Cours No 9

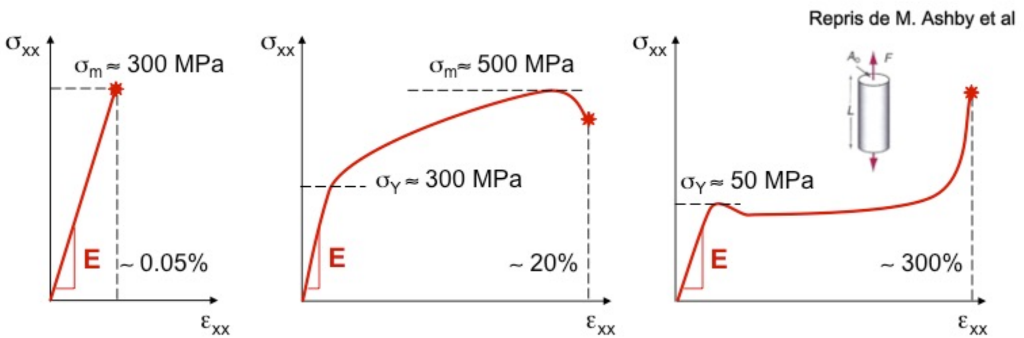
Dureté, Fatigue et Usure

Francesco Stellacci

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Rappels

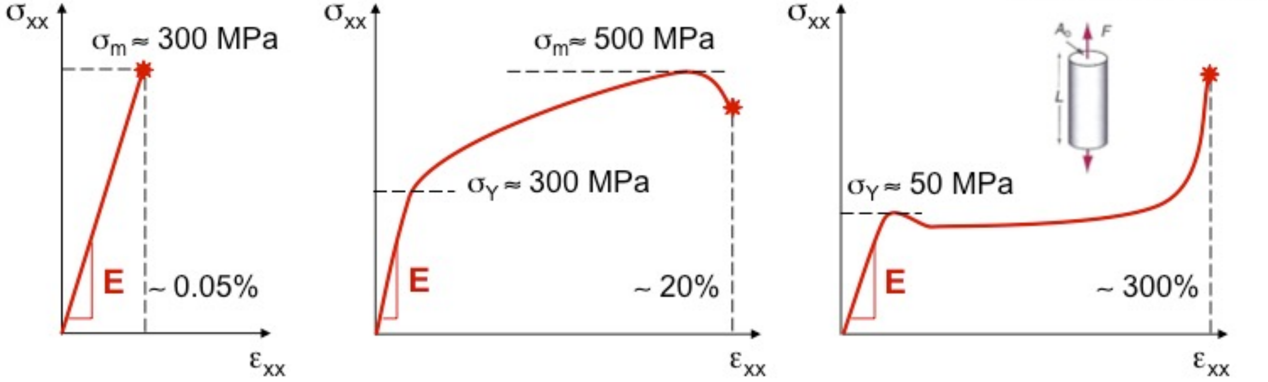
	Paramètres	Relations	Origines
Rigidité (module d'Young)	E (Pa)	$\sigma = \varepsilon x E$	Mét. et Cér.: Nature et énergie des liaisons entre les atomes Polym: Liaisons faibles entre les chaines
Limite Elastique	σ_y (Pa)	Mét. et Cér: σ_y pour $\varepsilon_R = 0.2\%$ Polym: σ_y pour $\varepsilon_R = 0.5\%$	Mét. et Cér.: début du mouvement des dislocations Polym: début du glissement des chaines et de microfissures
Dureté	H_v (kg/mm^2)	H_v (MPa)$\approx 3x\sigma_y$	La dureté représente la limite élastique par mesures d'indentation.
Ecrouissage	n	$n = d\sigma/d\varepsilon$ au-delà de σ_y	Mét.: renforcement par création de dislocations pendant la déformation Cér.: casse avant de plastifier Polym.: pas d'écrouissage
Ductilité	ε_R	Déformation résiduelle juste avant la rupture $\varepsilon_R = \varepsilon_{tot} - \sigma/E$	Mét.: mouvement des dislocations (10%) Cér.: cassent avant de se déformer plastiquement Polym.: Elongation des chaînes et microfissures (50-100%)



Rappels

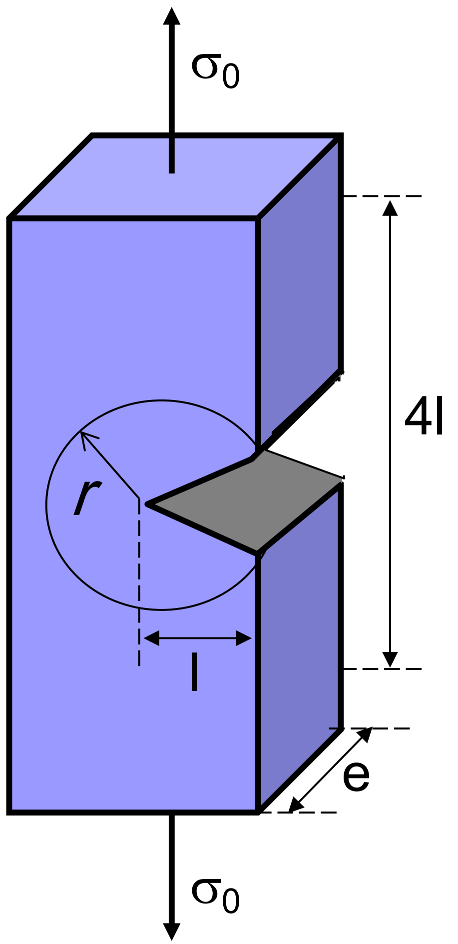
	Paramètres	Relations	Origines
Résistance	σ_m (Pa)	Contrainte maximale avant rupture	Mét.: Striction puis rupture - fissures Cér.: rupture fragile - fissures Polym.: striction, microfissures
Ténacité	$K_{1c} = (2E\gamma + EG^{pl}{}_c)^{1/2}$ (Pa.m$^{1/2}$)	$K_1 = \sigma_0(\pi l)^{1/2}$ $K_1 > K_{1c}$	Propagation d'une fissure Mét et Polym.: Déformation plastique avant propagation Cér.: fragiles, pas de déformation
Endurance	σ_e (Pa)	Amplitude de la contrainte pour rupture après 10^7 cycles. $\sigma_e \approx \sigma_m/3$	Progression d'une fissure à chaque changement de contrainte dans un cycle
Expansion thermique linéaire	α (K^{-1})	$\Delta L = \alpha L \Delta T$	Vient du caractère asymétrique de l'énergie de liaison entre les atomes
Usure	k_a (Pa^{-1})	$\Omega = k_a F/A$	Frottement et rugosité concentrent les contraintes qui localement sont assez grandes pour éroder le matériau

Repris de M. Ashby et al



Cours No 9

Rappels



En pointe de fissure, la contrainte peut s'approximer par la formule suivante:

$$\sigma(r) \propto \frac{\sigma_0\sqrt{\pi l}}{\sqrt{r}}$$

On définit le facteur d'intensité de contrainte:

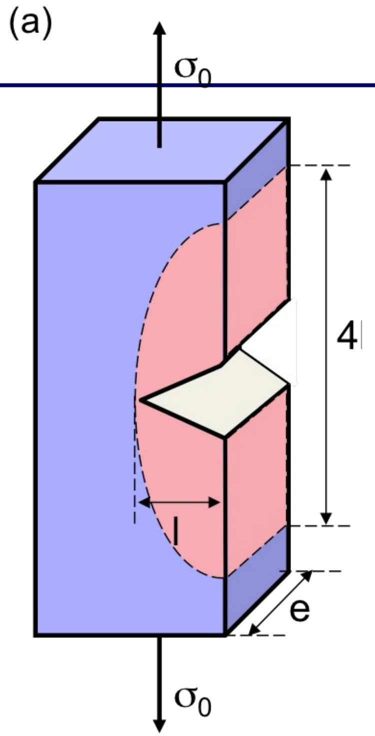
$$K_1(\sigma_0, l) = \sigma_0\sqrt{\pi l}$$

Pour une contrainte assez grande, ou une fissure assez longue, il y aura rupture. On regroupe ces conditions sur ces deux variables pour K_1:

$$K_1 > K_{1c}$$

K_{1c} : ténacité !

Rappels

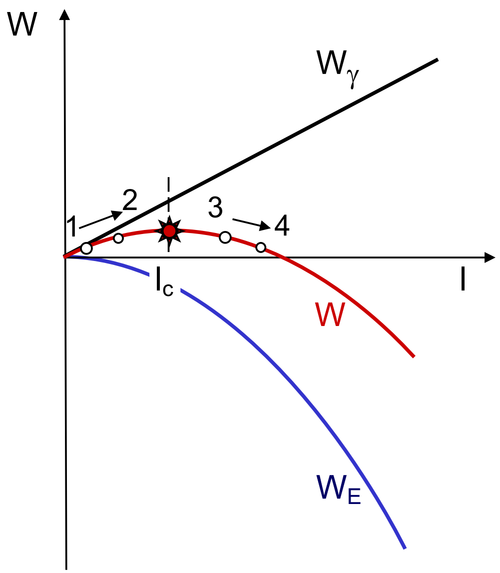


$$\boxed{K_{1C} = \sqrt{G_C\,E}}$$

$$G_C = 2\gamma + G_C^{pl}$$

- Rupture fragile: Gc = 2γ et K_{1C} est petit, matériaux peu tenaces.
L'énergie fournie au matériau contribute à casser les liasions

- Rupture ductile: Gc = 2γ + G_c^{pl} et K_{1C} est grand, matériaux tenaces.
L'énergie fournie au matériau contribute à le deformer plastiquement



Pour une contrainte donnée:

$$l > l_c \Leftrightarrow \sigma_0\sqrt{\pi l} > \sigma_0\sqrt{\pi l_c}$$

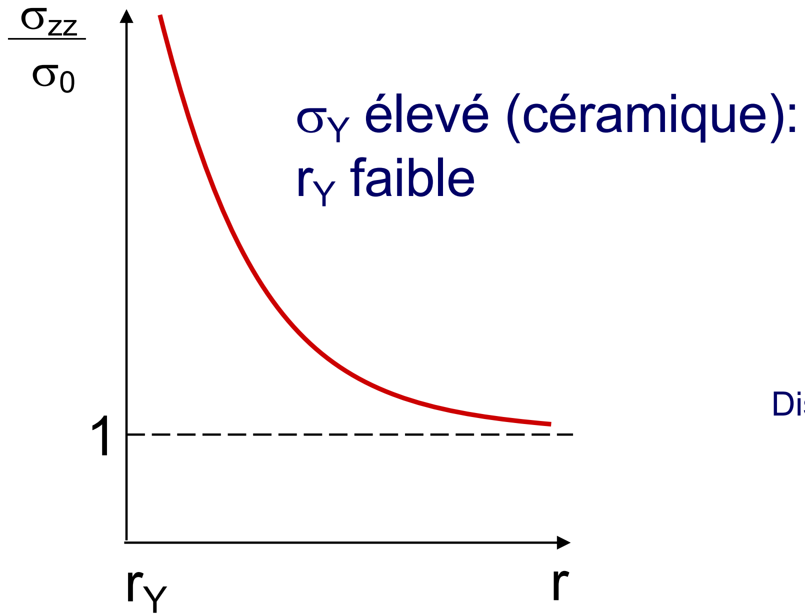
$$\Leftrightarrow K_1 > \sqrt{2\gamma E} \; ou \; K_1 > K_{1c}$$

Pour une longueur de fissure donnée:

$$\sigma_0 > \sigma_c \Leftrightarrow \sigma_0\sqrt{\pi l} > \sigma_c\sqrt{\pi l}$$

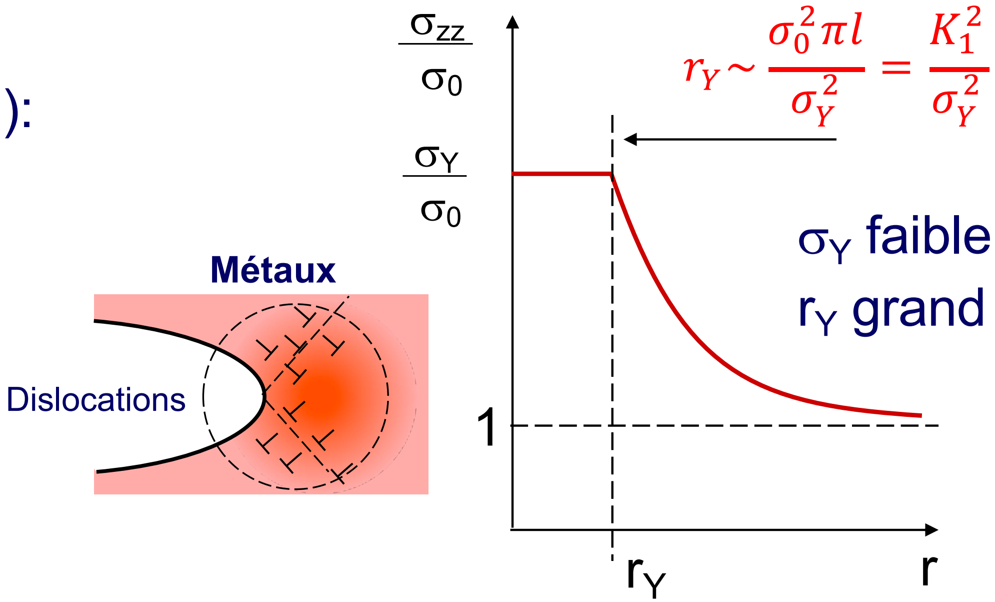
Rappels

Rupture fragile: $G_c = 2\gamma$



- Très peu de deformation plastique en pointe de fissure;
- La contrainte diverge et est assez grande pour casser les liaisons et favoriser la propagation de la fissure

