
Travail de fin d'études

Etude d'un milieu granulaire à l'état critique

Travail réalisé par
Antoine Watterman
Promoteur
Alain Holeyman
Lecteurs
Ramiro Daniel Verastegui Flores
Damien Christiaens

Table des matières

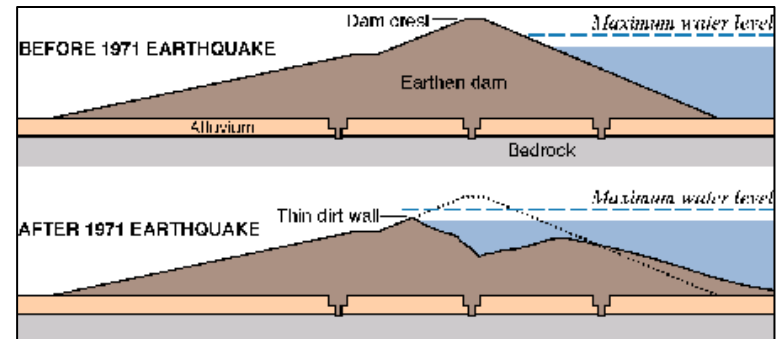
- 1 Mise en contexte
- 2 Présentation du logiciel utilisé
- 3 Essais de laboratoire
- 4 Adaptation des propriétés du modèle
- 5 Description du modèle implémenté
- 6 Essais de cisaillement
- 7 Conclusion

1. Mise en contexte

Liquéfaction des sols = danger



Niigata (Japon, 1964)

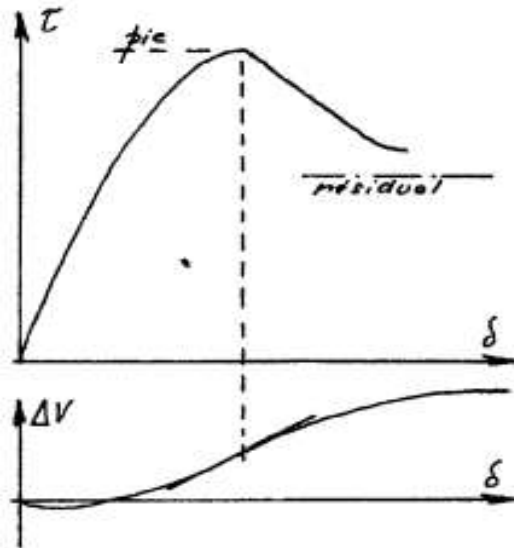


Van Norman (Californie, 1971)

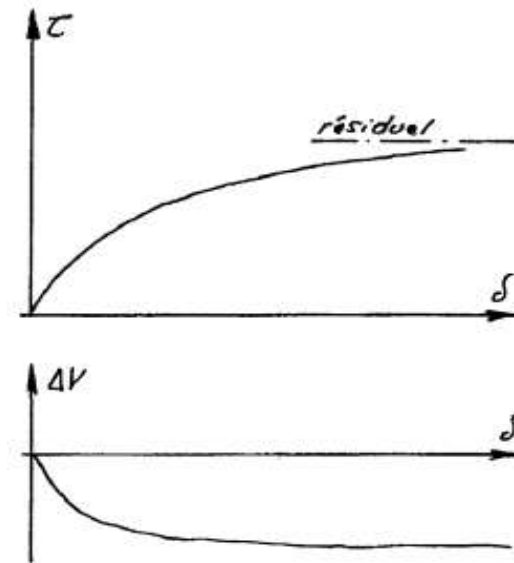
1. Mise en contexte

Origine de la liquéfaction

Sable dense



Sable lâche



1. Mise en contexte

Objectif :

- Analyse d'une configuration d'essai
- Etude des mouvements de convection.
- Système mis en roulement sous effort vertical contrôlé
- Evolution vers l'état critique :
 - Stationnarité du champ de contraintes
 - Volume constant
 - Déformations de cisaillement entretenues



2. Présentation du logiciel utilisé

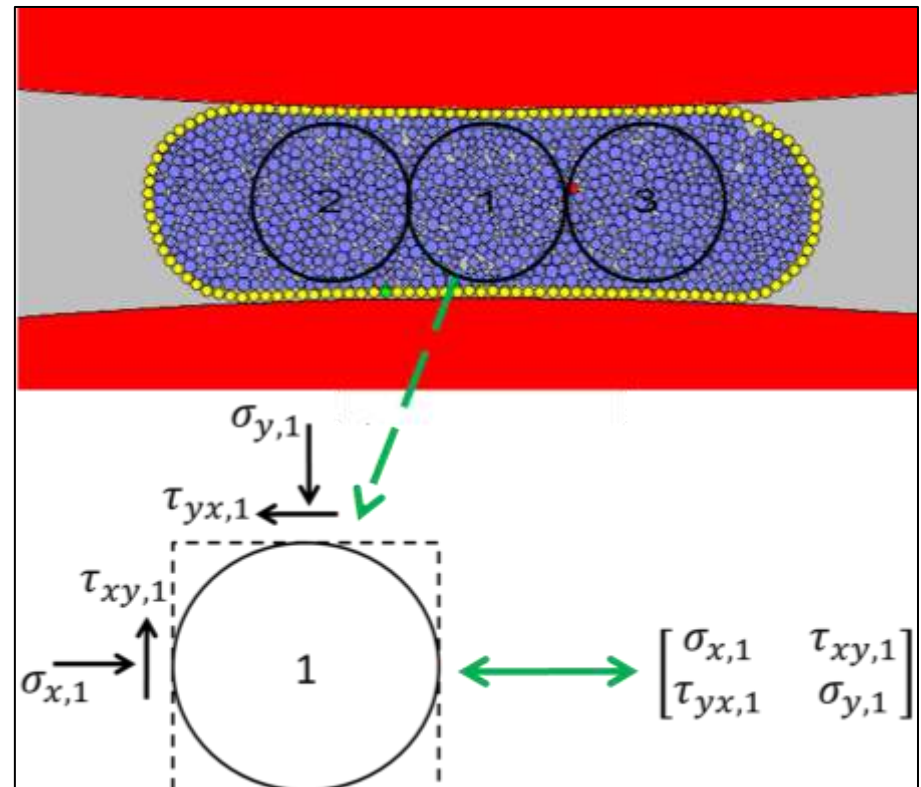
Particle Flow Code in 2 Dimensions (PFC2D)

- Logiciel implémentant des éléments discrets (DEM)
- Particules cylindriques déformables
- Lois de contact
- Cercles de mesures
 - Tenseur des contraintes
 - Indice des vides e

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

où

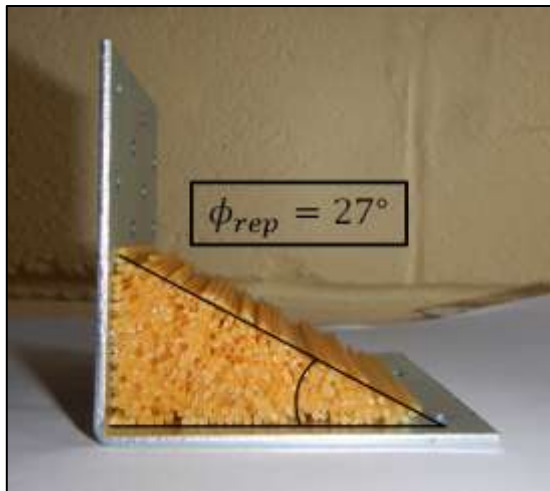
- V_v = volume des vides
- V_s = volume des grains



