Transport de particules : quelques exemples de modélisation pour les écoulements géophysiques

Laurence Girolami

Tim Druitt & Olivier Roche (LMV, France)

Anthony Wachs & Guillaume Vinay (IFP-EN, France)

Eliza Calder & Marcus Bursik (CGS, NY, USA)

Shinji Takarada & Fukashi Maeno (GSJ – ERI, Japon)

John Sherwood & François Charru (IMFT, France)

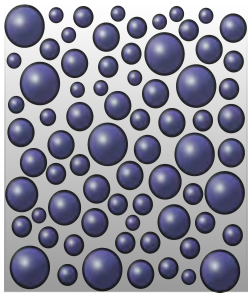
Jacques Ruer (SAIPEM, France) & Keld Nielson (ENI, Italie)

Lieu	IPGP	LMV	IFP-EN	GEC	CGS-GSJ	IMFT
Statut	Master	Doctorat	Post-Doc	ATER	Post-Doc	Post-Doc
Période	2004	2008	2009	2010	2011	2012	2013

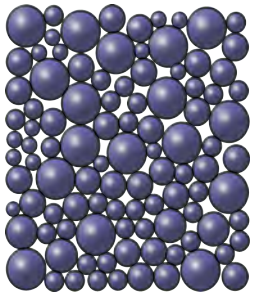
Intérêts

Ecoulements chargés en particules

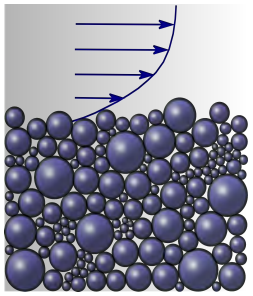
Ecoulements granulaires fluidisés



Ecoulements granulaires secs



Ecoulements granulaires cisaillés



Mentors

T.H. Druitt & O. Roche	A. Wachs & G. Vinay E. Calder & S. Takarada	J. Sherwood & F. Charru J. Ruer & K. Nielson

Transport et sédimentation de particules

Dynamique des processus de surface et leurs impacts morphologiques

Ecoulements gravitaires

Avalanche de roches
Alpes (1938)

Courant de turbidité
Mexique (2012)

Glissement de terrain
Californie (1995)

Effondrement d'édifice volcanique
Montserrat (1997)

Transport sédimentaire

Rivière en tresses
Chine (2012)

Lave torrentielle
Venezuela (1999)

Erosion de falaises
Canada (2013)

Mouvements de terrain observés en surface et transformant le paysage à travers le transport de particules

Plan de l'exposé

Ecoulements gravitaires

- Effondrement d'un lit fluidisé : approche expérimentale
  (thèse LMV)
- Effondrement d'une colonne granulaire : approche numérique
  (post-doc IFP-EN)

Ecoulements cisaillés

- Ecoulement d'un fluide sur une surface ondulée : approche théorique
  (post-doc IMFT)

Ecoulements granulaires fluidisés

Dans la nature

Effondrement de colonne

Mayon, Philippines (1984)

Effondrement d'édifice

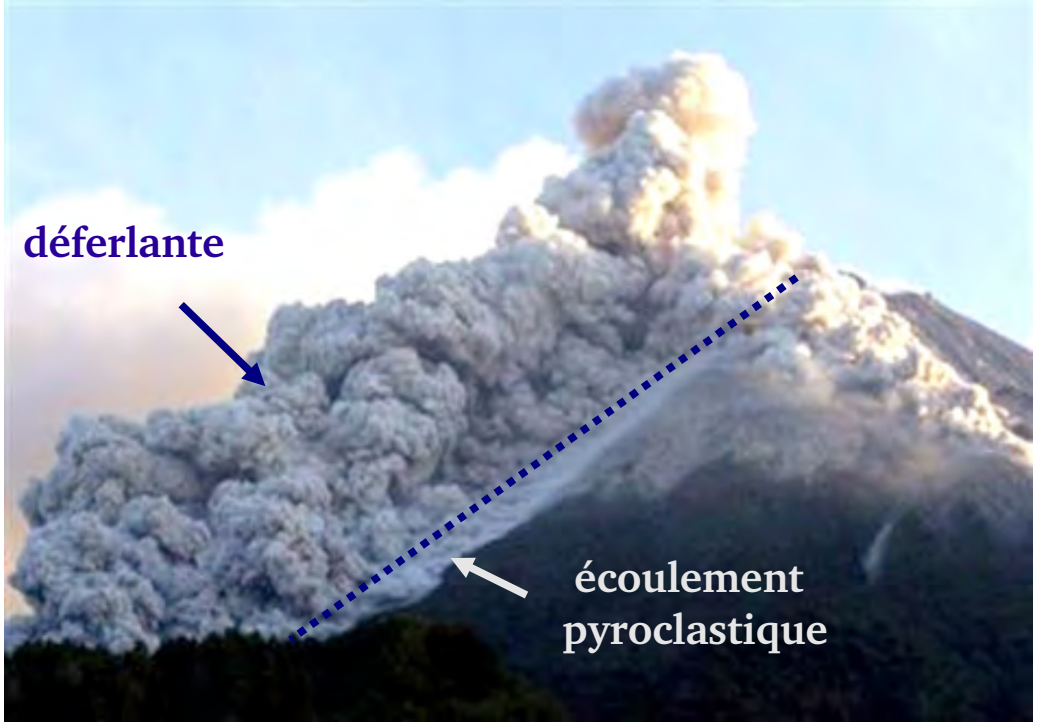
Mount Unzen, Japon (1993)

Ecoulement en domaine marin

Soufrière Hills, Montserrat (1997)

Vésuve, Italie (79) et Montagne Pelée, France (1902) > 30000 morts

Ecoulements granulaires fluidisés



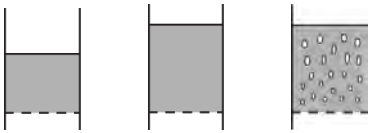
Mérapi, Indonésie (2006)

Tyers Ghaut Valley, Montserrat (2007)

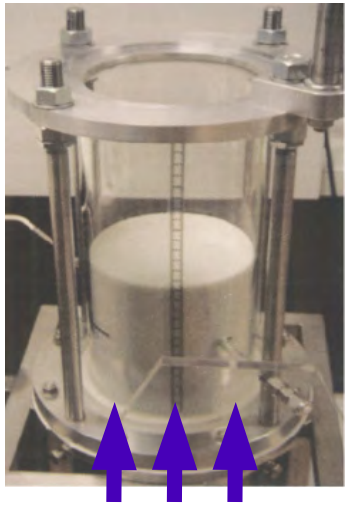
Dépôt ignimbritique, Laacher See (Allemagne)

