

*Partie 1*  
*Introduction*



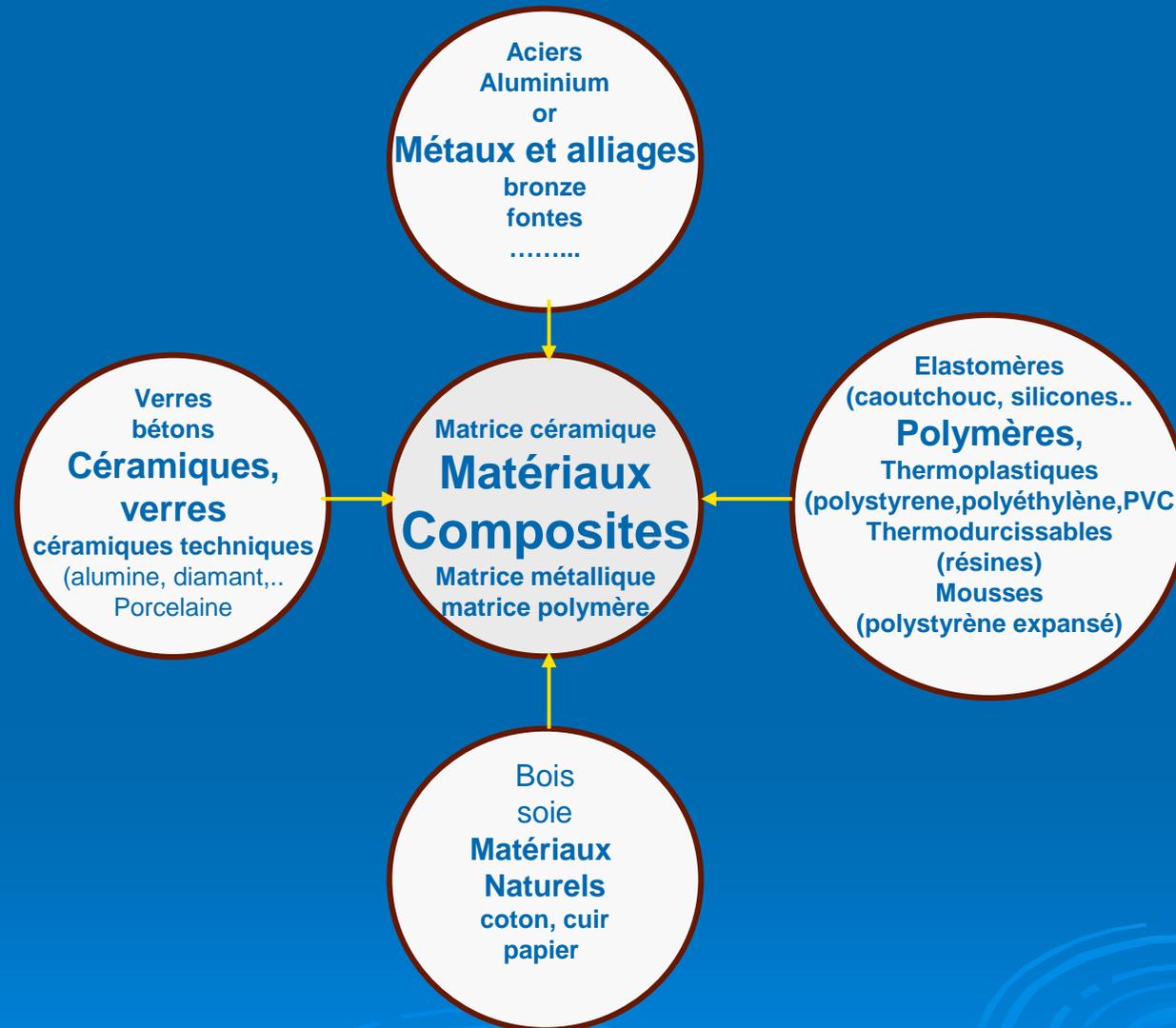
# 1. Introduction

## Classification des matériaux

- Nature des liaisons  $\Rightarrow$  Trois grandes classes de matériaux solides :  
métaux, céramiques, polymères
- Matériaux naturels
- Matériaux composites



# 1. Introduction



## *1. Introduction*

### **Classification des matériaux de construction**

Les **matériaux de construction** sont les matériaux qui ont la propriété de résister contre des forces importantes:

Pierres

Terres cuites

Bois

Béton

Métaux, etc.

Les **matériaux de protection** sont les matériaux qui ont la propriété d'enrober et protéger les matériaux de construction principaux:

Enduits

Peintures

Bitumes, etc.

## ***1. Introduction***

### Les caractéristiques des matériaux

- Classement des propriétés des matériaux en 6 catégories (en fonction des agents auxquels ils sont exposés) :

Mécaniques

Electriques

Thermiques

Magnétiques

Optiques

Chimiques

•

## *1. Introduction*

- Autres propriétés :

- ⇒ Qualitatives

- Résistance aux agressions chimiques

- Inflammabilité, résistance aux UV ...

- ⇒ Booléennes

- Procédés de mise en œuvre

- Procédés d'assemblage

- Formes disponibles

# 1. Introduction

## Générales :

*Densité, prix*

## Mécaniques :

*Module d'Young, limite d'élasticité, résistance, déformation à la rupture, limite d'endurance, ténacité, dureté Vickers, capacité d'amortissement*

## Thermiques

*Température de fusion, chaleur spécifique, conductivité thermique, coefficient de dilatation thermique*

## Electriques

*Résistivité*

## Optiques

*Transparence*

## Résistance à l'environnement

*Inflammabilité, solvants organiques, acides, bases, UV*

# 1. Introduction

- **Dureté**

*Mesurée en appuyant une bille ou un cône d'un matériau très dur (diamant, acier trempé) sur la surface du matériau*

- **Limite d'endurance**

*Sollicitation répétée pouvant entraîner l'apparition d'une fissure puis la rupture*  
*Amplitude de contrainte maximale pour laquelle la rupture ne se produit pas*

- **Ténacité**

*Mesurée en chargeant une éprouvette en présence d'une fissure*

*Deux grandeurs : énergie de rupture  $G_{1C}$  et ténacité  $K_{1C}$*

$$K_{1C} = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

# 1. Introduction

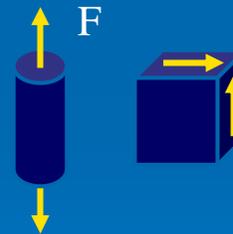
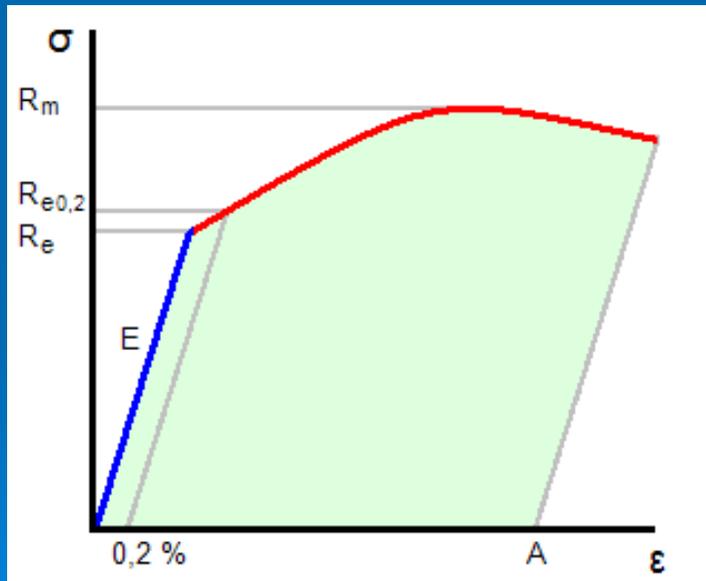
- Les modules d'élasticité

*Pentes des courbes contrainte – déformation*

*module d'Young  $E$  : comportement en traction et compression*

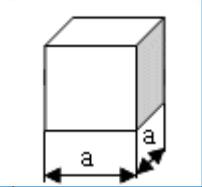
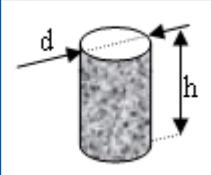
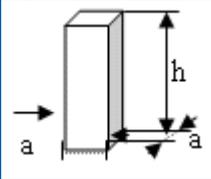
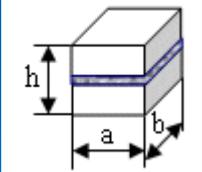
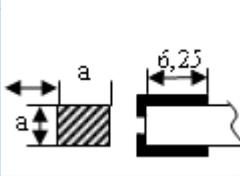
*module de Coulomb  $G$  : comportement en cisaillement*

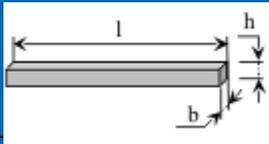
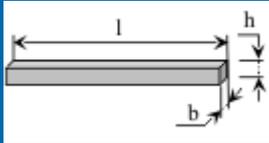
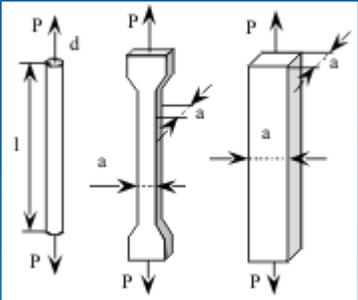
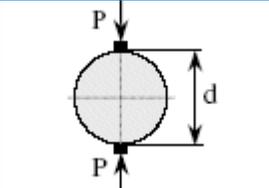
*coefficient de Poisson  $\nu$  : opposé du rapport des déformations transversale et longitudinale*



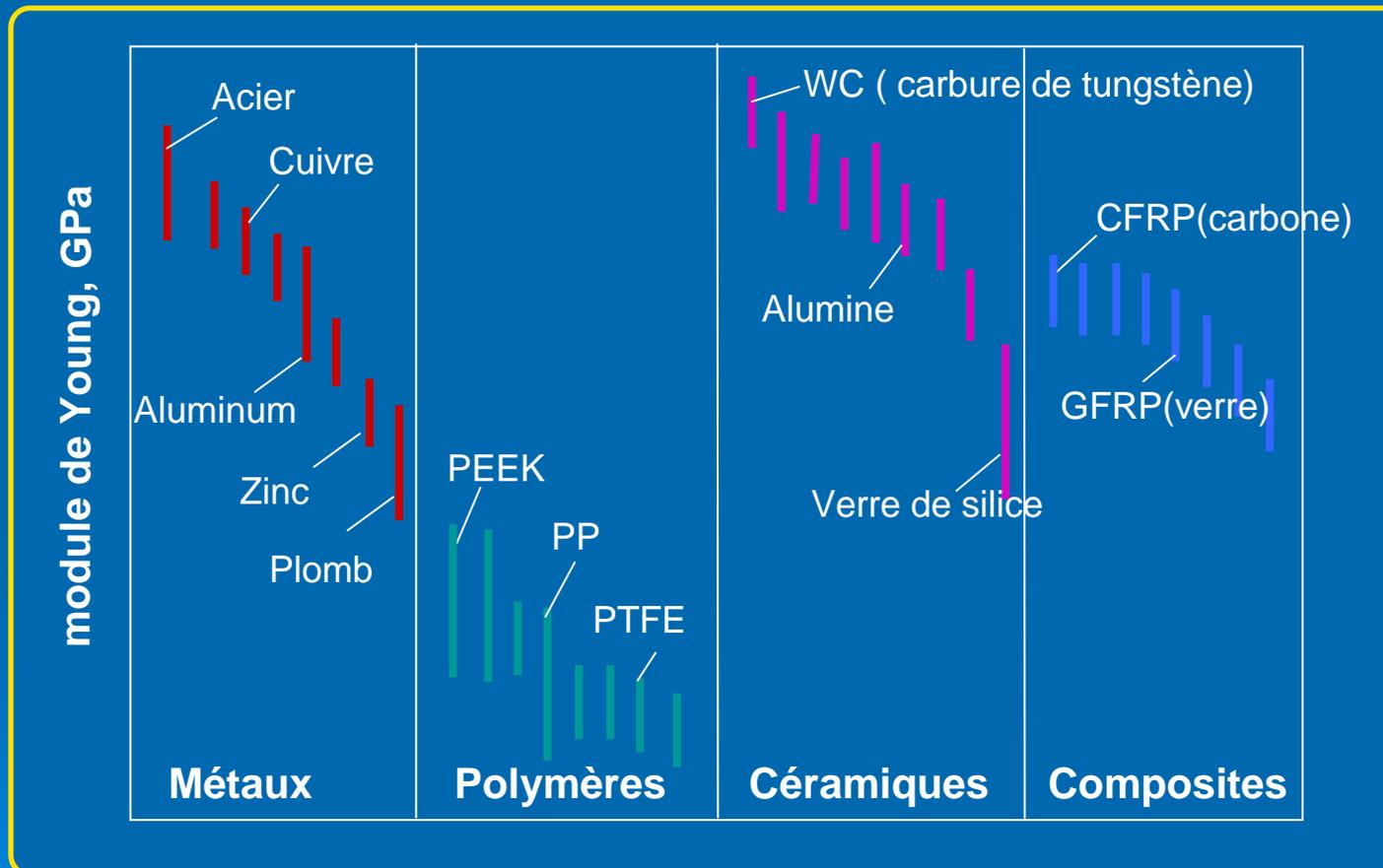
*Rque : matériaux homogènes isotropes*

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Echantillon	Schéma	Formule de calcul	Matériaux testés	Dimension des échantillons (cm)
Cube		$R = \frac{P}{a^2}$	Béton Mortier Roche naturelle	15x15x15 7,07x7,07x7,07 10x10x10 15x15x15 20x20x20
Cylindre		$R = \frac{4P}{\pi d^2}$	Béton Mortier Roche naturelle	d=15 ; h=30 d=h= 5; 7; 10; 15
Prisme		$R_{pr} = \frac{P}{a^2}$	Béton Bois	a=10; 15; 20 h=40; 60; 80 a=2; h=3
Échantillons assemblés		$R = \frac{P}{S}$	Brique	a=12; b=12,3; h=14
Moitié d'échantillon de Mortier		$R = \frac{P}{S}$	Ciment	a=4; S=25 cm <sup>2</sup>

Echantillon	Schéma	Formule de calcul	Matériaux testés	Dimension des échantillons (cm)
<b>Essai de traction par flexion</b>				
Prismatique Brique		$R_f = \frac{3Pl}{2bh^2}$	Ciment Brique	4x4x16 15x15x15
Prismatique		$R_{pf} = \frac{4l}{bh^2}$	Béton Bois	15x15x60 2x2x30
<b>Essai de résistance en traction pure</b>				
Cylindrique Prismatique		$R_t = \frac{4P}{\pi d^2}$ $R_t = \frac{P}{a^2}$	Béton Armature	5x5x50 10x10x80 $d_0=1;$ $l_0=5; l \geq 10$
Cylindrique		$R_{tf} = \frac{P}{\pi dl}$	Béton	d=15; l=30 d=16; l=32

# 1. Introduction



# 1. Introduction

- **Coefficient de dilatation thermique**

*Caractérise la dilatation d'un matériau lors d'une variation de température*

*Un seul coefficient pour les matériaux isotropes*

- **Températures caractéristiques**

*Température de transition vitreuse : transition entre le solide et le liquide visqueux pour les matériaux non cristallins*

*Température de fusion, température de service maximale*

- **Conductivité thermique**

*Vitesse à laquelle la chaleur se propage en régime permanent à travers un solide*

*Flux thermique :*

*avec  $\lambda$  conductivité thermique,  $\phi$  flux de chaleur,  $x$  distance entre les surfaces où sont mesurées les températures*

# 1. Introduction

- **Diffusivité thermique**

*Donne le flux thermique dans le cas d'un régime transitoire*

*Exprimée en fonction des autres caractéristiques*

- **Usure, oxydation, corrosion**

*usure volumétrique : rapport du volume de matière arraché et de la surface de contact*

*corrosion plus difficile à quantifier → seulement qualitatif*

*données pour des couples de matériaux ou en fonction des milieux*

# 1. Introduction

	Métaux	Céramiques	Polymères	Composites
<b>Densité</b>	Moyenne / élevée	Moyenne	Faible / très faible	Moyenne / faible
<b>Prix</b>	Faible / élevé	Elevé (techniques)	Faible / élevé	Elevé
		Faible (grde diffusion)		
<b>Module d'Elasticité</b>	Elevé	Très élevé	Moyen / faible	Elevé
<b>Résistance Mécanique</b>	Elevée	Très élevée (compression)	Moyenne / faible	Elevée
<b>Tolérance aux défauts et aux chocs</b>	Très tenace	Très fragile	Peu tenaces mais grande énergie absorbée	Très tenace
<b>Température d'utilisation</b>	Moyenne / hautes	Hautes / très hautes	Moyennes / faibles	Moyennes
<b>Tenue aux agressions chimiques</b>	Moyenne / mauvaise	Bonne / très bonne	Moyenne	Moyenne
<b>Conduction de la chaleur</b>	Bonne / très bonne	Moyenne / faible	Faible / très faible	Faible
<b>Conduction de l'électricité</b>	Bonne / très bonne	Faible / très faible		
<b>Facilité de mise en forme</b>	Facile	Difficile (technique)	Très facile	Moyenne dépendant de la forme
		Facile (grde diffusion)		
<b>Facilité d'assemblage</b>	Facile	Moyenne	Facile	difficile

# 1. Introduction

Données numériques : fourchettes de valeur

*Exemple : aciers*

*module de Young entre 190 et 210 GPa*

*limite d'élasticité entre 250 et 2000 MPa*

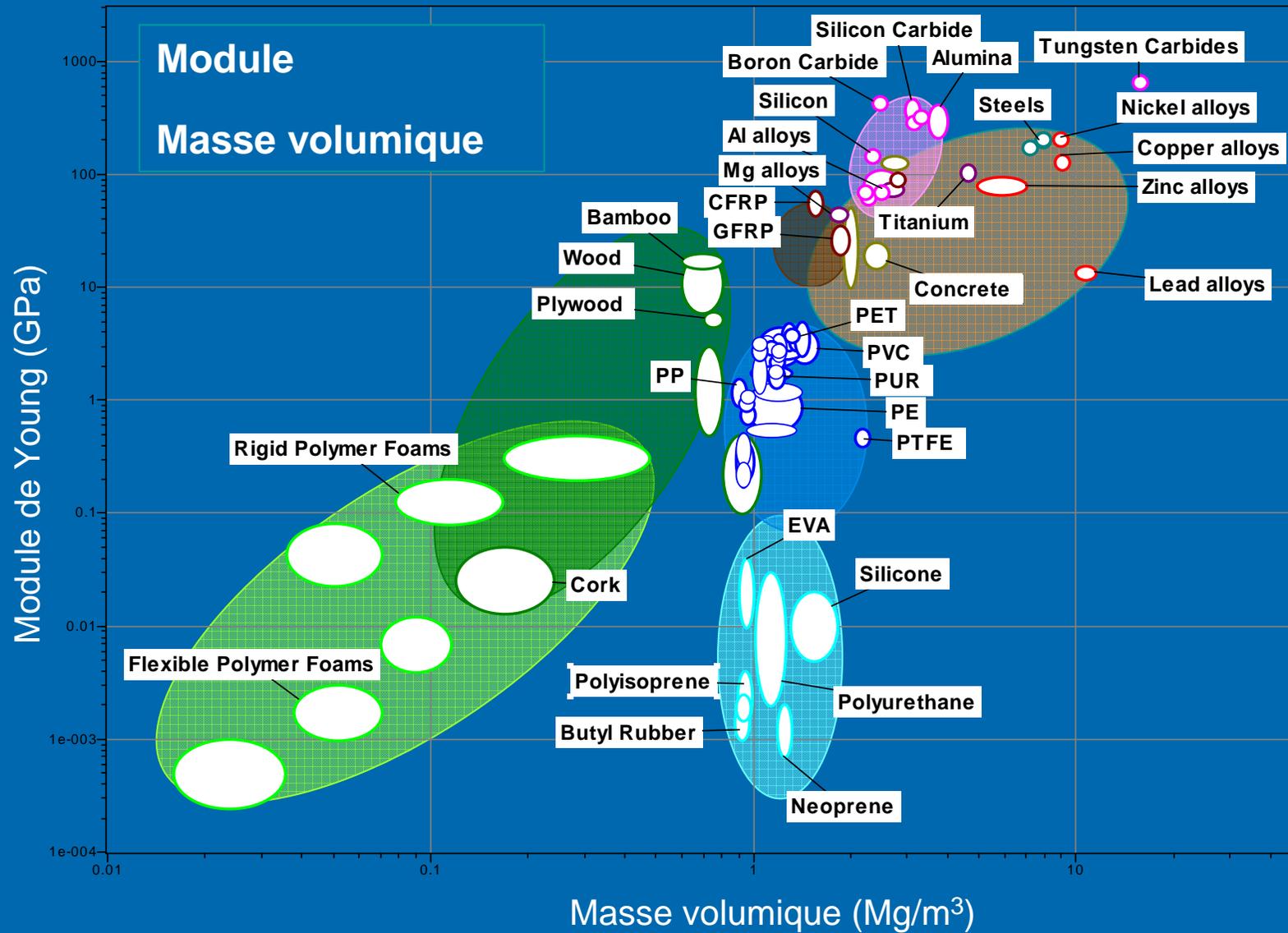
*alliages d'aluminium*

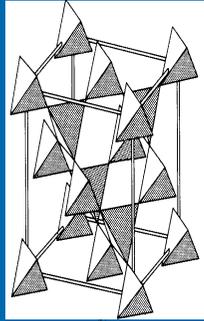
*module de Young entre 70 et 80 GPa*

*limite d'élasticité entre 100 et 650 MPa*

⇒ *On peut tirer des conclusions sur les modules, mais pas sur les limites d'élasticité*

# 1. Introduction





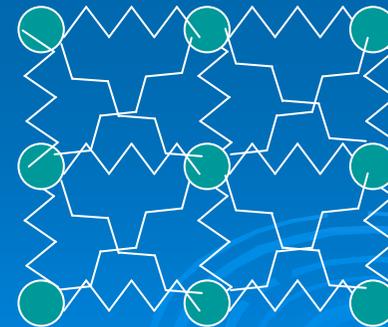
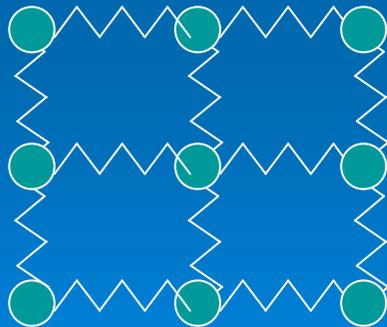
## *Partie 2*

# *Mise en évidence de la relation structure / propriétés*

Quelles sont les structures des matériaux ?  
Quels modèles appliquer ?

