

Michel Jaboyedoff

*Institut des
sciences de la terre
Group RISK-rock*

Unil
UNIL | Université de Lausanne

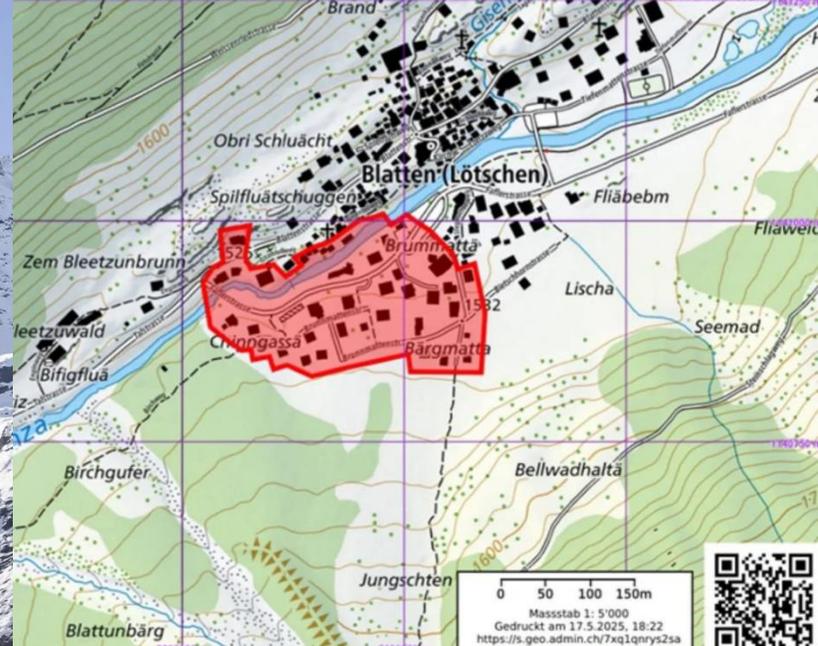


Les défis liés aux risques de mouvements gravitaires dans les régions de montagne dans un contexte dynamique

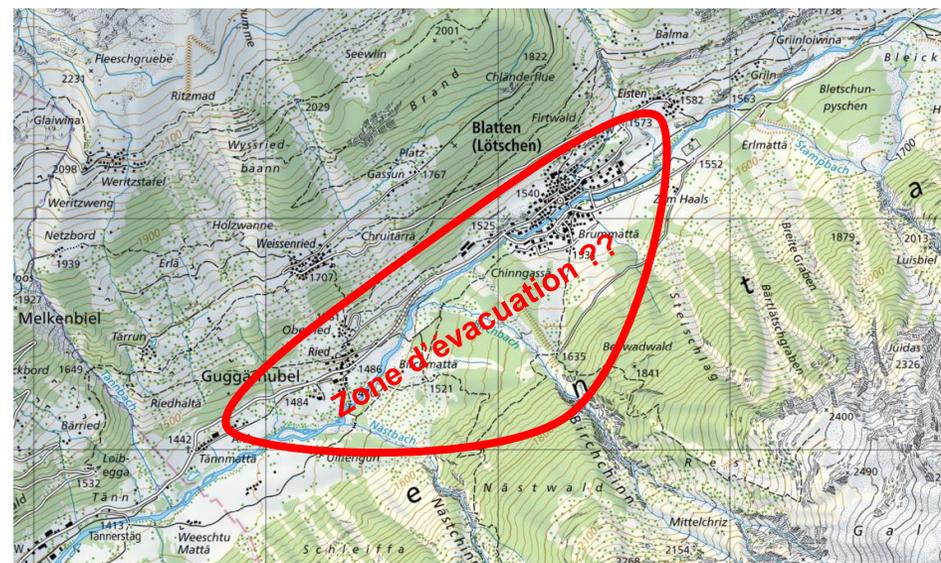


Le cas de Blatten

- Début mai 2025 des chutes de blocs (30'000 m³) se sont produites au Kleiner Nesthorn (3342 m), arrêt de débris à 500 m au-dessus de la vallée
- 17 mai évacuation de 92 personnes à Blatten
- 19 mai 300 personnes sont évacuées
- Des millions de m³ s'accumulent sur le glacier + laves torrentielles qui atteignent le village
- 28 mai 3 M m³ de roche forment une avalanche de roches et de glaces de 10 M m³.



<https://www.srf.ch/news/schweiz/loetschental-im-wallis-blatten-konkrete-gefahr-durch-bergstuerze-92-personen-evakuiert>



<https://www.swissinfo.ch/eng/various/imminent-landslide-threat-authorities-order-full-evacuation-of-swiss-mountain-village/89343820>

Le glissement rocheux



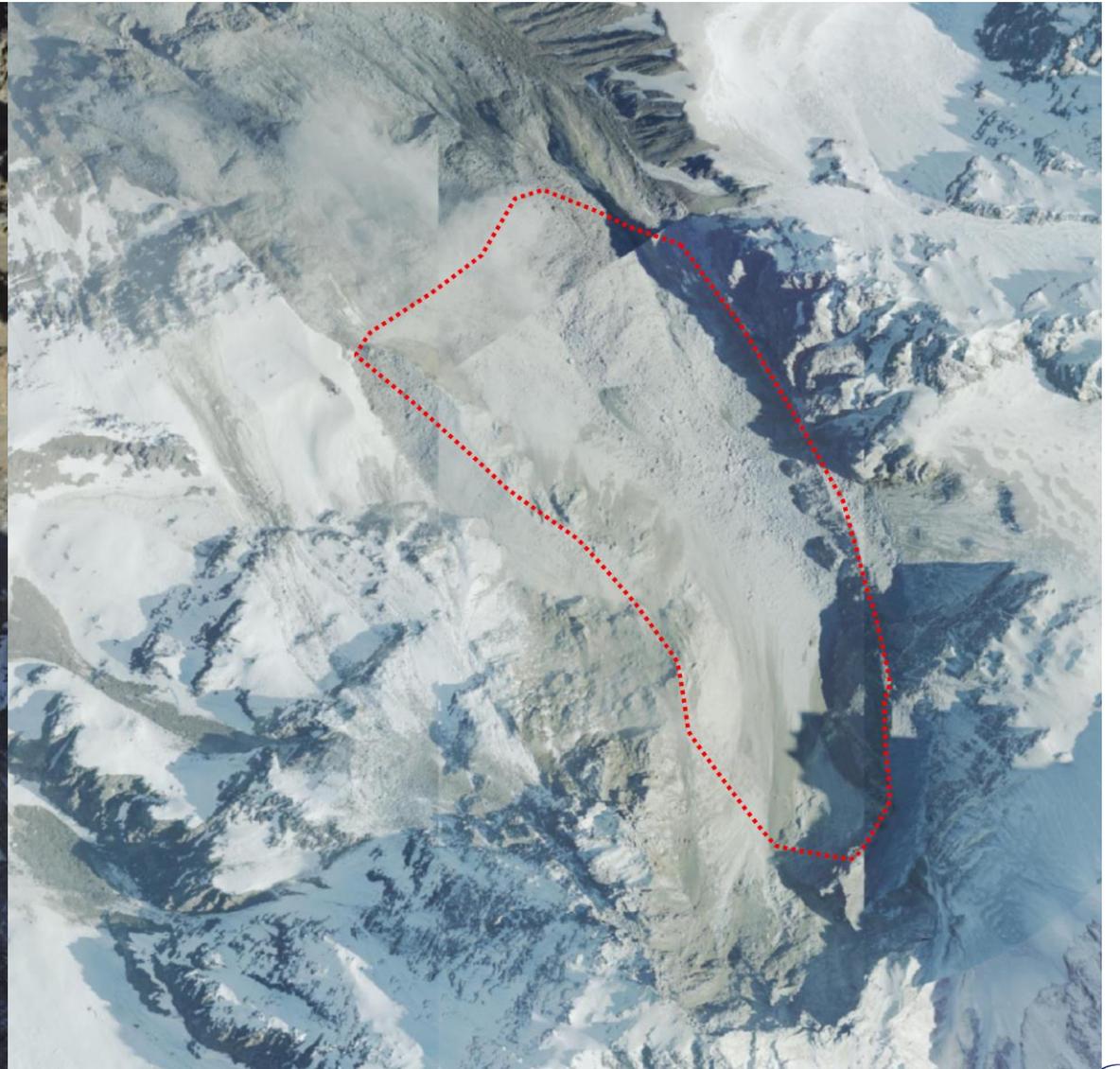
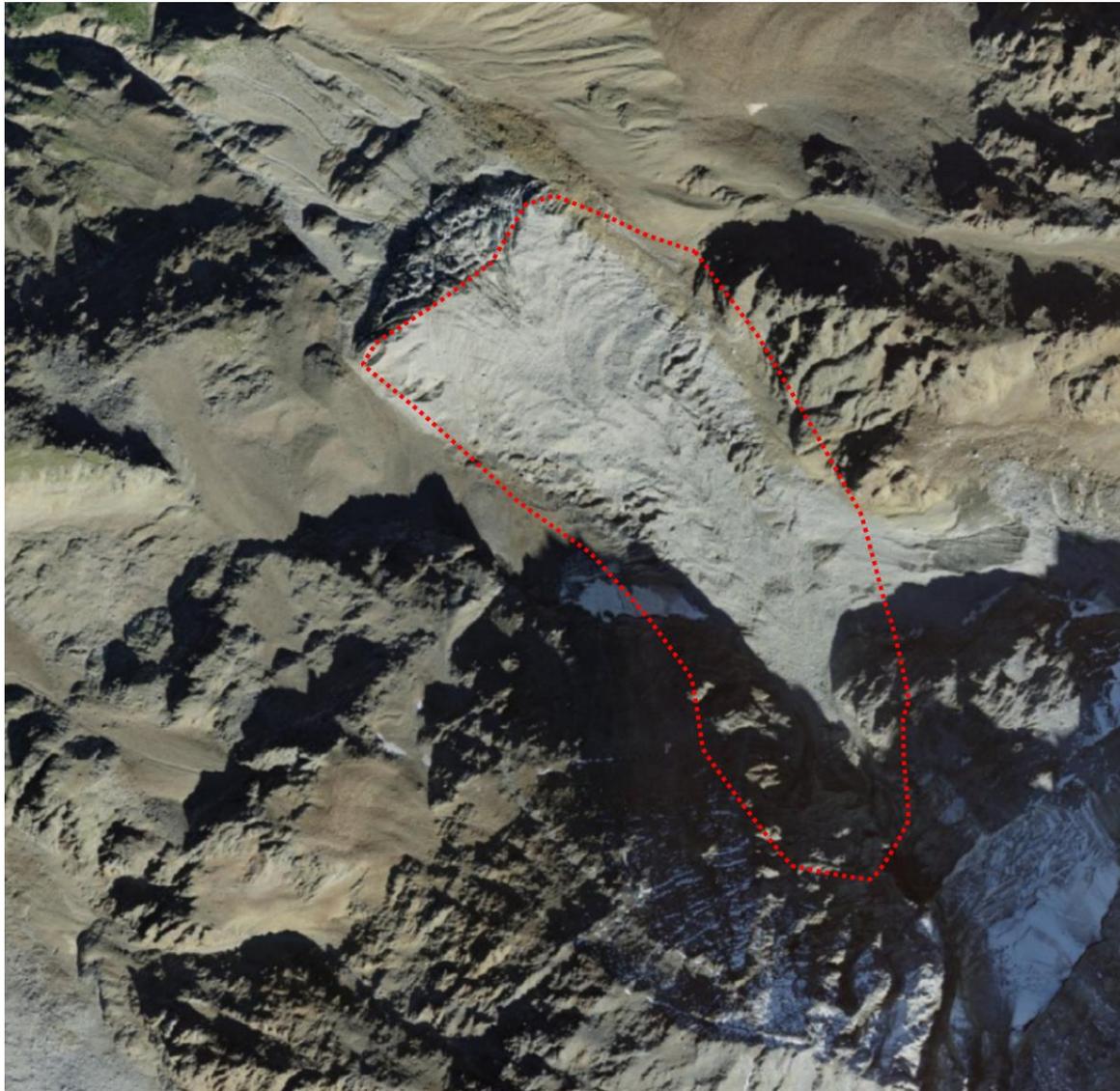
Mittwoch
14:00 Uhr

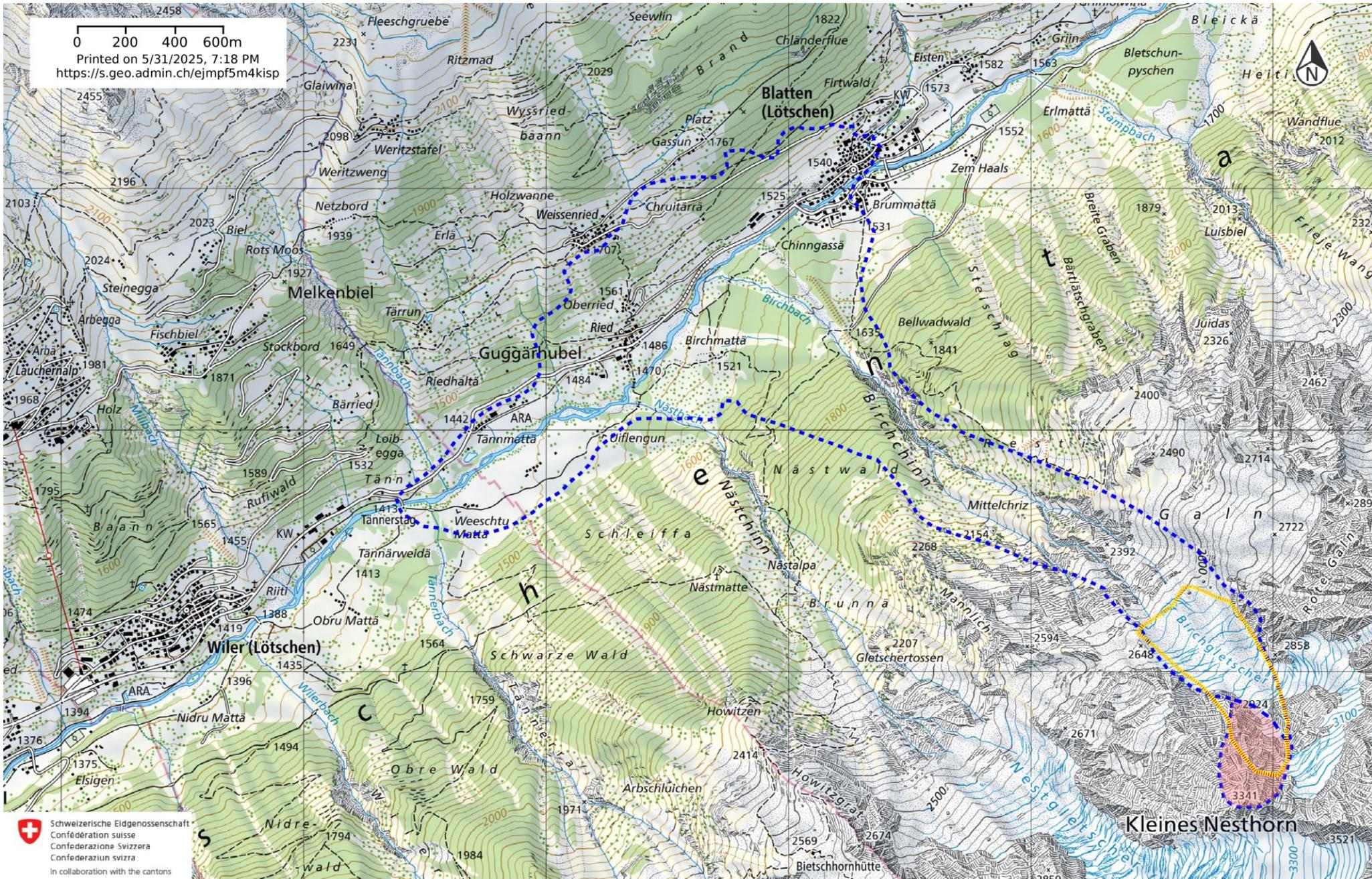
poAona.
MEDIA

Débris rocheux sur le glacier



Le dépôt (image swisstopo)





Cadre conceptuel

Modèles conceptuels de mouvement de terrain

Illustration des différents points à évaluer à chaque étape du développement d'un modèle modèles conceptuels de mouvement de terrain.

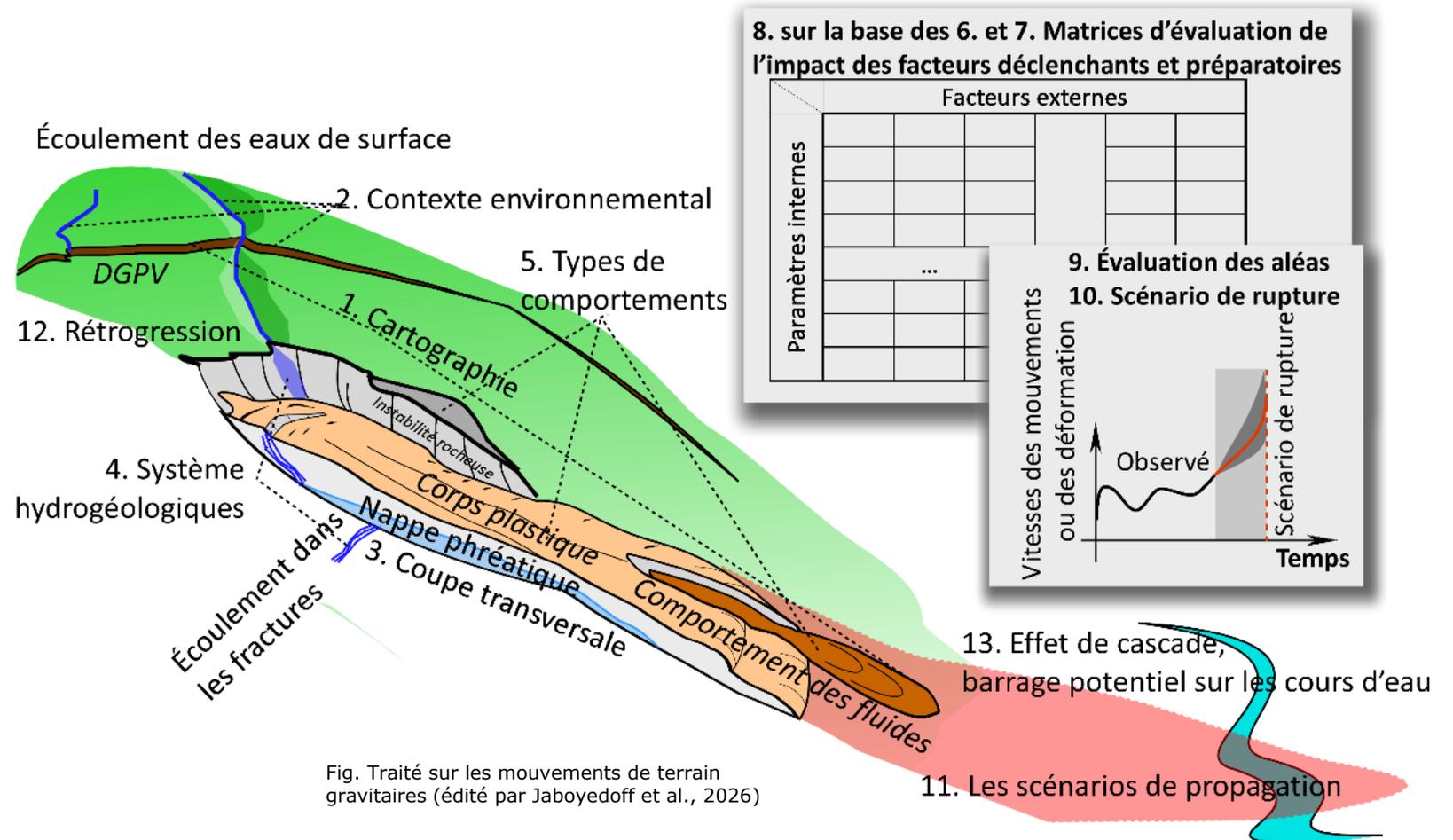


Fig. Traité sur les mouvements de terrain gravitaires (édité par Jaboyedoff et al., 2026)

Description des mouvements de versant

Vitesses de mouvement durant les différentes phases d'évolution d'un mouvement de terrain, suivant deux scénarios différents (modifié d'après Leroueil et al., 1996).

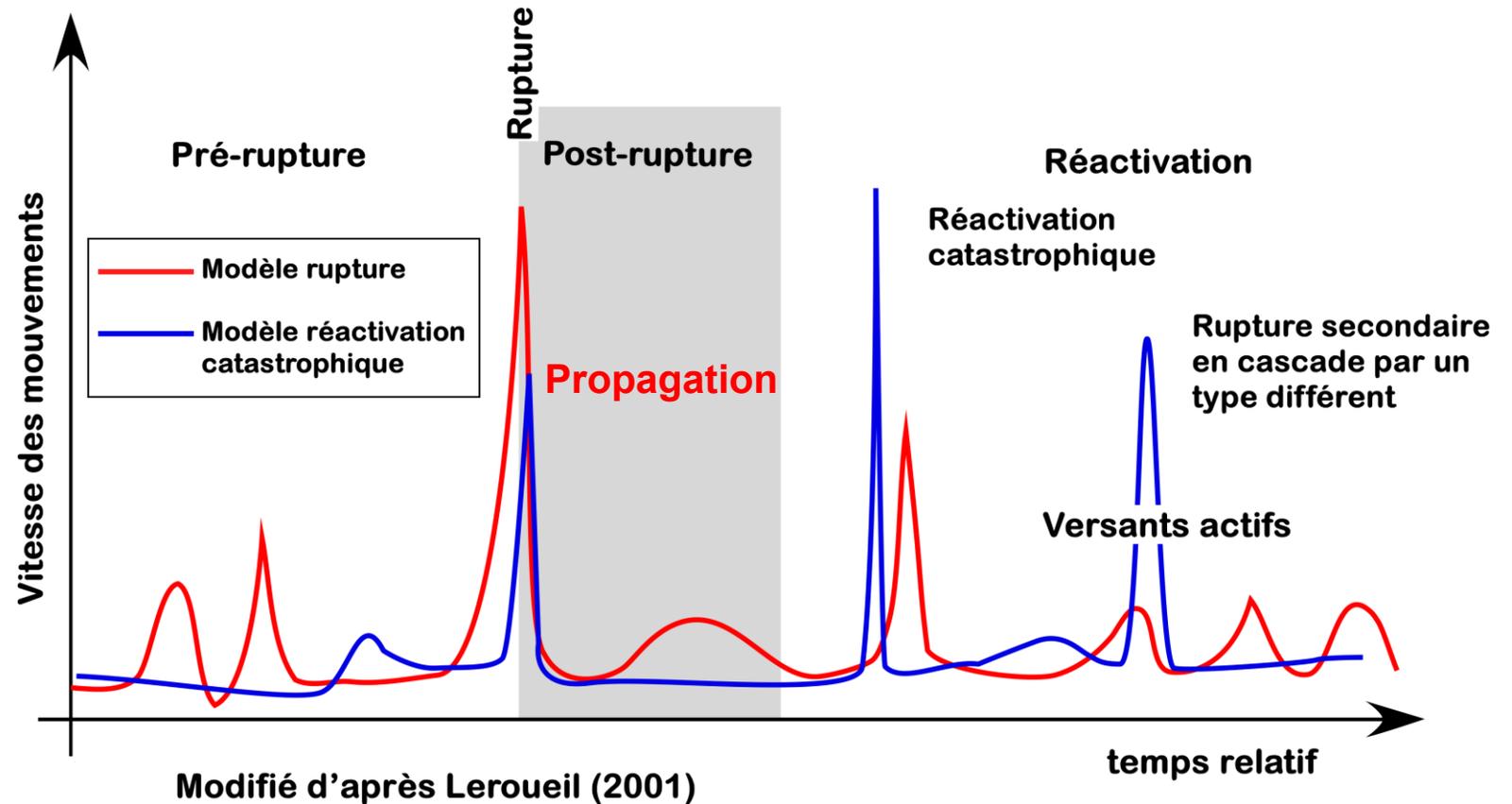


Fig. Traité sur les mouvements de terrain gravitaires (édité par Jaboyedoff et al., 2026)

L'analyse du risque au sein de la gestion du risque

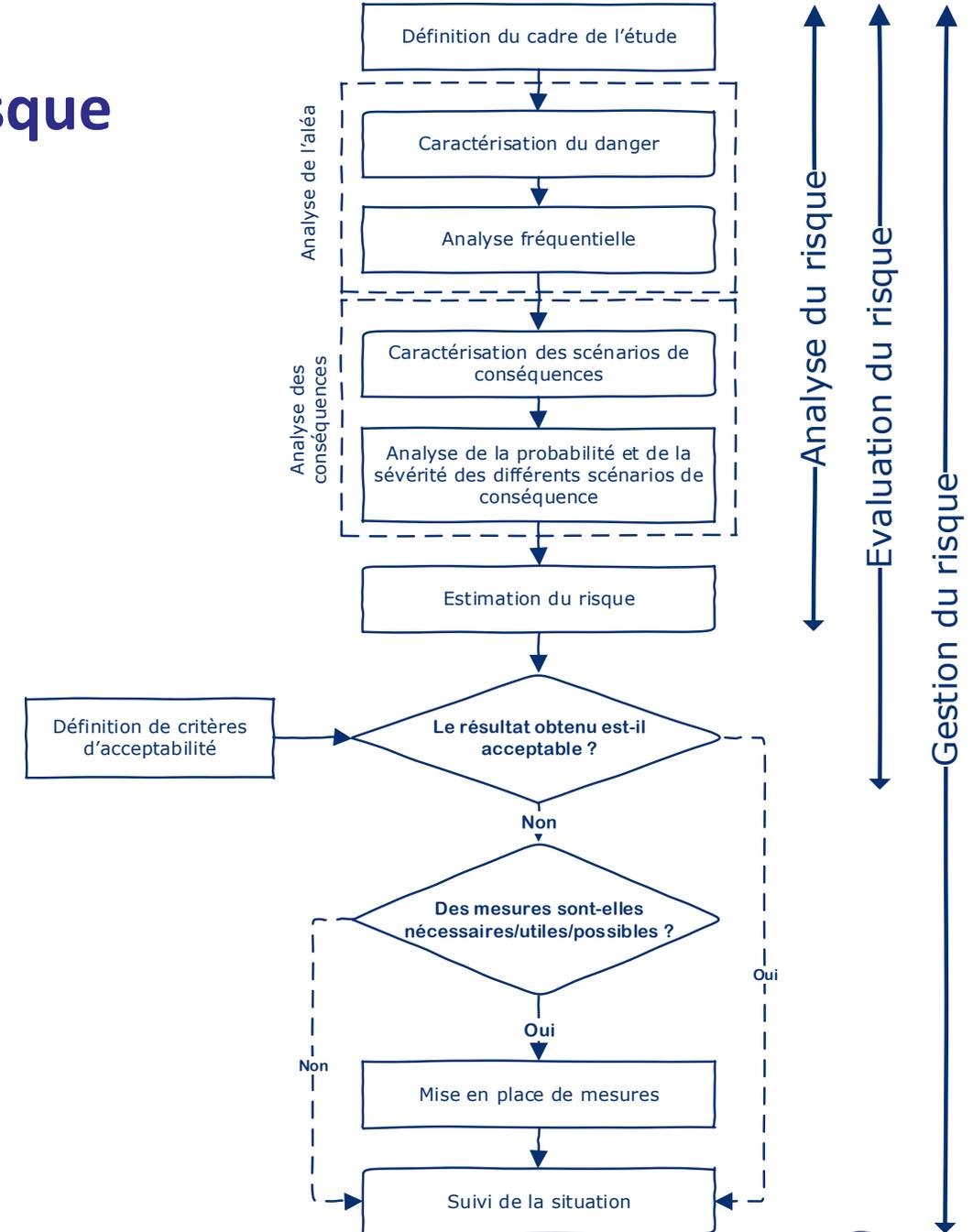
Selon la norme ISO 31000 (2018), le risque est défini comme :

« *L'effet de l'incertitude sur les objectifs* »

Cette définition s'applique bien au terme risque qui est utilisé lors d'une prise de décision, i.e., gestion des risques, car souvent, elle dépend d'un ensemble de facteurs qui sont indépendants de l'analyse de risque.