Ecoulements granulaires fluidisés

Fluidisation d'une pile granulaire

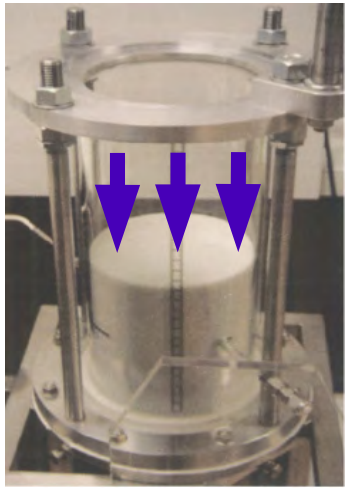


Fluidisation

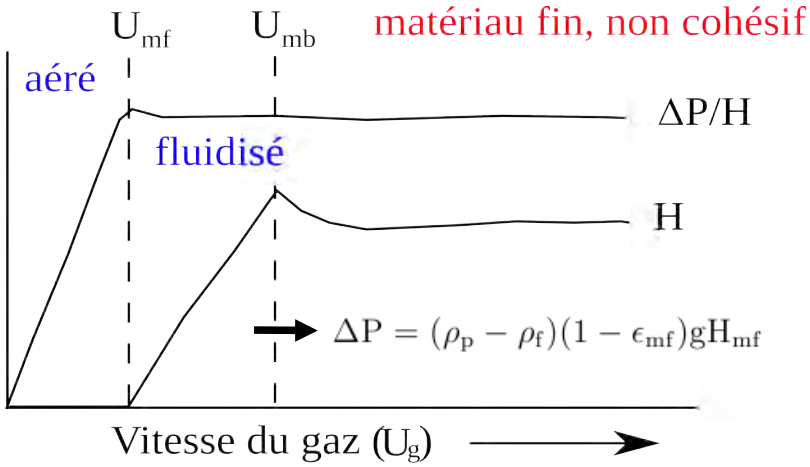


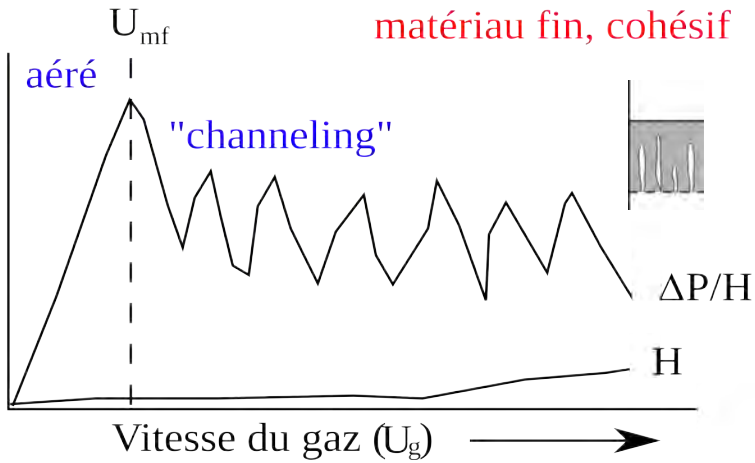
Injection de gaz

Sédimentation



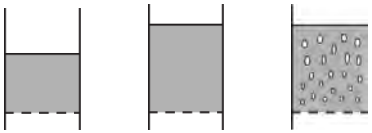
Coupure du gaz





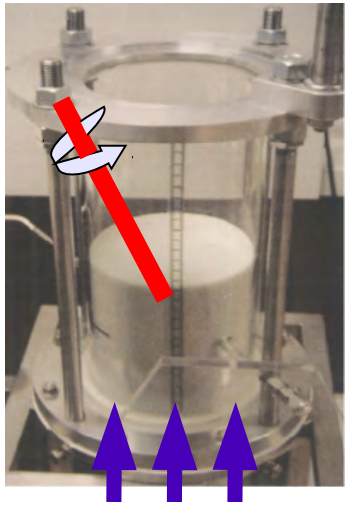
Ecoulements granulaires fluidisés

Fluidisation d'une pile granulaire



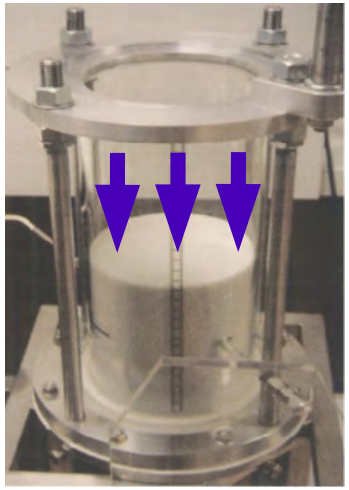
Fluidisation des matériaux naturels

≥ 150° C

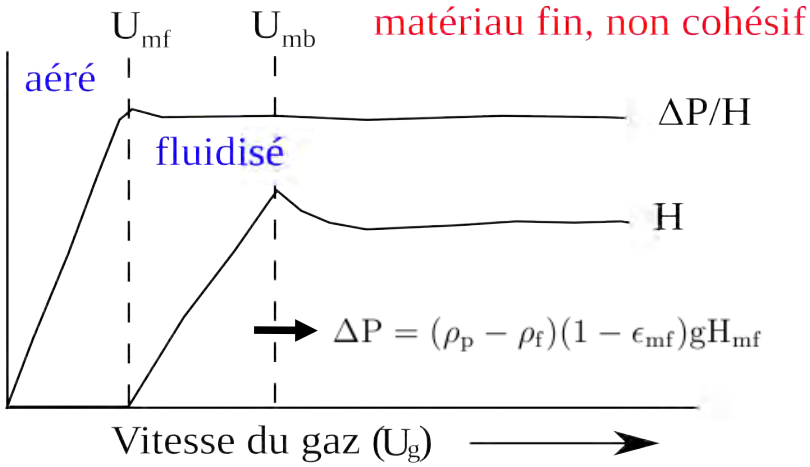


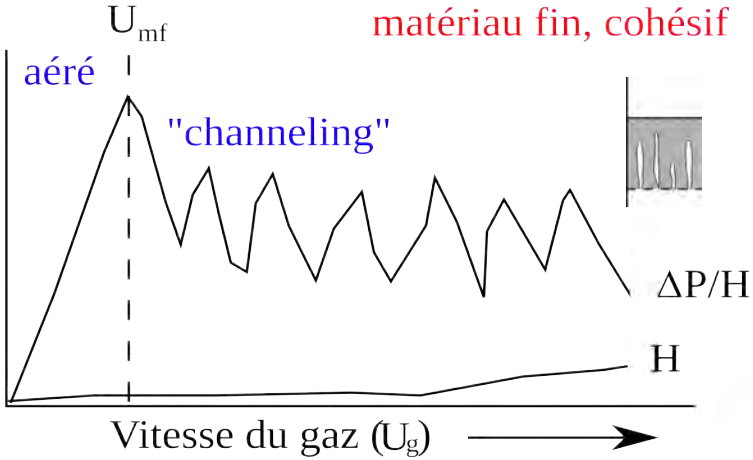
Injection de gaz

Sédimentation



Coupure du gaz

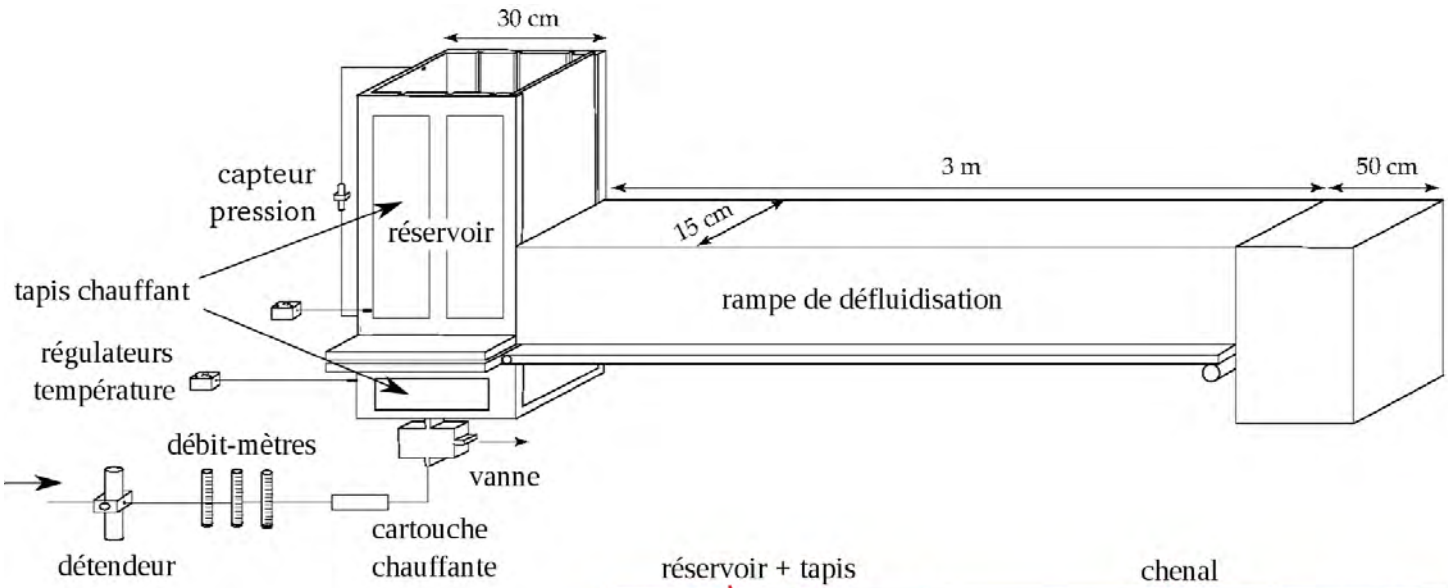


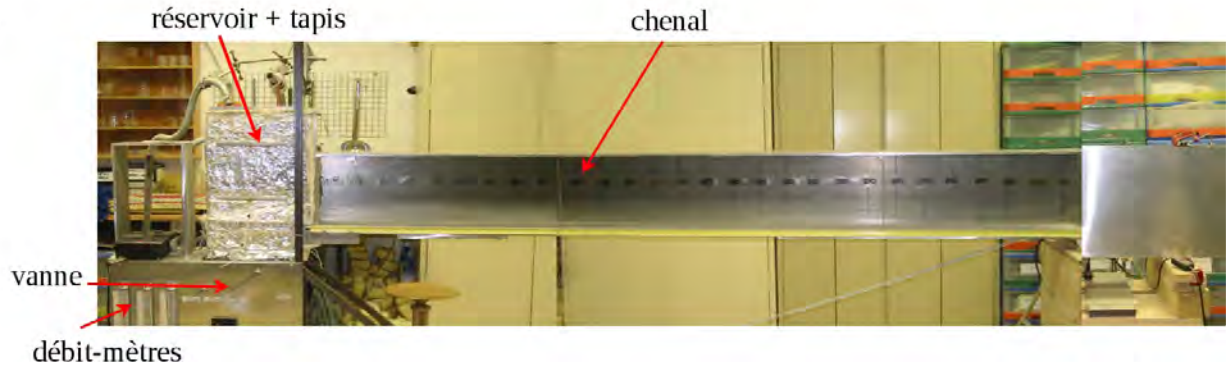


Ecoulements granulaires fluidisés

- Reproduction inédite d'écoulements pyroclastiques en laboratoire
- Comprendre l'influence de l'expansion initiale sur la dynamique

Dispositif expérimental

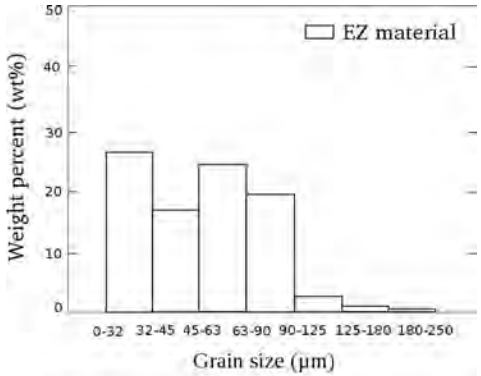


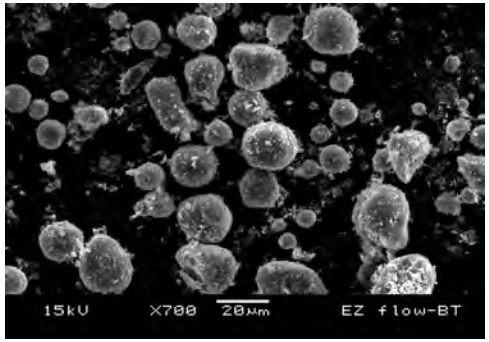


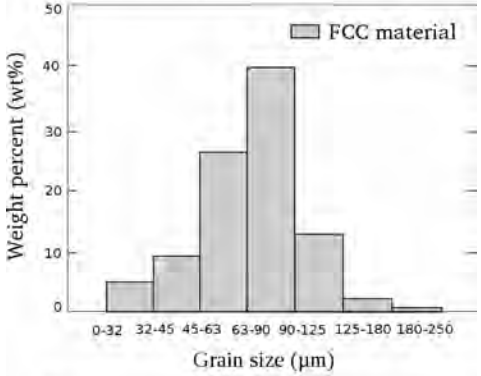
Ecoulements granulaires fluidisés

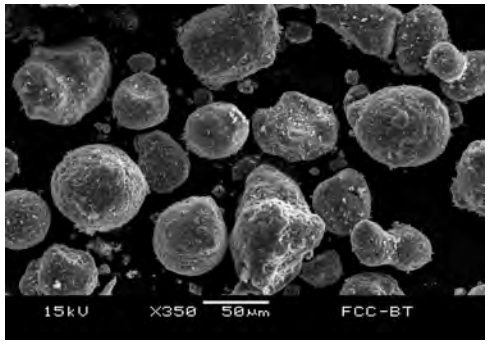
Particules

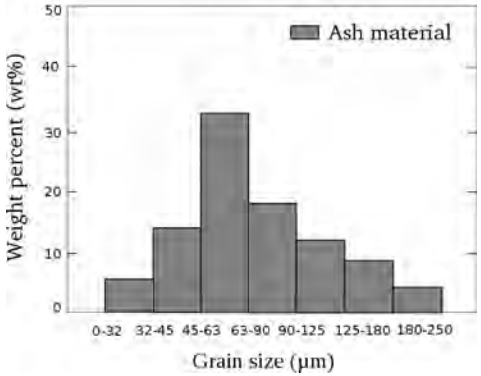
- *Cendres volcaniques :*
  - $< 250\ \mu m$
  - Capacité d'expansion > 50%
- *Matériaux synthétiques :*
  - Forme plus régulière
  - Capacité d'expansion : 22-50%

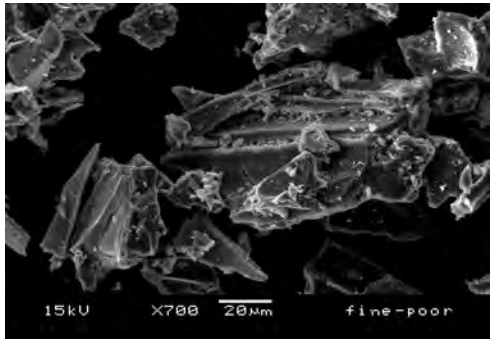








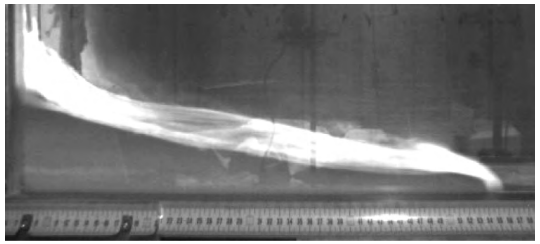




Ecoulements granulaires fluidisés

Analyse d'échelle

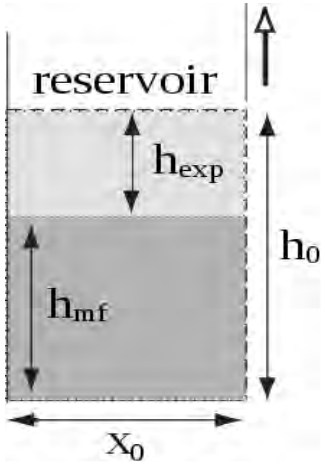
	Ecoulements pyroclastiques	Expériences
Fluidisation*	10^{-5}	10^{-5}
Particules* (*Sa*)	10^{-5}	10^{-3}
Rapport d'aspect (*a*)	< 1	< 1
Expansion (*E*)	10-20 vol%	0-50 vol%
Froude (*Fr*)	1.3 - 2	1.1 - 1.6

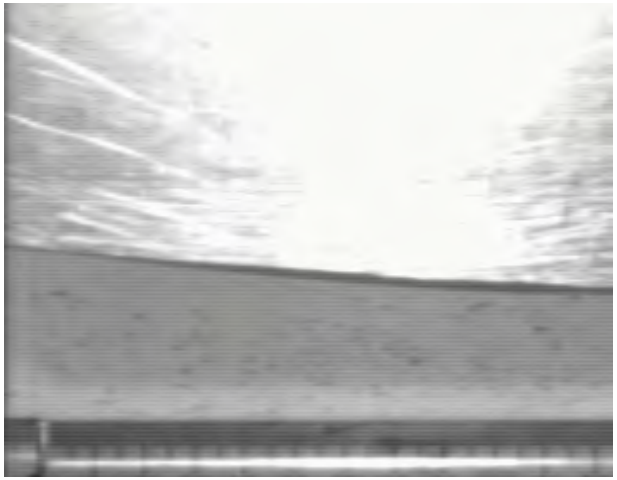


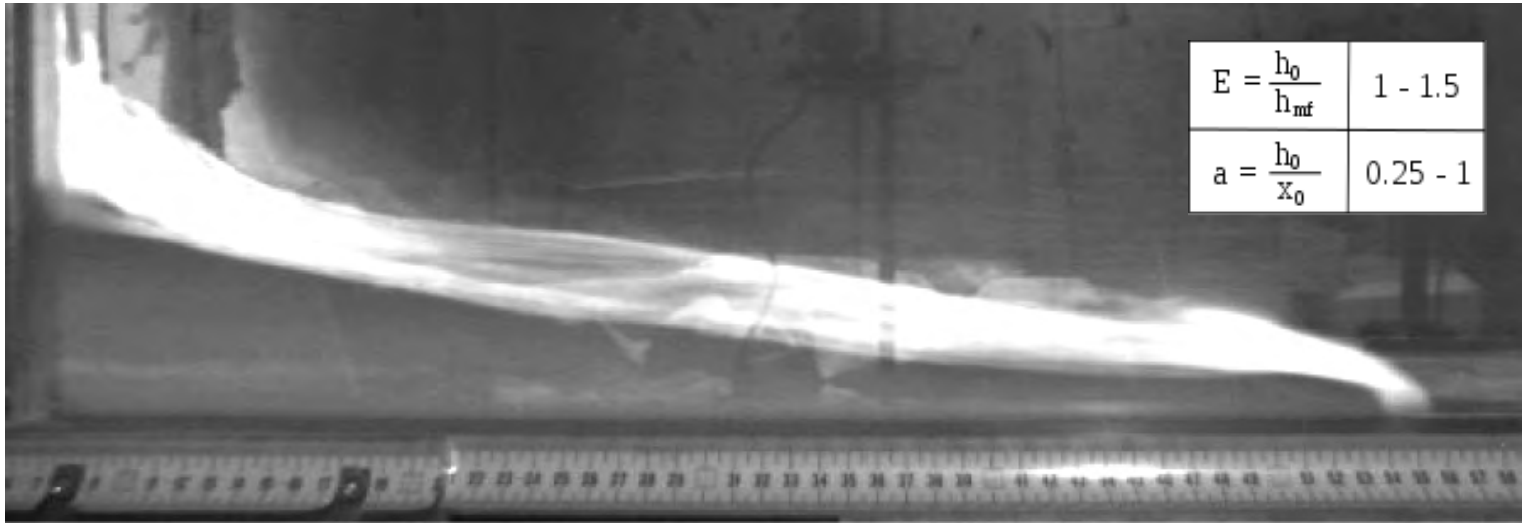
*cf. *Iverson and Denlinger* [2001]

