

Chapitre 0

Introduction à la mécanique des matériaux innovants : rappels et pré-requis

1. Démarche de choix matériaux pour des applications structures

→ Exemple de la voilure d'un avion (l'aile) pour préciser l'importance du choix optimal de propriétés mécaniques (matériau) pour une géométrie donnée.

→ Comme dans toute démarche de conception, l'optimalité des propriétés mécaniques d'une structure est une question de compromis.

→ Critères mécaniques classiques :

- la rigidité (E : module d'Young),
- la résistance (σ_y : contrainte d'écoulement),
- la ténacité (K_{IC} : facteur d'intensité de contrainte représentatif de la résistance à la propagation de fissures),
- le poids (ρ : densité).

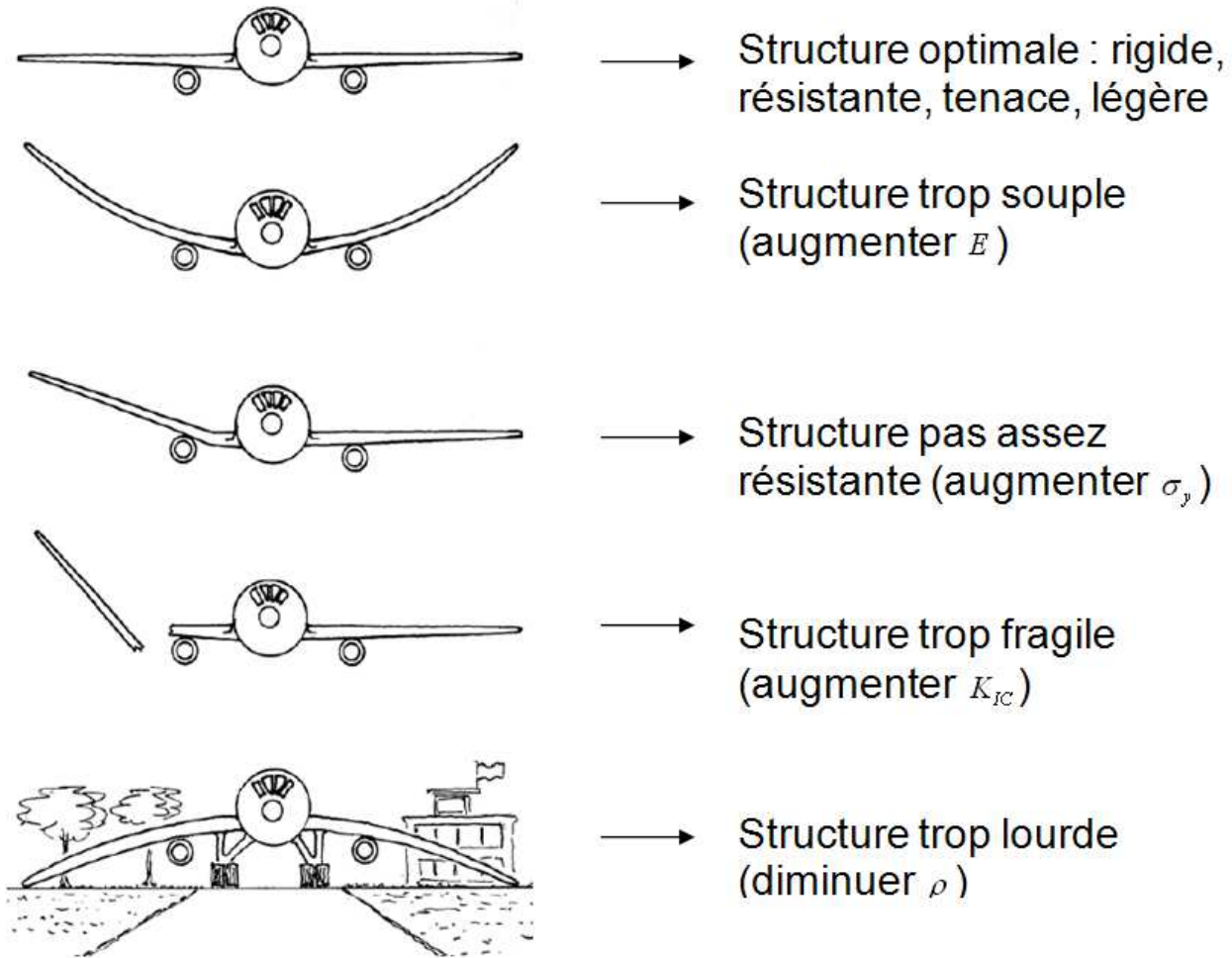


Fig. – Exemple de choix des propriétés mécaniques pour une structure optimale [CEB]

→ Le choix d'un matériau aux propriétés mécaniques optimales ne suffit à garantir à lui seul une structure au comportement mécanique optimal.

→ Nécessité de prendre en compte d'autres facteurs essentiels :

- influence des procédés de fabrication,
- comportement en fatigue,
- environnement potentiellement pénalisant (température, humidité, feu, corrosion, produits chimiques, radiations...)

→ D'où le développement d'une démarche de conception intégrée prenant en compte ces facteurs aux différentes étapes de la réalisation de la structure.

→ Par ailleurs, le dimensionnement des structures s'inscrit généralement dans le domaine de comportement élastique des matériaux : **comportement linéaire**.

→ Cependant, il est nécessaire de connaître le comportement du matériau au-delà du domaine élastique : **comportement anélastique** éventuel puis **rupture**.

2. Principaux types de comportement mécanique [MAT06]

→ Mise en évidence par un essai de traction :

→ Comportement élastique-fragile :

Comportement global linéaire élastique. La rupture intervient de façon brutale (sans signes précurseurs).

Ex. : céramiques massives, verres.

→ Comportement élastique-quasi fragile :

Comportement global non-linéaire. Non-linéarité due à des micro-fissurations (décharge partielle+perte de rigidité)

Ex. : composites, bétons, céramiques.

→ Comportement élastique-plastique-fragile :

Déformation plastique faible suivie d'une rupture brutale.

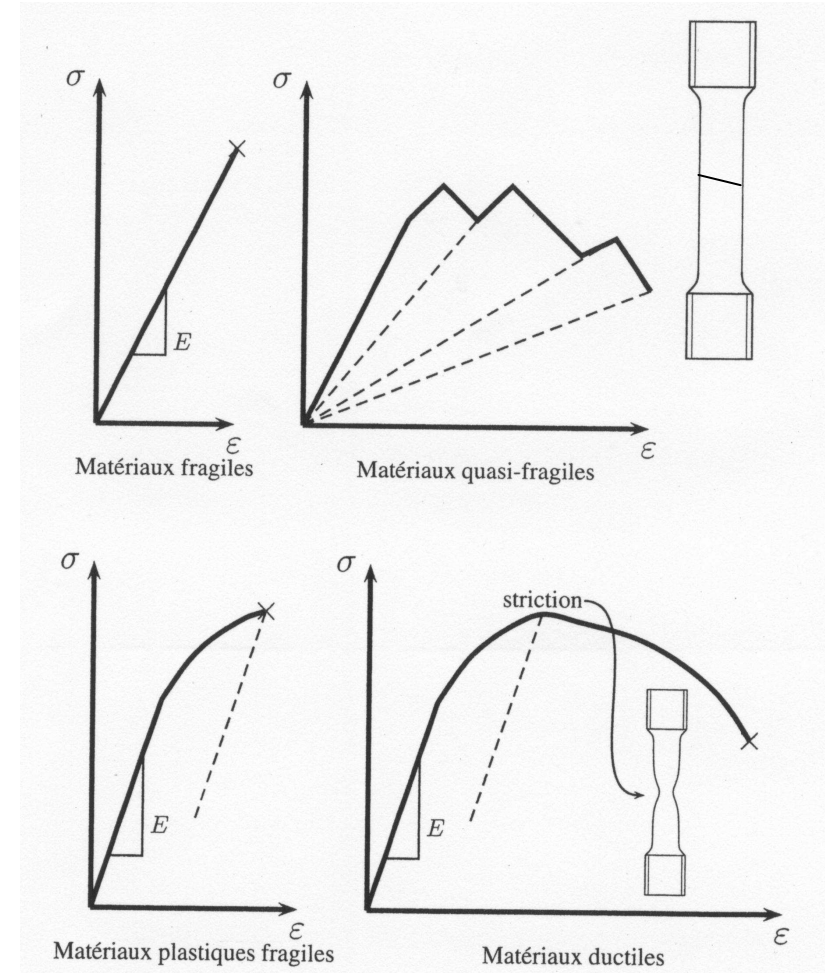
Ex. : métaux à faible température, composites, plastiques.

→ Comportement élastique-ductile :

Déformation plastique importante et rupture progressive due à l'initiation et à la propagation de fissures ou d'endommagements au sein du matériau. S'accompagne généralement d'une striction.

Ex. : métaux à haute température, plastiques, composites.

→ Autres types de comportements (élastomères, mousses, AMF, céramiques piézoélectriques...)



3. Quels matériaux pour quels critères (comportement, rigidité, résistance, coût, masse...) ?

3.1 Etude de cas - Choix d'un matériau pour une fourche de vélo [ASH00]

- Lors de la conception d'une fourche de vélo, critère principal : la fourche ne doit pas se déformer excessivement (rigidité) et ne doit pas casser dans des conditions d'utilisation normales.
- Les fourches de vélo sont essentiellement sollicitées en flexion (cf. relations utiles de la RDM).
- Pour un vélo de route de compétition, objectif : concevoir la fourche la plus légère possible répondant aux exigences de résistance.
- **Question** : quel est le matériau le plus adapté ?

Cahier des charges :

Fonction	Poste de pilotage vélo
Objectif	Poids minimal
Contraintes	1. Pas d'endommagement sous les charges spécifiées par la conception (normes) : contrainte sur la résistance 2. Longueur donnée

Dimensionnement :

→ On peut représenter une fourche par une poutre tubulaire de rayon R , d'épaisseur t , de longueur L devant supporter une charge maximale F .

→ On veut ainsi concevoir un tube le plus léger possible : quel matériau choisir ? Selon quels critères ?

→ D'une part, la RDM permet de calculer la résistance en flexion d'une telle poutre :

- La contrainte σ est la plus élevée au point y_m de la surface le plus éloigné de la fibre neutre :

$$\sigma = \frac{M \cdot y_m}{I} = \frac{M}{Z}$$

Où M est le moment de flexion, I le moment quadratique en flexion.

- Dans les problèmes d'endommagement des poutres, la géométrie intervient via le module de section $Z = \frac{I}{y_m}$.
- Si la contrainte σ dépasse la résistance mécanique σ_f en flexion du matériau alors la poutre rompt ou présente un comportement non-linéaire. Le moment de flexion est alors $M_f = Z \cdot \sigma_f$

- Le facteur de forme pour la résistance en flexion est noté ϕ_F^f . Il représente le rapport entre le moment de flexion M_f de la poutre tubulaire sur le moment de flexion M_f^0 de la poutre cylindrique pleine de même section :

$$\phi_F^f = \frac{M_f}{M_f^0} = \frac{Z}{Z^0}$$

Où $Z^0 = \frac{\pi R^4}{4R} = \frac{\pi}{4} R^3 = \frac{A^{3/2}}{4\sqrt{\pi}}$ est le module de section pour le cylindre plein et $A = \pi R^2$ est la section de la poutre.

- On obtient donc l'expression du facteur de forme en fonction de Z et A :

$$\phi_F^f = \frac{4\sqrt{\pi}Z}{A^{3/2}} \text{ ou bien } Z = \frac{A^{3/2}}{4\sqrt{\pi}} \phi_F^f$$

Ce facteur de forme vaut 1 pour une poutre cylindrique pleine.

- Finalement, la défaillance de la poutre se produit lorsque le moment de flexion vaut :

$$M_f = \frac{A^{3/2}}{4\sqrt{\pi}} \phi_F^f \sigma_f$$

→ D'autre part, on cherche une équation représentant la quantité à minimiser ou à maximiser (ici la masse du tube). Il s'agit de la **fonction objectif** qui est définie dans cet exemple par la masse de la poutre :

$$m = \rho \cdot A \cdot l$$

Où ρ désigne la densité du matériau, A la section du tube et l sa longueur fixée.

- La section A de la poutre doit être suffisante pour supporter une charge F donnée en flexion telle que :

$$M \leq M_f$$

A la limite, A vérifie alors :

$$M = F \cdot l = M_f = \frac{A^{3/2}}{4\sqrt{\pi}} \phi_F^f \sigma_f$$

Soit :

$$A = \left[\frac{4\sqrt{\pi} \cdot M_f}{\phi_F^f \sigma_f} \right]^{2/3}$$

La fonction objectif se traduit alors par :

$$m = \rho \cdot \left[\frac{4\sqrt{\pi} \cdot F \cdot l}{\phi_F^f \sigma_f} \right]^{2/3} \cdot l$$

On sépare alors les données du problème (F, l) des quantités associées au matériau (σ_f, ρ) et au facteur de forme ϕ_F^f du tube :

$$m = [4\sqrt{\pi} \cdot F \cdot l^3]^{2/3} \cdot \frac{\rho}{[\phi_F^f \sigma_f]^{2/3}} = [4\sqrt{\pi} \cdot F \cdot l^3]^{2/3} \cdot \frac{1}{M_3}$$

→ La masse est alors minimale lorsque l'indice de performance M_3 relatif à la densité / (résistance + facteur de forme) est le plus grand :

$$M_3 = \frac{[\phi_F^f \sigma_f]^{2/3}}{\rho}$$

→ On peut ainsi en déduire le tableau suivant pour différents matériaux :

Matériau	Résistance σ_f (MPa)	Densité ρ (Mg · m ⁻³)	Facteur de forme ϕ_F^f	Indice $\sigma_f^{2/3} / \rho$	Indice M_3^*
Épicéa (Norvège)	70 – 80	0,46 – 0,56	1 – 1,5	36	36 – 50
Bambou	80 – 160	0,6 – 0,8	2,4 – 2,8	(33)	59 – 65
Acier (Reynolds 531)	770 – 990	7,82 – 7,83	7 – 8	12	44 – 48
Al (6061 T6)	240 – 260	2,69 – 2,71	5,5 – 6,3	15	47 – 51
Titane 6-4	930 – 980	4,42 – 4,43	5,5 – 6,3	22	69 – 75
Magnésium AZ 91	160 – 170	1,80 – 1,81	4 – 4,5	17	42 – 46
CFRP	300 – 450	1,5 – 1,6	4 – 4,5	33	83 – 90

* L'intervalle de valeurs de l'indice est basé sur les moyennes des propriétés du matériau et correspond à l'intervalle de valeurs du facteur de forme.

