

**Partie II: Cours No 6.2**  
**Dureté / Usure**

**V.Michaud**

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne**



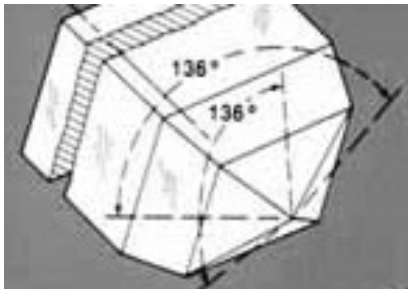
# Objectifs du cours

---

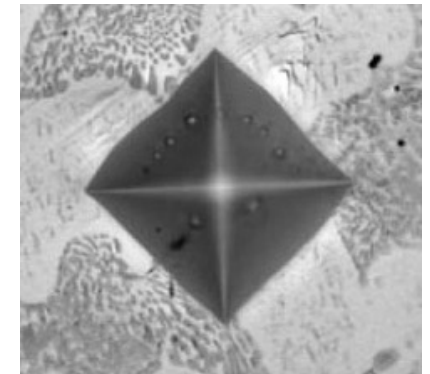
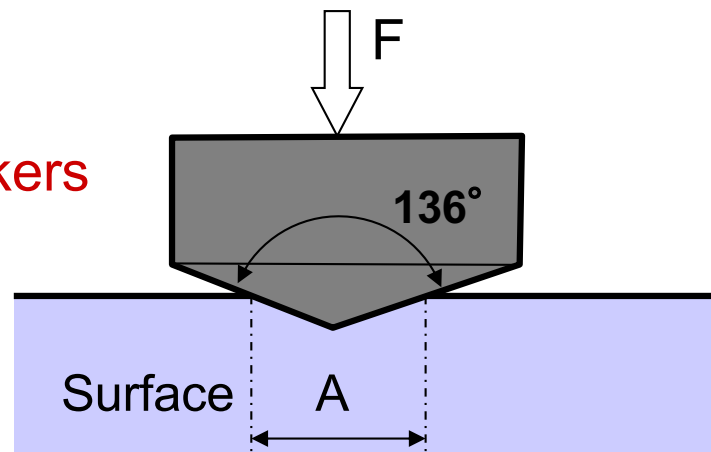
- Introduire le concept de dureté d'un matériau (pratique pour mesurer sa limite d'élasticité).
- Introduire le concept d'usure, qui est un cas de chargement cyclique, qui mène au remplacement périodique nécessaire des pièces de frottement.

# Dureté des matériaux

La mesure de la limite d'élasticité  $\sigma_{el}$  ( $\sigma_m$  ou  $\sigma_Y$ ) par un test en traction ou en compression n'est pas toujours aisée. Afin de comparer différents matériaux, on peut avoir recours à un test de **dureté**.

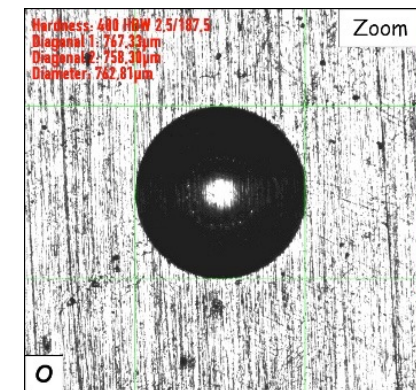
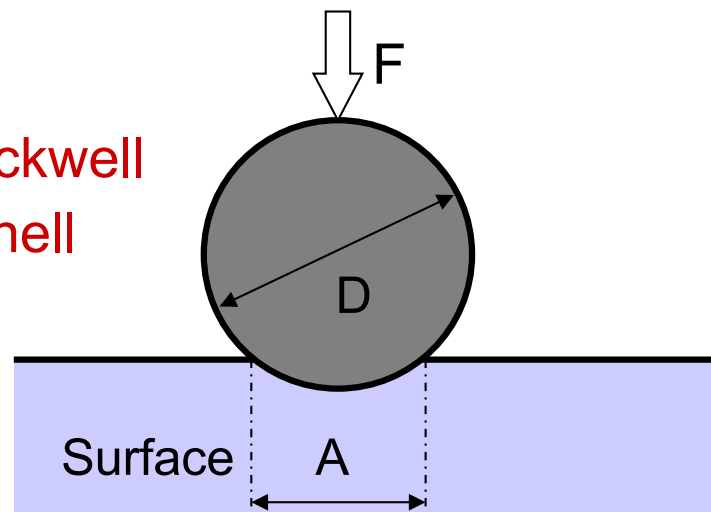


Vickers



Ni - Cr - Mo - Ti

Rockwell  
Brinell



Old.struers.dk

# Dureté des matériaux

La **dureté Vickers** est définie comme suit, avec F la force appliquée:

$$H_v = \frac{F \text{ (kg Force)}}{S \text{ (mm}^2\text{)}}_{\text{emp. té}}$$

$$F = 10 \text{ kg} = 10 \times 9.81 = 98.1 \text{ N}$$

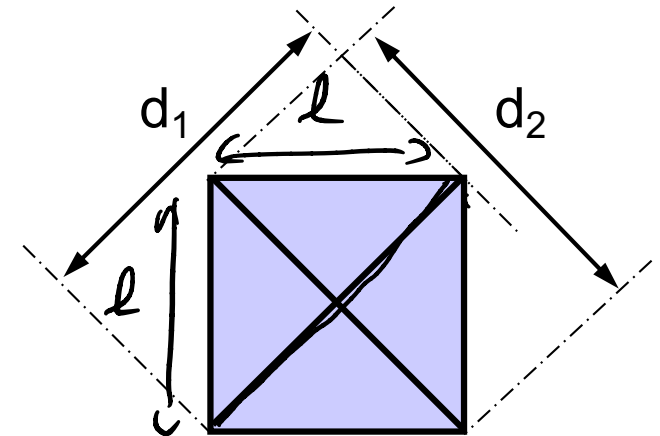
$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$S_{\text{emp}} = 4 S_{\text{coté}}$$

