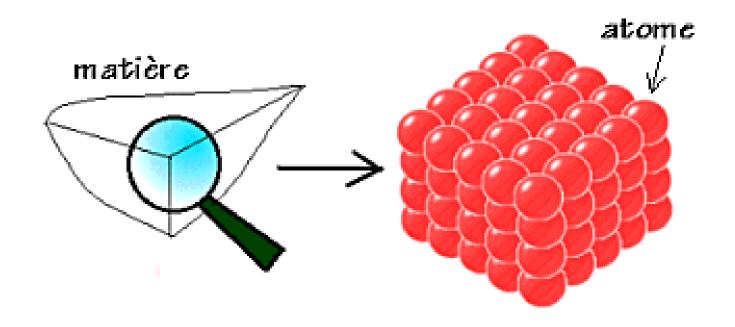
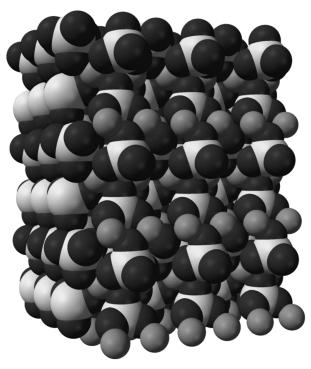
### Notions de base De la Physique du Solide



#### CRISTALLOGRAPHIE : c'est de la géométrie

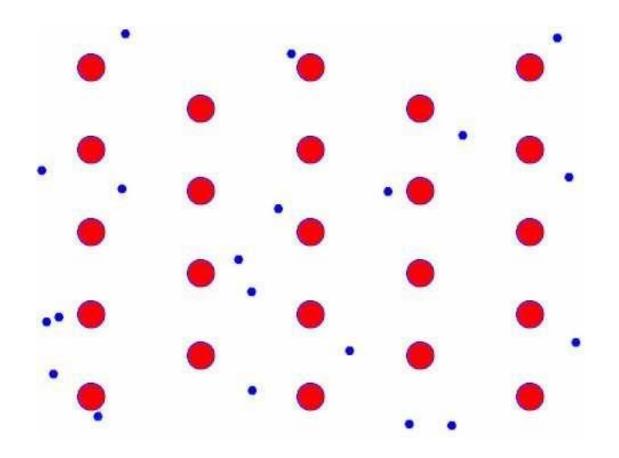




Sulfate de cuivre CuSO4

Description de l'arrangement des atomes d'un cristal périodique

#### **ELECTRONS** dans les cristaux

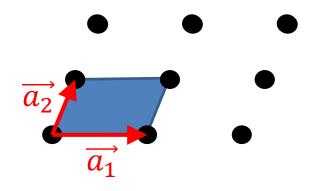


Certains localisés sur les atomes, d'autres délocalisés

#### 1<sup>er</sup> objectif : Repérer le vocabulaire



#### 2<sup>eme</sup> objectif : Savoir-faire



- Déterminer la maille élémentaire

- Déterminer la configuration électronique

 $C: 1s^2 2s^2 2p^2$ 

- Savoir utiliser l'expression de Drude

$$\sigma = \frac{nq^2\tau}{m}$$

#### Plan du cours:

- Introduction
- a. Le réseau d'atomes. Observation expérimentale
- b. Cristallographie. Définitions
- c. Cristallographie. Exemples de structures cristallines
- d. L'espace réciproque
- e. Les électrons d'un atome. Notion d'orbitales atomiques et e- de valence
- f. Les électrons dans les solides. Modèle classique des électrons libres de Drude
- Résumé
- Annexe 1. Pourquoi négliger les interactions coulombiennes ?
- Annexe 2. Courtes vidéos sur la cristallographie

#### 2.2. CRISTALLOGRAPHIE - INTRODUCTION

Certains cristaux fascinent depuis des siècles par leur forme anguleuse et ordonnée. Le film suivant retrace brièvement l'histoire de la cristallographie, des premières observations à l'œil nu aux méthodes expérimentales de pointe utilisées aujourd'hui (diffraction X, microscopie électronique)

Cette introduction historique et expérimentale est le meilleur point d'entrée pour appréhender l'intérêt et la force du formalisme de la cristallographie abordé dans la suite du cours.

Il contient aussi une explication de la diffraction des rayons X, que l'on utilisera plus loin dans ce cours, pour donner une première définition du concept central d'espace réciproque.

https://www.youtube.com/watch?v=gPZ4SX23osA

#### [Vidéo]

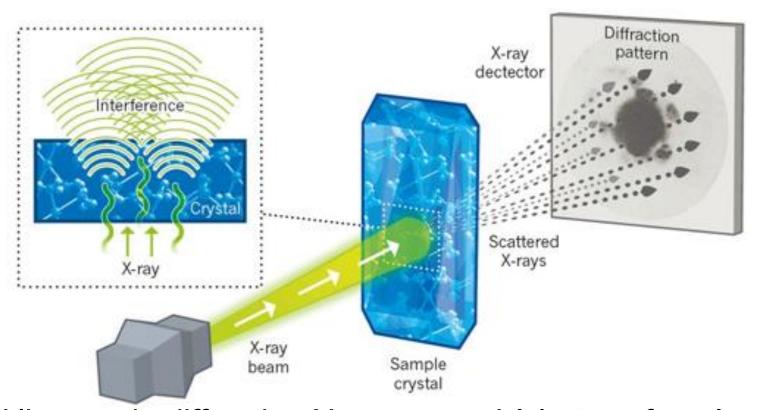
http://www.univ-paris-diderot.fr/Mediatheque/spip.php?article454



- a. Quelle est la technique expérimentale de référence en cristallographie ?
- 1. La diffraction des rayons X
- 2. L'imagerie par résonance magnétique
- 3. Le transport électrique
- 4. La conductivité thermique

Quelle est la technique expérimentale de référence en cristallographie ?

#### 1. La diffraction des rayons X



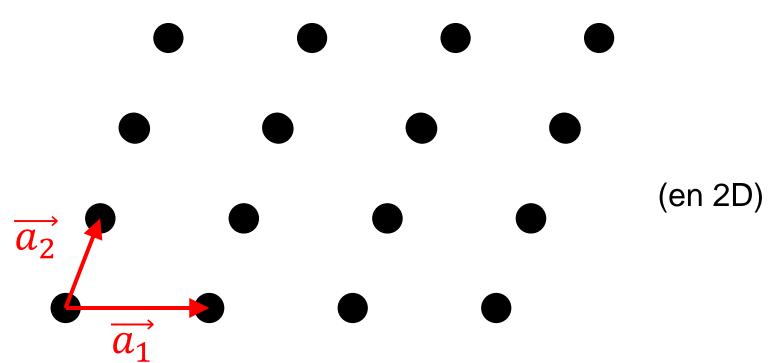
L'image de diffraction X correspond à la transformée de Fourier du réseau cristallin

Cristallographie : définitions



#### Réseau de Bravais

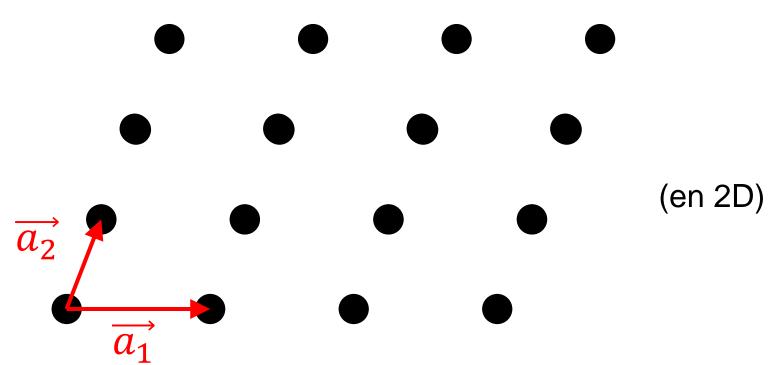
Réseau infini de points dont la position est donnée par  $\vec{R} = n_1 \vec{a_1} + n_2 \vec{a_2} + n_3 \vec{a_3}$  avec  $n_1, n_2, n_3 \in \mathbb{Z}$ 





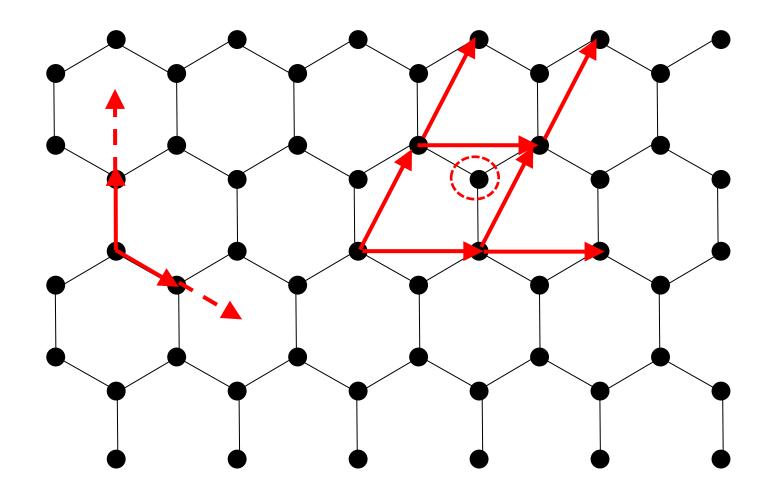
#### Vecteurs de base

= Vecteurs  $\overrightarrow{a_1}$ ,  $\overrightarrow{a_2}$ ,  $\overrightarrow{a_3}$  du réseau de Bravais



