



# Modélisation numérique 3D pour l'étude des laves torrentielles : un outil de diagnostic et de validation de solutions pour la protection des zones habitées

JDHU 2018

8èmes Journées Doctorales en Hydrologie Urbaines  
7-9 novembre 2018 - Paris



3D EAU



**Nicolas SCHAE<sup>1,2</sup>, Damien KUSS<sup>3</sup>, Yann QUEFFELEAN<sup>3</sup>, José VAZQUEZ<sup>2</sup>,  
Matthieu DUFRESNE<sup>1</sup>, Jonathan WERTEL<sup>1</sup>, Gilles ISENMANN<sup>2</sup>**

1 : 3D EAU, 21 rue Jacobi Netter, 67200 STRASBOURG, France

2 : LABORATOIRE ICUBE, Département de Mécanique, 4 rue Boussingault, 67000 STRASBOURG, France

3 : ONF-RTM, 9 Quai Créqui, 38000 GRENOBLE, France

# Sommaire

---

**1** Contexte technique et scientifique

---

**2** Modélisation numérique

---

**3** Valorisations et perspectives

---

# Sommaire

---

**1** Contexte technique et scientifique

---

**2** Modélisation numérique

---

**3** Valorisations et perspectives

---

## Risque naturel

- 550 laves depuis 1978 en France (*Pavlova et al., 2014*)
- 21 M€ de dégâts à Belledonne en 2005 (*IRMA, 2007*)



Mont Granier, France, 2016

(RTM 38, ONF, 2017)



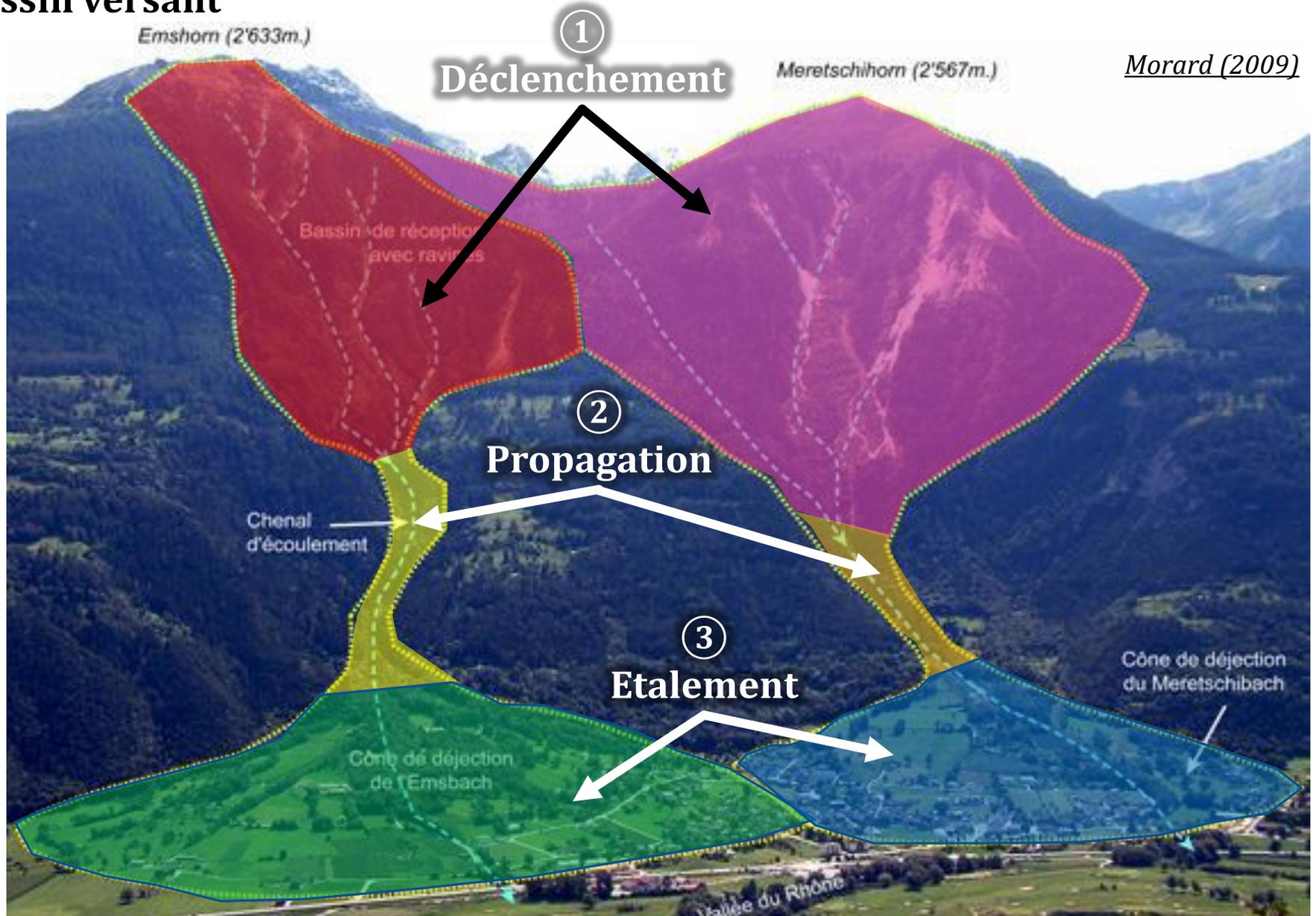
Chamoson, Suisse, 2018



Montecito, Etats-Unis, 2018

(CNN, 2018)

# Bassin versant



# Phénoménologie



*Zufferey (2016)*

- Institut WSL, Universités de Genève, de Durham
- *de Hass et al. (2018), Bennett et al. (2013), Franke et al. (2014), Walter et al. (2017)*

## Terminologie rhéologique

→ 3 classes de laves (*Ancey, 1999* ; *Cousot, 1996* ; *Ancey, 2007*)

### Comportement granulaire



*Bel (2017)*

### Comportement boueux

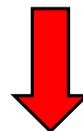


*Ancey (1999)*

### De type « lahar »

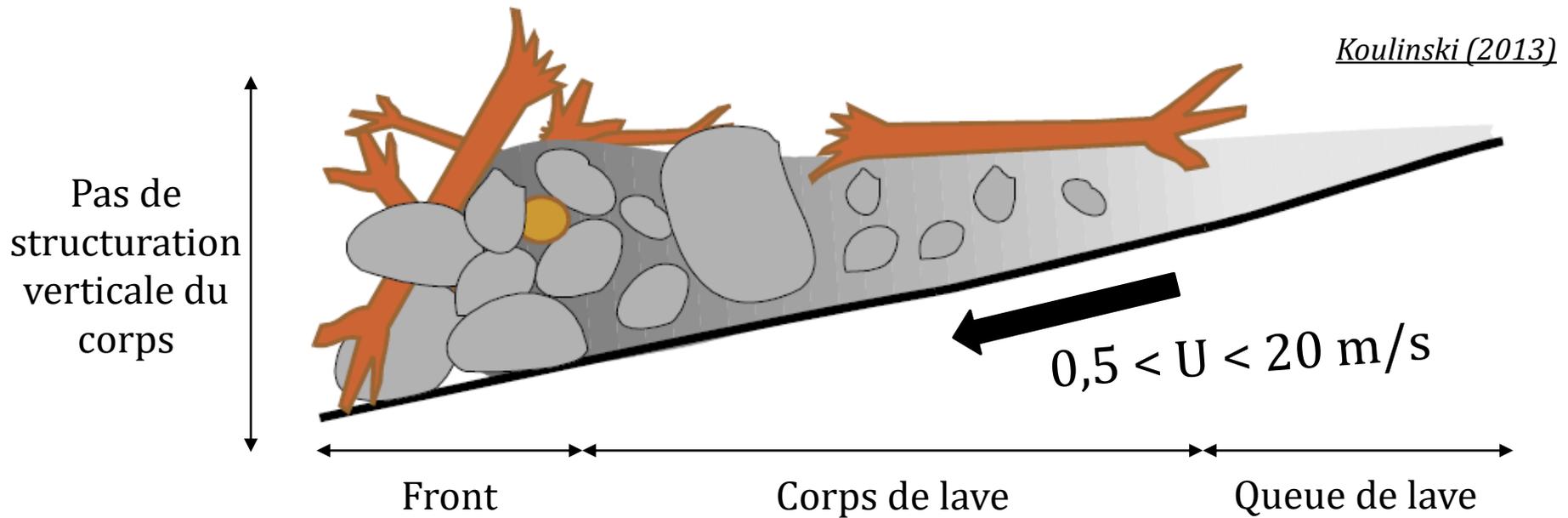
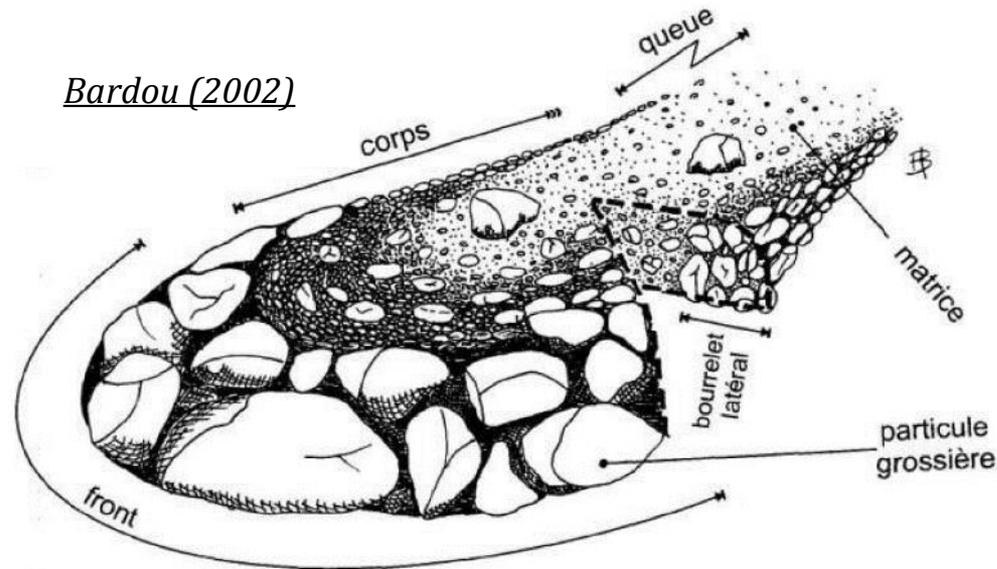


