

COURS DE MECANIQUE DES SOLIDES ET DES MATERIAUX (MSM2)

AMPHI 18: BILAN DU COURS

Matteo Ciccotti

Prof. De l'ESPCI
Laboratoire SIMM
Esc H – H3.08

OBJECTIF

Prédire comment un objet répond à une charge



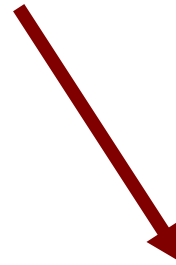
Matériau:

- Métal
- Céramique
- Polymère
- Composite

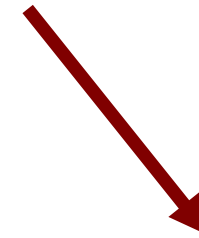
Structure

(géométrie et mobilité):

- Corps continu
- Assemblage
- Éléments simples

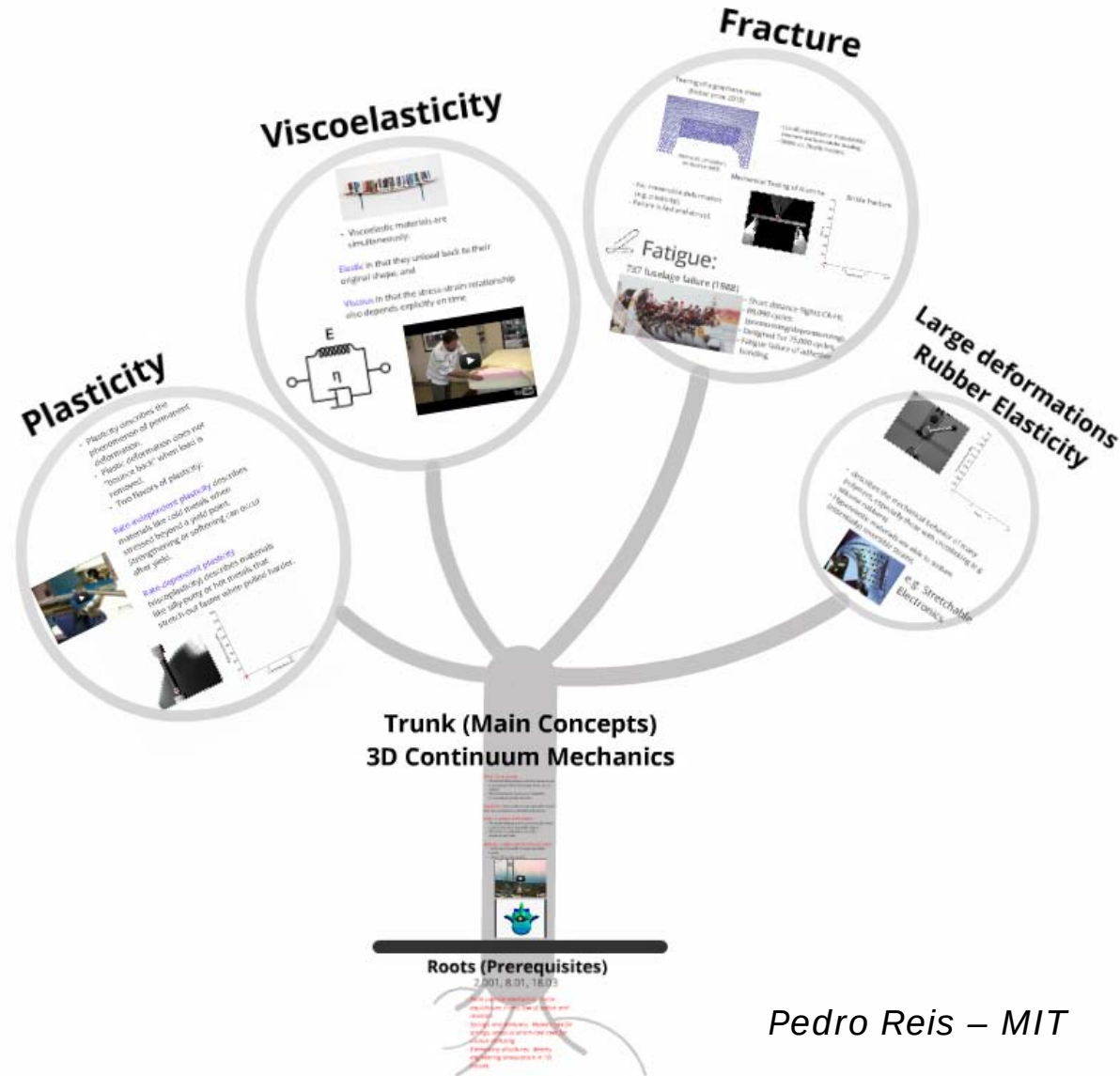


- Changement de forme
- Ecoulement
- Fracture
- Relaxation
- Fluage
- Fatigue



- Charge statique
- Gravité
- Elongation
- Cisaillement
- Flexion
- Torsion
- Impact

L'ARBRE DE LA MECANIQUE DES SOLIDES



Pedro Reis – MIT

PROGRAMME DU COURS

1. Introduction

2. MMC, matériaux et comportements (rappels)

3. Elasticité (compléments)

- Méthodes énergétiques, stabilité et lois d'échelle
- Ondes et vibrations

4. Viscoélasticité

- Fluage, relaxation, modèles rhéologiques
- Représentation en temps et fréquence
- Transition vitreuse et équivalence temps-température

5. Plasticité

- Seuil de plasticité, écrouissage, viscoplasticité
- Modèles rhéologiques
- Critères de plasticité 3D

6. Fracture

- Mécanique de la fracture linéaire élastique
- Mécanismes de dissipation
- Adhésion, frottement, problèmes dynamiques

7. Grandes déformations (interprétation!)



UNE APPROCHE AU PREMIER ORDRE...

Formalisme réduit

Linéarisation

Estimations en ordre de grandeur

Rendre scalaire par estimation des termes dominants

Solutions en loi d'échelle

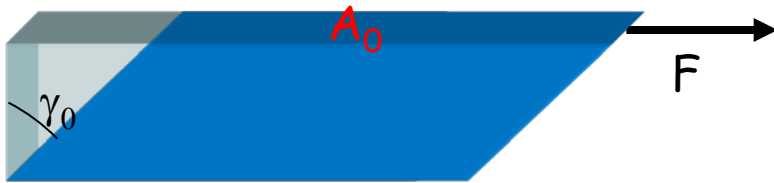
Analyse dimensionnelle: échelles physiques !

Cueillir l'essence du phénomène physique

Exercices de modélisation et d'interprétation

BRANCHE 1: VISCOELASTICITE

Les matériaux **viscoélastiques** (surtout polymères) partagent certains traits des matériaux élastiques et des fluides newtoniens et ceci même pour des déformations arbitrairement petites



$$\sigma \sim E \varepsilon$$


$$\sigma \sim \eta \dot{\varepsilon}$$


De conséquence la réponse à une sollicitation sera en général:

- 1) retardée
- 2) sensible au temps/rapidité d'application de la charge
- 3) sensible à la température (comme la viscosité)



Pneu



Amortisseur



Joint



Mousse

BRANCHE 1: VISCOELASTICITE

Le temps de la matière

Un ou plusieurs temps de relaxation

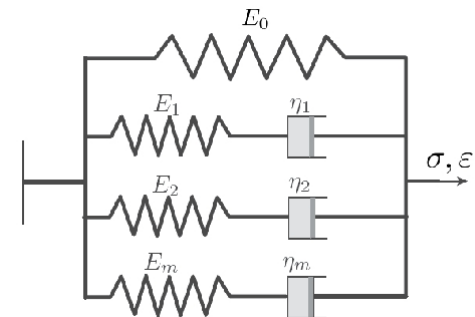
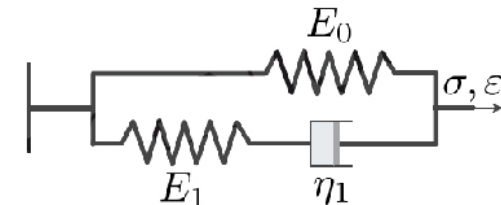
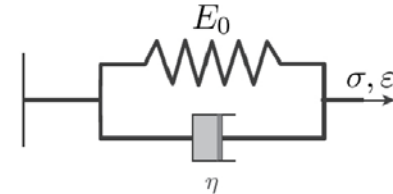
$$\tau = \frac{\eta}{E}$$

Nombre(s) de Deborah

$$De = \frac{\tau}{t^*}$$

Effets visqueux pour $De \sim 1$
Dissipation, Retard, Relaxation, ...

