

# Prédiction de l'écoulement d'une mousse autour d'un obstacle

I. Cheddadi

avec

P. Saramito, F. Graner, B. Dollet, C. Raufaste

Laboratoire Jean Kuntzmann, Grenoble

GDR Mousse, octobre 2009, Paris

# Introduction : comment décrire la mousse ?

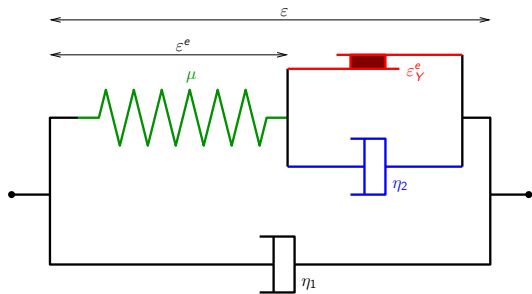
- la mousse combine
  - ▶ **élasticité** : déformation réversible
  - ▶ **plasticité** : déformation irréversible
  - ▶ **viscosité** : écoulement fluide
- structure **discrète** mais comportement **continu**
- modélisation : **milieu continu visco-élasto-plastique**
- testé avec succès sur cisaillement entre deux cylindres  
[*IC et al EPJE 08*]
- test plus contraignant : écoulement autour d'un obstacle

# Plan de l'exposé

- Modélisation milieux continus
- Présentation des expériences
- Ajustement de l'expérience 1
- Prédiction et test de l'expérience 2
- Conclusion & perspectives

# Modèle continu visco-élasto-plastique

[Saramito JNNFM 07]



$\mu$  : module élastique

$\varepsilon_Y^e$  : déformation seuil

$\eta_2$  : viscosité plastique

$\lambda = \eta_2/\mu$  : temps caractéristique

$\eta_1$  : viscosité bulle/bulle

$d(\text{élasticité})/dt$  +  $\text{taux de plasticité}$  =  $\text{taux de déformation}$

$$\frac{D\varepsilon^e}{Dt} + \frac{1}{\lambda} \begin{cases} 0 & \text{si } |\varepsilon_d^e| < \varepsilon_Y^e \\ \frac{|\varepsilon_d^e| - \varepsilon_Y^e}{|\varepsilon_d^e|} \varepsilon^e & \text{sinon} \end{cases} = 0.5(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)$$

# Modèle continu visco-élasto-plastique

Pour fermer le système d'équations :

**contrainte totale** :  $\sigma_{tot} = -pI + \eta_1(\nabla\mathbf{v} + \nabla\mathbf{v}^T) + 2\mu\epsilon^e$

**conservation de la quantité de mouvement** :  $-\text{div } \sigma_{tot} = -\beta\mathbf{v}$

$\beta$  : friction des plaques

**conservation de la masse** :  $\text{div } \mathbf{v} = 0$

- modèle **continu**, pas de bulles
- formalisme **3D**
- **2nd principe** en petites déformations
- **éléments finis**  $\implies$  grande variété de géométries

Autres modèles continus :

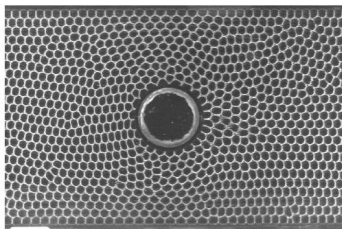
*Janiaud et al. PRL 2006* : **1D**, friction des plaques

*Katgert et al. PRL 2008* : **1D**, HB, friction des plaques en loi de puissance

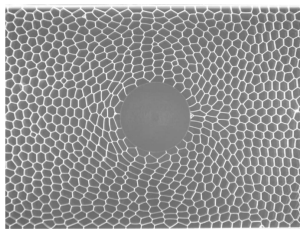
*Marmottant Graner EPJE 2007* : **3D**, plasticité progressive

