INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES CENTRE VAL DE LOIRE

12èmes JOURNEES académiques DES PROFESSEURS INSA DE PHYSIQUE-CHIMIE

Laboratoire de Mécanique et Rhéologie

Modélisation en mécanique : du matériau au calcul de structures

Michaël CALIEZ, Maître de Conférences
INSA Centre Val de Loire
Laboratoire de Mécanique et Rhéologie, EA2640, INSA CVL / Univ F. Rabelais TOURS

INTRODUCTION - CONTEXTE

La modélisation en mécanique des structures : pourquoi?

1- Comportement mécanique de la structure

Fonction du chargement (temporel ou non):

Statique (déplacements, efforts...)
Dynamique (vibrations...)
Thermique
Interactions fluide/structure

2- Prévision de la durée de vie (temps longs)

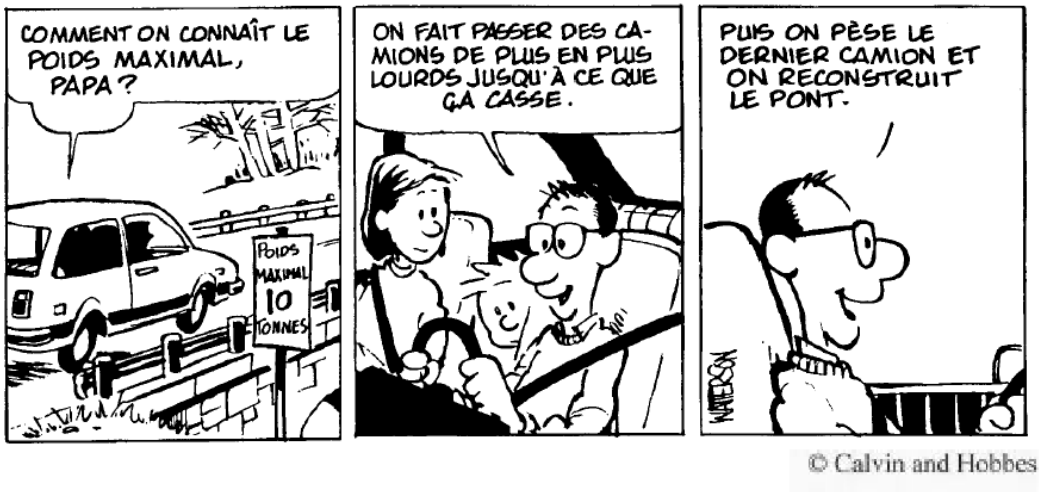
Evolution microstructurales
Endommagement
Rupture

INTRODUCTION - CONTEXTE

La modélisation en mécanique des structures : pourquoi?

3- Gagner du temps, de l'argent : dimensionnement par simulations

le dimensionnement vu par le papa de Calvin ...



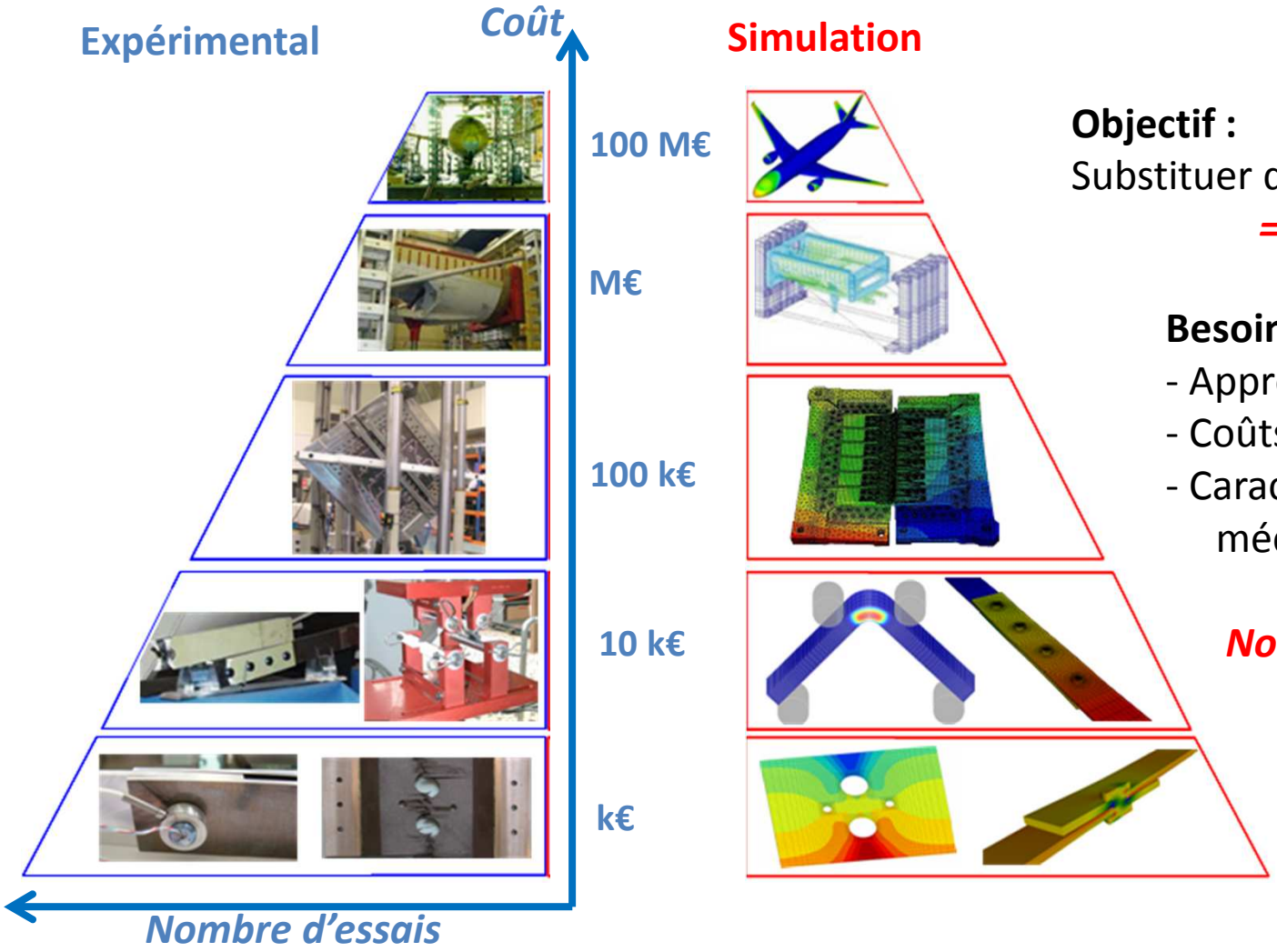
Approche purement expérimentale : non prédictive ET destructive

INTRODUCTION - CONTEXTE

La modélisation en mécanique des structures : pourquoi?

3- Gagner du temps, de l'argent : remplacement de certains essais par des simulations

Exemple : Pyramide de certification expérimentale aéronautique



Objectif :
Substituer des simulations aux essais
= virtual testing

Besoins :
- Approche physique, robuste
- Coûts de calculs réduits
- Caractérisation des propriétés mécaniques des matériaux

Notion de loi de comportement

PLAN

1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

- **Métalliques**
- **Polymères**
- **Composites**

2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

- **Essais uniaxiaux / multiaxiaux**
- **Mesures de déformation**

3- Calcul de structures par éléments finis

- **Principes**
- **Application industrielle**

Conclusions

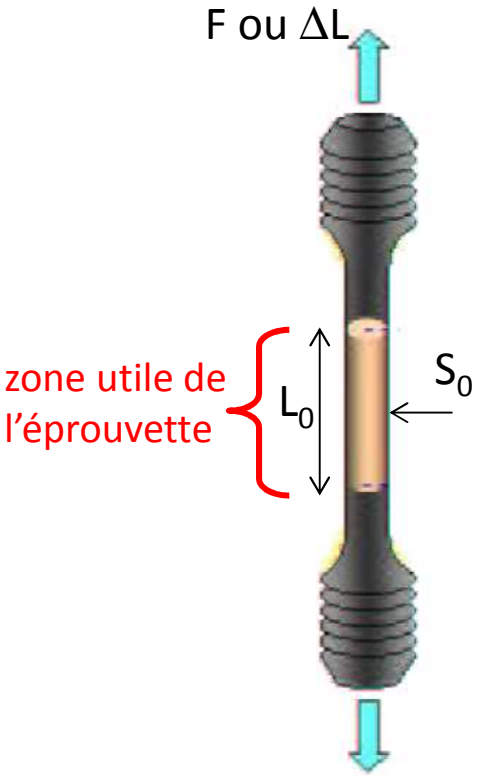
1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

Grandeurs d'intérêt

Etude du comportement mécanique d'un matériau =

suivi de la réponse (allongement / déformation) en fonction de la charge (force / contrainte)



Hypothèse Petites Perturbations

déformation conventionnelle : $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$ (sans dim, %)

contrainte conventionnelle : $\sigma = \frac{F}{S_0}$ (MPa)

La relation $\sigma = f(\varepsilon)$ est la loi de comportement

1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

Les métaux et alliages métalliques

Matériaux les plus employés pour les applications structurales (90% métaux ferreux, autres : alliages Al, Ti, Cu, Ni)

Matériaux métalliques sont denses, et bons conducteurs thermiques et électriques.

Les matériaux métalliques sont capables de se déformer de manière permanente

= plasticité

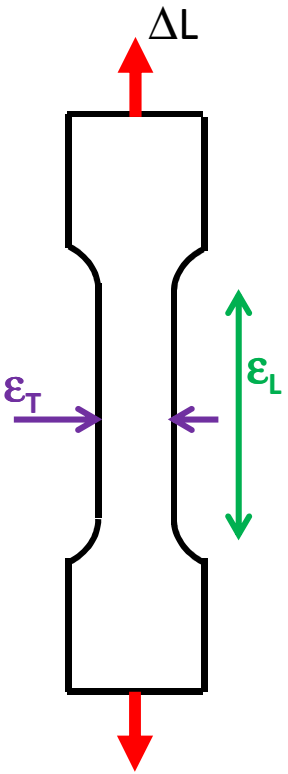
Mise en forme (emboutissage...)

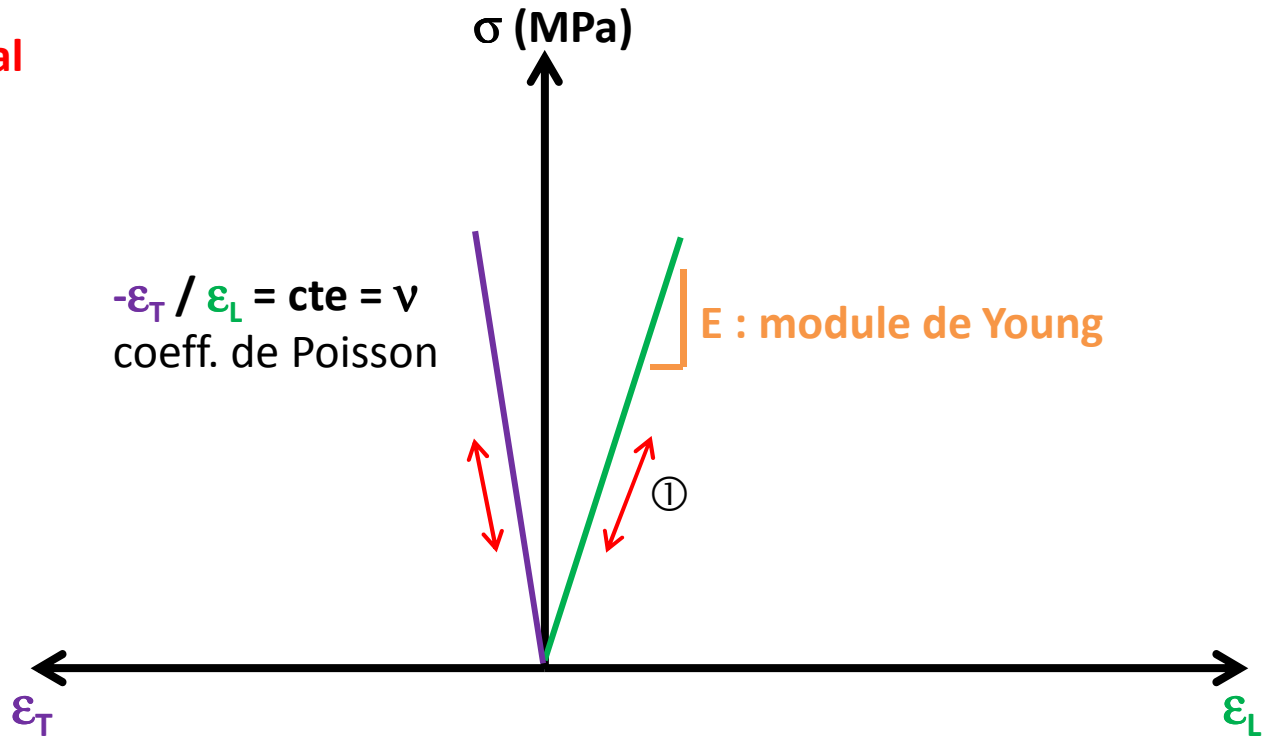
Dissipation d'énergie

1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

Les métaux et alliages métalliques

Comportement général





Phase ① : phase élastique linéaire , une décharge à σ =0 entraîne un retour à l'état initial, i.e. $\varepsilon_T = \varepsilon_L = 0$

Pour un matériau **isotrope** : 2 coeffs élastiques E et ν

1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

Les métaux et alliages métalliques

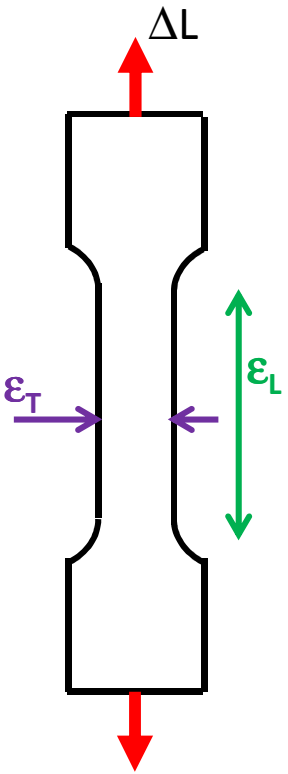
Comportement général

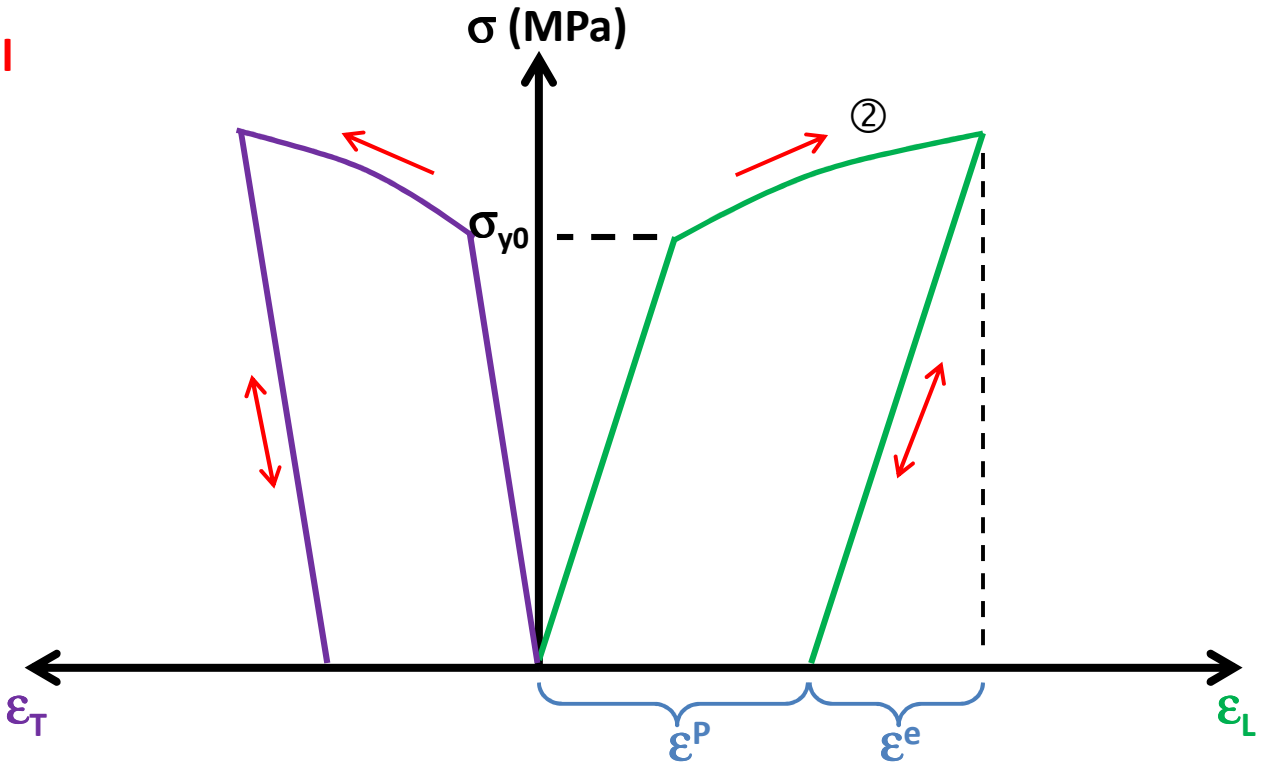
matériau	température (degré C)	module d'Young (GPa)	coefficient de Poisson
Alliage d'aluminium AU4G	20	72	0,32
	200	66	0,325
	500	50	0,35
Alliage de titane Ti 4Al 4Mn	20	315	0,34
	200	115	0,34
Acier XC10	20	216	0,29
	200	205	0,30
	600	170	0,315
Fonte grise	20	100	0,29
Acier inoxydable austénitique 316	20	196	0,3
	200	170	
	700	131	
Aluminium (A5)	20	68	0,33
Bronze	20	130	0,34
	180	61	

1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

Les métaux et alliages métalliques

Comportement **général**





Phase ② : phase plastique nonlinéaire, une décharge à $\sigma = 0$ entraîne une déformation plastique résiduelle, i.e. $\varepsilon_T = \varepsilon_L \neq 0$

=> écrouissage

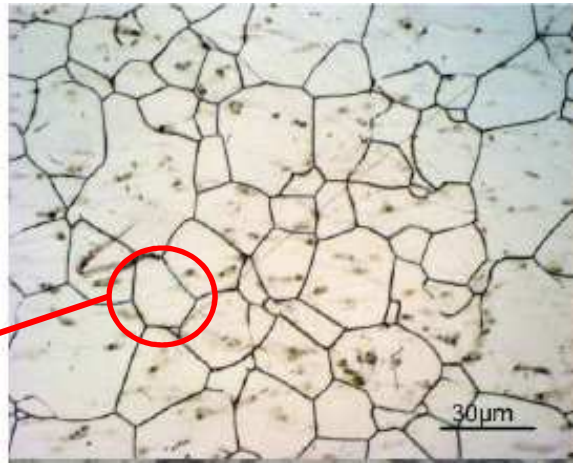
σ_{y0} = limite d'élasticité ou contrainte seuil d'écoulement

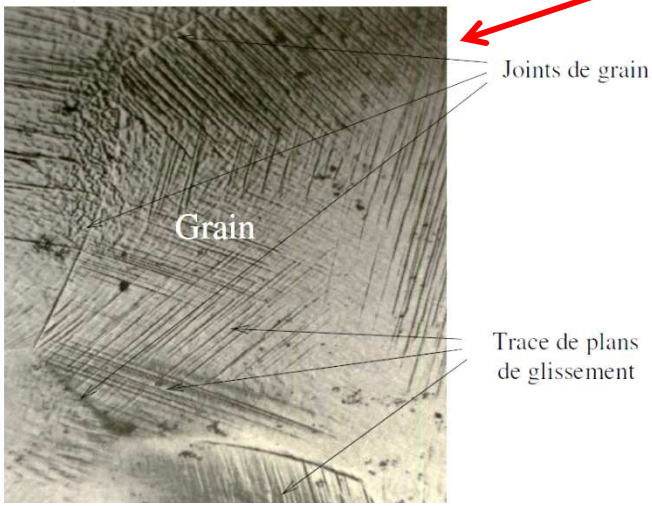
1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

