L'exploitation
et la maintenance
des infrastructures

C2ROP

Chutes de Blocs
Risques Rocheux
Ouvrages de Protection

IREX
Institut pour la recherche appliquée
et l'expérimentation en génie civil

Modélisation des éboulements rocheux de taille intermédiaire

Franck Bourrier, Thierry Faug, Guillaume Chambon (IGE - INRAE Grenoble)

Marc Peruzzetto (BRGM)

Axe « Aléa » - Action Apropag02

MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
Liberté
Égalité
Fraternité

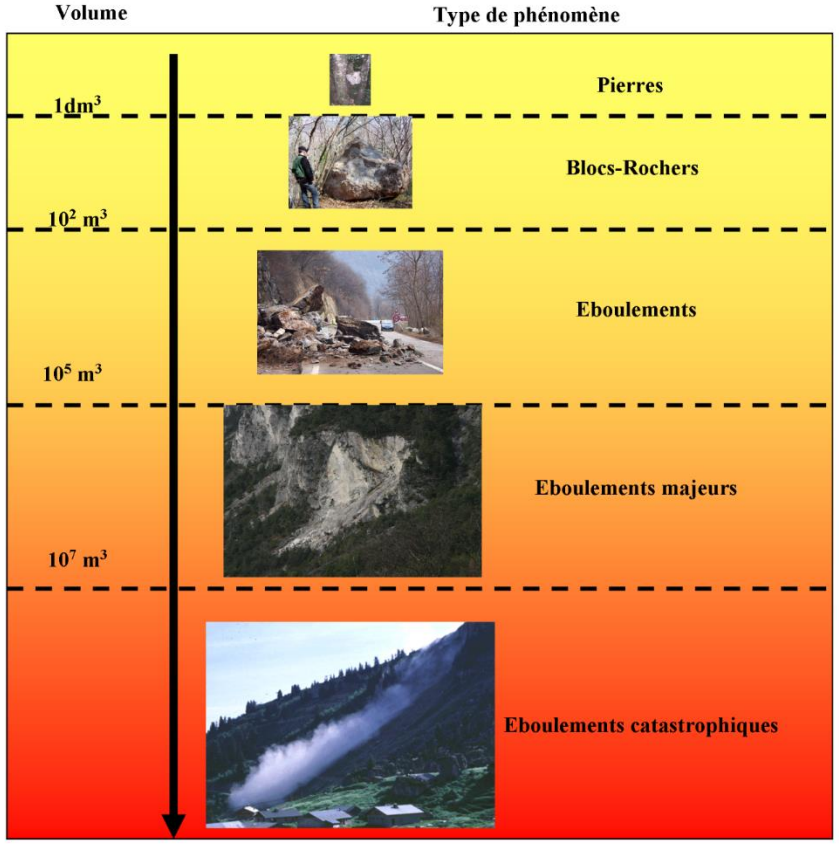
AG du 18/01/2024

HUB INNOV INFRA

INDURA
Auvergne-Rhône-Alpes

Classification des événements liés au risque rocheux

✓ Fonction du volume de départ

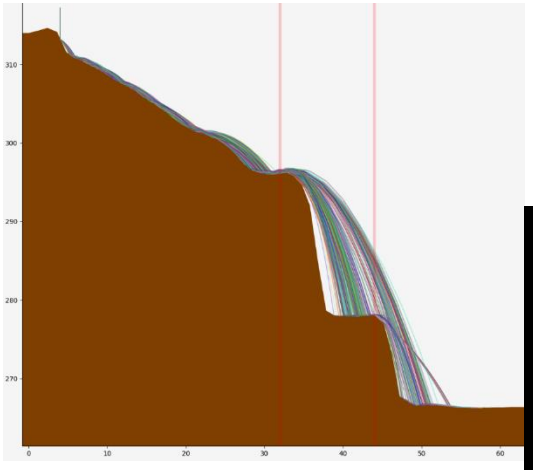


✓ Fonction du type de processus

VS

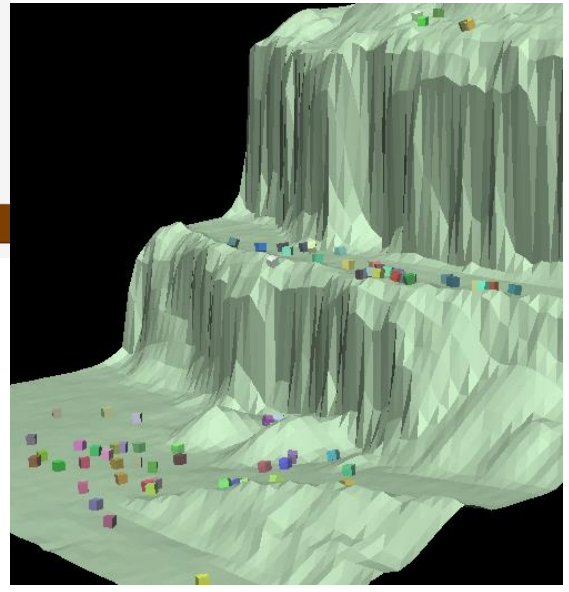
Modèles mécanique de la propagation des masses rocheuses

