

# GLISSEMENTS DE TERRAIN DANS LE VAL D'ARLY

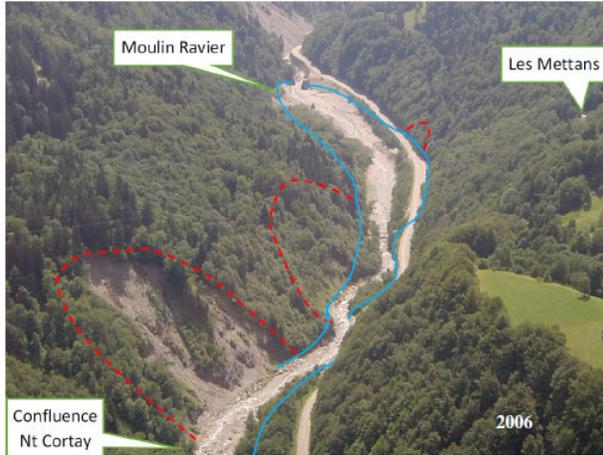
## Géomorphologie, analyse des glissements de terrain et calcul de la susceptibilité

Y. Thiery, A-C. Flindt, E. Equilbey, F. Lacquement  
Mai 2023



Avec le soutien de





ETRM, 2015



SAGE, 2018

# GENERALITES

Un site actif soumis à plusieurs types d'aléas

- Chutes de blocs
- Glissements de terrain
- Torrentiels





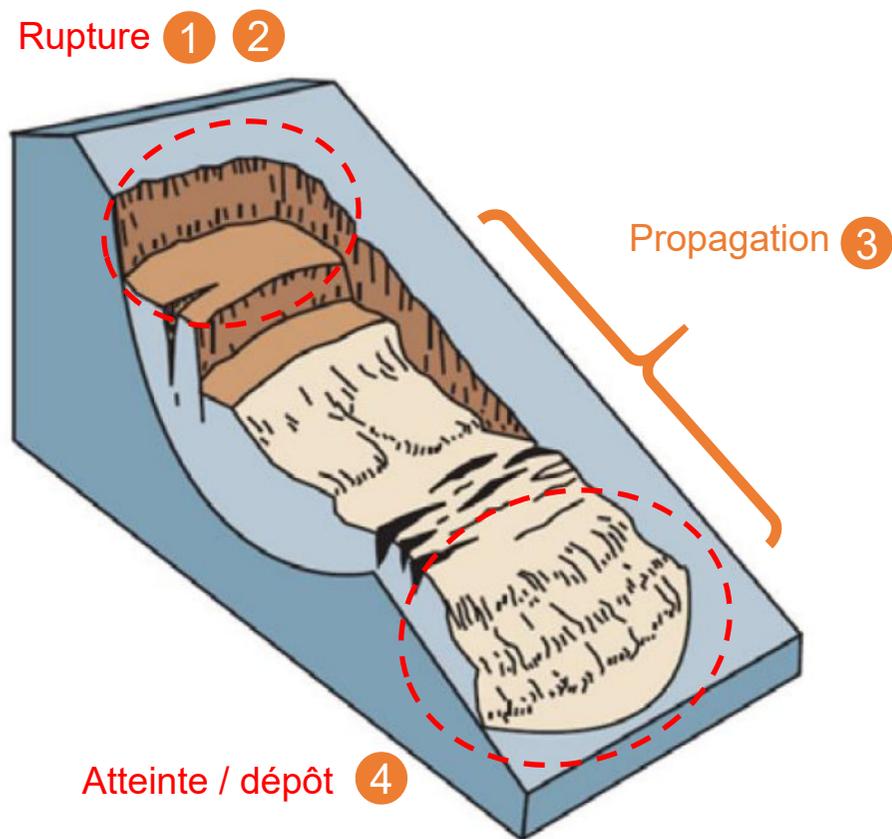
# Les types de glissements de terrain

Un site aux instabilités variées

- Chutes de blocs
- Glissements de terrain
- Grande déformations de versant



# Travaux réalisés



- Carte géomorphologique et carte de l'activité des glissements de terrain
- Modélisation des ruptures (recherche de critères de rupture) 1
- Modélisation spatiale des probabilités de déstabilisations et estimation des volumes mobilisables selon des scénarios de nappe 2
- Analyse de la propagation et estimation de l'atteinte 3

4

# Carte géomorphologique

- **Objectifs**

Localiser et caractériser les déstabilisations  
Localiser les formes liées aux glissements de terrain  
Caractériser l'activité des phénomènes

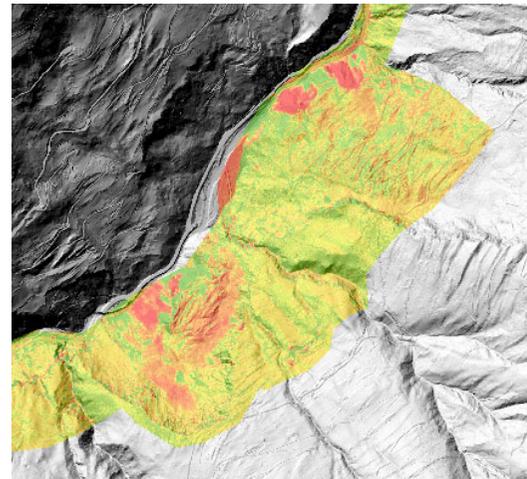
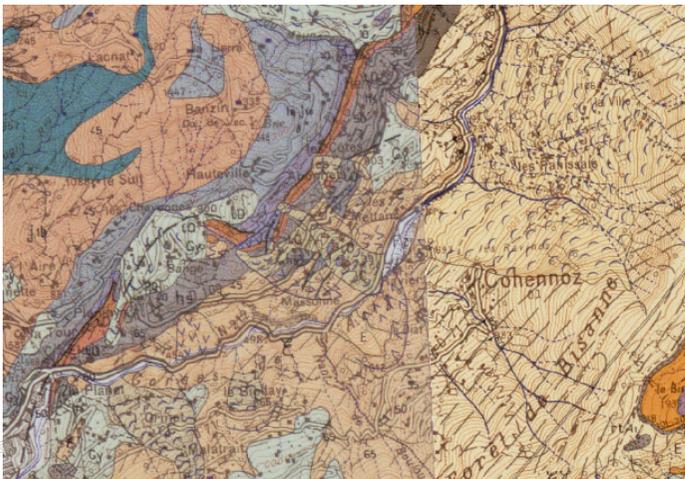
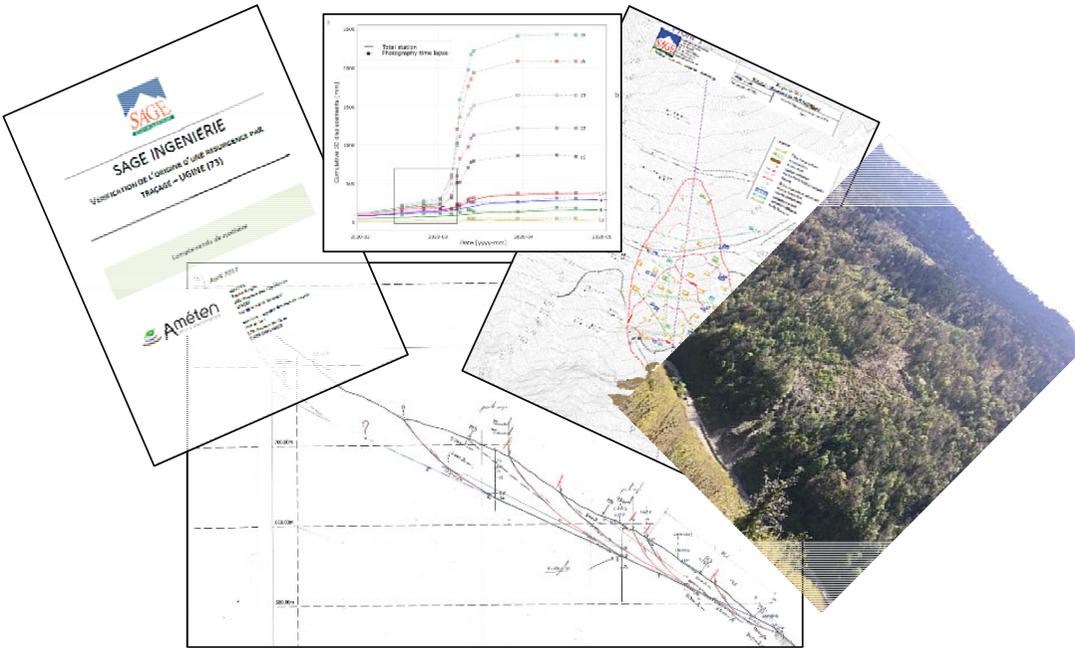
- **Moyens**

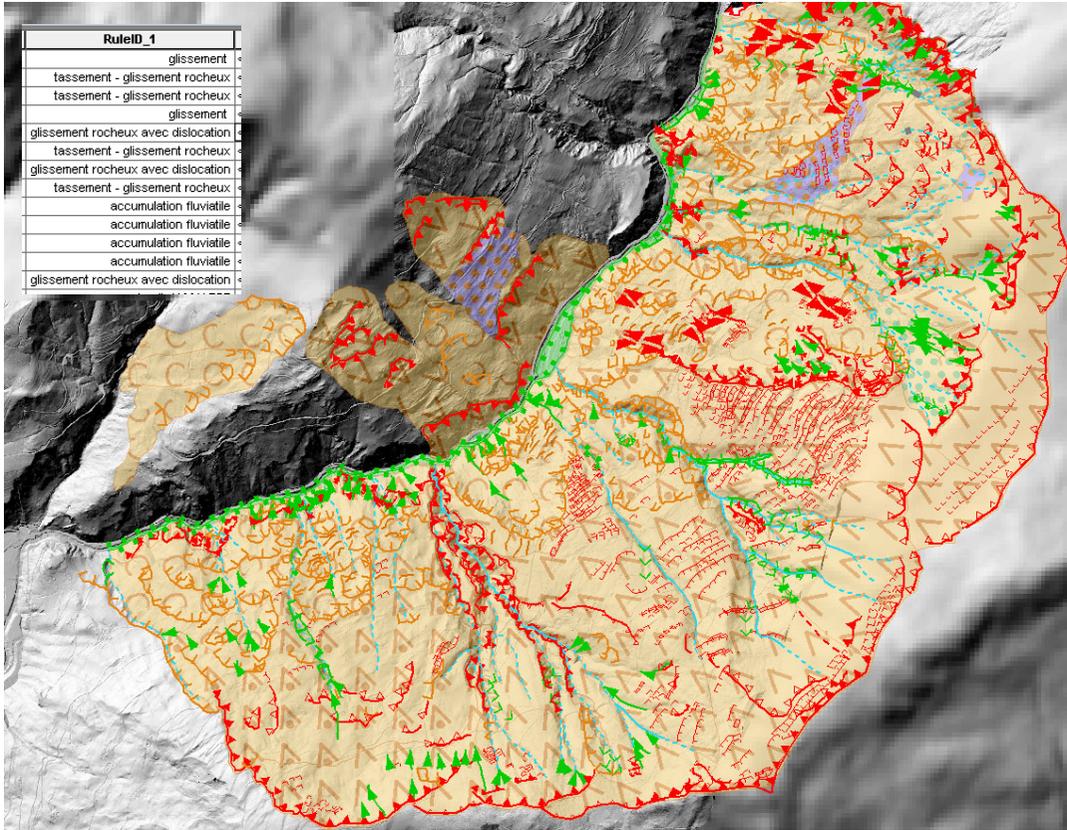
Rapports/cartes antécédent(e)s

Observations de terrain

Analyse diachronique (Photographies aériennes et MNT)

Analyse des vitesses (European Ground Motion Service <https://egms.land.copernicus.eu/>)





