

# MATERIAUX ?



Métaux



Céramiques



Verres



Polymères

## LIAISONS ENTRE ATOMES

Les liaisons assurent la cohésion du matériau

- **Liaison covalente** : mise en commun d'un doublet d'e<sup>-</sup> (polymères, élastomères). La liaison covalente est dirigée → fortes contraintes géométriques sur les empilements atomiques.
- **Liaison ionique** : attraction électrostatique entre deux ions (cas classique de NaCl) La liaison ionique est forte et non dirigée. Ex. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO et ZrO<sub>2</sub>.
- **Liaison métallique** : la mise en commun d'un ou de plusieurs électrons dans un nuage « délocalisé ». métaux = assemblage d'ions positifs dans un « gaz d'e<sup>-</sup> ». Liaison non dirigée et conduit à des assemblages compacts.
- **Liaison de Van der Waals** C'est une liaison faible, due à l'attraction électrostatique entre doublets électrons-noyau. Ex. polymères organiques, gaz rares à basse T°.
- **Liaison hydrogène** ← résonance entre deux positions d'un proton entre deux anions voisins fortement électronégatifs (O<sup>2-</sup>, F<sup>-</sup>), caractère ionique marqué. (ex. l'eau, la glace, les sels hydratés, les polymères organiques et inorganiques.



---

## Métaux

---





---

## Céramiques

---



# Définitions

---

Liaisons ioniques - Liaisons covalentes

Matériaux cristallins : ordre à longue distance

---

## *Composition*

éléments métalliques  
Mg, Al, Ti...

+

éléments non métalliques

O : oxydes

N : nitrures

C : carbures

F : fluorures

---

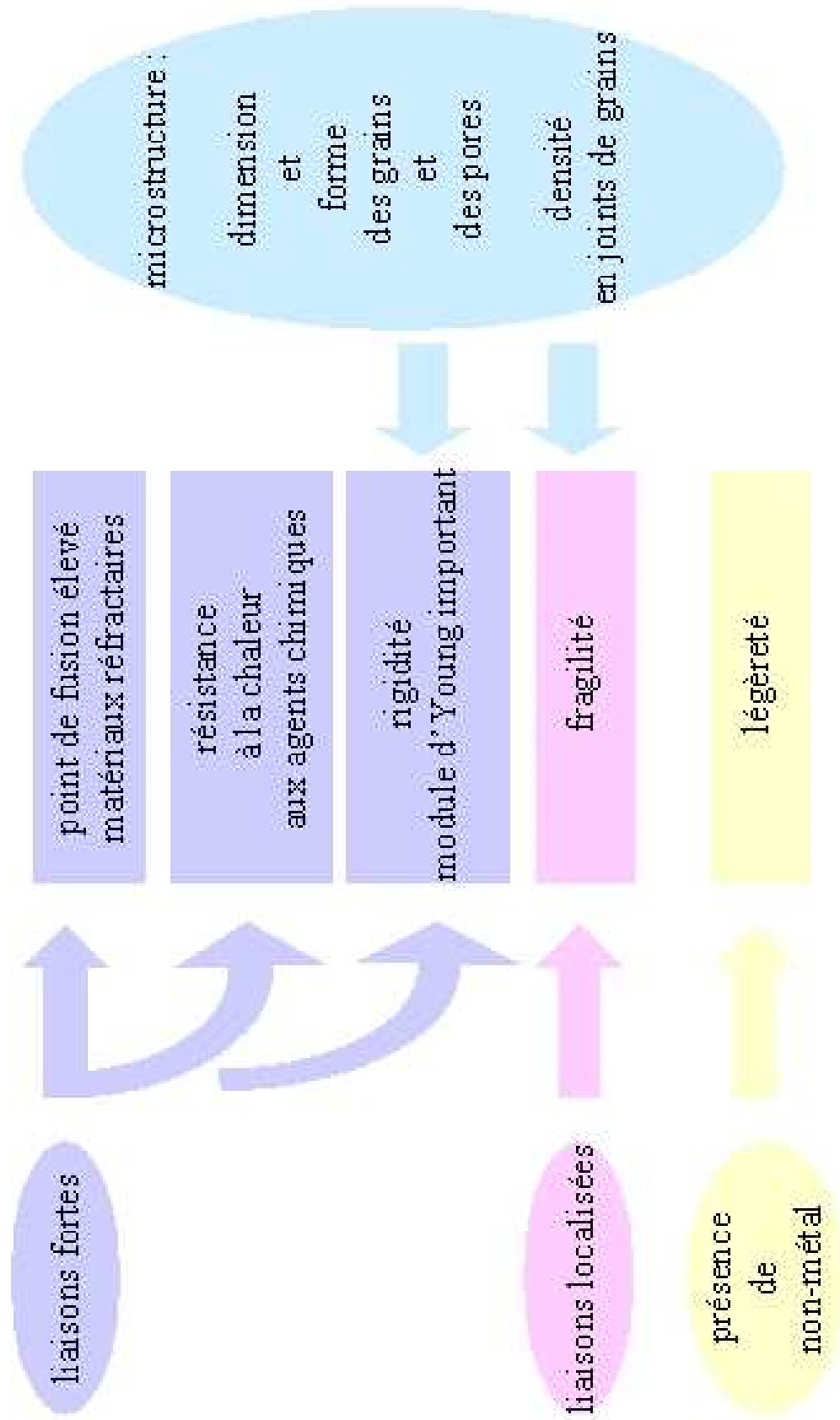
## *Forme*

agglomérat de grains de  
poudre soudés (frittés) entre  
eux pour donner une pièce  
massive et bien densifiée



Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Institut für Keramische  
Technologie und Materialwissenschaft

# Propriétés



# Les différents types de céramiques

---

## Céramiques naturelles : les pierres

---



calcaire  
surtout  $\text{CaCO}_3$



grès  
surtout  $\text{SiO}_2$



marbre  
surtout  $\text{CaCO}_3$



granit  
silicates d' alumine

## Les différents types de céramiques

Premières céramiques synthétiques : (souvent vitrifiées)



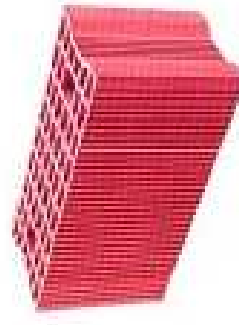
porcelaine



faïence



terre cuite



briques

à base d'argiles aluminosilicates hydratés m'élangés à d'autres minéraux inertes





# Les différents types de céramiques

---

## Les céramiques techniques

### à base d'oxydes

réfractaires et abrasifs :	$Al_2O_3$ , $ZrO_2$ , $MgO$
magnétiques :	ferrites : $MFe_2O_4$ manganites : $Mn_{(3-x)}M_xO_4$
pour le nucléaire :	$UO_2$
ferroélectriques :	$LiNbO_3$ , $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$
piézoélectriques :	$ZnO$
à porosité :	zéolithes $M_{x/n}[(AlO_2)_x(SiO_2)_y]_m H_2O$ (membranes, tamis moléculaires, échangeurs de cations, applications catalytiques)
biocéramiques :	$Al_2O_3$

# Les différents types de céramiques

## Les céramiques techniques

à base de nitrures et oxy-nitrures

réfractaires :  $\text{Si}_3\text{N}_4$

à base de carbures

abrasifs :  $\text{SiC}$ ,  $\text{TiC}$

à base de borures

réfractaires :  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$



# Verres



---

# Verres

---

Liaisons ioniques - Liaisons covalentes

éléments métalliques Mg, Al, Ti...	+	éléments non métalliques O : oxydes N : nitrures C : carbures F : fluorures
---------------------------------------	---	---

pas d'ordre à longue distance

# Verre = Solide non cristallin - Matériau amorphe

## Substances vitrifiables

Éléments	groupes V et VI : P, S et Se
Oxydes	SiO <sub>2</sub> , GeO <sub>2</sub> , B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> importance industrielle : 70 SiO <sub>2</sub> , 20 Na <sub>2</sub> O, 10 CaO
Chalcogénures	AsS, AsSe, PSe, GeSe - transparents dans l'IR
Halogénures	BeF <sub>2</sub> faible indice de réfraction - lasers de puissance ZrF <sub>4</sub> transparent dans l'IR ZnCl <sub>2</sub>
Sels fondus	mélanges de nitrates K(NO <sub>3</sub> )-Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , sulfates KHSO <sub>4</sub> , fluoroborates etc...
Composés organiques	MeOH, EtOH
Polymères organiques	polyéthylène, chlorure de polyvinyl, polystyrène, etc... (verres organiques)
Métaux	alliages Pd Si, Fe B, Fe Ni P B, Ni Nb, Cu Zn



---

# Polymères

---



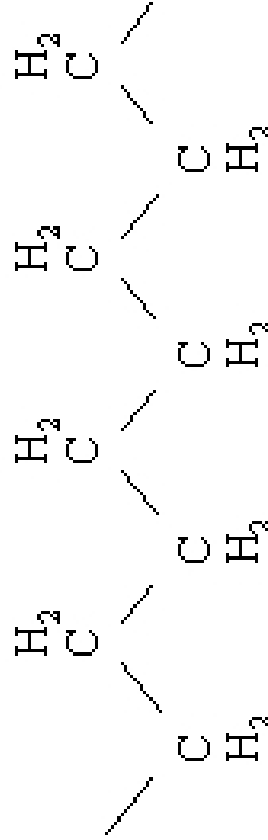
## Définitions

---

- macromolécule - répétition d'un motif constitutif

e.g. : motif =  $-\text{CH}_2-$

polyéthylène



- liaisons chimiques **covalentes** à l'intérieur des chaînes
- cohésion entre macromolécules par **liaisons physiques** (van der Waals ou H)
- parfois **pont covalent** entre chaînes

## Propriétés

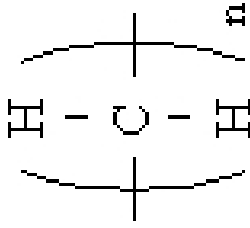
---

- légèreté → éléments légers : principalement C et H
- résistance mécanique plus faible que dans cas des céramiques → liaisons covalentes, donc directionnelles pas de structure compacte
- déformati on plastique augmente au cours du temps → liaisons faibles entre chaînes (dont la température de fusion est proche de l'am biante)



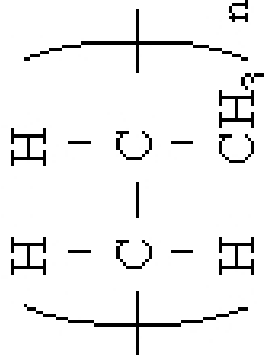
quelques exemples

polyéthylène (PE)



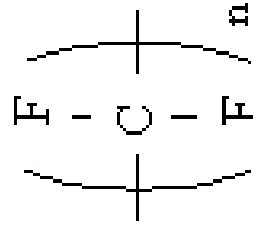
tubes, films, bouteilles,  
isolation électrique,  
emballage

polypropylène (PP)



id. plus léger, plus rigide,  
plus résistant à la lumière

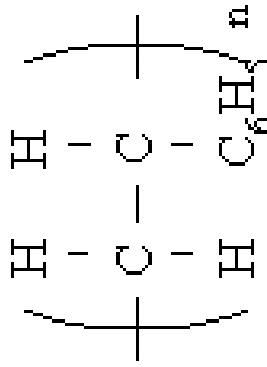
polytétrafluoroéthylène (PTFE)



Téflon  
tenue haute température,  
coefficient de frottement et  
d'adhésion faibles  
(poêles, joints, etc ...)

