

# Matériaux pour le génie civil: les métaux (+ thermique, 2 cours)

Prof. J.-M. Drezet, IMX (Institut des Matériaux, IMX)  
[jean-marie.drezet@epfl.ch](mailto:jean-marie.drezet@epfl.ch)

Les différentes échelles des métaux

Maîtrise des microstructures métalliques pour optimiser les propriétés

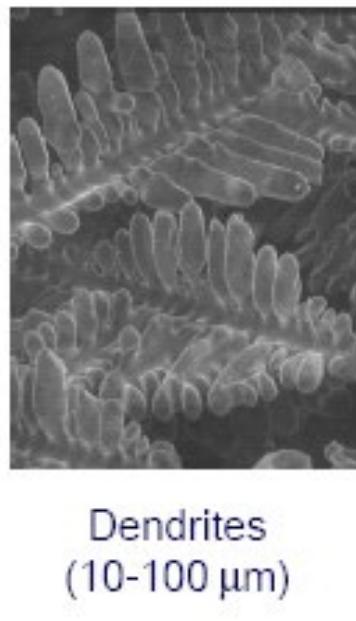
Pièce métallique



Aube de turbine Ni  
(10 cm)



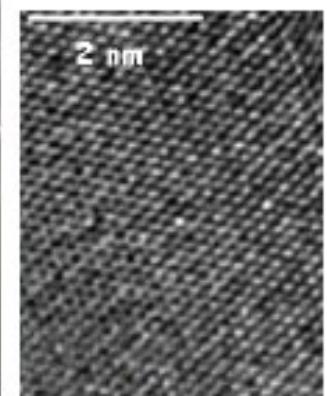
Grains  
(mm)



Dendrites  
(10-100 µm)



Précipités Ni<sub>3</sub>Al  
(10-100 nm)



Atomes  
(0.1 nm)

Macro-

Méso-

Micro-

Nano- structure

Atome

# **Matériaux : Les métaux et thermique**

**Du 9 avril au 28 Mai: 13 séances de 2h avec exos corrigés à la séance suivante**

- 1- De l'atome au solide: structures cristallines
- 2- Elaboration et mise en forme: aciers et alus
- 3- Propriétés mécaniques I: essais de traction, limite élastique, ductilité
- 4- Propriétés mécaniques II: essais de dureté et résilience
- 5 & 6 - Alliages, diagrammes de phases, loi des leviers
- 7 & 8 - Diagramme Fe-C: aciers et fontes
- 9- Modes de durcissement
- 10- Corrosion et protection des métaux
- 11 & 12- Thermique / isolation d'un bâtiment
- 13- Questions et examen 2024

# Matériaux : Les métaux et thermique

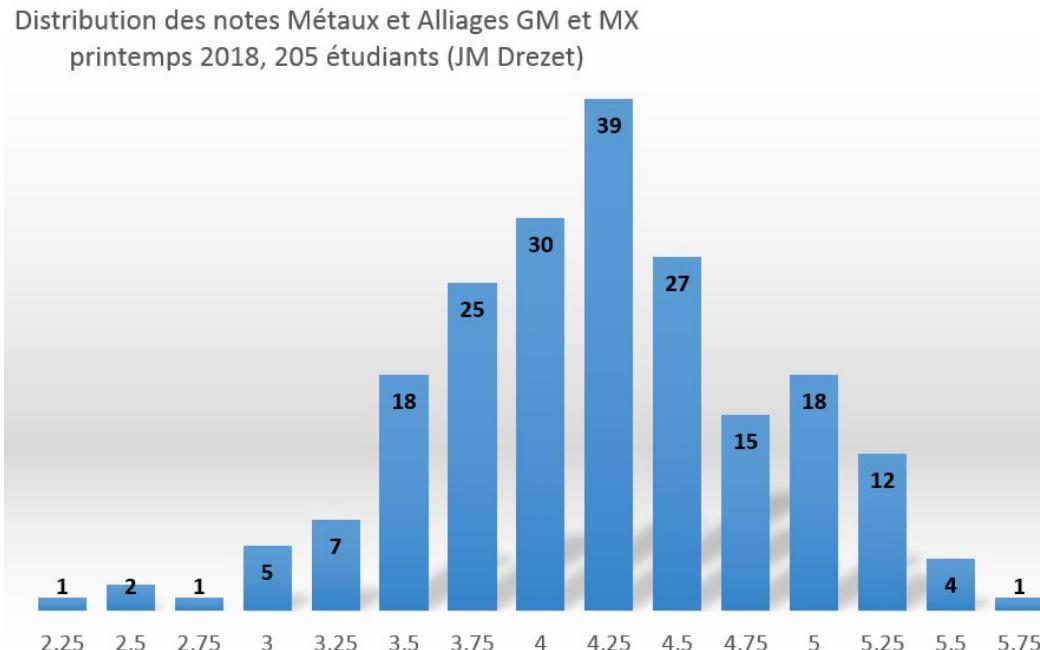
Cours sur moodle.epfl.ch (MSE-171): le cours en pdf apparait un ou 2 jours avant le cours

Webinars : <https://tube.switch.ch/channels/0f4356ca>

**SUIVEZ LES COURS ATTENTIVEMENT CHAQUE LUNDI ET MERCREDI**

**FAITES LES EXOS PROPOSES** (le corrigé apparait la semaine suivante sur moodle, mail si questions)

**Examen écrit de 2 heures le mardi 24 juin 2025 9h15-11h15 en CE 1 6**  
(métaux et thermique: 2 feuilles à rendre, aucun document, seulement une calculette)



## Ouvrages de référence

1- **Introduction à la science des Matériaux**, JP Mercier, G. Zambelli et W. Kurz,  
Traité des Matériaux, plusieurs exemplaires au RLC.

Regardez en particulier les chapitres suivants:

- 3- Structure et organisation des solides
- 4- Structure des principaux matériaux
- 7- Défauts de la structure cristalline
- 12- Comportement des matériaux en traction
- 13- Facteurs influençant les prop. mécaniques.

2- **Matériaux, ingénierie, science et procédés**, M. Ashby et al. (traduction  
française, L. Deillon et M. Rappaz)

Cartes de Ashby (ex. propriétés spécifiques)

3- **Précis de métallurgie**, Barralis J. et Maeder G. : AFNOR, 1997

Pour des connaissances plus approfondies sur les métaux et alliages.

4- Internet. Mais restez très très critique.

Mercredi 8 Avril 2025

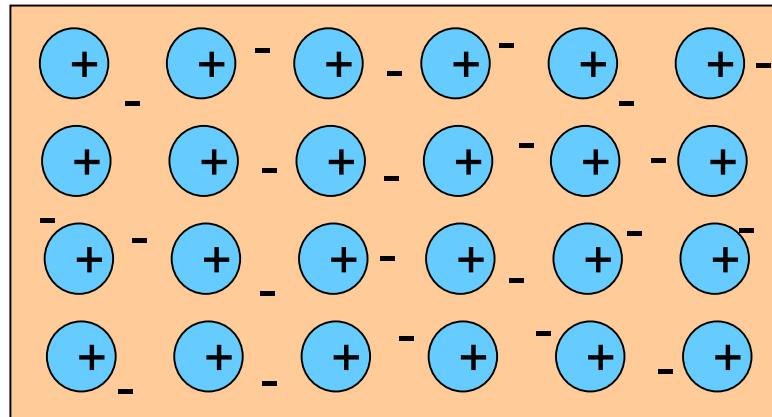
Cours Métaux1a

## De l'atome au solide: structures cristallines

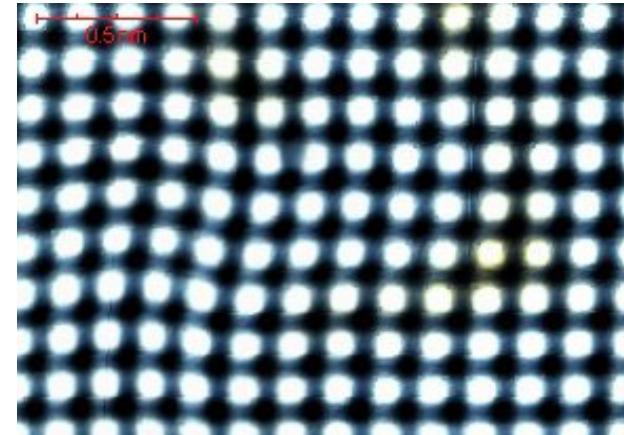
- définition d'un métal
- généralités sur les métaux
- structure cristalline
- empilements compacts 2D et 3D