Matériaux envisageables pour la fabrication d'une fourche de vélo [ASH00]

→ Indépendamment de la géométrie (ϕ_F^f), le bambou et l'écicéa sont très performants.

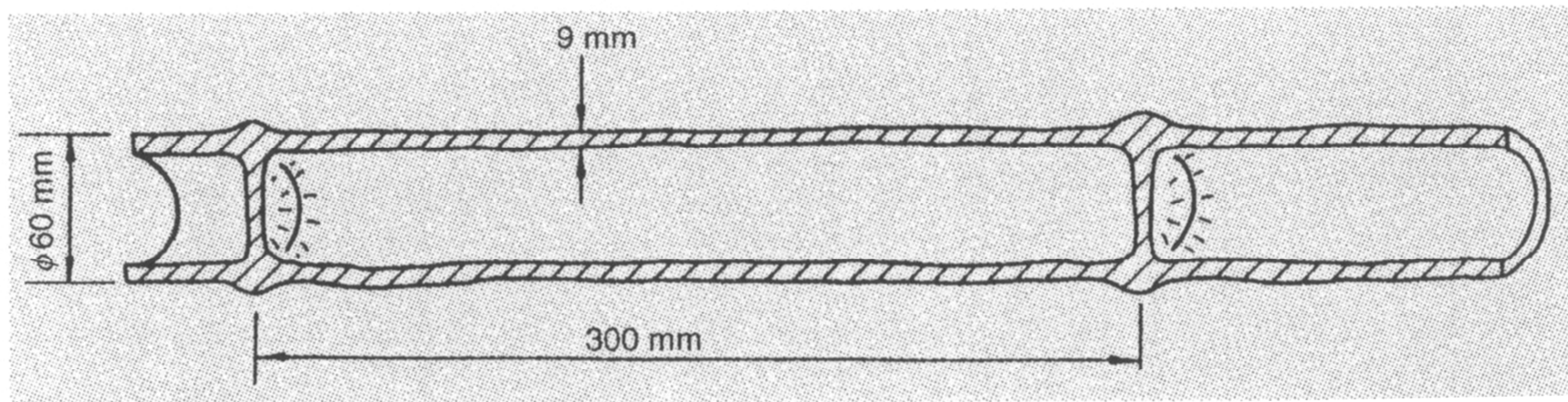


Cadre de vélo en bambou [CAL]



Cadre de vélo en bois

- Quand on prend en compte la géométrie, les plastiques renforcés par des fibres de carbone (CFRP) devancent respectivement le titane, le bambou et l'acier !
- La forme tubulaire du bambou lui confère naturellement de bons facteurs de forme ϕ_F^f et ϕ_F^e (selon un dimensionnement en résistance ou en rigidité) en flexion.
- Il possède également de bons facteurs de forme en torsion.
- Le bambou est ainsi très utilisé ou a été utilisé pour fabriquer des rames, des échafaudages, des cannes à pêche, des bâtiments et des vélos !



Section transversale d'un bambou [ASH00]

3.2 Le bambou – un matériau naturel innovant ?

→ Plante vivace de la famille des graminées dont la croissance est parmi les plus rapides du monde végétal (certaines espèces de bambou peuvent pousser jusqu'à un mètre par jour dans des conditions très favorables).

→ Faible densité (de 0,5 à 0,8 g/cm³) due à la structure du matériau : tiges tubulaires fibreuses avec des nœuds pleins fibreux.

→ Ces nœuds jouent un rôle essentiel dans les propriétés physiques et mécaniques du bambou. La résistance des fibres augmente à partir du nœud jusqu'au centre de la partie inter-nodale et de la périphérie de la paroi jusqu'au centre.

→ Les fibres longitudinales (fibres cellulosiques) procurant au bambou ses remarquables propriétés mécaniques (notamment sa résistance en traction et compression).



(a) Section longitudinale – (b) Section oblique du bambou dans la partie nodale

Propriétés mécaniques du bambou :

→ Le bambou est **10 à 20 fois moins rigide que l'acier** mais sa résistance en traction (ou en compression) est similaire voire supérieure selon l'espèce considérée.

→ Le bambou est 10 à 13 fois plus léger que l'acier (masse volumique = $7,8 \text{ g/cm}^3$)

Propriétés mécaniques (MPa)	Propriétés brutes	
	Bambou	Acier
Rigidité en traction	4000	210000
Résistance en traction	30-76	16
Résistance en compression	6-9	14
Résistance en flexion	8-28	14
Résistance en cisaillement	2	9

Propriétés spécifiques	
Bambou	Acier
8000	27000
60-152	2
12-18	1,8
16-56	1,8
4	1,1

Propriétés mécaniques du bambou vs acier [BAM] : brutes et spécifiques (ramenées à la densité)

→ Aptitude du bambou pour une utilisation en génie civil : possibilité de renforcer le béton par des tiges de bambou en remplacement des armatures en acier (beaucoup plus chères).

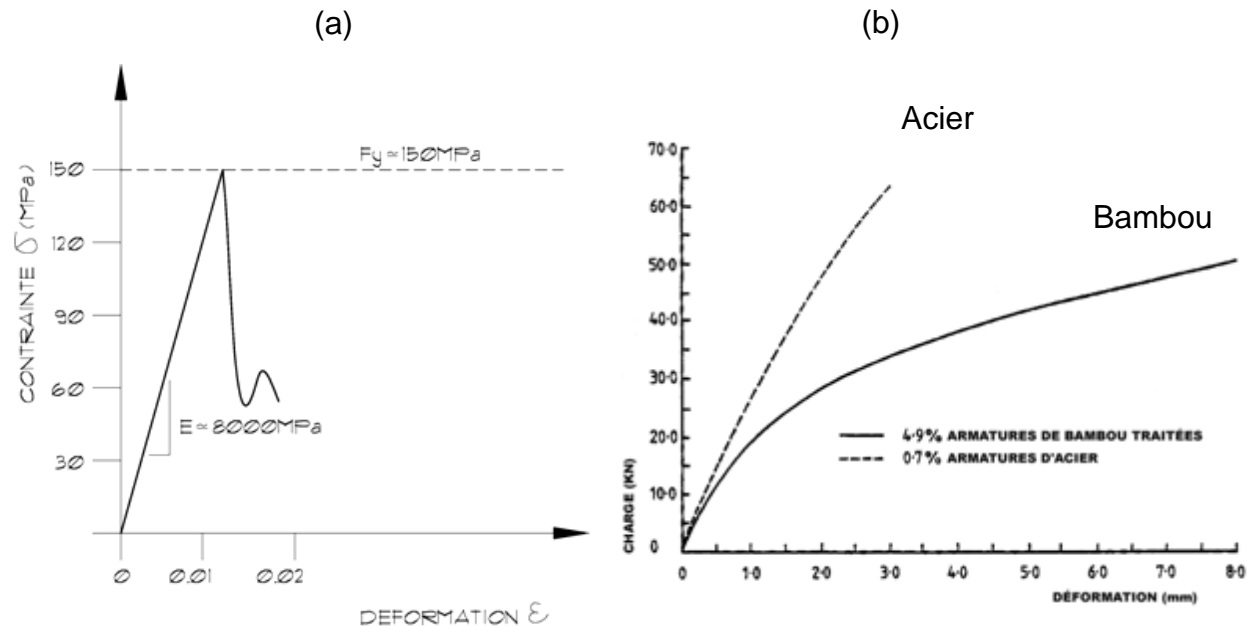
→ Problème d'adhérence entre tiges de bambou et le béton : principale limite.

→ Sollicitation en traction dans le sens des fibres :

limite d'élasticité de 30-80 MPa pour un module d'Young de 4000 MPa.

→ Pour un béton armé, la charge à rupture varie de 60 à 50 kN selon la nature du renfort.

→ Allongement à rupture environ 2,5 fois plus important pour un béton armé de bambou.



Comportement en traction : (a) Courbe contrainte-déformation du bambou - (b) Courbes effort-déplacement pour une poutre en béton renforcée [BOU]

→ Bonne résistance au feu.

→ Matériau à la mise en forme aisée sous étuve : géométries variées avec une excellente stabilité dimensionnelle dans le temps.

4. Quels matériaux pour quelles applications ?

→ L'exemple du bambou illustre bien que le dimensionnement des structures doit se faire sans a priori.

→ Au-delà des critères mécaniques classiques de dimensionnement (rigidité, résistance) pour des applications structures, on peut rechercher d'autres propriétés :

- la ténacité K_c (résistance à la propagation de fissures),
- la dureté H ,
- la capacité d'amortissement η ,
- la tenue en fatigue (limite d'endurance σ_e),
- les propriétés thermiques (conductivité λ : régime permanent, diffusivité a : régime transitoire, coefficient de dilatation α , températures caractéristiques : T_f ou T_g , résistance au fluage),
- les propriétés électriques (conductivité σ),
- la tenue à l'usure, à l'oxydation ou à la corrosion

→ Nous allons maintenant présenter le (ou les) comportements mécaniques spécifiques aux différentes classes de matériaux (céramiques, alliages métalliques, polymères et élastomères) et à quelques matériaux singuliers (Matériaux cellulaires, matériaux intelligents : Alliages à Mémoire de Forme – Céramiques piézoélectrique, matériaux composites).

4.1 Les céramiques et les minéraux

→ Représentent les matériaux inorganiques (synonyme de minéral en chimie) dont le comportement, bien que fragile, ne les a pas exclu des applications structures (construction antiques : Pyramides de Gizeh, Muraille de Chine...).

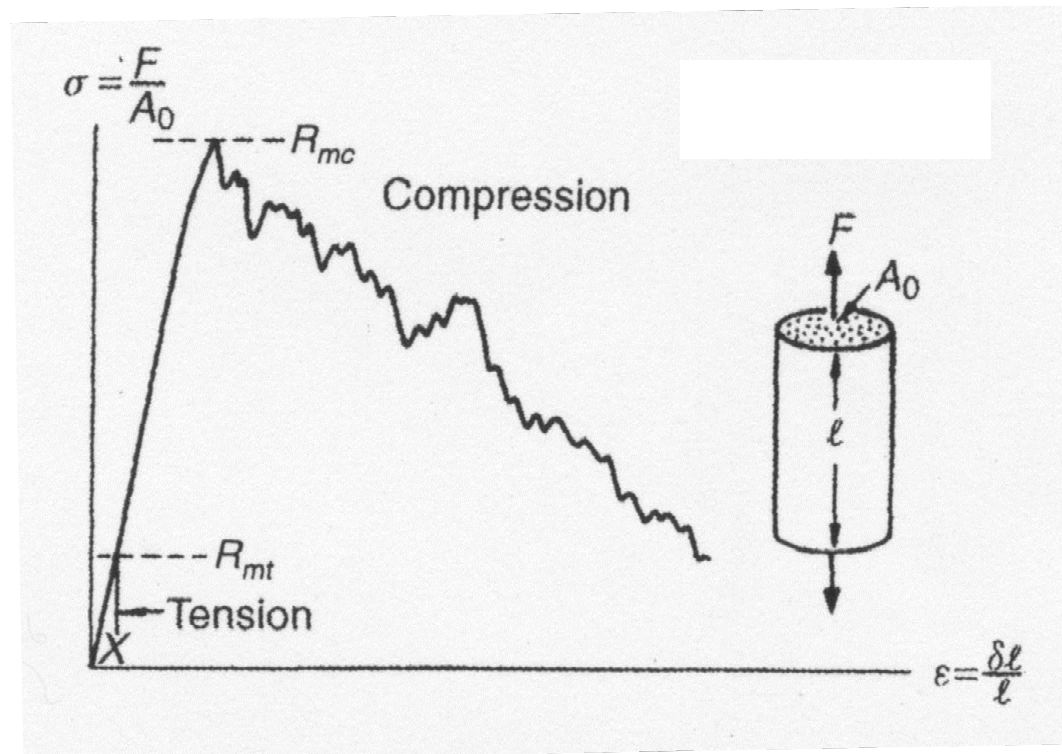
→ Le terme « céramique » regroupe de nombreux matériaux :

- céramiques traditionnelles (calcaire, granit, grès, glace),
- oxydes purs,
- verres,
- carbures et nitrures,
- ciments et bétons,
- matériaux à base de carbone (diamant).

→ Inconvénient par rapport aux alliages métalliques notamment : très faible ténacité (résistance à la propagation de la rupture)

→ Qualités avérées de dureté, rigidité, résistance à l'usure, à la corrosion, à la dégradation thermique ou encore à l'endommagement.

→ Comportement mécanique élastique-fragile en traction et élastique-quasi fragile en compression.



Courbe contrainte-déformation caractéristique en traction-compression d'une céramique

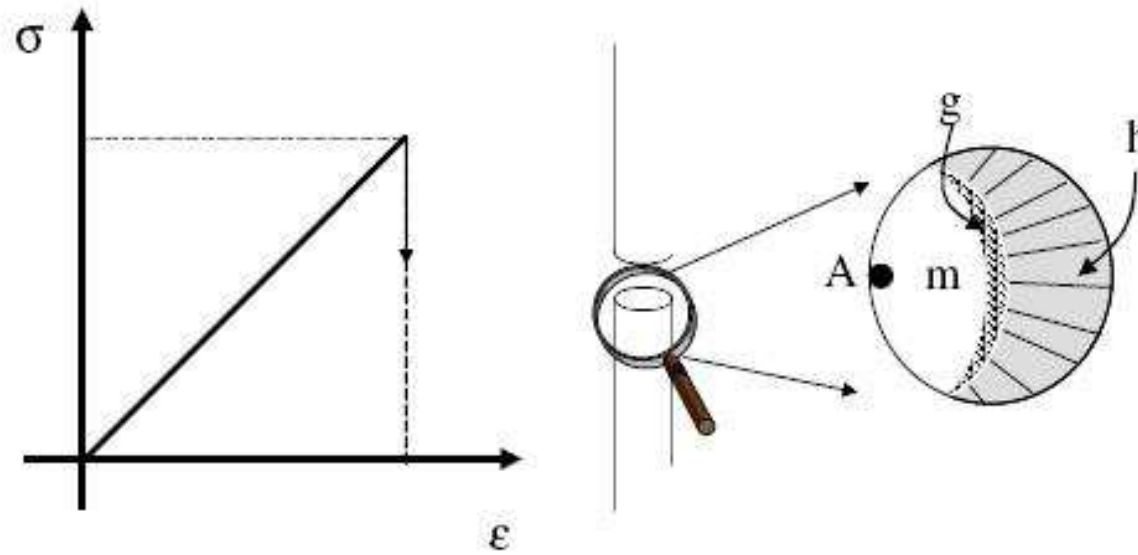
→ Les qualités mécaniques de ces matériaux s'expriment pleinement en compression ou lorsqu'ils sont associés à des matériaux plus ductiles tels que les métaux ou les polymères.

