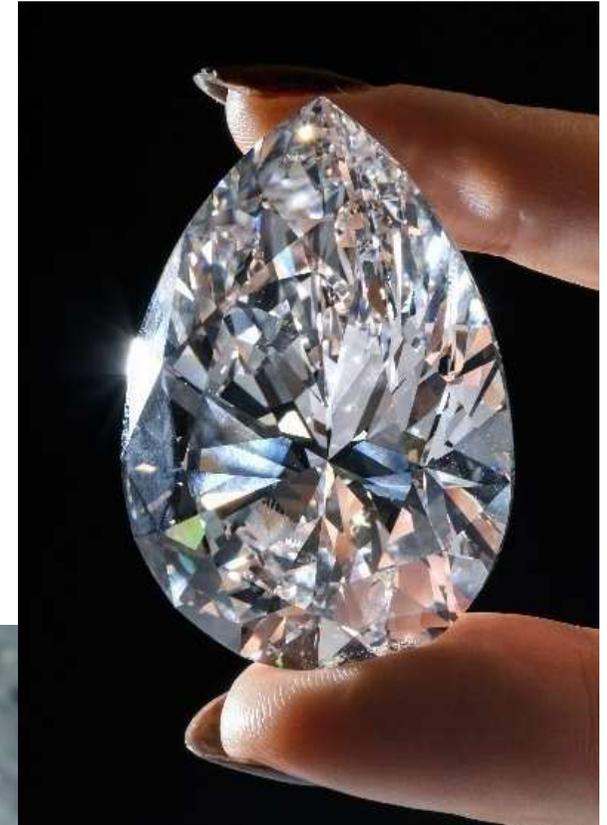


Chapitre C4

# Structure et propriétés physiques des solides

# Un élément, des matériaux



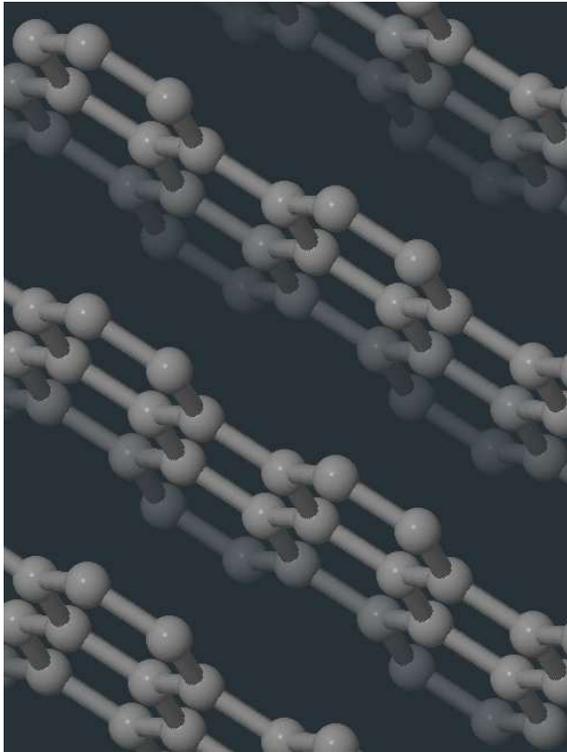
Différentes  
*variétés*  
*allotropiques*



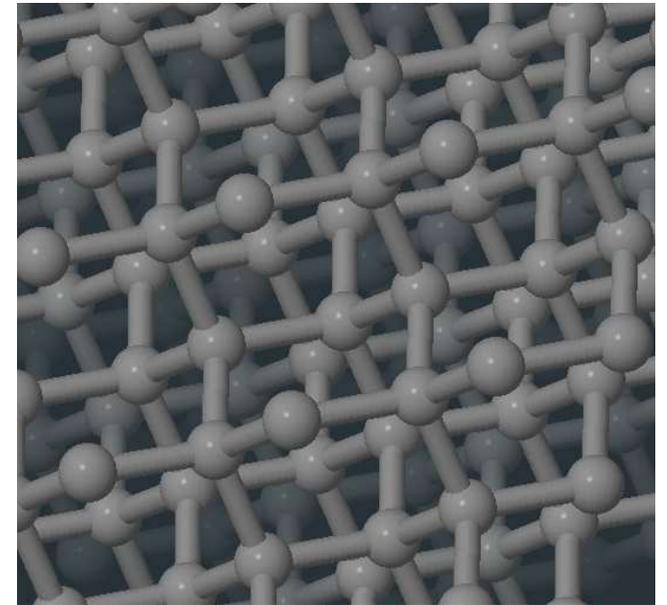
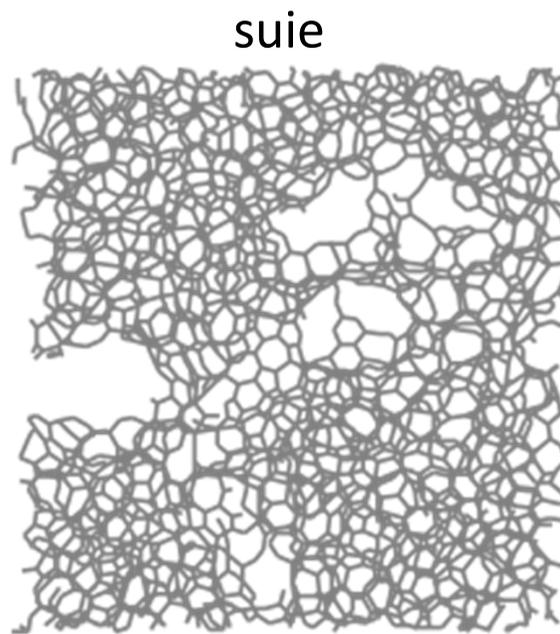
Il faut zoomer pour mieux comprendre!



# Structure à l'échelle atomique

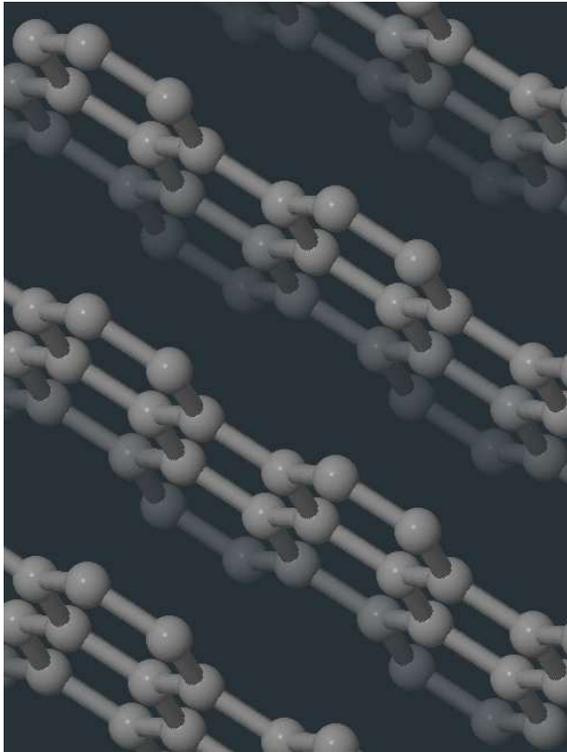


graphite



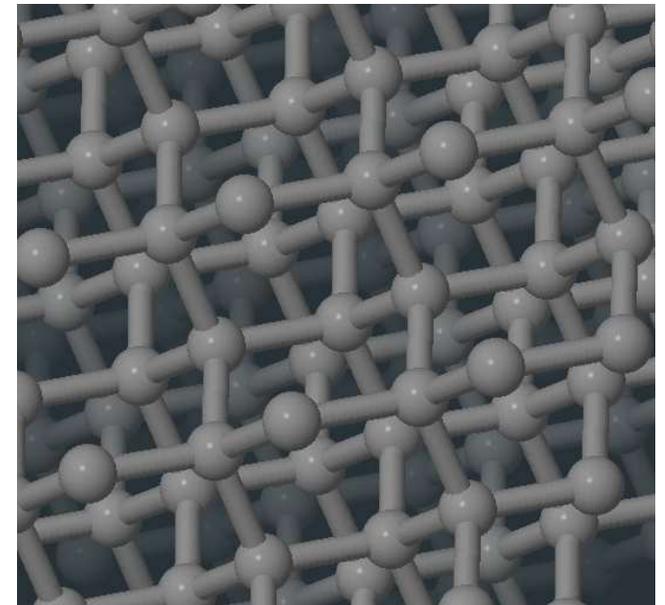
diamant

# Structure à l'échelle atomique



graphite

Les ***solides cristallins*** sont constitués d'une répétition quasi-parfaite de l'arrangement des atomes dans les 3 directions de l'espace.

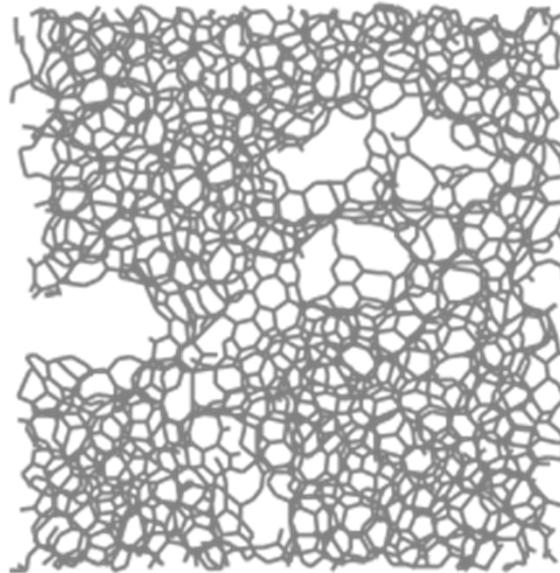


diamant

# Structure à l'échelle atomique

Les ***solides amorphes*** correspondant à un état liquide figé et pour lesquels l'***ordre à longue distance n'existe pas.***

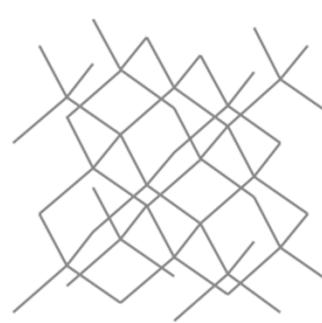
suie



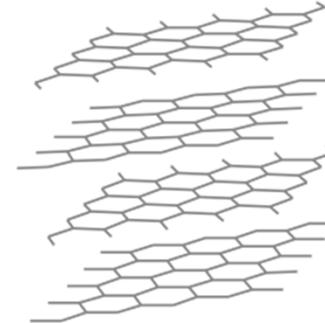
# Pour être exhaustif...

Huit formes allotropiques du carbone :

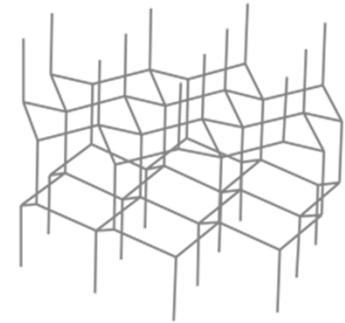
- a) diamant,
- b) graphite,
- c) lonsdaléite,
- d) C<sub>60</sub> (fullerène)
- e) C<sub>540</sub>
- f) C<sub>70</sub>
- g) carbone amorphe
- h) nanotube.



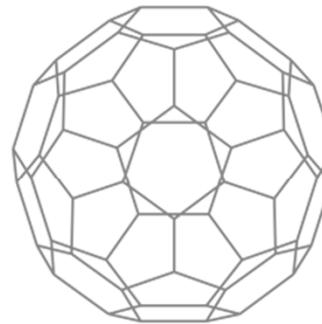
a



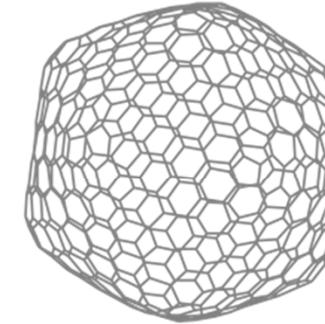
b



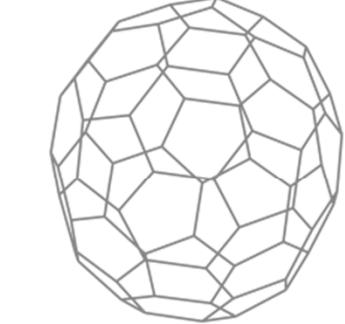
c



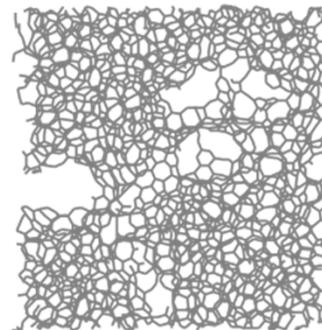
d



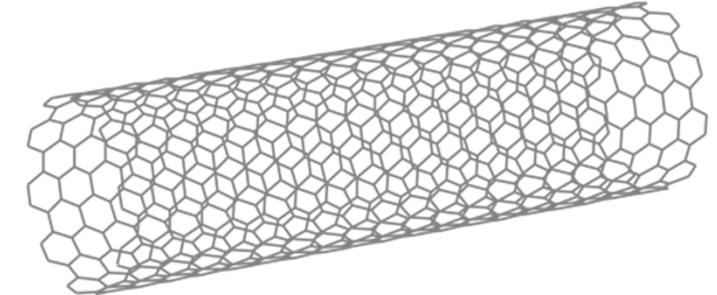
e



f

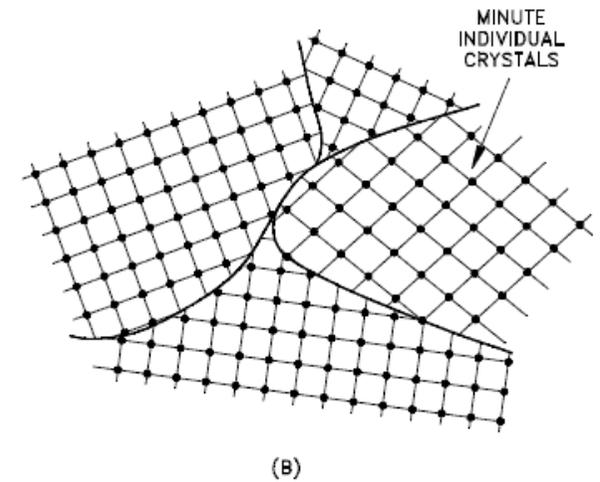
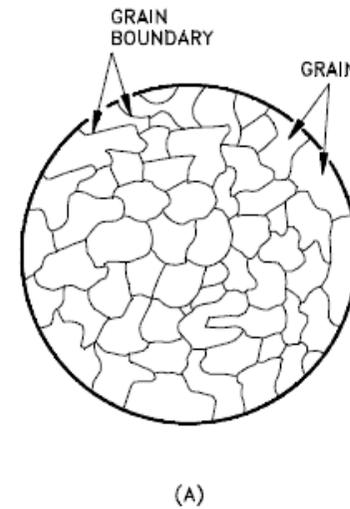
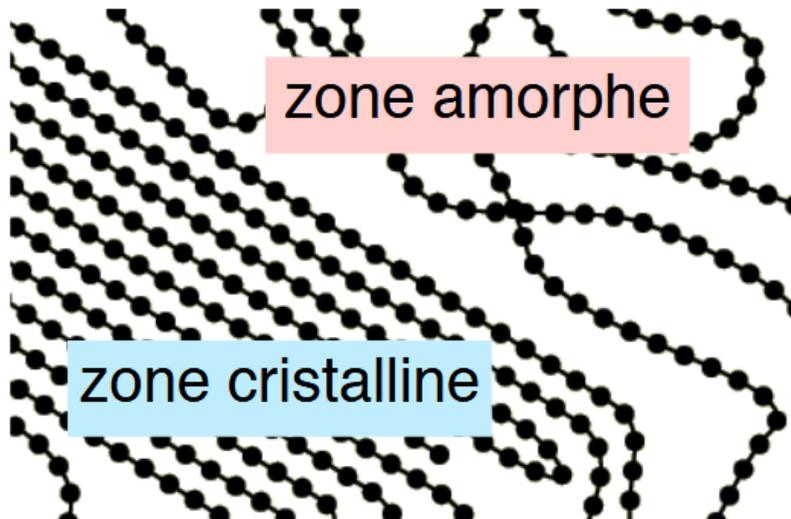