# Définition d'un métal (ou alliage métallique)

- Un métal est un élément chimique qui perd **ses électrons périphériques (ou de valence)** pour former des liaisons métalliques
- Un métal peut donc être vu comme un ensemble de cations (noyaux positifs) baignant dans un **nuage d'électrons** lui conférant des propriétés de conduction thermique et électrique (**pas de molécules !**).
- Les **liaisons isotropes (non directionnelles)** lui confèrent la **ductilité** (habileté à se déformer plastiquement sans se rompre).



Etat métallique: les cations sont en bleu.



Arrangement des cations  $\text{Cu}^{2+}$  et  $\text{Cu}^{3+}$   
et distorsion locale du réseau

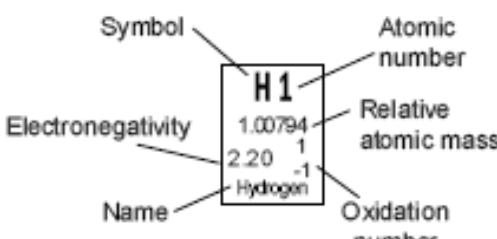
# Éléments métalliques

Tout élément situé à gauche de la barre en escalier est un métal sauf H

Ex. Al est un métal, AlSi7%pds est un alliage métallique et Fe-C est un acier ou une fonte.

Tableau périodique des éléments (tableau de Mendeleïev)

1 IA H 1 1.00794 2.20 -1 Hydrogen	2 IIA Li 3 6.941 0.98 1 Lithium	3 IIIB Be 4 9.012182 1.57 2 Beryllium	4 IVB Na 11 22.989769 0.93 1 Sodium	5 VB Mg 12 24.3060 1.31 2 Magnesium	6 VIB K 19 39.0983 0.82 1 Potassium	7 VIIIB Ca 20 40.078 1.0 2 Calcium	8 VIIIB Sc 21 44.95592 1.36 3 Scandium	9 VIIIB Ti 22 47.867 1.54 4 Titanium	10 VIIIB V 23 50.9415 1.63 5 Vanadium	11 VIIIB Cr 24 51.9961 1.66 6,3 Chromium	12 VIIIB Mn 25 54.938045 1.55 7,4,2 Manganese	13 III A Fe 26 55.845 1.83 3,2 Iron	14 IV A Co 27 58.933195 1.88 3,2 Cobalt	15 VA Ni 28 58.6934 1.91 2 Nickel	16 VIA Cu 29 63.546 1.9 2,1 Copper	17 VIIA Zn 30 65.38 1.65 2 Zinc	18 VIIIA Ga 31 69.723 1.81 3 Gallium	19 VIIIA Ge 32 72.64 2.01 4,2 Germanium	20 VIIIA As 33 74.92160 2.18 3 Arsenic	21 VIIIA Se 34 78.96 2.55 4,2 Selenium	22 VIIIA Br 35 79.904 2.96 5,3,1 Bromine	23 VIIIA Kr 36 83.798 3.00 0,2 Krypton
24 Fr 87 223.0197 0.7 1 Francium	25 Ra 88 226.0254 0.9 2 Radium	26 Ac 89 227.0278 1.1 3 Actinium	27 Rf 104 281.11 - - - Rutherfordium	28 Db 105 262.11 - - - Dubnium	29 Sg 106 263.12 - - - Seaborgium	30 Bh 107 262.12 - - - Bohrium	31 Hs 108 264 - - - Hassium	32 Mt 109 266.1378 - - - Meitnerium	33 Ds 110 269 - - - Darmstadtium	34 Rg 111 272 - - - Roentgenium	35 Cn 112 277 - - - Copernicium	36 Uut 113 284 - - - Ununtrium	37 114 289 - - - Flerovium	38 Uup 115 288 - - - Ununpentium	39 116 292 - - - Livermorium	40 Uus 117 293 - - - Ununseptium	41 Uuo 118 294 - - - Ununodium					



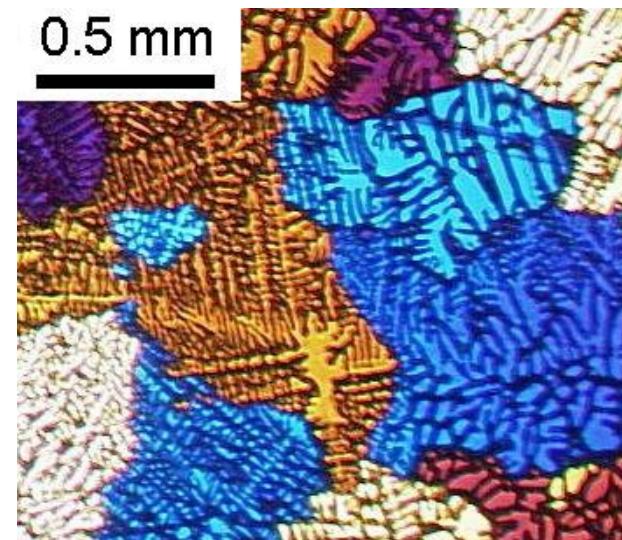
3 III B 4 IV B 5 V B 6 VI B 7 VII B 8 VIII 9 10 11 12 I B I I B

# Les propriétés (thermiques, optiques, magnétiques, mécaniques, etc.) des métaux sont très variables

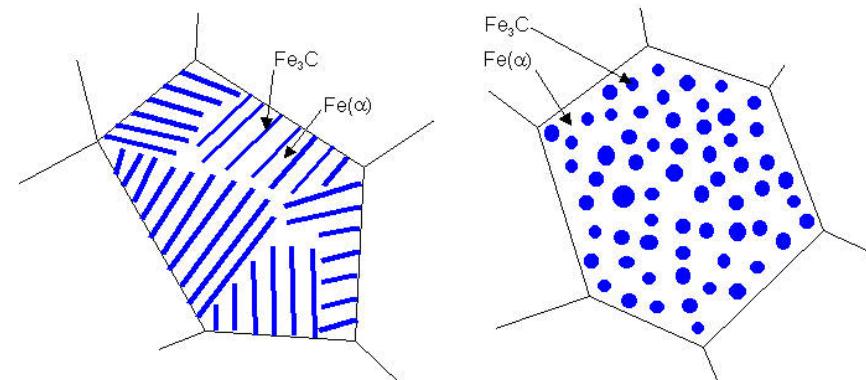
- Différence de structure cristalline
- Différence de microstructure (taille de grains, texture, ....)
- Présence d'autres atomes/ions dans la structure (impuretés ou alliages)
- Plusieurs phases dans la microstructure

On contrôle les propriétés par:

- le mélange d'atomes différents (alliages, solutions solides)
- le mélange de phases différentes (ex. la perlite = ferrite + cémentite)
- l'optimisation des tailles de grains et des structures
- et par des TT (traitements thermiques), e.g. pour les aciers.



