

Investigations microscopiques des couplages fluide/grains dans les milieu granulaires ou cohésifs

**P. PHILIPPE¹, F. BRUNIER-COULIN¹, C.D. NGUYEN¹,
J. NGOMA¹, R. BEGUIN¹, S.E. MENA², E.V. DIAZ GONZALEZ³**

1: IRSTEA, Aix-Marseille Univ., RECOVER, Aix-en-Provence, France

2: University of Florida, Chemical Engineering, Gainesville, FL, USA

3: Autonomous University of the state of Mexico, Mexico

Plan de l'exposé

I) Contexte et motivations

II) Méthodologie

III) Exemples

a - Sols granulaires

b - Sols cimentés

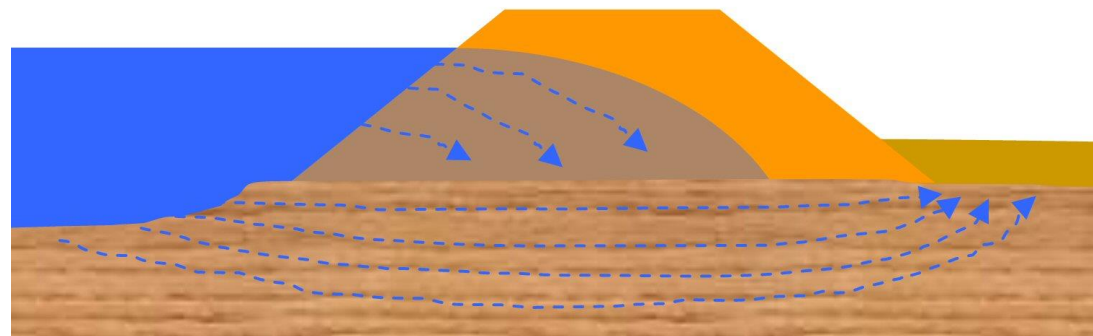
Erosion des ouvrages hydrauliques en terre

Risque majeur pour la sécurité des barrages et des digues

Erosion externe → **Surverse** ~ 50% des ruptures de barrages [Forster, 2000]



Erosion interne → **Infiltration** ~ 45% des ruptures de barrages [Forster, 2000]



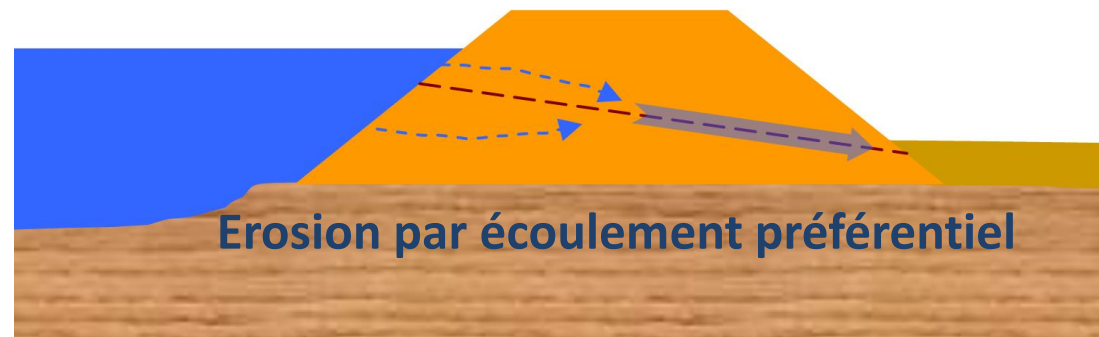
Erosion des ouvrages hydrauliques en terre

Risque majeur pour la sécurité des barrages et des digues

Erosion externe → **Surverse** ~ 50% des ruptures de barrages [Forster, 2000]



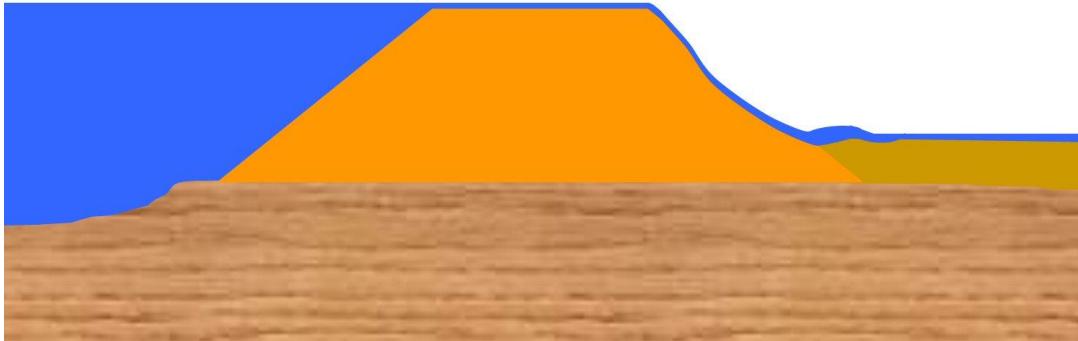
Erosion interne → **Infiltration** ~ 45% des ruptures de barrages [Forster, 2000]



Erosion des ouvrages hydrauliques en terre

Risque majeur pour la sécurité des barrages et des digues

Erosion externe → **Surverse** ~ 50% des ruptures de barrages [Forster, 2000]



Erosion interne → **Infiltration** ~ 45% des ruptures de barrages [Forster, 2000]



Erosion des ouvrages hydrauliques en terre

Risque majeur pour la sécurité des barrages et des digues

Erosion externe → **Surverse** ~ 50% des ruptures de barrages [Forster, 2000]



Erosion interne → **Infiltration** ~ 45% des ruptures de barrages [Forster, 2000]



Erosion des ouvrages hydrauliques en terre

Risque majeur pour la sécurité des barrages et des digues

Erosion externe → **Surverse** ~ 50% des ruptures de barrages [Forster, 2000]



Erosion interne → **Infiltration** ~ 45% des ruptures de barrages [Forster, 2000]



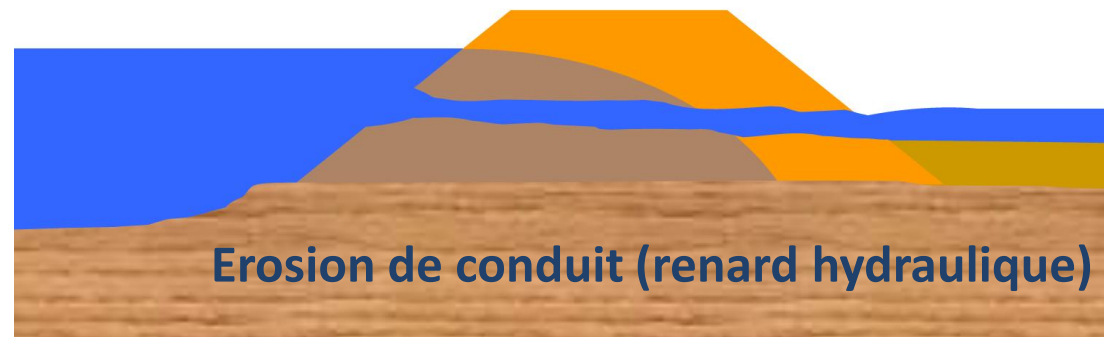
Erosion des ouvrages hydrauliques en terre

Risque majeur pour la sécurité des barrages et des digues

Erosion externe → **Surverse** ~ 50% des ruptures de barrages [Forster, 2000]



Erosion interne → **Infiltration** ~ 45% des ruptures de barrages [Forster, 2000]



Rupture du barrage de Teton (Idaho - 1976)



source web:

A. G. Sylvester, Santa Barbara University
<http://www.geol.ucsb.edu/faculty/sylvester>

Rupture du barrage de Teton (Idaho - 1976)



source web:

A. G. Sylvester, Santa Barbara University
<http://www.geol.ucsb.edu/faculty/sylvester>

Rupture du barrage de Teton (Idaho - 1976)



source web:

A. G. Sylvester, Santa Barbara University
<http://www.geol.ucsb.edu/faculty/sylvester>

Rupture du barrage de Teton (Idaho - 1976)



source web:

A. G. Sylvester, Santa Barbara University
<http://www.geol.ucsb.edu/faculty/sylvester>

Quelques autres victimes plus récentes...



Zoeknog, South
Africa (1993)



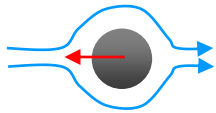
Algodões,
Brazil (2009)



Lianfeng,
China (2013)

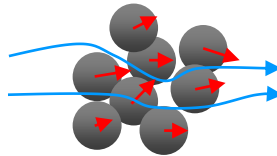
Couplage fluide/grains : questions scientifiques

Grain mobile dans un écoulement



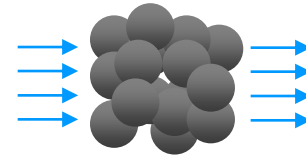
$$C_d = f(Re)$$

Grains mobiles en **interaction** avec un écoulement interstitiel



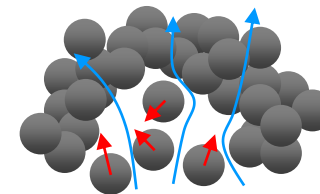
Couplage mésoscopique

Écoulement interstitiel dans un empilement statique



Darcy, Ergun

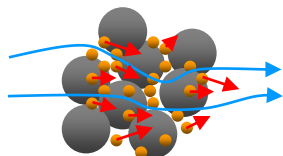
→ **Rétro-action** entre l'écoulement et la structure granulaire évolutive



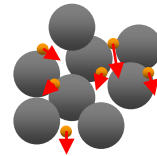
Hétérogénéités induites

→ Action **différentiée** du fluide selon la taille des particules solides

↔ **Volume**

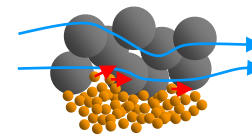


Écoulement macroscopique



Fluide au repos

↔ **Interface**



Écoulement macroscopique

Motivations des investigations microscopiques

→ Améliorer notre compréhension des **mécanismes locaux** de l'érosion interne et des instabilités hydro-mécaniques en jeu

→ Relier les **mesures moyennes macroscopiques** aux valeurs **locales** et à leurs **fluctuations**

