

# CHAPITRE 2

# LES STRUCTURES

*Pr. A. Belayachi*  
*Université Mohammed V - Agdal Faculté*  
*des Sciences Rabat*  
*Département de Physique - L.P.M*  
*[belayach@fsr.ac.ma](mailto:belayach@fsr.ac.ma)*

# 1. Le solide cristallin

Un **crystal idéal** est formé par la **répétition périodique et infinie** dans l'espace d'éléments identiques.

Un **crystal physique réel**, mais toujours idéalisé dans le fait qu'il est **infini**, peut-être décrit en donnant son **réseau de Bravais** sous-jacent, ainsi qu'une description de **l'arrangement des atomes, molécules, ions, etc.**, à l'intérieur d'une maille primitive particulière. On utilise aussi le terme « **structure cristalline** » pour décrire un **crystal physique réel**.

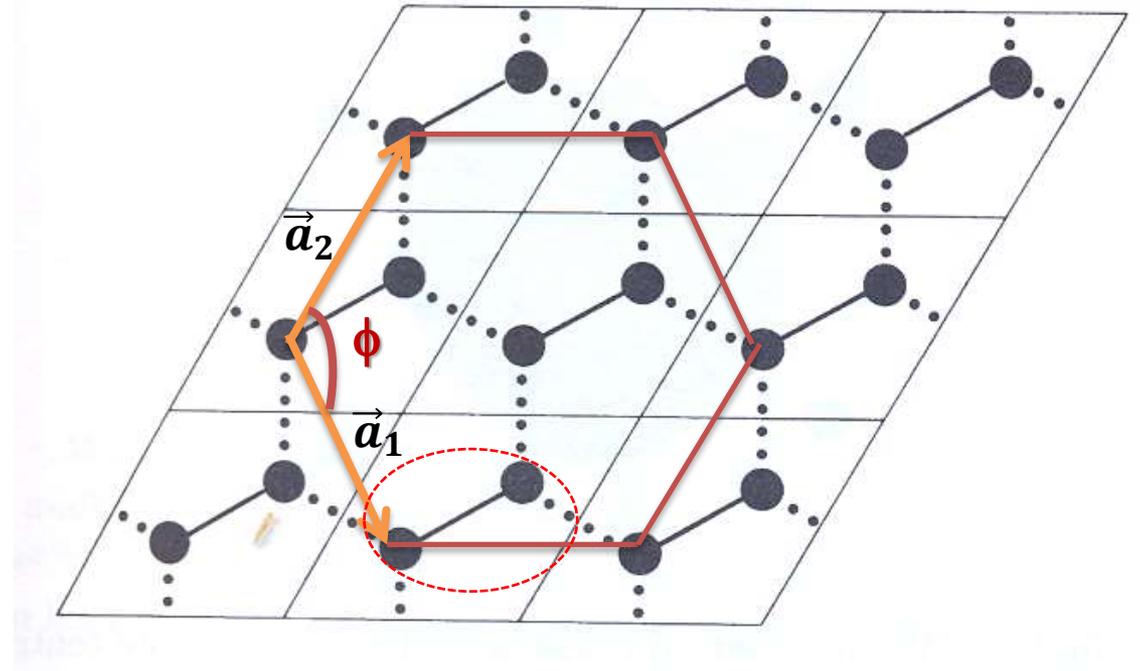
## *1.1 Structure cristalline*

Une **structure cristalline** est constituée de copies identiques de la même unité physique, appelée **motif** ou **base**, située sur tous les nœuds d'un réseau de Bravais.

## *1.2 Réseau à motif*

Il fait référence à une **structure périodique** même quand l'unité de base n'est pas un objet physique mais un autre ensemble de points.

Les nœuds d'un réseau en nid d'abeilles bidimensionnel, ne constituent pas un réseau de Bravais. Cet ensemble de nœuds peut être décrit par un réseau de Bravais hexagonal simple, de paramètres  $a_1 = a_2 = a$  et  $\phi = 120^\circ$ , avec un motif à deux points.



## 2. Caractérisation d'une structure cristalline

### 2.1 Description

Une structure cristalline **idéale** sera décrite en donnant le **réseau de Bravais**, le **motif** ou la **base** ainsi que les coordonnées atomiques de chacun des atomes dans la **maille élémentaire** ou une **maille conventionnelle**.

### 2.2 Compacité

On appelle **compacité** ou **densité de remplissage C** d'une structure le rapport du volume réellement occupé au volume total de la maille:

$$C = \frac{V_{\text{occupé}}}{V_{\text{maille}}}$$

Dans le cas où les nœuds sont occupés par des atomes ou des ions identiques assimilables à des **sphères dures** de rayon  $r$ ,  $C$  est définie par:

$$C = \frac{N \frac{4}{3} \pi r^3}{V_{\text{maille}}}$$

$N$ : est la population ou la multiplicité de la maille i.e. le nombre de motifs.

Par exemple pour une structure cristalline dont le réseau de Bravais est cubique centré, la multiplicité est donnée par:

$$N = \left( 8 \times \frac{1}{8} \right)_{\text{sommets}} + 1_{\text{centre}} = 2$$

## 2.3 Coordinance

Dans le modèle d'assemblage de sphères dures, la coordinance d'une sphère est le **nombre de voisins tangent** à la sphère envisagée.

## 2.4 Masse volumique

Ramenée à une maille, c'est le rapport de la masse des constituants d'une maille par son volume.

$$\rho = \left( \frac{m}{V} \right)_{\text{maille}} = \frac{NM_{\text{motif}}}{N_A V_{\text{maille}}}$$

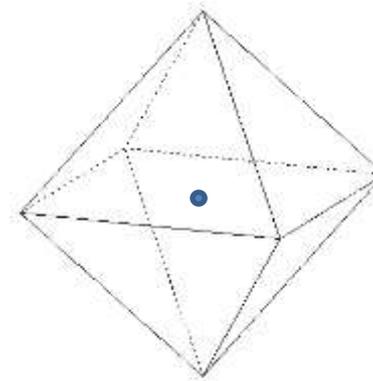
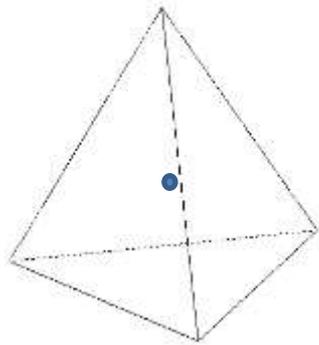
**$N$** : multiplicité de la maille;

**$M_{\text{motif}}$** : masse molaire du motif;

**$N_A$** : constante d'Avogadro.

## 2.5 Existence de sites

- Dans le modèle d'assemblage de sphères dures en contact on ne peut pas remplir tout l'espace d'une maille ( $C < 1$ ). Dans ce volume perdu on peut définir des **cavités** ou des **sites**, lieux où on pourra éventuellement placer d'autres atomes. On s'intéresse à deux types de sites: les sites tétraédriques et les sites octaédriques.
- On appelle **site tétraédrique**, noté **T**, une **cavité** située au **centre d'un tétraèdre régulier** défini par 4 atomes en contact.
- On appelle **site octaédrique**, noté **O**, une **cavité** située au **centre d'un octaèdre régulier** défini par 6 atomes en contact. Par exemple les centres des faces d'un cube forment un octaèdre régulier.



### Schéma d'un site T

### Schéma d'un site O

- Réseau cubique centré formé d'un seul type d'atomes de rayon  $r$

Nombre de sites	12 Sites T	6 sites O
Taille du site	$0,291 r$	$0,155 r$

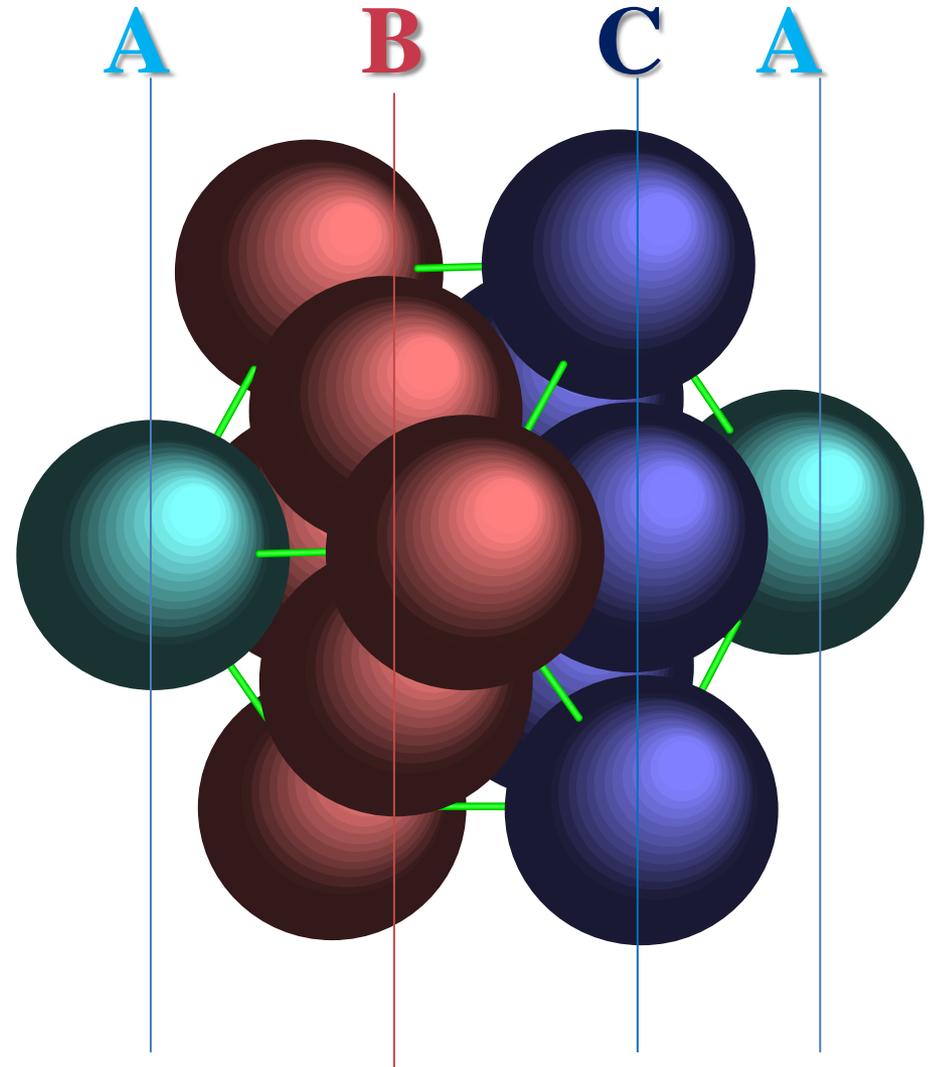
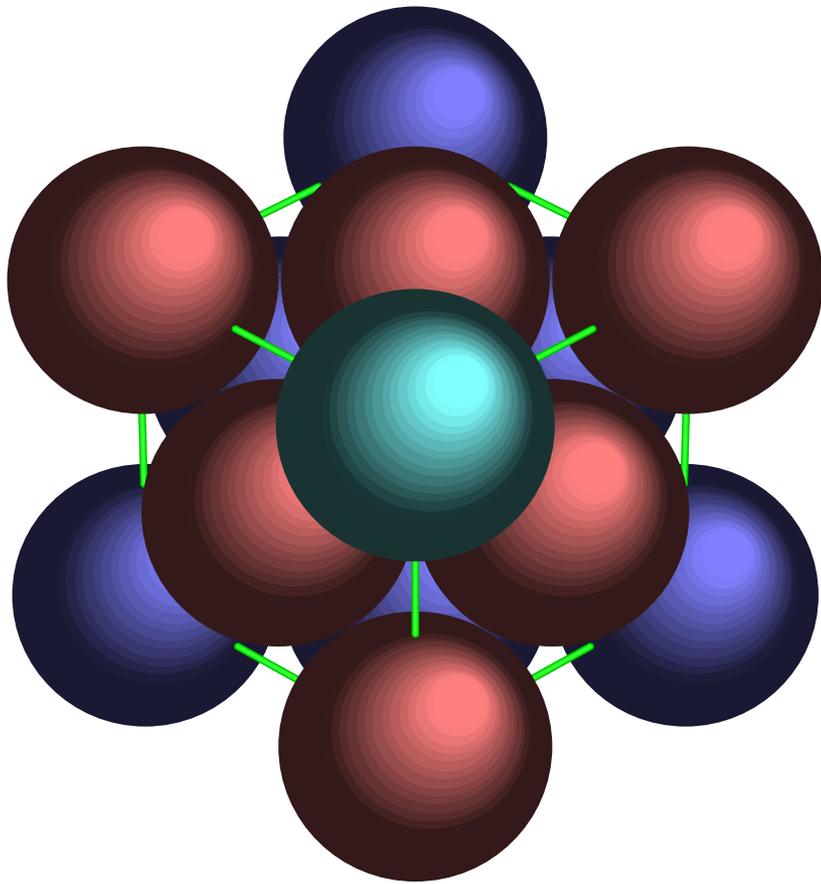
- Réseau cubique à faces centrées formé d'un seul type d'atomes de rayon  $r$