*Benito et al. EPJE 2008* : **3D**, élasticité non linéaire

# Présentation des expériences



EXP1



EXP2

- EXP1 (B. Dollet) : mousse **humide**,  $\phi = 7\%$ ,  $V = 0.88$  cm/s.
- EXP2 (C. Raufaste) : mousse **sèche**,  $\phi = 1.2\%$ ,  $V = 0.6$  cm/s.
- $\Delta\phi \Rightarrow \Delta\varepsilon_Y^e$
- caractérisation des paramètres sur EXP1
- EXP2 prédite **sans** paramètres ajustables

# Choix des paramètres

Calculs **systematiques** : effet séparé de chaque paramètre

- $\beta = 0$  : *friction des plaques négligée*
- $\eta_1 \ll \eta_2$  : *viscosité bulle/bulle négligeable*
- $\lambda = \eta_2/\mu$  plutôt que  $\eta_2$  ou  $\mu$   
⇒ on **fixe**  $\mu = 12.6 \text{ N.m}^{-2}$  d'après l'expérience 1

caractérisation de  $\varepsilon_{\gamma}^e$  et  $\eta_2$  avec  $\mathbf{v}$ ,  $\nabla\mathbf{v}$ ,  $\varepsilon^e$ ,  $\dot{\varepsilon}^p$ .

- EXP1 :
  - ▶ **déformation seuil**  $\varepsilon_{\gamma}^e = 0.15$ ,
  - ▶ viscosité "plastique"  $\eta_2 = 2.9 \text{ Pa.s}$ ,

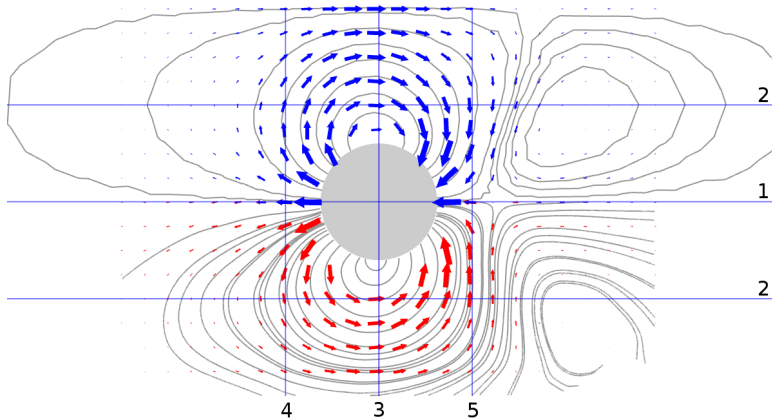
Temps caractéristique  $\lambda = \eta_2/\mu \approx 0.2 \text{ s}$ .

- EXP2 : mêmes paramètres sauf la **déformation seuil**  $\varepsilon_{\gamma}^e = 0.3$

# EXP1 : vitesse dans le référentiel de la mousse

haut : modèle, **continu**, pas de bulles

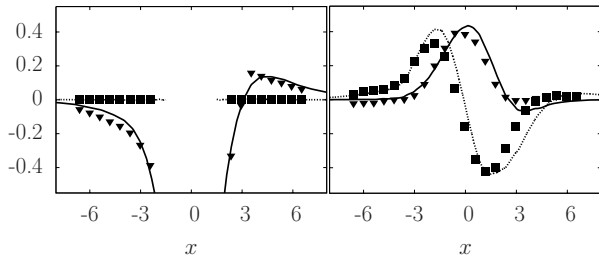
bas : **expérience**, **discret**, moyennes



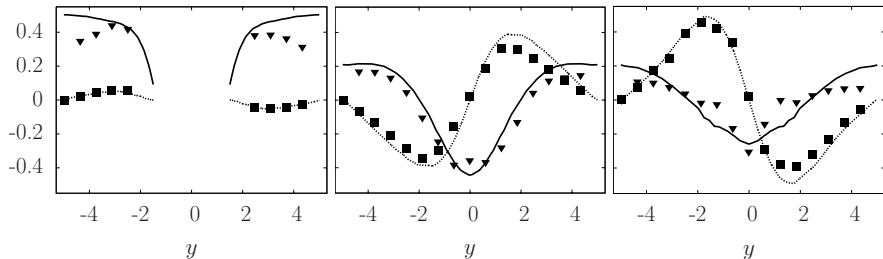
**asymétrie** amont/aval ; **points d'arrêt** derrière l'obstacle



