

Rayure de Polymère et Polymère anti rayure

Christian GAUTHIER



Institut Charles Sadron CNRS-UPR22
23 rue du Loess
F-67034 Strasbourg Cedex 2



Plan

- 1. Introduction : problématique, base de mécanique, et énoncé scientifique du pb
- 2. Comportement surfacique des surfaces de polymères nues
- 3. Mode d'action d'un vernis AR
- 4. Mécanismes de ruine d'un vernis AR

Conclusions et marge de progression

1. Introduction : Problématique

- Films, couches minces, vernis recouvrent les surfaces de tous les matériaux
- La rayure est une altération
 - Esthétique (brillance, couleur, blanchiment)
 - Fonctionnelle (transparence, protection)
- Les diamètres des contacts compris entre 1 μm et 100 μm
- Les épaisseurs des films 10nm et qqes 100 μm .
- Les propriétés mécaniques de ces matériaux pas toujours connues



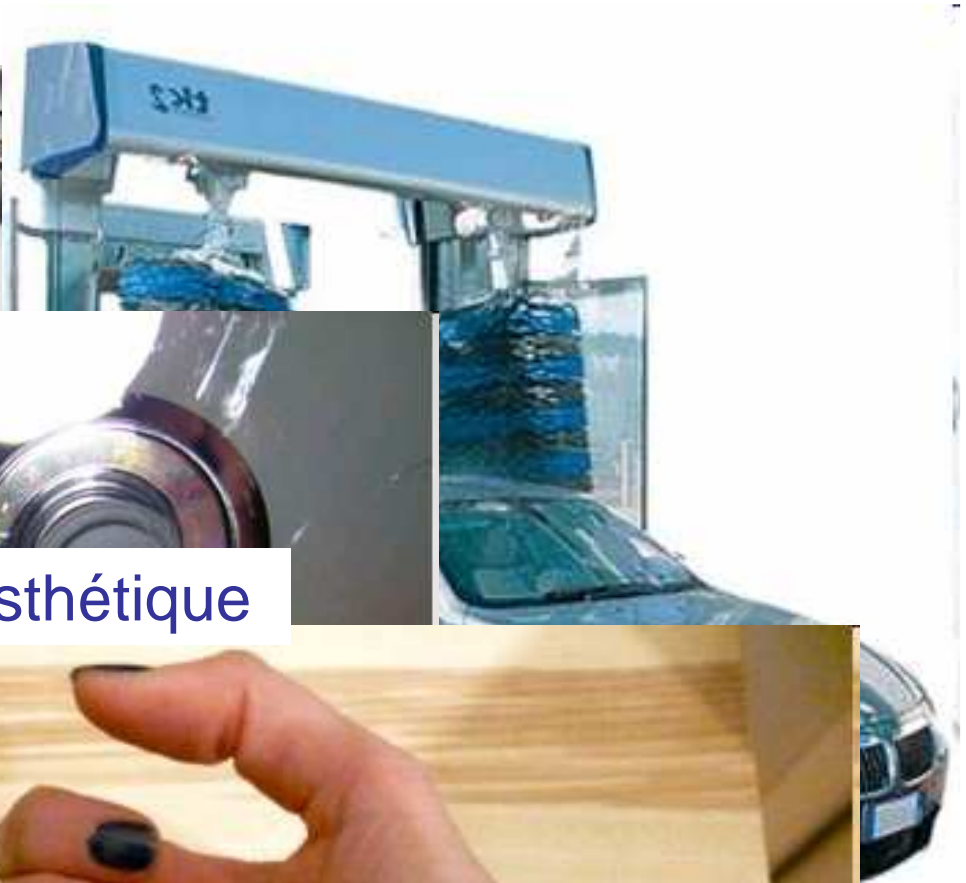
Pas une rayure mais un « emboutissage »



Risque majeur pour peinture



Pas aussi sensible à la rayure qu'il n'y paraît



Rayure versus esthétique



Toucher / frotter sans rayer



Rayure versus surfaces fonctionnelles



1. Introduction : réponse industrielle

Structure du verre traité

Fonction des différentes couches

Anti-salissures
(quelques nm)

Anti-reflets

Vernis anti-rayures
(~3-4 μm)

Résistance à l'impact (1 μm)
Primaire d'adhésion (1 μm)

Primaire

colorants

colorants

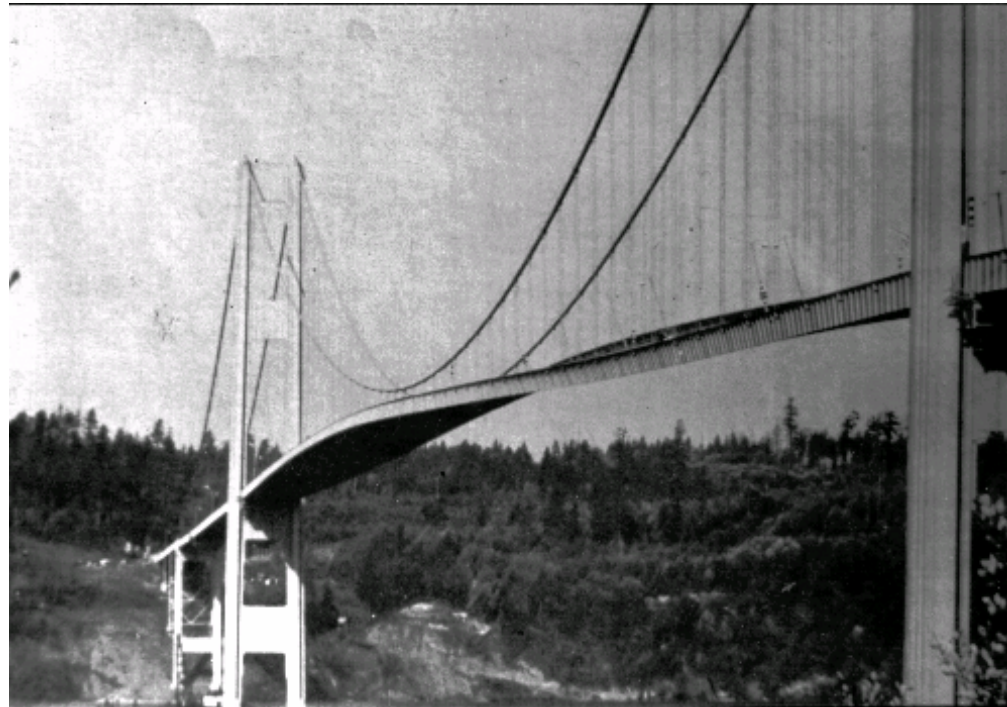
Pourquoi cela marche ?
Que faire pour améliorer la performance ?

Copyright Essilor

1. Introduction : essai structure ou matériau

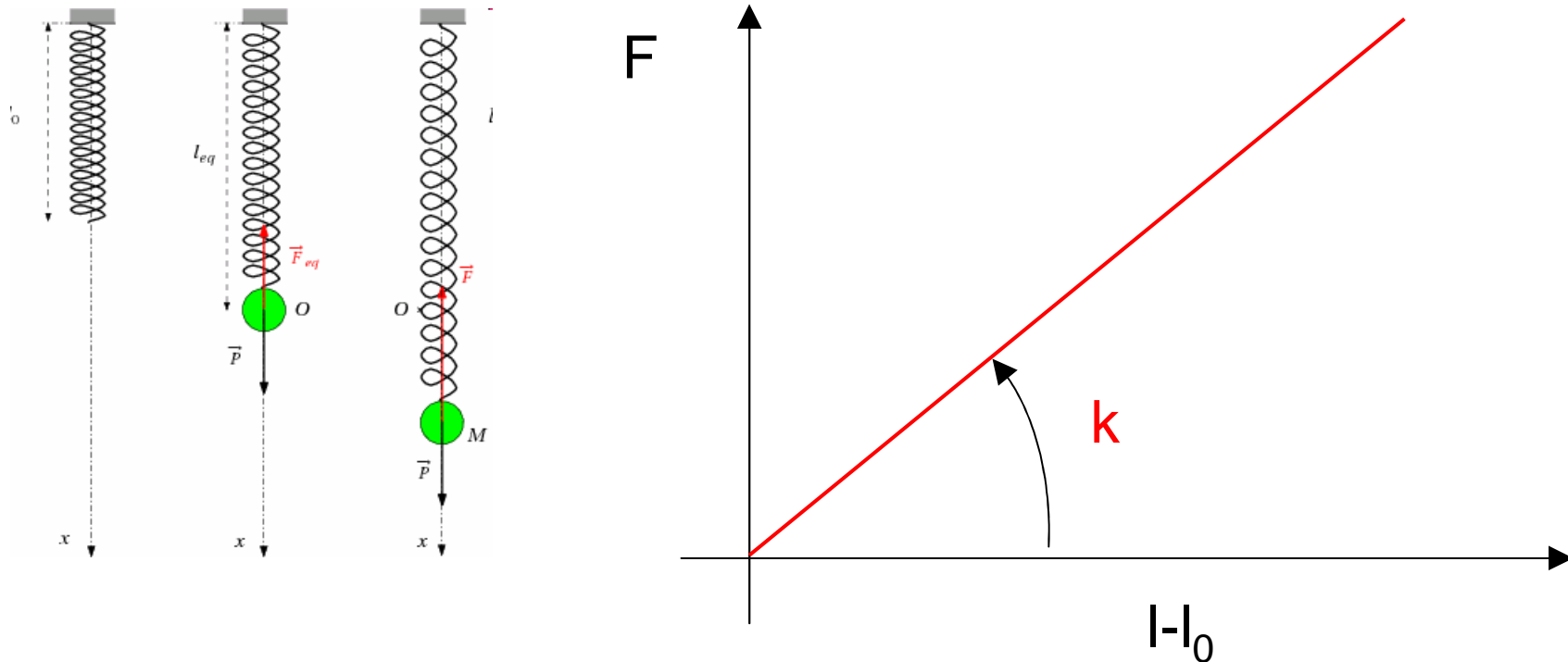
Notion de mécanique.....

Un essai de mécanique des structures mesure une raideur,
analyse une fréquence propre ...



1. Introduction : essai matériau ?

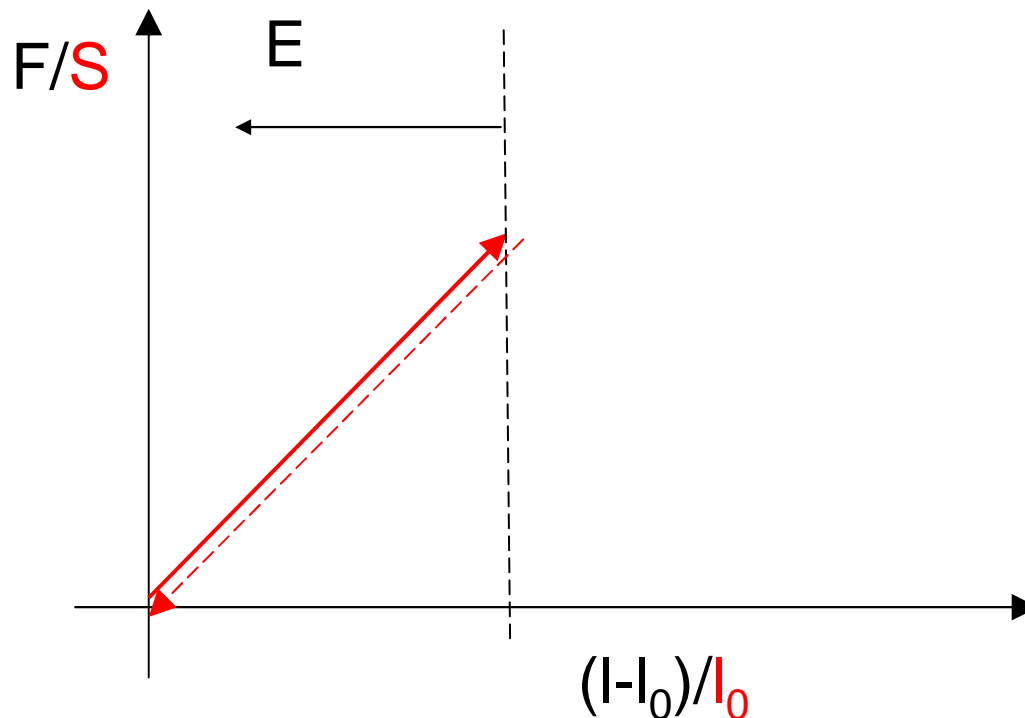
Notion de mécanique.....



k : fonction des propriétés du matériau, du diamètre d'enroulement des spires, du diamètre du fil.... donc d'éléments géométriques **et** de grandeurs matériaux

1. Introduction : essai matériau ?

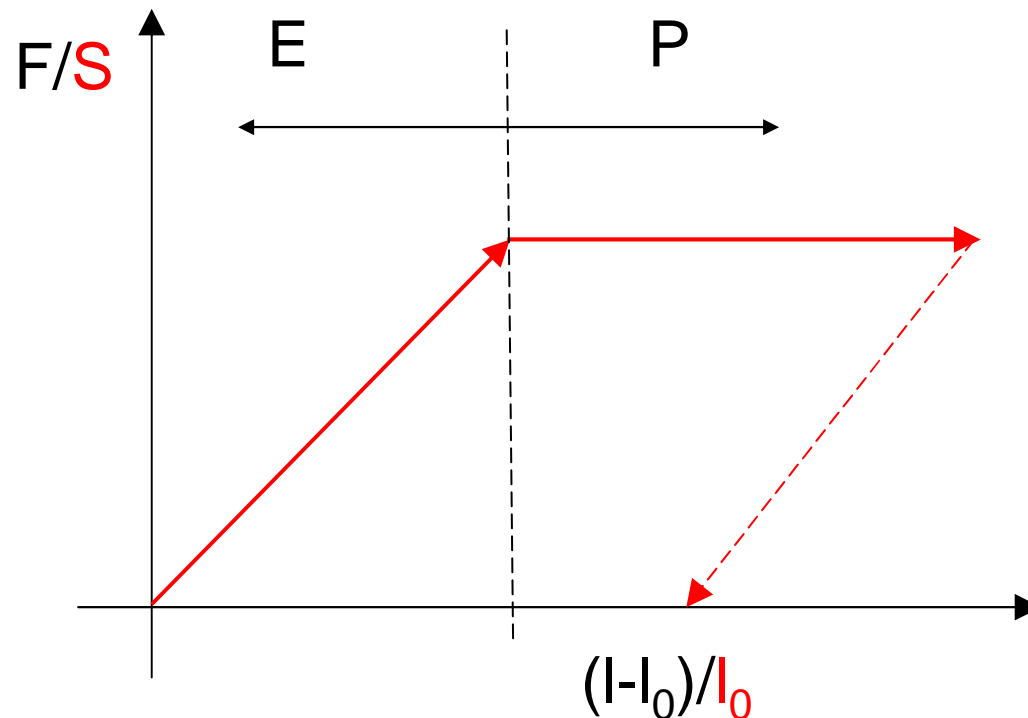
En mécanique des matériaux, on cherche à identifier la relation contrainte (Pa) versus déformation (-)



Besoin de la décharge pour interpréter le chargement

1. Introduction : essai matériau ?

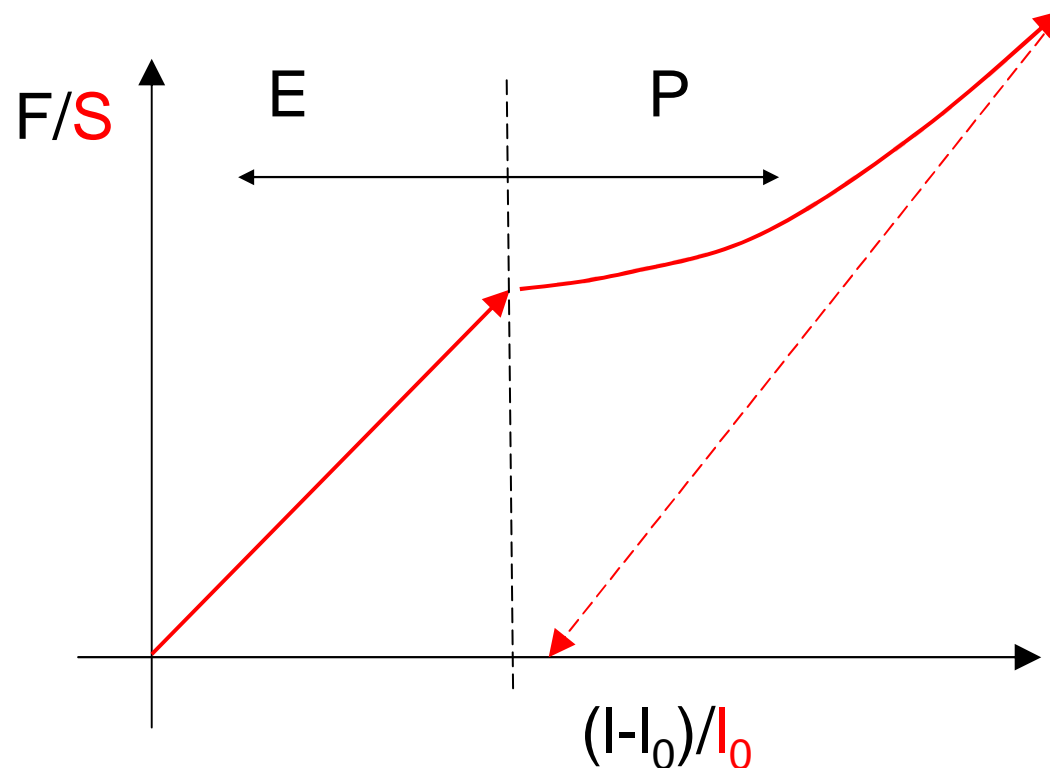
En mécanique des matériaux, on cherche à identifier la relation contrainte (Pa) versus déformation (-)



Besoin de la décharge pour interpréter le chargement

1. Introduction : essai matériau ?

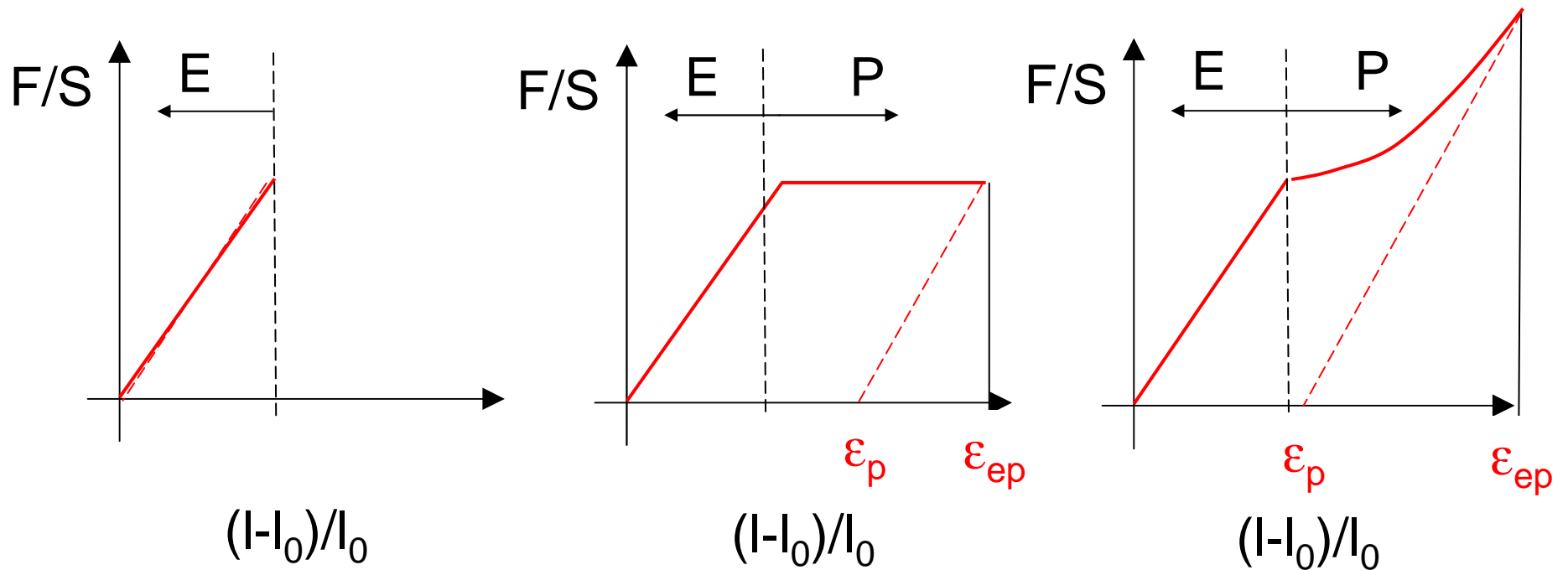
En mécanique des matériaux, on cherche à identifier la relation contrainte (Pa) versus déformation (-)



Besoin de la décharge pour interpréter le chargement

1. Introduction : essai matériau ?

En mécanique des matériaux, on cherche à identifier la relation contrainte (Pa) versus déformation (-)



1. Introduction : problématique scientifique

Essai de rayure

Essai structure ?

