

UNIVERSITÉ BATNA 2, FACULTÉ DE TECHNOLOGIE, DÉPARTEMENT DE MÉCANIQUE

COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES MATÉRIAUX MÉTALLIQUES

Cours destiné aux Etudiants inscrits en Master 1 GM

P^r A. DERARDJA

Chapitre 1. Essais mécaniques - Lois simples

- Paramètres importants
- Élément de volume représentatif
- Vitesse de déformation et température
- Types de sollicitation
- Quelques lois simples
- Essais monotones
- Essais cycliques
- Dureté et résilience

INTRODUCTION

Un matériau = Toute matière composant un objet.

Les matériaux métalliques = métaux et alliages métalliques

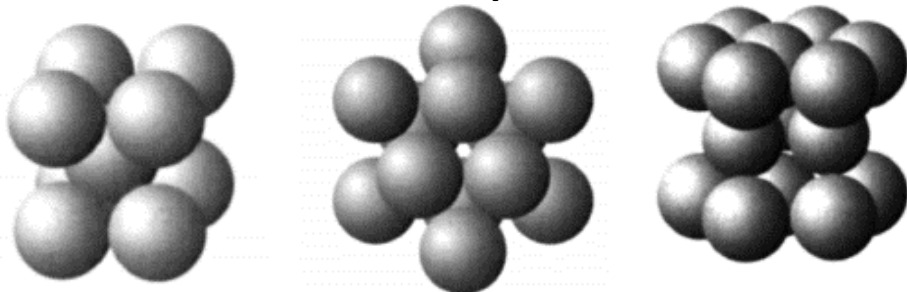
Les métaux et alliages se présentent à l'état d'assemblages de cristaux.

Monocristaux

Polycristaux

La maille élémentaire se répète dans les 3 directions de l'espace.

L'ensemble des monocristaux orientés au hasard constitue un polycristal



Exemple de structures cristallines

Afin de sélectionner le matériau adapté à une application donnée, donc ayant un comportement spécifique, la structure de celui-ci doit être prise en compte à différentes échelles:

- Macrostructure (x1)
- Microstructure ($\times 10^6$)
- Nanostructure ($\times 10^9$)

Matériau métallique



Echelle macroscopique > mm

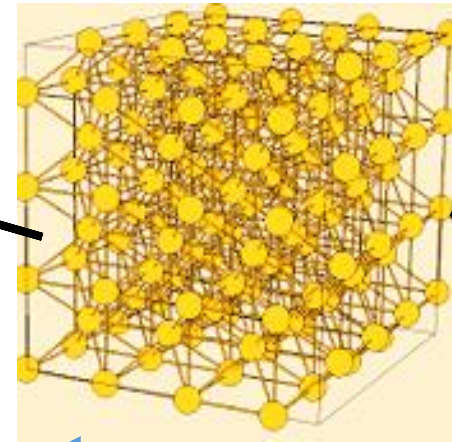
Fer: Structure polycristalline



100 μm

Echelle mésoscopique : 10 – 100 μm
Echelle microscopique : 0.1 – 10 μm

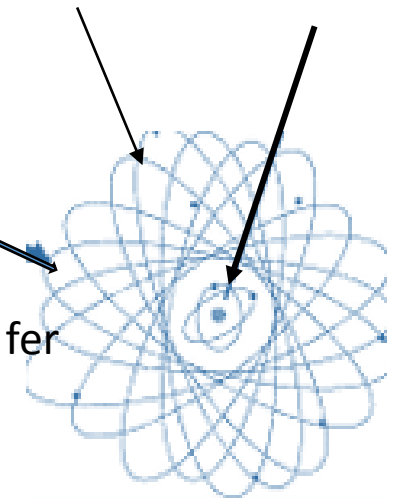
Monocristal de fer (c.c)



1 nm

Echelle nanoscopique ou atomique <10 nm

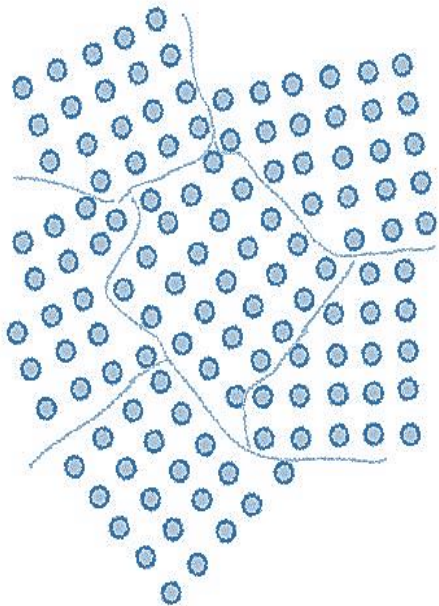
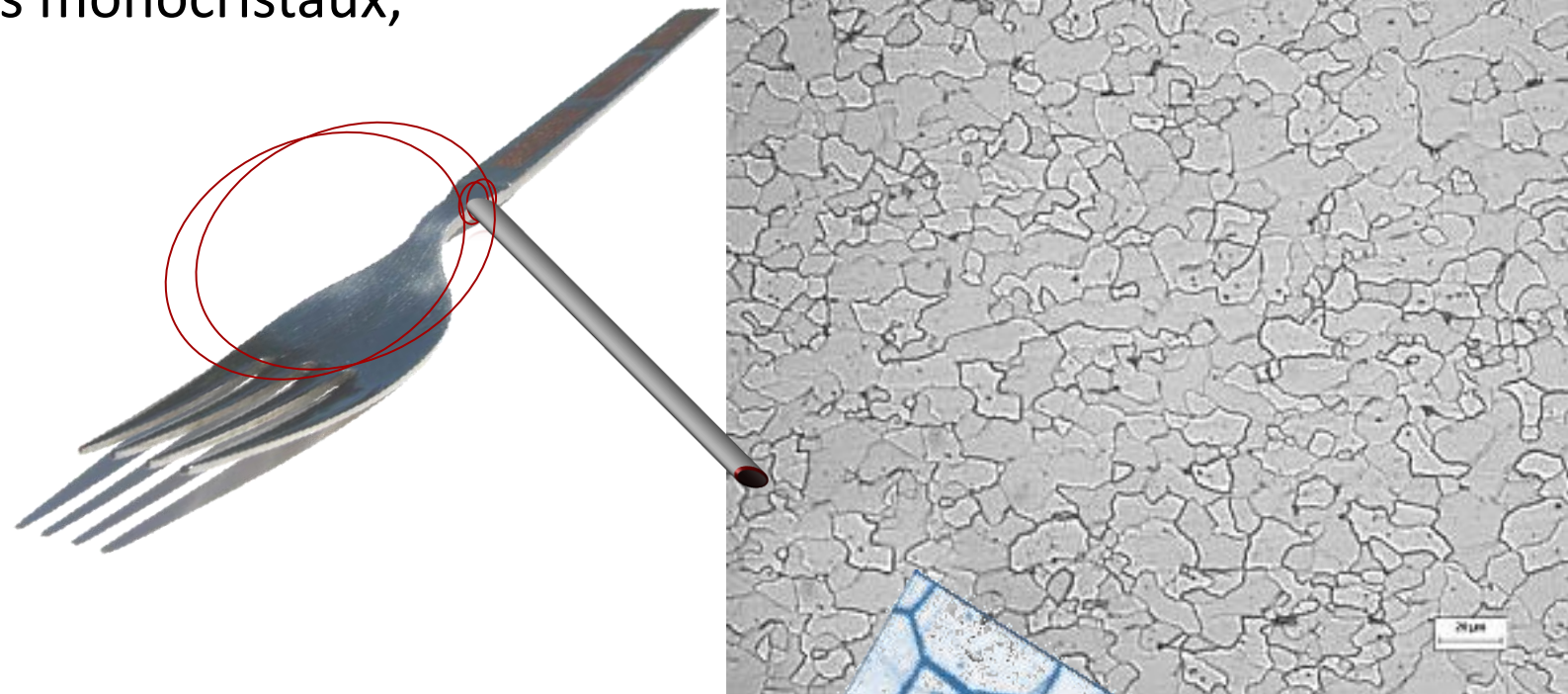
26 électrons Noyau



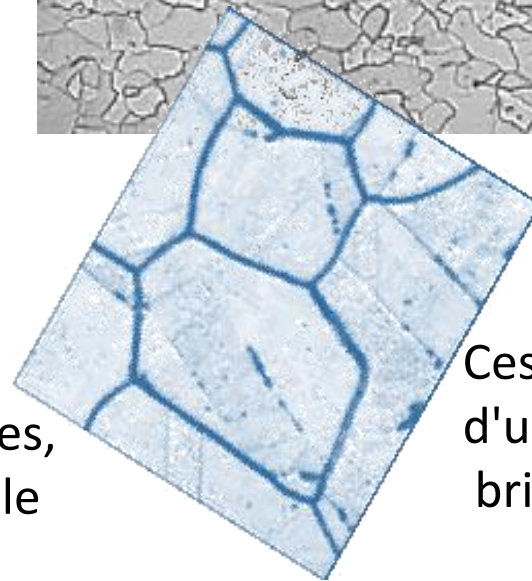
Atome de fer

0.1 nm

Une fourchette en acier est composée de grains microscopiques, des monocristaux, collés les uns aux autres.



On représente cet empilement par un ensemble ordonné de petits cubes, les atomes se retrouvant par exemple aux sommets de ces cubes.



Ces grains sont constitués d'un empilement régulier de briques : les atomes.

Propriétés d'un matériau

La propriété d'un matériau est la mesure d'un comportement par un essai

- **Propriétés physiques** : mesurent le comportement des matériaux soumis à l'action de la température, des champs électriques ou magnétiques ou de la lumière.
- **Propriétés mécaniques** : reflètent le comportement des matériaux déformés par un système de forces.
- **Propriétés chimiques** : caractérisent le comportement des matériaux soumis à un environnement plus ou moins agressif.

Les performances d'un matériau dépendent de ses propriétés.

Propriétés physiques : conductibilité électrique, aimantation, conductibilité thermique, chaleur spécifique, température et chaleur latente de transformation, énergie de surface, de liaison, transparence, . . .

Propriétés mécaniques : module d'élasticité ou limite d'élasticité, écrouissage, ductilité, viscosité, vitesse de fluage, dureté, charge à la rupture, résistance à la fatigue, à l'usure, . . .

Propriétés chimiques : résistance à la corrosion ou à l'oxydation, inflammabilité, diagrammes d'équilibre, . . .

Les propriétés mécaniques fondamentales sont:

- La limite élastique conventionnelle R_e
- La résistance mécanique conventionnelle R_m
- La dureté Vickers HV , Brinell HB ou Rockwell C HRC
- La limite de fatigue ou d'endurance σ_D , et, en fluage,
- La contrainte à la rupture σ_r en un temps donné,
- La ténacité
- La résilience KCU ou KCV .

Les voies d'accès aux propriétés mécaniques

L'approche déductive

Elle prend en compte la microstructure du matériau en vue de déterminer ses propriétés macroscopiques. Cette approche choisit de **modéliser l'hétérogénéité des matériaux**, en vue de mieux prévoir le comportement moyen global.

Elle est relativement riche, de par son principe même, mais elle est lourde à mettre en œuvre. Son utilisation est encore limitée à la prévision du comportement des matériaux, dans l'optique de mieux comprendre leur «fonctionnement» et d'améliorer leurs propriétés mécaniques.

L'approche inductive

Elle permet de caractériser le comportement d'un élément de volume représentatif (EVR).

Elle consiste à déterminer les relations de cause à effet qui existent entre les variables constituant les entrées et les sorties du processus étudié. Elle trouve une justification dans le fait que des phénomènes de l'échelle microscopique très divers peuvent conduire, après des effets de moyenne, à des réponses globales de même nature. Cette méthode est, dans bien des cas, la seule applicable dans un cadre industriel.

Élément de volume représentatif (EVR)

L'élément de volume représentatif **EVR** (ou **VER**) doit être suffisamment grand pour lisser les discontinuités de la matière (grand par rapport aux hétérogénéités du matériau) et rester petit par rapport aux gradients de contraintes et de déformations dans la structure (petit par rapport au volume total de la matière considérée).



S'il n'est pas possible de définir un tel volume pour un milieu donné, celui-ci n'est pas un milieu continu.

Exemple:

Pour réaliser un essai mécanique, un élément de volume "représentatif" du matériau doit être utilisé, afin que les hypothèses des milieux continus soient satisfaites.

Métaux et alliages: taille des hétérogénéités : (grain : 0,001 à 0,1mm)

$$\text{EVR} = 0,5 \times 0,5 \times 0,5\text{mm}$$

Les principaux types de comportements mécaniques

Elasticité

Plasticité

Fracture

Fluage

Fatigue



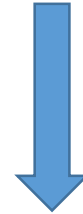
Essais mécaniques

Lors d'un essai mécanique, un matériau peut réagir de différentes manières :

- ✓ par échauffement thermique,
- ✓ par déformation élastique,
- ✓ par déformation plastique,
- ✓ par formation et croissance de microcavités

Etude du comportement mécanique des matériaux

Réponse à une sollicitation donnée



Paramètres décrivant cette réponse



la contrainte σ

la déformation ε

la vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}$

la température

Le modèle de comportement



Les différents types d'essais

Il existe de nombreux essais qui permettent de caractériser les propriétés mécaniques des matériaux. Certains sont normalisés (**AFNOR**, Association Française de Normalisation ; **ISO**, International Standardisation Organisation ; **ASTM**, American Society for Testing and Materials).

Il s'agit d'essais simples à réaliser, reproductibles, servant à donner des informations sur les seuils de charge qui produisent des déformations irréversibles, ou encore la rupture.

Lors de la réalisation d'essais mécaniques, le choix de la direction de sollicitation conditionne souvent le domaine de validité de la loi de comportement obtenue. On peut classer les directions de sollicitation en deux grandes catégories : les sollicitations uniaxiales et les sollicitations multiaxiales. On parle alors **d'essai « uniaxial »** ou **d'essai « multiaxial »**. Les principaux essais uni-axiaux utilisés sont :

- la traction-compression
- la torsion
- la flexion

Définitions des paramètres

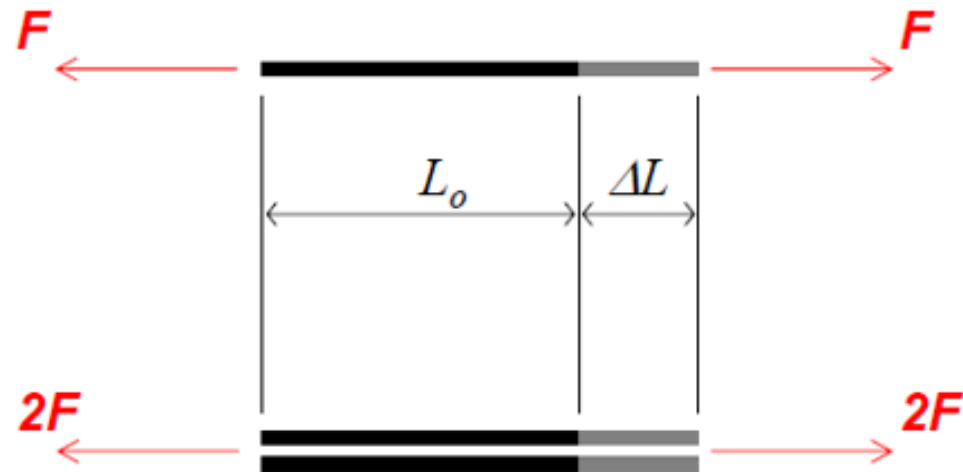
La Contrainte: $\sigma(N.m^{-2}) = \frac{F (N)}{S(m^2)}$

$1 N.m^{-2} = 1Pa$

$1 N.mm^{-2} = 1 Mpa.$



La force nécessaire pour déformer un solide dépend du volume ou de la surface de celui-ci.