Nombre de sites	8 Sites T	4 sites O
Taille du site	$0,225 r$	$0,414 r$

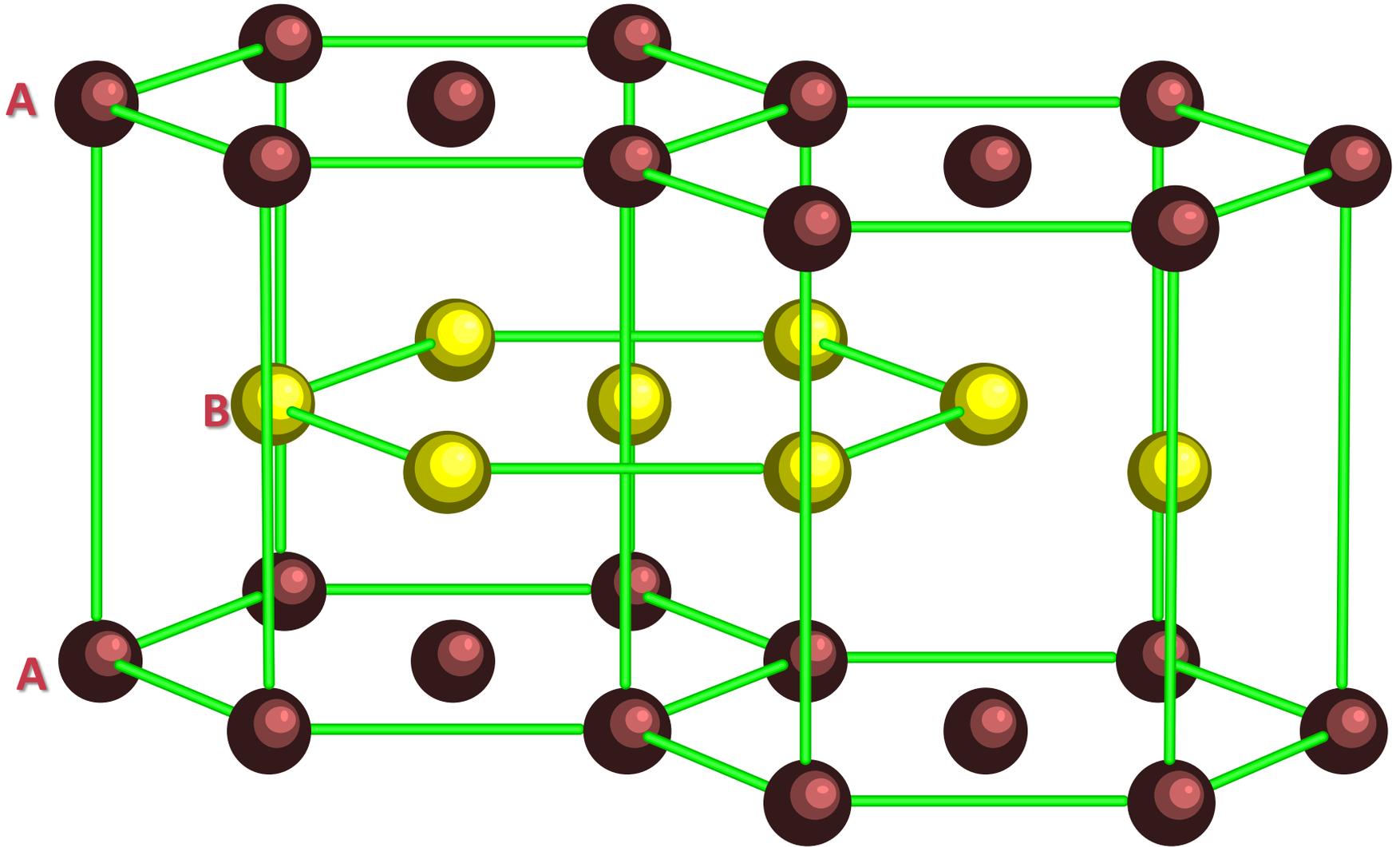
### 3. Empilements compacts

Il existe deux manières d'empiler **régulièrement** des sphères égales de manière à minimiser le volume occupé, l'une du type **ABCABC...** conduit à une **structure à symétrie cubique** (réseau cubique à faces centrées) et l'autre du type **ABABAB...** qui conduit à une **symétrie hexagonale**, on l'appelle **structure hexagonale compacte** (TP cours 2).

Dans un empilement compact le taux de remplissage (ou compacité: rapport du volume occupé par les sphères au volume total) est de **74%**.



**Empilement compact des plans dans le réseau C.F.C**



**Empilement ABAB dans une structure hexagonale compacte**

## 4. Structures usuelles

Ce sont les structures qui seront étudiées dans le (TP cours 2).

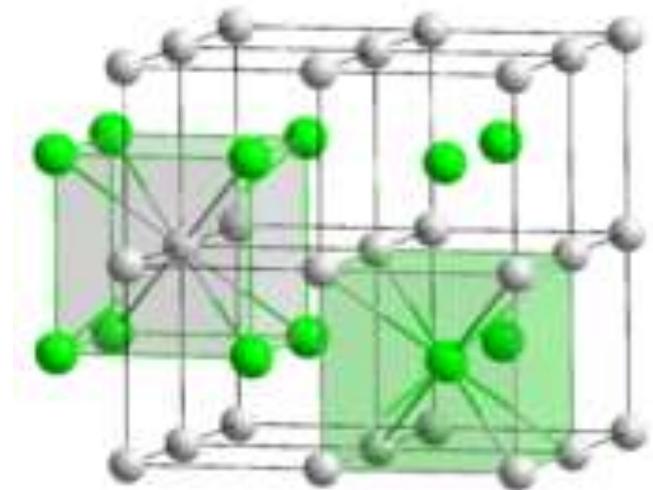
### 4.1 Structure du chlorure de césium

Le réseau de Bravais est cubique simple.

Le motif est constitué de deux ions:

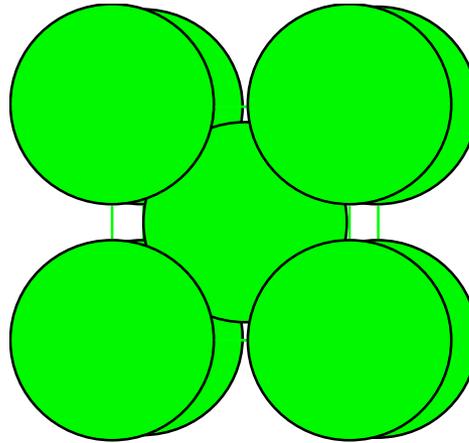
1 ion  $\text{Cl}^-$   $(0,0,0)$

1 ion  $\text{Cs}^+$   $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$



## 4.2 Structure des métaux alcalins

Le réseau de Bravais adopté par les métaux alcalins (ainsi que certains métaux de transitions) est **cubique centré**.



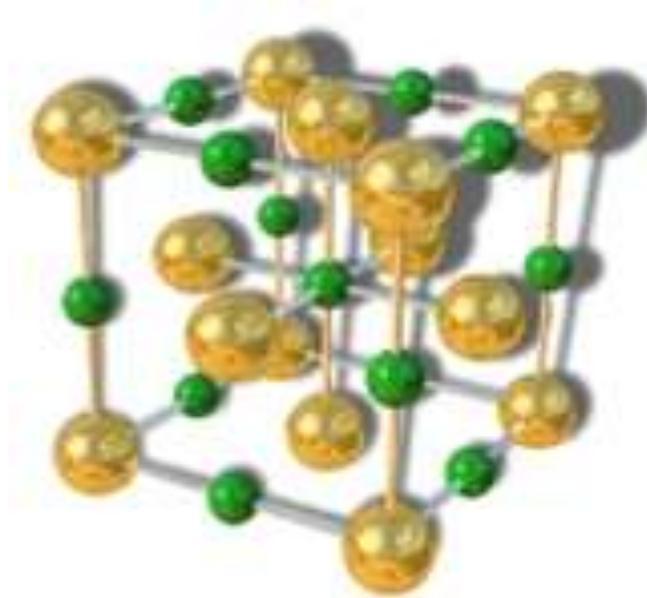
Le motif est constitué de deux atomes:

1 atome en  $(0,0,0)$

1 atome en  $\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$

## 4.3 Structure du chlorure de sodium

Le réseau de Bravais est cubique faces centrées.



Le motif est formé de deux ions:

1 ion  $\text{Cl}^-$  en  $(0,0,0)$

1 ion  $\text{Na}^+$  en  $\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$

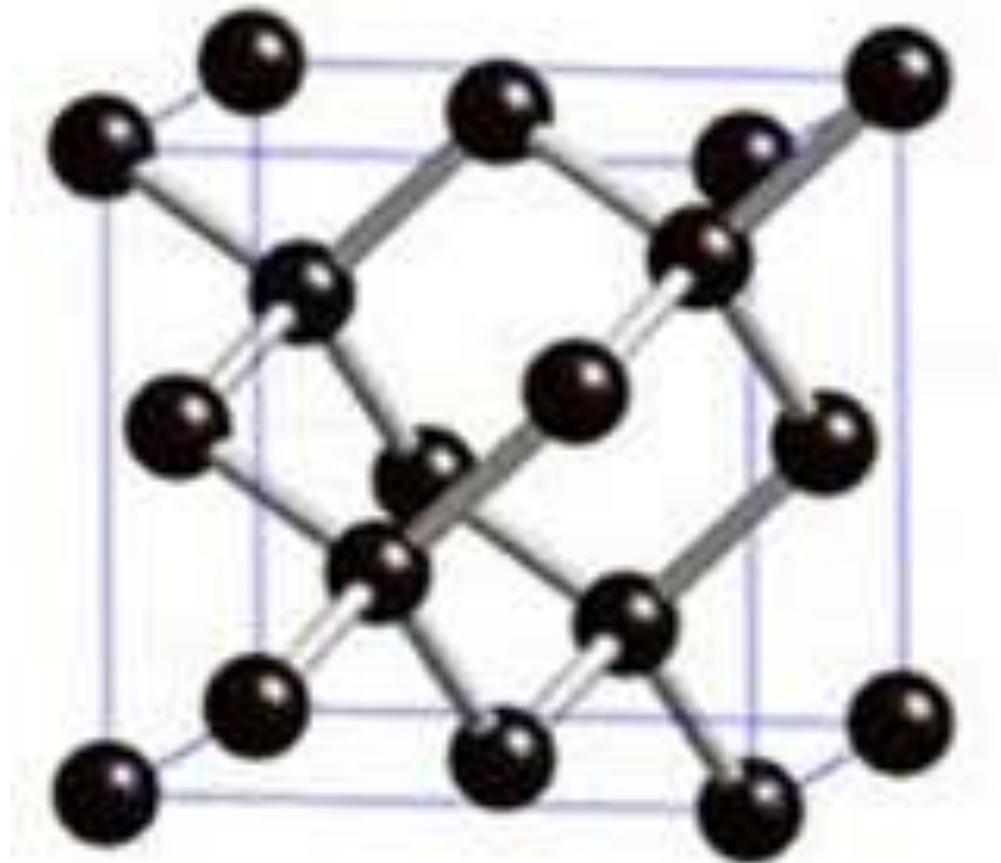
## 4.4 Structure du diamant

Le réseau de Bravais est  **cubique faces centrées**.

Le motif est formé de deux atomes:

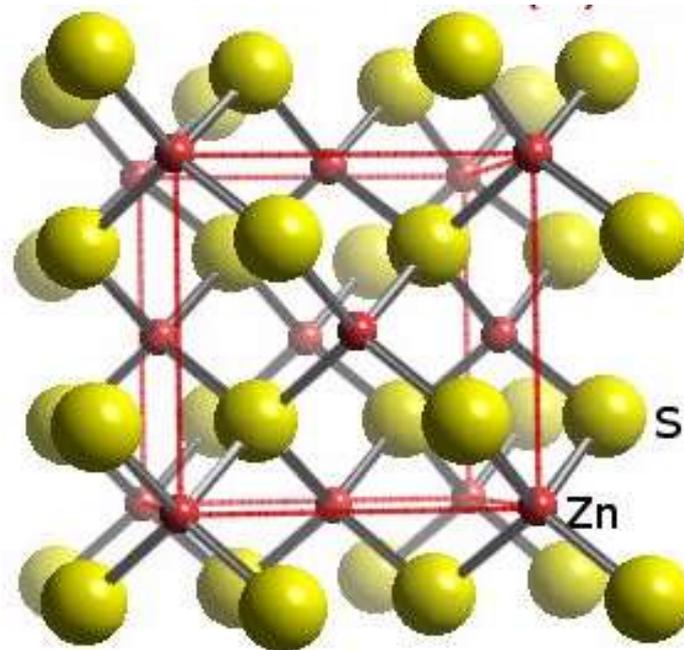
1 atome C  $(0,0,0)$

1 atome C  $\left(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}\right)$



## 4.5 Structure Blende

C'est la structure du sulfure de zinc ZnS qui est une structure voisine de celle du diamant. Les ions  $S^{2-}$  occupent les nœuds du réseau CFC et les ions  $Zn^{2+}$  la moitié des sites tétraédriques du réseau.