Remarques:

« *L'analyse de risque consiste à appliquer des recettes, qui peuvent dépendre du point de vue ou/et des données qui sont accessibles.* »



(d'après Fell et al., 2005).

Etapes et du processus de gestion des risques des mouvements de terrain

(Tiré de Capobianco et al., 2025)

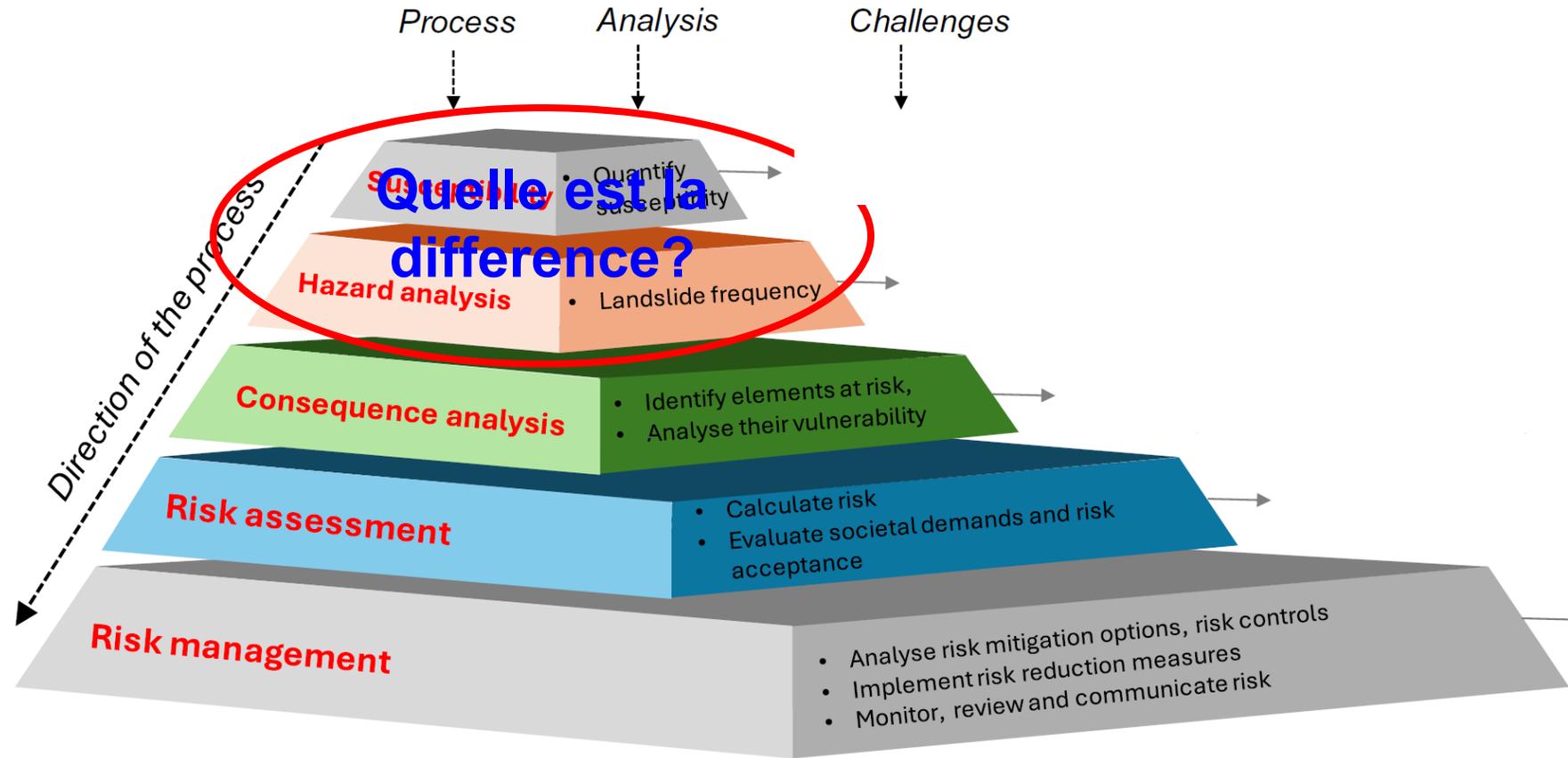


Schéma des étapes et du processus de gestion des risques des mouvements de terrain et des défis associés à l'ère du changement climatique rapide, des changements démographiques et de l'évolution des priorités sociales (modifié d'après Fell et al. 2005)

Un calcul du risque

Le risque des objets E_i occupant le domaine X peut-être écrit de manière conceptuelle (modifié d'après Leroueil et Locat 1998 ; Jaboyedoff et al., 2001 ; Volkwein et al., 2011 ; Farvacque et al., 2019):

$$R(X) = \sum_j \sum_i W_i(X) \frac{1}{an} \int_0^{1 \text{ an}} \int_{I_{min}}^{I_{max}} H(X, I(X, M_j(t)), t) \times V(I(X), E_i(X)) \times Exp(E_i(X), t) dI dt$$

où l'unité de risque est un coût par an ou le nombre de décès par an ; en tenant compte de différentes classes de valeurs de magnitude M_j , et des objets à risque. Avec

$$H(X, I(X, M_j(t)), t) = \lambda(M_j, t) \times Pp(X, I(X, M_j) | M_j)$$

Source du scénario M_j

- Type d'instabilité
- Caractéristiques (Volume)
 - Fréquence de rupture

Propagation

- Périmètre
- Caractéristiques
- Probabilité de propagation pour une intensité donnée

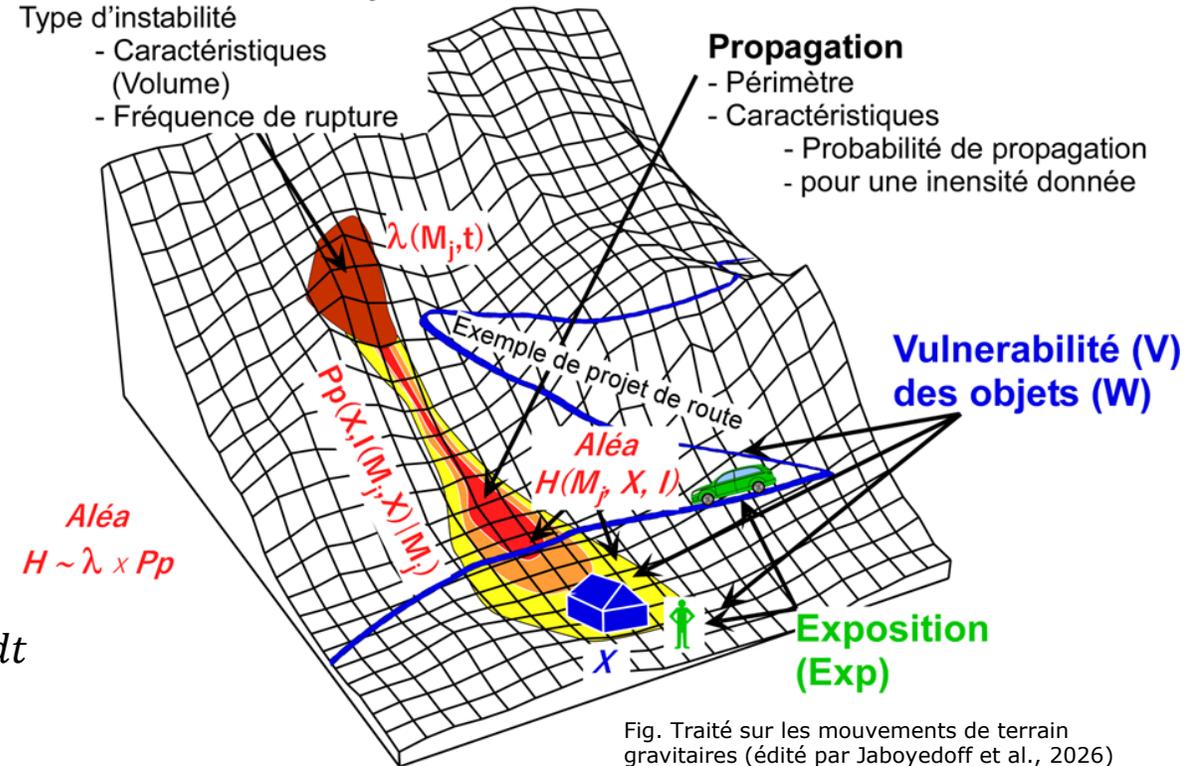
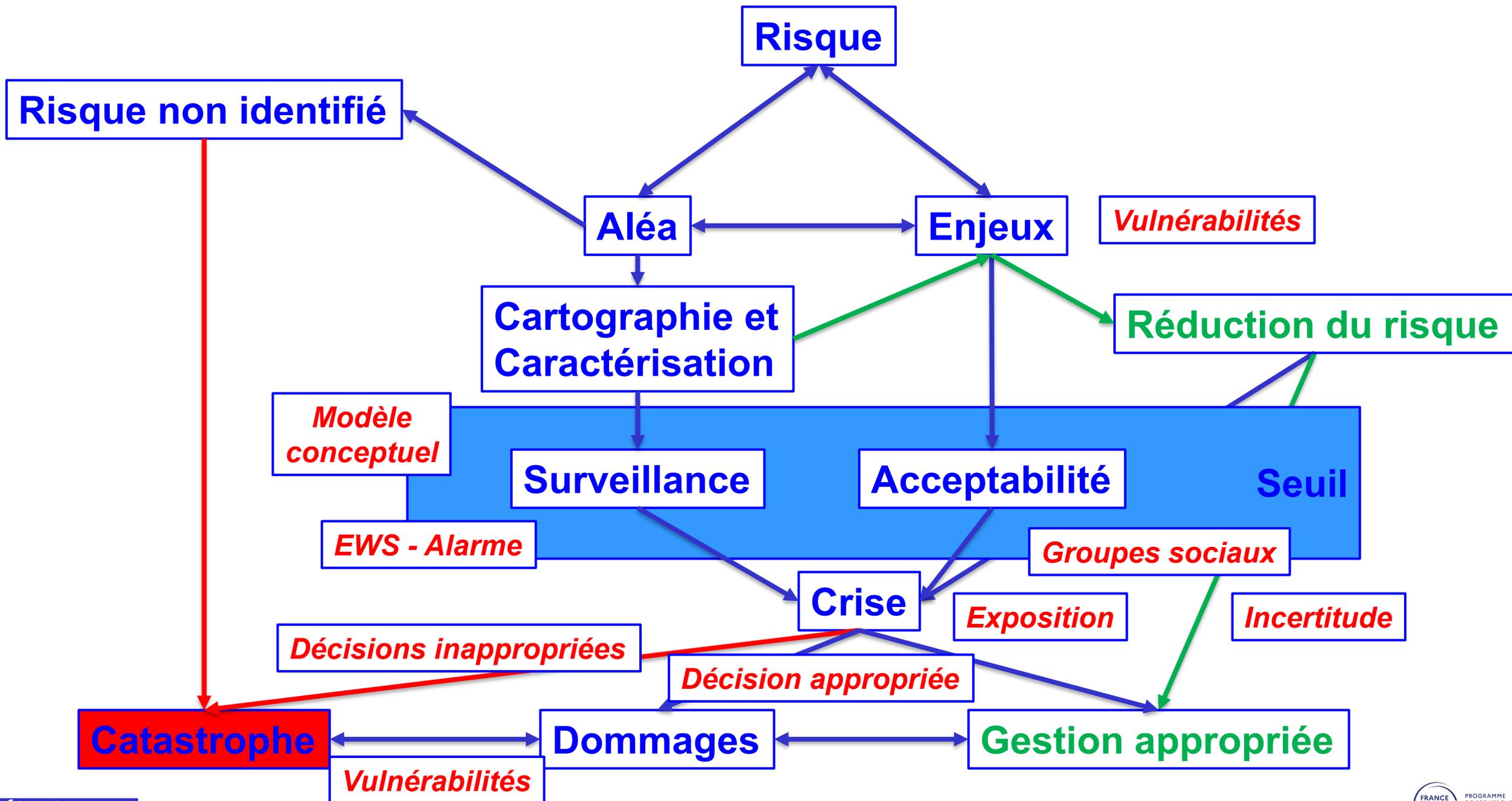
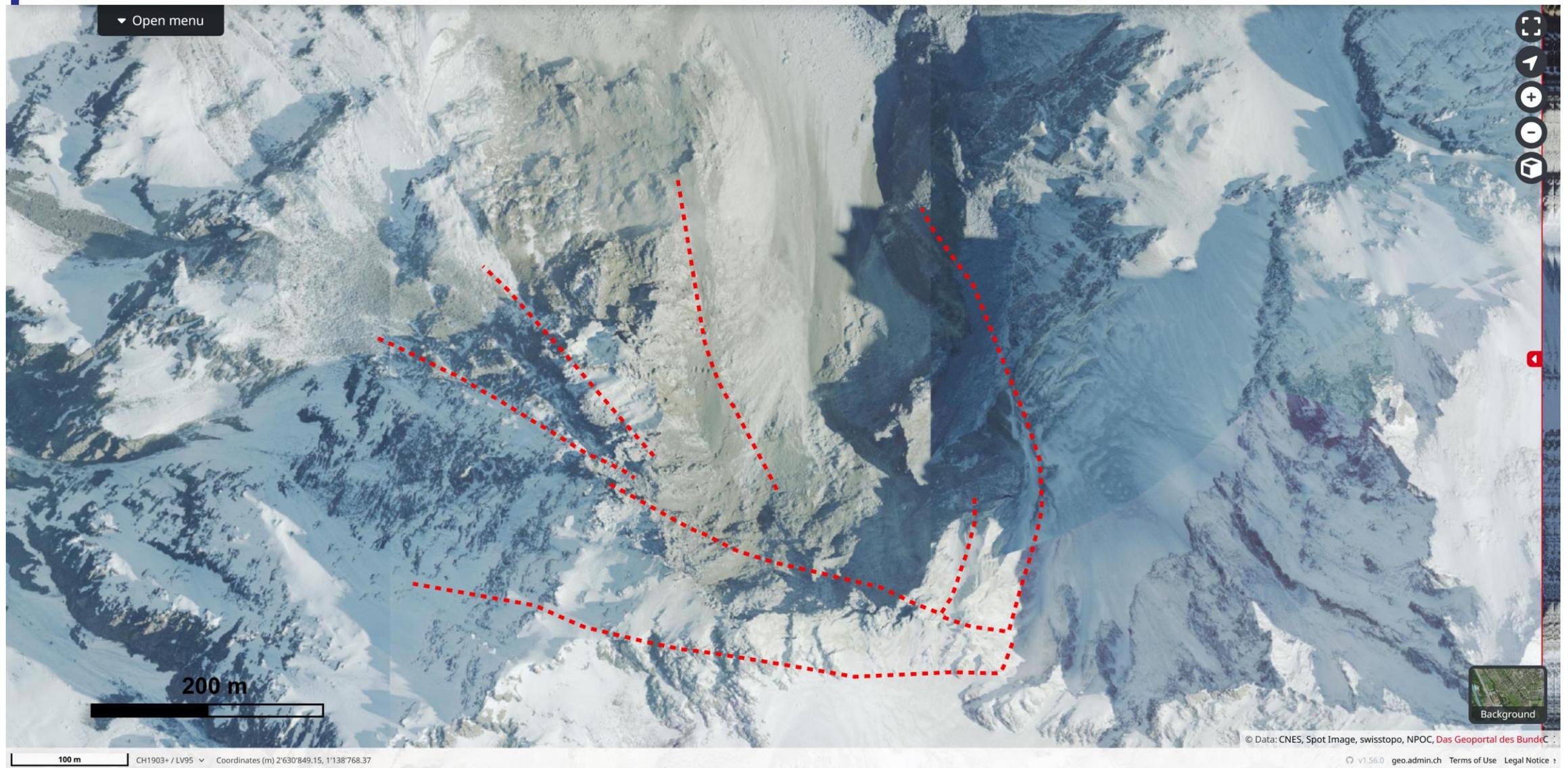


Illustration des variables spatiales utilisées pour le calcul de l'aléa et du risque. L'aléa H dépend de la probabilité de rupture ou de réactivation d'un mouvement de terrain λ et de la probabilité de propagation Pp .

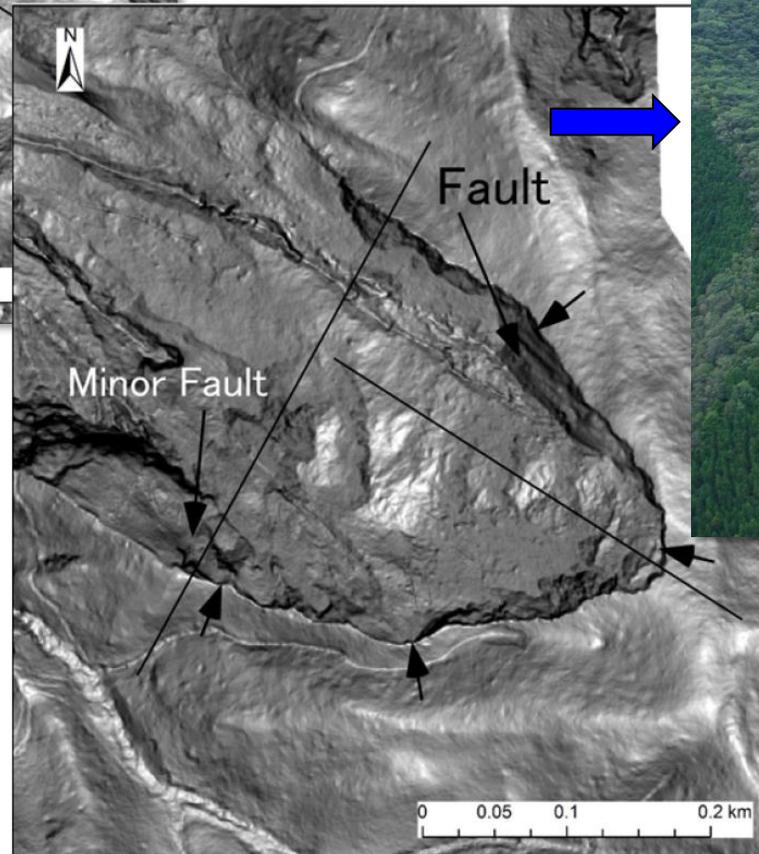
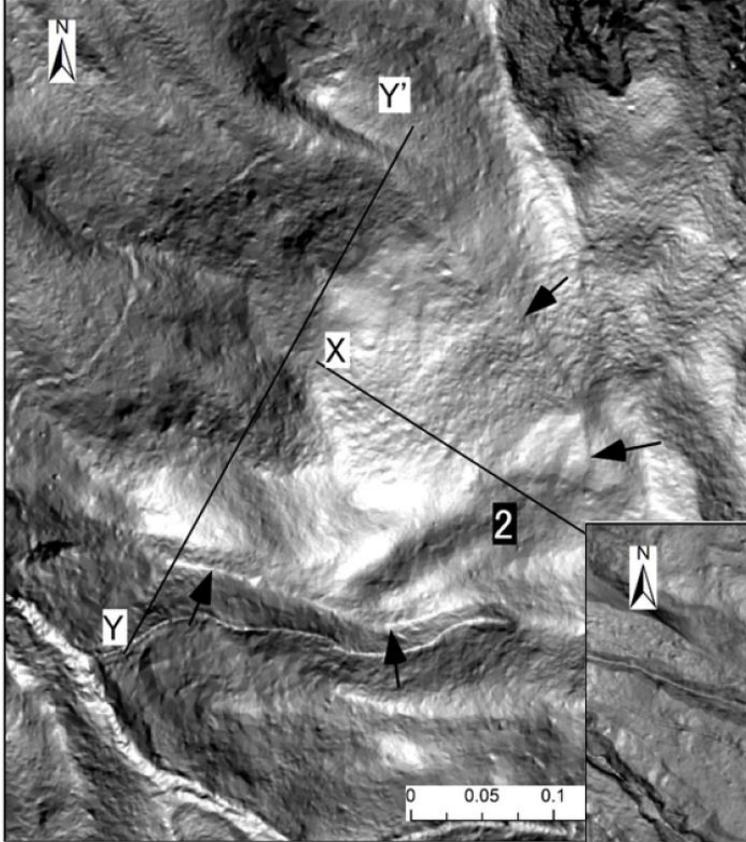


Éléments d'évaluation de l'aléa de rupture ou de déclenchement

Instabilité préexistante (données swisstopo): était-ce prévisible?



L'inspection du MNT à haute résolution (LiDAR) permet de détecter le glissement de terrain d'Akatani (d'après Chigira et al., 2013).



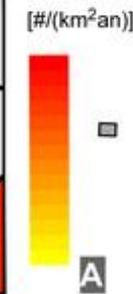
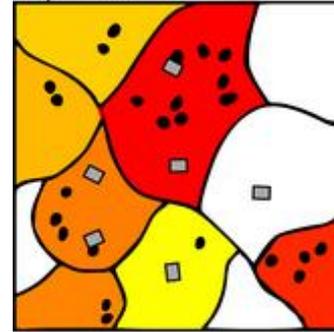
Akatani landslide in Kii peninsula triggered during Typhoon Talas (9.2011)

Différence qui existe entre études locales et régionales et format de données

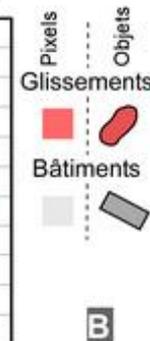
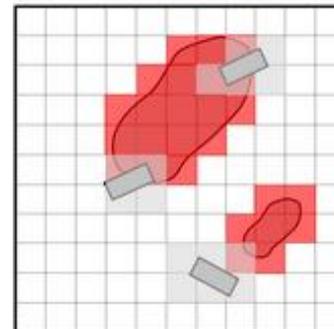
Les échelles sont fictives et peuvent grandement varier. Les échelles de couleur symbolisent les valeurs de la variable représentée:

- A. Données et résultats indiquant le degré d'aléa de mouvement de terrain par an par unité de surface fournis sur la base de densité de glissements de terrain (en noir) par unité morphologique, représenté avec les enjeux, ici les bâtiments (en gris).
- B. Calcul effectué à l'aide d'une approche dite rasterisée (grille).
- C. Aléas et risques représentés pour une voie de communication.
- D. Étude cas sur un site spécifique avec résultat à l'objet.