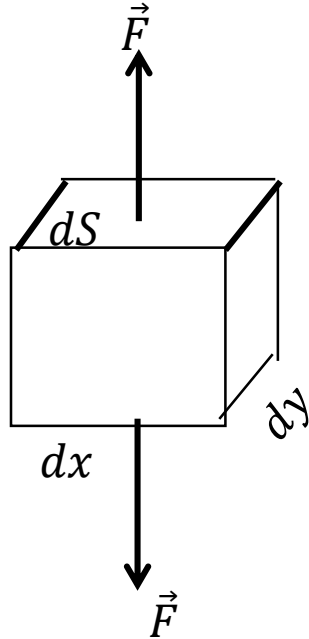


La contrainte nécessaire pour déformer un solide ne dépend pas du volume ou de la surface de celui-ci.

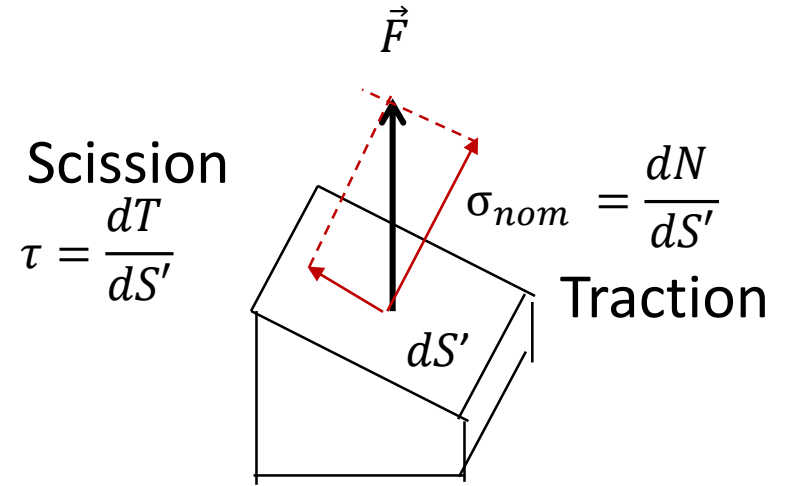
$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{2F}{2S}$$

La contrainte nominale:

$$\sigma_{nom} = \frac{dF}{dS} = \frac{dF}{dxdy}$$

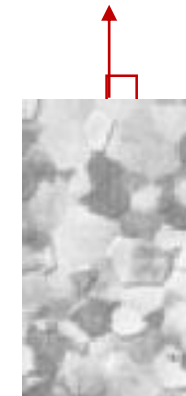


= la contrainte normale

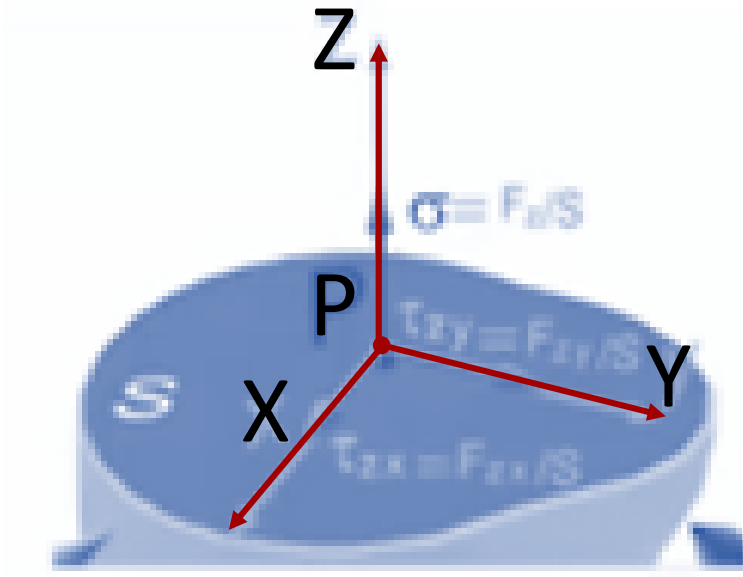
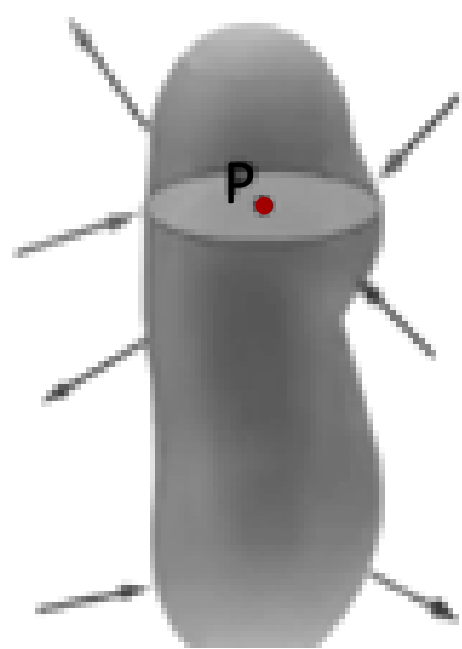


= la combinaison de La contrainte normale et de la contrainte tangentielle.

Le matériau métallique est polycristallin



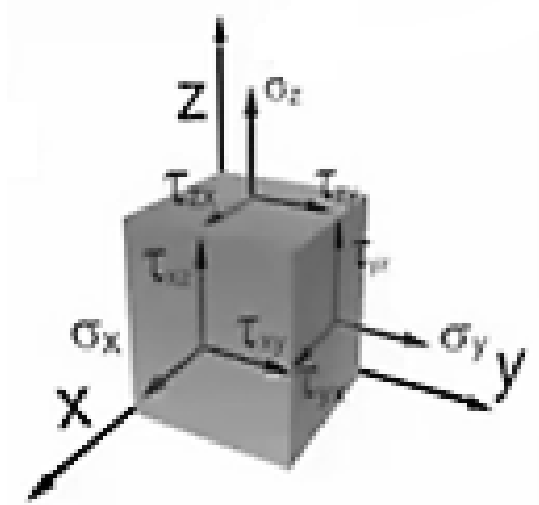
Tri-axialité des contraintes:



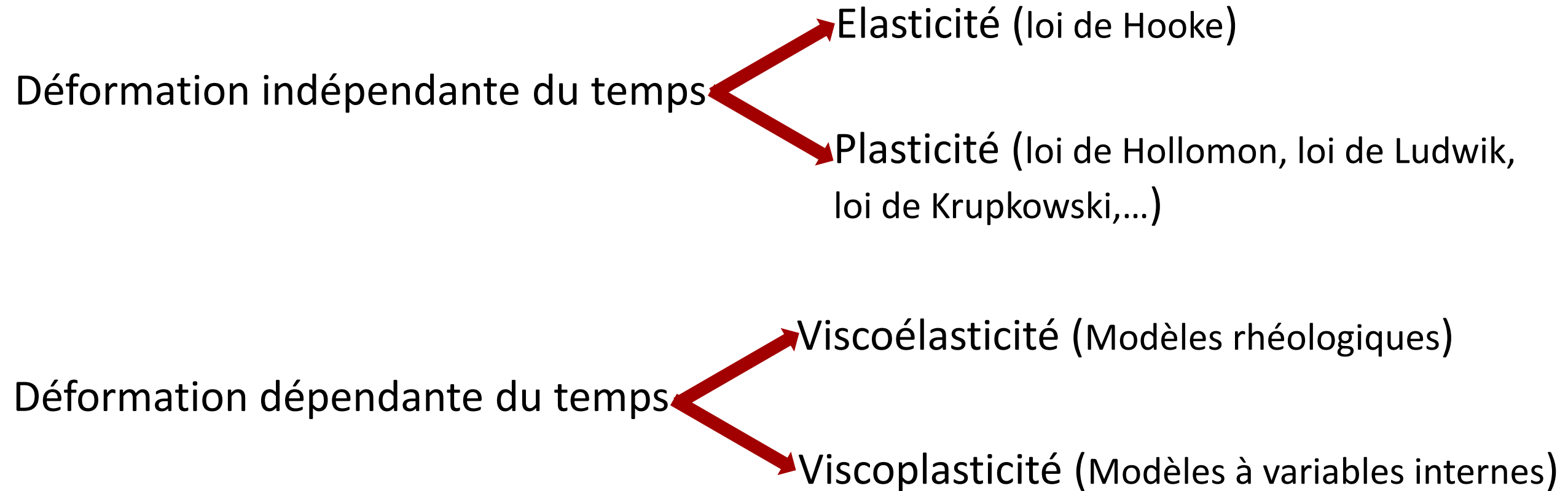
3 contraintes normales: σ_x , σ_y et σ_z

6 contraintes tangentielles: τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} , τ_{yx} , τ_{zx} et τ_{zy}

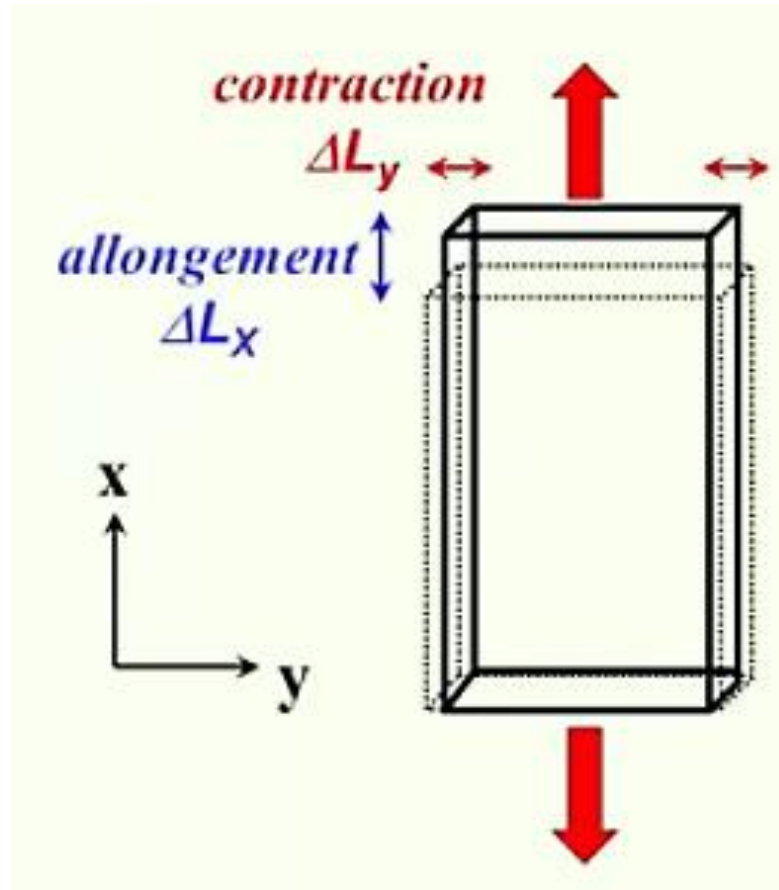
- Avec :
- $\tau_{xy} = \tau_{yx}$
 - $\tau_{xz} = \tau_{zx}$
 - $\tau_{yz} = \tau_{zy}$



Principaux types de déformations

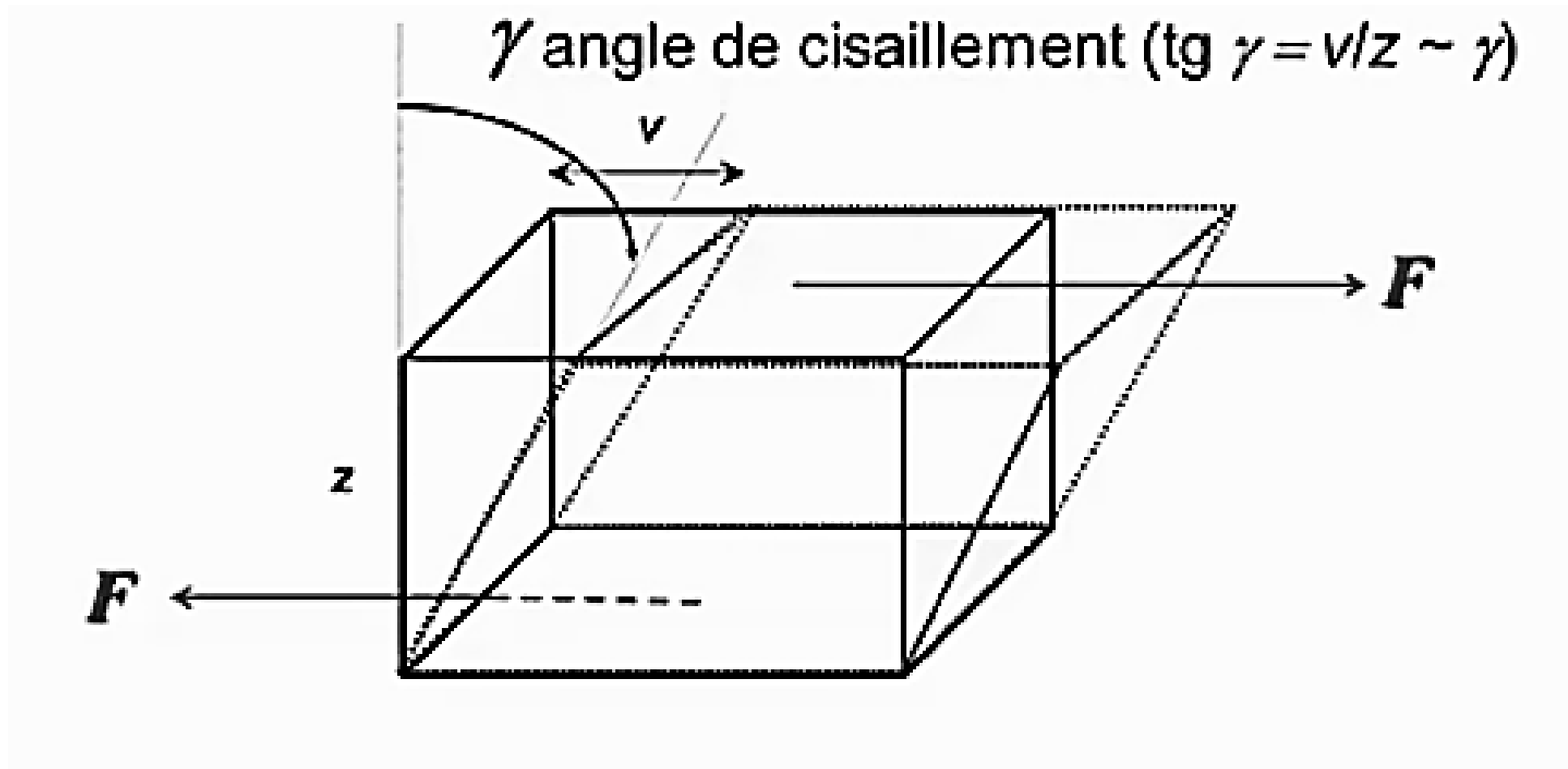


Déformations:



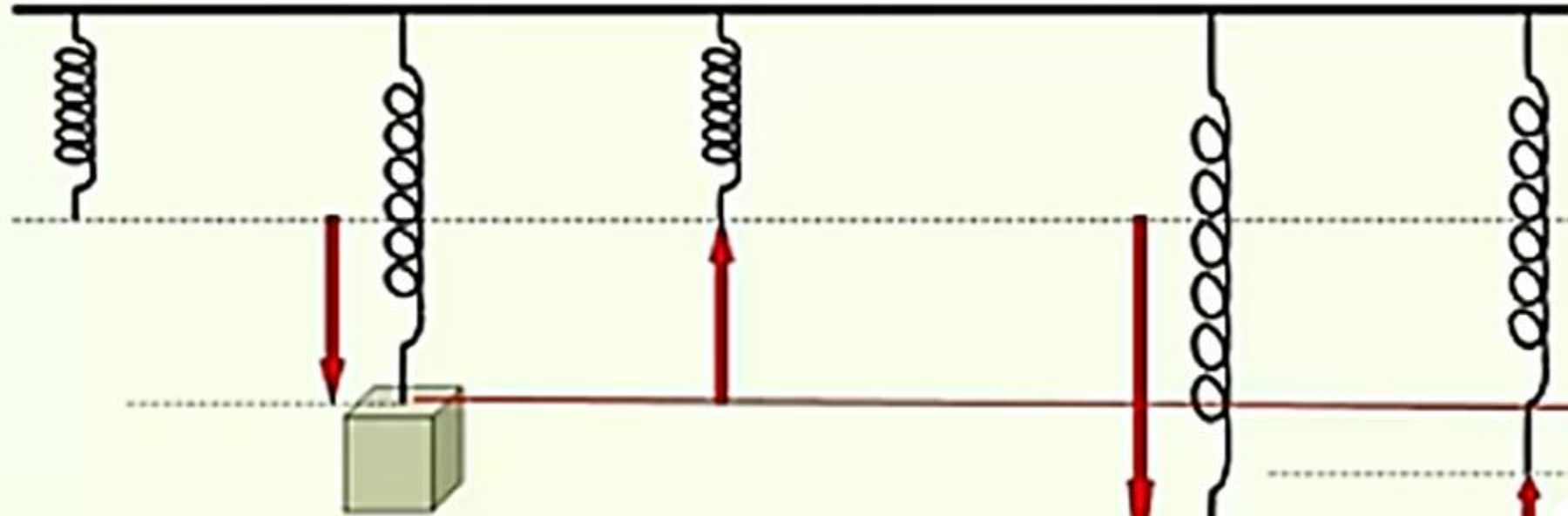
Le coefficient de Poisson définit le rapport entre le taux de contraction et le taux d'allongement. Pour les matériaux métalliques, ν est de l'ordre de 0,3 soit environ 30 % de contraction par rapport à l'allongement.

