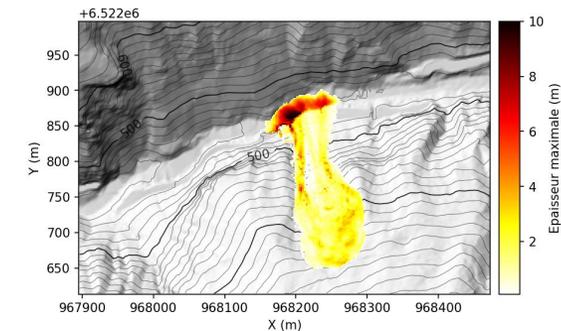
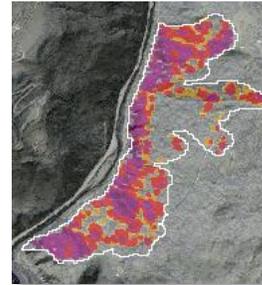
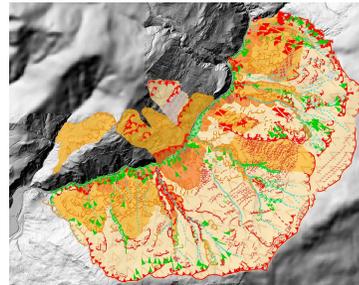




Glissements de terrain dans les Gorges de l'Arly

Géomorphologie, analyse des mouvements de terrain et modélisation préliminaire en stabilité et propagation

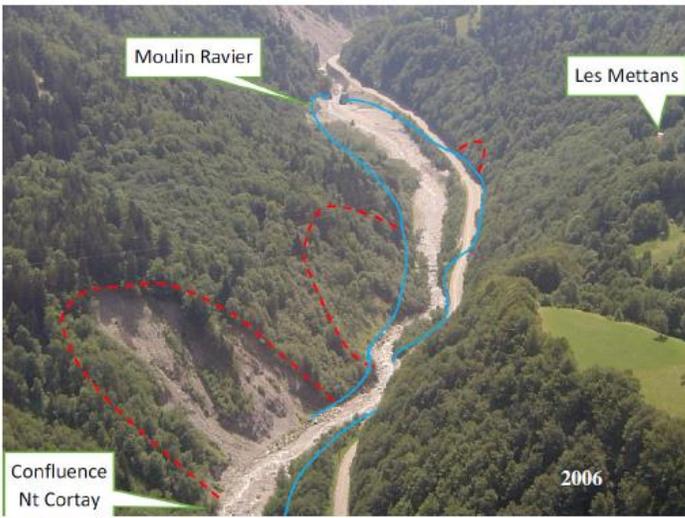
Y. Thiery, A-C. Flindt, E. Equilbey, F. Lacquement, M. Peruzzetto



GENERALITES

Un site actif soumis à plusieurs types d'aléas

- Chutes de blocs
- Glissements de terrain
- Torrentiels



SAGE, 2018



ETRM, 2015





Les types de glissements de terrain

Un site aux instabilités variées

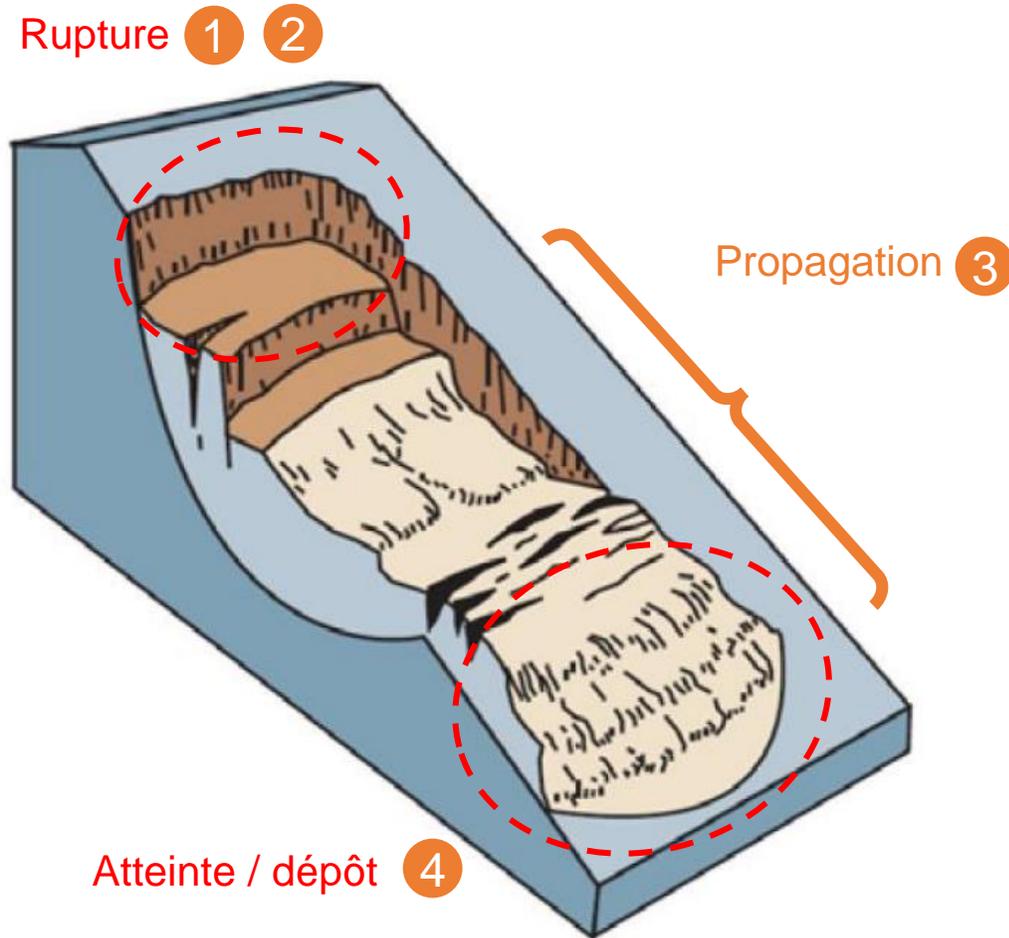
Chutes de blocs

Glissements de terrain

Grandes déformations de versant



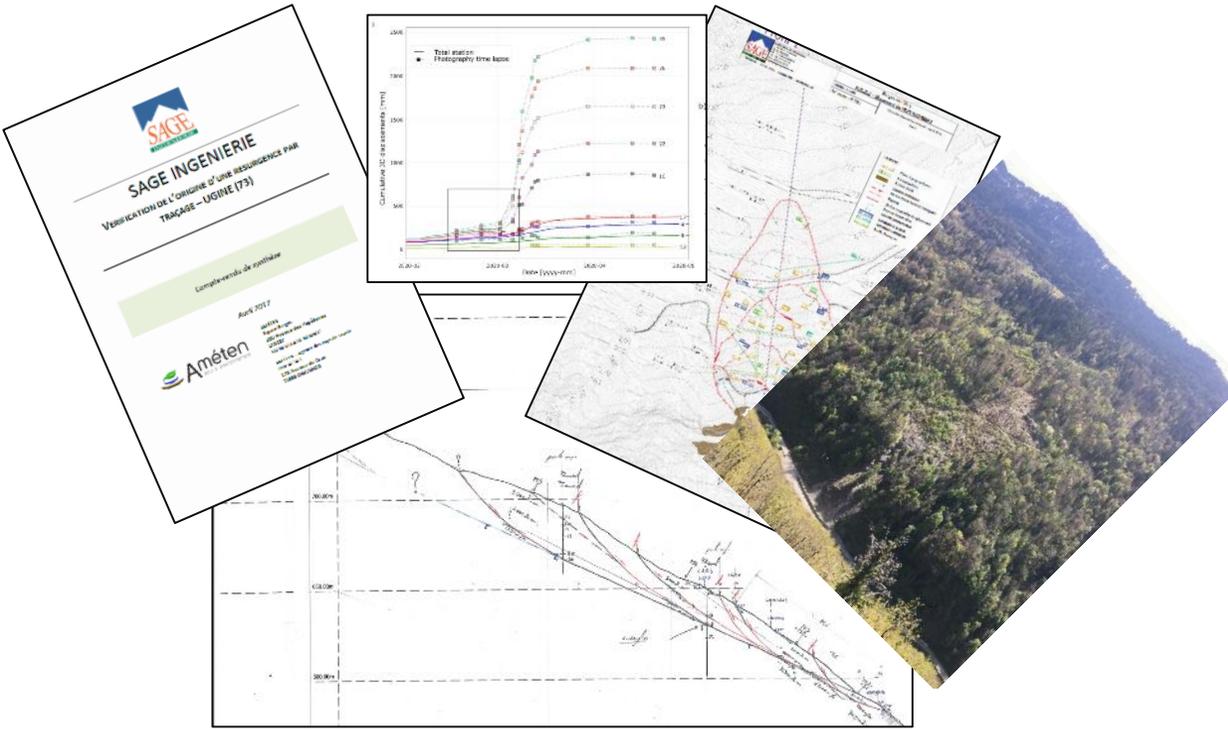
Travaux réalisés



- 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

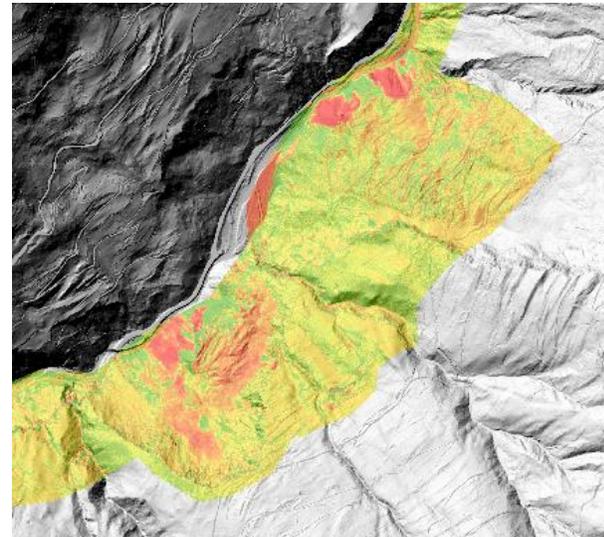
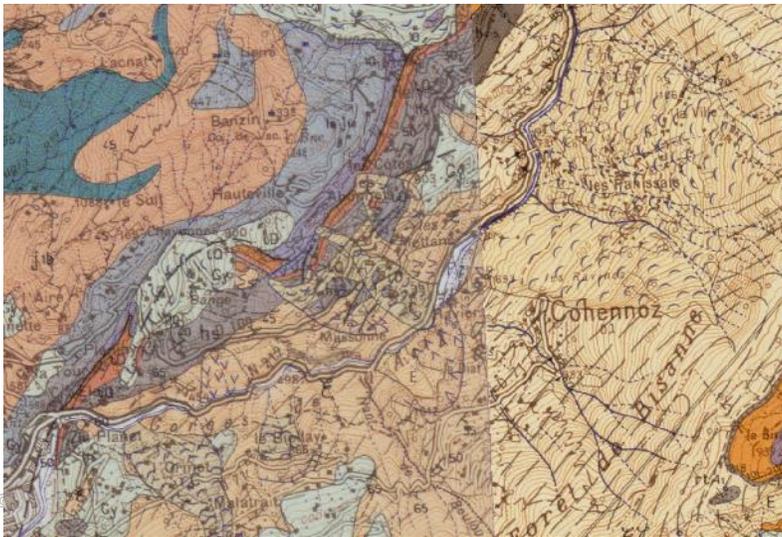


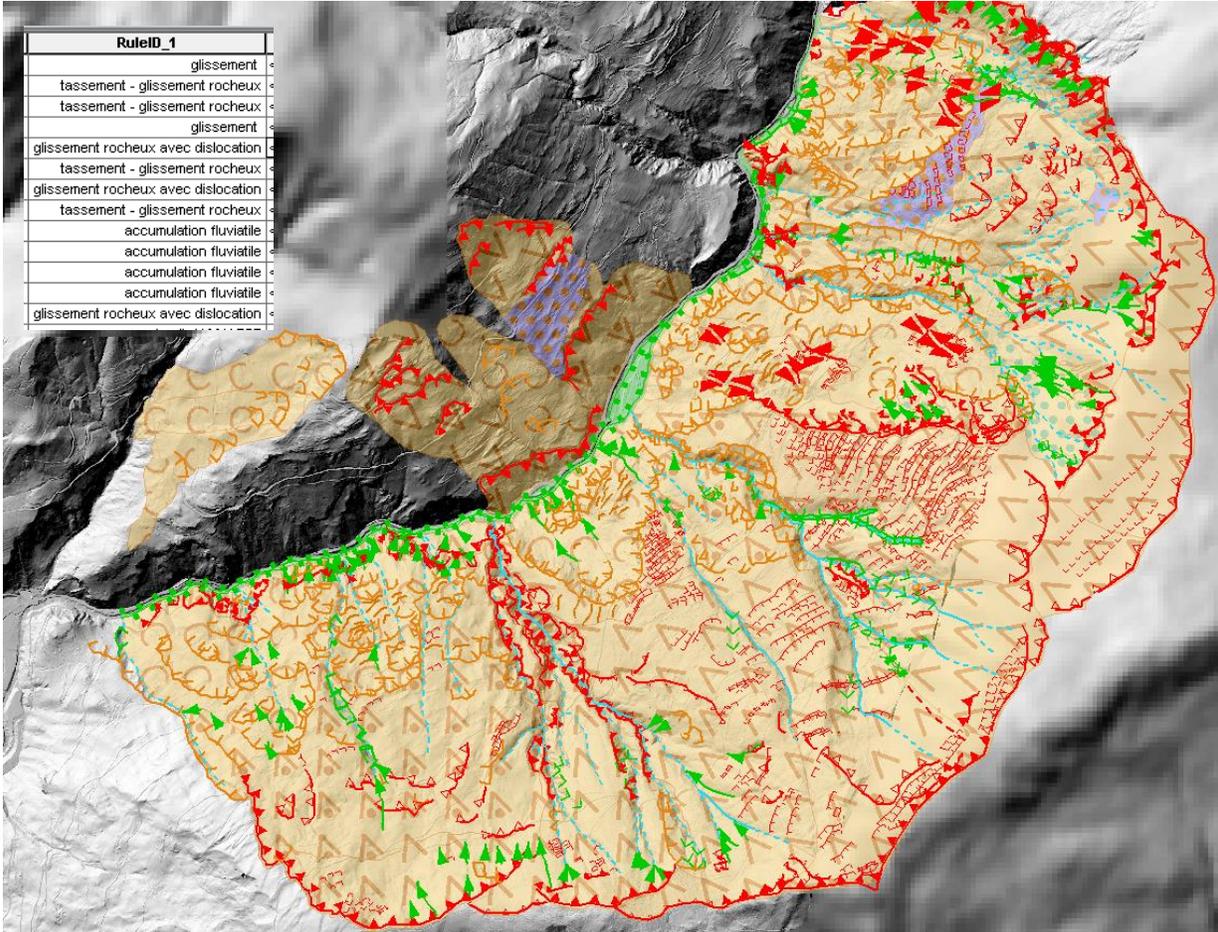
- **Objectifs**

- 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/>)





