

# Chapitre 1 – Les essais mécaniques

**Que lire ?**

**Ashby & Jones, vol. 1, Chapitres 8, 11, 17 et 20**

**Chapitre 1 du poly du cours MSE 310**

(nota: tous deux vont au-delà du contenu de ce cours; les diapos qui suivent font référence pour ce que vous êtes censé(e)s apprendre et retenir pour MSE 234)

aussi [https://fr.wikipedia.org/wiki/Essai\\_de\\_traction](https://fr.wikipedia.org/wiki/Essai_de_traction) est bien fait.

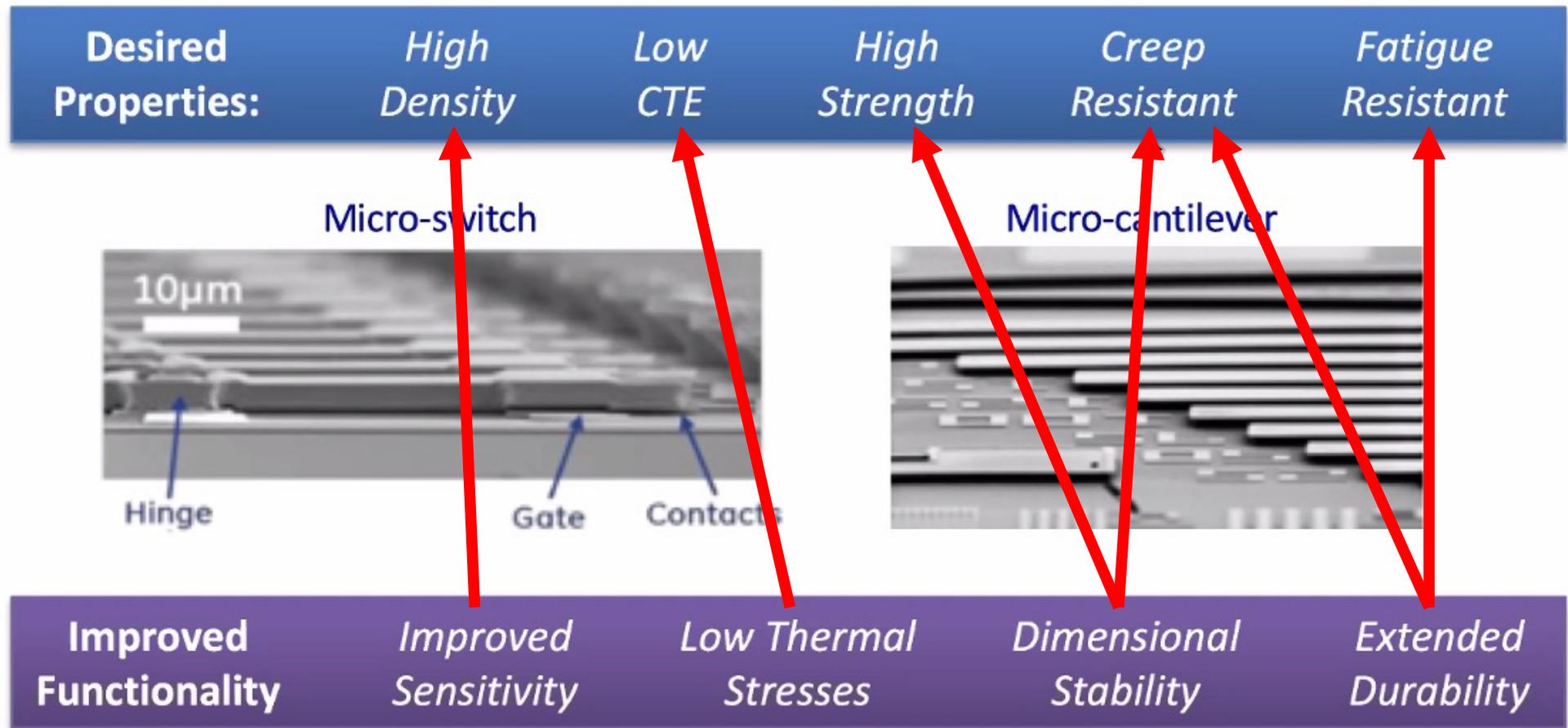
# Chapitre 1 – Les essais mécaniques

## **De la fonction à la propriété: un exemple**

*(tiré de la conférence du Prof. Kevin Hemker, Johns Hopkins University, USA, à l'EPFL le 3 mai 2021):*



# Expanding MEMS materials beyond silicon



Keimel et. al., IEEE & CPS (2011); Krogstad et. al. JMR (2013)

# I – L'essai de traction

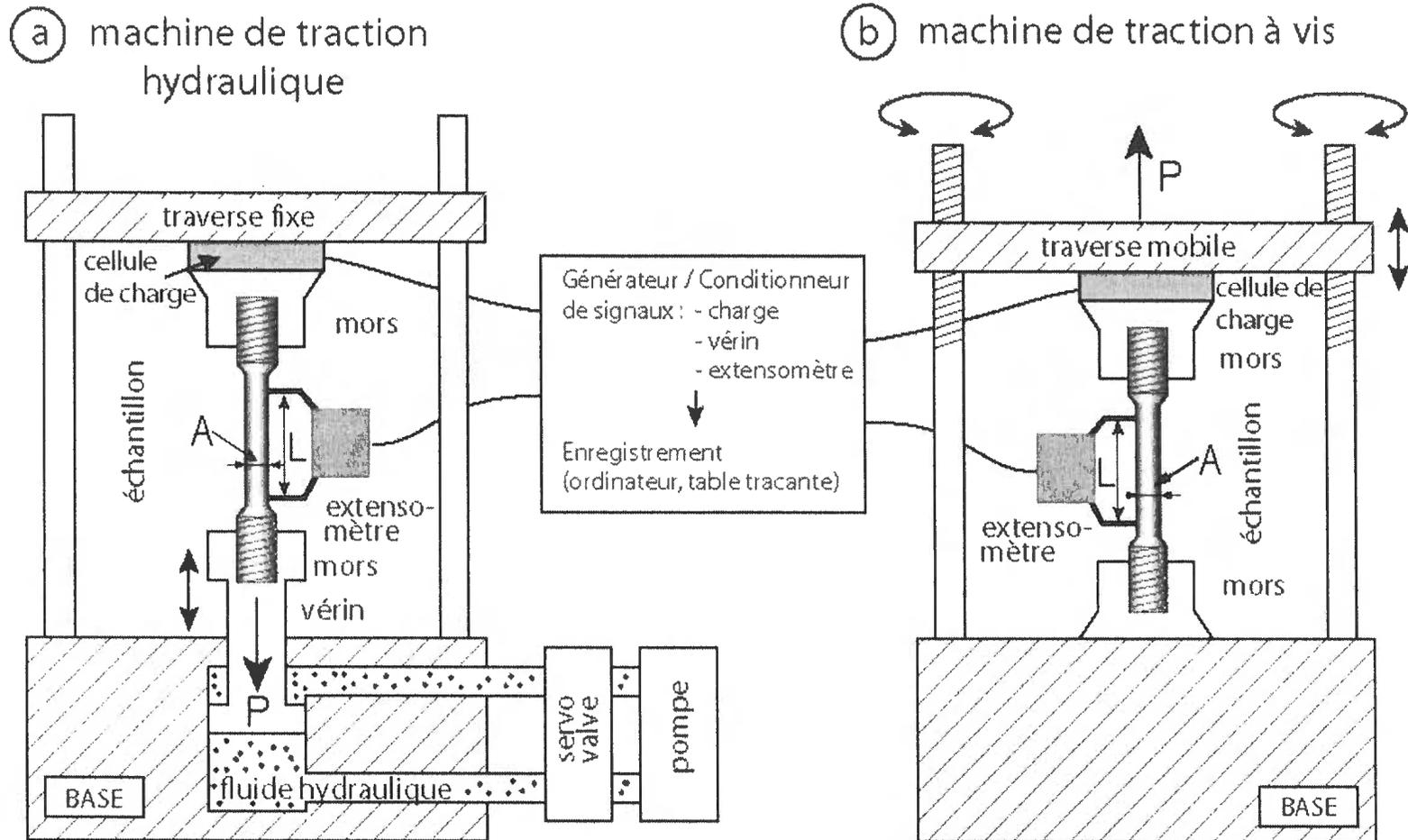
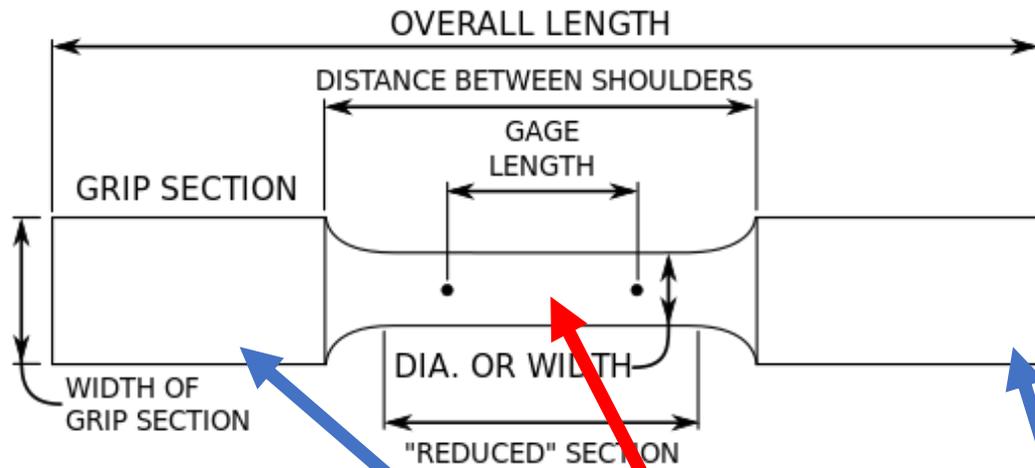


Figure 1 - Description schématique de l'essai de traction selon les deux types principaux de machines utilisées: a) machine servohydraulique, b) machine à vis.

# Le barreau de traction (tensile test bar/sample)

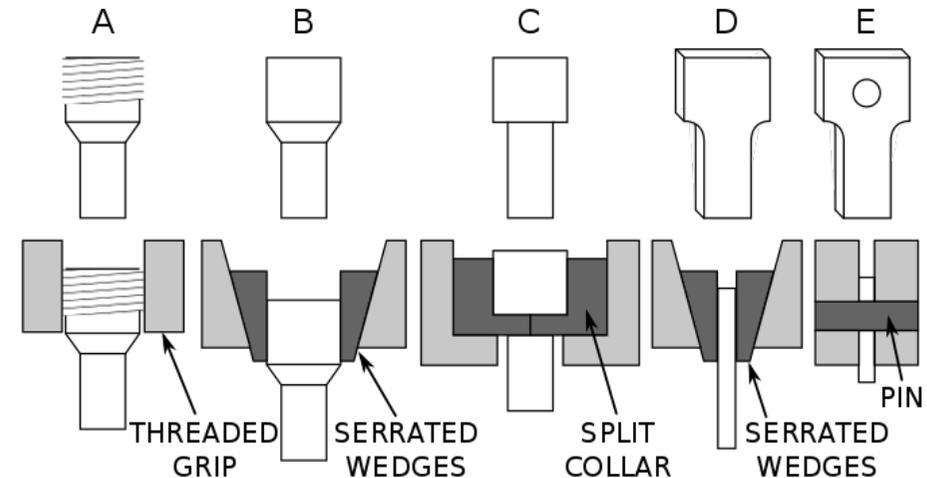
Barreau typiquement cylindrique ou plat



Test specimen nomenclature

Section réduite (gauge section)

Zones d'amarrage (grip section)



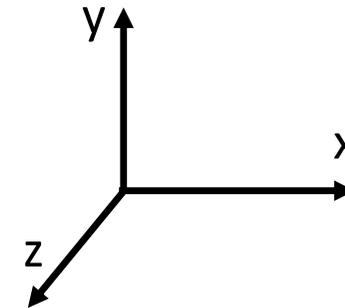
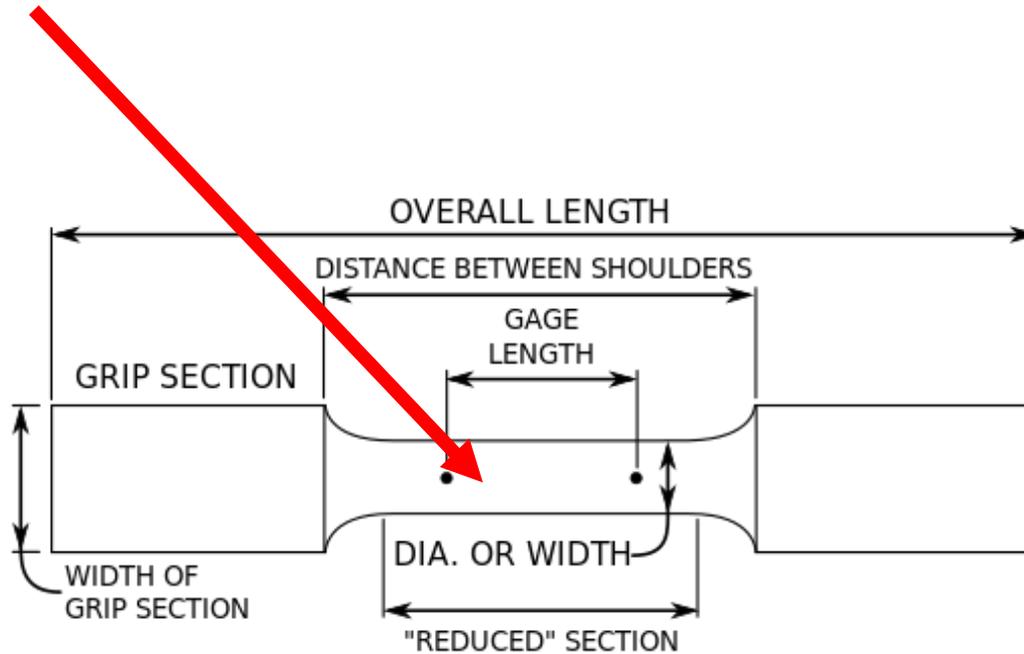
Various shoulder styles for tensile specimens. Keys A through C are for round specimens, whereas keys D and E are for flat specimens. Key:

- A. A Threaded shoulder for use with a thread
- B. A round shoulder for use with serrated grips
- C. A butt end shoulder for use with a split collar
- D. A flat shoulder for used with serrated grips
- E. A flat shoulder with a through hole for a pinned grip

## L'irrésistible attrait de l'essai de traction:

Une seule contrainte,  $\sigma_{xx}$ , rien de plus, constante dans toute la section réduite (gauge section) du barreau

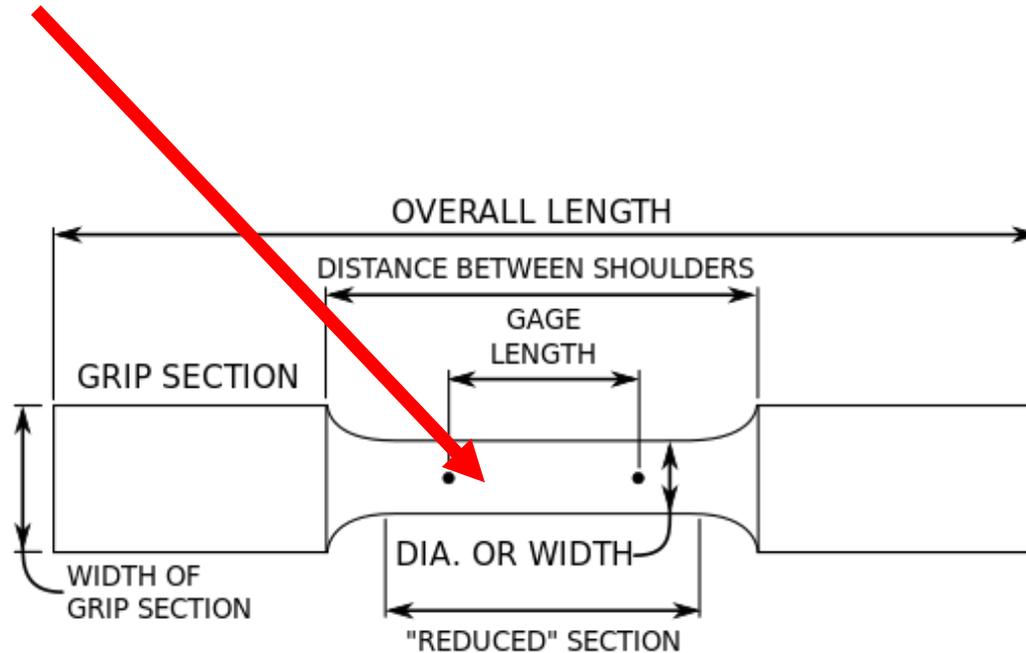
$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



Test specimen nomenclature

## L'irrésistible attrait de l'essai de traction:

La déformation  $y$  est donc aussi **uniforme** ... mais n'a pas qu'une seule composante (car le solide se rétrécit latéralement).



Test specimen nomenclature

## L'irrésistible attrait de l'essai de traction:

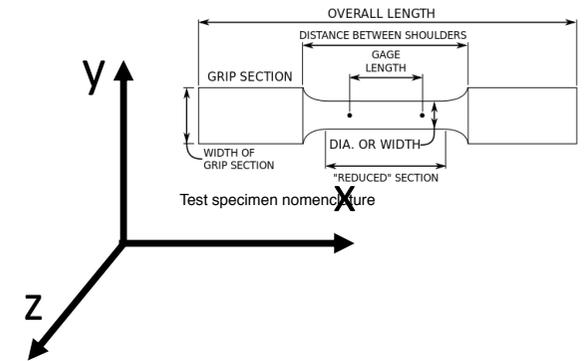
En déformation élastique linéaire, pour un solide isotrope, on a:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{E}, \quad \text{et} \quad \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = -\nu \frac{\sigma_{xx}}{E}$$

avec

$E$  = Module d'Young (Young modulus)

$\nu$  = coefficient de Poisson (Poisson ratio).



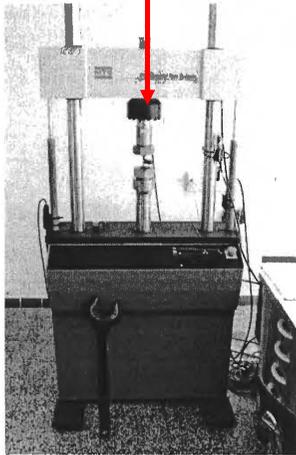
Si le volume  $V$  est constant (ce qui est grosso modo le cas aux - plus grandes - déformations plastiques), si le solide est isotrope on a

$$\varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = -\frac{\varepsilon_{xx}}{2}$$

$$\text{car } \frac{dV}{V} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$$

## En pratique

La charge ou force  $P$  est donnée par la cellule de charge (load cell)



L'allongement  $\Delta L$  est donné par le mouvement de la traverse (crosshead displacement) (peu précis), ou d'autres méthodes plus précises: un extensomètre (extensometer), une jauge résistive (strain gage) ou par analyse du mouvement de points le long de la surface de l'éprouvette

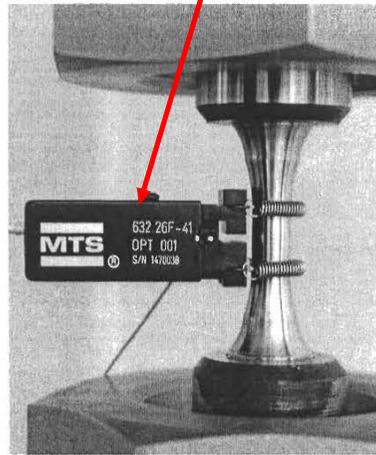


Figure 2 Machine servohydraulique (gauche) et un échantillon (non-conventionnel car destiné à un essai de fatigue) avec un extensomètre commercial (droite).

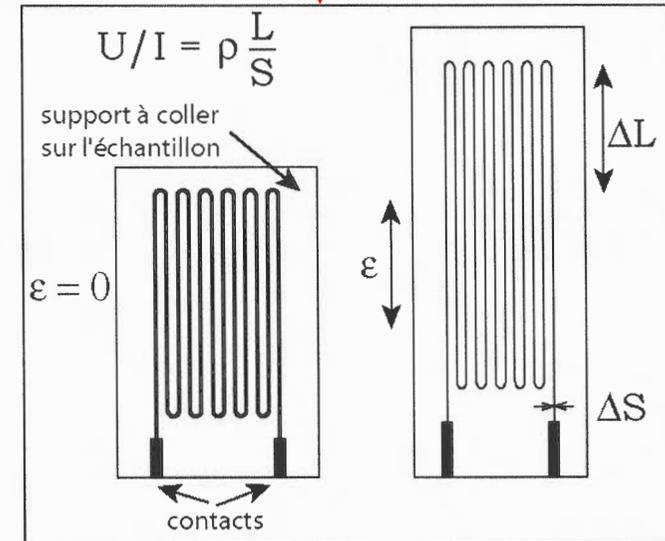


Figure 3 - Jauge résistive, avant et après déformation. La bande de métal résistive s'allonge et voit sa section diminuer progressivement lors de la déformation ; par conséquent, la résistance augmente. Ceci permet, par un calcul simple (déformation homogène de la bande résistive + loi de Joule) de mesurer continûment la déformation.

## La courbe de traction: l'abscisse (axe horizontal) est la déformation

(i) **L'allongement relatif (engineering strain)  $e$**  est défini par référence à la longueur initiale  $L_0$  de la section réduite:

$$e = \frac{L - L_0}{L_0}$$

(ii)  $e$  diffère de la **déformation vraie (true strain)  $\varepsilon$**  au sein de la section réduite, laquelle est définie par:

$$d\varepsilon = \frac{dL}{L},$$

ce qui donne après intégration

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(1 + e)$$

## La courbe de traction: l'ordonnée (axe vertical) est la contrainte

La cellule de charge (load cell) mesure la charge appliquée  $P$  (en Newtons). De celle-ci on définit:

(i) la charge unitaire (engineering stress)  $R$ :

$$R = P/S_0$$

où  $S_0$  est la surface transverse de la section réduite du barreau de traction avant l'essai, et

(ii) la contrainte vraie (true stress)  $\sigma$  :

$$\sigma = P/S$$

où  $S$  est l'aire transverse instantanée de la section réduite de l'éprouvette.

Aux grandes déformations (plastiques) on peut prendre le volume de la section réduite comme étant constant:  $V_0 = S_0 L_0 \approx SL$

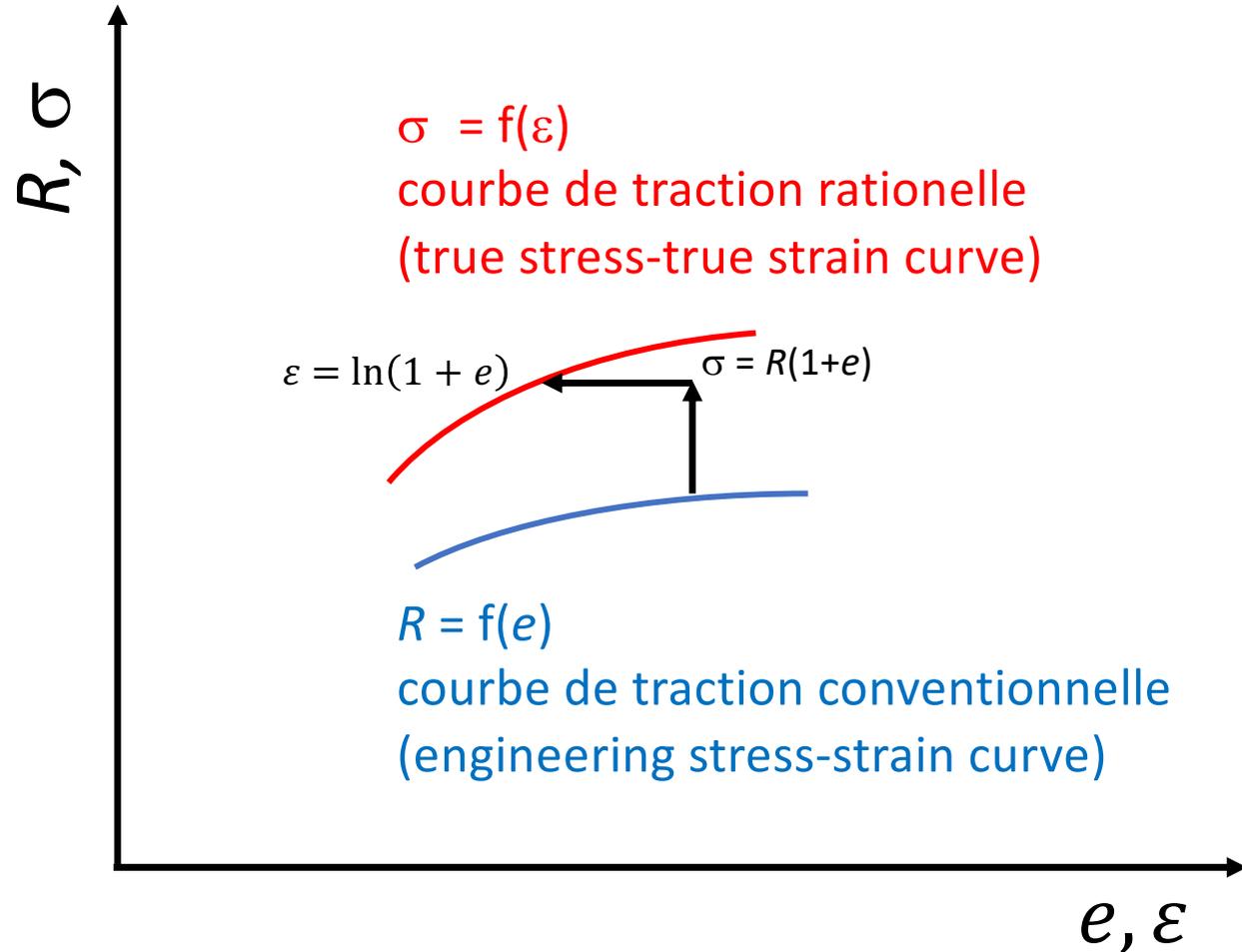
d'où:

$$\sigma = P/S \approx P/S_0 L/L_0 = R(1+e)$$

R-e vs.  $\sigma$ - $\varepsilon$ 

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

$$\sigma = R(1+e)$$



## La courbe de traction conventionnelle: grandeurs typiquement recueillies

$E$  = Module d'Young

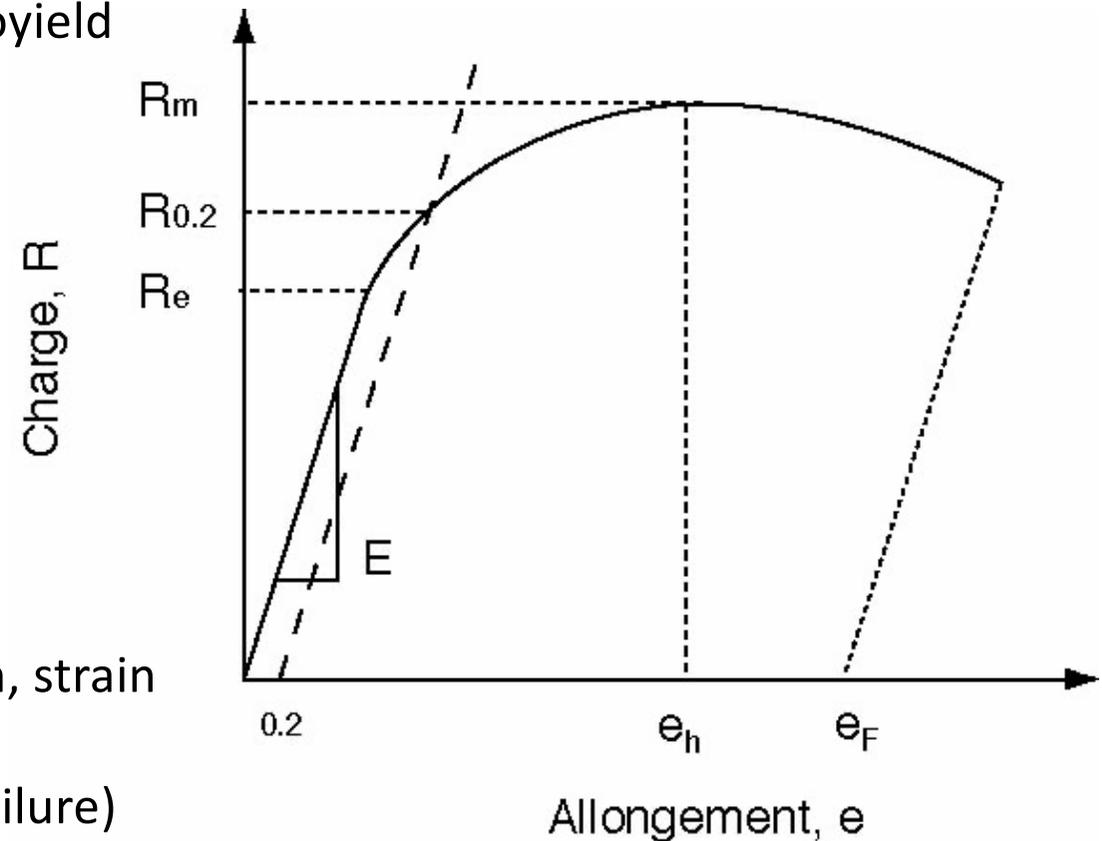
$R_e$  = limite d'élasticité «microscopique» (microyield stress), première déviation de la linéarité (définition difficile en pratique)

$R_{0.2}$  = limite d'élasticité conventionnelle à x% (typiquement 0.2%) (x% offset yield stress)

$R_m$  = résistance en traction (tensile strength, ultimate tensile strength, UTS)

$e_h$  = allongement réparti (homogeneous strain, strain at necking)

$e_F$  = allongement après rupture (strain after failure)



