

Contact mechanics and elements of tribology

Lecture 7. *Wear and Fretting*

Henry Proudhon

*MINES ParisTech, PSL Research University, Centre des Matériaux, CNRS UMR 7633,
Evry, France*

@ Centre des Matériaux
February 14, 2019

1 Wear

- Usure par adhésion
- Usure par abrasion
- Usure chimique
- Experimental testing

2 Fretting

- Basics
- Fretting wear
- Experimental determination of fretting crack initiation
- Numerical analysis of fretting initiation and propagation
- Fretting fatigue

3 Outlook : insight from numerical models

L'usure est un terme très général qui se définit comme la dégradation de la surface de contact d'un matériau en service. Ces dégradations peuvent être dues à de multiples facteurs, et il est aujourd'hui courant de séparer l'usure en 4 familles distinctes :

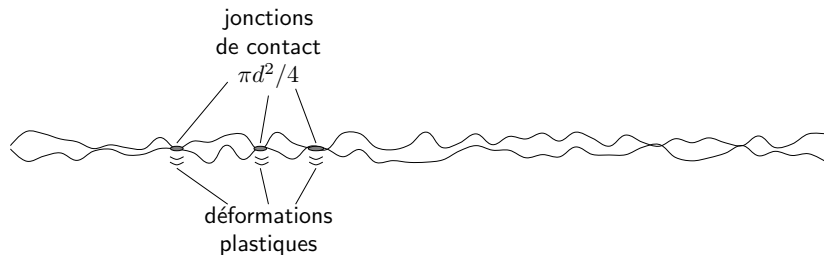
- l'usure adhésive ;
- l'usure abrasive et érosive ;
- l'usure chimique (corrosion) ;
- l'usure par fatigue de contact.

Nous décrirons dans un premier temps les trois premiers types d'usure, le dernier sera évoqué de façon plus approfondie à la section 2.

Phénomène d'adhésion de deux solides en contact

Création de **liaisons fortes** conduisant à la formation de jonctions entre les deux matériaux au niveau des **aspérités en contact**.

Les contraintes au niveau des aspérités sont généralement assez élevées pour engendrer des **déformations plastiques** locales et la création de **liaisons interfaciales adhésives**.



L'indice d'adhésion

L'indice d'adhésion renseigne sur la propension pour deux matériaux d'adhérer l'un à l'autre s'il sont mis en contact.

Il s'exprime en fonction du module de Young effectif E^* , du rayon de courbure moyen du sommet des aspérités R , de l'écart type de la distribution de hauteur des aspérités σ et, enfin, du travail d'adhésion W_{ad} :

$$\alpha = \frac{E^*}{W_{ad}} \left(\frac{\sigma^3}{R} \right)^{1/2}$$

On considère que si $\alpha \leq 5$ les risques d'adhésion sont importants.

L'indice de plasticité

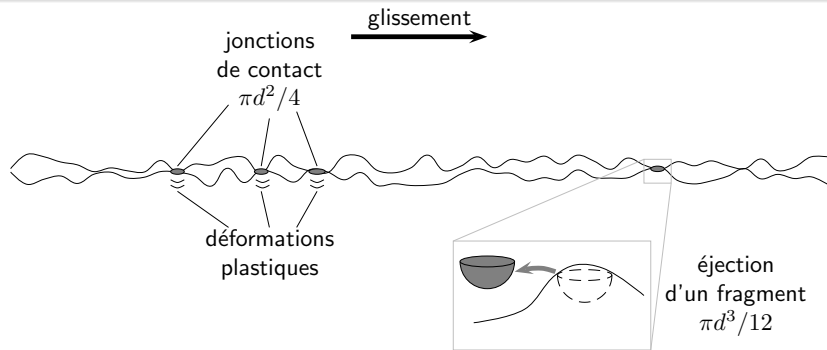
L'indice de plasticité renseigne sur le risque de déformation plastique d'une surface rugueuse soumise à une charge P :

$$\psi = \frac{P}{H} \left(\frac{\sigma}{R} \right)^{1/2}$$

Pour $\psi \leq 0,6$ la déformation de la surface est essentiellement élastique, alors que pour des valeurs supérieures à l'unité, la déformation sera majoritairement plastique.

On utilise cet indice pour prévoir les périodes de rodage, qui constituent des périodes d'adaptation où l'on observe une transition du domaine plastique vers le domaine élastique.

Usure adhésive



- Si l'on est en présence d'adhésion ($\alpha \leq 5$) et que **du glissement est imposé**, l'usure va se produire.
- Certaines jonctions peuvent donner lieu à l'**arrachement d'une particule de matière**, qui est généralement transférée sur la surface du corps antagoniste ; cette particule peut ensuite être éjectée ultérieurement sous forme de débris.
- L'usure par adhésion est directement liée à l'**aire réelle de contact** entre les deux corps $\approx P/H$.

Modèle simplifié^[1] en considérant que les jonctions ont une surface moyenne de $\pi d^2/4$ et que les fragments de matière arrachés sont hémisphériques de volume $\pi d^3/12$. Le nombre de jonctions n à un instant donné se calcule grâce à l'aire réelle de contact P/H :

$$n = P/H/(\pi d^2/4)$$

On considère un déplacement Δl , et Archard suppose que chaque jonction est rompue après une distance d . Ainsi, pour le déplacement Δl , il se sera formé N jonctions tel que :

$$N = n \frac{\Delta l}{d} = 4 \frac{P}{H} \frac{\Delta l}{\pi d^3}$$

Si K est la probabilité pour une jonction de donner lieu au transfert d'une particule, le volume usé s'exprime par $\Delta V = KN \pi d^3 / 12$. Le volume usé par unité de glissement s'écrit donc :

$$\frac{\Delta V}{\Delta l} = \frac{KP}{3H}$$

On observe que le volume usé est **proportionnel à la charge de contact** ainsi qu'à la distance parcourue, mais inversement proportionnel à la dureté du matériau usé. K est appelé *coefficient d'usure* et permet de comparer divers matériaux entre eux pour leur résistance à l'usure. Plus K est élevé, plus l'usure sera importante.

