

Etude expérimentale des écoulements granulaires fluidisés et implications pour les écoulements pyroclastiques

Olivier Roche

Laboratoire Magmas & Volcans
IRD-Université Blaise Pascal-CNRS
Clermont-Ferrand

GDR Egrin
23-26 mai 2016

Mayon, 1984 (C. Newhall)



Laboratoire
Magmas &
Volcans



ClerVolc

Clermont-Ferrand Centre for Volcano Research

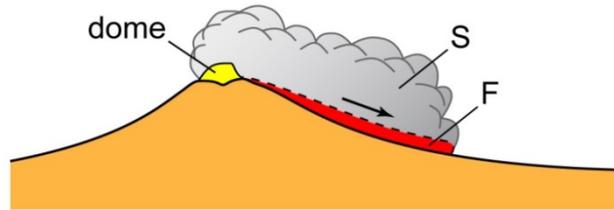


Institut de recherche
pour le développement

Plan

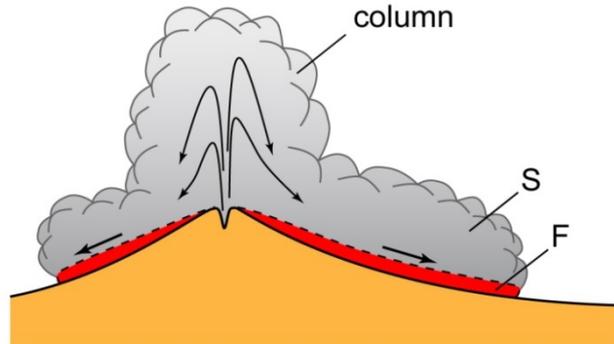
- **Ecoulements pyroclastiques**
phénoménologie, mécanismes de transport
- **Approche expérimentale**
écoulements air-particules
- **Application aux cas naturels**
super-éruptions

Courants de densité pyroclastiques (CDP) mélanges gaz-particules



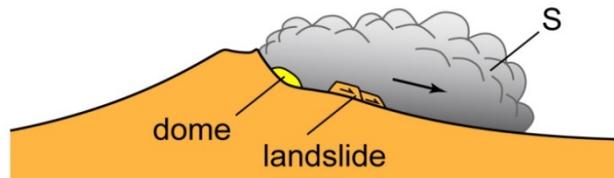
Effondrement d'un dôme

- gravitationnel, explosif
(Unzen 1990, Montserrat 1995...)



Effondrement d'une colonne éruptive

- discret, continu
(Montserrat 1995-1999)

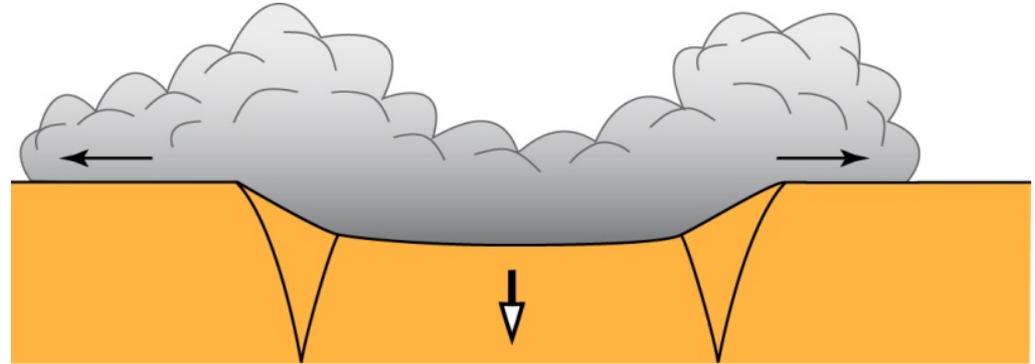


Glissement + explosion d'un (crypto)dôme

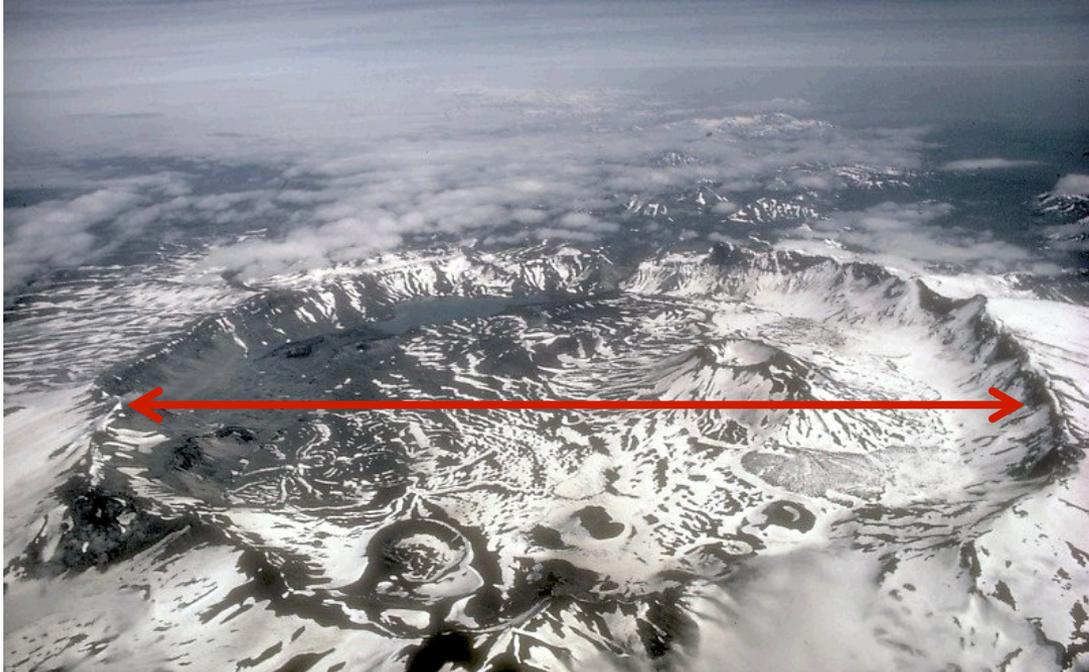
- "blast" de haute vitesse
(Bezymianny 1956, Mt St Helens 1980...)

Courants de densité pyroclastiques (CDP) mélanges gaz-particules

Formation d'une caldera



Aniakchak, Alaska (USGS)



Volume d'éruption :
10's-1000's km³
("super-éruptions")

Quel est le diamètre
de la caldera ?



Soufrière Hills (Montserrat)

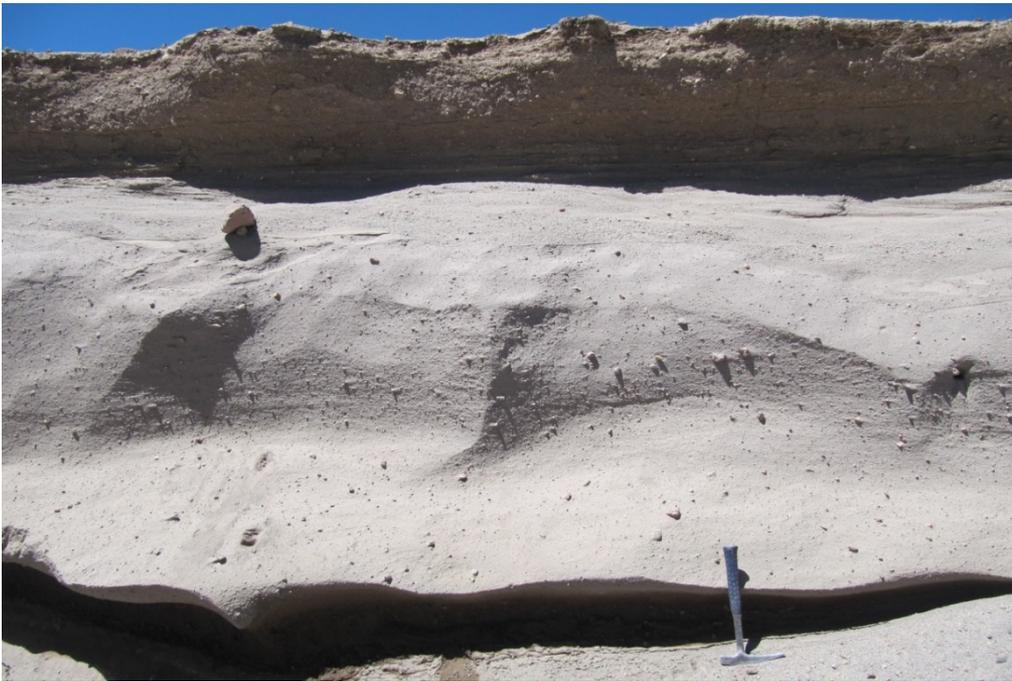
Video : M. Sagot

Les particules...

taille : $<1 \mu\text{m}$ à $>1 \text{ m}$

masse volumique : <500 à 3000 kg m^{-3}

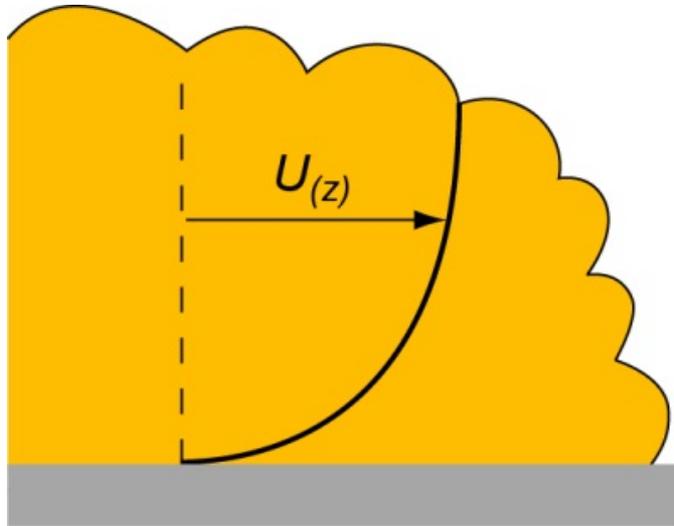
nombreux cas : matrice de cendres ($<100 \mu\text{m}$)



**Que peut-on apprendre des dépôts
concernant les mécanismes de transport ?**

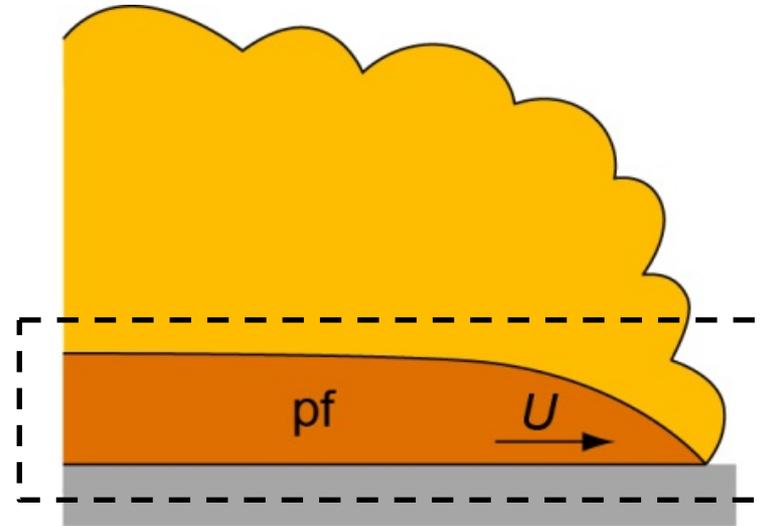
Mécanismes de transport des particules

(1) Courant dilué turbulent



- 0.1-1 % vol. particules
- $\rho \sim 1 \text{ kg/m}^3$
- vitesse = 10-80 m/s
(petites éruptions)

(2) Ecoulement basal dense

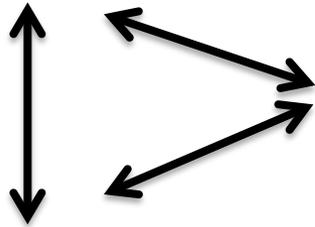


- >30 % vol. particules
- $\rho \sim 10^3 \text{ kg/m}^3$
- vitesse = 10-30 m/s
(petites éruptions)

Existe-t-il des cas intermédiaires ?

Méthodes et objectifs

Terrain
étude des dépôts



Modélisation



**Simulation des
éruptions**

Expérimentation

écoulements gaz-particules

- **Meilleure compréhension des mécanismes physiques pour la modélisation**

Questions relatives aux écoulements pyroclastiques (denses)

- **Mécanismes de propagation ?**
 - cinématique et structure interne
 - interactions gaz-particule et particule-particule
- **Mécanismes de dépôt ?**
 - en masse vs. aggradation progressive
- **Interaction avec un substrat ?**
 - entraînement
 - rôle de la rugosité du substrat

Ecoulements denses

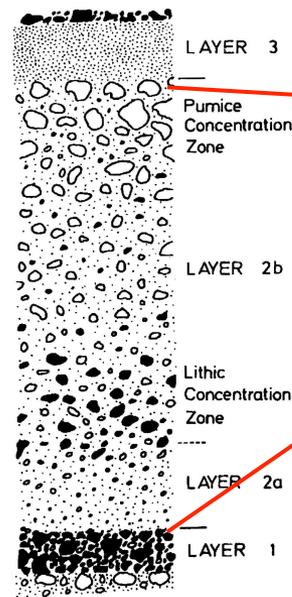
Fortement concentrés

- dépôts: massifs, mal classés (cendres → blocs), concentrés dans les vallées, ± soudés

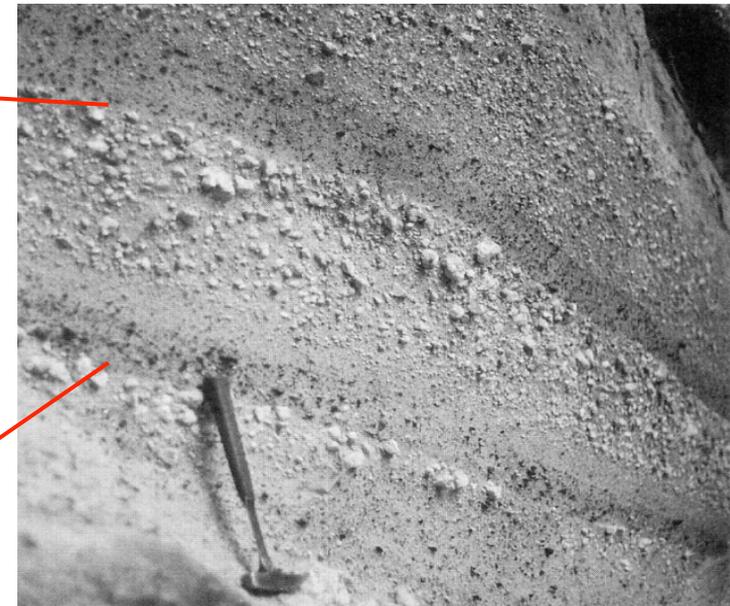
Influence du gaz

- unité d'écoulement standard (état fluidisé : mouvement gaz/particules → pression de fluide interstitielle)

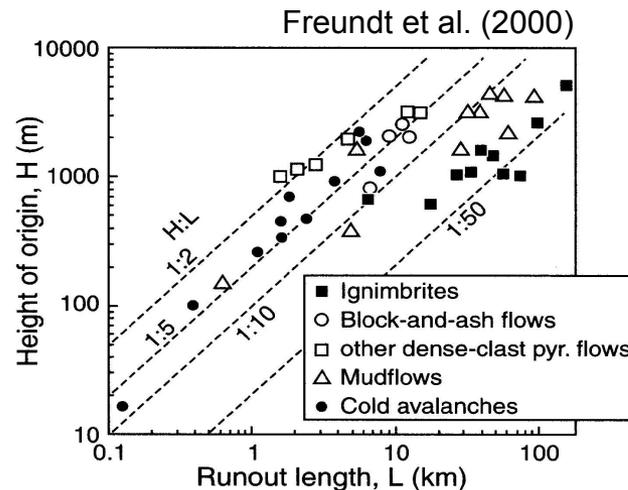
- surface subhorizontale
- forte mobilité
 $L = <1 \text{ à } >100 \text{ km}$



Sparks et al. (1973)

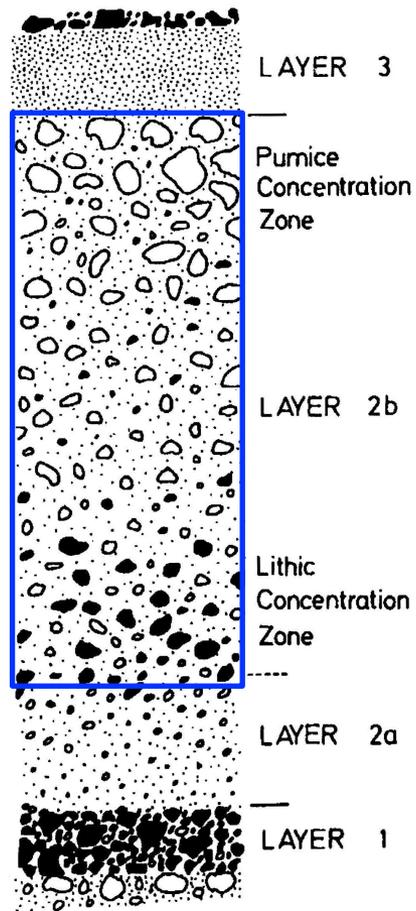


Laacher See (A. Freundt)



Katmai (T. Druitt)

Unité standard

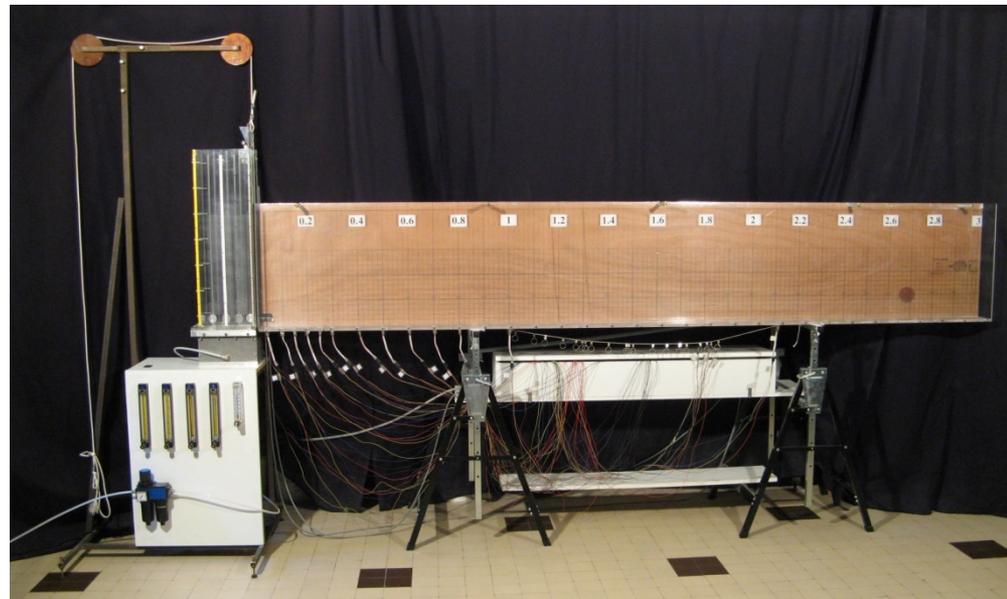
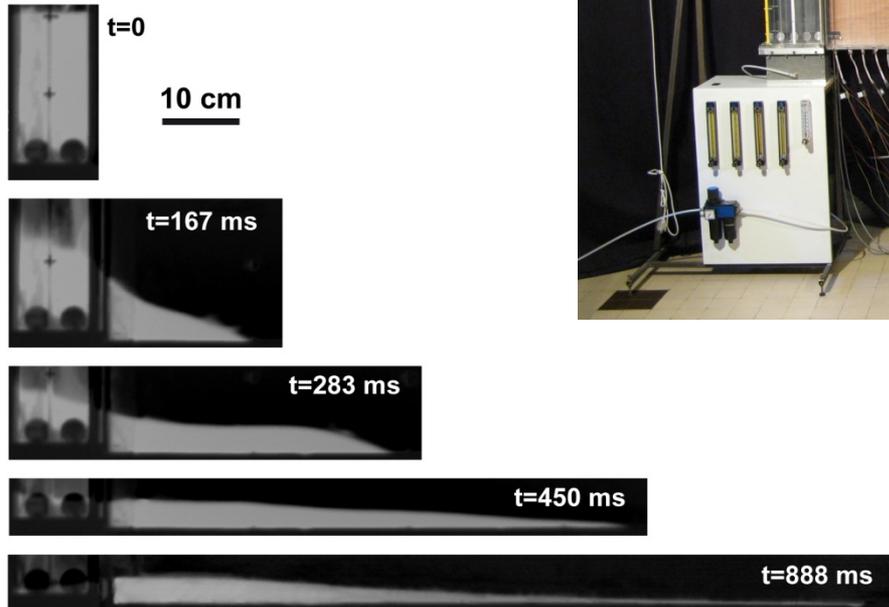


Compatible avec un lit fluidisé

Video from Martin Rhodes (Monash University)

http://www.youtube.com/watch?v=3BqVFGCUviY&feature=player_detailpage

Approche expérimentale



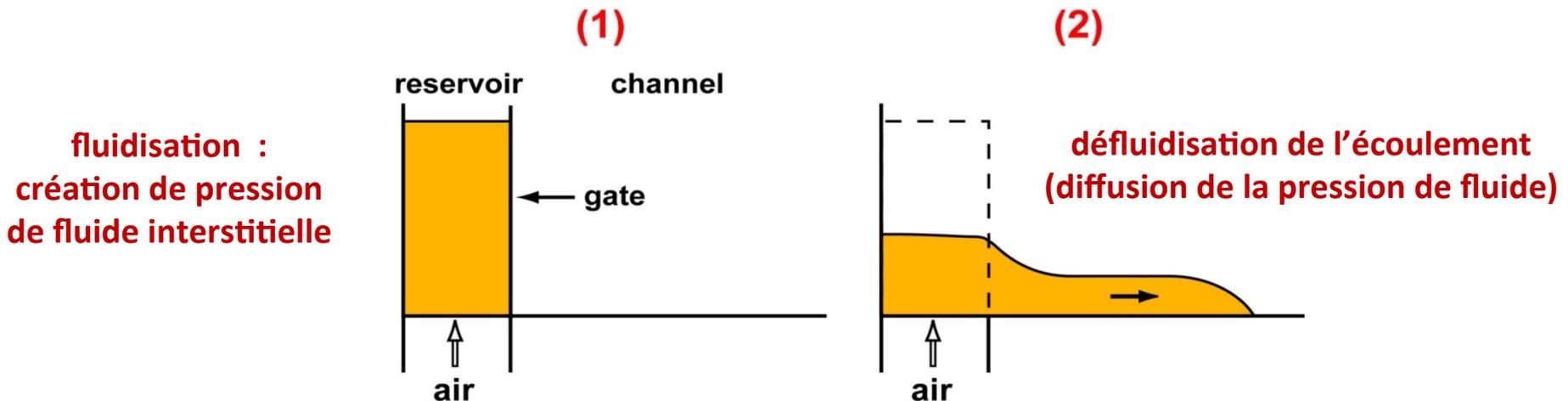
Approche expérimentale

- Principe (cf. propriétés des écoulements pyroclastiques)

- gaz-particules, denses, écoulements gravitaires non permanents qui peuvent former des dépôts

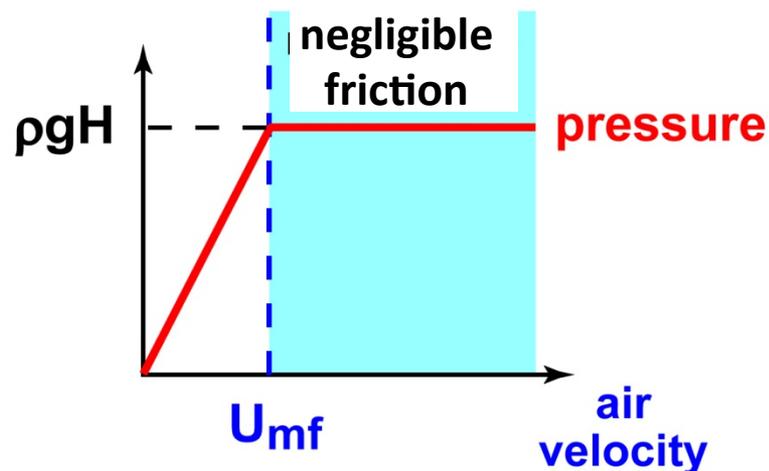
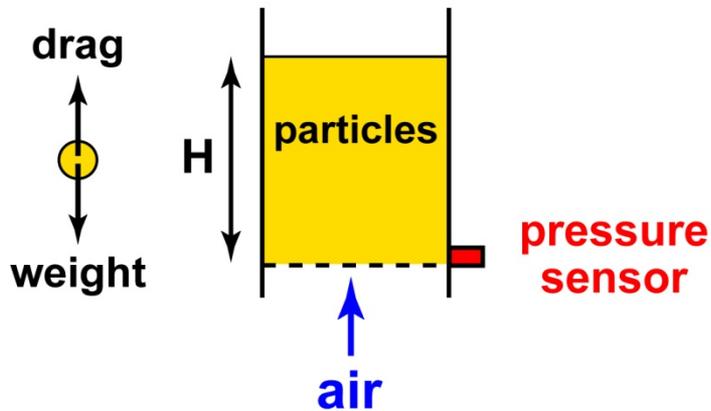
- Méthode

- "dam-break" : relâchement du colonne granulaire fluidisée
- analyse : cinématique, pression de fluide interstitielle



Fluidisation et diffusion de pression de fluide

(1) fluidization

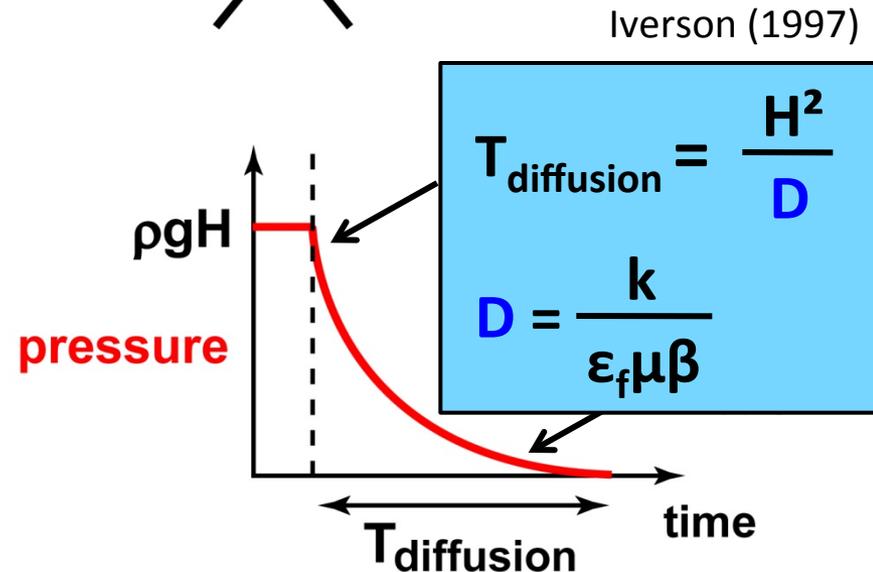
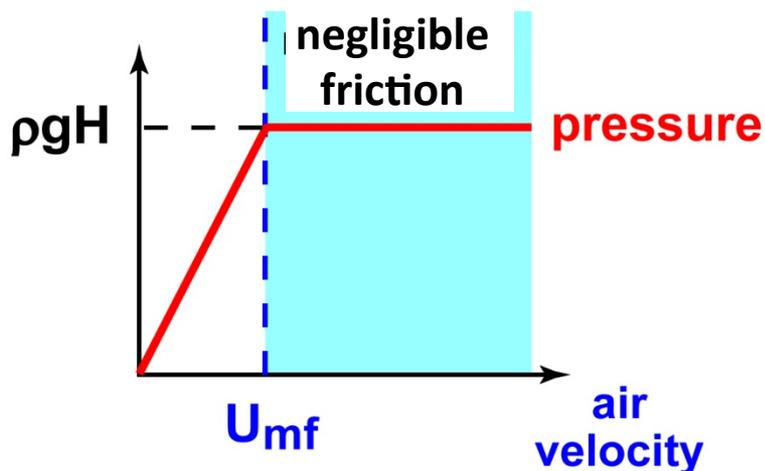
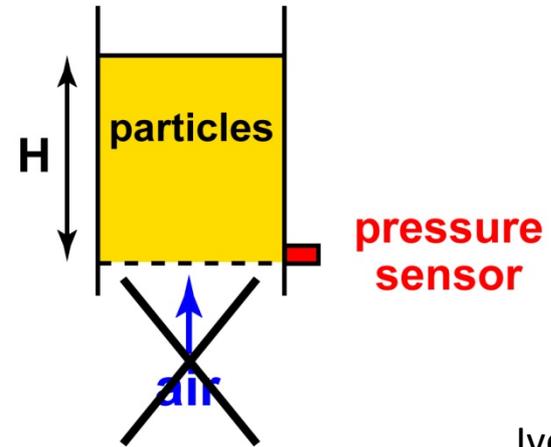
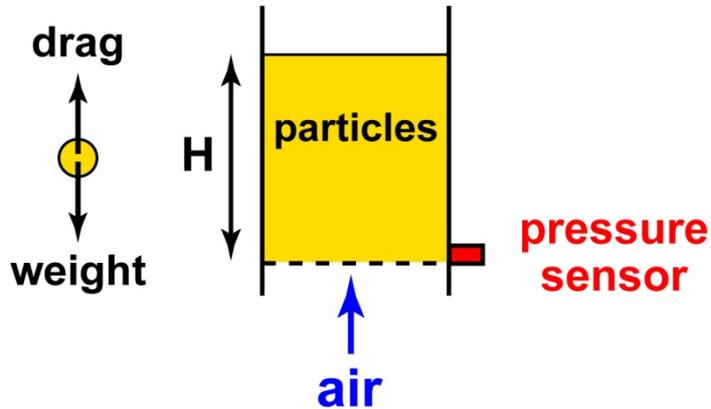


$$U_{mf} = k / \mu P_{mf} / H$$

$$k = \frac{\varepsilon_f^3 d_p^2}{150 (1 - \varepsilon_f)^2}$$

Fluidisation et diffusion de pression de fluide

(1) fluidization \longrightarrow (2) defluidization



Diffusion de la pression

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}$$

cf. Iverson (1997,
Rev. Geophys.)