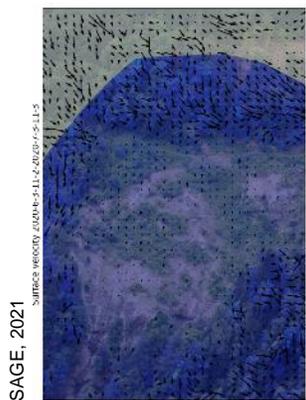
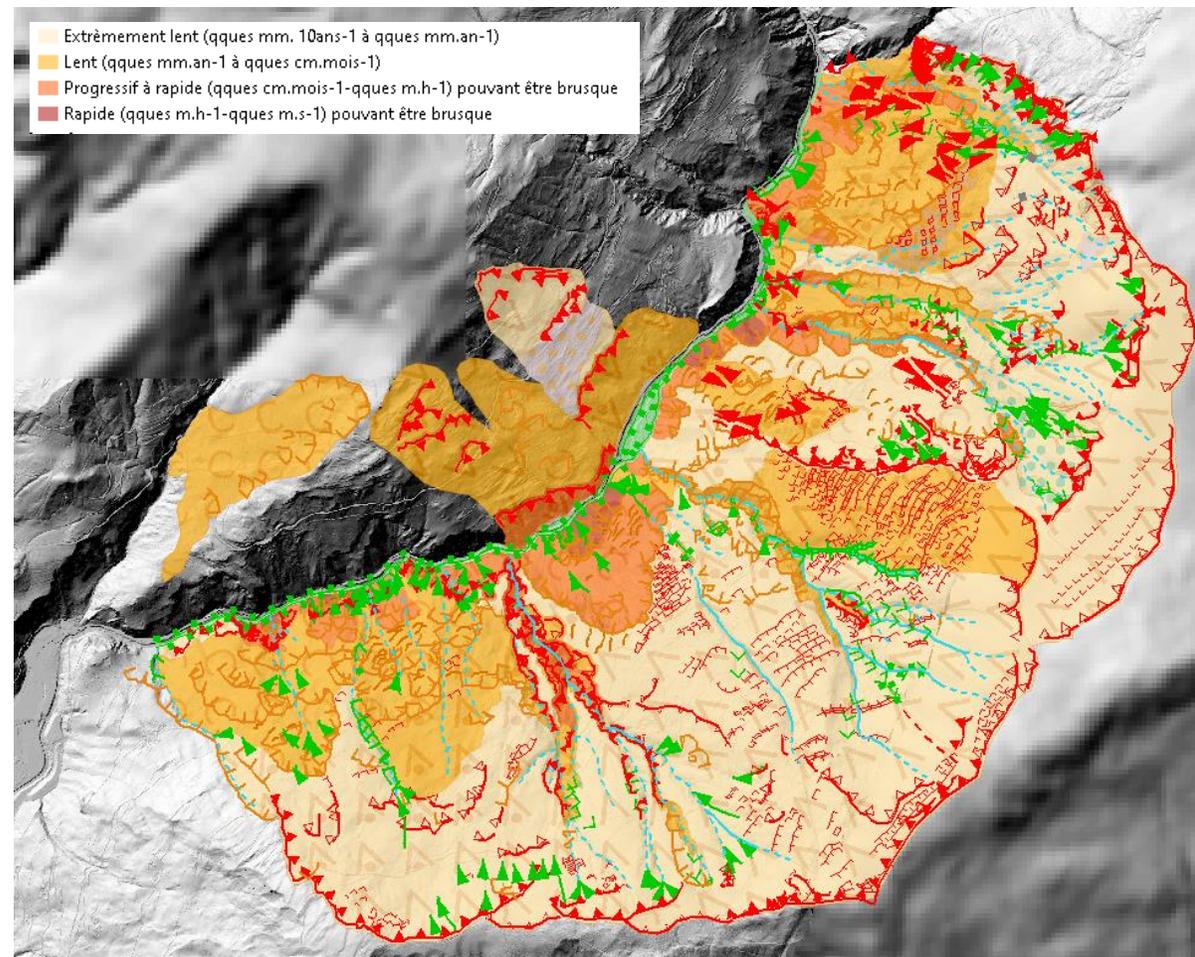
Carte géomorphologique

• Résultats

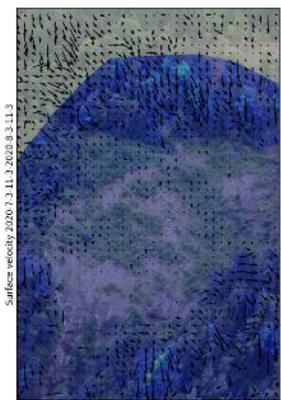
Base de données des phénomènes

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

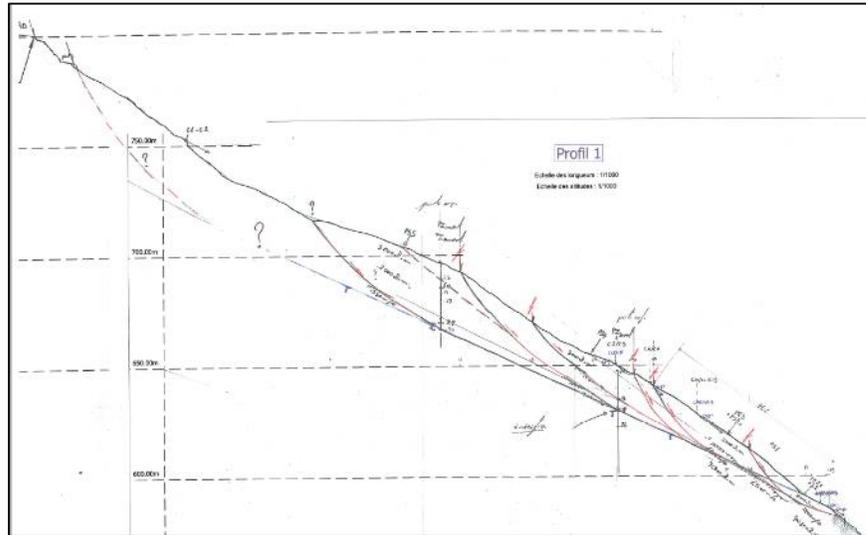


Déplacements entre le 3/7/20 et le 3/8/20



FR

Conceptualisation (SAGE)



Modélisation des ruptures

- **Objectifs**

Définir des profondeurs de rupture type

Définir des critères géotechniques pour les matériaux impliqués

Définir des seuils de nappe favorables aux ruptures

- **Moyens (TALREN)**

Observations de terrain

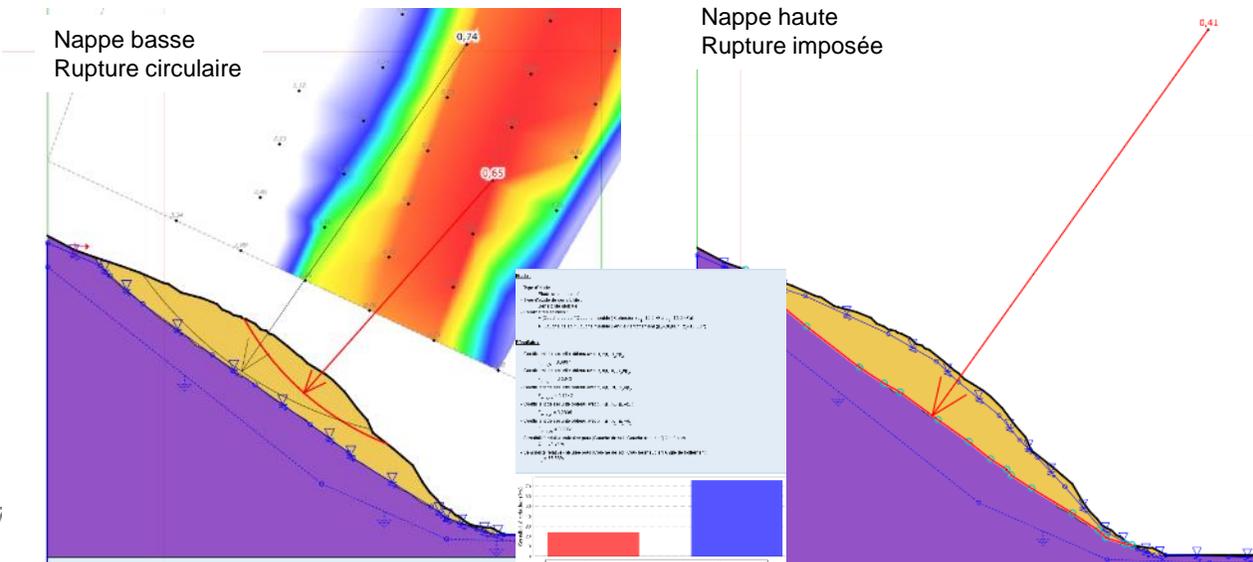
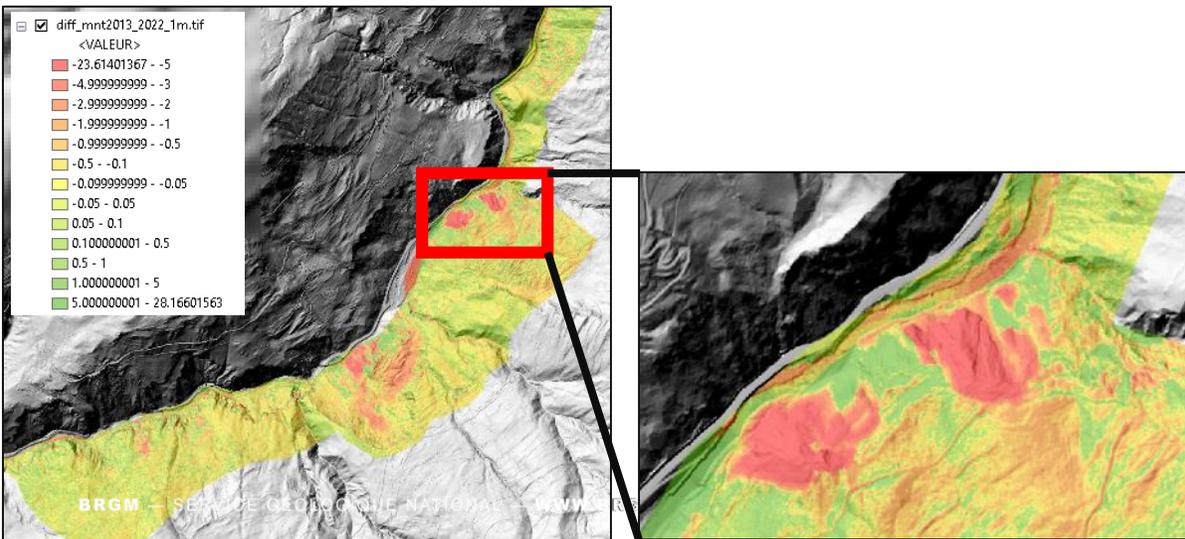
Coupes antécédentes

Analyse diachronique de la topographie (DoD)

Calcul d'équilibre limite (*TALREN®*, *Fondasol*) pour des profils types et des scénarii types (*Analyse de Sensibilité –AS-* et définition de scénarii de nappe d'eau)

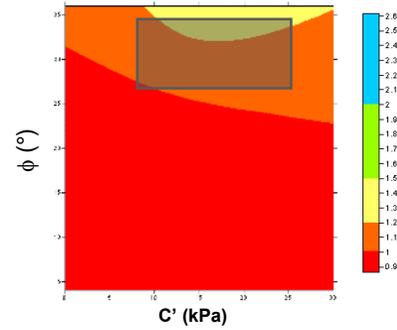
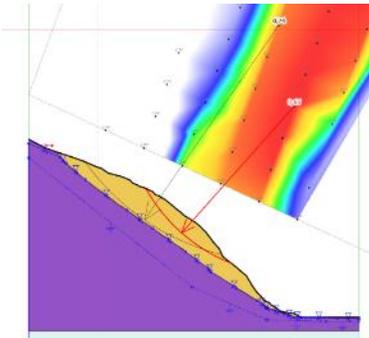
Calcul de stabilité pour différents scénarii de rupture et de nappe d'eau (AS)

Analyse des surfaces de rupture par MNT (DoD - 2013-2022)

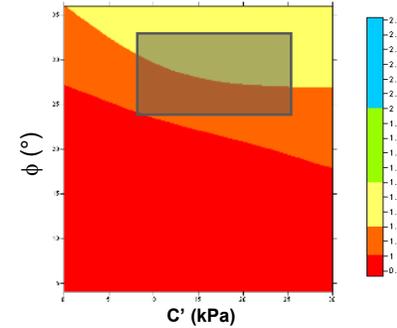
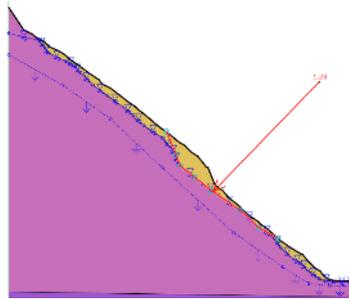


Modélisation des ruptures

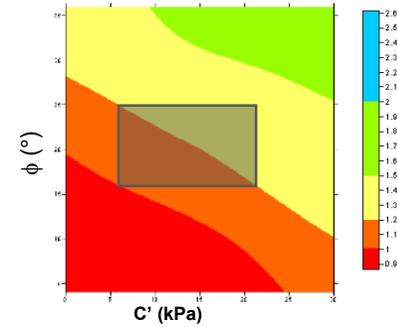
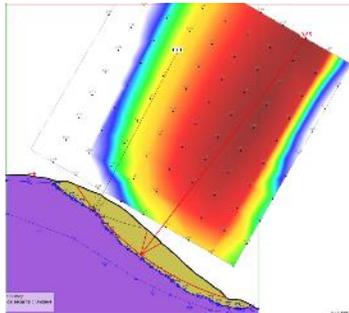
Glissements de terrain très profonds (pfd=20m; l=70 m)



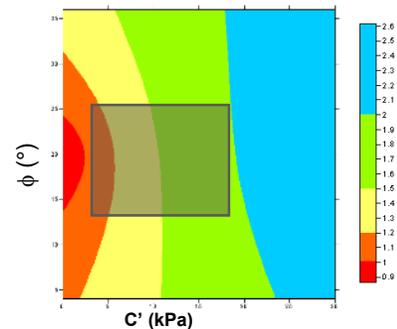
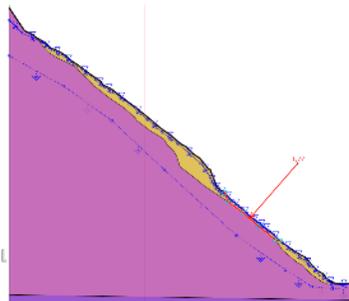
Glissements de terrain profonds (pfd=15m; l=50 m)



