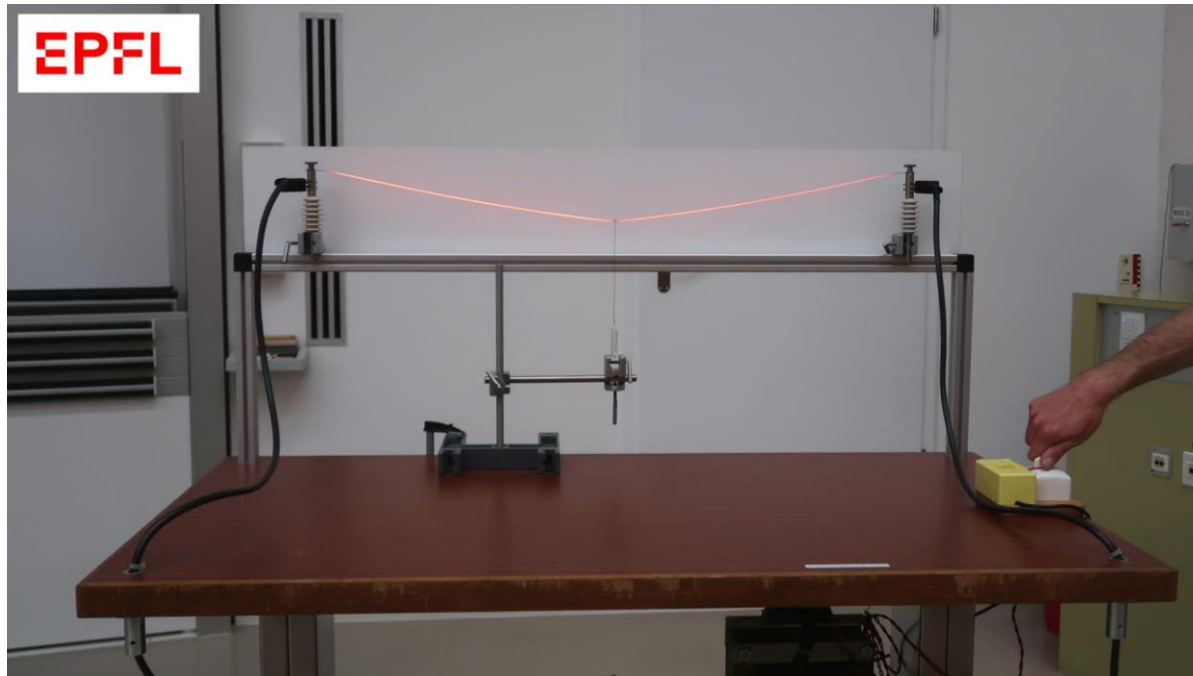




# Expérience de changement de phase

Le fer est cubique centré (CC) à  $T < 910^{\circ} \text{ C}$ , et cubique faces centrées (CFC) à  $T > 910^{\circ} \text{ C}$ .

- Au **chauffage**, CC  $\rightarrow$  CFC : densité **augmente** et longueur/volume **diminue**.
- Au **refroidissement**, CFC  $\rightarrow$  CC : densité **diminue** et longueur/volume **augmente**.
- Aux autres températures, le matériau subit de la simple dilatation/contraction thermique



From [Pierre Wets](#) , EPFL mediaspace

[https://mediaspace.epfl.ch/media/2%20Etats%20allotropiques%20du%20fer%20\(fil%20rougi\)/0\\_nzv3y23k](https://mediaspace.epfl.ch/media/2%20Etats%20allotropiques%20du%20fer%20(fil%20rougi)/0_nzv3y23k)

# Résumé

---

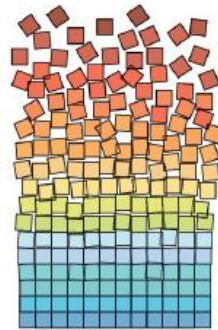
- La matière condensée peut se présenter sous forme de **liquide**, **solide cristallin** ou solide **amorphe** (verre)
- Le liquide et l'amorphe n'ont pas d'**ordre** à longue distance
- Un **cristal** est un arrangement périodique d'atomes qui se caractérise par un réseau et un motif
- Le **réseau** est décrit par 3 vecteurs de base (**a**, **b**, **c**), selon 7 systèmes cristallins et 14 réseaux de Bravais
- Une grande partie des métaux, et certaines céramiques simples, cristallisent dans la **structure cubique** à faces centrées (CFC), cubique centrée (CC) ou **hexagonale** compacte (HC).

# Pour revoir les notions abordées

---

- *Lire la **Leçon Guidée No 1** du livre de Ashby (réseau cristallin)*

## Leçon guidée n° 1: quelques éléments de cristallographie



### Contenu du chapitre

Introduction et présentation du chapitre	GL1-2
PARTIE 1: Structures cristallines	GL1-2
PARTIE 2: Espaces interstitiels	GL1-6
PARTIE 3: Description d'un plan du réseau	GL1-8
PARTIE 4: Description d'une direction du réseau	GL1-10
PARTIE 5: Structures des céramiques	GL1-12
PARTIE 6: Cristaux polymères	GL1-16