g



h

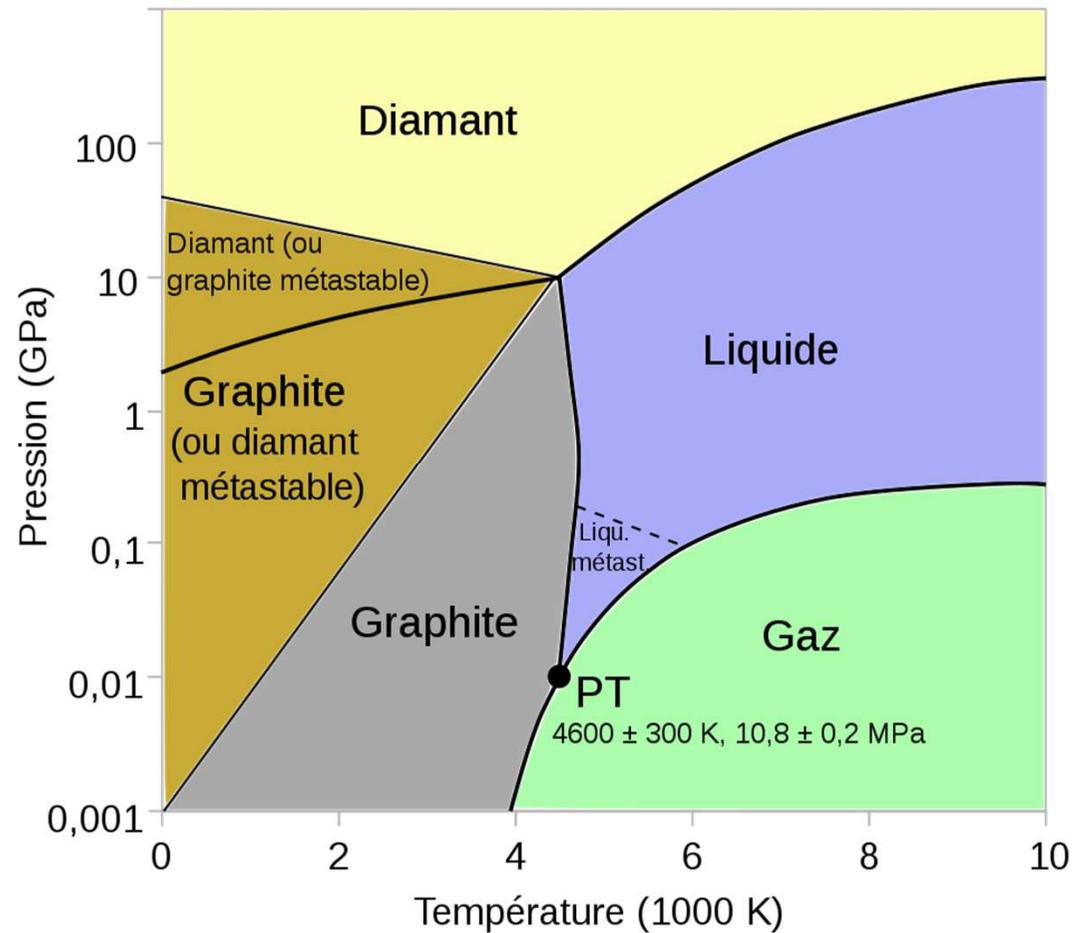
# Entre amorphe et cristallin....



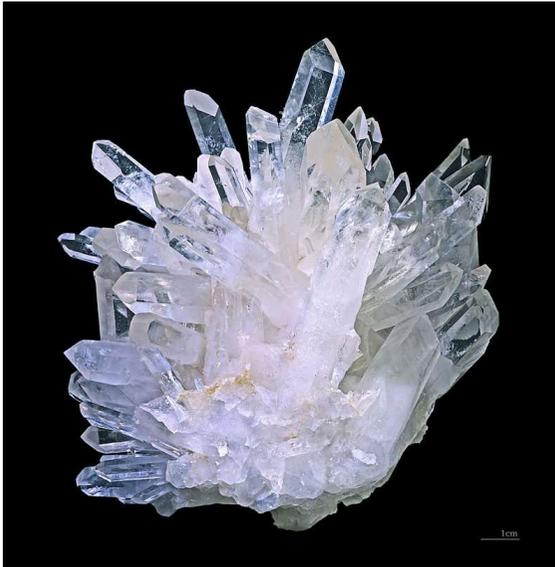
**Exemple de matériau polycristallin**

**exemple de polymère semi-cristallin**

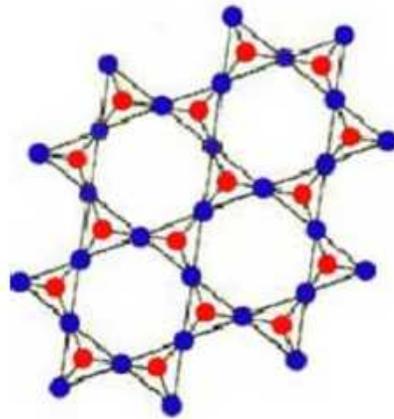
# Pourquoi une variété plutôt qu'une autre?



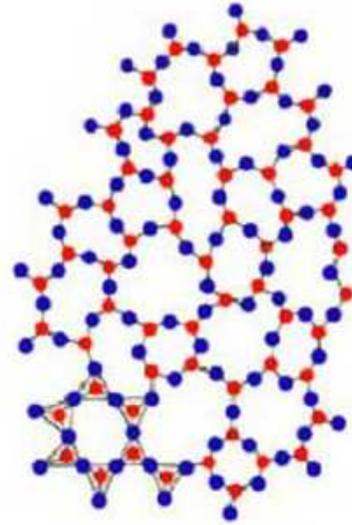
Pourquoi une variété plutôt qu'une autre?  
Un autre exemple.



SiO<sub>2</sub> cristallin  
(Quartz)

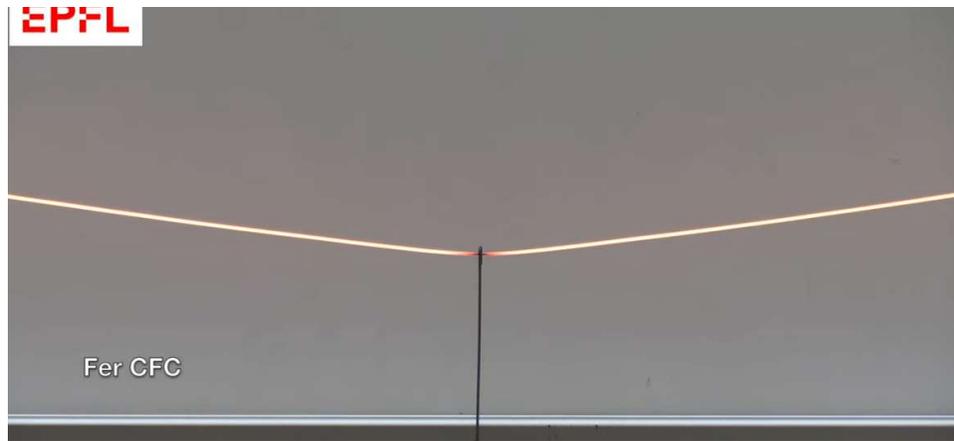


SiO<sub>2</sub> amorphe  
(Verre)



Pour un certain nombre de matériaux, l'obtention d'un état cristallisé ou amorphe dépend de la vitesse de refroidissement.

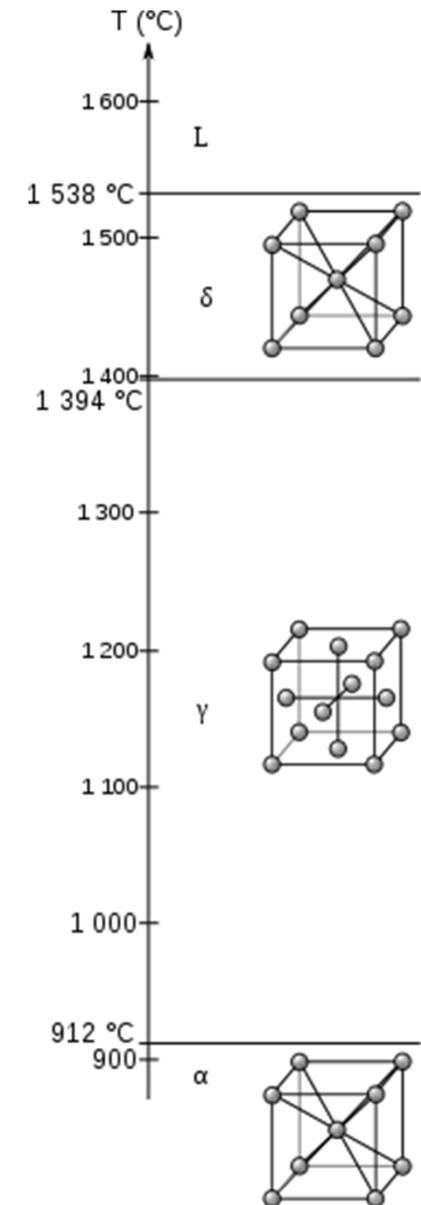
# Encore un autre exemple.



<https://www.youtube.com/watch?v=-pM5P3omg34>

## Variétés allotropiques du fer

Pour un certain nombre de matériaux, la nature du cristal dépend de la température.



# Cristallographie

Etude des solides cristallins

# Les débuts de la cristallographie

1794. Abbé René-Just Haüy, minéralogiste



Calcite (carbonate de calcium)

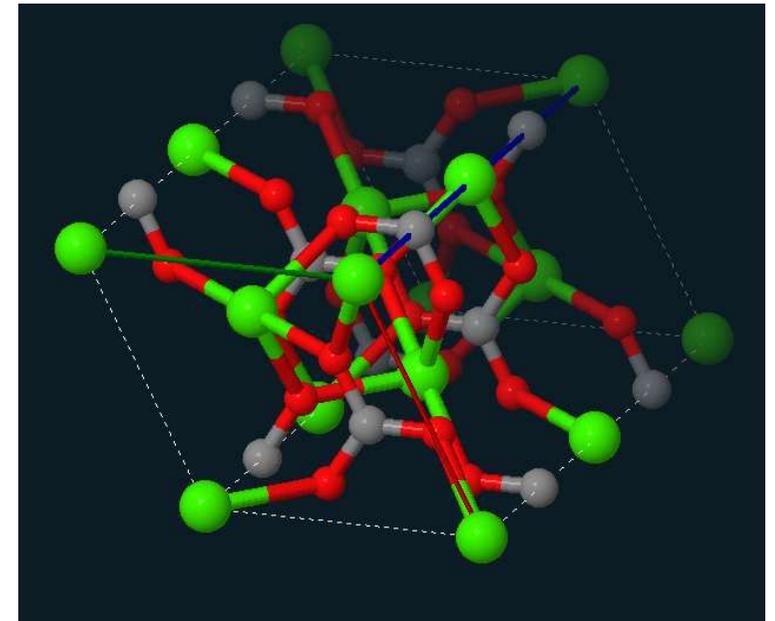


[https://fr.wikipedia.org/wiki/René\\_Just\\_Haüy](https://fr.wikipedia.org/wiki/René_Just_Haüy)

# Des propriétés macroscopiques qui découlent de la structure microscopiques



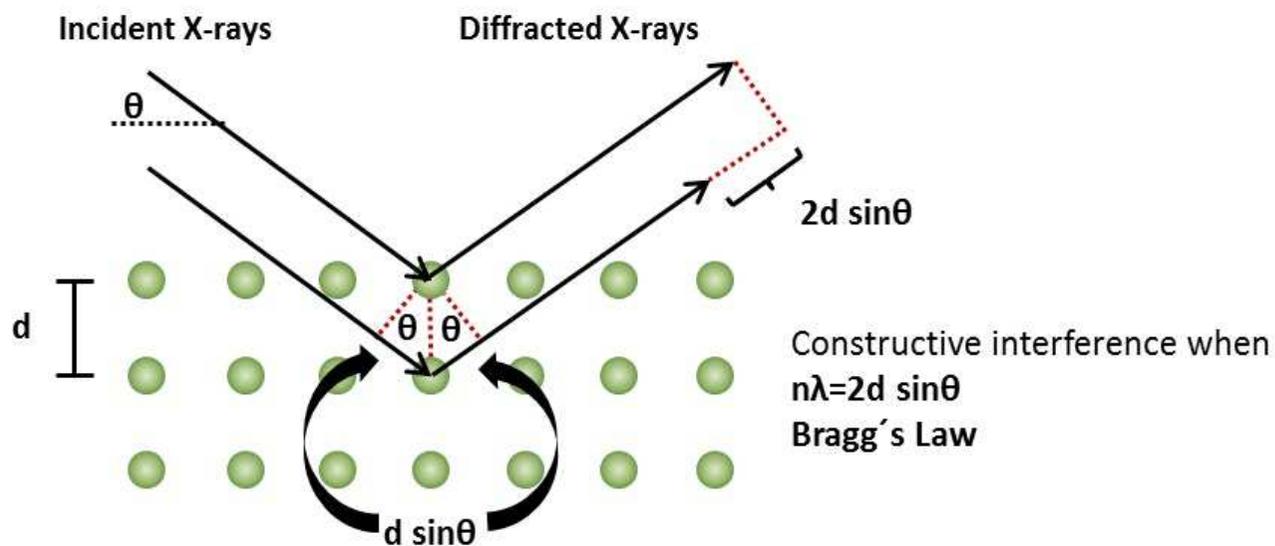
Calcite (carbonate de calcium)