*Another Header (2008)*



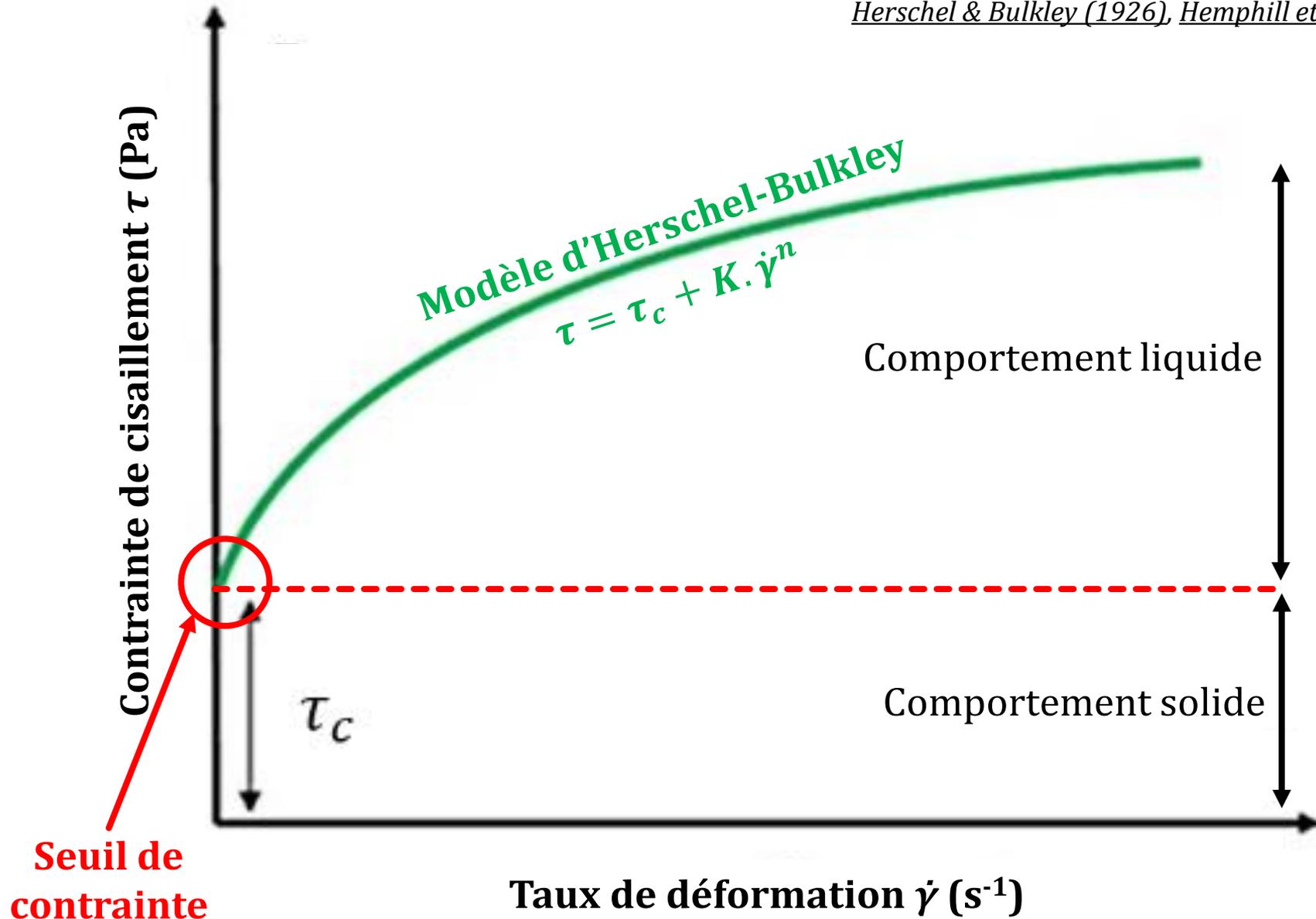
Comportement viscoplastique  
Dépôts réguliers très cohésifs, limites bien définies

# Caractérisation



# Modèle viscoplastique

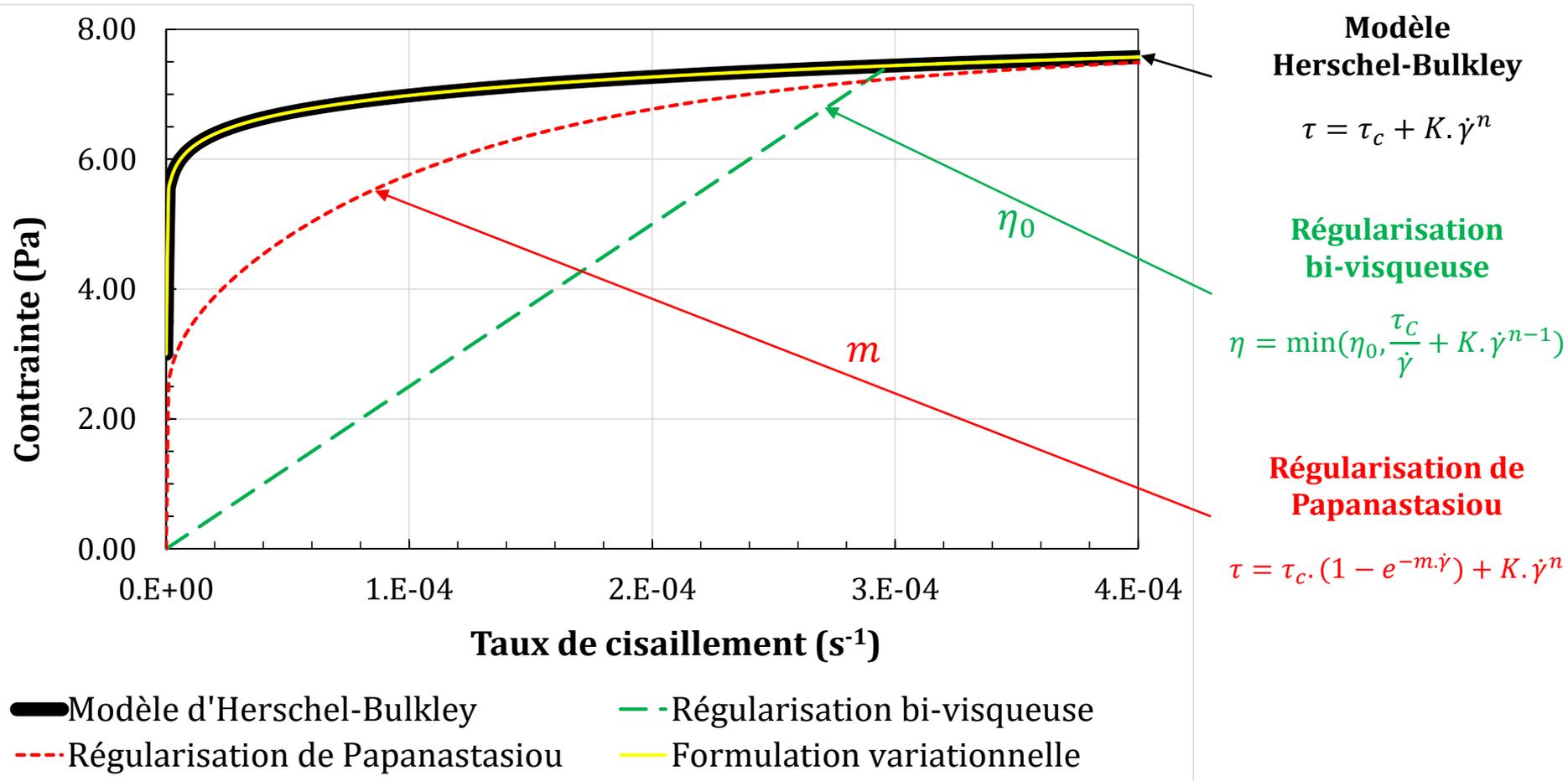
*Herschel & Bulkley (1926), Hemphill et al. (1993)*