## 4.6 Structure du magnésium

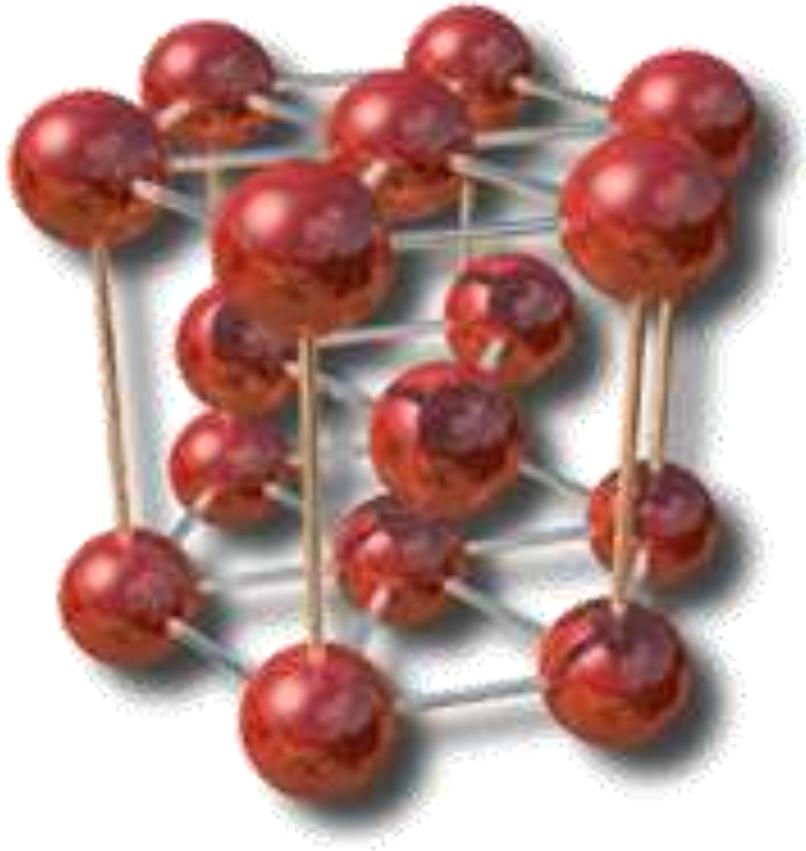
Le réseau de Bravais est **hexagonal primitif**. Le motif est formé de deux atomes:

1 atome Mg  $(0,0,0)$

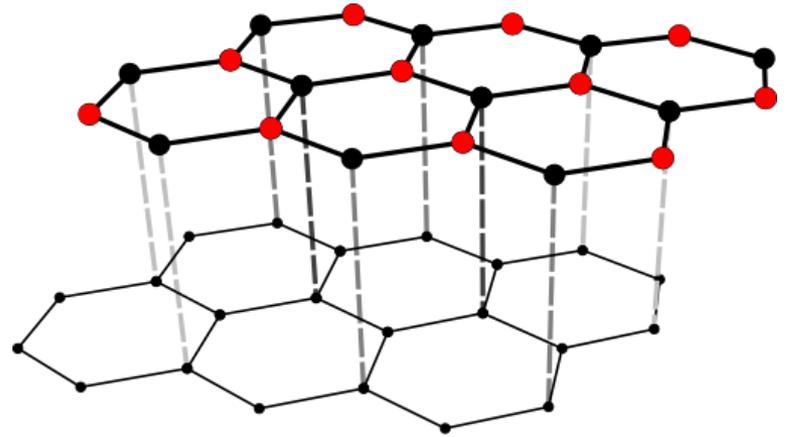
1 atome Mg  $(\frac{2}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2})$

## 4.7 Structure du graphite

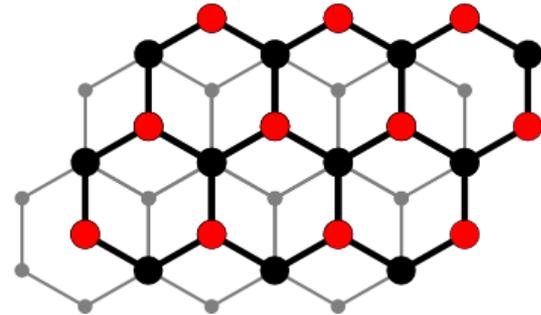
Dans la forme  $\alpha$ , le réseau est hexagonal simple avec un motif de 4 atomes. Les atomes sont disposés selon des plans parallèles (plans réticulaires pour lesquels la densité surfacique d'atomes est maximale).



**Structure HC du magnésium**



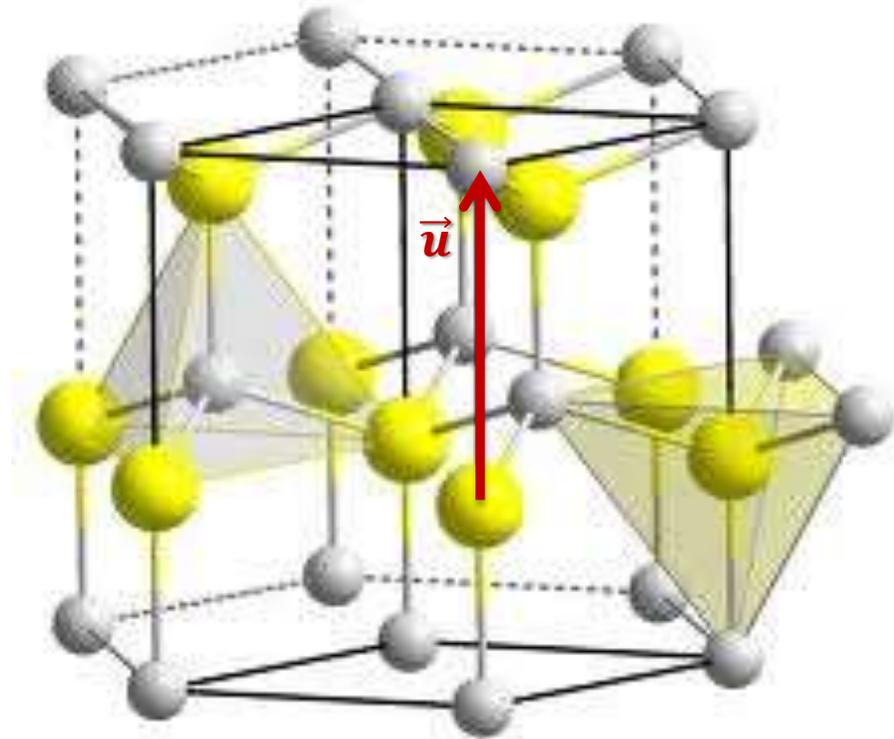
**Structure en feuillet du carbone graphite**



## 4.8 Structure würtzite

La structure würtzite est la variété hexagonale du ZnS cubique. Les ions  $S^{2-}$  forment une structure HC et les ions  $Zn^{2+}$  occupent la moitié des sites tétraédriques. Les cations  $Zn^{2+}$  forment une structure HC analogue à celle des anions  $S^{2-}$  mais décalée par une translation de type vecteur :

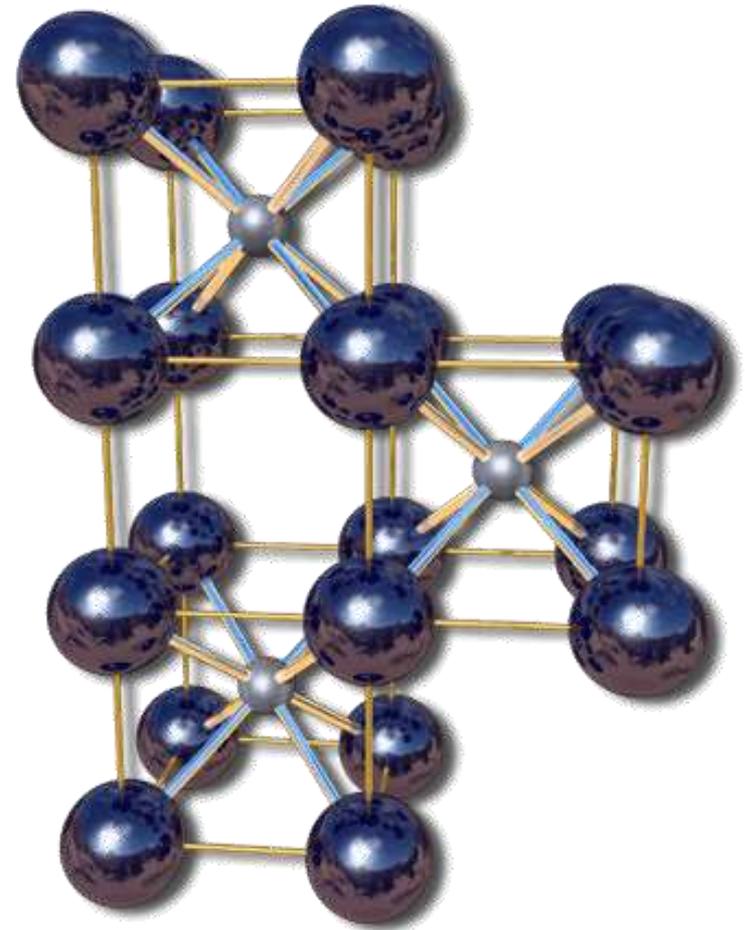
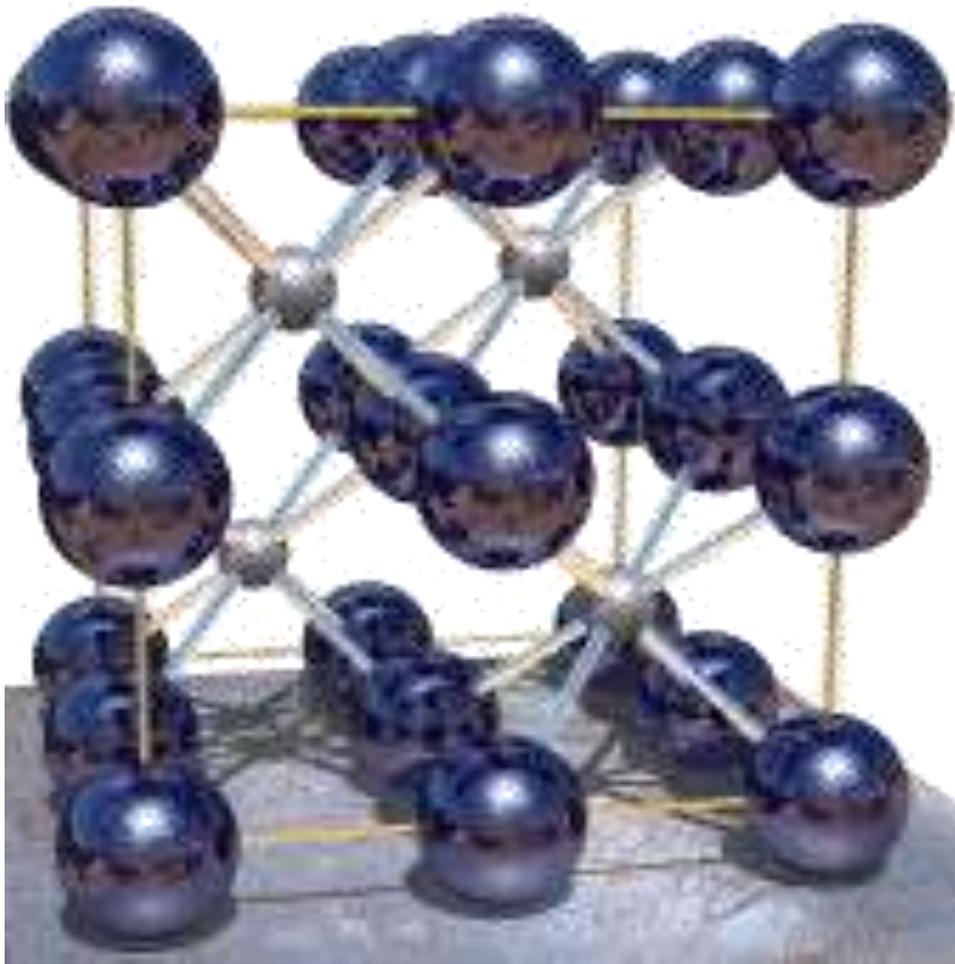
$$\vec{u} \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{5}{8} \end{pmatrix}$$