# La courbe de traction conventionnelle (engineering stress-strain curve): $R$ vs. $e$

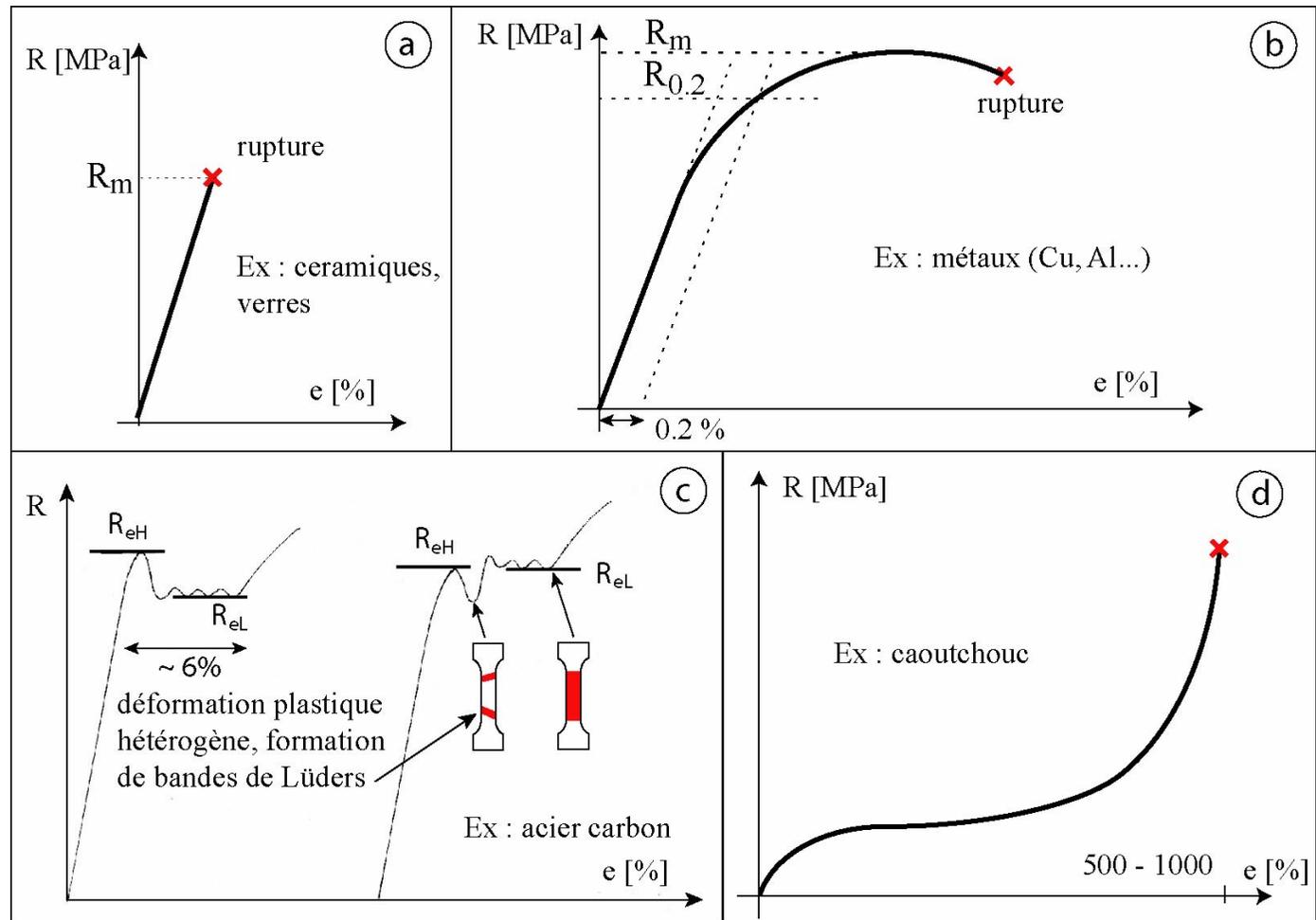
## Exemples typiques:

(a) matériaux fragiles (verre, céramiques),

(b) matériaux métalliques ductiles,

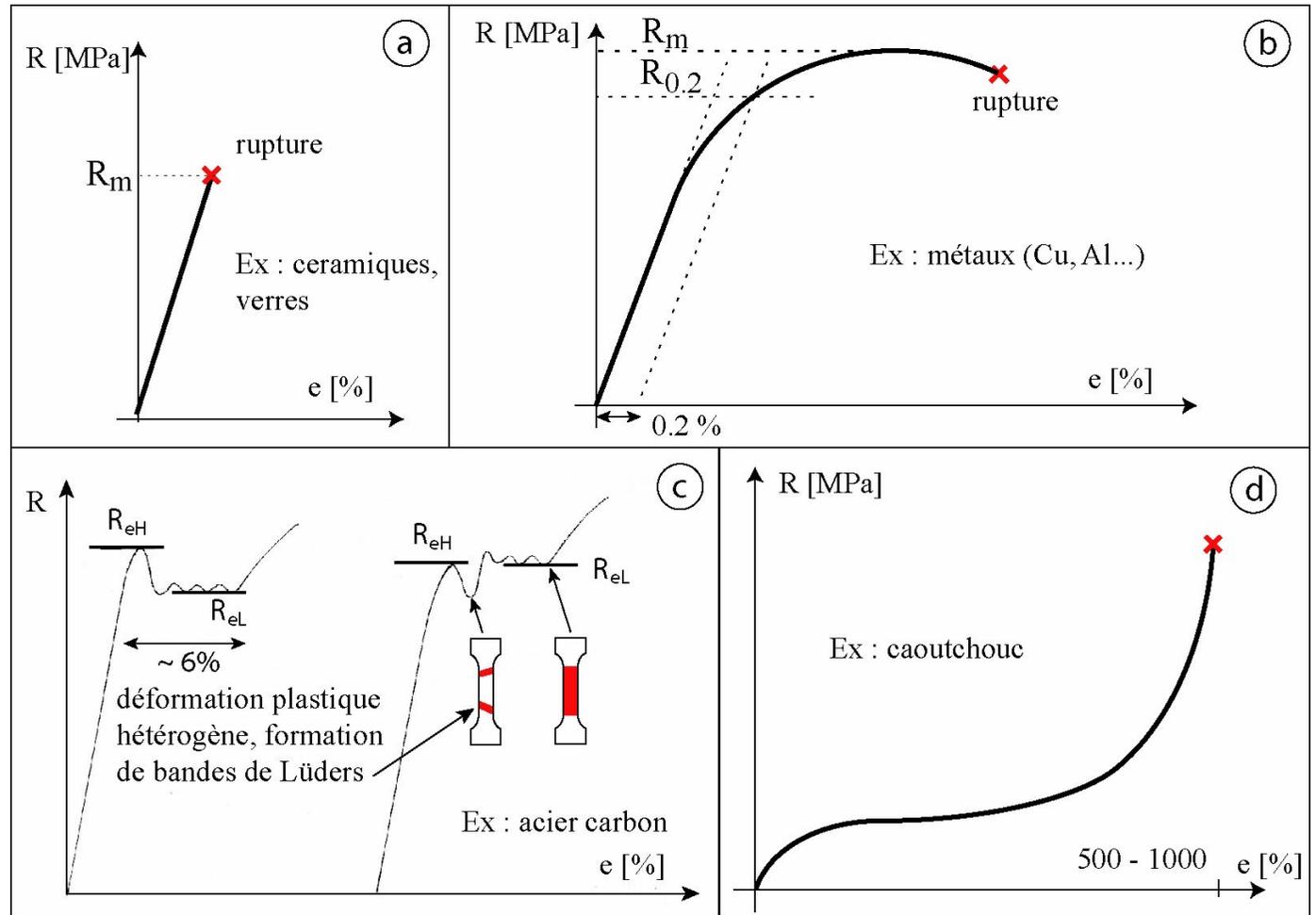
(c) certains alliages (les aciers doux au carbone en particulier) montrant un crochet en début de déformation (yield point), ainsi que nombre de polymères,

(d) les alliages pseudoélastiques et les élastomères ( presque toute la déformation est réversible).



**Question:**

1 – Quelle est la trajectoire de la courbe si on réduit à zéro la charge appliquée à partir de chacun des trois points marqués d'une croix rouge ?

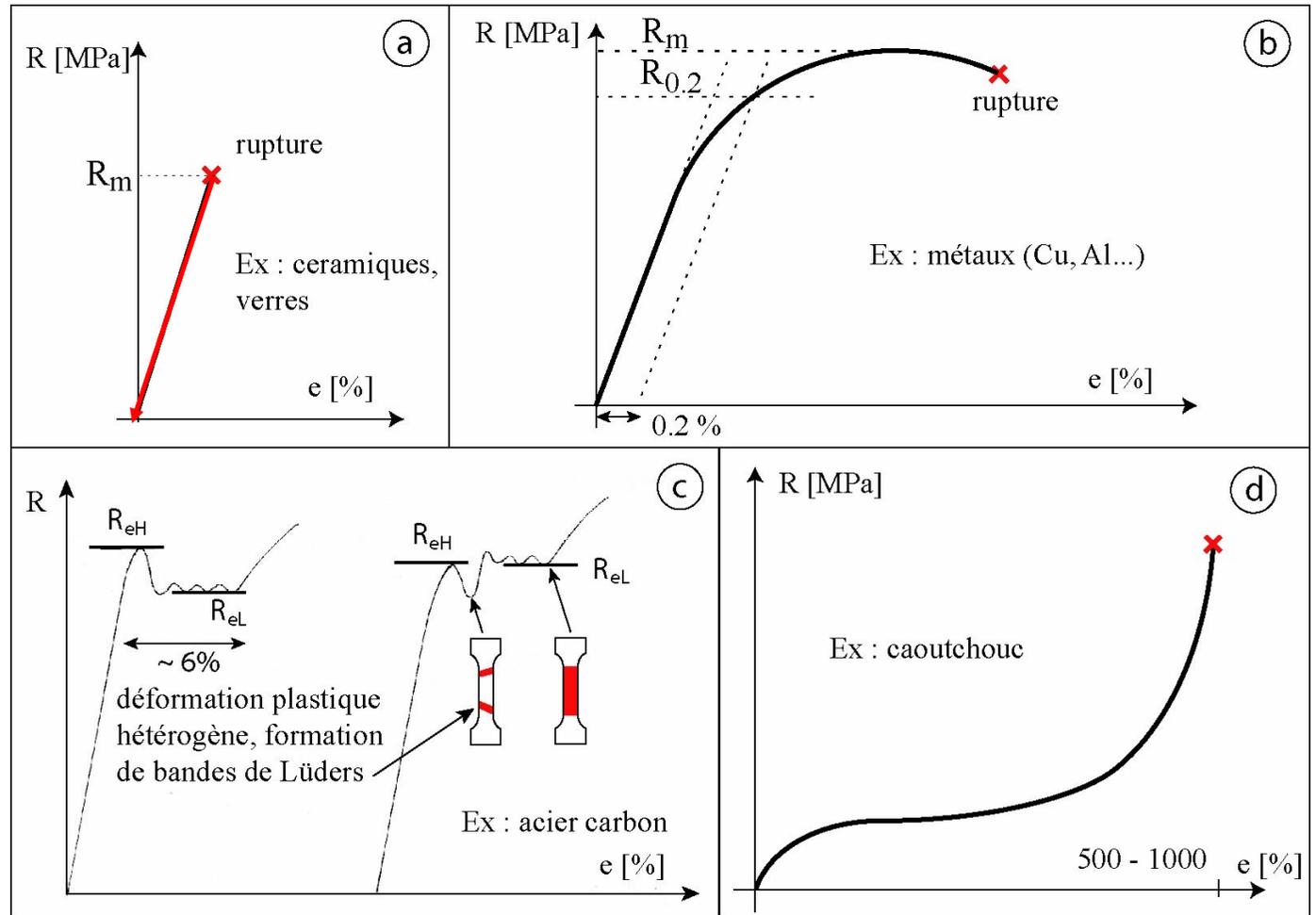


**Question:**

1 – Quelle est la trajectoire de la courbe si on réduit à zéro la charge appliquée à partir de chacun des trois points marqués d'une croix rouge ?

**Réponse:**

les courbes en rouge ci-contre

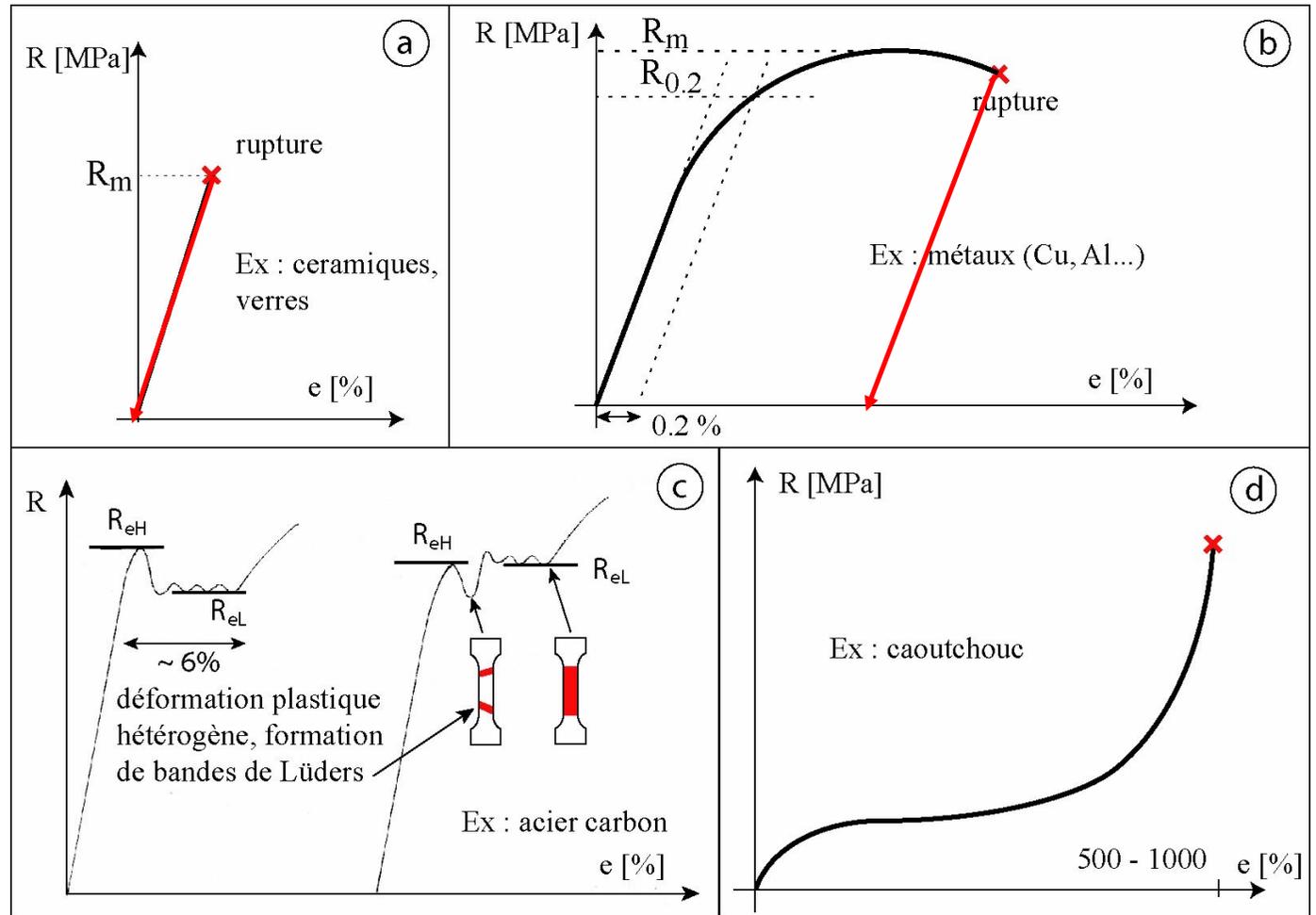


**Question:**

1 – Quelle est la trajectoire de la courbe si on réduit à zéro la charge appliquée à partir de chacun des trois points marqués d'une croix rouge ?

**Réponse:**

les courbes en rouge ci-contre

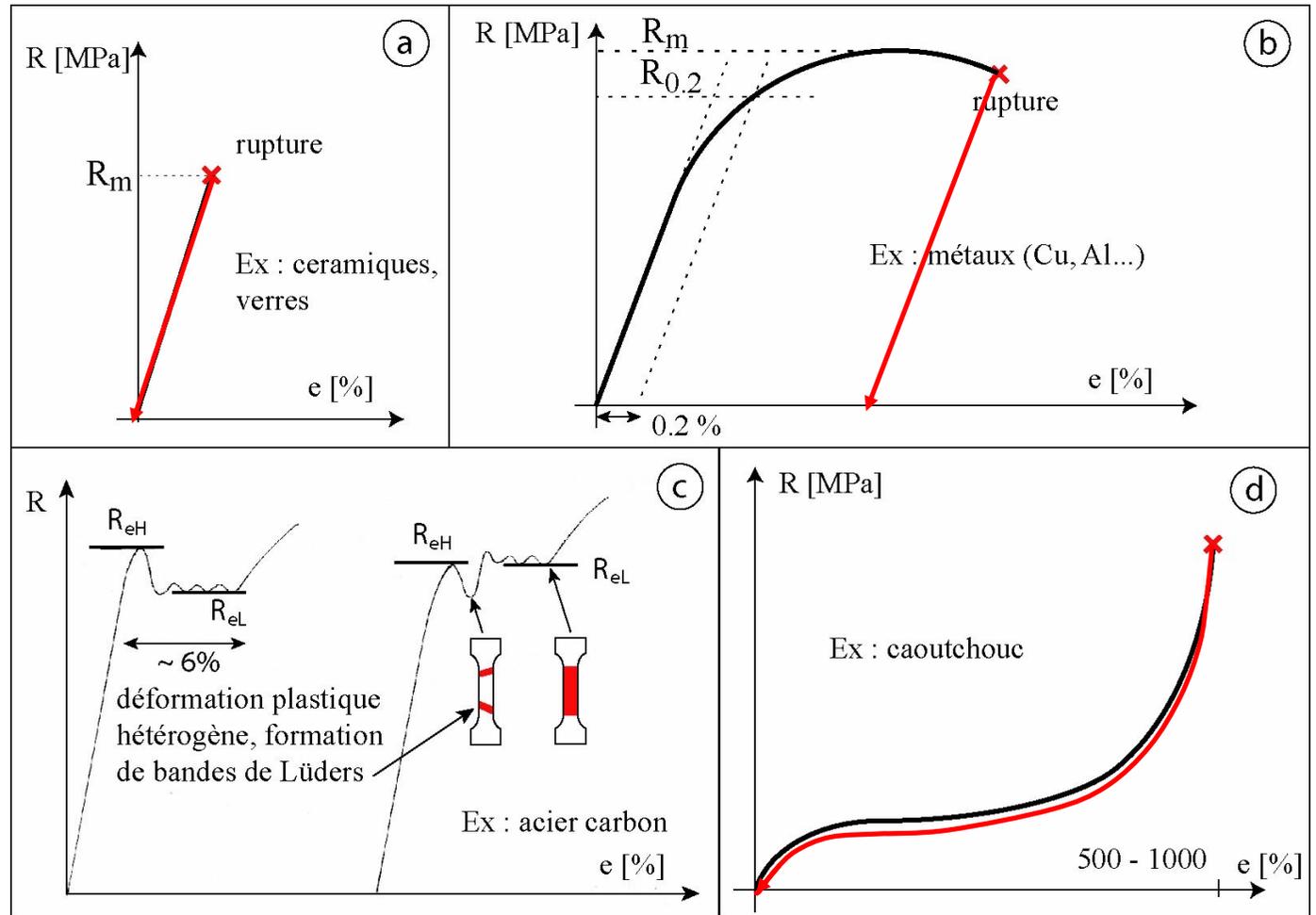


**Question:**

1 – Quelle est la trajectoire de la courbe si on réduit à zéro la charge appliquée à partir de chacun des trois points marqués d'une croix rouge ?

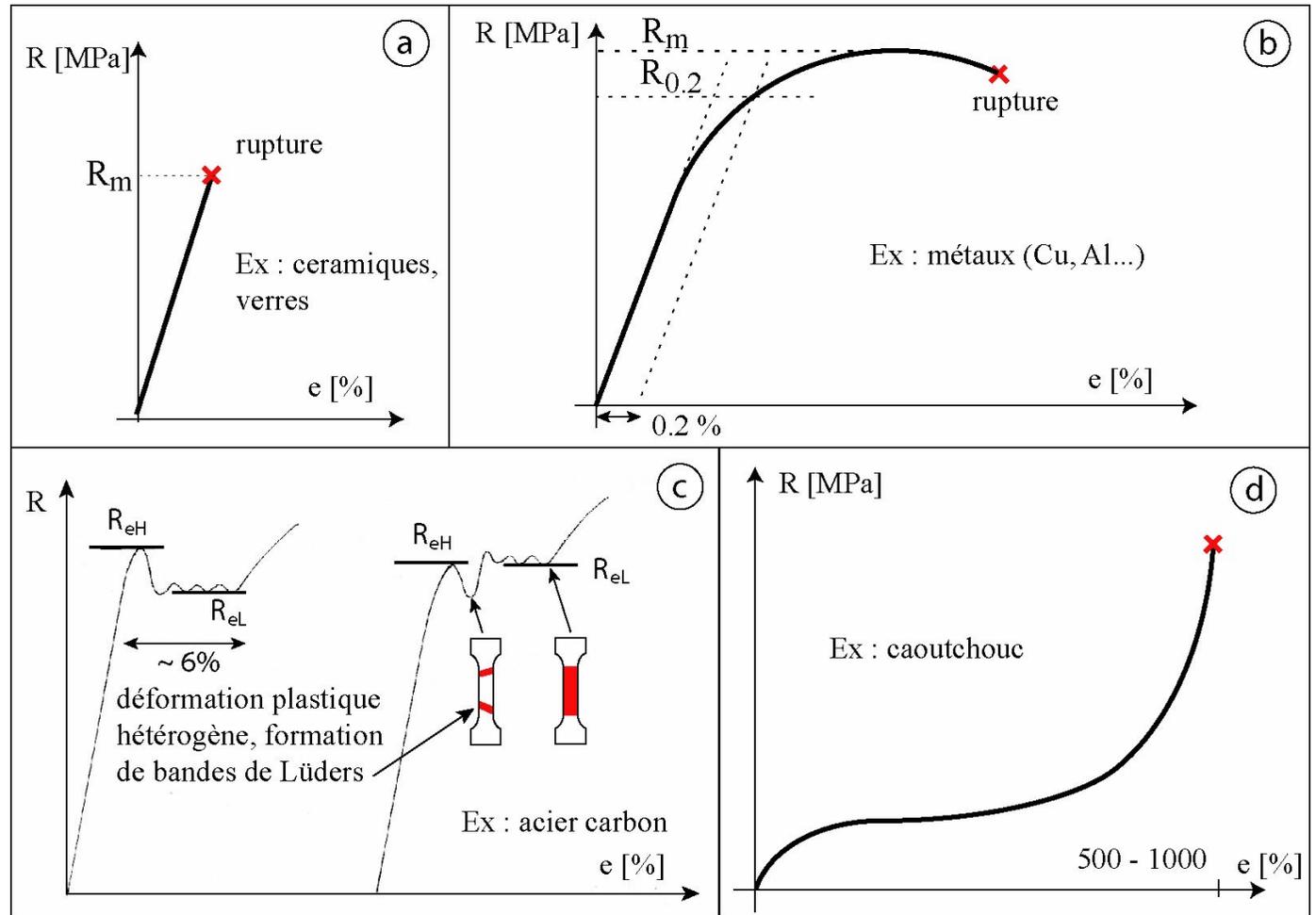
**Réponse:**

les courbes en rouge ci-contre



**Question:**

2 - Quelle est la densité (volumique) d'énergie mécanique emmagasinée au sein du matériau à chaque point le long de la courbe de traction ?



**Question:**

2 - Quelle est la densité (volumique) d'énergie mécanique emmagasinée au sein du matériau à chaque point le long de la courbe de traction ?

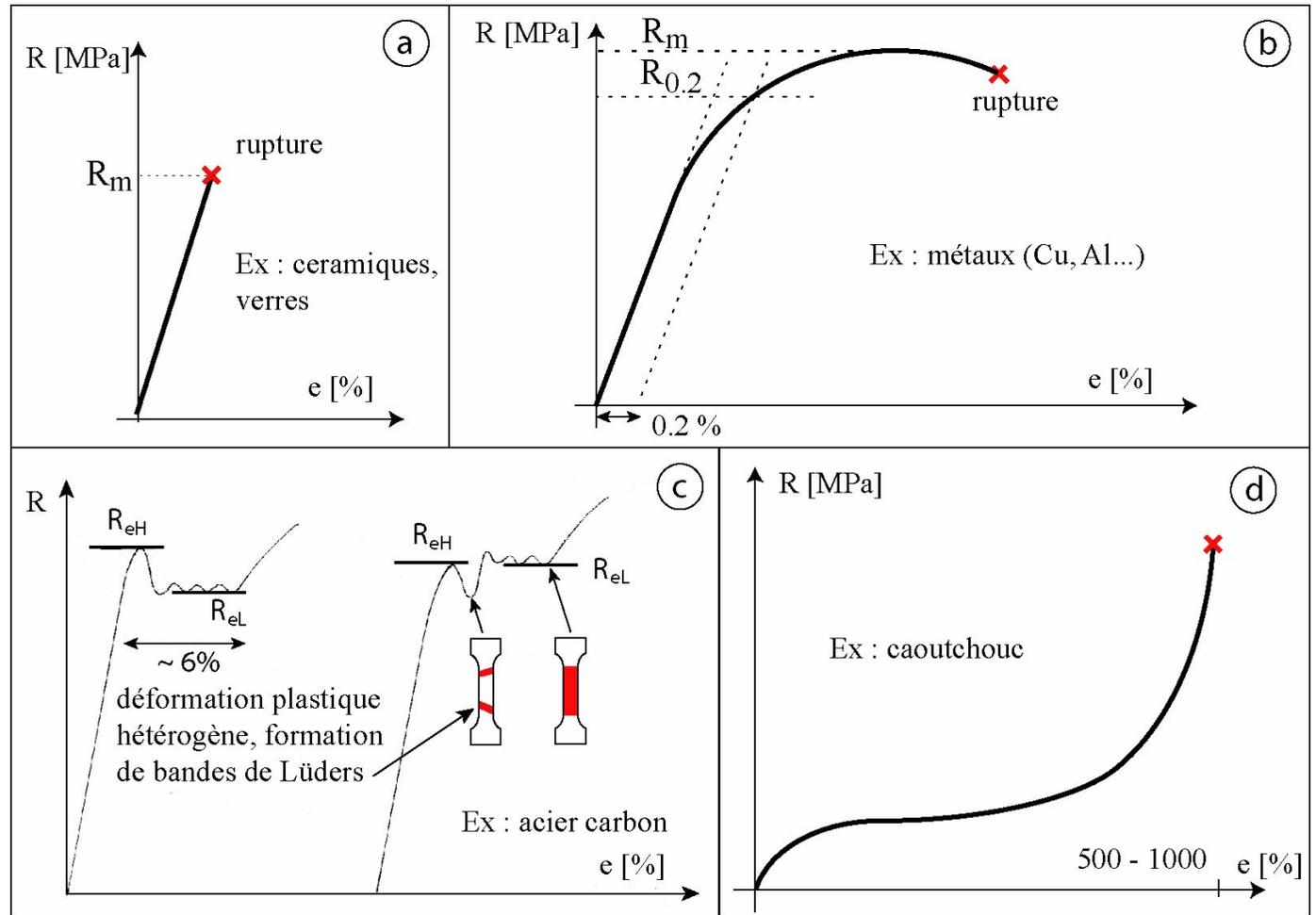
**Réponse:**

C'est l'intégrale de la courbe:

$$E = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon$$

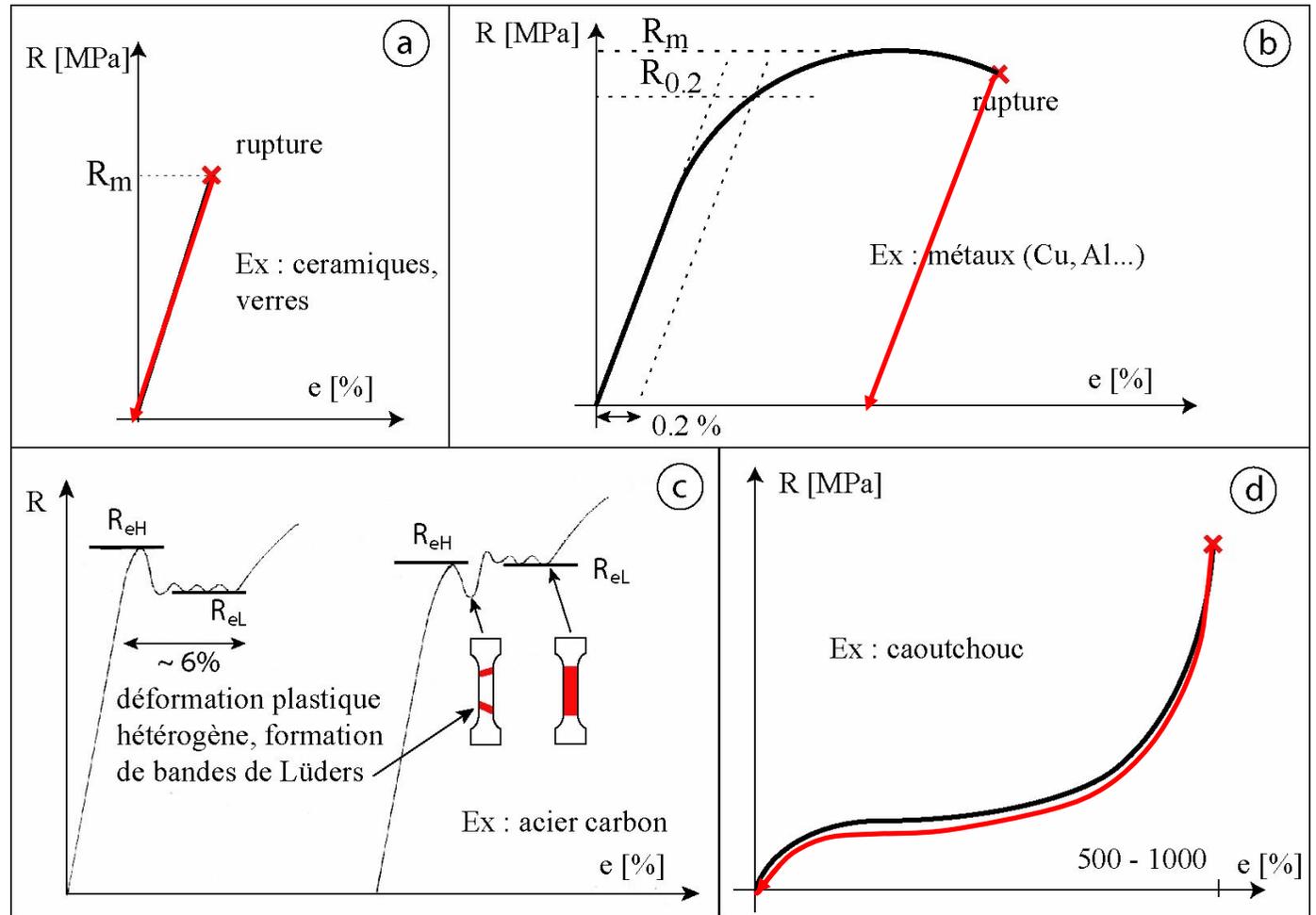
en J/m<sup>3</sup>.