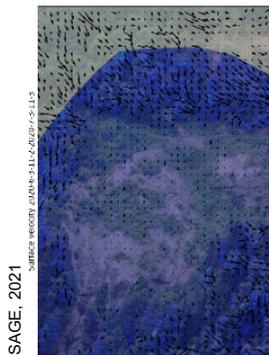
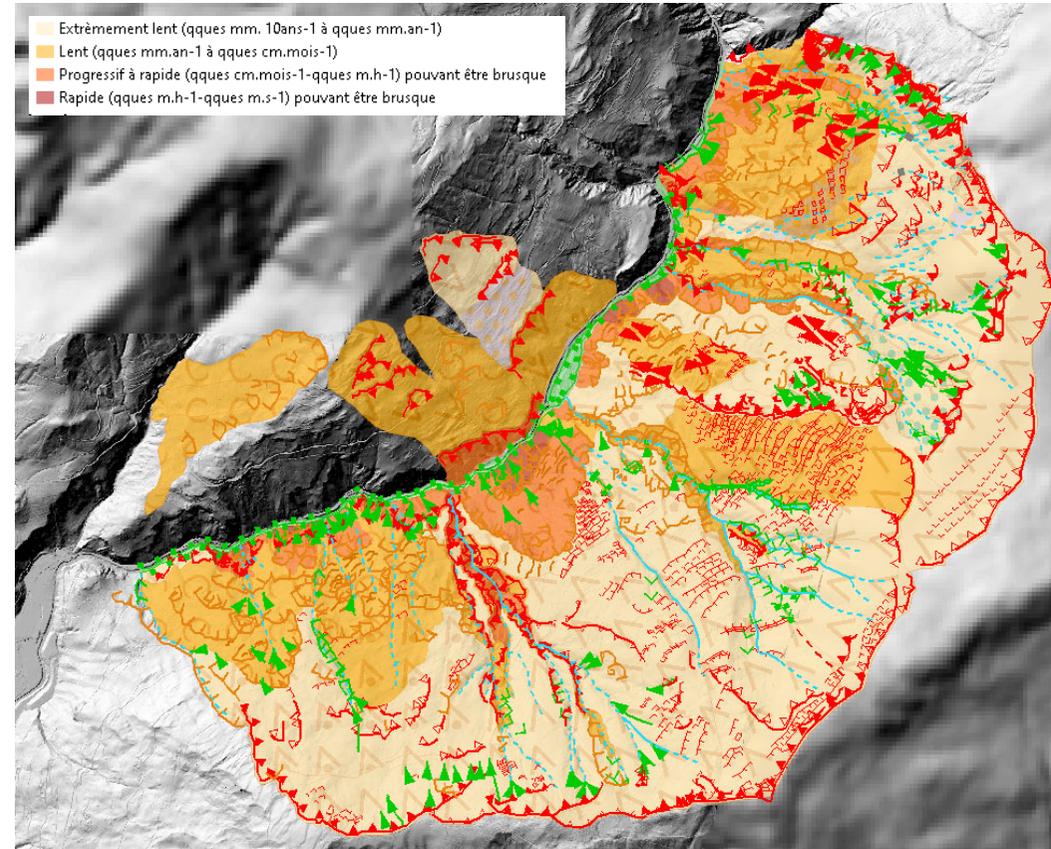
# Carte géomorphologique

## • Résultats

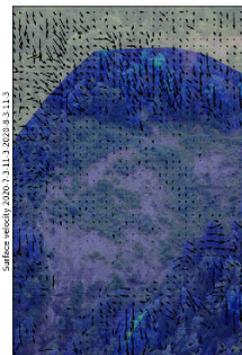
Base de données des phénomènes

Carte géomorphologique (*Légende UNIL adaptée*)

Carte de l'activité des glissements de terrain (*appuyée par des mesures in situ –SAGE-, observations satellitaires EMGS*)



Déplacements entre le 3/6/20 et le 3/7/20



Déplacements entre le 3/7/20 et le 3/8/20





# Modélisation des ruptures

## Hypothèses

Déstabilisations dans matériaux altérés argileux

Matériaux meubles homogènes

Scénarii de déstabilisations pour différentes profondeur et différents niveaux de nappes

Type sélectionnés :

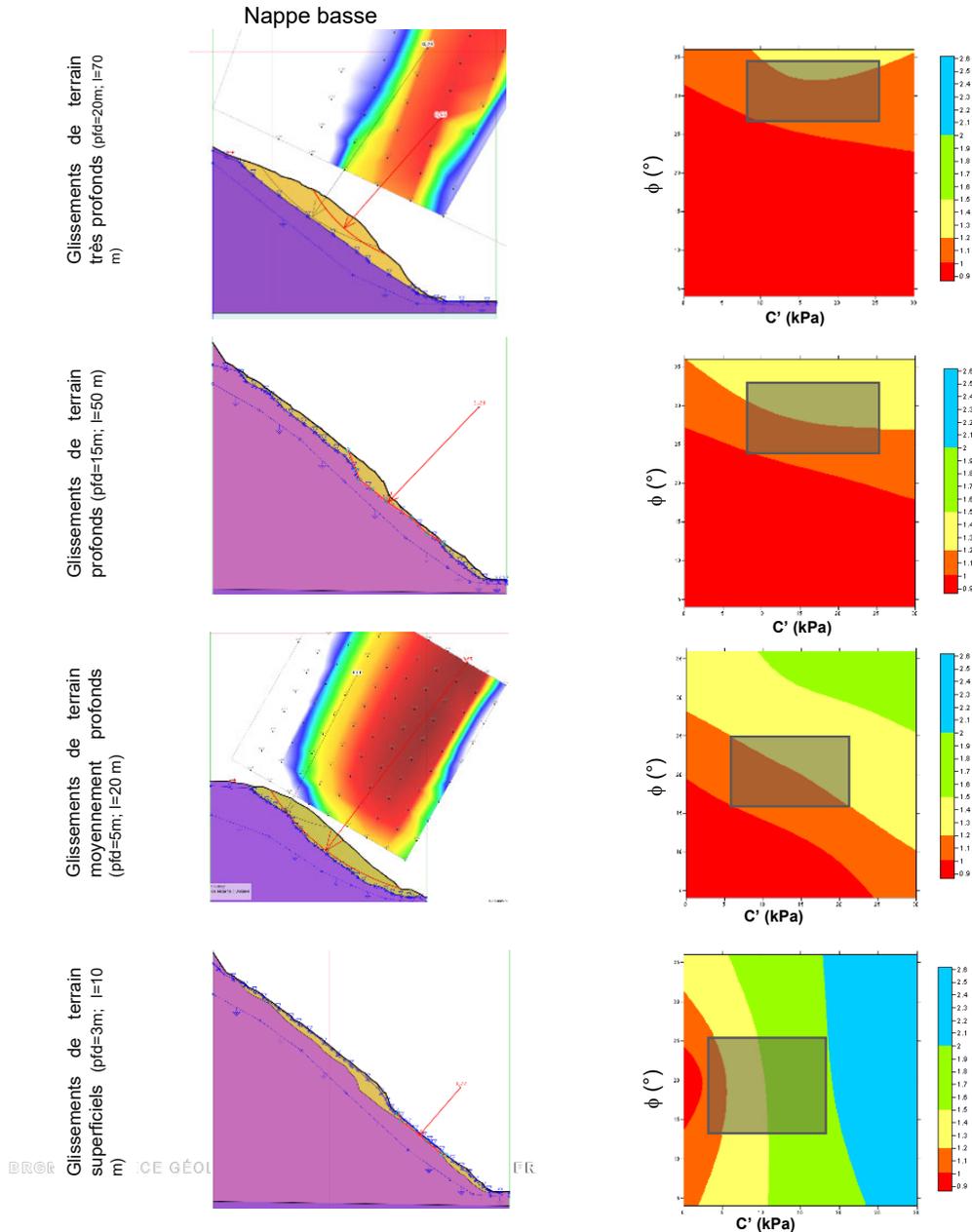
- Glissements de terrain très profonds (pfd= max 20m; l=70 m)
- Glissements de terrain profonds (pfd=max 15m; l=50 m)
- Glissements de terrain moyennement profonds (pfd= max 5m; l= 20 m)
- Glissements de terrain superficiels (pfd= max 3m; l=10 m)

Niveau de nappe d'eau:

- Niveau bas (0)
- Niveau modéré (0.5)
- Niveau haut (0.9)

## Résultats

Caractéristiques mécaniques définies pour les matériaux meubles pour des conditions de nappe basse ( $c' = 7-25\text{kPa}$ ;  $\phi = 25-35^\circ$ ;  $\gamma = 20\text{kN.m}^3$ ) après analyse de sensibilité



Fenêtre de valeurs sélectionnées pour chaque cas

Parmi les fenêtres retenues, un choix 'expert' est réalisé pour l'ensemble des matériaux meubles (altérations des schistes) considérés comme homogènes sur le site

# Modélisation spatiale des ruptures

- Objectifs

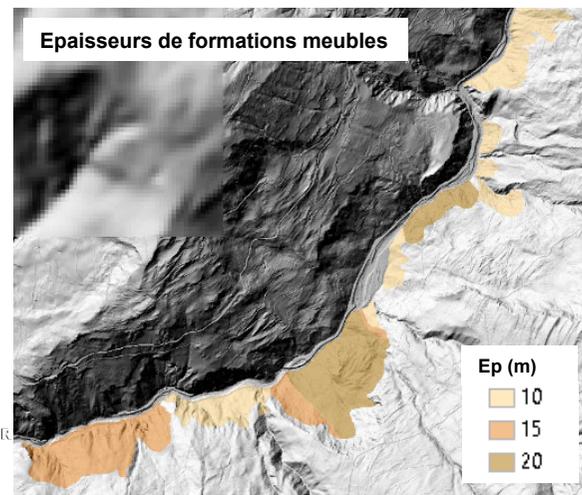
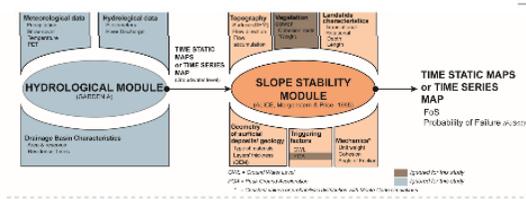
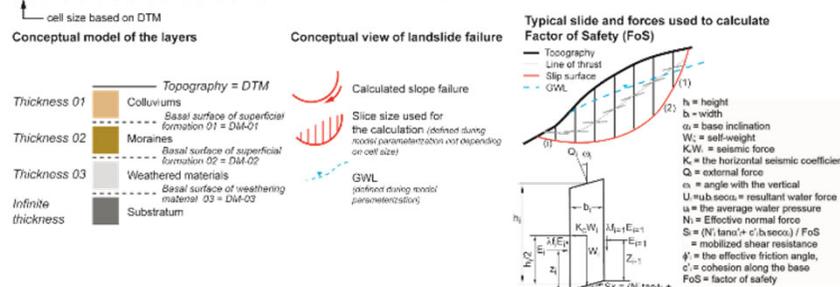
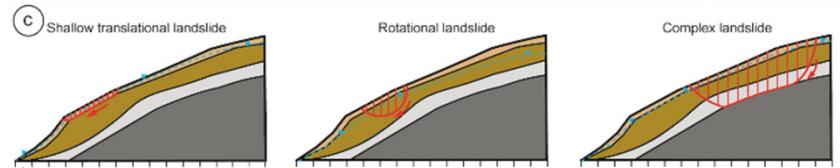
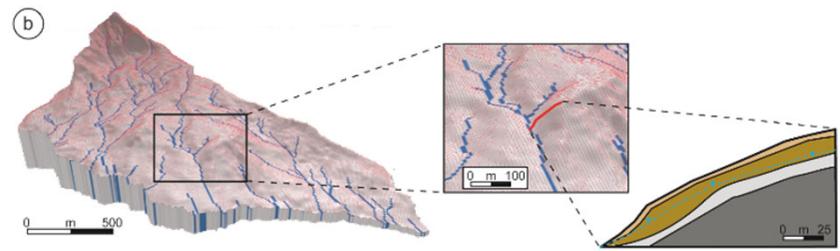
Spatialiser les secteurs susceptibles pour chaque type de rupture définies