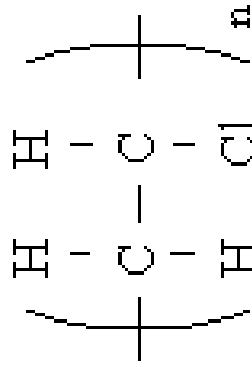
quelques exemples (suite)

polystyrène (PS)



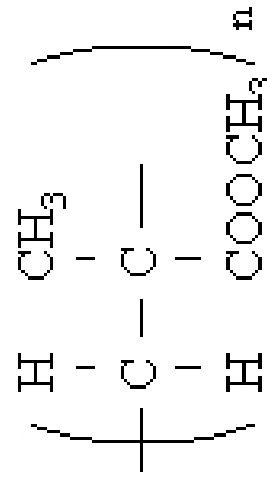
objets moulés  
expandé au CO<sub>2</sub> pour  
emballages courants

polychlorure de vinyle (PVC)



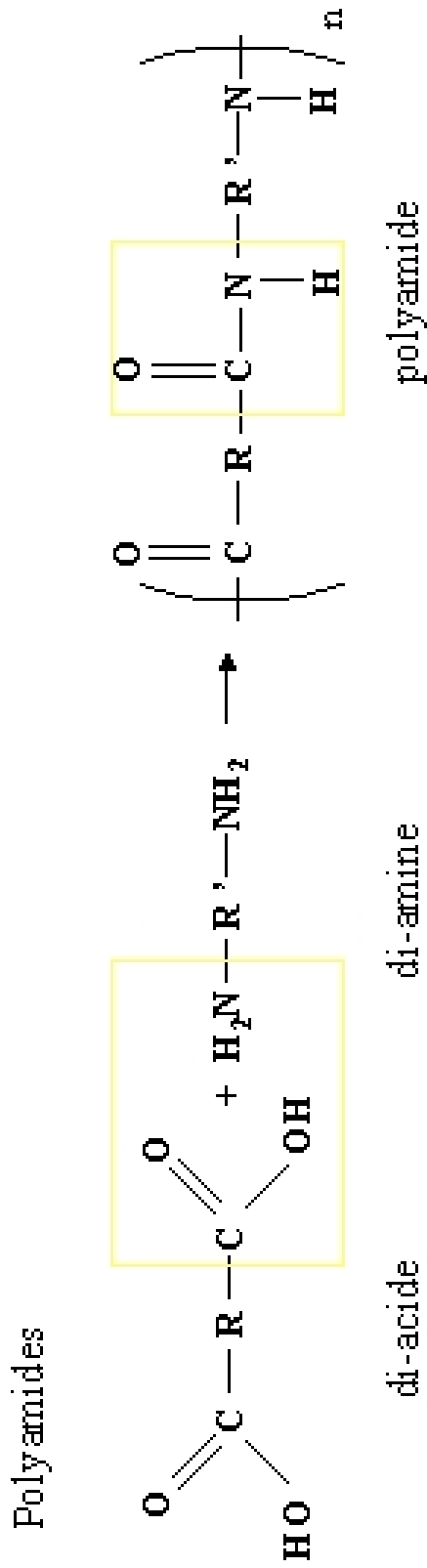
montants de fenêtres, portes  
etc...  
simili-cuir  
tuyaux

polyméthacrylate de méthyle  
(PMMA)



Plexiglas  
plaques transparentes  
hublots d'avions, etc...

quelques exemples (suite)

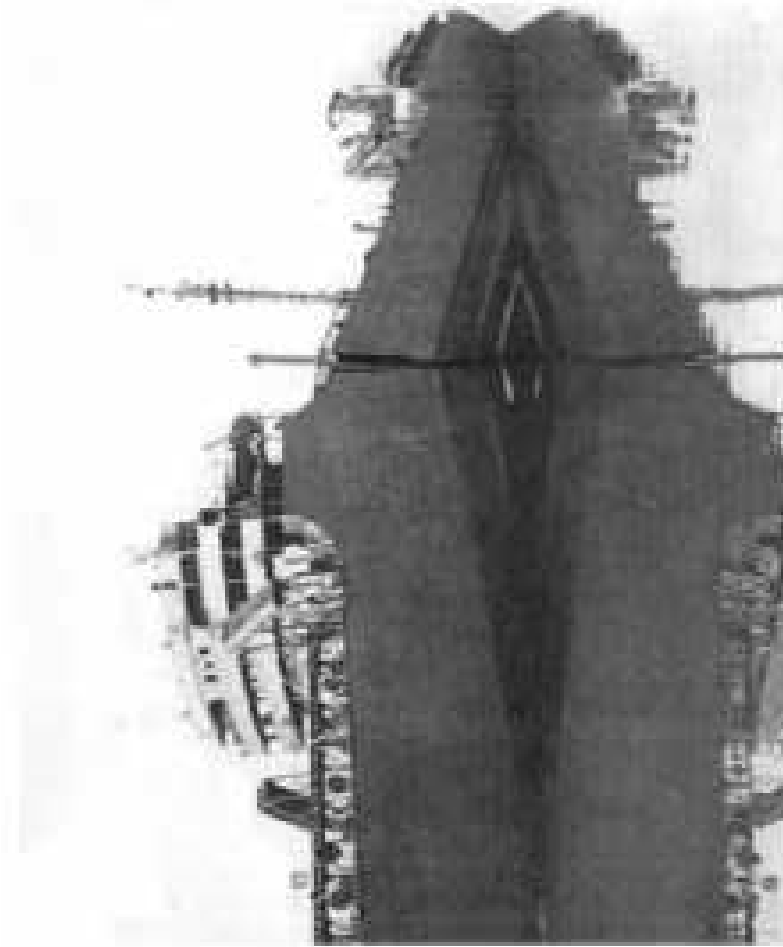


fibres textiles résistantes

Propriété	Métaux	Céramiques	Polymères
Densité $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	8000 (2000..22000)	4000 (2000..18000)	1000 (900..2000)
Dilatation thermique $\alpha$ [1/K]	$10 \cdot 10^{-6}$ ( $1 \cdot 10^{-6} \dots 100 \cdot 10^{-6}$ )	$3 \cdot 10^{-6}$ ( $1 \cdot 10^{-6} \dots 20 \cdot 10^{-6}$ )	$100 \cdot 10^{-6}$ ( $50 \cdot 10^{-6} \dots 500 \cdot 10^{-6}$ )
Capacité calorifique $c_p$ [J/(kg·K)]	500 (100..1000)	900 (500..1000)	1500 (1000..3000)
Conductivité thermique $k$ [W/(m·K)]	100 (10.. 500)	1 (0.1.. 20)	1 (0.1.. 20)
Température de fusion ou de transition vitreuse $T_m$ [K]	1000 (250..3700)	2000 (1000..4000)	400 (350..600)
Module d'élasticité, module de Young $E$ [GPa]	200 (20..400)	200 (100..500)	1 ( $10^{-3} \dots 10$ )
Coefficient de Poisson	0.3 (0.25..0.35)	0.25 (0.2..0.3)	0.4 (0.3..0.5)
Contrainte à rupture $\sigma_Y$ [MPa]	500 (100..3500)	100 (10..400 tract.) (50..5000 compr.)	50 (10..150 tract.) (10..350 compr.)
Dureté	Moyenne	Haute	Basse
Usinabilité	Bonne	Très mauvaise	Très Bonne
Résistance à l'impact	Bonne	Mauvaise	Très Mauvaise
Résistance au fluage thermique	Moyenne	Excellente	Très mauvaise
Conductivité électrique	Haute	Très faible	Très faible
Résistance à la corrosion	Moyenne	Excellente	Bonne

# Contraintes et déformations

## Notions élémentaires



(a)



(b)

*(a) Rupture fragile d'un liberty-ship (seconde guerre mondiale) au cours d'un hiver rigoureux, (b) rupture d'un autopont lors d'un tremblement de terre.*

Une **déformation** se produit lorsque les matériaux sont soumises à des **contraintes**.

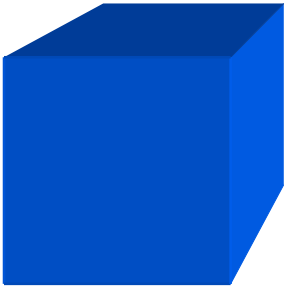
Les différents types de déformation



Translation



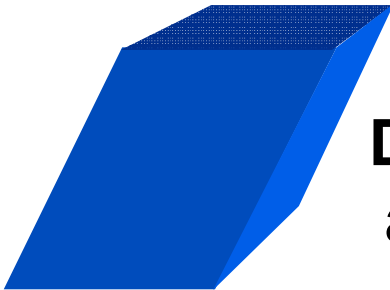
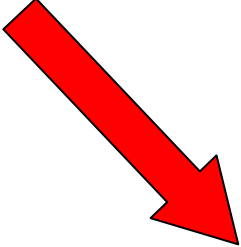
Changement de volume



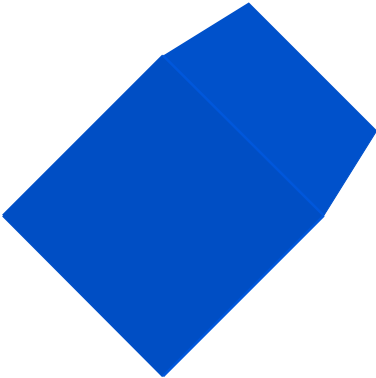
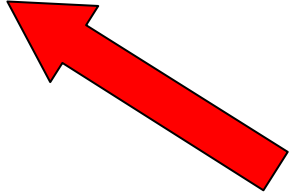
Etat initial  
(non déformé)