→ On trouve ainsi des composites à matrice céramique renforcés par des métaux et plus couramment des polymères renforcés par des fibres de verre : la fibre (module d'Young élevé) qui procure la rigidité au composite.

→ Les céramiques et minéraux présentent ainsi un module spécifique très élevé par rapport aux autres classes de matériaux.

Matériau	E [Gpa]	ρ [SD]	E/ ρ [Gpa]
Aciers	210	1.8	27
Alliages Aluminium	70	2.7	26
Alumine	390	3.9	100
Silice	69	2.6	27
Ciment	45	2.4	19

Modules d'Young et densités de céramiques et métaux



Comportement fragile du verre en traction – surface de rupture [FLA]

A : amorce – g : zone « grenue »- h : inégalité de surface, rayonnement (hackle : fracture en lancettes)

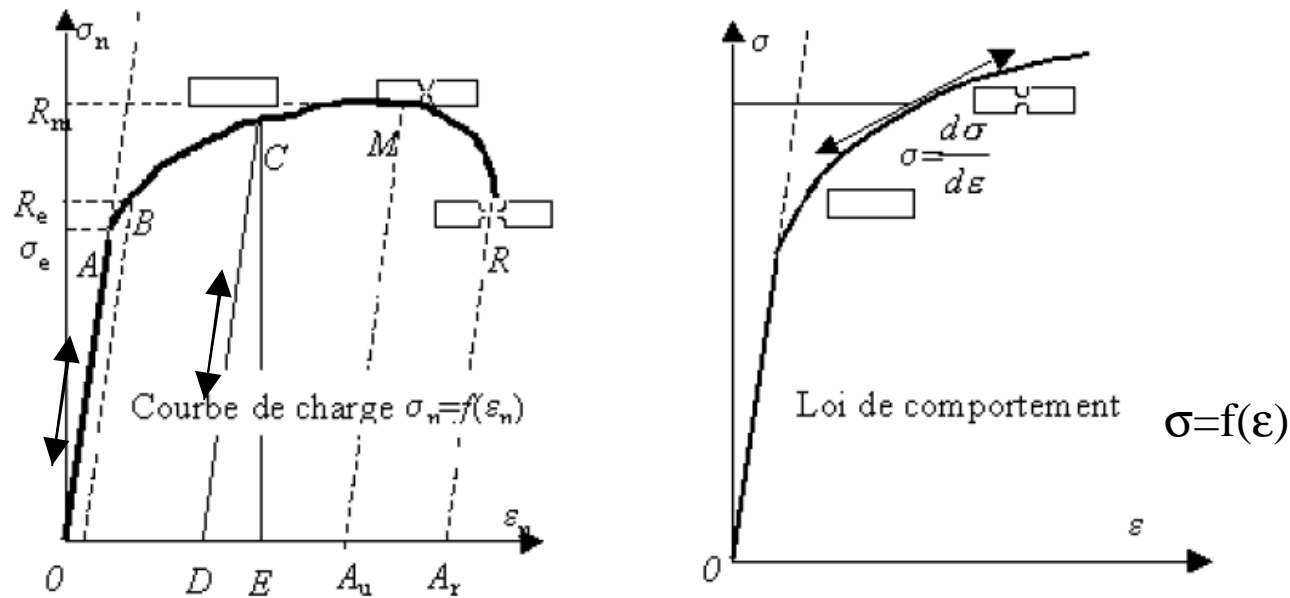
4.2 Les alliages métalliques

Les métaux et les alliages métalliques présentent une grande variété de comportements mécaniques selon :

- leur composition,
- leur mode d'élaboration,
- le chargement thermomécanique auquel ils sont soumis.

→ Généralement, leur comportement présente un domaine élastique suivi d'un domaine d'écoulement plastique.

→ Courbe de traction caractéristique d'un alliage métallique dont le comportement est ductile :



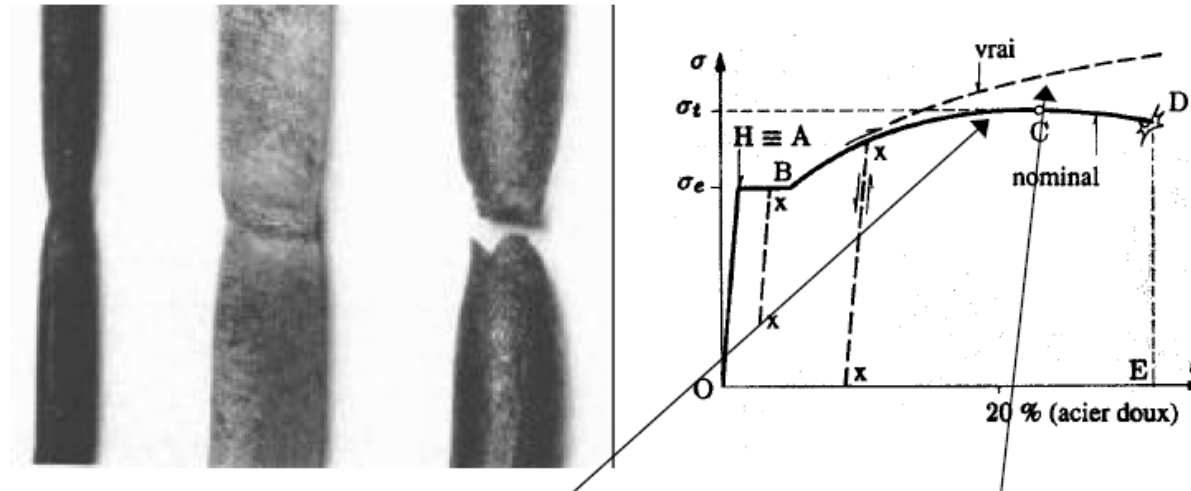
Comportement mécanique caractéristique en traction d'un alliage métallique :
(a) Contrainte-déformation nominales – (b) Contrainte-déformation vraies

→ Différentes zones :

- Entre O et B : domaine caractérisé par le module d'élasticité (module d'Young E : pente de la courbe). Le comportement est élastique linéaire et réversible.
- En A : Limite d'élasticité σ_e (en MPa).
- En B : Limite apparente d'élasticité R_e (en MPa).
- Au-delà de B : déformation plastique permanente mise en évidence par une décharge partielle CD.
- Entre B et M : écoulement plastique lors duquel l'éprouvette s'allonge jusqu'à l'allongement plastique ultime A_u correspondant à la résistance ultime en traction R_m .
 - La déformation plastique reste alors uniforme sur la longueur de l'éprouvette.
 - **Phénomène d'écrouissage** (durcissement = augmentation de la limite d'élasticité) : domaine de plasticité utilisable pour la mise en forme (emboutissage par ex.).
 - Suivant les alliages métalliques, les déformations atteignent plusieurs dizaines de %.

→ Pour ce niveau de déformation, on utilise non plus la contrainte et la déformation nominales mais la contrainte et la déformation vraies :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} (1 + e) \text{ et } \varepsilon = \ln(1 + e) \text{ avec } e = \frac{\Delta L}{L_0}$$



Contrainte nominale :

$$\sigma_n = \frac{F}{S_0}$$

S_0 section initiale

Contrainte vraie :

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

S section réelle

Phénomène de striction – Contraintes nominale et vraie [MSM, Univ. Liège]

- Au-delà de M : phénomène de striction correspondant à un écoulement plastique instable qui conduit à la rupture en R.

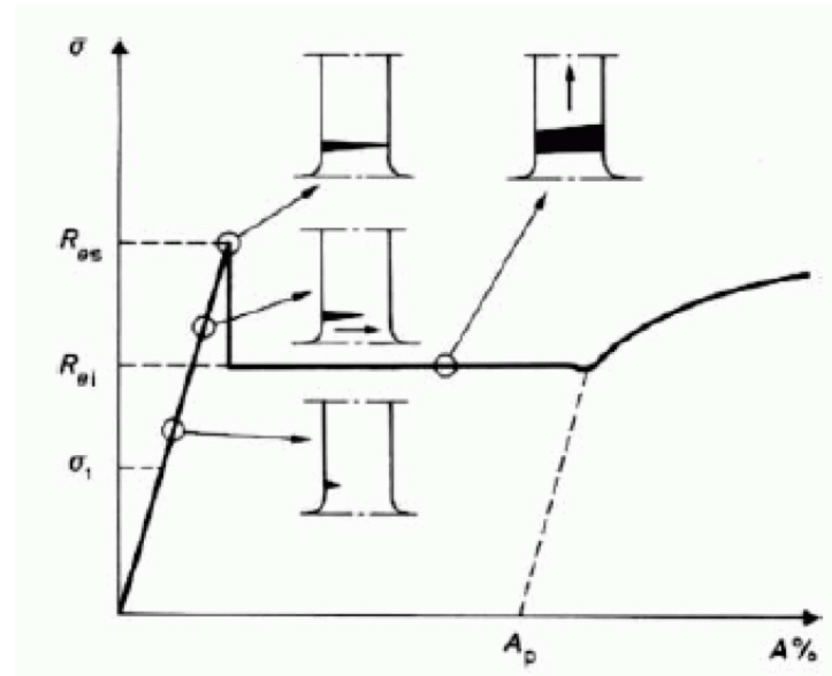
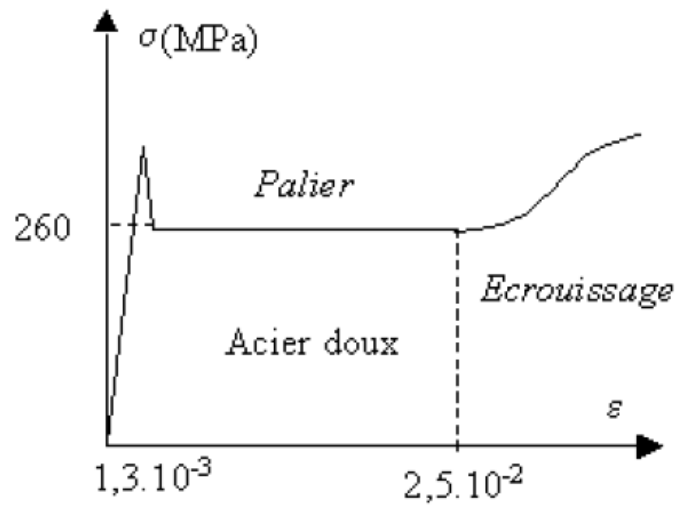
→ A_r : allongement à la rupture.

→ **Dans le domaine MR**, toutes les sections de l'éprouvette ne se déforment pas de la même manière de sorte que l'on observe la diminution de la section droite au milieu de l'éprouvette à l'origine de la rupture : **c'est la striction**

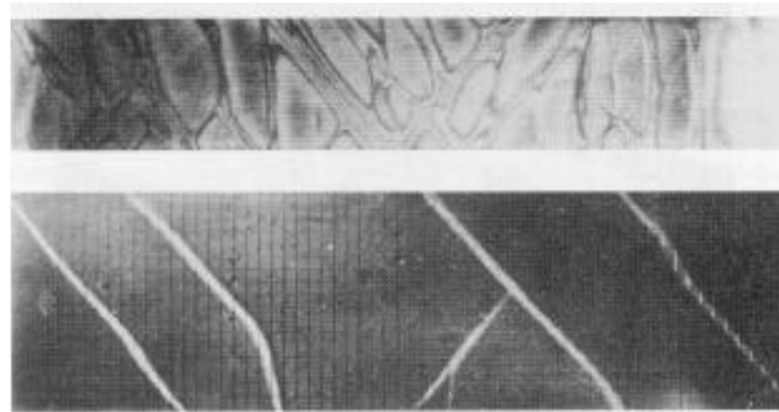
→ Les alliages métalliques peuvent également présenter un **comportement adoucissant** : le comportement élastique est suivi non pas d'un durcissement (écrouissage) mais d'un adoucissement encore appelé **palier plastique**.

→ Dans les **aciers doux**, il y a localisation des déformations par formation d'une succession de bandes étroites (**appelées bandes de Lüders**).

- déformation hétérogène dans l'éprouvette,
- déformation homogène quand toutes les bandes ont balayé l'éprouvette (extrémité du palier plastique).



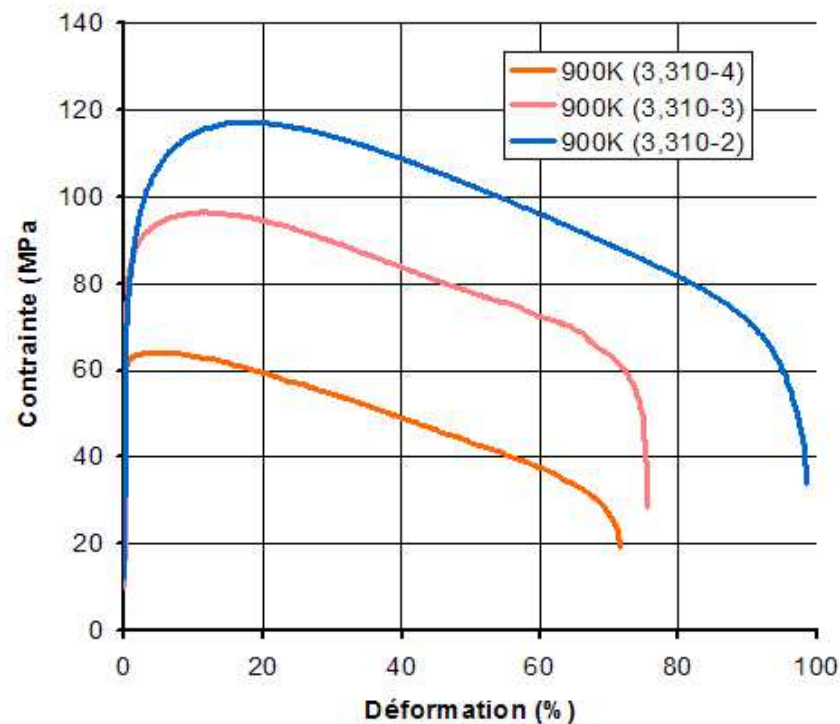
Comportement adoucissant des aciers doux [ENSMP]



Les lignes de Lüders traduisent la présence des plans de glissement [MSM, Univ. Liège]

→ Le comportement des alliages métalliques peut également être sensible à la vitesse de déformation.

→ Pour **différentes vitesses de déformation** à une température donnée ($T=900K$), on observe différentes courbes réponses en traction qui illustrent le **comportement élasto-viscoplastique** du matériau.