Rupture ductile: $G_c = 2\gamma + G_c^{pl}$

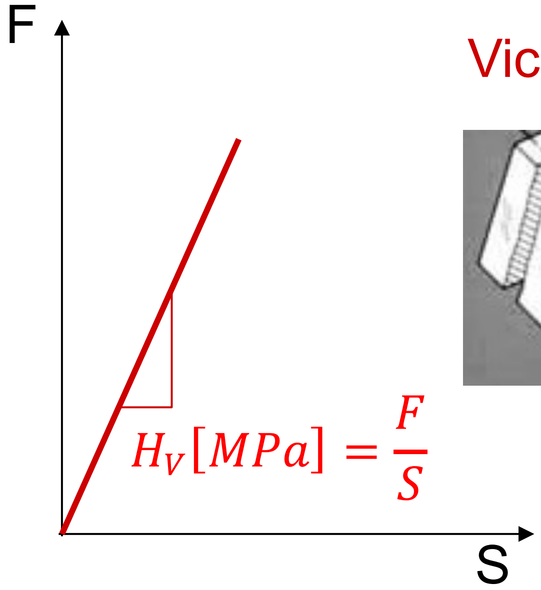


- Déformation plastique en pointe de fissure qui s'arrondit
- La contrainte reste assez faible autour de la limite élastique, pas assez grande pour casser les liaisons

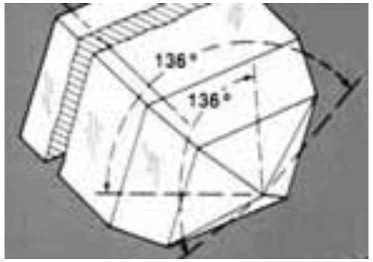
Table des matières

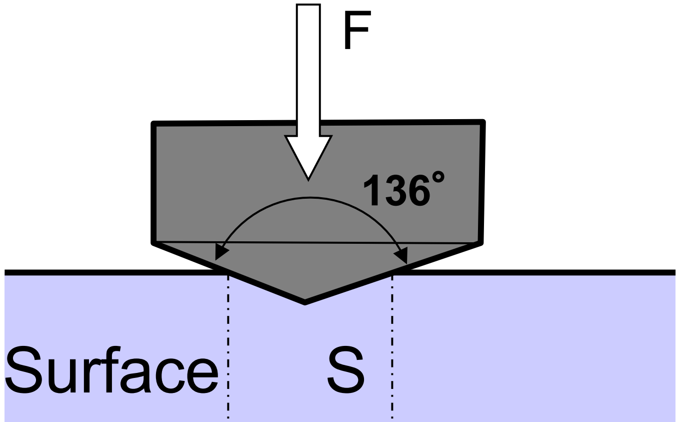
Dureté des matériaux

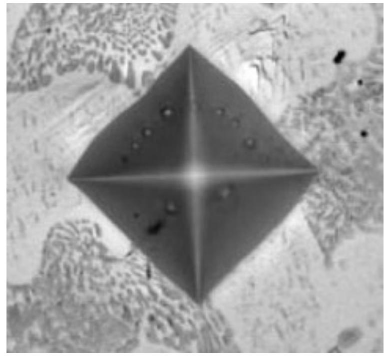
La mesure de σ_{el} (ou σ_m ou σ_Y) par un test en traction ou en compression n'est pas toujours aisée, surtout pour les céramiques. Afin de comparer différents matériaux, on peut avoir recours à un test de **dureté**.



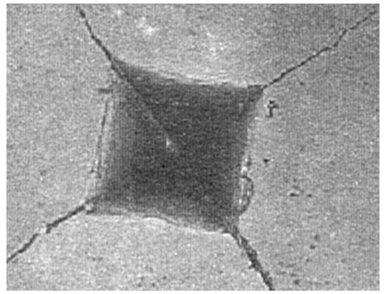
Vickers







Ni - Cr - Mo - T



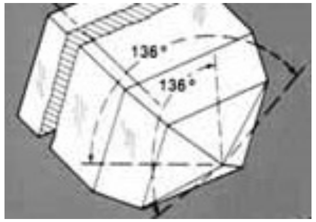
Matériau fragile

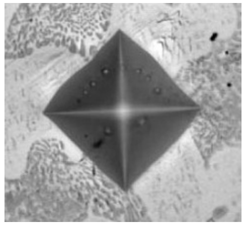
La dureté Vickers est donnée par le rapport de la masse, ou la force en unité de kg Force, divisée par la surface de contact:

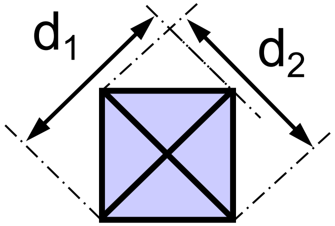
$$H_V = \frac{m\ (kg)}{S\ (mm^2)} = \frac{F\ (N)}{g\ (m.s^{-2}) \times S(mm^2)}$$

Dureté des matériaux

Il est possible de relier simplement la surface S de contact aux dimensions de l'indentation résiduelle:







$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$H_V = \frac{1.854}{g\ (m.s^{-2})} \times \frac{F(N)}{d^2(mm^2)}$$

$$H_V = 0.189 \times \frac{F}{d^2} \quad [kg.mm^{-2}]$$

On peut exprimer la dureté Vickers en MPa pour la comparer à la limite élastique:

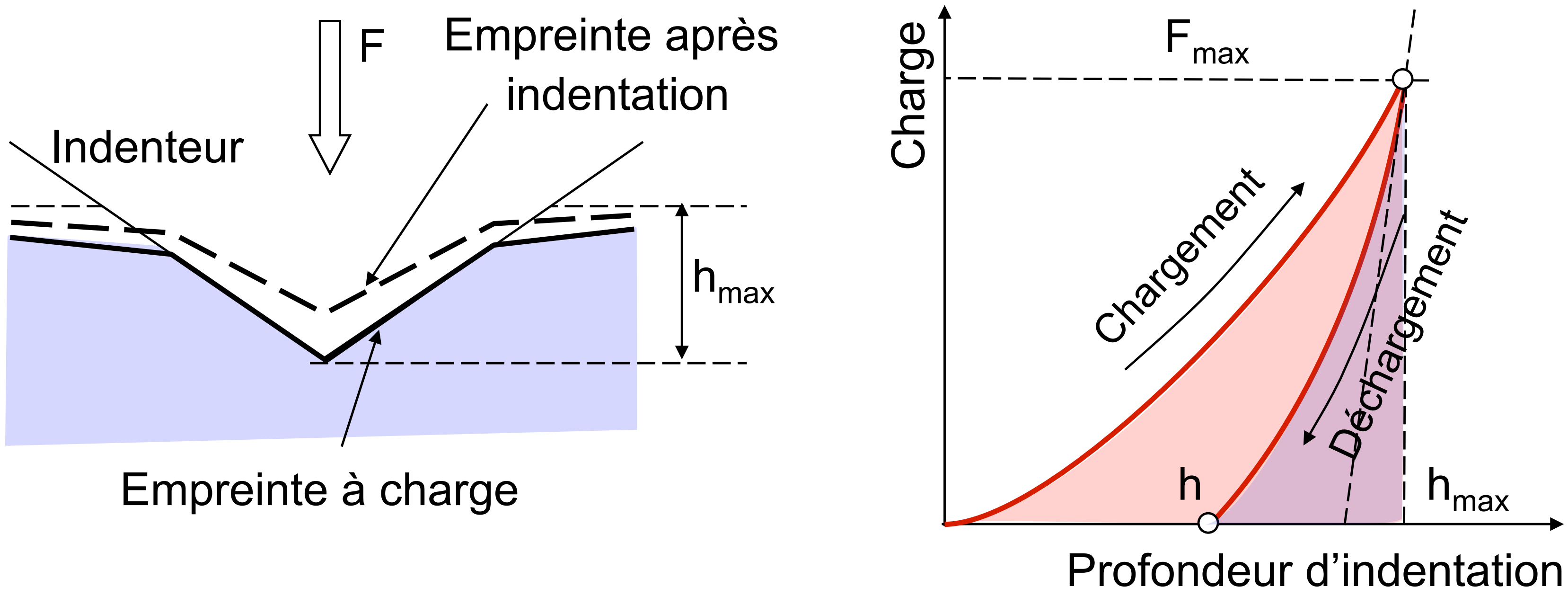
$$H_V^{MPa} = g \times H_V = \frac{F\ (N)}{S(mm^2)} \quad [MPa]$$

Comme le matériau déformé sous la pointe est contraint par le matériau autour, H_V exprimé en MPa est plus grand que σ_Y. Il est environ trois fois plus grand pour une grande majorité des matériaux:

$$\boxed{H_V^{MPa} = g \times H_V \approx 3 \times \sigma_Y\ [MPa]}$$

Dureté des matériaux

Lors d'un test de dureté, on a les phénomènes suivants:



La dureté est liée à la déformation plastique après indentation: elle est reliée à la notion de limite élastique !

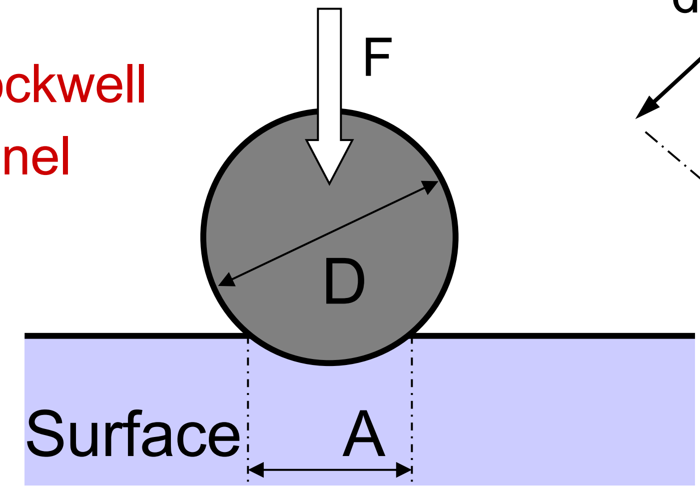
La force étant appliquée sur une surface très faible, on entre très vite dans le domaine plastique: mais le matériau se déforme toujours aussi de façon élastique.

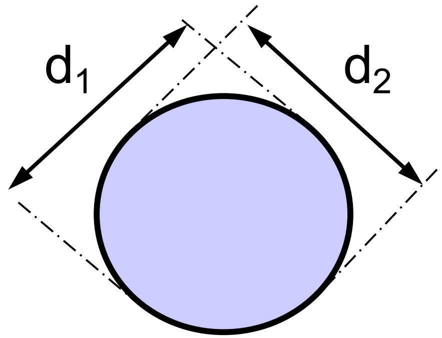
Dureté des matériaux

Dureté Birnell

Sphère de 1 à 10 mm de diamètre D, en acier trempé ou en carbure de Tungstène.