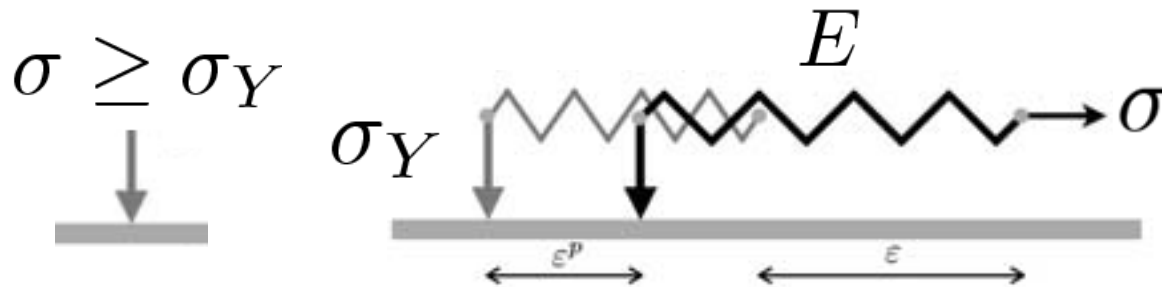
Fonction de relaxation/fluage
et modules complexes
Principe de correspondance



BRANCHE 2: PLASTICITE'

Les matériaux **(élasto-)plastiques** (surtout métaux) présentent

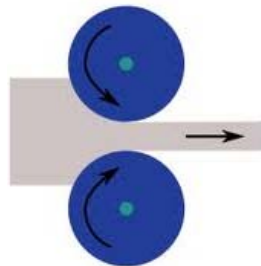
- 1) un comportement élastique jusqu'à un seuil de contrainte
- 2) un écoulement (généralement non-newtonien) ensuite
- 3) des déformations permanentes après l'annulation de la charge



Si en outre ils sont sensibles à la rapidité de sollicitation, on parlera de matériaux **viscoplastiques** (surtout polymères)



Emboutissage



Laminage



Extrusion



Dissipation

BRANCHE 2: PLASTICITE'

Méthodes de solution pour
déformations plastiques petites ou modérées

Déformation plastique inhomogène...
...mécanismes... une question de structure!

Limite de charge et limite d'écoulement...
...souvent équivalents en loi d'échelle!

Contrairement à la fracture, la plasticité tend à émousser les défauts!

Les structures ductiles sont généralement moins résistantes, mais plus tenaces et robustes (moins sensibles au défaut) !

BRANCHE 3: FRACTURE

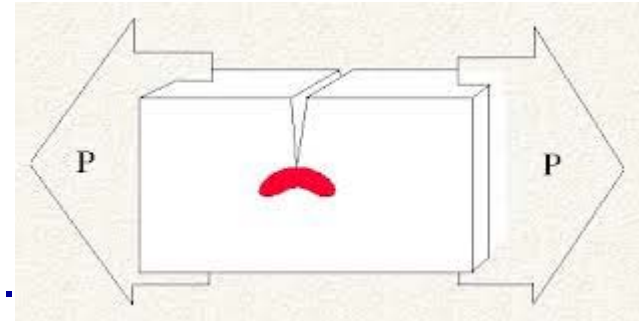
La fracture est essentiellement le phénomène de **création de nouvelles surfaces** à l'intérieur d'un objet.

Il s'agit d'un **mode de ruine** généralement opposé à la plasticité et se terminant par la **séparation de l'objet en deux ou plus parties**.

La présence d'une fissure dans un objet chargé s'accompagne d'une forte **concentration de contrainte**.

On parlera de **fracture fragile** (céramiques) ou **ductile** (métaux) en mesure de l'entité des déformations plastiques permanentes subies pendant ruine.

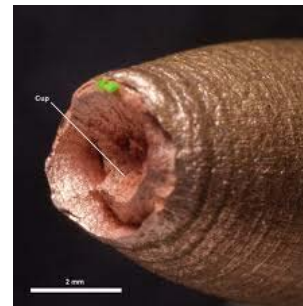
$$\gamma, \Gamma$$



Test de rupture



Fragile



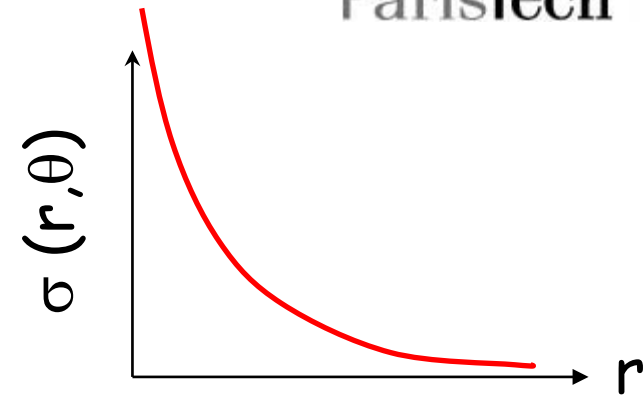
Ductile

FRACTURE REVERSIBLE

Théorie LEFM:

Singularité de contrainte:

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad K_I \geq K_{Ic}$$



Minimisation de l'énergie totale:

$$G = -\frac{dU_{el}}{dA} + \frac{dW}{dA} \geq G_c = w$$

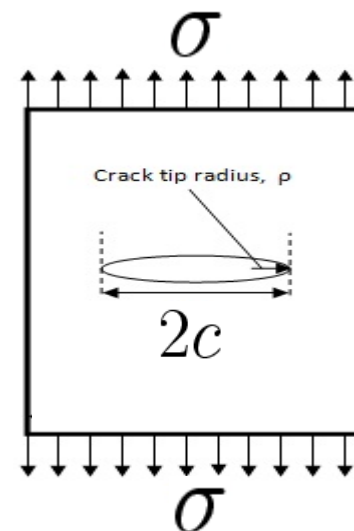
$$G_c = \frac{K_{Ic}^2}{E'}$$

Longueur de Griffith:

$$c_G \sim \frac{K_{Ic}^2}{\sigma^2} \sim \frac{G_c E}{\sigma^2}$$

Rayon de courbure critique:

$$\rho \sim \frac{G_c}{E}$$



FRACTURE DISSIPATIVE

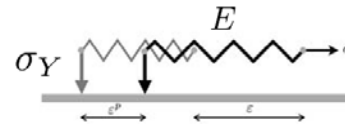
Extension de la LEFM si zone de process petite

$$G_c = \Gamma(v) \gg w$$

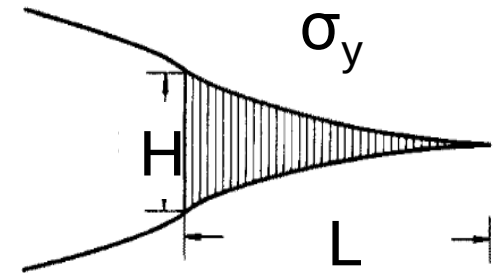
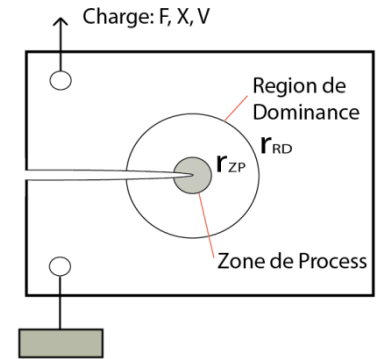
Fracture élasto-plastique:

Longueur de Dugdale:

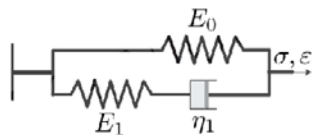
$$L_D \sim \frac{K_{Ic}^2}{\sigma_y^2} \sim \frac{\Gamma E}{\sigma_y^2}$$



$$\Gamma \sim \sigma_y H$$



Fracture viscoélastique (solide):



$$\tau = \frac{\eta_1}{E_1}$$

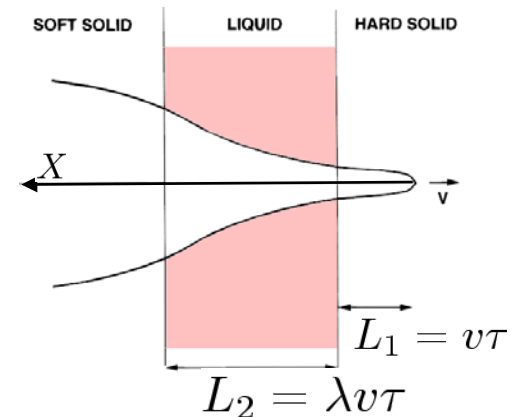
$$E_\infty = E_0 + E_1$$

$$\Gamma_{max} = \lambda w \gg w$$

$$\lambda = \frac{E_\infty}{E_0}$$

Longueurs de de Gennes:

$$L_1 = v\tau \quad L_2 = \frac{E_\infty}{E_0} v\tau$$



BRANCHE 4: GRANDES DEFORMATIONS (ELASTIQUES ET PLASTIQUES)

Dans la plus part des matériaux l'élasticité est limitée à des déformations de l'ordre de 1 %.

De façon surprenante les **élastomères** (et d'autres **matériaux mous**) présentent un **domaine élastique (réversible)** pouvant atteindre un étirement d'un **facteur 10** !
On parle d'**élasticité caoutchoutique**.

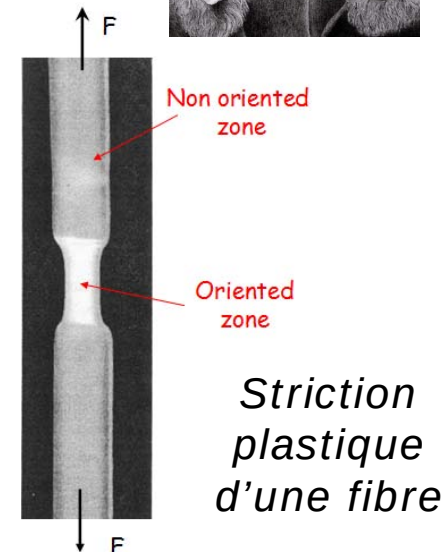
D'autres matériaux tels certains métaux et les polymères sémi-cristallins peuvent présenter des **déformations plastiques exceptionnellement grandes** avant de casser



Chewing gum



$$\epsilon \sim 1$$

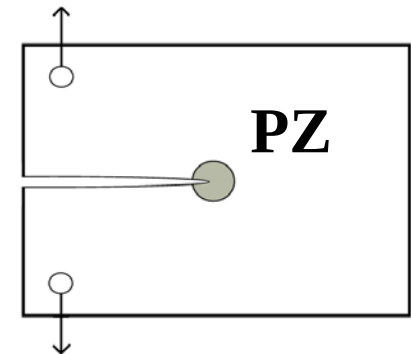


CADRE COHERENT EN PETITES DEFORMATIONS

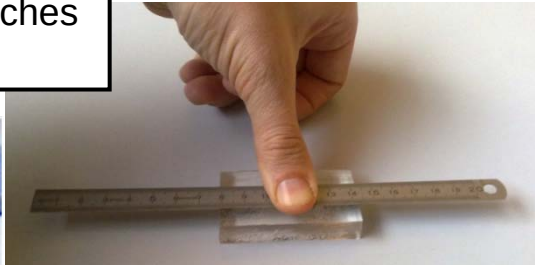
- Notions de tenseurs de déformation et contrainte (nominales)
- Théorie élastique linéaire
(principe de superposition)
- Théorie viscoélastique linéaire
(temps indépendant de l'amplitude, principe superposition Boltzmann, principe de correspondance)
- Théorie des petites déformations plastiques
(perturbation solution élastique, négliger les variations de volume)
- Théorie de la fracture élastique linéaire
(malgré la singularité de contrainte)
- Solutions en loi d'échelle!

CELA N'EMPECHE PAS DE TRAITER...

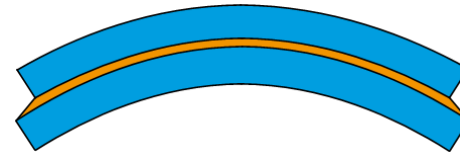
- Des grands déplacements...
...si les objets sont élançés!
- Des matériaux mous...
...si on se limite aux petites déformations!
- Les conditions de transition en grande déformation
...en odg!
- Les instabilités...
...si la transition d'instabilité arrive
en petite déformation!
- Les singularités de contrainte...
...si elles sont régularisées
par une zone de process de petite taille!



-Marche sur les planches
-Rides



Vibrations et ondes atténuées



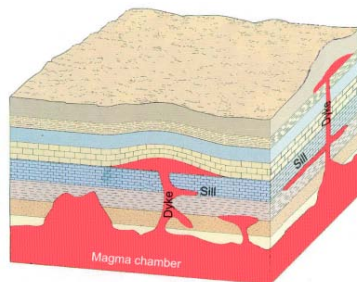
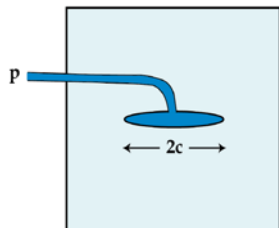
Rebonds élastiques et viscoélastiques

ESPCI
ParisTech

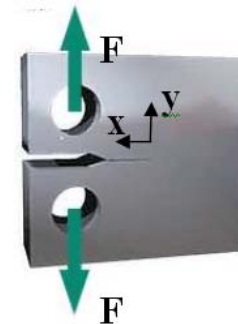


Tortillement plastique d'un ruban

- Hydrofracture

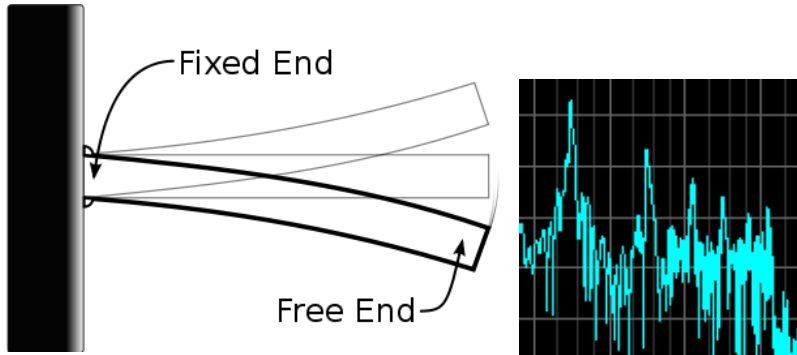


-Fragilité vs ductilité

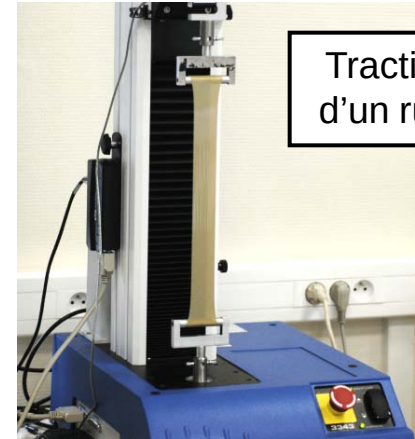


TRAVAUX PRATIQUES HMP (2 / 4)

