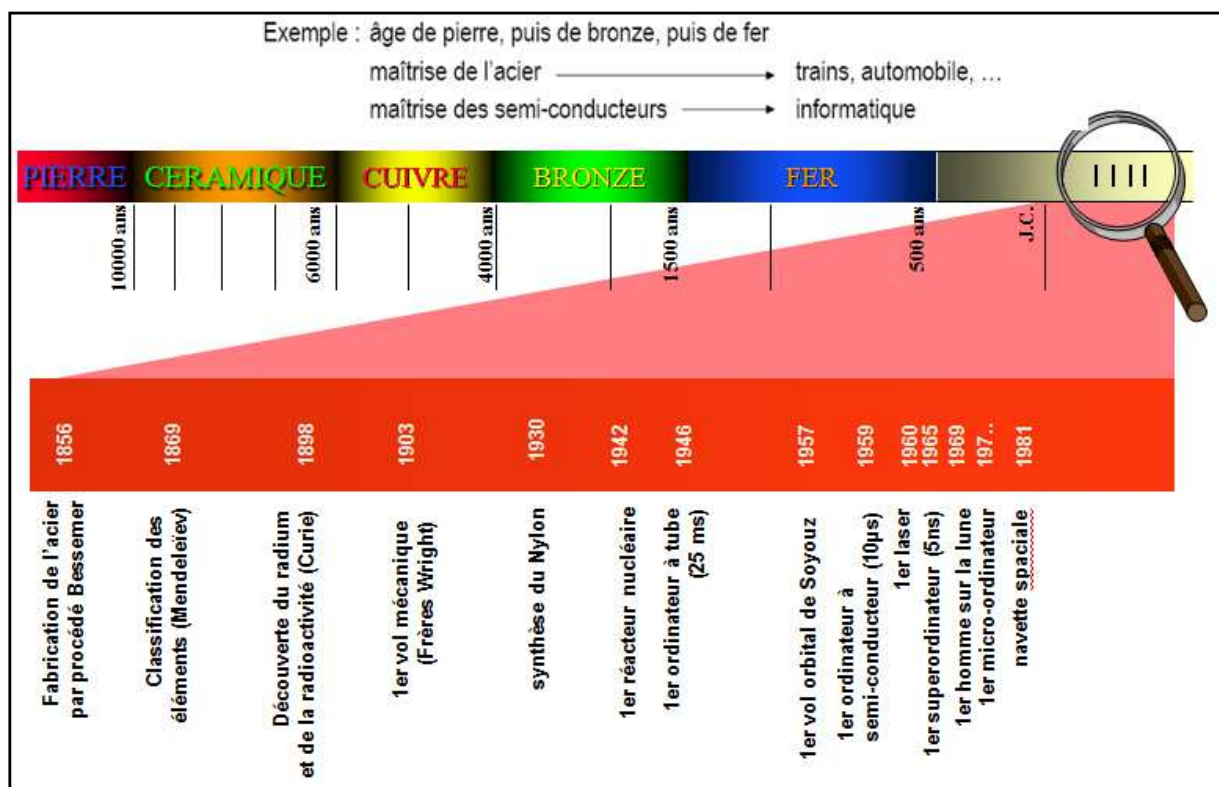


MODULE : Introduction à la Science des Matériaux
Année Universitaire : 2019-2020
Semestre : 4
2^{ème} année Licence (Groupe : Recrutement National)

I.1. Matériaux et histoire

Les matériaux définissent le niveau de développement de l'humanité.

Le rôle des matériaux est tellement considérable pour les sociétés que les civilisations sont souvent caractérisées par les matériaux qu'elles sont capable transformer et de contrôler.



🌍 **Matériau = solide utilisé par l'homme pour la fabrication d'objets.**

Exclus : gaz, liquides, matières énergétiques (charbon, combustibles nucléaires, ...)

🌍 **Les matériaux sont en général le facteur limitant des machines**

➡ **définissent le niveau de développement de l'humanité**

Exemple : âge de pierre, puis de bronze, puis de fer

maîtrise de l'acier —————> trains, automobile, ...

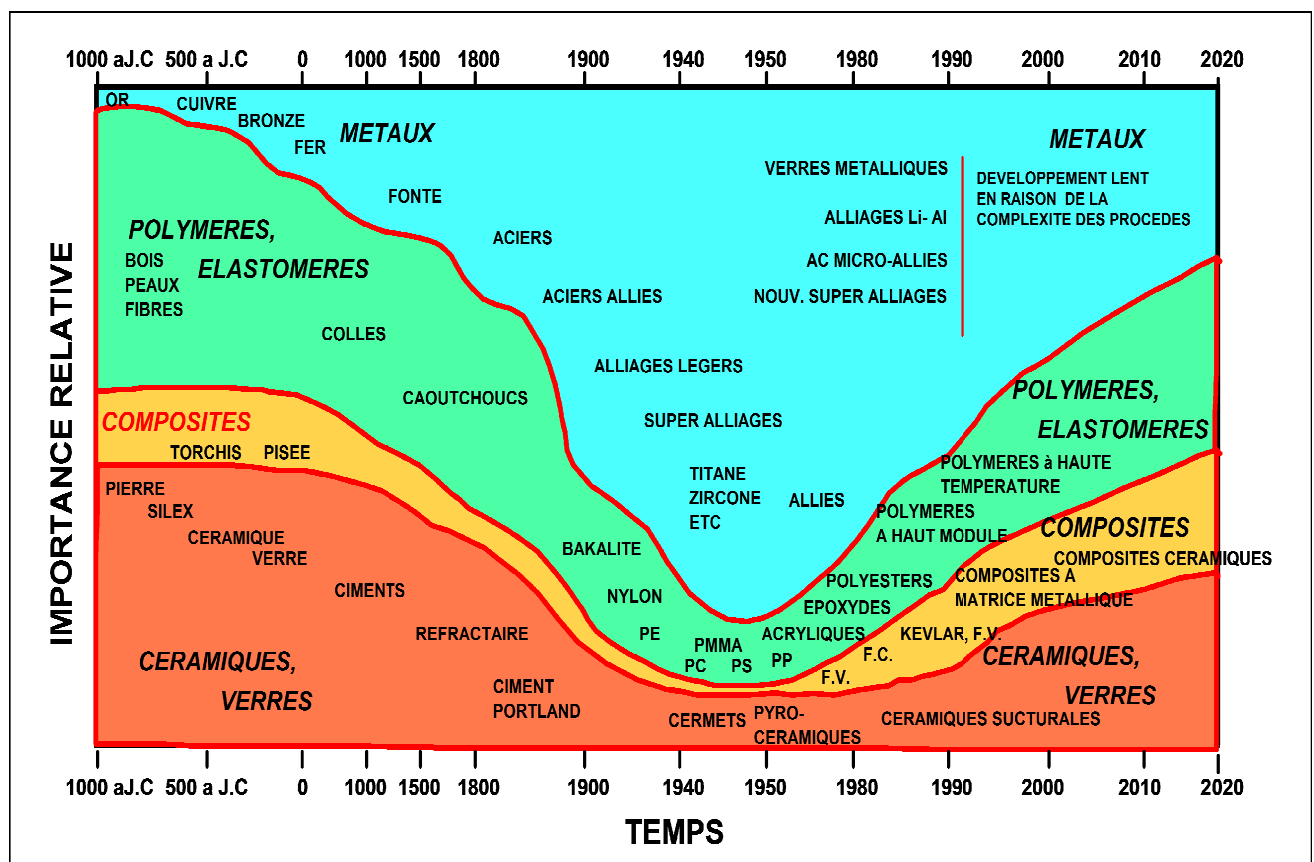
maîtrise des semi-conducteurs —————> informatique

moitié de la recherche du programme Apollo : matériaux nouveaux

🌍 **La science des matériaux date des années 1950**

avant :
procédés empiriques

depuis :
matériaux élaborés selon les caractéristiques voulues



I.2. Les Etats physiques de la matière

- La matière est constituée d'atomes, de molécules ou d'ions, **maintenus par des interactions de cohésion**.
- Ces entités, constituant la matière, sont soumises en permanence à une **agitation thermique** qui se manifeste par la **température**.
- C'est l'importance relative de ces deux facteurs (interaction et agitation) qui permet aux entités de se regrouper (phases condensées **liquides** et **solides**) ou de rester isolées (**gaz**).