Rockwell
Brinel





$$H_B = 0.102\,\frac{2F\ [N]}{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)\ [mm^2]}$$

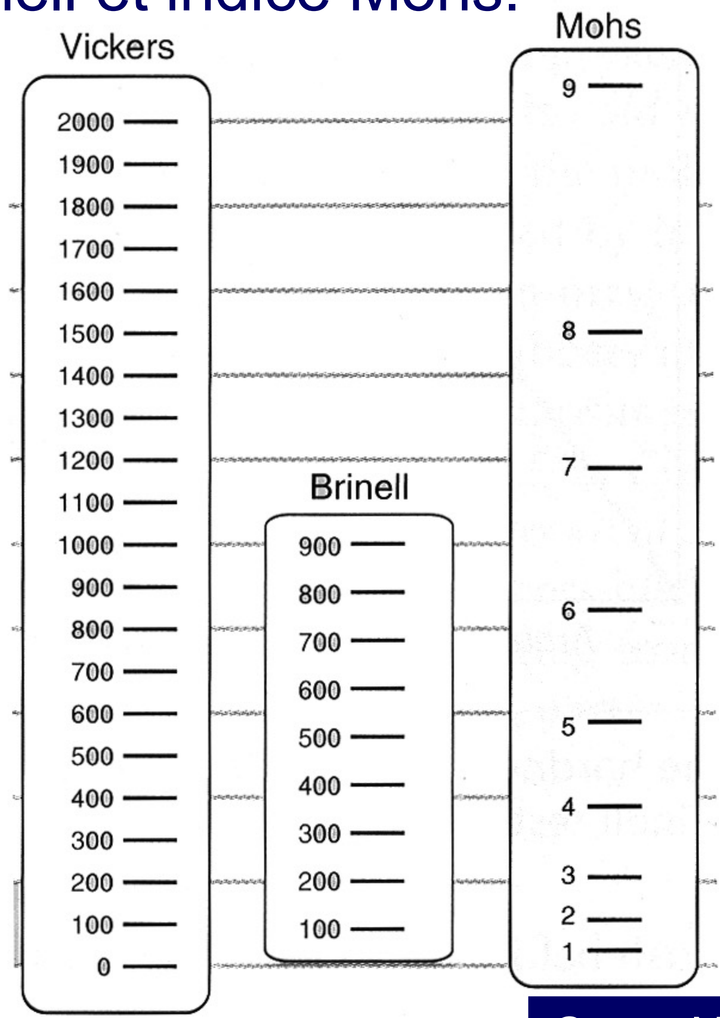
Matériau	Nombre de Brinell
Bois tendre	1.6 HBS 10/100
Bois dur	2.6 à 7.0 HBS 10/100
Aluminium	15-150 HB
Cuivre	35 HB
Acier doux	120 HB
Acier Inox	250 HB
Verre	550 HB
Acier à outils	650 à 700 HB

Dureté des matériaux

Quelques duretés typiques sont données ci-contre, avec une conversion entre duretés Vickers, Brinell et indice Mohs.

1	Talc	Mg3Si4O10(OH)2
2	Gypse	CaSO4·2H2O
3	Calcite	CaCO3
4	Fluorine	CaF2
5	Apatite	Ca5(PO4)3(OH-, Cl-, F-)
6	Orthose	KAlSi3O8
7	Quartz	SiO2
8	Topaze	Al2SiO4(OH-, F-)2
9	Corindon	Al2O3
10	Diamant	C

Indice de dureté Mohs

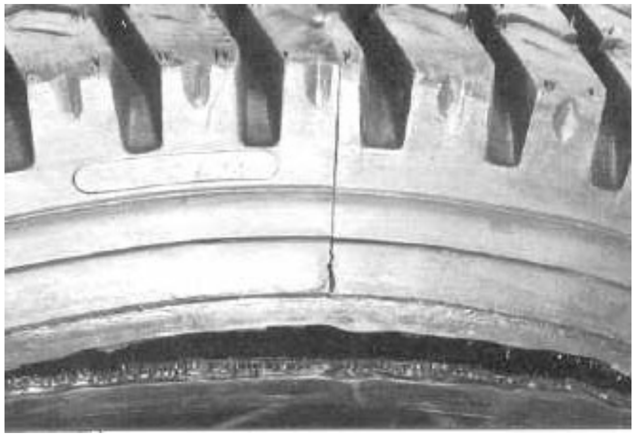


Introduction

Même dans un régime élastique, il y a dissipation d'énergie ou **amortissement** (damping). Ceci s'observe notamment pour des vibrations acoustiques. Lorsque les sollicitations mécaniques sont répétées, cela peut amener à la rupture du matériau par **fatigue**.

Rupture par fatigue d'un boulon tenant un sprinkler.

http://metallurgist.com/html/ClampBoltFailure.htm

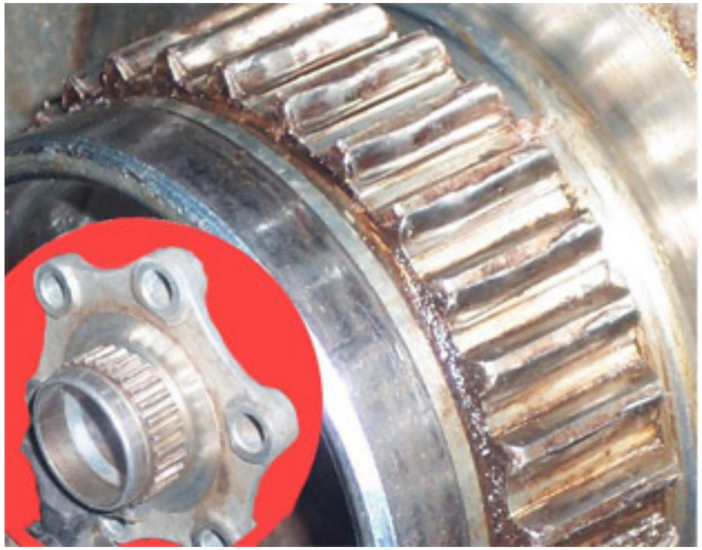


Rupture circonférentielle d'un pneu sous-gonflé par fatigue de la carcasse radiale.

http://www.tpub.com/content/constructionmisc/TM-9-2610-200-14/css/TM-9-2610-200-14_152.htm

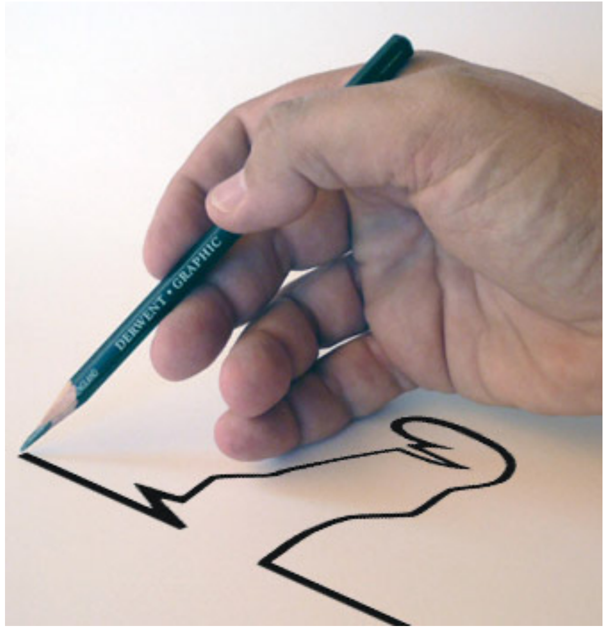
Introduction

Une autre source de dégradation des matériaux, moins brutale que la fracture, est l'**usure**.



Usure anormale du moyeu de la roue arrière d'une moto, par manque de graissage.

http://1200venture.unblog.fr/tag/usure/

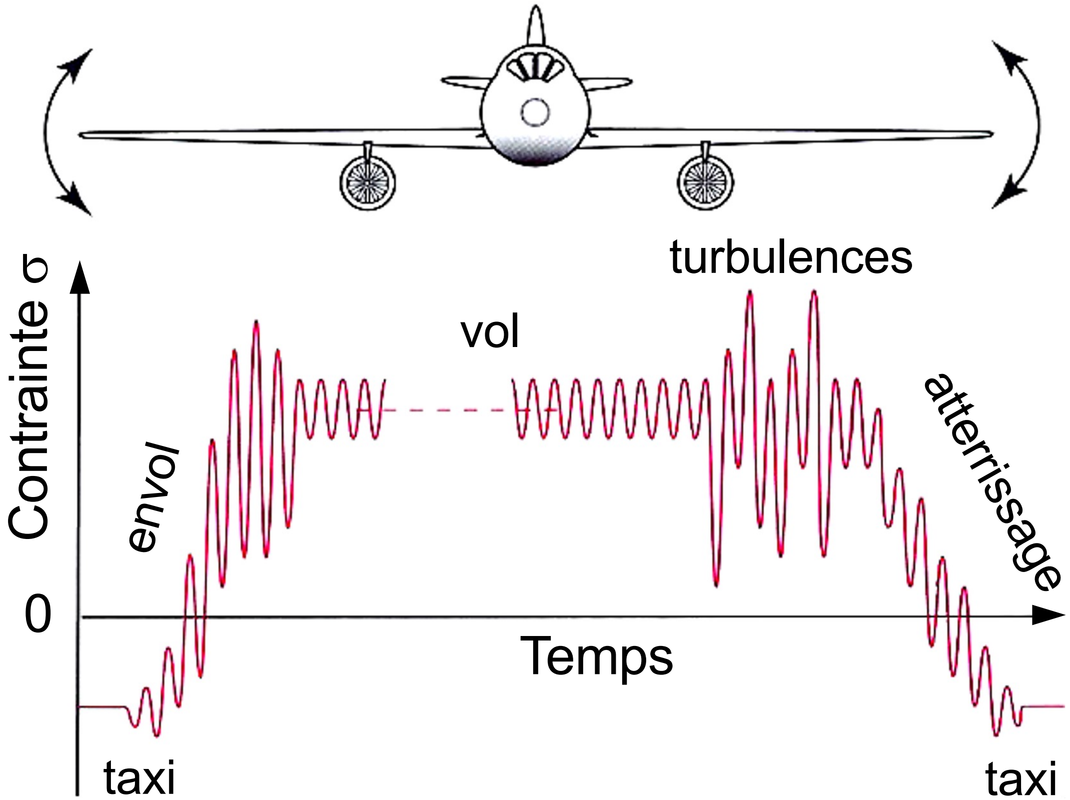


Mais sans usure, pas de dessin au crayon, ni d'adhérence des semelles!

http://cuoresportivo-plaza.blogspot.com/2006_12_01_archive.html

Fatigue

La **résistance en fatigue** d'un matériau se définit comme sa réponse à des variations répétées (périodiques) de la contrainte appliquée.

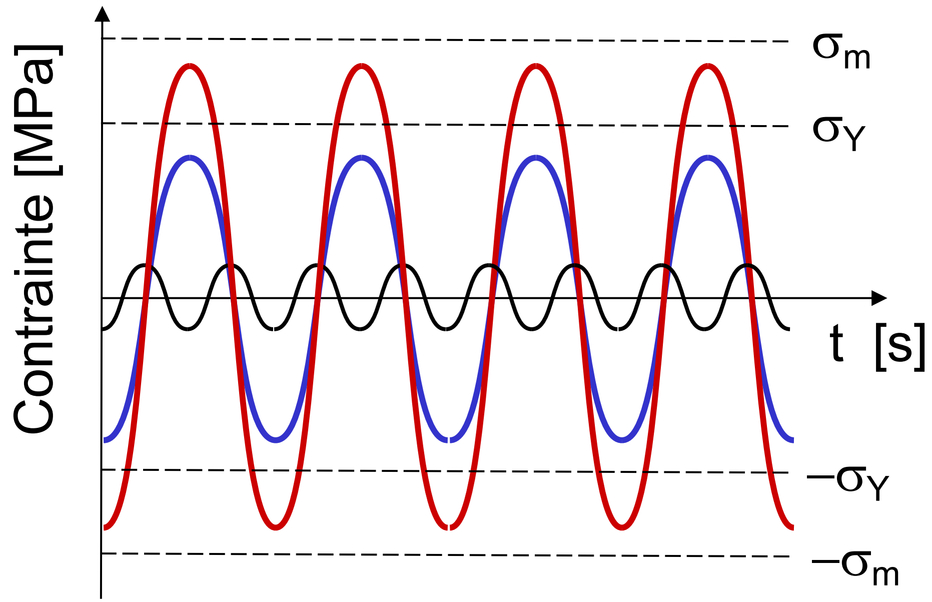


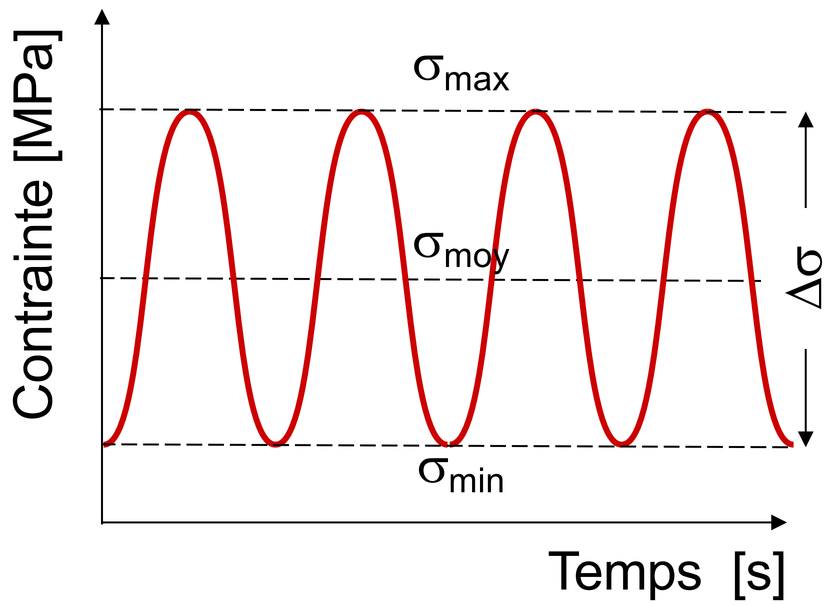
Contrainte ressentie au cours du temps par une aile d'avion. Mais dans quelle partie ?

Bras de suspension de l'Alfa 156

Fatigue

La **résistance en fatigue** d'un matériau se définit comme sa réponse à des variations répétées (périodiques) de la contrainte appliquée.