# Modélisation numérique rhéologique

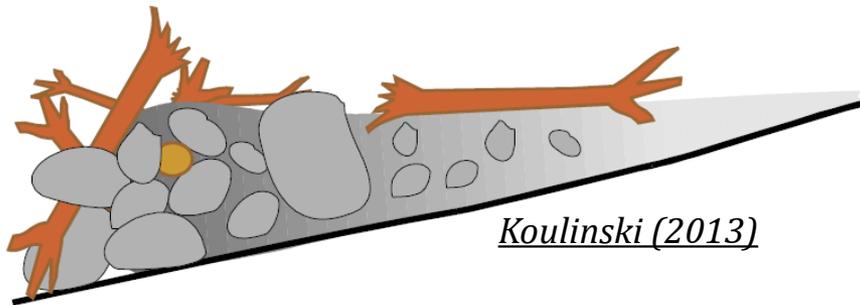
→ 2 approches (*Balmforth et al., 2014* ; *Saramito & Wachs, 2017*)

- Formulation variationnelle (*Fortin & Glowinski, 1983* ; *Marly & Vigneaux, 2017*)
- Modèles régularisés (*Tanner & Milthorpe, 1983* ; *Papanastasiou, 1987*)



## De la recherche à l'ingénierie : codes 2D

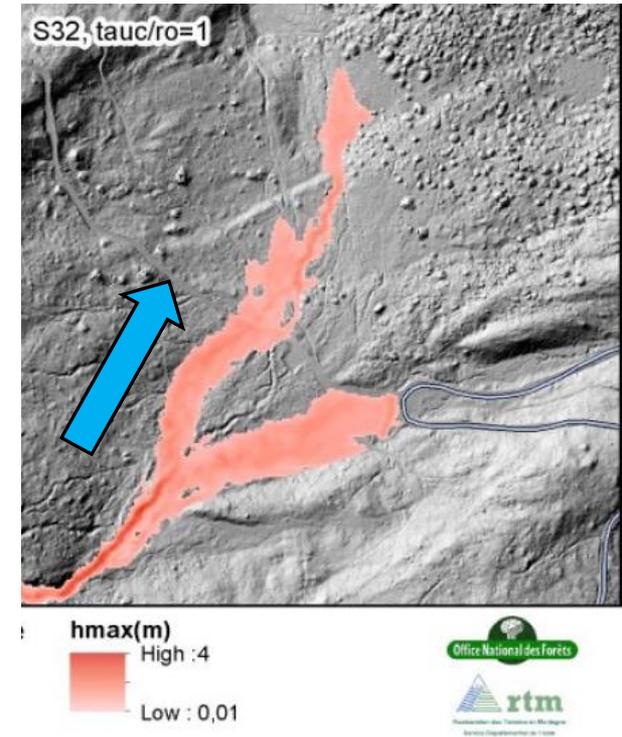
- Lave2D (*Laigle, 1998 ; Laigle et al., 2003*)
- RAMMS (*Preuth et al., 2010 ; Schneider et al., 2010*)
- Flo-2D (*O'Brien et al., 1993*)
- Nasa-Vof 2D (*Torey et al., 1985*)
- DFEM 1D-2D (*McArdell et al., 2003*)



sont négligés...

- Front + queue de lave
- Rugosité du lit
- Dépôts et reprise
- Frottement pariétal latéral ( $R_h$ )

  
**Limites**  
**Hypothèse**  
**Domaine**  
**de validité**



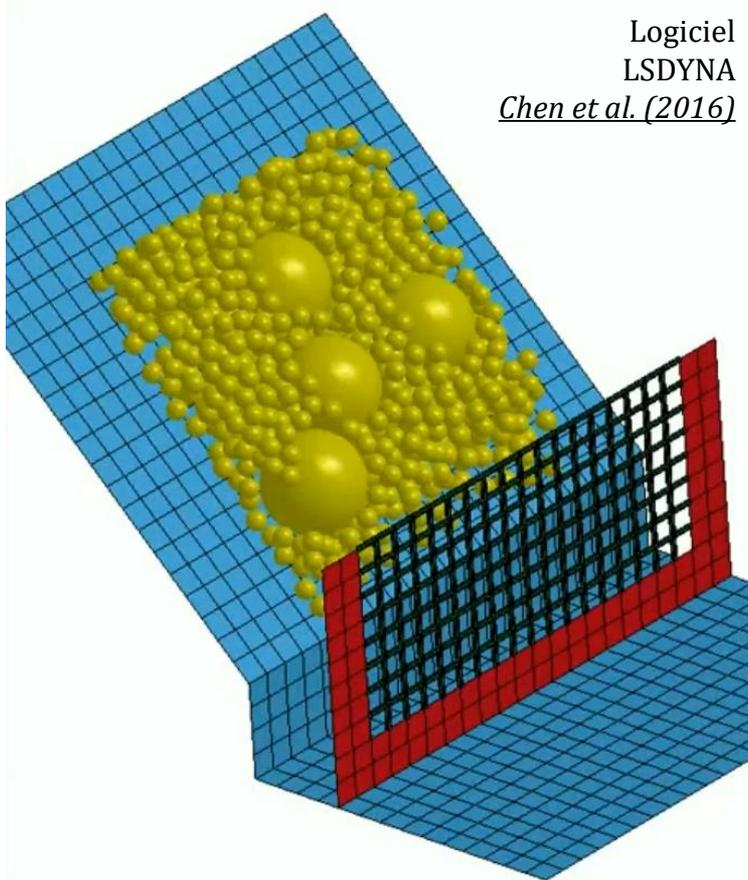
Simplification de l'écoulement

- Fluide continu, homogène, incompressible, propriétés constantes dans le temps
- Pas de vitesses verticales avec le 2D (*Minussi & Maciel, 2012*)
- Pression hydrostatique (*Remaître, 2006*)
- Pas de valeurs locales (*Wang et al., 2016 ; Pastor et al., 2014*)

## Dimension 3D

→ 2 axes de développement (*Hirsch, 2007*)

