



# **Comportement d'interface des matériaux granulaires**

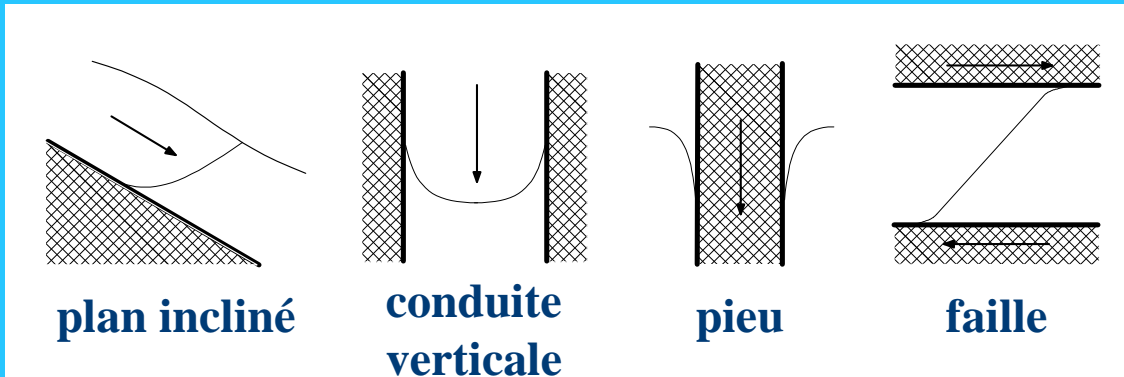
**Georg Koval**  
(post doc IPGS)

**Institut Navier  
(CERMES-LMSGC)**

**Alain Corfdir  
François Chevoir  
Jean-Noël Roux**

**Séminaire IPGS 13/03/2008**

# Interface granulaire



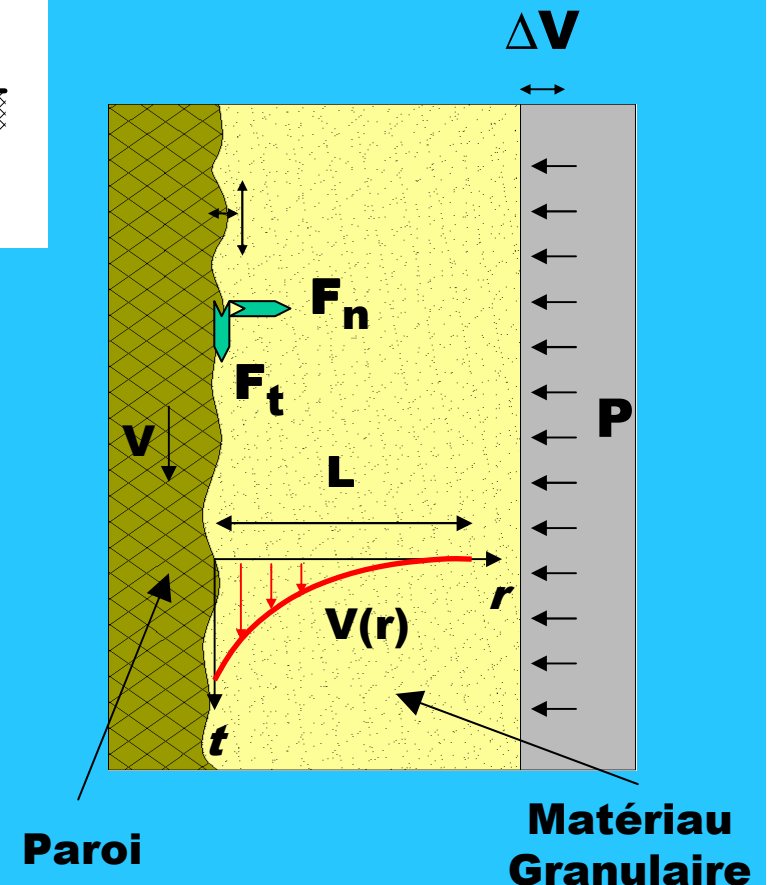
## Questions :

### « Macroscopiques »

- ⇒ Coefficient de Frottement ( $F_t/F_n$ )
- ⇒ Variations volumiques  $\Delta V$

### « Mésoscopiques »

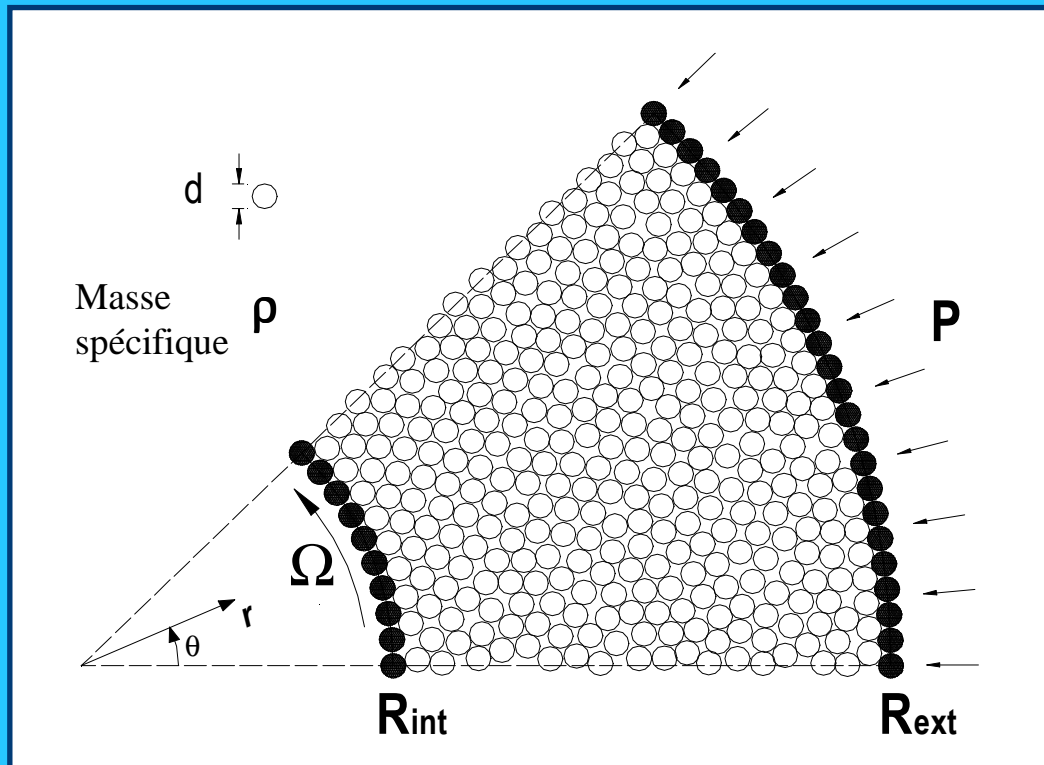
- ⇒ Localisation du cisaillement
- ⇒ Epaisseur de cette couche
- ⇒ Influence de la paroi: géométrie, rugosité
- ⇒ Influence des grains: taille, forme...



# Plan de l'exposé

- 1. Description de la géométrie et des paramètres**
2. Différentes Approches
3. Comportement Macroscopique
4. Comportement Mésoscopique
5. Régimes de déformation
6. Conclusions et perspectives

# Géométrie annulaire



**Géométrie définie par  $R_{int}/d$**

$$R_{ext}/d \rightarrow 2 R_{int}/d$$

$$V_{\theta} = \Omega R_{int}$$

# Distribution des contraintes

## → Contrainte normale

- On vérifie  
(par simulations, cas stationnaire)  $\frac{\sigma_{rr}}{P} \square 1$

## → Contrainte de cisaillement

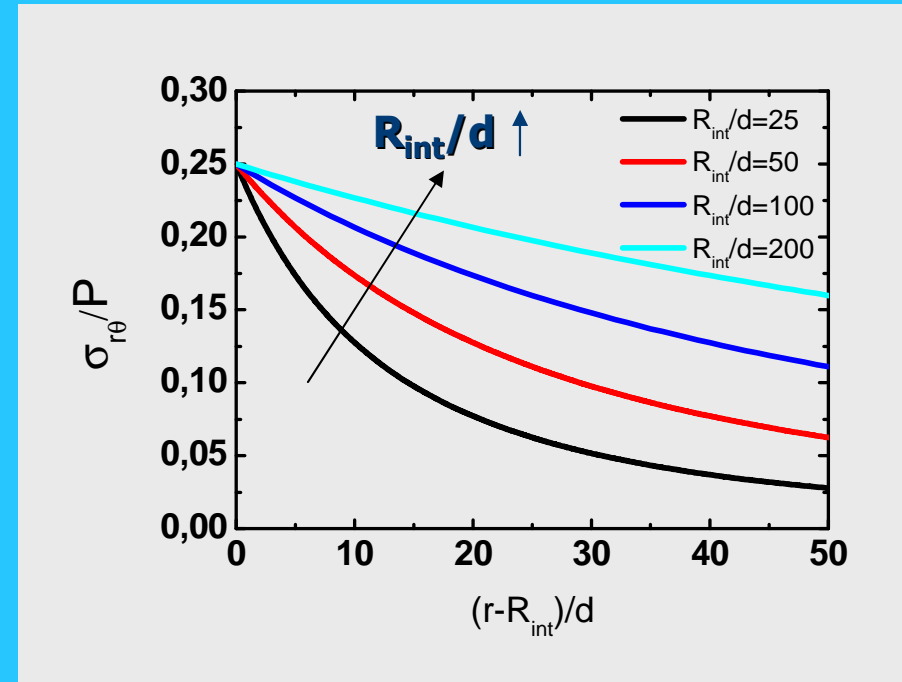
- Eq. de Moment  $\sigma_{r\theta} = \frac{Cst}{r^2}$

### Sur la paroi intérieure

$$\rightarrow \sigma_{r\theta}(R_{int}) = S \quad \sigma_{r\theta} = \frac{S R_{int}^2}{r^2}$$

$R_{int} \uparrow$  le cisaillement devient plus homogène

$R_{int} \rightarrow \infty$   $\sigma_{r\theta}(r) = S$   
(cisaillement plan)