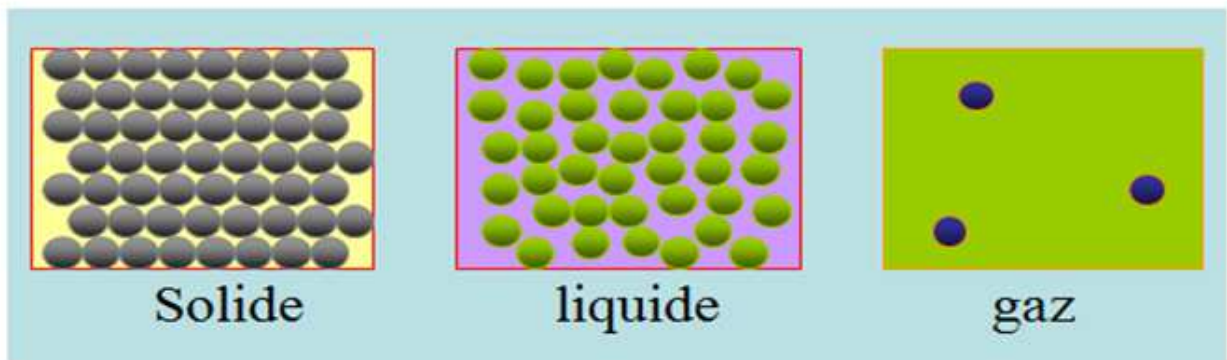


Tableau Périodique des éléments

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
I A	II A	III A	IV A	V A	VI A	VII A	VIII A	VIII A	VIII A	IX A	X A	XI A	IV A	V A	VI A	VII A	VIII A

Dans des conditions normales de pression et de température :

1																	2
H																	He
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56		72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88		104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr	Ra		Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Mc	Lv	Fl	Mc	Db	Ts	Og
- Lanthanides		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
- Actinides		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

Les éléments dont le numéro atomique est **rouge** sont gazeux ;
 Les éléments dont le numéro atomique est **bleu** sont liquides (il n'y en a que deux : le brome et le mercure) ;
 Les éléments dont le numéro atomique est **noirs** sont solides.

Tableau Périodique des éléments

■ Nonmetals
■ Metals
■ Metalloids
■ Noble gases

The metals, nonmetals, and metalloids

1A 1 H																	18A 2 He						
2 Li	3 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr						
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe						
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	76 Re	78 Os	79 Ir	80 Pt	81 Au	82 Hg	83 Tl	84 Pb	85 Bi	86 Po	87 At	88 Rn						
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun	111 Uuu	112 Uub												

Rare earth elements

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Lanthanides
 Actinides

Copyright © 2000 Benjamin Cummings, an imprint of Addison Wesley Longman, Inc.

Dans le tableau périodiques des éléments la diagonale partant du **bore** (B) et allant jusqu'au **polonium** (Po) sépare les éléments métalliques (en bas à gauche) des éléments non métalliques (en haut à droite). Les éléments placés sur cette ligne sont des **métalloïdes**.

I.3. Classification de la matière

• Corps purs

Contiennent une seule sorte de matière

Exemples:

- Diamant
- Or 24 carats
- Eau distillée

• Mélanges

Contiennent plusieurs sortes de matières

Exemples:

- Les aliments
- L'eau de mer
- L'air

• Mélanges homogènes

On ne distingue pas les constituants

Exemples:

- L'air
- L'eau salée

• Mélanges hétérogènes

On peut distinguer les constituants

Exemples:

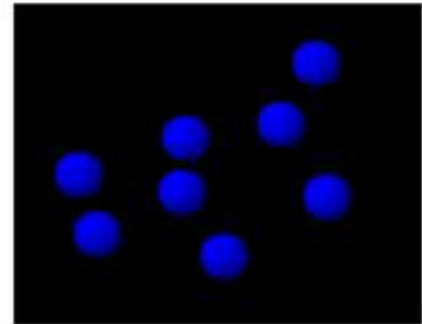
- Un sandwich
- Une mayonnaise ratée

- Corps purs élémentaires

Une seule sorte d'atomes

Exemples:

- L'Or
- L'Hélium

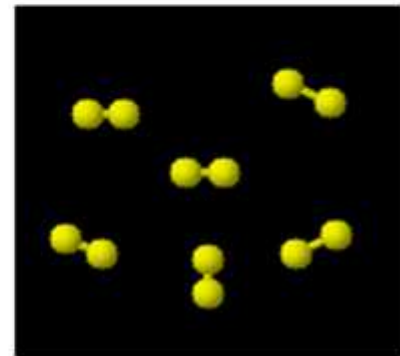


- Corps purs simples

Une seule sorte d'atomes liés en molécules

Exemples:

- L'Hydrogène (H_2)
- L'Oxygène (O_2)
- Le Soufre (S_8)

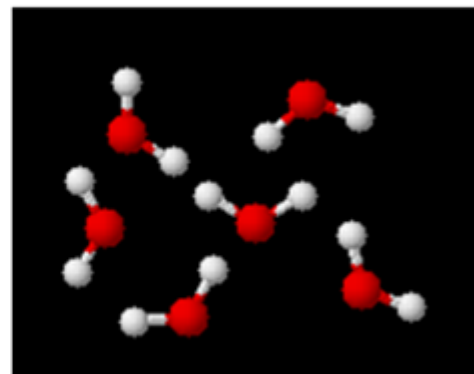


- Corps purs composés

Plusieurs sortes d'atomes liés en molécules

Exemples:

- L'eau (H_2O)
- Le sel de cuisine NaCl
- Le sucre glucose ($C_6H_{12}O_6$)
- ...



L'utilisation d'un matériau dépend :

de ses propriétés
de ses ressources
de son coût
des méthodes de synthèse
de sa compatibilité avec l'environnement
de la possibilité de mise en forme

Propriétés :

caractérise la réponse à une sollicitation

mécaniques : rigidité, résistance, ductilité, ténacité, ...

chimiques : réactivité, résistance à la corrosion, ...

physiques

électrique : conductivité, constante diélectrique, ...

magnétique : susceptibilité, ...

optique : transparence, réflectivité, couleur, ...

thermique : conductivité, capacité calorifique, ...

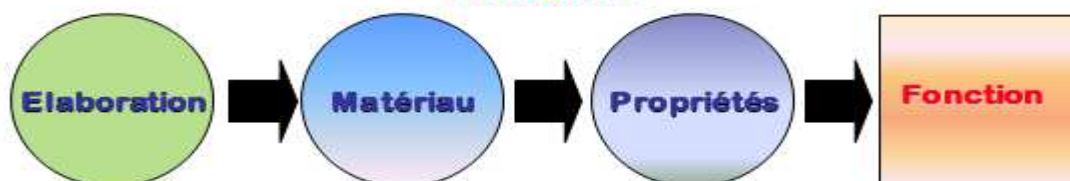
La science des matériaux

c'est:

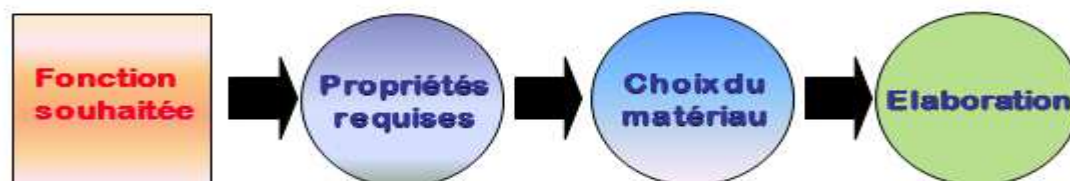
concevoir et élaborer un matériau à l'échelle atomique (composition, structure), en vue d'obtenir des propriétés spécifiques et des performances optimales