Vibrations (faible $\Delta\sigma$, haute f)

Fatigue à grand nombre de cycles ("high-cycle") $\sigma_{max} < \sigma_Y$

Fatigue à faible nombre de cycles ("low-cycle") $\sigma_{max} > \sigma_Y$

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

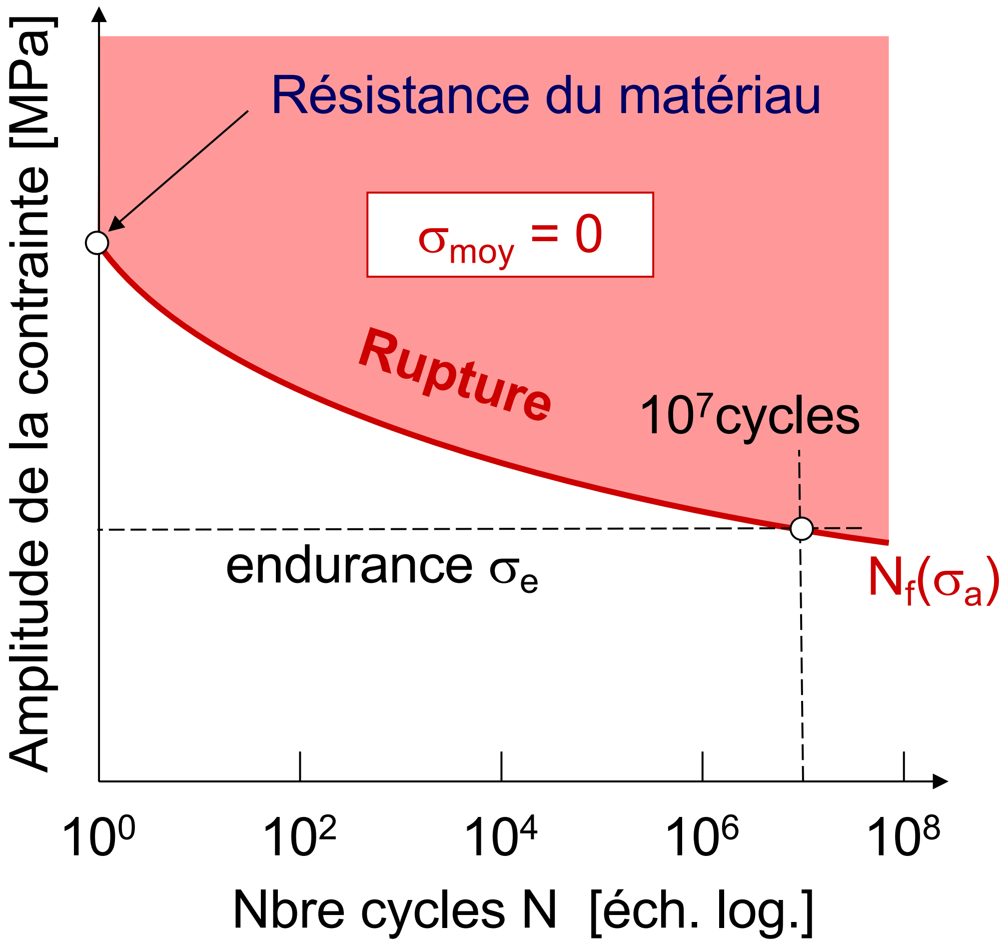
$$\sigma_{moy} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

Fatigue

Cette résistance à la fatigue dépend de la **contrainte moyenne**, σ_{moy}, de l'**amplitude** σ_a et du **nombre de cycles**. On obtient une **courbe de Wöhler**.

- Lorsque la contrainte pic dépasse σ_Y, il y a **endommagement rapide** et le matériau supporte peu de cycles (**"low-cycle" fatigue,** ou **fatigue oligocyclique**).

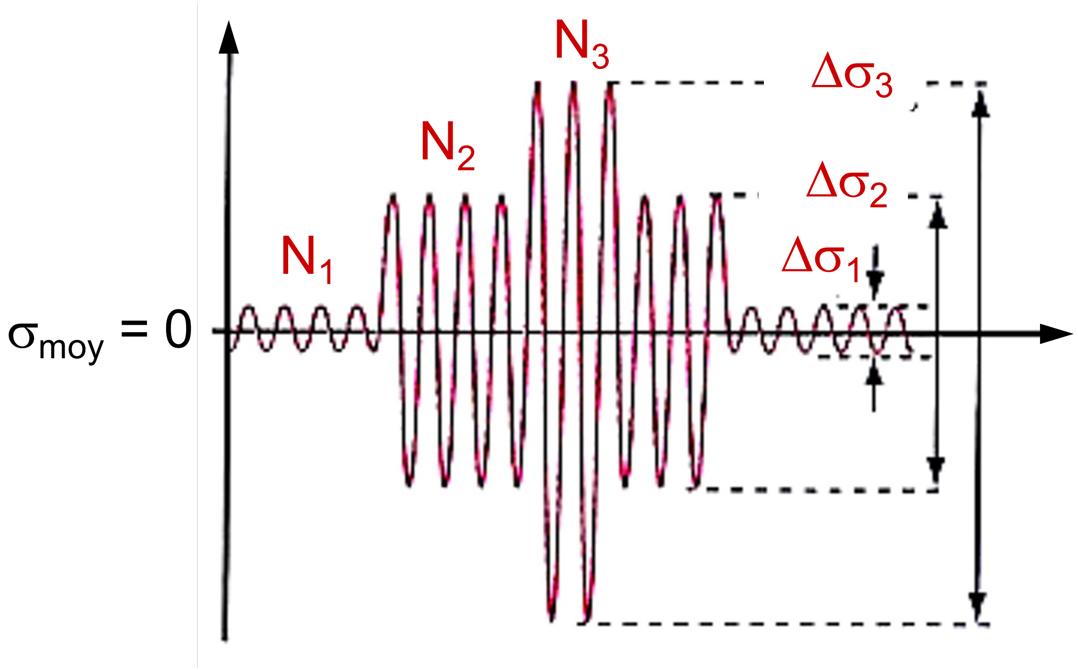
- Lorsque la contrainte pic est inférieure à σ_Y, le matériau peut supporter un grand nombre de cycles (**"high-cycle" fatigue**).



Fatigue

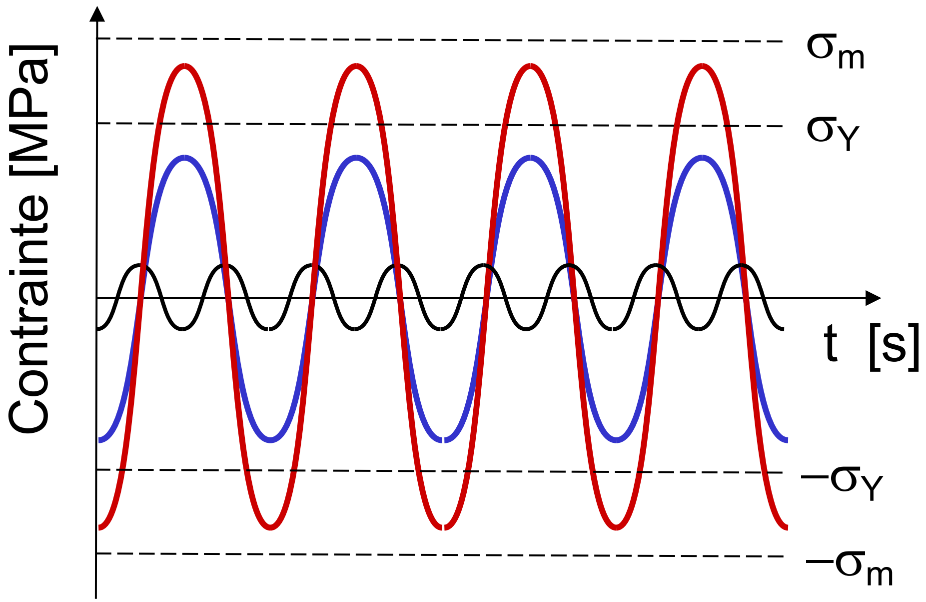
Pendant leur utilisation, les matériaux sont soumis à des cycles de fatigue d'amplitude ou de fréquence différentes. Leurs contributions s'additionnent selon la Règle de Miner:

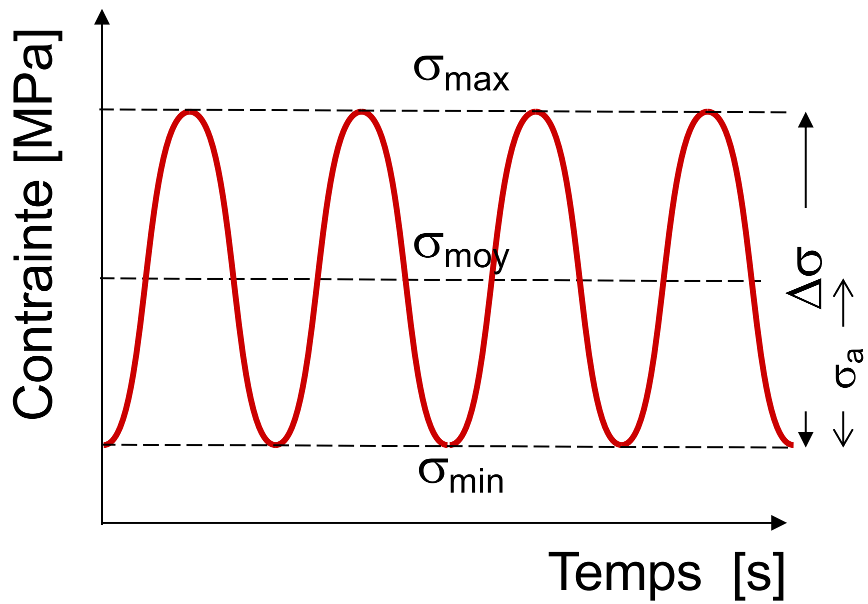
$$\boxed{\sum \frac{N_i}{N_f(\sigma_{ai})} = 1}$$



Fatigue

La **résistance en fatigue** d'un matériau se définit comme sa réponse à des variations répétées (périodiques) de la contrainte appliquée.





Vibrations (faible $\Delta\sigma$, haute f)

Fatigue à grand nombre de cycles ("high-cycle") $\sigma_{max} < \sigma_Y$

Fatigue à faible nombre de cycles ("low-cycle") $\sigma_{max} > \sigma_Y$

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

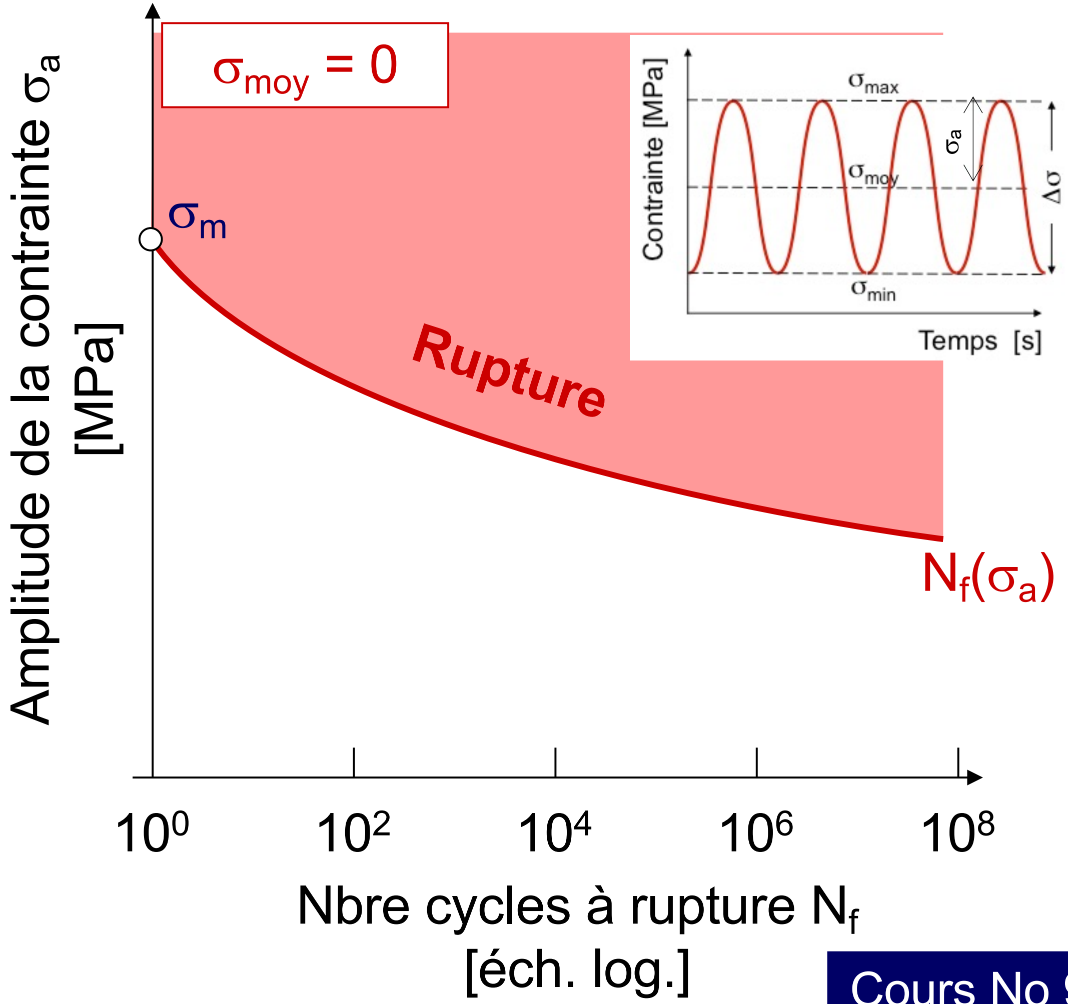
$$\sigma_{moy} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

Fatigue

Cette résistance à la fatigue dépend de la **contrainte moyenne**, σ_{moy}, de l'**amplitude** σ_a et du **nombre de cycles**. On peut construire une **courbe (dite de Wöhler)** si on note après combien de cycle le matériau va rompre, pour une amplitude de contrainte donnée.