Ecoulements granulaires fluidisés

Expériences dam-break 2D



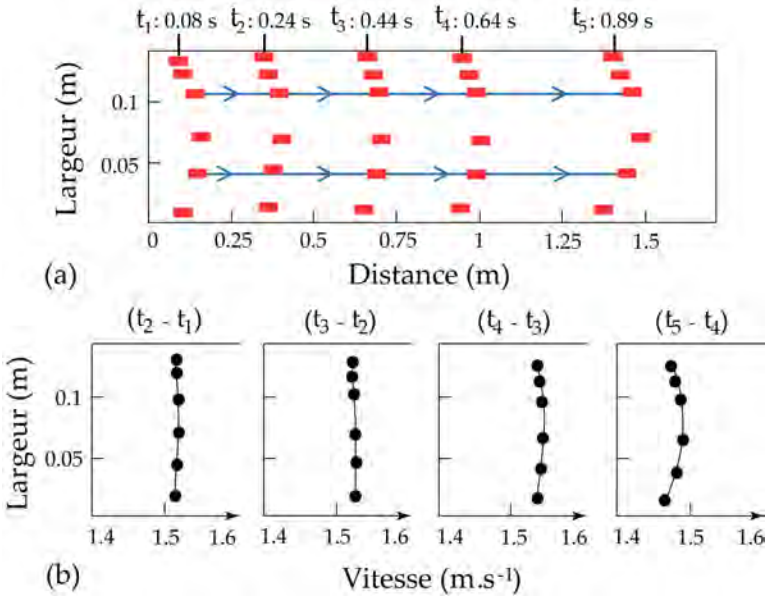


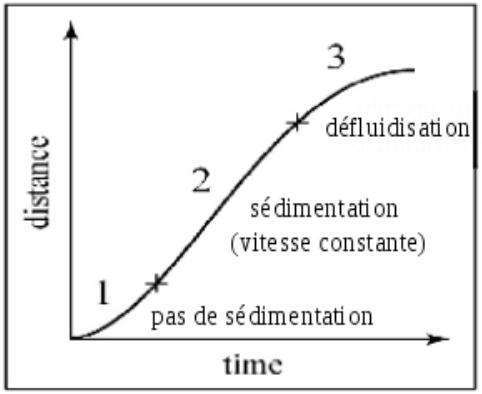


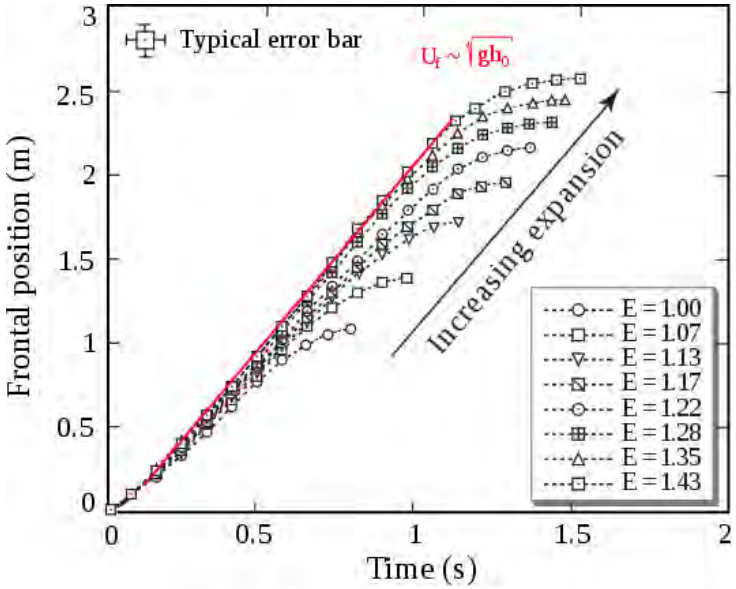
Girolami et al. [2008] ***JGR***, 113(B2) – Girolami et al. [2010] ***Bulletin of Volcanology***, 72, 747-759

Ecoulements granulaires fluidisés

Cinématique





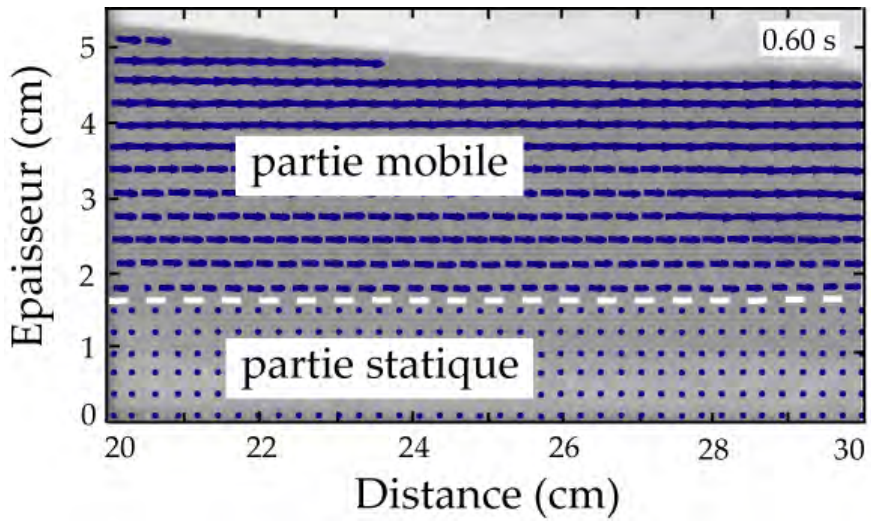


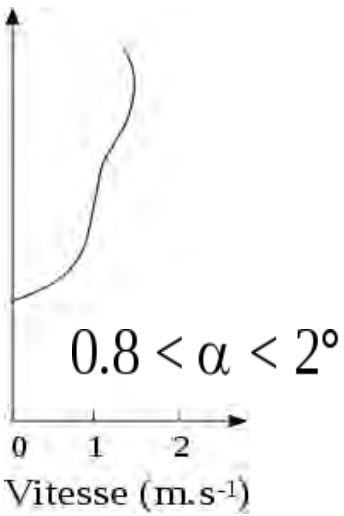
- Gradient latéral faible : peu d'effet de bord
- 1 phase dominante de transport à vitesse quasi-constante

Ecoulements granulaires fluidisés

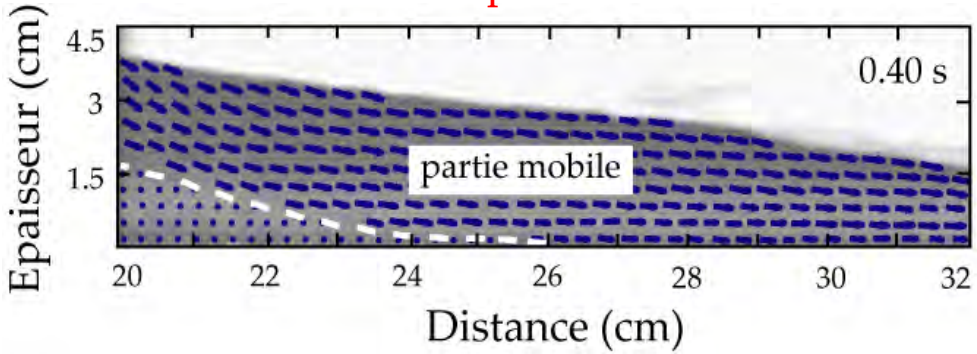
Structures internes

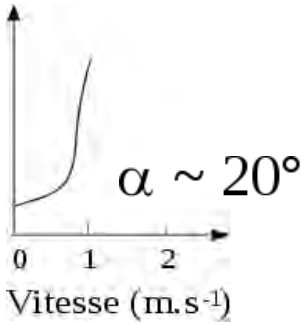
Ecoulements expansés





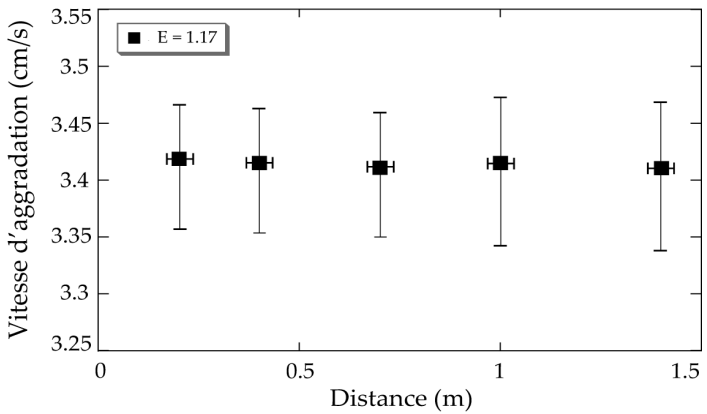
Ecoulements non expansés

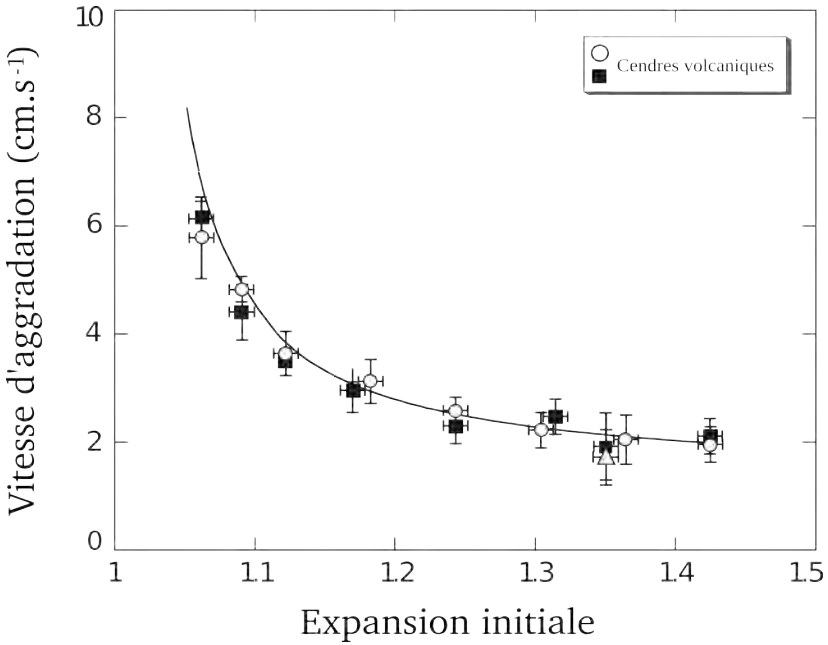


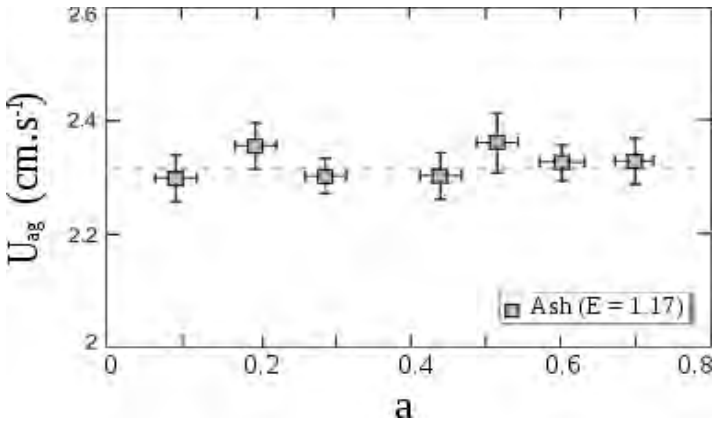


Ecoulements granulaires fluidisés

Sédimentation



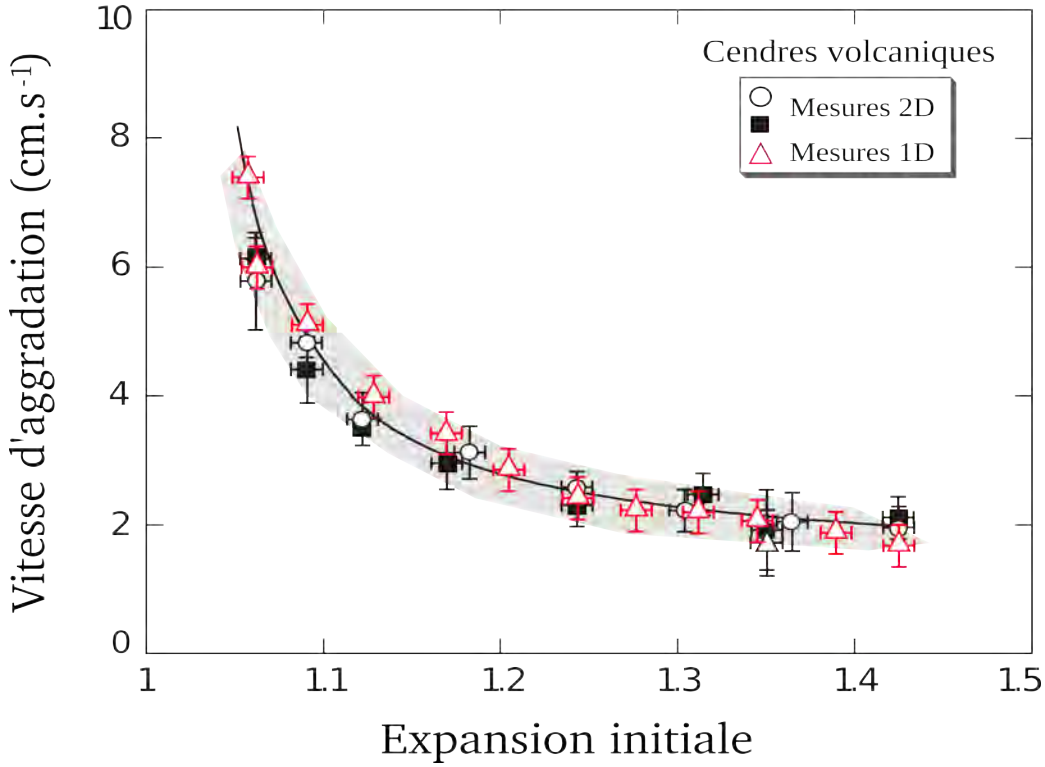




- La vitesse d'aggradation est indépendante de la distance au réservoir et du rapport d'aspect initial
- La vitesse d'aggradation diminue fortement avec l'expansion initiale