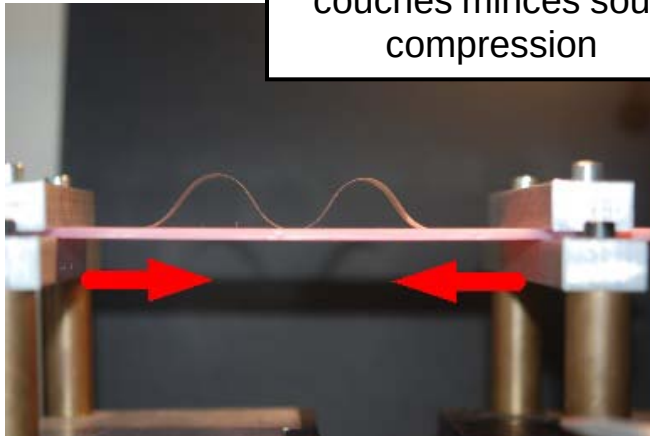
Vibration de poutres



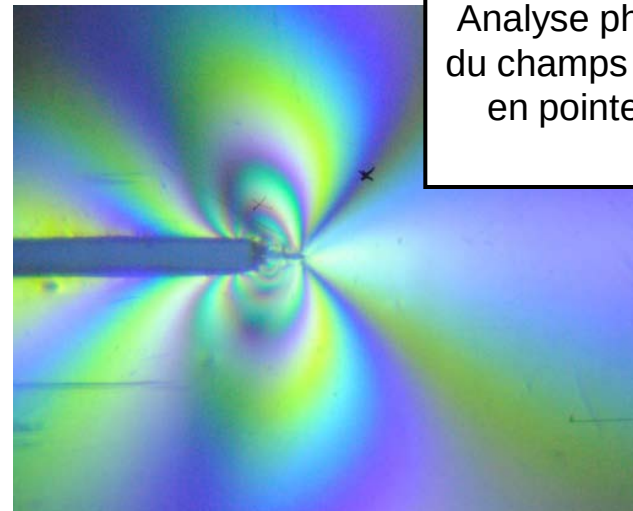
Traction viscoplastique
d'un ruban de polymère



Délamination de
couches minces sous
compression

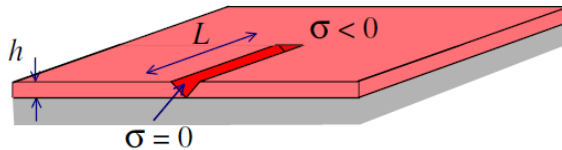
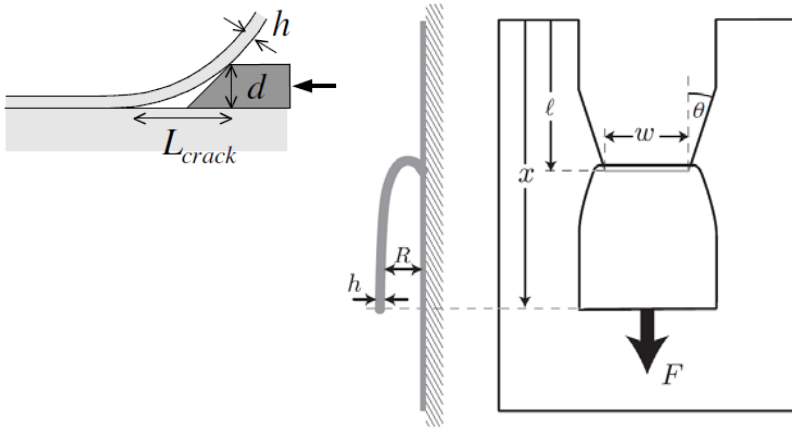


Analyse photoélastique
du champs de contrainte
en pointe de fissure

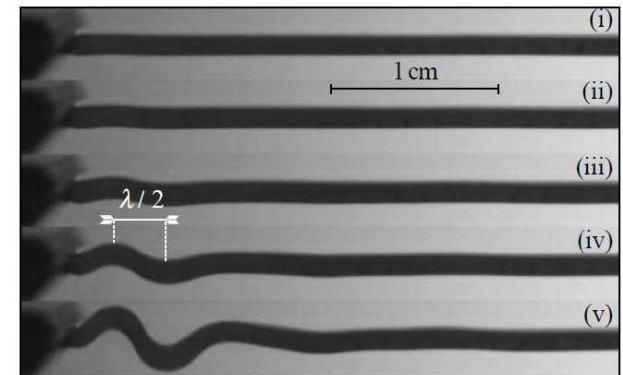
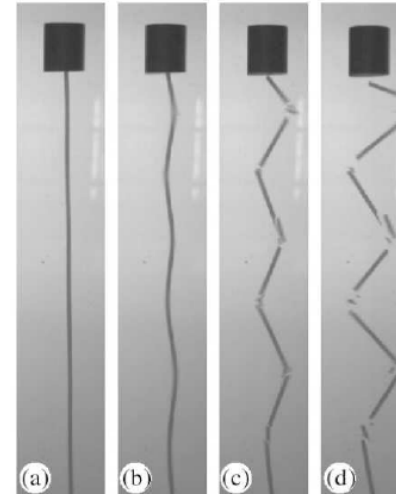


2 TUTORATS

Elasticité et surfaces: crack!
Rabot, Pelage, Faiençage



Impacts, Rebonds,
Fragmentation spaghetti
Relâche d'un élastique



SCALAIRE OU TENSORIEL?

$\overline{\sigma}$ et $\overline{\varepsilon}$ des **grandeurs tensorielles !!!**

On peut traiter des **problèmes scalaires** si:

- 1) symétries de la structure et du chargement
- 2) identification de la composante dominante
- 3) solution en loi d'échelle (identification d'un mécanisme)

Mais il ne faut **pas oublier la nature tensorielle**:

- 1) Contraction de Poisson
- 2) Incompressibilité
- 3) Critères de plasticité
- 4) Critères de initiation et propagation de fissures (et direction)



SOLIDE OU LIQUIDE?

(la rhéologie « panta rei » Héraclite)

Solide non déformable (pas ici)

Solide déformable élastique:

Admet état équilibre sous sollicitation

Fluide visqueux:

Subit écoulement pour toute sollicitation

Dans la vraie vie?

Une question d'échelle de temps...

$$De = \frac{\tau}{t_{\text{exp}}}$$

Nombre de Deborah

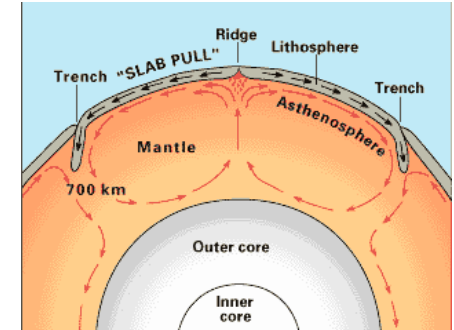
Markus Reiner depuis la Bible (Livre des Juges 5:5)
« Les montagnes coulèrent devant le Seigneur »

...de **contraintes!**

La plasticité est l'écoulement de solides!

...et **de température!**

(Dépend aussi de la microstructure!)



DoITPoMS, Univ Cambridge

$\mu, \eta, \sigma_y, \tau, k_B T$ **ESPCI**
ParisTech

DUR OU MOU?

(Rigide-complaisant)

 E

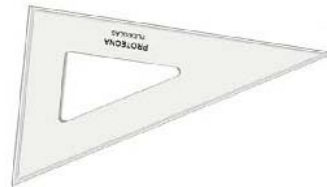
$$B = EI$$

Ordre de grandeur du module élastique

~200 GPa
Acier



~1 GPa
Plexiglas



~1 MPa
Latex



~1 kPa
Flan



Matériau ou structure? Parfois les sens peuvent tromper !