$$S_{\text{coté}} = \frac{1}{2} l \times a$$

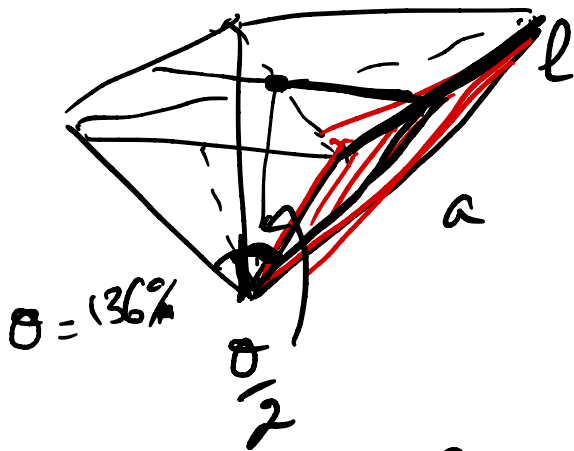
$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{l}{2/a} \rightarrow a = \frac{1}{\sin \frac{\theta}{2}} \frac{l}{2}$$

$$S_{\text{coté}} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2}d}{2} \times \frac{\sqrt{2}d}{2 \times 2} \frac{1}{\sin \frac{\theta}{2}} = \frac{1}{8} \frac{d^2}{\sin \frac{\theta}{2}}$$



$$d^2 = l^2 + l^2$$

$$\rightarrow l = \frac{\sqrt{2}d}{2}$$



# Dureté des matériaux

La **dureté Vickers** est définie comme suit, avec  $F$  la force appliquée:

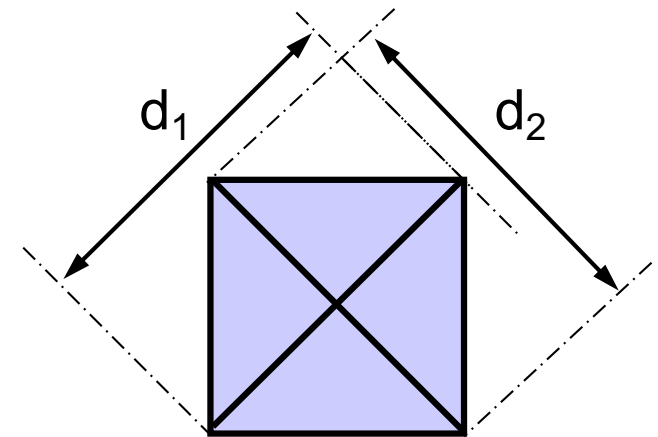
$$H_v = \frac{F(\text{kgf})}{\text{Sempur}} = \frac{F(\text{kgf})}{4 \frac{1}{8} d^2 \sin \frac{\theta}{2}}$$
$$= \frac{2 F(\text{kgf})}{d^2 \sin \frac{136}{2}} = 1.854 \frac{F(\text{kgf})}{d^2 (\text{mm}^2)}$$

Unités de  $H_v$  = Vickers ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

$$H_v \approx \frac{F[\text{N}]}{g} \times \frac{1.854}{d^2} \approx 0.185 \frac{F[\text{N}]}{d^2}$$

Empiriquement, pour l'acier on a trouvé que  $\sigma_y [\text{MPa}] \approx 3 H_v [\text{vickers}]$

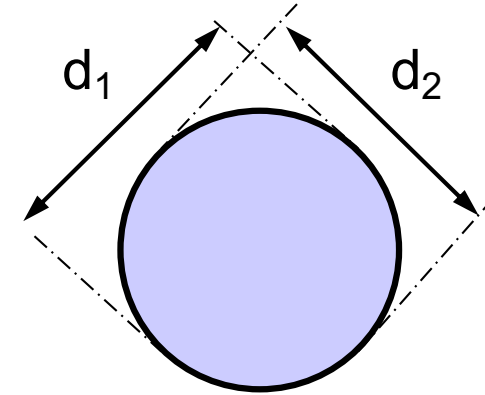
$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$



# Dureté des matériaux

## Autre test de dureté: Dureté Brinell

Sphère de 1 à 10mm de diamètre  $D$ , en acier trempé ou carbure de tungstène (très dure), enfoncée avec une force  $F$ .