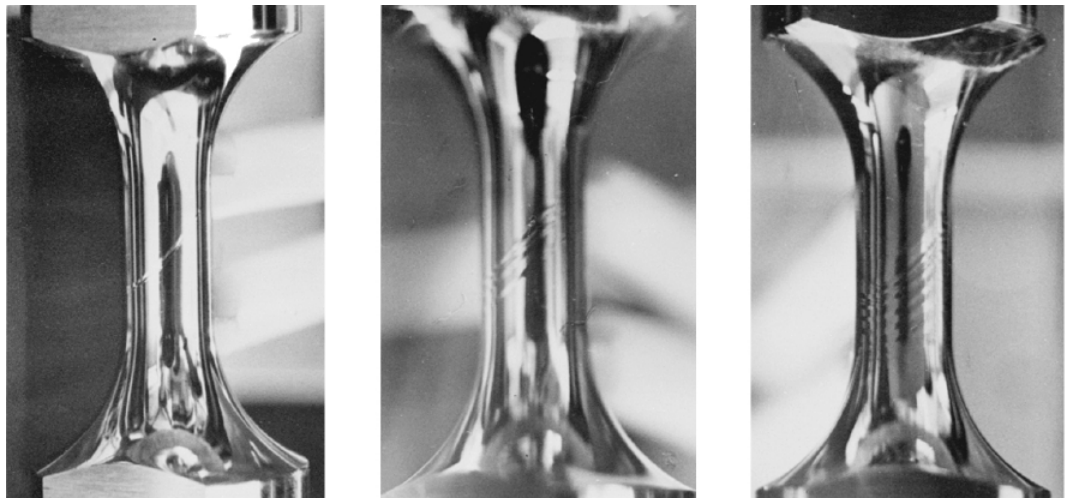
Les métaux et alliages métalliques

Origines physiques de la plasticité :

Le mécanisme de déformation plastique est un
glissement relatif de plans cristallins
qui s ’effectue progressivement
=> dislocations





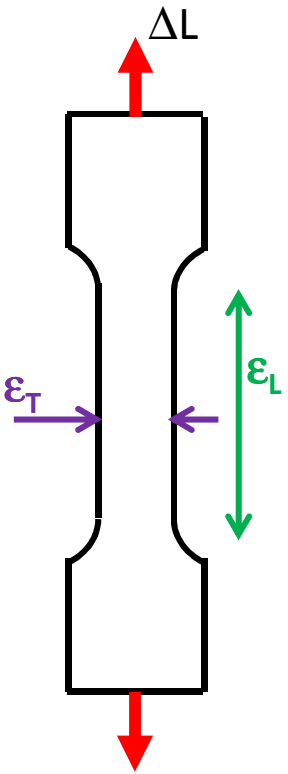


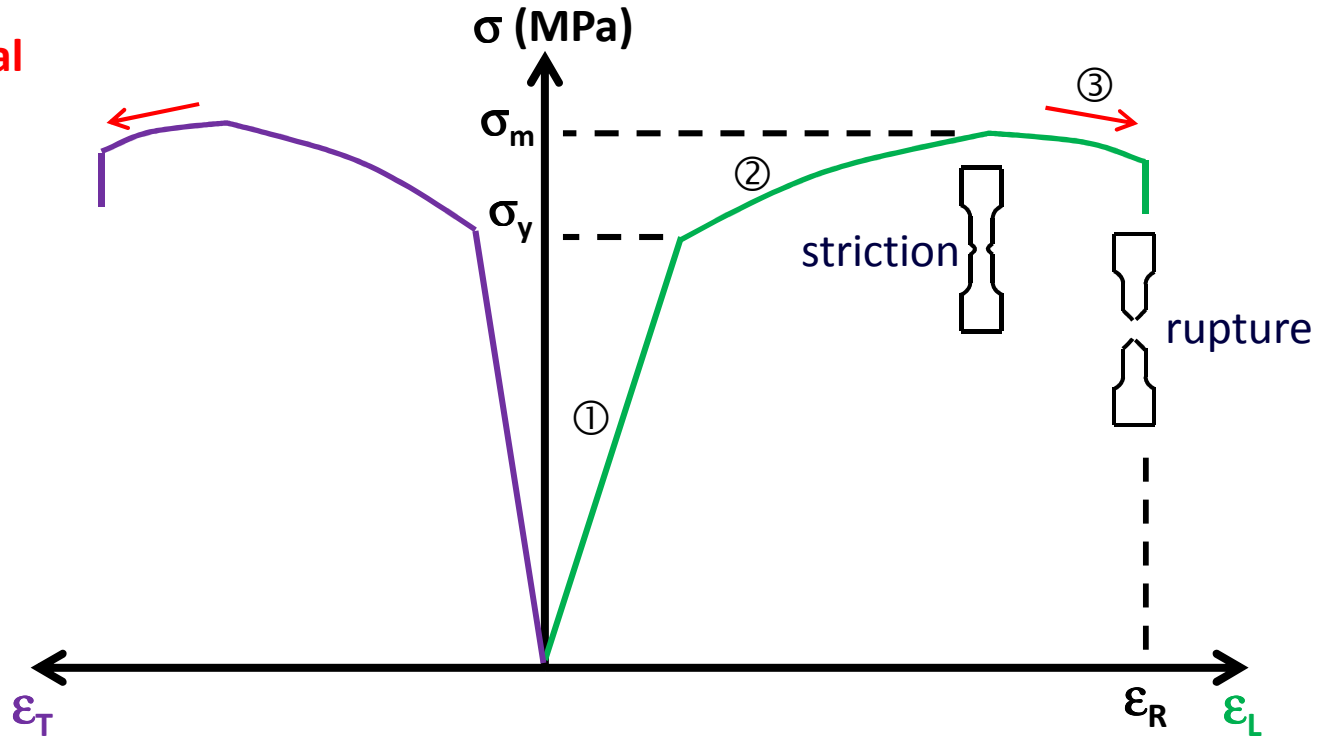
Bandes de cisaillement plastique sur monocristal

1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

Les métaux et alliages métalliques

Comportement général





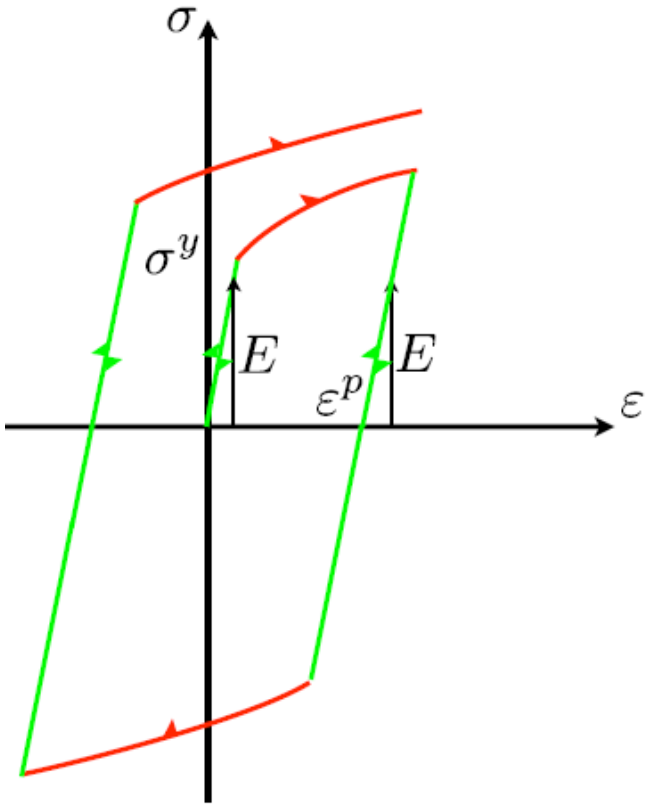
Phase ③ : phase nonlinéaire, striction =

- localisation de la déformation + diminution brutale de la section
- rupture rapide

Si ③+②>>① alors le matériau est ductile sinon fragile

1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

Les métaux et alliages métalliques



En résumé :

- élasticité linéaire
- σ_y limite d'élasticité initiale
- plasticité avec écrouissage
- décharge élastique
- ε^P déformation permanente
- remise en plasticité

etc...

Symétrie initiale traction/compression mais peut devenir dissymétrique

Comportement non-linéaire

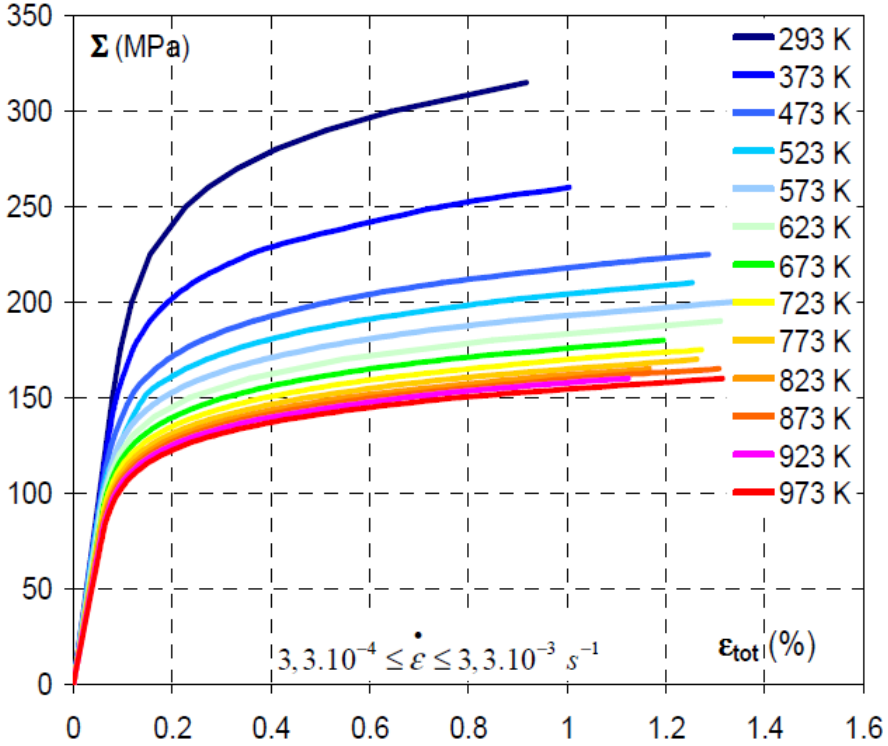
Courbe contrainte/déformation pas univoque car dépend de l'histoire du chargement

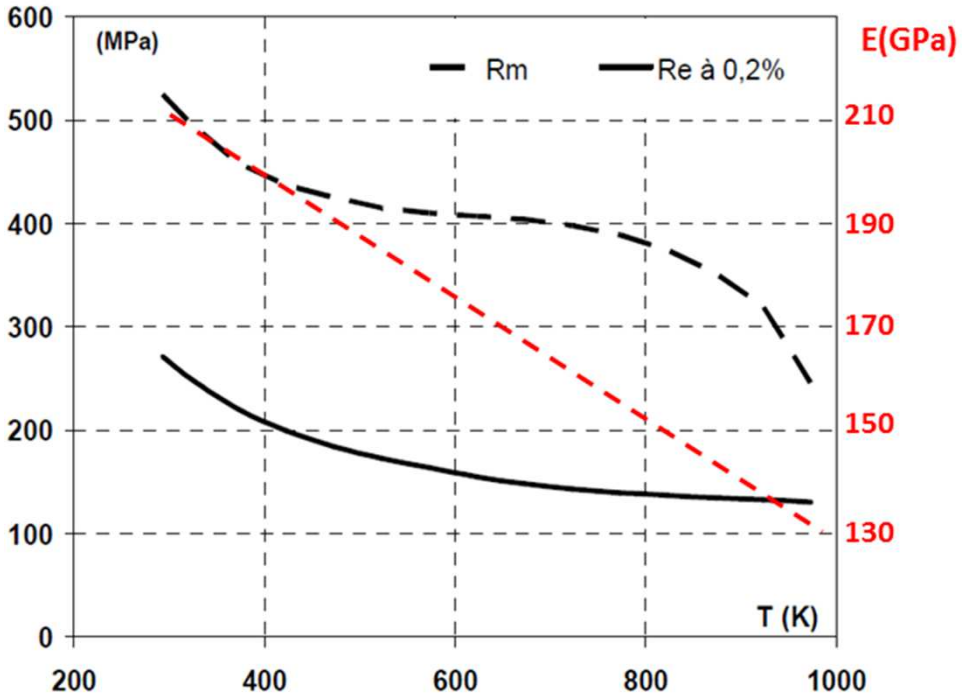
Hystérésis = dissipation thermique

1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

Les métaux et alliages métalliques

Effet de la température: ex. inox 316L





1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

Les métaux et alliages métalliques

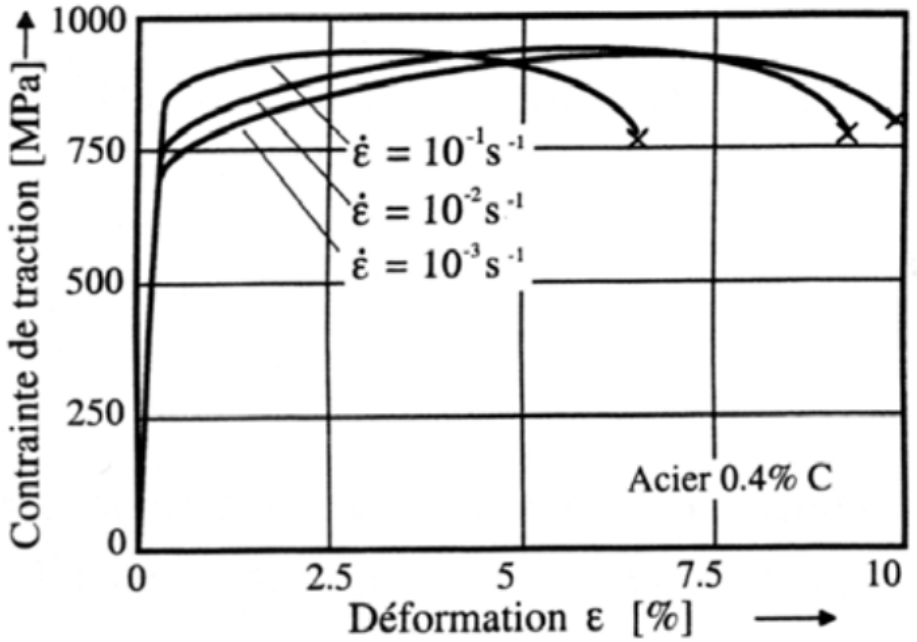
Effet de la température : viscoplasticité

Effet de la vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}$ sur le comportement plastique qd T↗

- ↗ du seuil de plasticité
- ↘ de la déformation à rupture

=> meilleure tenue élastique mais fragilisation

Généralement comportement élastique non impacté

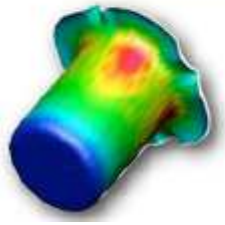


1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

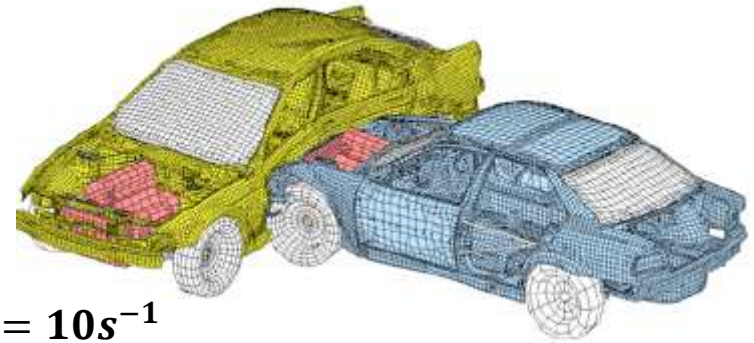
Les métaux et alliages métalliques

Effet de la température: viscoplasticité

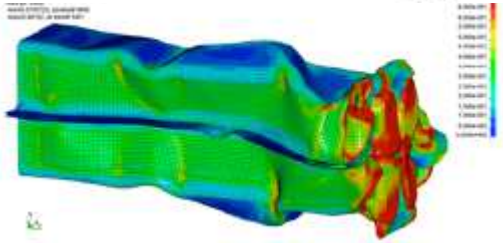
$\dot{\varepsilon} = 1s^{-1}$

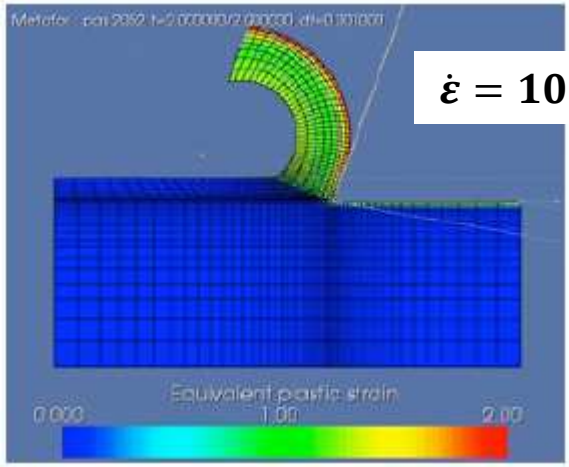


Simulation d'un emboutissage profond avec PamStamp (Arts et Métiers ParisTech Angers)



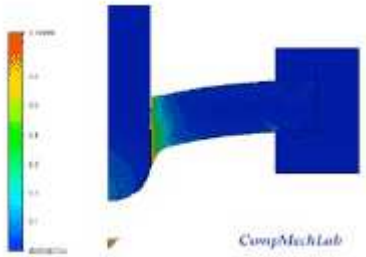
$\dot{\varepsilon} = 10s^{-1}$





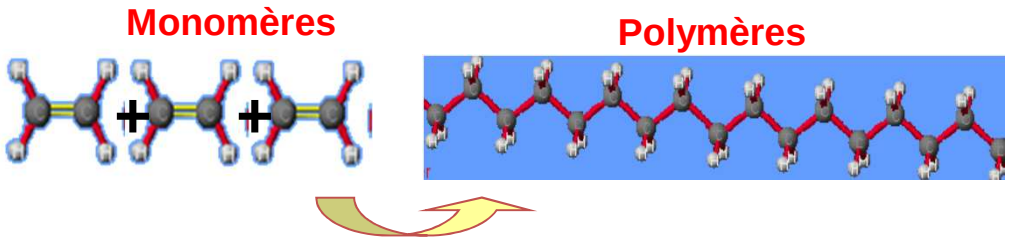
$\dot{\varepsilon} = 100s^{-1}$

$\dot{\varepsilon} = 1000s^{-1}$



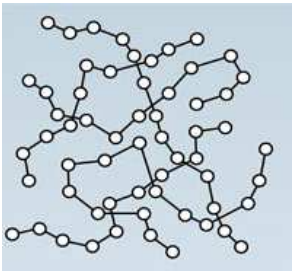
1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

Les polymères



Les thermoplastiques :

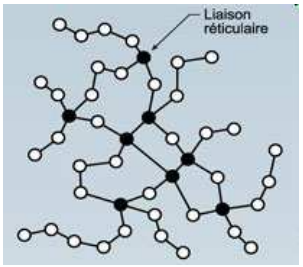
- chaînes ramifiées
- point de fusion identifié
- changement d'état solide/liquide ou pâteux peut se faire plusieurs fois (liaisons physiques réversibles) => recyclage



Les amorphes (ABS, PMMA, PVC...) : structure sans ordre apparent
Les cristallins (PE, PET, PTFE...) : structure ordonnée dans une matrice amorphe

Les thermodurcissables (polyester, époxydes...):

- macromolécules orientées
- besoin d'un agent réticulant, catalyseur ou d'un durcisseur
- pas de point de fusion (irréversibilité thermique)
- plus rigides que les thermoplastiques
- Renforcement fibreux possible

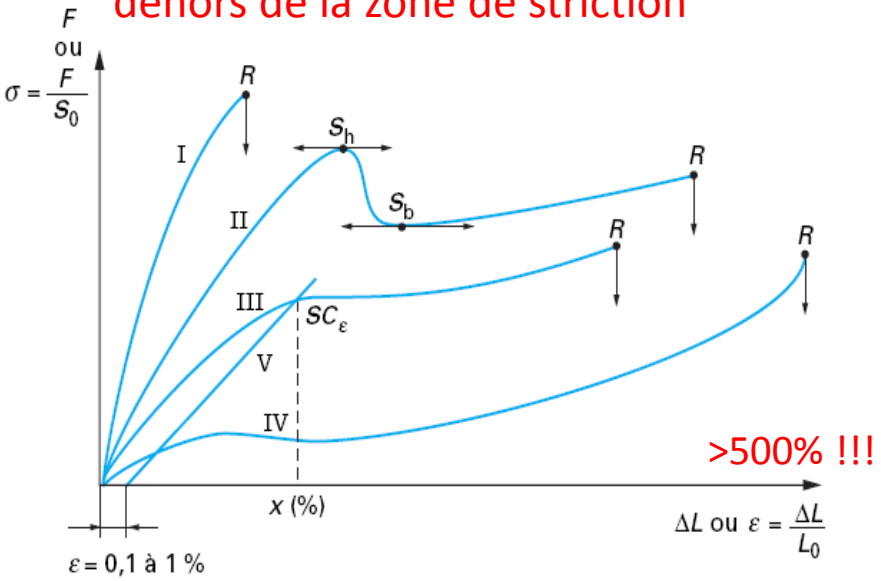


1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

Les polymères (thermoplastiques)