# EXP1 : vitesse dans le référentiel de la mousse (coupes)



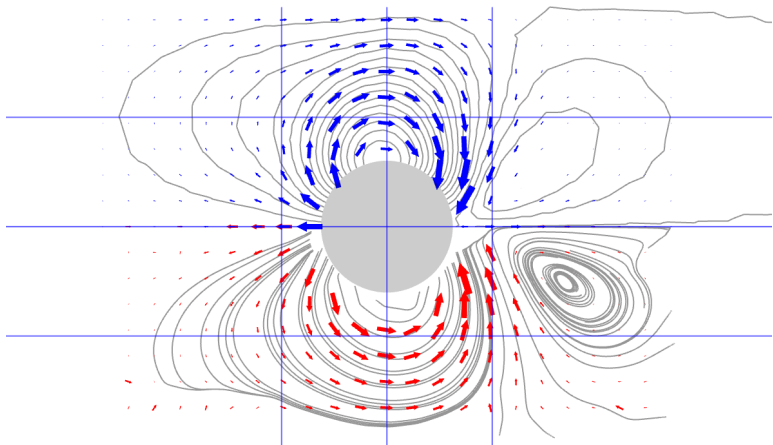
coupes suivant  
les axes 1 à 5 :  
traits **continus**,  $\blacktriangledown$  :  $v_x$   
traits **discontinus**,  $\blacksquare$  :  $v_y$



# EXP2 : vitesse dans le référentiel de la mousse

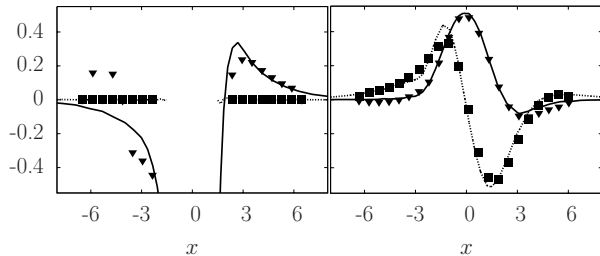
haut : modèle

bas : expérience

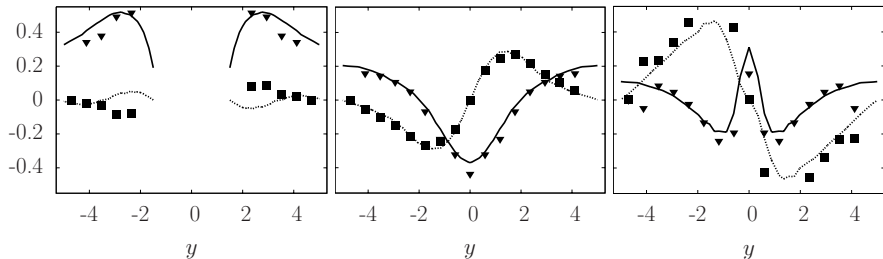


Le point d'arrêt est plus proche de l'obstacle.

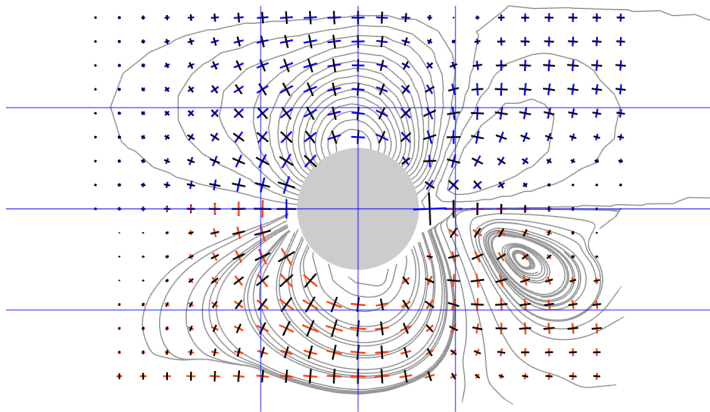
# EXP2 : vitesse dans le référentiel de la mousse (coupes)