- Lorsque la contrainte max dépasse σ_Y, il y a **endommagement rapide** et le matériau supporte peu de cycles (**"low-cycle" fatigue,** ou **fatigue oligocyclique**).

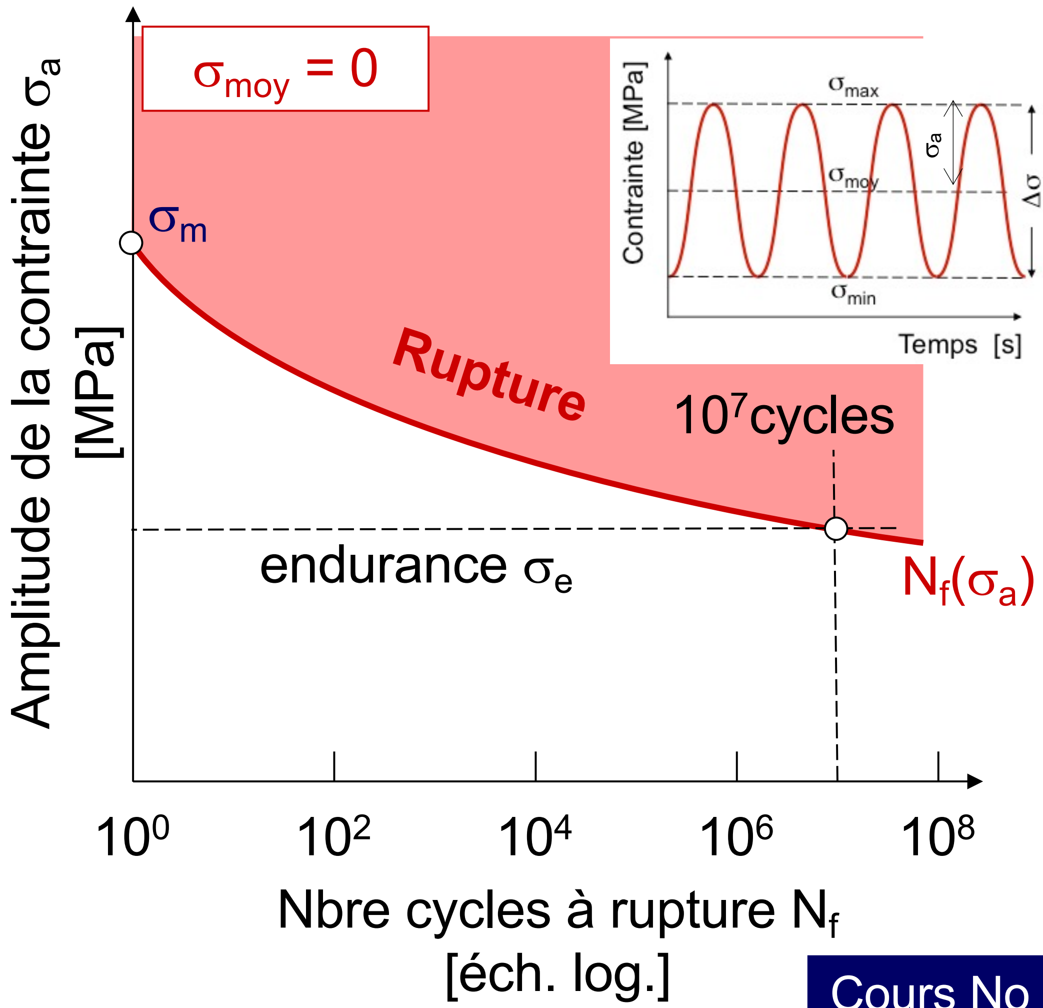
- Lorsque la contrainte max est inférieure à σ_Y, le matériau peut supporter un grand nombre de cycles (**"high-cycle" fatigue**).



Fatigue

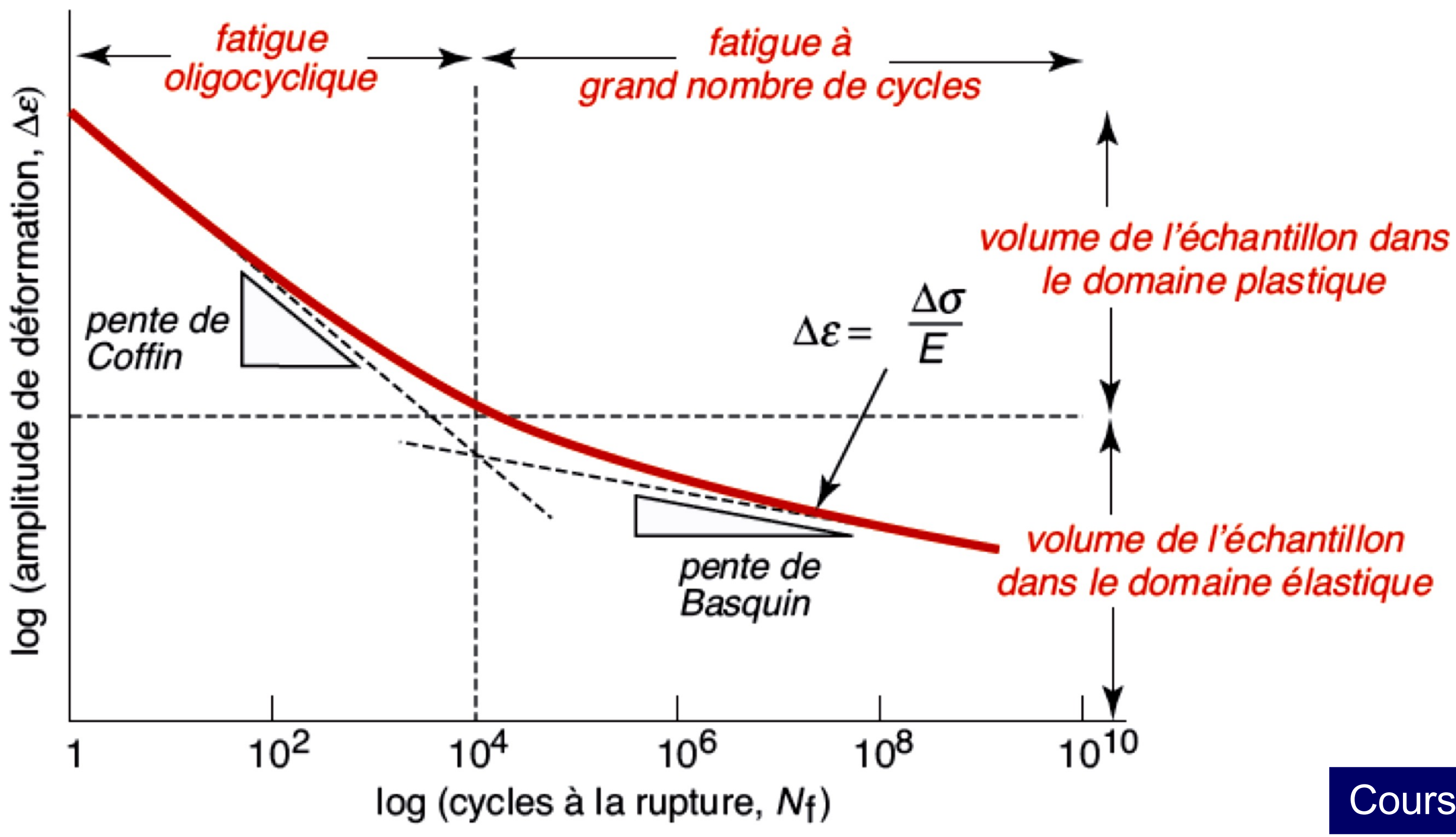
La limite d'endurance, σ_e, est défnie comme la valeur d'amplitude de contrainte pour laquelle le matériau tient pendant 10 millions de cycles (10^7 cycles) avant de rompre.

C'est cette valeur (et non σ_m, contrainte à rupture trouvée pendant un test de traction simple), qui sera utilisée pour dimensionner une pièce qui travaille en fatigue.



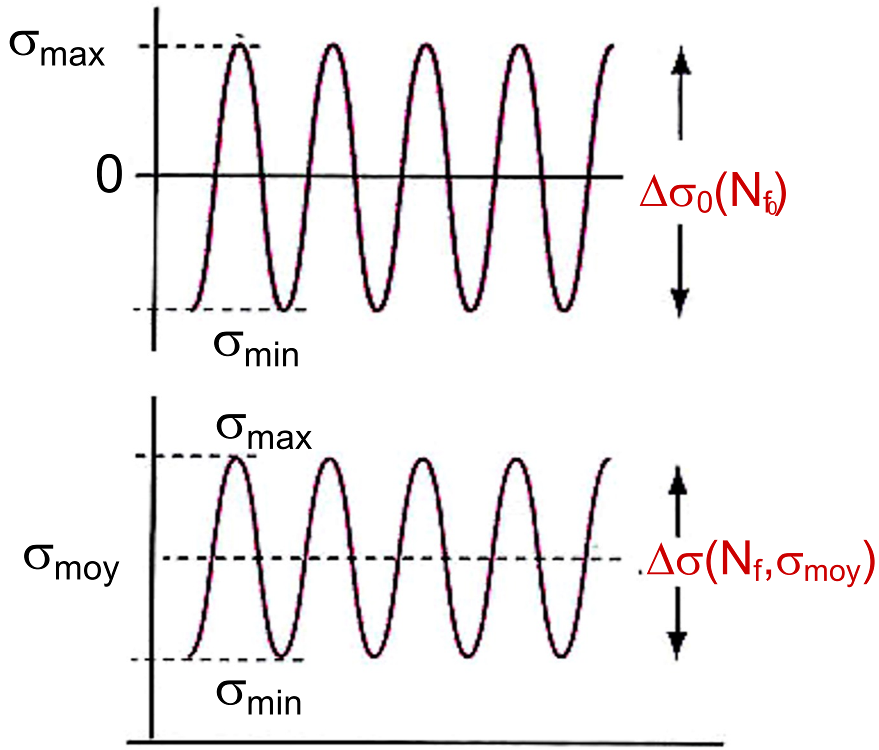
Déformation lors de la Fatigue

Dans le régime de la fatigue usuelle ($\sigma_{max} < \sigma_Y$), l'échelle de la contrainte appliquée peut être facilement convertie en déformation. Pour la fatigue oligocyclique ($\sigma_{max} > \sigma_Y$), ceci n'est plus aussi simple.



Fatigue avec contrainte moyenne non nulle

Comment adapter la courbe de Wöhler au cas où $\Delta\sigma$ n'est pas appliquée autour de $\sigma_{moy} = 0$? On a recours à des lois empiriques.



La loi de Goodman relie l'amplitude pour une contrainte moyenne non nulle qui correspond à un nombre de cycles à rupture N_f, avec l'amplitude pour une contraine moyenne nulle, qui donne un nombre de cycles à rupture N_{fo}

$$\sigma_a(N_f, \sigma_{moy}) = \sigma_a(N_f, 0)\left(1 - \frac{\sigma_{moy}}{\sigma_m}\right)$$

Avec σ_m= contrainte à rupture en traction statique du matériau.