Sollicitation surfacique ?

ou

ou

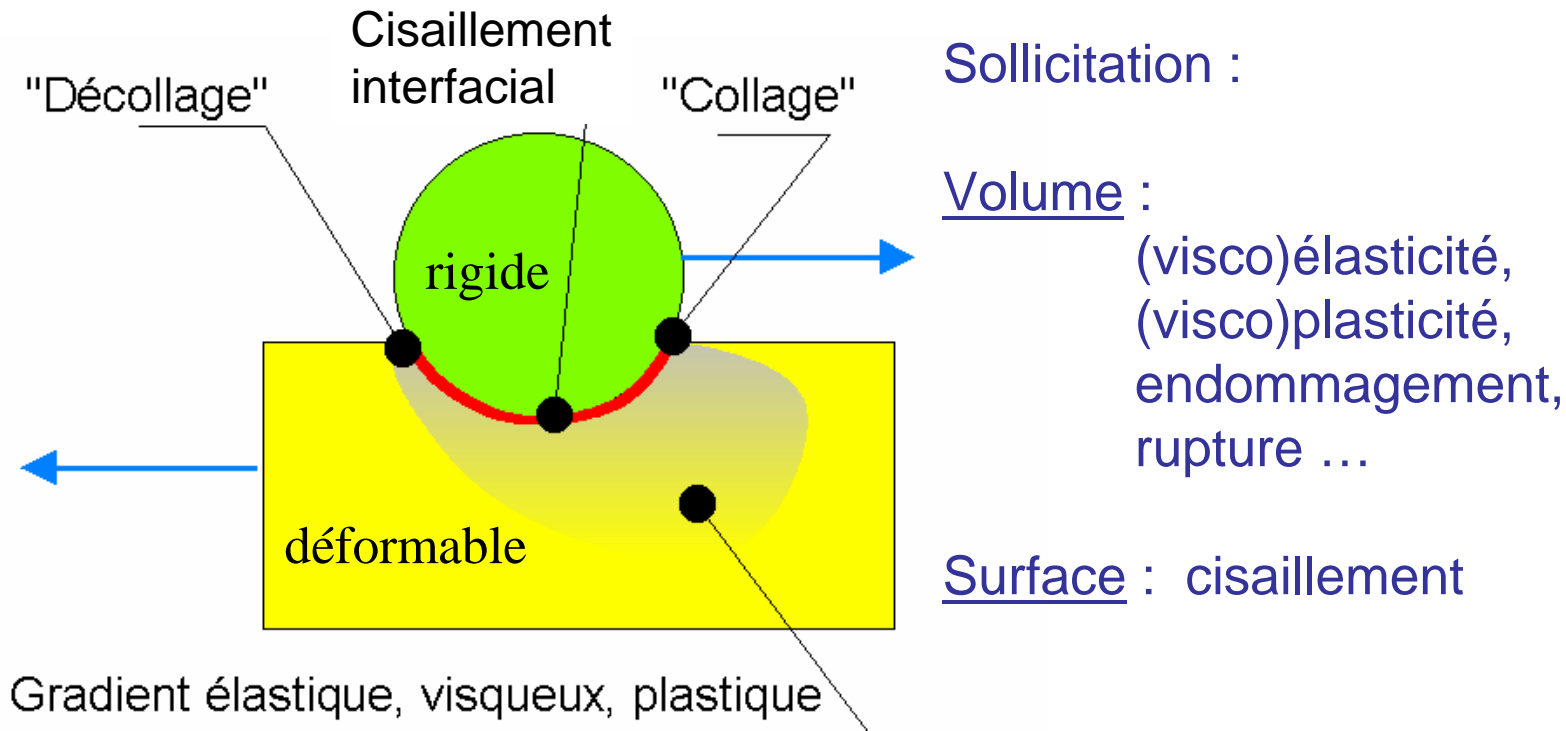
Essai matériau ?

Sollicitation volumique ?

Comment développer une bonne analyse en rayure ?

Peut-on / doit-on dissocier contact et sillon ?

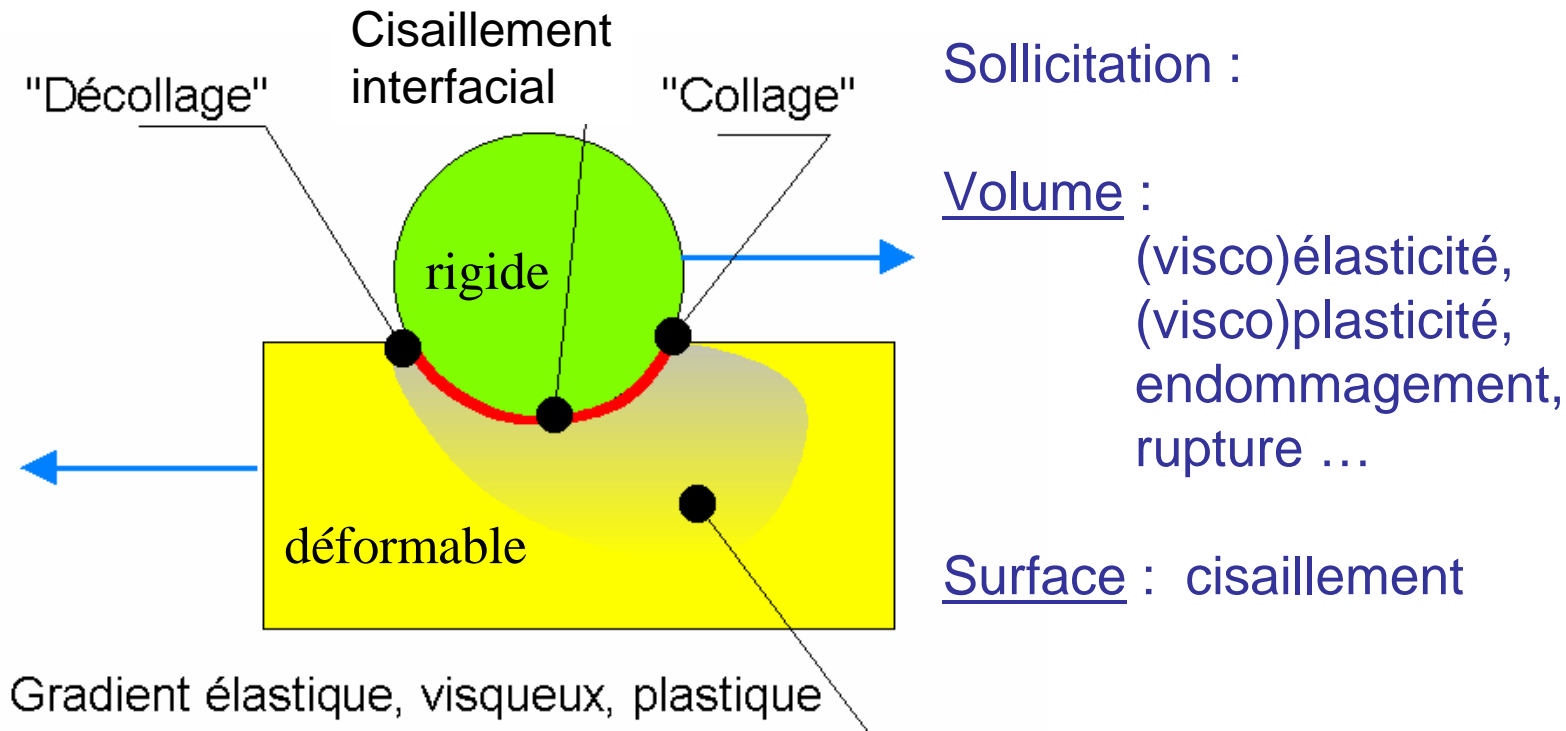
1. Introduction : problématique scientifique



Comment analyser le cisaillement interfacial (frottement), la déformation du contact, la plasticité et les mécanismes de rupture ?

Cas général : à partir d'une mesure de raideur (forces extérieures appliquées) et d'un modèle de contact.

1. Introduction : problématique scientifique

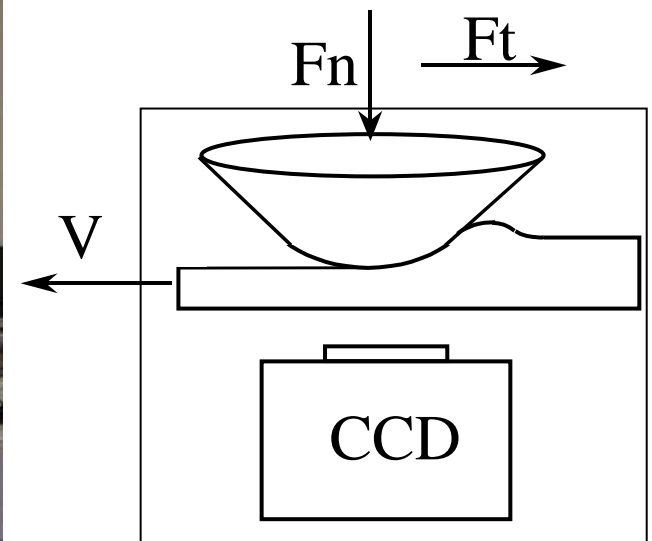
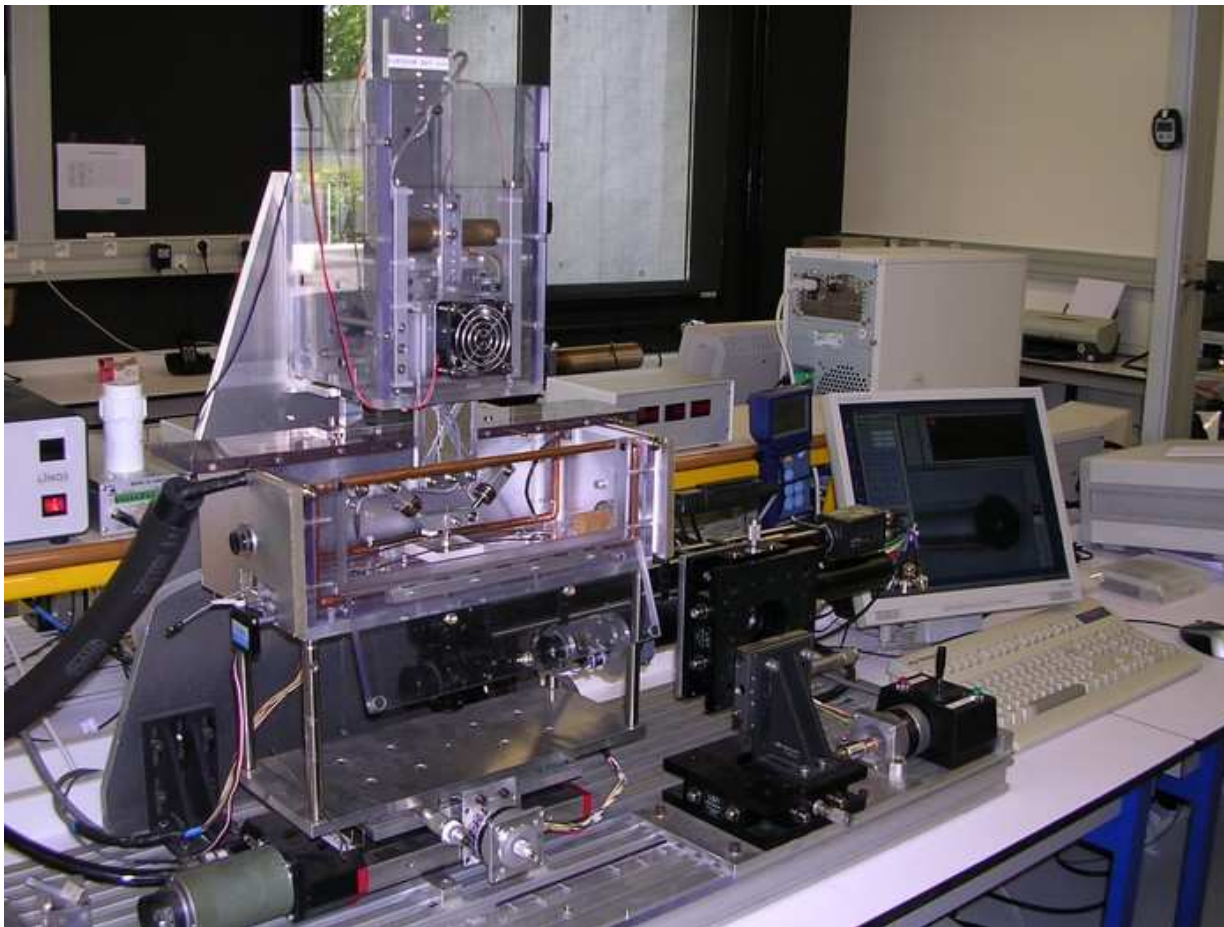


Comment analyser le cisaillement interfacial (frottement), la déformation du contact, la plasticité et les mécanismes de rupture ?

Approche ICS : contrôle de la taille de la pointe, et vision in situ du contact (pas modèle dépendant)

1. Introduction : principe des dispositifs exp.

Paramètres : géométrie pointe, température, vitesse, force normale
Mesures : force tangentielle, géométrie du contact, empreinte et sillon



- $F_n - F_t$: 0.01 à 35N
- R_{tip} : 10 μm – 50mm
- V_{tip} : 1 $\mu\text{m/s}$ à 10 mm/s
- T : -60 $^{\circ}\text{C}$ à + 120 $^{\circ}\text{C}$

1. Introduction : principe des dispositifs exp.

Géométrie pointe sphérique : ϵ pilotable

(Pour mémoire $\sigma = E\epsilon$ réponse uniaxiale élastique avec $\epsilon \approx \Delta l / l$)

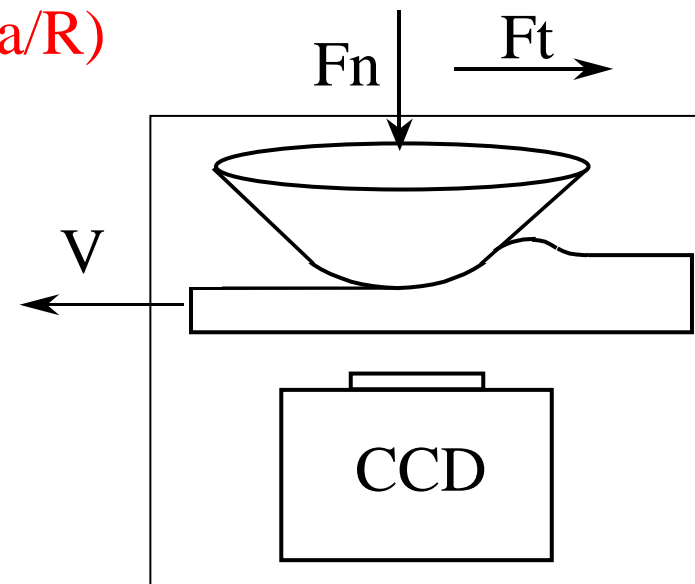
Contact élastique $p \propto E a / R$

Contact plastique $p / \sigma_y \propto \ln (E / \sigma_y a / R)$

Vitesse et Température

Essai micro : $h > 1\mu\text{m}$

Echelle optiquement intéressante

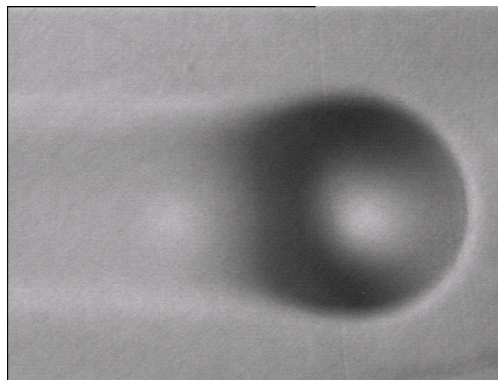
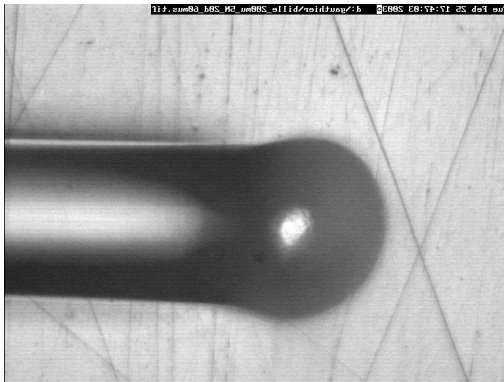


Pour tester les massifs ou les microstructures (adhérence vernis...)