↳ **Distributions** spatiales et/ou temporelles

↳ **Perte d'homogénéité** à l'échelle de l'échantillon

→ Interroger la **pertinence** des lois **empiriques** proposées pour l'**érosion locale** d'un sol

$$\varepsilon = k_{er}(\tau - \tau_c)$$

[Ariathurai, 1978]
[Partheniades, 1965]

Plan de l'exposé

I) Contexte et motivations

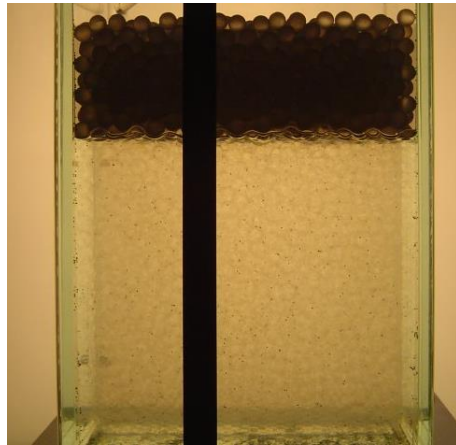
II) Méthodologie

III) Exemples

a - Sols granulaires

b - Sols cimentés

Mise au point d'une sonde optique locale

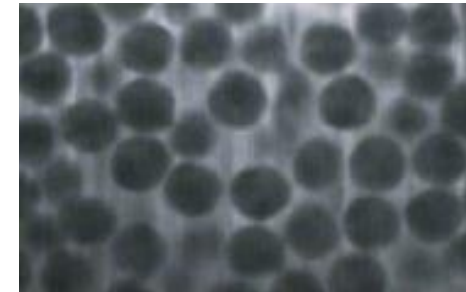


Milieu iso-indice
+
Fluorescence induite
par plan laser

Colorant fluorescent
(phase liquide)

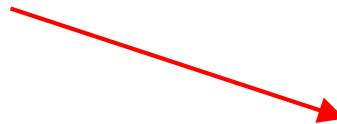


Tomographie



S1

Traceurs fluorescents
(phase liquide)

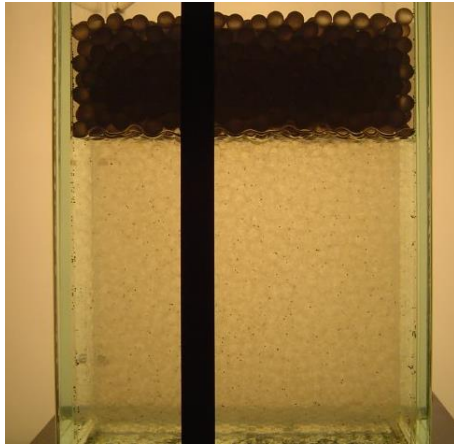


Suivi de traceurs fluides



S2f

Mise au point d'une sonde optique locale



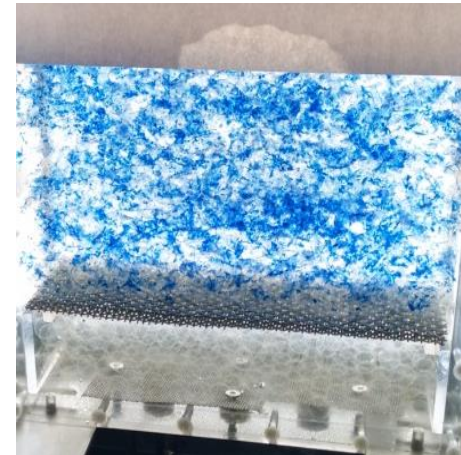
Milieu iso-indice

+

~~Fluorescence induite
par plan laser~~

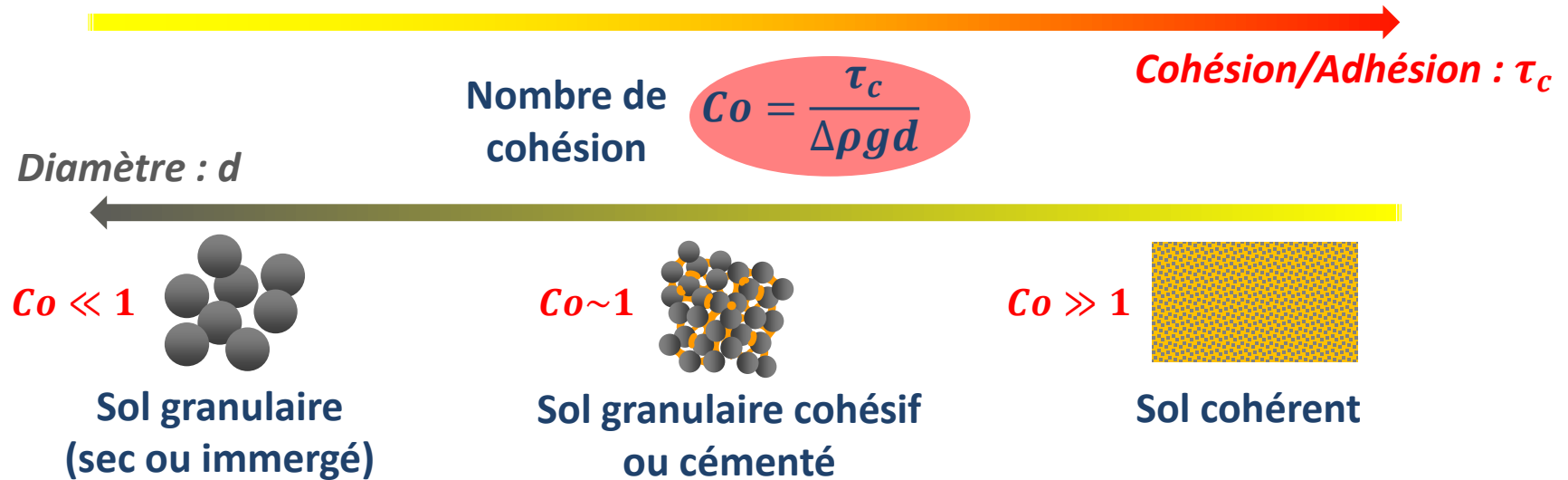
Particules opaques
(phase solide)

