

Cours No 5
Elasticité linéaire

Francesco Stellacci

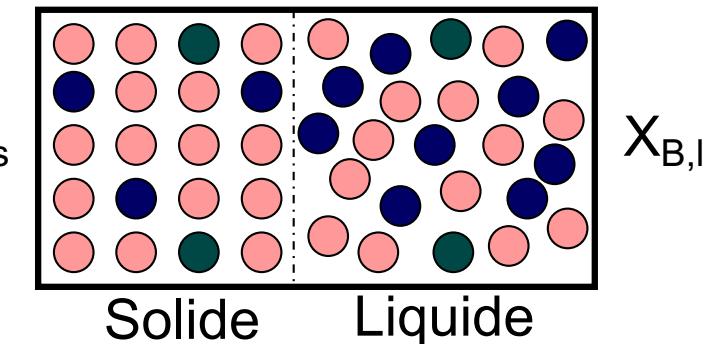
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Règles des phases de Gibbs

Pour un système composé de N_C constituants (A, B, ...) avec N_P phases en présence (α, β, \dots), le nombre de degrés de liberté N_{DL} du système est donné par la **règle de Gibbs**:

$$N_{DL} = 2 + N_C - N_P$$

(T, p)



Variables: $2 + (N_C - 1)N_P$

T, p

$(X_A, X_B, \dots, X_{N_C-1})^\alpha$
 $(X_A, X_B, \dots, X_{N_C-1})^\beta$

....

$(X_A, X_B, \dots, X_{N_C-1})^{N_P}$

Contraintes: $(N_P - 1)N_C$

$\mu_{A,\alpha} = \mu_{A,\beta} = \dots = \mu_{A,N_P} = \mu_A$

$\mu_{B,\alpha} = \mu_{B,\beta} = \dots = \mu_{B,N_P} = \mu_B$

....

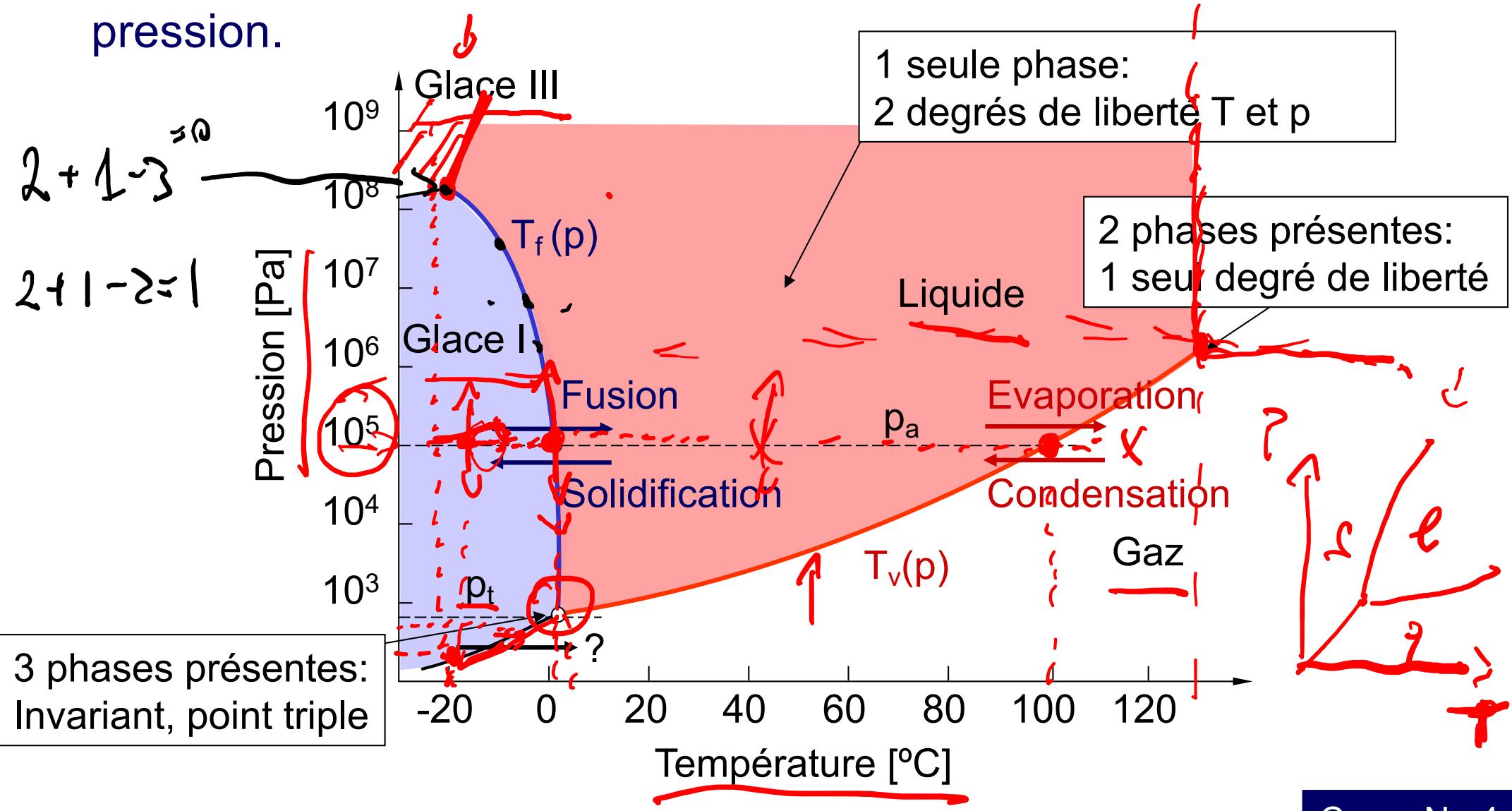
....

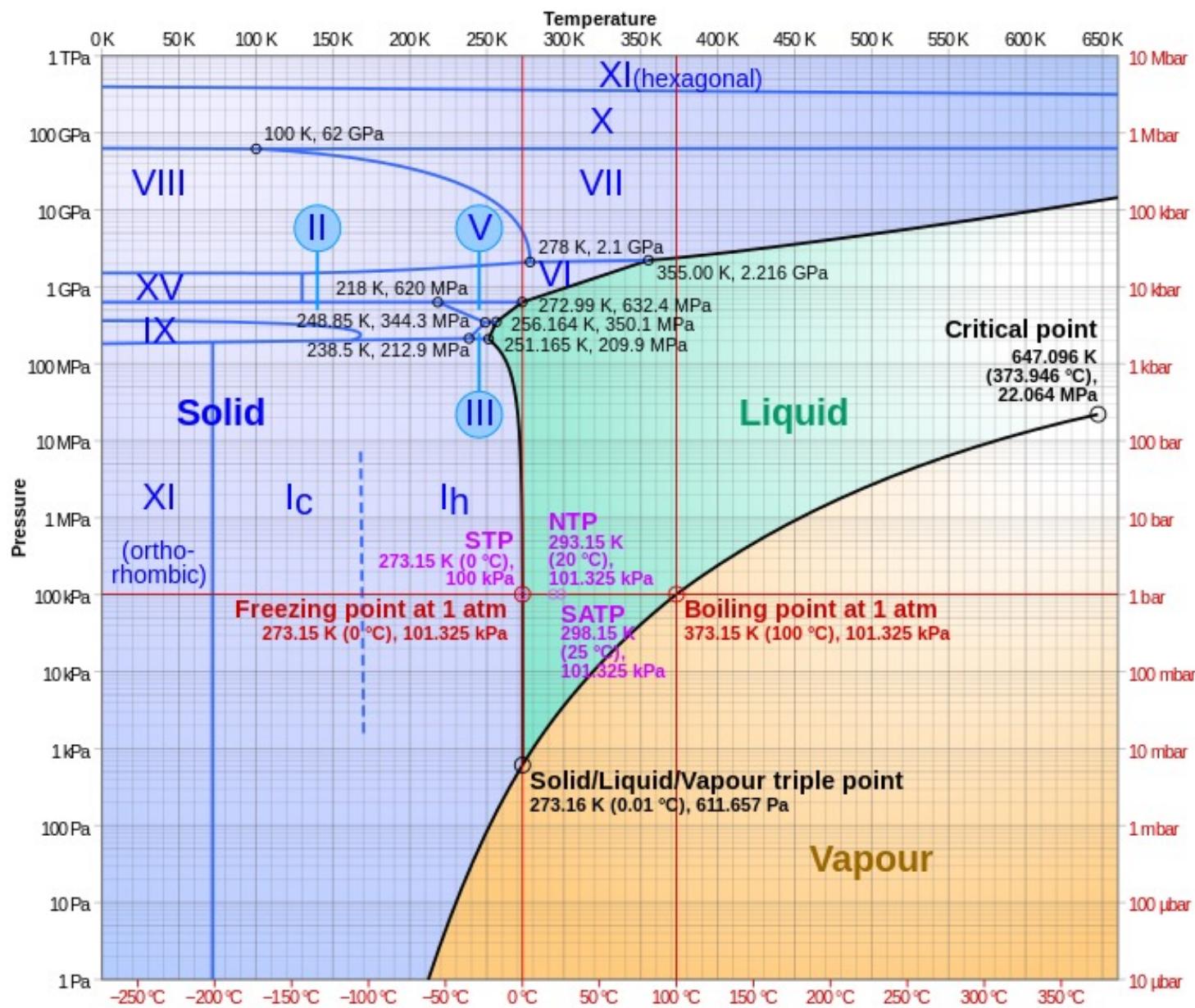
$\mu_{N_C,\alpha} = \mu_{N_C,\beta} = \dots = \mu_{N_C,N_P} = \mu_{N_C}$

L'énergie d'un constituant A dans une phase β est mesurée par ce que l'on appelle le **potentiel chimique** $\mu_{A,\beta}$ (et non plus par $G_{A,\beta}^m$).

Systèmes unaires

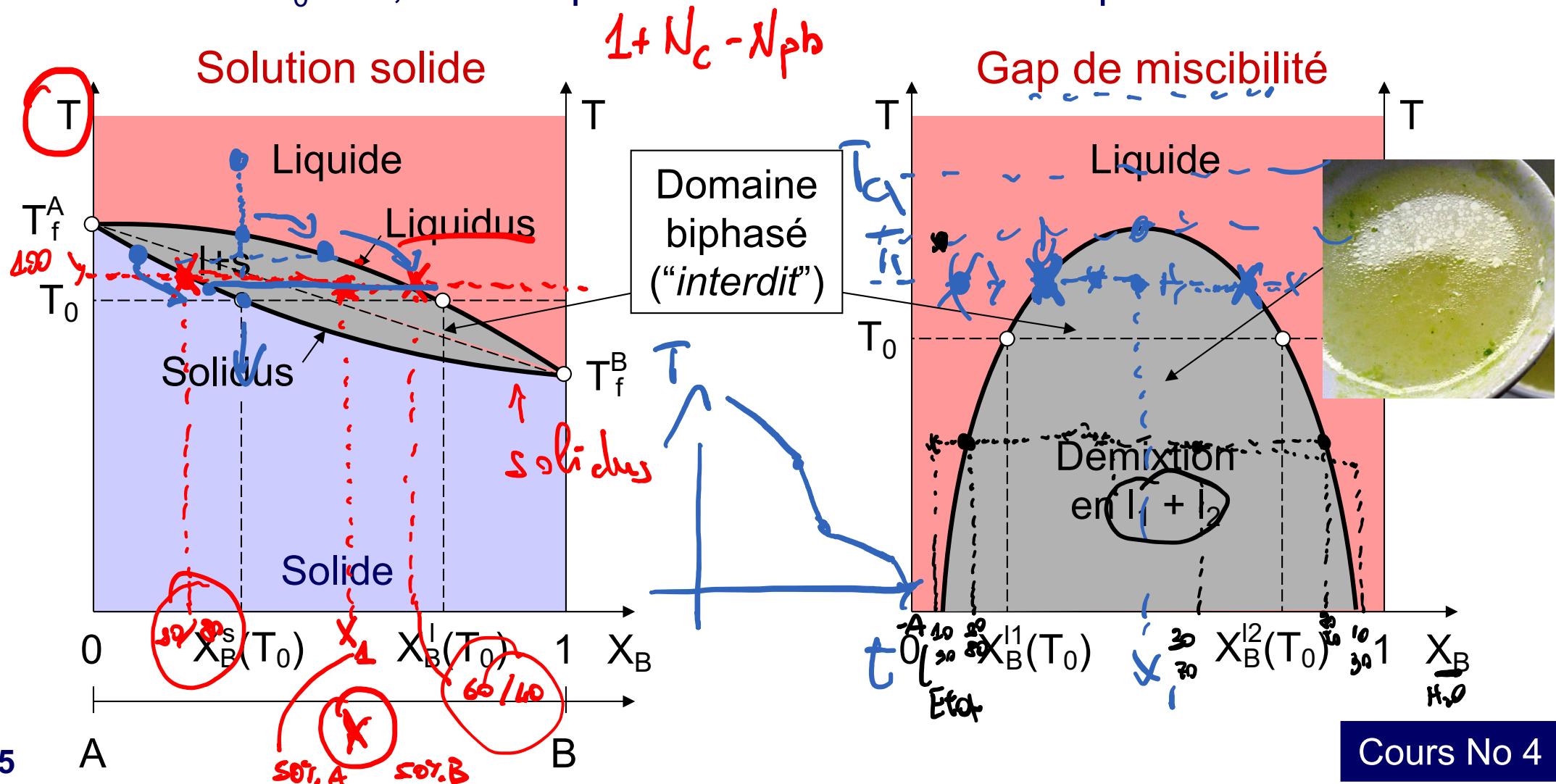
Voici le diagramme d'équilibre de l'eau, quand on varie la pression.





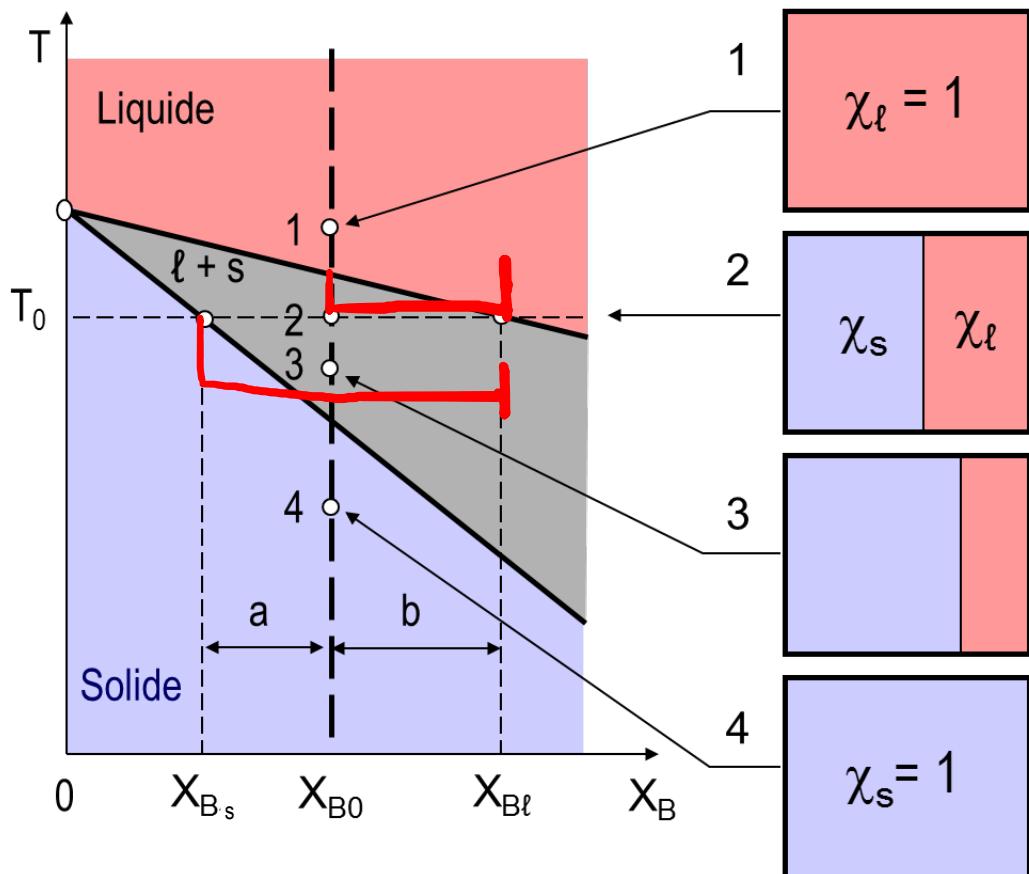
Systèmes binaires

Si l'on fixe p , il reste 2 variables pour une phase d'un système binaire: T et X_B . Si **2 phases sont en présence** (ex. s et l), il reste **1 degré de liberté**. A T_0 fixé, les compositions du solide et du liquide sont fixées.





Règle des leviers



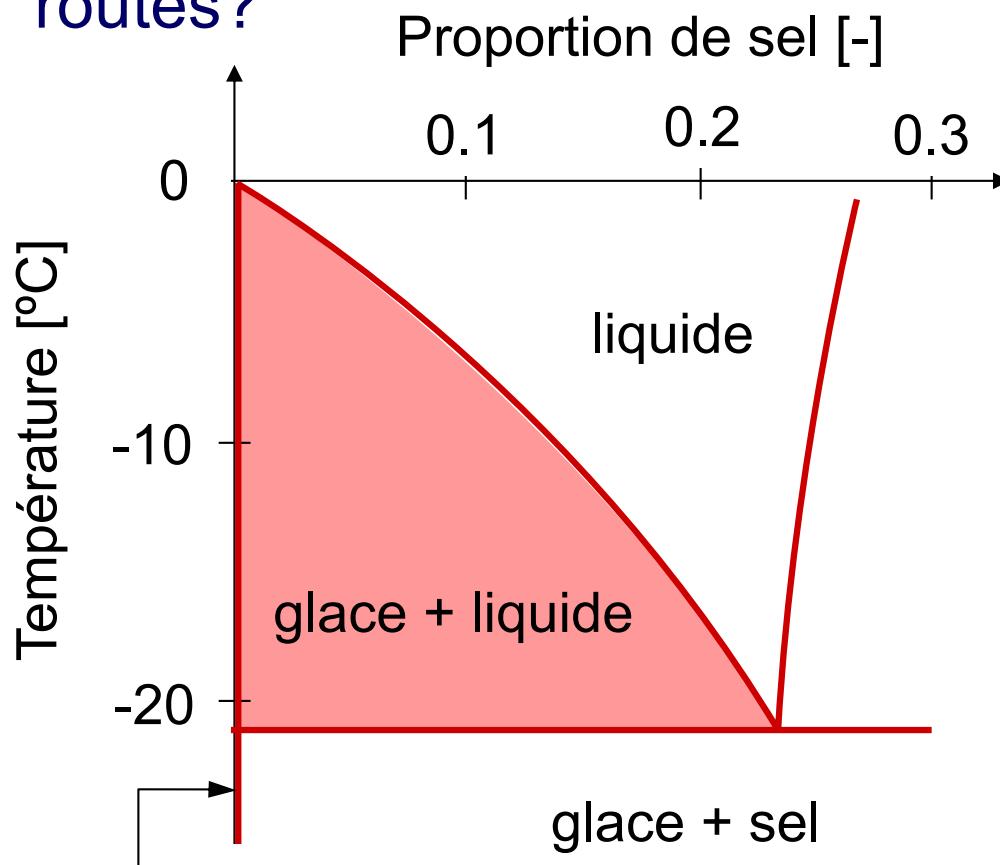
- Au final, on obtient la règle des leviers donnant la fraction molaire de solide

$$\underline{\chi_s} = \frac{X_{Bl} - X_{B0}}{X_{Bl} - X_{Bs}} = \frac{b}{a + b}$$

$$\underline{\chi_s} = \frac{80 - 50}{80 - 20} = \frac{30}{60} = 0.5$$

Systèmes binaires

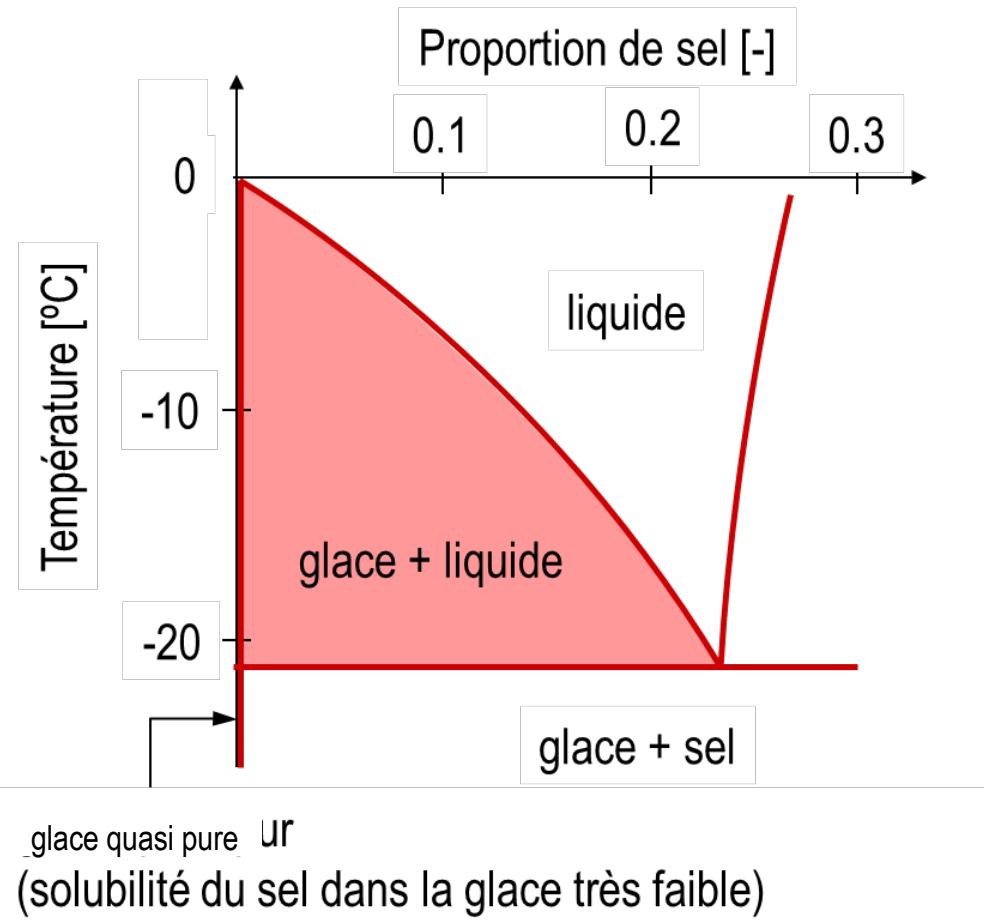
Deux constituants, $N_C = 2$. Un système bien connu est le sel et l'eau. Pourquoi, en ajoutant du sel, arrive-t-on à dégeler les routes?



glace quasi pure
(solubilité du sel dans la glace très faible)

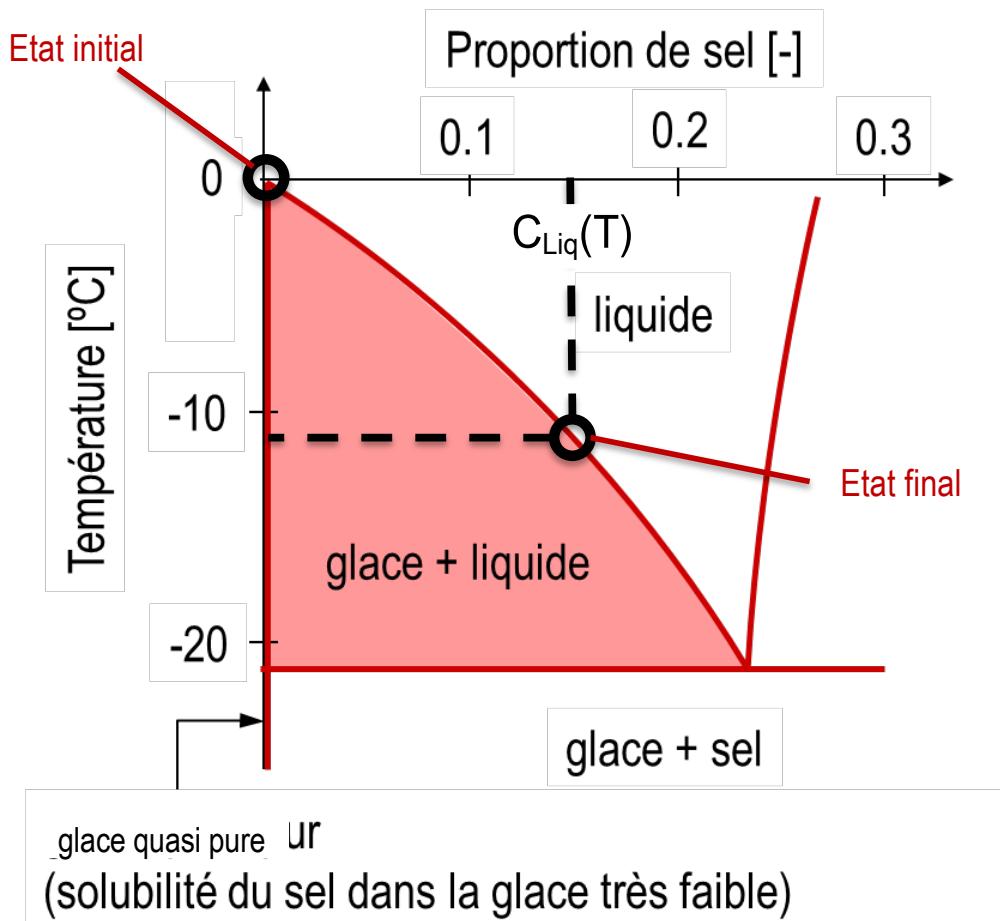


Systèmes binaires



- Diagramme de phases (partiel) du système eau + sel

Systèmes binaires

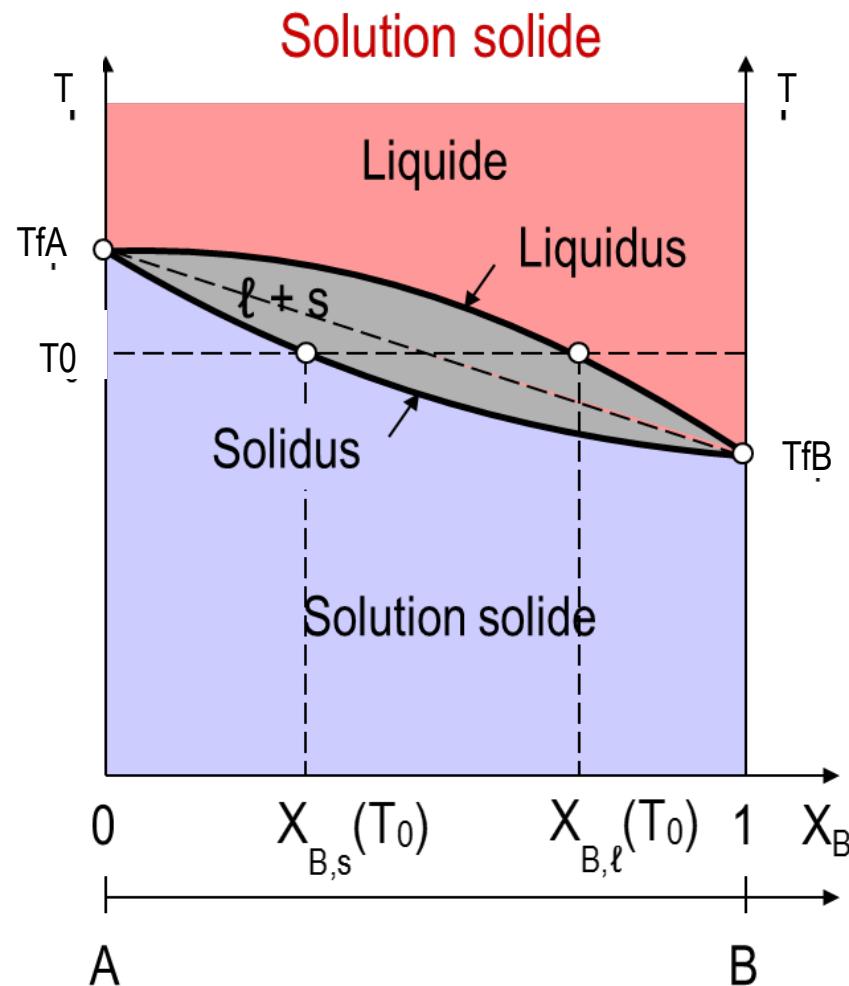


- Un petit exercice de calcul sur la base de l'expérience montrée, en supposant qu'il reste de la glace à l'équilibre
- Inconnues: $m_{g,f}$, masse de glace fondue
 T , température finale