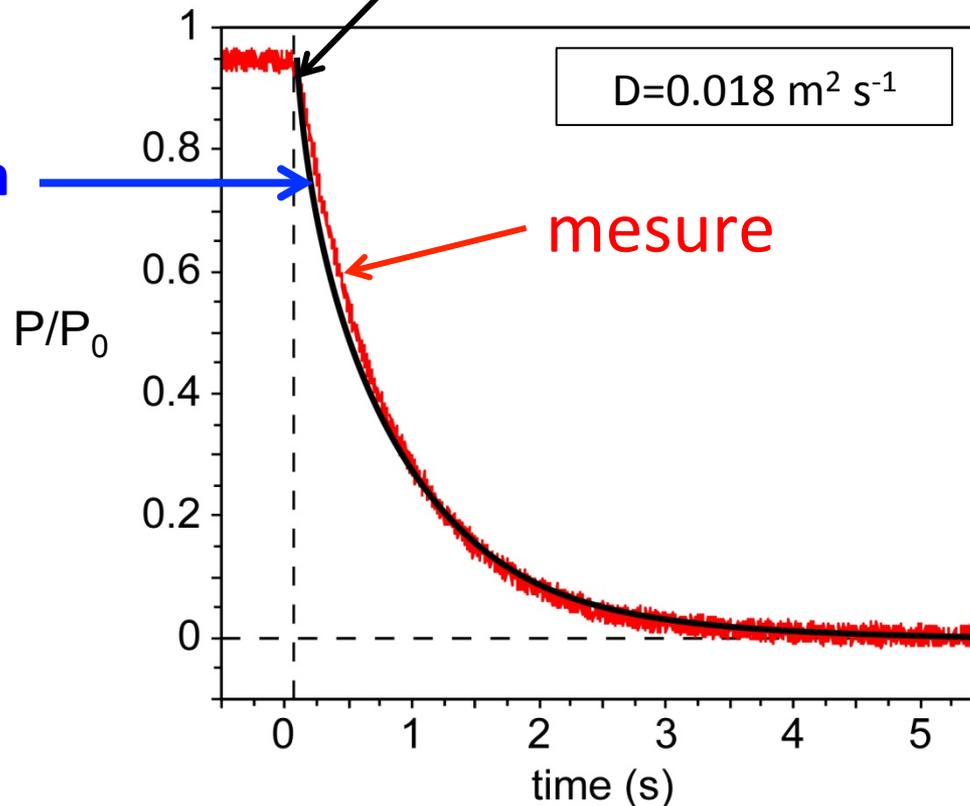
Solution pour un gradient de pression initial linéaire (Carslaw and Jeager 1959):

$$P = P_0 \left\{ 1 - \frac{2(Dt)^{1/2}}{H} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ (-1)^n \left[\text{ierfc} \left(\frac{nH}{(Dt)^{1/2}} \right) - \text{ierfc} \left(\frac{(n+1)H}{(Dt)^{1/2}} \right) \right] \right\} \right\}$$

solution proche :

$$P = P_0 \exp \left[-Dt \left(\frac{\pi}{2H} \right)^2 \right]$$

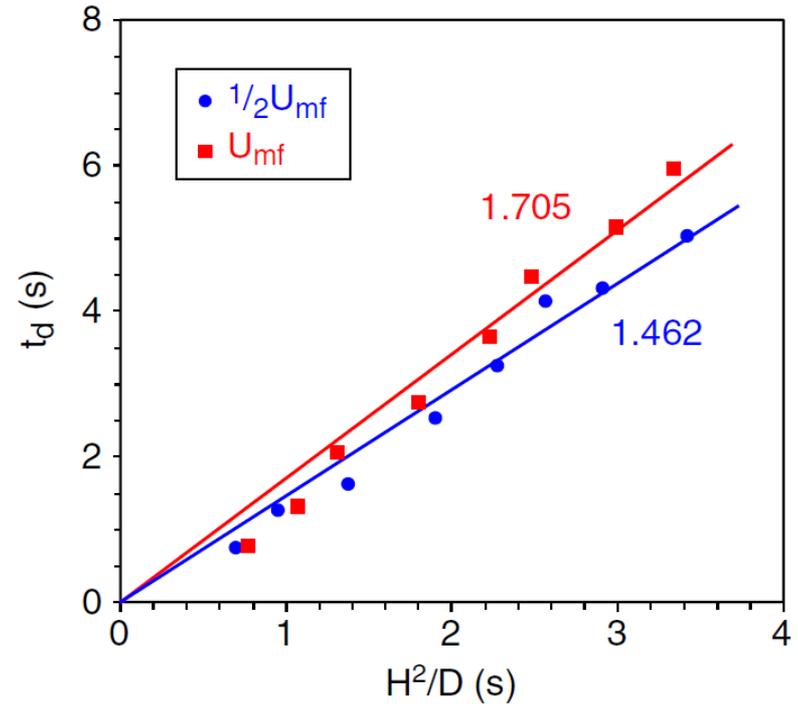
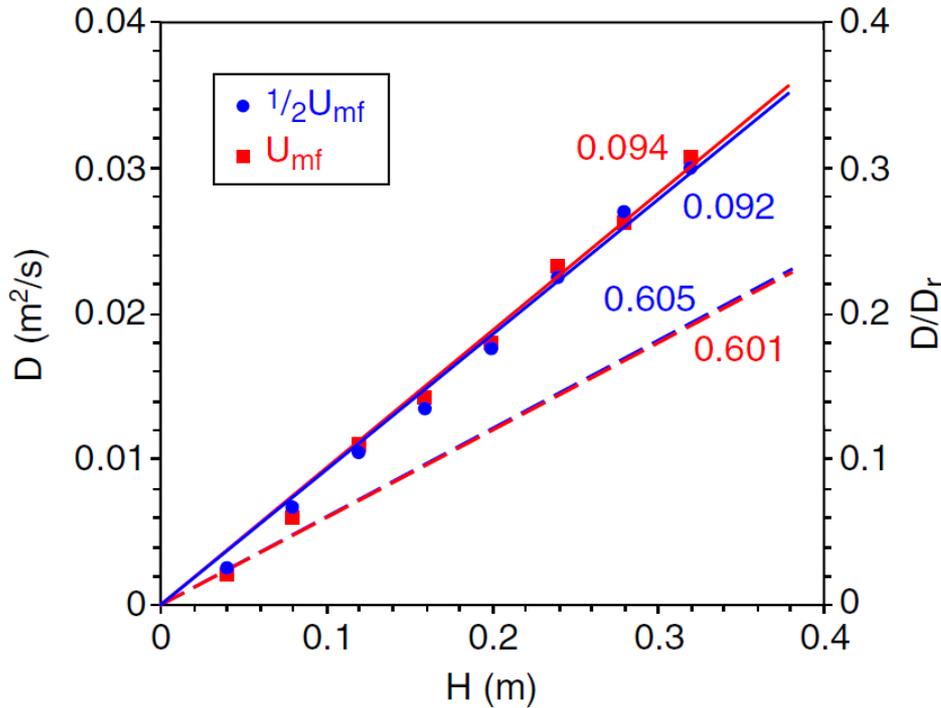
**Forte pression de
fluide = fluidisation**



Diffusion de la pression

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}$$

cf. Iverson (1997,
Rev. Geophys.)

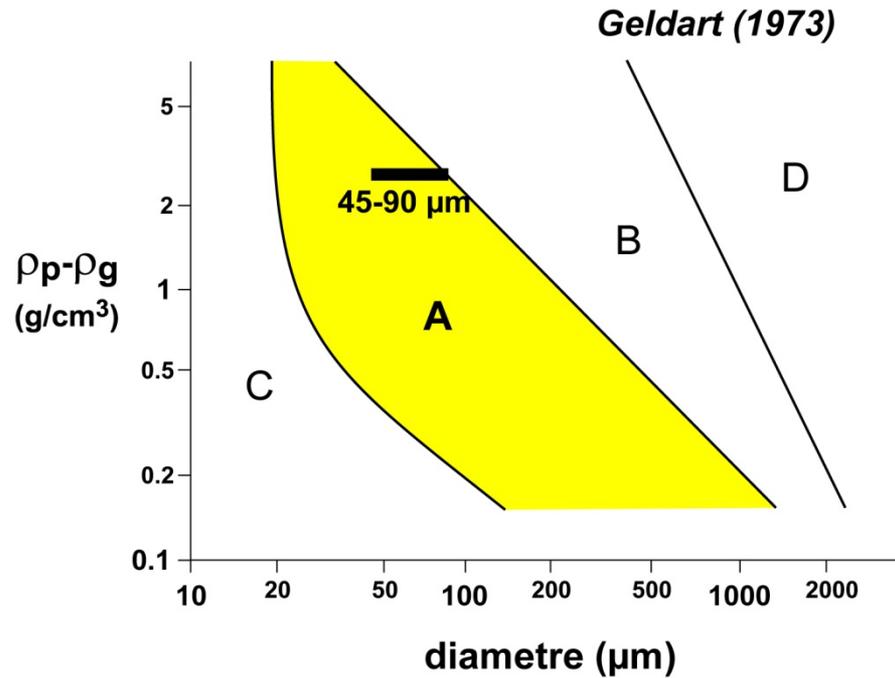
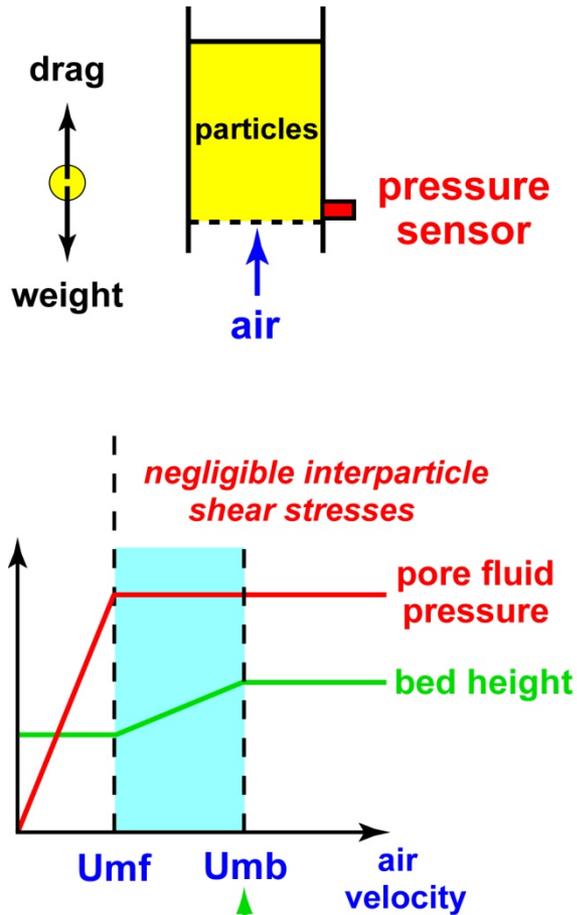


$$D \downarrow r = \frac{k}{\epsilon \downarrow f} = \frac{k(P \downarrow atm + \rho g H)}{\mu \beta \quad \epsilon \downarrow f \mu}$$

Roche (2012, Bull.
Volcanol.)

Particules utilisées

groupe A : cf. ignimbrite (Druitt et al. 2007)



maximum bed expansion ~ 2-4 %

Analyse dimensionnelle

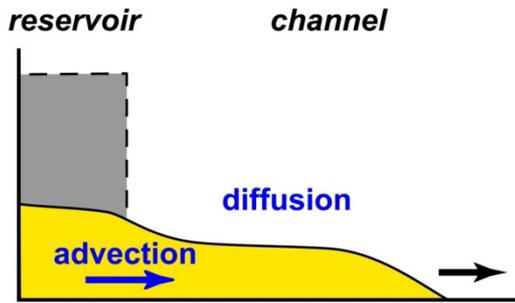
cf. Iverson (1997), Iverson and Denlinger (2001)

10 paramètres

10-3=7 nombres sans dimension

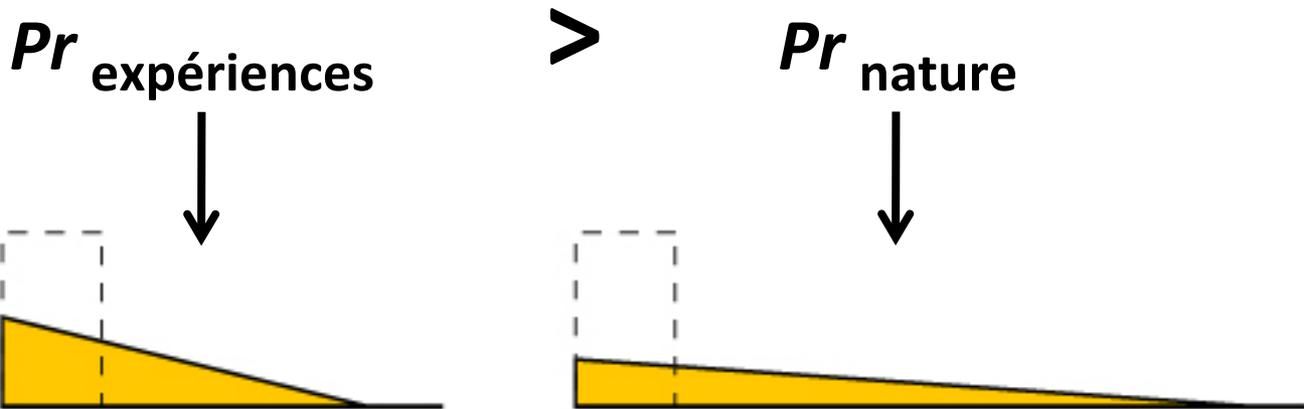
ε_s		Masse	$Ma = \varepsilon_s \rho_s / (\varepsilon_f \rho_f)$	$\gg 1$
d (m)				
ρ_s (kg/m ³)		Froude	$Fr = U / (gh)^{1/2}$	> 1
ε_f				
μ (Pa.s)		Bagnold	$Ba = (\rho_s \gamma d^2 / \mu) (\varepsilon_s / \varepsilon_f)$	régime macrovisqueux
ρ_f (kg/m ³)	⇒	Darcy	$Da = \mu / (\varepsilon_s \rho_s k \gamma)$	intér. solide-fluide dominantes
g (m/s ²)				
h (m)				
L (m)		Fluidisation	$Fl = k \varepsilon_s \Delta \rho (g/L)^{1/2} / (\mu \varepsilon_f)$	$\gg 1$
U (m/s)		Pression	$Pr = (L/g)^{1/2} / (h^2/D)$	
k (m ²)				
D (m ² /s)		Savage	$Sa = \rho_s \gamma^2 d^2 / (\Delta \rho g h \tan \varphi)$	régime frictionnel

$\gamma = U/h$; φ : pente

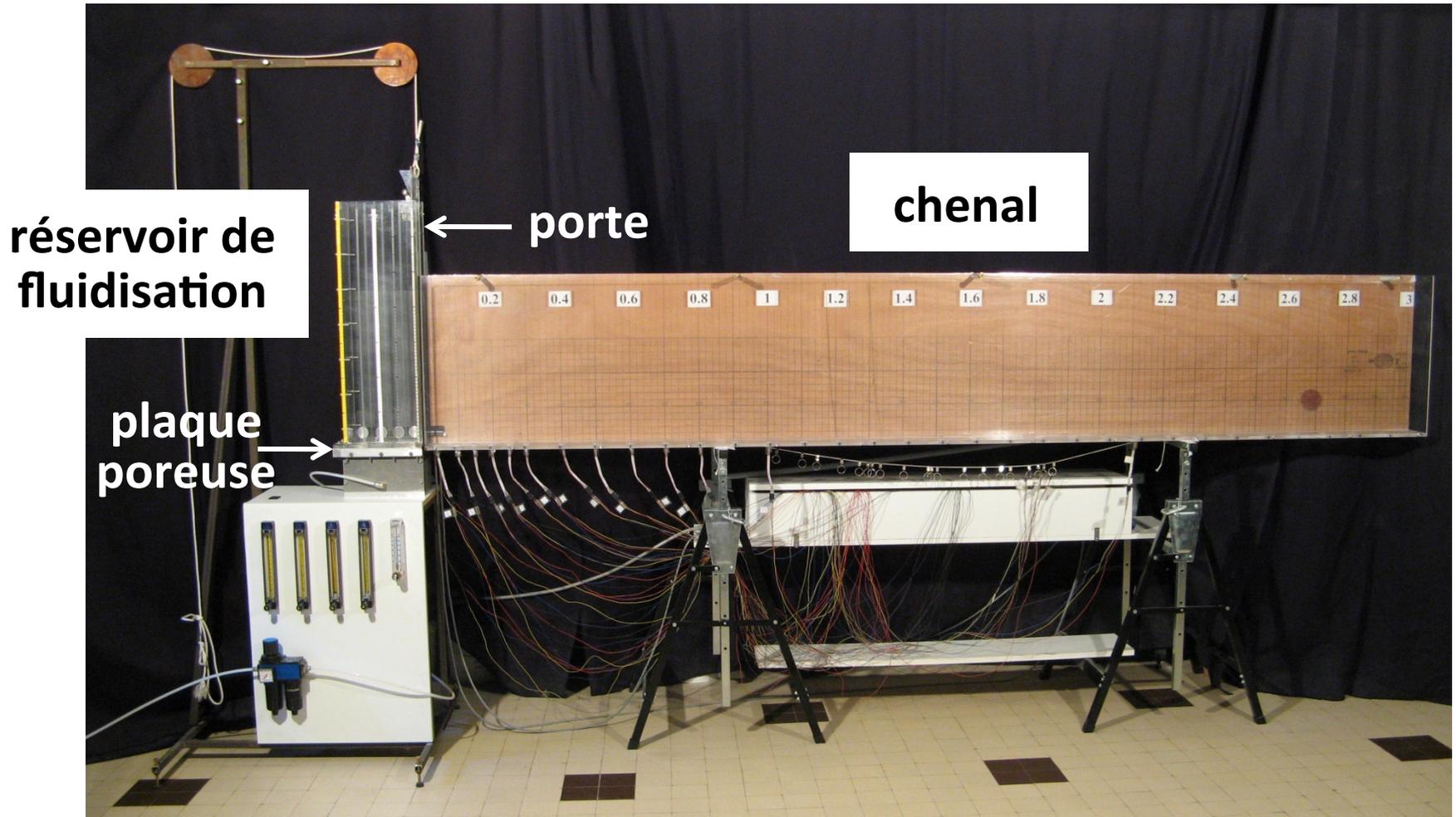


cf. Iverson and Denlinger (2001)

$$Pr = \frac{T_{\text{advection}} \text{ (cf. temps de parcours)}}{T_{\text{diffusion}} \text{ de la pression}} = \frac{(L/g)^{1/2}}{h^2/D}$$

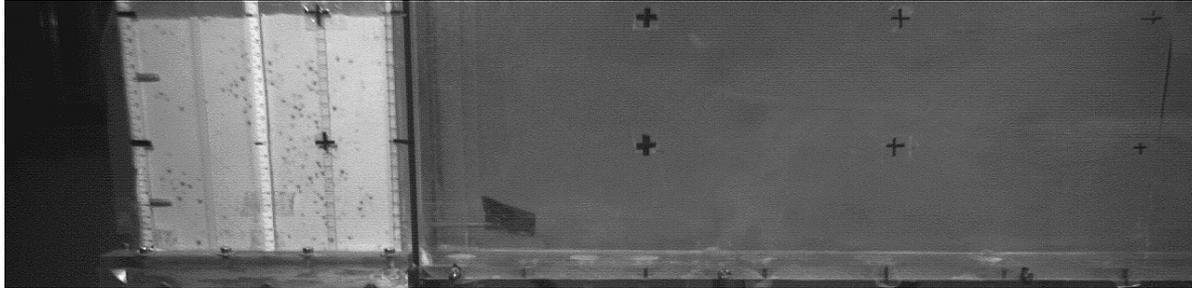


Dispositif expérimental



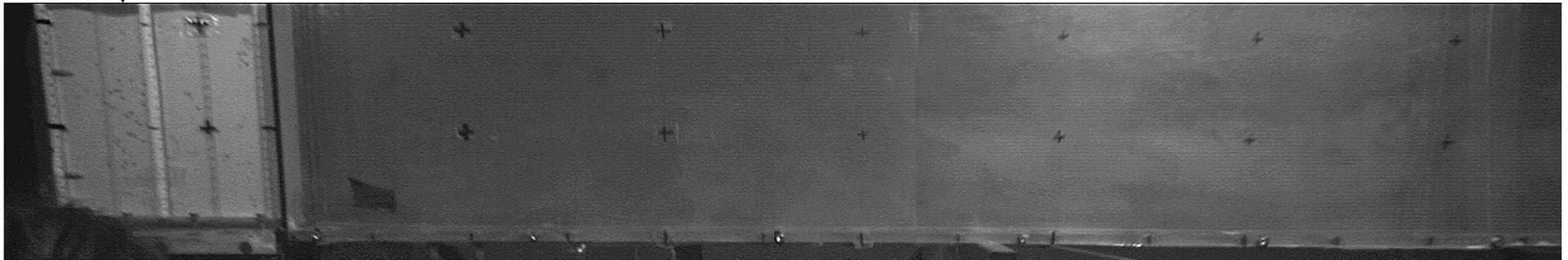
Matériau granulaire : billes de verre (80 μm)

Particules non fluidisées



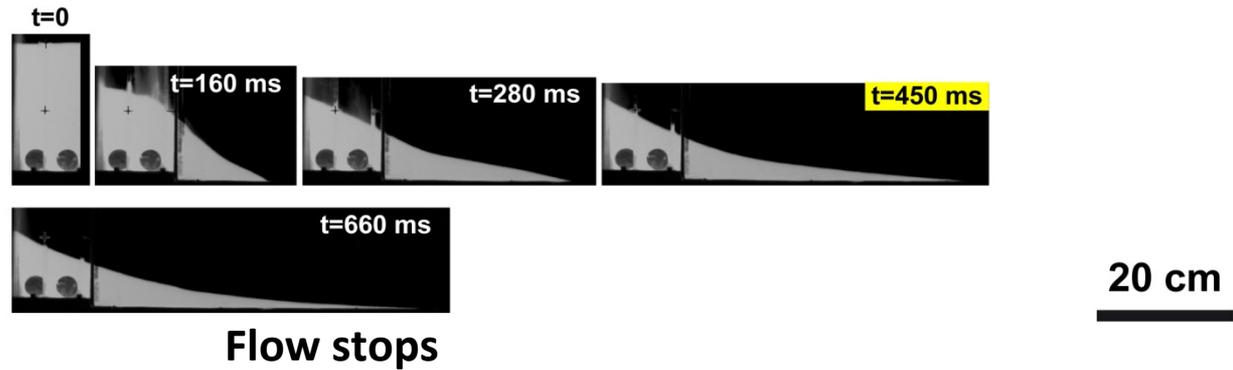
(vitesse vidéo : 1/20)

Particules fluidisées

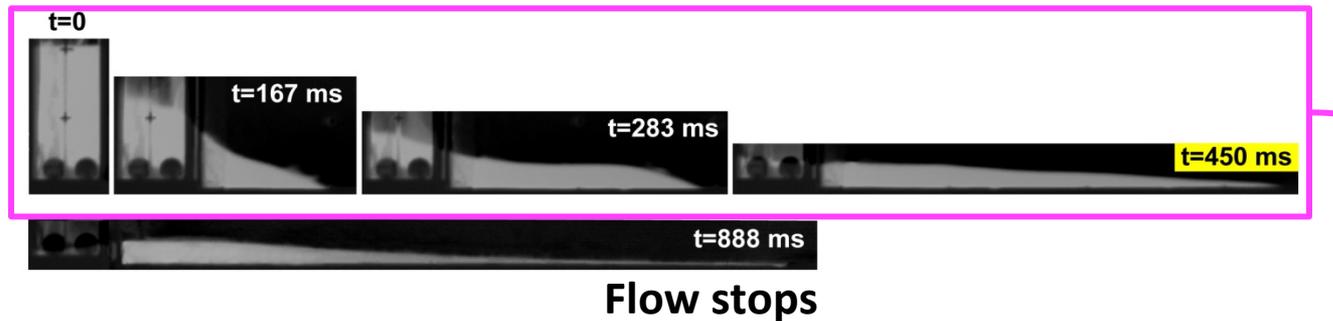


Cinématique – comparaison avec un fluide

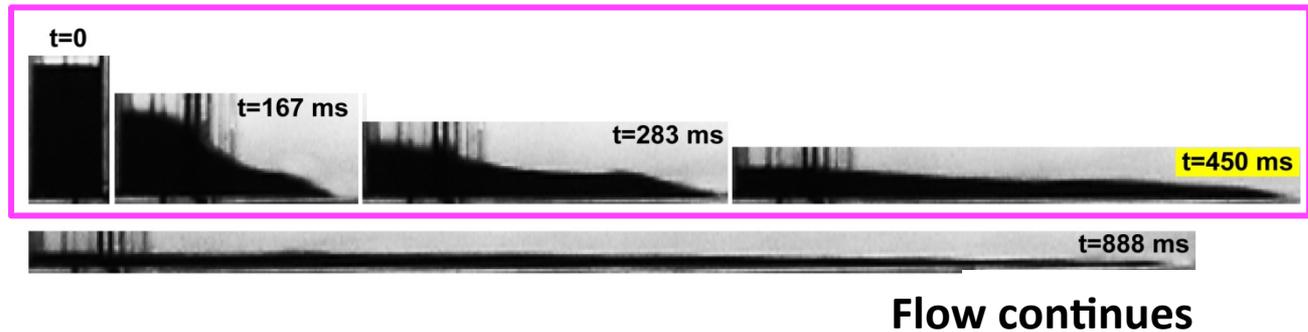
Granulaire
Non-fluidisé



Granulaire
initialement fluidisé
(expansion 2-4%)

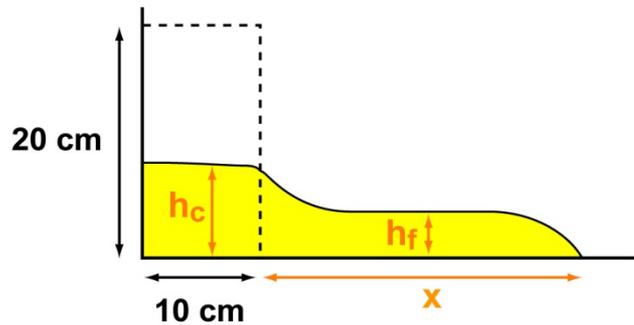


Eau
régime inertiel
($Re = 10^4-10^5$)



Roche et al. (JGR, 2008)

Cinématique : 3 phases

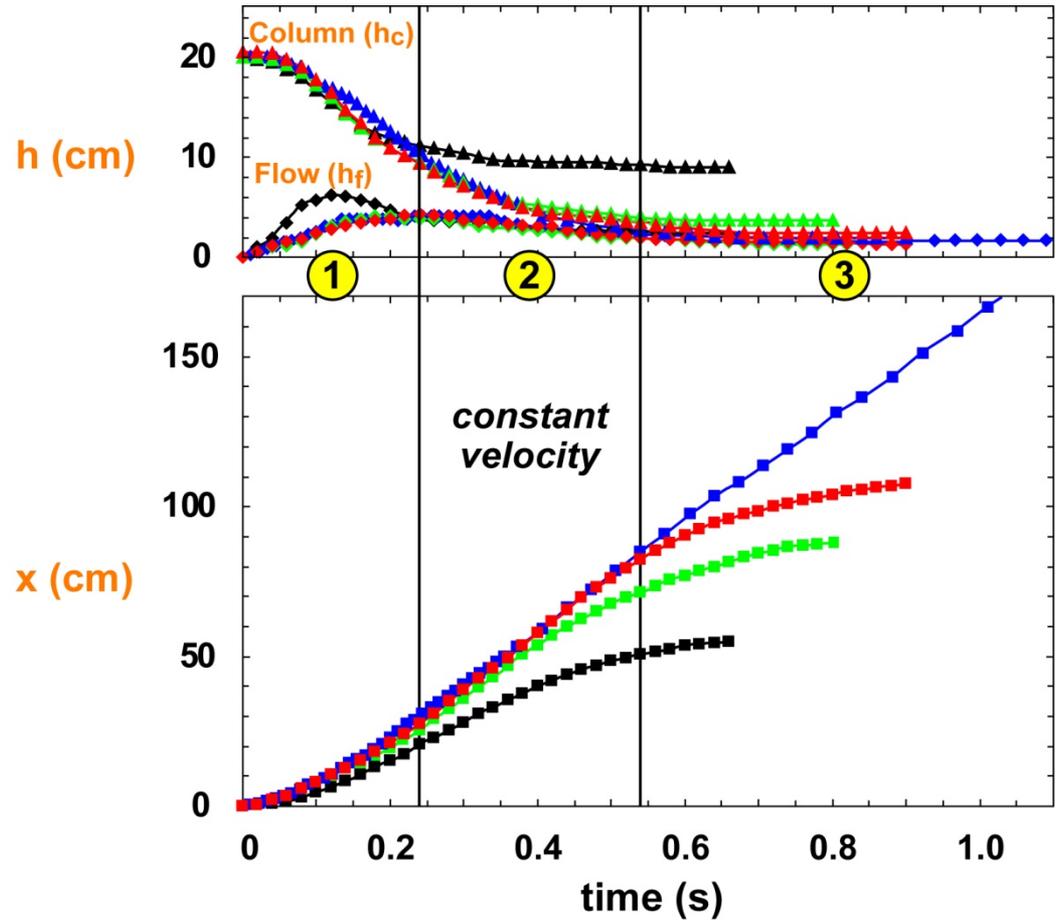


Water

Fluidised (U_{mb})
2.5-4.5 % expansion

Fluidised (U_{mf})
0 % expansion

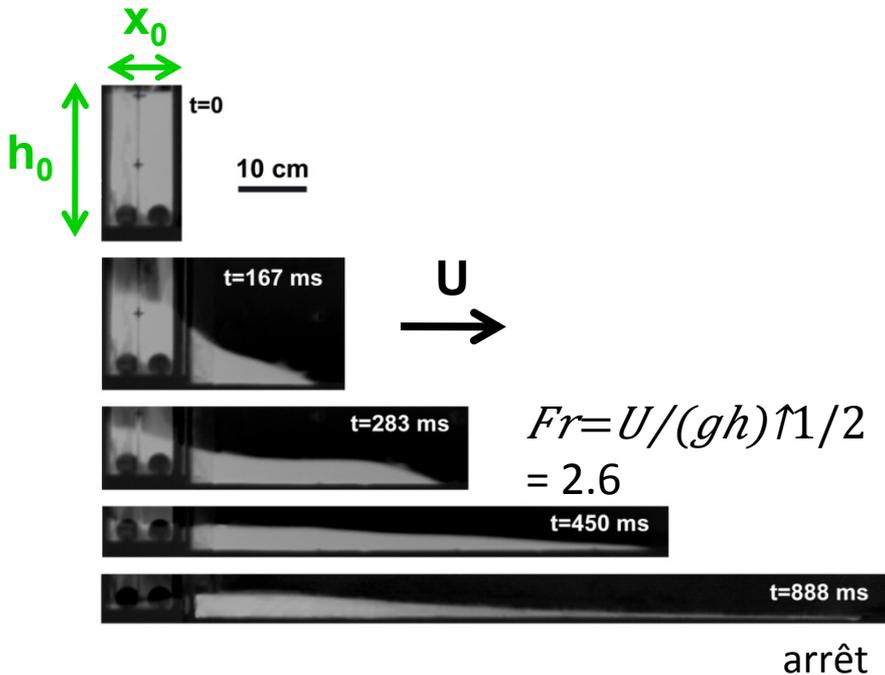
Non-fluidised



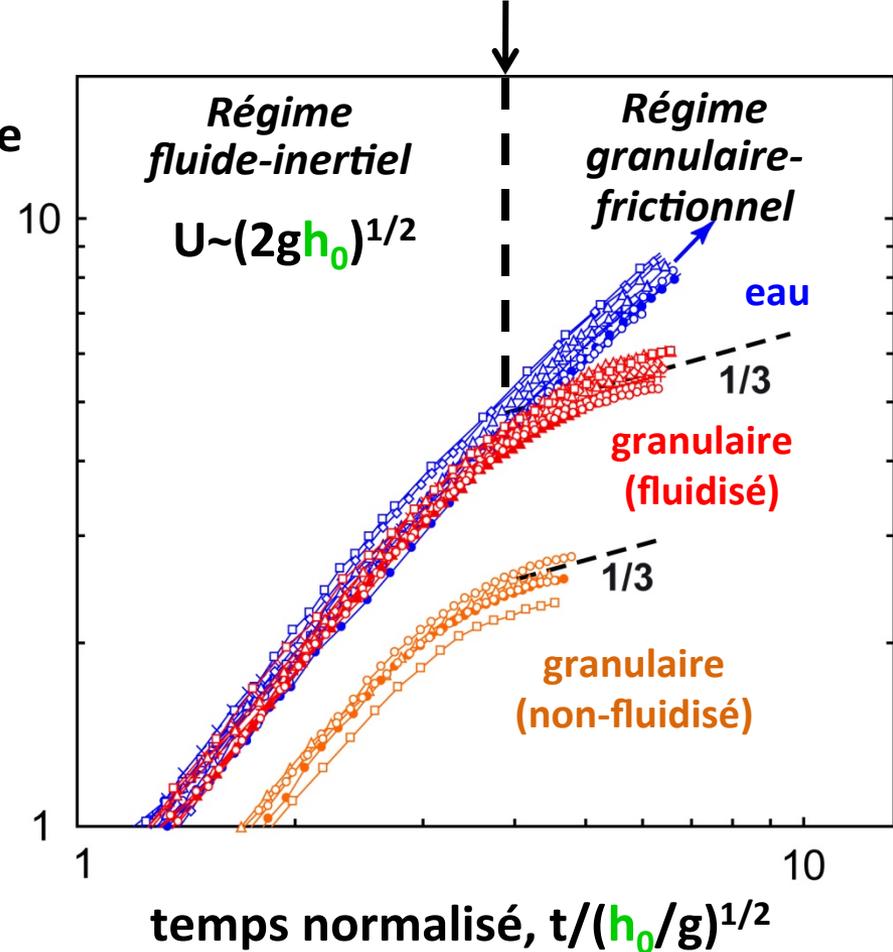
Cinématique

position du front normalisée
 x/h_0

$h_0/x_0 = 0.5-3$

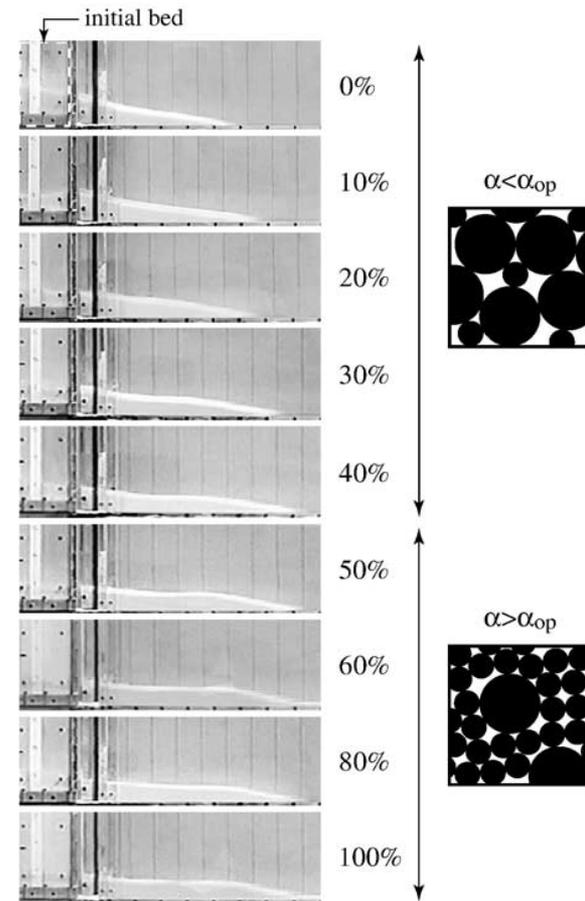
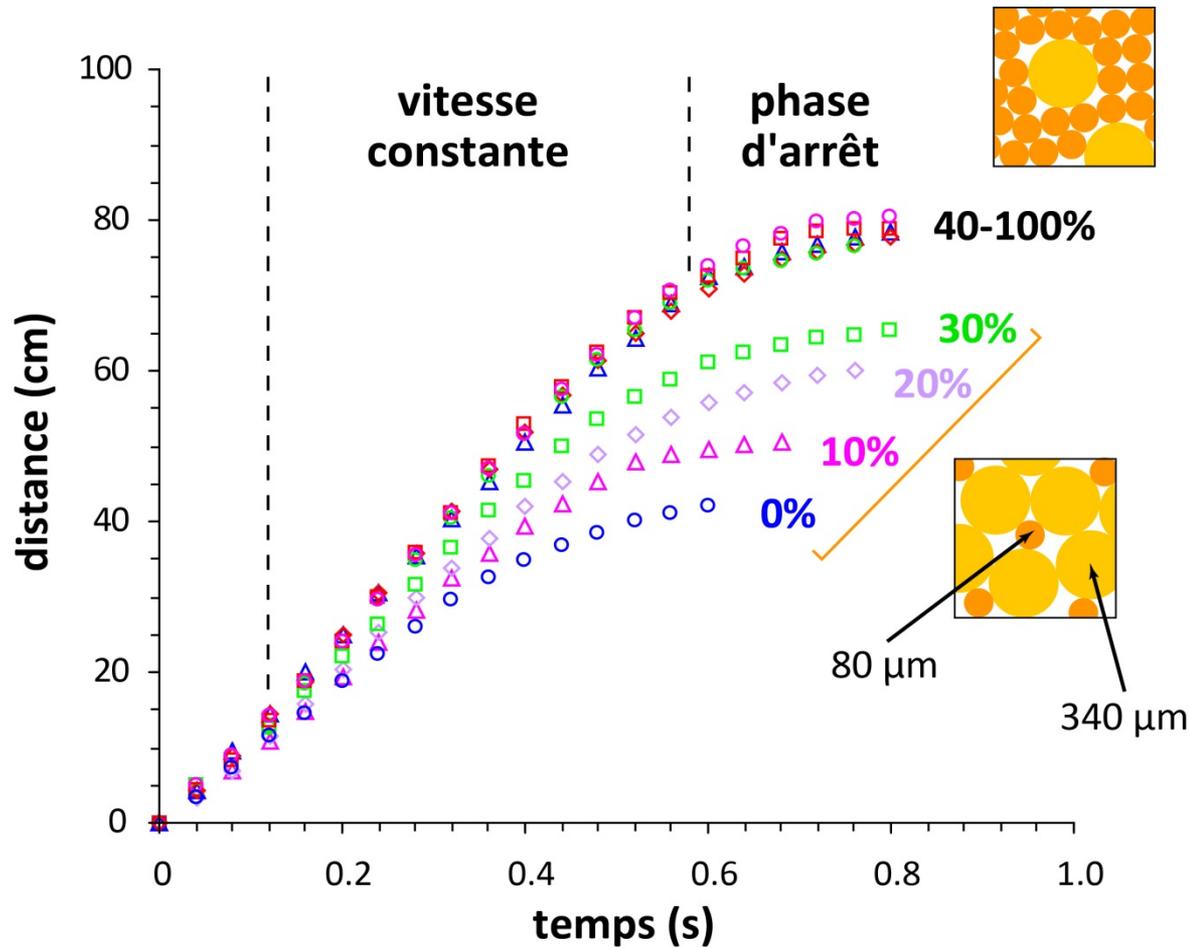