Comportement élasto-viscoplastique d'un alliage de cuivre (Narloy-Z) utilisé par SNECMA Moteurs pour ses bonnes propriétés mécaniques à haute température dans le cadre du moteur Vulcain II d'Ariane 5

4.3 Les polymères et élastomères

On distingue trois grandes classes de matériaux organiques, encore appelés polymères ou élastomères, dont le comportement mécanique est différent. Ils sont constitués de **macromolécules**.

→ Le terme macromolécule, désignant de grandes molécules, est souvent utilisé pour désigner un enchaînement de monomères.

→ Un monomère est une molécule composée principalement de carbone et d'hydrogène.

→ Un polymère peut être défini comme un enchaînement d'unités structurales répétitives.

→ La polymérisation désigne une réaction chimique, fonction du temps et de la température, conduisant à la solidification de la résine de manière irréversible.

→ L'assemblage ou l'enchaînement des monomères détermine pratiquement toutes les propriétés mécaniques et physiques du plastique résultant ainsi que les procédés de mise en forme (combinaison chauffage/pression) en produit industriel :

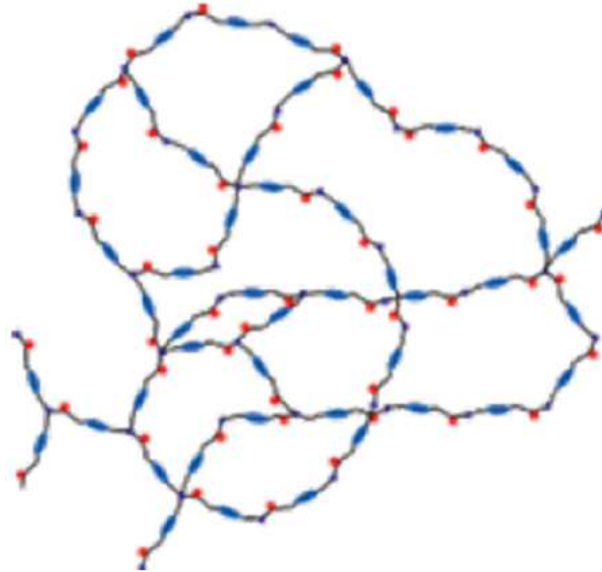
- Les thermodurcissables présentent une structure tridimensionnelle. La polymérisation induit un pontage des macromolécules et cette structure se solidifie de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée.

→ Pour le matériau obtenu après mise en œuvre, les liaisons entre macromolécules sont des liaisons chimiques fortes : **cette transformation est irréversible.**

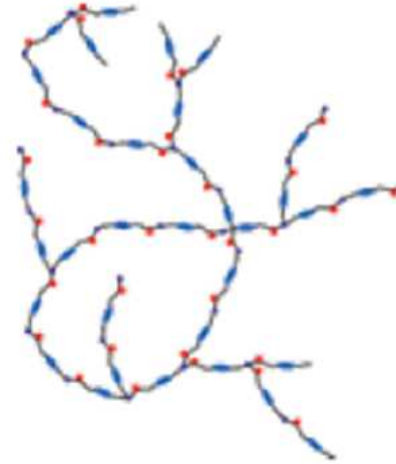
- Les thermoplastiques présentent une structure linéaire (ou légèrement ramifiée) enchevêtrée qui ne résulte pas d'une polymérisation. Lors de la mise en forme par chauffage, les macromolécules se replient puis se bloquent au cours d'un refroidissement d'où une solidification.

→ Pour le matériau obtenu après mise en œuvre, les liaisons entre macromolécules sont des liaisons physiques faibles de type Van Der Waals : **cette transformation est réversible.**

(a) Structure réticulée



(b) Structure ramifiée



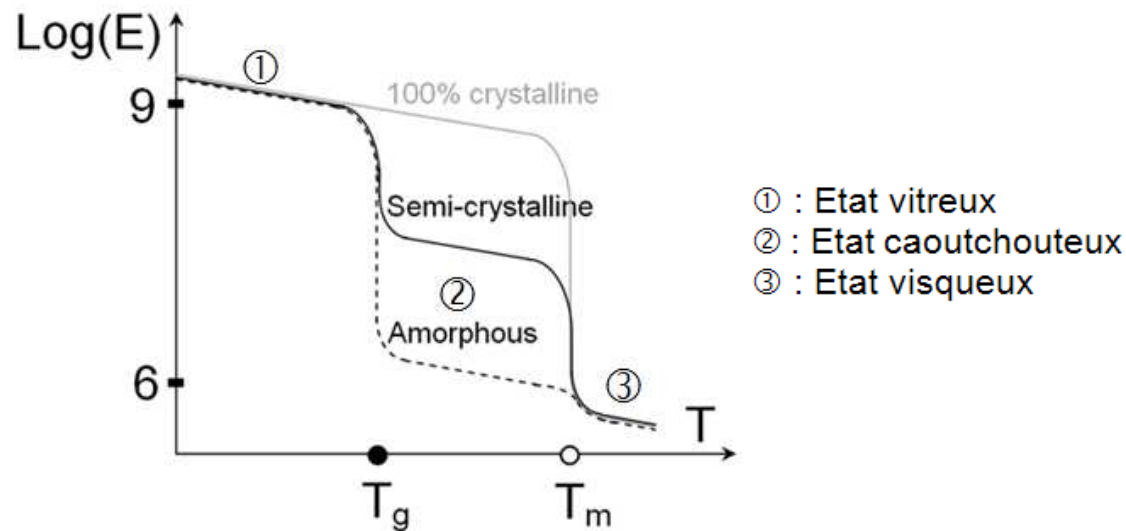
Différents types de polymères : (a) thermodurcissable – (b) thermoplastique

→ On distingue également les polymères selon leur degré de cristallinité (phase cristalline) : polymères amorphes ou semi-cristallins.

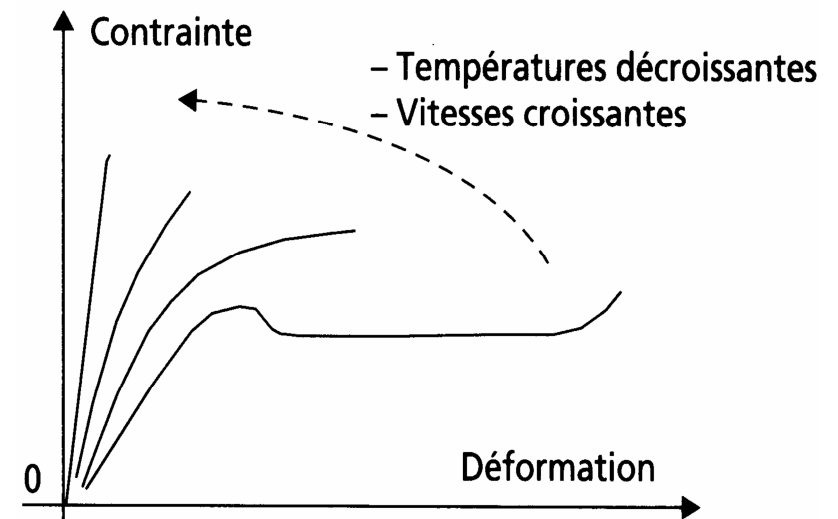
→ Selon le type de polymère (amorphe ou semi-cristallin), on distingue une ou deux températures qui sont des propriétés physiques des polymères :

- la température de transition vitreuse T_g ,
- la température de fusion T_m .

→ Ces températures permettent de connaître l'état du matériau à une température donnée et conditionnent le comportement mécanique des polymères :

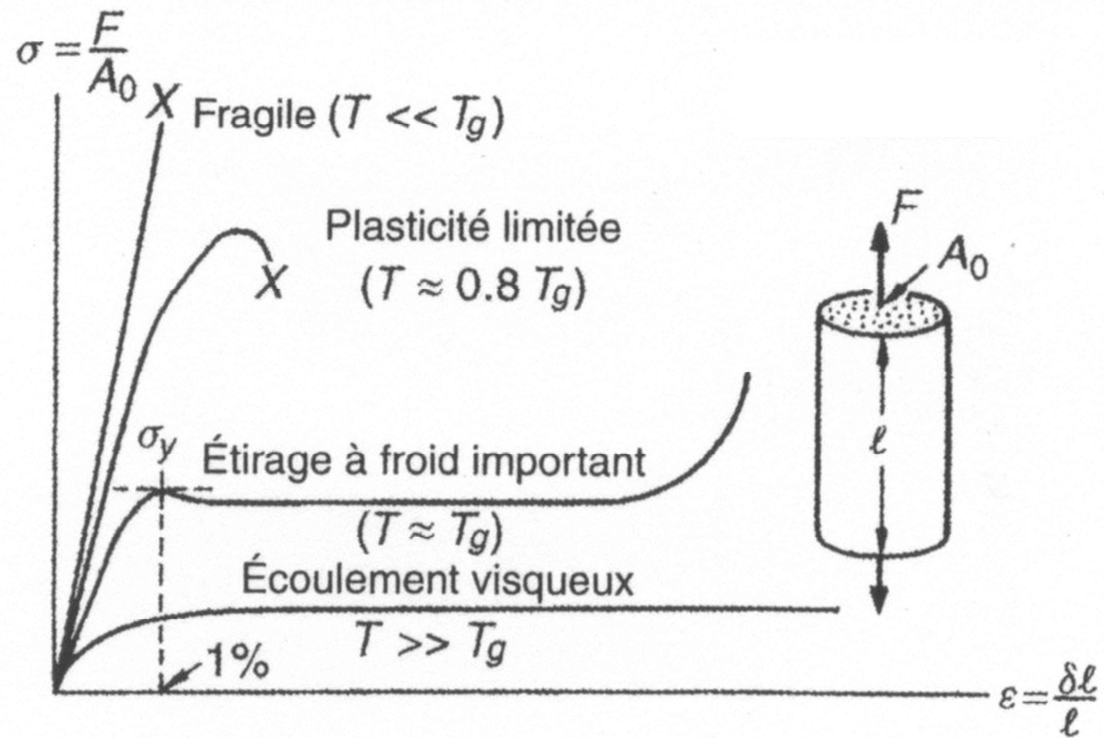


Evolution du module d'Young en fonction de la température et du taux de cristallinité

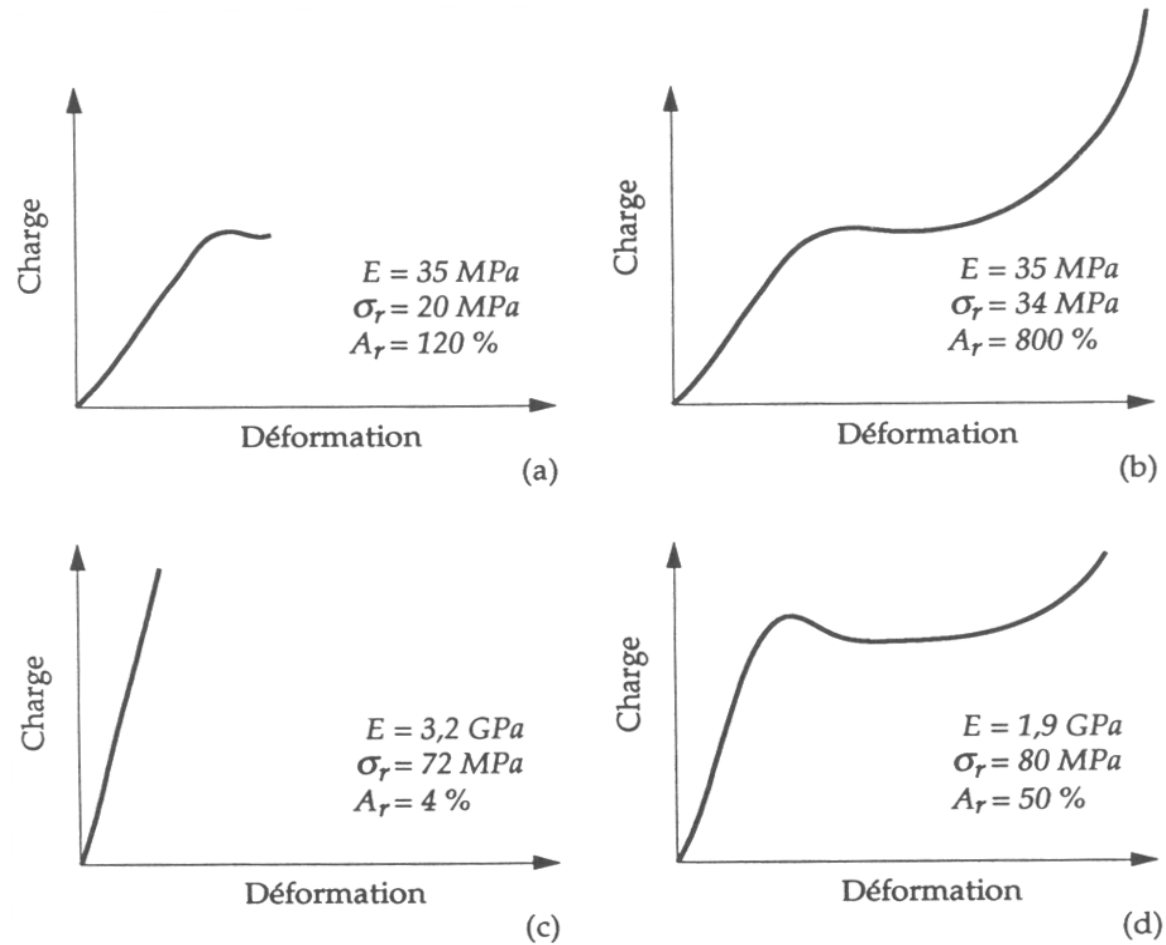


Mise en évidence du comportement viscoplastique des polymères [DUP02]

→ Influence de la température sur le comportement des polymères :