- Moyens (ALICE®)

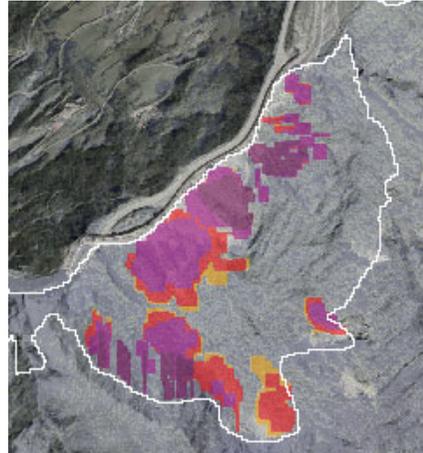
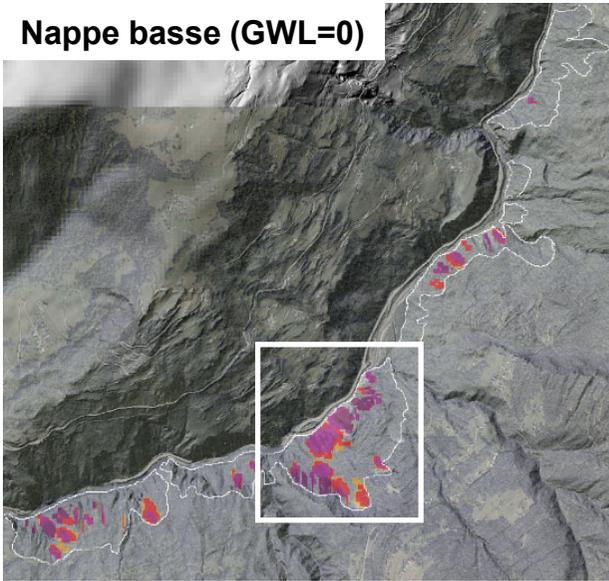
Calcul spatialisé de la probabilité de rupture ( $FS \leq 1$ ) pour 4 types de déstabilisation définis précédemment → ALICE®

- Hypothèses

- Sélection experte des secteurs à matériaux meubles
- Épaisseur des matériaux définis de manière empirique selon obs. de terrain et rapports antécédents
- Niveaux de nappe d'eau uniforme
- Pas de circulation d'eau dans les matériaux
- Pas d'effet de succion pris en compte



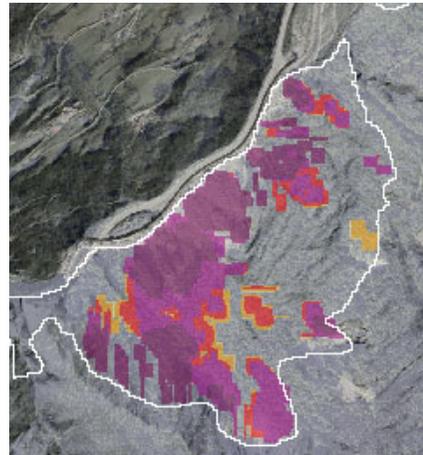
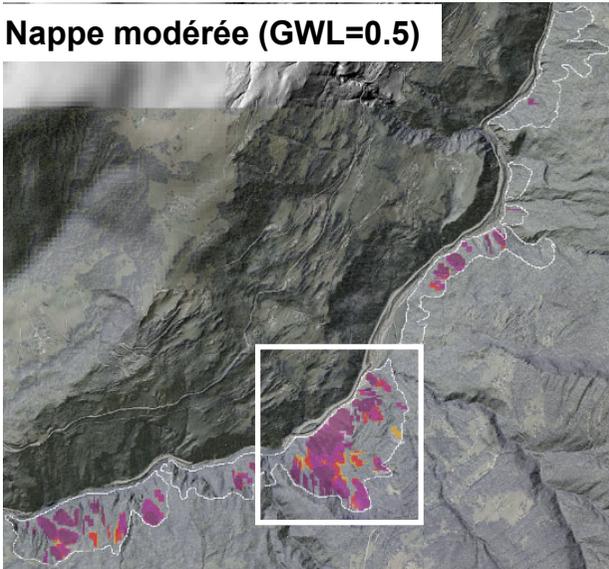
Nappe basse (GWL=0)



Probabilité de rupture

0 - 0.00001	Nulle à négligeable
0.0000100001 - 0.0001	Très faible
0.0001000001 - 0.001	Faible
0.0010000001 - 0.01	Modérée
0.0100000001 - 0.1	Forte
0.1000000001 - 0.5	Très forte
0.5 - 1	

Nappe modérée (GWL=0.5)



# Modélisation spatiale des ruptures (GT profonds – 15-20 m)

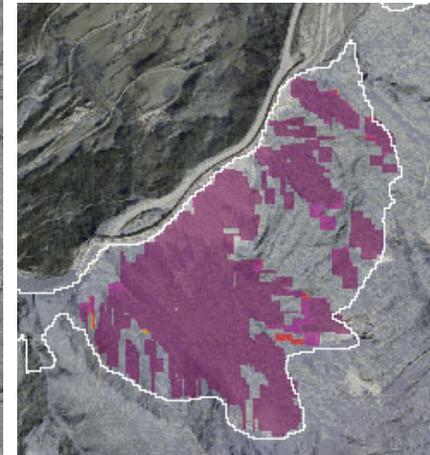
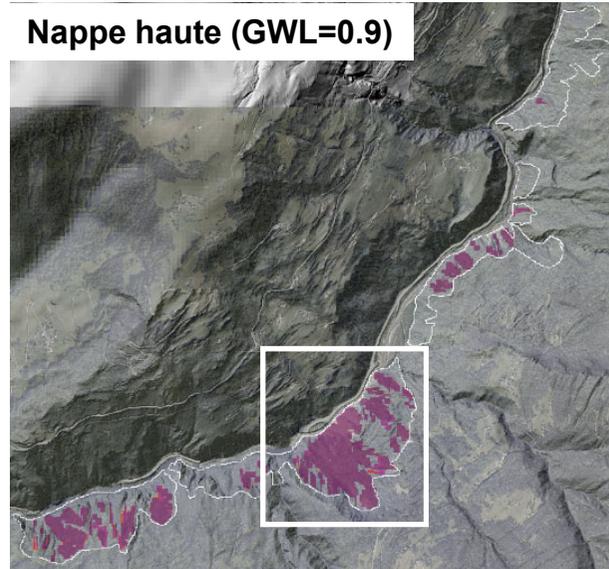
## • Résultats

Carte des probabilités de rupture pour différentes profondeurs  
 Scénarii de déstabilisation pour différents types de rupture  
 Estimation des volumes mobilisables

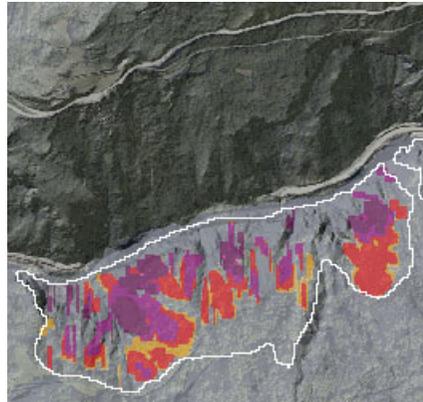
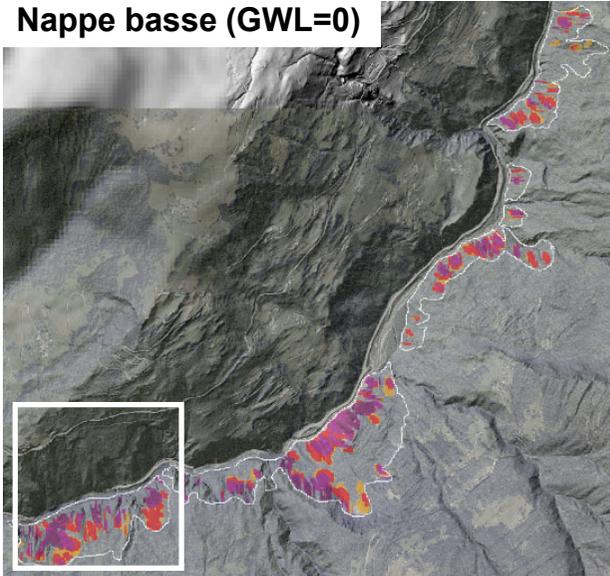


**Probabilités fortes de déstabilisation même en contexte de nappe basse**  
**Volumes mobilisables en cas de nappe haute (i.e. cellule avec probabilités > 10<sup>-3</sup>) → 6,2.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>**

Nappe haute (GWL=0.9)



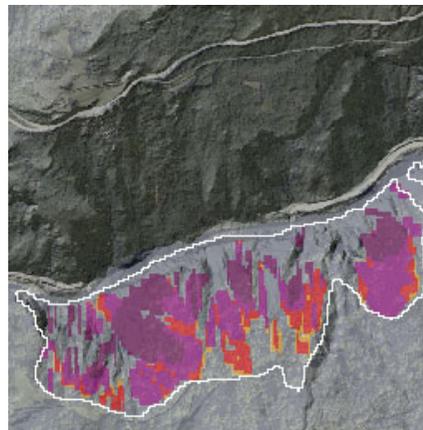
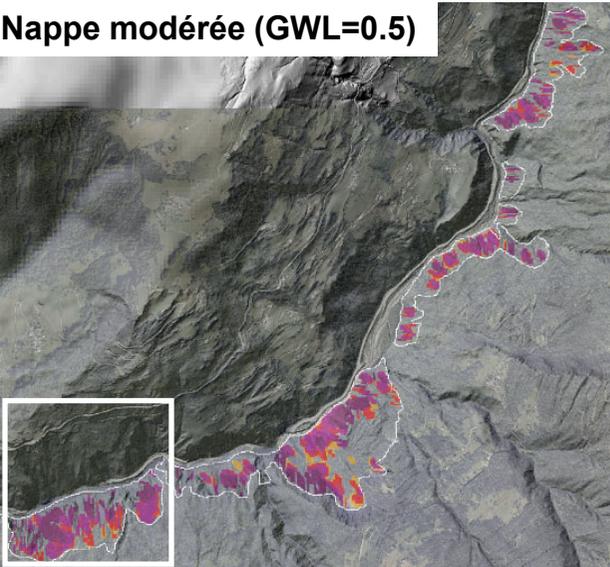
Nappe basse (GWL=0)



Probabilité de rupture

0 - 0.00001	Nulle à négligeable
0.0000100001 - 0.0001	Très faible
0.0001000001 - 0.001	Faible
0.0010000001 - 0.01	Modérée
0.0100000001 - 0.1	Forte
0.1000000001 - 0.5	Très forte
0.5 - 1	

Nappe modérée (GWL=0.5)



# Modélisation spatiale des ruptures (GT moyennement profonds – 10-15 m)

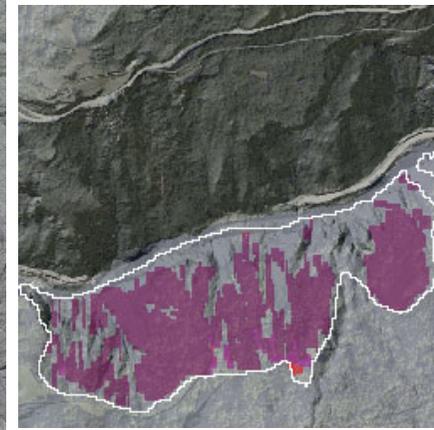
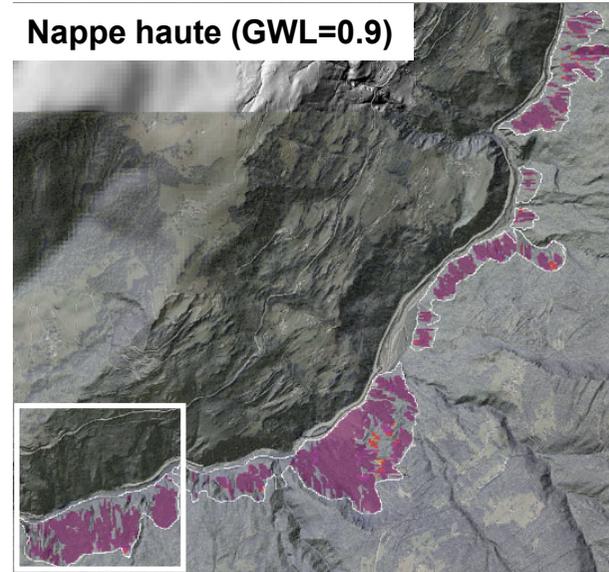
## • Résultats