Le coefficient d'usure K

K représente donc la fraction des jonctions de contact qui vont donner lieu à de l'arrachement, produisant l'usure.

- $K = 1$: Chaque jonction de contact produit un fragment d'usure.
- $K = 0.1$: Un dixième des jonctions de contact produit des fragments d'usure. Pour une surface d'or propre, K est entre 0.1 et 1. Pour du cuivre K est entre 0.1 et 0.01. Les surfaces propres d'or s'usent donc 10 fois plus que celles de cuivre dans les mêmes conditions de contact.
- $K = 10^{-7}$: Une jonction de contact sur 10 millions produit un fragment d'usure.

Valeurs de quelques coefficients d'usure

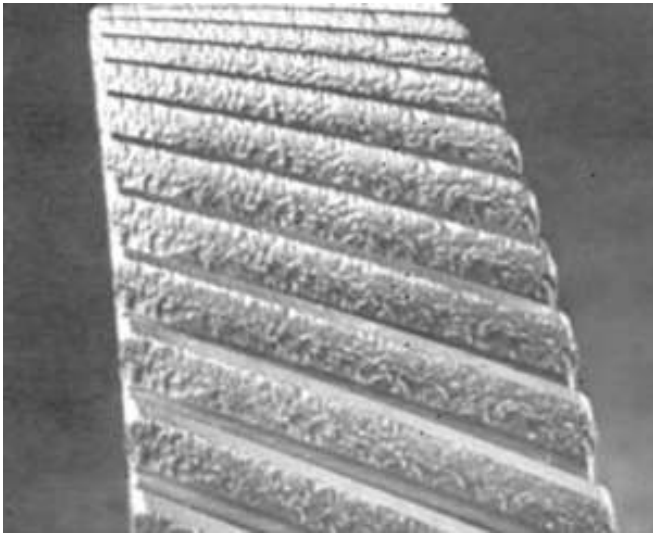
Le tableau suivant présente des valeurs de coefficients d'usure pour différentes combinaisons de matériaux en contact^[1].

Notons que la présence d'un lubrifiant permet d'abaisser de façon considérable le coefficient d'usure.

Matériaux en contact	Coefficient d'usure K
Zinc sur Zinc	$160 \cdot 10^{-3}$
Cuivre sur Cuivre	$32 \cdot 10^{-3}$
Acier inoxydable sur Acier inoxydable	$21 \cdot 10^{-3}$
Cuivre sur Acier bas carbone	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Acier bas carbone sur Cuivre	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Bakélite sur Bakélite	$0,02 \cdot 10^{-3}$

M. Shaw M, *Friction and Wear*, p 657-673, Addison Wesley, Reading MA (1966).

Usure par abrasion



Description de l'usure par abrasion

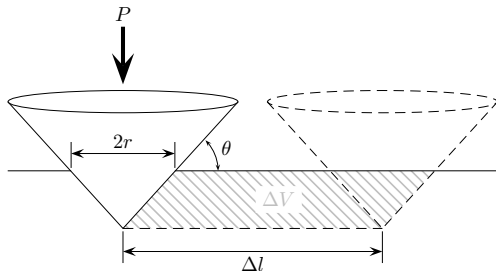
- Une surface dure pénètre dans une surface plus molle ;
- le déplacement relatif des surfaces entraîne une dégradation.

Usure à deux corps lorsque les deux matériaux en contact ont des duretés très différentes

Usure à trois corps lorsque des petites particules très dures sont situées entre les deux matériaux (introduites intentionnellement, comme dans le cas du polissage, ou bien générées par les premières phases d'usure à deux corps ou de réaction tribochimique).

→ L'usure se manifeste par la création de sillons plastiques à la surface du matériau abrasé et de l'éjection possible de particules de matière.

Estimation du volume de matière usé ΔV



Particule conique pénétrant dans le matériau le moins dur, déplacée d'une distance Δl .

Le volume du sillon créé par le déplacement de la particule conique s'exprime par $\Delta V = r^2 \tan \theta \Delta l$, alors que la pression d'indentation est liée directement à la dureté H du matériau le plus mou et à l'aire de contact : $P = \pi r^2 H$. On peut donc écrire :

$$\frac{\Delta V}{\Delta l} = \frac{\tan \theta}{\pi} \frac{P}{H}$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta l} = K' \frac{P}{H}$$

Cette loi est globalement de la même forme que la loi d'Archard au coefficient multiplicatif près. Par rapport à l'usure adhésive, les coefficients d'usure dépendent essentiellement de la géométrie des particules abrasives et sont plutôt de l'ordre de 10^{-3} pour l'usure à trois corps et 10^{-2} pour l'usure à deux corps. L'usure à deux corps est donc beaucoup plus dangereuse, le troisième corps jouant en quelque sorte le rôle de lubrifiant solide.

Usure tribochimique

On qualifie d'usure tribochimique les dégradations de contact en présence d'un **environnement réactif**. L'endommagement est dominé par des réactions chimiques se produisant entre les surfaces de contact et/ou l'environnement extérieur. Ces phénomènes interagissent avec les sollicitations mécaniques qui peuvent parfois faciliter les réactions.