Fibres de verre
~70 GPa



Cheveux
~1 GPa



Film cuisine
~1 GPa

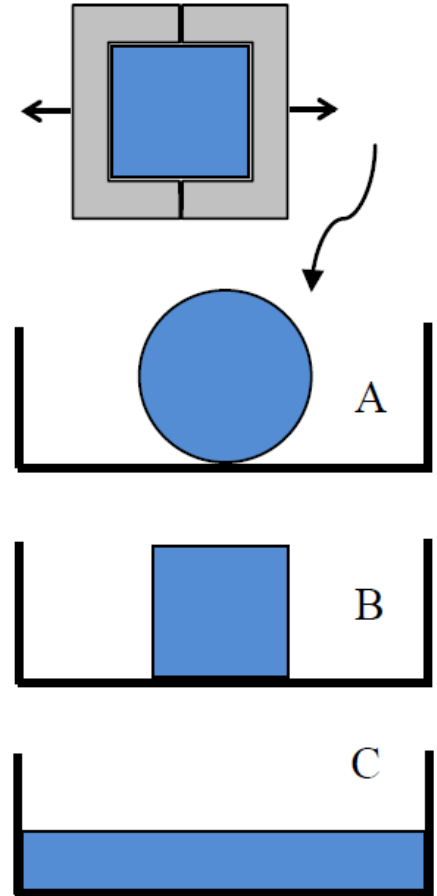


Film alu
~70 GPa

Pour les objets élançés la flexion est beaucoup plus souple!

EXAMPLE: QCM INTERPRETATION (EXAM 2014)

3. On prépare dans un moule un cube de taille L d'un matériau élastique de module E , densité ρ , et tension de surface γ (à interpréter comme dans les cas d'un liquide). Ensuite on le démoule, on le pose dans un récipient à fond plat lubrifié (glissement permis) et on observe le changement de forme. Associer chacune des 3 situations illustrées dans les figures A, B, C à une combinaison de critères fondés sur la comparaison entre la taille L du cube et l'une des longueurs physiques obtenues en comparant les énergies entre élastique, gravitaire et surfacique par paires.



- | | | | | | | |
|------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| I. | $L \gg \frac{\gamma}{E}$ | $L \gg \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}}$ | $L \ll \frac{E}{\rho g}$ | ☐ A | ☒ B | ☐ C |
| II. | $L \gg \frac{\gamma}{E}$ | $L \gg \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}}$ | $L \gg \frac{E}{\rho g}$ | ☐ A | ☐ B | ☒ C |
| III. | $L \ll \frac{\gamma}{E}$ | $L \ll \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}}$ | $L \ll \frac{E}{\rho g}$ | ☒ A | ☐ B | ☐ C |

ÇA COULE OU ÇA CASSE? (les modes de ruine)

La déformation élastique comporte
une accumulation d'énergie mécanique

Plasticité et fracture sont deux modes
antagonistes de relaxer cette énergie

Encore une fois c'est une question de

- échelle de temps
- température
- contraintes
- ...et de taille!

$$\mu, \eta, \sigma_y, \tau, k_B T$$
$$\gamma, \Gamma$$

...OU ÇA PLIE?



CHAUD OU FROID? $k_B T$ $U_d = Q$

SI ÇA DISSIPE ÇA CHAUFFE ! (couplage thermomécanique)

1) La température affecte le comportement !

2) Dissipation implique l'échauffement !

Avantages:

- Amortissement
- Protection des chocs
- Eviter éclats

Désavantages:

- Consommation
- Echauffement

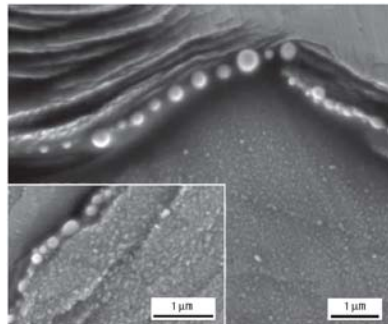
No panic!

Approximation isotherme!

Tribofusion d'une roche



Echauffement par plastification



Lewandowski 2006

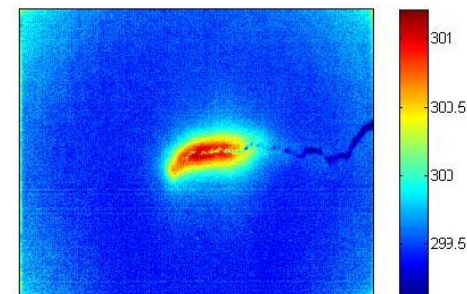
Balle de squash



Roulement de pneu



Fissure chaude? (IR)



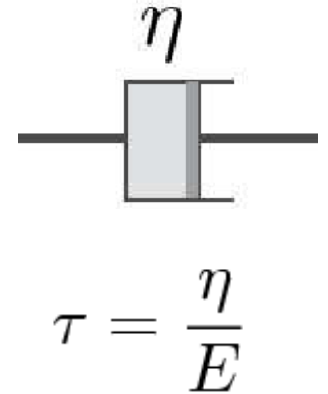
Santucci 2006

LENT OU RAPIDE?

(Quasistatique ou dynamique?)

La dissipation implique une échelle de temps

- 1) Viscosité : $\sigma \sim \eta \dot{\epsilon}$
- 2) Visco-élasticité $\sigma + \tau \dot{\sigma} = E_0 \epsilon + \tau E_\infty \dot{\epsilon}$
- 3) Visco-plasticité $\sigma \sim C \epsilon^\alpha \dot{\epsilon}^\beta$



Traitement quasi-statique (stationnaire ou variation lente):

$$v \ll c \sim \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{vitesse des ondes sonores}$$



Sinon il faut prendre en compte l'énergie cinétique

- 1) Génération et propagation d'ondes élastiques ($t^* \ll L/c$)
- 2) Modes propres de vibration d'une structure ($t^* \sim L/c$)
- 3) Vitesse limite de propagation des fissures
- 4) Energie cinétique des fragments -> Explosion



PETIT OU GRAND

(les échelles physiques de couplage)

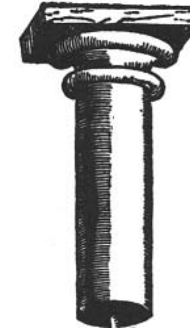
Rapport surface volume

$$\frac{S}{V} = \frac{L^2}{L^3} = \frac{1}{L}$$

Supporter son propre poids (débout)

$$\sigma = \frac{F}{L^2} = \frac{\rho g L^3}{L^2} = \rho g L \leq \sigma_C = \sigma_P, \sigma_R$$

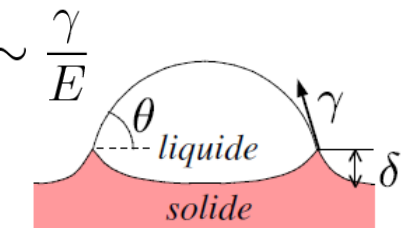
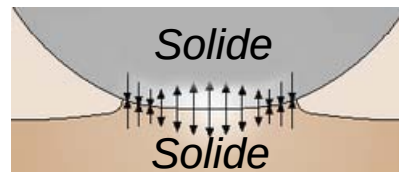
$$\frac{\rho g L}{\sigma_C, \sigma^*, E} \ll 1$$



Adhésion et tension de surface

$$\ell_{EA} \sim \frac{\gamma}{E}$$

$$\frac{U_{\text{elast}}}{U_{\text{surf}}} = \frac{EL^3}{\gamma L^2} = \frac{EL}{\gamma} \ll 1$$



Contact

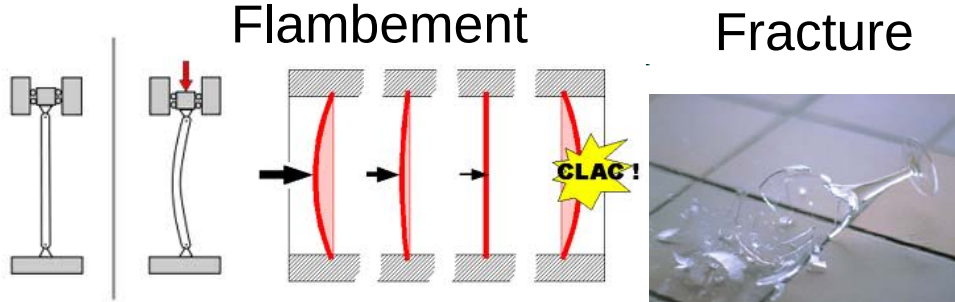
Flexion





LE FRISSON DE L'INSTABILITE'

Des clacs...