par un procédé de fabrication économique, et respectueux de l'environnement

La science des matériaux, une discipline en mutation

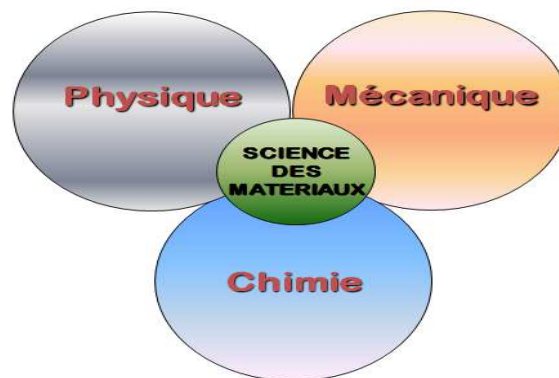


Approche traditionnelle



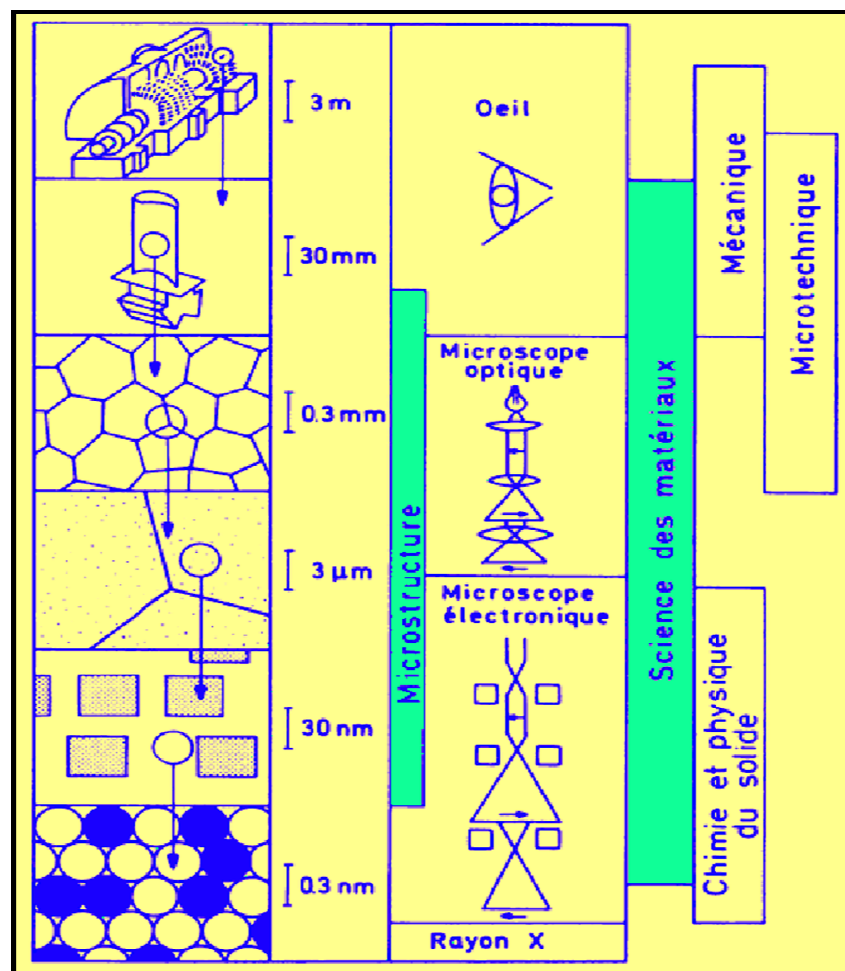
Approche fonctionnelle (nouvelle)

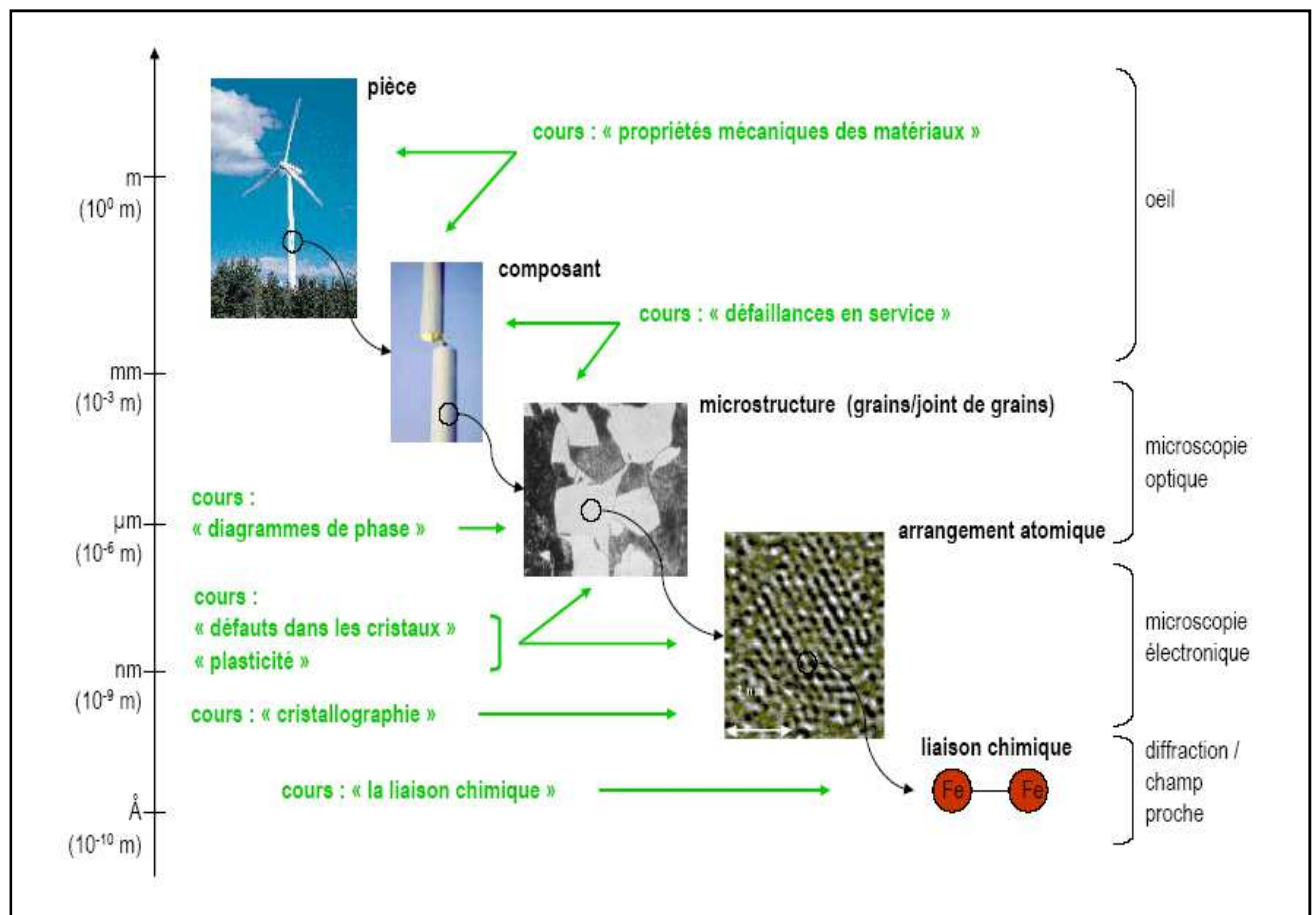
La science des matériaux, une spécialité interdisciplinaire



Où se situe la SCIENCE DES MATÉRIAUX ?

Elle fait le lien entre le niveau atomique et l'échelle macroscopique

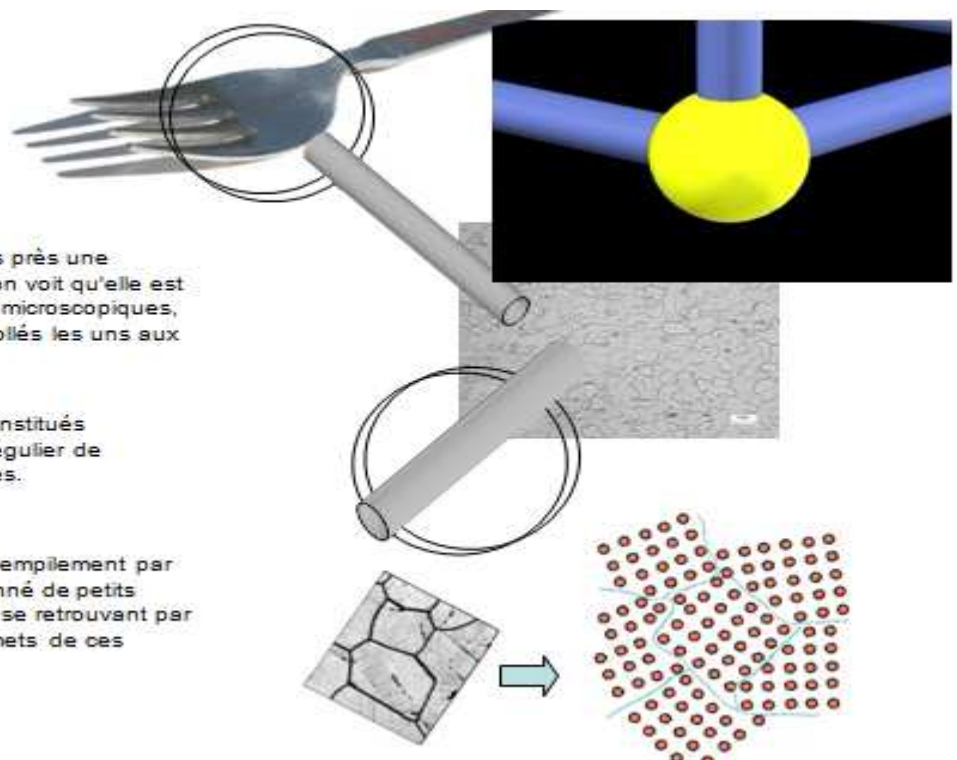




Si on regarde de très près une fourchette en acier, on voit qu'elle est composée de grains microscopiques, des monocristaux, collés les uns aux autres.

Ces grains sont constitués d'un empilement régulier de briques : les atomes.

On représente cet empilement par un ensemble ordonné de petits cubes, les atomes se retrouvant par exemple aux sommets de ces cubes.