Comportement général :

Contrairement aux métaux, la déformation continue même en dehors de la zone de striction



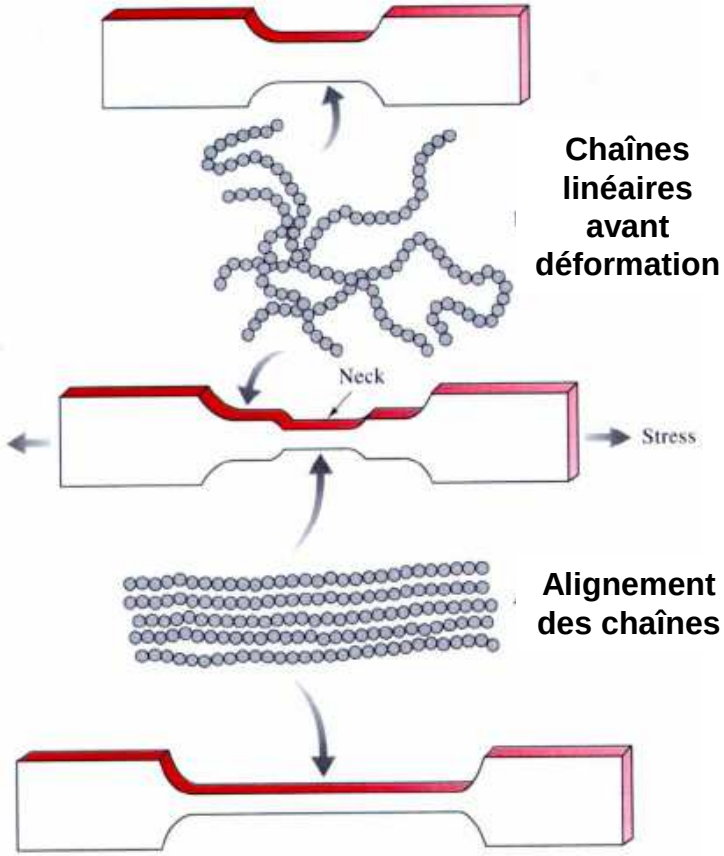
I : thermodurcissables, thermoplastiques (sous certaines conditions)

II : thermoplastiques (T° ambiante)

III : polymère cristallins

IV : matériaux caoutchoutiques

La déformation a lieu par glissement des chaînes entre elles => forte orientation de la microstructure après l'essai



1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

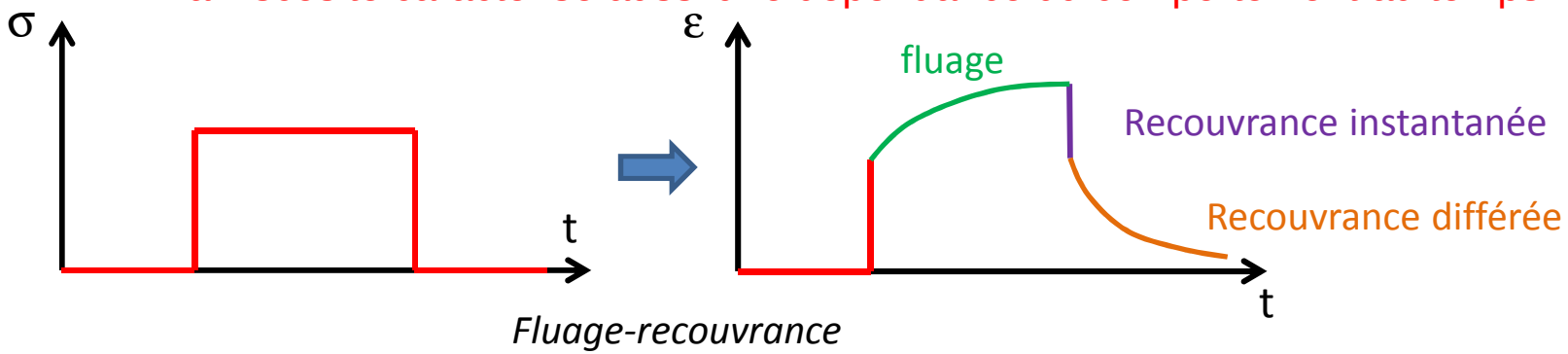
Les polymères (thermoplastiques)

Viscoélasticité :

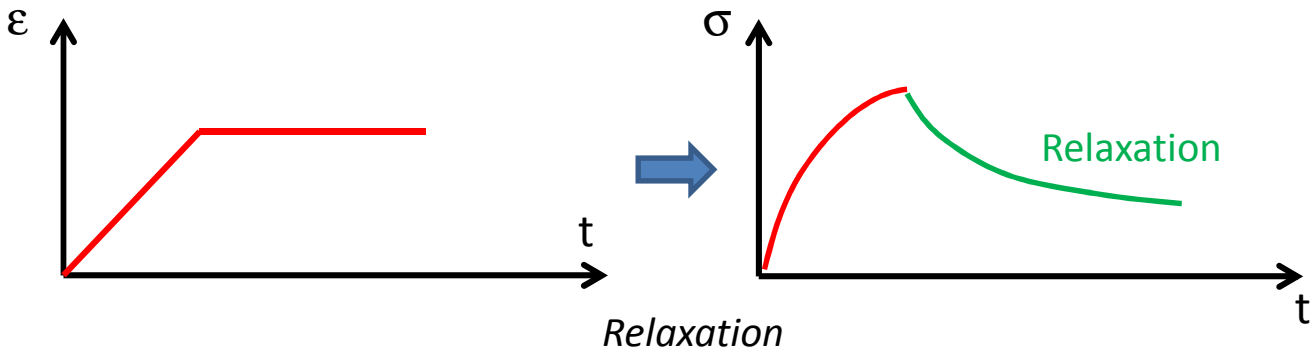
Le comportement élastique des polymères peut être :

- non-linéaire (hyperélasticité)
- dépendant de la vitesse de sollicitation : viscoélasticité

!!! La viscosité caractérise aussi une dépendance du comportement au temps



Fluage-recouvrance



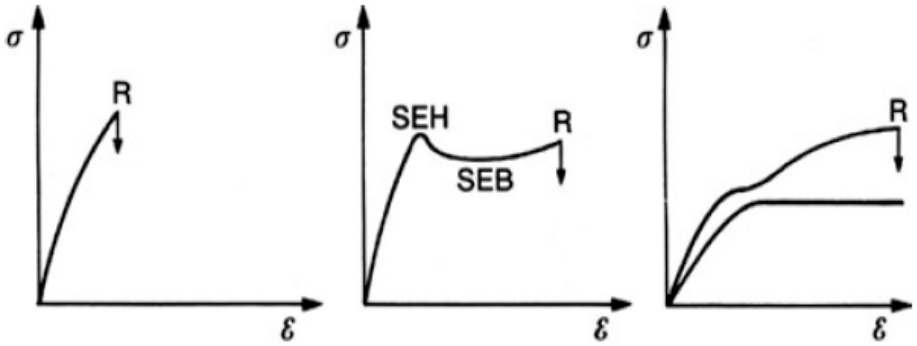
Relaxation

1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

Les polymères (thermoplastiques)

Influence de la température :

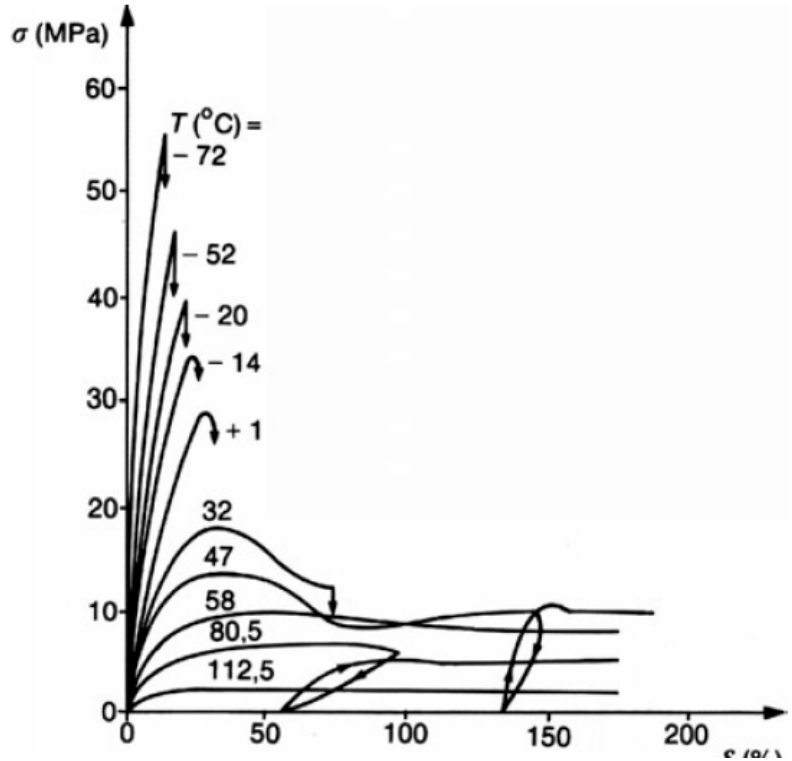
Comportement et rupture sont influencés par la présence de trois températures caractéristiques



Type a :
T < Tc

Type b :
Tc < T <Tg

Type c :
Tg < T <Tf



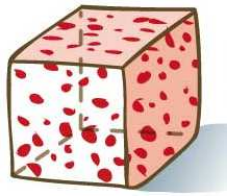
1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

Les composites

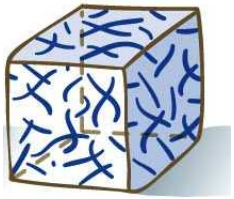
Le matériau composite est constitué de l'assemblage d'au moins 2 matériaux non miscibles et de natures différentes (matrice + renforts)

Matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

Souvent défini par l'architecture des renforts et la nature de la matrice :

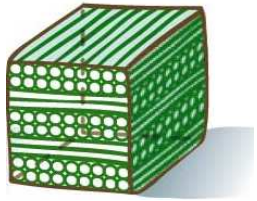


Inclusions



Fibres courtes

Matériau initialement isotrope

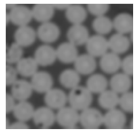


Fibres continues (stratifié)

Matériau anisotrope

Composites à matrice organique

Fibre Céramique (Carbone, Glass)
Fibre Organique (Kevlar)
Fibre Métallique (Bore, Aluminium)

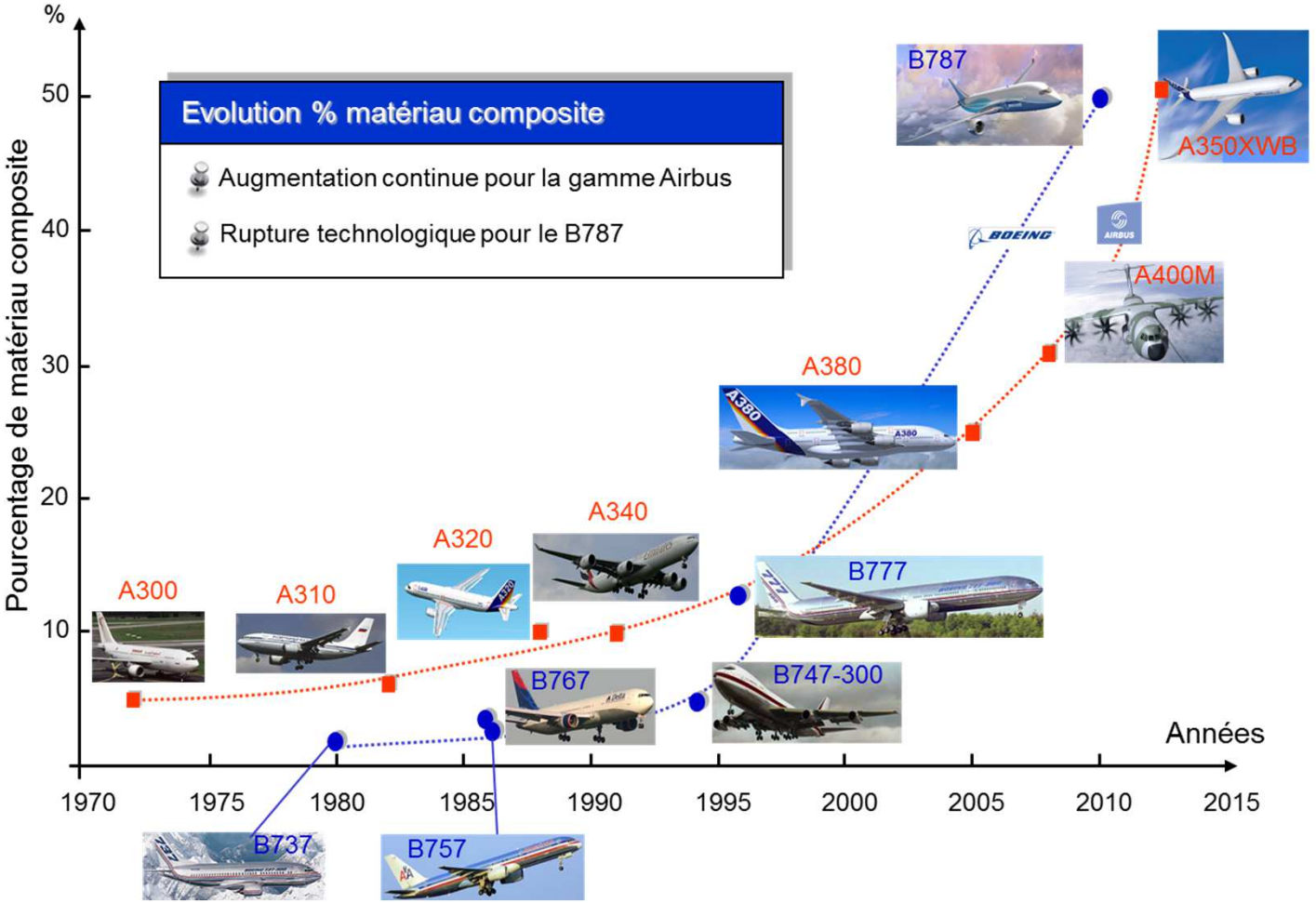


Composites à matrice métallique
fibre céramique (Sic)
fibre métallique (Bore)

Composites à matrice céramique
Fibre céramique (Sic)

1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

Les composites

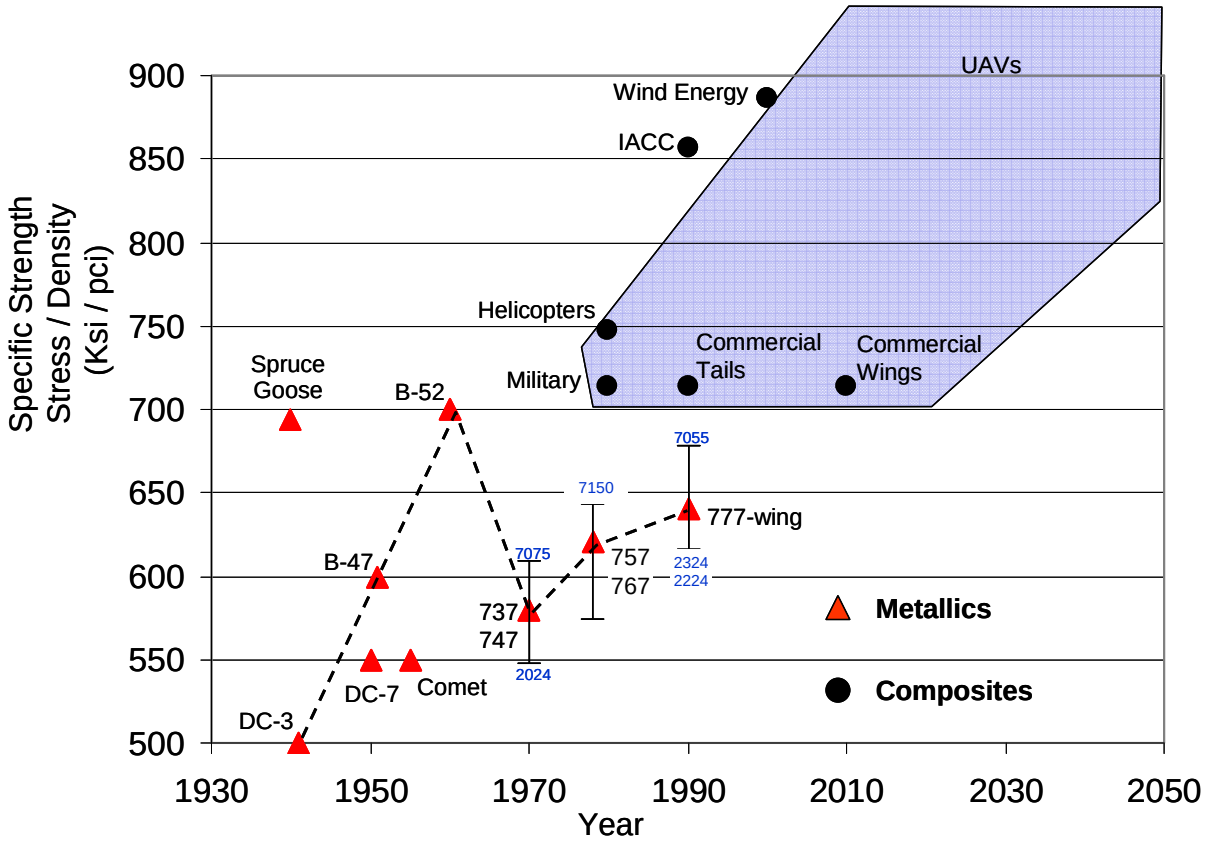


1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

Les composites

Utilisation des matériaux composites principalement pour réduire la masse des structures due à leur excellent rapport: masse / rigidité / résistance

Matériau métallique	Acier 35 CND 16 E=200 GPa R=1850 MPa ρ=7,9 g/cm^3
	Aluminium AU 4SG E=72 GPa R=500 MPa ρ=2,8 g/cm^3
Matériau composite	HS Carbon/Epoxy E=140 GPa R=2000 MPa ρ=1,5 g/cm^3
	HM Carbon/Epoxy E=200 GPa R=1400 MPa ρ=1,7 g/cm^3



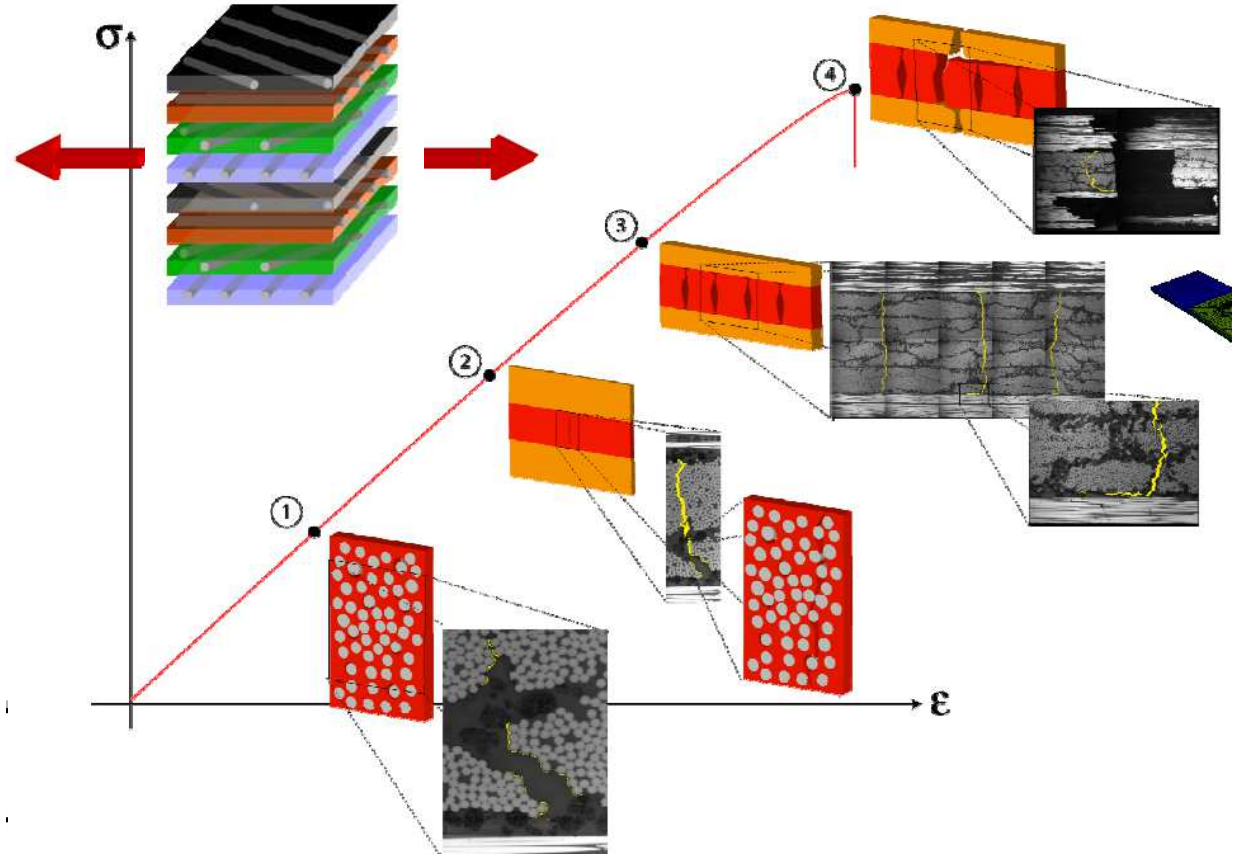
1- Différents types de matériaux et de comportement étudiés

Les composites

Comportement extrêmement complexe : viscoélasticité, anisotropie, interfaces matrice/renforts, interfaces entre plis....