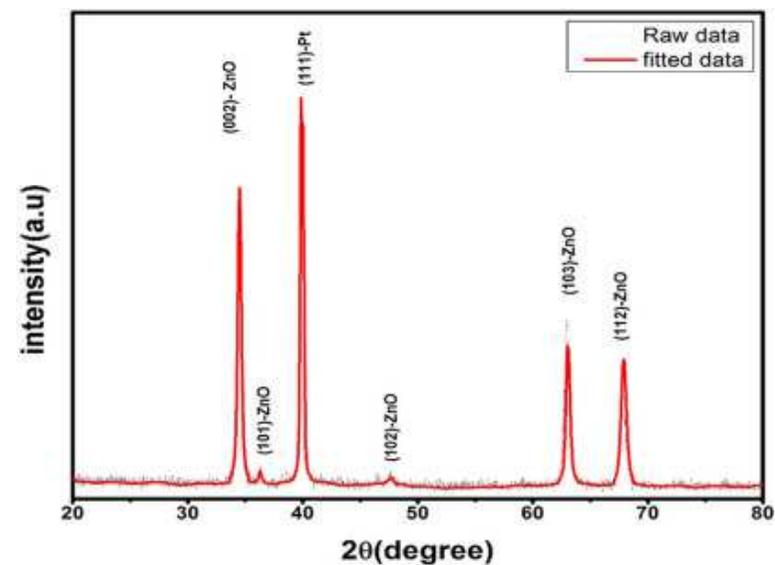
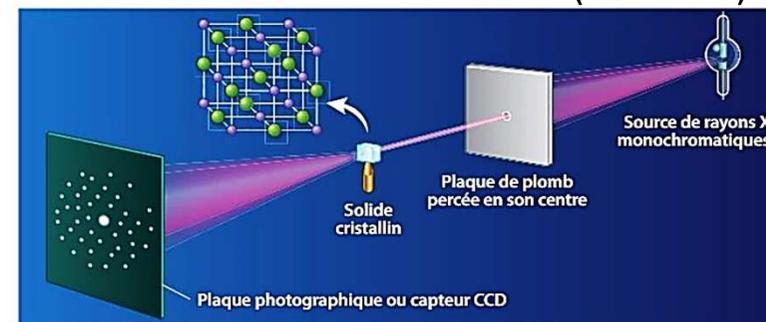
<https://libmol.org/minusc/>

# Comment obtenir cette structure microscopique?

Merci les interférences de rayons X !

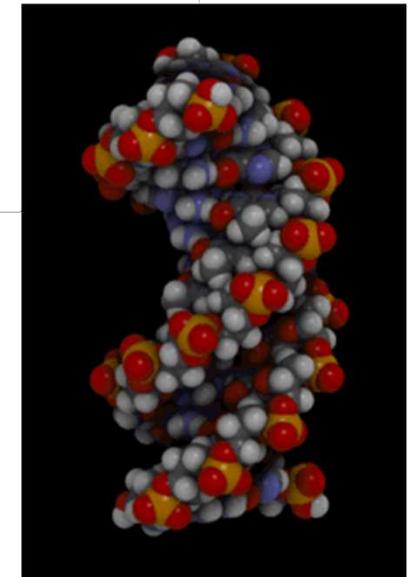
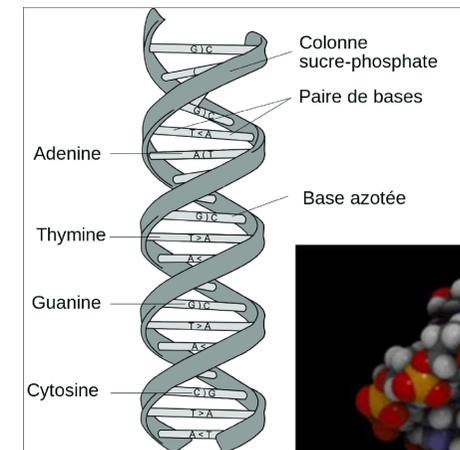
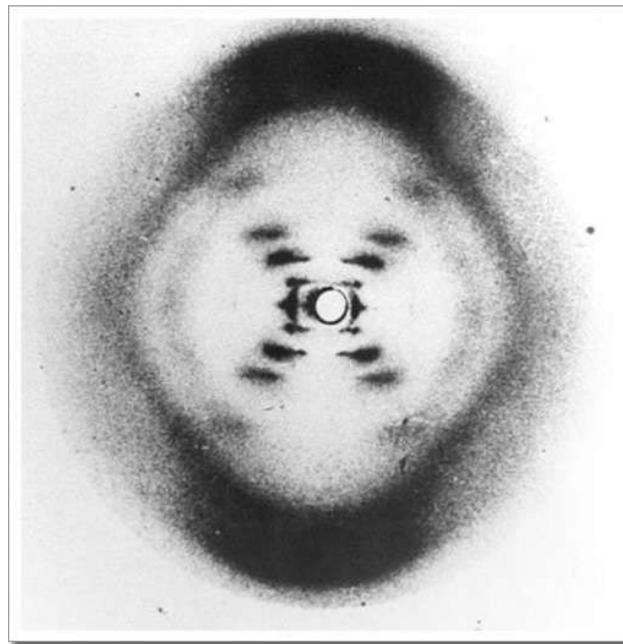


(Voir TP 8)



# Un exemple notable.

Rosalind Franklin



[https://fr.wikipedia.org/wiki/Rosalind\\_Franklin](https://fr.wikipedia.org/wiki/Rosalind_Franklin)

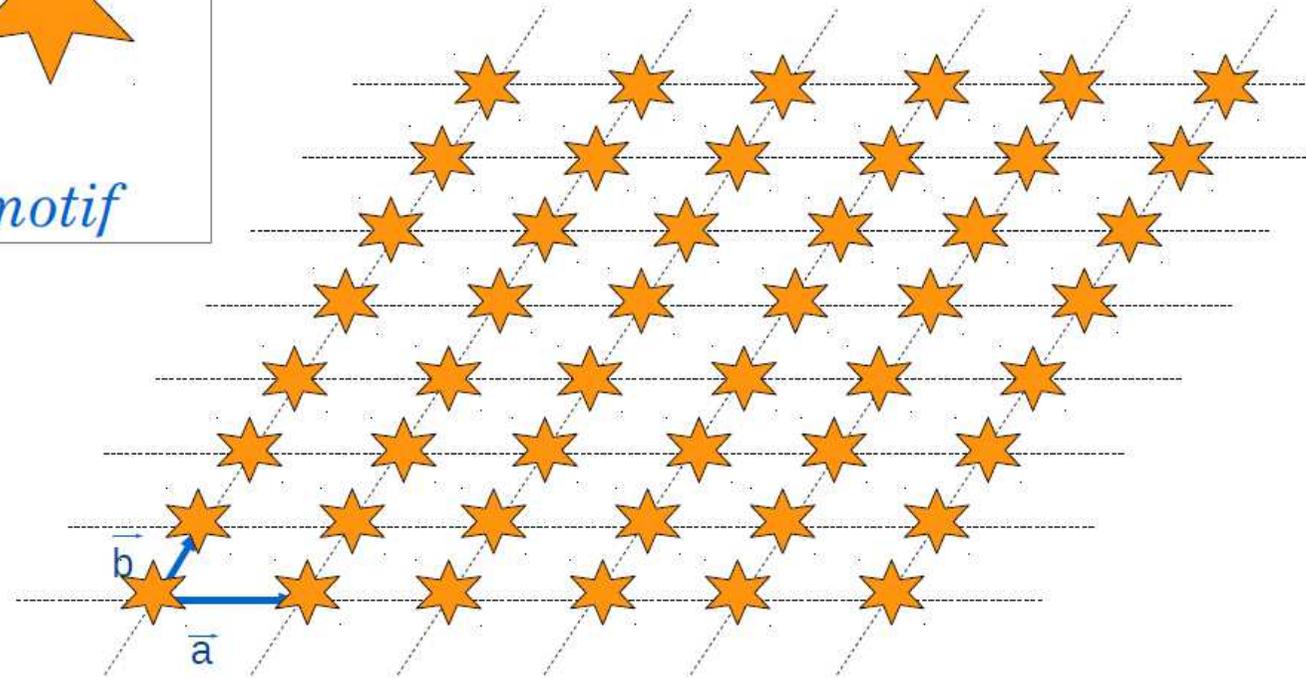
Prix Nobel de physiologie 1962 pour Crick et Watson....

# Modèle du cristal parfait

## Définition : Cristal parfait

La structure microscopique d'un **cristal parfait** est répétitive, ou **périodique** : il est formé par la **répétition**, dans les **trois dimensions** de l'espace, d'une cellule de base appelée la **maille**.

→ Pour décrire un cristal, il suffit de donner le motif qui se répète, et comment il se répète.

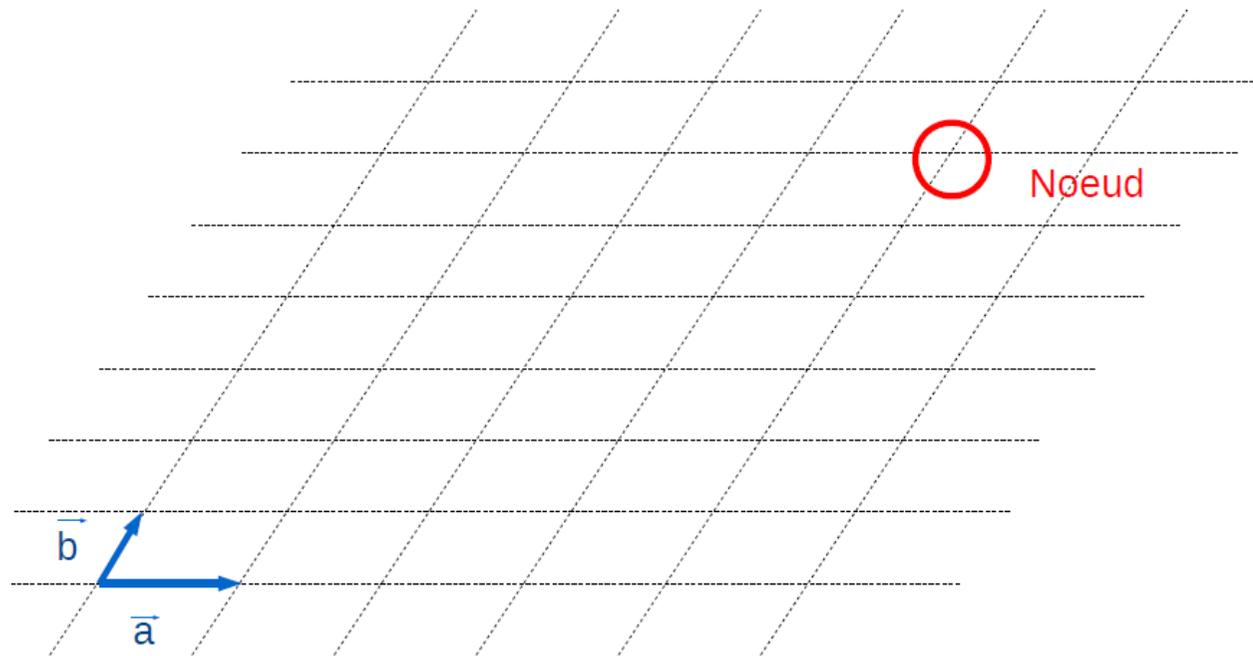


# Modèle du cristal parfait

## Définitions : Réseau

On peut simplifier la description de la structure cristalline en remplaçant les différents motifs par des points appelés *nœuds*.

On appelle *réseau cristallin* l'arrangement tridimensionnel des nœuds. C'est un outil mathématique permettant de décrire la périodicité d'une structure cristalline.



# Modèle du cristal parfait

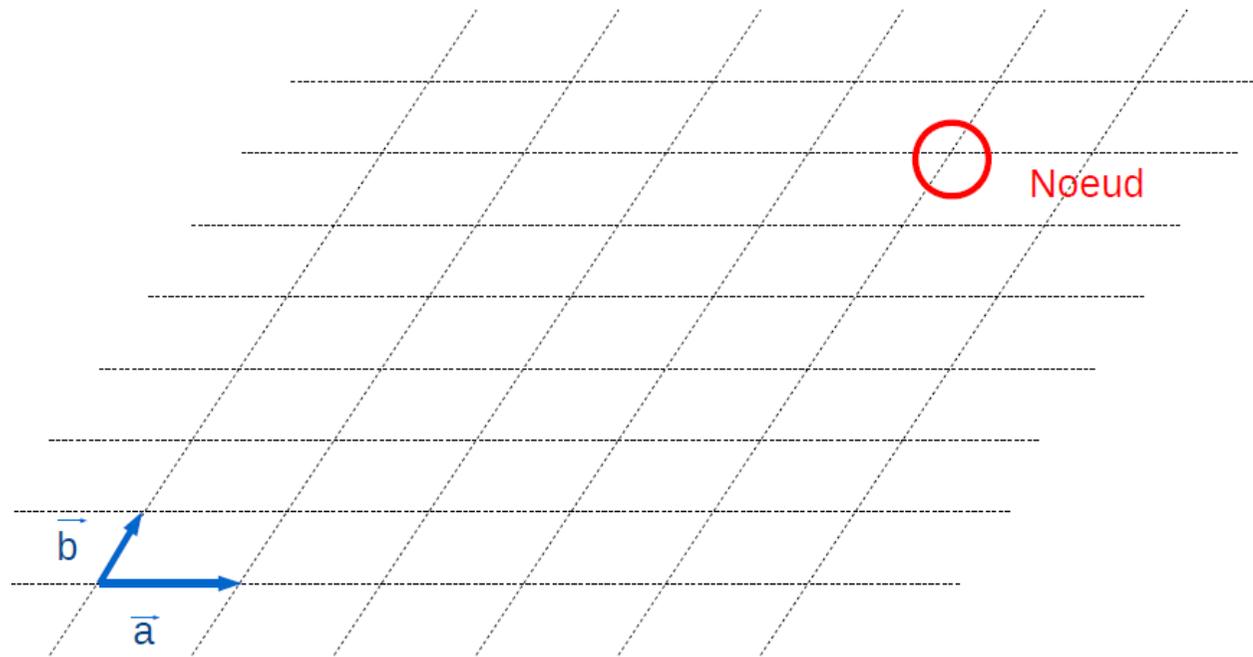
## Définitions : Réseau

On peut simplifier la description de la structure cristalline en remplaçant les différents motifs par des points appelés *nœuds*.