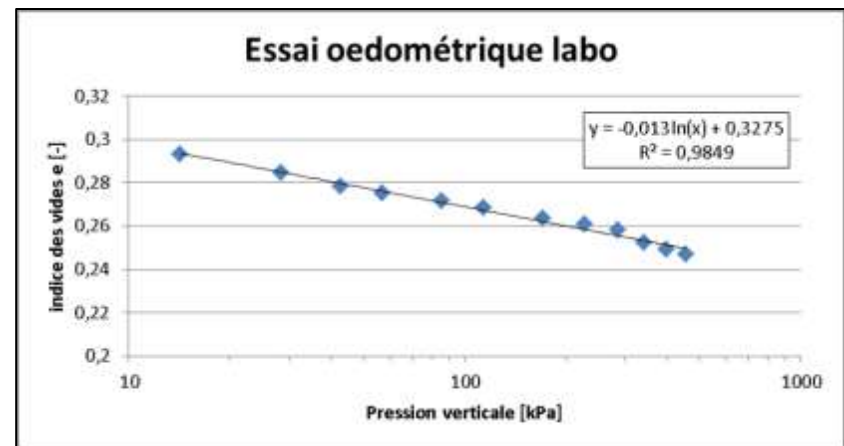
3. Essais de laboratoire

Caractérisation des spaghettis :

- Géométrie
 - Diamètre : $\phi_{moyen} = 1,67[mm]$
 - Longueur : $L_{moyen} = 24,96[cm]$
 - Poids volumique : $\gamma_{spaghetti} = 1454 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$
- Comportement mécanique :



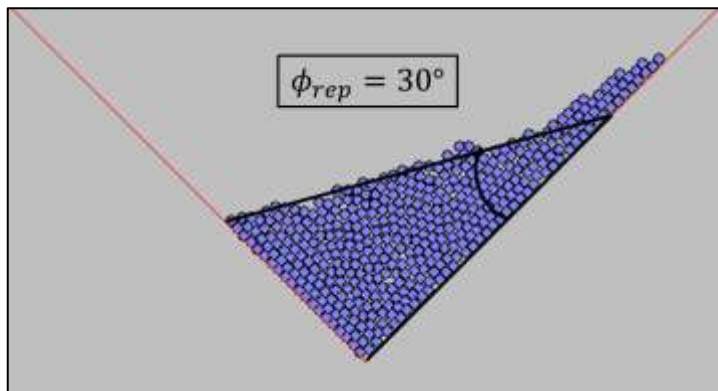
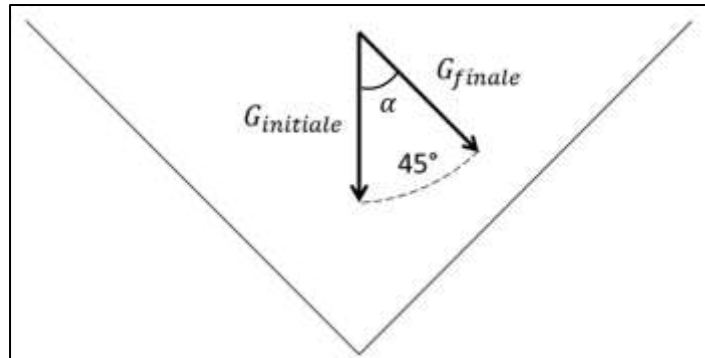
Angle de repos



4. Adaptation des propriétés du modèle

Comparaison des résultats de labo avec PFC2D

Angle de repos – Coefficient de frottement

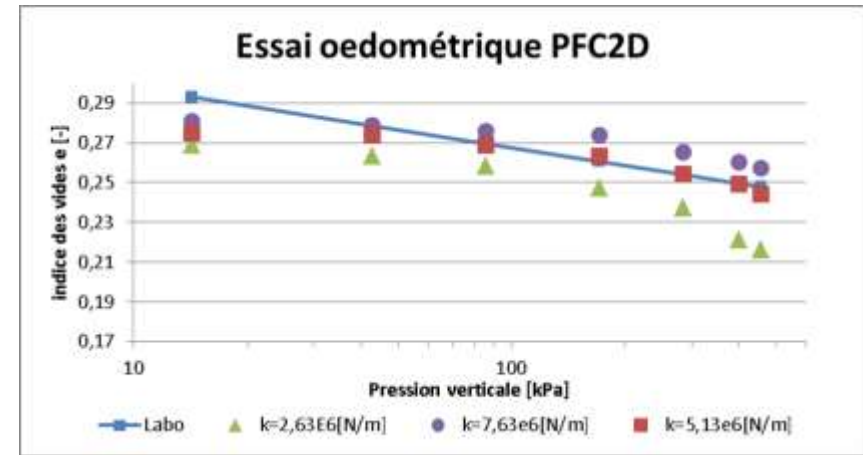
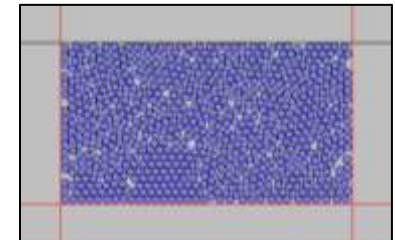