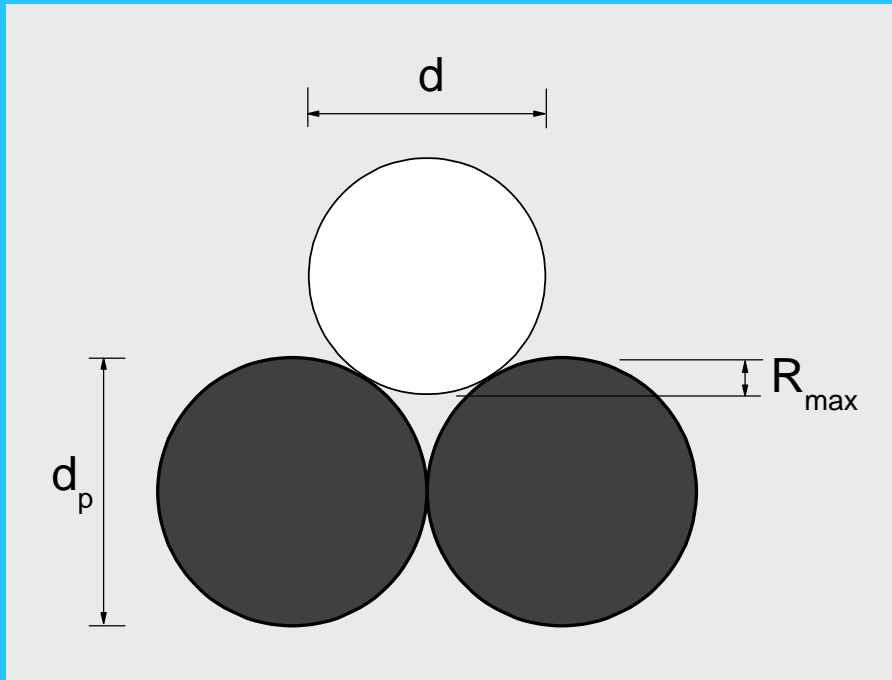


+ rhéologie du matériau :  
**Effets géométriques sur le comportement**

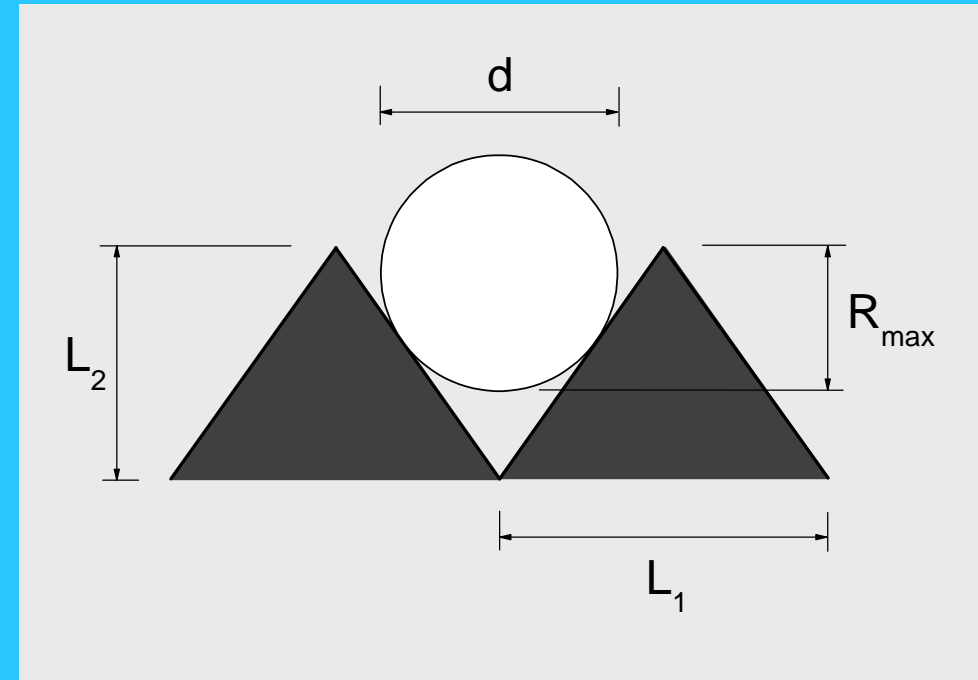
### Frottement effectif

$$\mu^*(r) = \frac{\sigma_{r\theta}(r)}{\sigma_{rr}(r)}$$

# Rugosité normalisée



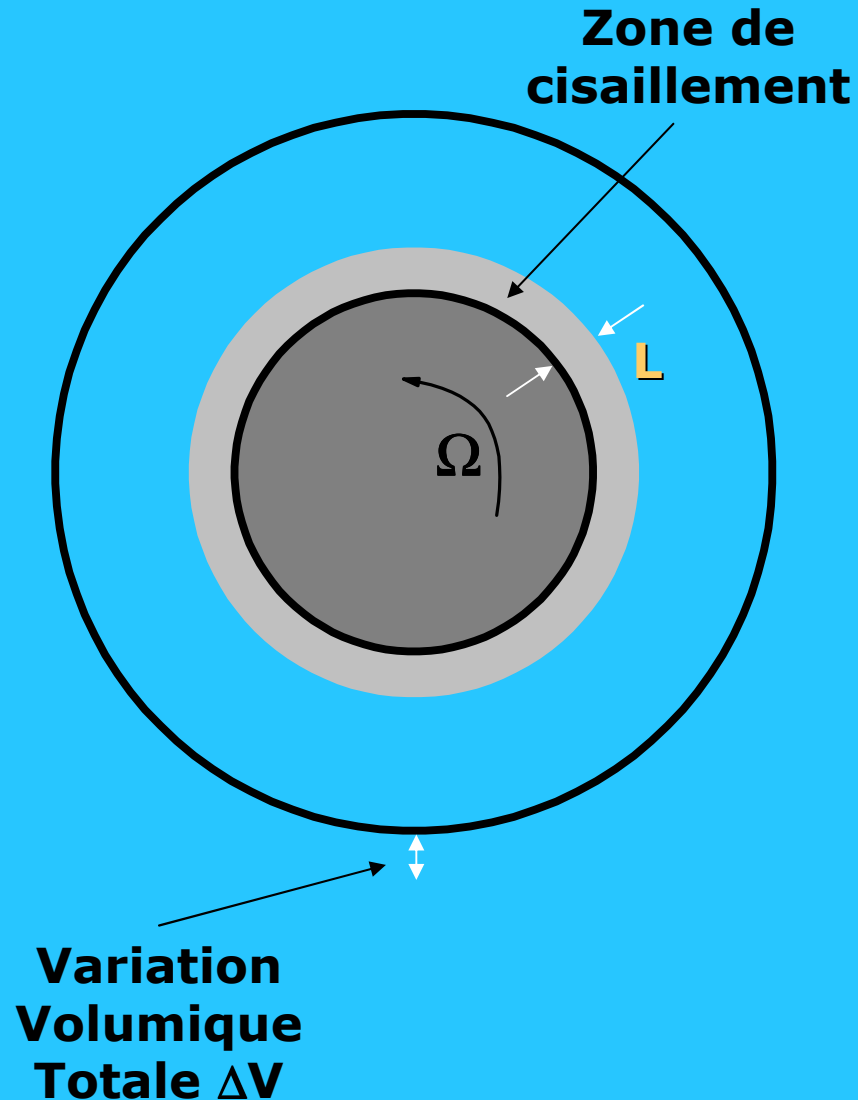
Surface composée de grains



Surface striée

$$R_n = R_{max}/d$$

# Variation volumique normalisée $\Delta V_n$



→ normalisation de  $\Delta V$   
par la surface de la paroi  $A_p$   
et par la taille des particules  $d$

$$\Delta V_n = \frac{\Delta V / d^3}{A_p / d^2} = \frac{\Delta V}{A_p d} = \frac{\Delta L}{d}$$

$$A_p = 2\pi R_{\text{int}} H$$

→ variation de l'épaisseur  
de la zone de cisaillement  $L$   
normalisée par  $d$

# Plan de l'exposé

1. Description de la géométrie et des paramètres
- 2. Différentes Approches**
3. Comportement Macroscopique
4. Comportement Mésoscopique
5. Régimes de déformation
6. Conclusions et perspectives

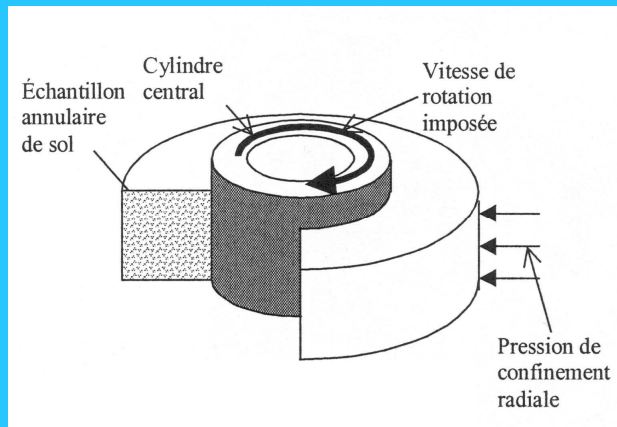


# Différentes approches

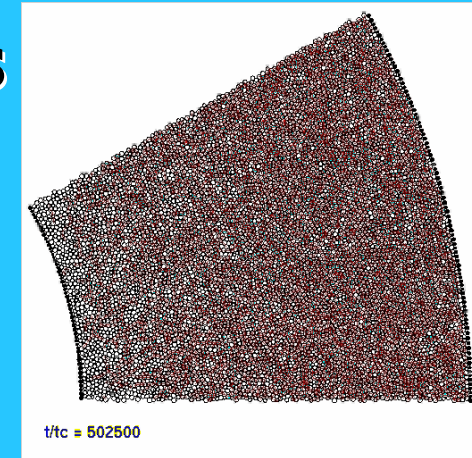
## Géométrie :

### ► Cellule de cisaillement Annulaire

→ distance cisailée :  
pas d'effet de bord



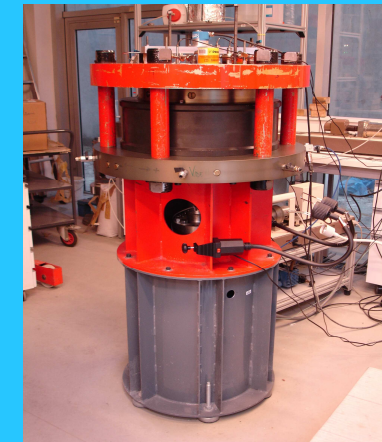
Simulations  
discrètes 2D



Etude expérimentale

→ ACSA

(*appareil de cisaillement  
simple annulaire*)



### ► Étude des régimes transitoire et stationnaire

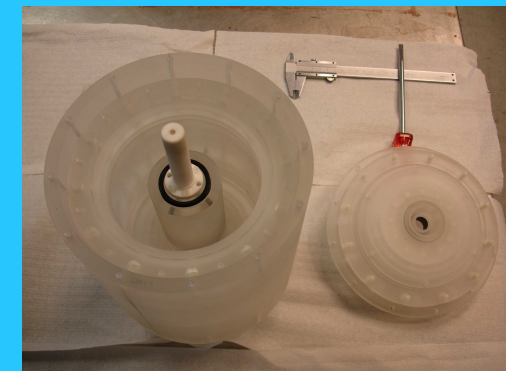
### ► Contrôle de la pression de confinement

### ► Matériaux modèles

→ forme et caractéristiques bien définies

Etude expérimentale

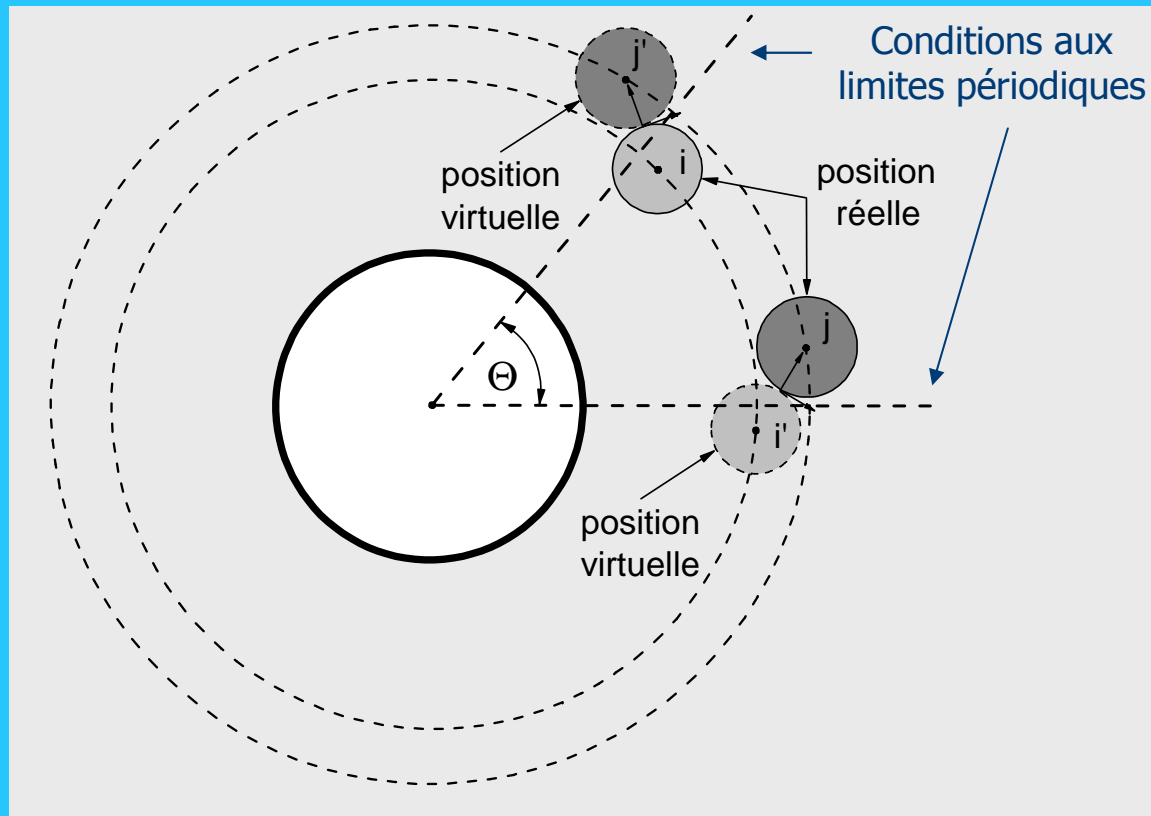
→ Mini-ACSA dans l'IRM



# Simulations Numériques

→ Dynamique moléculaire 2D

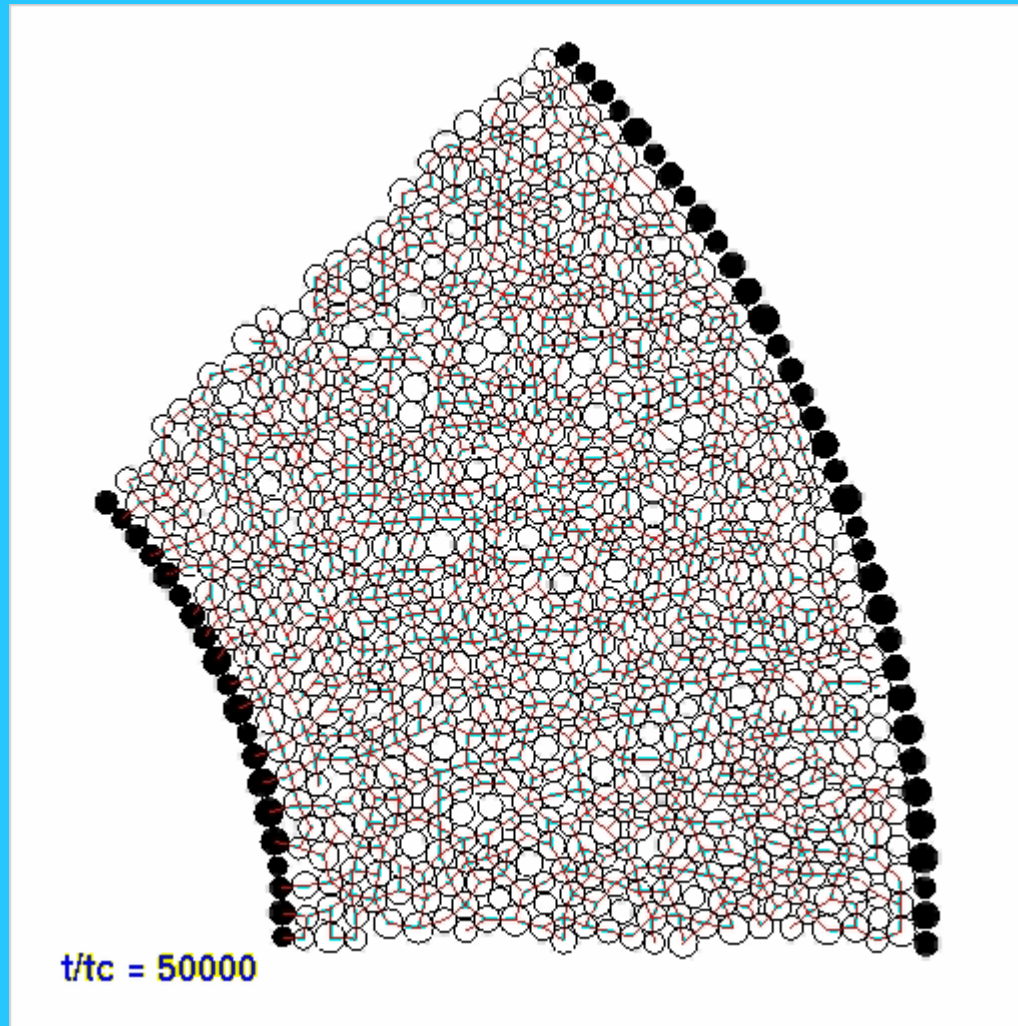
[da Cruz04, Lätzel03]



