

Modélisation numérique en mécanique des matériaux solides et des structures, mécanique des milieux continus et science des matériaux

¹Marc Blétry, ²Georges Cailletaud

¹ Université de Paris XII, ICMPE, 94320 THIAIS

²MINES ParisTech, Centre des Matériaux, CMRS UMR 7633, 91003 EVRY

May 12, 2009

Plan

- 1 Le site mms2
- 2 Pédagogie induite

Plan

- 1 Le site mms2
- 2 Pédagogie induite

Le site mms2

Partenaires

- 1 Mines de Paris
- 2 Mines de Saint-Etienne
- 3 INP Lorraine

Domaines

- Mécanique des Milieux Continus (30 h) (1, 2, 2)
- Mécanique des Matériaux Solides (30 h) (1)
- Matériaux (40 h) (1, 3)
- Eléments Finis (30 h) (1, 1)

Le site mms2 - quelques chiffres

Contenu

- 1 9 cours - à différents stades
- 2 Interactif : 15 quizz, 5 exercices, 7 miniprojets, 1 application
- 3 Illustrations : 4 films + gifs

Investissements 2006/2007

- 1 Serveur neuf
- 2 Refonte intégrale (nouveau graphisme)

Visites (Goctets) en mars

- | | |
|---------------------|----------------------|
| • 2004 : 45 (0,1) | • 2007 : 5392 (33,1) |
| • 2005 : 365 (2,0) | • 2008 : 8276 (43,7) |
| • 2006 : 1566 (8,0) | • 2009 : 9009 (47,8) |

Le site mms2

Public visé

- 1 Etudiants *captifs* (ENSMP, COMADIS)
- 2 Etudiants d'autres écoles, d'autres pays francophones
- 3 Enseignants
- 4 Professionnels

Contenu - licence *Creative Commons*

- 1 Cours + TD & annales (résolus) + transparents
- 2 Quizz interactifs
- 3 Illustrations : sujets réels/historiques
- 4 Animations : films / applications interactives
- 5 Miniprojets interactifs : cas complexes / lien avec expérience

Modélisation, Mécanique, Matériaux

But

→ Sortir du carcan imposé par le petit nombre d'heures de cours (MMS + matériaux = 60 h à MINES ParisTech)

→ Le virtuel, pour revenir vers le réel

- Prolongation du cours, mise à disposition de documents complémentaires
- Donner le moyen à l'étudiant de se contrôler lui-même
- Fournir une ouverture vers la *vraie vie* (applications industrielles, autres domaines)
- Donner accès à des simulations numériques pour aborder des situations complexes (extension des TD, toucher la matière)

Miniprojets

Existant

8 miniprojets en **mécanique des matériaux solides** :

- Contraintes thermomécaniques dans une bille
- Loi de comportement du gypse
- Retour élastique en flexion circulaire
- Calcul de couple de serrage en régime plastique
- Calcul d'une passerelle
- Etude de plaques composites
- *Mécano* de poutres métalliques
- Conception de plaques composites
- Calcul d'une aile d'avion (A380)

Un miniprojet

Travail demandé aux étudiants

- Expérimental : à réaliser ou données disponibles
- Modélisation : modèles élaborés (Code éléments finis ou développements numériques dédiés)
- 1 document guide (pdf) + outils interactifs *ad hoc*
- Durée : \approx 10 à 20 H en binôme
exemple : [Contrainte thermomécanique dans une bille](#)

Aspects techniques

- Interface via documents pdf
- Scripts (PHP, shell)
- Calculs EF sur le serveur (Zébulon - Maillage, calcul)
- Production du nouveau pdf (images, courbes,...)

INTRODUCTION

RHEOLOGIE

CRITERES

PLASTICITE 3D

ECROUISSAGE

APPROCHE

EXPERIMENTALE

IAE

HOMOGENEISATION

IAE POUTRES

IAE PLAQUES

IAE MECANIQUE

LINEAIRE DE LA

RUPTURE

MINI-PROJETS

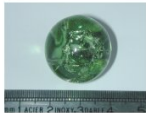
ANNALES

Mini projets

Le texte du mini-projet en pdf peut être chargé en cliquant sur l'icône. La case la plus à droite donne accès à des liens directs sur les éventuelles feuilles de calcul. Les textes des mini-projets sont accessibles ci-dessous :