Distorsion linéaire



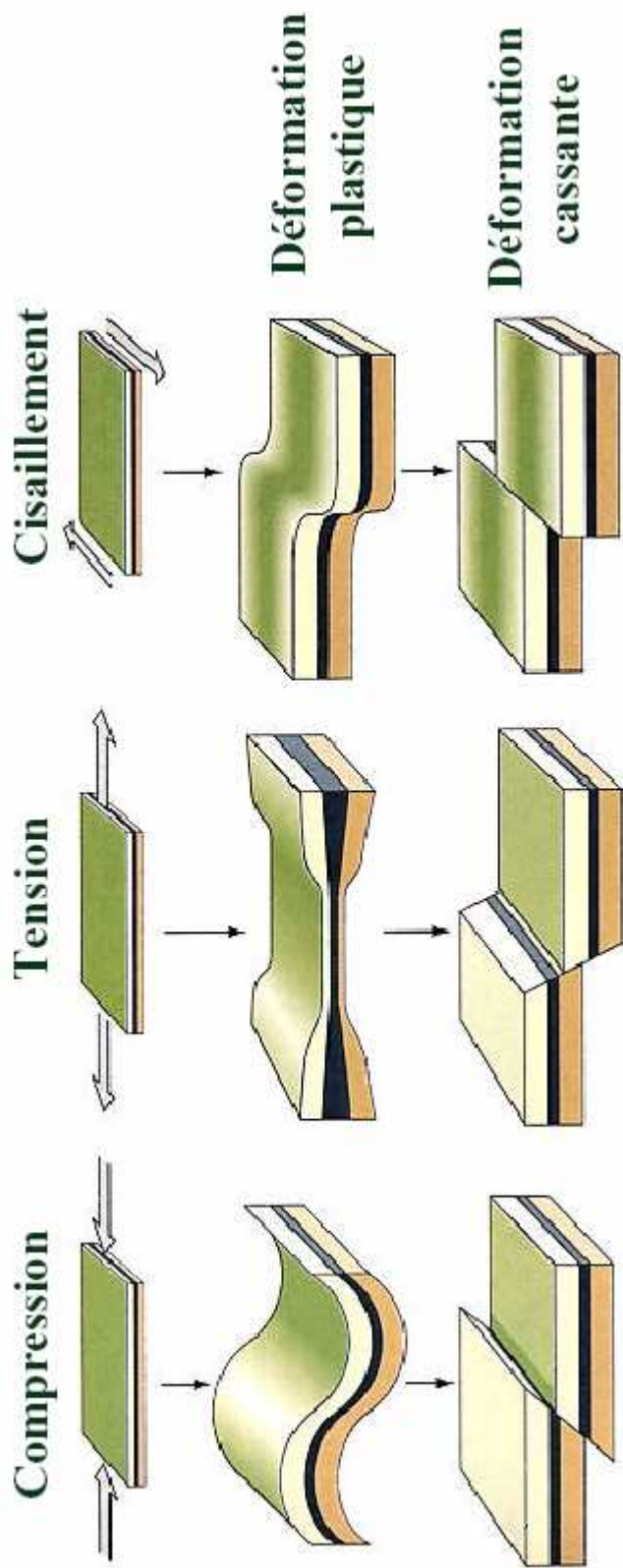
Distorsion angulaire



Rotation



# Les types de déformations



# Essai de traction

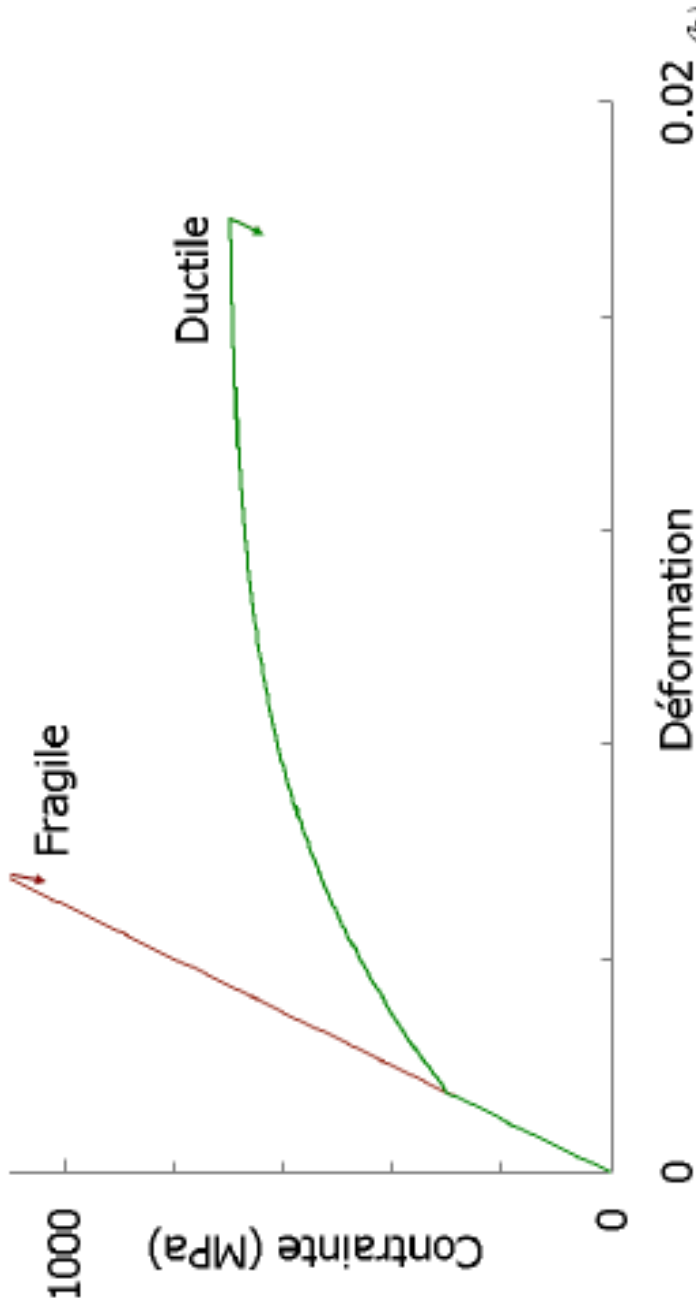


Striction

Un essai de traction permet de mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau quelconque.

On enregistre l'allongement et la force appliquée, que l'on convertit ensuite en déformation et contrainte.

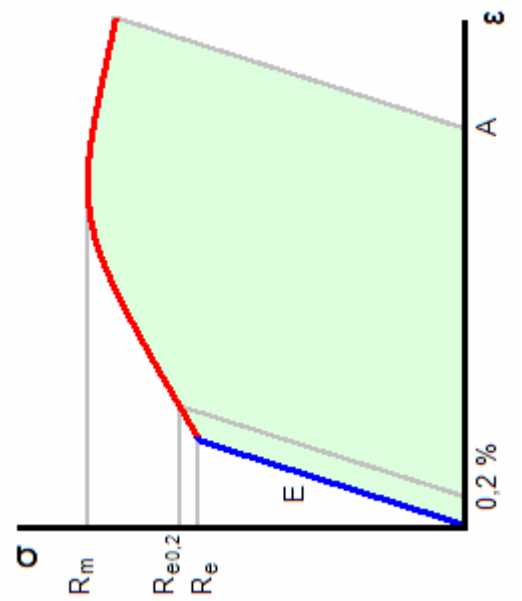
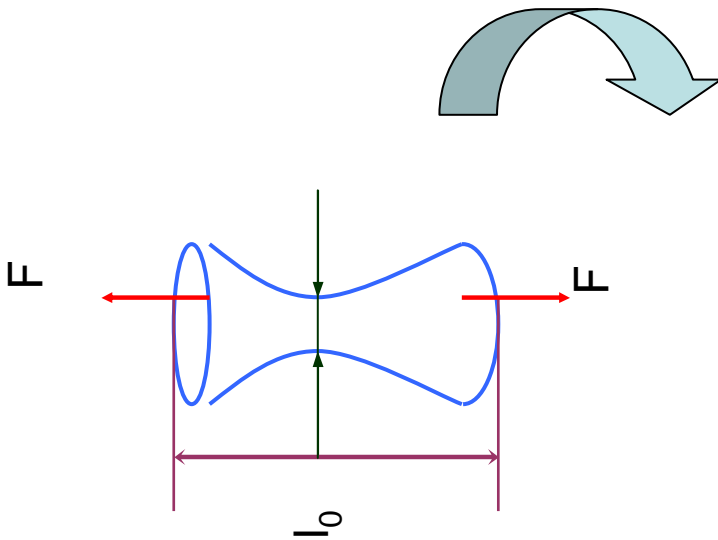
# Essai de traction