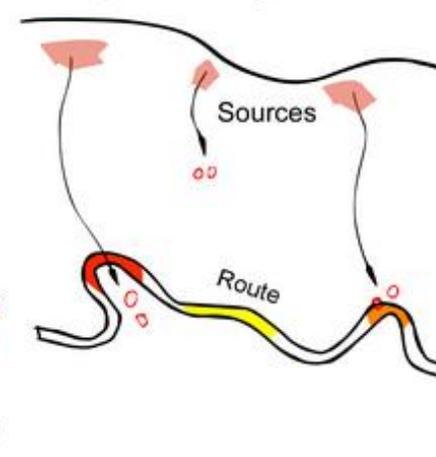
Mouvements de versant [#/(km²an)]
ou par unité



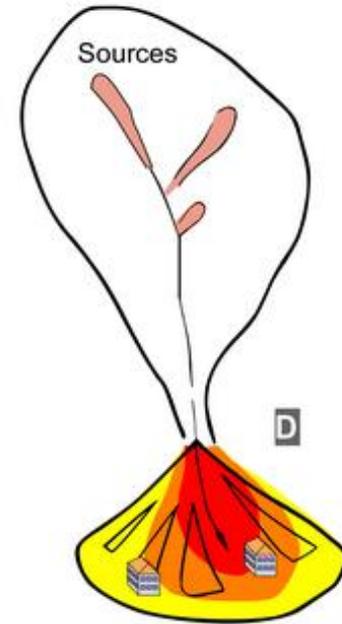
Mouvements de versant pixels



Nombre de chutes de blocs [#/(km an)]
ou par unité de longueur



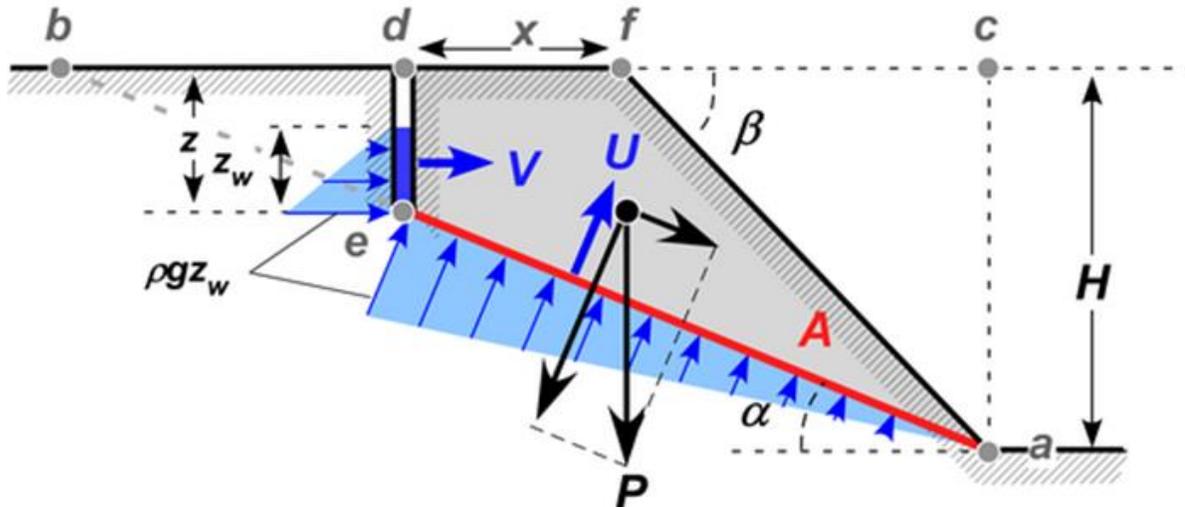
C



Événements de laves torrentielles
par année [#an]

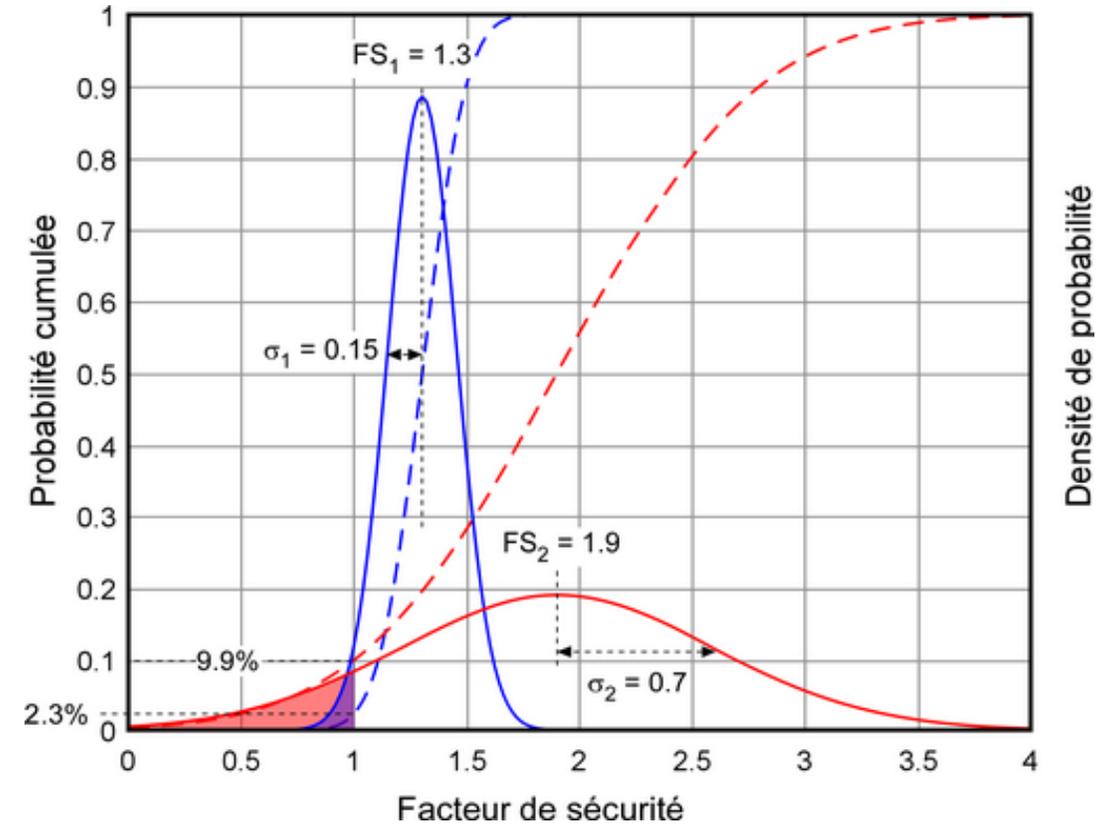
(modifié d'après Corominas and Moya, 2008)

Incertitude et connaissance du système: exemple classique



Modèle simple de glissement rocheux avec fissure de tension arrière situé dans la face supérieure (d'après Hoek et Bray, 1981):

$$F_s = \frac{c' A + (P \cos \alpha - U - V \sin \alpha) \tan \phi'}{P \sin \alpha + V \cos \alpha}$$

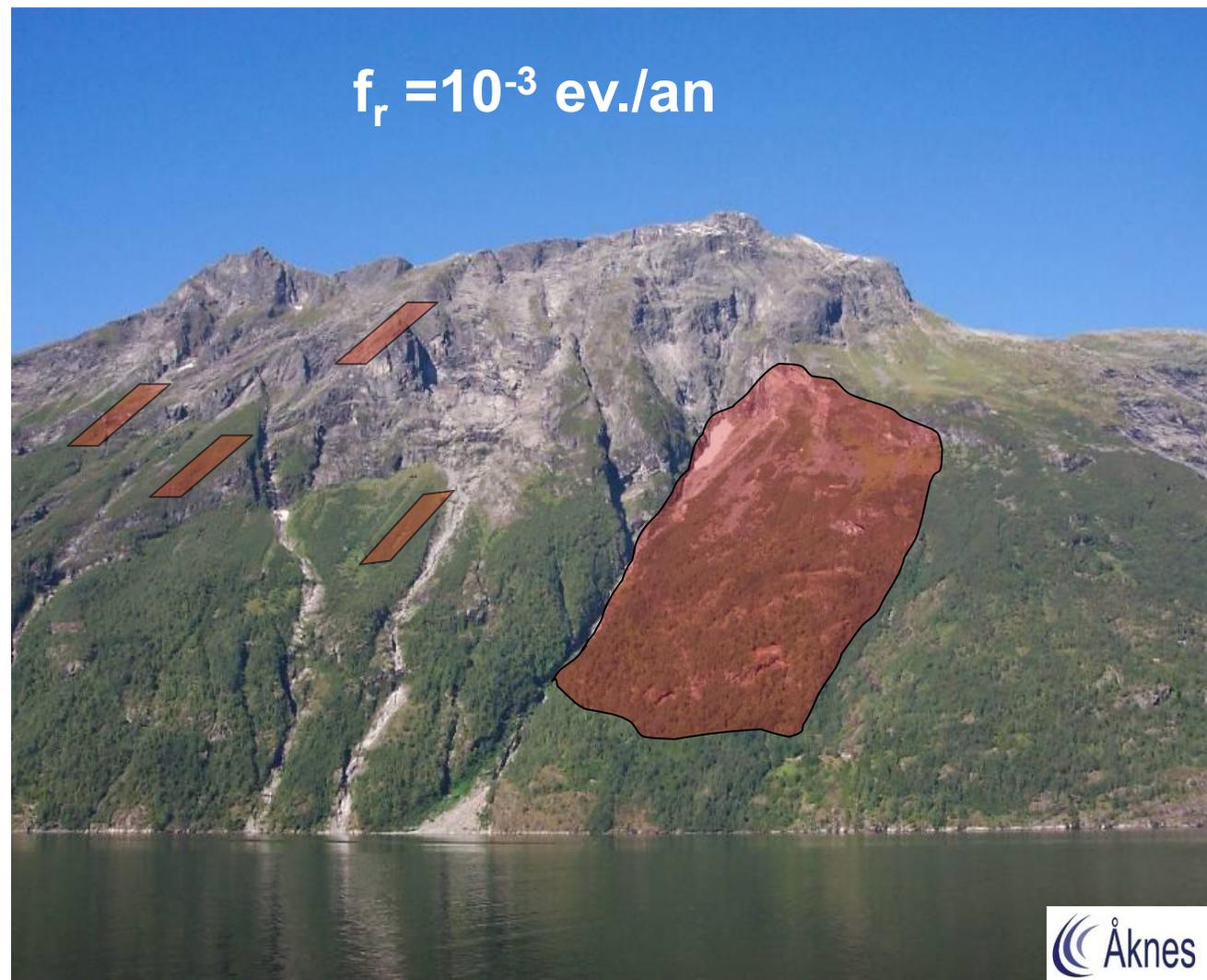
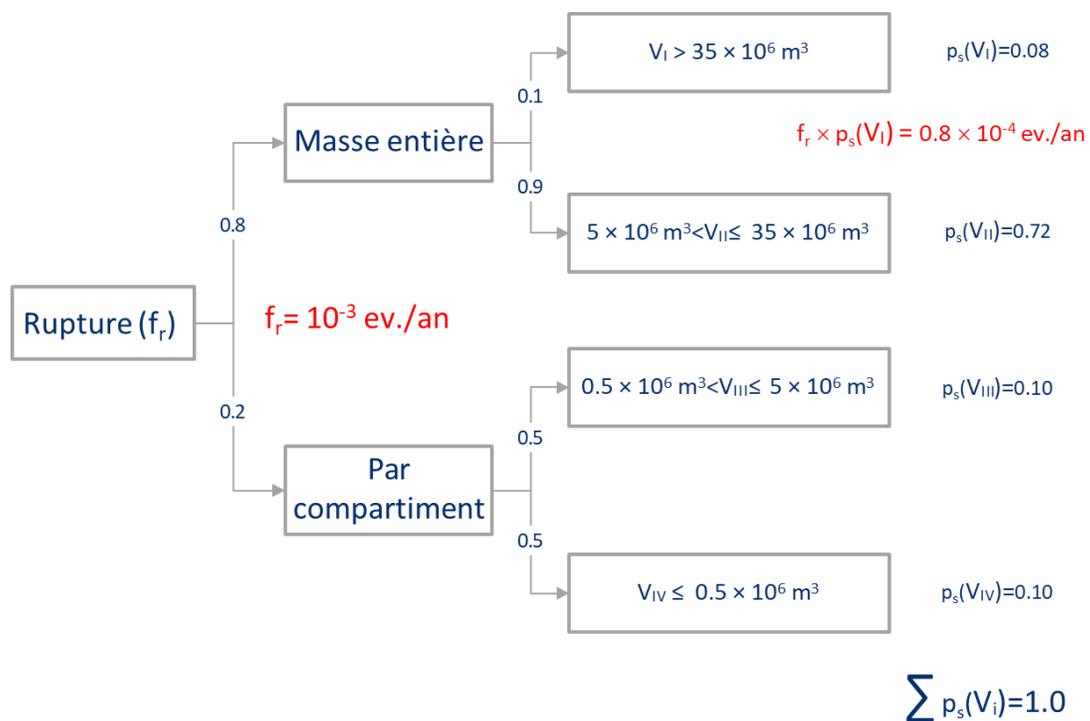


Il est plus probable que FS_2 soient inférieur à 1 que FS_1 (Modifié d'après Leroueil et Locat, 1998). En trait tillé les fonctions de répartitions.

Fig. Traité sur les mouvements de terrain gravitaires (édité par Jaboyedoff et al., 2026)

Approche de « l'aléa » par scénarios (experts)

Arbre de décision pour le glissement rocheux d'Åknes pour différents volumes fournissant une évaluation de $f_s(V_i) = f_r \times p_s$ pour différents scénarios de volume V_i . Les probabilités conditionnelles sont indiquées sur chaque arc (modifié d'après Lacasse et Nadim, 2008 et 2009). La rupture possédant un fréquence de $f_r = 10^{-3}$ ev./an.

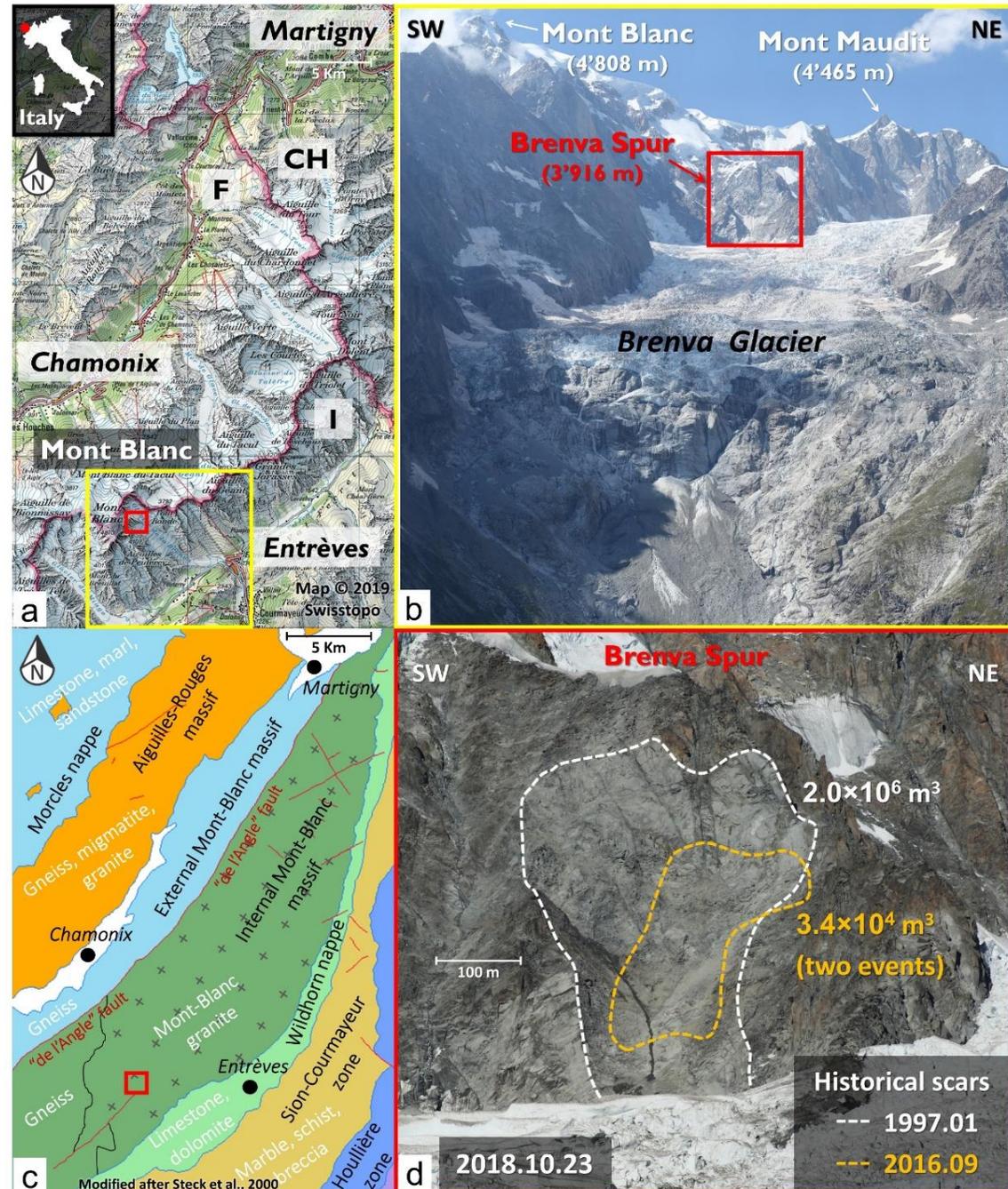


Site d'étude de la Brenva Mont-Blanc

Trois grands événements :

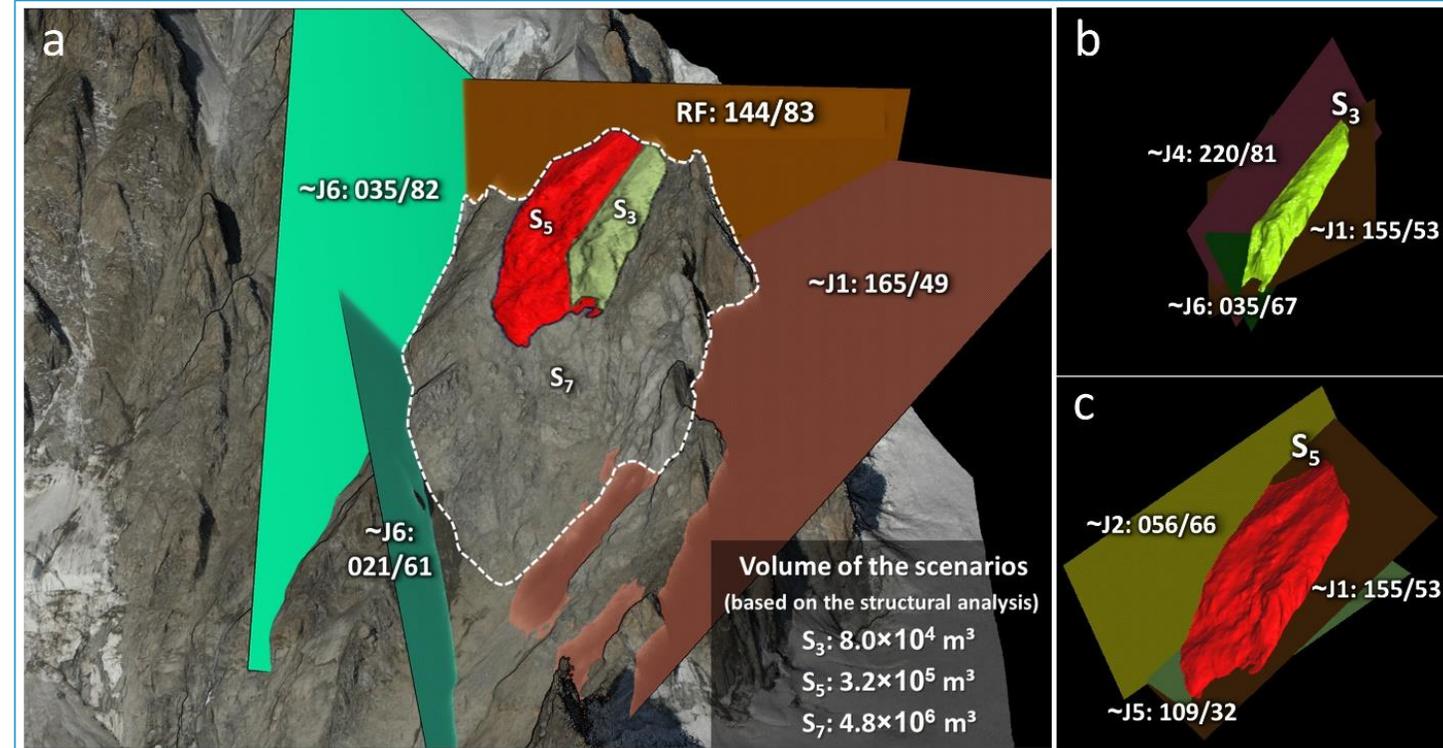
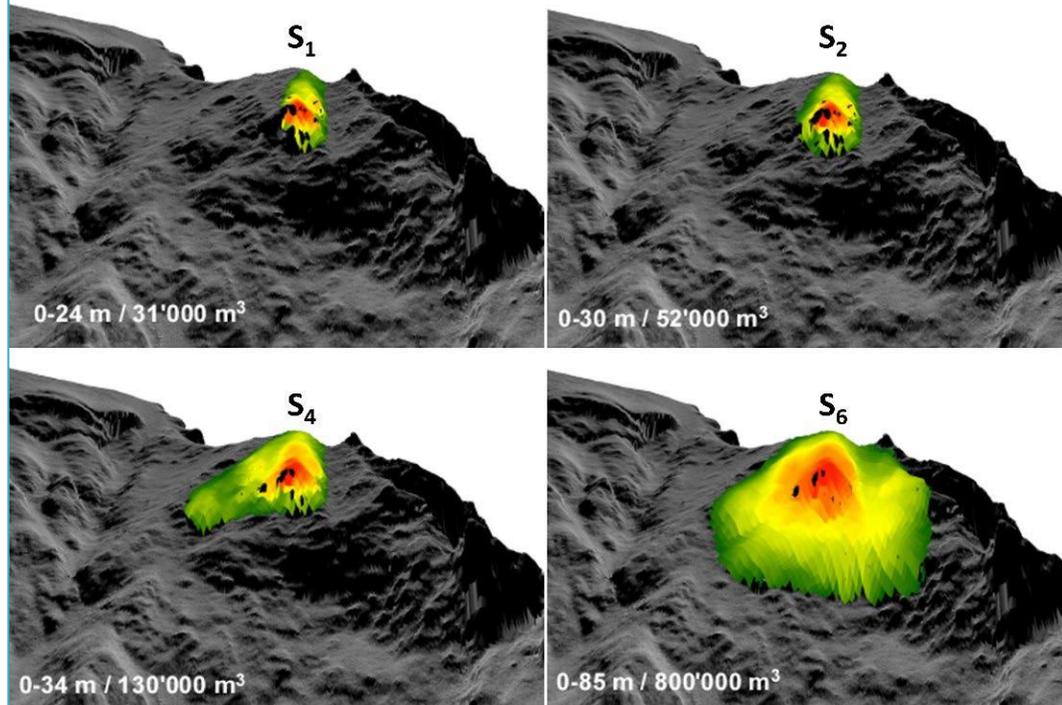
1997 : $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ de roche détachée de l'éperon de Brenva

2016 : $3.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ éboulement (deux événements)