On appelle *réseau cristallin* l'arrangement tridimensionnel des nœuds. C'est un outil mathématique permettant de décrire la périodicité d'une structure cristalline.

## Définition : structure cristalline

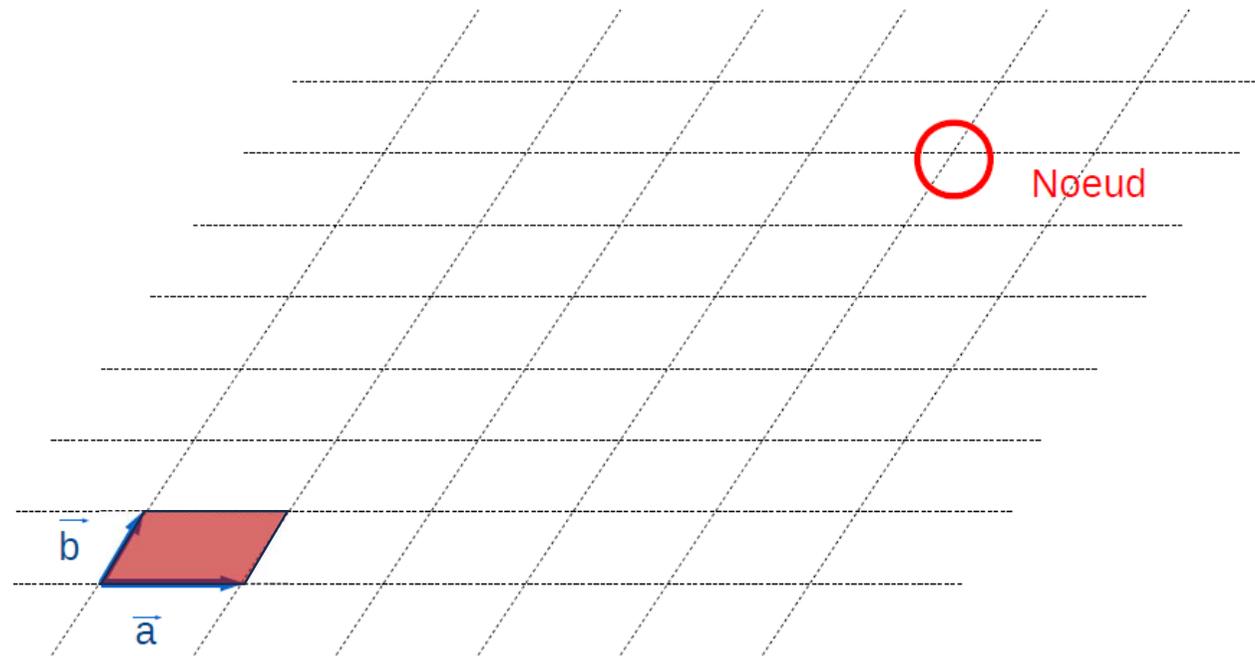
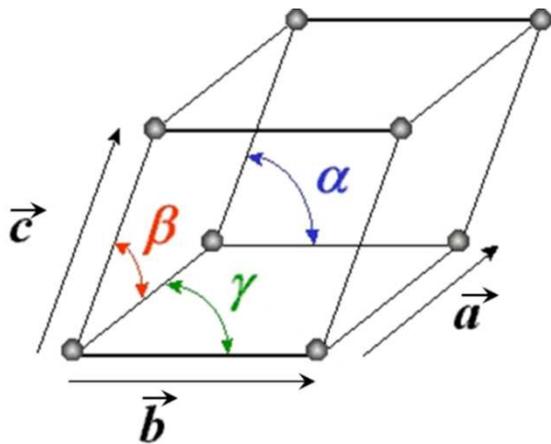
La *structure cristalline* est la donnée d'un *réseau cristallin* et d'un *motif*.



# Modèle du cristal parfait

## Définition : Maille élémentaire

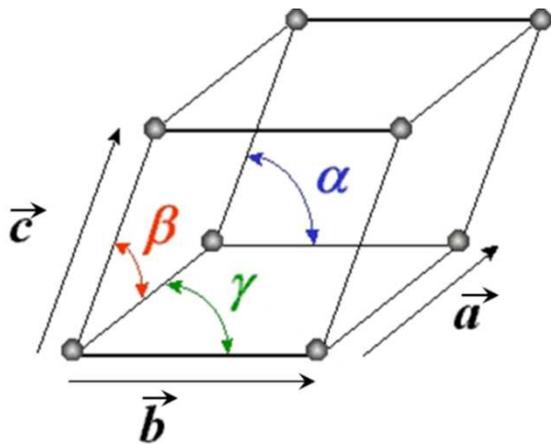
On appelle *maille élémentaire* la structure géométrique la plus simple qui, par translation dans les directions de l'espace, permet de *générer le réseau dans son ensemble*.



# Modèle du cristal parfait

## Définition : Maille élémentaire

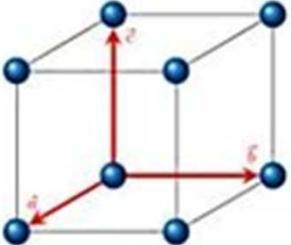
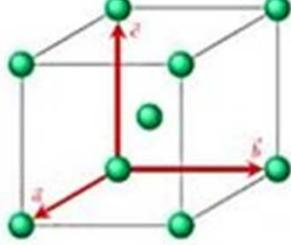
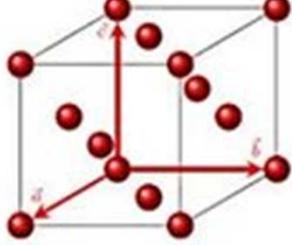
On appelle *maille élémentaire* la structure géométrique la plus simple qui, par translation dans les directions de l'espace, permet de **générer le réseau dans son ensemble**.



## Réseaux de Bravais

Type de réseau	Primitif (P)	Centré (I)	Bases centrées (C)	Faces centrées (F)
Cubique $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma$				
Rhomboédrique $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$				
Hexagonal $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$				
Quadratique $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
Orthorhombique $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
Monoclinique $a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ$ $\beta \neq 90^\circ$				
Triclinique $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$				

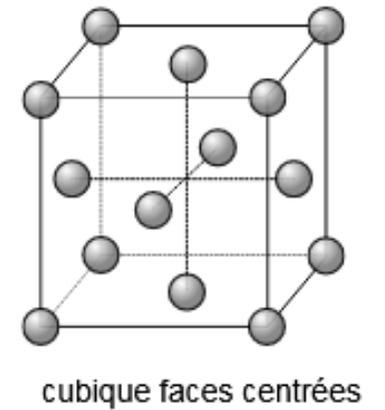
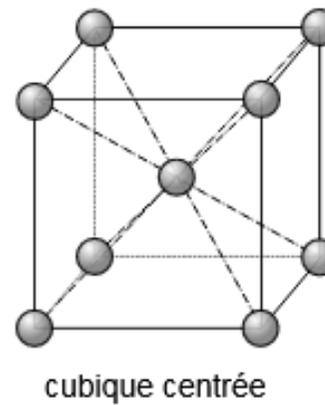
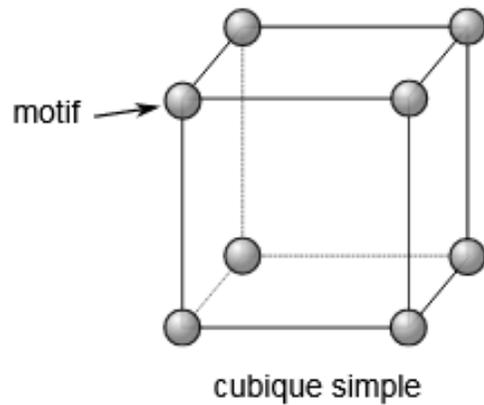
# Modèle du cristal parfait

Type de réseau	Primitif (P)	Centré (I)	Bases centrées (C)	Faces centrées (F)
Cubique $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma$				

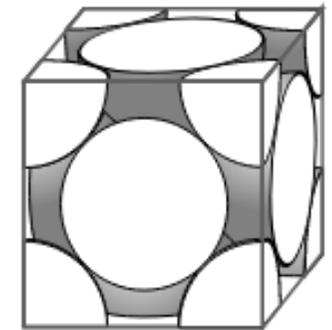
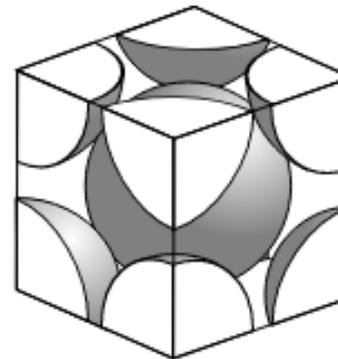
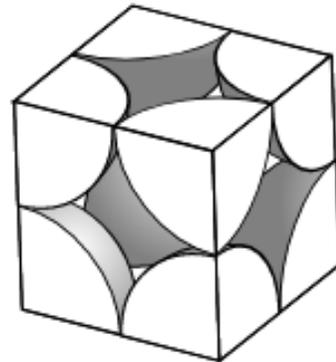
A connaître par cœur !

# Modèle du cristal parfait

représentation éclatée :

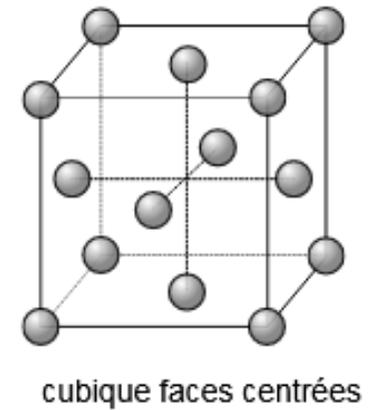
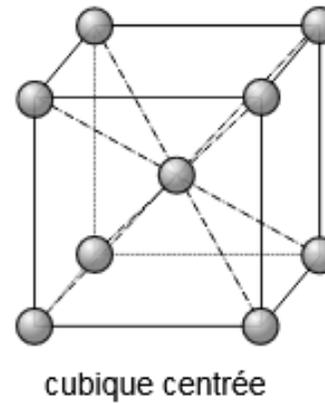
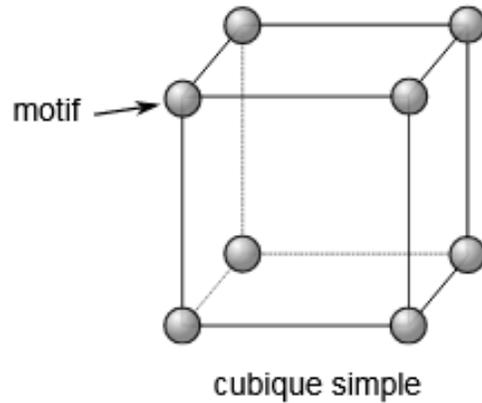


représentation compacte :



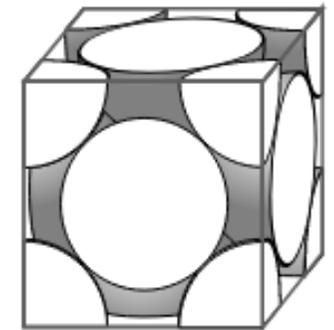
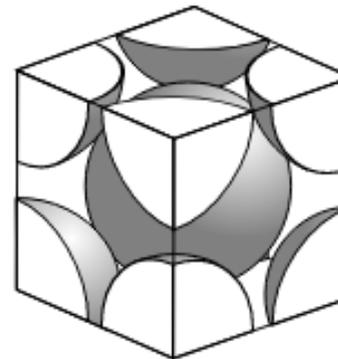
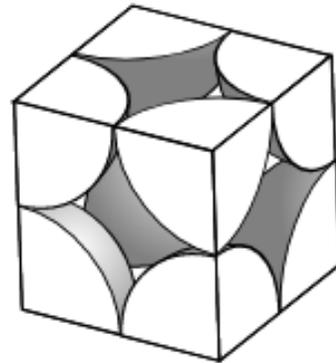
# Modèle du cristal parfait

représentation éclatée :



## Modèle : Modèle des sphères dures

Dans ce modèle, nous supposons que les motifs sont des **sphères rigides**, de **rayons identiques**, ne pouvant s'interpénétrer.



Marche bien pour les cristaux métalliques

## ***Savoir-faire 1 – Établir les caractéristiques de la maille cubique face centrée***

L'argent pur cristallise dans une structure de type cubique face centrée (CFC).

Données : Rayon métallique de l'argent  $r_{Ag} = 144$  pm, masse molaire  $M(Ag) = 107$  g.mol<sup>-1</sup>, constante d'Avogadro  $\mathcal{N}_a = 6,022.10^{23}$  mol<sup>-1</sup>.