Essai oedométrique

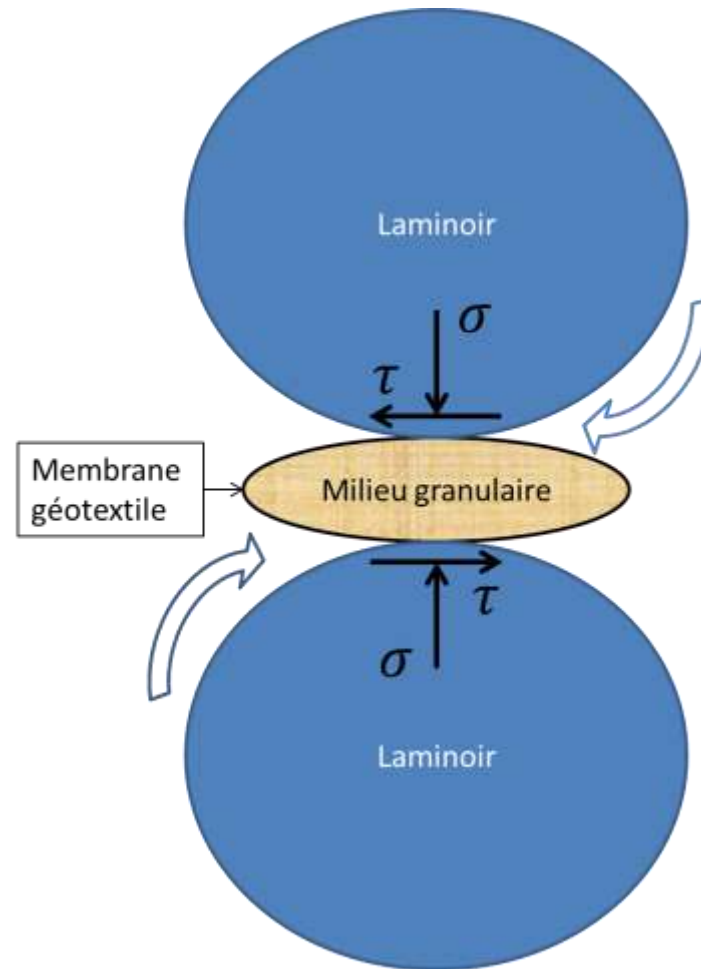
$$k = k^* \times EA/l$$

$$k = 5,13 \times 10^5 \text{ [N/m]}$$

$$k^* = 19,5 \text{ [-]}$$



5. Description du modèle implémenté

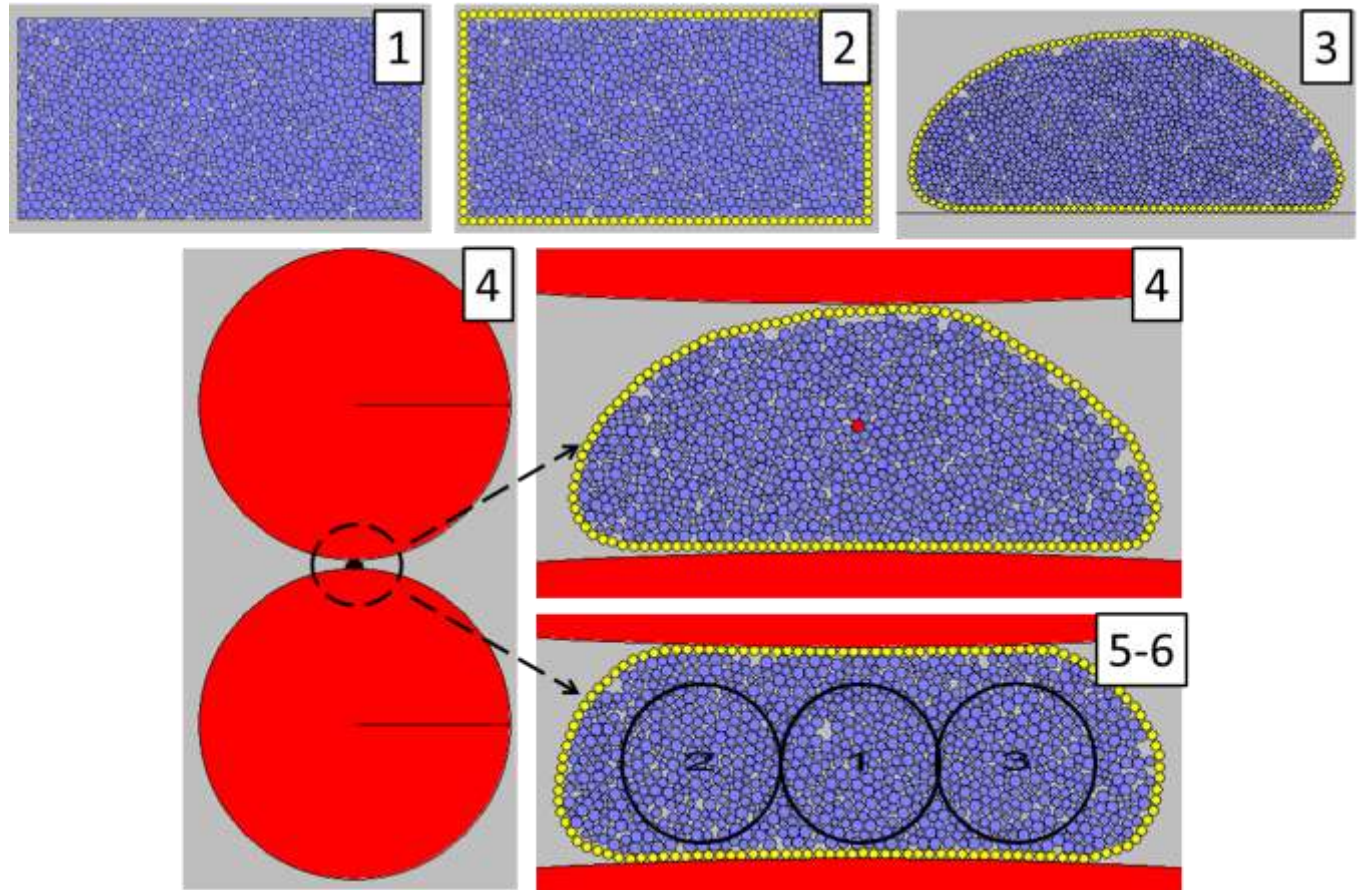


5. Description du modèle implémenté

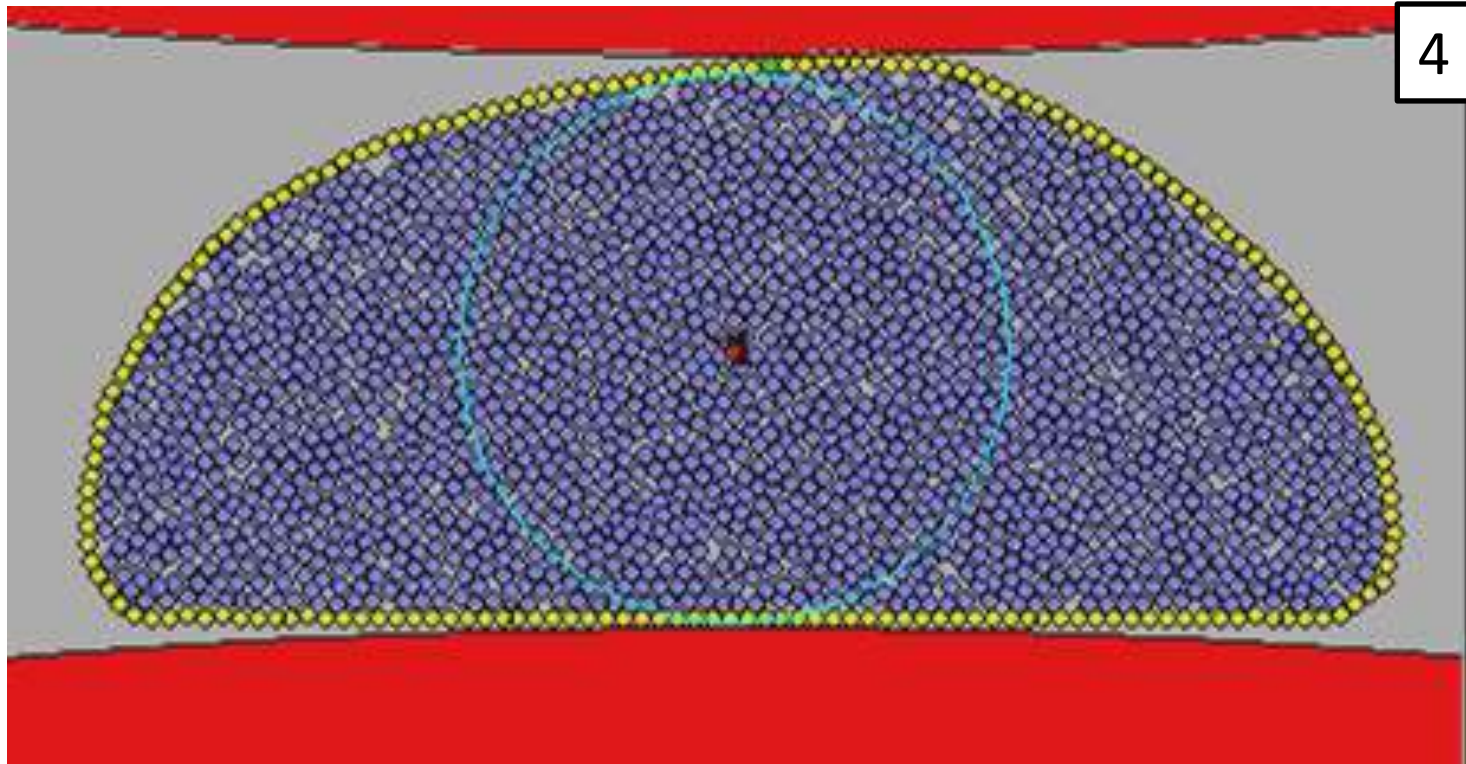
1800 particules $\Phi_{max} = 1,5\Phi_{min}$