Scénarios de rupture définis par le concept SLBL et analyse structurale

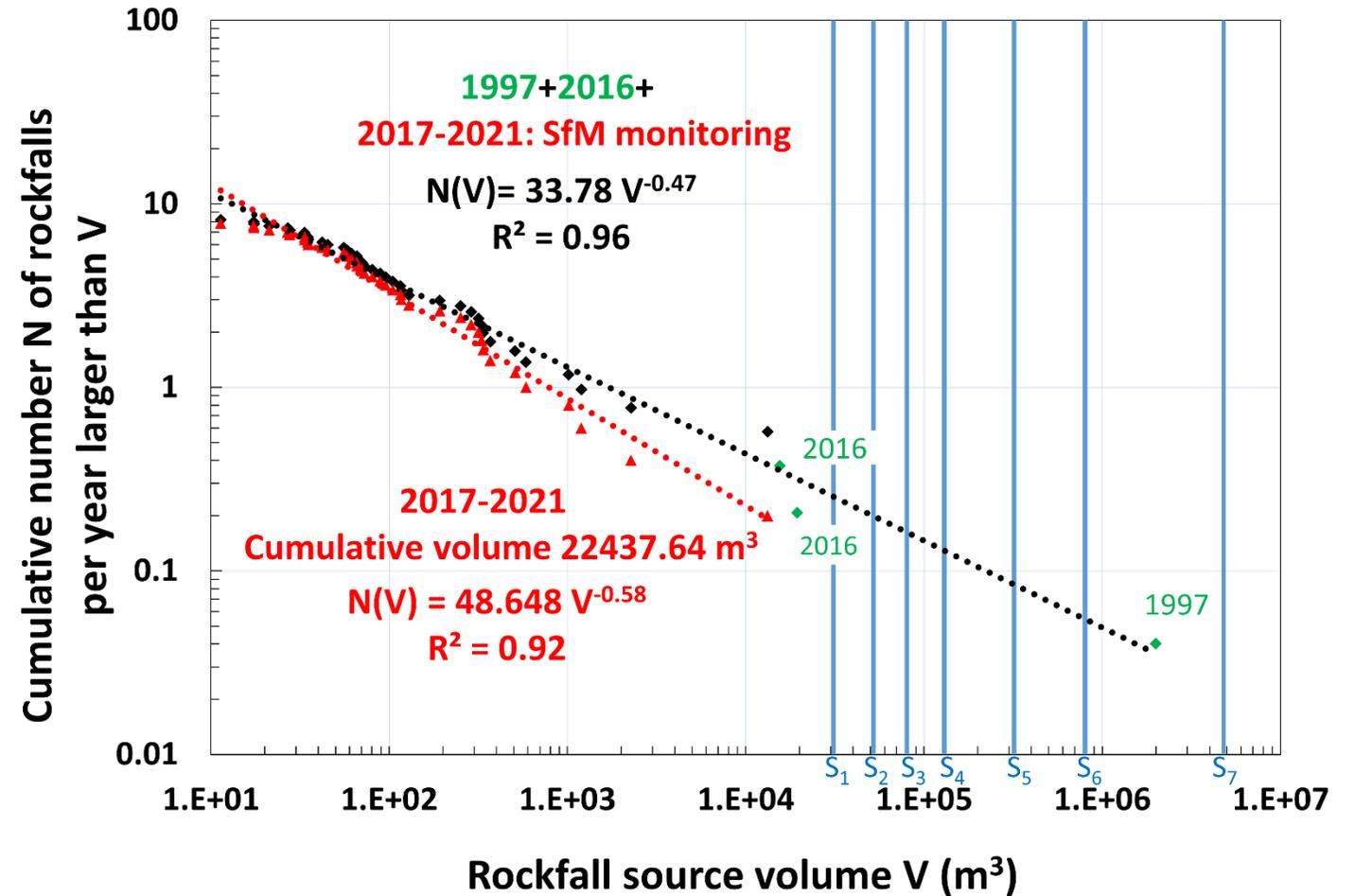
Scénarios calculés avec SLBL analyses



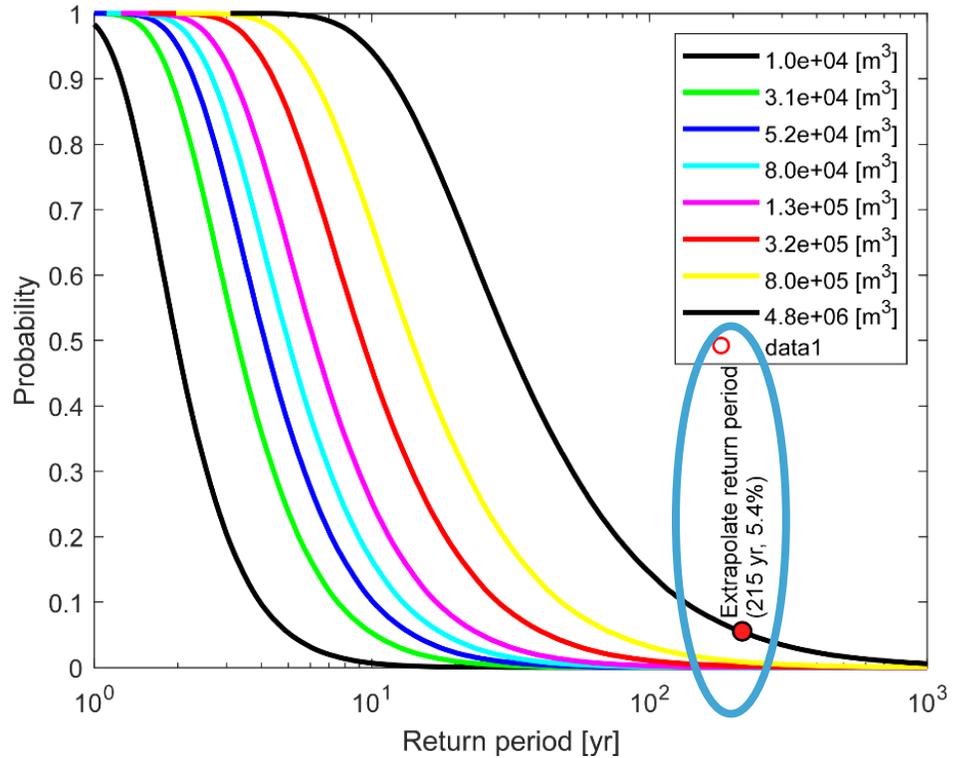
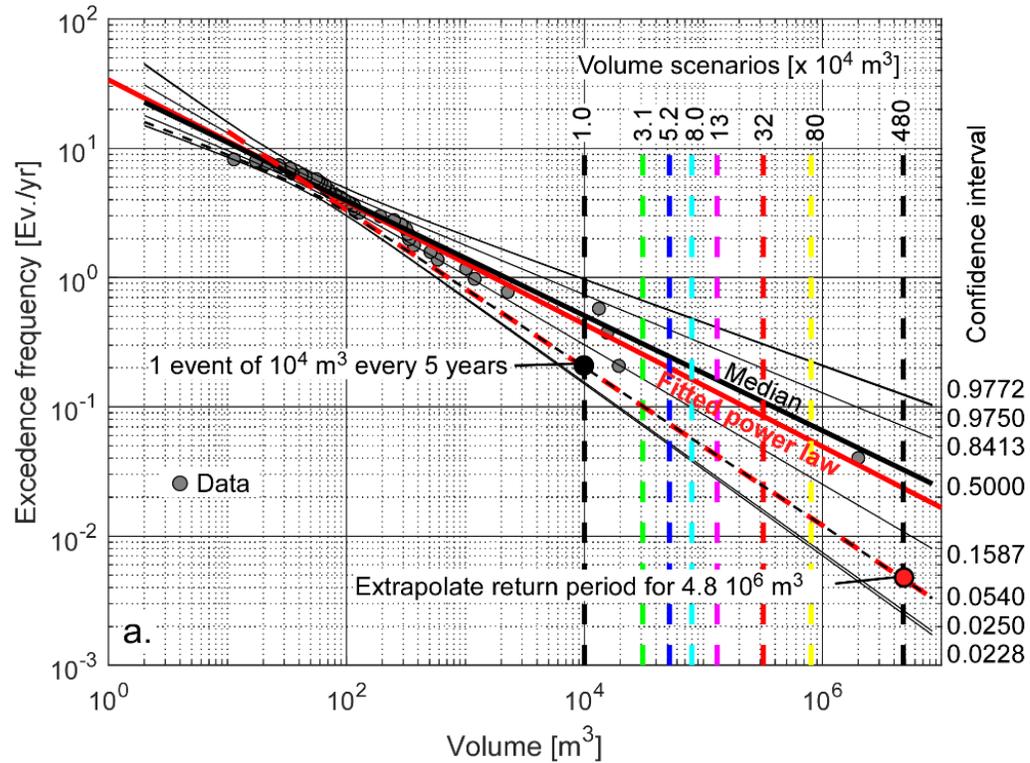
(D'après Li et al., 2023)

Résultats : Relation volume-fréquence (V-F)

On peut supposer qu'un événement supérieur ou égal à 100 000 m³ pourrait se produire tous les 6.6 ans, tandis que des événements supérieurs ou égaux à un million de m³ pourraient se produire tous les 20 ans.



Scénarios de rupture extrêmes, périodes de retour et incertitude



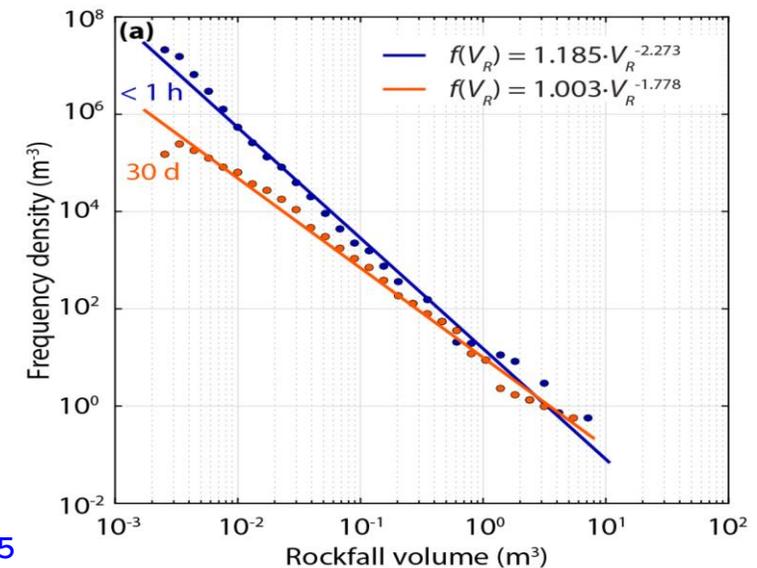
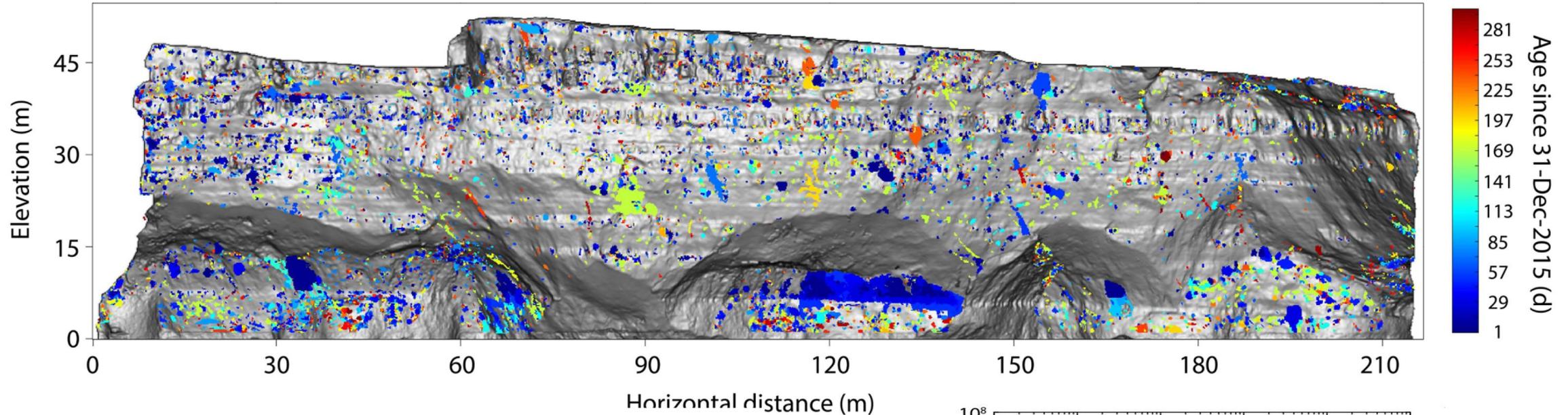
$$N(v \geq V) = a V^{-b}$$

$$N(V) = 33.78 V^{-0.47}$$



$$V_{sim} = \left(\frac{F_{min} + rand \times (F_{max} - F_{min})}{a} \right)^{-\frac{1}{b}}$$

Volumes d'éboulement Résolution magnitude-fréquence et temps d'acquisition (Williams et al., 2018)

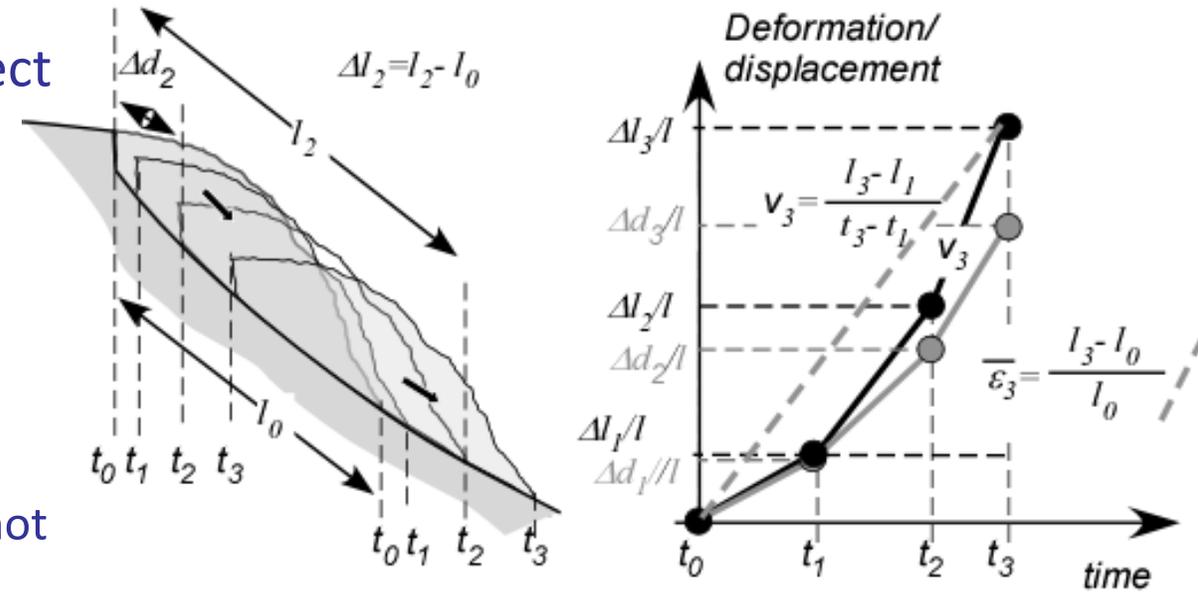


Strain or scarp ratio (Chigira, 2009; Chigira et al., 2013; Jaboyedoff et al., 2012)

From an examination of aerial photos or other indirect observations it is possible to obtain a “velocity” and strain rates. Strain rate can be assumed as:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta l}{l \Delta t} = \frac{v}{l}$$

- Where v is the velocity and Δt the time lapse including or not internal deformation of the rock mass.
- The uncertainty in strain rate estimation is related to the period during which the landslide moved (Δt) and l .
- Δt for the observed landslides can be set to the average age of the known deposits for this period of activity (for ages of deposits see Longva et al., 2009; Hermanns et al., 2006).
- This means that if it has moved during this earlier period, the present velocity (the important one) is overestimated.

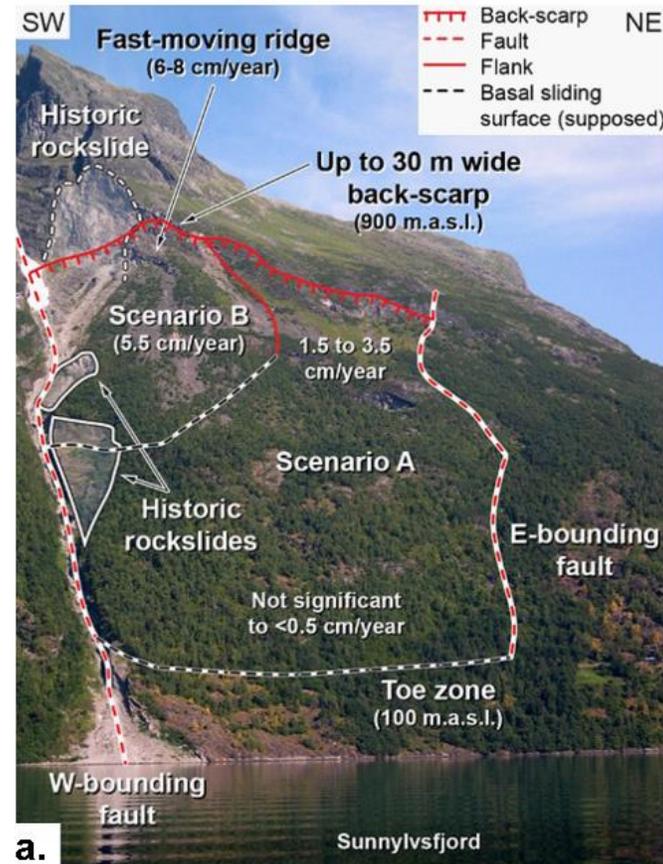


Graphique activité-déformation (d'après Jaboyedoff et al., 2012 ; Oppikofer et al., 2018)

Évaluation de la susceptibilité (rouge : élevée, orange : modérée, jaune : faible).

Les chiffres 1 et 2 à gauche indiquent si un ou deux critères d'activité sont atteints (éboulement et taux de déformation suffisant).

Utilisée au Canada par BGC et comparée à d'autres techniques par Birdeau et Hermans.



	Taux de déformation	Chutes de blocs	Nombre de critères	Type de déformation						
				0 - 0	1 - 2	1 - 1	0 - 1 / 1 - 2	1 - 0 / 2 - 1	2 - 2 / X - X	
Activité	0.01%/an	Rapide (>5cm/y)	Fréquent	2 X N'existe pas	Red	Red	Red	Red	Red	Scenario B
		1	Orange	Red	Red	Red	Red	Red	Scenario A	
	0.001%/an	Modérée	Occasionnel	2 X N'existe pas	Orange	Orange	Orange	Red	Red	Scenario A
				1	Yellow	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
Non	S'est déplacé ou se déplace	Dépôt/seulement	Non	2 X N'existe pas	Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange	
				1	White	Yellow	Yellow	Yellow	Orange	

Fig. Traité sur les mouvements de terrain gravitaires (édité par Jaboyedoff et al., 2026)

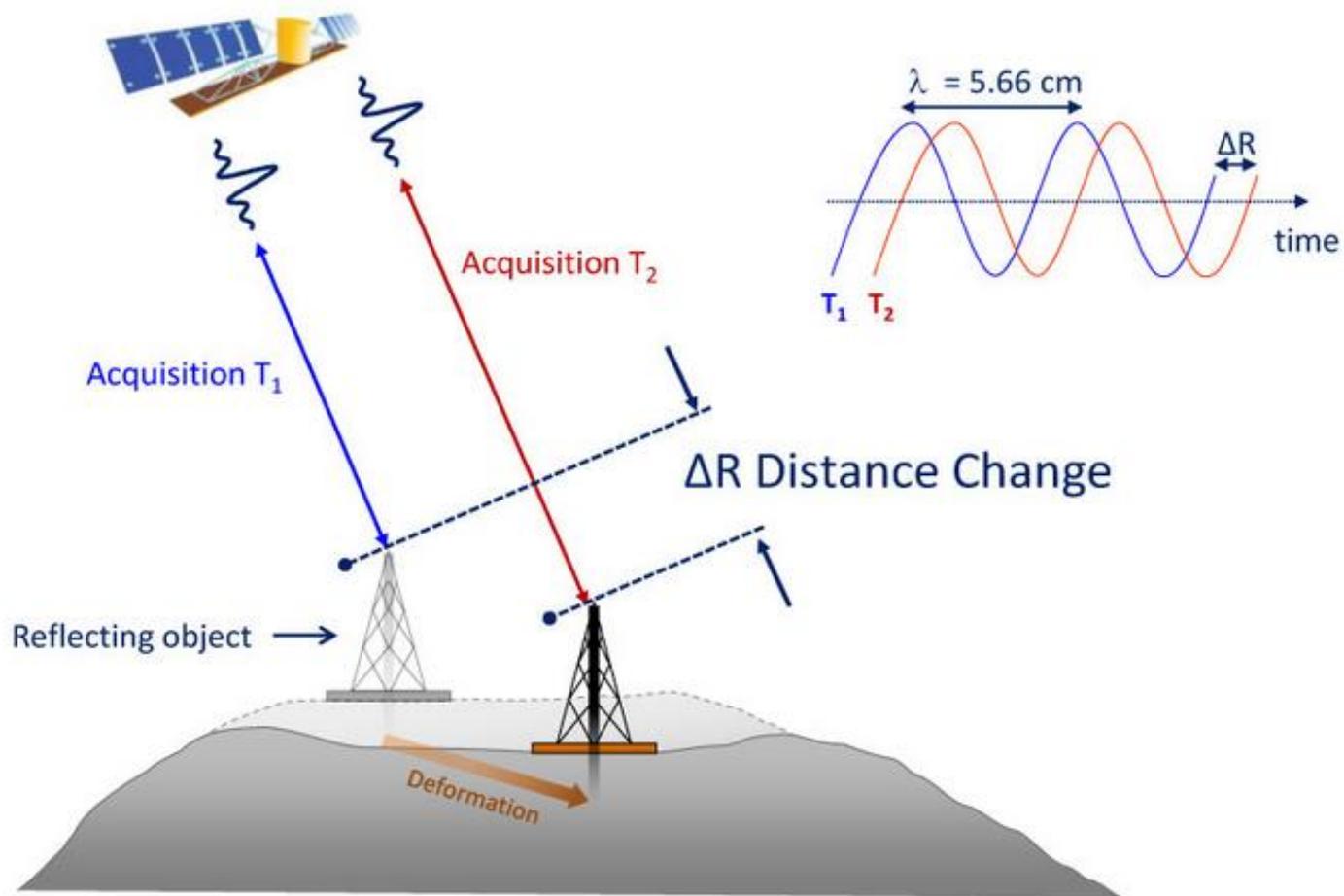
Åknes rockslide

- Un grand éboulement de 30 à 55 millions de m³
- Peut générer un tsunami destructeur dans les fjords affectant 4 à 10 municipalités

(from Blikra, 2009)



Principe du DInSAR (de TRE)



 © 2011 Tele-Rilevamento Europa

Schematic showing ground displacement and signal phase shift.

Schematic showing the relationship between ground displacement and signal phase shift. The numerical value of the wavelength is from the ERS satellite.

CLOSE >

<https://insar.ngu.no/> : Norwegian ground motion service

>2 billion measurement locations in Norway

4000 Sentinel-1 scenes per year

Development phase: 2016-2020

Project budget, ~ €1 million/year (development phase)

The goal is to identify and understand all unstable rock slopes that could impact communities, aiming for zero loss of life from large rock slope failures in the future. This involves locating and assessing unstable slopes, understanding their geologic conditions, ranking them based on hazard and risk, implementing 24/7 monitoring, early warning systems, and employing a risk-based mapping approach.



GEOLOGICAL
SURVEY OF
NORWAY

- NGU -



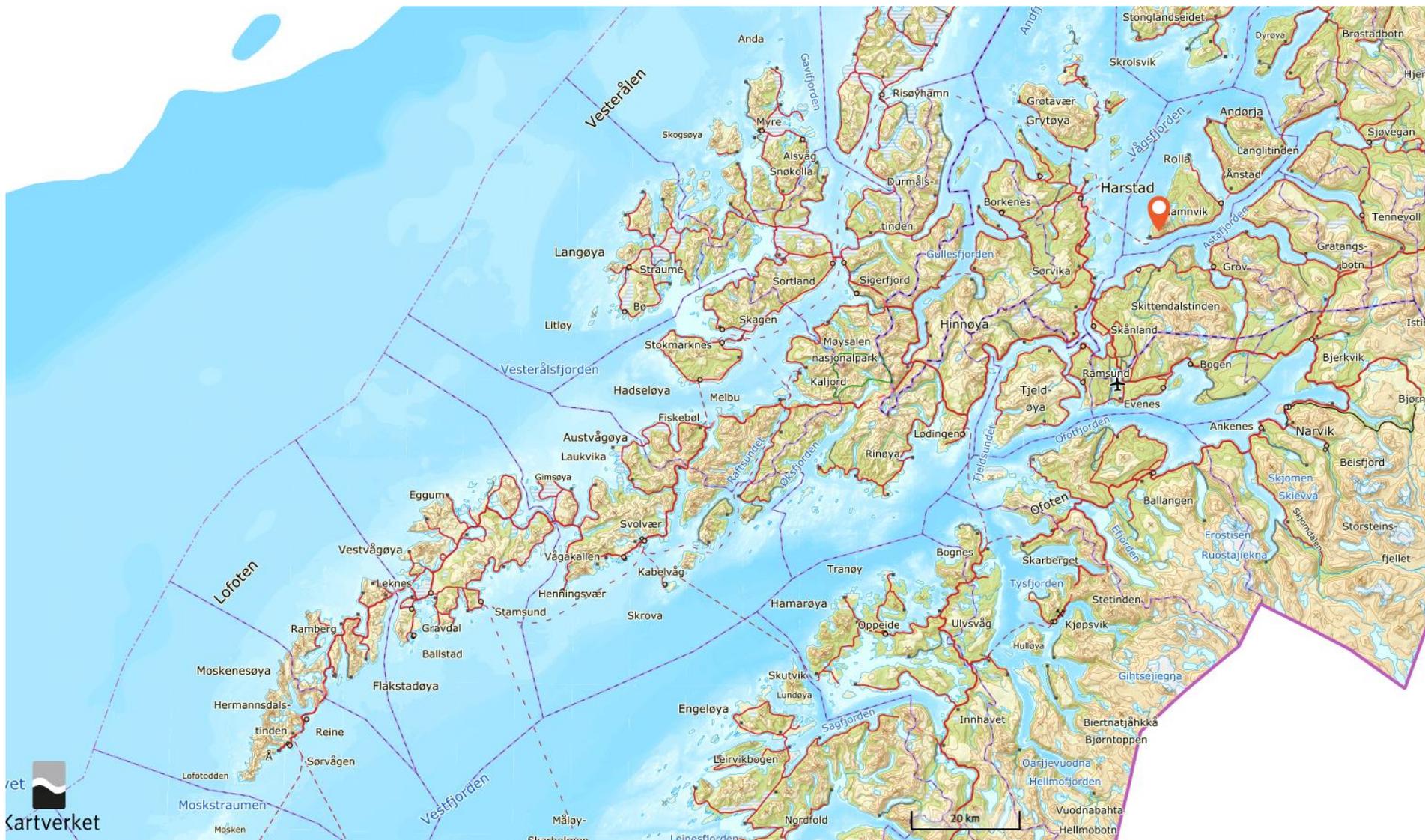
Baseline deformation product

- National scale, with annual updates.