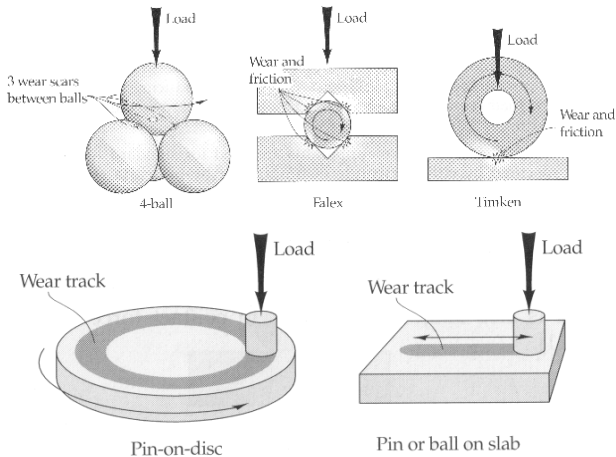
Si le milieu est corrosif, on peut aussi observer un phénomène de **tribocorrosion** activé par les contraintes de contact de la même façon que l'endommagement par corrosion sous contrainte. Les dégradations d'usure sont alors fortement augmentées.

La formation d'oxydes dans ces conditions (tribo-oxydation) peut avoir des effets soit bénéfiques, soit néfastes pour la tenue mécanique des pièces :

- la couche d'oxyde formée peut limiter les sollicitations mécaniques, en abaissant le coefficient de frottement ou par plasticité d'adaptation ;
- à l'inverse, si cette couche se fracture sous l'action des contraintes mécaniques de contact, elle est rapidement éliminée. L'action dépend de si les débris vont jouer efficacement le rôle de troisième corps en lubrifiant le contact. Si ce n'est pas le cas (débris durs et abrasifs) les dégradations peuvent vite devenir catastrophiques.

Tribometers

Schematic illustration of some sample configurations used in simulation of dry or partially lubricated sliding contacts :

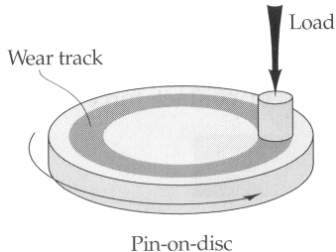


Pin on disk tribometer standards

DIN 50 324 Testing of friction and wear

ASTM G 99 - 95a Standard test method for wear testing with a Pin-on-Disk apparatus

ASTM G 133 - 95 Standard test method for linearly reciprocating ball-on-flat at sliding wear



Comonly used parameters in the characterisation of tribological contacts

Operating parameters

- Load
- Sliding speed
- Sliding distance

Material parameters

- Hardness
- Toughness
- Melting point

Lubrication parameter

- Viscosity
- Flow rate
- Thermal conductivity
- Acidity
- Boiling point
- Solidification point

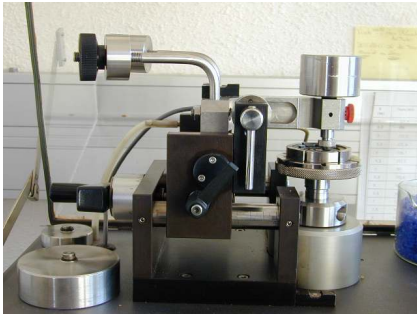
Environmental parameters

- Relative humidity
- Local air pressure
- Radiation level

Tribometers at CdM

Pin on disc tribometer

- CSM company
- rotating specimen vs fixed pin
- environmental control chamber



High load UMT TriboLab

- CETR (now Brucker) company
- reciprocating sliding
- motorized 500 N normal load

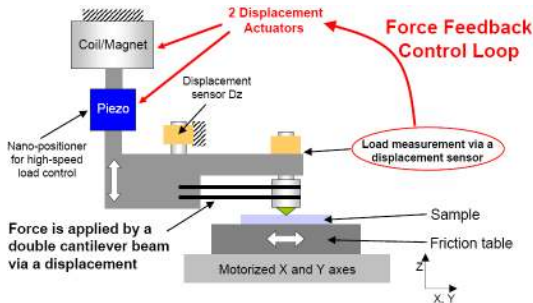


Scratch test

Investigation of the phenomena occurring along the scratch deformation : cracking, spallation, delamination or bulking.

Quantify :

- Scratch resistance
- Adhesion of Coatings
- Friction Coefficient
- Viscoelastic properties
- Wear Testing
- Conventional Hardness

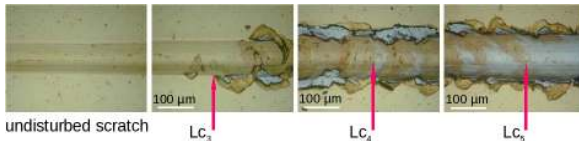
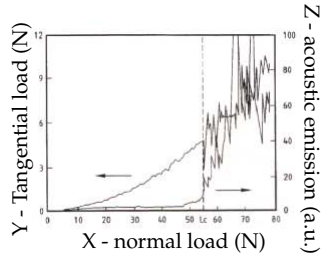
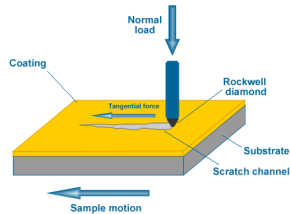


Scratch test to quantify coatings adhesion to substrate

→ scratching a surface with an indenter or ball to characterize the critical loads (L_C) at which the coating failure occurs.