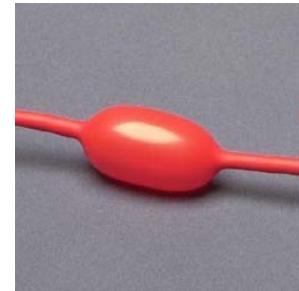


Des séparations...

Striction



Gonflement

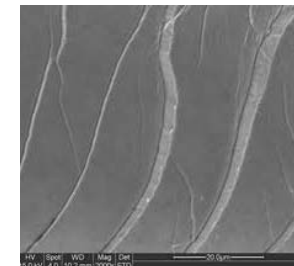
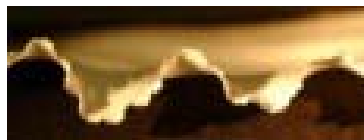


Des morphologies...

Séchage



Plis



Bandes de cisaillement

Des rythmes...

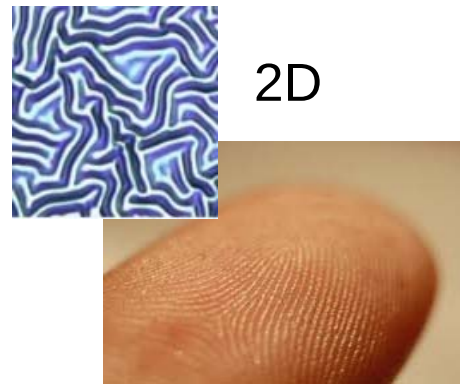
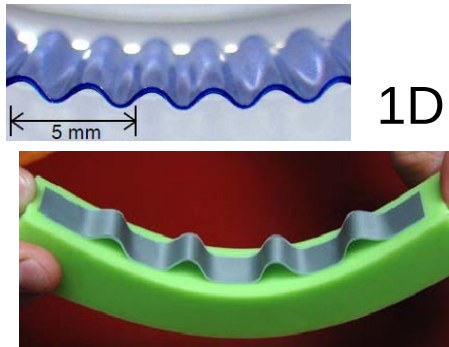
Pelage saccadé



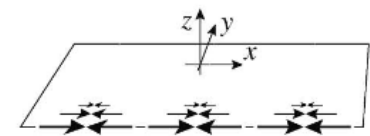
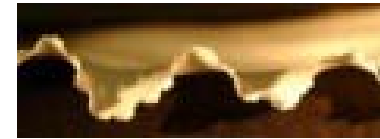
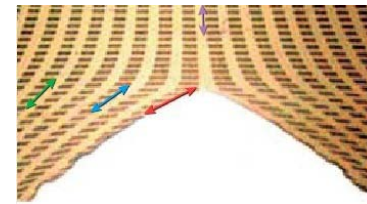
ESPCI
ParisTech

ORIGINE DES MORPHOLOGIES

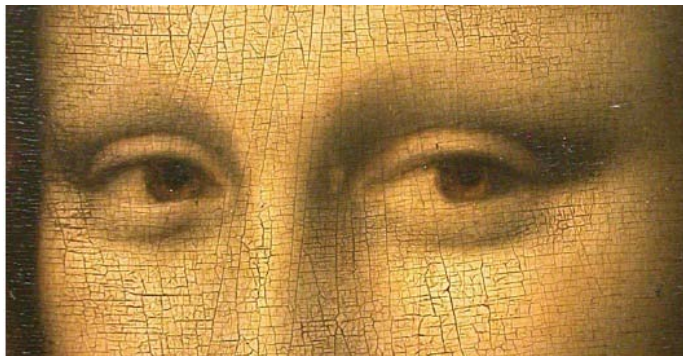
Rides et cloques par **compression**
d'un film mince collé à un substrat



Ondulations fractales
aux lèvres d'une fissure plastique



Réseau de fissures par **traction** d'un
film mince collé à un substrat

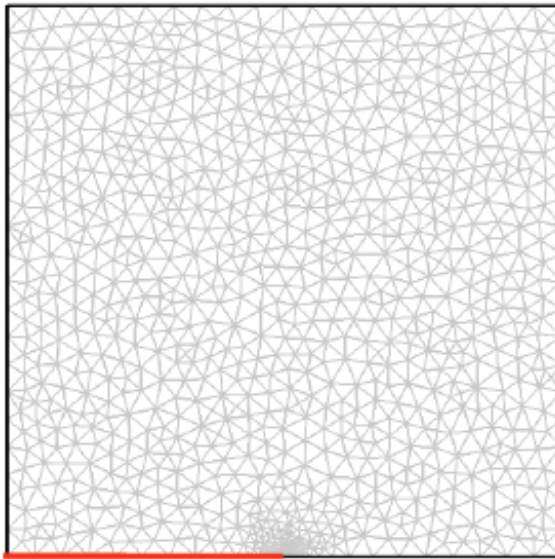


Fragmentation dynamique



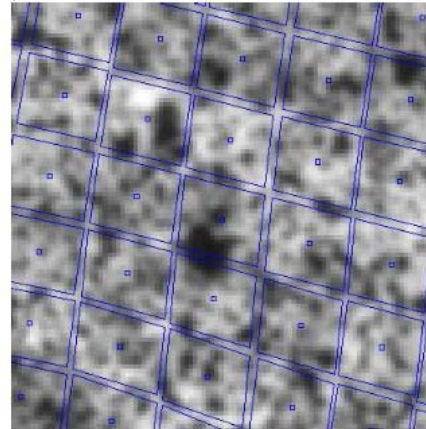
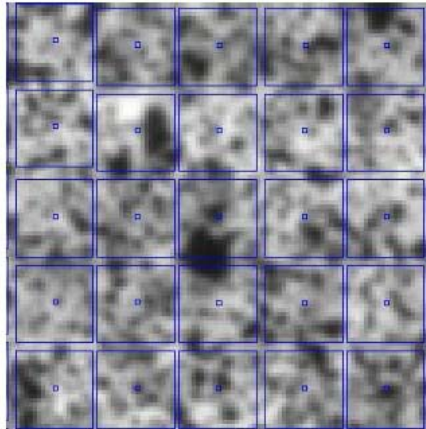
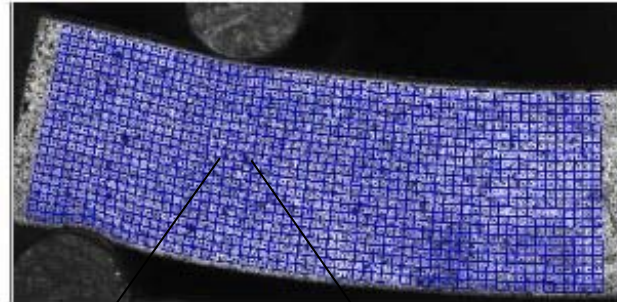
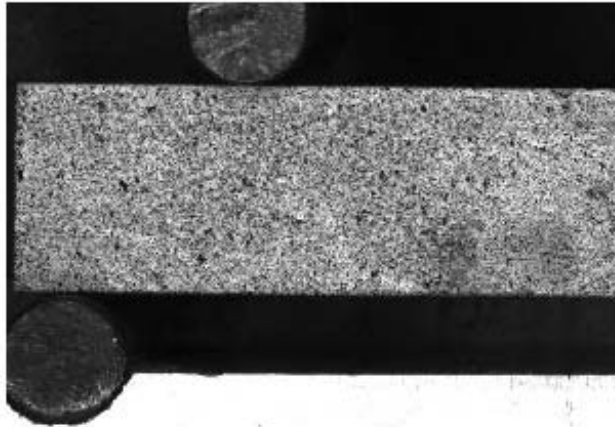
AU DELA DES LOIS D'ECHELLE... SIMULATIONS AUX ELEMENTS FINIS