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

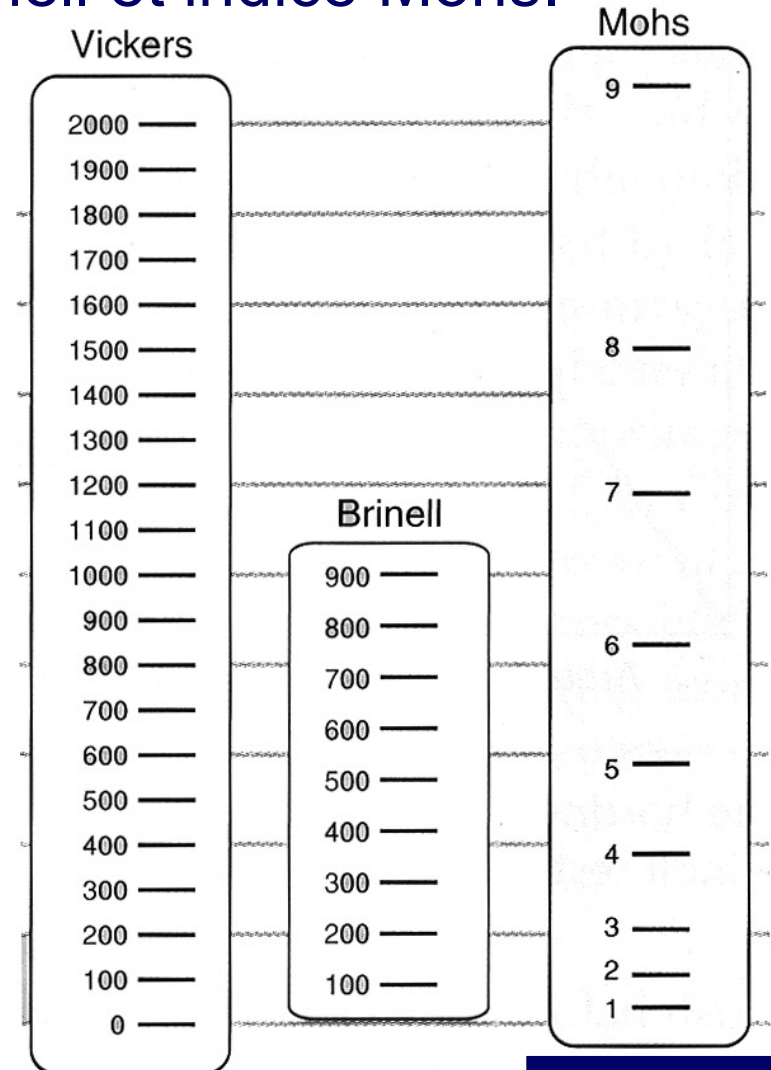
$$H_B = 0.102 \frac{2F \text{ [N]}}{\pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \text{ [mm}^2\text{]}}$$

# Dureté des matériaux

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

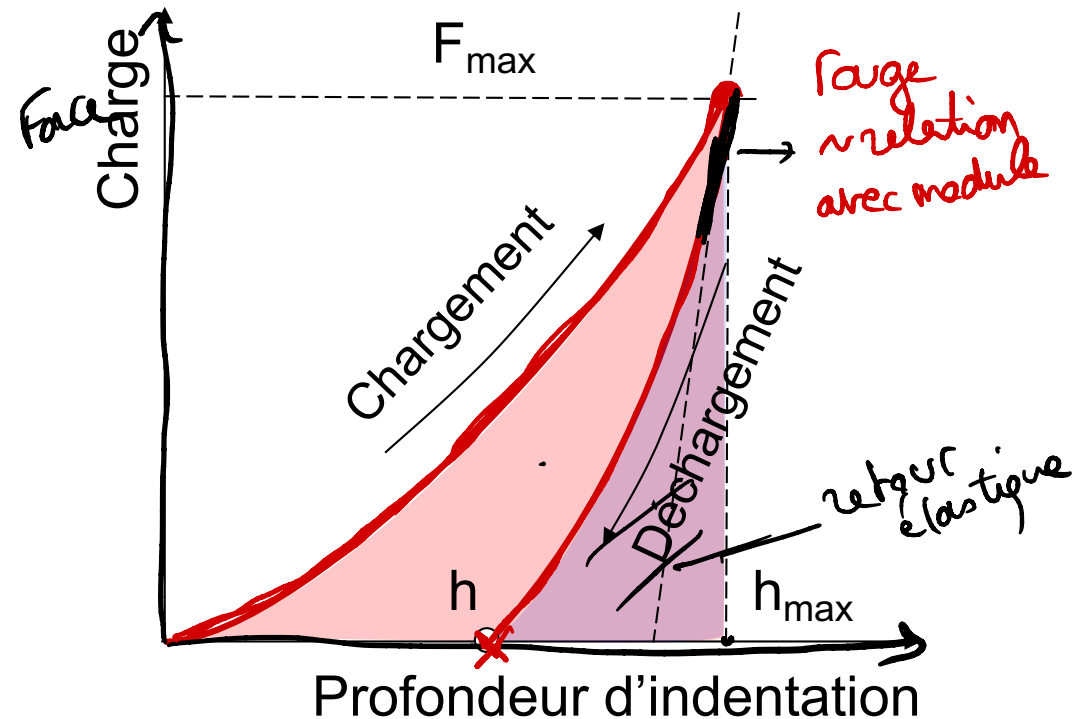
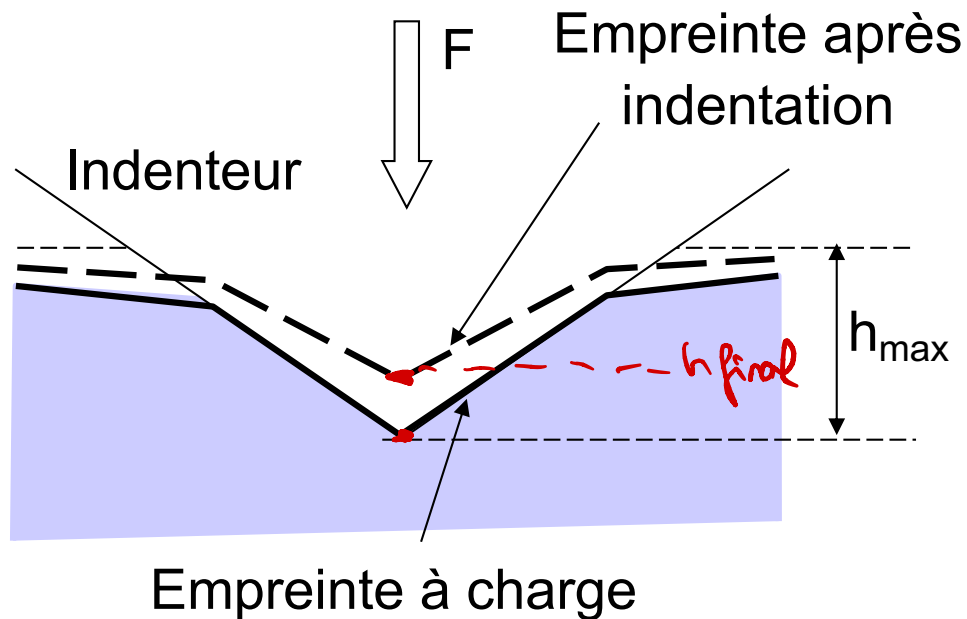
1	Talc	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
2	Gypse	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
3	Calcite	$CaCO_3$
4	Fluorine	$CaF_2$
5	Apatite	$Ca_5(PO_4)_3(OH-, Cl-, F-)$
6	Orthose	$KAlSi_3O_8$
7	Quartz	$SiO_2$
8	Topaze	$Al_2SiO_4(OH-, F-)_2$
9	Corindon	$Al_2O_3$
10	Diamant	C