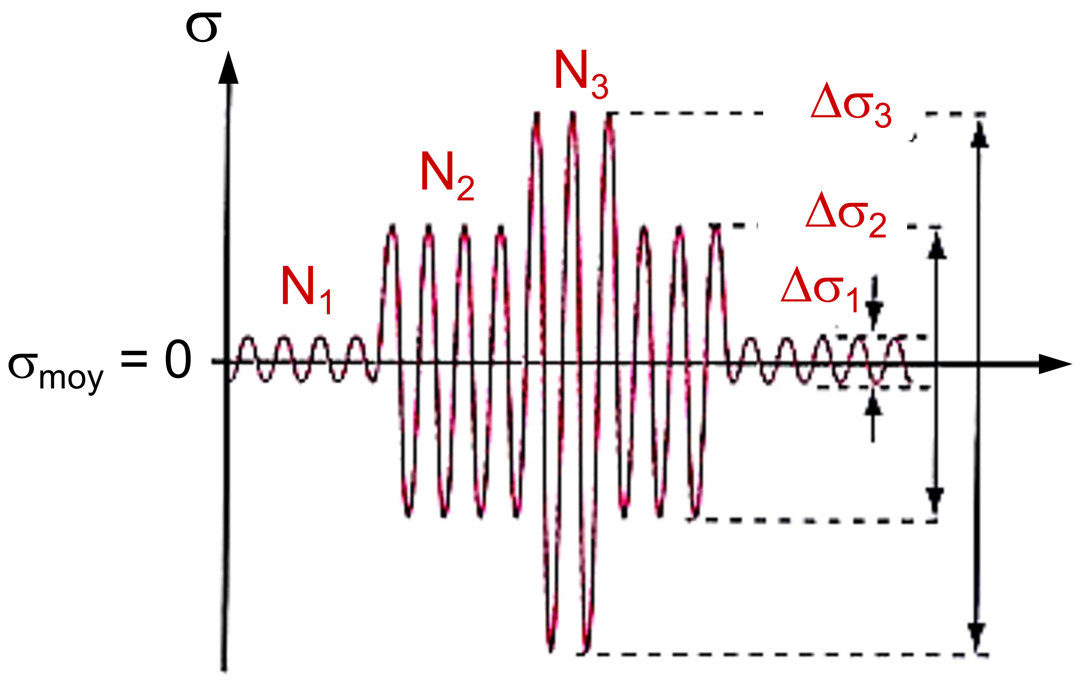
Fatigue avec variation de la contrainte

Comment adapter la courbe de Wöhler au cas où les cycles ne sont pas uniformes ? On a recours à des lois empiriques.

Règle de Miner

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{N_i}{N_{f,i}} = 1$$

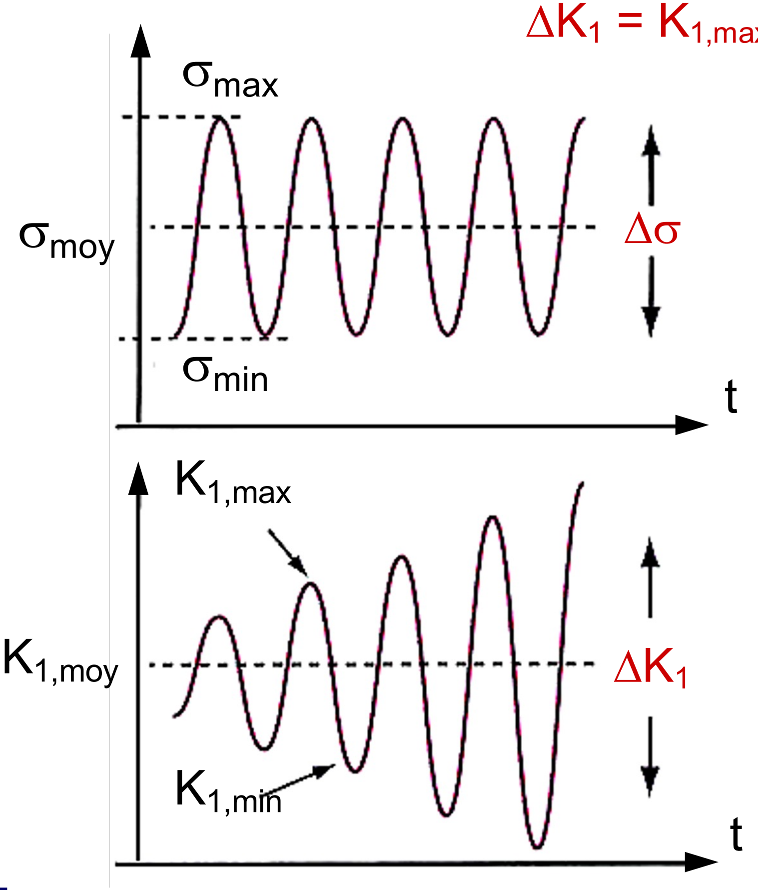
Avec N_i le nombre de cycles faits avec l'amplitude $\Delta\sigma_i/2$, et $Nf_{,i}$ le nombre de cycles à rupture pour cette même amplitude.

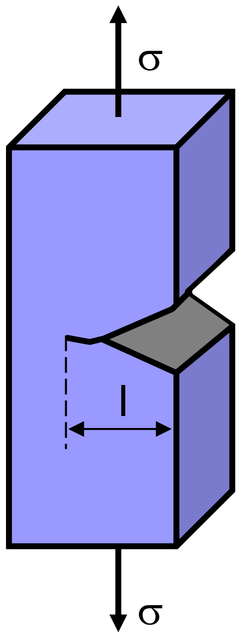


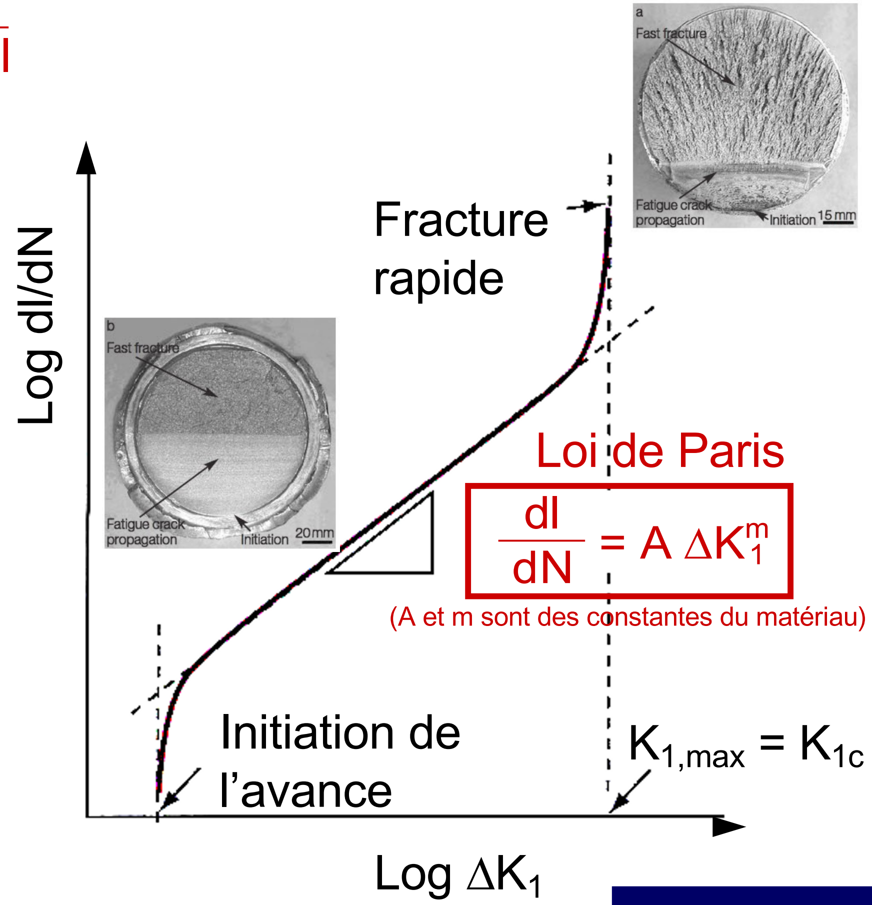
Fatigue de matériau fissuré

Que se passe-t-il si l'échantillon contient déjà des fissures, par exemple une pièce soudée ? Avec $\Delta\sigma$ appliqué constant, **le facteur d'intensité de contrainte ΔK_1 augmente** avec l'avance de la fissure l. Jusqu'à ce que K_1 approche K_{1c}, où l'échantillon fracture au cycle suivant.

$$\Delta K_1 = K_{1,max} - K_{1,min} = \Delta\sigma\sqrt{\pi l}$$







Fatigue

Le cycle de contrainte peut faire avancer des micro-fissures et les faire grandir petit à petit: le matériau se fatigue.

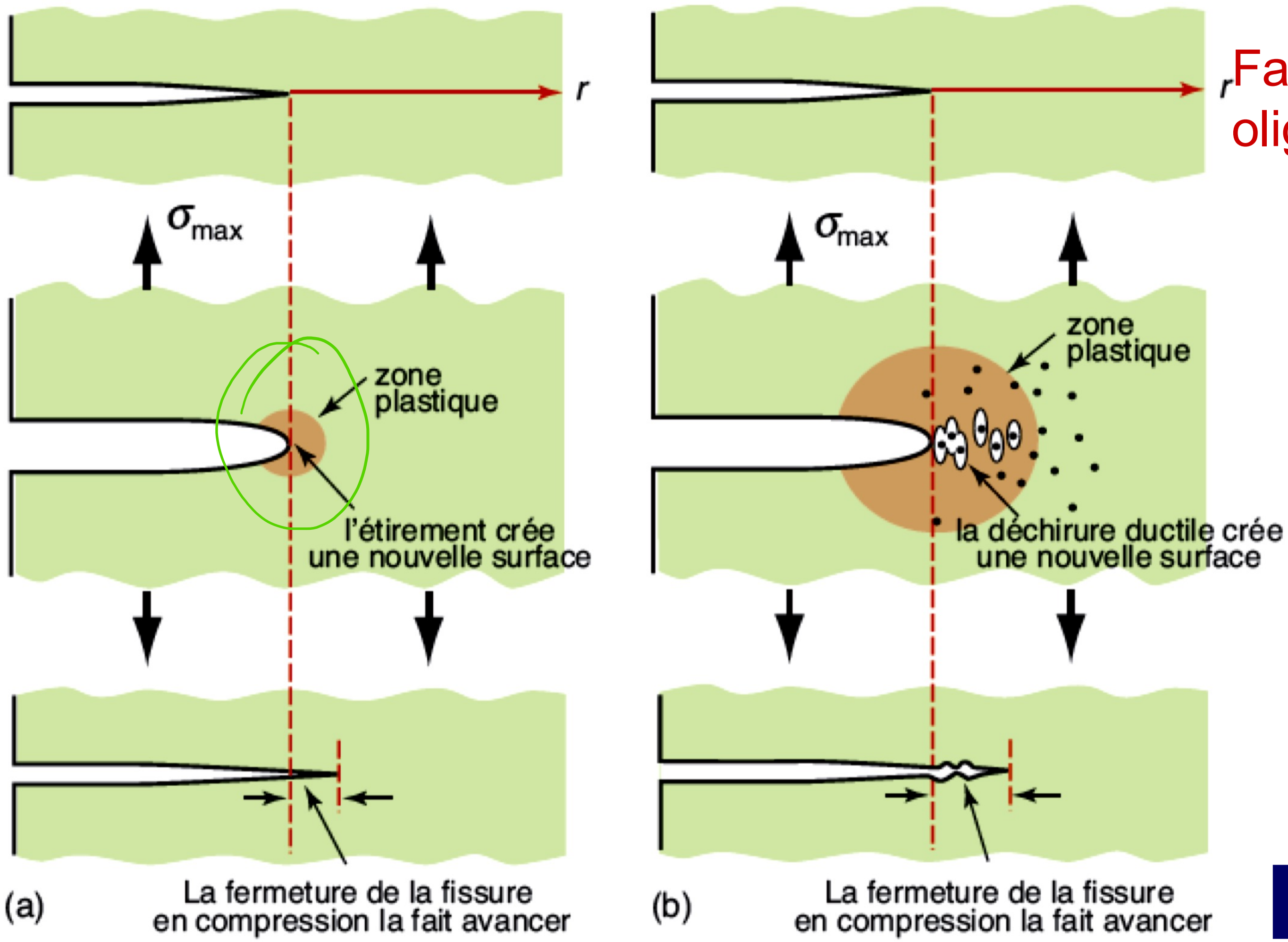
Mécanismes de propagation d'une fissure en fatigue