Simulation d'une fissure en traction
(demi par symétrie)



JJ Marigo

MESURE DE CHAMPS DE DEPLACEMENT PAR CORRELATION DIGITALE D'IMAGES



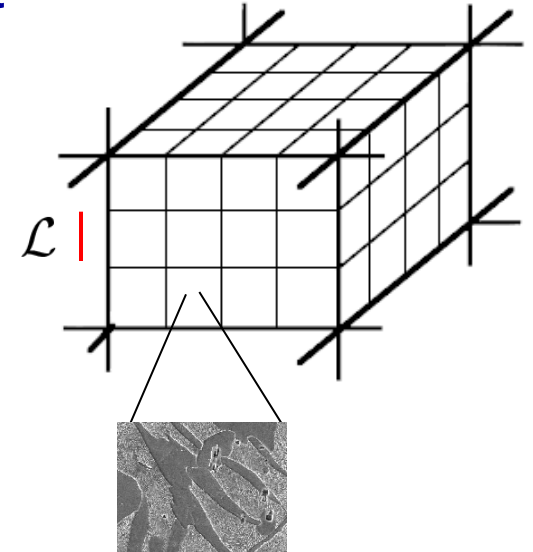
P LeTallec

LIMITES DE L'APPROCHE CONTINU (MMC)

1) Homogénéisation de la loi de comportement

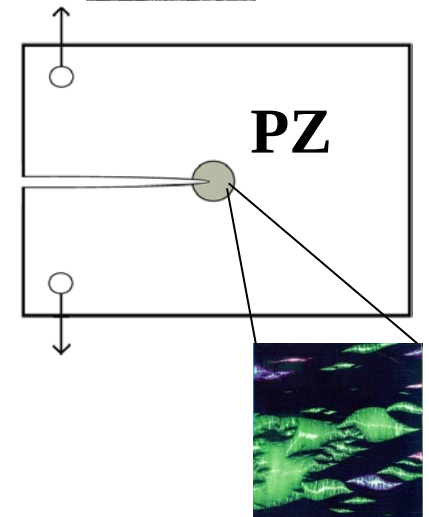
$$g(\sigma, \dot{\sigma}) = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$$

Echelle de description $\mathcal{L}$ grande
par rapport à la microstructure du matériau
et à l'échelle d'action des
micromécanismes de déformation



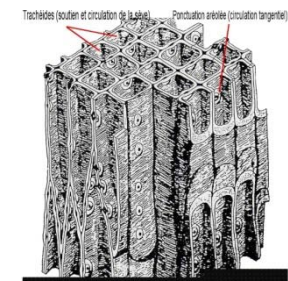
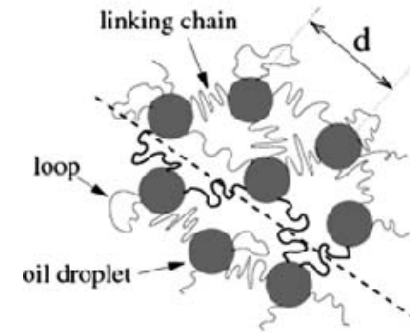
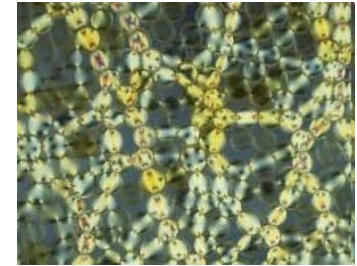
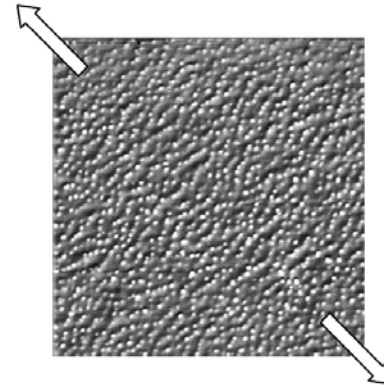
2) Extensions de la mécanique de la fracture

Micromécanismes d'endommagement confinés
dans une **zone de process** de petite taille



MATERIAUX QUI DEFIENT LA MMC

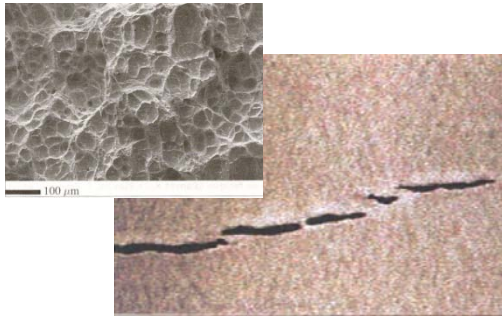
- Nanocomposites
- Matériaux granulaires
- Suspensions non-browniennes
- Pâtes
- Gels physiques et chimiques
- Systèmes hybrides
- Mousses solides
- Matériaux multiéchelle (bois, os, ...)



MICROMECHANISMES D'ENDOMMAGEMENT

Cavitation

(métaux, polym)

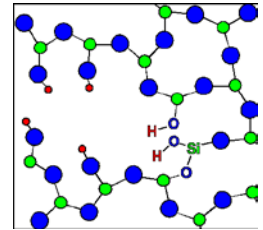


Craquelures

(polymères)

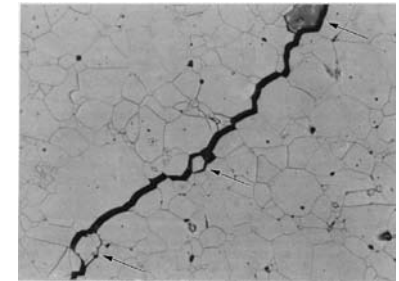
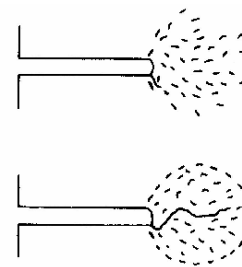


Rupture de liaisons
individuelles (verres)
+ chimie



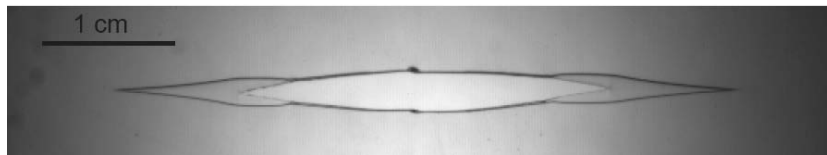
Microfissuration

(roches, céramiques)



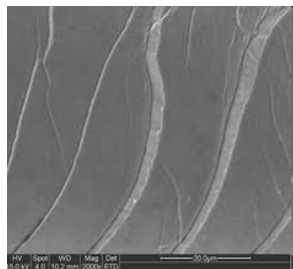
Striction

(métaux, polym)

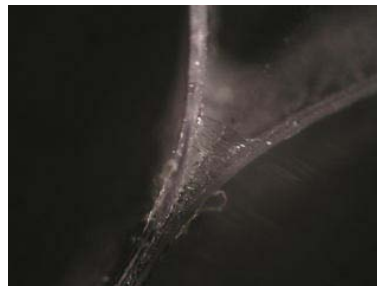


Bandes de cisaillement

(métaux, polym)

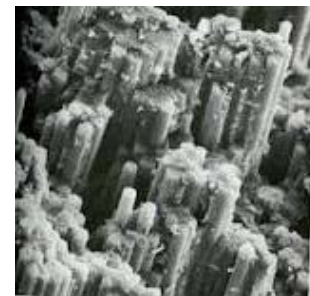
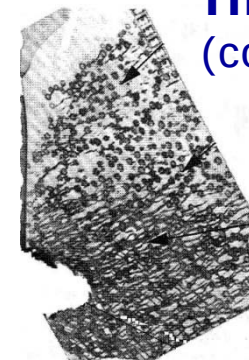


Fibrils (soft polymers)