Indice de dureté Mohs



# Dureté des matériaux

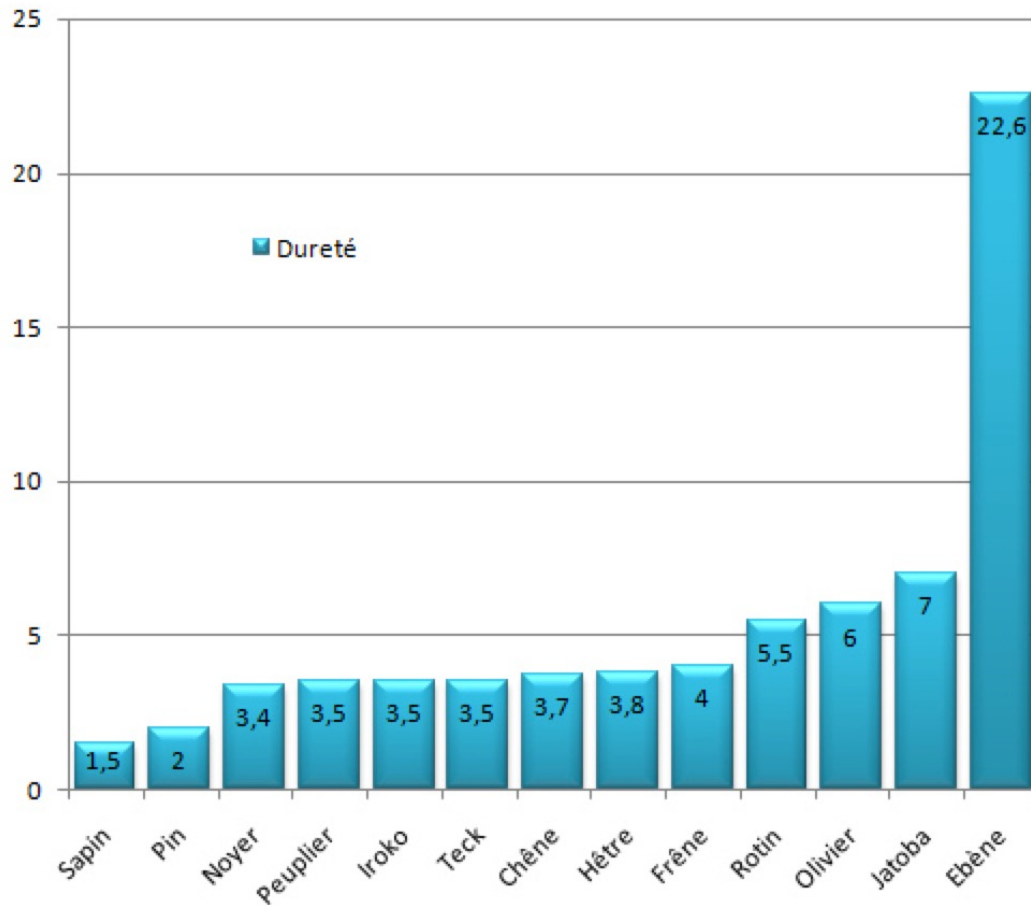
Lors d'un test de dureté instrumenté, on a les phénomènes suivants:



Pourquoi ? Que représente la pente initiale de la courbe lors du déchargement ? Que représentent les surfaces colorées ?