Suivi de traceurs solides

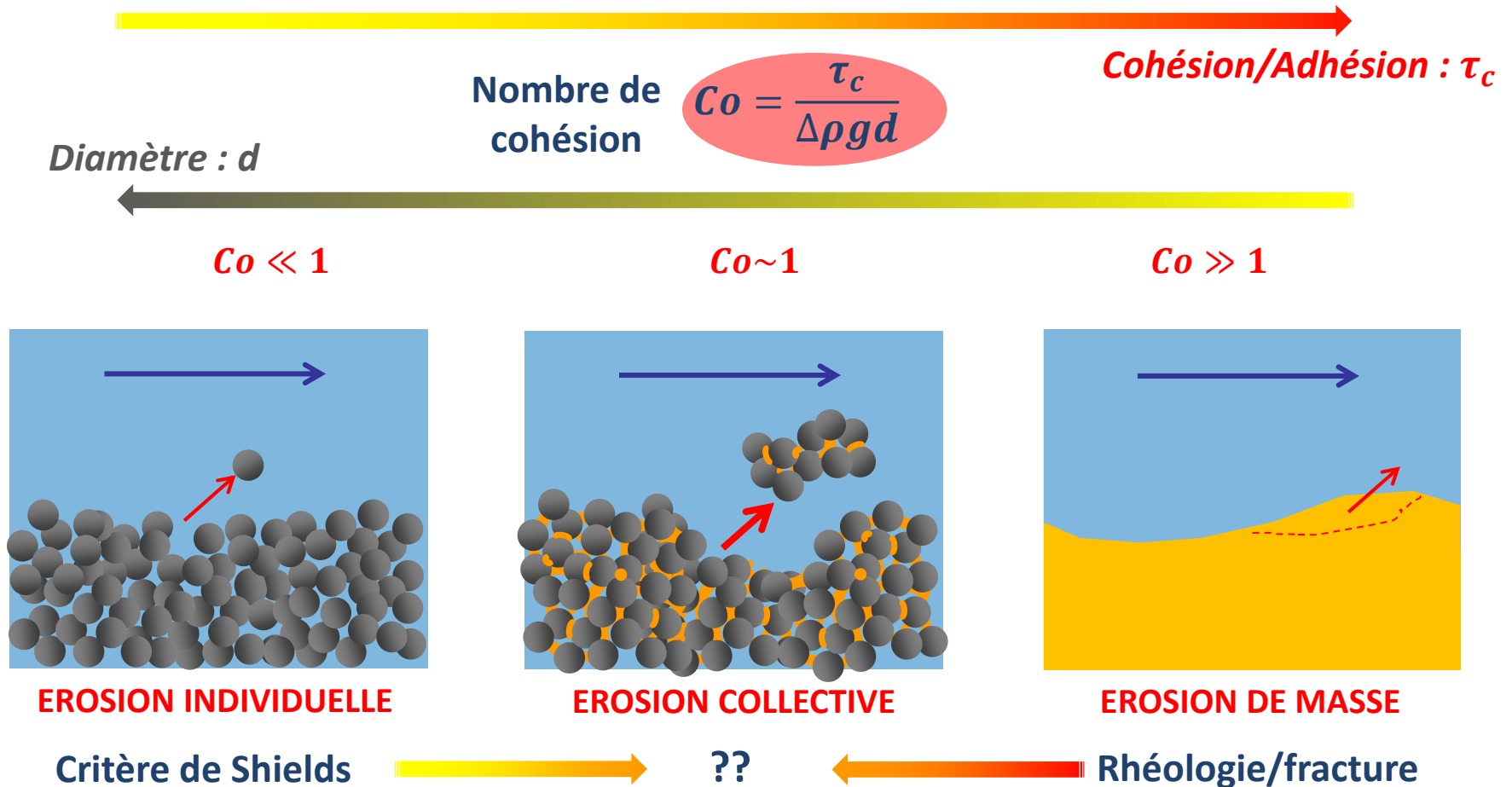


S2s

Sols granulaires cohésifs : cadre conceptuel

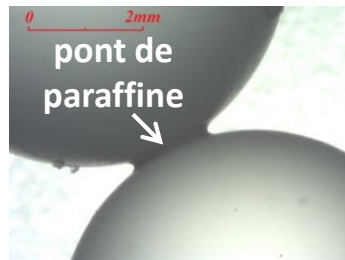


Sols granulaires cohésifs : cadre conceptuel



Sols granulaires cohésifs artificiels

Ponts solides



$\tau_c ?$



Billes de verre avec ponts cohésifs

ponts liquides



$\tau_c ?$

↪ capillarité

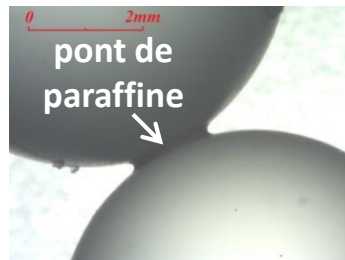
$$\tau_c \sim \frac{\gamma}{d}$$

↪ résistance à la traction

Sols granulaires cohésifs artificiels

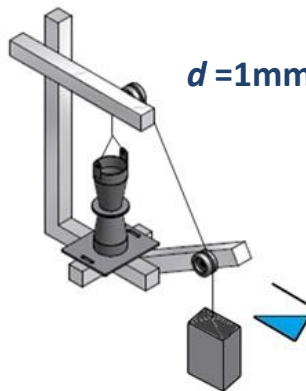
→ Tests mécaniques de traction

Ponts solides



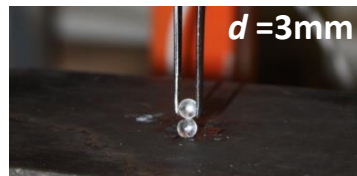
$\tau_c ?$

↔ résistance à la traction



→ Echelle de l'échantillon : τ_M (Pa)

$$C_o = \frac{\tau_M}{\Delta\rho g d}$$



→ Echelle du contact : F_m (mN)

$$\tau_M \approx 1.25 \frac{F_m}{d^2}$$

Formule de Rumpf

Plan de l'exposé

I) Contexte et motivations

II) Méthodologie

III) Exemples

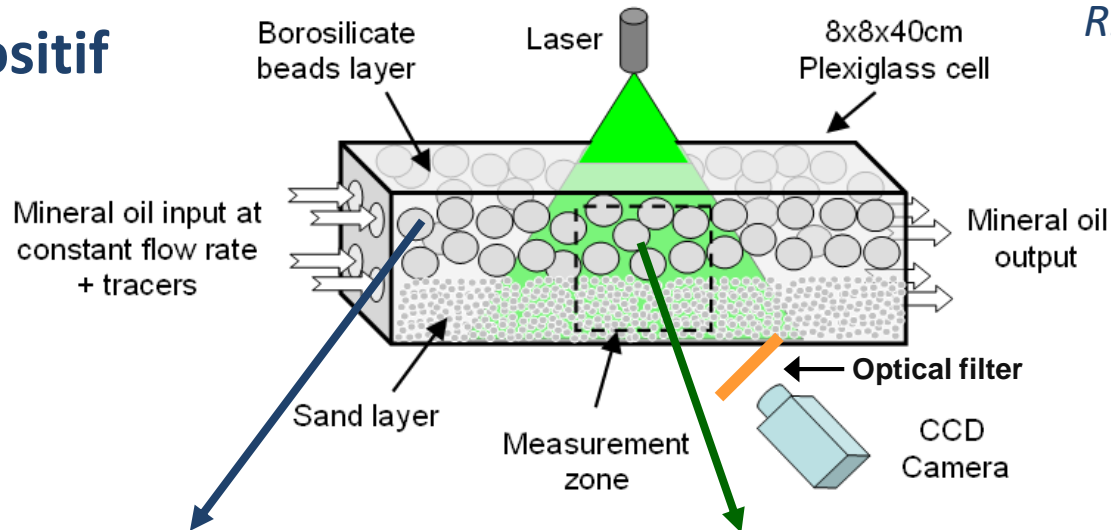
a - Sols granulaires

b - Sols cimentés

Hydrodynamique de l'érosion de contact

1/Dispositif

R. Béguin (2008-2011)

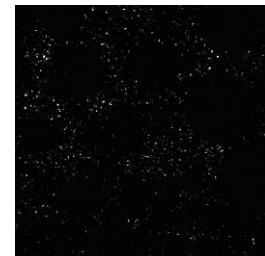
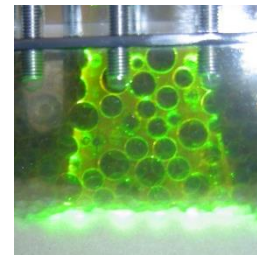


Milieu iso-indice

Fluorescence induite par laser

billes borosilicate
($d=7,3$ & $9,7\text{mm}$)

huile minérale
($\mu \approx 3.10^{-5} \text{ Pa.s}$)



colorant  S1

traceurs  S2f

Hydrodynamique de l'érosion de contact

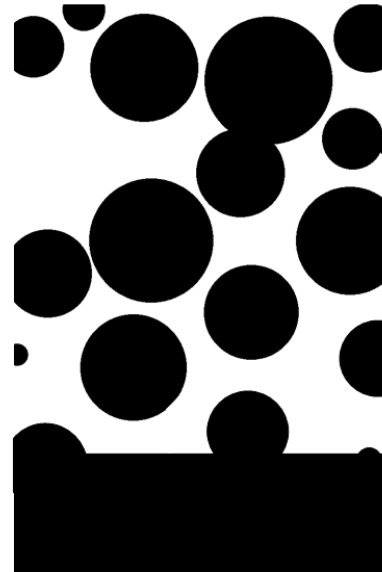
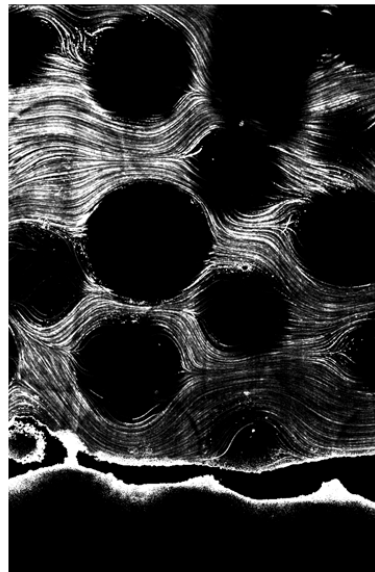
2/Post-traitement

R. Béguin (2008-2011)

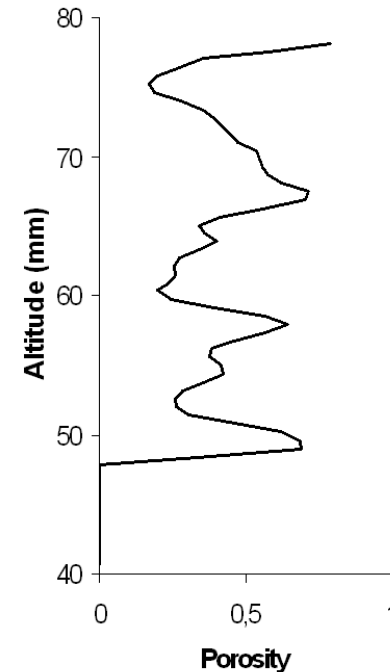
Porosité



S1



Logiciel : **ImageJ**



→ Masque de correction pour le champ de vitesse

→ Porosité (profil vertical)

Hydrodynamique de l'érosion de contact

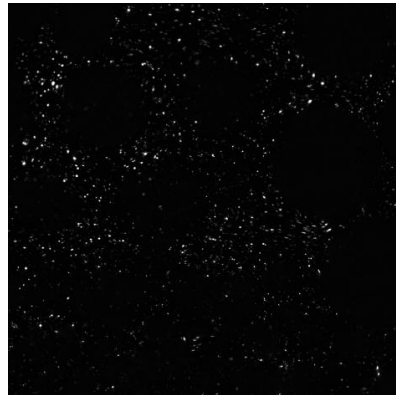
2/Post-traitement

R. Béguin (2008-2011)

Vitesse



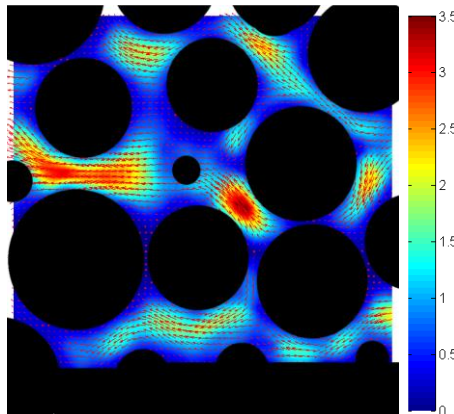
S2f



algorithme PIV
avec masque

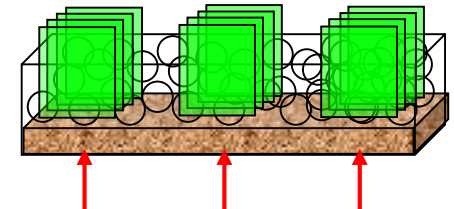
Logiciel : **DPIVsoft**

[Meunier, 2007]



moyenne temporelle
sur 250 champs bruts

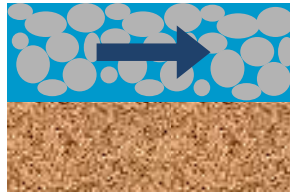
+ moyenne spatiale



Hydrodynamique de l'érosion de contact

2/Post-traitement

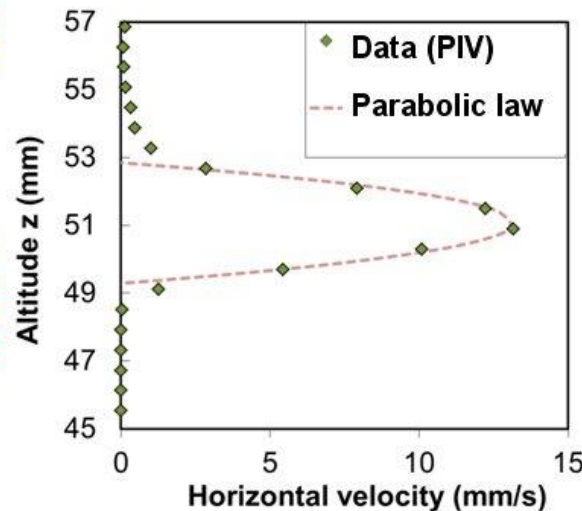
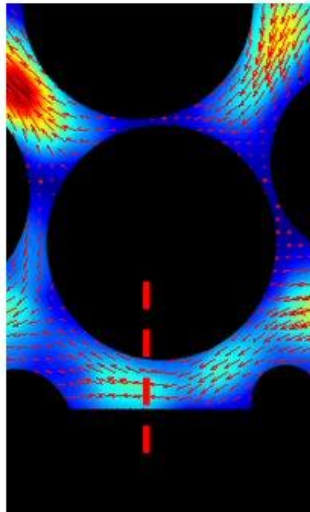
R. Béguin (2008-2011)