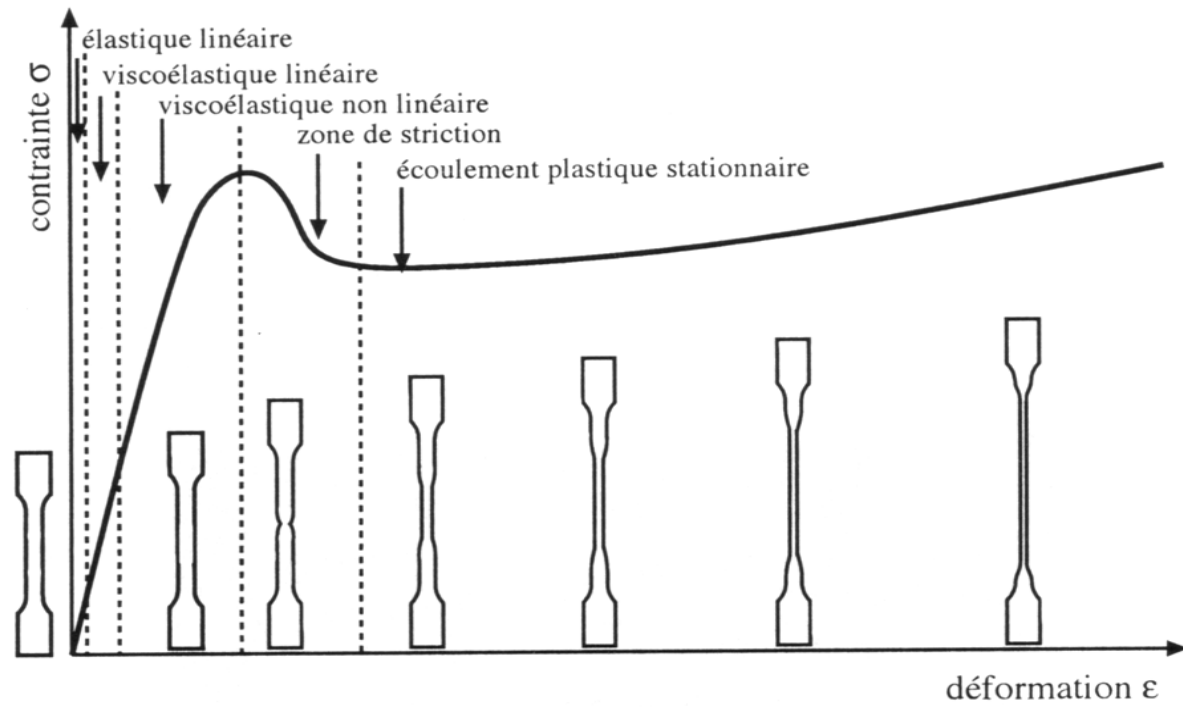


Courbes contrainte-déformation en traction d'un polymère à différentes températures par rapport à T_g



Courbes charge -déformation pour différents polymères [EHR00] :

- (a) souple et peu résistant*
- (b) souple et ductile*
- (c) rigide et fragile*
- (d) rigide et ductile*

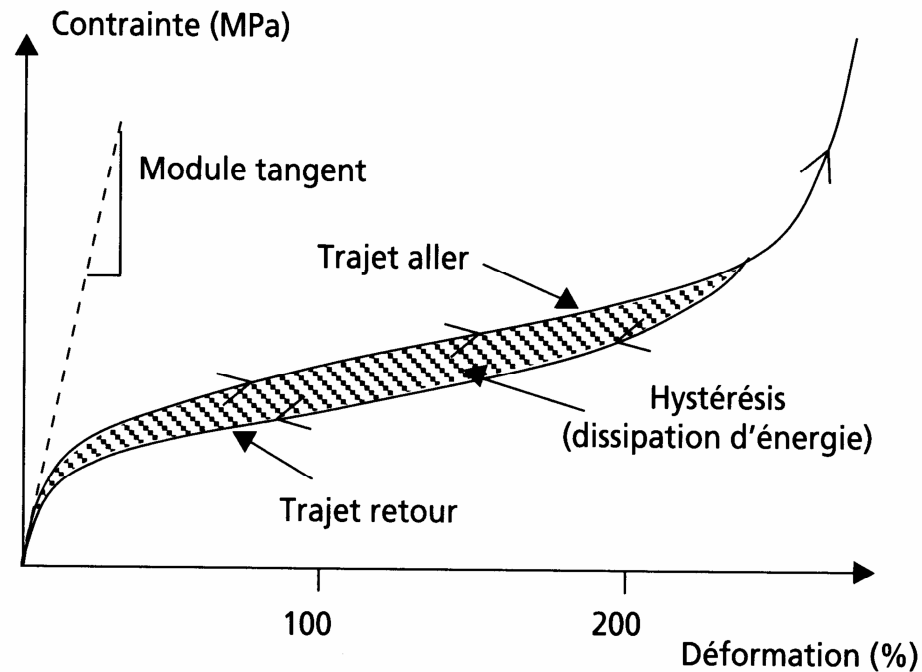


Réponse caractéristique en traction d'un polymère thermoplastique semi-cristallin et évolution de la forme de l'éprouvette [OUD94]

Les élastomères :

Les élastomères sont une classe de polymères obtenus à partir de la réticulation (pontage) des macromolécules. On parle alors de vulcanisation (caoutchouc).

Ils présentent présente la particularité d'une déformation élastique de grande amplitude non-linéaire. Ce comportement élastique permet de définir seulement un module tangent à l'origine comme module d'élasticité.



Courbe de traction caractéristique d'un élastomère

- La décharge est caractérisée par un retour élastique qui donne lieu à un hystérésis en contrainte.
- Hystérésis = dissipation d'énergie mécanique sous forme de chaleur du fait de la friction des macromolécules lors de leurs mouvements relatifs. Phénomène prononcé pour les élastomères en raison de leur amplitude de déformation importante.
- Comportement caractéristique pour les polymères dès lors qu'ils sont sollicités au-delà de leur température de transition vitreuse.
- Ce comportement hystérétique en contrainte justifie leur utilisation pour des applications d'amortissement afin d'absorber les vibrations.
- On qualifie souvent ce type de comportement élastique comme « superélastique ». Les Alliages à Mémoire de Forme (introduits par la suite) présentent également ce comportement.

4.4 Les matériaux composites renforcés

Matériau composite ?

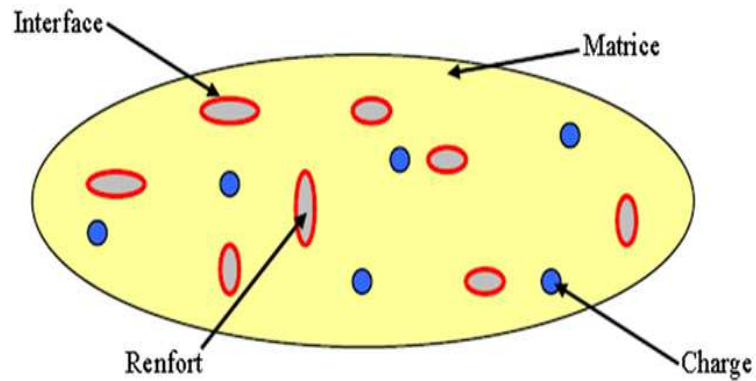
→ Définition : matériau solide et hétérogène, formé de plusieurs composants distincts, dont l'association confère à l'ensemble des propriétés qu'aucun des composants considéré ne possède séparément.

→ Association d'au moins deux composants : **renfort et matrice**, qui doivent être compatibles entre eux pour se solidariser.

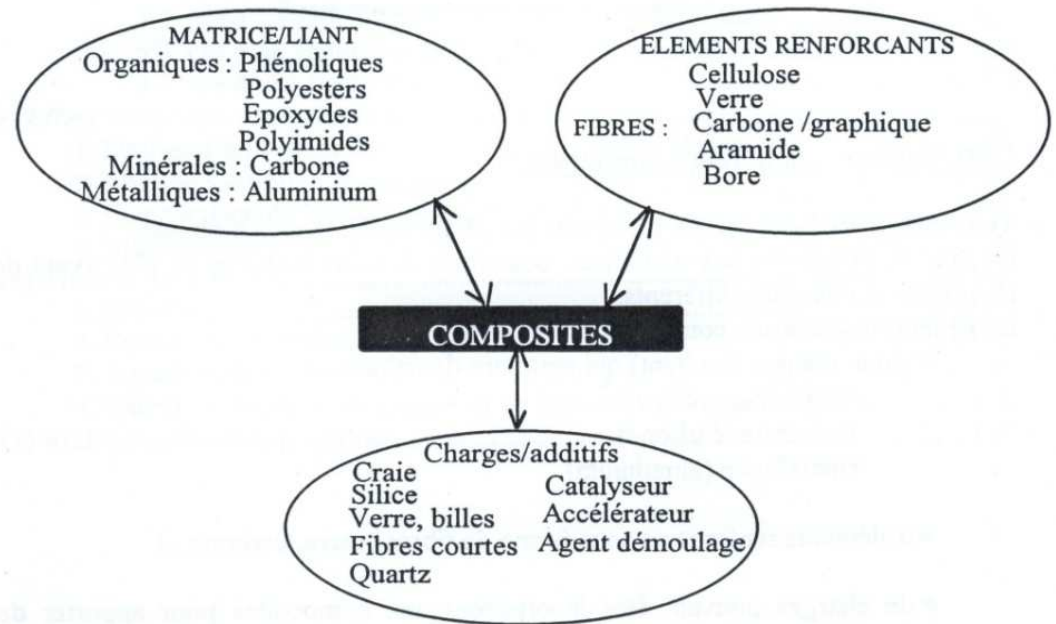
→ D'autres éléments sont nécessaires :

- agent de liaison (appelé interface) pour faciliter l'adhésion du renfort avec la matrice
- charges et additifs sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide,

⇒ modifier une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par ex. tenue aux chocs, résistance aux UV, résistance au feu...).



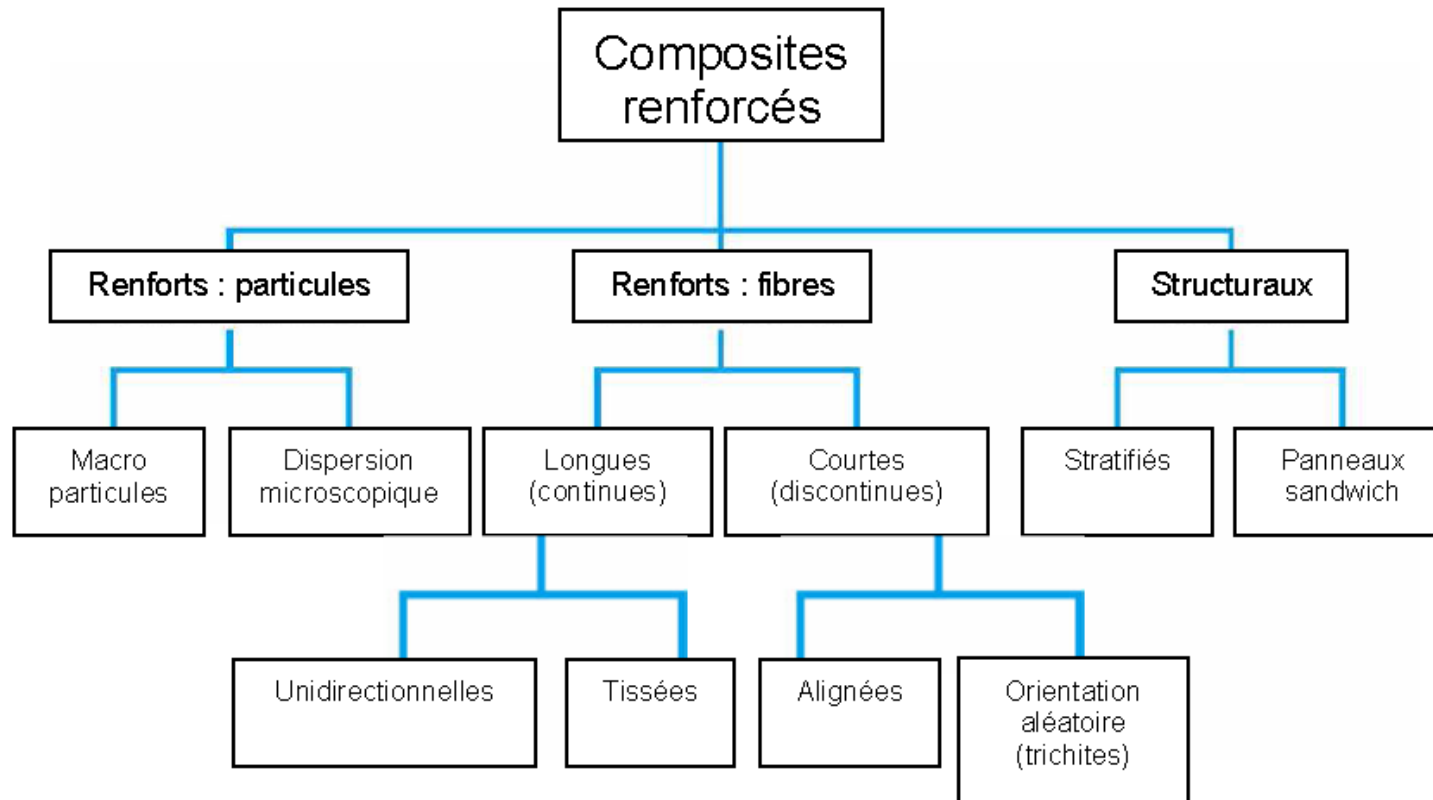
Représentation schématique d'un matériau composite [CAR05]



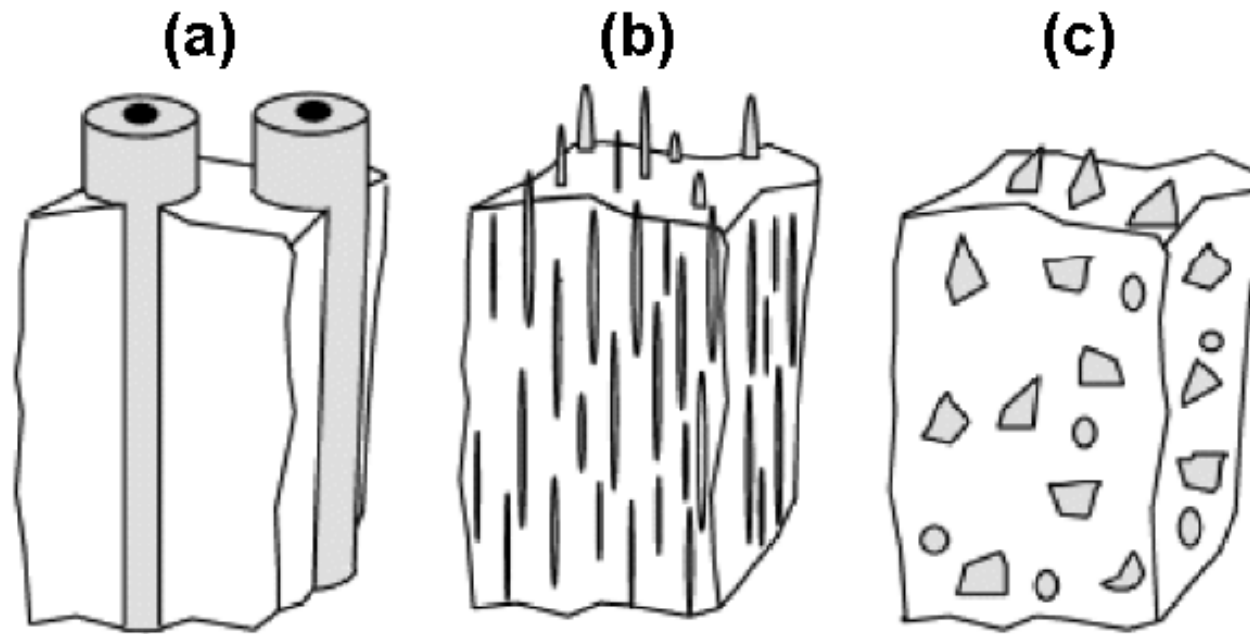
Les composites = des multi-matériaux

→ Les matériaux composites renforcés sont des matériaux au comportement fortement anisotrope.