Glissements de terrain moyennement profonds (pfd=5m; l=20 m)



Glissements de terrain superficiels (pfd=3m; l=10 m)



Hypothèses

Déstabilisations dans matériaux altérés argileux

Matériaux meubles homogènes

Scénarii de déstabilisations pour différentes profondeurs et différents niveaux de nappes

Types 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

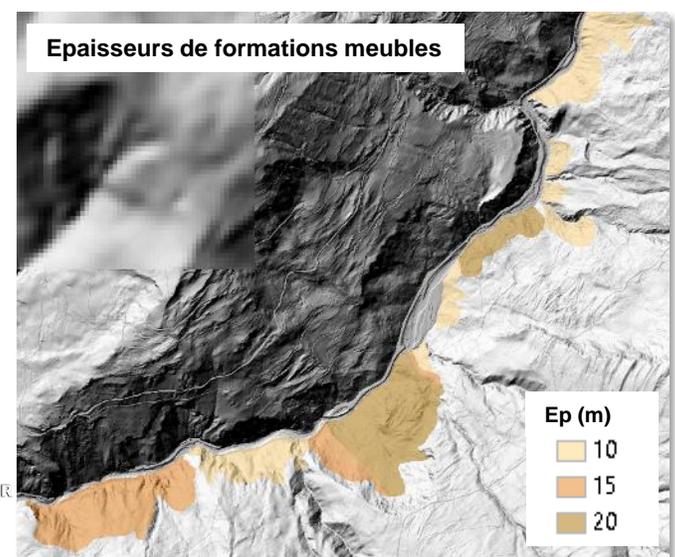
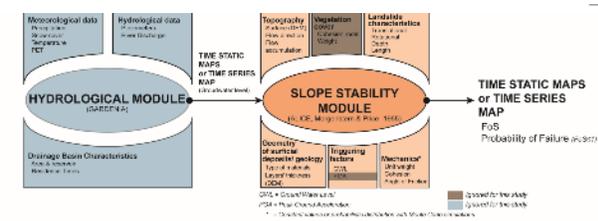
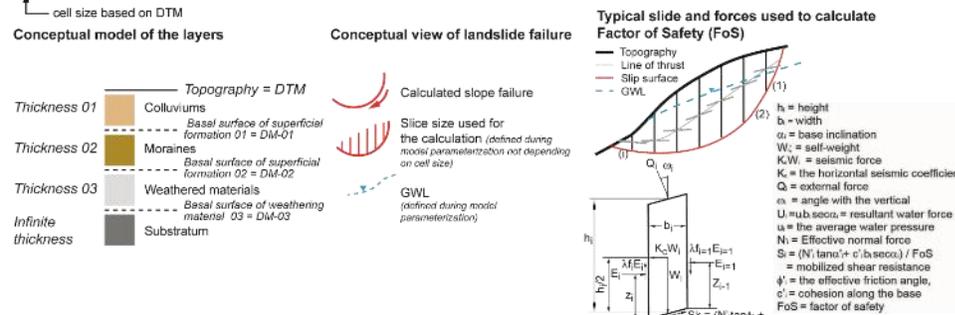
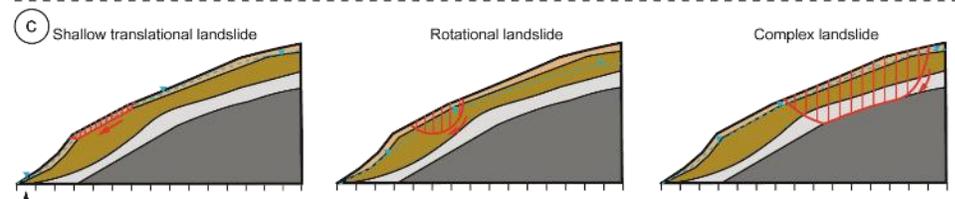
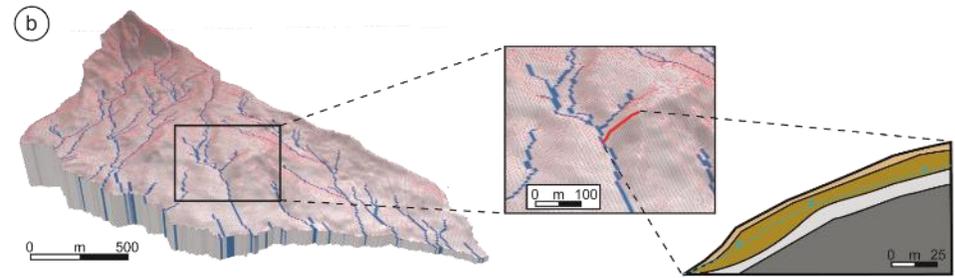
Spatialiser les secteurs susceptibles pour chaque type de rupture définies

- Moyens (ALICE®)

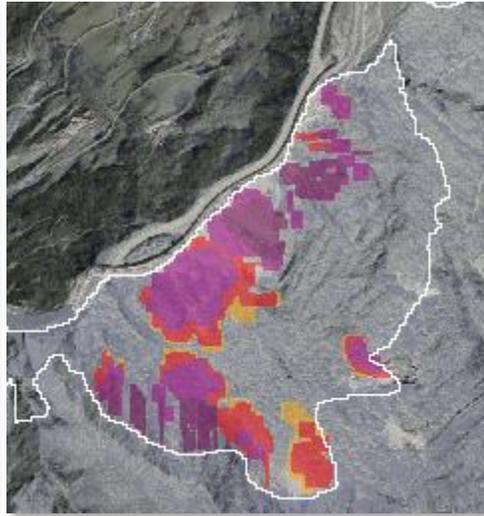
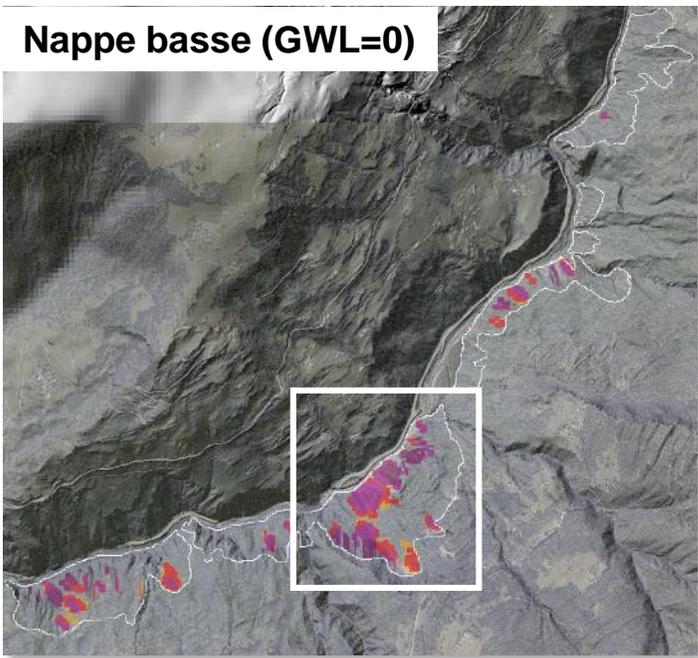
Calcul spatialisé de la probabilité de rupture ($FS \leq 1$) pour 4 types de déstabilisation définis précédemment → ALICE®

- 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



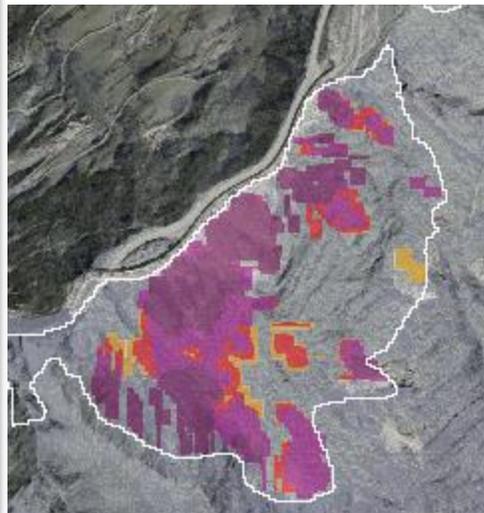
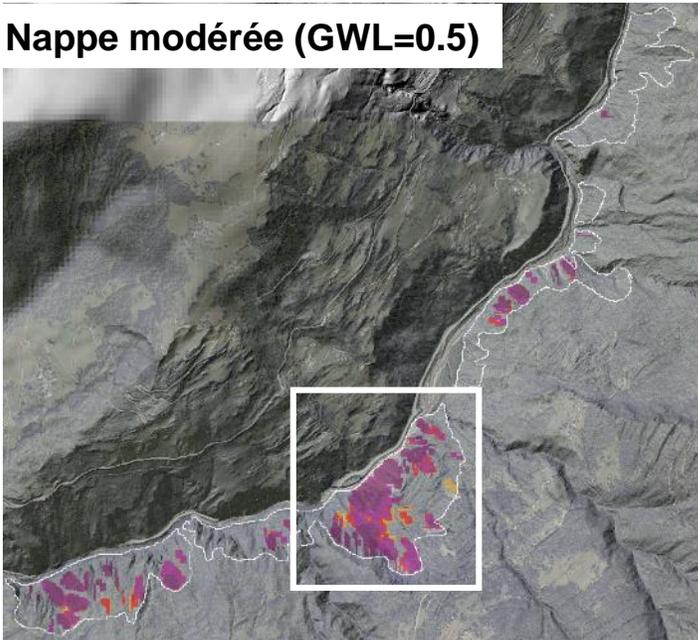
Nappe basse (GWL=0)



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)

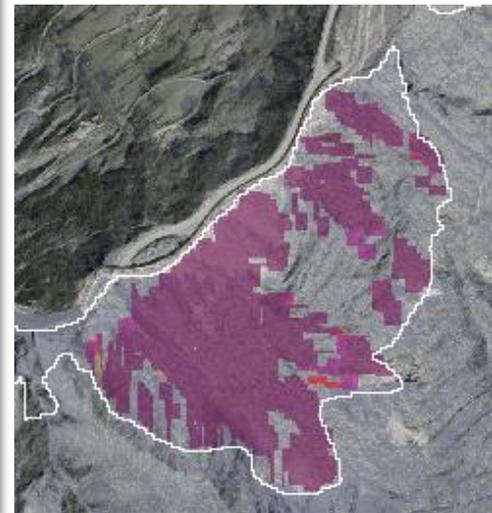
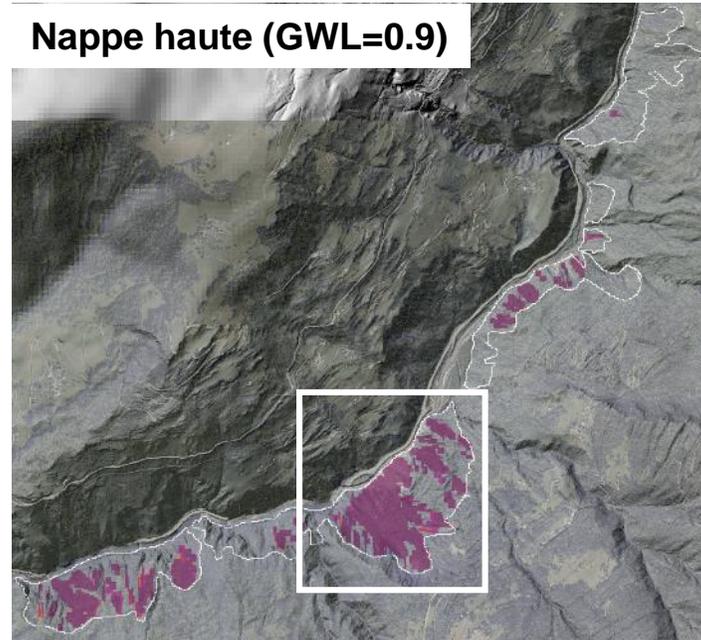
• Résultats

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

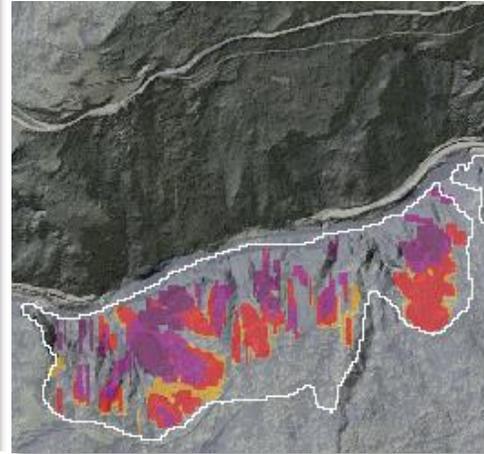
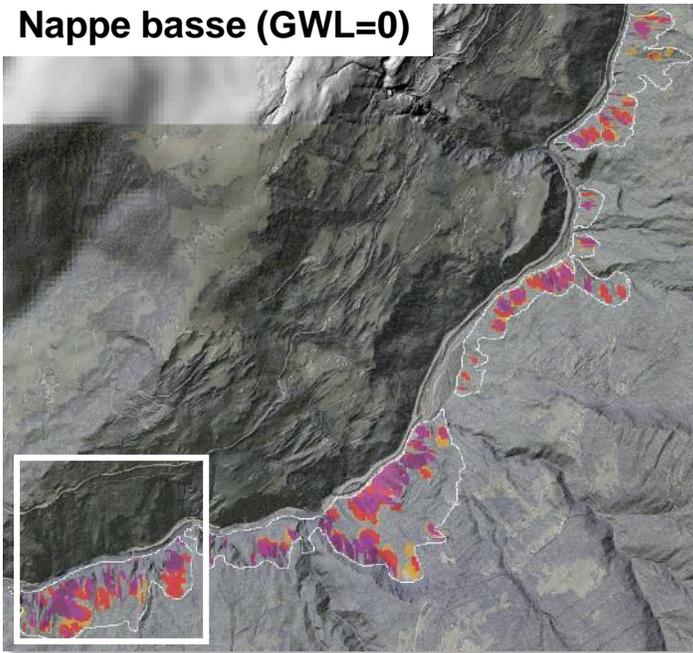


Probabilités fortes de déstabilisation même en contexte de nappe basse
Volumes mobilisables en cas de nappe haute (i.e. cellule avec probabilités > 10⁻³) → 6,2.10⁶ m³

Nappe haute (GWL=0.9)



