



SMAI 2011, Guidel, Bretagne



Dynamique des instabilités gravitaires sur Terre et sur Mars

**Anne Mangeney¹, François Bouchut², Antoine Lucas³, Pascal Favreau¹,
Lev Tsimring⁴**

¹Institut de Physique du Globe de Paris, Université Paris-Diderot 7

²LAMA, UMR-8050, Université Paris Est Marne la Vallée

³Division of Geological & Planetary Sciences, Caltech, Pasadena, USA

⁴INLS, University California San Diego, CA

Collaborations

Nathalie Thomas, *IUSTI, Marseille*



François Bouchut, *DMA, ENS Paris*

Equations sur la partie tangentielle $\vec{v}^B = (u, s, v)$

$$\partial_t(u) + v \partial_x(u) + w \partial_z(u) + (u-s) \partial_x \left[\frac{1}{2} \rho P \right]$$

$$\partial_t(s) + v \partial_x(s) + w \partial_z(s) + c s \partial_x \left[\frac{1}{2} \rho P \right]$$

$$= -g v^2 + [s \cdot (v \cdot \nabla s)](s, u) + c^2 (v \cdot \nabla s) \cdot u + \frac{s \cdot (v \cdot \nabla s)}{c} w$$

Equation d'energie

$$\partial_t \left(\frac{\rho u^2}{2} + v \cdot \nabla \left(\frac{\rho u^2}{2} + w \partial_z \left(\frac{\rho u^2}{2} + c u \partial_x \left[\frac{1}{2} \rho P \right] \right) \right) \right)$$

$$= -g^2 s \cdot u - [s \cdot (v \cdot \nabla s)](s, u) + c^2 s \cdot (v \cdot \nabla s) \cdot u$$

Ioan Ionsecu, *LPMTM*

Pascal Favreau, JP Vilotte, *IPGP*

Enrique Fernandez Nieto, *Universidad de Seville*

$$= -g v^2 + [s \cdot (v \cdot \nabla s)](s, u) + c^2 s \cdot (v \cdot \nabla s) \cdot u$$

$$\partial_t \left(\frac{\rho u^2}{2} + v \cdot \nabla \left(\frac{\rho u^2}{2} + w \partial_z \left(\frac{\rho u^2}{2} + c u \partial_x \left[\frac{1}{2} \rho P \right] \right) \right) \right)$$

$$\partial_t \left(\frac{\rho v^2}{2} + v \cdot \nabla \left(\frac{\rho v^2}{2} + w \partial_z \left(\frac{\rho v^2}{2} + c v \partial_x \left[\frac{1}{2} \rho P \right] \right) \right) \right)$$

$$\partial_t \left(\frac{\rho w^2}{2} + v \cdot \nabla \left(\frac{\rho w^2}{2} + w \partial_z \left(\frac{\rho w^2}{2} + c w \partial_x \left[\frac{1}{2} \rho P \right] \right) \right) \right)$$

$$\partial_t \left(\frac{\rho P}{2} + v \cdot \nabla \left(\frac{\rho P}{2} + w \partial_z \left(\frac{\rho P}{2} + c P \partial_x \left[\frac{1}{2} \rho P \right] \right) \right) \right)$$

$$\text{mais } \vec{g} \cdot \mathbf{M} = -g(\delta + Zc) \text{ donc}$$

$$\partial_t (\vec{g} \cdot \mathbf{M}) + v \cdot \nabla (\vec{g} \cdot \mathbf{M}) + w \partial_z (\vec{g} \cdot \mathbf{M}) = -g(s \cdot u + c w)$$

$$\partial_t \left(\frac{\rho (u^2 + v^2 + w^2)}{2} + \vec{g} \cdot \mathbf{M} \right) + v \cdot \nabla \left(\frac{\rho (u^2 + v^2 + w^2)}{2} + \vec{g} \cdot \mathbf{M} \right) + w \partial_z \left(\frac{\rho (u^2 + v^2 + w^2)}{2} + \vec{g} \cdot \mathbf{M} \right) = 0$$

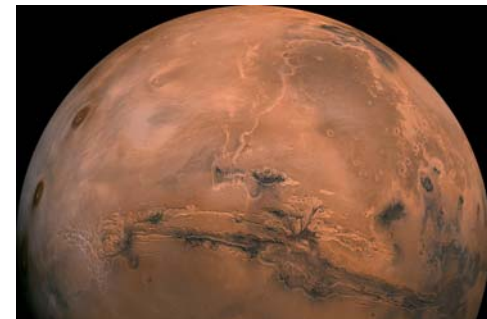
Olivier Roche, *LMV, Clermont*

PhD. Antoine Lucas

PhD. Clément Hibert

PhD. Laurent Moretti

Post-doc Marica Pelanti

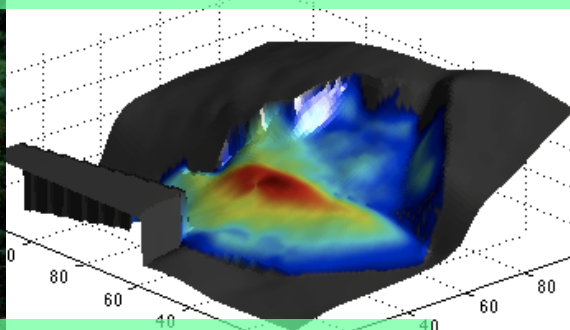


Philippe Labazuy, Karim Kelfoun, *LMV, Clermont*

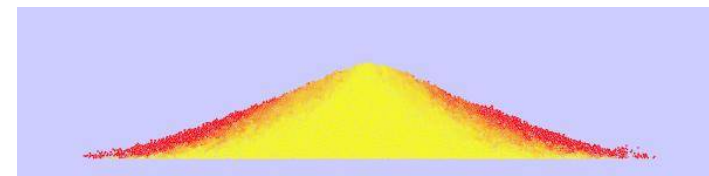
Claudio Scavia, Marina Pirulli, *Politecnico, Turin*