Nom du projet	Téléchargement de la description	Liens sur les feuilles de calcul
<p>Contrainte thermomécanique dans une bille</p> <p>On génère une multitude de petites fissures (dites de faïençage thermique) en plongeant dans l'eau glacée une bille préalablement mise au four. A l'inverse, une bille préalablement refroidie (azote liquide) va se rompre par l'intérieur. On étudie les divers modes de rupture possibles, et on cherche à prévoir la taille des réseaux de fissures.</p>		<p>Calcul 1D Calcul 2D</p>
<p>Loi de comportement d'un géomatériau : le gypse</p> <p>En mécanique des roches et des sols, les données expérimentales utilisées pour définir ces lois de comportement proviennent d'essais triaxiaux classiques ou d'essais spéciaux, de type oedométrique ou de type Brésilien. Dans ce mini-projet, on se limitera à un essai de compression uniaxiale (essai triaxial avec un confinement nul) et à un essai Brésilien qui permet la mesure, d'une façon indirecte, de la résistance à la traction. Les essais seront réalisés sur des éprouvettes de gypse.</p>		<p>Simulation</p>
<p>Retour élastique en flexion circulaire</p> <p>Ce projet a pour but d'illustrer le retour élastique de tôles en acier ou en aluminium après déformation plastique; il montre que le rayon final est d'autant plus grand que (i) la tôle est mince, (ii) la limite d'élasticité est faible, (iii) le module d'élasticité est grand.</p>		<p>Simulation</p>
<p>Calcul d'un couple de serrage en régime plastique</p> <p>Dans le cas des structures vissées, l'art du serrage consiste</p>		

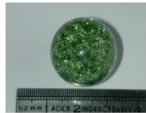
Etude de la fissuration d'une bille de verre



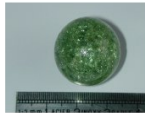
200°C → 20°C



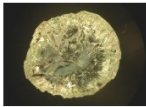
300°C → 20°C



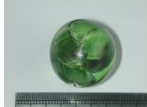
400°C → 20°C



500°C → 20°C



200°C → -196°C



-196°C → 20°C



-196°C → 20°C

Résultats de trempes de billes de verre illustrant les différents modes de fissuration.

On génère une multitude de petites fissures (dites de faïençage thermique) en plongeant dans l'eau glacée une bille préalablement mise au four. A l'inverse, une bille préalablement refroidie (azote liquide) va se rompre *par l'intérieur*. On se propose dans ce mini-projet d'étudier le phénomène, sous le double aspect expérimental et numérique. On réalisera donc des expériences de *trempes* sur des billes de verre, et des simulations thermiques et mécaniques.

Dans le cas d'un matériau homogène, le problème peut se résoudre en coordonnées sphériques tant qu'il n'y a pas de fissures. C'est ce

qui est fait dans un premier temps, en enchaînant un calcul thermique et un calcul mécanique sur des éléments "uniaxiaux" sphériques. Pour prévoir la destinée des fissures éventuelles, il faut mailler au minimum en coordonnées cylindriques (en supposant que la fissure fait le tour de la bille ! ce qui ne reflète pas non plus très bien la réalité).

Les planches ci-dessus montrent les résultats obtenus sur des billes de diamètre 12 mm.

Simulation on 1D spherical geometry :

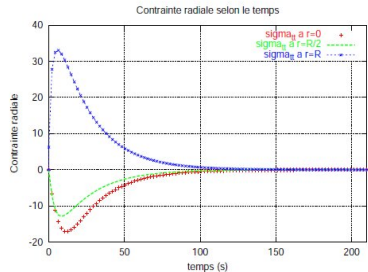
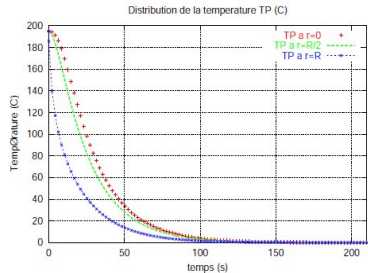
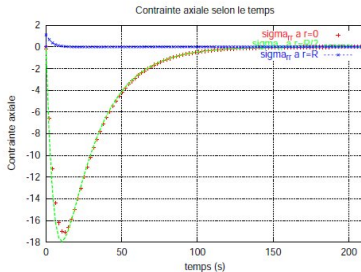
$$R = 0.012$$

$$T_0 = 200.$$

$$T_1 = 20.$$

Reset

Go



[INTRODUCTION](#)[RHEOLOGIE](#)[CRITERES](#)[PLASTICITE 3D](#)[ECROUISSAGE](#)[APPROCHE](#)[EXPERIMENTALE](#)[IAE](#)[HOMOGENEISATION](#)[IAE POUTRES](#)[IAE PLAQUES](#)[IAE MECANIQUE](#)[LINEAIRE DE LA](#)[RUPTURE](#)[MINI-PROJETS](#)[ANNALES](#)

Calcul d'un couple de serrage en régime plastique

Dans le cas des structures vissées, l'art du serrage consiste à appliquer suffisamment d'effort pour l'assemblage ne se dévisse pas, mais pas trop pour ne pas générer de rupture. Le processus résulte finalement d'un équilibre entre les propriétés élastoplastiques des composants, et les frottements, le tout arbitré par la géométrie locale des boulons et des pas de vis...



Calcul vis

Calcul d'une passerelle

On veut réaliser une passerelle provisoire pour un décor de théâtre. Le but du mini-projet est de trouver les meilleurs matériaux, en suivant plusieurs critères, au nombre desquels la résistance mécanique, mais également le coût des matériaux et de la mise en place.