Carte des probabilités de rupture pour différentes profondeurs  
 Scénarii de déstabilisation pour différents types de rupture  
 Estimation des volumes mobilisables

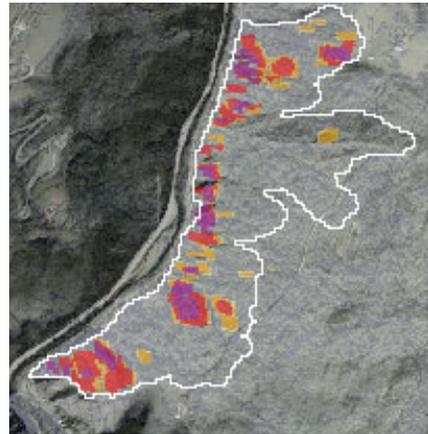
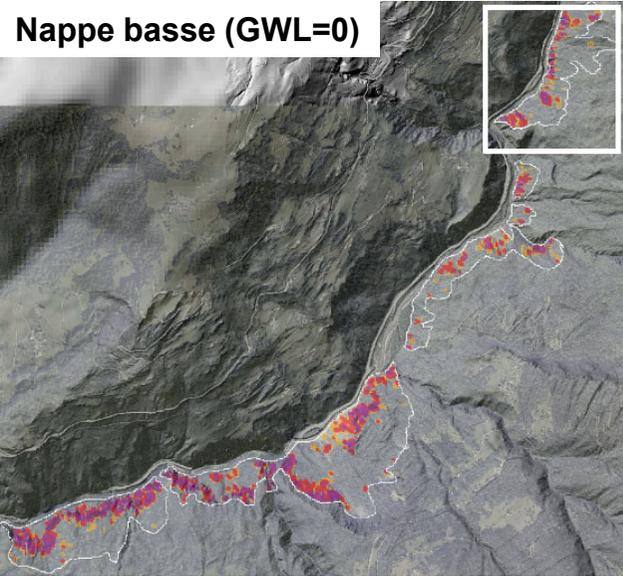


**Probabilités fortes de déstabilisation même en contexte de nappe basse**  
**Volumes mobilisables en cas de nappe haute (i.e. cellule avec probabilités > 10<sup>-3</sup>) → 7.6.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>**

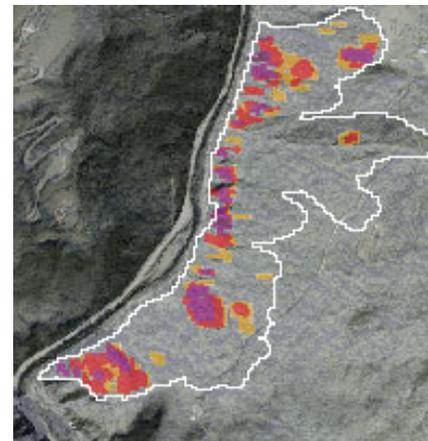
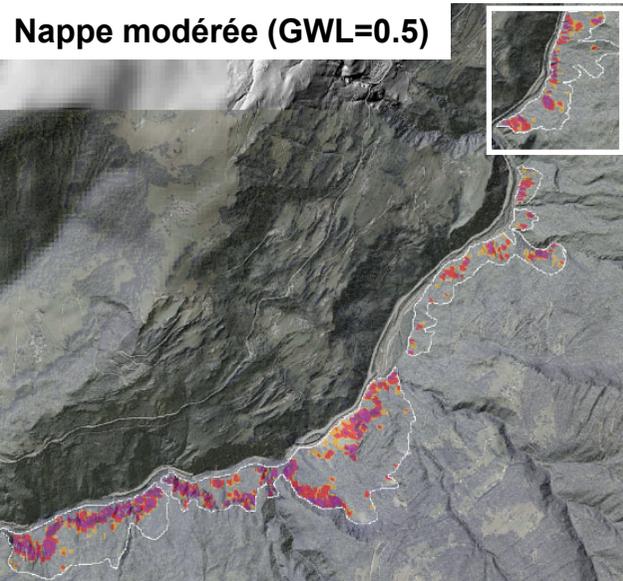
Nappe haute (GWL=0.9)



Nappe basse (GWL=0)



Nappe modérée (GWL=0.5)



Probabilité de rupture

0 - 0.00001	Nulle à négligeable
0.0000100001 - 0.0001	Très faible
0.0001000001 - 0.001	Faible
0.0010000001 - 0.01	Modérée
0.0100000001 - 0.1	Forte
0.1000000001 - 0.5	Très forte
0.5 - 1	

# Modélisation spatiale des ruptures (GT superficiels – max 5m)

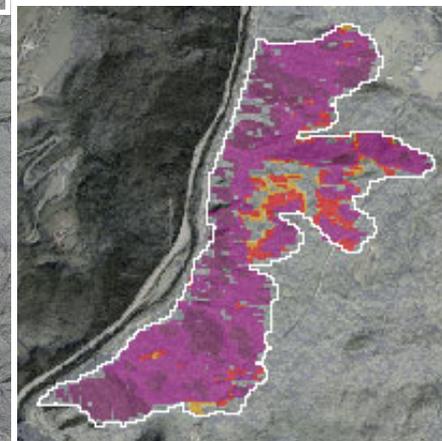
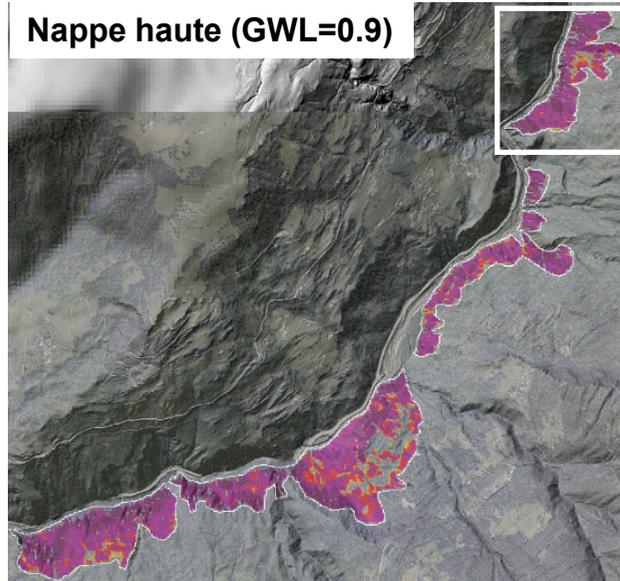
## • Résultats

Carte des probabilités de rupture pour différentes profondeurs  
 Scénarii de déstabilisation pour différents types de rupture  
 Estimation des volumes mobilisables

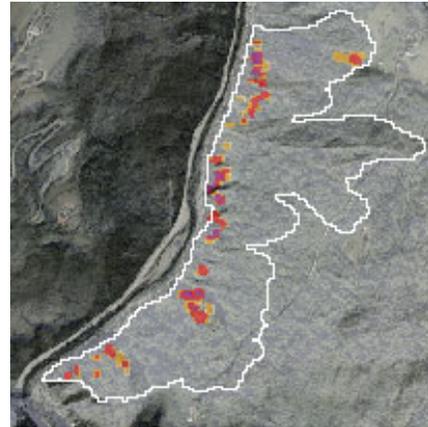
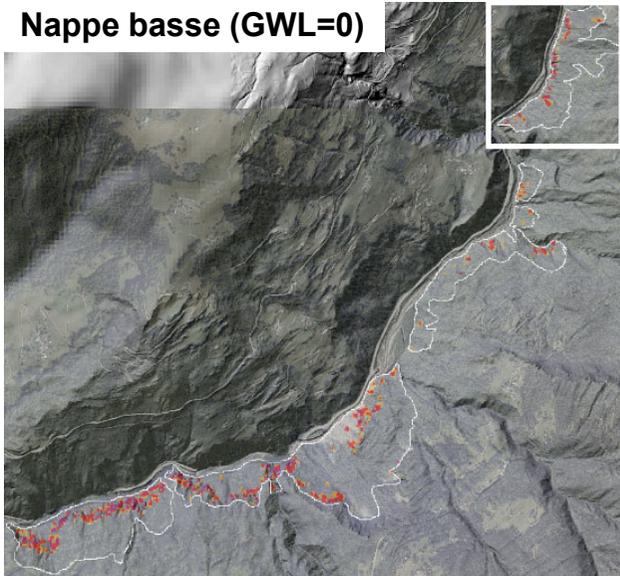


**Probabilités très fortes de déstabilisation en bas de versants même en contexte de nappe basse ou modérée**  
**Volumes mobilisables en cas de nappe haute (i.e. cellule avec probabilités > 10<sup>-3</sup>) → 1,85.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>**

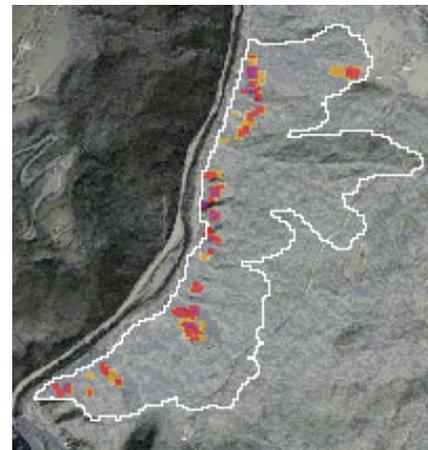
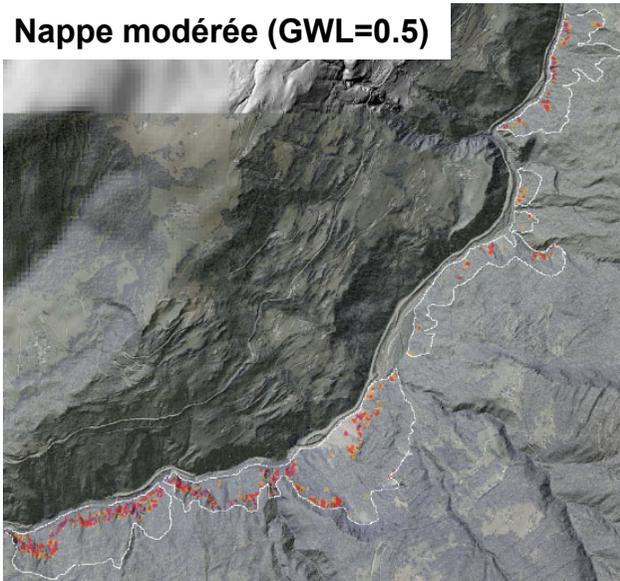
Nappe haute (GWL=0.9)



Nappe basse (GWL=0)



Nappe modérée (GWL=0.5)



Probabilité de rupture

0 - 0.00001	Nulle à négligeable
0.0000100001 - 0.0001	Très faible
0.0001000001 - 0.001	Faible
0.0010000001 - 0.01	Modérée
0.0100000001 - 0.1	Forte
0.1000000001 - 0.5	Très forte
0.5 - 1	