GEOLOGICAL
SURVEY OF
NORWAY
- NGU -





Kartverket



GEOLOGICAL
SURVEY OF
NORWAY

· NGU ·





GEOLOGICAL
SURVEY OF
NORWAY

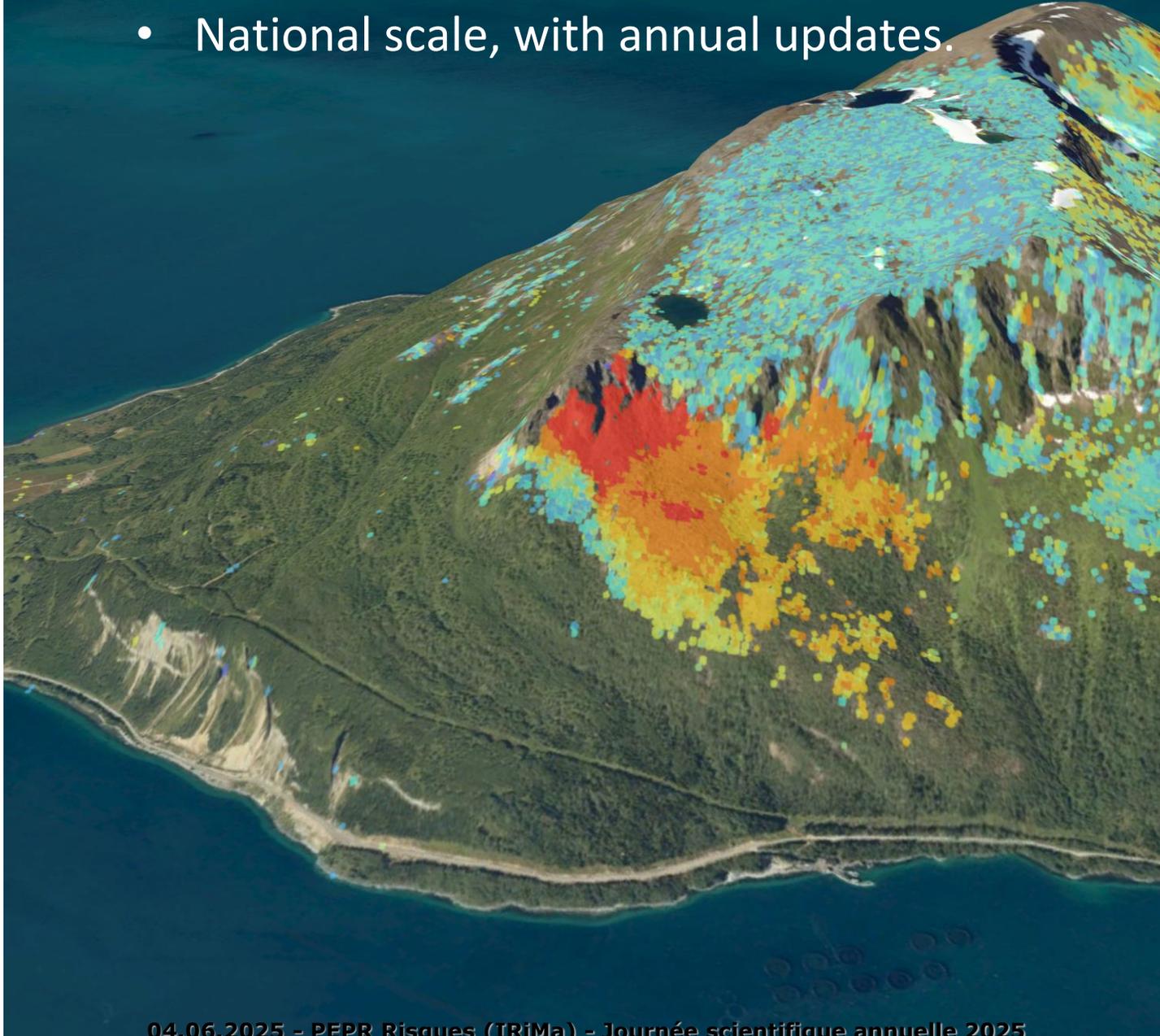
- NGU -



04.06.2025 - PEPR Risques (IRiMa) - Journée scientifique annuelle 2025



- Baseline deformation product
 - National scale, with annual updates.

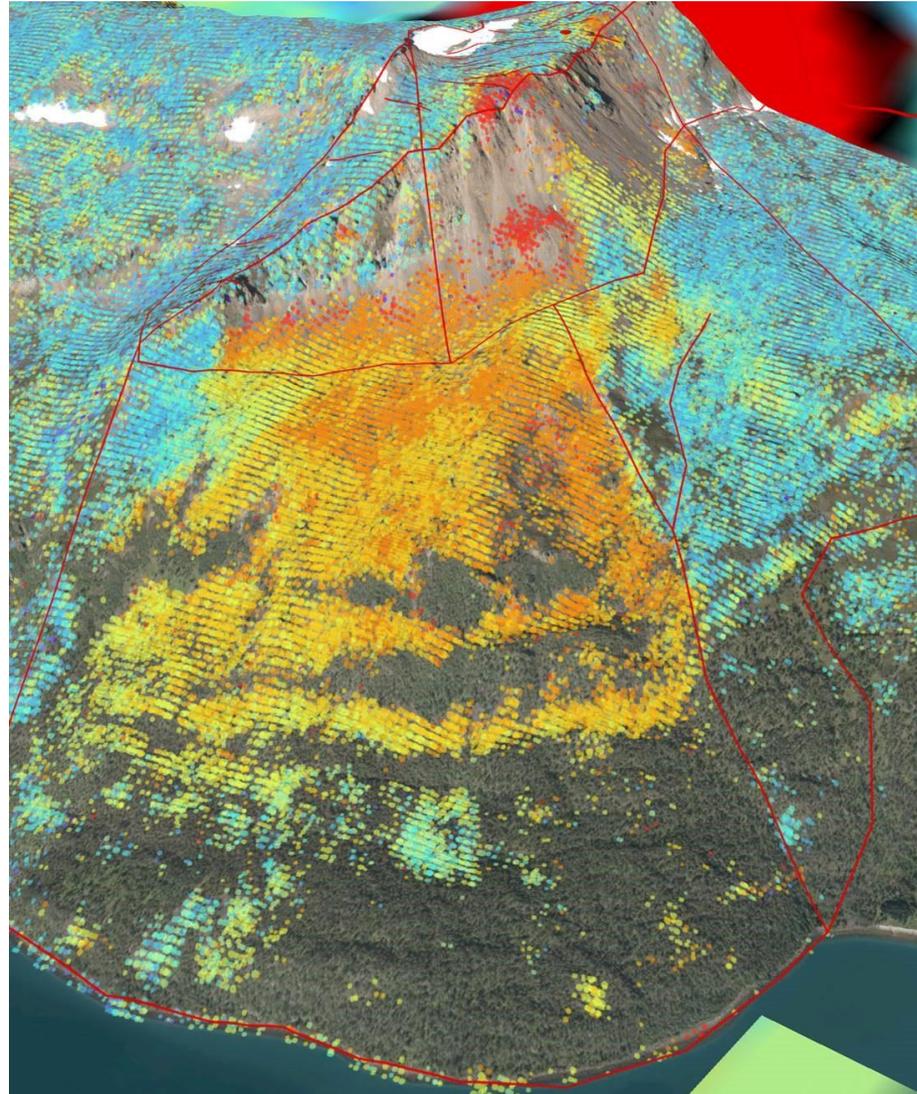


GEOLOGICAL
SURVEY OF
NORWAY
- NGU -



Centre norvégien de cartographie des déformations

En Europe: <https://egms.land.copernicus.eu/>



GEOLOGICAL
SURVEY OF
NORWAY
- NGU -

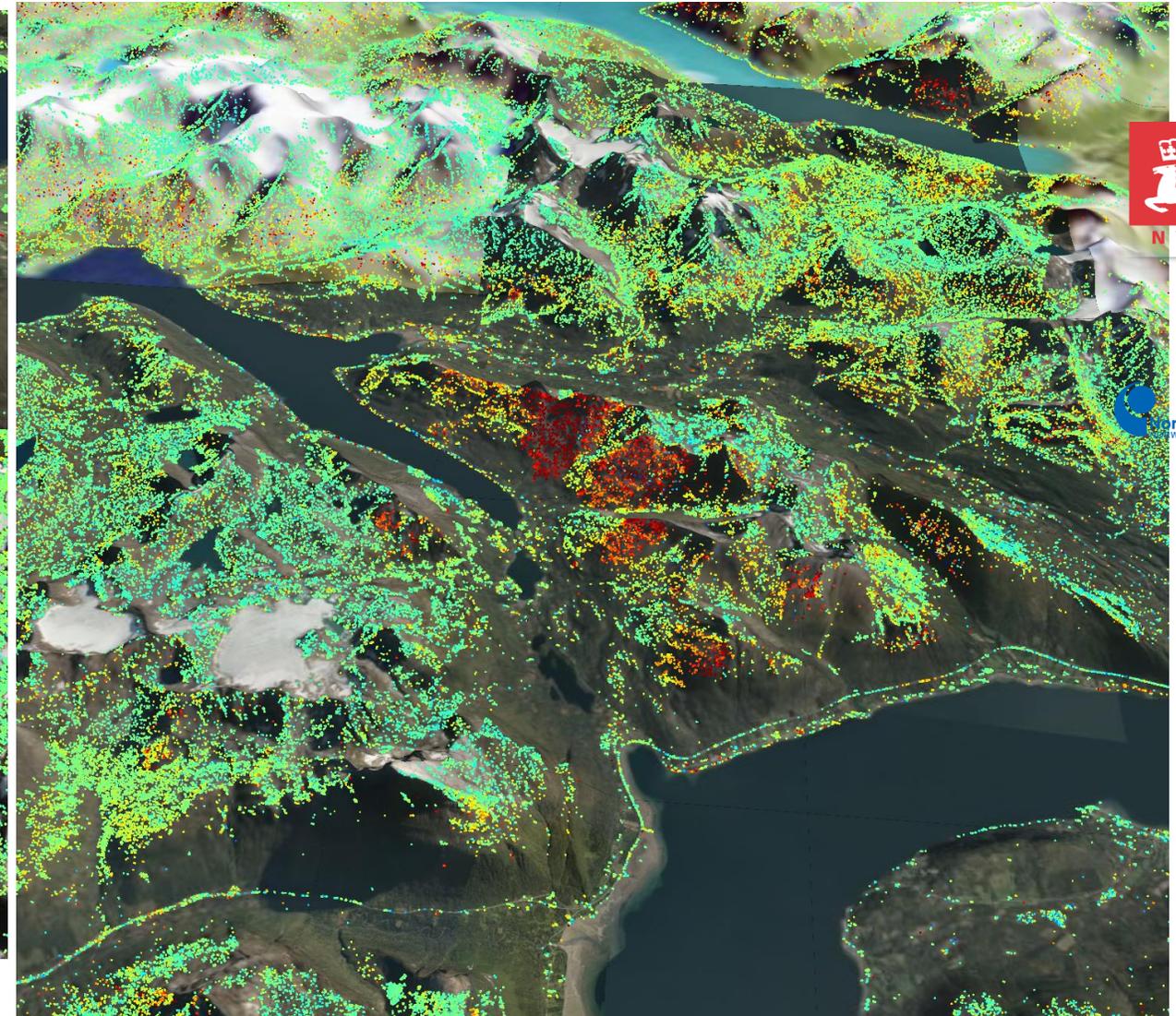
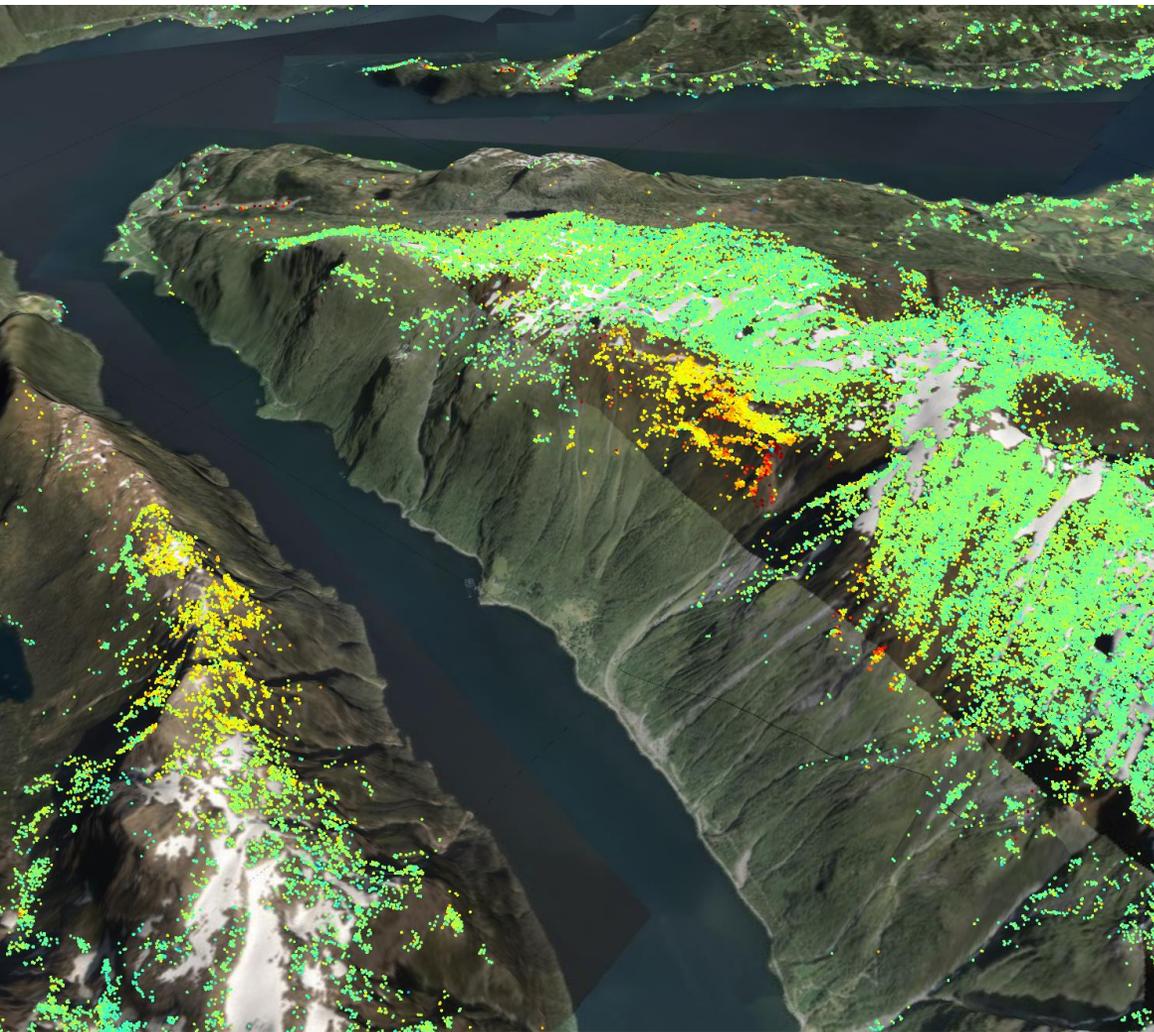


Centre norvégien de cartographie des déformations

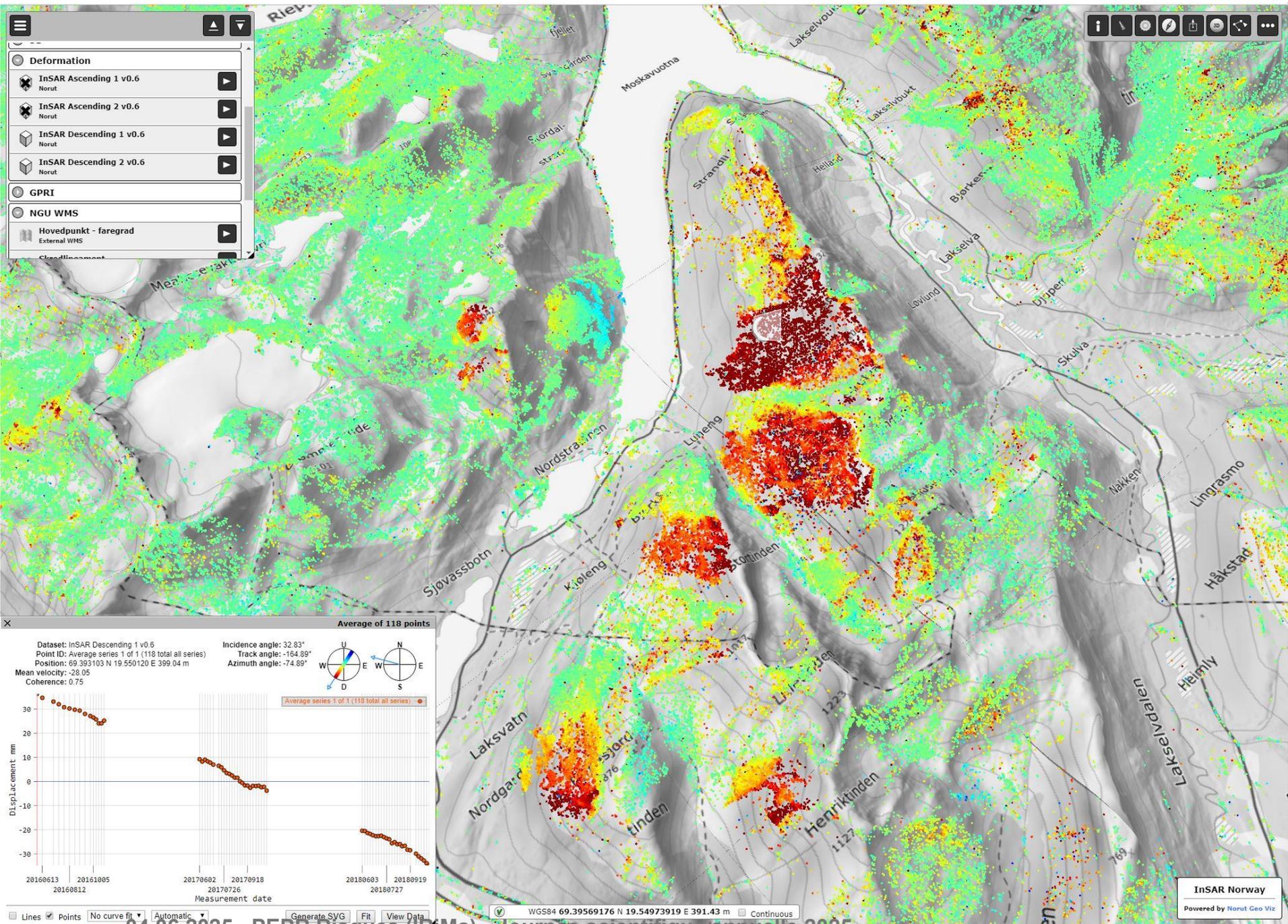
En Europe: <https://egms.land.copernicus.eu/>



GEOLOGICAL
SURVEY OF
NORWAY
- NGU -

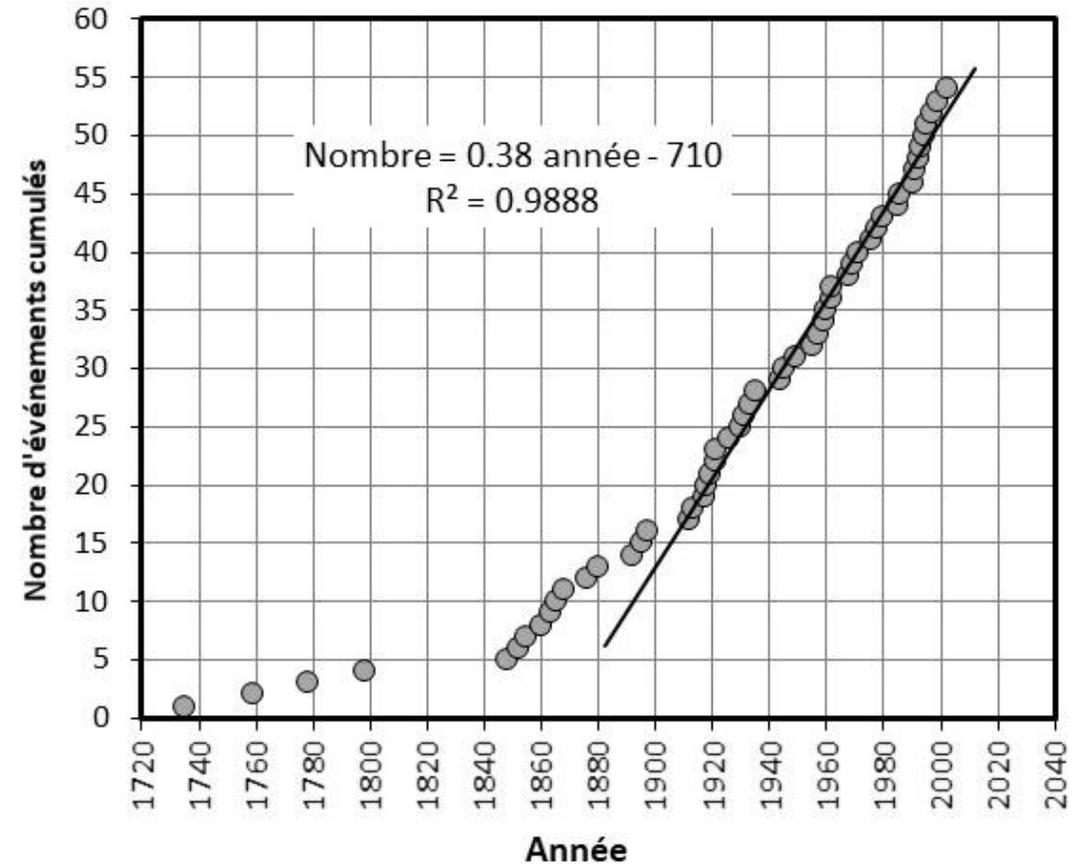


Norsk Romsenter
NORWEGIAN SPACE CENTRE



Approches historiques → aléa de propagation intégrant la rupture

Activité de laves torrentielles du Geisstriftbach (Suisse), établie sur l'observation des dommages aux arbres et grâce à la dendro-géomorphologie. À partir de 1910 les arbres sont suffisamment préservés pour montrer une activité stationnaire d'un événement tous les 2 ou 3 ans en moyenne (d'après des données de Stoffel et al., 2010).



Crise: l'aléa augmente

Différences entre système d'alarme et système d'alerte précoce (généré par ChatGPT et Copilot, avec vérification et modification par MJ)

→ Alarm Systems are automated and trigger instant alerts followed by actions.

Les systèmes d'alerte précoce (EWS) fournissent des informations préalables sur les dangers potentiels.

→ Les systèmes d'alarme alertent les personnes en cas de danger immédiat ou imminent.

Les EWS détectent les signes avant-coureurs ou les indices de dangers avant qu'ils ne se développent pleinement.

→ Les systèmes d'alarme réagissent lorsqu'un danger est présent ou imminent.

Les EWS permettent de prendre des mesures proactives et de planifier, si nécessaire.

→ Les systèmes d'alarme nécessitent une action immédiate pour garantir la sécurité.

Les EWS ont des délais plus longs (de quelques heures à plusieurs jours) pour les préparatifs et impliquent une certaine organisation.

→ Les systèmes d'alarme agissent en quelques secondes ou minutes pour une réponse urgente.

Les EWS se concentrent sur la réduction des risques et les mesures préventives.

→ Les systèmes d'alarme visent à minimiser les risques et l'impact grâce à des actions rapides.

Les EWS impliquent souvent des processus de surveillance, de prévision et de prise de décision.

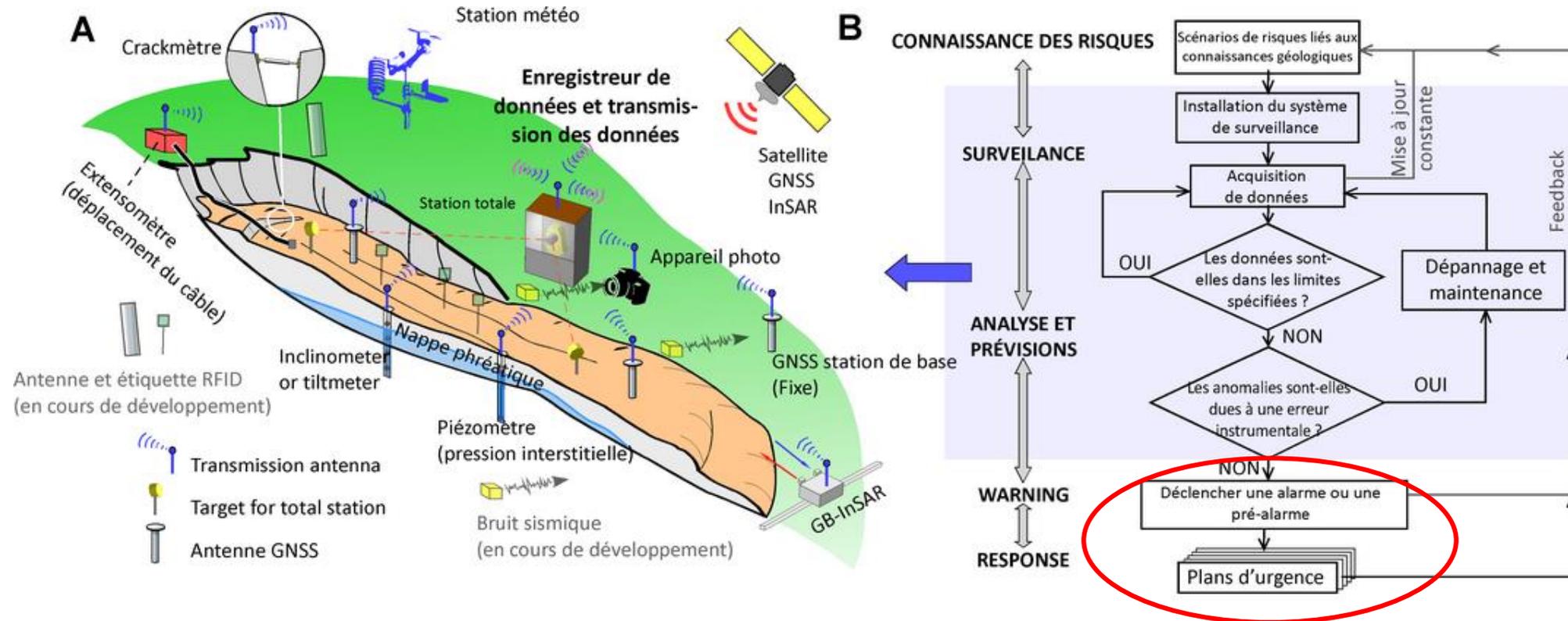
→ Les systèmes d'alarme sont automatisés et déclenchent des alertes instantanées suivies d'actions.

Nécessité d'alarme: Lave torrentielle du 11 août 2019 – Chamoson



- La coulée de débris a été déclenchée par de fortes précipitation survenues entre 17 et 18 heures dans le bassin de Chamoson, situé dans les Alpes suisses.
- Vers 19 heures, deux voitures ont été emportées par la coulée de débris, dont l'une avec deux personnes à l'intérieur.
- La coulée de débris a causé la mort de deux personnes et de nombreux dégâts dans le village de Chamoson.