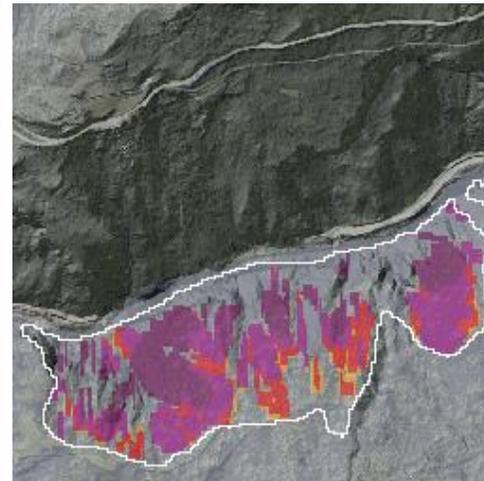
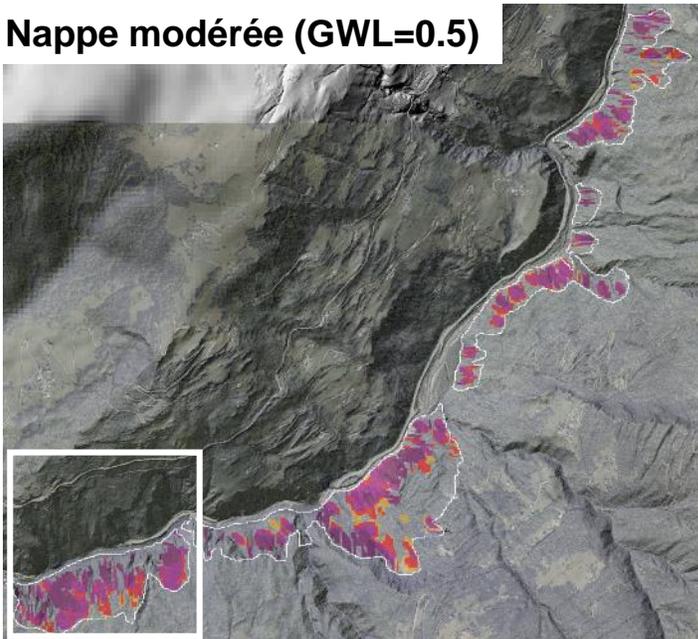
Nappe basse (GWL=0)



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)

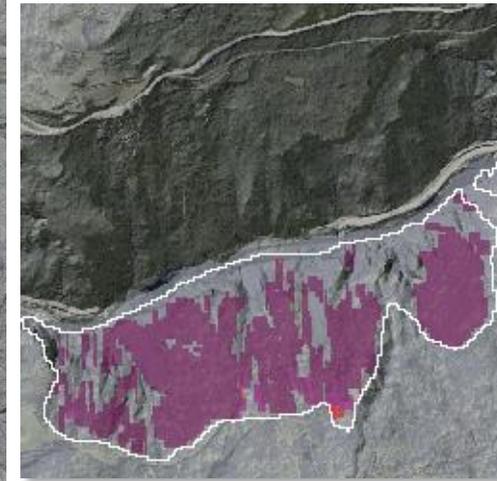
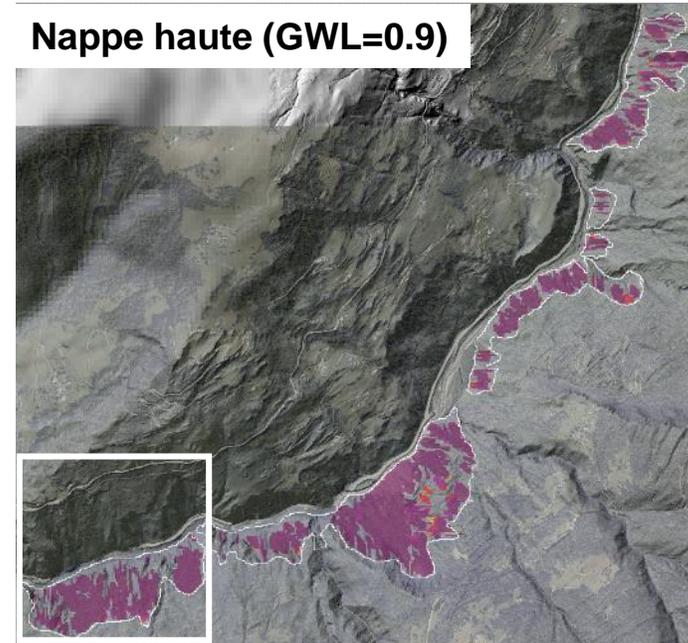
• Résultats

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

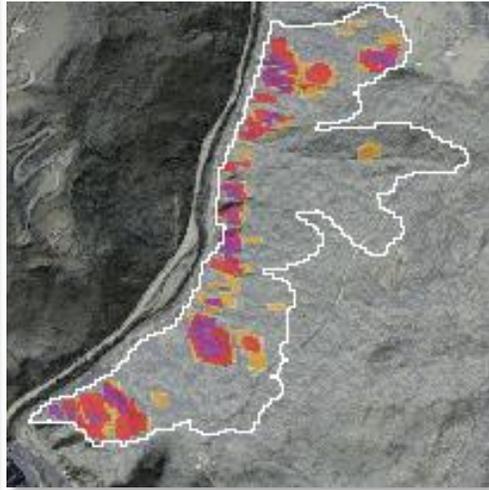
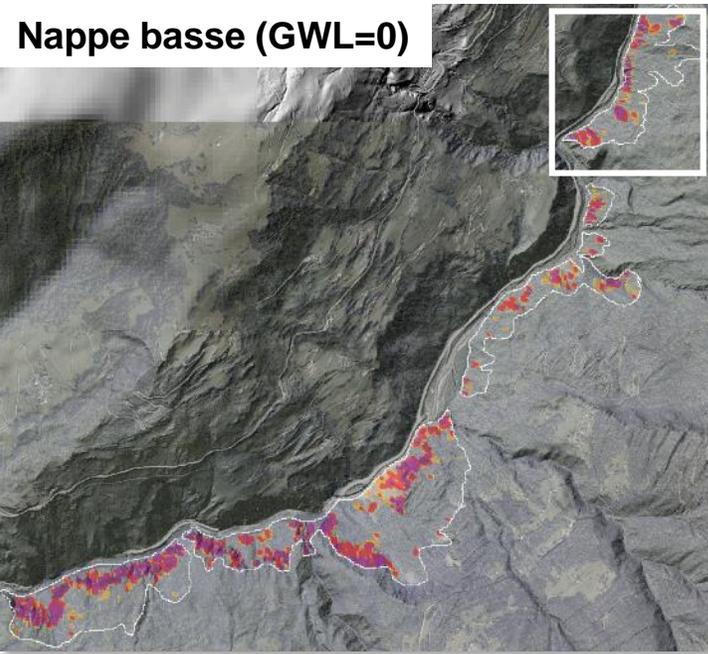


Probabilités fortes de déstabilisation même en contexte de nappe basse
Volumes mobilisables en cas de nappe haute (i.e. cellule avec probabilités > 10⁻³) → 7.6.10⁶ m³

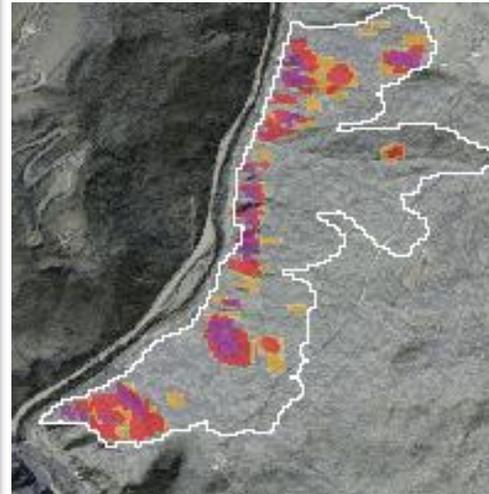
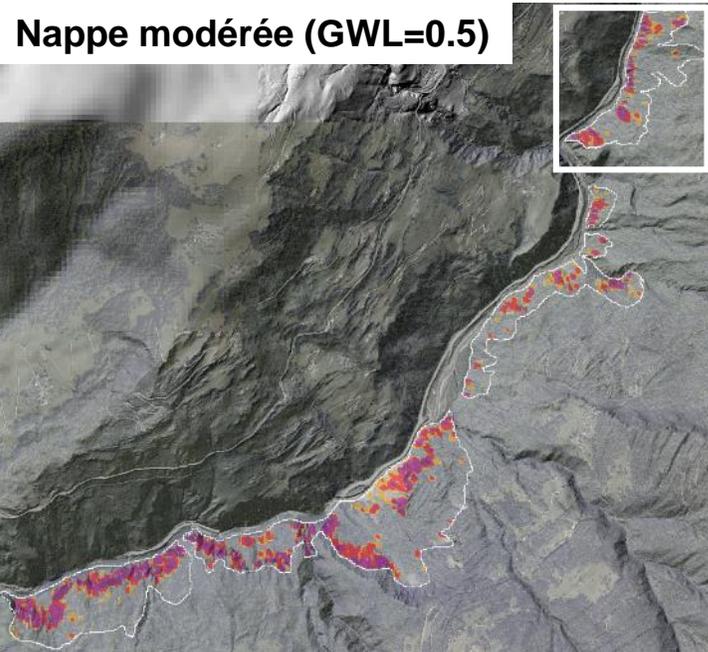
Nappe haute (GWL=0.9)



Nappe basse (GWL=0)



Nappe modérée (GWL=0.5)



Probabilité de rupture

0 - 0.00001	Nulle à négligeable
0.000010001 - 0.0001	Très faible
0.000100001 - 0.001	Faible
0.001000001 - 0.01	Modérée
0.010000001 - 0.1	Forte
0.100000001 - 0.5	Très forte
0.5 - 1	

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

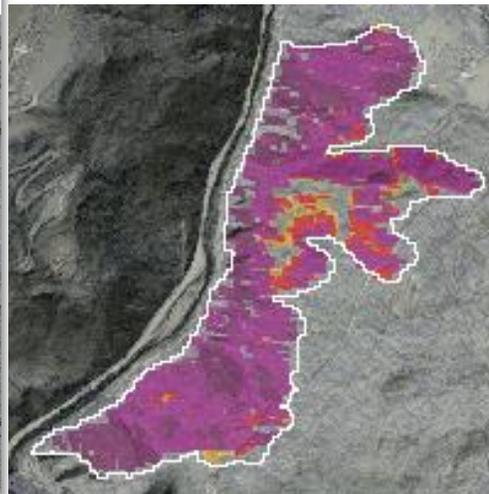
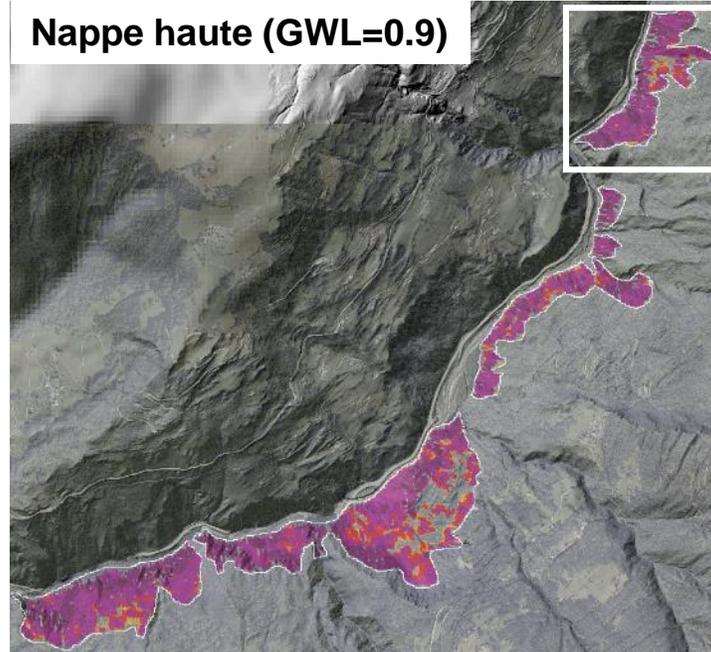
• Résultats

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

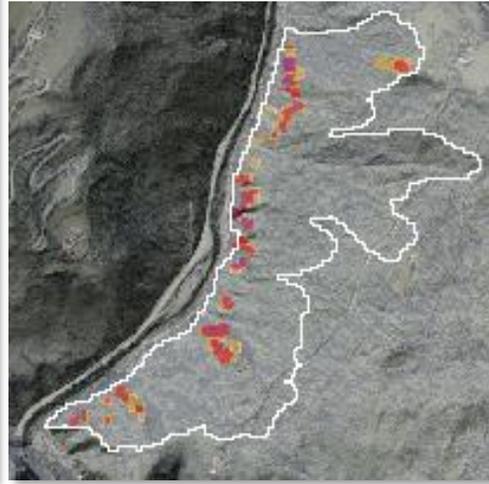
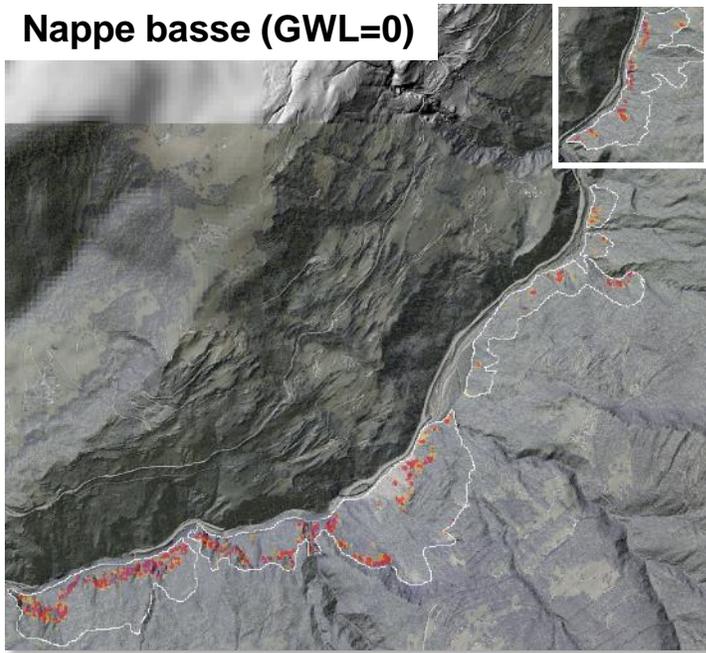


Probabilités très fortes de déstabilisation en bas de versants même en contexte de nappe basse ou modérée
Volumes mobilisables en cas de nappe haute (i.e. cellule avec probabilités > 10⁻³) → 1,85.10⁶ m³

Nappe haute (GWL=0.9)