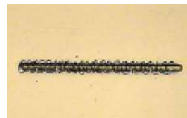
www.iphoneincanada.ca



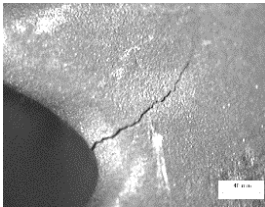
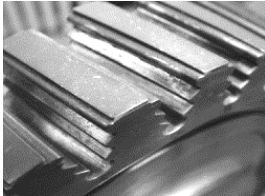
Standard EN 1071-3

Three different scratching procedures :

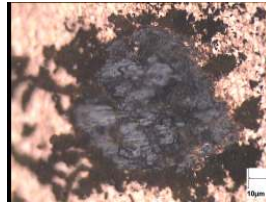
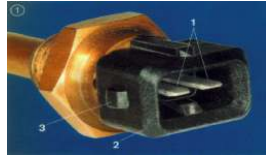
- Progressive load scratch test (PLST)
 - loading rate 100 N/min
 - lateral displacement speed 10 mm/min
- Constant load scratch test (CLST)
 - loading rate 100 N/min
 - lateral displacement speed 10 mm/min
 - load step 1/5 of L_C
- Multipass scratch test (MPST)
 - repeated scratching under a constant sub-critical load within the same scratch track
 - lateral displacement speed 10 mm/min
 - operating parameter same as for CLST
 - load 1/2 of L_C
 - number of scratches until failure



Fretting problems



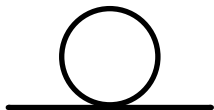
ex : turbine blade/disk contact (cracking)



ex : electrical contact (wear)

Configurations de contact

Géométries réelles de contact très compliquées → simplification de la géométrie pour les essais en laboratoire.



Sphère-Plan



Cylindre-Plan



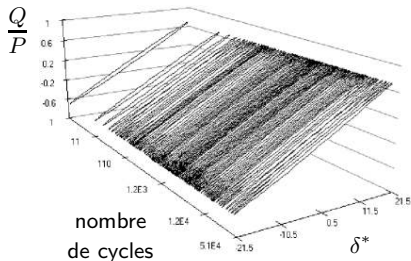
Plan-Plan

- Les configuration sphère-plan et plan-plan sont souvent utilisées pour étudier les cinétiques de fretting usure ;
- la configuration cylindre-plan est plutôt utilisée pour étudier la fissuration par fretting.

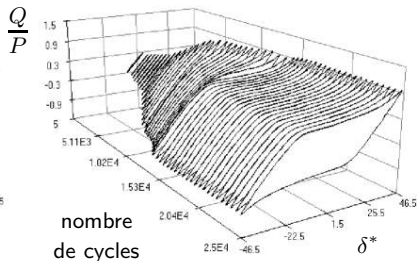
Les différents régimes de glissement

La courbe $Q(\delta)$ adopte deux formes caractéristiques en fonction des paramètres de chargement :

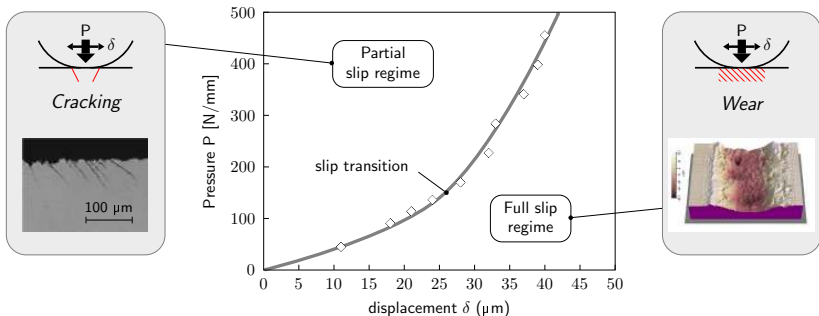
a)



b)



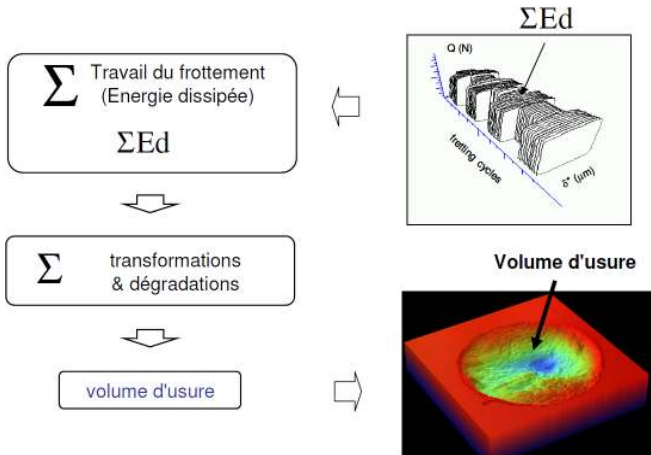
Running condition fretting map



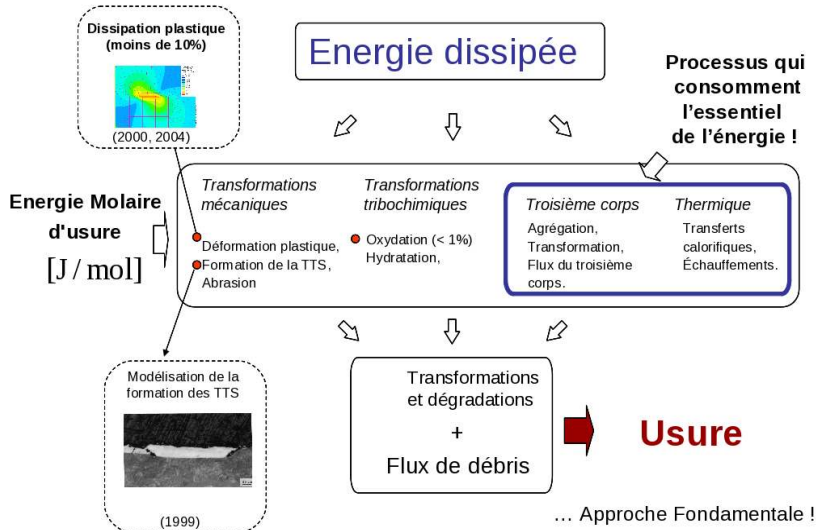
- At low displacement amplitudes and high normal load : partial slip regime. **Cracking** is mainly observed.
- At large displacement amplitudes : full sliding regime. **Wear** is the dominant degradation mechanism.