Déformation angulaire (radians):



**Déformation élastique
ou REVERSIBLE**

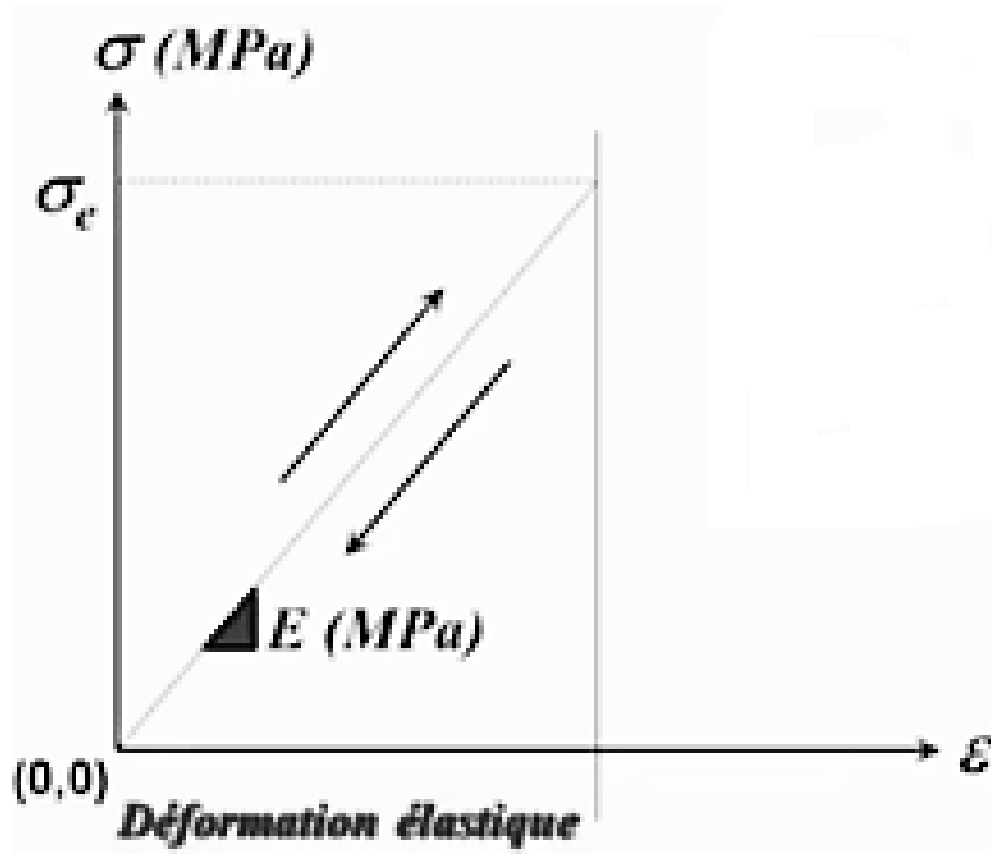
**Déformation plastique
ou PERMANENTE**



Déformation "Retour" complet

Déformation "Retour" incomplet

Déformation élastique linéaire:

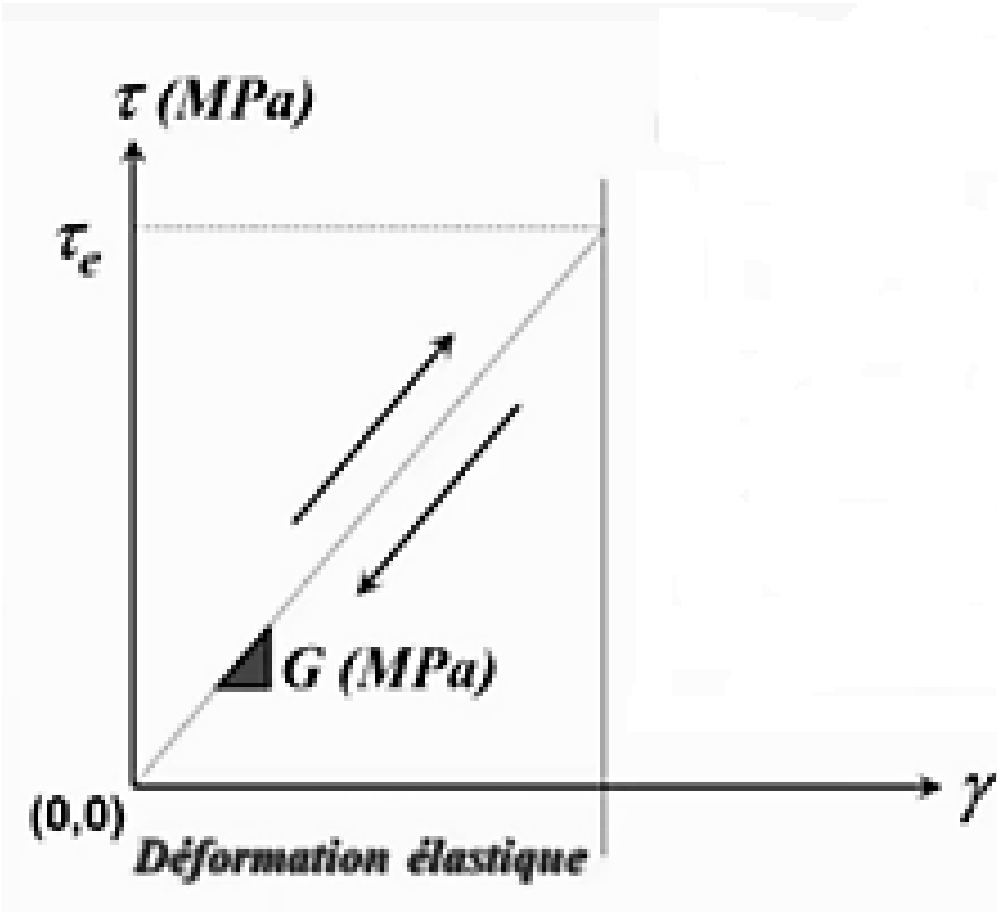


Déformation linéaire de traction:
Seuil/Contrainte/Limite d'élasticité σ_e

E Module de Young

Loi de Hooke : $\sigma = \epsilon \cdot E$





Déformation linéaire de scission:

Seuil/Contrainte/Limite d'élasticité τ_e

G Module de Coulomb ou de cisaillement

Loi de Coulomb : $\tau = G \cdot \gamma$

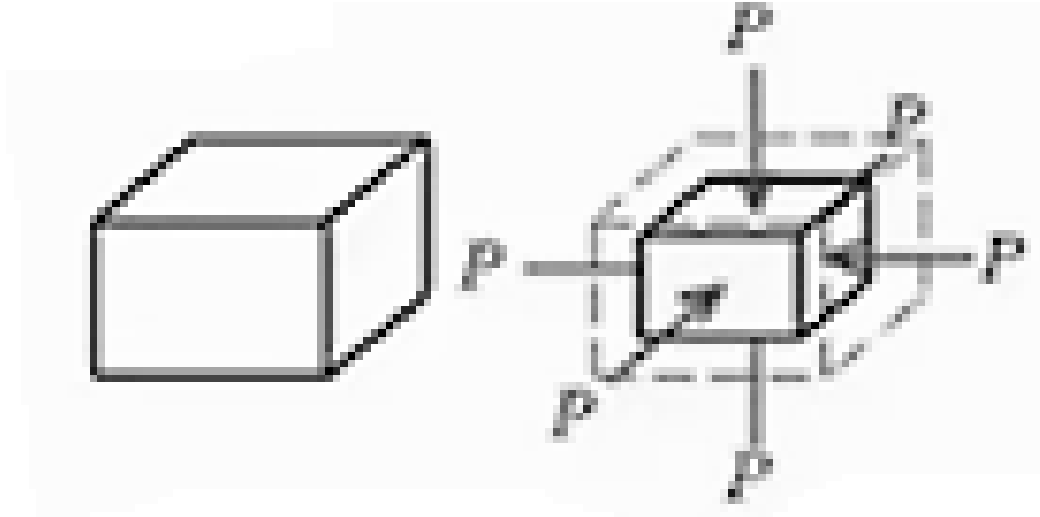
Pour les matériaux isotropes

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

Pour les matériaux métalliques : $G = 40\% E$

Compressibilité

$$\Delta P = -K \frac{\Delta V}{V_0}$$



K : Module d'élasticité isostatique

Pour un matériau isotrope:

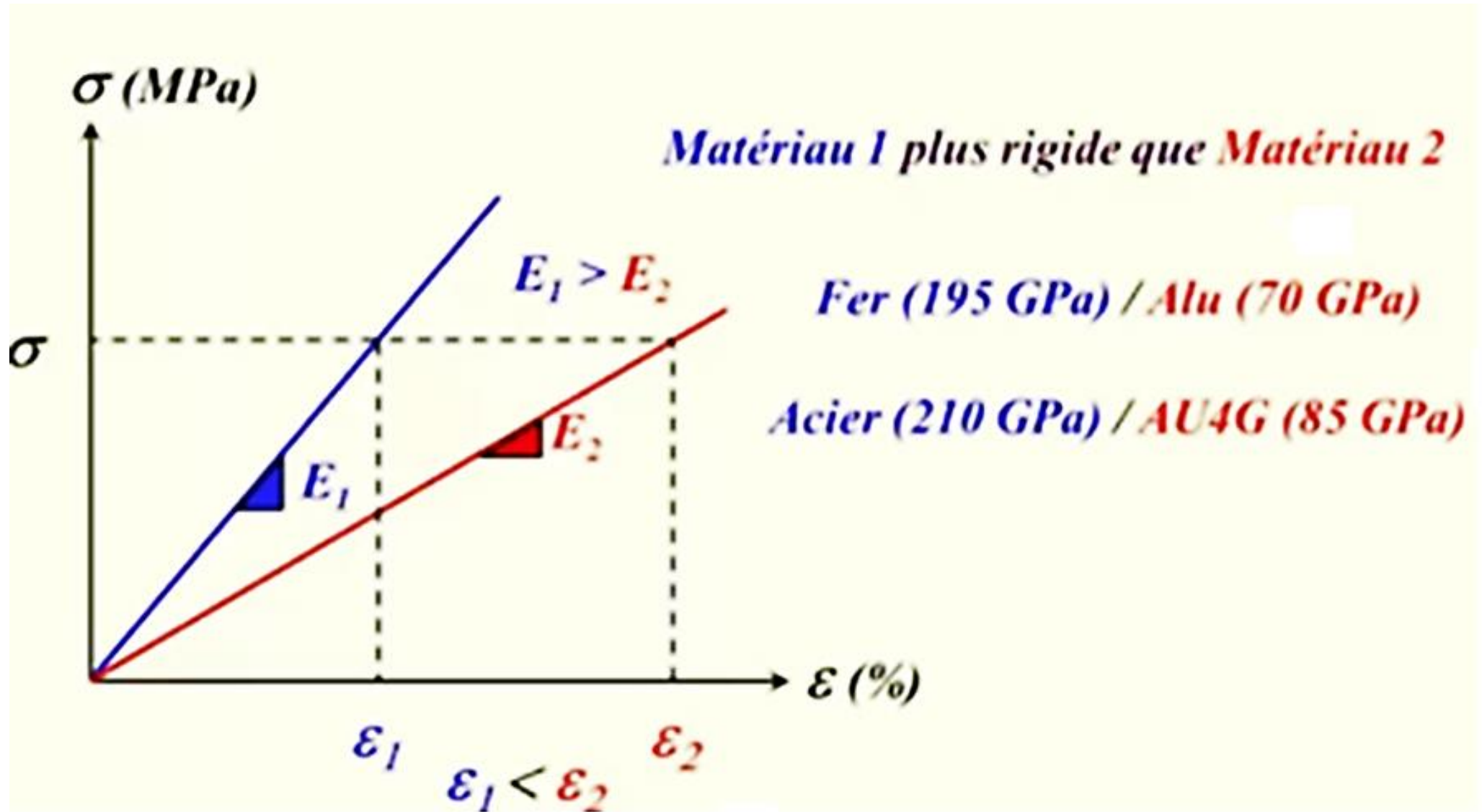
$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

Pour les matériaux métalliques:

$$0.3 \leq \nu \leq 0.35 \Rightarrow K \cong E$$

E , K et G varient avec la température

Rigidité



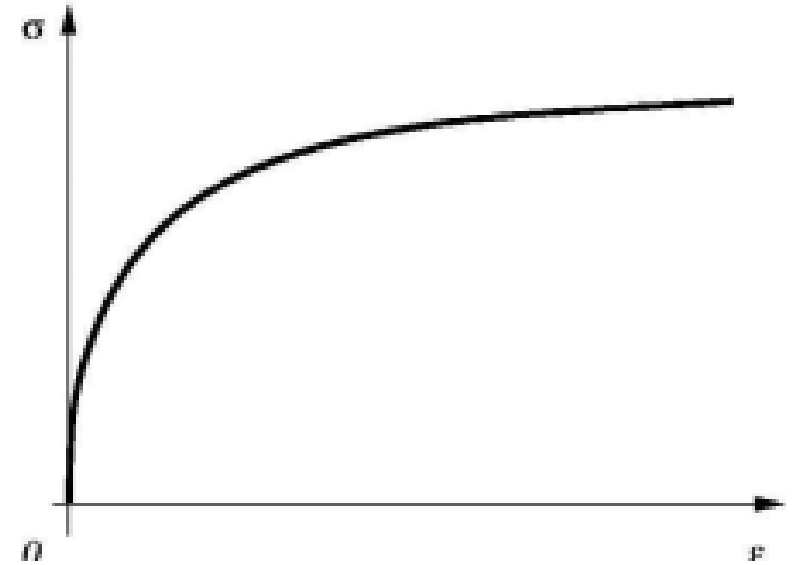
En pratique, pour beaucoup de matériaux (dont la plupart des métaux), la partie élastique de la déformation est très faible devant la partie plastique lors d'une opération de mise en forme. Il est donc fréquent, dans une approche phénoménologique, de négliger ϵ_e , et donc de confondre ϵ_e et ϵ_p .