- ✓ Chute de blocs unitaires
  - Analyse trajectographique

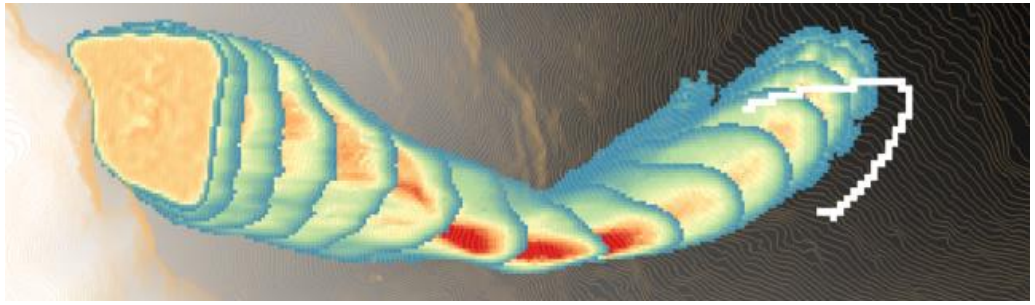


« point matériel »
vs
« forme explicite »

2D vs 3D



- ✓ Eboulements rocheux
  - Modélisation « fluide continu »



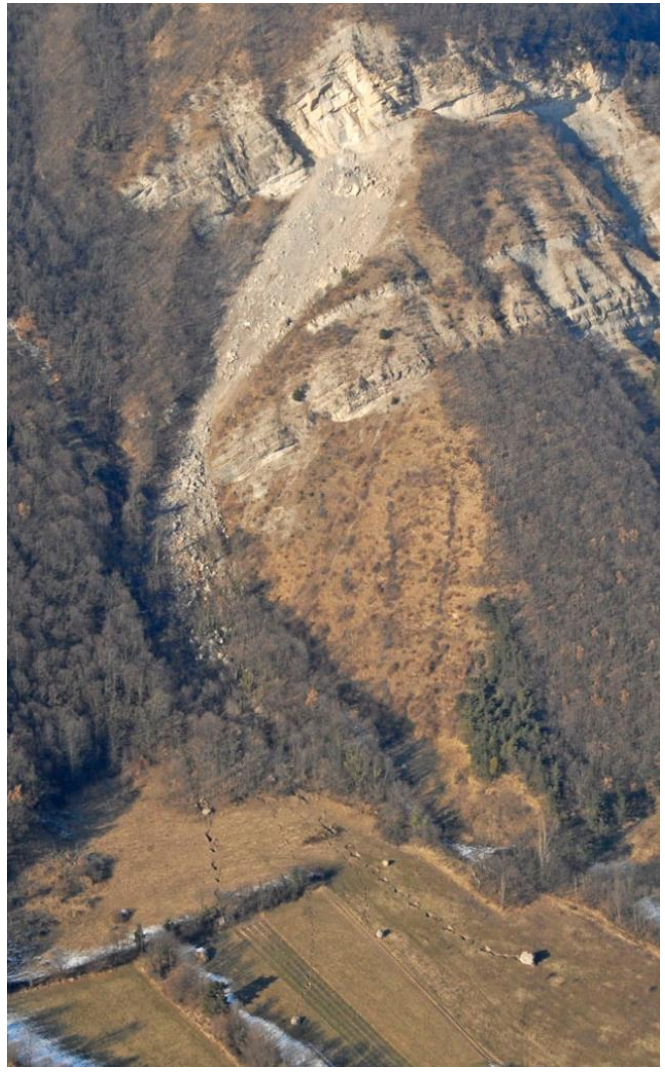
Modèle « Saint-Venant »
+
Loi de fermeture (par ex. frottement de Voellmy)

Le cas des événements « de taille intermédiaire »

- ✓ Volume typiques : de quelques centaines à quelques milliers de m^3

- ✓ Un dépôt caractérisé par :
  - une zone dense *(nombreux blocs en contact)*
  - une phase diffuse *(quelques blocs en contact)*
  - quelques blocs éjectés

- ✓ Observable aussi pour des volumes de départ plus grands ou plus petits, notamment en fonction de :
  - La configuration topographique
  - La taille des blocs constitutifs



©Photothèque IRMA – Sébastien Gominet

Quelques processus importants

- ✓ *Pris en compte*
  - *Topographie*
  - *Interaction avec le substratum*
  - *Blocs unitaires : conditions de détachement, forme, forêt*
  - *Eboulements : déformation de la masse rocheuse fragmentée*

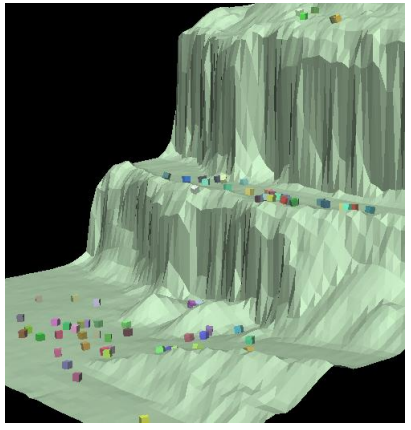
[Giacomini et al., 2009]

- ✓ *Non pris en compte*
  - *Fragmentation*
  - *Déformation du substratum*
  - *Obstacles (souches, blocs déposés, par ex.)*
  - *Mise en mouvement de blocs déposés sur la pente*

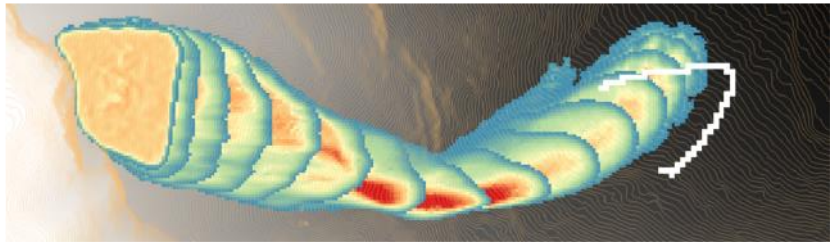
©Photothèque IRMA – Sébastien Gominet

Possibilités pour la modélisation des événements « de taille intermédiaire »