→ Conditions aux limites périodiques

**Longueur** →  $d$   
**Masse** →  $\rho$   
**Temps** →  $d(\rho/P)^{1/2}$   
 $\sigma$  →  $P$

# Visualisation - $V_{\theta}=0,025$

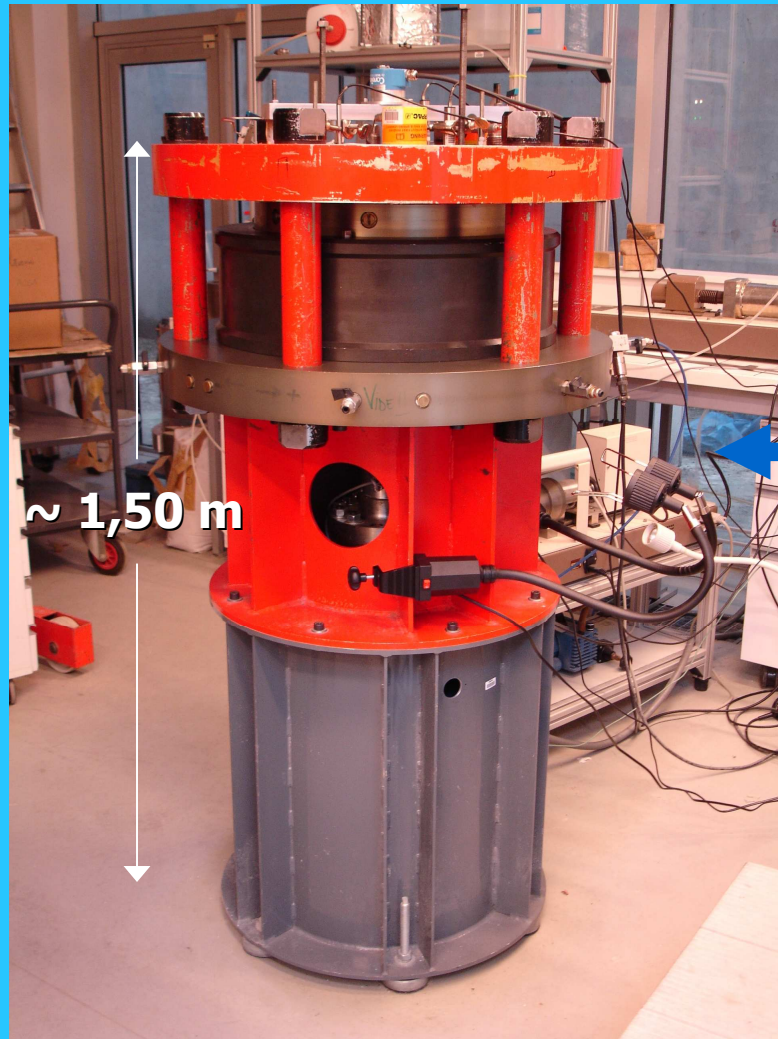


$R_{int}-R_{ext}$  25-50



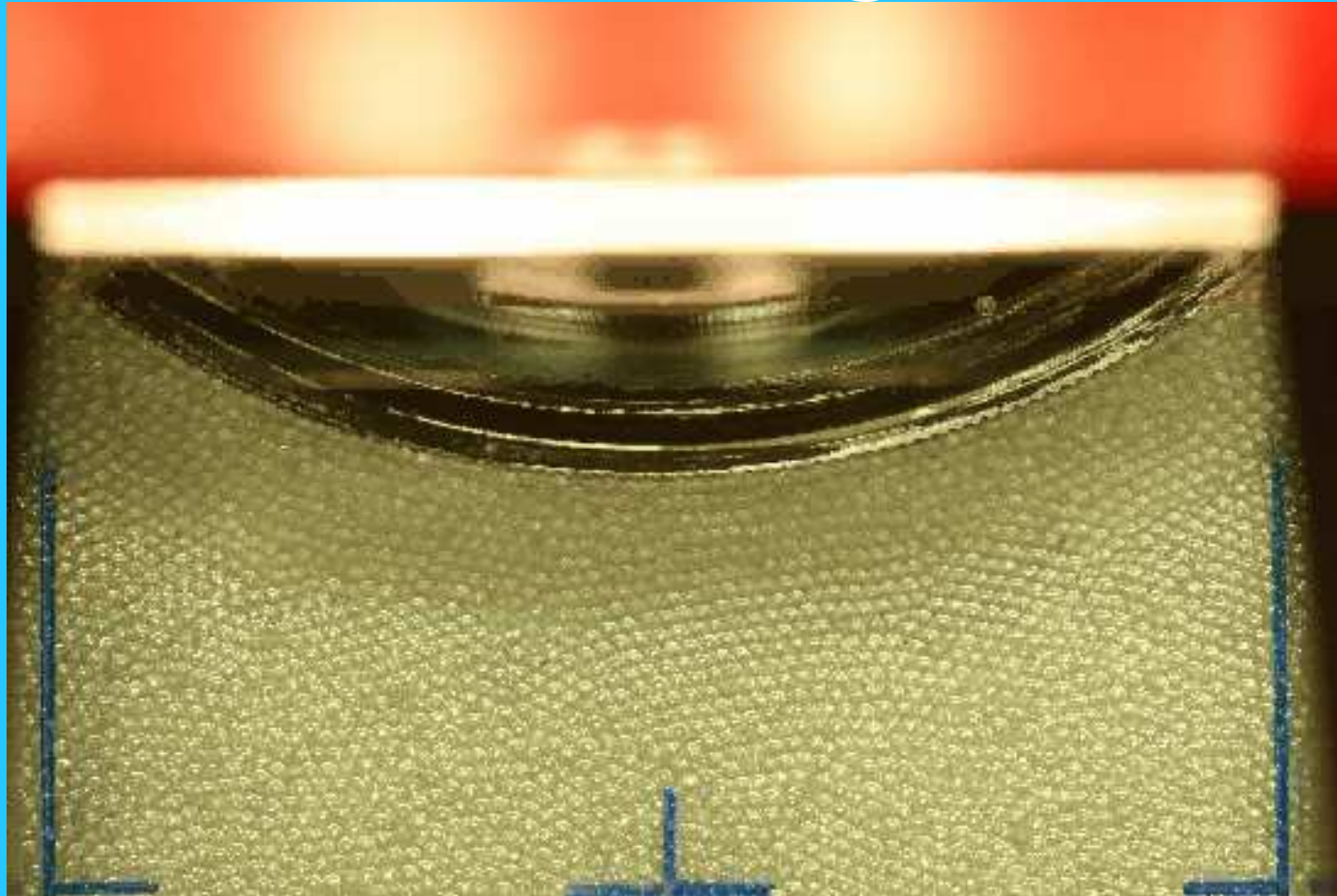
# ACSA

[Lerat96, Chambon03, Dumitrescu05]



4,5 cm

## ACSA - Paroi rugueuse



**$P = 100 \text{ kPa}$**

**$V_{\theta} = 2 \text{ mm/min}$**

**$D = 0 - 5 \text{ cm}$**

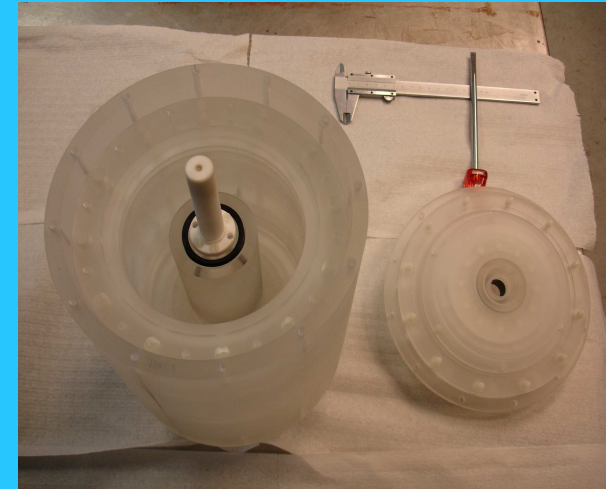
**$d = 1,8 \text{ mm (billes de verre)}$**



# Mini-ACSA – IRM



Pascal Moucheron



- ⇒ **Appareil analogue à l'ACSA mais inséré dans l'IRM**
- ⇒ **Échelles et matériaux différents ( $R_{int} = 3$  cm - graines)**
- ⇒ **Pression de confinement d'ordre de 10 kPa**
- ⇒ **Vitesse de cisaillement: 0,1 à 1 tr/min**

# Paramètres géométriques

| Approches          | $R_{int}/d$                       | $R_n$            |
|--------------------|-----------------------------------|------------------|
| <b>Simulations</b> | 25 à 200                          | $10^{-3}$ à 1    |
| <b>ACSA</b>        | 12,5 à 400<br>( $R_{int}=100$ mm) | $10^{-3}$ à 2    |
| <b>Mini-ACSA</b>   | 20<br>( $R_{int}=30$ mm)          | $10^{-3}$ à 0,15 |

# Conditions aux bords

## Simulations

Longueur  $\rightarrow d$   
Masse  $\rightarrow \rho$   
Temps  $\rightarrow d(\rho/P)^{1/2}$   
 $\sigma \rightarrow P$

$\longrightarrow$  **adimensionnée**

$$V_{\theta \min} = 0,001$$
$$V_{\theta \max} = 2,5$$

**ACSA**

$$V_{\theta} = 3,33 \cdot 10^{-2} \text{ mm/s}$$
$$P = 100 \text{ kPa}$$

**adimensionnée**

$$V_{\theta} \sim 5 \cdot 10^{-6}$$

**Mini-ACSA**

$$V_{\theta} = 3,14 \text{ mm/s}$$
$$P = 10 \text{ kPa}$$

$$V_{\theta} \sim 0,001$$



# Plan de l'exposé

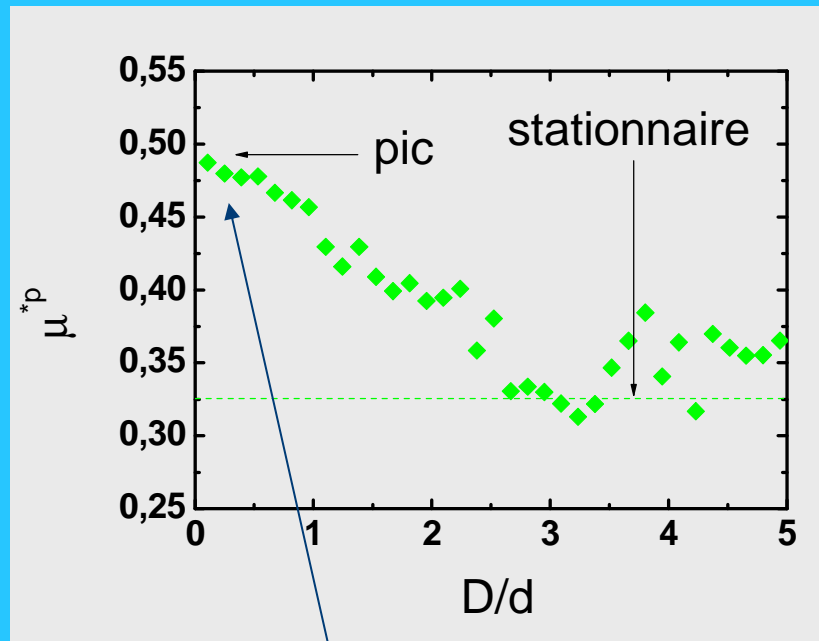
1. Description de la géométrie et des paramètres
2. Différentes Approches
- 3. Comportement Macroscopique**
4. Comportement Mésoscopique
5. Régimes de déformation
6. Conclusions et perspectives