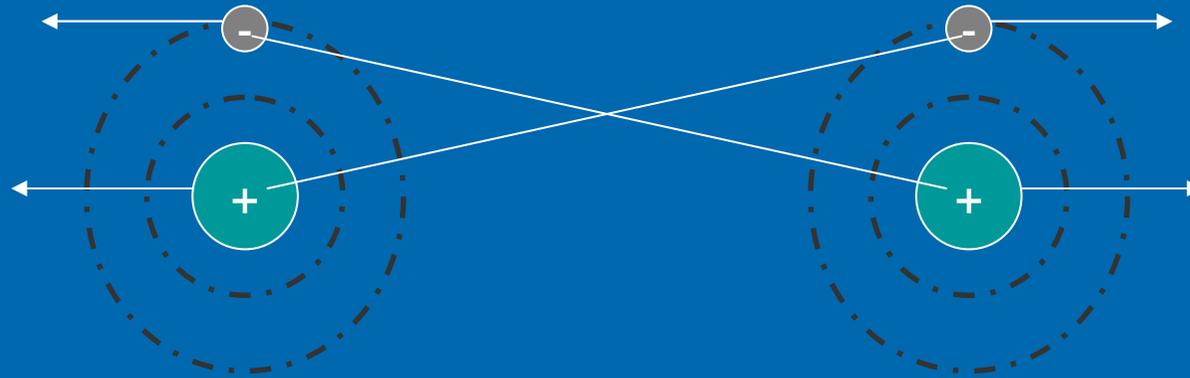
Ex: explication de la loi d'Young  $\sigma = E\varepsilon$

A- Modèle mécanique



# Modèle électrostatique

## 2. Structure / propriétés

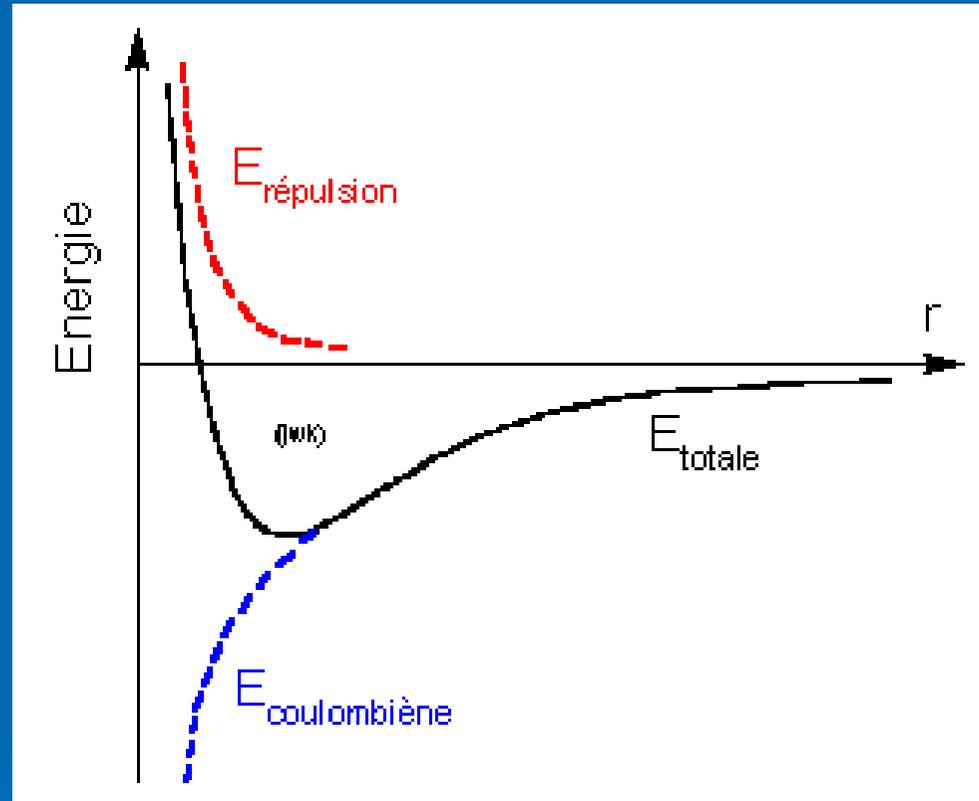


$$U_a = \frac{A}{D}$$

$$U_r = \frac{B}{D^m}$$

# Modèle électrostatique

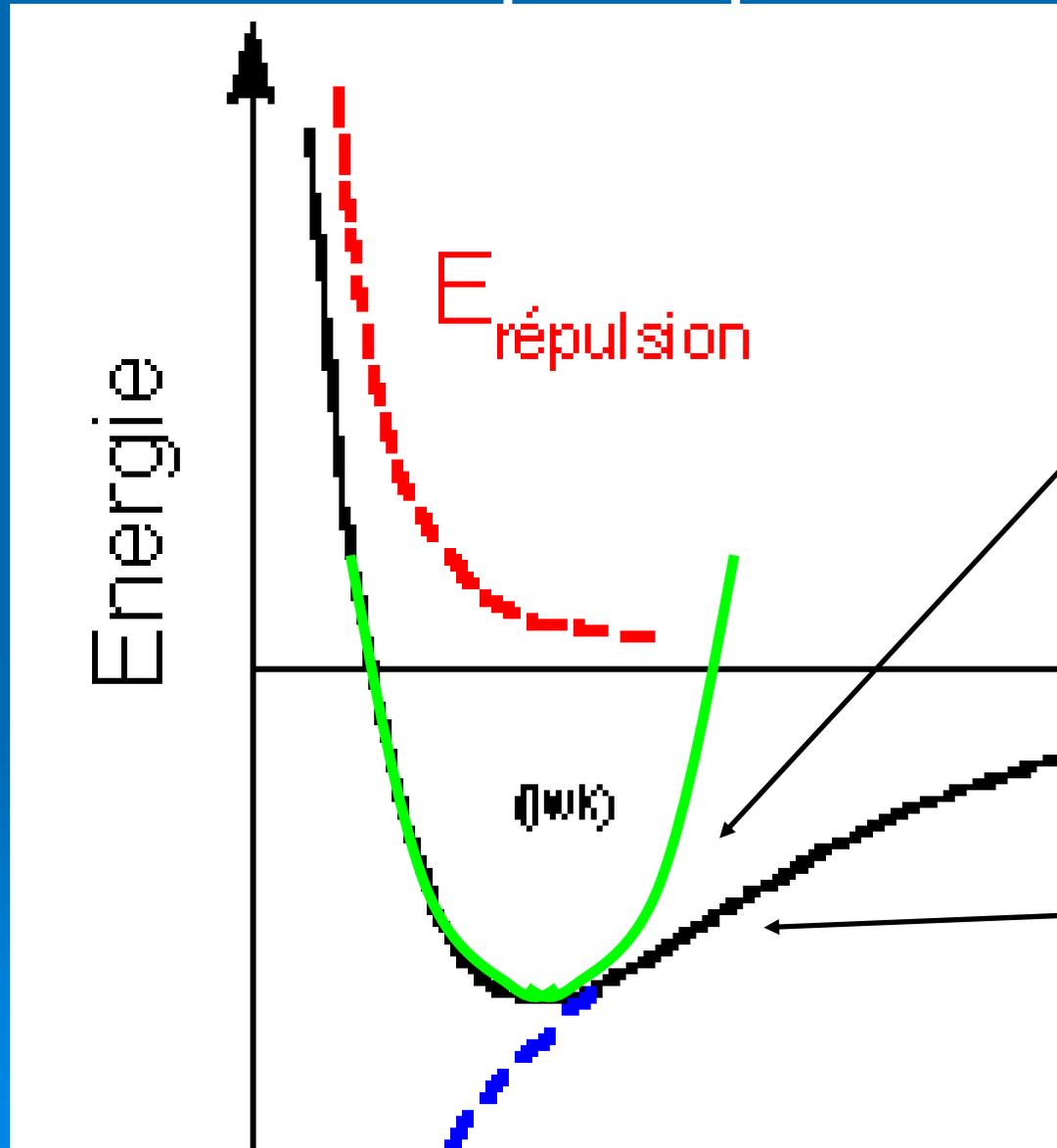
## 2. Structure / propriétés



$$F = \frac{dU}{dr}$$

## 2. Structure / propriétés

### Modèle électrostatique – explication de la dilatation thermique

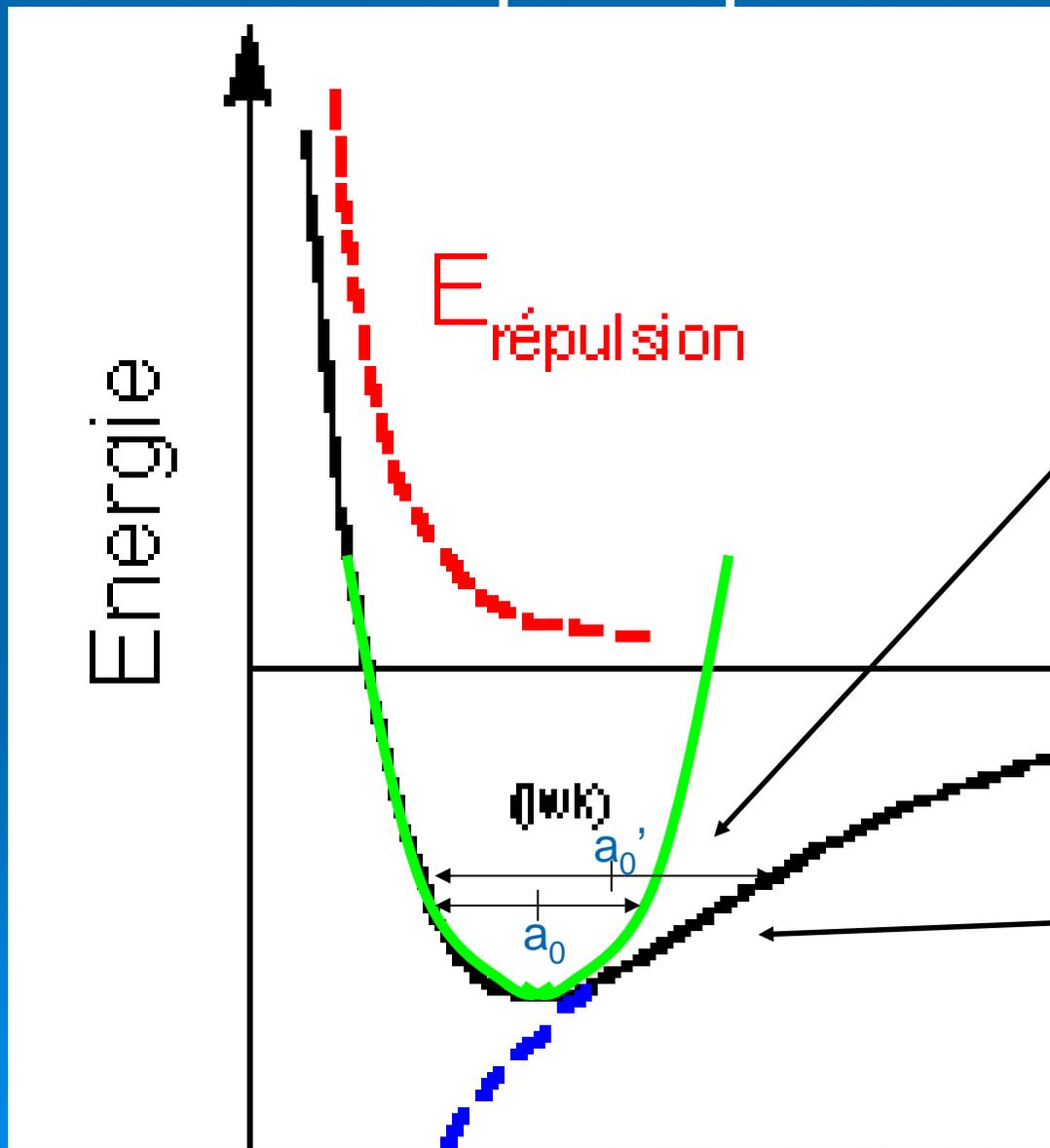


Approximation  
harmonique du potentiel

Potentiel réel  
anharmonique

## 2. Structure / propriétés

### Modèle électrostatique – explication de la dilatation thermique



Approximation  
harmonique du potentiel

Potentiel réel  
anharmonique

$a_0 < a_0'$  donc dilatation du  
matériau

## 2. Structure / propriétés

### Les différentes liaisons

On a établi, rapidement, des relations entre certaines propriétés des matériaux ( $E$ ,  $\alpha$ ) et l'énergie de liaison.

D'autres propriétés dépendent aussi du type de liaison établie entre les atomes ou les molécules.

Ex : fragilité : matériaux covalents et ioniques

ductilité : conséquence directe de la liaison métallique.

- Liaison covalente
- Liaison ionique
- Liaison métallique
- Liaison mixtes
- Liaison de faible intensité

## 2. Structure / propriétés

### La liaison covalente

Colonne 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 1,0 <b>H</b> Hydrogène																	2 4,0 <b>He</b> Hélium
3 6,9 <b>Li</b> Lithium	4 9,0 <b>Be</b> Béryllium											5 10,8 <b>B</b> Bore	6 12,0 <b>C</b> Carbone	7 14,0 <b>N</b> Azote	8 16,0 <b>O</b> Oxygène	9 19,0 <b>F</b> Fluor	10 20,2 <b>Ne</b> Néon
11 23,0 <b>Na</b> Sodium	12 24,3 <b>Mg</b> Magnésium											13 27,0 <b>Al</b> Aluminium	14 28,1 <b>Si</b> Silicium	15 31,0 <b>P</b> Phosphore	16 32,1 <b>S</b> Soufre	17 35,5 <b>Cl</b> Chlore	18 39,9 <b>Ar</b> Argon
19 39,1 <b>K</b> Potassium	20 40,1 <b>Ca</b> Calcium	21 45,0 <b>Sc</b> Scandium	22 47,9 <b>Ti</b> Titane	23 50,9 <b>V</b> Vanadium	24 52,0 <b>Cr</b> Chrome	25 54,9 <b>Mn</b> Manganèse	26 55,8 <b>Fe</b> Fer	27 58,9 <b>Co</b> Cobalt	28 58,7 <b>Ni</b> Nickel	29 63,5 <b>Cu</b> Cuivre	30 65,4 <b>Zn</b> Zinc	31 69,7 <b>Ga</b> Gallium	32 72,6 <b>Ge</b> Germanium	33 74,9 <b>As</b> Arsenic	34 79,0 <b>Se</b> Sélénium	35 79,9 <b>Br</b> Brome	36 83,8 <b>Kr</b> Krypton
37 85,5 <b>Rb</b> Rubidium	38 87,6 <b>Sr</b> Strontium	39 88,9 <b>Y</b> Yttrium	40 91,2 <b>Zr</b> Zirconium	41 92,9 <b>Nb</b> Niobium	42 95,9 <b>Mo</b> Molybdène	43 (98) <b>Tc</b> Technétium	44 101,1 <b>Ru</b> Ruthénium	45 102,9 <b>Rh</b> Rhodium	46 106,4 <b>Pd</b> Palladium	47 107,9 <b>Ag</b> Argent	48 112,4 <b>Cd</b> Cadmium	49 114,8 <b>In</b> Indium	50 118,7 <b>Sn</b> Étain	51 121,8 <b>Sb</b> Antimoine	52 127,6 <b>Te</b> Tellure	53 126,9 <b>I</b> Iode	54 131,3 <b>Xe</b> Xénon
55 132,9 <b>Cs</b> Césium	56 137,3 <b>Ba</b> Baryum	57 138,9 <b>La</b> Lanthane	72 178,5 <b>Hf</b> Hafnium	73 180,9 <b>Ta</b> Tantale	74 183,8 <b>W</b> Tungstène	75 186,2 <b>Re</b> Rhénium	76 190,2 <b>Os</b> Osmium	77 192,2 <b>Ir</b> Iridium	78 195,1 <b>Pt</b> Platine	79 197,0 <b>Au</b> Or	80 200,6 <b>Hg</b> Mercure	81 204,4 <b>Tl</b> Thallium	82 207,2 <b>Pb</b> Plomb	83 209,0 <b>Bi</b> Bismuth	84 (209) <b>Po</b> Polonium	85 (210) <b>At</b> Astate	86 (222) <b>Rn</b> Radon
87 (223) <b>Fr</b> Francium	88 (226) <b>Ra</b> Radium	89 (227) <b>Ac</b> Actinium	104 (261) <b>Rf</b> Rutherfordium	105 (262) <b>Db</b> Dubnium	106 (266) <b>Sg</b> Seaborgium	107 (264) <b>Bh</b> Bohrium	108 (269) <b>Hs</b> Hassium	109 (268) <b>Mt</b> Meitnerium	110 (269) <b>Uuq</b> Ununquadium	111 (272) <b>Uuu</b> Unununium	112 (277) <b>Uub</b> Unubium	114 <b>Uuq</b> Ununquadium	116 <b>Uuh</b> Ununhexium				118 <b>Uuo</b> Ununoctium
			58 140,1 <b>Ce</b> Cérium	59 140,9 <b>Pr</b> Praséodyme	60 144,2 <b>Nd</b> Néodyme	61 (145) <b>Pm</b> Prométhium	62 150,4 <b>Sm</b> Samarium	63 152,0 <b>Eu</b> Europium	64 157,4 <b>Gd</b> Gadolinium	65 158,9 <b>Tb</b> Terbium	66 162,5 <b>Dy</b> Dysprosium	67 164,9 <b>Ho</b> Holmium	68 167,3 <b>Er</b> Erbium	69 168,9 <b>Tm</b> Thulium	70 173,0 <b>Yb</b> Ytterbium	71 175,0 <b>Lu</b> Lutétium	
			90 232,0 <b>Th</b> Thorium	91 231,0 <b>Pa</b> Protactinium	92 238,0 <b>U</b> Uranium	93 (237) <b>Np</b> Neptunium	94 (244) <b>Pu</b> Plutonium	95 (243) <b>Am</b> Américium	96 (247) <b>Cm</b> Curium	97 (247) <b>Bk</b> Berkélium	98 (251) <b>Cf</b> Californium	99 (254) <b>Es</b> Einsteinium	100 (257) <b>Fm</b> Fermium	101 (258) <b>Md</b> Mendélévium	102 (259) <b>No</b> Nobélium	103 (260) <b>Lw</b> Lawrencium	



Dmitri Ivanovitch Mendeleïev (1834 - 1907) est un chimiste russe connu pour ses travaux sur la classification périodique des éléments. En 1869, il publia une première version de son tableau périodique des éléments appelé aussi tableau de Mendeleïev. Il déclara que les éléments chimiques pouvaient être arrangés selon un modèle qui permettait de prévoir les propriétés des éléments non encore découverts.

6 →

7 →

Numéro atomique → **Z** ← Masse molaire atomique (g.mol<sup>-1</sup>)

Symbole atomique → **X** ← Famille

Nom

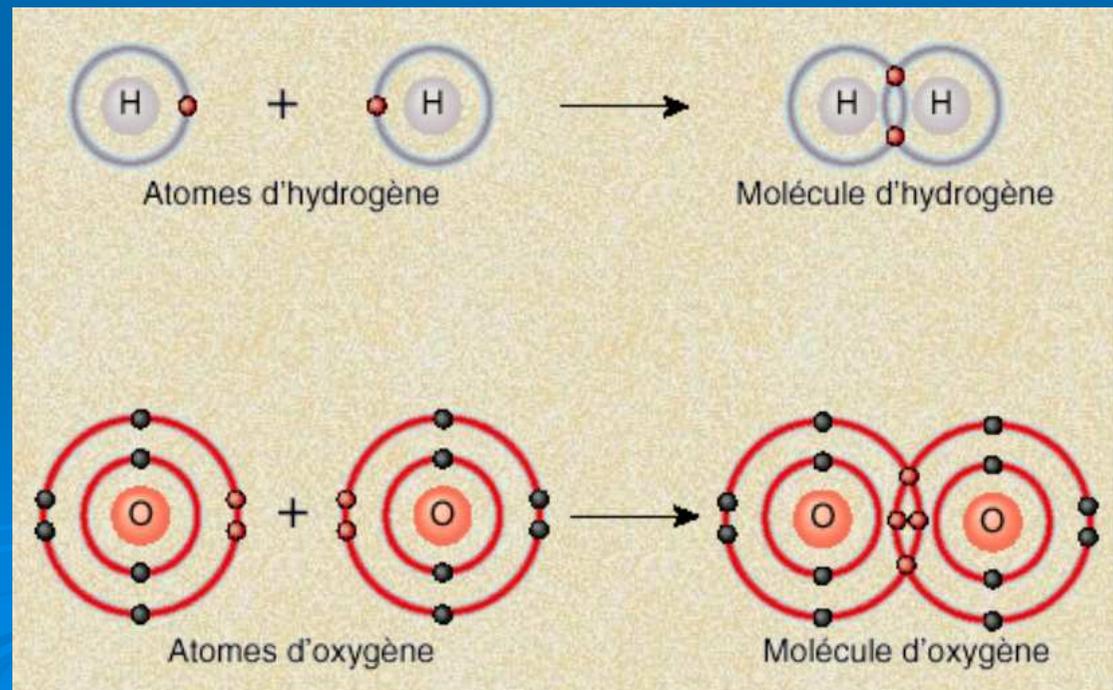
## 2. Structure / propriétés

### La liaison covalente

Elle est formée par le **partage d'électrons** entre les atomes, ce qui signifie que ceux-ci ne gagnent ni ne perdent des électrons. Il en existe **deux types**:

La liaison covalente non polaire relie deux atomes dont l'**attraction des électrons** de la part des 2 atomes est **égale**.

C'est ce type de liaison qui relie les atomes dans les **molécules d'hydrogène (H<sub>2</sub>)**, **d'oxygène (O<sub>2</sub>)** et **d'azote (N<sub>2</sub>)**

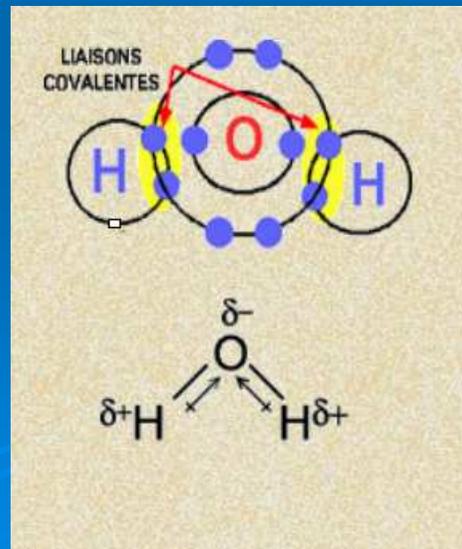


## 2. Structure / propriétés

### La liaison covalente

La liaison covalente polaire implique une **attirance inégale des électrons** entre des atomes. Ceci peut être dû à une **différence de grosseur** des deux atomes comme dans le cas d'une molécule d'eau par exemple.

Les électrons passent alors **plus de temps autour** du noyau de l'atome qui les **attire le plus**. Ceci entraîne l'apparition de **charges partielles** au niveau des atomes.



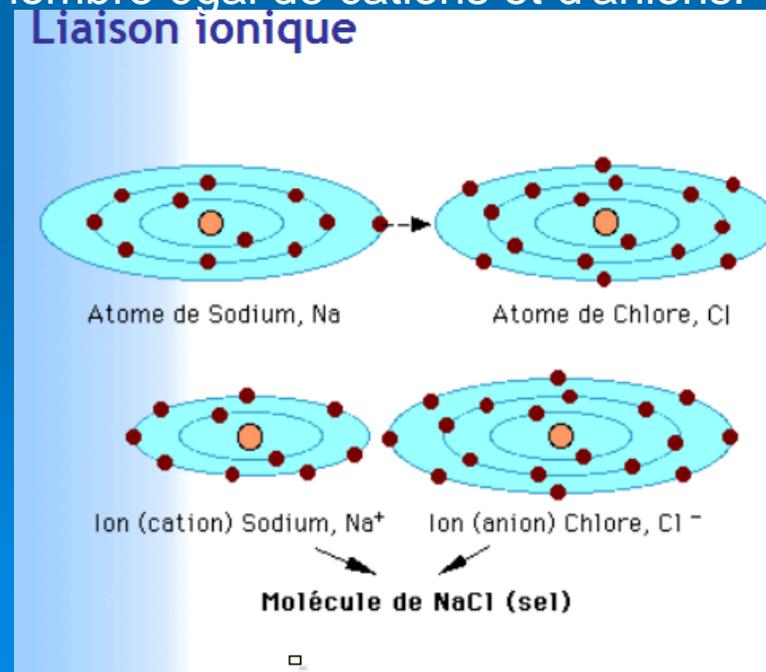
Exemple : molécule d'eau

# La liaison ionique

Dans certains cas, deux atomes exercent des attractions tellement inégales sur les électrons périphériques que l'atome le plus électronégatif arrache complètement un électron à l'autre atome.