## Remarque : les noeuds d'un réseau nid d'abeille 2D ne forment pas un réseau de Bravais



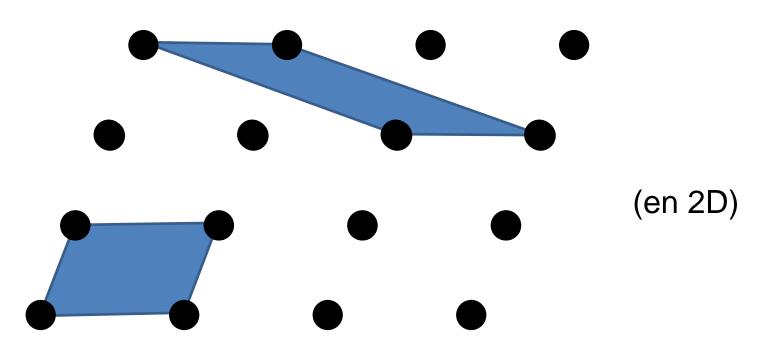




#### Maille élémentaire

Motif géométrique le plus petit qui en se répétant indéfiniment, constitue un réseau de Bravais

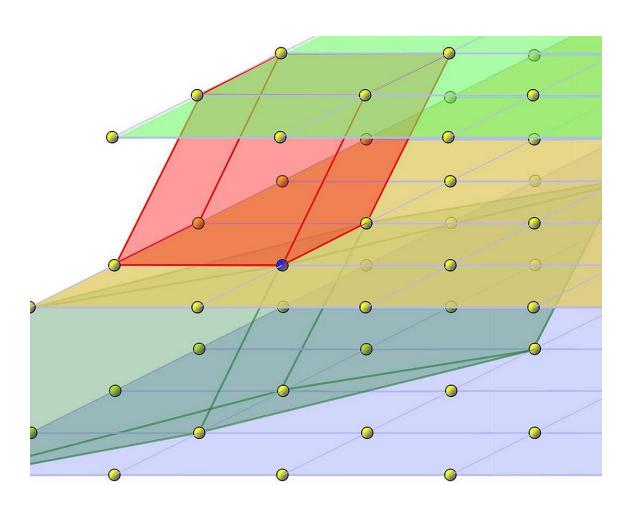
#### Remarque : plusieurs possibilités





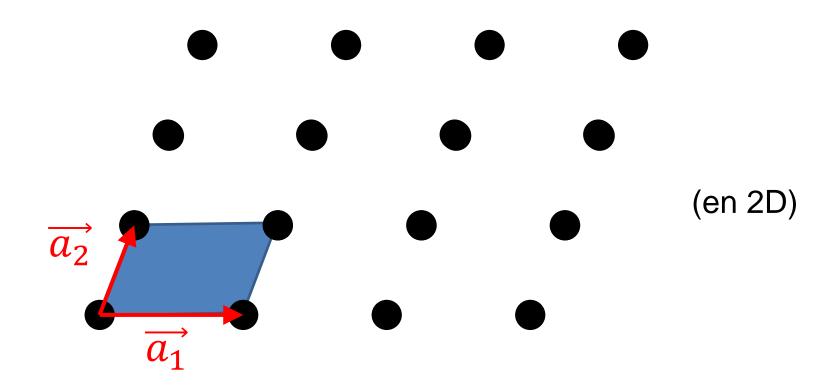
#### Volume d'une maille élémentaire, propriété

Deux mailles élémentaires d'un même réseau ont le même volume





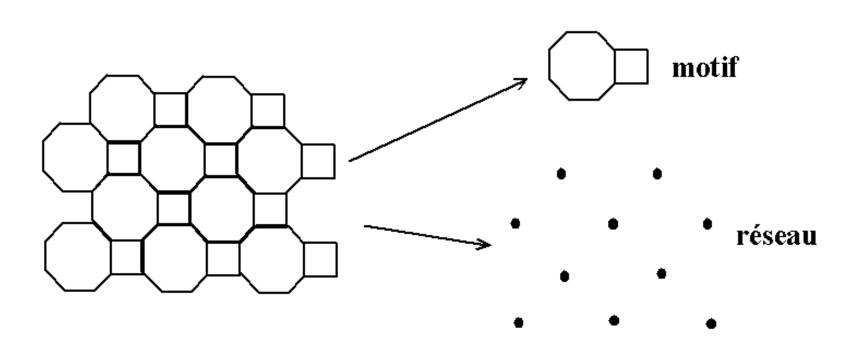
Remarque : la maille élémentaire correspond au volume engendré par les vecteurs de base





#### **Motif**

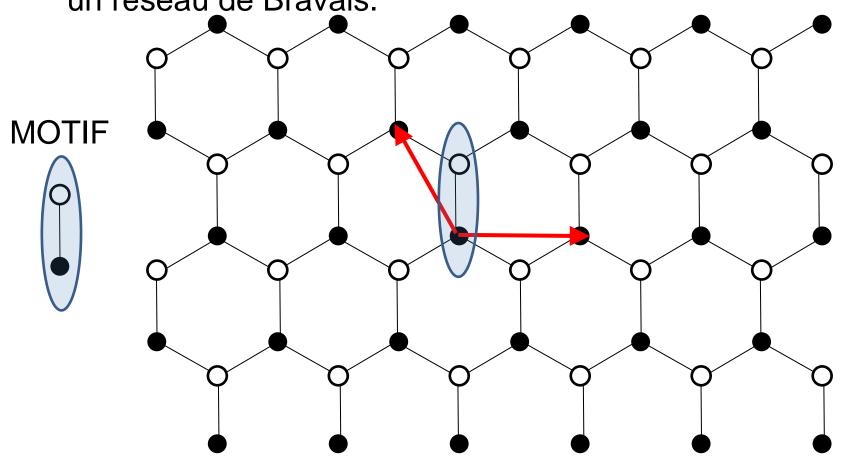
Ensemble d'atomes attaché à un noeud du réseau de Bravais, qui possède la même périodicité

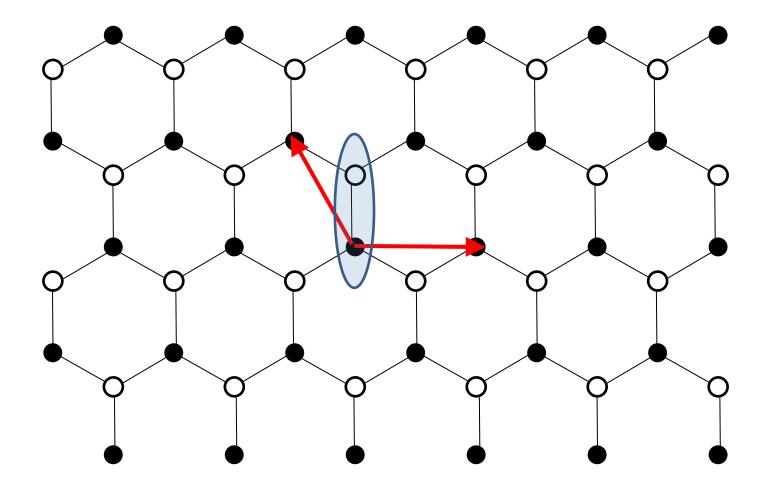




#### **Motif**

Illustration dans le cas de la structure nid d'abeille 2D. Si l'on prend un motif à 2 atomes, cette structure est un réseau de Bravais.



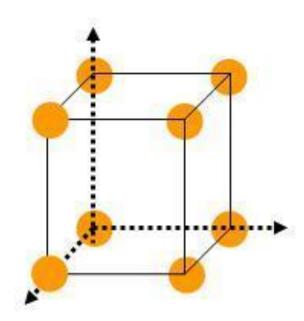




#### Nombre d'atomes par maille

Le nombre d'atomes par maille est le nombre d'atomes du motif.