- 2 équations:
$$\frac{m_{sel}}{m_l + m_{g,f}} = C_{Liq}(T)$$

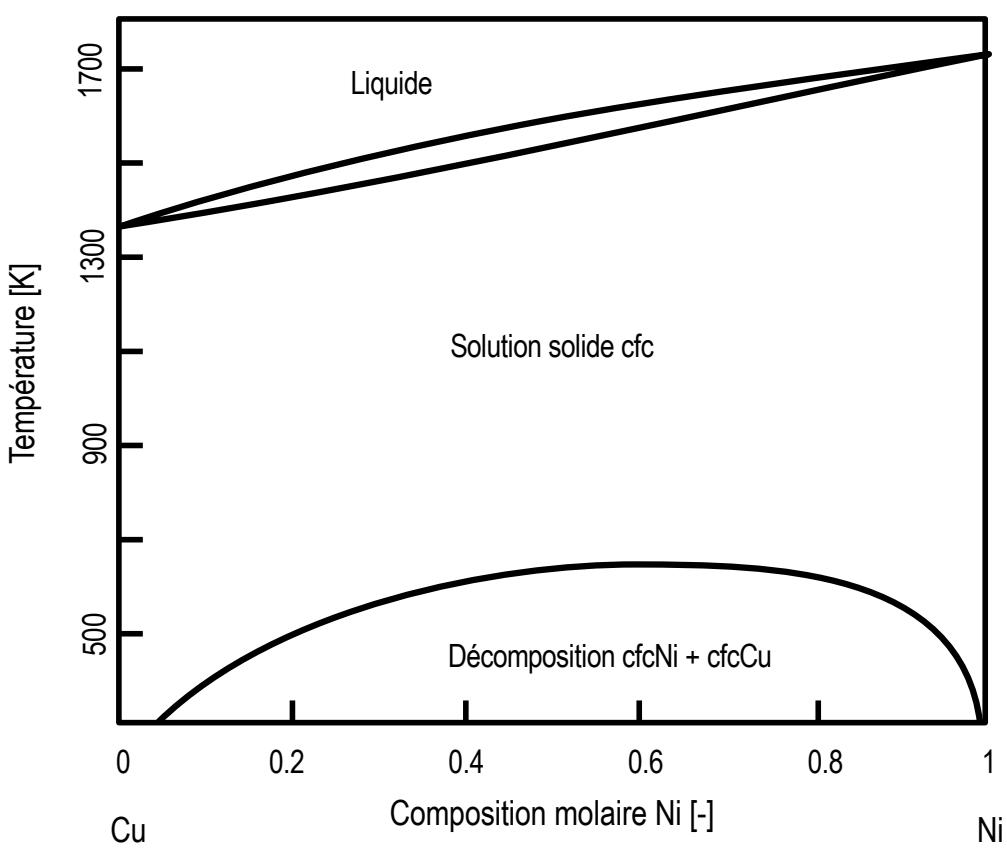
$$-m_{g,f} L + m_{tot} \langle c_{p,tot} \rangle (0 - T) = 0$$

Systèmes binaires



- En fixant la pression, nous avons donc 2 degrés de liberté lorsqu'une seule phase est présente
- Lorsque 2 phases sont présentes (ici solide et liquide), la composition de chaque phase est fixée une fois que la température est donnée
- Le lien à une température donnée entre $X_{B,s}$ et $X_{B,l}$ est appelé conode (tie-line en anglais)

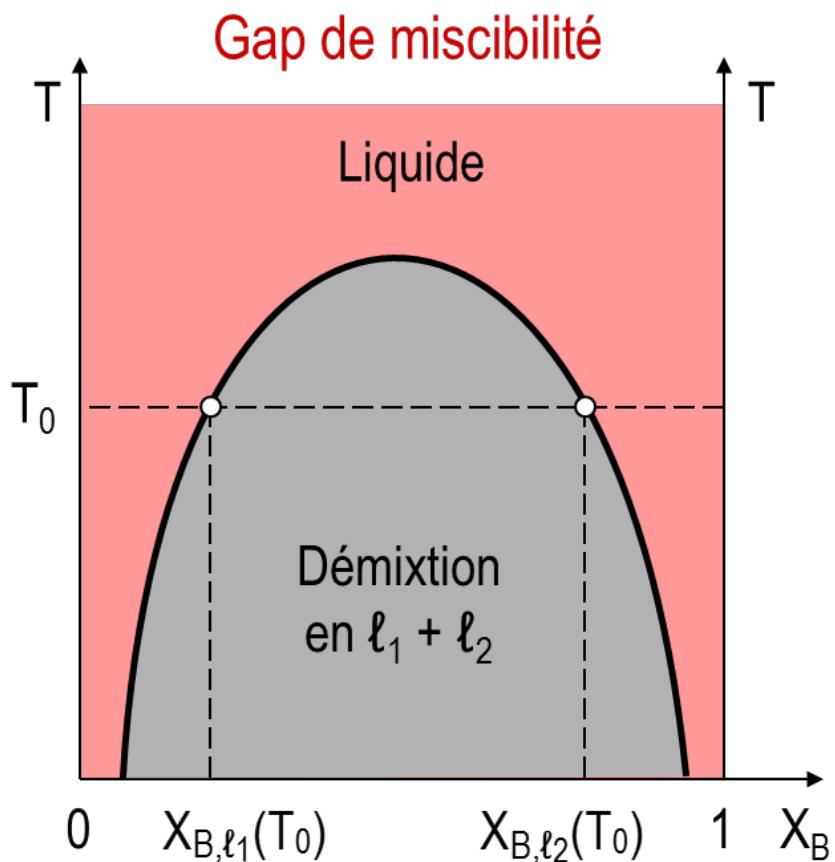
Systèmes binaires



- Exemple typique d'un tel alliage:
le système Cu-Ni
(à haute température)

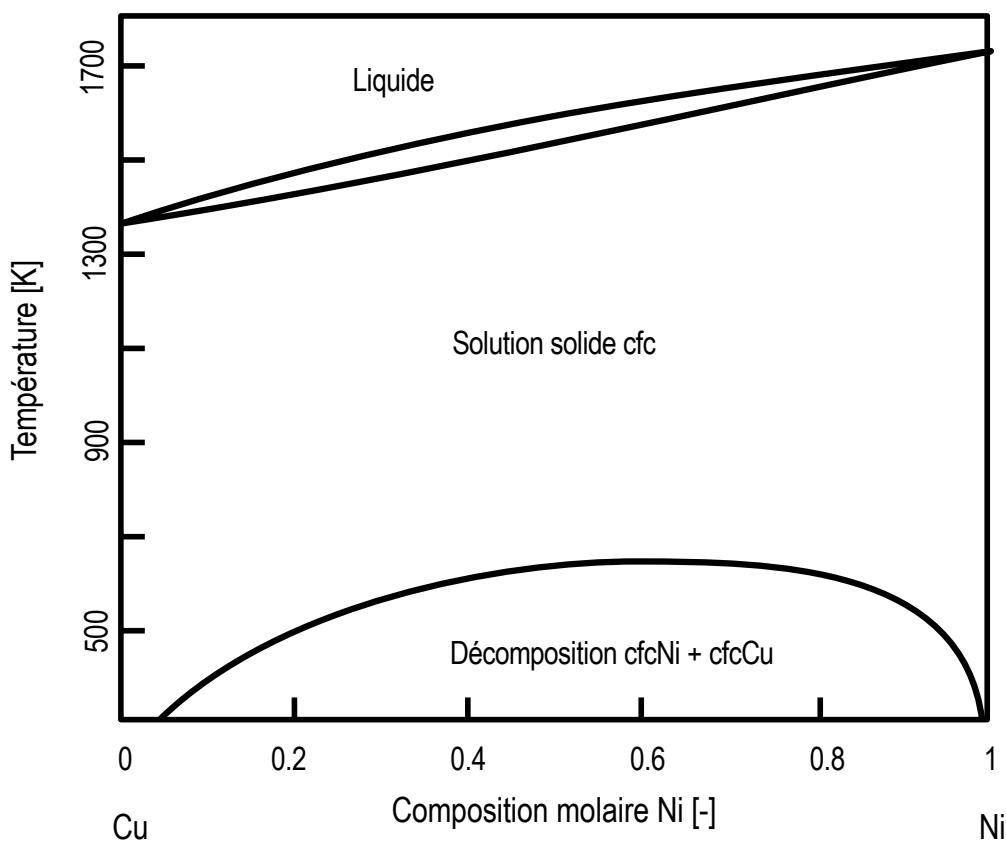
(dessin d'après FactSage)

Systèmes binaires



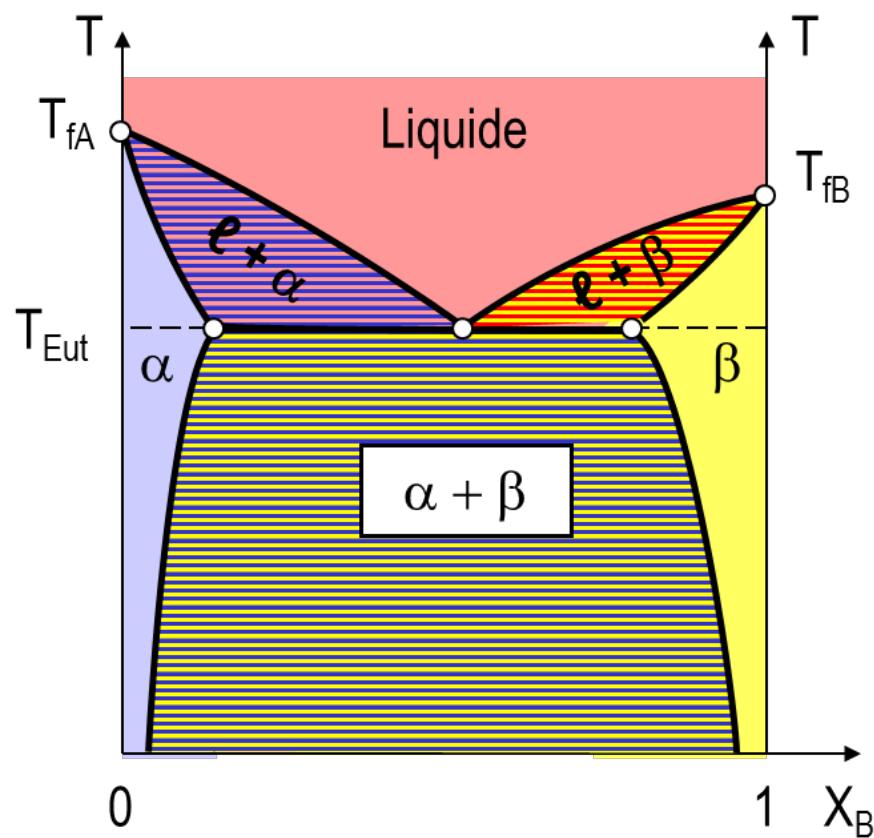
- Dans certains cas (les constituants sont plutôt « incompatibles »): il y a alors démixtion s'il s'agit d'une phase liquide.
- Dans le cas d'une solution solide, on parle alors de décomposition spinodale

Systèmes binaires



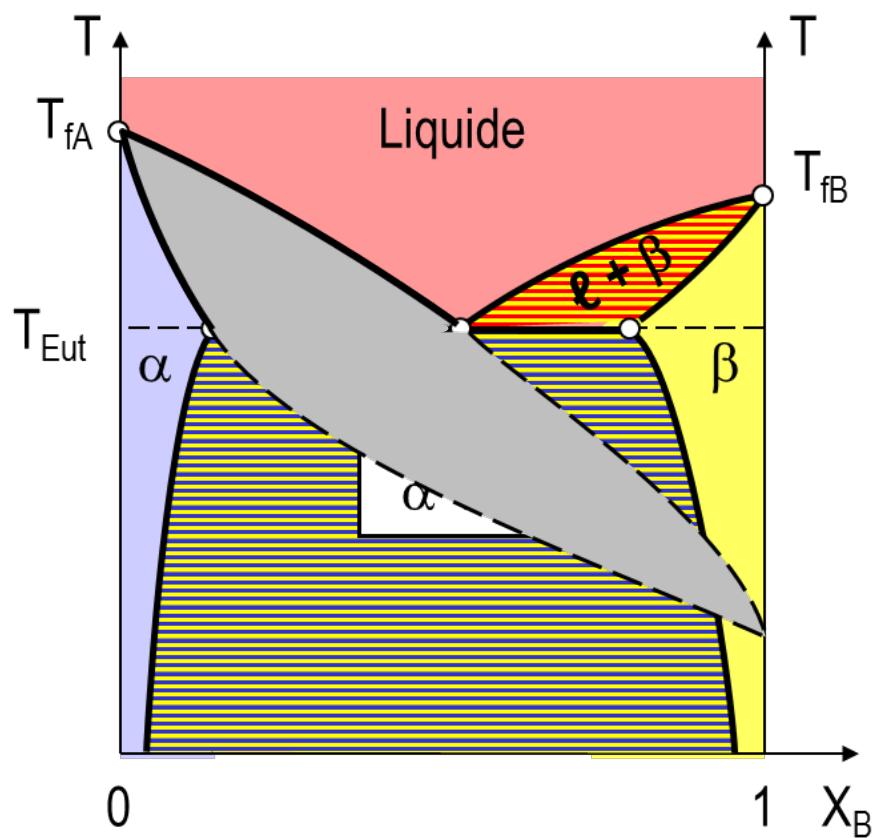
- Exemple typique d'un tel alliage:
le système Cu-Ni
(à basse température)

Systèmes binaires



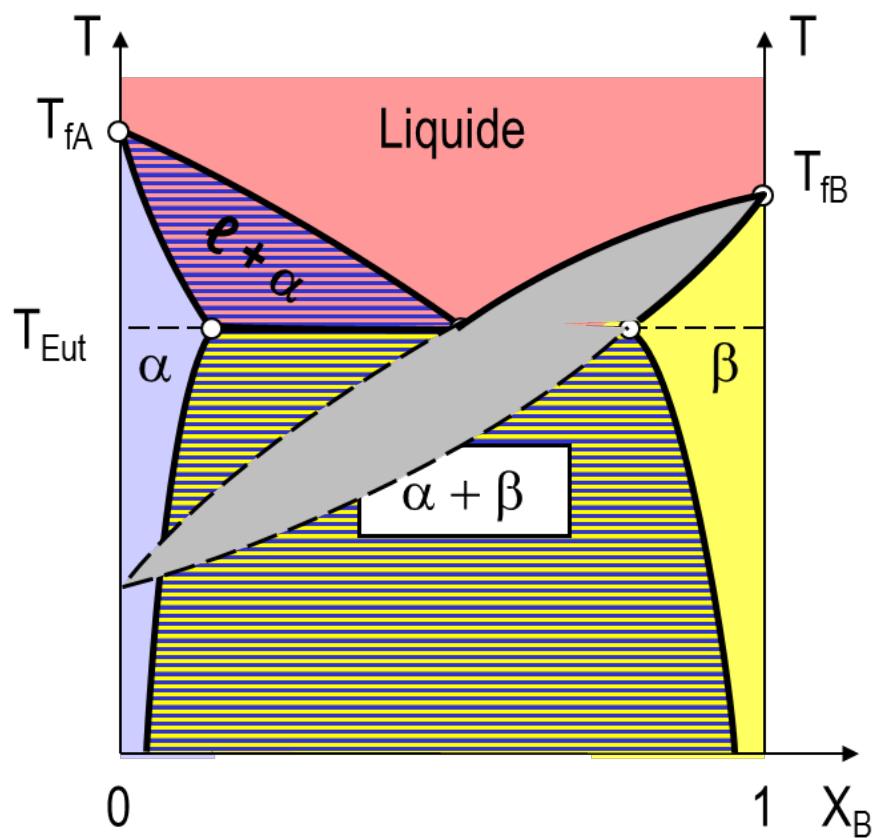
- Lorsque les deux constituants, A et B, cristallisent dans deux phases différentes, α et β , on peut avoir cette situation:
Un diagramme de phase de
type eutectique

Systèmes binaires



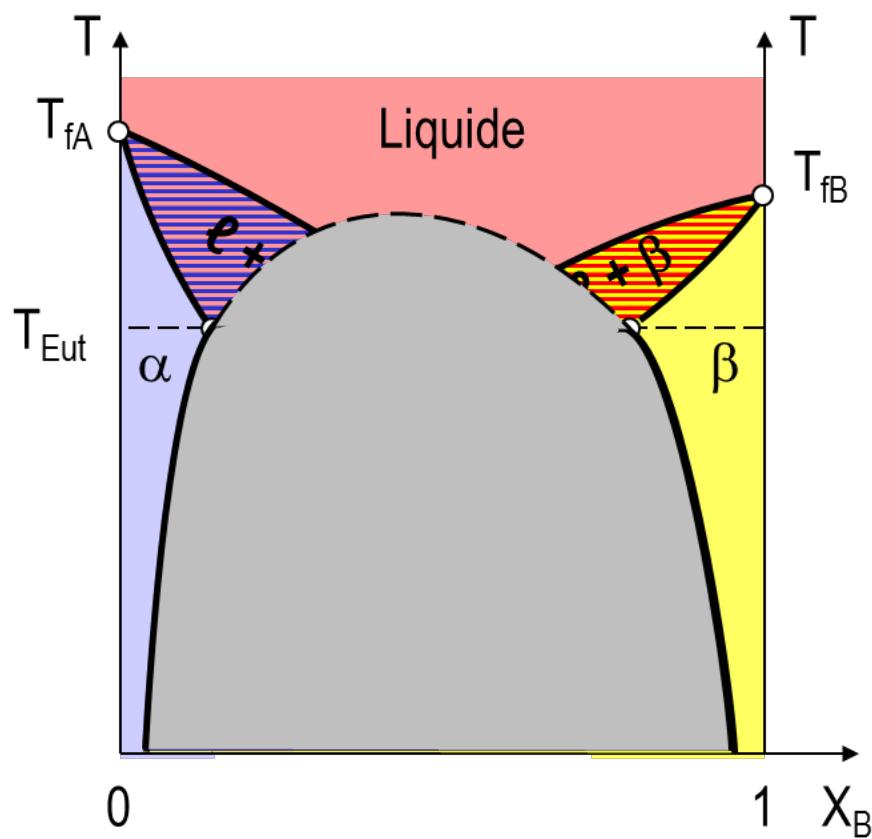
- Un tel diagramme peut être vu comme la réunion de trois diagrammes de phases faisant intervenir 2 phases Liquide et α

Systèmes binaires



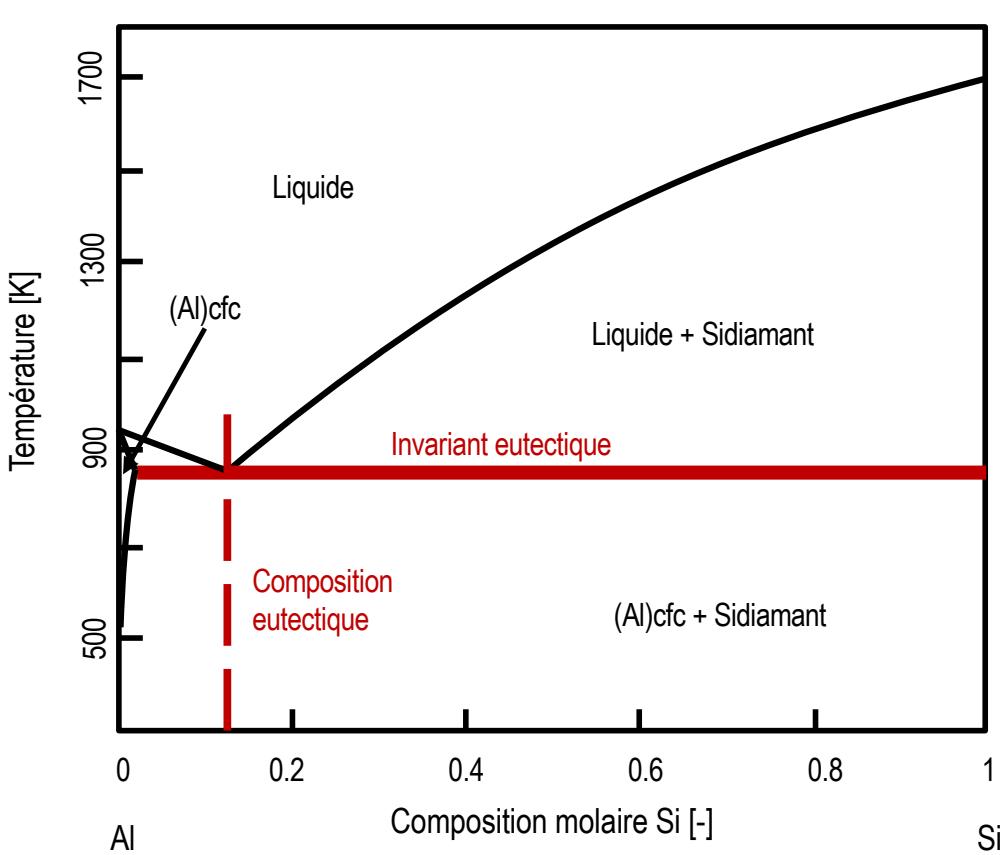
- Un tel diagramme peut être décomposé en une réunion de trois diagrammes de phases faisant intervenir 2 phases Liquide et β

Systèmes binaires



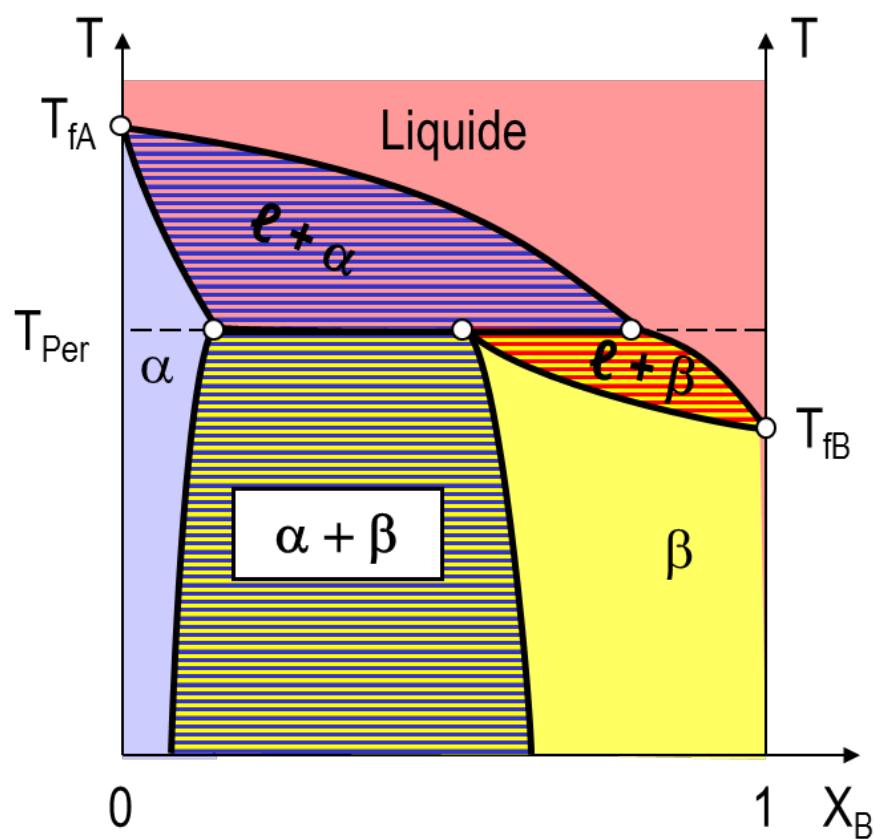
- Un tel diagramme peut être décomposé en une réunion de trois diagrammes de phases faisant intervenir 2 phases
α et β

Systèmes binaires



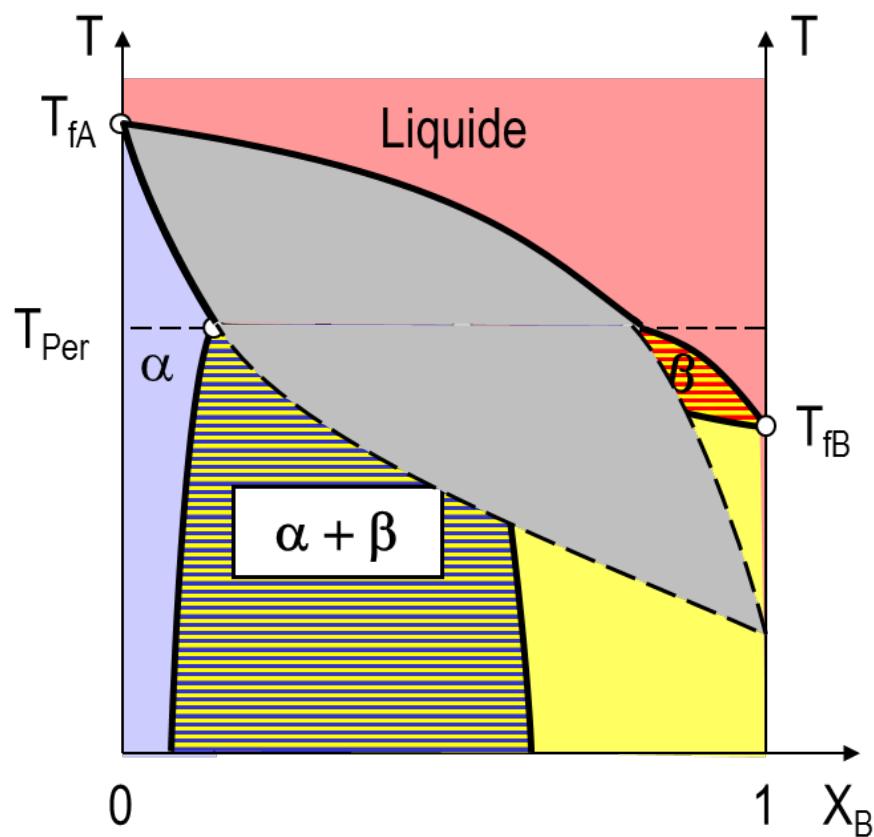
- Exemple typique d'un tel alliage:
le système Al-Si

Systèmes binaires



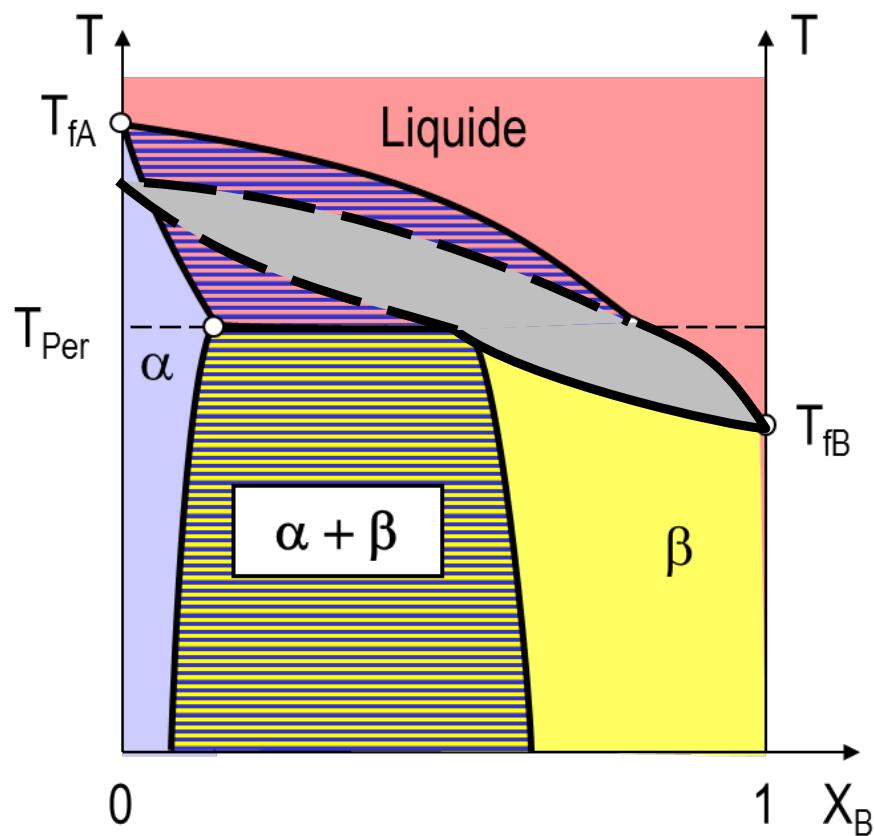
- Lorsque les deux constituants, A et B, cristallisent dans deux phases différentes, α et β , on peut aussi avoir cette situation:
Un diagramme de phase de
type péritectique

Systèmes binaires



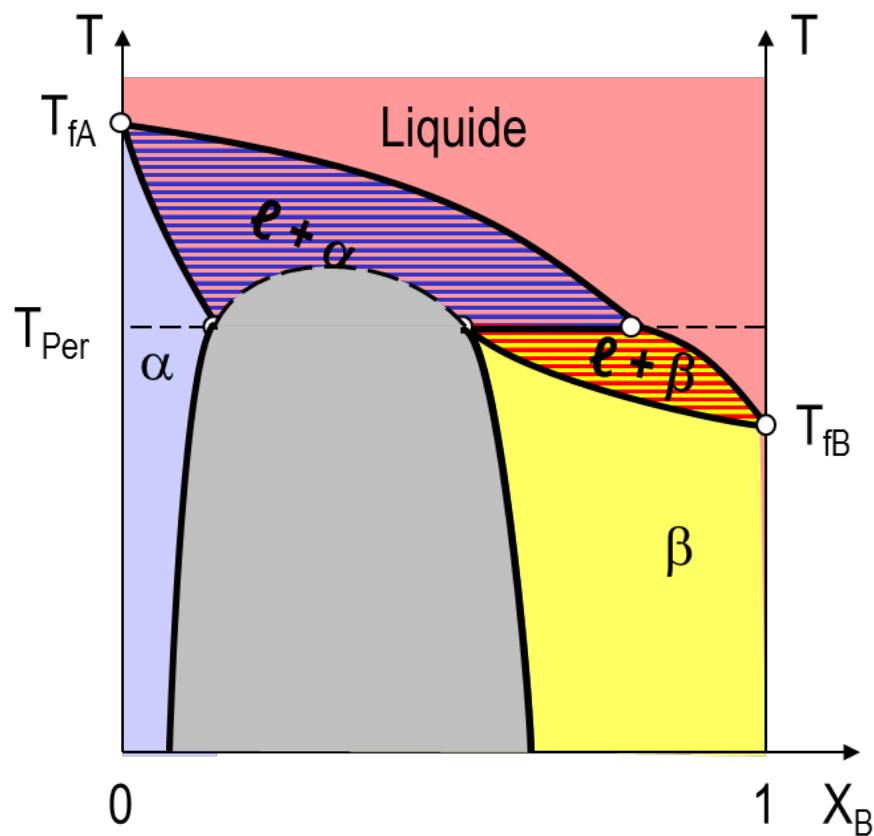
- Un tel diagramme peut être vu à nouveau comme la réunion de trois diagrammes de phases faisant intervenir 2 phases Liquide et α