### Sans maillage - SPH

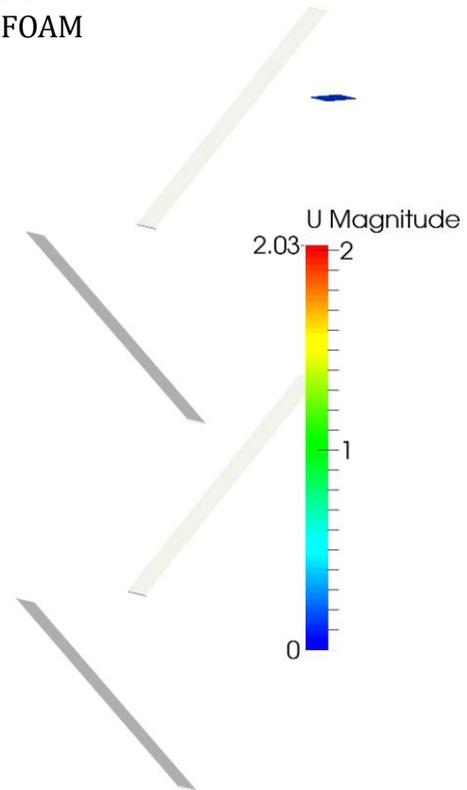


Logiciel  
LSDYNA  
*Chen et al. (2016)*

*Wang et al. (2016)*  
*Canelas et al. (2015)*  
*Laigle & Labbe (2017)*

### Avec maillage - Méthode des volumes finies

Logiciel  
OpenFOAM



*Boetticher et al. (2016)*  
*Bugnion et al. (2012)*  
*Viccione et al. (2015)*

## Bilan de l'état de l'art

- 3 types de laves torrentielles

Comportement granulaire

Comportement viscoplastique

Comportement de type lahar

- 2 approches numériques rhéologiques

Formulation variationnelle

Modèles régularisés

- Limites des codes 2D

Intégration selon  $z$  + Pression hydrostatique + Frottement pariétal réduit + Approximation  $R_h$

- Développements en 3D

Sans maillage (ex : SPH)

Avec maillage (ex : volumes finis + VOF)

# Verrous scientifiques et techniques

Etat de l'art

Simulation (3D VOF)  
laves torrentielles  
cas grandeur nature

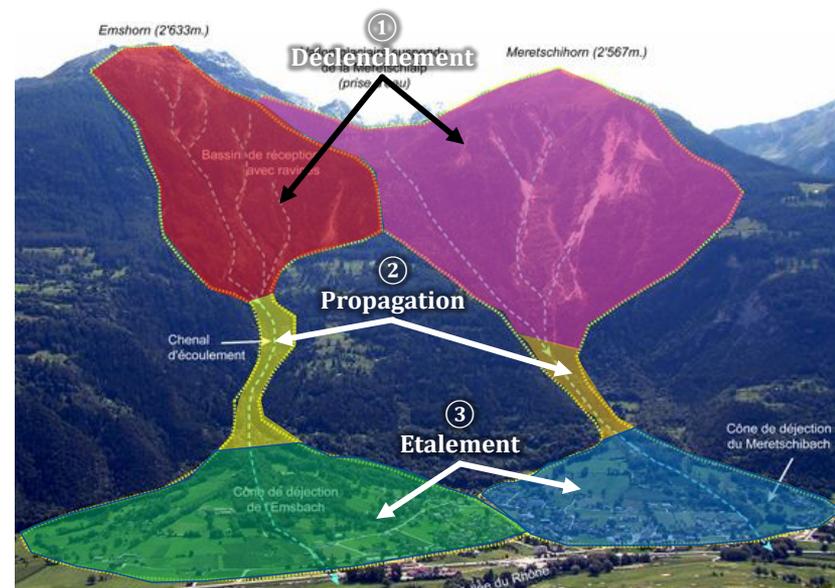
## Besoins

- Rupture barrage
- Ecoulement chenalisé
- Etalements (arrêt)
- Phénomènes 3D (pont, rétrécissement, etc.)

| Verrou                     |
|----------------------------|
| Modèles régularisés        |
| Détection des zones R/L    |
| Modèle surface libre (VOF) |
| Maillage complexe          |
| Champ de vitesse           |
| Aspect transitoire         |

Légende

|                             |
|-----------------------------|
| Priorité 1 / Intérêt fort   |
| Priorité 2 / Intérêt modéré |
| Priorité 3 / Intérêt faible |



## Développement et démarche adoptée

Etat de l'art

Développement  
codeExpériences  
numériquesSimulation (3D VOF)  
laves torrentielles  
cas grandeur nature

### Code OpenFOAM

- Bi-visqueux ( $\eta_0$ )
- Implémentation Papanastasiou ( $m$ )
- Surface libre
- Algorithme PIMPLE
- Schémas numériques

Légende

Priorité 1 / Intérêt fort

Priorité 2 / Intérêt modéré

Priorité 3 / Intérêt faible

| Exp.                       | Chenal            |                         |                              | Rupture<br>Etalement barrage |                           |
|----------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|
|                            | Debiane<br>(2000) | Luu<br>et al.<br>(2015) | De Souza<br>et al.<br>(2010) | Cochard<br>et al.<br>(2009)  | Ancey<br>et al.<br>(2009) |
| <b>Verrou</b>              |                   |                         |                              |                              |                           |
| Modèles régularisés        | B.V.              | B.V<br>Papa.            | B.V<br>Papa.                 | B.V.                         | B.V.                      |
| Détection des zones R/L    | X                 | X                       | X                            |                              |                           |
| Modèle surface libre (VOF) | X                 |                         |                              | X                            | X                         |
| Maillage complexe          | X                 | X                       |                              | X                            |                           |
| Champ de vitesse           | X                 | X                       |                              |                              |                           |
| Aspect transitoire         |                   |                         |                              | X                            | X                         |

# Sommaire

---

**1** Contexte technique et scientifique

---

**2** Modélisation numérique

---

**3** Valorisations et perspectives

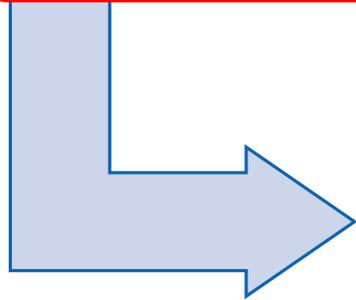
---

## Démarche

### VERROU TECHNIQUE

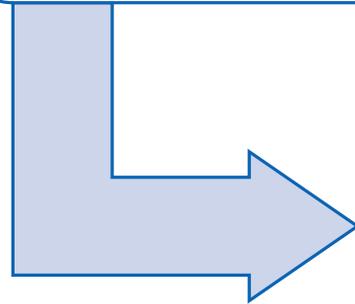
Application  
cas grandeur  
nature

- Bassin versant alpin français



Limites

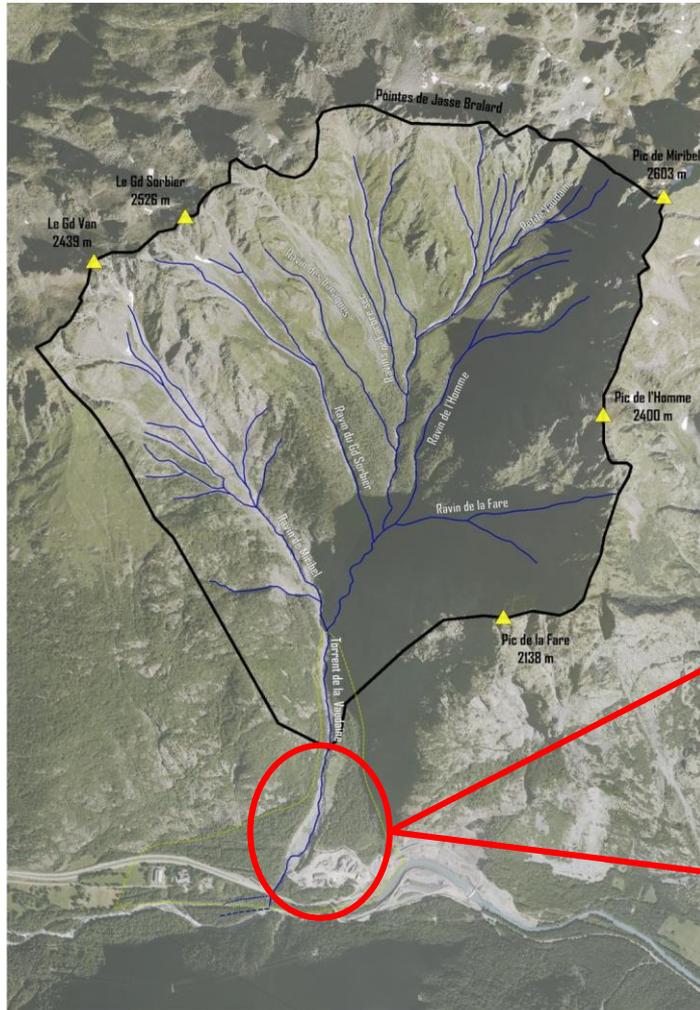
- Pas de données de terrain



Evaluation  
modèle

- Comparaison avec 2D

# Site retenu : bassin versant de la Vaudaine



Carrière (d'extractions massives de matériaux)