1. Représenter la maille d'un cristal d'argent.

# Caractéristiques de la maille élémentaire

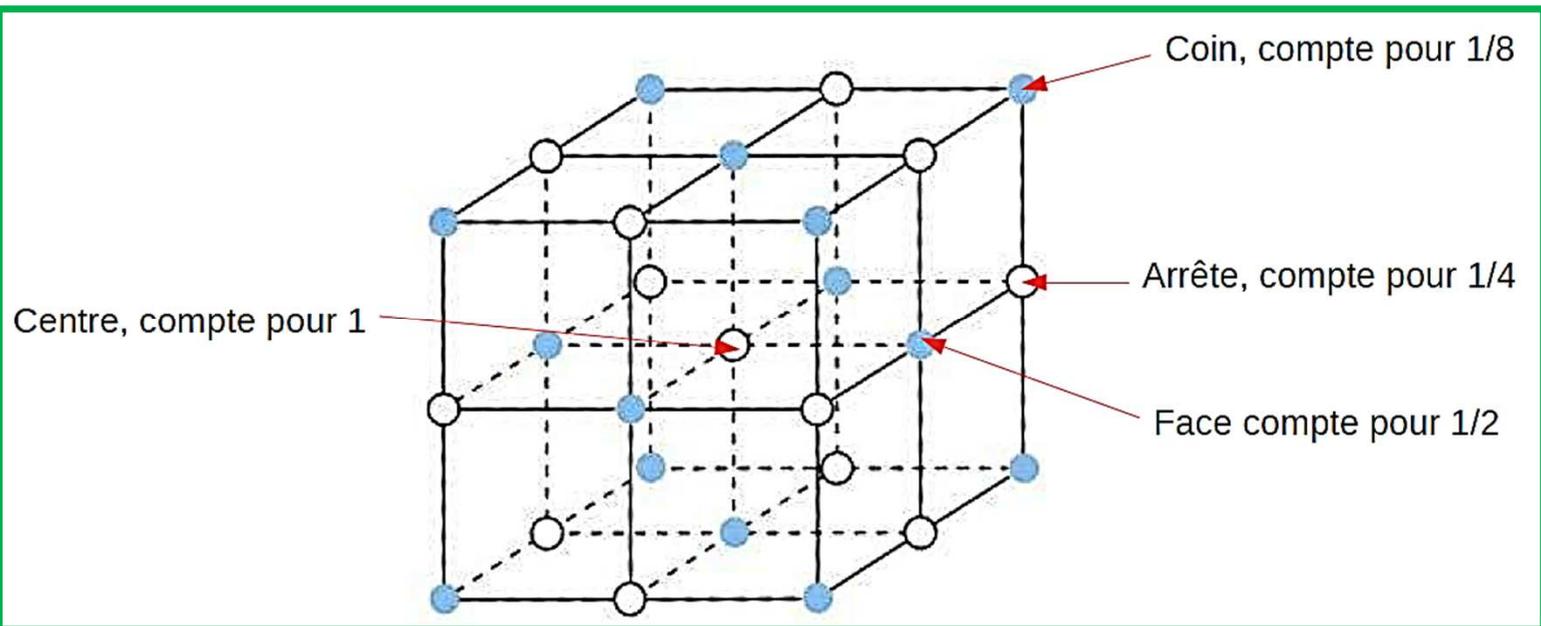
## **Définition : Population (ou multiplicité) de la maille**

La **population** de la maille est le nombre de motifs (en pratique le motif se limitera souvent à un seul atome ou ion) par maille. On la note en général  $N$ .

# Caractéristiques de la maille élémentaire

## Définition : Population (ou multiplicité) de la maille

La *population* de la maille est le nombre de motifs (en pratique le motif se limitera souvent à un seul atome ou ion) par maille. On la note en général  $N$ .



## ***Savoir-faire 1 – Établir les caractéristiques de la maille cubique face centrée***

L'argent pur cristallise dans une structure de type cubique face centrée (CFC).

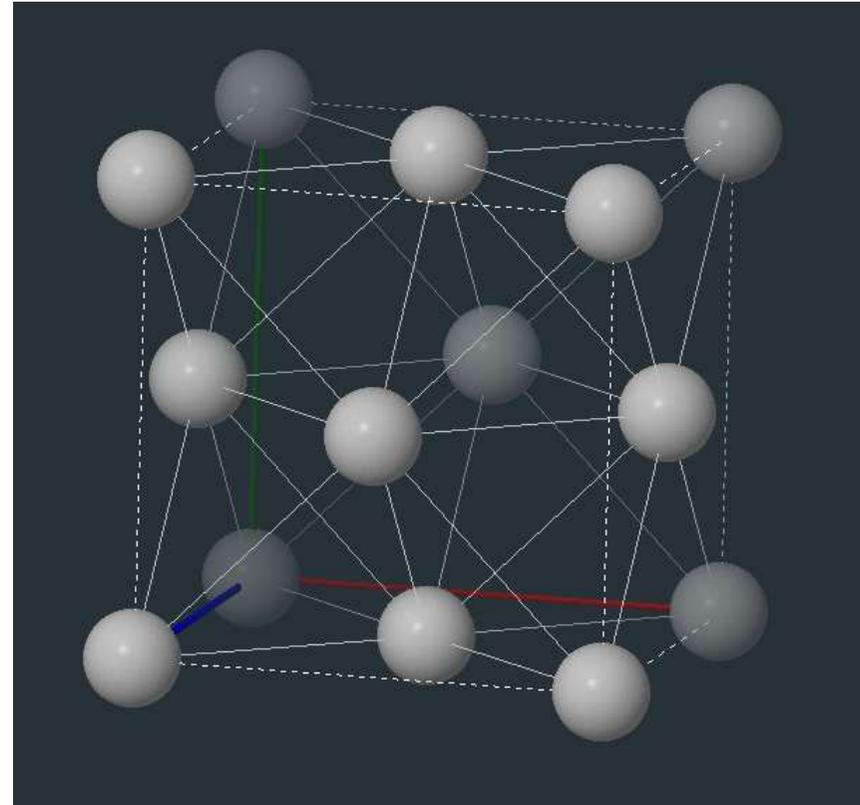
Données : Rayon métallique de l'argent  $r_{Ag} = 144$  pm, masse molaire  $M(Ag) = 107$  g.mol<sup>-1</sup>, constante d'Avogadro  $\mathcal{N}_a = 6,022.10^{23}$  mol<sup>-1</sup>.

1. Représenter la maille d'un cristal d'argent.
2. Déterminer la population de cette maille.

# Caractéristiques de la maille élémentaire

## **Définition : Coordinence**

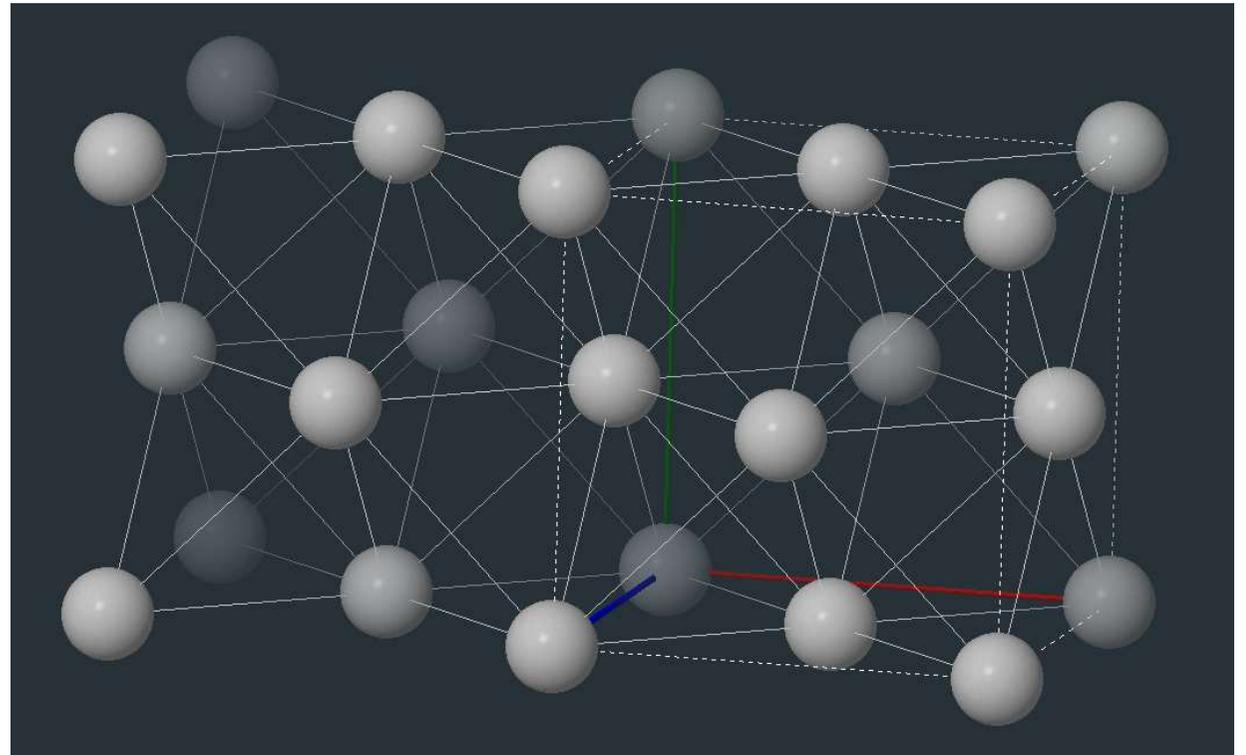
La ***coordinence*** d'un atome est le nombre de ses ***plus proches voisins***.



# Caractéristiques de la maille élémentaire

## Définition : Coordinence

La ***coordinence*** d'un atome est le nombre de ses ***plus proches voisins***.



## ***Savoir-faire 1 – Établir les caractéristiques de la maille cubique face centrée***

L'argent pur cristallise dans une structure de type cubique face centrée (CFC).

Données : Rayon métallique de l'argent  $r_{Ag} = 144$  pm, masse molaire  $M(Ag) = 107$  g.mol<sup>-1</sup>, constante d'Avogadro  $\mathcal{N}_a = 6,022.10^{23}$  mol<sup>-1</sup>.

1. Représenter la maille d'un cristal d'argent.
2. Déterminer la population de cette maille.
3. Déterminer la coordinence de l'argent dans cette maille.

# Caractéristiques de la maille élémentaire

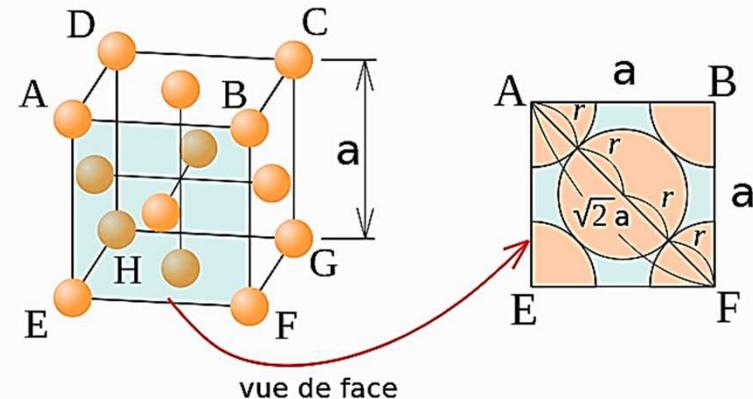
## Définition : Compacité

La **compacité**  $\mathcal{C}$  est le rapport du volume des **motifs en propre** dans une maille sur le volume  $V_{maille}$  de la maille. C'est un nombre sans dimension, compris entre 0 et 1, exprimant le **taux d'occupation des motifs dans la maille**.

$$\mathcal{C} = \frac{N_{motif} \cdot V_{motif}}{V_{maille}}$$

On considère que deux sphères voisines sont au contact l'une avec l'autre.

- Étape 1 : identifier la ligne de contact dans la maille (arrête, diagonale d'une face, diagonale du cube).
- Étape 2 : Faire apparaître cette ligne de contact sur un schéma (modèle compact).
- Étape 3 : Traduire ceci en une relation entre le paramètre de maille  $a$  et le rayon  $r$  des atomes. Isoler  $r$ .



## ***Savoir-faire 1 – Établir les caractéristiques de la maille cubique face centrée***

L'argent pur cristallise dans une structure de type cubique face centrée (CFC).

Données : Rayon métallique de l'argent  $r_{Ag} = 144 \text{ pm}$ , masse molaire  $M(Ag) = 107 \text{ g.mol}^{-1}$ , constante d'Avogadro  $\mathcal{N}_a = 6,022.10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .

1. Représenter la maille d'un cristal d'argent.
2. Déterminer la population de cette maille.
3. Déterminer la coordinence de l'argent dans cette maille.
4. Déterminer le paramètre de maille  $a$ .
5. Déterminer la compacité de cette structure. Dépend-elle de la nature de l'élément considéré ?

# Caractéristiques de la maille élémentaire

## **Définition : Masse volumique**

La **masse volumique**  $\rho$  d'une maille, donc du solide, est le rapport de la masse des atomes contenu dans la maille, divisé par le volume de la maille :

$$\rho = \frac{N_{\text{motif}} \cdot m_{\text{motif}}}{V_{\text{maille}}} = \frac{N_{\text{motif}} \cdot M_{\text{élément}}}{\mathcal{N}_A \cdot V_{\text{maille}}}$$

où  $M_{\text{élément}}$  est la masse molaire de l'élément constituant le motif,  $\mathcal{N}_A$  la constante d'Avogadro.

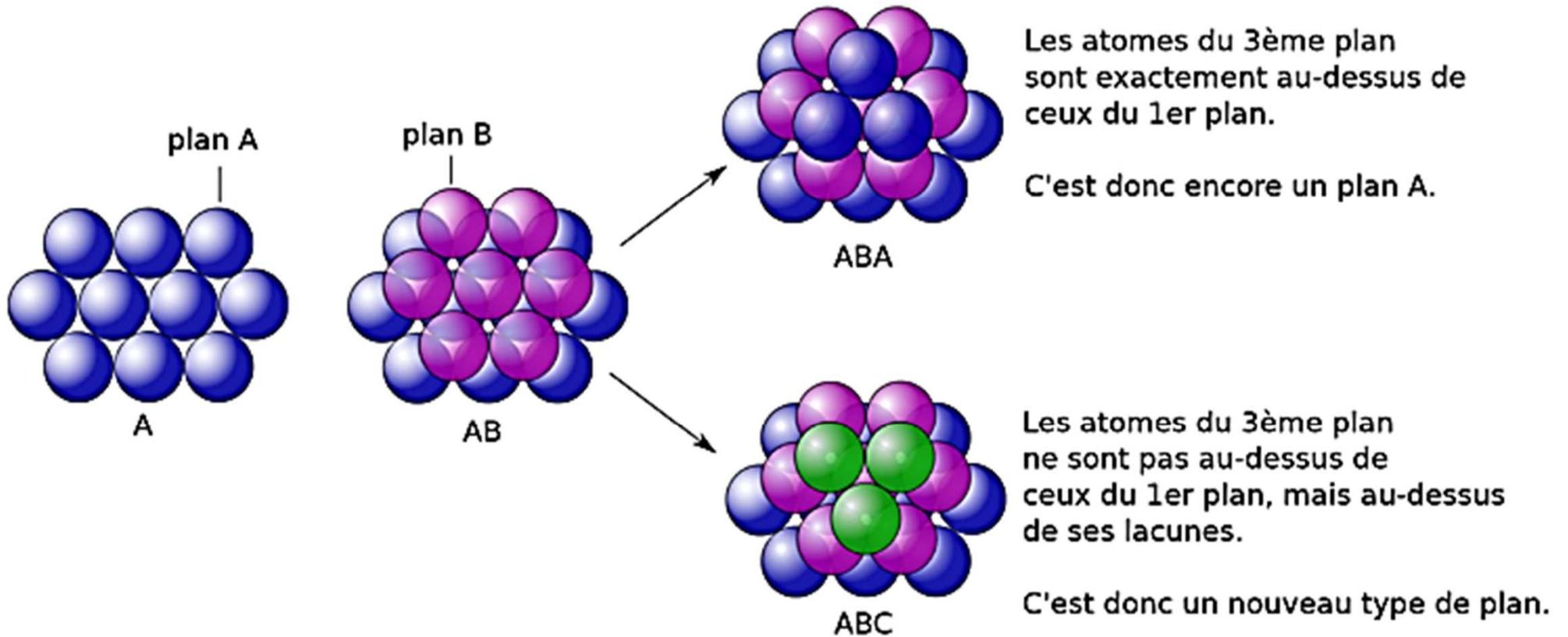
## ***Savoir-faire 1 – Établir les caractéristiques de la maille cubique face centrée***

L'argent pur cristallise dans une structure de type cubique face centrée (CFC).