# Évolution de $\mu^{*p}$ durant le transitoire

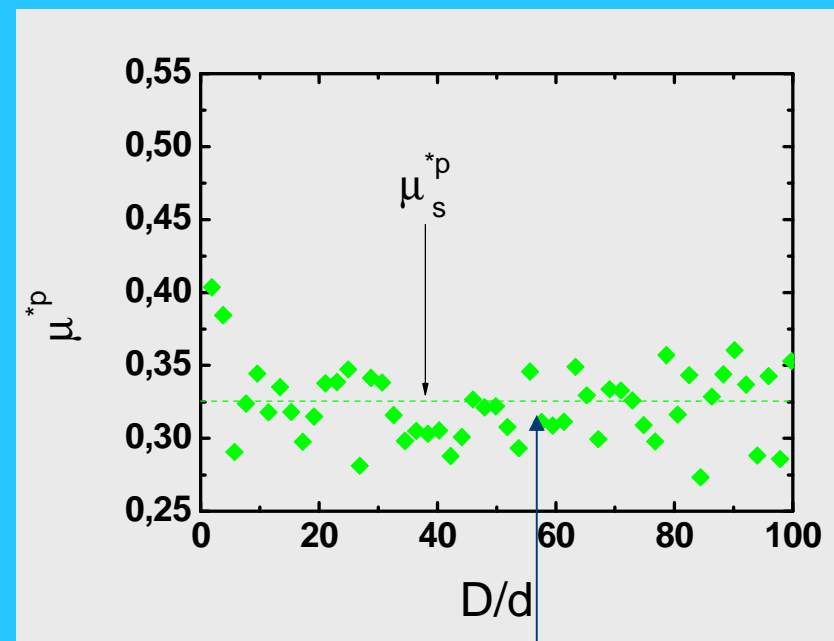
**Frottement effectif  
à la paroi interne**

$$\mu^{*p} = S / N$$

**Simulations numériques**

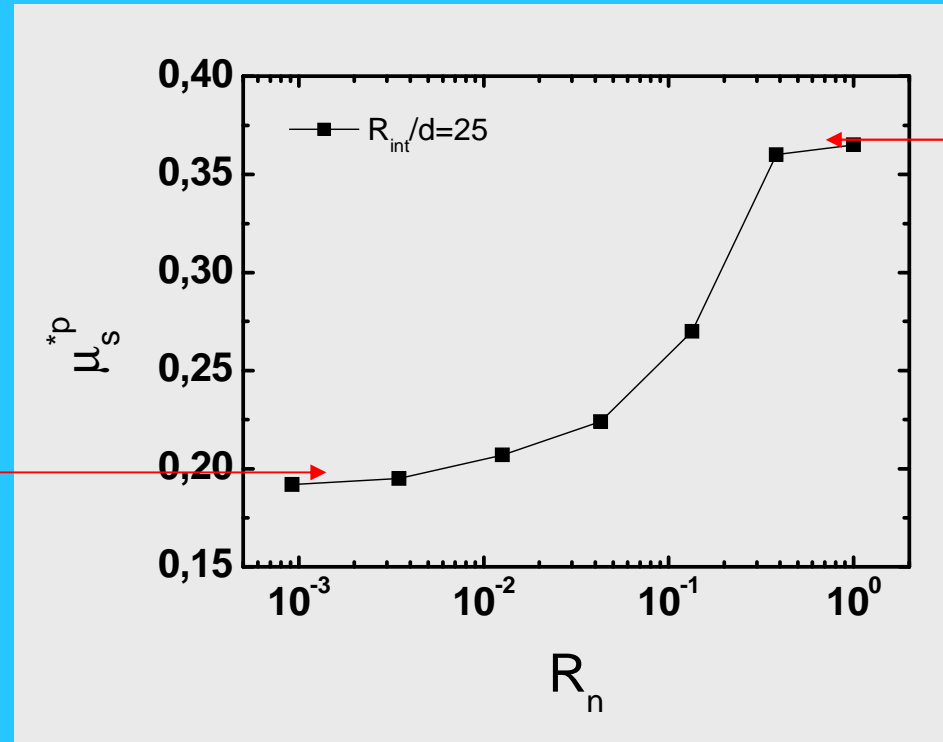


État initial dense  
montée très raide



Comportement stationnaire

# Effet de la rugosité



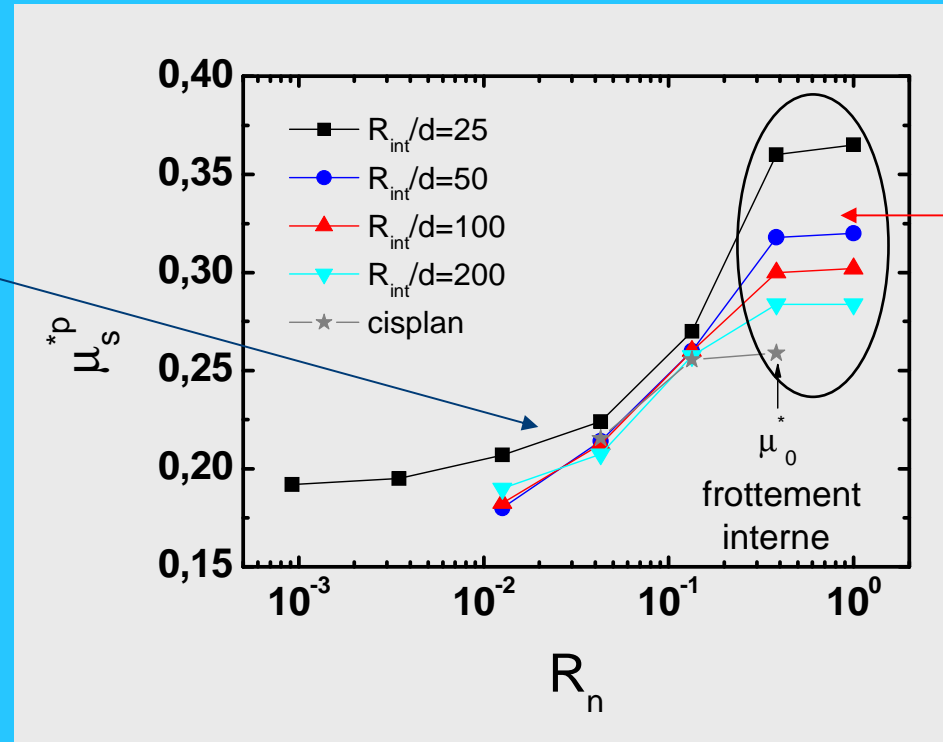
Limite inférieure  
Paroi lisse

Limite supérieure  
Limite de  
transmission des  
efforts par  
l'interface

Simulations numériques

# Effet additionnel de la géométrie ( $R_{int}/d$ )

Effet seulement pour  $R_{int}/d < 50$

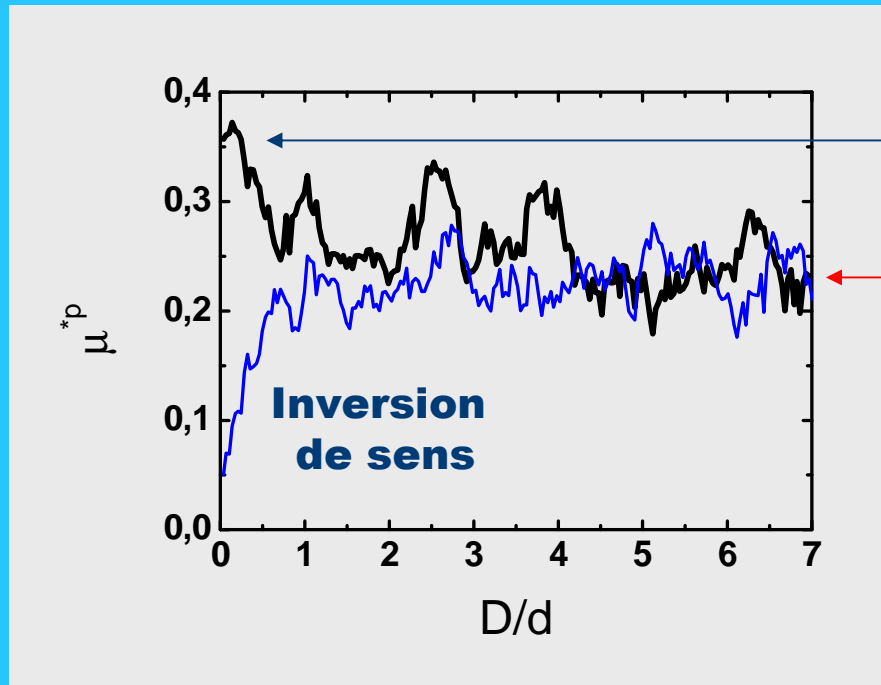


Effet notable pour  $R_n$  élevée

**Effet géométrique :  
hétérogénéité des contraintes + effet de paroi**

**Simulations numériques**

# Effets de l'état initial et de la sollicitation

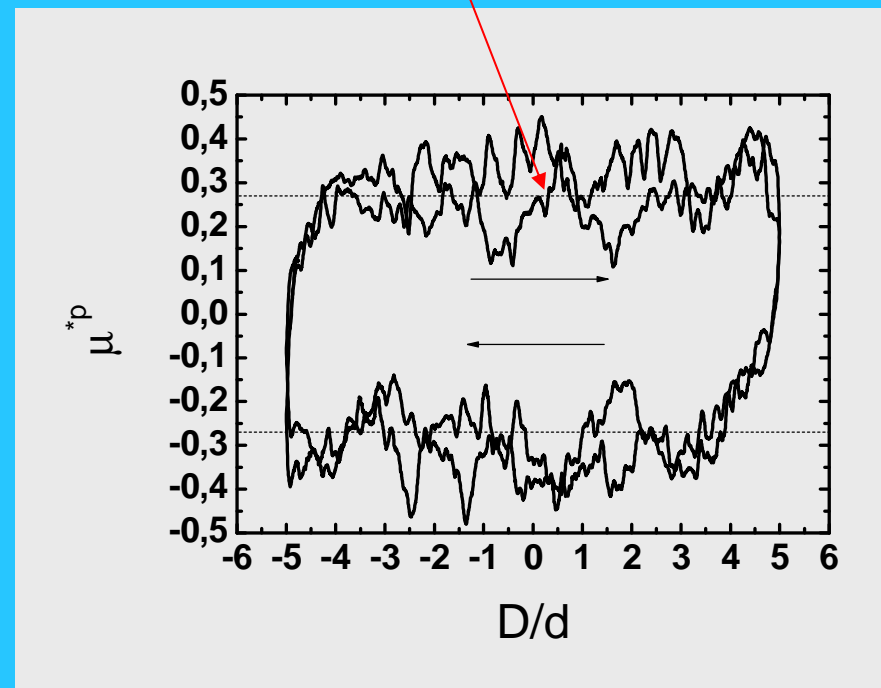


Etats initiaux :  
dense et après une inversion de sens

État initial  
dense

Convergence vers  
un même état

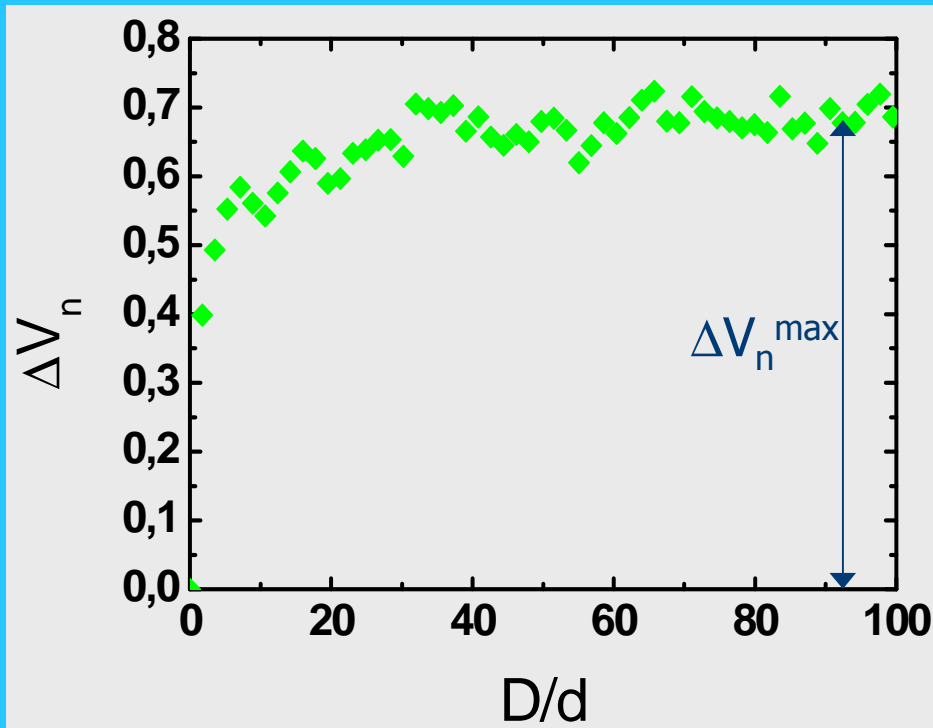
État critique



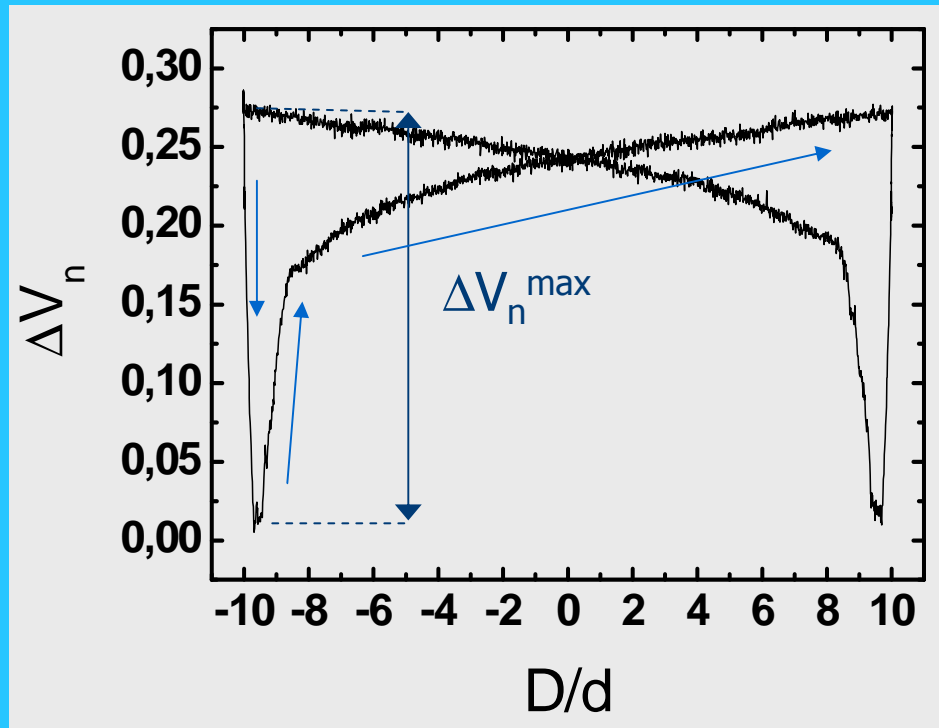
Cisaillement cyclique

Simulations numériques

# Variation volumique normalisée $\Delta V_n$

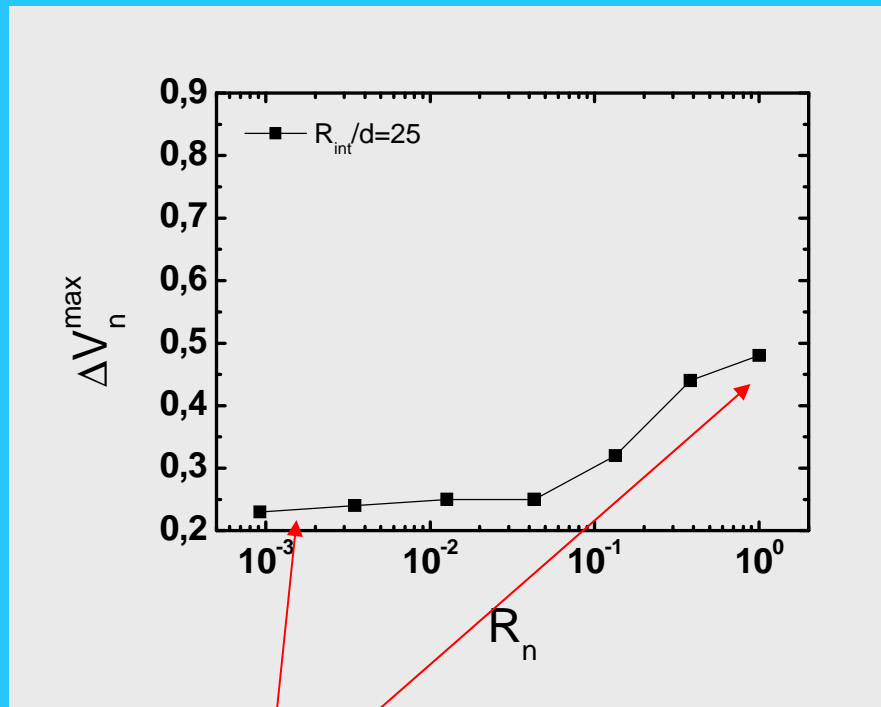


Simulations  
État initial dense  
⇒ Forte dilatation



ACSA  
Cisaillement cyclique  
⇒ Compaction lors des inversions de sens  
suivi par comportement dilatant