Systèmes binaires



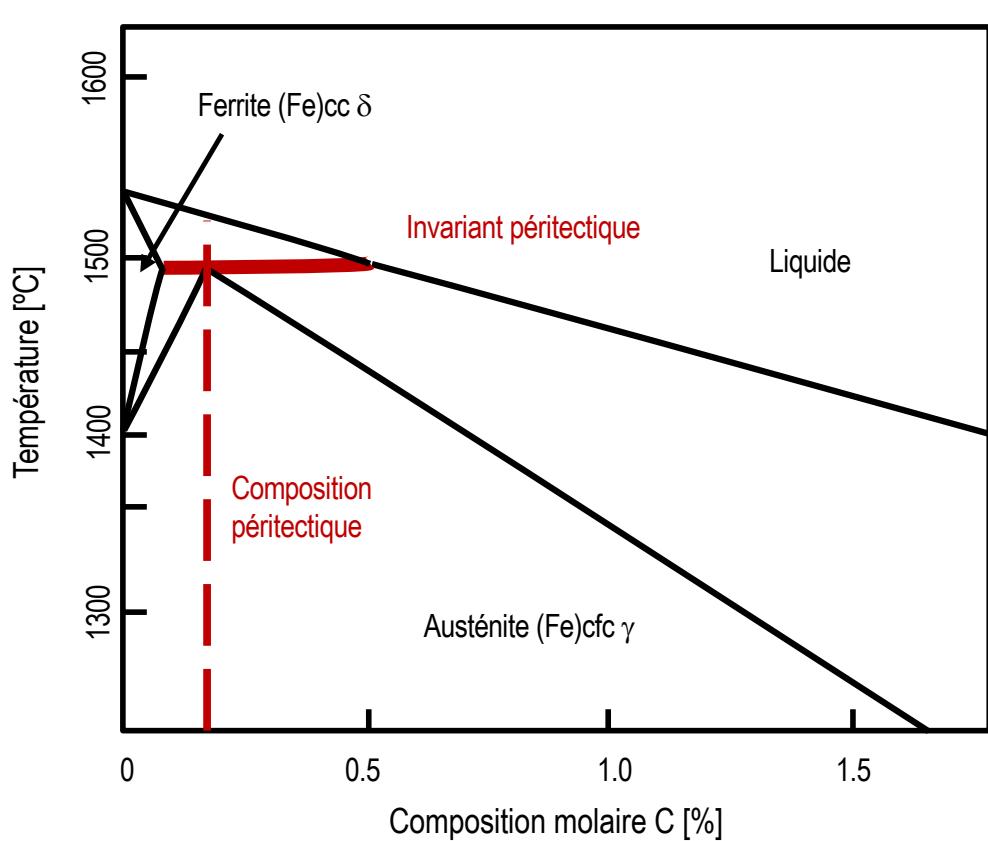
- Un tel diagramme peut être vu à nouveau comme la réunion de trois diagrammes de phases faisant intervenir 2 phases Liquide et β

Systèmes binaires



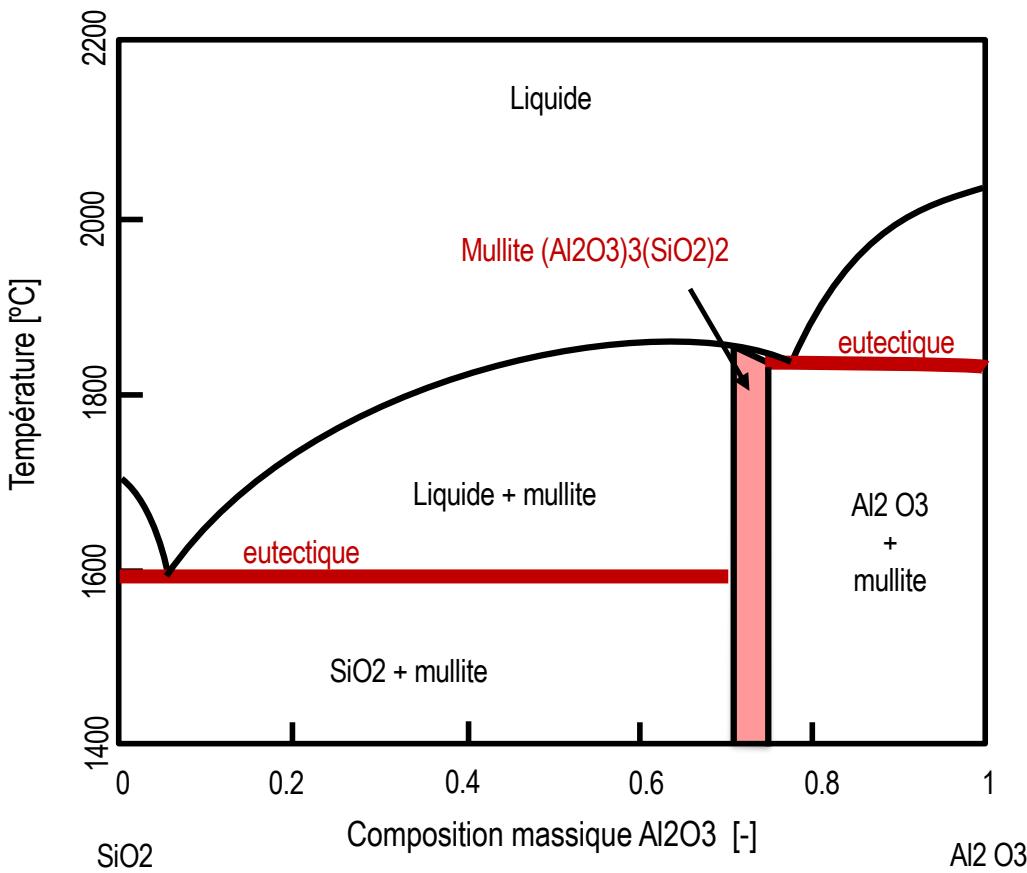
- Un tel diagramme peut être vu à nouveau comme la réunion de trois diagrammes de phases faisant intervenir 2 phases
 α et β

Systèmes binaires



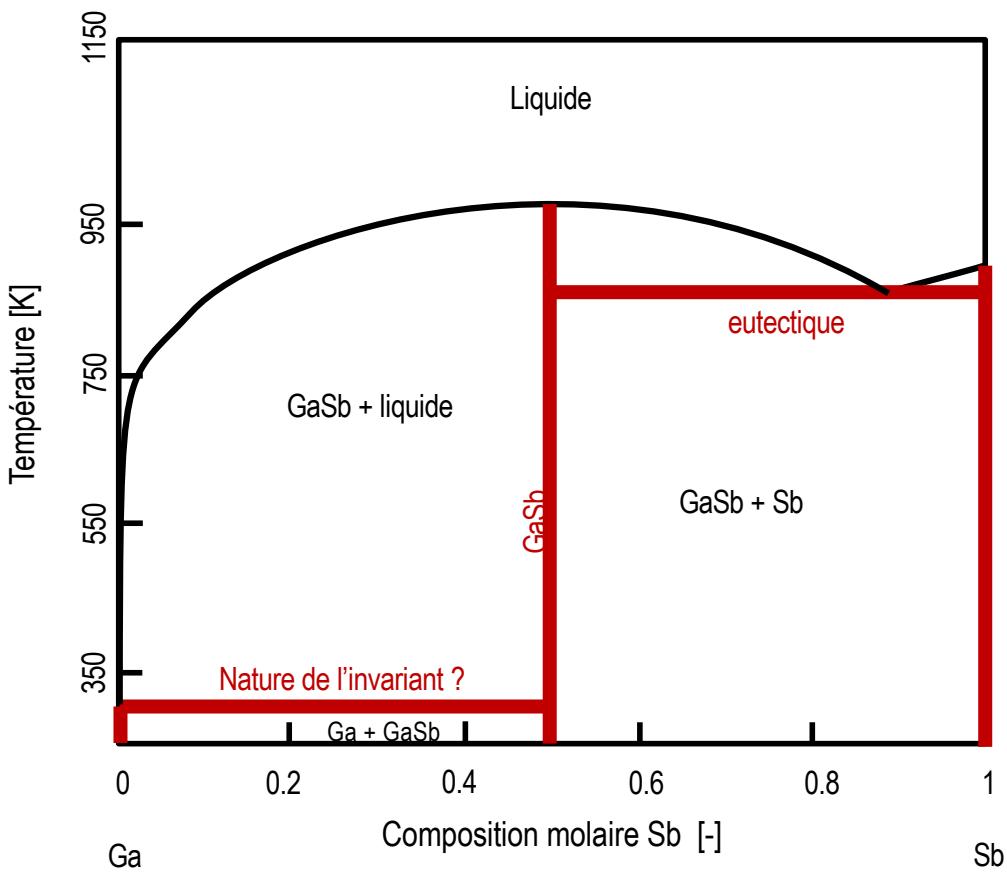
- Exemple typique d'un tel alliage : le système Fe-C à haute température (acier ferritique ou austénitique)

Systèmes binaires



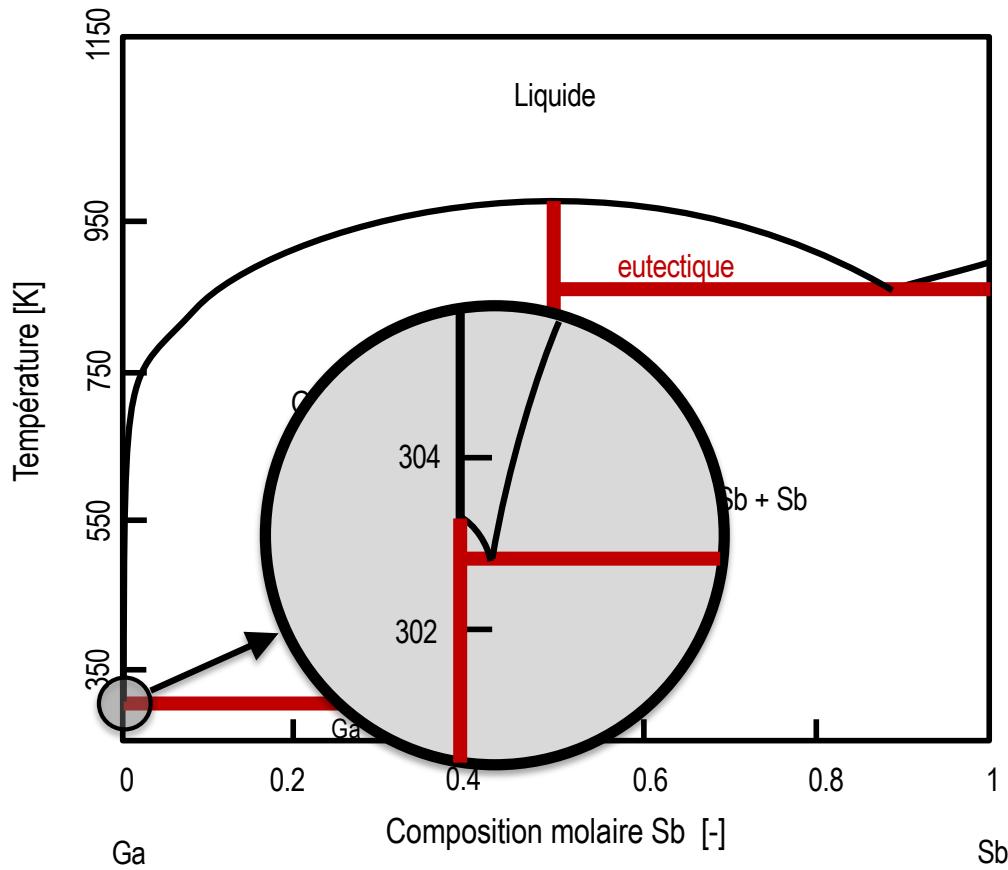
- Les diagrammes de phases peuvent être utiles pour les céramiques
- On voit apparaître une nouvelle phase intermédiaire
- Le diagramme peut se décomposer en 2 eutectiques

Systèmes binaires



- Les phases stoechiométriques (ou pures) apparaissent comme des droites verticales

Systèmes binaires

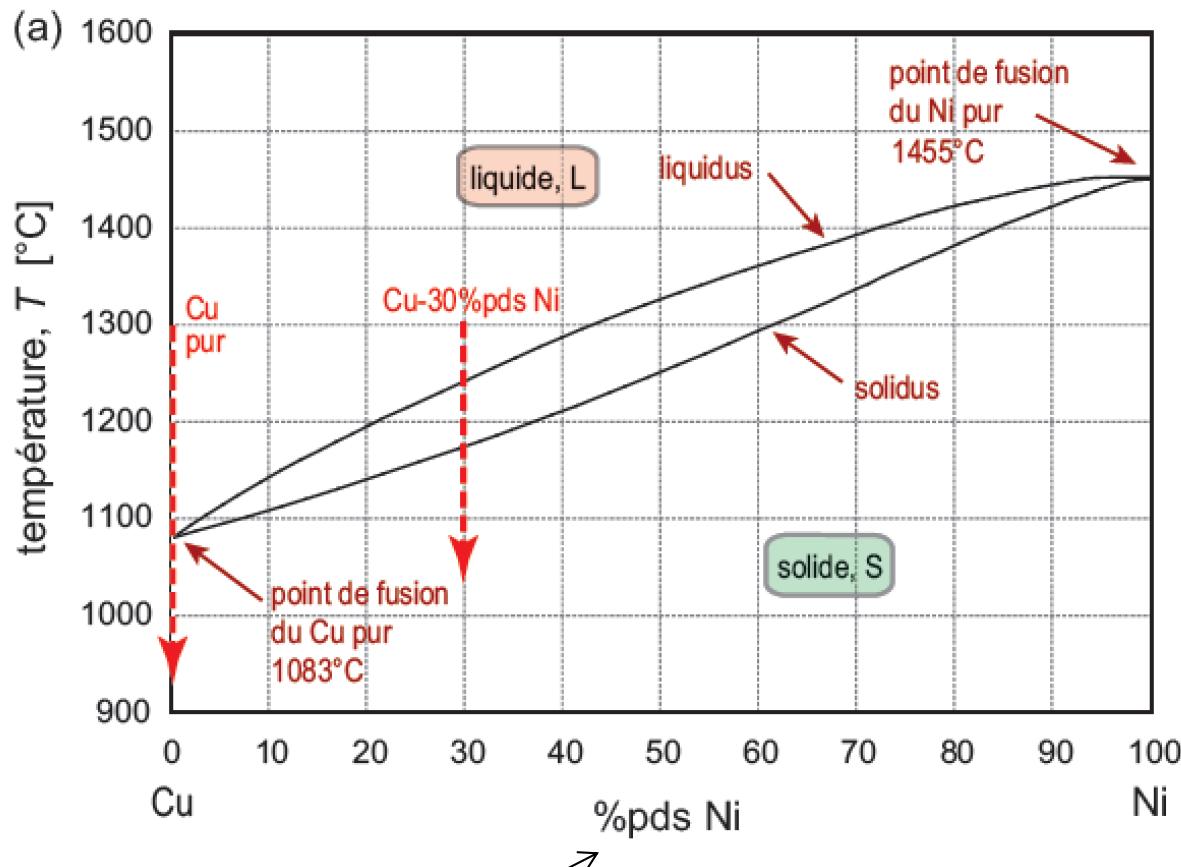


- L'invariant à gauche du diagramme Ga-Sb est un eutectique, car

$$T_{f,Ga} = T_{eut} + 0.4 \text{ K}$$

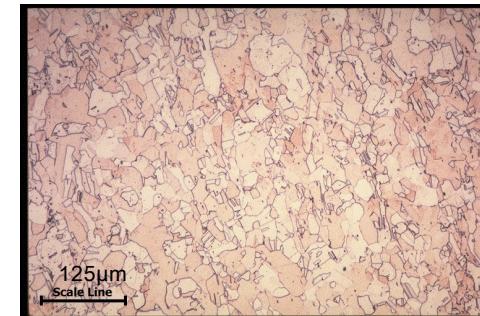
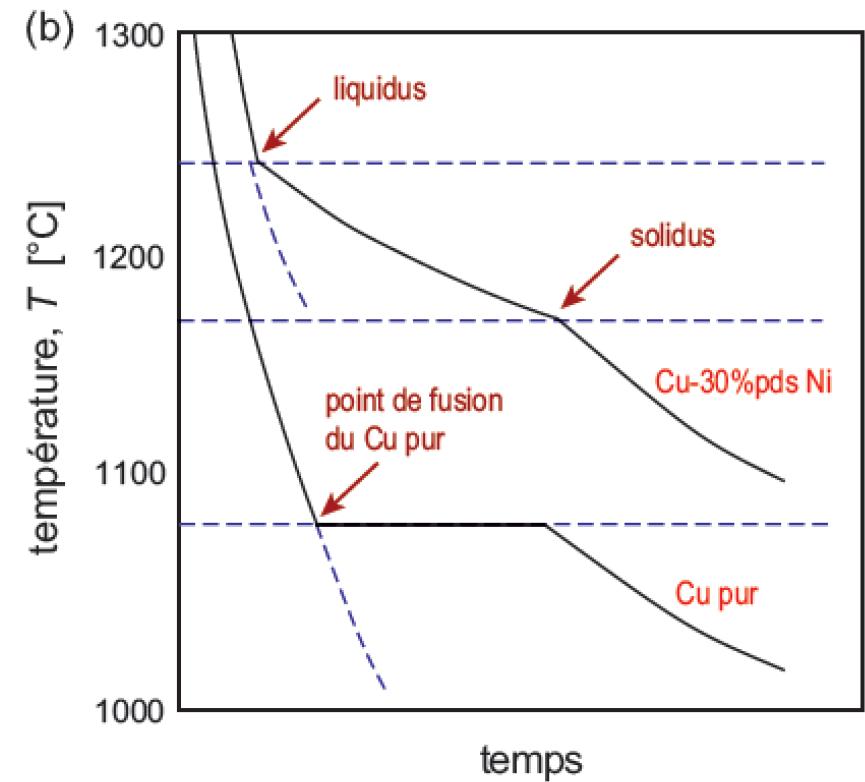
Systèmes binaires

Exemple: Diagramme Cuivre-Nickel.



Concentration: attention,
parfois %molaires, parfois %
massiques

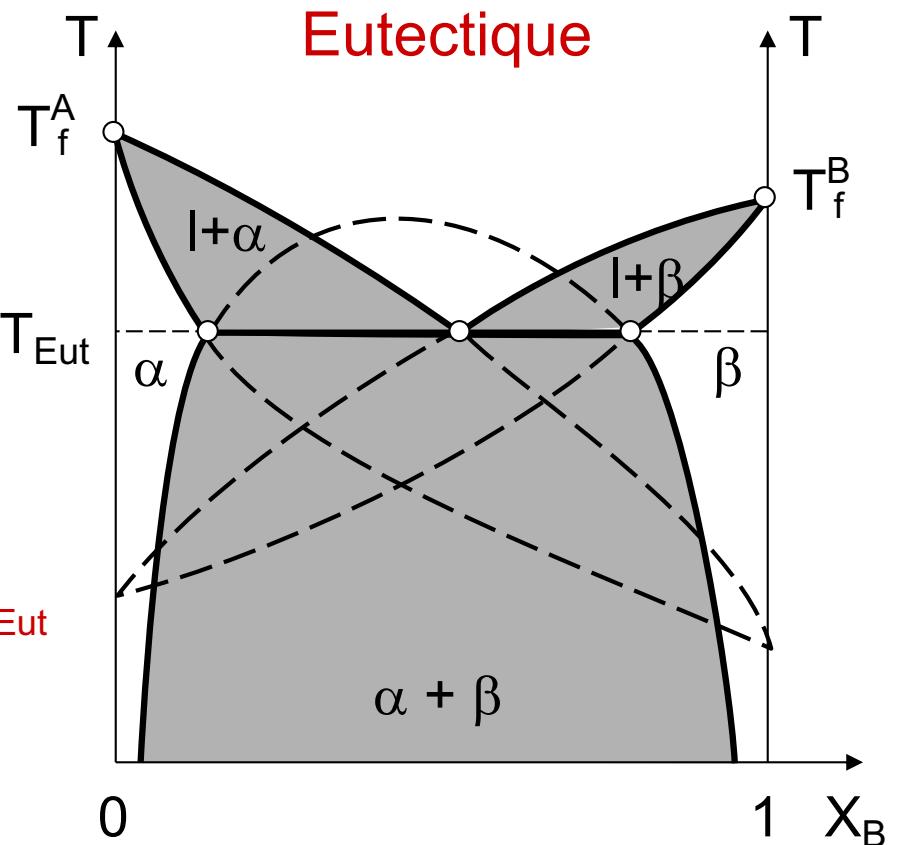
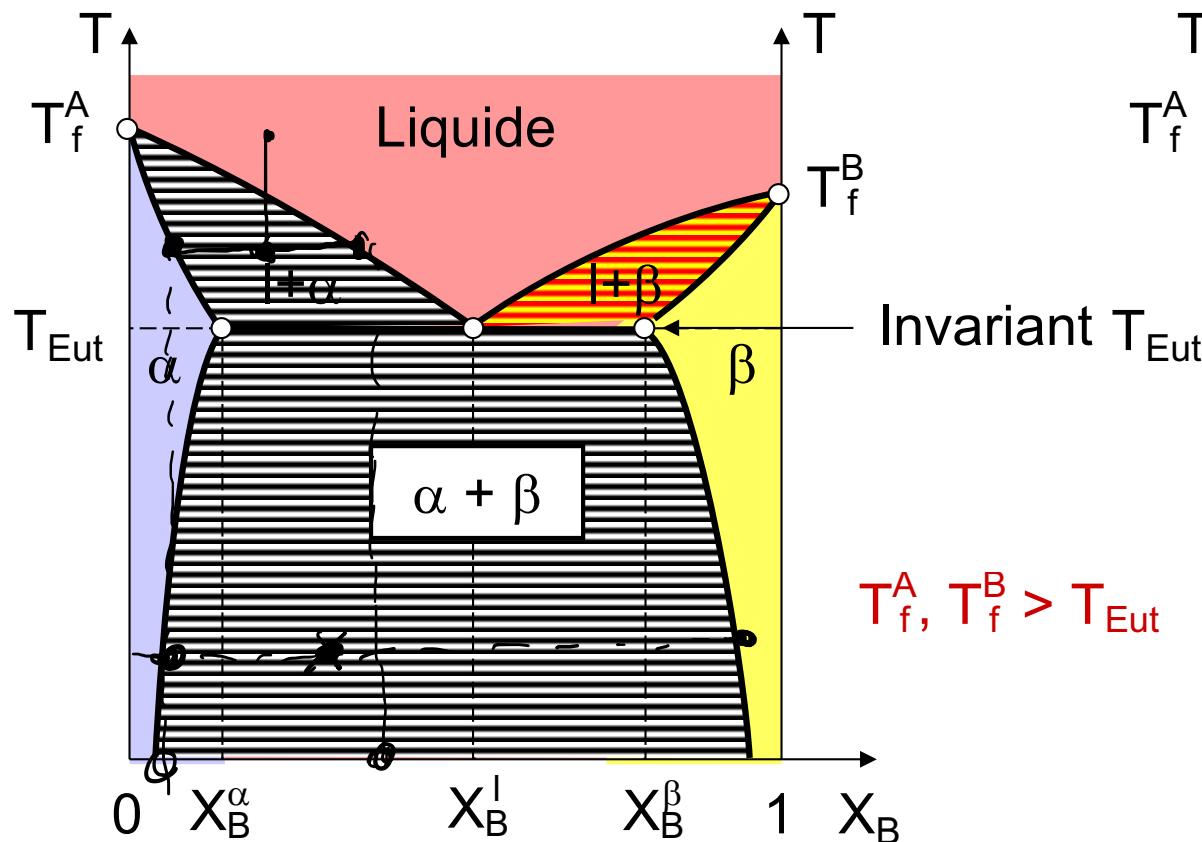
Cu-10%pds Ni



Cours No 4

Systèmes binaires

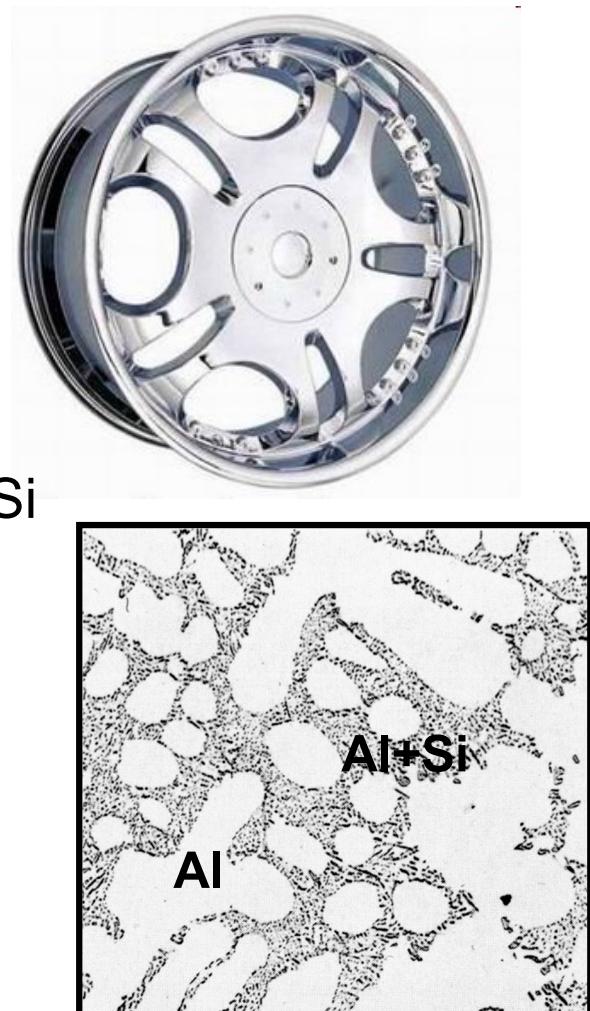
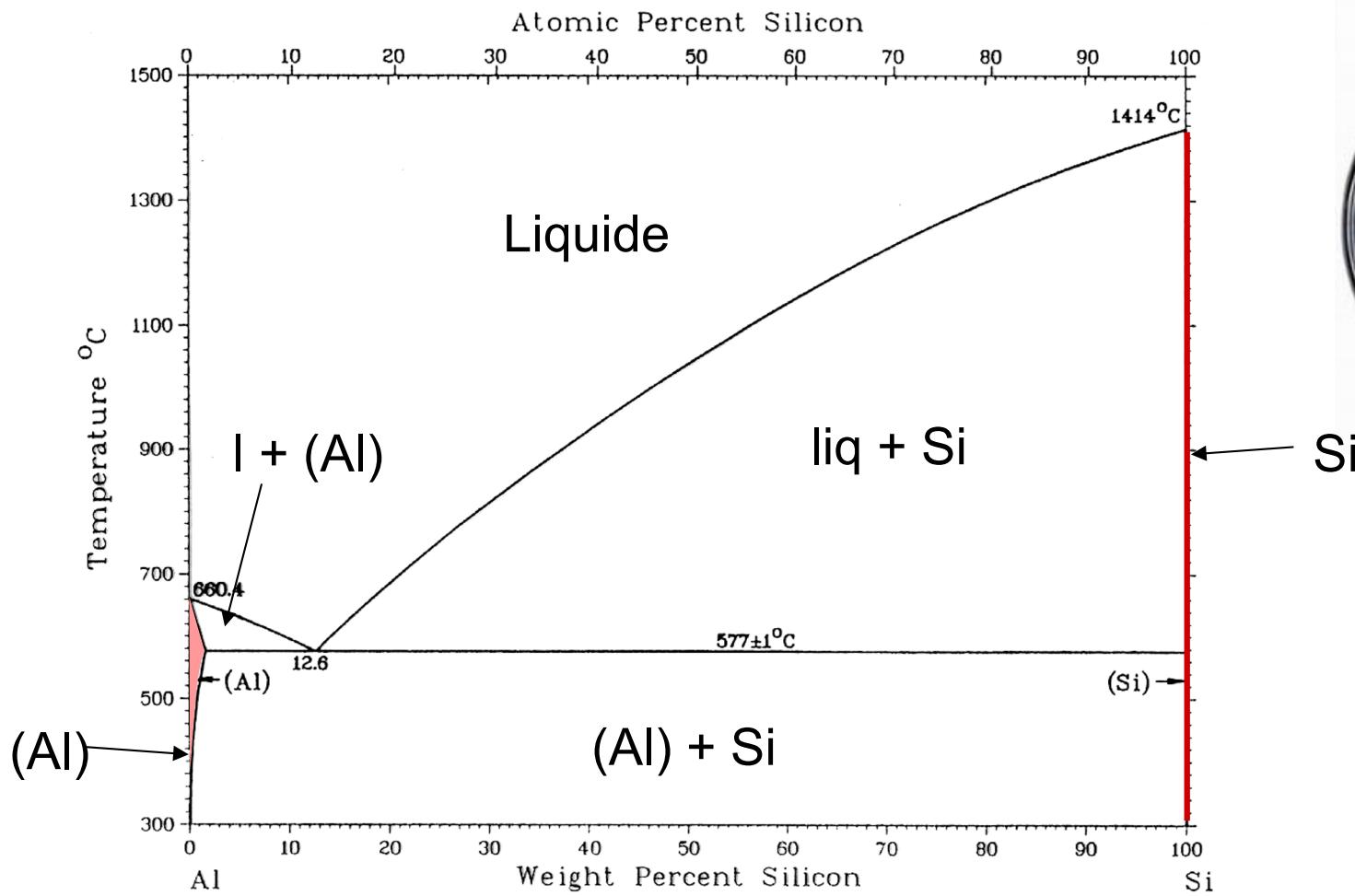
Si l'on fixe p avec **3 phases en présence**, il ne reste plus aucun degré de liberté: **Invariant**.



Lorsqu'une phase liquide co-existe avec deux phases solide α et β de part et d'autre, on parle d'**eutectique**. Un alliage de composition eutectique fond à une température unique, T_{Eut} , plus faible que les points de fusion de α et β .