Données : Rayon métallique de l'argent  $r_{Ag} = 144 \text{ pm}$ ,  
masse molaire  $M(Ag) = 107 \text{ g.mol}^{-1}$ , constante d'Avogadro  $N_a = 6,022.10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .

1. Représenter la maille d'un cristal d'argent.
2. Déterminer la population de cette maille.
3. Déterminer la coordinence de l'argent dans cette maille.
4. Déterminer le paramètre de maille  $a$ .
5. Déterminer la compacité de cette structure. Dépend-elle de la nature de l'élément considéré ?
6. Déterminer la valeur de la masse volumique de l'argent.

# Le point de vue des empilements



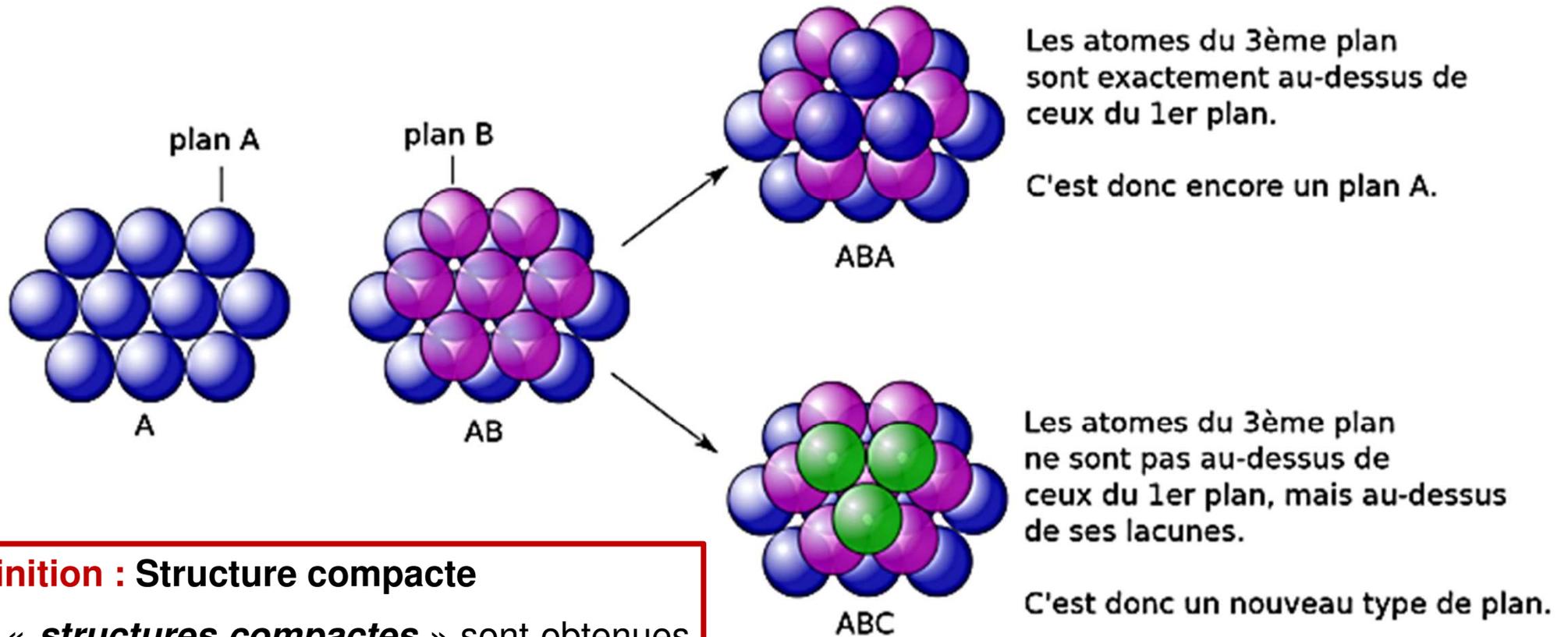
Les atomes du 3ème plan sont exactement au-dessus de ceux du 1er plan.

C'est donc encore un plan A.

Les atomes du 3ème plan ne sont pas au-dessus de ceux du 1er plan, mais au-dessus de ses lacunes.

C'est donc un nouveau type de plan.

# Le point de vue des empilements



## Définition : Structure compacte

Les « **structures compactes** » sont obtenues par superposition de couches de sphères placées de manière la plus compacte possible.

# Le point de vue des empilements



## **Définition : Structure compacte**

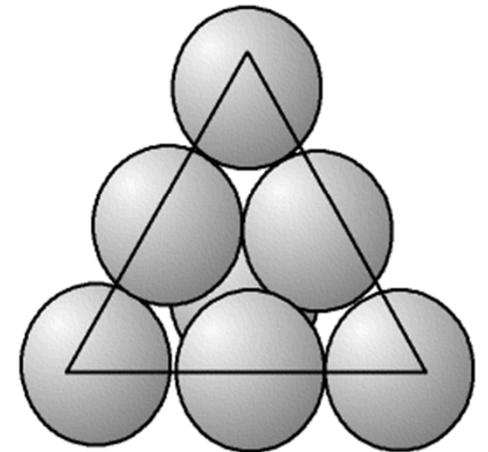
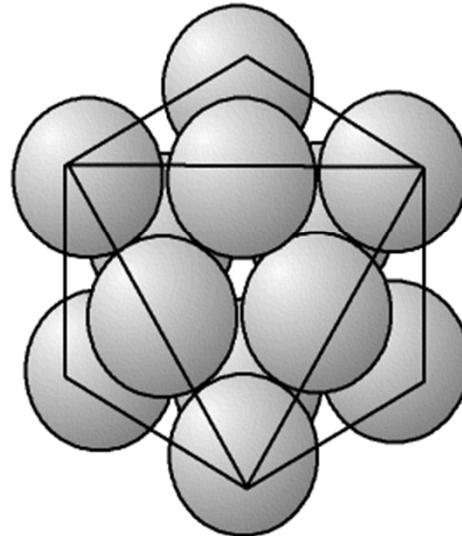
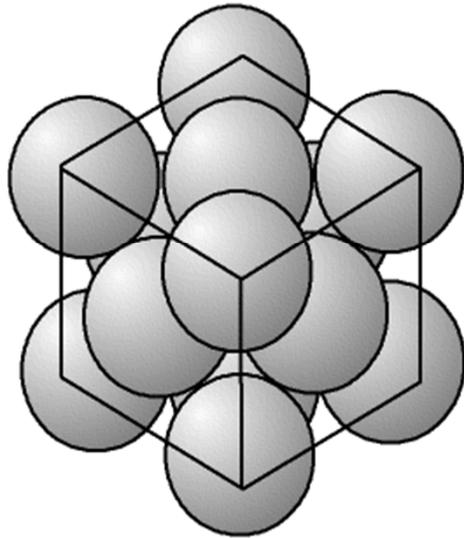
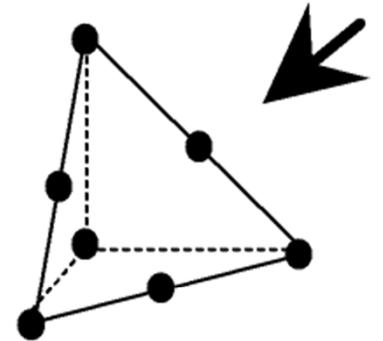
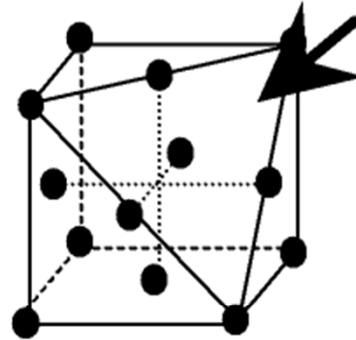
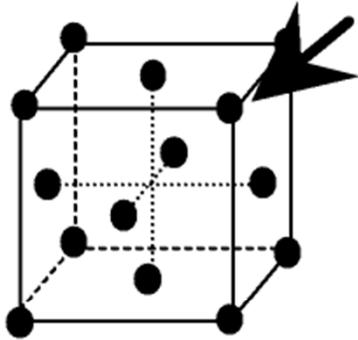
Les « **structures compactes** » sont obtenues par superposition de couches de sphères placées de manière la plus compacte possible.



*Kepler a proposé l'empilement hexagonal compact comme empilement le plus compact (le plus d'orange par unité de volume).*

*Sa conjecture ne fut formellement démontrée qu'en 2014 !*

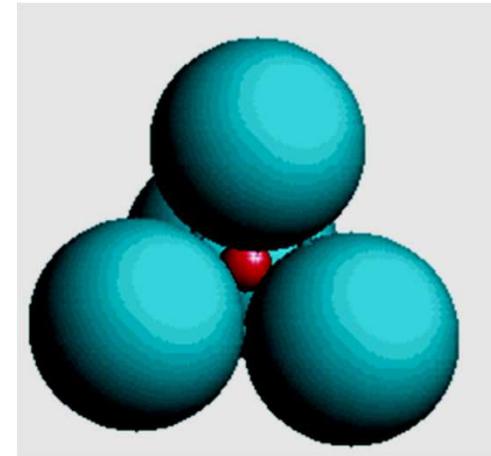
# Le point de vue des empilements



# Oui mais il reste de la place!

## **Définition : Site tétraédrique**

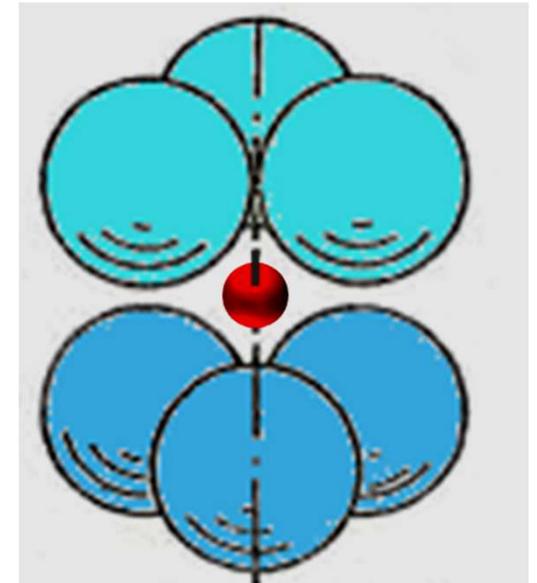
Un **site tétraédrique** est une cavité située au centre d'un tétraèdre régulier défini par 4 atomes en contact. Il est donc formé par la superposition de deux couches d'atomes.



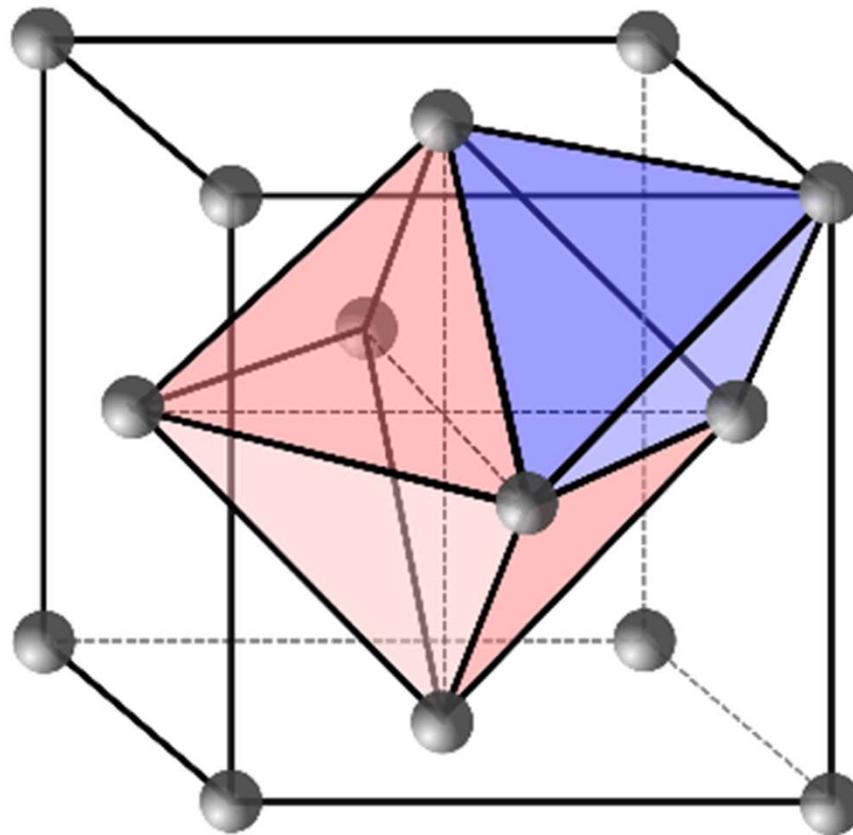
Oui mais il reste de la place!

**Définition : Site octaédrique**

Un **site octaédrique** est une cavité située au centre d'un octaèdre régulier défini par 6 atomes en contact. Il est ainsi formé par la superposition de deux triangles de sphères en sens opposés.