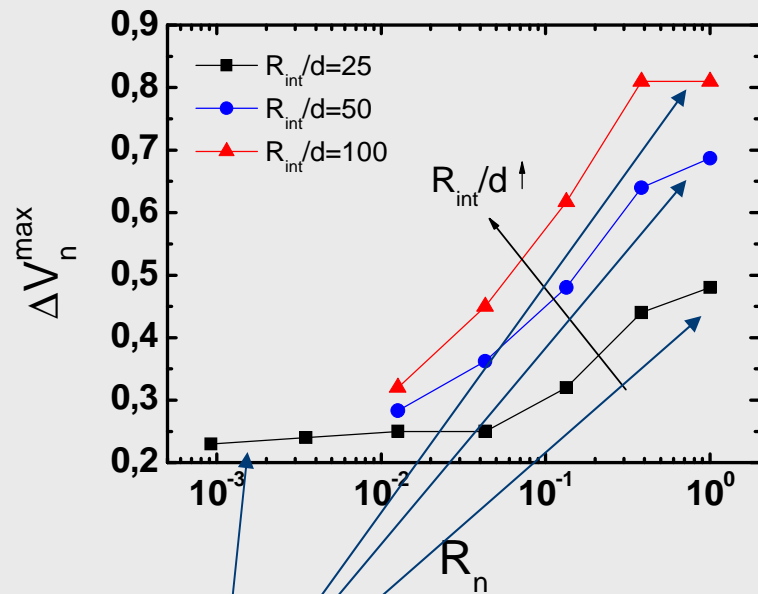
# Effet de la rugosité sur $\Delta V_n$



**simulations**

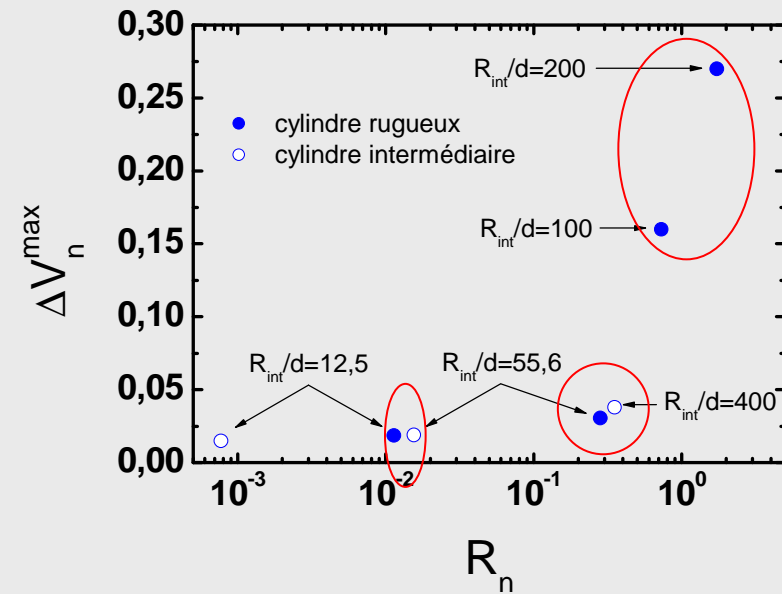
Limite inférieure / supérieure

# Effets additionnel de la géométrie ( $R_{int}/d$ ) sur $\Delta V_n$



**simulations**

Limite inférieure / supérieure



**ACSA**

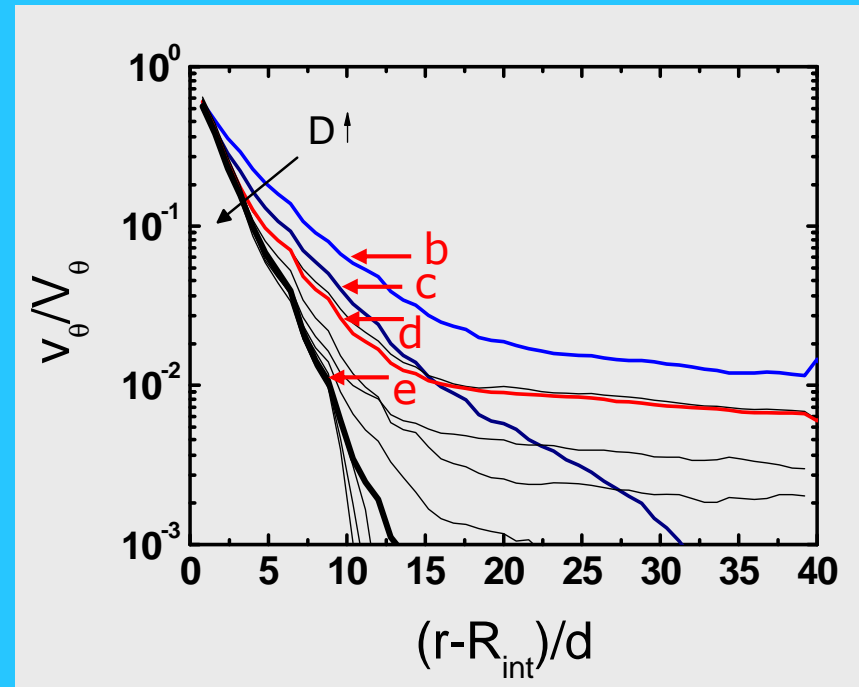
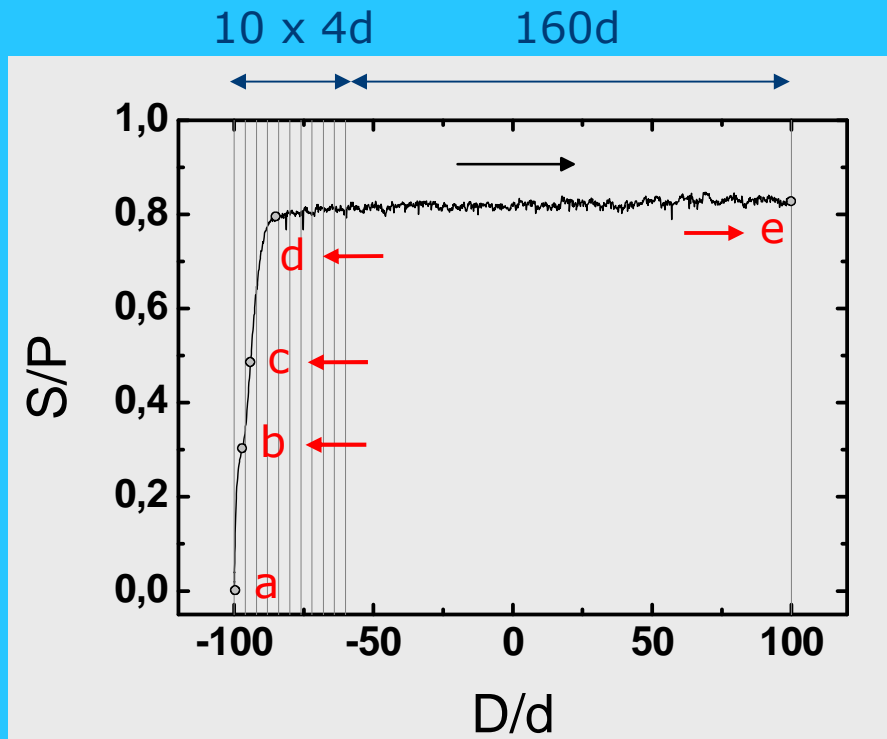
Effet de la géométrie plus évident pour  $R_n$  plus élevé



# Plan de l'exposé

1. Description de la géométrie et des paramètres
2. Différentes Approches
3. Comportement Macroscopique
- 4. Comportement Mésoscopique**
5. Régimes de déformation
6. Conclusions et perspectives

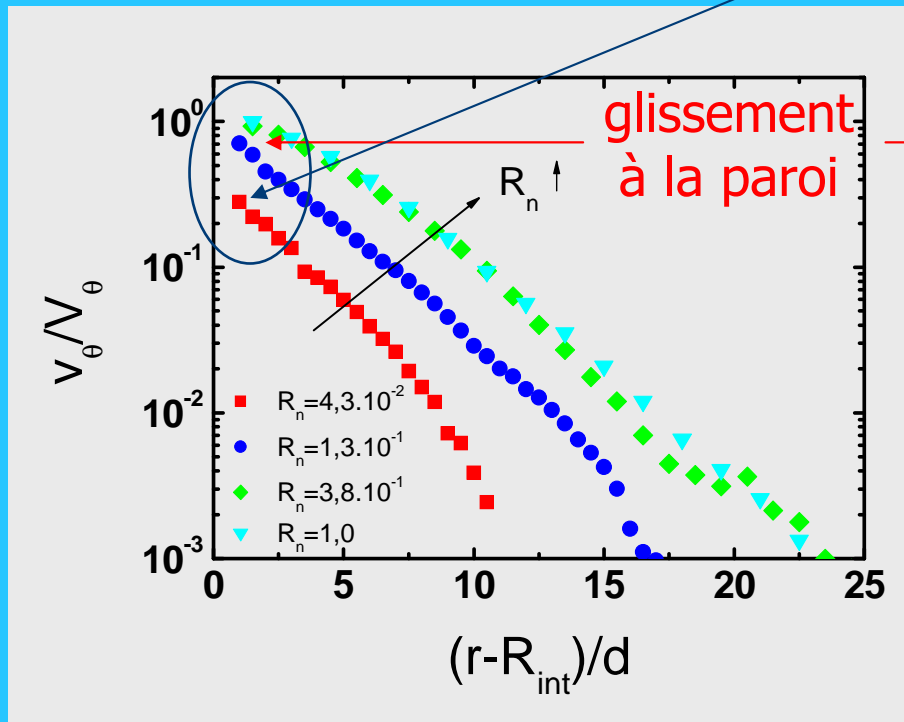
# Évolution de la zone de cisaillement



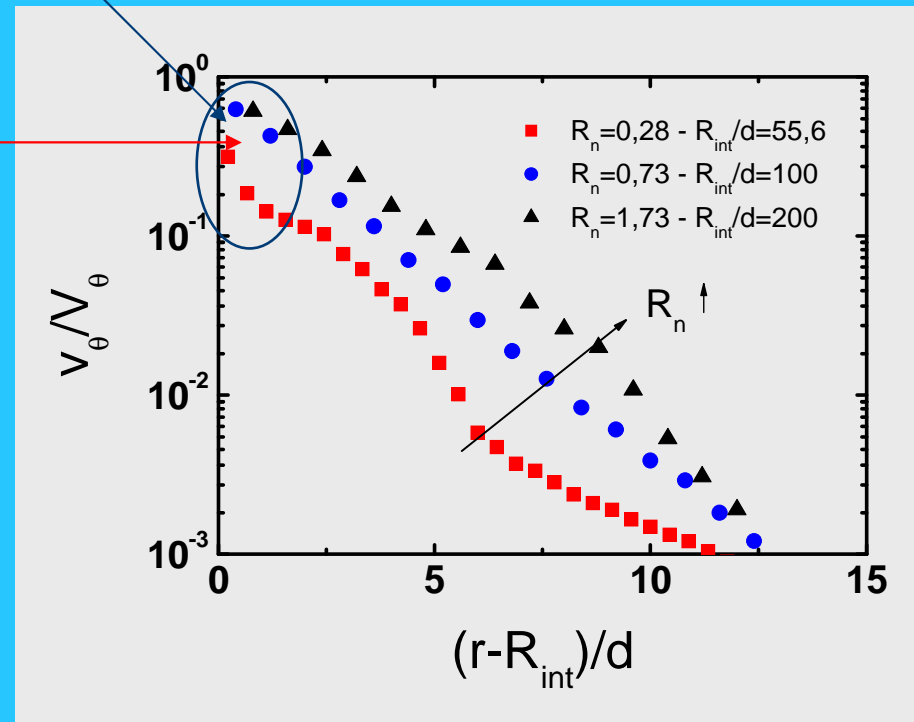
## ACSA

- Localisation du cisaillement durant le transitoire
- Simultanéité des évolutions du rapport des contraintes et du profil de vitesse tangentielle