Endommagement par fissuration

Cinétique propre à chaque composite



2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

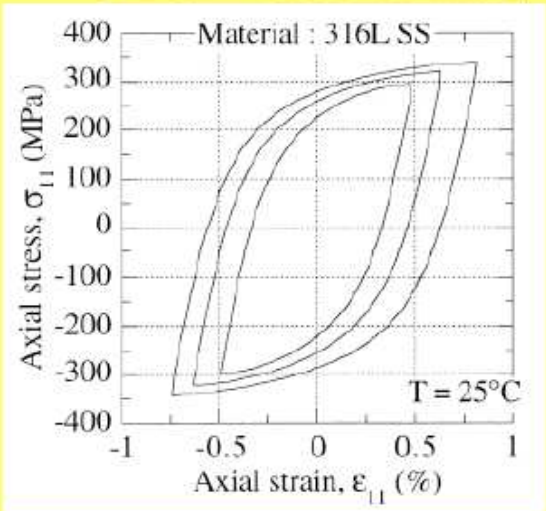
2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Essais uniaxiaux /multiaxiaux

2 objectifs : qualitatif et quantitatif

1	***Identification qualitative du comportement***	

1



2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Essais uniaxiaux /multiaxiaux

2 objectifs : qualitatif et quantitatif

1	*Identification qualitative du comportement*
↓	
2	*Proposition d'un modèle de comportement*

2

Strain decomposition: $\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{\varepsilon}}^e + \underline{\underline{\varepsilon}}^p$

Hooke's law: $\underline{\underline{\varepsilon}}^e = \frac{1}{2\mu}\left(\underline{\underline{1}} - \frac{\nu}{1+\nu}\underline{\underline{1}} \otimes \underline{\underline{1}}\right) : \underline{\underline{\sigma}}$ with $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$

Yield function: $f\left(\underline{\underline{\sigma}}, R, \underline{\underline{X}}\right) = J_2\left(\underline{\underline{\sigma}} - \underline{\underline{X}}\right) - R - k$

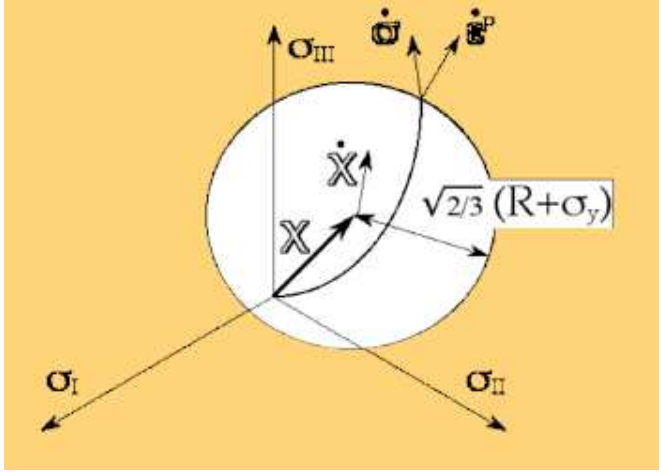
where $J_2 = \sqrt{\frac{3}{2}\left(\underline{\underline{S}} - \underline{\underline{X}}\right) : \left(\underline{\underline{S}} - \underline{\underline{X}}\right)}$ and $\underline{\underline{S}} = \underline{\underline{\sigma}} - \frac{1}{3}tr\underline{\underline{\sigma}}\,\underline{\underline{1}}$

Flow rule: $\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p = \dot{\lambda}\frac{\partial f}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} = \dot{\lambda}\underline{\underline{n}}$ with $\underline{\underline{n}} = \frac{3}{2}\frac{\underline{\underline{s}} - \underline{\underline{X}}}{J_2\left(\underline{\underline{s}} - \underline{\underline{X}}\right)}$

Kinematic hardening rule: $\underline{\underline{X}} = \underline{\underline{X}}_1 + \underline{\underline{X}}_2 \quad \underline{\underline{\dot{X}}}_i = \frac{2}{3}C_i\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p - \gamma_i\varphi_i(p)\dot{p}\underline{\underline{X}}_i \quad (i = 1, 2)$
with $\varphi_i(p) = \varphi_{\infty i} + (1 - \varphi_{\infty i})e^{-\omega_i p}$

Isotropic hardening rule: $\dot{R} = b(Q_\infty - R)\dot{p}$

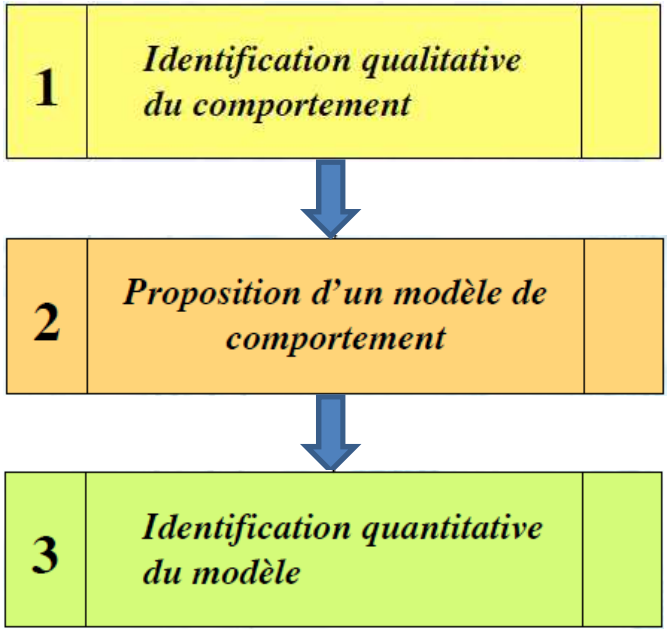
with $k, Q_\infty, b, \varphi_{\infty i}, \omega_i, C_i, \gamma_i, \gamma_2$ material parameters



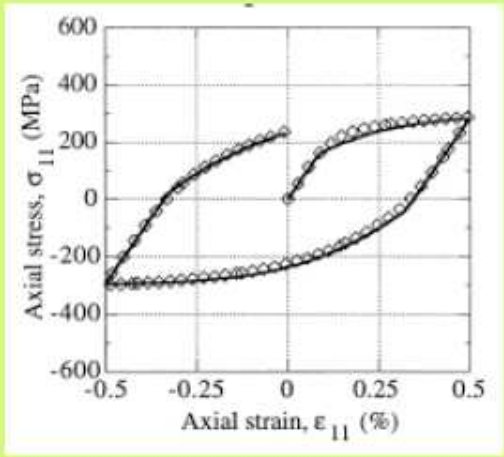
2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

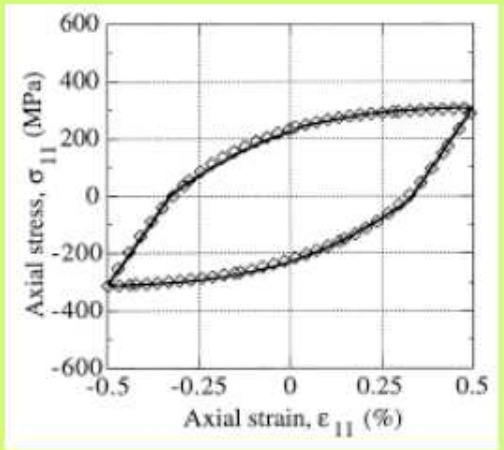
Essais uniaxiaux /multiaxiaux

2 objectifs : qualitatif et quantitatif



3



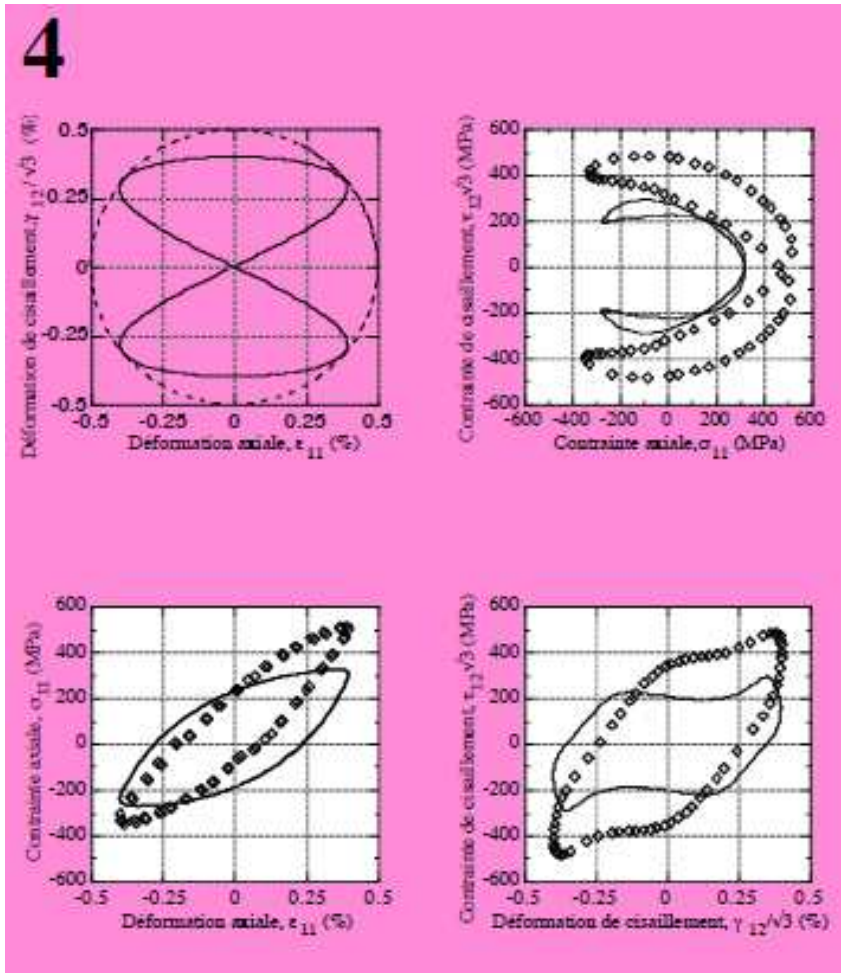


2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Essais uniaxiaux /multiaxiaux

2 objectifs : qualitatif et quantitatif

1. *Identification qualitative du comportement*
2. *Proposition d'un modèle de comportement*
3. *Identification quantitative du modèle*
4. *Validation du modèle*

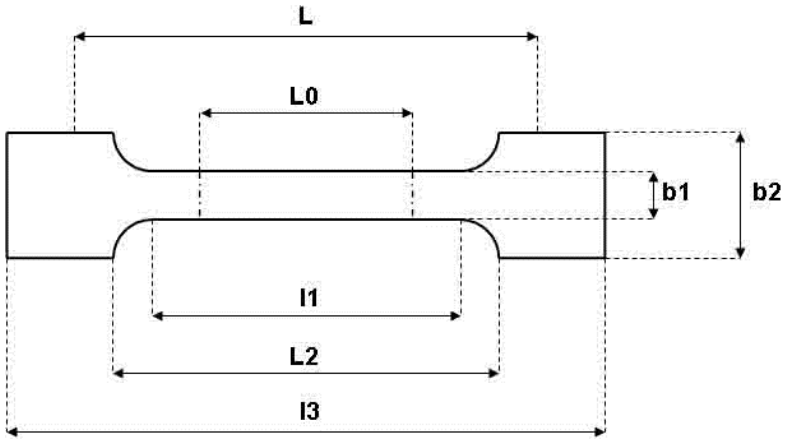


2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Essais uniaxiaux /multiaxiaux

Comment ?

Géometrie pièce connue et maîtrisée
=> éprouvettes normalisées



Conditions aux limites maîtrisées
=> champs de contraintes et déformations homogènes

Instrumentation adaptée: ↗ précision = ↗ prix = ↗ temps de préparation

2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Essais uniaxiaux /multiaxiaux

Machine traction/compression électromécanique

Capacité 5 à 300kN

Vmin 0,005mm/min +/- 1%
Vmax 750 à 3000 mm/min +/- 1%

Précision positionnement : +/- 0,1%

Fréquence acquisition : 2000Hz

Pilotage déplacement OK

Pilotage force moins « facile »

Pas fait pour des changements de vitesse ou de sens de chargement brutaux.

Vis à billes précontraintes

Traverse mobile

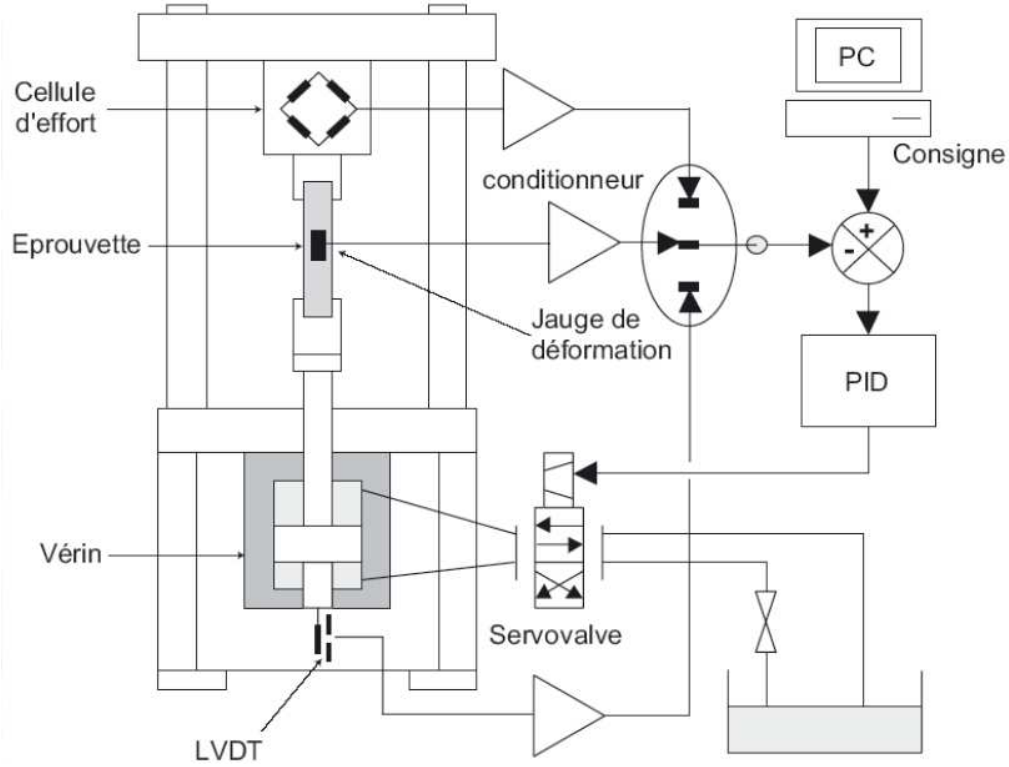
Cellule d'effort

Mors autoserrant mécaniques

2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Essais uniaxiaux /multiaxiaux

Machine traction/compression hydraulique



Pilotage déplacement / force

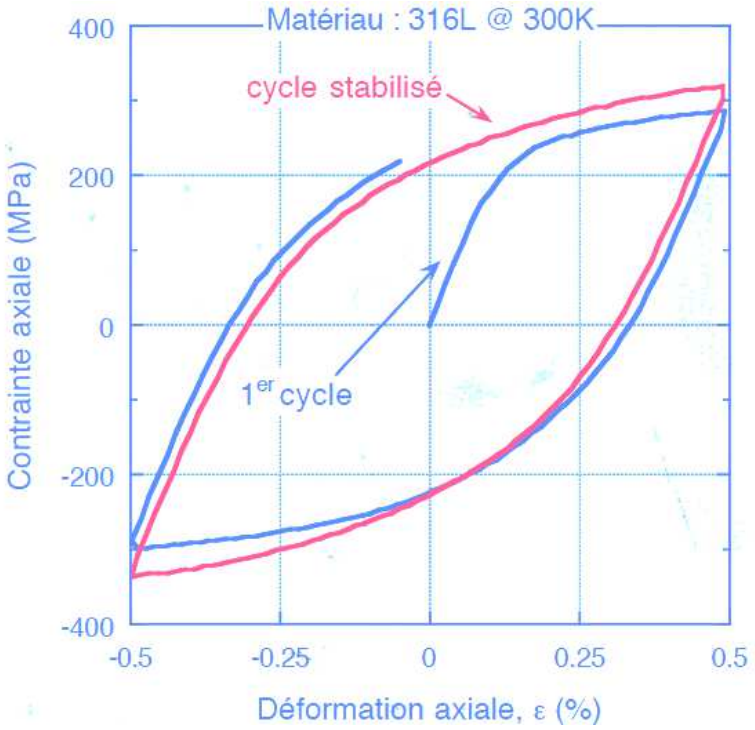
Machine plus « dynamique »

Jusqu'à 1000kN en version double vérin et 4 colonnes

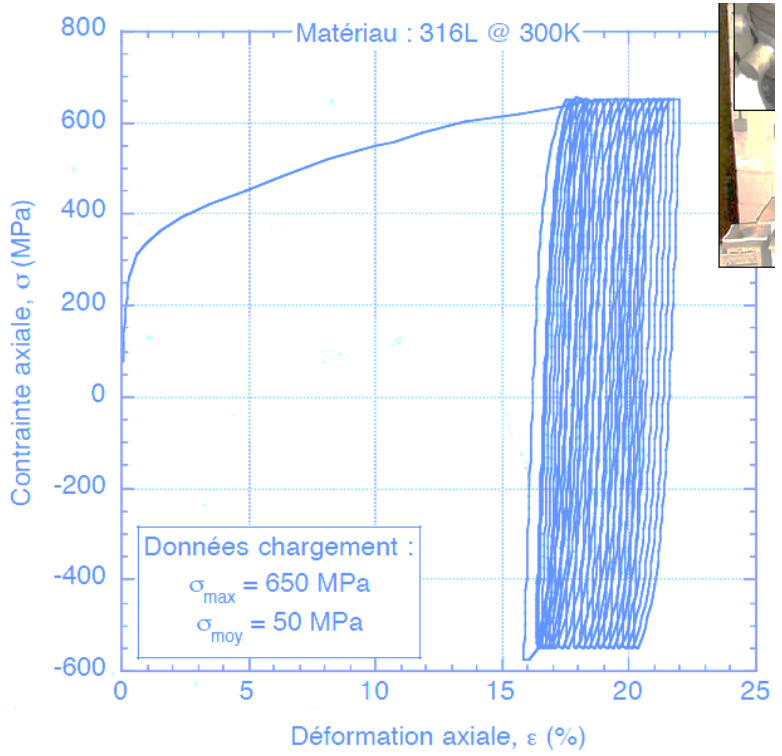
2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Essais uniaxiaux /multiaxiaux