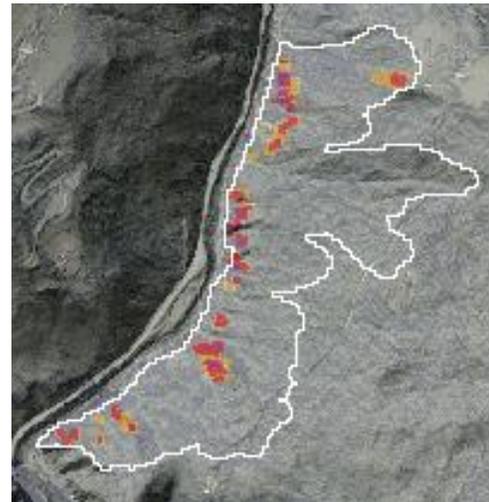
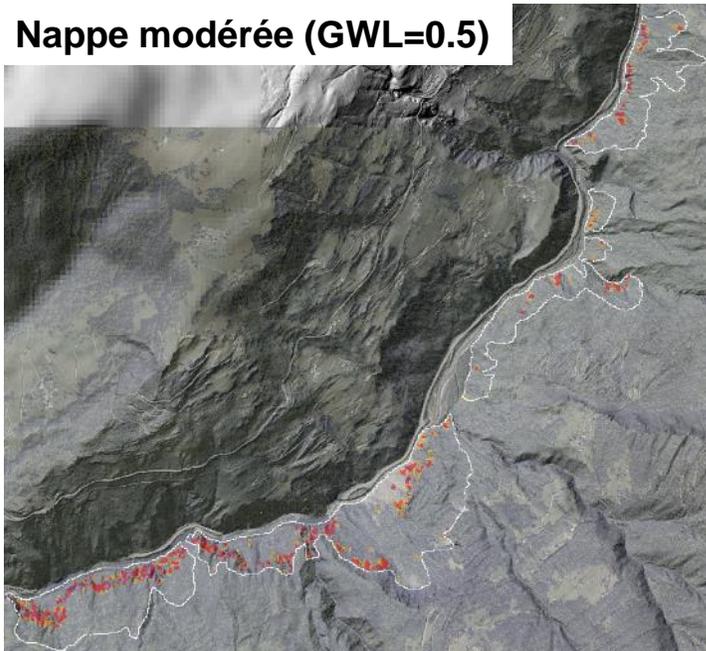


Nappe basse (GWL=0)



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 superficiels – max 3m)

• Résultats

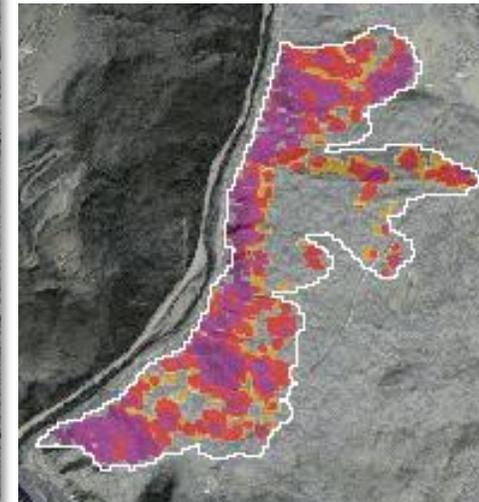
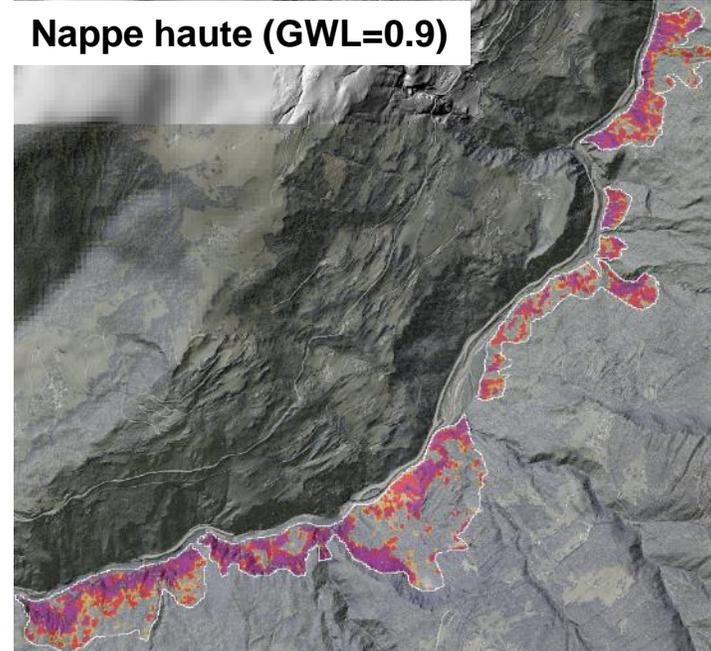
- Carte des probabilités de rupture pour différentes profondeurs
- Scénarii de déstabilisation pour différents types de rupture
- Estimation des volumes mobilisables



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 > 10⁻³) → 6,85.10⁵ m³

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

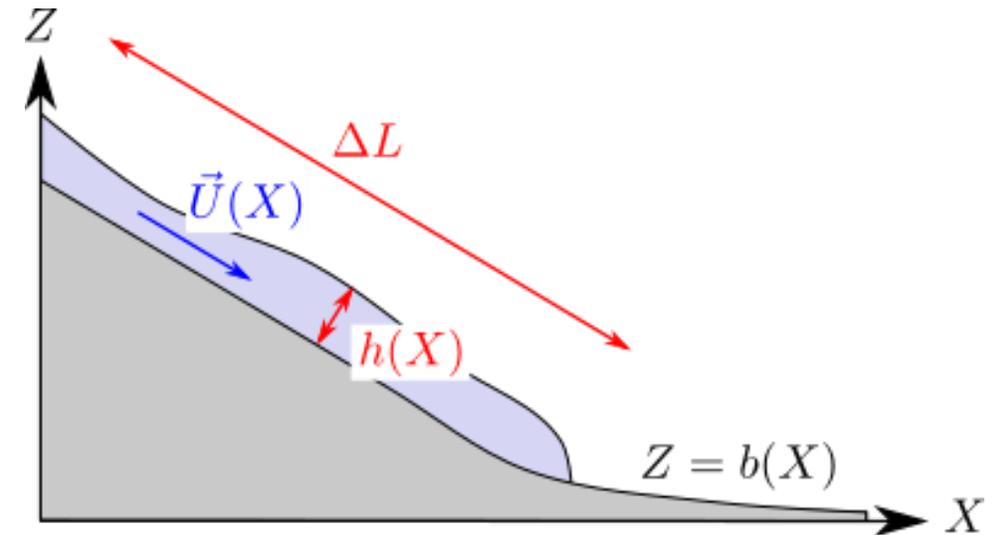
- $h \ll \Delta L$
- Matériaux homogènes
- Pas d'érosion du lit
- Dissipation de l'énergie par friction basale

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

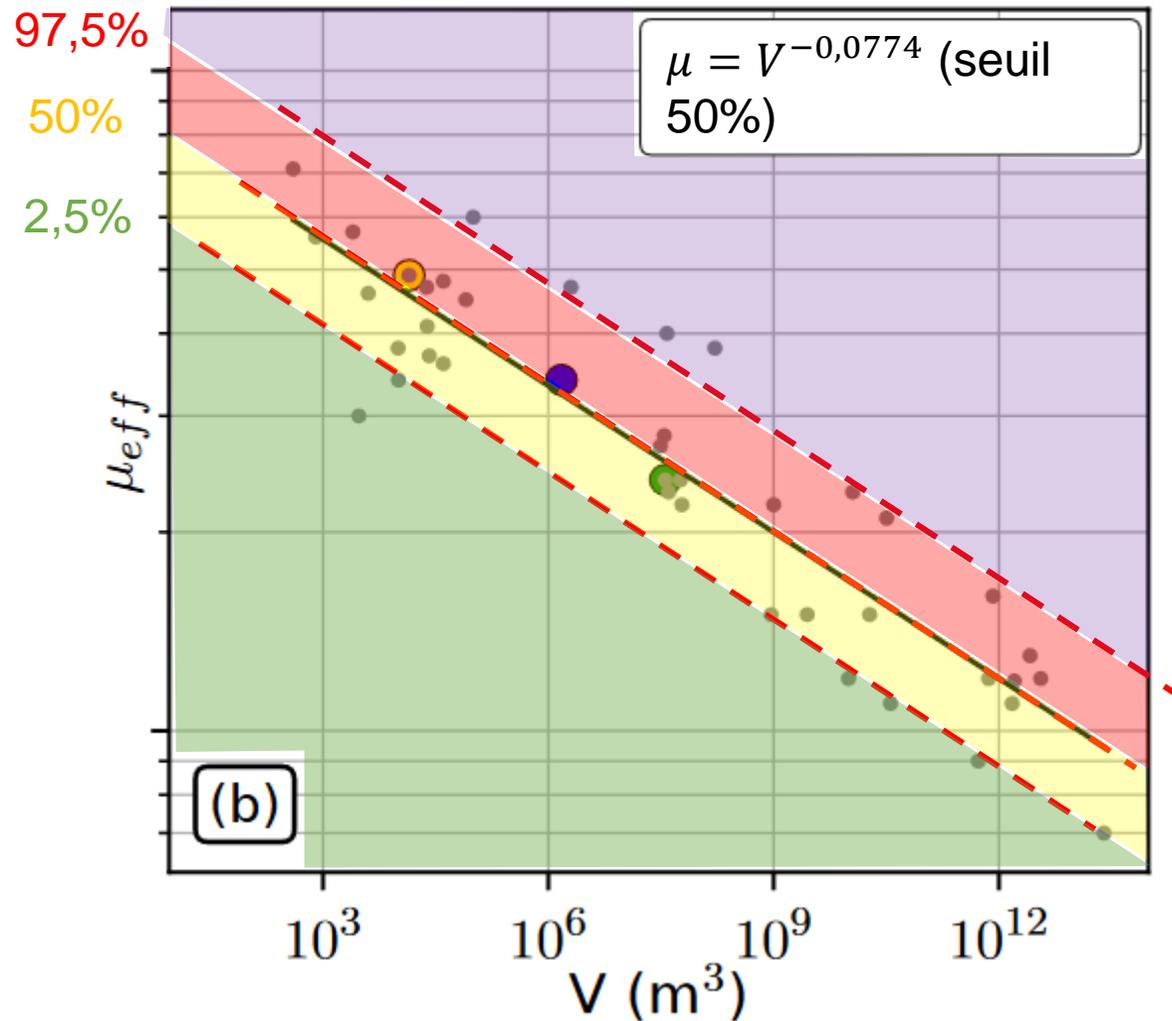
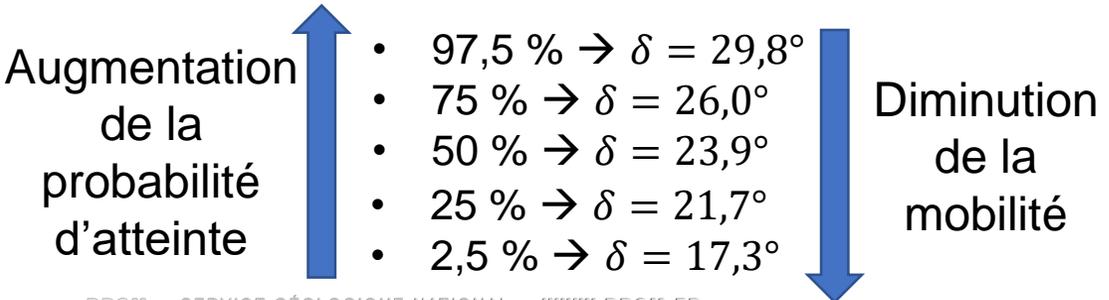
Choix de la rhéologie

- **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 \rightarrow 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 $V = 15\ 600\ m^3$:



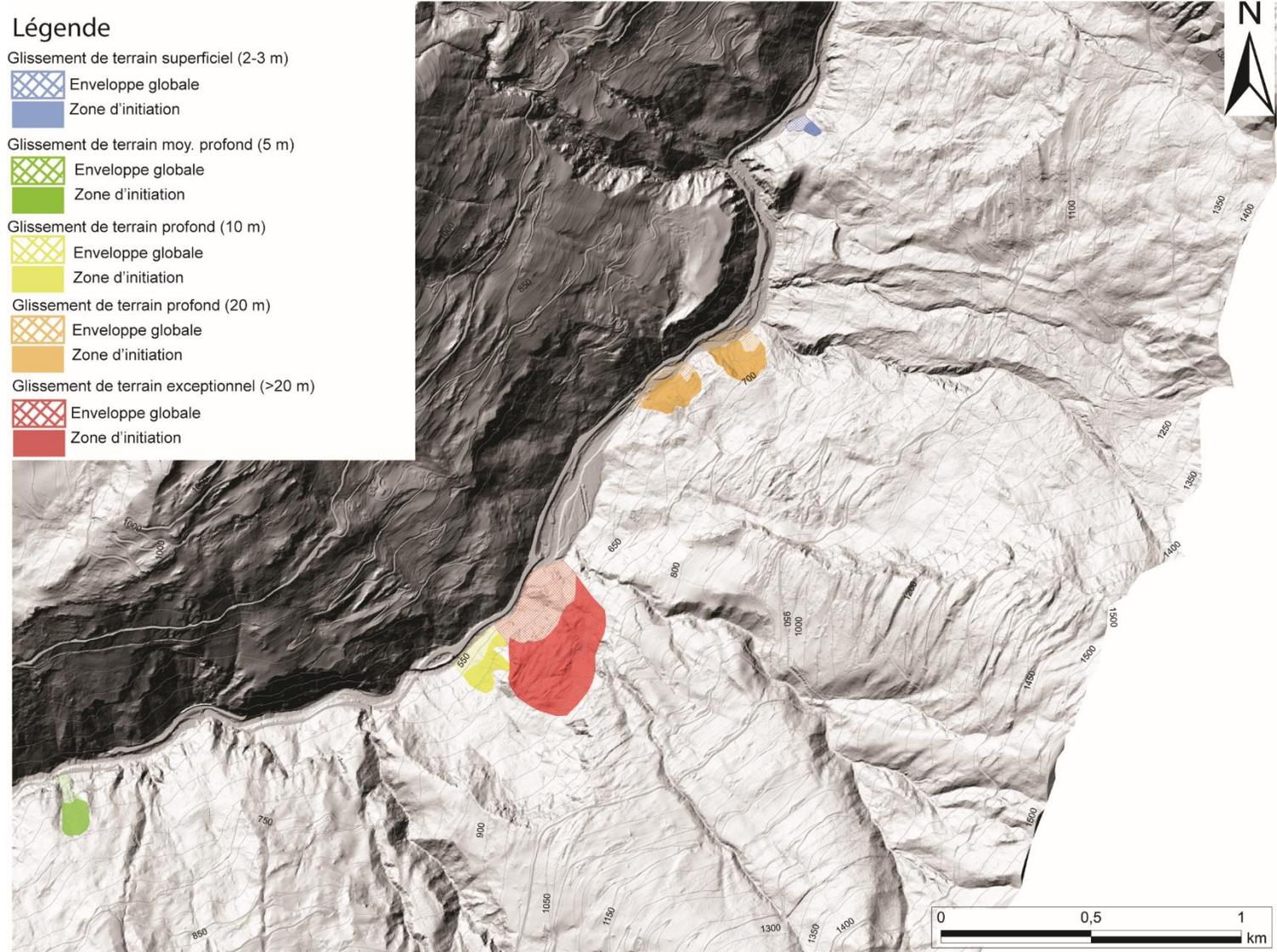
Analyse de la propagation et estimation de l'atteinte : SHALTOP