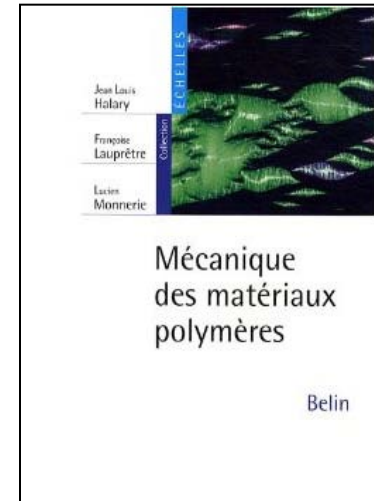
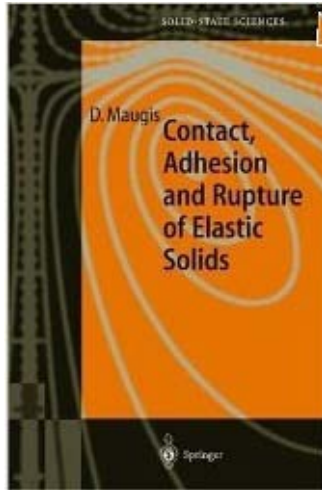


Interaction

(composites)



LES LIVRES



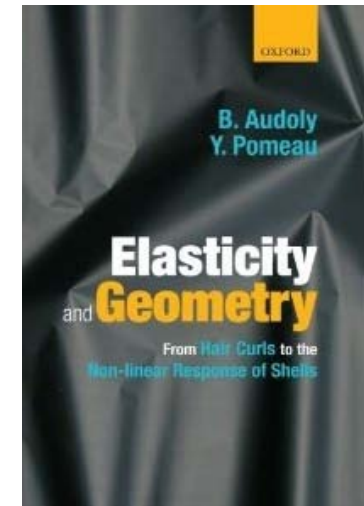
Documents: <http://cours.espci.fr>

Poly d'autres cours de mécanique en ligne:

JC Charmet (ESPCI)

JJ Marigo (Ecole Polytechnique)

P Letallec (Ecole Polytechnique)





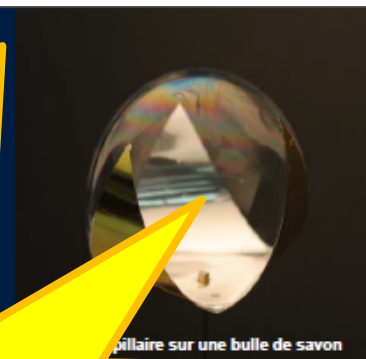
L'ESPCI ParisTech, au coeur de Paris
© D. Morisseau

Le monde de la mécanique des matériaux est en train de subir une profonde révolution par le biais de l'ouverture vers le regard original des physiciens et par son implication dans des domaines de plus en plus interdisciplinaires, tels que la biologie, l'agroalimentaire, la pharmacie, l'énergie durable et les nanosciences. Ce processus a entraîné des retombées dans les domaines d'applications traditionnels tels que le génie civil, l'ingénierie des matériaux, les transports, l'habitat, la géophysique, les applications militaires et nucléaires.

Le Master 2 Recherche en Mécanique Physique répond à une demande croissante, aussi bien dans le domaine académique que chez les industriels, pour un profil de chercheur sachant allier les compétences de mécanique formelle, de physico-chimie des matériaux ainsi que d'une capacité à approcher des problèmes complexes par le biais d'un formalisme simple qui permet d'en extraire rapidement les points clés et de proposer des solutions innovantes.



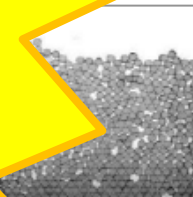
Nouveau Master en Mécanique Physiques des Matériaux !!!



Capillaire sur une bulle de savon



Mécanique des cellules vivantes



Chemins de force dans un empilement de grains



Torsion d'une coque cylindrique molle



ÉCOLE SUPÉRIEURE DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE INDUSTRIELLES
DE LA VILLE DE PARIS

Master 2 Recherche en Mécanique Physique



ÉCOLE SUPÉRIEURE
DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE INDUSTRIELLES
DE LA VILLE DE PARIS

10 rue Vauquelin
75231 Paris Cedex 05 France

+33 1 40 79 44 00
www.espci-paristech.fr

MASTER RECHERCHE EN MECANIQUE PHYSIQUE

PREMIER SEMESTRE

LES ENSEIGNEMENTS

1) Elasticité et géométrie

- a- Mécanique des continus, élasticité, surfaces
- b- Tiges, Plaques et Coques

2) Plasticité, Fracture et Interfaces

- a- Lois de comportement dissipatives
- b- Mécanique de la fracture
- c- Interfaces, adhésion, frottement

3) Outils de modélisation micro-macro

- a- Physique statistique de la matière condensée
- b- Mécanismes atomiques de plasticité et de fracture
- c- Homogénéisation

4) Techniques de simulation

- a- Atelier d'éléments finis
- b- Dynamique moléculaire
- c- Corrélation digitale d'images

5) Matériaux complexes

- a- Matériaux granulaires
- b- Fluides à seuil
- c- Biomatériaux et matière active

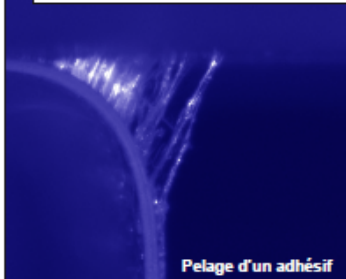
Certains cours peuvent être échangés avec des cours d'autres Parcours

PROJET EXPERIMENTAL

Une UE d'approfondissement est proposée sous forme de projet expérimental à effectuer en binôme et en relation avec un tuteur. Ce projet aura lieu au cours du premier semestre et permettra d'appliquer les connaissances des différentes UE à la compréhension d'une problématique personnalisée et approchée par des expériences simples.

CYCLE DE CONFÉRENCES

Une série de conférences permettra aux étudiants de connaître les applications récentes des méthodes de la mécanique physique dans des domaines pluridisciplinaires, ainsi que de prendre contact avec le monde académique et industriel.



Pelage d'un adhésif

SECOND SEMESTRE

STAGE DE RECHERCHE DE 5 MOIS

Au cours de ce stage, pouvant être effectué en laboratoire ou en entreprise, l'étudiant réalisera un travail de recherche personnel dans le domaine de la mécanique physique des matériaux. Ce stage donnera lieu à la rédaction d'un mémoire qui sera soutenu devant le jury du master. Ce stage représente à la fois un moyen privilégié d'acquisition de connaissances et l'occasion de s'orienter vers une thèse ou vers le début d'une carrière professionnelle. Possibilité de faire ce stage à l'étranger.

PRE-REQUIS

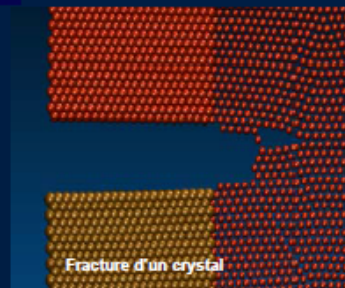
Master 1 en Physique ou Mécanique

DEBOUCHÉS

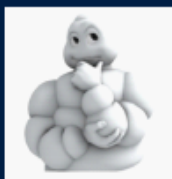
Ce parcours prépare les étudiants à effectuer une thèse dans un laboratoire académique ou industriel. Les débouchés naturels sont les carrières de chercheur ou enseignant-chercheur dans le secteur public (CNRS, université) ou une insertion dans le secteur R&D industriel.

INFORMATIONS PRATIQUES

Contact: Matteo Ciccotti
matteo.ciccotti@espci.fr - 0140794419
Formulaires de candidature sur demande par email
Examen de candidature sur dossier puis audition
Cloture des inscriptions fin Juin



Fracture d'un cristal



DIVERS

Master2 en Mécanique Physique
(ESPCI, UPMC, P7, P11, ENS-Cachan)

Réception en H3.08 les lundis à 16-17h (rdv)

Examen!

Partie A sans documents (QCM)

Partie B avec feuille A4 R/V manuscrite
(exos loi échelle, problème)

Exemples sur cours.espci.fr



THE END