Essai de traction quasi-statique



Pilotage déformation

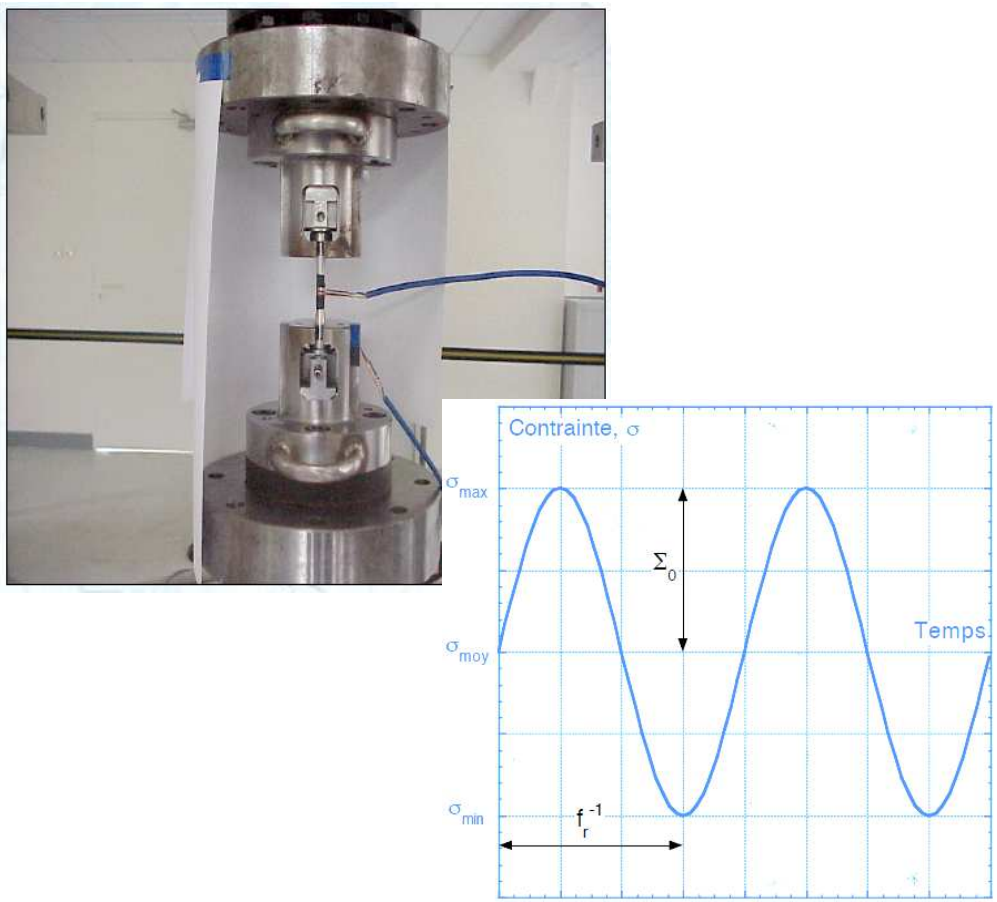


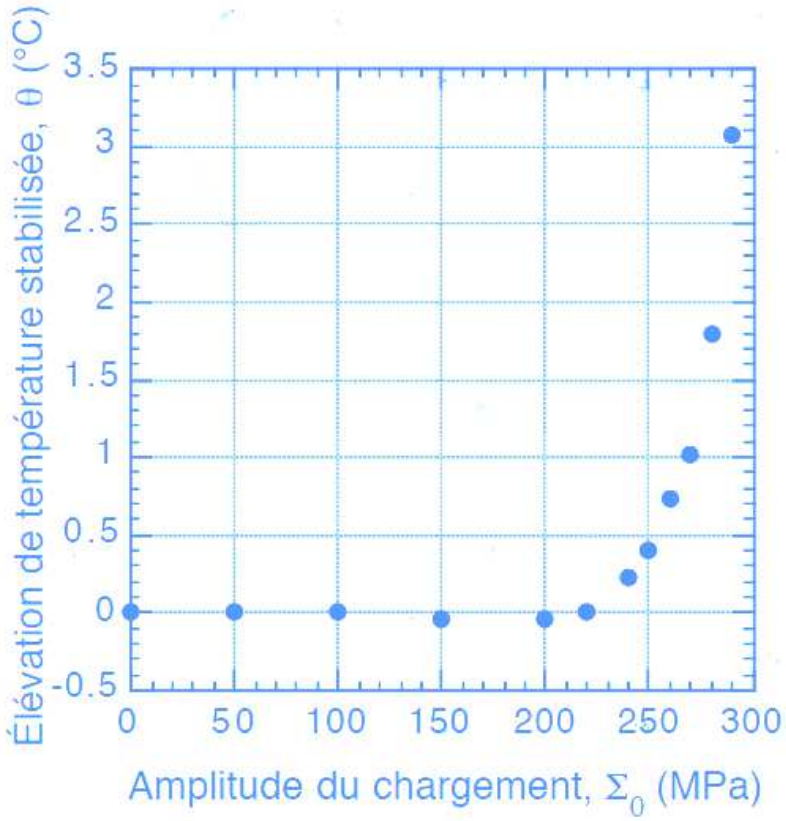
Pilotage contrainte

2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Essais uniaxiaux /multiaxiaux

Essai de traction (dynamique, fr=10Hz)



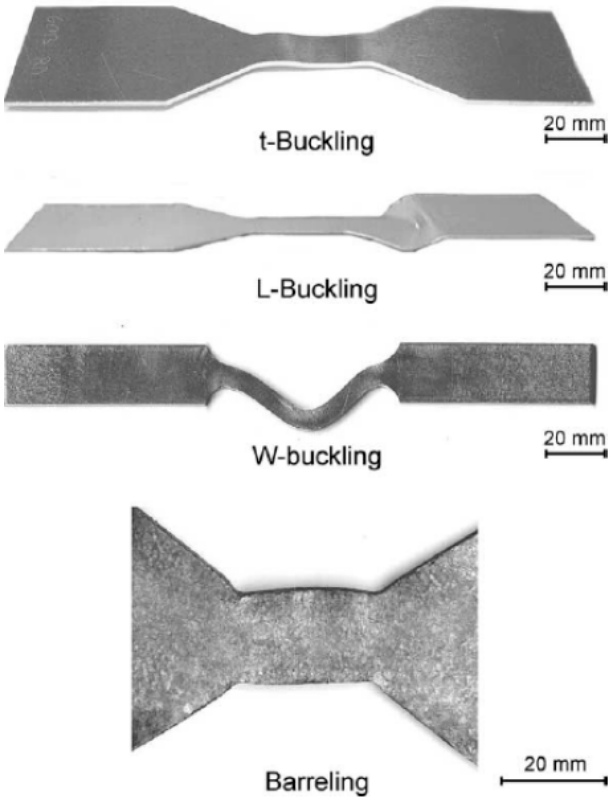


2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Essais uniaxiaux /multiaxiaux

Essai de compression

!!! Géométrie d'éprouvette (flambage)

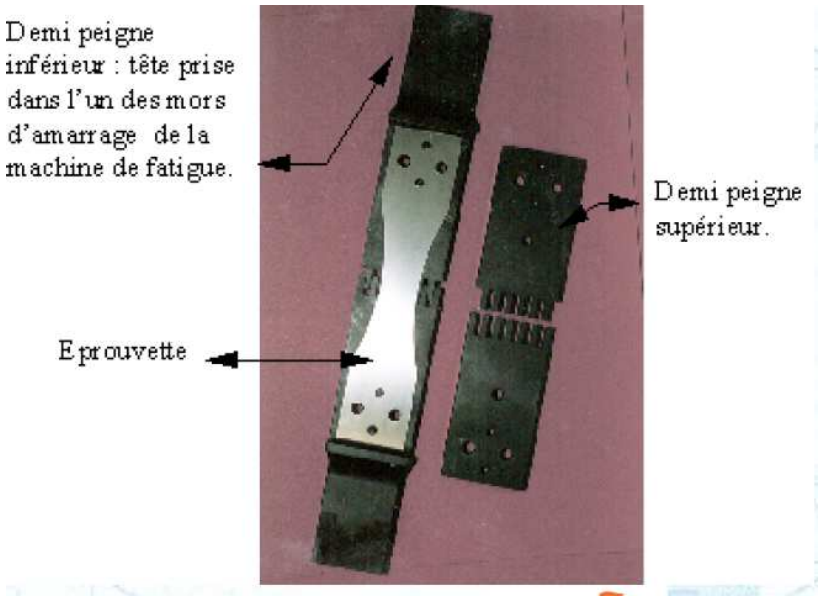


Eprouvette cylindrique entre plateaux

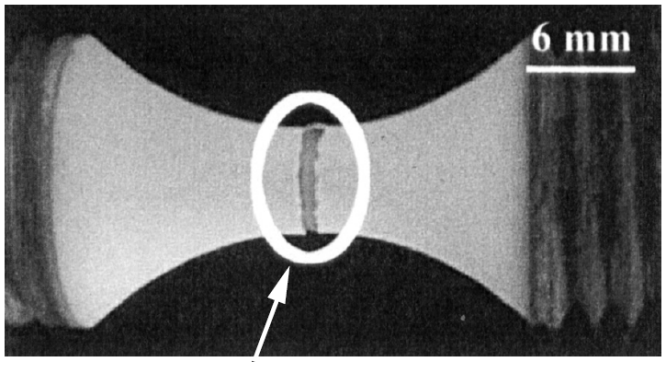
2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Essais uniaxiaux /multiaxiaux

Essai de compression



Dispositif anti-flambement

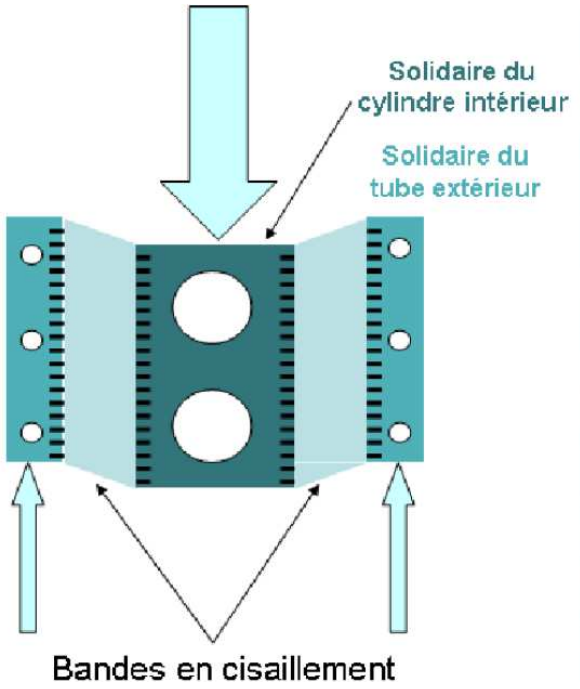


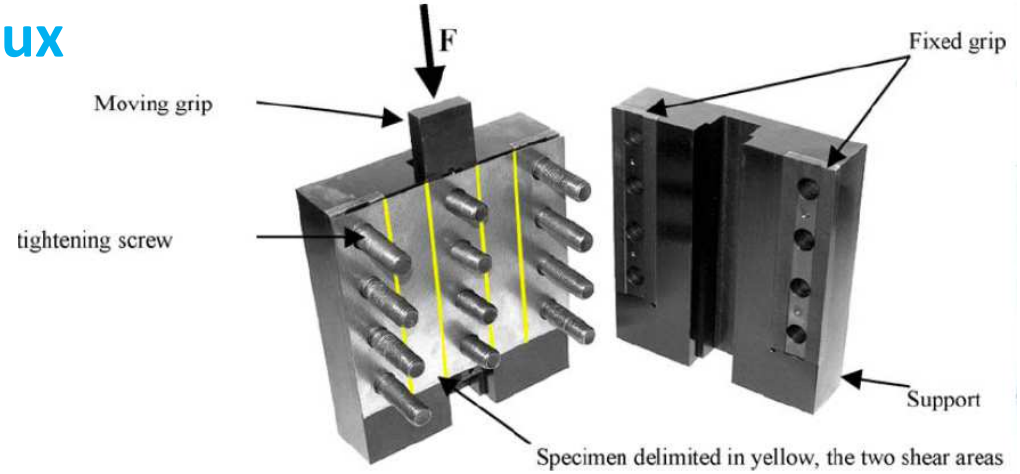
Eprouvette diabolo avec têtes d'amarrage filetée (traction/compression)

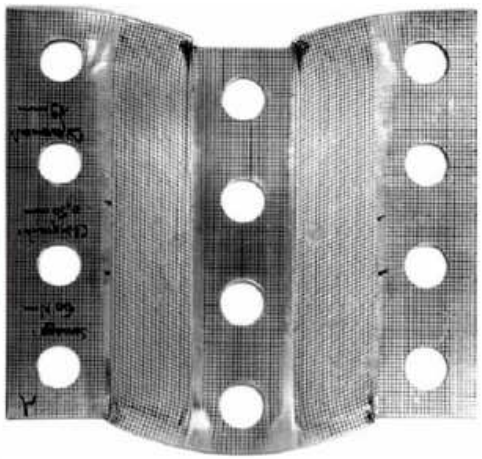
2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

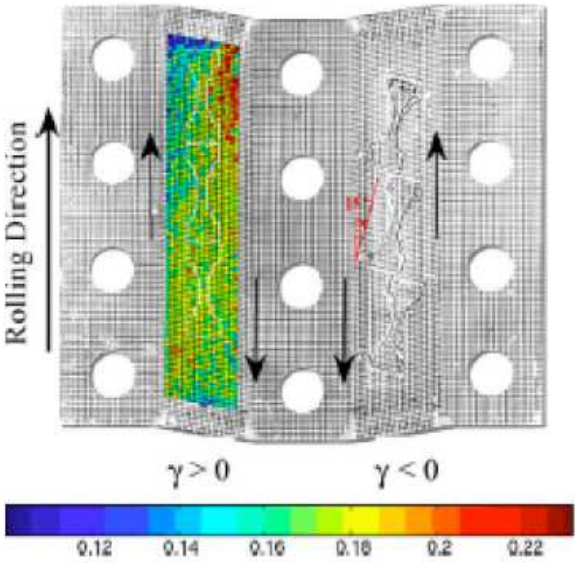
Essais uniaxiaux /multiaxiaux

Essai de cisaillement simple









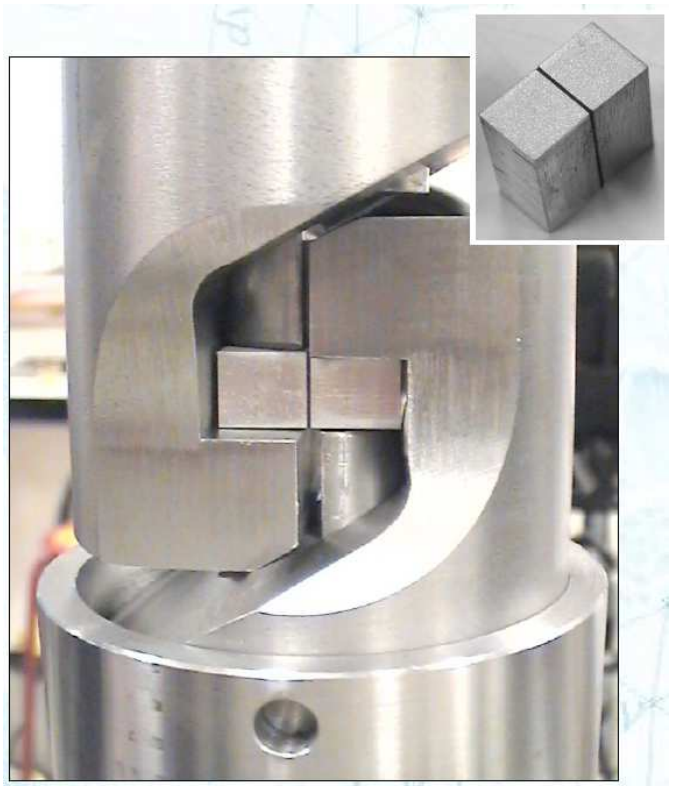
Champ « presque » homogène

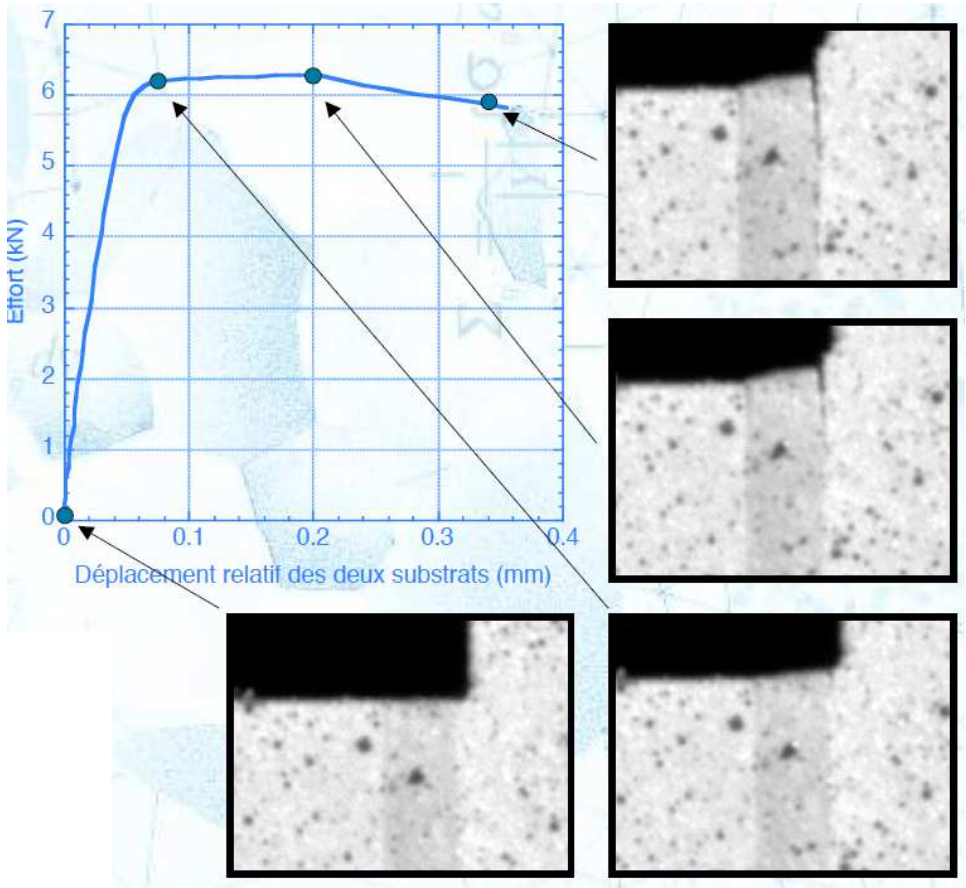
2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Essais uniaxiaux /multiaxiaux

Essai de cisaillement simple

Assemblage collé

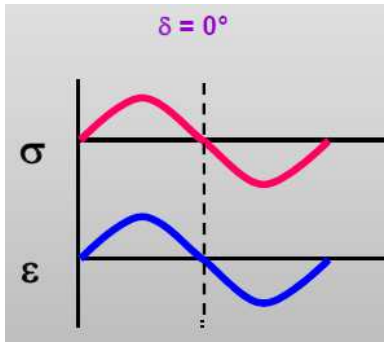




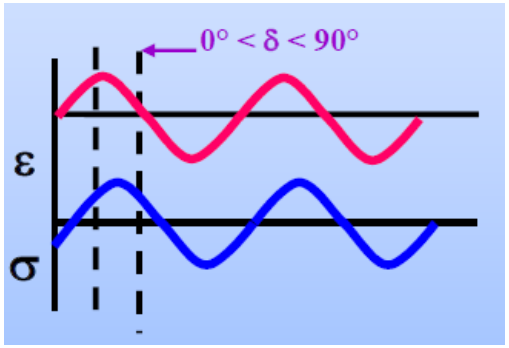
2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Essais uniaxiaux /multiaxiaux

Essai DMA (Dynamic Mechanical Analysis) : viscoélasticité



comportement élastique



comportement viscoélastique

$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos(\omega t) \rightarrow \sigma(t) = \sigma_0 . \cos(\omega t + \delta)$