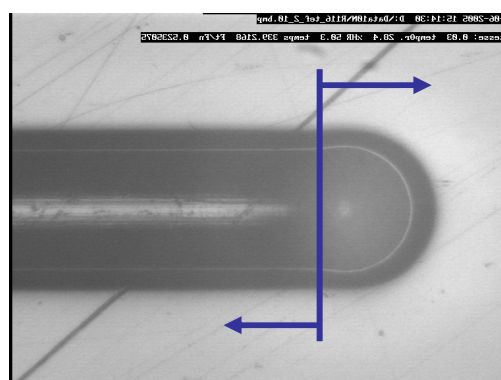
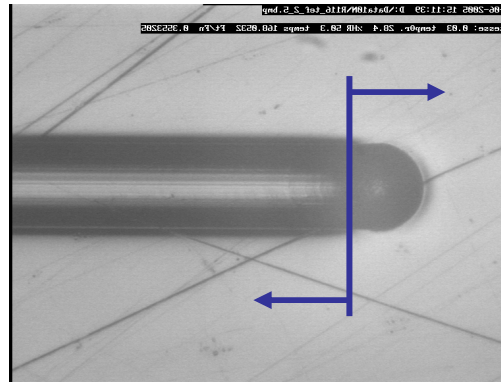
Et ne pas être modèle dépendant dans l'analyse des grandeurs moyennes

1. Introduction : contacts types.

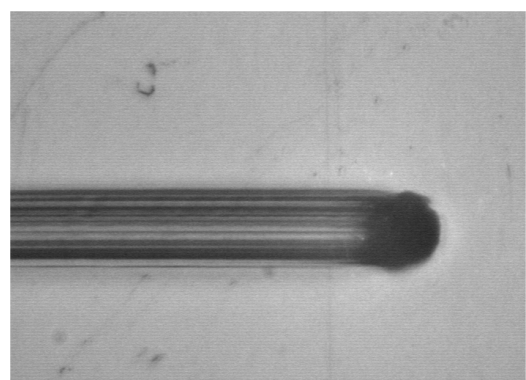
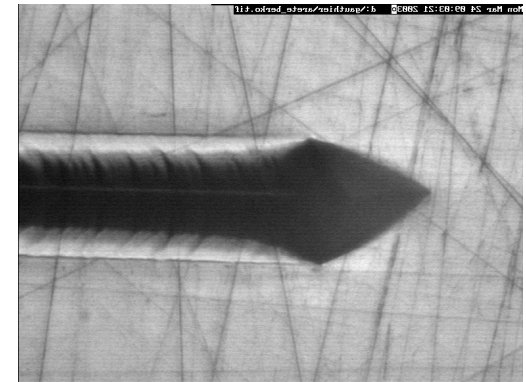
Sillon viscoélastique
 a/R et μ faibles



Sillon plastique
 a/R ou μ élevés,



Si singularité géométrique,
déformations locales
importantes



Dissocier contact / sillon

2. Essais sur surfaces nues : rayure

- Analyse en créneaux de déformations imposées (de forces normales)
- Analyse en vitesse et en température

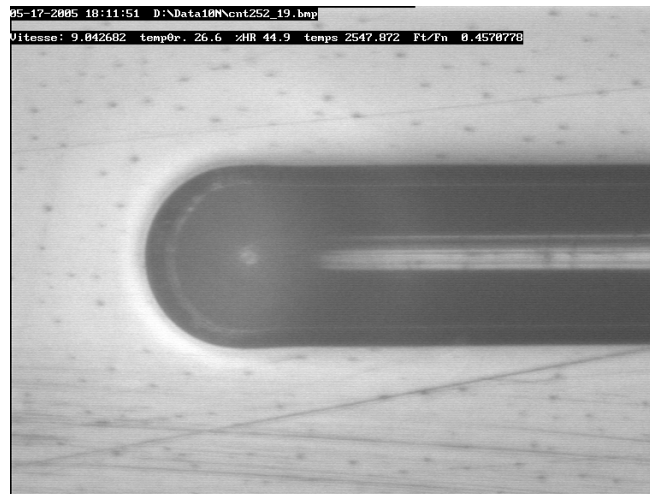
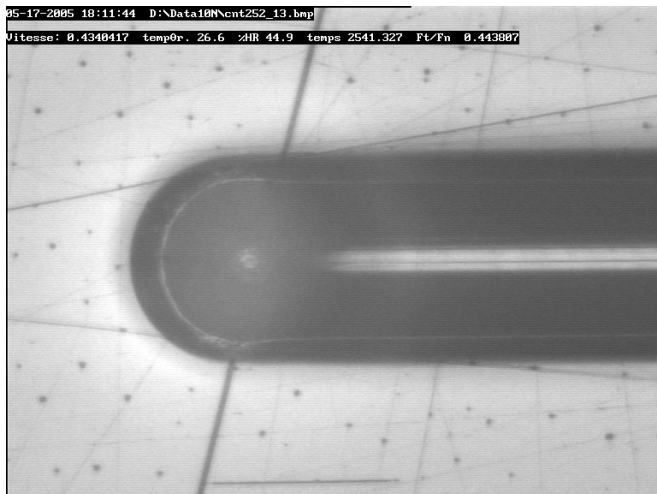
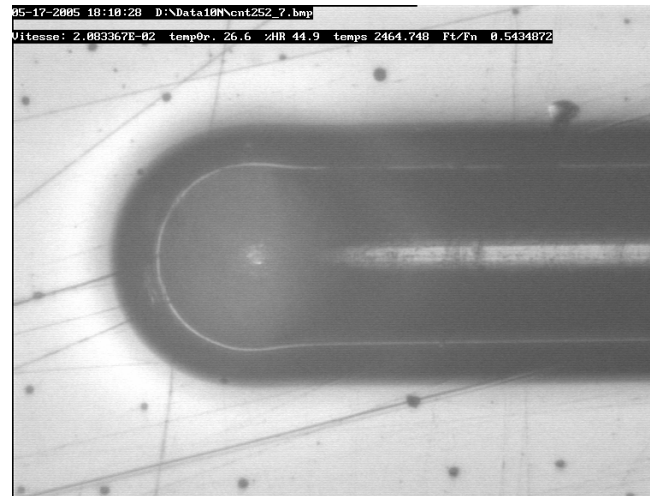
Pour identifier la frontière entre contact élastique et contact plastique

2. Essais sur surfaces nues

Balayage en V à T constante

$R=116\text{ }\mu\text{m}$
 $T=20^{\circ}\text{C}$

- PMMA
- Force normale constante
- Augmenter la vitesse diminue la largeur du sillon



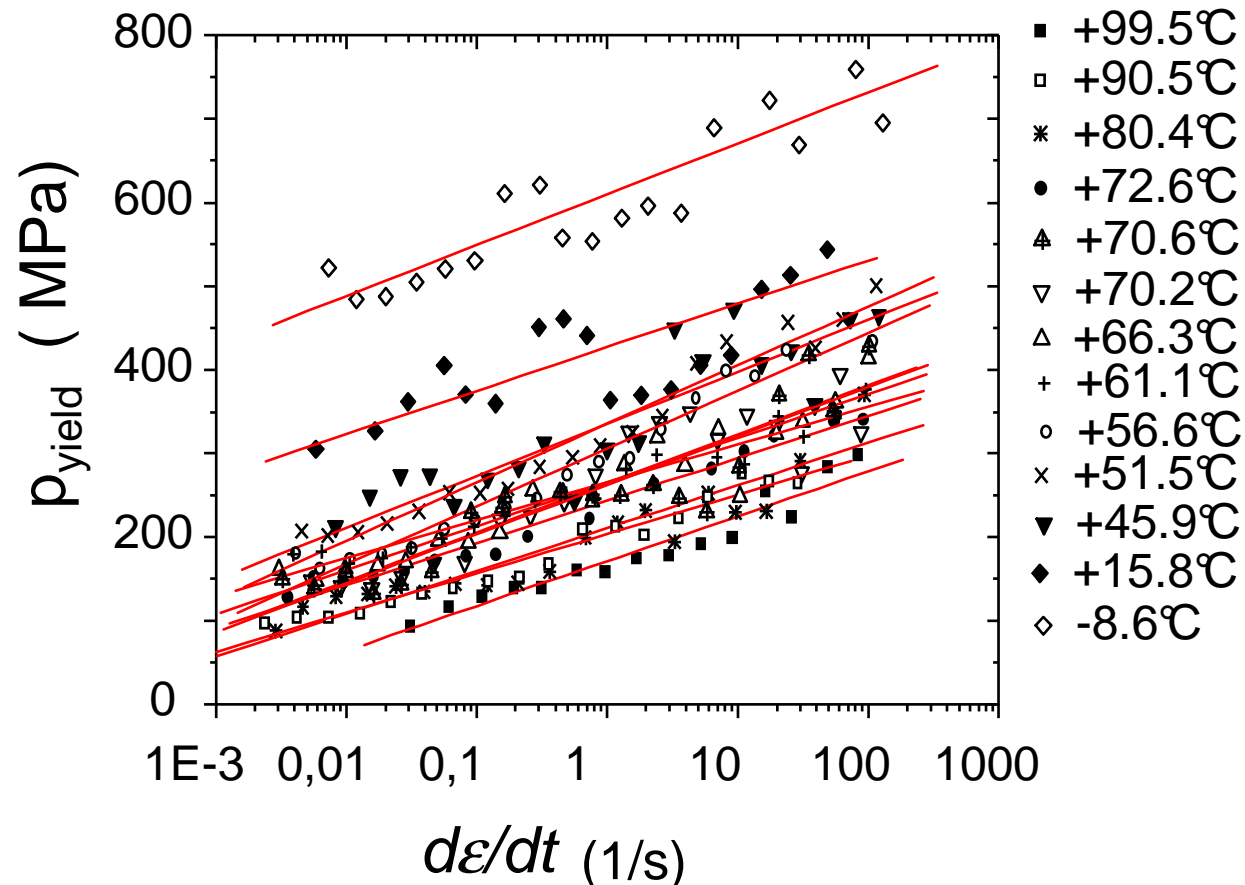
2. Essais sur surfaces nues

- pression de contact

$$p_{\text{yield}} = F_n / \text{aire de contact}$$

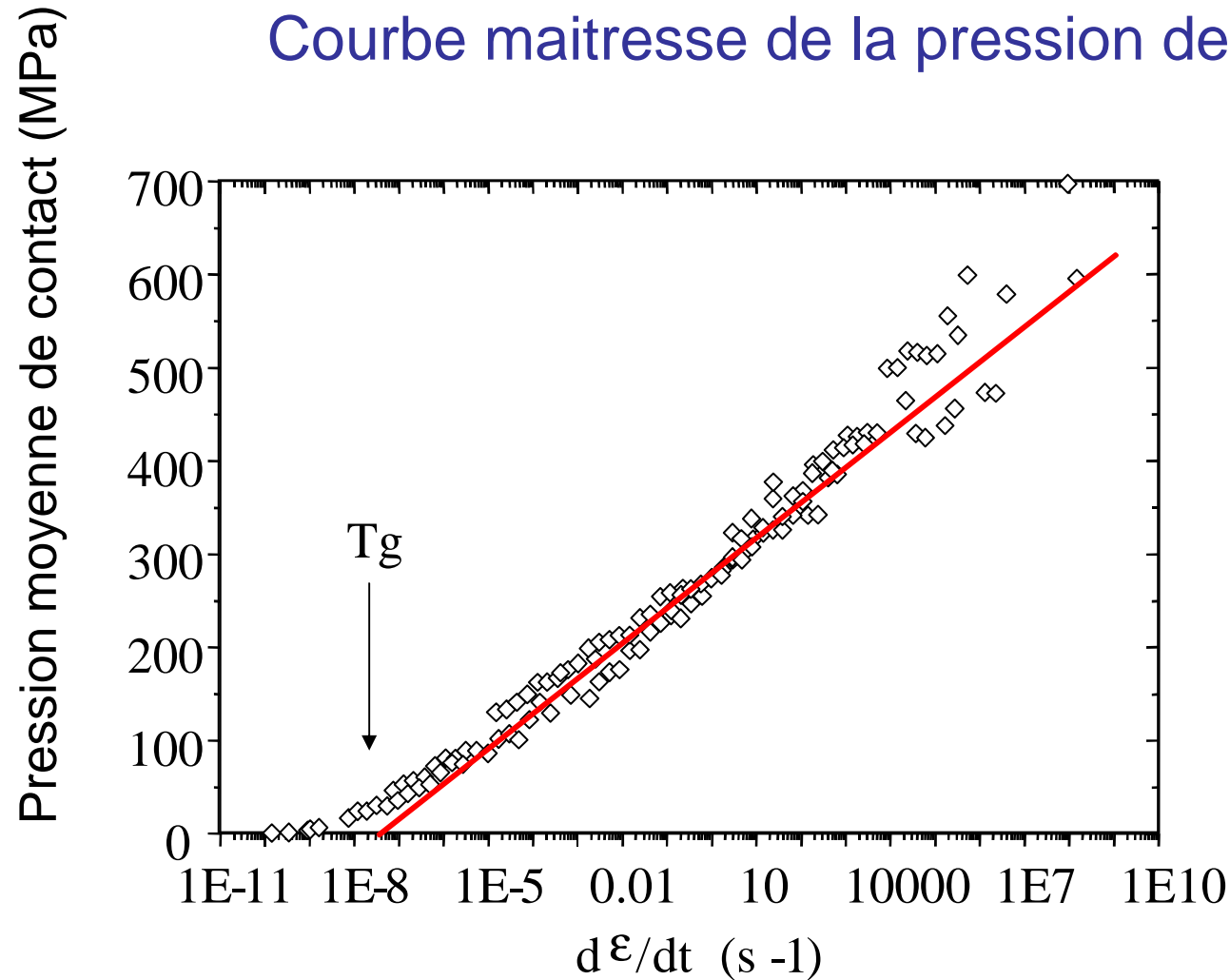
- vitesse de déformation

$$d\varepsilon/dt = V_{\text{tip}} / \text{rayon de contact}$$



2. Essais sur surfaces nues

Courbe maitresse de la pression de contact

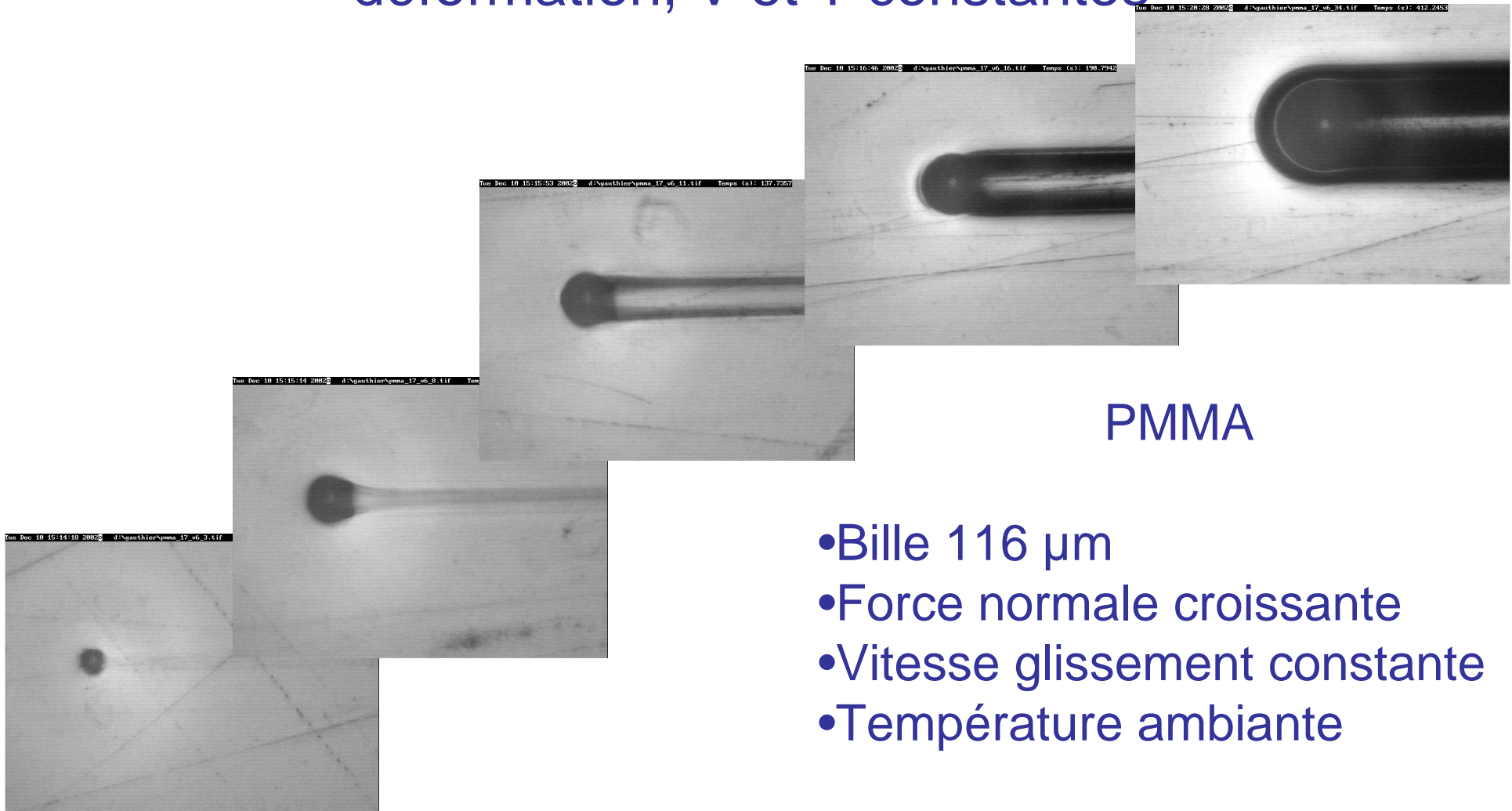


$$p \propto \sigma_y$$

Bon ordre de
grandeur pour
Ea et V*

2. Essais sur surfaces nues

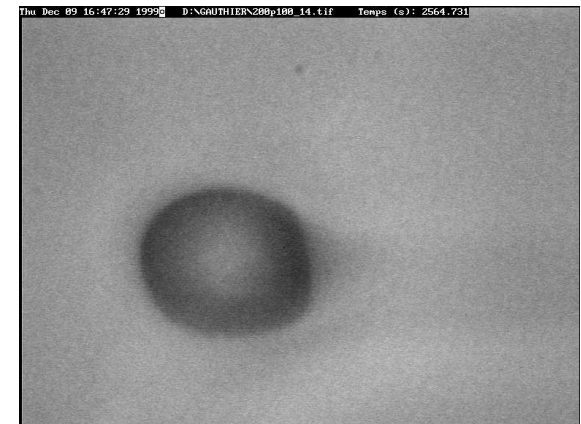
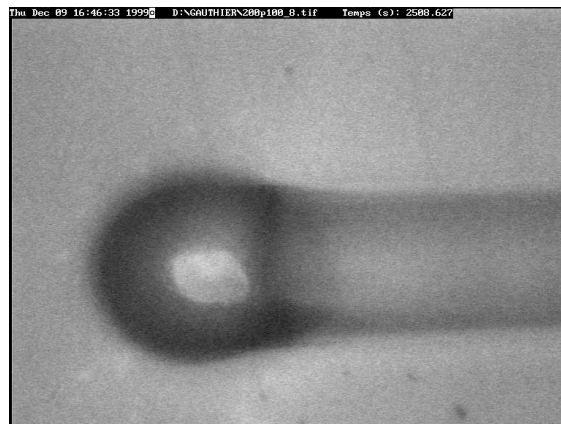
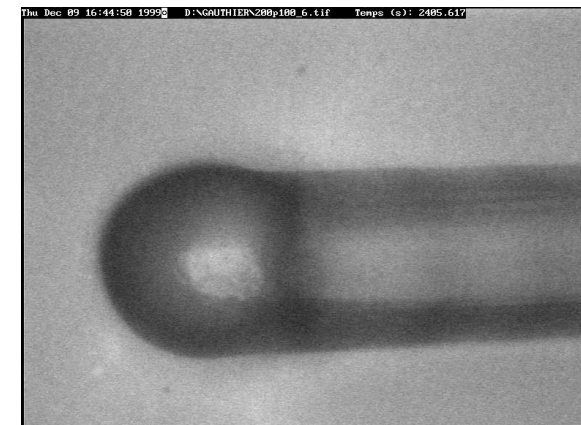
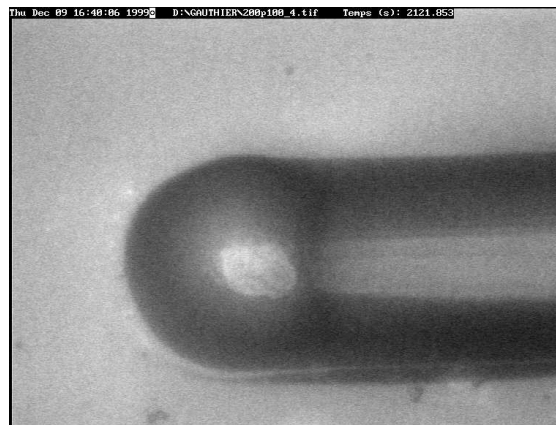
Evolution de la réponse en fonction de la déformation, V et T constantes