Ecoulements granulaires fluidisés

Sédimentation



- La vitesse d'aggradation en champ proche est identique à celle mesuré dans le réservoir avant ouverture de la trappe
- La vitesse d'aggradation peut être prédite à partir de U_g, h_{mf}, et E

Ecoulements granulaires fluidisés

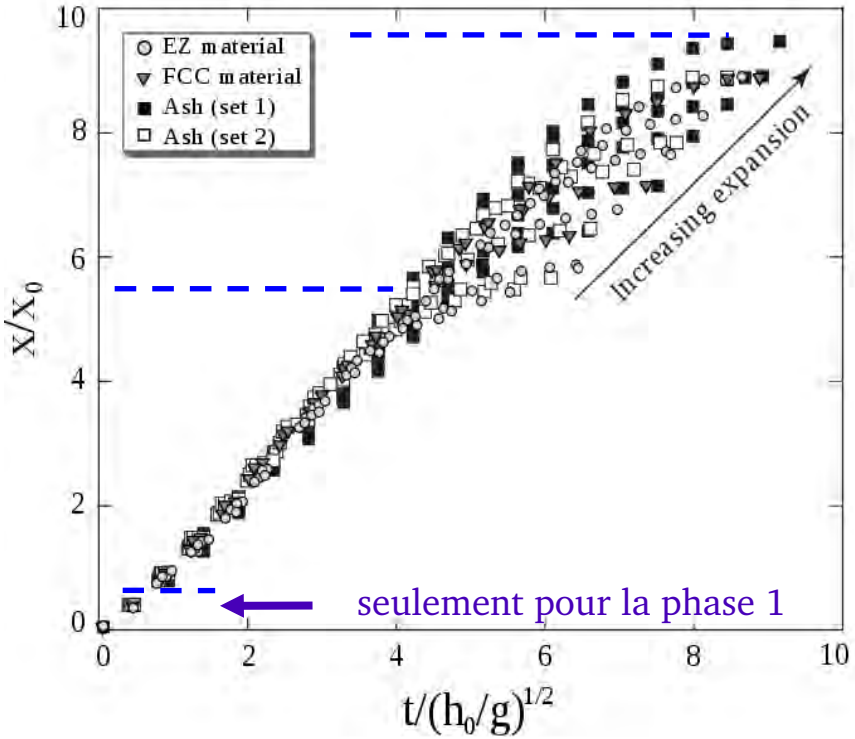
Loi d'échelle

- *Echelle de temps*

$$t_g = \left(\frac{h_0}{g}\right)^{1/2}$$

- *Echelle de longueur*

$$x_0 = L_{\text{réservoir}}$$



▶ Les phases 2 et 3 sont gouvernées par des mécanismes additionnels ou d'autres mécanismes

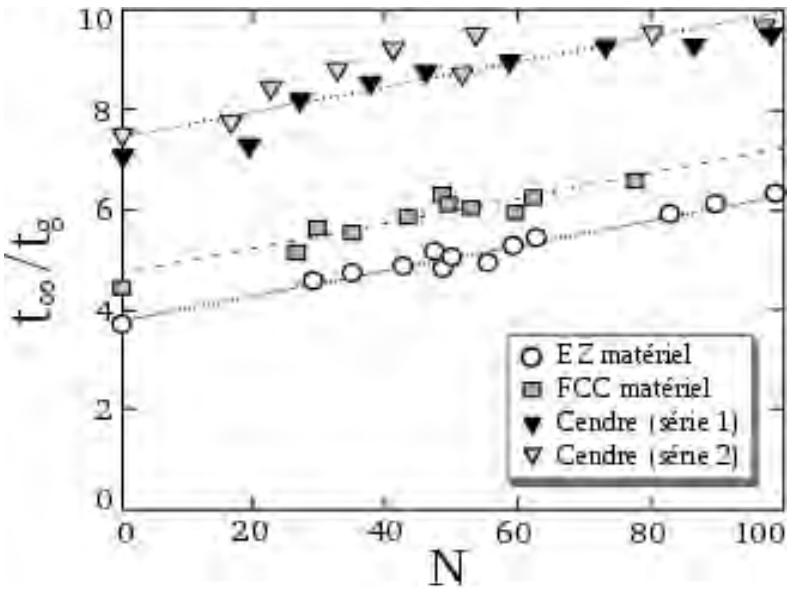
Ecoulements granulaires fluidisés

Loi d'échelle

$$t_g = \left(\frac{h_0}{g}\right)^{1/2}$$

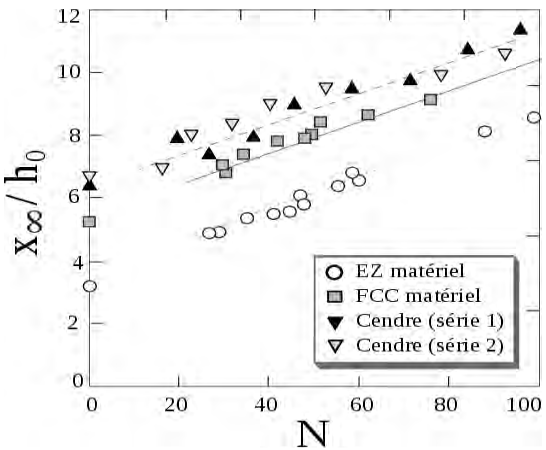
$$t_{sed} = \frac{h_0}{EU_{ag}}$$

$$N = \frac{t_{sed}}{t_g}$$



- Ecoulements fluidisés, non expansés : $\begin{cases} \dfrac{t_\infty}{t_g} \simeq \alpha \\ \dfrac{x_\infty}{h_0} \simeq \beta \end{cases}$

- Ecoulements fluidisés, expansés : $\begin{cases} \dfrac{t_\infty}{t_g} \simeq \alpha + 0.02N \\ \dfrac{x_\infty}{h_0} \simeq \beta + 0.1N \end{cases}$

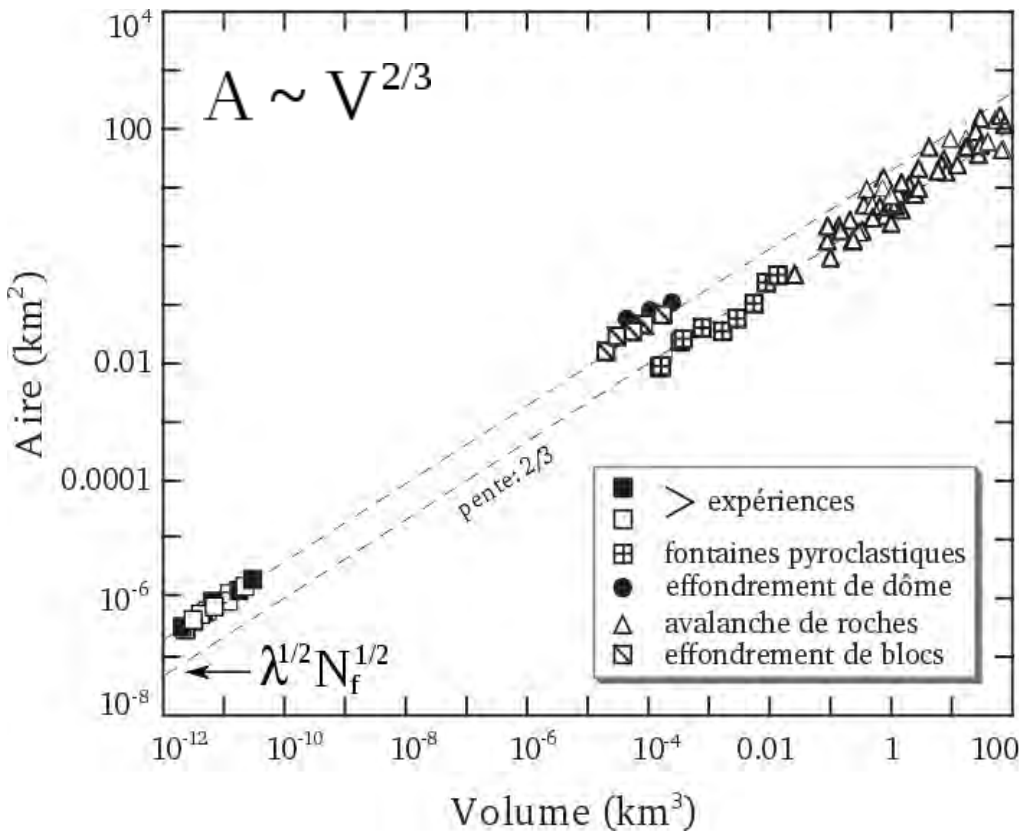


▶ où α et β dépendent des propriétés intrinsèques des matériaux

Ecoulements granulaires fluidisés

Morphologie des dépôts

Dade and Huppert [1998]



- Le rôle du fluide interstitiel est significatif dans ces écoulements

Ecoulements granulaires secs

Dans la nature

Avalanches de petits volumes

Retombée de blocs (Canada, 2011)

Avalanches de blocs (Colorado, 1970)

Avalanches de grands volumes

Effondrement d'édifice (Suisse, 1991)

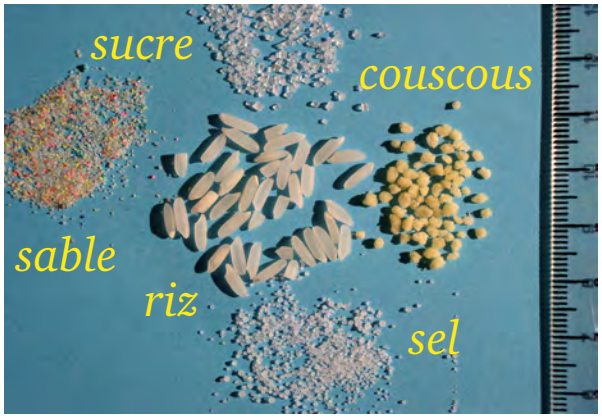
Avalanche de grande ampleur (Alaska, 1999)

Runout : 0.01-50 km – Vitesse : 1-20 $m.s^{-1}$

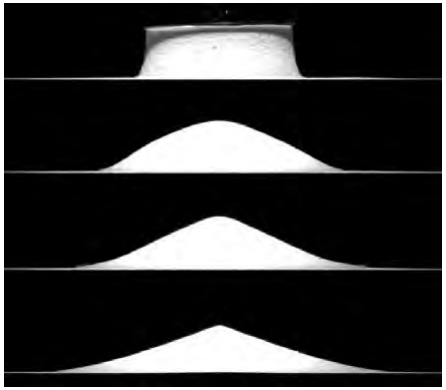
Ecoulements granulaires secs

A l'échelle du laboratoire

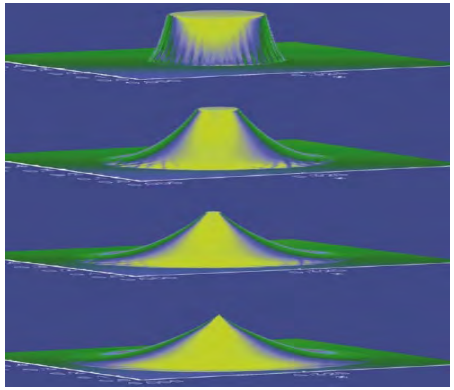
Particules



Effondrement axi-symétrique

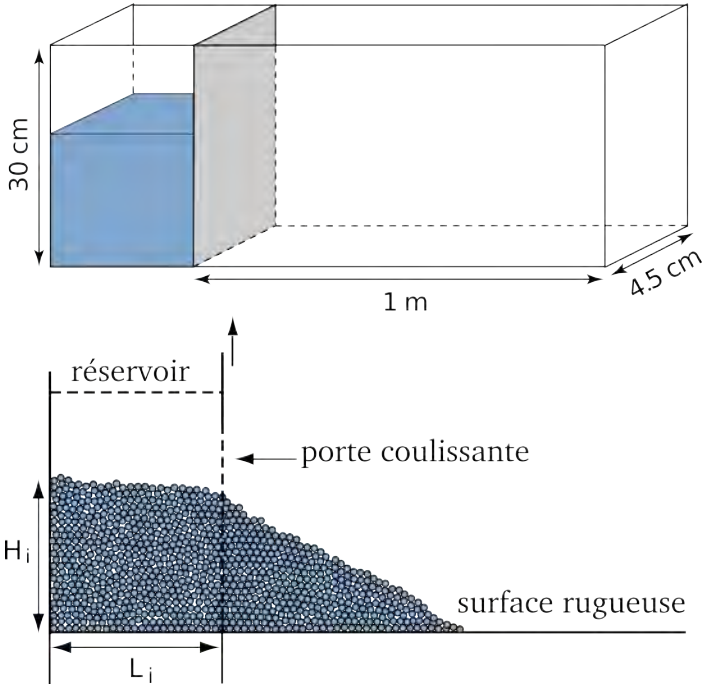


Lube et al. [2005]