$\sigma^*(t) = E^*(t).\varepsilon^*(t)$ avec $E^*(t) = E' + i.E''$

E' module élastique ou de stockage

E'' module dissipatif ou de perte

2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

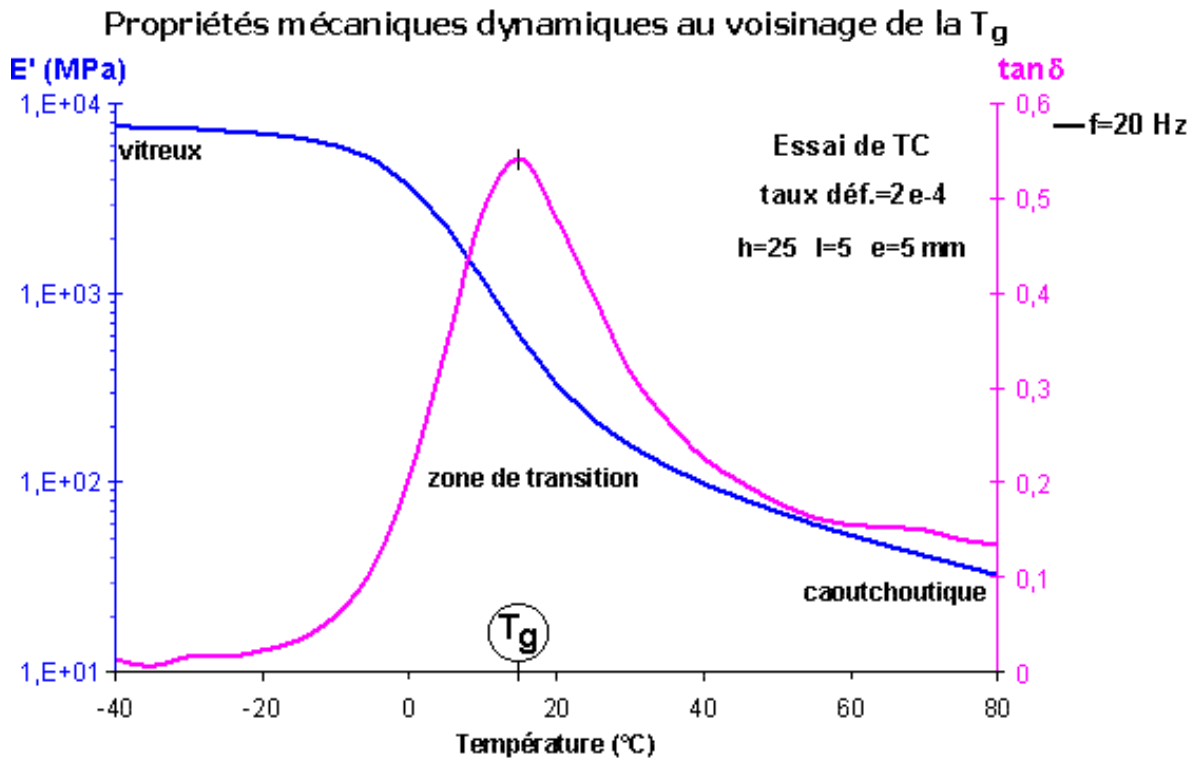
Essais uniaxiaux /multiaxiaux

Essai DMA (Dynamic Mechanical Analysis) : viscoélasticité

E' module élastique ou de stockage

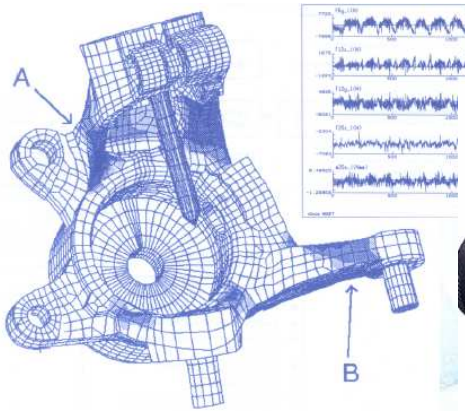
E'' module dissipatif ou de perte

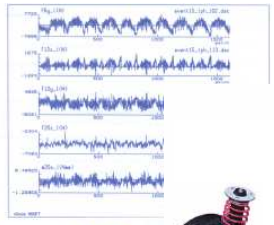
$$\tan\delta = \frac{E''}{E'}$$

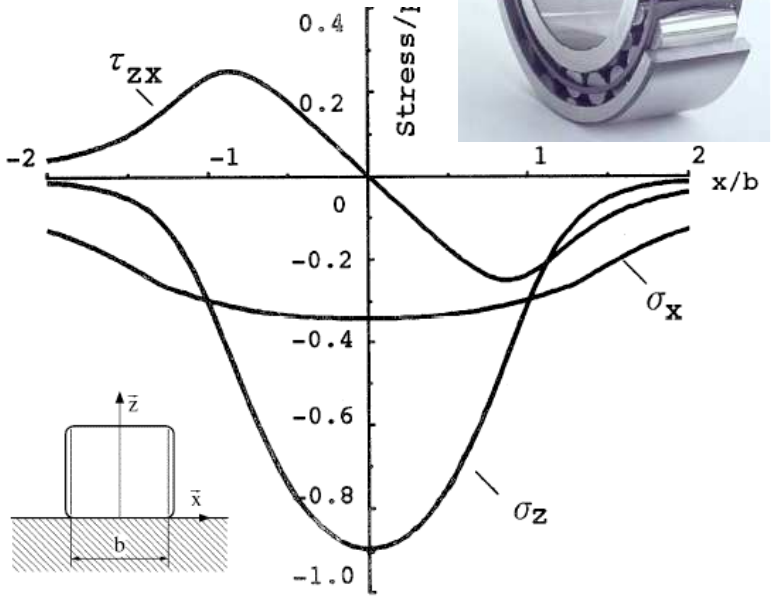


2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Essais uniaxiaux /multiaxiaux







Une structure est très rarement soumise à une sollicitation uniaxiale

La multiaxialité des sollicitations peut influer très fortement le comportement

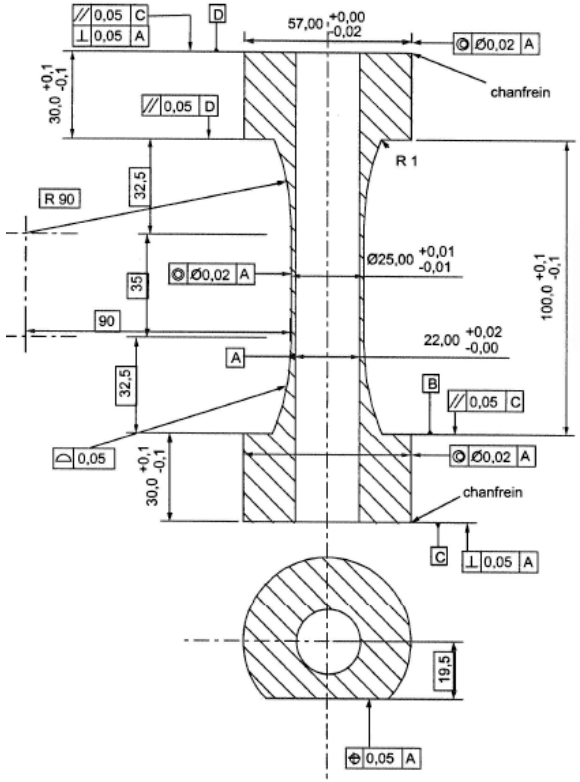
- Loi de comportement multiaxiale
- Essais et machines dédiés

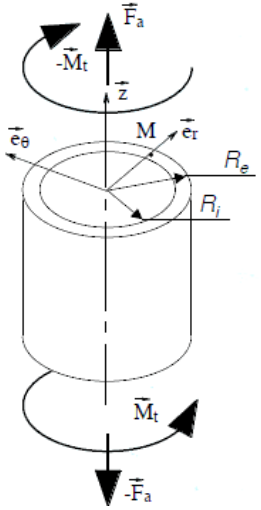
2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Essais uniaxiaux /multiaxiaux

Essai de traction/torsion

Géométrie
d'éprouvette adaptée





$$\underline{\underline{\sigma}} : \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tau \\ 0 & \tau & \sigma \end{pmatrix}_{(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{z})}$$

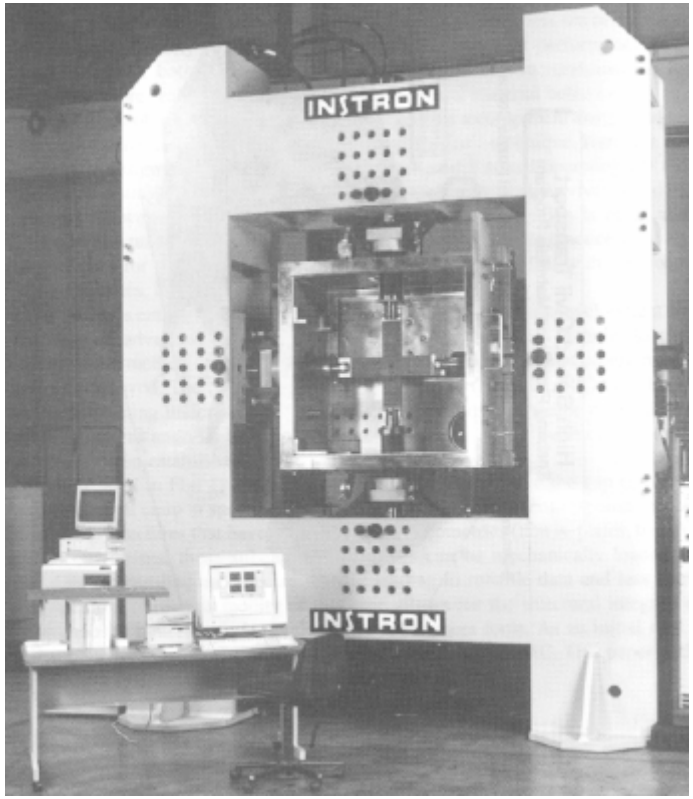
$$\sigma = \frac{F_a}{\pi\left(R_e^2 - R_i^2\right)} \quad et \quad \tau = \frac{3\,M_t}{2\pi\left(R_e^3 - R_i^3\right)}$$

$$\frac{e}{R_{moy}} = 2\frac{\left(R_e - R_i\right)}{\left(R_e + R_i\right)} << 1$$

2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

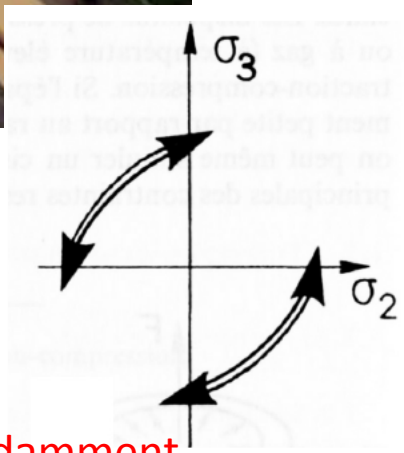
Essais uniaxiaux /multiaxiaux

Essai de bitraction / bicompression



1ère machine bitraction (NASA)

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix}$$



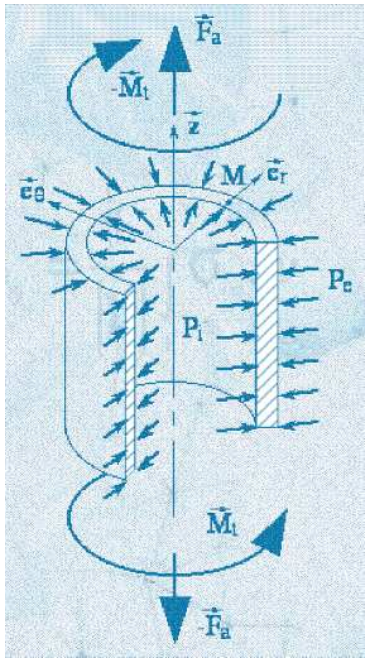
σ_2 et σ_3 pilotées indépendamment

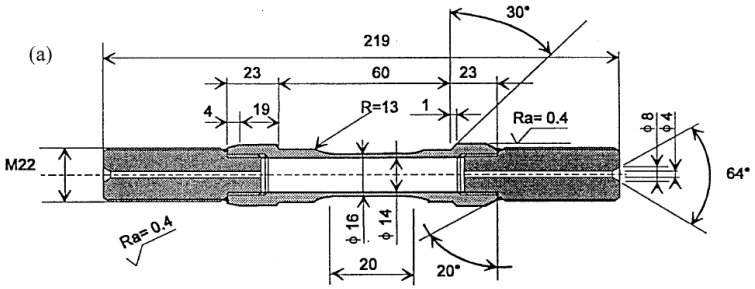
ratio σ_2 / σ_3 piloté

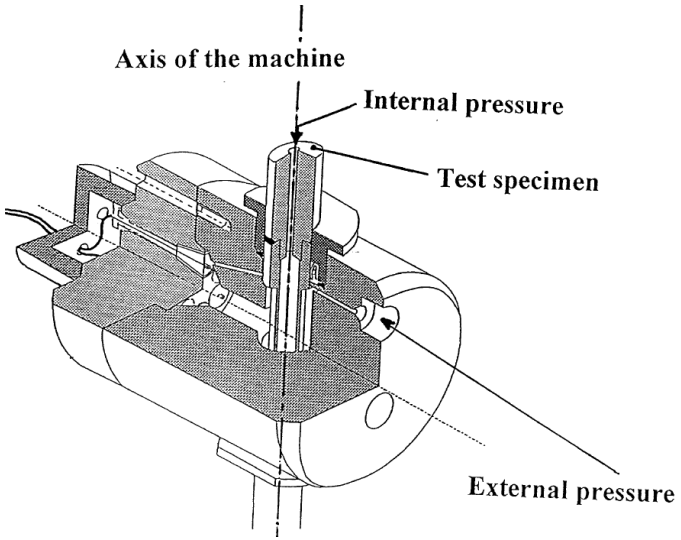
2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Essais uniaxiaux /multiaxiaux

Encore plus loin : traction / torsion + pression interne / externe







$$\underline{\underline{\sigma}} : \begin{pmatrix} \sigma_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\theta\theta} & \tau \\ 0 & \tau & \sigma_{zz} \end{pmatrix}_{(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{z})}$$

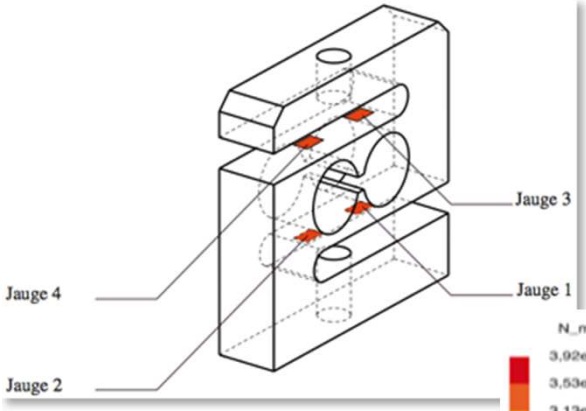
$$\begin{cases} \sigma_{zz} = \dfrac{F_a}{\pi\left(R_e^2 - R_i^2\right)} + \dfrac{1}{2}\dfrac{\left(P_i R_i - P_e R_e\right)}{\left(R_e - R_i\right)} \\ \sigma_{\theta\theta} = \dfrac{\left(P_i R_i - P_e R_e\right)}{\left(R_e - R_i\right)} \\ \sigma_{rr} = -\dfrac{\left(P_i + P_e\right)}{2} \\ \sigma_{z\theta} = \dfrac{3 M_t}{2\pi\left(R_e^3 - R_i^3\right)} \end{cases}$$

2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

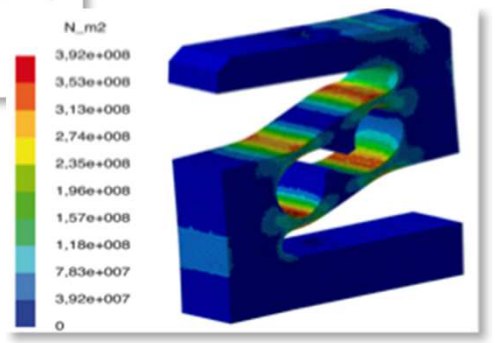
Métrologie

Que sait-on mesurer?

- un déplacement ΔL
- une déformation $\Delta L/L_0$
- un effort (de façon indirecte)
  - par mesure de déformation d'un corps de référence (cellule d'effort)
  - par mesure de transformation d'énergie (capteur piézoélectrique)



Précision :
0.1 à 0.5% valeur lue



2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Métrologie

Problématique liée à la mesure de déplacement ou déformation

déformation $\varepsilon = \Delta L / L_0$

ΔL = déplacement traverse « machine »

Pb : souplesse machine!
la déformée machine intervient dans ΔL

L_0 = longueur zone utile de l'éprouvette

Pb : Est-on vraiment sûr que seule la zone utile travaille?

Nécessité d'une mesure locale

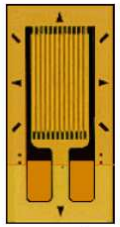
- avec contact
- sans contact (optique)

2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

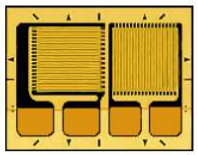
Métrologie

Mesure locale de déformation avec contact

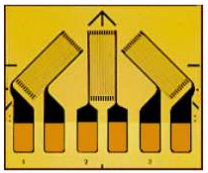
Jauges de déformation

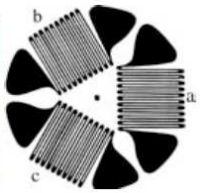


simple

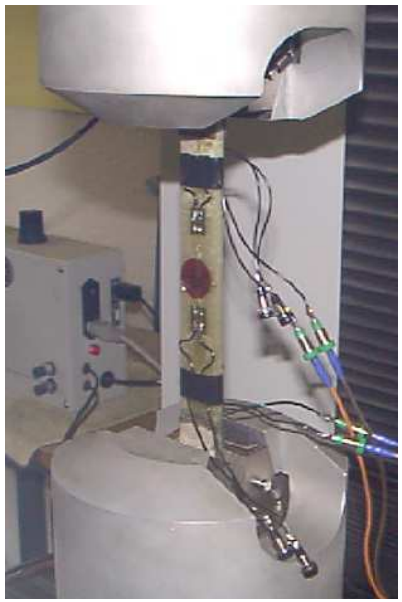


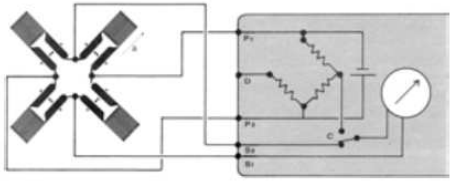
biaxiale



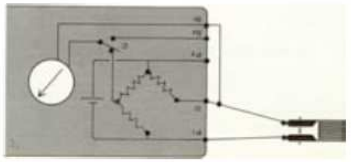


Rosette : donne le tenseur ε dans le plan

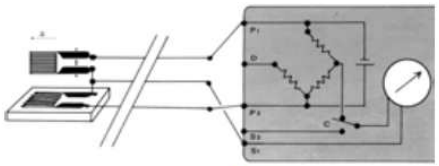




pont complet



quart de pont 2 fils



montage 1/2 pont

Pont Wheatstone

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{K}\frac{\Delta R}{R}$$

$K = C(1-2\nu)+1+2\nu$, où C dépend du matériau

Pb : collage

polymères : intégrité matériau ?
température > 300°C

2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Métrologie

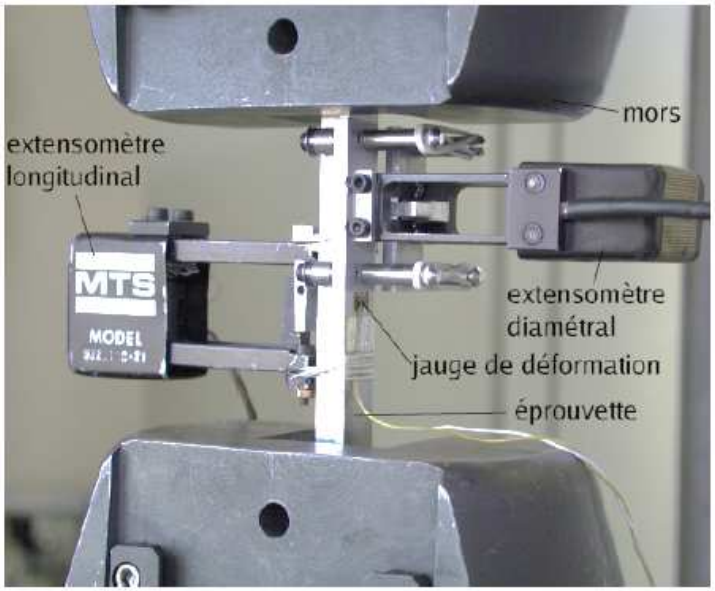
Mesure locale de déformation avec contact

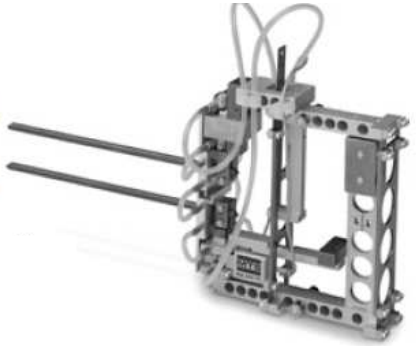
Extensomètres

mesure de déformation d'un corps de référence par jauges

Pb : nécessité d'un effort de maintien

matériaux souples ?