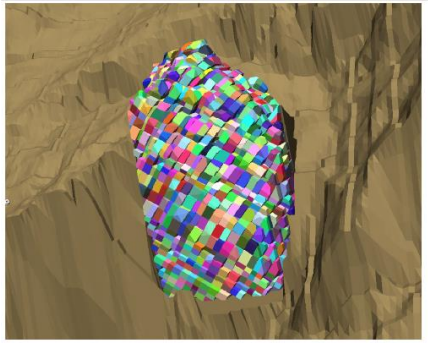
✓ Analyse trajectographique

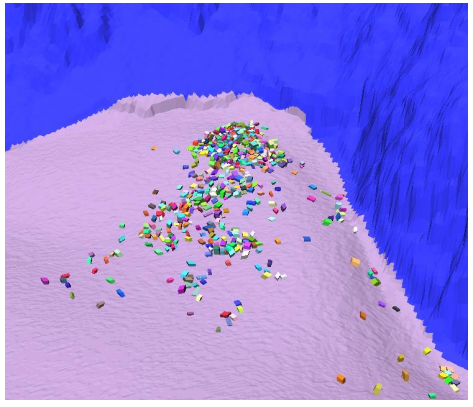


✓ Modélisation « fluide continu »



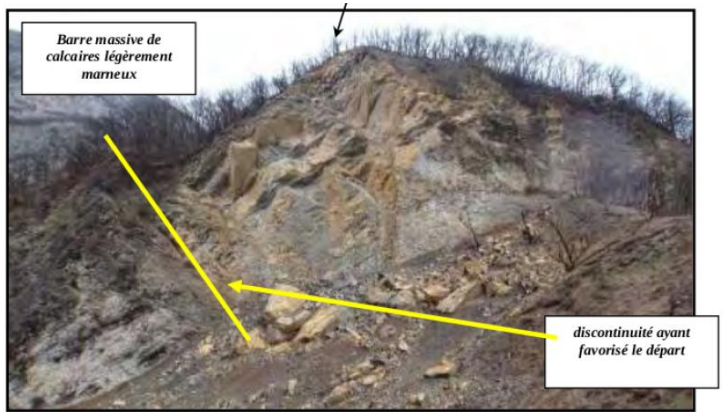
✓ Modélisation discrète



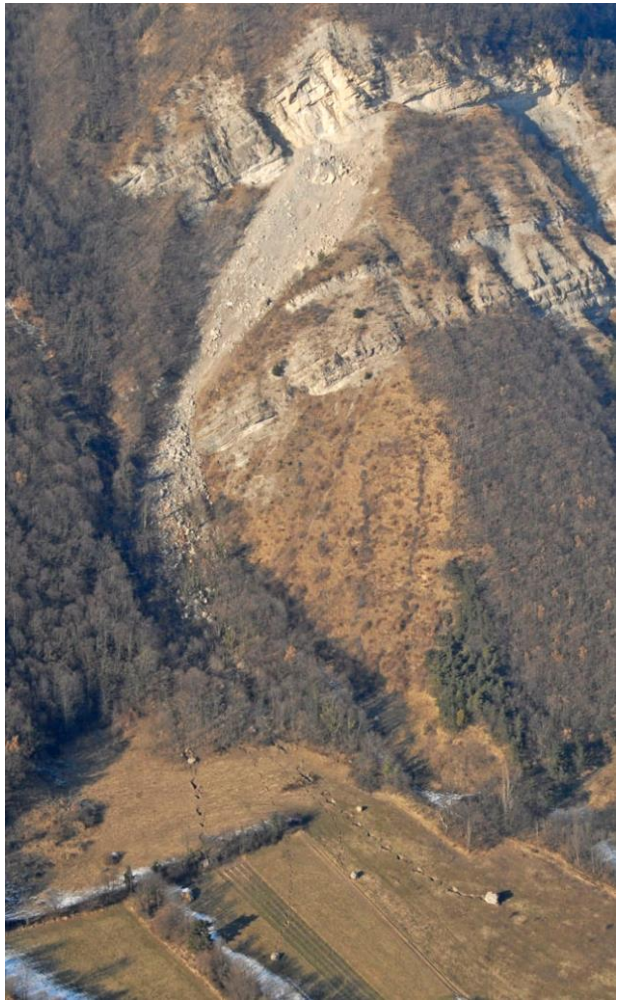


Exemple : le cas de Saint Paul de Varces

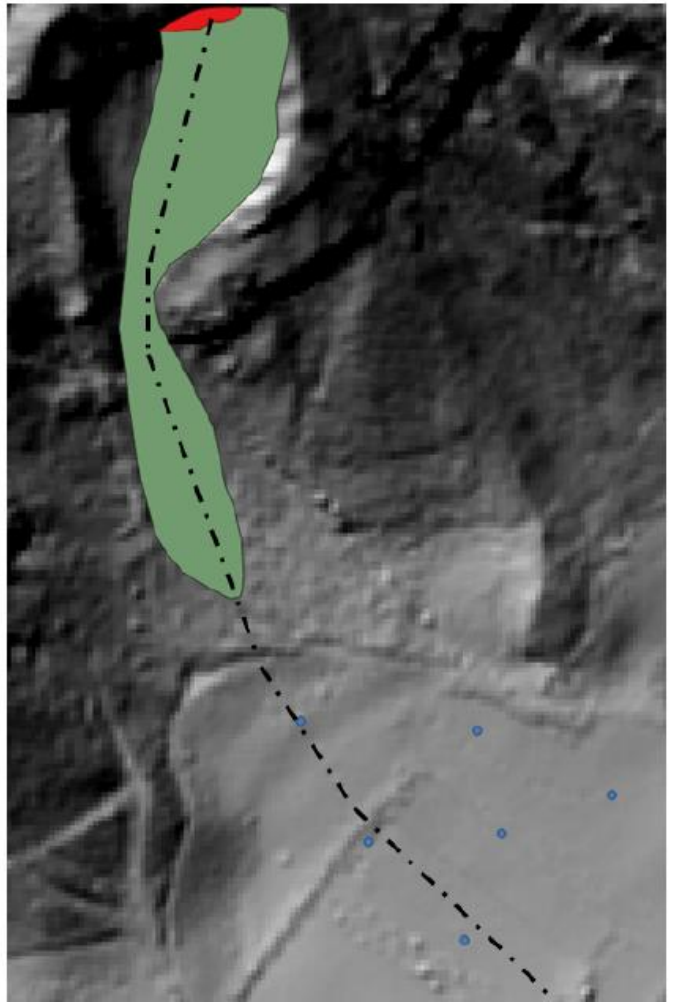
- ✓ Volume total : environ 2000m^3
- ✓ Un bloc de 33m^3