(= l'intégrale de  $F dL$  sur 1 m<sup>3</sup>)



Notez que cette énergie est la somme d'une énergie (i) **réversible**: cette partie, dite énergie élastique, est l'intégrale de la courbe tracée lors de la *décharge* (courbes rouges)

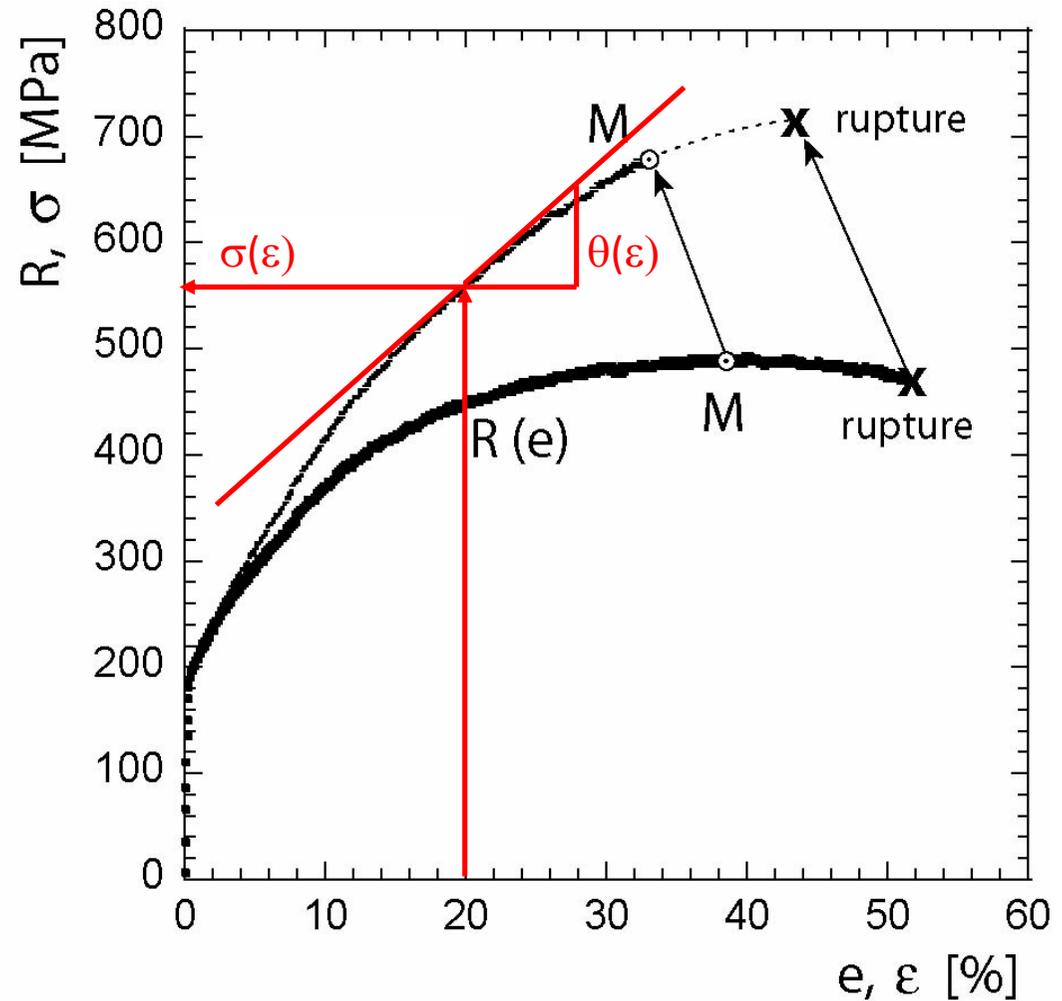
(ii) **irréversible** (= l'intégrale de la courbe de charge moins la courbe de décharge); elle est soit dégagée sous forme de chaleur, soit stockée au sein du matériau, notamment dans les métaux sous forme de dislocations.



## Autres grandeurs

La contrainte d'écoulement  
(« flow stress »)  
 $\sigma(\varepsilon)$

Le taux d'écrouissage  
(« work hardening rate »)  
 $\theta(\varepsilon) = d\sigma/d\varepsilon$



## Ruptures en traction

Echantillons de traction rompus :

- a) matériau métallique fragile,
- b) matériau métallique ductile (acier inoxydable),
- c) matériau métallique très ductile (Al pur).

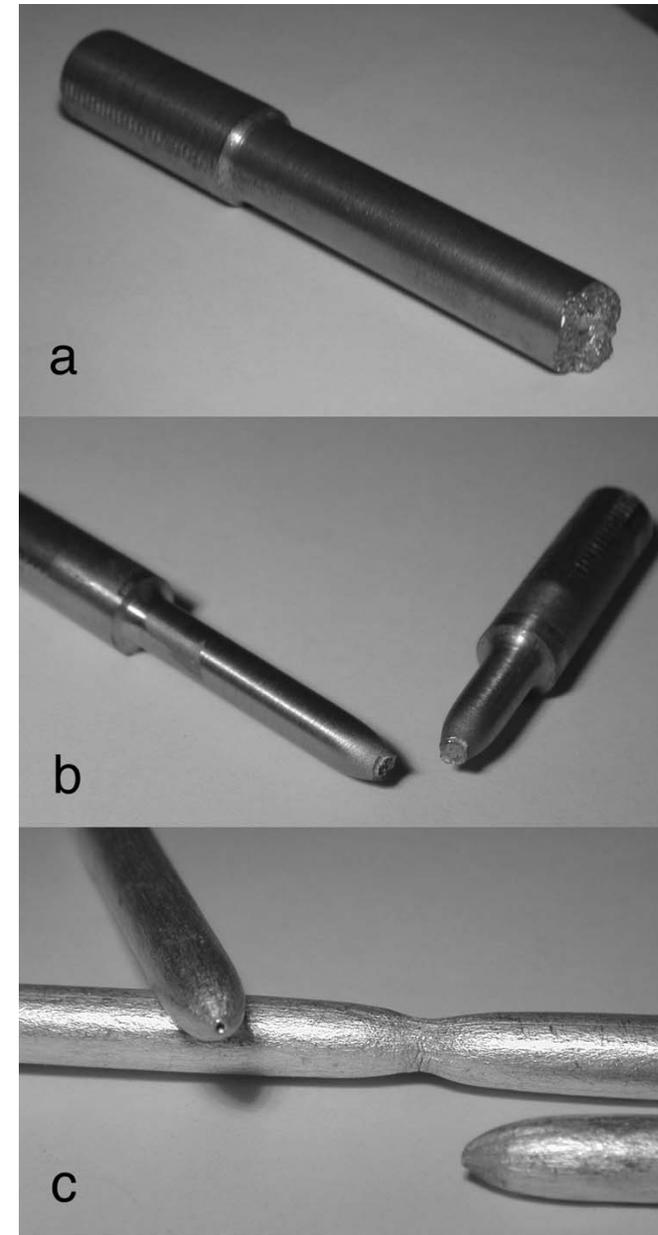
On mesure la **ductilité** par l'allongement (relatif) à rupture ( $\Delta L/L_0$ );

$\leq 1\%$  = « matériau fragile »;

$>10\%$  = « matériau ductile ».

On utilise parfois aussi le rapport de l'aire finale sur la surface de rupture/aire initiale du barreau:

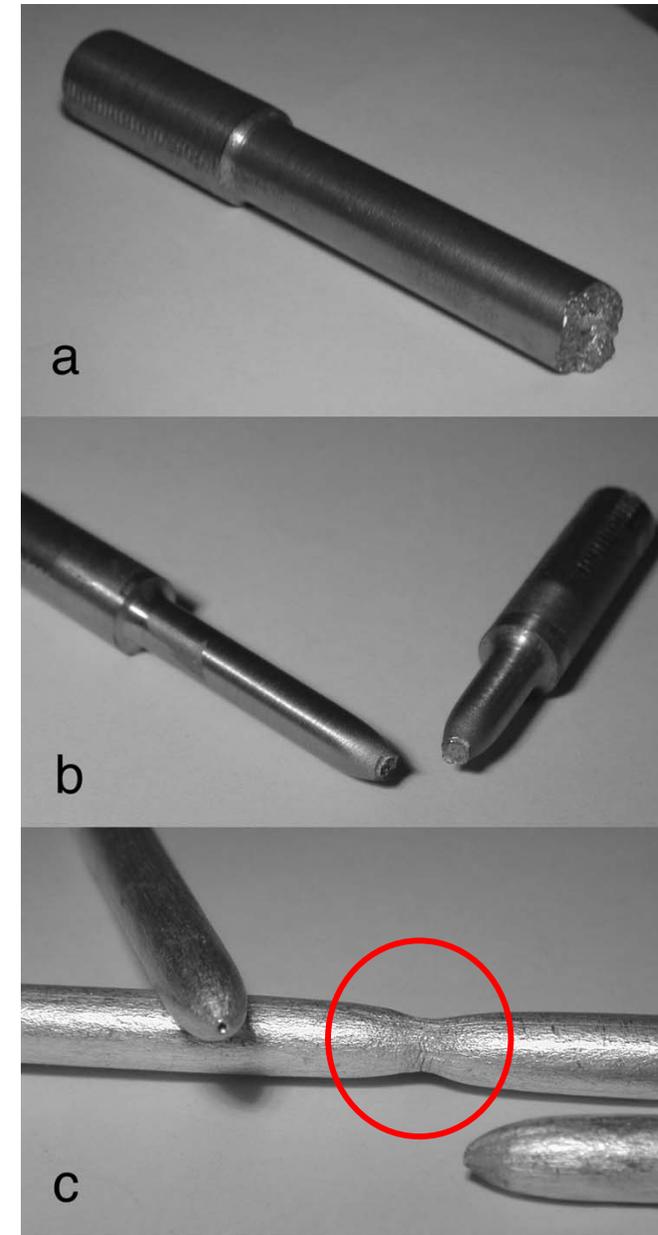
$$A_f/A_0$$



## Notion de base: l'instabilité de Considère et la striction

Notez dans les matériaux ductiles (b & c) la concentration de la déformation en une section limitée du barreau: c'est le phénomène de **striction** (« necking »).

La striction est due à une instabilité mécanique (autre instabilité mécanique: le flambage)

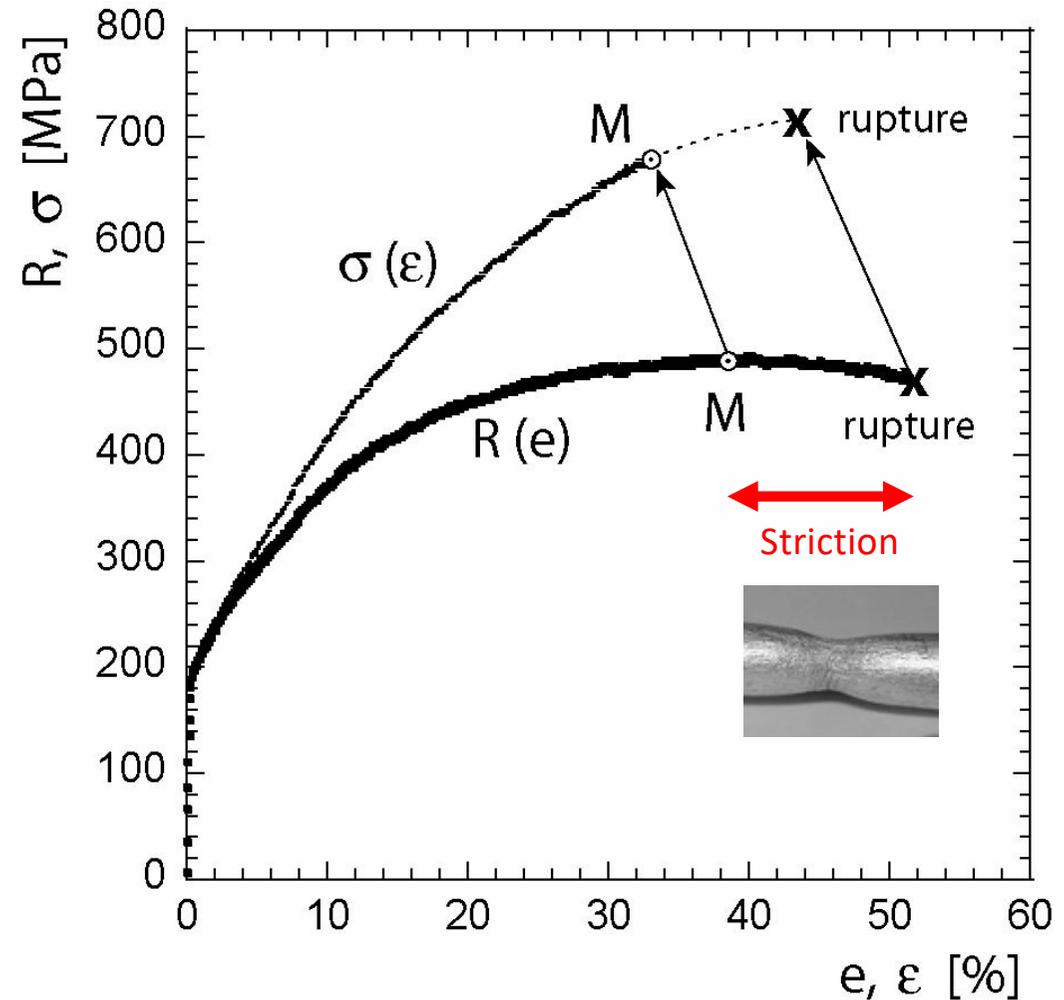


## R-e vs. $\sigma$ - $\varepsilon$

Comparaison des courbes de traction conventionnelles  $R = f(e)$  et rationnelle  $\sigma = f(\varepsilon)$  (engineering stress-strain curve; true stress-true strain curve)

Notez que le maximum de la courbe conventionnelle résulte des définitions de  $R$  et  $e$  : quand commence la striction, la contrainte vraie  $\sigma$  dans l'échantillon là où il se déforme continue d'augmenter avec la déformation.

Pourquoi la striction ?



## Notion de base: l'instabilité de Considère (la striction)

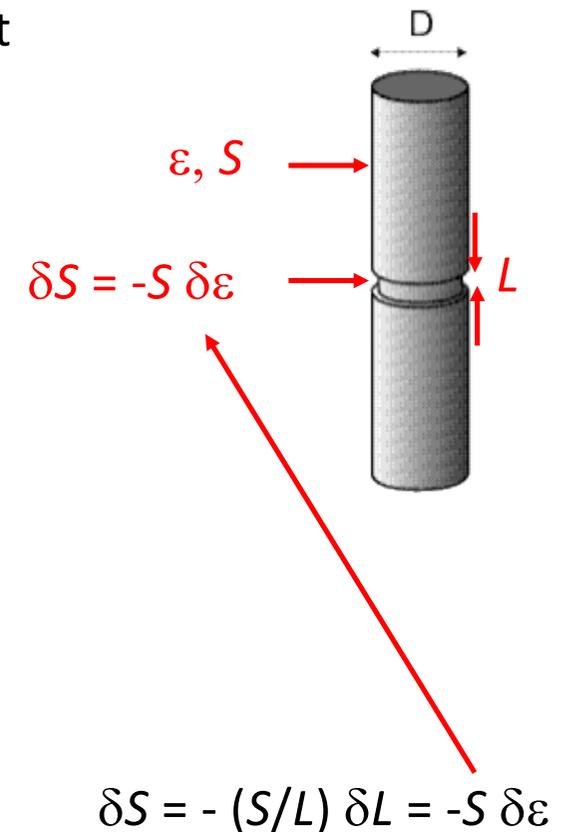
Considérons un barreau de traction selon la loi de déformation uniaxiale  $\sigma = f(\varepsilon)$  capable de subir un allongement conséquent (généralement par déformation plastique).

La déformation plastique a généralement lieu à volume  $V$  constant: dès lors, tout incrément  $\delta L$  de la longueur  $L$  d'une tranche transverse le long de la section réduite est tel que localement:

$$\delta V = \delta(SL) = S\delta L + L\delta S = 0,$$

où  $S$  est l'aire de la section transverse de cet élément.

Donc si on a un incrément d'allongement local  $\delta L$  le long de la section réduite, on a aussi un rétrécissement de l'aire de la section transverse à cet endroit, donné par:



## Notion de base: l'instabilité de Considère (la striction)

Supposons maintenant que localement, pour une raison quelconque, l'élongation diffère de la valeur moyenne  $\varepsilon$  par  $\delta\varepsilon$ . Il faut dès lors que:

- la section ait changé là un peu plus qu'ailleurs, par la quantité

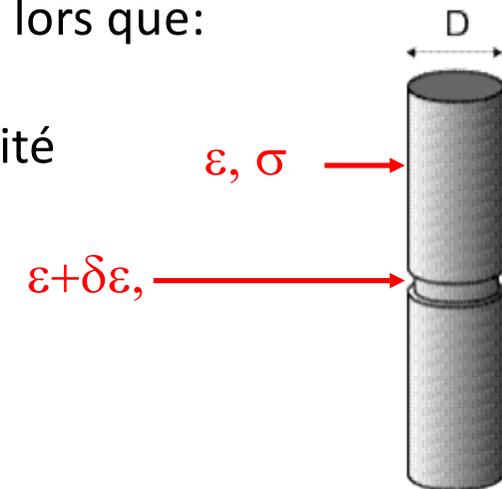
$$\delta S = - S \delta\varepsilon,$$

- et donc, puisque la charge  $P$  est la même partout le long du barreau:

$$\delta P = \delta(\sigma S) = \sigma \delta S + S \delta\sigma = 0,$$

Donc la contrainte locale y diffère de  $\sigma$  par la quantité

$$\delta\sigma = - \sigma \delta S / S = \sigma \delta\varepsilon.$$



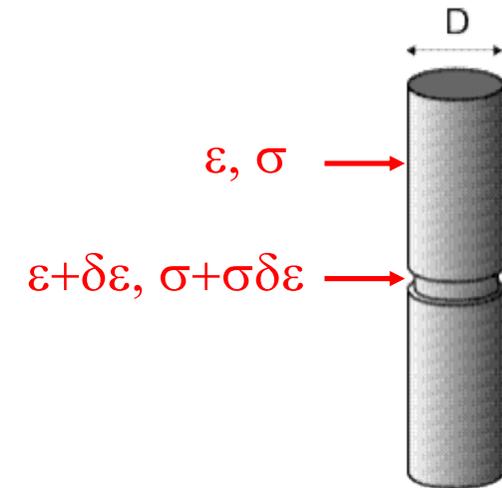
## Notion de base: l'instabilité de Considère (la striction)

Localement, déformation et de contrainte doivent donc être:

$$(\varepsilon + \delta\varepsilon, \sigma + \sigma \delta\varepsilon)$$

en cet endroit déformé un peu plus qu'ailleurs, au lieu de  $(\varepsilon, \sigma)$  partout ailleurs le long de la section réduite.

**Deux cas de figure peuvent alors se présenter.**



## Notion de base: l'instabilité de Considère (la striction)

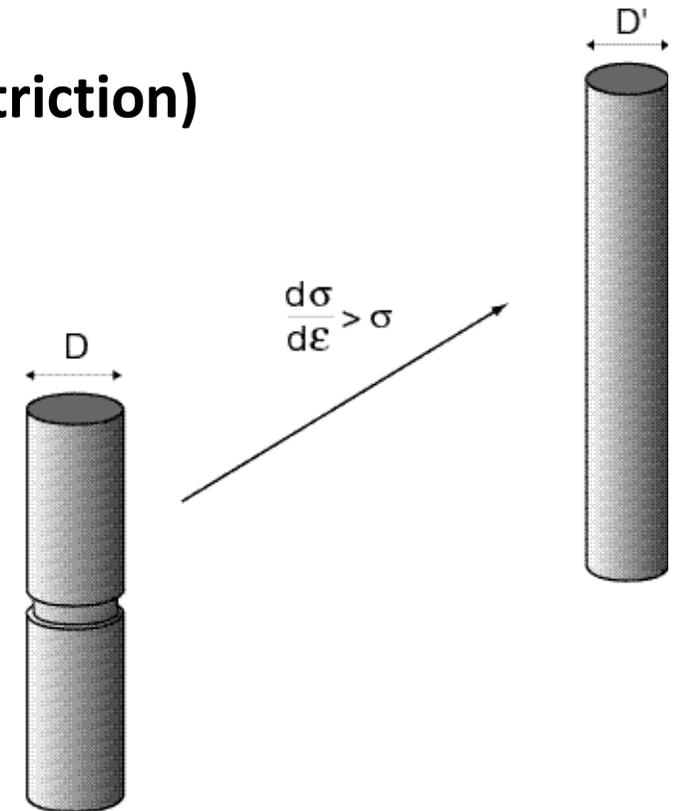
- soit la loi de comportement du matériau  $\sigma = f(\varepsilon)$  est telle qu'à la déformation  $\varepsilon$  correspond un taux d'écrouissage  $\theta(\varepsilon)$  tel que

$$\theta(\varepsilon) = d\sigma/d\varepsilon > \delta\sigma/\delta\varepsilon = \sigma \delta\varepsilon/\delta\varepsilon = \sigma.$$

Dans ce cas, la contrainte d'écoulement du matériau a été davantage augmentée localement suite à l'excédent de déformation que n'a augmenté la contrainte locale. La contrainte locale ne peut plus déformer le matériau là où a eu lieu l'excédent de déformation.

La déformation plastique s'y arrête donc momentanément, pendant que la déformation continue ailleurs. Le reste du barreau s'allonge et rattrape en termes de déformation l'endroit qui s'était localement déformé un peu trop.

La déformation est alors stable : les sections moins déformées ont tendance à se déformer préférentiellement, et une inhomogénéité de déformation est effacée.



## Notion de base: l'instabilité de Considère (la striction)

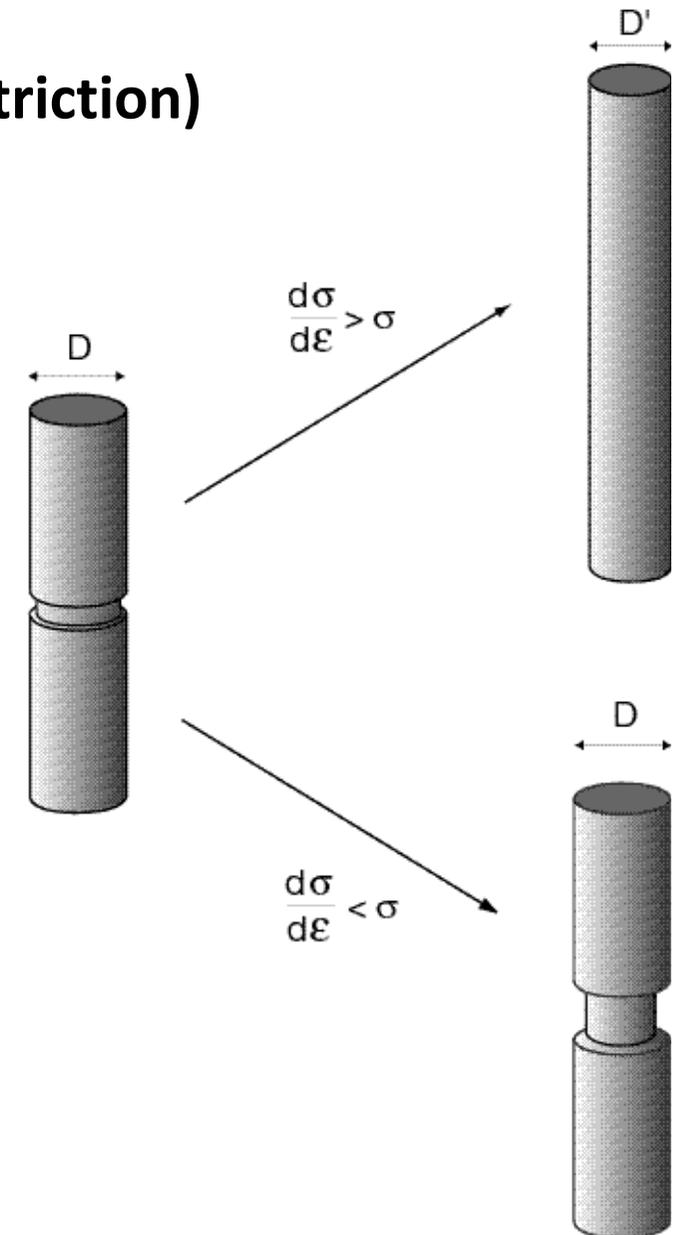
- soit c'est l'inverse:

$$\theta(\varepsilon) = d\sigma/d\varepsilon < \delta\sigma/\delta\varepsilon = \sigma \delta\varepsilon/\delta\varepsilon = \sigma.$$

Dans ce cas la déformation, localement plus accentuée à l'endroit ayant vu une déformation augmentée de  $\delta\varepsilon$ , va s'y poursuivre. Pour cela la charge requise est plus faible que la charge  $P$  qui était appliquée au barreau au moment où un segment du barreau a commencé à se déformer davantage que le reste.

La charge  $P$ , dès lors devenue trop grande pour correspondre à la contrainte d'écoulement de la partie amincie, décroît donc légèrement. De ce fait, partout ailleurs le long du barreau la contrainte décroît en dessous de la contrainte d'écoulement et la déformation s'y arrête, pour ne se poursuivre, selon la loi de comportement du matériau  $\sigma = f(\varepsilon)$ , que dans la petite section ayant subi un allongement accéléré.