# Exemples de dureté des matériaux

## Dureté du bois (Brinell):

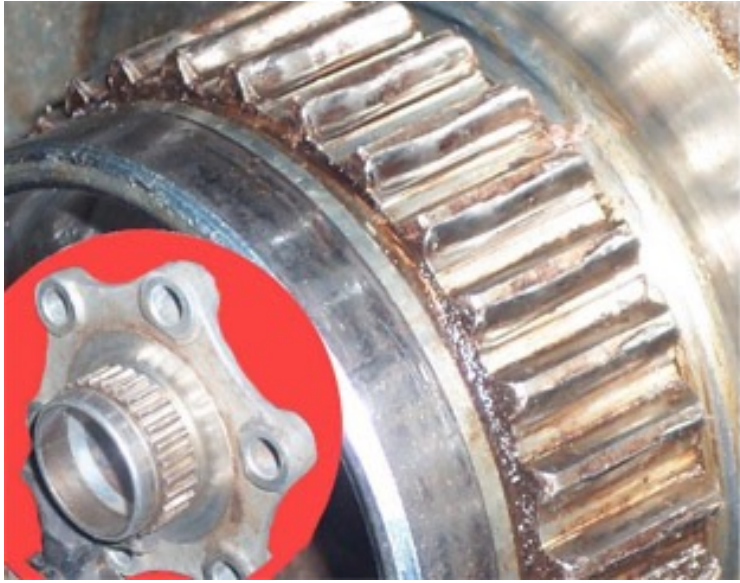


Matériau	Nombre de Brinell
Bois tendre	1.6 HBS 10/100
Bois dur	2.6 à 7.0 HBS 10/100
Aluminium	15-150 HB
Cuivre	35 HB
Acier doux	120 HB
Acier Inox	250 HB
Verre	550 HB
Acier à outils	650 à 700 HB

<http://www.nunchaku-sfw.com>

# Usure

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

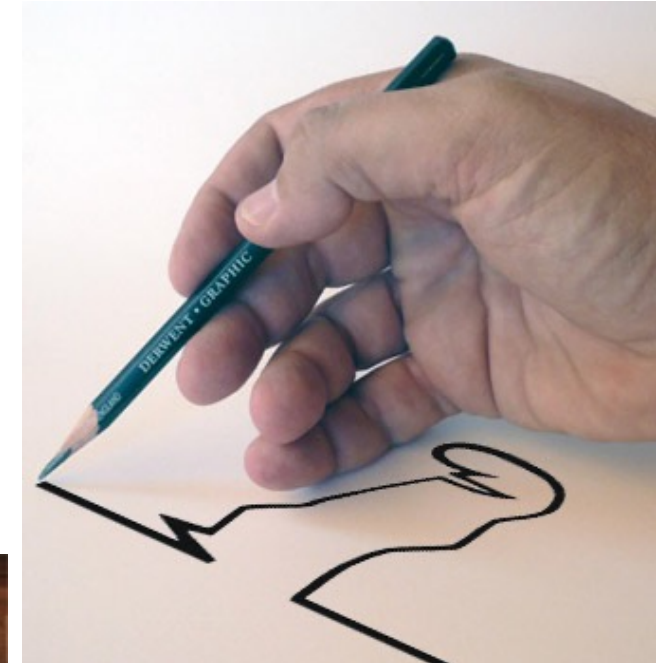


Usure anormale du moyeu de la roue arrière d'une moto, par manque de graissage.

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

[http://cuoresportivo-plaza.blogspot.com/2006\\_12\\_01\\_archive.html](http://cuoresportivo-plaza.blogspot.com/2006_12_01_archive.html)

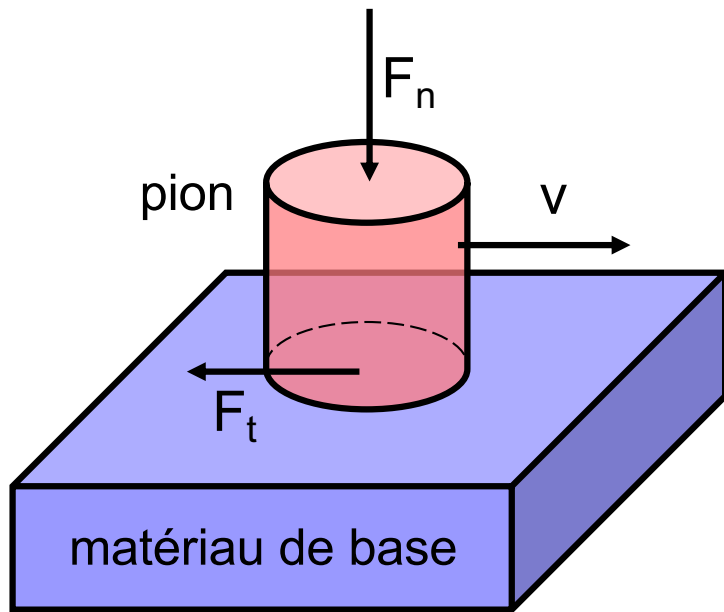
Mais sans usure, pas de dessin au crayon, ni d'adhérence des semelles!



# Usure

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

On définit **2 coefficients de friction**:



$$\mu_s = \frac{F_t}{F_{normale}}$$

statique  $\mu_s$  qd  $\vec{v} = 0$

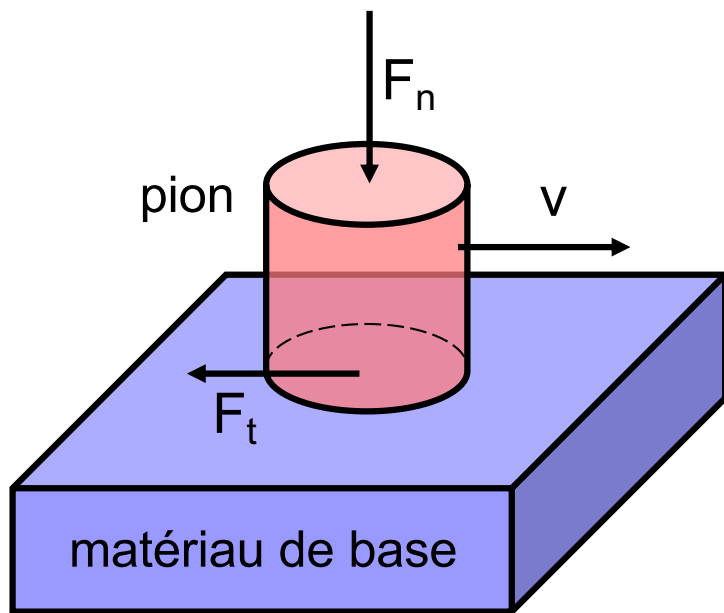


dynamique  $\mu_d = \frac{F_t}{F_{normale}}$  avec  $\vec{v} \neq 0$

# Friction

L'usure des matériaux est dûe 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)