Préparation métallographiques

1. Découpe des Échantillons:



2. Dégraissage



3. Enrobage



4. Polissage



5. Nettoyage



6. Attaque chimique



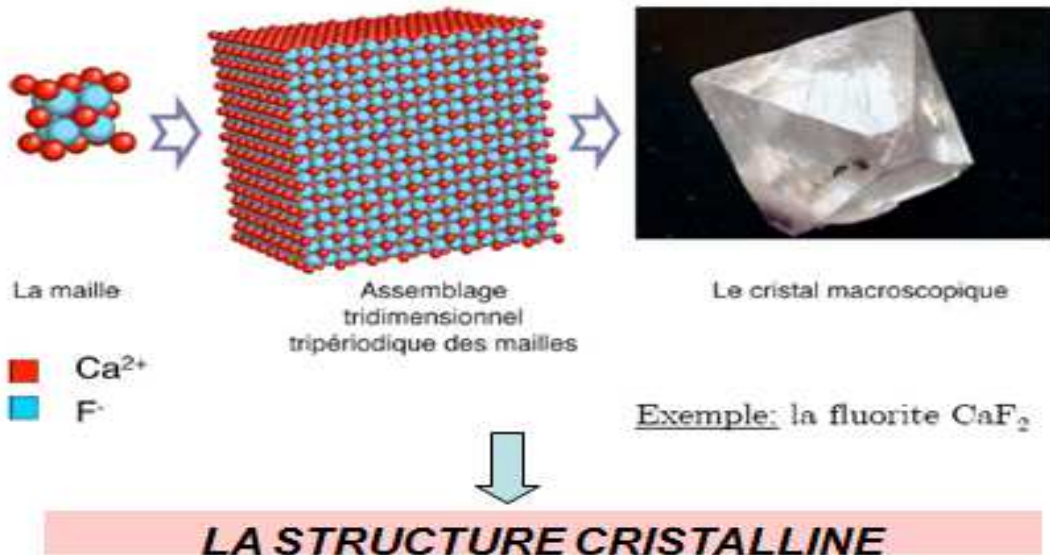
7. Visualisation



I.4. Structure Cristalline

Dans les matériaux, l'état plus important est l'état cristallin

Un **solide cristallin** est un solide à structure régulière et périodique, formé d'un empilement ordonné d'un grand nombre d'atomes, de molécules ou d'ions.



Matériaux Cristallins

Organisation des atomes pour former une maille élémentaire.

La maille élémentaire se répète dans les 3 directions de l'espace.

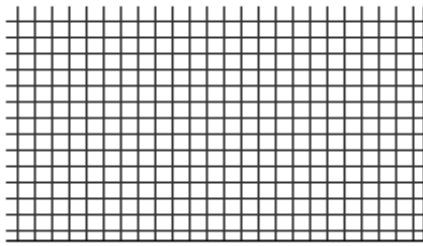
Matériaux amorphes

Les atomes sont ordonnés à courtes distances (molécules).

Mais la structure ne présente pas d'ordre à grandes distances.

Matériaux Cristallins

Matériaux monocristallins



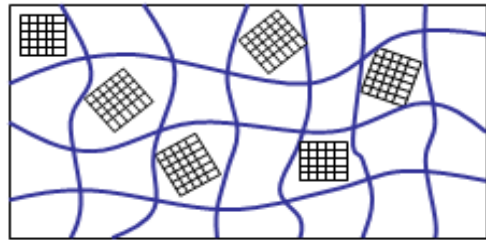
La maille élémentaire se répète dans les 3 directions de l'espace.

Limites = bords de la pièce

Matériaux polycristallins

Ensemble de petits monocristaux (grains)

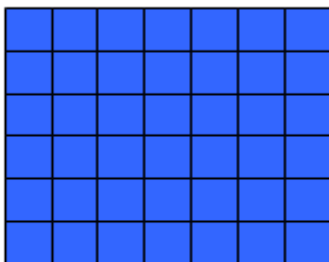
Limites = joints de grains



Matériaux polycristallins

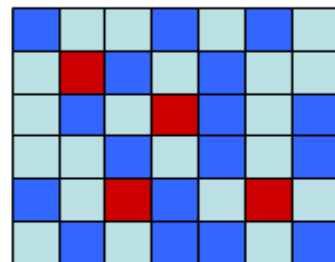
Matériaux monophasés

Tous les grains ont même nature chimique et cristallographique



Matériaux polyphasés

Deux ou plusieurs types de grains (nature chimique ou cristallographique) coexistent



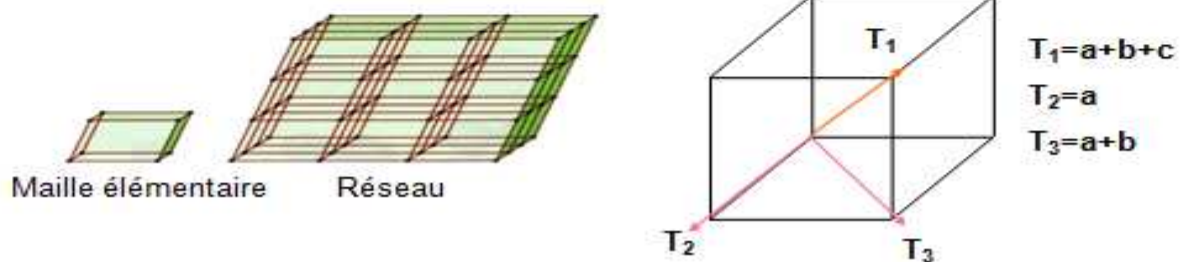
DESCRIPTION DE L'ETAT CRISTALLIN

Deux concepts fondamentaux sont à la base de la description de la structure cristalline : **Le réseau et le motif**

LA STRUCTURE CRISTALLINE = RESEAU + MOTIF

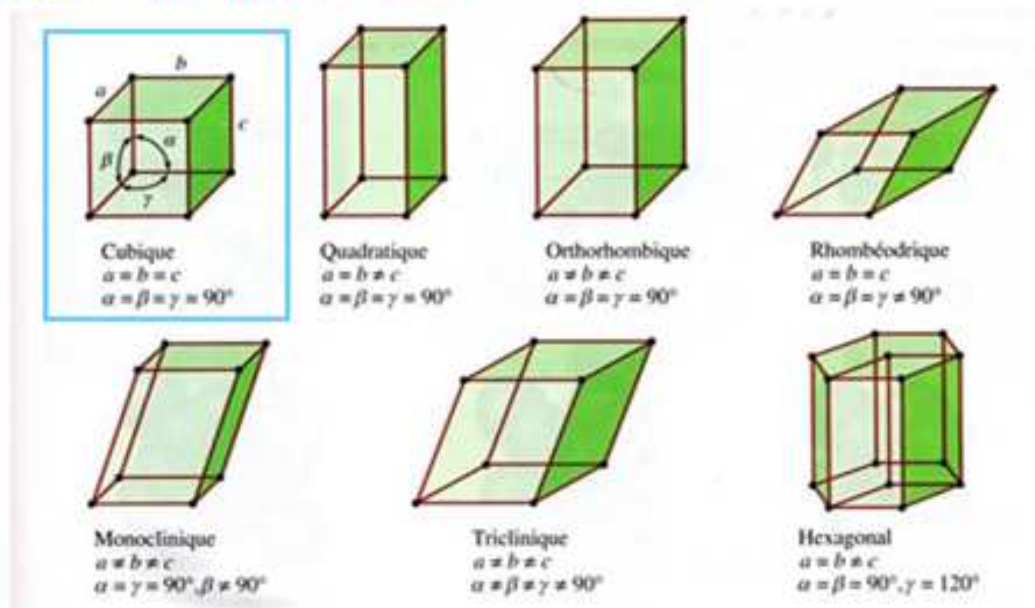


Le réseau est défini par ses **vecteurs de base** $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, et $\mathbf{c}$ indépendants et tels que tout point du réseau peut s'écrire: $\mathbf{R} = l\mathbf{a} + m\mathbf{b} + n\mathbf{c}$



Types de structures cristallines

Toutes les structures cristallines se ramènent à un ou l'autre des sept types (ou **systèmes cristallins**) suivants :