Membrane géotextile

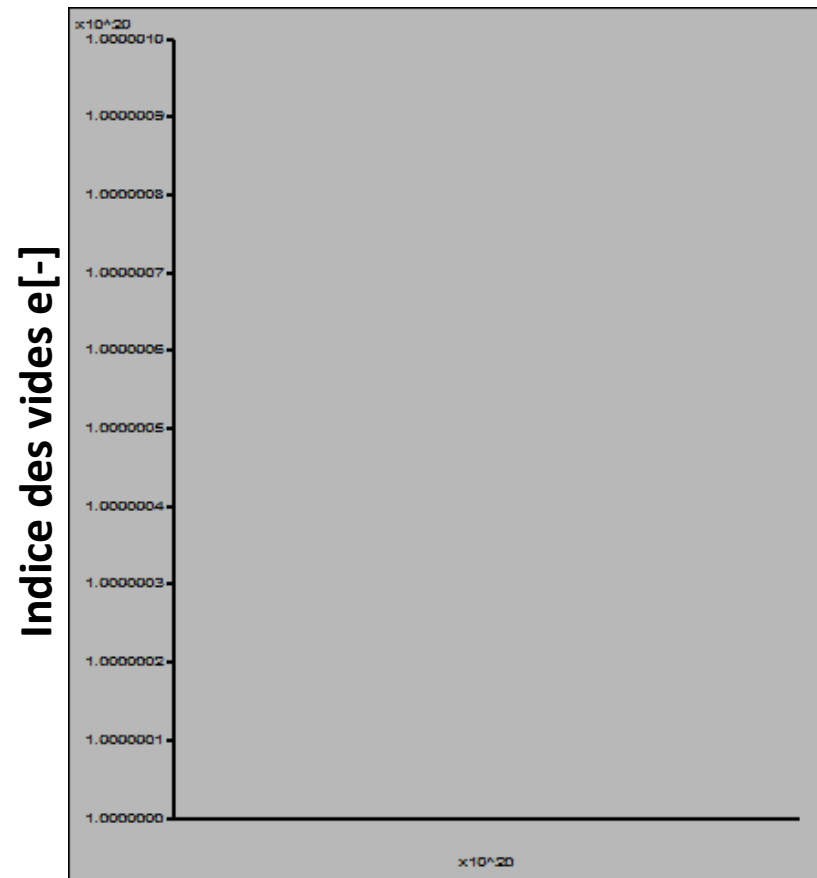
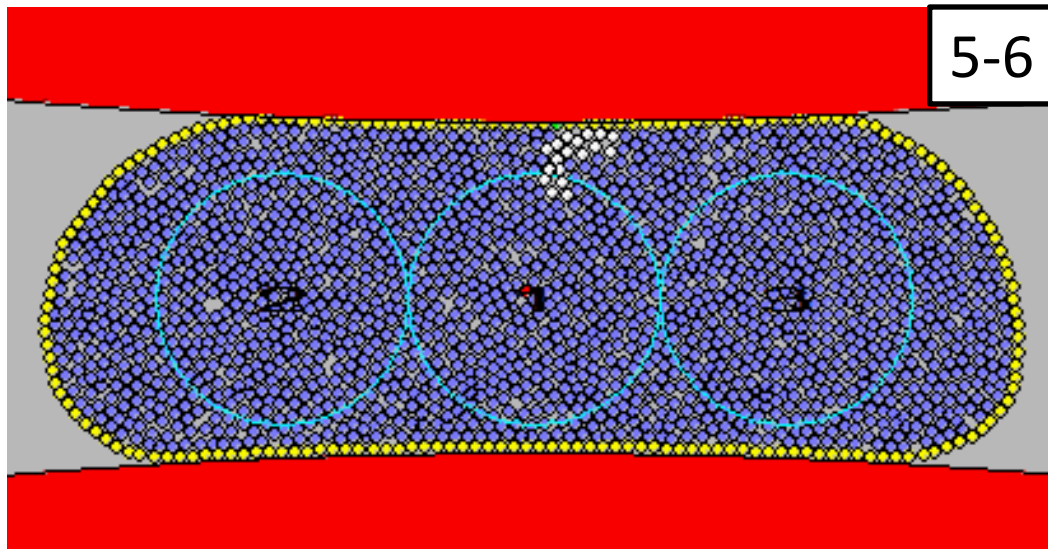
Laminoirs



5. Description du modèle implémenté



5. Description du modèle implémenté



6. Essais de cisaillement

Essais réalisés:

- Différence entre mesures macroscopiques et microscopiques
- Etude de sensibilité du positionnement des cercles de mesures
- Influence de l'ampleur du confinement appliqué
- Etude de sensibilité du nombre de particules composant le milieu granulaire
- Influence de la vitesse de rotation des laminoirs sur l'indice des vides du milieu

6. Essais de cisaillement

Nombre idéal de particules?