Grains de Al.

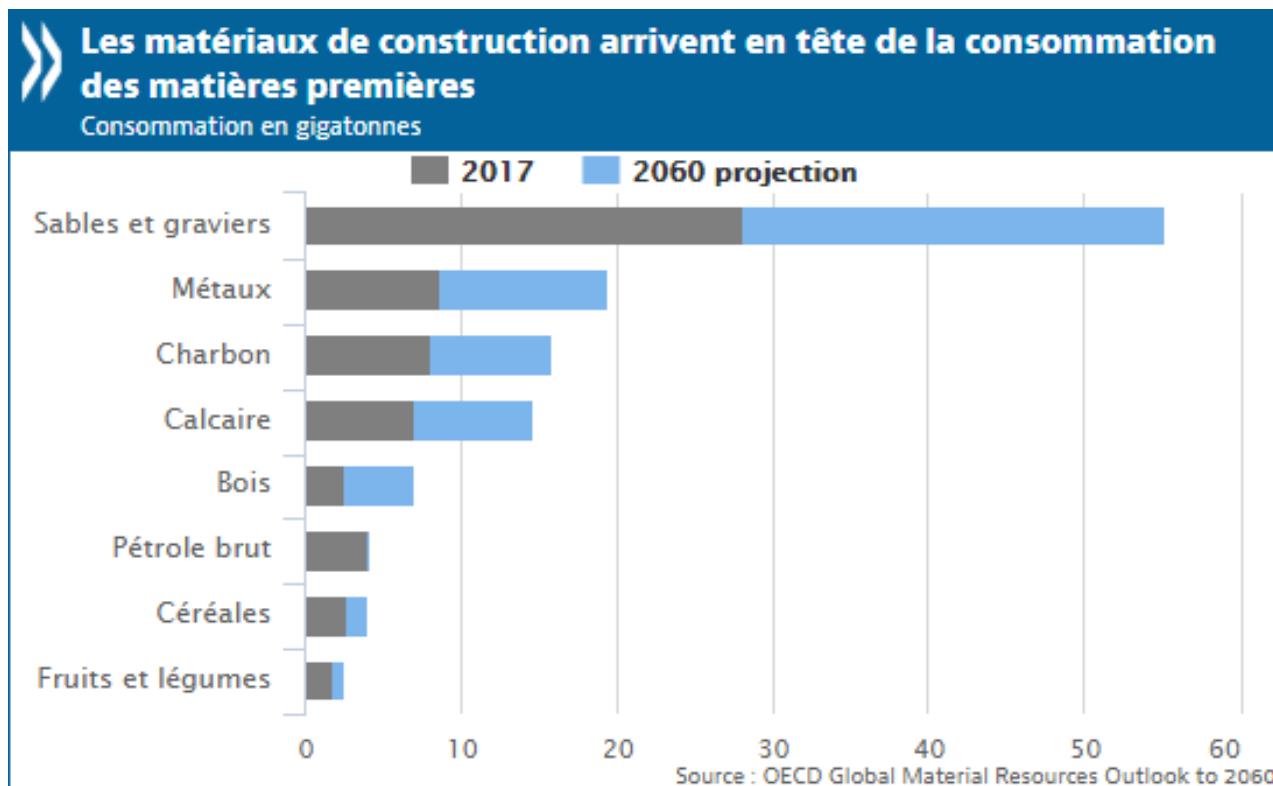


Perlite lamellaire et globulaire.

## Les métaux sont des matériaux très attrayants (métallurgie)

- Résistants (en compression et tension)
- Ductiles (mise en forme facile par déformation plastique)
- Conducteurs (électricité, chaleur, ...)
- **Recyclables à 100% par fusion** (réutilisation du stock mobilisé)
- **Mais ils sont assez chers**
  - leur extraction à partir de minéral est polluante (mines, houillères, )
  - la réduction des oxydes ( $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ) requiert une forte consommation énergétique
  - certains éléments sont peu disponibles (Li, Co, Ni, W, Ir, In, Pt, métaux rares, etc... )
- **Ils peuvent se corroder** (durabilité, protection)
  - les oxydes métalliques sont thermodynamiquement plus stables que les métaux (e.g. rouille)
- Leur utilisation est limitée en température
  - Fluage (déformation à chaud) puis fusion

# Consommation mondiale des Matériaux en 2017 en Gt



Matériaux de construction (béton, ciment, sables, graviers, calcaire et bois) et métaux: doublement d'ici à 2060.  
Pétrole brut ? Charbon ....

# Consommation mondiale des Métaux en 2012

	$10^6$ t/an	kg/an/ h
Acier	1129	185.8
Aluminium	32	5.3
Cuivre	30	4.9
Zinc	9.7	1.6
Plomb	5	0.8
Titanium	2	0.3
Nickel	1.3	0.2
Magnésium	0.6	0.1
Silicium	5.	0.8

## Lithium : la flambée de l'or blanc

Prix d'une tonne de carbonate de lithium négocié en Chine de janvier 2018 à octobre 2022 (moyenne mensuelle) \*



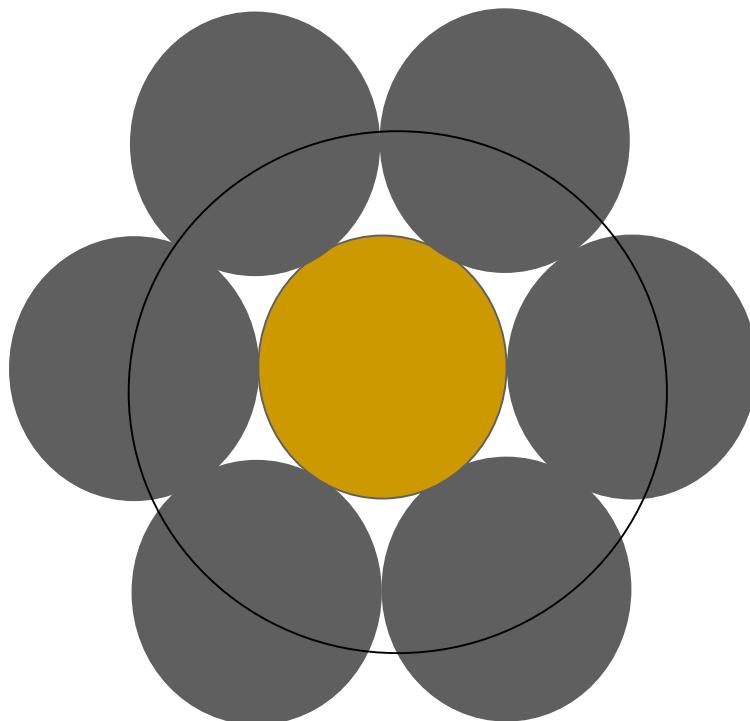
1 Gt = 1 gigatonne =  $10^9$  tonnes = mille millions de tonnes.

Acier en premier (extraction à partir de minerai riche en magnétite, sidérite, hématite (houille) ou recyclage), puis Aluminium (minerai = bauxite) et Cuivre.

NB: Si (semi-conducteur) est nécessaire pour les ordinateurs et le lithium (métal) pour les batteries (Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>).

## structures cristallines des métaux

- Les atomes (cations) se rangent de manière ordonnée à l'état solide pour former des **cristaux** (pièce polycristalline, minimum d'énergie) **appelés grains**
- Les métaux sont **polycristallins**: les grains sont séparés par **des joints de grains** (zone de désordre local sur quelques Angstroëms)
- Un cristal est défini par un **motif** et un **réseau cristallin** : on parle de **structure cristalline** ou structure cristallographique.