Mangeney et al. [2005]

Effondrement rectangulaire



Lajeunesse et al. [2005]

- Utilisation limitée des modèles continus (sur-estimation du runout, paramètres non réalistes)

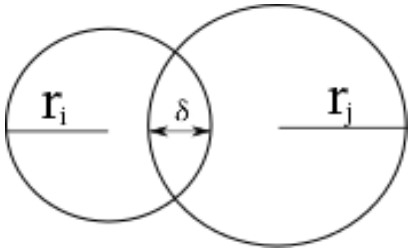
Ecoulements granulaires secs

Grains3D basé sur la méthode des éléments discrets (DEM) :

- *Loi de Newton :*

$$\mathbf{F}_i = M_i \mathbf{g} + \sum_{j=0, j\neq i}^{N-1} \mathbf{F}_{ij}$$

- *Approche sphère molle :*



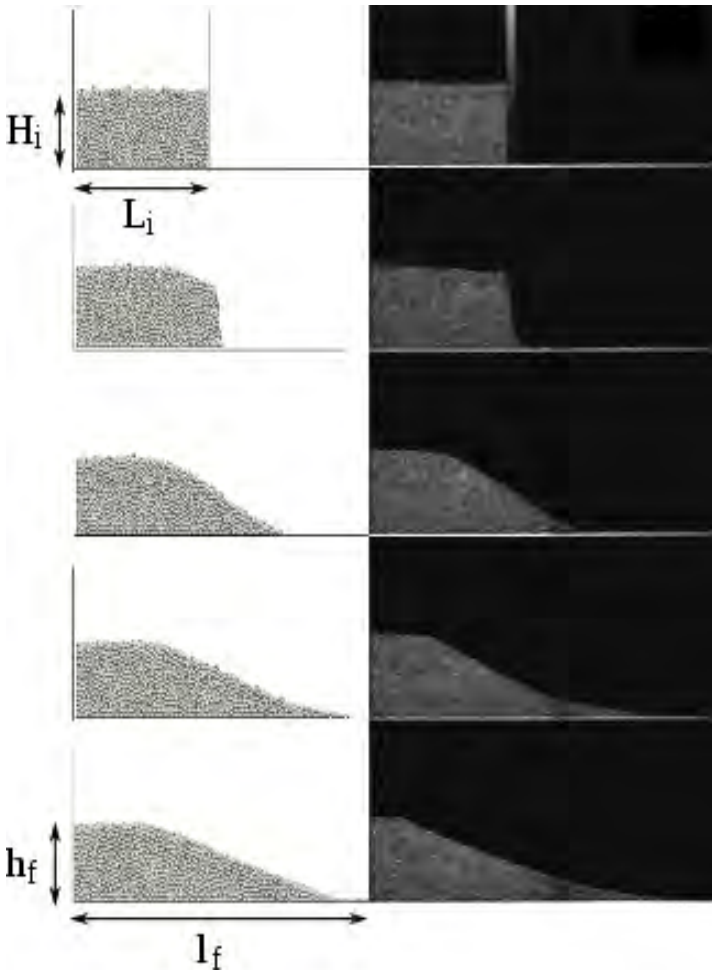
Parallélisation

- Décomposition de domaine statique
- Communication entre les différents processeurs (Interface MPI)

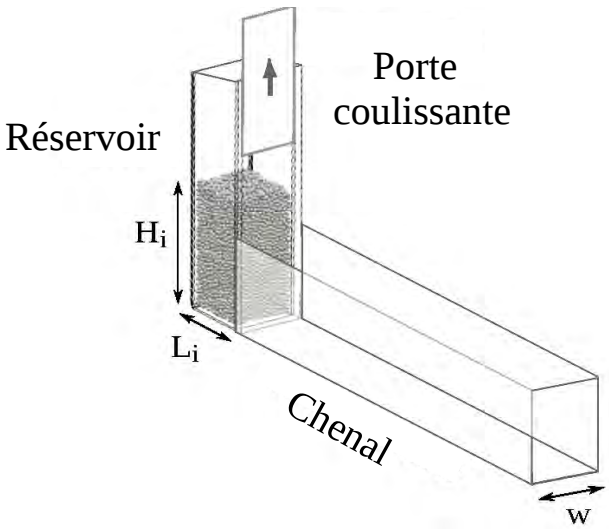
Refs.	ϵ_n	k_n	μ_c	N	d_p(mm)	a
Girolami et al. [2012]	0.75	4.10^5	0.5	15,000	3/5	0.5–18
Zenit et al. [2005]	0.75	7.10^5	0.3/0.57	100–10,000	3.5	0.33–12.38
Staron and Hinch [2005]	0.5		1	1,000–8,000		0.21–17
Cleary and Franck [2005]	0.4		0.3	165,000	1.9–2.1	1.91
Lacaze et al. [2008]	0.5	4.10^5	0.15/0.35	160–6,000	2.5/5	1.2–23.7

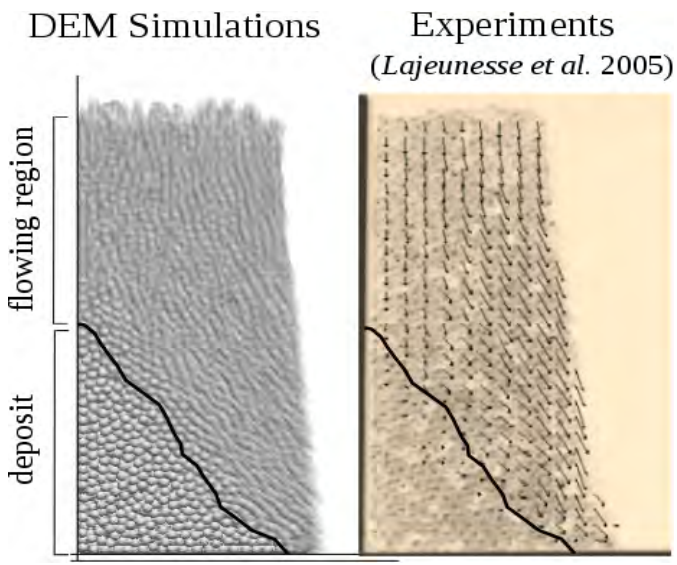
Ecoulements granulaires secs

Validation de Grains3D



▶ Prédiction de la morphologie de la colonne

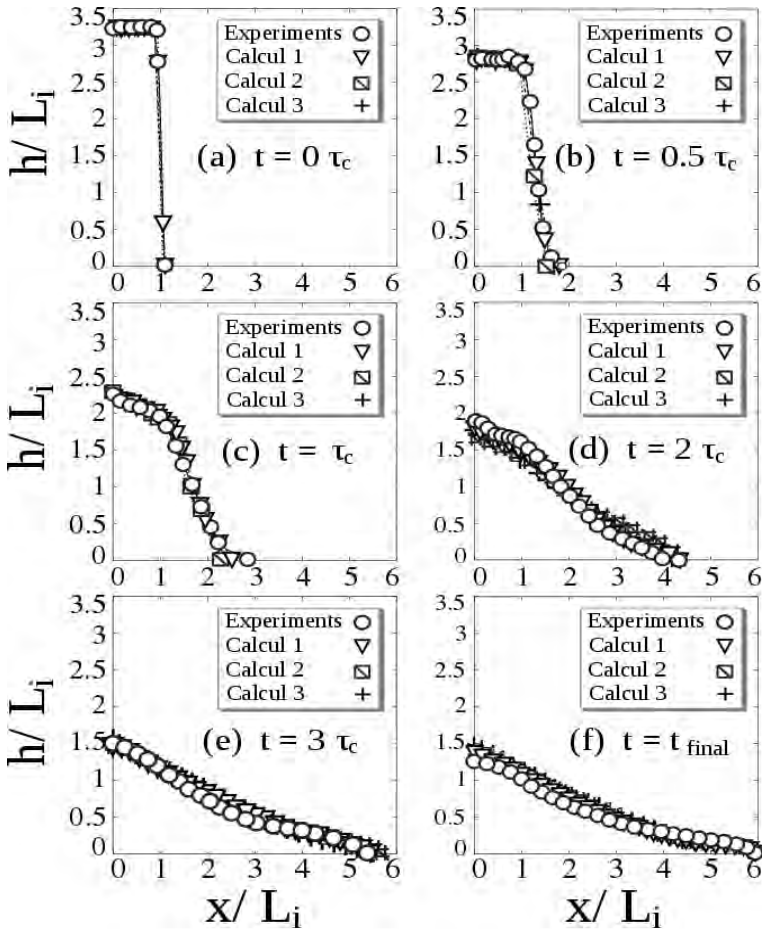




▶ Prédiction des structures internes

Ecoulements granulaires secs

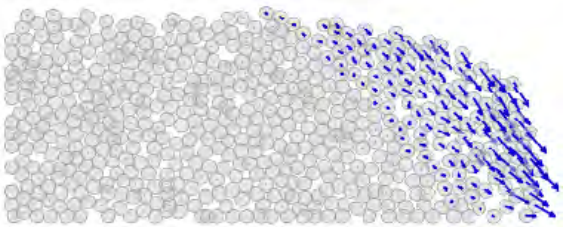
Morphologie de la colonne $\tau_c = \sqrt{\frac{H_i}{g}}$



La morphologie de la colonne dépend uniquement de son rapport d'aspect initial

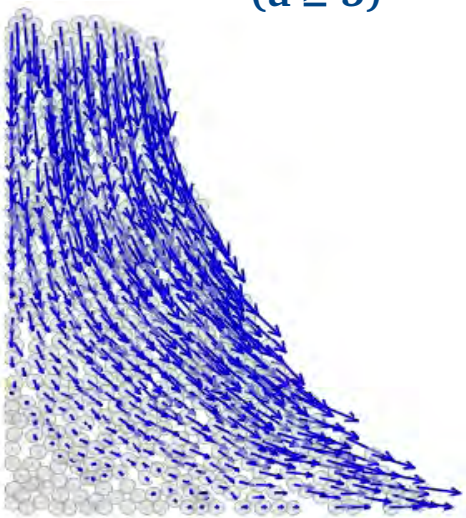
2 régimes d'écoulement

- **Avalanches de petit volume ($a \leq 3$)**



▶ 10-15 % de particules mobilisées

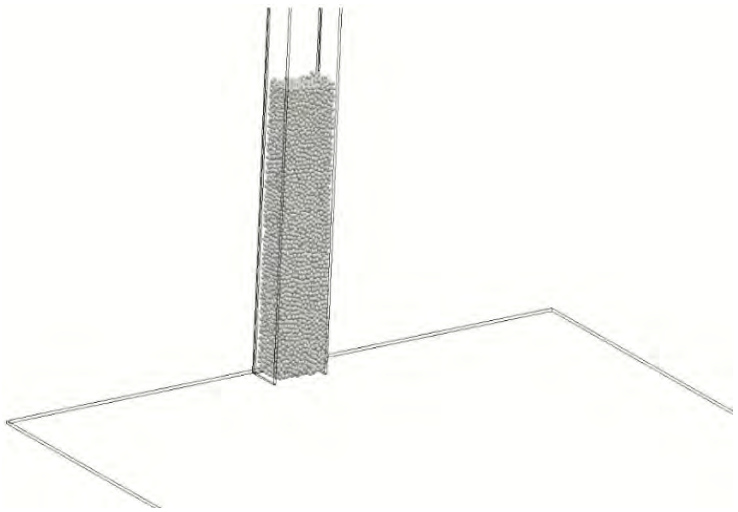
- **Avalanches de grand volume ($a \geq 3$)**