## 5. Structures particulières

### 5.1 Structure Fluorine type $AX_2$

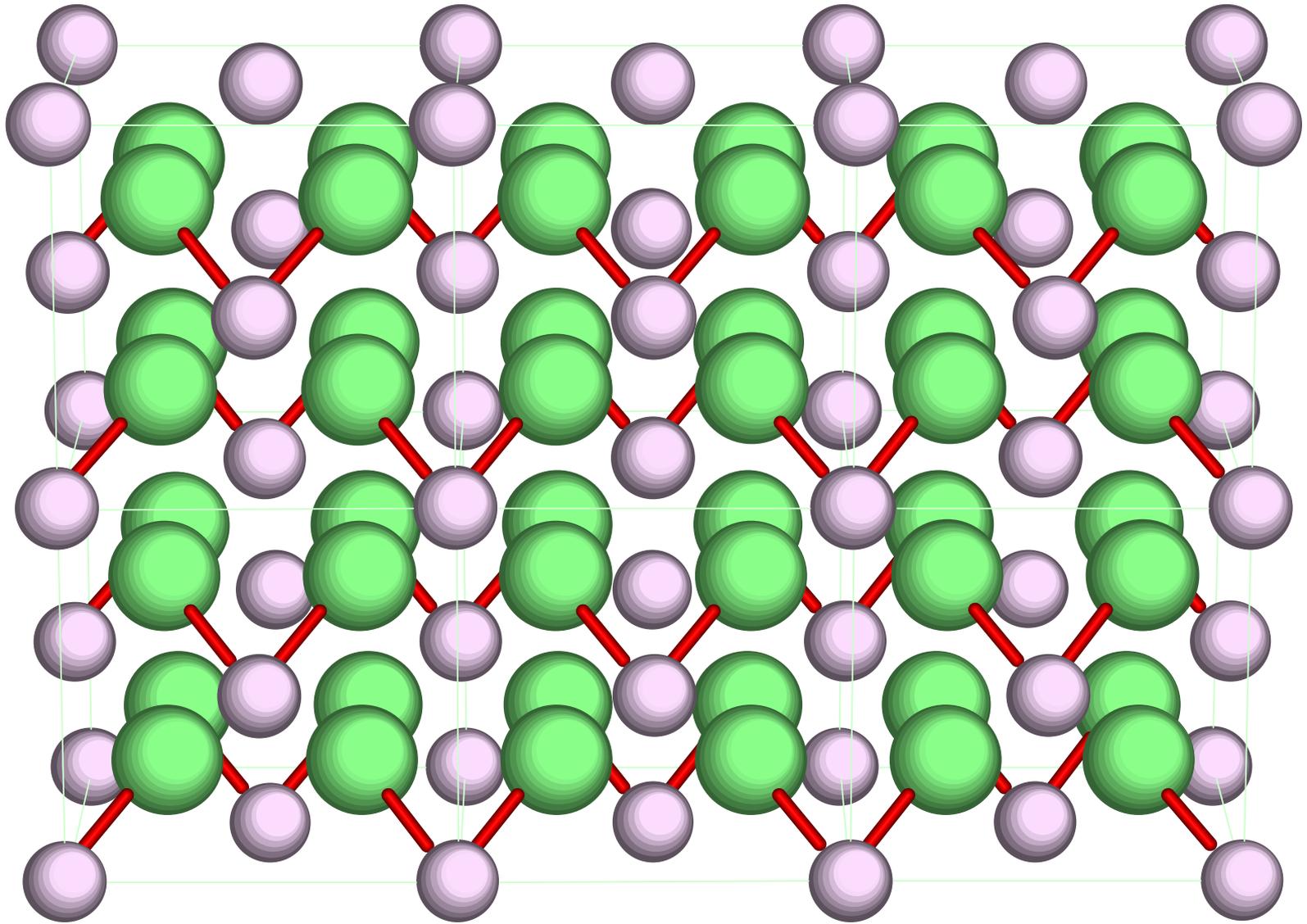
Elle est apparentée à la structure du fluorure de calcium  $CaF_2$ , les ions fluor occupent les **sommets**, les **centres des faces**, les **milieux des arêtes** et le **centre de la maille** d'un cube d'arête  $a$ . Les ions calcium occupent la moitié des sites cubiques. Ils ont donc une coordination 8. Chaque fluor est entouré par quatre atomes de calcium qui forment un tétraèdre (coordination 4). La maille contient **quatre** groupements  $CaF_2$ . On observe une alternance de sites cubiques (sites de coordination 8) occupés par les cations calcium (en gris), et de sites cubiques vides. Un site sur deux est occupé par les cations calcium.



**Représentation de la structure Fluorine origine sur le fluor.**

On peut représenter alternativement cette structure en plaçant les **ions calcium** dans un réseau **CFC** et les **ions fluors** au centre de **tous les sites tétraédriques**, comme illustré sur la figure ci-dessous. Cette représentation met en évidence la symétrie cubique à faces centrées mais illustre mal la compacité du réseau des ions fluor ; elle est par contre plus adaptée à la description de composés tels que  $\text{LiO}_2$ . On l'appelle structure antifuorine. Les caractéristiques de la structure sont:

Réseau :	cubique F
paramètre de la maille:	$a = 5,363 \text{ \AA}$
Compacité:	$C = 0,641$
Coordinance $\text{Ca}^{2+}$ :	8
Coordinance $\text{F}^-$ :	4



**Représentation de la structure Fluorine origine sur le calcium**

## 5.2 Structure pérovskite type $ABX_3$

La **structure pérovskite** est la structure apparentée à celle de l'oxyde de titane de Strontium ( $SrTiO_3$ ). La formule chimique générale pour des composés de structure pérovskite est  $ABX_3$ , où A et B sont deux cations de rayons ioniques très différents (les atomes A sont plus grands que les atomes B) et X un anion (généralement l'oxygène). La **structure idéale** est **cubique simple** dont laquelle les cations A sont entourés par 12 anions dans une coordination cubo-octaédrique, tandis que les cations B sont entourés par 6 anions dans une coordination octaédrique. Les anions X sont entourés par 2 cations B et 4 cations A.

Cependant la structure cubique idéale subit une distorsion (déterminée par le facteur de Goldschmidt  $t$ ) qui dépend des rayons ioniques des atomes qui la composent.

$$t = \frac{R_A + R_X}{\sqrt{2}(R_B + R_X)}$$

La structure pérovskite est stable pour  $0,8 \leq t \leq 1,06$ .

$t$	0,8-0,9	0,9-0,95	0,95-1	1-1,06
Réseau	Orthorhombique	quadratique	Cubique	Hexagonal

Par exemple le  $\text{CaTiO}_3$  subit une déformation orthorhombique de paramètres de maille:

$$a = 5,4338 \text{ \AA} \quad b = 5,4886 \text{ \AA} \quad c = 7,6841 \text{ \AA}$$

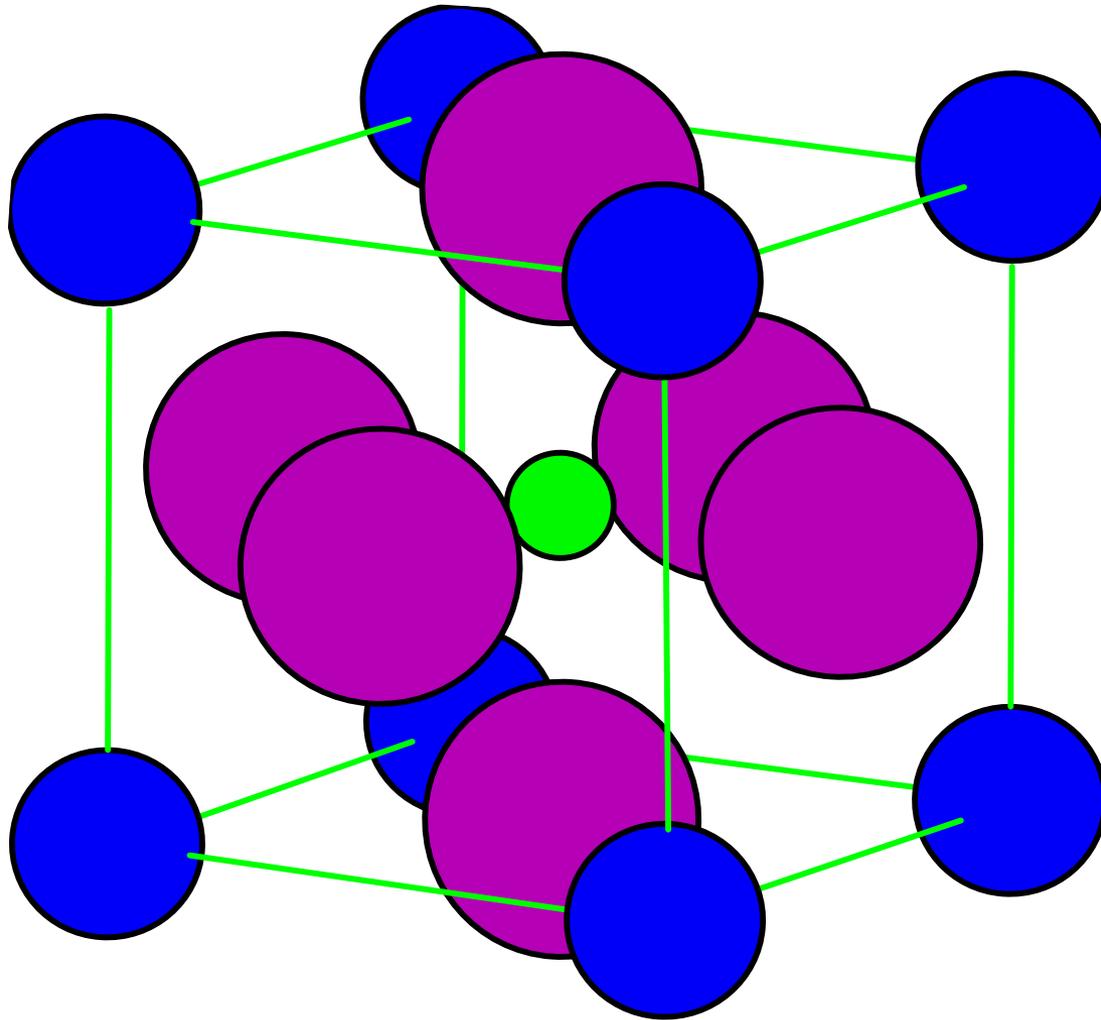
**Le composé  $\text{BaTiO}_3$  subit une déformation quadratique:**

**Réseau :** quadratique

**paramètres de la maille:**  $a = 3,995 \text{ \AA}$   
 $c = 4,034 \text{ \AA}$

**Les pérovskites avec leur structure cristalline particulière présentent une variété étonnante de propriétés électroniques et magnétiques.**

**Les matériaux de structure pérovskite sont utilisés dans les capteurs, les dispositifs à mémoires (RAM), amplificateurs, piles à combustible, dispositifs électro-optiques et depuis les années 90 comme supraconducteurs à haute température.**



**Modèle de la structure pérovskite**

### 5.3 Structure spinelle type $ABX_4$

- La structure spinelle peut se décrire, en terme d'empilement compact, comme un arrangement CFC d'anions (empilement ABC selon la direction [111] de la maille spinelle) dans lequel 50% des sites octaédriques sont occupés par un cation et 1/8 des sites tétra par le deuxième cation. Chaque maille contient 8 unités formulaires, donc 32 anions associés à 32 sites octaédriques et 64 sites tétraédriques

**Spinelle direct** : le cation trivalent est en site octaédrique uniquement.

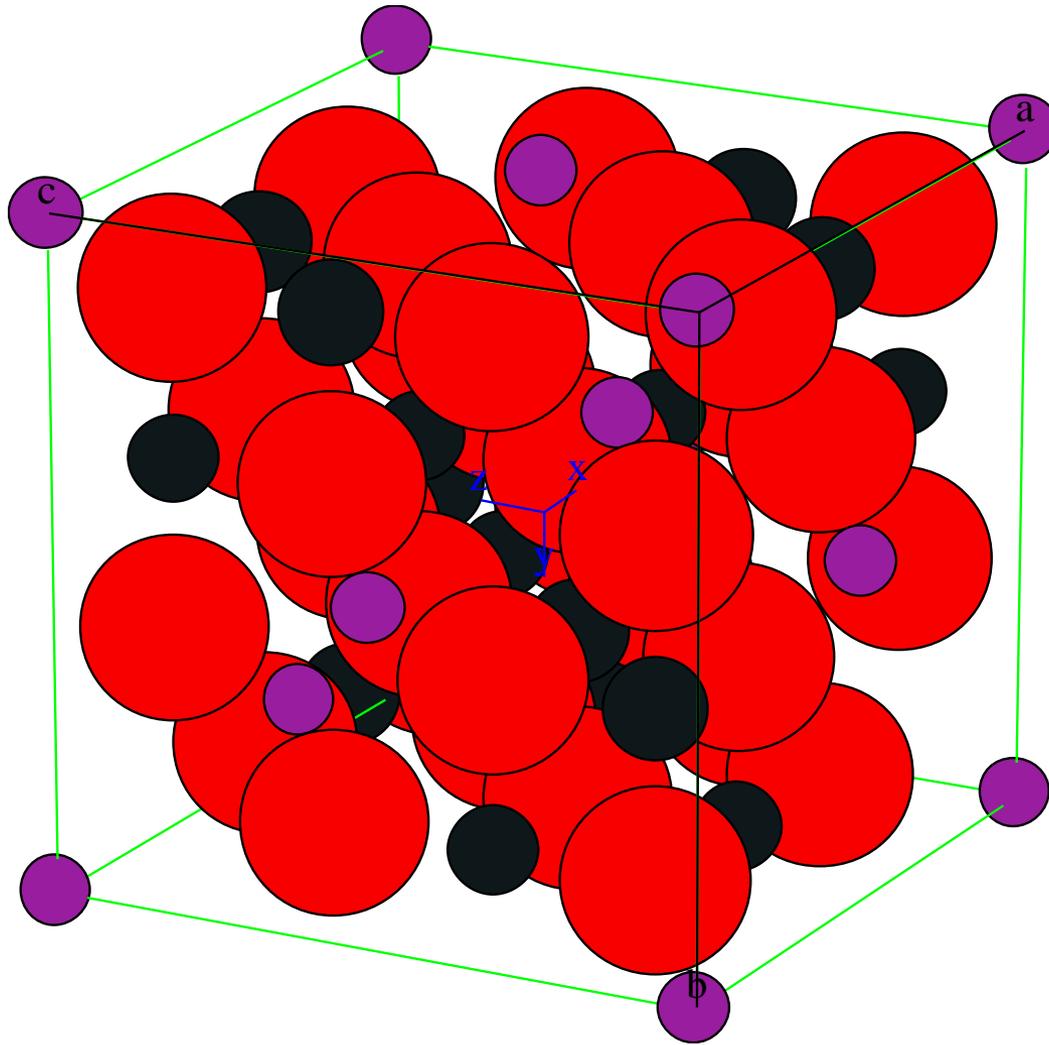
**Spinelle inverse** : la moitié des cations trivalents se trouve en site tétraédrique .