Exemple : structure cubique simple

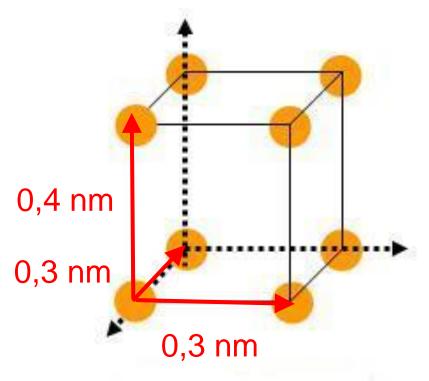


Le motif ne compte qu'un atome → Un atome par maille (ou 8 huitième d'atomes, selon la façon de voir)



#### Nombre d'atomes par maille et densité atomique

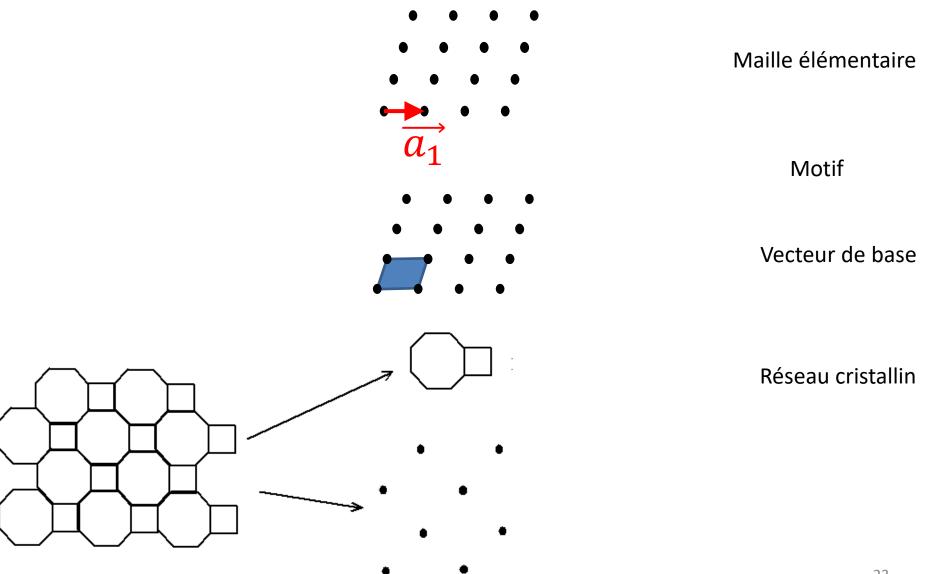
Connaissant le **nombre d'atomes par maille** et la **taille des vecteurs de base**, on obtient la densité atomique.



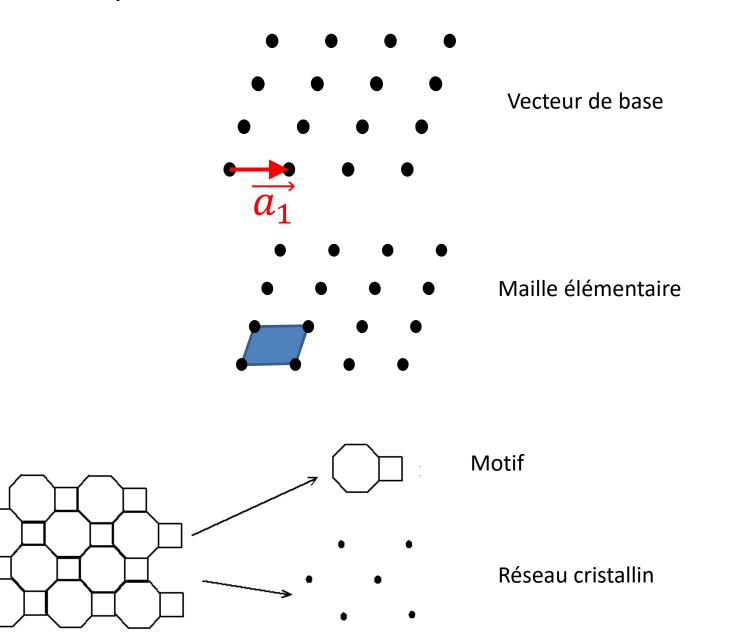
#### Exemple:

Volume V=  $0.3 \times 0.3 \times 0.4 \times 10^{-27} \text{ m}^3$ Densité =  $1 / \text{V} \sim 3.10^{28} \text{ atomes/m}^3$ 

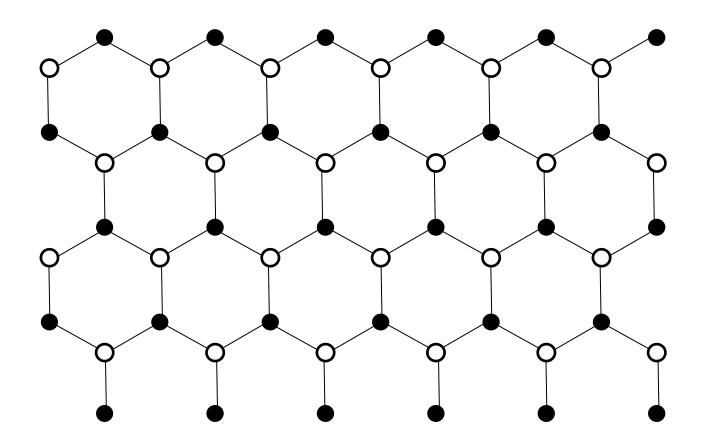
#### b. Associer un terme à chacun des 4 schémas de droite



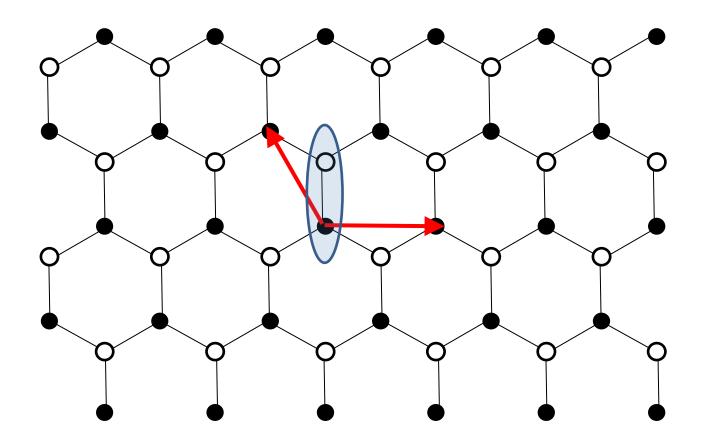
#### Réponse

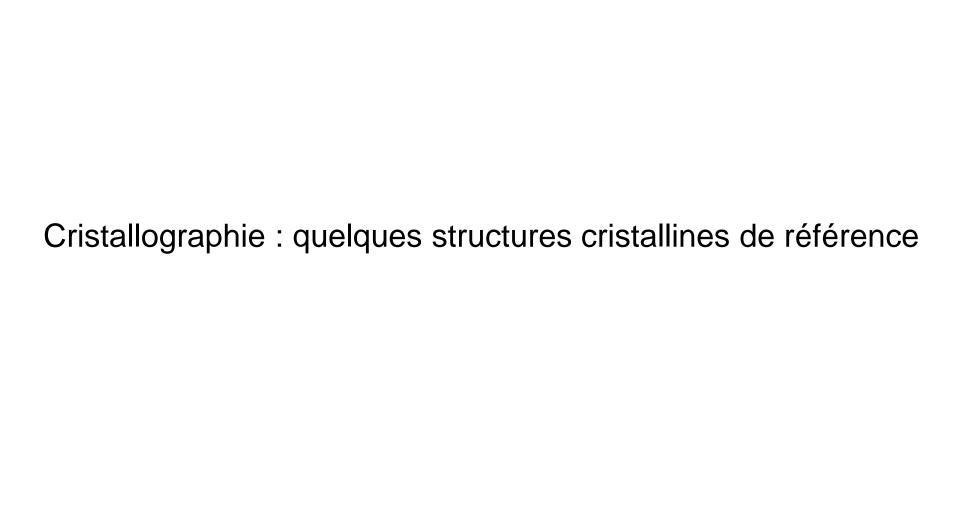


b2. Combien y a-t-il d'atomes par maille dans cette structure ? 1 2 3 6



#### Réponse : 2 (le nombre d'atomes du motif)





#### Structure cubique simple

# $\frac{\vec{k}}{\vec{l}}$

#### Cube de coté a

$$\overrightarrow{a_1} = a \overrightarrow{i}$$

$$\overrightarrow{a_2} = a \overrightarrow{j}$$

$$\overrightarrow{a_3} = a \overrightarrow{k}$$

Volume 
$$V = a^3$$

Exemple : le polonium cristallise dans le système cubique simple Le motif est constitué d'un atome Po Volume de la maille élémentaire, cas general (vecteurs pas forcément orthogonaux)

$$V = \overrightarrow{a_1}.(\overrightarrow{a_2} \wedge \overrightarrow{a_3})$$

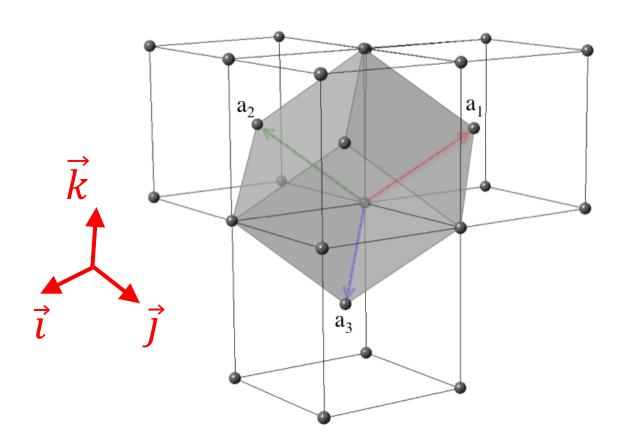
Rappel produit vectoriel et produit scalaire

$$\vec{a} \wedge \vec{b} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_y b_z - a_z b_y \\ a_z b_x - a_x b_z \\ a_x b_y - a_y b_x \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix}$$