2. Essais sur surfaces nues

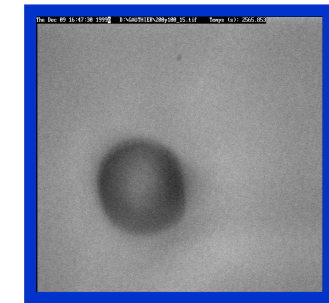
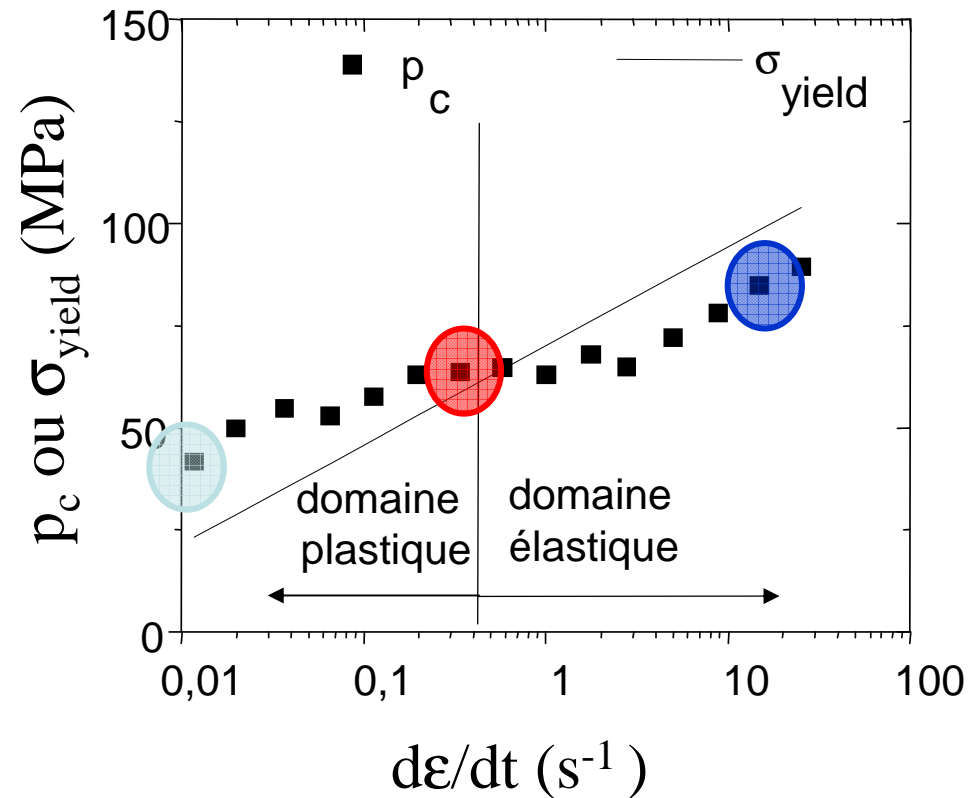
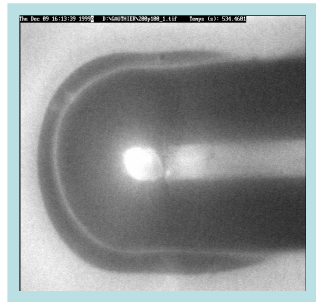
Transition de rayure à glissement Bille 200 μm $T=100^\circ\text{C}$

- Charge normale constante
- Augmentation de la vitesse de glissement logarithmiquement.
- Rayon contact diminue \Rightarrow déformation diminue



2. Essais sur surfaces nues

Comparaison pression de contact/ σ_{yield}



$$p / \sigma_y \propto c(\epsilon)$$

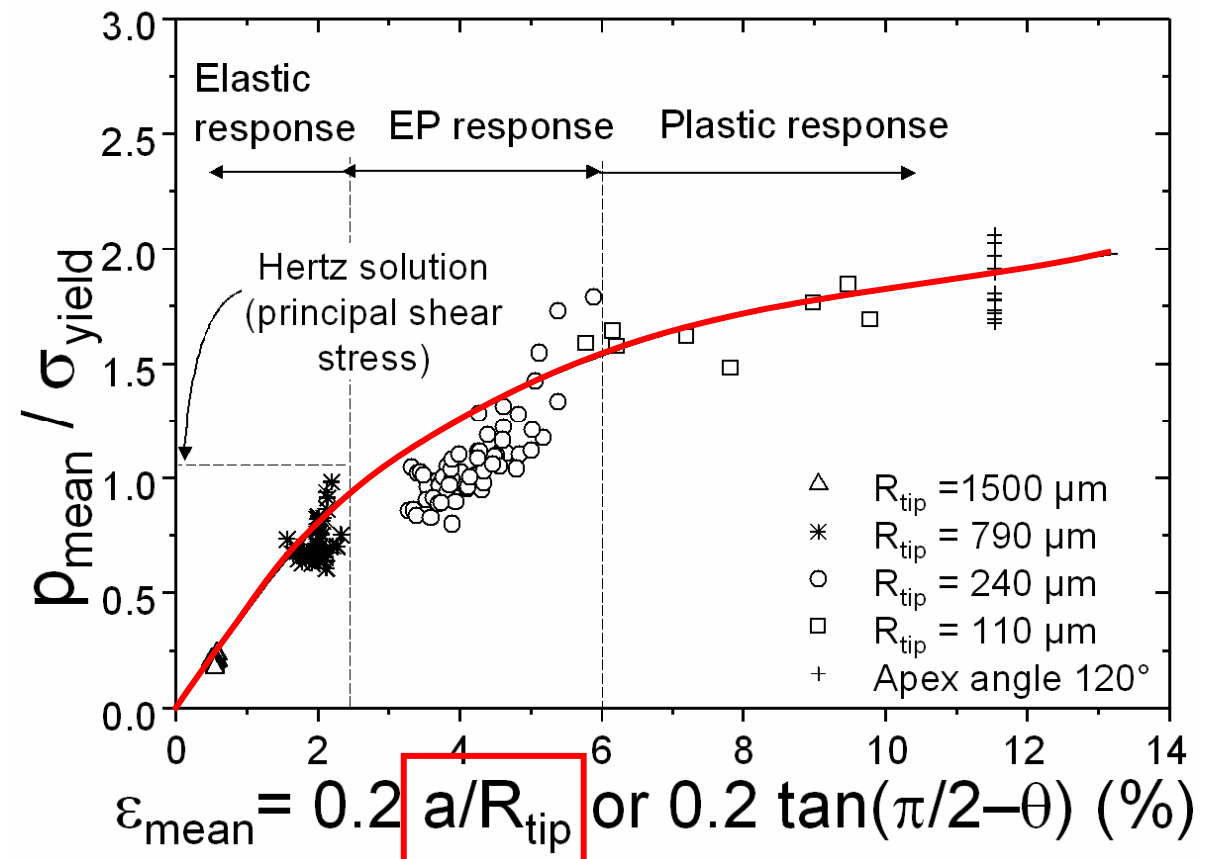
2. Essais sur surfaces nues

Courbe contrainte déformation en glissement-rayure.

- $\frac{p_c}{\sigma_{yield}}$ ne dépend pas de la vitesse ou de la température

$$\frac{p_c}{\sigma_{yield}} \approx C(\varepsilon)$$

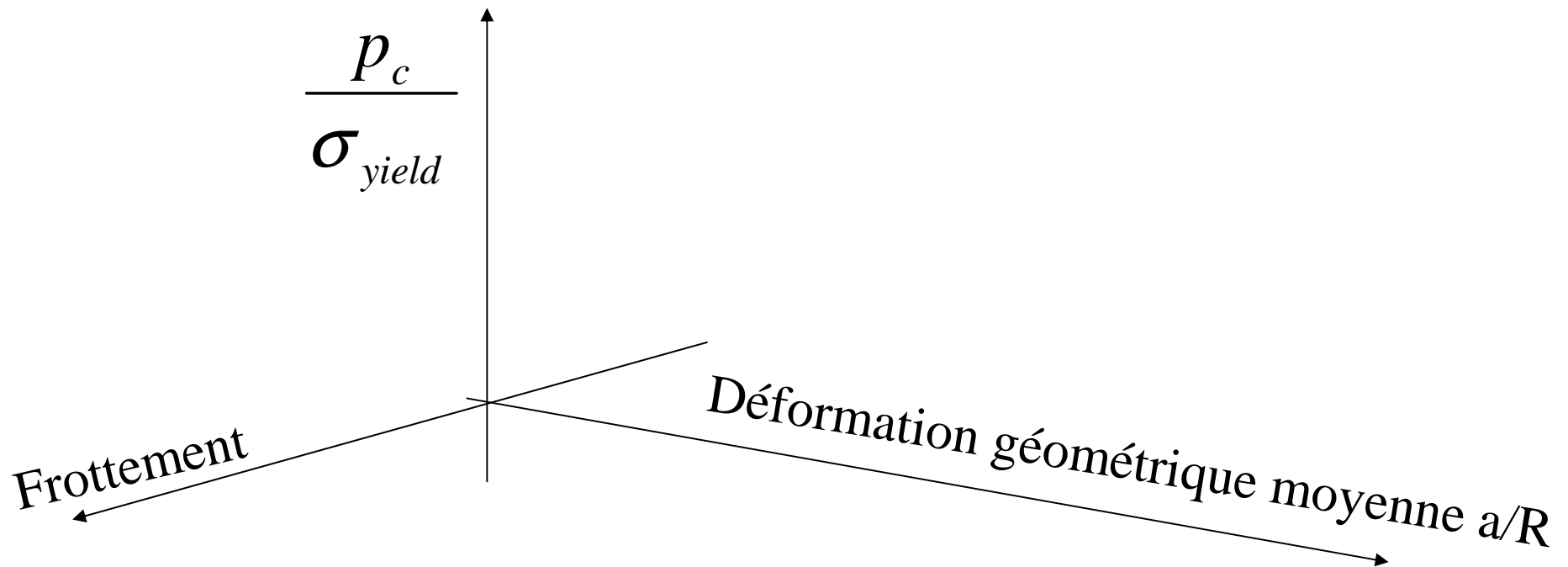
- 4 décades de vitesse
- 80° de température



2. Essais sur surfaces nues : conclusions

Analyse élastoplastique, en changeant rayon de pointe ou F_n ,
à Vitesse et Température constantes

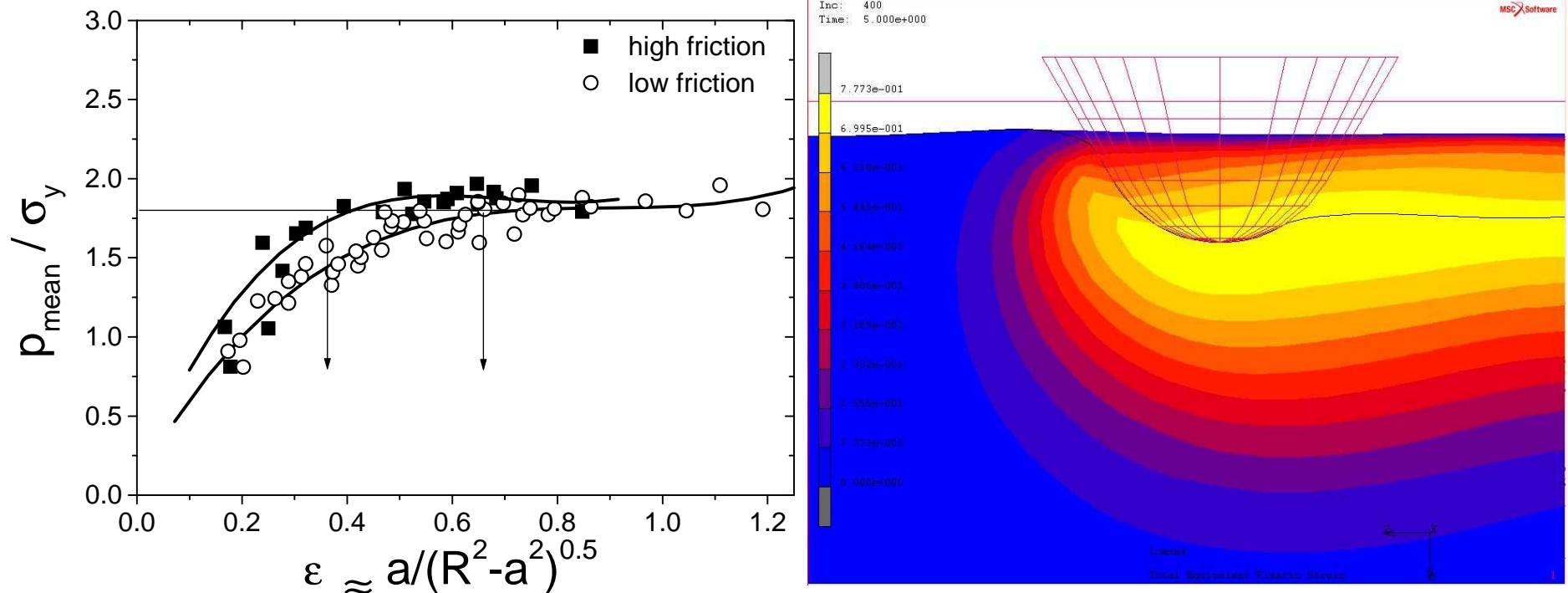
Analyse viscoplasticité, en pilotant vitesse ou température



Déformation représentative dans le contact sans frottement ?

2. Essais sur surfaces nues : enjeux

Essais avec deux niveaux de frottement (0.15 et 0.45)



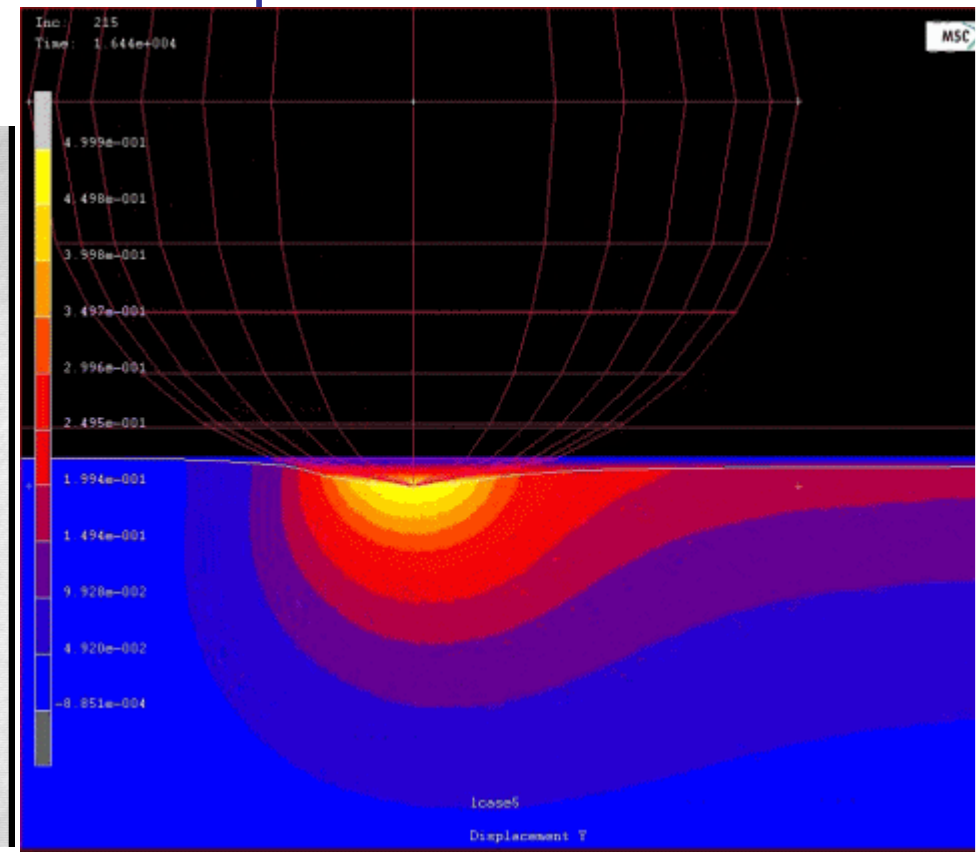
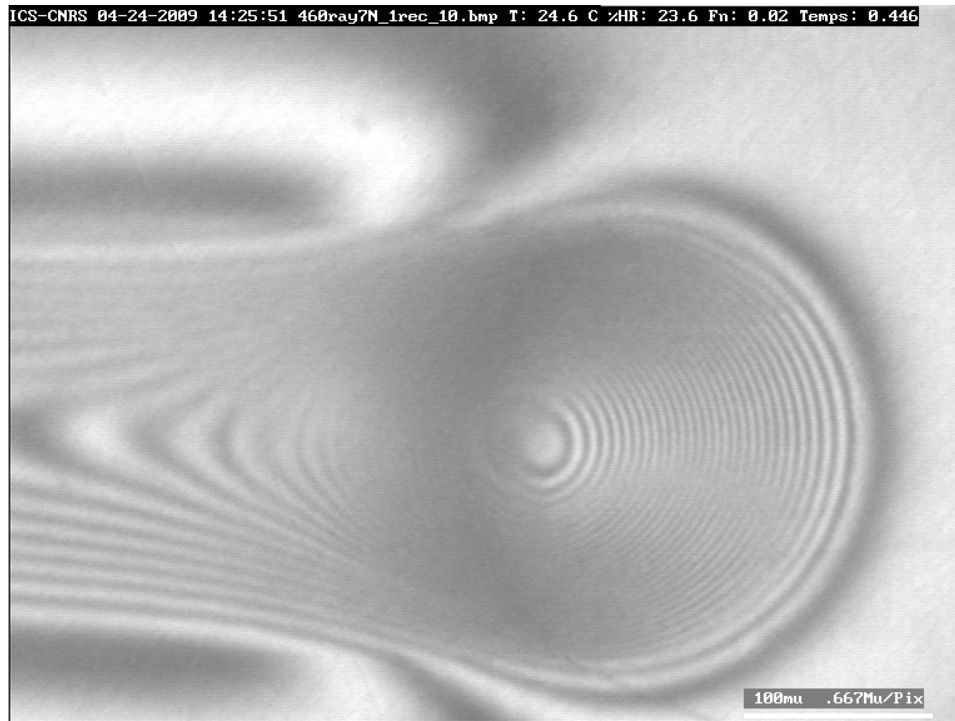
**Recours au numérique pour identifier une déformation
rayure représentative (a/R , μ)**

H. PELLETIER et col, J. Mater. Res., Vol. 24, No.3, 2009, DOI: 10.1557/JMR.2009.0138

H. PELLETIER et col, Tribol Lett, DOI 10.1007/s11249-008-9368-4

2. Essais sur surfaces nues : enjeux

Analyse de la « cicatrisation » des empreintes et des sillons

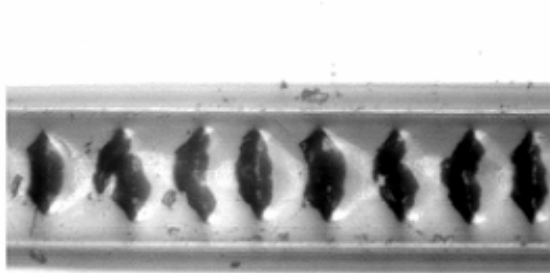


2. Essais sur surfaces nues : enjeux

Quelle condition pour rester ductile ?