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

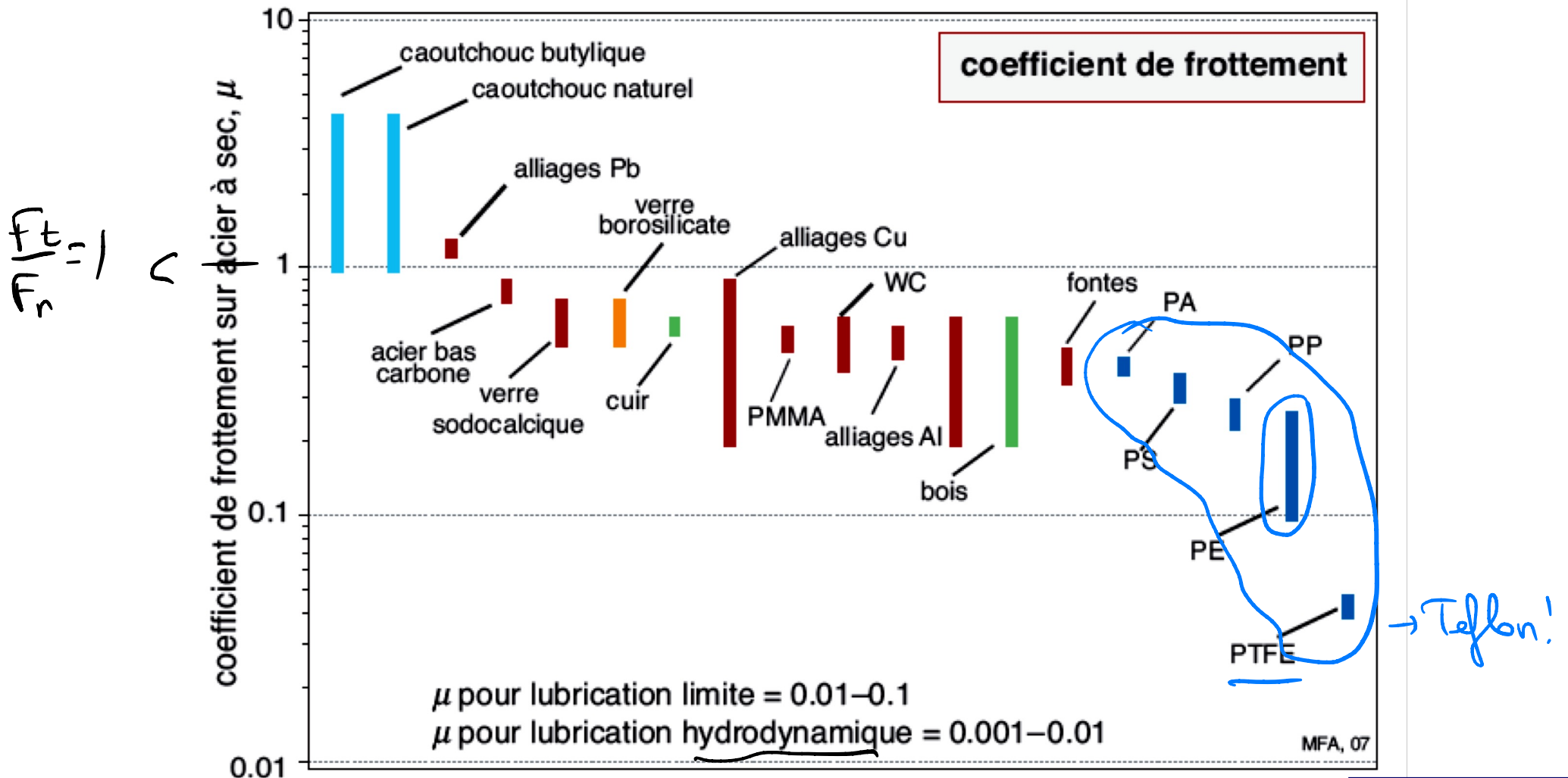
- **Coefficient de friction dynamique**

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

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

# Coefficient de frottement

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



# Exemple d'usure

---

Pièces de machine agricole, après/avant



Plaquette frein vélo, avant/après



Pneu 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.

$$W = \frac{\text{volume enlevé} \quad [m^3]}{\text{distance parcourue} \quad [m]} \text{ en } [m^2]$$

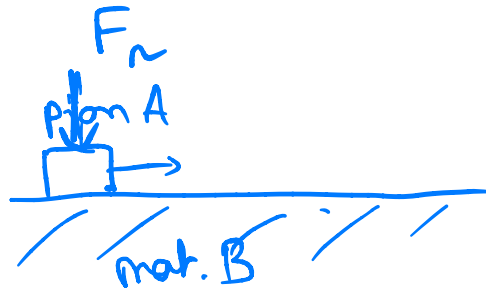
Le **taux d'usure spécifique  $\Omega$**  est normalisé par la surface de contact  $A$ :