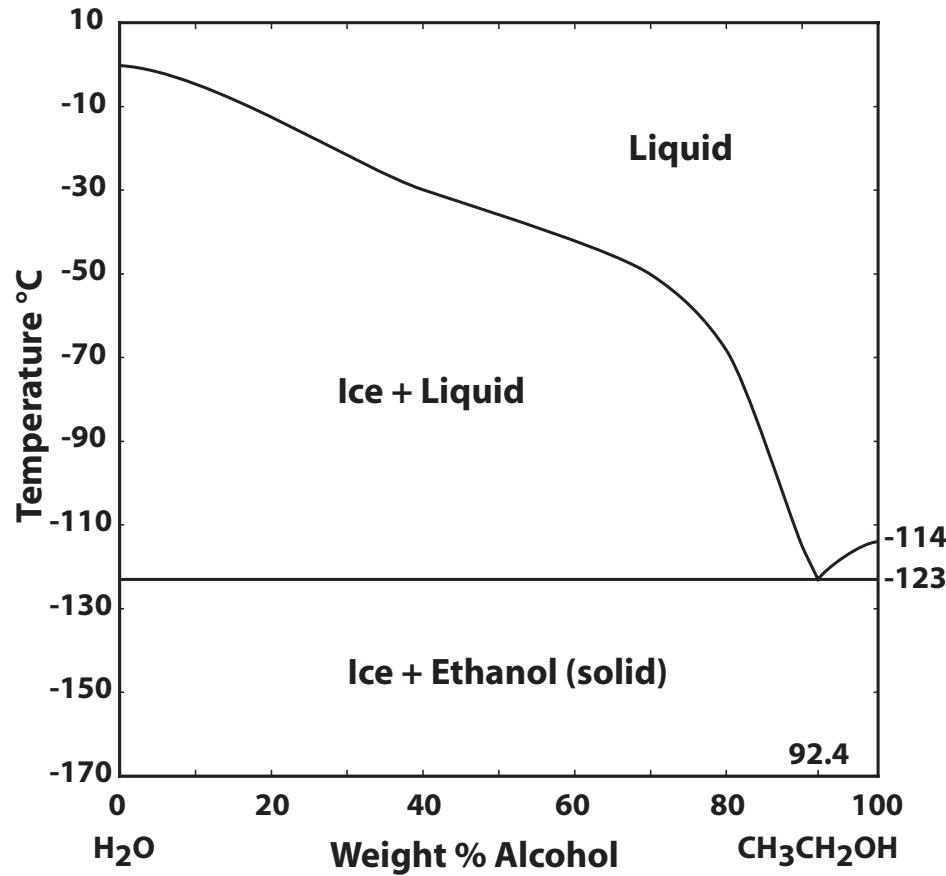
Systèmes binaires

Un exemple de diagramme eutectique: **l'alliage binaire Al-Si**, constituant la base des alliages de fonderie pour le moulage.



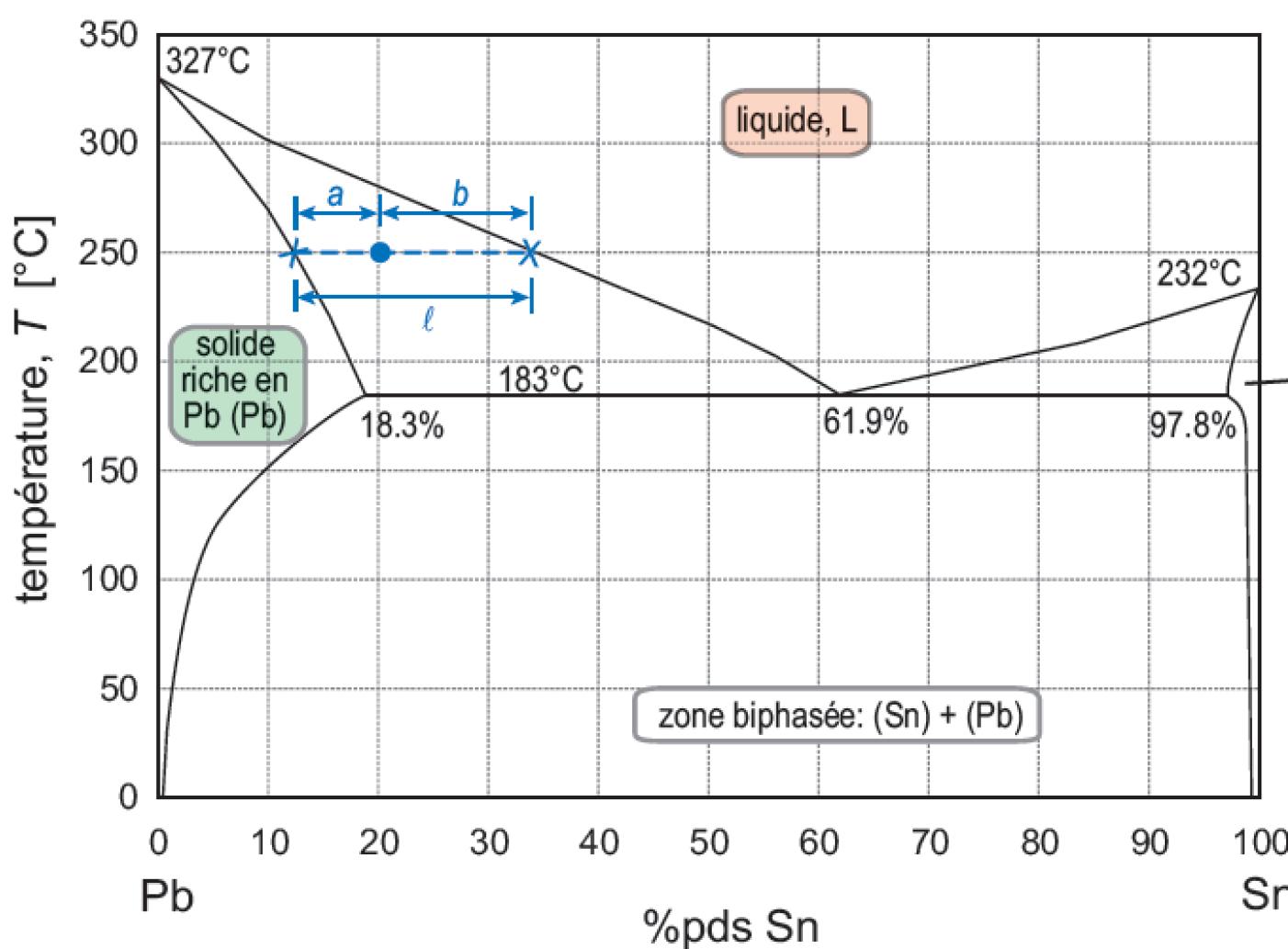
Systèmes binaires

Autre exemple de diagramme eutectique: **eau-ethanol**.



Systèmes binaires

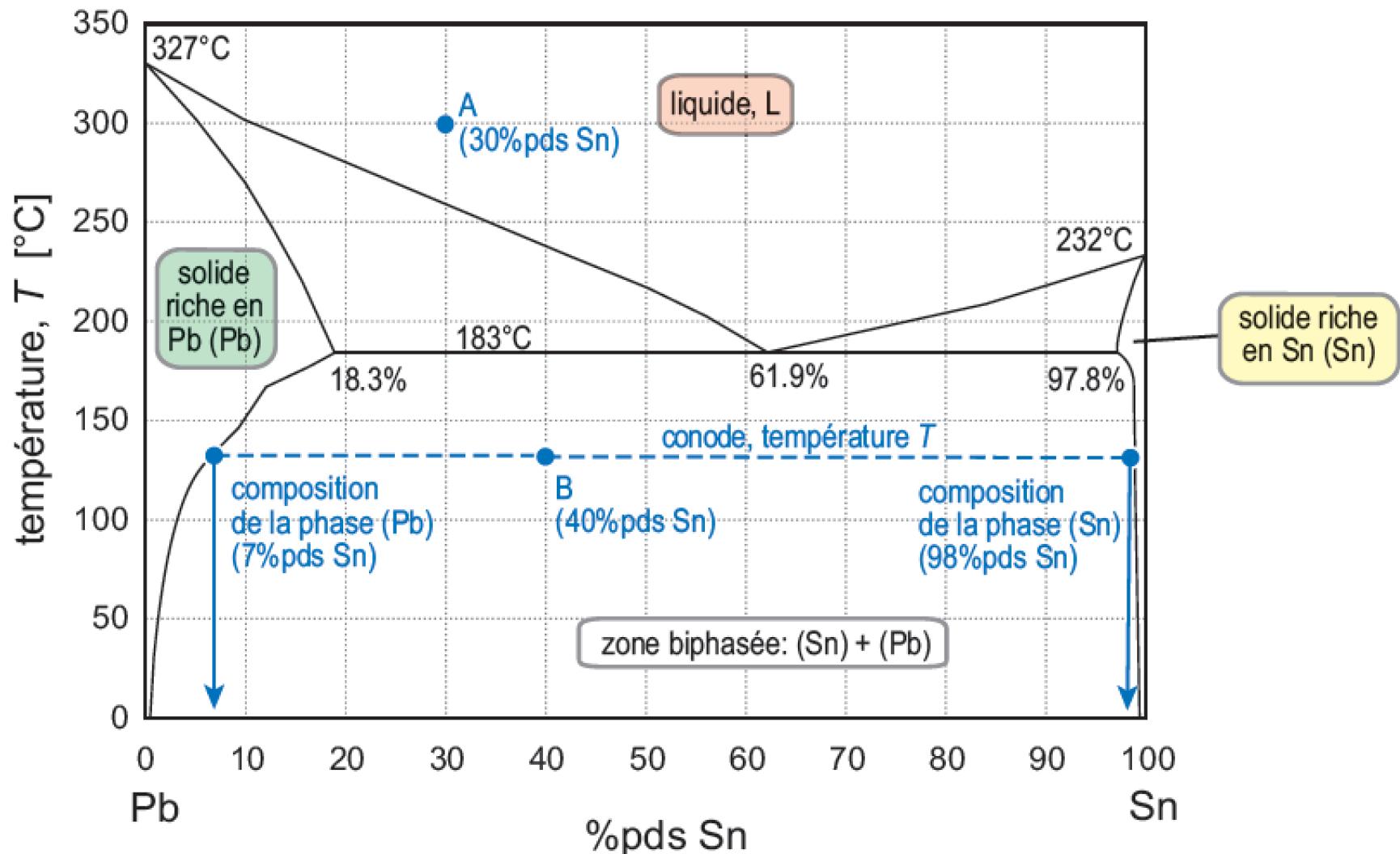
Exemple Pb-Sn



$$\chi_s = \frac{X_B^l - X_{B0}}{X_B^l - X_B^s} = \frac{b}{a + b}$$

Systèmes binaires

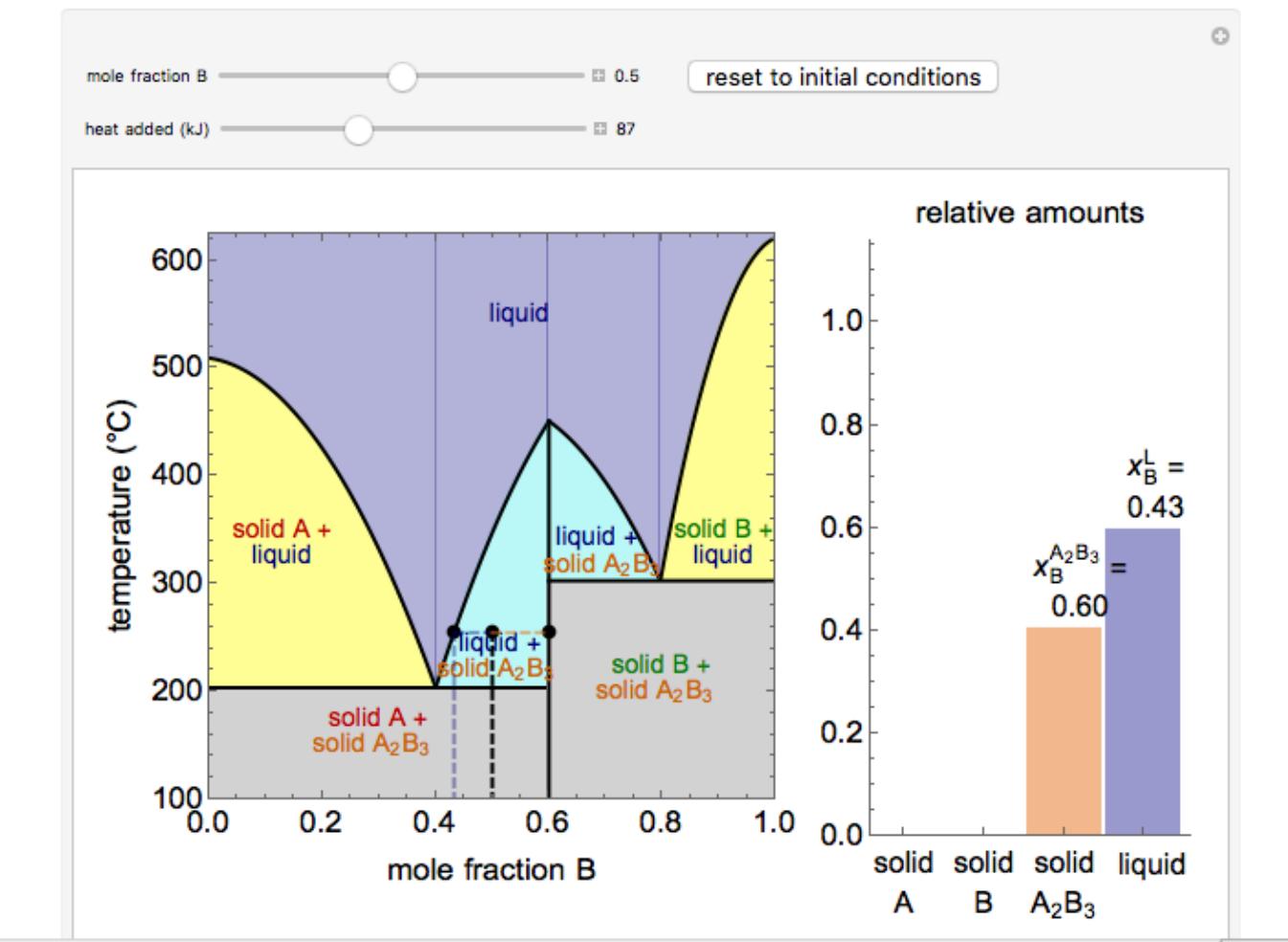
Exemple Pb-Sn



Systèmes binaires

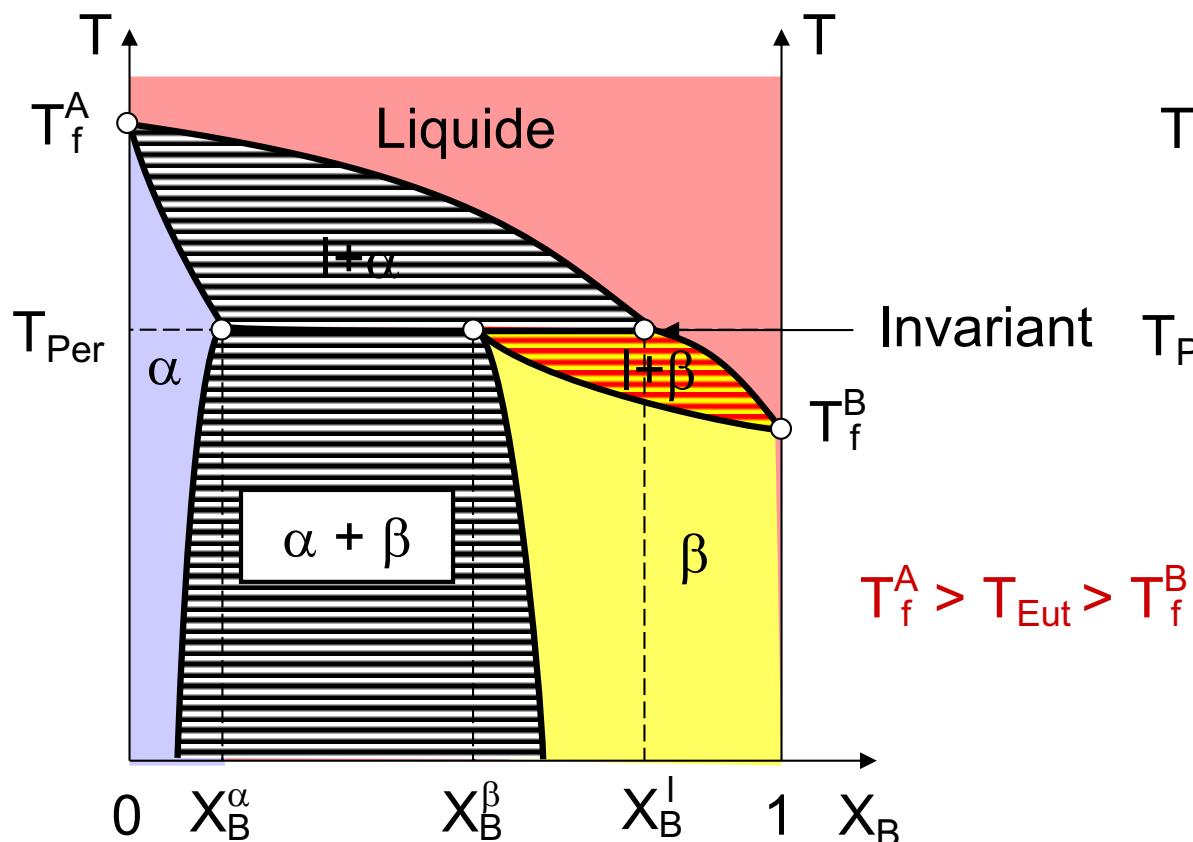
Exemple **interactif** A-B, avec pas de solubilité de B dans A ni de A dans B, et formation d'un intermétallique A_2B_3

Solid-Solid-Liquid Equilibrium

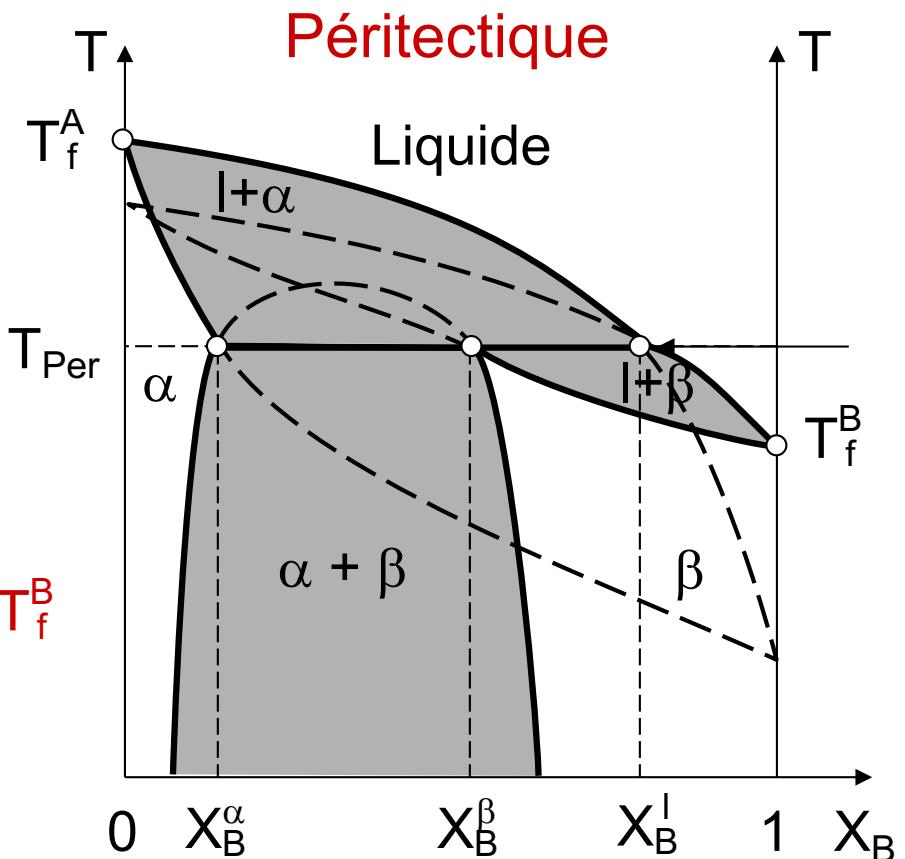


Systèmes binaires

Lorsque la phase liquide co-existe avec deux phases solides α et β situées du même côté, on parle de **péritectique**.



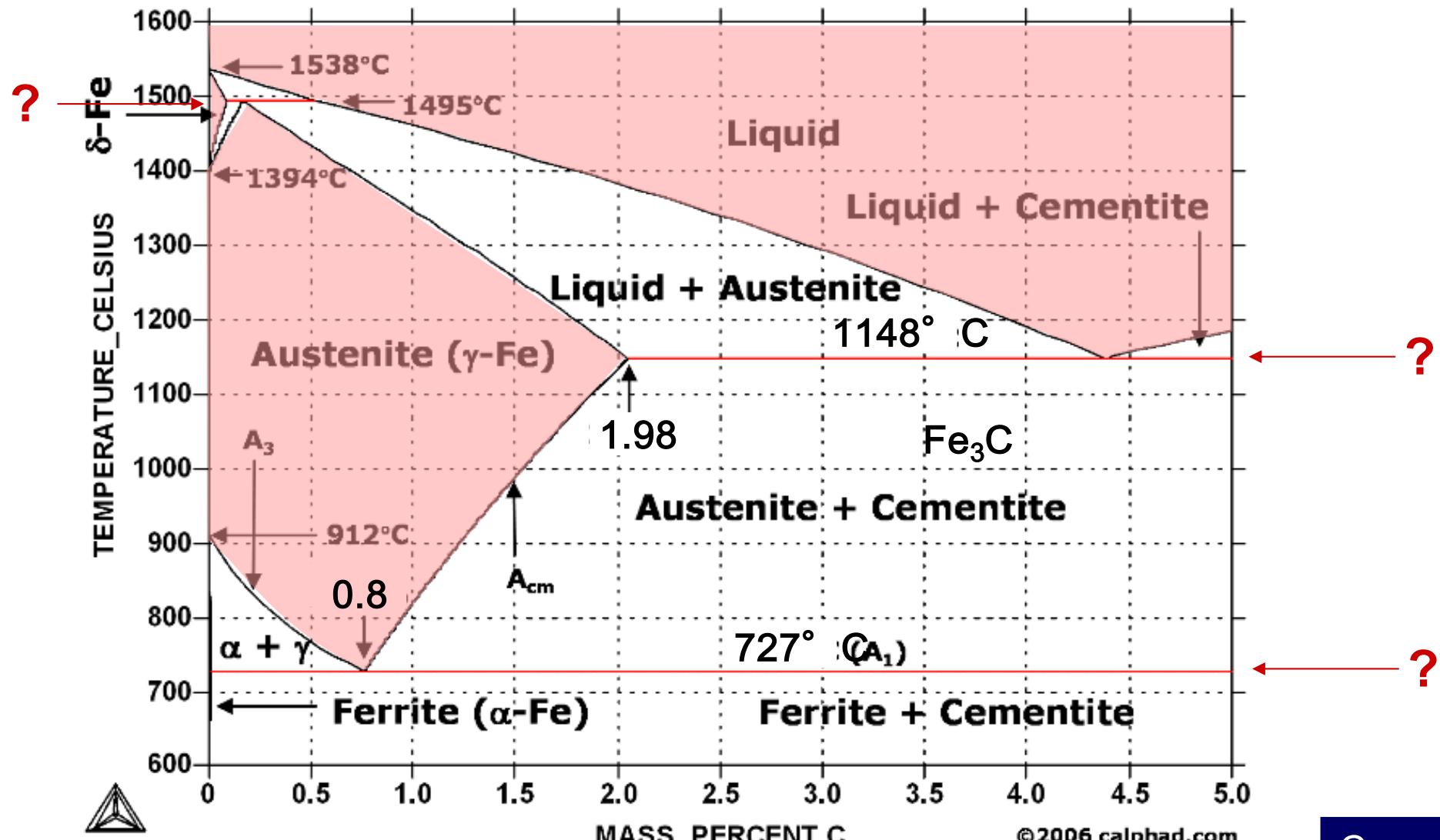
$$T_f^A > T_{Eut} > T_f^B$$



Les mêmes réactions, impliquant une phase parente solide, portent le suffixe “-oïde” : **eutectoïde**, **péritectoïde**.

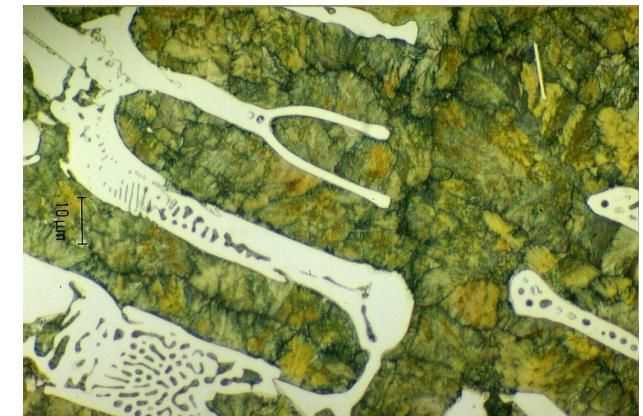
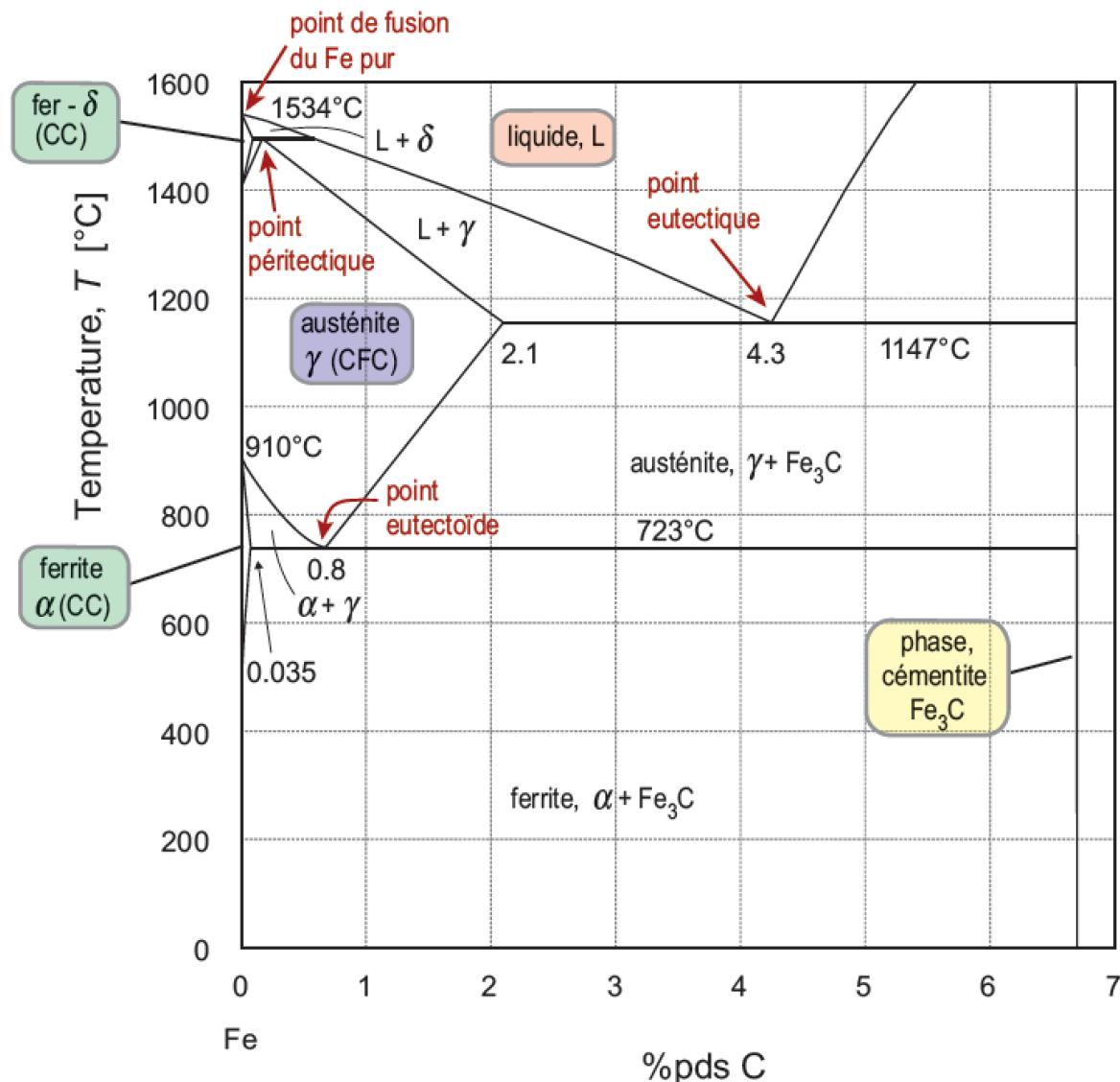
Systèmes binaires

Un diagramme réel, tel que celui de Fe et C, peut être décomposé en un ensemble de zones **monophasées**, **biphases** et d'**invariants**.