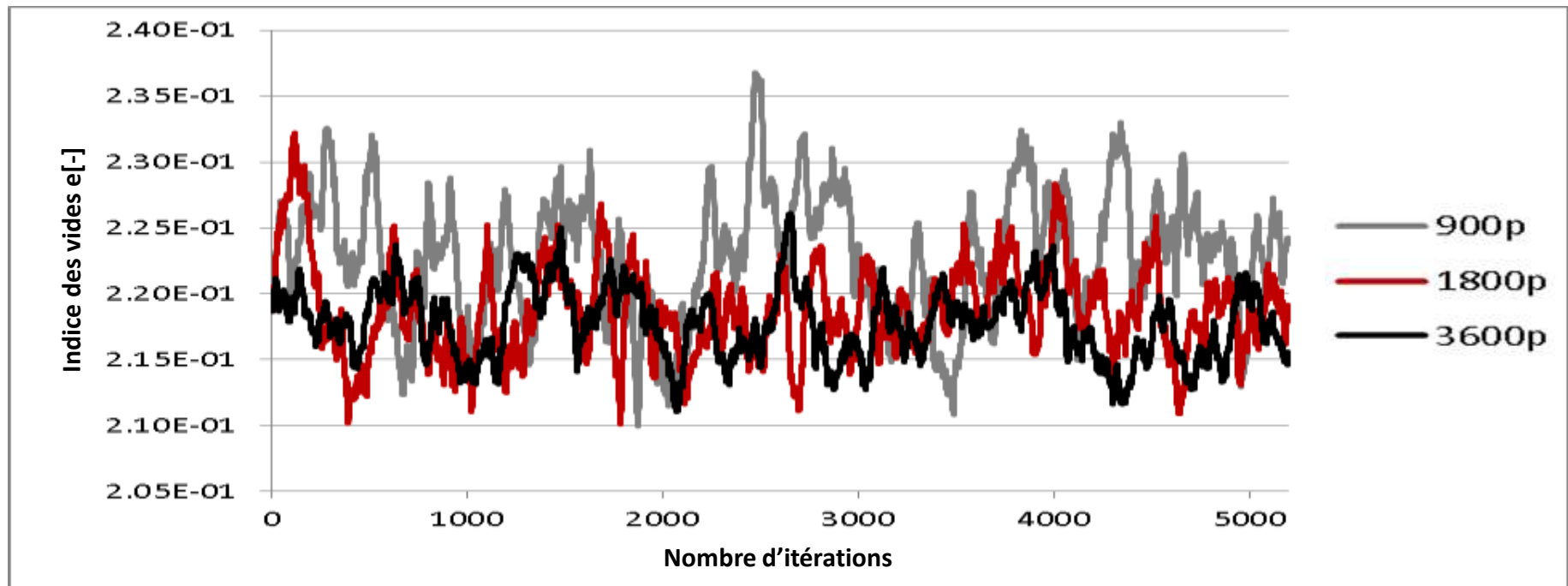
900 – 1800 - 3600 particules

$\sigma_{confi} = 150 [kPa]$

$v_{spin} = 0,1 [rad/s]$

1 tour membrane

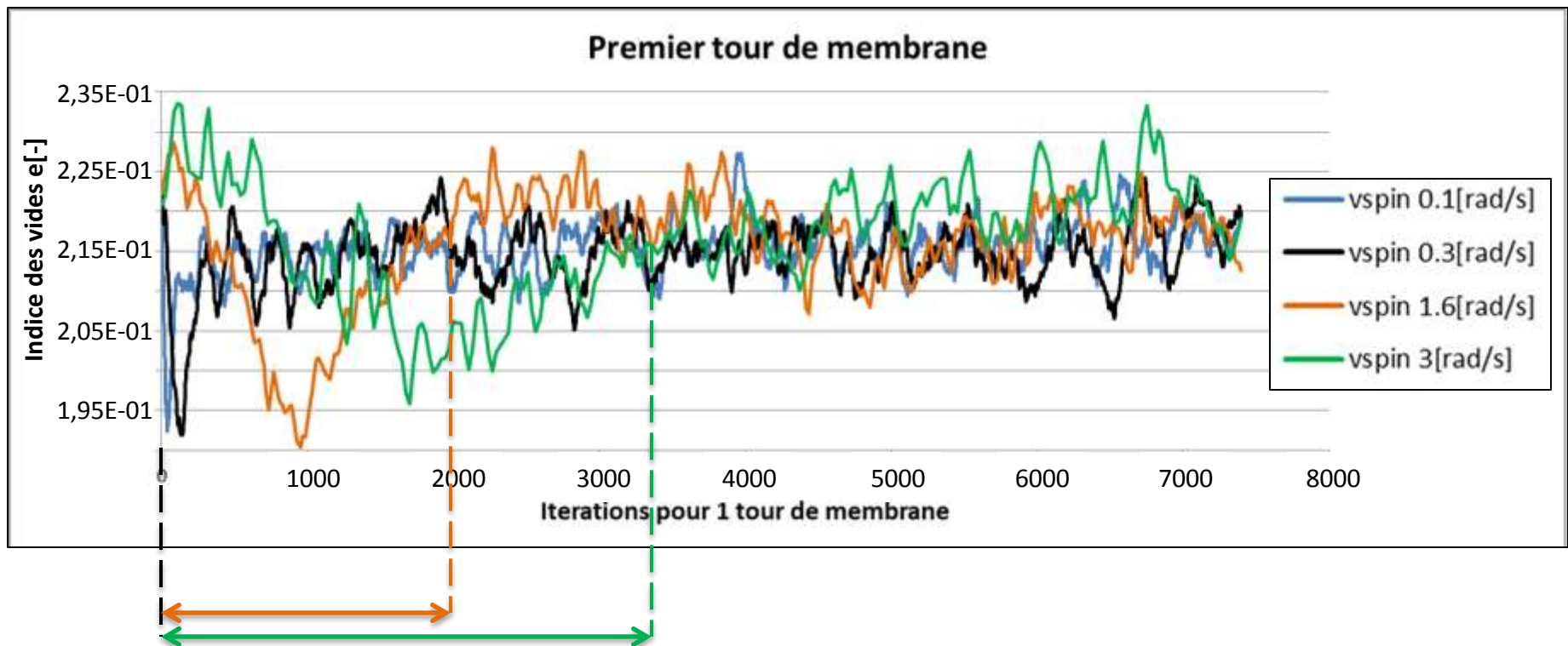
	$e_{moy} [-]$	$e_{devi} [-]$	$t_{simu} [min]$
900p.	0,223	4,8E-03	17
1800p.	0,219	3,5E-03	40
3600p.	0,218	2,7E-03	106



6. Essais de cisaillement

Influence de la vitesse de rotation des laminoirs?

1800 particules
 $\sigma_{confi} = 150 [kPa]$
 $v_{rot} = 0,1 - 0,3$
 $-1,6 - 3,0 [rad/s]$



6. Essais de cisaillement

Influence de la vitesse de rotation des laminoirs?

1800 particules
 $\sigma_{confi} = 150 [kPa]$
 $v_{rot} = 0,1 - 0,3$
 $-1,6 - 3,0 [rad/s]$

	1 ^{er} tour		2 ^e tour	
$v_{rot} [rad/s]$	$e_{moy,1} [-]$	$e_{devi,1} [-]$	$e_{moy,2} [-]$	$e_{devi,2} [-]$
0,1	0,215	3,46E-03	0,216	3,52E-03
0,3	0,215	3,28E-03	0,216	3,03E-03
1,6	0,216	7,09E-03	0,218	3,46E-03
3,0	0,217	9,92E-03 ↓	0,220	3,54E-03 ↓

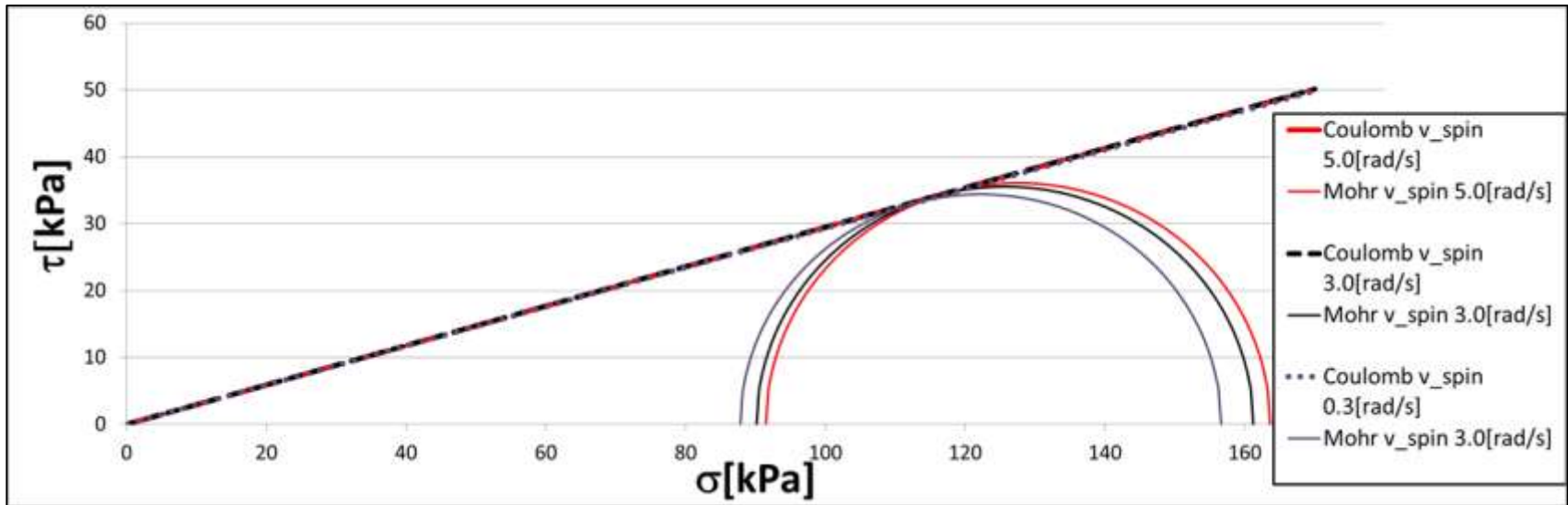
6. Essais de cisaillement

Dilatation de l'ensemble lorsque $v_{rot} \nearrow$?

	$v_{rot} [rad/s]$	$\sigma_{conf} [kPa]$	Tours
Test A	0,3	150	10
Test B	3,0	150	10
Test C	5,0	150	10

6. Essais de cisaillement

Dilatation de l'ensemble lorsque $v_{rot} \nearrow$?



	v_{rot} [rad/s]	e_{cs} [-]	$\sigma_{1,cs}$ [kPa]	$\sigma_{3,cs}$ [kPa]	ϕ_{cs} [°]
Test A	0,3	0,215	1,56E05	8,78E05	16,34
Test B	3,0	0,220	1,61E05	9,04E05	16,37
Test C	5,0	0,224	1,63E05	9,14E05	16,43

7. Conclusion

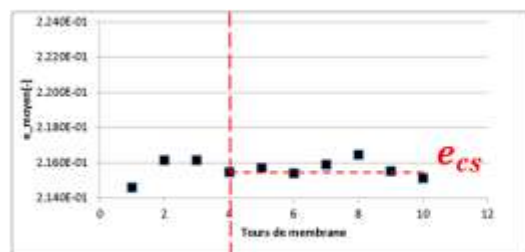
- Test de laboratoire = calage des données
- Nombre de particules requis
- Mise en régime du milieu ($t \sim v_{rot}$)
- $v_{rot} \nearrow \Rightarrow e_{cr} \nearrow$, cause : $\Phi_{cr} \nearrow$
- $v_{rot} \nearrow \Rightarrow (\sigma_1, \sigma_3) \nearrow$

Merci pour votre attention

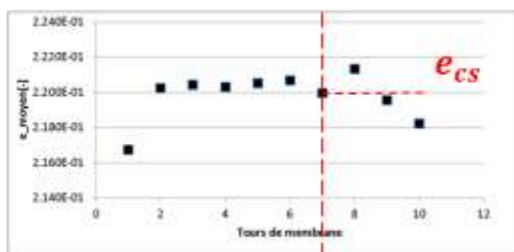
A.1. Essais de cisaillement

Dilatation de l'ensemble lorsque $v_{rot} \nearrow$?