Modélisation de l'érosion → contrainte à la surface de la couche de sol fin (sable)

↪ **loi locale** $\varepsilon = k_{er}(\tau - \tau_c)$ [Ariathurai, 1978]
[Partheniades, 1965]

Cisaillement



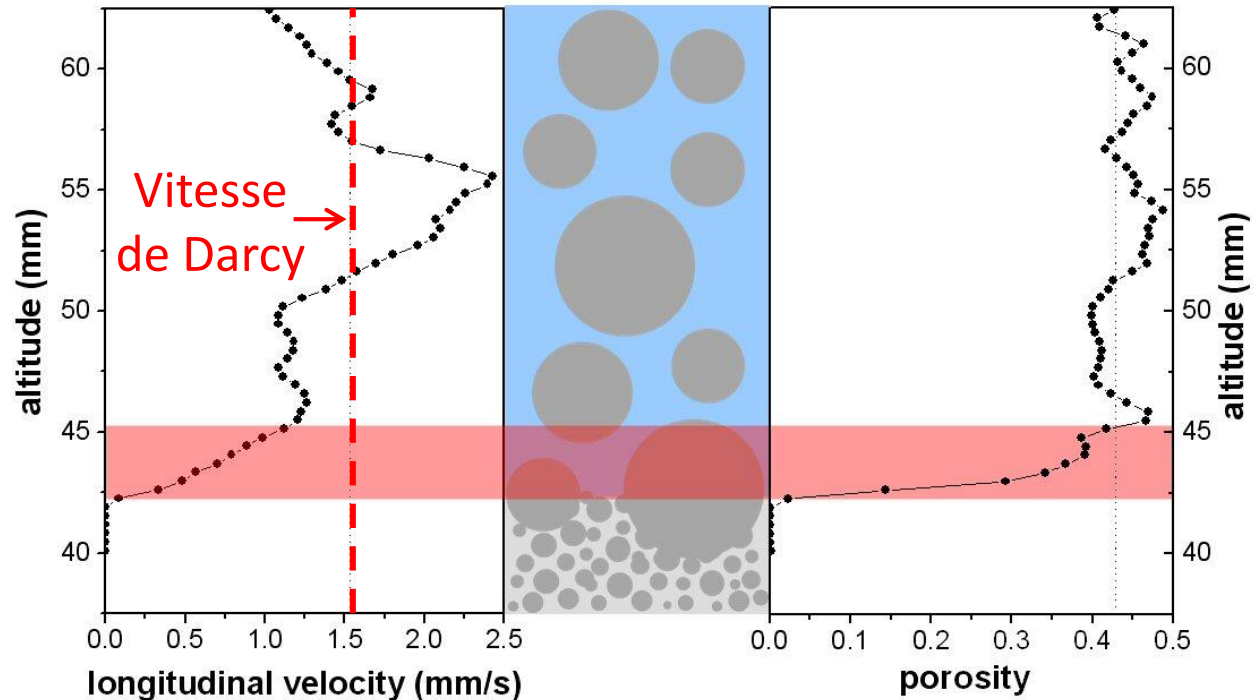
→ Composante longitudinale de la contrainte de cisaillement visqueux

Hydrodynamique de l'érosion de contact

3/Résultats

R. Béguin (2008-2011)

Zone de transition



- forte **variabilité spatiale**
- corrélation porosité/vitesse
- **représentativité** de la vitesse moyenne ?

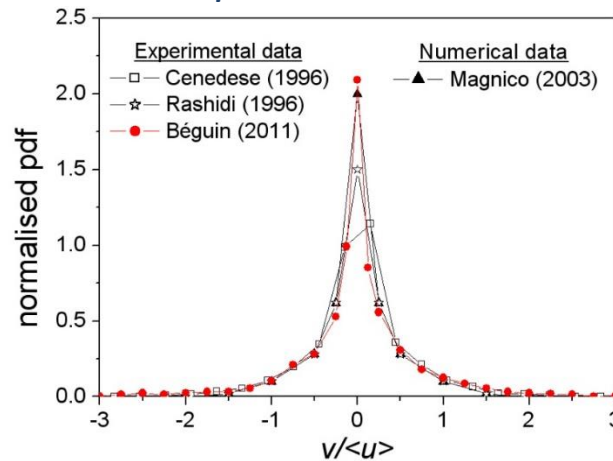
Hydrodynamique de l'érosion de contact

3/Résultats

R. Béguin (2008-2011)

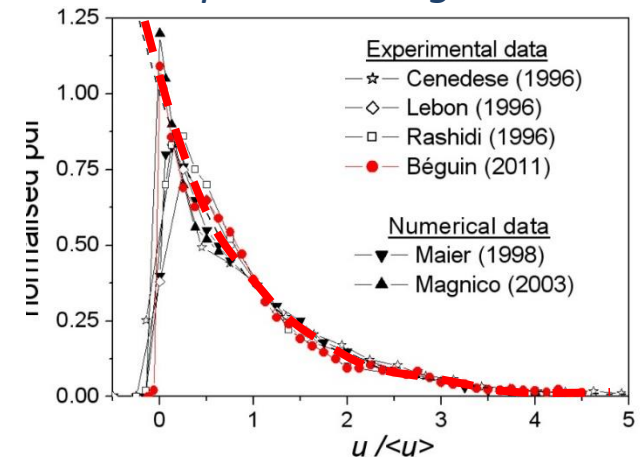
Distribution des vitesses

Composante transverse



→ distribution symétrique et resserrée

Composante longitudinale



→ distribution asymétrique et étendue

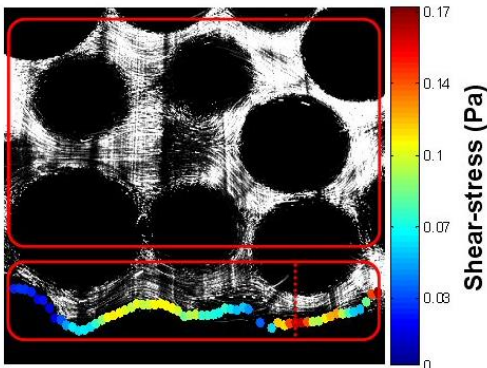
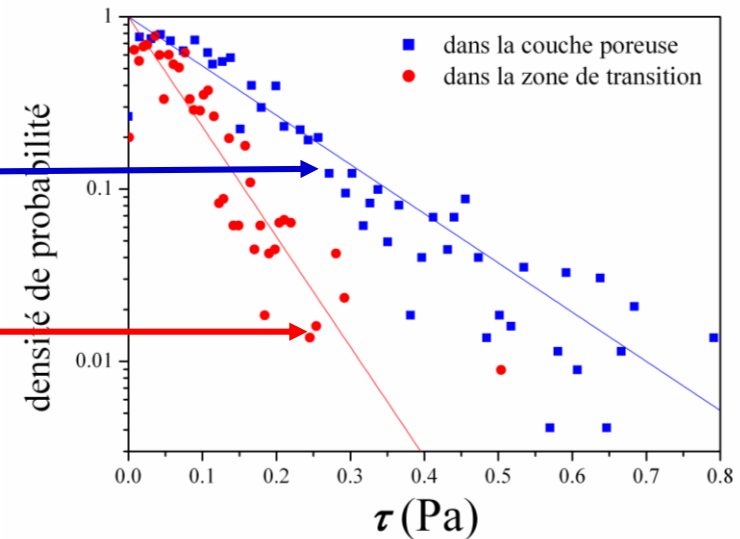
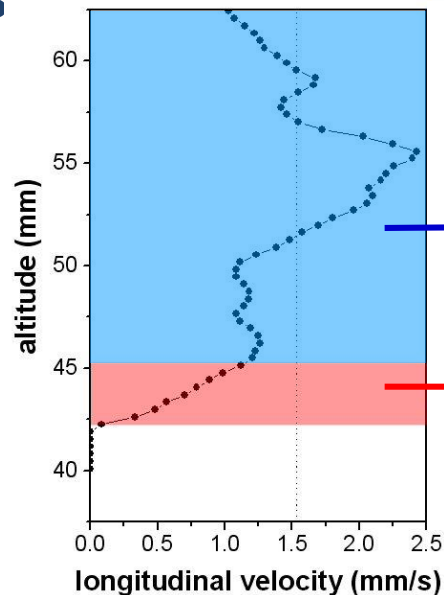
↪ loi exponentielle $f(u) = \frac{1}{\langle u \rangle} \exp\left(-\frac{u}{\langle u \rangle}\right)$

Hydrodynamique de l'érosion de contact

3/Résultats

R. Béguin (2008-2011)

Distribution
des
contraintes



↪ loi exponentielle $f(\tau) = \frac{1}{\langle \tau \rangle} \exp\left(-\frac{\tau}{\langle \tau \rangle}\right)$