# Modélisation spatiale des ruptures (GT superficiels – max 3m)

## • Résultats

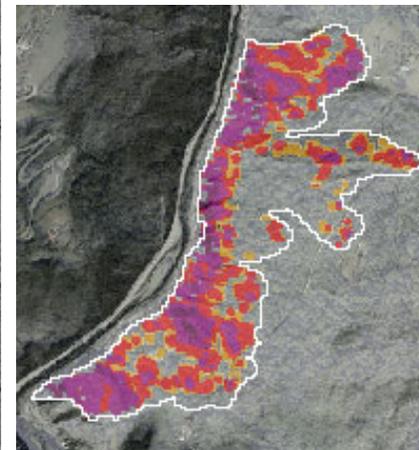
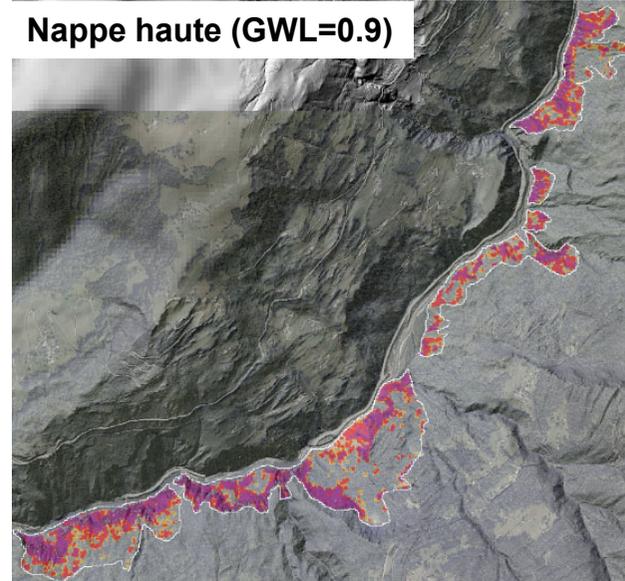
Carte des probabilités de rupture pour différentes profondeurs  
 Scénarii de déstabilisation pour différents types de rupture  
 Estimation des volumes mobilisables



**Probabilités fortes à modérées de déstabilisation en bas de versants même en contexte de nappe basse ou modérée**

**Volumes mobilisables en cas de nappe haute (i.e. cellule avec probabilités > 10<sup>-3</sup>) → 6,85.10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>**

Nappe haute (GWL=0.9)



# SYNTHESE 01: spatialisation de la déstabilisation



## RESULTATS ENCOURAGEANTS

- Facteurs de sécurité proches de ceux calculés sous TALREN
- Des enveloppes de déstabilisation satisfaisantes au regard des incertitudes sur données d'entrée (carac. géotechniques, épaisseurs etc...)

→ Secteurs calculés comme très instables proches des enveloppes de glissements considérés comme progressifs à rapides ou rapides sur la carte géomorphologique

## MODELES ACTUELS

- Une emprise des matériaux meubles définies empiriquement
- Une grande simplification des épaisseurs d'altération
- Une prise en compte de la nappe d'eau très sommaire
- Un MNT encore perfectible

→ Fortes incertitudes sur les volumes mobilisables

## ALICE



## AXES DE PROGRESSION

- Intégration et spatialisation des épaisseurs de formations d'altération avec des levés géophysiques
- Construction d'une nappe d'eau tenant compte des effets topographiques et des observations experts
- Affiner les valeurs géotechniques pour éviter une trop forte incertitude (vers des essais géotechniques?)



# Modélisation de la propagation

- **D'une manière spécifique lorsque des zones mal connues, à fort risque supposé, sont identifiées**
  - Modélisation numérique à base physique : SHALTOP
- **D'une manière générale dans l'optique de la révision du plan de prévention des risques naturels**
  - Utilisation de FLOW-R

# Analyse de la propagation et estimation de l'atteinte : SHALTOP

## Hypothèses principales

- $h \ll \Delta L$
- Matériaux homogènes
- Pas d'érosion du lit
- Dissipation de l'énergie par friction basale

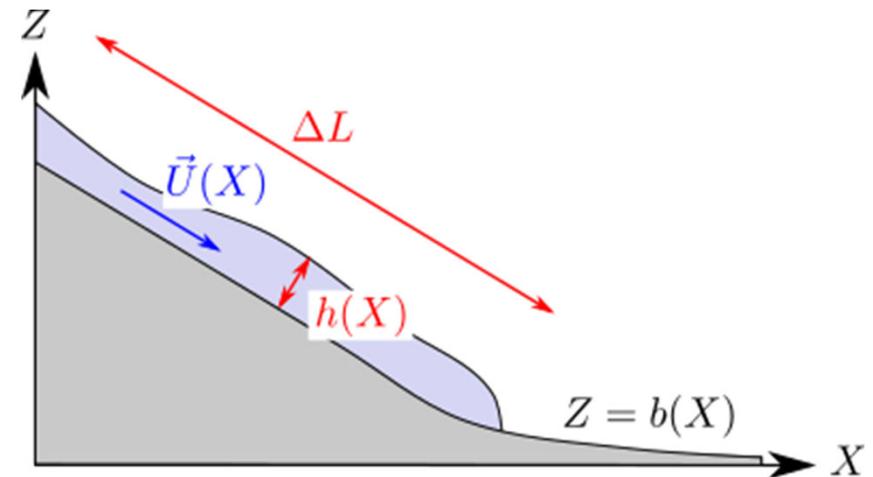
## Applications

- Écoulements granulaires expérimentaux (e.g. Mangeney et al., 2007)
- Glissements de terrain (e.g. Favreau et al., 2010; Lucas et al., 2014; Moretti et al., 2015; Brunet et al., 2017; Yamada et al., 2018; Peruzzetto et al., 2019, 2020, 2021, 2022, Guimpier et al., 2021; ...)

## Description fine de la courbure de la topographie

(Peruzzetto et al., 2021)

- Important pour bien prendre en compte les ruptures de pente
- Important pour la calibration des paramètres



e.g. Bouchut et al. (2003); Bouchut et Westdickenberg (2004); Mangeney-Castelneau et al. (2005); Mangeney et al. (2007)

# Analyse de la propagation et estimation de l'atteinte : SHALTOP

## Méthode classique d'utilisation

- 1 : Calibration du modèle

**Reproduction  
d'événements passés**



**Choix de la rhéologie et  
des paramètres  
rhéologiques associés**

- 2 : Simulation prédictive avec les paramètres calibrés

**Scénarios de  
déstabilisations**



**Simulations prédictives  
avec analyse de sensibilité**

## Cas du Val d'Arly

- Pas de données disponibles pour reproduire des événements passés
- → **Simulations prédictives en utilisant des paramètres de la littérature**

# Analyse de la propagation et estimation de l'atteinte : SHALTOP

## Choix de la rhéologie

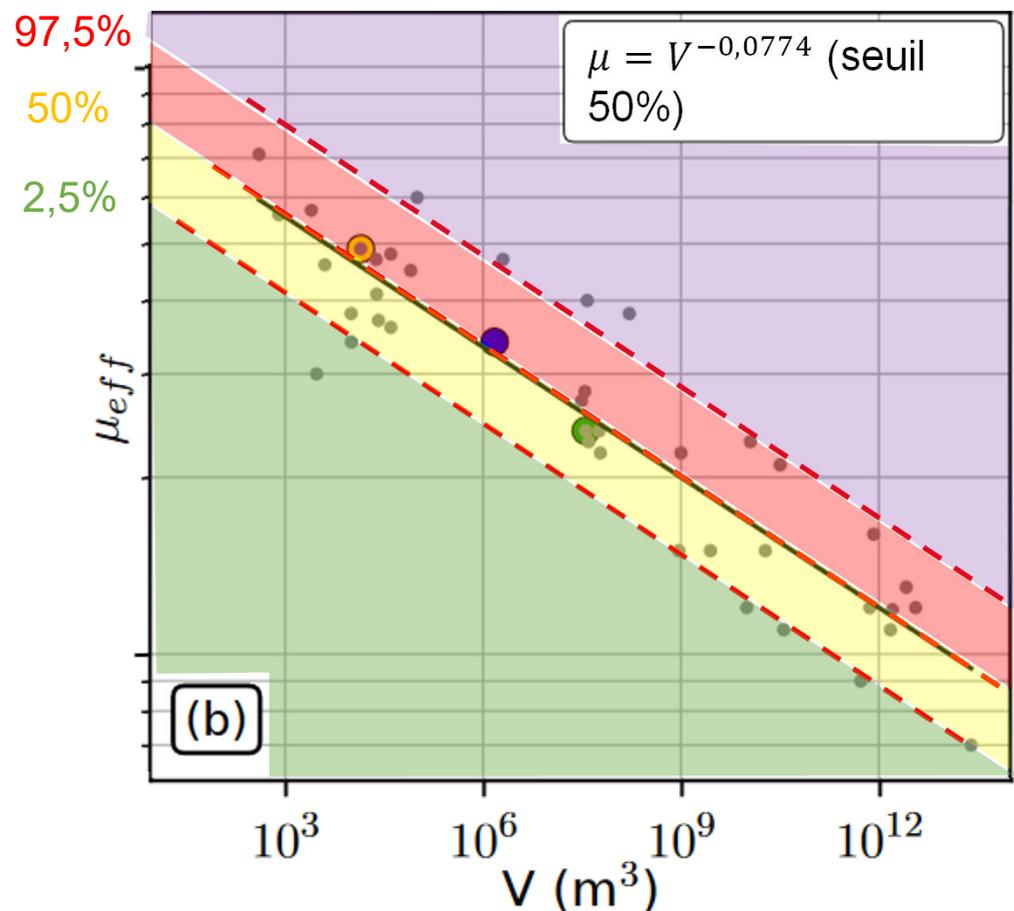
- **Rhéologie de Coulomb** : un seul paramètre empirique, le **coefficient de friction basal**  $\mu = \tan(\delta)$ , contrôle la mobilité du glissement
- Augmentation du coefficient de friction → Diminution de la mobilité
- A déjà permis de reproduire des écoulements gravitaires secs et chargés en eau

## Choix du coefficient de friction

- Loi empirique fonction du volume  $V$  :  $\mu = V^{-0,0774}$
- **Incertitude** estimée grâce à la dispersion entre la loi et les observations

## Exemple de seuils pour $V = 15\,600\text{ m}^3$ :

Augmentation de la probabilité d'atteinte	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 97,5 % → <math>\delta = 19,8^\circ</math></li> <li>• 75 % → <math>\delta = 26,0^\circ</math></li> <li>• 50 % → <math>\delta = 23,9^\circ</math></li> <li>• 25 % → <math>\delta = 21,7^\circ</math></li> <li>• 2,5 % → <math>\delta = 17,3^\circ</math></li> </ul>	↓	Diminution de la mobilité
--	---	--	---	---------------------------------