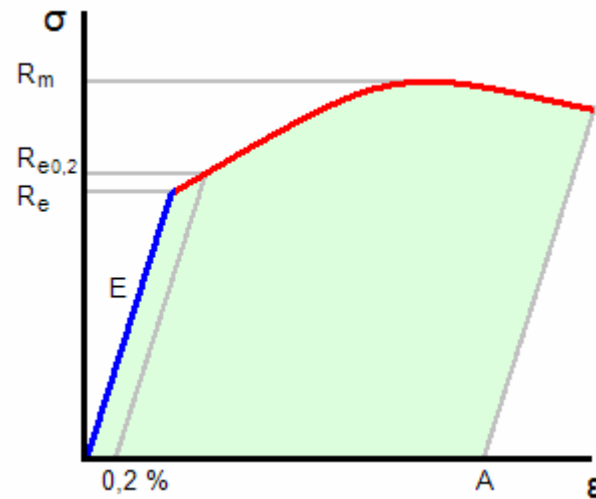


$$S_0 = \frac{\pi D^2}{4}$$

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

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

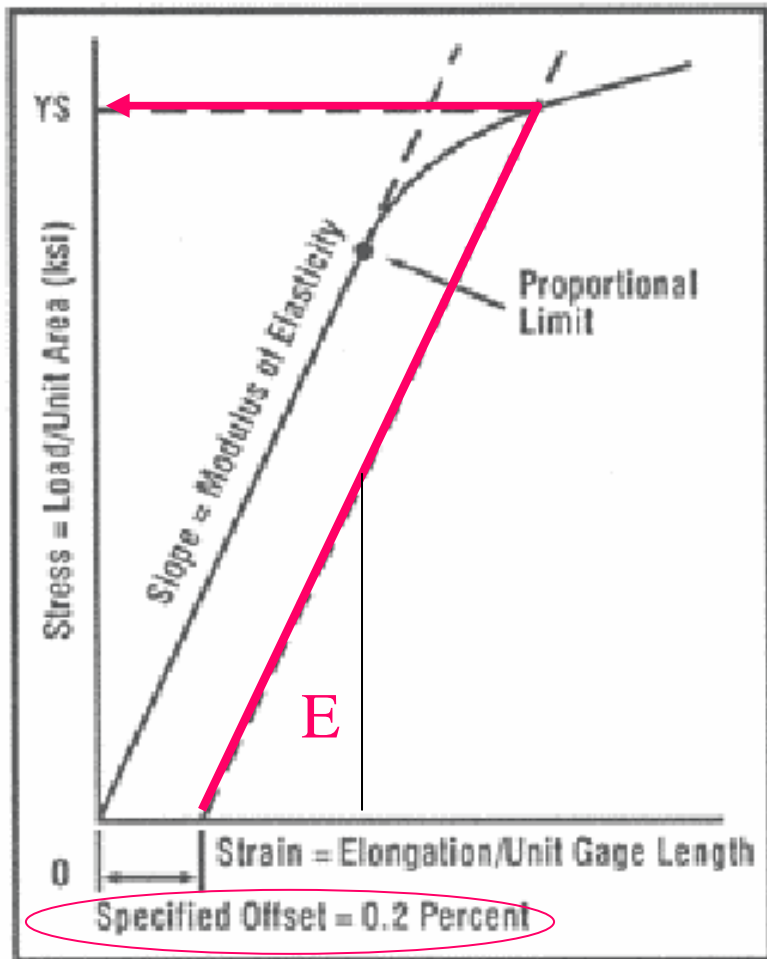




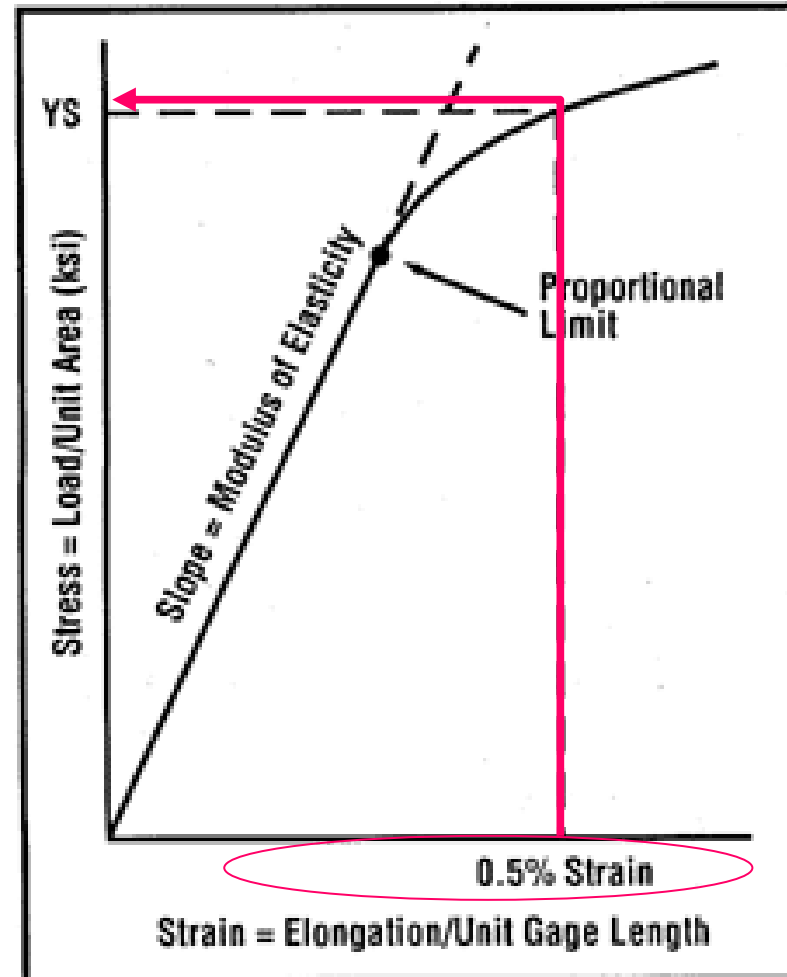
L'essai de traction donne plusieurs valeurs importantes :

- Module de Young  $E$ , ou module d'élasticité longitudinale ;
- Limite élastique  $R_e$  ou  $\sigma_e$ , qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité ;
- Limite à la rupture  $R_m$  ou  $\sigma_m$  ;
- Allongement à la rupture  $A$ , qui mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant sa rupture, propriété intéressante dans certaines applications ;
- Coefficient de Poisson, qui chiffre la variation de volume induite par la déformation des matériaux dans le domaine élastique.

# Détermination de Re

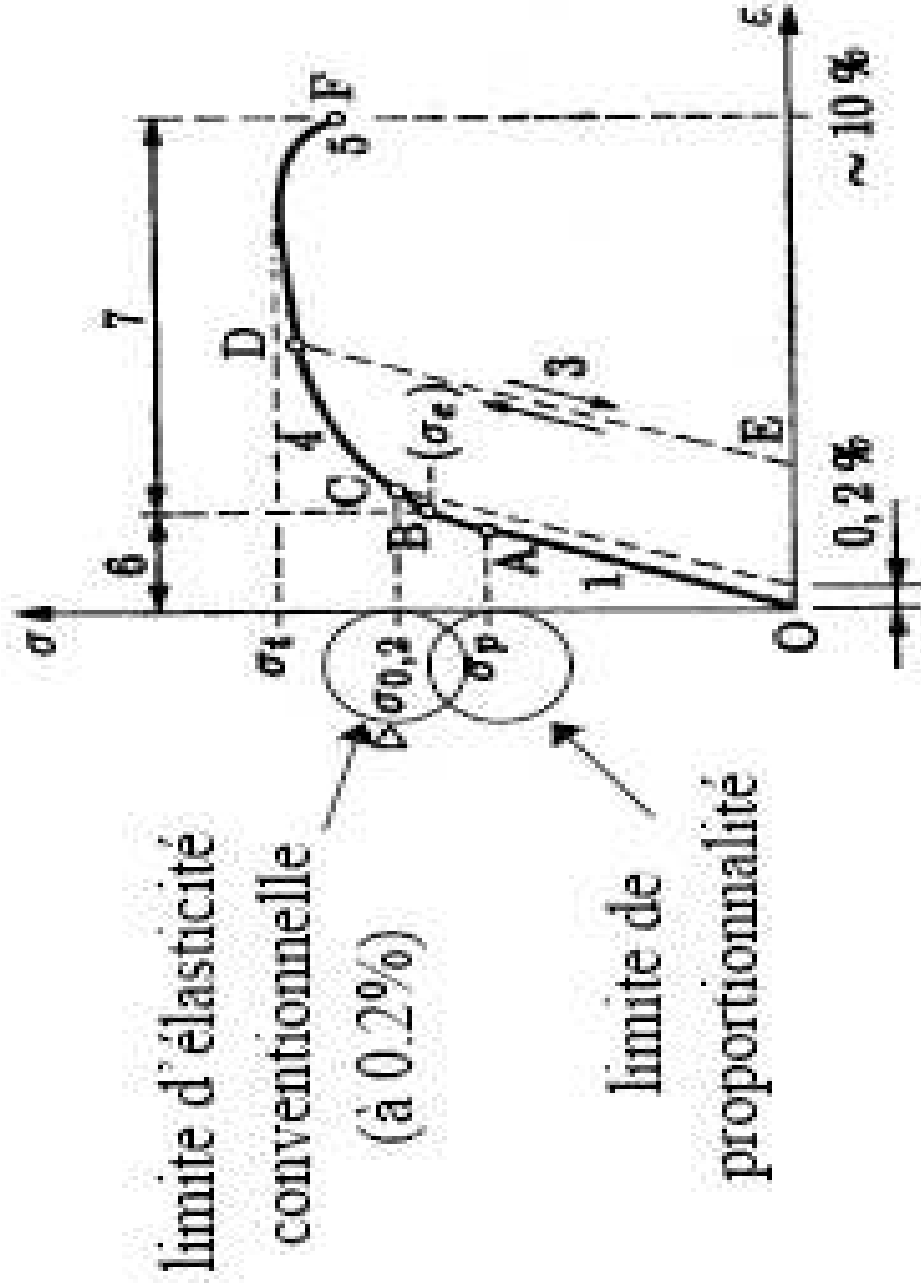


**Fig. 2.5 Stress-strain diagram for determination of yield strength by offset method**



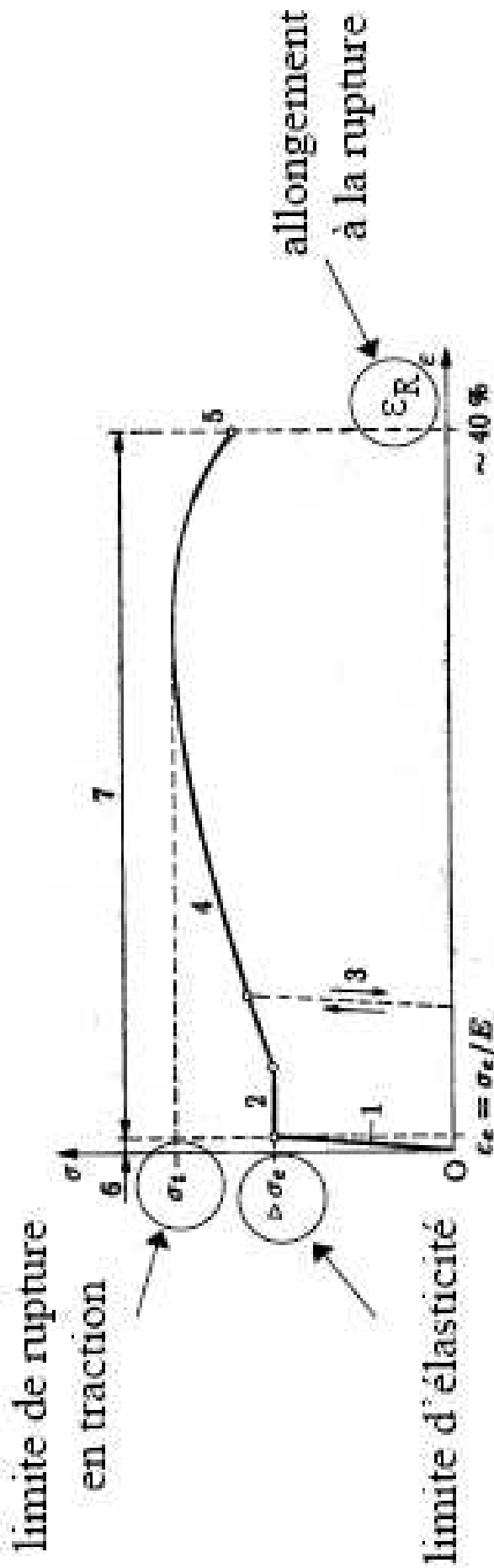
**Figure 2-6 — Stress-strain diagram for determination of yield strength by 0.5% strain extensions under load method.**

# Aluminium - traction



- 1 : droite de Hooke
- 2 : palier d'étréage
- 3 : déchargement élastique
- 4 : zone de l'écroutissage
- 5 : rupture
- 6 : zone élastique
- 7 : zone plastique