Définition des scénarios

- Zones déjà déstabilisés / instables
- Epaisseurs déduites par différence de MNT / estimation expertes

Objectifs des simulations

- Illustration des capacités de modélisation sur des cas hypothétiques / passés



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

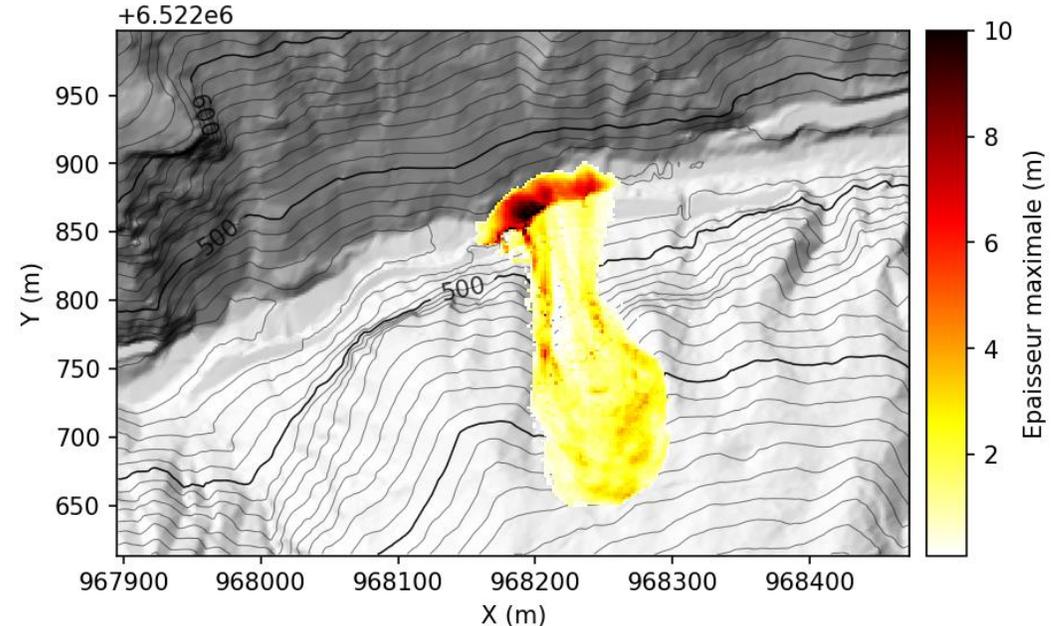
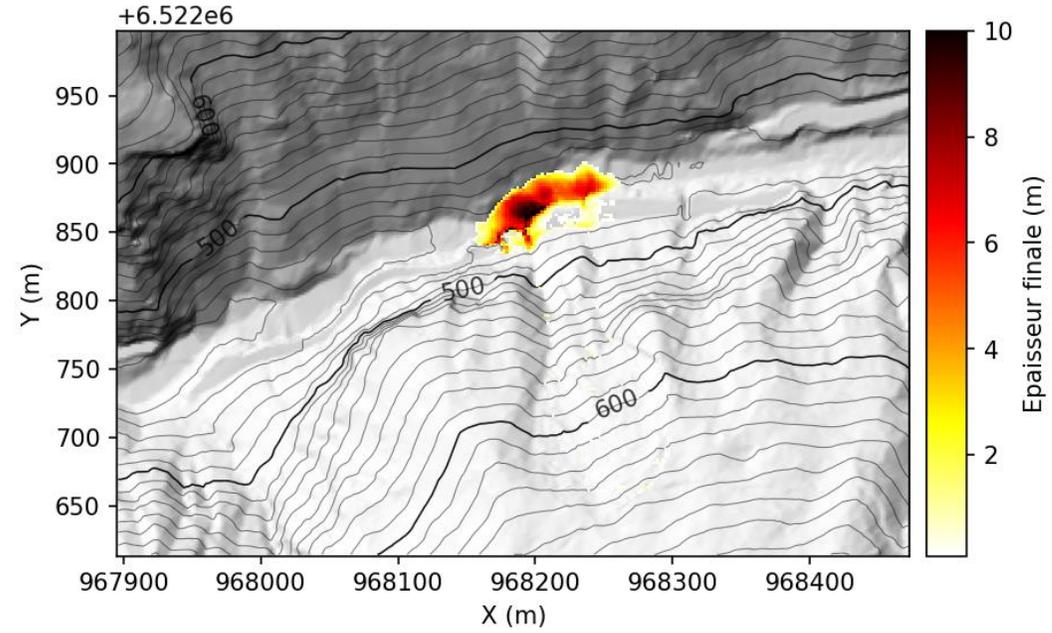
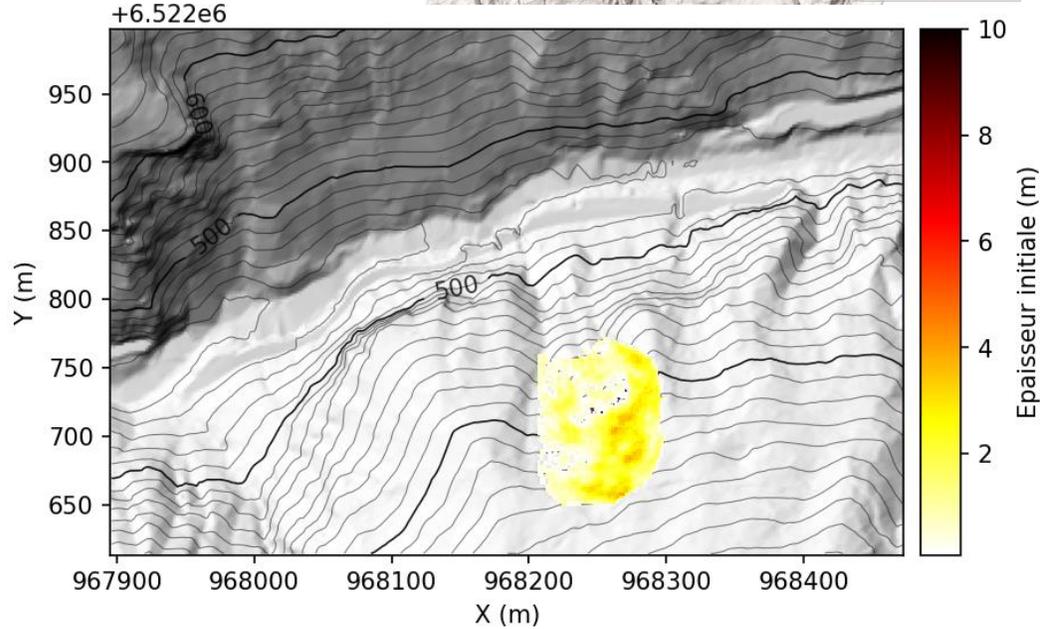
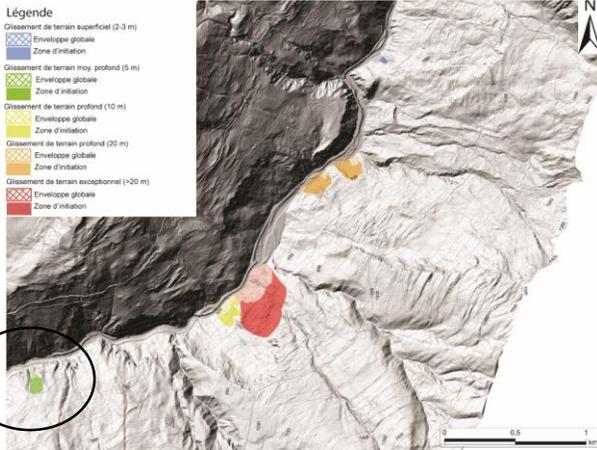


Les cartes suivantes sont données à titre indicatif et informatif. Elles n'ont pas vocation à être utilisées telles que pour du zonage réglementaire ou des décisions d'aménagement



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

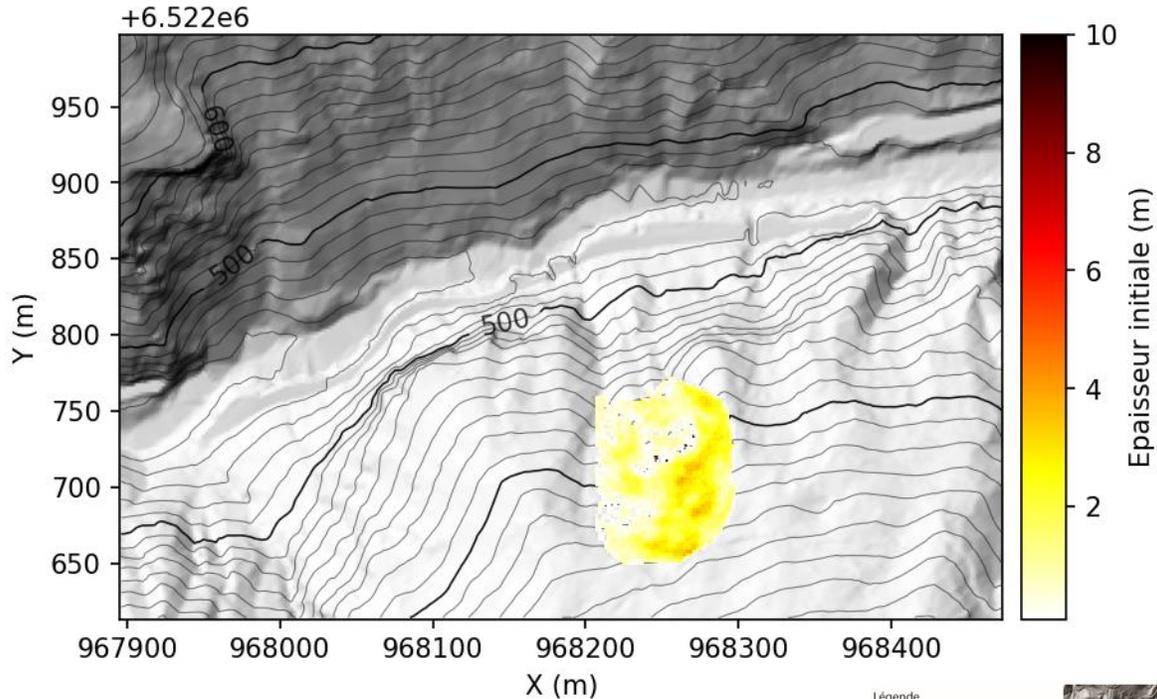
Exemple de simulation
(MOY, 15 600 m³)



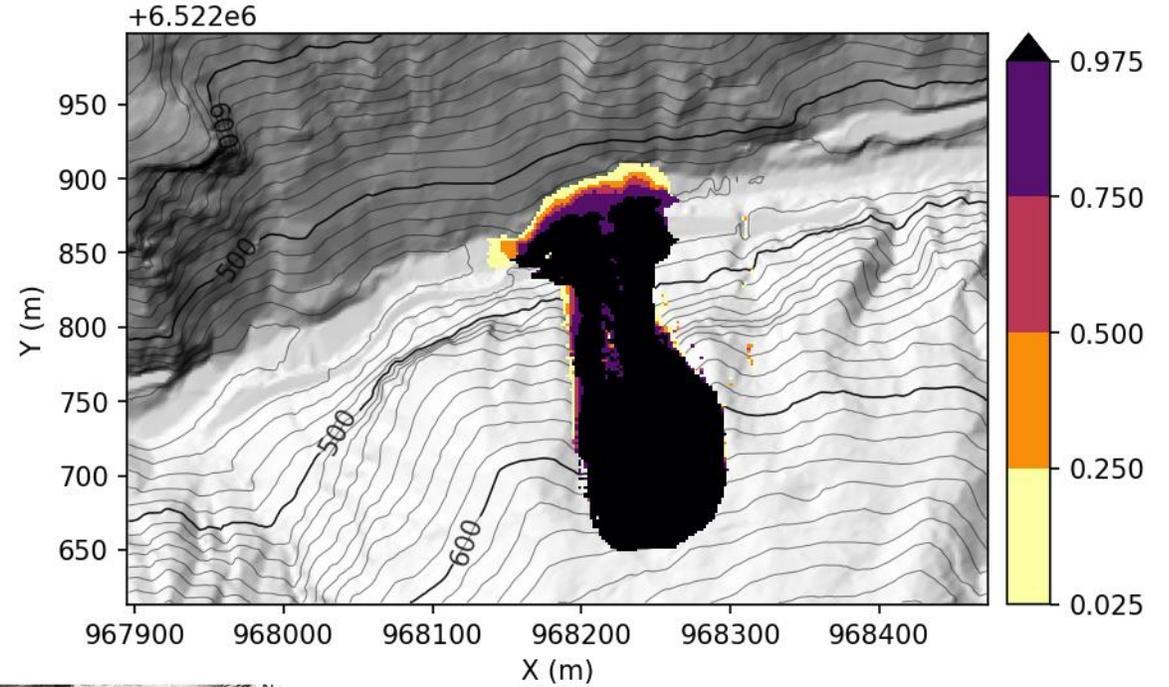
Résultats
simus pour
coeff friction
intermédiaire
($\delta = 23,9^\circ$)

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

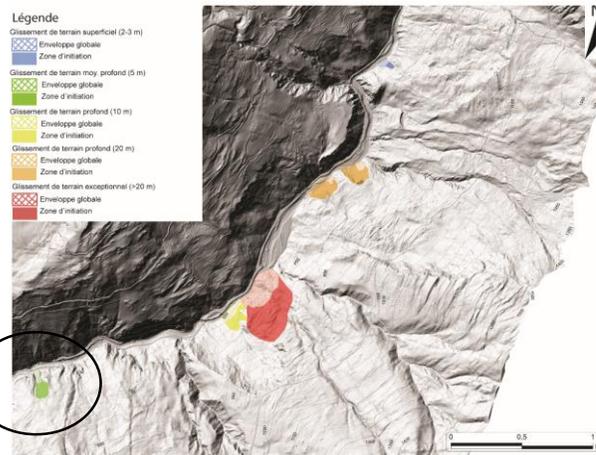
Estimation proba d'atteinte (MOY, 15 600 m³)