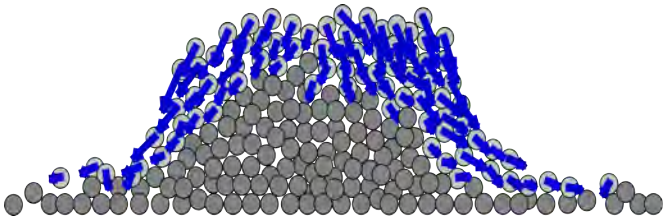


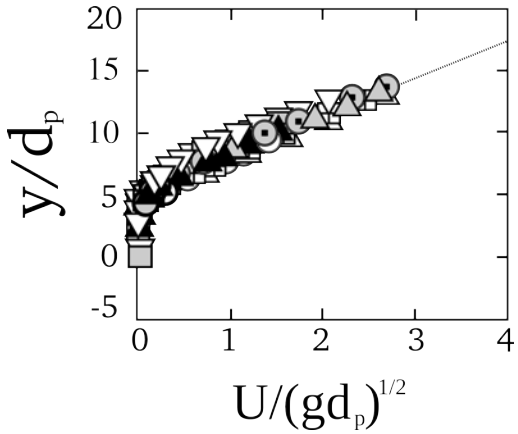
▶ 90-95 % de particules mobilisées

Ecoulements granulaires secs

Phénoménologie des écoulements

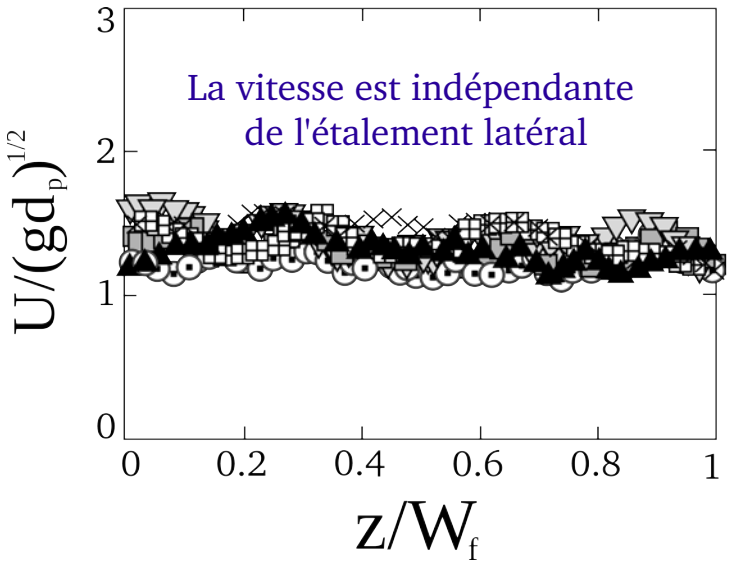






Le cisaillement mesuré dans la partie linéaire du profil est prédit par :

$$\gamma = 0.3\sqrt{\frac{g}{d_p}}$$



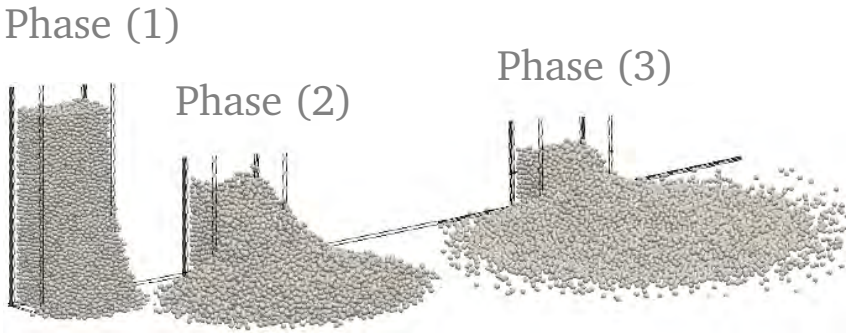
La durée des écoulements est 2 fois plus élevée

Girolami et al. [2012] ***Granular matter***, 14(3), 381-392 – Girolami et al. [2013] ***Physics of Fluids***, 25(4)

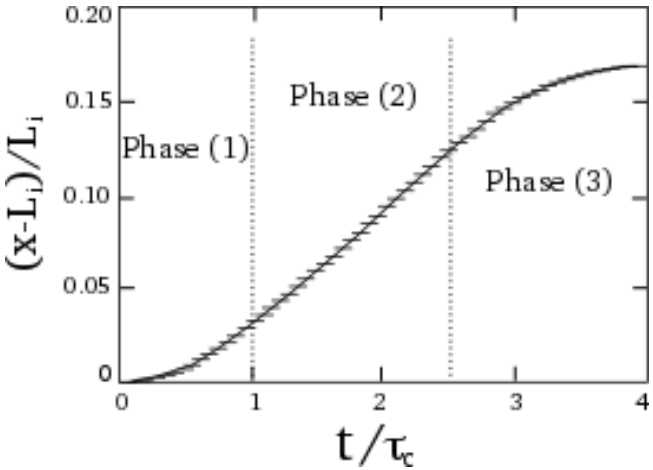
Ecoulements granulaires secs

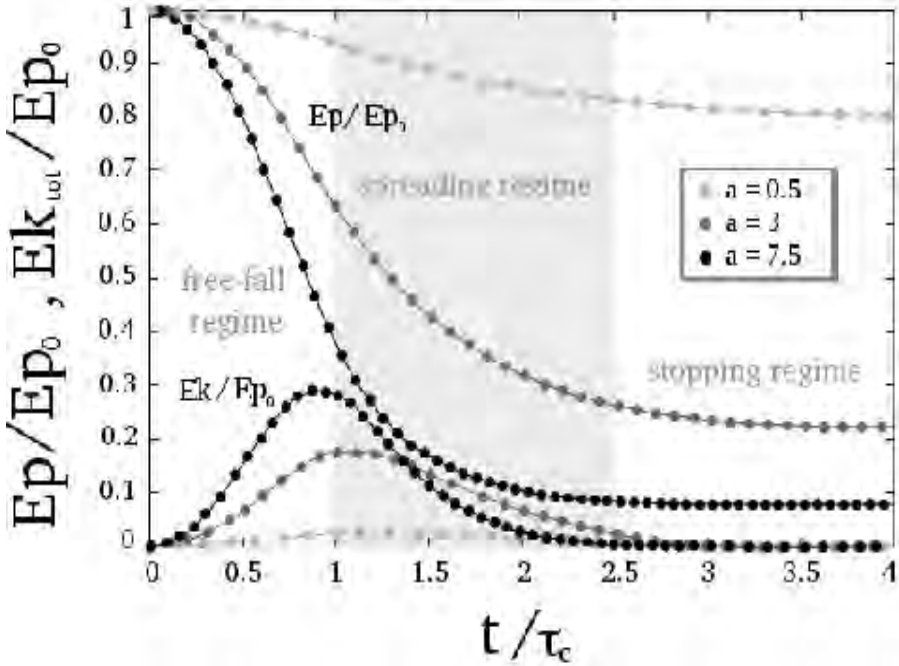
Cinématique

$$\tau_c = \sqrt{\frac{H_i}{g}}$$



(1) phase d'accélération (~ 1 τ_c)
(2) phase d'étalement (~ 2.5 τ_c)
(3) phase d'arrêt (~ 3.5 τ_c)

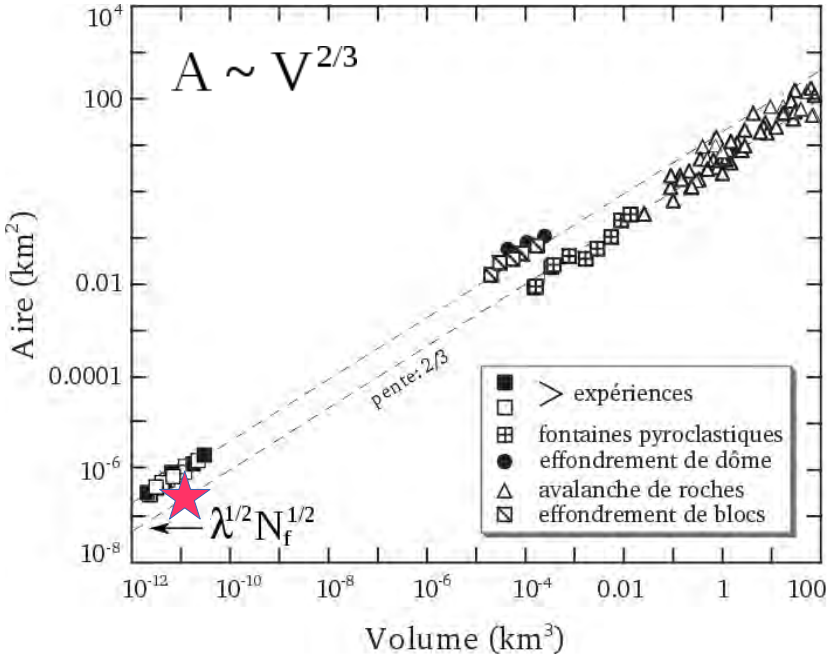


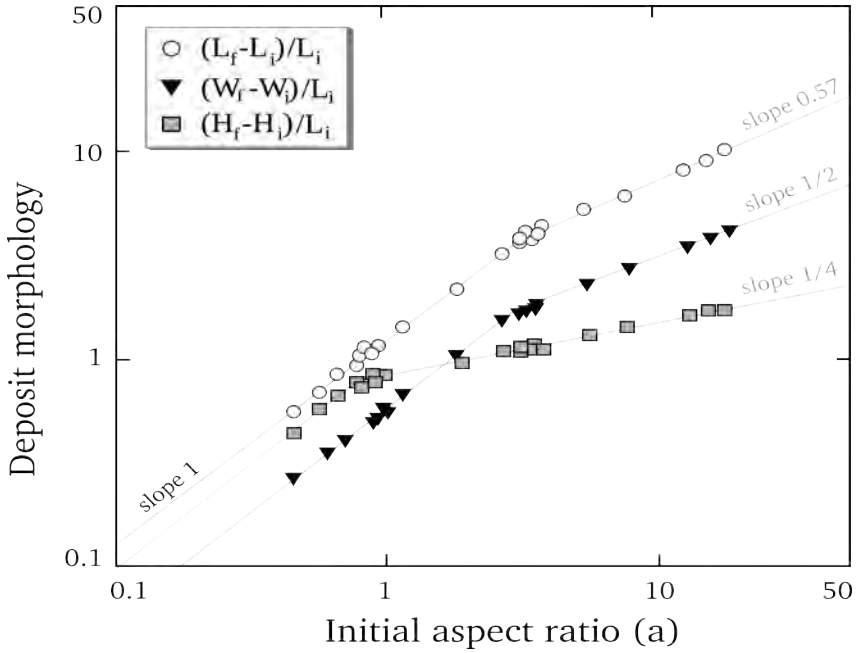


Le rapport d'aspect détermine la capacité de la colonne à convertir l'énergie potentielle disponible en énergie cinétique

Ecoulements granulaires secs

Morphologie des dépôts





- La morphologie des dépôts peut être reproduite à partir d'expériences de petite échelle très simplifiée
- La morphologie des dépôts d'avalanches peut être prédite à partir de la géométrie initiale de la colonne

Ecoulements granulaires cisaillés

Dans la nature

Formation de rides sur la plage (Bretagne, Fance)

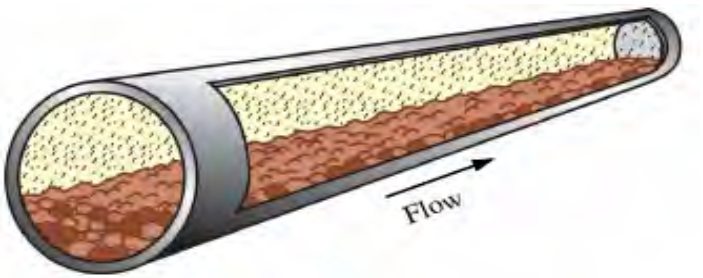
Dunes barchanes sur la plage (Mexique)

Bars alternés dans une rivière (Japon)

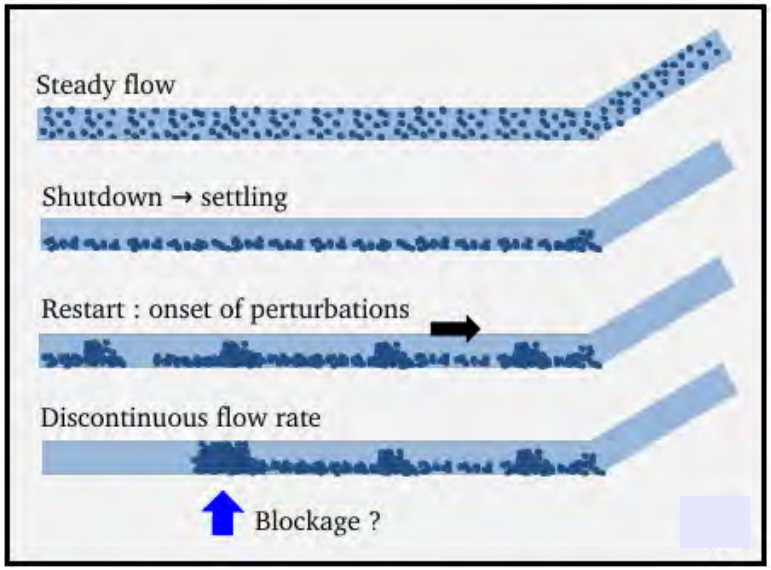
Les grains sont érodés par l'action du fluide et transportés sur des échelles de longueur et de temps variables

Ecoulements granulaires cisaillés

Dans l'industrie



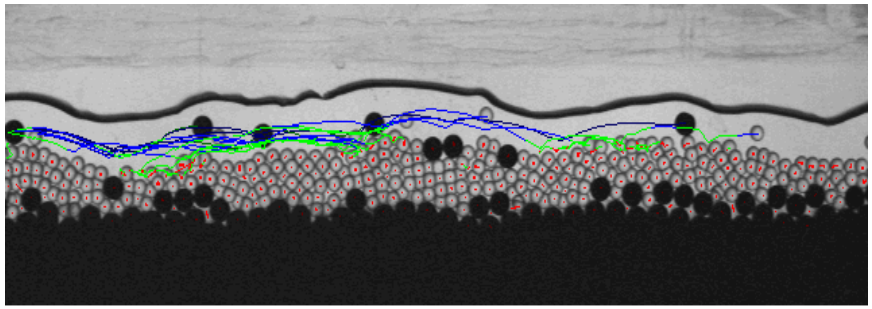
- Formation d'une couche de sable à la base



- Perturbations de l'écoulement induites par la déformation du lit

- Érosion induite par la friction du lit de grains

A l'échelle du laboratoire



Transport de la charge de fond en canal [*Hergault et al.*, 2010]

Modèles de prédiction nécessaires à la gestion du sable

Ecoulements granulaires cisaillés

Modèle 1D

- *Equations pour la phase fluide :*

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (hU)}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial (hU)}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha h U^2)}{\partial x} &= -\frac{h}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{1}{\rho}\left(\tau_w + \tau_b\right) \end{aligned}\right\}$$

nécessite un jeu d'équations pour les situations hors-équilibres (modèle pour τ)