Les principales lois de comportement phénoménologiques utilisées sont :

- la loi de Hollomon ou loi puissance,
- la loi de Ludwik,
- la loi de Swift ou loi de Krupkowsk.

la loi de Hollomon ou loi de puissance

$$\sigma = K \epsilon^n$$



Pour identifier les paramètres K et n, on transforme la courbe en $\ln(\sigma) - \ln(\epsilon)$, qui devient linéaire.

La pente de cette courbe donne le coefficient

$n = d\ln(\sigma) / d\ln(\epsilon)$, appelé coefficient d'écrouissage.

$$n = \frac{d(\log \sigma)}{d(\log \epsilon)} = \frac{d(\ln \sigma)}{d(\ln \epsilon)} = \frac{\epsilon}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\epsilon}$$

$n = 0$ for perfectly plastic solids

$n = 1$ for perfectly elastic solids

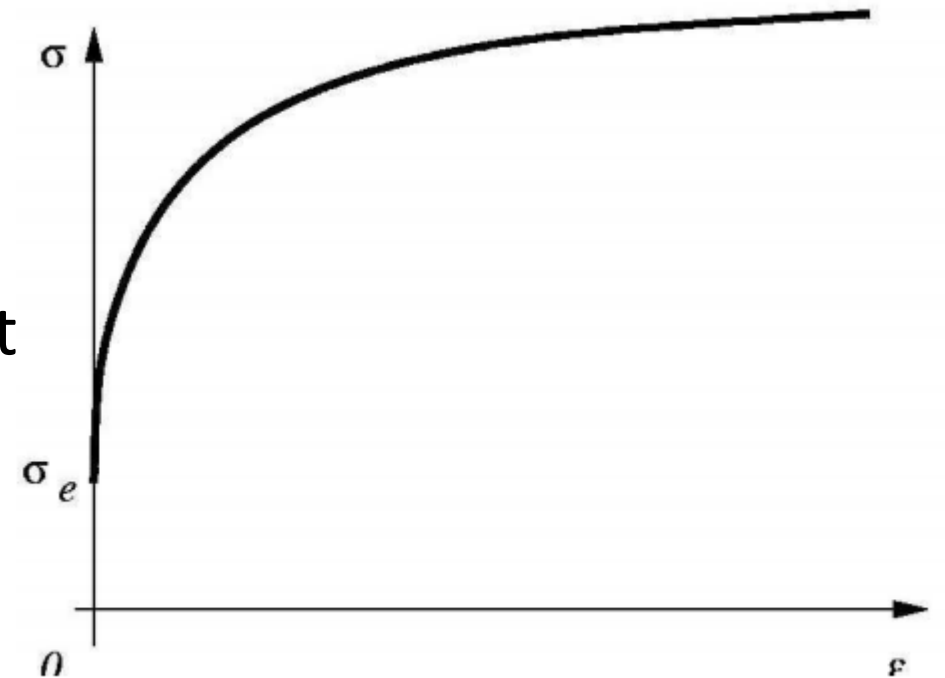
$n = 0.1 - 0.5$ for most metals

la loi de Ludwick

$$\sigma = \sigma_e + K \epsilon^n$$

Pour obtenir les paramètres σ_e , K et n ,
il faut tout d'abord identifier σ_e , qui est en fait
la limite d'élasticité du matériau, puis
transformer la courbe en $\ln(\sigma - \sigma_e) - \ln(\epsilon)$
pour obtenir les deux autres paramètres.

le paramètre n ne désigne pas le coefficient
d'écrouissage du matériau.



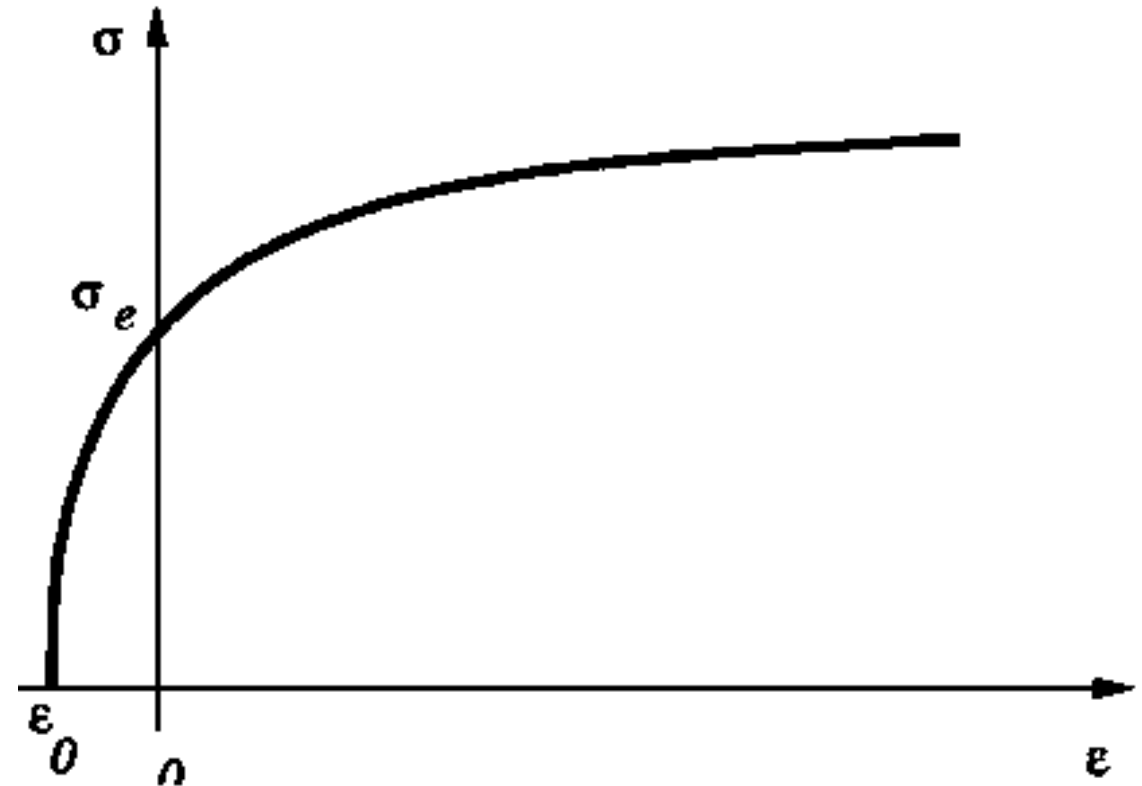
la loi de Swift ou loi de Krupkowski

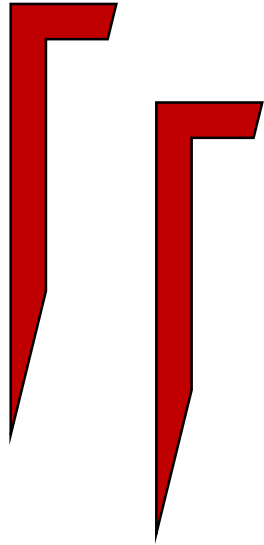
$$\sigma = K (\epsilon_0 + \epsilon)^n$$

On remarque qu'avec cette loi, la limite d'élasticité du matériau vaut:

$$\sigma_e = K \epsilon_0^n$$

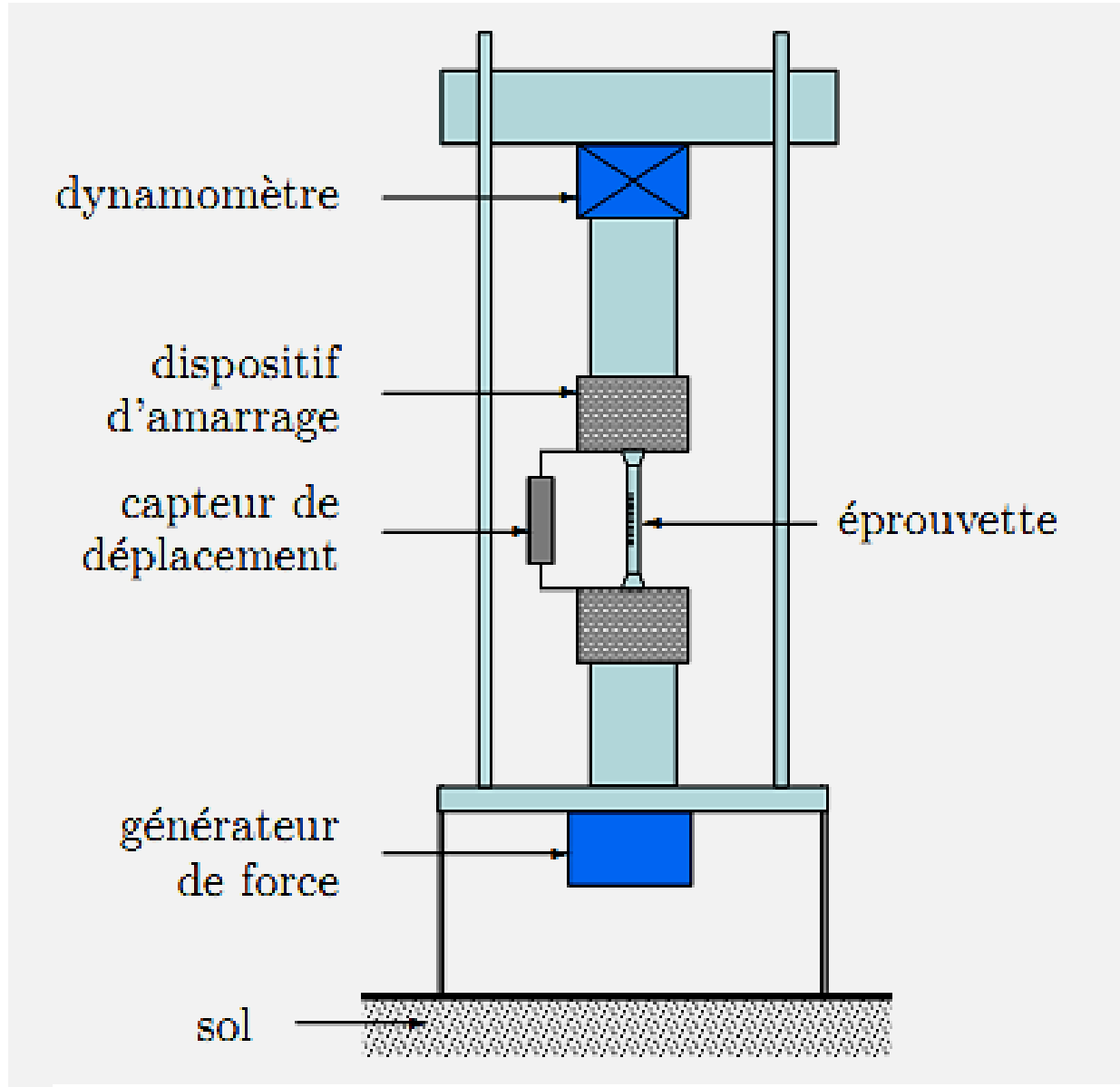
Le paramètre n n'est pas le coefficient d'écrouissage du matériau.



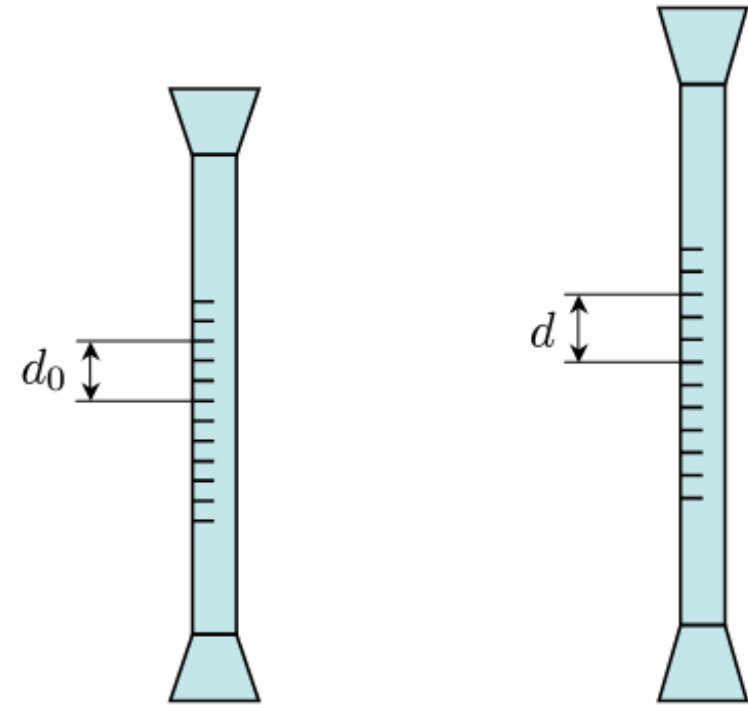


Essais monotones

Traction/Compression



Dispositif d'essai en traction/compression



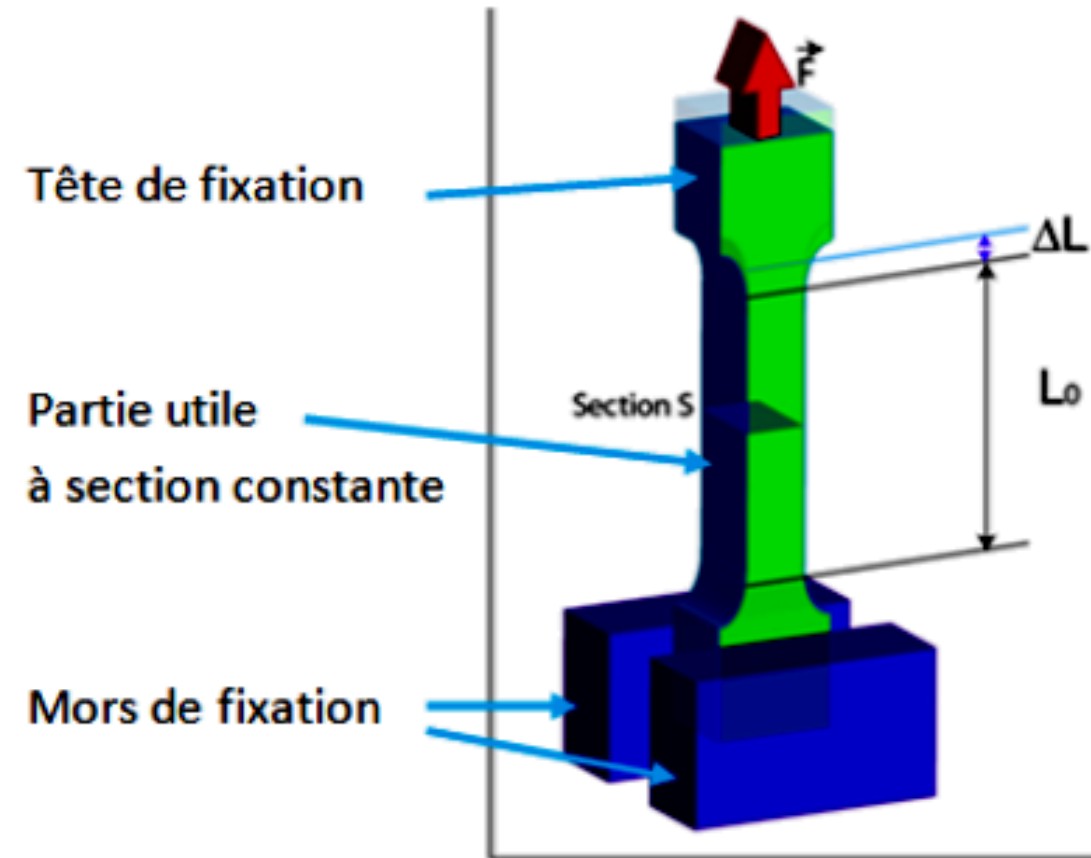
$$\epsilon = \frac{d - d_0}{d_0}$$

$\epsilon > 0$ TRACTION

$\epsilon < 0$ COMPRESSION

Essai utilisé pour obtenir une loi de comportement simple et rapide.