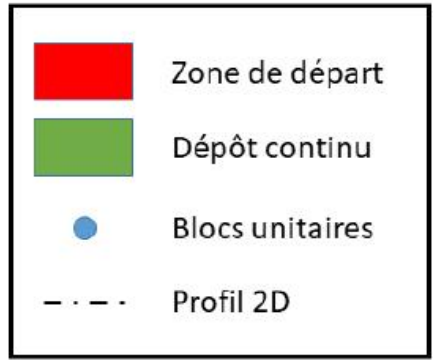


[Berger et al., 2009]

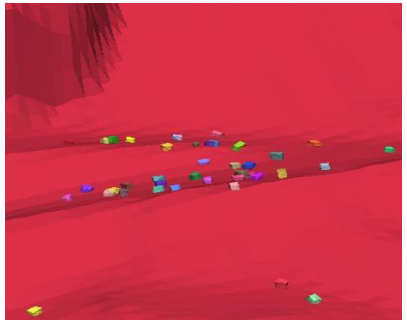


©Photothèque IRMA – Sébastien Gominet



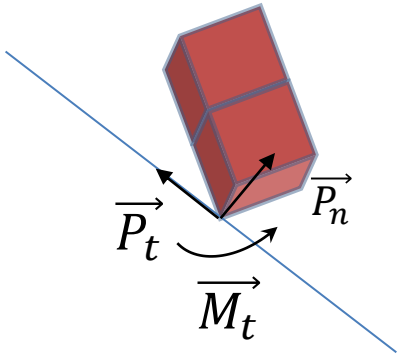


Exemple : le cas de Saint Paul de Varces



Simulations trajectographiques

- Platrock 3D-Shape
- Forme de bloc aléatoire
- 3 volumes : 2m³ ; 8m³ ; 33m³
- Loi de contact :

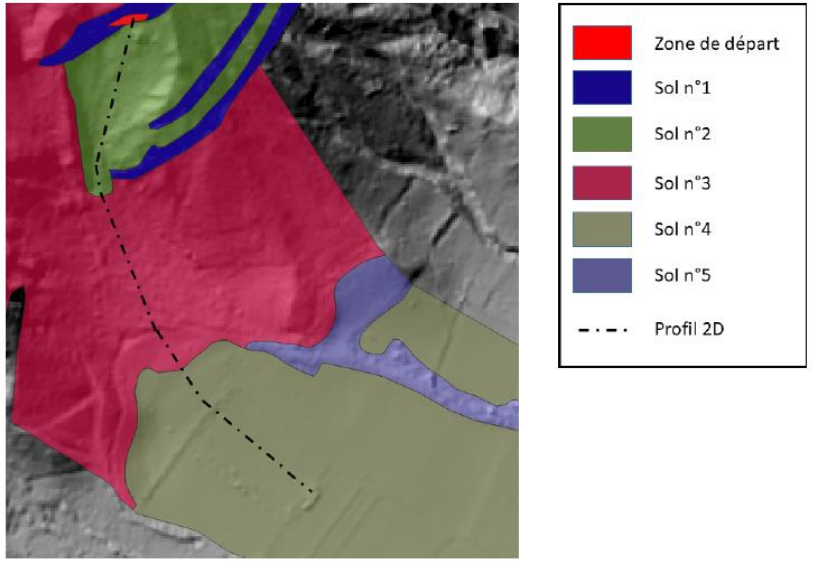


$\overrightarrow{P_n}$ tel que $\overrightarrow{V^{re}_{n,point\ impact}} = -e\ \overrightarrow{V^{in}_{n,point\ impact}}$

$\overrightarrow{P_t}$ tel que $\overrightarrow{P_t} \leq \mu\ \overrightarrow{P_n}$

$\overrightarrow{M_t}$ tel que $\overrightarrow{M_t} \leq \mu_r R_{eq,bloc}\ \overrightarrow{P_n}$