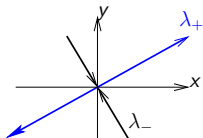
coupes suivant  
les axes 1 à 5 :  
traits **continus**,  $\blacktriangledown$  :  $v_x$   
traits **discontinus**,  $\blacksquare$  :  $v_y$



# EXP2 : tenseur de déformation élastique

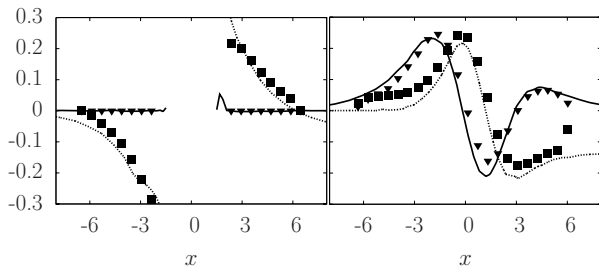


haut : modèle  
bas : expérience

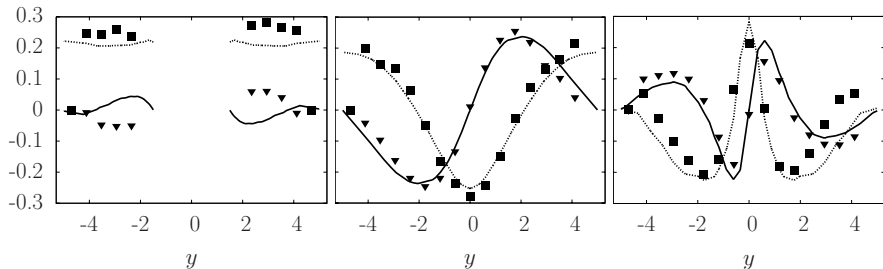


axe **coloré** : plus grand **étirement**  
axe **noir** : plus grande **contraction**

# EXP2 : tenseur de déformation élastique (coupes)



coupes suivant  
les axes 1 à 5 :  
traits **continus**,  $\blacktriangledown$  :  $\varepsilon_{xy}^e$   
traits **discontinus**,  $\blacksquare$  :  
 $0.5(\varepsilon_{xx}^e - \varepsilon_{yy}^e)$



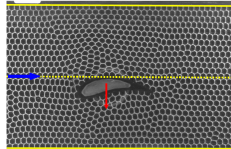
# Conclusion

- Comparaison modèle-expérience
  - ▶ accord qualitatif **et** quantitatif
  - ▶ modèle **prédictif**
  - ▶ valeurs **réalistes** des paramètres
- Modélisation
  - ▶ paramètres **pertinents** :  $\varepsilon_Y^e$ ,  $\mu$ ,  $\eta_2$
  - ▶ ingrédients **simples** mais comportement **complexe**
- Approche
  - ▶ l'écoulement autour d'un obstacle est un **bon test** pour les modèles car il fait apparaître chacune des propriétés VEP
  - ▶ la description **milieux continus** est pertinente

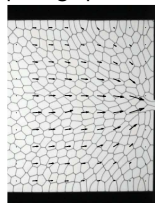
# Perspectives

- Avec le modèle actuel :
  - ▶ **portance et traînée** sur l'obstacle
  - ▶ **autres géométries** 2D et 3D
  - ▶ **autres fluides** (émulsions, colloïdes, ...)
- Améliorations du modèle :
  - ▶ friction externe en **loi de puissance** pour écoulements à **haute vitesse**
  - ▶ **Plasticité progressive**  
[Marmottant Graner EPJE 2008]
  - ▶ Dissipation plastique de type **Herschell-Bulkley**  
[Saramito JNNFM 2009]