~65% durée d'écoulement
 ~80% distance de parcours

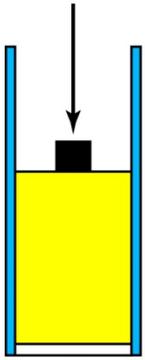


Roche et al. (JGR, 2008)

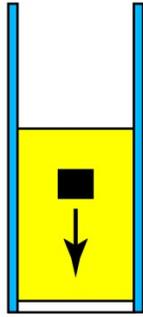
Ecoulements bidisperses



objet dense

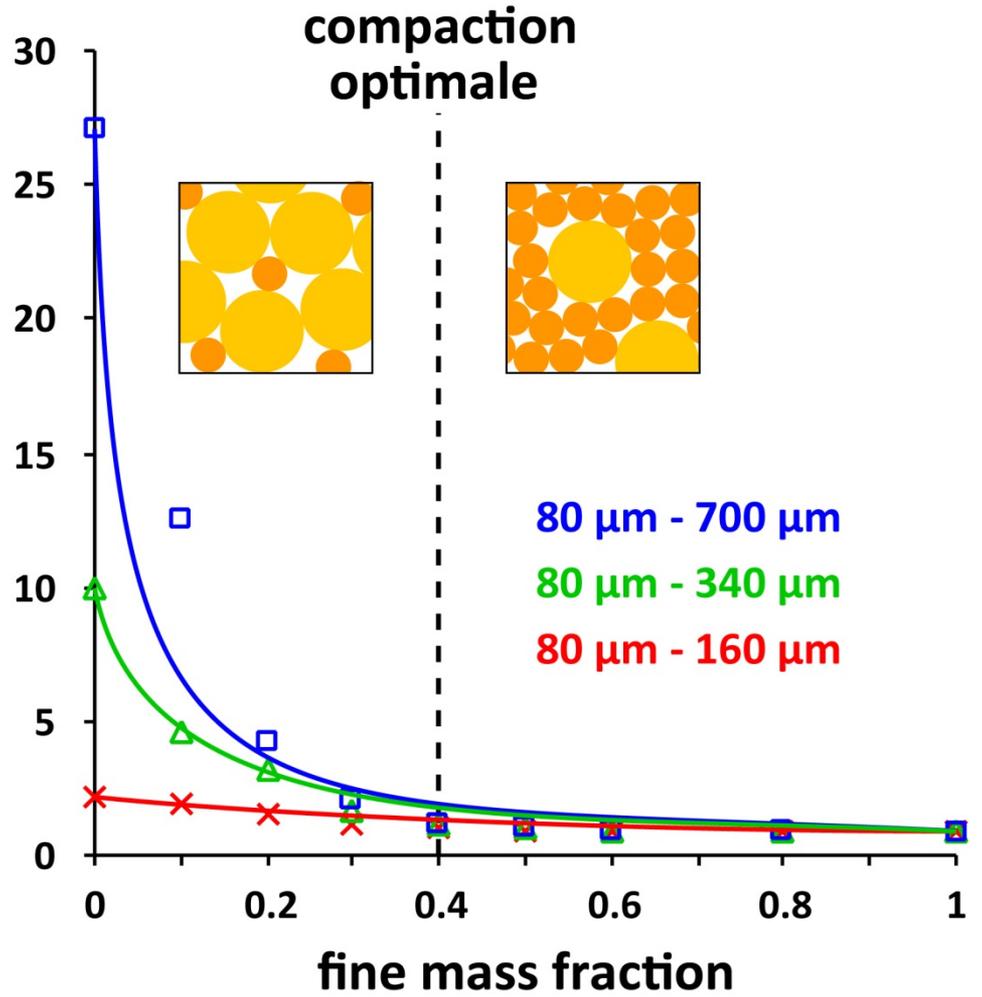


$U < U_{mf}$

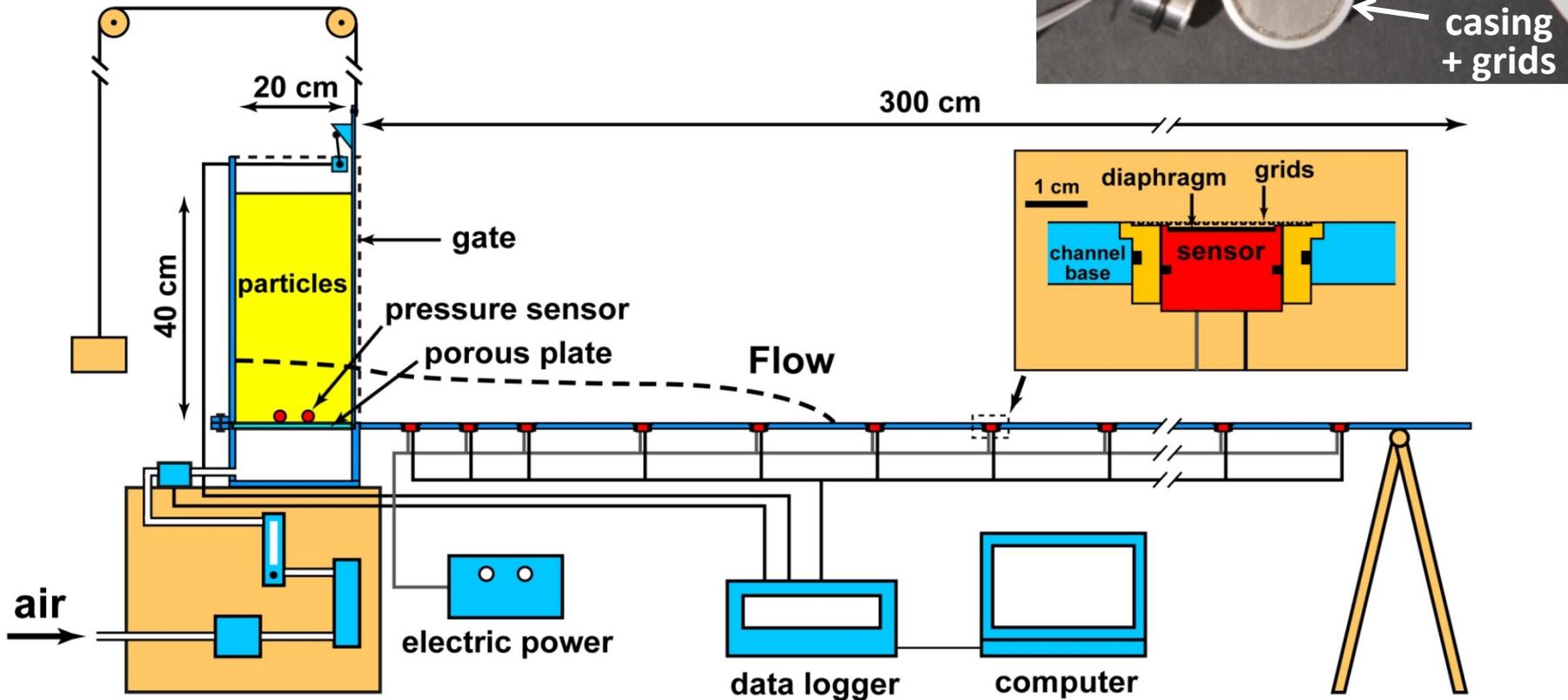


$U = U_{mf}$

U_{mf}
(cm/s)

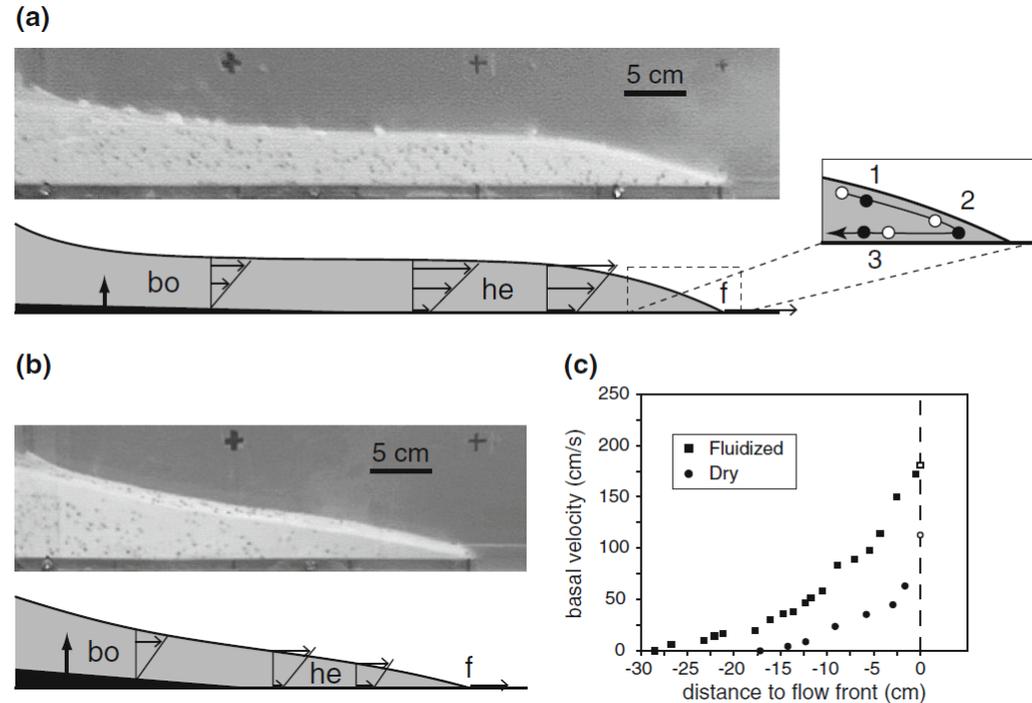
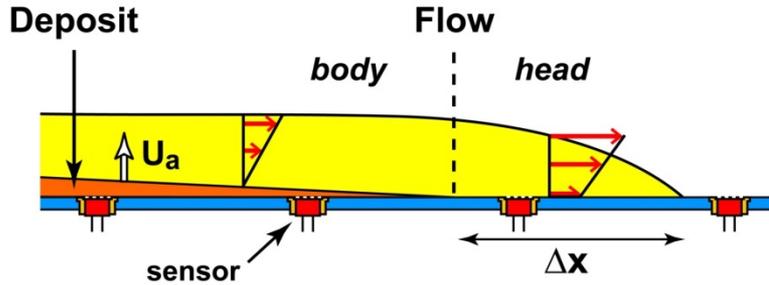


Mesure de la pression de fluide et cinématique interne



Roche et al. (2010)

Structure interne des écoulements



- Champ de vitesse interne complexe
- Δx : ~20-80 cm ($\Delta t=0.2-0.4$ s)
- U_a : ~16-19 cm/s (écoulements secs)
~6-8 cm/s (écoulements initialement fluidisés)

Écoulement initialement fluidisé

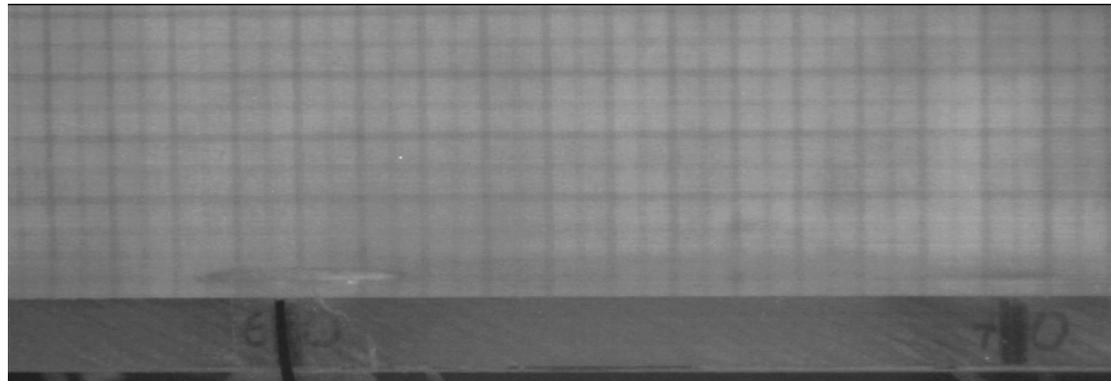
Vitesse de la
vidéo: 1/10

Marqueurs noirs
(700 μm)

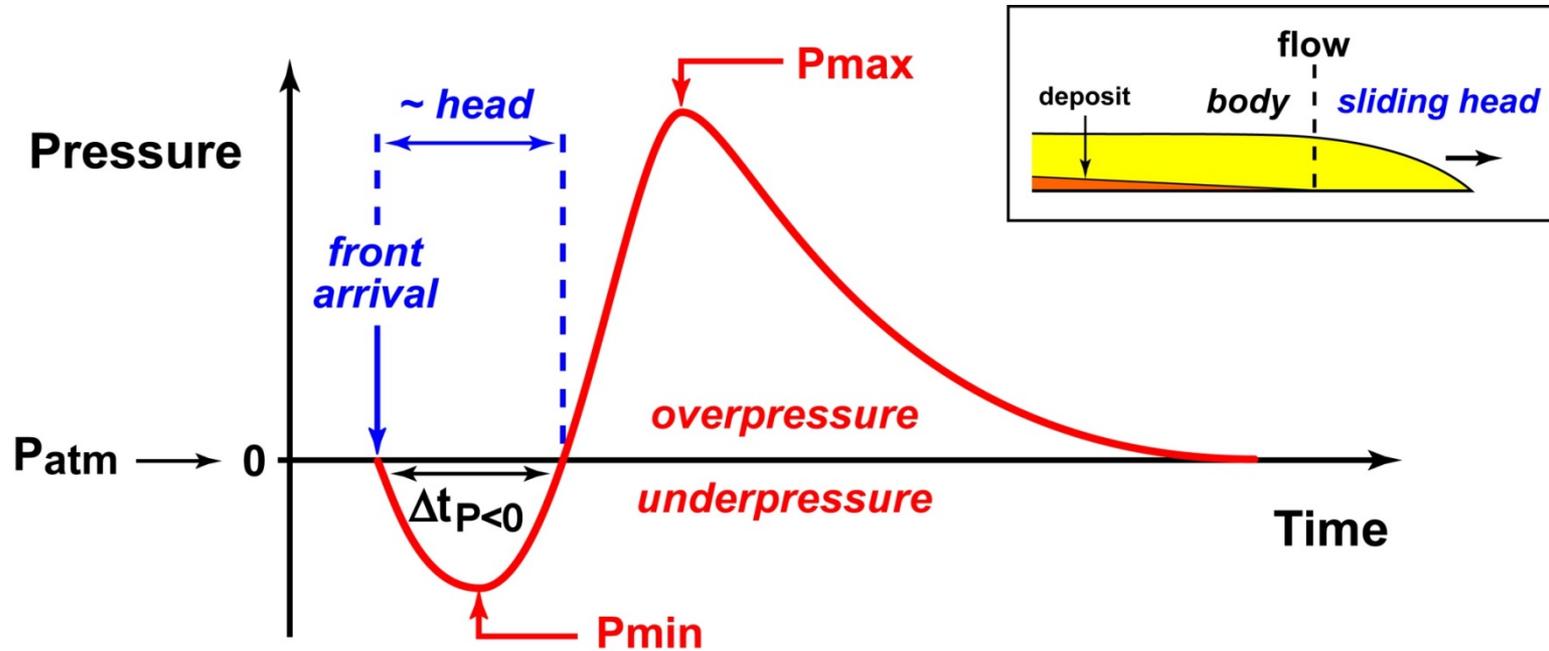
Proximal



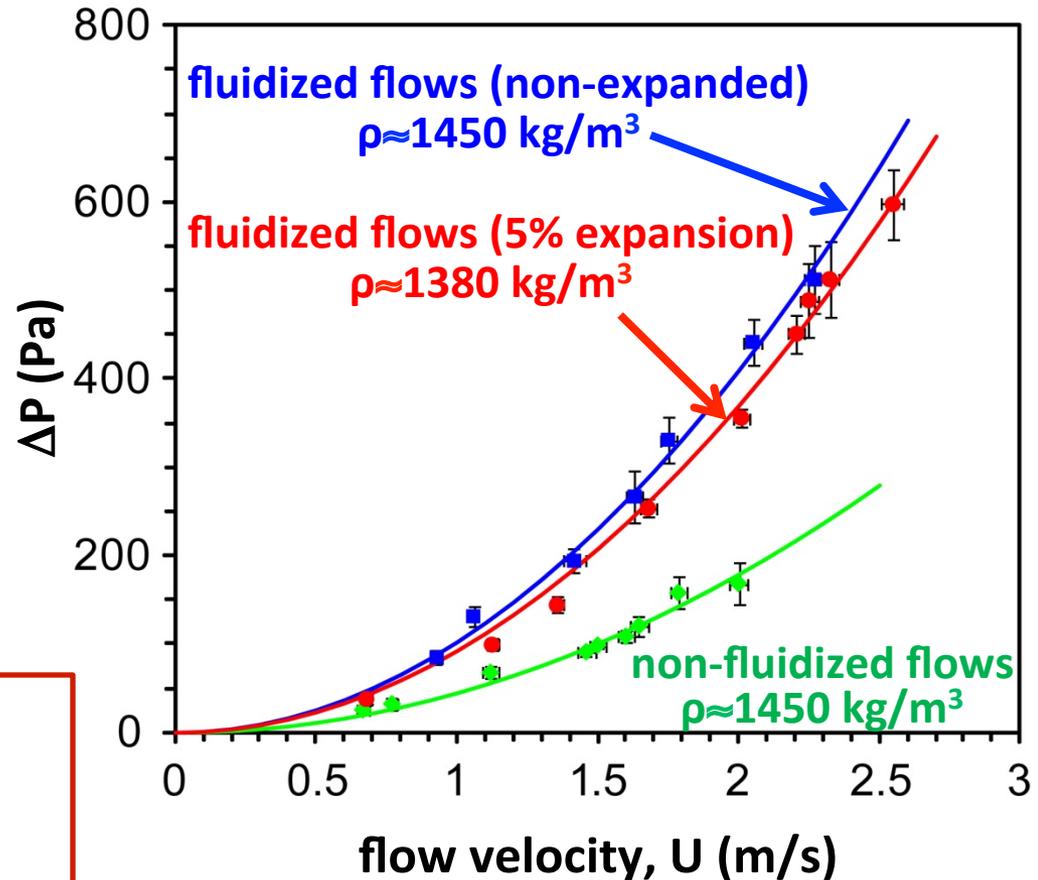
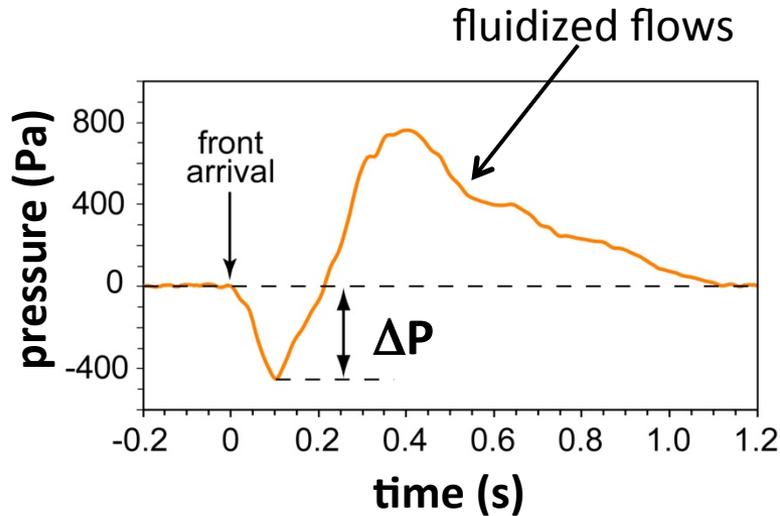
Distal



Signal de pression dans le chenal



Sous-pression générée par la tête



$$\Delta P = \alpha \rho U^2$$

- fluidized : $\Delta P = 0.069 \rho U^2$
- non-fluidized : $\Delta P = 0.031 \rho U^2$

Autres exemples de sous-pression

Expérience (billes de ping-pong)

McElwaine and Nishimura (2001)

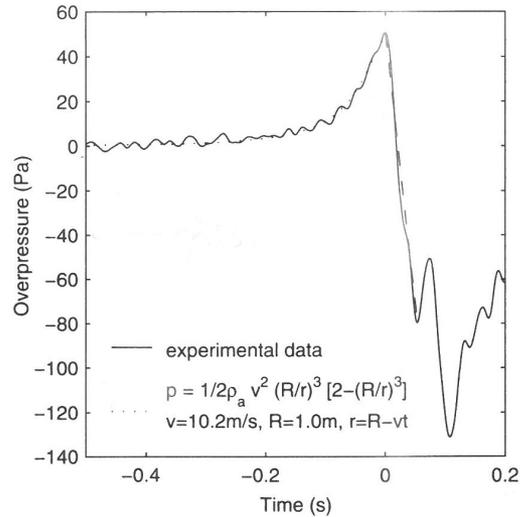
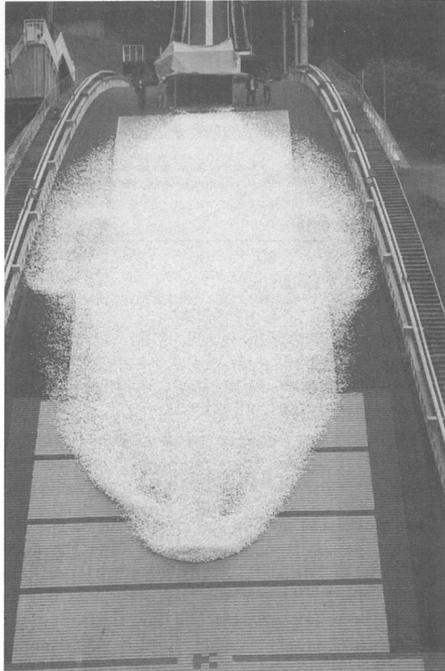


Fig. 3. Front view of a 550 000 ball avalanche at the Miyanomori ski jump. The horizontal lines are 5-m apart and the lowest one is 90 m from the top of the landing slope.

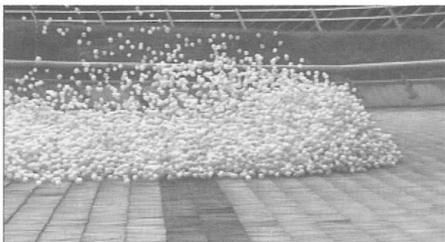
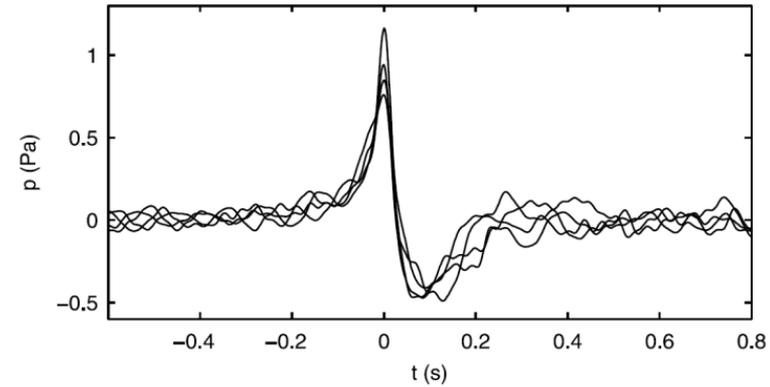


Fig. 4. Side view of the head of a 5 550 000 ball avalanche at the Miyanomori ski jump.

Expérience (billes de polystyrene)

Turnbull and McElwaine (2008)



Avalanche de neige

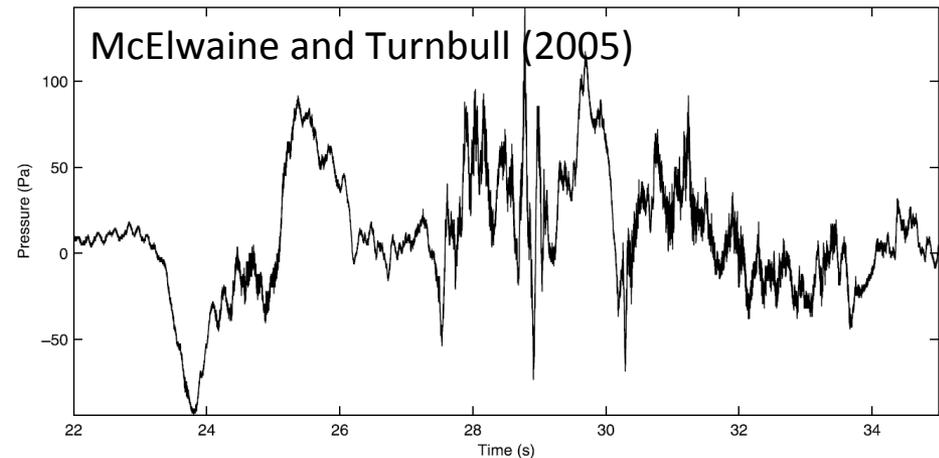


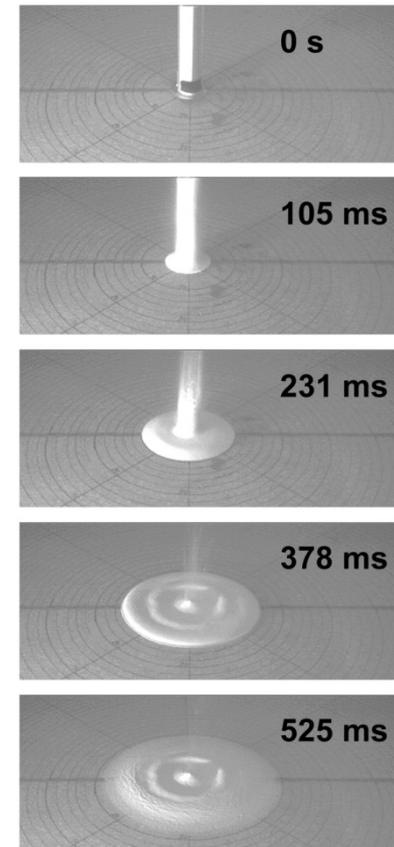
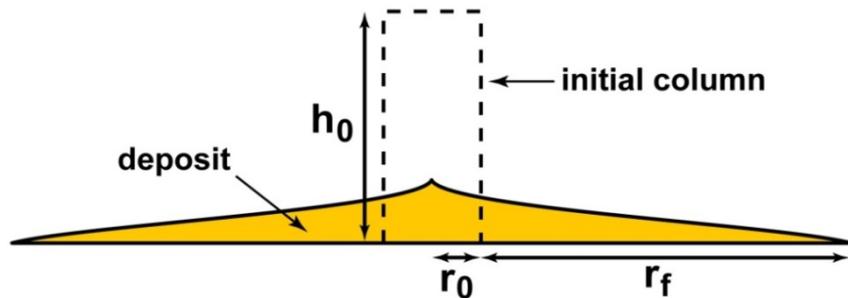
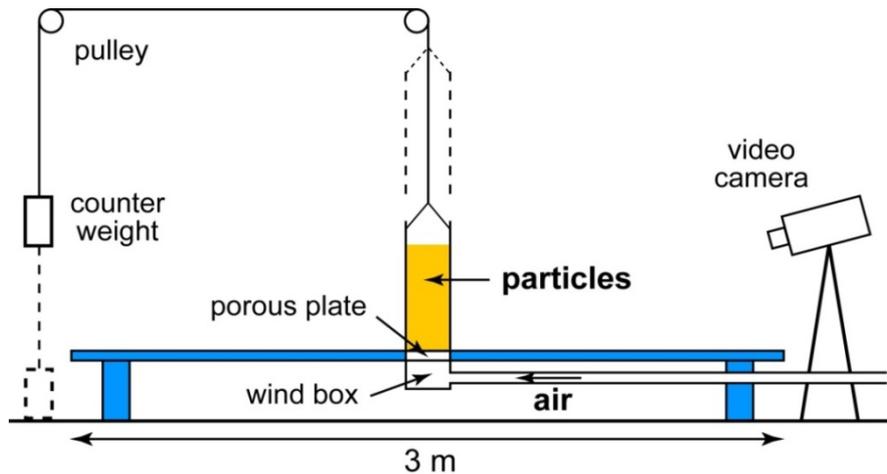
Figure 6. Avalanche 628: pressure data during the avalanche.