Dans le autres cas la spinelle est dite **mixte**.

- En fonction de la nature des cations et leur distribution dans les sites tétraédriques et octaédriques la spinelle peut présenter une grande variété de propriétés **électroniques** et **magnétiques**.
- Les ferrites spinelles de formule générale  $MFe_2O_4$ , où M représente un cation bivalent tel que **Ni**, **Co**, **Cu**, **Zn**, **Fe**, **Mg**...., appartiennent à une structure de symétrie cubique à faces centrées dont la maille élémentaire mesure environ 80 nm et comporte 32 ions oxygène développant 8 sites tétraédriques et 16 sites octaédriques qui sont occupés par les cations métalliques. Ce sont surtout les ferrites Mn-Zn et les ferrites Ni-Zn qui sont les plus utilisées.

- Les ferrites sont des **matériaux** idéaux pour **l'électronique** et les **télécommunications** : inducteurs hautes fréquences (HF), transformateurs HF, tores pour tubes cathodiques, bâtonnets d'antennes, mémoires magnétiques non volatiles, microcomposants, filtres LS...

- Certaines ferrites sont utilisées comme peinture magnétique pour les revêtements d'**avions** et de **navires** militaires dits **furtifs**, ces peintures ou couches absorbent une partie des ondes radar et ne laissent sur les écrans qu'une trace très faible ce qui les rend **indétectables**.



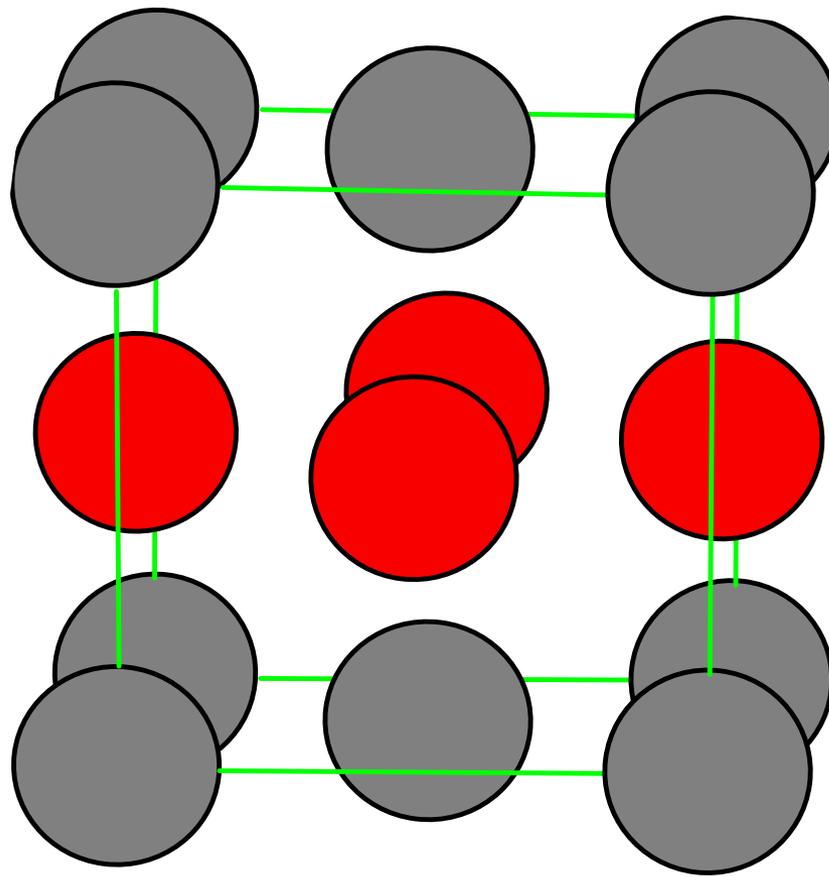
**Modèle de la structure spinelle  $\text{AlFe}_2\text{O}_4$**

## 6. Alliages

Beaucoup de métaux donnent lieu à la formation d'alliages.

### 6.1 Alliages de substitution

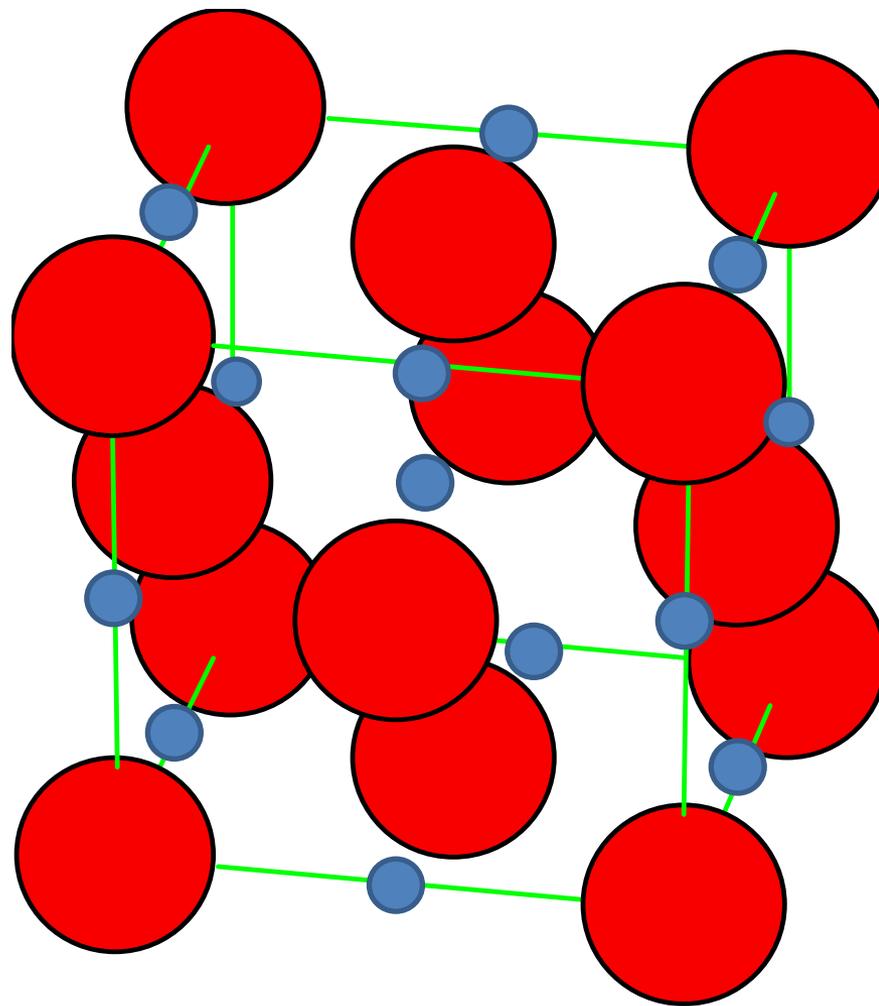
Ils correspondent au mélange de deux métaux possédant la même structure à l'état pur. Ils sont observés lorsque leur **rayons atomiques sont proches** (à moins de 15%) et leurs **électronégativités voisines**. C'est le cas de l'alliage **or/cuivre CuAu** qui peut exister sous deux formes, une forme désordonnée (occupation aléatoire des nœuds par les deux atomes) dont la maille est cubique ( $a = 384$  pm), une forme ordonnée (Figure ci-dessous) dans laquelle la maille est quadratique ( $a = 398$  pm,  $c = 372$  pm).



**Dans l'alliage or/cuivre ordonné, les atomes d'or occupent les sommets et les centres des bases alors que les atomes de cuivre occupent le centre des faces du parallélépipède de base carré.**

## *6.2 Alliages d'insertion*

Ils apparaissent lorsqu'un des **atomes** est nettement **plus petit** que **l'autre**. Celui-ci peut se loger dans un site du réseau-hôte sans entraîner une déformation trop importante. Les alliages d'insertion les plus fréquents sont issus d'un arrangement de type cubique à faces centrées pour le réseau-hôte, les atomes d'insertion sont disposés dans les sites octaédriques de cette structure. Par exemple le carbure de tungstène est un alliage très résistant utilisé pour les outils de coupe mécanique.



**L'alliage carbure du tungstène CW est obtenu par insertion d'atomes carbone dans tous les sites octaédriques du réseau de tungstène.**

## 7. Structures non idéales

Il n'existe pas de preuve générale du fait que le cristal idéal constitue l'état d'énergie minimale des atomes au zéro absolu. Il existe dans la nature de nombreuses structures **régulières** mais non totalement périodiques. Certaines structures non périodiques peuvent être métastables, mais avec des durée de vie très longues.

### *7.1 Croissance pentagonale*

C'est un **empilement dense** de sphères indéformables **autour** d'un axe de **symétrie d'ordre 5**. Elle peut se développer dans l'espace à partir d'un noyau convenable comme pour des diamant synthétiques, des dendrites de cuivre, des whiskers de nickel, fer et platine ainsi que pour des cristaux de cobalt obtenus par réduction du bromure de cobalt  $\text{CoBr}_2$ .

## *7.2 Empilement aléatoire*

Il existe des structures formées d'empilements de plans denses et non périodiques (par exemple un empilement du type ACBCAB.....) appelés **empilements aléatoires** qu'on rencontre dans certains systèmes comme les **nanoparticules de cobalt**.

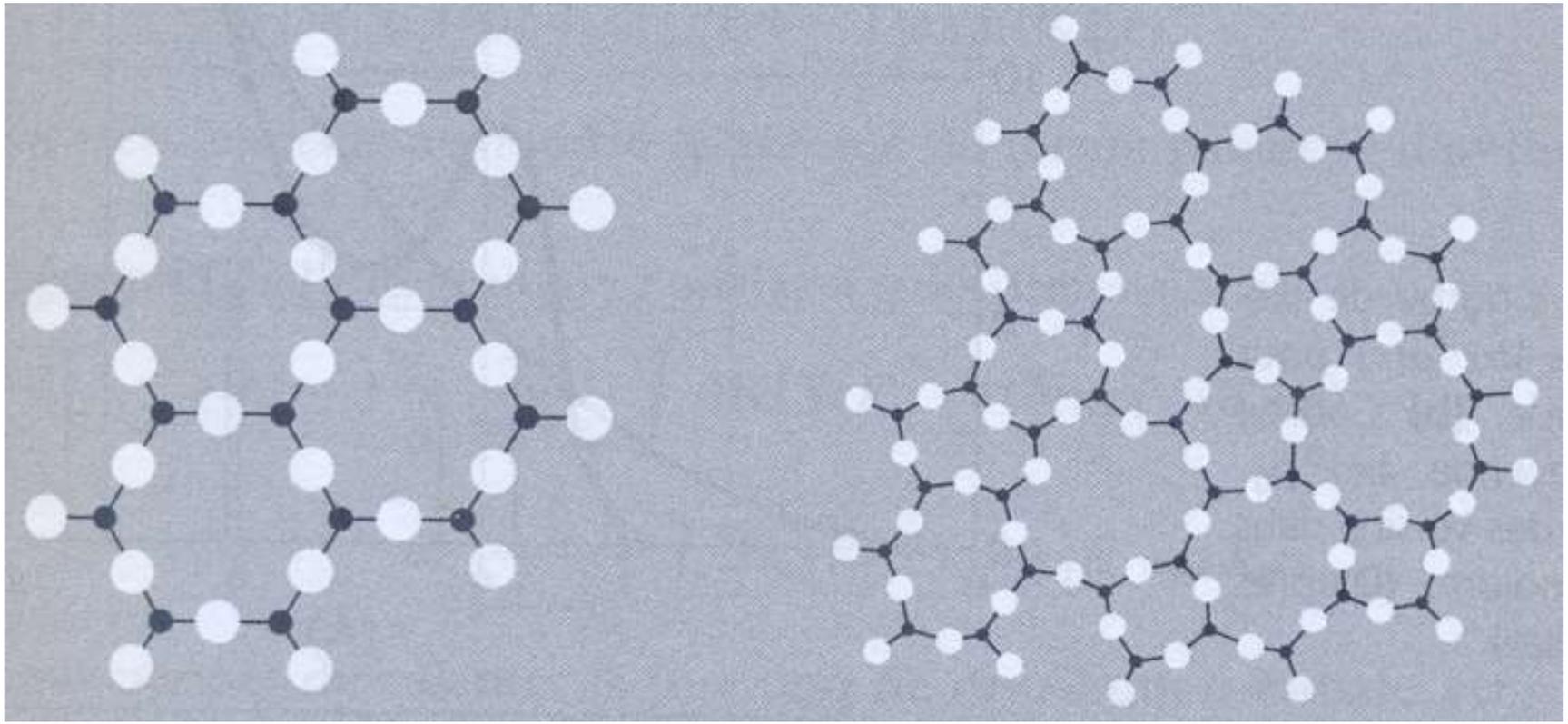
## *7.3 Polytypisme*

Il est caractérisé par une séquence d'empilements à **période élevée**, c'est-à-dire la répétition des dizaines de séquences d'empilements réguliers. Par exemple un empilement:

**ACBCABAC|ACBCABAC|ACBCABAC|ACBCABAC|..**

## *7.4 Structures non cristallines*

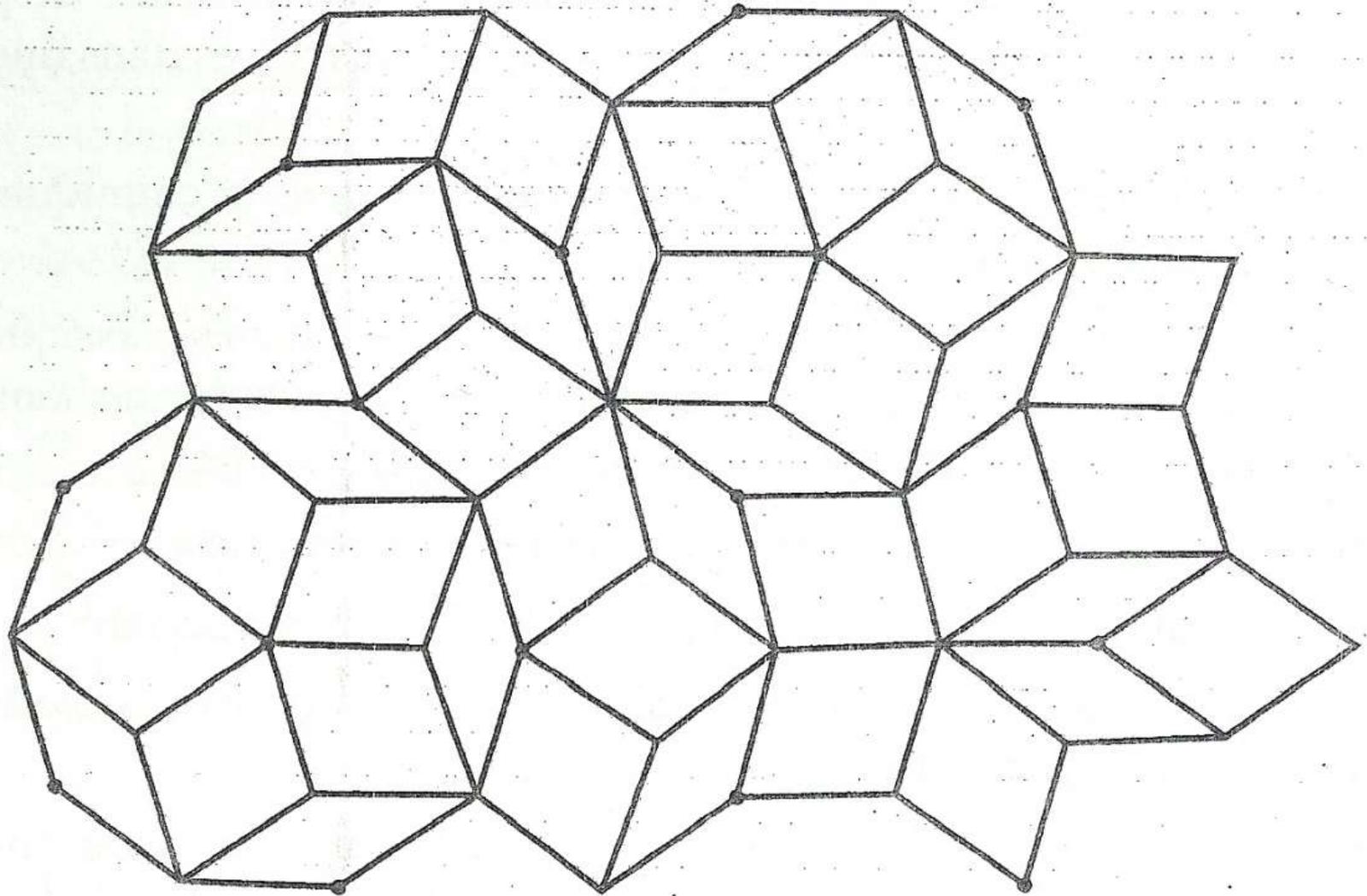
**Elles représentent les solides amorphes, solides non cristallins, solides désordonnés, verres et cristaux liquides. Les structures non cristallines n'ont pas de signification structurale précise mais désignent une structure «qui n'est cristalline à aucune échelle significative». L'ordre principal que représente la structure est imposé par une distance approximativement constante entre atomes ou molécules plus proches voisins (Voir TP cours 2 ).**



**Schéma à deux dimensions illustrant la différence entre la structure d'un cristal répétée régulièrement et le réseau aléatoire continu d'un verre.**

## 8. Les quasi-cristaux

Un cristal parfait est obtenu en pavant entièrement l'espace à l'aide de parallélépipèdes juxtaposés. Ces pavés constituent une figure qui se répète périodiquement, sans vide et sans superposition comme des carrés, des triangles isocèles équilatéraux ou des rectangles. En 1979, le mathématicien R. Penrose a montré qu'il est possible de paver de manière apériodique une surface au moyen de deux losanges d'angles au sommet  $\frac{\pi}{5}$  et  $\frac{2\pi}{5}$ . En 1984, ce résultat mathématique a trouvé une **application** en **physique** des **matériaux** lorsque furent fabriqués des structures cristallines d'un alliage de manganèse aluminium possédant un pavage à trois dimensions non périodique appelées les **quasi-cristaux**.



**Pavage de Penrose avec deux losanges**

Ces quasi-cristaux montrent l'existence d'une structure ordonnée à grande distance avec, en plus, l'existence de **symétrie** d'ordre **5**. Ils sont préparés par trempe ultrarapide d'alliages liquides. Leurs propriétés physico-chimiques sont très remarquables:

- **grande résistivité électrique par rapport aux alliages cristallins;**
- **faible conductivité thermique contrairement aux métaux;**
- **grande dureté ( 5 fois celle des aciers spéciaux);**
- **non-mouillabilité;**
- **résistance à l'oxydation et à la corrosion supérieure à celle des métaux;**
- **très faible coefficient de frottement sur la surface (10 fois plus faible que celle d'un acier).**

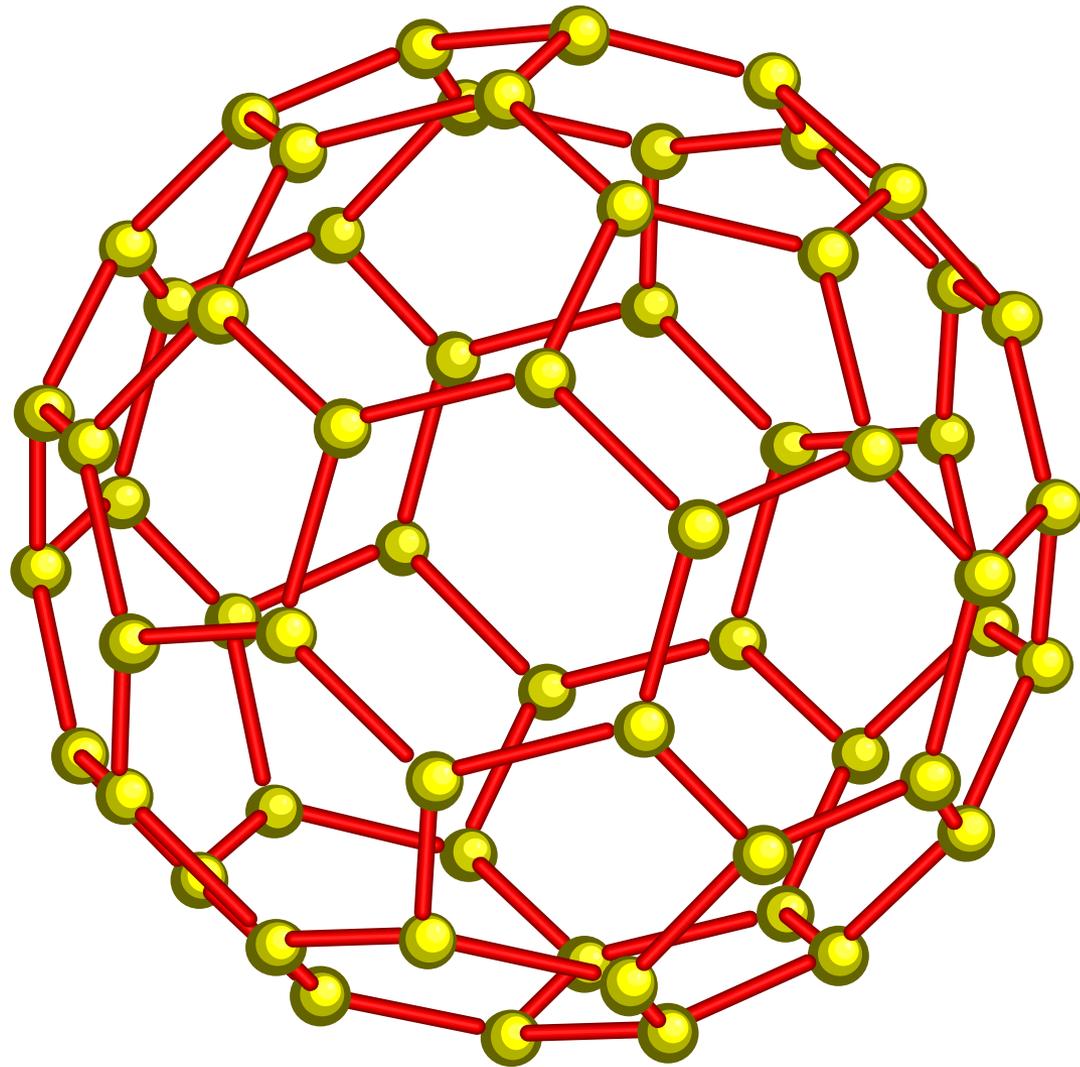
# 9. Les nanostructures

## 9.1 Définition

Elles décrivent la structure des **nanomatériaux** constitués de **grains** contenant au plus **quelques dizaines de milliers d'atomes** et dont les **dimensions ne dépassent pas 100 nanomètres**.

## 9.2 Les fullerènes

- Parmi ces matériaux nanométriques on distingue les fullerènes, découverts dans les années 1980, où les atomes de carbone se lient entre eux en formant des structures nanométriques comme le **carbone 60** noté **C<sub>60</sub>** composé de **12 pentagones** et **20 hexagones** formant une structure tridimensionnelle fermée (qui a la forme d'un nanoballon de football) comme le montre la figure suivante.

