Génie mécanique

Cours No 3.2
Structure des matériaux

V.Michaud

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

EPFL

Table des matières

- Rappels sur les liaisons atomiques
- Les états de la matière
- Les niveaux de structuration des solides
- L'état cristallin

Objectifs du cours

- Les différents états de la matière (solide, liquide, gas)
- Vous présenter les structures cristallines, et commencer à vous apprendre à indexer les plans et directions des cristaux pour les structures simples.

Récapitulatif 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.*
- ***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 directionelles, 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*** *notamment permet d'expliquer les liaisons trivalentes et tétravalentes observées dans le graphite, le diamant, ou les polymères. sp3 tétraèdre (CH4), sp2 3 liaisons dans le plan (C_2H_6), sp linéaire (C_2H_4)*
- ***La théorie des bandes permet de parler en terme d'état d'énergie des électrons dans le solide,*** *prenant en compte le potentiel de tous les atomes (on la reverra au cours 13).*
- ***Des liaisons faibles (moins de environ 40 kJ/mol, pont hydrogène, van der Waals) lient des molécules entre elles****. De nature électrostatique, elles sont très influentes dans les polymères.*

Etats de la matière

- Les positions d'équilibre des atomes entre eux (r_0) dont on vient de parler, dépendent du type d'atomes et de la liaison qu'ils forment, mais aussi du niveau d'énergie interne de l'atome (qui vibre), donc de la température à laquelle on se place.
- Un même assemblage d'atomes (matériau) peut donc se présenter sous plusieurs états selon la température et la pression ambiante.

Etats de la matière

Les états de la matière se distinguent d'abord par la **masse volumique**:

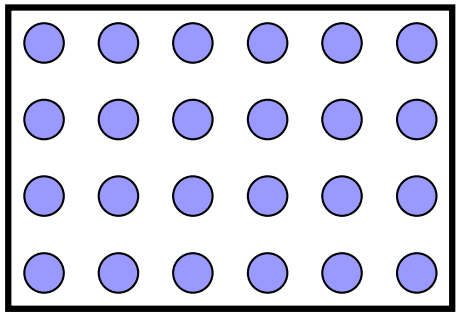
- **Gaz** $\rho_g \cong 1\ kg/m^3$
- **Liquide** $\rho_\ell \cong 10^3 - 20\times10^3\ kg/m^3$
- **Solide amorphe** $\rho_a \cong \rho_\ell$
- **Solide cristallin** $\rho_c \cong \rho_\ell + \Delta\rho$

$\Delta\rho/\rho$ = 0 à +10% pour la majorité des matériaux
= -9% pour la glace à 0ºC
= -2.3% pour Si à 1'414ºC

Plus la masse volumique est grande, plus le matériau est dense. Le solide cristallin est plus dense car il est ordonné.

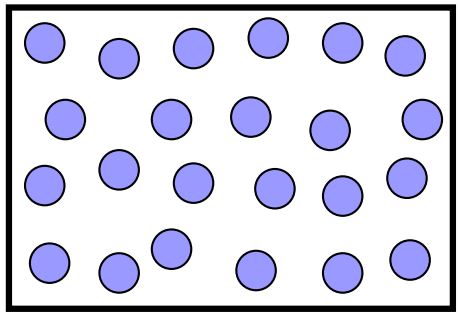
Etats de la matière

La densité du matériau résulte des interactions entre les atomes au niveau microscopique et de leur arrangement



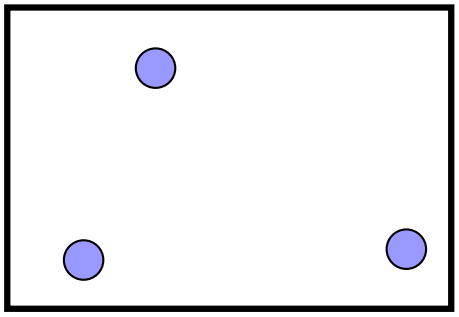
Cristal parfait

Arrangement régulier d'atomes - Ordre à longue distance



Liquide (ou amorphe)