Fatigue

Fatigue oligocyclique

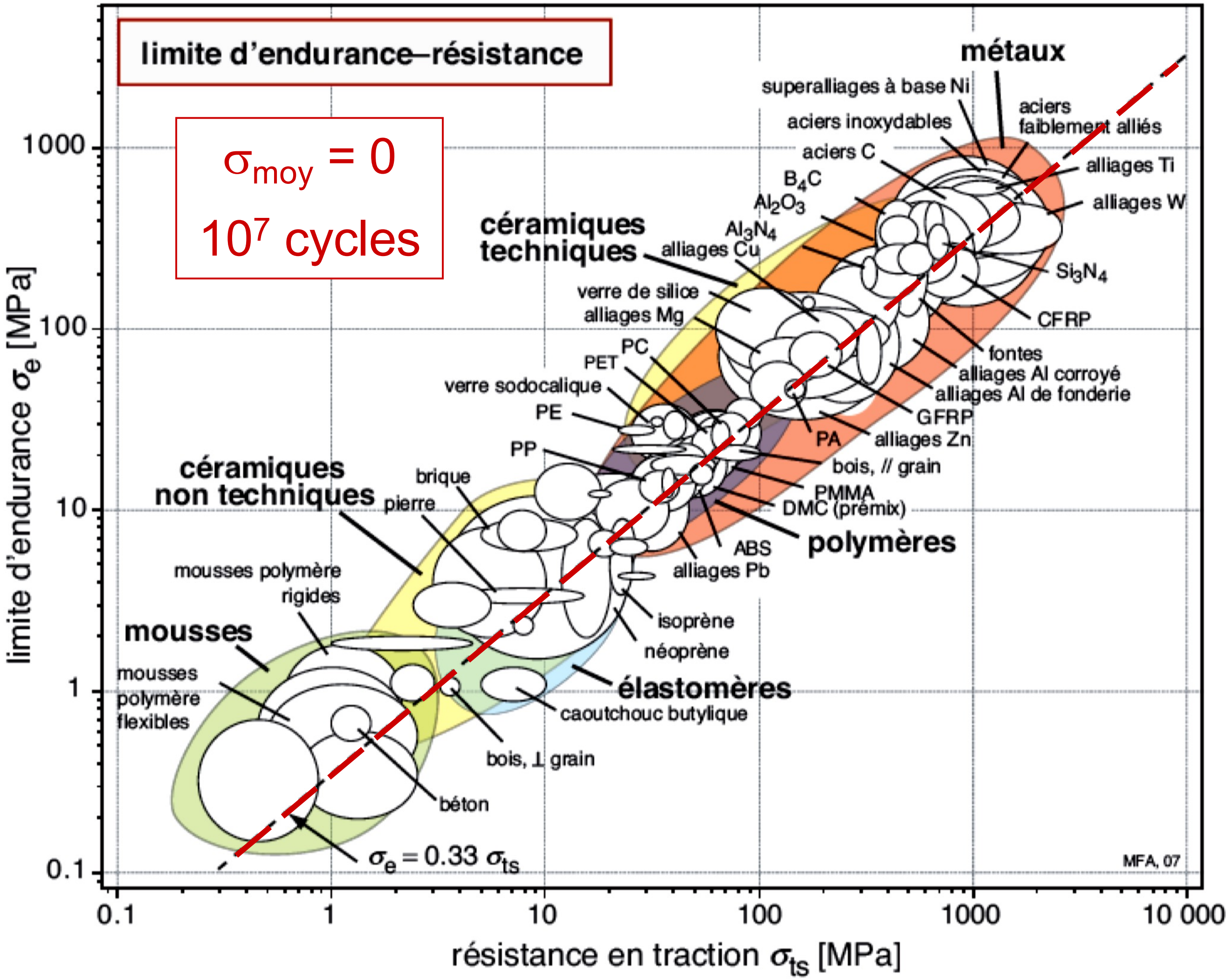
phase traction - ouverture

phase compression - fermeture



Fatigue

Si l'endurance σ_e est assez bien corrélée avec σ_m, elle l'est moins avec σ_Y. σ_e a tendance à diminuer lorsque σ_Y augmente.



$$\sigma_e \approx \frac{1}{3}\sigma_m$$

métaux
polymères

$$\sigma_e \approx 0.9\sigma_m$$

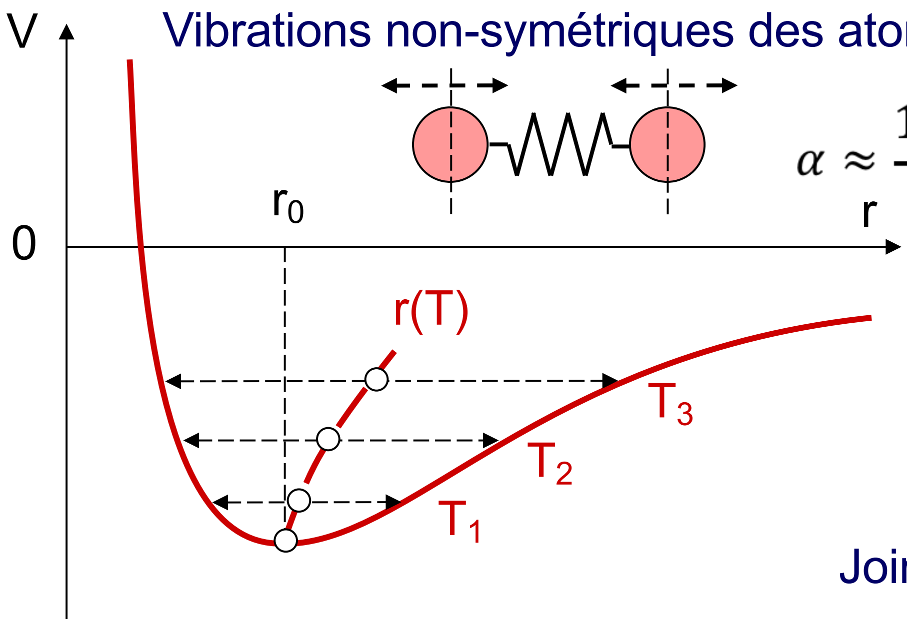
céramiques
verres

Fatigue thermique: Dilatation

Sous l'effet d'une augmentation de la température, presque tous les matériaux se **dilatent**. Ce phénomène est dû à **l'asymétrie** (anharmonicité) du potentiel d'interaction entre atomes.

Le **coefficient d'expansion thermique linéaire** α est défini comme:

$$\boxed{\alpha = \frac{1}{L}\frac{dL}{dT}}$$

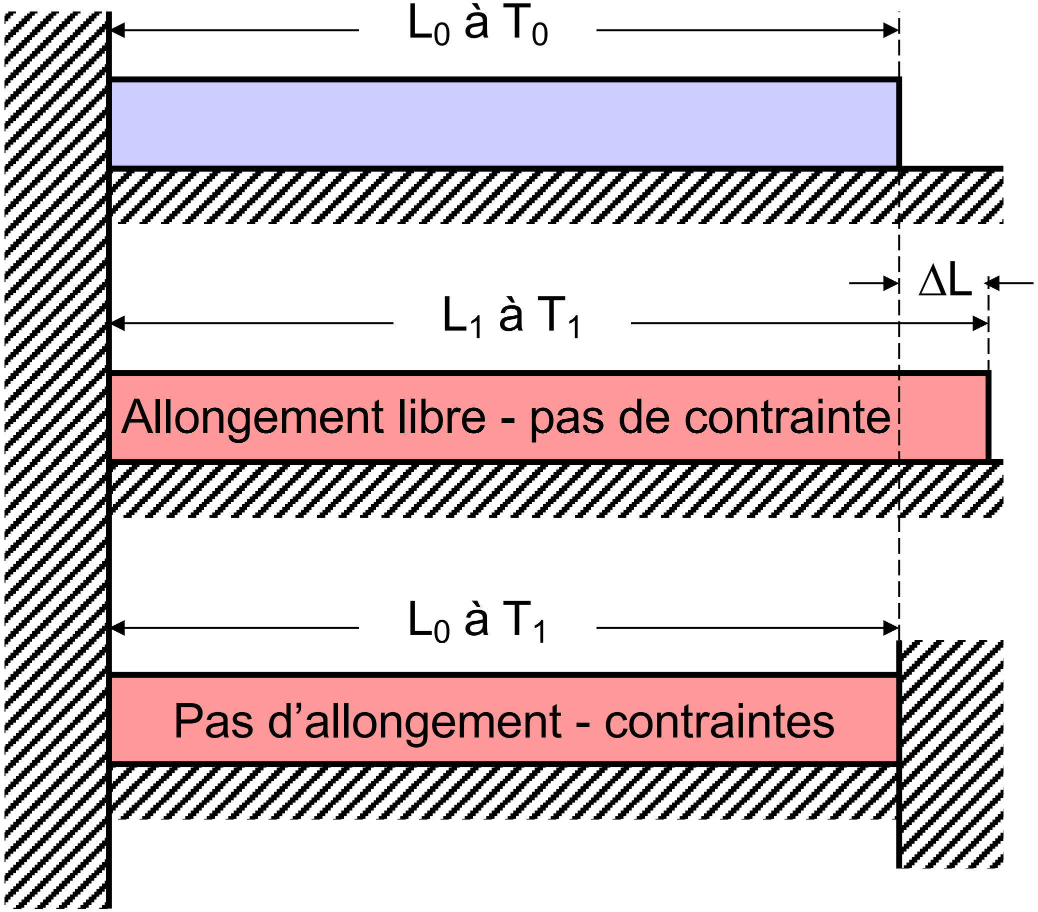


$$\alpha \approx \frac{1.6\times10^{-3}\ (GPa.K^{-1})}{E\ (GPa)}$$

Joint de dilatation thermique d'un pont

Contraintes thermo-mécaniques

L'expansion thermique engendre des **déformations** et des **contraintes thermo-mécaniques** dans les solides. Considérons un cas à une seule dimension.



Une barre libre de s'allonger a une longueur initiale L_0 à T_0. A T_1, elle a donc la longueur L_1:

$$L_1 = L_0 + \Delta L = L_0 [1 + \alpha (T_1 - T_0)]$$

$$\varepsilon_{xx}^{th} = \frac{\Delta L}{L_0} = \alpha (T_1 - T_0)$$

Si on empêche la barre de s'allonger pendant le chauffage, $\Delta L = 0$, ce qui signifie:

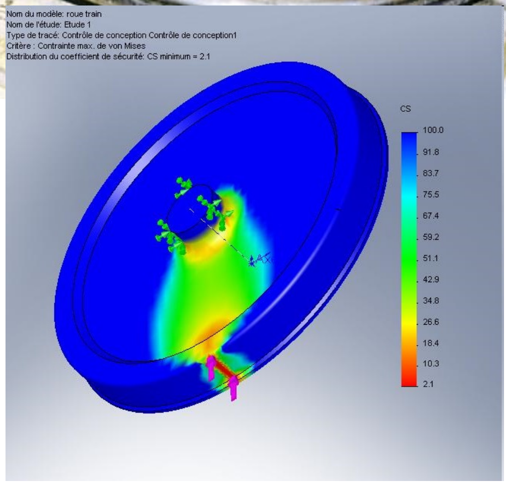
$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{xx}^{th} + \varepsilon_{xx}^{el} = 0$$

$$\sigma_{xx} = E\varepsilon_{xx}^{el} = -E\alpha (T_1 - T_0) < 0$$

Fatigue

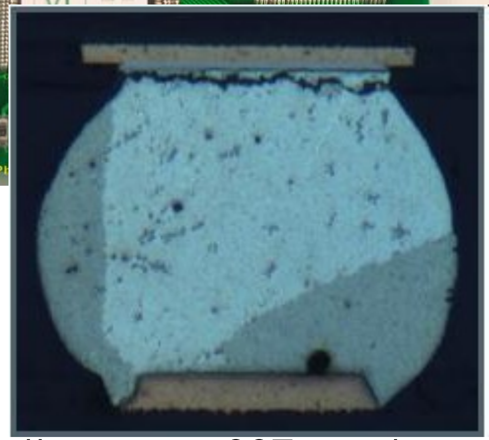
De nombreuses pièces sont soumises à de la fatigue, pouvant mener à leur rupture. Parfois indirectement, par chauffage (**fatigue thermique**).

Contraintes dans un contact roue-rail



Cycles d'une aube de moteur d'avion

Fissure de fatigue thermique dans une soudure



http://www.olympic.org/fr/passion/museum/temporary/photo_fr.asp?IdProv=21&PicId=71

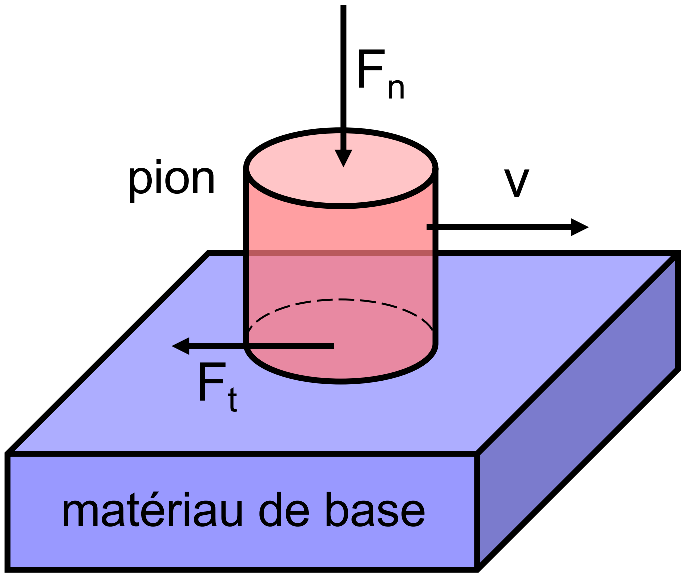
http://www.ems007.com/pages/zone.cgi?a=51654&_pf_=1

http://projets.ch/wp/blog/23/ http://www.tsb.gc.ca/fra/index.asp

Usure

L'usure des matériaux est dû au contact-mouvement entre deux surfaces en contact. C'est le domaine de la **tribologie**.