- 5 types de sol

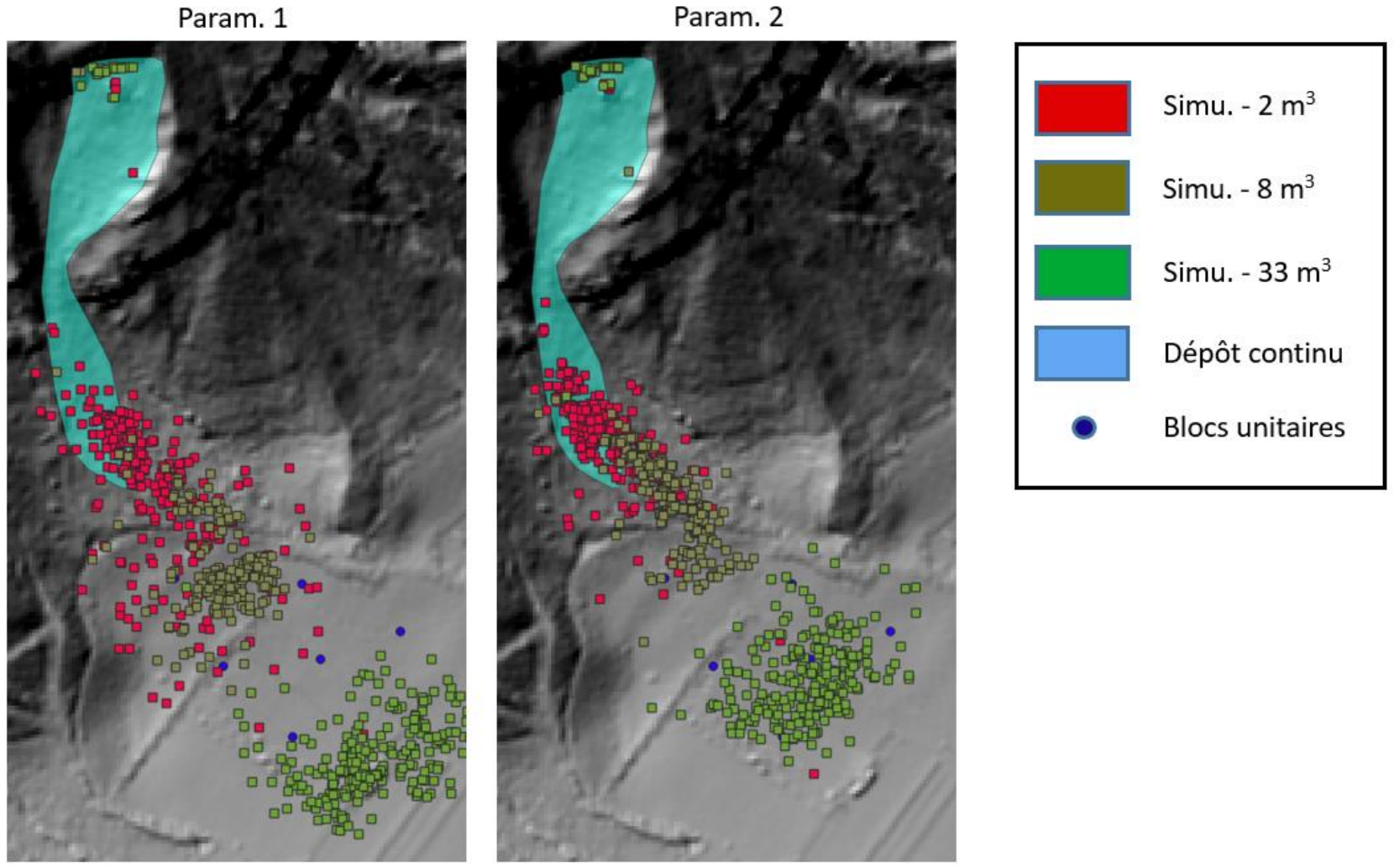


- 2 jeux de paramètres

Num. sol	1	2	3	4	5
$e_{b,t}$	0	0	0	0	0
$\mu_{b,t}$	0,65	0,7	0,7	0,75	0,75
$\mu_{r/b,t}$ - *Param. 1*	0,075	0,1	0,1	0,15	0,15
$\mu_{r/b,t}$ - *Param. 2*	0,075	0,15	0,15	0,2	0,2

Exemple : le cas de Saint Paul de Varces

Simulations trajectographiques



- ✓ Bloc « extrêmes » simulés
- ✓ Effet marqué du volume
- ✓ Jeu « Param. 2 » plus adapté

➡ Interprétation plus détaillée ?

Exemple : le cas de Saint Paul de Varces

Modélisation « fluide continu »

- ✓ Modèle de Saint-Venant
  - moyennée sur l'épaisseur
  - « couche mince »

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h\left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y}\right) = 0$$

$$h\frac{\partial U}{\partial t} + h\left(U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y}\right) = g_x h - g_z h\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right) - \frac{\tau_{zx}}{\rho}$$

$$h\frac{\partial V}{\partial t} + h\left(U\frac{\partial V}{\partial x} + V\frac{\partial V}{\partial y}\right) = g_y h - g_z h\left(\frac{\partial h}{\partial y}\right) - \frac{\tau_{zy}}{\rho}$$

- ✓ Modèle de Voellmy :
  - Frottement « solide »
  - Frottement « turbulent »