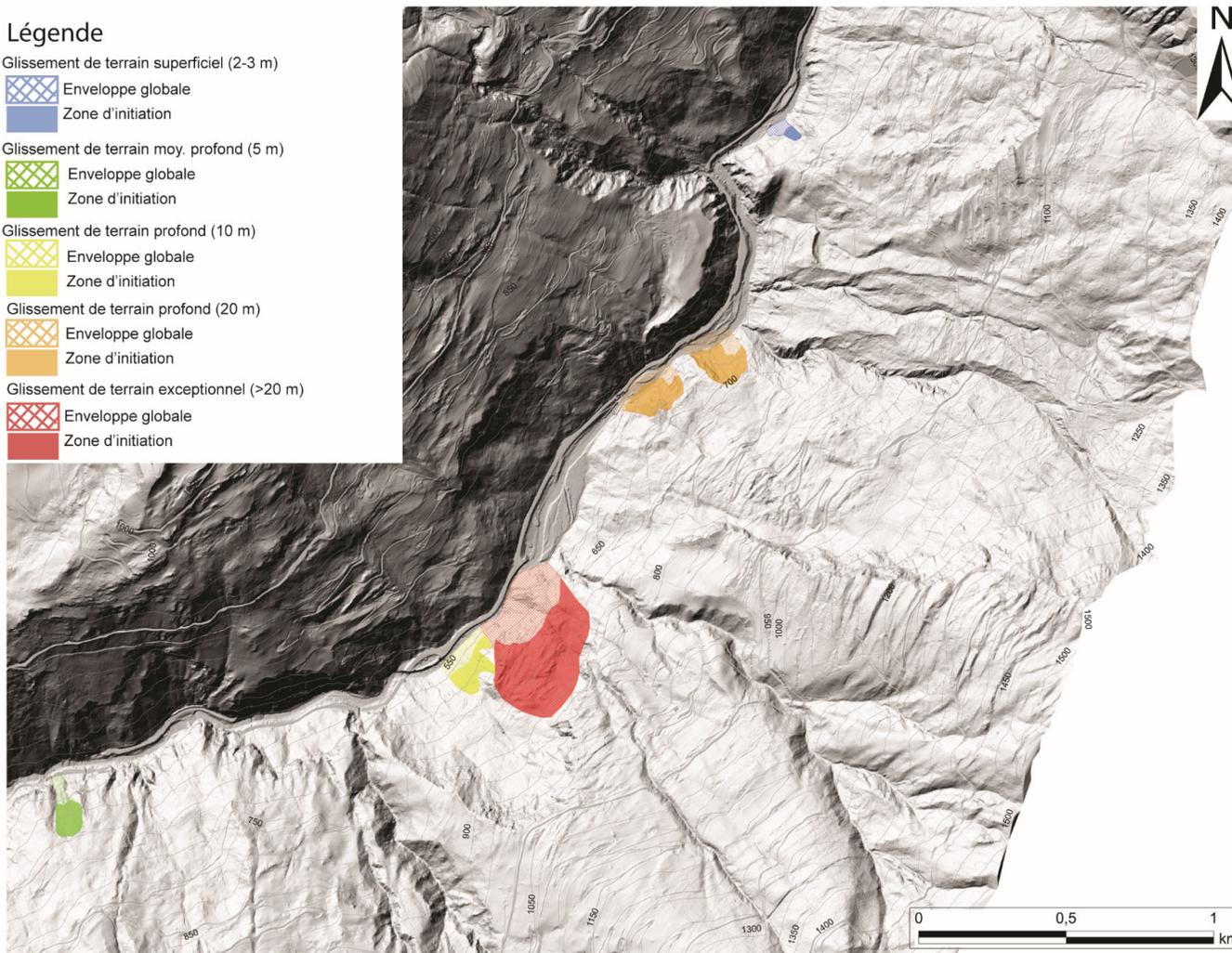


# Analyse de la propagation et estimation de l'atteinte : SHALTOP

## Définition des scénarios

### Légende

- Glissement de terrain superficiel (2-3 m)
  - Enveloppe globale
  - Zone d'initiation
- Glissement de terrain moy. profond (5 m)
  - Enveloppe globale
  - Zone d'initiation
- Glissement de terrain profond (10 m)
  - Enveloppe globale
  - Zone d'initiation
- Glissement de terrain profond (20 m)
  - Enveloppe globale
  - Zone d'initiation
- Glissement de terrain exceptionnel (>20 m)
  - Enveloppe globale
  - Zone d'initiation



# Analyse de la propagation et estimation de l'atteinte : SHALTOP

## Limites des simulations

- Pas d'érosion de la topographie
- Pas d'initiation progressive (e.g. déstabilisations régressives et/ou déplacements avant rupture)
- Pas de variations rhéologiques au cours de la propagation (e.g. intégration d'eau)
- La remobilisation des dépôts par l'eau en coulée de débris / écoulement torrentiel

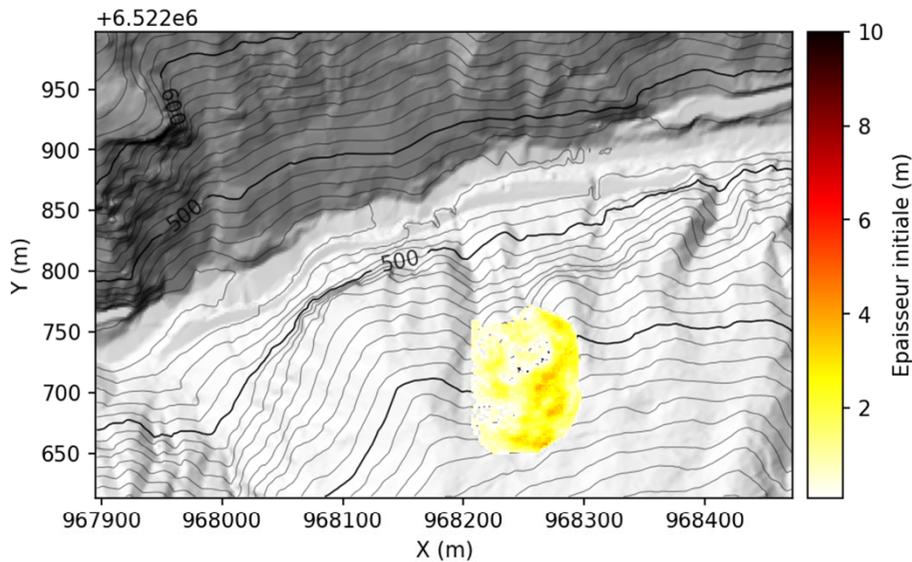


**Les cartes suivantes sont données à titre indicatif et informatif. Elles n'ont pas vocation à être utilisées telles quelles pour du zonage réglementaire ou des décisions d'aménagement**

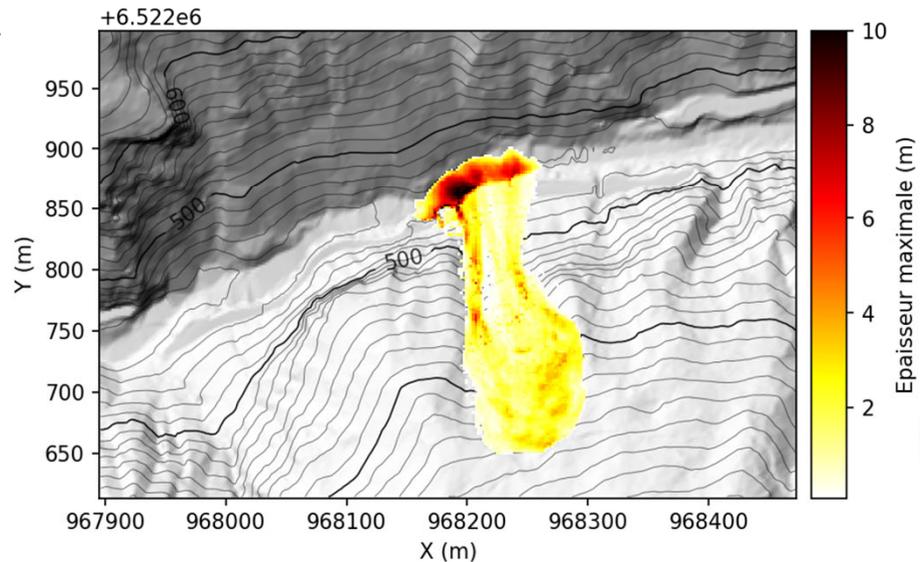
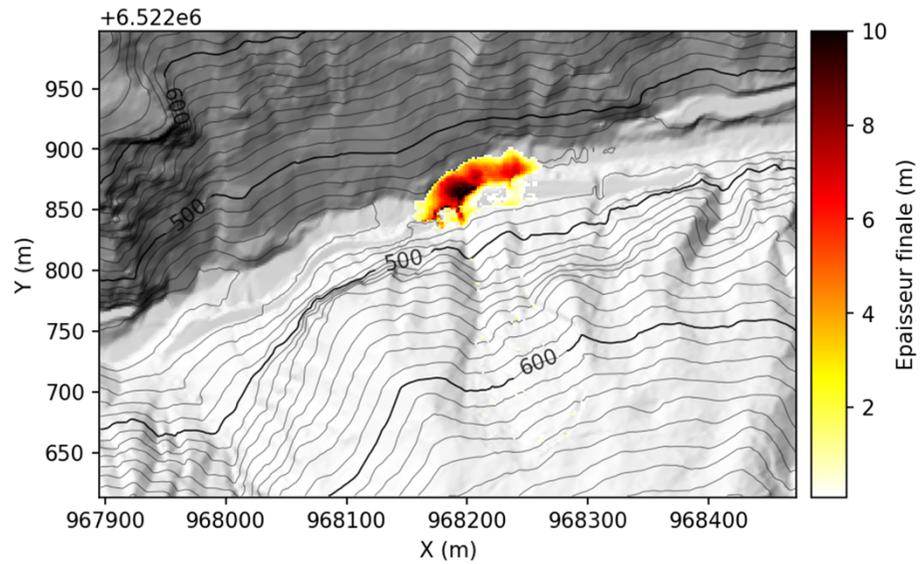


# Analyse de la propagation et estimation de l'atteinte : SHALTOP

Exemple de simulation (MOY, 15 600 m<sup>3</sup>)



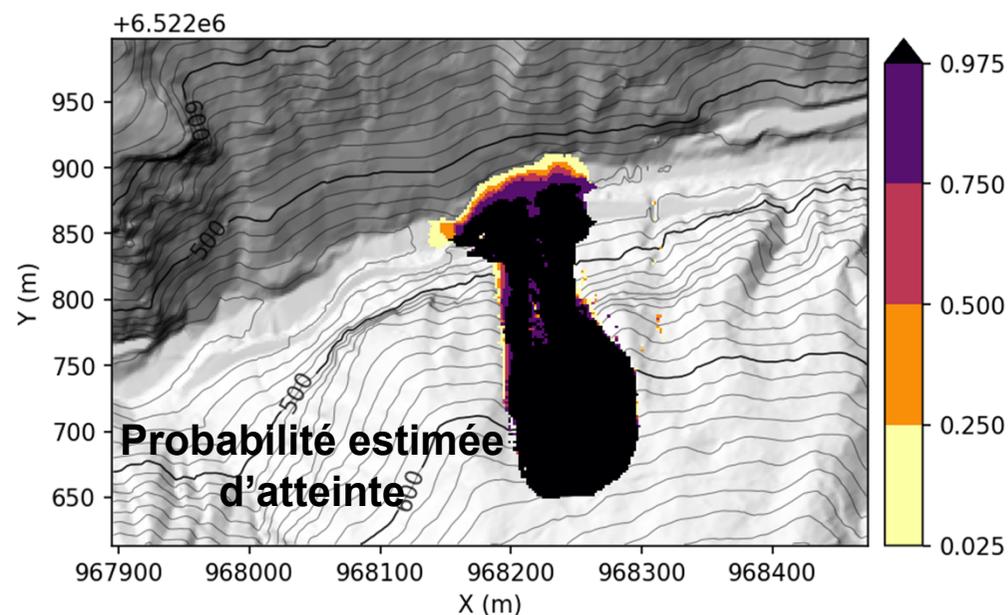
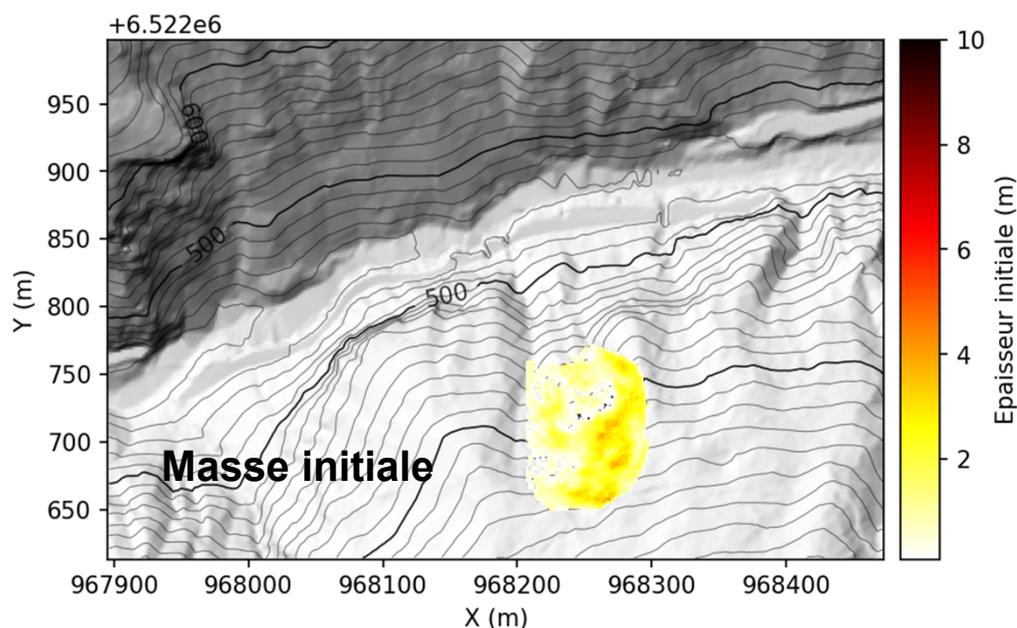
Masse initiale