Nicolas Mangold, *IDES-Orsay*

Daniel Mège, *LPG, Nantes*



Georges Boudon, Anne Le Friant, *IPGP*

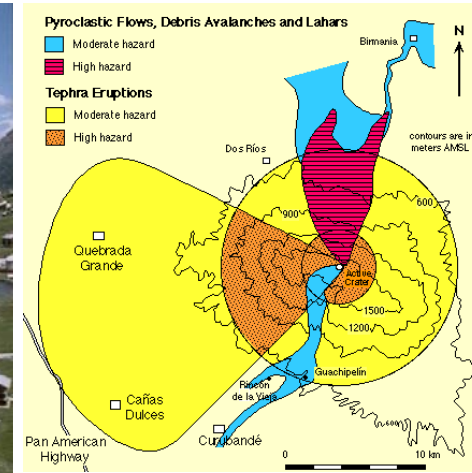


Dmitri Volfson, Lev Tsimring, *INLS, UC San Diego*

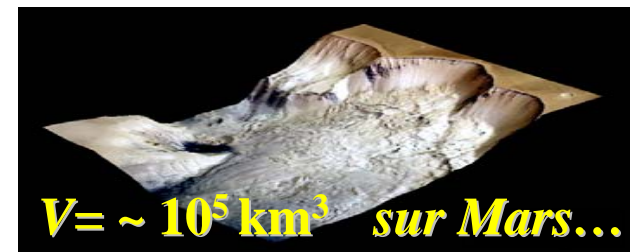
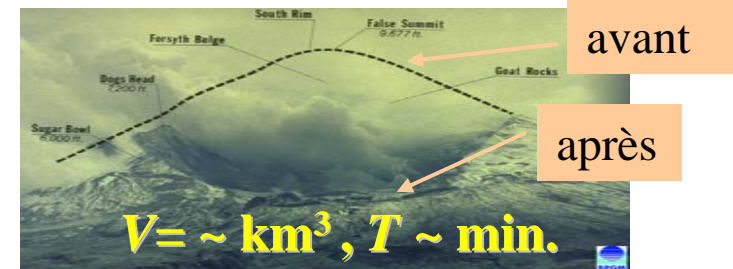
Modélisation des glissements de terrain

Motivation

- Processus d'érosion à la surface de la Terre et des planètes telluriques
- Evaluation des risques en milieu volcanique, sismique, montagneux, côtier ...



Echelle de volume : $m^3 \rightarrow 10^5 km^3$
 Echelle de temps : seconde \rightarrow année
 \neq Sources, \neq Topographies



Observation terrain,

Modélisation expérimentale, théorique et numérique

Ecoulements naturels

Matériaux hétérogènes

Peu de **données**: aire du **depôt**

Ecoulements granulaires de laboratoire

Mesures épaisseur et vitesse

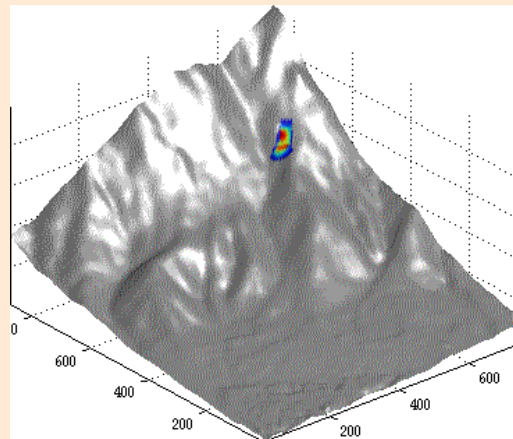
Mêmes processus physiques ?

km³



Montserrat 1997

Simulation numérique



cm³



Nathalie Thomas, IUSTI



Comprendre et quantifier les processus de mise en place

Approximation de couche mince sur topographie 2D

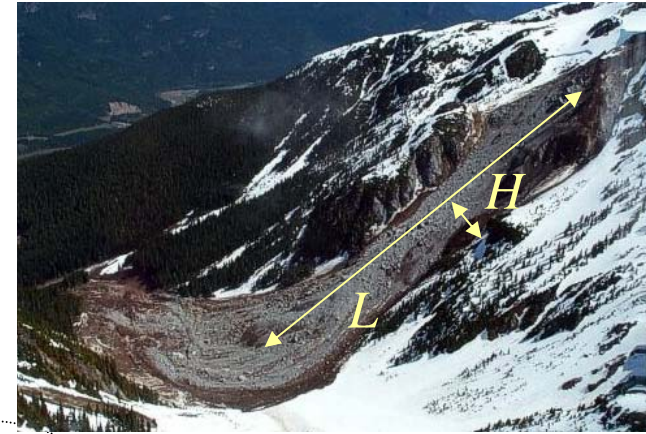
- **Topographie naturelle complexe**



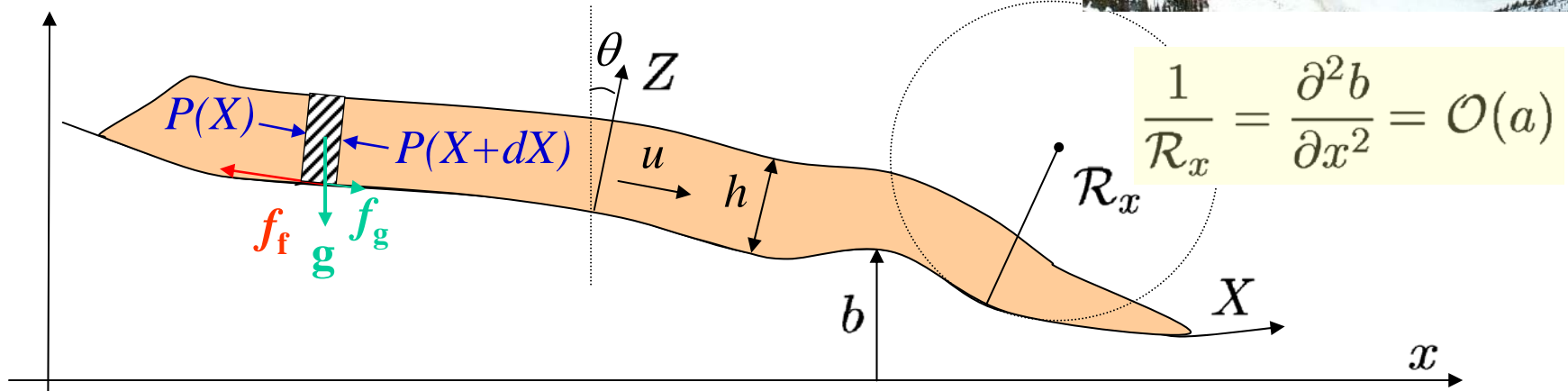
petit **rapport d'aspect**

Coût numérique élevé \Rightarrow

$$a = \frac{H}{L} \ll 1$$



- **Modèle de couche mince moyenné sur l'épaisseur**



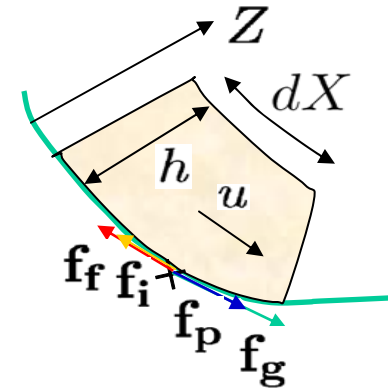
$$\underbrace{\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial X}}_{\text{inertie}} = \underbrace{\gamma_X g}_{\text{gravité}} - \underbrace{K \frac{\partial}{\partial X} (g \gamma_Z h)}_{\text{Gradient de pression}} - \underbrace{\mu \left(g \gamma_Z + \frac{u^2}{R_x} \right)}_{\text{Friction Coulomb}} \frac{u}{|u|}$$