Calcul poutre sandwich

Un mécano pour vérifier la théorie des poutres

La théorie permet entre autres d'étudier la déformée des poutres, le risque de flambement, les vibrations. Ce mini-projet offre l'occasion de comparer les résultats numériques avec des expériences simples, qui permettent de juger de la validité des hypothèses avancées, pour plusieurs géométries et plusieurs matériaux.



Calcul d'une aile d'avion

L'aile d'un avion est une poutre très complexe, qui subit une quantité de chargements différents. Ce mini-projet offre l'occasion de mener une enquête afin de déterminer les principaux paramètres géométriques d'une aile d'avion, puis de mener une étude libre dans laquelle on va chercher à justifier les capacités étonnantes de l'aile (pratiquement 7 m de fleche en bout d'aile sans endommagement de la structure !).



Etude de plaques composites

La superposition d'un grand nombre de plis élémentaires constitués de nappes de fibres unidirectionnelles noyées

1.2 Géométrie du boulon



Avant déformation



Après déformation

Fig 2 : Photo d'une vis avant et après essai → [Télécharger](#)

En utilisant les planches de la figure ci-dessus, qui montrent une vis avant et après essai :

- déterminer les différentes caractéristiques géométriques de la vis avant essai ;
- en déduire les valeurs que vous choisirez pour les différents rayons R_s et R_b définis précédemment ;
- mesurer le pas de la vis, avant et après essai ; en déduire la valeur de la déformation plastique subie par la vis pendant l'essai ;
- déterminer la forme du pas de vis (angle au sommet notamment) ; en déduire, par un calcul approché prenant en compte la section du boulon et la surface des filets susceptible d'être cisailée en cas de chargement excessif, le nombre de filets qui peuvent entrer en plasticité. Le nombre trouvé est faible : il est bien connu des spécialistes que seuls les tous premiers filets d'un filetage «travaillent».

1.3 Première analyse des résultats mécaniques

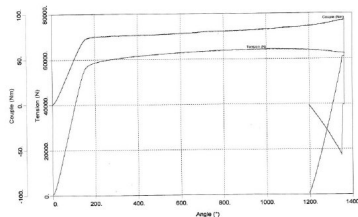
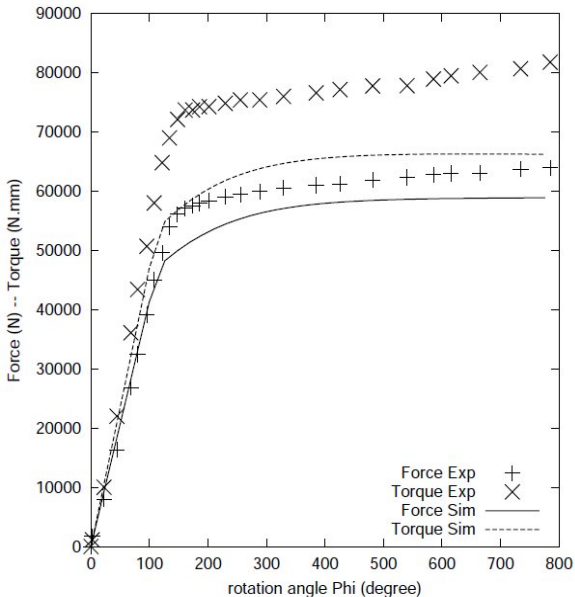


Fig 3 : Evolution de la force et du couple en fonction de l'angle de rotation
→ [Télécharger les valeurs numériques](#)

La figure 3 montre les courbes de force et de couple obtenues à partir de la mise en contact. On observe que les deux courbes présentent d'abord une portion linéaire, qui correspond au comportement élastique du matériau, puis une partie non linéaire. Les deux courbes tendent à adopter un comportement asymptotique, ce qui indique que la charge limite est atteinte. L'essai correspondant a été mené jusqu'à rupture, ce qui n'est évidemment pas le cas du boulon présenté sur les photos. Ce dernier a été arrêté juste avant rupture, au moment où la perte de résistance devenait apparente.

Pour la suite, on utilisera les résultats du fichier offert au téléchargement, dans lequel on a effectué une légère correction de zéro, pour prendre en compte la mise en place du système. On notera Φ l'angle de rotation de la tête de l'éprouvette, qui figure en abscisse de la courbe de la figure 1.3 ; il ne faut bien sûr pas le confondre avec la *torsion* du boulon provoquée par le couple C , que l'on caractérisera par un angle β .



D_s	10.
L	95.
h	1.5
D_t	12.
D_h	18.
μ_t	0.15
μ_h	0.15
R_M	250000.
E	200000.
ν	0.3
σ_y	680.
σ_u	850.
b	200.
ϕ	720
<i>Control</i>	1

Etapes futures

Traduction en anglais

- Etudiants étrangers, augmentation du public potentiel
- Délais : moyen à long terme

6 nouveaux miniprojets en cours de réalisation

- Interdisciplinaires :
 - Mécanique et matériau (ex : vieillissement des aciers et des aluminiums)
 - Séchage du bois
 - Aspects coûts
 - Matériaux du vivant
- délais : 3 à 6 semaines / projet (modélisation + expériences)