Résultats  
simus pour  
coeff friction  
intermédiaire  
( $\delta = 23,9^\circ$ )

# Analyse de la propagation et estimation de l'atteinte : SHALTOP

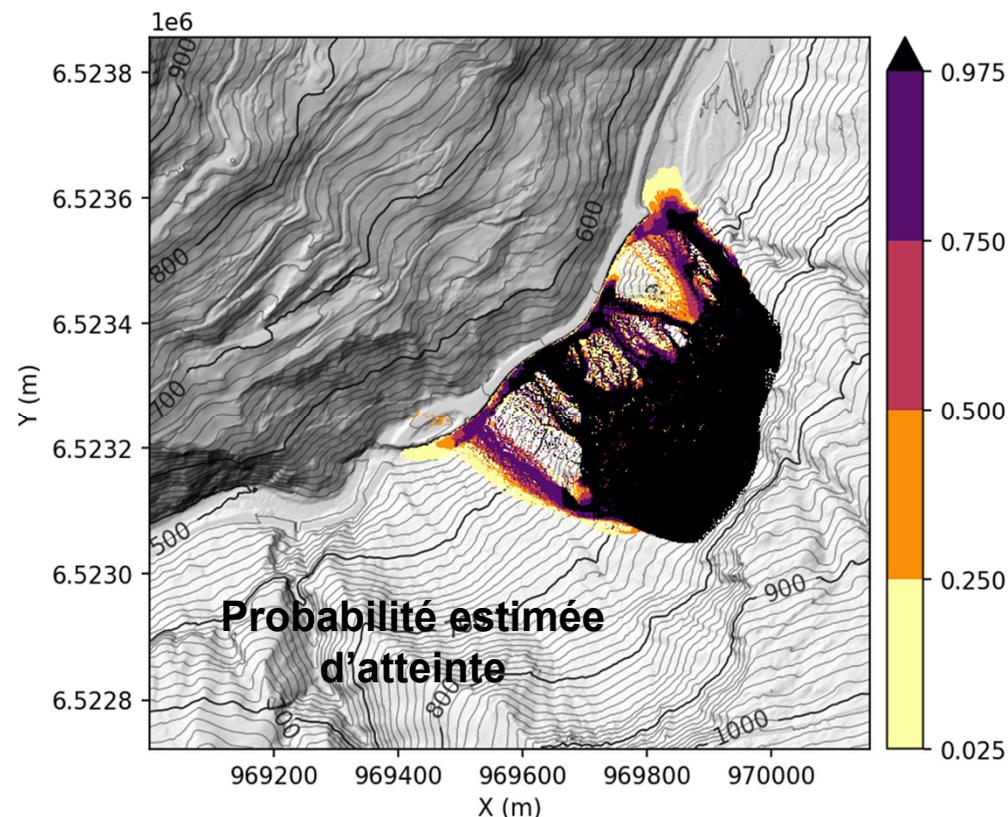
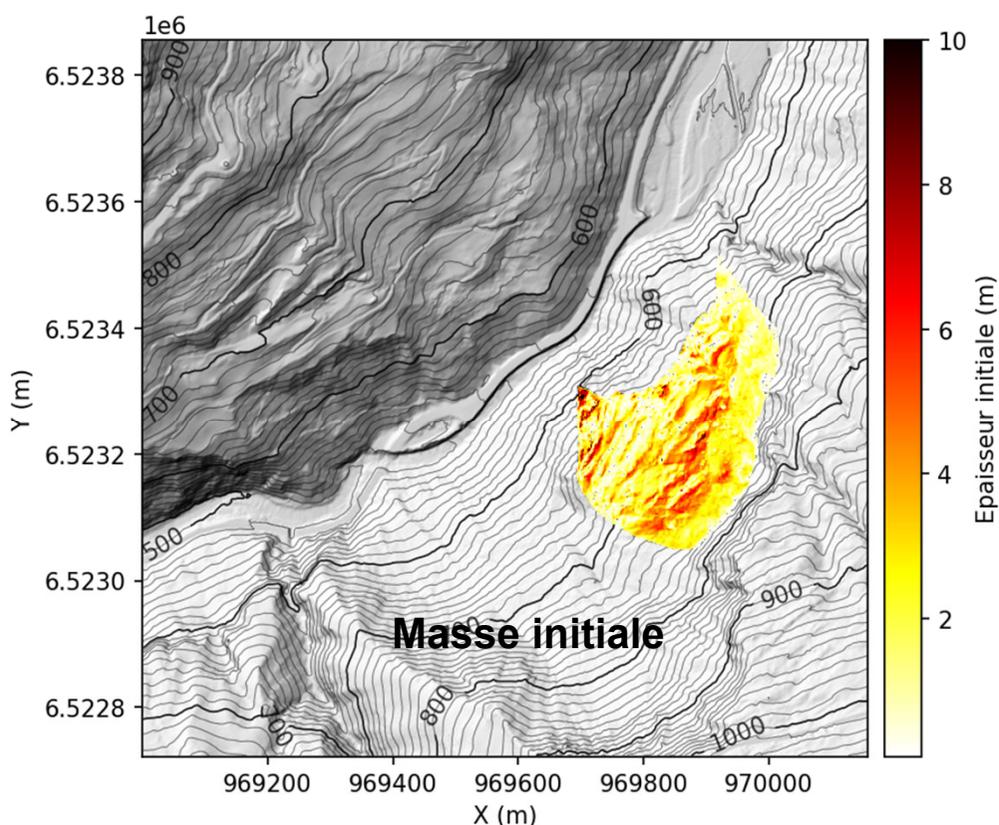
Estimation proba d'atteinte (MOY, 15 600 m<sup>3</sup>)



**Selon le coefficient de friction, les volumes atteignant l'Arly varient ici de 6 675 m<sup>3</sup> pour 97,5 % de probabilités d'atteintes (glissement peu mobiles; et 2 925 m<sup>3</sup> déposés sur la RD1212) à 13 555 m<sup>3</sup> pour 2,5 % de probabilités d'atteintes (glissements plus mobiles; 400 m<sup>3</sup> déposés sur la RD1212).**

# Analyse de la propagation et estimation de l'atteinte : SHALTOP

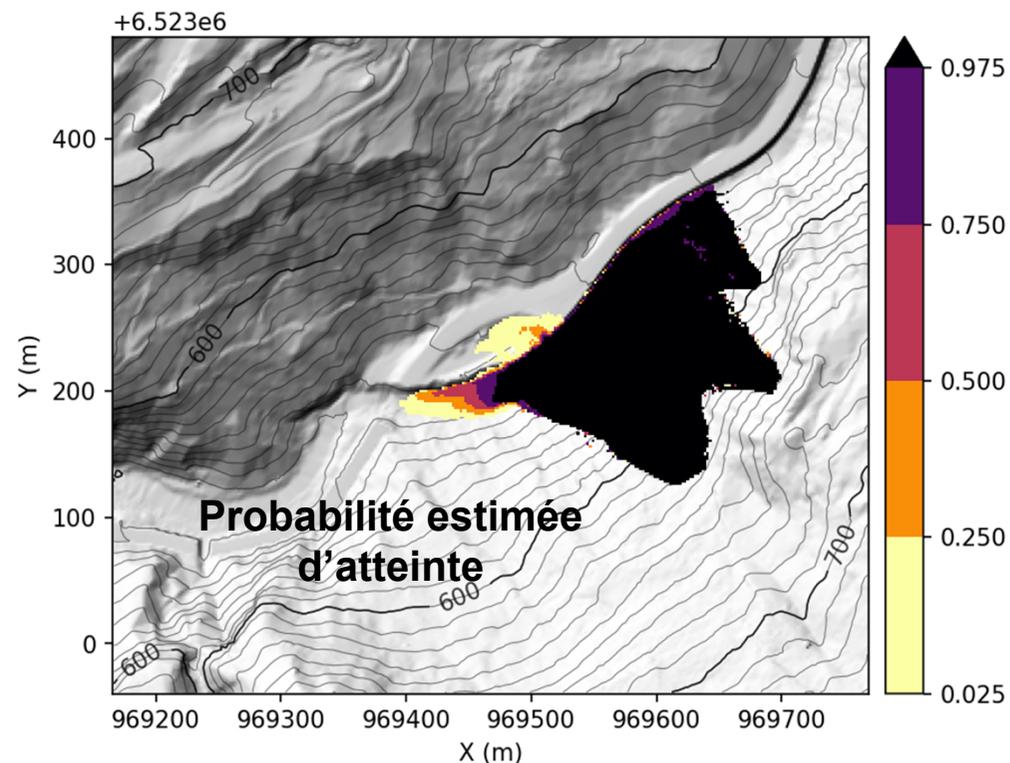
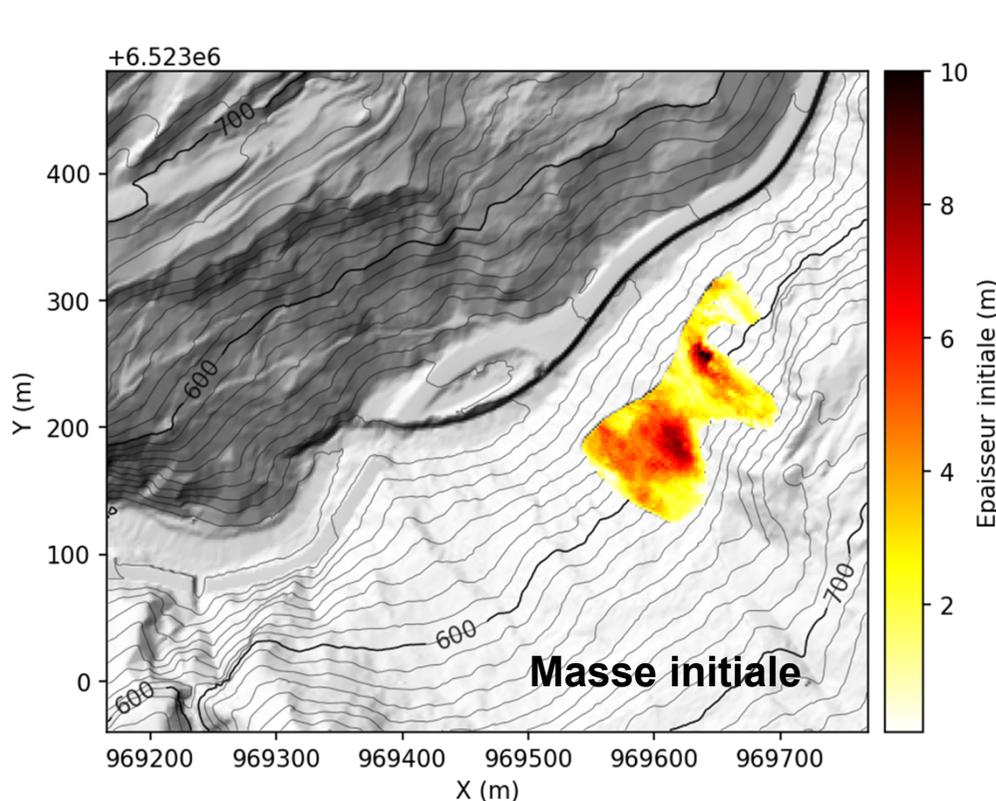
Estimation proba d'atteinte (EXCEP, 230 000 m<sup>3</sup>)



Selon le coefficient de friction, les volumes atteignant l'Arly varient ici de 12 650 m<sup>3</sup> pour 97,5 % de probabilité d'atteinte à 95 600 m<sup>3</sup> pour 2,5 % d'atteinte.