Etudes complémentaires

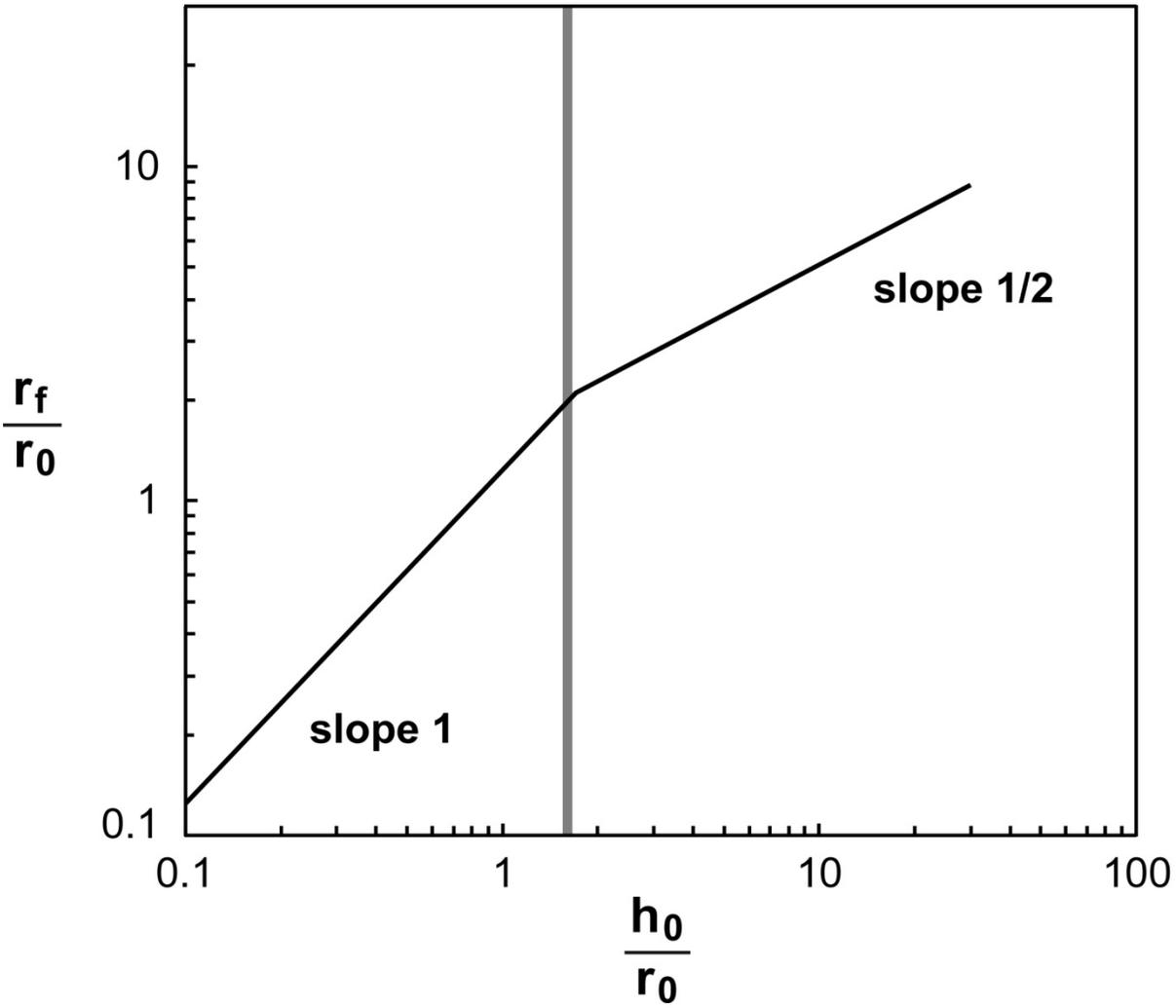
- **Lois d'échelle de la distance de parcours**
- **Mécanismes d'auto-fluidisation**
- **Erosion d'un substrat granulaire**

Lois d'échelle de la distance de parcours

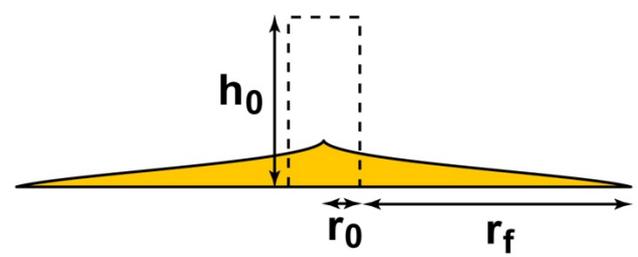
- cf. expériences 3D sur écoulements secs (Lube et al. 2004, Lajeunesse et al. 2004)
- Roche, Attali, Mangeney, Lucas (2011, EPSL)

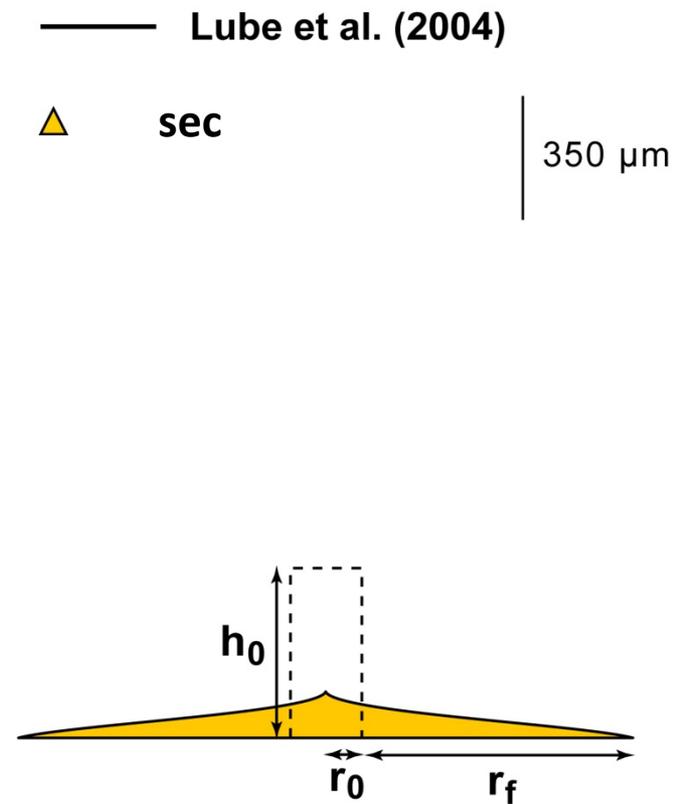
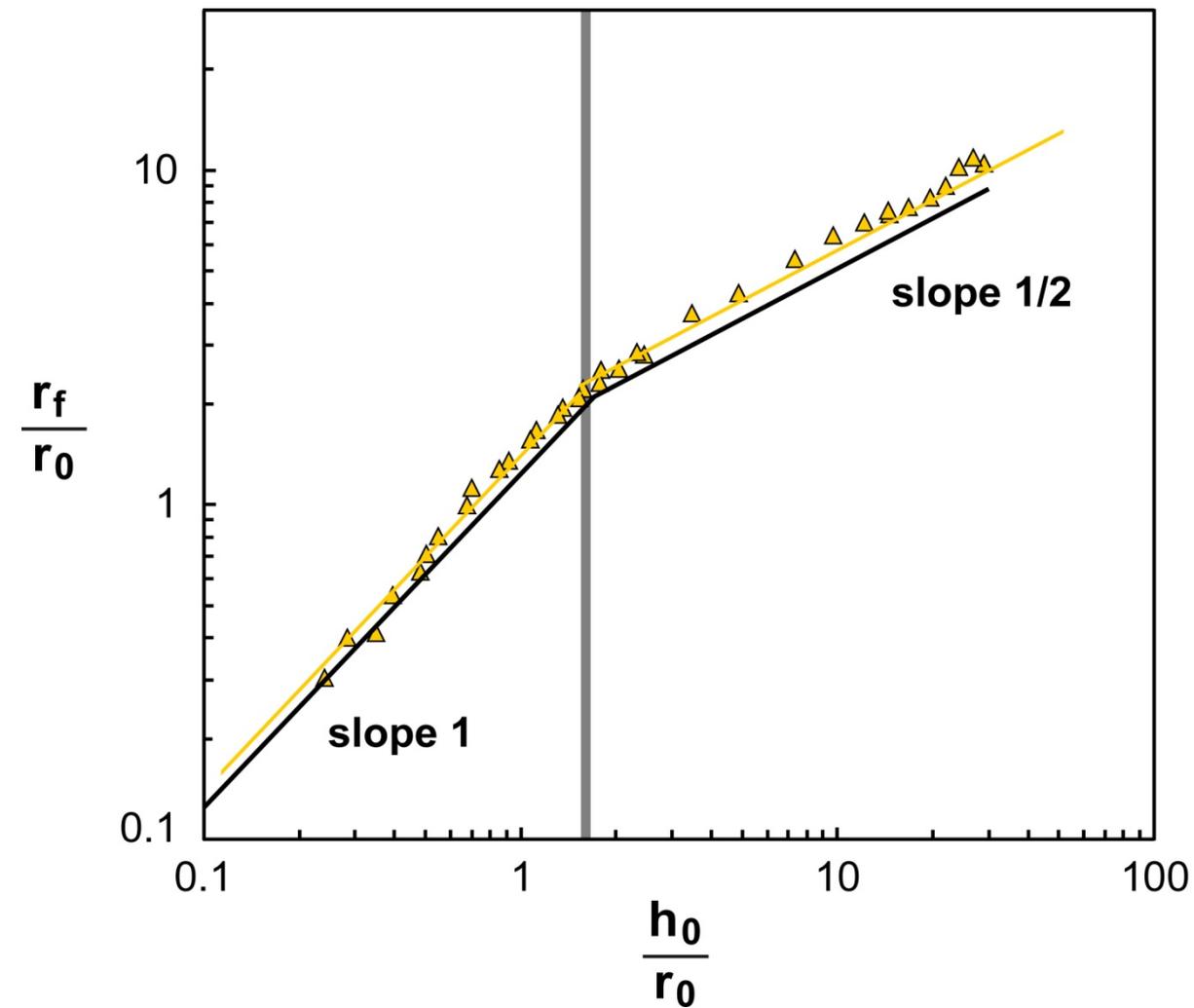


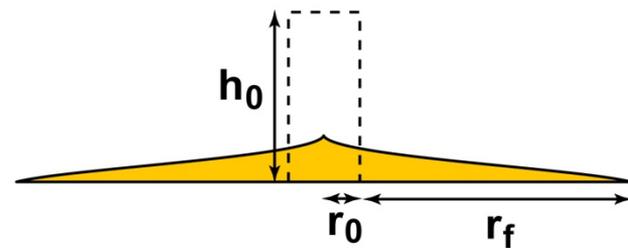
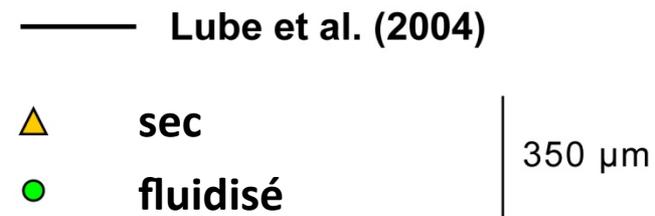
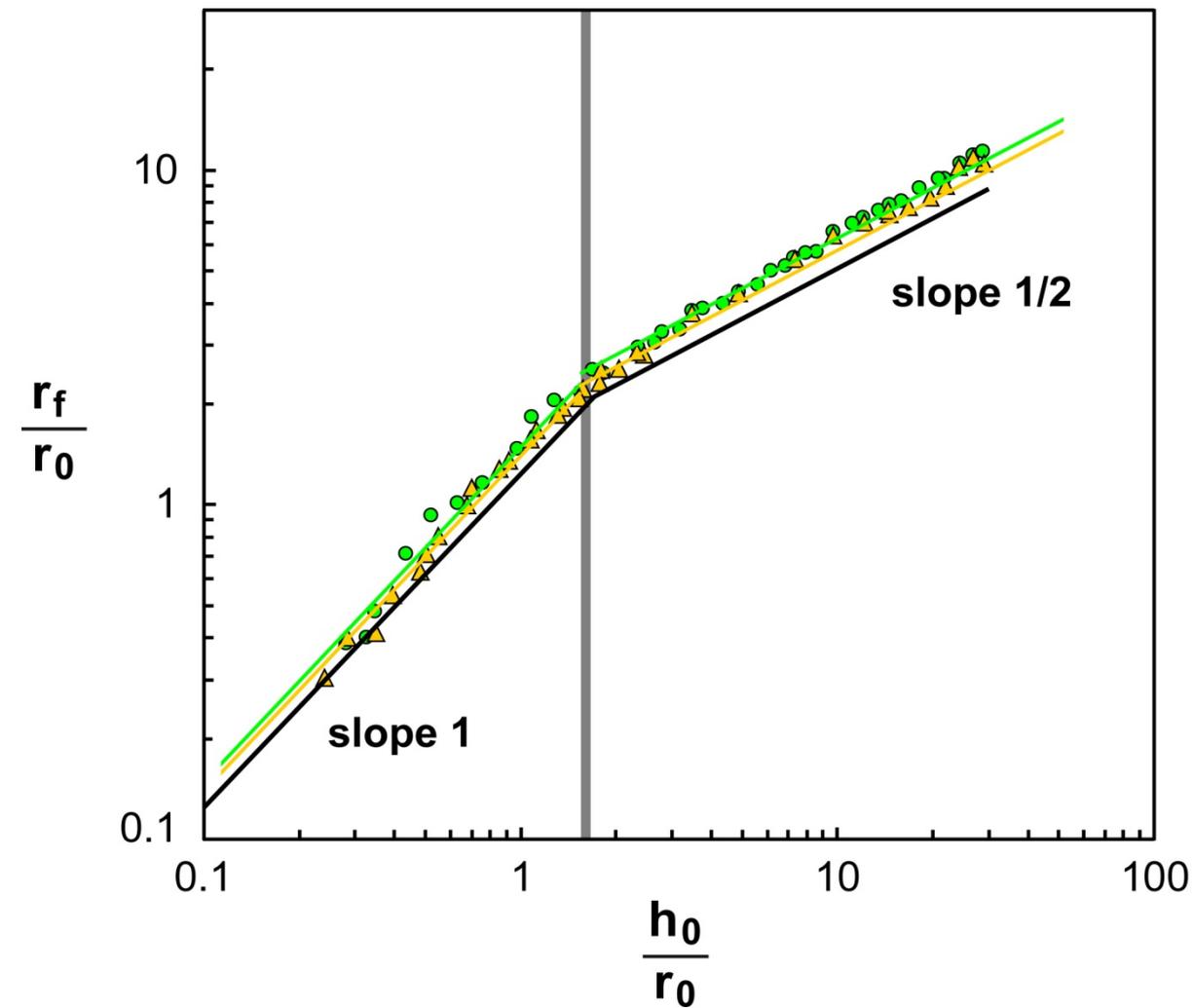
$$r_f/r_0 = \lambda (h_0/r_0)^n$$

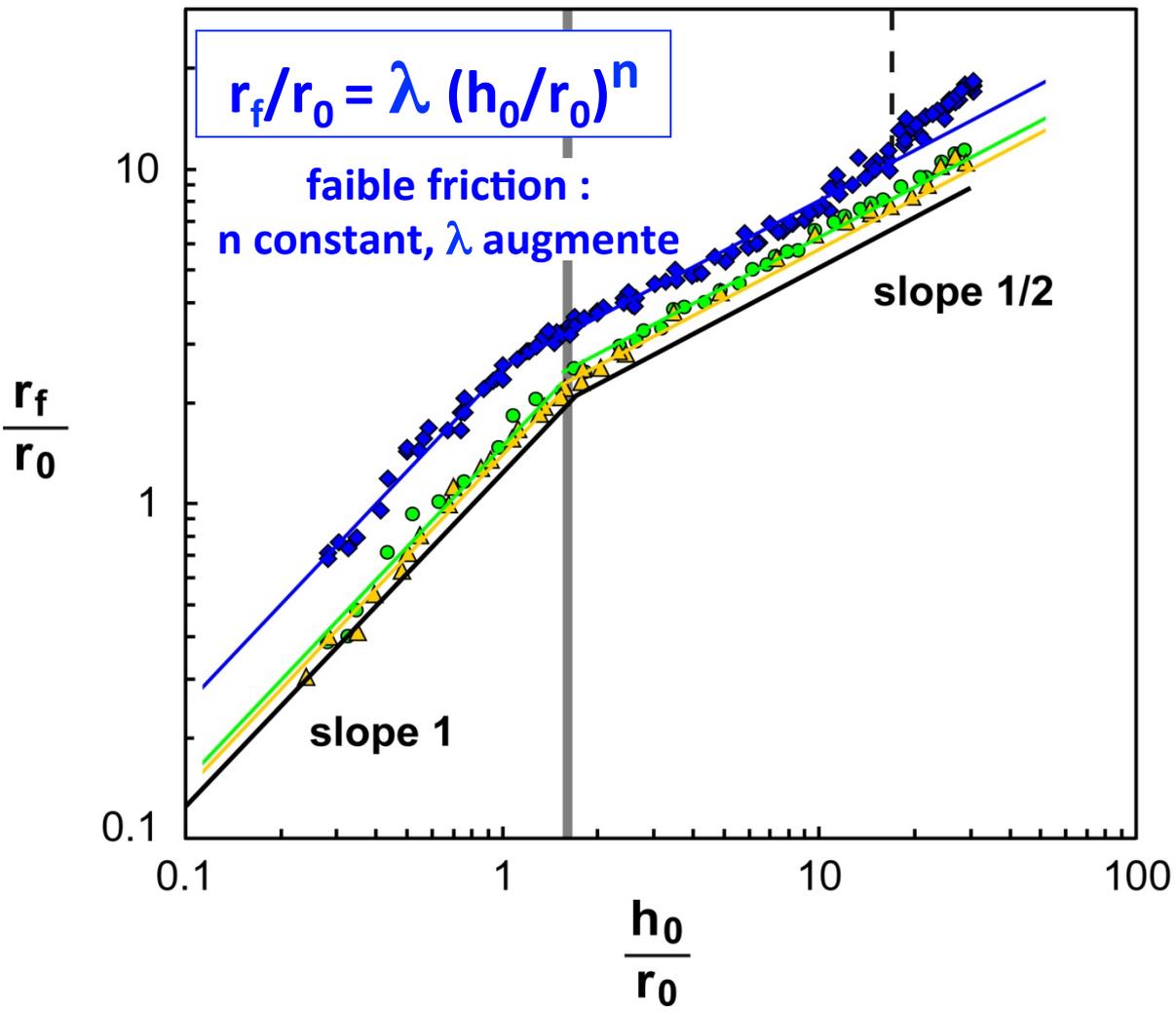


— Lube et al. (2004)

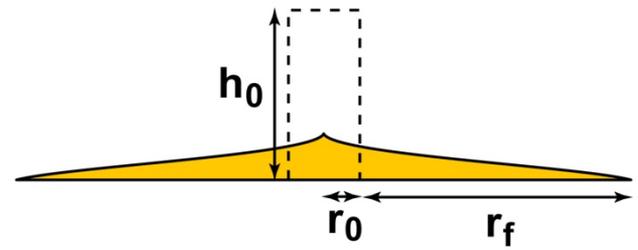


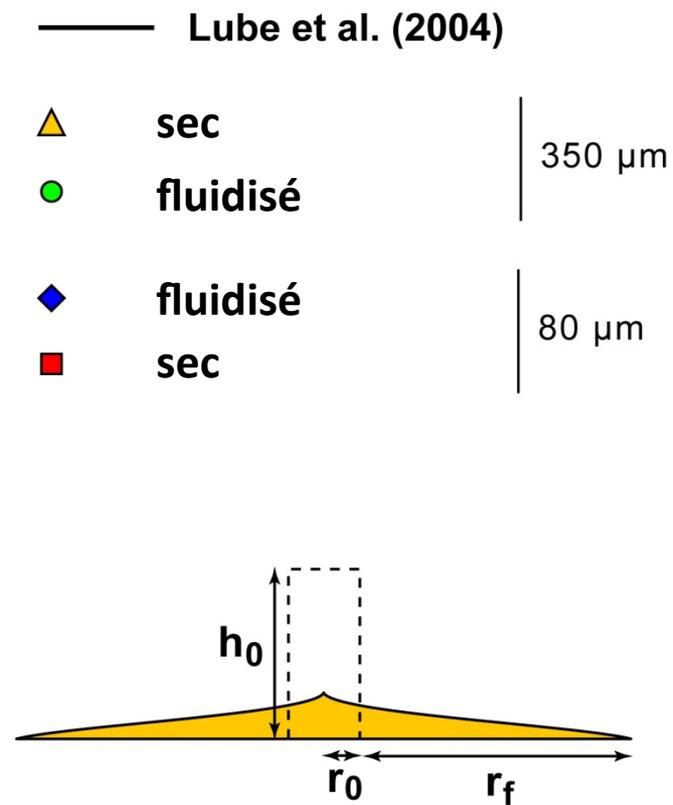
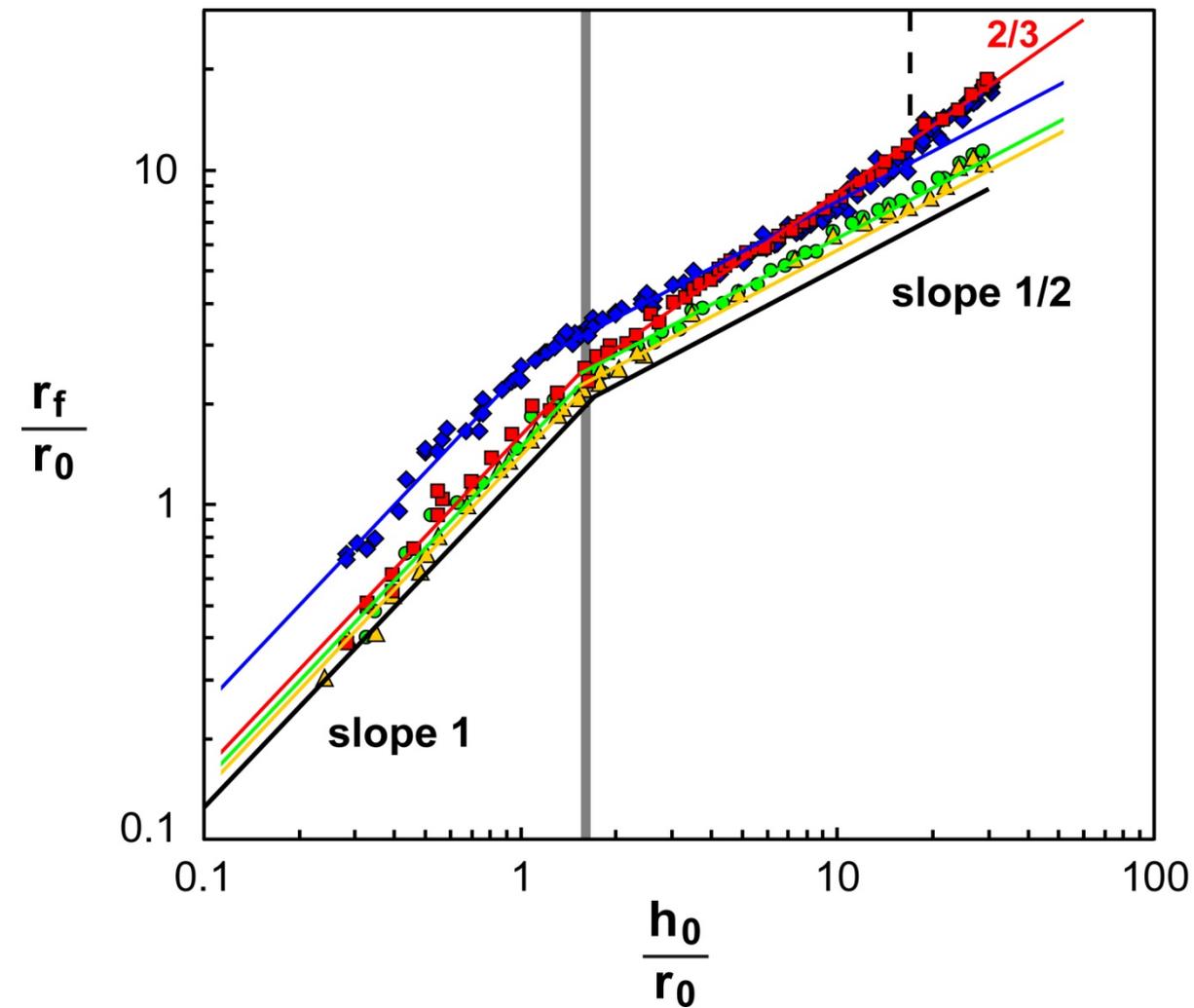






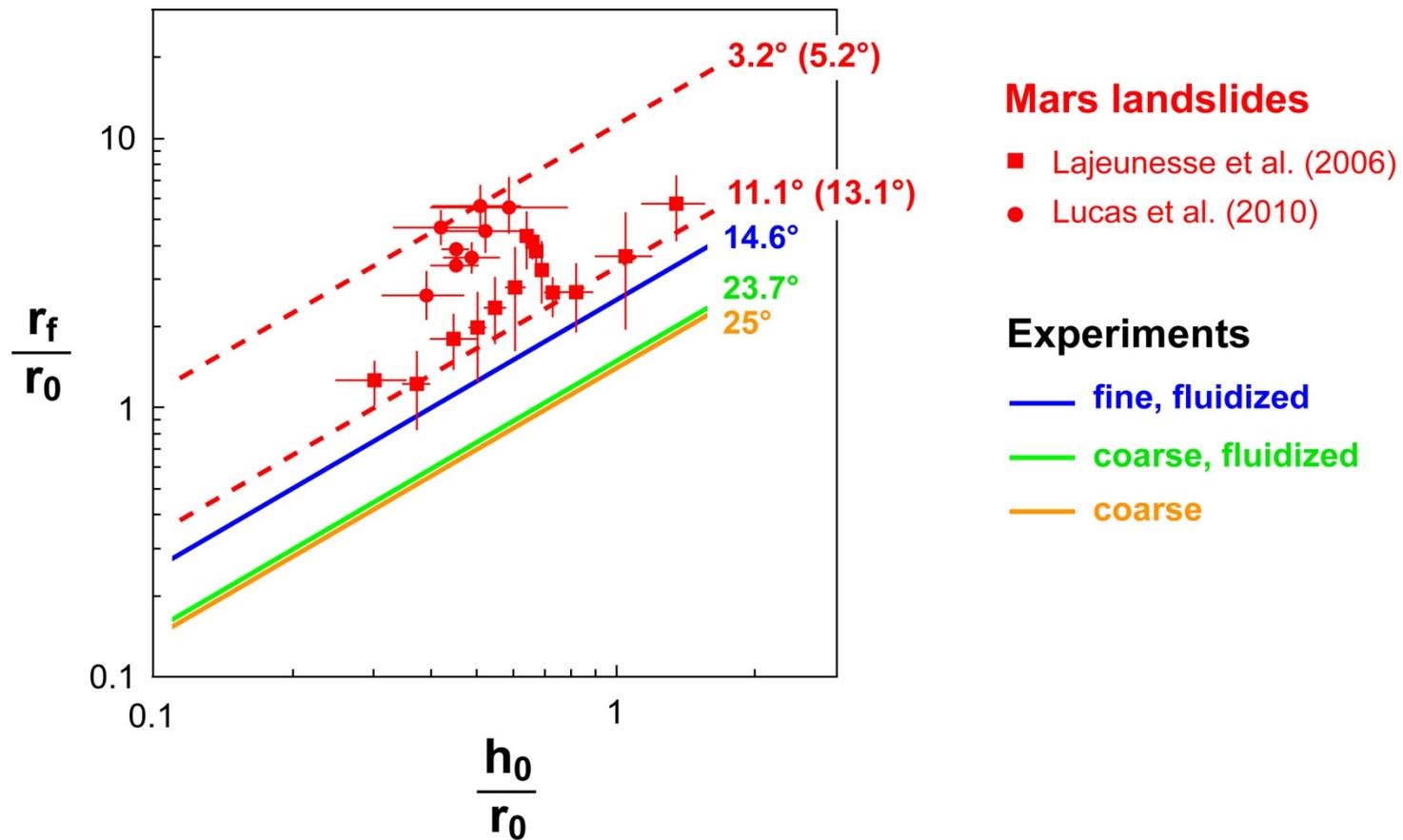
- Lube et al. (2004)
 - ▲ sec
 - fluidisé
 - ◆ fluidisé
- 350 μm
 80 μm



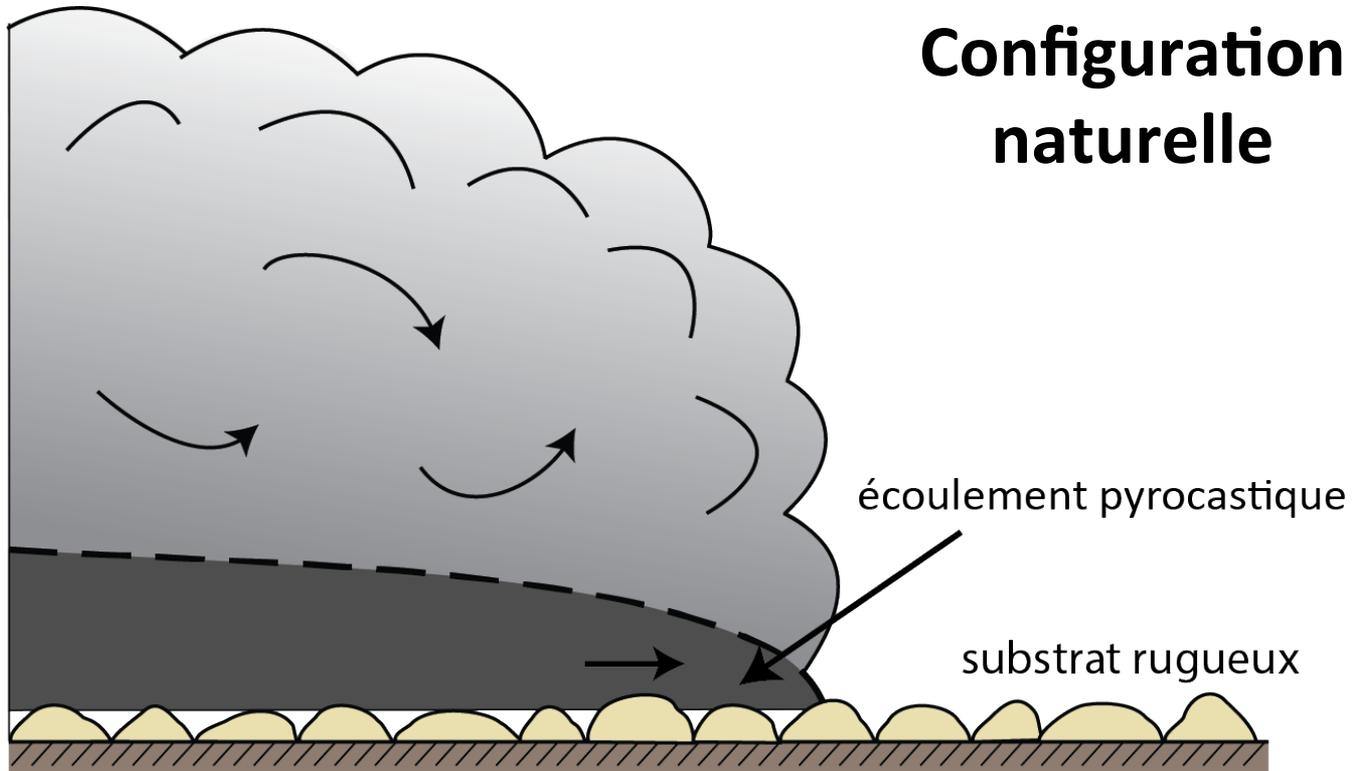


Application aux cas naturels ($h_0/r_0 < 1.5$, $n=1$)

Lucas and Mangeney (2007, GRL) :
$$\frac{r_f}{r_0} = \frac{\alpha}{\tan\delta - \tan\theta} \frac{h_0}{r_0} \quad (\alpha=0.65)$$

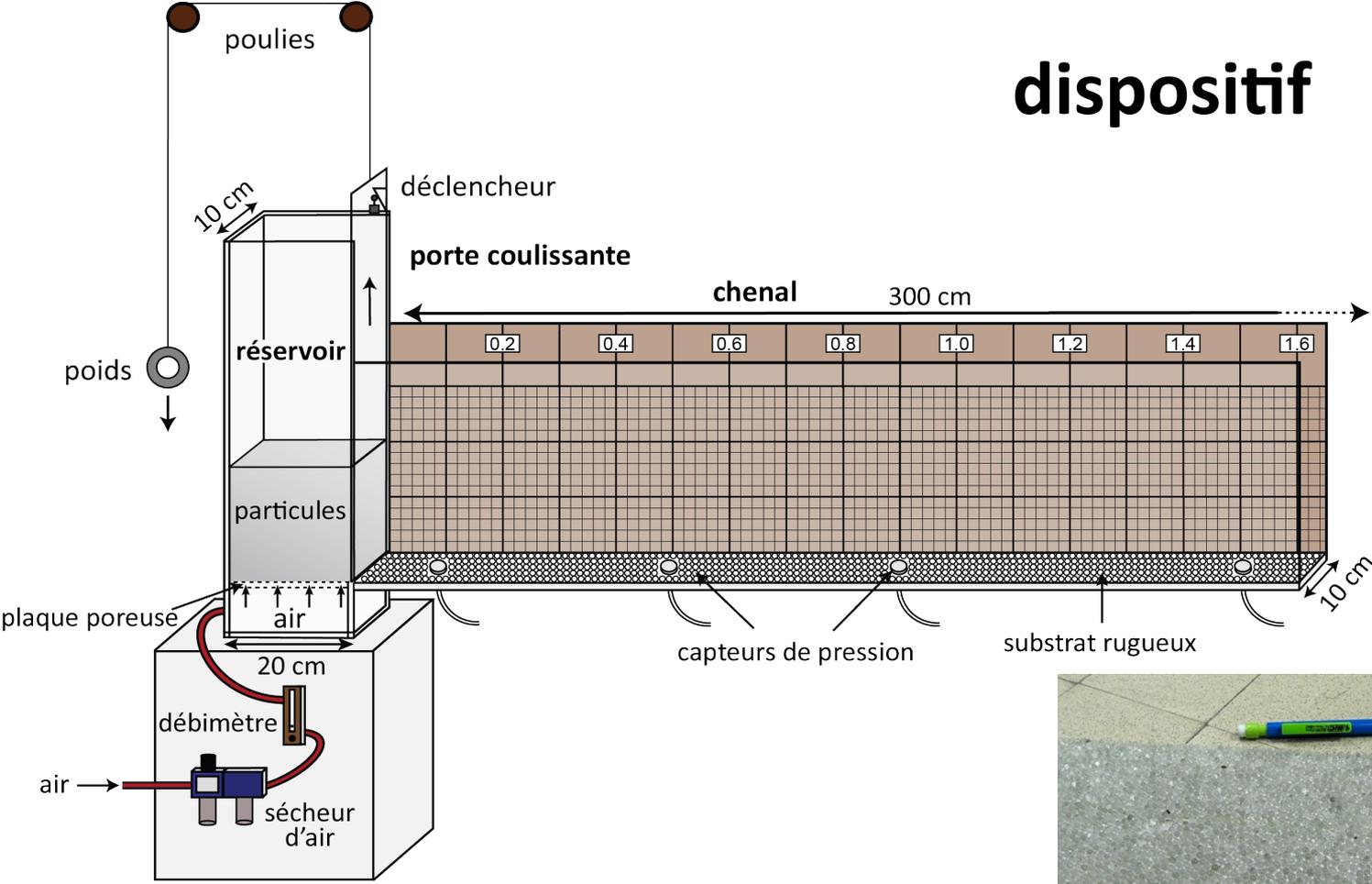


Auto-fluidisation



Thèse de Corentin Chédeville

dispositif

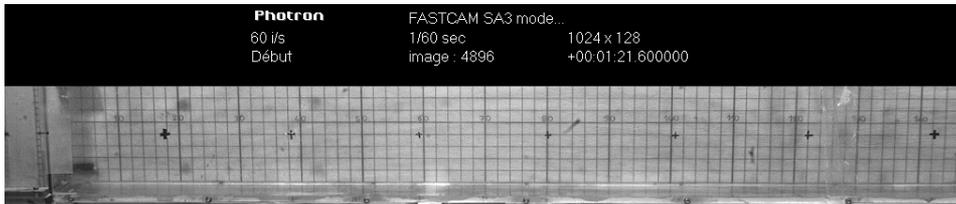


rugosité (μm)								
Lisse	73	200	350	500	700	1500	3000	6000

écoulements initialement fluidisés

vitesse de la vidéo : 1/2

substrat lisse

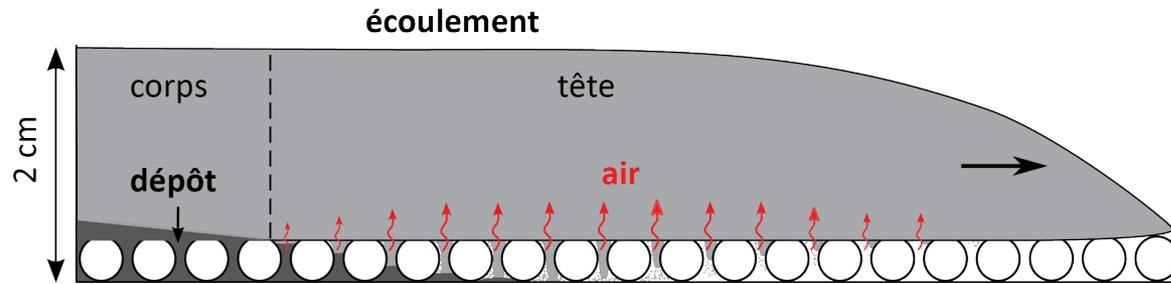


substrat rugueux (3 mm)