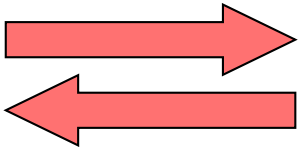
Ordre à courte distance avec fluctuations - Désordre à longue distance



Gaz

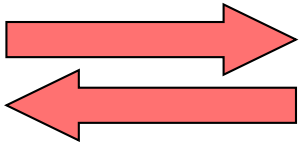
Distance entre atomes élevée – Désordre total

Fusion



Cristallisation
Solidification

Evaporation

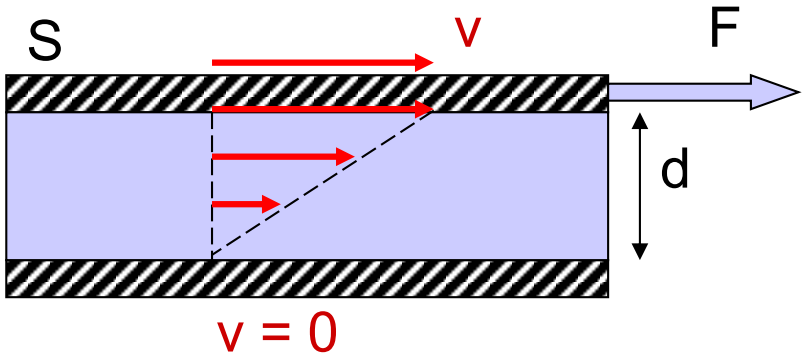


Condensation

Propriétés d'écoulement

Viscosité μ [Pa.s]:

Viscum album



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

$\mu_g \cong 2\times10^{-5}$ Pa s

$\mu_\ell \cong 1\times10^{-3}$ Pa s

$\mu_s \cong 1.5\times10^{13}$ Pa s

$\mu_\ell \cong 1\times10^{-2}$ Pa s

$\mu_\ell \cong 10$ Pa s

$\mu_\ell \cong 100$ Pa s

Etats des corps solides

Mis à part les polymères qui seront étudiés plus tard, les autres matériaux (métaux, céramiques) peuvent se présenter sous:

- Une **forme vitreuse**

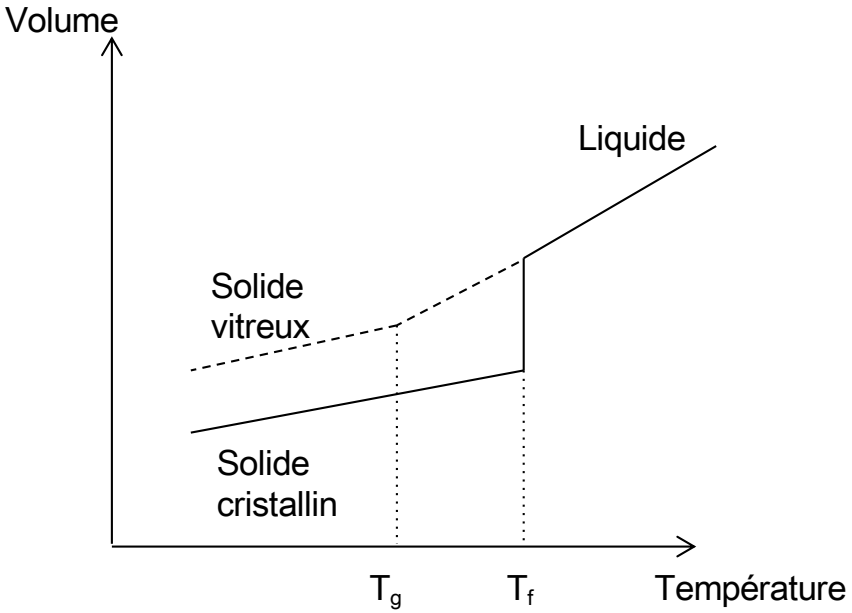
Vitrail et verre
(mélange de silice + autres oxydes)

- Une **forme cristalline**

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

Etat vitreux

L'état vitreux est celui d'un liquide figé, de très haute viscosité, qui n'a pas eu l'occasion de s'organiser lors du refroidissement pour réduire son volume, donc n'a pas pu cristalliser.



