

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

Prof. J.-M. Drezet, IMX (Institut des Matériaux, IMX)

jean-marie.drezet@epfl.ch

Les différentes échelles des métaux

Maîtrise des microstructures métalliques pour optimiser les propriétés

Pièce métallique



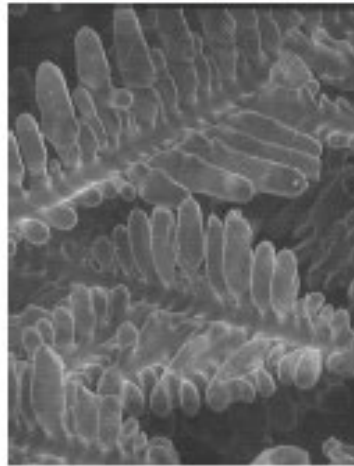
Aube de turbine Ni
(10 cm)

Macro-



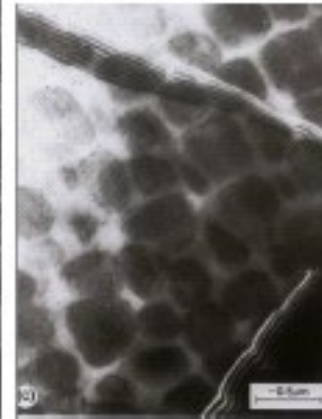
Grains
(mm)

Méso-



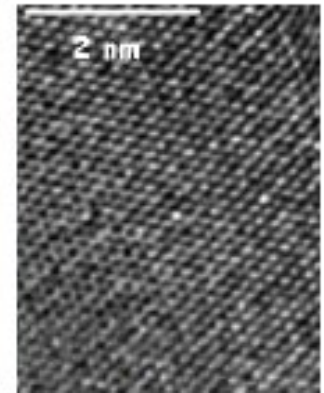
Dendrites
(10-100 μm)

Micro-



Précipités Ni_3Al
(10-100 nm)

Nano- structure



Atomes
(0.1 nm)

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

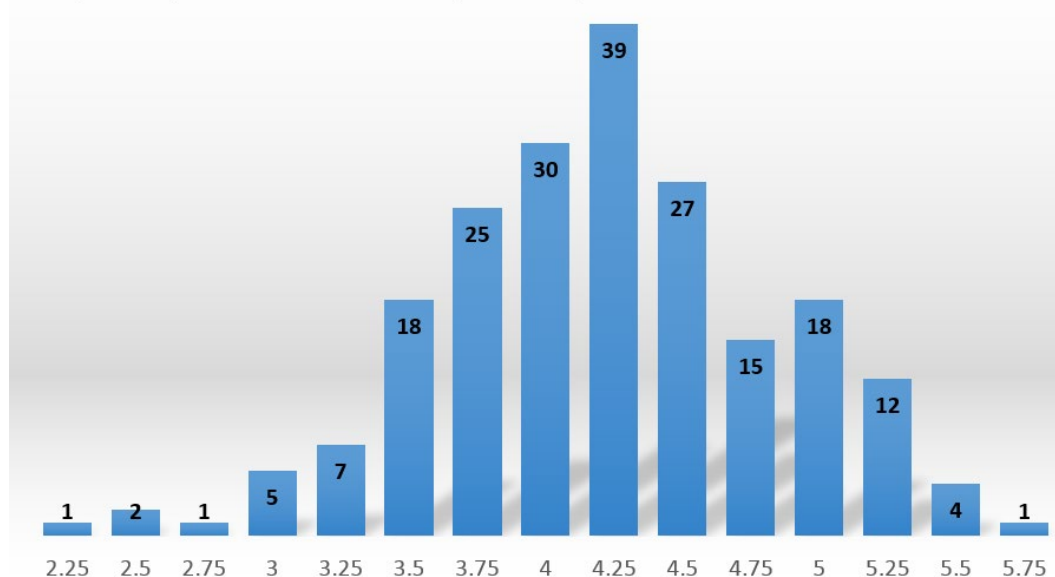
Webinars : <https://tube.switch.ch/channels/0f4356ca>

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)

Distribution des notes Métaux et Alliages GM et MX
printemps 2018, 205 étudiants (JM Drezet)



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

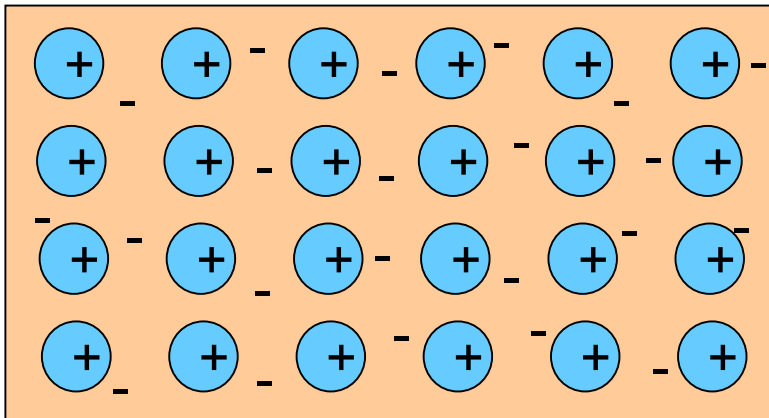
Cours Métaux1a

De l'atome au solide: structures cristallines

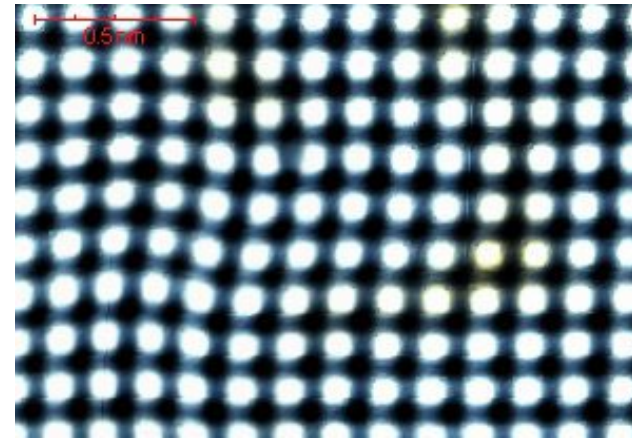
- définition d'un métal
- généralités sur les métaux
- structure cristalline
- empilements compacts 2D et 3D

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** (habilité à se déformer plastiquement sans se rompre).



Etat métallique: les cations sont en bleu.



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

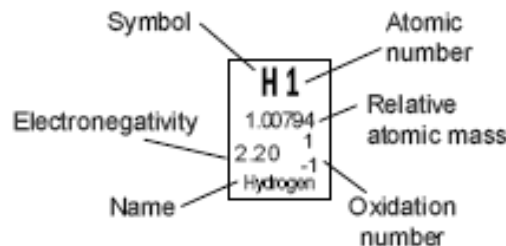
Éléments métalliques

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)

Tableau périodique des éléments (tableau de Mendeleïev)																		18 VIIIA																	
1 IA												He 2																							
H 1 1.00794 2.20 1 Hydrogen												- 0 Helium																							
2 IIA												13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	Ne 10																		
Li 3 6.941 0.98 1 Lithium		Be 4 9.012182 1.57 2 Beryllium												B 5 10.811 2.04 3 Boron	C 6 12.0107 2.55 4 Carbon	N 7 14.0067 3.04 5,3 Nitrogen	O 8 15.9994 3.44 -2 Oxygen	F 9 18.998403 3.98 -1 Fluorine	Ne 10 20.1797 - 0 Neon																
3		4												11 IB	12 IIB	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18														
Na 11 22.989769 0.93 1 Sodium		Mg 12 24.3050 1.31 2 Magnesium												26.981538 1.61 3 Aluminum	28.0855 1.90 4 Silicon	30.973762 2.19 5,3 Phosphorus	32.065 2.58 6,4,2 Sulfur	35.453 3.16 7,5,3,1 Chlorine	39.948 - 0 Argon																
4		5												6	7	8	9	10	11	12	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36									
K 19 39.0983 0.82 1 Potassium		Ca 20 40.078 1.0 2 Calcium		Sc 21 44.95592 1.36 3 Scandium		Ti 22 47.867 1.54 4 Titanium		V 23 50.9415 1.63 5 Vanadium		Cr 24 51.9961 1.66 6,3 Chromium		Mn 25 54.938045 1.55 7,4,2 Manganese		Fe 26 55.845 1.83 3,2 Iron		Co 27 58.933195 1.88 3,2 Cobalt		Ni 28 58.6934 1.91 2 Nickel		Cu 29 63.546 1.9 2,1 Copper		Zn 30 65.38 1.65 2 Zinc		Ga 31 69.723 1.81 3 Gallium		Ge 32 72.64 2.01 4,2 Germanium		As 33 74.92160 2.18 5,3 Arsenic		Se 34 78.96 2.55 6,4,2 Selenium		Br 35 79.904 2.96 5,3,1 Bromine		Kr 36 83.798 3.00 0,2 Krypton	
5		6												7	8	9	10	11	12	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54										
Rb 37 85.4678 0.82 1 Rubidium		Sr 38 87.62 0.95 2 Strontium		Y 39 88.90585 1.22 3 Yttrium		Zr 40 91.224 1.33 4 Zirconium		Nb 41 92.90638 1.6 5 Niobium		Mo 42 95.96 2.16 6,4 Molybdenum		Tc 43 98.9062 1.9 7,4 Technetium		Ru 44 101.07 2.2 4,3 Ruthenium		Rh 45 102.90550 2.28 3 Rhodium		Pd 46 106.42 2.2 4,2 Palladium		Ag 47 107.8682 1.93 1 Silver		Cd 48 112.411 1.69 2 Cadmium		In 49 114.818 1.78 3 Indium		Sn 50 118.710 1.96 4,2 Tin		Sb 51 121.760 2.05 5,3 Antimony		Te 52 127.60 2.1 6,4,2 Tellurium		I 53 126.90447 2.7 7,5,3,1 Iodine		Xe 54 131.293 2.60 0,6 Xenon	
6		7												8	9	10	11	12	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86											
Cs 55 132.90545 0.79 1 Cesium		Ba 56 137.327 0.89 2 Barium		La 57 138.9057 1.1 3 Lanthanum		Hf 72 178.49 1.3 4 Hafnium		Ta 73 180.94788 1.5 5 Tantalum		W 74 183.84 2.36 6,4 Tungsten		Re 75 186.207 1.9 4 Rhenium		Os 76 190.23 2.2 4 Osmium		Ir 77 192.217 2.2 4,3 Iridium		Pt 78 195.084 2.28 4,2 Platinum		Au 79 196.96657 2.54 3 Gold		Hg 80 200.59 2.0 2,1 Mercury		Tl 81 204.3833 1.62 3,1 Thallium		Pb 82 207.2 2.33 4,2 Lead		Bi 83 208.98040 2.02 3 Bismuth		Po 84 208.9824 2.0 4,2 Polonium		At 85 209.9871 2.2 -1 Astatine		Rn 86 222.0176 2.2 0 Radon	
7		8												9	10	11	12	13	14	15	16	17	18												
Fr 87 223.0197 0.7 1 Francium		Ra 88 226.0254 0.9 2 Radium		Ac 89 227.0278 1.1 3 Actinium		Rf 104 261.11 - - Rutherfordium		Db 105 262.11 - - Dubnium		Sg 106 263.12 - - Seaborgium		Bh 107 262.12 - - Bohrium		Hs 108 264 - - Hassium		Mt 109 266.1378 - - Meitnerium		Ds 110 269 - - Darmstadtium		Rg 111 272 - - Roentgenium		Cn 112 277 - - Copernicium		Uut 113 284 - - Ununtrium		Fl 114 289 - - Flerovium		Uup 115 288 - - Ununpentium		Lv 116 292 - - Livermorium		Uus 117 293 - - Ununseptium		Uuo 118 294 - - Ununoctium	

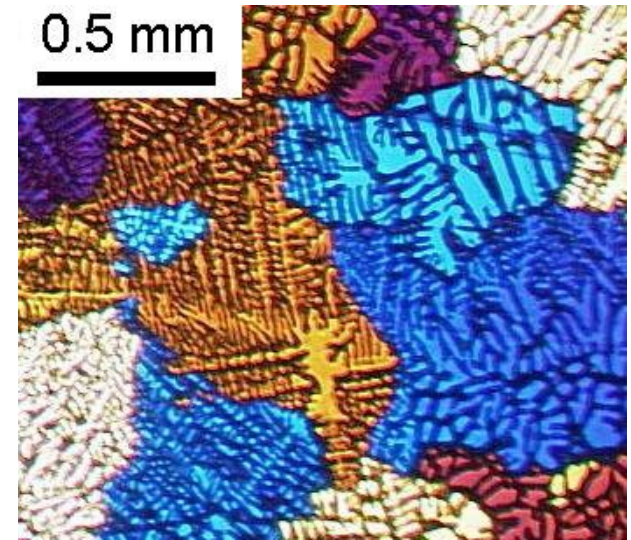


Les propriétés (thermiques, optiques, magnétiques, mécaniques, etc.) des métaux sont **très variables**

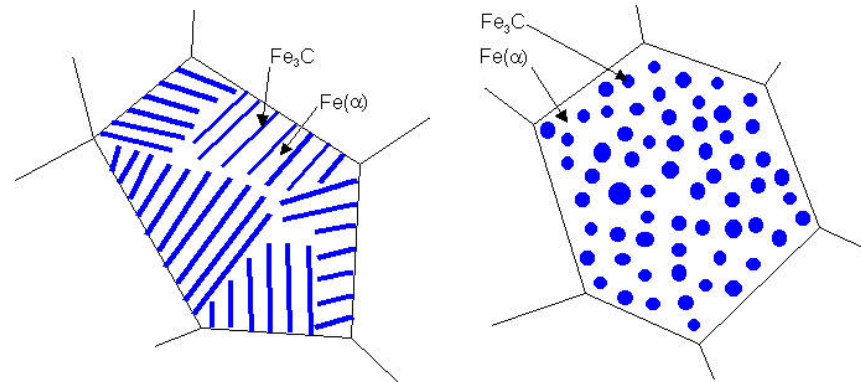
- Différence de structure cristalline
- Différence de microstructure (taille de grains, texture,)
- Présence d'autres atomes/ions dans la structure (impuretés ou alliages)
- Plusieurs phases dans la microstructure

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.

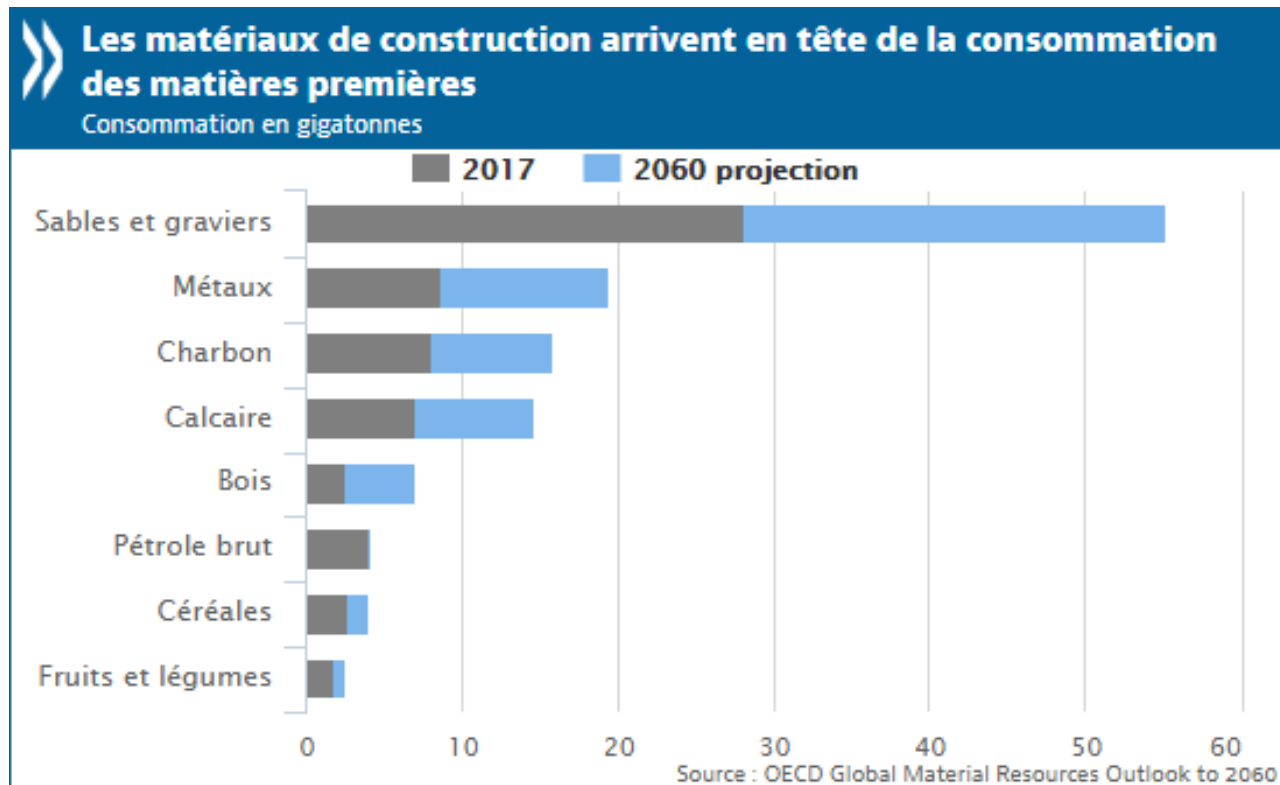


Perlite lamellaire et globulaire.

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 minerai 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

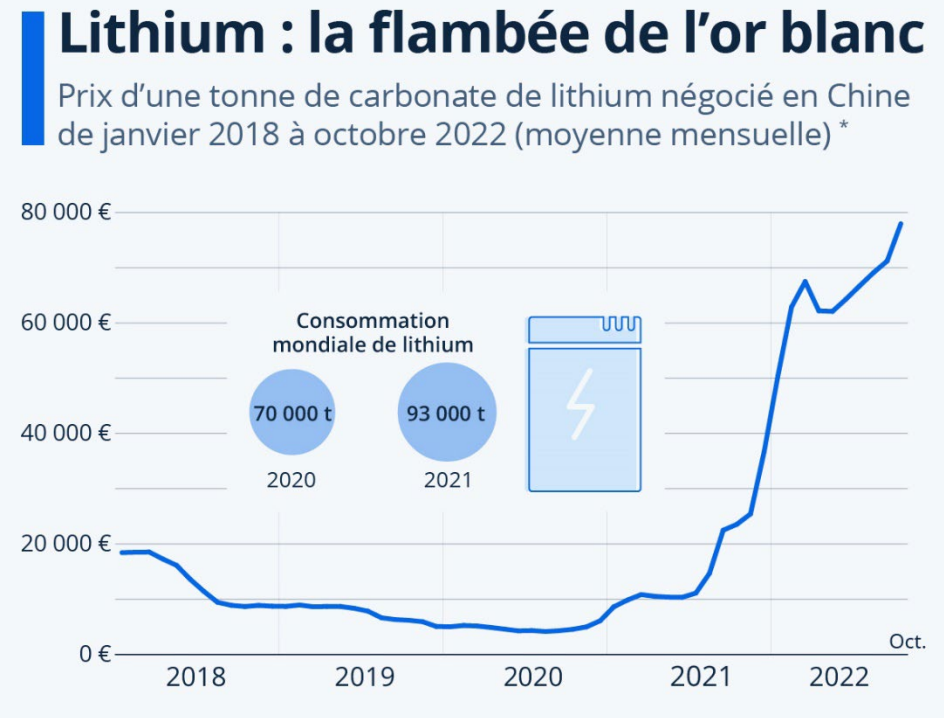
Consommation mondiale des Matériaux en 2017 en Gt



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
Titane	2	0.3
Nickel	1.3	0.2
Magnésium	0.6	0.1
Silicium	5.	0.8



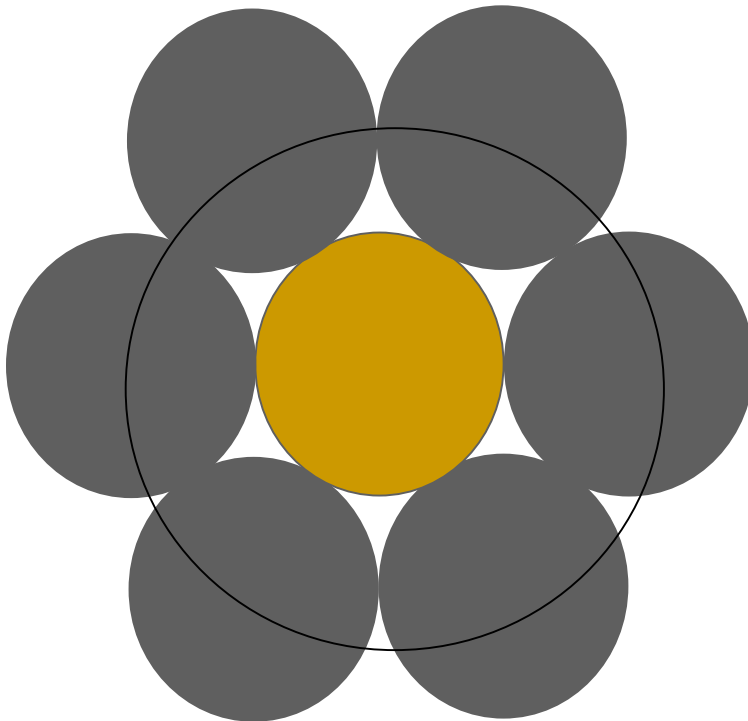
1 Gt = 1 gigatonne = 10⁹ tonnes = mille millions de tonnes.

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 (Li₂CO₃).

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 Angströms)
- Un cristal est défini par un **motif** et un **réseau cristallin** : on parle de **structure cristalline** ou structure cristallographique.



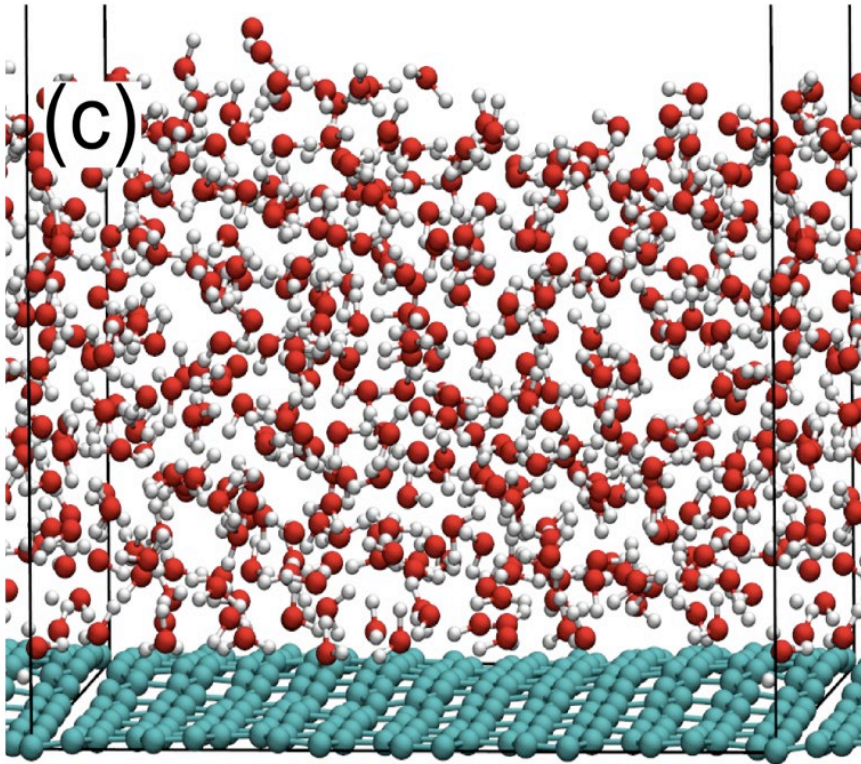
**Modèle de sphères rigides
et tangentes :**

chaque sphère représente
un atome

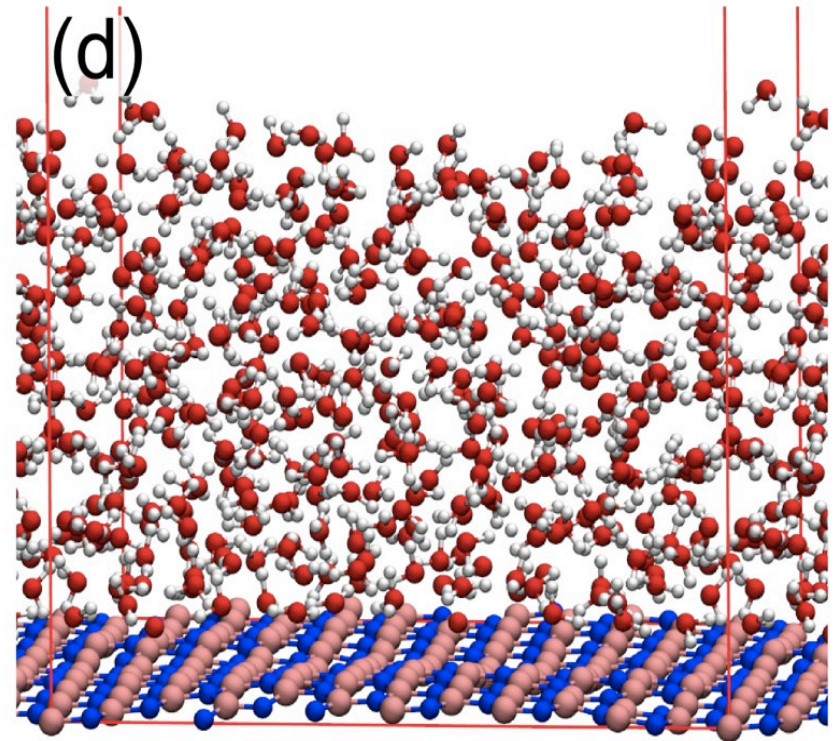
structures cristallines des métaux

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

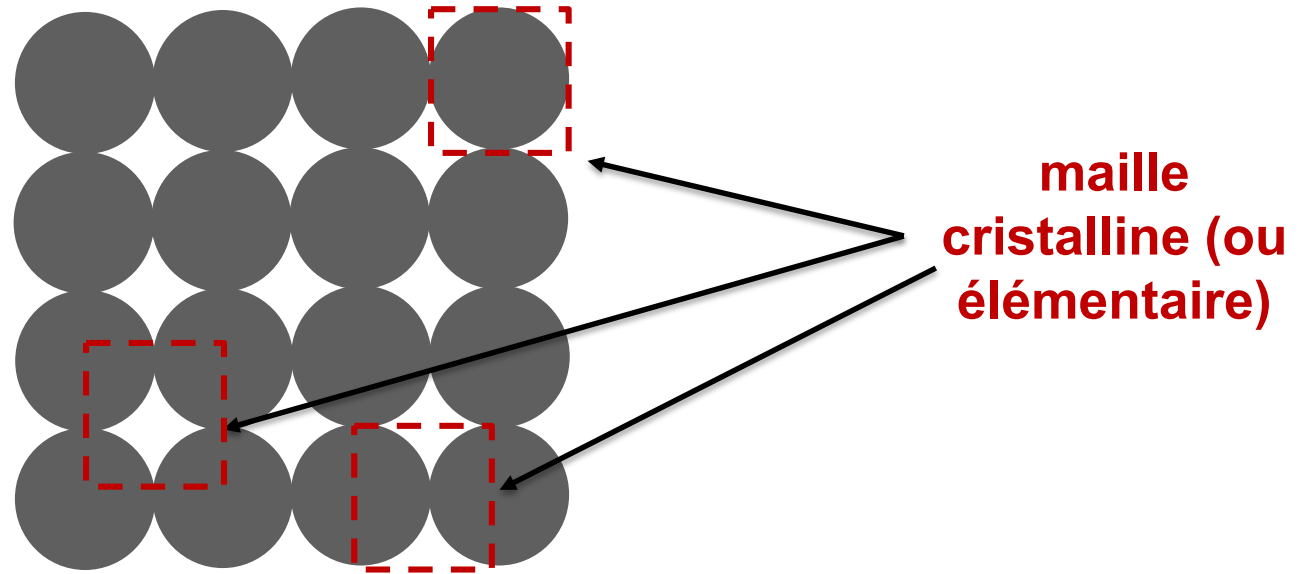


Eau liquide (H_2O) sur une couche solide de carbone (graphène)



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

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



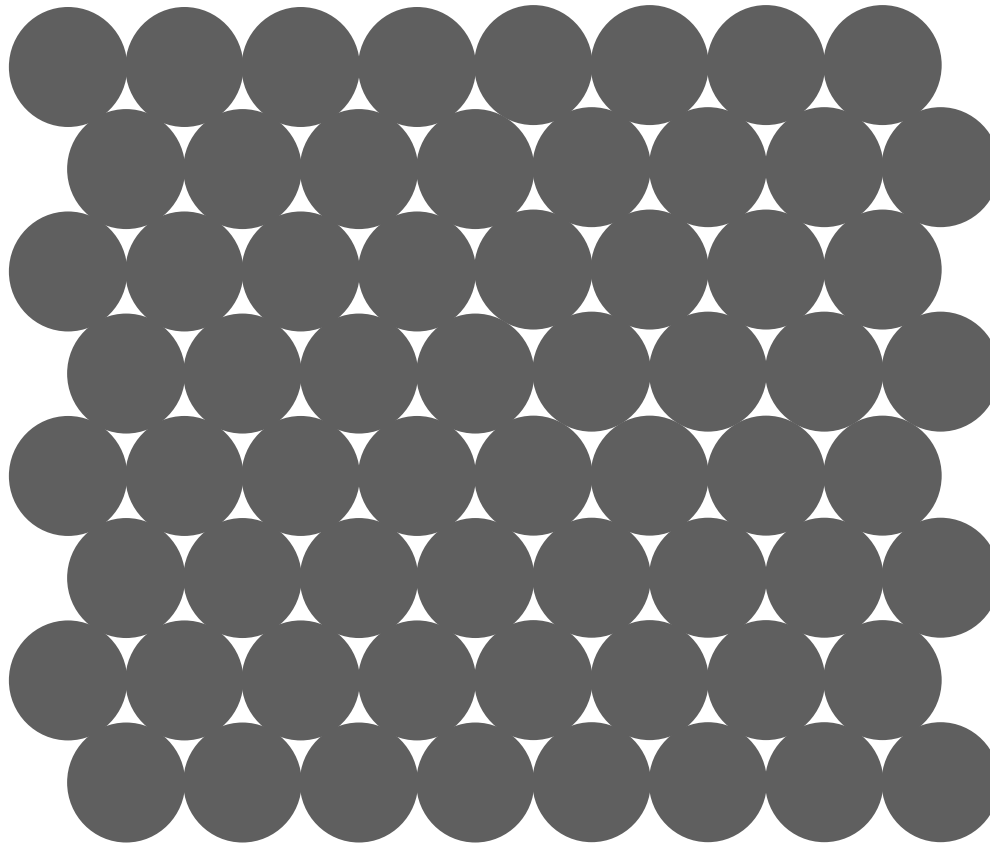
Maille élémentaire: volume (ou surface) minimum qui répété dans les 3 (2) directions de l'espace permet de construire l'entier du cristal.

L'empilement ici est peu compacte

Beaucoup de vide...

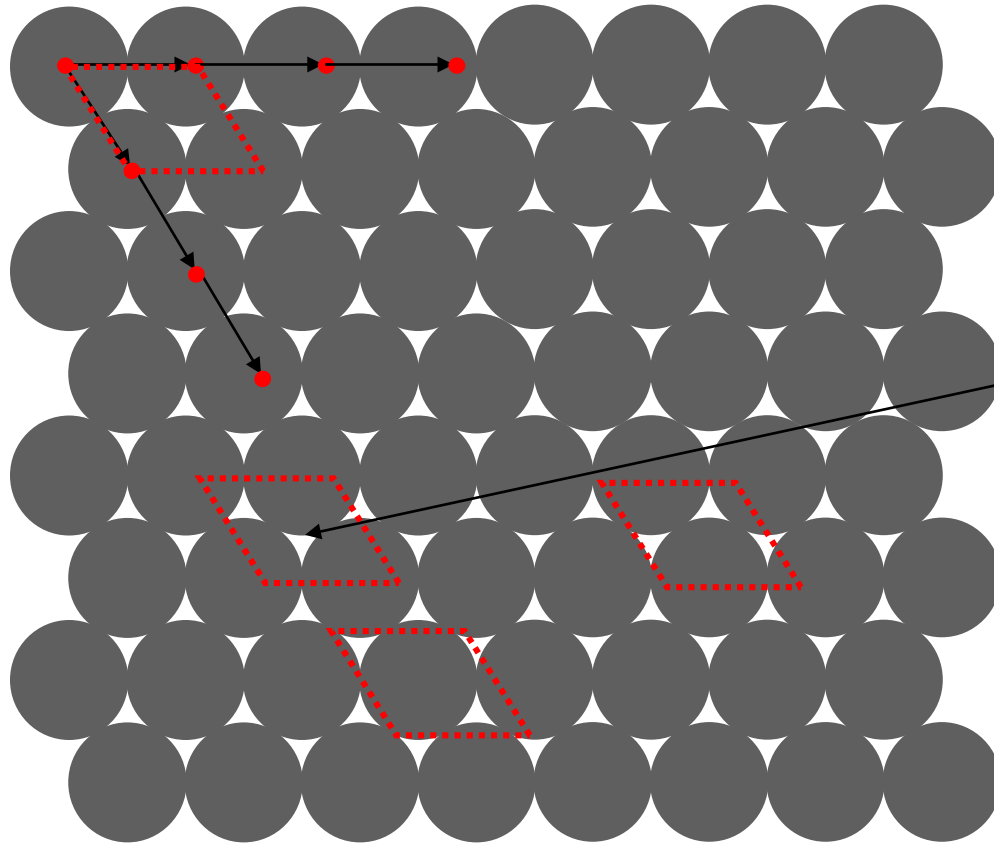
La nature n'aime pas le vide

Empilement compact 2D (métal pur)



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

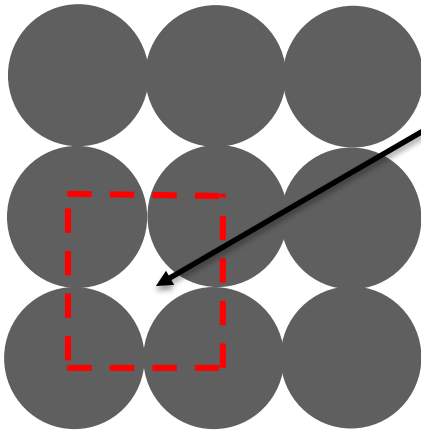
Maille cristalline: organisation géométrique élémentaire qui se répète dans toutes les directions pour former le cristal.



**maille
cristalline
= losange ici**

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

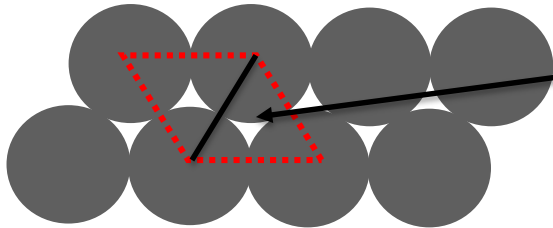
Dans $S = a^2$, il y a ? atomes



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

NB: empilement non compact

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



Dans S , il y a ? atomes

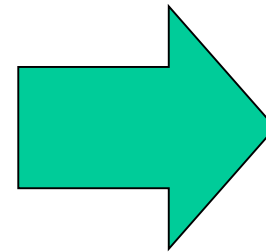
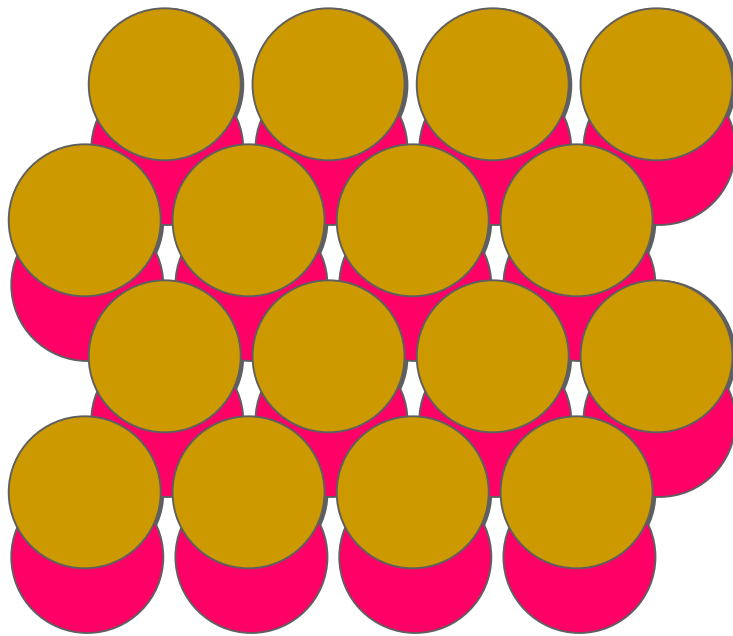
$$a = 2R, h = ? \text{ et } S = ?$$

$$C_{2D} = ?$$

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

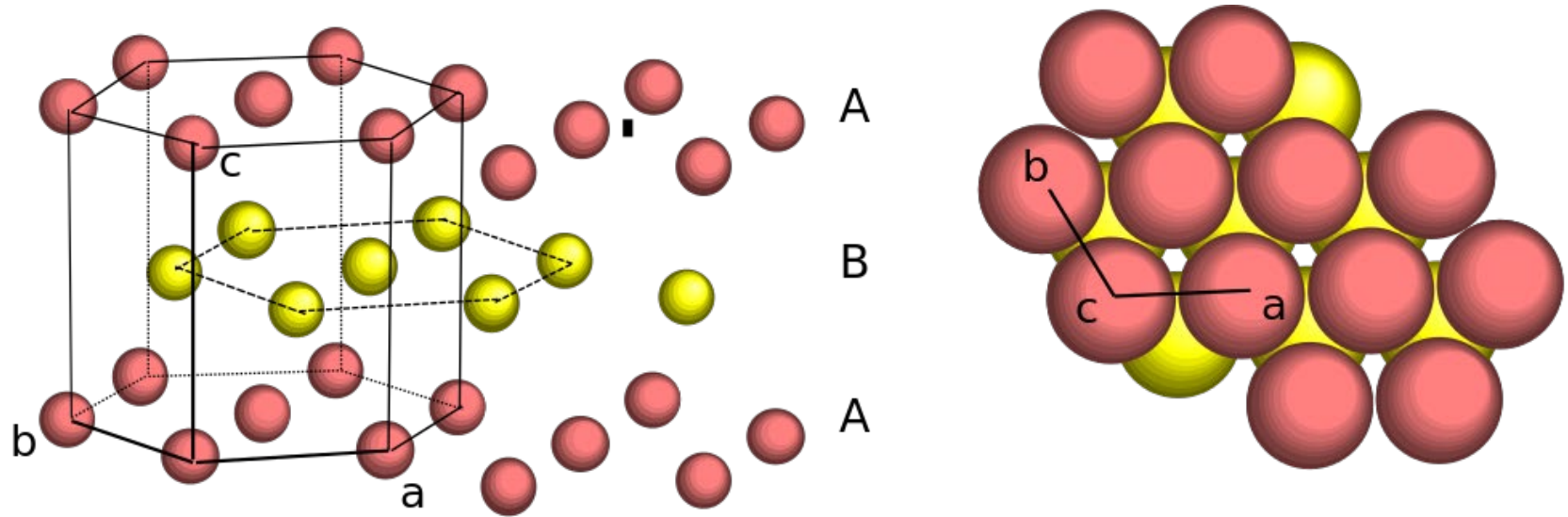
1^{ère} manière: ABABABABA.... Ex. Zn et Mg

A
B
A



structure
hexagonale
compacte
h.c.p.

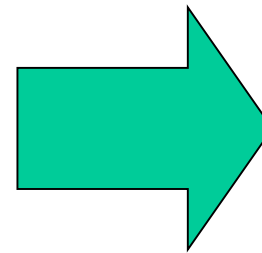
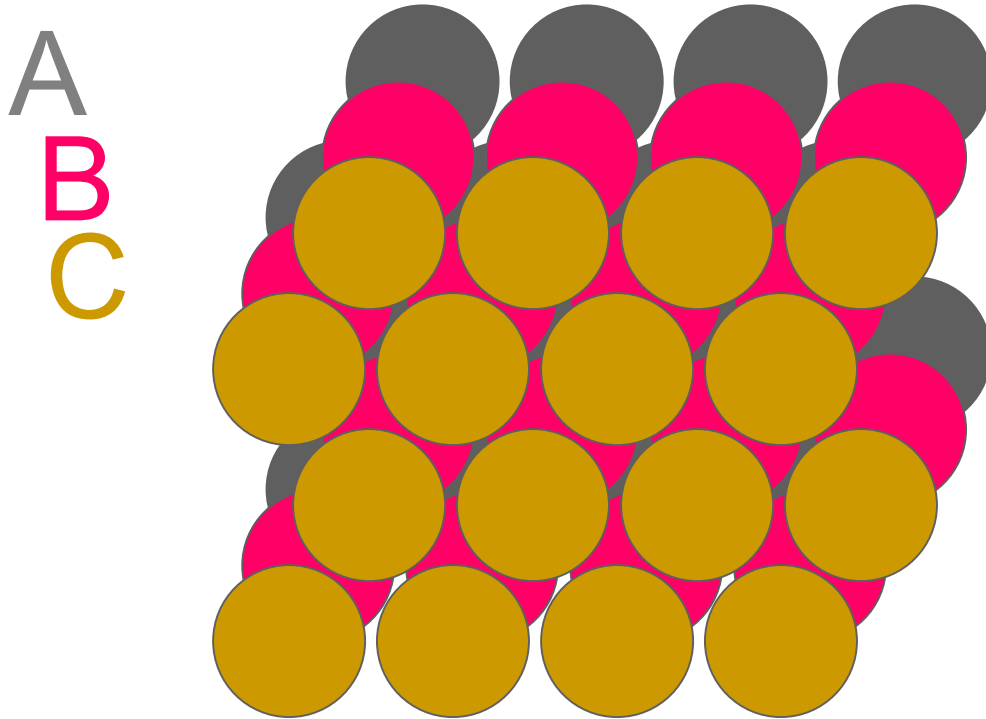
Structure hexagonale compacte: hcp



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

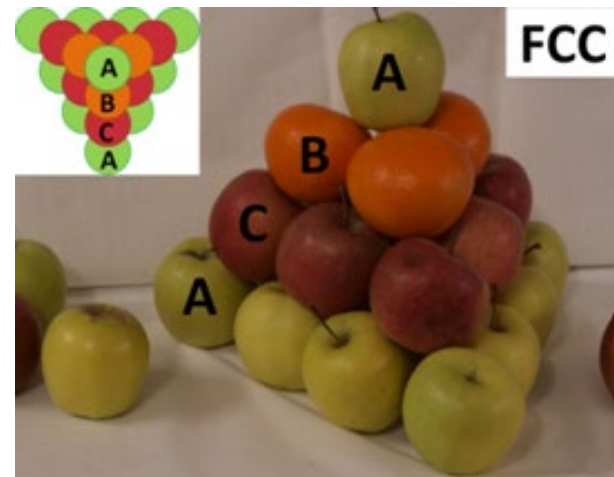
En 3D: il y a 2 possibilités d'empiler de manière compact les plans compacts.

2^{ème} manière: ABCABCABCAB ... CFC ex Al, Ni, Cu, Fe-austénite, ...)

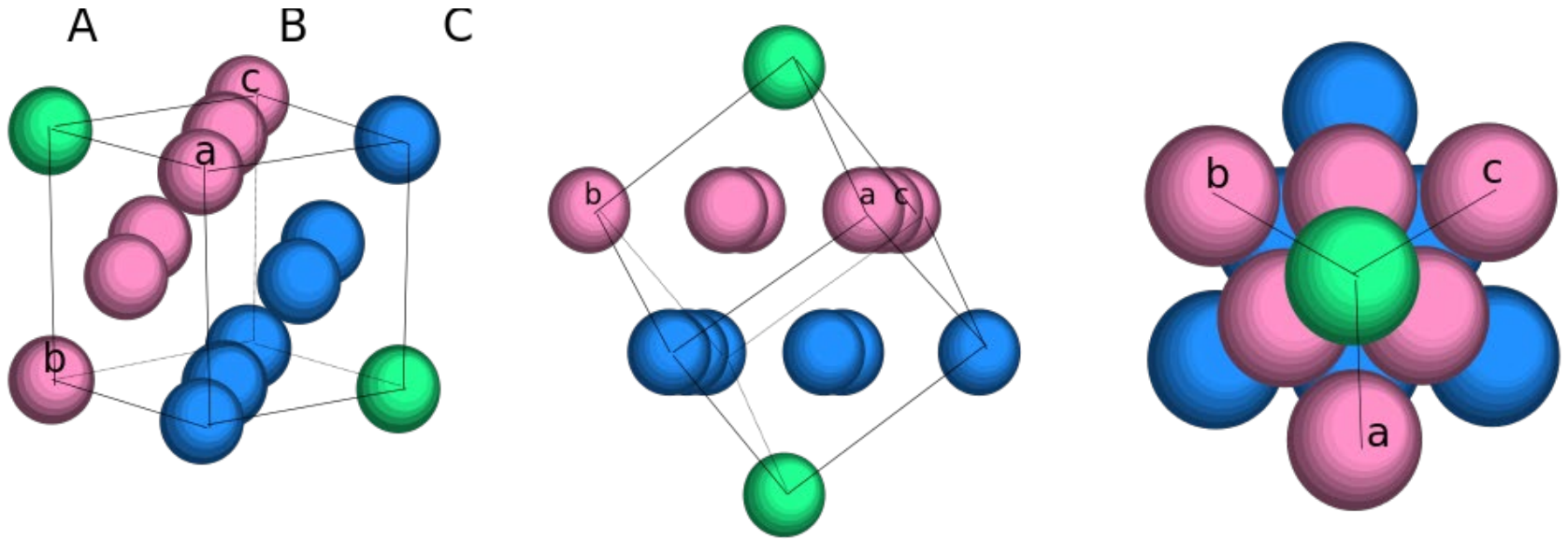


Structure cubique
à faces centrées:
cfc

FCC = face centered cubic



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

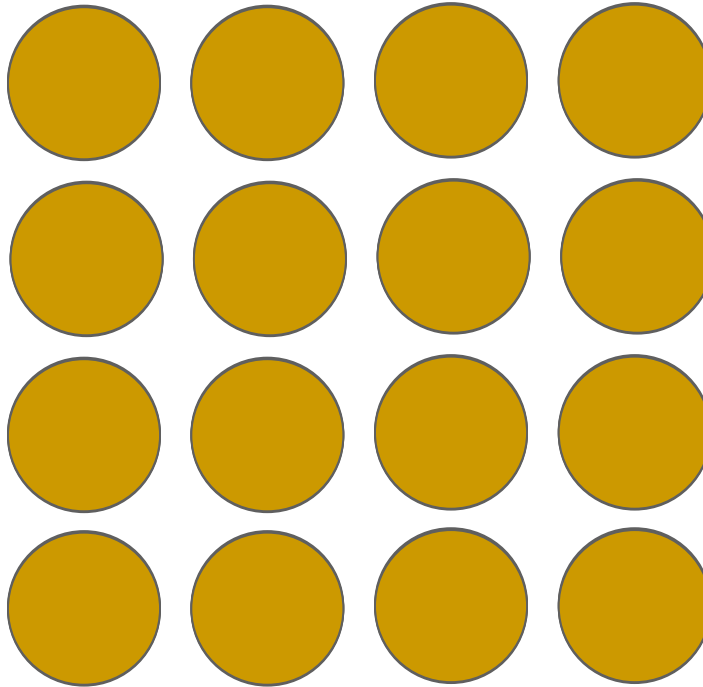
Soient 4 atomes dans la maille cubique

Empilement 3D non compact de plans non compacts

A

A

A



Structure
cubique
simple

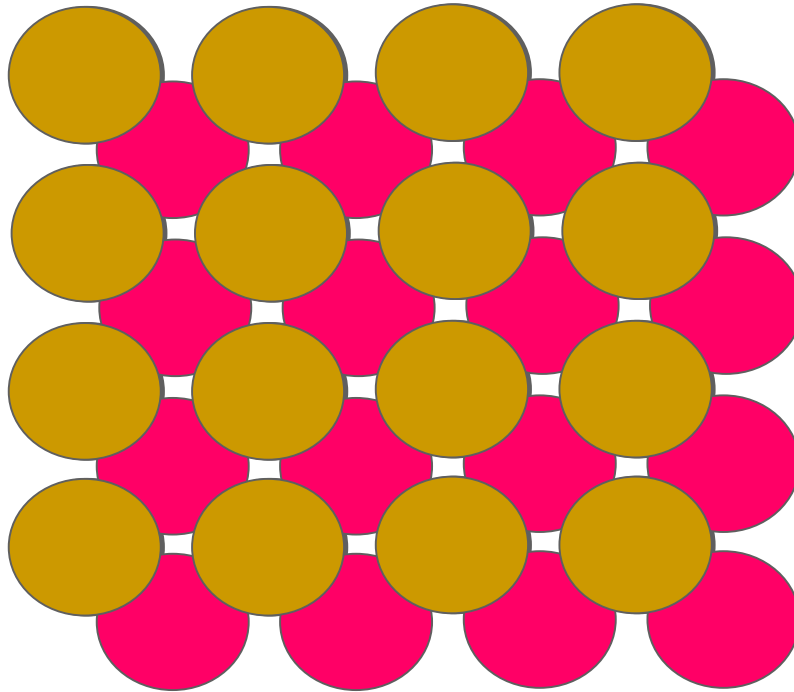
Ex: le Polonium ($Z = 84$ et $M = 210$ g)
très instable et
hautement
radioactif (Pierre et
Marie Curie, 1898)

Empilement 3D compact de plans non compacts

A

B

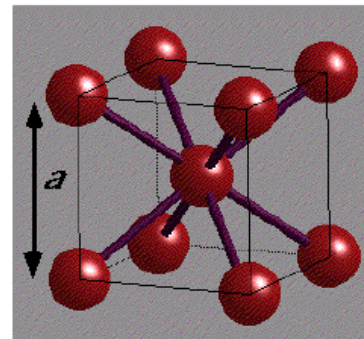
A



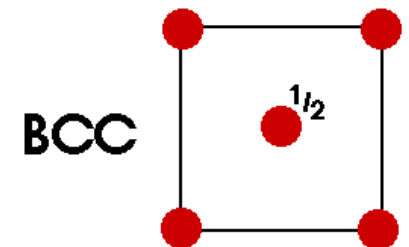
Structure cubique
centrée: bcc

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

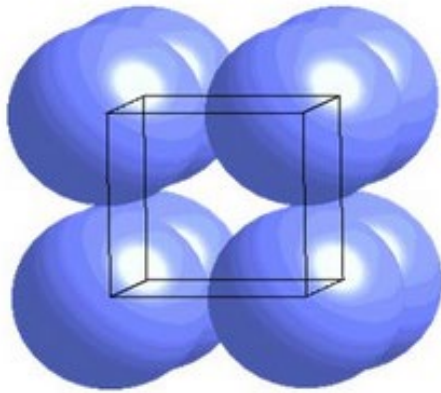


Body-Centred Cubic

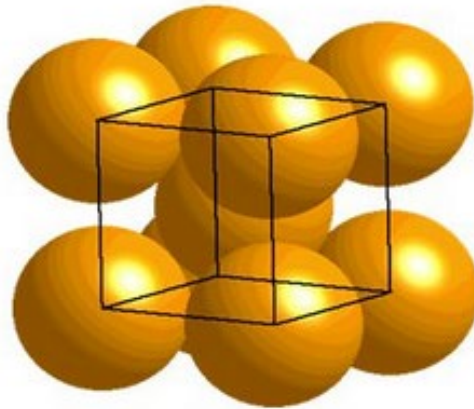


Compacité des systèmes cubiques (métaux purs)

Système cubique: réseau dont la maille élémentaire est un cube de côté a = paramètre de maille (e.g 4 Angstrœm 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

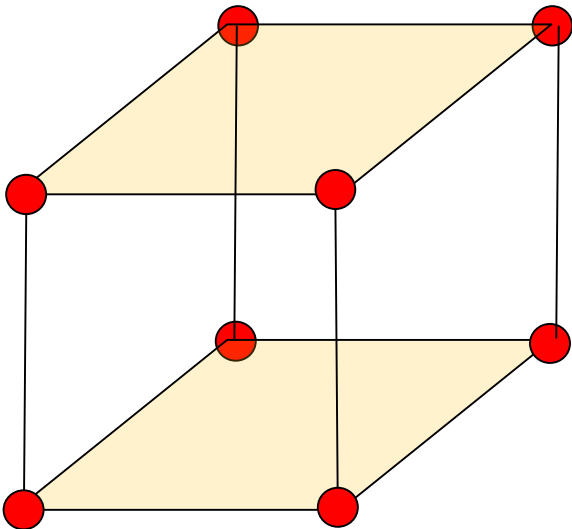
Compacité = degré de remplissage

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

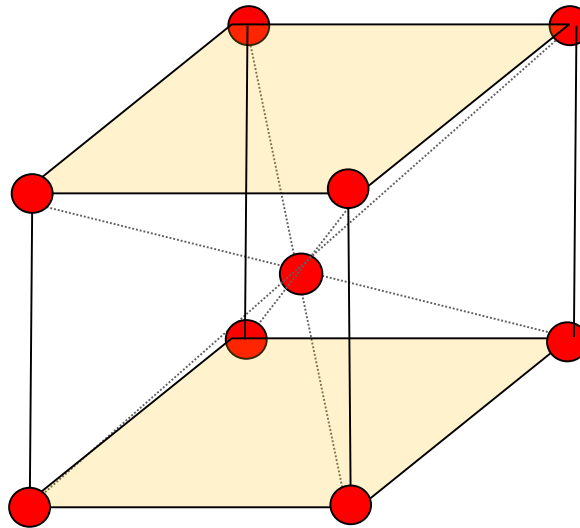
Systèmes cubiques: modèle éclaté.
Atomes de rayon R , a = coté du cube = paramètre de maille
et n = nombre d'atomes dans la maille.

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

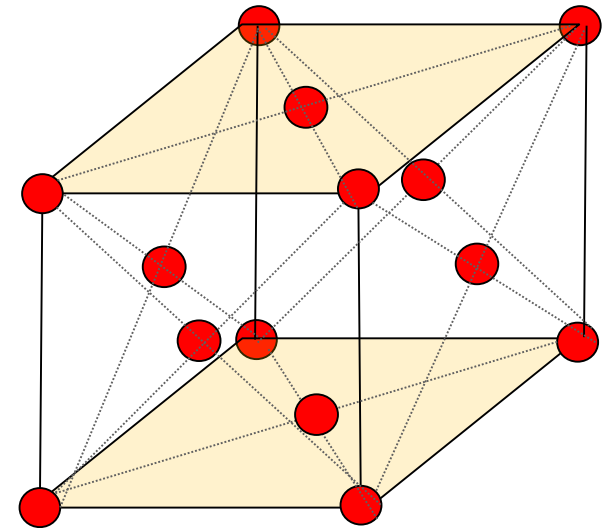
Cubique simple



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