**C'est ainsi et alors que la striction apparaît.**



## Notion de base: l'instabilité de Considère (la striction)

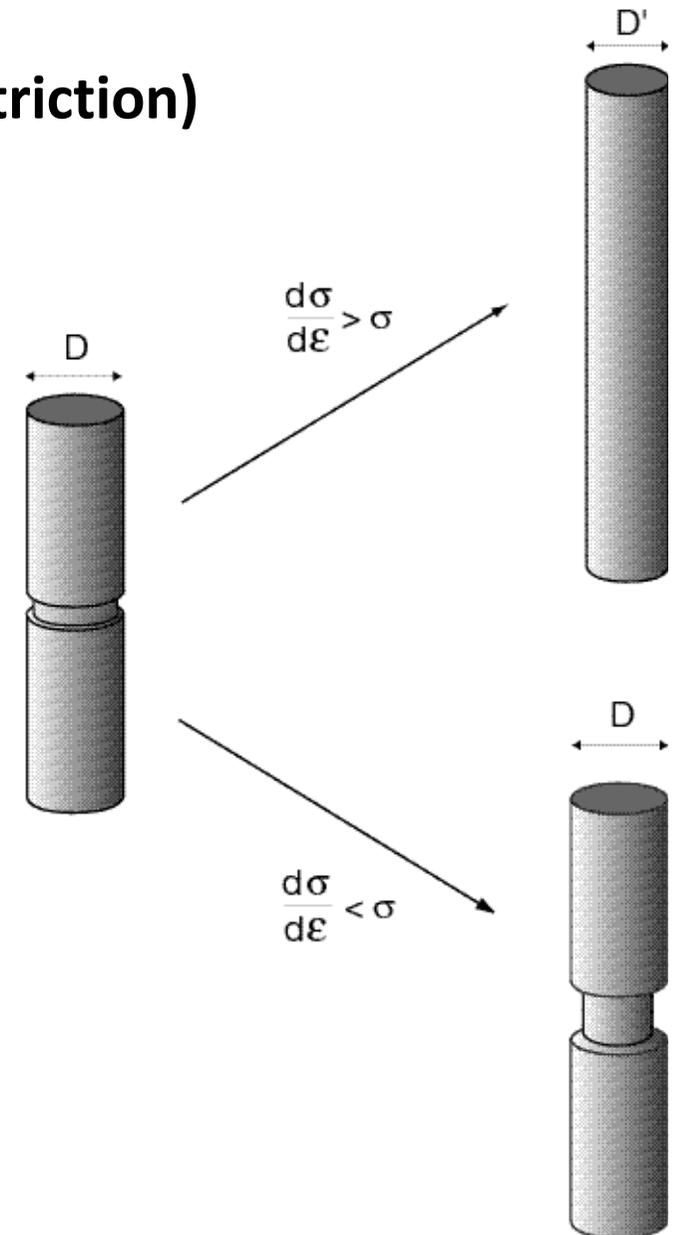
En somme, la striction apparaît quand:

$$\sigma = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

On peut montrer (c'est un bon exercice) que ceci correspond à

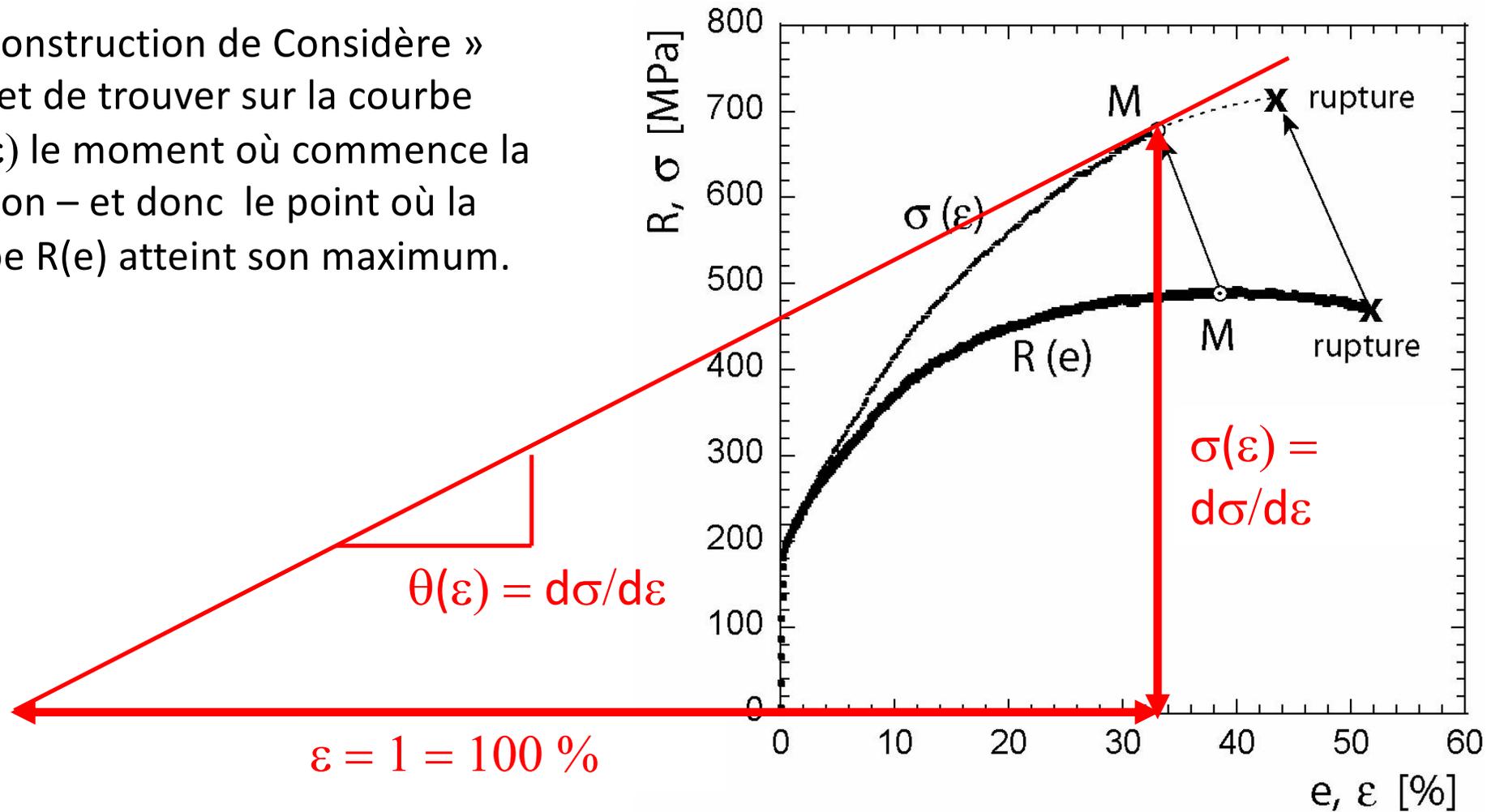
$$0 = \frac{dR}{de}$$

Le maximum de la courbe de traction conventionnelle correspond donc à l'amorçage de la striction.



## La construction de Considère

La « construction de Considère » permet de trouver sur la courbe  $\sigma = f(\epsilon)$  le moment où commence la striction – et donc le point où la courbe  $R(e)$  atteint son maximum.



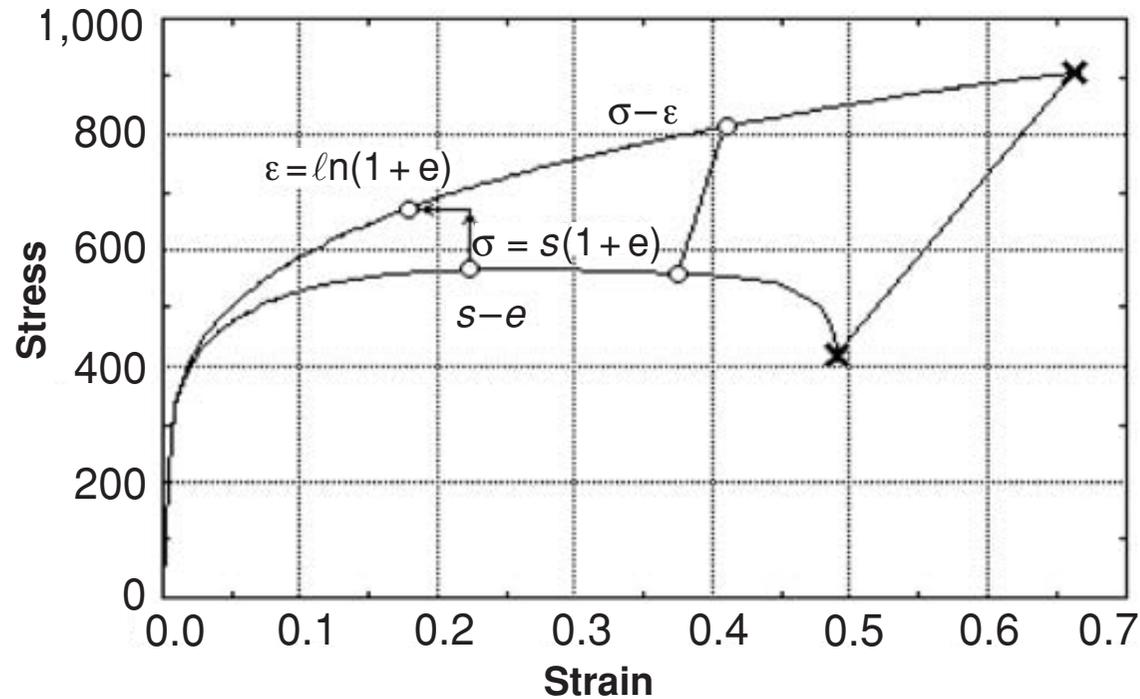
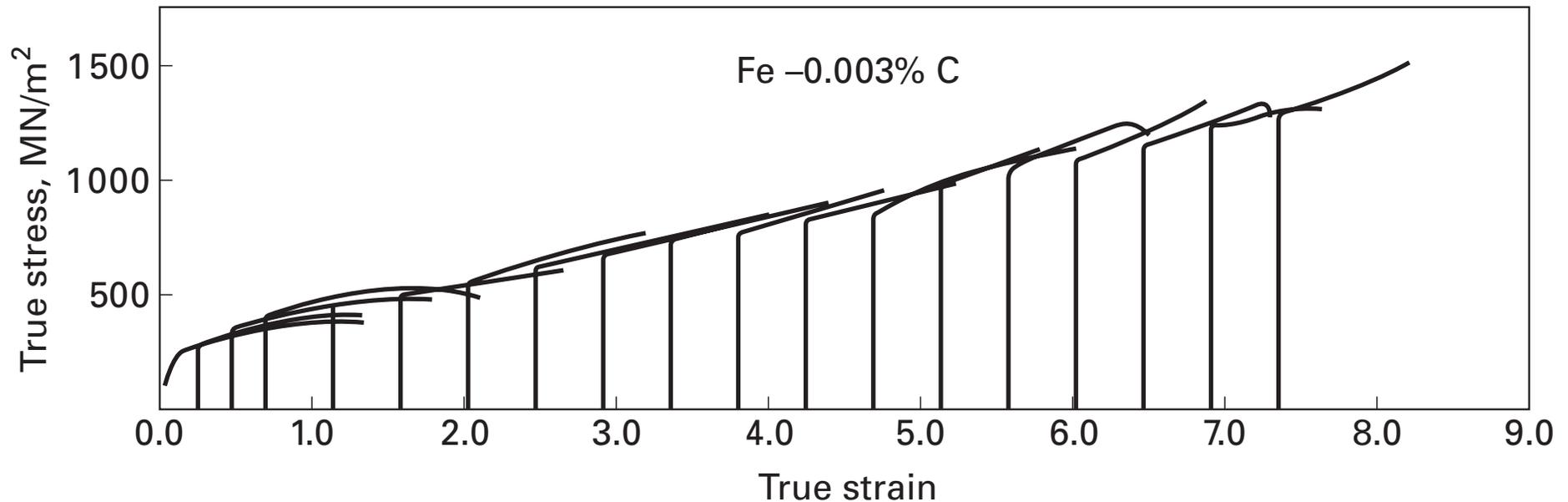
R-e vs.  $\sigma-\varepsilon$ 

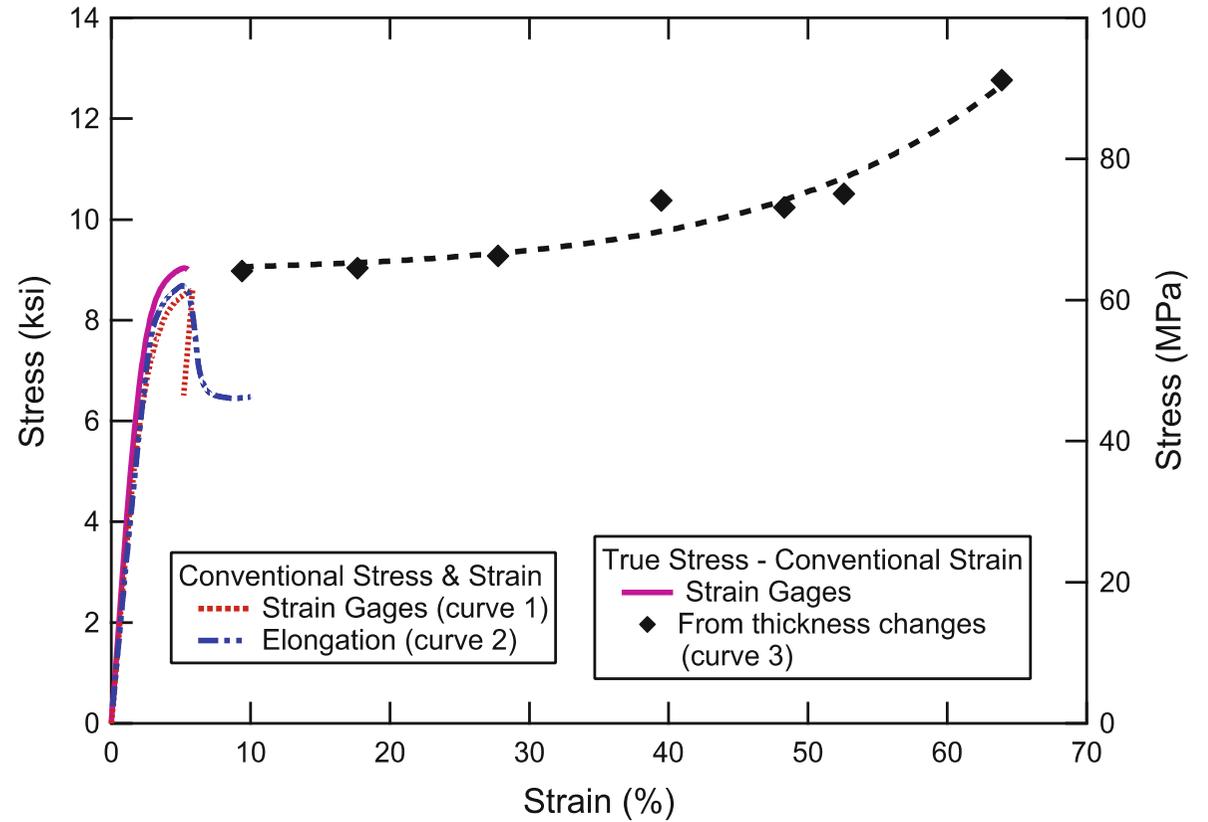
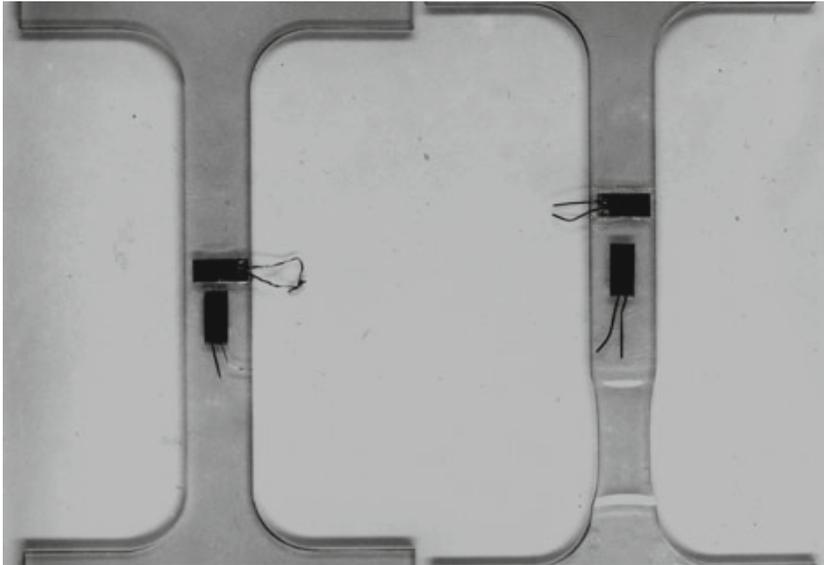
Figure 3.9. Comparison of engineering and true stress–strain curves. Before necking, a point on the true stress–strain curve ( $\sigma-\varepsilon$ ) can be constructed from a point on the engineering stress–strain curve ( $s-e$ ) with equations (3.7) and (3.8). After necking, the cross-sectional area at the neck must be measured to find the true stress and strain.

L'essai de traction ne mesure donc qu'une partie limitée de la vraie capacité de déformation des matériaux ductiles; voici une belle illustration



**Fig. 3.11** Stress-strain curves for Fe-0.003% C alloy wire, deformed to increasing strains by drawing; each curve is started at the strain corresponding to the prior wire-drawing reduction. (Courtesy of H. J. Rack.)

# En voici une autre: exemple du polycarbonate



## L'essai de traction en pratique

Ce site, d'un constructeur de machines d'essai, décrit assez bien l'essai de traction dans la pratique

<https://www.zwickroell.com/industries/metals/metals-standards/tensile-test-iso-6892-1/>

<https://www.zwickroell.com/industries/composites/#c138436>

(anglais)

<https://www.zwickroell.com/fr/secteurs-dactivite/metal/normes-metal/essai-de-traction-iso-6892-1/#c10004>

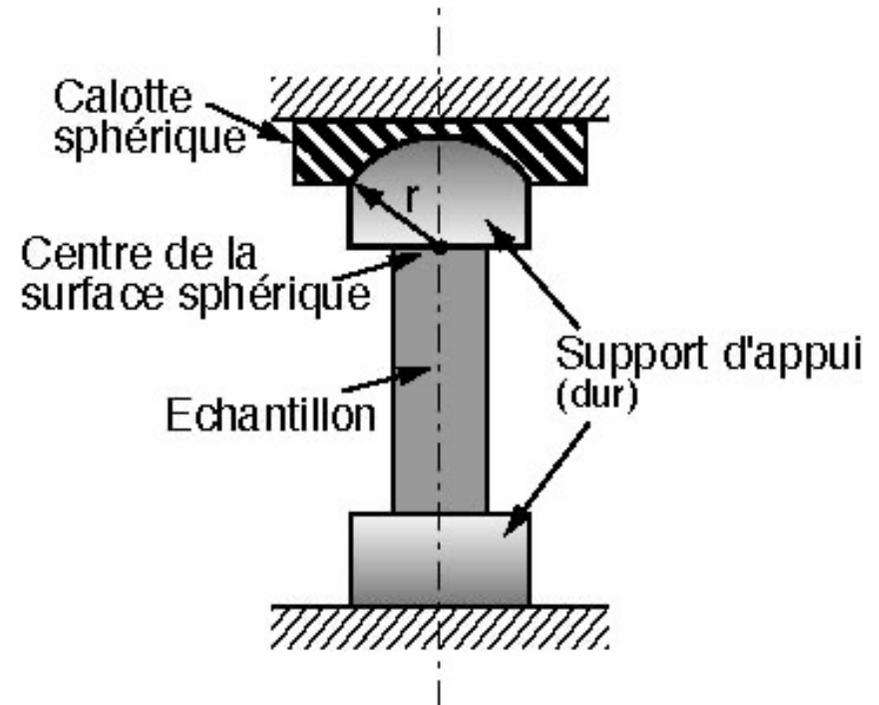
<https://www.zwickroell.com/fr/secteurs-dactivite/composites/>

(français)

## II – L'essai de compression

## L'essai de compression

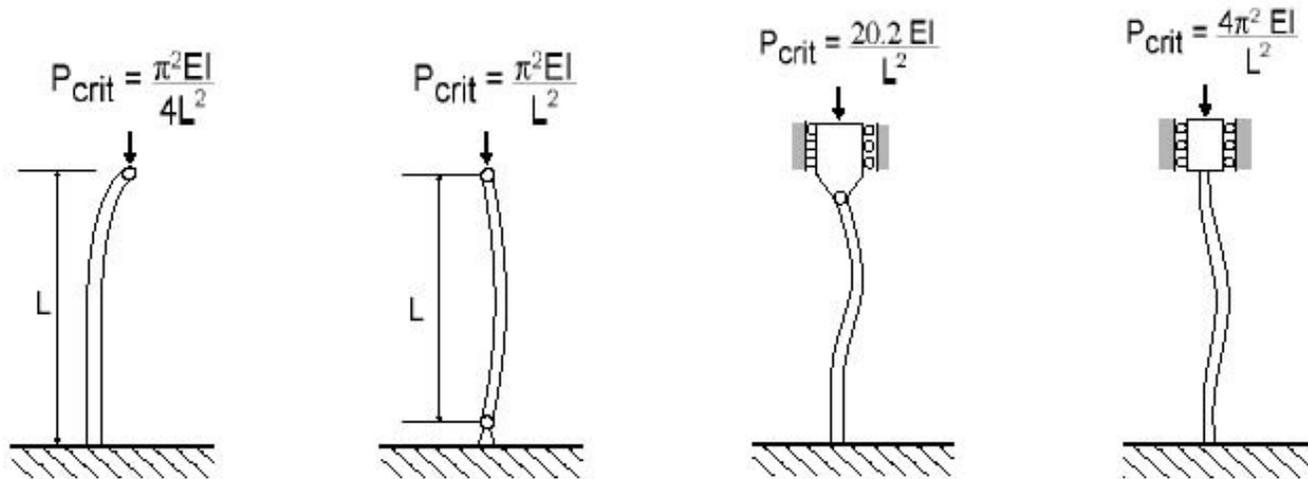
...présente **deux désavantages** par comparaison avec l'essai de traction:



## L'essai de compression

1 - Le **flambage**, autre instabilité mécanique.

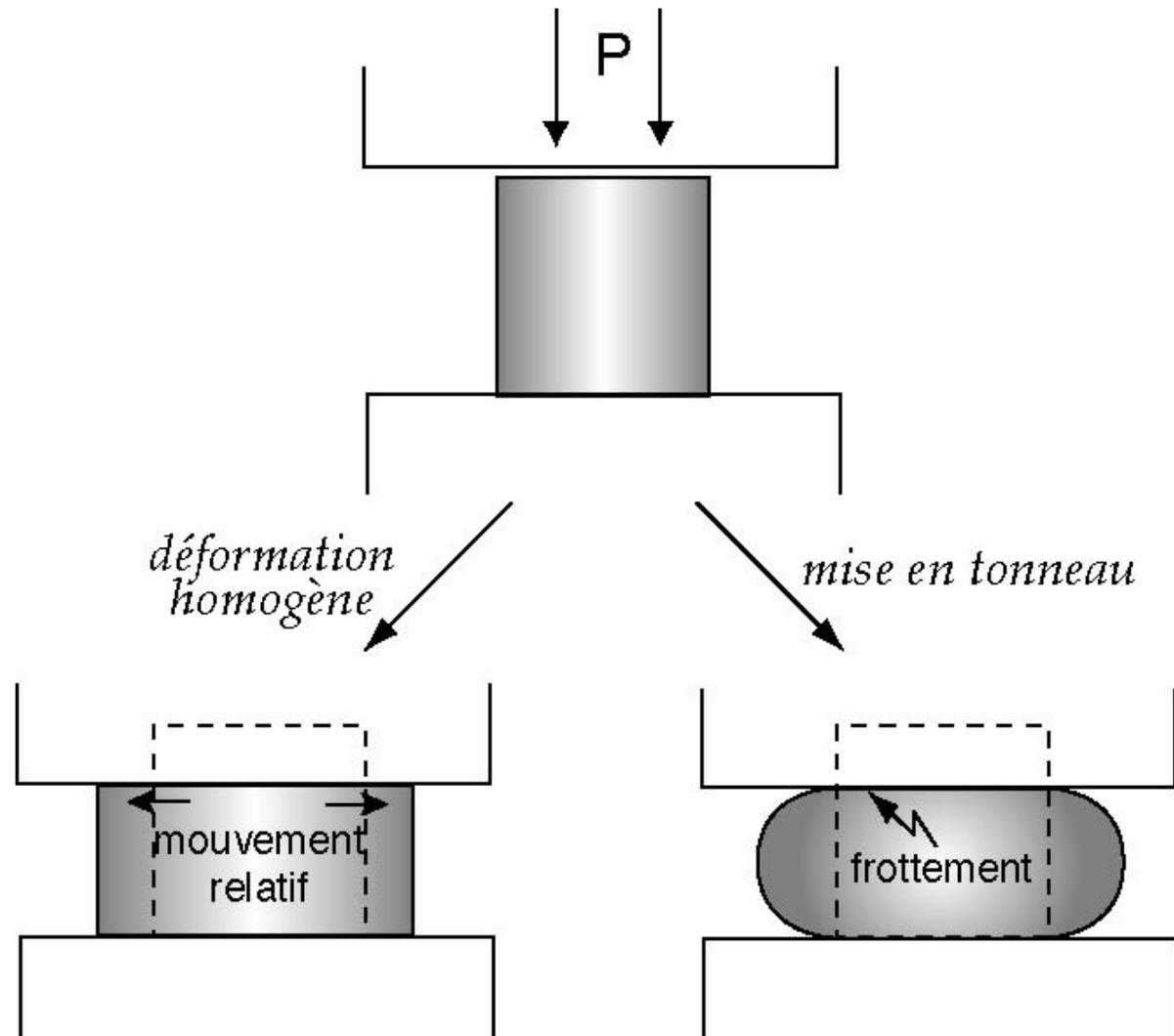
Pour l'éviter il faut des barreaux trapus; les équations pour la contrainte de flambage de solides élastiques linéaires isotropes est:



## L'essai de compression

2 - Le **frottement**, qui dissipe de l'énergie et cause la mise en tonneau. Là, on préfère des barreaux longs.

Le **compromis** est souvent fait avec un rapport hauteur/diamètre  $\approx$  3 ou 4.



## L'essai de compression

**En pratique**, on utilise l'essai de compression

(i) si produire ou amarrer des barreaux de traction est difficile, ou

(ii) si on veut mesurer spécifiquement le comportement en compression de certains matériaux (le béton ou les composites, dans ce second cas avec des amarrages complexes).

**La courbe conventionnelle est en compression plus élevée que la courbe conventionnelle de traction**, puisque (i) la section transversale s'aggrandit au lieu de se rétrécir, et (ii) la striction est absente. De plus les déformations maximales sont généralement plus élevées.

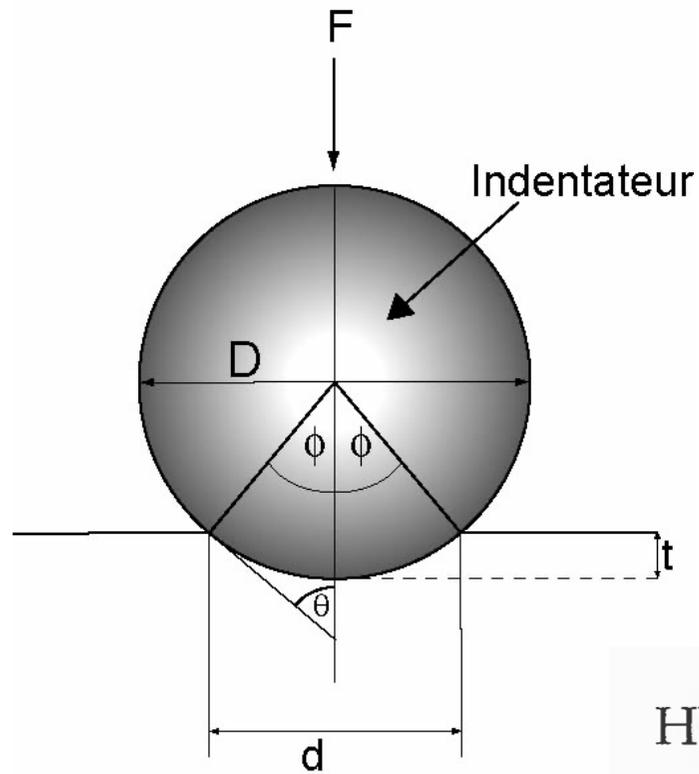
Le même **site** (de constructeur d'appareil d'essai mécanique) cité plus haut donne aussi des exemples d'essais de compression sur une large gamme de matériaux:

<https://www.zwickroell.com/industries/materials-testing/compression-test/#c73609> (anglais)

<https://www.zwickroell.com/fr/secteurs-dactivite/test-de-materiau-essai-de-materiau/essai-de-compression/> (français).