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$$

#### Structure cubique centré



$$\overrightarrow{a_1} = \frac{a}{2} \left( \overrightarrow{-i} + \overrightarrow{j} + \overrightarrow{k} \right)$$

$$\overrightarrow{a_2} = \frac{a}{2} \left( \overrightarrow{i} - \overrightarrow{j} + \overrightarrow{k} \right)$$

$$\overrightarrow{a_3} = \frac{a}{2} (\overrightarrow{i} + \overrightarrow{j} - \overrightarrow{k})$$

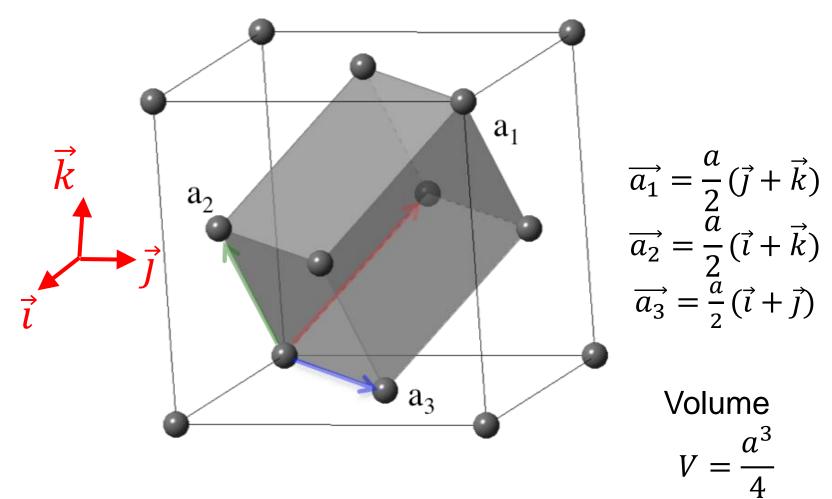
Volume

$$V = \frac{a^3}{2}$$

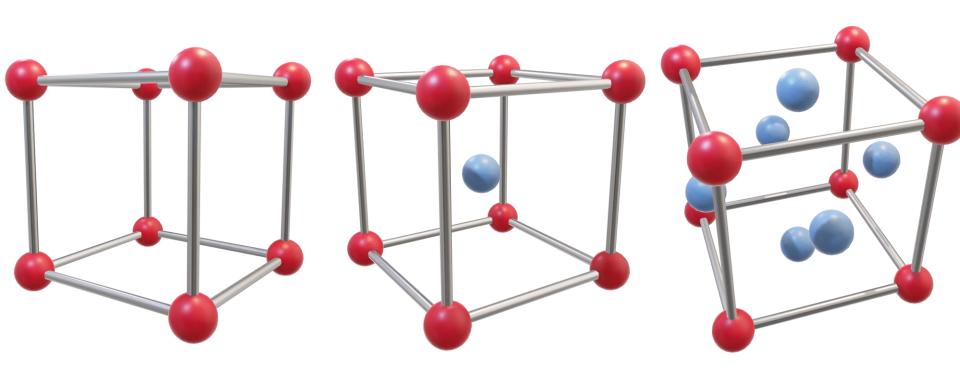
Exemple : le chrome cristallise dans le système cubique centré. Le volume de la maille élémentaire inscrit sur ces vecteurs (en gris) est plus petit que le cube de base.

Le motif correspondant est constitué d'un atome de Cr

#### Structure cubique faces centrées



Exemples : or, cuivre, fer, aluminium,..
Le motif correspondant est constitué d'un atome d'or



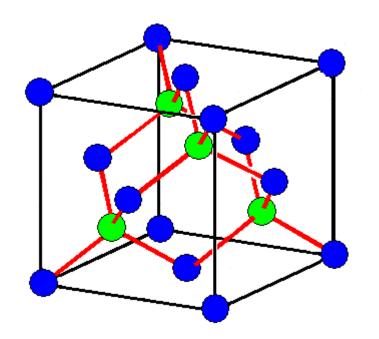
#### Structure silicium (ou structure diamant)

On a vu précédemment une schématisation de la structure du silicium, aplatie, avec chaque atome de Si ayant 4 voisins

Version réelle tridimensionnelle : 2 CFC décalés

#### Structure silicium: diamant, silicium, GaAs, InP, ZnS...

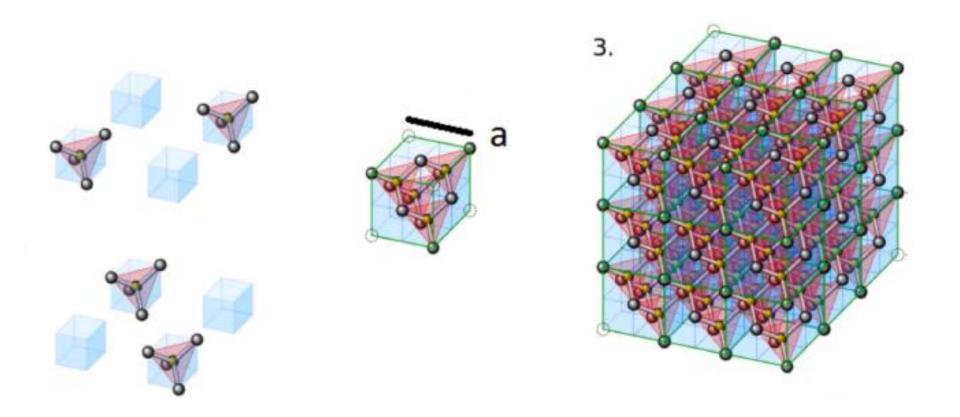
→ 2 CFC imbriqués, décalés d'un quart de la diagonale du cube



Mêmes vecteurs de base qu'un CFC, avec un motif de 2 atomes (ici un bleu et un vert)

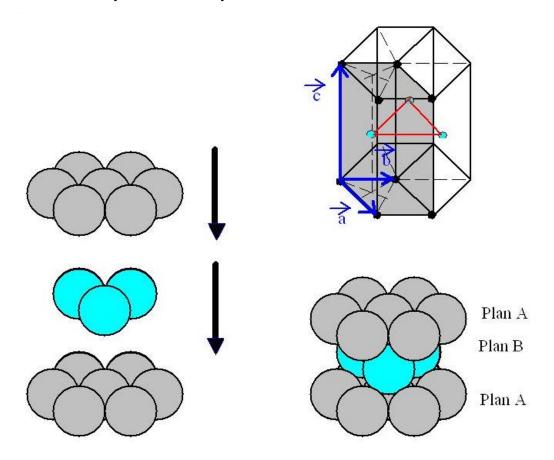
GaAs, InP, ZnS: un CFC de Ga (bleu) + un CFC de As (vert) Diamant, silicium: les 2 CFC sont avec les mêmes atomes

#### Structure silicium - complément



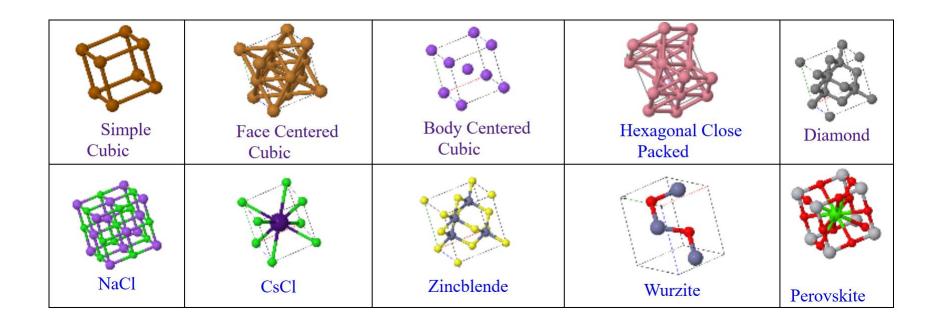
La structure peut être considérée comme l'empilement de tétraèdres. Un tetraèdre est constitué d'un atome au centre d'un petit cube avec 4 voisins en position tétraédrique. L'empilement se fait en considérant l'alternance de petit cube pleins et vides.