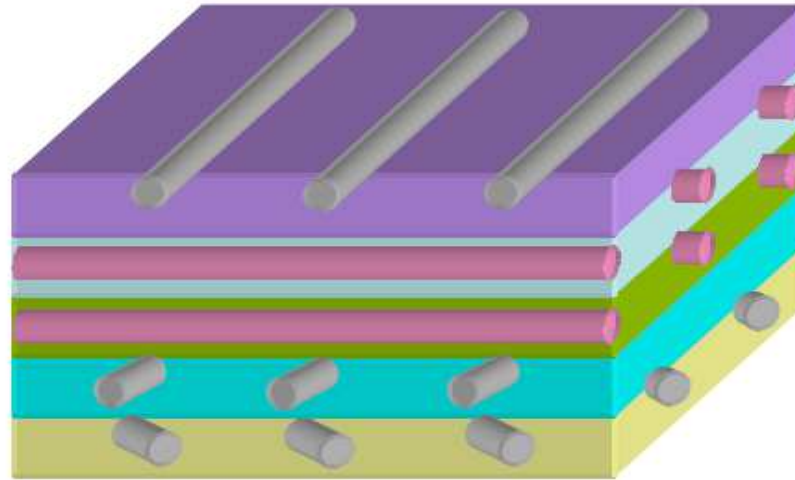
→ Ils sont constitués d'une matrice (polymère, métallique, céramique) et d'un renfort fibreux (fibre de carbone, de verre, de chanvre, métallique, céramique) dont l'orientation dépend de l'état de contraintes thermomécaniques appliqué à la structure.



Architecture du renfort dans les composites renforcés [JAN]



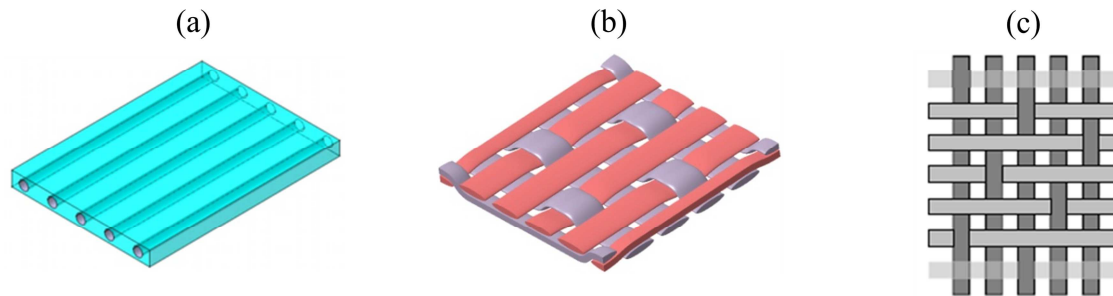
Composites renforcés : (a) fibres longues unidirectionnelles – (b) fibres courtes ou trichites – (c) particules



Représentation schématique d'un matériau composite stratifié [CAR]

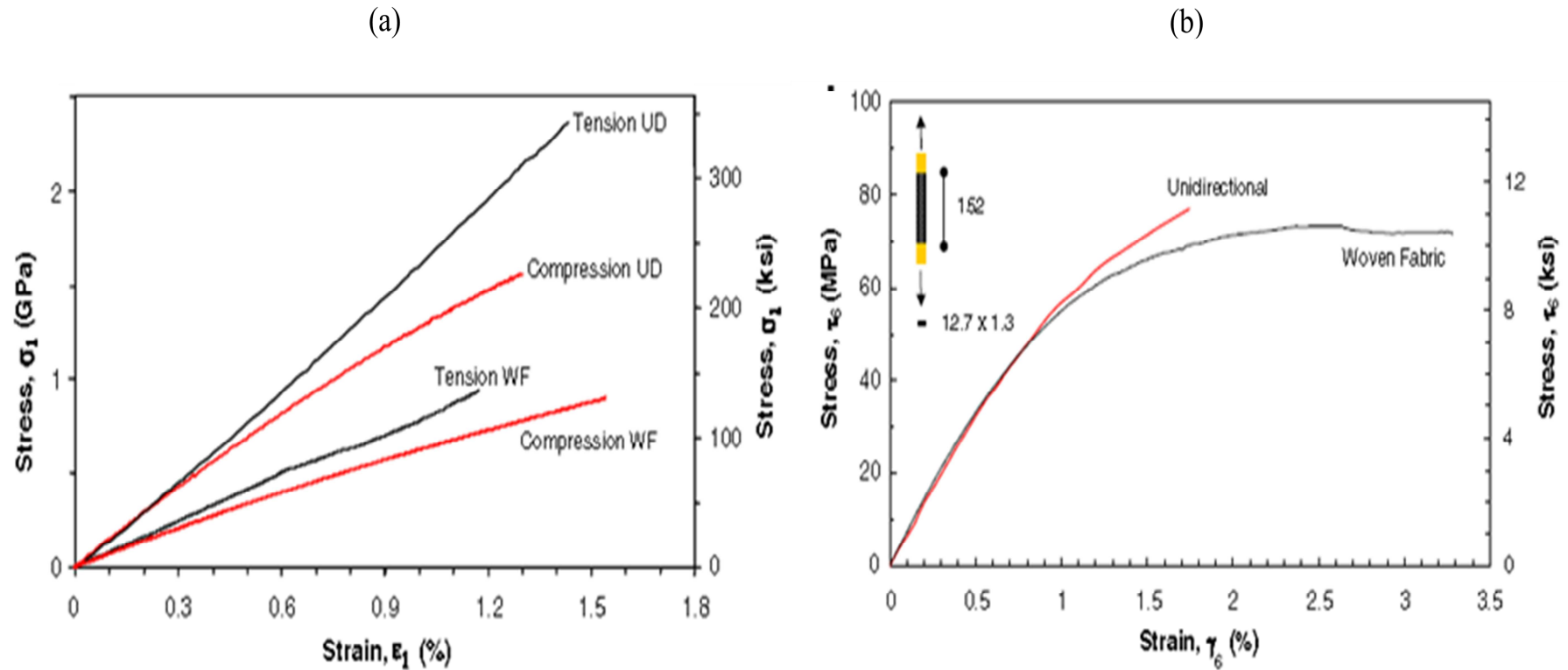
→ Intérêt : possibilité de réaliser un matériau « sur-mesure ».

→ Dans les composites stratifiés, le renfort peut présenter une architecture unidirectionnelle (UD) ou tissée :



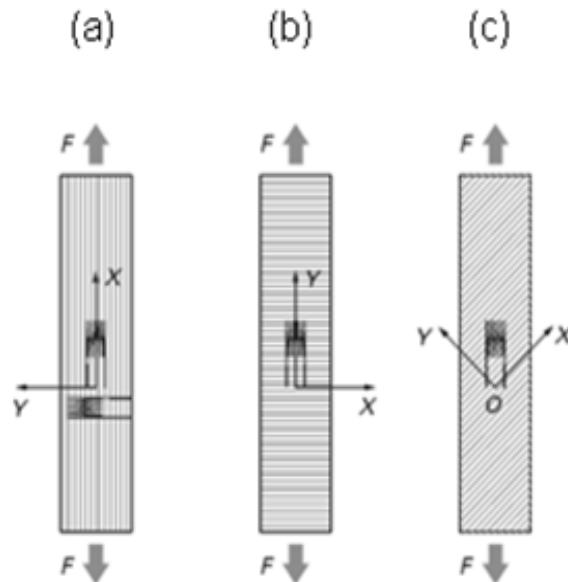
(a) Stratifié à plis UD – (b) Architecture d'un pli tissé (Sens chaîne et trame) – (c) Tissu satin de 5

→ Ces spécificités (nature des constituants, architecture, orientation des renforts) confèrent aux matériaux composites une grande diversité de comportements mécaniques.



*Courbes contrainte-déformation de stratifiés carbone/époxy à plis UD ou à plis tissés [DAN08] :
(a) Traction/compression – (b) Cisaillement plan*

→ On peut accéder aux propriétés mécaniques des composites en réalisant plusieurs essais élémentaires : traction/compression – flexion

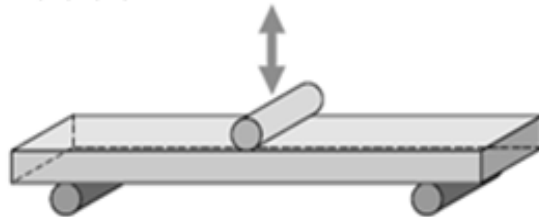


(a) essai de traction sens longitudinal
→ E_{xx} et $\nu_{xy} - \sigma_x$

(b) essai de traction sens transversal
→ $E_{yy} - \sigma_y$

(c) essai de traction hors axes
→ $G_{xy} - \sigma_{xy}$

(d)-(e)

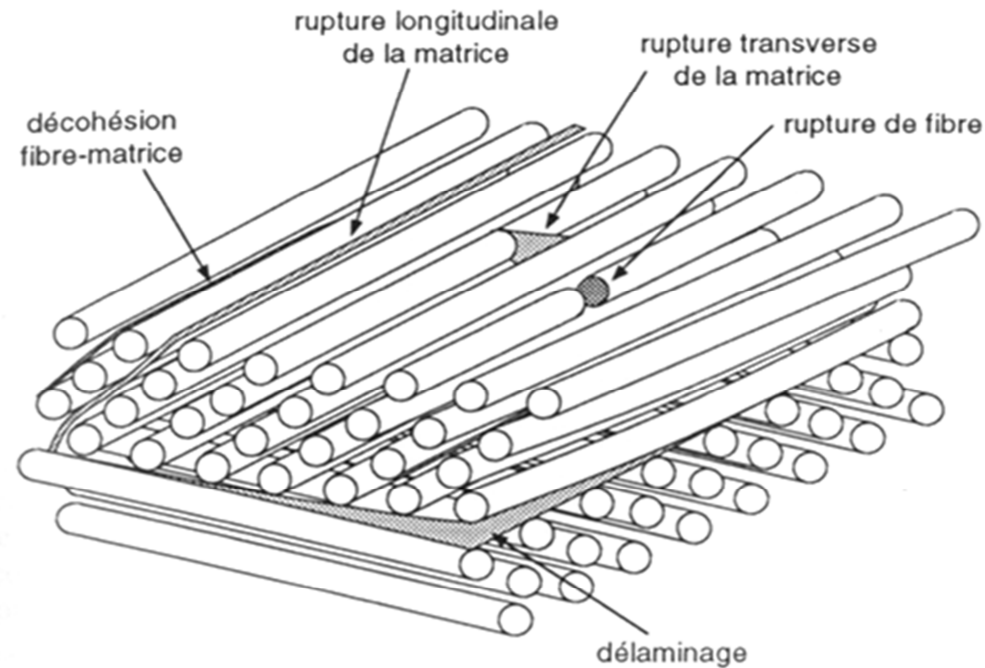


(d) essai de flexion sens longitudinal
→ $G_{xz} - \sigma_{xz}$

(e) essai de flexion sens transversal
→ $G_{yz} - \sigma_{yz}$

Détermination des propriétés mécaniques d'un composite stratifié [BAR]

→ Les mécanismes d'endommagement des matériaux composites sont complexes : rupture longitudinale ou transverse de la matrice, décohésion fibre/matrice, rupture de fibre et délaminage (fissuration interplis).

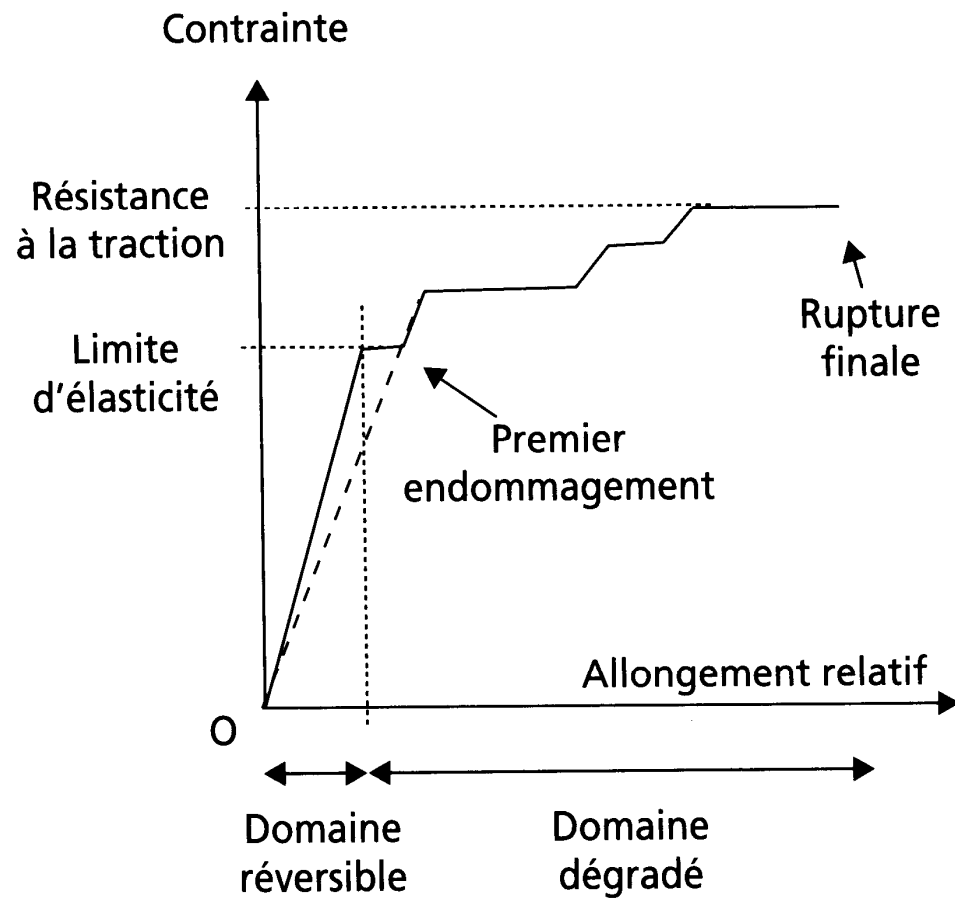


Représentation schématique des principaux mécanismes d'endommagement dans les stratifiés UD [BER05]