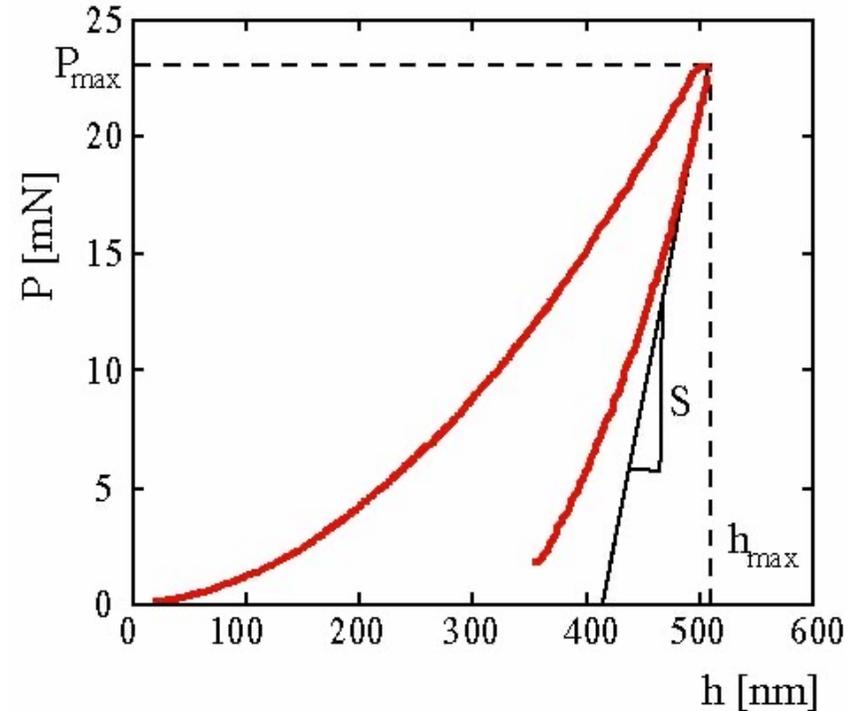
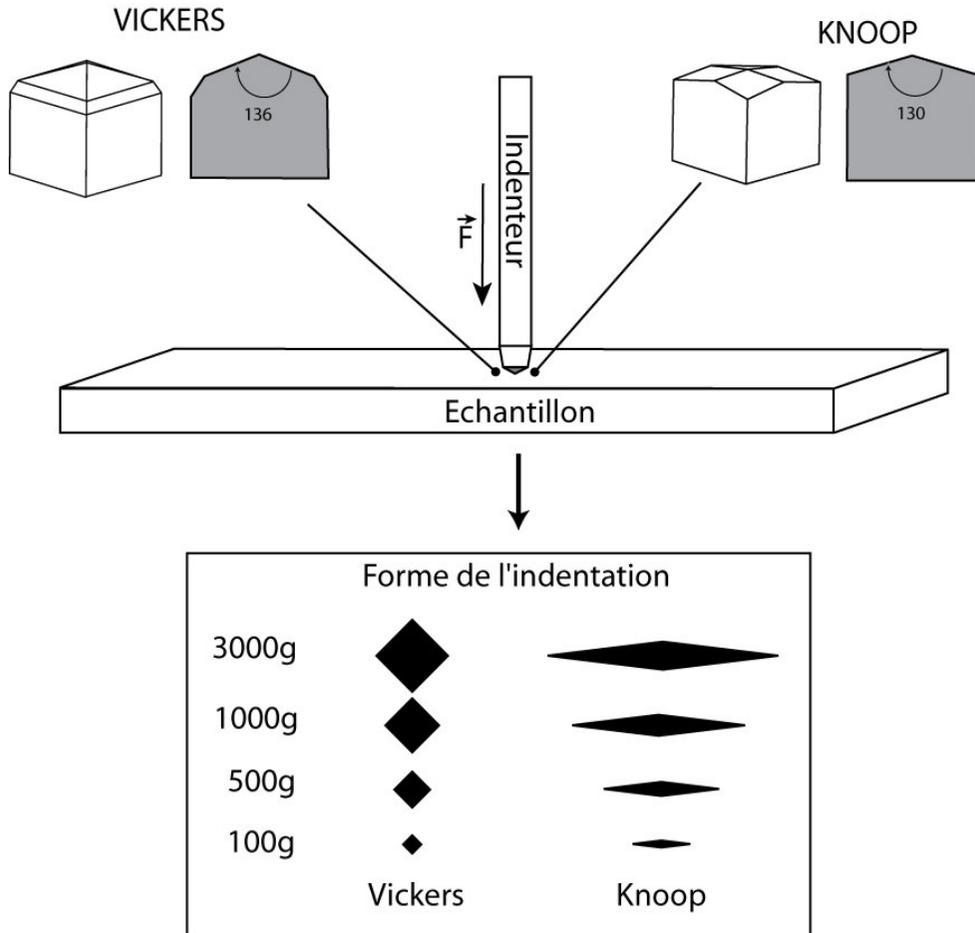
## III – L'essai de dureté

## L'essai de dureté: essai de Brinell



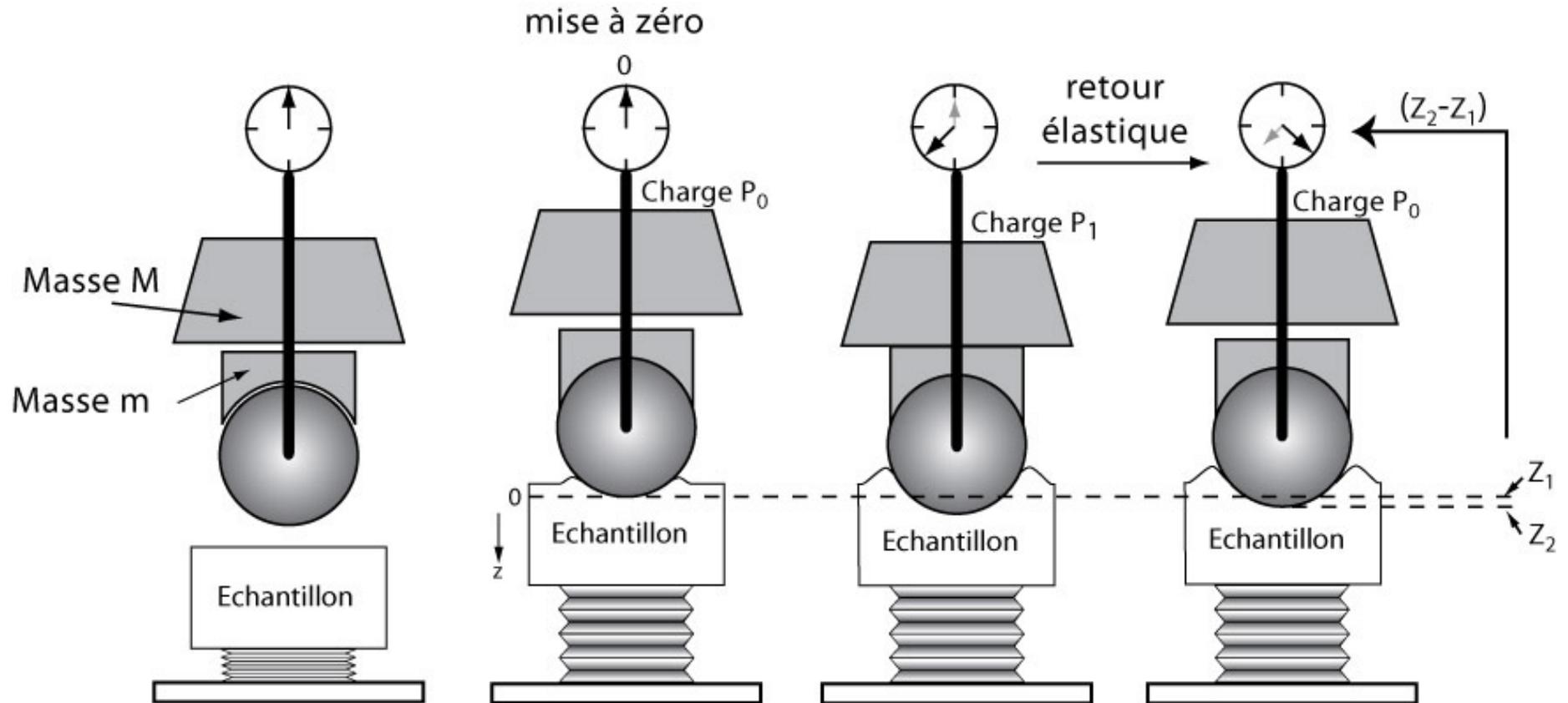
$$\text{HB (Hardness Brinell)} = \frac{P}{(1/2 \cdot \pi \cdot D)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{P}{\pi \cdot D \cdot t}$$

# L'essai de dureté: essais Vickers, Knoop et instrumenté

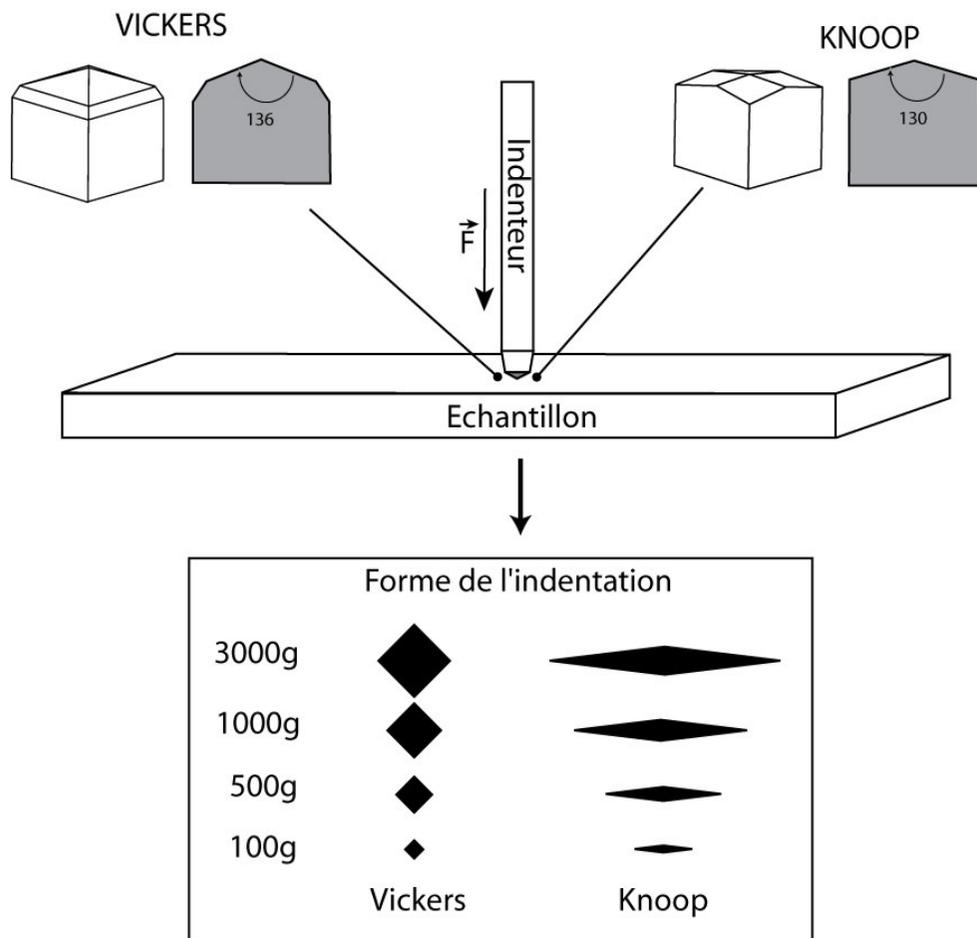


Essais *instrumenté* (où on mesure la courbe charge-déplacement de l'indentateur), typique de la nanoindentation.

# L'essai de dureté: essai Rockwell (basé sur la profondeur d'indentation, les valeurs de dureté étant données de là par un tableau)



## L'essai de dureté: *au niveau le plus simple...*



... la *dureté* est généralement définie comme étant la force divisée par l'aire de l'empreinte:

$$H = \frac{F}{A};$$

soit une contrainte (mais il existe d'autres définitions conventionnelles liées à tel ou tel essai spécifique).

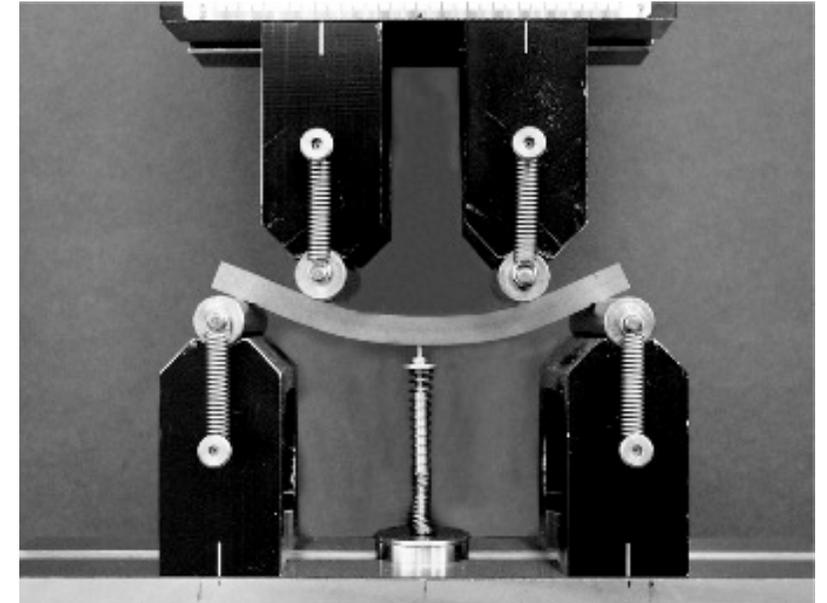
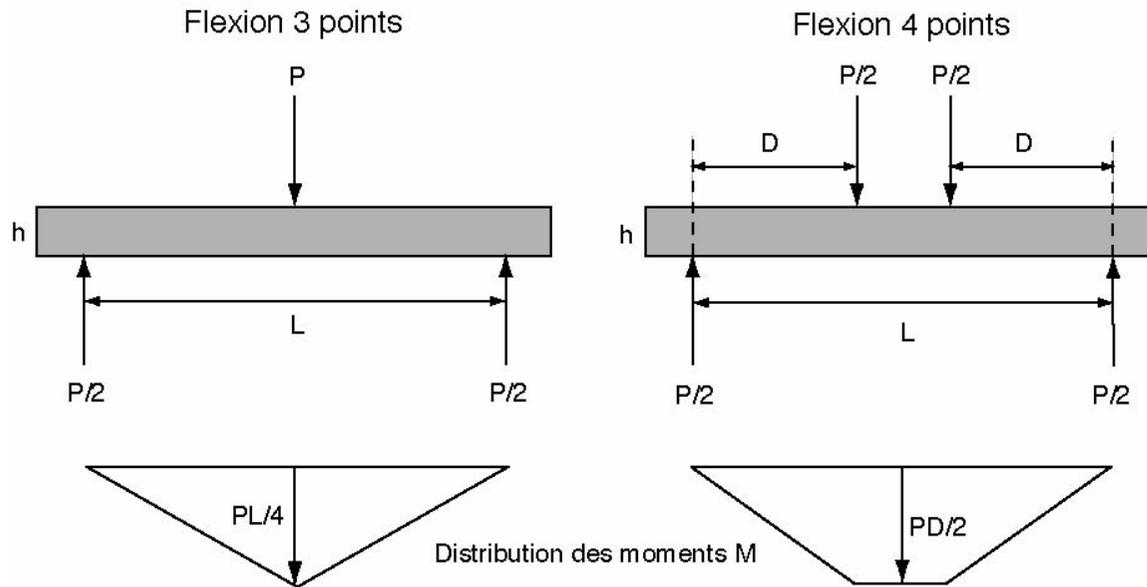
Pour le cas le plus simple (pas d'écroutissage & déformation 2D) on montre que:

$$H = 3\sigma_y$$

... qu'il est bon de garder à l'esprit.

## IV – L'essai de flexion

# L'essai de flexion



Essais de flexion trois points (gauche) et quatre points (droite), ainsi que les distributions du moment  $M$  pour ces configurations.

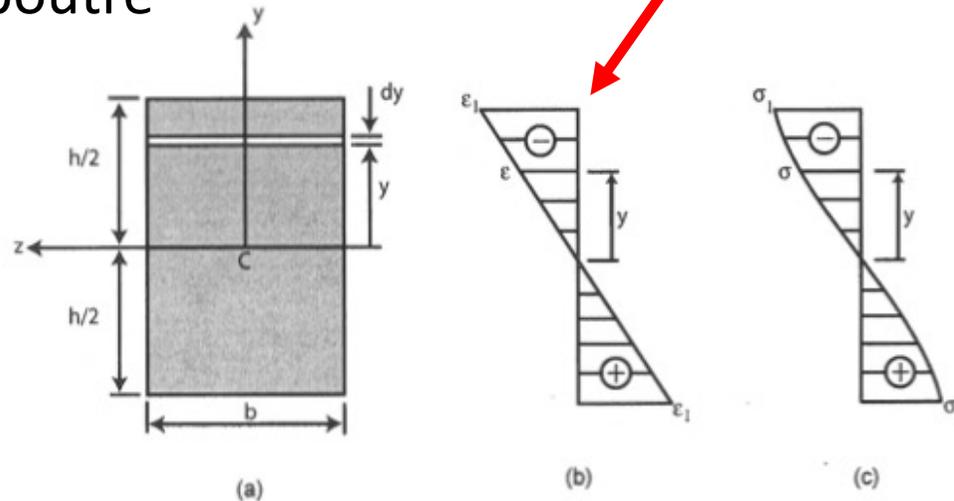
## L'essai de flexion – éléments d'analyse simple

### Théorie des poutres simplifiée (Euler-Bernoulli):

$y$  = distance de l'axe neutre;

$R$  = courbure locale de la poutre

$$\varepsilon_{xx} = \frac{y}{R}$$



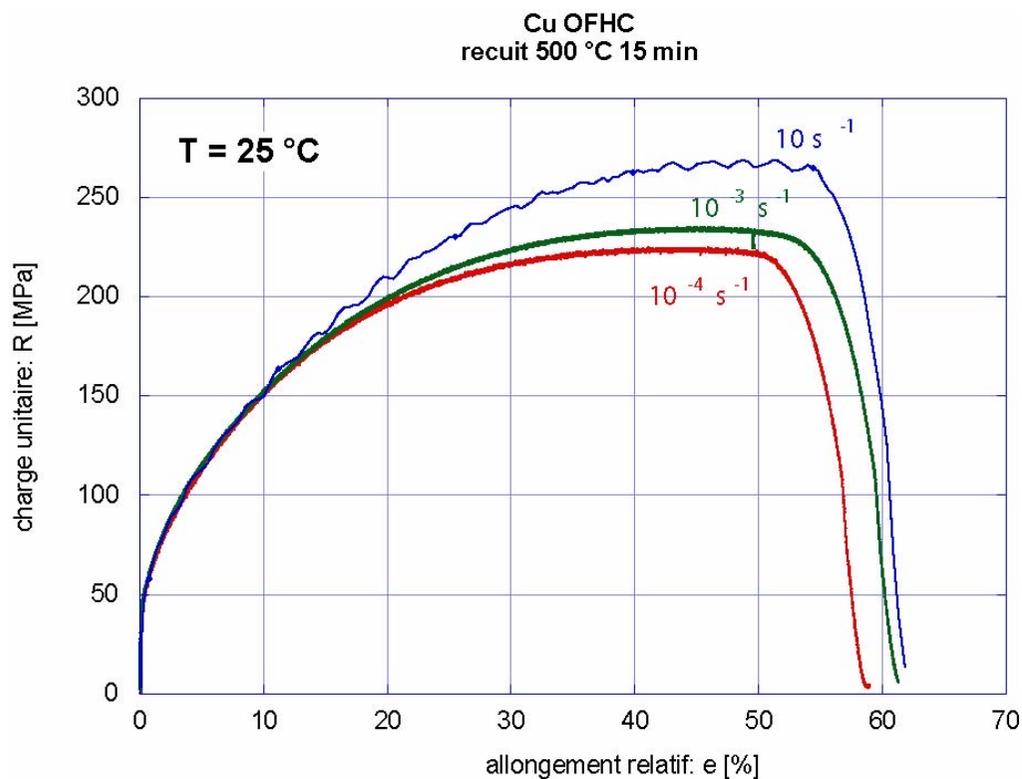
... prévoit qu'il y a une courbe  $\sigma$  vs.  $y$  identique, au facteur  $1/R$  découlant de  $\varepsilon = y/R$  près, à la courbe de traction/compression uniaxiale  $\sigma$ - $\varepsilon$ .

Par contre, déduire la courbe de traction des données (charge  $P$  vs. déflexion  $\delta$ ) d'un essai de flexion n'est pas si simple...

V – Quand la déformation dépend du temps

(= quand la température est “élevée”)

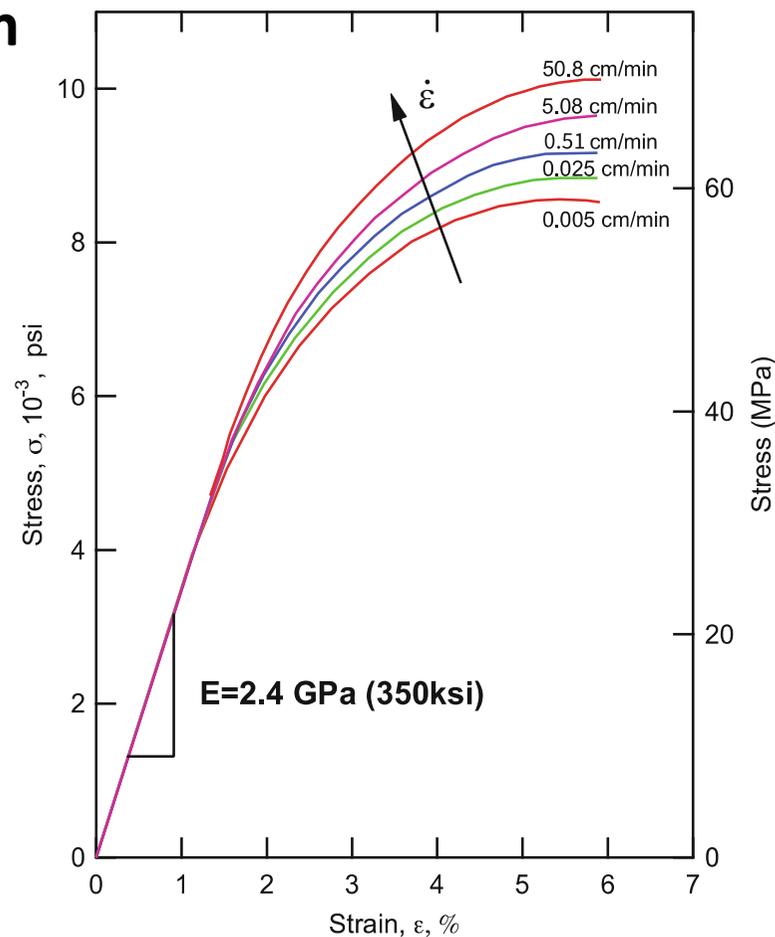
## Influence de la vitesse de déformation



Cuivre pur (OFHC) à température ambiante sur cinq ordres de grandeur de la vitesse de déformation  $de/dt$ . Nota : les variations sur la courbe à  $de/dt = 10 \text{ s}^{-1}$  sont dues à l'incertitude de mesure à cette vitesse élevée.

Courbe produite par Laurent Felberbaum, LMM, EPFL.

Chapitre 1 – Les essais mécaniques 52



**Fig. 3.8** Constant strain-rate behavior of a thermoplastic polymer (polycarbonate) (Data from Brinson 1973)

Source: H.F. Brinson & L.C. Brinson, Polymer Engineering Science and Viscoelasticity – An Introduction, 2<sup>nd</sup> Ed., Springer, 2015

## Utilisation de l'essai de traction:

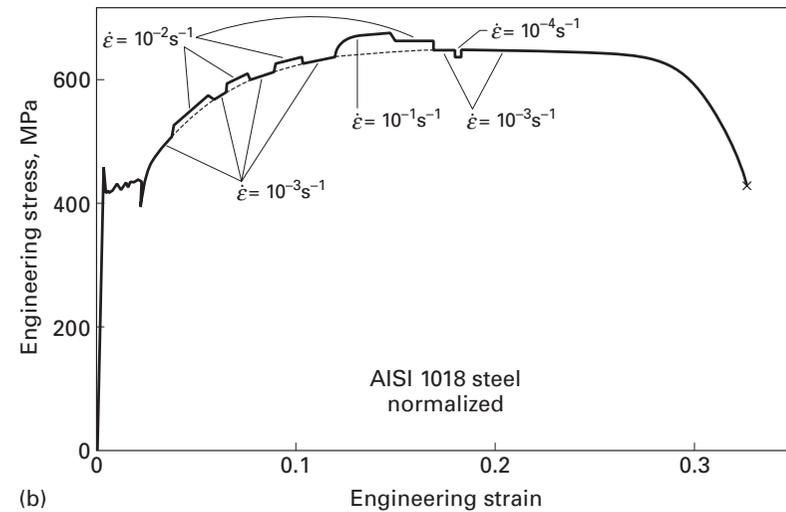
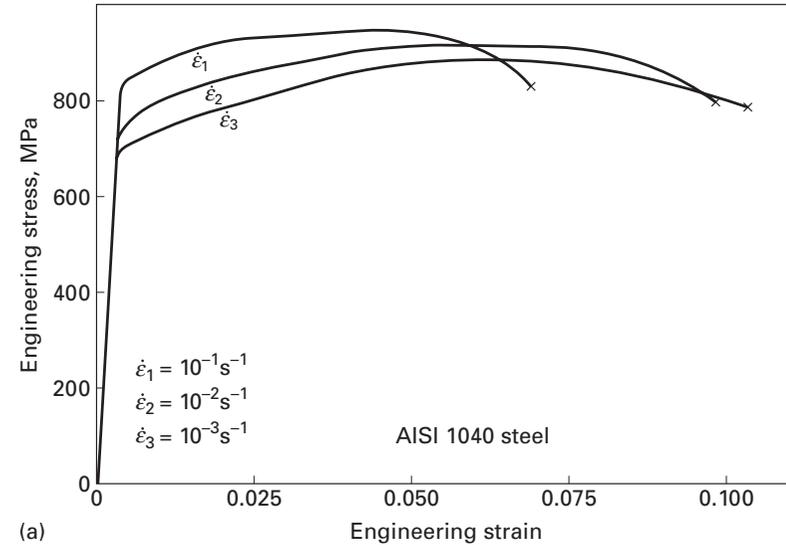
### L'essai de saute de vitesse de déformation ("strain-rate jump tests")

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m$$

$$m = \left. \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right|_{\epsilon, T}$$

$$m = \frac{\ln(\sigma_2/\sigma_1)}{\ln(\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1)}$$

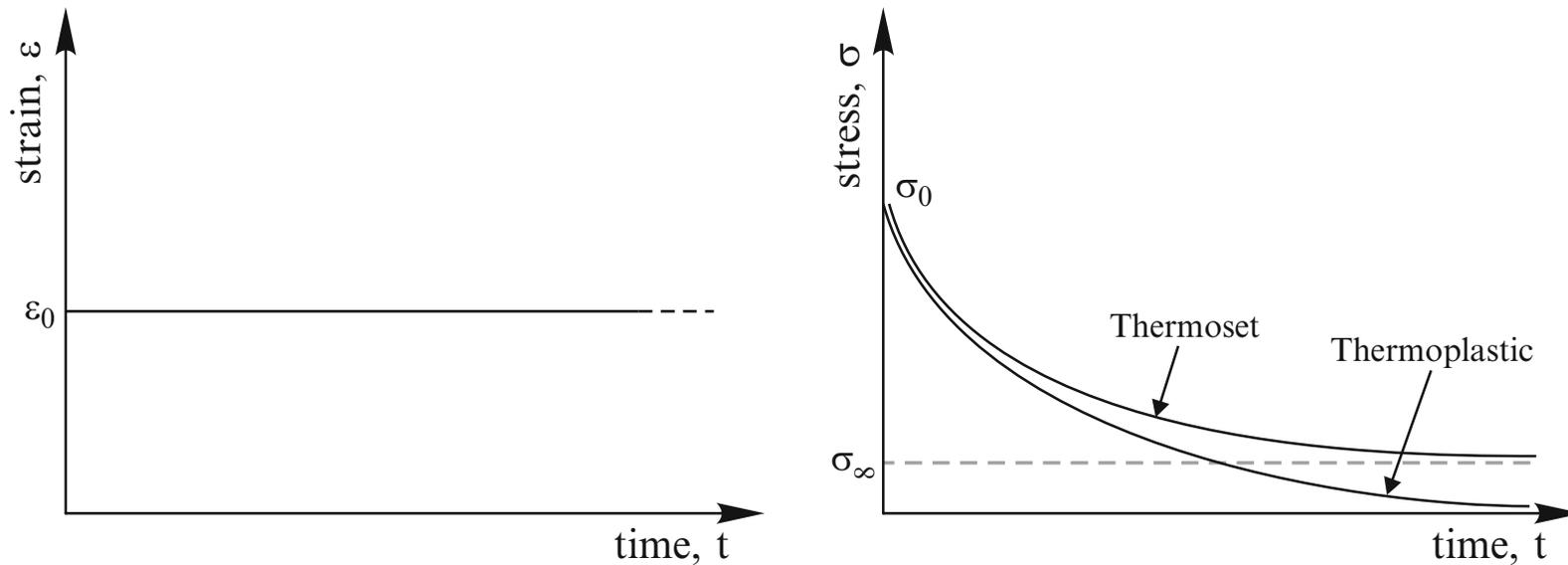
Source: M.A. Meyers and K.K. Chawla, Mechanical Behavior of Materials 2<sup>nd</sup> Ed., Cambridge University Press, 2009



**Fig. 3.12** (a) Effect of strain rate on the stress–strain curves for AISI 1040 steel. (b) Strain-rate changes during tensile test. Four strain rates are shown:  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ , and  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

## Utilisation de l'essai de traction: L'essai de relaxation ("relaxation testing")

### (i) déformation instantanée



**Fig. 3.12** Relaxation test: strain input (*left*) and qualitative stress output (*right*)

**EPFL** *Utilisation de l'essai de traction: L'essai de relaxation ("relaxation testing") (ii) pendant l'essai de traction*

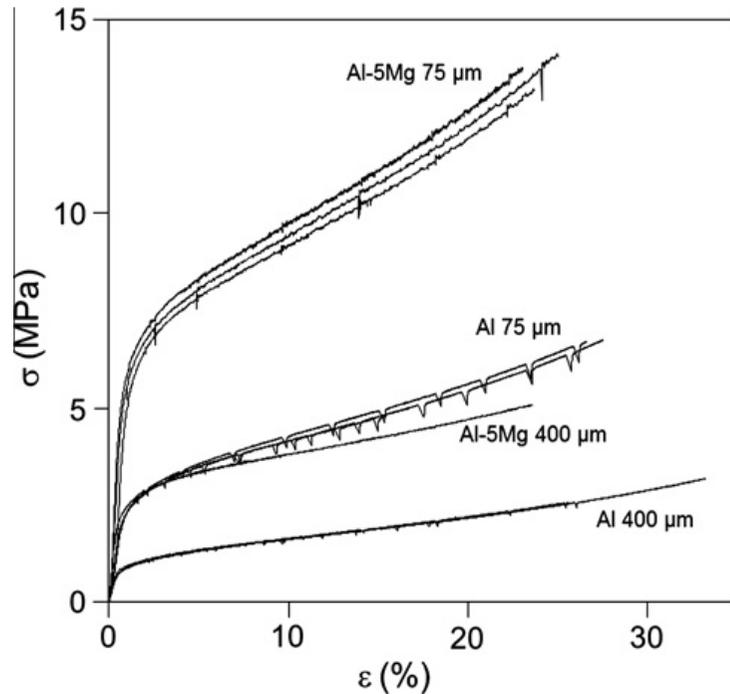


Fig. 3. (a) Engineering stress–strain compression curves of the 99.99% aluminium and Al–5 wt.% Mg foam of pore size 400 and 75  $\mu\text{m}$ . Major marks along the curves correspond to the points where repeated relaxation tests were carried out.