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

$$\Omega = f(\text{matériaux A et B}, F_n)$$

$$\Omega = k_a \frac{F_n}{A}$$

loi de Archard  
coeff  $k_a$  [ $Pa^{-1}$ ]



A surface de contact  
 $h_{\text{initial}} \rightarrow$  après usure  $h_{\text{finale}}$

frotté sur 10 mètres

$$W = \frac{(h_{\text{in}} - h_{\text{fin}}) A}{10 \text{ m}}$$

# Usure

---

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

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

Le **taux d'usure spécifique  $\Omega$**  est normalisé par la surface de contact  $A$ :

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

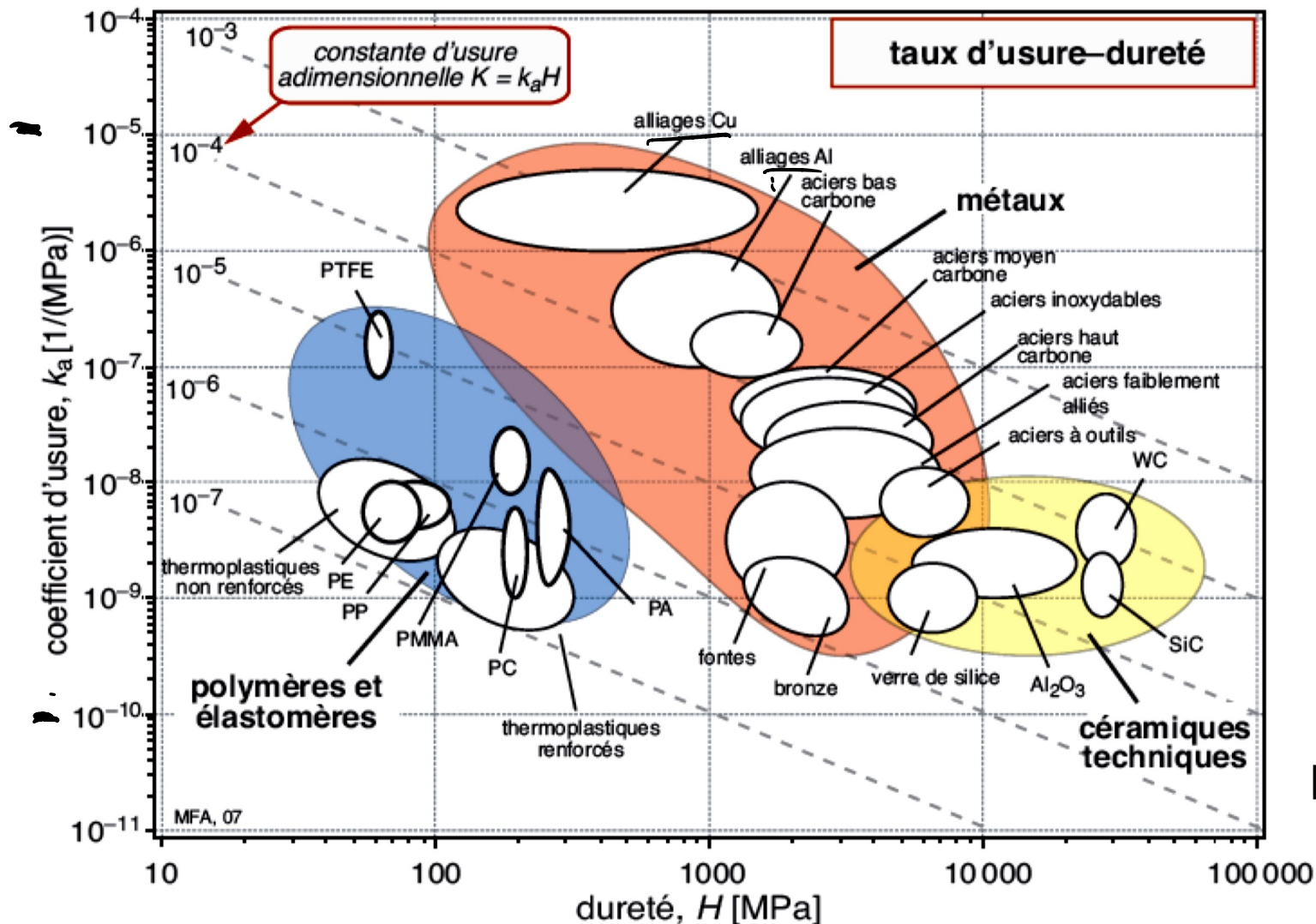
Le taux d'usure spécifique  $\Omega$  est fonction des matériaux en contact, de leur état de surface et de la **pression appliquée  $p$  (ou force normale  $F_n$ )**:

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

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

# Usure

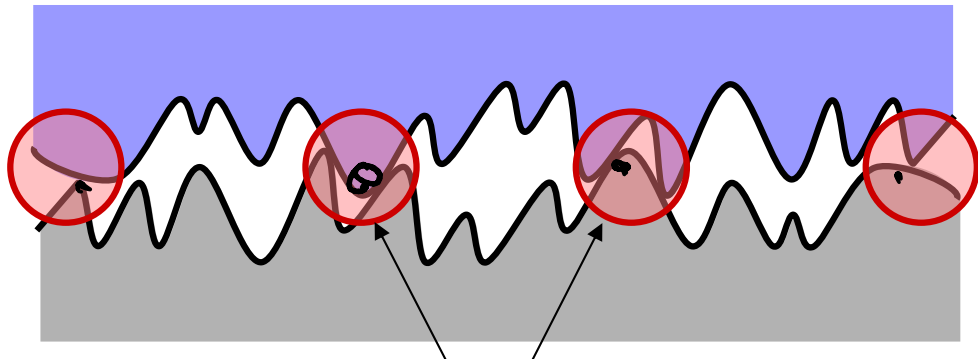
On peut relier (dans une certaine mesure) le coefficient d'usure  $k_a$  avec la dureté des matériaux, ici pour un contact lubrifié.