Source : RTM 38 (2015)

ZOOM

ZOOM



Pont routier de la RD1091

Source : RTM 38 (2015)



**Légende**

- Réseau hydrographique
- Tracé aval RD (2015)
- ▭ Limite de bassin versant
- ▭ Cône de déjection

Service RTM Isère, Octobre 2015

# Simulation de l'écoulement global de la lave

Test16

Current situation with the RD91 road bridge

879,636 cells

Debris flow rheology (Herschel-Bulkley model)

$\rho = 2,200 \text{ kg/m}^3$

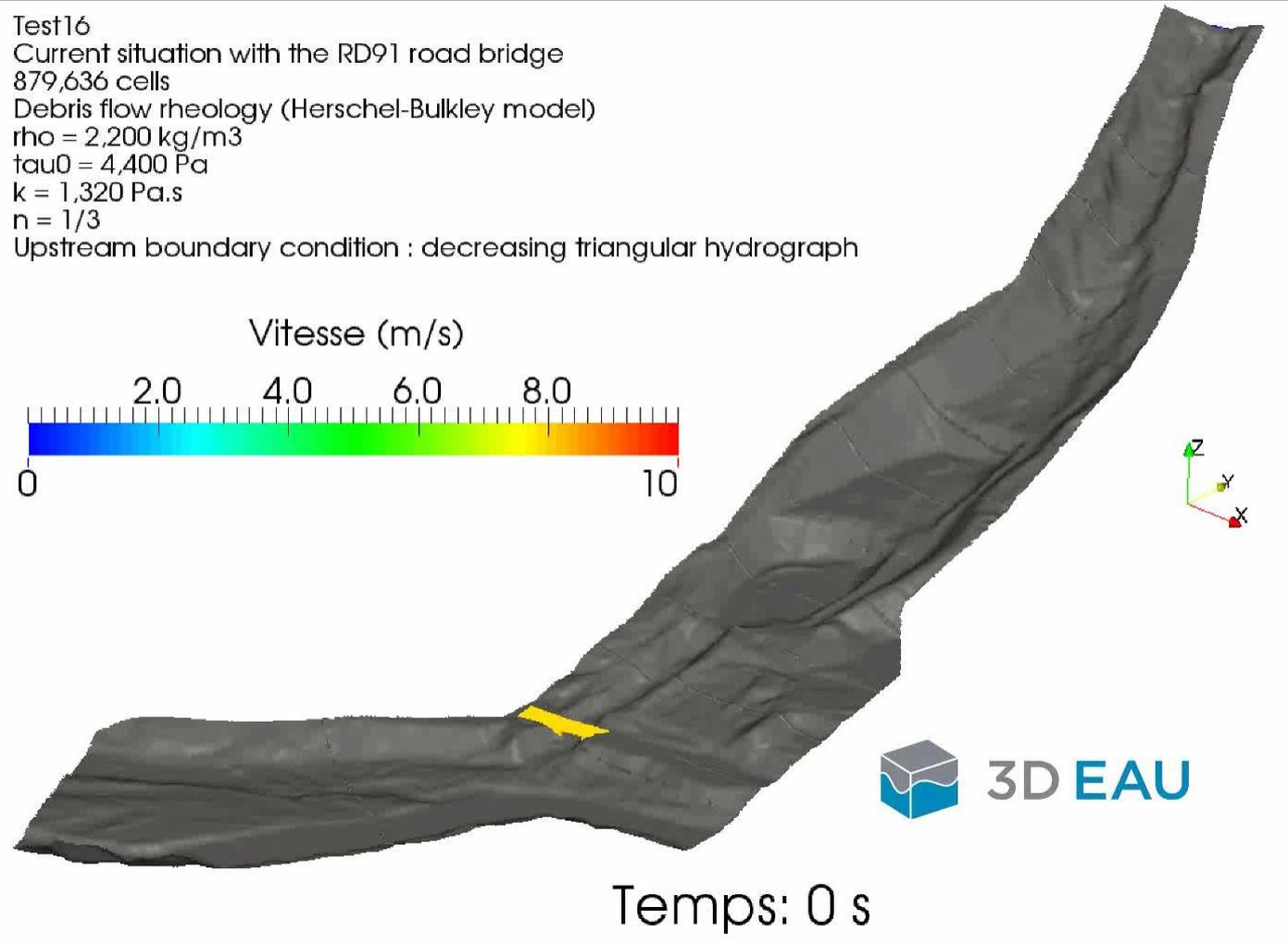
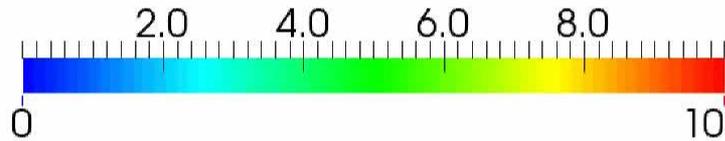
$\tau_0 = 4,400 \text{ Pa}$

$k = 1,320 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

$n = 1/3$

Upstream boundary condition : decreasing triangular hydrograph

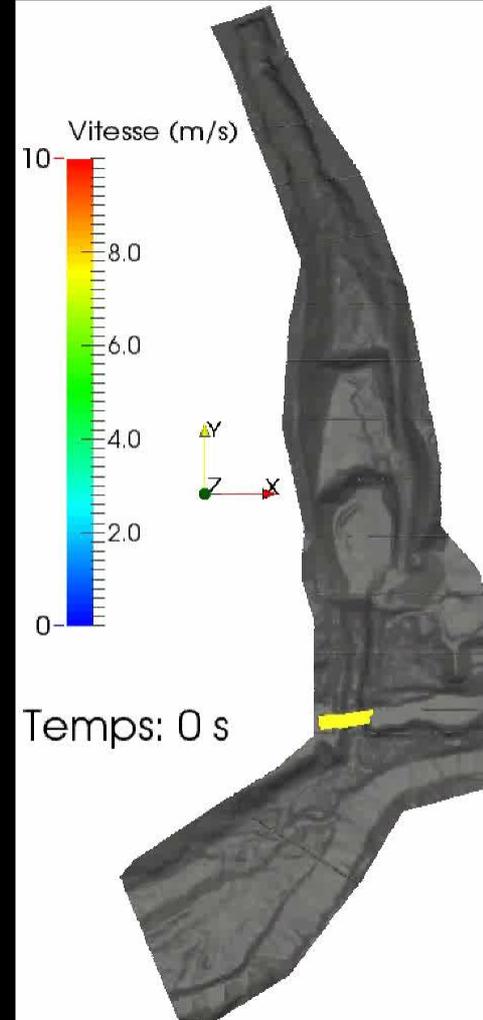
Vitesse (m/s)



Vitesse (m/s)