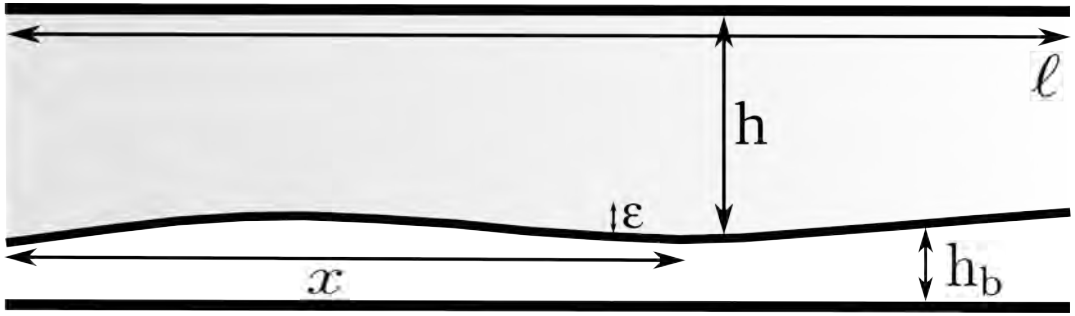
- *Equations pour la phase solide :*

$$\left.\begin{aligned} L_{\text{sat}}\frac{\partial q}{\partial x} &= q_{\text{sat}}(\tau_b) - q \\ -\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} &= 0 \end{aligned}\right\}$$

➡ *Couplage des deux phases : évolution temporelle de la morphologie du lit*

Ecoulements granulaires cisaillés

Ecoulement laminaire plan



Modèle physique

Conditions aux limites :

En surface :

$$\begin{cases} u = 0 \\ v = 0 \end{cases}$$

Au sol :

$$\begin{cases} u = 0 \\ v = -\dfrac{\partial h_b}{\partial t} = \dfrac{\partial h}{\partial t} \end{cases}$$

avec :

u, v : vitesse locale horizontale, verticale

Equations du problème :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{dP}{dx} + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0$$

Ecoulements granulaires cisaillés

Formalisme multi-échelle basé sur la morphologie du lit

Solution dominante :

$$u(x,y,t) = u^{(0)}(x,y,t) \qquad \begin{cases} v^{(0)} = 0 \\ \dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial P^{(0)}}{\partial x} = \nu \dfrac{\partial^2 u^{(0)}}{\partial y^2} \end{cases}$$

➡ correspond à la vitesse à l'équilibre pour un h_b donné

Correction de 1er ordre :

$$u(x,y,t) = u^{(1)}(x,y,t) \qquad \begin{cases} \dfrac{\partial u^{(0)}}{\partial x} + \dfrac{\partial v^{(1)}}{\partial y} = 0 \\ \dfrac{\partial u^{(0)}}{\partial t} + u^{(0)}\dfrac{\partial u^{(0)}}{\partial x} + v^{(1)}\dfrac{\partial u^{(0)}}{\partial y} = -\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial P^{(1)}}{\partial x} + \nu \dfrac{\partial^2 u^{(1)}}{\partial y^2} \end{cases}$$

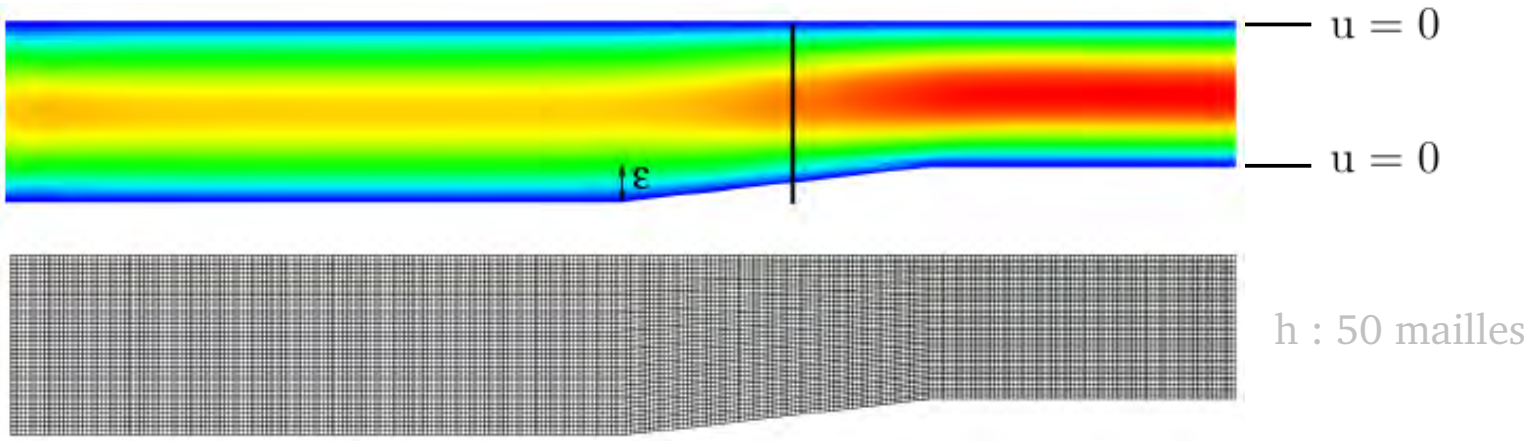
➡ inclue les effets inertiels liés à la déformation du lit

Girolami et al. [2014a, b] ***Journal of Multiphase Flows***, to be submitted

Ecoulements granulaires cisaillés

Validation du modèle théorique

Simulations numériques directes réalisées avec Neptune

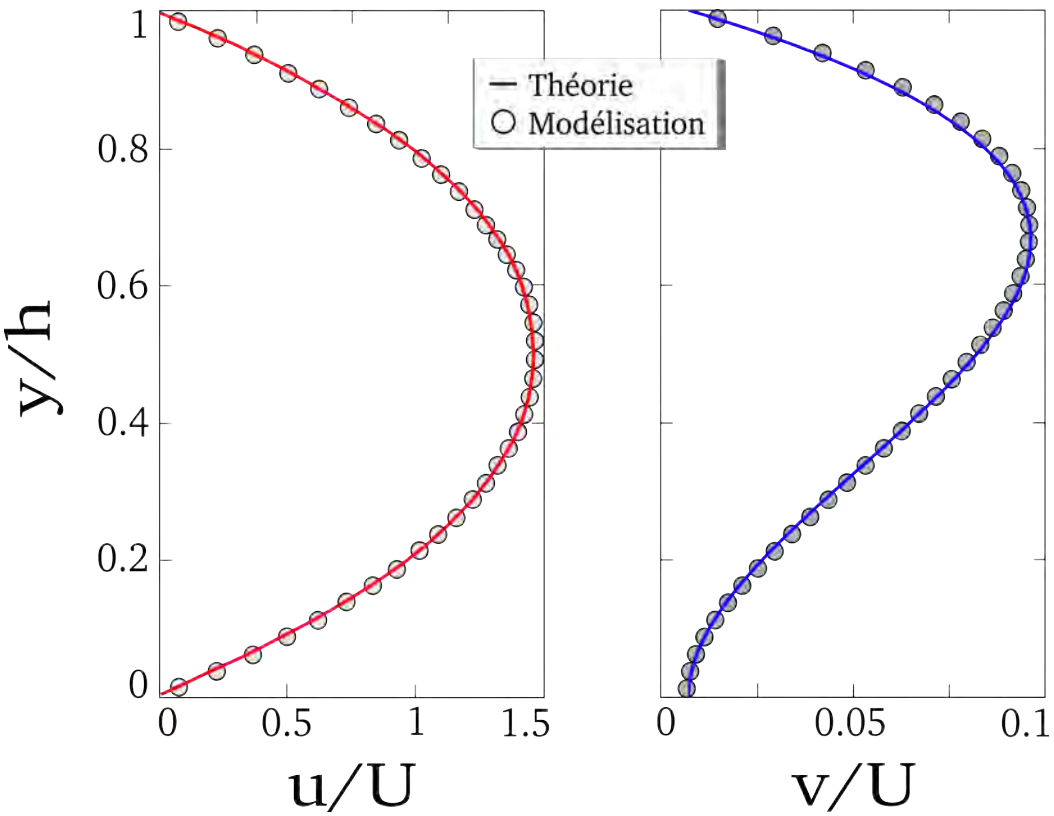


Ecoulement 2D
laminaire, stationnaire

$$\begin{cases} \mathcal{R}e = 20 - 400 \\ \frac{\partial h_b}{\partial x} = 0.05 - 0.1 - 0.2 \\ \frac{\partial h_b}{\partial t} = 0 \end{cases}$$

Ecoulements granulaires cisaillés

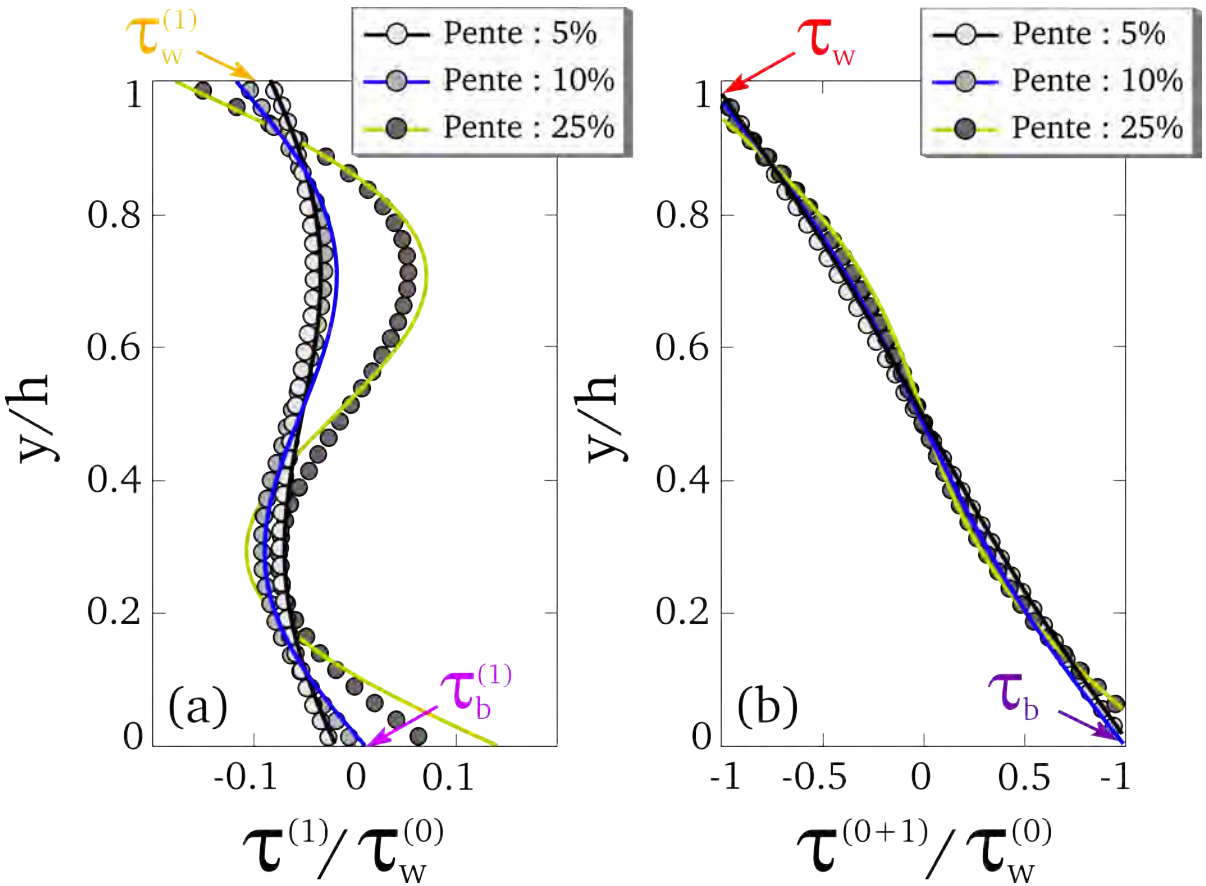
Validation du modèle théorique



- Très bonne prédiction des profils de vitesse horizontale et verticale

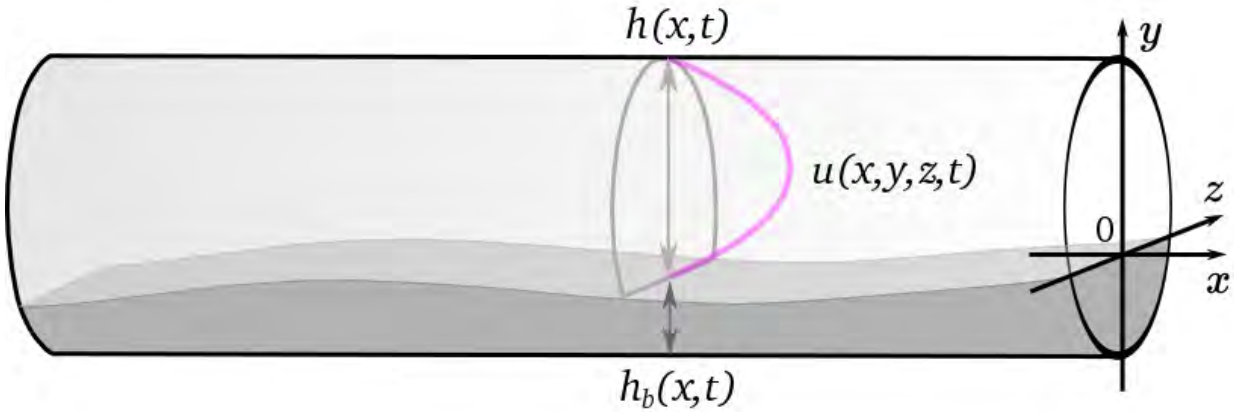
Ecoulements granulaires cisaillés

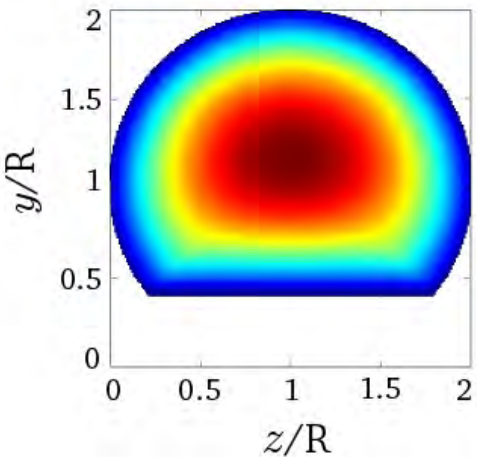
Validation du modèle théorique



- Très bonne prédiction du cisaillement (base, paroi)