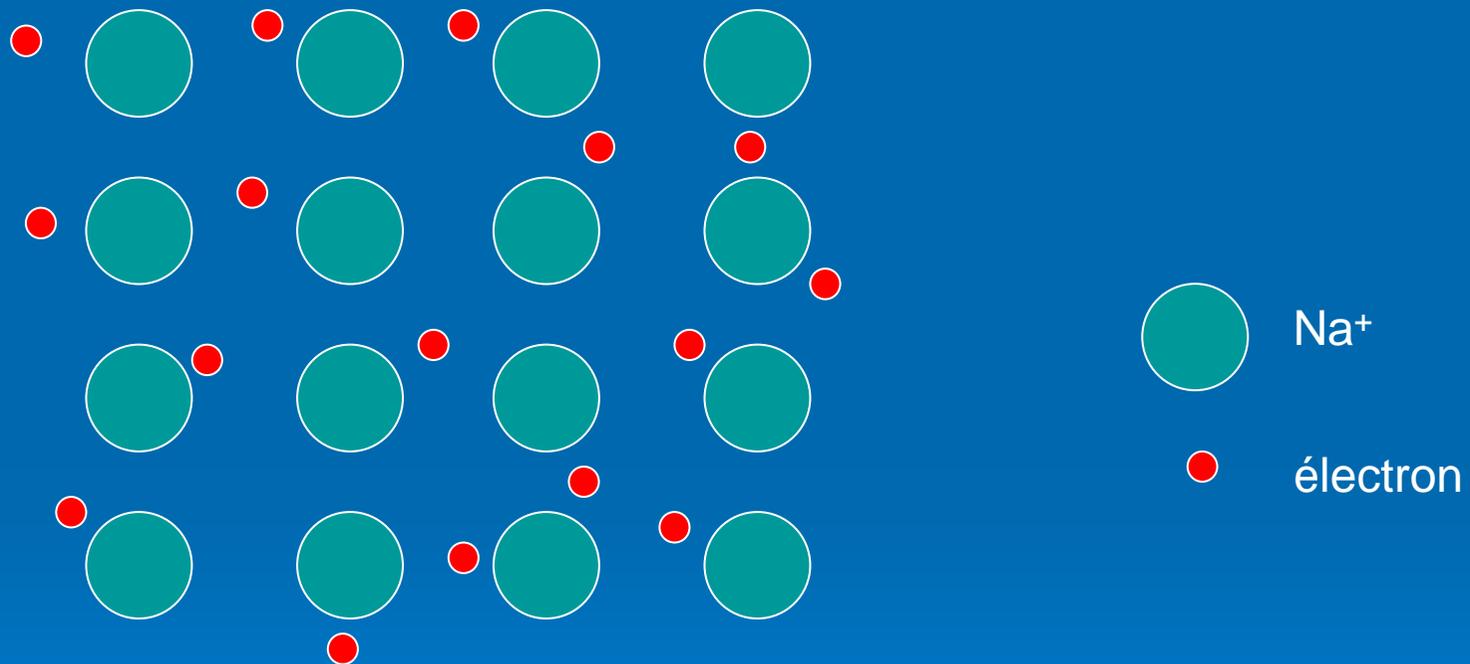
Un atome chargé (ou une molécule chargée) s'appelle un ion. Le terme ion s'emploie également pour désigner des molécules covalentes entières qui porte une charge électrique, comme par exemple:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ . Lorsque la charge est positive l'ion s'appelle cation. Lorsque la charge est négative, l'ion se nomme anion. En raison de leurs charges opposées, les cations et les anions s'attirent l'un l'autre dans ce qui s'appelle une liaison ionique.

Les composés ioniques portent le nom de sel. Les sels ne possèdent pas tous un nombre égal de cations et d'anions.



## 2. Structure / propriétés

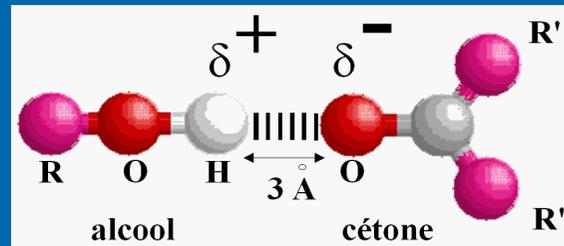
### La liaison métallique



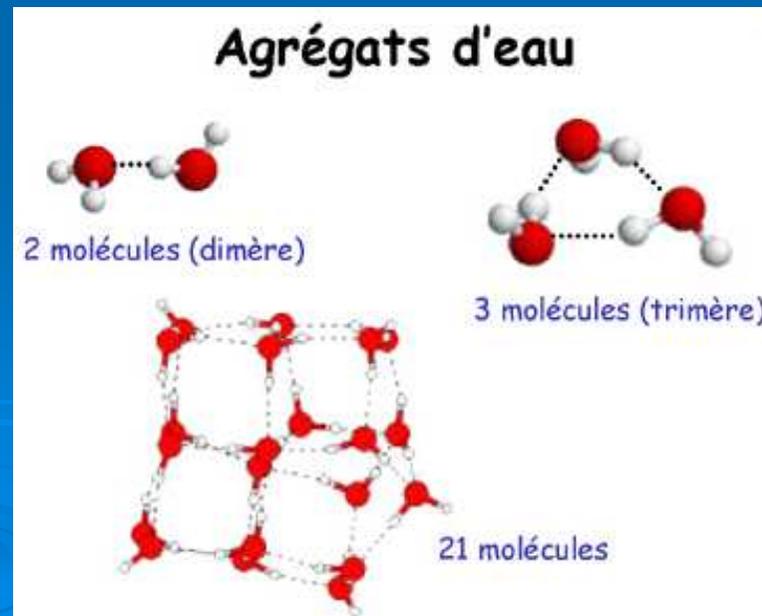
## 2. Structure / propriétés

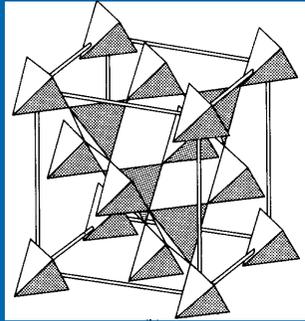
### Les liaisons de faibles intensité

-Dipôles



- liaisons hydrogènes, Van der Waals





# *Partie 3*

## *Architecture atomique*

### **Plan**

#### **3.1 Ensemble d'atomes : ordre et désordre**

3.1.1 Liquide ou solide amorphe

3.1.2 Solide cristallin

#### **3.2 Notions de cristallographie**

3.2.1 Systèmes et réseaux cristallins

3.2.2 Repérage des directions et des plans

3.2.3 Densité de noeuds et compacité

#### **3.3 Défauts cristallins**

3.3.1 à 3.3.4 Défauts sans, à une, deux et trois dimensions

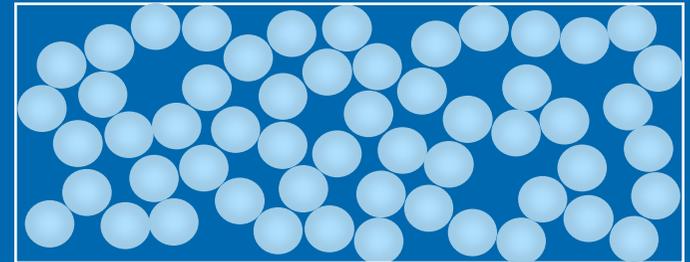
### 3. Architecture atomique

## 3.1 Ensemble d'atomes : ordre et désordre

*Comment, dans  $1 \text{ cm}^3$  de solide, disposer  $10^{24}$  atomes ?*

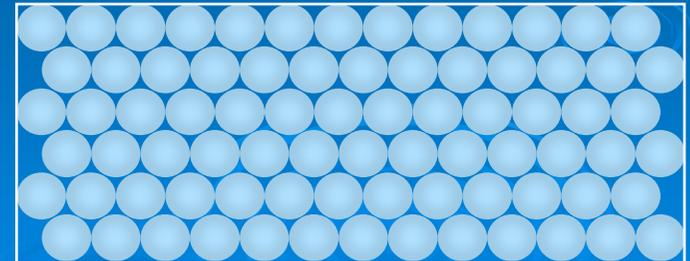
\* *En désordre : solides amorphes*

- plastiques
  - céramiques
  - verres
- } *en partie*



\* *En ordre : solides cristallins*

- métaux
  - céramiques
  - plastiques
- } *en partie*



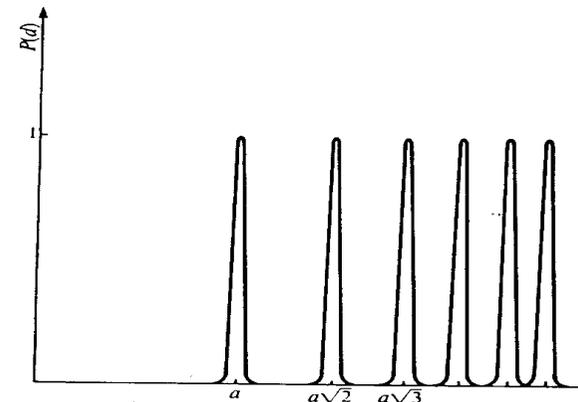
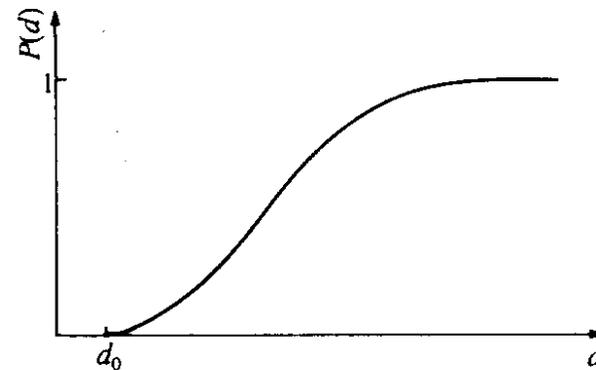
### 3. Architecture atomique

#### 3.1 Ensemble d'atomes: ordre et désordre

*L'architecture atomique, c'est la disposition des atomes dans l'espace et les relations géométriques qui en découlent.*

*En ce sens, les gaz représentent le **désordre complet** puisque la position d'un atome par rapport à un autre est tout à fait arbitraire. En mouvement continu.*

*À l'opposé, les solides cristallins démontrent un **ordre parfait** puisque la position d'un atome par rapport à un autre est bien définie.*



### 3. Architecture atomique

#### *Les gaz*

- \* *Les atomes ne sont pas en contact et occupent tout l'espace disponible (compressible)*
  - \*  *$PV = nRT$*
  - \* *Les atomes sont toujours en mouvement (aucun ordre)*
- 

### 3. Architecture atomique

## 3.1 Ensemble d'atomes : ordre et désordre

### 3.1.1 *Liquide ou solide amorphe*

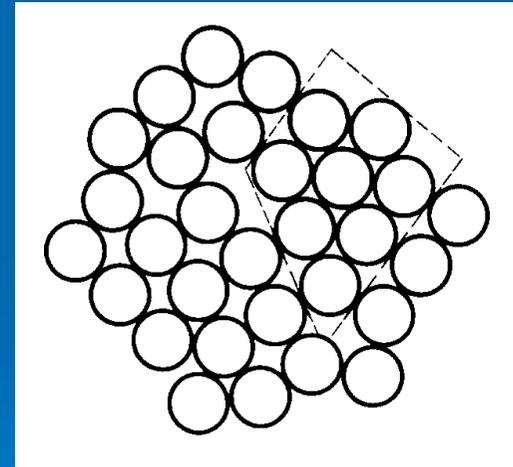
\* *Atomes sont en contact (incompressible)*

\* *Ordre à courte distance*

\* *Arrangement irrégulier  
(au hasard) dans l'espace*

\* *Conséquence  $\Rightarrow$  isotropie*

- *les propriétés des corps isotropes sont les mêmes  
quelque soit la direction selon laquelle on les mesure.*



## 3. Architecture atomique

### 3.1.1 Liquide

- \* *Les groupe d'atomes sont toujours en mouvement*
- \* *Viscosité du liquide dépend, entre autre, de la taille et de la forme des groupe d'atomes*
- \* *sable vs gravier passant dans un entonnoir*

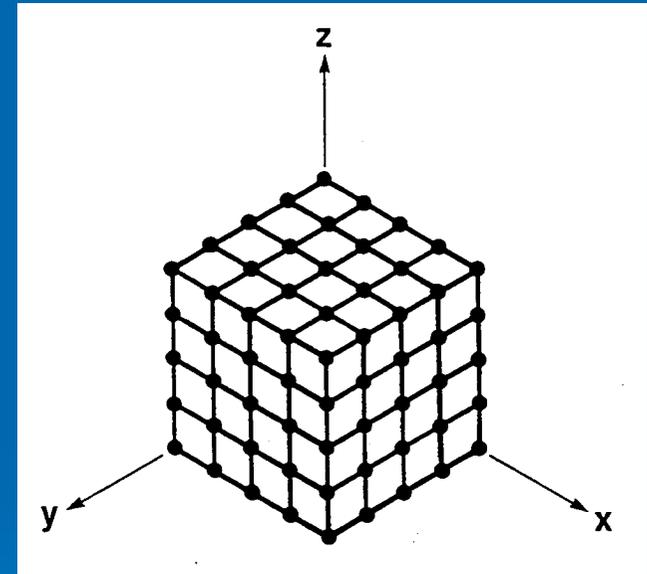


## 3. Architecture atomique

### 3.1 Ensemble d'atomes : ordre et désordre

#### 3.1.2 Solide cristallin

- \* *Symétrie*
- \* *Ordre à longue distance*
- \* *Arrangement régulier dans l'espace*
- \* *Conséquence*  $\Rightarrow$  *anisotropie*
  - ex.: la biréfringence de la calcite  
(2 indices de réfraction différents, dépendant de la direction de mesure)



### 3. Architecture atomique

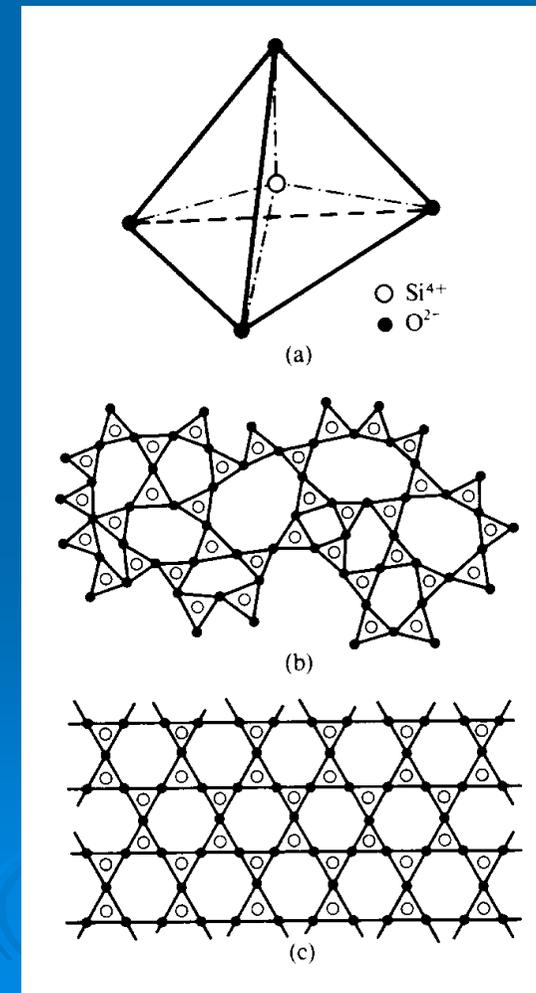
## 3.1 Ensemble d'atomes : ordre et désordre

\* *Exemple de la silice ( $\text{SiO}_2$ )*

(a) tétraèdre de base

(b) état amorphe (vitreux)

(c) état cristallin



### 3. Architecture atomique

## 3.1 Ensemble d'atomes : ordre et désordre

- \* *Quand on refroidit un liquide, le mouvement des atomes est suffisant pour que chacun se positionne dans le système cristallin. En devenant cristallin, la plupart des liquides diminue de volume (compacité optimale) Exception : la glace*
  - \* *Toutefois, si on refroidit rapidement (trempe), on « fige » les atomes en place...*
- 

## 3. Architecture atomique

### 3.1 L'état amorphe

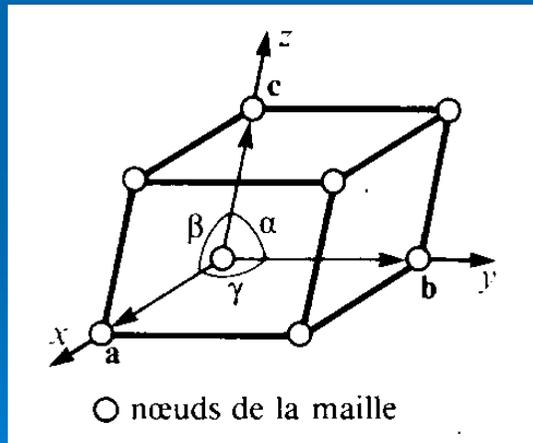
- \* *Les matériaux amorphes présentent des propriétés différentes des matériaux cristallins.*
- \* *Ils peuvent être plus réactifs :*
  - *structure instable (figée à des conditions de température + élevée)*
  - *structure plus « ouverte » laissant passer les éléments étrangers*
  - *Isotropie des matériaux amorphes*

## 3. Architecture atomique

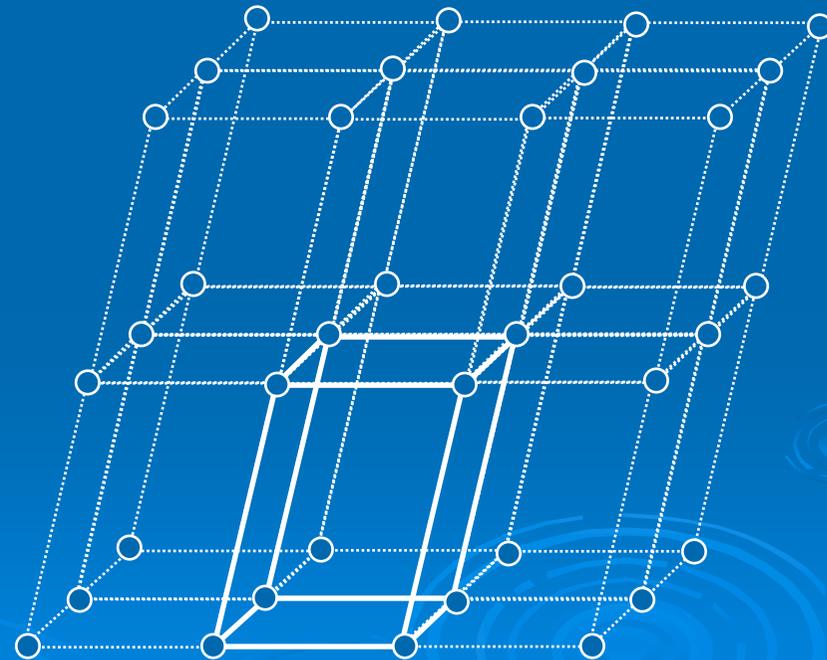
### 3.2 Notions de cristallographie

#### 3.2.1 Systèmes et réseaux cristallins

\* *Maille primitive*



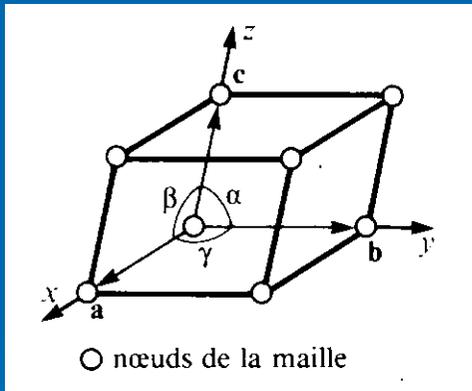
*Vidéo 3.2*



### 3. Architecture atomique

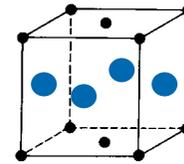
#### 3.2.1 Systèmes et réseaux cristallins (suite)

7 systèmes cristallins

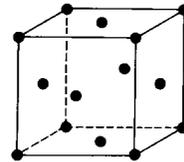


+

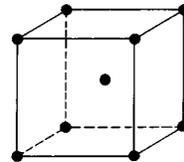
nœuds supplémentaires



au centre des bases (BC)



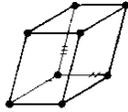
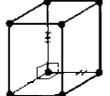
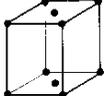
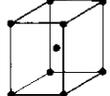
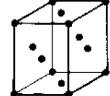
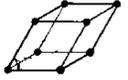
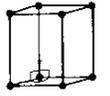
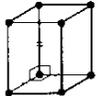
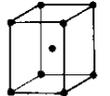
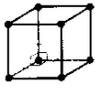
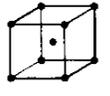
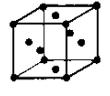
au centre des faces (FC)



au centre de la maille (C)

= 14 réseaux de Bravais

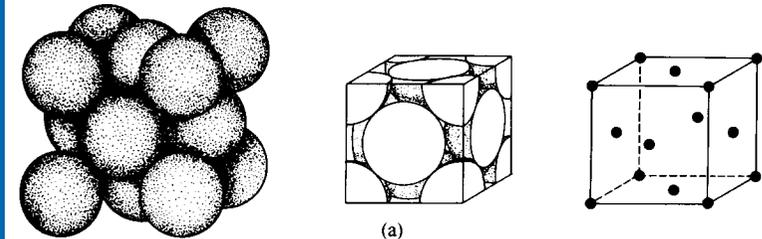
# Réseaux de Bravais

Système cristallin	Relations entre les axes	Relations entre les angles	Réseaux de Bravais			
			simple	à bases centrées	centré	à faces centrées
triclinique	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$				
monoclinique	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$				
orthorhombique	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
rhomboédrique	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$				
hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$				
quadratique	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
cubique	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				

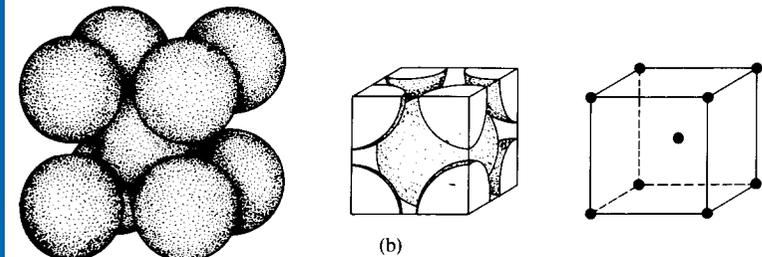
### 3. Architecture atomique

## Réseaux de Bravais : cas étudiés

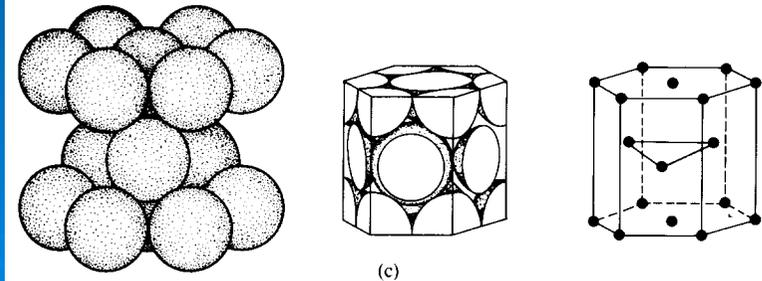
*cubique à faces centrées (c.f.c.)*



*cubique centré (c.c.)*



*hexagonal compact (h.c.)*



### 3. Architecture atomique

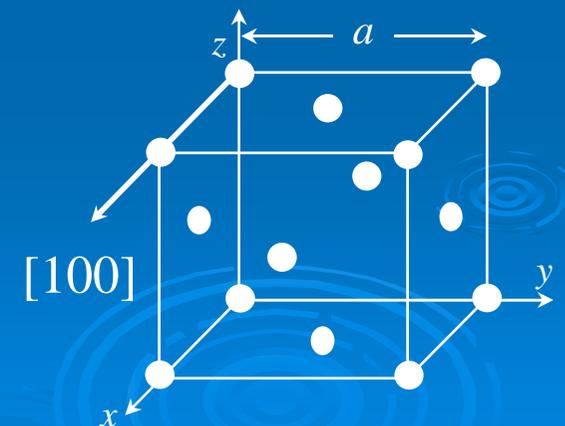
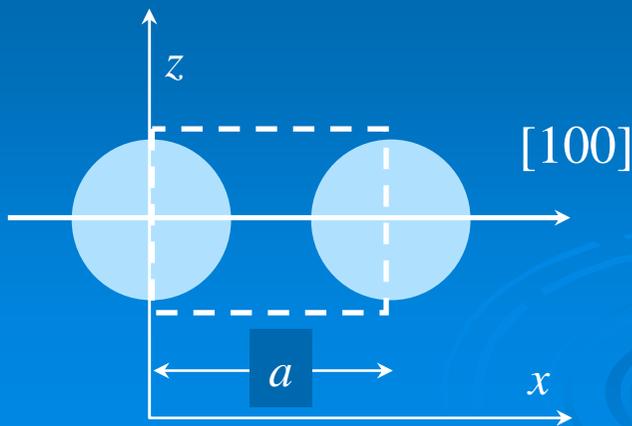
#### 3.2.3 Densité des nœuds et compacité

\* *Densité de noeuds*

(a) exemple de calcul sur une rangée :

maille c.f.c.  
direction [100]

$$d = \left( 2 \cdot \frac{1}{2} \right) / a = 1/a$$



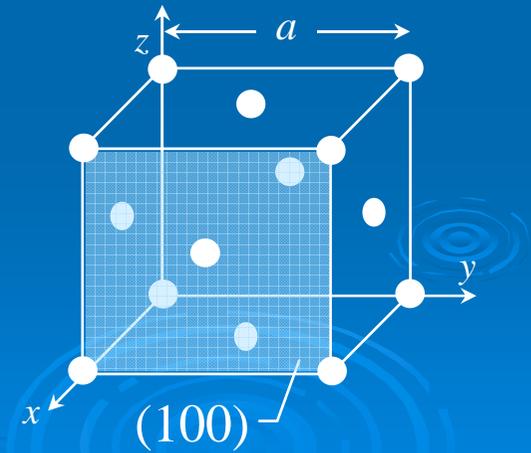
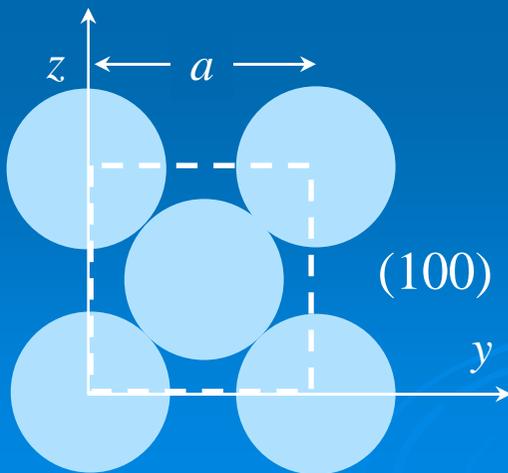
### 3. Architecture atomique

#### \* *Densité de noeuds*

(b) exemple de calcul sur une surface :

maille c.f.c.  
plan (100)

$$d = \frac{\left(4 \cdot \frac{1}{4} + 1\right)}{a^2} = \frac{2}{a^2}$$



### 3. Architecture atomique

#### \* *Compacité*

- volume des atomes p/r au volume de la maille
- exemple : Cu (c.f.c.)