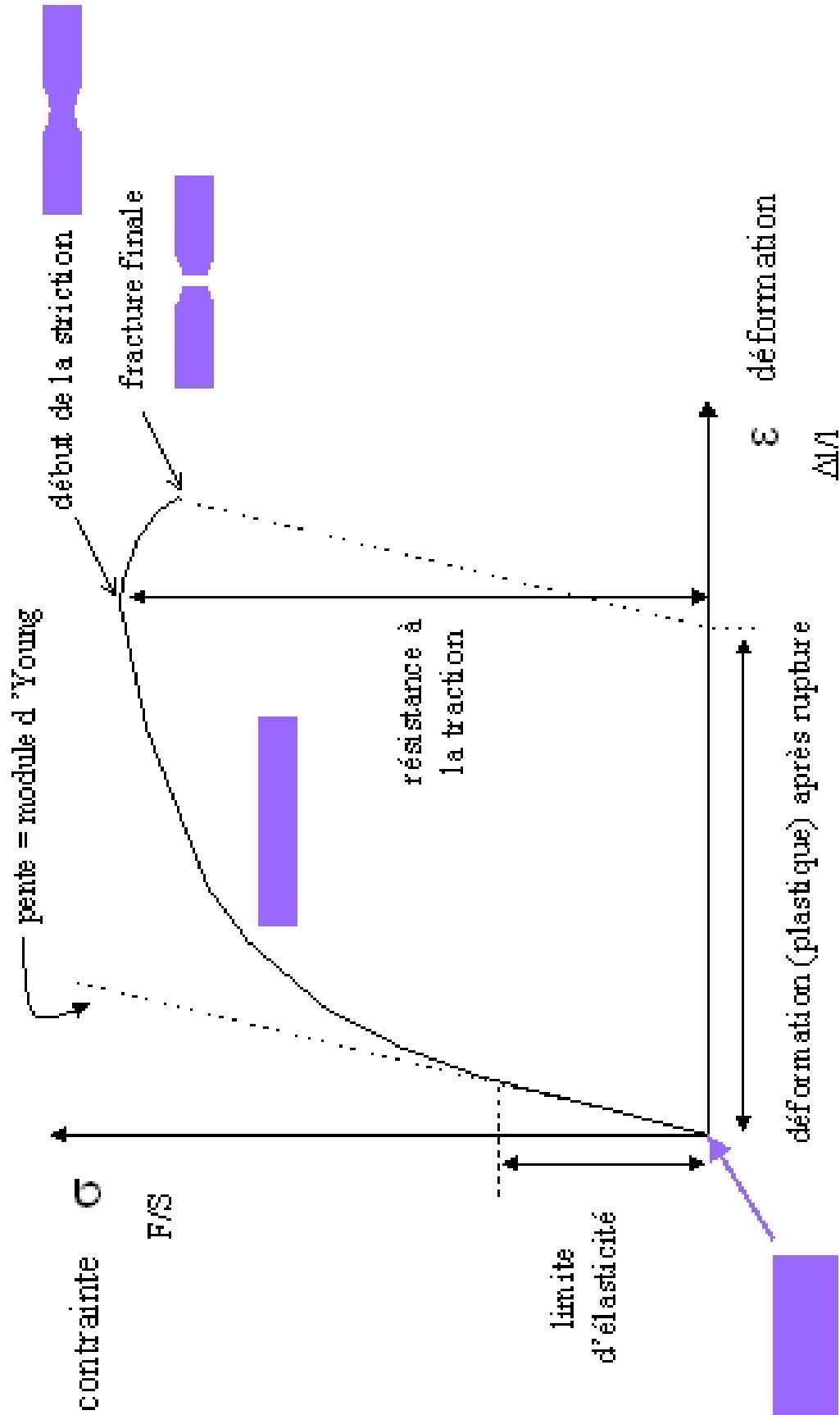
# Aciers doux - traction



- 1 : droite de Hooke
- 2 : palier d'étréage
- 3 : déchargement élastique
- 4 : zone de l'écrouissage
- 5 : rupture
- 6 : zone élastique
- 7 : zone plastique



# Propriétés mécaniques



# La ductilité

- **Qualité des matériaux à être déformé de façon permanente sans se rompre.**
- La ductilité d'un matériau se mesure par son allongement à la rupture (A%) ou par la striction à la rupture (Z%)

Allongement  
à la rupture

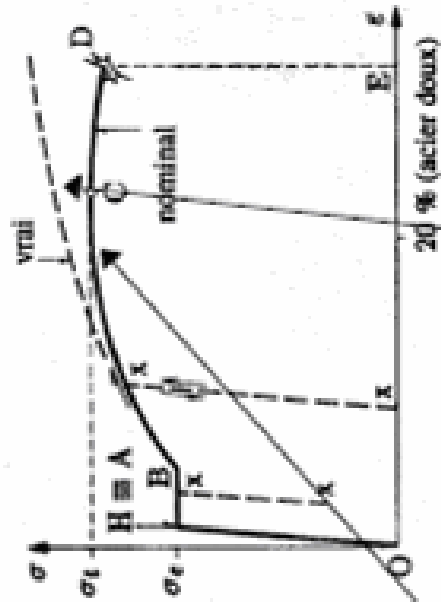
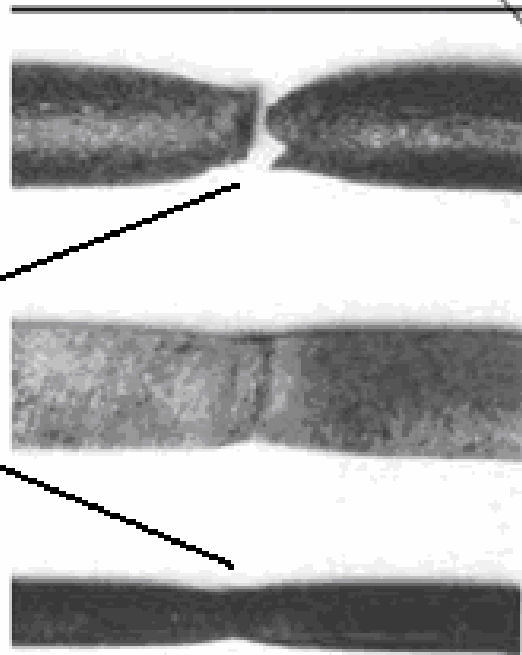
$$A\% = \frac{L_f - L_0}{L_0} \cdot 100$$

Striction  
à la rupture

$$Z\% = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \cdot 100$$

$S_0$  ( $S_f$ ) sections initiale (finale) de l'éprouvette

# Striction



contrainte nominale

$$\sigma = \frac{N}{A}$$

A = section initiale

contrainte vraie

$$\sigma' = \frac{N}{A'}$$

A' = section réelle

# Déformations réelles

Les déformations sont très élevées lors de la mise en forme par déformation plastique: Pour mieux les mesurer, on utilise les déformations réelles définies :

Déformations réelles

$$\varepsilon = \int_{L_0}^{L_f} \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{L_f}{L_0}\right)$$

conversions

$$\varepsilon = \ln(1 + e)$$

$$\sigma_r = \sigma_{eng} (1 + e)$$

e: déformation calculée ou d'ing.

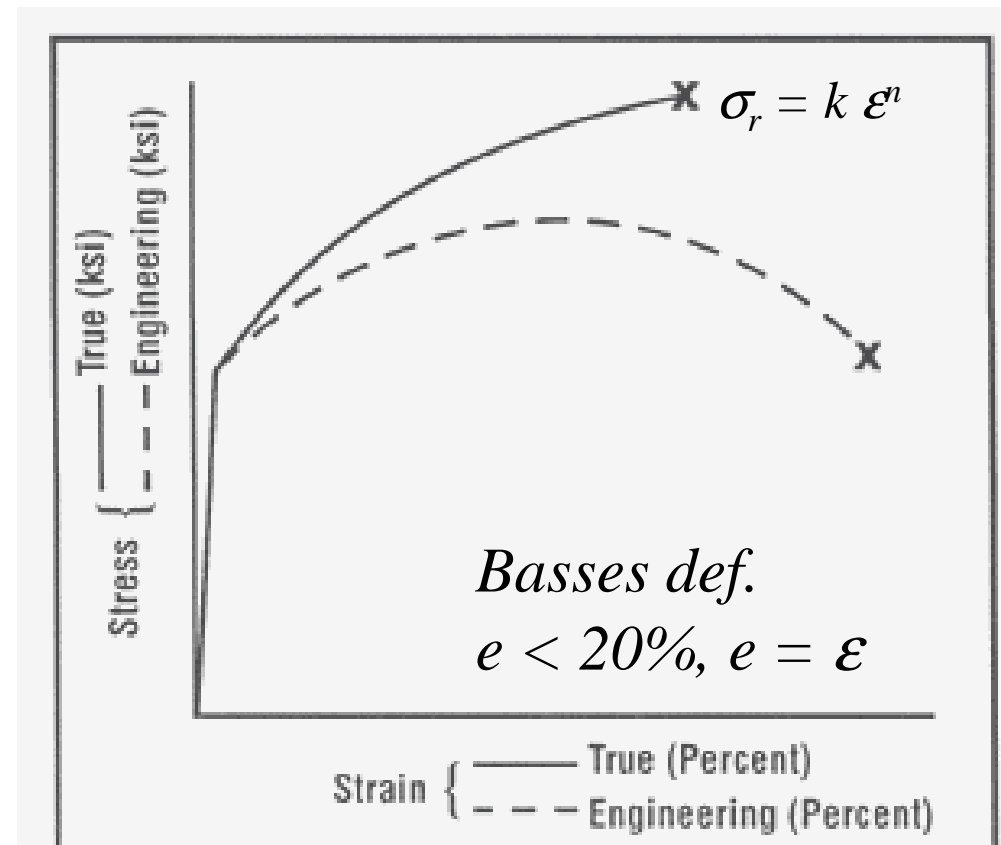


Figure 2-8 — Comparison of true stress-true strain curve with an engineering stress-strain curve. True stress-strain shows continuous increase to failure.