↔
10 cm

Mécanisme d'auto-fluidisation



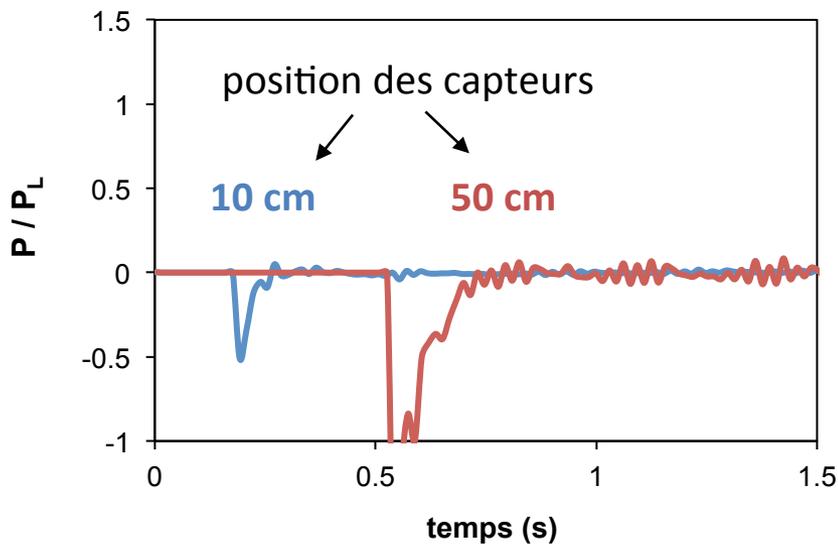
Chédeville and Roche (2014, JGR)

- Echappement de l'air causé par la chute des particules de l'écoulement
- Vitesse d'évacuation de l'air ($U_a = U_p \varepsilon_p$) $>$ $U_{mf} = 8$ mm/s
- Jusqu'à ce que les interstices soient remplis
- Le temps de remplissage augmente avec la rugosité

Mesures de pression d'air interstitiel

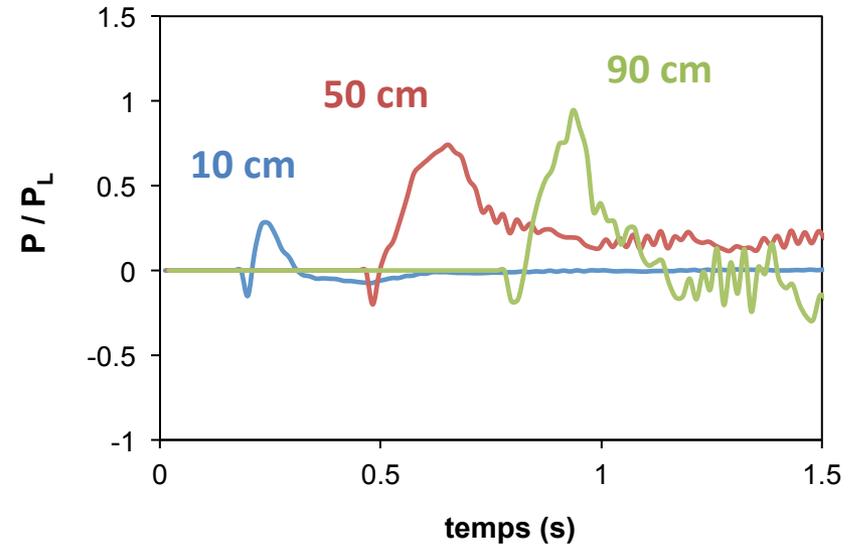
écoulements initialement secs

substrat lisse



Pas de surpression

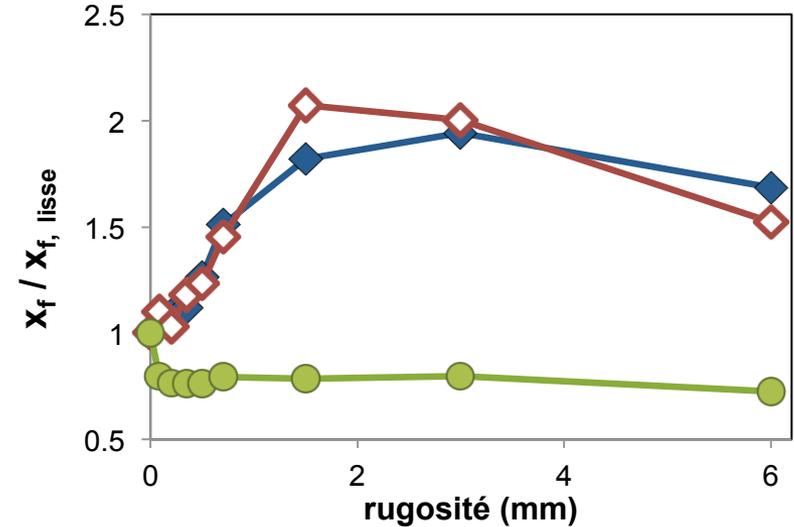
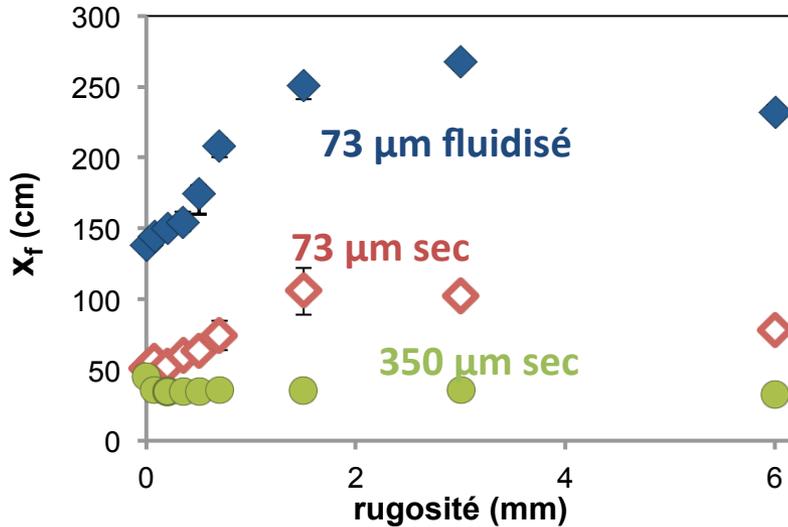
substrat rugueux (3 mm)



Surpression (P/P_L maximum ~ 1)

→ Auto-fluidisation

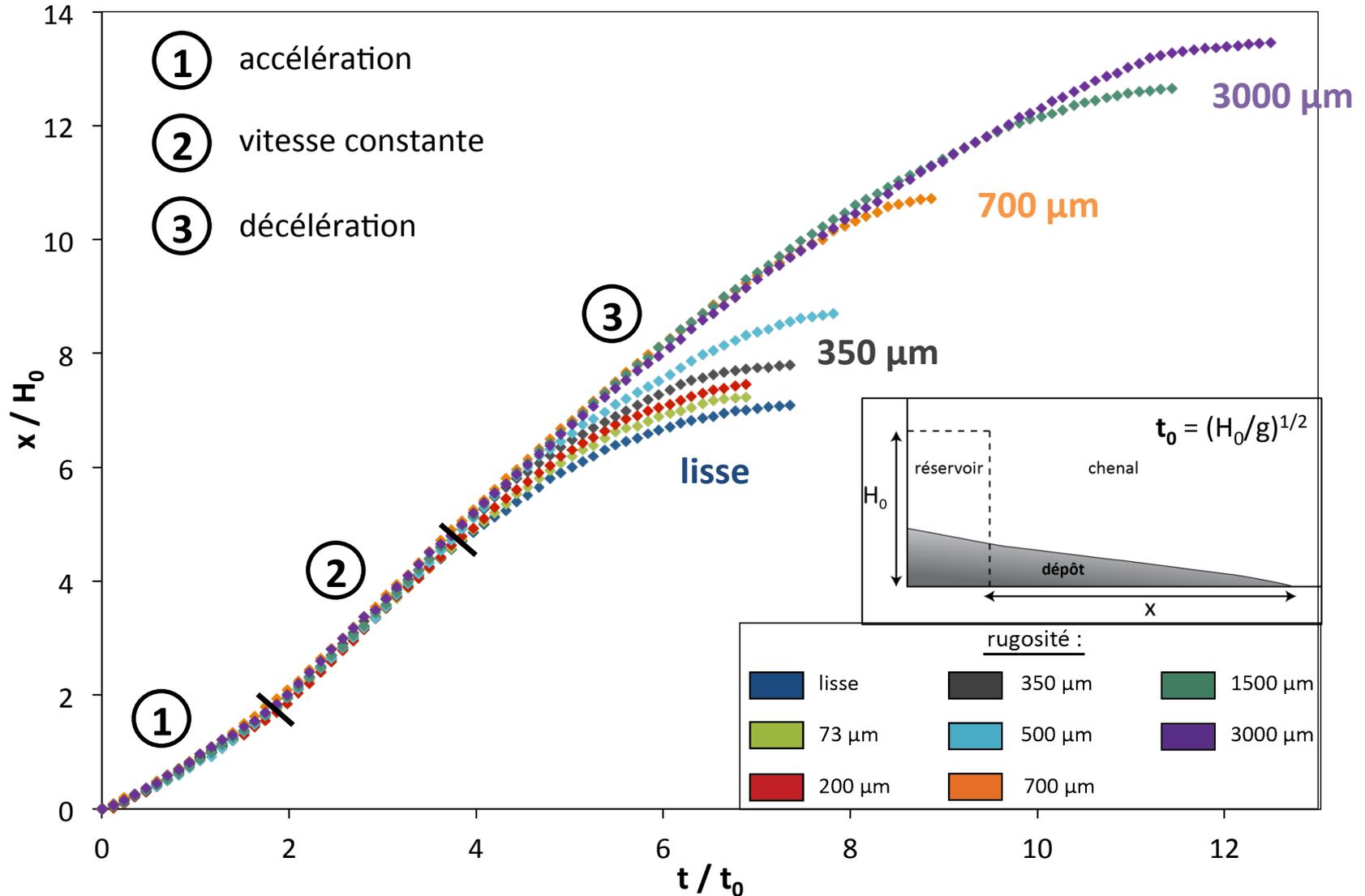
Distance de parcours



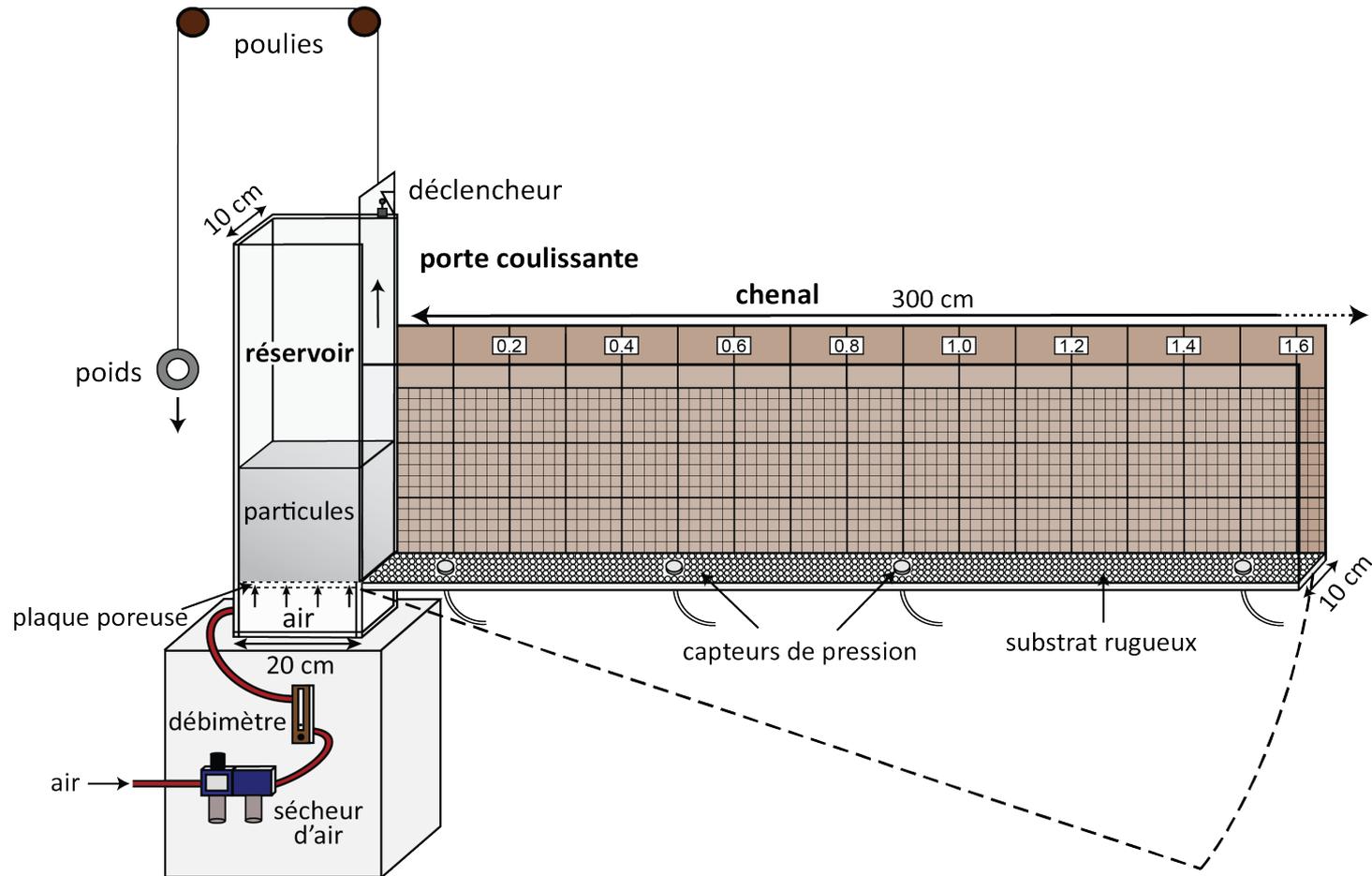
- 73 μm : la distance de parcours augmente avec la rugosité (jusqu'à ~3 mm)
- 350 μm : pas d'influence de la rugosité

Cinématique

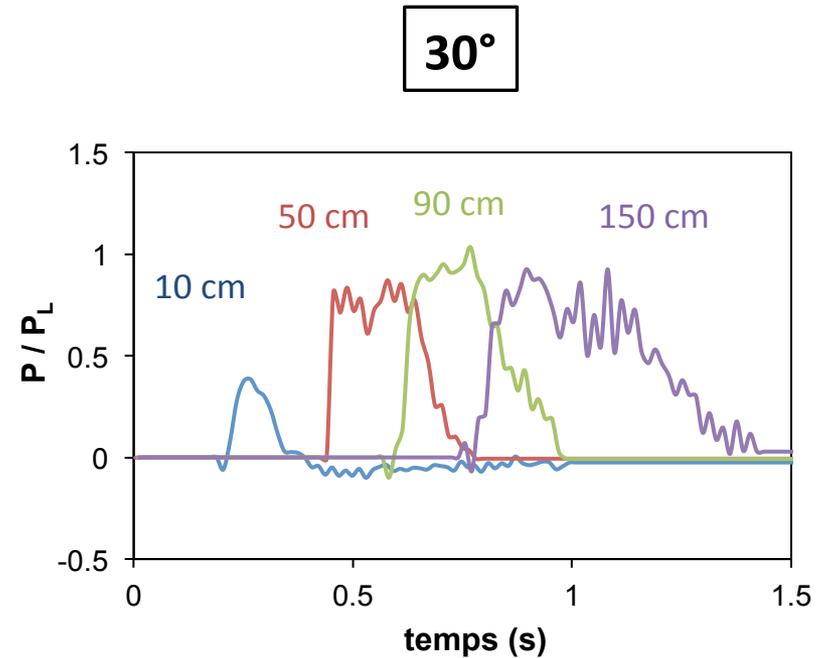
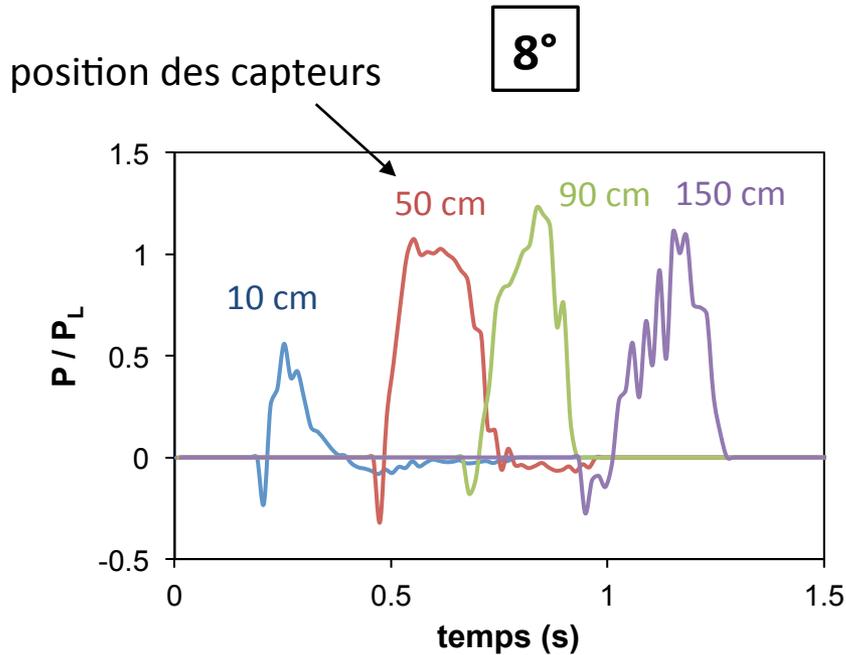
écoulements initialement fluidisés



Effet de la pente (0-30°)

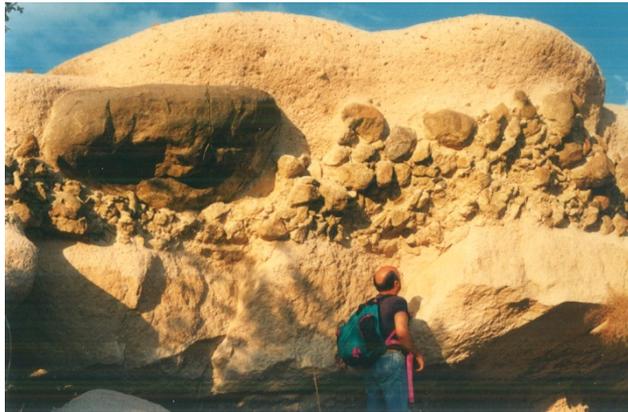
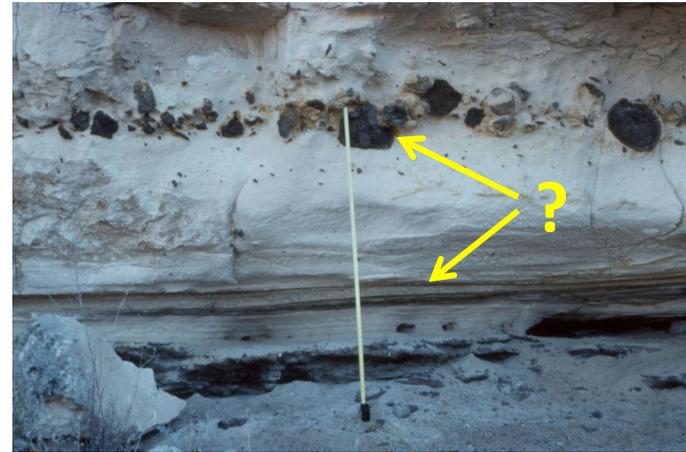


Ecoulements initialement secs, rugosité = 3 mm

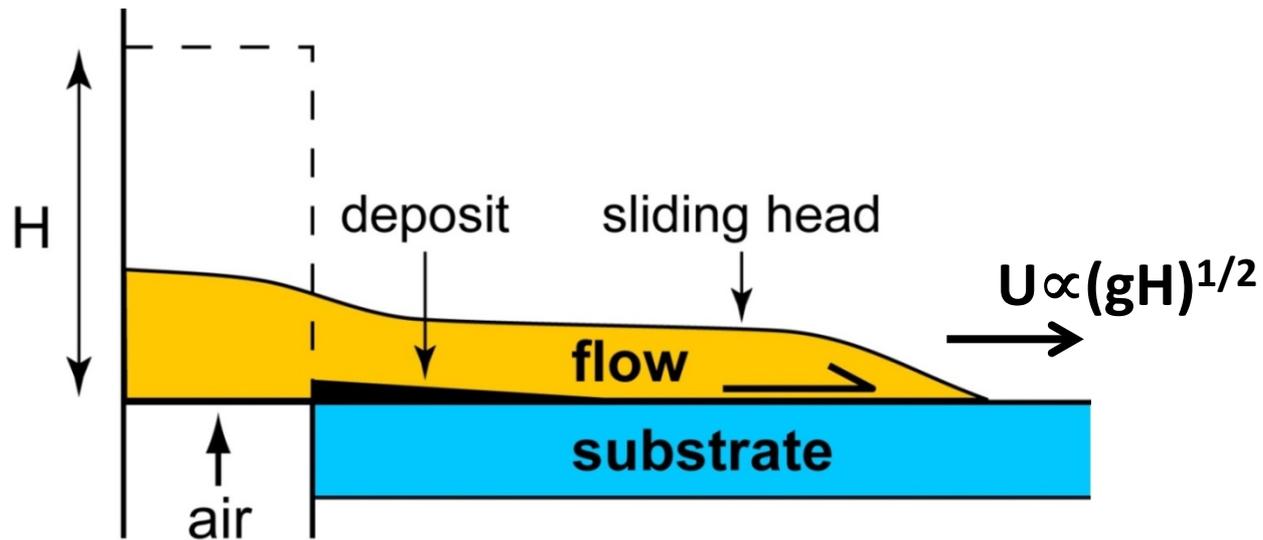


Mécanisme d'auto-fluidisation efficace à forte pente (<30°)

Erosion d'un substrat granulaire et application aux "super-éruptions"



Collaboration: A. Mangeney, Y. Niño, B. Brand, N. Pollock, D. Buesch, G. Valentine



Écoulement

- Particules : billes de verre, $d=0.08$ mm
- Fluidisation initiale

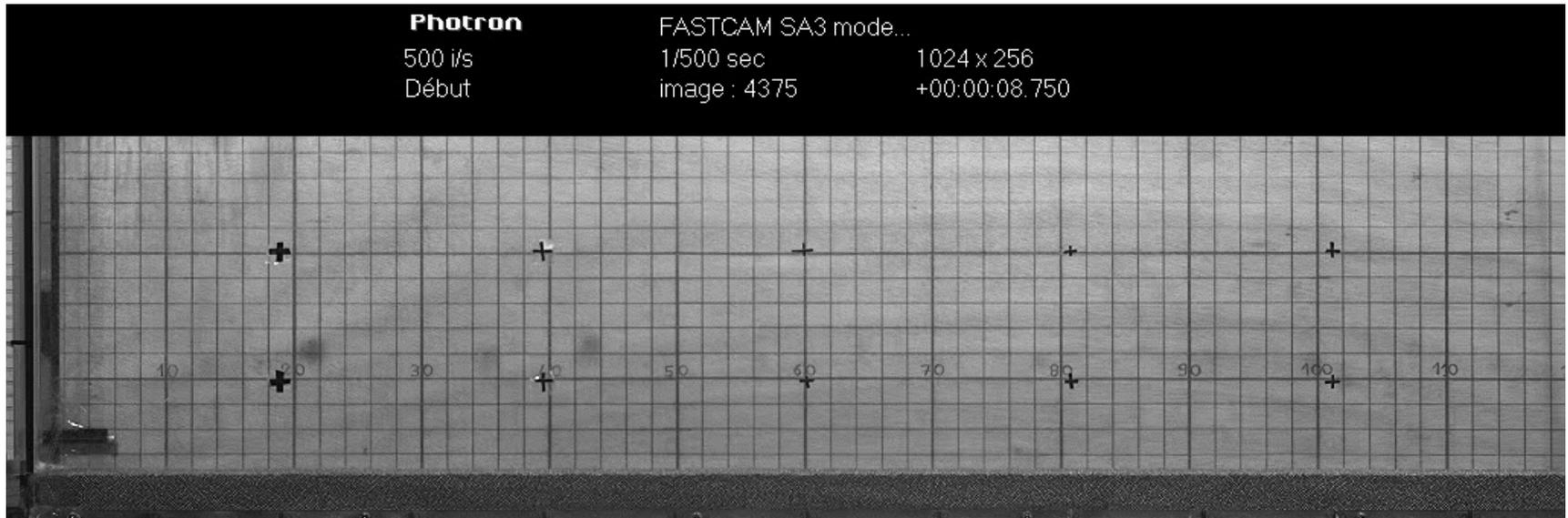
Substrat granulaire horizontal

- verre ($d=0.08$ mm, $\rho_p=2500$ kg m⁻³)
- verre ($d=1.5$ mm, $\rho_p=2500$ kg m⁻³)
- acier ($d=1.6$ mm, $\rho_p=7850$ kg m⁻³)

Propagation sur un substrat granulaire

Ecoulement initialement fluidisé ($d=80\mu\text{m}$), $U=3.06\text{ m/s}$

vitesse vidéo: 1/20



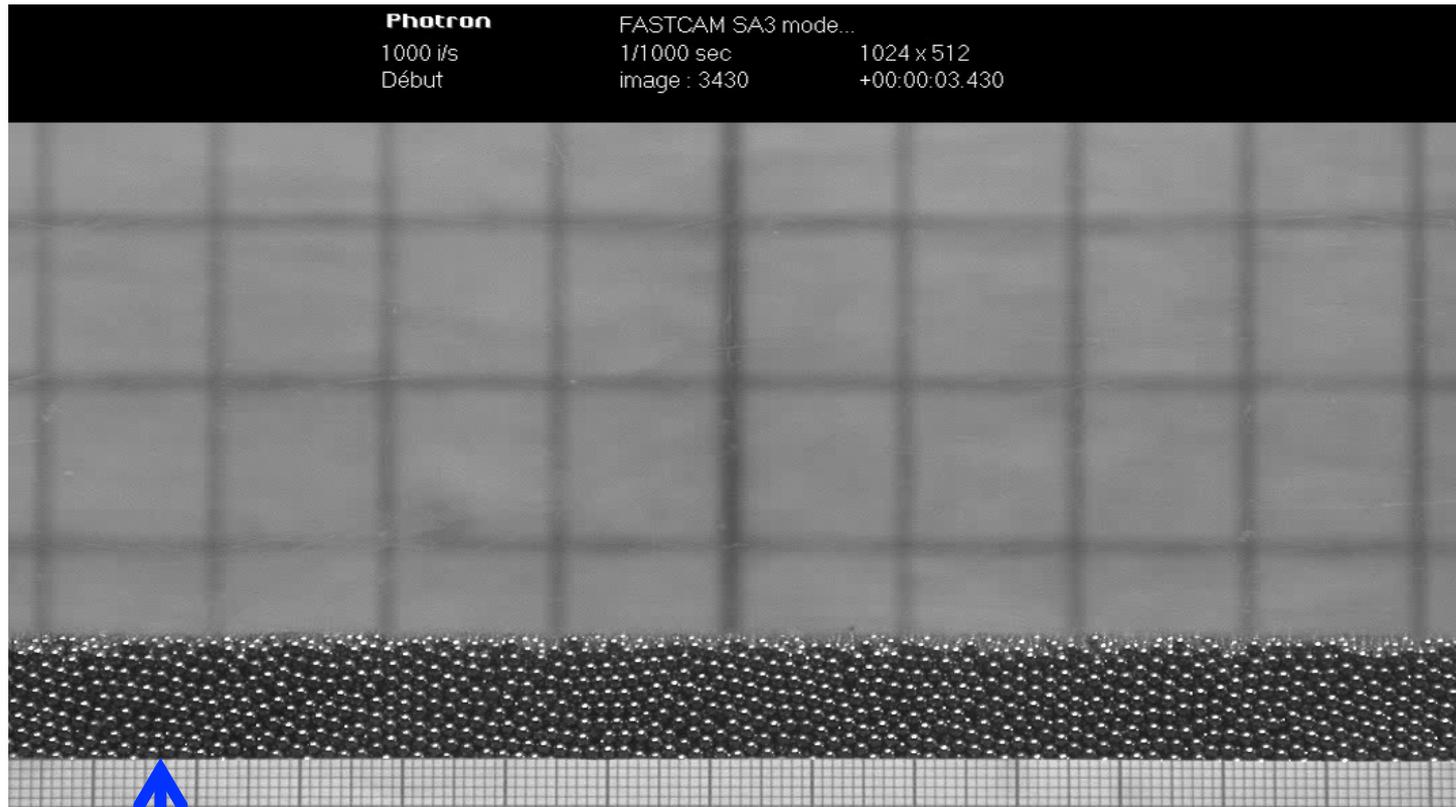
10 cm

Substrat : billes d'acier ($d=1.6\text{ mm}$, $\rho_p=7850\text{ kg m}^{-3}$)
épaisseur = 3 cm

Propagation sur un substrat granulaire

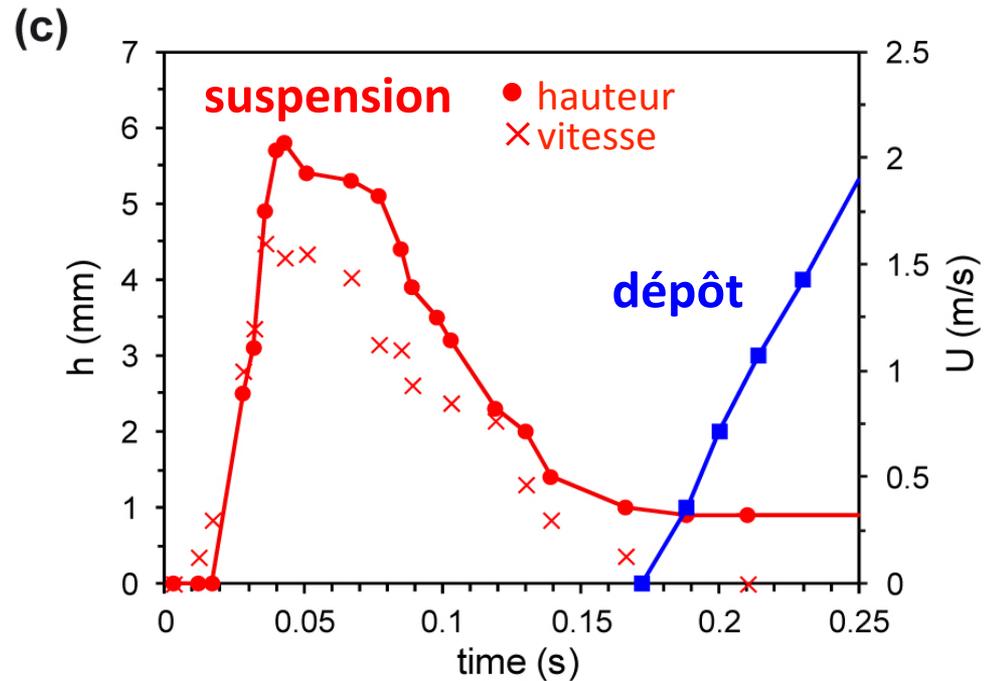
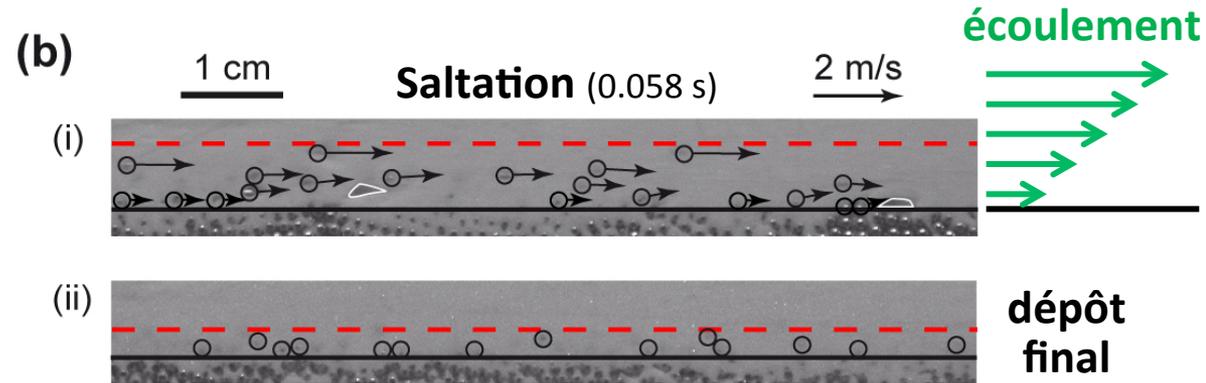
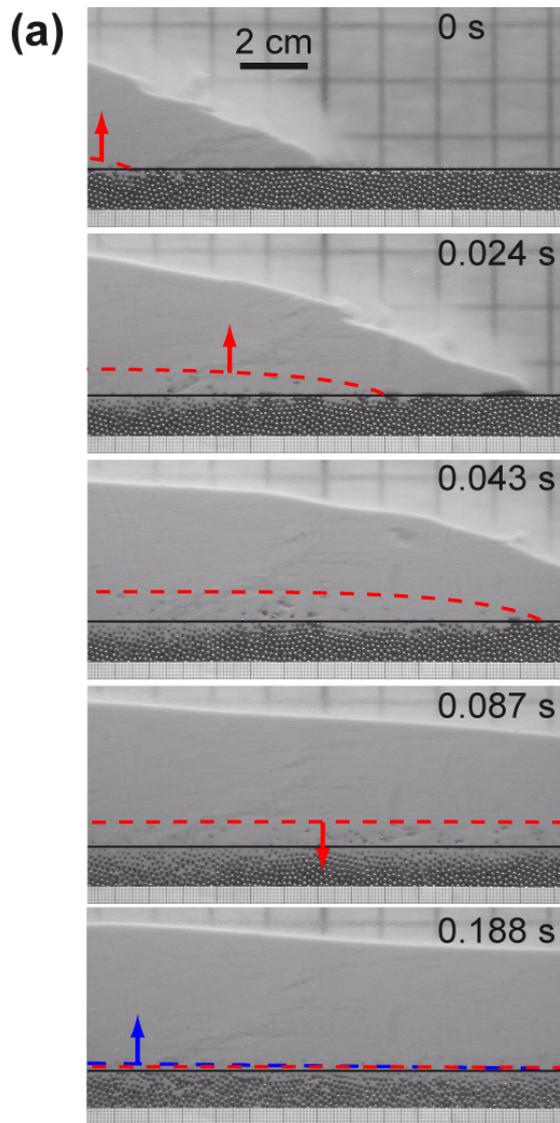
Écoulement initialement fluidisé ($d=80\ \mu\text{m}$), $U=2.55\ \text{m/s}$