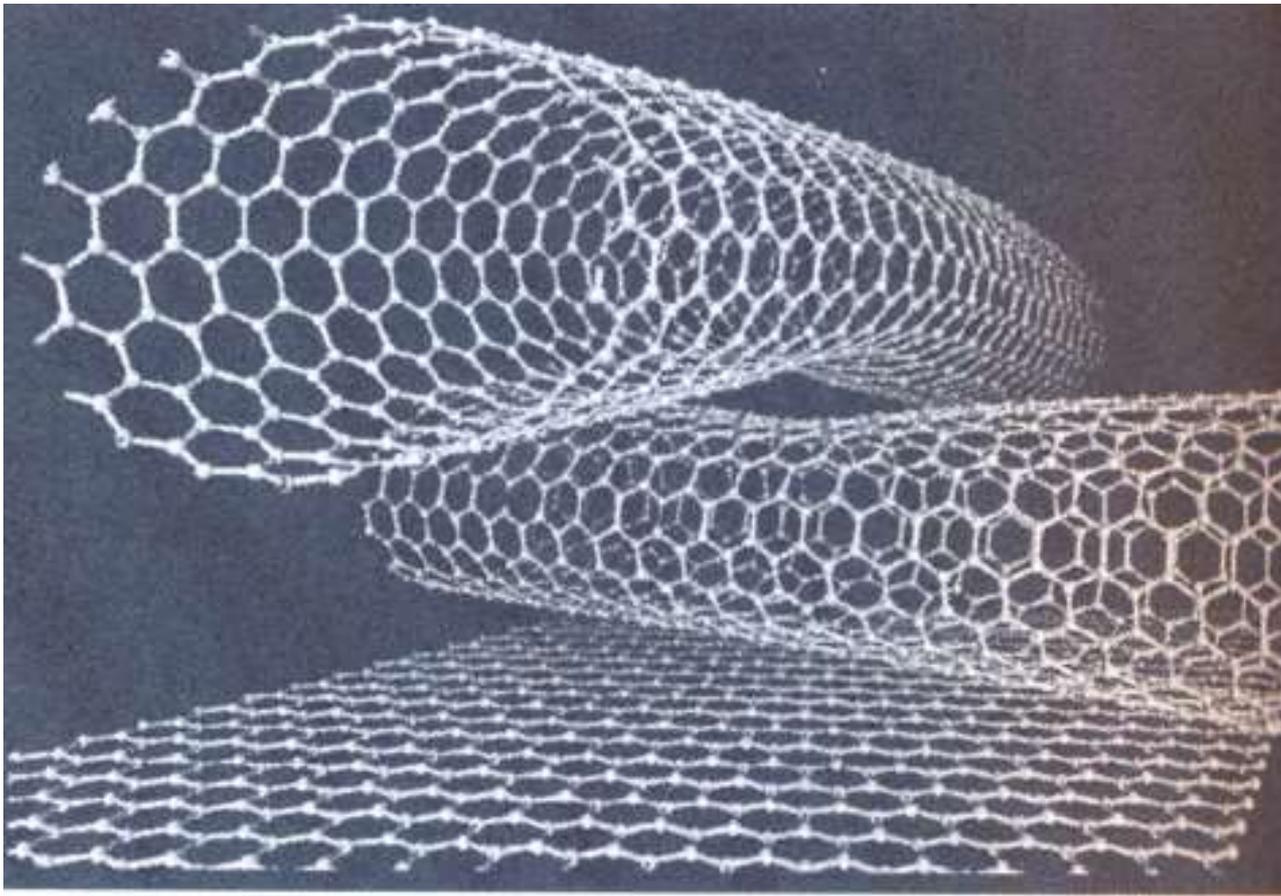


**Modèle du carbone 60 appelé  $C_{60}$**

D'autres formes ont été découvertes depuis, le carbone 70 noté  $C_{70}$  formé de **12 pentagones et 25 hexagones** ainsi que le  $C_{80}$  formé de **12 pentagones et 30 hexagones**. Il faut noter que le carbone  $C_{60}$  a été ensuite identifié dans des roches argileuses de Nouvelle Zélande âgées de 65 millions d'années ainsi qu'au Canada dans le cratère d'impact d'une météorite de 1,85 milliard d'années. Le  $C_{60}$  cristallise à la température ambiante, dans un réseau C.F.C. alors qu'en dessous de 249 K il change de structure et le réseau devient cubique simple. Soumis à une très forte pression ( $\approx 20$  Gpa), le fullerène  $C_{60}$  se transforme en diamant polycristallin à température ordinaire.

### *9.3 Les nanotubes*

Les **nanotubes** sont des feuillets d'atomes de carbone assemblés selon un **réseau d'hexagones** et **roulé sur lui-même**. Observés pour la première fois en 1991 par **Sumio Iijima**, chercheur de la société NEC (Japon) les nanotubes constituent la troisième forme cristalline du carbone après le diamant et le graphite. Ils sont dotés d'extraordinaires propriétés mécaniques, électroniques et thermiques. Par exemple leur conductance électrique chute brusquement (résistance augmente) lorsque le voltage ou la température (donc l'agitation thermique) passe sous un certain seuil. Ce phénomène est appelé «**blocage de Coulomb**» serait provoqué par «**l'embouteillage**» des électrons tentant de pénétrer dans le faible diamètre du nanotube.



**Image au microscope à force atomique d'une paire de nanotubes, la région d'intersection montre le réseau en nid d'abeilles des feuillets de graphène.**

## ***9.4 Applications***

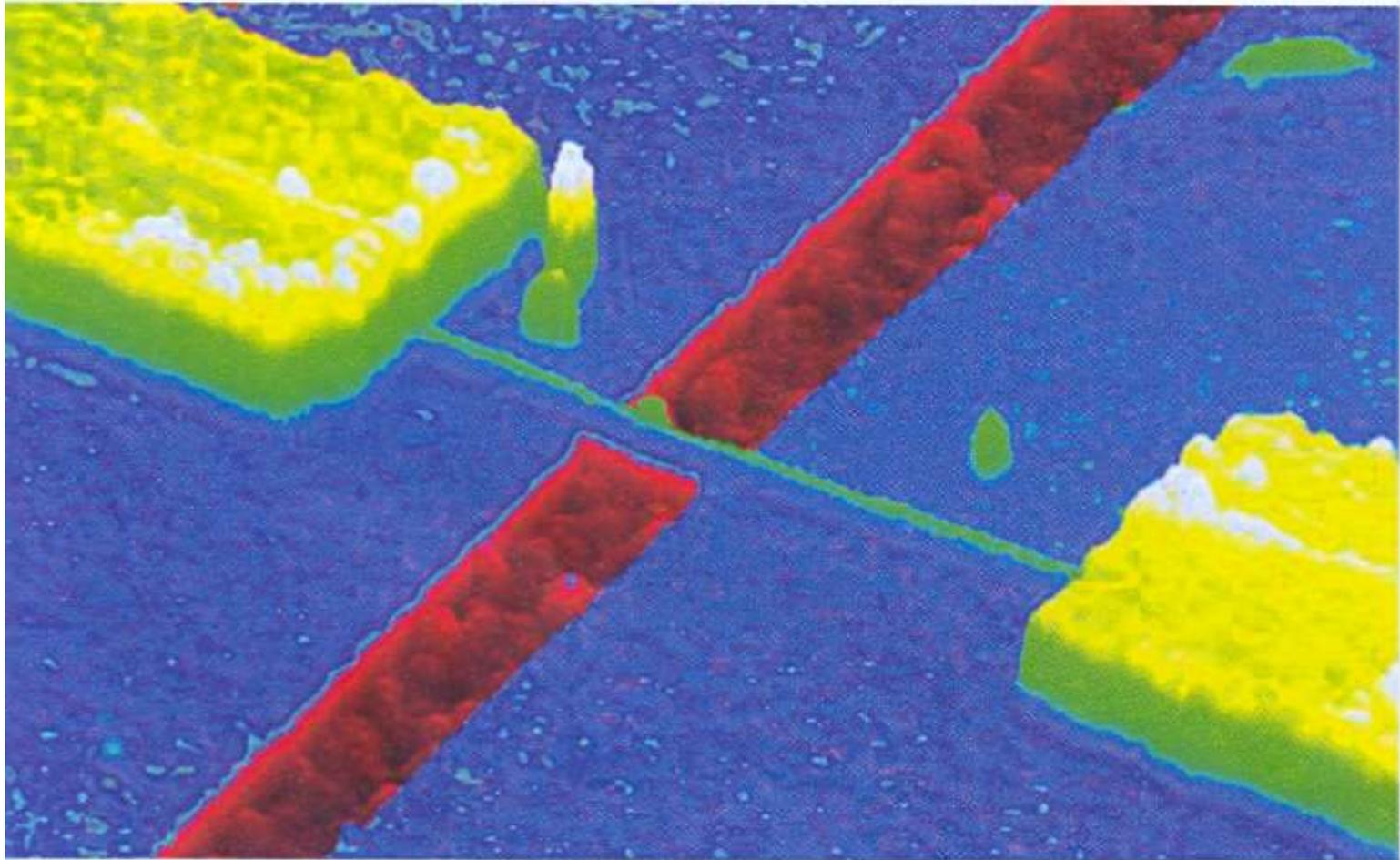
**Parmi les applications futures et possibles des nanotubes on peut citer:**

- Réservoirs d'hydrogènes pour les piles à combustible.**
- Composants électroniques de la taille d'une molécule: chimtronique, spintronique.**
- Prototypes d'écrans plats ultrafins à base de nanotubes.**
- Gilets pare-balles ultralégers indestructibles.**
- En cosmétique et pharmaco-chimie des nano-dispositifs sont utilisés comme cage pour des molécules médicamenteuses actives qui seraient libérées petit à petit dans le corps.**

Bien que l'utilisation du **spin électronique** (spintronique) est aujourd'hui **limitée** au stockage d'information dans des mémoires magnétiques (Magnetic Random Access Memory **MRAM**) des physiciens du CEA-Inac ont réussi à faire circuler un **courant polarisé en spin** au sein d'une couche mince de germanium Ge. L'information portée par les spins est conservée sur une distance supérieure à un micron ( $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ) ce qui conforte la perspective d'une **électronique du spin**. Mais ceci ne pourra être réalisé que lorsqu'on aura réussi le **transport du spin** dans le **silicium Si** qui est le semiconducteur le plus utilisé en électronique.

Dans un nano-interrupteur, la tension appliquée entre les deux électrodes (jaunes) déforme le nanotube de carbone (vert) qui entre en contact avec la piste (rouge): le courant passe entre les électrodes et la piste.

© CEA



**Image d'un nano-interrupteur d'après (Défis du CEA)**

# 10. Les défauts dans les cristaux

Le cristal **parfait** n'existe pas réellement. Toute structure cristalline peut comporter des **défauts** dans l'assemblage régulier des atomes, parmi lesquels on peut citer:

– **Défauts ponctuels**: on désigne ainsi toute perturbation de la périodicité cristalline, dont le volume, petit, présente l'ordre de grandeur du volume atomique. Un atome étranger ou **impureté**, une **lacune**, un **interstitiel** et un **agrégat** (association de plusieurs défauts) sont des défauts ponctuels.

– **Dislocations et joints.**

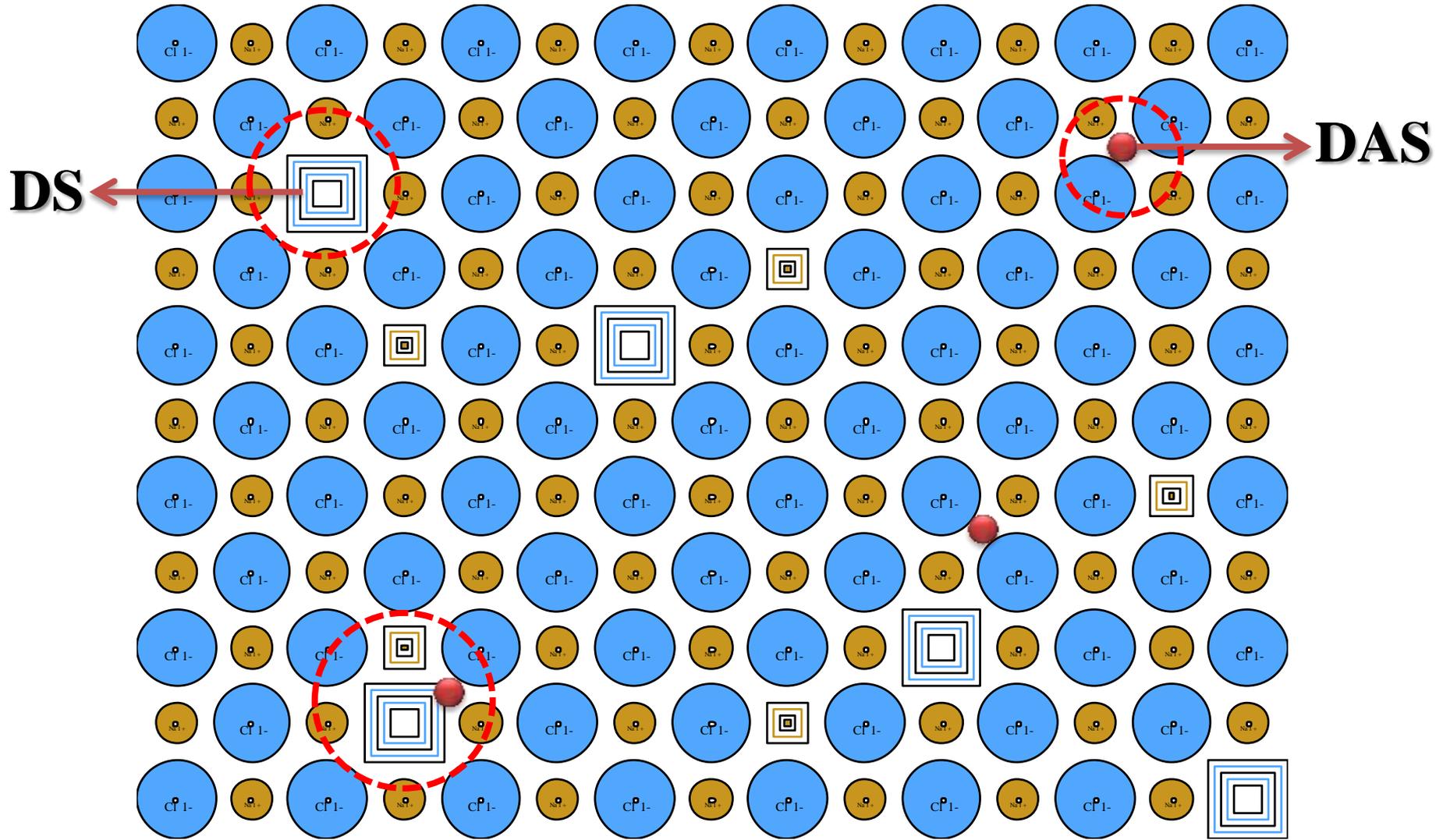
## 10.1 Défauts ponctuels

On distingue **3** types de **défauts ponctuels**: Schottky, anti-Schottky et Frenkel.