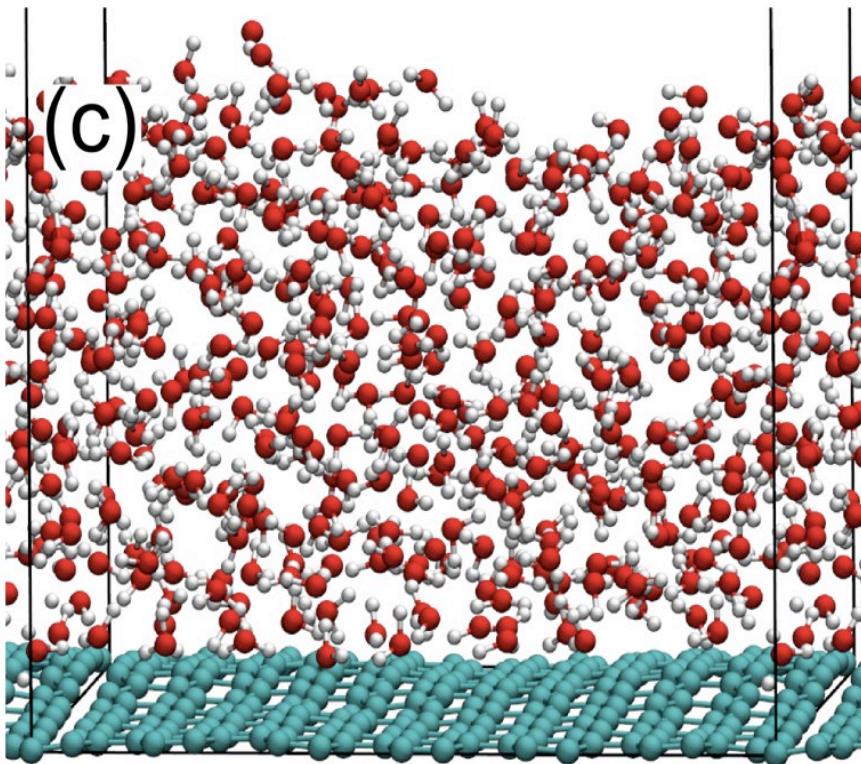
**Modèle de sphères rigides et tangentes :**

chaque sphère représente un atome

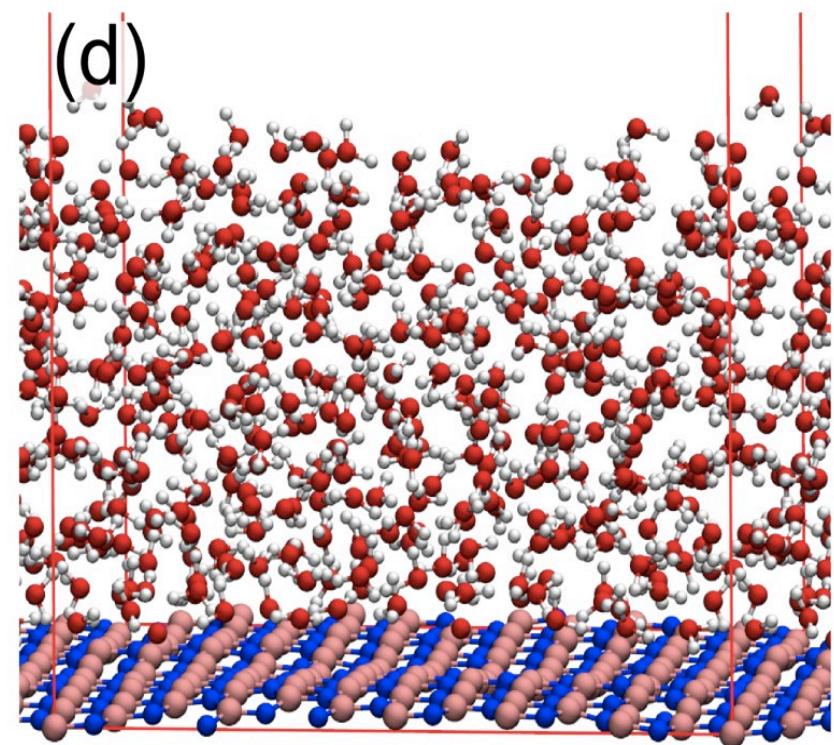
## structures cristallines des métaux

Les atomes vibrent à la fréquence de Debye,  $10^{13}$  Hz pour Fe (période de  $10^{-13}$  s soit 0,1 picoseconde), autour d'une position d'équilibre.

Exemple de l'eau liquide ( $H_2O$ ) sur une monocouche solide

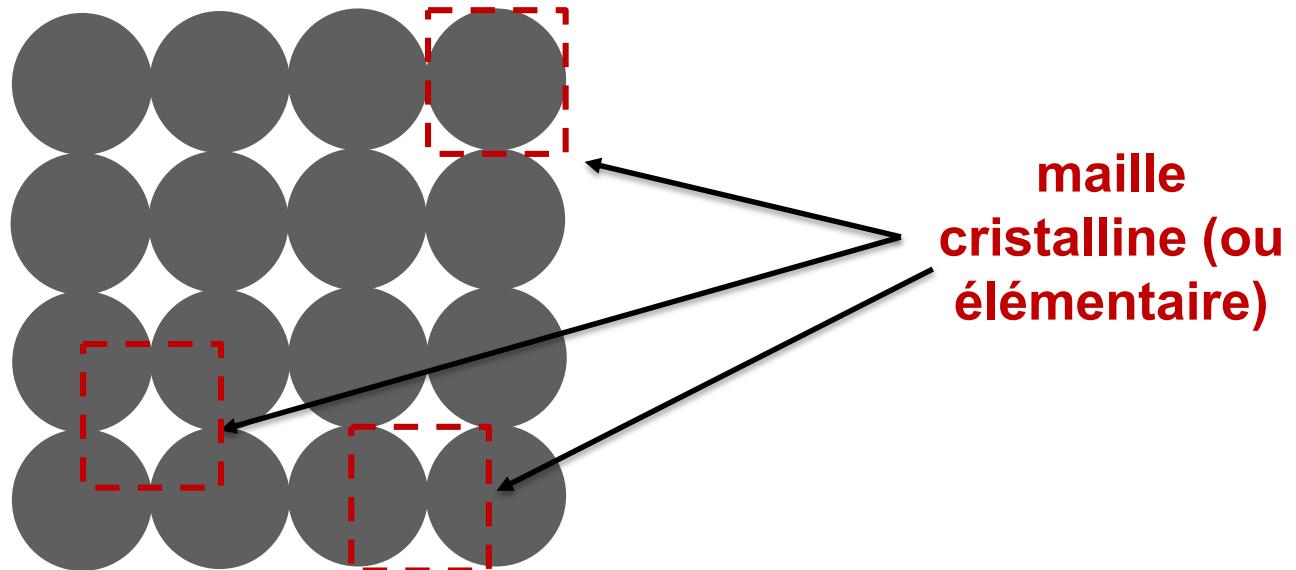


Eau liquide ( $H_2O$ ) sur une couche solide de carbone (graphène)



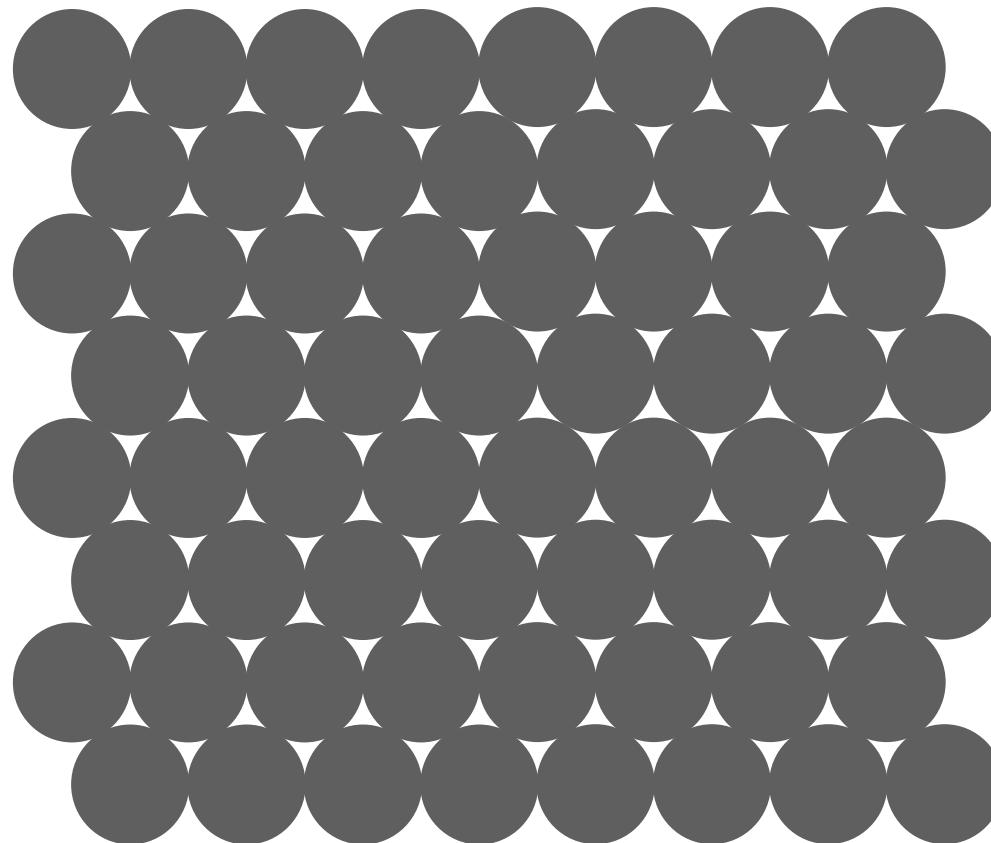
Eau liquide ( $H_2O$ ) sur une couche solide de nitre de bore (NB)

## Empilement 2D pour un métal pur (i.e. un seul élément): modèle de sphères rigides tangentes



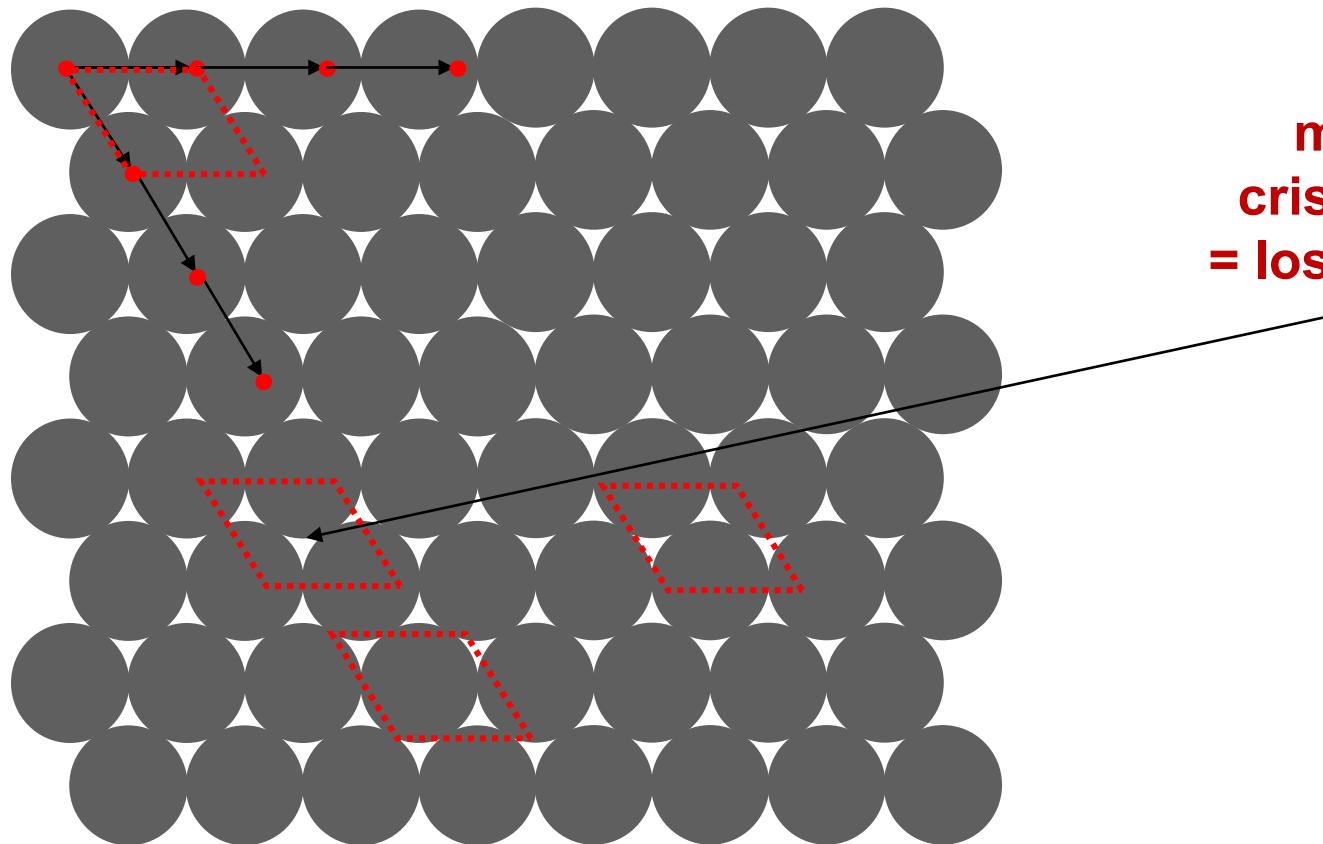
**Maille élémentaire:** volume (ou surface) minimum qui répété dans les 3 (2) directions de l'espace permet de construire l'entier du cristal.  
L'empilement ici est peu compacte ....  
Beaucoup de vide...  
La nature n'aime pas le vide .....

## Empilement compact 2D (métal pur)



C'est l'empilement 2D le plus compact de sphères rigides.

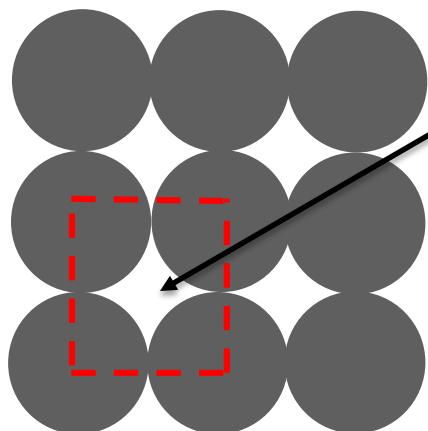
**Maille cristalline:** organisation géométrique élémentaire qui se répète dans toutes les directions pour former le cristal.



maille  
cristalline  
= losange ici

**Exo1a:** calculer la compacité surfacique  $C$  pour les 2 arrangements cristallins 2D en notant  $a$  le côté de la maille cristalline et  $R$  le rayon atomique.

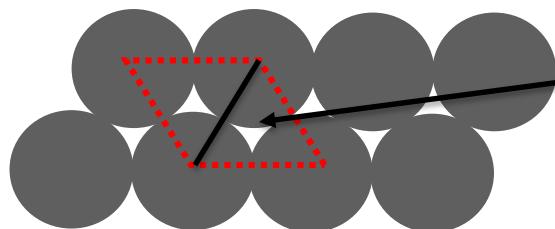
Dans  $S = a^2$ , il y a ? atomes



$$a = 2R \text{ et } C_{2D} = ?????$$

NB: empilement non compact

$$a = 2R \text{ et } C_{3D} = ?????$$



Dans  $S$ , il y a ? atomes

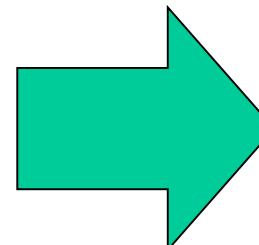
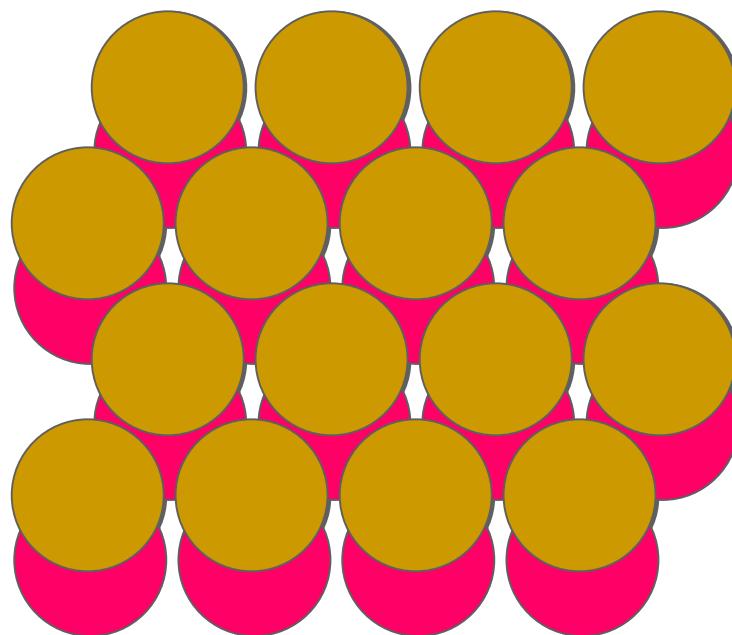
$$a = 2R, h = ? \text{ et } S = ?$$

$$C_{2D} = ?$$

En 3D: il y a 2 possibilités d'empiler de manière compact les plans compacts.

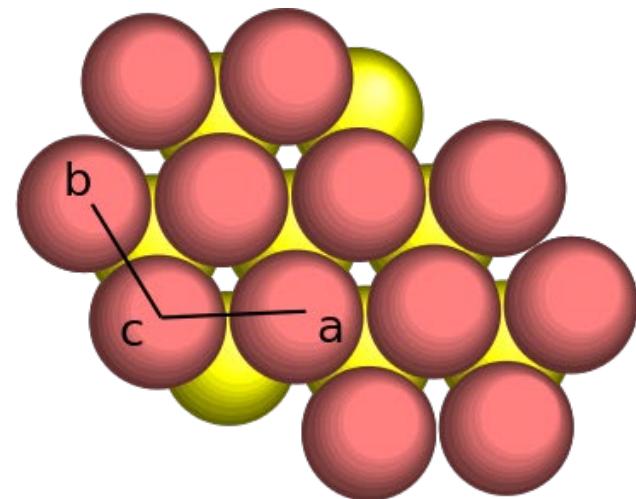
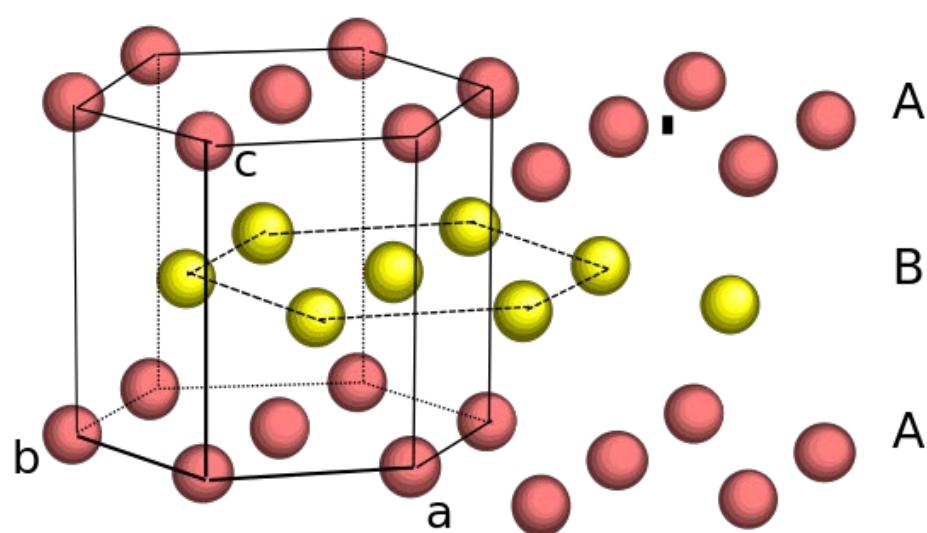
1<sup>ère</sup> manière: ABABABABA.... Ex. Zn et Mg

A  
B  
A



structure  
hexagonale  
compacte  
h.c.p.

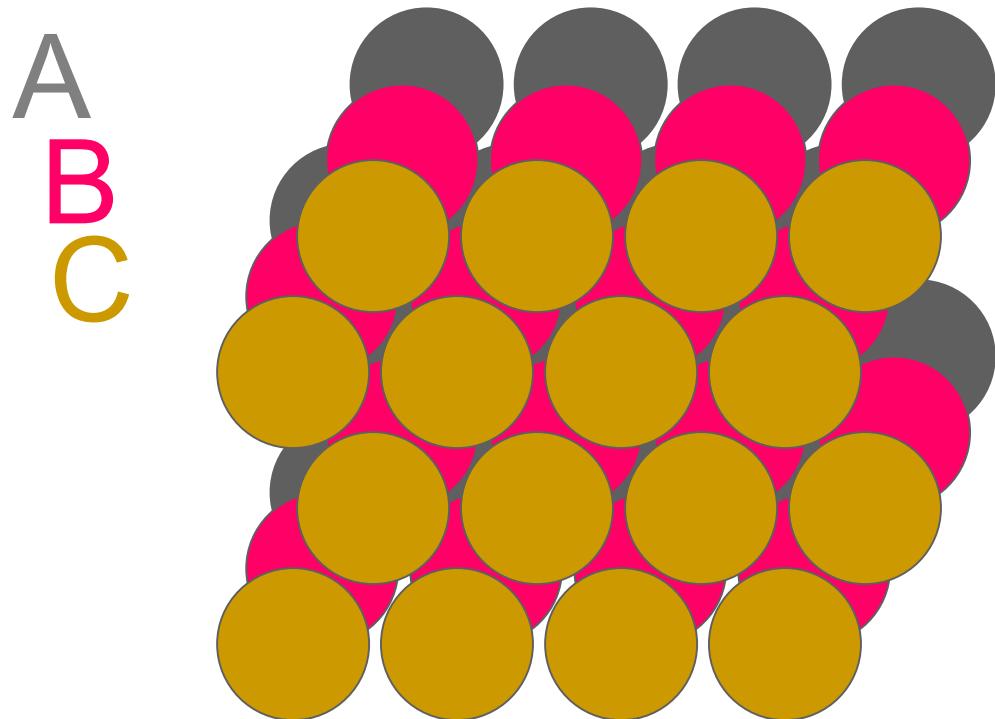
# Structure hexagonale compacte: hcp



Empilement Hexagonal Compact  
( hexagonal close-pack : hcp ABAB )

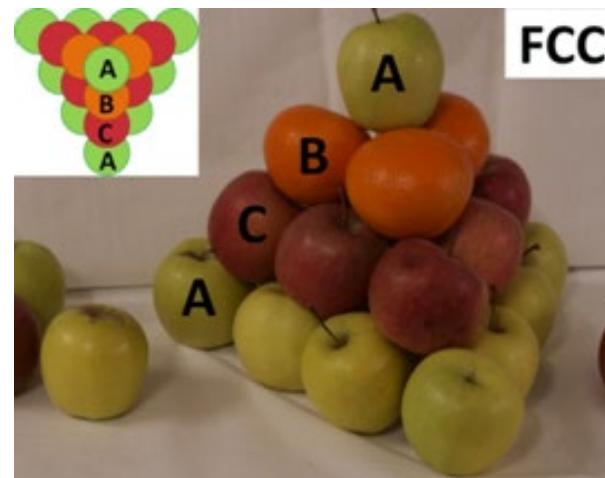
**En 3D: il y a 2 possibilités d'empiler de manière compact les plans compacts.**

**2<sup>ème</sup> manière: ABCABCABCAB ... CFC ex Al, Ni, Cu, Fe-austénite, ...)**

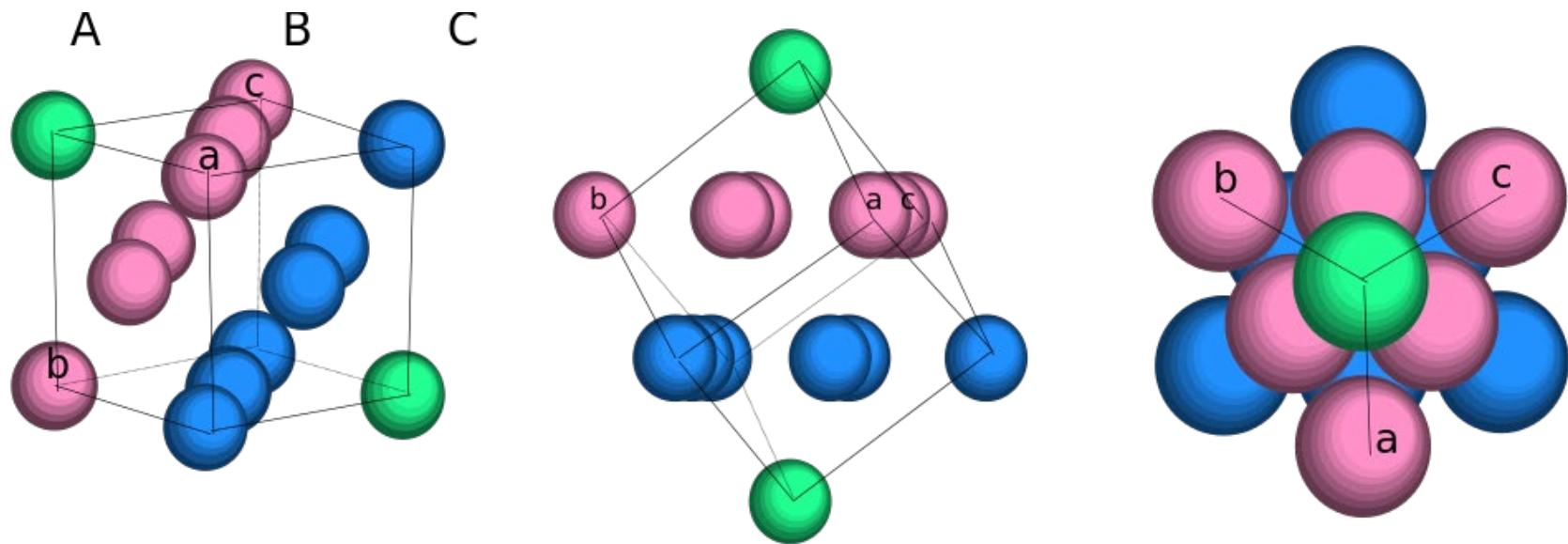


FCC = face centered cubic

## Structure cubique à faces centrées: cfc



# Structure cubique à faces centrées: cfc



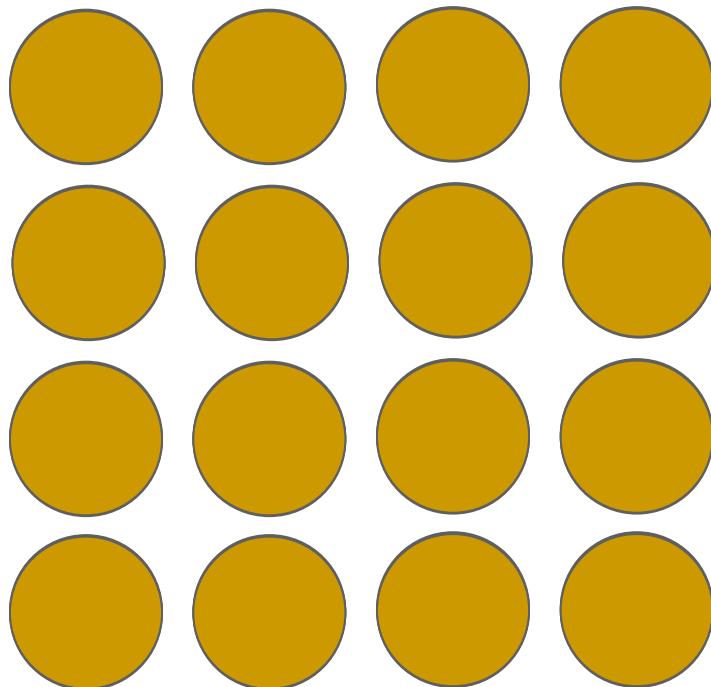
Empilement compact Cubique Faces Centrées  
( cubic close- pack CCP, ABC )

1 atome à chaque sommet du cube et 1 atome au centre de chaque face du cube

Soient 4 atomes dans la maille cubique

# Empilement 3D non compact de plans non compacts

A  
A  
A

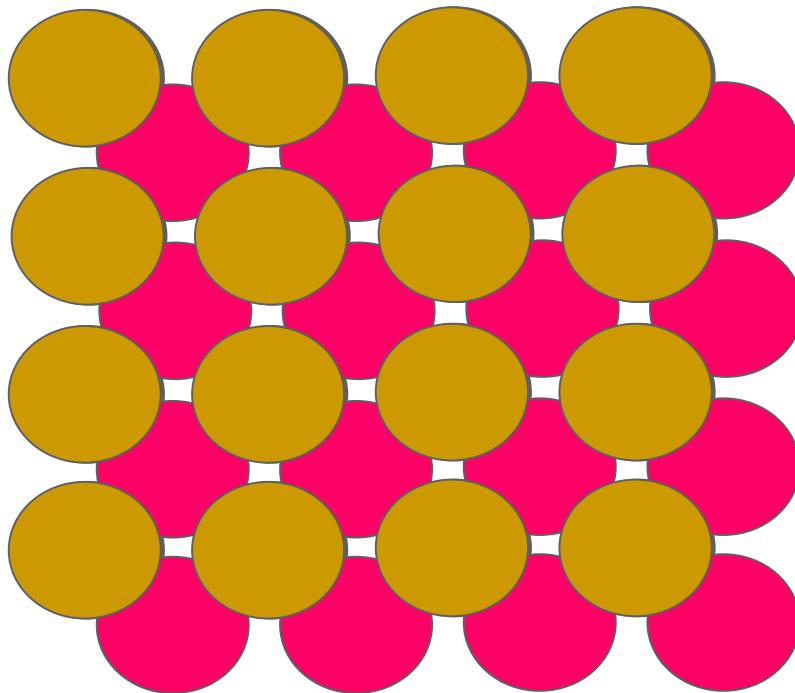


Structure  
cubique  
simple

Ex: le Polonium ( $Z = 84$  et  $M = 210$  g)  
très instable et  
hautement  
radioactif (Pierre et  
Marie Curie, 1898)