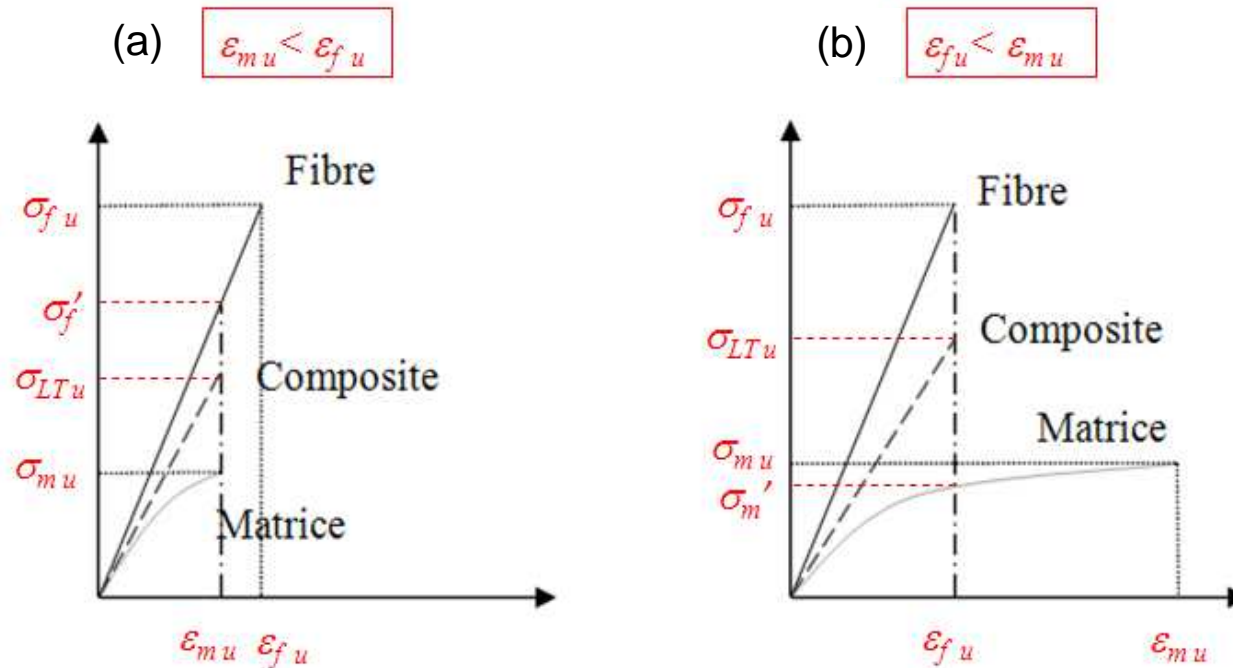
→ La résistance et la ductilité d'un composite sont conditionnées par ces mécanismes de rupture.

→ Lorsque l'endommagement s'initie par l'un de ces mécanismes, la rigidité de l'éprouvette diminue.

→ Lors du chargement, l'endommagement se généralise ce qui se traduit par une perte de rigidité du matériau jusqu'à sa rupture finale (généralement sans striction et de manière fragile).



Représentation schématique de la réponse en traction d'un matériau composite à matrice organique thermoplastique



Réponses mécaniques en traction d'un composite UD renforcé de fibres sollicité dans le sens des fibres :

(a) $\varepsilon_{mu} < \varepsilon_{fu}$ – (b) $\varepsilon_{fu} < \varepsilon_{mu}$

→ La rigidité longitudinale E_{LT}^u , la contrainte à rupture σ_{LT}^u et le coefficient de Poisson ν_{LT} du matériau composite peuvent alors être estimés par une loi des mélanges :

$$\begin{cases} E_{LT} = v_f \cdot E_f + (1 - v_f) \cdot E_m \\ \sigma_{LT}^u = v_f \cdot \sigma_f^u + (1 - v_f) \cdot \sigma_m' \\ \nu_{LT} = v_f \cdot \nu_f + (1 - v_f) \cdot \nu_m \end{cases}$$

Où v_f est la fraction volumique de fibres et $v_m = 1 - v_f$ est la fraction volumique de matrice

4.5 Les matériaux cellulaires

Couramment répandus dans la nature (os, bois, liège...), ces matériaux présentent une porosité (i.e. des cellules vides) excédant 70% du volume.

Ils se distinguent par une faible densité et des propriétés spécifiques élevées.

Des matériaux cellulaires artificiels peuvent être obtenus à partir de polymères, céramiques, métaux, semi-conducteurs ou des matériaux composites.

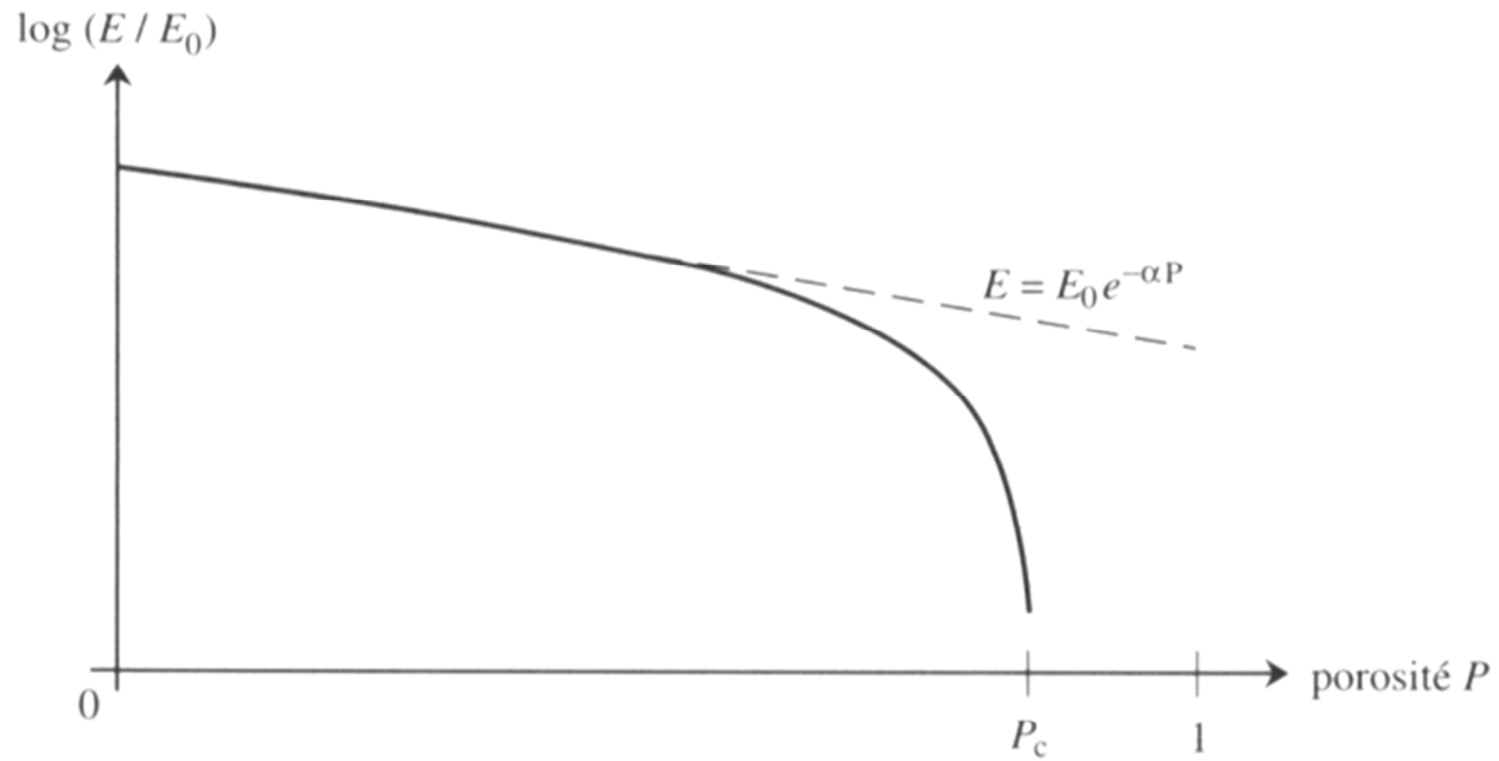
Les matériaux cellulaires sont des matériaux hétérogènes présentant des porosités qui vont être le siège de concentrations de contraintes lors de la sollicitation mécanique.

Les principaux paramètres caractéristiques d'un matériau cellulaire sont :

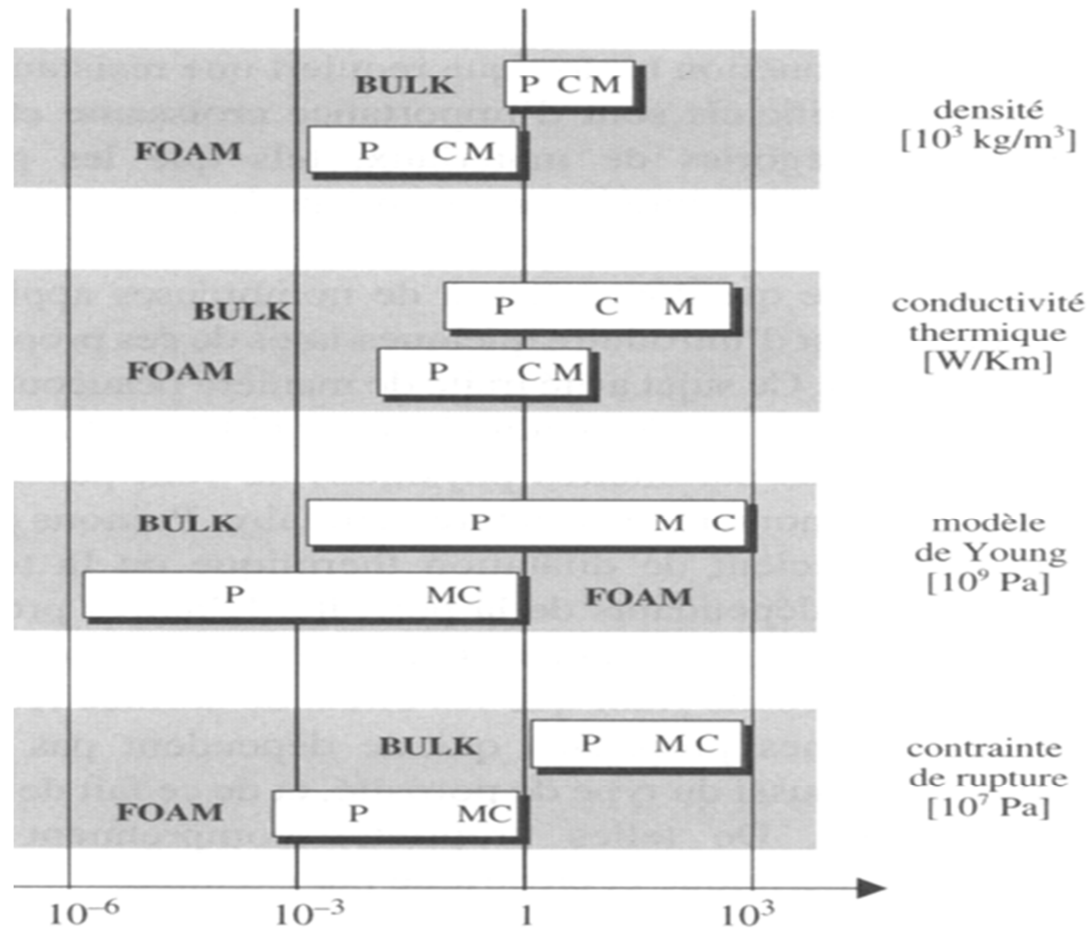
- Sa densité relative $f = \rho^* / \rho$, rapport entre la masse volumique apparente du matériau cellulaire ρ^* et celle du matériau constitutif des parois à l'état massif ρ .
- Sa porosité P définie comme le rapport du volume des pores par rapport au volume total du matériau.

→ Une très grande porosité influence de manière significative certaines de leurs propriétés physiques, modifications à l'origine d'applications innovantes [GIB].

→ La structure cristalline, le coefficient de dilatation thermique, la température de fusion ne dépendent pas de la porosité.

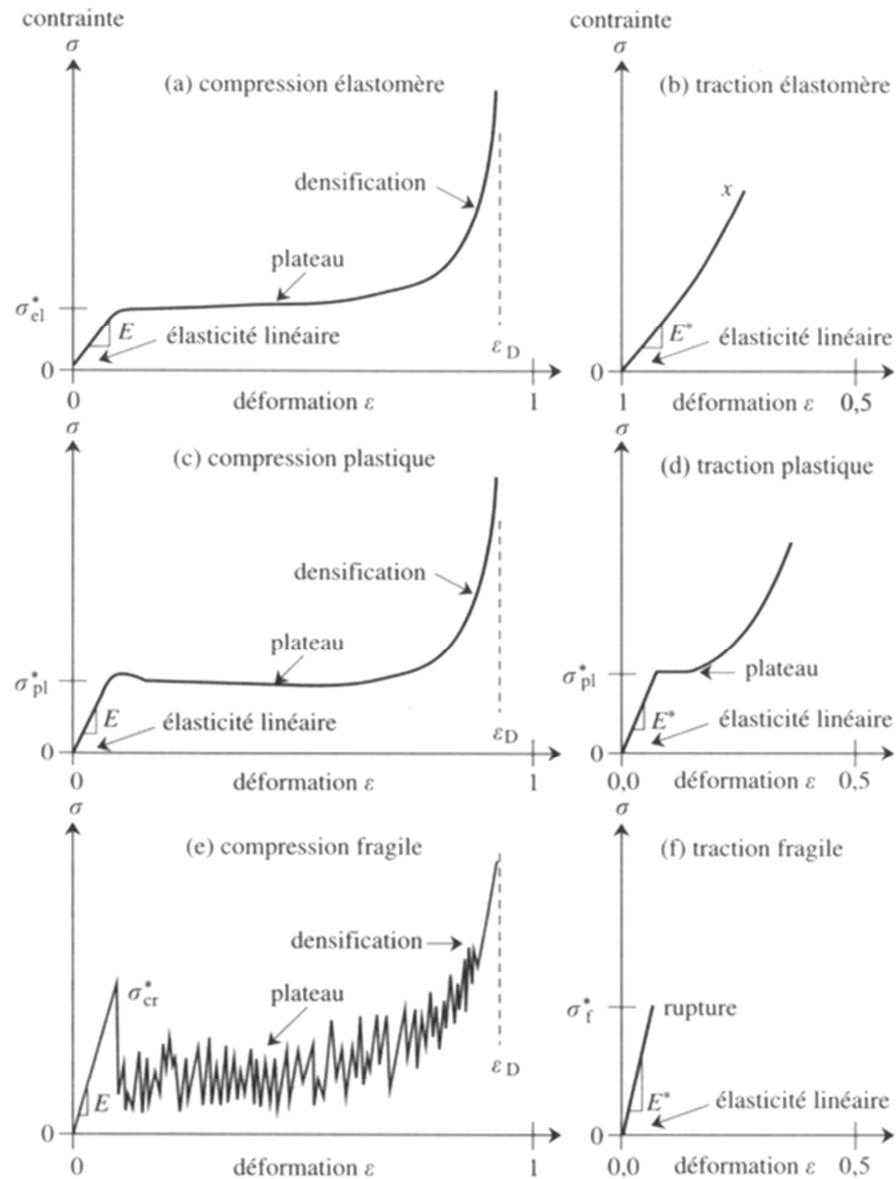


Evolution du module d'Young en fonction de la porosité pour un matériau cellulaire



Ordre de grandeur de quelques propriétés de matériaux cellulaires à base polymère (P), métallique (M) ou céramique (C)

→ Comme la plupart des matériaux, le comportement des matériaux cellulaires est dissymétrique en traction-compression. Le module apparent est en général plus faible en compression qu'en traction du fait du flambement élastique des parois.