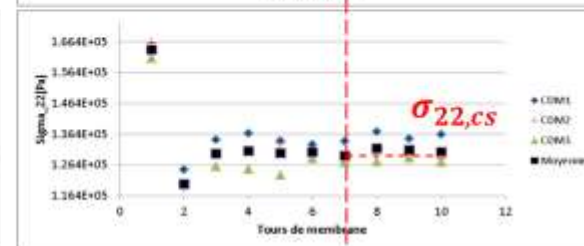
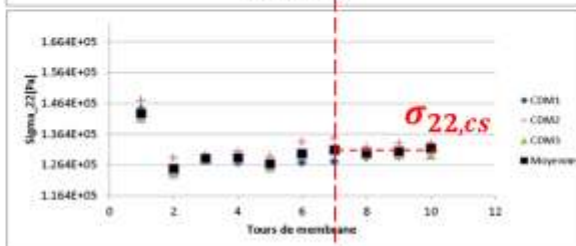
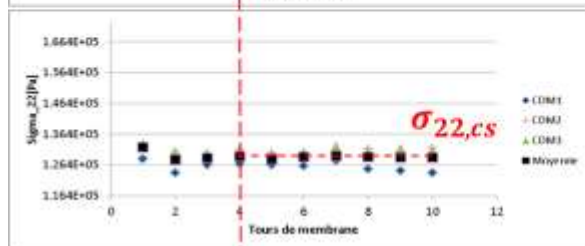
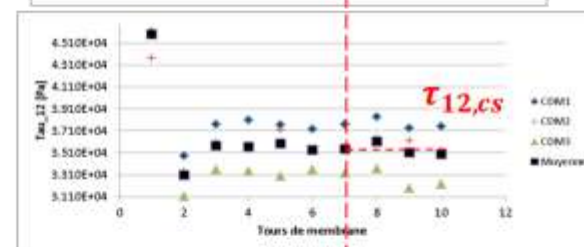
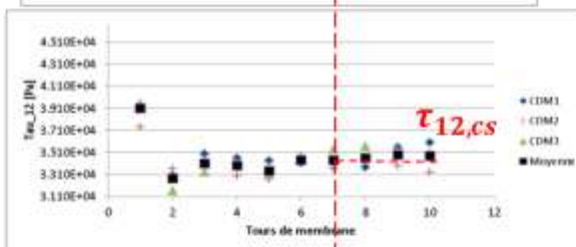
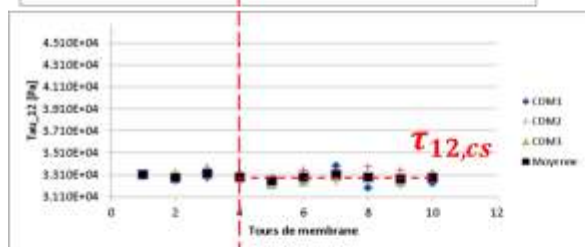
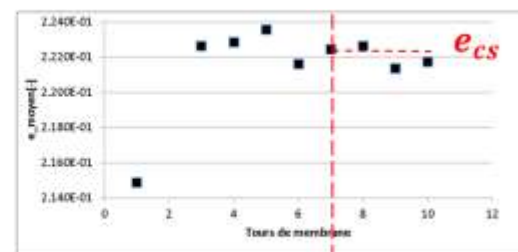
$v_{spin} = 0,3 [rad/s]$



$v_{spin} = 3,0 [rad/s]$

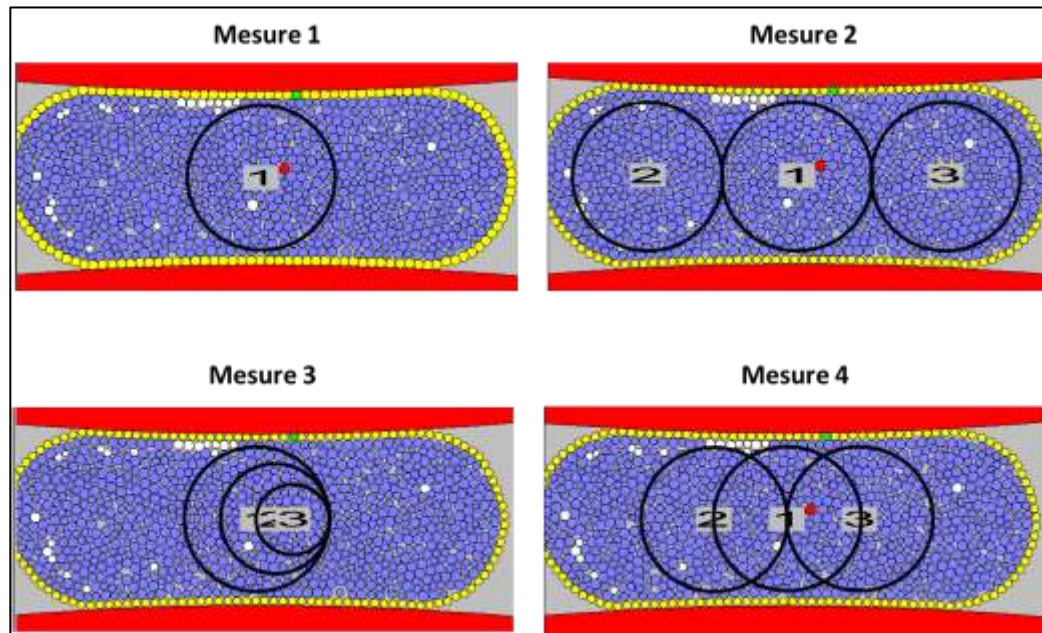


$v_{spin} = 5,0 [rad/s]$



A.2. Essais de cisaillement

Positionnement des cercles de mesures

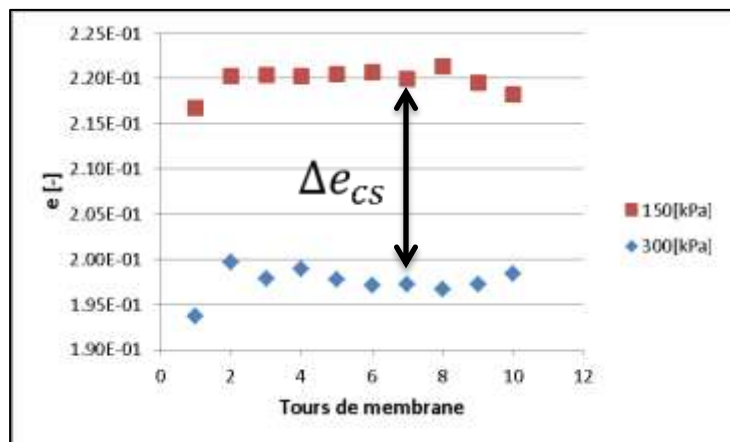


1 tour	Cdm1		Cdm2		Cdm3		Moyenne	
	Mean	Devi	Mean	Devi	Mean	Devi	Mean	Devi
Mesure 1	1.82E-01	3.29E-03					1.82E-01	3.29E-03
2	1.82E-01	3.29E-03	1.75E-01	3.40E-03	1.76E-01	3.33E-03	1.78E-01	1.64E-03
3	1.82E-01	3.29E-03	1.78E-01	4.97E-03	1.76E-01	7.76E-03	1.78E-01	4.63E-03
4	1.82E-01	3.29E-03	1.82E-01	3.50E-03	1.84E-01	3.57E-03	1.83E-01	2.16E-03