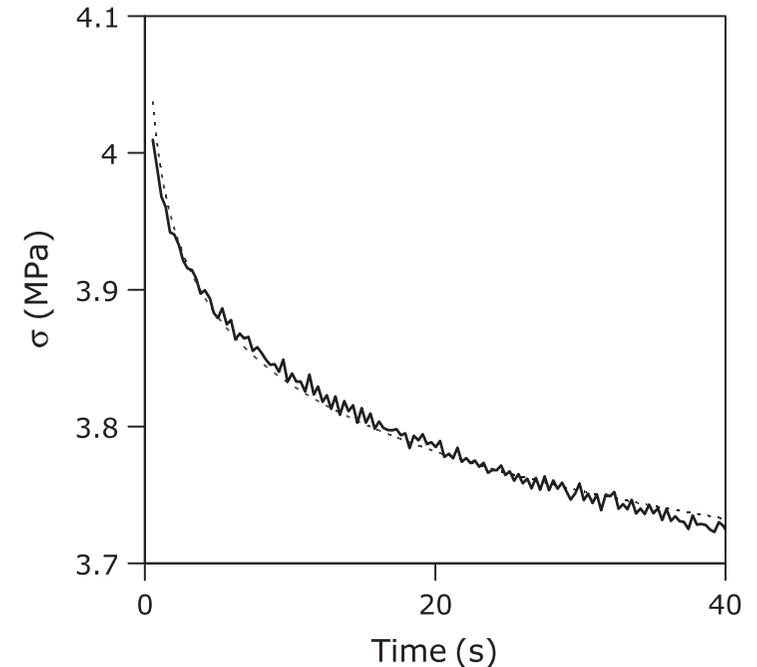


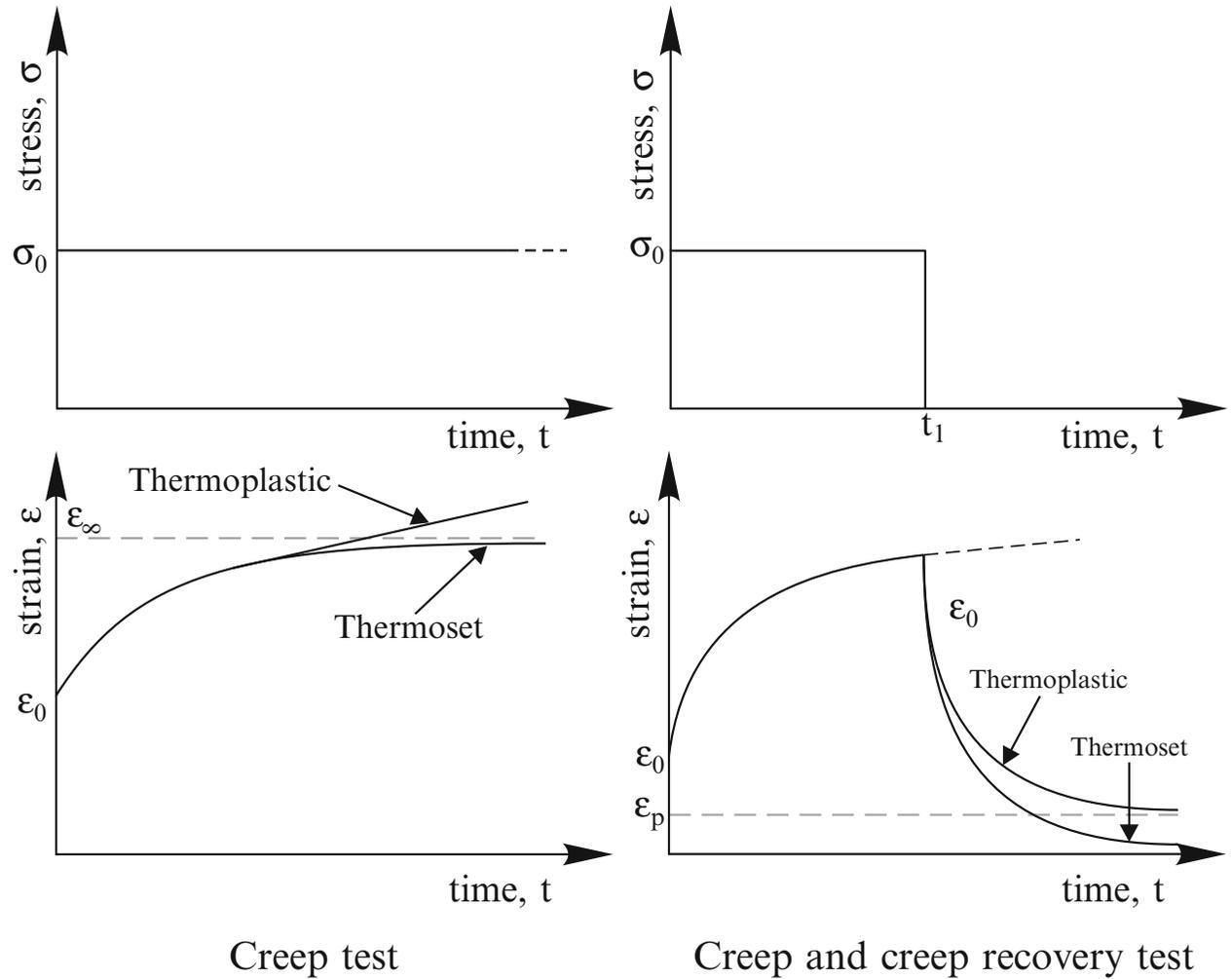
Fig. 4. A representative relaxation curve extracted from a series of repeated relaxation of 75  $\mu\text{m}$  aluminium foam, correctly fitted with Eq. (4) (dotted line).

**L'essai de fluage ("creep test");**

où la charge, ou parfois la contrainte (au lieu de la vitesse de déformation), est constante.

Illustré ici pour les polymères:

Source: H.F. Brinson & L.C. Brinson, Polymer Engineering Science and Viscoelasticity – An Introduction, 2<sup>nd</sup> Ed., Springer, 2015



**Fig. 3.13** Creep and creep recovery tests: stress input (*above*) and qualitative material strain response (*below*)

**EPFL** Le fluage (creep):

déformation des métaux et des céramiques à  $T > \frac{1}{2} T_m$  (K)



# L'essai de fluage ("creep test")

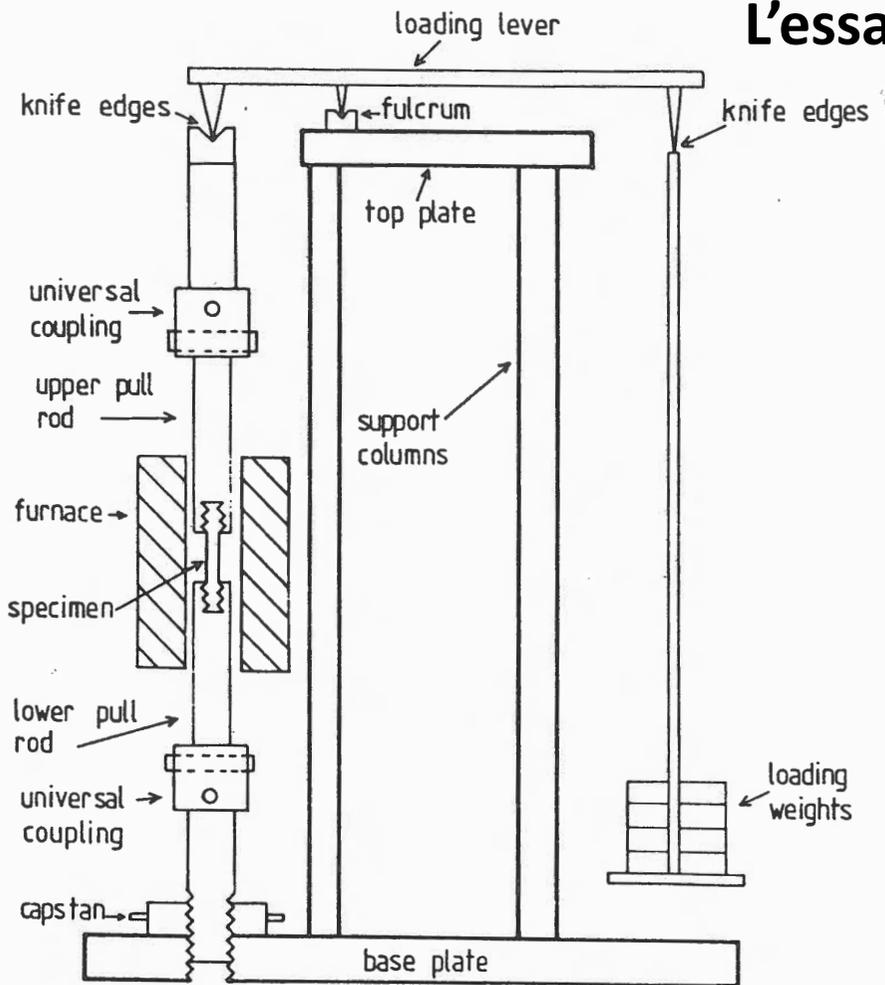


Figure 2.2 Schematic illustration of the loading system for a single top-lever machine.

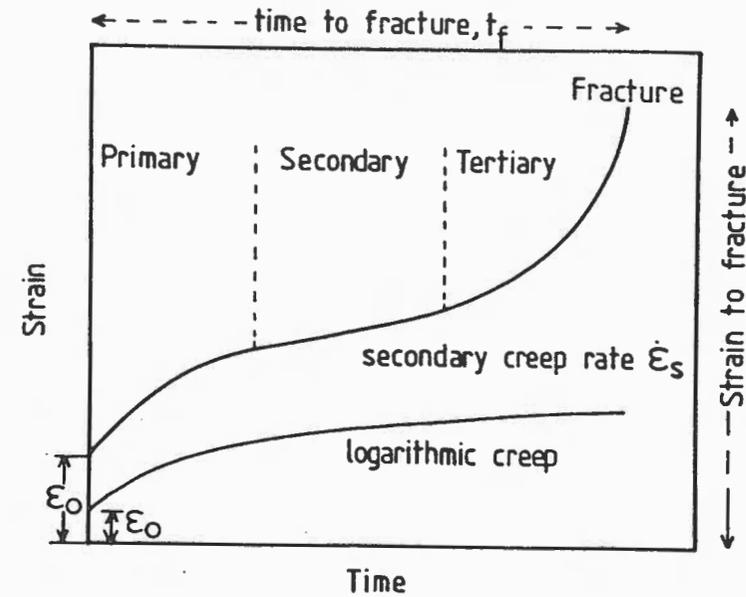


Figure 1.1 Schematic representation of the strain/time curves recorded when logarithmic behaviour is observed at low temperatures and when normal creep curves are displayed at temperatures above  $\sim 0.4T_m$ .

# L'essai de fluage ("creep test")

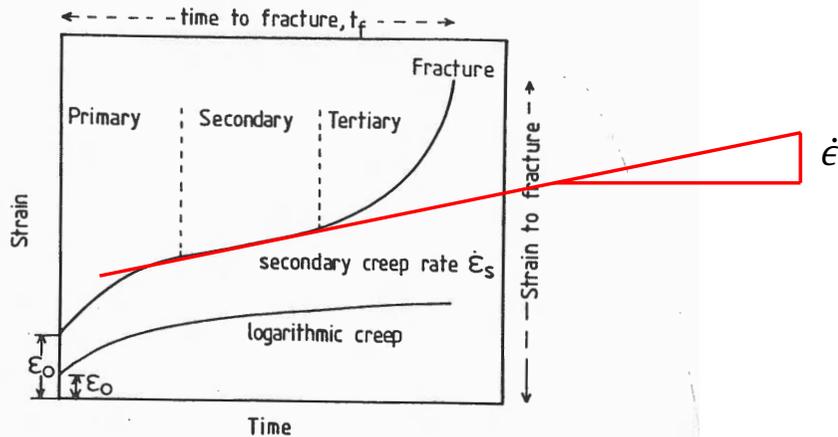


Figure 1.1 Schematic representation of the strain/time curves recorded when logarithmic behaviour is observed at low temperatures and when normal creep curves are displayed at temperatures above  $\sim 0.4T_m$

Source: R.W. Evans & B. Wilshire, *Creep of Metals and Alloys*, The Institute of Metals, London, 1985, Chapitre 2

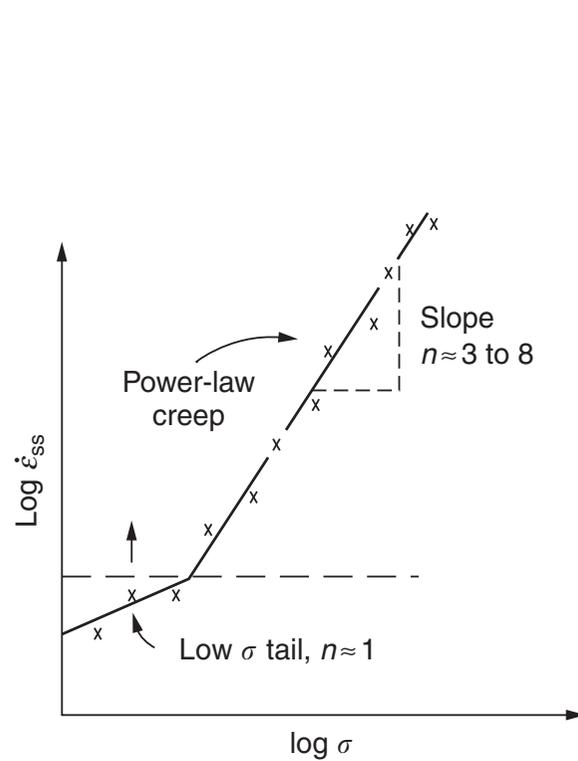
En régime stationnaire on a souvent la loi:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = A \sigma^N e^{\frac{-Q}{RT}};$$

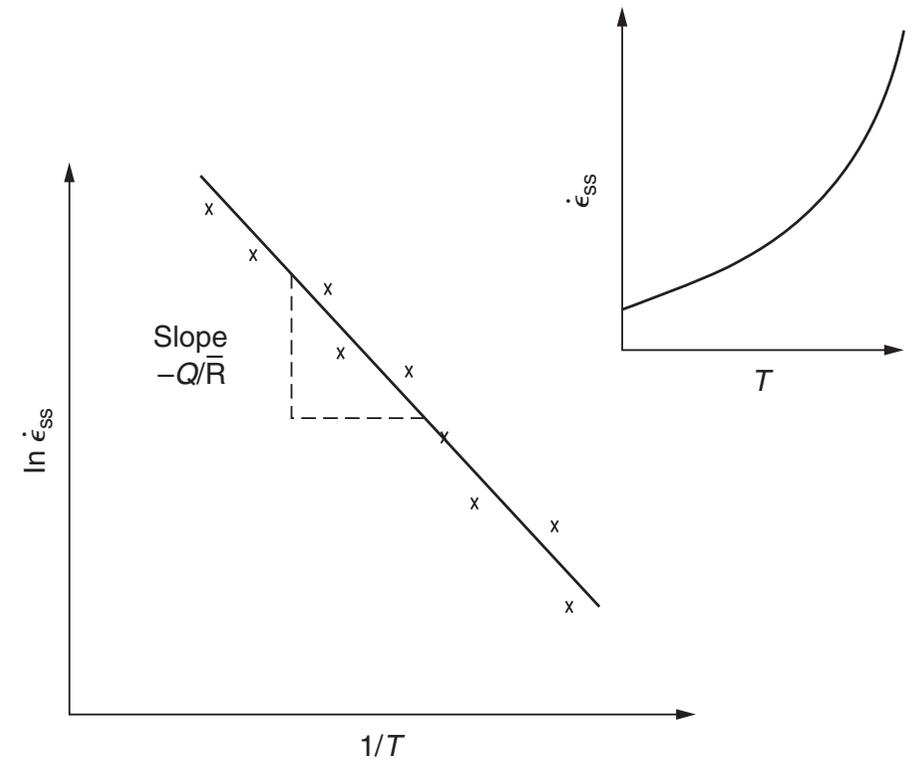
$N$  est généralement entre 1 et 10, et est souvent égal à 5 s'il s'agit de fluage lié au mouvement de dislocations;

$Q$  donné par la loi d'Arrhenius correspond souvent à l'énergie d'activation de l'auto-diffusion, d'ordre de grandeur  $10^5 \text{ J mol}^{-1}$

## L'essai de fluage ("creep test")

**FIGURE 20.6**

Variation of creep rate with stress.

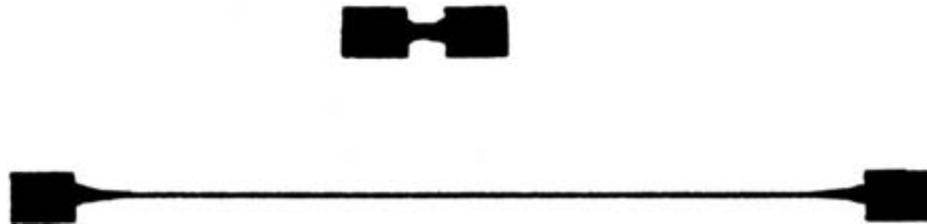
**FIGURE 20.7**

Variation of creep rate with temperature.

Si augmenter la vitesse de déformation durcit le matériau\*, il devient bien plus résistant à la striction; l'effet peut être spectaculaire

(\* correspondant à  $m$  élevé dans  $\sigma = K \dot{\epsilon}^m$  )

**Fig. 13.37** Superplastic tensile deformation in Pb-62% Sn eutectic alloy tested at 415 K and a strain rate of  $1.33 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ; total strain of 48.5. (From M. M. I. Ahmed and T. G. Langdon, *Met. Trans. A*, 8 (1977) 1832.)

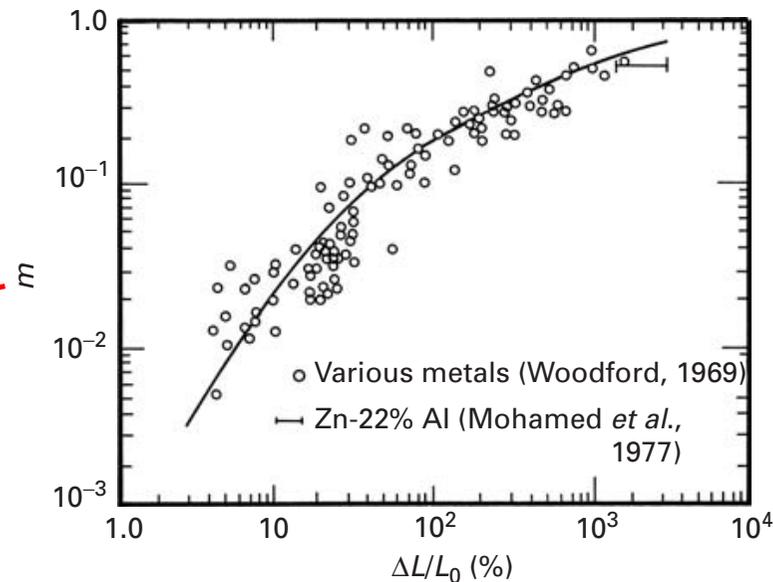


Si augmenter la vitesse de déformation durcit le matériau, il devient bien plus résistant à la striction; l'effet peut être spectaculaire

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m$$

où  $m$  est l'exposant lié à la vitesse de déformation "strain rate exponent".

(notez que  $m = 1/N$  avec  $N =$  exposant de la vitesse de fluage; voir diapo 60)



**Fig. 13.41** Effect of strain-rate sensitivity  $m$  on maximum tensile elongation for different alloys (Fe, Mg, Pu, Pb-Sr, Ti, Zn, Zr based). (From D. M. R. Taplin, G. L. Dunlop, and T. G. Langdon, *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 9 (1979) 151.)

## Cas extrême: le fluide visqueux Newtonien

Si  $m = 1$ ,

$$\sigma = K \dot{\varepsilon}$$

et on a (par définition) un fluide visqueux newtonien.

On n'observe alors tout simplement pas la striction - exemples: verre, caramel, ..

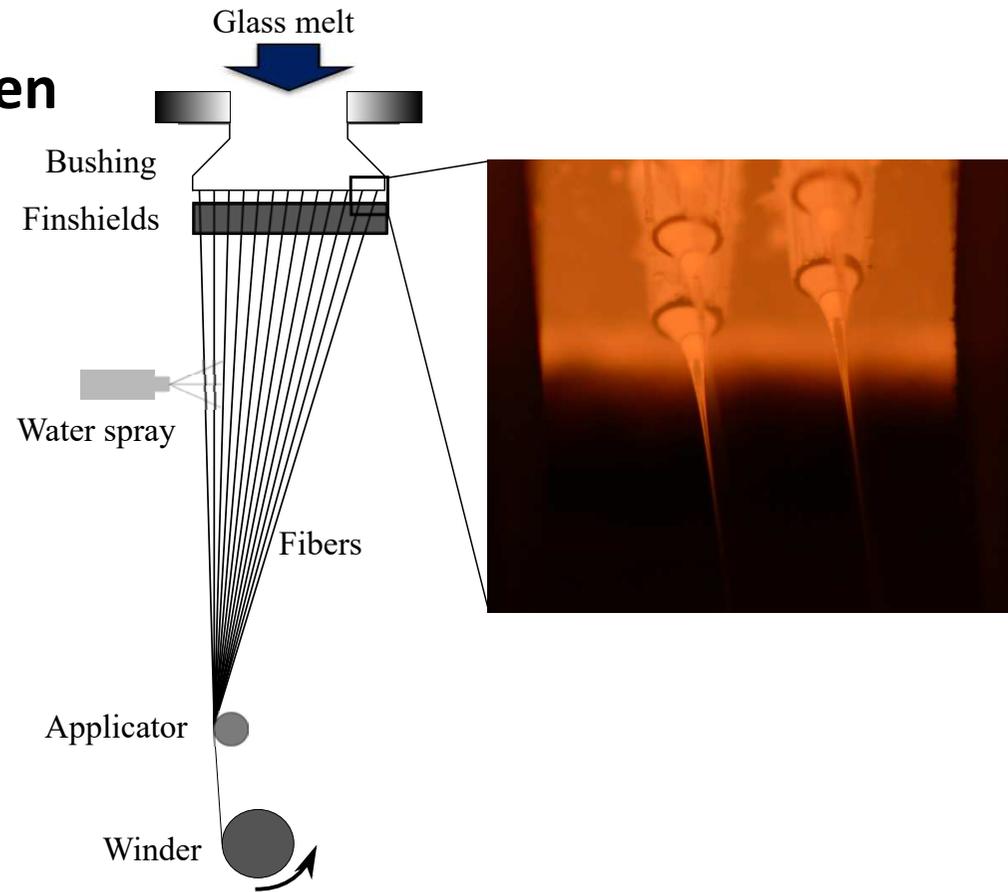


Figure 1.4: Overall schematic view of a bushing position (left) and detailed view of four tips and the corresponding forming fibers (right).

## VII – Les essais de rupture

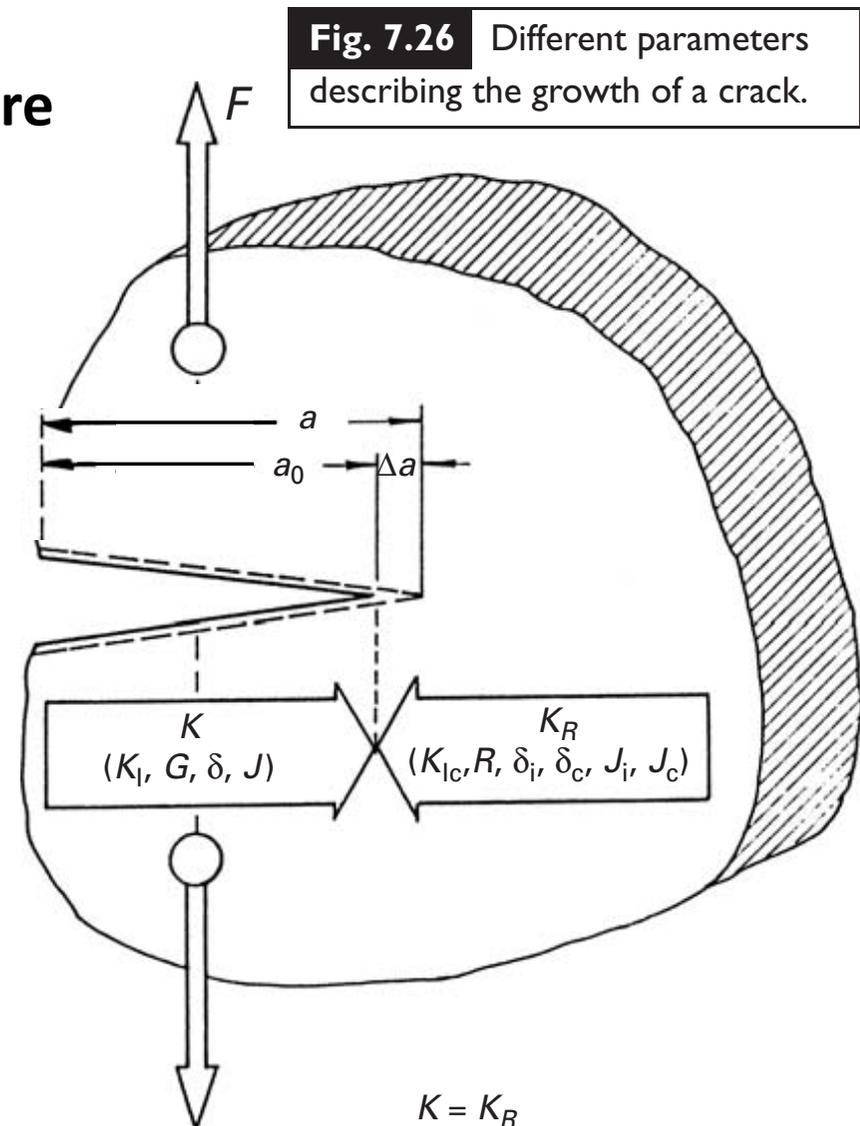
- la fracture
- l'impact
- la déformabilité
- la fatigue

## Notion de base: la mécanique de la rupture

La *mécanique de la rupture*  
(«*fracture mechanics*»)  
est la mécanique des corps fissurés;

elle présuppose la présence d'une fissure dans un solide, et cherche à en prévoir le comportement en présence d'une contrainte (statique, dynamique, variable, interne, ...).

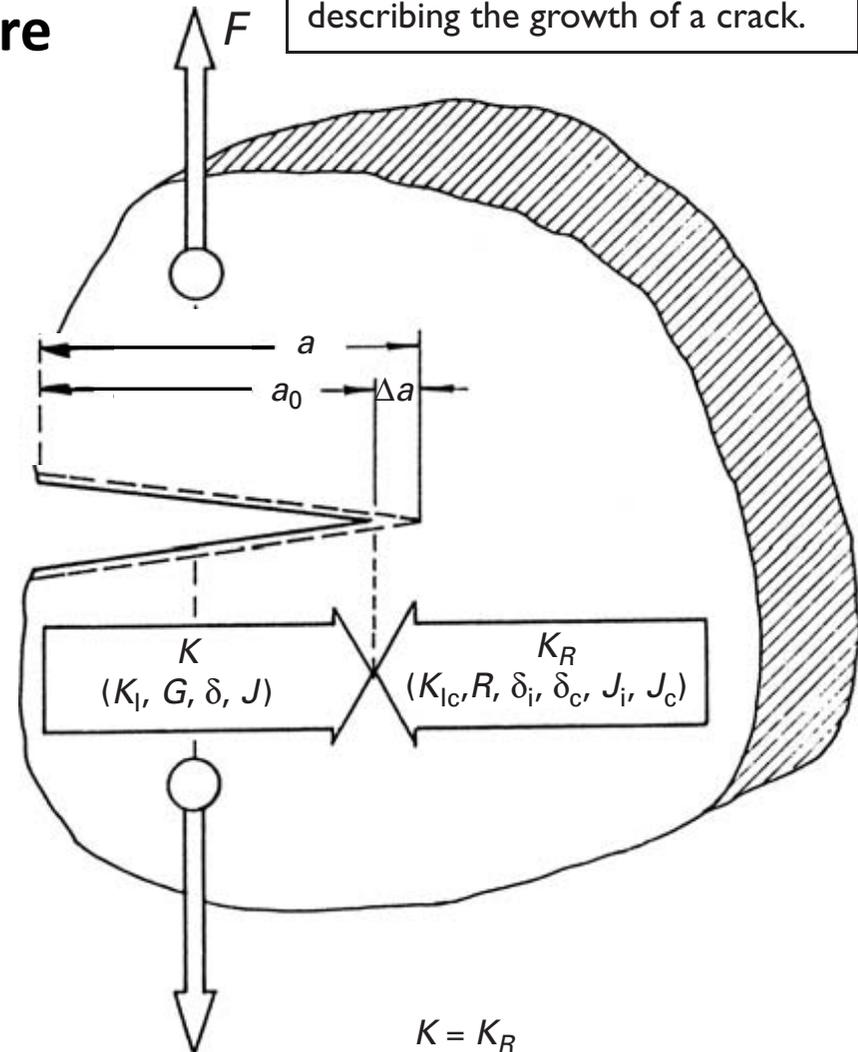
On utilise deux paramètres fondamentaux, liés à deux approches différentes de la question. Ces paramètres partent d'un point de vue différent – pour ensuite se rejoindre.



## Notion de base: la mécanique de la rupture

Le premier paramètre mesurant la résistance à la fracture est **l'énergie de fissuration:  $R$ , ou  $G_c$** , en  $\text{J/m}^2$ . C'est l'énergie qu'il faut fournir pour créer un mètre carré de fissure dans le solide.

**Fig. 7.26** Different parameters describing the growth of a crack.



## Notion de base: la mécanique de la rupture

### Analyse énergétique de la rupture:

le solide va se fissurer si l'avancée d'une fissure libère plus d'énergie (élastique emmagasinée ou sous forme de travail des charges appliquées) qu'il n'en coûte pour agrandir la fissure.