Ecoulements granulaires cisaillés





Equations moyennées dans la section

$$\frac{\partial \mathcal{A}_\ell}{\partial t} + \frac{\partial(\mathcal{A}_\ell U)}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial(\mathcal{A}_\ell U)}{\partial t} + \frac{\partial\left(\alpha \mathcal{A}_\ell U^2\right)}{\partial x} = -\frac{\mathcal{A}_\ell}{\rho}\frac{dP}{dx} + \frac{1}{\rho}\int_{d\Omega} \tau d\ell$$

➡ Determination de α and ∫τ dl

$$\int_{d\Omega} \tau d\ell = \int_{d\Omega_b} \tau_b d\ell + \int_{d\Omega_w} \tau_w d\ell$$

Vitesse moyennée sur la section

$$U = \frac{1}{\mathcal{A}_\ell}\iint_\Omega u^{(0)} d\Omega$$

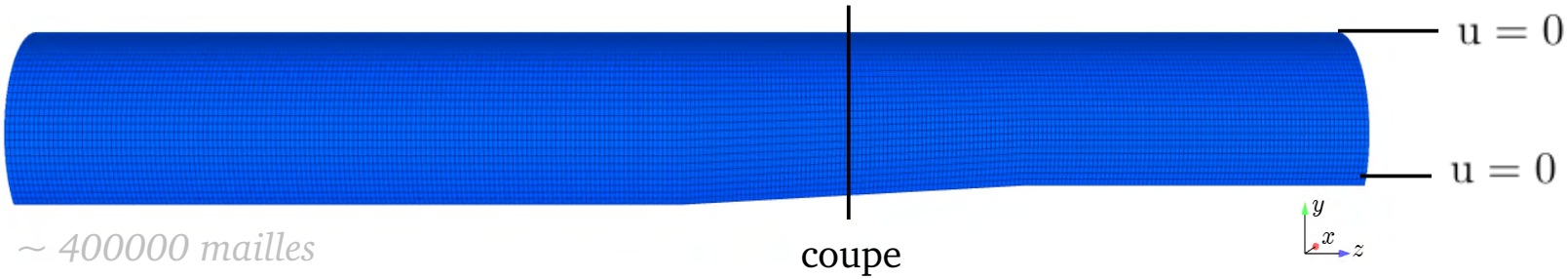
Facteur forme

$$\alpha = \frac{\frac{1}{\mathcal{A}_\ell}\iint_\Omega u^2 d\Omega}{\left(\frac{1}{\mathcal{A}_\ell}\iint_\Omega u d\Omega\right)^2}$$

Ecoulements granulaires cisaillés

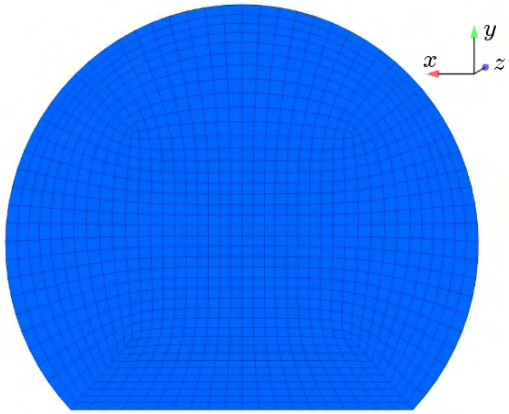
Validation du modèle théorique

Simulations numériques directes réalisées avec Neptune



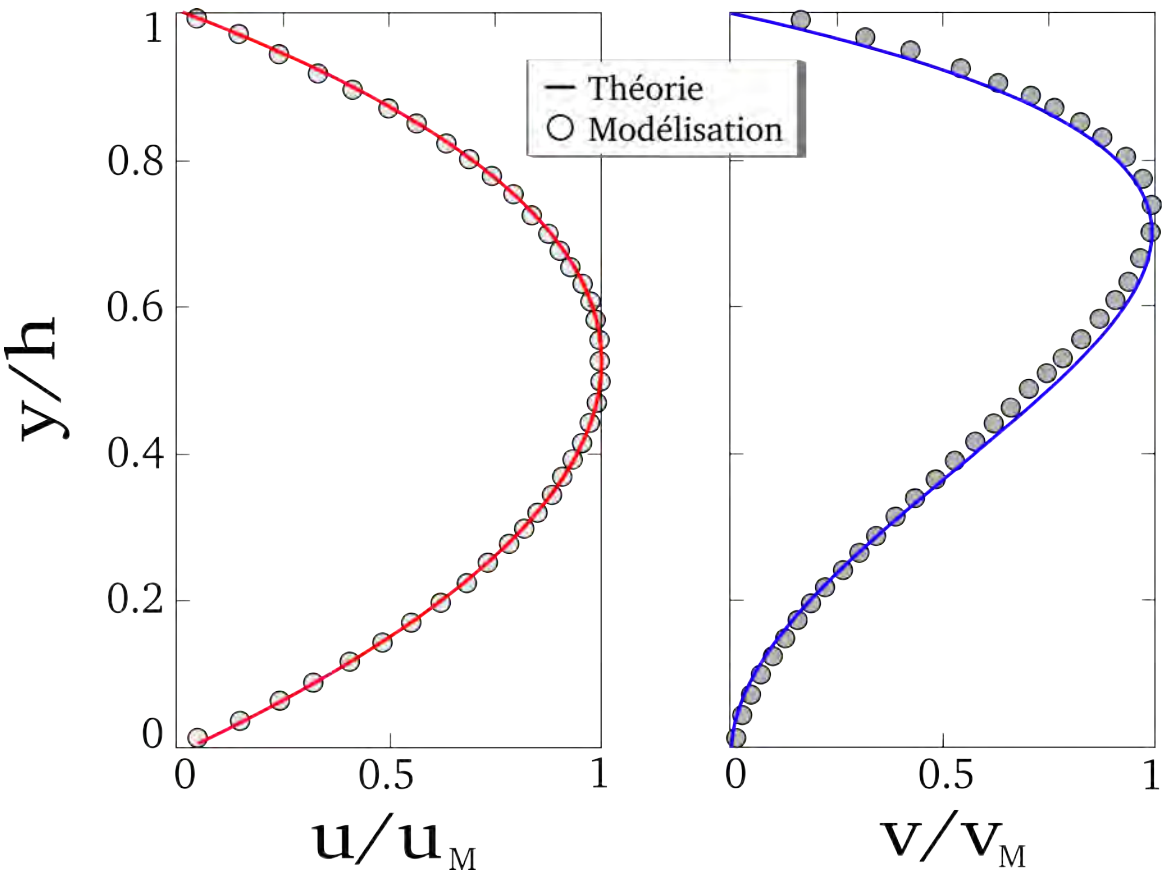
Ecoulement 3D laminaire stationnaire

$$\begin{cases} \mathcal{R}e = 20 - 400 \\ \frac{\partial h_b}{\partial x} = 0.05 - 0.1 - 0.2 \\ \frac{\partial h_b}{\partial t} = 0 \end{cases}$$



Ecoulements granulaires cisaillés

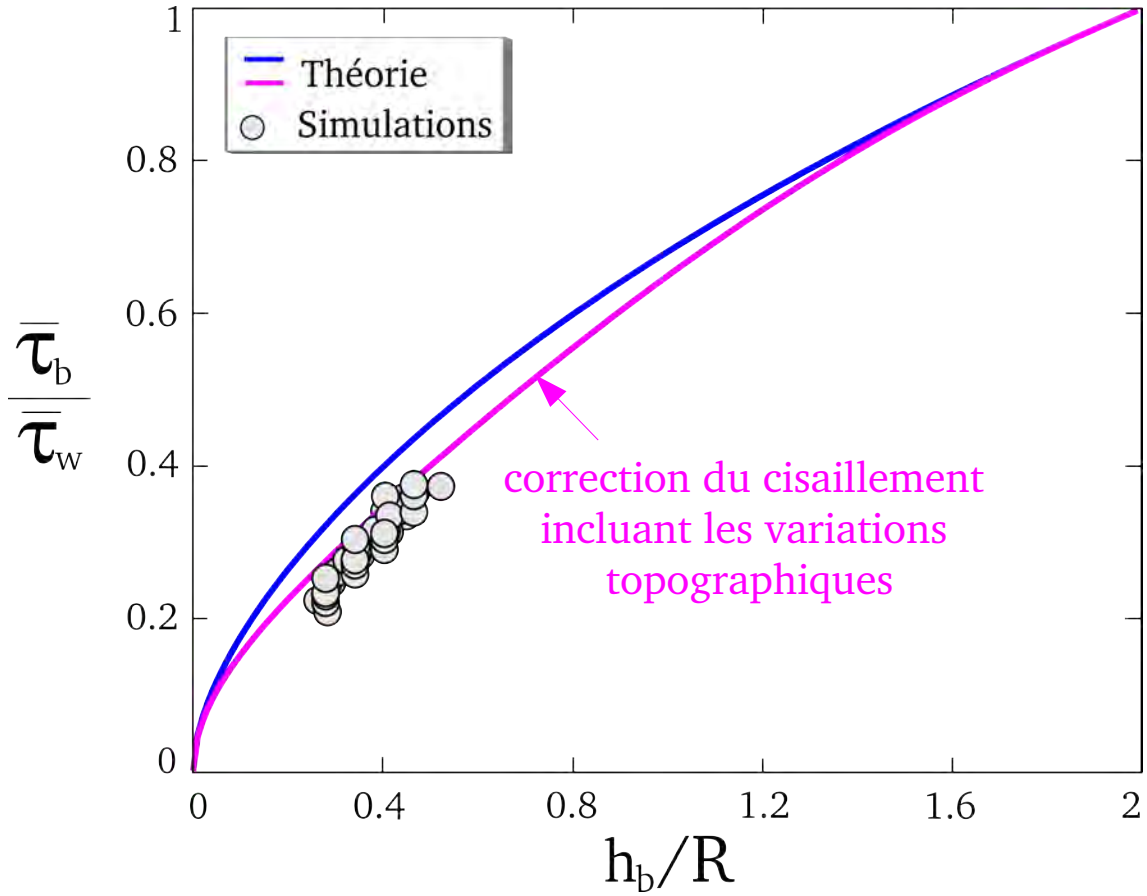
Validation du modèle théorique



- Très bonne prédiction des profils de vitesse horizontale et verticale

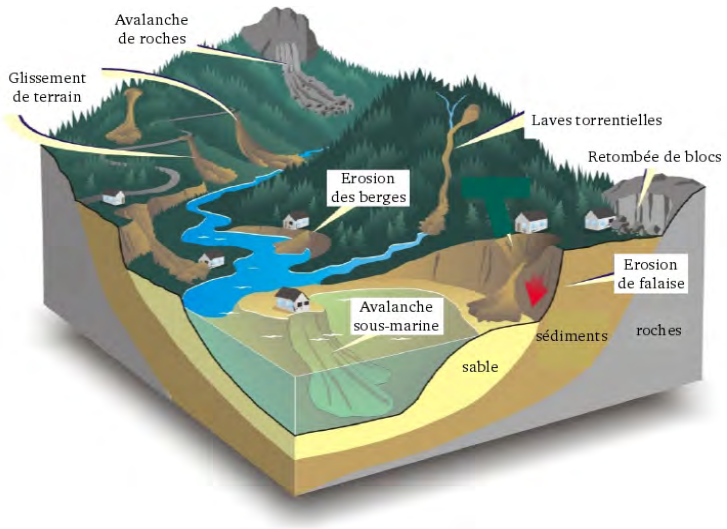
Ecoulements granulaires cisaillés

Validation du modèle théorique

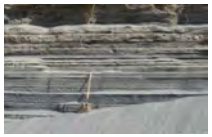


- Prédiction du cisaillement à la base en bon accord avec les simulations

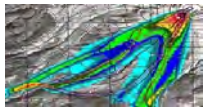
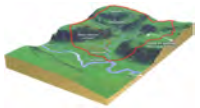
En résumé

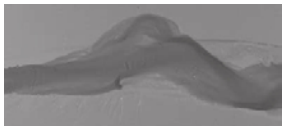


Données de terrain



Modélisation de grande échelle

Evènements extrêmes

Modélisation de petite échelle