Movie speed : 1/40



Substrat rugueux : billes d'acier ($d=1.6\ \text{mm}$, $\rho_p=7850\ \text{kg m}^{-3}$)
épaisseur = 3 cm

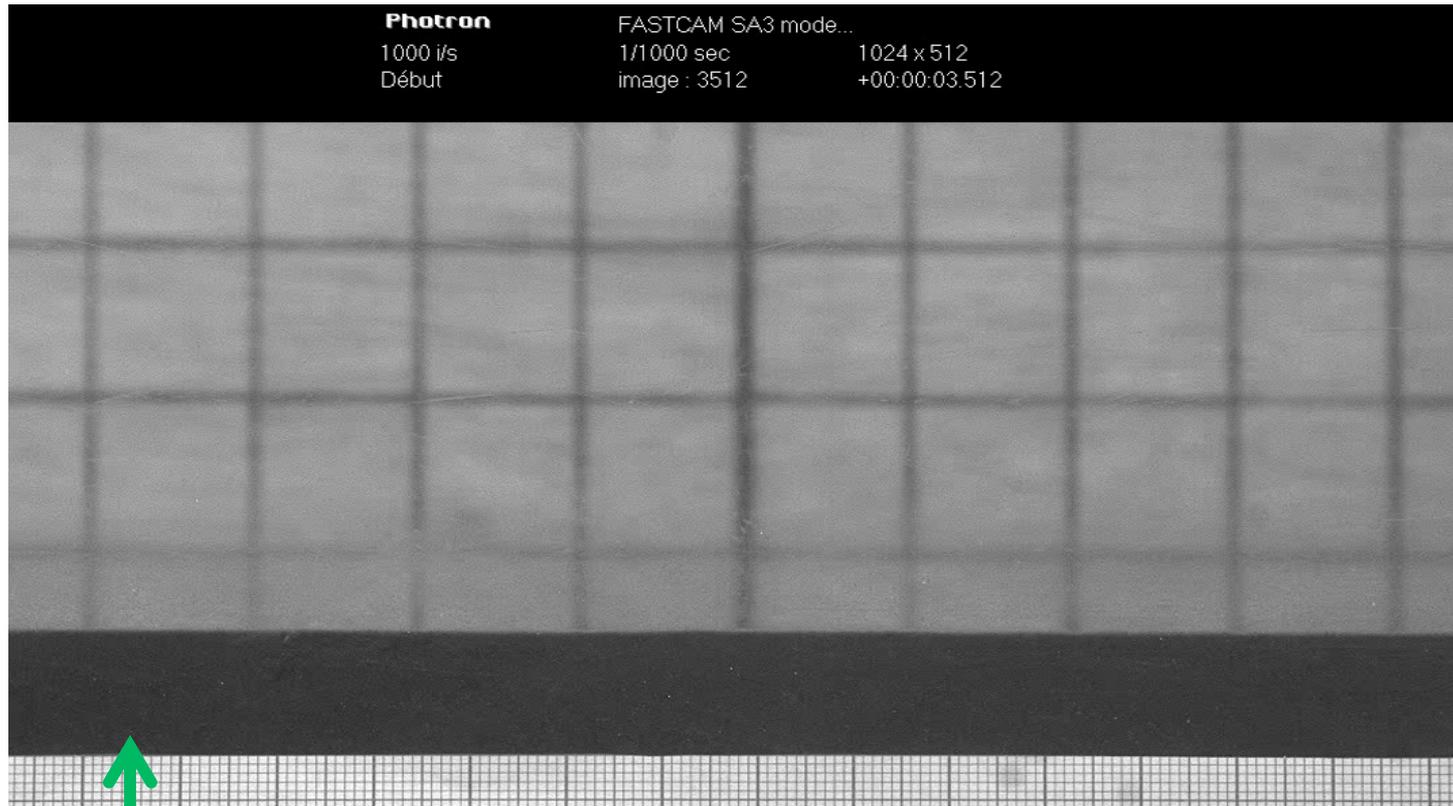
Expériences complémentaires sur les écoulements denses



Propagation sur un substrat granulaire

Ecoulement initialement fluidisé ($d=80 \mu\text{m}$), $U=2.60 \text{ m/s}$

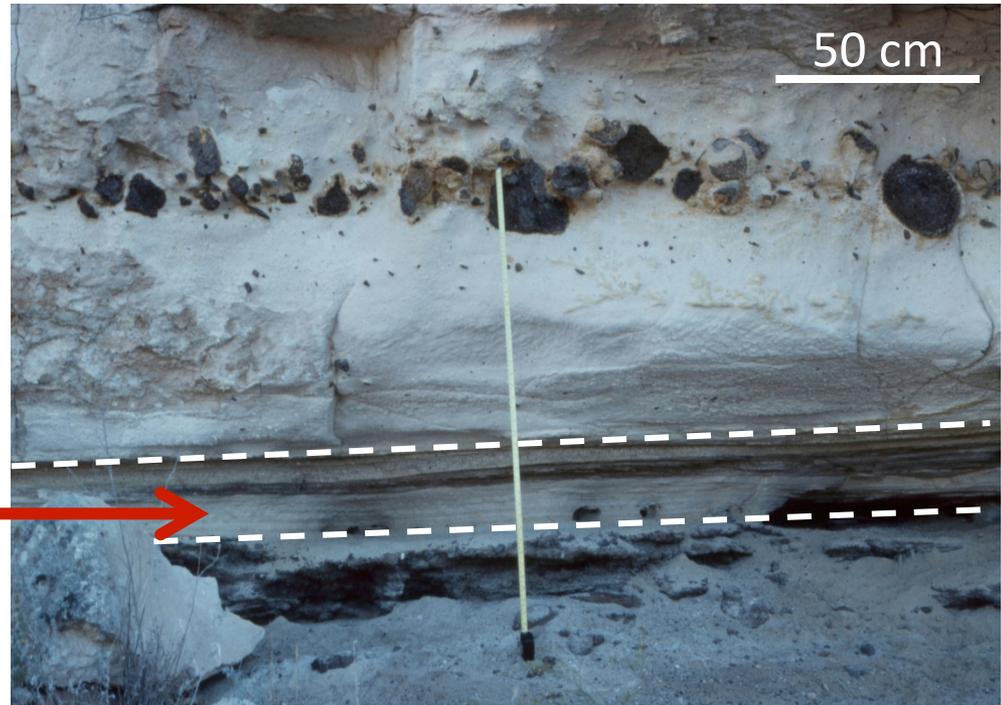
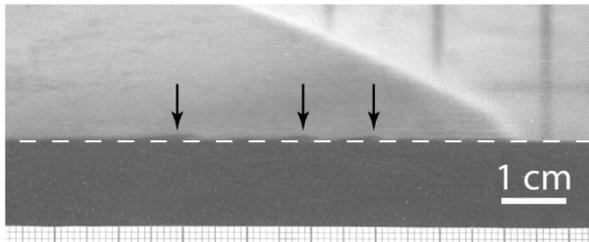
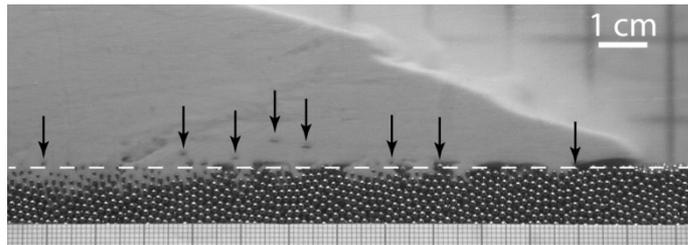
Movie speed : 1/40



Substrat lisse : billes de verre ($d=80 \mu\text{m}$, $\rho_p=2500 \text{ kg m}^{-3}$)
épaisseur = 3 cm

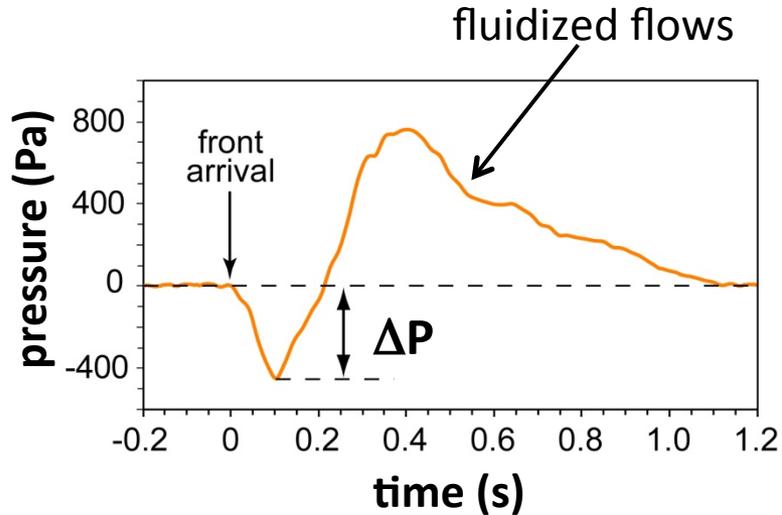
Bilan qualitatif : Les expériences reproduisent les observations de terrain

Substrat rugueux :
(1) percolation, (2) entrainement
(3) soulèvement (cause ?)

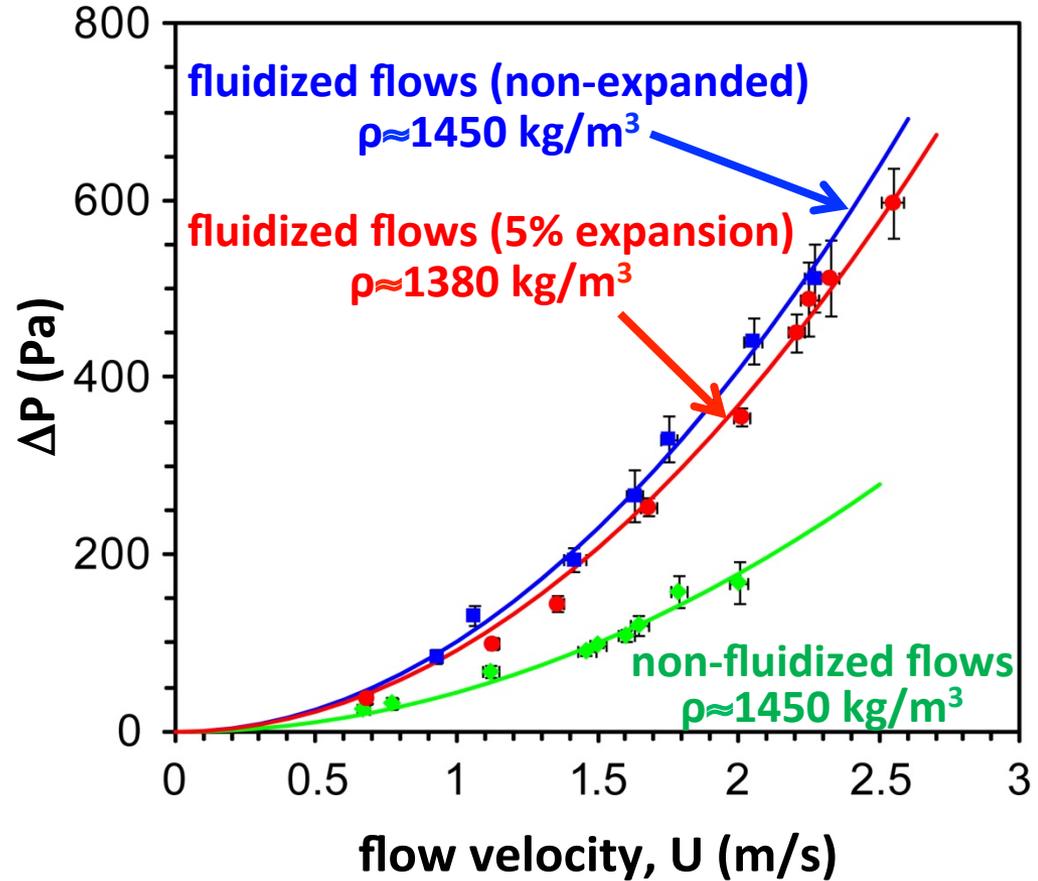


Remarque : mêmes mécanismes pour des écoulements non-fluidisés

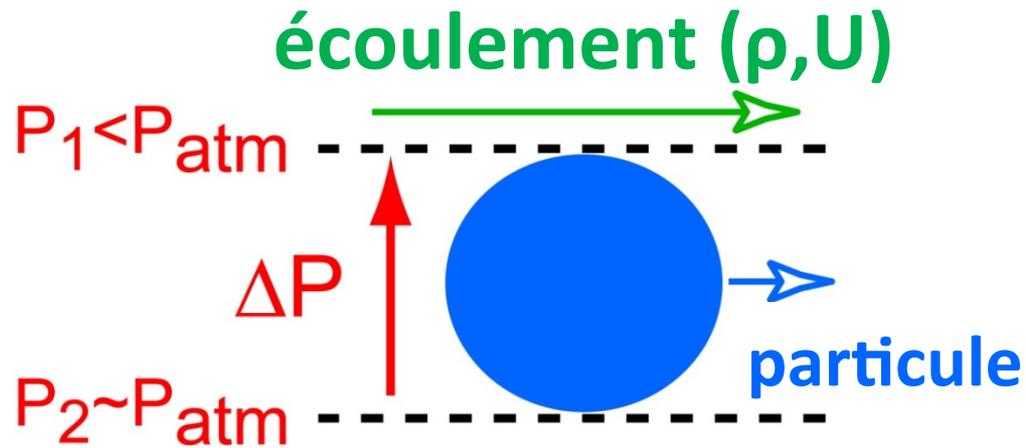
Sous-pression générée par la tête



$$\Delta P = \gamma \rho U^2$$



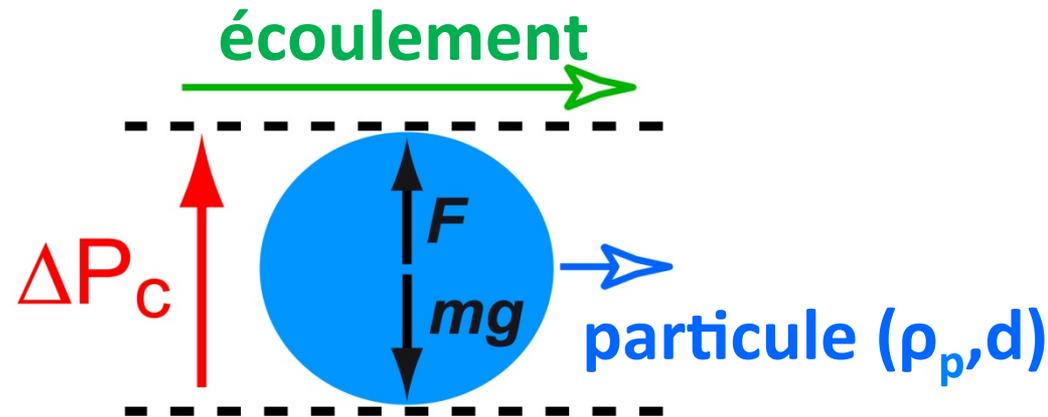
➔ gradient de pression de fluide
à l'interface écoulement/substrat



$$\Delta P = \gamma \rho U^2$$

↑
~ 0.06

Effet du gradient de pression → soulèvement d'une particule

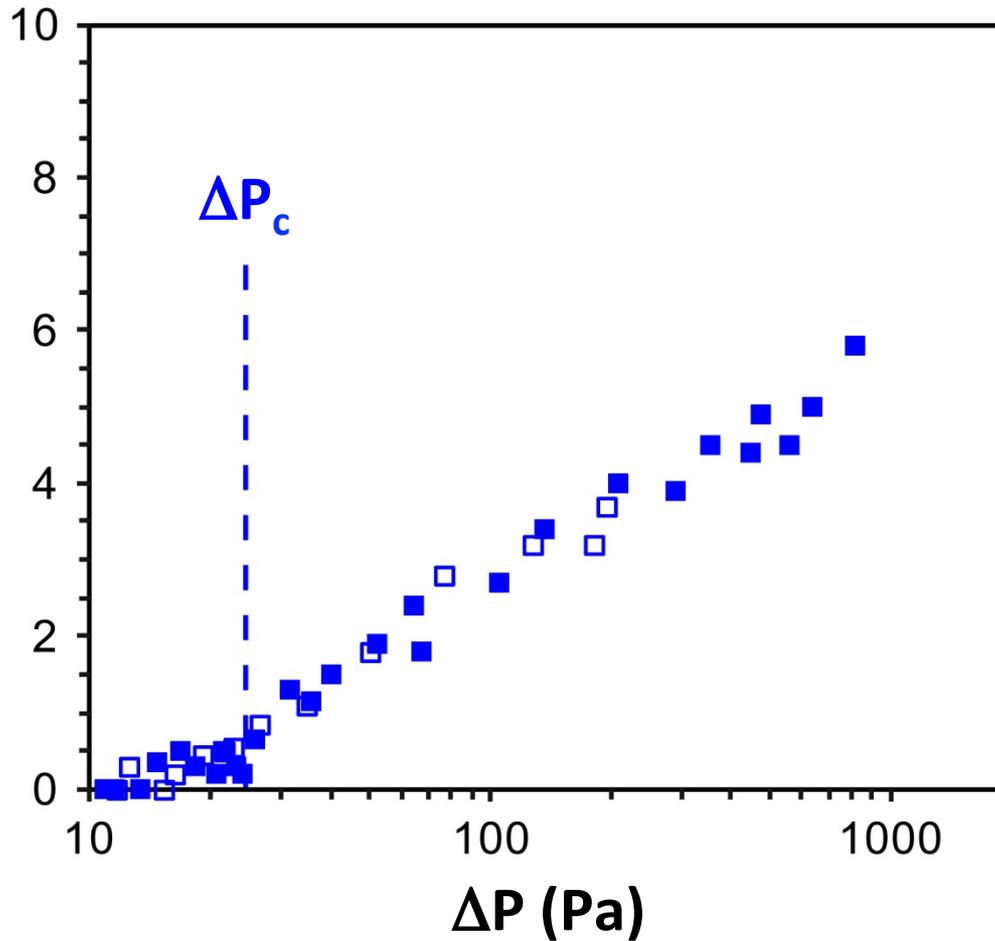


$$\Delta P_c = \frac{\text{poids}}{\text{surface eff.}} = \frac{2}{3} \rho_p g d$$

Note : on fait l'hypothèse que ce mécanisme ne fonctionne pas pour un substrat de particules fines

Soulèvement de particules : expériences

**Hauteur
maximale de
soulèvement
(mm)**



Billes de verre

d=1.5 mm

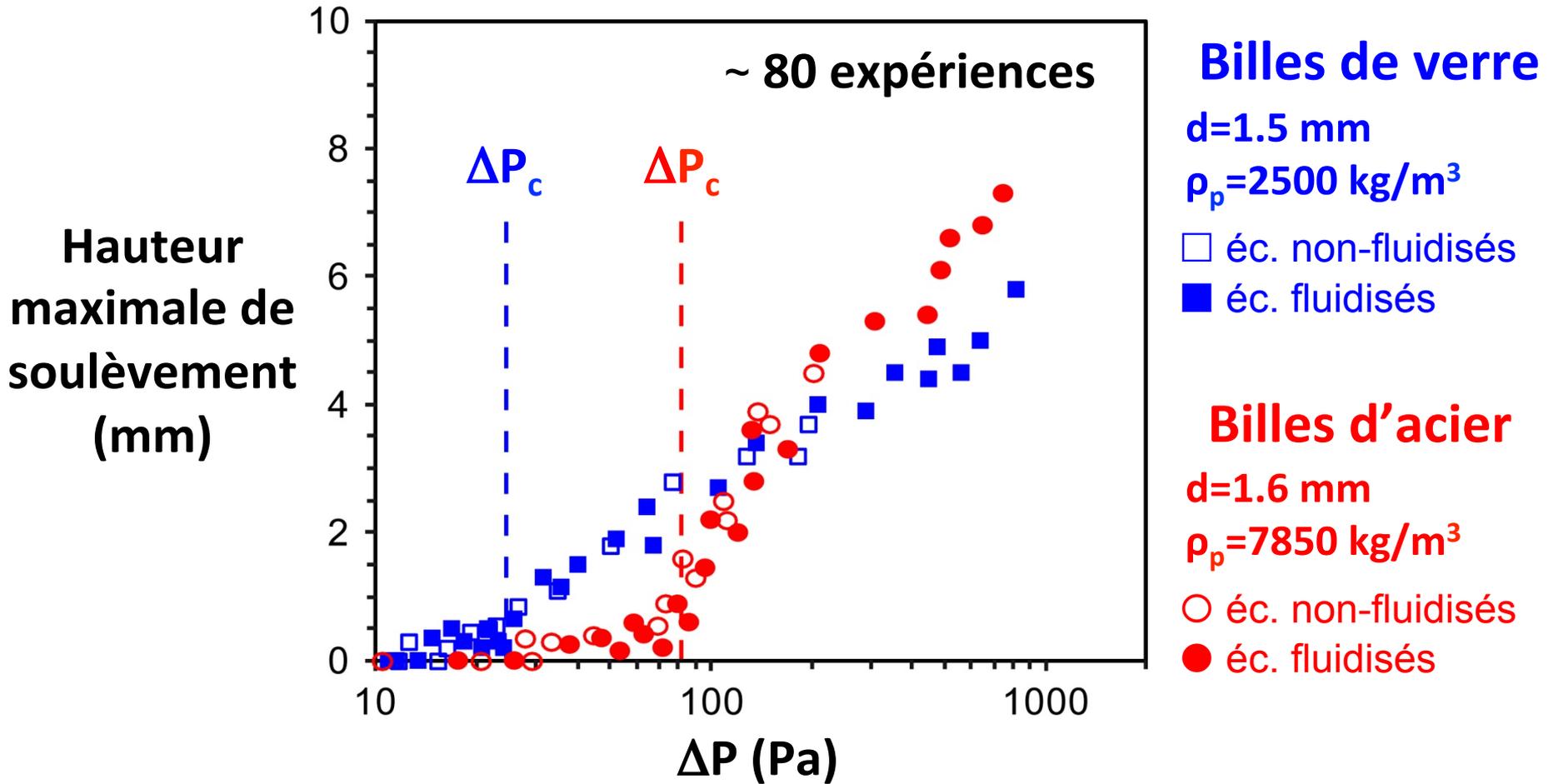
$\rho_p=2500 \text{ kg/m}^3$

□ éc. non-fluidisés

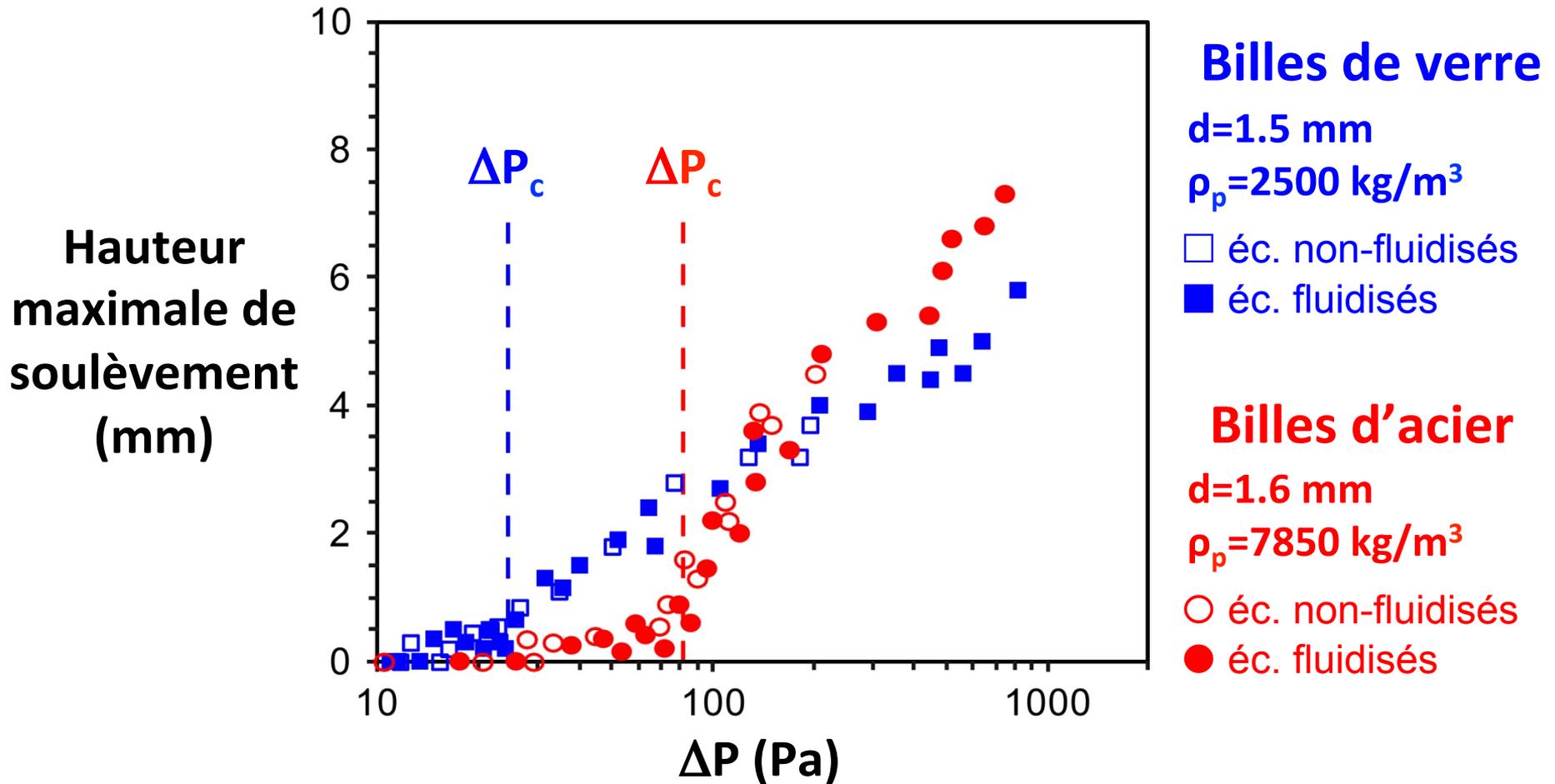
■ éc. fluidisés

$$\Delta P = \gamma \rho U^2$$

Soulèvement de particules : expériences



Soulèvement de particules : expériences



- ➔ Soulèvement à $\sim \Delta P_c$, indépendant de la taille des particules
- ➔ la hauteur ne dépend pas de la vitesse d'écoulement

Application aux écoulements pyroclastiques

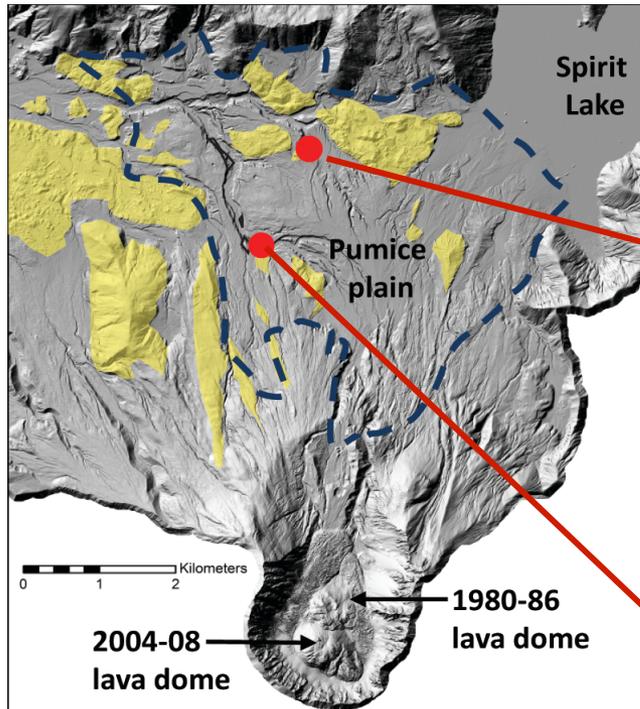
(1) Mt St-Helens 1980

(2) Super-éruptions (Peach Spring Tuff)

Dépôts pyroclastiques du Mont St-Helens (18 mai 1980)

blocs d'andésite de l'avalanche de débris dans les dépôts (<100 m en amont)

Brand et al. (2014)



- dist.=7.2 km
- slope <math><4^\circ</math>
- maximum block size 45 x 25 cm



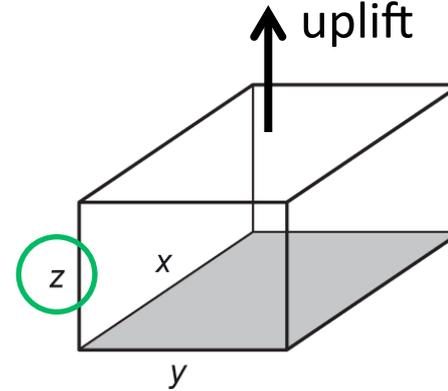
- dist.=5.6 km
- slope <math><6^\circ</math>
- maximum block size 53 x 35 cm



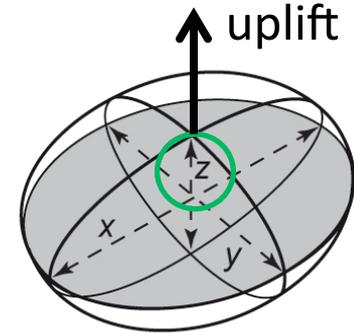
Vitesse des écoulements

- $\Delta P = \gamma \rho U^2$

- $\Delta P_c = \frac{\text{poids}}{\text{surf. eff.}} = C \rho_p g z$



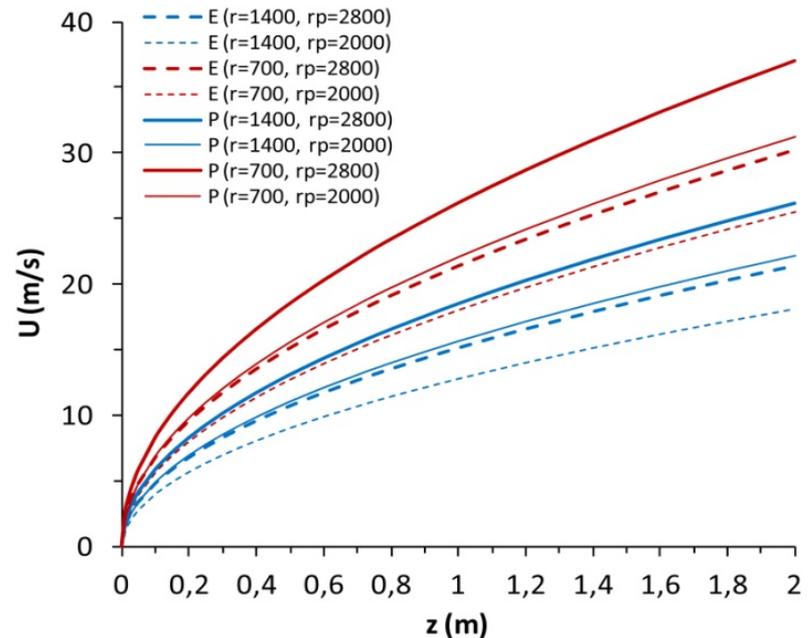
C=1



C=2/3

➔

$$U = \sqrt{\frac{C \rho_p g z}{\gamma \rho}}$$



Ecoulements pyroclastiques du Mont St-Helens (18 mai 1980)

$$U = \sqrt{\frac{C \rho_p g z}{\gamma \rho}}$$

$C=1$ (parall.)