Les 14 réseaux cristallins de Bravais

cubique

$$a = b = c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

tétragonal

$$a = b \neq c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

orthorhombique

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

HEXAGONAL

$$a = b \neq c$$

$$\alpha = \beta = 90^\circ$$

$$\gamma = 120^\circ$$

monoclinique

$$a \neq b \neq c$$

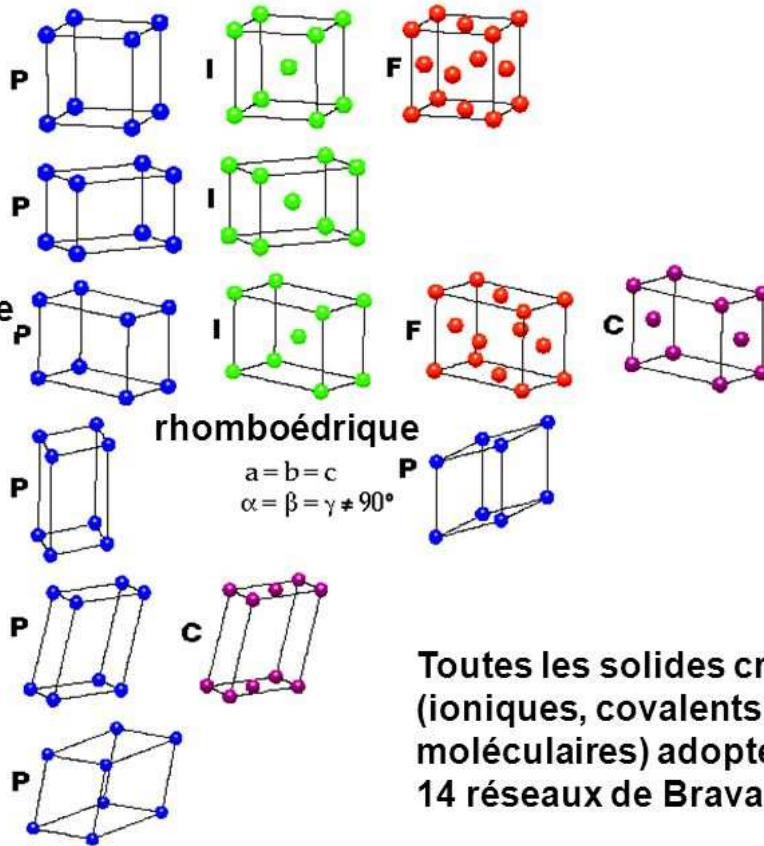
$$\alpha = \gamma = 90^\circ$$

$$\beta \neq 120^\circ$$

triclinique

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$

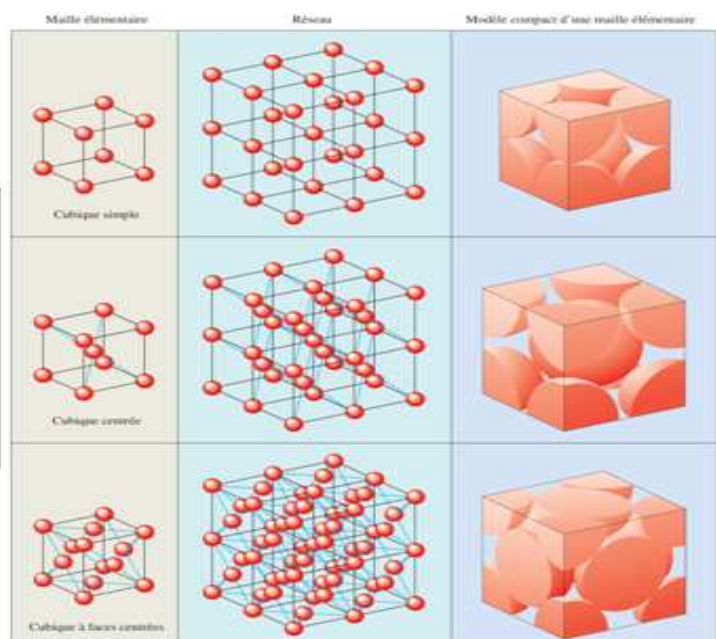
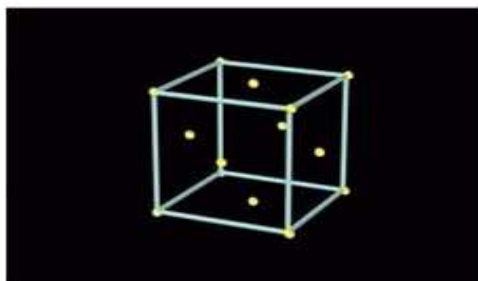


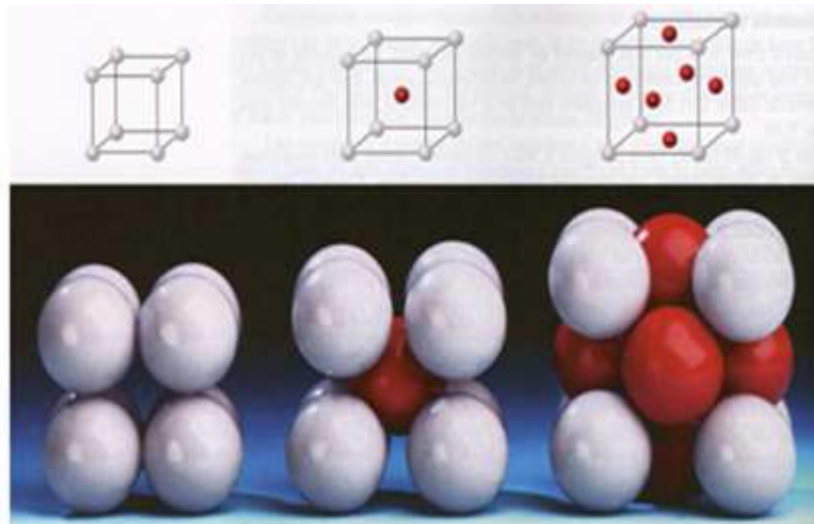
La maille élémentaire est caractérisée par les 3 distances a , b , c et les 3 angles α , β , γ .

Toutes les solides cristallins (ioniques, covalents, métalliques, moléculaires) adoptent une des 14 réseaux de Bravais.

I.5. Calculs sur les mailles

Les 3 mailles les plus courantes :

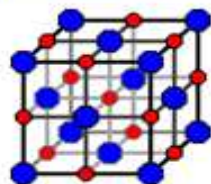




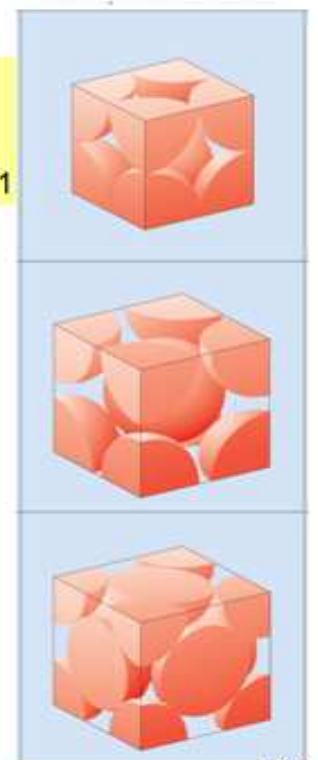
Le nombre de **Coordination** représente le nombre de premiers voisins d'un atome donné
 La **Compacité** de la structure définie par le rapport du volume des atomes sur le volume de la maille

Calculs sur les mailles

- Sur un sommet, l'ion appartient à 8 mailles et compte pour $1/8$
- Sur une arête, l'ion appartient à 4 mailles et compte pour $1/4$
- Sur une face, l'ion appartient à 2 mailles et compte pour $1/2$
- À l'intérieur de la maille, l'ion appartient à 1 maille et compte pour 1



Prenons par exemple la maille du NaCl :
 ions Cl^- : 8 aux sommets et 6 sur des faces, soit $8 \times 1/8 + 6 \times 1/2$
 $= 4$ ions Cl^- par maille
 ions Na^+ : 12 sur des arêtes et un au centre, soit $12 \times 1/4 + 1 \times 1$
 $= 4$ ions Na^+ par maille



Masse d'une maille

la masse molaire de chaque ion :

$$m_{\text{maille}} = \frac{\sum (M_{\text{ion}} \cdot n_{\text{ion}})}{N}$$

avec
 m_{maille}

la masse de la maille,

M_{ion}

la masse molaire des différents ions de la maille,

n_{ion}

la quantité des différents ions dans la maille et

N

le nombre d'Avogadro.

Pour la maille de NaCl :

$$m_{\text{maille}} = \frac{M_{\text{Cl}} \cdot n_{\text{Cl}} + M_{\text{Na}} \cdot n_{\text{Na}}}{N} = \frac{35,5 \times 4 + 23,0 \times 4}{6,22 \cdot 10^{23}} = 3,76 \cdot 10^{-22} \text{ g}$$

CUBIQUE SIMPLE

Caractéristiques

Nombre de nœuds par maille : $n_{\text{gf}} = 1$

Les atomes sont tangents selon une arête : $a_s = 2R$

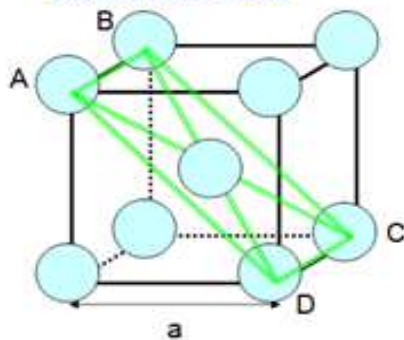
Coordinance : L'atome central est entouré par 6 atomes voisins dans les 6 directions d'un trièdre rectangle. La coordinance est $E/E = [6]$

La **compacité** est telle que :