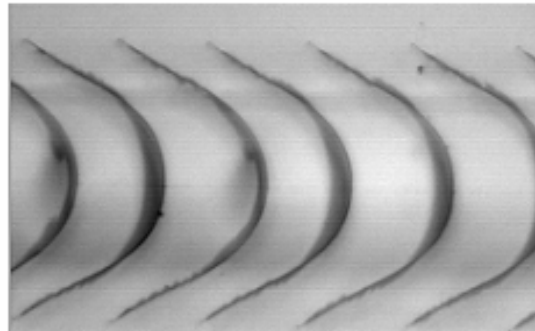
PMMA:

Crazing
perpendiculaire à la
direction de glissement



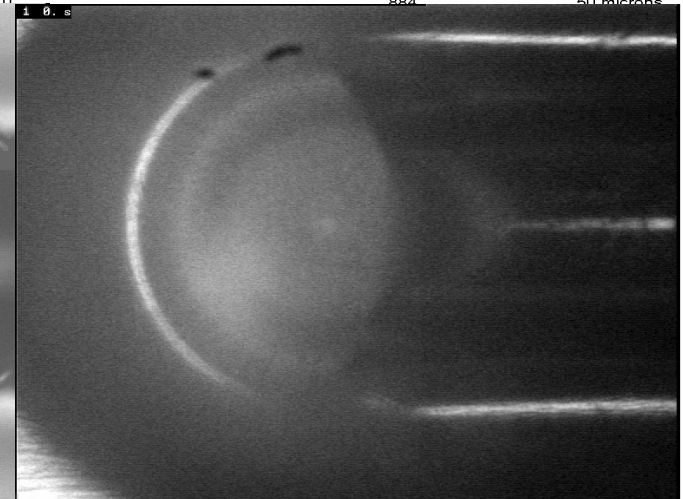
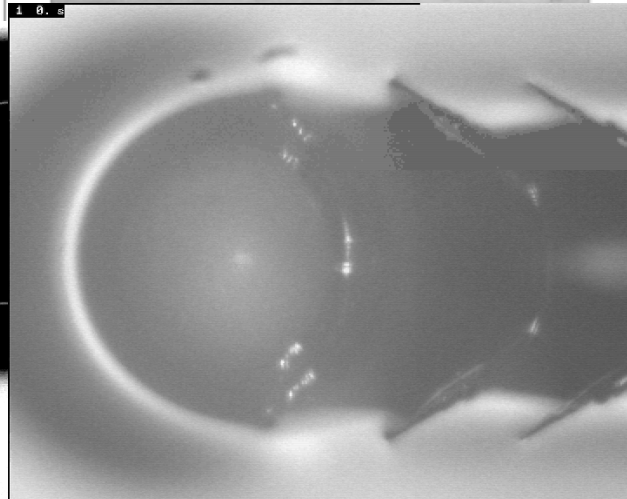
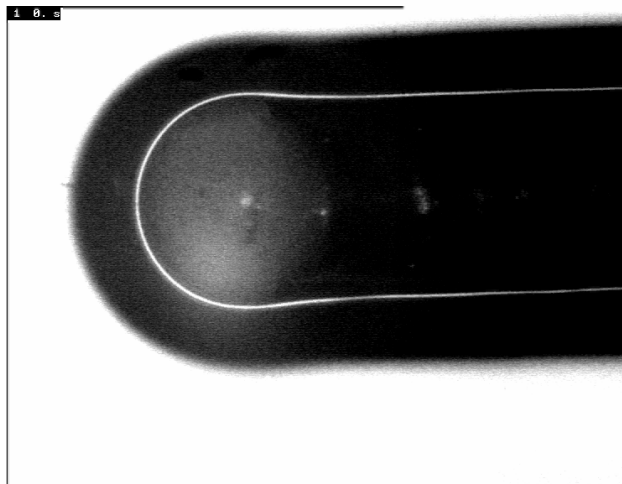
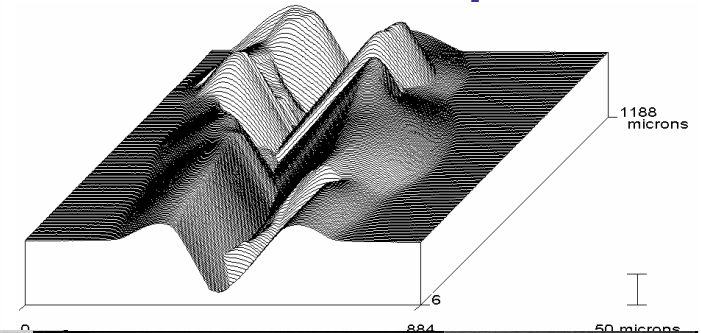
CR39:

**Fissuration sur le bord
arrière du contact**



PC:

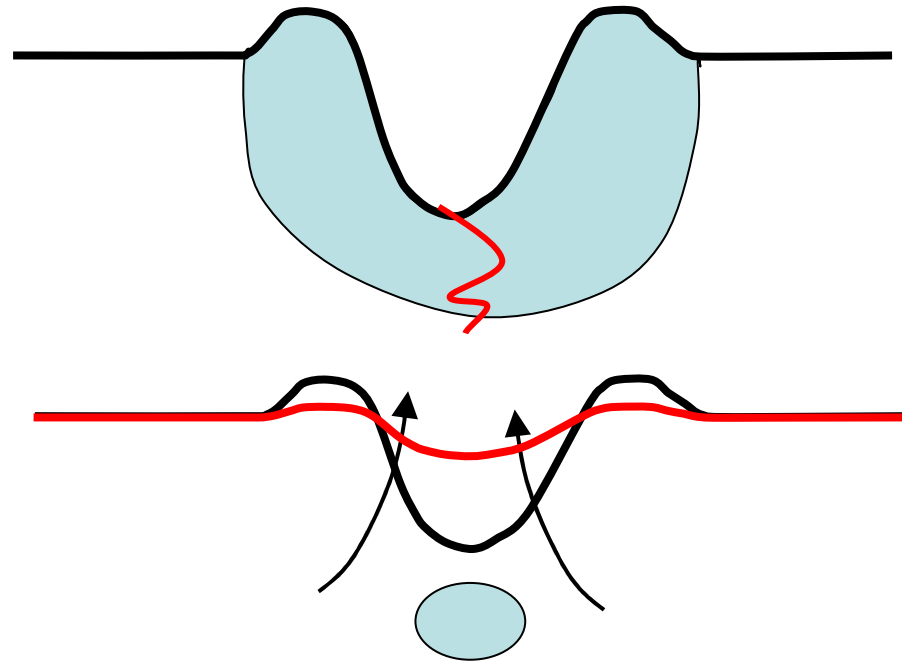
**Bandes de cisaillement
entraînant des dépôts
latéraux de la pointe**



2. Essais sur surfaces nues : conclusions

« Cicatrisation » impossible
si déformation plastique en
surface et en volume ou si
endommagement fragile

Recouvrance partielle du
sillon si déformation
plastique seulement en
volume



Solution pour contrôler la plasticité en surface :

- diminuer le coefficient de friction
- rhéologie avec écrouissage
- utilisation d'un revêtement « élastique »

3. Vernis anti rayure : mode d'action

Augmenter la résistance à la rayure = augmenter la part élastique dans la réponse du contact glissant

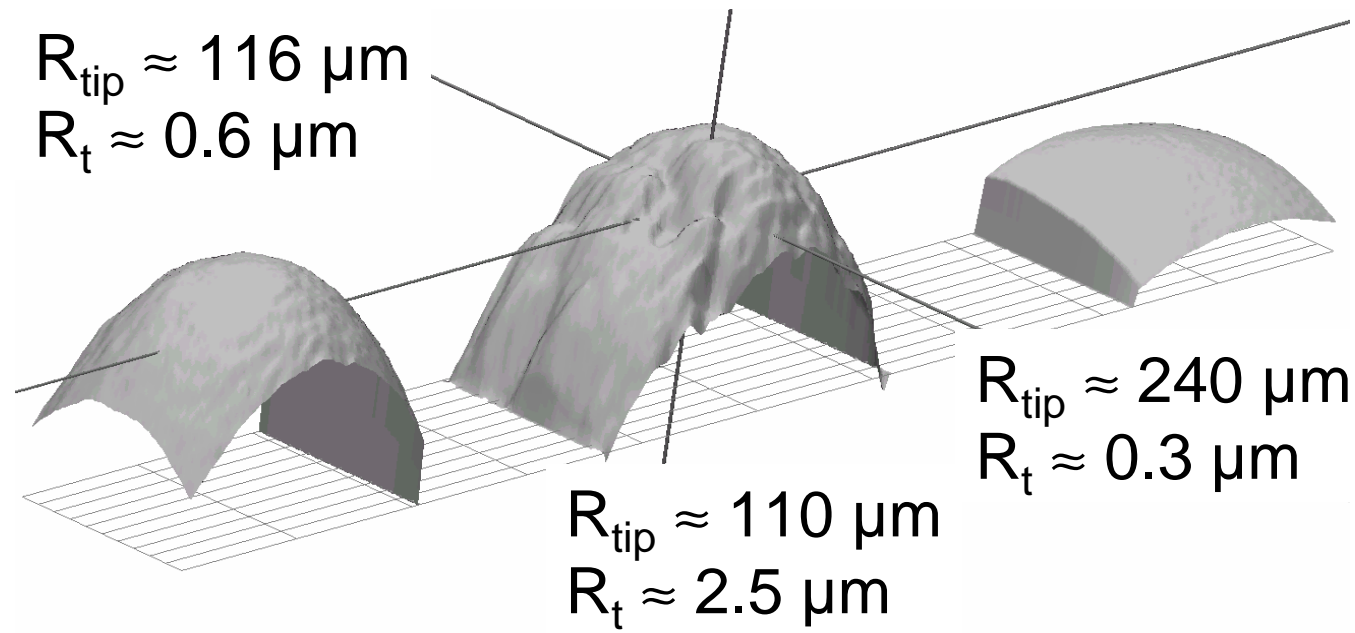
Mode d'action d'un vernis mince ?

Comment un vernis mince améliore le comportement à la rayure pour des contacts 10 à 100 fois plus grands que son épaisseur ?

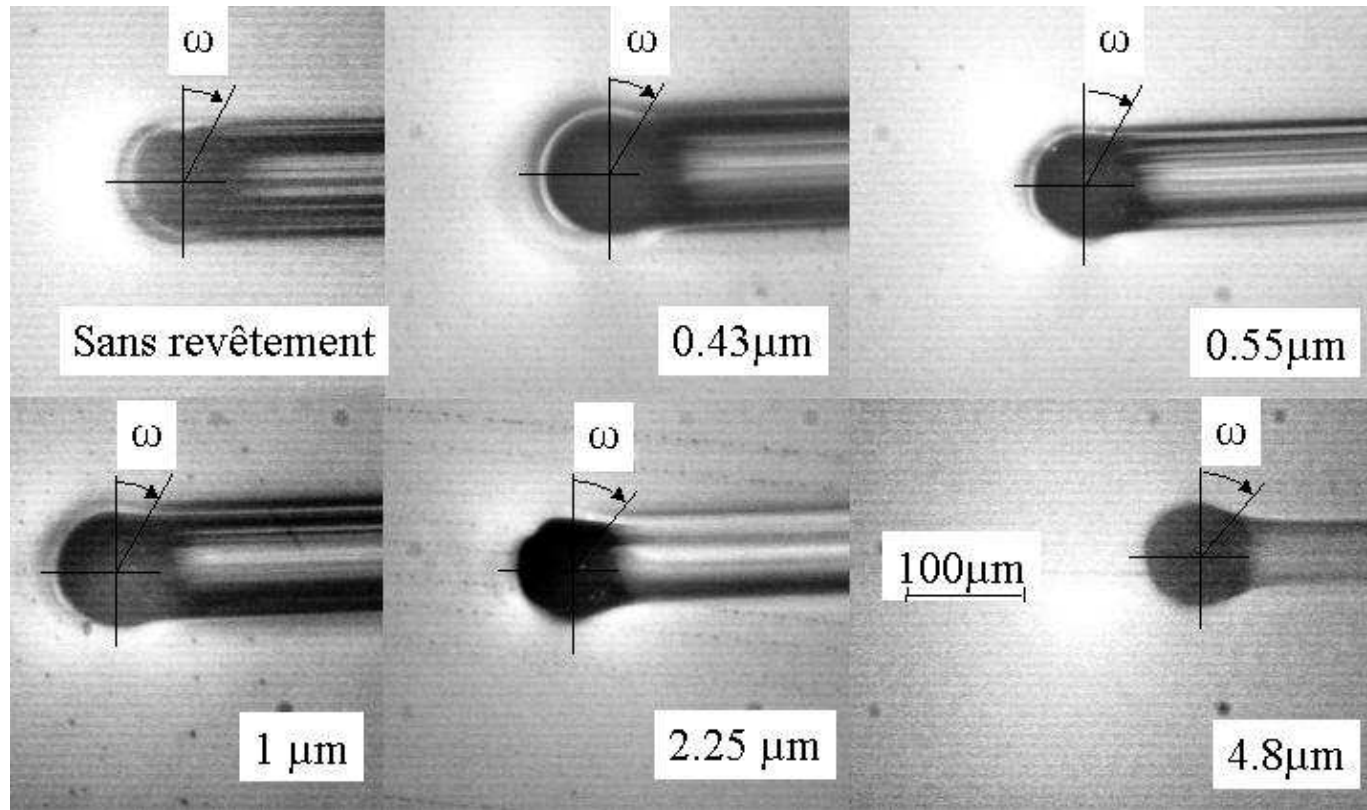
$ep \ll a$ et R_{tip}

3. Vernis anti rayure : mode d'action

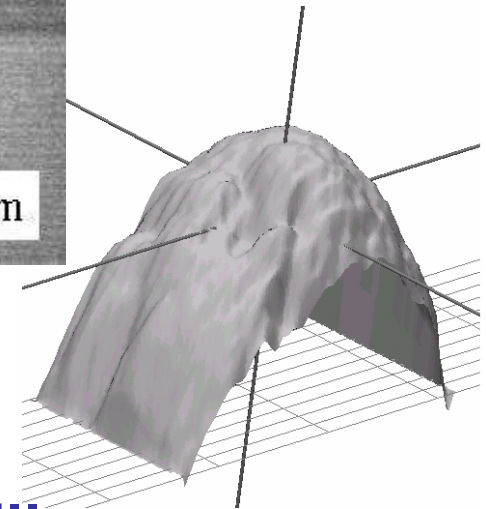
Relation entre épaisseur du vernis et rugosité de la pointe ?



3. Vernis anti rayure : mode d'action

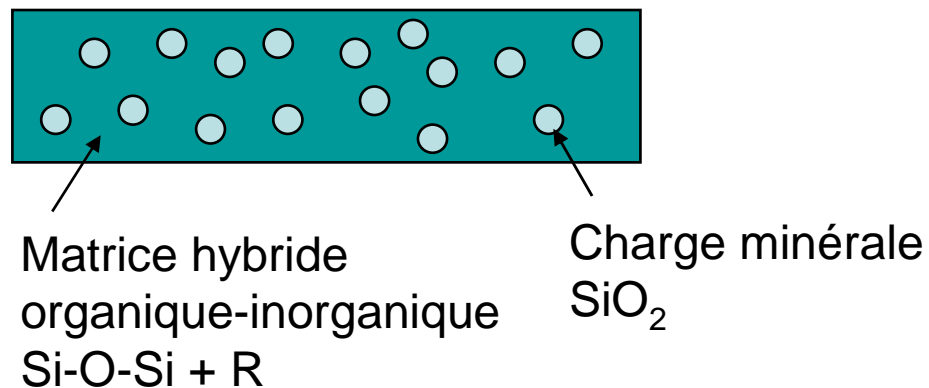
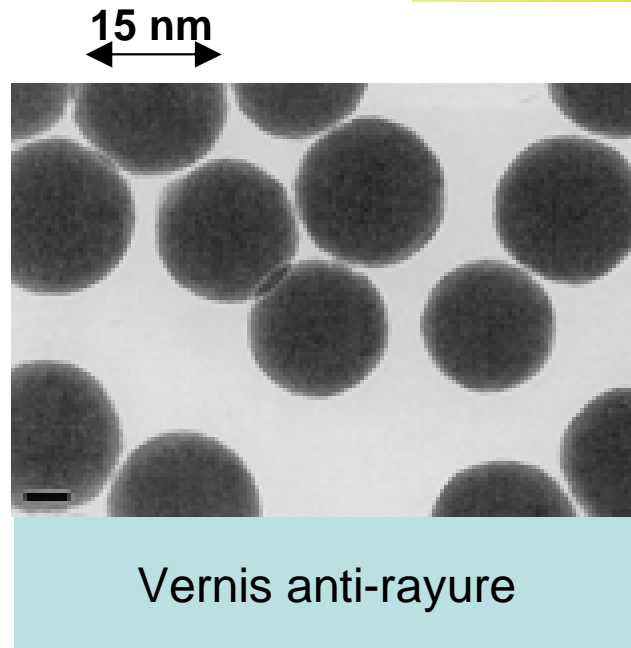