# D'autres structures sont très répandues, citons notamment la **structure hexagonale**, illustrée ci dessous Structure la plus compacte à deux dimensions





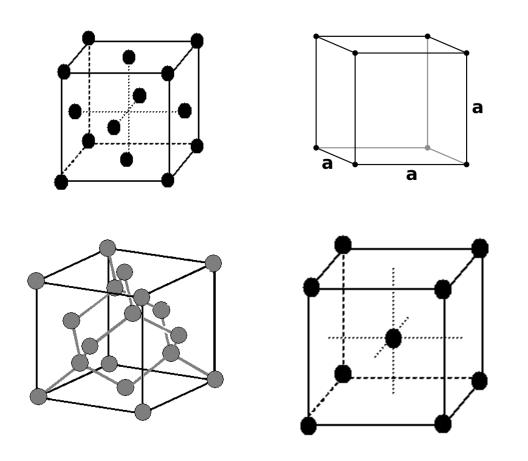
Exemple: graphite



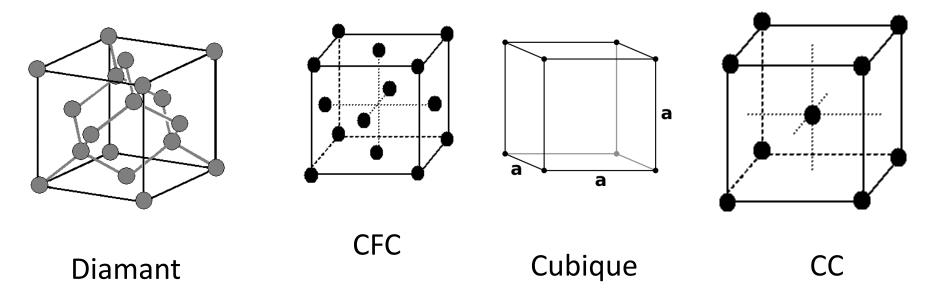
Site proposant une visualisation en faisant tourner les structures <a href="http://lampx.tugraz.at/~hadley/ss1/crystalstructure/crystalstructure.php">http://lampx.tugraz.at/~hadley/ss1/crystalstructure/crystalstructure.php</a>

#### c. Associer un terme à chacun des 4 schémas

#### Quel est le schéma de la structure CC?

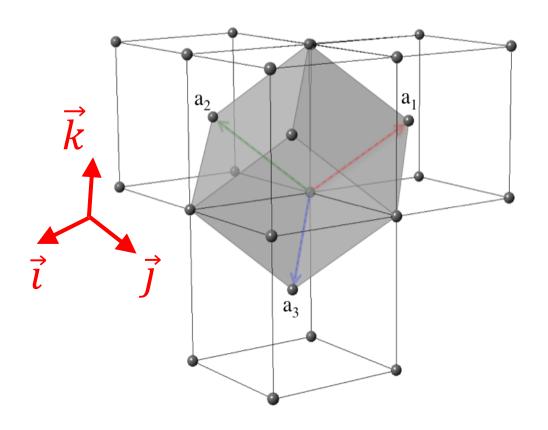


#### Réponse



c2. Faire correspondre les trois vecteurs de base et le volume de la maille élémentaire avec leur expression :

$$\overrightarrow{a_1}$$
  $\overrightarrow{a_2}$   $\overrightarrow{a_3}$   $V$ 



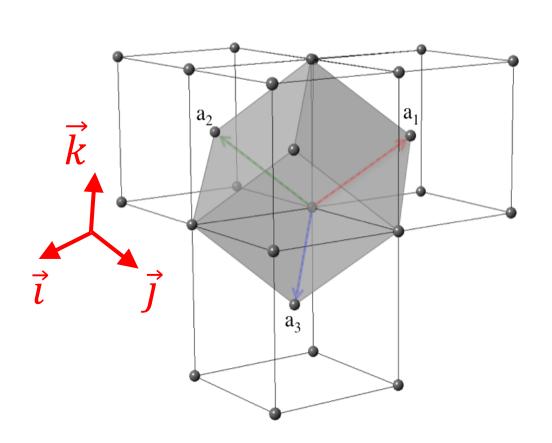
$$\frac{a}{2}(\vec{-i}+\vec{j}+\vec{k})$$

$$\frac{a}{2}(\vec{\imath}-\vec{\jmath}+\vec{k})$$

$$\overrightarrow{a_1}.(\overrightarrow{a_2} \wedge \overrightarrow{a_3}) = \frac{a^3}{2}$$

$$\frac{a}{2}(\vec{\imath}+\vec{\jmath}-\vec{k})$$

#### Réponse



$$\overrightarrow{a_1} = \frac{a}{2} \left( \overrightarrow{-i} + \overrightarrow{j} + \overrightarrow{k} \right)$$

$$\overrightarrow{a_2} = \frac{a}{2} \left( \overrightarrow{i} - \overrightarrow{j} + \overrightarrow{k} \right)$$

$$\overrightarrow{a_3} = \frac{a}{2} \left( \vec{i} + \vec{j} - \vec{k} \right)$$

$$V = \overrightarrow{a_1} \cdot (\overrightarrow{a_2} \wedge \overrightarrow{a_3}) = \frac{a^3}{2}$$

Notion d'espace réciproque

#### Espace réciproque : une définition

Espace réel

(x, y, z)



Espace réciproque

 $(k_x, k_y, k_z)$ 

Remarque. Ici, transformée de Fourrier sur les coordonnées spatiales

#### Définition

La **transformée de Fourier** d'un signal x(t) est définie par

$$\widehat{x}(f) := \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2\pi j f t} dt.$$

[Cours de G. Chênevert]

Transformée de Fourier spatiale :

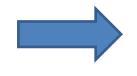
$$f \rightarrow \vec{k}$$

$$t \rightarrow \vec{r}$$

(A une constante près, car on utilise une définition basée sur la pulsation  $\omega=2\pi f$ )

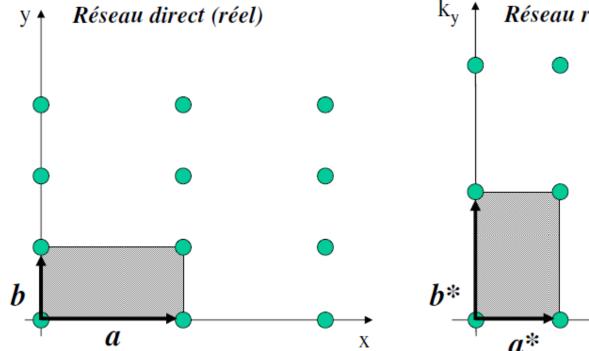
#### En cristallographie

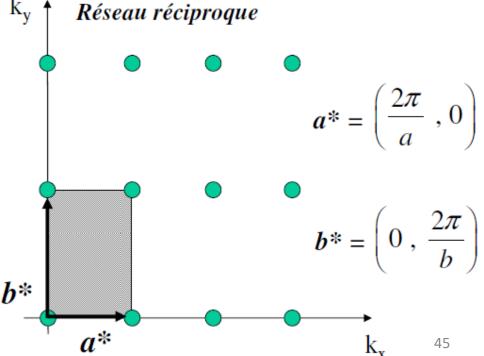
Réseau cristallin  $(\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$ 



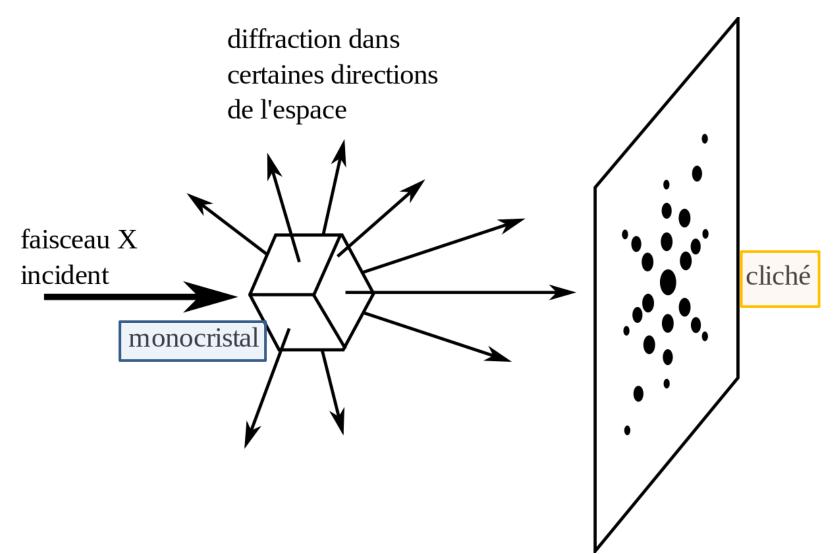
Réseau réciproque  $(\overrightarrow{a^*}, \overrightarrow{b^*}, \overrightarrow{c^*})$ 