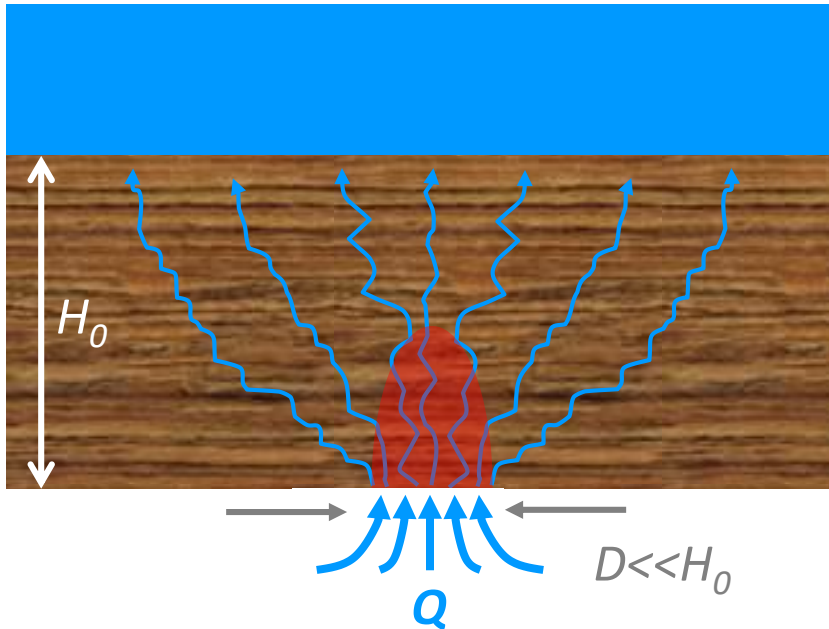
↪ effet de paroi $\langle \tau \rangle_{bulk} \approx 2 \langle \tau \rangle_{transition}$

→ INHIBITION
DE L'ÉROSION

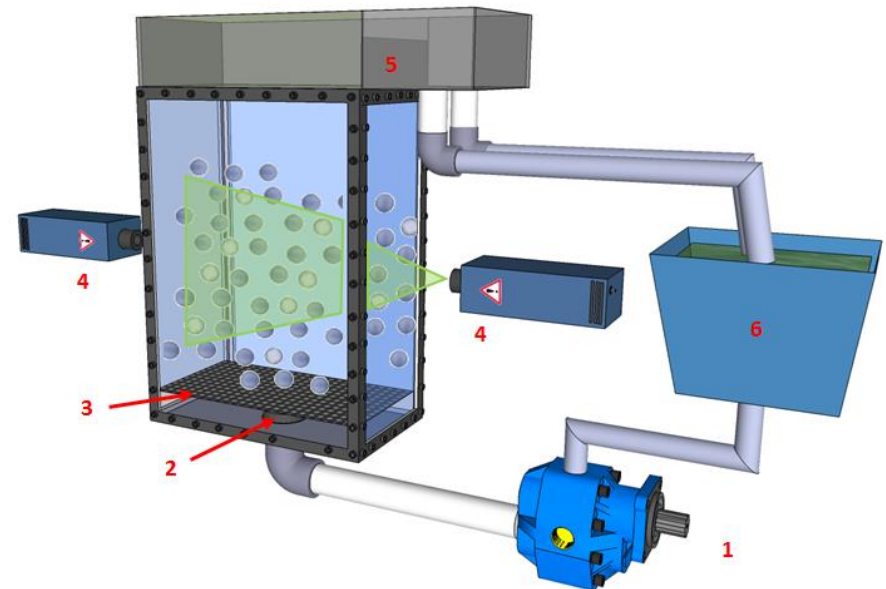
Fluidisation localisée d'une couche granulaire

1/Contexte et dispositif

J. Ngoma (2011-2014)
S. E. Mena (2013-2014)



- Régimes stationnaires
 - Seuil(s)
- Régimes transitoires



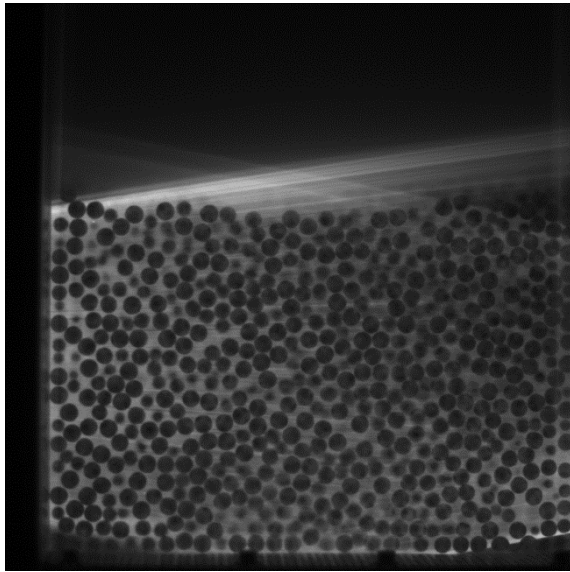
- 1: Gear pump. 2: Injection port. 3: Metallic mesh plate.
4: Planar lasers. 5: Over-flow set-up. 6: Reservoir.