Fretting wear : dissipated energy

Fretting usure : approche énergétique^[1]

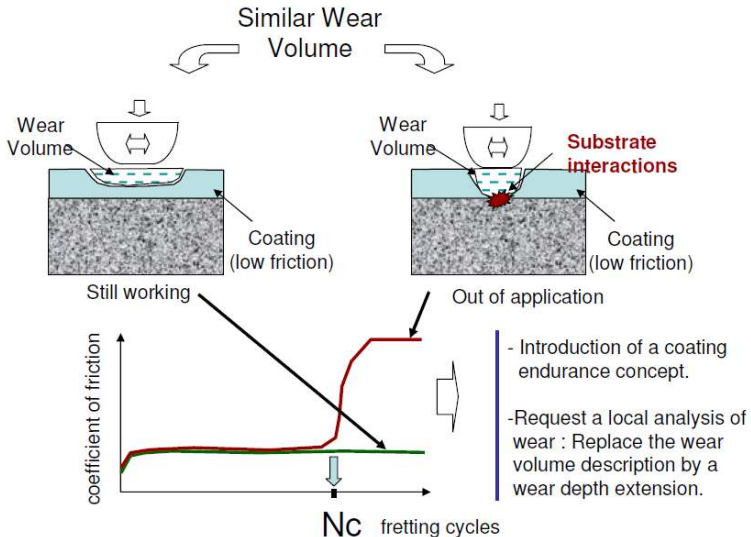


Fretting wear : thermodynamic approach

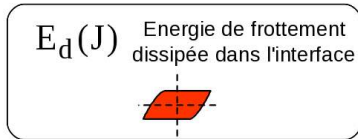


Fretting wear : local approach

Fretting Usure : Approche Locale

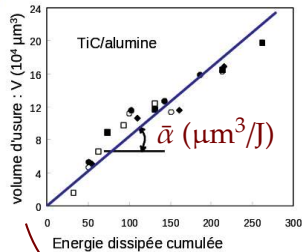
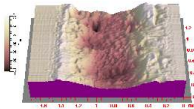


Friction energy capacity to predict surface coating endurance

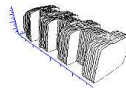


transformations
et dégradations

Usure
 V (μm^3)



$$V = \bar{\alpha} \cdot E_d$$



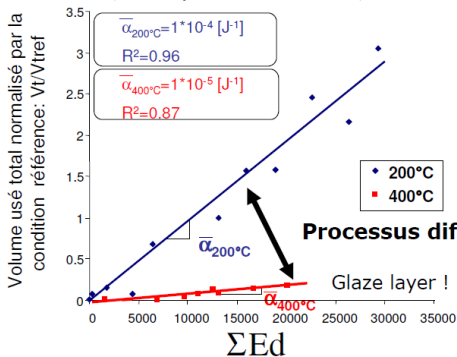
Validé pour
des amplitudes
variables

Travaux de S. Fouvry & T. Lieskiewicz^[1]

Example of Comparative analysis

Fretting Usure : Approche énergétique de l'usure

(360000 cycles, HR=10%, f=13 Hz)



Ex. Contact Inox/Inox

analyse comparative

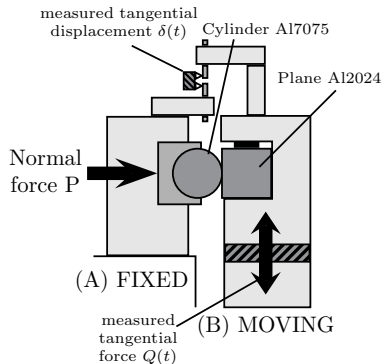
$\bar{\alpha}$

$$\frac{\bar{\alpha}_{200^\circ\text{C}}}{\bar{\alpha}_{400^\circ\text{C}}} \approx 10$$

Example of experimental fretting tests

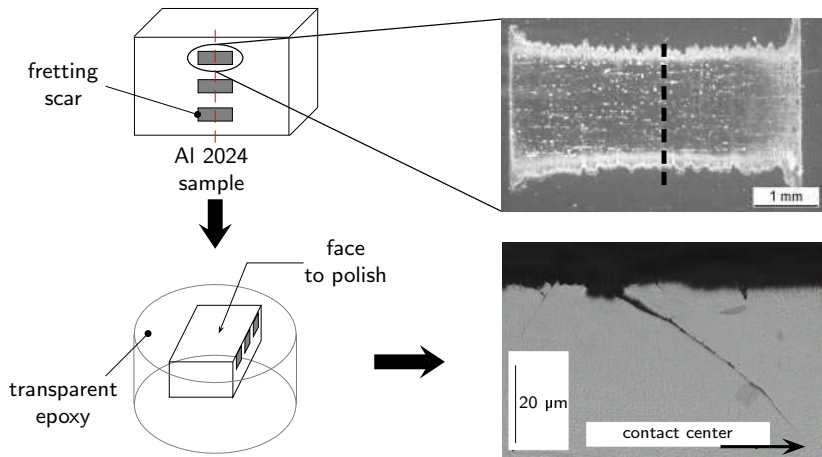
Fretting wear configuration

- Flat vs. Cylinder contact
- AA2024 damage tolerant aerospace alloy
- Partial slip condition
- Measure of P , $Q(t)$ and $\delta(t)$ during test
- number of cycles
 $0 < N \leq 4.10^6$