# Relations $\sigma - \epsilon$ ; échelle réelle

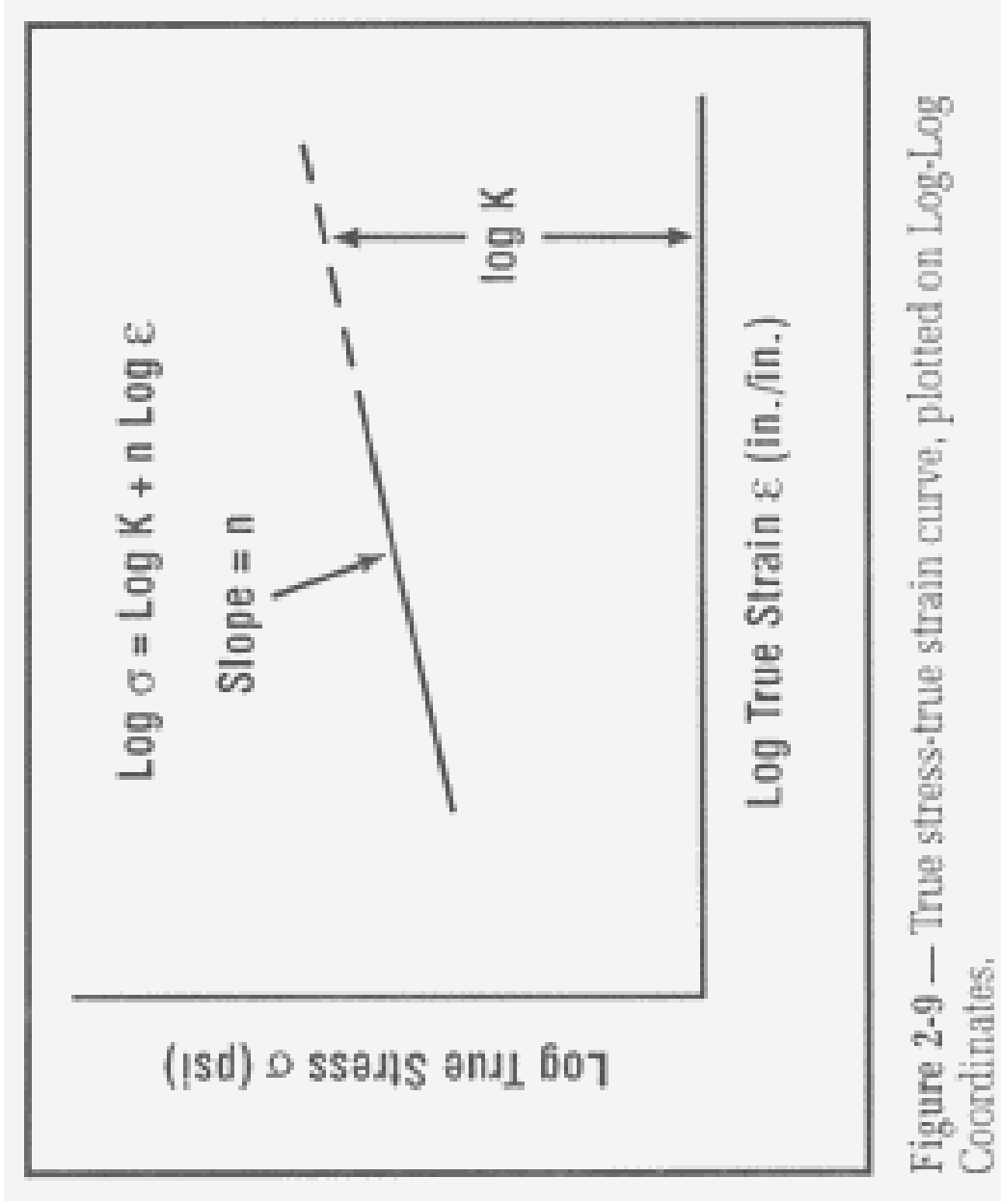
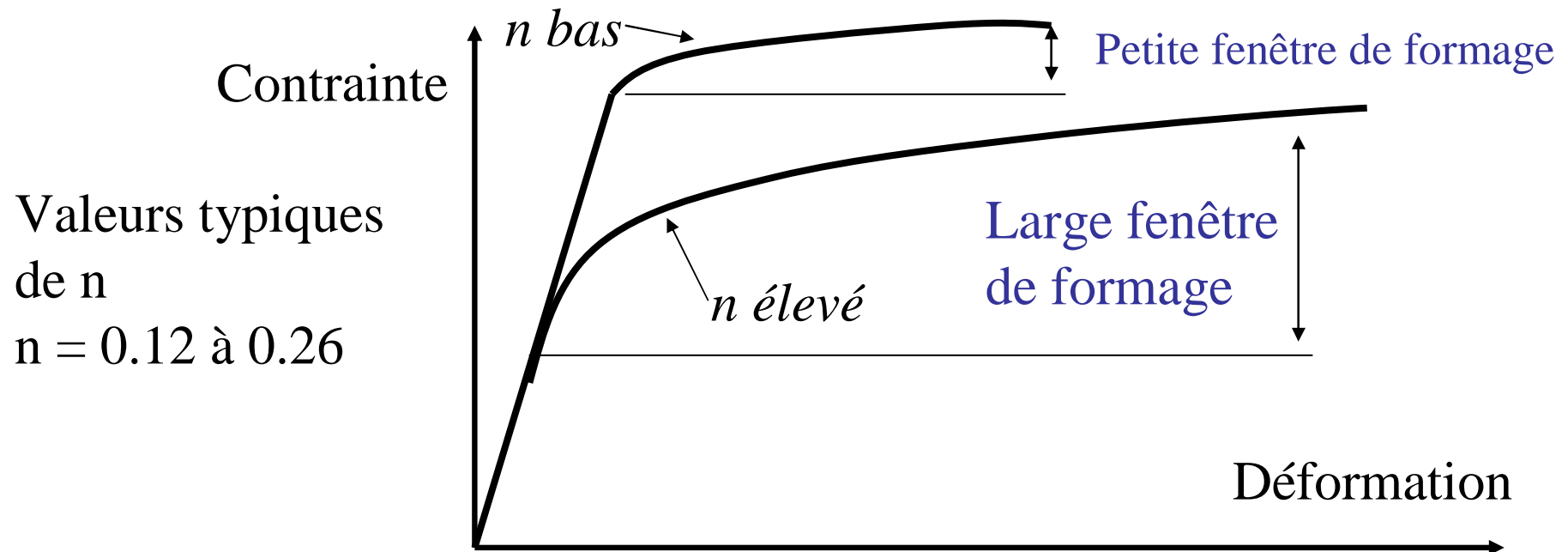


Figure 2-9 — True stress-true strain curve, plotted on Log-Log Coordinates.

# Coefficient d'écrouissage (n)

- Formabilité:  $\sigma = K \varepsilon^n$ .
- n est l'exposant d'écrouissage. Il indique l'habilité du matériau à distribuer uniformément les déformation lors du formage.



# Coefficient de poisson ( $\nu$ )

$\nu$ : rapport entre la déformation latérale et la déformation axiale

$$\nu = -\varepsilon_x / \varepsilon_z = -\varepsilon_y / \varepsilon_z$$

$$\nu = \frac{(d_0 - d) / d_0}{(L - L_0) / L_0}$$

$d_0$  et  $d$  sont respectivement le diamètre initial et le diamètre sous charge,  $L_0$  et  $L$  la longueur initiale et la longueur sous charge.  $\nu$  est défini dans le domaine élastique et il mesure le rapport entre la contraction transversale unitaire et l'allongement axiale unitaire.

# Isotropie vs anisotropie

- Isotropie : un matériaux est dit isotrope si ses propriétés sont conservées dans les 3 directions de l'espace.



# Ténacité

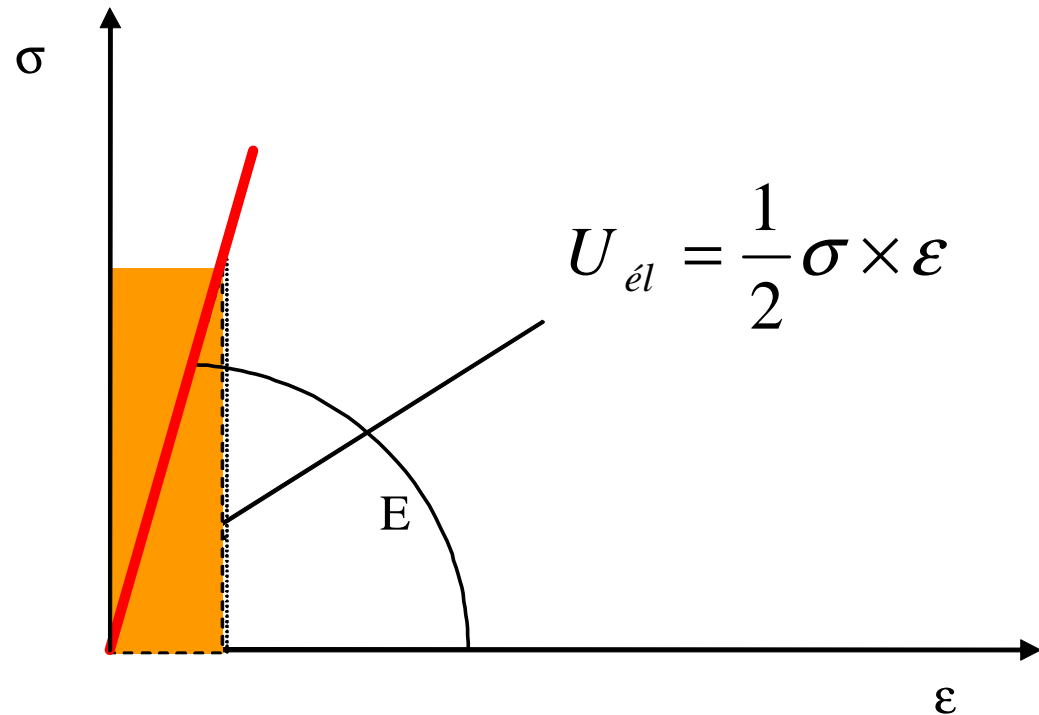
l'énergie mécanique qu'est en mesure d'accumuler un matériau jusqu'à la rupture

Un matériau est tenace s'il est résistant et ductile

On compte la ténacité par unité de volume :

- $W = 1 / (S_0 \cdot l_0) \cdot \int F \cdot d(\Delta l) = \int \sigma \cdot d \varepsilon$