Masse initiale

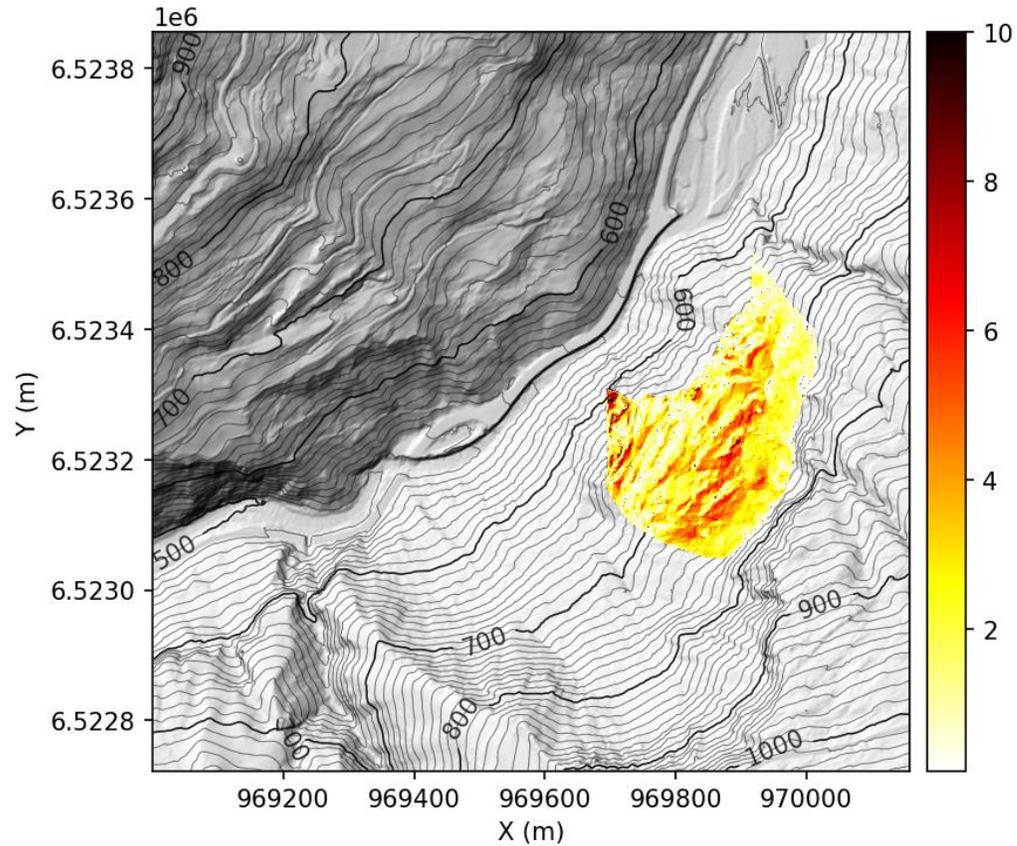


Probabilité estimée d'atteinte

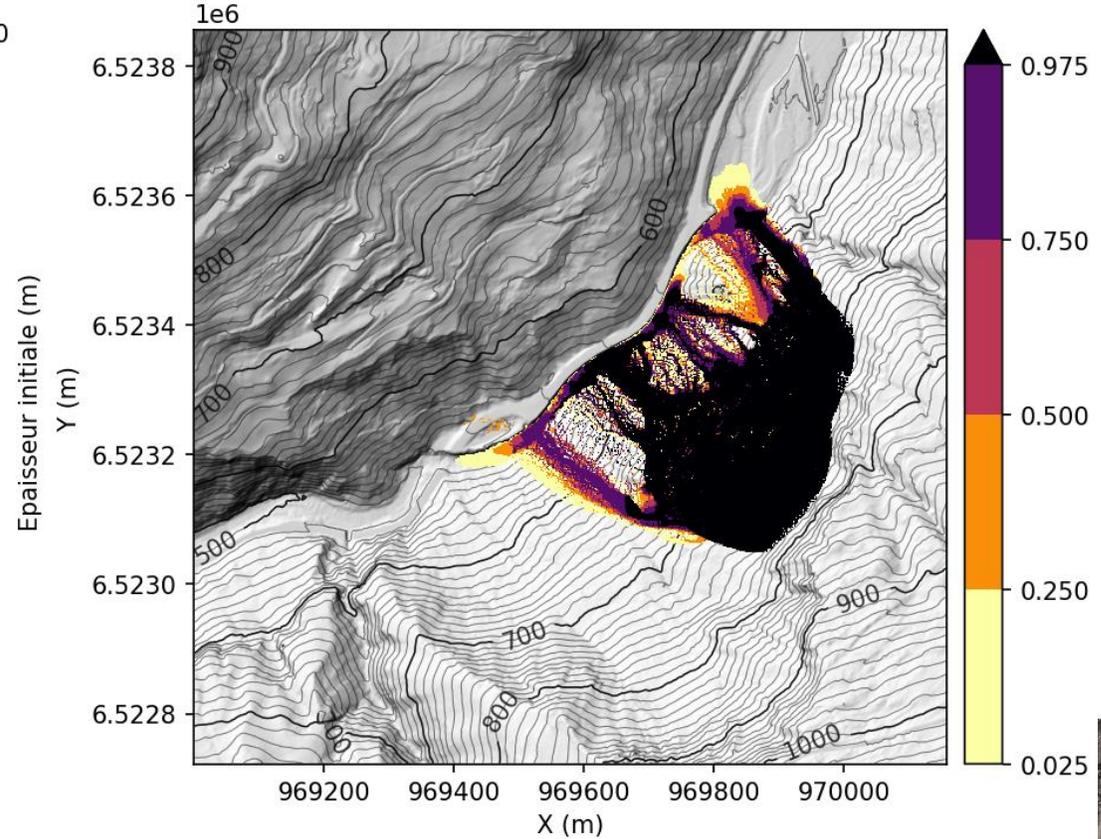


Analyse de la propagation et estimation de l'atteinte : SHALTOP

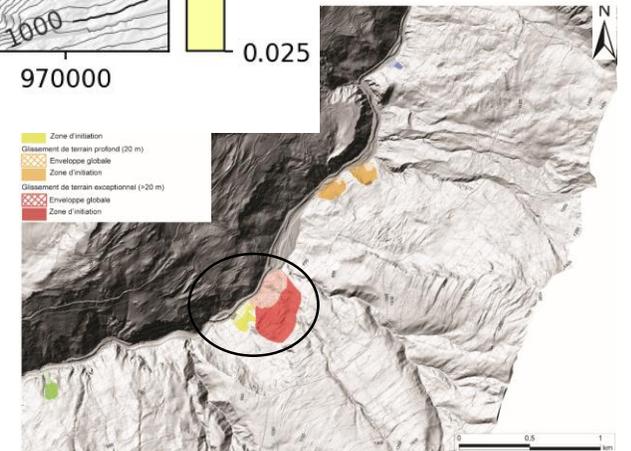
Estimation proba d'atteinte (EXCEP, 230 000 m³)



Masse initiale

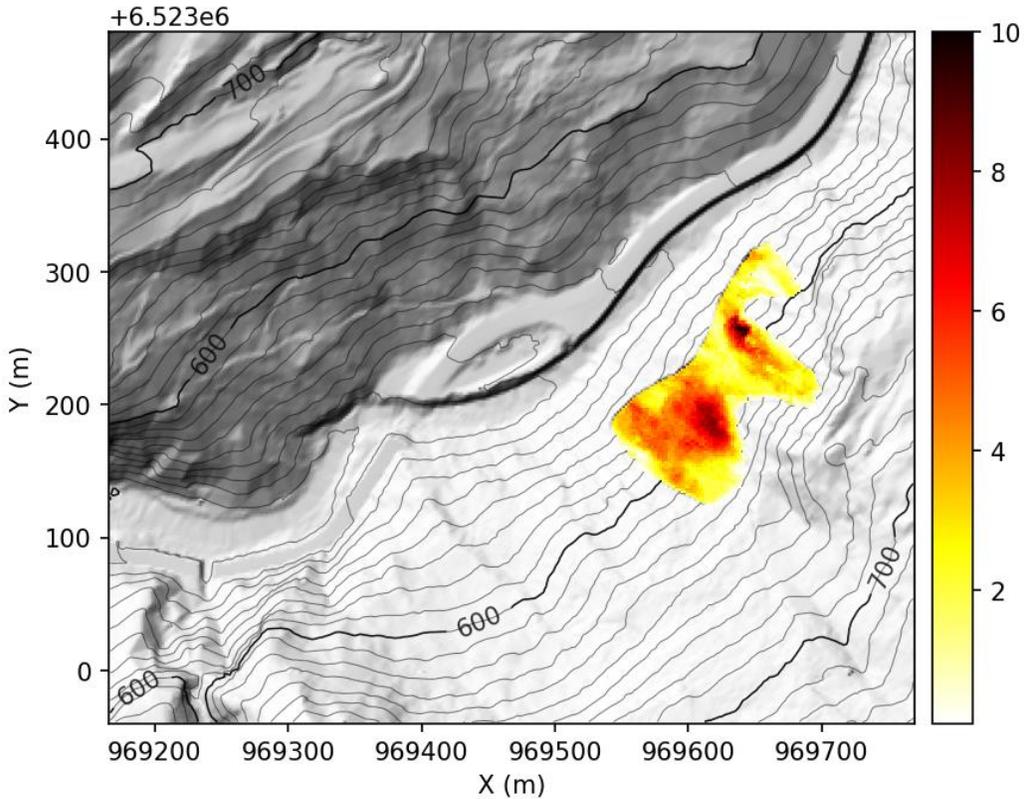


Probabilité estimée d'atteinte

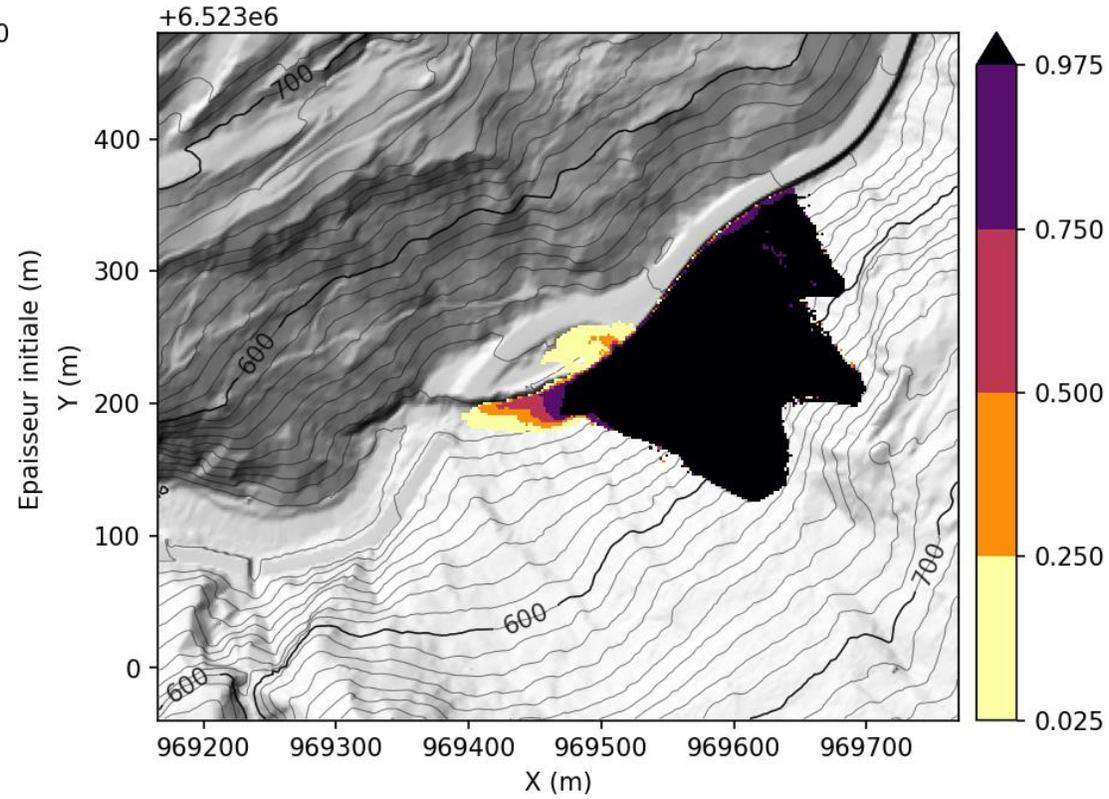


Analyse de la propagation et estimation de l'atteinte : SHALTOP

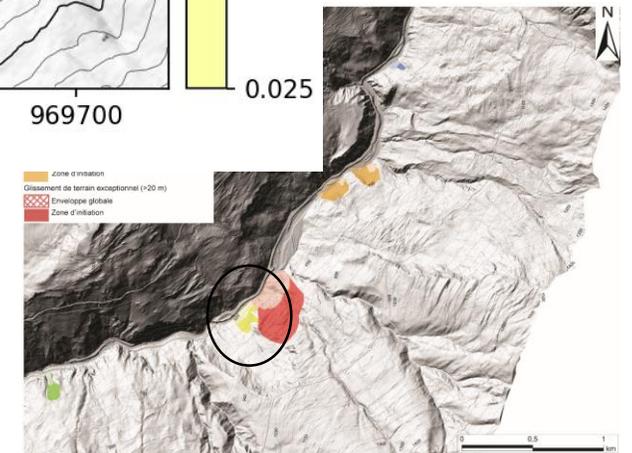
Estimation proba d'atteinte (PFD10, 54 800 m³)