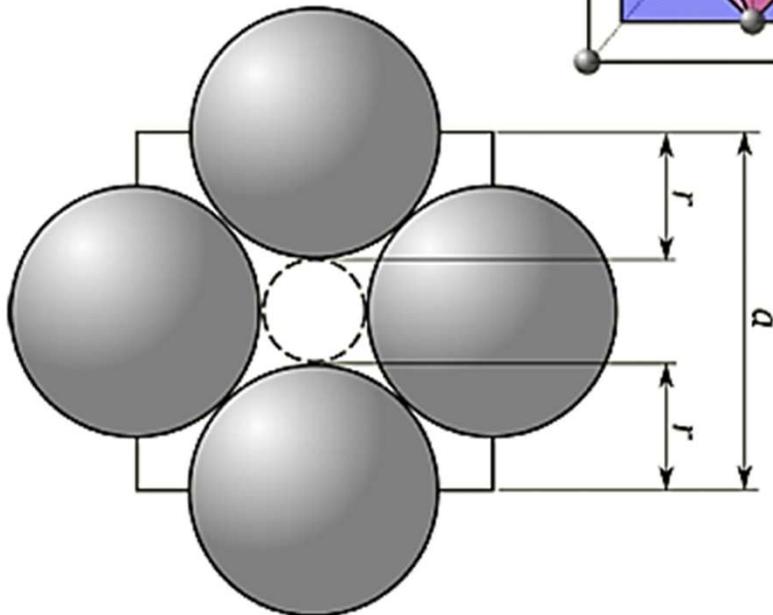
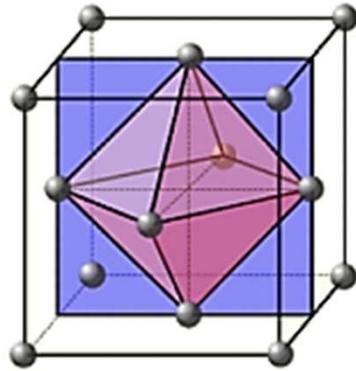
Oui mais il reste de la place!



Dans la maille  
CFC

# Oui mais il reste de la place! Combien ?

Exemple dans le cas  
d'un site octaédrique



**Définition :** Dimension du site (habitabilité) :

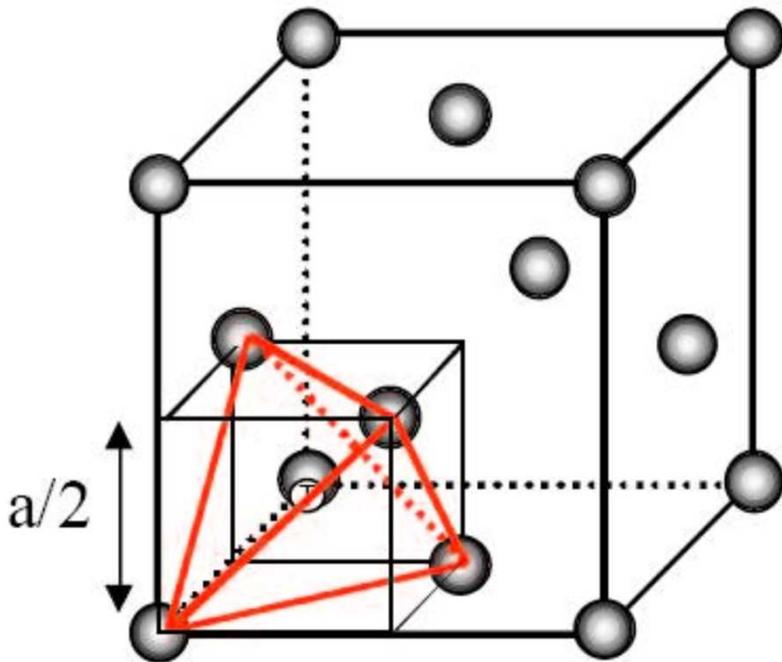
L'*habitabilité* correspond au **rayon**  $r_0$  de la **plus grosse sphère** que l'on peut insérer **dans le site interstitiel**.

**Méthode :** Déterminer l'habitabilité d'un site interstitiel

- Étape 1 : Choisir judicieusement un plan contenant le site interstitiel.
- Étape 2 : Faire un schéma (modèle compact) et faisant bien apparaître les dimensions d'intérêt (rayon des atomes, paramètre de maille).
- Étape 3 : Exprimer  $r_0$  en fonction du paramètre de maille  $a$  et du rayon  $r$  des atomes.

# Oui mais il reste de la place! Combien ?

Exemple dans le cas  
d'un site tétraédrique



**Définition :** Dimension du site (habitabilité) :

L'**habitabilité** correspond au **rayon**  $r_0$  de la **plus grosse sphère** que l'on peut insérer **dans le site interstitiel**.

**Méthode :** Déterminer l'habitabilité d'un site interstitiel

- Étape 1 : Choisir judicieusement un plan contenant le site interstitiel.
- Étape 2 : Faire un schéma (modèle compact) et faisant bien apparaître les dimensions d'intérêt (rayon des atomes, paramètre de maille).
- Étape 3 : Exprimer  $r_0$  en fonction du paramètre de maille  $a$  et du rayon  $r$  des atomes.

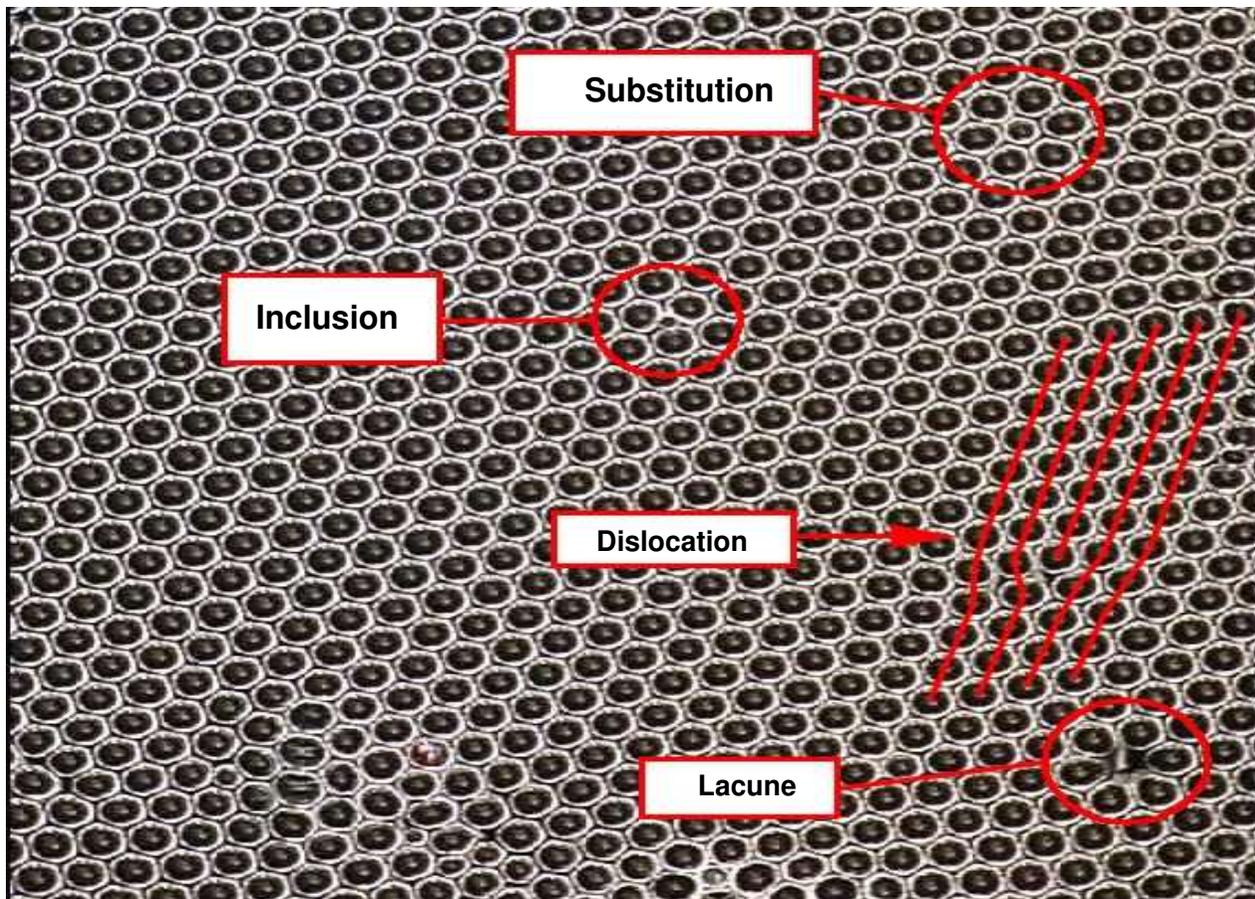
***Savoir-faire 2 – Localiser, dénombrer les sites tétraédriques et octaédriques d'une maille CFC et déterminer leur habitabilité***

On considère toujours le cristal d'argent étudié précédemment.

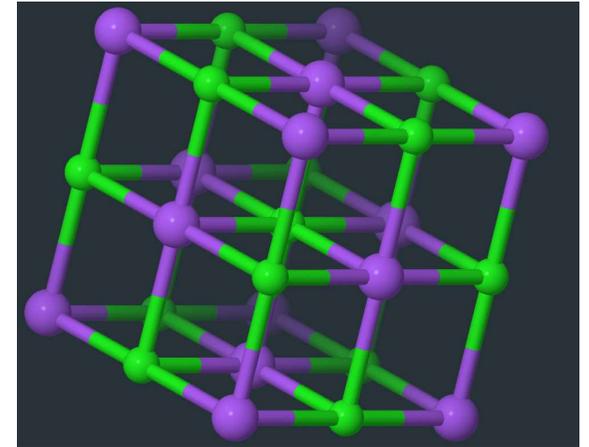
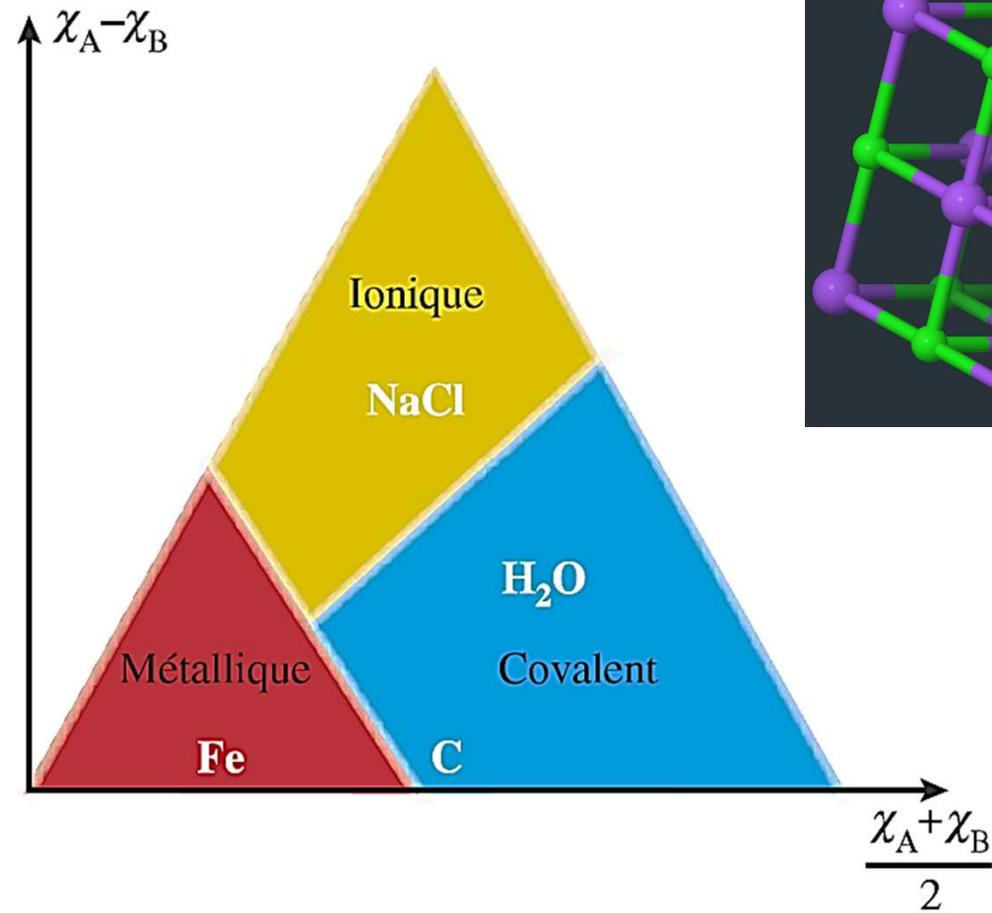
Données : rayon métallique du cuivre  $r_{Cu} = 128 \text{ pm}$

1. Déterminer la taille des sites octaédriques et tétraédriques de cette structure.
2. Montrer que les alliages cuivre-argent Cu-Ag ne peuvent pas être des alliages d'insertion.