L'éprouvette de traction est caractérisée par une « **partie utile** » centrale, à section constante S_0 , et de longueur initiale L_0 .
Sous l'effet d'une **force uniaxiale** F , le matériau est soumis à une contrainte uniforme dans la partie utile.

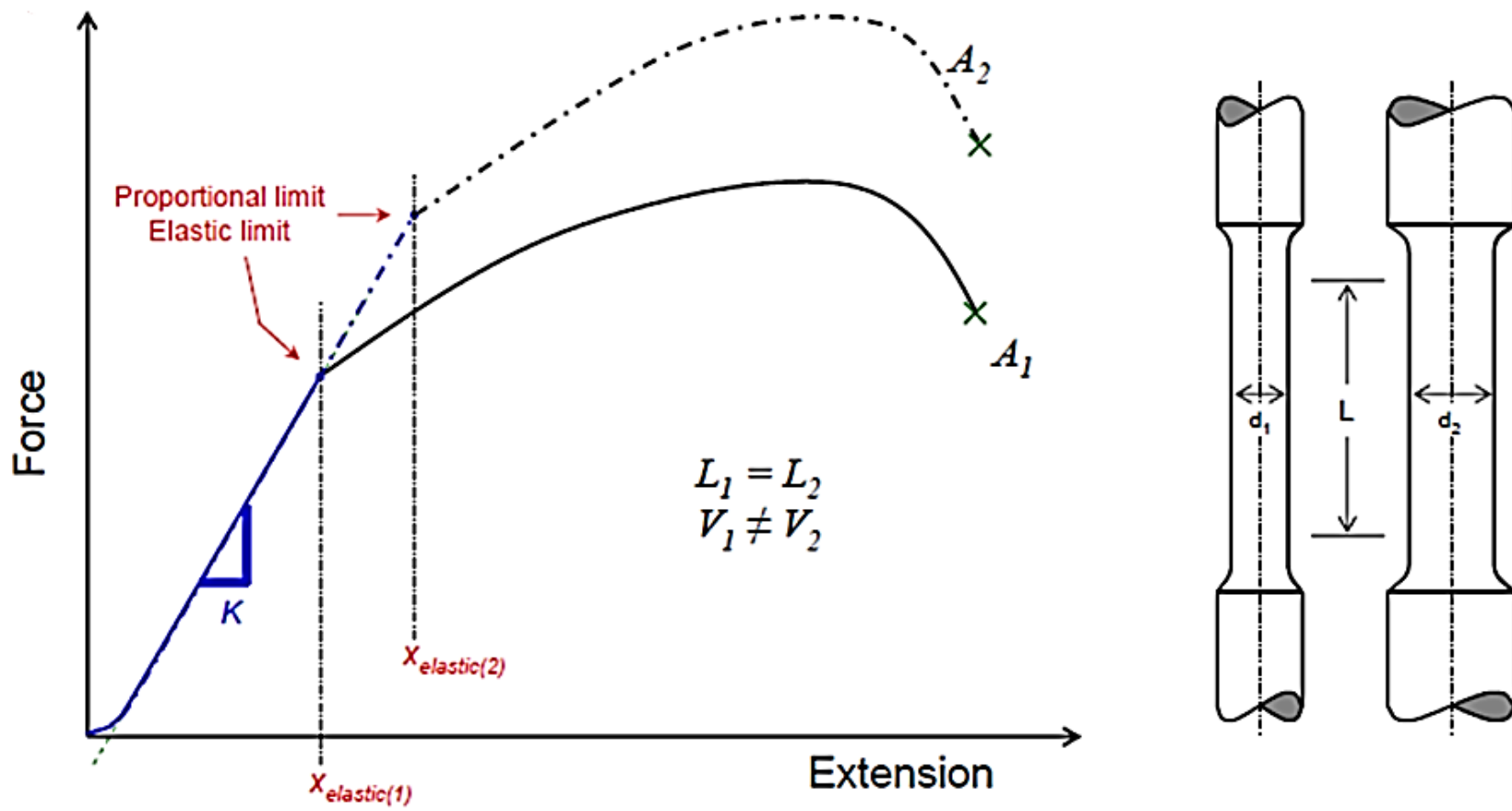


Conditions nécessaires à la validité de l'essai :

- Volume de matière testé >> échelle de l'hétérogénéité du matériau
- Contrainte et déformation homogène dans la zone utile de l'éprouvette.
- Exemple : caractérisation du comportement en traction simple d'un acier doux à 0.48 % de C. Taille de grain : 30 μm .

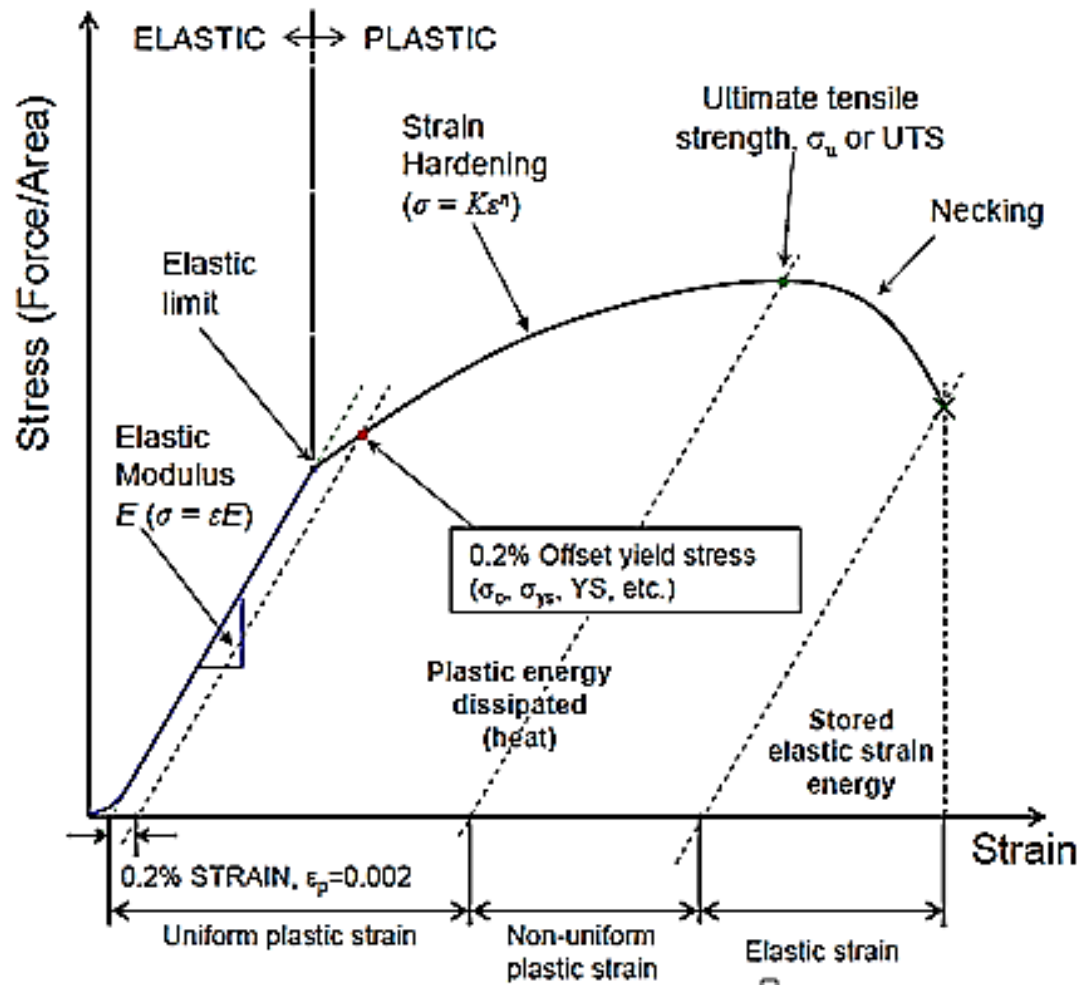
Volume minimal de matière : 10^6 grains

Eprouvette est cylindrique avec $L=1.5 D \rightarrow D=10 \text{ mm}$



Si $X \leq X \text{ élastique}$ $F = kx$ et Si $X > X \text{ élastique}$ $F \neq kx$

Sur la courbe $F = f(\Delta L)$, la pente n'est pas une propriété du matériau seul car les longueurs et les sections sont reportées sur la pente. C'est une propriété structurelle: la raideur, qui compte à la fois la propriété du matériau et le facteur de forme $\frac{S_0}{L_0}$ qui définit le ressort.



✓ Zone de déformation élastique jusqu'à la limite élastique Re (σ_e).

✓ Zone de déformation plastique uniforme entre σ_e et la limite maximale à la traction ou contrainte ultime Rm (σ_m).

✓ Zone de déformation plastique non uniforme après σ_m . Zone de striction jusqu'à la rupture.

✓ L'allongement à la rupture est noté A_r ; il mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant sa rupture.

Sur la courbe $\sigma = f(\epsilon)$, la pente est une propriété du matériau seul, c'est la propriété du matériau à la traction: la rigidité.

Références utilisées

Propriétés conventionnelles	Conservation du volume	Propriétés rationnelles ou vraies S et L
$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$	$S_0 L_0 = S L$	$\varepsilon_V = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = L n \left(\frac{L}{L_0} \right)$
$\varepsilon = \frac{L}{L_0} - 1$	$\frac{L}{L_0} = 1 + \varepsilon$	$\varepsilon_V = L n (1 + \varepsilon)$
	$S = \frac{S_0 L_0}{L}$	$\sigma_V = \frac{F}{S} = \sigma \cdot \frac{L}{L_0} = \sigma (1 + \varepsilon)$

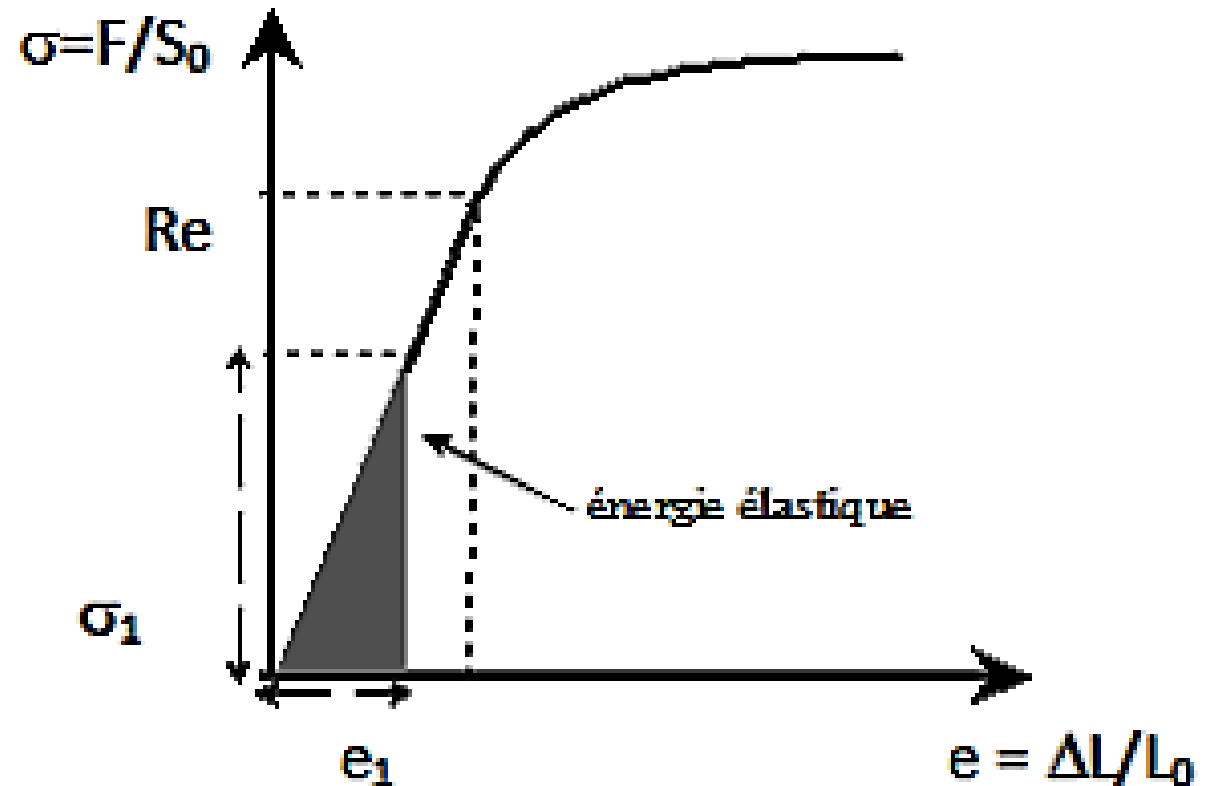
Aux petites déformations (élasticité linéaire): $\varepsilon_V \cong \varepsilon$ et $\sigma_V \cong \sigma$

Aux grands écarts de déformation (inélasticité): $\varepsilon_V \neq \varepsilon$ et $\sigma_V \neq \sigma$

Energie élastique

La déformation élastique s'accompagne d'un stockage d'énergie réversible (principe des ressorts). En tension, lorsqu'on atteint la contrainte σ , cette énergie s'écrit :

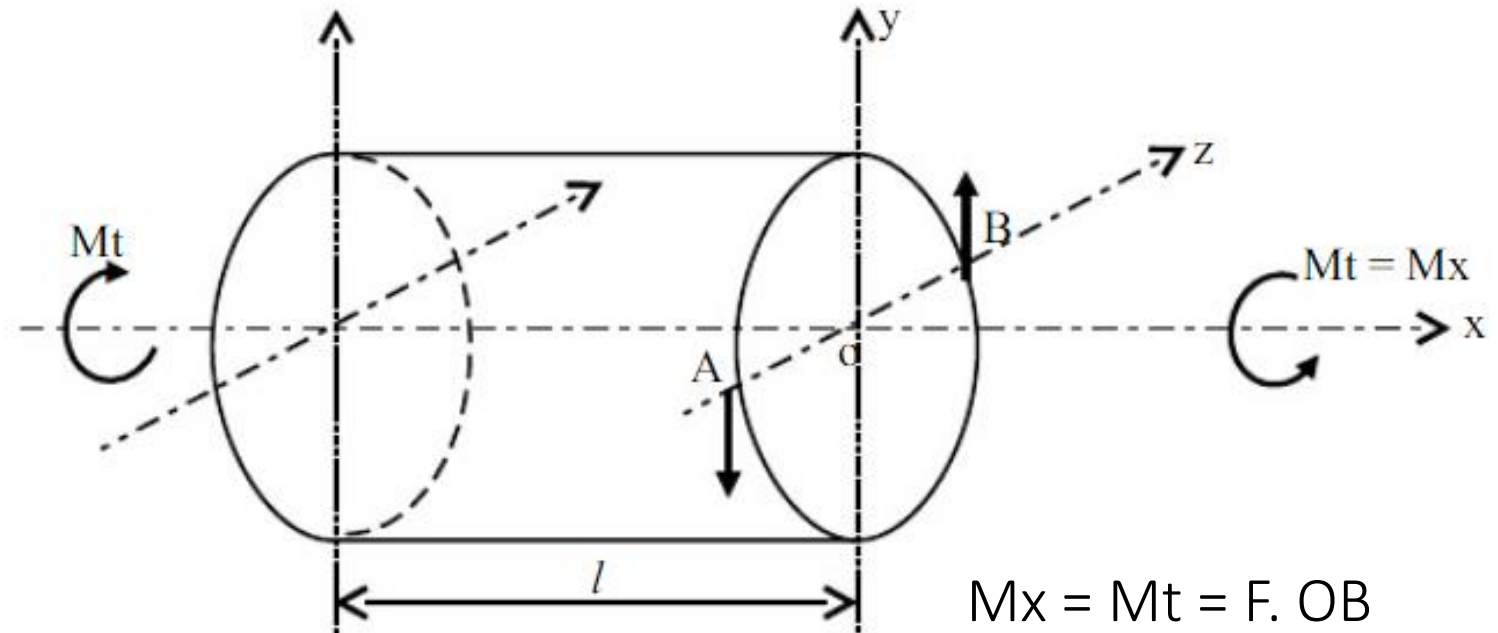
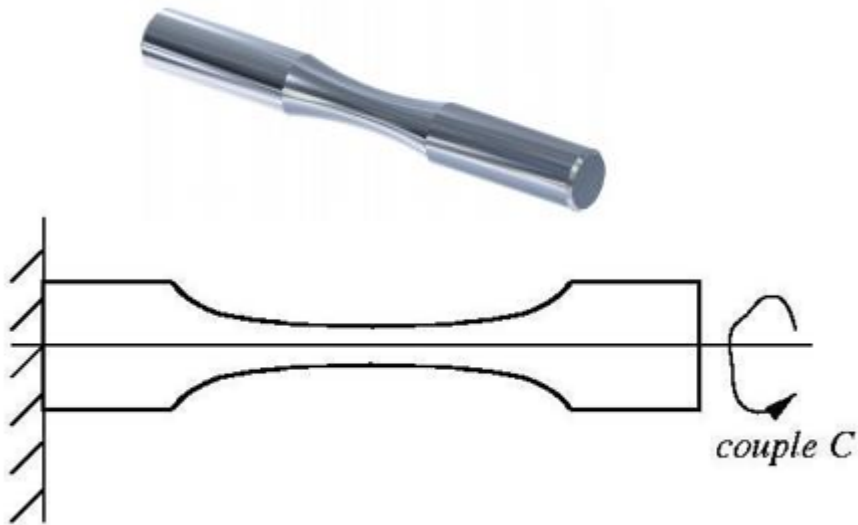
$$U_E = \int_0^{\sigma_1} \sigma de = \frac{E}{2} e_1^2 = \frac{\sigma^2}{2E}$$



Essai de torsion

Réalisé sur une éprouvette cylindrique pleine, cet essai est essentiellement utilisé à haute température pour connaître l'aptitude à la mise en forme des alliages métalliques.