On définit **2 coefficients de friction**:



- **Coefficient de friction statique**

  La vitesse relative du pion sur la base est nulle (pneu adhérant sur la route)

$$\mu_s \approx \frac{F_t}{F_n} \qquad v = 0$$

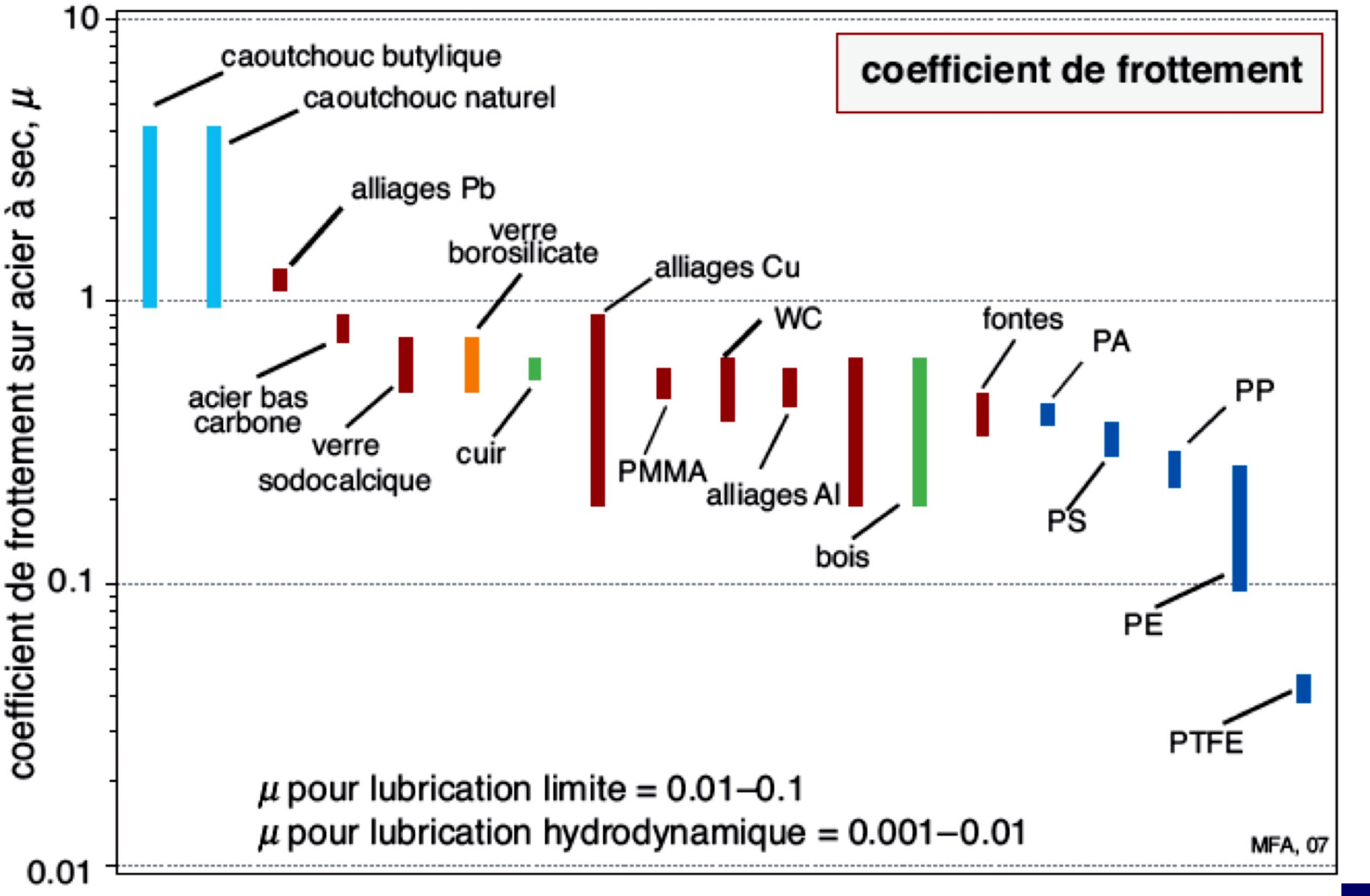
- **Coefficient de friction dynamique**

  La surface inférieure du pion a une vitesse non-nulle relativement à la base (freinage roues bloquées)

$$\mu_d \approx \frac{F_t}{F_n} \qquad v \neq 0$$

Usure

Quelques coefficients de friction dynamique lors d’un **frottement sec** de divers matériaux sur une plaque d’acier.



Exemples d'Usure

Pièces de machine agricole
après / avant

Plaquette frein vélo

après / avant

Pneus de voiture

après / avant

Usure

On définit un **taux d'usure W** comme la quantité de matière enlevée du pion par unité de longueur de déplacement.

$$W = \frac{\text{volume enlevé}}{\text{distance parcourue}} \qquad [m^2]$$

Le **taux d'usure spécifique Ω** est normalisé par la surface de contact:

$$\Omega = \frac{W}{A} \qquad [-]$$

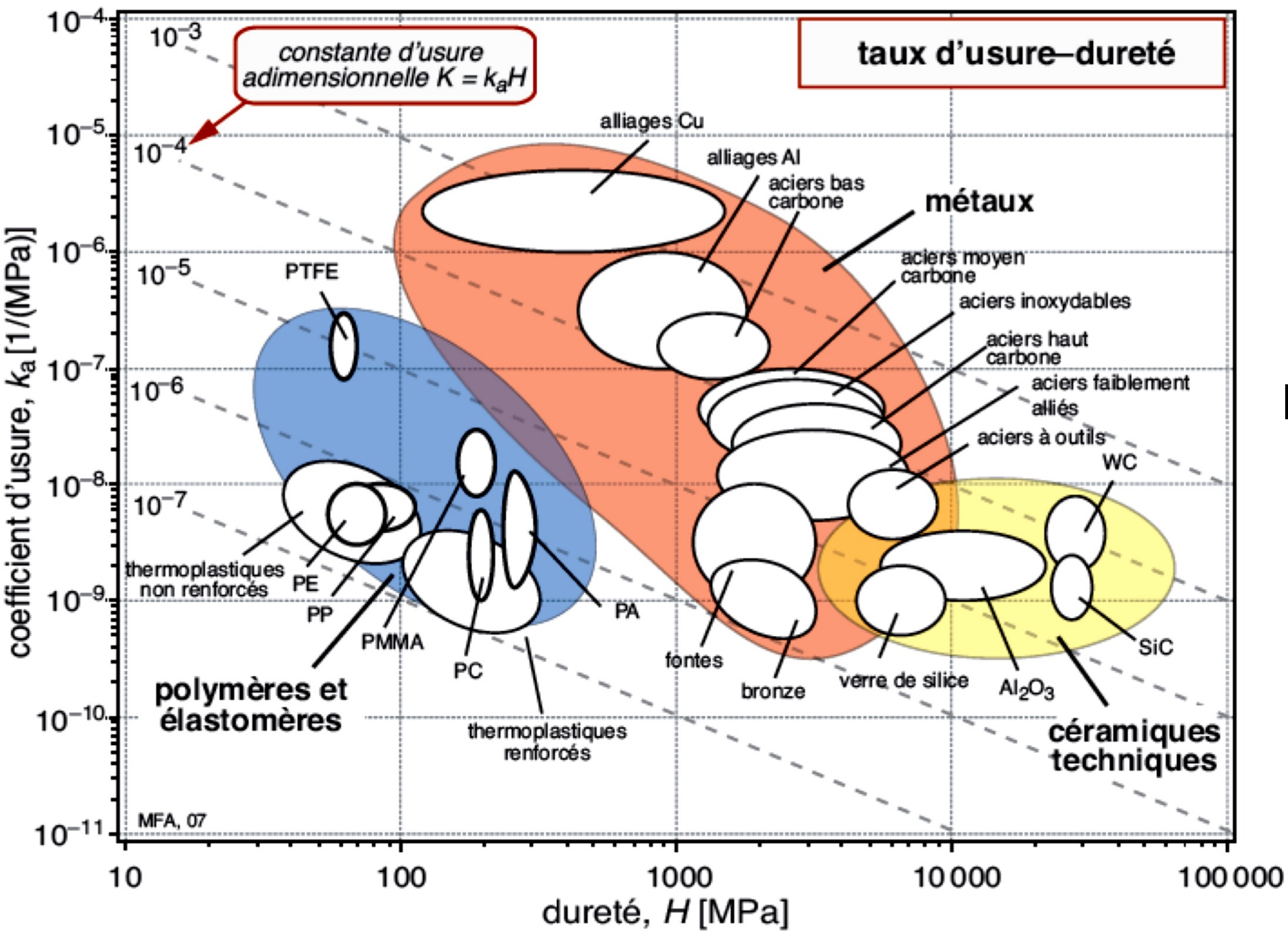
Le taux d'usure spécifique Ω est fonction des matériaux en contact, de leur état de surface et de la **pression appliquée**:

$$\Omega = \frac{W}{A} = k_a\, p = k_a \frac{F_n}{A}$$

k_a est le **coefficient d'usure d'Archard** $[Pa^{-1}]$. Outre le type de matériaux et leur état de surface, ce coefficient dépend fortement de l'**état de lubrification du contact**.

Usure

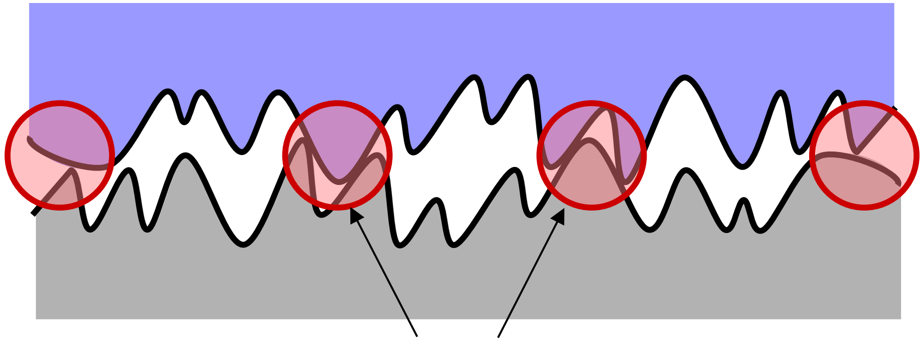
On peut relier (dans une certaine mesure) le coefficient d'usure k_a avec la dureté des matériaux, ici pour un contact lubrifié.



$H_V(MPa) = g x H_V$

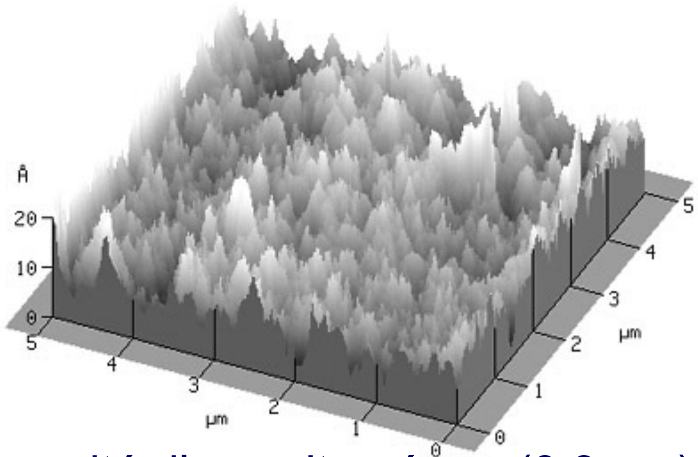
Usure

La friction entre deux surfaces est due aux **points de contact** entre elles, c'est-à-dire à leur **rugosité** de surface.



Zones de contact

Aire de contact : A_C



Rugosité d'une vitrocéram (0.3 nm)

http://www.cndp.fr/Themadoc/micro3/micro3Imp.htm

En admettant qu'aux points de contact la pression est telle qu'on a atteint σ_Y, on a alors:

$$\sigma_Y = \frac{F_n}{A_C} = p\,\frac{A}{A_C} \qquad \text{ou} \qquad \frac{A_C}{A} = \frac{p}{\sigma_Y}$$

Réduire F_n (ou p) et/ou augmenter σ_Y (ou H_V) va ainsi diminuer la surface effective de contact, diminuer la taille des fragments créés lors du frottement et réduire l'usure.

Résumé

- La fatigue et l’usure sont deux causes très importantes de dégradation des matériaux.
- Les courbes de Wöhler permettent de relier le nombre de cycles à la rupture pour une variation de contrainte appliquée.
- Il faut distinguer fatigue oligocyclique, où la contrainte dépasse la limite d’élasticité, et fatigue à grand nombre de cycles.
- Des règles euristiques permettent d’adapter les lois de fatigue à des situations complexes, mais des tests proches de la réalité sont souvent nécessaires.
- La dilatation thermique, qui résulte du caractère asymétrique de l’énergie des liaisons atomiques autour de la position d’équilibre, est un phénomène important de dégradation et de rupture.
- L’usure n’est pas une propriété d’un matériau, mais plutôt celle d’un couple de matériaux, dans une configuration donnée, avec la plupart du temps la présence d’un lubrifiant.