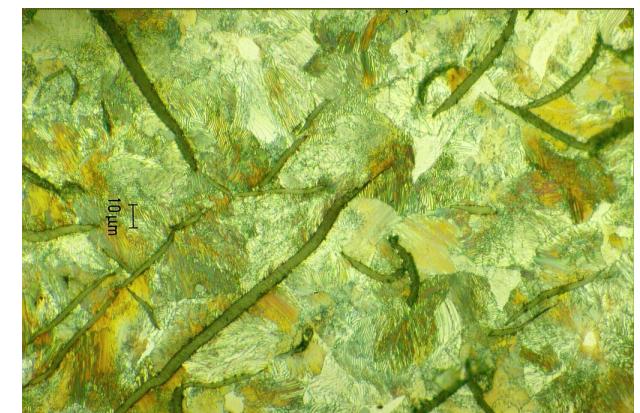


Systèmes binaires

Diagramme Fer Carbone

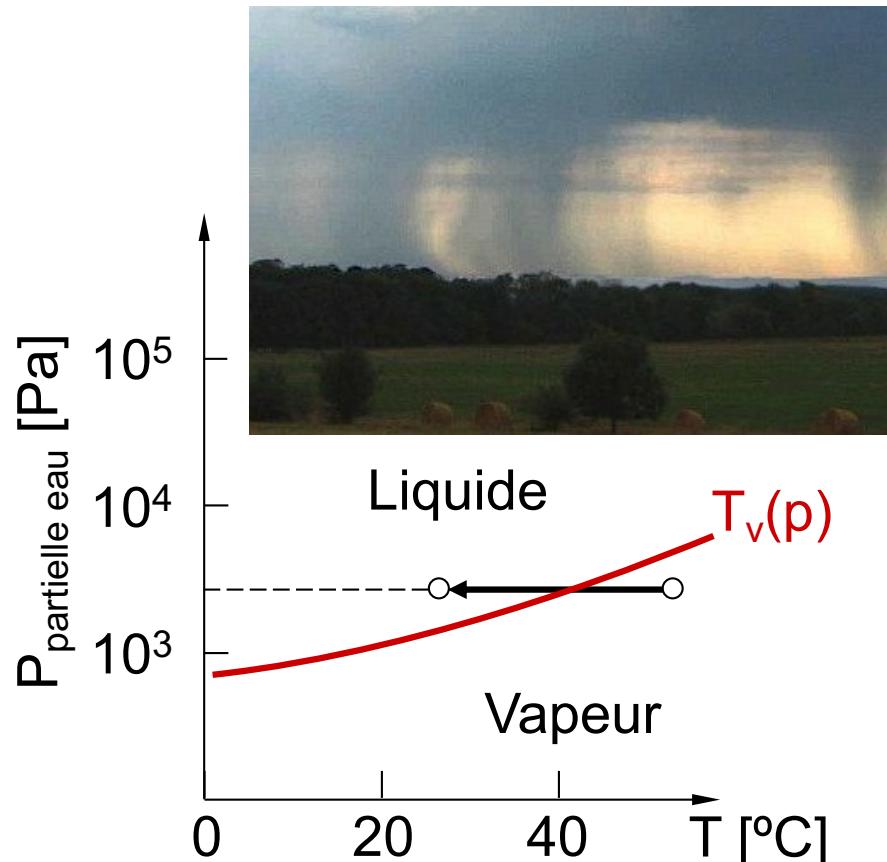


Exemples de microstructures de fonte

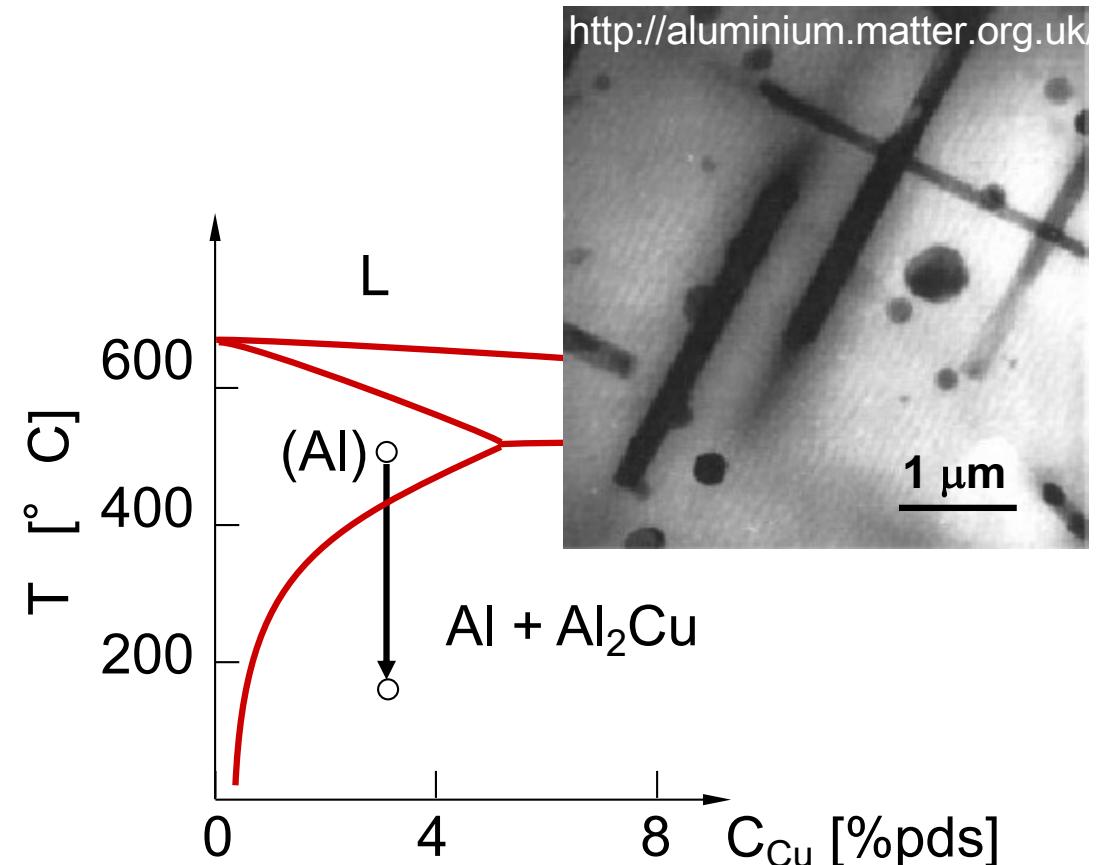


Formation des microstructures

Lorsque l'on amène un système d'un domaine d'équilibre dans un autre, il doit y avoir **formation d'une nouvelle phase**.



Un front chaud humide rencontrant un front froid donne ... **des précipitations!**

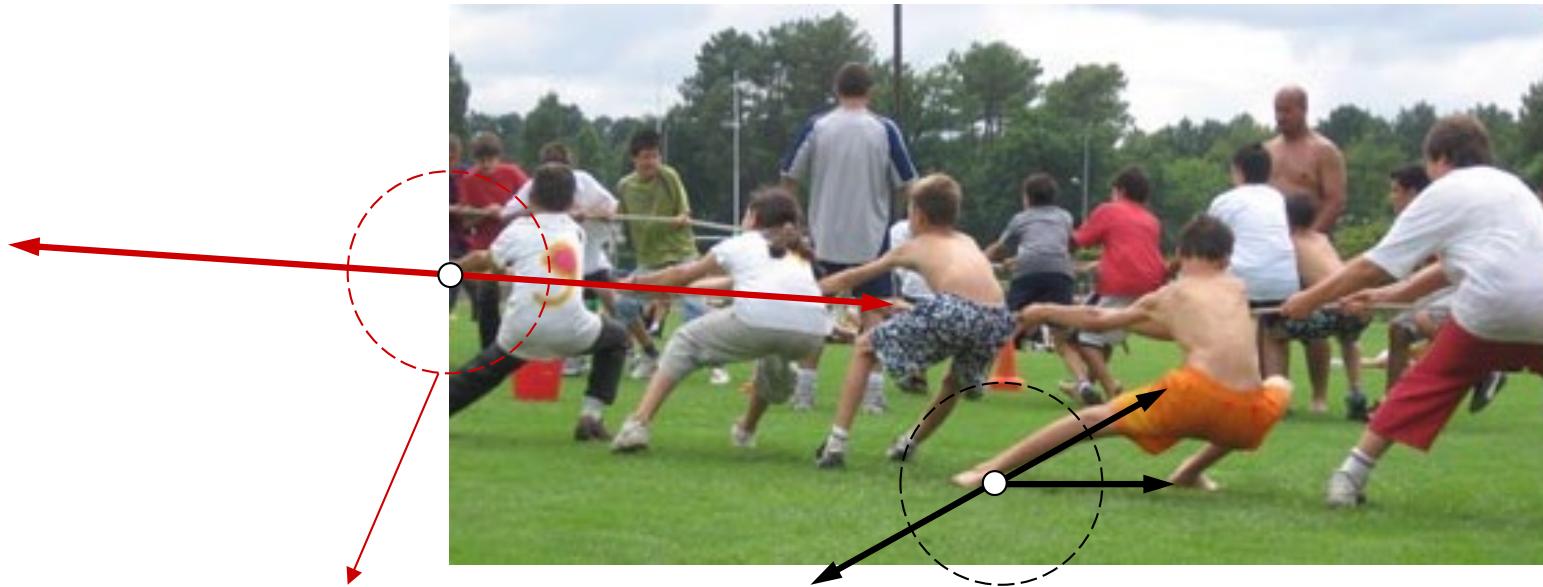


Un alliage Al-Cu refroidi forme des **précipités Al_2Cu**

Table des matières

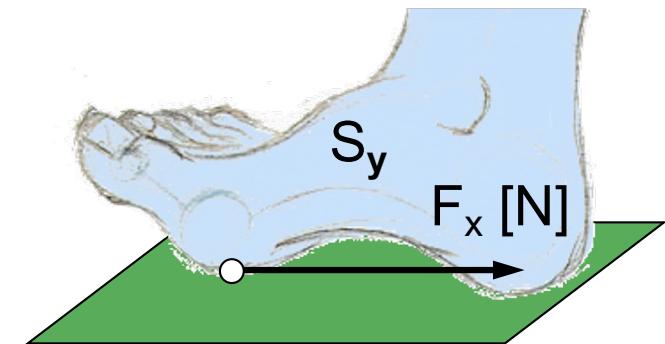
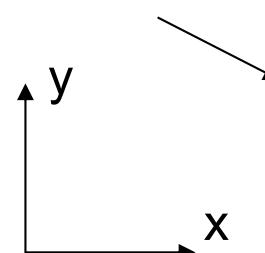
- Contraintes et déformations
- Origine de l'élasticité
- Traction / compression uniaxiale
- Compression hydrostatique
- Propriétés élastiques des matériaux
- Choix des matériaux

Contraintes et déformations



$$\text{Contrainte: } \sigma_{xx} = \frac{F_x}{S_x} \quad [\text{Pa} = \text{Nm}^{-2}]$$

Traction



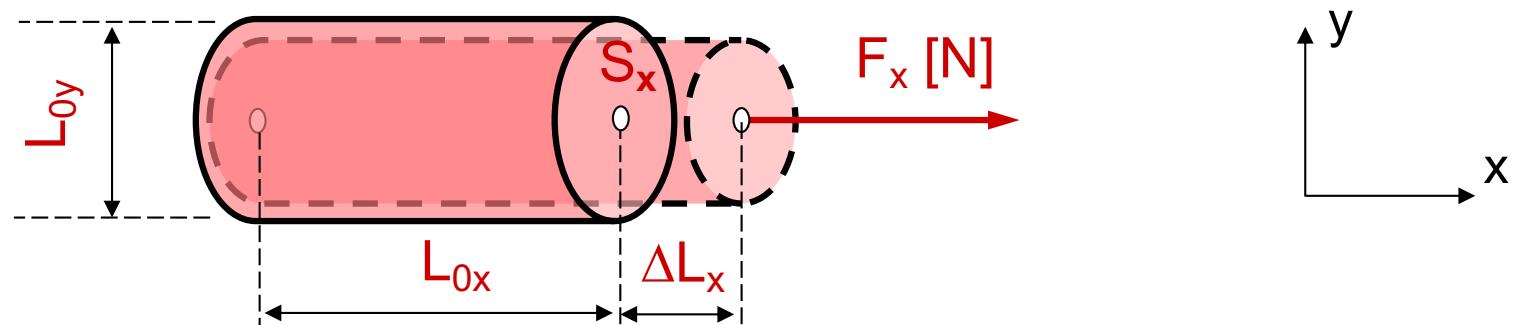
$$\text{Contrainte: } \sigma_{xy} = \frac{F_x}{S_y} \quad [\text{Pa} = \text{Nm}^{-2}]$$

Cisaillement

Cours No 5

Contraintes et déformations

Lorsqu'un corps est soumis à des forces (**contraintes**) externes, il se **déforme**.

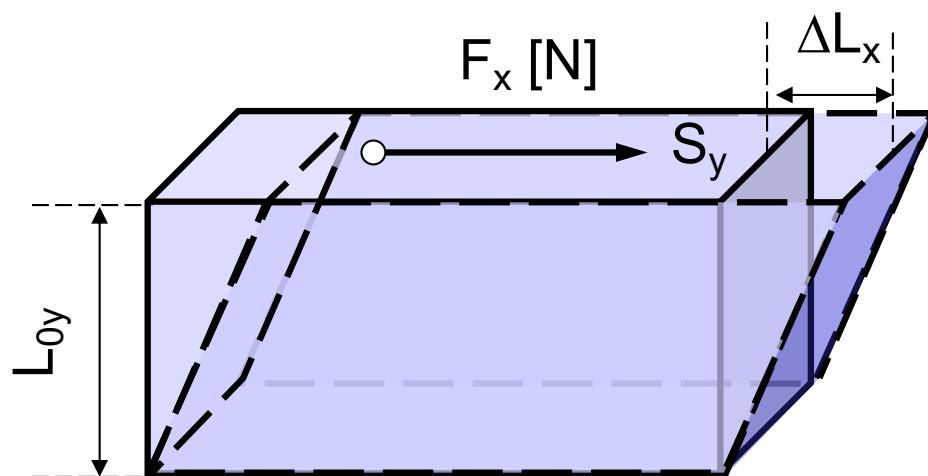


Traction:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\Delta L_x}{L_{0x}}$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\Delta L_y}{L_{0y}}$$

Les déformations ε sont sans dimension !



Cisaillement

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \frac{\Delta L_x}{L_{0y}}$$

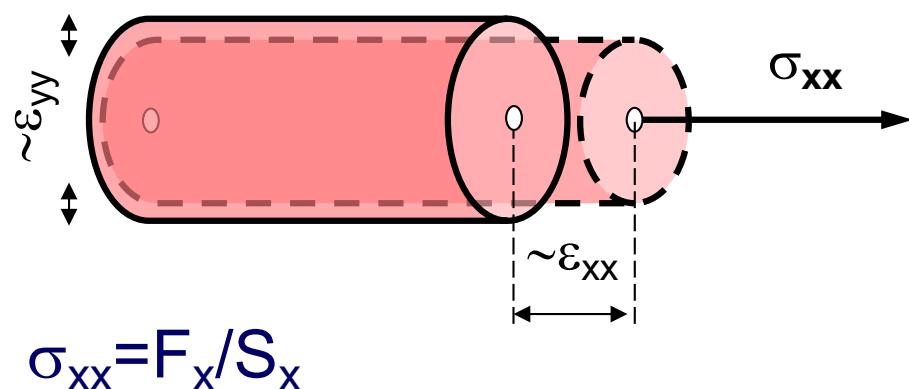
(Facteur $\frac{1}{2}$ par convention)

Traction /compression uniaxiale



Dans une gamme de déformation dite **élastique**, un corps soumis à une charge normale se déforme mais revient à sa position originale une fois déchargé (**déformation réversible**).

Si la relation entre contrainte et déformation est linéaire, on parle de déformation élastique linéaire.

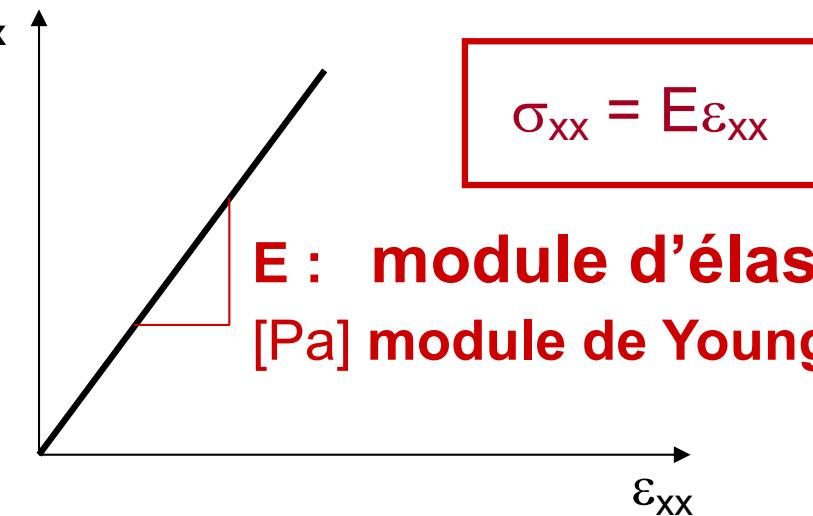


$$\sigma_{xx} = F_x / S_x$$

On observe $F_x = k \Delta l$

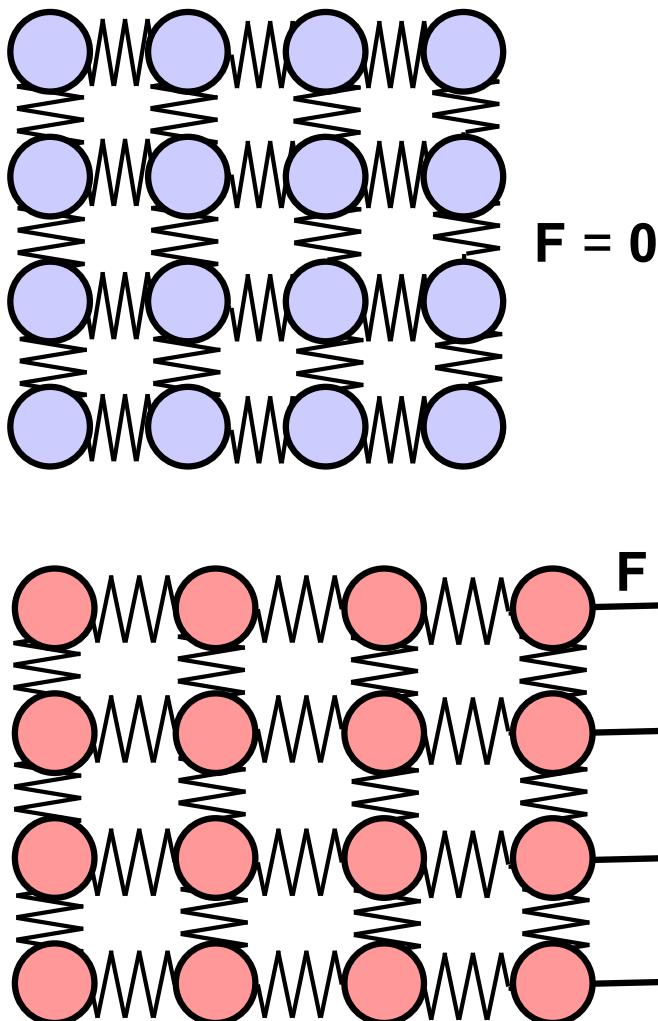
41 Alors $\sigma_{xx} = k \Delta l / S_x = k l_0 / S_x \cdot \Delta l / l_0 = E \varepsilon_{xx}$

Loi de Hook:



Origine de l'Elasticité

Pour un cristal, il est aisé de relier les propriétés élastiques aux liaisons interatomiques.



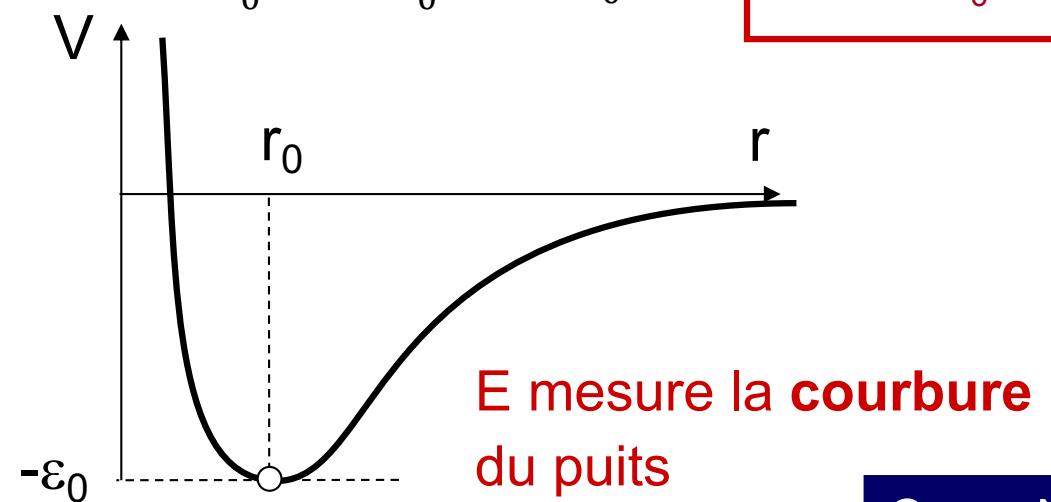
En prenant un potentiel de Lennard-Jones:

$$V = \epsilon_0 \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} - 2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \right] \quad \text{et} \quad F(r) = -\frac{dV}{dr}$$

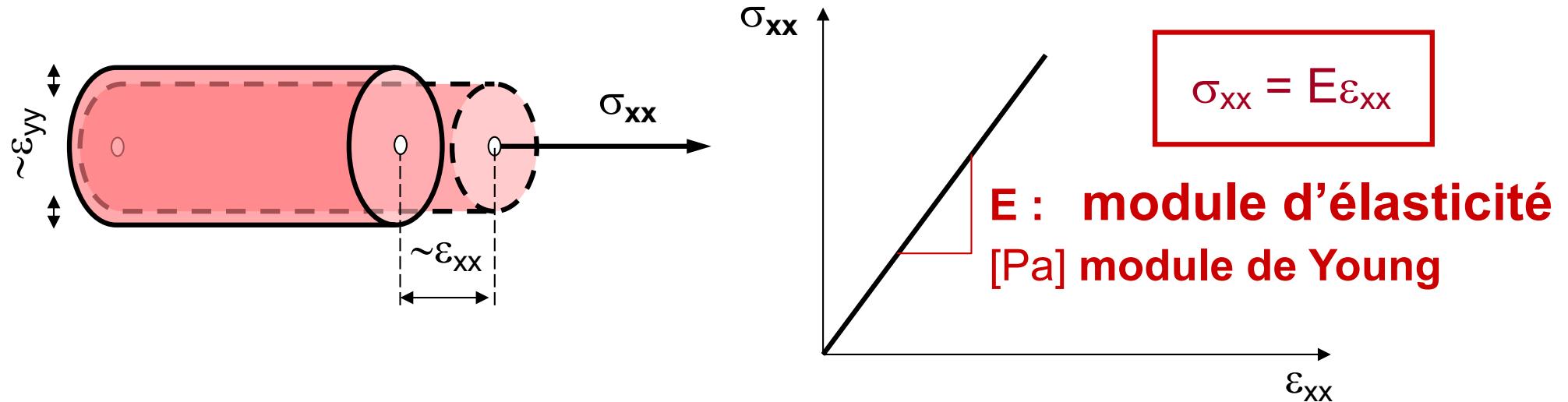
On a en traction uniaxiale, autour de la position d'équilibre:

$$\frac{F(r)}{r_0^2} = \frac{72\epsilon_0}{r_0^3} \times \frac{r - r_0}{r_0}$$

$$E = \frac{72\epsilon_0}{r_0^3}$$



Traction/compression uniaxiale



$$\varepsilon_{yy} = -\nu\varepsilon_{xx}$$

ν : le coefficient de Poisson mesure la contraction latérale, ou transverse, lors d'une déformation uniaxiale.

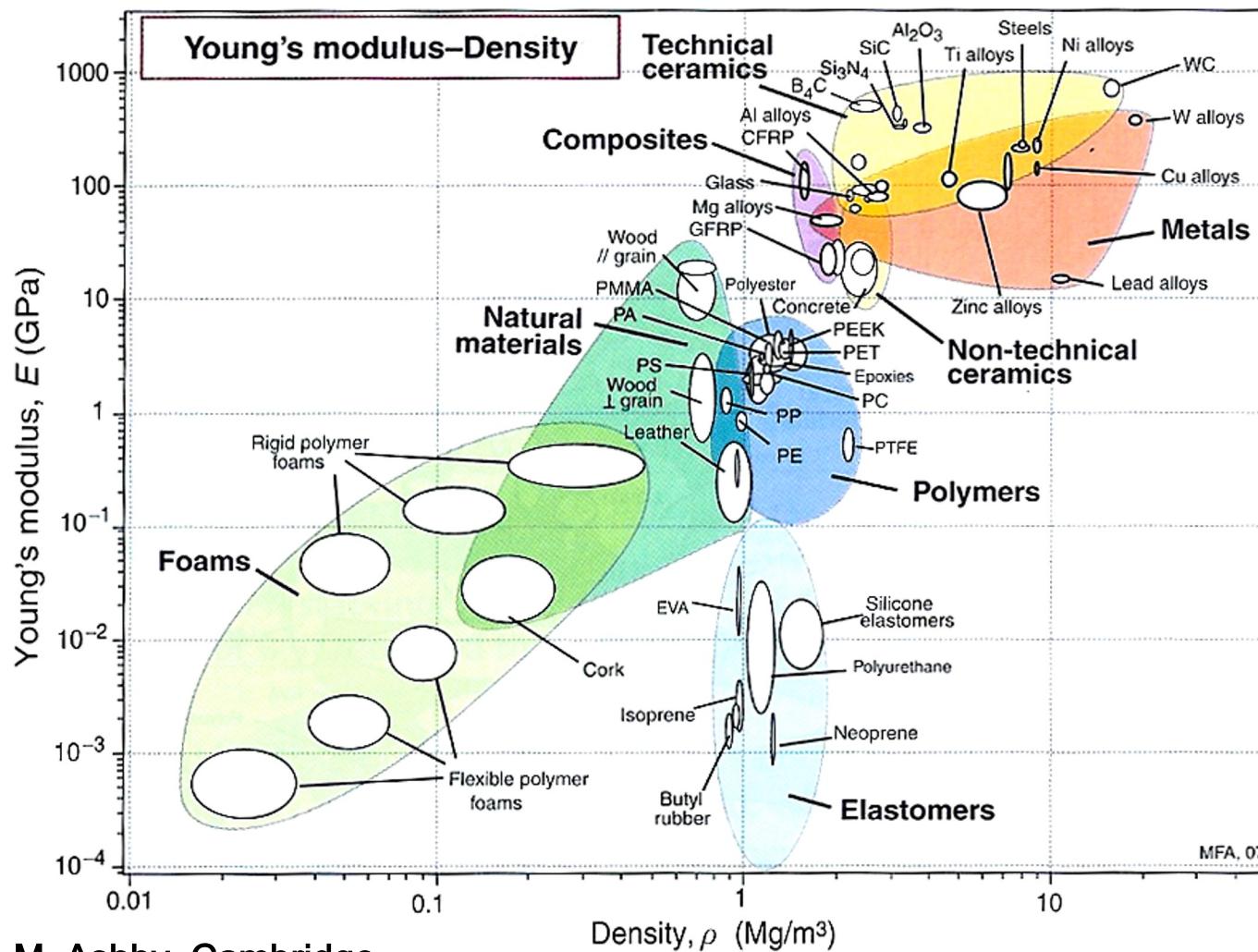
Traction/compression uniaxiale

Quelques coefficients:

Matériaux	E [GPa]	v [-]
Caoutchouc	0.001-0.1	~0.5
PTFE (Teflon)	0.5	0.46
Nylon	2 - 4	0.39
Chêne	11	0.3
Béton (en compression)	30	0.2
Aluminium	69	0.33
Verre	50 - 90	0.18 - 0.3
Acier	200	0.3
Saphir (Al ₂ O ₃) axe c	435	0.3
Carbure de silicium (SiC)	450	0.17
Carbure de tungstène (WC)	450 - 650	0.22
Nanotubes de carbone	>1.000	~0.2
Diamant	1220	0.1

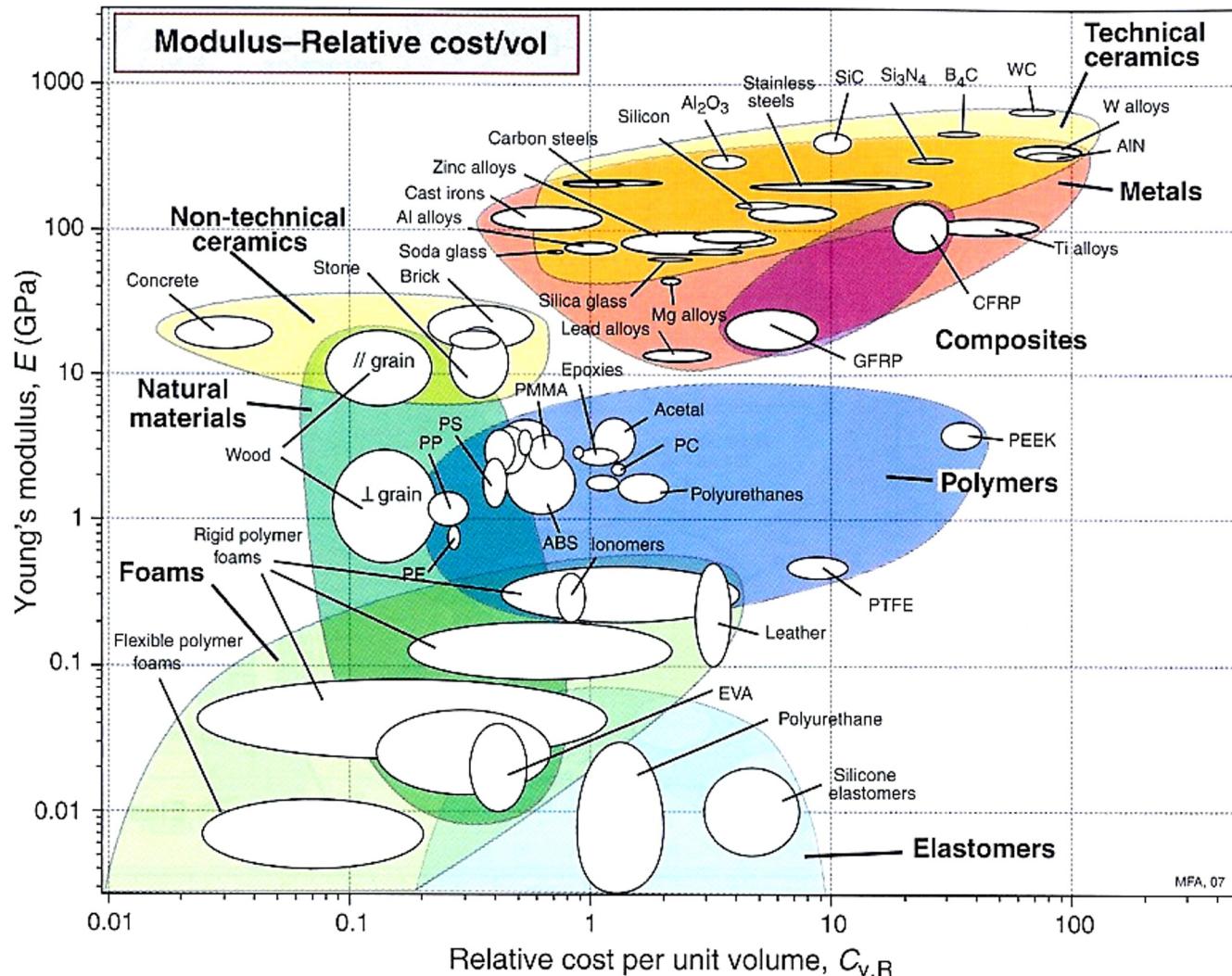
Traction/compression uniaxiale

Les cartes d'Ashby donnent une représentation graphique du module d'élasticité (ou de Young) en fonction de la densité...