# Energie élastique stockée



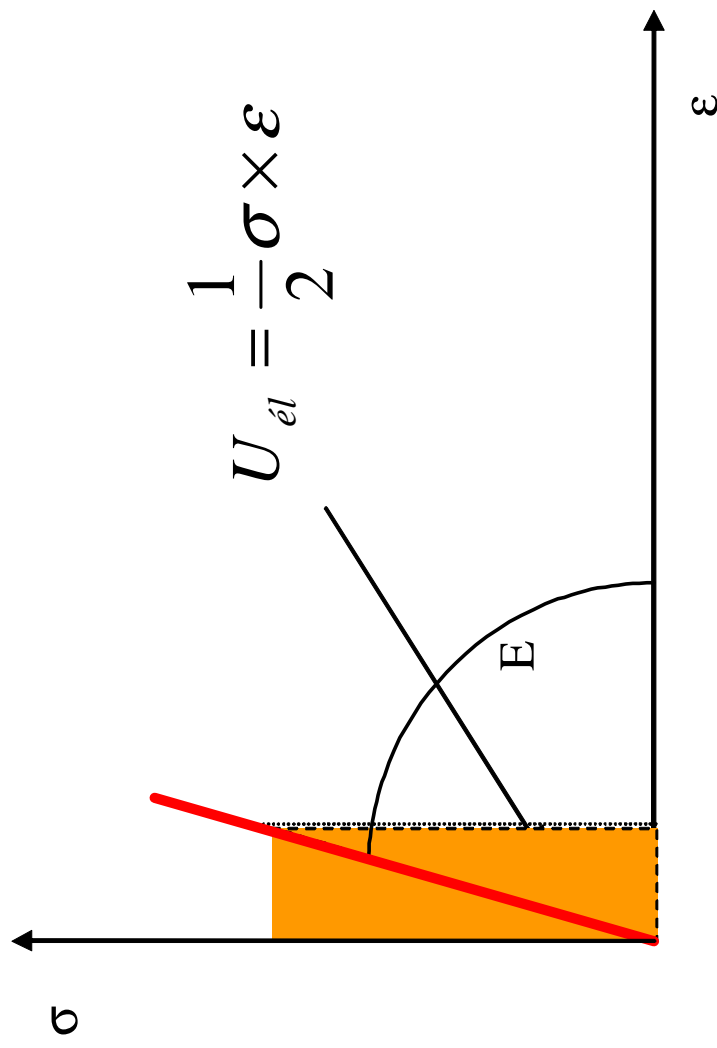
- La courbe a pour équation:

$$\sigma = E \varepsilon$$

- La surface du triangle grisé est:

$$U_{él} = \frac{1}{2} \sigma \times \varepsilon$$

# Energie élastique stockée



$$U_{el} = \frac{1}{2} \sigma \times \epsilon$$

$$\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times \frac{\text{m}}{\text{m}} = \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$$

# Energie élastique stockée

$$U_{él} = \frac{1}{2} \sigma \times \varepsilon \quad \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times \frac{\text{m}}{\text{m}} = \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$$

La densité d'énergie élastique stockée est donc:

$$U_{él} = \frac{\sigma^2}{2E}$$

# Compression et cisaillement

- Des forces de compression, cisaillement et de torsion peuvent également déformer le matériau d'une manière plastique. Le comportement obtenu ressemble à celui de la traction, excepté que pour la compression on n'observe pas de striction

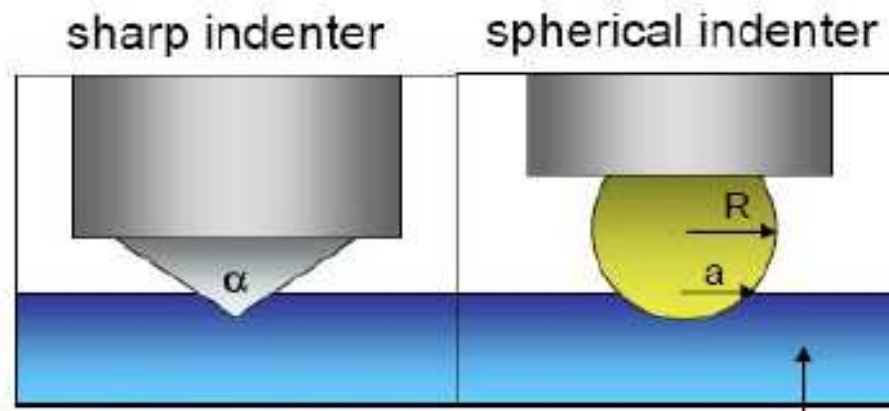
# module de cisaillement

- Le **module de cisaillement**, ou *module de glissement*, est une grandeur physique intervenant dans la caractérisation des déformations causées par des efforts de cisaillement. Pour un matériau isotrope, il est relié au module d'élasticité  $E$  et au coefficient de Poisson  $\nu$  par l'expression

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

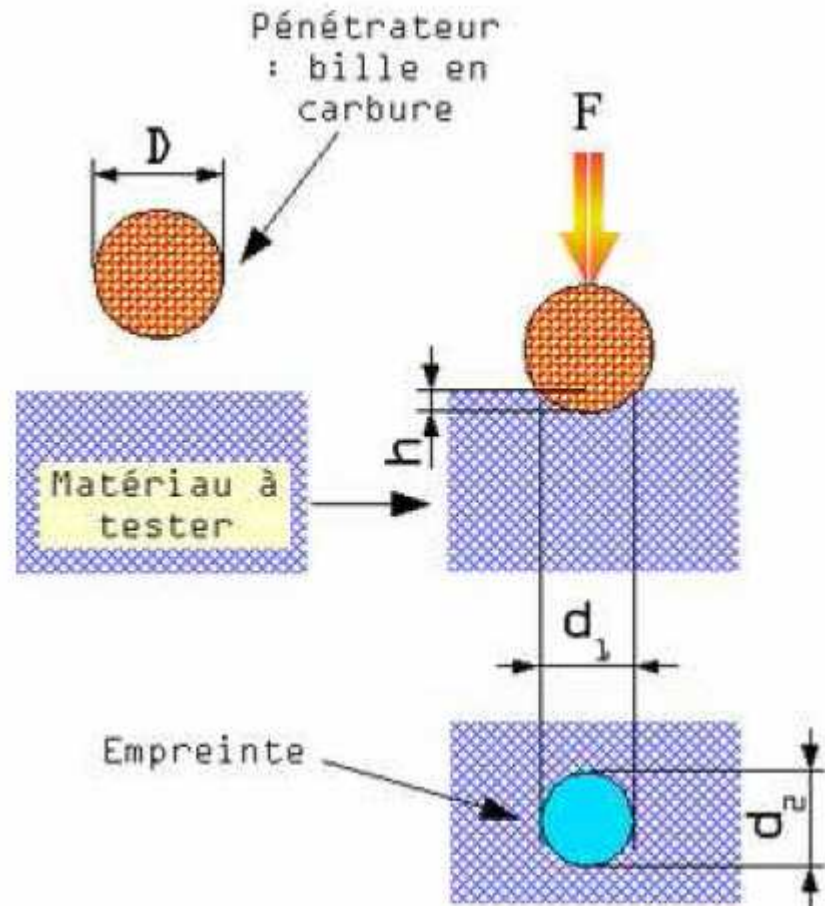
# Mesures de dureté par pénétration

**Principe** : un pénétrateur indéformable laisse une empreinte dans le matériau à tester. On mesure les dimensions de l'empreinte et on en déduit la dureté.



# Dureté Brinell

- Faire pénétrer un pénétrateur en forme de bille dans un métal
- $HB$  : dureté Brinell
- $D$  : diamètre du pénétrateur (mm)
- $d_1$  et  $d_2$  : mesure de l'empreinte réalisée à  $90^\circ$ (mm)
- $h$  : profondeur (mm)
- $F$  : charge d'essai (N)

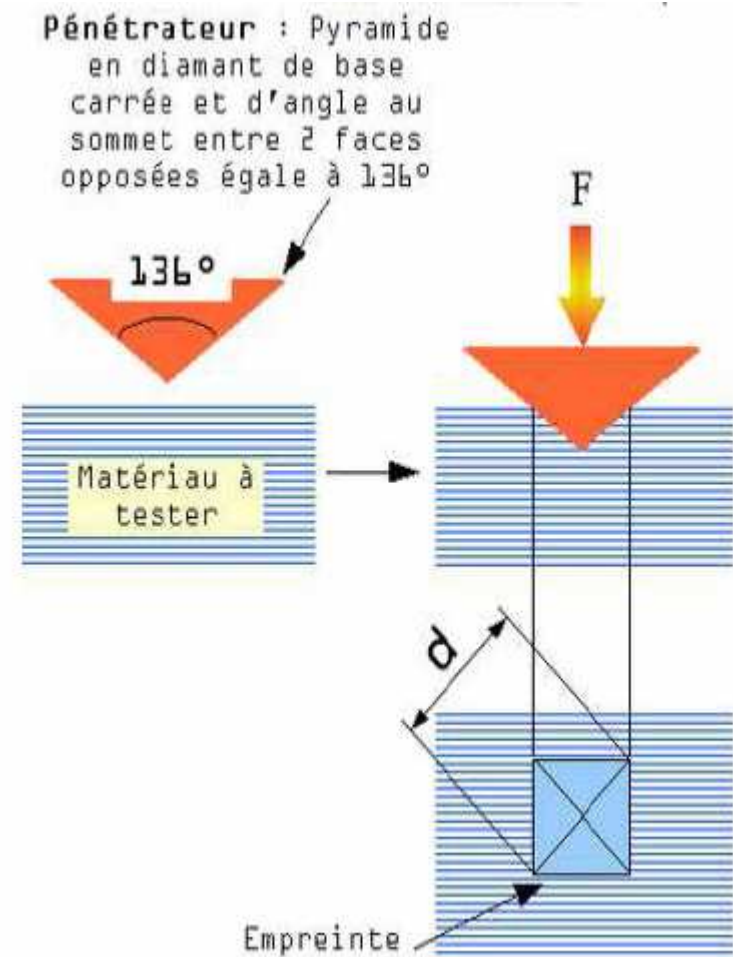


$$H_B = Cte \frac{\text{charge de l'essai}}{\text{Aire de l'empreinte}}$$
$$= 0.102 \frac{F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \text{ avec } d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$