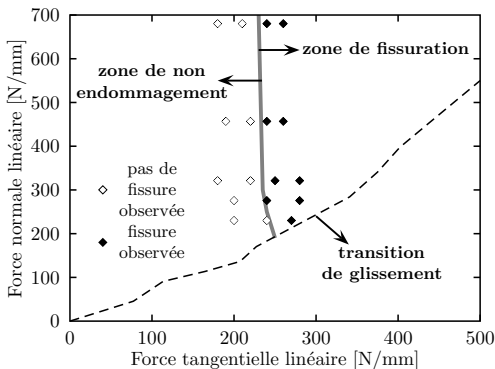
Fretting experiments carried out at Ecole Centrale de Lyon

Fretting damage investigation



Fretting crack initiation boundary

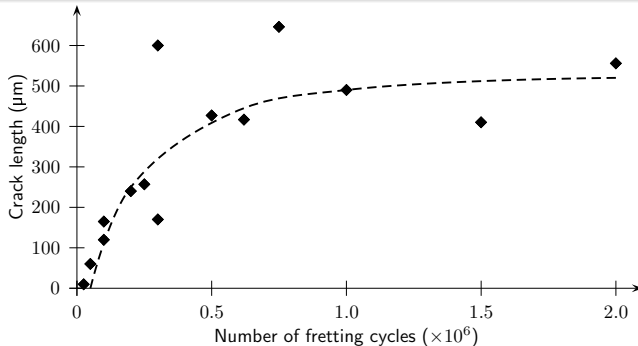
- frontière d'amorçage obtenue pour un contact sec aluminium-aluminium à 50k cycles
- la pression de contact ne semble pas jouer un rôle important
- seuil d'amorçage en force tangentielle $Q_c = 240$ N/mm. L'amorçage dans ce cas semble donc entièrement piloté par le cisaillement en surface.



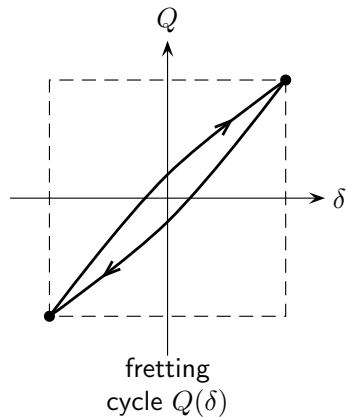
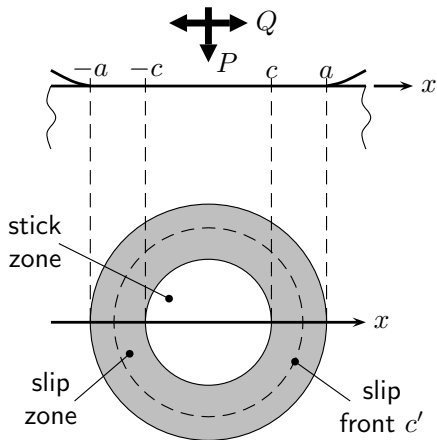
Fretting crack propagation

Experimental conditions

- Fretting loading : $p_0 = 325$ MPa, $\delta = 20$ μm ;
- Destructive characterisation : 1 experimental point $\Leftrightarrow$ 1 test.



Fretting contact in the partial slip regime



Theory of superposition

Formulation by McEwen^[1] and applied to contact loading like fretting by Johnson^[2], later extended by Hills^[3] :

- Analytical stress distribution for sliding contact

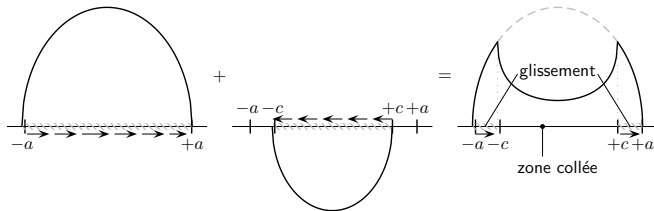
$$\underline{\sigma} = \underline{\sigma}^P + \underline{\sigma}^Q \text{ (Hertz and Coulomb)}$$

- Partial slip stress distribution (proposed by Cattaneo and Mindlin)

$$\underline{\sigma}(\underline{X}, c') = \underline{\sigma}^P + \underline{\sigma}^Q(\underline{X}, c) + \underline{\sigma}^Q(\underline{X}, a) - 2\underline{\sigma}^Q(\underline{X}, c') \text{ load}$$

$$\underline{\sigma}(\underline{X}, c') = \underline{\sigma}^P - \underline{\sigma}^Q(\underline{X}, c) - \underline{\sigma}^Q(\underline{X}, a) + 2\underline{\sigma}^Q(\underline{X}, c') \text{ unload}$$

Example at the surface at the end of the fretting cycle ($c = c'$) :



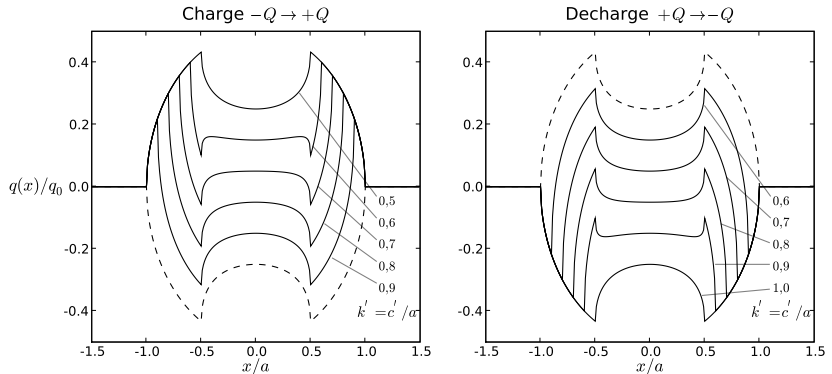
E. McEwen, *Philosophical Magazine*, 40 :454-459 (1949).