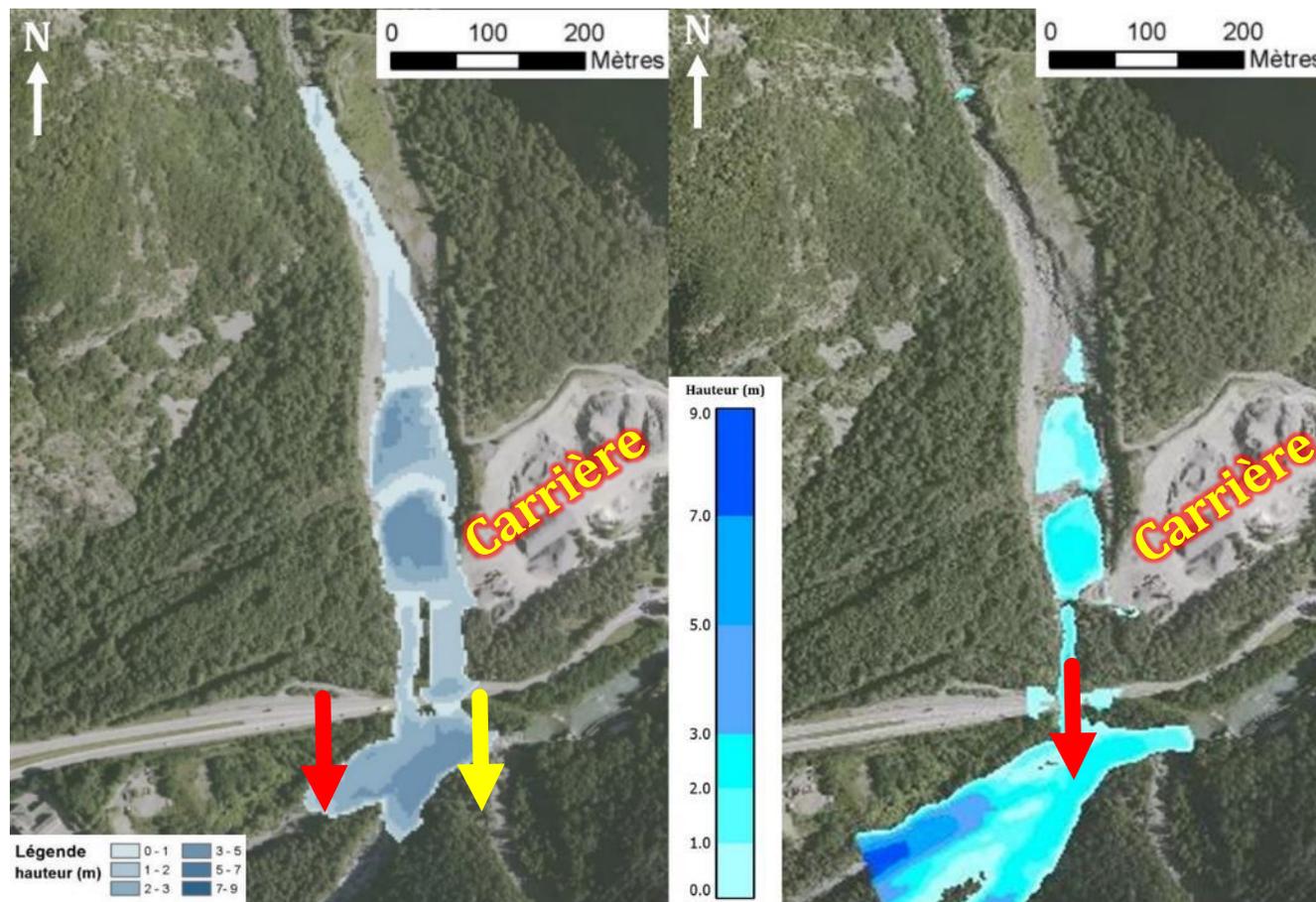
Temps: 0 s



Vitesse réelle x 100

# Cartographie des hauteurs

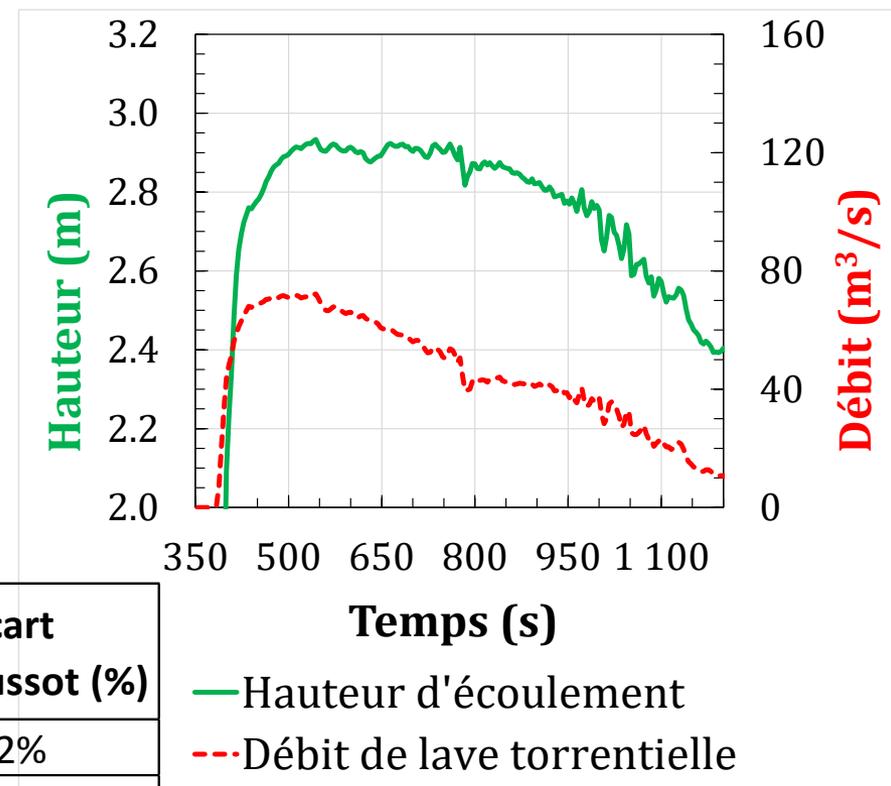
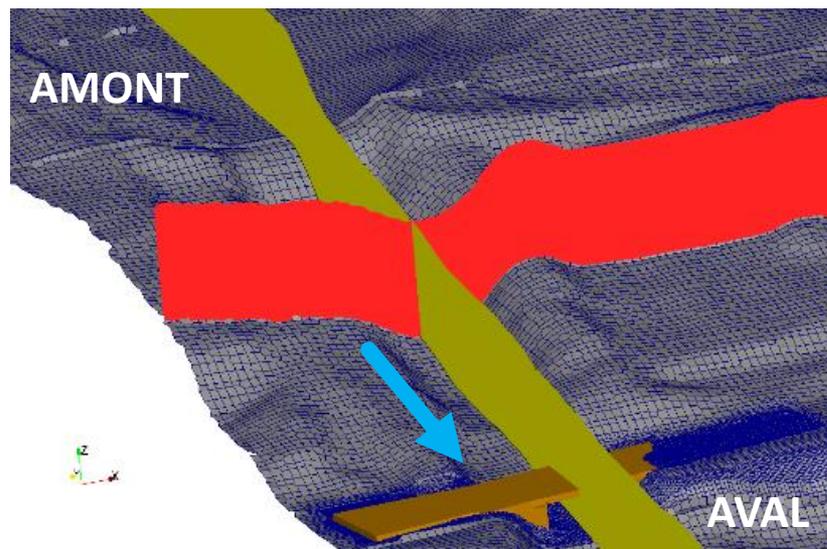
## 2D



## 3D

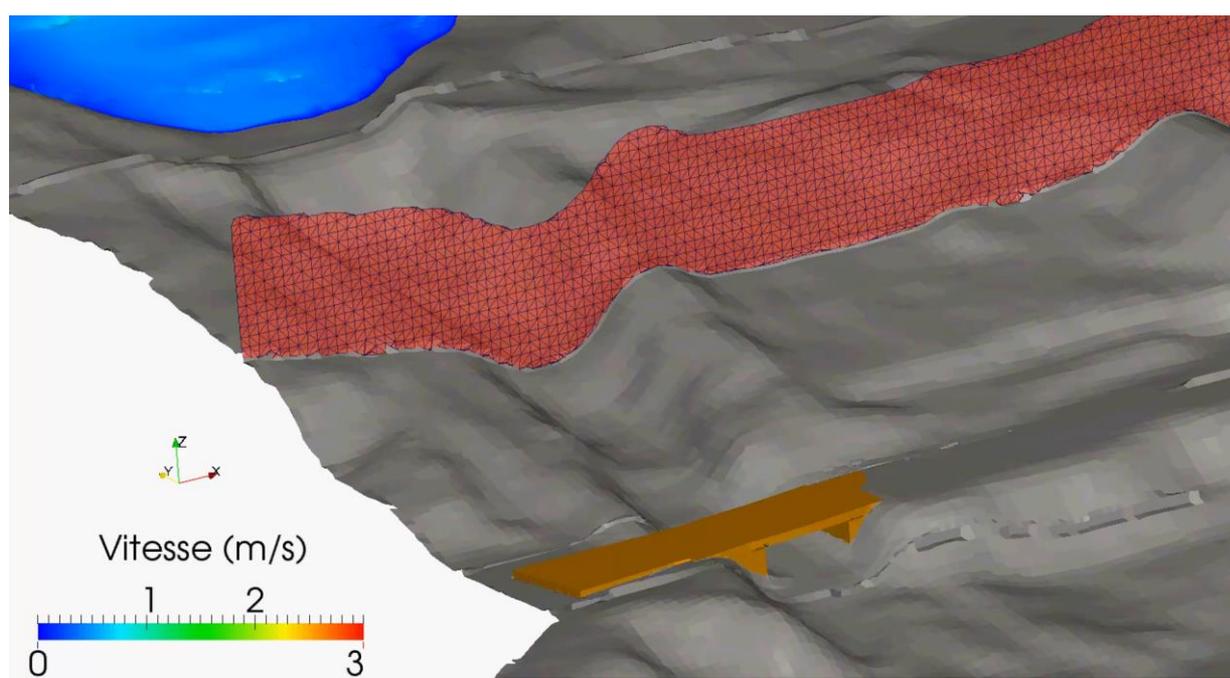
| Modèle | $h_{\text{Global}}$ | $h_{\text{Plateforme}_3}$ | $h_{\text{Chenal}}$ | Différences                                                                                                                                |
|--------|---------------------|---------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2D     | 0 à 5 m             | 0 à 2,7 m                 | 0 à 2 m             | Maillage uniforme (3 m), pas de pont                                                                                                       |
| 3D     | 0 à 8,5 m           | 0 à 2,9 m                 | 0 à 3 m             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Maillage évolutif (10 cm à 4 m)</li> <li>Débordements : maillage &gt; fraction volumique</li> </ul> |