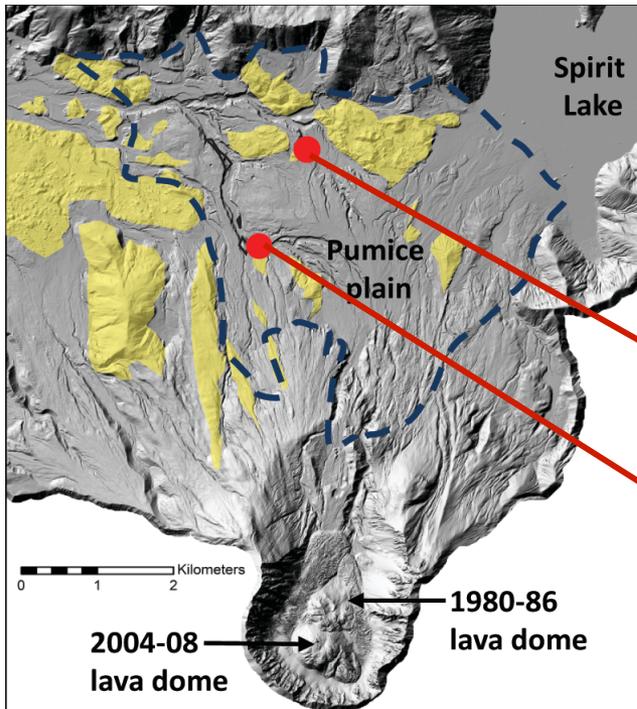
$\rho_p=2600 \text{ kg m}^{-3}$

$z=0.25\text{-}0.35 \text{ cm}$

$\gamma=0.06$

$\rho=700\text{-}1400 \text{ kg m}^{-3}$

(conc. vol.~30-60%)



$U = 8.9\text{-}12.6 \text{ m s}^{-1}$

$U = 10.5\text{-}14.9 \text{ m s}^{-1}$

**Ne sont pas
des valeurs
minimales !**

Roche et al. (2013)

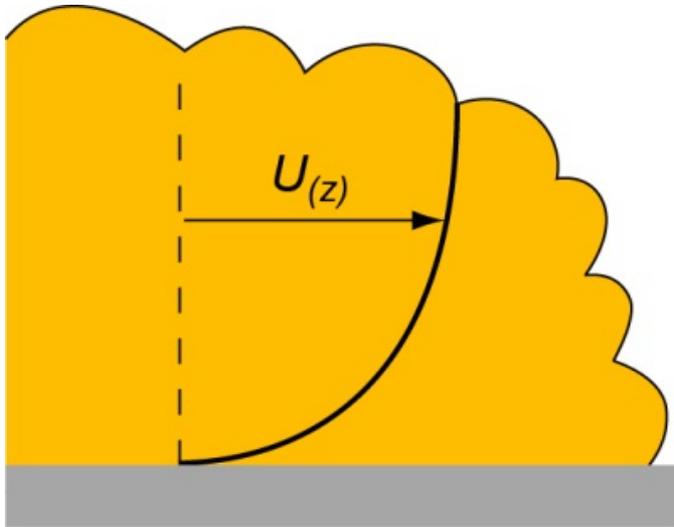
**Super-éruptions
volcaniques
et écoulements
pyroclastiques associés**



Courants de densité pyroclastiques

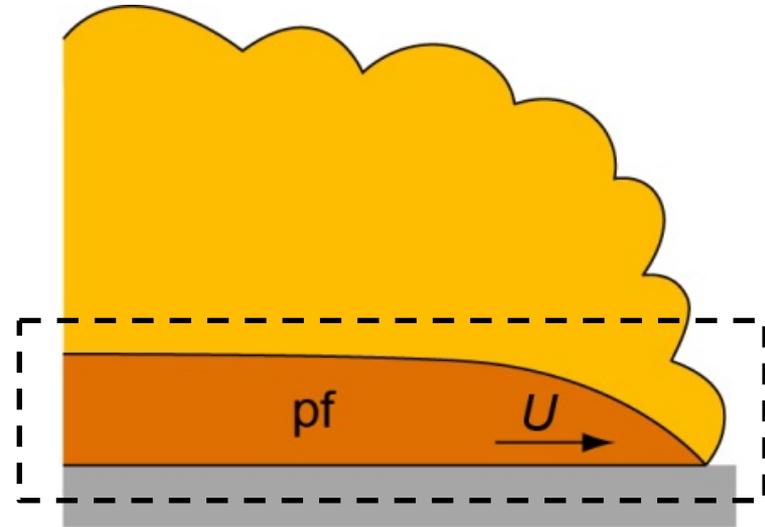
quel mécanisme pour les "super-éruptions" ?

(1) Courant dilué turbulent



- 0.1-1 % vol. particules
- $\rho \sim 1 \text{ kg/m}^3$

(2) Ecoulement basal dense



- >30 % vol. particules
- $\rho \sim 10^3 \text{ kg/m}^3$

Magnitude, indice d'explosivité, occurrence

MAGNITUDE

The magnitude of an eruption has been defined by the mass of erupted material (lava or pyroclastic), as follows (Pyle 2000):

$$\log_{10}(\text{erupted mass in kg}) - 7$$

This calculation yields a value similar to the VEI (see following table)

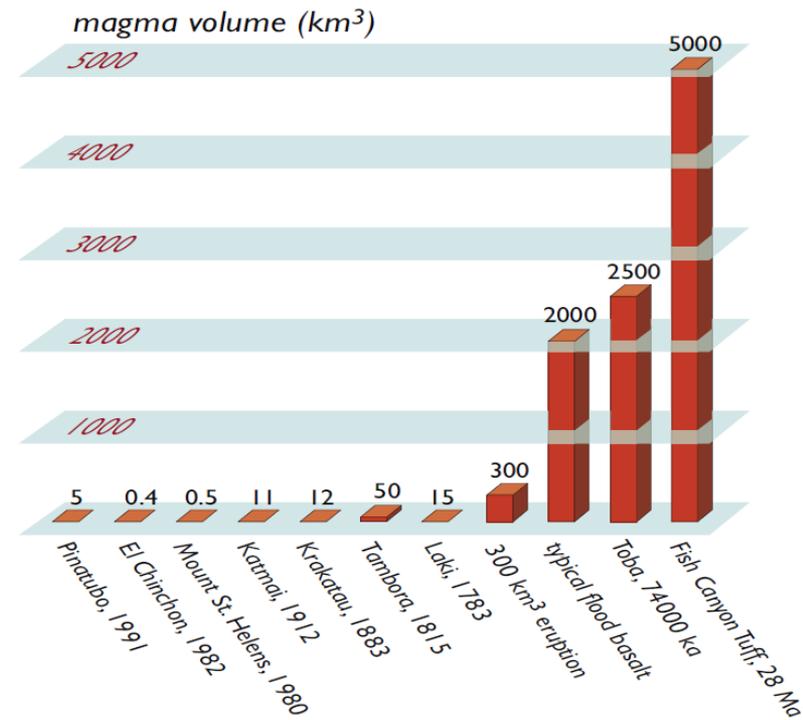
VOLCANIC EXPLOSIVITY INDEX (VEI)

VEI	Plume height (km)	Ejected volume (km ³)	Frequency on Earth	Example
0	<0.1	>~10 ⁻⁶	daily	Kilauea, Hawai'i
1	0.1–1	>~10 ⁻⁵	daily	Stromboli, Italy
2	1–5	>~10 ⁻³	weekly	Galeras, Colombia, 1993
3	3–15	>~10 ⁻²	yearly	Nevado del Ruiz, Colombia, 1985
4	10–25	>~10 ⁻¹	~every 10 y	Soufrière Hills, West Indies, 1995
5	>25	>~1	~every 50 y	Mount St. Helens, USA, 1980
6	>25	>~10	~every 100 y	Pinatubo, Philippines, 1991
7	>25	>~100	~every 1000 y	Tambora, Indonesia, 1815
8	>25	>~1000	~every 10,000–100,000 y	<i>Supereruptions</i> : Toba, 74 ka

MODIFIED AFTER NEWHALL AND SELF (1982)

- 47 éruptions reconnues, probablement des milliers (Mason et al, 2004)
- la plus récente : Uruanui (NZ), 26 ka
- la plus volumineuse : Fish Canyon Tuff (~5000 km³)

Sparks et al. (2005)



"The probability of a supereruption in our lifetime is not zero" (Miller and Wark 2008)

Conséquences à grande échelle

Toba (74 ka)

- cendres dispersées dans l'atmosphère
- courants de densité pyroclastiques
- tsunamis

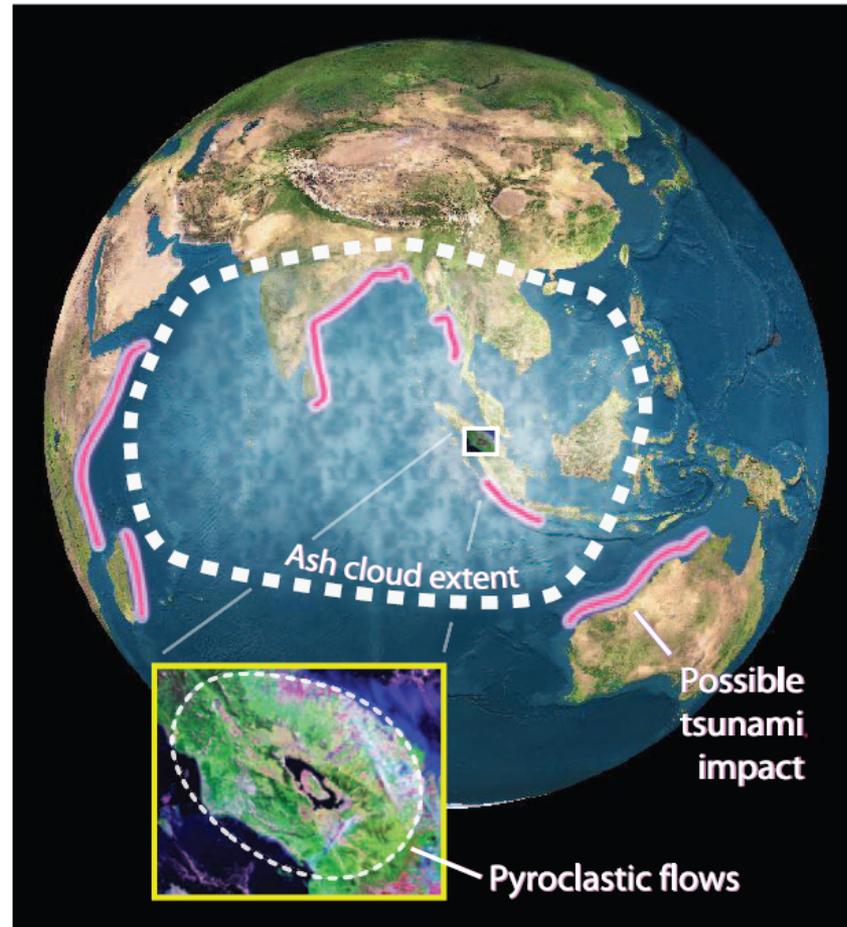


FIGURE 2 Likely extent of ash cloud (thick dashed line) and of pyroclastic flows (inset Landsat image; thin dashed line) produced during the 74 ka supereruption from the Toba caldera, Sumatra. Lake Toba (visible in center of inset) fills the 100 km long by 40 km wide depression formed during caldera collapse. Also shown is the possible impact zone of a tsunami generated by Toba pyroclastic flows entering the sea 150–200 kilometers from the source vents, but note that sea level was about 60 m lower at 74 ka than now. Figure based on original illustration by S. Self and S. Blake.

Miller and Wark (2008)

La controverse Taupo

Age de l'éruption : 1800 BP

Dépôts de $\sim 30 \text{ km}^3$ et $\sim 20\,000 \text{ km}^2$

Distance $\sim 80 \text{ km}$ (épaisseur moyenne $\sim 1.5 \text{ m}$)

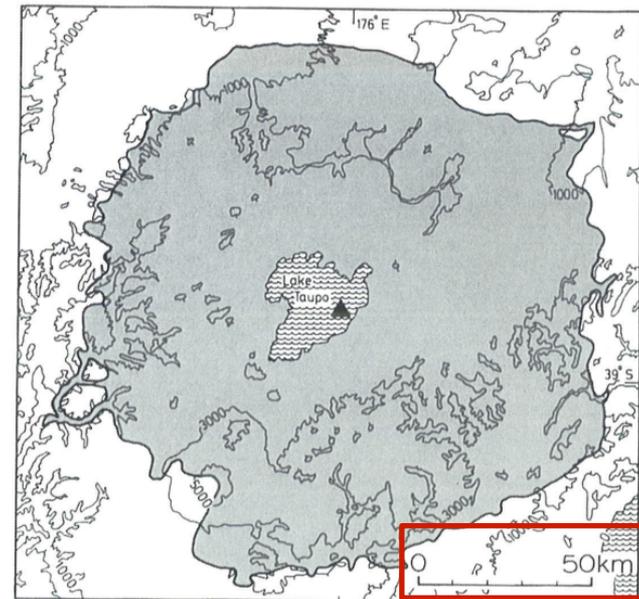


Fig. 4. The 1800 BP Taupo Ignimbrite, New Zealand, which extends up to 80 km from its source vent. This is an example of a low-aspect ratio ignimbrite emplaced by a high-velocity pyroclastic flow of short duration. From Wilson (1986).

Ecoulement dense (Wilson, 1985)

- layer 1 + layer 2
- les ponces "flottent"
- dépôt plus épais dans les vallées
- figures de ségrégation par flux de gaz

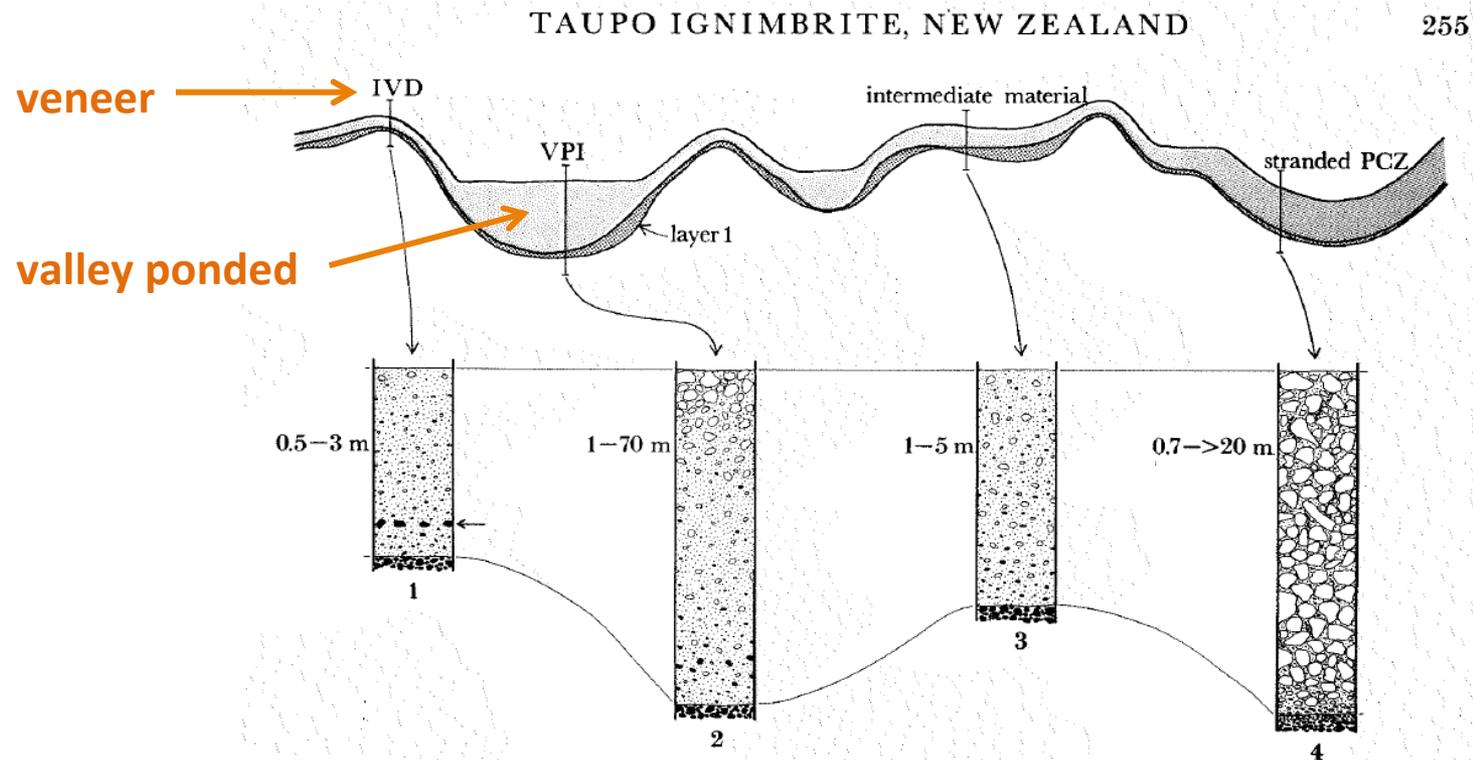


FIGURE 27. Schematic sections illustrating relationships between the ignimbrite veneer deposit (IVD) and valley-ponded ignimbrite (VPI). The sections show (see text for further discussion): 1, typical IVD, showing grainsize stratification, an overall compositional zonation towards a more pumiceous top and a one-clast-thick lithic-concentration zone (arrowed); 2, typical VPI showing poorly defined layer 2a, normal-lithic and reverse-pumice grading (the latter to give a pumice-concentration zone - PCZ); 3, material intermediate between the IVD and VPI found on flat-lying interflues; 4, stranded PCZ material with a thin layer 2a (see Wilson & Walker 1982, figure 4).

Écoulement dense (Wilson, 1985)

Arguments contre :

- Pas d'approche quantitative pour expliquer la distribution de taille des particules
- Figures de ségrégation : formation dans le dépôt, pas au cours de l'écoulement

Courant dilué (Dade and Huppert, 1996)

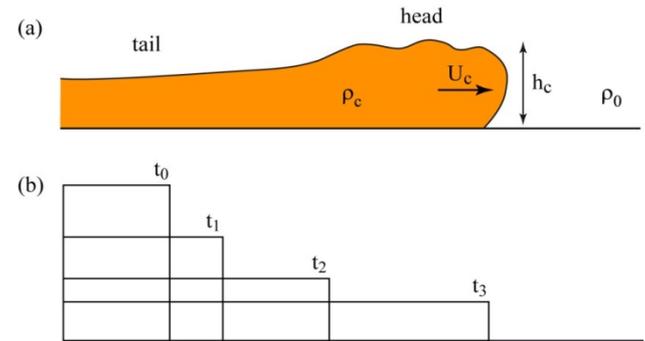
- **Modèle "de boîte" axisymétrique** pour un courant gravitaire fluide-particules

$$Q_{cte} = 2\pi R h U$$

$$U = dR/dt = Fr [g'(C - C^*)h]^{1/2}$$

$$dC/dt = -WC/h$$

avec : $Fr \approx 1$, $g' = (\rho_p - \rho_{gas}) / \rho_{air}$, $C^* = (\rho_{air} - \rho_{gas}) / (\rho_p - \rho_{gas})$
 $W = v/d [(81 + \eta^*)^{1/2} - 9]$, $\eta^* = g' \rho_{air} d^3 / \rho_{gas} v^2$



- **Distribution de la taille des particules** décrite avec **une fonction de probabilité** pour la vitesse de chute des particules

$$C = C_0 \int \exp[-\pi W_{(\phi)} R^2 / Q] p_{(\phi)} d\phi$$

- **Model ajusté avec l'épaisseur des dépôts proximaux** pour fixer la valeur du flux d'entrée

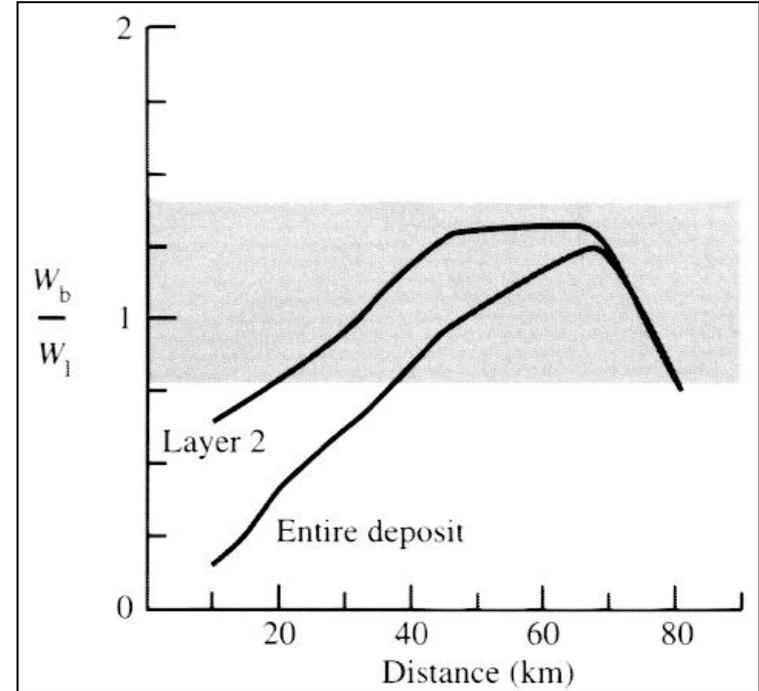
Courant dilué (Dade and Huppert, 1996)

Equivalence hydraulique des plus grandes particules

$$d_{\text{ponce}} = 60 \text{ cm}$$

$$\text{vitesse de chute : } W \sim (gd\rho_s/\rho_g)^{1/2}$$

$$W_{\text{ponce}}/W_{\text{lithique}} \approx [(\rho d)_p/(\rho d)_l]^{1/2} \approx 1$$



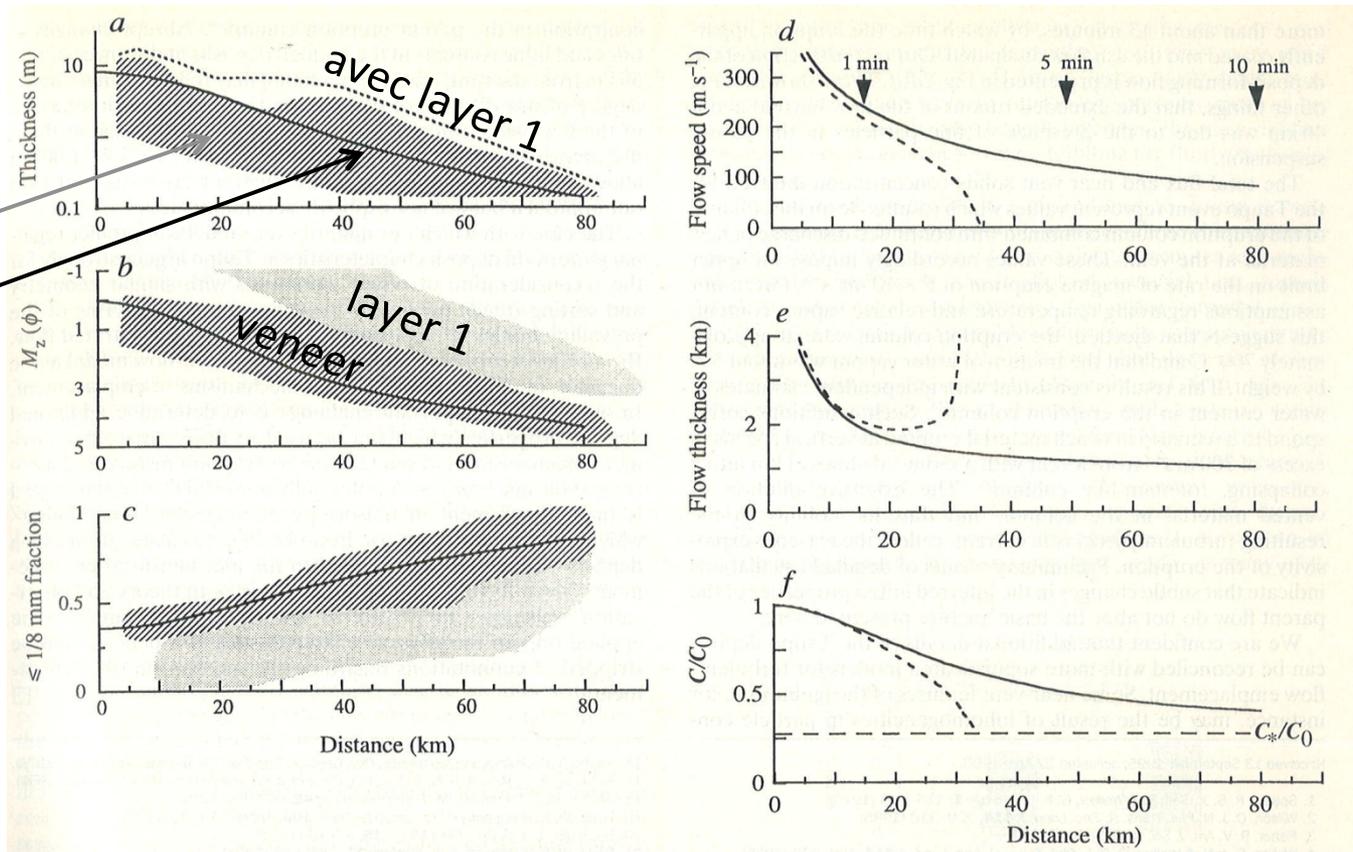
Courant dilué (Dade and Huppert, 1996)

Autres résultats

- bon accord avec l'épaisseur du dépôt et la distribution de taille des particules
- épaisseur ~ 1 km température = 450 °C
- vitesse $\sim 100-300$ m s⁻¹ durée ~ 15 mn concentration = 0.3% vol. ($\rho = 3$ kg/m³)
- flux volumique (dilué) = 40 km³ s⁻¹ (DRE: 0.05 km³ s⁻¹)

observations

model

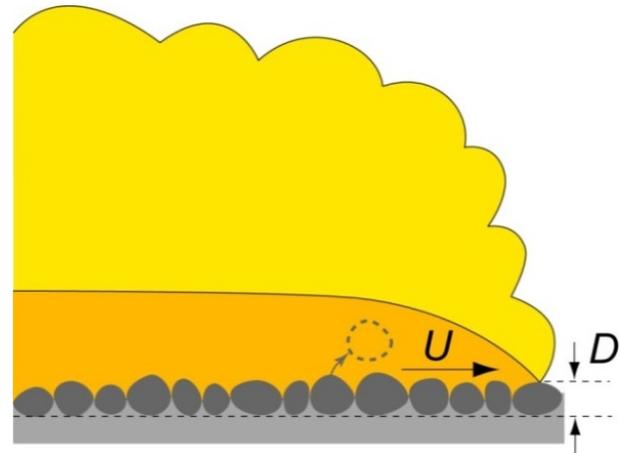
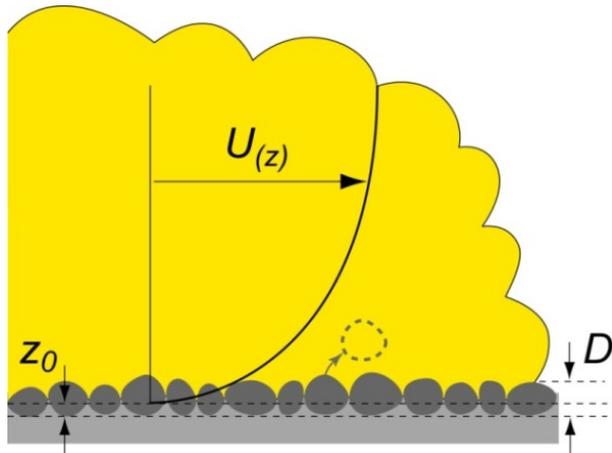


Courant dilué (Dade and Huppert, 1996)

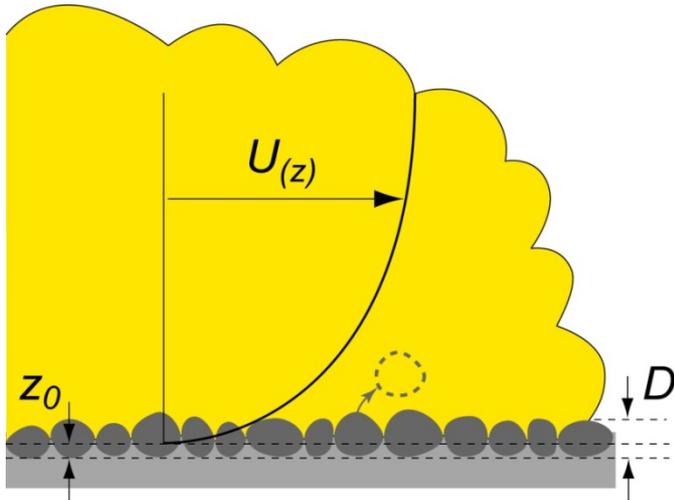
Arguments contre :

- modèle ne prend pas en compte
 - la stratigraphie
 - les variations de la granulométrie à 50-60 km
 - l'entraînement de l'air ambient
- $W_{\text{ponce}}/W_{\text{lithique}} \neq 1$
Pas d'équivalence hydraulique dans le niveau 2
- Mégadunes seulement à <13-20 km

Les blocs dans les dépôts peuvent-ils permettre de déduire le mécanisme des écoulements ?