#### Illustration à 2 dimensions



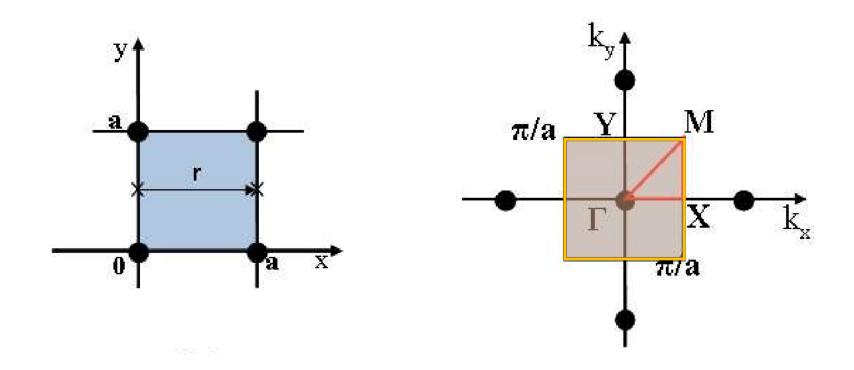


### La figure de diffraction d'un cristal correspond à la structure cristalline dans l'espace réciproque (admis)



#### "Première Zone de Brillouin"

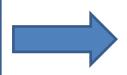
Définition : maille élémentaire du réseau réciproque



La notion de zone de Brillouin apparaîtra aussi dans la description quantique des électrons dans les cristaux

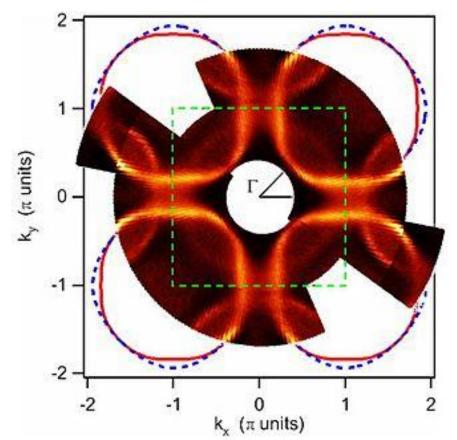
#### Concernant les propriétés des électrons

Proba. de présence des électrons dans un cristal



Structure de bandes et surface de Fermi





# Pourquoi le concept d'espace réciproque est il si présent en Physique du solide ?

Relation de Planck:

la position et le vecteur d'onde sont des grandeurs duales

 $(E, k_x, k_y, k_z)$ 

Représentation corpusculaire

Représentation ondulatoire

Expérimentalement, on accède souvent à la signature ondulatoire des électrons dans les solides

# Cristallographie et réseau réciproque

- d. Qu'est-ce que l'espace réciproque ?
- 1. L'espace x,y,z auquel on adjoint le temps t
- 2. La transformée de Fourier de l'espace réel
- 3. L'espace discret des positions atomiques
- 4. L'espace symétrique par translation

#### Réponse

Qu'est-ce que l'espace réciproque ?

#### 2. La transformée de Fourier de l'espace réel



(x, y, z)



Transformée de Fourier

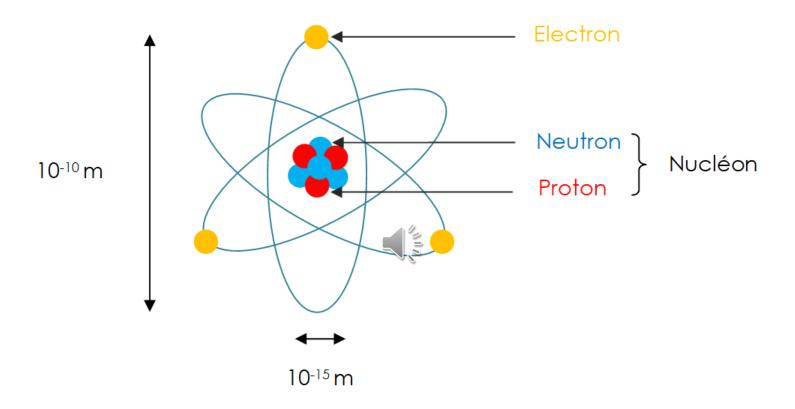
Espace réciproque

 $(k_x, k_y, k_z)$ 

« L'espace des k »

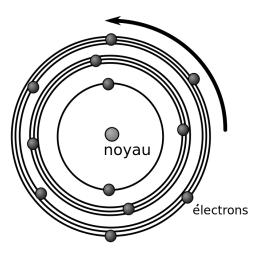
Orbitales atomiques et électron de valence

Un solide est une collection d'atomes.



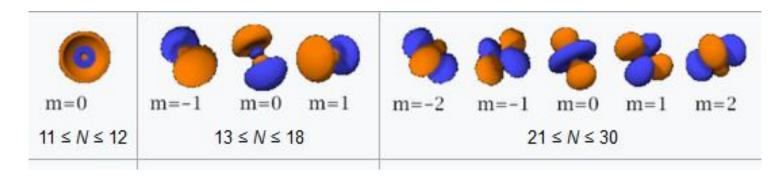
Comportement des électrons gravitant autour d'un atome ?

→ notion d'orbitale atomique



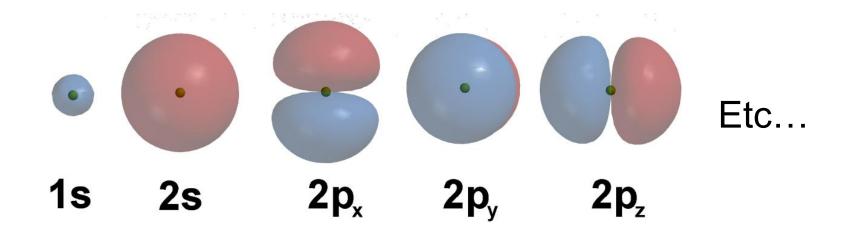
#### Modèle planétaire (orbites) : incorrect

#### **Orbitales atomiques**



Comme les orbites, les orbitales atomiques correspondent à des niveaux d'énergie *n* 

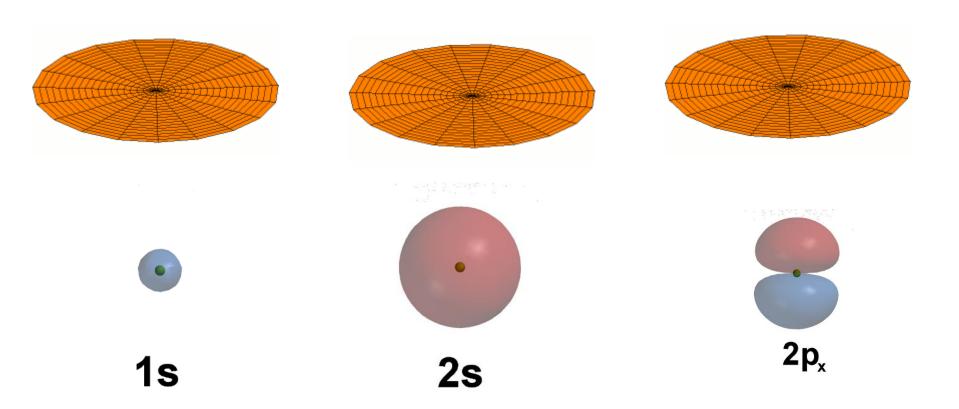
Représentation d'une **orbitale atomique** : volume dans lequel on a 95% de probabilité de trouver l'électron.



Résultat admis ici.

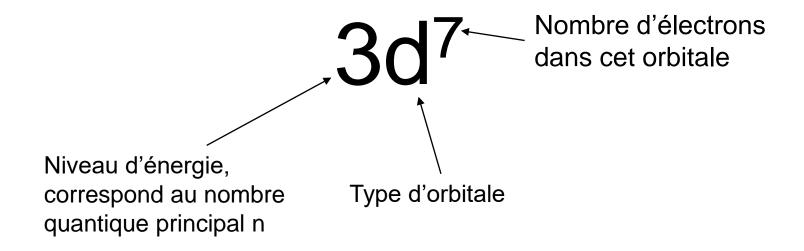
La démonstration peut être faite en résolvant l'équation de Schrödinger pour l'électron de l'atome d'hydrogène (1 proton+1 électron)

#### Pourquoi ces formes ? Analogie avec les modes de vibration d'un tambour



#### **Notation**

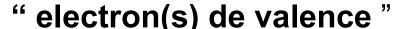
#### **Orbitale atomique**

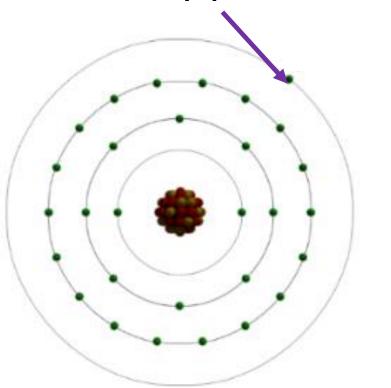


#### Configuration électronique

Exemple: Carbone (Z=6) 1s<sup>2</sup> 2s<sup>2</sup> 2p<sup>2</sup>

Seul les électrons situés dans le dernier niveau d'énergie interviennent dans les liaisons chimiques, la conductivité électrique, l'absorption optique...