Friction Coulomb : $\mu = \tan \delta$

$$\gamma_X = \sin \theta, \quad \gamma_Z = \cos \theta$$

Commentaires sur les équations de Savage and Hutter

- **Forces effectives** agissant sur le milieu moyenné



- **Transition solide/fluide:**

“seuil de Coulomb” pour le milieu moyen $\sigma_c = \mu \rho g \gamma_z h$

Forces “motrices” : $\mathcal{F} = f_g + f_p - f_i$

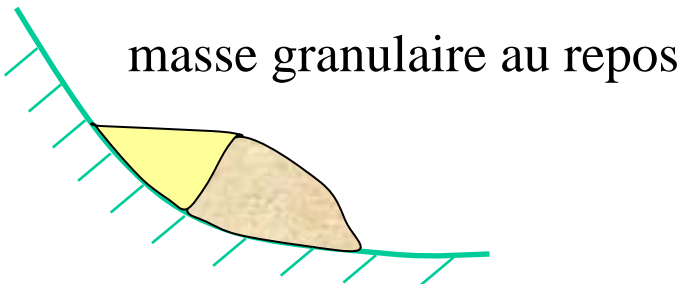
$$\begin{cases} |\mathcal{F}| > \sigma_c, & f_f = -\sigma_c \frac{u}{|u|} & \text{Comportement de type fluide} \\ |\mathcal{F}| < \sigma_c, & u = 0 & \text{Comportement de type solide} \end{cases}$$

Bouchut, 2004

Mangeney et al., 2003, 2007

- Etat d'équilibre au repos non préservé : **un terme supplémentaire doit être introduit**

Restaure une inégalité de dissipation d'énergie...



masse granulaire au repos

Mangeney et al., 2003



fluide au repos

Bouchut, Mangeney, Perthame, Vilotte, 2003

Approximation de couche mince sur topographie 3D

- Jusqu'à très récemment : **extension arbitraire des équations sur topographie 2D ...**

Repère lié à la pente

Encore utilisée [*Pitman et al., 2003*]

- **Développements sur topographies de + en + complexes**

Repère lié à la pente

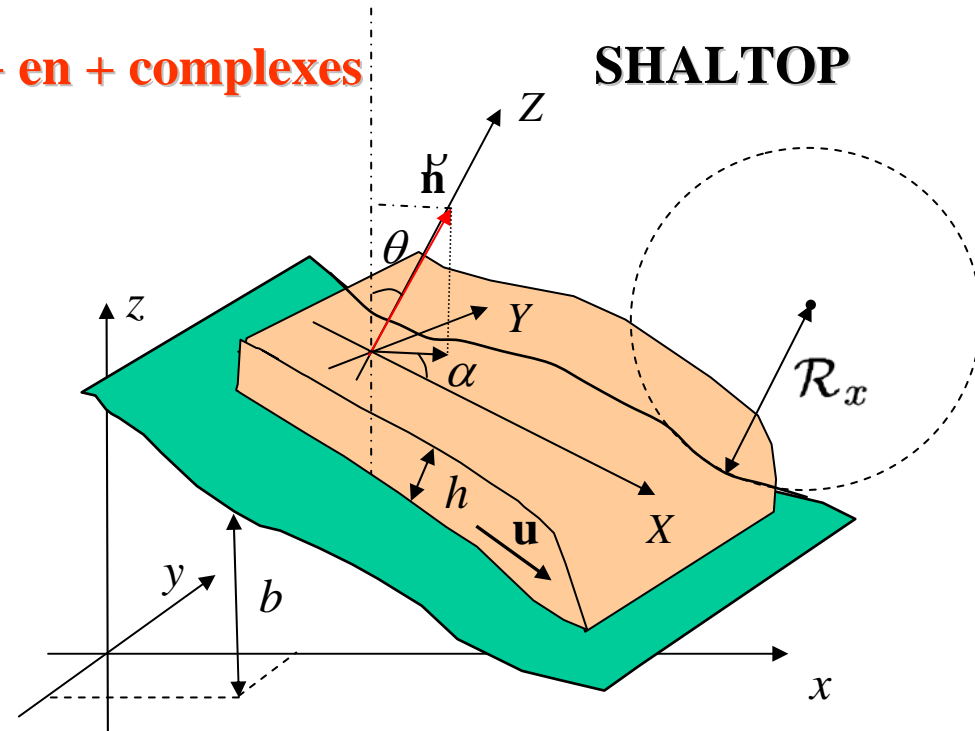
Hutter et collaborateurs...

- **Tenseur des courbures** complet

$$\mathcal{H} = c^3 \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 b}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 b}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 b}{\partial y^2} \end{pmatrix}$$

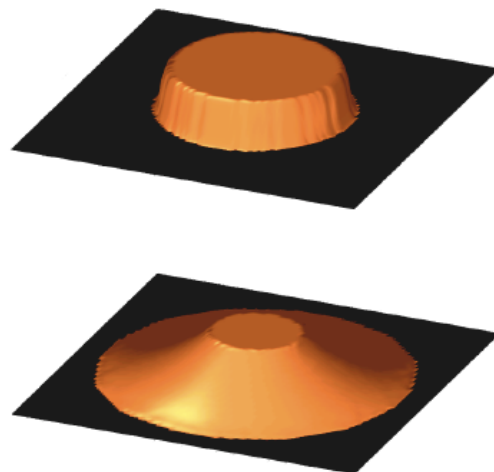
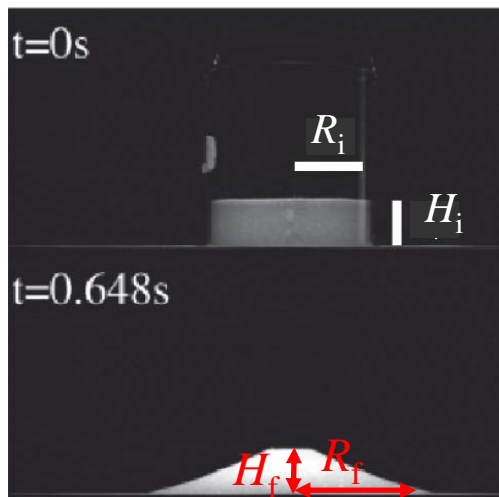
Forces « centrifuges »