A.3. Essais de cisaillement

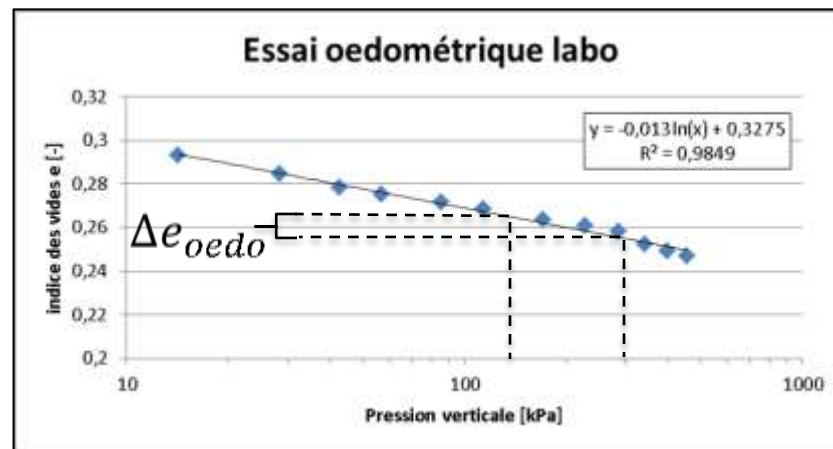
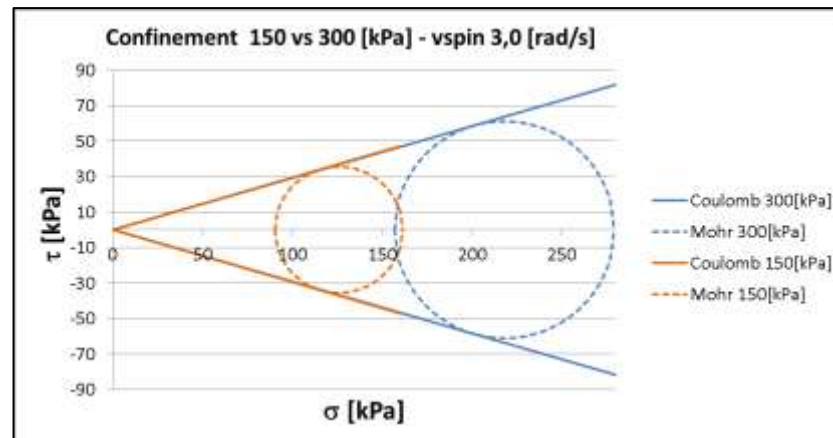
Influence de l'ampleur du confinement appliqué

1800 particules
 $\sigma_{confi} = 150 - 300 [kPa]$
 $v_{rot} = 3,0 [rad/s]$



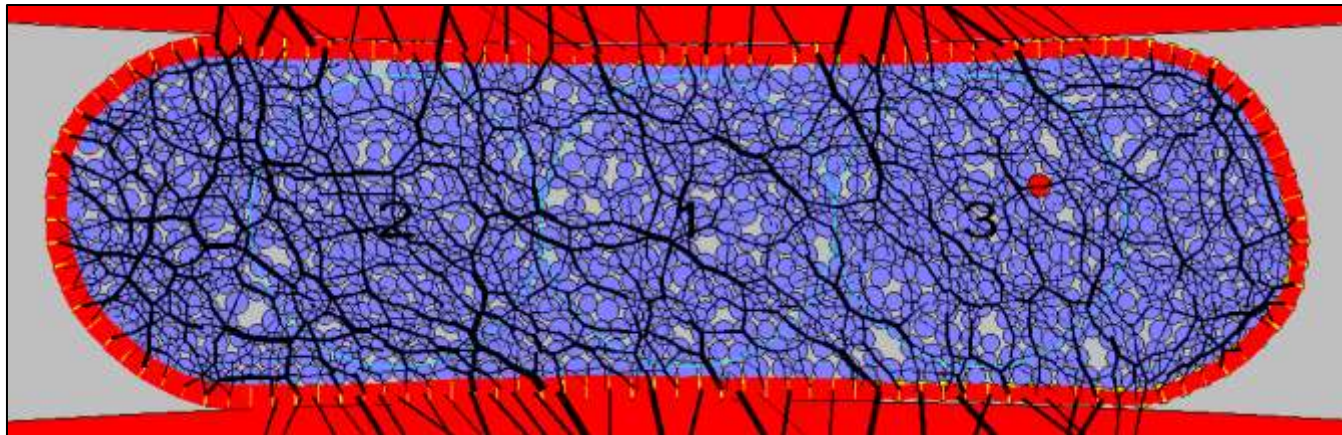
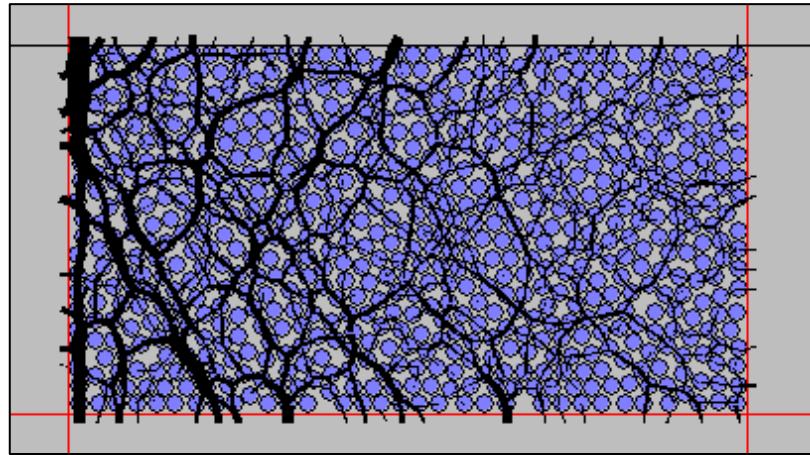
$$\Delta e_{CS} = 0,023$$

$$\Delta e_{CS} = 2\Delta e_{oedo}$$



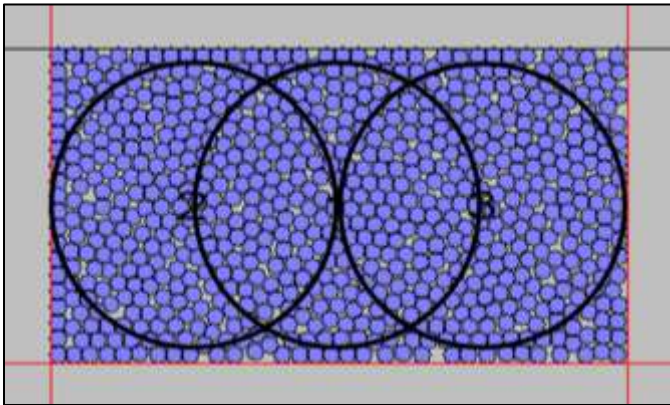
A.4. Essais de cisaillement

Raison de la déviation de l'indice des vides



A.5. Essais de cisaillement

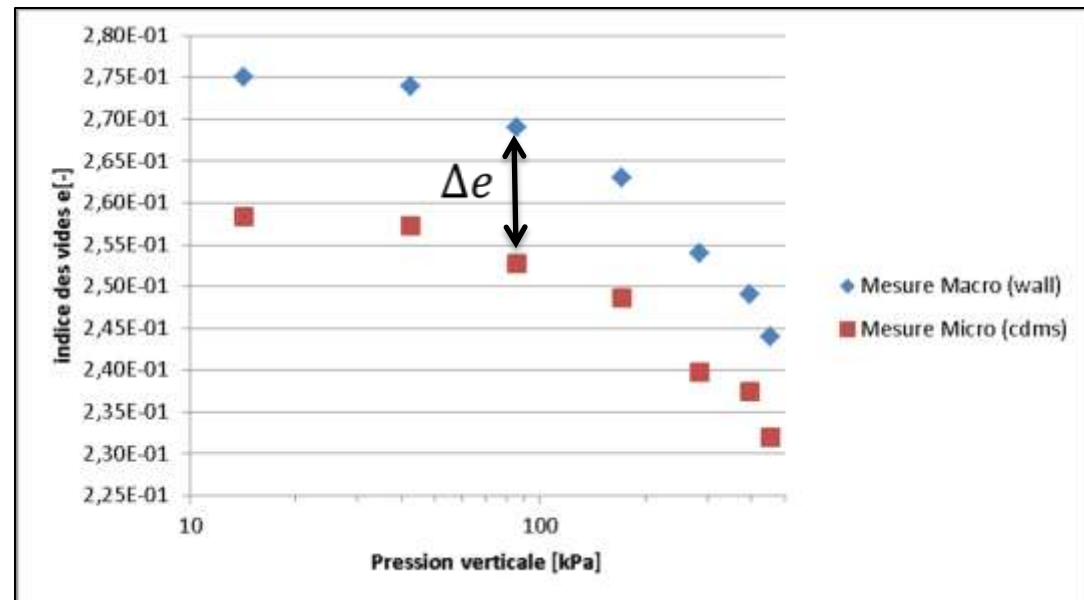
Mesure microscopique \Leftrightarrow macroscopique