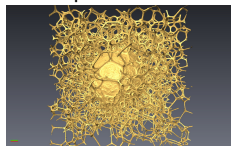
aile d'avion



passage par un trou

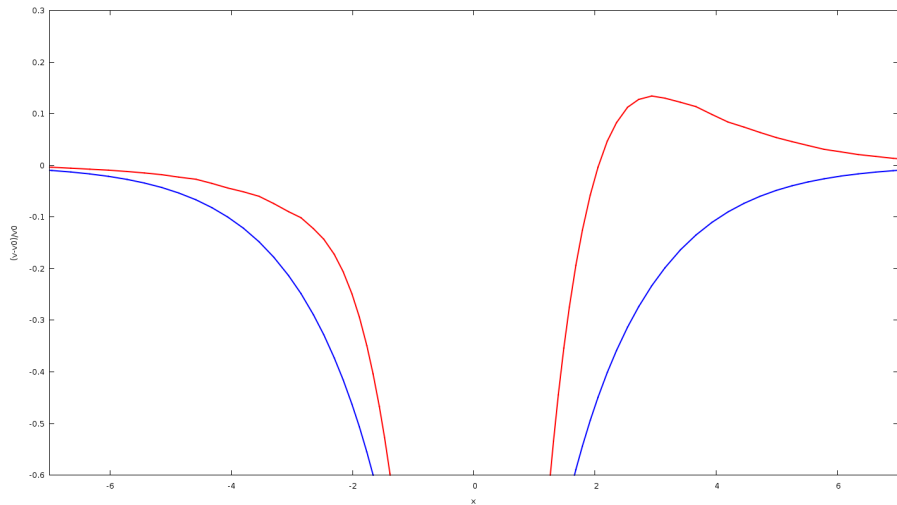


écoulement 3D autour d'une sphère



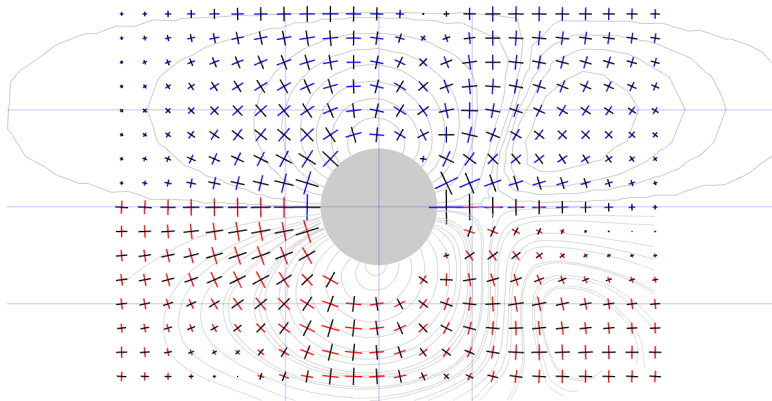
# Le sursaut est VEP !

vitesse le long de l'axe  $y = 0$  VEP et VE.





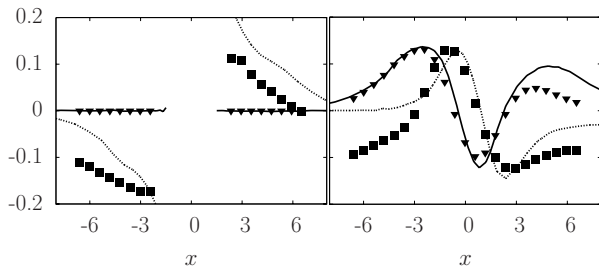
# EXP1 : tenseur de déformation élastique