#### *Volume des atomes*

$$\text{Nombre d'atomes} = 6 \cdot \frac{1}{2} + 8 \cdot \frac{1}{8} = 4$$

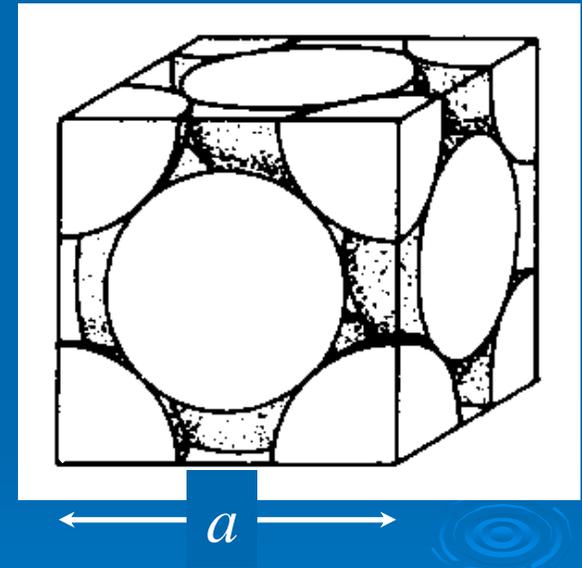
$$\text{Rayon d'un atome} \cdot 4 = a\sqrt{2}$$

$$V_{\text{atomes}} = 4 \cdot \frac{4}{3} \pi \left( \frac{a\sqrt{2}}{4} \right)^3 = a^3 \left( \frac{\pi\sqrt{2}}{6} \right)$$

#### *Volume de la maille*

$$V_{\text{maille}} = a^3$$

$$\text{Compacité: } C = \frac{V_{\text{atomes}}}{V_{\text{maille}}} = \frac{\pi\sqrt{2}}{6} \cong 0,74$$

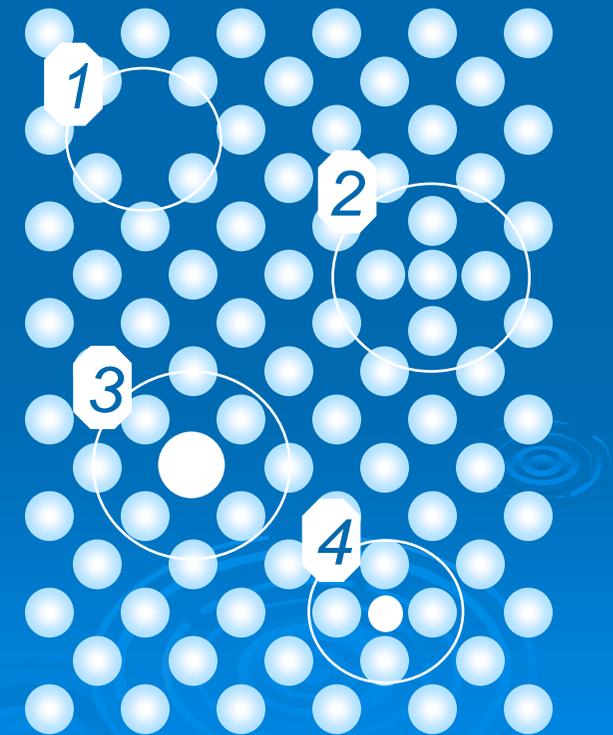


## 3. Architecture atomique

### 3.3 Défauts cristallins

#### 3.3.1 défauts ponctuels

- \* **1** *Lacune*
- \* **2** *Atome autointerstitiel*
- \* **3** *Atome étranger en substitution*
- \* **4** *Atome étranger en insertion*



## 3. Architecture atomique

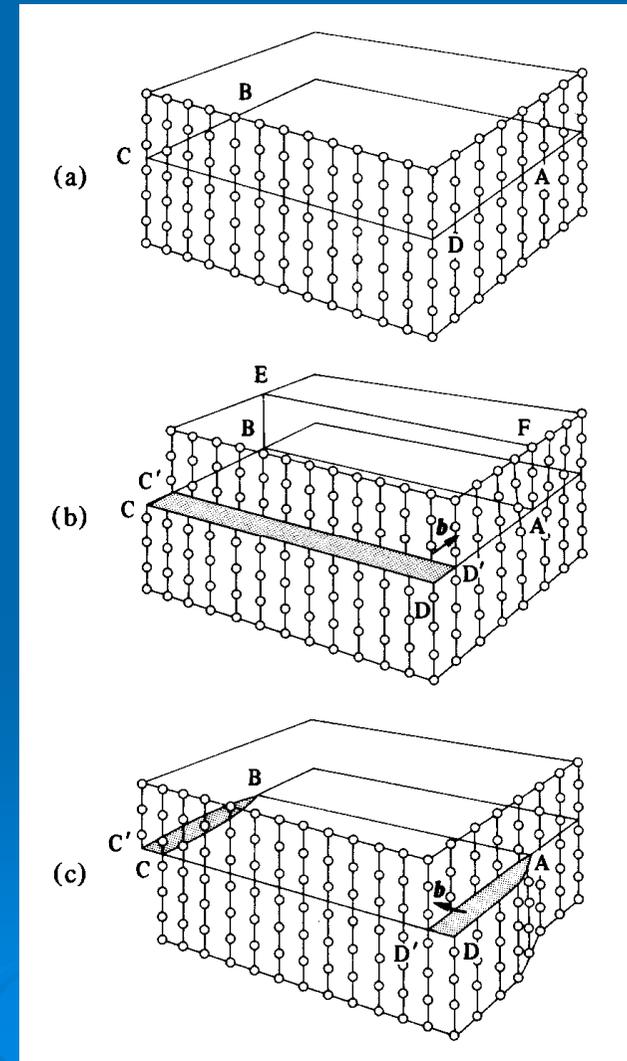
### 3.3 Défauts cristallins

#### 3.3.2 défauts à une dimension

##### \* *Les dislocations*

- (a) cristal parfait
- (b) dislocation-coin
- (c) dislocation-vis

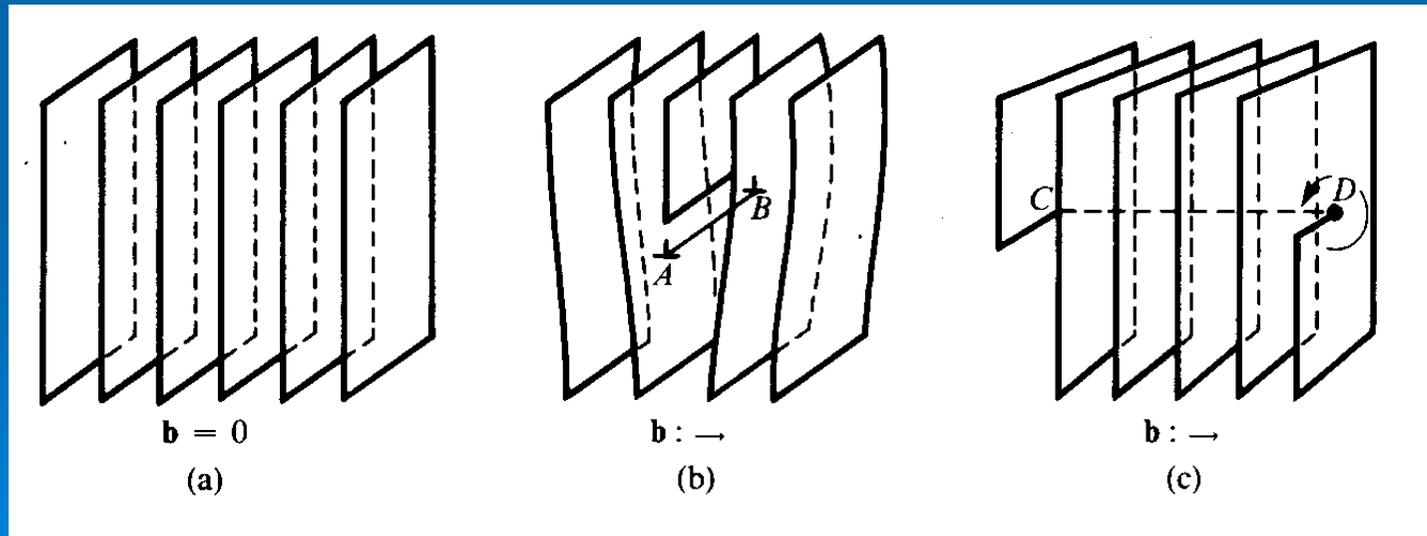
Explication de Rth  
Boucle Frank et Read



### 3. Architecture atomique

\* *Dislocations : visualisation selon les plans cristallins*

- (a) cristal parfait
- (b) dislocation-coin
- (c) dislocation-vis



## 3. Architecture atomique

### 3.3 Défauts cristallins

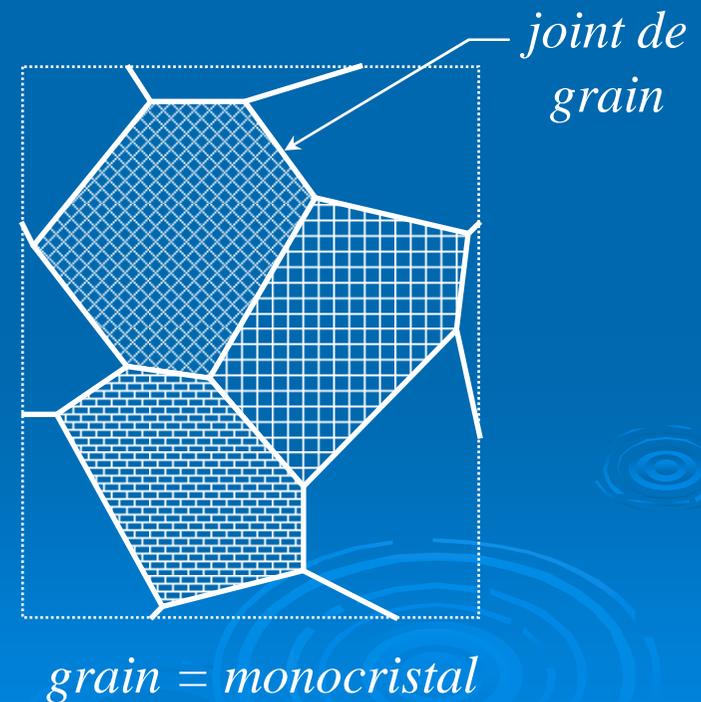
#### 3.3.3 défauts à deux et trois dimensions

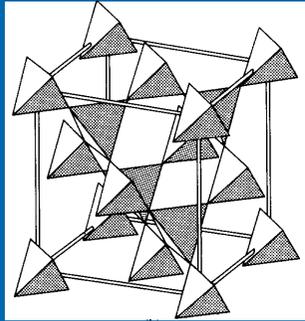
- \* *Deux dimensions*

- Macle
- Joints de grains

- \* *Trois dimensions*

- Précipités





## *Partie 4*

# *Propriétés physiques*

### **Plan**

- 4.1 Propriétés thermiques**
- 4.2 Conductivité électrique**
- 4.3 Diélectrique**

## Propriétés Thermique :

Conductivité par les électrons + par les vibrations du réseau (phonon)

$$K = k_e + k_p$$

Avec  $k_e \gg k_p$

Donc liaison métallique donne bonne conductivité (nuage d'électron)

Matériaux isolant électrique (moins d'électrons libre)  $k = k_p$  donc faible

# Propriétés électriques

<u>Propriété</u>	<u>Symbole</u>	<u>Unité</u>
<i>Voltage</i>	U	volt, V
<i>Intensité de courant</i>	I	ampère, A
<i>Courant élect.</i>	<i>i</i>	coulomb, C
<i>Résistance</i>	R	ohm, $\Omega$
<i>Conductance</i>	$R^{-1}$	siemens, S
<i>Puissance</i>	P	watt, W
<i>Résistivité élect.</i>	$\rho$	$\Omega \cdot m$
<i>Conductibilité élect.</i>	$\sigma$	$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
<i>Champ élect.</i>	E	V/m
<i>Densité de courant</i>	J	A/m <sup>2</sup>

<u>Propriété</u>	<u>Symbole</u>	<u>Unité</u>
<i>Vitesse instantanée</i>	$\bar{v}$	m/s
<i>Vitesse de dérive</i>	$v$	m/s
<i>Charge élect. él.</i>	$e$	1,602E-19 C
<i>Mobilité des é</i>	$\mu_e$	m <sup>2</sup> /V·s
<i>Masse é</i>	$m_e$	kg
<i>Charge élect.</i>	$q$	C
<i>Température</i>	T	°K

## Relations

$$U = RI$$

$$P = UI = RI^2$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

$$R = \frac{l}{\sigma S}$$

$$J = \sigma E = \frac{I}{S} = n_e \bar{v} e$$

$$a = \frac{eE}{m_e}$$

$$I = \frac{dq}{dt}$$

$$\mu_e = \frac{\bar{v}}{E} = \frac{\sigma}{nq}$$

$$E = \frac{V}{l}$$

$$\bar{v} = \frac{1}{2} \frac{eE}{m_e} t$$

Plus la **résistivité électrique** d'un matériau est élevée, plus la perte d'énergie sous forme de chaleur sera importante (inverse aussi vrai)

L'équation suivante permet donc de faire le design des résistances.

$$R = \frac{l}{\sigma S}$$

La **perte de puissance** suite au passage du courant à travers une résistance est donnée par l'équation suivante:

$$P = VI = RI^2$$

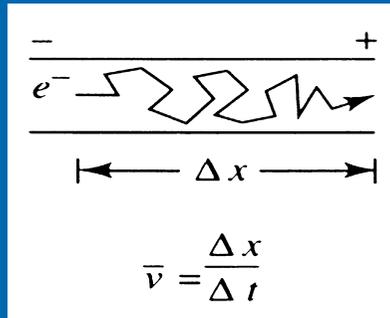
La conductibilité électrique peut être aussi exprimée par la relation suivante:

$$\sigma = n_e e \mu_e$$

(nombre d'é libre/ volume)  $\xrightarrow{\quad}$

où  $\mu_e = \frac{\overline{v}}{E}$  (mobilité des é)

La **vitesse de dérive**, contrairement à la vitesse instantanée, est une vitesse moyenne de parcours. Suite à de multiples collisions, Les électrons perdent leur énergie cinétique qui est transformée en phonons. Sous l'effet de l'agitation thermique, les électrons retrouvent une énergie cinétique mais la direction qu'ils poursuivent est **aléatoire** et le chemin parcouru est finalement **nul**.



### *Vidéo 9.8*

Analogie au mouvement d'une bille sur un plan incliné truffé de clous!

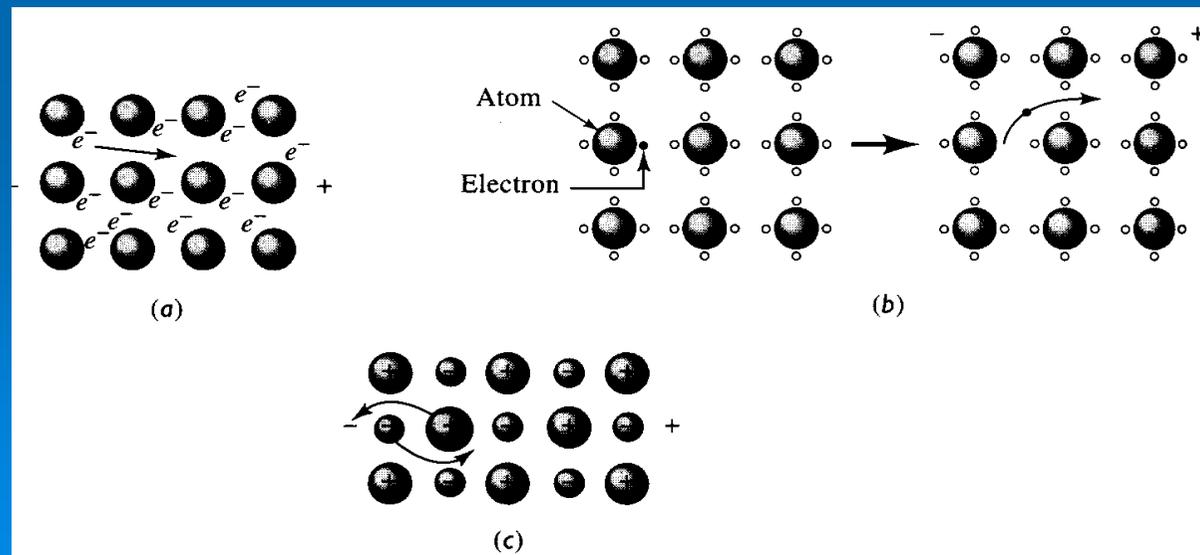
Par contre, sous l'action d'un champ électrostatique, le chemin parcouru devient **non nul**.

Le déplacement des électrons s'effectue dans le sens opposé à celui du champ électrique. La **vitesse instantanée** d'un électron est donc plusieurs fois supérieure à sa vitesse de dérive.

$$v = l_e / t$$

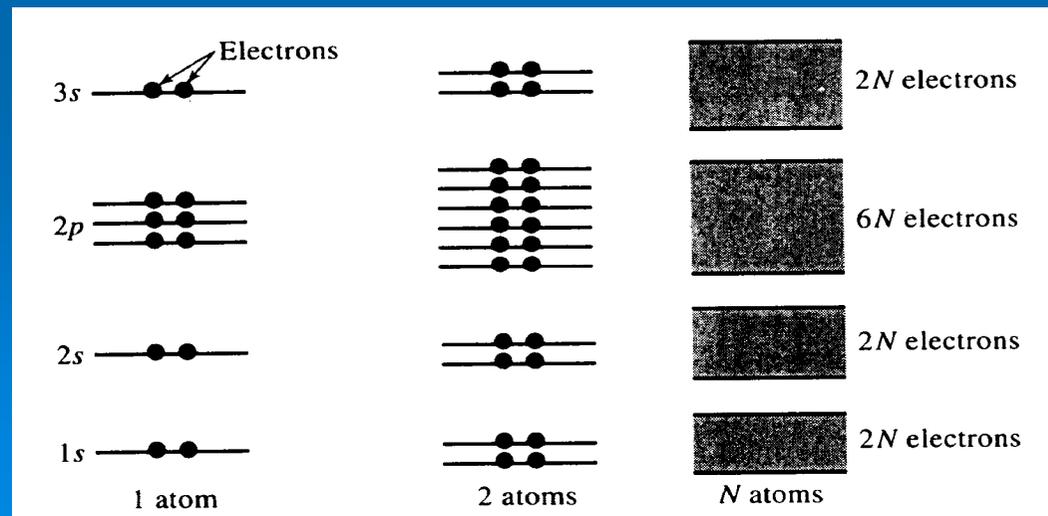
où  $t$  est le temps écoulé entre deux collisions

Il est donc possible de **contrôler la conductibilité électrique** d'un matériau en contrôlant le nombre d'électrons libres dans le matériau ou encore en contrôlant la mobilité de ces électrons. La **mobilité** des électrons libres est un facteur important chez les métaux alors que le nombre d'électrons libres est un facteur plus déterminant chez les semi-conducteurs. La mobilité dépend du **type de liaison, des défauts et de la microstructure**. Chez les composés ioniques par exemple, la mobilité est fonction du taux de diffusion suite à la présence de lacunes.

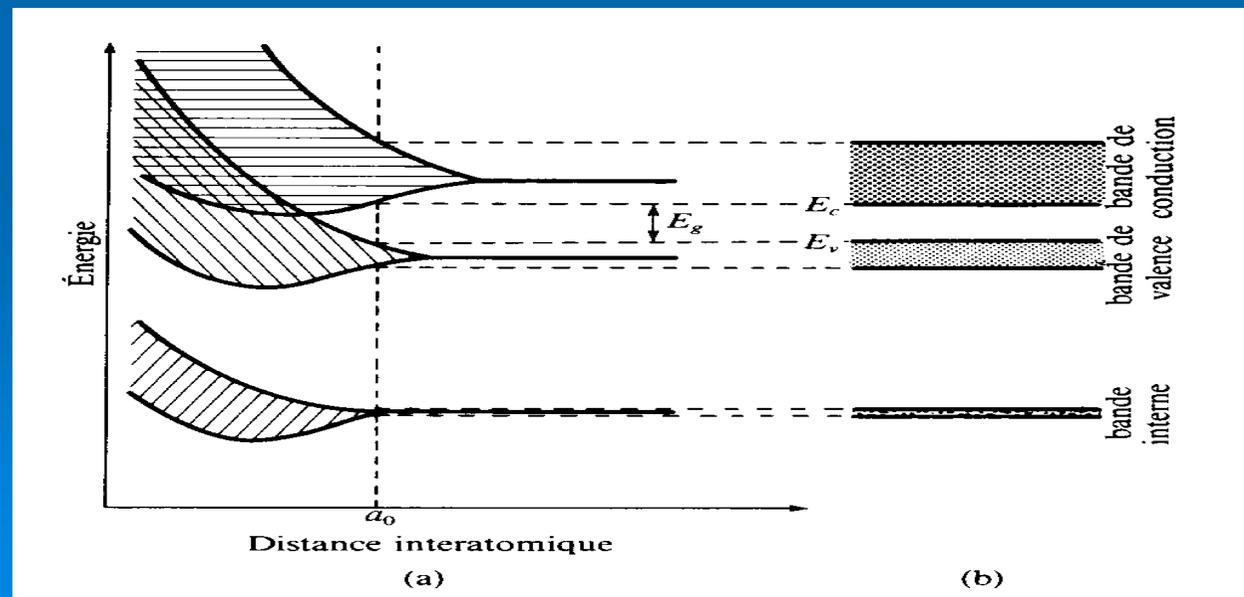


## *Théorie des bandes*

Le **principe d'exclusion de Pauli** veut que seulement deux électrons occupent un même orbitale ou niveau d'énergie. Lorsque  $N$  atomes sont réunis dans un solide, le principe de Pauli requiert encore que seulement deux électrons occupent un même niveau d'énergie. Il se crée donc une bande d'énergie au niveau de chaque orbitale.

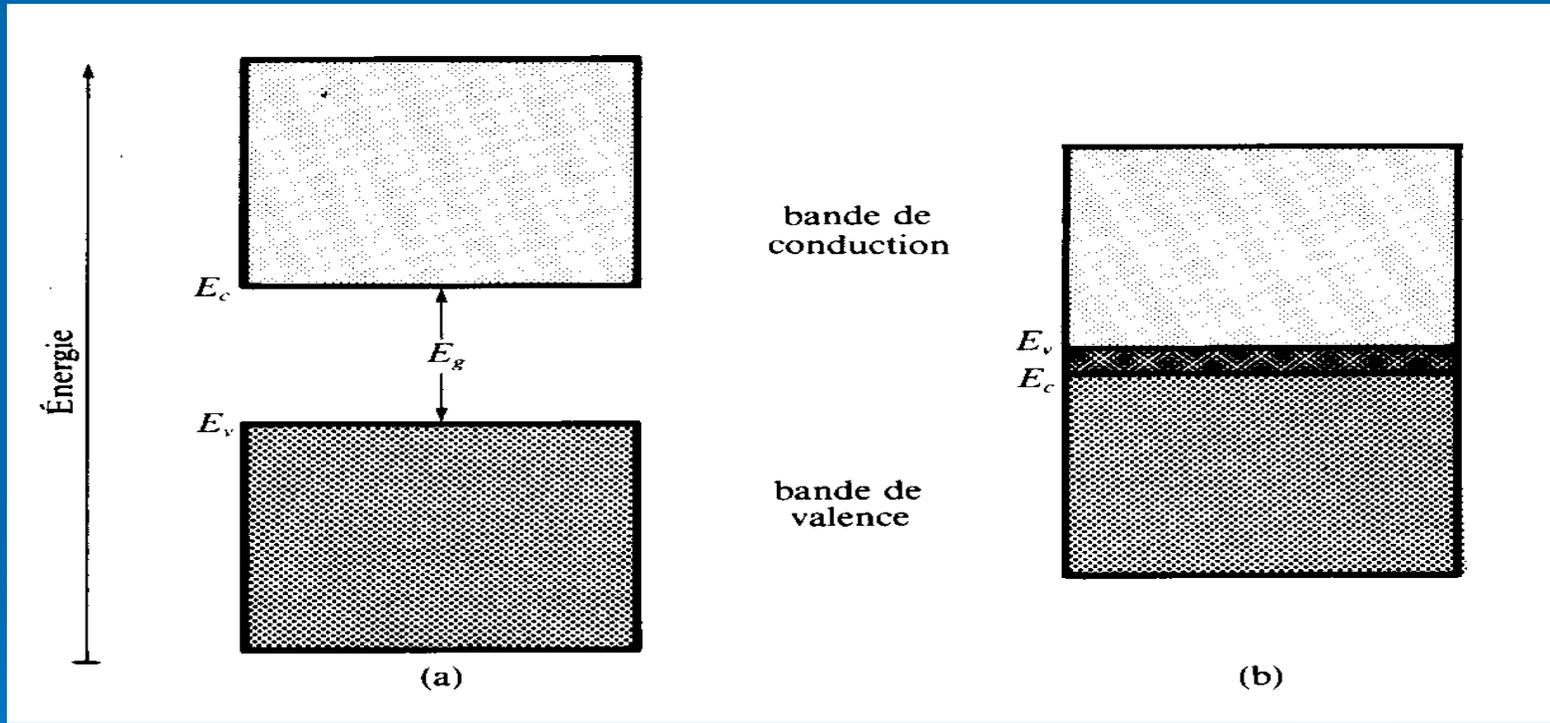


Dans les solides, plus les électrons sont près du noyau, plus les niveaux d'énergie des électrons forment une bande étroite appelé **bande interne**. Les niveaux d'énergie des électrons de valence forment des bandes plus larges appelées **bandes de valence**. Lorsque les électrons sont excités, ils occupent la **bande de conduction**. L'énergie supérieure de la bande de valence et l'énergie inférieure de la bande de conduction sont désignés respectivement par  $E_v$  et  $E_c$ . La **bande interdite**,  $E_g$ , est la largeur de bande qui sépare la bande de valence et la bande de conduction ( $E_c - E_v$ ).



À zéro degré Kelvin, la largeur de la bande interdite dans les solides à liaisons covalentes et ioniques est trop importante pour permettre aux électrons libres de se déplacer sous l'action d'un champ électrique. De plus, les **matériaux à liaisons ioniques** ont leur couche de valence complète ce qui augmente l'énergie nécessaire pour qu'un électron puisse passer de la bande de valence à la bande de conduction. Les matériaux à liaisons ioniques sont donc d'excellents **isolants électriques**.

Par contre, la bande interdite est inexistante chez les métaux. Les **métaux** possèdent des couches de valence non complètes et les électrons de ces matériaux peuvent acquérir, sous l'effet d'un champ électrique, une énergie cinétique suffisante pour passer à des niveaux d'énergie supérieurs et ainsi se déplacer. Les métaux sont donc des **conducteurs électriques**.

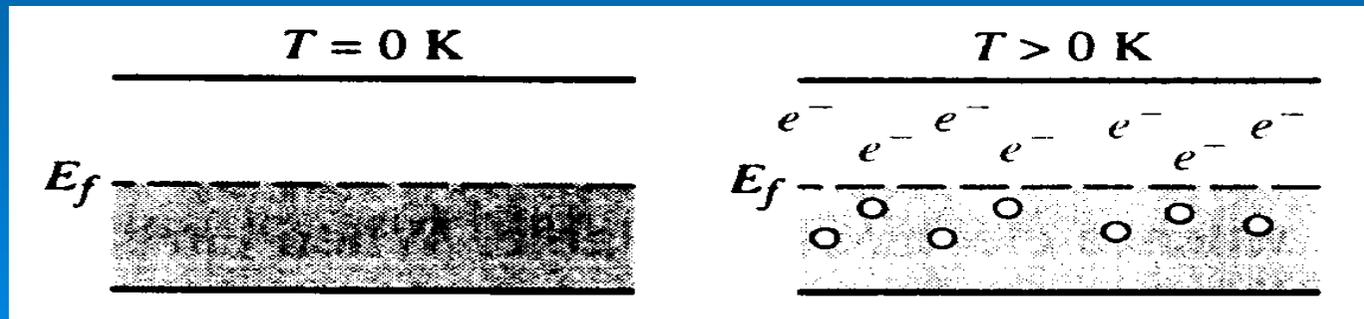


## *Semi-conducteurs*

Si on élève la température d'un matériau, les atomes vibrent de plus en plus intensément autour de leurs positions d'équilibre. Suivant l'intensité des **liaisons covalentes**, certains électrons acquièrent suffisamment d'énergie de vibration pour se libérer de la liaison et pour circuler librement dans le cristal. Ces électrons participent alors à la conductibilité ce qui explique la diminution de la résistivité électrique des **semi-conducteurs intrinsèques** au fur et à mesure que la température augmente.



Le départ d'un électron laisse un **trou** dans la bande de valence maintenant incomplètement remplie. Ce trou équivaut à un ion positif de charge  $+e$  et joue le rôle de porteur du fait qu'un électron de valence d'une liaison voisine peut venir s'y incorporer sans pour autant devenir un électron libre. Un cristal pur contient un nombre égal d'électrons de conduction et de trous appelé **paires d'électron-trou**. En présence d'un champ électrique, le mouvement des trous s'effectue dans le sens du champ, alors que les électrons circulent en sens inverse.



L'action d'incorporer des impuretés dans un semi-conducteur s'appelle **dopage**. Lorsqu'on substitue dans une liaison covalente un atome d'une valence de 4 par un atome d'une valence de 5 (**atome donneur**), l'électron excédentaire possède un niveau d'énergie se situant dans la bande interdite. Il suffit alors que d'un simple apport thermique pour que cet électron passe à la bande de conduction. Ce type de dopage conduit à des **semi-conducteurs extrinsèque de type n** (porteurs de charge majoritairement négatifs - électrons). Si par contre on procède au dopage en utilisant des atomes avec seulement 3 électrons de valence, il se forme un trou. Les niveaux d'énergie de ces solides de substitution se situent également dans la bande interdite. À température ambiante, les électrons de la bande de valence ont suffisamment d'énergie thermique pour remplir ces niveaux d'impuretés, laissant ainsi des trous dans la bande de valence. On désigne ce type d'impureté par le terme **accepteur** et le **semi-conducteur** résultant est dit **extrinsèque de type p**.

*semi-conducteurs extrinsèque de type n : ajout d'élément de valence + élevée (électrons en trop...)*

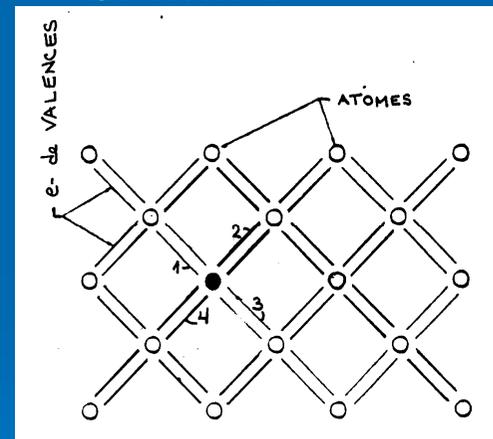
*semi-conducteur extrinsèque de type p:  
ajout d'élément de valence - élevée (déficit en électrons)*

## *Semi-conducteurs intrinsèques*

- éléments de la colonne IVA (tabl. périodique) qui ne sont pas fortement liés; l'intensité des liaisons diminue avec l'augmentation du numéro atomique

<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>V</i>
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

*Structure*



4 e- de valence  
partage des e-

- éléments combinés des colonnes IIIA-VA et IIB-VIA (ex.: GaAs, AlSb, etc..)

*En général, à température ambiante,*

La conductibilité d'un semi-conducteur intrinsèque est donnée par l'équation suivante:

$$\sigma = n_e e \mu_e + n_t e \mu_t$$

où  $n_e$  et  $n_t$  sont respectivement le nombre d'électrons libres et de trous et  $\mu$  leur mobilité respective.

Dans un semi-conducteur intrinsèque, le nombre d'électrons libres et le nombre de trous sont égaux.

$$n_i = n_e = n_t$$

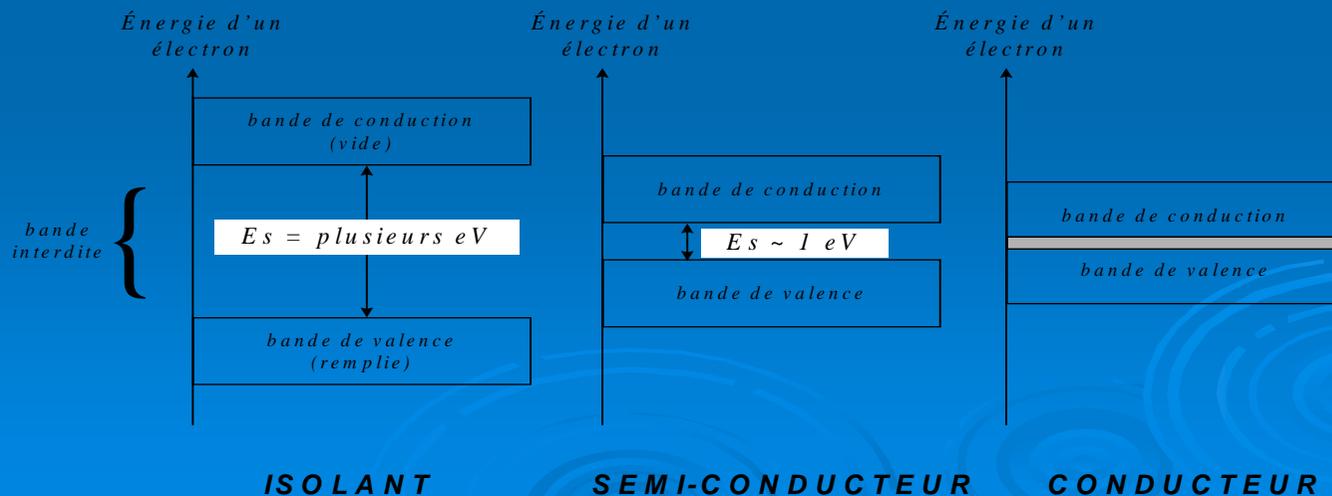
Le nombre de porteurs générés est fonction de la température:

$$n_i = n_0 \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$

où  $n_0$  est une constante qui est fonction du matériau.

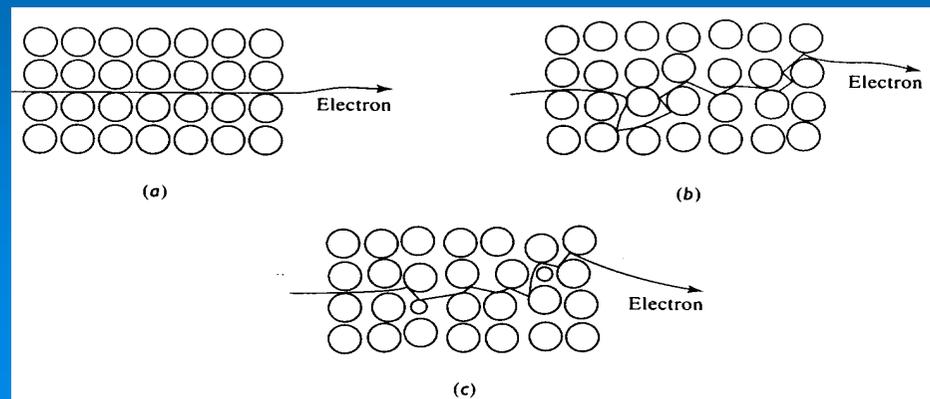
## Isolants (diélectriques)

Contrairement aux semi-conducteurs, l'écart énergétique entre la bande de valence et la bande de conduction des **isolants** est très élevé  $\approx 10$  eV. Par conséquent, très peu d'électrons peuvent franchir la barrière énergétique. Notons aussi que la majorité des solides sont cristallins et qu'à l'intérieur d'un même grain les propriétés physiques tout comme les propriétés mécaniques sont fonctions de la direction de mesure.



## *Effet de la température*

Nous avons vu que la **mobilité des électrons** est fonction de la **vitesse de dérive** et que cette dernière est influencée par les multiples collisions. Dans un **crystal parfait** à zéro degré Kelvin, il existe des directions selon lesquelles un électron peut se déplacer sans entrer en collision avec les atomes. Lorsqu'on augmente la température d'un solide, il se produit une agitation thermique qui perturbe cet ordre. Les atomes vibrant autour d'une position d'équilibre réduisent alors le **libre parcours moyen** et la mobilité de l'électron libre et augmentent la résistivité électrique du matériau.



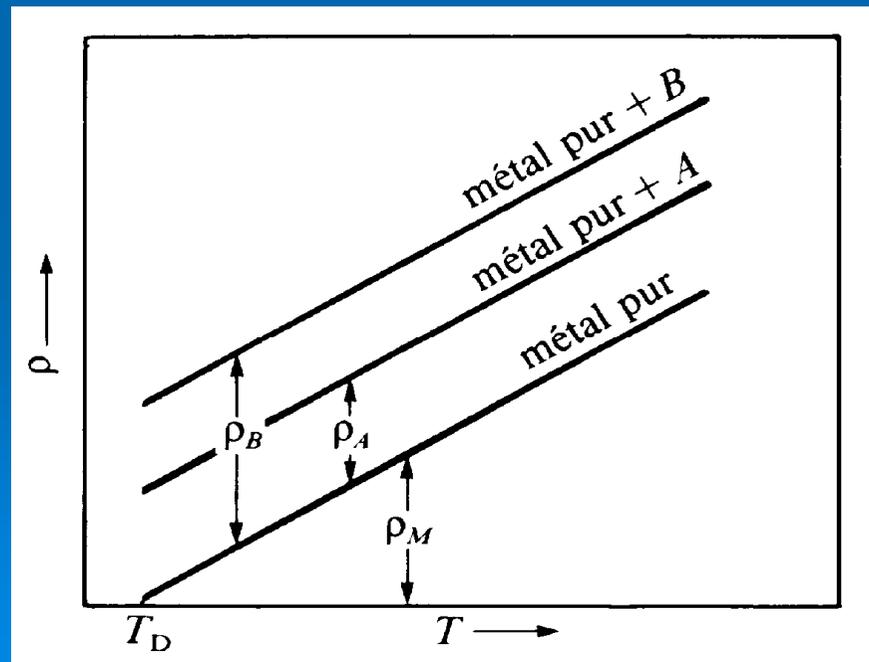
La présence de défauts et d'impuretés contribue aussi à la diminution de la mobilité des électrons et de la conductibilité. Ainsi nous avons:

$$\rho_d = b(1-x)x$$

Où  $\rho_d$  est l'augmentation de la résistivité associée aux défauts,  $b$  est le coefficient de variation de la résistivité due aux défauts et  $x$  est la fraction atomique d'impuretés présentes. La résistivité résultante est donnée par:

$$\rho = \rho_T + \rho_d$$

La présence d'irrégularité dans la maille est ce qui explique la résistivité plus élevée des alliages par rapport aux métaux. Tant que la teneur d'élément d'alliage est faible, soit inférieure à 0,1%, le gain de résistivité est assimilable à celui apporté par des défauts ou impuretés.



En absence d'agitation thermique, soit à des températures de l'ordre du zéro absolu, certains cristaux se comportent comme des **supraconducteurs** dû au fait qu'il n'y a aucune résistance au libre passage d'un électron et ce dernier peut alors circuler sans aucune collision. Cependant, certains matériaux démontrent une supraconductivité à un température quelque peu supérieure au zéro absolu et ce même en contenant des défauts.



La **conductibilité chez les matériaux ioniques** est souvent réalisé par un déplacement de l'ion au complet puisque la largeur de la bande interdite est trop élevée pour permettre à un électron de passer à la bande de conduction. La mobilité des ions est donnée par l'équation suivante:

$$\mu = \frac{ZeD}{kT}$$

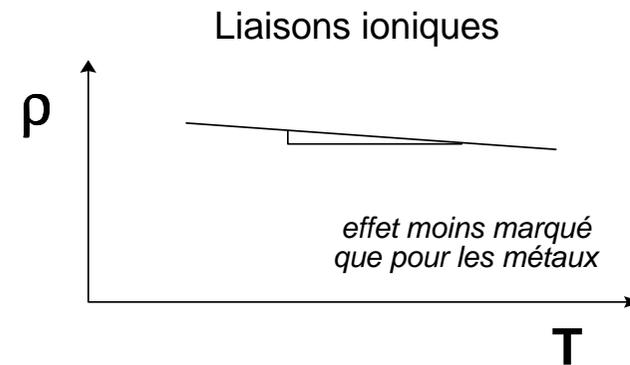
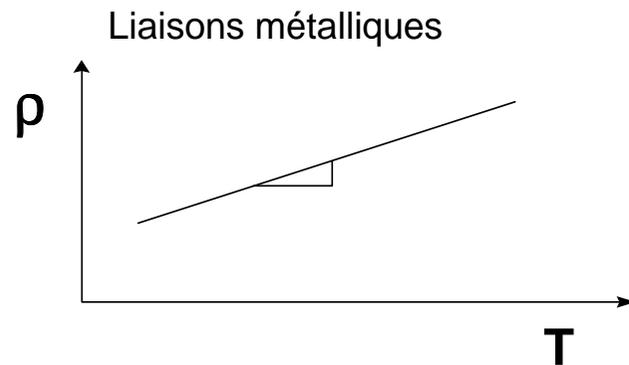
où D est la constante de diffusion, Z est le nombre d'électrons perdus ou acceptés, e est la charge d'un électron, k est la constante de Boltzmann (8,63E-5 eV/K) et T est la température absolue. La conductibilité est donnée par l'équation suivante:

$$\sigma = nZq \mu$$

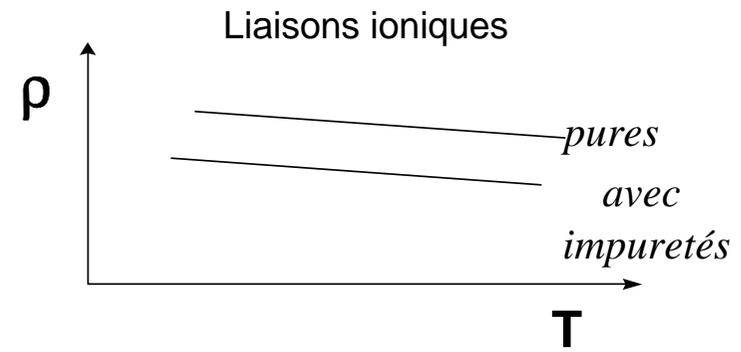
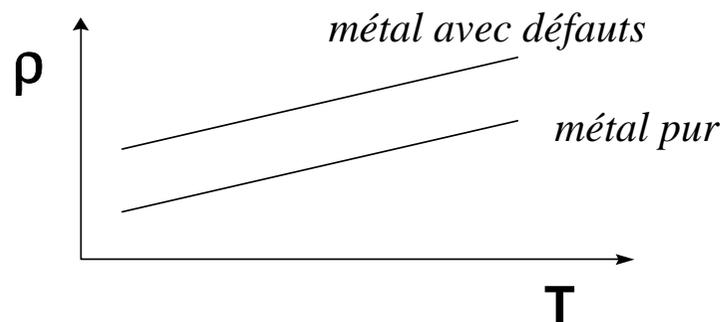
Les lacunes et les impuretés augmentent la conductibilité des solides ioniques. Les lacunes sont nécessaires pour la diffusion et leur nombre augmente avec la température. Quant aux impuretés, elle peuvent aussi se diffusées à travers le matériaux et aident ainsi au transport du courant. Les matériaux ioniques restent en général de mauvais conducteurs.

# Influence de la température et des impuretés sur la résistivité des matériaux

## *Effet de la température*



## *Effet des impuretés*



## Conduction électrique dans certains matériaux utilisés en génie civil

Beaucoup de matériaux utilisés en génie civil sont naturellement non conducteurs (béton, bois, roche, etc.) à cause de leur **squelette solide très résistif**.

Toutefois, ces matériaux sont relativement poreux. L'eau contenue dans les pores n'est généralement pas pure mais contient des ions en solution (donc conducteurs) et joue le rôle d'**électrolyte**.

C'est donc à travers le réseau de pores que circule le courant électrique.

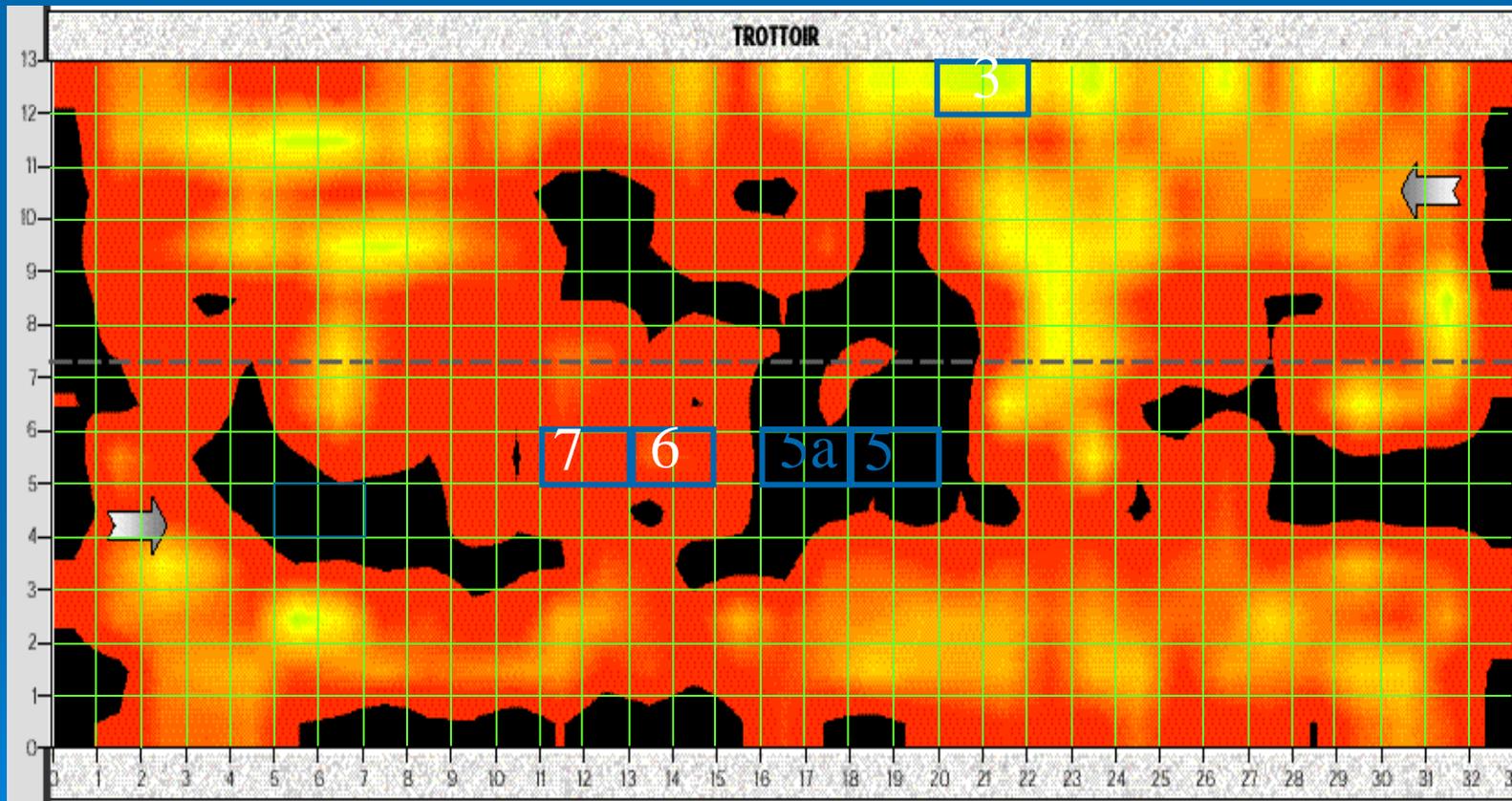
## **Conduction électrique dans certains matériaux utilisé en génie civil**

**Les facteurs influençant la résistivité électrique sont  
donc:**

- la teneur en eau du matériau**
  - La porosité du matériau (diamètre des pores,  
connectivité, tortuosité)**
  - La concentration ionique de l'eau interstitielle**
- 

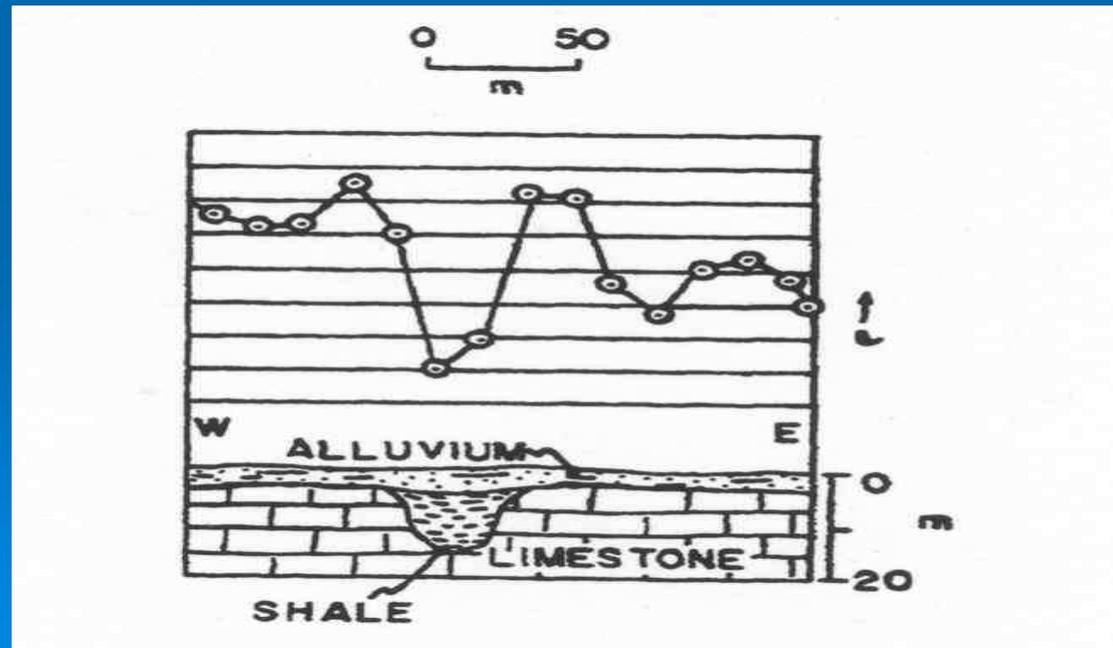
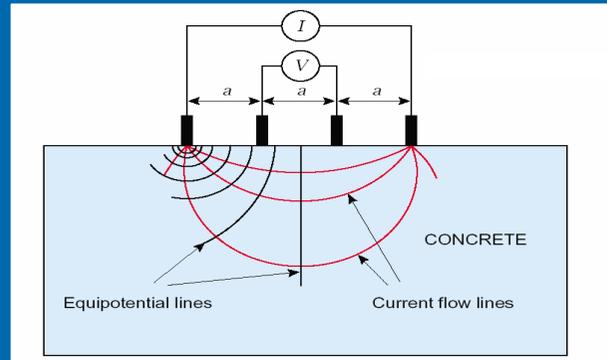
# Différence de propriété électrique (conductivité)

## Applications en génie civil



corrosion  
des armature d'une dalle de pont

# Exemple de mesure de résistivité



# LES METAUX

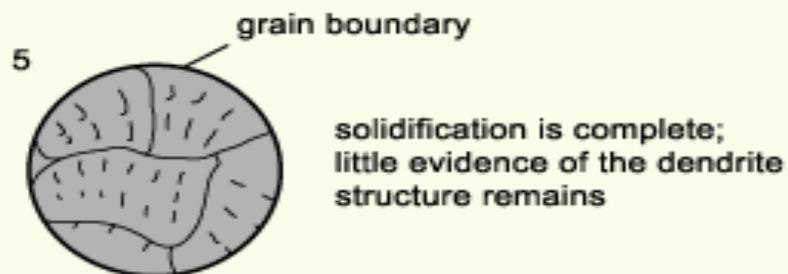
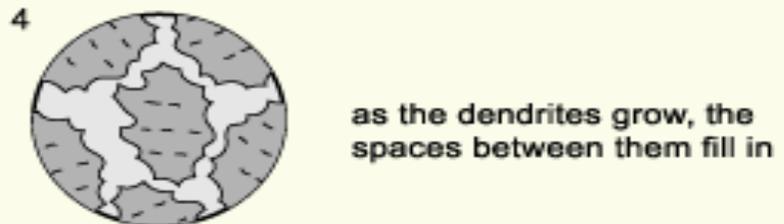
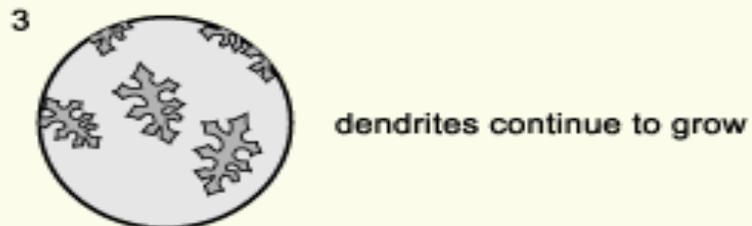
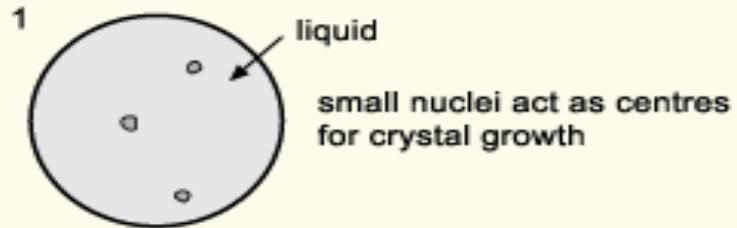


# 1. Introduction

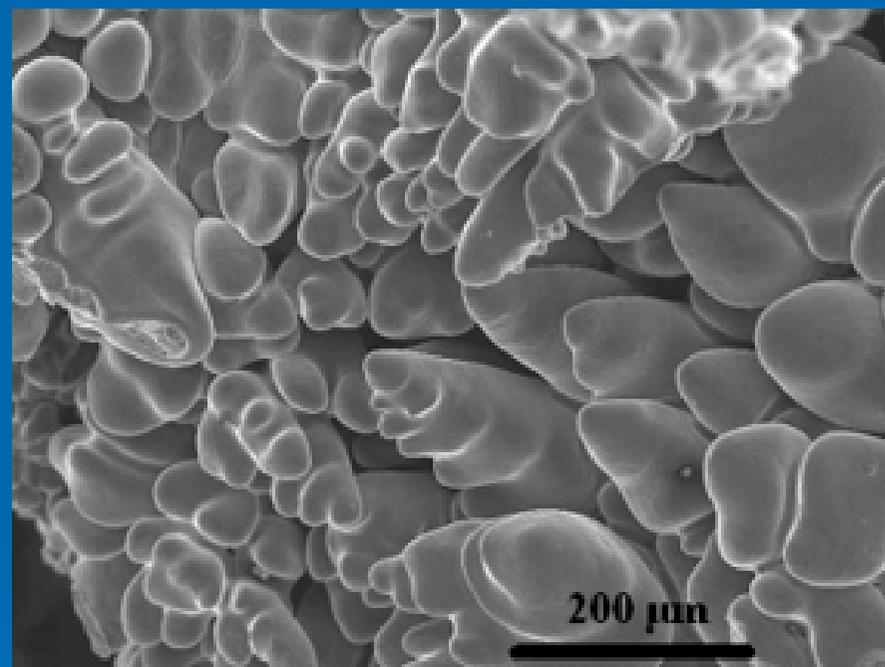
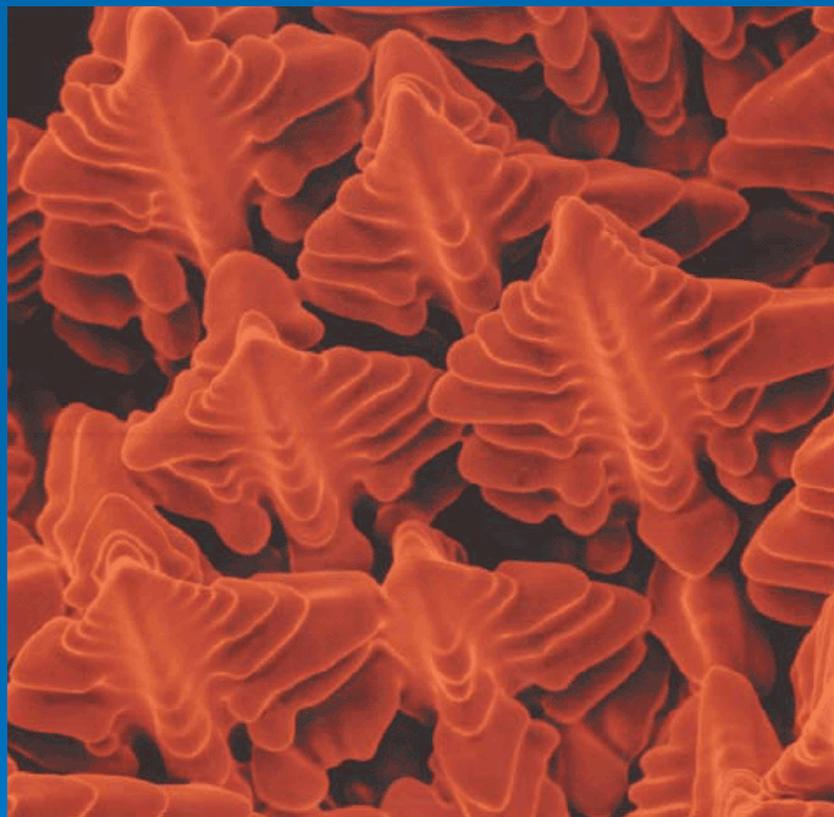
## Les métaux et alliages

- Exemples : aciers, aluminium, titane, or, bronze, fonte, zinc, tungstène, magnésium...
- Métaux purs ou alliages
- Type de liaison : métallique (assurée par électrons délocalisés)
- Propriétés spécifiques :
  - conduction de chaleur et électricité
  - températures de fusion et de vaporisation en général élevées
  - propriétés élastiques élevées
  - possibilité d'augmenter la résistance (durcissement structural)
  - denses, sensibles à la corrosion et à la fatigue

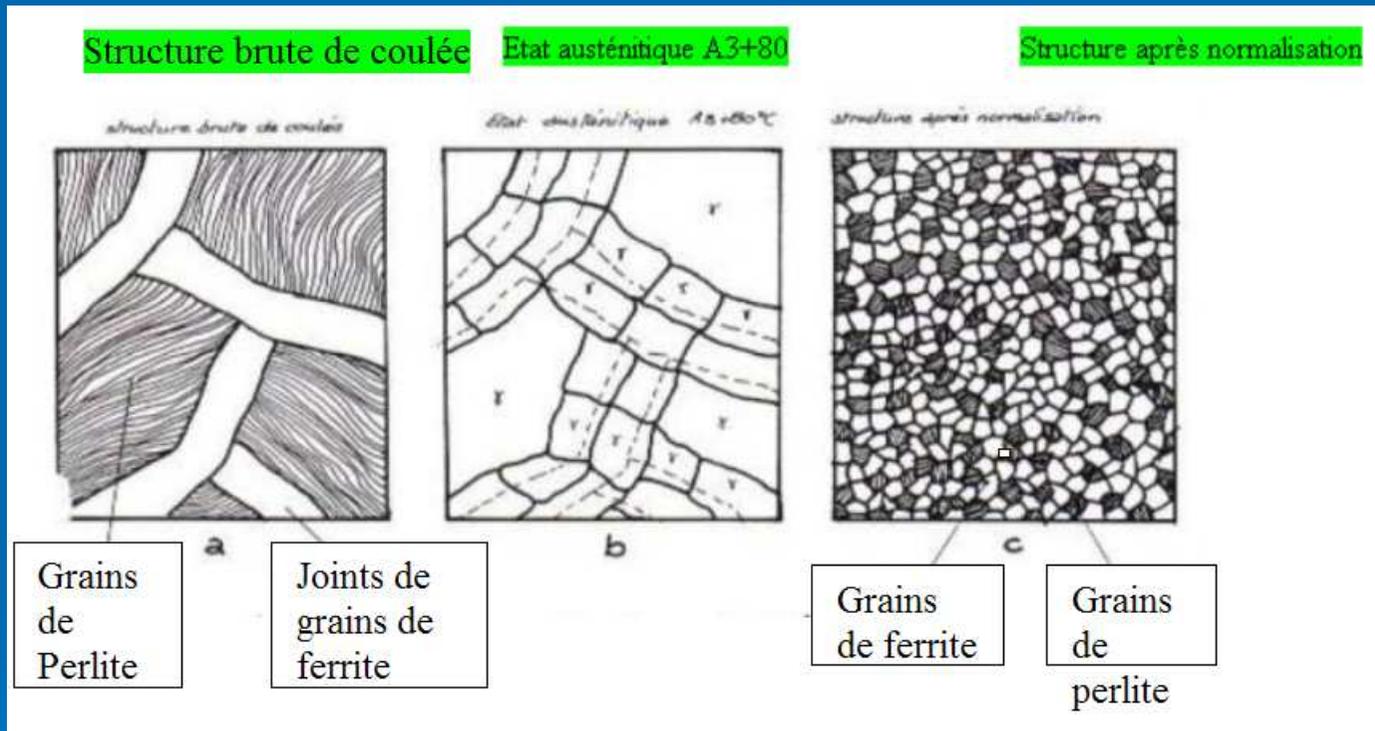
# Solidification d'un métal



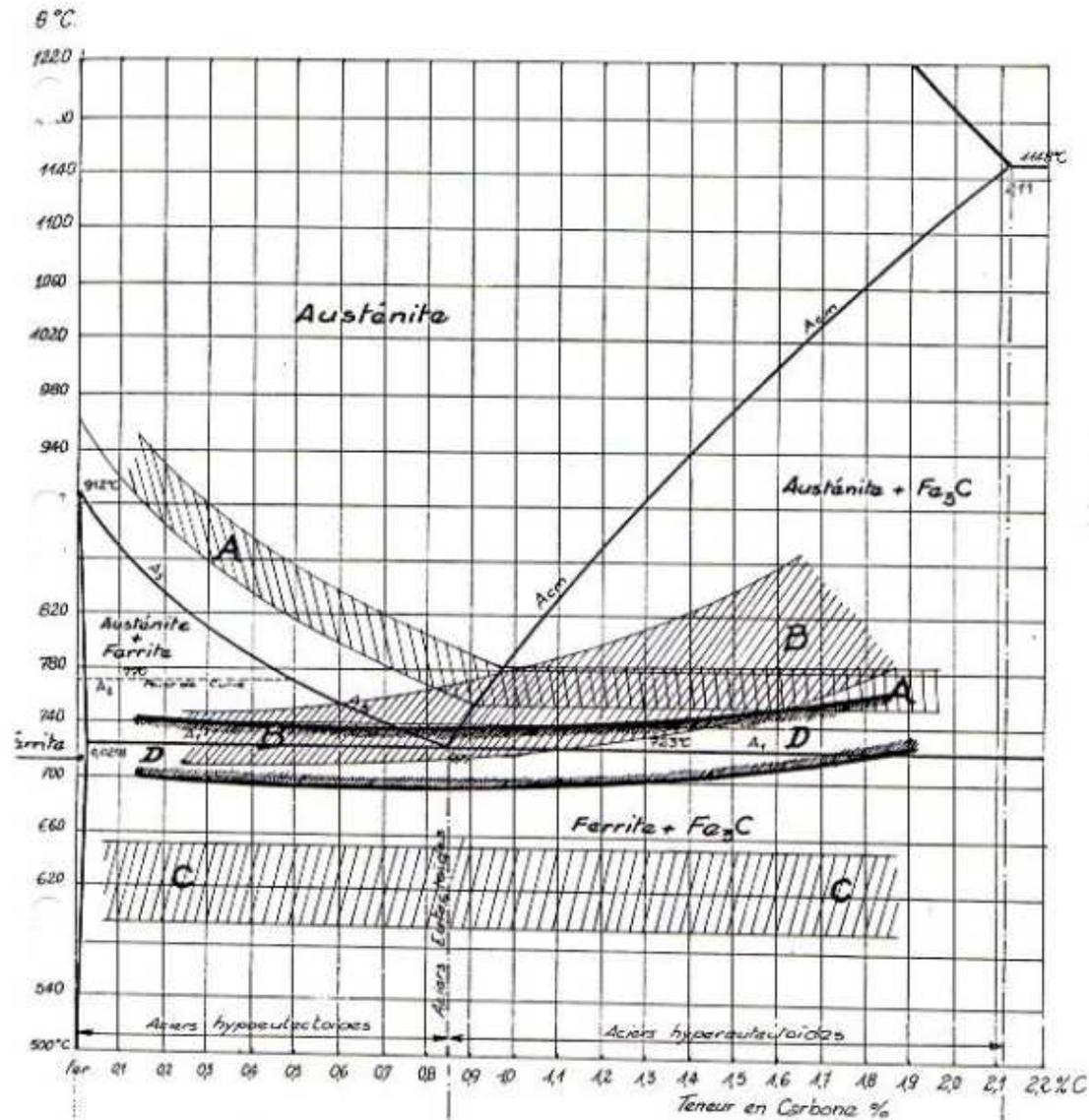
## Solidification d'un métal



# Modification de la structure, recristallisation



Co



**Fig 67:** Zones des températures les plus favorables pour les différents recuits

- A :** Recuits de normalisation et de recristallisation
- B :** Recuits d'adoucissement
- C :** Recuits de détente
- D :** Recuits d'homogénéisation ou de diffusion

# LES POLYMERES



# 1. Introduction

## Les polymères

- Macromolécules à squelette covalent

*exemple :  $(CH_2-CH_2)_n$*

- Type de liaison : Van der Waals (liaison faible)

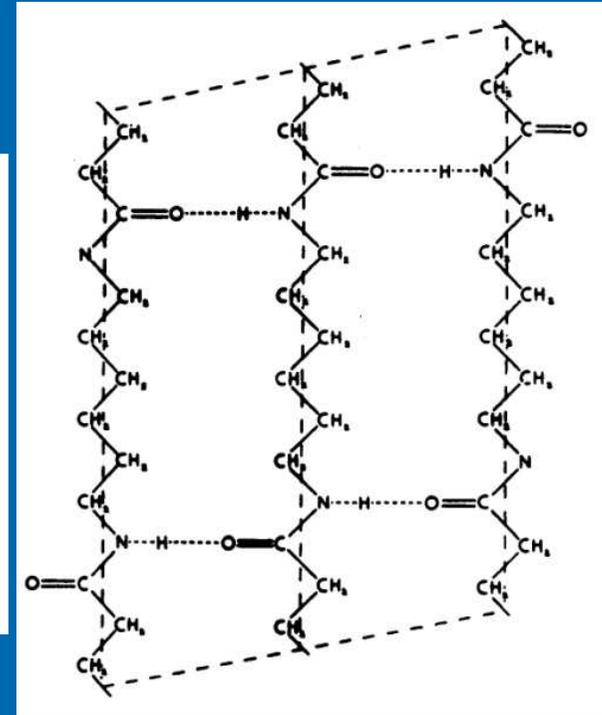
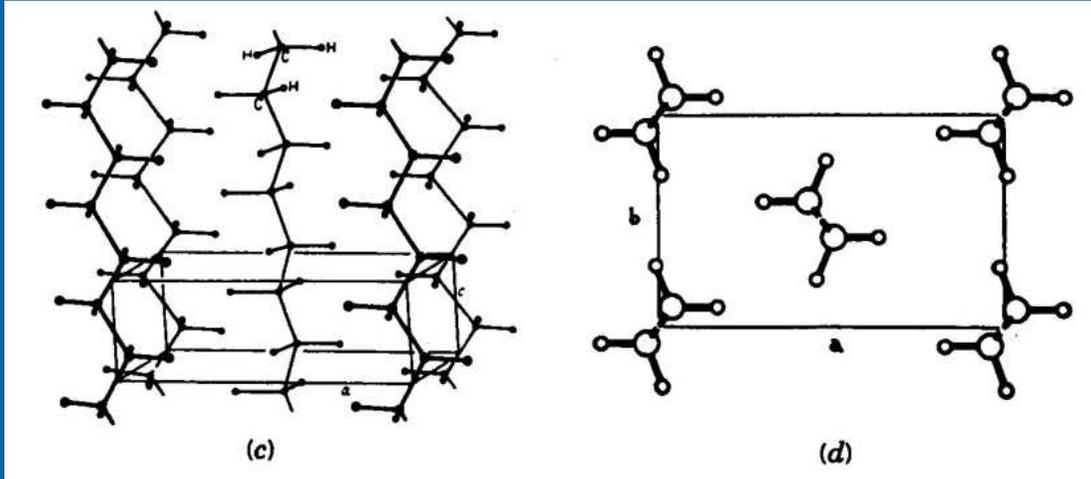
- Propriétés spécifiques :

- deux températures spécifiques : transition vitreuse et dégradation
- faibles propriétés élastiques
- résistants à l'usure et à la corrosion

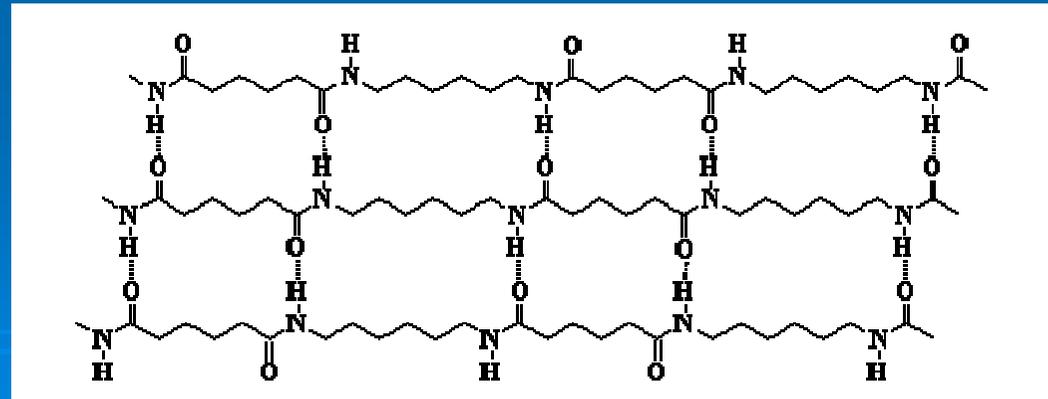
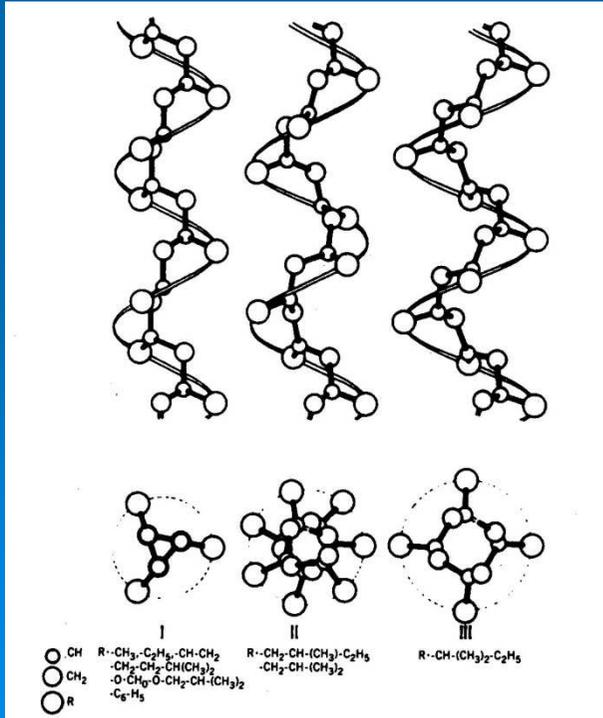
- Catégories : thermoplastiques, thermodurcissables, élastomères

# 1) Zig-zag planaire

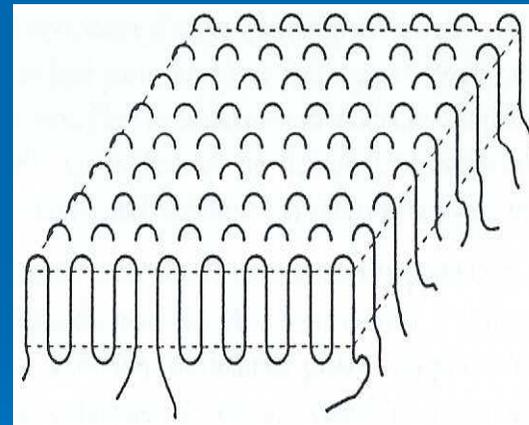
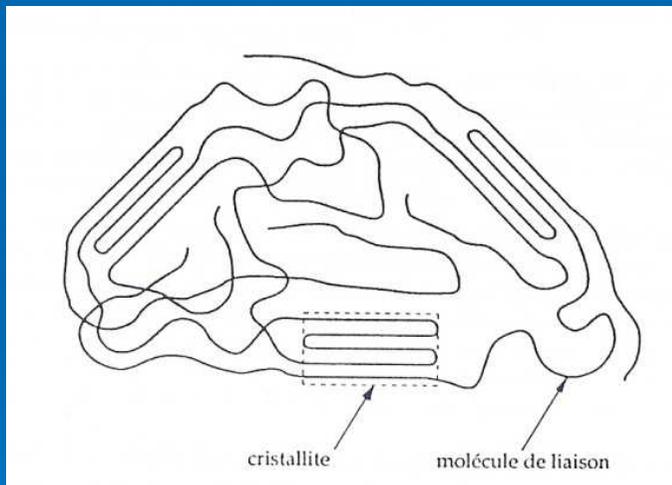
Exemple : PE et Nylon

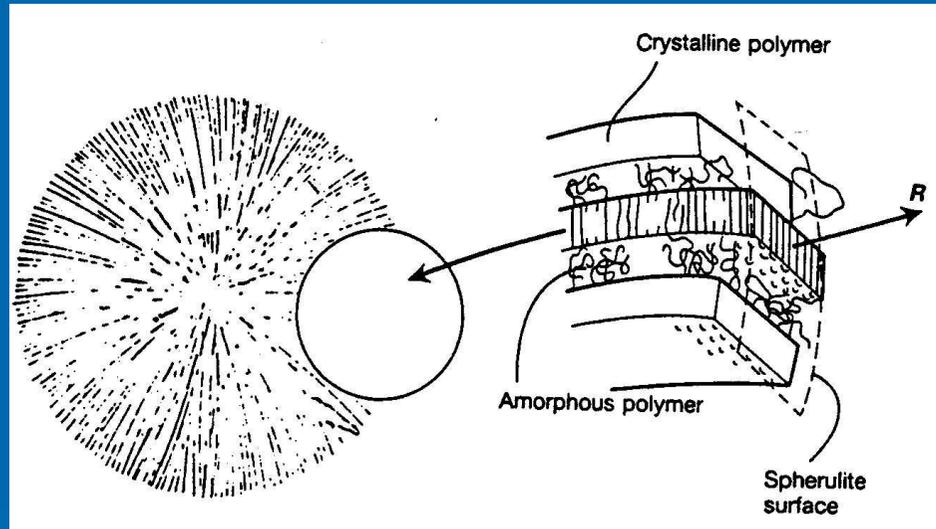
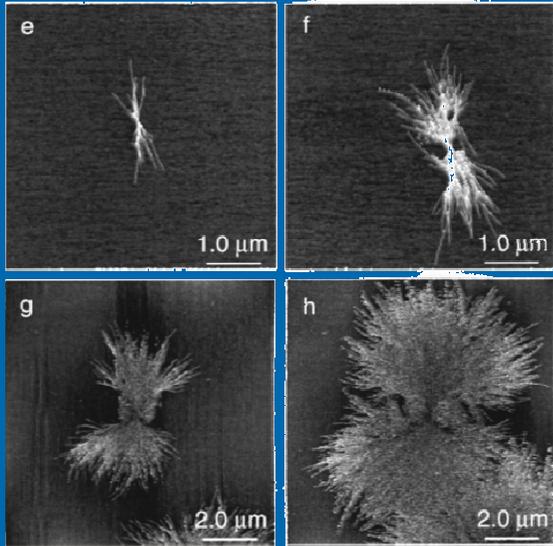


# 2) En hélice :



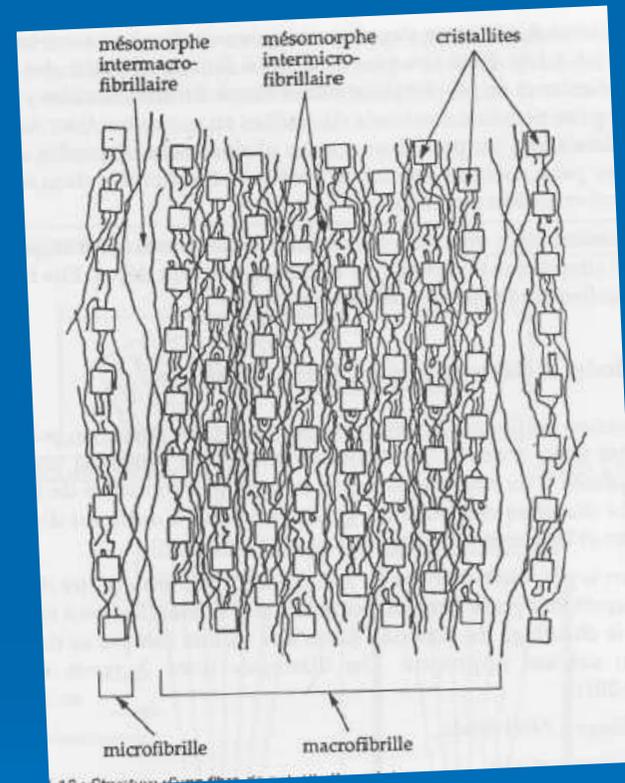
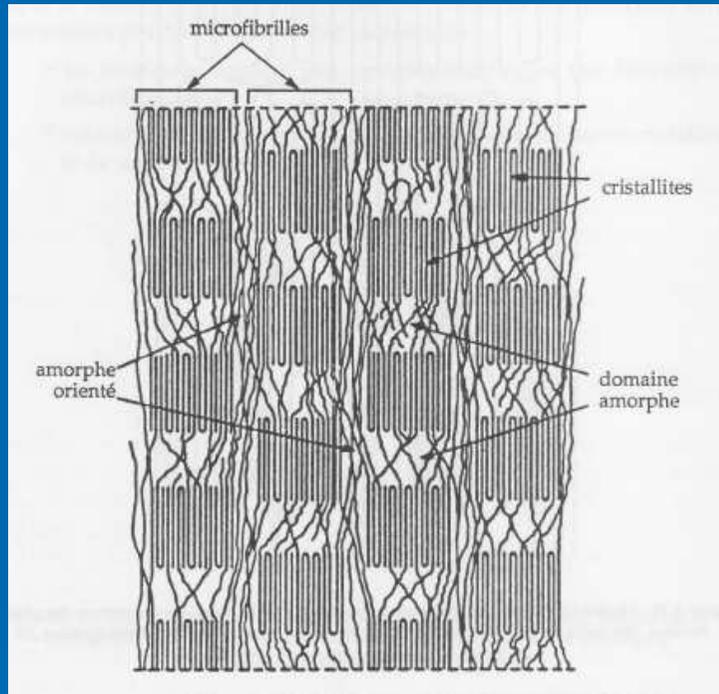
Dans le nylon 6,6, les oxygènes carbonyles et les hydrogènes des amides forment des liaisons hydrogène. Cela permet aux chaînes de s'aligner de façon régulière, et par conséquent de former des fibres.





## Structures des macrofibrilles

### Structures d'une microfibrille



# LES CERAMIQUES



# 1. Introduction

## Les céramiques

- Exemples : verres, béton, alumine, diamant, carbures, roches, briques, porcelaines...
- Elements métalliques et non métalliques (carbures, nitrures...)
- Type de liaison : ionique ou covalente (très énergétiques)
- Propriétés spécifiques :
  - tenue en température
  - excellentes propriétés élastiques
  - fragiles, peu ductiles, peu tenaces
  - résistants à l'usure et à la corrosion
  - prix élevé pour les céramiques techniques

# Le matériau béton



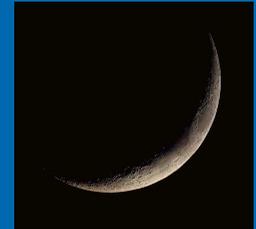
# Pourquoi le béton ?

⇒ Objectifs :

technique/architecture/coût/sécurité

- un matériau résistant et durable, y compris en conditions extrêmes,
- avec un minimum de matériaux,
- dont l'élaboration et la mise en place sont aisées et rapides.

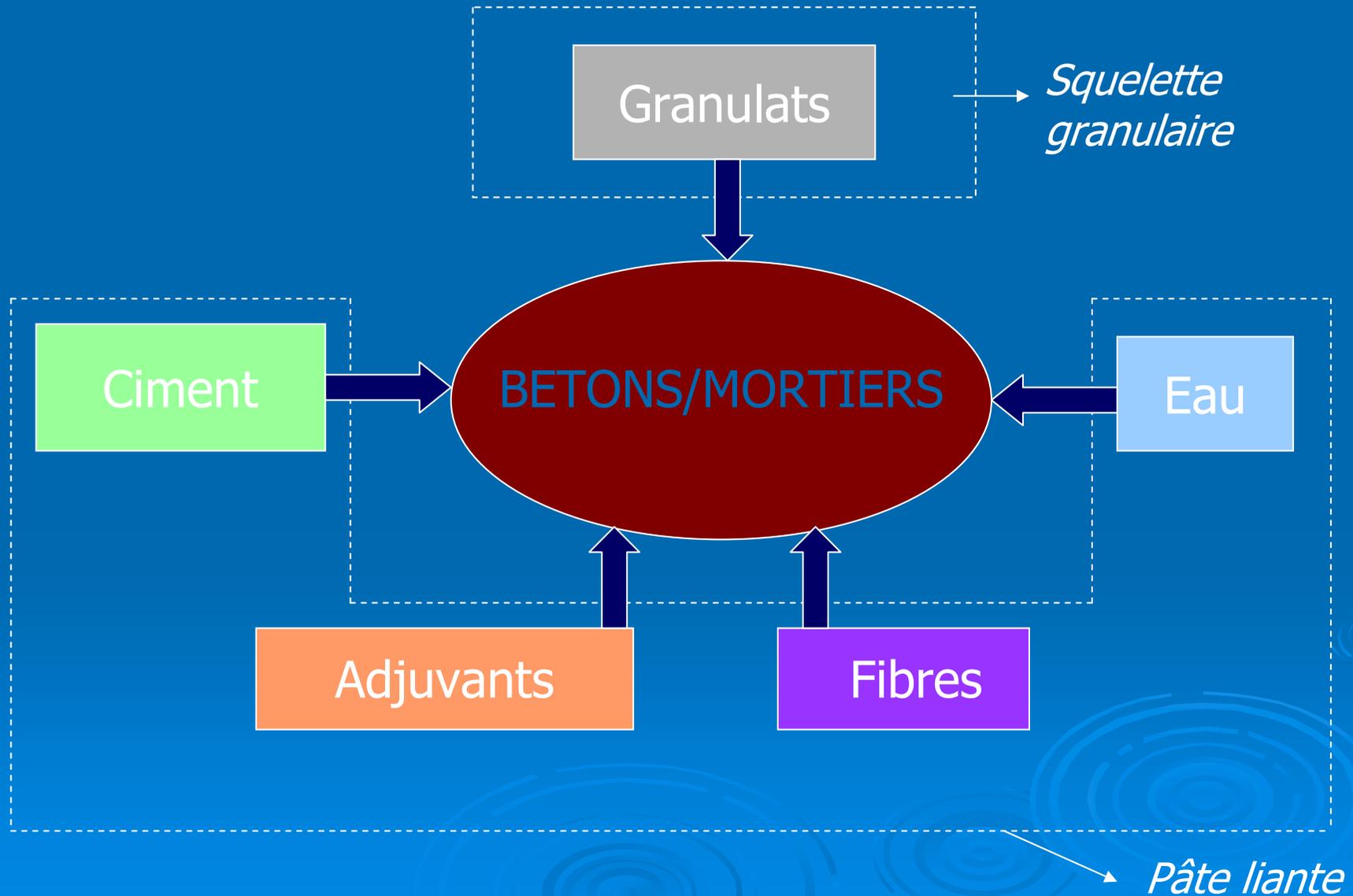
⇒ Résulte d'un développement des matériaux et des techniques de construction traditionnels



# Un peu d'histoire

- **1756** : Smeaton égale la résistance de la pierre de Portland pour la construction du phare du roc d'Eddystone.
- **XIXème siècle** :
  - ✓ Compréhension des mécanismes de durcissement sous l'eau des liants hydrauliques : Vicat (1812) relie propriétés de résistance et constituants argileux, brevet du ciment Portland par Aspdin (1824)
  - ✓ Développement du concept de béton armé : barque de Lambot (1848), brevet du Béton armé par Monnier (1878)
- **XXème siècle** : généralisation de l'utilisation du béton, développement des techniques de construction
  - ✓ Béton Précontraint par Freyssinet (1930-1950)
  - ✓ Bétons à Hautes Performances (fin 70's)
  - ✓ Bétons Autoplaçants (fin 80's)

# Un matériau composite



# 1. Granulats

- **Matériaux inertes (sables, gravillons)**
- **70% du volume**
- **Ossature (squelette) du matériau béton**

## A. Origine

- naturelle : roches sédimentaires (silex, calcaires durs, silico-calcaires)
- artificielle : roches transformées (argiles ou schistes expansés), sous-produits industriels (démolition)

# 1. Granulats

## B. Propriétés

Rôle majeur dans les caractéristiques du béton :

- au niveau de la mise en œuvre
    - densité/masse volumique
    - granulométrie, teneur en fines
    - forme des grains
  - au niveau du comportement mécanique et des performances à long terme
    - résistance mécanique
    - propreté des sables
    - gélivité
    - alcali-réaction
- 

# 2. Ciment

## A. Le Ciment Portland Artificiel

- composition
- fabrication

## B. Additions minérales

## C. Principales caractéristiques du ciment

## D. Classification



# 2. Ciment

Notation européenne

## A. Le Ciment Portland Artificiel (CPA - CEM I)

= le ciment « pur »

Notation française

### ➤ Composition chimique (*poudre*)

Roche calcaire

Argile

**Notation  
cimentaire**

(**H** = H<sub>2</sub>O)

Oxydes		Teneur massique moyenne
CaO	<b>C</b>	62-67%
SiO <sub>2</sub>	<b>S</b>	19-25%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>A</b>	2-9%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>F</b>	1-5%
SO <sub>3</sub>		1-3%
MgO		0-3%
K <sub>2</sub> O		0.6%
Na <sub>2</sub> O		0.2%

# 2. Ciment

## ➤ Fabrication

1. Broyage et homogénéisation du « cru » (mélange de 80% de calcaire et de 20% d'argile)

2. Chauffage à 1450°C

- ✓ Déshydratation (perte H<sub>2</sub>O)
- ✓ Décarbonatation ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ )
- ✓ Formations de matières solides par réactions chimiques (« clinkérisation »)
  - Alite (silicate tricalcique) : C<sub>3</sub>S
  - Bélite (silicate tricalcique) : C<sub>2</sub>S
  - Céliste (aluminat tricalcique) : C<sub>3</sub>A
  - Alumino-ferrite tétracalcique : C<sub>4</sub>AF

## 2. Ciment

3. Refroidissement rapide (trempe) pour figer les espèces minérales produites

⇒ obtention du **clinker** (nodules de quelques cms)

4. Broyage et ajout de gypse

⇒ obtention de la **poudre de ciment CPA**

*Composition  
minéralogique*

Phases	Proportions
$C_3S$	60-65%
$C_2S$	20-25%
$C_3A$	8-12%
$C_4AF$	8-10%

# 2. Ciment

## B. Additions minérales

- fines minérales (granulométrie  $\leq$  ciment)
- ajoutées au CPA pour en améliorer les performances
  - comportement mécanique (propriétés hydrauliques)
  - durabilité
- issues :
  - du concassage de matières premières (fillers calcaires ou siliceuses, pouzzolanes)
  - du concassage de sous-produits industriels (laitiers vitrifiés moulus de haut fourneau)
  - de dépoussiéreurs industriels (cendres volantes de centrales thermiques, fumées de silice)

# 2. Ciment

## C. Principales caractéristiques

ciment anhydre (poudre)

- composition chimique
  - ☞ résistance et durabilité en environnement extrêmes (marin, sulfaté)
- densité : CPA-CEM I :  $d=3.15$  (le + dense)
- finesse (  $1\mu\text{m} < d < 80\mu\text{m}$  ) :
  - ☞ ↗ finesse  $\Rightarrow$  ↗ surface en contact avec eau
  - ⇒ hydratation rapide et complète
  - ☞ mesure de la surface massique ( $\text{m}^2/\text{kg}$ ) au perméabilimètre de Blaine

## 2. Ciment

Ciment + Eau  $\Rightarrow$  Hydratation

*1/ prise : état fluide  $\rightarrow$  rigide*

*2/ durcissement : acquisition de résistance*

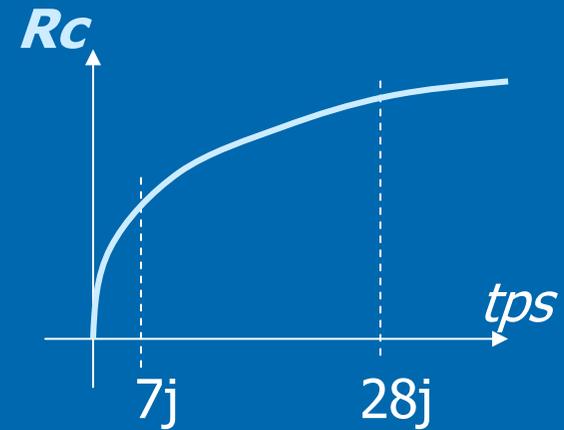
pâte de ciment fluide

- consistance (ou fluidité)
- temps de prise
  - ➔ enfoncement aiguille de Vicat
  - ➔ cône d'écoulement

## 2. Ciment

pâte de ciment durcissante

- résistance en compression
  - au jeune âge (2 jours, 7 jours)
  - normalisée (28 jours)
- expansion volumique après la prise
  - ☞ essai Le Chatelier
- chaleur d'hydratation
  - ☞ calorimètre de Langavant



# 4. Adjuvants

- Composés organiques ajoutés en faible quantité (-5% de la masse du ciment)
- Améliorant les propriétés du béton

## ➤ **Plastifiants/superplastifiants**

➤ Bétons à Haute Performance (BHP)

➤ Bétons fluides

➤ Bétons Autoplaçants

➤ Fluidification du mélange (lubrification des grains)

➤ Diminution de la quantité d'eau (défloculation)

# 4. Adjuvants

## ➤ **Accélérateurs/retardateurs de prise ou durcissement**

- Transport de béton frais sur de longues distances
- Besoin d'une résistance rapide

## ➤ **Entraîneurs d'air**

- Création d'un réseau de fines bulles d'air occlus conférant une meilleure résistance au gel

## ➤ **Autres**

- Etanchéité à l'eau du béton durci
- Inhibition de la corrosion

# 5. Fibres

- Couture des bétons après fracturation
  - (résistance en traction)
- 
- **Fibres métalliques** (aciers de différentes teneurs en carbone)
  - **Fibres organiques** (polypropylène, carbone)
  - **Fibres minérales** (verres)



# Fabrication du matériau

↳ *en centrales à béton*

## 1. Choix des constituants

- Granulats
- Ciment anhydre (CA)
- Eau (E)
- Adjuvants/Fibres

## 2. Dosage

## 3. Malaxage



⇒ **béton frais liquide**

# Transport

↳ *jusqu'au chantier*

- délai court < durée pratique d'utilisation (DPU)
- avec agitation permanente pour éviter la ségrégation\* (camions « toupies »)



\* *Distribution non uniforme des constituants*

# Coulage

↳ *dans le coffrage ferrillé*

- bandes transporteuses ou « Camions-tapis »



- coulage gravitaire : benne surélevée par une grue



# Coulage

↳ *dans le coffrage ferrillé*

- pompage (+ rapide)



# Compaction

↳ *au sein des coffrages*

- **vibration mécanique** (favorise l'imbrication des granulats et enlève bulles d'air)



# Finitions

↳ *sur béton frais*

- Esthétique (planéité des planchers, décorations,..)



# Finitions

↳ *sur béton frais*

- Cure (soins après coulage) :
  - arrosage léger pour éviter le séchage trop rapide en surface,
  - application de revêtements étanches ou résines,..



# Finitions

↳ *sur béton durci*

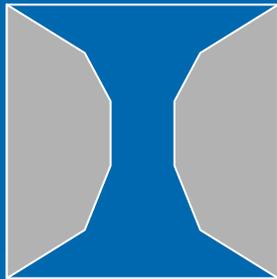
- Décoffrage (au bout de 1-2 jours en général)



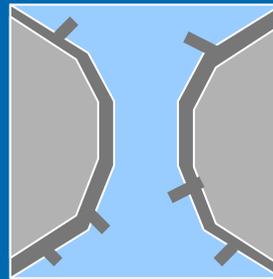
- Autres finitions esthétiques (couleur,..)