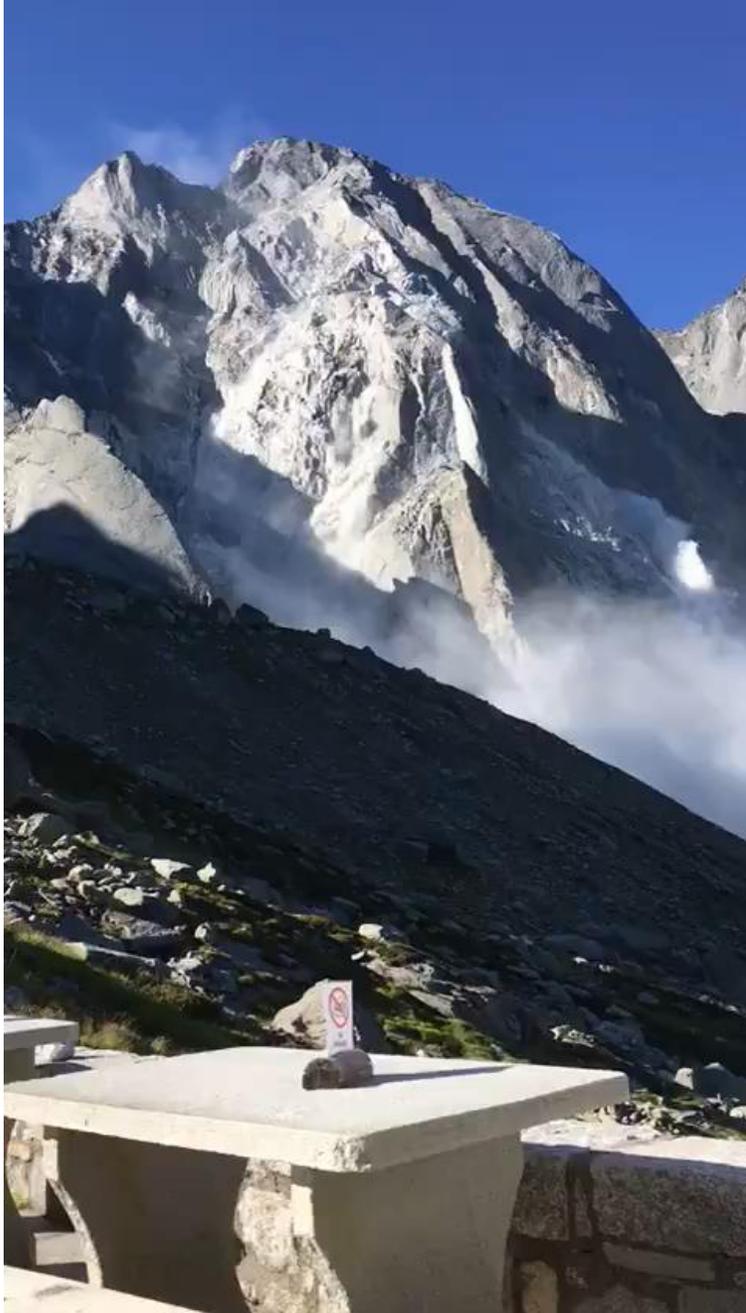
Outils de surveillance des mouvements gravitaires



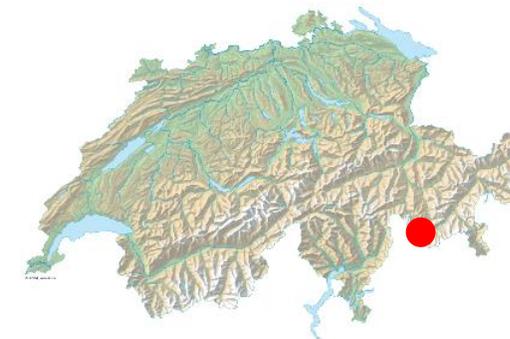
- Illustration des composants d'un système d'alerte précoce moderne ne montrant pas les sources d'énergie et les deux ou trois niveaux de redondance.
- Organigramme des activités liées à la mise en œuvre et au fonctionnement d'un système d'alerte précoce (modifié d'après Intrieri et al., 2012). L'encadré bleu dans (b) indique l'action liée au système de surveillance.

From: Casagli et al. (2017) – DRMKC report

Pizzo Cengalo - Bondo (avalanche de pierres, lave torrentielle immédiatement après)



- L'avalanche de pierres du 23 août 2017 a duré 1 min. 30 secondes (d'après l'enregistrement sismique), suivie environ 10 minutes plus tard par une coulée de débris (Amann et al., 2018).
- Le comportement de l'avalanche rocheuse est démontré par la poussière et le souffle des arbres tombés.
- La glace et la neige parmi les $0,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ ont été partiellement incorporées dans l'avalanche rocheuse
- Les déclencheurs sont probablement la fonte de la glace et la pression interstitielle.
- 8 victimes (touristes)



View on 29.9.2017



Comme les débris incorporaient de l'eau, ils commencèrent vraisemblablement à être visqueux et se sont déplacés probablement plus lentement que les débris de roches sèches dans un premier temps. Lorsque l'avalanche s'est arrêtée, le matériau humide était encore capable de se déplacer, en raison de sa moindre résistance, et a commencé à créer une coulée de débris qui a dépassé les avalanches de pierres (Fahrböschung 25.5°) et qui a franchi la distance de 3.2 km à partir de la source. Elle a parcouru 4 kilomètres supplémentaires en direction du village de Bondo avec une Fahrböschung totale de 13°. Au cours des jours suivants, plusieurs coulées de débris successives ont atteint le village pour un volume total d'environ $0,8 \times 10^6 \text{ m}^3$.

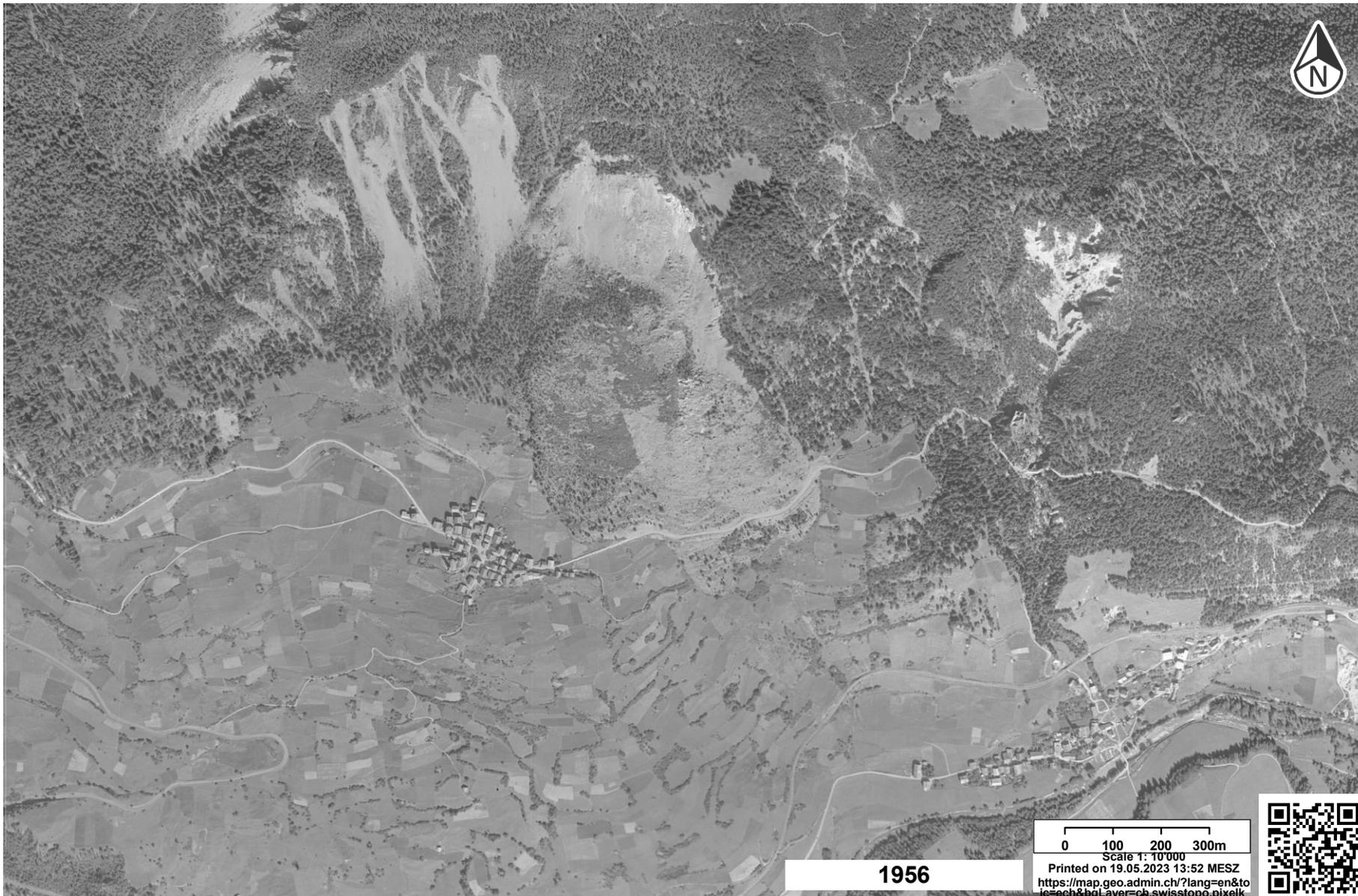
Evacuation du village de Brienz/Brinzauls le 13 mai 2023

84 les résidents ont dû quitter la zone dangereuse

- Le glissement de terrain de Brienz/Brinzauls GR a montré une augmentation des taux de déplacement depuis 2017.
- Déplacements dans la zone peuplée inférieure : 1 à 2 m/an.
- Déplacements dans la région supérieure : 3 à 7 m/an.
- Le village de Brienz, avec environ 100 résidents, est directement menacé.
- Les pressions d'eau élevées identifiées comme facteur clé du glissement.
- Un tunnel exploratoire prévu pour tester des solutions de drainage.
- Objectif : réduire les mouvements du glissement et protéger les habitants.
- → Fonte de neige (MJ), mais Löw ne le pense pas



Brienz/Brinzauls, situé dans le sud-est de la Suisse, est en danger imminent de destruction en raison de l'effondrement de la montagne voisine. Keystone / Gian Ehrenzeller



0 100 200 300m
Scale 1: 10'000

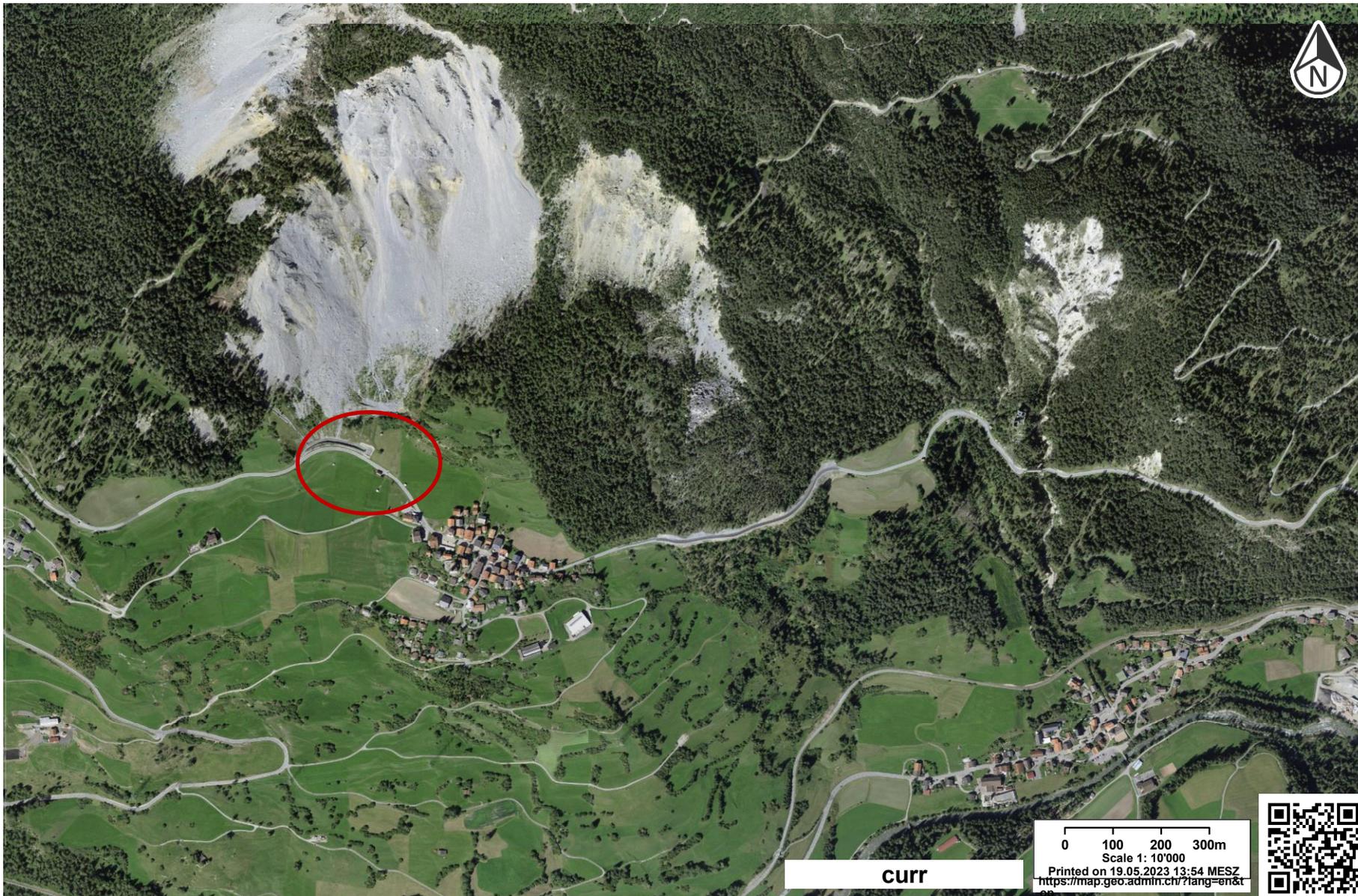
1956

Printed on 19.05.2023 13:52 MESZ
<https://map.geo.admin.ch/?lang=en&topic=ech&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte>



 Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra
In collaboration with the cantons

www.geo.admin.ch is a portal provided by the Federal Authorities of the Swiss Confederation to gain insight on publicly accessible geographical information, data and services.
Completeness of this information. Copyright, Swiss federal authorities.
http://www.disclaimer.admin.ch/terms_and_conditions.html
© swisstopo



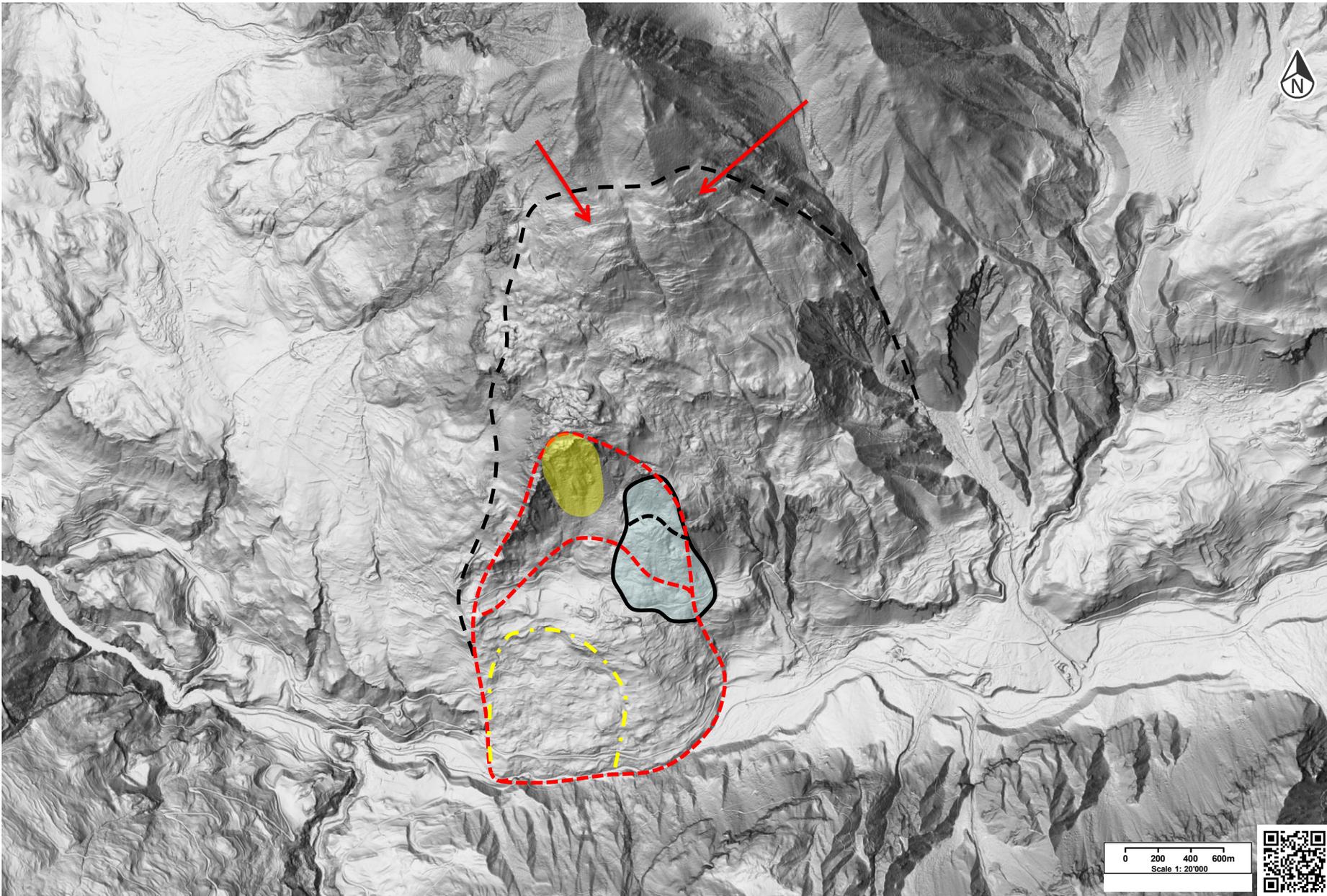
0 100 200 300m
 Scale 1: 10'000
 Printed on 19.05.2023 13:54 MESZ
<https://map.geo.admin.ch/?lang=en&...>

CURR



 Schweizerische Eidgenossenschaft
 Confédération suisse
 Confederazione Svizzera
 Confederaziun svizra
 In collaboration with the cantons

www.geo.admin.ch is a portal provided by the Federal Authorities of the Swiss Confederation to gain insight on publicly accessible geographical information and data.
 The completeness of this information. Copyright, Swiss federal authorities.
http://www.disclaimer.admin.ch/terms_and_conditions.html
 © swisstopo

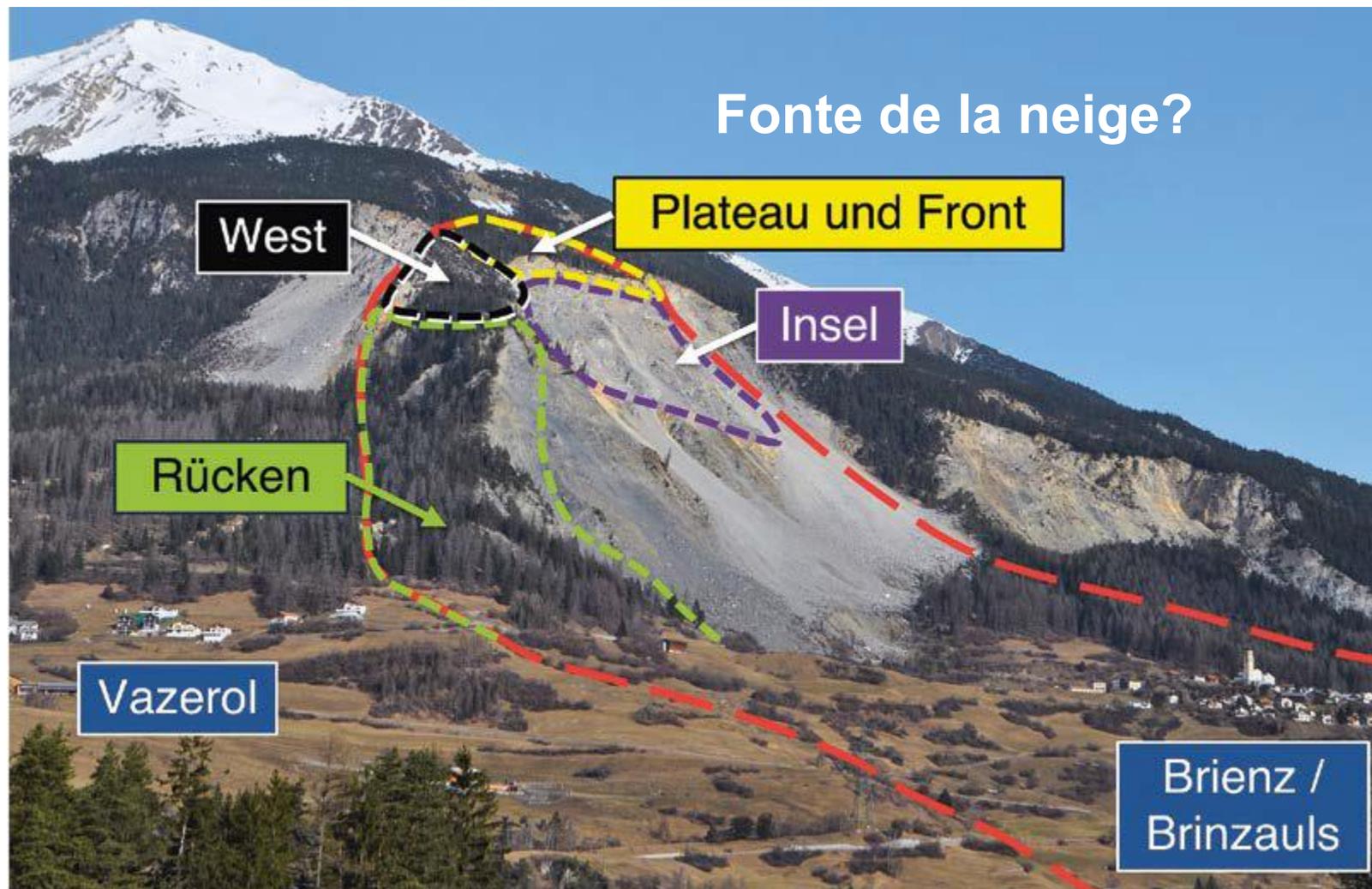



 Schweizerische Eidgenossenschaft
 Confédération suisse
 Confederazione Svizzera
 Confederaziun svizra
 In collaboration with the cantons

www.geo.admin.ch is a portal provided by the Federal Authorities of the Swiss Confederation to gain insight on publicly accessible geographical information, data and services. Although every care has been taken by the Federal Authorities to ensure the accuracy of the information published, no warranty can be given in respect of the accuracy, reliability, up-to-dateness or completeness of this information.

Copyright: Swiss Federal
 Office of Statistics
 h. bay.haltstellen-
 oev.ch.swisstopo.swisstim3d-
 wanderwege.ch.astra.wanderland-
 sperrungen_umleitungen.ch.swissto-
 po.