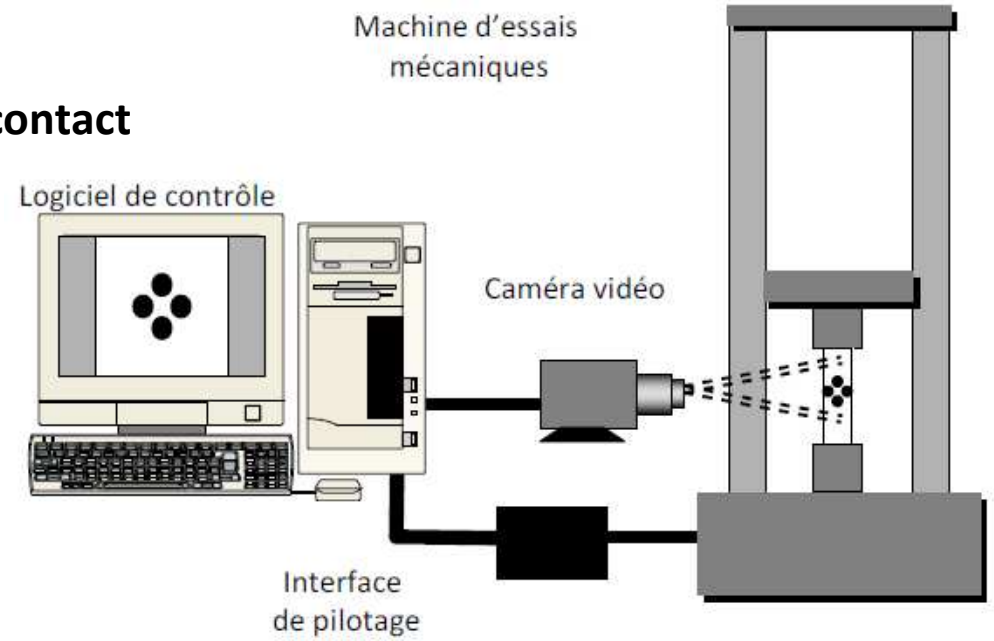


2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Métrologie

Mesure locale de déformation sans contact

Vidéo extensomètres



2 tâches pour mesure longi
2 tâches pour mesure transverse

Suivi en temps réel du déplacement du barycentre des tâches

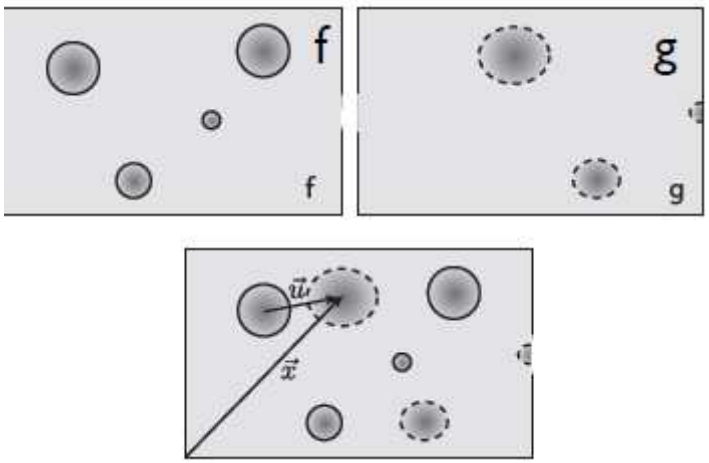
Précision:
- dépend des conditions d'éclairage
- dépend de la combinaison entre dimensions zone d'étude / résolution caméra

2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Métrologie

Mesure locale de déformation sans contact

Mesure de champs de déformation (Full Field Measurement) par corrélation d'images



Principe :
Suivi par caméra ou appareil photo haute résolution

la photo f correspond à l'état initial

la photo g est prise en cours d'essai

g correspond à f déformée

On cherche $\vec{u}$ qui transforme f au plus proche de g

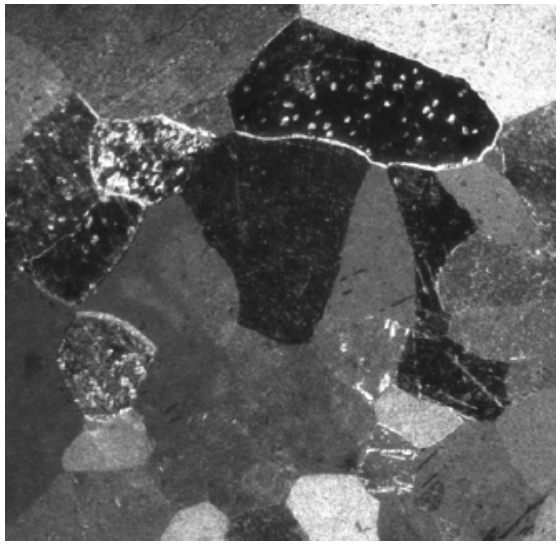
2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

Métrologie

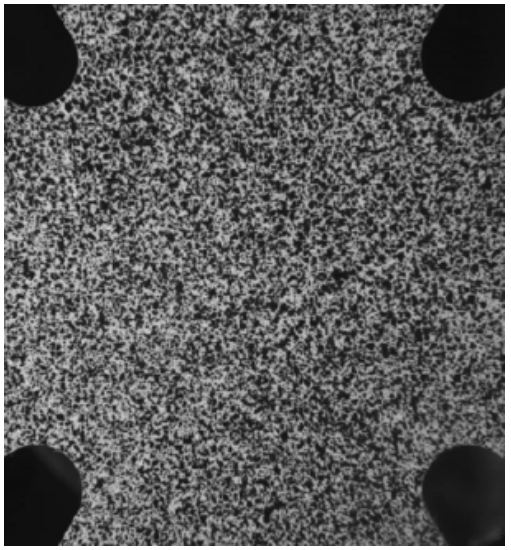
Mesure locale de déformation sans contact

Mesure de champs de déformation (Full Field Measurement): corrélation d'images

Mouchetis:



Naturel : texture matériau



Artificiel : peinture

Stockage de chaque image = matrice NxM de niveau de gris

2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

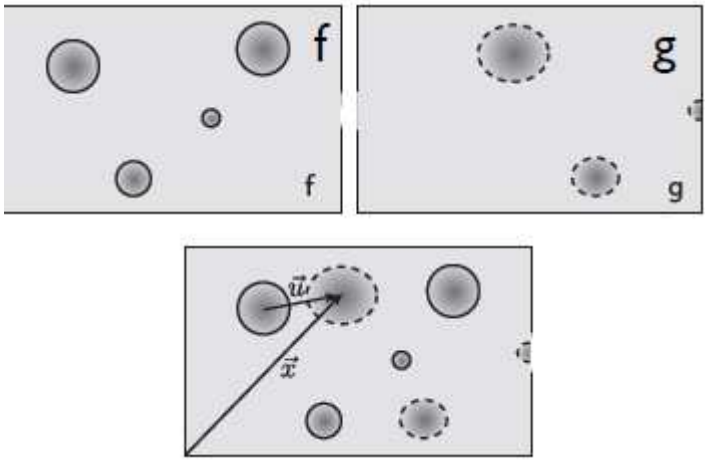
Métrologie

Mesure locale de déformation sans contact

Mesure de champs de déformation (Full Field Measurement): corrélation d'images

Stockage de chaque image = matrice NxM de niveau de gris (M et N : nb de pixels)

Pour chaque pixel x : $g(\underline{x}) \cong f(\underline{x}+\underline{u})$



Minimisation de la fonctionnelle

$$\Phi(\underline{u}) = \int [g(\underline{x}) - f(\underline{x}+\underline{u})]^2 d\underline{x}$$

! $\underline{u}$ doit être cinématiquement admissible

Maximisation de la fonction d'intercorrélation

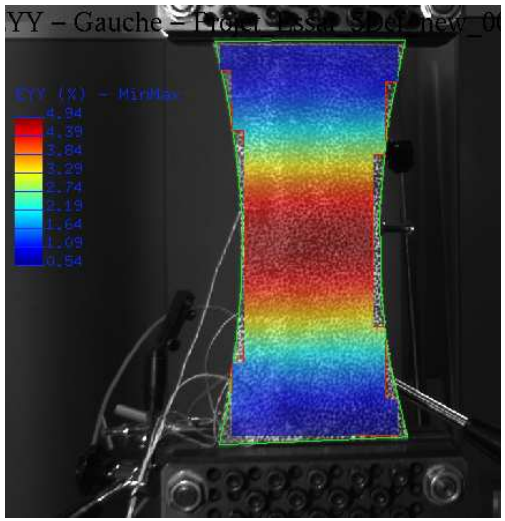
$$(g * f)(\underline{u}) = \int g(\underline{x}) f(\underline{x}+\underline{u}) d\underline{x}$$

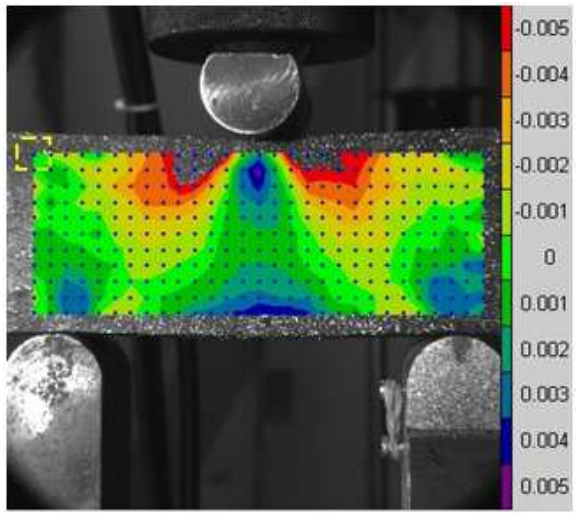
2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

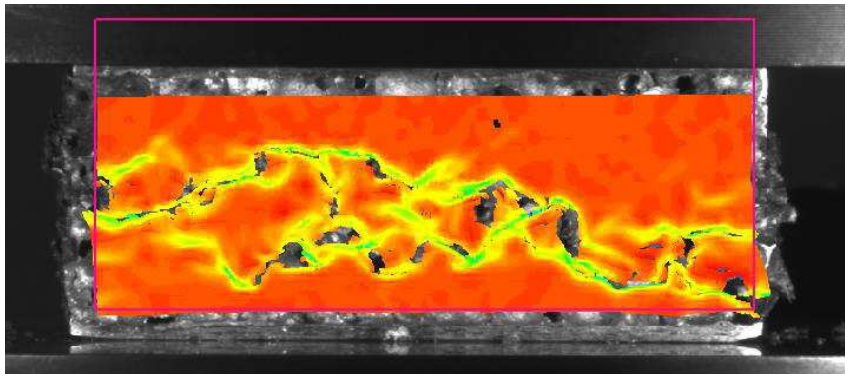
Métrologie

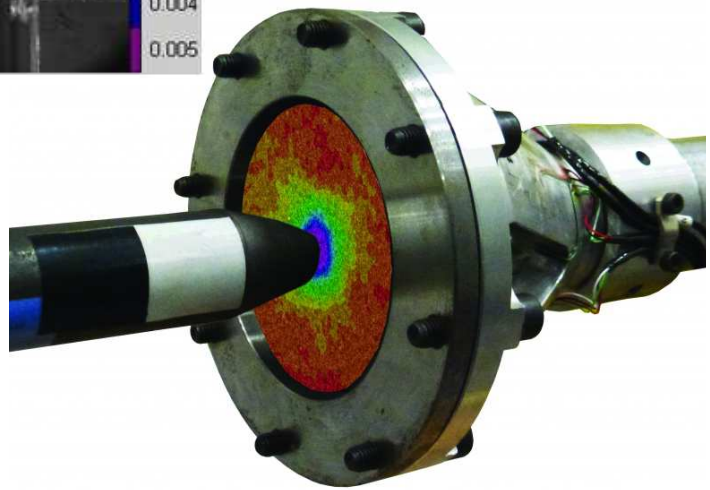
Mesure locale de déformation sans contact

Mesure de champs de déformation (Full Field Measurement): corrélation d'images









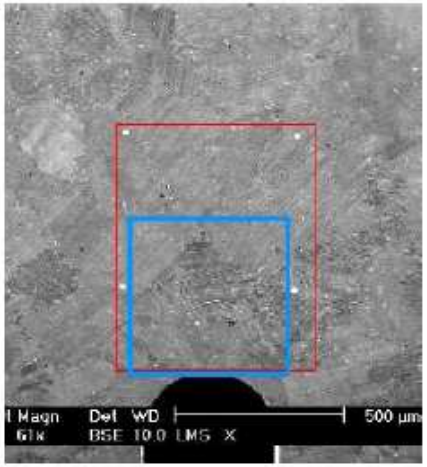
2- Les essais mécaniques et la métrologie associée

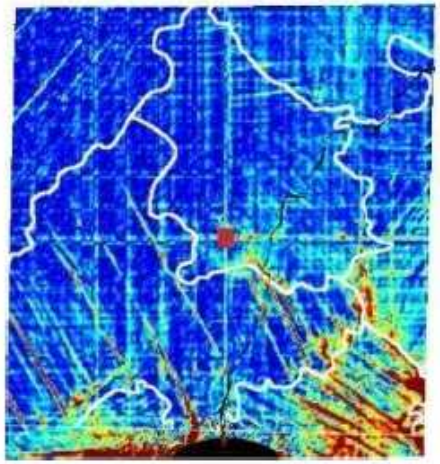
Métrologie

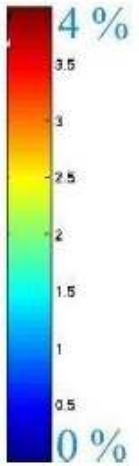
Mesure locale de déformation sans contact

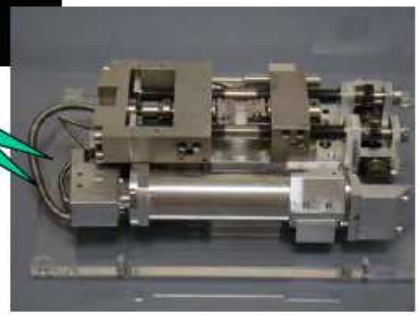
Mesure de champs de déformation (Full Field Measurement): corrélation d'images

Essais de traction in-situ sous MEB









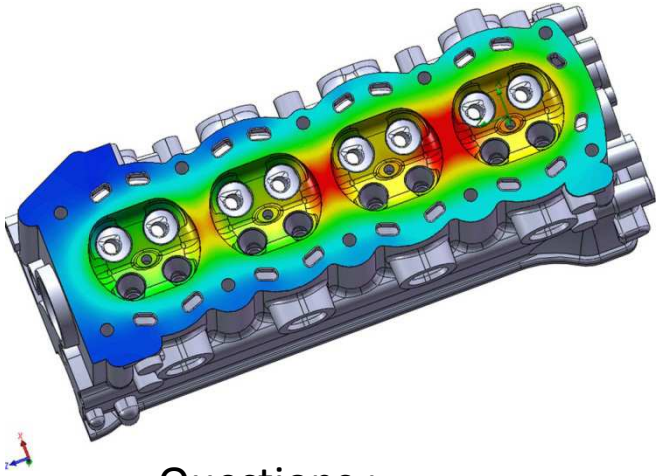
3- Calcul de structures par éléments finis

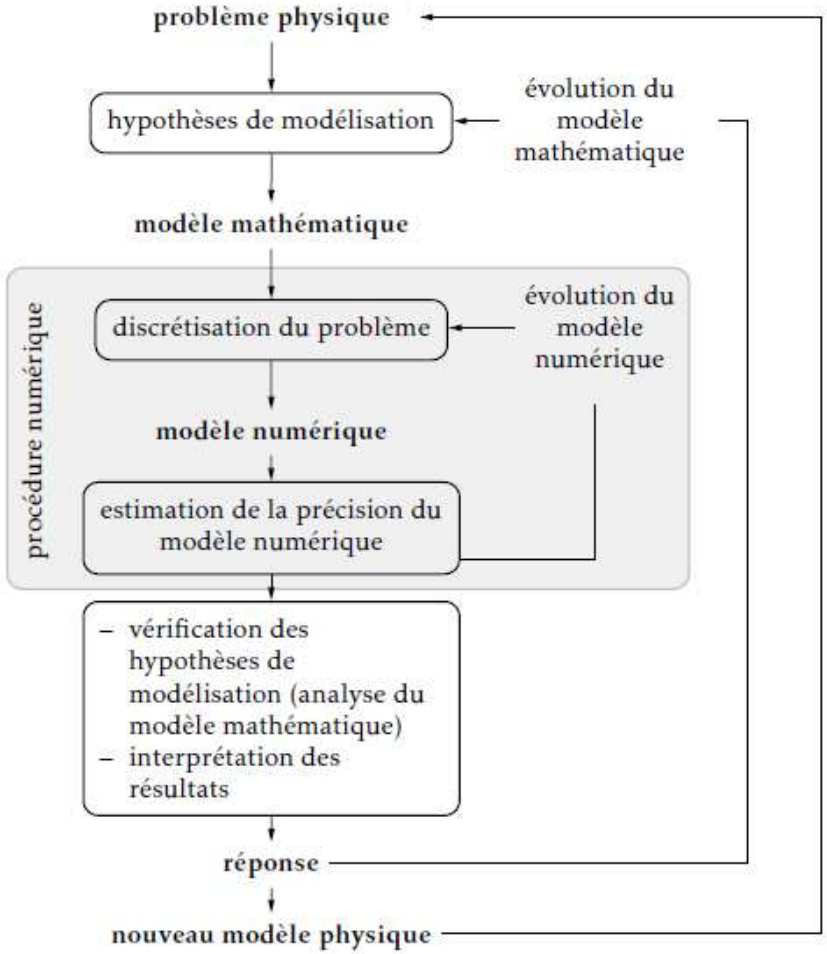
3- Calcul de structures par éléments finis

Modélisation

Besoins :

Estimer un champs de déformation, de contraintes, de température... dans une structure quelconque soumise à un chargement complexe





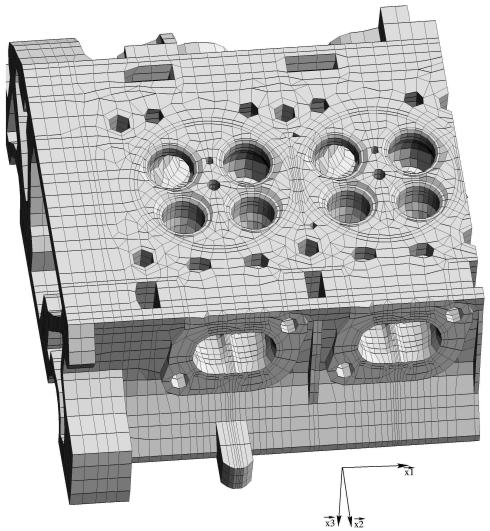
Questions :

- quel modèle mathématique utiliser?
- quel est le modèle numérique associé?

→ **Les éléments finis**

3- Calcul de structures par éléments finis

Principe

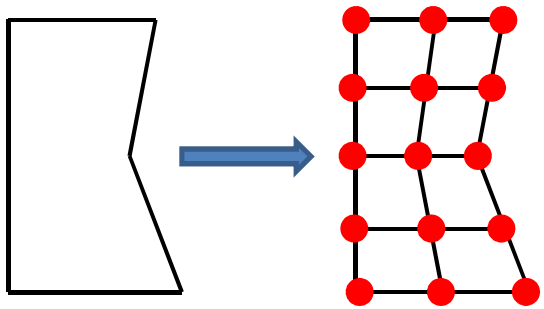


Structure quelconque : pas de solution analytique !

Idée : diviser la structure en « briques » élementaires de dimensions connues => **éléments finis**

Ces éléments sont liés entre eux par des noeuds

maillage :



Les degrés de liberté des noeuds sont les déplacements ou les températures

On applique sur certains des noeuds des conditions aux limites connues : déplacement, force, température, flux....