Courant dilué turbulent



- Quelle est la taille des particules qui peuvent être entraînées par un courant dilué ?
- Calcul du profil de vitesse requis pour l'entraînement

Profil de vitesse

$(z_0 = D/30, \kappa = 0.4)$

$$U_{(z)} = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

**Seuil de transport
(nombre de Shields)**

$$\theta = \frac{\rho u_*^2}{(\rho_p - \rho)gD}$$

pente

$$\theta_\alpha = \theta_c \left(\cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\tan \phi} \right)$$

$$\Rightarrow U_{c(z)} = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{\theta_\alpha (\rho_p - \rho)gD}{\rho}} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

with : $\alpha=0-10^\circ, \phi=30^\circ$

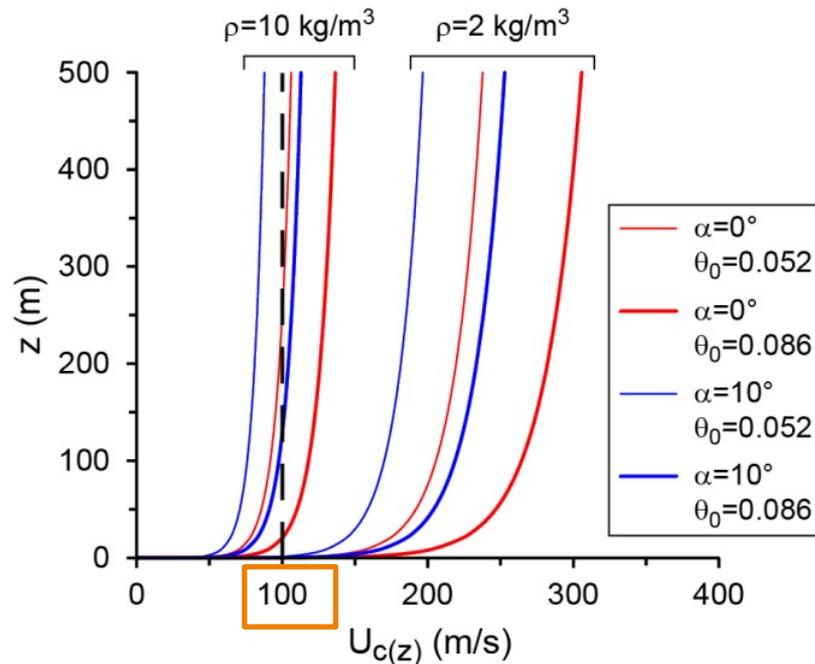
$\theta_c=0.052-0.086 \quad (Re_p > 10^4)$

Profils de vitesse

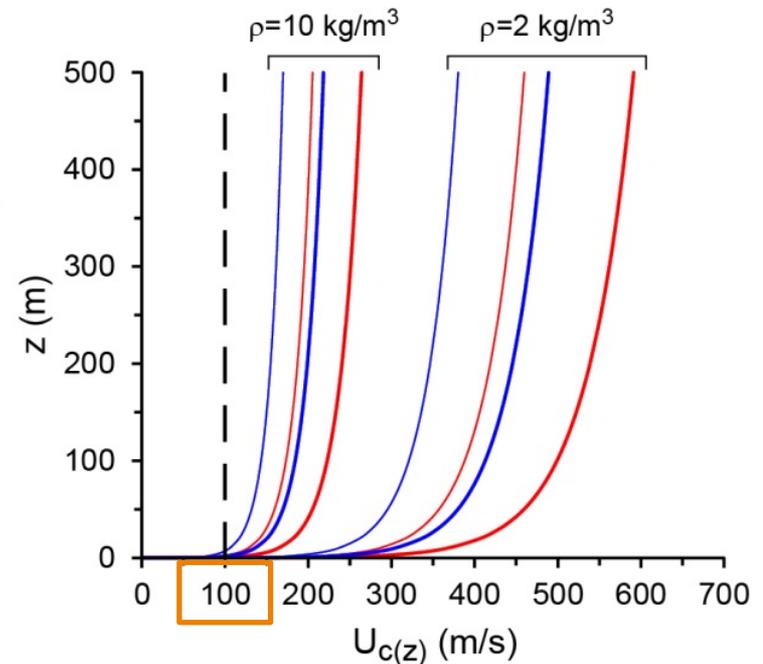
$$U_{c(z)} = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{\theta_\alpha (\rho_p - \rho) g D}{\rho}} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

$$(\rho_p = 2500 \text{ kg/m}^3)$$

D=0.1 m



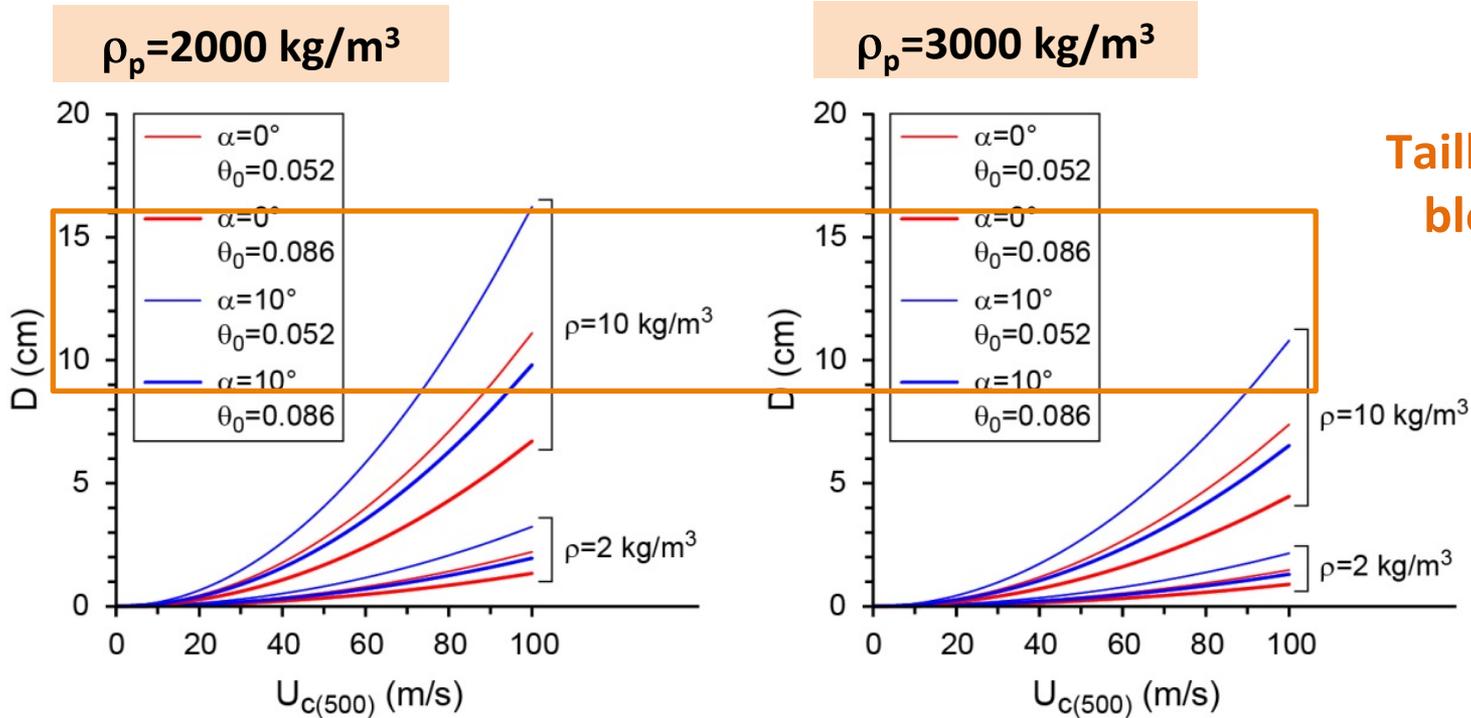
D=0.5 m



Courants issus d'un blast (Mt St-Helens, Soufrière Hills): $U_{\max} = 70-90 \text{ m/s}$
(Esposti-Ongaro et al. 2008, 2012)

$$U_{c(z)} = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{\theta_\alpha (\rho_p - \rho) g D}{\rho}} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \rightarrow \quad D = \frac{\rho}{\theta_\alpha (\rho_p - \rho) g} \left(\frac{U_{c(z)} \kappa}{\ln(z/z_0)} \right)^2$$

500 m



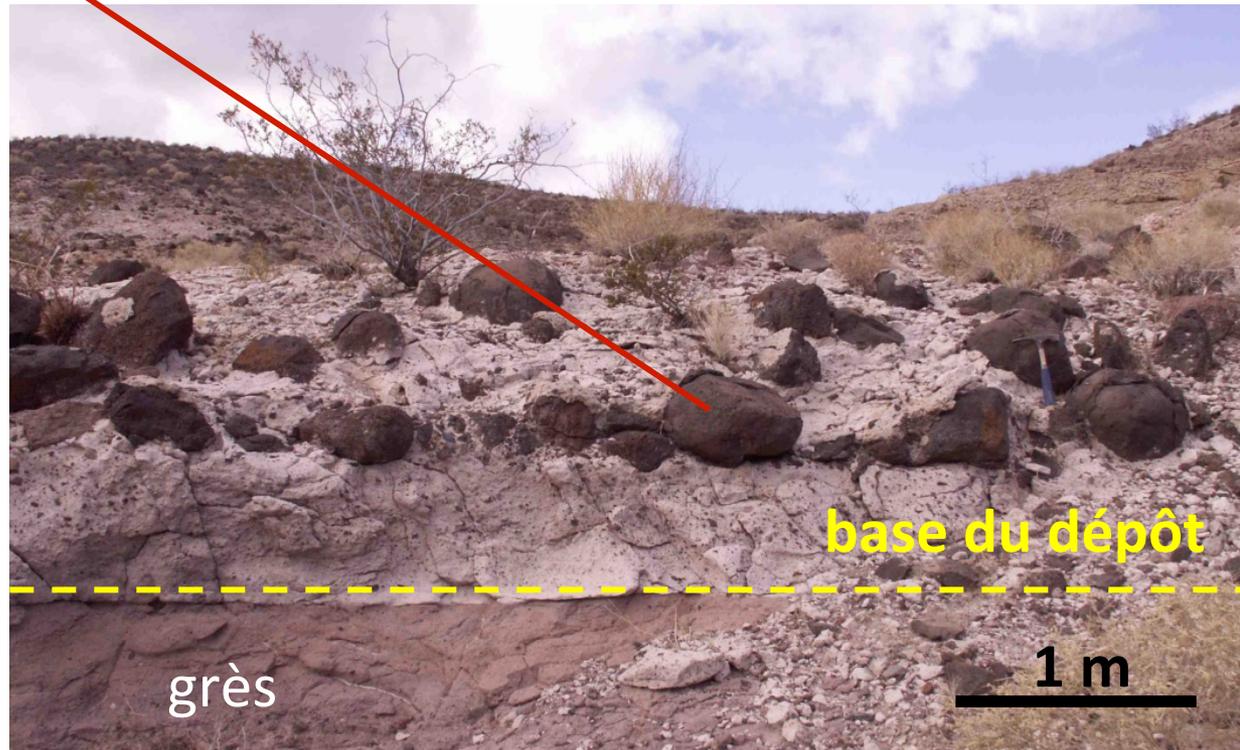
→ **D > 10-15 cm : pas d'entrainement par un courant dilué**

→ **Entrainement par un écoulement dense**

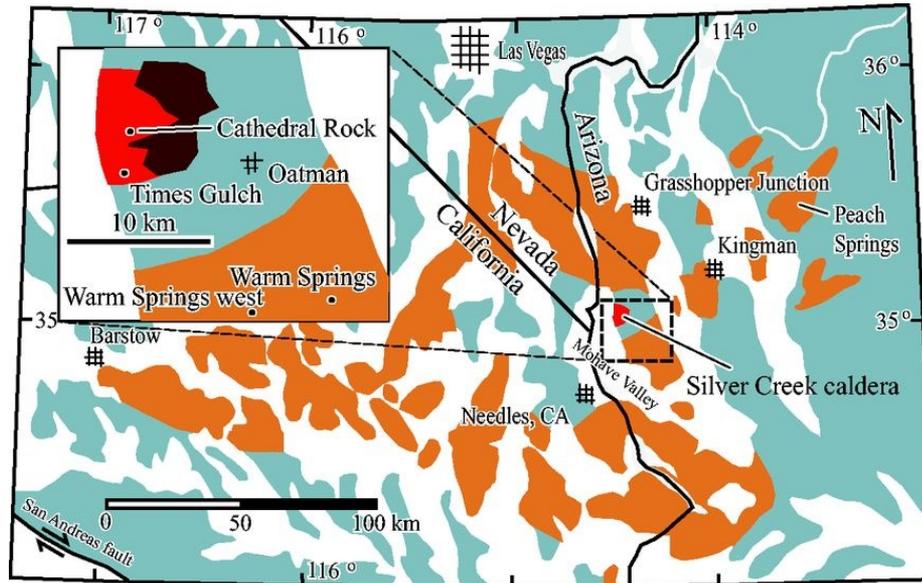
Application au Peach Spring Tuff (USA)

En collaboration avec David Buesch (US Geological Survey) et Greg Valentine (NY State University at Buffalo)

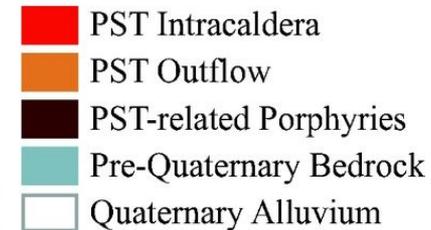
- blocs >10-15 cm issus de sédiments fluviaux



Peach Spring Tuff

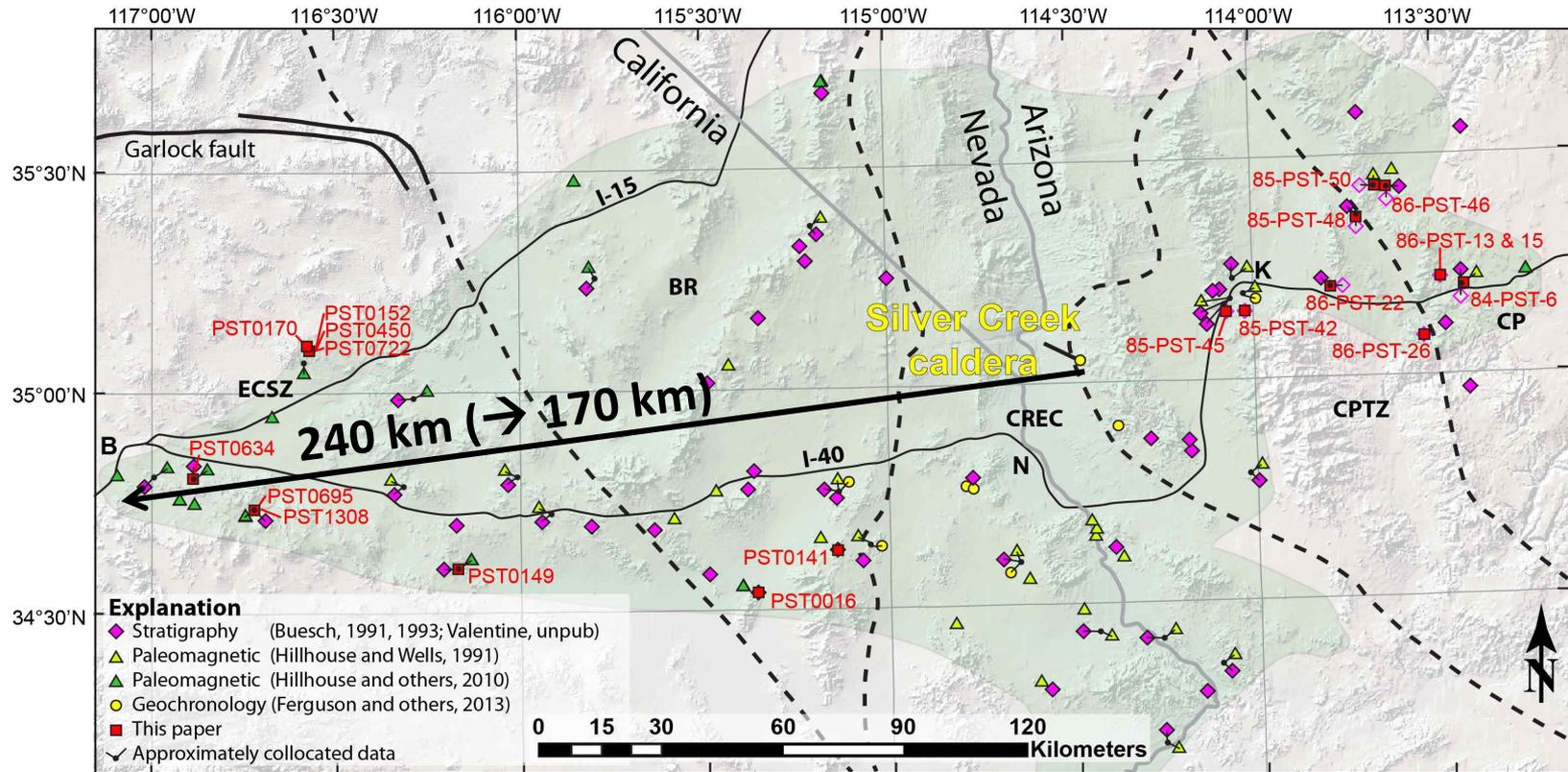


<https://my.vanderbilt.edu/supereruptionreu/>



- âge : 18.8 Ma
- caldera de Silver Creek
- surface = 32000 km², volume (DRE) >1300 km³
- épaisseur = 5-200 m (moyenne = 30 m)
- dépôts jusqu'à 170 km (corrigé, cf. extension régionale)
- rapport de forme = 1/10 000

Carte des affleurements



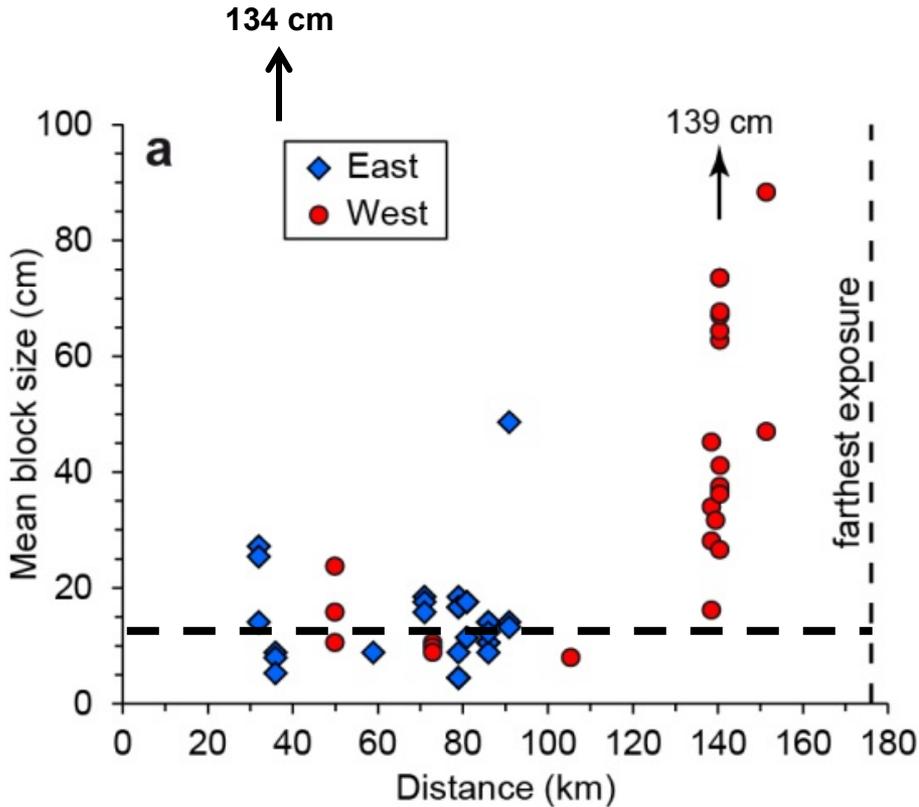
Cities

B Barstow
N Needles
K Kingman

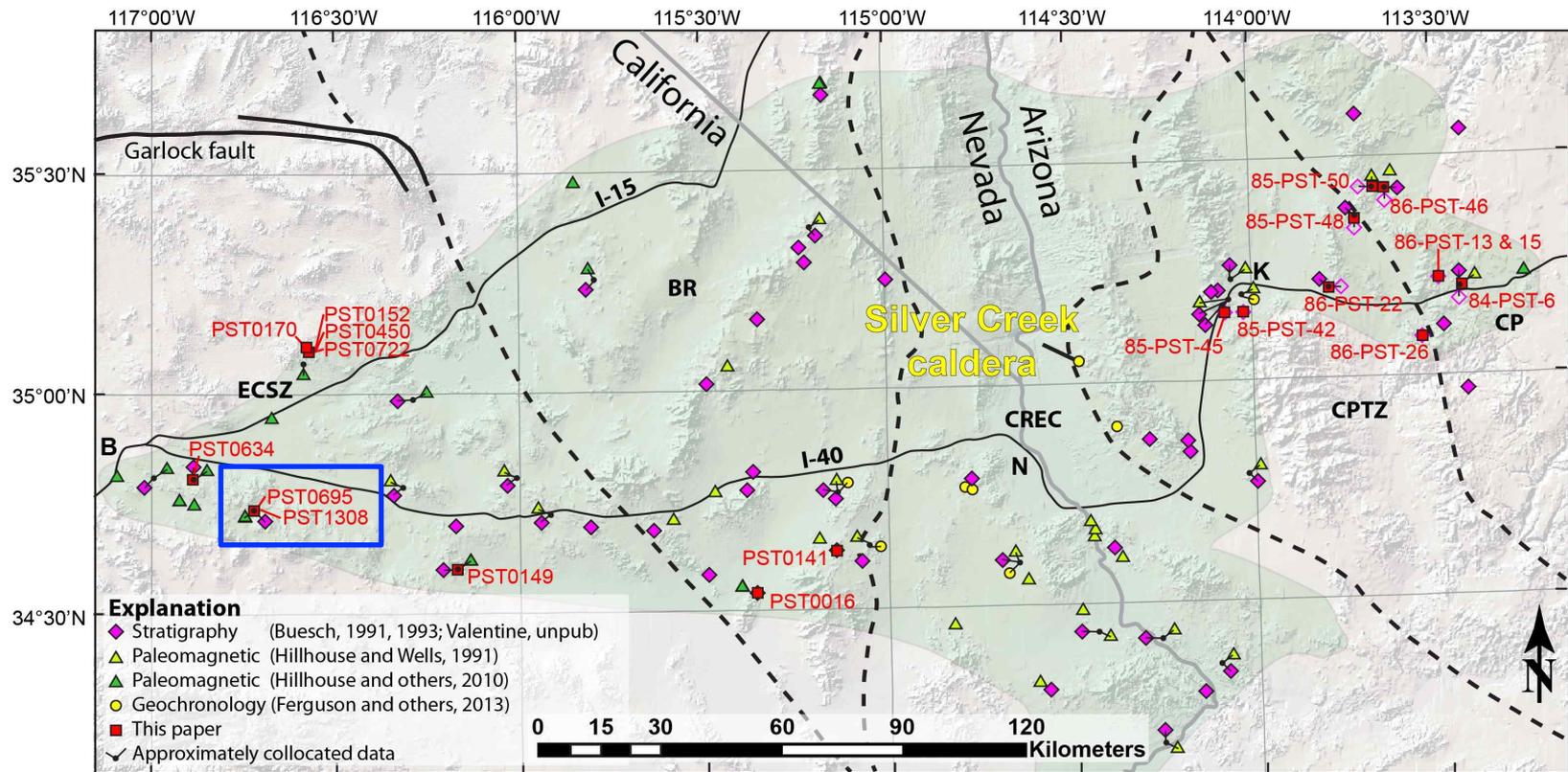
Structural domains

ECSZ Eastern California Shear Zone
BR Basin and Range
CREC Colorado River Extensional Corridor
CPTZ Colorado Plateau Transition Zone
CP Colorado Plateau

Taille des blocs (20 affleurements)



- blocs > 10-15 cm
- quelques cas > 100 cm
- blocs présents sur presque toute la distance de parcours



Cities

B Barstow
 N Needles
 K Kingman

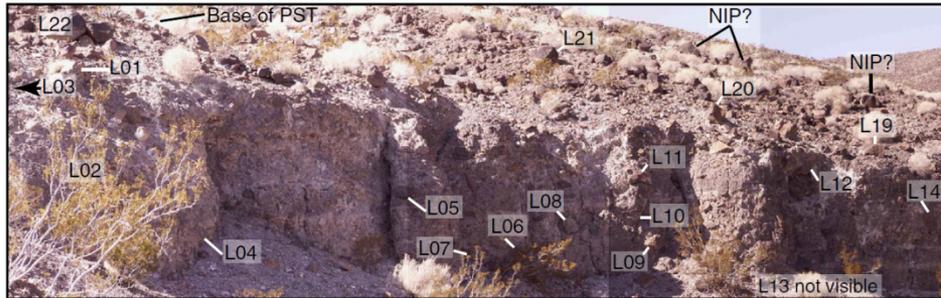
Structural domains

ECSZ Eastern California Shear Zone
 BR Basin and Range
 CREC Colorado River Extensional Corridor
 CPTZ Colorado Plateau Transition Zone
 CP Colorado Plateau

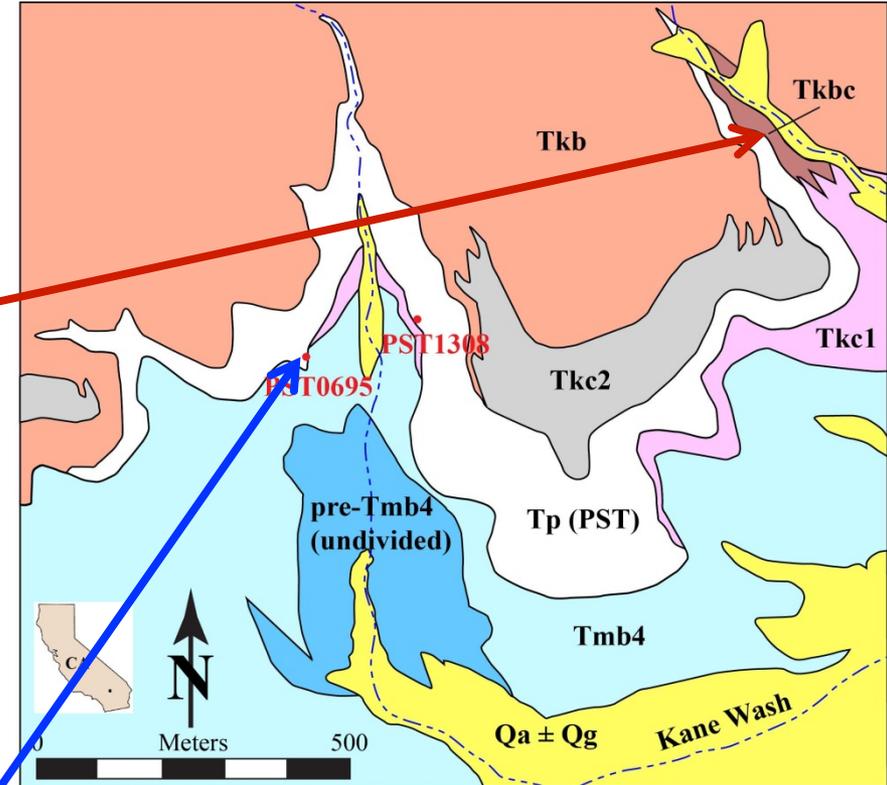
← PST boundary from Hillhouse and others (2010)

Distance de transport des blocs : quelques centaines de mètres

Zone source possible des blocs



Blocs du substrat dans le dépôt



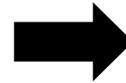
Explanation of symbols

- Qa, Qg Quaternary alluvium and gravel
- Tkb | Tkcbc Miocene alluvial fan; Tkb - sandstone and cobble conglomerate with mixed volcanic clasts; Tkcbc - boulder conglomerate with 1-m basaltic andesite clast
- Tkc1 | Tkc2 Miocene axial braided stream; sandstone and pebble conglomerate with mixed volcanic clasts; Tkc1 is pre-Tp (PST), Tkc2 is post-Tp (PST)
- Tp (PST) Peach Spring Tuff (PST)
- Tmb4 Basaltic andesite lava flows
- pre-Tmb4 Pre-basaltic andesite lava flow tuff, sandstone, and lava flow (undivided)

D. Buesch (USGS)

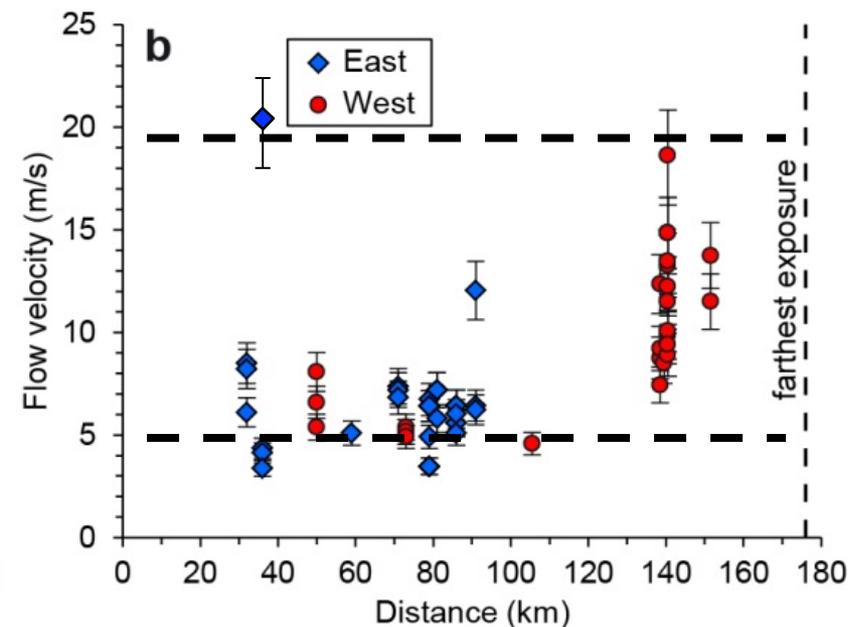
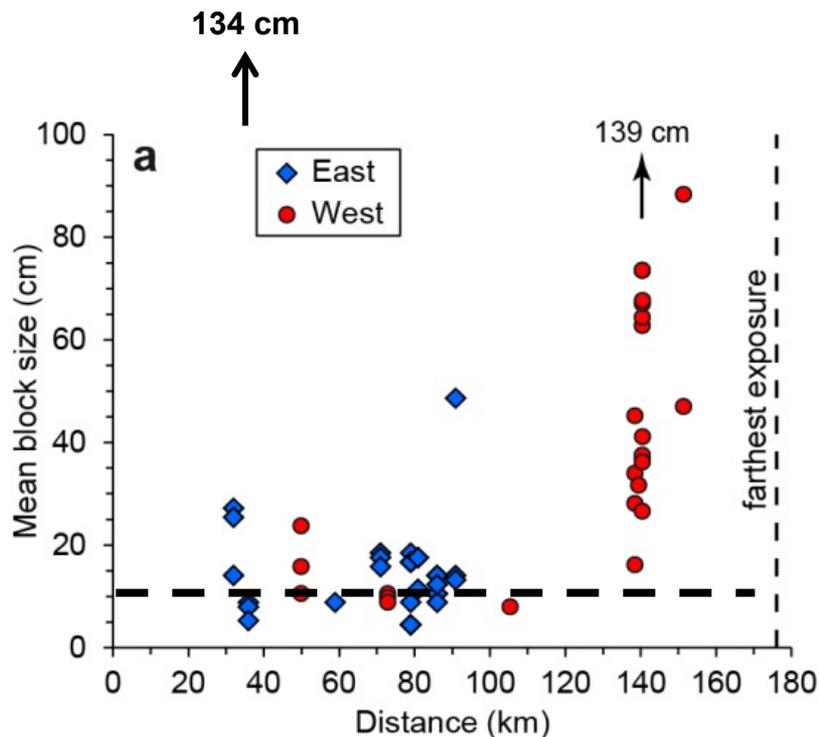
Vitesse des écoulements

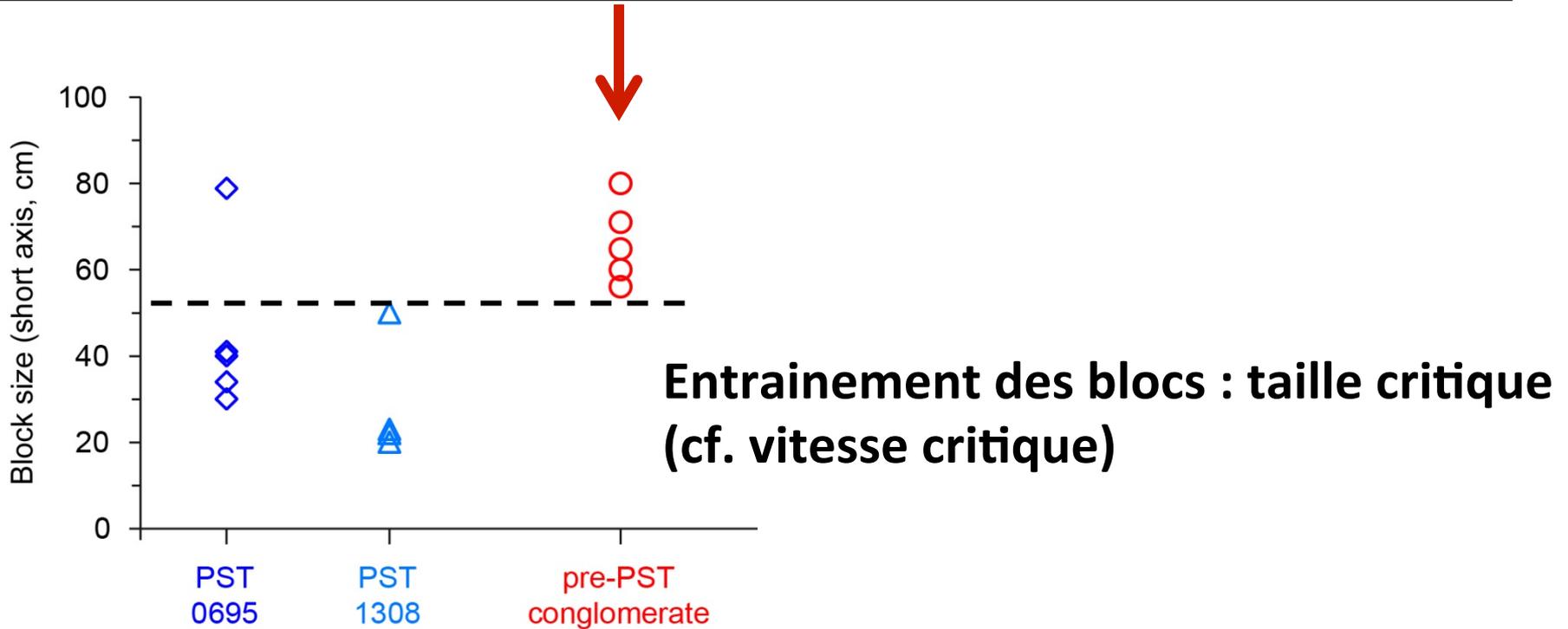
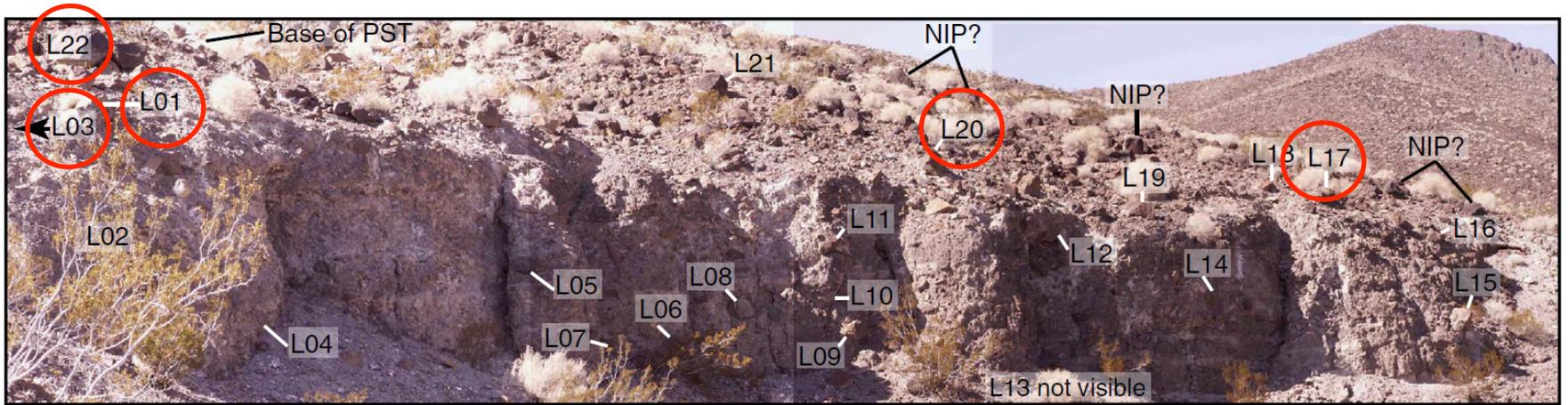
Taille des blocs (et densité)



Vitesse

(avec $\rho_{\text{écoulement}} = 875\text{-}1400 \text{ kg/m}^3$)





Paramètres éruptifs

• **Durée min. = distance / vitesse = 2.5-10 h**

• **Débit max. = volume / durée = 10^7 - 10^8 m³/s**

10^{11} kg/s

Autres éruptions:

Pinatubo, 1991

10^9 kg/s

Vésuve, 79

10^8 kg/s

Kos, 162 ka

10^6 m³/s

Tambora, 1915

10^8 kg/s

Novarupta, 1912

10^7 - 10^8 kg/s

Taupo, 1.8 ka

10^7 m³/s

Toba, 75 ka

10^{10} kg/s

Conclusions

- Les écoulements biphasés hyper-concentrés avec une forte pression de fluide se comportent comme des fluides purs
- La pression de fluide décroît exponentiellement (i.e. obéit à une loi de diffusion de pression)
- Les écoulements de particules fines peuvent être auto-fluidisés
- Entrainement d'un substrat granulaire favorisé par un gradient de pression dynamique
- Méthode pour "inverser" les dépôts naturels (→ vitesse des écoulements)
- Ecoulements pyroclastiques lors de la super-éruption du Peach Spring Tuff : denses, relativement lents