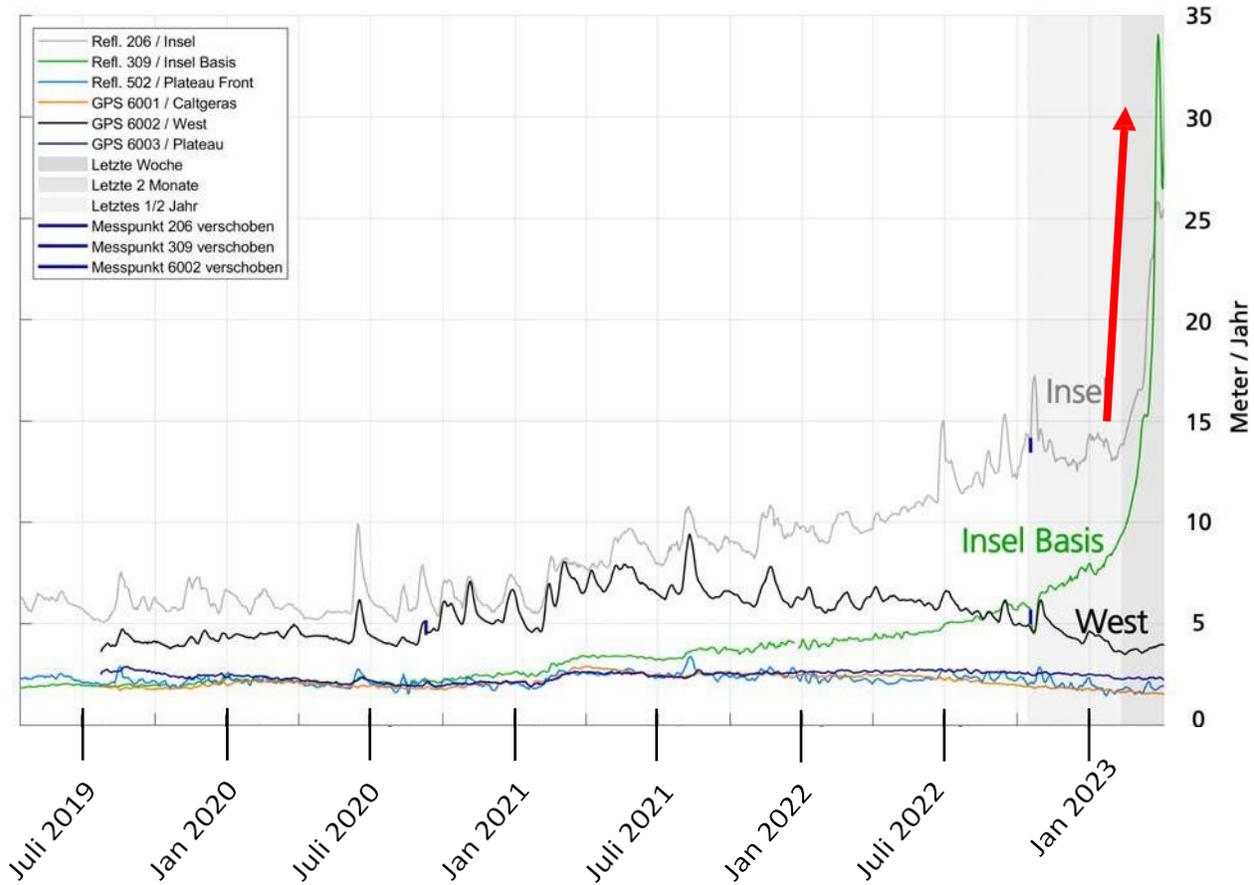
Le grand glissement de terrain Brienz/Brinzauls est divisé en deux glissements partiels et plusieurs parties individuelles. Dans ce contexte, plusieurs scénarios d'événements sont estimés. (Illustration : CSD INGENIEURE AG)



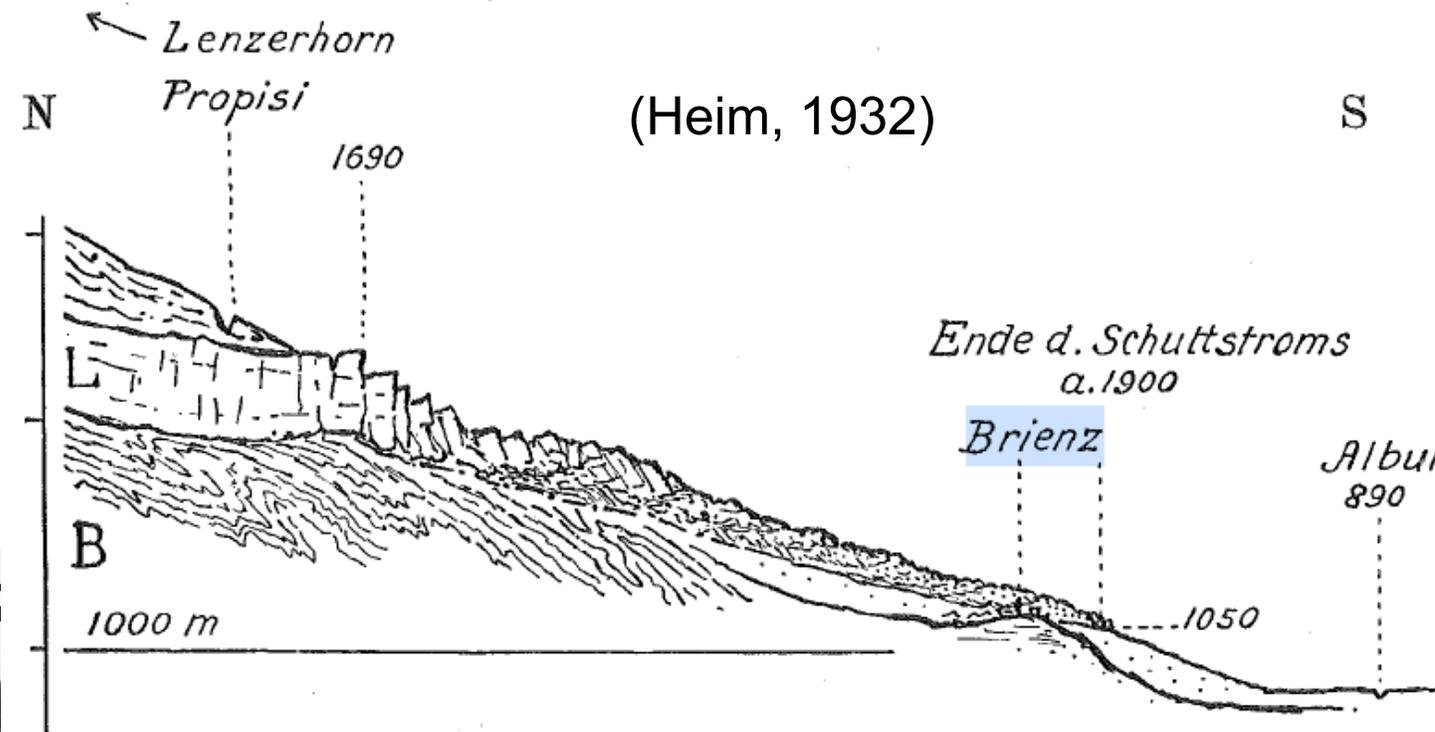
In Bündner Wald, Jahrgang 74 | Dezember 2021



Situation au 12.04.2023

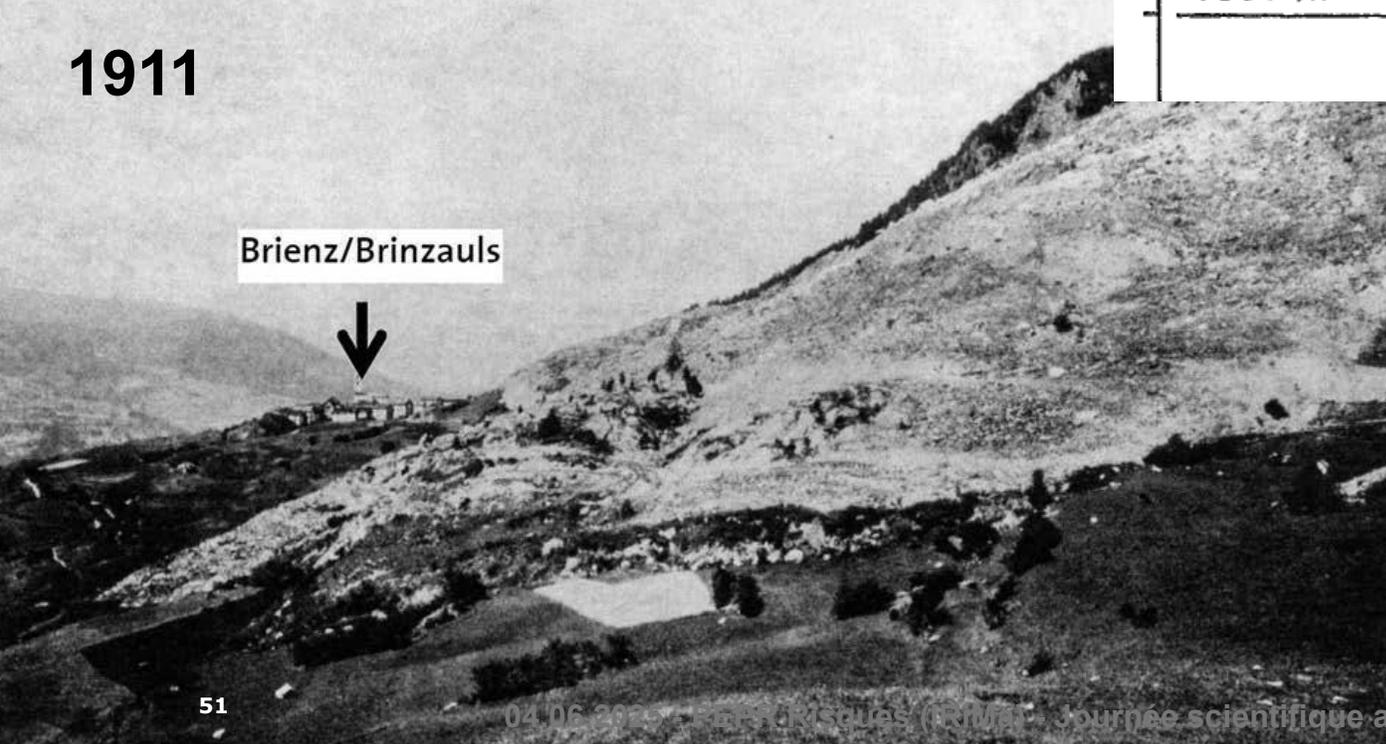


Glissement de terrain 1878



Bündner Wald, Jahrgang 74 | Dezember 2021

1911



Systeme de surveillance

Vue d'ensemble des quatre systemes de mesure du service d'alerte precoce. Le radar Doppler et les mesures GPS manuelles ne sont pas representes. Celles-ci ne sont pas utilisees directement pour l'alerte precoce, mais fournissent des informations supplementaires sur la distribution de la vitesse sur le glissement de terrain et l'activite des eboulements. (Illustration : CSD INGENIEURE AG)

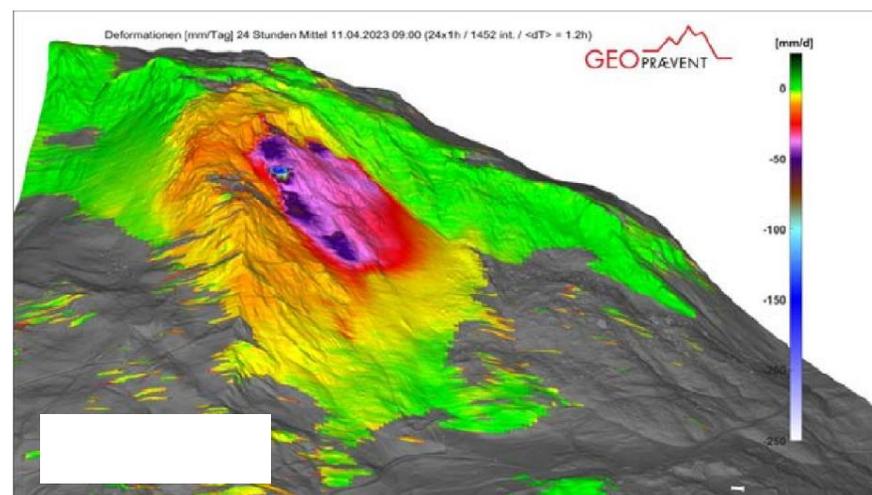
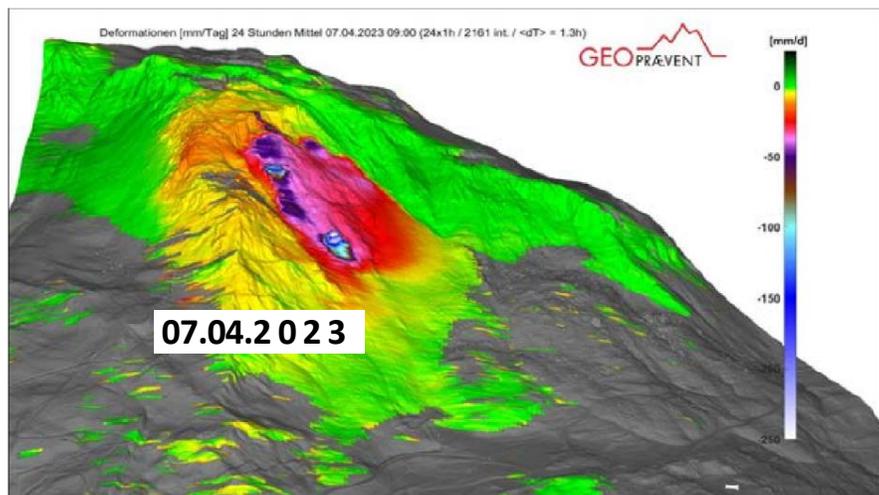
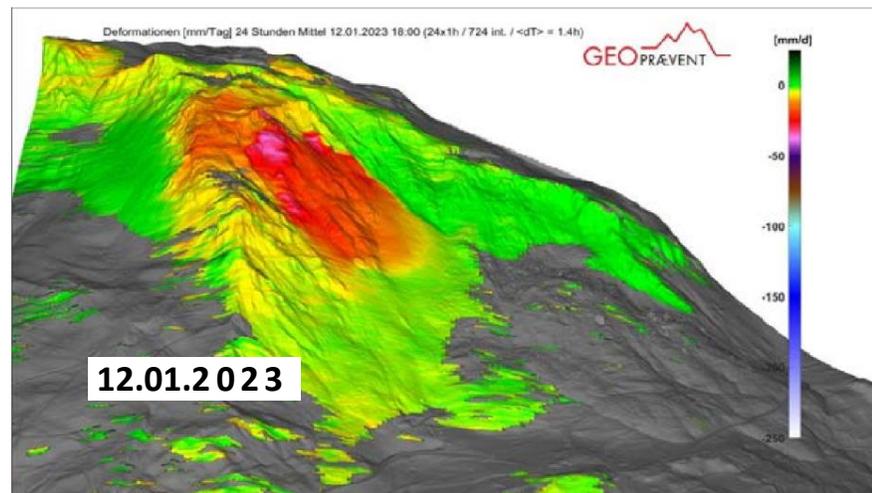
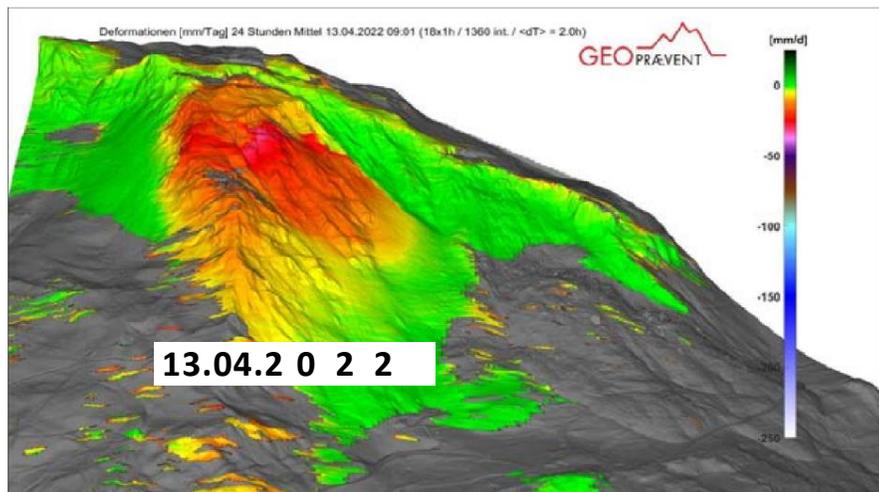


GB-Insar



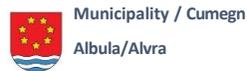
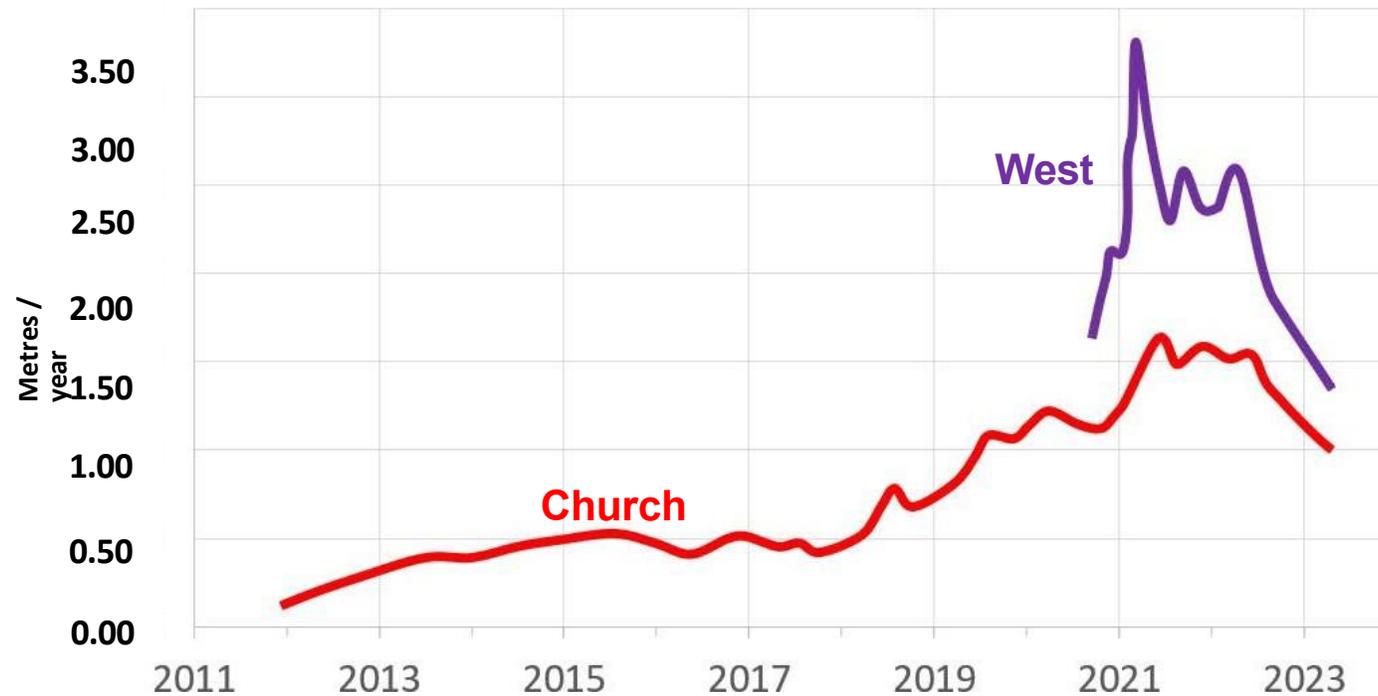
CSD

GB-InSAR



Mouvement du glissement de terrain autour du village

Pkt. 5001 Kirche Brienz/Brinzauls und Pkt. 7002 ehemaliger Stall

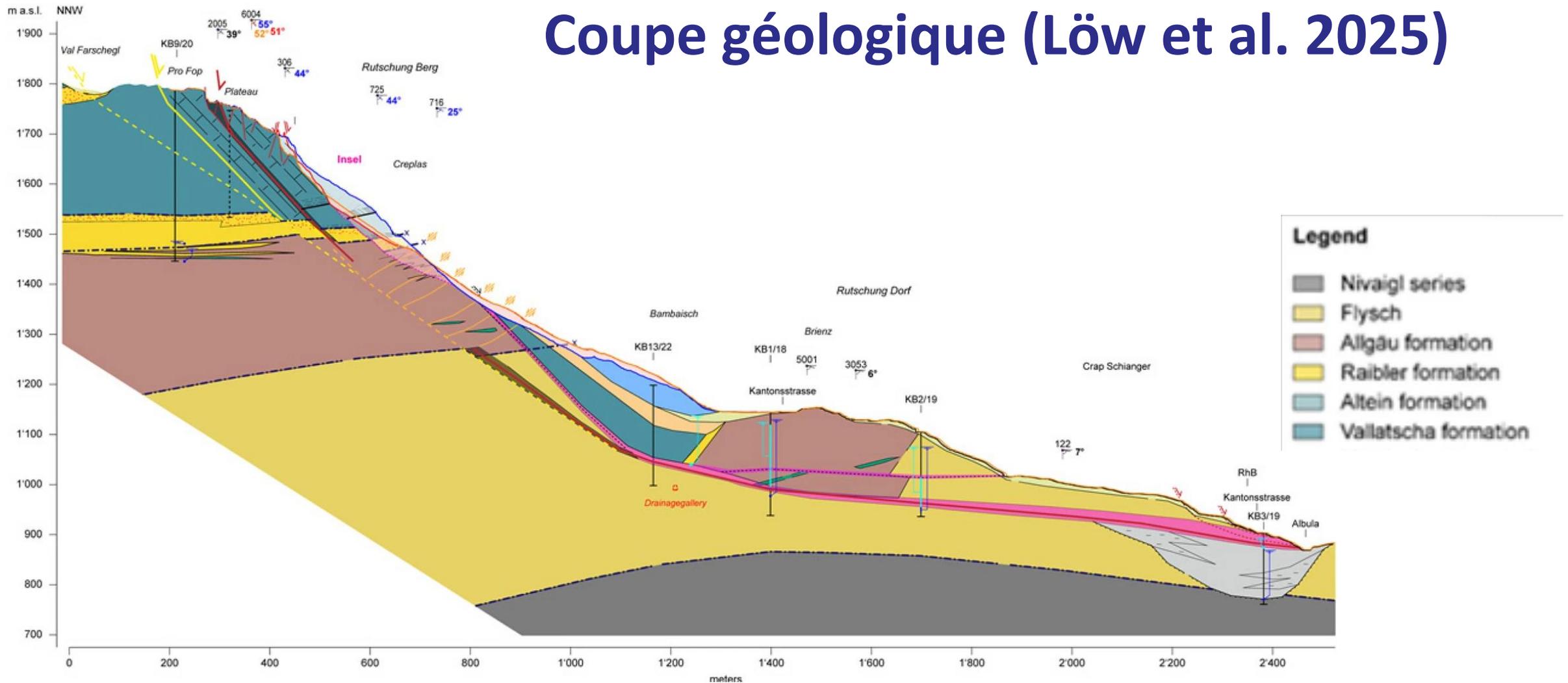


www.brienzer-rutsch.ch

Status
12.04.2023

CSDINGENIEURE+
VON GRUND AUF DURCHDACHT

Coupe géologique (Löw et al. 2025)

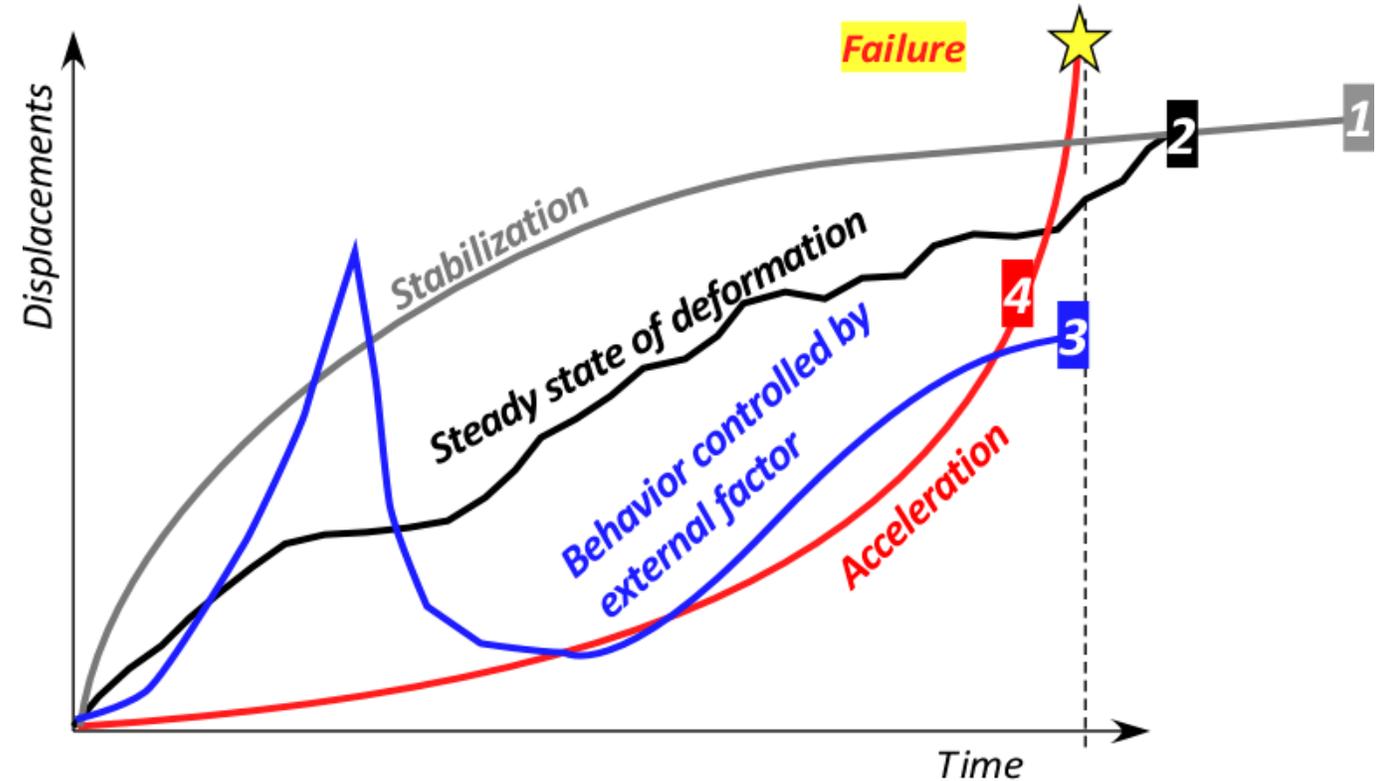


La coupe géologique du complexe de glissement de Brienz met en évidence les zones de cisaillement actives et inactives, la topographie avant et après la rupture et les couches de sédiments. La datation au radiocarbone du bois enfoui indique un âge d'environ 13 000 ans.