Fluidisation localisée d'une couche granulaire

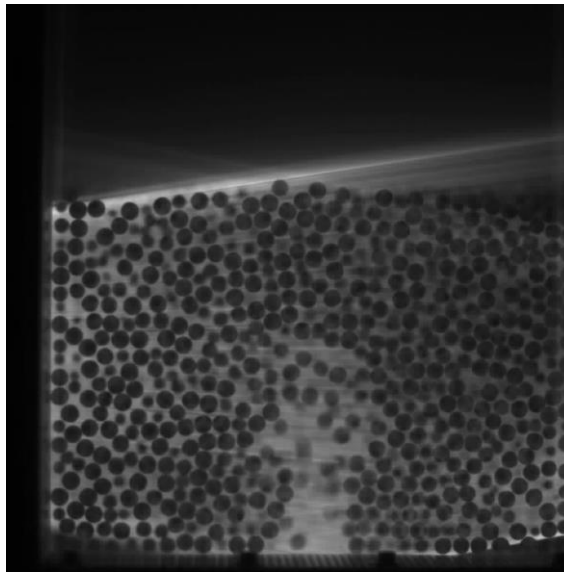
2/Résultats: régimes stationnaires

J. Ngoma (2011-2014)
S.E. Mena (2013-2014)

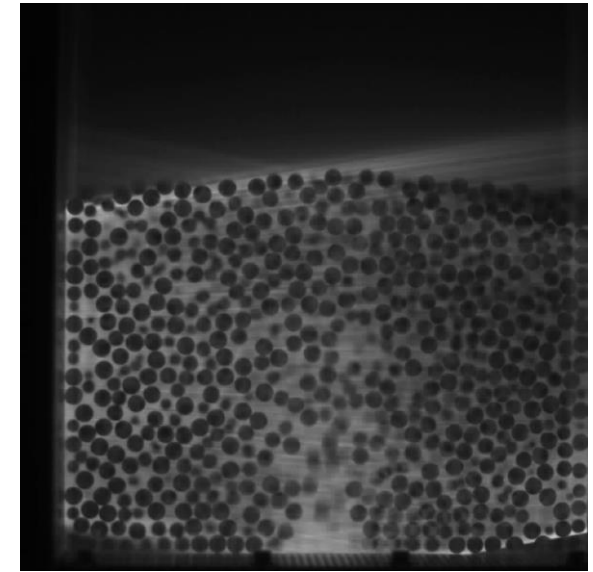
→ *Lit statique*



→ *Cavité fluidisée*



→ *Cheminée fluidisée*

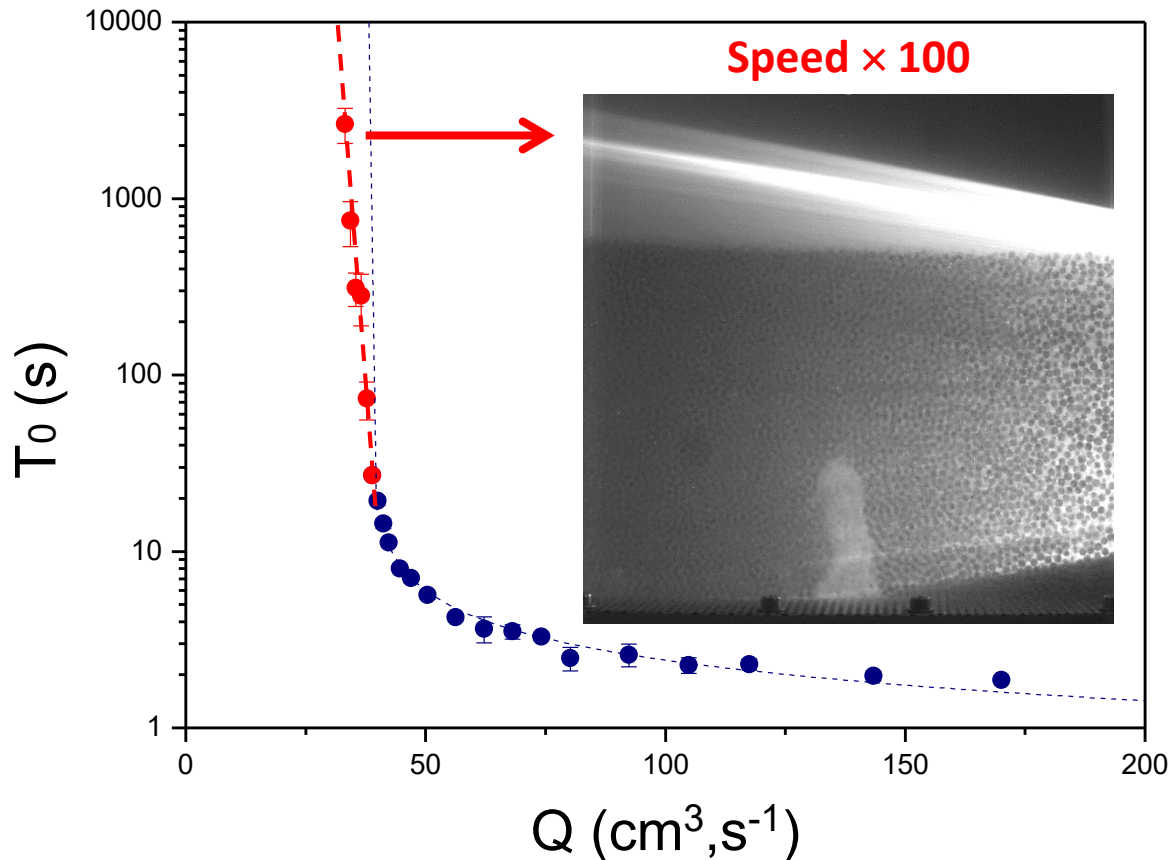


Augmentation du débit Q

Fluidisation localisée d'une couche granulaire

2/Résultats: régimes transitoires

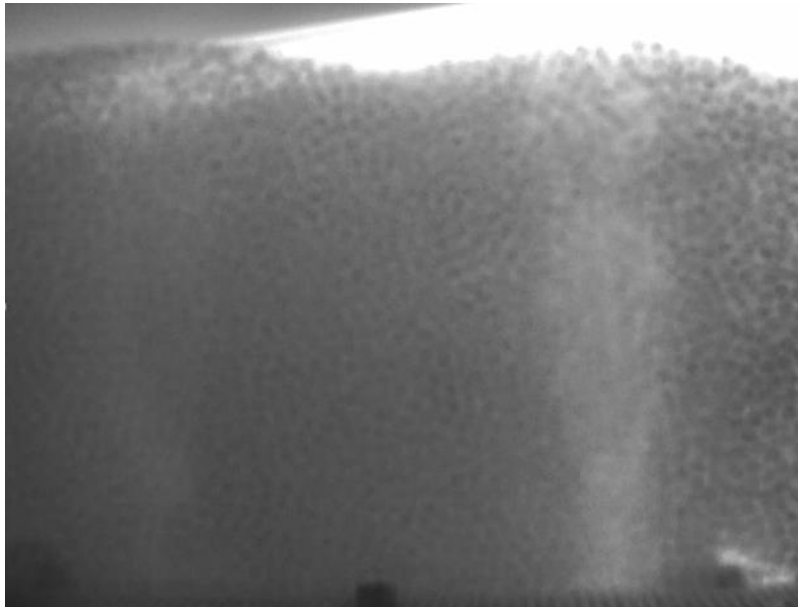
J. Ngoma (2011-2014)
S.E. Mena (2013-2014)



Fluidisation localisée d'une couche granulaire

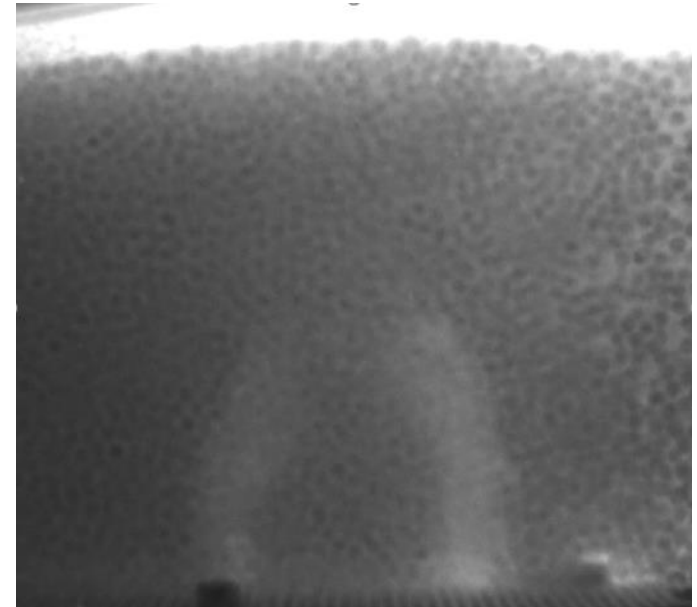
2/Résultats: interaction entre 2 sources

J. Ngoma (2011-2014)
S.E. Mena (2013-2014)



Pas d'interaction

$$Q_{chim}^{1s} < Q_{chim}^{2s} < 2Q_{chim}^{1s}$$



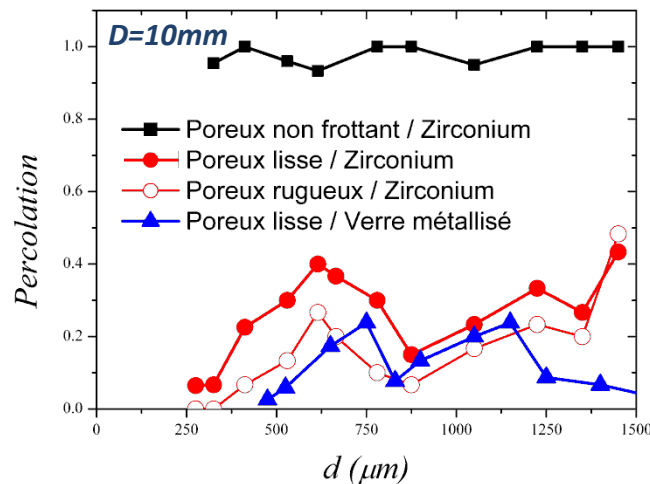
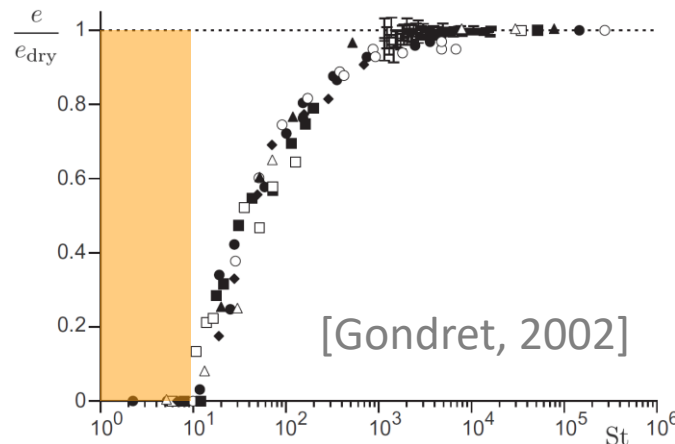
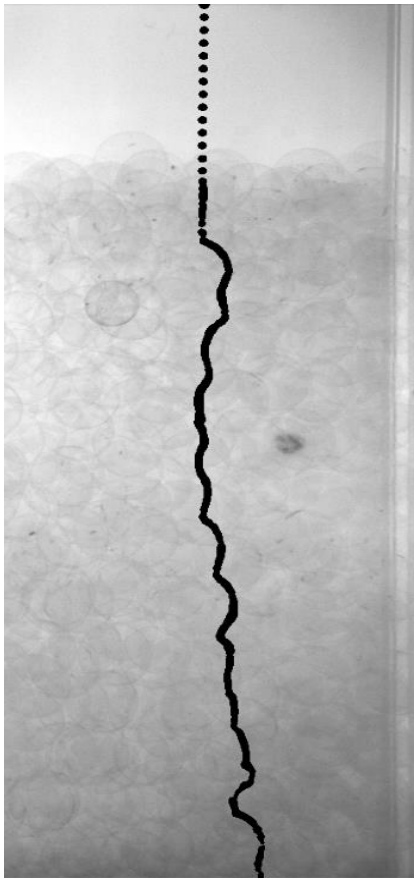
Interaction !

$$Q_{chim}^{2s} \sim Q_{chim}^{1s}$$

Filtration granulaire en régime visqueux

Traceurs opaques 

S2s



F. Brunier-Coulin (2013)

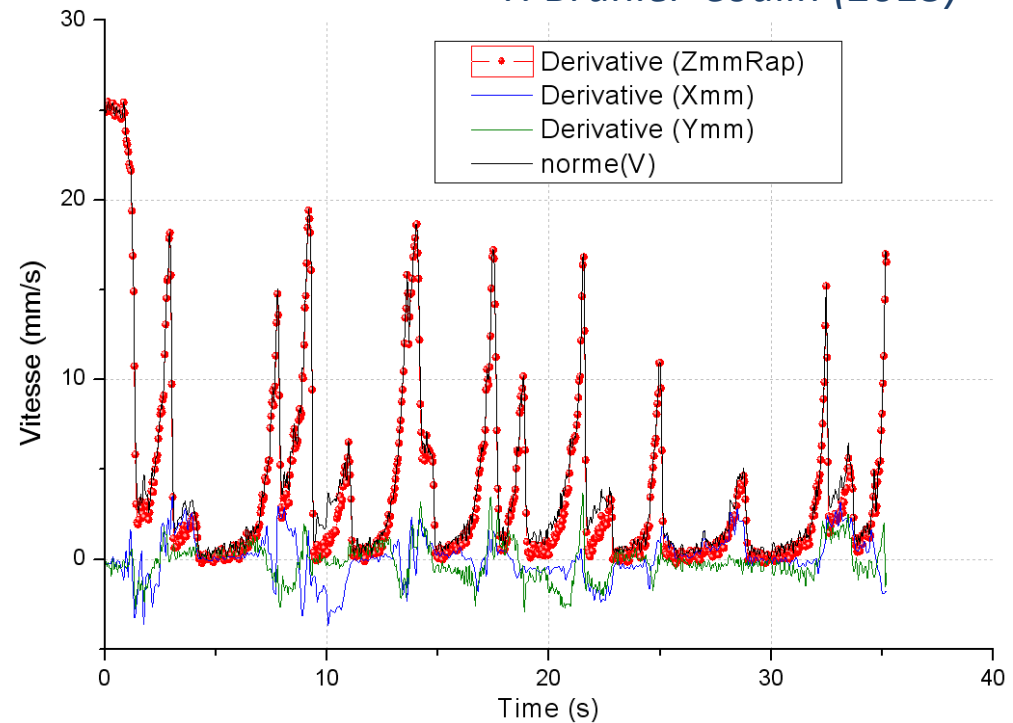
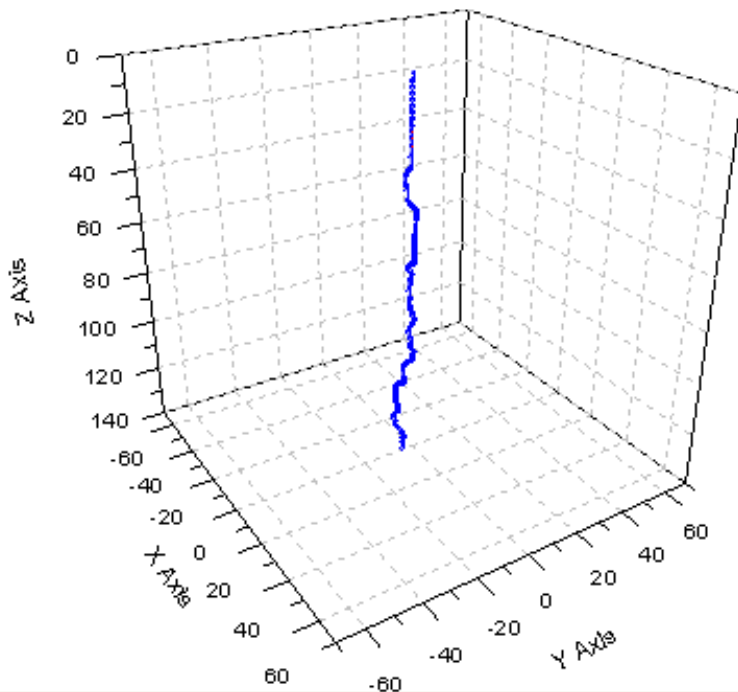
↳ Régime visqueux
= **sans rebond**

↳ Nouveau mode
de piégeage
« **visco-frictionnel** »
(2 points de contact)

→ Origine(s) du
comportement très
discriminant sur la **taille**
des particules?