Les éprouvettes sont déformées par torsion à grande vitesse $\dot{\epsilon} = 1$ à 10 s^{-1} .



M_t = moment de torsion $\Rightarrow M_t = F \cdot OB$

l = la longueur

G = module d'élasticité transversal

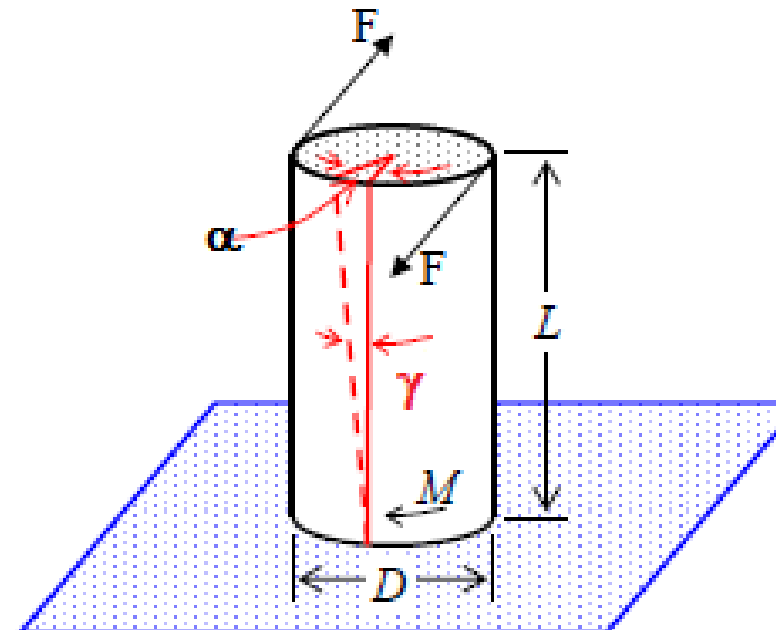
I_p = moment quadratique ou moment d'inertie

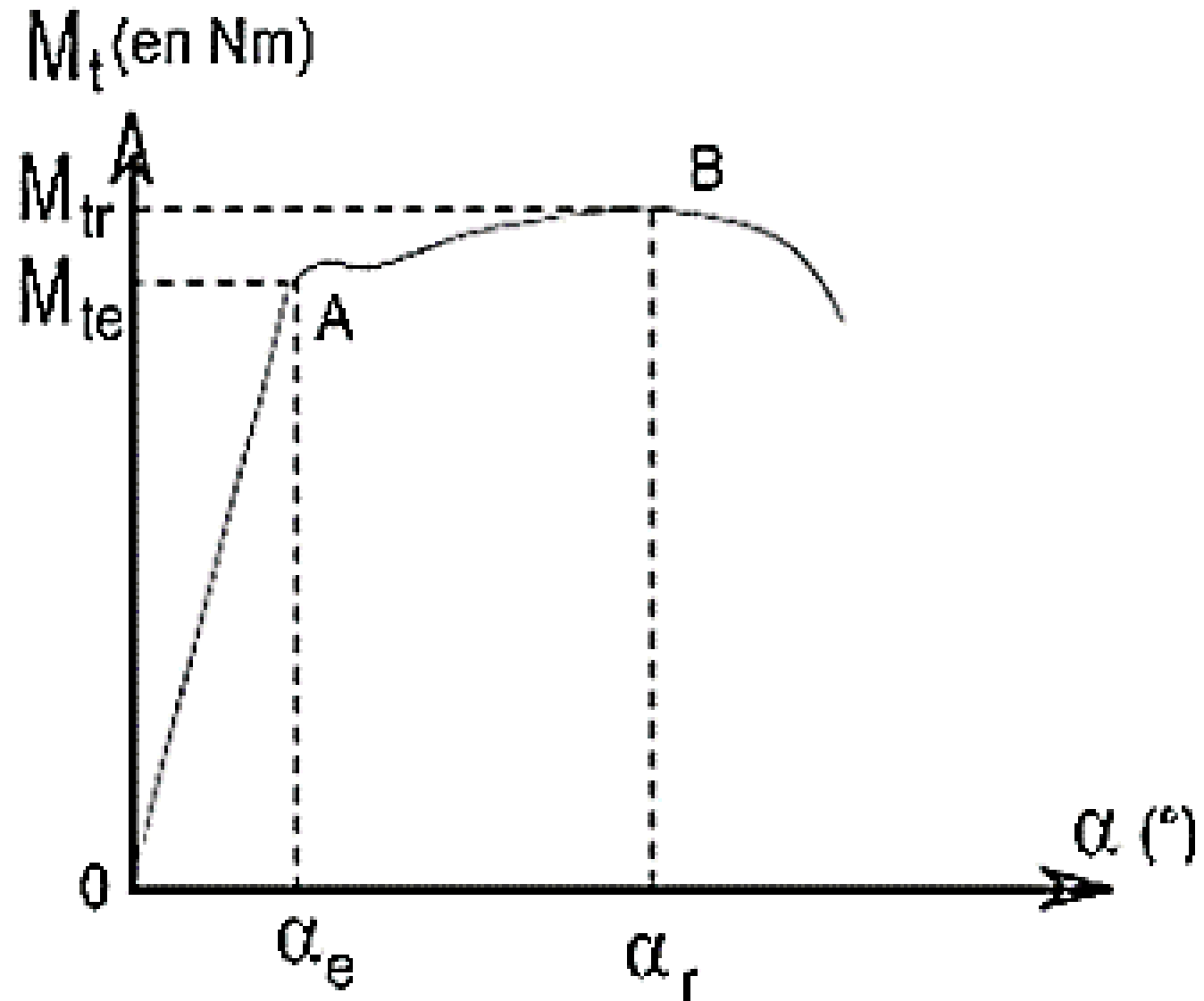
$$\alpha = \frac{M_t l}{G I_p}$$

$$I_p = \frac{\pi d^4}{32}$$

Matériau dur $\longrightarrow \alpha$ petit

Matériau ductile $\longrightarrow \alpha$ grand





Moment de torsion en fonction de l'angle de torsion α

Essai de flexion

Souvent utilisé pour des matériaux fragiles qui se comportent de manière élastiquement linéaire, cet essai est gouverné par deux équations:

$$\frac{M}{I} = \frac{E}{R}$$

$$\frac{M}{I} = \frac{\sigma}{y}$$

et

M = moment de flexion appliqué

I = moment d'inertie de la poutre autour du plan neutre

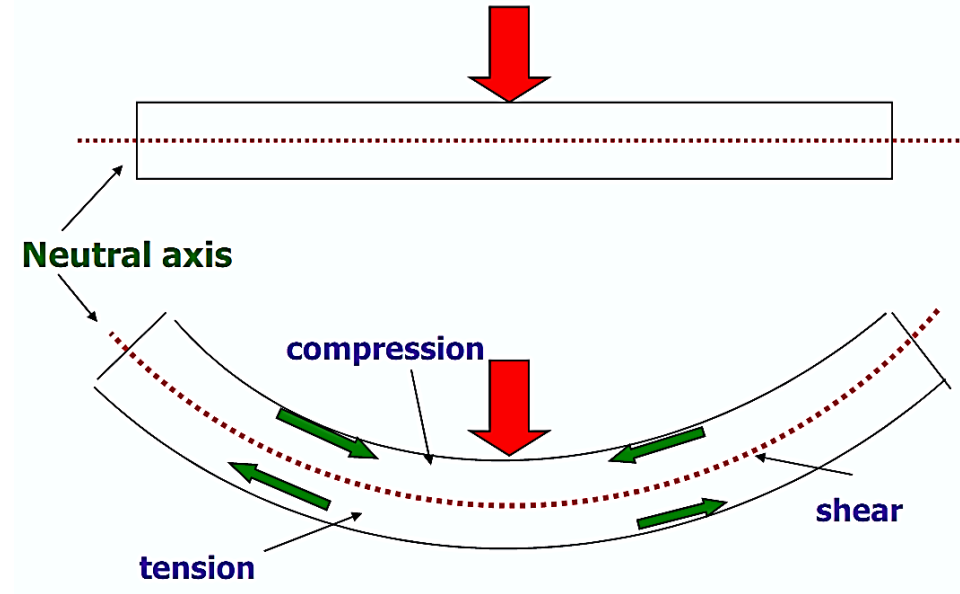
E = module d'Young

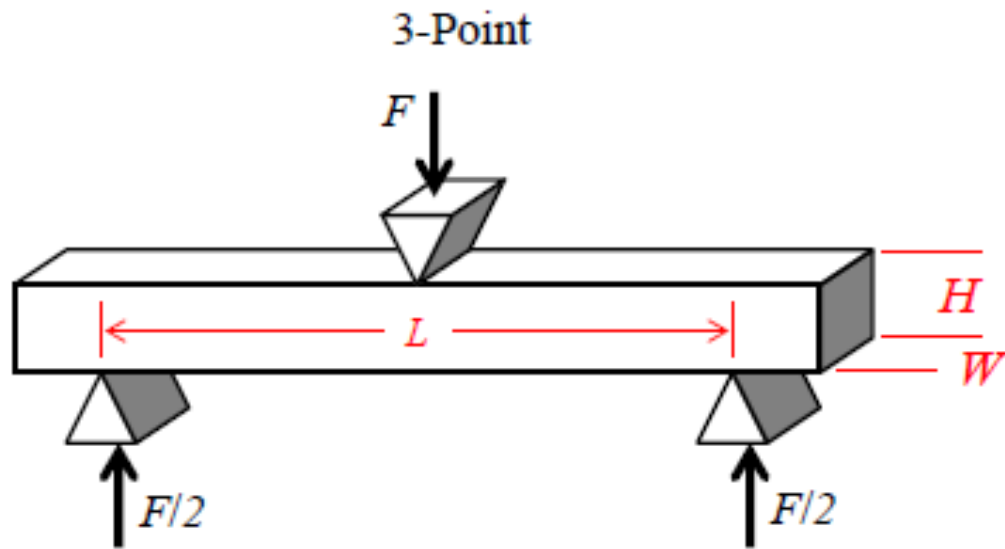
R = rayon de courbure

σ = contrainte de compression

y = distance au plan neutre (distance à laquelle on regarde l'application du moment fléchissant)

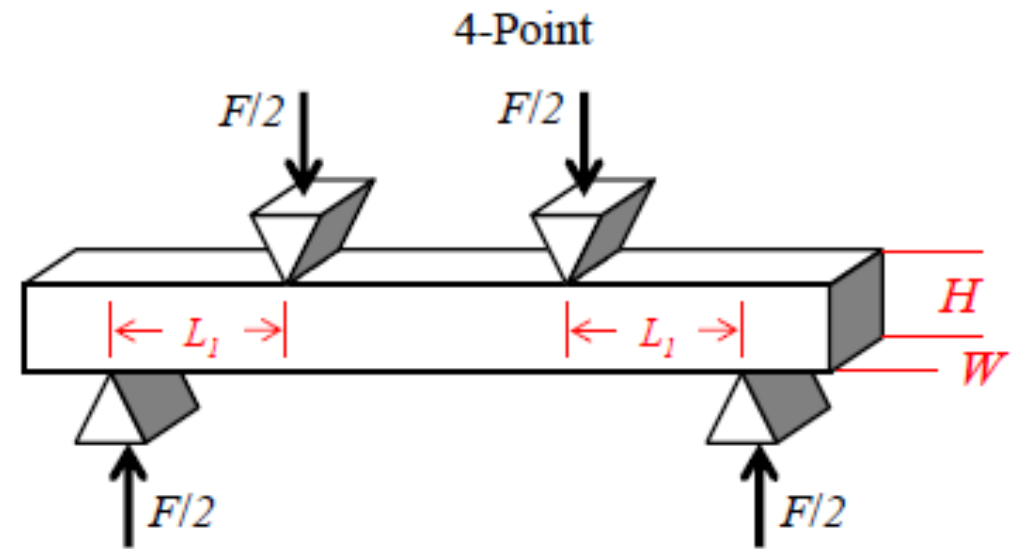
$$y = \frac{Fl^3}{48EI}$$





$$\sigma_{\max} = \frac{FLH}{8I}$$

$$I_{\text{rectangular}} = \frac{WH^3}{12}; I_{\text{round}} = \frac{\pi D^4}{64}$$