Différentes épaisseurs de vernis
Rayon de 110 μm - $R_t=2.5 \mu\text{m}$

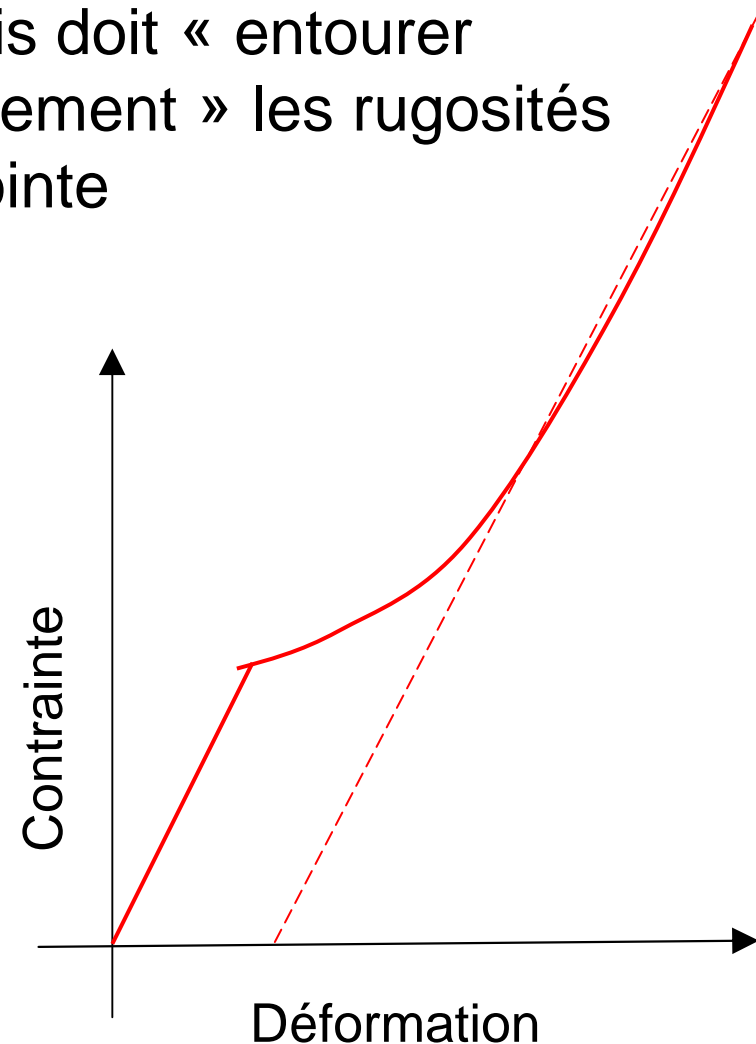


Empêcher les micro rayures dans le macro sillons

3. Vernis anti rayure : mode d'action

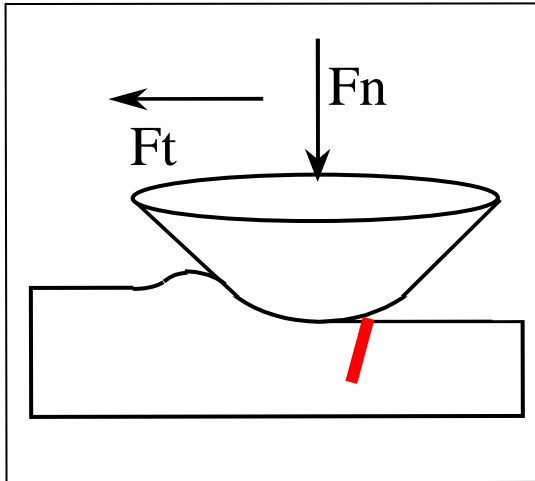
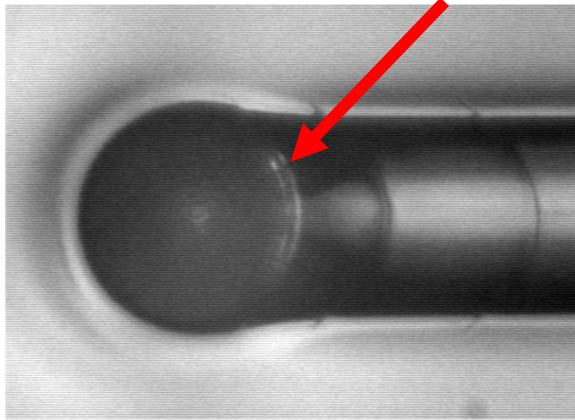


- Le vernis doit « entourer élastiquement » les rugosités de la pointe



4. Vernis AR : fissuration

Hypothèse classique :

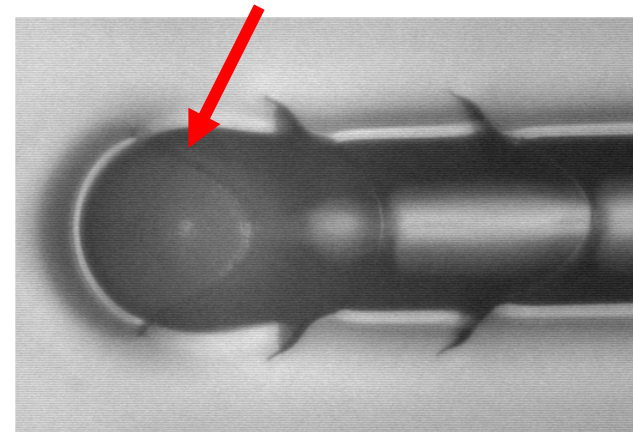


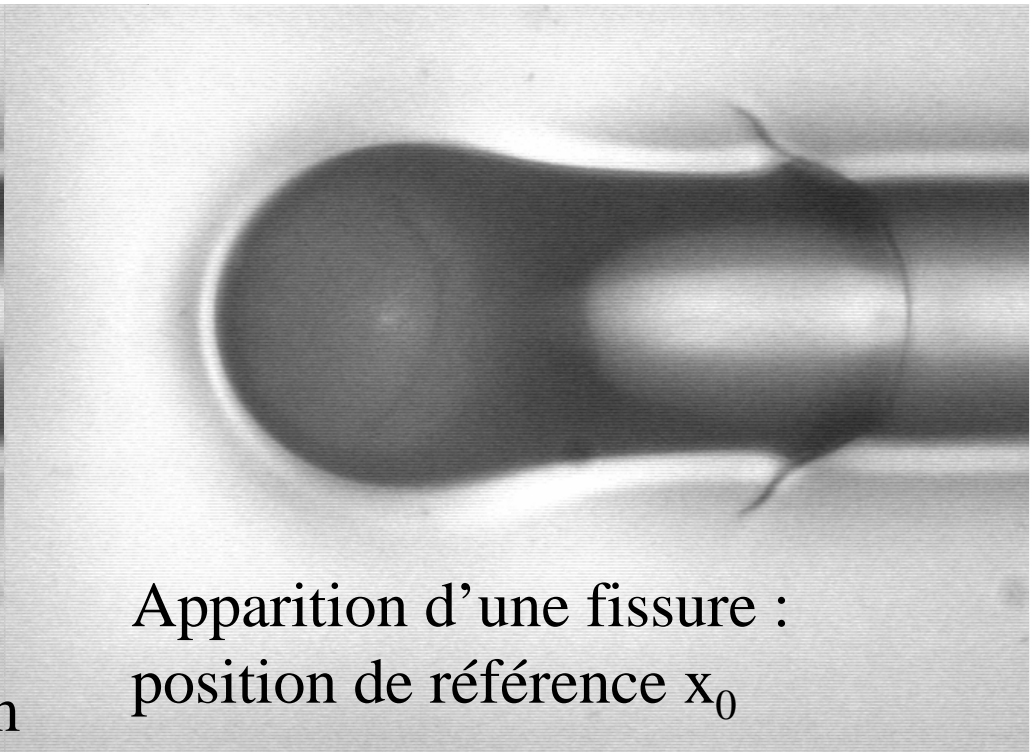
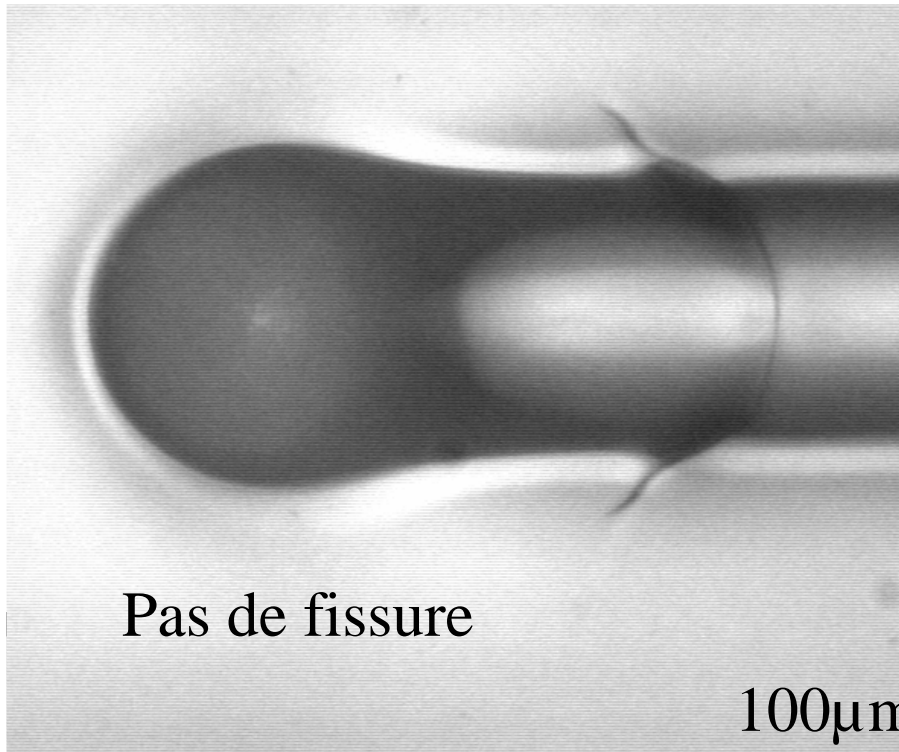
Communément admis :

σ_{xx} arrière du contact

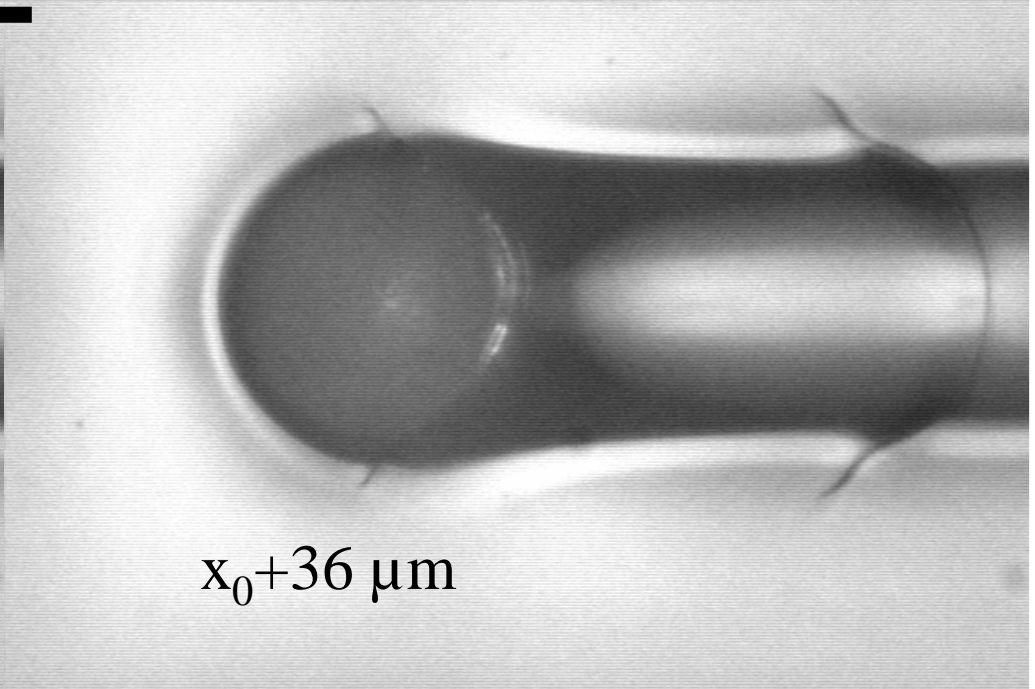
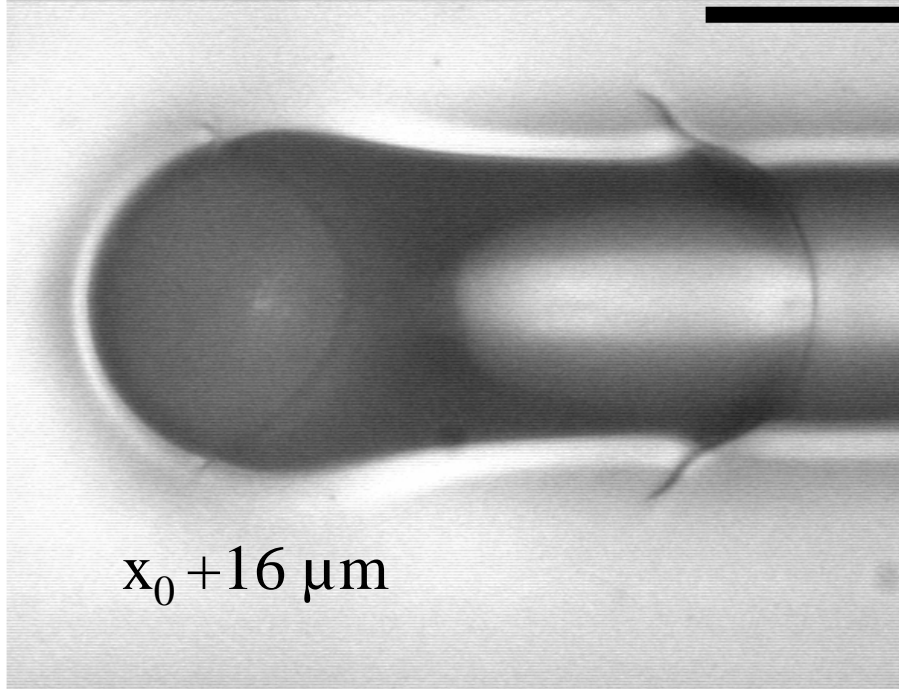
Mais fissuration sous la pointe !

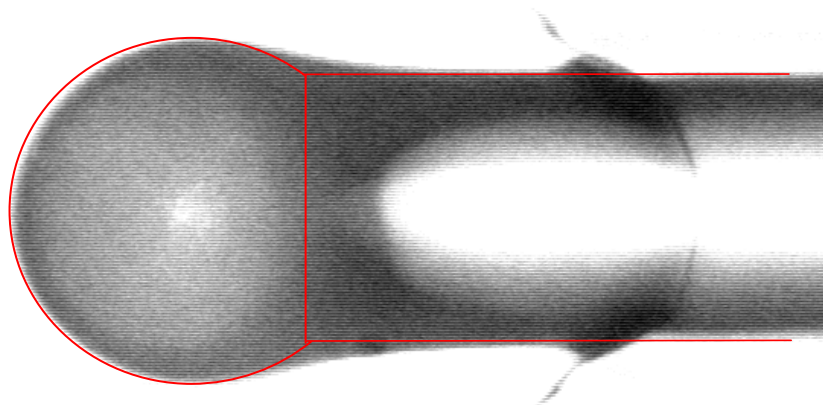
Origine ? Déformation max
dans le contact en lieu avec
plasticité





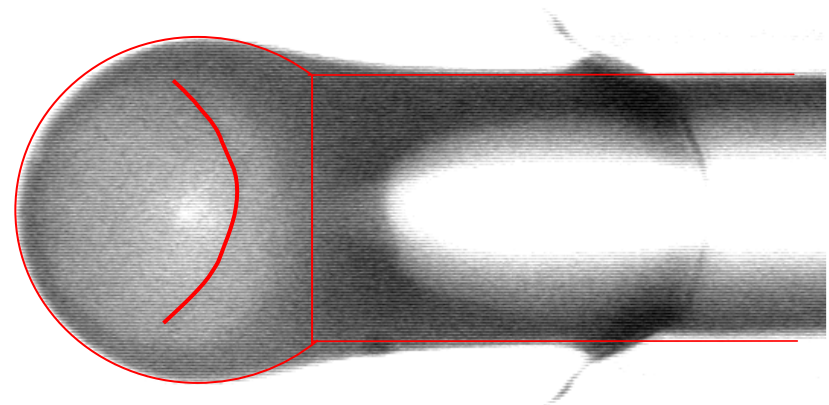
100 μm





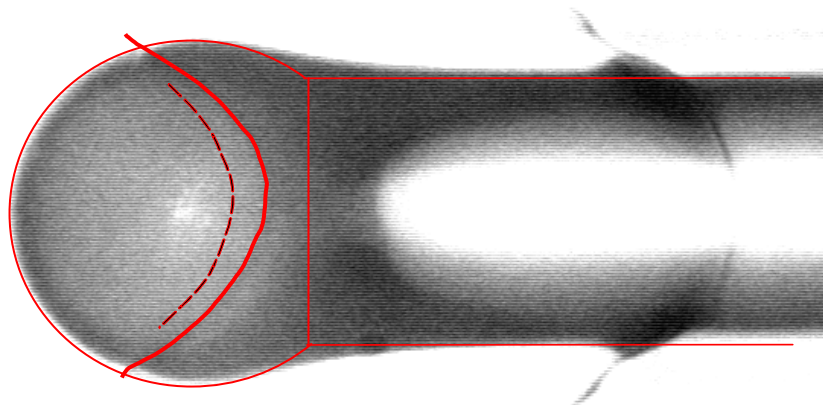
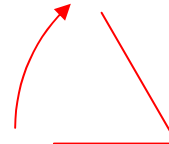
Pas de fissure