Filtration granulaire en régime visqueux

F. Brunier-Coulin (2013)



Logiciel : **Origin**

Traitement : correction des distorsions, synchronisation des caméras

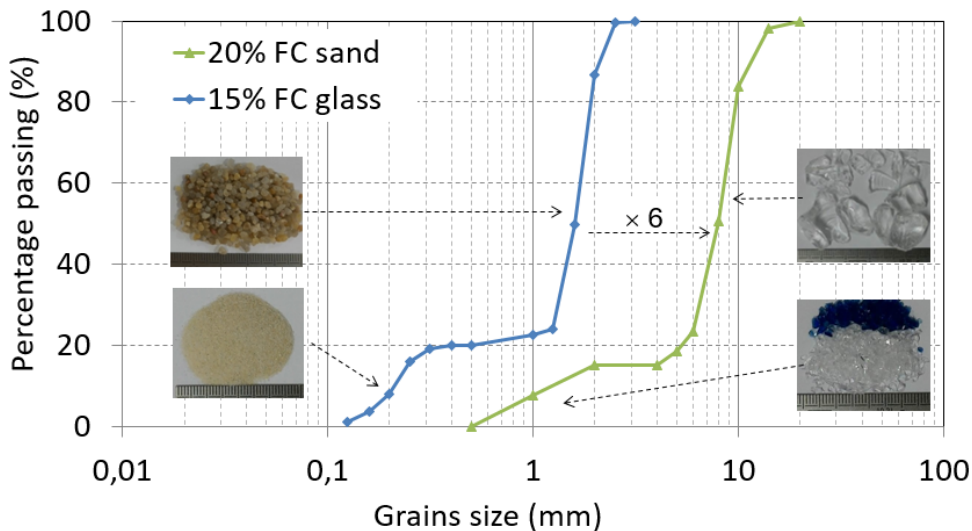
→ analyse **statistique**

Observation locale de la suffusion

Matériaux : courbes granulométriques en quasi-similitude sur la base de la conservation du nombre de Shields

C.D. Nguyen (2015-2018)
E.V. Diaz-Gonzalez (2016)

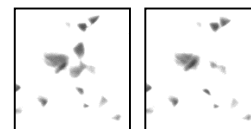
$$Sh_{\tau}^* = \frac{\tau_b^*}{\Delta\rho g d} \rightarrow d_s \approx 6 \times d_0$$



Traceurs opaques  S2s



Augmentation du gradient i



Détection locale (mouvement)

Observation de fines en sortie (transport)



Plan de l'exposé

I) Contexte et motivations

II) Méthodologie

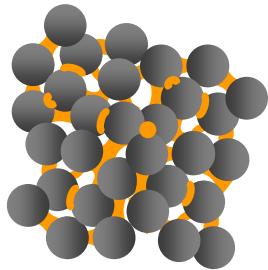
III) Exemples

a - Sols granulaires

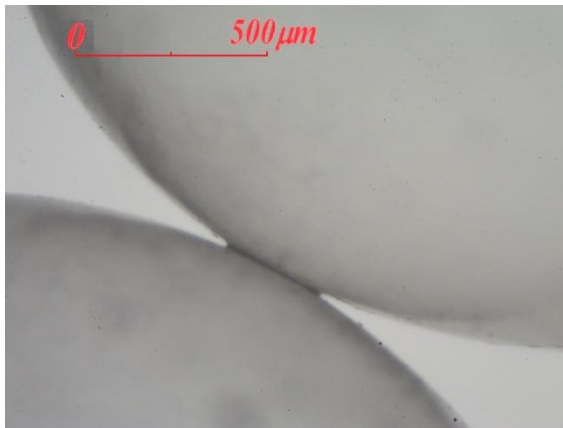
b - Sols cimentés

Erosion par jet impactant d'un sol cimenté artificiel

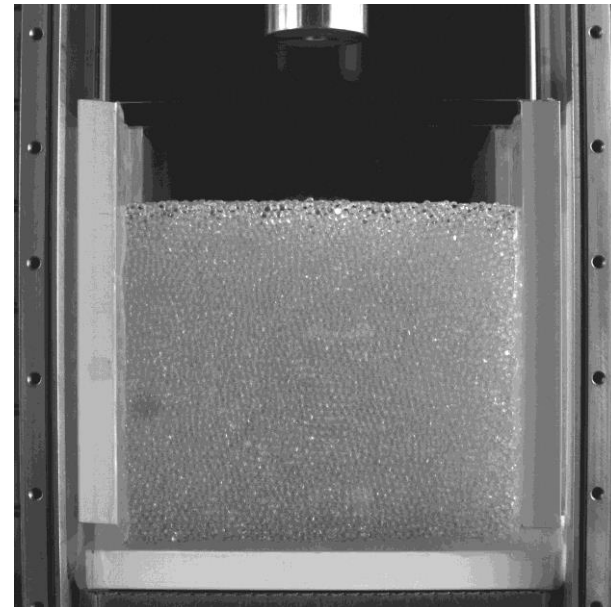
F. Brunier-Coulin (2013-2016)



**Billes de verre
avec ponts
solides**

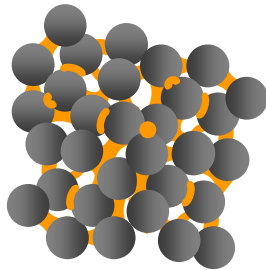


Pont solide de résine polyuréthane
entre deux billes de verre
borosilicate de diamètre 3mm

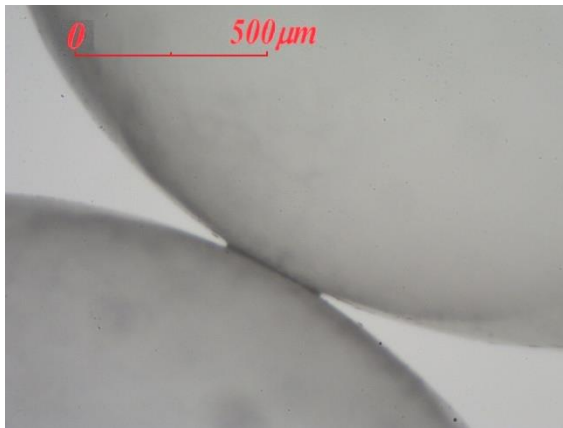


Erosion par jet impactant d'un sol cimenté artificiel

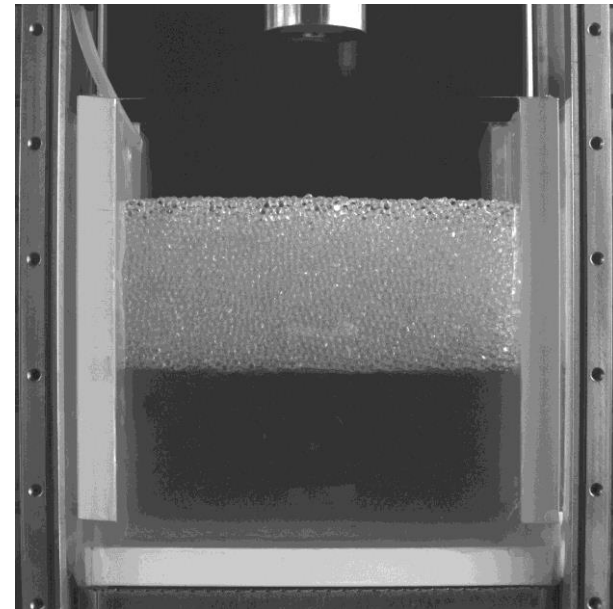
F. Brunier-Coulin (2013-2016)



**Billes de verre
avec ponts
solides**



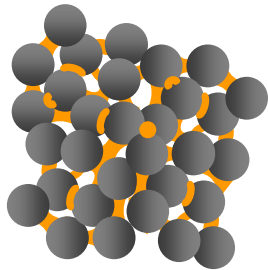
Pont solide de résine polyuréthane
entre deux billes de verre
borosilicate de diamètre 3mm



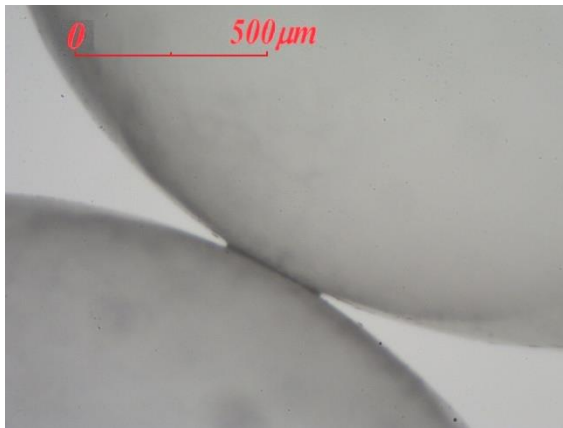
**Saturation par un
liquide ajusté
optiquement**