# Influence de la rugosité sur $V_\theta$

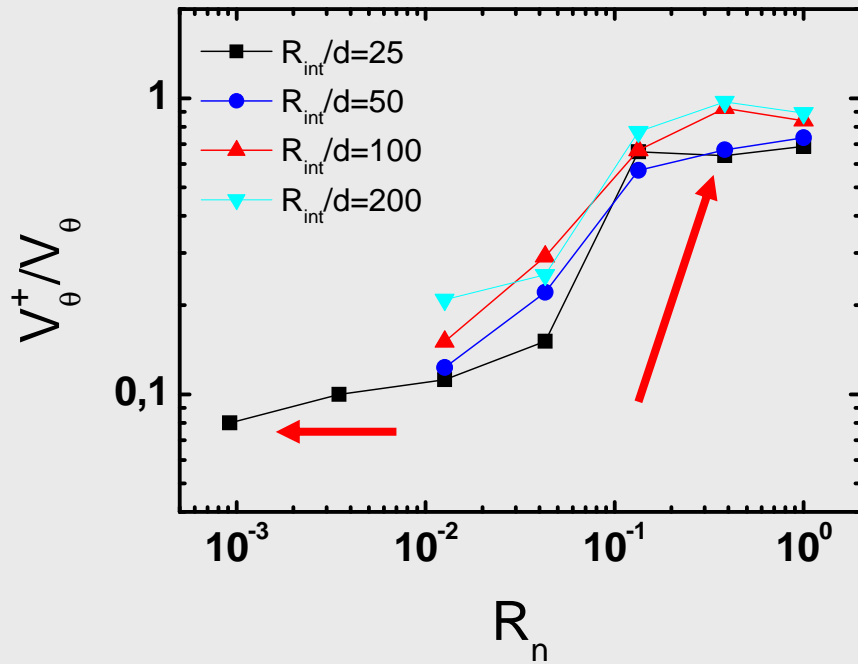


Simulations

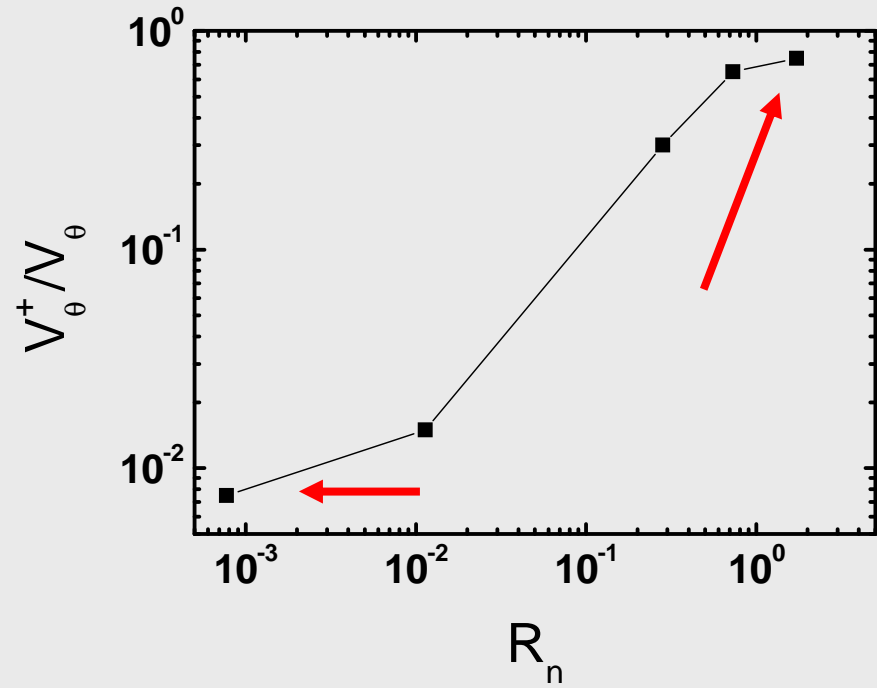


ACSA

# Influence de la rugosité sur le glissement à la paroi



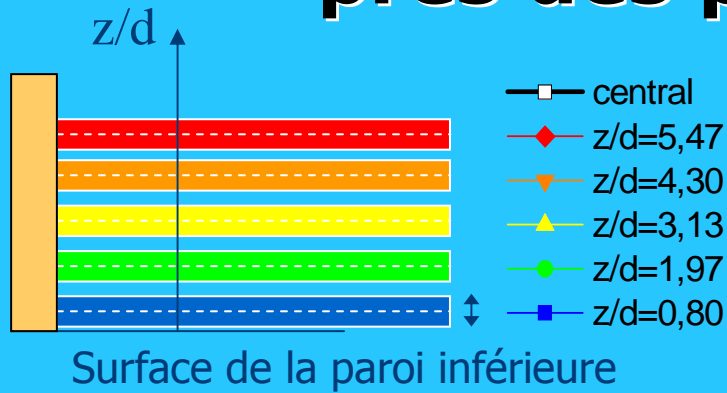
Simulations



ACSA

Limite  
inférieure/supérieure

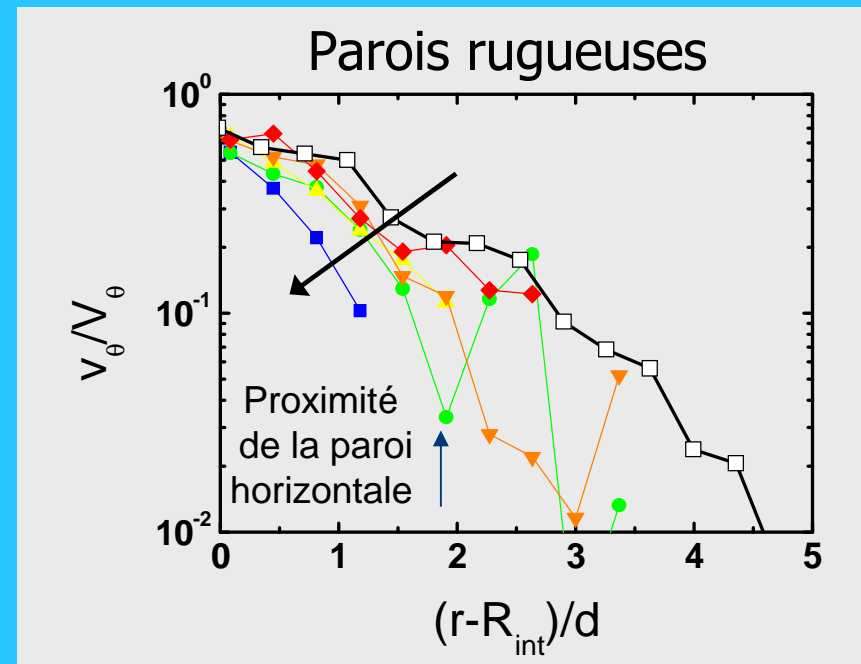
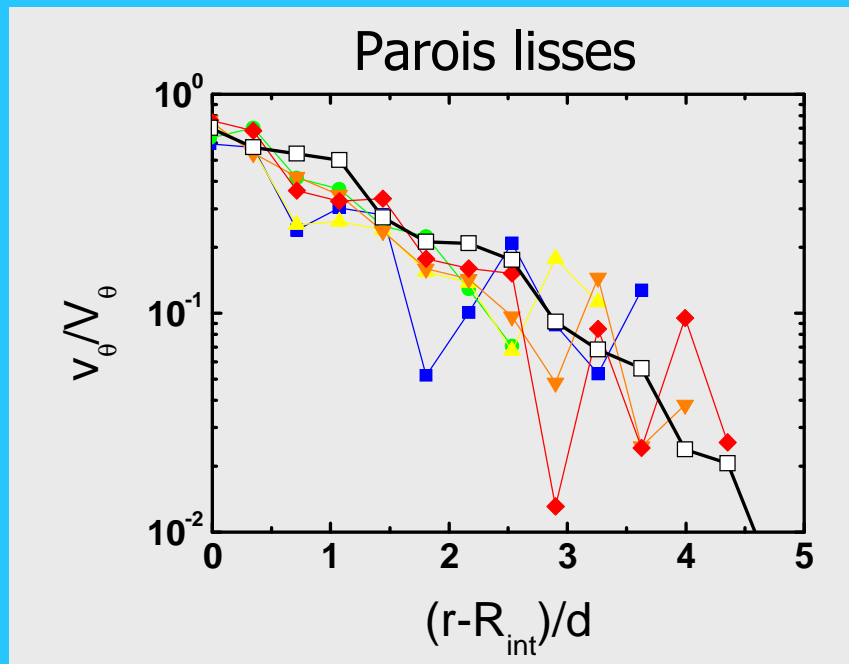
# Vitesse tangentielle près des parois horizontales



Profils de  $V_\theta$  sur des couches d'épaisseur de 1,5 mm ( $\sim 1d$ ) à proximité de la paroi horizontale inférieure

