

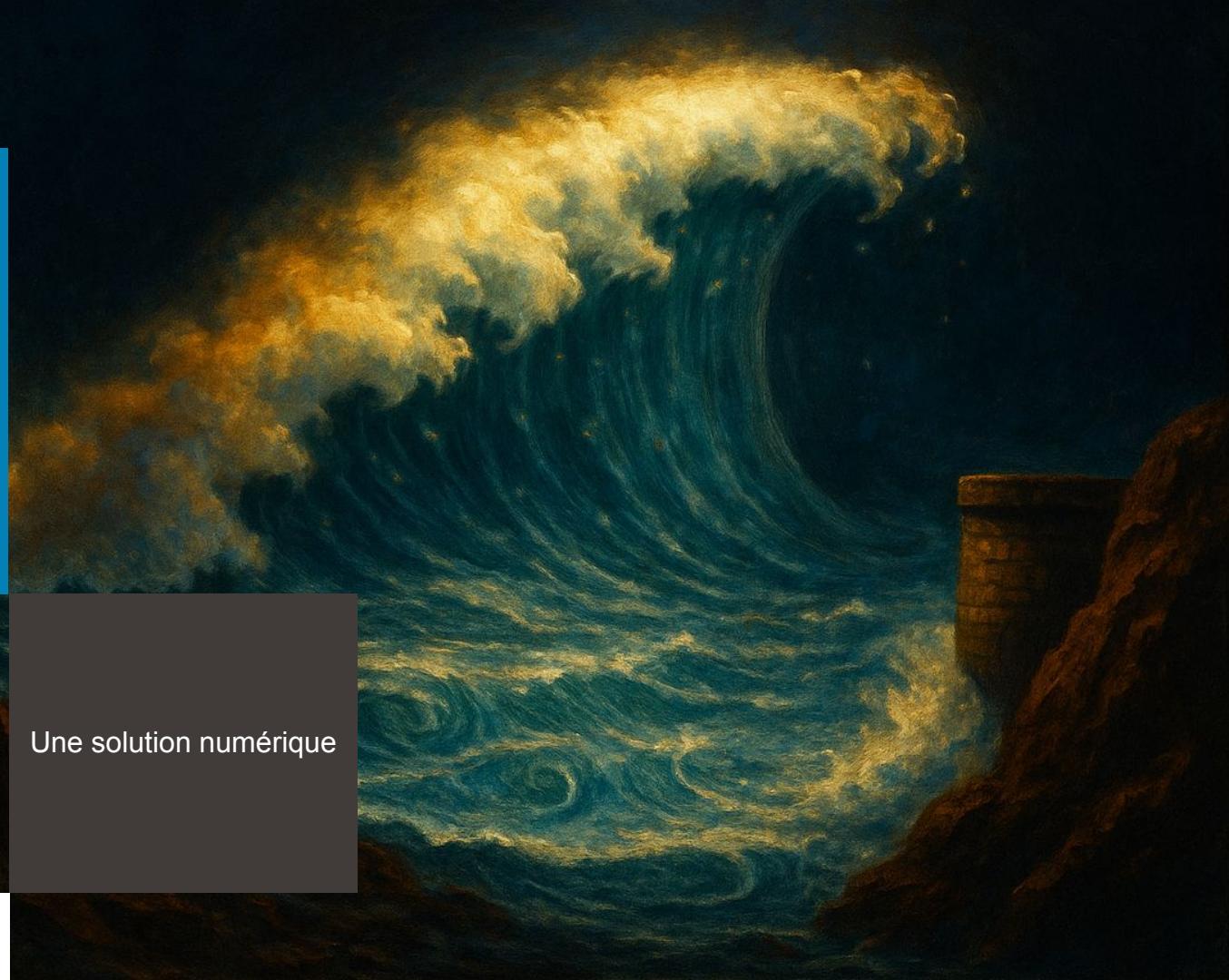
# Vagues d'impulsion dues aux avalanches



LHE  
Environmental  
Hydraulics  
Laboratory

Axel Giboulot

Une solution numérique





# Contexte

## Vagues d'impulsion lacustres

- Barrage du Vajont, 1959 : un glissement de terrain provoque une vague destructrice
- Total de 1'900 morts en aval
- Les avalanches en sont-elles capables ?



# Trützisee

- Lac de 4,5 ha vidé par une avalanche en 1999
- Qu'en est-il des grands lacs ?



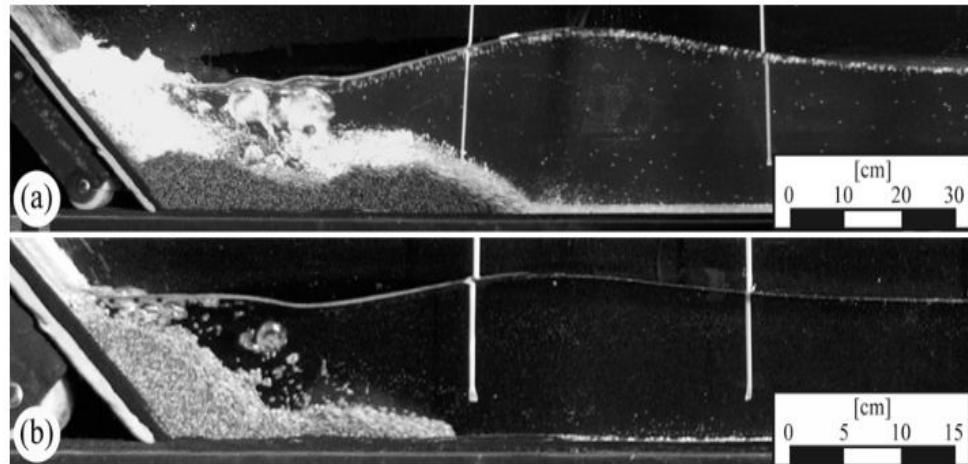
# Cas d'étude : Trift

- ~100ha (1km<sup>2</sup>) pour 180m de haut
- Comment calculer l'ampleur de la vague ?
- Comment gérer ce risque saisonnier ?
- Baisser le niveau (PHE) en hiver ?
  - Réduit l'offre des centrales hydroélectriques...

Alors que la demande est plus haute !

# Méthode du VAW (ETH)

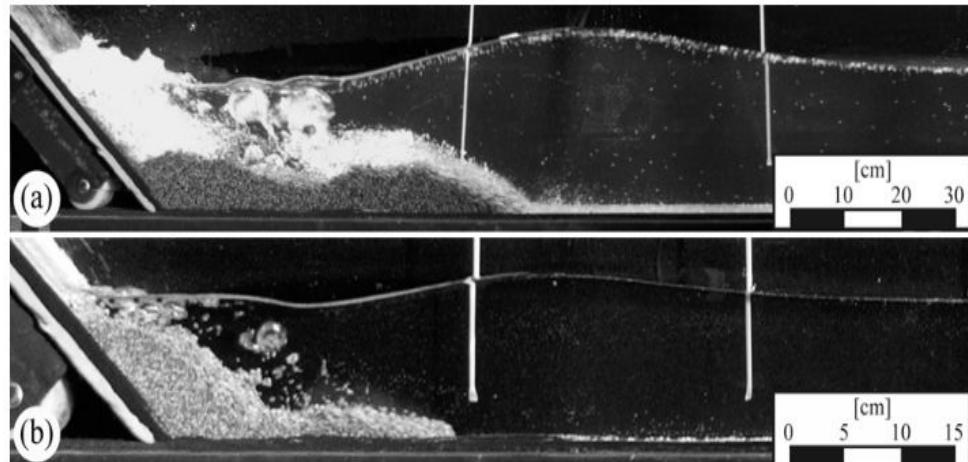
- Exemple à Trift : vague de ? mètres de haut
  - 1 mètre
  - 5 mètres
  - 20 mètres



# Méthode du VAW (ETH)

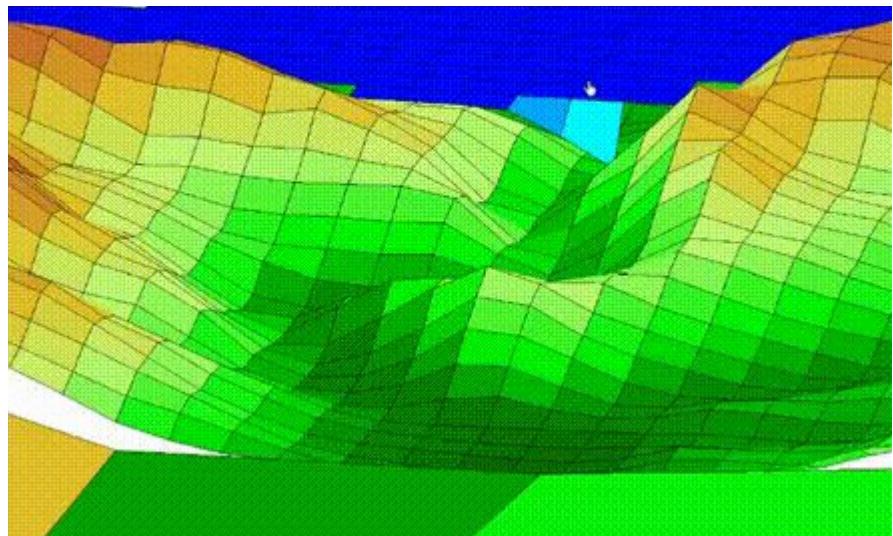
- Exemple à Trift : vague de **20** mètres de haut
  - 1 mètre
  - 5 mètres
  - skull 20 mètres
- Nombre limité d'observations en labo
- La neige est particulière car légère ( $d \sim 0,3$ )
- La question persiste :

*"Comment estimer la hauteur de vague ?"*



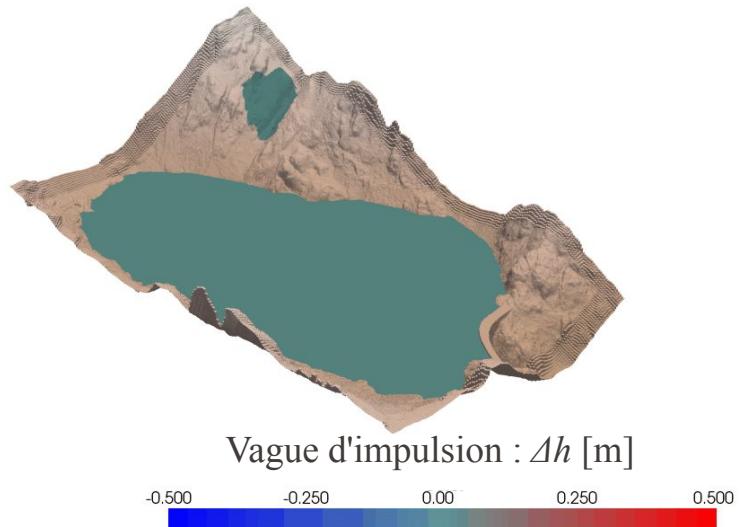
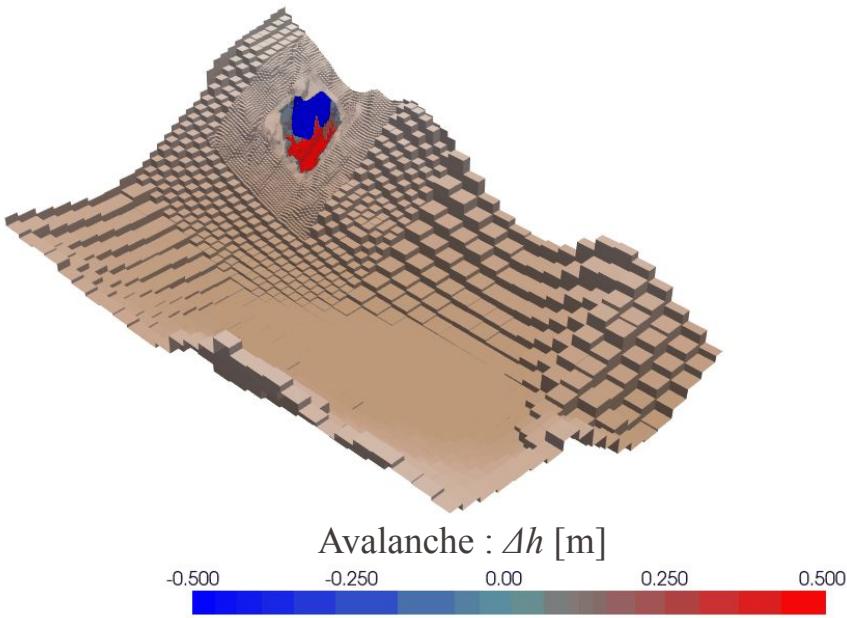
# Solutions numériques existantes

Avalanches et vagues+crues



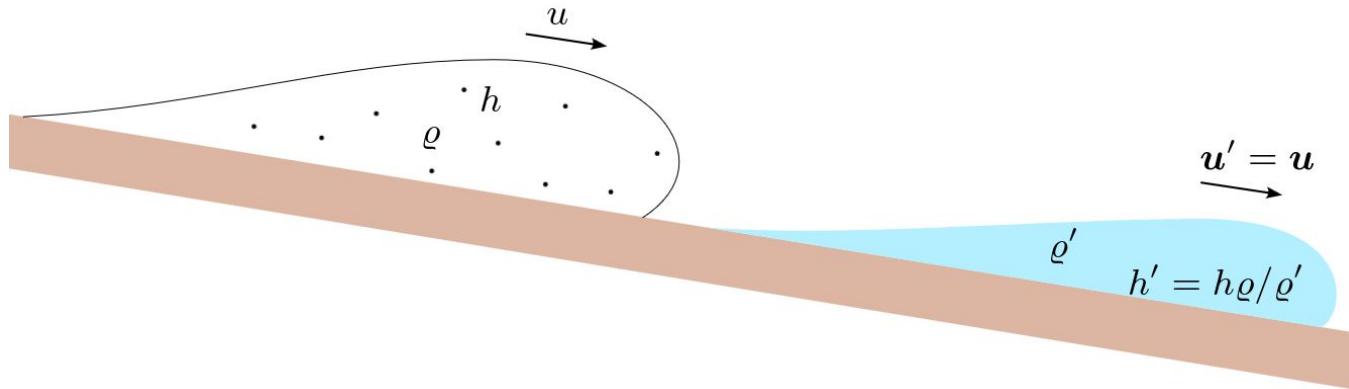
# Stratégie

1. Simuler l'avalanche
2. Imposer l'avalanche dans le modèle de vagues  
? Comment transformer l'avalanche en eau ?



# Transformation (neige → eau) instantanée

- Hypothèses pessimistes :
  - Transfert complet de la quantité de mouvement
  - Transfer complet de la masse
- Neige plus lourde => plus loin, plus vite, plus fort
  - Exemple :  $\varrho_{\text{neige}} \sim 500 \text{ kg/m}^3$  ( $\varrho_{\text{eau}} = 2 \varrho_{\text{neige}}$ ) donc  $h_{\text{eau}} = h_{\text{neige}}/2$

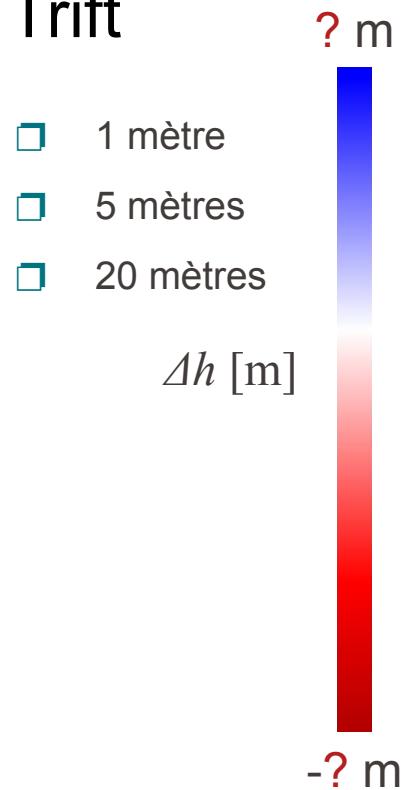


$$\begin{pmatrix} m \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m' \\ q' \end{pmatrix}$$

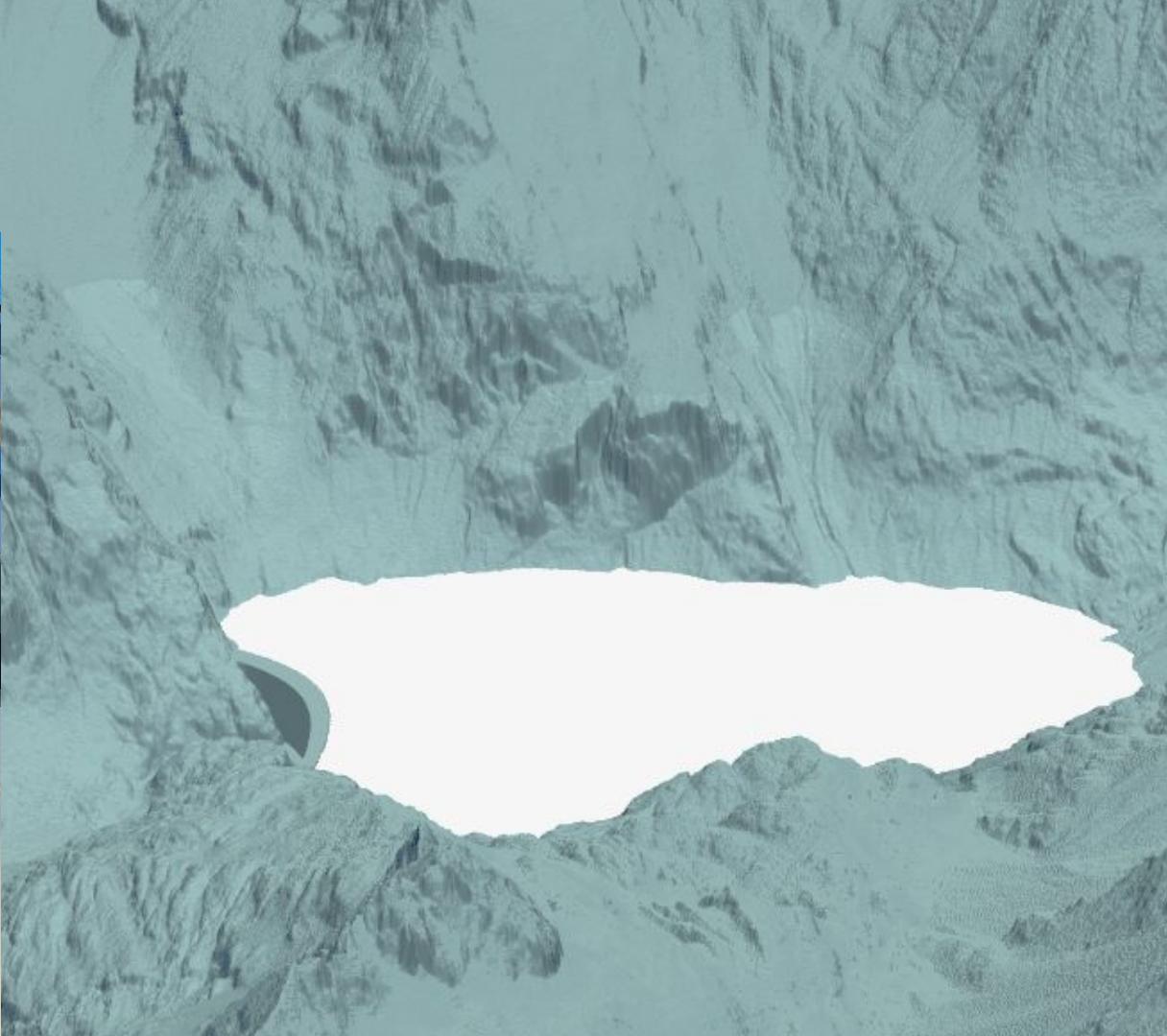
$$\Rightarrow \begin{pmatrix} \varrho h \\ \varrho h u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varrho' h' \\ \varrho' h' u' \end{pmatrix}$$

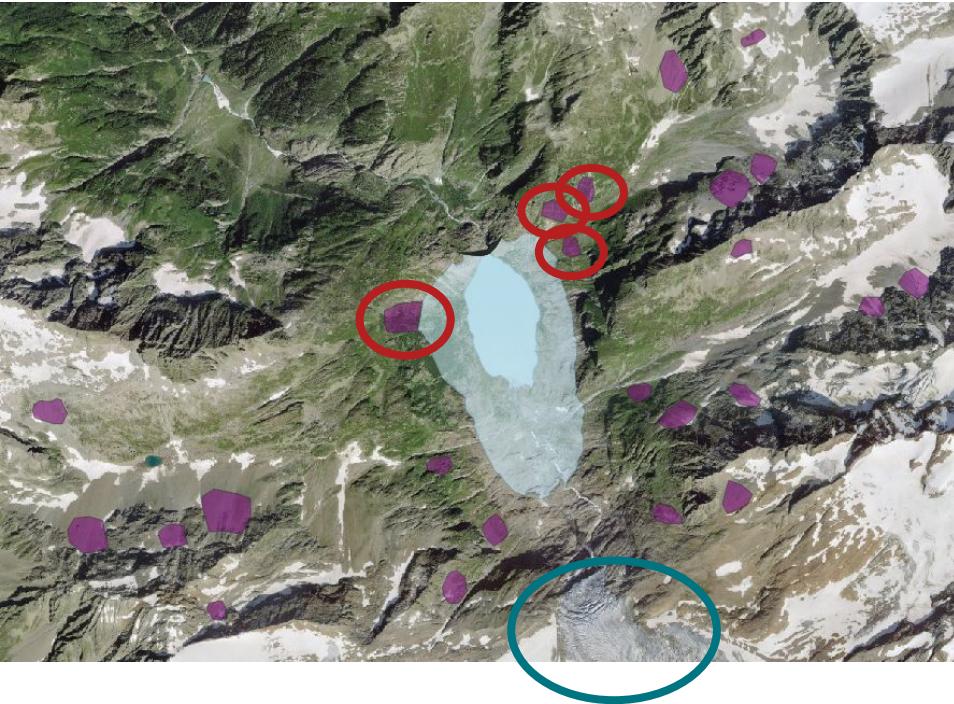
$$\Rightarrow \begin{pmatrix} h \varrho / \varrho' \\ u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h' \\ u' \end{pmatrix}$$

# Avalanche critique à Trift



# Vagues d'impulsion dues aux avalanches





Panneaux de  
départ des  
avalanches

# Avalanches critiques

- Les avalanches arrivant près du barrage sont déterminantes
- Les avalanches trop lointaines laissent le temps à leur vague de se diffuser
  - À l'exception des chutes de sérac dont le volume est d'un ordre de grandeur supérieur (très épais)

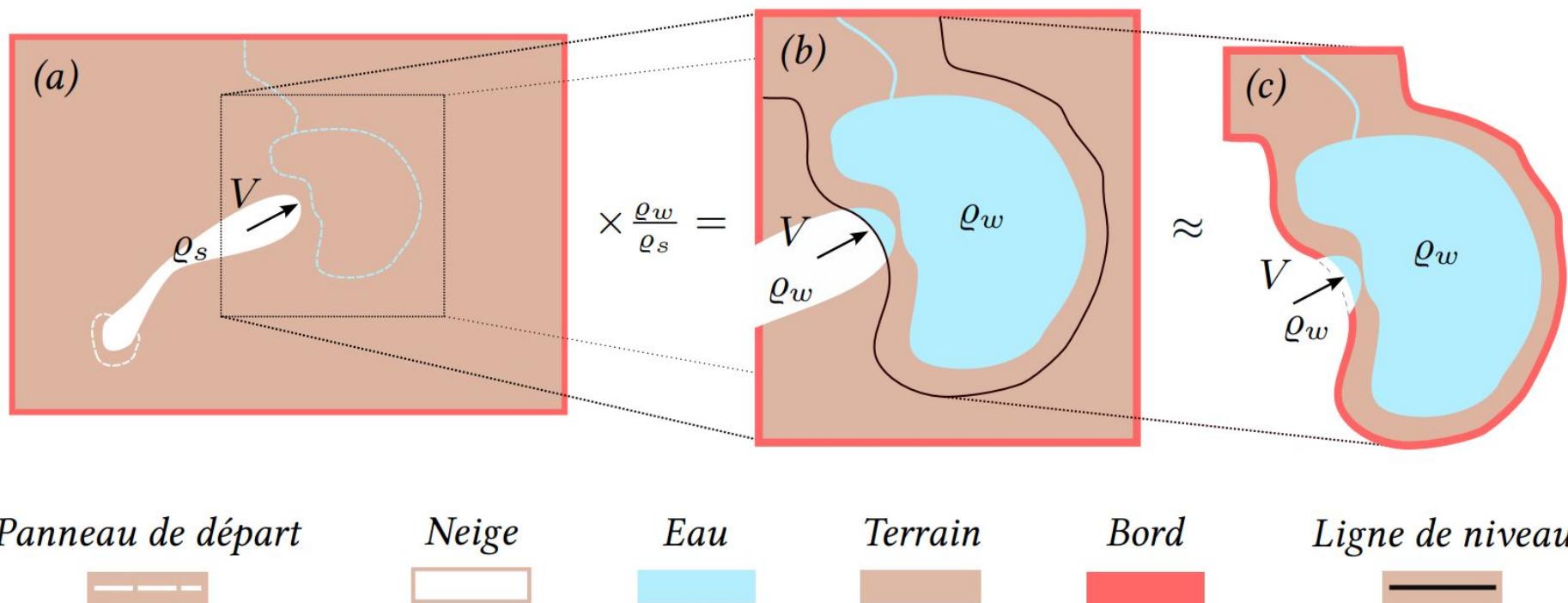
# Conclusion

- Jonction des modèles numériques proposée
  - vagues réaliste de 5 mètres de haut (contre 20 mètres selon méthode VAW)
  - hypothèses pessimistes
- Les outils disponibles permettent de **fournir un outil tout-en-un**
  - Simple d'utilisation (interface en Python)
  - Performant (Fortran)
  - Automatisé (avalanche et lac arbitraires)

# Merci à tous !

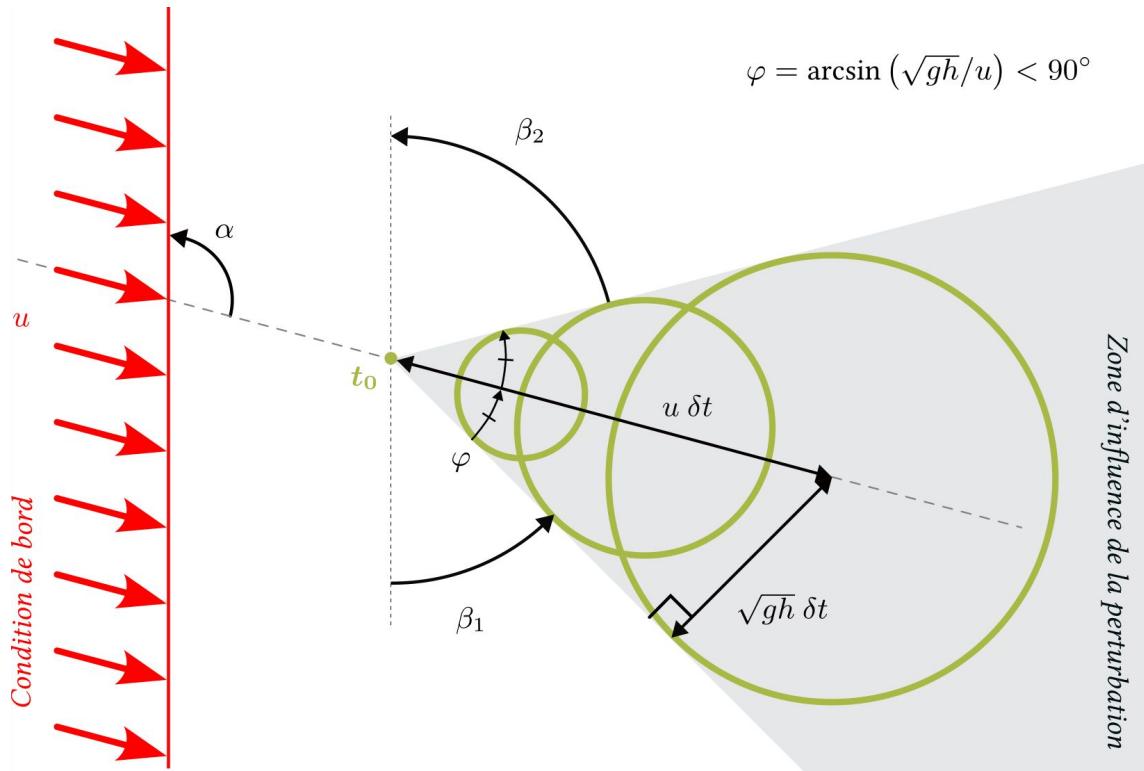
- Merci à Christophe Ancey et à Stéphane Terrier pour m'avoir offert l'occasion de travailler sur ce projet.
- Merci aux membres du LHE pour leur sympathie et leur support !
- Merci à mes collègues de bureau !

# Schéma de jonction numérique



# Condition de bord et conflits d'information

16



# Équations de Saint-Venant

## Avec bathymétrie et frottement

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (h \bar{\mathbf{u}}) = 0$$

$$\frac{\partial h \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla \cdot (h \bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{u}}) = -gh \nabla(h+z) - \frac{\boldsymbol{\tau}}{\varrho}$$

$$\bar{\mathbf{u}} = (\bar{u}, \bar{v})$$

- $h$  est la hauteur d'écoulement
- $\bar{\mathbf{u}}$  est la vitesse horizontale
- $z$  est la bathymétrie
- $\boldsymbol{\tau}$  est la contrainte au fond

(vecteurs en gras)

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \varrho g h \frac{\bar{\mathbf{u}}}{|\bar{\mathbf{u}}|} + \varrho \bar{\mathbf{u}} |\bar{\mathbf{u}}| \frac{\boldsymbol{\xi}}{\xi}$$

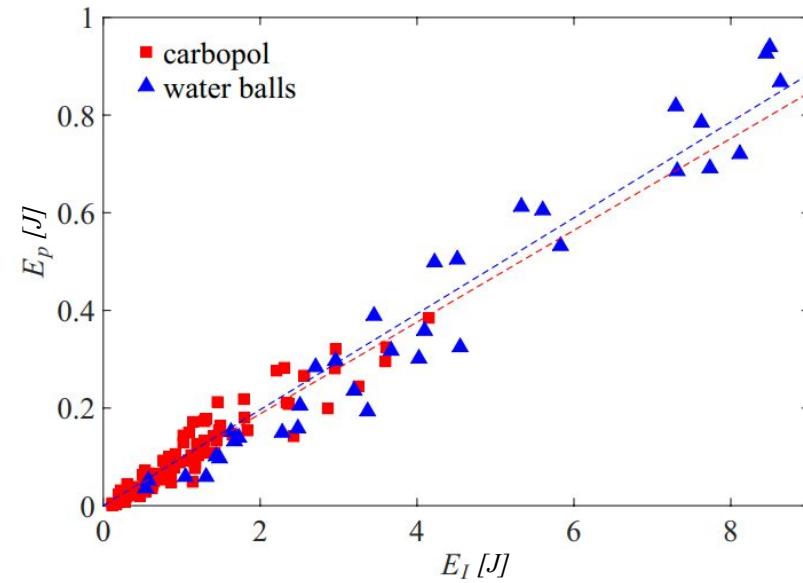
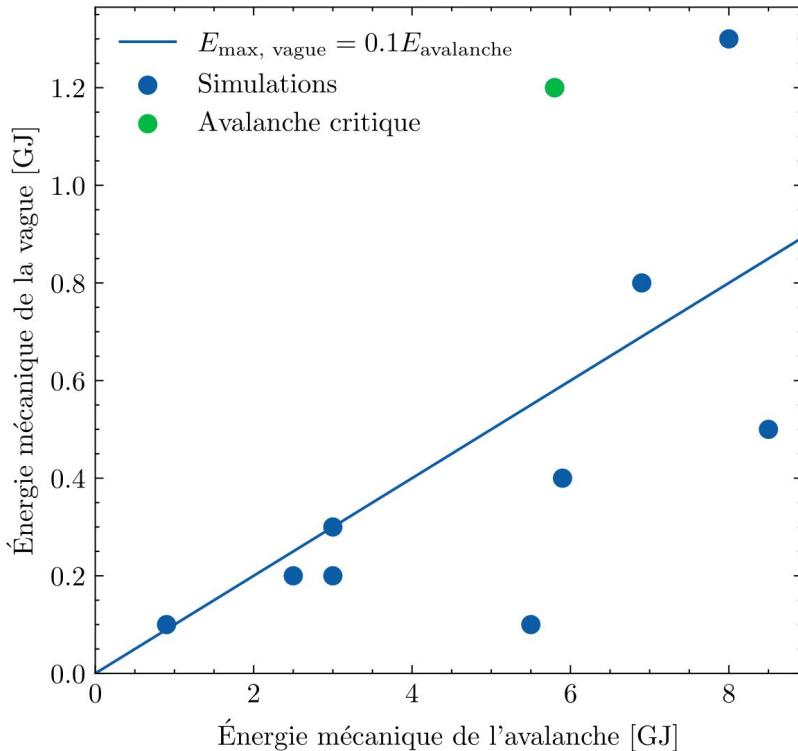
Avalanche

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{g}{K^2 h^{7/3}} h^2 \bar{\mathbf{u}} |\bar{\mathbf{u}}|$$

Vague

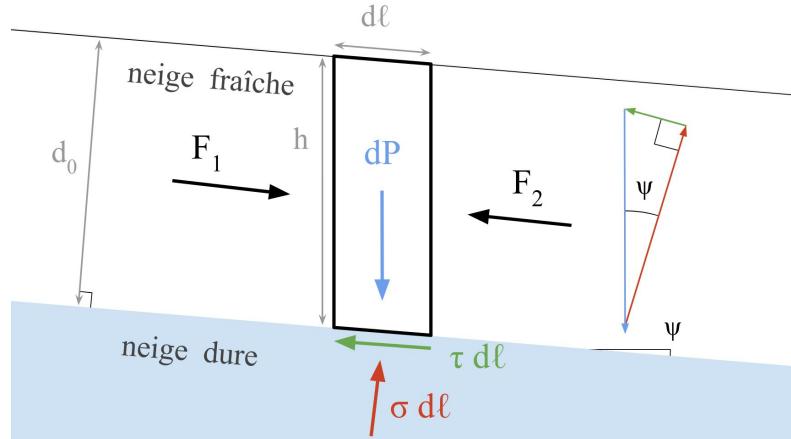
# Comparaison au données en laboratoire

Régression selon Z. Meng & C. Ancey (2019)



**Fig. 12** Variation in the wave's maximum potential energy  $E_p$  relative to the slide's kinetic energy  $E_I$

# Méthode VSG - pour les praticiens



- Épaisseur de neige initiale (LEM)
- Estimation de la vitesse (Voellmy)
- Période de retour parmi 30, 100 et **300** ans
- Estimation de la pression en cas de choc sur un obstacle

$$d_0 = h \cos \psi = \frac{c'}{\rho_{\text{neige}} g} \cdot \frac{1}{\sin \psi - \mu_s \cos \psi}$$

$d_0^*$

- $d_0$  est l'épaisseur de neige fraîche.
- $c'$  est la cohésion entre les deux couches.
- $\psi$  est la pente.
- $\mu_s$  est le coefficient de frottement statique.
- $\rho_{\text{neige}}$  est la masse volumique de la neige.