100 μ m

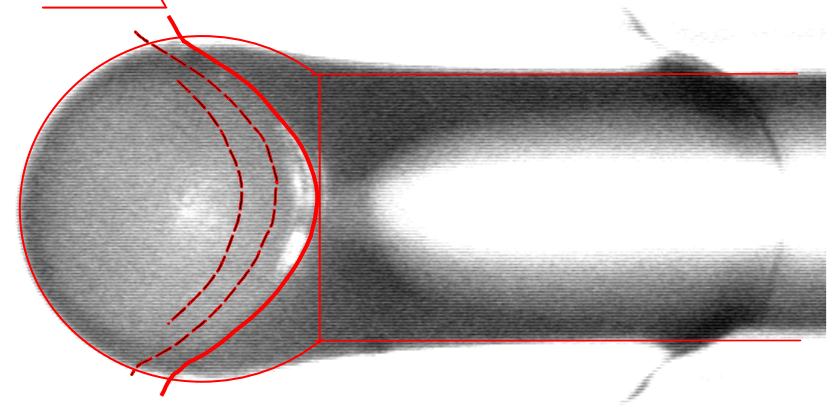


Apparition d'une fissure :
position de référence x_0

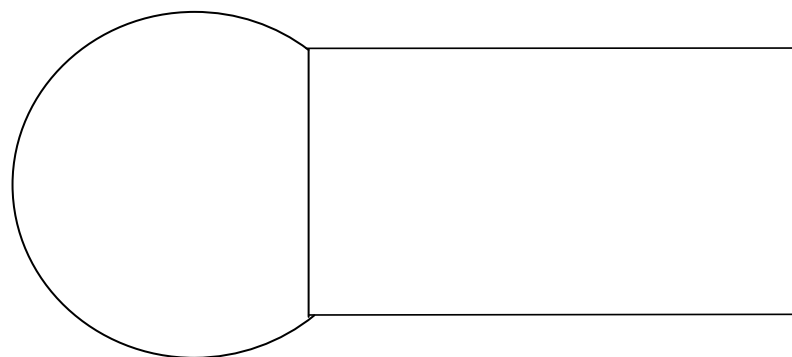
45°



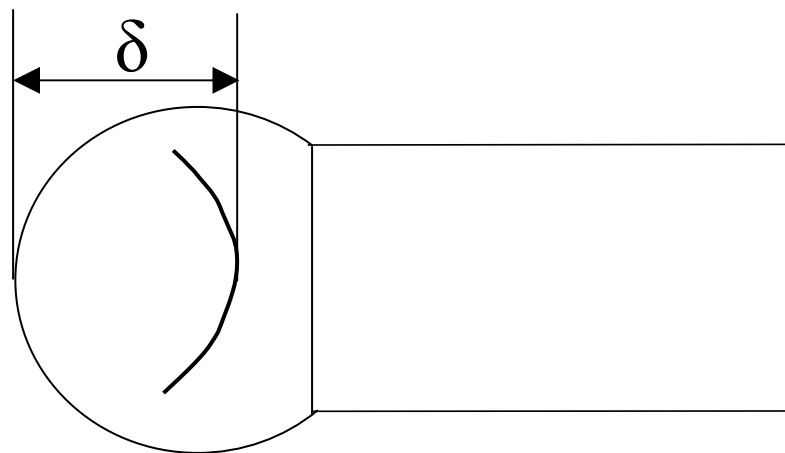
$x_0 + 16 \mu\text{m}$



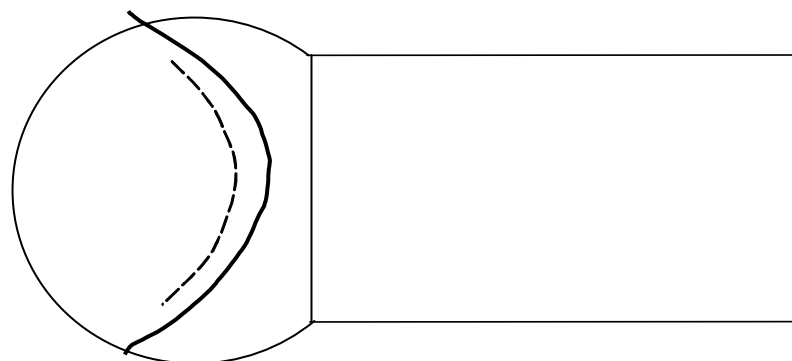
$x_0 + 36 \mu\text{m}$



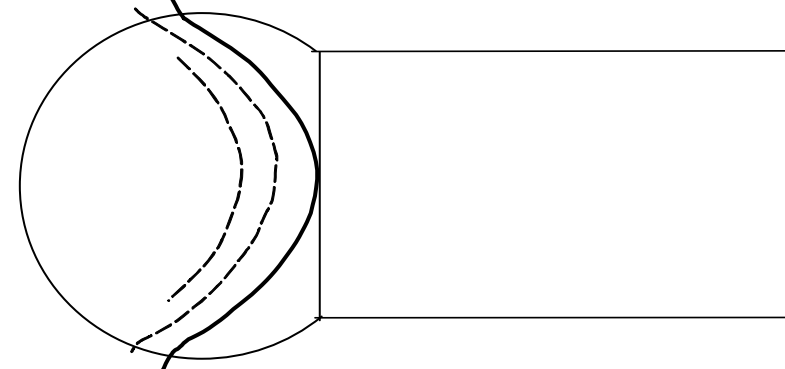
Pas de fissure



Apparition d'une fissure :
position de référence x_0



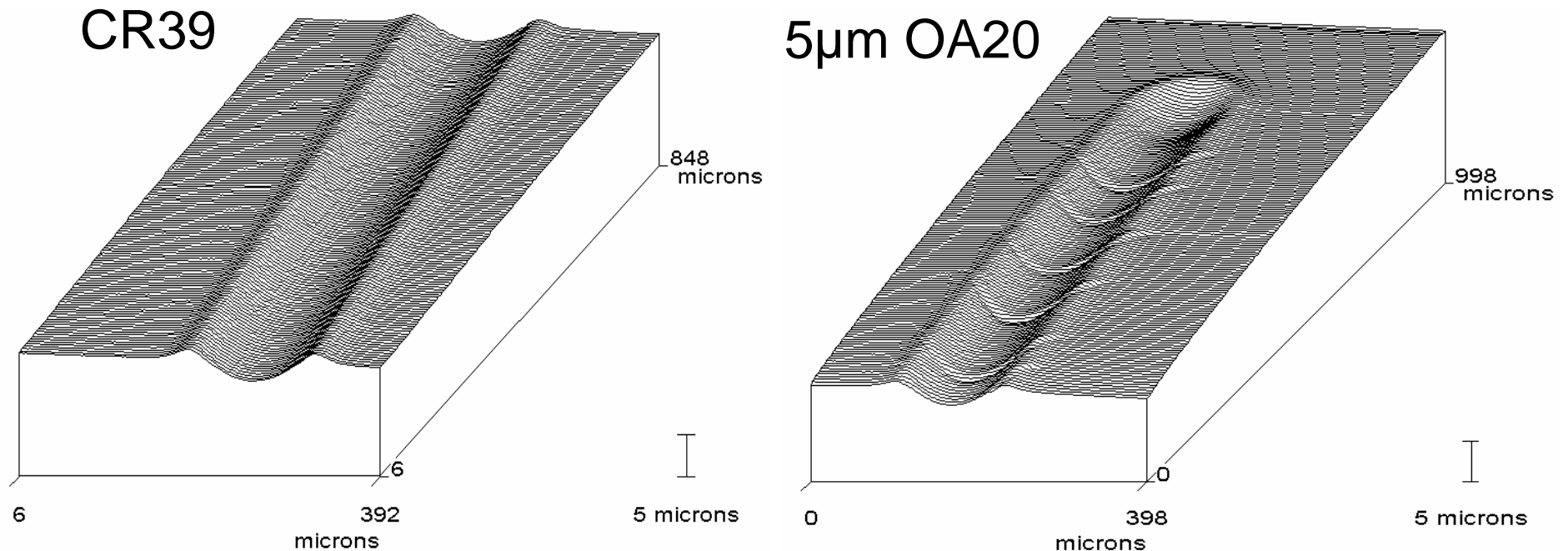
$x_0 + 16 \mu\text{m}$



$x_0 + 36 \mu\text{m}$

4. Vernis anti rayure : endommagements

Un vernis anti-rayure n'empêche pas les déformations plastiques !



4. Vernis anti rayure : endommagements

Simulation numérique EF

Vernis élastique ou élasto-plastique
sur substrat élastique ou élasto-plastique

Prise en compte progressive de l'EP, de l'écrouissage...

Résultats

- Plasticité du substrat,
- Confinement a/h ,
- Rapport E_v/E_s ,
- Frottement μ

jouent un rôle important sur la valeur et la position de la contrainte principale σ_1 et de la déformation principale.

4. Vernis : conclusions partielles

- Si le vernis est élastique et le substrat élastoplastique, contrainte principale de traction peut entrer dans le contact
« Peau élastique sur un substrat à seuil »
- Si vernis élastique et substrat EP avec écrouissage, la contrainte principale de traction est repoussée sur le bord arrière du contact.
- Si, vernis EP avec écrouissage, la contrainte principale de traction diminue
- Seule la déformation principale max semble rester dans le contact.

4. Vernis : conclusions partielles

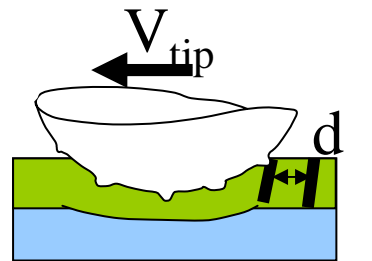
- Si le vernis est élastique et le substrat élastoplastique, contrainte principale de traction peut entrer dans le contact
« Peau élastique sur un substrat à seuil »
- Si vernis élastique et substrat EP avec écrouissage, la contrainte principale de traction est repoussée sur le bord arrière du contact.
- Si, vernis EP avec écrouissage, la contrainte principale de traction diminue
- Seule la déformation principale max semble rester dans le contact.

Enjeu : réaliser des vernis tenaces en traction, rhéodurcissant en compression et faiblement frottant

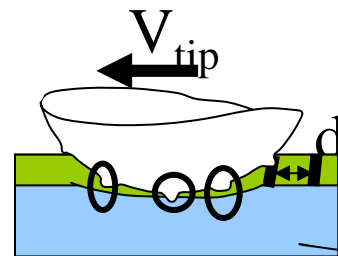
4. Vernis anti rayure : endommagements

Fissuration / rugosité/ épaisseur

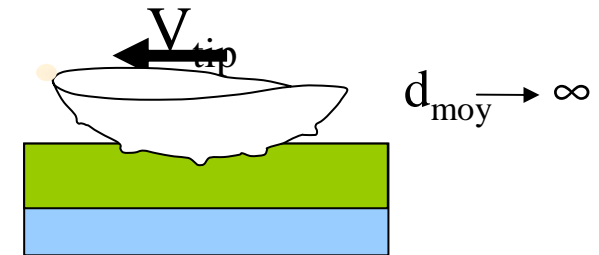
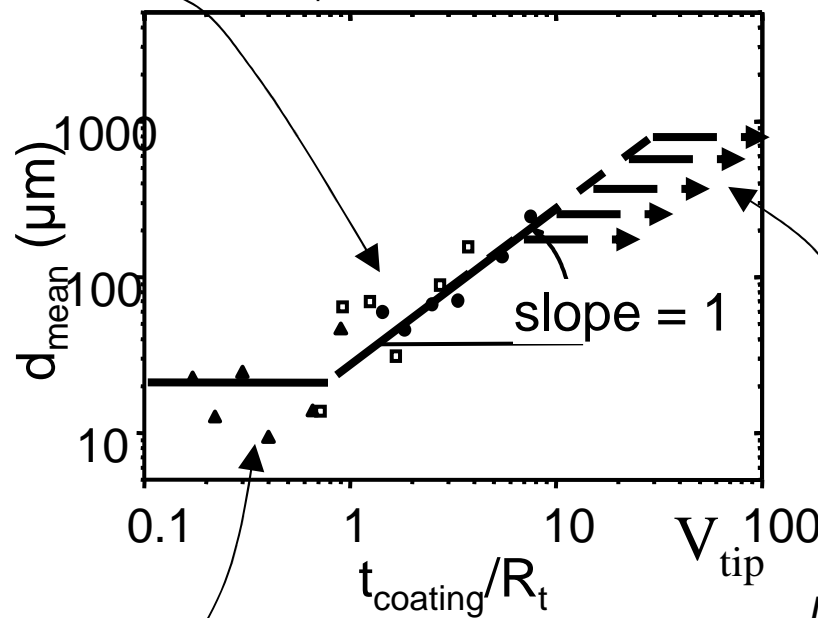
- $R_{tip}=240\mu\text{m}$ - $R_t=0.3\mu\text{m}$
- ◻ $R_{tip}=116\mu\text{m}$ - $R_t=0.6\mu\text{m}$
- ▲ $R_{tip}=110\mu\text{m}$ - $R_t=2.5\mu\text{m}$



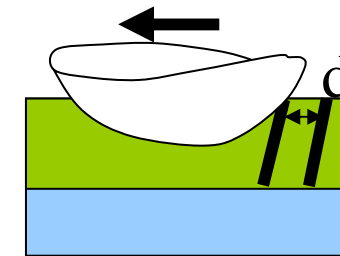
Cracking controlled by both local scale and macroscopic contact scale



Cracking depends on local scale



$d_{\text{moy}} \rightarrow \infty$



Cracking depends on macroscopic contact scale

4. Ecaillage de vernis minces

Exemple d'écaillage remarquable

3.5 μm vernis nanocomposite (20% de silice 20nm),

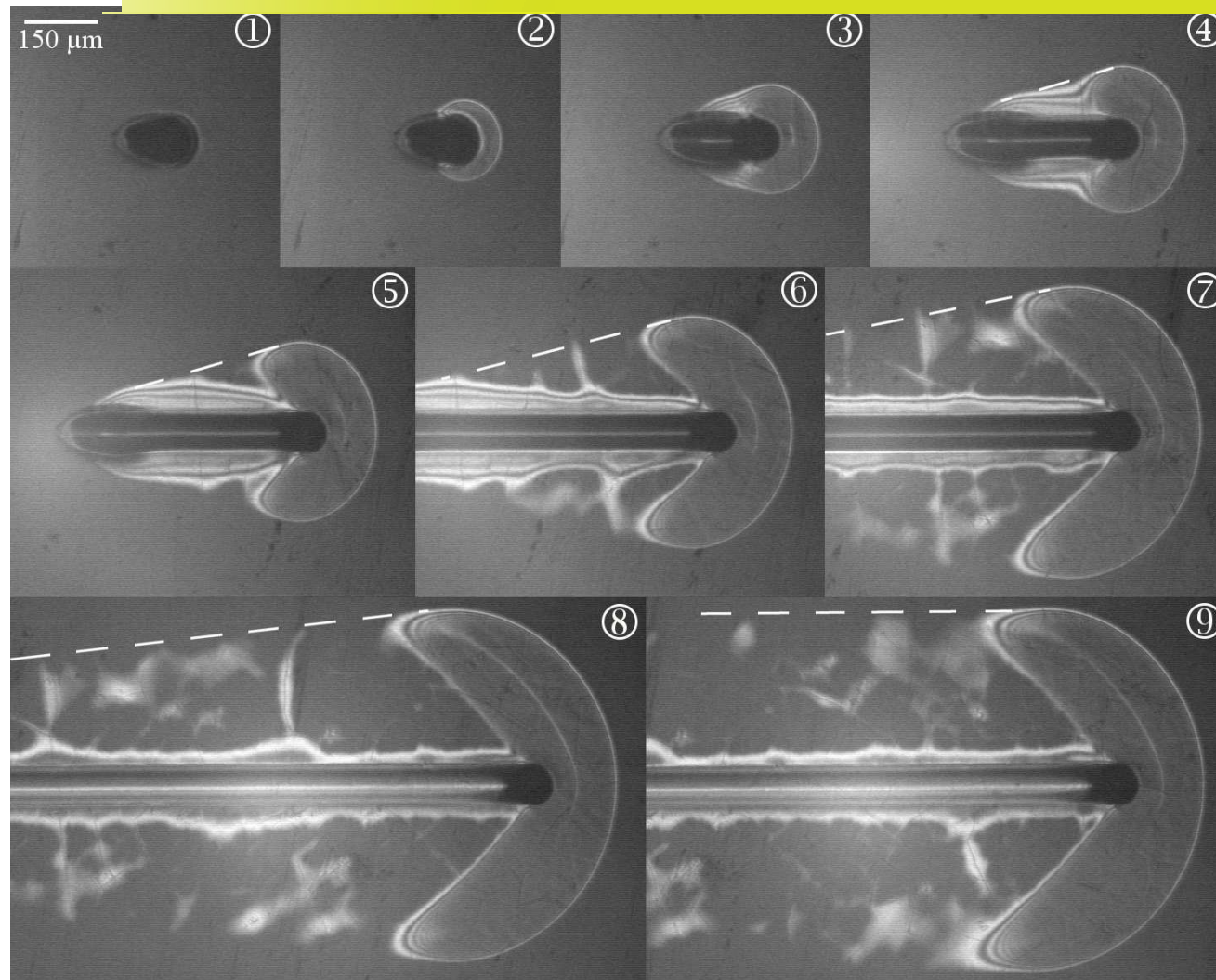
Plasticité du substrat (PC) comme prometteur de l'écaillage

$T = 70^\circ\text{C}$.

Vitesse : 30 $\mu\text{m/s}$

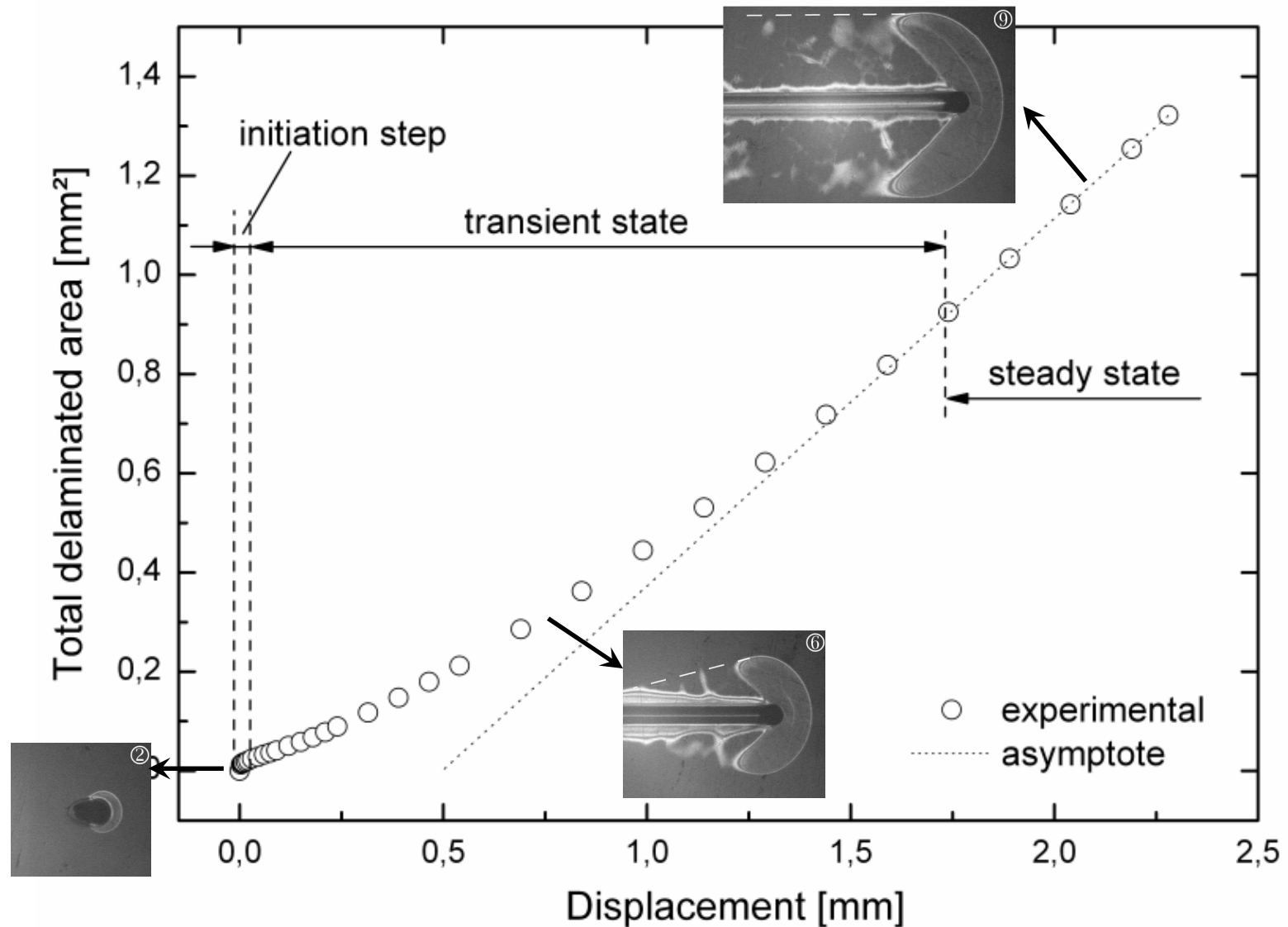
R_{tip} 116 μm

4. Ecaillage de vernis minces



Après passage de la pointe, la pression atmosphérique re plaque le vernis sur le substrat

4. Ecaillage de vernis minces



4. Ecaillage : analyse énergétique



Forme variationnelle du bilan énergétique global

$$\Delta W = \Delta E_F + \Delta E_D + \Delta E_E$$

- ΔW : travail de l'indenteur $\Delta W = F_t \cdot d$
- ΔE_F : énergie de rupture (délaminage film / substrat)
$$\Delta E_F = 2\Delta A_{interf} \cdot \gamma_{s-interf}$$
- ΔE_D : énergie de dissipation (plasticité du substrat, frottement)
$$\Delta E_D = (\sigma_{yield} \cdot S_t + F_n \cdot \mu_{local}) \cdot d$$
- ΔE_E : énergie élastique $\Delta E_E = 0$