Comment déterminer la configuration électronique et ainsi le nombre d'électrons de valence d'un atome ?

# Règles de remplissage des électrons dans les orbitales atomiques (admis)

- Jusqu'à 2 électrons par orbitales S,
   6 électrons par orbitales P
   10 électrons par orbitales D
   14 électrons par orbitales F
- 2. L'ordre des orbitales à remplir : règle de Klechkowski

#### Règle de Klechkowski

#### On obtient:

1s 2s 2p 3s 3p 4s 3d 4p 5s 4d 5p 6s 4f 5d 6p 7s 5f 6d 7p

#### Remplissage des orbitales atomiques, pour résumer :

$$1s_{2}^{2} 2s_{4}^{2} 2p_{10}^{6} 3s_{12}^{2} 3p_{18}^{6} 4s_{20}^{2} 3d_{30}^{10} 4p_{36}^{6} 5s_{38}^{2} \dots 7p_{118}^{6}$$

Uuo (Ununoctium) : atome connu ayant le plus d'électrons : 118

#### Exemple:

Carbone (Z=6) 1s<sup>2</sup> 2s<sup>2</sup> 2p<sup>2</sup>



Nombre d'électrons de valence ?

#### Electrons de valence :

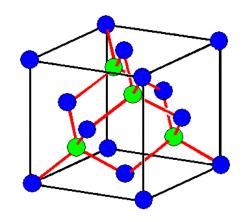
Electrons dans la couche de nombre quantique n le plus élevé

Carbone (Z=6) 1s<sup>2</sup> 2s<sup>2</sup> 2p<sup>2</sup>



Couche n = 2 : 4 ELECTRONS DE VALENCE (2 électrons s et 2 électrons p)

Structure diamant : les 4 électrons sont utilisés pour les liaisons chimiques avec 4 voisins (voir cristallo) pas d'électrons disponibles pour la conduction électrique -> isolant



#### Autre exemple :

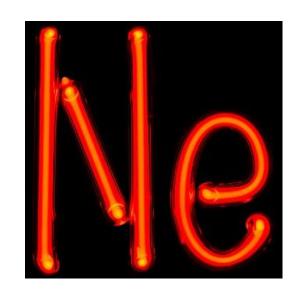
Neon (Z=10)

Configuration électronique ? 1s<sup>2</sup> 2s<sup>2</sup> 2p<sup>6</sup>

Nombre d'électrons de valence ?

Couche n=2 : 8 électrons de valence couche complète → Gaz inerte

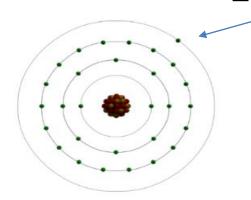
 $1s_{2}^{2} 2s_{4}^{2} 2p_{10}^{6} 3s_{12}^{2} 3p_{18}^{6} 4s_{20}^{2} 3d_{30}^{10} 4p_{36}^{6} 5s_{38}^{2} \dots 7p_{118}^{6}$ 



# Synthèse ORBITALE ATOMIQUE 1s 2s 2p<sub>x</sub> 2p<sub>y</sub> 2p<sub>z</sub>

$$1s_{2}^{2} 2s_{4}^{2} 2p_{10}^{6} 3s_{12}^{2} 3p_{18}^{6} 4s_{20}^{2} 3d_{30}^{10} 4p_{36}^{6} 5s_{38}^{2} \dots 7p_{118}^{6}$$

#### ELECTRON DE VALENCE



e. Soit une orbitale atomique notée 3d<sup>7</sup>, que vaut son nombre quantique principal ?

- 1.3
- 2.4
- 3. 7
- 4.21

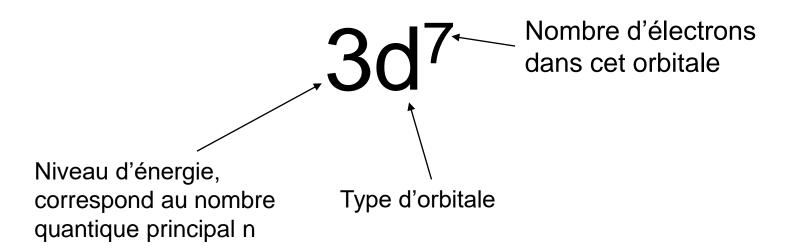
#### Réponse

Soit l'orbitale atomique 3d<sup>7</sup>, que vaut son nombre quantique principal ?

1.3

#### **Notation**

#### Orbitale atomique



## e2. La configuration électronique de l'aluminium est : 1s² 2s² 2p6 3s² 3p¹

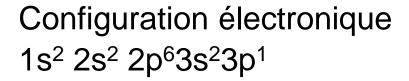
Combien a-t-il d'électrons de valence ?

- 1.1
- 2. 2
- 3.3
- 4.4



#### Réponse

Aluminium (Z=13)



Nombre d'électrons de valence ?

Couche n=3 : **3 électrons de valence** (2 type s et 1 type p)

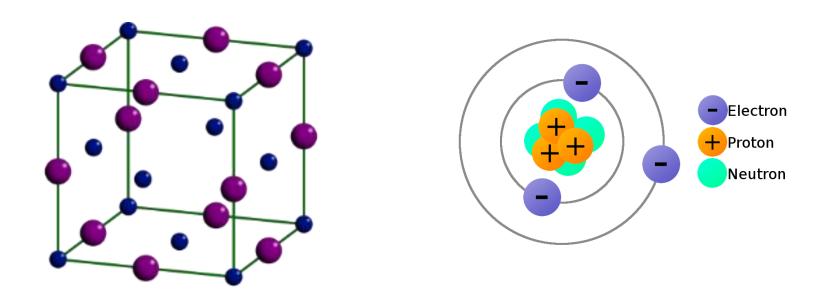
 $1s_{2}^{2} 2s_{4}^{2} 2p_{10}^{6} 3s_{12}^{2} 3p_{18}^{6} 4s_{20}^{2} 3d_{30}^{10} 4p_{36}^{6} 5s_{38}^{2} \dots 7p_{118}^{6}$ 



#### Problématique

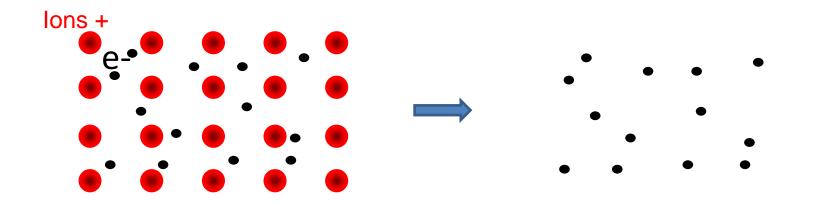
#### CONDUCTION ELECTRIQUE

Solide : électrons, protons, neutrons

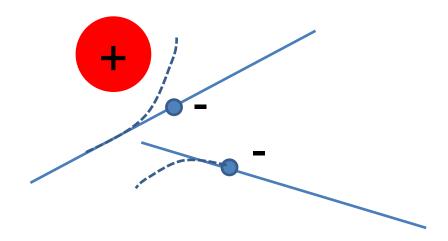


Conduction électrique dans les métaux : une partie des électrons se déplacent

#### MODELE DES ELECTRONS LIBRES DE DRUDE



→ Plusieurs approximations majeures



On néglige les interactions coulombiennes électrons / ions électrons / électrons

#### Modèle de Drude

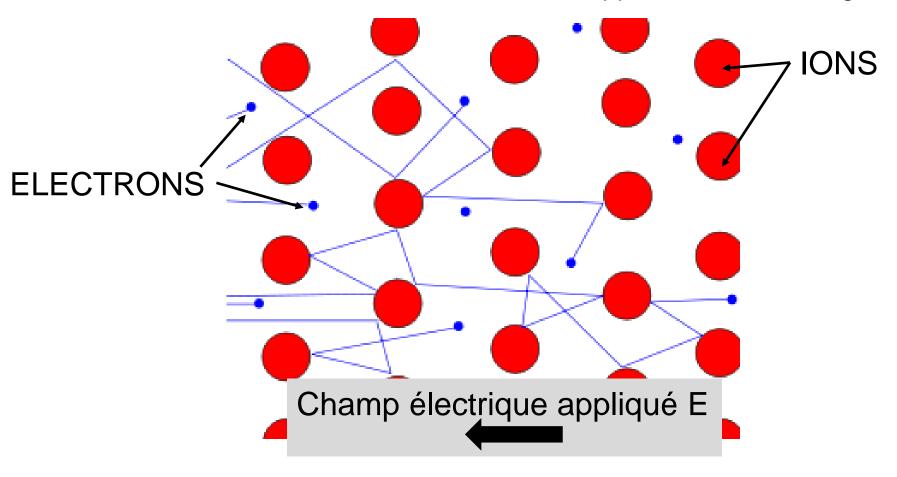


Paul Drude 1863-1906 Physicien allemand

# Traitement classique des électrons

$$\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$$

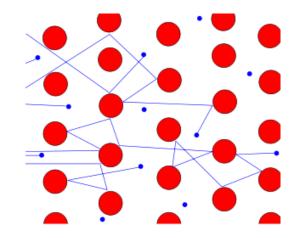
Electrons = billes bleues dans un flipper d'ions fixes rouges