On montre que cela a lieu si :

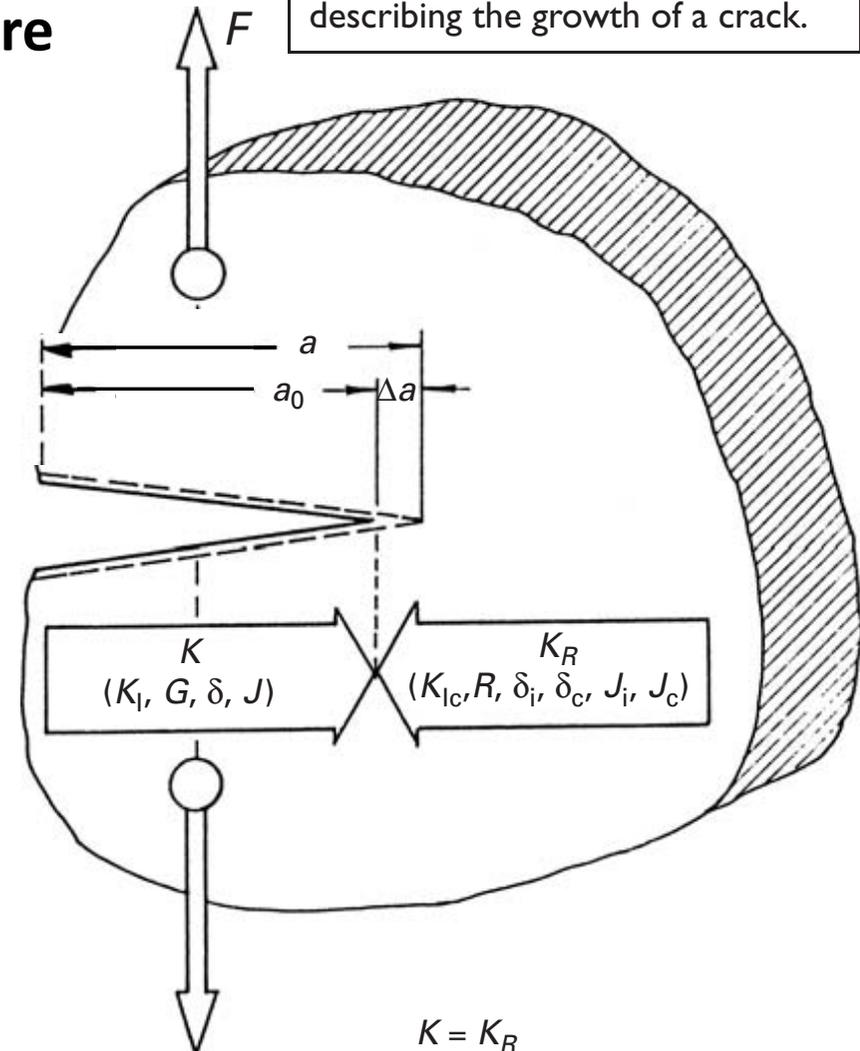
$$G \equiv \frac{\pi F \sigma^2 a}{E} = R$$

où  $F$  est fonction de la géométrie de la pièce fissurée,  $a$  est la longueur de la fissure,  $E$  le module d'Young,  $G$  est la force motrice d'avancée de la fissure.

$R$ , souvent aussi appelée  $G$  critique ( $G_c$ ), est l'énergie requise pour créer la fissure en  $J/m^2$ .

**La fissuration a lieu quand  $G = G_c$**

**Fig. 7.26** Different parameters describing the growth of a crack.



## Notion de base: la mécanique de la rupture

Le second paramètre est la **valeur critique du facteur d'intensité de contrainte** à la pointe de la fissure,  $K_c$  mesuré en  $\text{MPa m}^{1/2}$ . Celui-ci caractérise, dans un solide isotrope élastique linéaire, le champ de contraintes au voisinage d'une pointe de fissure, lequel a la forme:

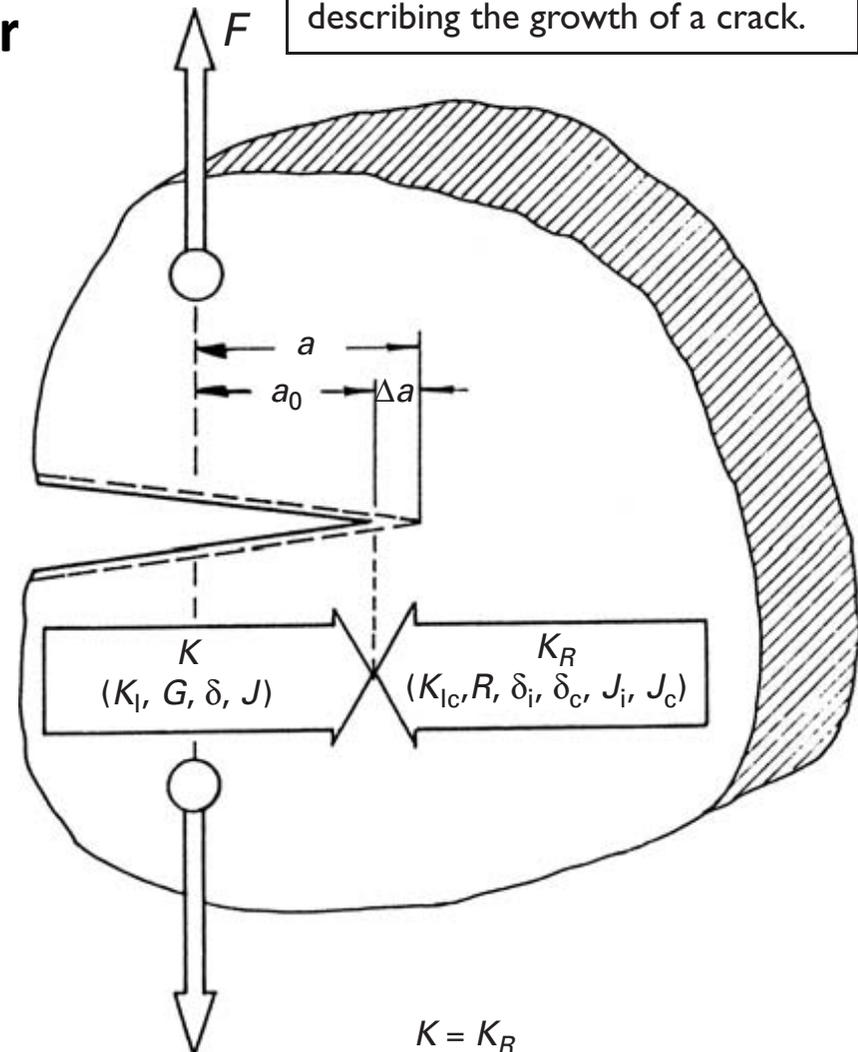
$$\sigma_{r\theta} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta),$$

où  $K$  est lié au champ de contrainte appliquée par

$$K = \sigma Y \sqrt{\pi a}$$

**La fissuration a lieu quand  $K = K_c$**

**Fig. 7.26** Different parameters describing the growth of a crack.



## Notion de base: la mécanique de la rupture

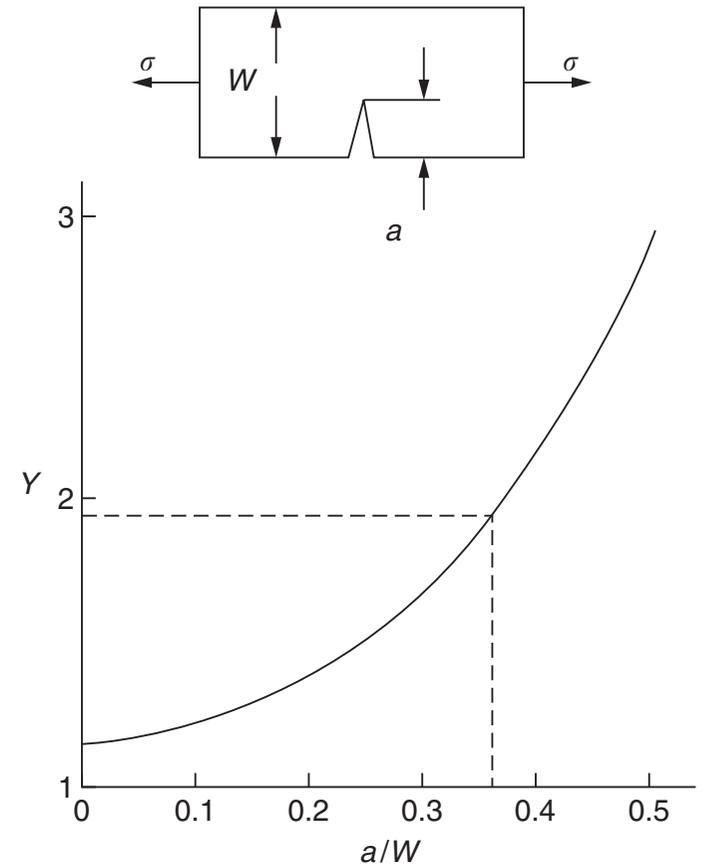
La propension à la rupture est ainsi mesurée par ce **facteur d'intensité de contraintes** (en pointe de fissure):

$$K = \sigma Y \sqrt{\pi a}$$

où  $Y$  est fonction de la géométrie et donc (parfois faiblement mais quand même) fonction aussi de  $a$ .

$Y = 1$  pour une fissure interne de demi-longueur  $a$  dont le plan est normal à la contrainte appliquée  $\sigma$  au sein d'une plaque infinie.  $Y = 1.12$  pour une fissure émergente dont le plan est normal à la contrainte appliquée  $\sigma$  au sein d'une au bord d'une plaque semi-infinie. Pour une telle fissure dans une plaque finie la valeur de  $Y$  est dans le schéma ci-contre.

En général,  $Y(a)$  est calculé au cas par cas, et est donné pour toute une série de géométries par des interpolations ou des tableaux (exemple simple à droite).



**FIGURE 16.3**

$Y$  value for the crack (dimensions in mm).

## Notion de base: la mécanique de la rupture

Les deux critères se rejoignent, avec :

$$G_c = A \frac{K_c^2}{E}$$

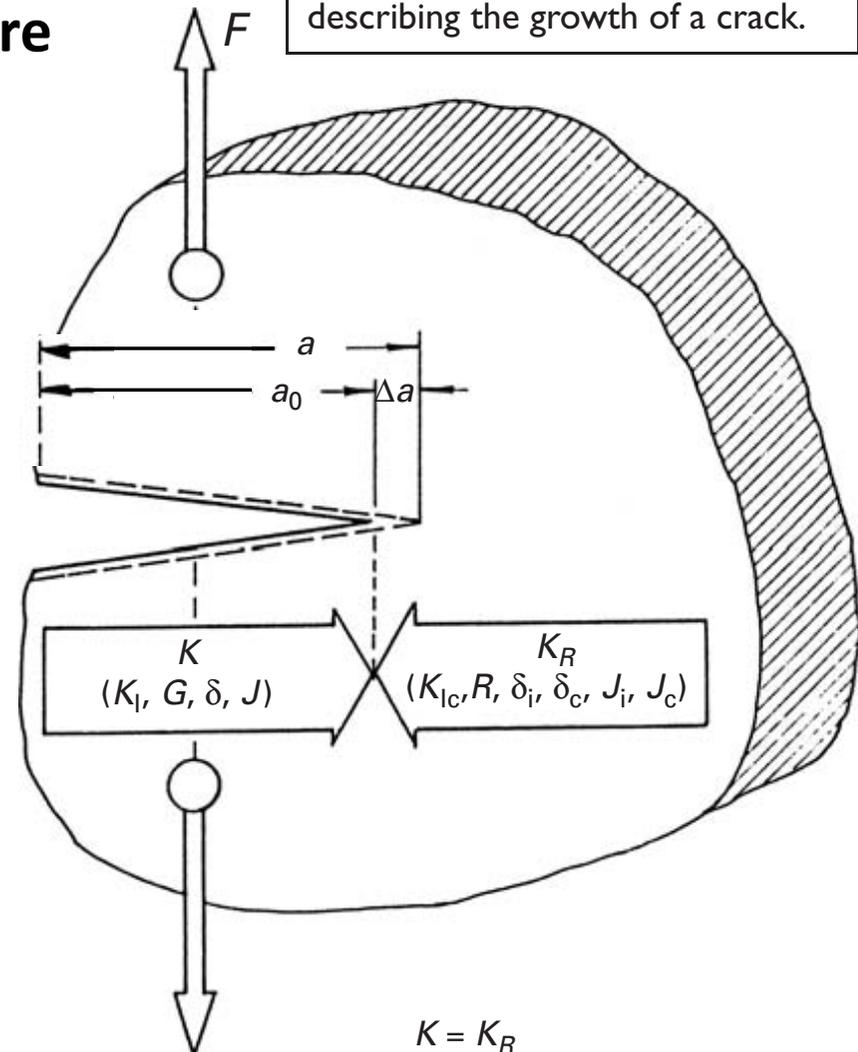
où  $A$  est un facteur dépendant de la géométrie de la pièce.

En général, bien que  $G$  ait un sens physique clair (c'est ce qui «pousse» la fissure en avant), en mécanique de la rupture on raisonne d'habitude en terme du **facteur d'intensité de contrainte**

$$K = \sigma Y \sqrt{\pi a}$$

car  $K$  est proportionnel à la contrainte appliquée  $\sigma$ . La ténacité est donc le plus souvent rapportée en terme de  $K_c$  plutôt que  $G_c$ .

**Fig. 7.26** Different parameters describing the growth of a crack.



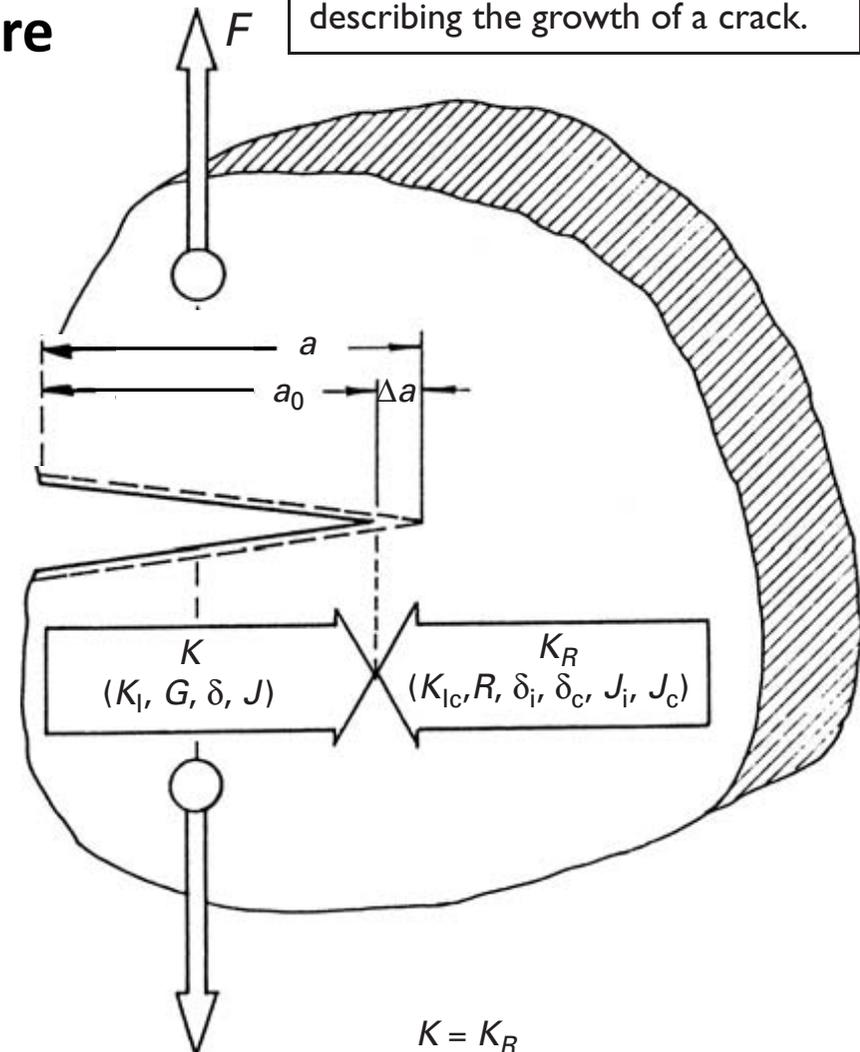
## Notion de base: la mécanique de la rupture

Un point important qu'il faudra garder à l'esprit est celui-ci:

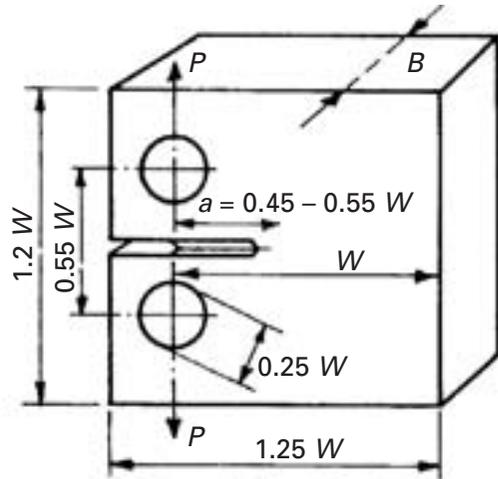
comme  $K = \sigma Y \sqrt{\pi a}$ , plus la fissure est longue (= plus  $a$  est grand), plus elle satisfera le critère de rupture. Donc sauf circonstances spéciales (par exemple une diminution de la contrainte avec l'avancée de la fissure), une fois la propagation d'une fissure amorcée, celle-ci ne va pas cesser: la pièce va dès lors être subitement coupée en deux.

**En général, donc,  $K = K_c$  signe la rupture catastrophique de la pièce.**

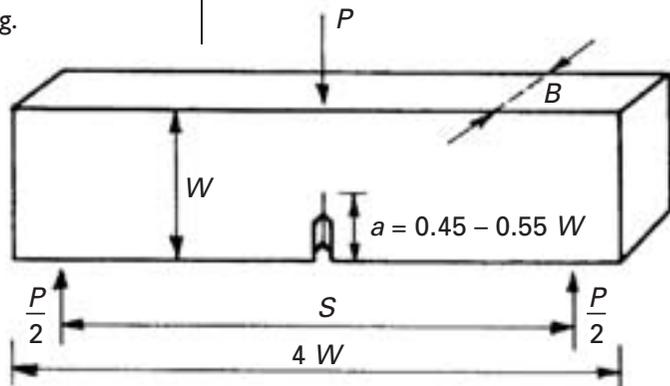
**Fig. 7.26** Different parameters describing the growth of a crack.



# L'essai de fracture ("fracture toughness test")

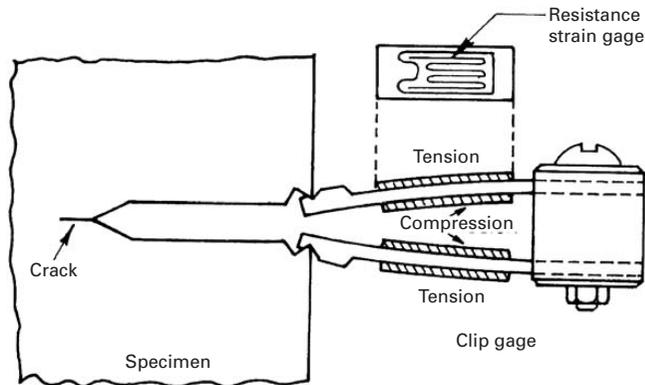


(a)

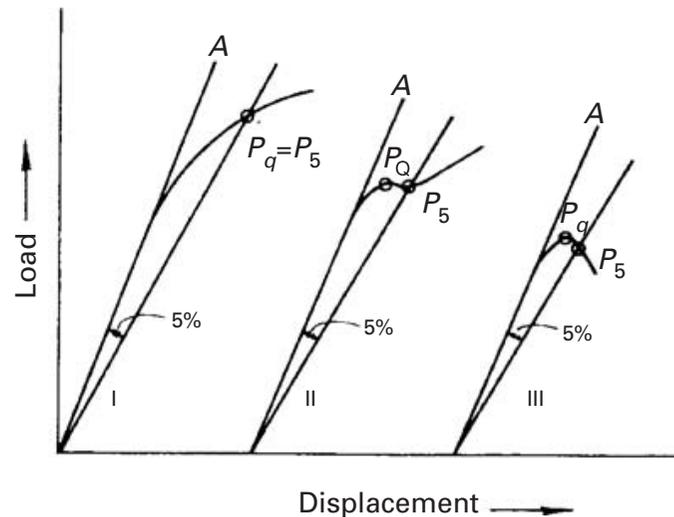


(b)

**Fig. 9.8** Typical ASTM standard plane-strain fracture toughness test specimens. (a) Compact tension. (b) Bending.



**Fig. 9.11** Assembly for measuring displacement in a notched specimen.

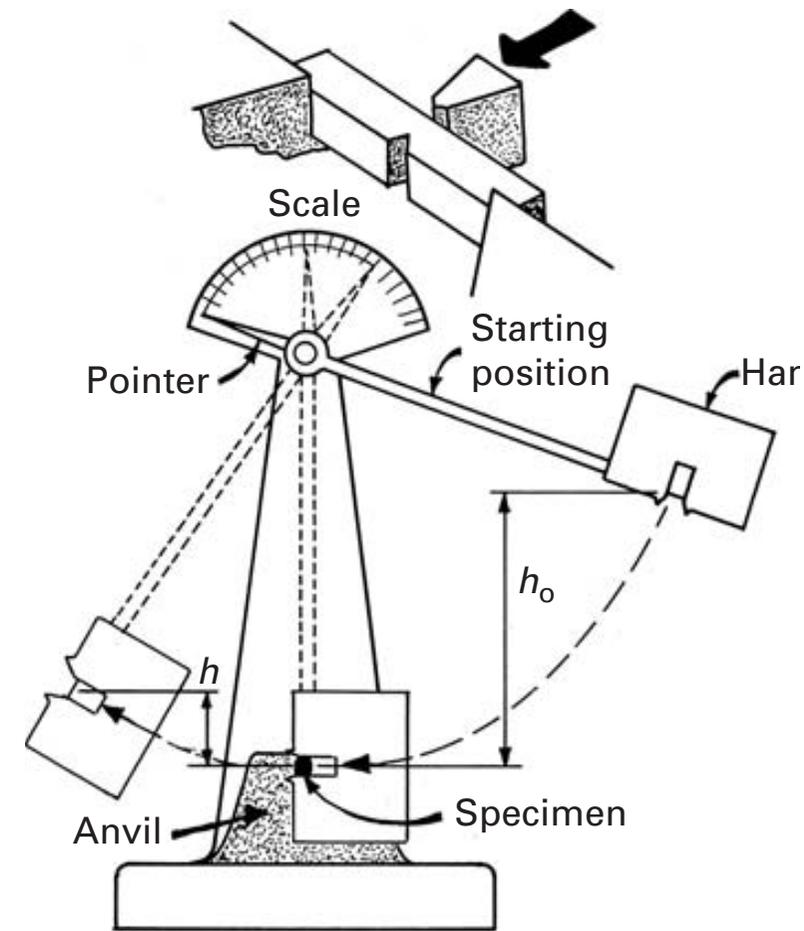
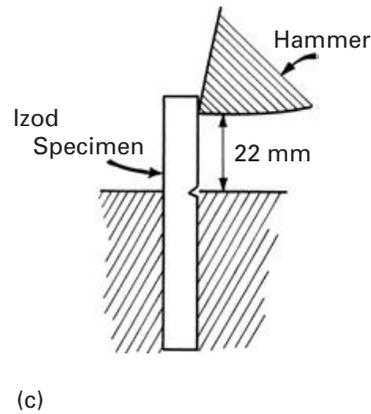
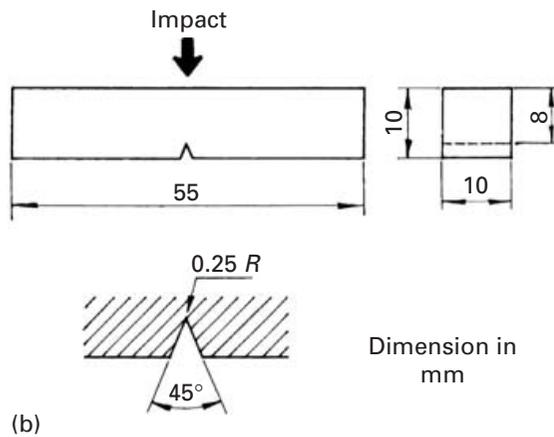


**Fig. 9.12** Procedure used for measuring the conditional value  $K_Q$ .

# L'essai d'impact Charpy (et apparentés: Izod, ...)

Source: M.A. Meyers and K.K. Chawla, Mechanical Behavior of Materials 2<sup>nd</sup> Ed., Cambridge University Press, 2009

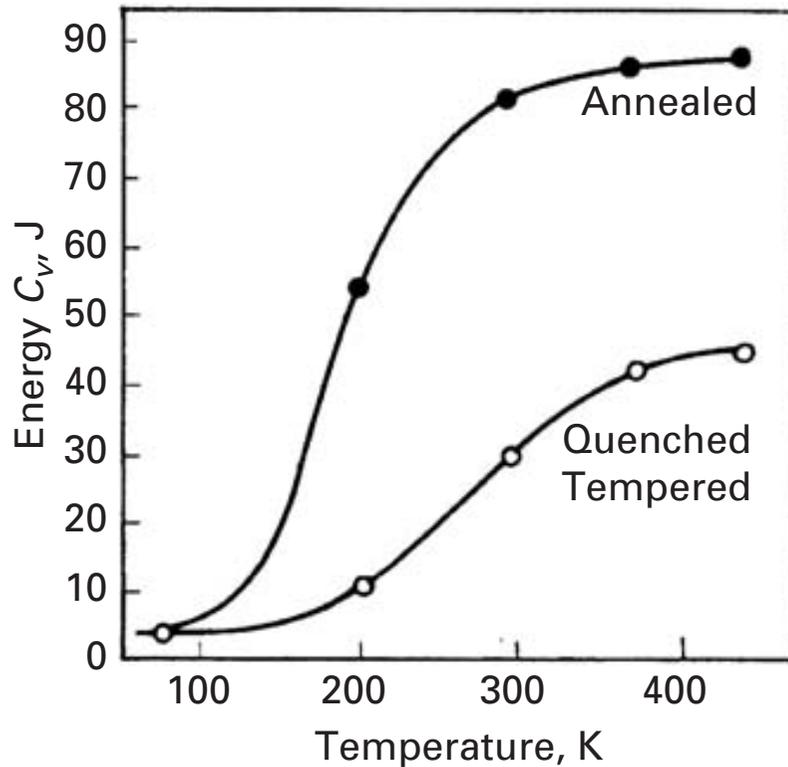
**Fig. 9.1** (a) Charpy impact testing machine. (b) Charpy impact test specimen. (c) Izod impact test specimen.



Une vidéo illustrative

<https://www.youtube.com/watch?v=tpGhqQvftAo>

## L'essai d'impact Charpy (et apparentés: Izod, ...)

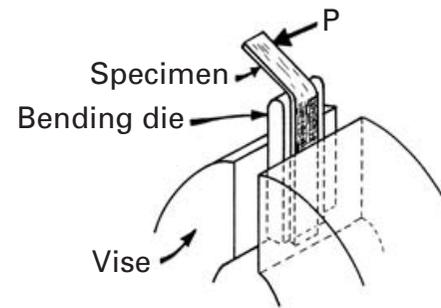


**Fig. 9.2** Energy absorbed versus temperature for a steel in annealed and in quenched and tempered states. (Adapted with permission from J. C. Miguez Suarez and K. K. Chawla, *Metalurgia-ABM*, 34 (1978) 825.)

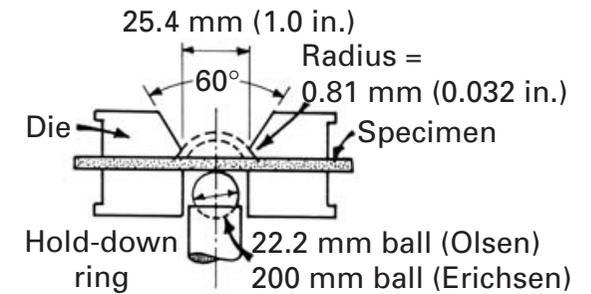
Illustration vidéo :

<https://www.youtube.com/watch?v=tpGhqQvftAo>

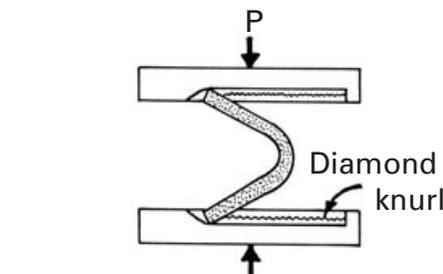
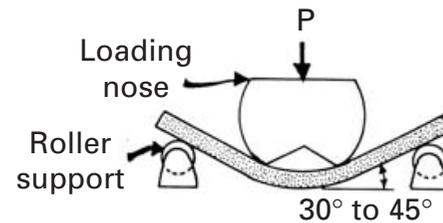
# Les essais de formabilité ("formability tests")



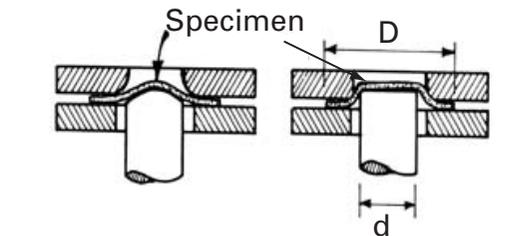
(a)



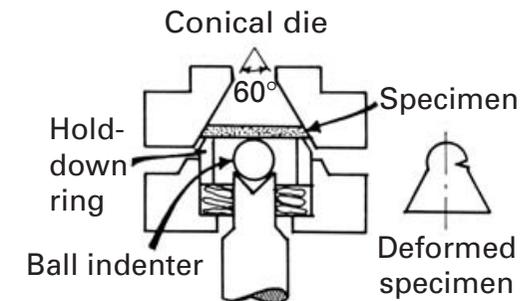
(c)



(b)



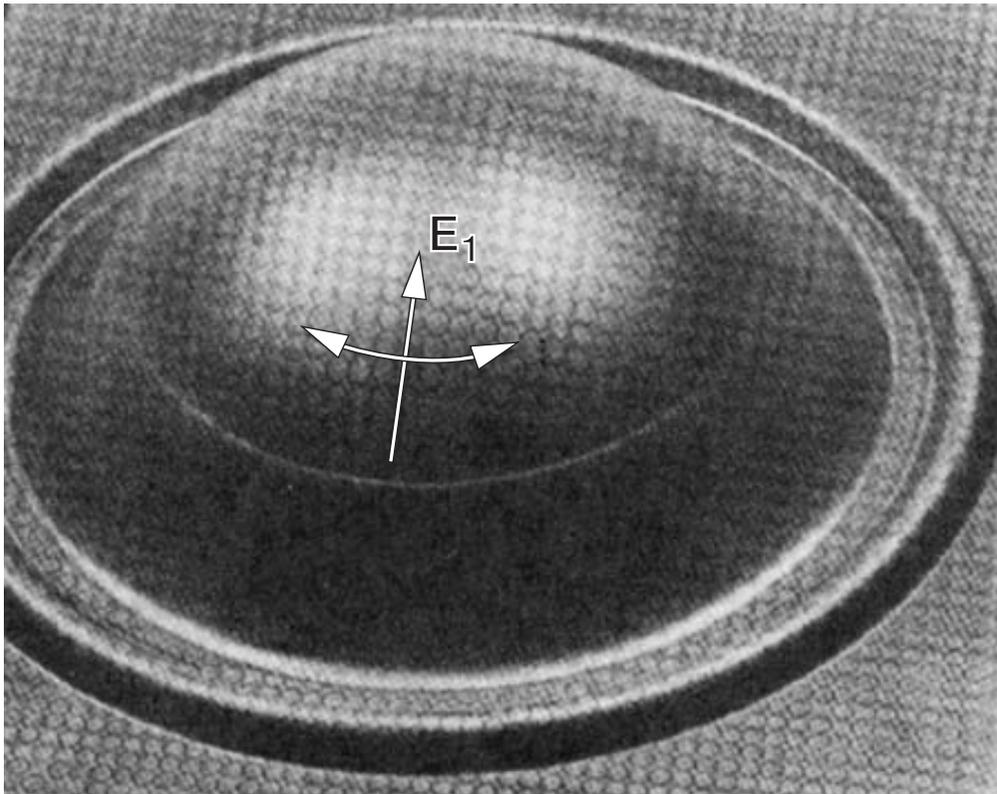
(d)



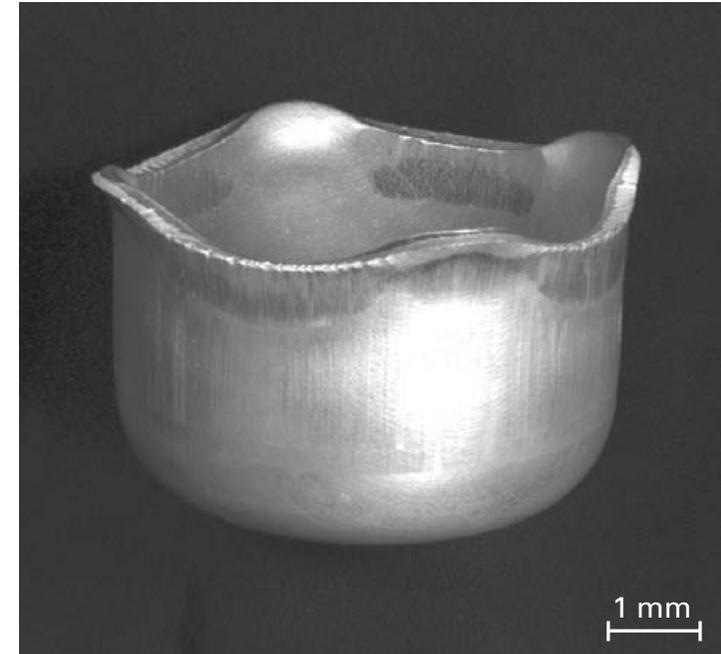
(e)

**Fig. 3.44** Simple formability tests for sheets. (a) Simple bending test. (b) Free-bending test. (c) Olsen or Ericksen cup test. (d) Swift cup test. (e) Fukui conical cup test.