# Écoulement chenalisé



| Temps (s) | Q (m <sup>3</sup> /s) | h <sub>3D</sub> (m) | h/B  | Critère h/B<4 | h <sub>Coussot</sub> (m) | Ecart 3D/Coussot (%) |
|-----------|-----------------------|---------------------|------|---------------|--------------------------|----------------------|
| 500       | 71.0                  | 2.93                | 0.57 | Ok            | 3.58                     | 22%                  |
| 600       | 66.1                  | 2.94                | 0.58 | Ok            | 3.55                     | 21%                  |
| 700       | 56.0                  | 2.92                | 0.57 | Ok            | 3.49                     | 20%                  |
| 800       | 43.7                  | 2.87                | 0.56 | Ok            | 3.40                     | 18%                  |
| 900       | 41.3                  | 2.82                | 0.55 | Ok            | 3.38                     | 20%                  |
| 1000      | 37.2                  | 2.75                | 0.54 | Ok            | 3.35                     | 22%                  |
| 1200      | 10.7                  | 2.35                | 0.46 | Ok            | 2.98                     | 27%                  |
|           |                       |                     |      |               | <b>moyenne</b>           | <b>21%</b>           |

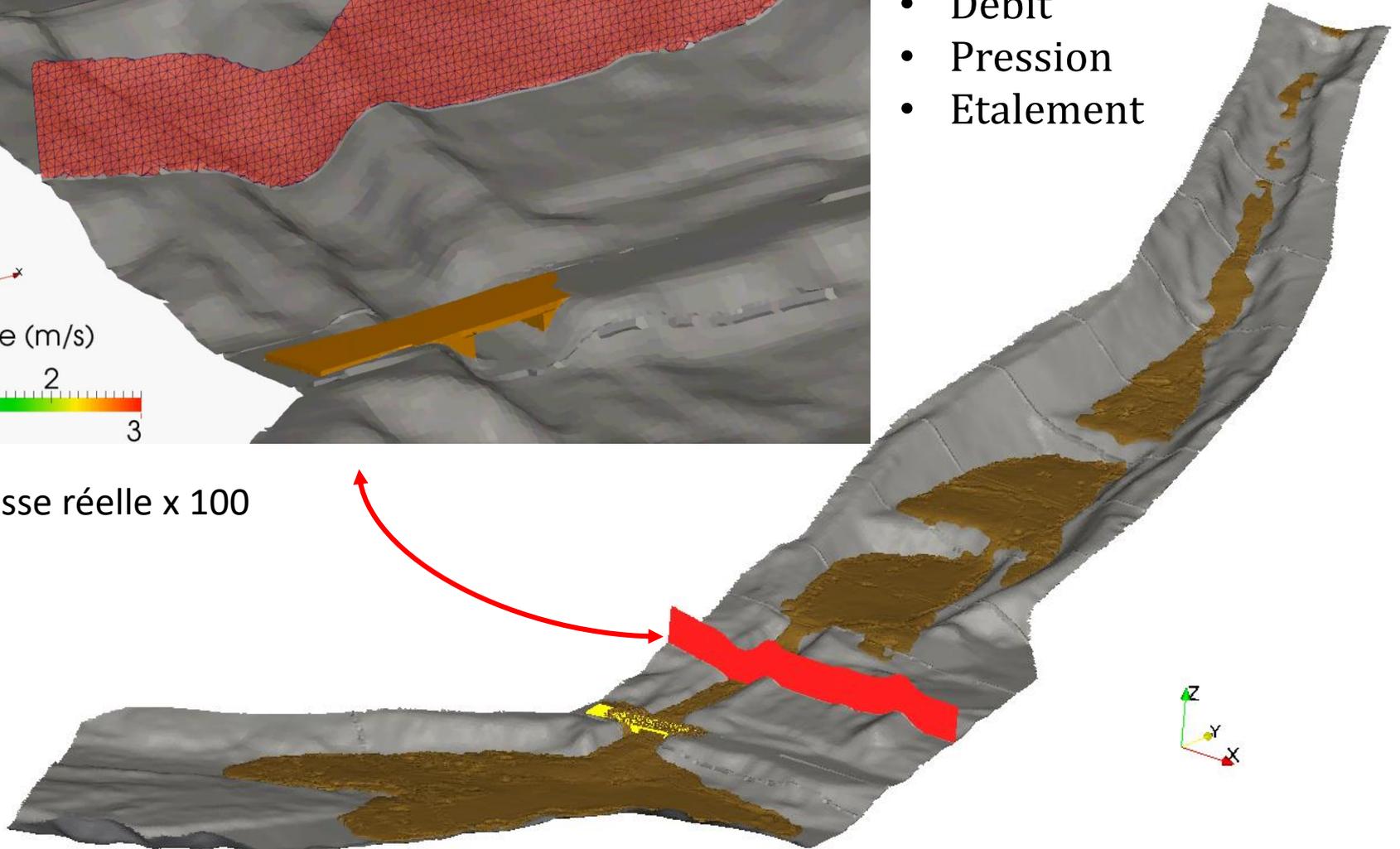
## Interaction avec le pont



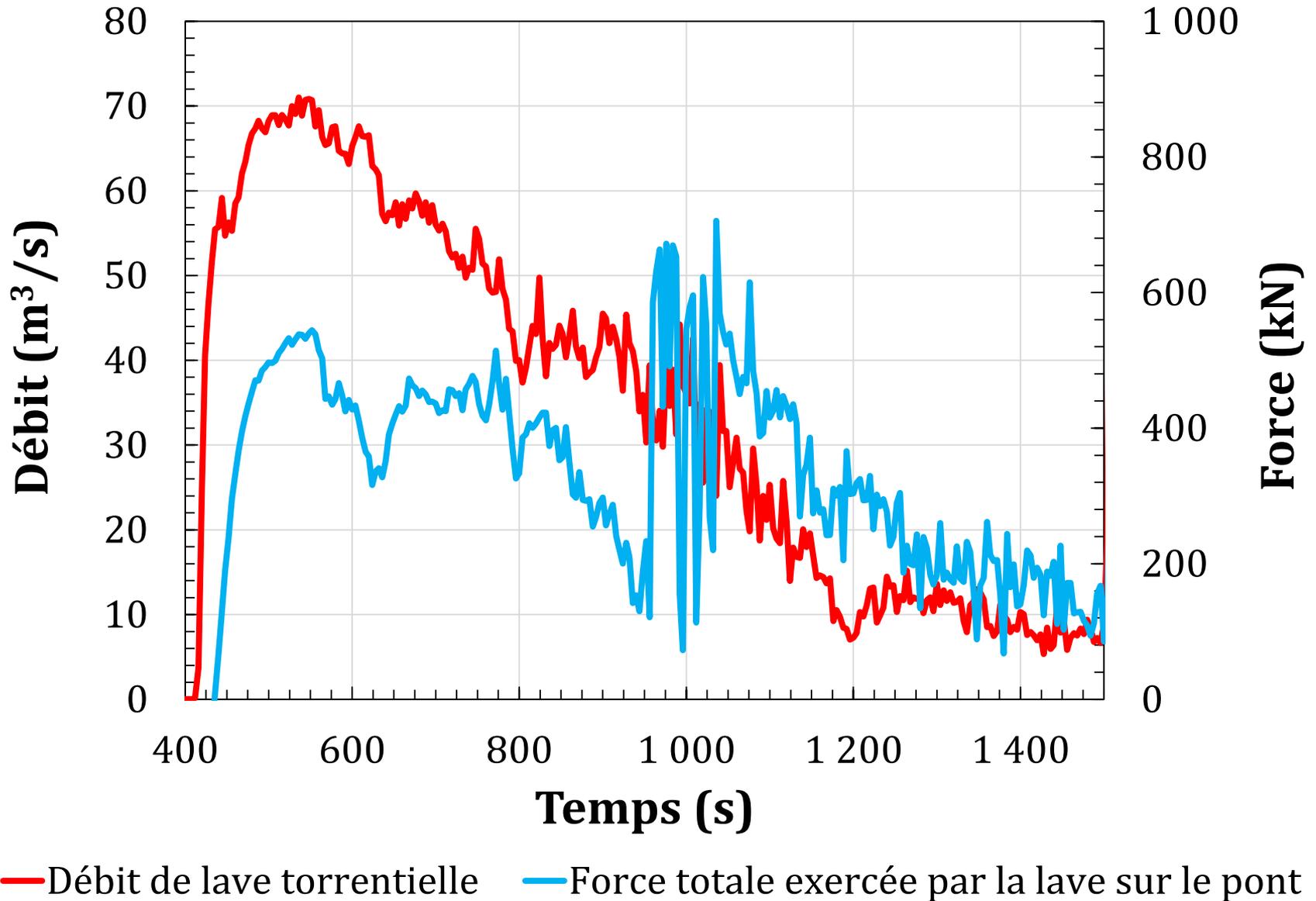
Vitesse réelle x 100