Variation de volume au refroidissement
T_f température de fusion,
T_g température de transition vitreuse

Attention aux faux-amis: le verre en cristal ci-dessous est amorphe (mais il contient de l'oxyde de Plomb, qui lui donne une belle sonorité)

Etat vitreux

Refroidi assez rapidement, même un métal peut se présenter sous forme amorphe, sans ordre présent sur une grande distance: On parle alors de **verre métallique**.

Club de golf avec tête en verre métallique

Une vitrocéramique est une dispersion de microcristaux dans une matrice de verre

Etat cristallin

Contrairement à la phase amorphe où les atomes sont désordonnés (à longue distance), l'état cristalin est **ordonné**.

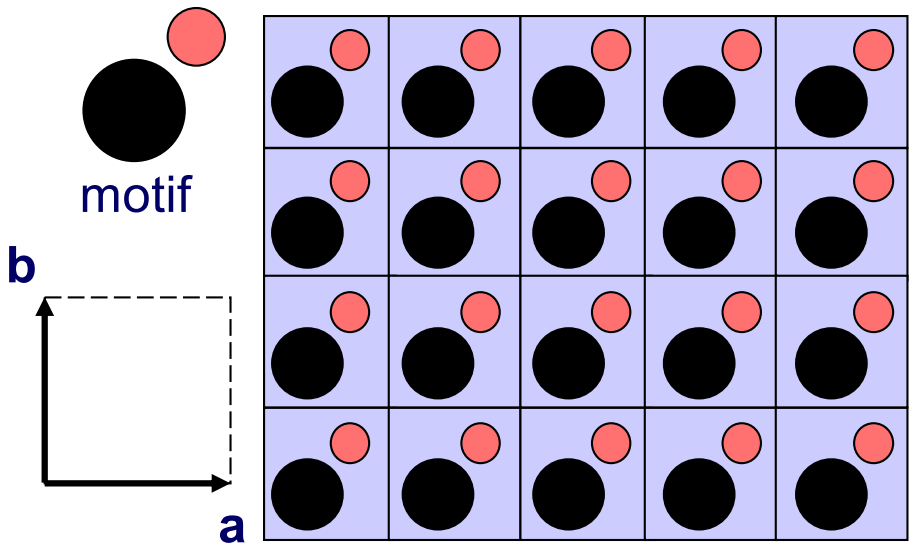
Pyrite de fer: FeS_2

Quartz: SiO_2