## Les essais de formabilité ("formability tests")



**Fig. 3.47** Sheet specimen subjected to punch–stretch test until necking; necking can be seen by the clear line. (Courtesy of S. S. Hecker.)

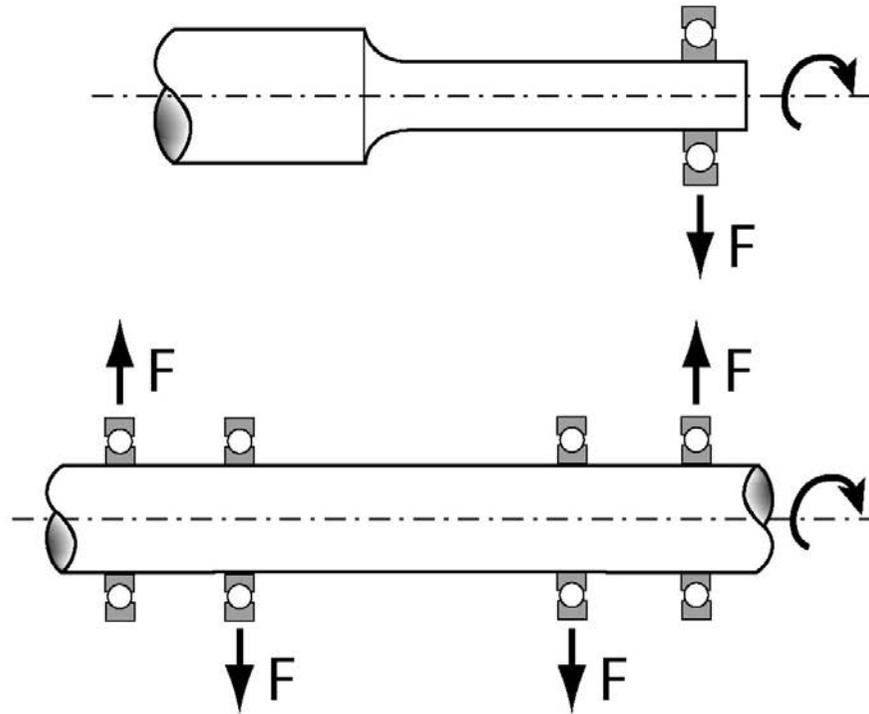


**Fig. 3.45** "Ears" formed in deep-drawn cups due to in-plane anisotropy. (Courtesy of Alcoa, Inc.)

Vidéo illustrant le procédé d'emboutissage (deep drawing):

<https://www.youtube.com/watch?v=2KZRQSI8GkQ>

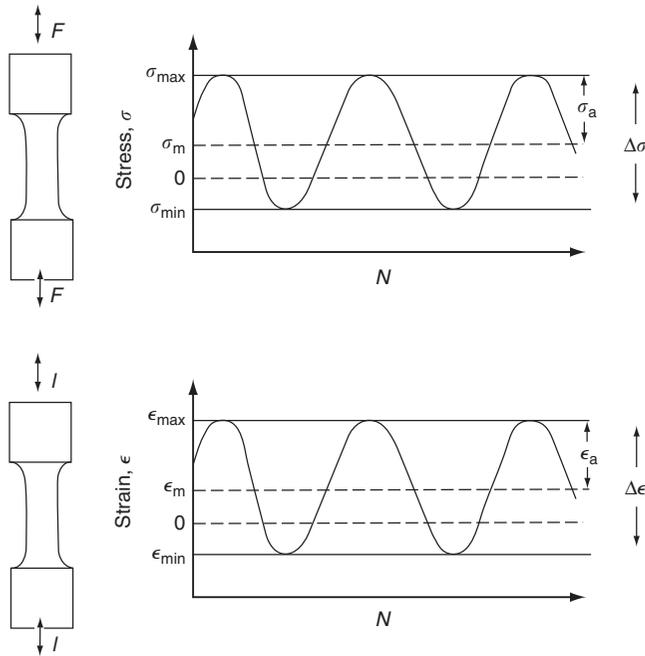
Echantillons d'essai  
de fatigue



Une vidéo illustrative

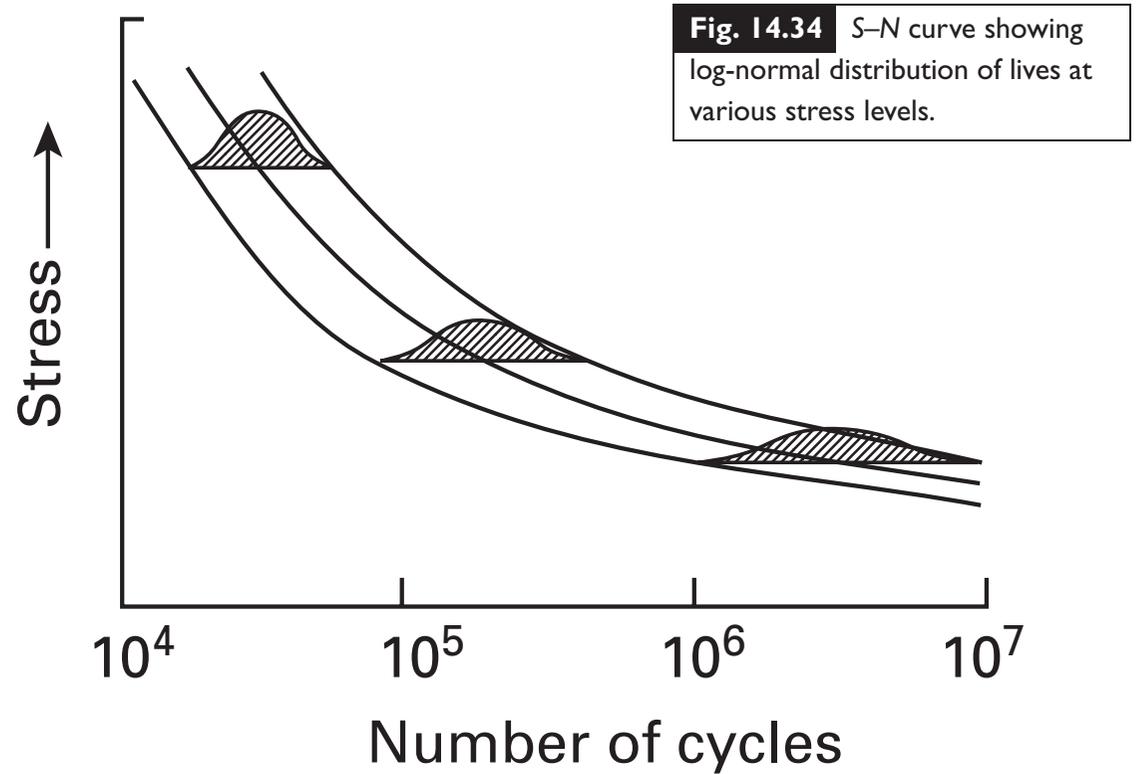
[https://www.youtube.com/watch?v=LhUclxBUV\\_E](https://www.youtube.com/watch?v=LhUclxBUV_E)

**Les essais de fatigue** – 2 types: (i) à échantillon lisse: on rapporte le nombre de cycles à rupture. Attention: les résultats sont statistiques !



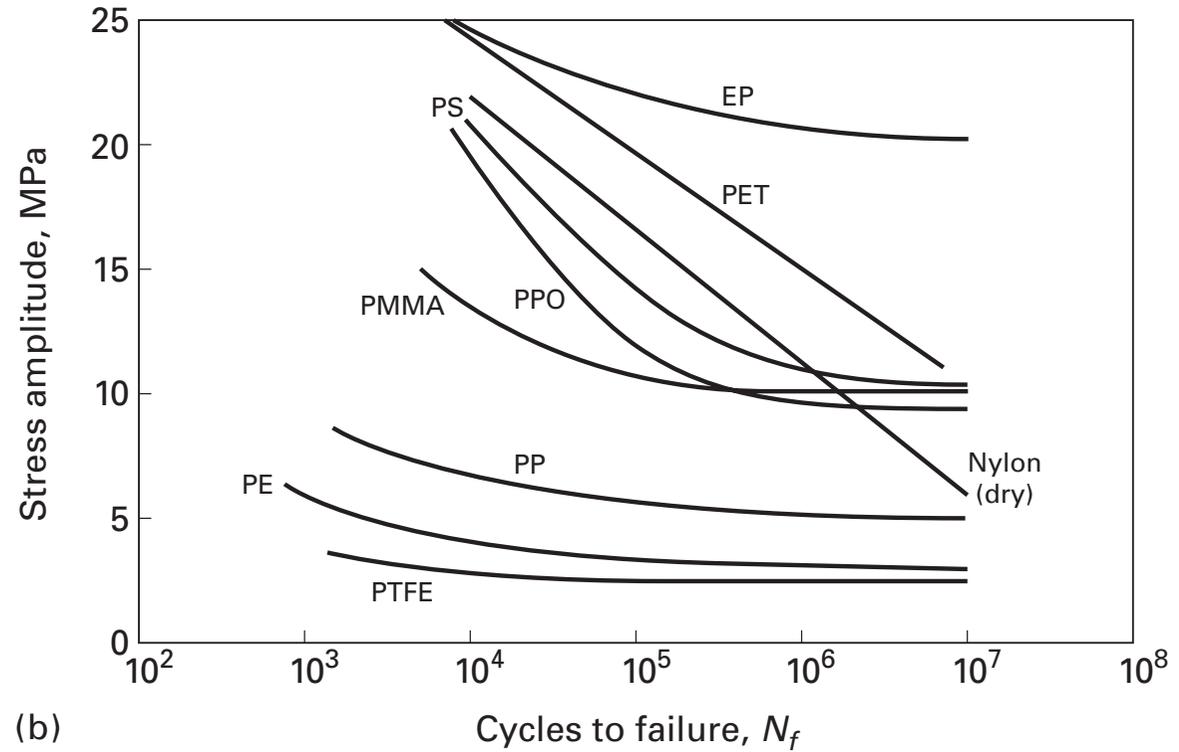
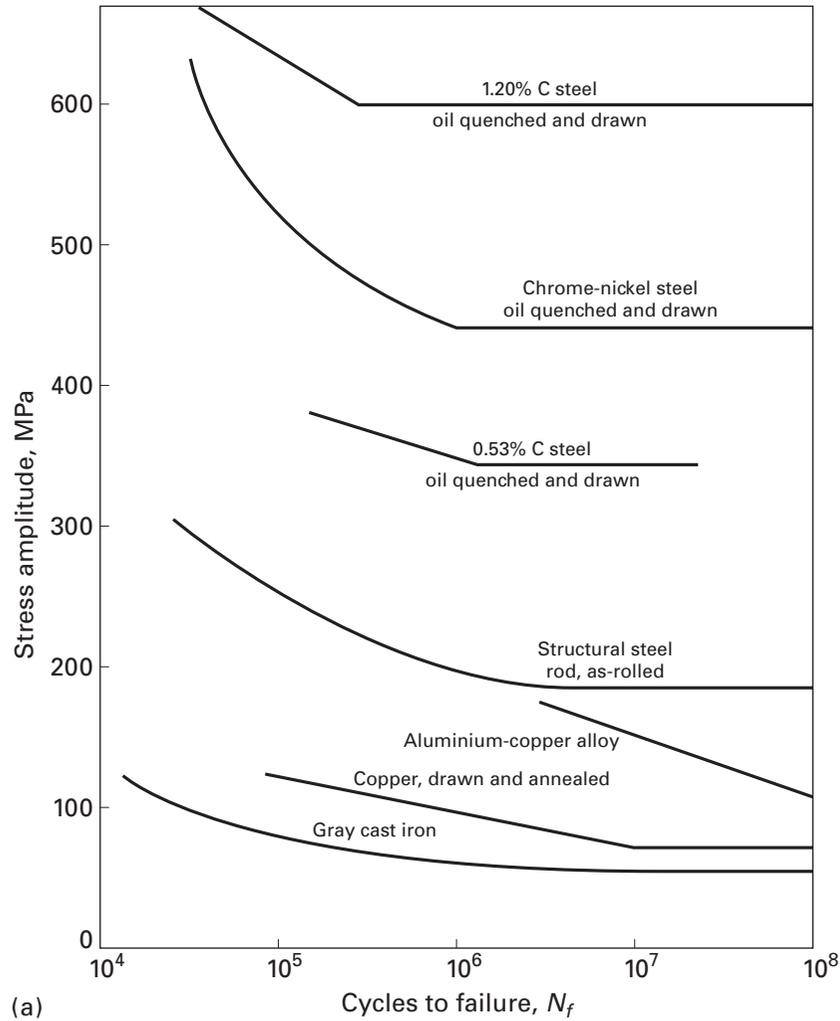
**FIGURE 17.1**  
Fatigue testing.

Source: M.F. Ashby and D.R.H. Jones, Engineering Materials Vol. 1, 4<sup>th</sup> edition, Butterworth-Heinemann, 2012.



Source: M.A. Meyers and K.K. Chawla, Mechanical Behavior of Materials 2<sup>nd</sup> Ed., Cambridge University Press, 2009

# Les essais de fatigue: courbes de Wöhler (“S-N Curves”)



**Fig. 14.4** S-N curves for typical (a) metals and (b) polymers.

**EPFL** **Les essais de fatigue** – les résultats peuvent dépendre de facteurs tels que la fréquence, l'environnement (fatigue-corrosion), l'état de surface, ...:

Exemple: cas d'un polymère, qui dissipe de l'énergie en se déformant (nous verrons cela plus tard) et peut donc s'échauffer puis rompre prématurément pendant la déformation à haute fréquence, largement du fait de son échauffement.

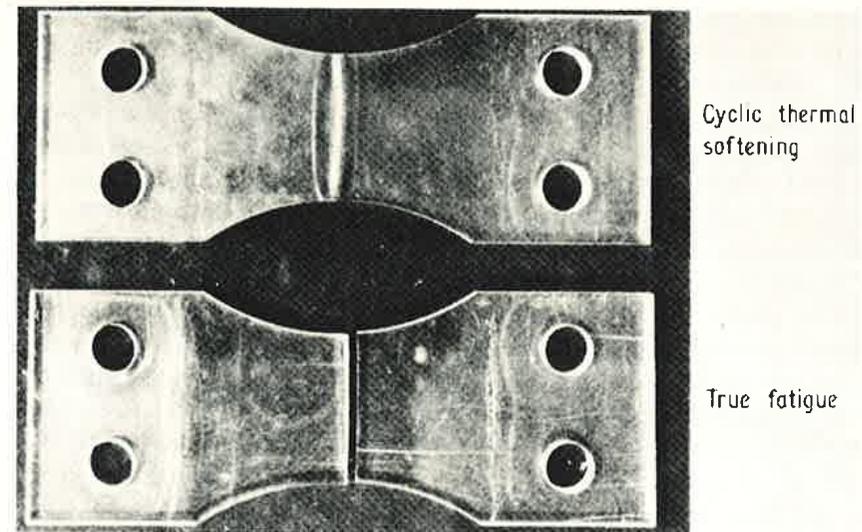
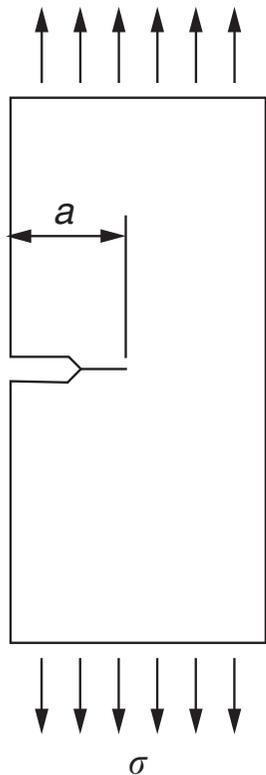


FIGURE 12.24 Typical fatigue and cyclic thermal softening failures in poly(methyl methacrylate).<sup>29</sup> (Reproduced by courtesy of The Institution of Mechanical Engineers from an article by I. Constable, J. G. Williams, and D. J. Burns from *JMES* 12, 20 (1970).)

Source: R.W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 3<sup>rd</sup> Ed., J. Wiley & Sons, 1989

**Les essais de fatigue** – 2 types: (ii) à échantillon fissuré: on mesure la longueur de fissure  $a$  dans le temps et on rapporte la vitesse (cyclique) de croissance de la fissure,  $da/dN$ .

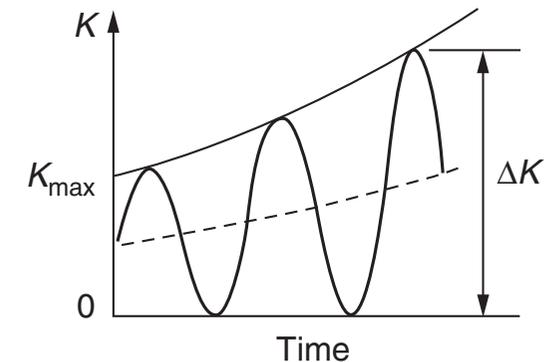
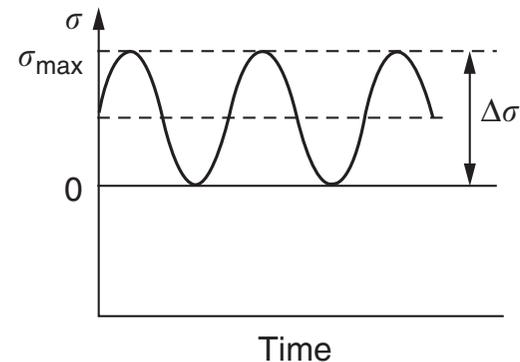
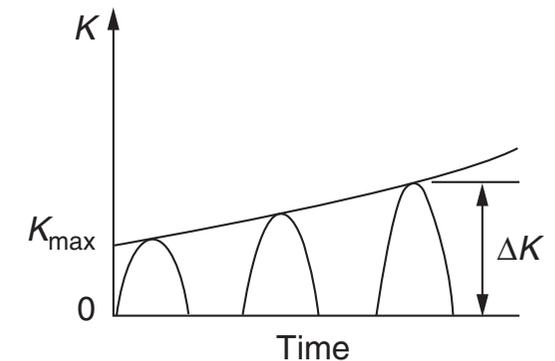
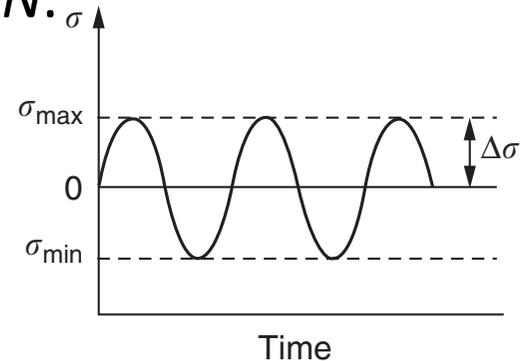


$$K = Y\sigma \sqrt{\pi a}$$

$$K_{\max} = Y\sigma_{\max} \sqrt{\pi a}$$

$$K_{\min} = Y\sigma_{\min} \sqrt{\pi a} \text{ for } \sigma_{\min} > 0$$

$$K_{\min} = 0 \quad \text{for } \sigma_{\min} \leq 0$$

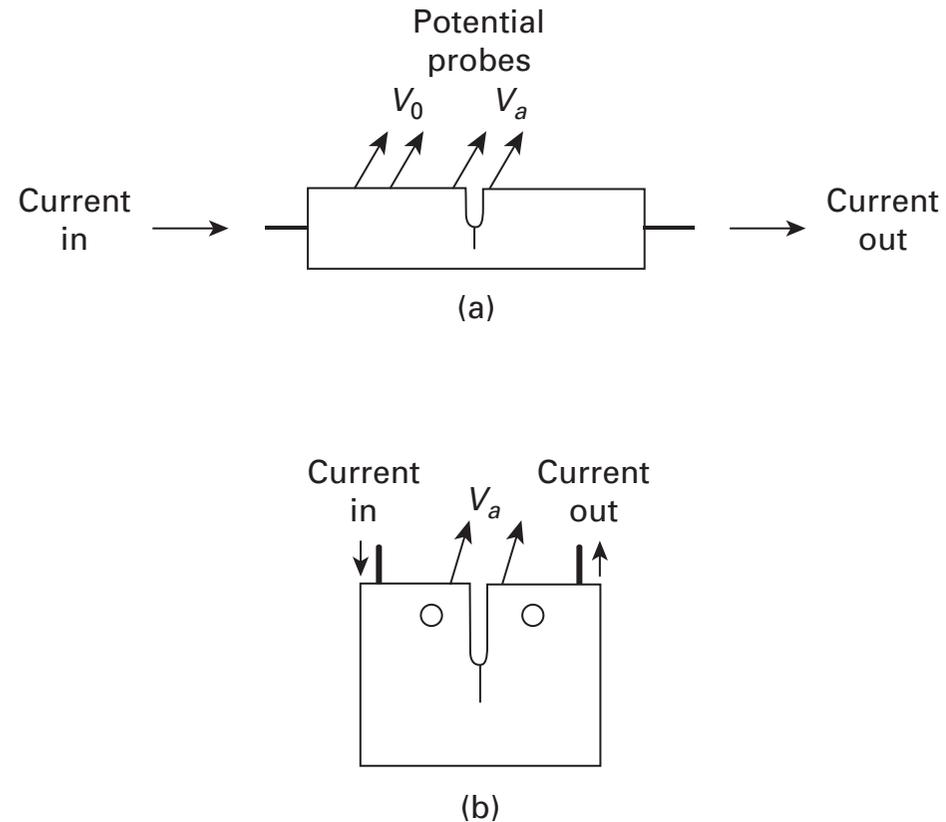


**FIGURE 17.6**

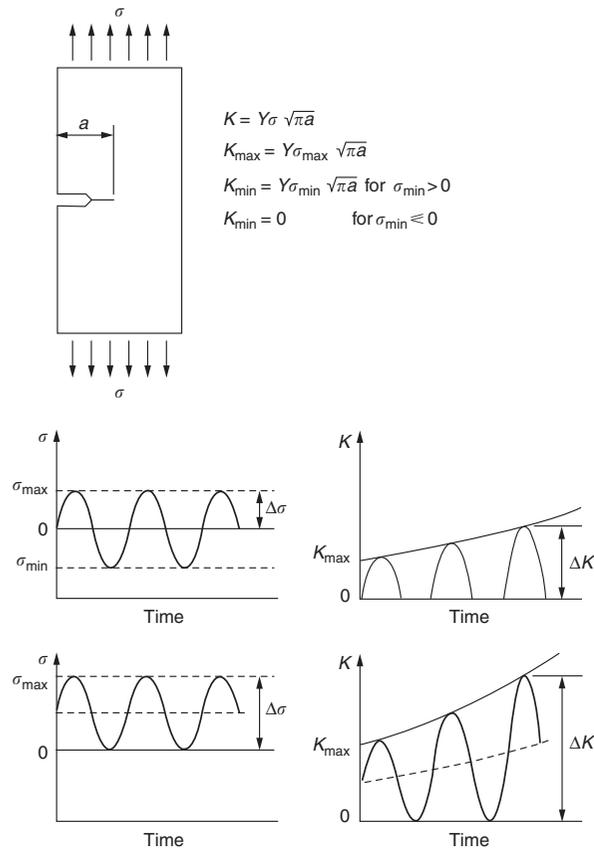
Fatigue-crack growth in precracked components.

## Les essais de fatigue – 2 types: (ii) à échantillon fissuré: on rapporte la vitesse de croissance de la fissure, $da/dN$ .

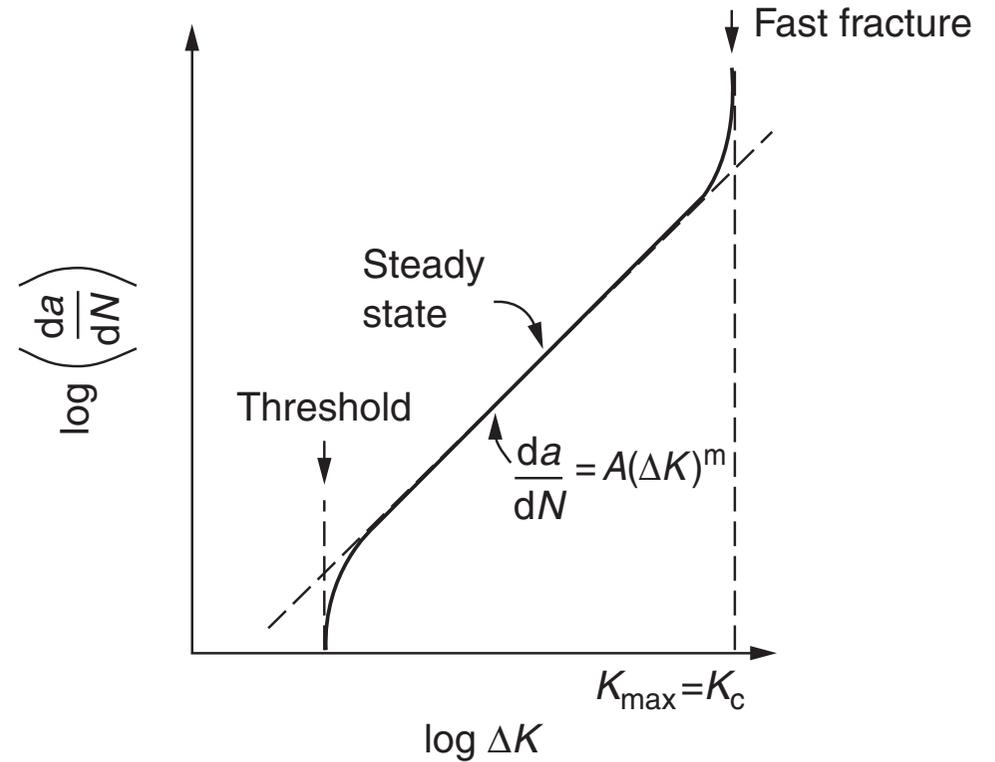
**Fig. 14.38** Electric potential drop method for crack growth measurements. (a) Bend specimen. (b) Compact-tension specimen.  $V_a$  is the potential drop across the crack while  $V_0$  is some reference potential. The crack length is obtained as function of the normalized potential ( $V_a/V_0$ ). The sample is loaded by inserting pins in holes shown.



# Les essais de fatigue – 2 types: (ii) à échantillon fissuré: on rapporte la vitesse de croissance de la fissure, $da/dN$ .



**FIGURE 17.6**  
Fatigue-crack growth in precracked components.



**FIGURE 17.7**

Fatigue crack-growth rates for precracked material.

Sources: M.F. Ashby and D.R.H. Jones, Engineering Materials Vol. 1, 4<sup>th</sup> edition, Butterworth-Heinemann, 2012; M.A. Meyers and K.K. Chawla, Mechanical Behavior of Materials 2<sup>nd</sup> Ed., Cambridge University Press, 2009

## Chapitre 1 – Les essais mécaniques

**Fin du chapitre... suite aux travaux pratiques.**

**Nous passons maintenant aux matériaux, en commençant par les céramiques.**