Bouchut and Westdickenberg, 2004; Mangeney et al., 2007

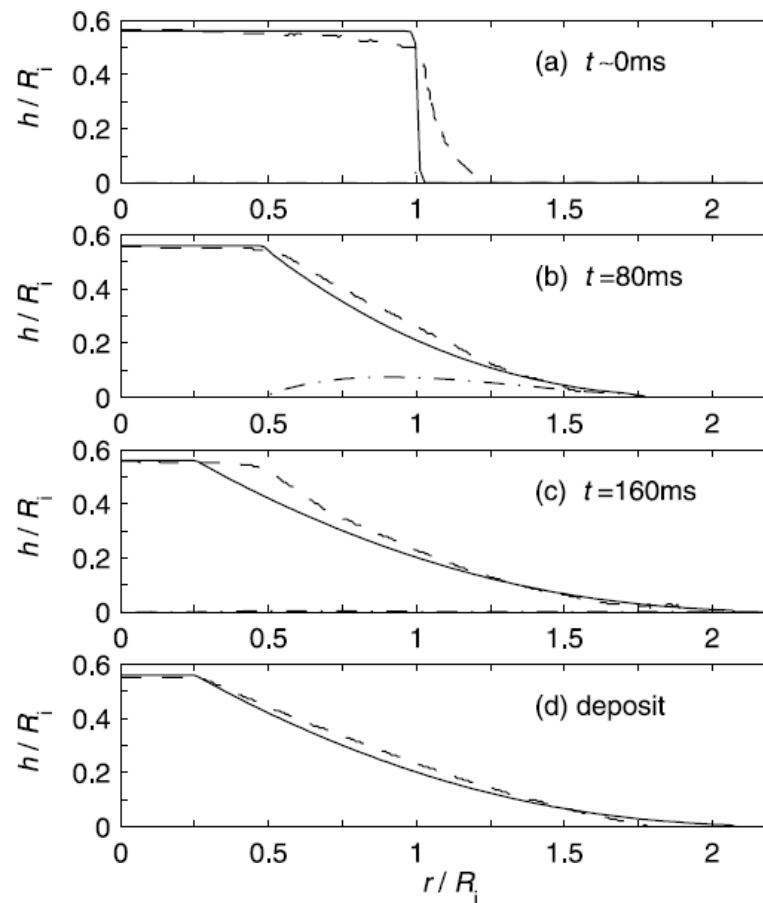


Limites de l'approximation de couche mince

Rapport d'aspect initial: $a = H_i / R_i$

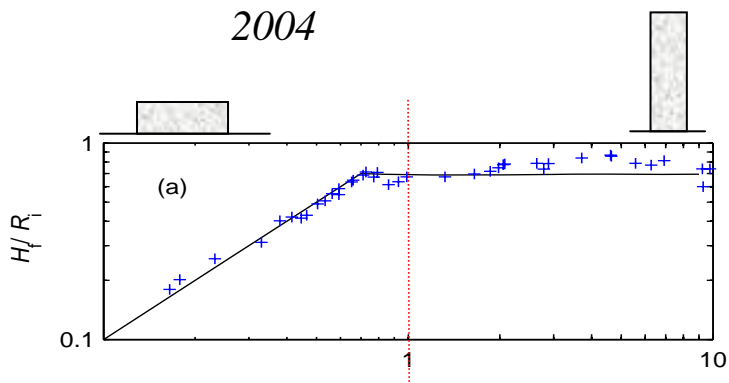


$a=0.8$



Lajeunesse, Mangeney, Vilotte, 2004

Mangeney-Castelnau et al., 2005



Coefficient de friction constant

Bon accord simulation/expériences d'étalement de colonnes granulaires
si $a < 1$ généralement le cas pour les **glissements naturels**

Comparaison avec simulations aux éléments discrets

Limites de l'approximation de couche mince

- **Effets non hydrostatiques** importants quand $a \nearrow$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = g + \cancel{\frac{dw}{dt}} \longrightarrow \frac{dw}{dt} \sim 20\% g \quad \text{for } a = 0.9$$



Mangeney et al., 2006

- **Nouveaux développements asymptotiques** incluant l'**accélération verticale**
- **Description de la transition statique/mobile** dans les milieux granulaires



Modèles proposés dans la littérature: équation pour l'énergie non cohérente !

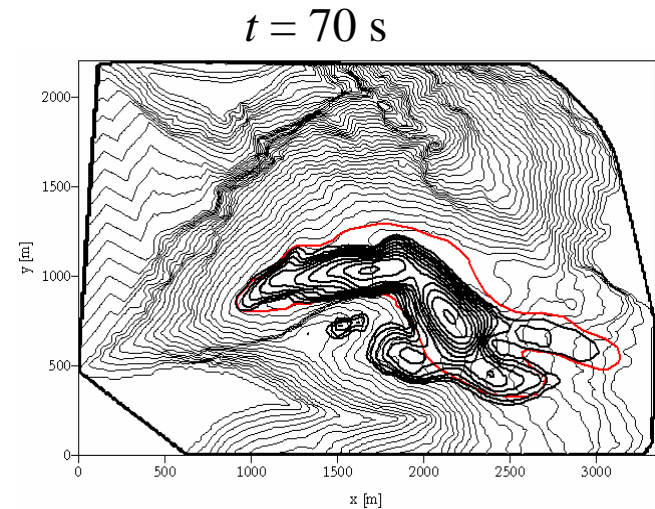
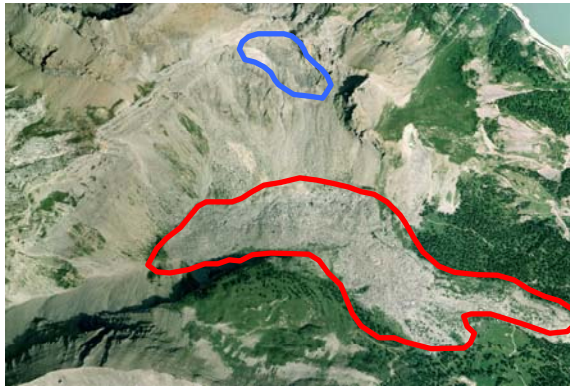
Bouchut, Fernandez-Nieto, Mangeney, and Lagrée, 2008...

Simulation des écoulements naturels

Simulation des **dépôts observés** (Suisse)

avec modèle de couche mince incluant friction de Coulomb:

$\mu = \tan \delta$: **description empirique** de la **dissipation moyenne**



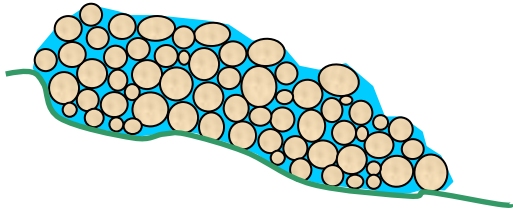
Friction utilisée dans le modèle : $\delta = 17^\circ$

Angle de friction petit comparé aux angles de friction des matériaux naturels !

$$\theta_r \sim 35^\circ$$

Origine de la grande mobilité des écoulements naturels ??

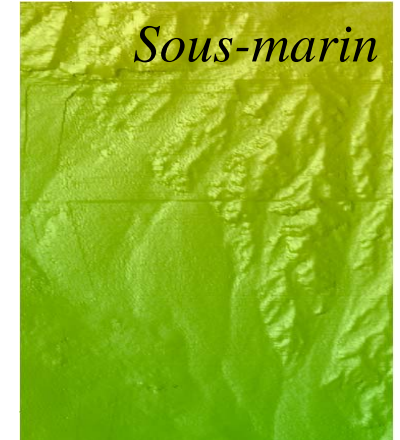
Différents processus physiques



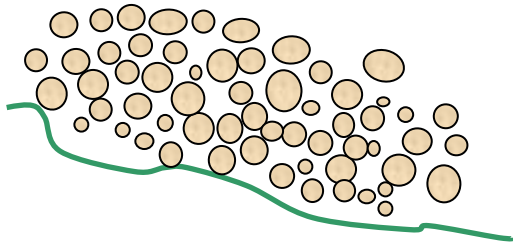
Phase fluide



Islande



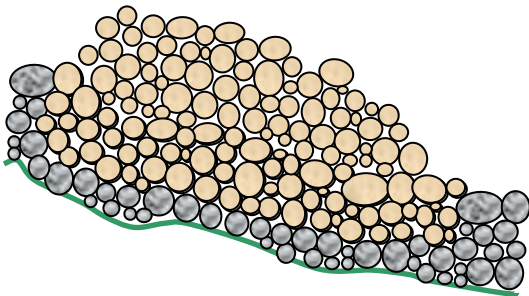
Sous-marin



Fluidisation



Lascar, Chili



Erosion



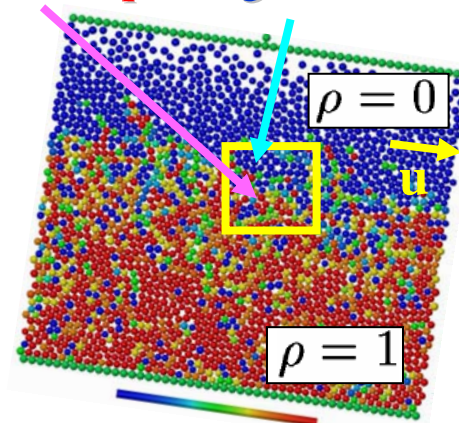
Canada

Modèle de fluidisation partielle



Ecoulements pyroclastiques, volcan Lascar, Chili

grains statiques grains en écoulement



Simulation par éléments discrets

Loi de comportement valide pour les grains statiques et les grains mobiles ??

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^f + \sigma_{ij}^s$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{ij}^f \\ \sigma_{ij}^s \end{array} \right.$$

- grains en écoulement

- grains statiques

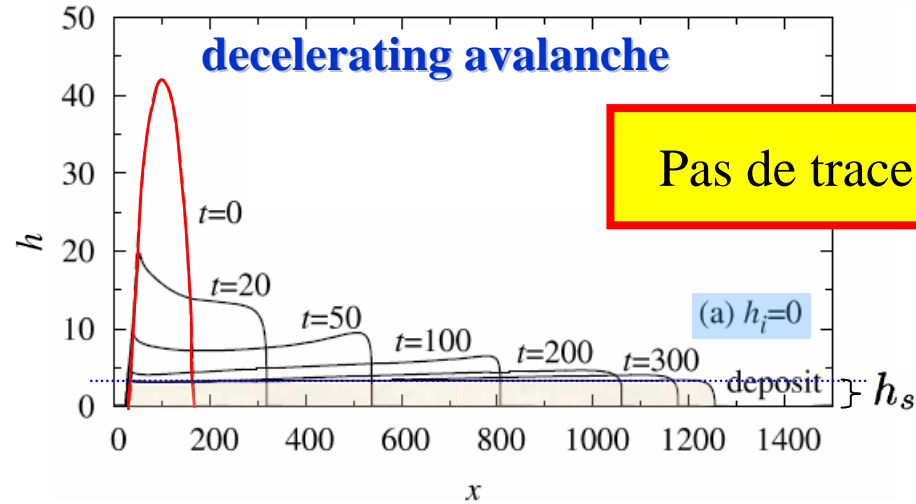
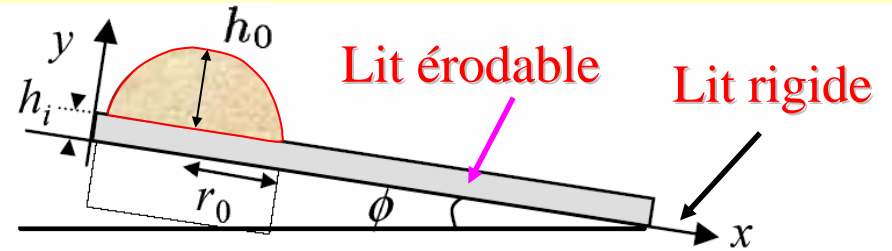
$$\sigma_{xy}^f = q(\rho) \sigma_{xy}$$

Paramètre ρ caractérise l'« état » de la matière granulaire $\rho = \frac{\Sigma \text{ contacts statiques}}{\Sigma \text{ contacts}}$

Modélisation des effets d'érosion

- Simulation numérique 2D

Mangeney et al., 2007



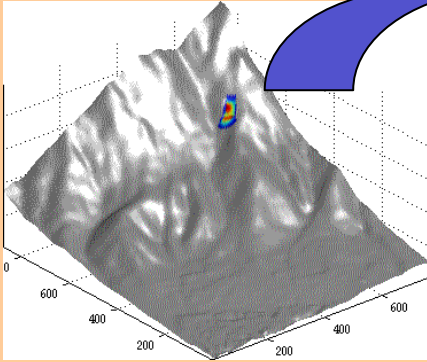
Données sur la dynamique !?!



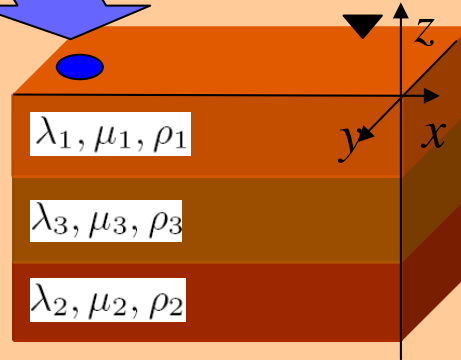
Simulation des instabilités et des ondes générées

Problème direct

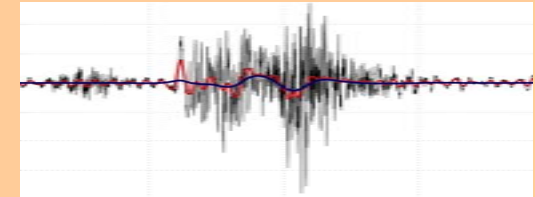
Simulation glissement



Simulation propagation des ondes sismiques



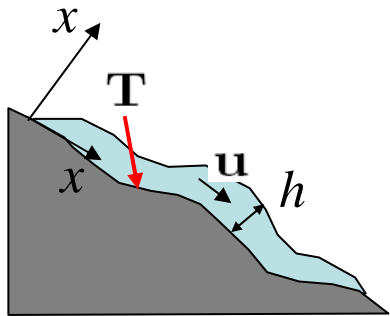
Comparison avec observations



Mangeney et al., 2005, 2007

Favreau et al., 2010

Champs de contrainte appliqué sur le sol

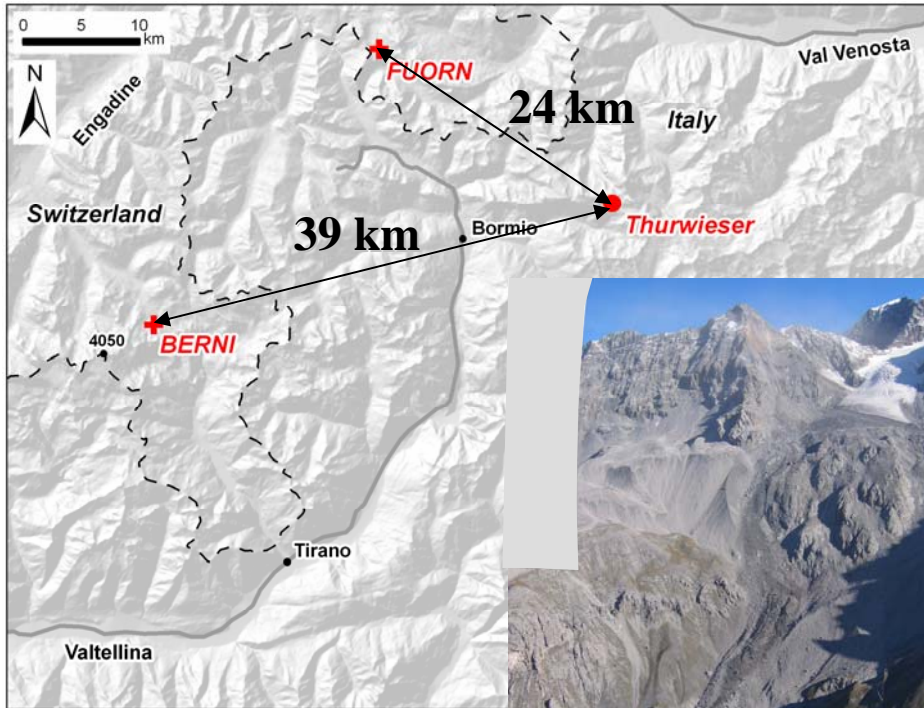


$$\mathbf{T} = \rho g h \left(\cos \theta + \frac{\mathbf{u}_h^t \mathcal{H} \mathbf{u}_h}{g \cos^2 \theta} \right) \left(\mu \frac{u_X}{\|\mathbf{u}\|}, \mu \frac{u_Y}{\|\mathbf{u}\|}, -1 \right)$$

↑
Effets de courbure

Simulation du glissement de Thurweiser

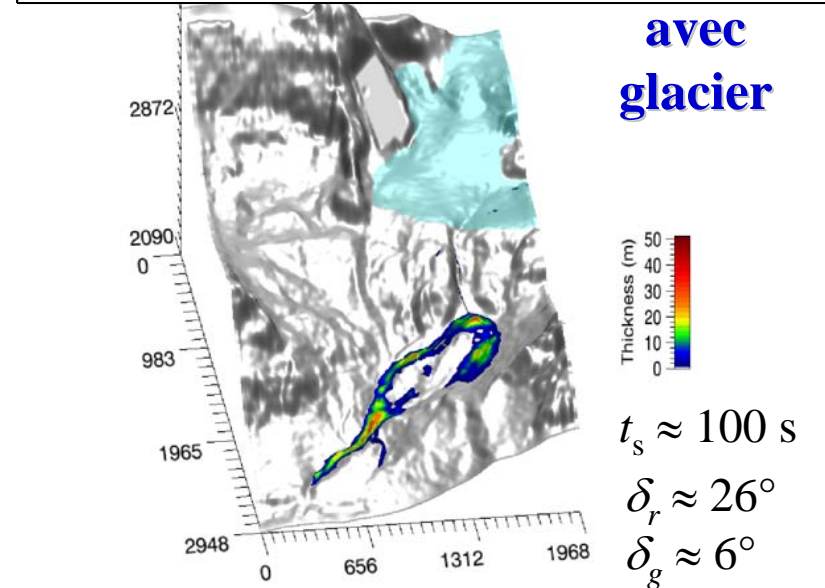
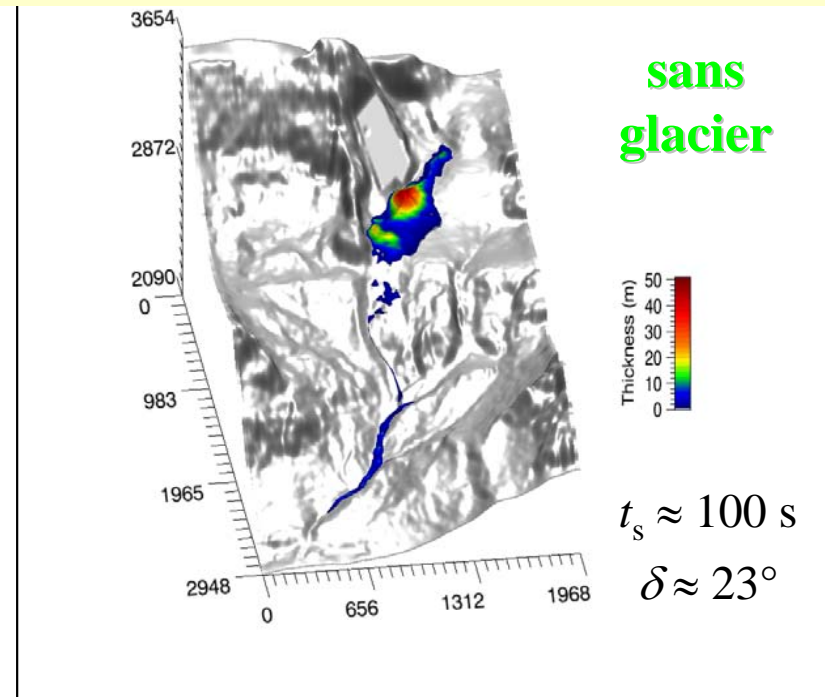
Avalanche rocheuse Thurwieser, Italy
Septembre 2004



$$V = 2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$$

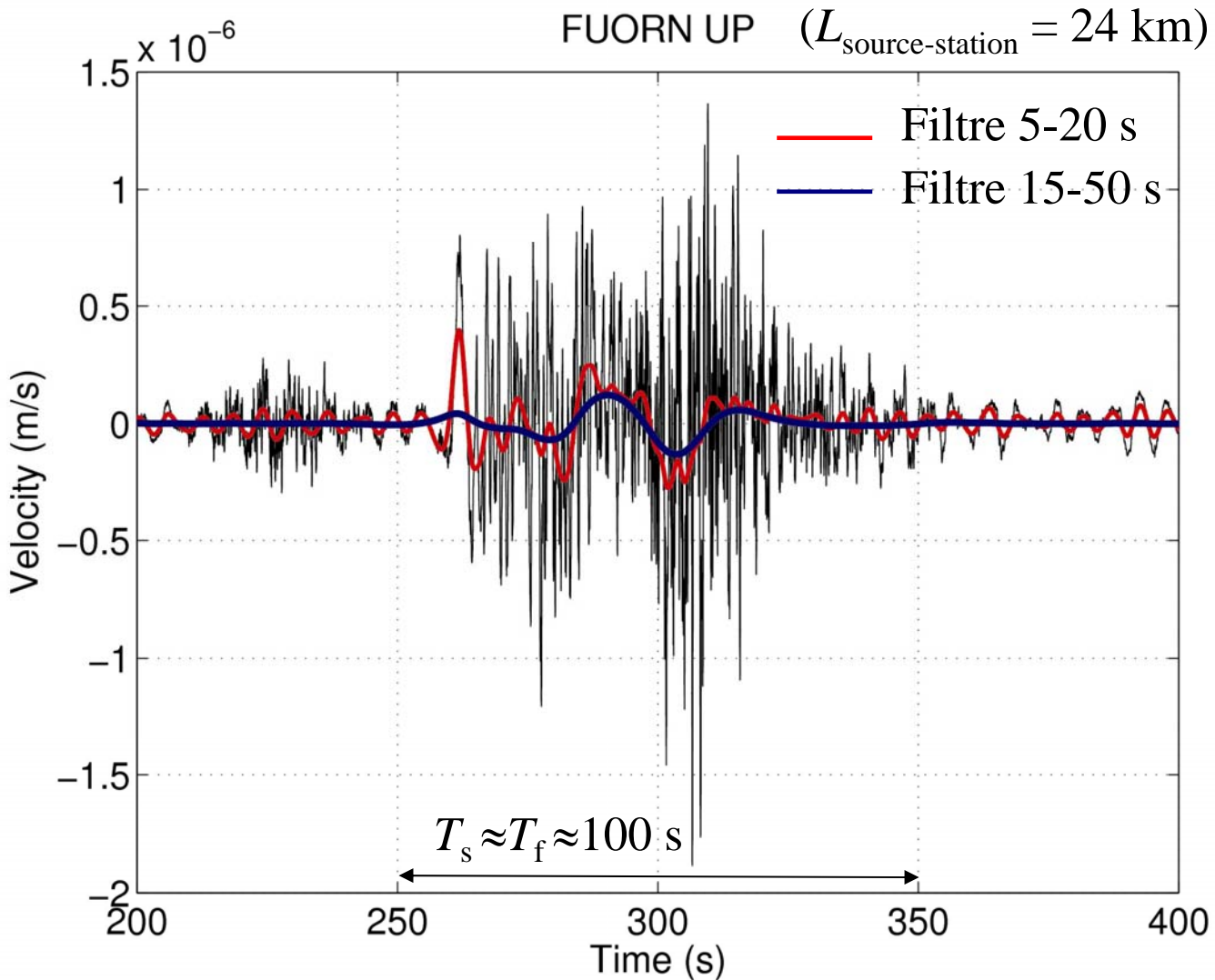
$$R_f = 2.9 \text{ km}$$

$$T_f \approx 90 \text{ s}$$

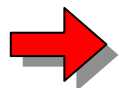


Sosio et al., 2008, Favreau et al., 2010

STS2 Data



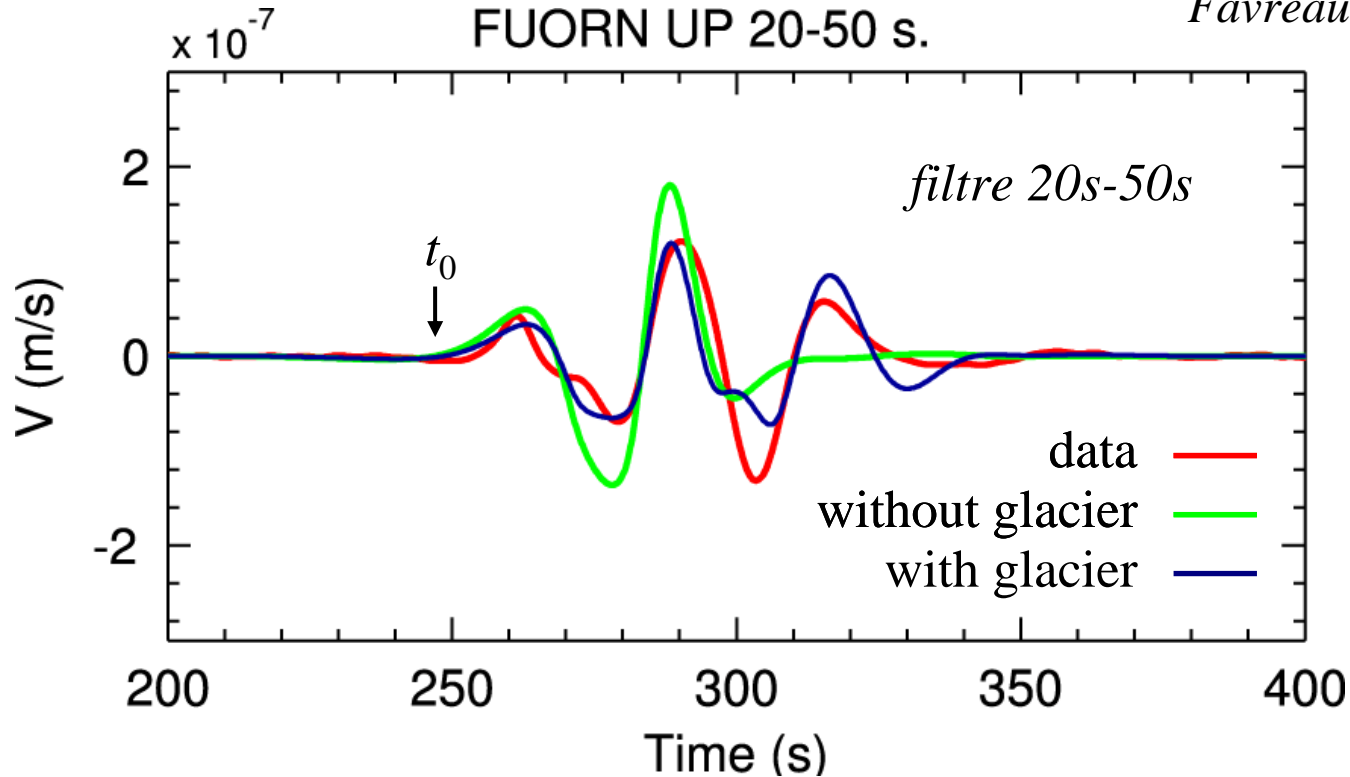
Pour $T > 15 \text{ s}$, $\lambda = cT \approx 45 \text{ km}$



Effets de **topographie** et de **complexité du milieu** traversé **faibles**

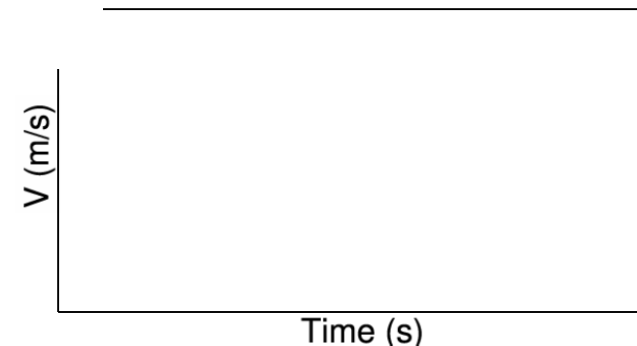
Simulation des ondes sismiques générées

Favreau et al., 2010



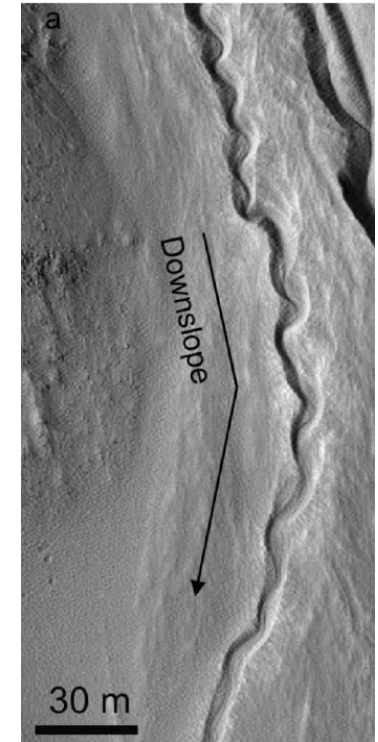
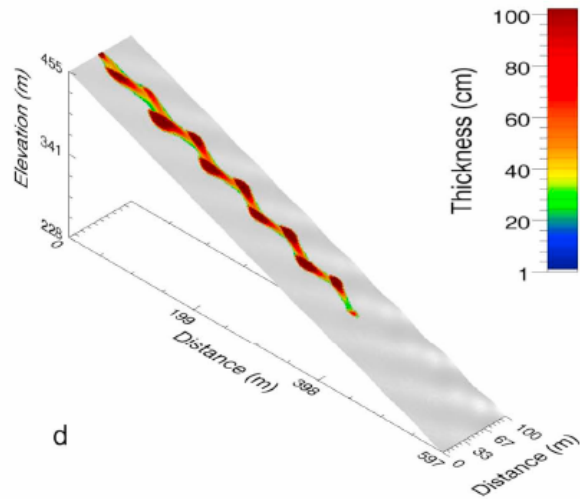
- Le scénario avec glacier reproduit mieux la forme d'onde verticale
⇒ Première estimation des **paramètres rhéologiques**

- **Effets** de la **topographie** sur la dynamique de l'écoulement → impact important sur le signal sismique généré



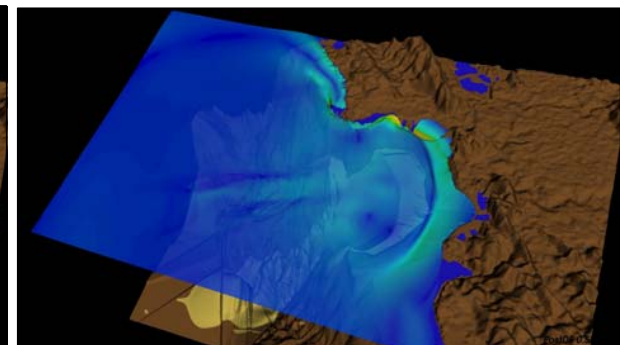
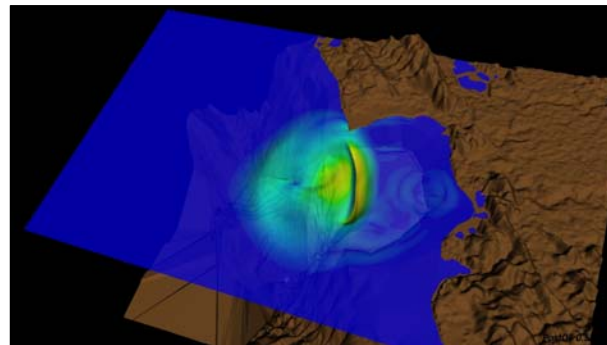
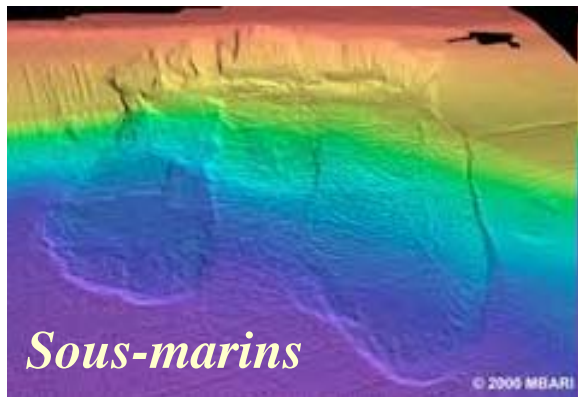
Nouveaux problèmes : milieux bi-phasés, ...

Écoulements de débris (granulaire/fluide)



Mangold et al., 2010; Pelanti, Bouchut, Mangeney, 2008, 2010

Glissements de terrain sous-marins et tsunamis générés



Fernandez-Nieto, Bouchut et al., 2008; Fernandez-Nieto, Mangeney et al., 2010

Conclusion



Modèles numériques: **outil empirique** \Rightarrow **mobilité** des écoulements naturels



calibré sur évènements passés

prédiction dans le même contexte géologique



Premiers outils opérationnels pour l'évaluation des risques



- Des données sur la dynamique : **sismologie**
- Plus de **physique** dans les modèles: mélange solide/fluide, érosion/déposition ...

De nouvelles équations à résoudre.....