Objectif : résoudre de manière discrète et approchée l'équilibre de la structure

$$[K].\{U\} - \{F\} = \{R\} \to 0$$

3- Calcul de structures par éléments finis

Principe

Exemple : élément finis à 2 noeuds

Etape 1 : Approximation du champs de déplacements U(x) = a.x + b (approx. linéaire ici)

$$U(x) = U1\left(1 - \frac{x}{L}\right) + \frac{x}{L}U2$$

Réécriture sous forme matricielle :

$$U(x) = [N(x)]\{U\}, \quad \text{N(x) = fonctions de forme}$$

Etape 2 : Calcul des déformations (aux pts de Gauss : permet le passage d'une config de référence à une config déformée):

$$\varepsilon(x) = [B(x)]\{U\}$$

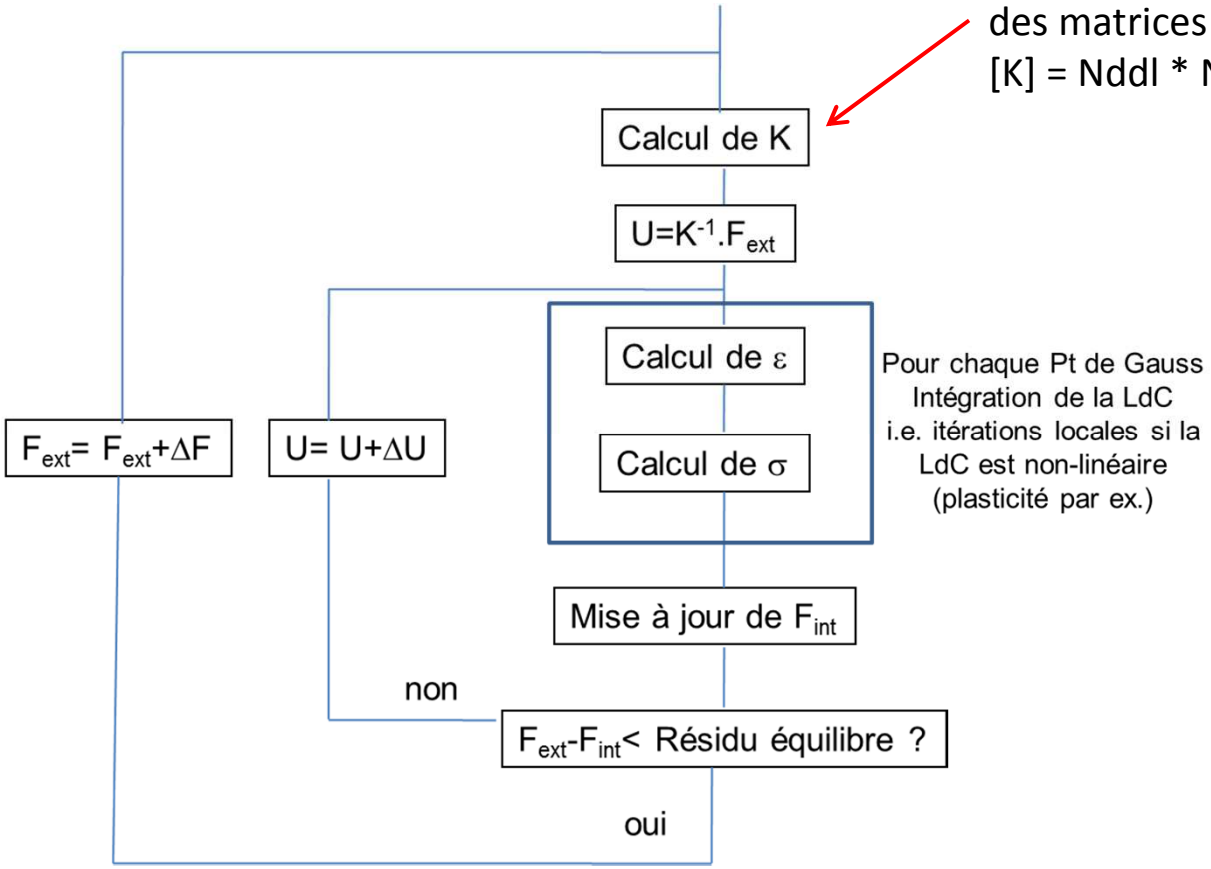
Etape 3 : Calcul des contraintes (aux pts de Gauss) : loi de comportement : $\sigma = f(\varepsilon)$ résolution numérique d'un système d'EDP

Etape 4 : Principe des puissances virtuelles $\{\delta U\}^T\{F\} = \int_V \{\delta\varepsilon\}^T\{\sigma\}dv$

discrétisation: $\{F\} = [K]\{U\}$

3- Calcul de structures par éléments finis

Principe : algorithme général



Matrice de rigidité globale : obtenue par assemblage des matrices de rigidité de tous les éléments
[K] = Nddl * Nddl

Qualité du calcul

- choix du maillage
- choix du type d'éléments
- choix de la loi de comportement
- qualité de l'intégration de la loi de comportement

Interprétation des résultats

Logiciel (code) éléments finis:

- Abaqus (Dassault Systems)
- Ansys
- Comsol
- ASTER (EDF
- ....

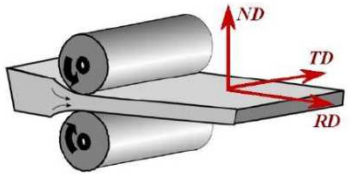
3- Calcul de structures par éléments finis

Applications : thèse A. Zinbi

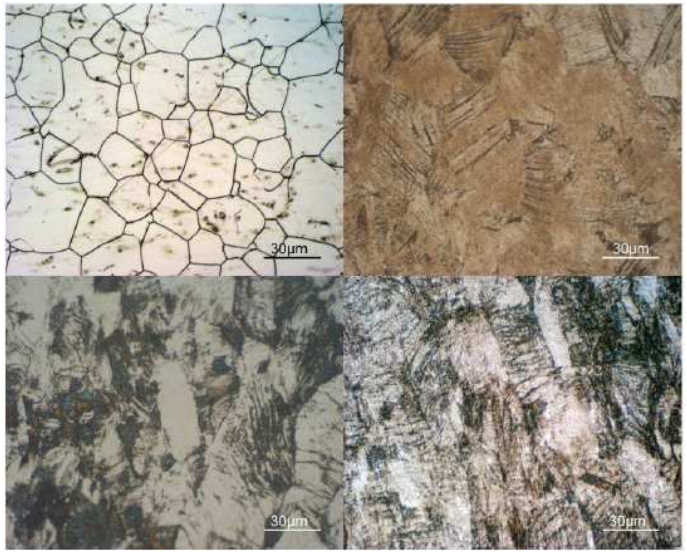
Sté CAILLAU Romorantin
Colliers de serrage automobile

Acier austénitique A301 écroui instable (laminé)

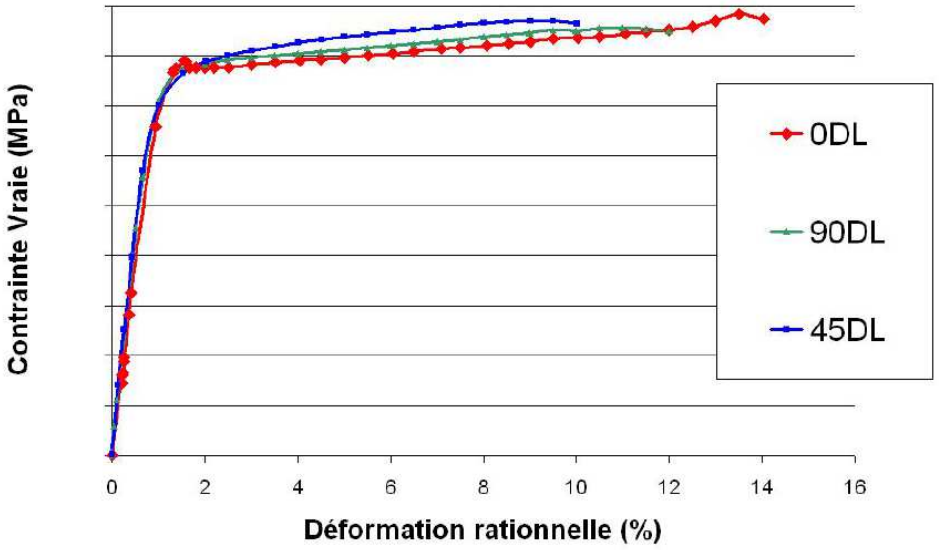
Sous sollicitation, transformation martensitique induite par plasticité, qui induit elle-même une déformation plastique (effet TRIP *TRansformation Induced Plasticity*)= durcissement microstructural



- Caractérisation thermomécanique (cadre anisotrope)



Recuit, 23%, 42%, 61% laminage

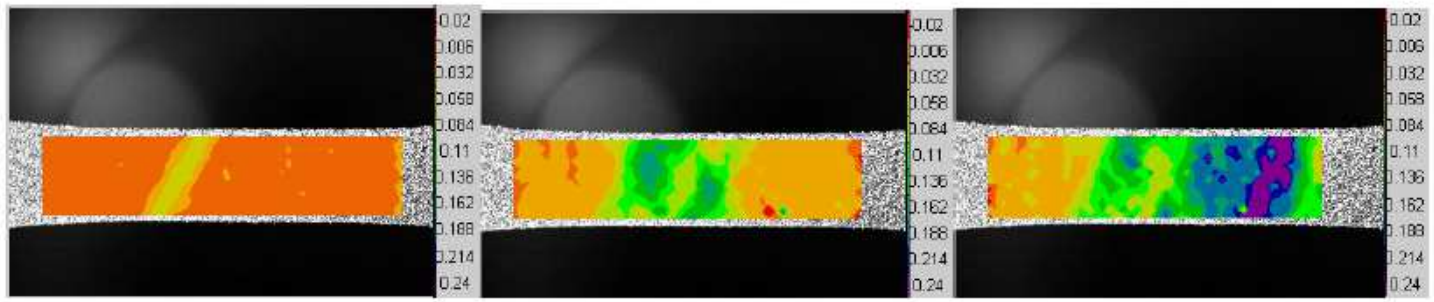


Comportement en traction : anisotropie

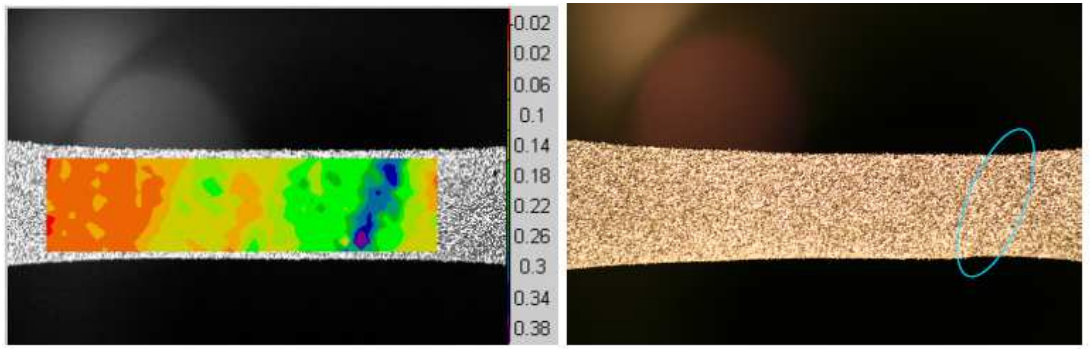
3- Calcul de structures par éléments finis

applications

- Caractérisation de la transformation martensitique = ferritoscope + corrélation d'image pour bandes de cisaillement



(a) initiation d'une bande (b) propagation des bandes (c) localisation avant rupture

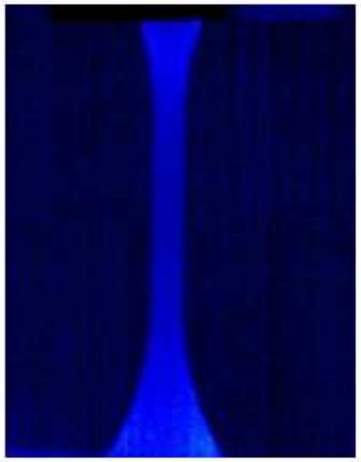


(a) déformation longitudinale (b) apparition de la striction

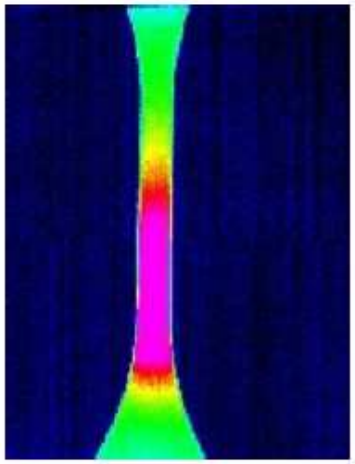
3- Calcul de structures par éléments finis

applications

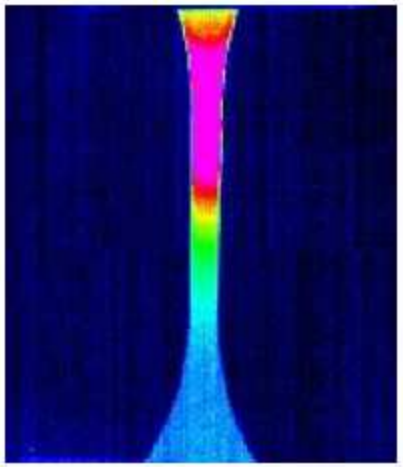
- Caractérisation de la transformation martensitique = mesure d'autoéchauffement dû à l'effet TRIP



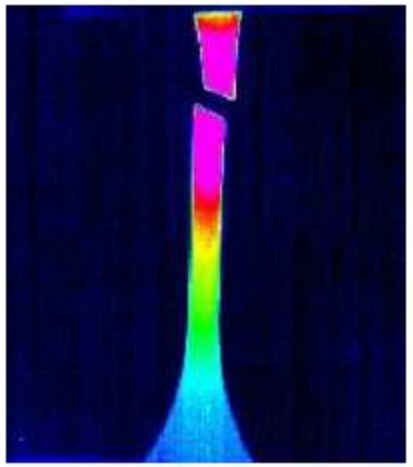
(a) Avant sollicitation



(b) Initiation des bandes



(e) Propagation des bandes

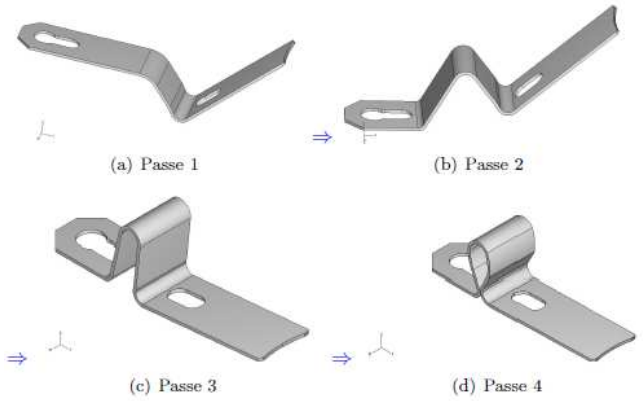


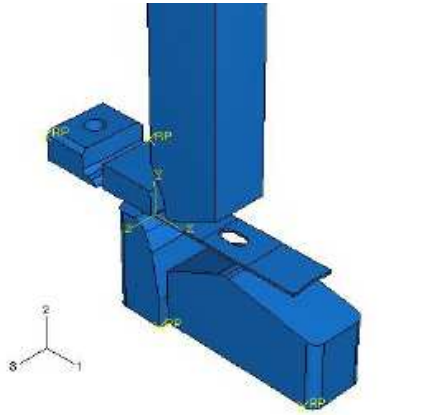
(f) Rupture de l'éprouvette

3- Calcul de structures par éléments finis

applications

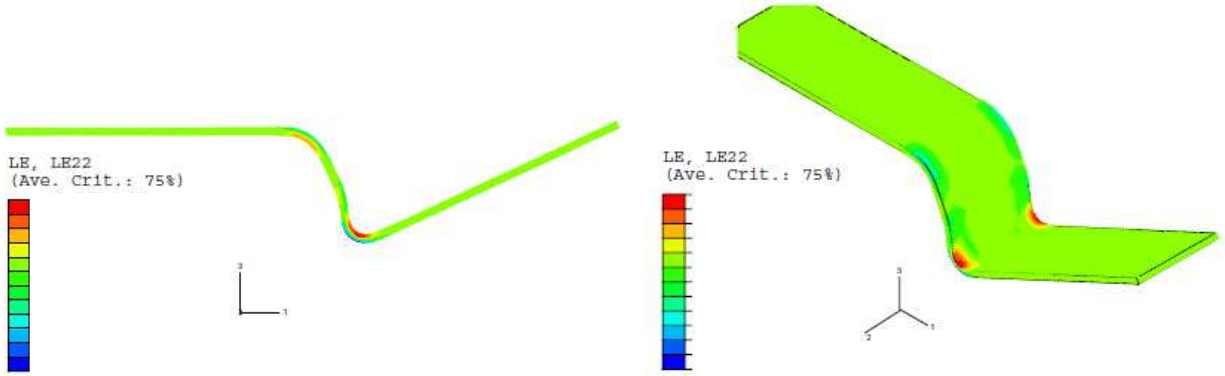
- Ecriture et implantation de la loi de comportement dans le code de calcul
- Simulation du process de fabrication du collier





(a) Maquette numérique du pliage de tôle

(b) Maillage utilisé

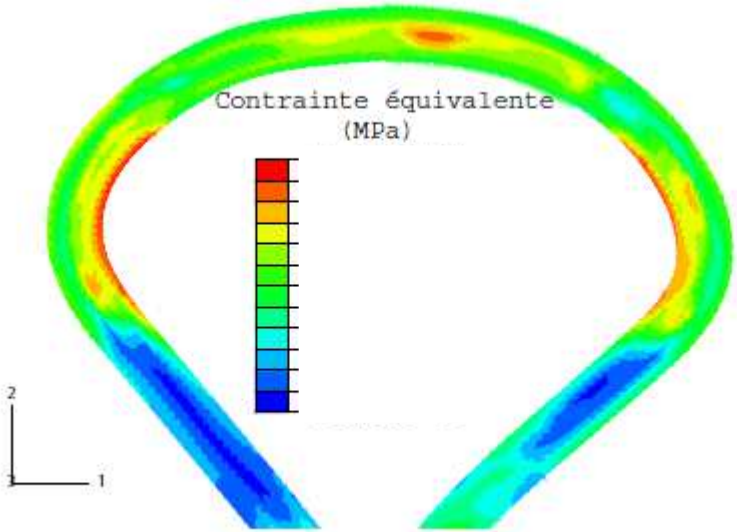


Champs de déformation transverse (passe1)

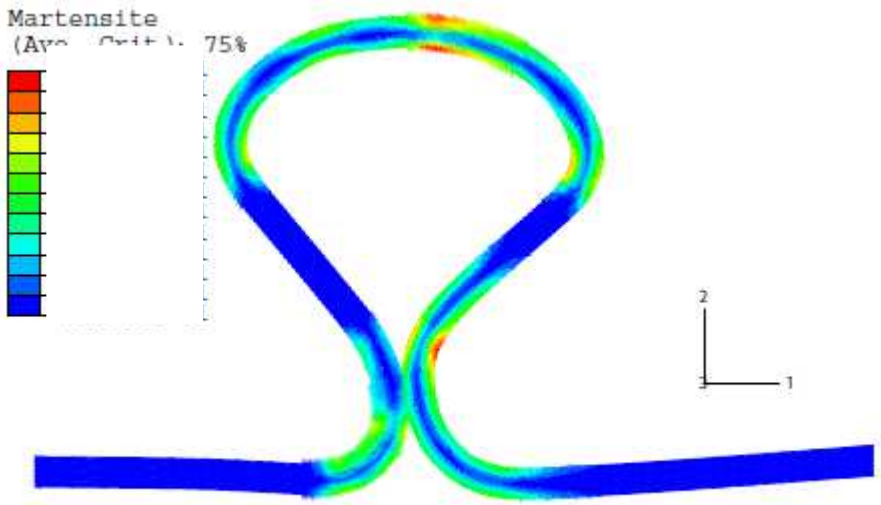
3- Calcul de structures par éléments finis

applications

- Estimation du champs de contrainte après mise en forme
- Estimation du taux de martensite



(a) contraintes internes après retour élastique



(b) taux de martensite

Conclusion

Calcul de structures = approche complète
Maîtrise des aspects matériaux, modélisation, numériques

Le matériau dicte la loi de comportement

La loi de comportement peut être complexe (1 thèse)

Métrologie optique en plein essor (stéréocorrélation 3D)

Gros effort des industriels actuellement (gain d'investissement potentiel)
notamment sur la simulation des process de fabrication et les composites

Futur : proposer des modèles simplifiés mais représentatifs.