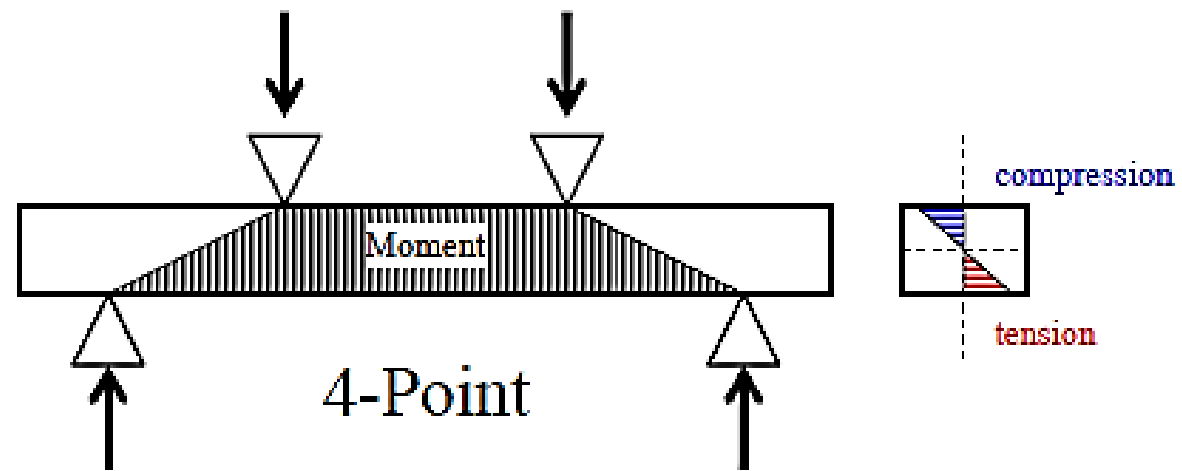
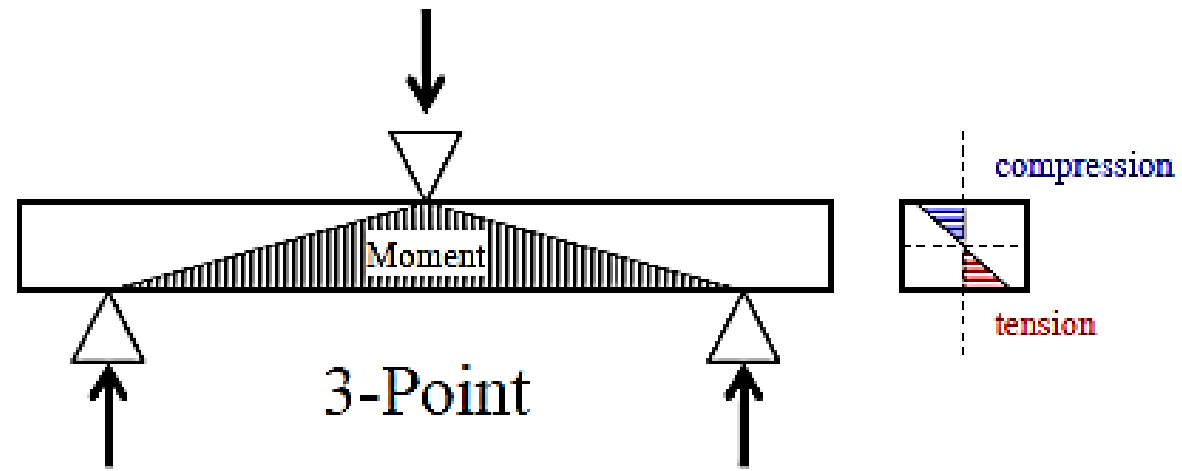
$$\sigma_{\max} = \frac{FLH}{4I}$$

$$I_{\text{rectangular}} = \frac{WH^3}{12}; I_{\text{round}} = \frac{\pi D^4}{64}$$

σ_{\max} = module de rupture

$I_{\text{rectangular}}$ et I_{round} représentent, respectivement, les moments d'inertie de la coupe transversale uniforme rectangulaire ou circulaire

Diagramme des moments et répartition des contraintes dans le module d'essai de rupture



- Dans l'essai de flexion à 4 points, le matériau sur la portée intérieure est soumis à une contrainte constante; alors que dans l'essai à 3 points les contraintes sont localisées sur la surface supérieure.
- Ainsi, un matériau de volume important est soumis à un essai de flexion 4 points plutôt qu'un essai 3 points. Par conséquent, dans l'essai à 4 points, les défauts des matériaux sont plus susceptibles de résider dans la région de contrainte maximale.

Essai de fluage

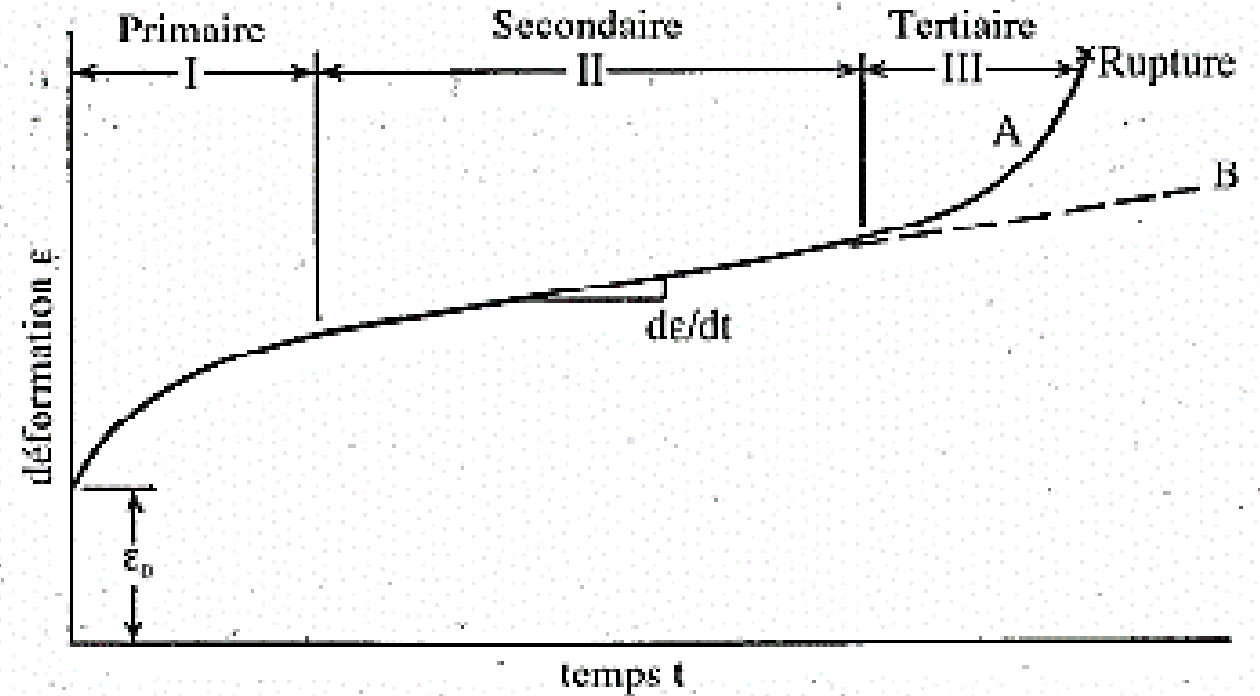
L'essai de fluage consiste à soumettre, à une température donnée, un échantillon à un effort F constant (traction ou compression) et à enregistrer son allongement ou sa réduction ΔL en fonction du temps.

Il s'agit d'une déformation lente qui peut conduire à la rupture du métal. Cette déformation s'exprime généralement par l'allongement subi par une éprouvette soumise à un effort de traction uniaxial.

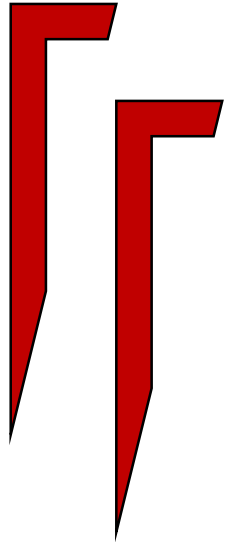
La réponse expérimentale (courbe de fluage) comporte trois domaines plus ou moins apparents selon le matériau et la température.

- Le fluage primaire au cours duquel la vitesse de déformation diminue
corrélativement à une augmentation de résistance du matériau,

- Le fluage secondaire au cours
duquel la vitesse de déformation
reste constante,



-Le fluage tertiaire caractérisé par une augmentation de la vitesse de déformation associée à l'apparition d'un endommagement sensible à l'échelle mécanique (formations de cavités).



Essais cycliques

Les essais cycliques sont caractérisés par une suite de sollicitations alternées. Les plus courants sont ceux de traction-compression, mais on utilise également des essais de flexion ou de torsion alternée.

L'objectif de ces essais est d'obtenir la loi de comportement "cyclique" du matériau, qui caractérise son évolution au fur et à mesure des cycles de sollicitation. Les essais de traction-compression peuvent être réalisés à déformation ou à contrainte imposée.

L'endommagement du matériau au cours de l'essai est appelé "fatigue"

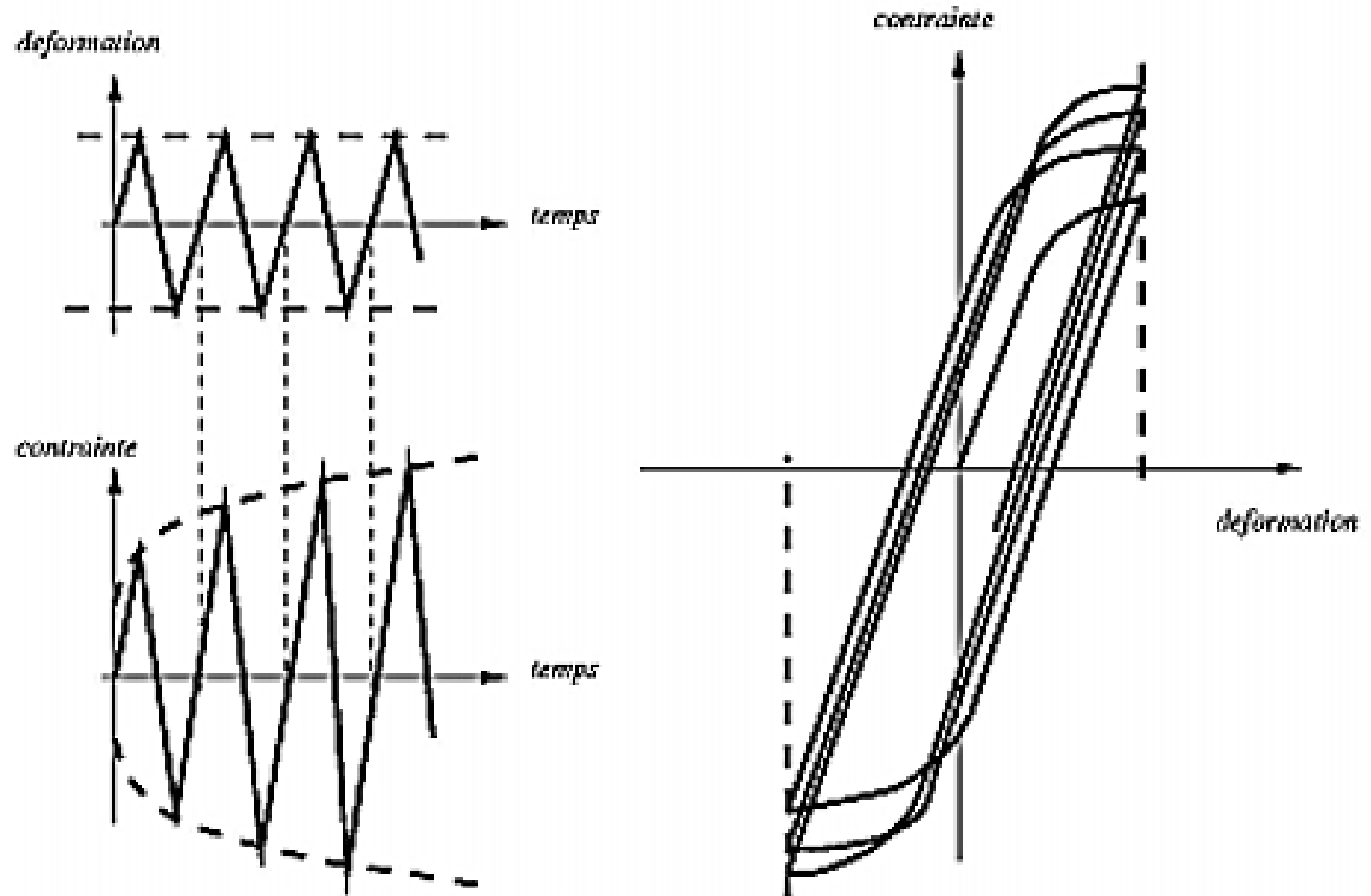
Lorsque l'on soumet un matériau à des cycles répétés d'efforts, il subit des modifications de microstructure regroupés sous le terme général d'endommagement par fatigue.

Cet endommagement ne se signale par aucune modification macroscopiquement décelable et la rupture peut intervenir à des niveaux de contraintes peu élevés, souvent inférieurs à la résistance à la traction ou même à la limite d'élasticité.

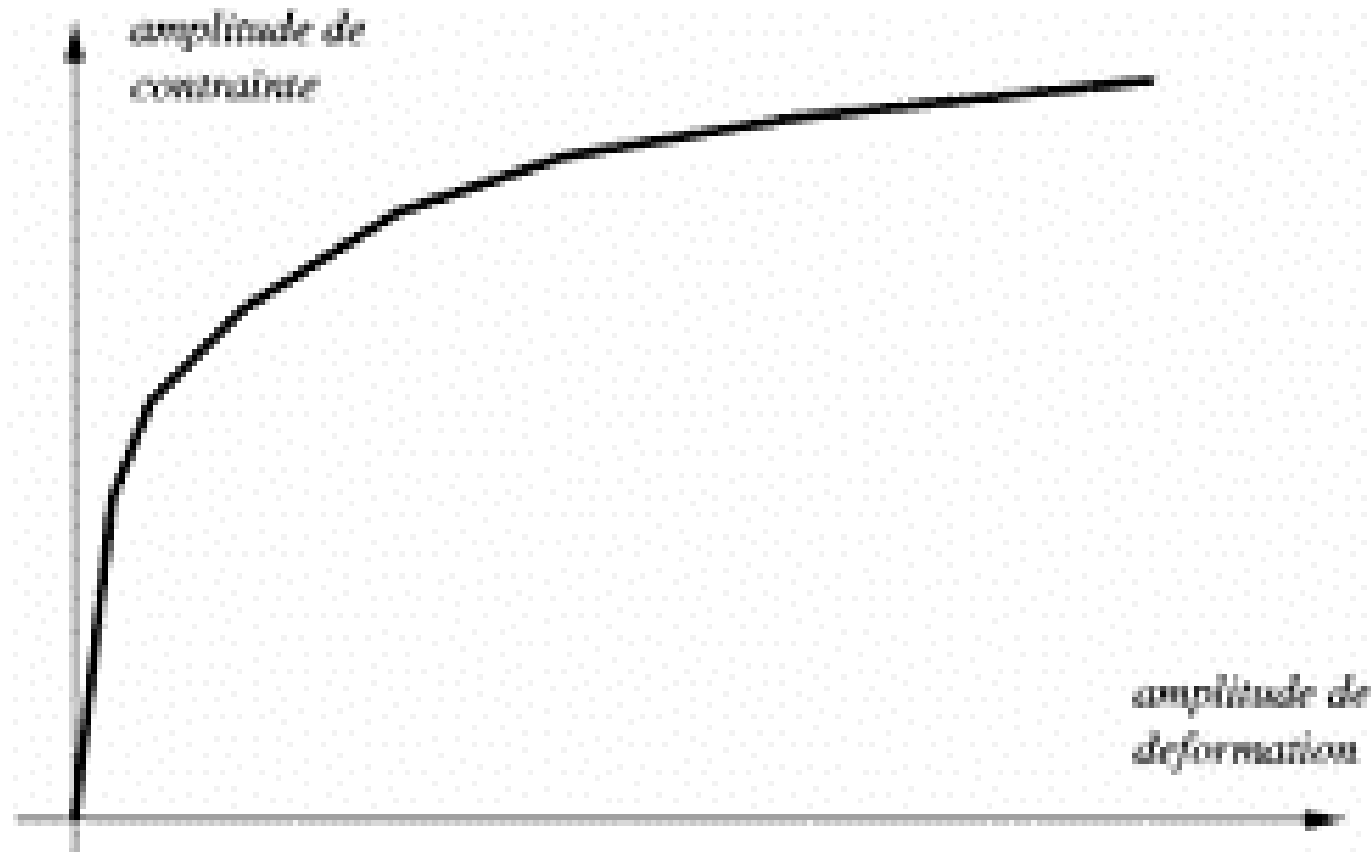
Le processus de fatigue implique l'apparition d'une fissuration qui se développe progressivement sous l'action de la répétition des sollicitations.

Les essais les plus simples consistent à imposer à des séries d'éprouvettes (cylindriques ou rectangulaires) des cycles d'efforts périodiques sinusoïdaux soit par charge axiale soit par flexion rotative.