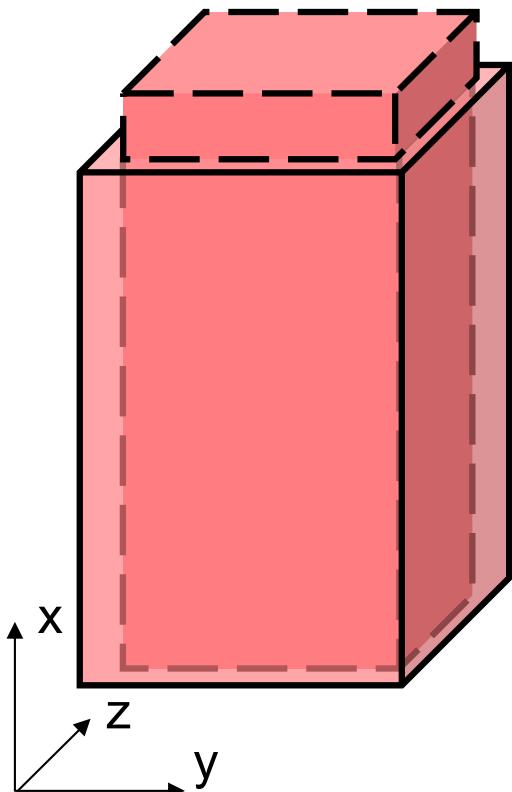
Traction/compression uniaxiale

... ou du prix.



Traction/compression uniaxiale

Lors d'une déformation uniaxiale (ou autre), le matériau subit un **changement de volume** donné par:



$$V_0 = L_{0x} \times L_{0y} \times L_{0z}$$

$$V = (L_{0x} + \Delta L_{0x}) \times (L_{0y} + \Delta L_{0y}) \times (L_{0z} + \Delta L_{0z})$$

$$\frac{V}{V_0} = (1 + \varepsilon_{xx}) \times (1 + \varepsilon_{yy}) \times (1 + \varepsilon_{zz}) \cong 1 + (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz})$$

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V - V_0}{V_0} \approx \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \varepsilon_{xx}(1 - 2\nu)$$

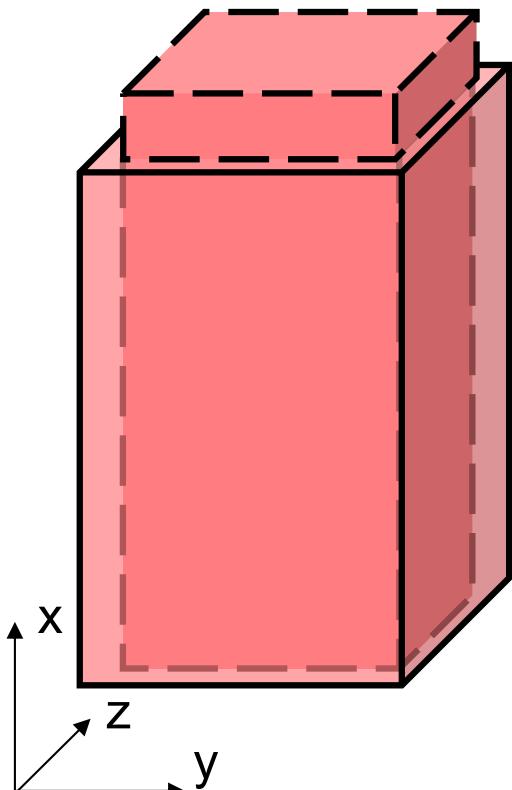
Le module de Poisson est donc ≤ 0.5 .

Le caoutchouc, avec $\nu \cong 0.5$ se déforme élastiquement presque sans changement de volume.

Traction/compression uniaxiale

Lors d'une déformation uniaxiale (ou autre), le matériau subit aussi un **changement section efficace**:

$$S_0 = L_{0y}L_{0z}$$



$$S = L_y L_z$$

$$S = L_{0y}(1 - \nu \varepsilon_{xx}) \times L_{0z}(1 - \nu \varepsilon_{xx})$$

$$S = S_0(1 - 2\nu \varepsilon_{xx} + \nu^2 \varepsilon_{xx}^2) \approx S_0(1 - 2\nu \varepsilon_{xx})$$

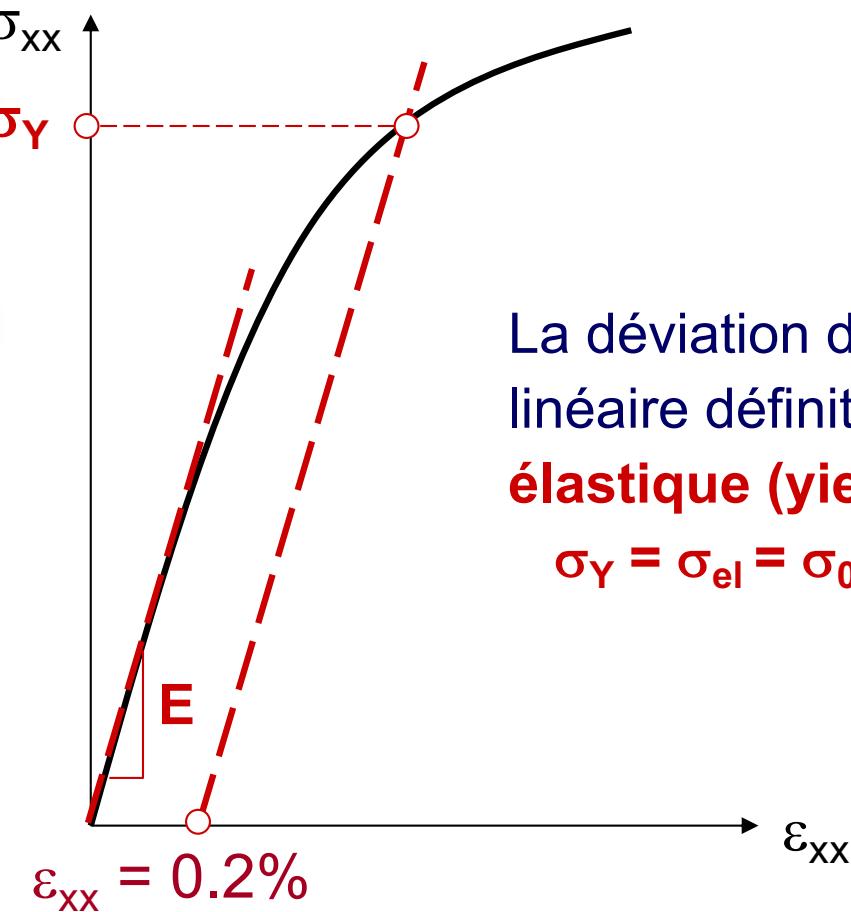
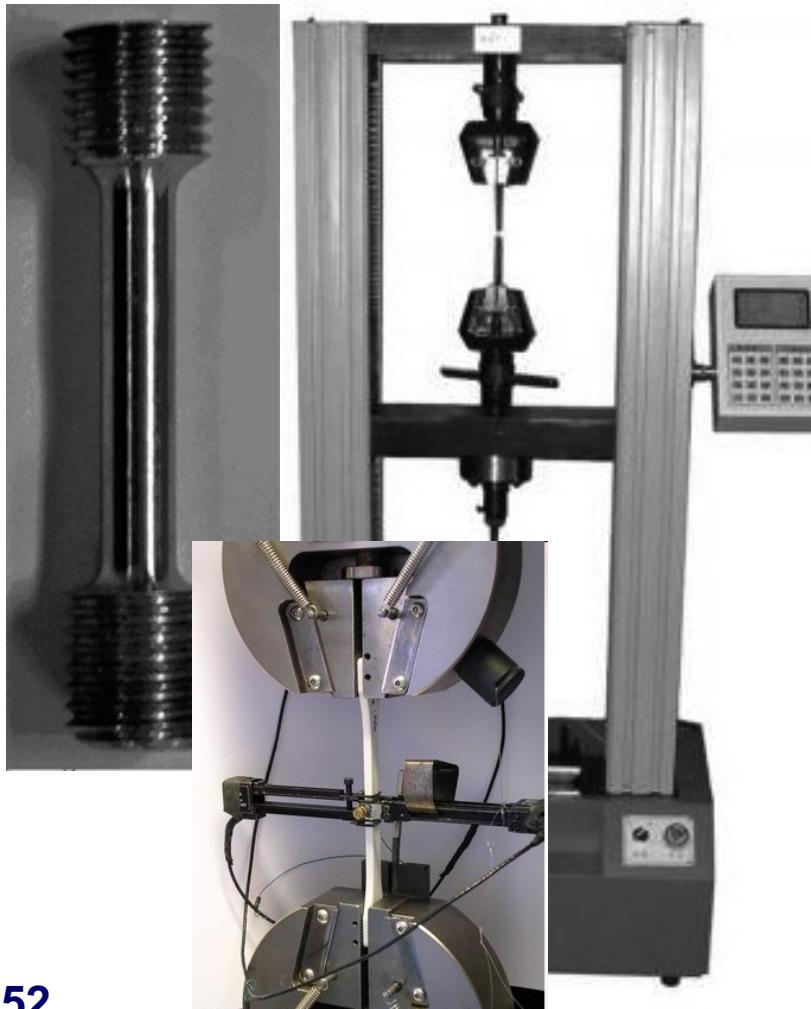
$$\frac{\Delta S}{S_0} = \frac{S - S_0}{S_0} = -2\nu \varepsilon_{xx}$$

Et pour une section cylindrique: $\varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = \frac{\Delta r}{r_0} = -\nu \varepsilon_{xx}$

$$S = \pi(r + \Delta r)^2 = \dots$$

Traction/compression uniaxiale

La mesure du module élastique et du coefficient de Poisson se fait généralement sur une **éprouvette de traction**. On impose un mouvement et on mesure force/allongement par des capteurs.

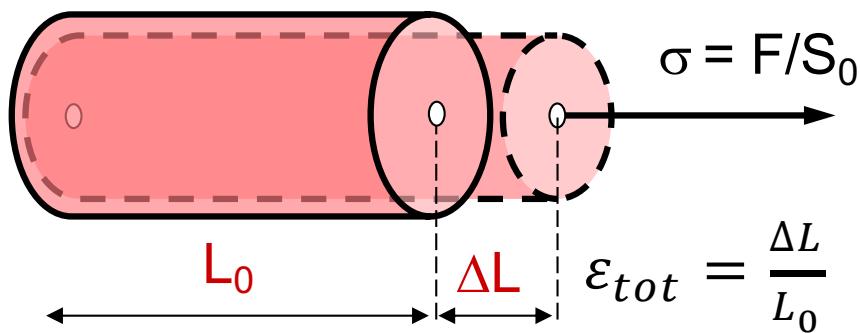


La déviation du comportement linéaire définit **une limite élastique (yield strength)**

$$\sigma_Y = \sigma_{el} = \sigma_{0.2\%}$$

Energie Elastique

Pour déformer élastiquement un matériau, il faut lui appliquer une contrainte et donc fournir une énergie. Cette énergie est emmagasinée dans le matériau sous forme d'énergie élastique.



Le travail à fournir pour déformer le matériau d'une longueur dl est:

$$dW = F dl$$

Soit au total: $W = \int_{L_0}^{L_0 + \Delta L} F dl$

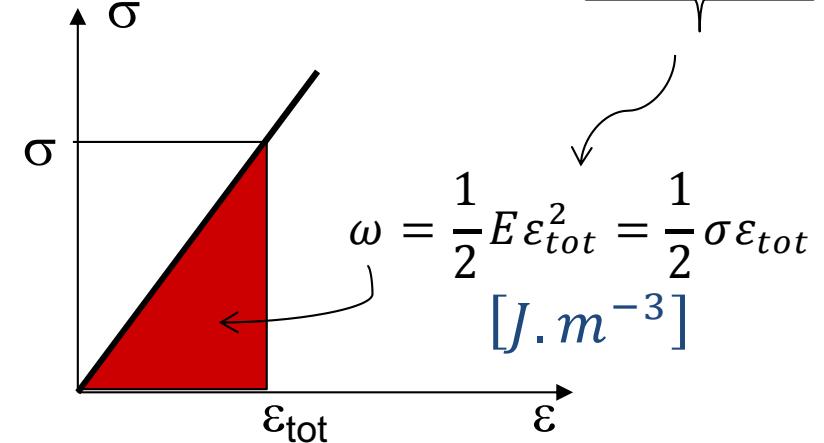
Un changement de variable $\varepsilon = \frac{l - L_0}{L_0}$

Nous permet d'écrire: $W = S_0 L_0 \int_0^{\varepsilon_{tot}} \sigma d\varepsilon$

Incrément de densité d'énergie élastique:

$$dw = \sigma_{xx} d\varepsilon_{xx} \quad [\text{J/m}^3]$$

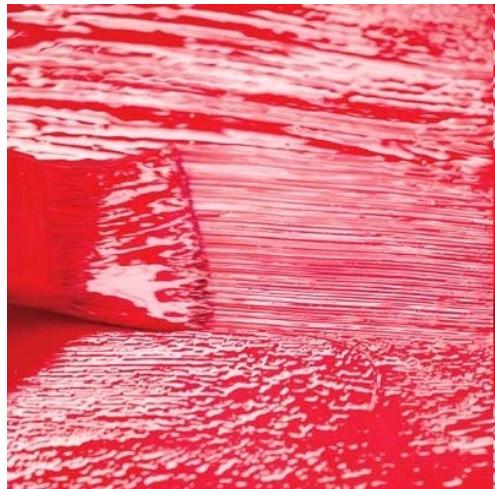
Energie élastique [J]: $W = \frac{E \varepsilon_{xx}^2}{2} V$



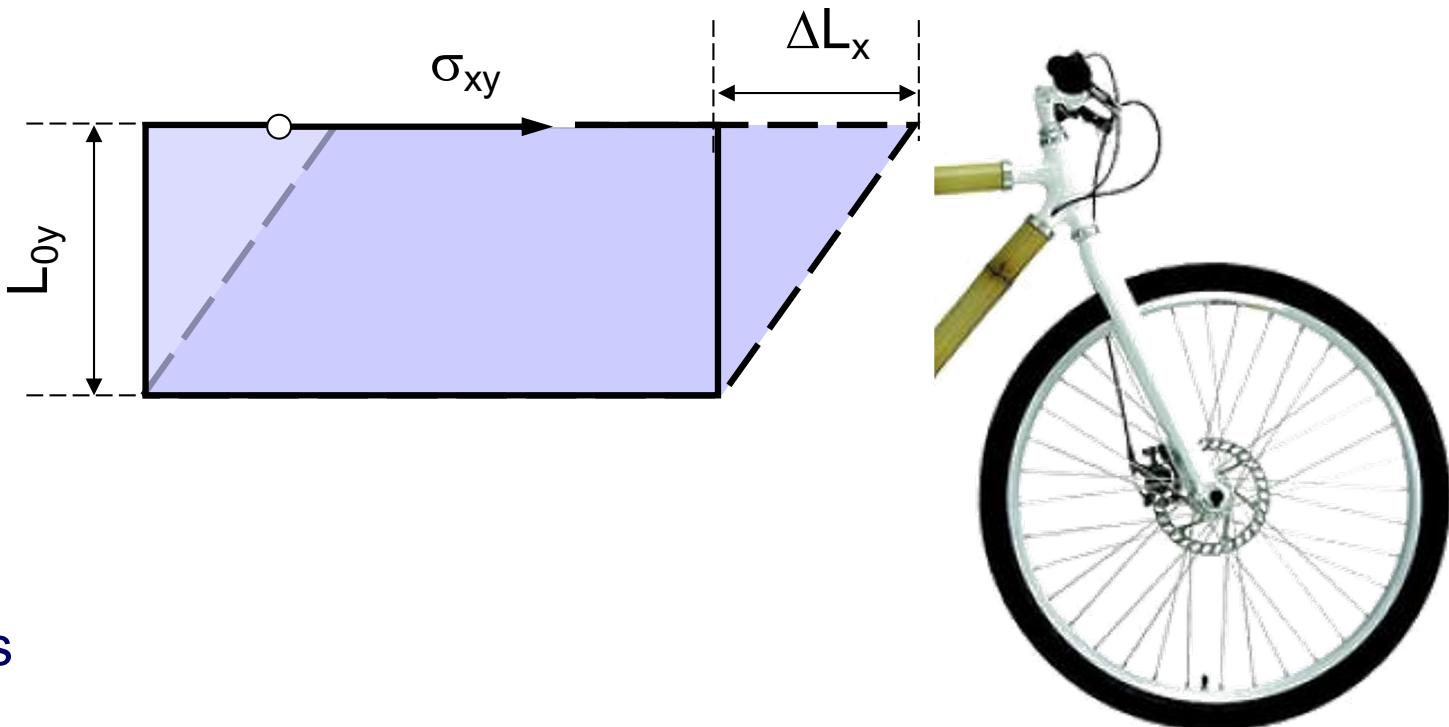
Cisaillement simple

Un corps soumis à un cisaillement simple élastique permet de définir un **module de cisaillement G**.

$$\sigma_{xy} = G \underline{2\varepsilon_{xy}} = G \frac{\Delta L_x}{L_{oy}}$$



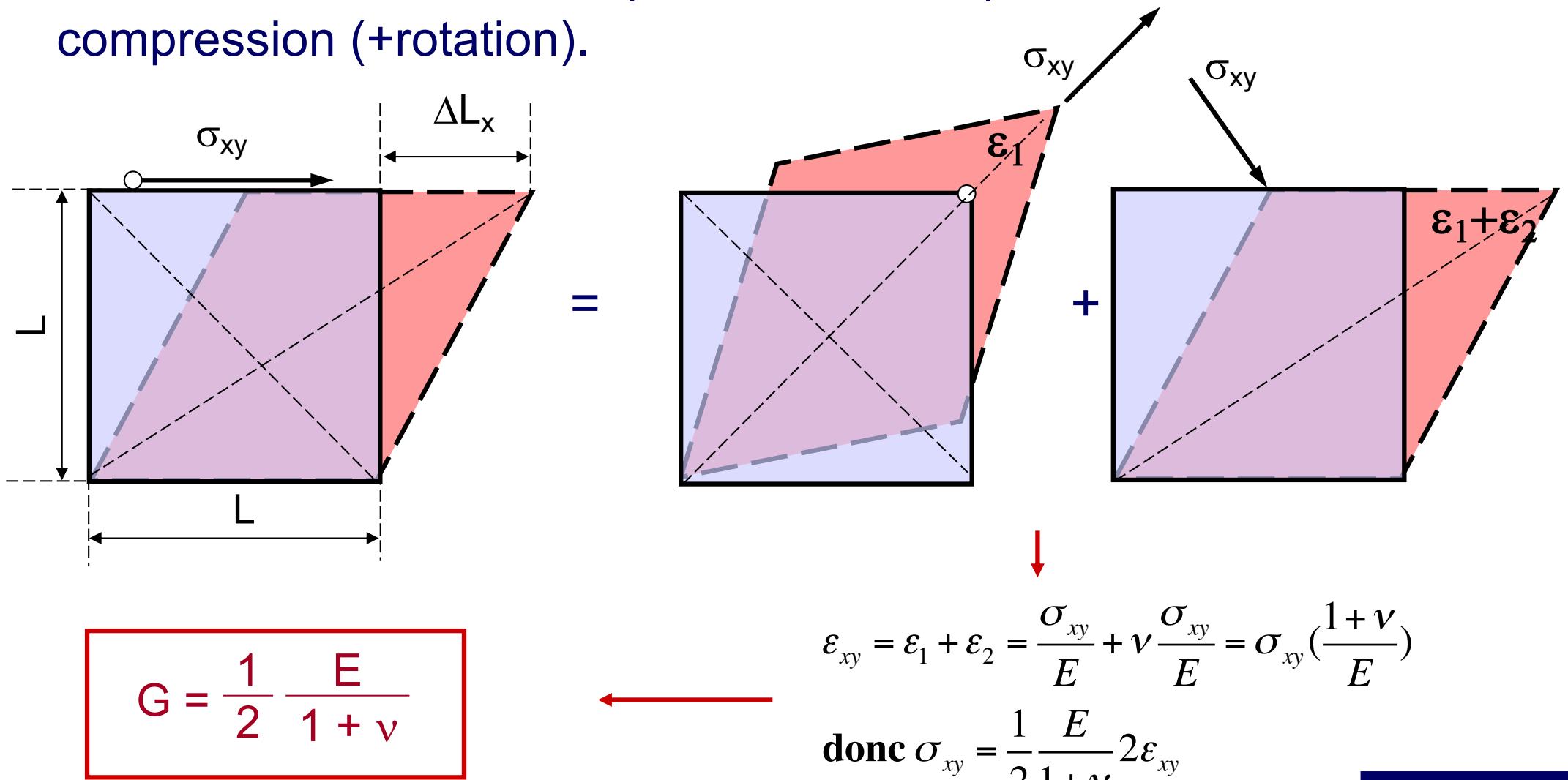
Application de vernis



Freinage

Relation entre E, ν et G

Pour un solide **isotrope**, E, ν et G ne sont pas indépendants. Une contrainte de cisaillement peut être décomposée en une traction + compression (+rotation).

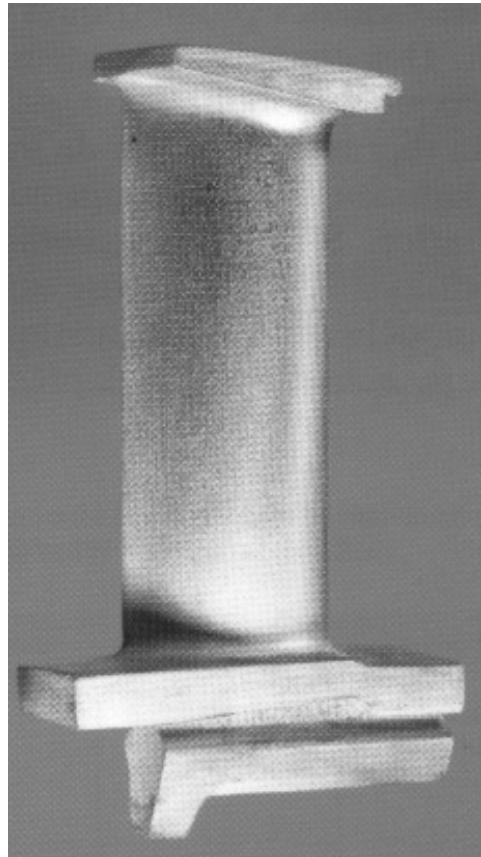


Propriétés élastiques

Les coefficients (E , ν , G) peuvent dépendre de l'orientation et sont donc **anisotropes** (ex. monocristal). Un échantillon polycristallin présente des **propriétés isotropes**.

$$\begin{matrix} E_{[100]} \\ E_{[110]} \end{matrix}$$
$$E_{[100]} \neq E_{[110]}$$

Aube de turbine
monocristalline

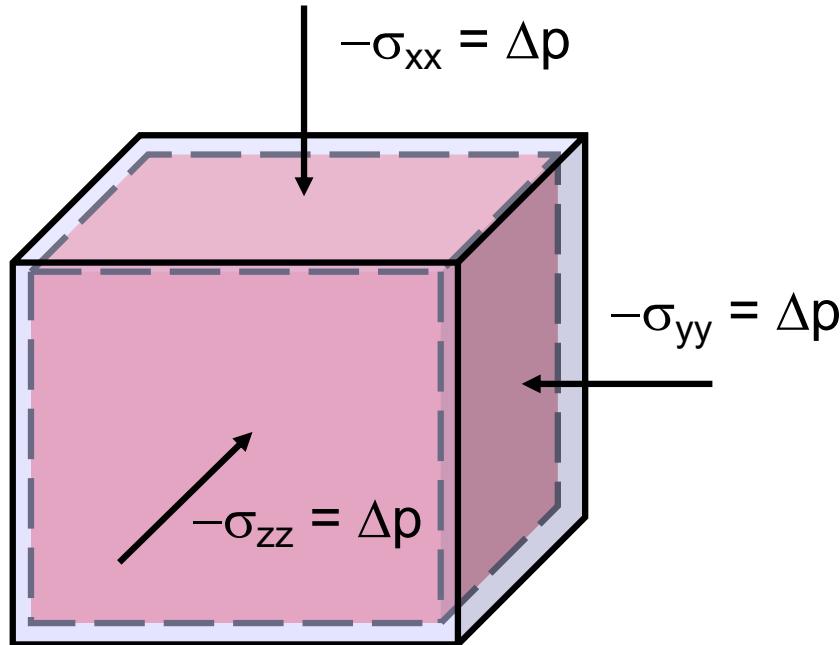


$$\begin{matrix} E(n) \\ E(n) = E \quad \forall n \end{matrix}$$

Aube de turbine
polycristalline

Compression hydrostatique

Une **compression hydrostatique** correspond à une **contrainte normale constante** (négative) sur toute la surface du solide.

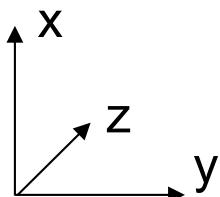


On définit le **coefficient de compressibilité** K comme:

$$K = -V_0 \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad [\text{Pa}]$$

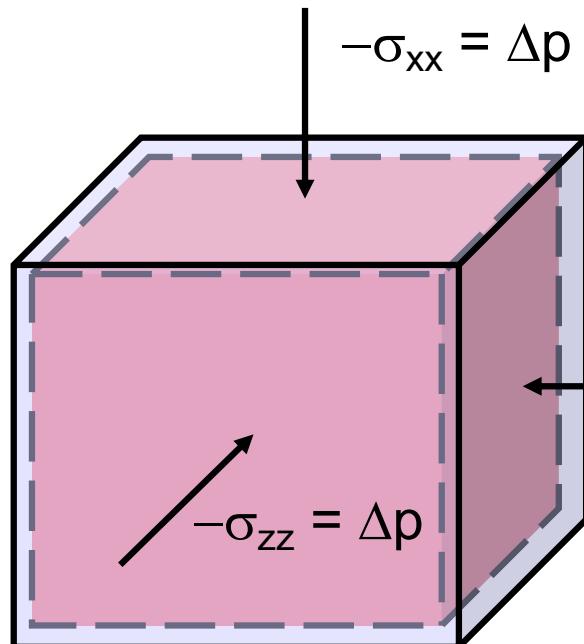
Pour un solide isotrope, on peut montrer que:

$$K = \frac{1}{3} \frac{E}{1 - 2\nu}$$



Compression hydrostatique

On peut décomposer la pression en trois temps:



Une première compression selon x:

$$\begin{aligned} L_{0x} &\rightarrow L_{0x}(1 + \varepsilon_{xx}) &= L_{0x}(1 + \varepsilon_{xx}) \\ L_{0y} &\rightarrow L_{0y}(1 + \varepsilon_{yy}) &= L_{0y}(1 - \nu\varepsilon_{xx}) \\ L_{0z} &\rightarrow L_{0z}(1 + \varepsilon_{zz}) &= L_{0z}(1 - \nu\varepsilon_{xx}) \end{aligned}$$

Une seconde compression selon y:

$$\begin{aligned} L_{0x}(1 + \varepsilon) &\rightarrow L_{0x}(1 + \varepsilon)(1 - \nu\varepsilon) \\ L_{0y}(1 - \nu\varepsilon) &\rightarrow L_{0y}(1 - \nu\varepsilon)(1 + \varepsilon) \\ L_{0z}(1 - \nu\varepsilon) &\rightarrow L_{0z}(1 - \nu\varepsilon)(1 - \nu\varepsilon) \end{aligned}$$

Une troisième compression selon z:

$$\begin{aligned} L_{0x}(1 + \varepsilon)(1 - \nu\varepsilon) &\rightarrow L_{0x}(1 + \varepsilon)(1 - \nu\varepsilon)(1 - \nu\varepsilon) \\ L_{0y}(1 - \nu\varepsilon)(1 + \varepsilon) &\rightarrow L_{0y}(1 - \nu\varepsilon)(1 + \varepsilon)(1 - \nu\varepsilon) \\ L_{0z}(1 - \nu\varepsilon)(1 - \nu\varepsilon) &\rightarrow L_{0z}(1 - \nu\varepsilon)(1 - \nu\varepsilon)(1 + \varepsilon) \end{aligned}$$

En reportant sur les volumes:

$$\begin{aligned} V_0 &= L_{0x}L_{0y}L_{0z} \\ V &= L_{0x}L_{0y}L_{0z}(1 + (1 - 2\nu)\varepsilon)^3 = V_0(1 + (1 - 2\nu)\varepsilon)^3 \end{aligned}$$

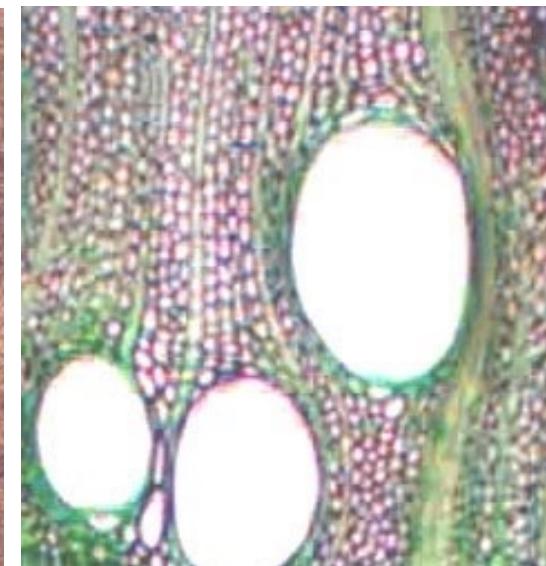
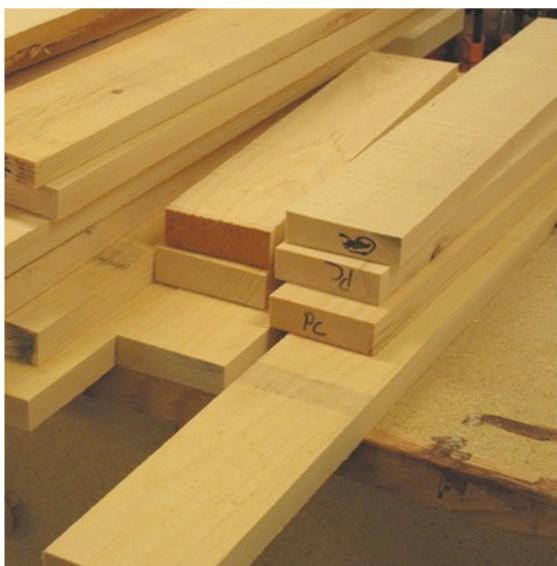
$$K = -\frac{V_0}{\Delta V}\Delta p = -\frac{V_0}{V - V_0}\Delta p = -\frac{V_0}{V_0(1 + 3(1 - 2\nu)\varepsilon - 1)}\Delta p = \frac{-\Delta p}{3(1 - 2\nu)\varepsilon}$$

soit

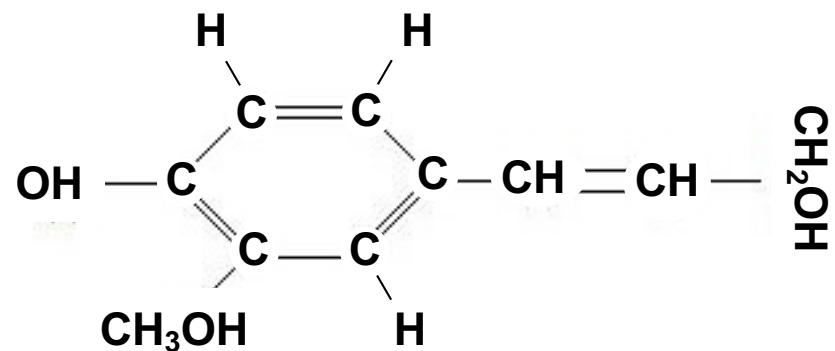
$$K = \frac{1}{3(1 - 2\nu)} \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

Structure des matériaux organiques

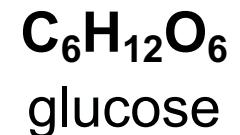
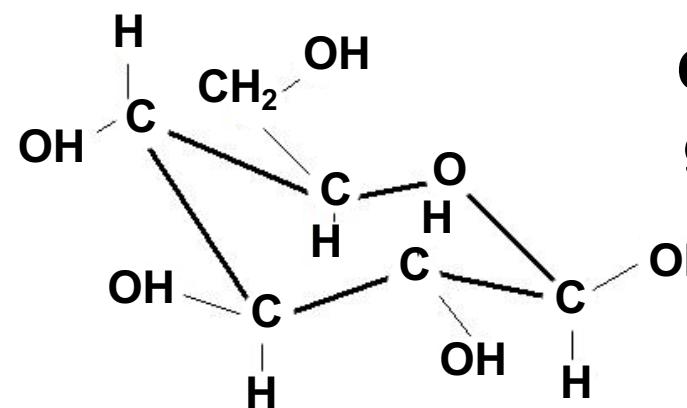
Le **bois** est un matériau organique dont les parois sont composées de **cellulose** et de **lignine**.