K. L. Johnson, *Contacts Mechanics*, Cambridge University Press, (1985).

D. Hills, D. Nowell and A. Sackfield, *Mechanics of Elastic Contacts*, (1993).

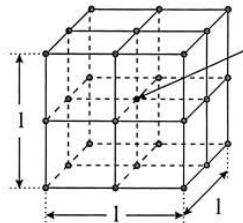
Shear stress during the fretting cycle

Evolution du cisaillement de surface lors du cycle de fretting en glissement partiel prédit par la théorie de Mindlin ($\mu = 0,5$ et $k = c/a = 0,5$) :

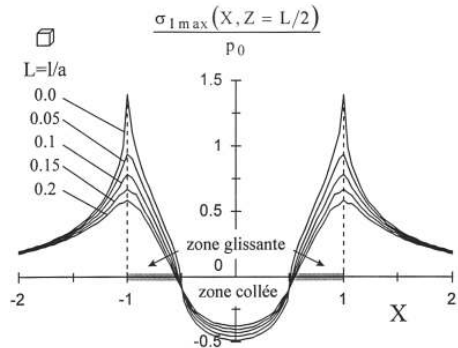


Multiaxial fatigue criterion for crack initiation

- From the stress fields and the elastic constants, the strain field can be derived (or computed numerically including plasticity effects).
- from σ and ϵ fields, a multiaxial fatigue criterion can be used to predict the initiation location and life.
- Due to the severe stress/strain gradients, a spatial averaging procedure is needed.

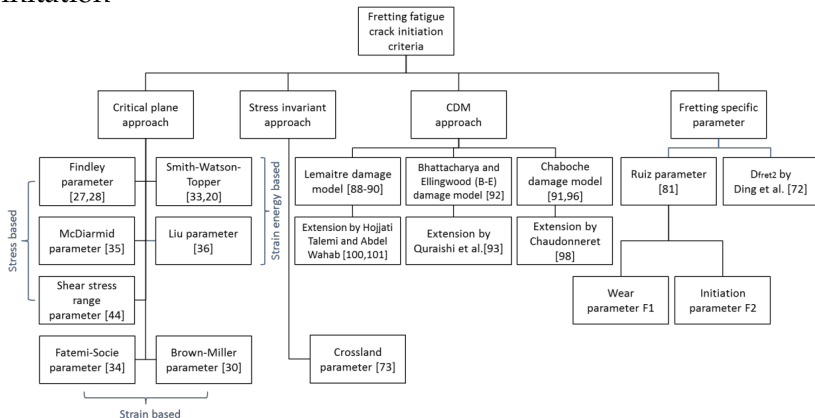


$M(X,Y,Z)$



A fretting criterion classification

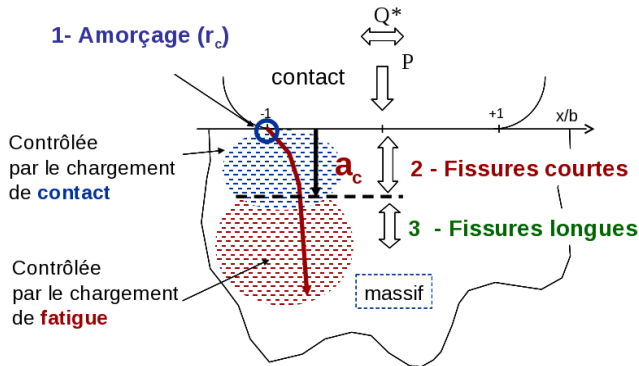
Review of the various criteria used to predict fretting crack initiation^[1]



Ex for the Findley Parameter :

$$FP = \frac{\tau_{max}}{2} + k_1 \sigma_{max}^n \quad \text{and initiation for} \quad \frac{\tau_{max}}{2} + k_1 \sigma_{max}^n = \tau'_f (2N_i)^{b'}$$

Fretting fatigue cracking



Fretting



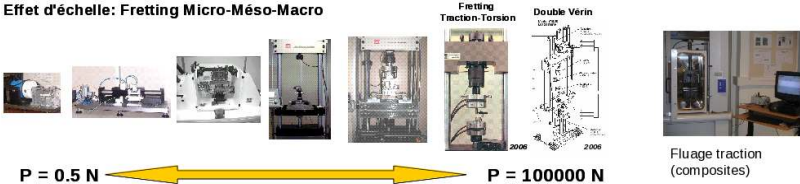
Fatigue

« Comment prédire la cinétique de fissuration en Fretting ? »

Fretting at LTDS, Lyon (France)

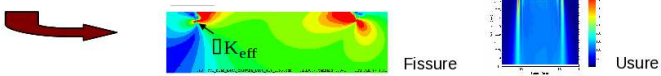
Plateforme expérimentale Fretting & Fatigue

Effet d'échelle: Fretting Micro-Méso-Macro

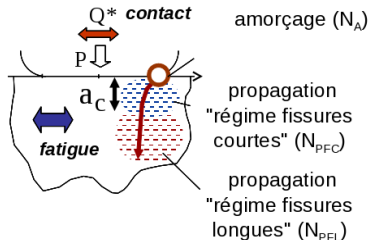


Plateforme numérique Fretting & Fatigue

- Centre FEM ABAQUS (macro - 2D // Visco-Elasto-Plastique)
- Critères multiaxiaux de fatigue
- Propagation des fissures (Crack-Box, Fonctions de poids & Dislocations)
- Codes d'usure remaillage des surfaces (Wear-Box)