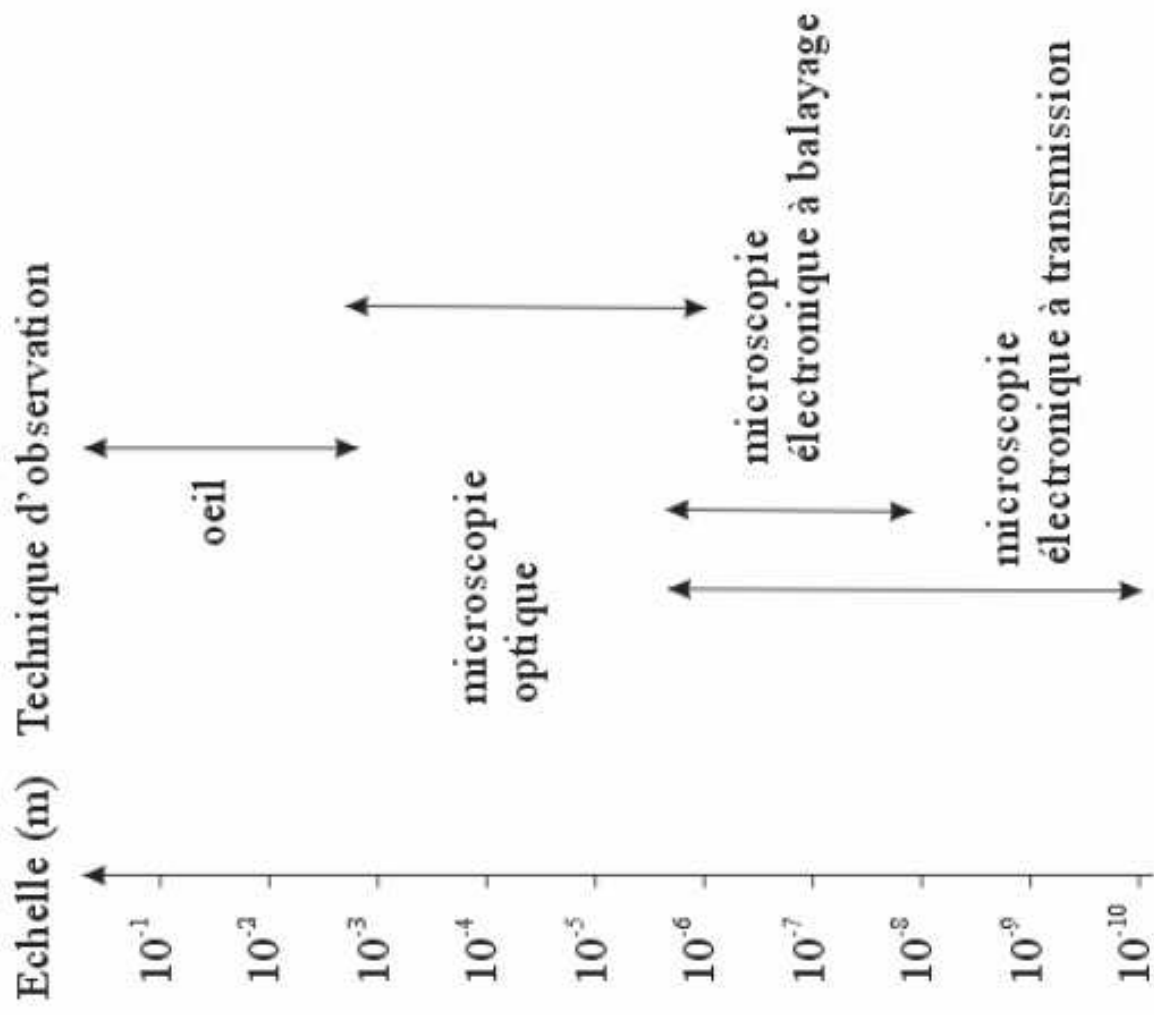
# dureté Vickers

- pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre face égal à 136°. L'empreinte a donc la forme d'un carré.
- $H_V$  : dureté Vickers
- $d_1$  et  $d_2$  : mesure de l'empreinte réalisée à 90° (2 diagonales du carré de l'empreinte)(mm)
- $F$  : charge d'essai (N)



$$H_V = Cte \frac{\text{charge de l'essai}}{\text{Aire de l'empreinte}} = 0.189 \frac{F}{d^2}, \text{ avec } d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

# Méthodes de caractérisation de la microstructure

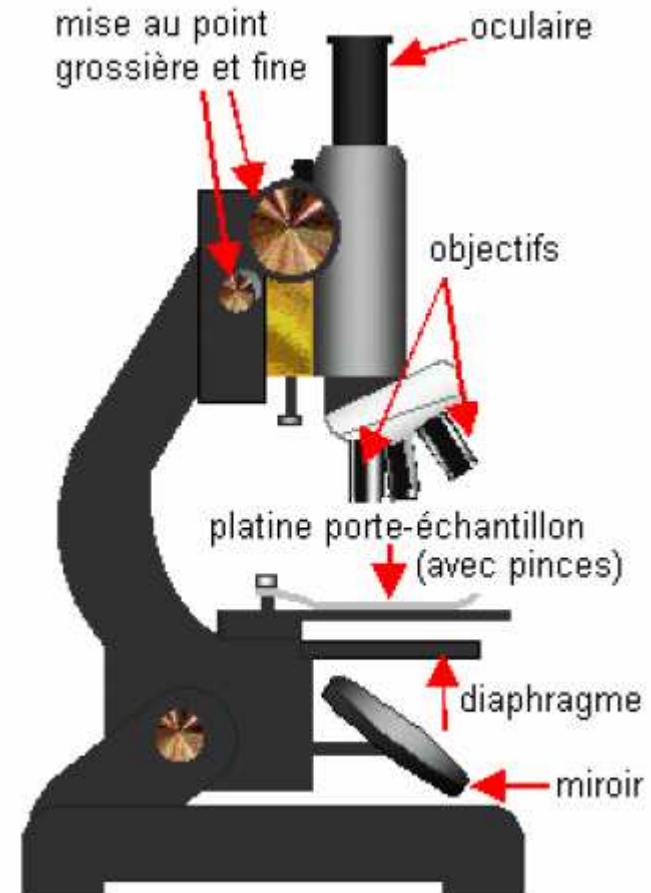


# Microscope Optique

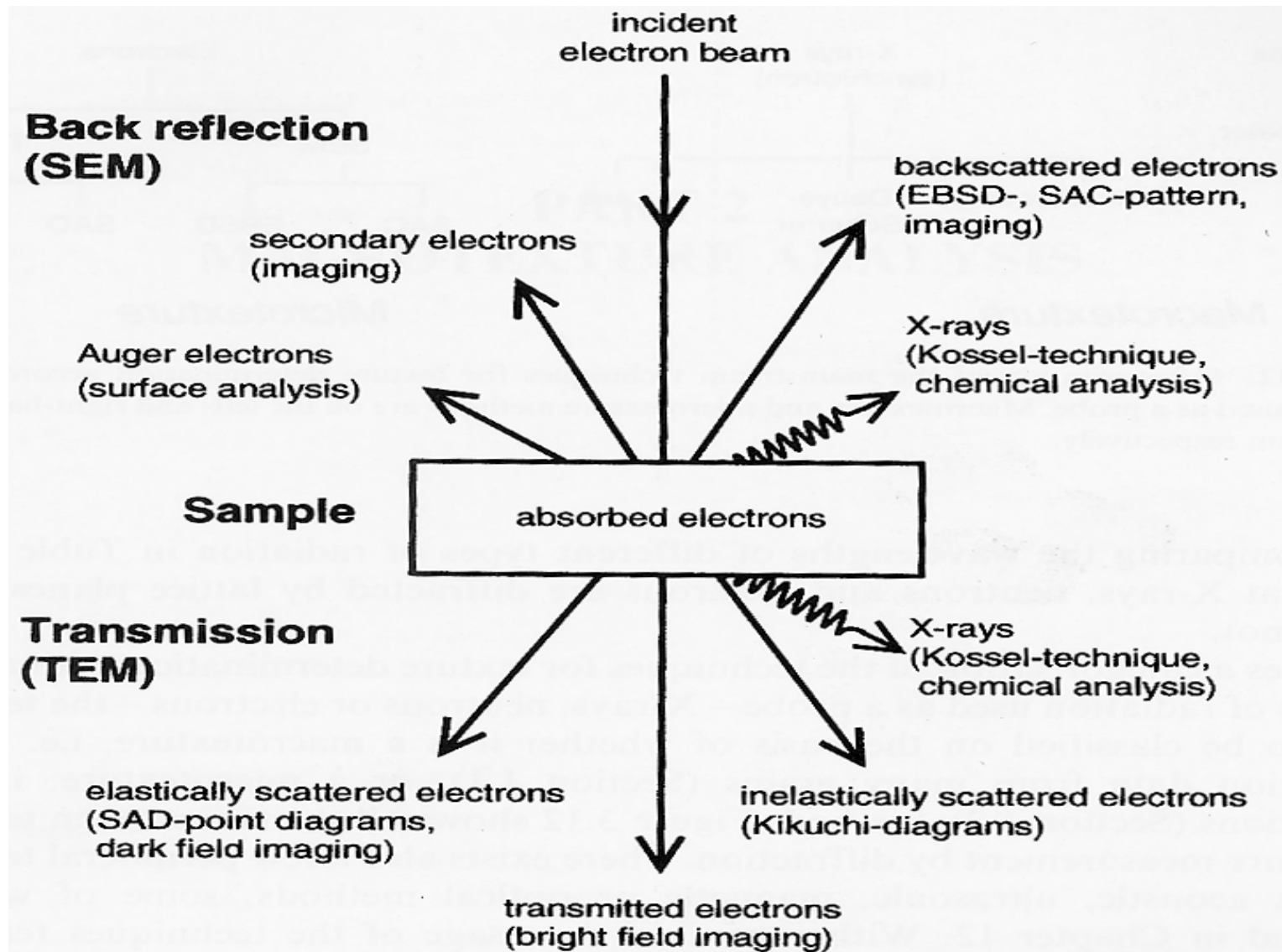
- Miroir : réfléchit la lumière
- Diaphragme : ouverture de diamètre variable
- Platine porte-échantillon : où l'on pose l'échantillon. Mobile → balayer l'échantillon
- Objectifs → grossissement.
- Mise au point grossière et fine : focalisation → image nette
- Oculaire : Image reposante pour l'oeil ;

L'oculaire peut être remplacé par un appareil photographique, par une caméra

vidéo ou une caméra CCD pour faire une acquisition numérique.



# Differents signals obtenus par l'interaction des electrons avec la matiere dans un **microscope électronique**



# Diffraction

- Le pattern résultant de la diffraction est donné par la loi de Bragg,

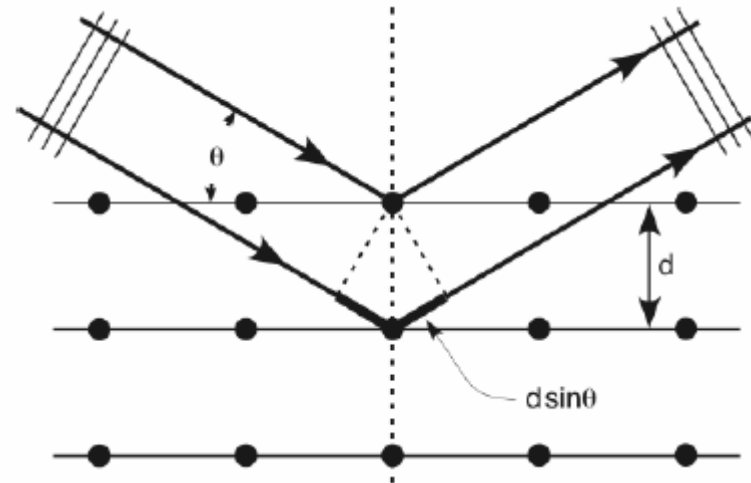
$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

d: distance interplanaire

$\theta$ : angle d'incidence (angle de Bragg)

n: Nombre entier (0, 1, 2, 3 ..... )

$\lambda$ : Longueur d'onde de l'électron incident



## Note:

En diffraction, On utilise le **Réseau Réciproque** dans lequel un ensemble de plan du réseau est représenté simplement par des points.

Comme les plans cristallographiques peuvent être repérés par les indices de Miller  $\{hkl\}$ , on peut indexer les pics de diffraction selon ces indices.