Elément de base d'une des **lignines**

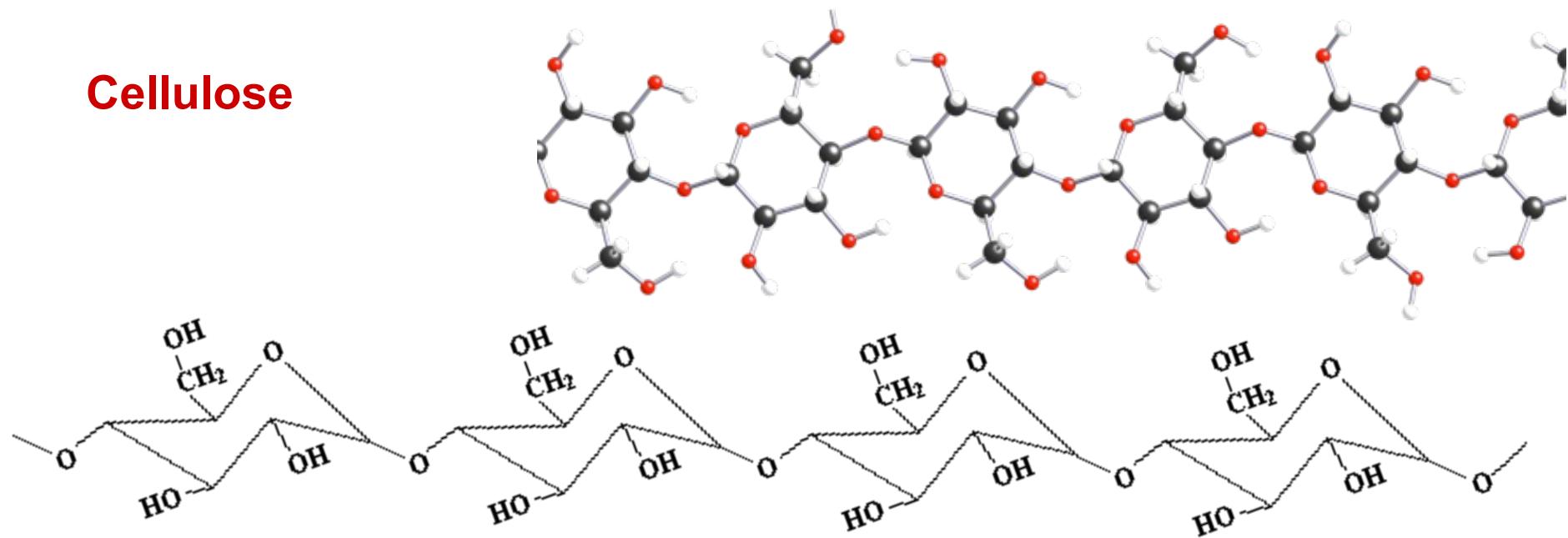


Elément de base de la **cellulose**



Structure des matériaux organiques

La lignine et la cellulose sont en fait des **polymères** naturels, c'est-à-dire de longues chaînes répétant un **motif de base**.

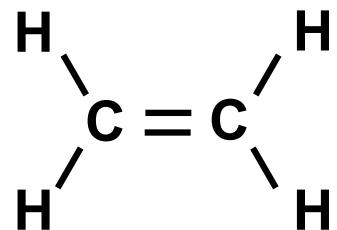


De nombreux matériaux naturels organiques (végétaux, coton,...) ont comme base la cellulose ($> 50\%$ biomasse). Nous allons plutôt regarder les **matériaux organiques synthétiques**, le principe de construction restant le même

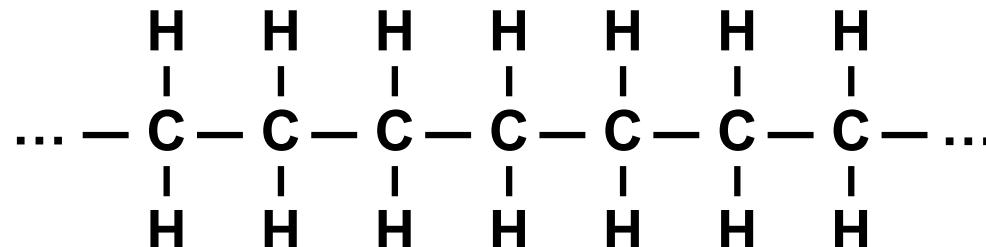
Structure des matériaux organiques

Un polymère est une **macromolécule** obtenue par la répétition d' un **bloc de base**.

éthylène C_2H_4



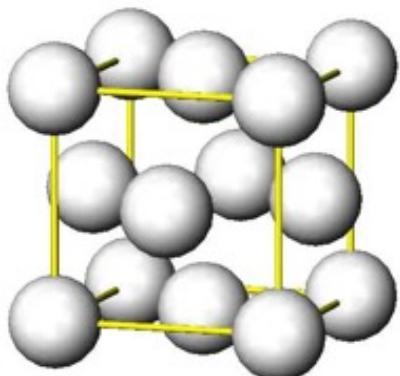
Polyéthylène (PE)



La **polymérisation** est l' opération permettant de passer dans ce cas d' une molécule avec double liaison C-C à une longue macromolécule avec des liaisons C-C simples.

La **masse molaire** typique de ce polymère est **$10^5 - 10^6$ g/mole**

Métaux et céramiques



Motif: quelques atomes

Polymères

Motifs:



-quelques atomes dans le motif de base pour former une chaîne

-Plusieurs milliers d'atomes par chaînes qui s'organisent pour former le matériau !!

Structure des matériaux organiques

On distingue:

- **Homopolymère:** polymère constitué d'un seul bloc de base A
... – A – A – A – A – A – ... (où A = C₂H₄ pour le polyéthylène)
- **Copolymère:** polymère composé de deux blocs A et B
- **Degré de polymérisation:** nombre moyen de blocs par chaîne

$$n = \frac{M_{\text{polymère}}}{M_{\text{monomère}}}$$

Valeur moyenne
sur un ensemble
de chaines.

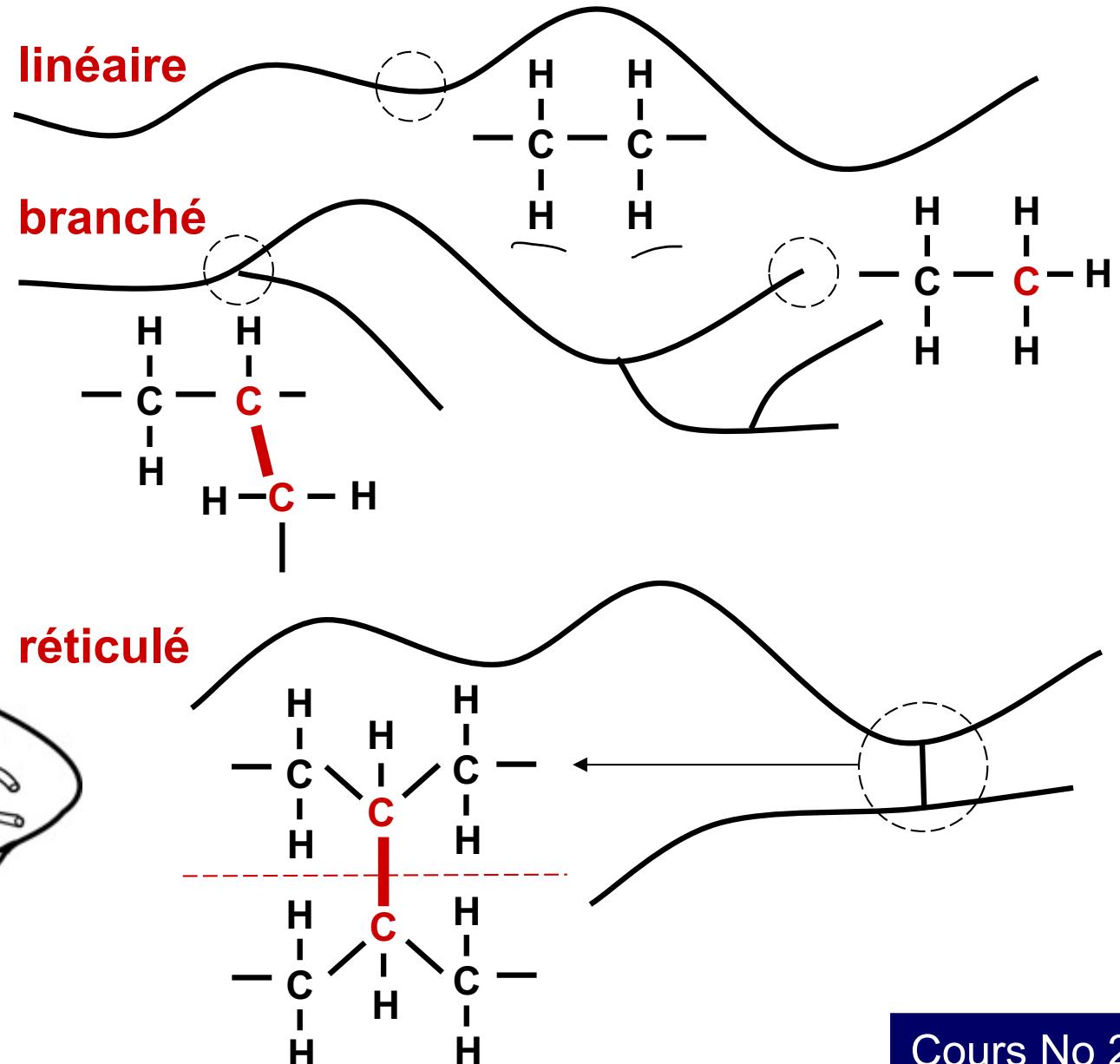
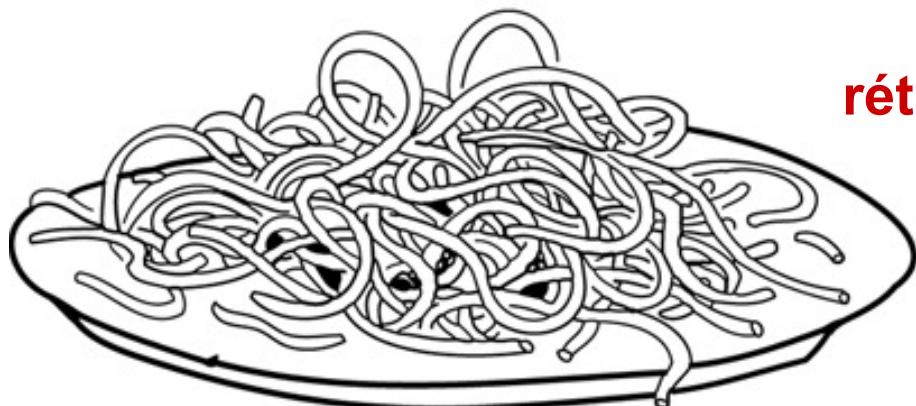
Les liaisons au sein des chaines sont covalentes ! C-C, C-O, C-H, C-F, C-Cl....

Entre les chaines: Van der Waals ou ponts covalents

Structure des matériaux organiques

Le polymère peut être:

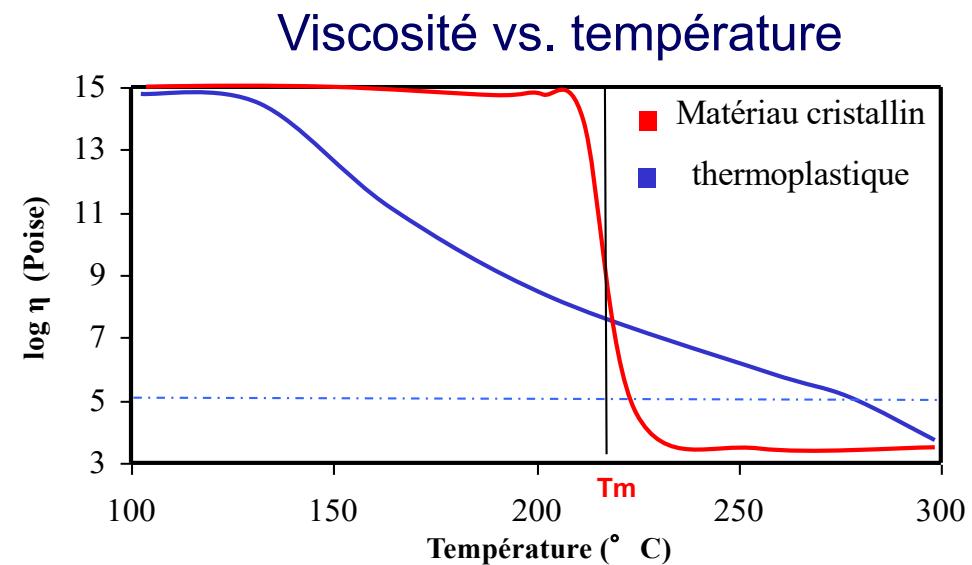
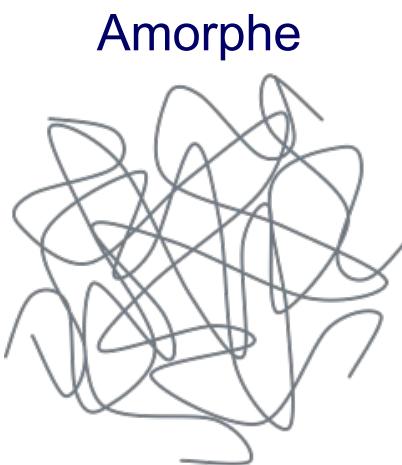
Les interactions entre chaînes étant faibles, une masse polymère peut être vue comme:



Structure des matériaux organiques

■ Thermoplastiques

- polymère moulé à chaud et ensuite utilisé à froid. Donc en principe, recyclable.
- Pas de ponts réticulants: forces de Van der Waals entre les chaînes
- Amorphes ou semi-cristallins

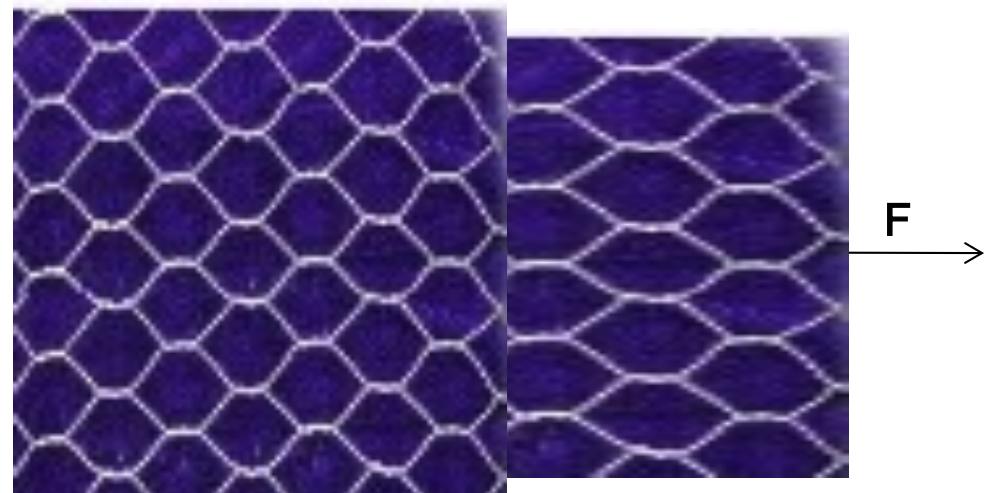
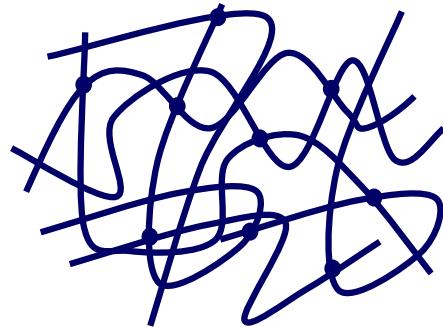


Exemples: Polyéthylène Téréphthalate (PET), Polymethyl métacrylate (PMMA), Polycarbonate (PC)...(voir slides supplémentaires à la fin du cours)

Structure des matériaux organiques

- **Elastomères:**

- polymère réticulé à chaud par vulcanisation pour le rendre très élastique
- Polymère amorphes, non recyclables
- Exemple: caoutchouc, néoprène, silicone, ...



- **Thermodurcissables**

- polymère **très** réticulé (10-100 fois plus que les élastomères) à chaud. Devient donc résistant à la température. Ne peuvent pas être recyclés.
- Polymère amorphes, non recyclables
- Exemple: colles époxy, résines polyesters, bakélite, ...

Structure des matériaux organiques

Quelques polymères : **polyméthacrylate de méthyle (PMMA)**

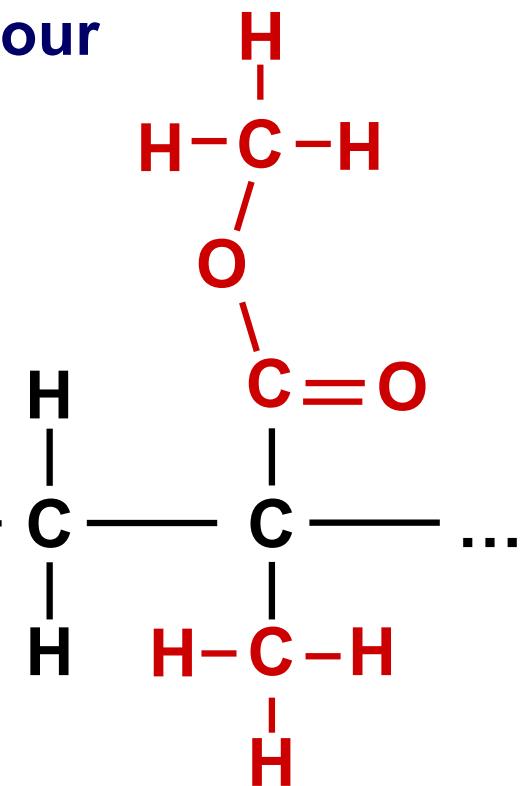


Plus connu sous le nom de **Plexiglas**

Thermoplastique transparent pour remplacer le verre

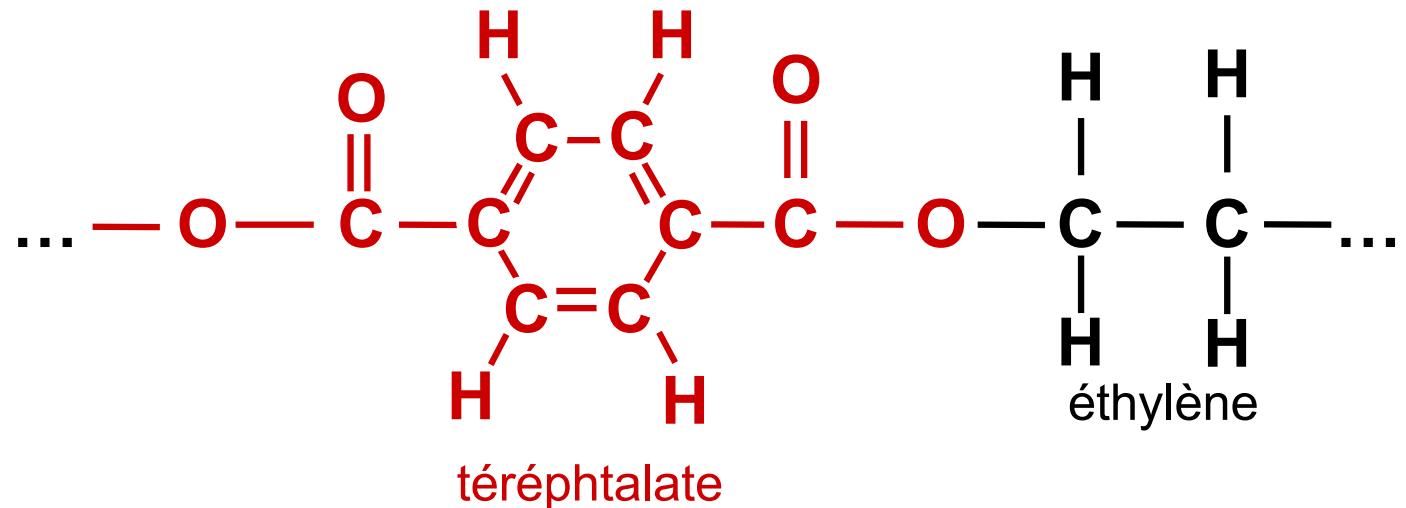


...