Erosion par jet impactant d'un sol cimenté artificiel

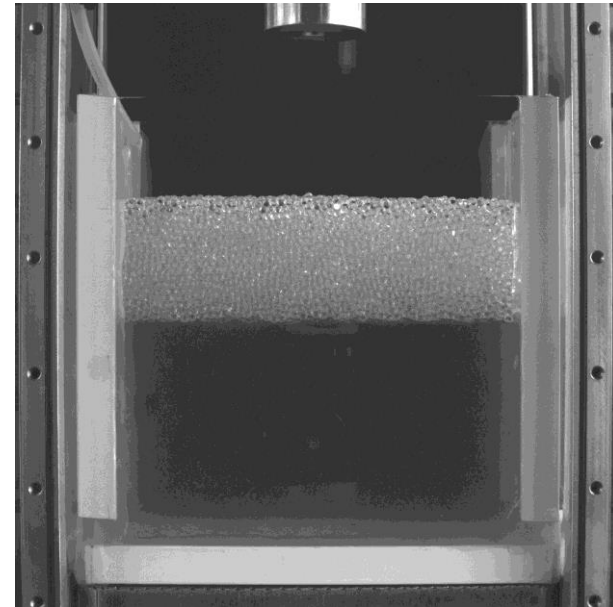
F. Brunier-Coulin (2013-2016)



**Billes de verre
avec ponts
solides**



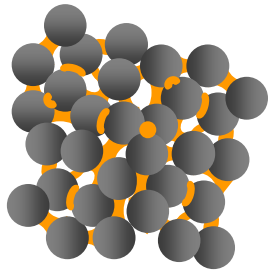
Pont solide de résine polyuréthane
entre deux billes de verre
borosilicate de diamètre 3mm



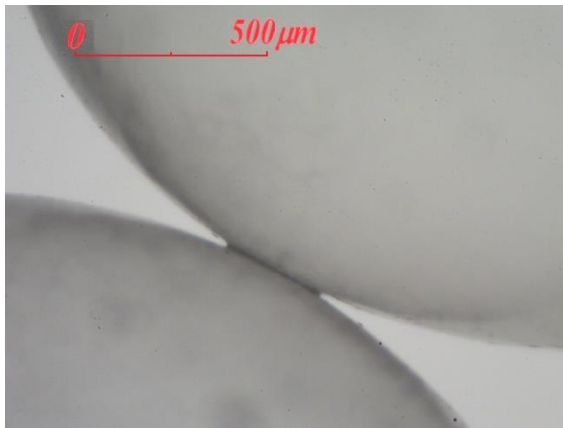
**Saturation par un
liquide ajusté
optiquement**

Erosion par jet impactant d'un sol cimenté artificiel

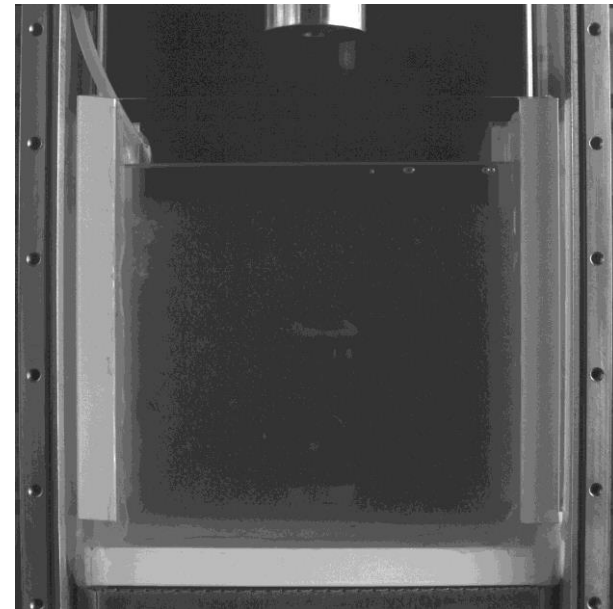
F. Brunier-Coulin (2013-2016)



**Billes de verre
avec ponts
solides**



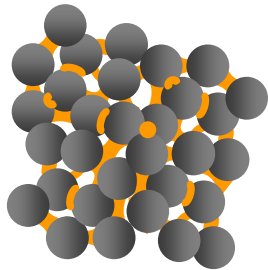
Pont solide de résine polyuréthane
entre deux billes de verre
borosilicate de diamètre 3mm



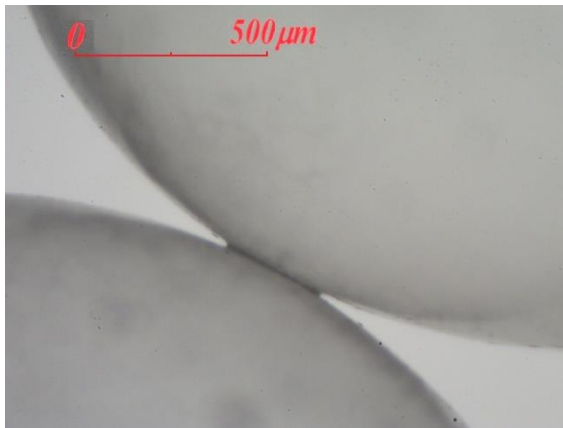
**Saturation par un
liquide ajusté
optiquement**

Erosion par jet impactant d'un sol cimenté artificiel

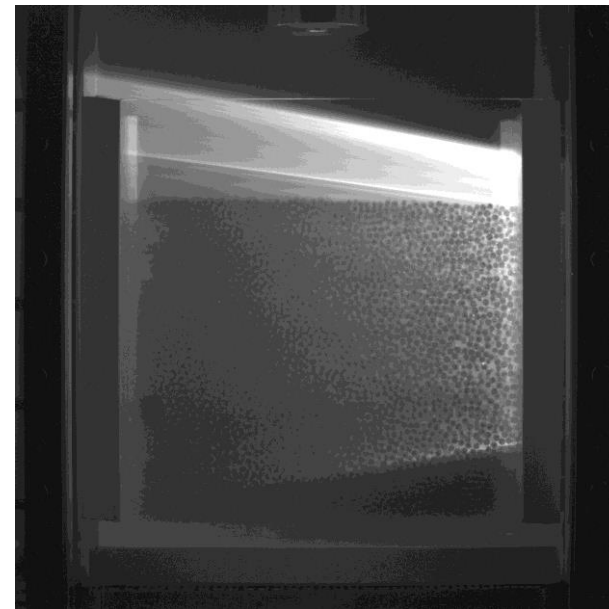
F. Brunier-Coulin (2013-2016)



Billes de verre
avec ponts
solides



Pont solide de résine polyuréthane
entre deux billes de verre
borosilicate de diamètre 3mm

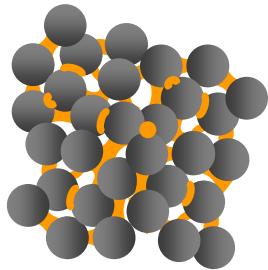


laser

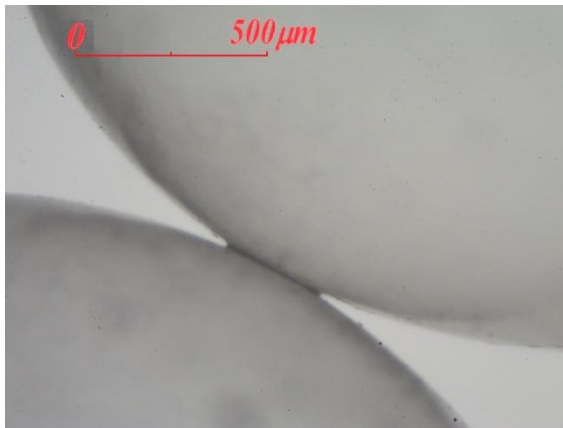
colorant  S1

Erosion par jet impactant d'un sol cimenté artificiel

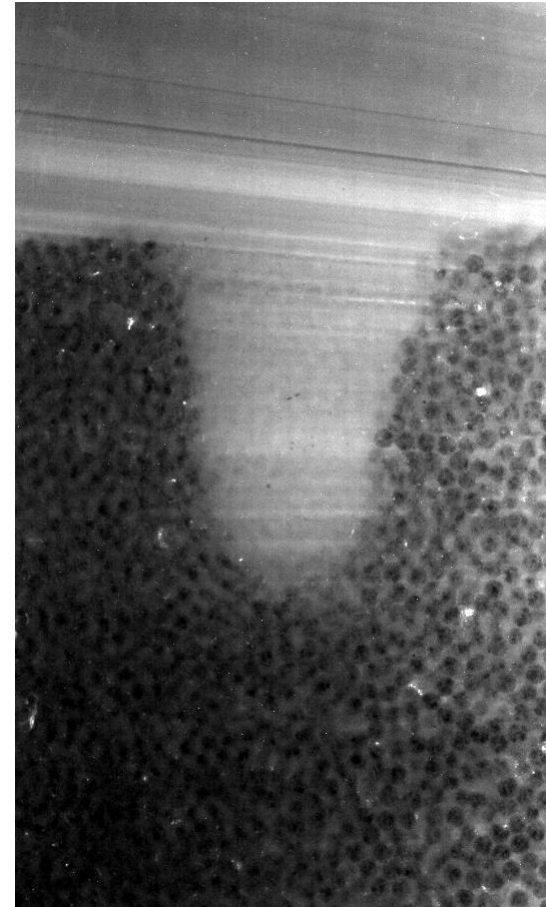
F. Brunier-Coulin (2013-2016)



**Billes de verre
avec ponts
solides**



Pont solide de résine polyuréthane
entre deux billes de verre
borosilicate de diamètre 3mm



Erosion par jet impactant d'un sol cimenté artificiel

Généralisation du nombre de Shields

F. Brunier-Coulin (2013-2016)

Résistance à l'érosion

$$\underbrace{\text{poids déjaugé frottement}}_{\propto \Delta \rho g d} + \underbrace{\text{cohésion adhésion}}_{\propto \tau_{M^*} c_l}$$

$$GSh_{\tau}^* = \frac{\tau_b^*}{\Delta \rho g d + \alpha \tau_{M^*} c_l}$$

$$GSh_{\tau}^* = \frac{Sh_{\tau}^*}{1 + \alpha Co}$$

$$Co = \frac{\tau_M}{\Delta \rho g d}$$

Nombre de cohésion