Masse initiale

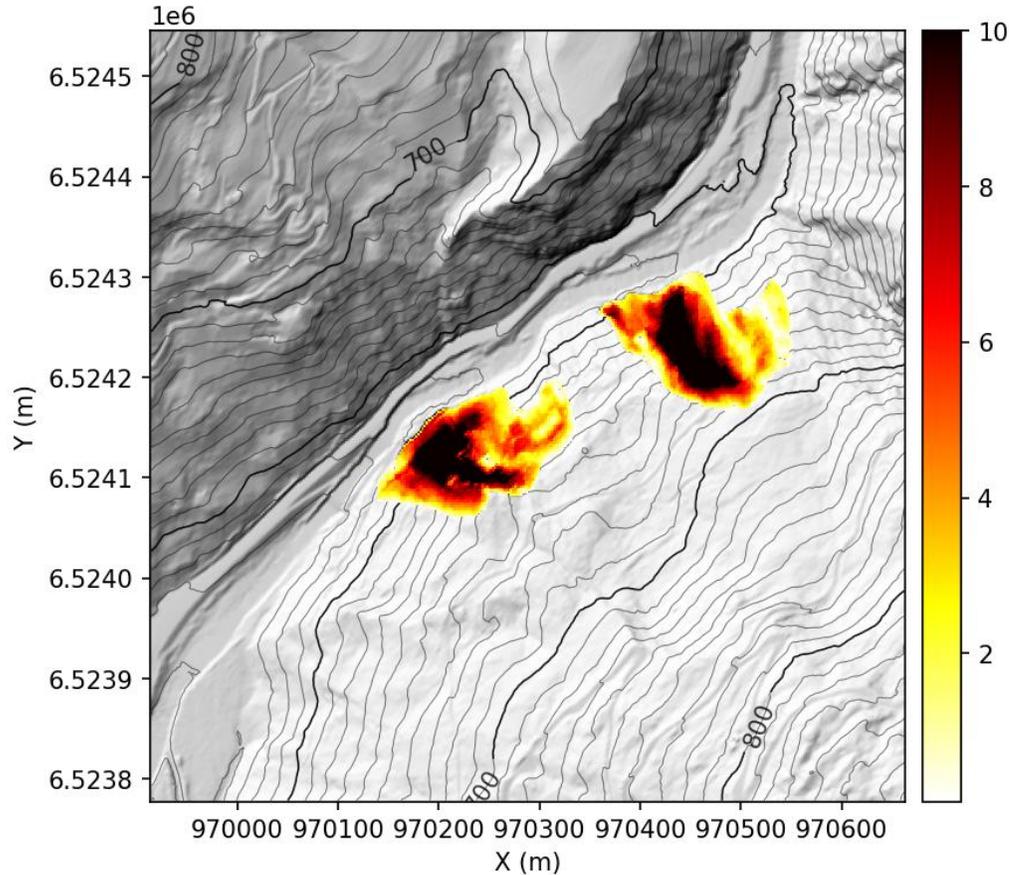


Probabilité estimée d'atteinte

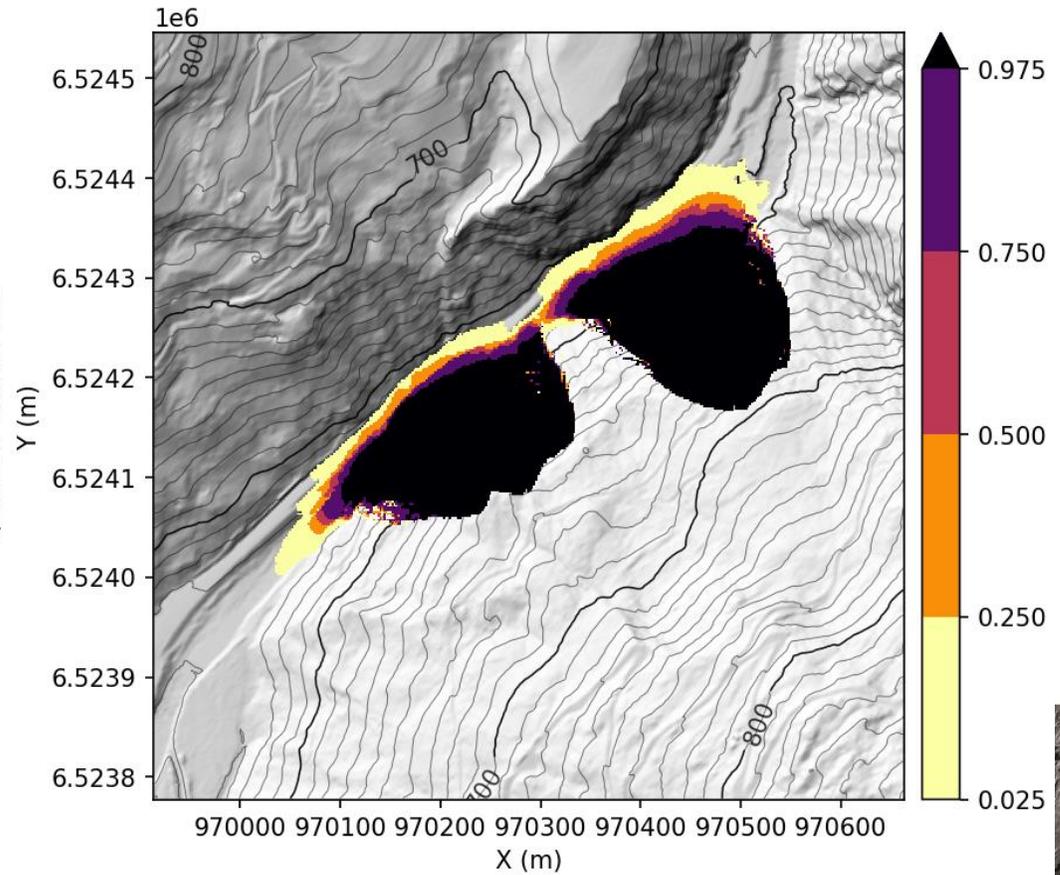


Analyse de la propagation et estimation de l'atteinte : SHALTOP

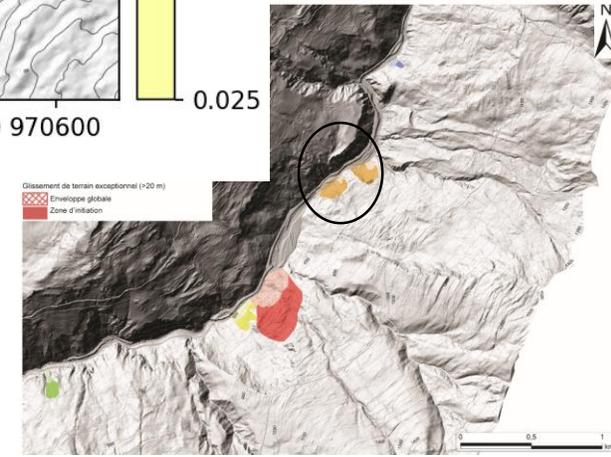
Estimation proba d'atteinte (PFD20, 235 000 m³)



Masse initiale

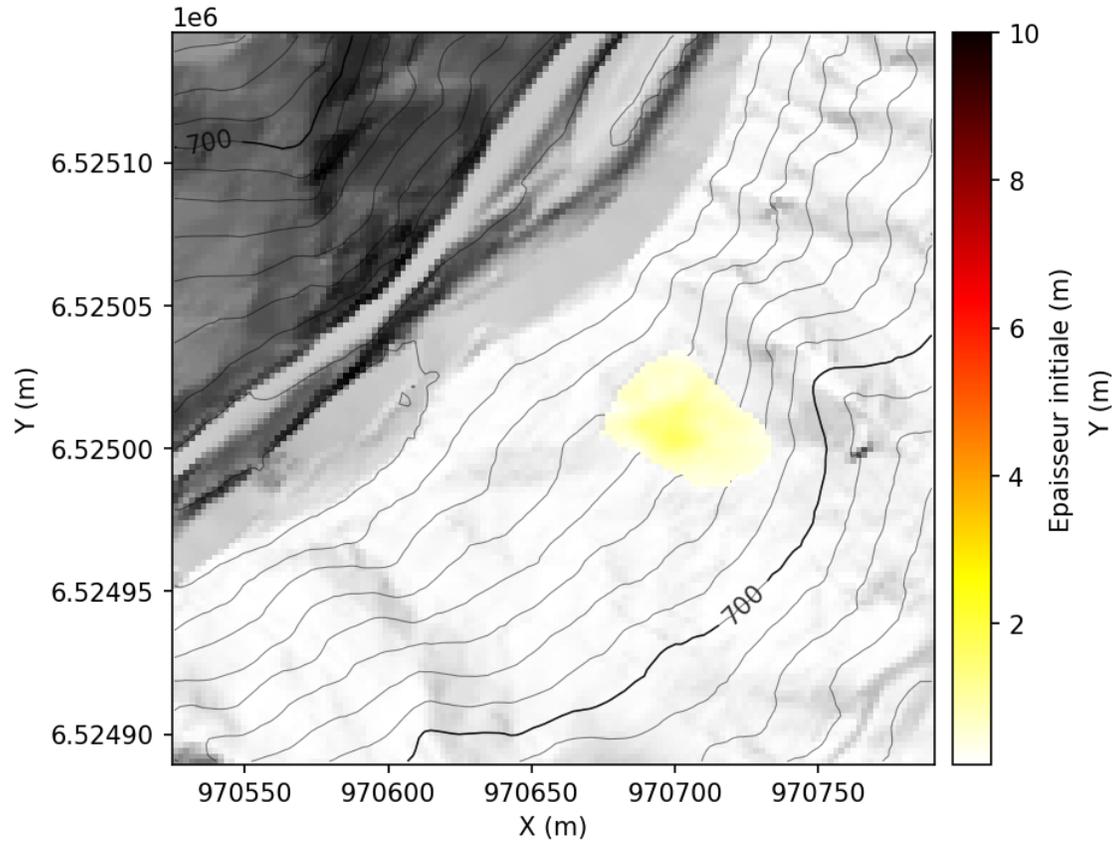


Probabilité estimée d'atteinte

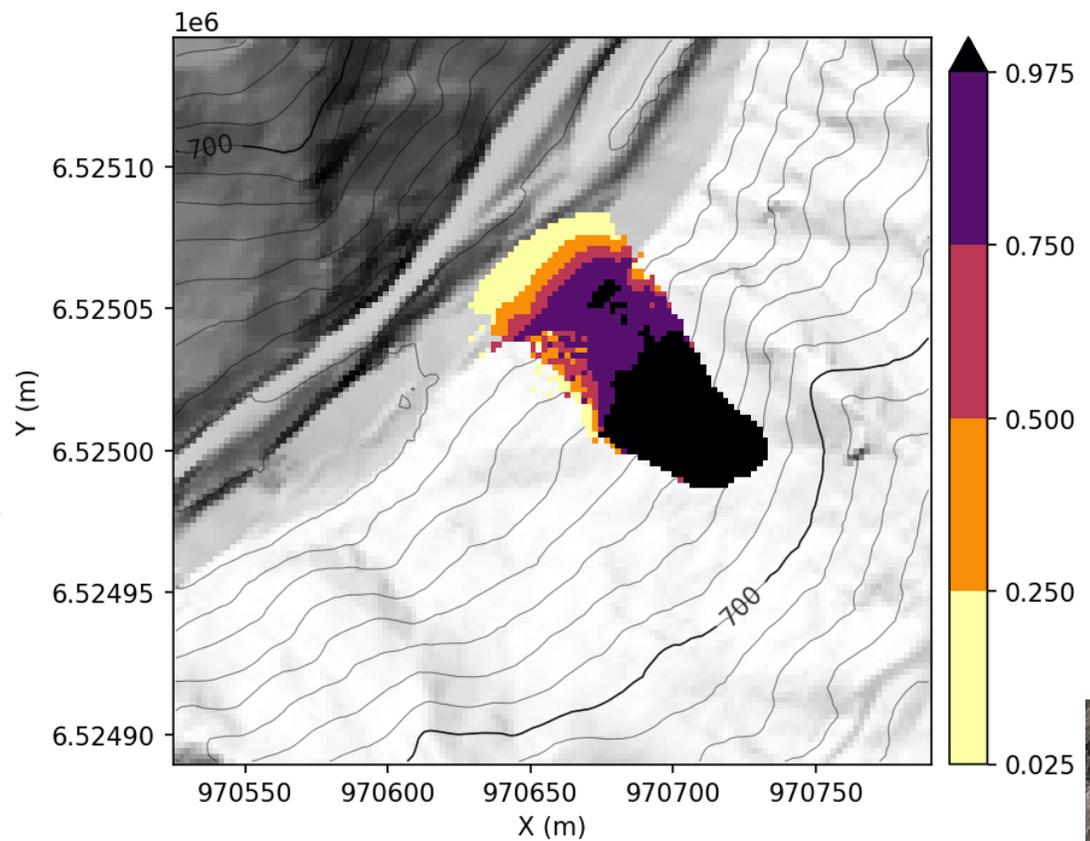


Analyse de la propagation et estimation de l'atteinte : SHALTOP

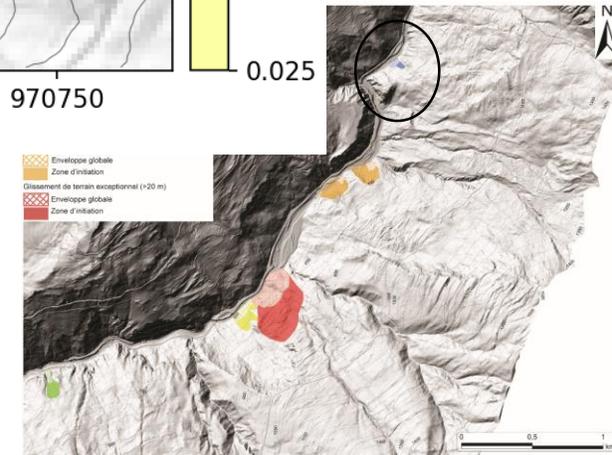
Estimation proba d'atteinte (SUP, 1600 m³)



Masse initiale

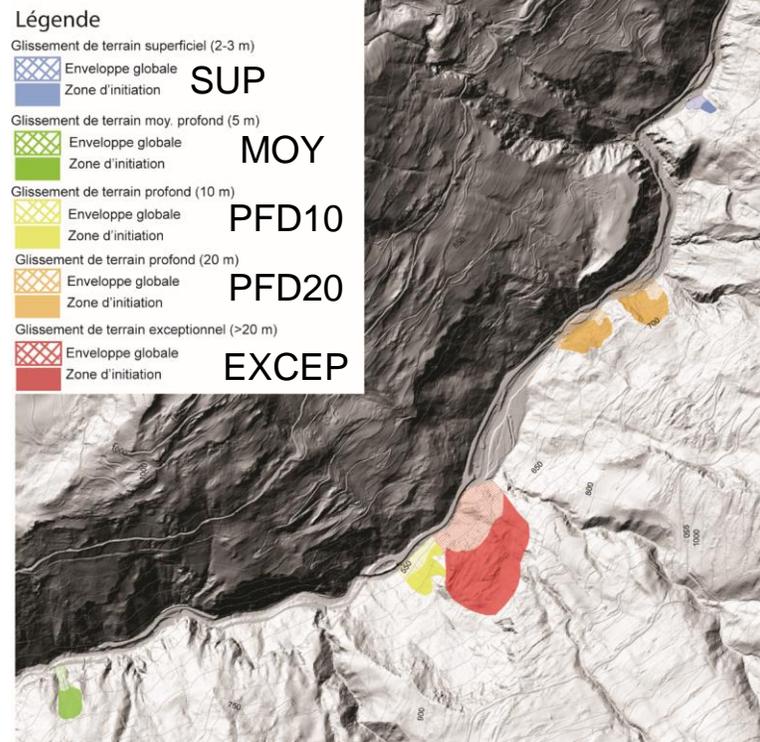


Probabilité estimée d'atteinte



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

Estimation des volumes (en m³) déposés dans le lit de la rivière et sur la route par scénario



Probabilité si déclenchement	EXCEP		MOY		PFD10		PFD20		SUP	
	lit rivière	route								
0,025	95609	4	13556	405	40814	23	202757	16604	1556	0
0,25	52630	2	13393	735	37657	0	201067	743	1440	0
0,5	35816	0	12782	1248	38489	0	192841	6	1178	0
0,75	25823	0	11808	2000	39576	0	179147	0	725	0
0,975	12648	0	6674	2924	36161	0	141911	0	20	0

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

Conclusion

- Possibilité de modéliser la dynamique et la géométrie de glissements sur des zones localisées
- Approche probabiliste simplifiée à partir de lois empiriques

Limites et perspectives

- **Les cartes présentées restent indicatives:**
 - Géométrie des zones d'initiation incertaine
 - Modélisation d'une rupture soudaine, sans modélisation de la déformation progressive
- Approche applicable sur un site spécifique, bien documenté, en particulier pour la géométrie.
- Possibilité de simuler en avance plusieurs scénarios / volumes pour aider à la gestion des risques.