### Forces subies par un électron

$$\vec{F} = q\vec{E}$$
 Force électrique

$$\vec{f} = -\frac{m}{\tau} \vec{v}$$
 Force de frottement (collisions)



q et m : charge et masse de l'électron  $\tau$  : temps caractéristique entre 2 collisions sur les ions

Application du principe fondamental de la dynamique

$$m\vec{a} = \vec{F} + \vec{f}$$
 qu'on réécrit  $\frac{dv}{dt} + \frac{1}{\tau}v = \frac{qE}{m}$ 

$$\frac{dv}{dt} + \frac{1}{\tau}v = \frac{qE}{m}$$

Résolution de l'équation différentielle (pour E=cste)

$$v = Kexp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \frac{qE\tau}{m}$$

Régime transitoire

Régime permanent

La vitesse de l'électron est

$$v = \frac{qE\tau}{m}$$

Conductivité électrique  $\sigma$  ?

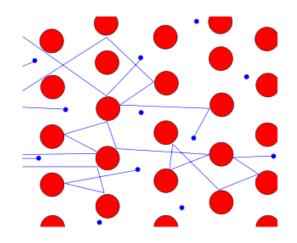
Définie par la loi d'Ohm :  $j = \sigma E$ 

Drude: 
$$v = \frac{qE\tau}{m}$$

Relation entre densité de courant j et vitesse j=nqv n : densité volumique de charge

On obtient 
$$\sigma = \frac{nq^2\tau}{m}$$

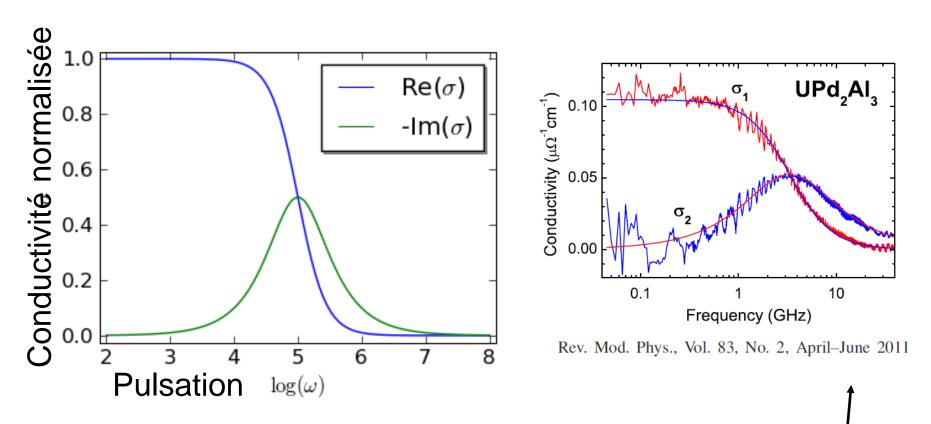
$$\sigma = \frac{nq^2\tau}{m}$$



- $\sigma$  Conductivité électrique
- m Masse de l'électron
- q Charge de l'électron
- n Densité électronique
- au Temps caractéristique entre 2 collisions

## Au-delà de la prédiction de $\sigma$ en champ E constant

### Prédiction de la conductivité en champ électrique alternatif



Excellent accord avec l'expérience, équations largement utilisées aujourd'hui pour étudier de nouveaux matériaux

## Au-delà de la prédiction de $\sigma$ en champ E constant

### Le modèle de Drude permet de démontrer la loi de WF

#### LOI DE WIEDEMANN-FRANZ

$$\frac{\textit{Conductivit\'e thermique}}{\textit{Conductivit\'e \'electrique} \times \textit{Temp\'erature}} = \textit{constante}$$



Les conductivités thermique et électrique sont liées car elles sont toutes deux liées aux électrons (dans les métaux)

# Modèle de Drude : synthèse

Une première approche encore largement utilisée aujourd'hui pour les propriétés électriques des composés conducteurs.

Mais fortes limitations.

$$\sigma = \frac{nq^2\tau}{m}$$

Pourquoi certains composés sont conducteurs ? Isolants ?

Propriétés optiques ?...

- f. Quelles sont les caractéristiques majeures du modèle de Drude ? (3 réponses correctes)
  - 1. il néglige les interactions coulombienne
  - 2. il considère les électrons libres
  - 3. il peut permettre de déterminer la conductivité électrique
  - 4. il peut permettre de déterminer si un matériau est un métal ou un isolant

#### Réponse

Quelles sont les caractéristiques majeures du modèle de Drude ?

- 1. il néglige les interactions coulombienne
- 2. il considère les électrons libres
- 3. il peut permettre de déterminer la conductivité électrique
- 4. il peut permettre de déterminer si un matériau est un métal ou un isolant

- f2. Dans le modèle de Drude, que représente le temps de relaxation  $\tau$ ?
  - 1. Le temps moyen entre deux collisions que subit un électron
  - 2. Le temps caractéristique de retour à l'équilibre d'un électron
  - 3. Le temps que met un électron à parcourir un mètre
  - 4. Le temps caractéristique d'accélération d'un électron soumis à un champ électrique

# Réponse 2

- m Masse de l'électron
- q Charge de l'électron

$$\sigma = \frac{nq^2\tau}{m}$$

- n Densité électronique
- **Temps caractéristique entre 2 collisions**

#### NOTIONS DE BASE - RESUME

Description et concepts développés.

Un solide cristallin est constitué d'atomes organisés de façon périodique. Ce cours présente quelques concepts de base de la cristallographie permettant de décrire cette organisation. Les électrons issus des atomes du cristal gouvernent les propriétés électriques et optiques des solides. On voit dans ce cours deux approches opposées et complémentaires des électrons, utiles par la suite : la description des orbitales électroniques atomiques et la description classique du gaz d'électrons libre de Drude. Dans le premier cas on voit l'interaction Coulombienne entre électrons d'un atome, dans le deuxième cas on néglige les interactions coulombiennes et on considère les électrons comme un ensemble de billes soumises à une force électrique et une force de frottement.

Vocabulaire défini dans ce cours.

Cristallographie, diffraction X, maille élémentaire, vecteurs de base, motif cristallin, espace réciproque, première zone de Brillouin, structure cubique simple, structure cubique centrée, structure cubique face centrée, structure diamant/silicium, orbitales atomiques, règle de Klechkowski, électrons de valence d'un atome, gaz d'électrons libres, modèle de Drude, (conductivité électrique, densité électronique, densité de courant, supposés déjà connus) temps caractéristique de diffusion.

#### Savoir faire.

- Déterminer la maille élémentaire de structures cristallines simples
- Déterminer la configuration électronique d'un élément
- Connaître, savoir utiliser l'expression de la conductivité de Drude

#### ANNEXE 1 – POURQUOI NEGLIGER LES INTERACTIONS COULOMBIENNES ?

Le modèle du gaz d'électrons libres de Drude décrit avec succès un bon nombre d'observations expérimentales, alors qu'il néglige les interactions coulombiennes subies par les électrons, pourquoi ?

Le premier élément de réponse est l'effet d'écran : le potentiel attractif des noyaux est amorti par le nuage électronique constitués par les orbitales atomiques pleines ; les électrons de valence ne subissent qu'un potentiel attractif fortement écranté. L'effet d'écran est illustré dans la vidéo : <a href="https://www.youtube.com/watch?v=ZPfDBu8Mhk8">https://www.youtube.com/watch?v=ZPfDBu8Mhk8</a>

Le deuxième élément de réponse est décrit par la théorie du liquide de Fermi avec la notion de quasi-particules. L'idée est la suivante : considérons un ensemble d'électrons qui se repoussent du fait de l'interaction coulombienne. On peut dans de nombreux cas (métaux, semiconducteurs) leur associer un ensemble de quasi-particules libres : chaque quasi-particule correspond à un électron habillé par les interactions qui l'entoure. Par analogie, on peut visualiser un individu se déplaçant dans une foule : on le décrit soit comme un individu en interaction, soit comme un individu dans un endroit désert se déplacant avec une vitesse moyenne plus lente.

#### ANNEXE 2 – VIDEOS SUR LA CRISTALLOGRAPHIE

Voici les liens vers deux belles vidéos sur la cristallographie, qui durent 2 à 3 minutes.

https://www.dailymotion.com/video/x1i2rf0

https://www.youtube.com/watch?time\_continue=187&v=PvLu7BOsJhM&feature=emb\_title