4. Ecaillage : analyse énergétique

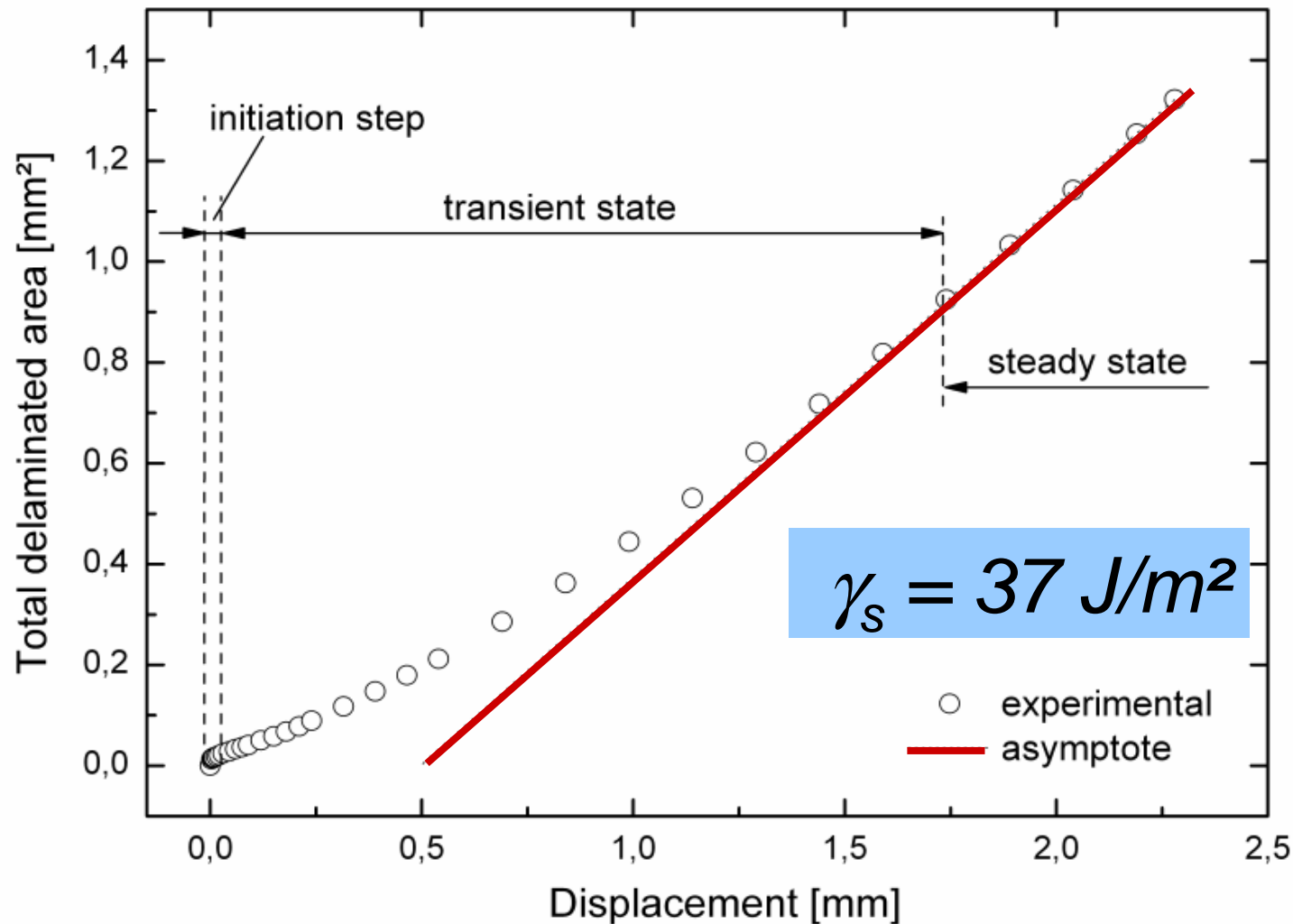
⇒ formulation simple :

Relation linéaire entre l'aire délaminée
et la distance de rayage

$$\Delta A_{interf} = \frac{d}{\gamma_{s-interf}} f(F_n, \mu_{app}, \mu_{local}, \sigma_{yield}, S_t)$$

⇒ Pente : $\frac{f}{\gamma_{s-interf}}$

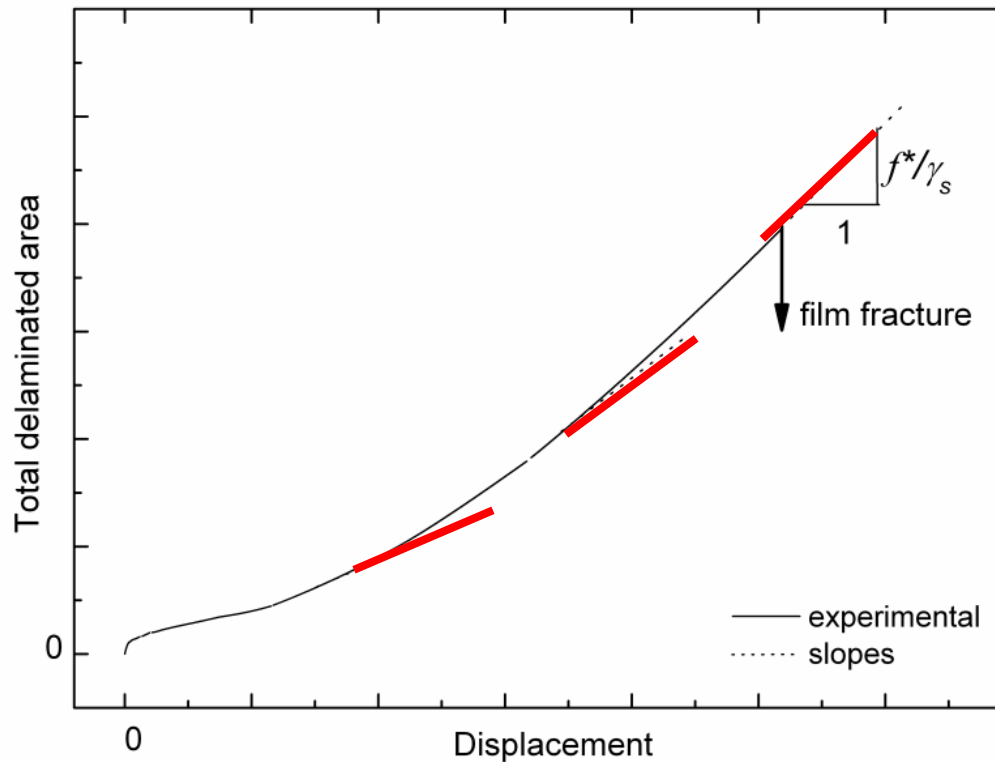
4. Ecaillage : analyse énergétique



adhesion Van der Waals $\approx 10 \text{ mJ/m}^2$ - fracture cohésive $\approx 3000 \text{ J/m}^2$

4. Ecaillage : analyse énergétique

➡ Cas particulier : rupture du film avant stabilisation



Pente : $\frac{f}{\gamma_{s-interf}}$ plus faible ➡ borne max de $\gamma_{s-interf}$!

Conclusion générale

Aux échelles étudiées, les propriétés mécaniques de surfaces sont en lien avec les propriétés volumiques,

- couplées avec le frottement
- mesurées (souvent) par un essai de structure (Force, longueur, raideur)

Progrès récents en Mécanique-Physique des Surfaces,
Progrès récents dans les modèles / expériences

On sait expliquer les endommagements,

On commence à pouvoir prédire les caractéristiques du matériau idéal. « Reste à le fabriquer en couches minces »

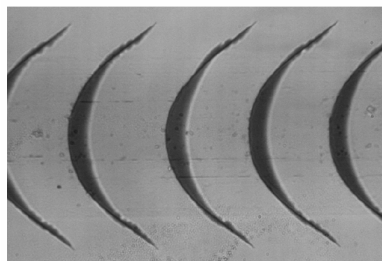
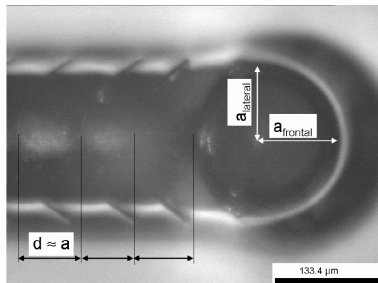
Enjeux / questions

- Gérer un changement d'échelle
- Relation frottement adhérence ? Quelle est l'épaisseur de la couche cisailée dans lors d'un glissement ?
- Quand forces de surfaces ne sont plus négligeables devant forces volumes (échelle submicronique) que deviennent les mesures de raideurs de contact ?
- Analyser la « cicatrisation » des empreintes et des sillons
- Coupler des analyses complémentaires pour enrichir l'analyse – et / ou travailler avec des physicochimistes pour bloquer des variables expérimentales

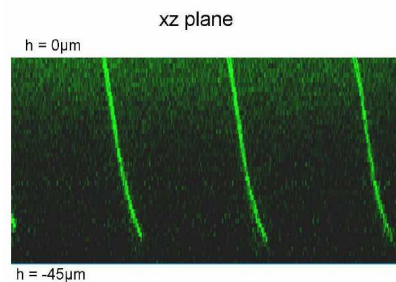
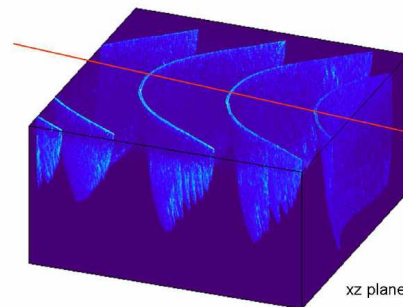
Enjeu / Perspective

Comment estimer une contrainte à rupture en traction pour un matériau fragile ?

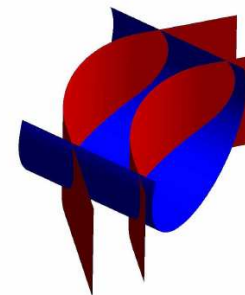
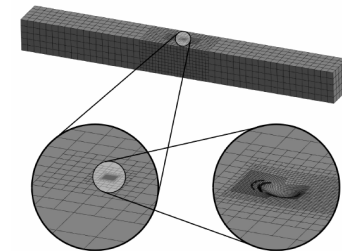
Expériences + simulation
des conditions de
contact



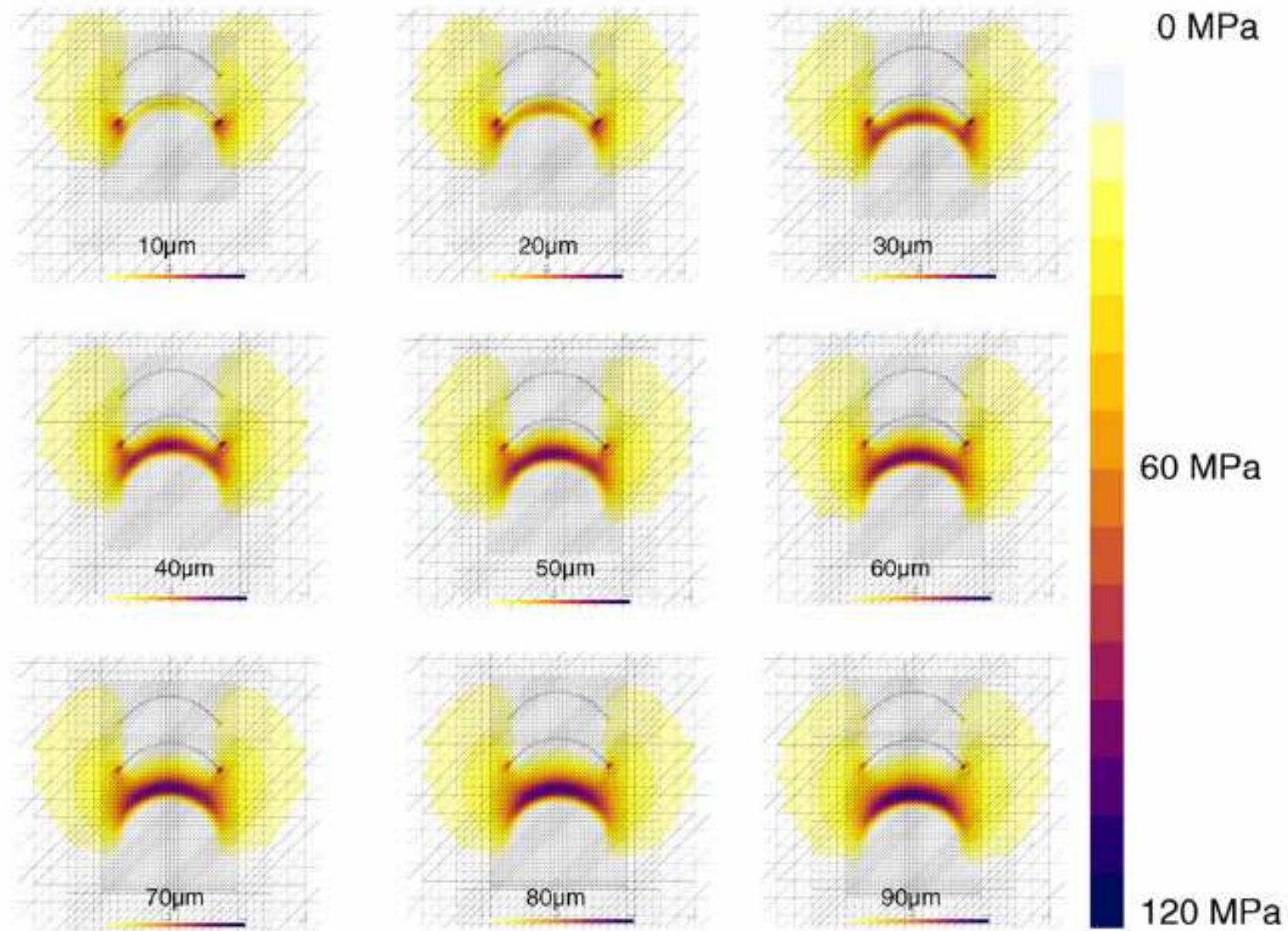
Analyse des périodicités



Modélisation 3D X-FEM
multigrid pour
analyser la périodicité



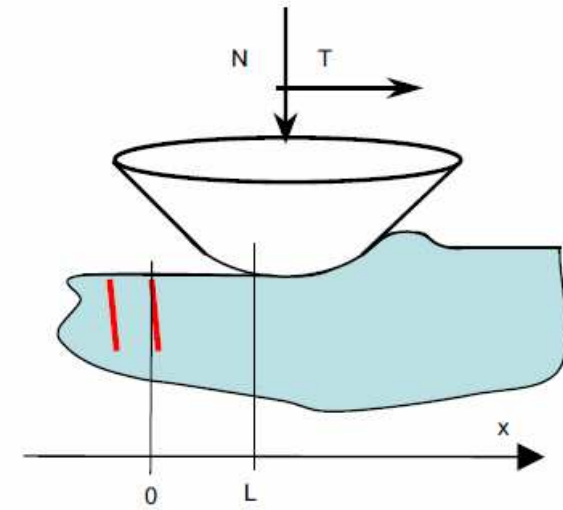
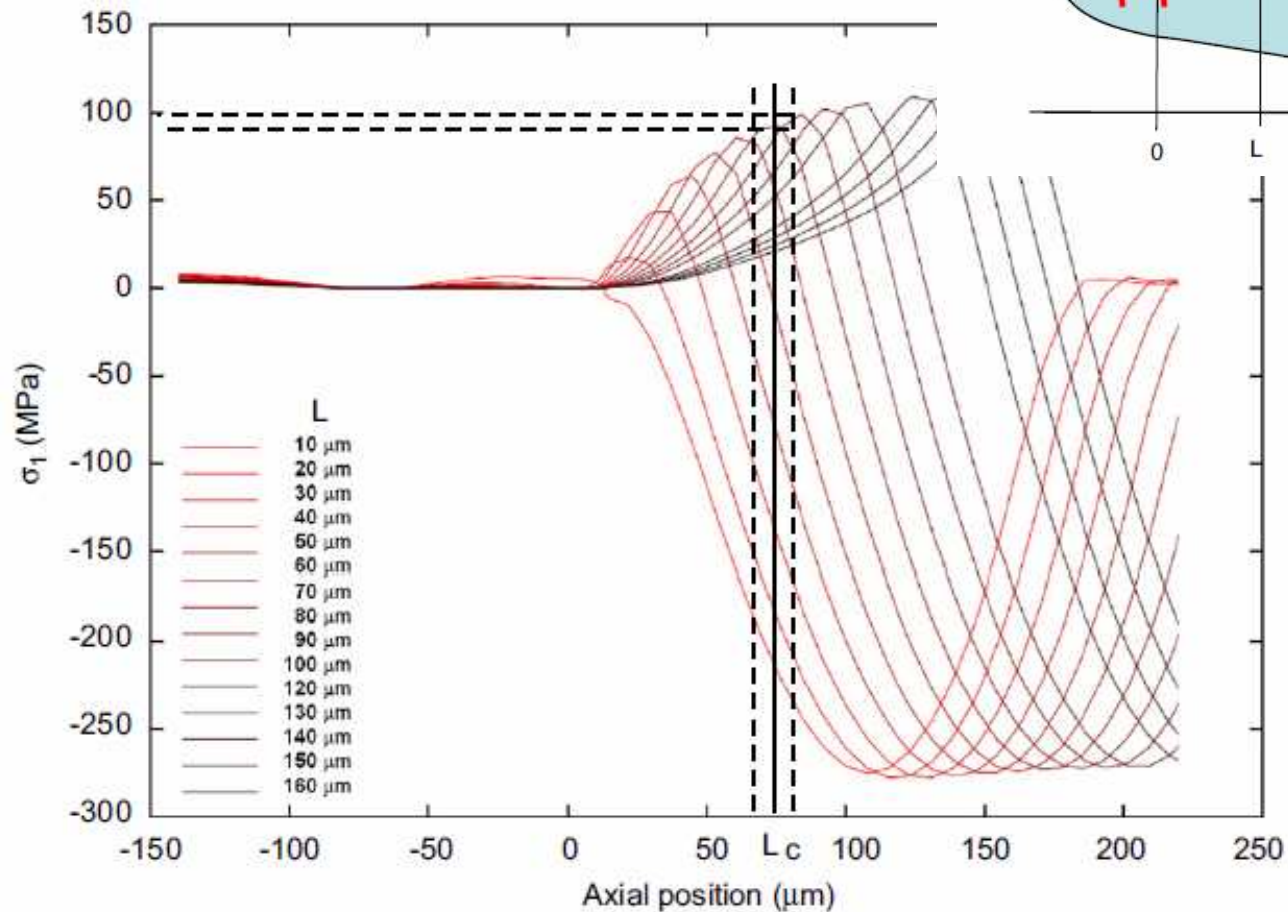
Enjeu / Perspective



Surface maximum tensile principal stress

Enjeu / Perspective

Surface maximum tensile principal stress



M.C BAIETTO, J. RANNOU, A. GRAVOUIL, H. PELLETIER, C. GAUTHIER, R. SCHIRRER
Tribology International (2010) doi:10.1016/j.triboint.2010.04.014