$$\Delta e = e_{wall} - e_{cdm}$$

$$\Delta e \cong 1,45 \cdot 10^{-2} [-]$$

$$e_{wall} \cong 94\% e_{cdm}$$



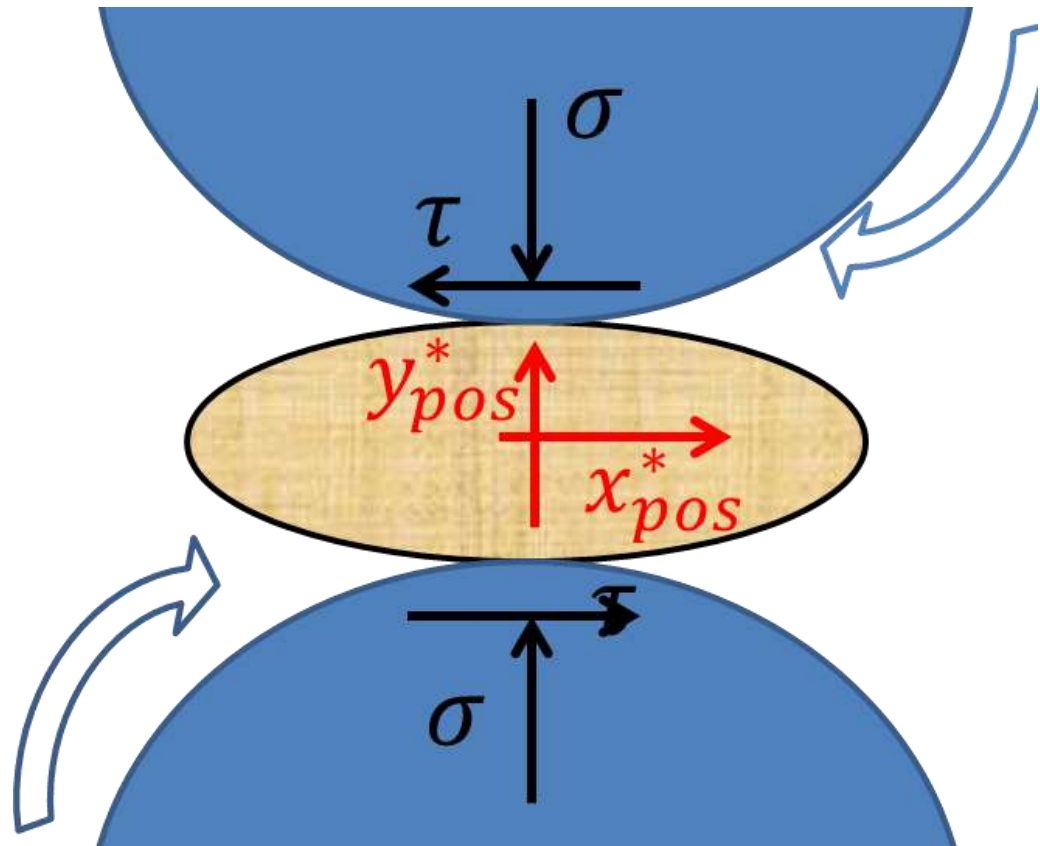
A.6. Essais de cisaillement

Stationnarité spatiale sous
vitesse de rotation élevée

1800 particules
 $\sigma_{confi} = 150 [kPa]$
 $v_{rot} = 3,0 - 5,0 - 20,0 [rad/s]$

$$x_{pos}^* = \sum \frac{N_p (x_p / r_p^2)}{N_p}$$

$$y_{pos}^* = \sum \frac{N_p (y_p / r_p^2)}{N_p}$$



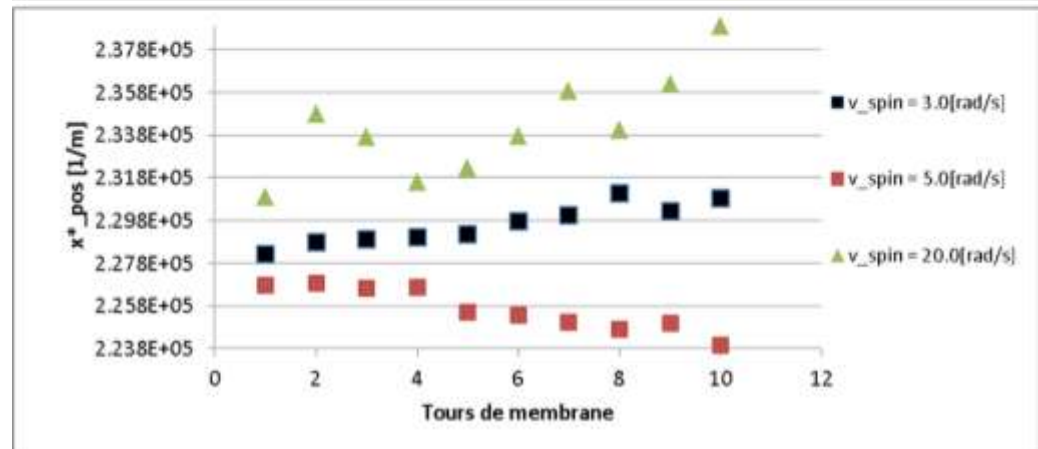
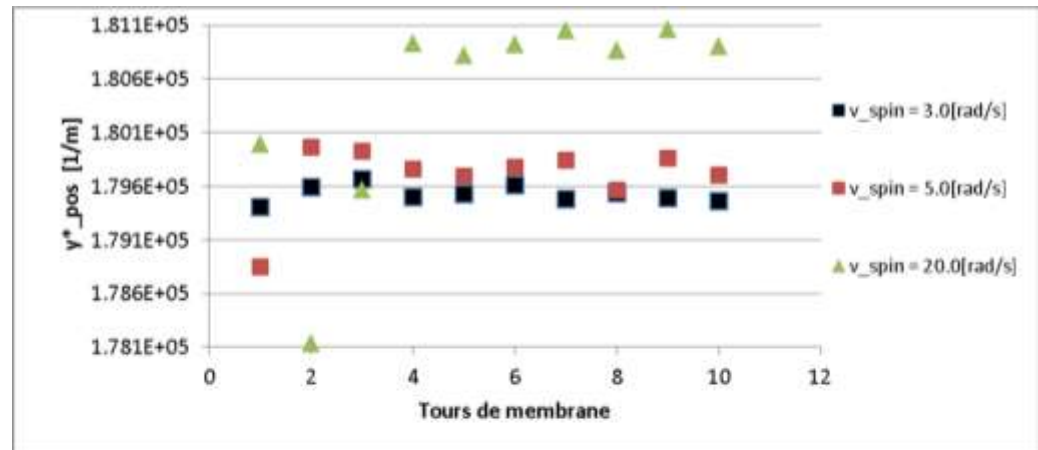
A.7. Essais de cisaillement

Stationnarité spatiale sous
vitesse de rotation élevée

1800 particules
 $\sigma_{confi} = 150 [kPa]$
 $v_{rot} = 3,0 - 5,0 - 20,0 [rad/s]$

$$x_{pos}^* = \sum \frac{N_p (x_p / r_p^2)}{N_p}$$

$$y_{pos}^* = \sum \frac{N_p (y_p / r_p^2)}{N_p}$$



A.8. Essais de cisaillement

Proposition d'un nouveau dispositif de test