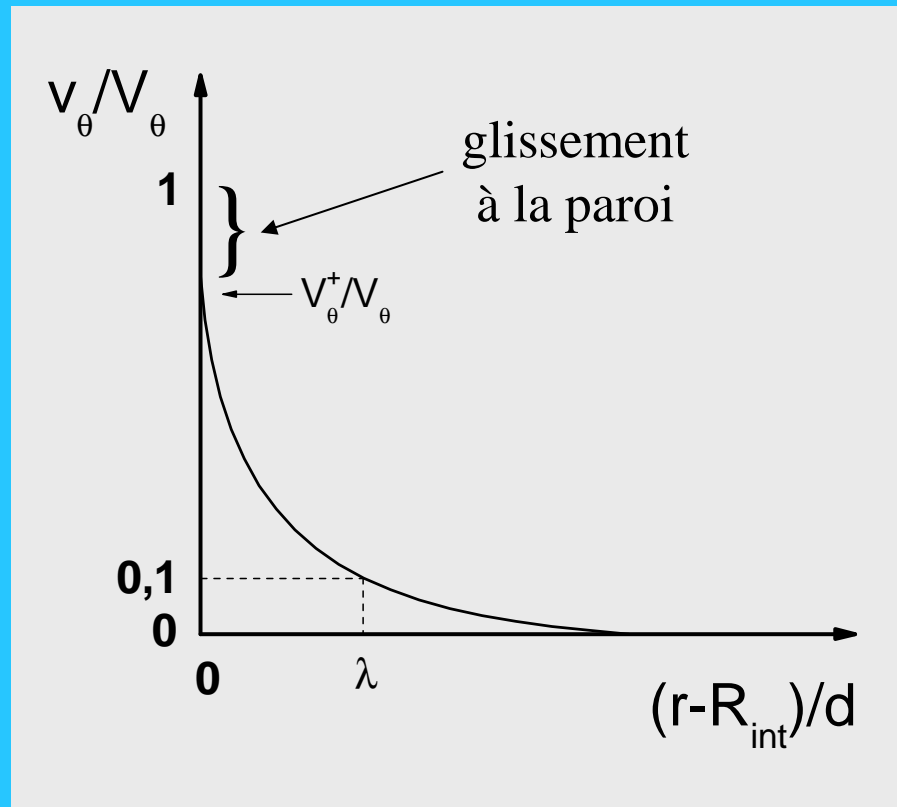
**Mini-ACSA**

**François Bertrand – multicouche IRM**



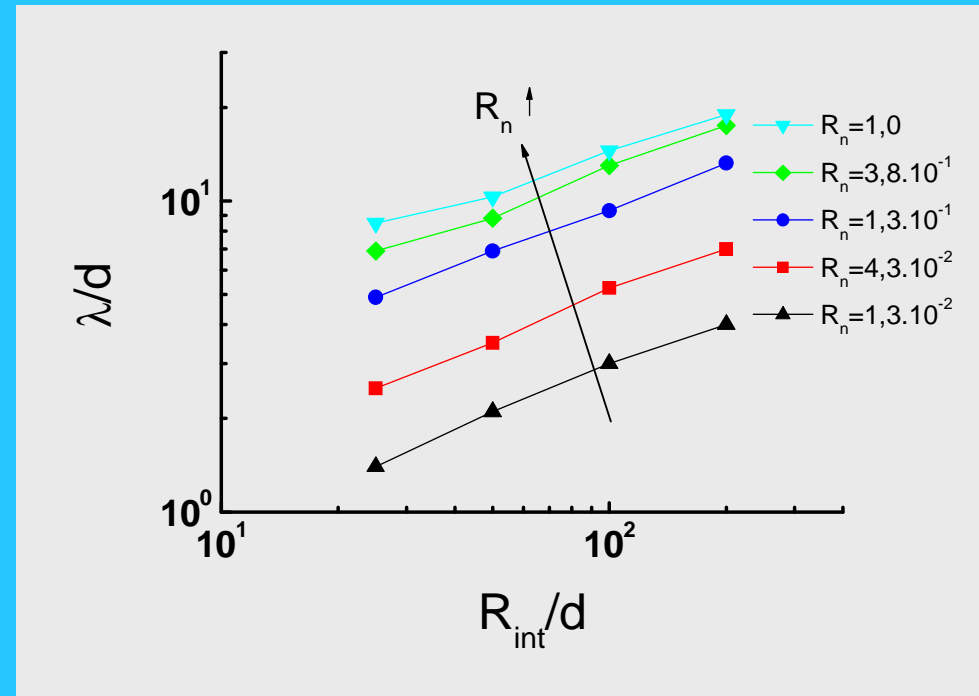
⇒ Validation des mesures à l'ACSA

# Épaisseur de la zone de cisaillement



Définition de  $\lambda$

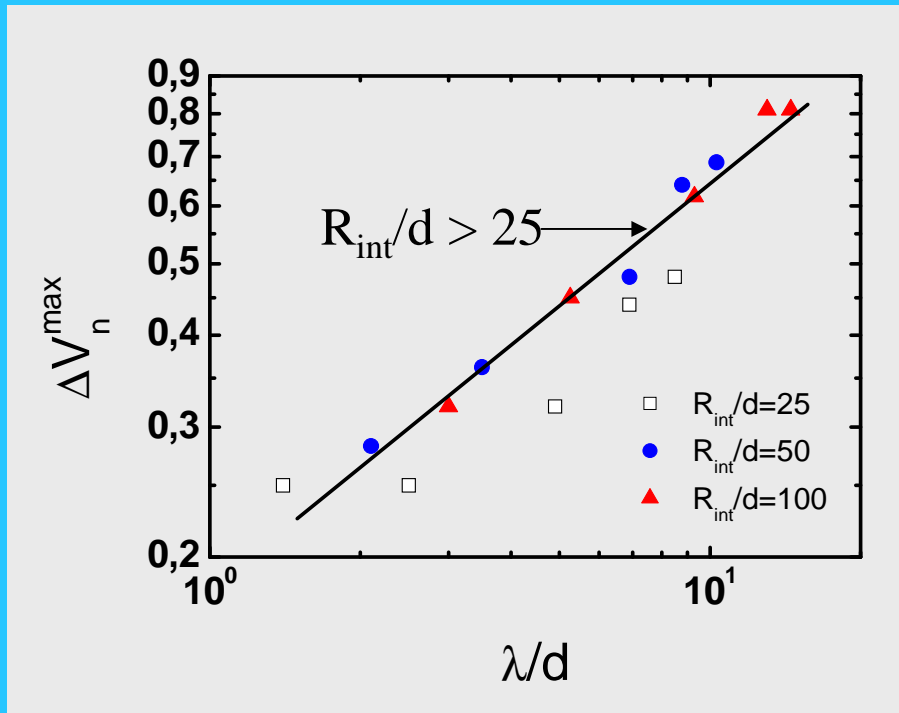
# Effet de la géométrie et de la rugosité sur l'épaisseur de la zone de cisaillement



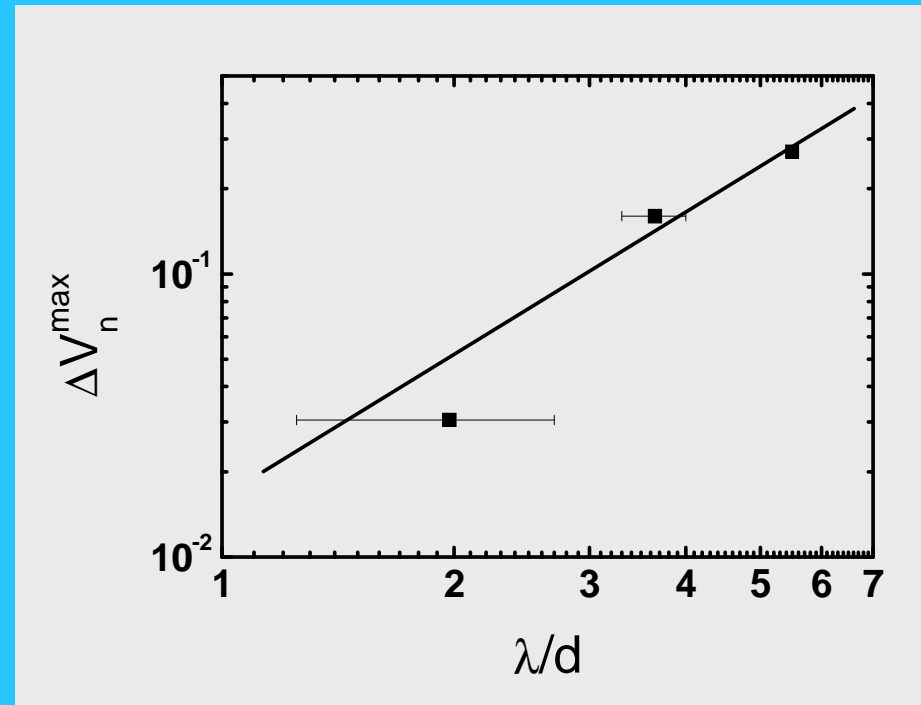
Simulations

- La zone cisailée est plus grande pour des géométries  $R_{int}/d$  plus grandes
- L'influence du glissement est forte sur la perception de la zone de cisaillement

# Rapport entre $\Delta V_n$ et $\lambda$ (état stationnaire)



Simulations – état initial dense



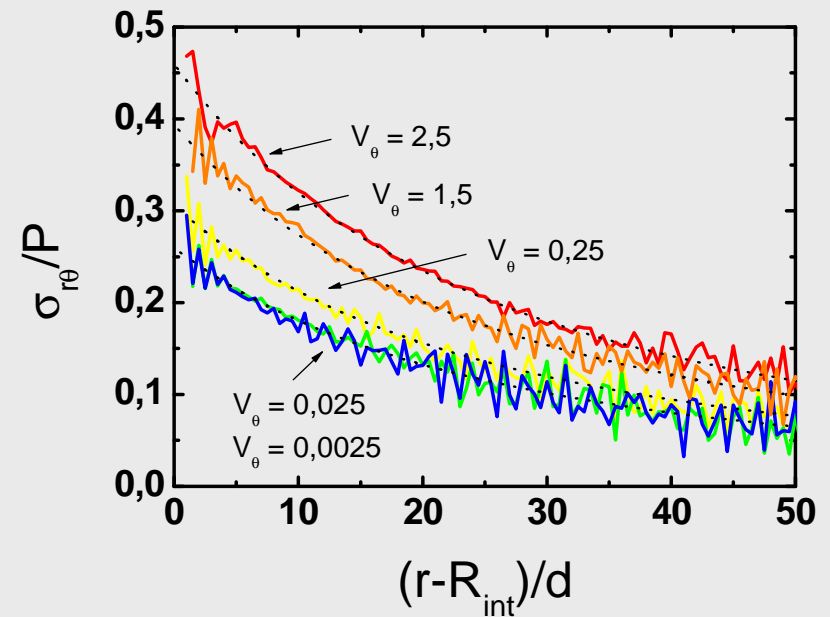
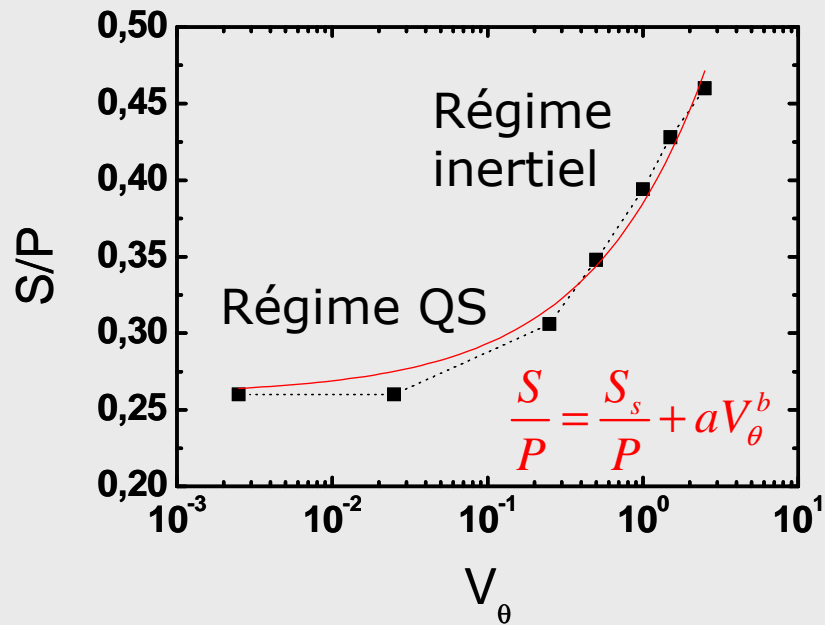
ACSA – cisaillement cyclique



# Plan de l'exposé

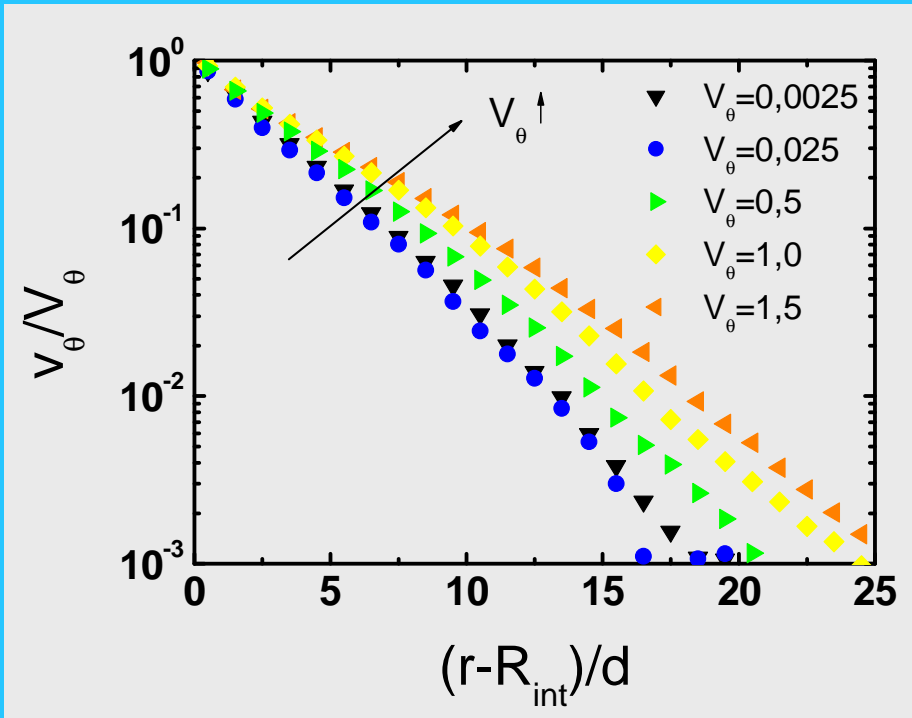
1. Description de la géométrie et des paramètres
2. Différentes Approches
3. Comportement Macroscopique
4. Comportement Mésoscopique
- 5. Régimes de déformation**
6. Conclusions et perspectives

# Deux régimes de déformation

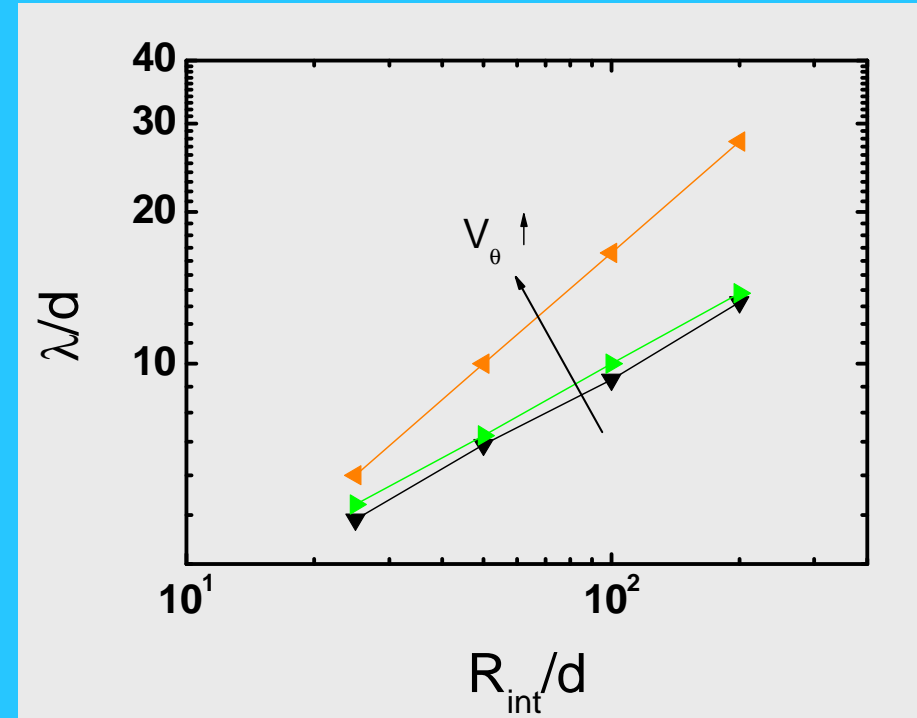


Simulations

# Effets inertiels sur les profils de vitesse tangentielle



Simulations ( $R_{50}, d_{p1}$ )



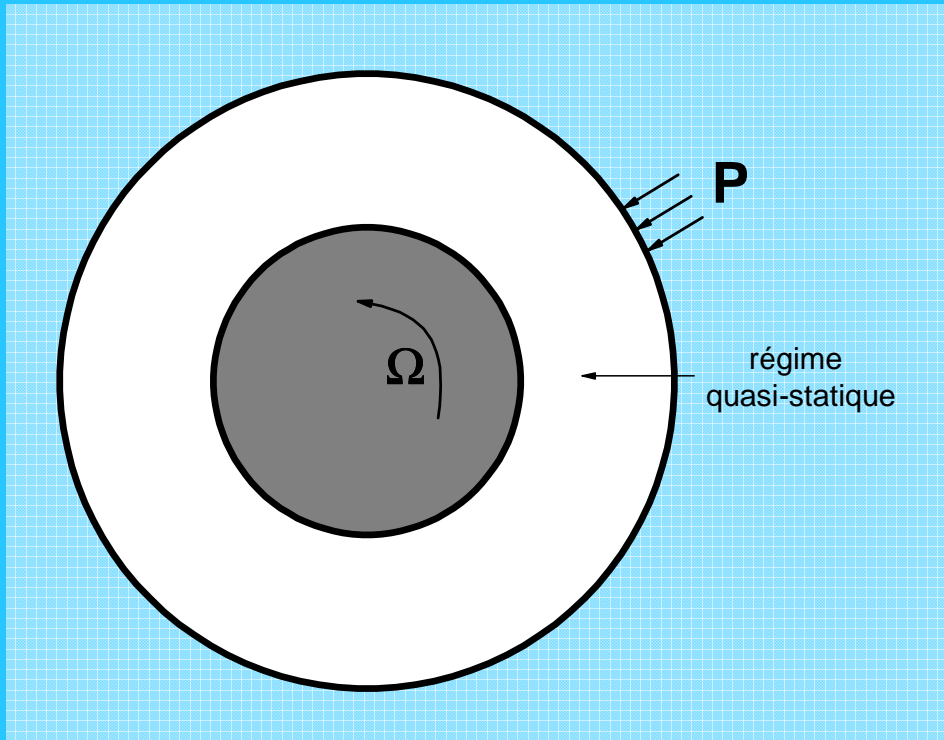
Simulations (diverses géométries,  $d_{p1}$ )