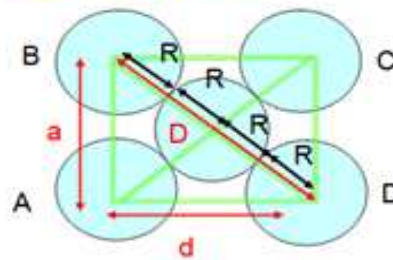
$$C = \frac{n_{\text{gf}} V_{\text{atome}}}{V_{\text{maille}}} = \frac{\frac{4}{3} \pi R^3}{(2R)^3} = \frac{\pi}{6} = 0.51$$

Structure cubique centrée

Relation entre a et R



— Plan de compacité



d = diagonale de la face du cube

$$d = a\sqrt{2}$$

D = diagonale du cube

$$D^2 = a^2 + d^2 = a^2 + 2a^2 = 3a^2$$

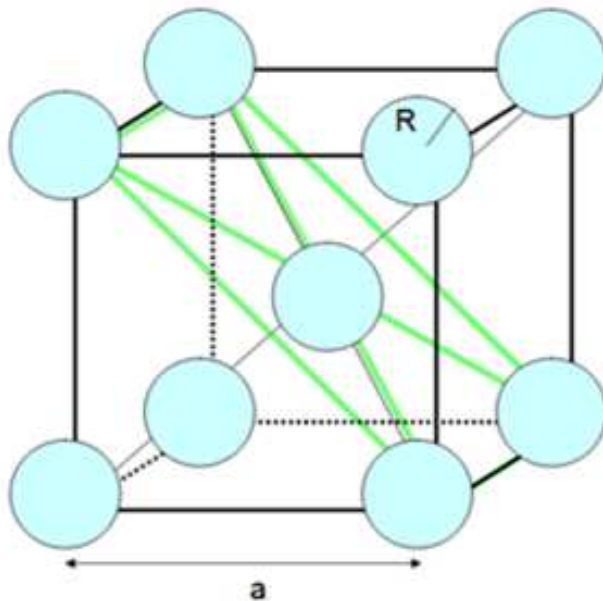
Soit:

$$D = a\sqrt{3}$$

On a aussi:

$$D = 4R$$

$$4R = a\sqrt{3}$$



— Plan de compacité

Coordinance :

Nombre de plus proches voisins à égale distance d'un atome donné

8 atomes à $a\sqrt{3}/2$

Compacité :

Volume occupé par tous les atomes

Volume de la maille

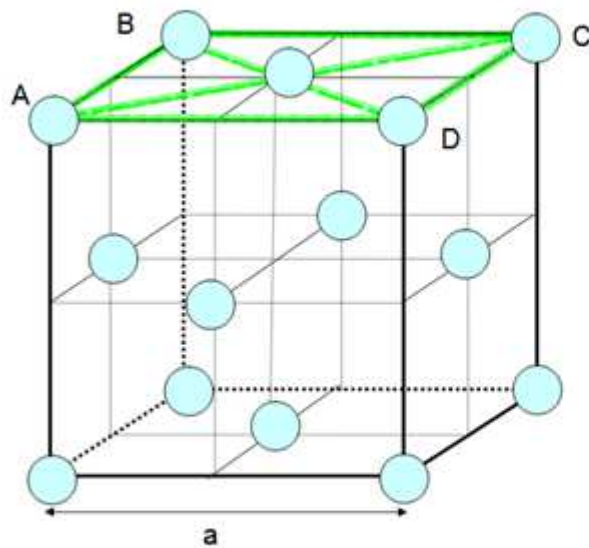
$$C = 0,68 = 68\%$$

soit 32 % de vide

Masse volumique :

$$\rho = \frac{N \times M}{N_a \times a^3}$$

Structure cubique faces centrées



— Plan de compacité

Descriptif

1 atome à chaque sommet : $8 \times 1/8$

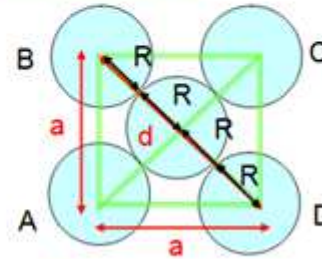
1 atome au centre de chaque face $6 \times 1/2$

= 4 atomes / maille

Paramètre de la maille

a : arête du cube

Relation entre a et R



Dans le plan de compacité, sur la petite diagonale, on a :

$$4R = a\sqrt{2}$$

Compacité :

Volume occupé par tous les atomes

Volume de la maille



$C = 0,74 = 74\%$
soit 26 % de vide

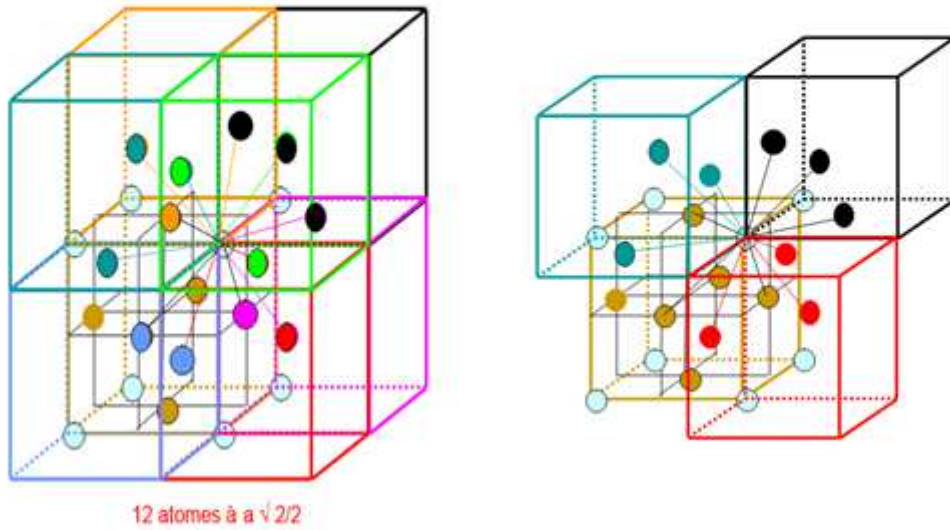
On dit que le système est **COMPACT**

Masse volumique :

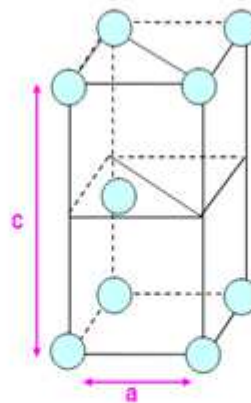
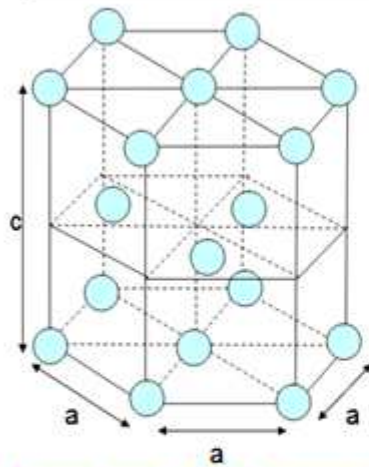
$$\rho = \frac{N \times M}{N_a \times a^3}$$

Coordinance :

Nombre de plus proches voisins à égale distance d'un atome donné



Structure hexagonale compacte



Paramètres de la maille

a: arêtes des bases hexagonales

c: Hauteur du prisme

Coordinance :

$$6 + 2 \times 3 = 12$$

Nombre d'atomes par maille hexagonale:

1 atome à chaque sommet : $12 \times 1/6$

1 atome au centre des 2 bases : $2 \times 1/2$

3 atomes à $c/2$: 3×1

= 6 atomes / maille

OU Nombre d'atomes par prisme droit à base losange:

1 atome à chaque sommet : $8 \times 1/8$

1 atome à $c/2$: 1

= 2 atomes / maille élémentaire

Indices de Miller

- Indices de Miller (h, k, l)

inverses des intersections du plan avec les trois axes du cristal, en fonction des longueurs a , b et c .

- détermination des indices :

1. déterminer les points d'intersection (l'origine des 3 axes ne doit pas être dans le plan)

1, 1/2, 2/3

2. prendre les inverses

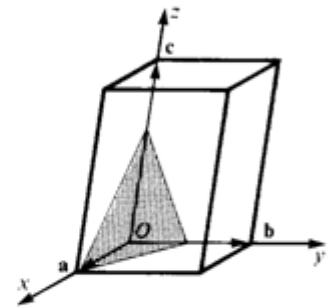
1, 2, 3/2

3. Mettre le tout au dénominateur commun

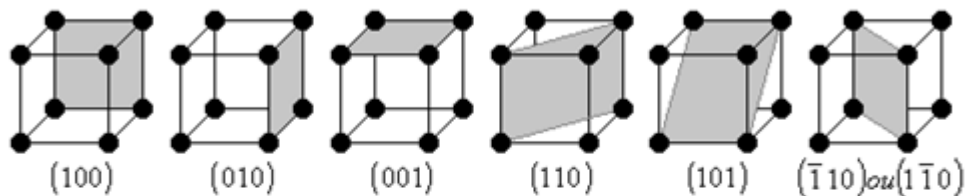
2/2, 4/2, 3/2

4. Les numérateurs sont les h, k, l

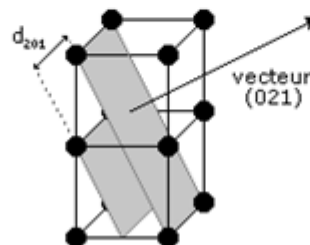
(2 4 3)



Voici quelques exemples d'indices de Miller et de leur plan associé pour des systèmes cubiques.