# Empilement 3D compact de plans non compacts

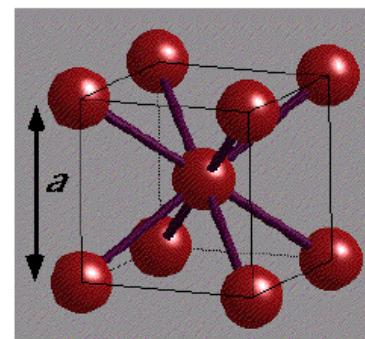
A  
B  
A



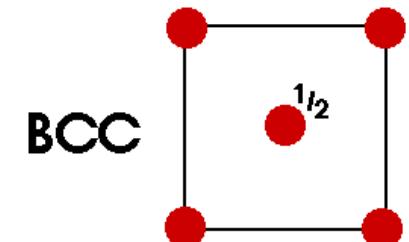
Structure cubique  
centrée: bcc

Ex: la ferrite (Fer en  
dessous de 727°C)

1 atome à chaque sommet du cube  
1 atome au centre du cube  
Soient 2 atomes dans la maille  
cubique

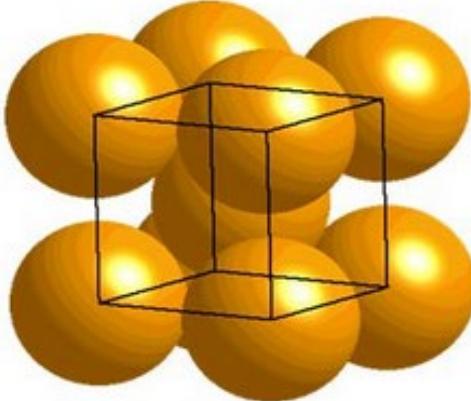
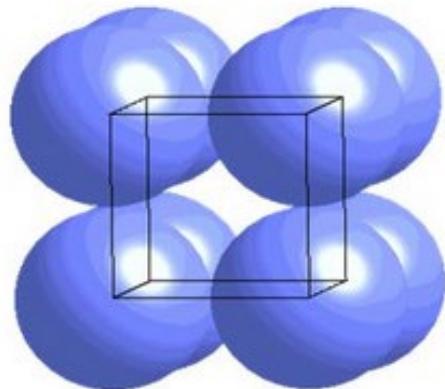


Body-Centred Cubic



## Compacité des systèmes cubiques (métaux purs)

**Système cubique:** réseau dont la maille élémentaire est un cube de côté  $a$  = paramètre de maille (e.g 4 Angström pour Al)



Les atomes se touchent selon le côté du cube

Les atomes se touchent selon la grande diagonale du cube

Les atomes se touchent selon la petite diagonale du cube

Compacité = degré de remplissage

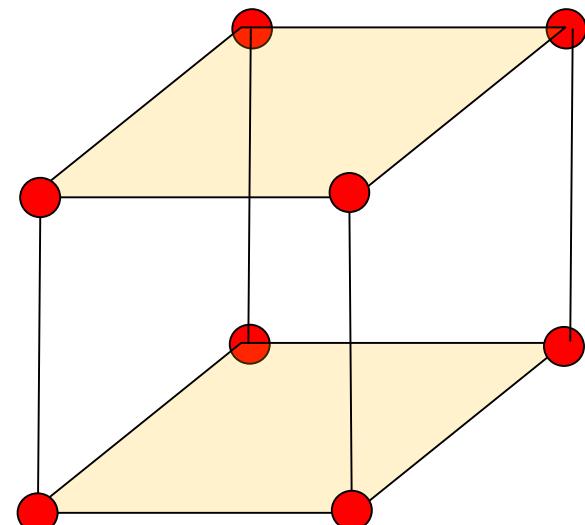
$C = \text{Volume occupé par les atomes} / \text{volume de la maille}$   
pour un empilement de sphères tangentées de rayon  $R$

## Systèmes cubiques: modèle éclaté.

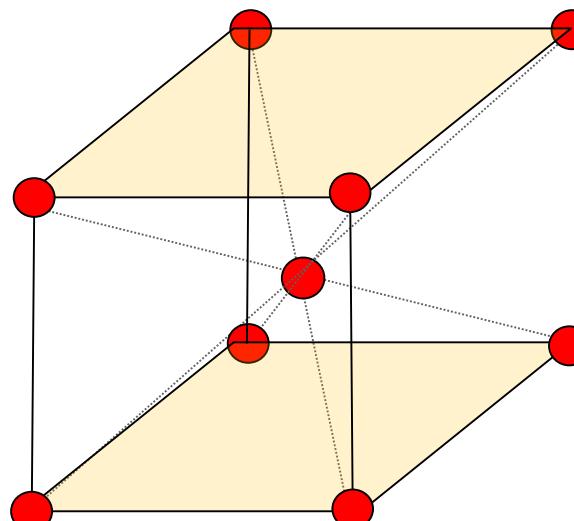
**Atomes de rayon  $R$ ,  $a = \text{coté du cube} = \text{paramètre de maille}$   
et  $n = \text{nombre d'atomes dans la maille.}$**

**Exo1b :** donnez le lien entre  $a$  et  $R$ , déterminez  $n$   
et calculez la compacité volumique  $C$  pour les 3 structures cubiques.

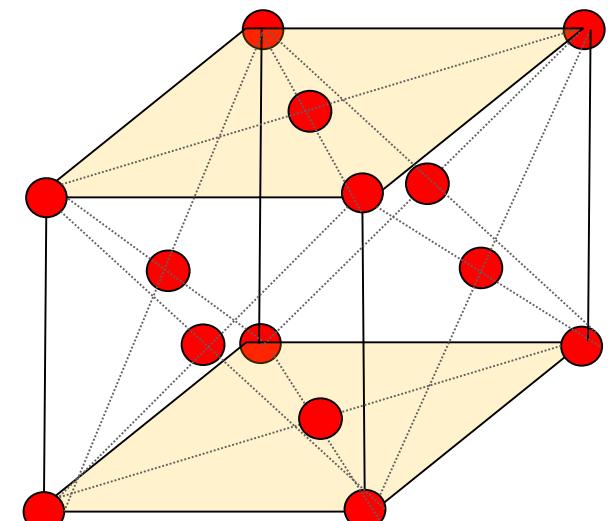
Cubique simple



Cubique centré



Cubique à faces centrées



Lundi 14 Avril 2025

## Cours Métaux1b: de l'atome au solide

- correction des exos compacités 2D et 3D
- réseaux cristallins des métaux
- motif (utile pour les phases intermétalliques)
- polymorphisme cristallin
- alliages et phases