Réponses contrainte-déformation en compression et en traction pour différents matériaux cellulaires : (a-b) élastomère – (c-d) métallique – (e-f) céramique

4.6 Les matériaux intelligents

→ Depuis une vingtaine d'années, les « smart materials » ou matériaux « intelligents » représentent une classe émergente de matériaux

→ Nécessité de miniaturisation des systèmes mécaniques et d'une intégration optimale.

→ L'avènement de la mécatronique a contribué activement à leur essor.

→ Pourquoi parle-t-on d'intelligence ? Cela fait référence à un matériau capable :

(i) de répondre aux stimuli et aux changements s'opérant dans leur environnement. Les stimuli peuvent provenir de l'intérieur ou de l'extérieur

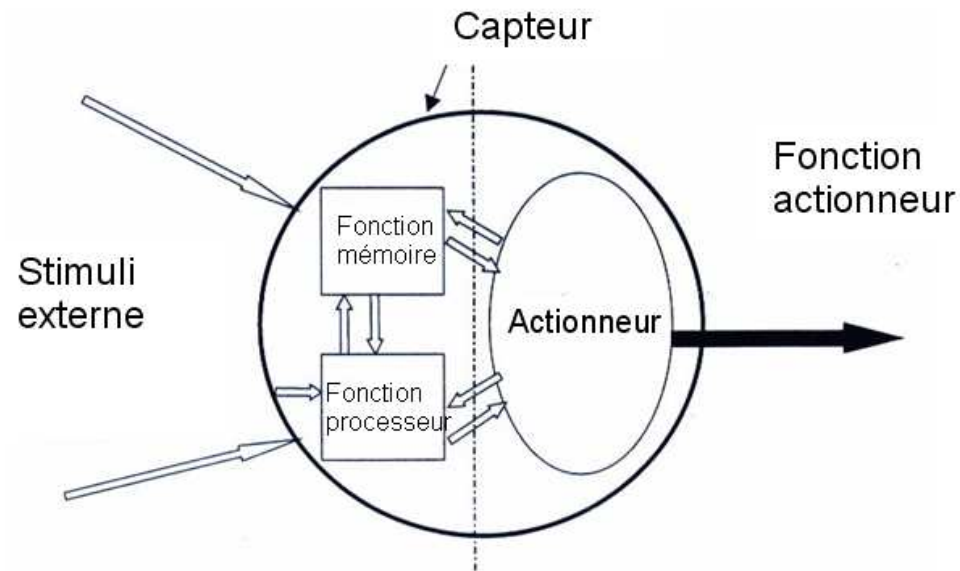
(ii) d'activer en conséquences les fonctions correspondantes.

→ Ces matériaux s'auto-adaptent aux variations du milieu environnant (vibrations, bruit, lumière, température, sollicitation mécanique...) en modifiant leur forme, leurs dimensions, leurs propriétés mécaniques dans le but d'assurer une ou des fonctions.

→ Fonctionnement en temps réel. Le temps de réponse représente la durée nécessaire à la réalisation des fonctions capteurs et actionneurs.

→ Selon la nature du matériau, ce temps est variable et conditionne grandement le champ d'applications.

→ Le temps de réponse assez long des Alliages à Mémoire de Forme ne favorise pas leur utilisation pour le contrôle actif des vibrations d'une structure contrairement aux matériaux piézo-électriques.



Les niveaux d'action du matériau intelligent [GAB]

Fonction capteur : percevoir les variations des caractéristiques de la structure sous l'effet de facteurs extérieurs

Fonctions mémoire et processeur : enregistrer les signaux transmis par le capteur

→ L'information perçue est comparée aux informations de référence acquises lors de la mise en œuvre du matériau et de son intégration dans la structure (fonction mémoire). Le processeur analyse ensuite ces données et transmet à l'actionneur la réponse optimale.

Fonction actionneur : Mise en œuvre la réponse fournie par le processeur

→ Selon le type de matériau, les actionneurs peuvent apporter des réponses de différente nature (production d'une contrainte, d'une déformation, d'une tension électrique, d'un gradient de température).

→ Un actionneur peut être défini comme un système qui transforme une énergie d'origine électrique, thermique, chimique ou fluïdique en une énergie mécanique.

<i>Type d'énergie</i>	<i>Sous groupe</i>	<i>Type d'actionneur</i>
Electrique	Champs magnétique et électrique	Electrostatique Electromagnétique
	Forces moléculaires -----	Magnétostrictif Piézo-électrique Electrostrictif
Fluidique	Energie pneumatique -----	Haute pression Basse pression
	Energie hydraulique -----	Hydraulique
Thermique	Dilatation -----	Bi-matériau Mono-matériau
	Transformation de phase -----	A mémoire de forme
Chimique	Forces électrolytiques -----	Electrochimiques
	Forces explosives -----	Pyrotechniques

Classification des actionneurs en fonction du type d'énergie disponible en entrée [ABA]

Exemple de comportement mécanique d'un matériau intelligent : la pseudoélasticité des AMF

→ Les **Alliages à Mémoire de Forme** (AMF) appartiennent à une classe de matériaux qui peuvent subir des changements réversibles dans leur structure cristallographique.

→ Changements liés à la **transformation martensitique** : transition de phase solide-solide entre une phase très symétrique (typiquement cubique), appelée austénite (**a**) ou phase mère, et une phase moins symétrique (typiquement monoclinique), appelée martensite (**m**) ou phase produit.

→ Les **températures de transformations**, propriétés physiques des AMF, pilotent les transformations de phase et conditionnent leurs propriétés :

- M_S^o est la température de début de transformation martensitique,
- M_F^o est la température de fin de transformation martensitique, température en dessous de laquelle la martensite est stable ($z = 1$),
- A_S^o est la température de début de transformation austénitique,
- A_F^o est la température de fin de transformation austénitique, température au dessus de laquelle l'austénite est stable ($z = 0$).

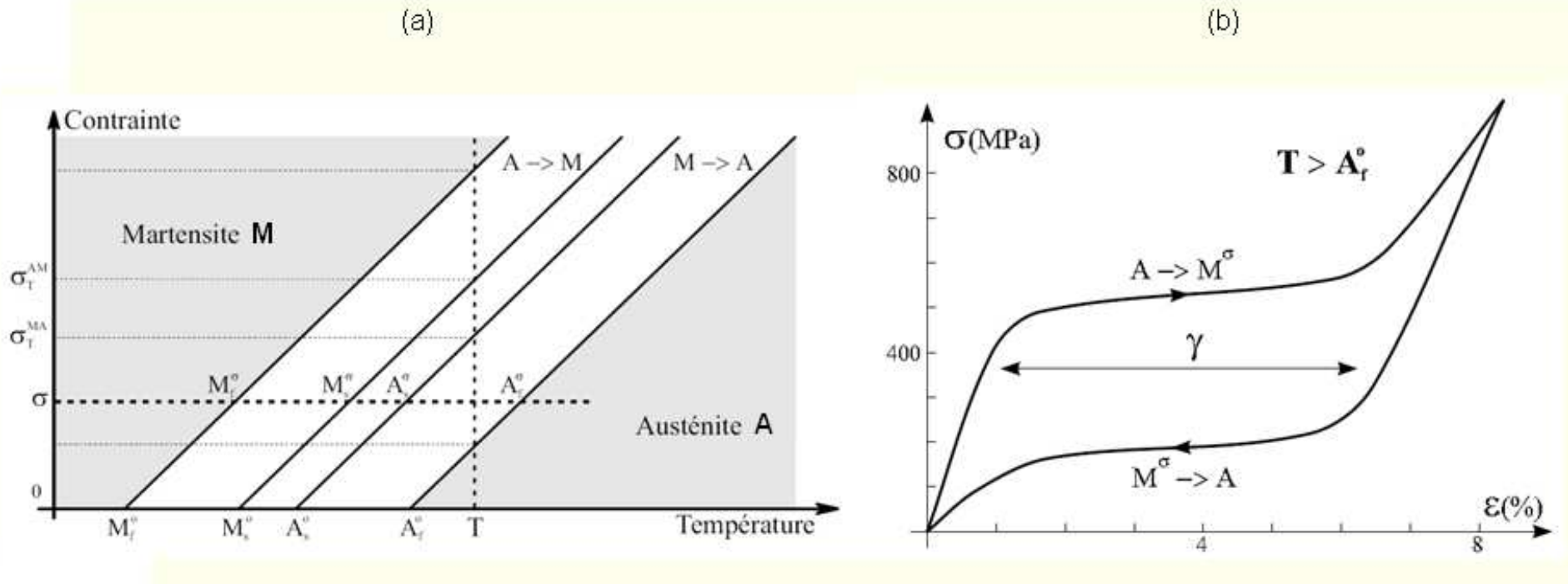


Fig. (a) Diagramme de phase idéal des AMF - (b) Pseudoélasticité des AMF [ABA]

→ Les alliages NiTi sont les plus utilisés dans l'industrie : bon compromis pour des applications comme actionneurs.

- Selon la nature de sa microstructure, déformations de 4 à 10 %
- Densité d'énergie supérieure à 10J.cm^{-3}
- Rendement est très faible (<1%)
- Principal inconvénient de ce matériau (comme la plupart des actionneurs thermiques) : temps de réponse élevé (de l'ordre de la seconde)
 - Limitation des applications en dynamique. La transformation martensitique dépend de la température et donc de l'inertie thermique laquelle
 - Commande en boucle fermée difficile en raison de comportement hystérétique fortement non-linéaire des AMF.
- Aptitude à la microfabrication : bons candidats pour l'actionnement des microsystèmes.

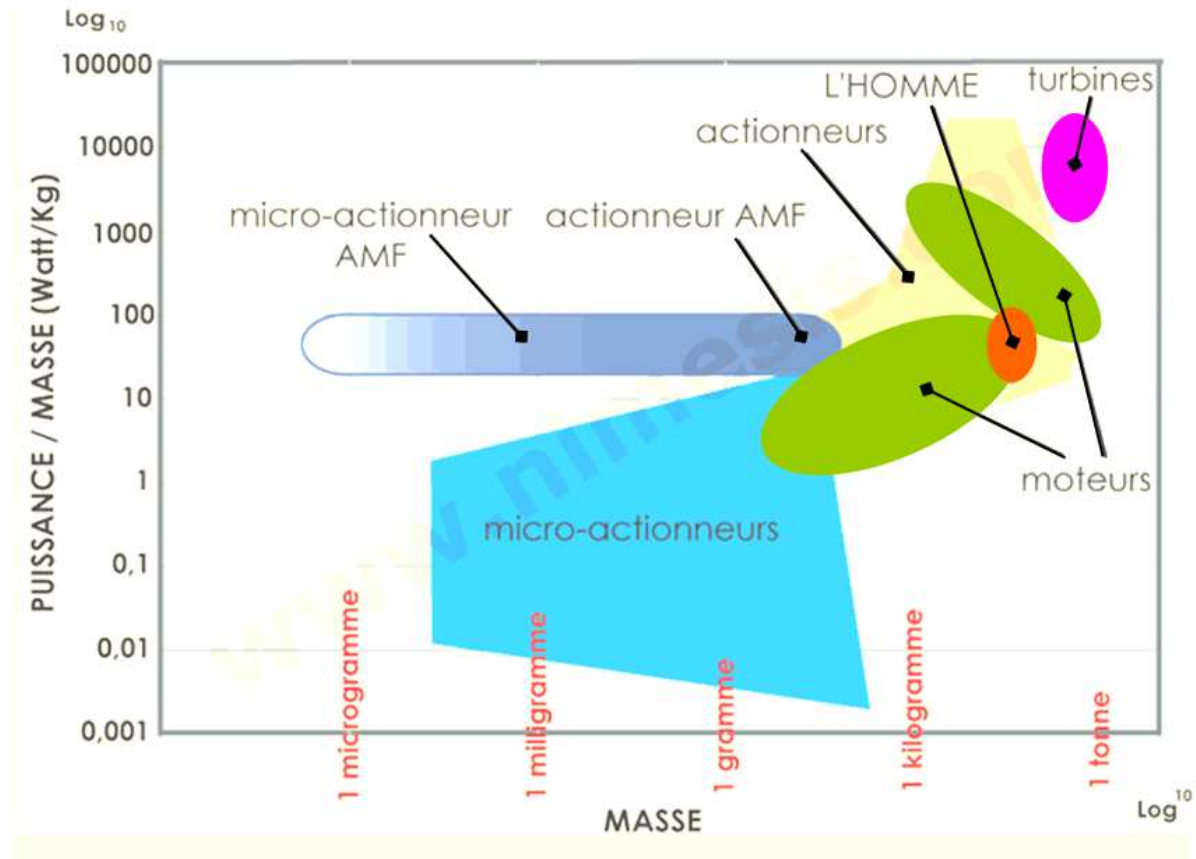


Fig. Comparaison des performances en puissance relative à la masse des actionneurs AMF [NIM]