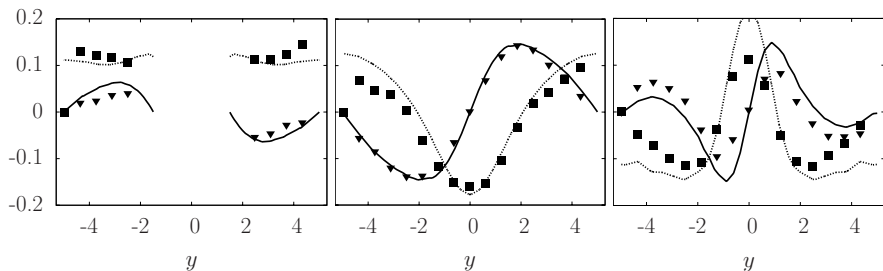
haut : modèle

bas : expérience

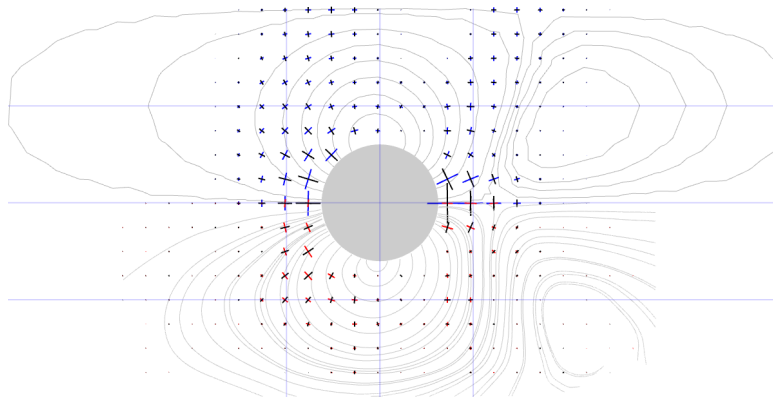
# EXP1 : tenseur de déformation élastique (coupes)



coupes suivant  
les axes 1 à 5 :  
traits **continus**,  $\blacktriangledown$  :  $\varepsilon_{xy}^e$   
traits **discontinus**,  $\blacksquare$  :  
 $0.5(\varepsilon_{xx}^e - \varepsilon_{yy}^e)$