La périodicité du cristal entraîne le fait qu'il existe une infinité de plans de mêmes indices parallèles entre eux. On appelle *distance inter-réticulaire*, notée d_{hkl} , la distance qui sépare deux plans parallèles voisins.



Ce schéma montre bien la distance inter-réticulaire ainsi que le vecteur normal d'indice de Miller (201).

Indices de direction dans le réseau cubique

Pour les matériaux anisotropes, les propriétés mécaniques, physiques sont différentes d'une direction à une autre d'où l'utilité d'indexer les directions cristallographique pour pouvoir exprimer cette anisotropie. Comme la plupart des métaux ont la structure cubique ou hexagonale, on étudiera les indices de Miller et leur utilisation pour ces structures. Dans la représentation des indices de Miller, les indices des directions sont mis entre crochets. Ils sont exprimés en nombres réduits aux entiers les plus et sont les composantes du vecteur support de ces droites.

Indice d'une direction réticulaire de vecteur période r ou $r = ua + vb + wc$

Où u, v, w sont des entiers positifs, négatifs ou nuls et premiers entre eux

Par convention ; l'indice de direction est mis entre crochets comme par exemple la direction $[110]$. L'expression $\langle 110 \rangle$ désigne la famille de direction :

$[110], [1\bar{1}0], [101], [10\bar{1}], [011], [01\bar{1}]$.

Méthode pour désigner une direction :

- Tracer dans la maille élémentaire un vecteur parallèle à la direction et passant par l'origine ;
- Projeter le vecteur sur les axes et exprimer ses coordonnées dans la base (a, b, c) ;
- Ramener ces coordonnées à des valeurs entières, les plus petites possibles ;
- Noter la direction de la façon suivante : $[uvw]$ (indices de Miller de la direction)

Densité des nœuds et nœuds en propre

Dans un réseau cristallin, il est souvent important de pouvoir déterminer la densité de nœuds soit par unité de longueur (densité linéique), soit par unité de surface (densité surfacique) soit par unité de volume (densité volumique).

Pour calculer la densité linéique de nœuds selon une direction cristallographique, on choisit un segment de référence de cette direction borné par deux nœuds. A ces deux nœuds, on attribue un coefficient de pondération égal à $\frac{1}{2}$ puisque chaque nœud est partagé par deux segments contigus. Si d'autres nœuds sont localisés sur le segment de référence, on leur attribue un coefficient de pondération égal à 1, car ils appartiennent en propre au segment de référence.

On procède de façon analogue pour calculer la densité surfacique de nœuds d'un plan cristallographique. Dans un tel plan, on choisit une maille plane qui est un parallélogramme. Si un nœud est situé à un sommet de cette maille plane, on lui attribue un coefficient de $\frac{1}{4}$, car le sommet est partagé par 4 parallélogrammes mitoyens. Si le nœud est situé sur une arête de la maille, on lui attribue un coefficient de $\frac{1}{2}$, car une arête commune est partagée par deux mailles planes mitoyennes. Enfin, si le nœud est situé à l'intérieur de la maille plane, on lui attribue un coefficient égal à 1, car il appartient en propre à cette maille.

Le même raisonnement peut aussi s'appliquer au cas du calcul de nœuds appartenant en propre à une maille tridimensionnelle. On calcul alors la densité volumique de nœuds ou d'atomes, les coefficients de pondérations sont alors égaux à $1/8$, pour les nœuds (ou atomes) situés un sommet de la maille parallélépipédique choisie, à $1/4$ pour les atomes situés sur une arête partagée par 4 mailles mitoyennes, à $1/2$ pour les nœuds (ou atomes) situés sur une face communes à deux mailles mitoyennes et à 1 si les atomes sont localisés à l'intérieur de la maille

Densité atomique planaire

- Pour un plan donné :
 - Surface interceptée par les sphères
 - Surface du plan
- ex.: structure CFC

Densité atomique planaire

- Structure cristalline cubique à faces centrées (CFC)
- propriétés « avt plans »

Densité atomique linéaire

- Structure cristalline cubique à faces centrées (CFC)
- propriétés « avt directions »

Densité atomique linéaire

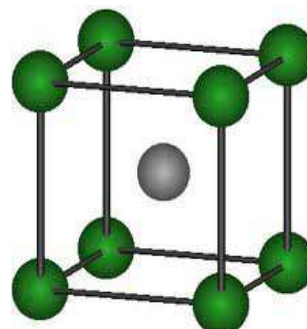
- Pour une direction donnée :
 - Longueur interceptée par les sphères
 - Longueur de la maille
- ex.: structure CFC

I.6. Les sites

Un site: espace libre entre les atomes de réseau. Centre du polyèdre dont les sommets sont occupés par les atomes entourant le site

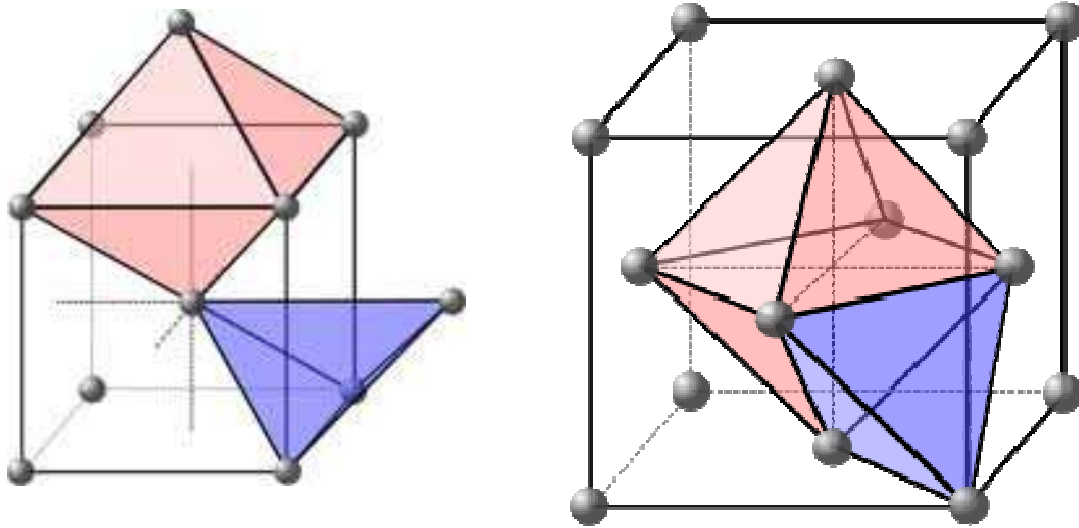
Site cubique: espace laissé libre par 8 atomes situé aux sommets d'un cube

Exemple: Chlorure de Césium



Site tétraédrique: espace laissé libre par 4 atomes situé aux sommets d'un tétraèdre

Site octaédrique: espace laissé libre par 6 atomes situé aux sommets d'un octaèdre



I.7. les liaisons

Toutes les liaisons ont une origine commune : l'attraction électrostatique entre les charges positives du noyau atomique et les charges négatives des électrons.

Il y a des attractions et des répulsions entre les charges électriques des électrons et des noyaux. L'équilibre entre cette force de répulsion et la force d'attraction électrostatique conduit à l'existence d'une distance d'équilibre entre deux atomes, caractéristique de la liaison considérée.

a) Liaisons chimiques :

- Liaison covalente : (entre deux non-métaux) mixité possible
- Liaison ionique : (entre un métal et un non-métal) (ioni-covalente)
- Liaison métallique (deux métaux)

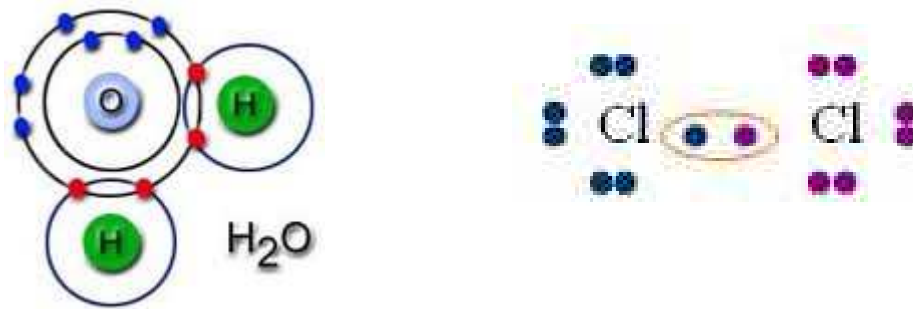
b) Liaison physiques :

- Liaison hydrogène
- Liaison de van der waals

Liaison covalente

La liaison covalente est caractérisée par la mise en commun entre atomes d'un ou de plusieurs électrons de façon à compléter leur couche extérieure à 8 électrons. Par exemple l'atome de chlore possède 7 électrons sur sa couche extérieure : la mise en commun d'un électron de chaque atome entraîne une liaison covalente entre deux atomes. Autre exemple, le germanium possédant 4 électrons périphériques se combine avec 4 autres atomes de germanium : chacun mettra en commun un électron périphérique

de façon à compléter toutes les couches extérieures à 8. Ces liaisons covalentes sont fortes et directionnelles.