# Le cristal réel



# Différents types de solides cristallins



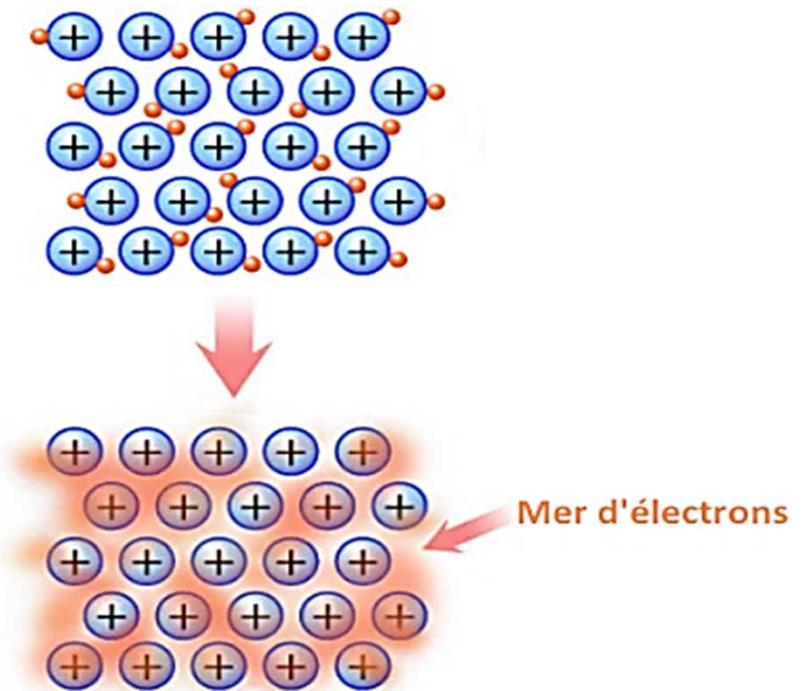
# Différents types de solides cristallins

Type de cristal	Métallique	Ionique	Covalent	Moléculaire
<b>Exemples</b>	$Fe_{(s)}, Ca_{(s)}, Zn_{(s)}$	$NaCl_{(s)}, KOH_{(s)}$	Diamant, $Si_{(s)}, Ge_{(s)}$	Glace, diiode
<b>Type de liaisons</b>	Métallique (électrons délocalisés)	Ionique (entre anion et cation)	Covalente	Liaisons de Van der Waals, liaison H
<b>Température de fusion</b>	Elevée ( $\sim 10^3 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Assez élevée ( $\sim 10^2 - 10^3 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Elevée ( $\sim 10^3 \text{ }^\circ\text{C}$ )	Faible ( $\leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$ )
<b>Propriétés mécaniques</b>	Dur, malléable, ductile	Dur mais cassant	Dur et peu malléable	Fragile
<b>Propriétés électriques</b>	Conducteur	Isolant	Le plus souvent isolant	Isolant
<b>Propriétés de solubilisation</b>	Insoluble	Très soluble dans les solvants polaires	Insoluble	Très soluble dans un solvant adéquat



# Cristal métallique

	Propriétés	Explications
Propriétés mécaniques	Dur, malléable, ductile	La forte énergie de liaison rend les cristaux métalliques très solides. La non-directionnalité de la liaison permet aux cristaux métalliques d'être relativement déformables.
Propriétés électriques	Excellents conducteurs	Cette conductivité électrique est assurée par la forte mobilité des <b>électrons délocalisés</b> dans le cristal.
Propriétés thermiques	Température de fusion très élevée	La liaison métallique est une <b>liaison forte</b> .



# Alliage

## Définition : Alliage

Un **alliage** est une **combinaison** d'un **métal hôte** avec un ou plusieurs autres éléments, métalliques ou non, appelés **hétéroéléments** ou éléments d'alliage.

On distingue deux types d'alliages :

- Alliage de **substitution** : un atome se substitue en certains nœuds du réseau.
- Alliage d'**insertion** : des atomes s'insèrent dans les sites interstitiels du réseau métallique.

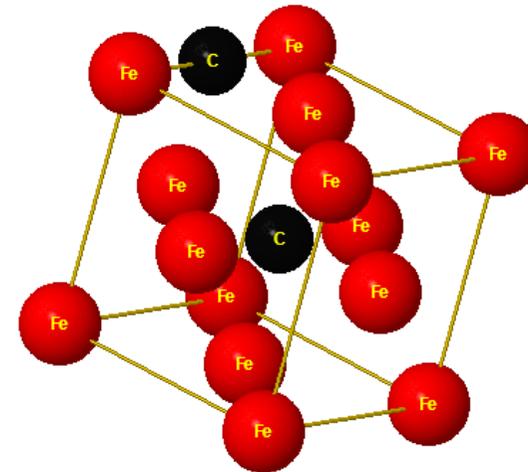
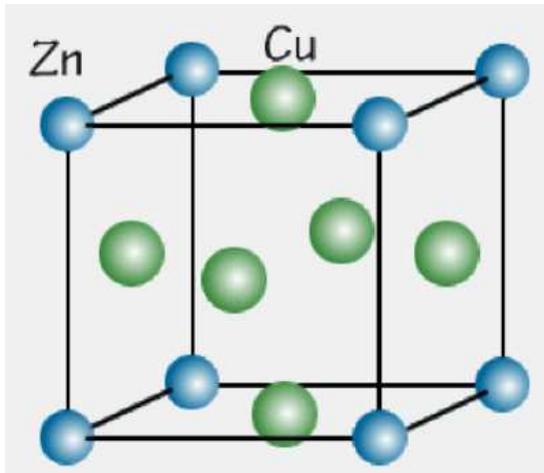
Nom	Élément principal	Éléments ajoutés	Propriétés et utilisations
Acier	Fer	Carbone 2%	Plus dur que le fer. Très répandu, par exemple en construction ou dans l'industrie automobile.
Acier inoxydable	Fer	Carbone 2% chrome et nickel	Plus résistant à la corrosion que l'acier simple.
Alliages d'aluminium	Aluminium	Cobalt, nickel Tantale	Alliages durs mais légers, utilisés notamment en aéronautique
Bronze	Cuivre > 60%	Étain	Plus résistant que le cuivre à l'usure. Utilisé pour la décoration, la lutherie, la sculpture.
Laiton	Cuivre > 60%	Zinc	Plus dur et plus facile à usiner que le cuivre. Utilisé en horlogerie, serrurerie, robinetterie, lutherie.
Or rose	Or	Cuivre 20%, Argent 5%	Utilisé en joaillerie.
Or blanc	Or	Argent	Utilisé en joaillerie, où il est recouvert d'une couche de rhodium pour le rendre plus brillant.

# Alliage

## Méthode : Déterminer la nature de l'alliage (insertion ou substitution)

On compare le rayon de l'élément métallique hôte et le rayon de l'élément d'alliage.

- Si le rayon de l'élément d'alliage est du **même ordre de grandeur** que celui de l'élément hôte, alors l'alliage est un **alliage de substitution**.
- Si le rayon de l'élément d'alliage est du **bien plus petit** que celui de l'élément hôte, alors l'élément d'alliage s'insère dans les sites interstitiels et l'alliage est un **alliage d'insertion**.



# Cristal ionique

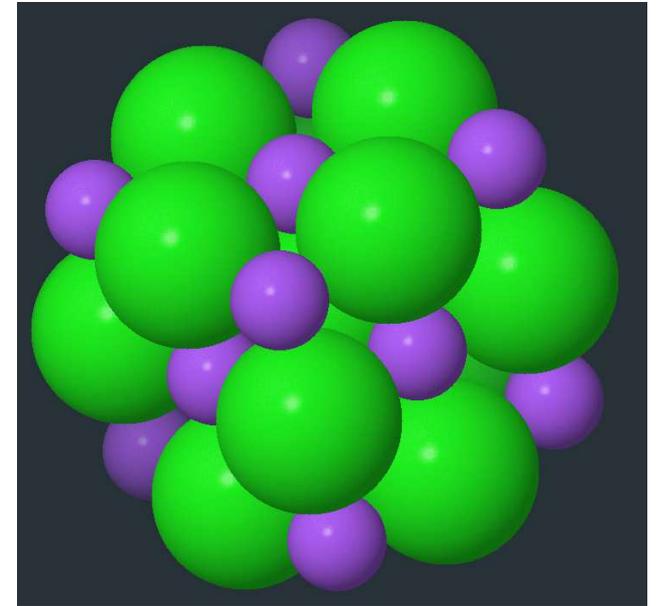
## Définition : Cristal ionique

Un **cristal ionique** est un assemblage **électriquement neutre** d'ions positifs (cations) et négatifs (anions) **de grande différence d'électronégativité**.

## Définition : Liaison ionique

La **liaison ionique** modélise l'**interaction coulombienne** entre charges positives et charges négatives.

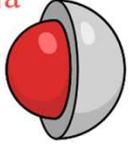
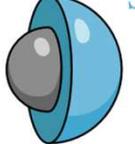
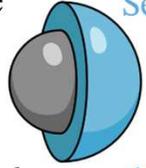
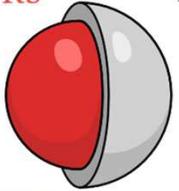
La liaison ionique est une **liaison forte** d'énergie de liaison de l'ordre de 100 à 600 kJ.mol<sup>-1</sup>. Ces liaisons sont **non-directionnelles** et la charge reste **localisée** sur les ions.



Les ions de même signe électrique ne se touchent pas!

# Cristal ionique

Distinction entre  
rayon atomique  
et  
rayon ionique

Tailles des atomes et de leurs ions en picomètres									
Groupe 1		Groupe 2		Groupe 13		Groupe 16		Groupe 17	
Li <sup>+</sup>  90	Li 134	Be <sup>2+</sup>  59	Be 90	B <sup>3+</sup>  41	B 82	O  73	O <sup>2-</sup>  126	F  71	F <sup>-</sup>  119
Na <sup>+</sup>  116	Na 154	Mg <sup>2+</sup>  86	Mg 130	Al <sup>3+</sup>  68	Al 118	S  102	S <sup>2-</sup>  170	Cl  99	Cl <sup>-</sup>  167
K <sup>+</sup>  152	K 196	Ca <sup>2+</sup>  114	Ca 174	Ga <sup>3+</sup>  76	Ga 126	Se  116	Se <sup>2-</sup>  184	Br  114	Br <sup>-</sup>  182
Rb <sup>+</sup>  166	Rb 211	Sr <sup>2+</sup>  132	Sr 192	In <sup>3+</sup>  94	In 144	Te  135	Te <sup>2-</sup>  207	I  133	I <sup>-</sup>  206

# Cristal ionique

	Propriétés	Explications
Propriétés mécaniques	Cassants	Une déformation du cristal conduit à mettre face à face des ions de charges de même signe, ce qui entraîne l'apparition d'interactions coulombiennes très répulsives.
Propriétés électriques	Isolants	Les ions occupent des positions fixes dans le cristal et les <b>charges restent localisées</b> sur les ions.
Propriétés thermiques	Température de fusion élevée	La liaison ionique est une <b>liaison forte</b> .

## ***Savoir-faire 3 – Établir les caractéristiques d'un cristal ionique***

Le chlorure de sodium  $NaCl$ , composé résiduel du processus de fabrication de l'eau de Javel, cristallise dans une structure où les ions chlorure  $Cl^-$  forment un réseau cubique à faces centrées alors que les ions sodium  $Na^+$  occupent les interstices octaédriques.

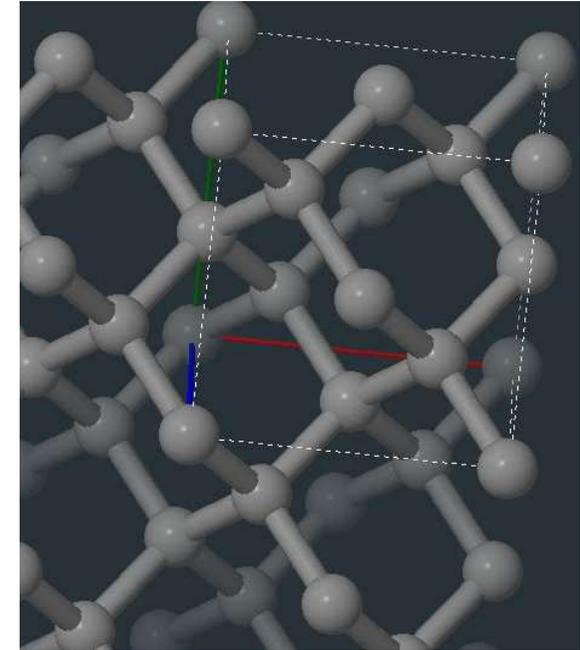
1. Donner une représentation de la maille conventionnelle de chlorure de sodium.
2. Déterminer la population pour chaque type d'ion. Vérifier la stœchiométrie du cristal (1 sodium pour 1 chlorure).
3. Définir, puis préciser la coordinence de chaque ion.
4. Exprimer la masse volumique  $\rho(NaCl)$  de ce solide ionique en fonction du paramètre de maille  $a$ .  
En déduire une valeur approchée de  $a$  et la comparer à la double somme des rayons ioniques.

Données :

- masses molaires atomiques :  $M(Na) = 23,0 \text{ g.mol}^{-1}$ ,  $M(Cl) = 35,5 \text{ g.mol}^{-1}$
- rayons ioniques :  $R(Na^+) = 102 \text{ pm}$  ;  $R(Cl^-) = 184 \text{ pm}$
- masse volumique du chlorure de sodium  $\rho(NaCl) = 2\,160 \text{ kg m}^{-3}$

# Cristal covalent

Exemple:  
*diamant*



## Définition : Cristal covalent

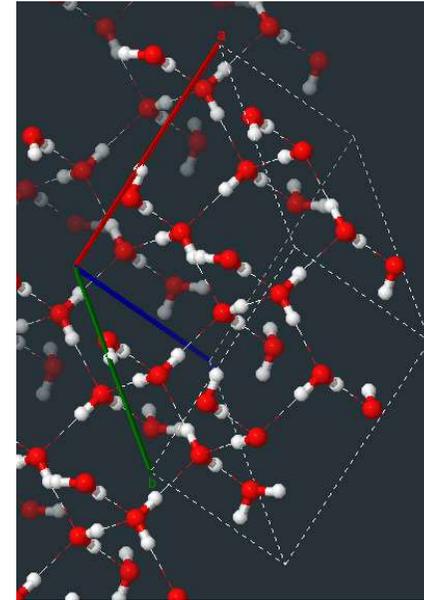
Dans les *cristaux covalents*, les nœuds du réseau sont occupés par des atomes identiques non-métalliques. Les atomes sont unis dans le cristal par des *liaisons covalentes*.

	Propriétés	Explications
Propriétés mécaniques	Grande dureté (exception pour le graphite)	La liaison covalente est une liaison <b>directionnelle</b> et <b>forte</b> , qui s'oppose à toute déformation.
Propriétés électriques	Isolants (exception pour le graphite et les semi-conducteurs)	Les électrons des liaisons covalentes restent <b>localisés</b> entre les atomes, ne sont pas mobiles.
Propriétés thermiques	Température de fusion très élevée	La liaison covalente est une <b>liaison forte</b> .

# Cristal moléculaire

## Définition : Cristal moléculaire

Un ***cristal moléculaire*** est un assemblage de molécules liées entre elles par des ***liaisons de Van der Waals*** et éventuellement des ***liaisons hydrogène***.



Exemple:  
***glace***

	Propriétés	Explications
Propriétés mécaniques	Fragiles	Les liaisons intermoléculaires sont des <b><i>liaisons faibles</i></b> .
Propriétés électriques	Isolants	Les électrons ne sont pas mobiles car impliqués dans les liaisons covalentes des molécules, et ne peuvent passer d'une molécule à l'autre.
Propriétés thermiques	Température de fusion faible	<b><i>Énergies de liaison faibles</i></b> (pour VdW $\approx 1$ à $10 \text{ kJ.mol}^{-1}$ , pour liaison hydrogène $\approx 10$ à $40 \text{ kJ.mol}^{-1}$ ).