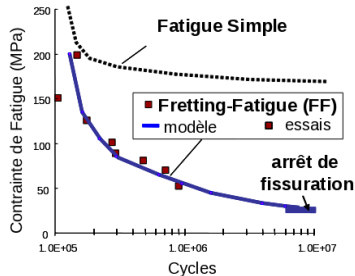
From fretting-fatigue maps to life predictions



Méthodes

- FEM (remailage) : "Crack Box"
- Fonction de poids
- Distribution de Dislocations

$$N_T = N_A + N_{PFC} + N_{PFL}$$

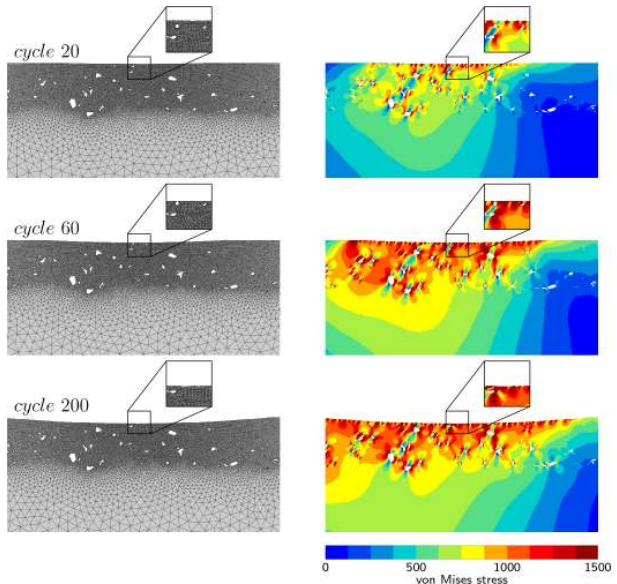
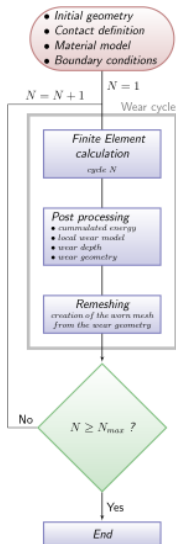


Fretting Fatigue (alliage 2XXX)

Th. K. Kubiak, 2005

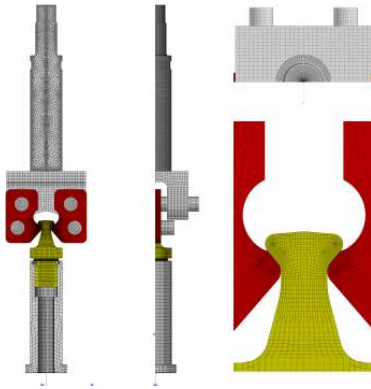
Prédiction de l'endurance en FF
Formalisation du coefficient d'abattement
Fretting-Fatigue / Fatigue

Modèle d'usure



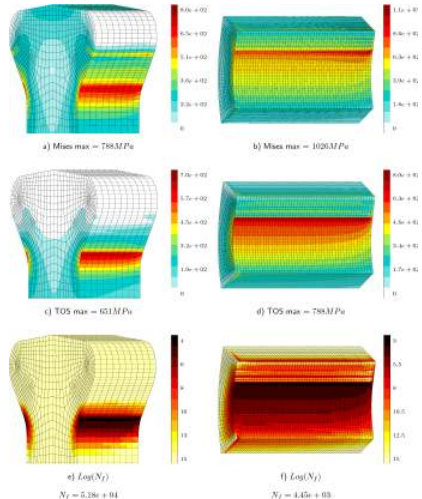
H. Proudhon *et al.*, Experimental and numerical wear studies of porous reactive plasma sprayed Ti-6Al-4V/TiN composite coating. *Wear*, (311) :159-166, 2014.

Calculs de fretting sur éprouvette technologique

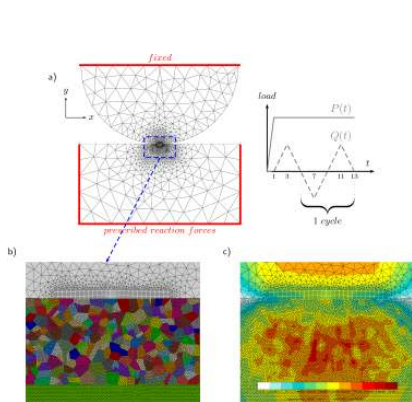


Modèle de l'essai technologique Sneema
Pied d'aube

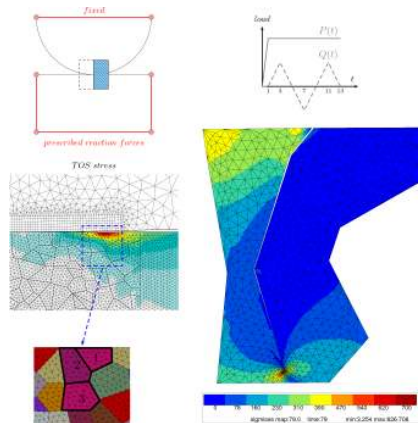
- Revêtement élastoplastique avec écrouissage
- Transferts de champs



Modèle de fissuration (polycrystal)



Amorçage (critère de fatigue)



Propagation (critère de plasticité cristalline)

Thèse L. Sun (2012), H. Proudhon *et al.*, *Matériaux et Techniques*, (101) :203, 2013.