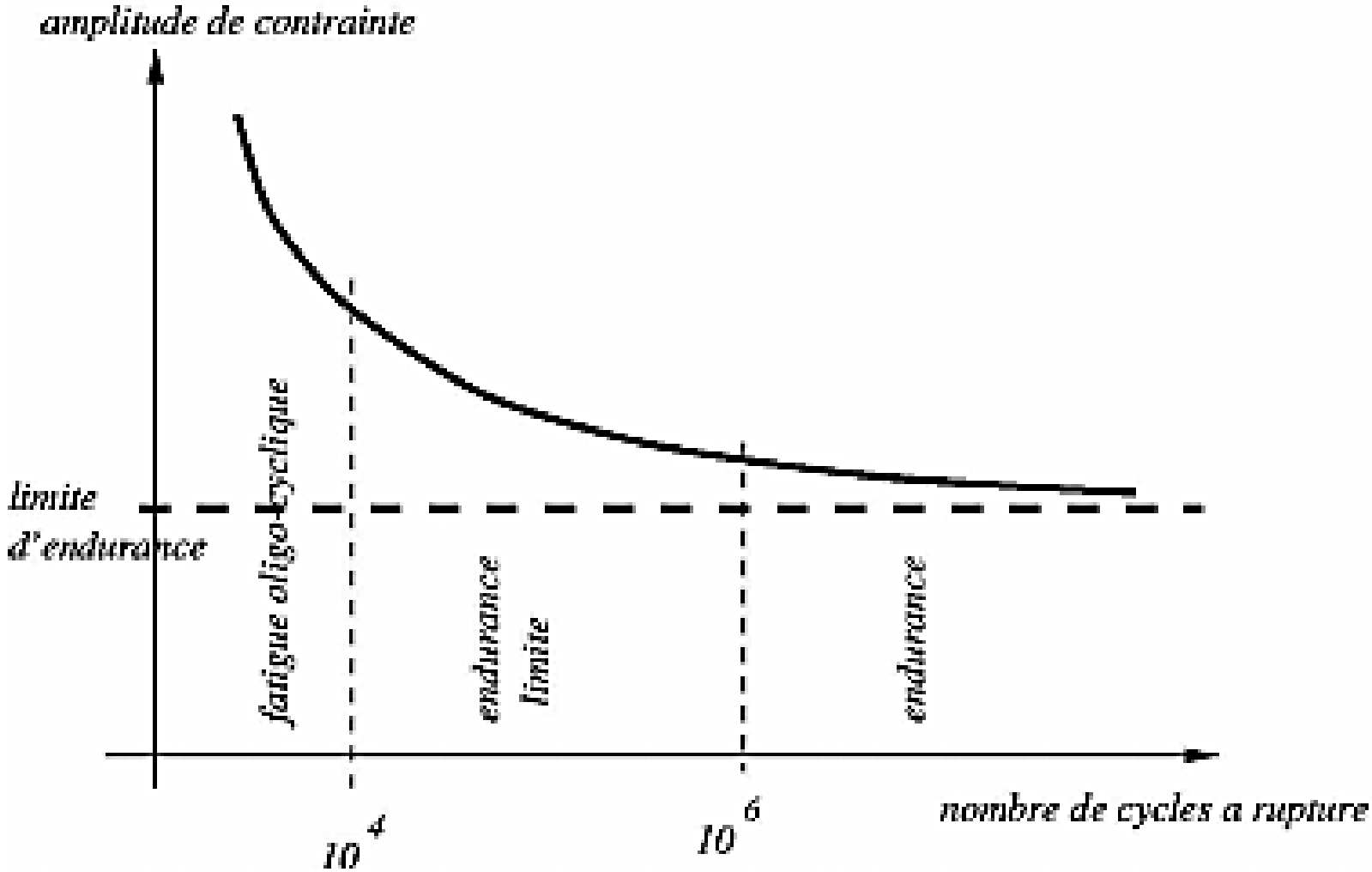
Essai cyclique à déformation imposée



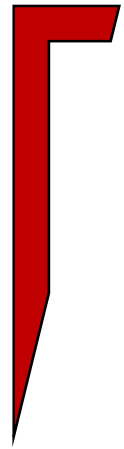
Pour chaque essai, on note l'amplitude de contrainte aux cycles stabilisés, que l'on trace en fonction de l'amplitude de déformation. le type de courbe obtenu est appelé "courbe de consolidation cyclique".



La contrainte peut être donnée en fonction du nombre de cycle à rupture :
courbe de Woehler



Courbe de Woehler typique



Essais de dureté et de résilience

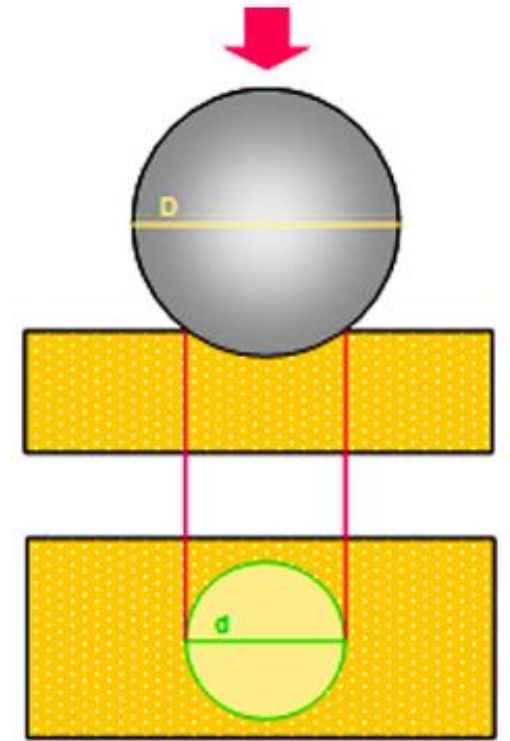
Largement employé comme moyen de contrôle, il mesure la résistance à la pénétration **d'indenteurs** de diverses formes:

- une bille d'acier de gros diamètre (10 mm) dans le cas de l'essai Brinell,
- une pyramide diamant à base carrée, l'angle entre les faces opposées étant de 136° pour l'essai Vickers.
- Une bille ou un cône dans le cas de l'essai Rockwell

Dureté Brinell (symbole HB)

Elle est obtenue par calcul. Après essai, on mesure l'empreinte laissée par une bille polie (diamètre : 1-2,5-5-10 mm) et la valeur de la charge F appliquée pour obtenir cette empreinte.

(Essai usuel : $F = 3\,000$ daN, $d = 10$ mm, pendant 15 à 60 secondes). Utilisation : tous métaux.



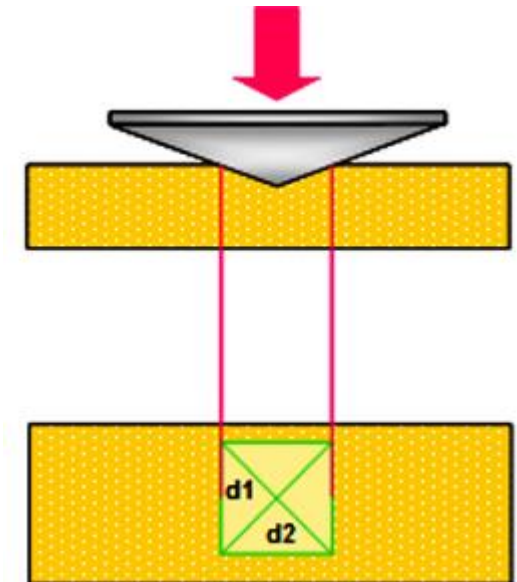
$$HB = \frac{F}{10\pi \left(5 - \sqrt{25 - \frac{d^2}{4}} \right)}$$

Dureté Vickers (symbole HV)

Elle est obtenue par calcul ; le principe est identique au précédent mais avec une pyramide droite en diamant à base carrée dont l'angle au sommet est de 136° .
Utilisation : tous métaux.

$$d = d_1 + d_2$$

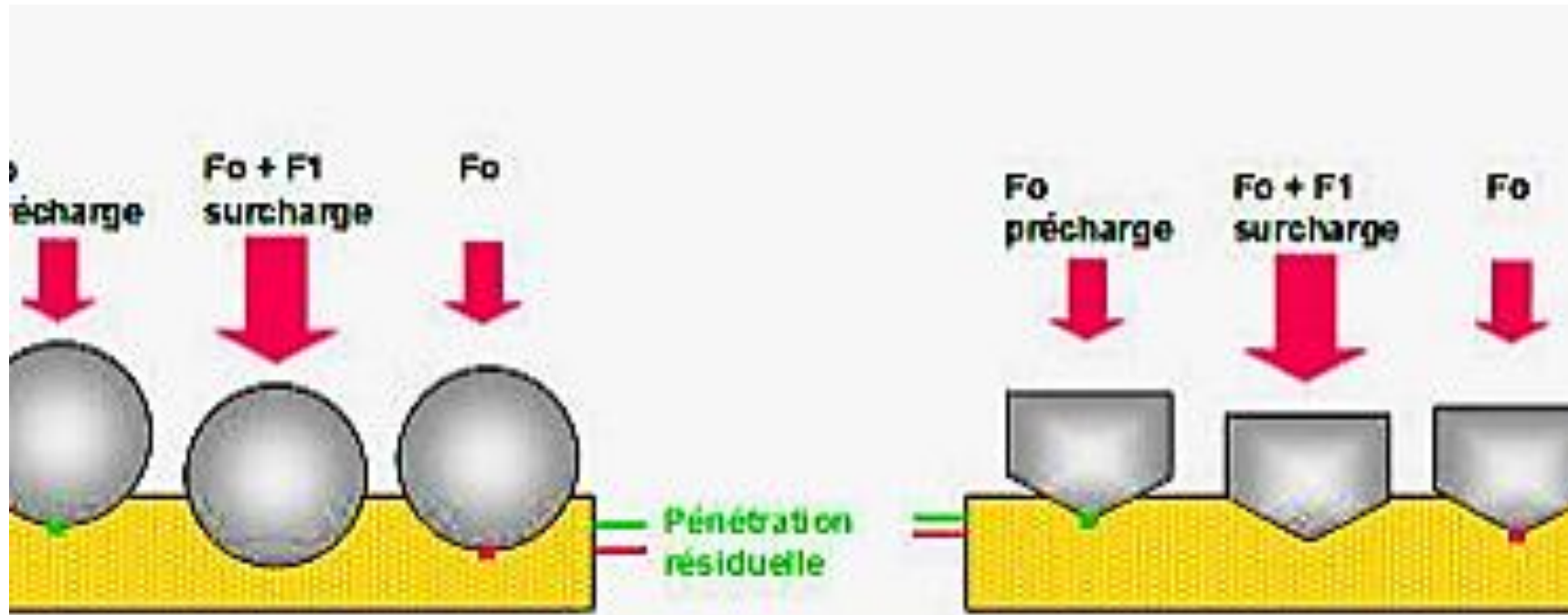
$$HV = \frac{0.189 \times F}{d^2}$$



Variante : essai Knoop (micro dureté, empreinte en forme de losange, matériaux durs pour petites pièces et pièces à sections fines).

Dureté Rockwell

L'essai de dureté Rockwell repose sur la mesure de la différence de profondeur de pénétration sous une charge lourde (majeure) par rapport à une charge préliminaire (mineure).



L'essai de résilience est un essai qui permet de caractériser le risque de rupture fragile du matériau. Le dispositif expérimental utilisé dans l'essai est le mouton Charpy.

La résilience est l'énergie de rupture ramenée ou non à la section sous entaille de l'éprouvette. C'est une mesure de la ténacité du matériau, c'est-à-dire de sa capacité globale à absorber de l'énergie.

➡ La résilience K (J/cm² ou en J) est l'aptitude que possède un matériau à résister aux chocs.

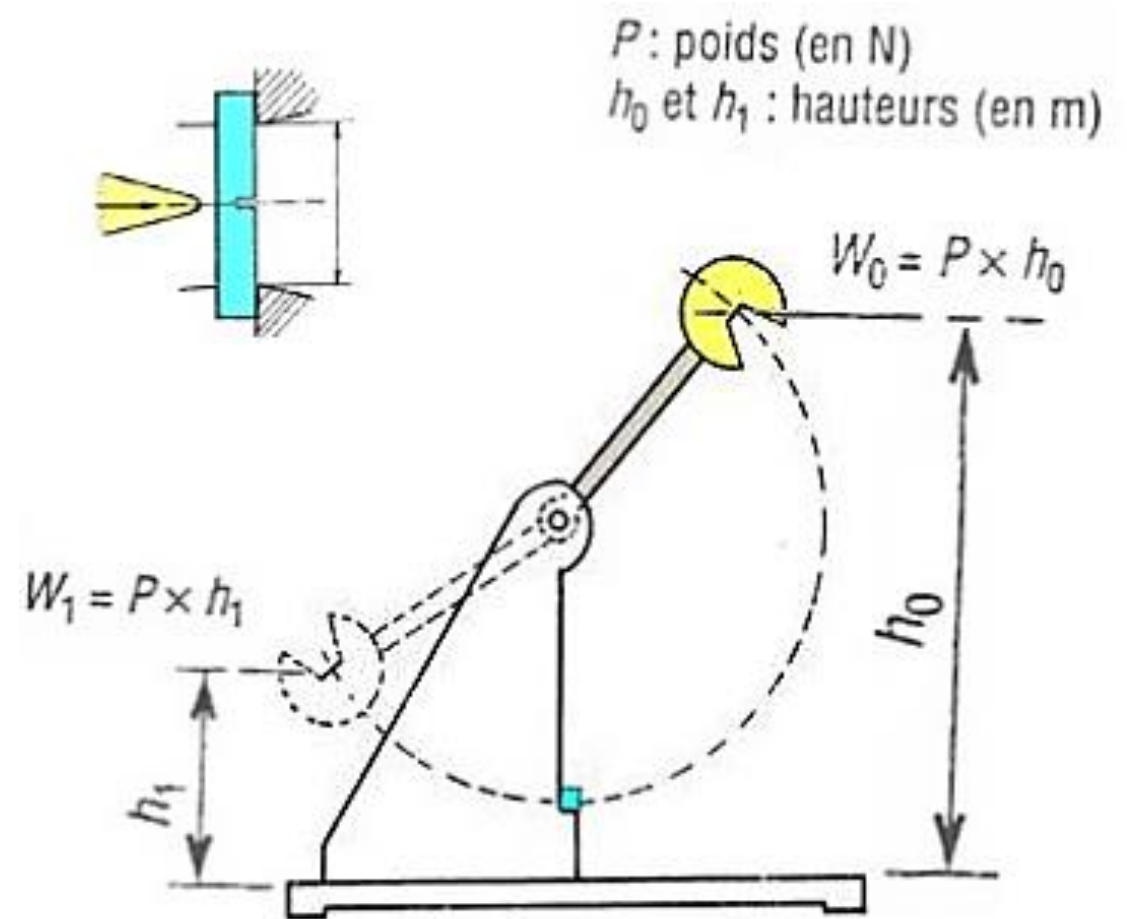
- le couteau est écarté de la verticale à une hauteur correspondant à une énergie de départ $W_0 = 300 \text{ J}$.

- On libère le couteau. Dans sa chute, en passant à la verticale, il brise l'éprouvette.

- On mesure la hauteur à laquelle remonte le pendule pour calculer l'énergie non absorbée W_1

- On calcule la différence $W_0 - W_1 = W = P(h_0 - h_1)$

- --> W est l'énergie absorbée.



References

- [1] M. A. Meyers And K. K. Chawla, Mechanical Behavior Of Materials, Prentice Hall, 1999.
- [2] N. E. Dowling, Mechanical Behavior of Materials, Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue, 3rd Ed, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2007.
- [3] <https://conceptec.net/fr/techniques-de-base/materiaux/essais-et-controles>