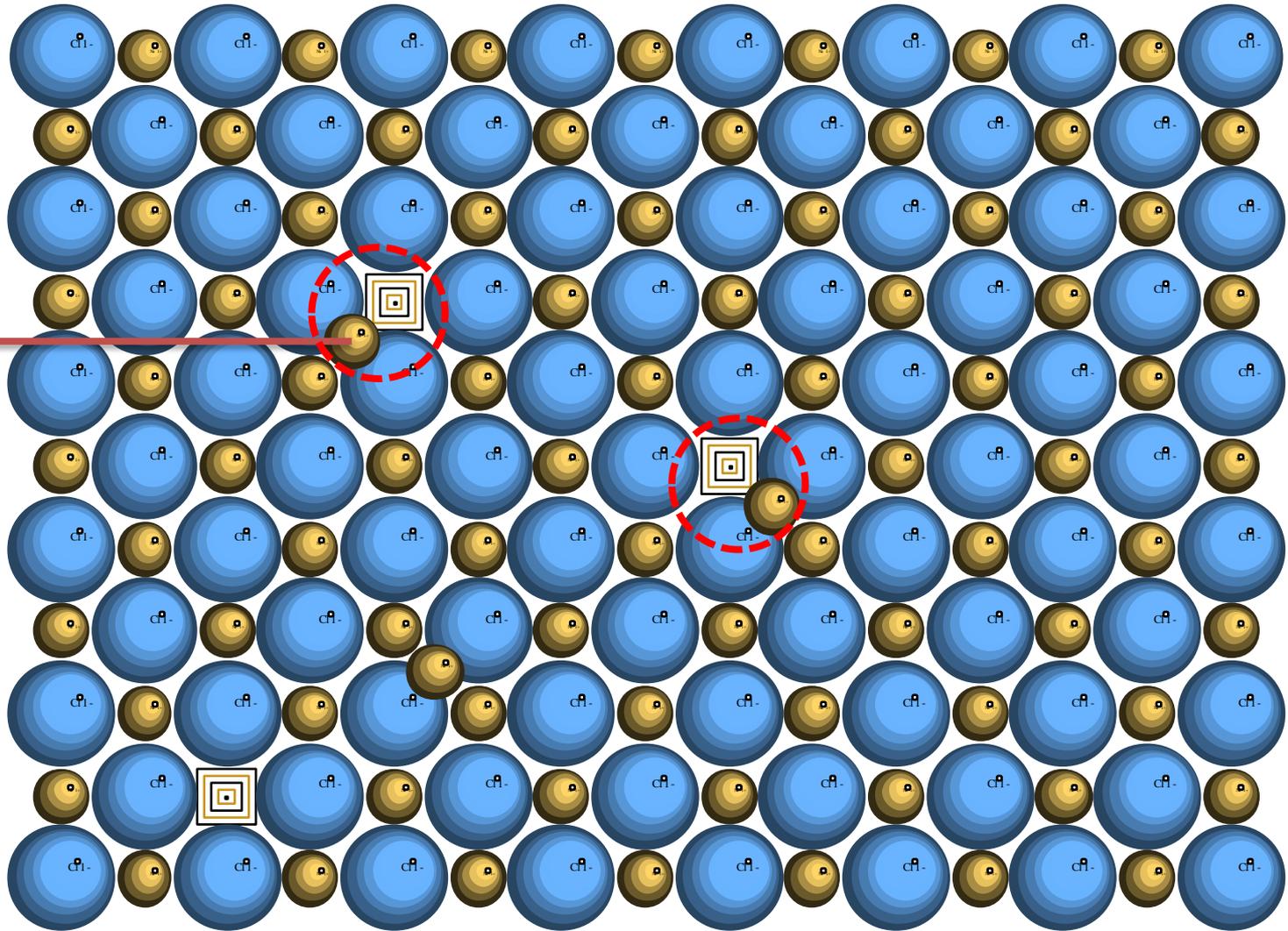
▣ Les lacunes, appelées défauts de **Schottky (DS)**, correspondent à l'absence d'un atome ou d'un ion dans un nœud du réseau.

● Les défauts de type **anti-Schottky (DAS)** sont liés à la présence d'un atome ou un ion excédentaire qui vient occuper une position interstitielle.

● Les **défauts de Frenkel (DF)** dans lesquels un atome passe d'un site du réseau à une position d'insertion.



**DF**



**Les défauts ponctuels sont entièrement responsables de la conductivité électrique dans les cristaux ioniques, et peuvent changer profondément leurs propriétés optiques.**

### *10.2 Les joints de grains*

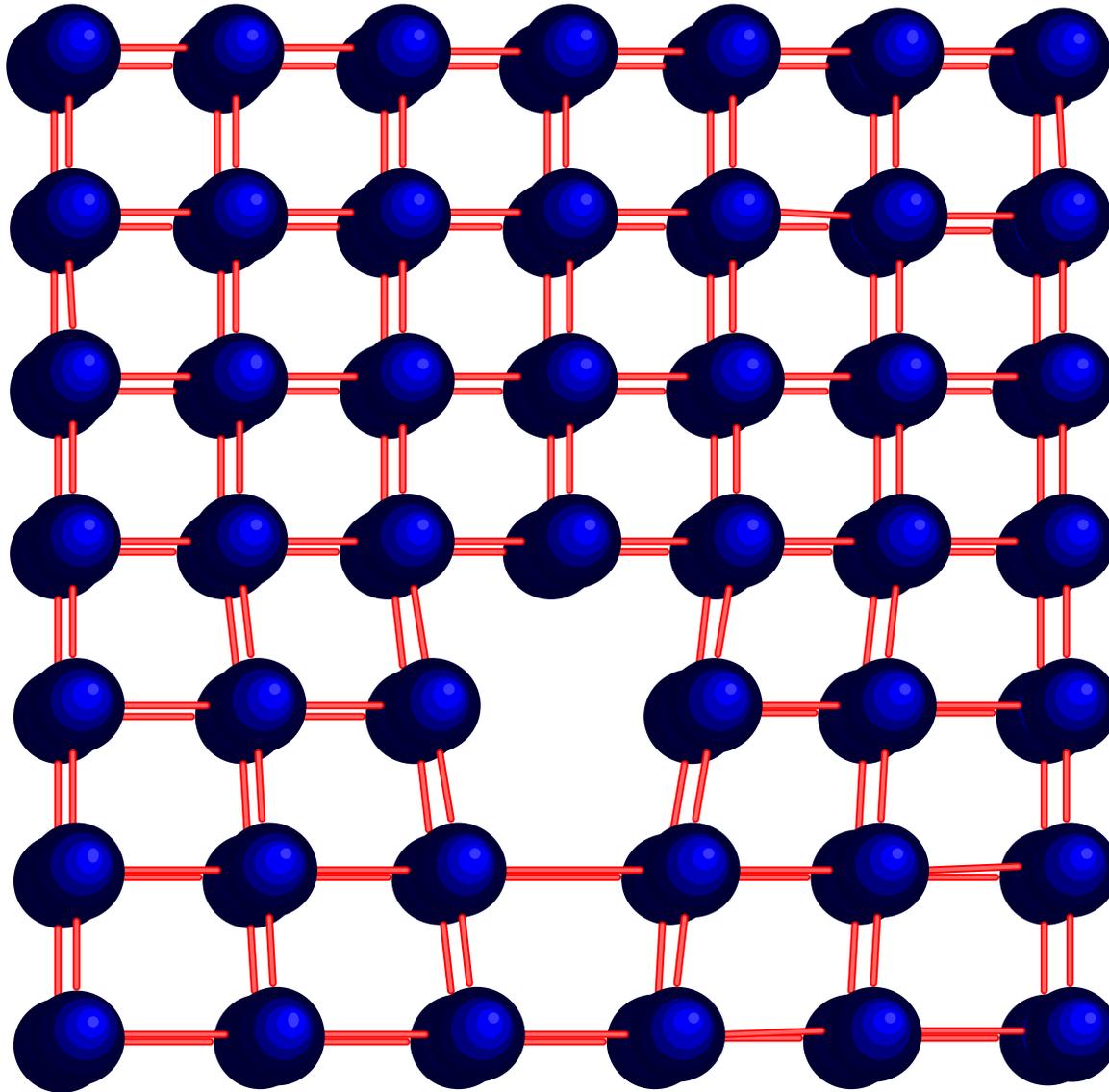
**Un joint de grain est formé par la jonction entre deux monocristaux orientés différemment le long d'une surface plane commune. Différents types de joints peuvent être identifiés:**

- Joint de faible désorientation.**
- Joint de flexion.**
- Joint de torsion.**

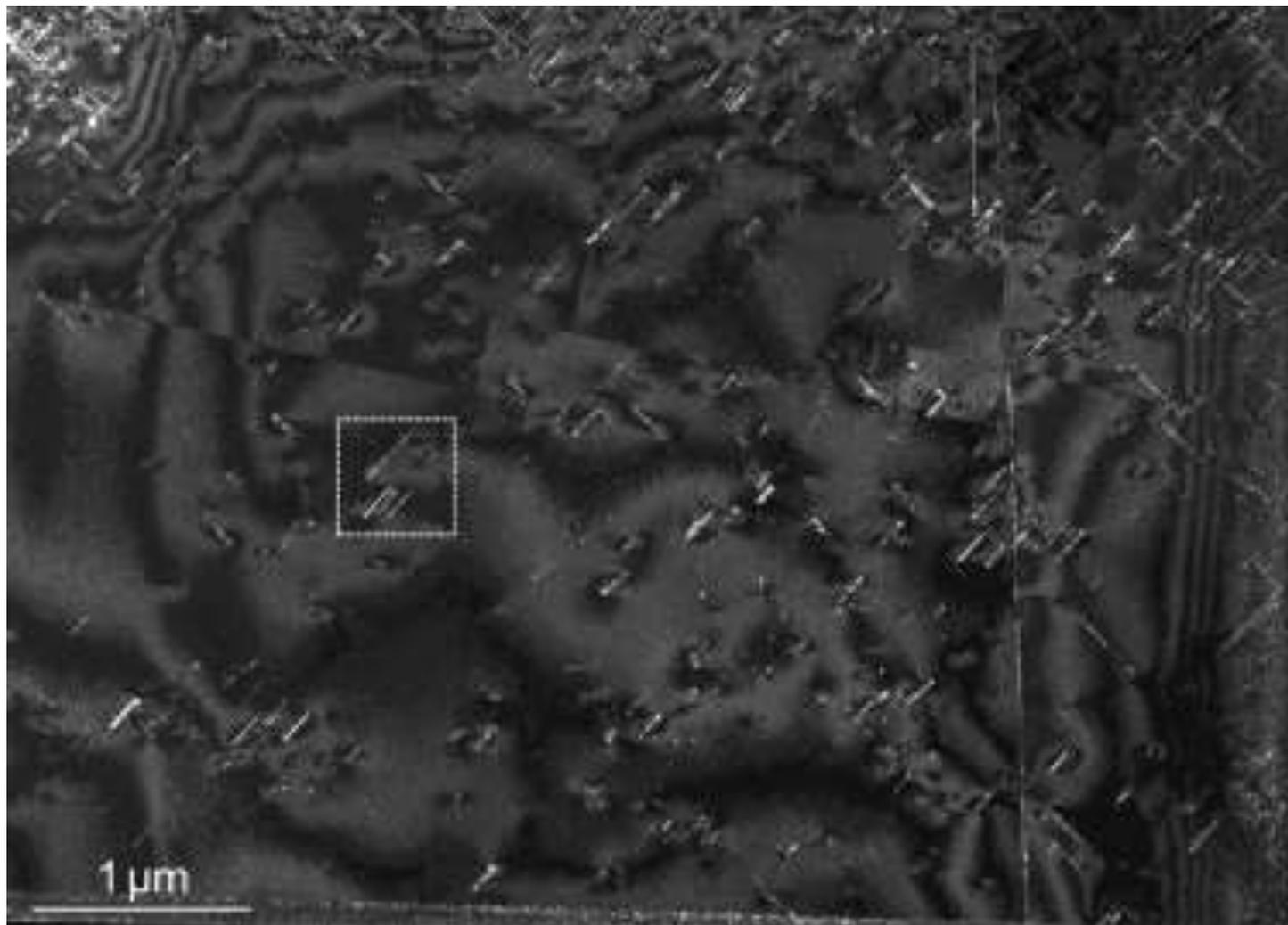
### *10.3 Les dislocations*

Ce sont des **défauts linéaires** qui, bien que probablement absents des cristaux idéaux à l'équilibre thermodynamique, sont presque **invariablement présents** dans n'importe quel échantillon réel. Elles mettent en jeu des **glissements**, le long de plans, à la manière des feuilles d'une rame de papier glissant les unes sur les autres. Les premières **données expérimentales** sur les dislocations furent obtenues à la fin des années 50 grâce au développement de la **microscopie électronique**.

Les dislocations sont essentielles pour expliquer la résistance observée des cristaux réels, ainsi que le taux de croissance cristalline.



**Représentation schématique d'une dislocation**



Analyse de la densité de **dislocation** par microscopie électronique à transmission dans un monocristal  $\text{SrTiO}_3$  de structure pérovskite . D'après: L. Jin et al., **Journal of Ultramicroscopy**, 134, (2013) 77-85

## *10.4 Conséquences*

La présence des défauts est un phénomène d'équilibre thermodynamique normal, de sorte qu'ils peuvent être une caractéristique intrinsèque des cristaux réels. Dans le cas des métaux, lorsqu'une pièce **cas**se ou est **corrodée**, c'est toujours à un endroit où le matériau est le plus fragile. Dans la plupart des cas cette fragilité est induite par l'un des défauts cités ci-dessus.

La présence des **défauts** est aussi un phénomène **naturel** comme le montre les images suivantes: