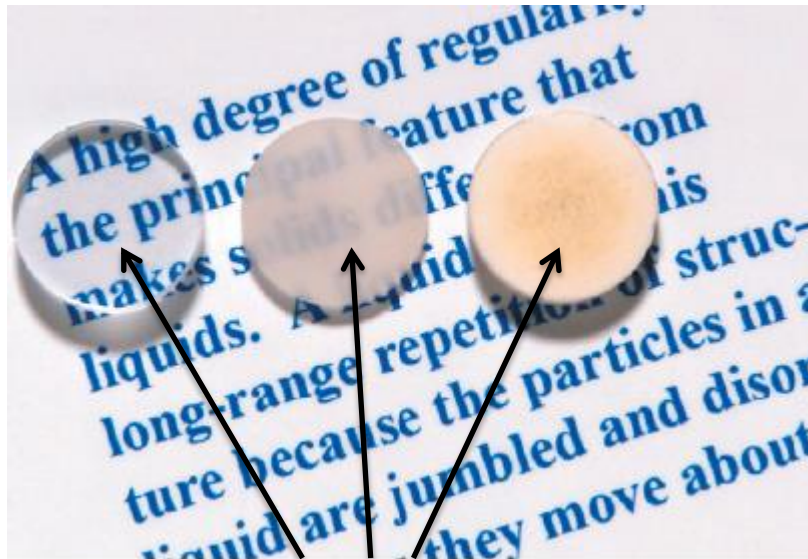


**Sciences des matériaux
et
Ingénierie des matériaux**

Science des matériaux étudie la relation entre la microstructure des matériaux et leurs propriétés physiques

Ingénierie des matériaux: design de la structure des matériaux pour obtenir des propriétés souhaitées (sur la base de la relation connue structure-propriété)



La structure différente résulte en différentes propriétés optiques



Motivation

Tout ingénieur va rencontrer les problèmes
reliées aux matériaux

mécanique → pignon d'une transmission

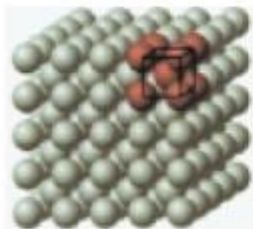
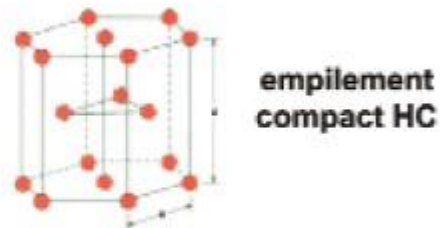
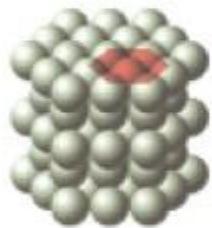
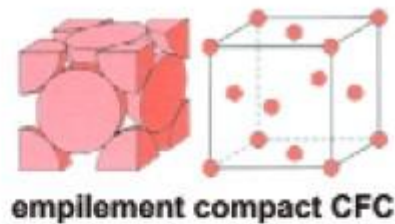
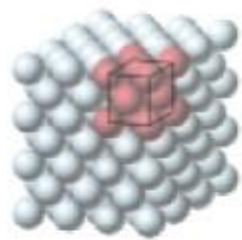
génie civile → structure de bâtiment

génie des procédés → composants d'une raffinerie

électronique → architecture d'une puce électronique

Classification des matériaux

1. Métaux et alliages métalliques – composés d'au moins 1 élément métallique (Fe, Co, Au, ...) et ayant souvent des éléments non-métalliques (carbone).



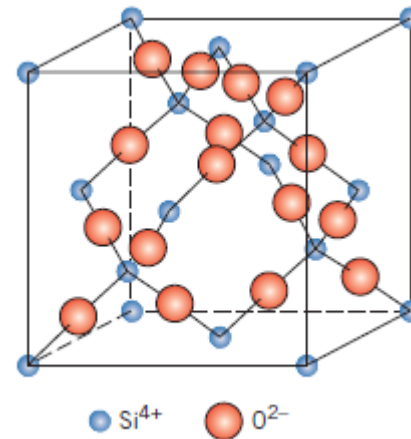
atomes très ordonnés

2. Céramiques – combinaison des éléments métalliques et non-métalliques, tels que

- oxydes (alumine Al_2O_3)
- nitrures (nitride de silice Si_3N_4)
- carbides (carbide de silice SiC)

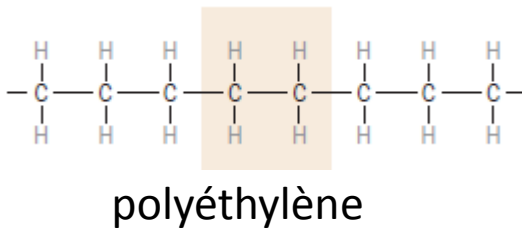
Propriétés

- Grandes dureté et raideur
- Très fragiles



3. Polymères – matériaux plastiques et résines, davantage organiques (ayant le carbone et l'hydrogène comme éléments principaux) et ayant des molécules très grandes:

- polyéthylène
- nylon
- Polyclorure de vinyle (PVC)
- Polystyrène (PS)



Propriétés:

- Faible dureté et raideur
- Pas fragiles et très pliables



4. Composites – matériaux composés de deux ou plus composants appartenant à des catégories différentes (métaux, céramiques, polymères)

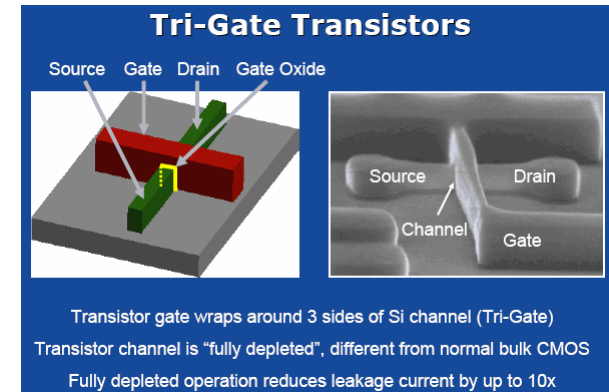
Intérêt d'un composite: combiner les avantages de chaque composante (ex: dureté des métaux + poids léger des polymères)



5. Matériaux avancés (en: advanced materials)

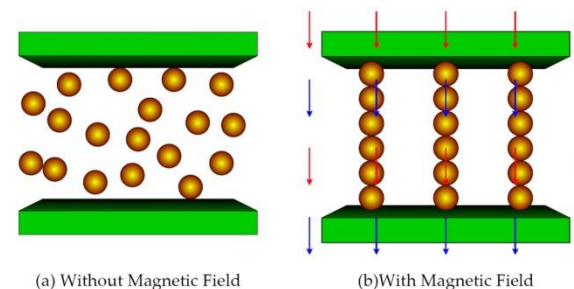
- **Semiconducteurs** (entre conducteurs et isolants)

Puces à **10 nm** entre les nœuds!

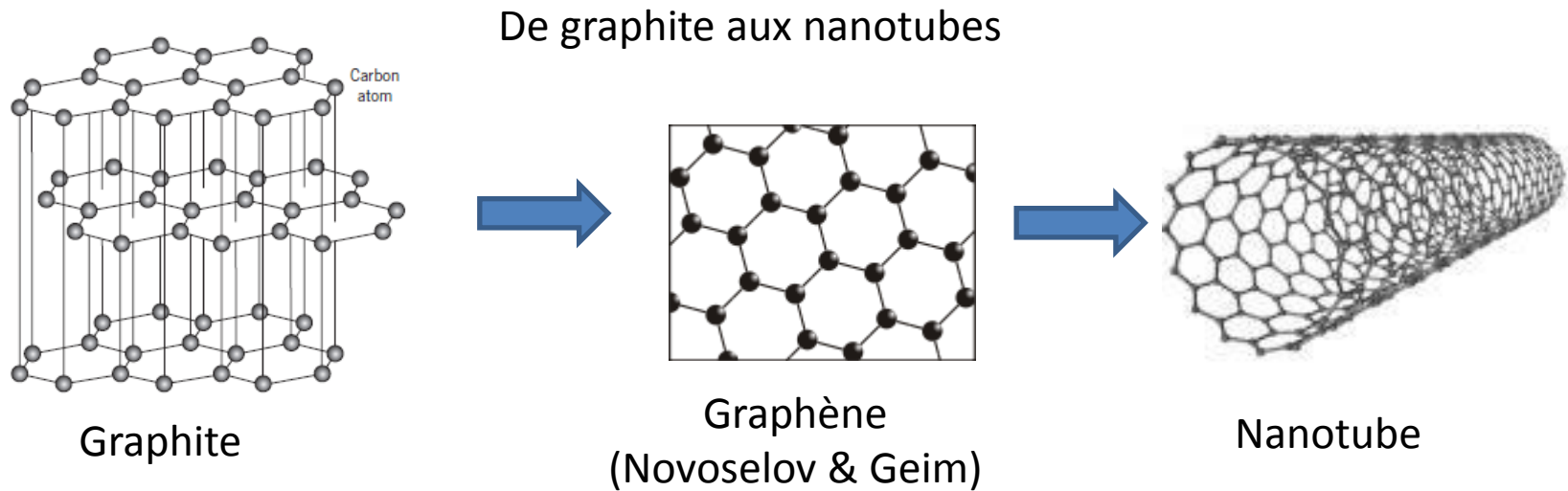


- **Biomatériaux** (matériaux implantés dans le corps humaine qui remplacent les tissus endommagés)
(ex: tissus artificiels fibrine-agarose+cellules)
- **Matériaux adaptatifs** (en: smart materials) –adaptent leurs propriétés physiques en fonction de changements des conditions opératoires

- ✓ Alliages de mémoire de forme
- ✓ Céramique piézoélectrique (actionneurs piézo)
- ✓ Matériaux magnétostrictifs (actionneurs magnéto)
- ✓ Fluides électro/magnétorhéologiques (amortisseurs contrôlables)



- **Matériaux issues des nanotechnologies** (design se fait à partir de la manipulation des atomes et des molécules)



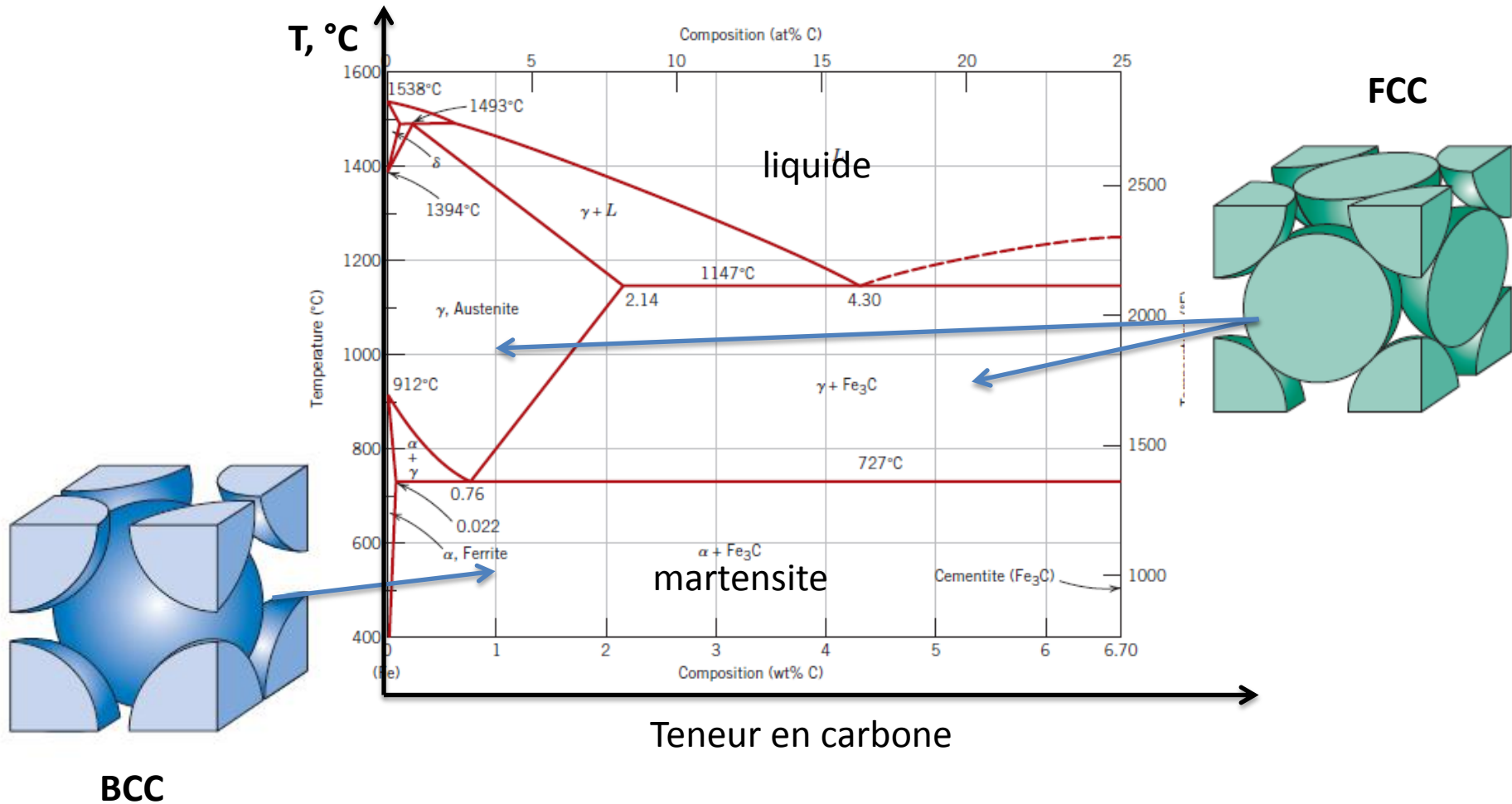
Nanotubes fabriquées par évaporation du graphite

Propriétés:

- Très fortes conductivité électrique et thermique (nanoélectronique)
- Très forte résistance mécanique (matériaux composites pour aérospatiale)

I. Métaux et alliages

1. Aciers



Type d'acier	Propriétés	Applications
Acier à basse teneur de carbone ($C < 0.25\%w$)	<ul style="list-style-type: none"> • Mou, faible résistance à la traction • Bonne résistance à la flexion (ductilité) 	Chassies des automobiles; Profilés métalliques; feuilles pour les tuyaux
Acier à moyenne teneur de carbone ($0.25\% < C < 0.6\%$)	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne résistance à la traction • Moyenne résistance à la flexion (ductilité) 	Roues de trains; pignons; vilebrequins
Acier à haute teneur de carbone ($0.6\% < C < 1.4\%$)	<ul style="list-style-type: none"> • Très résistants à la traction • faible résistance à la flexion (ductilité) 	Outils des machines-outils, filières et moule de formage, couteaux, rasoirs, ressorts
Aciers inoxydables	<ul style="list-style-type: none"> • Contiennent du Cr ($> 11\%w$) et donc très résistants à la corrosion • Résistants à haute température 	Turbines à gaz, chaudières à vapeur, cuves des réacteurs nucléaires

2. Titane

Propriétés:

- Hyper résistant à la traction
- A une très bonne ductilité
- Très bonne résistance à corrosion à température ambiante
- Faible résistance à corrosion à haute température



Applications:

- Structures des avions, des vaisseaux spatiaux
- implants chirurgicaux
- Outils des appareils de mesure

3. Métaux réfractaires (niobium, molybdène, tungstène, tantale)

Propriétés:

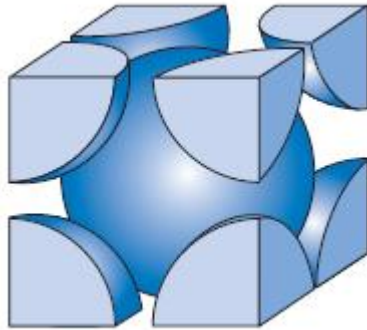
- Très haute température de fusion (2500-3400 °C)
- Bonne résistance à la traction

Applications:

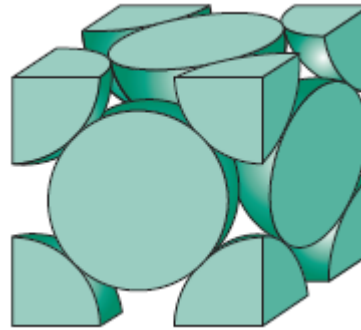
- Mb: filières d'extrusion des polymères; structures des vaisseaux spatiaux;
- W: filaments des lampes; tubes à rayons X, électrodes de soudage à l'arc;
- Nb, Ta: matériaux résistants à la corrosion à haute T.

4. Alliages à mémoire de forme

Phase moins compacte
(martensite)

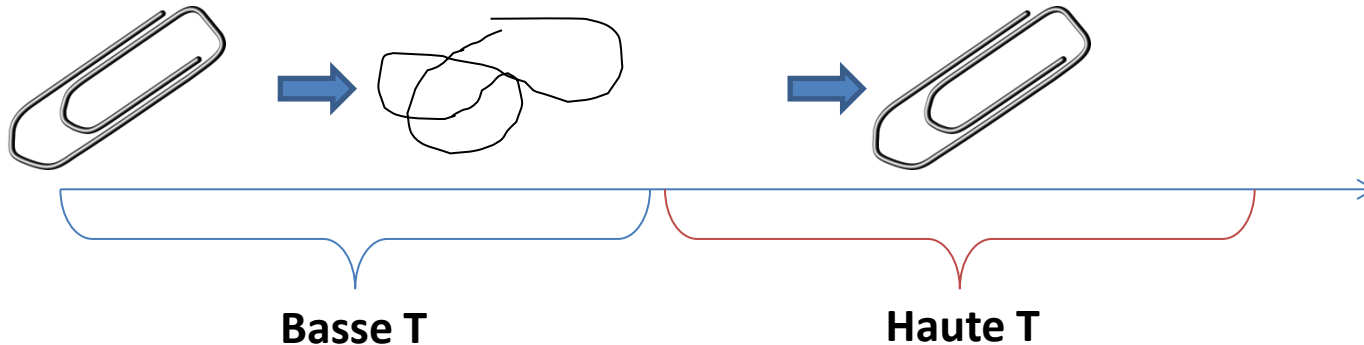


Phase plus compacte
(austénite)



- Alliages Ni-Ti (nitinol)
Alliages Cu-Al-Ni

Passage d'une phase à une autre se fait soit par changement de température, soit par déformation.



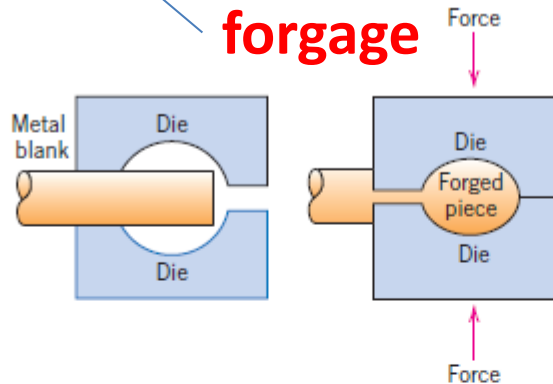
Applications:

- Amortisseurs et absorbeur de choc des lanceurs des vaisseaux spatiaux;
- Actionneurs dans le domaine aérospatiale,
- Autofocus des smartphones, système de stabilisation optique (photo)
- Chirurgie dentale

Fabrication des métaux: formage

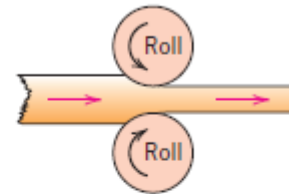
Vilebrequin, bielles

forgage

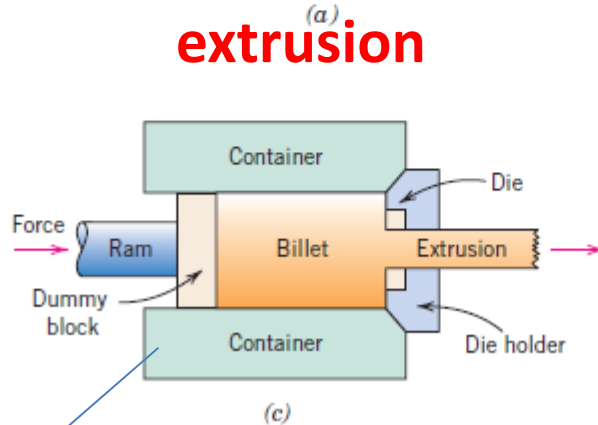


feuilles, profilés

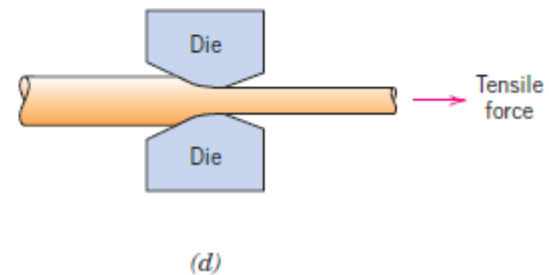
laminage



extrusion



étrirage



Barreaux, tubes de section non-circulaire

Barreaux, tubes, fils de section circulaire

Fabrication des métaux: fonderie

Applications/avantages:

- Pièces de très grand volumes
- Métal d'une ductilité très faible
- Souvent fiable économiquement



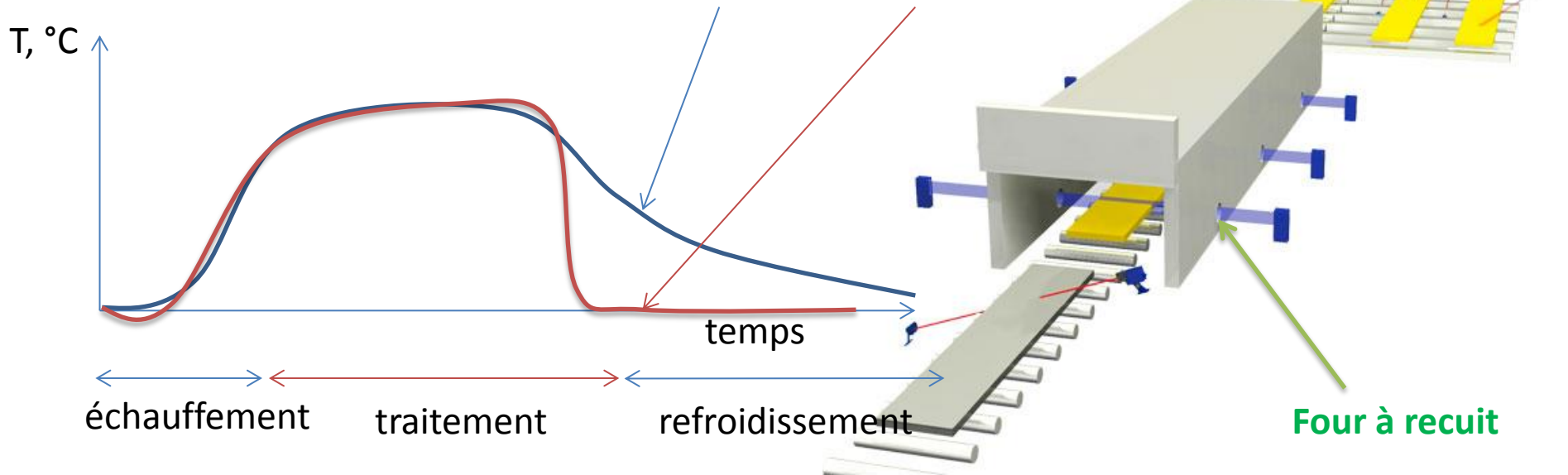
Fabrication des métaux: métallurgie des poudres

Applications:

- Métal d'une ductilité très faible
- Métal de haute température de fusion
- Haute précision de fabrication



Traitement thermique : recuit et trempe



Buts recuit:

- Diminuer les contraintes internes
- Augmenter la ductilité et la ténacité (résistance à la fracturation)
- Produire une microstructure souhaitée

Buts trempe:

- Produire une phase cristallin hors équilibre thermo
→ généralement dureté plus élevée



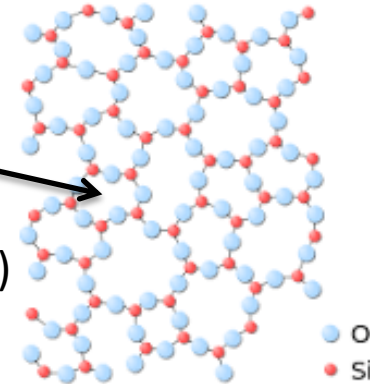
II. Céramiques

1. Verres

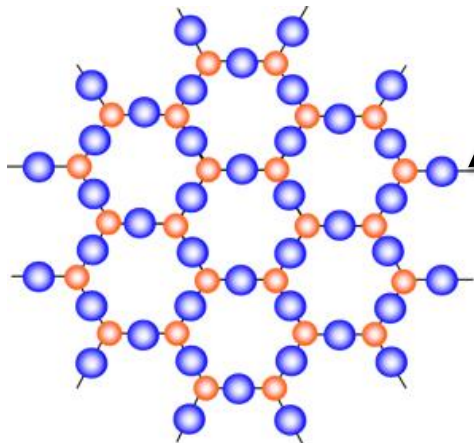
Composition: SiO_2 (70%w), CaO , Na_2O , Al_2O_3

Structure non-cristalline

Application: vitres, optique, fibres de verre (composites)



2. Verres-céramiques



Crystalline

Structure cristalline

Propriétés:

- Résistance mécanique assez élevée;
- Petite dilatation thermique → pas sensibles aux chocs therm.
- Basse conductivité électrique

Applications:

- Tables en verre; vitres des microondes, surfaces des cuisinières
- Isolants des circuits imprimés

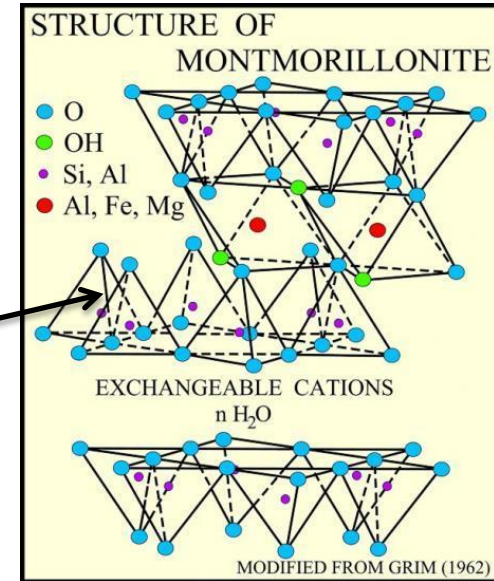
3. Argiles

Composition: SiO_2 - Al_2O_3

Structure cristalline en feuillets

Applications:

- briques, toiture, carrelage
- Lavabos, porcelaine, pots en argile



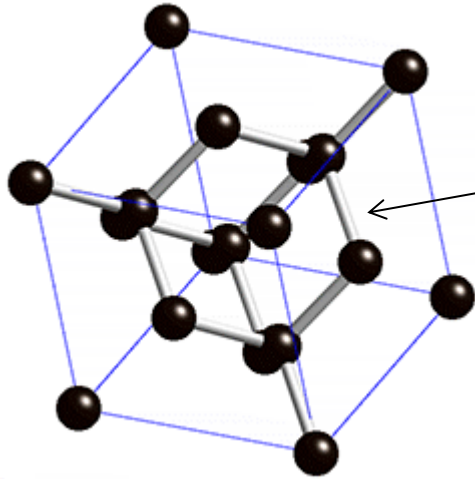
4. Céramique réfractaire

Composition: SiO_2 - Al_2O_3

Applications:

briques réfractaires pour les cheminées, fours industrielles, foyers des centrales thermiques

5. Abrasifs



Diamant (C)
carbure de tungstène (WC)
corindon (Al_2O_3 cristallisé)

Dureté très élevée

6. Ciments

Composition: SiO_2 - CaO

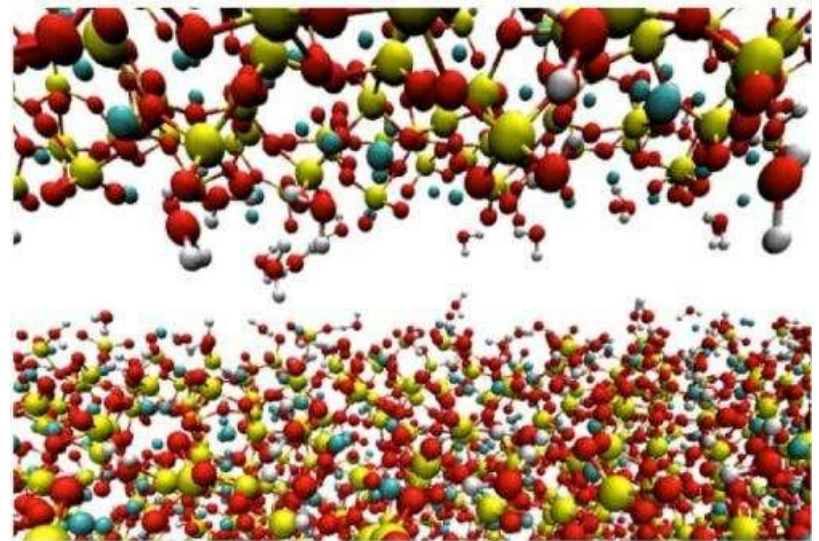
silicate

Prise du ciment: réaction d'hydratation:



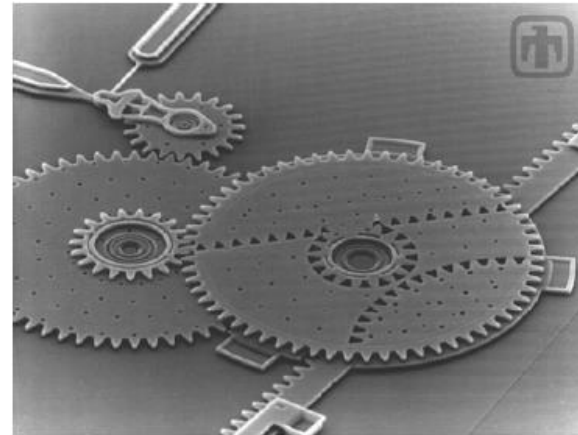
silicate

L'enchevêtrement du gel C-S-H donne sa solidité au ciment



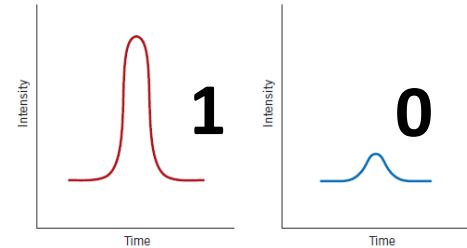
7. Systèmes microélectromécaniques (MEMS)

- Composants céramiques pour le stockage des données;
- Mécanique de précision;
- Détecteurs chimiques;
- Analyse de l'ADN;
- Micro-valves de microfluidique

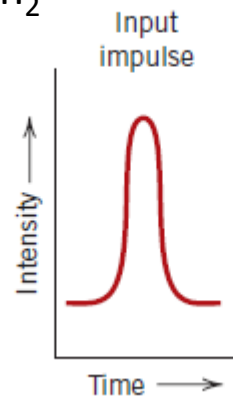
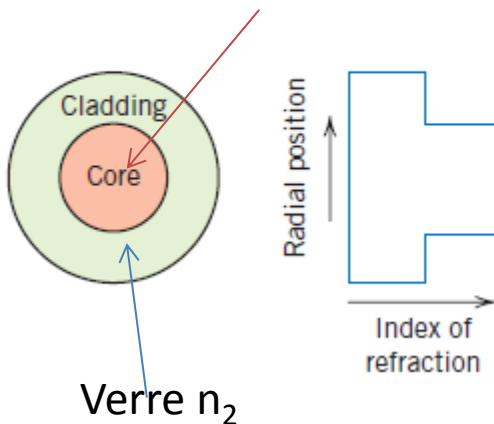


8. Fibres optiques

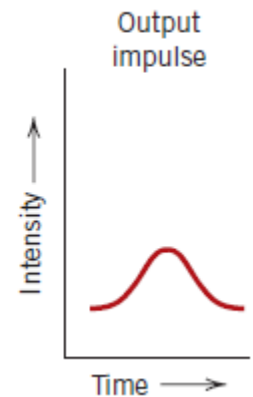
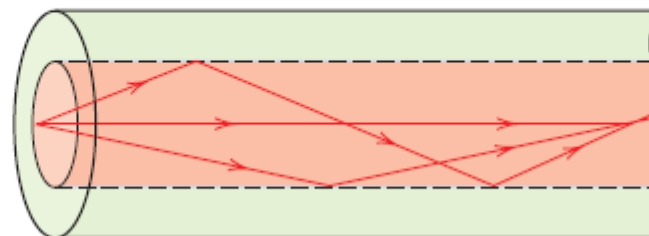
Principe de télécom →



Verre dopé B_2O_3 , GeO_2 $n_1 > n_2$

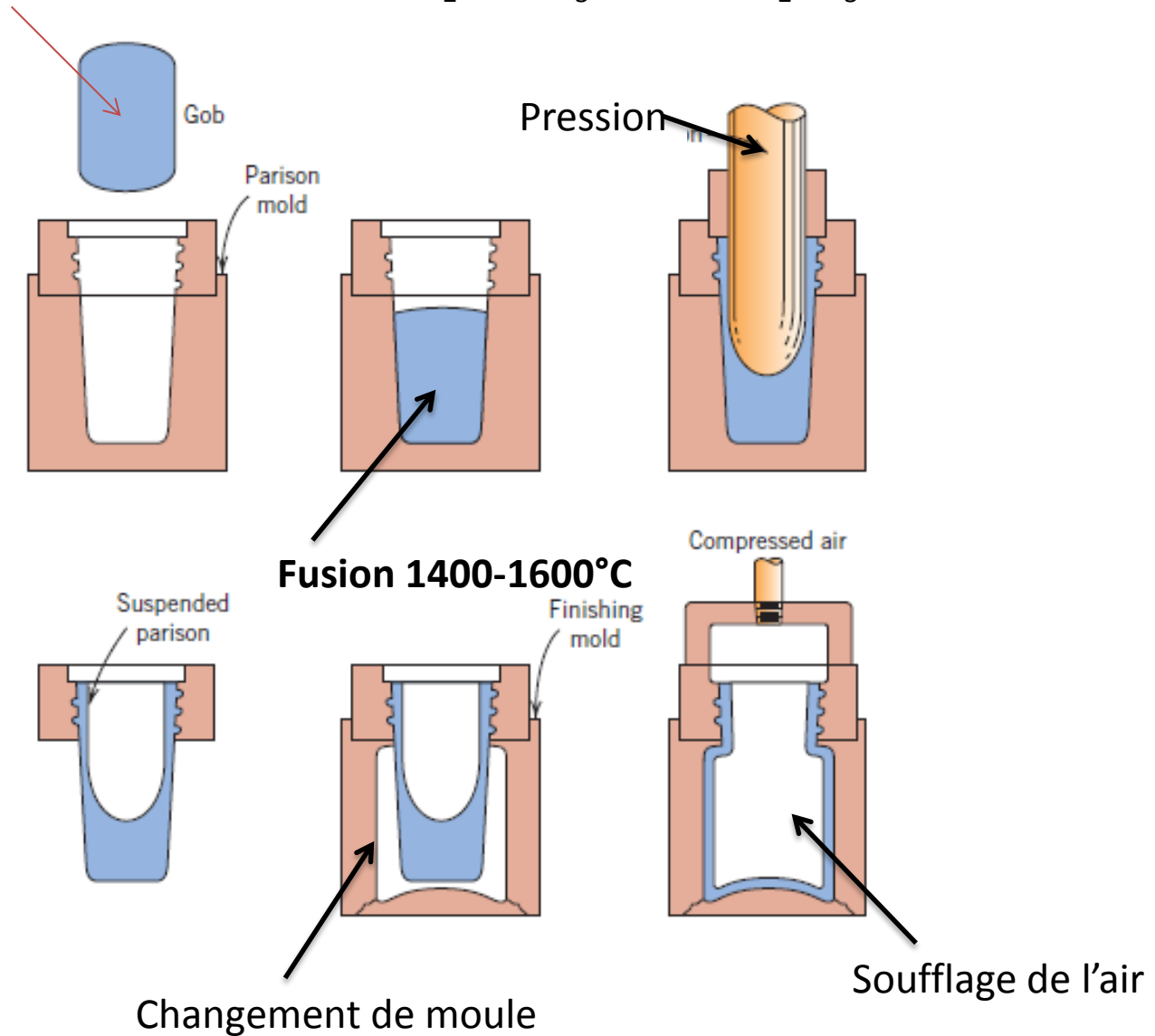


Réflexion totale

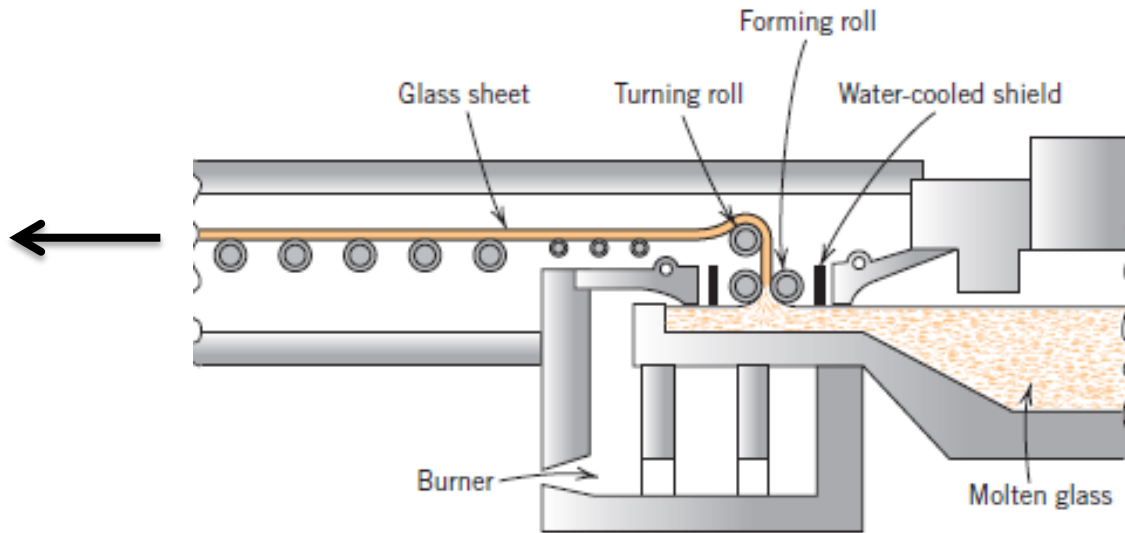


Fabrication des verres: « press & blow » des bouteilles

Matière primaire: sable de quartz SiO_2 + CaCO_3 + soude Na_2CO_3

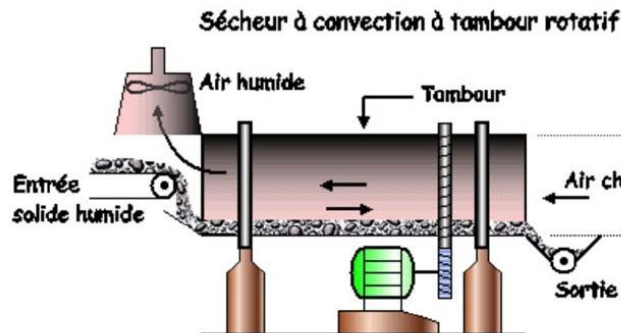


Fabrication des verres: étirage des plaques

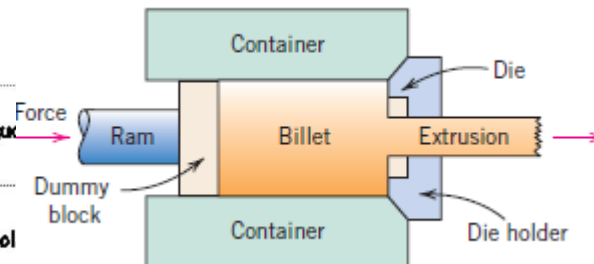


Fabrication des produits argileux (briques, carrelage, ...)

Séchage



formage hydroplastique

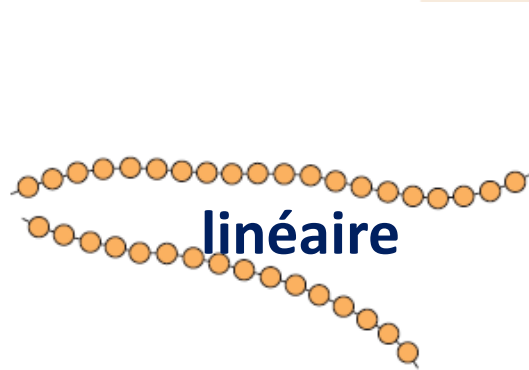
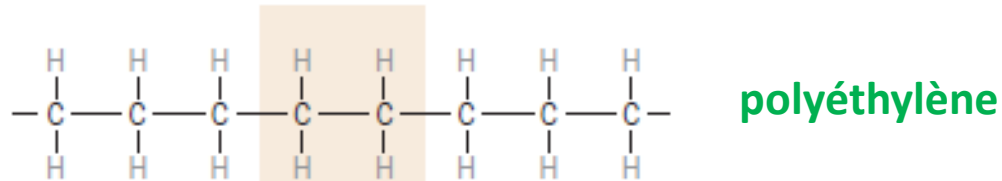


Cuisson (1000°C)

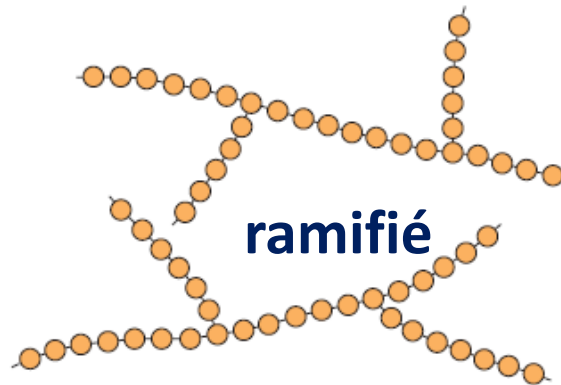


III. Polymères

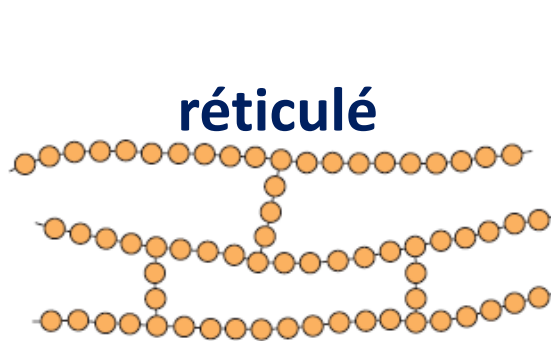
Macromolécules ayant des groupement chimiques répétitifs



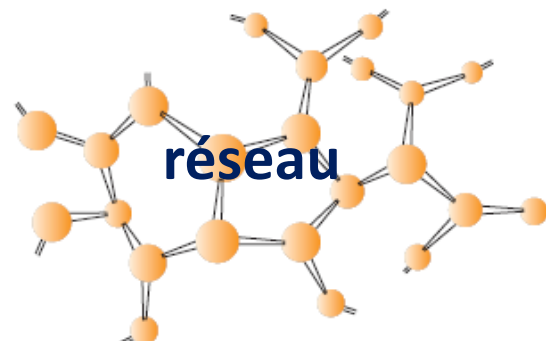
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 14.7 Schematic representations of (a) linear, (b) branched, (c) crosslinked, and (d) network (three-dimensional) molecular structures. Circles designate individual repeat units.

1. Thermoplastiques

Peuvent fondre et revenir à l'état initial après la solidification

Type de plastique	Propriétés	Applications typiques
Polyéthylène	Bonne résistance chimique, isolant électrique, bonne tenacité, petite résistance à traction	brique alimentaire (lait), jouets, films d'emballage, sacs
Polyamide (nylon)	Bonne résistance mécanique, résistance à l'abrasion, bonne tenacité, absorbe de l'eau	Roulements, pignons, comes, isolation des câbles
Fluorocarbones (téflon)	Inerte chimiquement, faibles frottement, résistant à des températures $<260^{\circ}\text{C}$; faible résistance mécanique	Joints d'étanchéité anticorrosifs; tuyauterie pour l'industrie chimique; couches antiadhésifs
Polyester	Très bonne tenacité, très bonne résistance à la traction et à l'humidité, aux acides	Bouteilles plastiques, films d'enregistrement magnétique, cordes des pneus
Polycarbonates	Absorbent peu d'eau, transparents, bonne résistance aux chocs, bonne ductilité et résistance chimique	Lentilles, pellicules photographiques, vitres blindées, capteurs solaires

2. Thermorigides (résines)

ne peuvent être mis en œuvre qu'une seule fois et deviennent infusibles et insolubles après polymérisation

Type de plastique	Propriétés	Applications typiques
Epoxy	Bonne résistance mécanique et anticorrosive, bonne adhésion, low cost	Conduits électriques, lavabos, constituant des composites fibrés dans l'aéronautique
Polyuréthane	Flexible, bonne adhésion, peut avoir une bonne résistance mécanique, bon isolant thermique	Isolation thermique, mousse de meubles et d'emballage, colles, roues des patins, combinaison de natation

3. Elastomères

Très élastiques: peuvent subir de grandes déformations avant la rupture

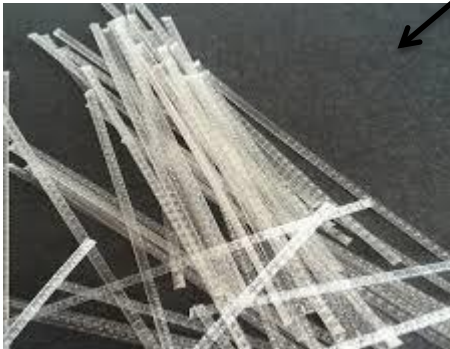
Type de plastique	Propriétés	Applications typiques
Polyisoprène naturel	Bonne résistance mécanique, résistance à l'abrasion, mauvaise résistance à la chaleur	Pneus, tubes, joints d'étanchéité
Acrylonitrile-butadien (Nitrile, NBR)	Bonne résistance chimique, moyenne résistance à la chaleur	Durites des voitures, tuyaux d'essence, joints d'étanchéité
Polysiloxane (silicone)	Bonne résistance à la chaleur, faible résistance mécanique	Isolants thermiques, joints d'étanchéité, tuyaux pour l'industrie agro-alimentaire et biomédicale, circuits microfluidiques

4. Fibres de polymères



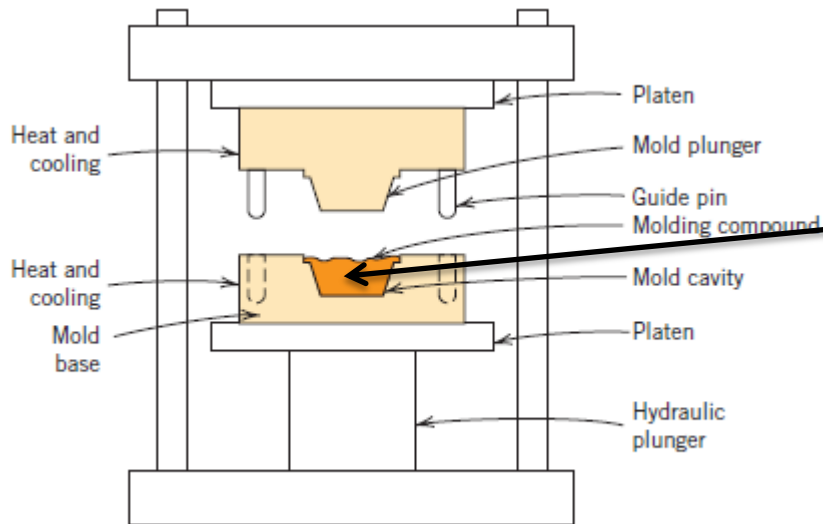
Applications:

- **Textile:** polyamide (nylon), polyester, viscose (faite de la cellulose)
- **Renforcement des bétons:** polypropylène
- **Renforcement des matériaux des avions/bateaux/pare-balles:** aramide (polyamide aromatique, Kevlar®)



Mise en forme des polymères

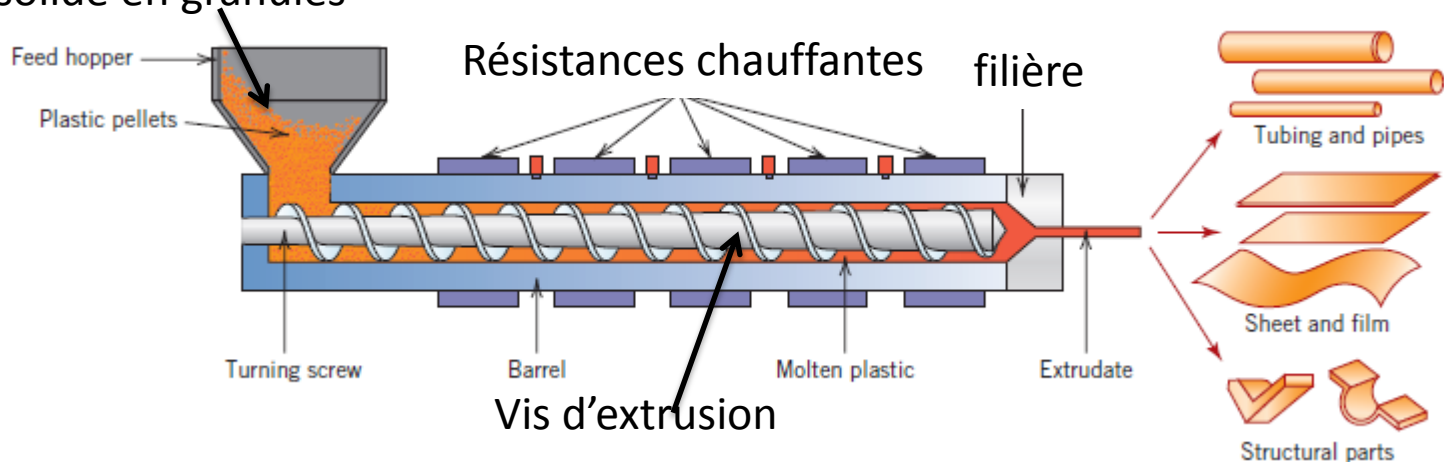
Thermocompression (thermoplastiques, résines, élastomères)



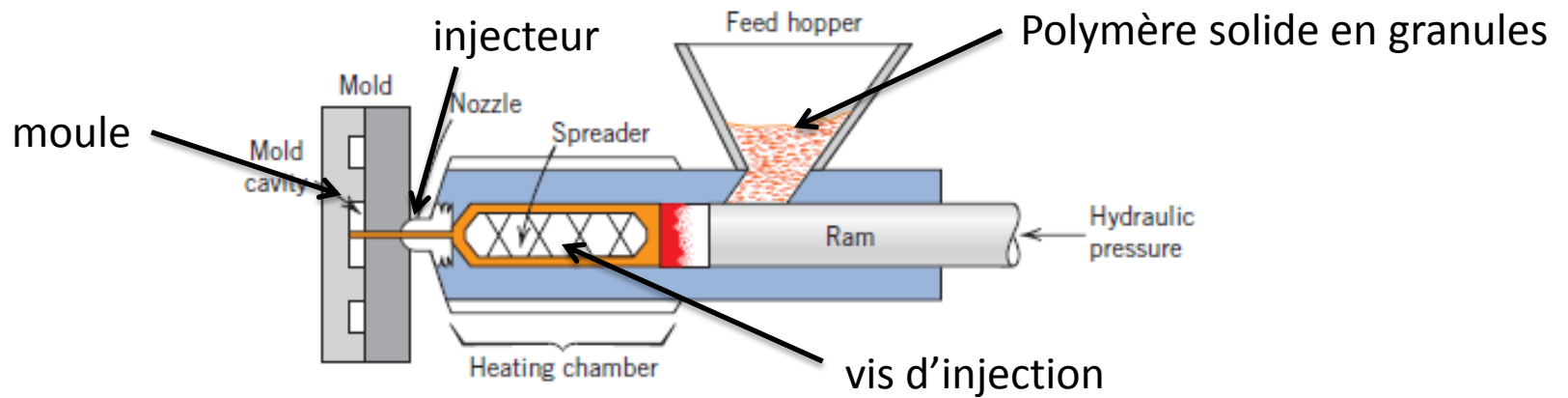
thermoplastique fondu
ou résine/élastomère
avec son durcisseur

Extrusion (thermoplastiques)

Polymère solide en granules



Injection (thermoplastiques)



« Fiber spinning » (thermoplastiques fondus ou en solution)

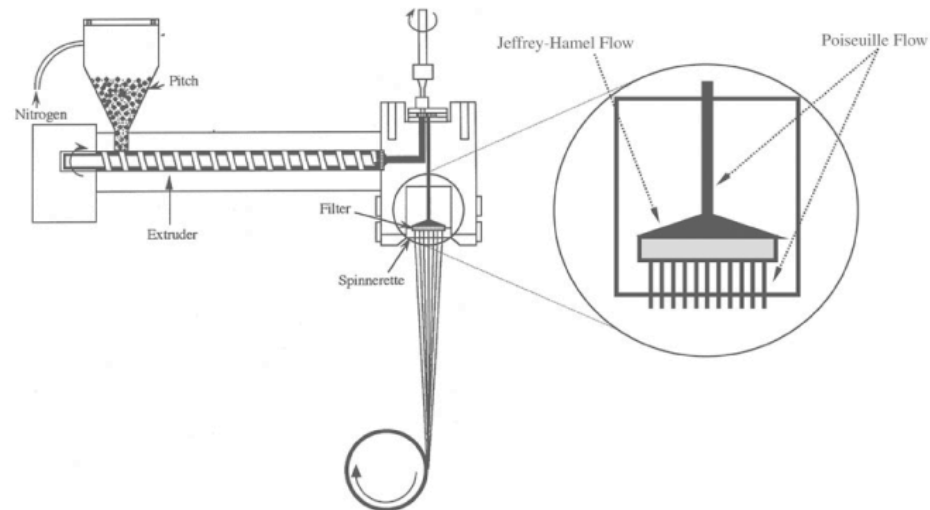


Figure 2. Processing sequence of mesophase carbon fibers. Adapted from McHugh⁶.

IV. Composites

1. Métallo-céramique

Métaux renforcés par des particules céramiques dures

Avantage: composite léger avec bonne résistance mécanique et thermique

Applications:

- Moteurs des voitures de course
- Prothèses dentaires
- Outils des machines à outils (carbure de tungstène, carbure de titane)

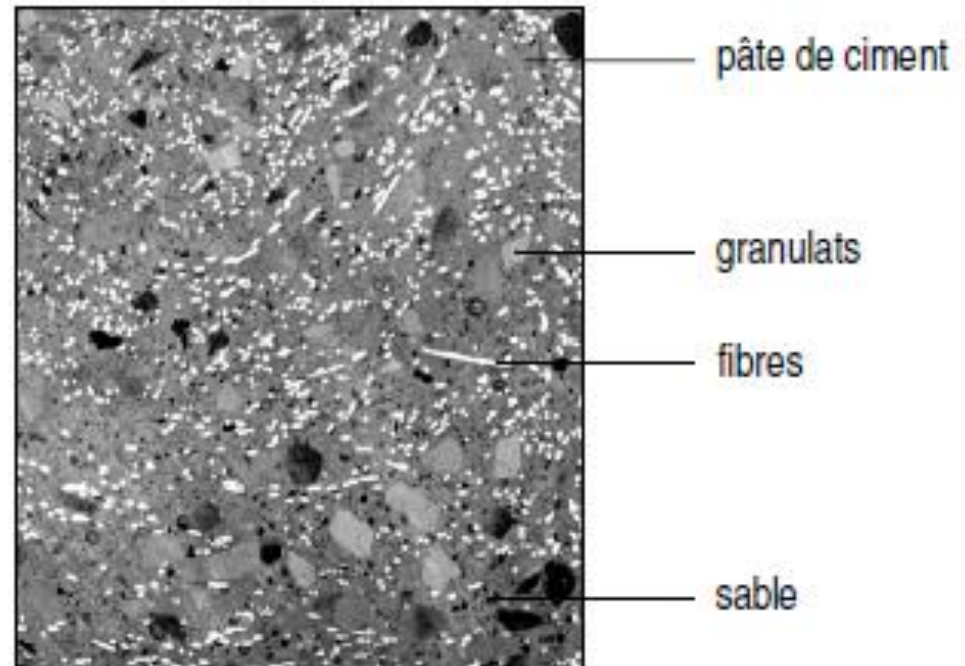


2. Composites renforcés avec des particules sphériques

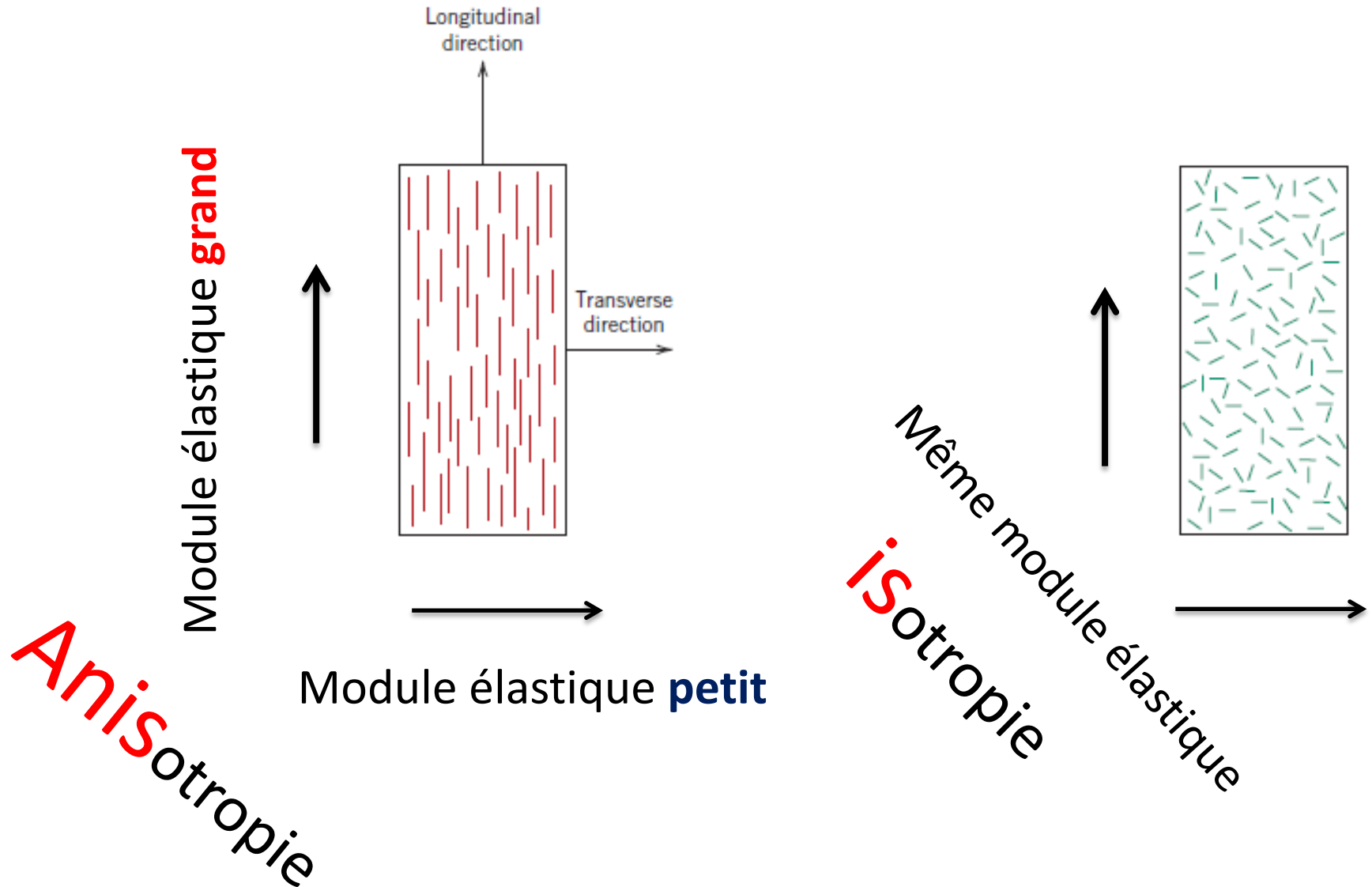


Pneus renforcés par le noir de carbone ou particules de silice

**Bétons – pâte cimentaire
+ sable + graviers**



3. Composites renforcés avec des fibres



3.1 Fibres dans la matrice polymérique (époxy & polyesters)

Type de fibres	Propriétés/Avantages	Applications
Fibres de verre	Low cost, bonne résistance mécanique/ permettent de diminuer le poids des véhicules/ bateaux	Chassies des voitures, coques des bateaux, tubes plastiques, planchers industriels
Fibres de carbone	bonne résistance mécanique et thermique/ permettent de diminuer le poids et augmenter la résistance à la chaleur	Équipement sportifs de haute performance, cage des moteurs des fusils, réservoirs à haute pression, composants de structure des avions et hélicoptères
Fibres d'aramide	Bonne flexibilité et ductilité	Gilets pare-balles, équipement sportifs de haute performance, pneus, cases de missiles, réservoirs de haute pression, plaquettes et disques de freinage

3.2. Fibres dans la matrice métallique



Applications:

- Block de cylindres des moteurs (Al + fibres de carbone)
- Composantes de transmission
- Arbres des moteurs à haute vitesse
- Renforcement de la structure de la navette spatiale « Orbiter » (fibres de bore)

Avantages:

- Petit poids
- Faibles vibrations lors de rotation des axes



3.3. Fibres de carbone dans la matrice carbone

Applications:

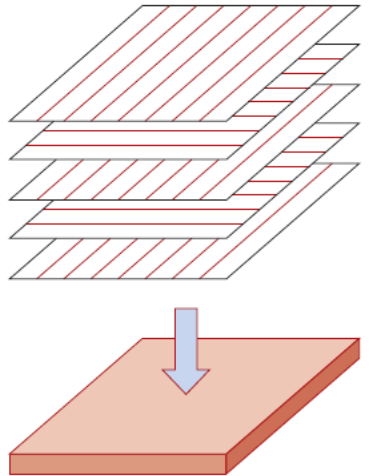
- Moteurs des fusils;
- Moules de hautes pression et températures;
- Turbines à gaz
- Disques de freinage

Avantages:

bonne résistance à la chaleur

4. Composites structurels

4.1 Composite laminaire

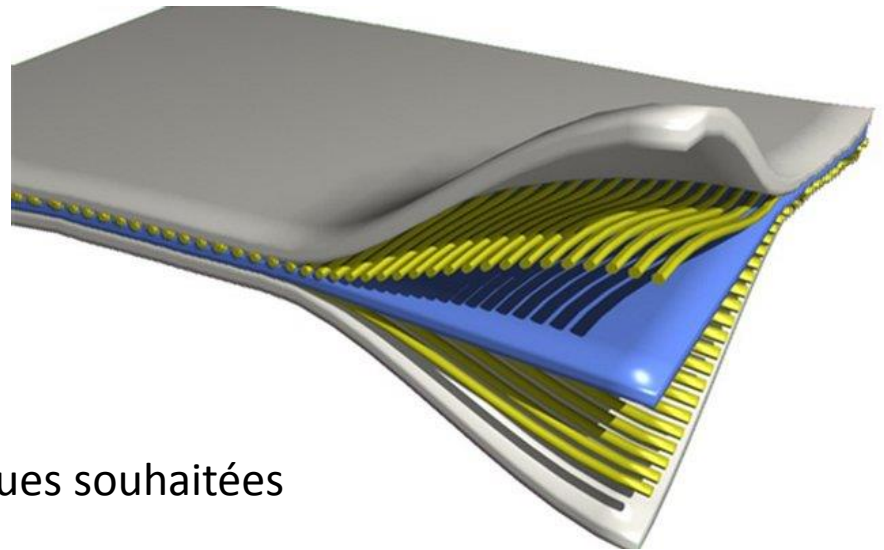


Applications:

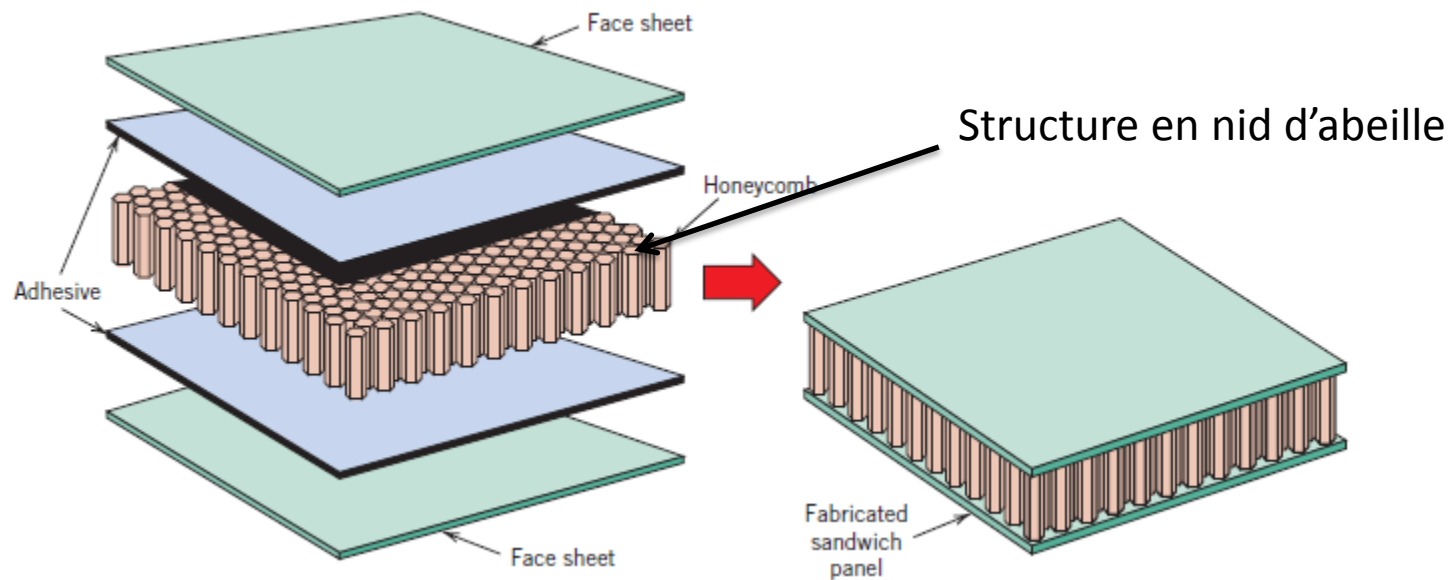
- Coques/ailes des avions,
- Skis

Avantages:

- Réduction du poids
- Combinaison des propriétés mécaniques souhaitées



4.2. Composite « sandwich »



Applications:

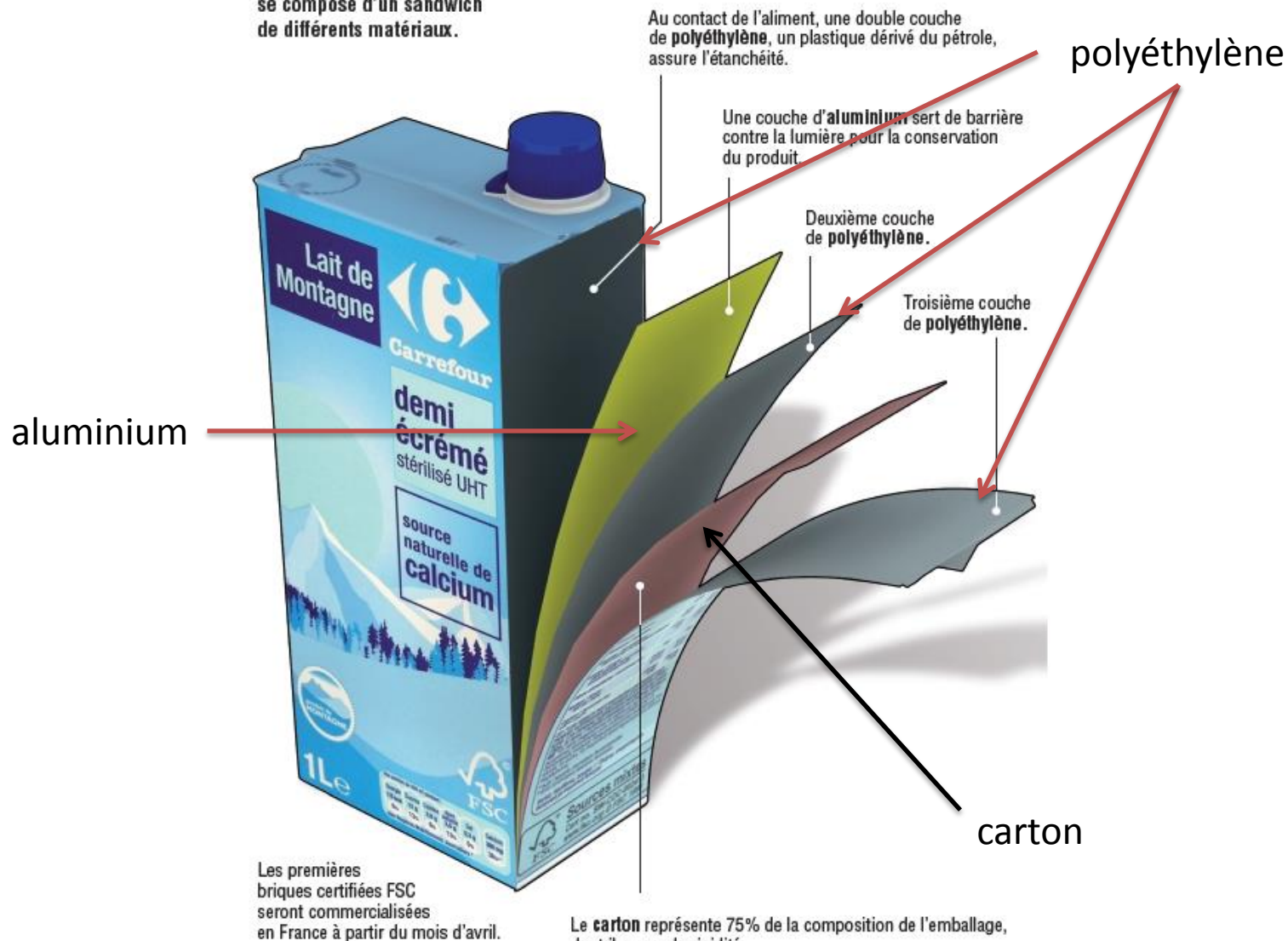
- Toits, planchers, murs
- Ailes, fuselage des avions
- Pare-chocs des véhicules
- Briques de lait

Avantages:

- Réduction du poids
- Combinaison des propriétés mécaniques souhaitées

La composition d'une brique alimentaire

Une brique Tetra Pak se compose d'un sandwich de différents matériaux.



Les premières briques certifiées FSC seront commercialisées en France à partir du mois d'avril.

Le **carton** représente 75% de la composition de l'emballage, dont il assure la rigidité. Pour les emballages sous la marque Carrefour, il sera désormais certifié FSC (« Forest Stewardship Council »), ce qui garantit qu'il est issu de forêts bien gérées.

A quoi peut ressembler le travail dans le domaine des matériaux?

coordinates have the forms

$$\begin{aligned} \frac{\lambda+2\mu}{\mu} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 u_r}{\partial r \partial \theta} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{1}{r^2} u_\theta - \frac{\cot^2 \theta}{r^2} u_\theta \right. \\ \left. + \frac{\cot \theta}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{\cot \theta}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial \theta \partial \phi} \right) - \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial \theta \partial \phi} \\ - \frac{\cot \theta}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \phi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} u_\theta - \frac{1}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} \\ - \frac{1}{r^2} u_\theta + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u_r}{\partial r \partial \theta} = 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{(\lambda+2\mu)}{\mu} \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} u_r + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r \partial \theta} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\cot \theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right. \\ \left. - \frac{\cot \theta}{r^2} u_\theta + \frac{1}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{\cot \theta}{r^2} u_\theta + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{\cot \theta}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \phi^2} \right. \\ \left. - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial r \partial \phi} - \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} = 0 \right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

and

$$\begin{aligned} \frac{(\lambda+2\mu)}{\mu} \frac{1}{r \sin \theta} \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r \partial \phi} + \frac{2}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \phi} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta \partial \phi} + \frac{\cot \theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \phi} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial \phi^2} \right) \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\phi}{\partial r} - \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial^2 u_r}{\partial r \partial \phi} + \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial \theta^2} - \frac{1}{r^2} u_\phi - \frac{\cot^2 \theta}{r^2} u_\phi \\ + \frac{\cot \theta}{r^2} \frac{\partial u_\phi}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\cot \theta}{\sin \theta} \frac{\partial u_\theta}{\partial \phi} - \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta \partial \phi} = 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Substituting (2.3) into (2.4)–(2.6) and equating to zero the coefficients of

$\sin^2 \theta$ and the terms independent of θ gives the three governing equations

$$\begin{aligned} 2(1-\nu) \left(U_r'' + \frac{2}{r} U_r' - \frac{2}{r^2} U_r - \frac{3}{r} U_\theta' + \frac{3}{r^2} U_\theta \right) \\ + (1-2\nu) \left(-\frac{6}{r^2} U_r + \frac{3}{r} U_\theta' + \frac{3}{r^2} U_\theta \right) = 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$2(1-\nu) \left(\frac{2}{r} U_r' + \frac{4}{r^2} U_r - \frac{6}{r^2} U_\theta \right) + (1-2\nu) \left(-\frac{2}{r} U_r' + U_\theta'' + \frac{2}{r} U_\theta' \right) = 0 \quad (2.8)$$

$$U_\theta + U_\phi = 0 \quad (2.9)$$

where the prime designates derivatives with respect to r . The solution of (2.7)–(2.9) may be shown to be given by

$$\begin{aligned} U_\theta = A_1 r - \frac{(7-4\nu)}{(1-2\nu)} A_2 r^3 - \frac{2A_3}{r^4} + \frac{2A_4}{r^2} \\ U_\phi = -U_\theta \end{aligned} \quad (2.10)$$

At this point, solutions of the form of (2.10) are taken for the inclusion phase and the matrix phase; thus

$$\begin{aligned} U_{ri} = A_1 r - \frac{6\nu_i}{1-2\nu_i} A_2 r^3 \\ U_{\theta i} = A_1 r - \frac{(7-4\nu_i)}{1-2\nu_i} A_2 r^3 \end{aligned} \quad (2.11)$$

and

$$\begin{aligned} U_{rm} = B_1 r + \frac{3B_3}{r^4} - \frac{5-4\nu_m}{1-2\nu_m} \frac{B_4}{r^2} \\ U_{\theta m} = B_1 r - \frac{2B_3}{r^4} + \frac{2B_4}{r^2} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Génie aérospatiale



Génie mécanique



Génie civil



Génie des procédés



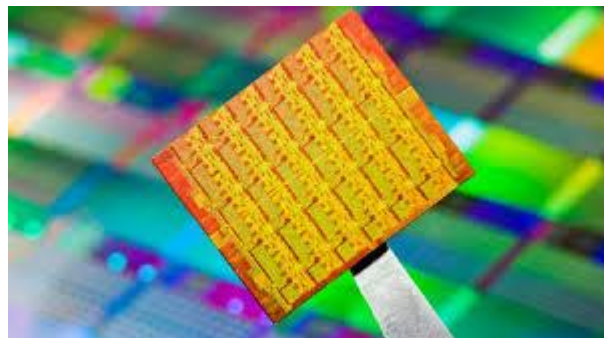
Génie chimique



Bio ingénierie



Microélectronique





Allez,
on se
motive...pour les matériaux?

Bon mardi