# Analyse de la propagation et estimation de l'atteinte : SHALTOP

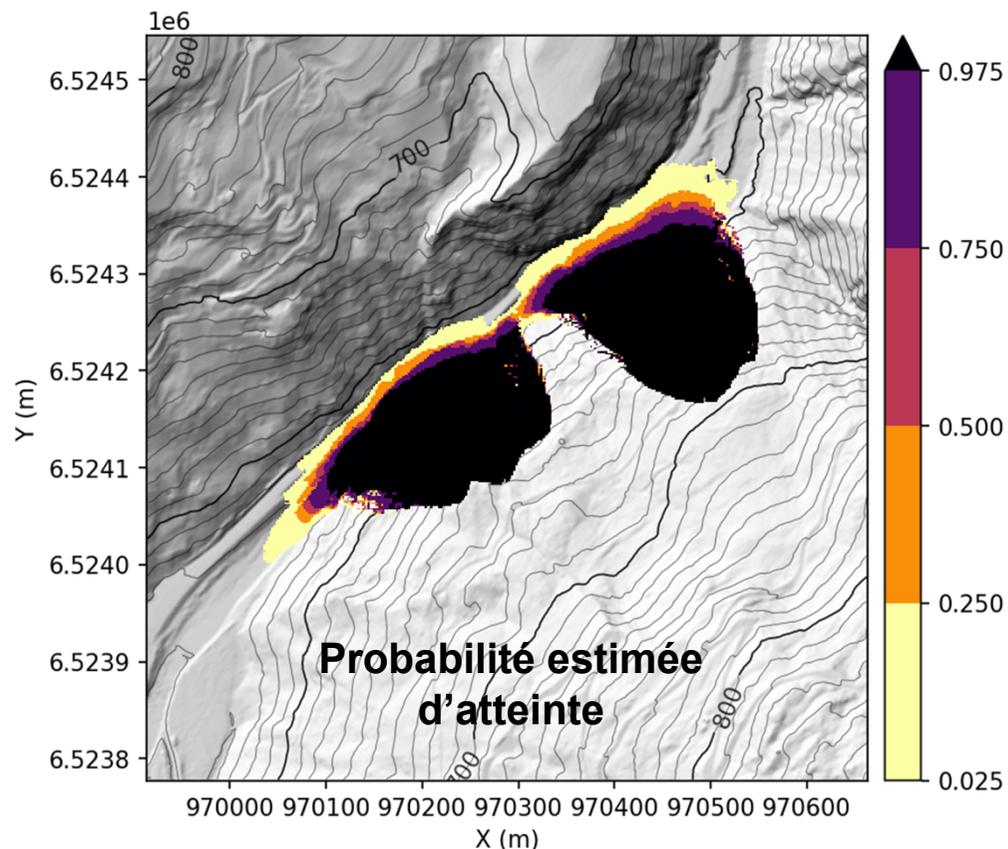
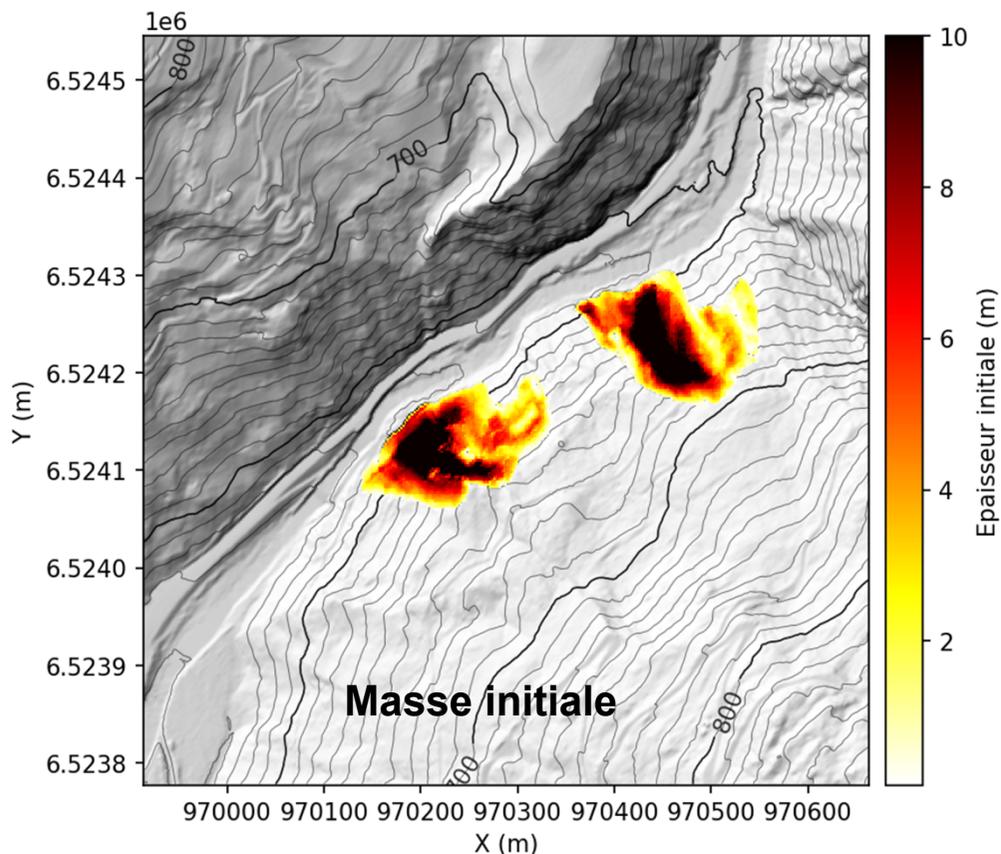
Estimation proba d'atteinte (PFD10, 54 800 m<sup>3</sup>)



Selon le coefficient de friction, les volumes atteignant l'Arly varient ici de 36 000 m<sup>3</sup> pour 97,5 % de probabilité d'atteinte à 40 800 m<sup>3</sup> pour 2,5 % d'atteinte.

# Analyse de la propagation et estimation de l'atteinte : SHALTOP

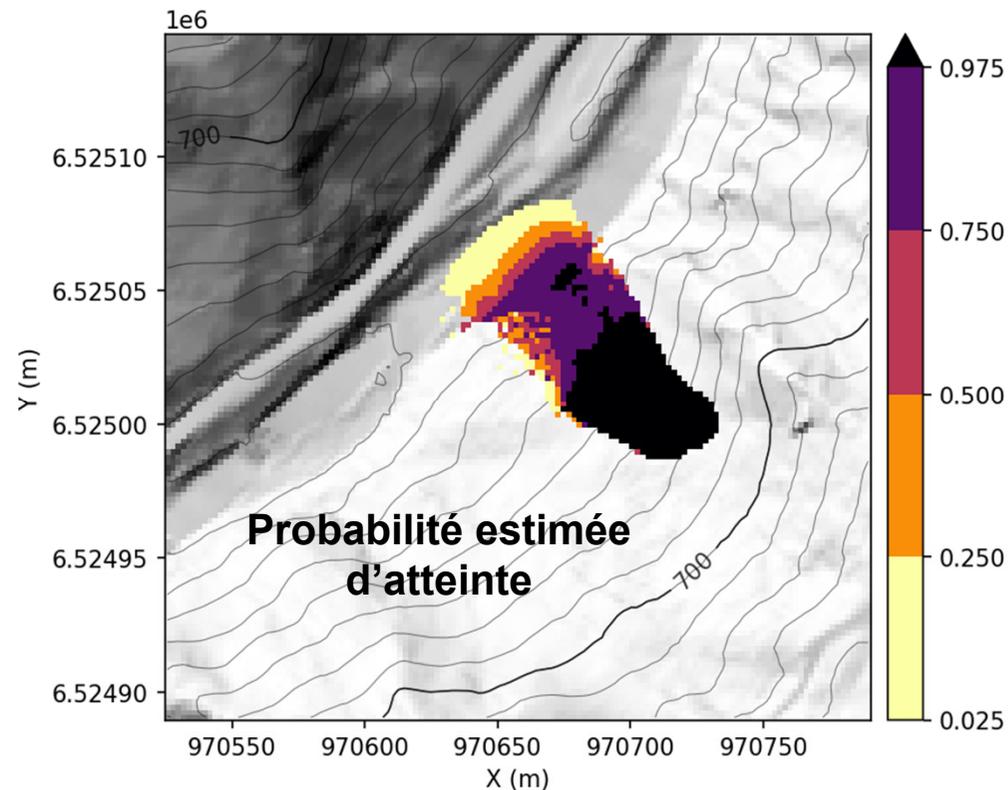
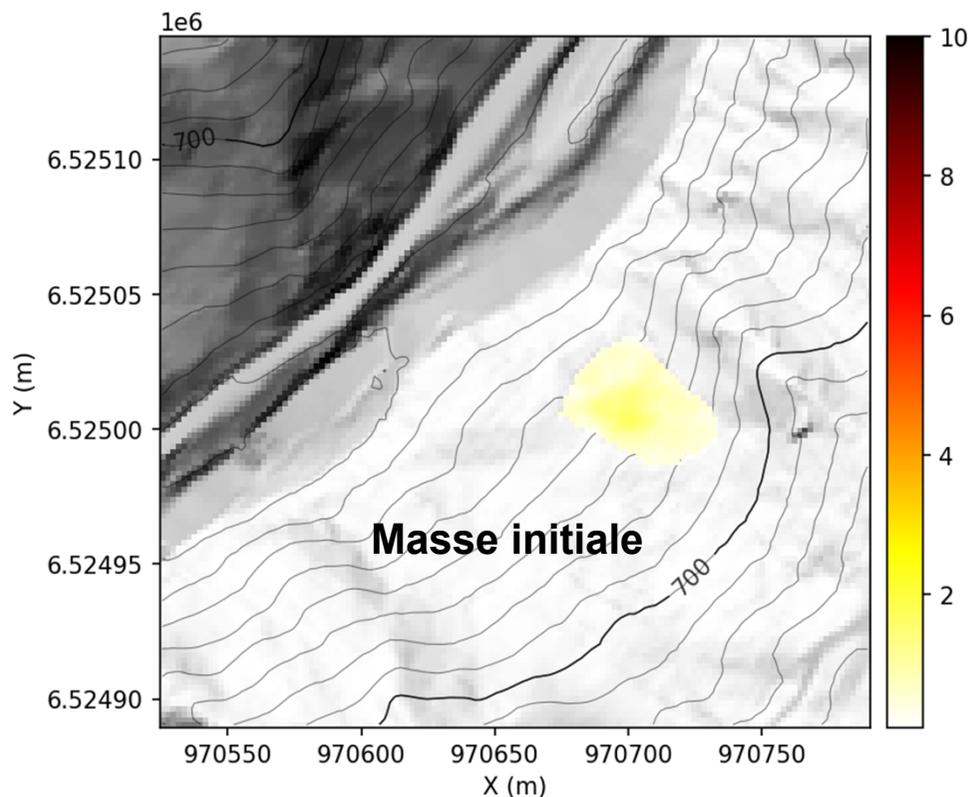
Estimation proba d'atteinte (PFD20, 235 000 m<sup>3</sup>)



Selon le coefficient de friction, les volumes atteignant l'Arly varient ici de 141 900 m<sup>3</sup> pour 97,5 % de probabilité d'atteinte à 202 750 m<sup>3</sup> pour 2,5 % d'atteinte (RD1212 envahie dans ce dernier cas sous 16 600 m<sup>3</sup>).

# Analyse de la propagation et estimation de l'atteinte : SHALTOP

Estimation proba d'atteinte (PFD20, 1600 m<sup>3</sup>)



**Selon le coefficient de friction, les volumes atteignant l'Arly varient ici de 20 m<sup>3</sup> pour 97,5 % de probabilité d'atteinte à 1 5 50 m<sup>3</sup> pour 2,5 % d'atteinte.**