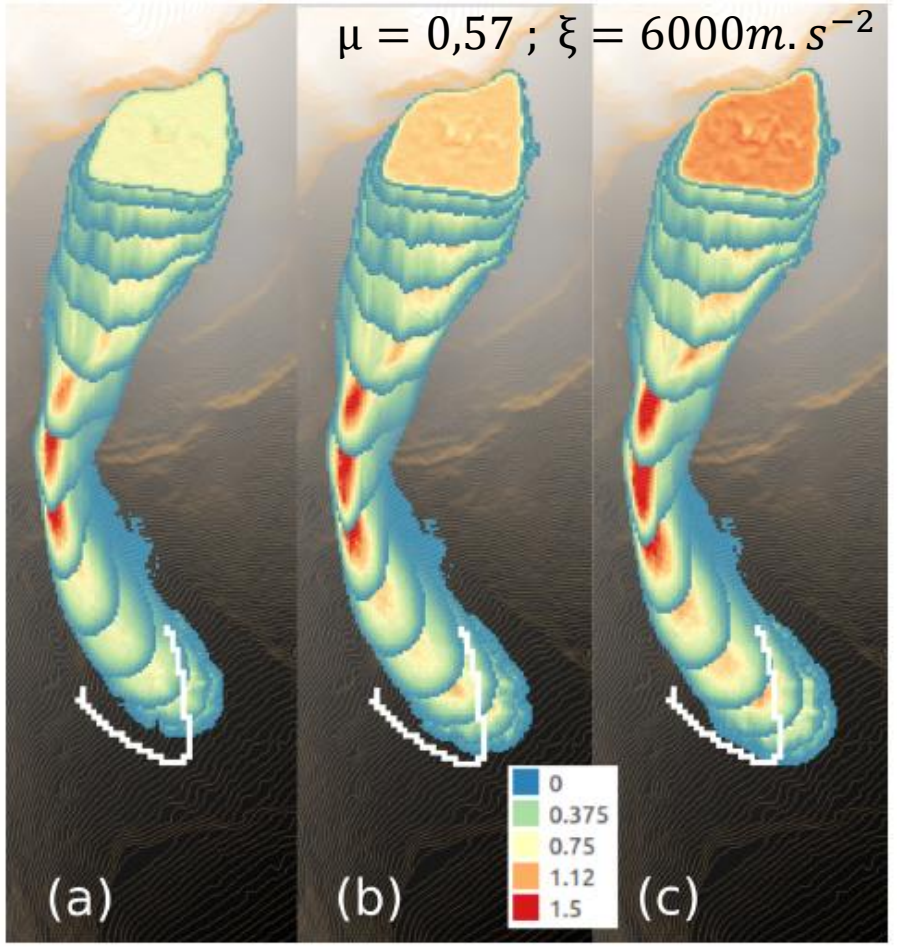
$$\tau_{zx} = \left[\mu\rho g_z h + \rho g_z \frac{|U|^2}{\xi}\right]\frac{U}{|U|}$$

$$\tau_{zy} = \left[\mu\rho g_z h + \rho g_z \frac{|V|^2}{\xi}\right]\frac{V}{|V|}$$

Exemple : le cas de Saint Paul de Varces

Modélisation « fluide continu »

- ✓ Prédiction de la limite aval
- ✓ Influence de V_{total}
- ✓ Limitations :
  - Blocs unitaires
  - Distribution des épaisseurs de dépôt