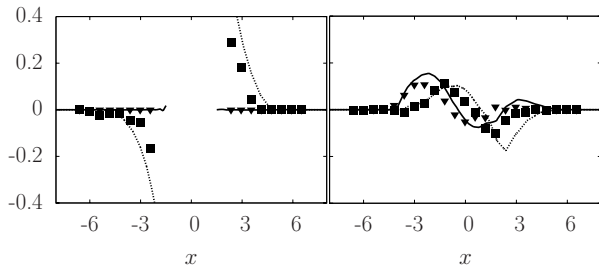
# EXP1 : taux de déformation plastique



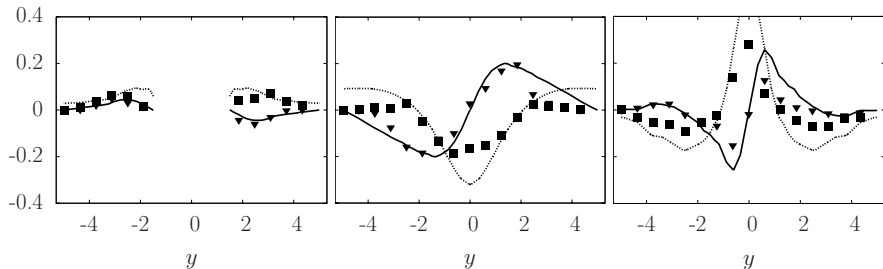
haut : modèle

bas : expérience

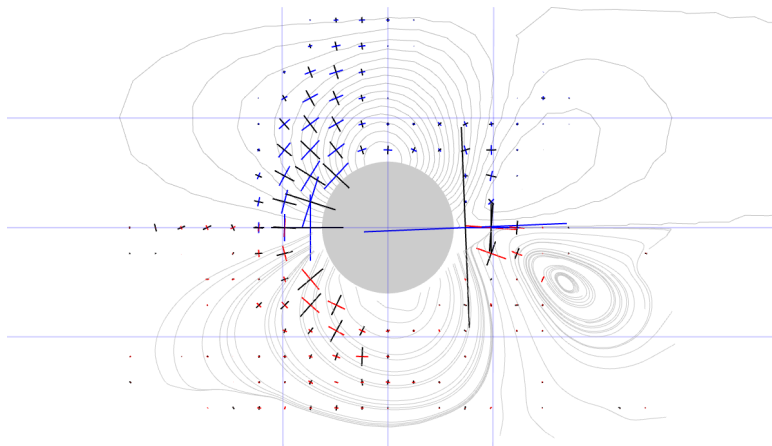
# EXP1 : taux de déformation plastique (coupes)



coupes suivant  
les axes 1 à 5 :  
traits **continus**,  $\blacktriangledown$  :  $\dot{\epsilon}_{xy}^p$   
traits **discontinus**,  $\blacksquare$  :  
 $0.5(\dot{\epsilon}_{xx}^p - \dot{\epsilon}_{yy}^p)$



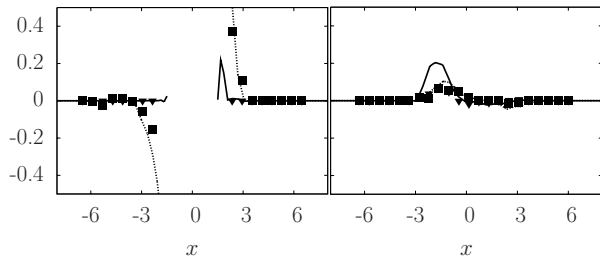
## EXP2 : taux de déformation plastique



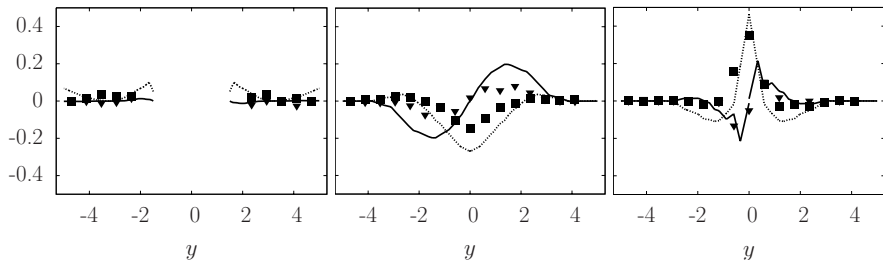
haut : modèle

bas : expérience

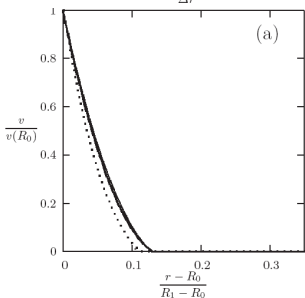
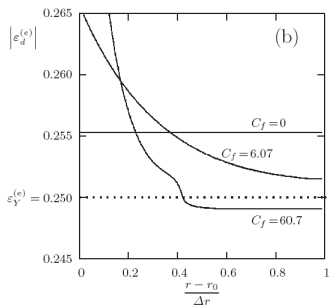
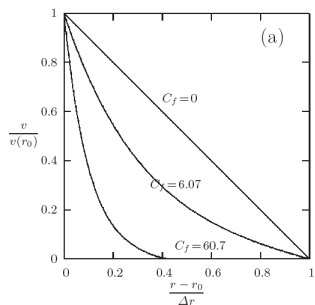
# EXP2 : taux de déformation plastique (coupes)



coupes suivant  
les axes 1 à 5 :  
traits **continus**,  $\blacktriangledown$  :  $\dot{\epsilon}_{xy}^p$   
traits **discontinus**,  $\blacksquare$  :  
 $0.5(\dot{\epsilon}_{xx}^p - \dot{\epsilon}_{yy}^p)$



# Résultat du modèle en écoulement de cisaillement



[IC et al. EPJE 2008]