*Dans le temps :*

- Débit
- Pression
- Etalement



## Interaction avec le pont

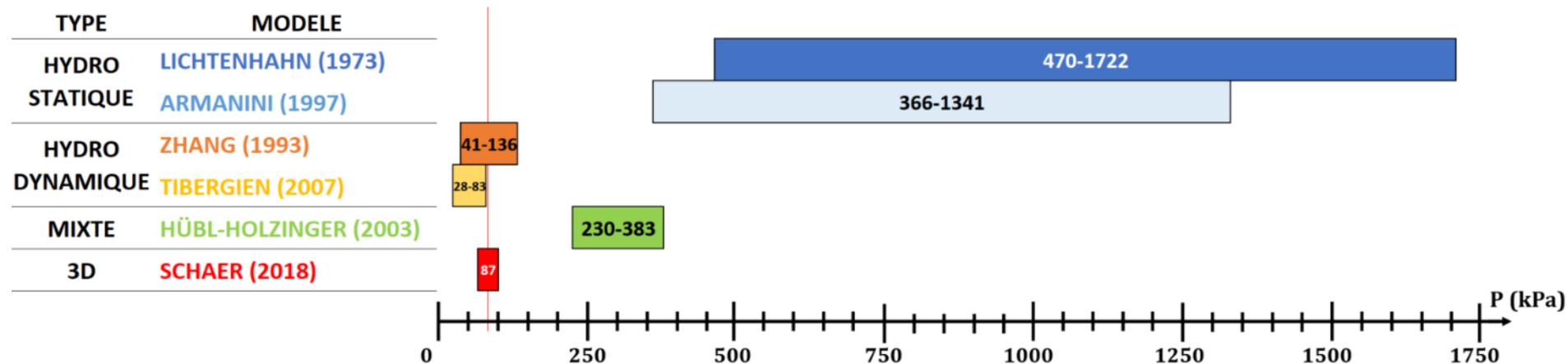
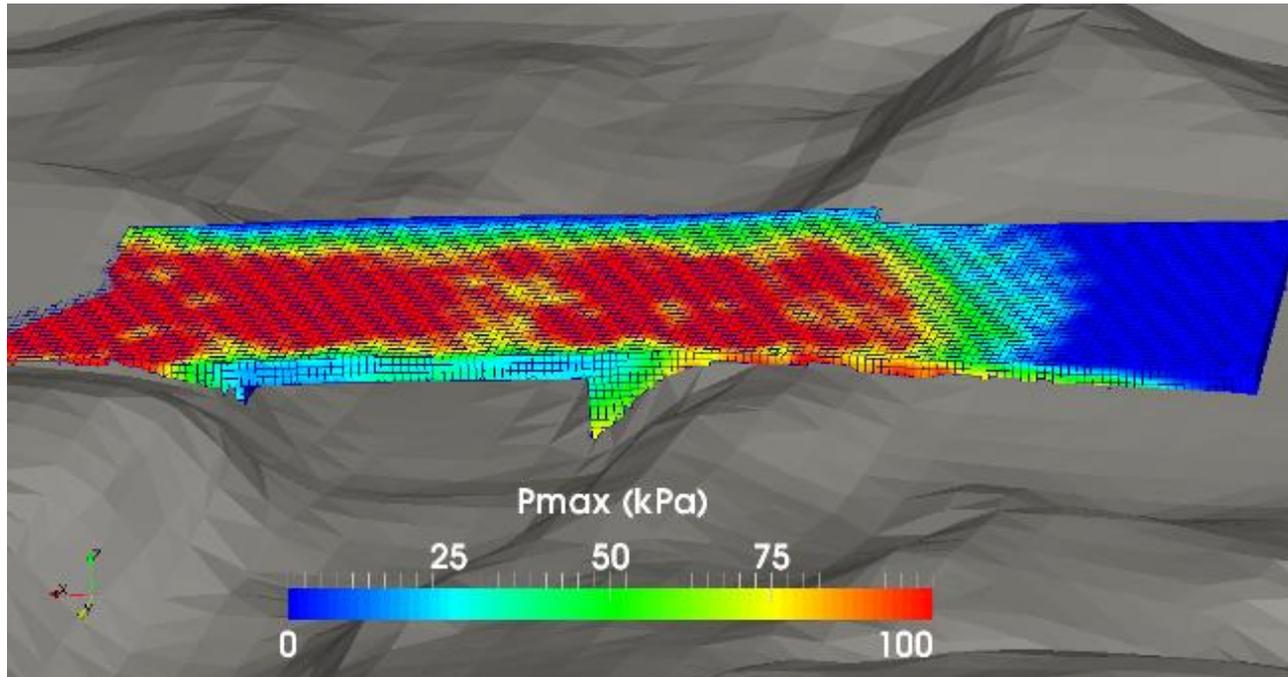


# Interaction avec le pont



Vitesse réelle x 20

# Interaction avec le pont



## Conclusion de l'application sur un cas grandeur nature



### Apports 3D

- Maillage et champ de vitesse
- Chenal ( $h_{3D}$ , frottement)
- Pont (impact)



### A améliorer

- Maillage (fraction volumique)
- Etalements aval (C.L.)
- Comparaison avec mesures *in situ*

# Sommaire

---

**1** Contexte technique et scientifique

---

**2** Modélisation numérique

---

**3** Valorisations et perspectives

---

## Bilan des travaux

### Développements numériques

- Implémentation Papanastasiou
- Représentation surface libre (diffusion numérique, schémas)
- Stabilité calculs (aspect transitoire algorithmique)

### Fiabilité du code

- Hauteur : 10-15 %
  - Front : 5-15 %
- Vitesse : 5-10 %  
Largeur : 6 %

Fluide homogène  
Rhéologie bien connue  
4 à 6 mailles  
 $Co = 0,1$  et  $C_\alpha \approx 0$   
Algorithme PIMPLE

### Application (laves torrentielles)

- Zones chenalisées
- Interaction ouvrages
- Ecoulements préférentiels



# Modélisation numérique 3D pour l'étude des laves torrentielles : un outil de diagnostic et de validation de solutions pour la protection des zones habitées

JDHU 2018 - 8èmes Journées Doctorales en Hydrologie Urbaines  
7-9 novembre 2018 - Paris



3D EAU



« Merci de votre attention »