Structure des matériaux organiques

Quelques polymères : **polyéthylène téréphthalate (PET)**

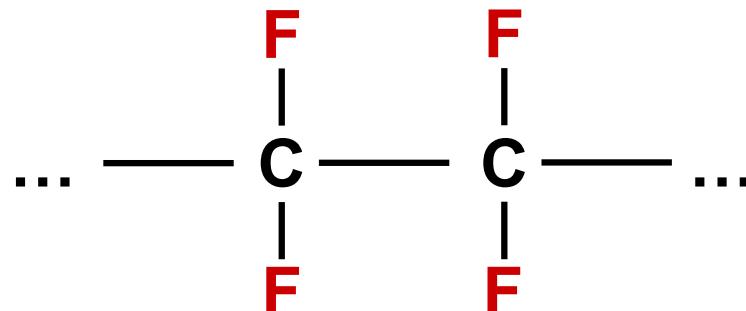


Bouteilles ... recyclées en vestes polaires



Structure des matériaux organiques

Quelques polymères : **polytétrafluoroéthylène (PTFE)**



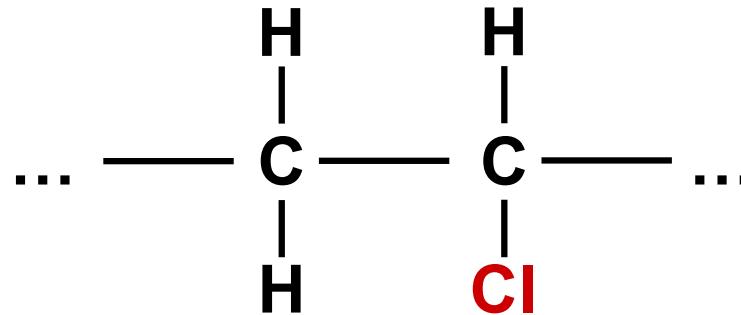
Plus connus sous le nom de **téflon**

Antiadhésif , revêtements, lubrifiant

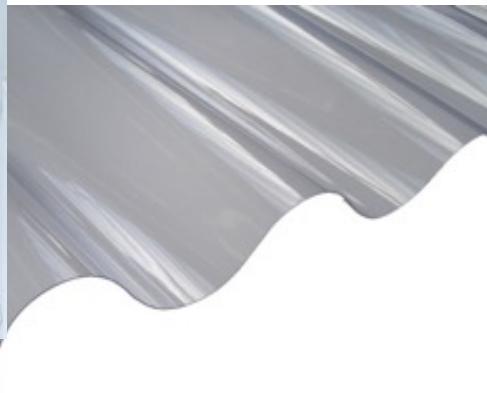


Structure des matériaux organiques

Quelques polymères : **polychlorure de vynile (PVC)**

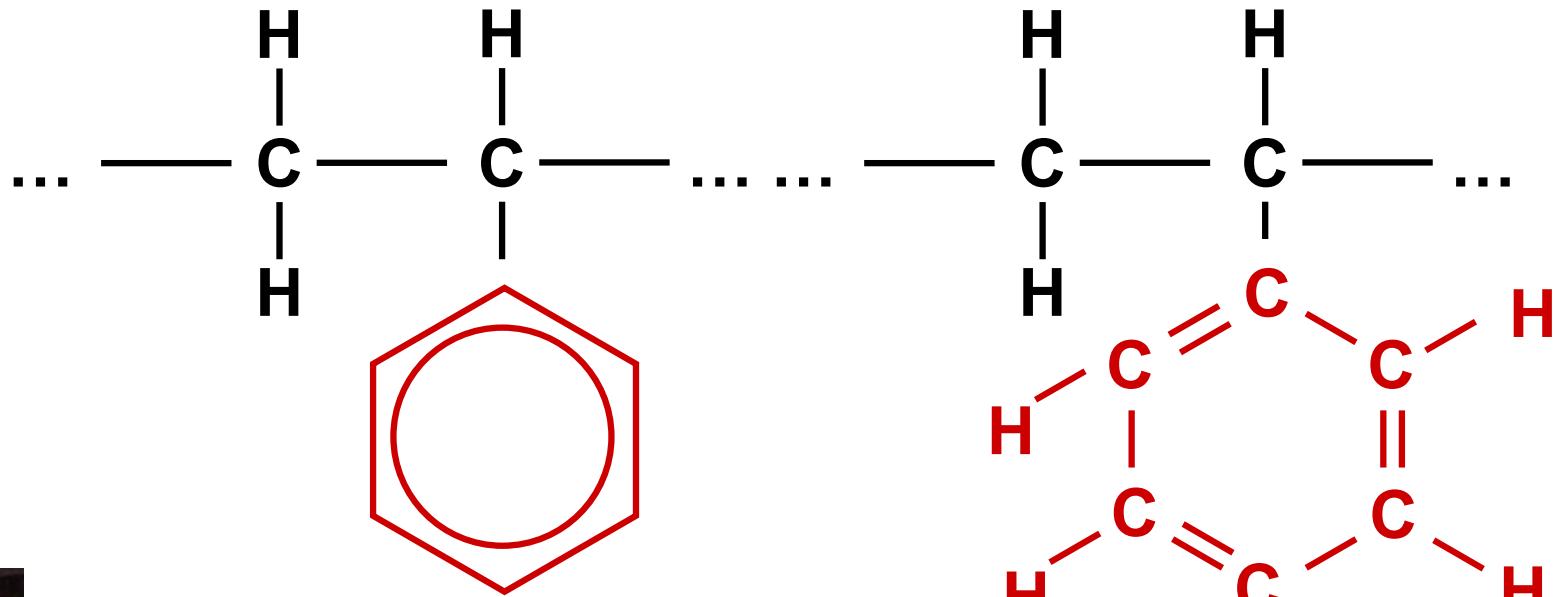


Résistant à l'eau et au feu



Structure des matériaux organiques

Quelques polymères : **polystyrène (PS)**

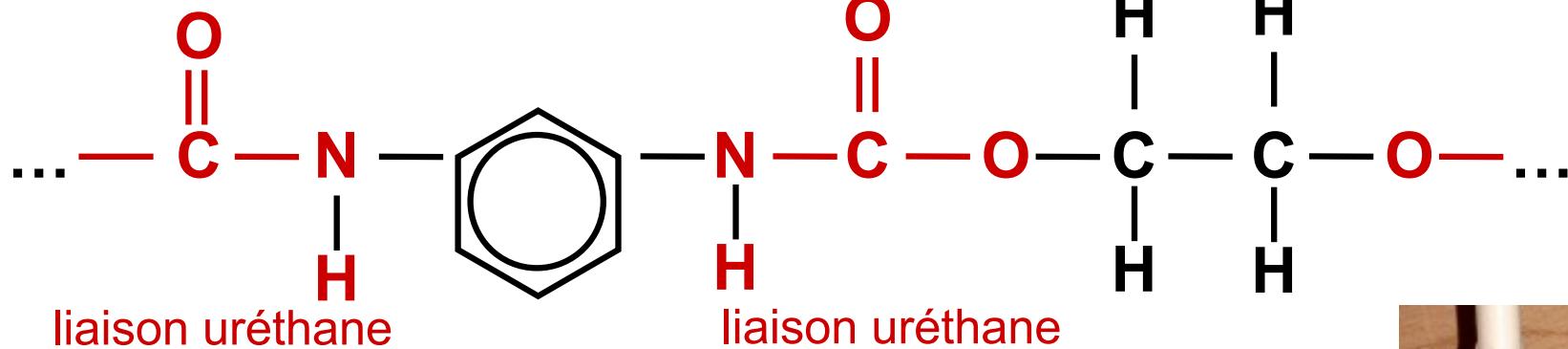


Thermoplastique dur
et bon marché



Structure des matériaux organiques

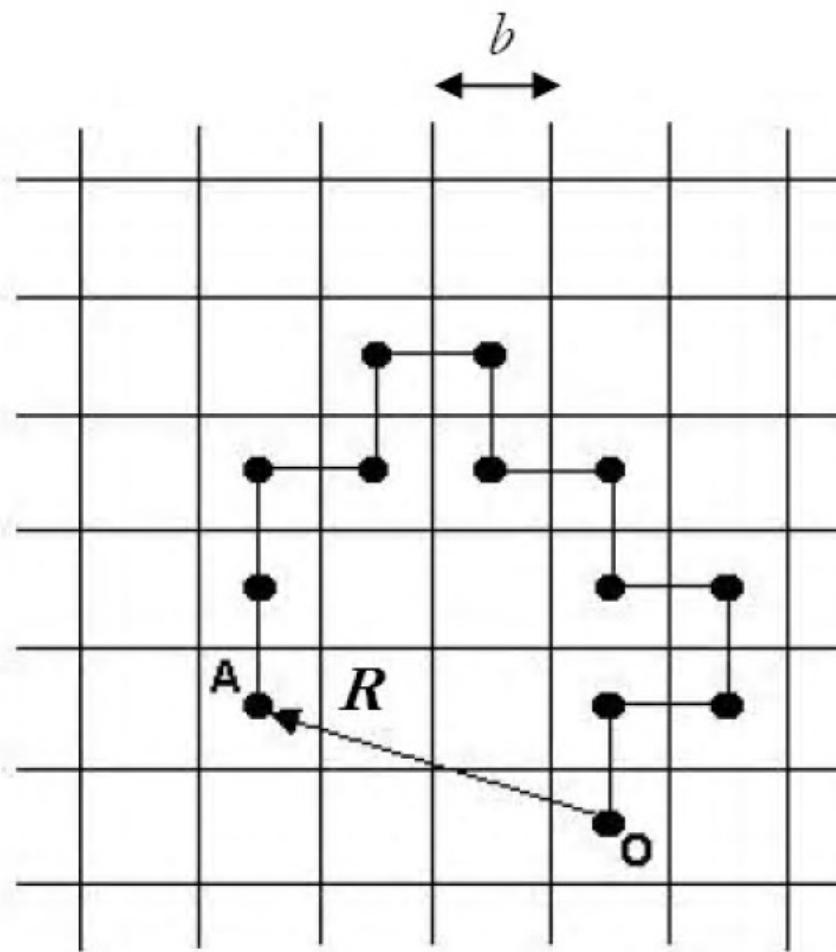
Quelques polymères : **polyuréthane**



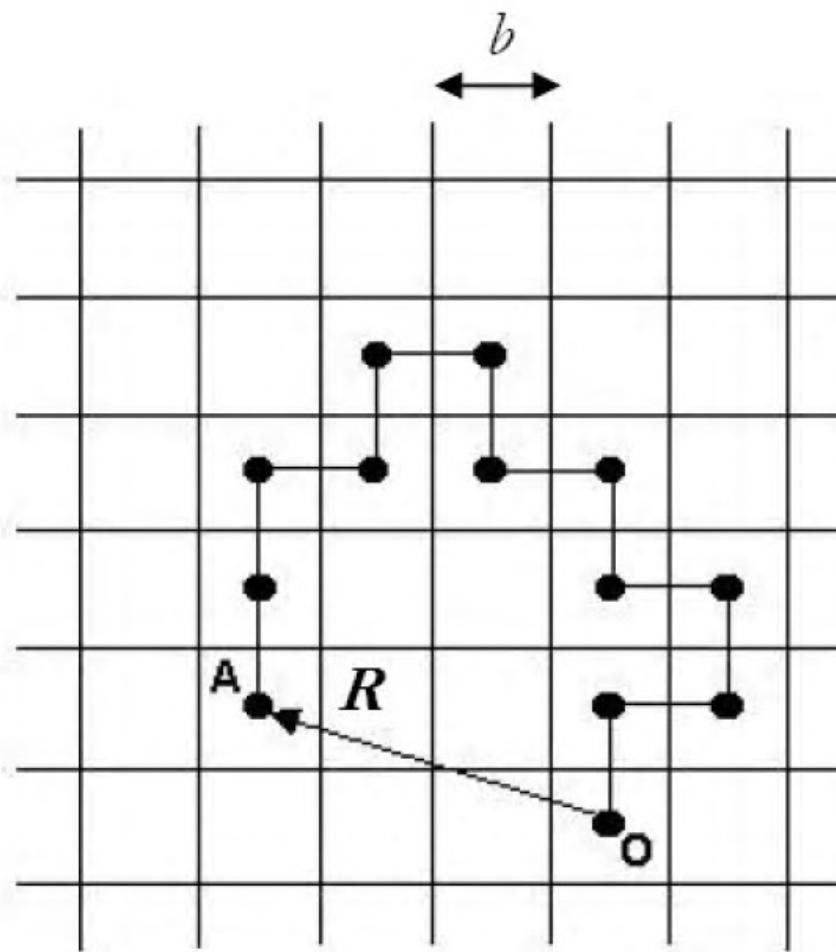
Elastomère, fibres, colles, ...



Modèle de Marche Aléatoire

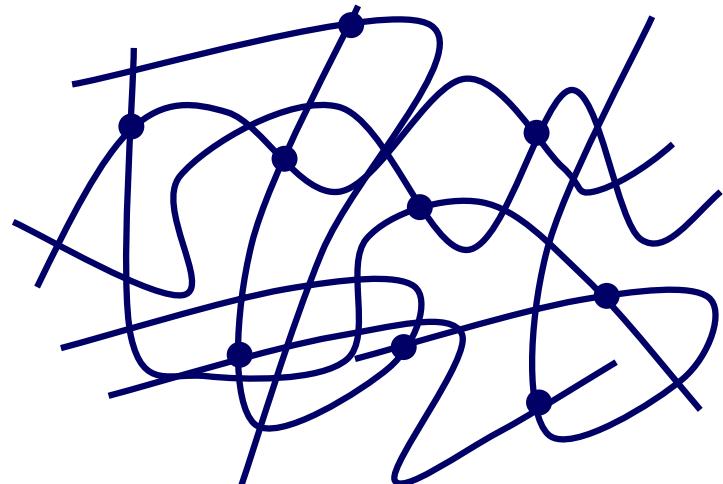


Modèle de Marche Aléatoire

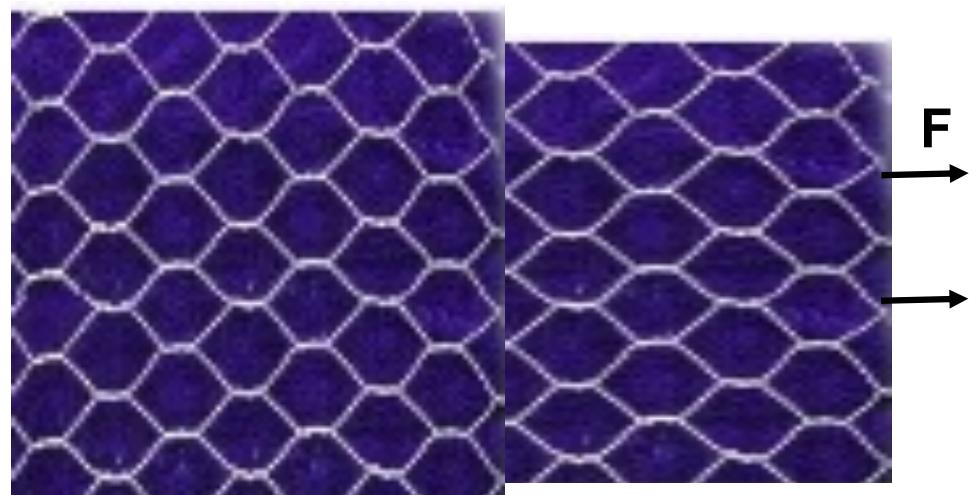


Propriétés élastiques des matériaux

Pour un élastomère, la déformation élastique a lieu grâce aux ponts entre les molécules, un peu comme un treillis.



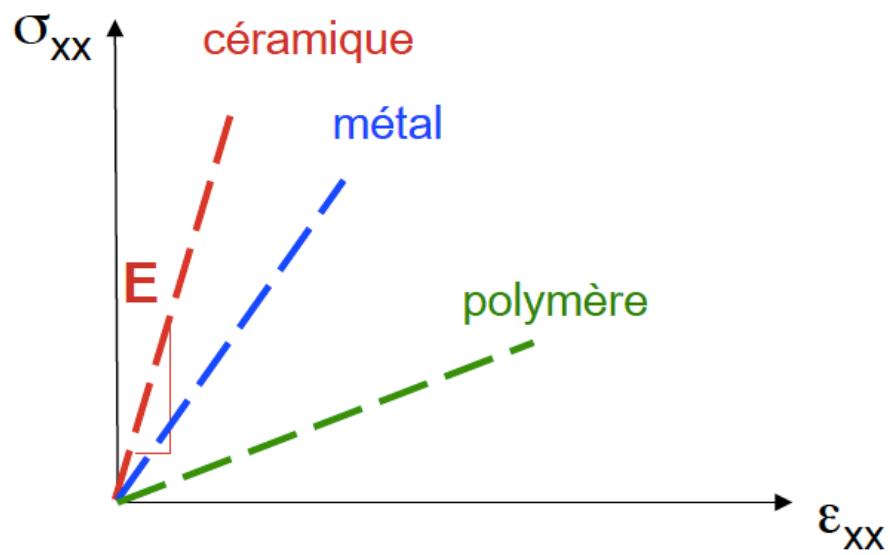
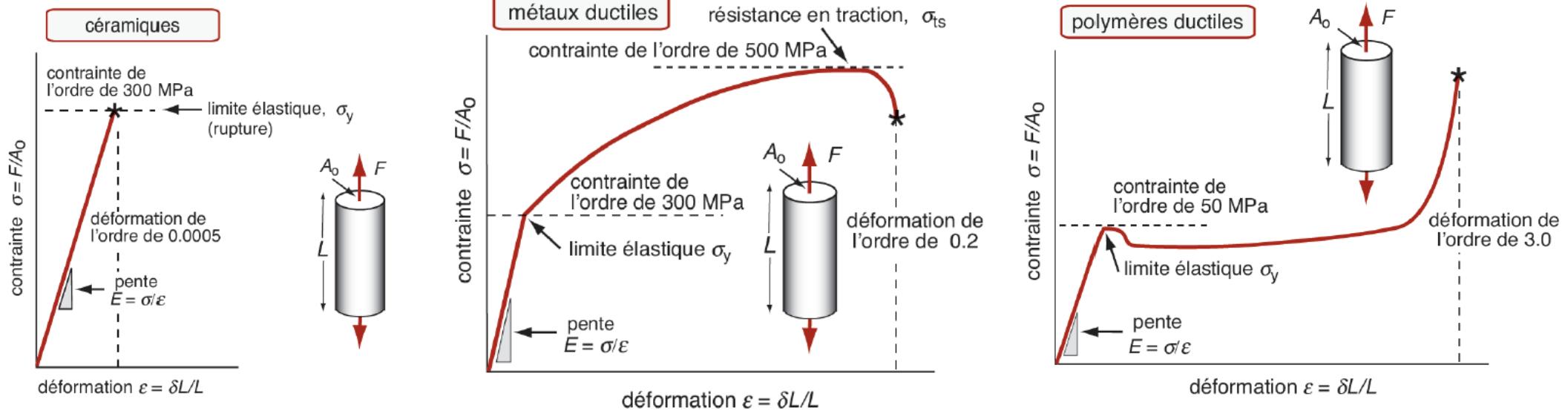
$$F = 0$$



$$F \rightarrow$$

La déformation élastique peut atteindre 1000%. Au-delà d'une limite, tous les ligaments entre ponts sont étirés et le matériau se durcit.

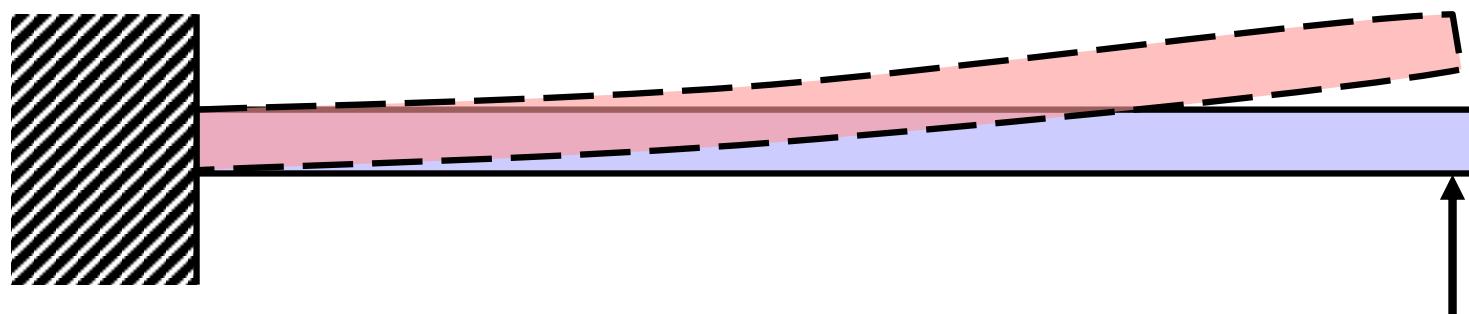
Propriétés élastiques des matériaux



- E est lié à l'énergie de liaison entre les atomes
- E représente la rigidité d'un matériau: plus E est grand, plus il est rigide
- E a la dimension d'une contrainte (Pa)
- La déformation élastique est réversible
- Au-delà de σ_Y (Pa), déformation plastique permanente

Propriétés élastiques des matériaux

Une situation réelle de déformation élastique:



Quelles sont les contraintes "ressenties" par les atomes ?

Propriétés élastiques des matériaux

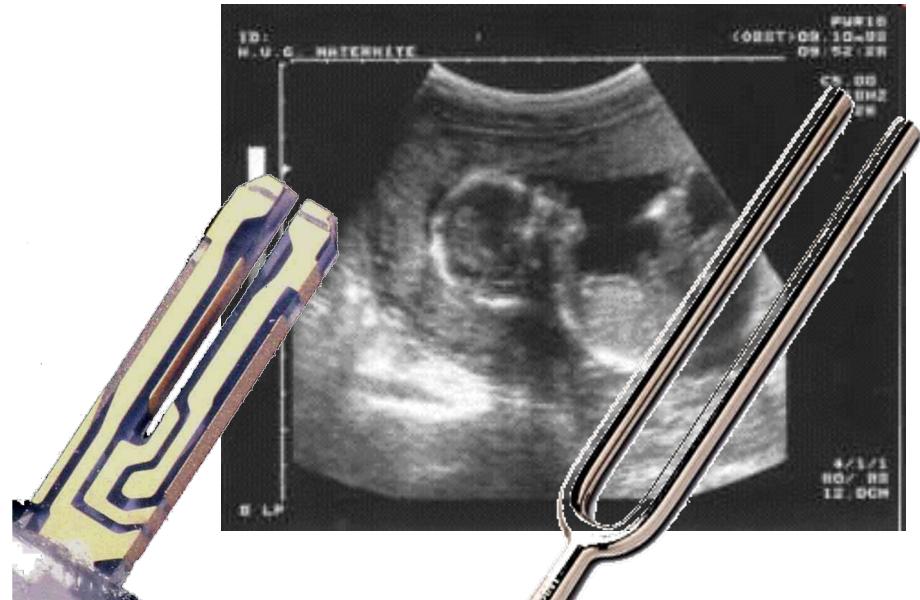
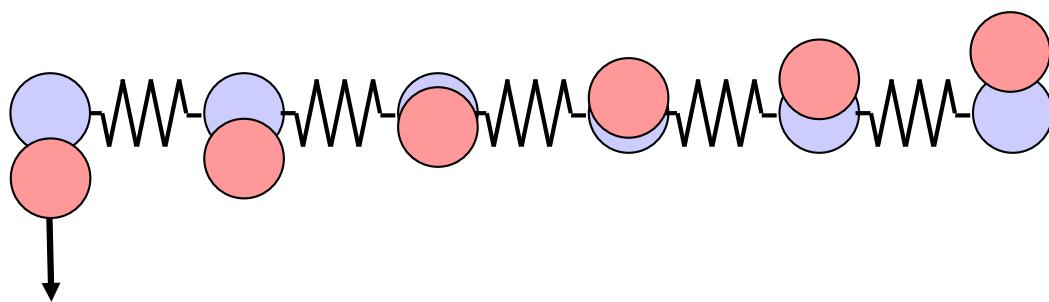
Les **ondes acoustiques** dans un matériau sont aussi un moyen de mesurer ses propriétés élastiques.

Ondes **longitudinales** (traction-compression) Vitesse de propagation



$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Ondes **transverses** (cisaillage)



Echographie

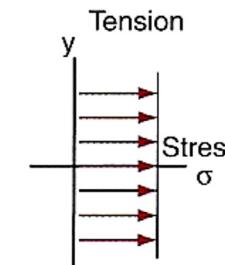
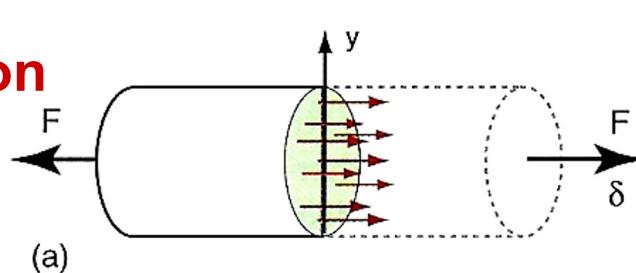
Diapason et diapason quartz

Propriétés élastiques des matériaux

Le choix d'un matériau dépend de plusieurs facteurs: type de sollicitation, charge maximum, prix, etc. On peut définir un **indice de rigidité spécifique**:



Traction

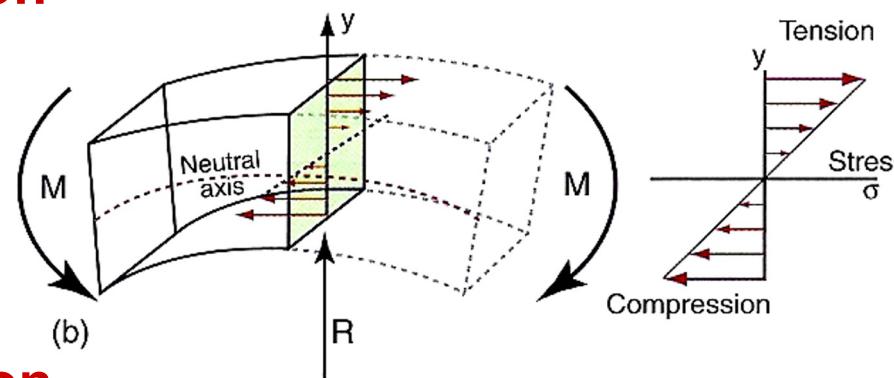


$$\frac{E}{P}$$

Acier : 25
Al : 26



Flexion

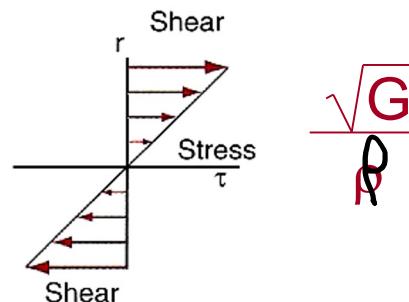
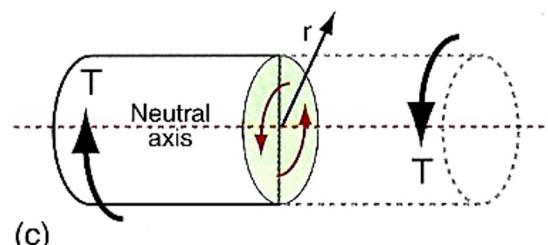


$$\frac{\sqrt{E}}{\rho}$$

Acier : 1.8
Al : 3.1



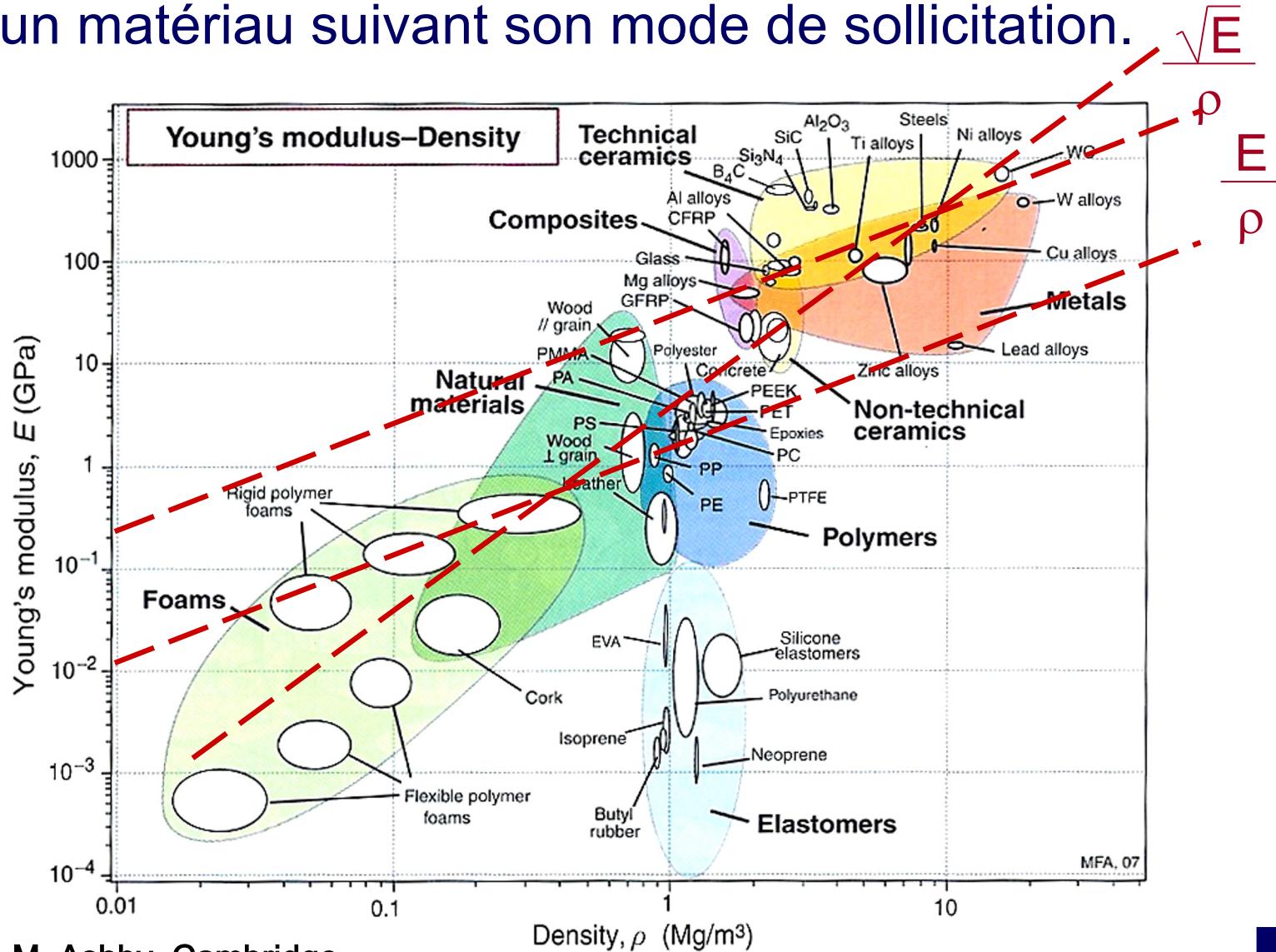
Torsion



$$\frac{\sqrt{G}}{R}$$

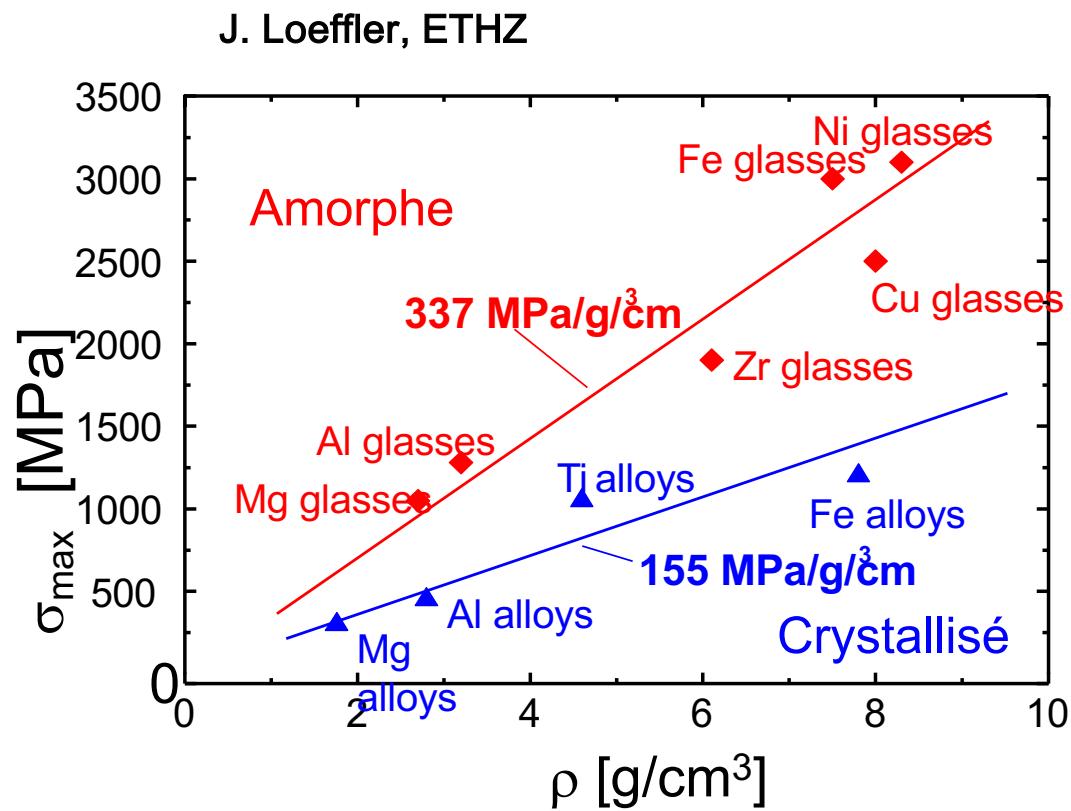
Propriétés élastiques des matériaux

Les cartes d'Ashby permettent de faire une présélection de la rigidité d'un matériau suivant son mode de sollicitation.

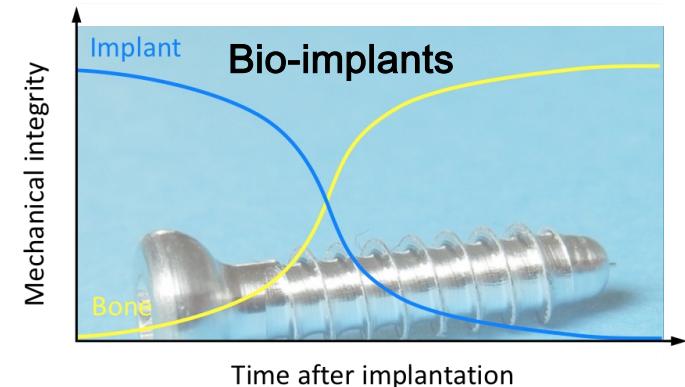


Propriétés élastiques des matériaux

Certains matériaux ont un comportement élastique remarquable.



<https://www.giantbomb.com/images/1300-370232>



Prof. Löffler group at ETH Zurich

Les **verres métalliques** ont une plus grande résistance et ductilité, ils peuvent donc stocker une plus grande énergie élastique.

Résumé

- Pour caractériser la déformation de matériaux, on définit les contraintes (Pa) et les déformations (sans dimension).
- Le module élastique (E , en Pa) et le module de cisaillement d'un matériau définissent sa rigidité.
- Ces propriétés dépendent essentiellement des liaisons inter-atomiques/moléculaires.
- Une déformation axiale s'accompagne d'une déformation transverse par l'intermédiaire du coefficient de Poisson.
- Dans le domaine élastique, l'énergie est emmagasinée dans le matériau et restituée lorsque la contrainte diminue.
- La limite élastique est la contrainte au-delà de laquelle le matériau se déforme de manière permanente.
- Le choix d'un matériau dépend (entre autres facteurs) du mode de sollicitation (traction, compression, flexion, torsion,...).