**Elargissement de la zone de cisaillement avec l'augmentation de  $V_\theta$**

- à partir de  $v_\theta(r)$  on calcule le taux de cisaillement

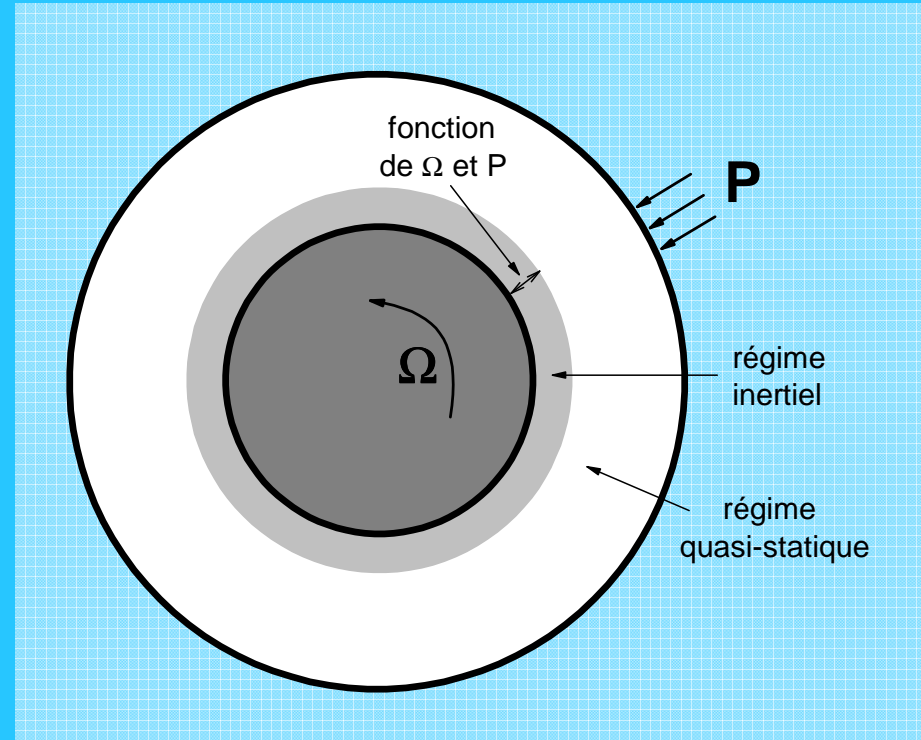
$$\dot{\gamma}(r) = 2\dot{\epsilon}_{r\theta} = r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v_\theta(r)}{r} \right)$$

# Développement du régime inertiel



Faibles  $V_\theta$

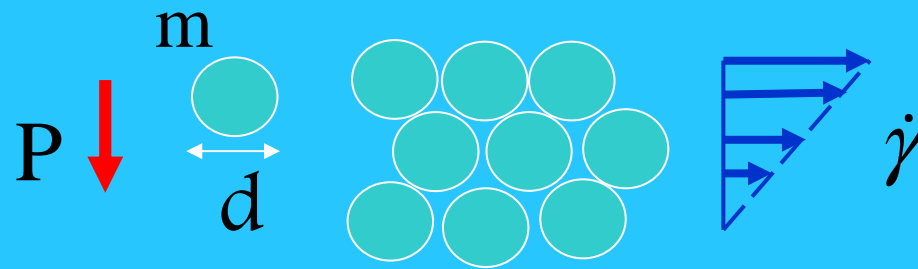
→ régime quasi-statique dans tout l'échantillon



Hautes  $V_\theta$

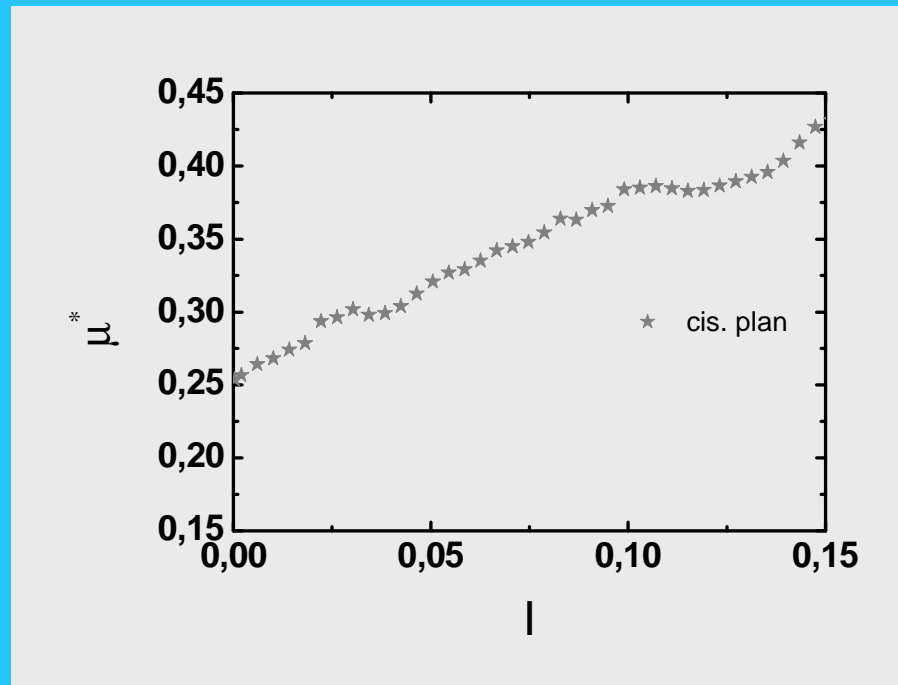
→ développement d'un régime inertiel à partir de la paroi

# Comportement du matériau – Régime inertiel



Nombre inertiel local

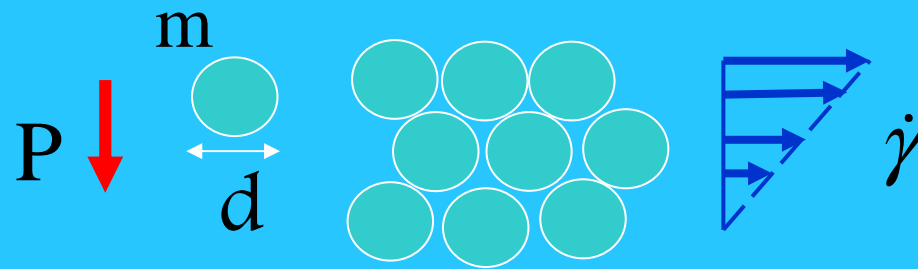
$$I(r) = \dot{\gamma}(r)d \sqrt{\frac{\rho}{P}}$$



$$\mu^*(r) = \frac{\sigma_{r\theta}(r)}{\sigma_{rr}(r)}$$

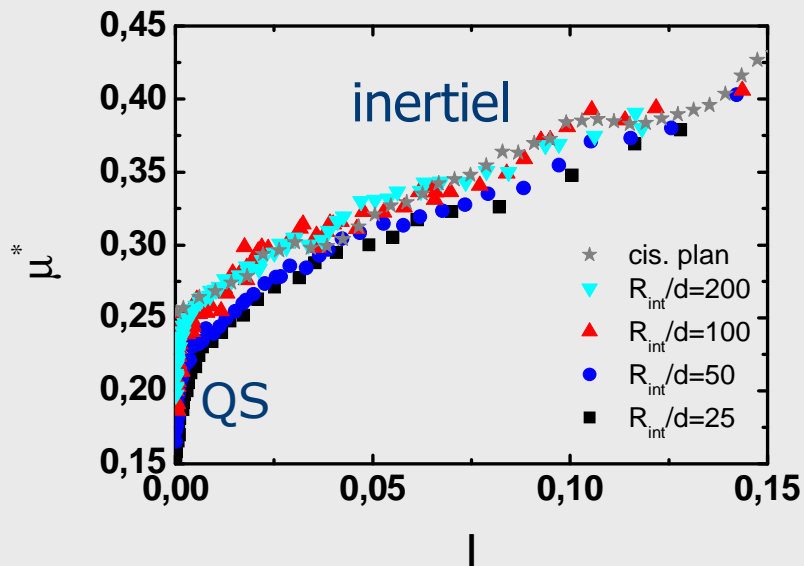
$$\mu^*(I) = \mu_{qs}^* + aI$$

# Comportement du matériau – Régime inertiel



Nombre d'inertie

$$I(r) = \dot{\gamma}(r)d \sqrt{\frac{\rho}{P}}$$

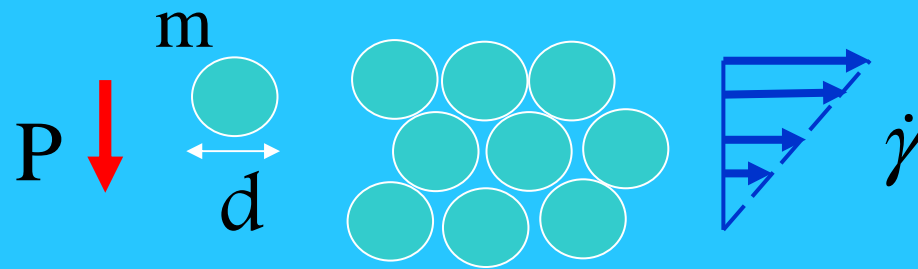


$$\mu^*(r) = \frac{\sigma_{r\theta}(r)}{\sigma_{rr}(r)}$$

$$\mu^*(I) = \mu_{qs}^* + aI$$

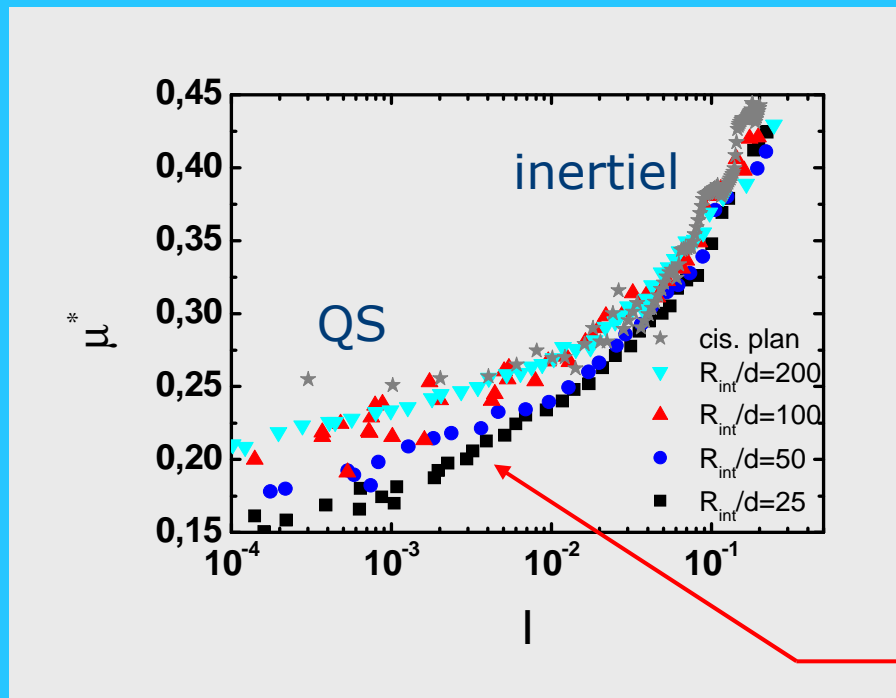
valable pour  $I > 0,05$   
faible effet de la géométrie

# Comportement du matériau – Régime QS



Nombre d'inertie

$$I(r) = \dot{\gamma}(r)d \sqrt{\frac{\rho}{P}}$$



$$\mu^*(r) = \frac{\sigma_{r\theta}(r)}{\sigma_{rr}(r)}$$

~~$$\mu^*(I) = \mu_{qs}^* + aI$$~~

Effet de  
la géométrie

# Plan de l'exposé

1. Description de la géométrie et des paramètres
2. Différentes Approches
3. Comportement Macroscopique
4. Comportement Mésoscopique
5. Régimes de déformation
- 6. Conclusions et perspectives**



# Conclusions

- ⇒ **Étude de l'interface en cisaillement annulaire**
- ⇒ **Confrontation expériences et simulations**
- ⇒ **Comportement transitoire/stationnaire sous cisaillement monotone et cyclique**
- ⇒ **Relation entre les comportements macroscopique et mésoscopique**
- ⇒ **Distinction des régimes quasi-statique et inertiel**
- ⇒ **Loi de comportement dans le régime inertiel**
- ⇒ **Effets de la géométrie et de la rugosité dans le régime quasi-statique**

# Perspectives

- ⇒ **Matériau plus complexe**
- ⇒ **Autres caractéristiques de la paroi**
- ⇒ **Simulation tridimensionnelle**
- ⇒ **Loi de comportement dans le régime quasi-statique**

**MERCI POUR VOTRE ATTENTION 😊**