$$H(\text{MPa}) = 10 H_V$$

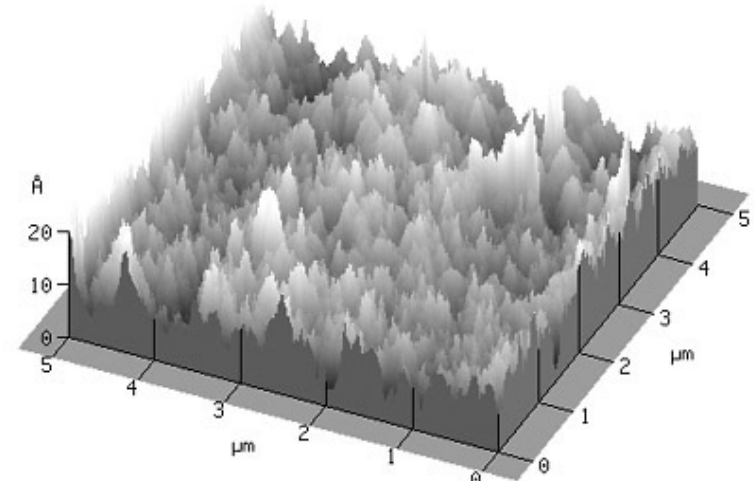
# Usure

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 sur ces zones :  $A_c$



Rugosité d'une vitrocéram (0.3 nm)

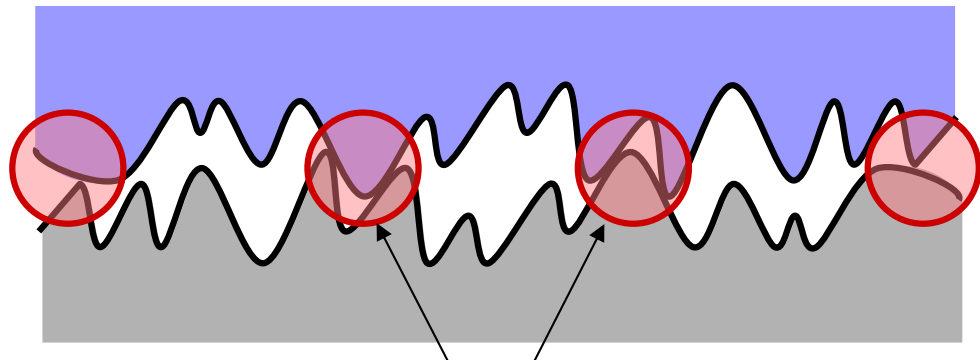
<http://www.cndp.fr/Themadoc/micro3/micro3Imp.htm>

on attend

$$\hookrightarrow \tau_y = \frac{F_n}{A_{\text{contact}}} \leftarrow A_{\text{zone rouge}}$$

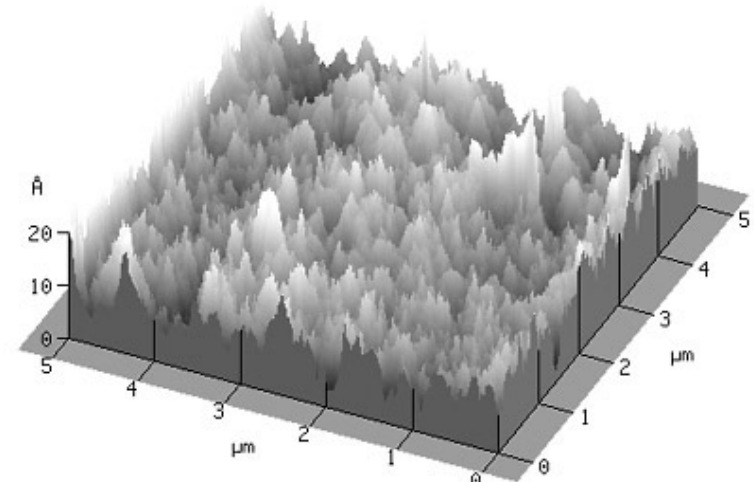
# Usure

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 sur ces zones :  $A_C$



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 la limite d'élasticité  $\sigma_Y$ , on a alors:

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

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

# Usure

On distingue 2 modes principaux d'usure: **l'usure adhésive** (typique de deux matériaux "équivalents") et **l'usure abrasive** (typique d'un matériau dur sur un matériau mou).

Dans certains cas, on peut avoir un mode de frottement mixte, de type **"stick-slip"**, qui peut créer des vibrations.



# Usure

## Exemple pratique



# Résumé

---

- Un moyen de tester simplement la résistance d'un matériau est de faire un test de dureté.
- L'usure est une cause très importante de dégradation des matériaux.
- 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.

# A retenir du cours d'aujourd'hui

---

- *Connaître les définitions de dureté (Vickers, Brinell), ténacité, énergie de surface, facteur d'intensité de contraintes.*
- *Savoir retrouver la valeur de dureté d'un matériau à partir d'une empreinte Vickers ou Brinell, et relier cette valeur à une limite (approximative) d'élasticité.*
- *Savoir la définition des coefficients de friction statique et dynamique, du taux d'usure et du taux d'usure spécifique, et appliquer la relation entre le taux d'usure spécifique et la pression appliquée.*