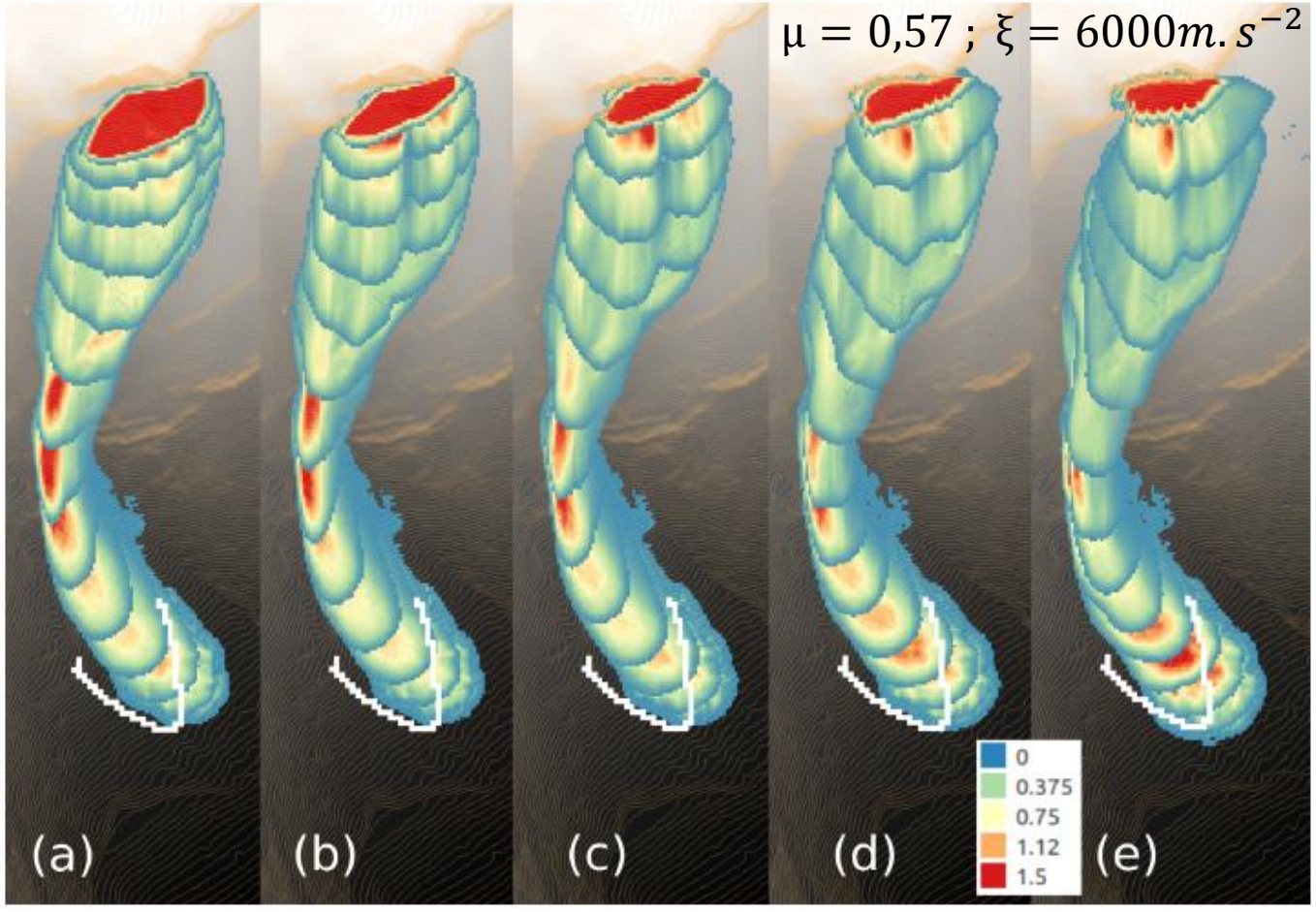


V_{total}	$1500m^3$	$2000m^3$	$2500m^3$

Exemple : le cas de Saint Paul de Varces

Modélisation « fluide continu »

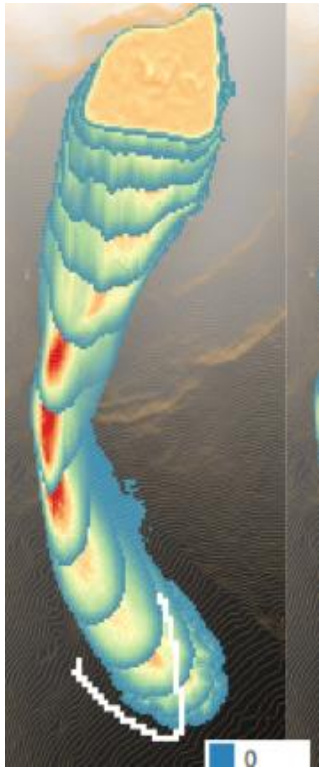
- ✓ Influence de la définition de la zone de départ
- ✓ Hypothèse « couche mince » non respectée au départ



Exemple : le cas de Saint Paul de Varces

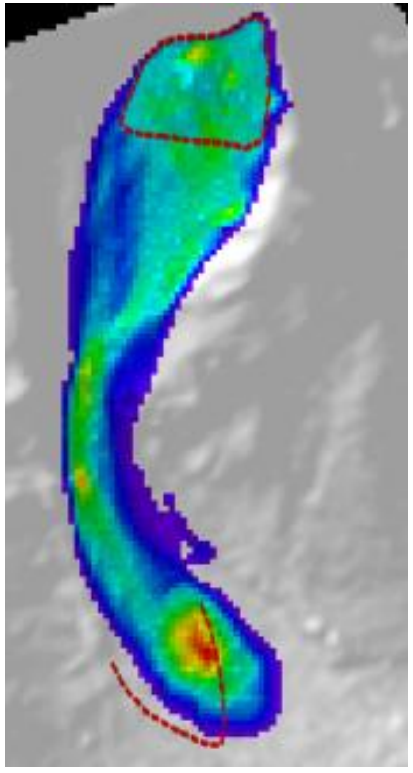
Modélisation « fluide continu » : comparaison d'outils (V_{total}=2000m³)

INRAEAval



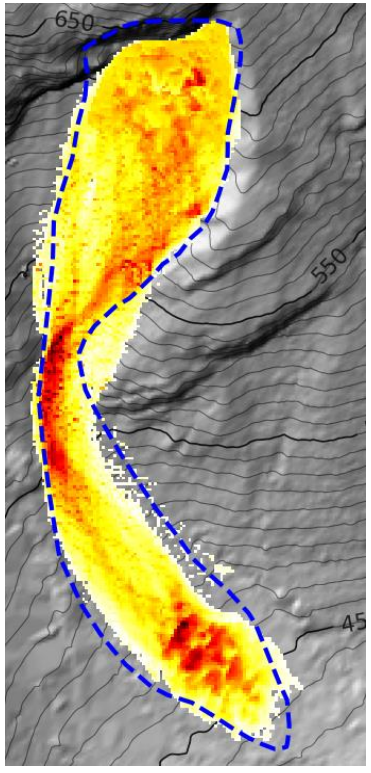
$\mu = 0{,}57$; $\xi = 6000 m.s^{-2}$

Ramms



$\mu = 0{,}58$; $\xi = 6000 m.s^{-2}$

Shaltop



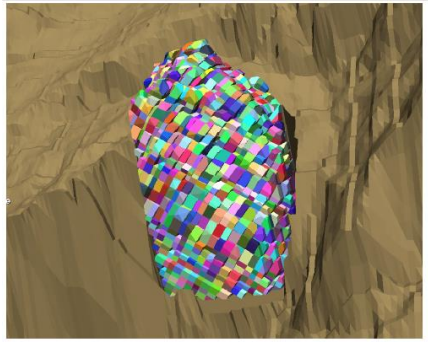
$\mu = 0{,}47$

➡ Résultats similaires

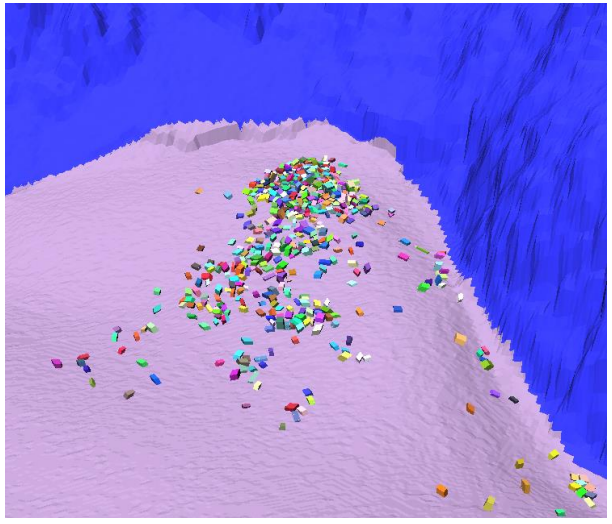
Exemple : le cas de Saint Paul de Varces