# Principe général

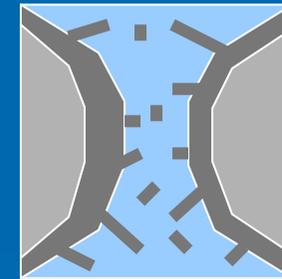
Ciment = liant hydraulique : sa réaction avec l'eau crée des liens solides (hydrates) entre les grains



**1. Grains de ciment anhydre**

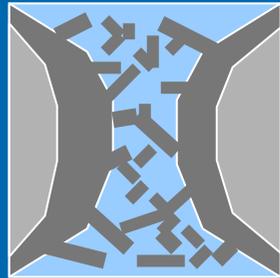


**2. Introduction de l'eau et malaxage** – Formation immédiate de cristaux d'hydrates à la périphérie des grains.

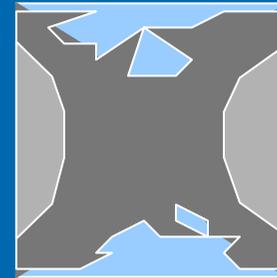


**3. Période dormante** - L'hydratation se poursuit lentement. (Le coulage du béton doit se faire durant cette période).

# Principe général



**4. Début de prise –**  
L'hydratation s'accélère, des ponts d'hydrates commencent à relier les grains de ciment entre eux.



**5. Fin de prise –** Les grains de ciment sont tous solidarisés. La poursuite de l'hydratation se traduit par le **durcissement**.

**Ciment/béton frais** : fluide plastique → fin prise

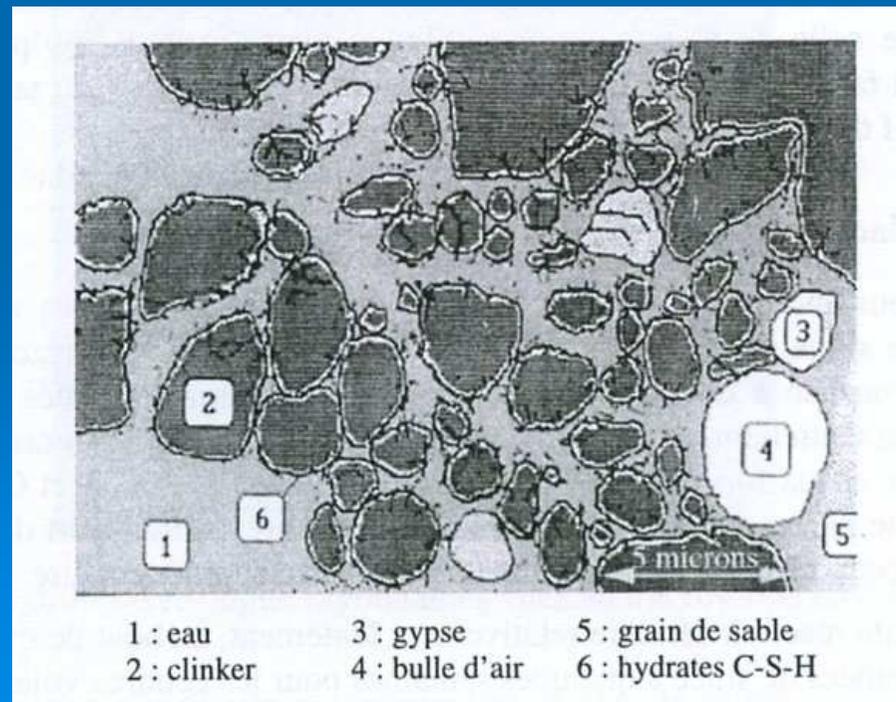
**Ciment/béton durcissant** : solide de + en + résistant

# Évolution de la microstructure

## 1 heure (période dormante) :

- grains majoritairement mobiles
- grains recouverts d'une mince couche de CSH

⇒ matériau  
fluide  
liquide

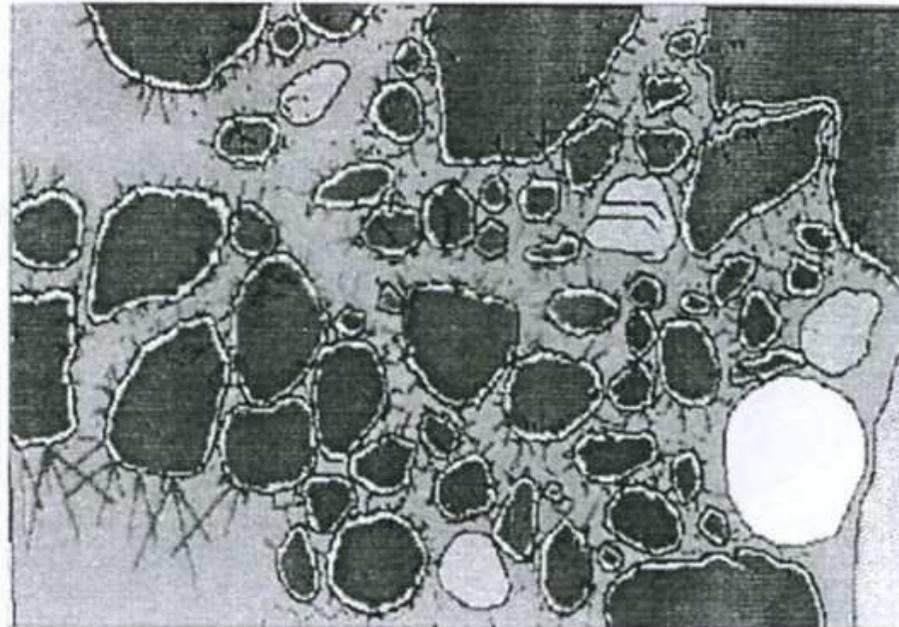


# Évolution de la microstructure

## 2 heures (période dormante) :

- poursuite lente de la formation des CSH
- allongement des cristaux d'ettringite

⇒ pâte + épaisse  
mais toujours  
plastique

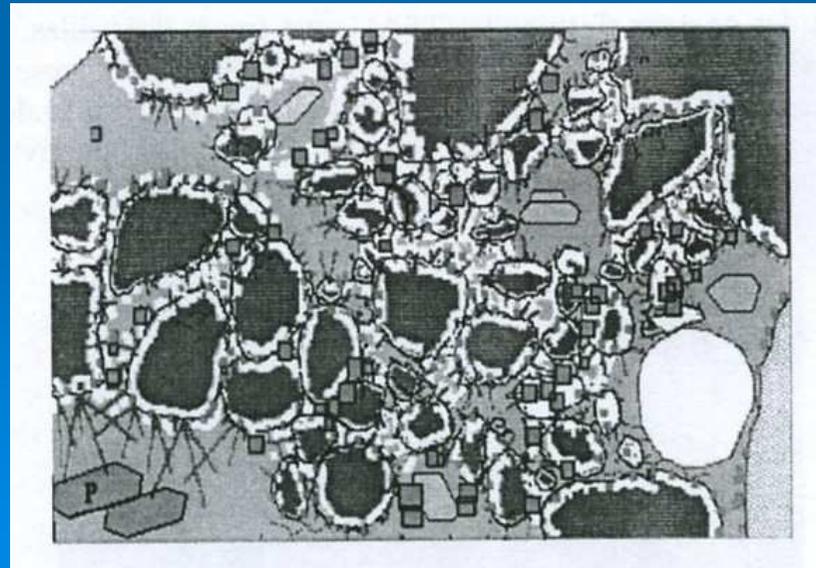


# Évolution de la microstructure

## 5 heures (début de prise) :

- accélération de la formation des CSH
  - formation de la portlandite
  - dissolution continue du gypse (réaction des aluminates)
  - Vol. hydrates  $\approx$  90% Vol. produits réactifs (CA+E)
- ⇒ **Contraction Le Chatelier** (vol. occupé par l'eau diminue)

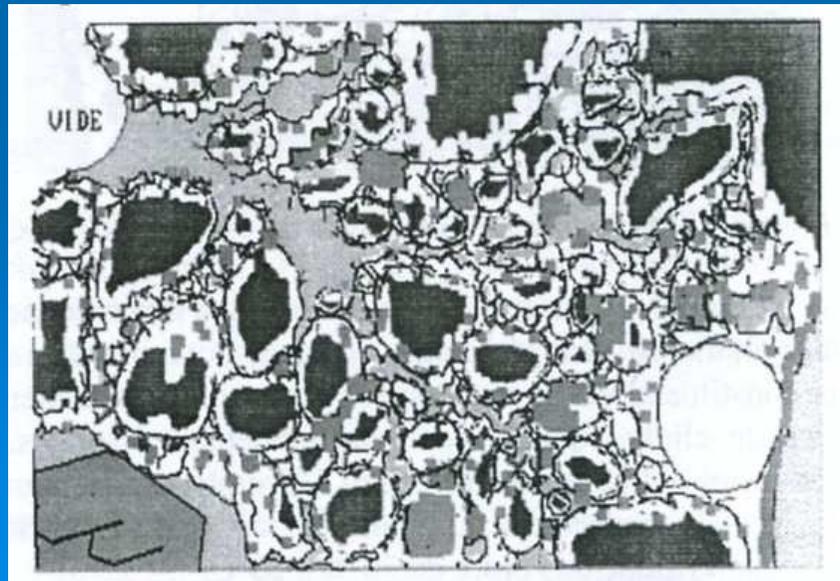
⇒ état rigide



# Évolution de la microstructure

## 3 jours :

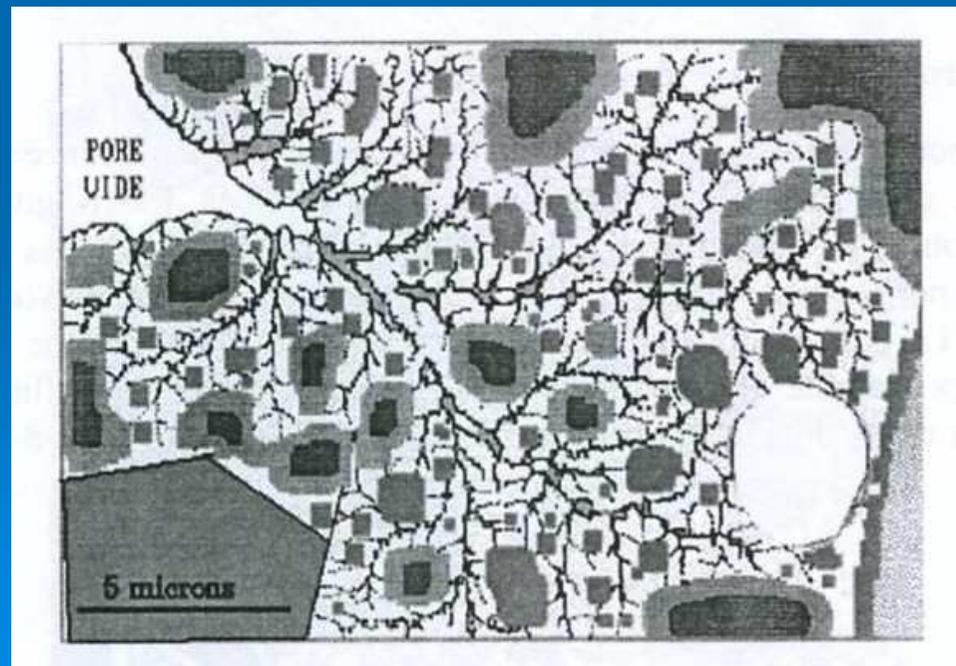
- formation des CSH ralentie par couche d'hydrates autour des grains de ciment (diffusion de l'eau de + en + difficile)
- développement des cristaux de portlandite
- plus de gypse  $\Rightarrow$  dissolution de l'ettringite
- accentuation de la Contraction Le Chatelier



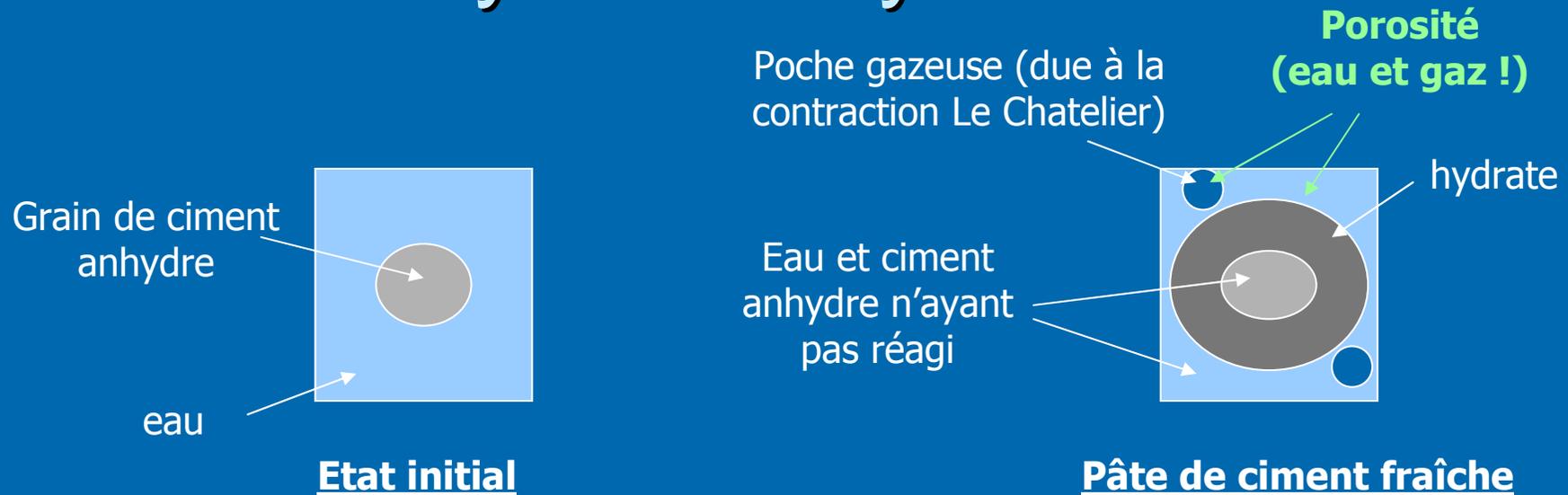
# Évolution de la microstructure

## 1 mois :

- microstructure très compacte
- majorité du volume = CSH et portlandite
- quelques grains de ciment non encore hydratés
- porosité de + en + fine



# Analyse de l'hydratation



⇒ fin de l'hydratation lorsque :

- toute l'eau a été consommée

*ou*

- tout le ciment a été consommé

# Avantages

- 👍 Comportement mécanique
  - ✓ *résistance en compression*
  - ✓ *peu sujet aux instabilités*
- 👍 Résistances aux agressions
  - ✓ *feu*
  - ✓ *chimiques (pluies acides, milieux marins)*
  - ✓ *intempéries, conditions climatiques (gel)*
- 👍 Faible coût
  - ✓ *disponibilité des matières premières*
  - ✓ *fabrication, mise en œuvre faciles*
  - ✓ *entretien*

# Inconvénients

- ↳ Comportement mécanique
  - ✓ résistance en traction
  - ↳ + aciers = béton armé (et béton précontraint)
- ↳ Poids
  - ↳ mise en oeuvre essentiellement sur chantier
- ↳ Qualités fortement conditionnées par les matériaux de base et la fabrication/mise en oeuvre
- ↳ Faible isolation thermique
- ↳ Recyclage difficile et coûteux

# LES COMPOSITES



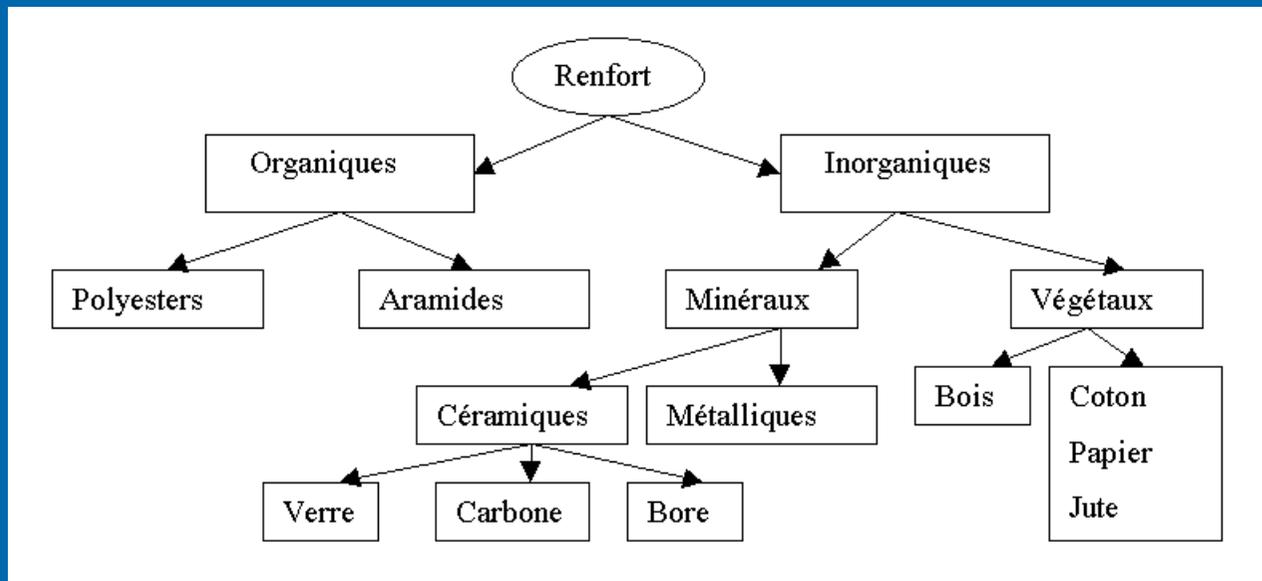
## ***1. Introduction***

### Les matériaux composites

- Association d'éléments de deux classes de matériaux pour obtenir une combinaison avantageuse de propriétés
- Facteurs influençant les propriétés :
  - nature des constituants
  - proportions de chacun
  - architecture du renfort (fibres courtes, longues, orientation...)

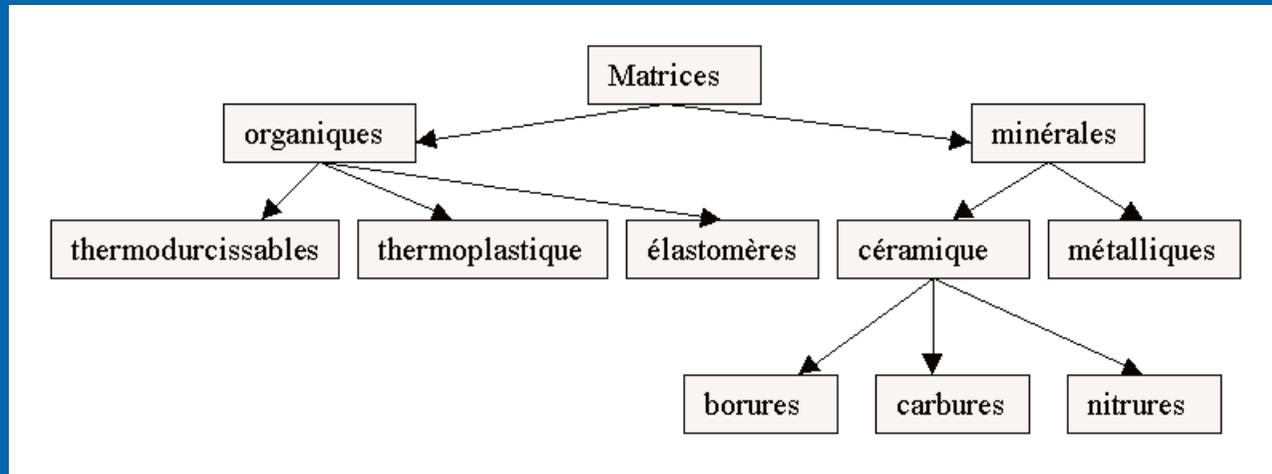
### Les matériaux naturels

- Deux catégories : origine végétale ou animale
- Exemples : bois, papier, carton, liège, fibres naturelles, cuir, laine...



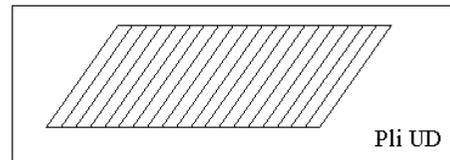
Principales caractéristiques mécaniques des fibres de base:

Fibre	densité	Charge de rupture en traction en MPa	Charge de rupture en compression MPa	Allongé à la rupture en %	Module d'élasticité longi en MPa	Diamètre du filament élémentaire En $\mu\text{m}$	Prix F/Kg
Verre E	2.54	3400	1200	4.8	73000	3 - 30	12
Verre R	2.48	4400	1300	5.4	86000	3 - 30	50
Aramide bas module	1.45	3100	500	2	70000	12	150
Aramide haut module	1.45	3100	500	1	130000	12	200
Carbone haute ténacité	1.78	2800	1800	0.5	200000	8	300/1000
Carbone haut module	1.8	2200	1300		400000	8	300/1000
Bore	2.63	3500	3500	0.8	400000	100 - 200	3000
Acier XC10	7.85	1000			210000		
Aluminium	2.63	358			69800		10



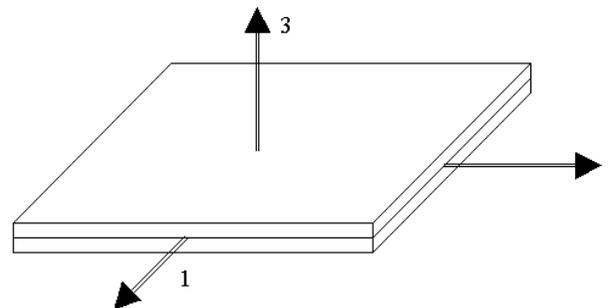
● Monocouches

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.



● Stratifiés

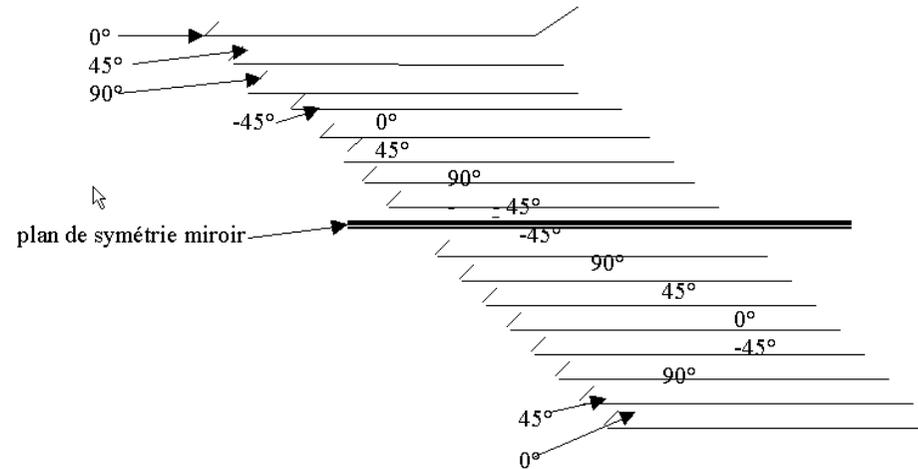
Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié.



Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques.

Notation " composite " : Un stratifié possédant l'empilement  $(0, +45, +90, -45)_2s$  est un stratifié avec 4 couches dans les directions  $0^\circ, -45^\circ, 90^\circ$  et  $+45^\circ$ , l'orientation  $0^\circ$  coïncidant avec la direction 1 du repère principal du composite. Ces plans seront réparties symétriquement par rapport au plan moyen du stratifié.

Notation " composite " : Un stratifié possédant l'empilement  $(0, +45, +90, -45)_2s$  est un stratifié avec 4 couches dans les directions  $0^\circ, -45^\circ, 90^\circ$  et  $+45^\circ$ , l'orientation  $0^\circ$  coïncidant avec la direction 1 du repère principal du composite. Ces plans seront réparties symétriquement par rapport au plan moyen du stratifié.



On pourra avoir des stratifiés de type :

1. Equilibré : stratifié comportant autant de couches orientée suivant la direction  $+\theta$  que de couches orientée suivant la direction  $-\theta$ .
2. Symétrique : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport à un plan moyen.
3. Orthogonal : stratifié comportant autant de couches à  $0^\circ$  que de couches à  $90^\circ$ .

### ● Sandwichs

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique.

$$10 \leq e_c / e_p \leq 100$$