Caractéristiques des cristaux covalents :

Les propriétés des cristaux covalents ou à caractère covalent dominant peuvent être résumées comme suit.

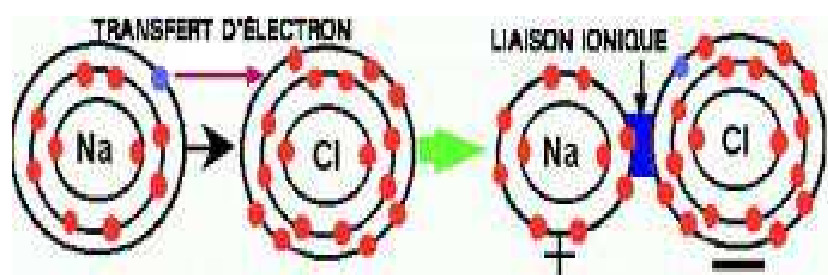
Leur *point de fusion* est élevé car leur énergie de cohésion est grande : 714 kJ/mole pour le diamant qui se sublime dès 3 652 C et 1186 kJ/mole pour le carbure de silicium qui fond à 2 600 C.

Ils sont *très peu déformables* en raison du caractère directionnel de la liaison, duquel résulte encore un *arrangement spatial relativement peu dense* des atomes

Ce sont des *isolants* ou des *semi-conducteurs*, car les électrons de valence sont fortement liés aux atomes et la conductivité par ions est négligeable.

Liaison ionique

Les atomes liés par des liaisons ioniques perdent ou gagnent un ou plusieurs électrons périphériques pour compléter leur couche extérieure à 8. Ils deviennent ainsi des ions positifs ou négatifs ; la liaison résulte de l'attraction entre les ions de charges opposées. Par exemple, dans le cas du fluorure de lithium Li F, l'atome de lithium perd son électron périphérique qui vient compléter la couche externe du fluor. Cette liaison ionique est encore une liaison forte. C'est le cas de nombreux composés tels que les oxydes métalliques, comme Al_2O_3 , MgO , CaO , etc.



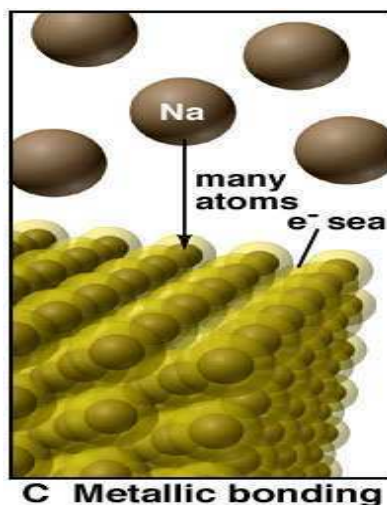
Caractéristiques des cristaux ioniques :

Les cristaux ioniques sont *durs*, car leur énergie de cohésion est élevée, de l'ordre de 750 kJ/mole pour les composés halogène-métal alcalin. Par comparaison, l'énergie de cohésion typique de la valence de Van der Waals est de l'ordre de 10 kJ/mole. Pour la même raison, leur *point de fusion* est élevé.

Leur *conductivité électronique* est faible car les électrons sont solidement attachés aux ions. A haute température une conduction ionique apparaît.

Liaison métallique

La liaison métallique (figure 1.1) se caractérise par la mise en commun des électrons de liaison qui sont répartis dans l'ensemble du réseau d'ions. Ainsi, les métaux sont constitués d'ions occupant des positions déterminées, formant un réseau et baignant dans un « nuage électronique ». La position des ions résulte des forces d'attraction et de répulsion électrostatiques qui s'exercent entre ces ions positifs et le nuage électronique délocalisé.



Il s'agit d'une liaison moyennement forte. On comprendra cependant que, compte tenu de la « flexibilité » du nuage électronique, qui peut se déplacer à l'intérieur de la structure, cette dernière est assez souple. En effet, s'il manque localement un ou plusieurs ions, la structure sera préservée, le nuage électronique s'adaptant pour maintenir les liaisons des autres ions. Nous verrons que cette propriété est à la base du comportement des matériaux métalliques.

Caractéristiques des cristaux métalliques :

La liaison métallique est caractérisée par une énergie de cohésion en moyenne plus faible que la liaison covalente ou ionique. A titre d'exemple, cette énergie vaut 311 kJ/mole dans l'aluminium et 386 kJ/mole dans le fer.

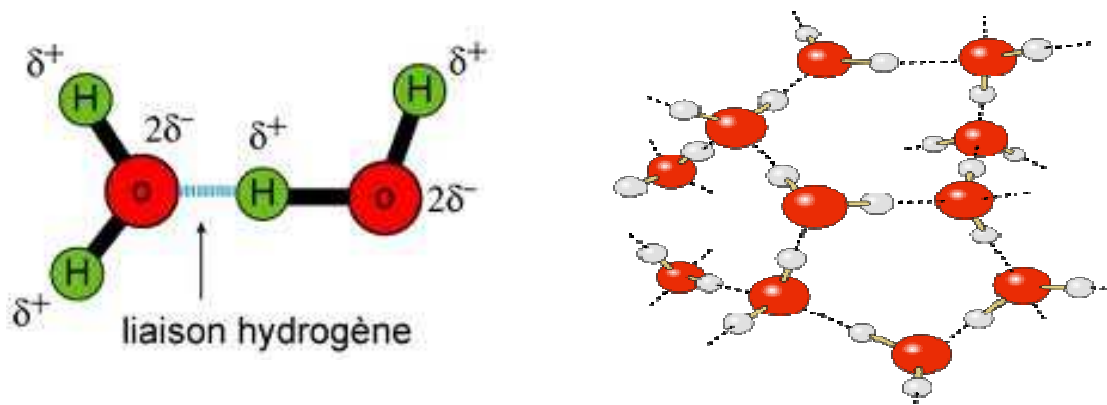
Les cristaux métalliques sont *ductiles*. Cette propriété découle du caractère non directionnel de la liaison métallique.

Moyennant certaines analogies physico-chimiques, des métaux différents peuvent être mélangés, parfois en toutes proportions, et former des *alliages*. Ceci provient du fait que le nombre exact d'électrons disponibles pour établir la liaison n'influence pas celle-ci de manière importante.

La haute *conductivité électrique* des cristaux métalliques a déjà été mentionnée. Elle s'accompagne d'une haute *conductibilité thermique*, liée elle aussi à la mobilité des électrons.

Liaison hydrogène

La liaison hydrogène ou pont hydrogène est une liaison chimique non covalente, Elle est de basse intensité (vingt fois plus faible qu'une liaison covalente classique), et relie des molécules en impliquant un atome d'hydrogène. On pensait à l'origine que l'électron de cet atome était partagé entre les molécules liées, et donc que cette liaison hydrogène était quasi-covalente. Bien que de la même famille que les forces de van der Waals, les liaisons hydrogène s'en distinguent par leur intensité : leur énergie de liaison est environ dix fois supérieure à celle de la force de van der Waals.



Liaison de Van der Waals

La liaison de Van der Waals est présente dans tous les matériaux, mais elle est le plus souvent masquée par des liaisons plus fortes. Elle est responsable de la liquéfaction et de la solidification des gaz à molécules symétriques, tels que H_2 , N_2 , O_2 , CH_4 , etc. Elle joue un rôle important dans de nombreux composés organiques, en particulier dans les polymères thermoplastiques, où elle relie entre elles les macromolécules à structure linéaire (sect. 4.11). La faible énergie de cohésion de la liaison de Van der Waals (< 40 kJ/mole) est responsable du ramollissement de ces matériaux à la chaleur.

Liaisons : Récapitulation

Type de liaison	Covalente	Ionique	métallique	hydrogène	Van der Waals
Liaison dirigée	oui	non	non	non	non
conductivité électrique	faible	Basse	élevée		
densité (compacité)	faible		élevée		compacité élevée
propriétés mécaniques	dureté, fragilité	dureté, fragilité	déformabilité, plasticité	faible résistance	faible résistance, forte compressibilité
température De fusion (°C)	élevée	élevée	faible à élevée	faible	très faible