Modélisation discrète

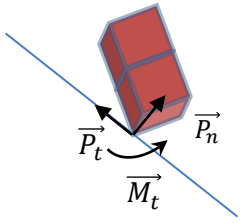
- Génération d'une masse rocheuse préfragmentée



- ✓ librairie Python Unblocksgen (Discrete Fracture Network)
- ✓ Orientations des plans de fractures (3 familles)
- ✓ Distances entre plans (distribution normale)



- Interactions bloc-sol **et bloc-bloc :**
  - ✓ Même modèle de contact



$\overrightarrow{P_n}$ tel que $\overrightarrow{V^{re}_{n,point\ impact}}$ = -e $\overrightarrow{V^{in}_{n,point\ impact}}$

$\overrightarrow{P_t}$ tel que $\overrightarrow{P_t} \leq \mu \overrightarrow{P_n}$

$\overrightarrow{M_t}$ tel que $\overrightarrow{M_t} \leq \mu_r R_{eq,bloc} \overrightarrow{P_n}$

✓ Paramètres

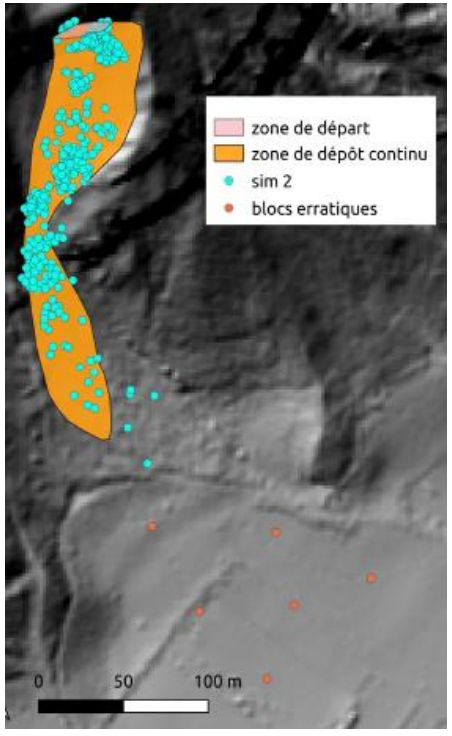
Num. sol	1	2	3	4	5	Bloc/bloc
$e_{b,t}$	0	0	0	0	0	0
$\mu_{b,t}$	0,65	0,7	0,7	0,75	0,75	0,6
$\mu_{r/b,t}$ - *Param. 2*	0,075	0,15	0,15	0,2	0,2	0

Exemple : le cas de Saint Paul de Varces

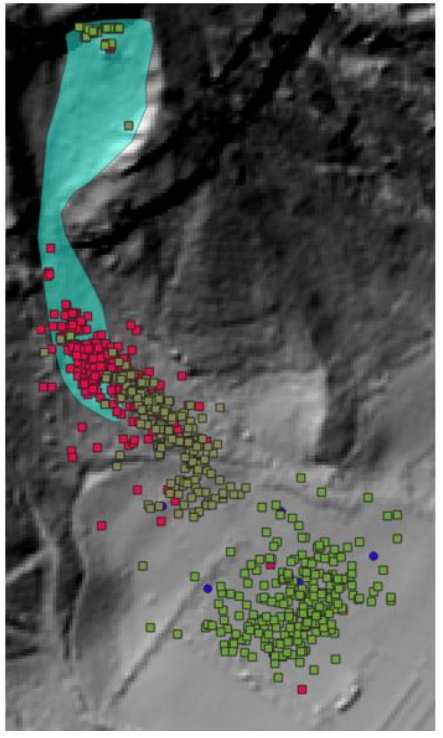
Modélisation discrète

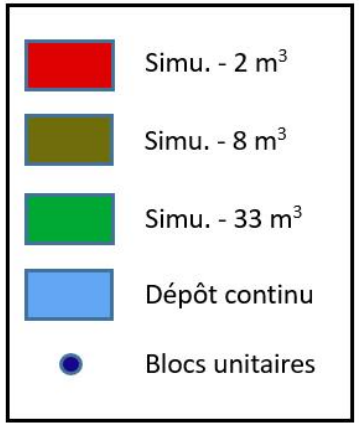
- Analyse qualitative
  - ✓ Dépôt continu
  - ✓ Bocs unitaires
- Comparaison avec les simu. trajecto.
  - ✓ Propagation plus faible
- Influence des paramètres de simulation
  - ✓ Fracturation de la masse rocheuse
  - ✓ Granulométrie

« Discret »



« Trajecto. »





Conclusions

- ✓ Modèle trajectographique difficile à interpréter
- ✓ Modèle « fluide continu » traduit la propagation du dépôt dense (mais pas celle des blocs unitaires)
- ✓ Modèles discrets prometteurs mais nécessitent une étude détaillée

Perspectives

- ✓ Analyse comparative détaillée de différents modèles « fluide continu »
  - Contrainte basale
  - Effets de la courbure
- ✓ Analyse fine du modèle discret :
  - Etude de sensibilité (paramètres prépondérants, robustesse)
  - Bilans énergétiques
  - Effets de :
    - Paramètres numériques
    - Géométrie de la masse rocheuses fragmentée
    - Paramètres des lois de contact

⇒ Procédure de choix justifié des paramètres du modèle