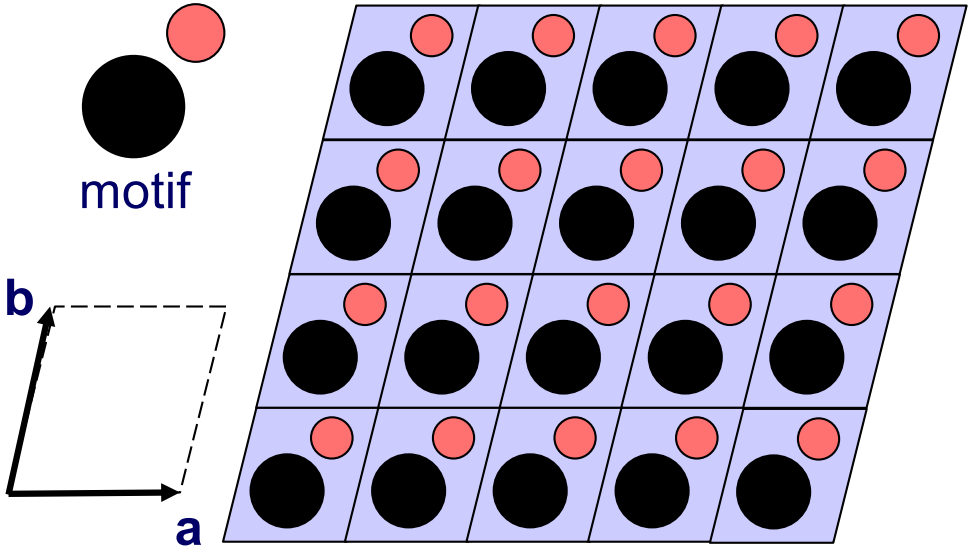
Flocon de neige: H_2O

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**.



réseau carré de carrelage

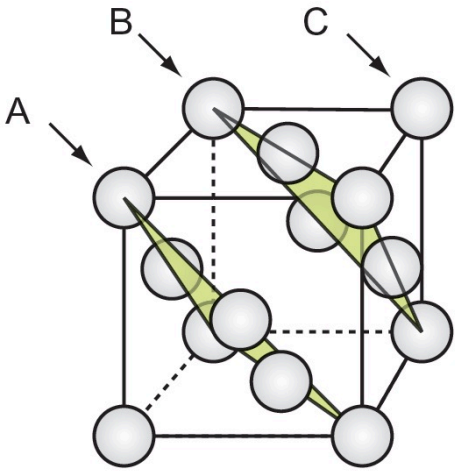


réseau losange de carrelage

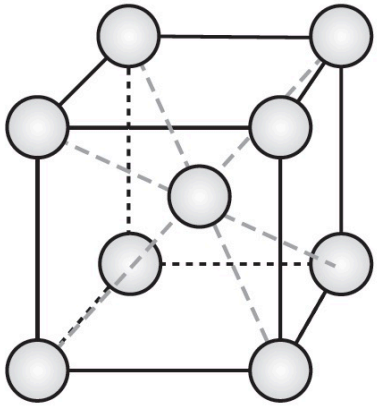
Ainsi, un carrelage à 2 dimensions peut être un "réseau" carré ou en losange. Chaque carreau porte un motif, ici 2 cercles ("atomes") rose et noir.

Etat cristallin

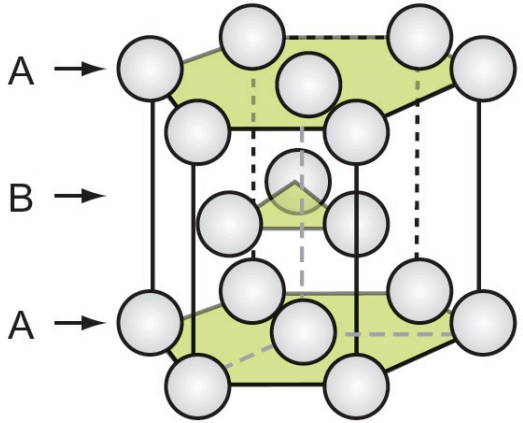
C'est l'état le plus courant pour la plupart des solides qui solidifient en forme de réseau. On verra qu'il existe de nombreuses formes de structures cristallines, mais la plupart des métaux se mettent en 3 principales structures: Cubique Face Centrée, Cubique Centré, et Hexagonal Compact.



CFC



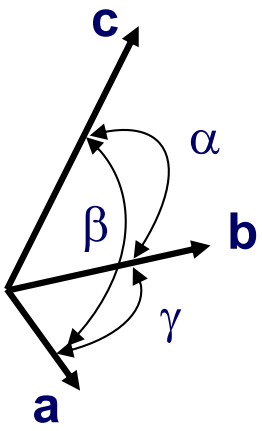
CC

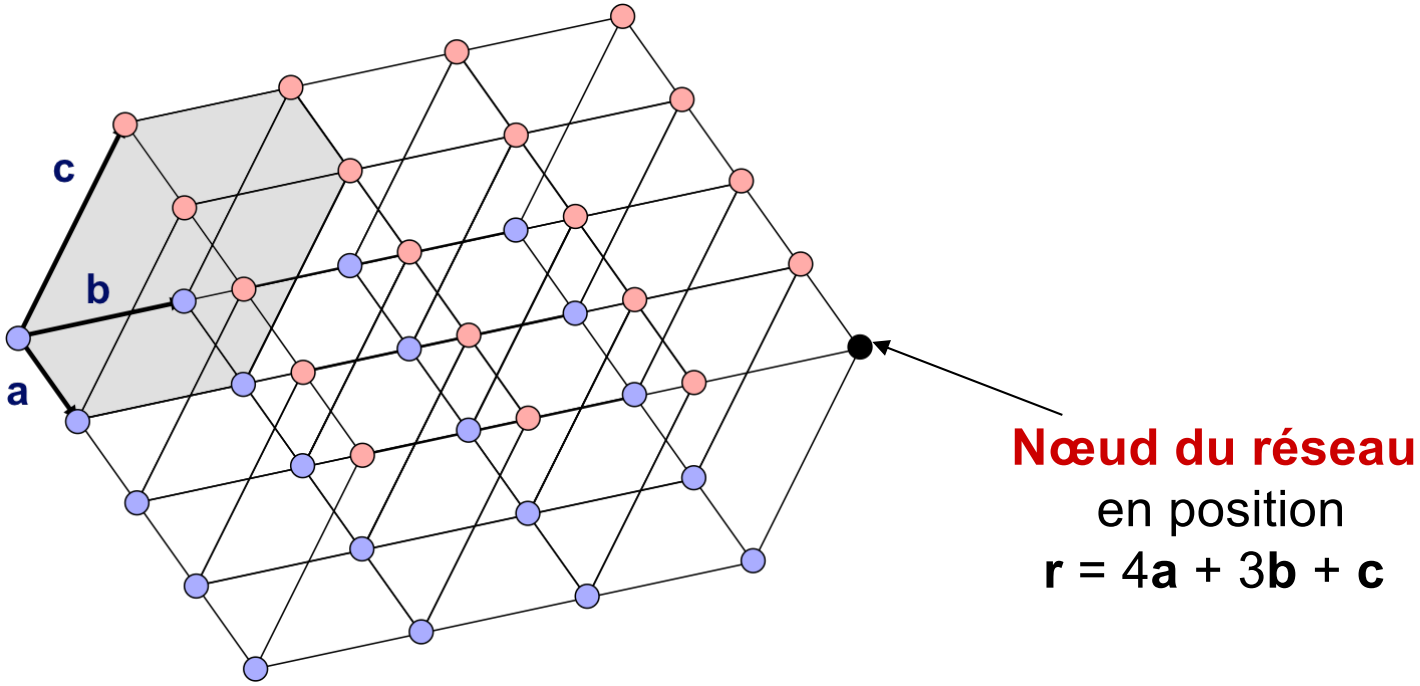


HC

Etat cristallin- description

On peut représenter un **réseau cristallin** à 3 dimensions, par 3 vecteurs **a**, **b** et **c** de telle sorte à répéter une **maille** dans l'espace



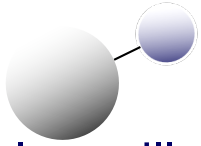


Sur chaque nœud du réseau, le cristal apparaît exactement identique

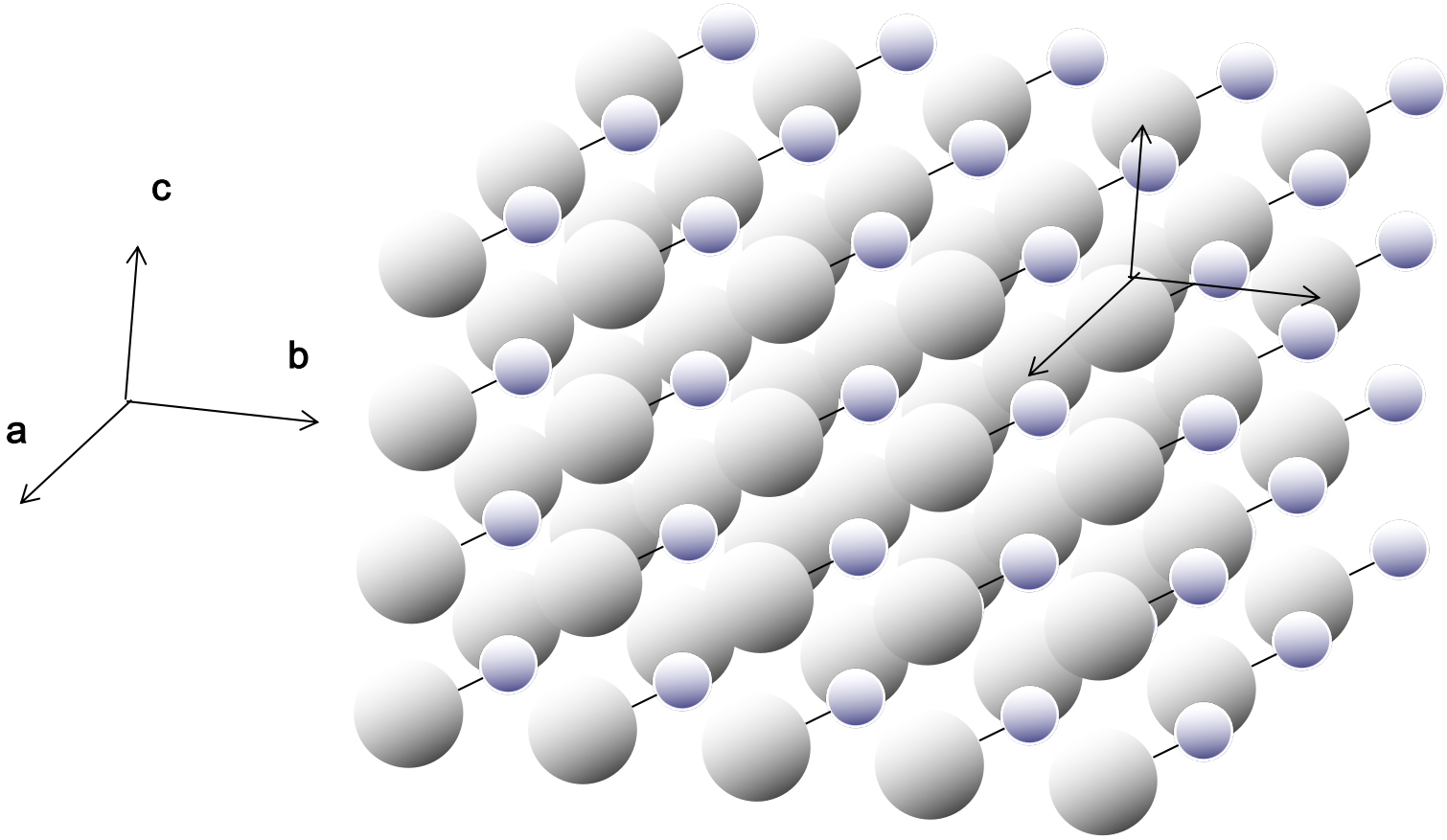
On dit qu'il y a une invariance par translation le long des trois vecteurs **a**, **b** et **c**

▪ Un cristal = Un motif + un réseau de Bravais

- On repère le motif;



- On le positionne dans la maille élémentaire du réseau de Bravais
- On translate cette maille selon les vecteurs orthonormés **a**, **b** et **c** du système cubique pour remplir tout l'espace.

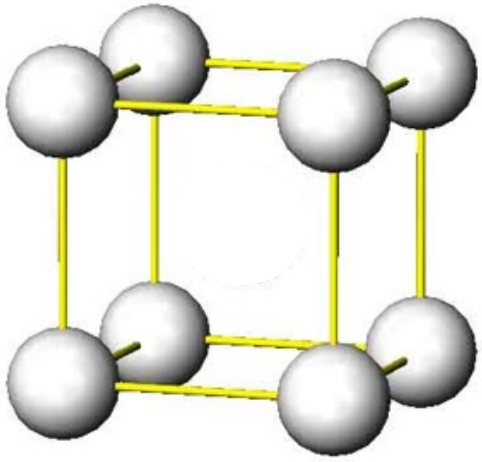


Etat cristallin

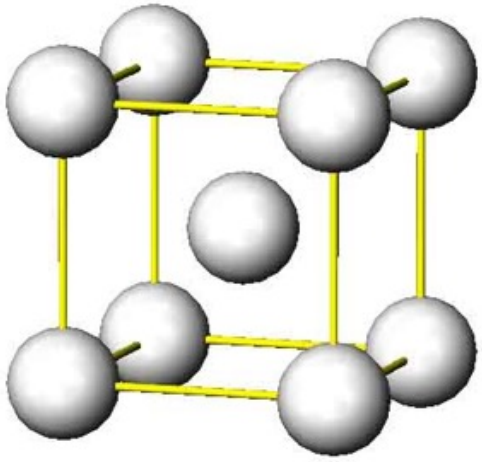
On distingue **7 systèmes cristallins**, reflétant la symétrie du cristal, et **14 réseaux de Bravais*, qui couvrent toutes les structures.**

Un cristal = Motif + un réseau de Bravais

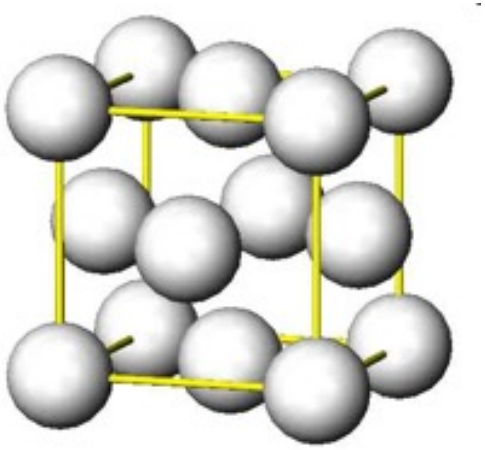
Dans ce cours, on ne considérera que le système cubique, qui a 3 réseaux de Bravais possibles:



Cubique simple



Cubique centré

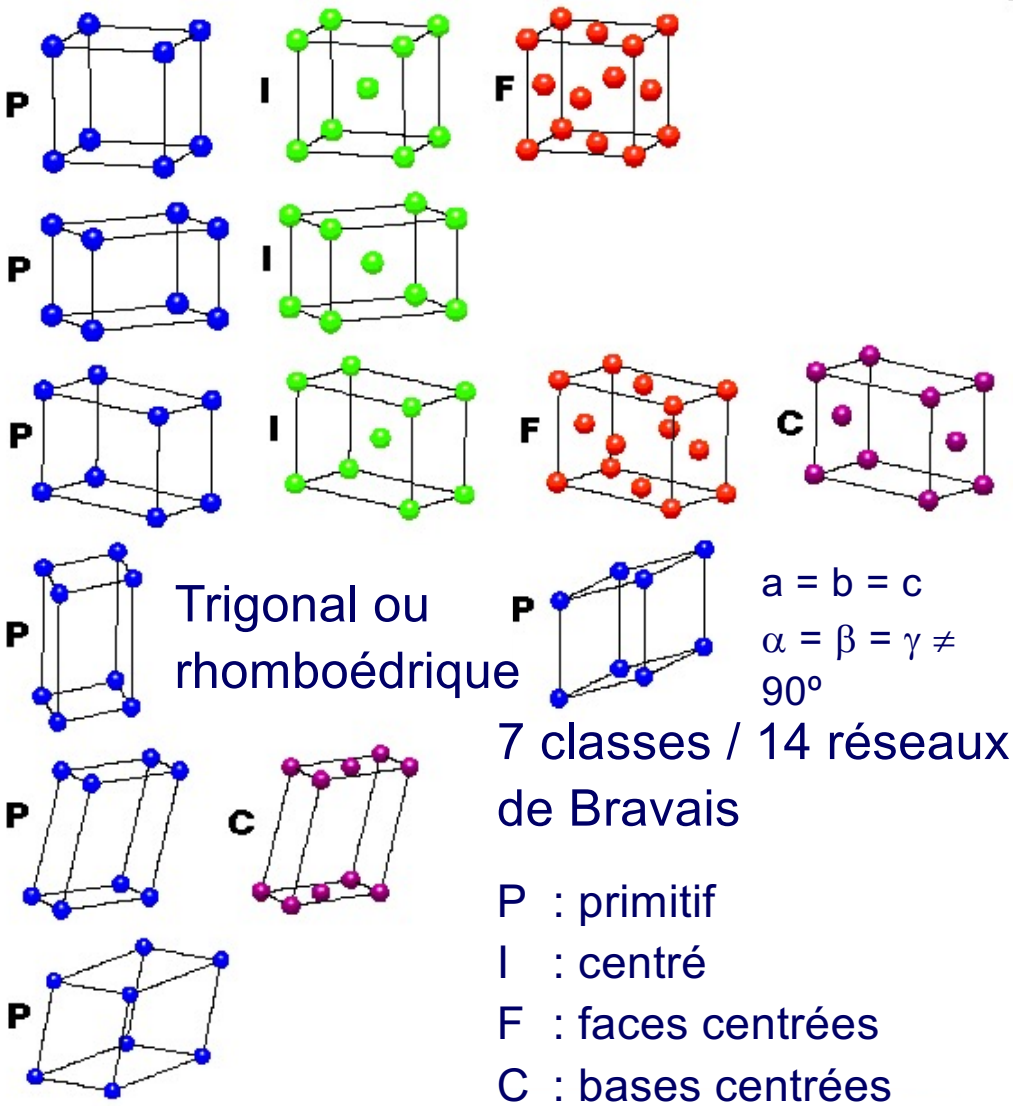


Cubique à faces centrées

*Auguste Bravais, physicien, minéralogiste (1811-1863)

Etat cristallin – pour info

Cubique	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^o$
Tétragonal	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^o$
Orthorhombique	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^o$
Hexagonal	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^o$; $\gamma = 120^o$
Monoclinique	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^o \neq \beta$
Triclinique	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^o$



$a = b = c$
$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^o$

7 classes / 14 réseaux de Bravais

P : primitif
I : centré
F : faces centrées
C : bases centrées

http://www.chem.ox.ac.uk/icl/heyes/structure_of_solids/lecture1/Bravais.gif

Résumé

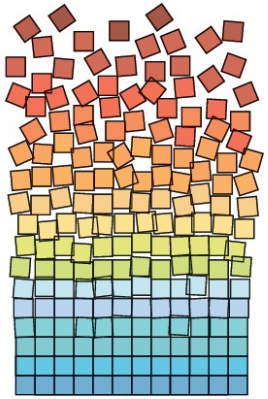
- La matière condensée peut se présenter sous forme de liquide, solide cristallin ou solide amorphe (verre)
- Le liquide et l'amorphe n'ont pas d'ordre à longue distance
- Un cristal est un arrangement périodique d'atomes qui se caractérise par un réseau et un motif
- Le réseau est décrit par 3 vecteurs de base (**a**, **b**, **c**), selon 7 systèmes cristallins et 14 réseaux de Bravais.
- On verra au prochain cours comment indexer de manière pratique ces réseaux pour les décrire sans équivoque.

Pour la prochaine fois

- *Lire la **Leçon Guidée No 1 du livre Ashby***

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