Surveillance par les Déplacements

Les déplacements et les vitesses présentent des tendances qui fournissent des informations sur l'évolution d'un glissement de terrain dans le temps et peuvent permettre de prédire son comportement futur. Si les conditions générales qui influencent la stabilité n'ont pas changé. Par exemple :

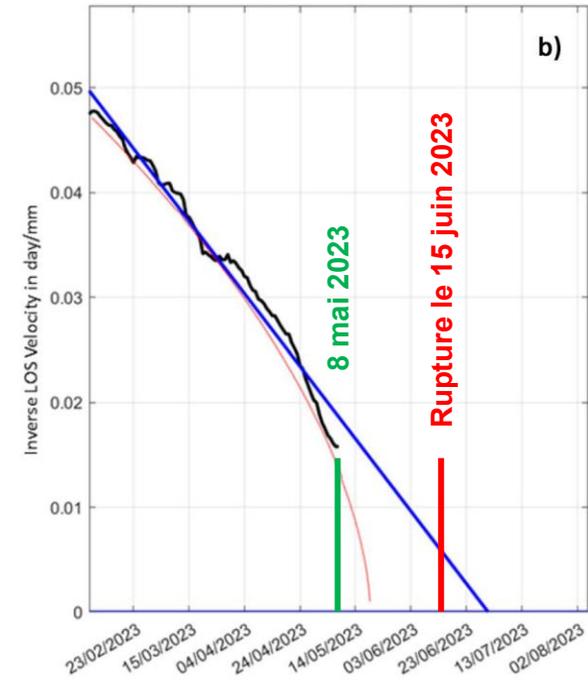
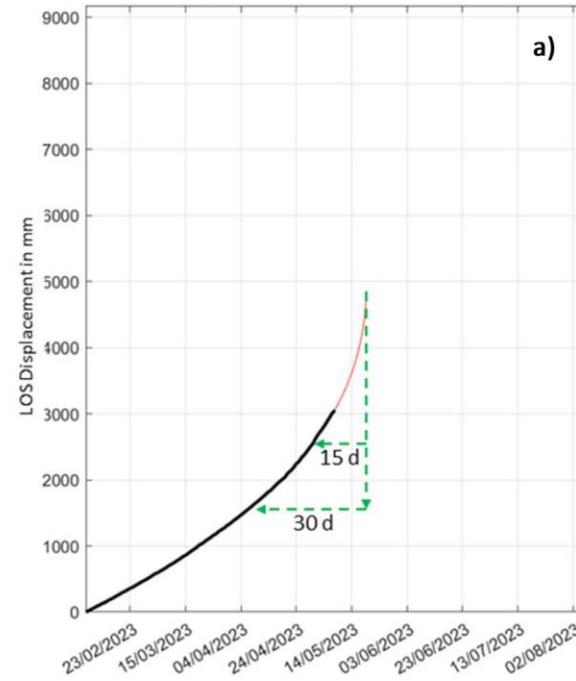
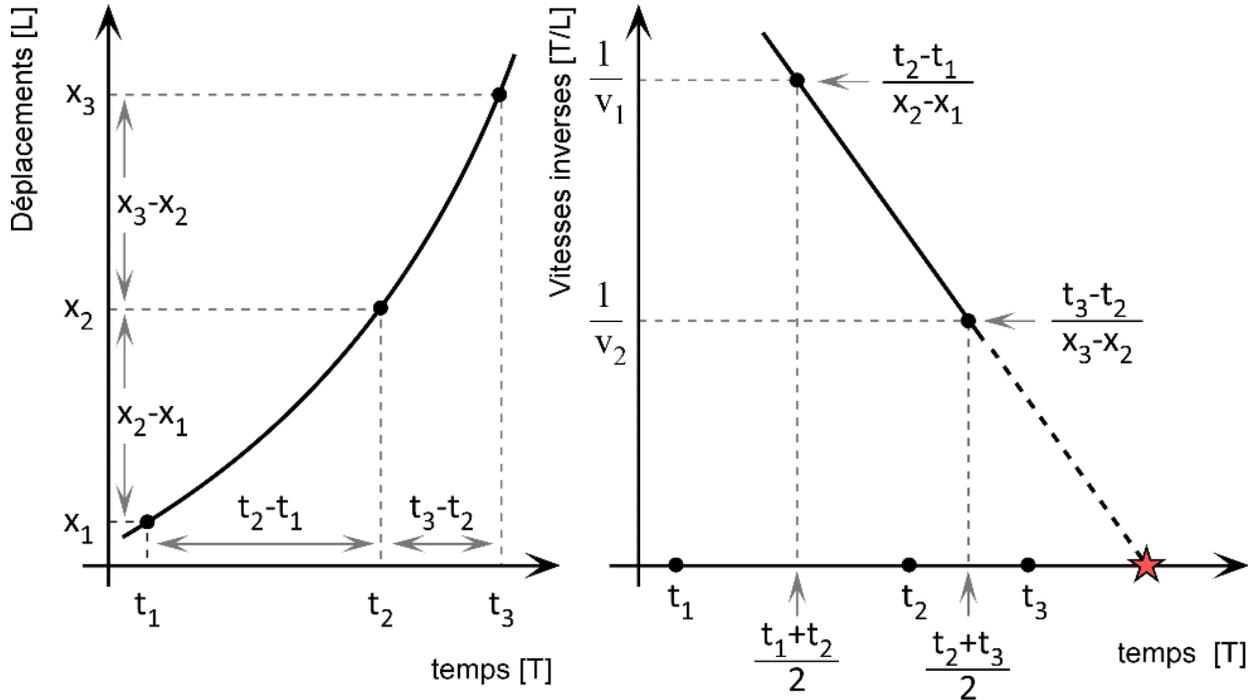
- Stabilisation du glissement de terrain
État stationnaire, ne présentant aucun changement significatif
- Les mouvements sont régis par des facteurs externes (précipitations, ...)
- Accélération vers la rupture



Il est difficile de fournir une méthode de courbes de déplacement. Les courbes 3 et 4 sont celles qui sont amenées plus rapidement à la rupture, cependant si les courbes de type 1 et 2 montrent une accélération significative, la probabilité de rupture peut être aussi importante que 3 et 4.

Ce sont les changements de comportement qui sont significatifs de la pré-rupture.

Prediction de la rupture sur la base des mouvements



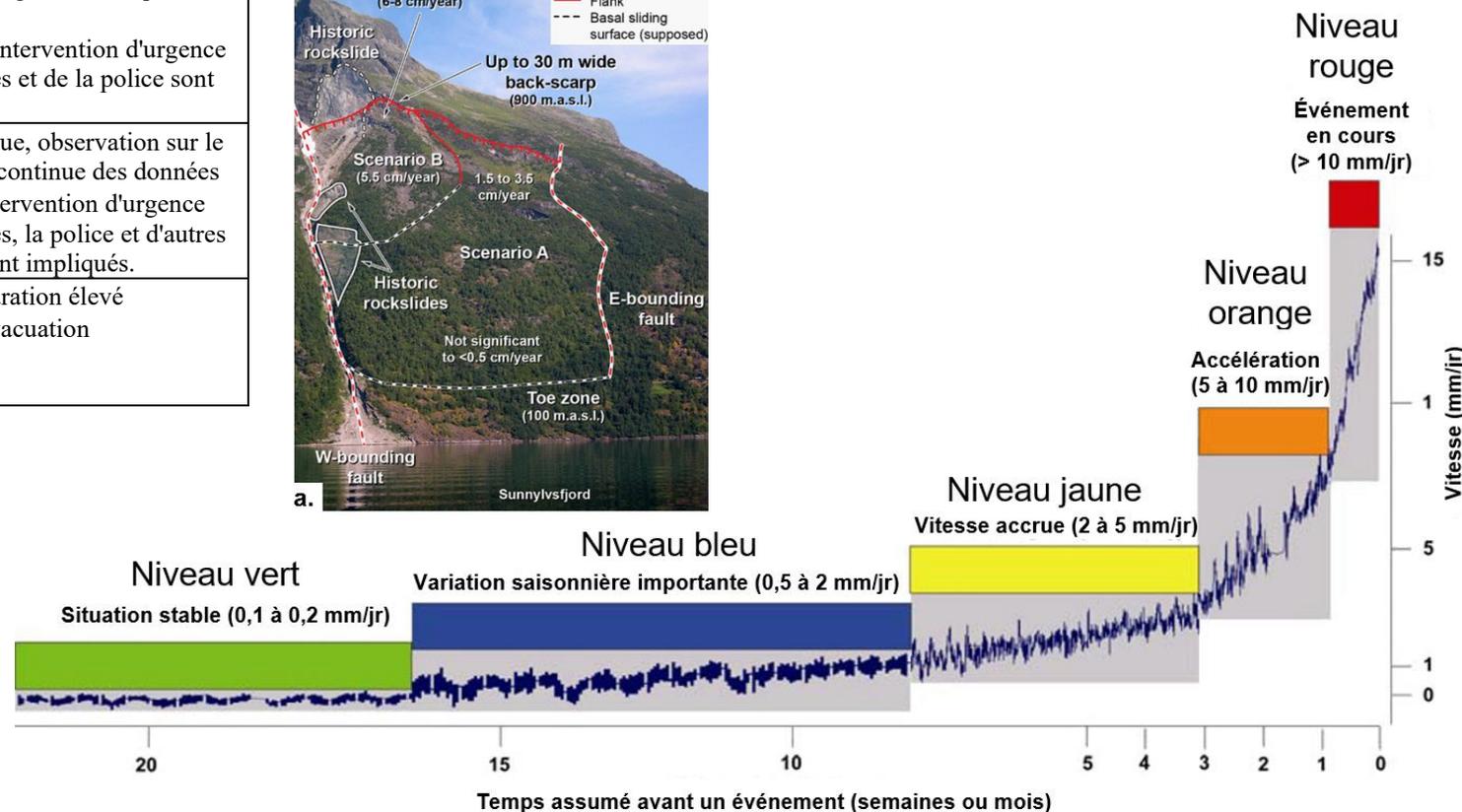
Cas de Brienz basé sur la méthode Voight (Crosta et Aglardi, 2003)
 Observations des déplacements Radar LOS (a) et des vitesses inverses (b) du point d'observation radar 715 entre le 7 février 2023 et le 8 mai 2023 (90 jours, lignes noires) par rapport aux ajustements au modèle de Voight (lignes rouges) et à un ajustement linéaire de la vitesse inverse Fukuzono (ligne bleue pour $\alpha = 2$) (tiré de Löw et al., 2005)

Niveau d'alerte	Activité et alerte	Réponse
 Vert - Situation normale	<ul style="list-style-type: none"> Petites variations de vitesse et petites variations saisonnières. Messages des différents capteurs 	<ul style="list-style-type: none"> La situation est normalement gérée par le personnel du centre d'intervention d'urgence Maintenance technique
 Bleu – Fluctuation saisonnière importantes	<ul style="list-style-type: none"> Importantes variations saisonnières Messages provenant de capteurs individuels et de capteurs multiples Valeurs seuils niveau 1 	<ul style="list-style-type: none"> Examens plus fréquents des données Le groupe d'experts en géosciences est informé
 Jaune – Suivi accru	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la vitesse générale en forage Valeurs seuils niveau 2 Seuils atteints sur de multiples capteurs 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la diligence raisonnable et des examens de données plus fréquents Groupe d'experts géoscientifiques impliqué Les systèmes d'intervention d'urgence des municipalités et de la police sont informés
 Orange – Accélération, Danger	<ul style="list-style-type: none"> Accélération de la tuyauterie Valeurs seuils niveau 3 Alarmes à capteurs multiples 	<ul style="list-style-type: none"> Préparation accrue, observation sur le terrain, analyse continue des données Le système d'intervention d'urgence des municipalités, la police et d'autres organisations sont impliqués.
 Rouge - Critique	<ul style="list-style-type: none"> Accélération accrue dans le tuyau Valeurs seuils niveau 4 Alarmes à capteurs multiples 	<ul style="list-style-type: none"> Niveau de préparation élevé Conseils sur l'évacuation

Aperçu des différents niveaux d'alarme et des réponses possibles lors du développement du système d'alerte précoce du glissement de Aknes, en Norvège (Blikra et al. 2007).

Niveau d'alerte précoce

Schéma possible de niveaux d'alerte basés sur des critères de vitesse pour le cas du glissement actif de Aknes en Norvège (modifié d'après Blikra et al. 2007 et Blikra 2008).



Déformation par GB-Radar et Lidar (Amann et al., 2017)

Déformations du Pizzo Cengalo 2012-2014, mesurées par interférométrie radar

Les déformations 2013 - 2016 sont calculées à partir d'un LiDAR terrestre dans la direction de LOS.

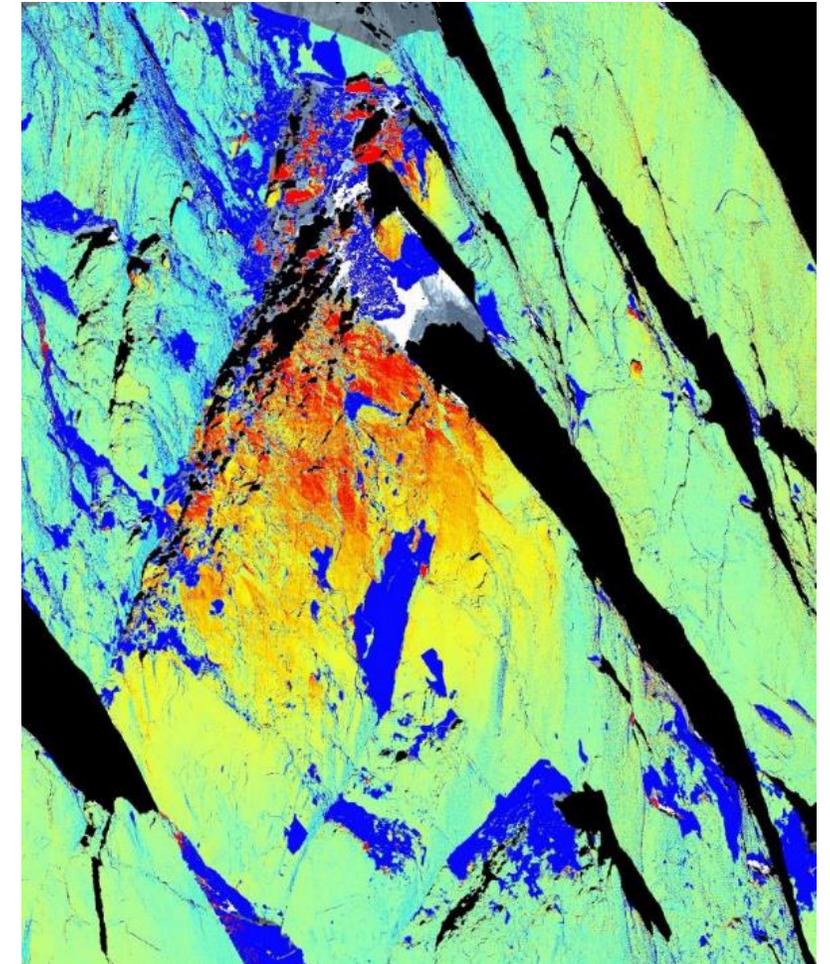
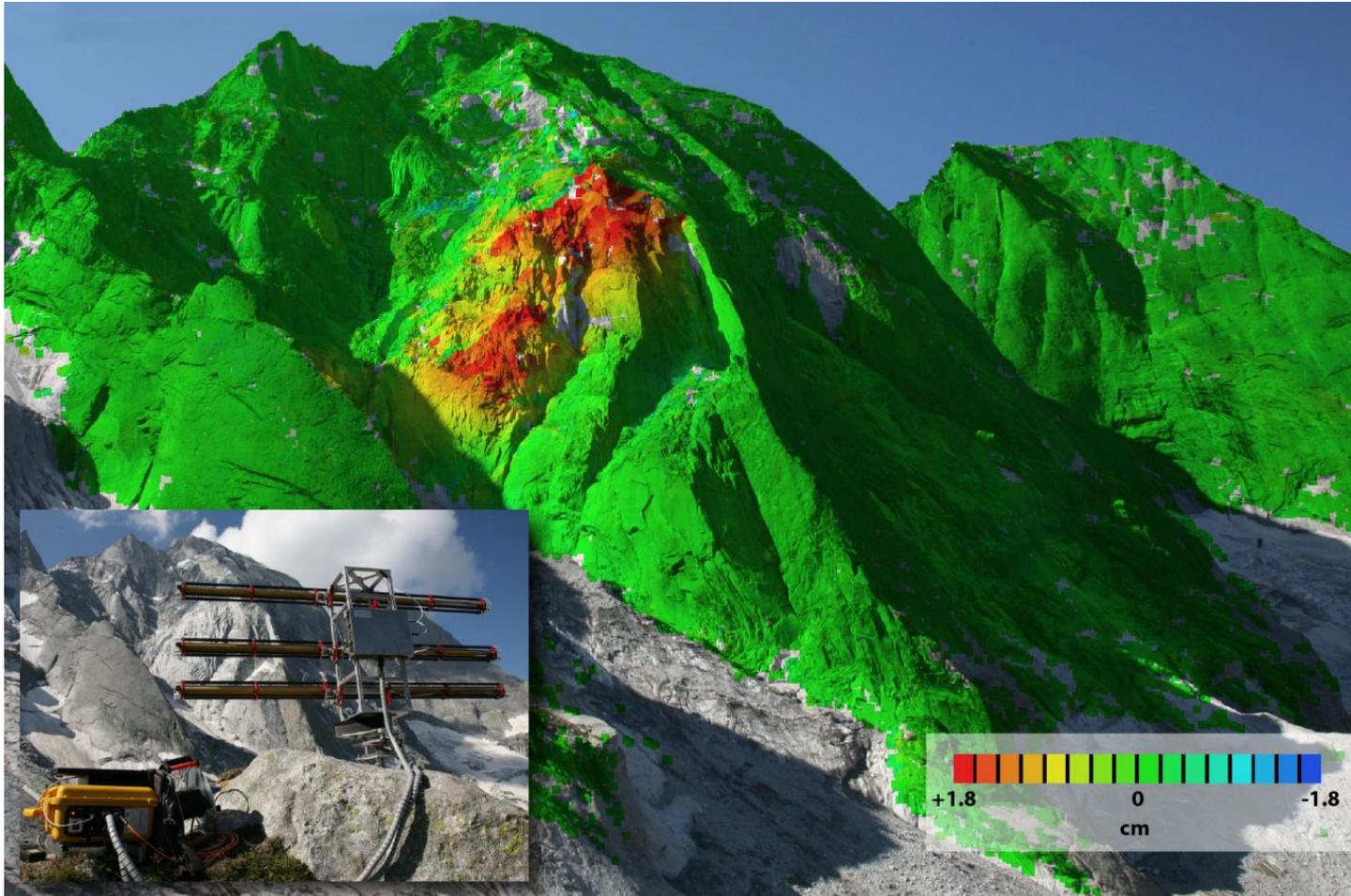
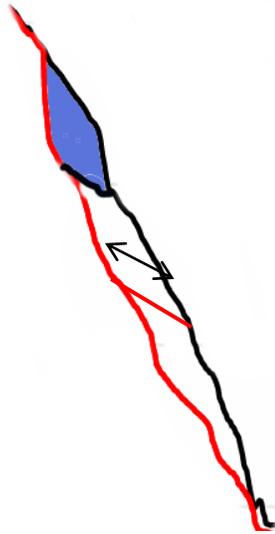


Diagramme activité-déformation pour le Pizzo Cengalo

Environ 2 cm le long
 ~ 100 m en 2 ans
 = 0,01%/an



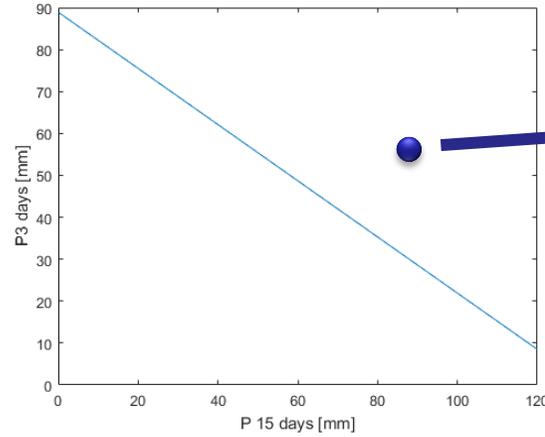
Déplacement plus élevé
 d'après Amann te al.
 (2017)

	Strain rate	Rockfall	Number of criterion	Deformation state									
				0-0	1-2	1-1	0-1/1-2	1-0/2-1	2-2/X-X				
Activity	Fast (>5cm/y)	Frequent	2	X Does not exists								Chutes de blocs Taux de défromation	
			1										
	Moderate	Occasional	2	X Does not exists									
			1										
	Has moved or move	Deposit-only	2	X Does not exists									
			1										
No	No	No											

Crise: les conditions pour que l'aléa augmente par des facteurs externes comme la météo

Seuil d'alerte pour glissements superficiels

$P_0 = P_3 + 0.67P_{15} - 3.5$ where, P_0 is the threshold index, P_3 is the 3-day (72 hr) cumulative precipitation, and P_{15} is the 15-day cumulative prior to the 3-day



Tiré de Baum et Godt (2010)

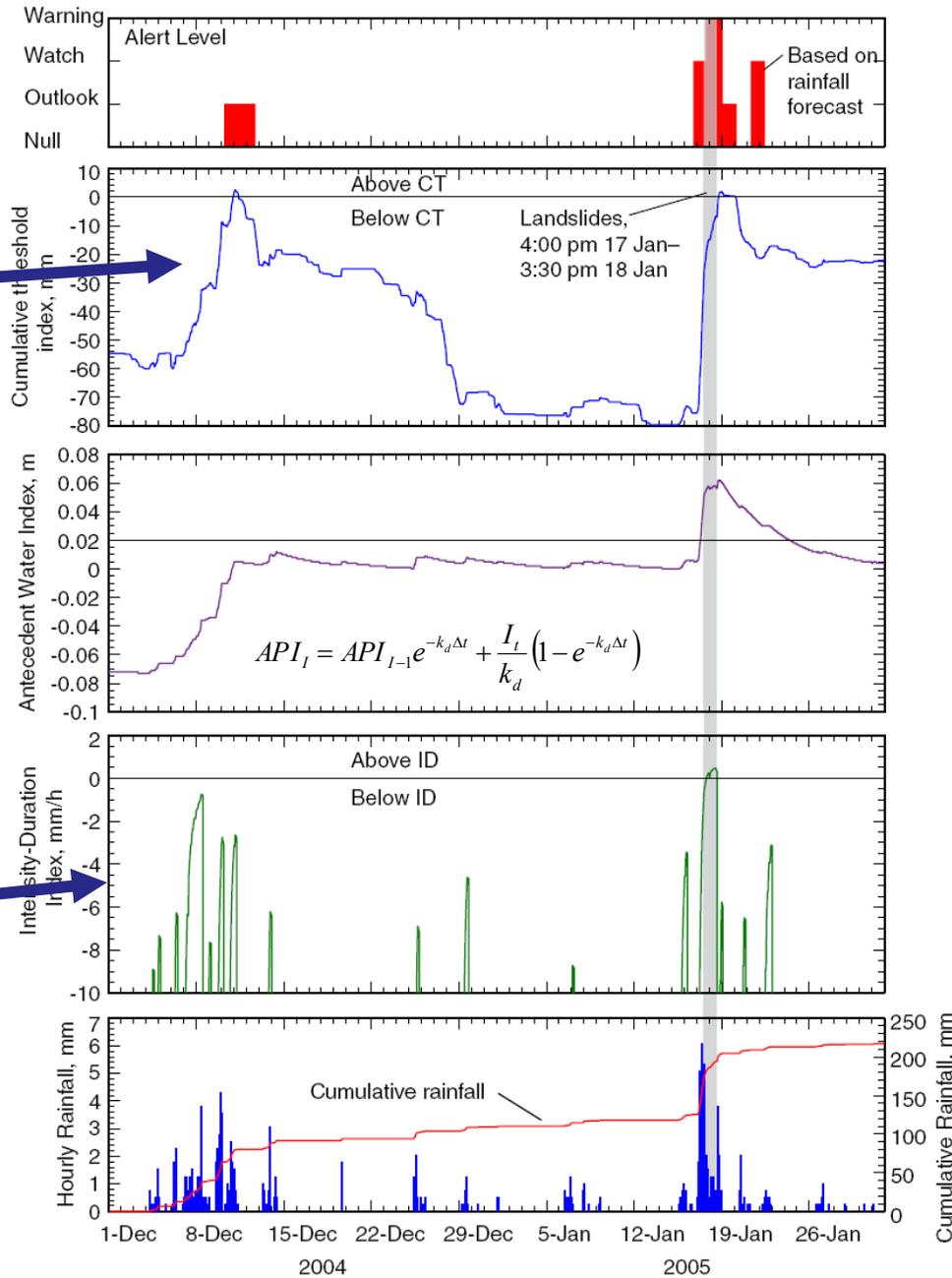
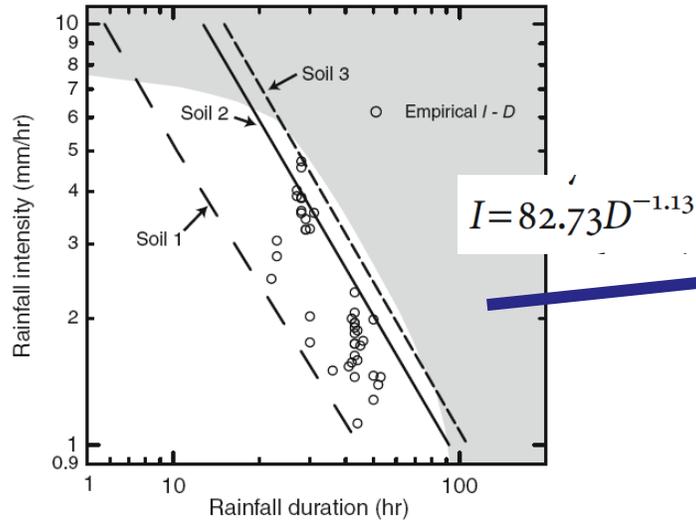


Fig. 8 Deterministic rainfall thresholds for three soils with varying hydrological properties overlying a typical landslide-prone hillside in the Seattle area. The open circles are rainfall intensity and duration associated with known landslide occurrence (after Godt and McKenna 2008)



Repubblica e Cantone
Ticino

Evènement météo dans la haute Vallemaggia 29-30 juin 2024

Roland David, Sezione forestale

Bellinzona, 26 agosto 2024

Repubblica e Cantone Ticino

Dipartimento del territorio

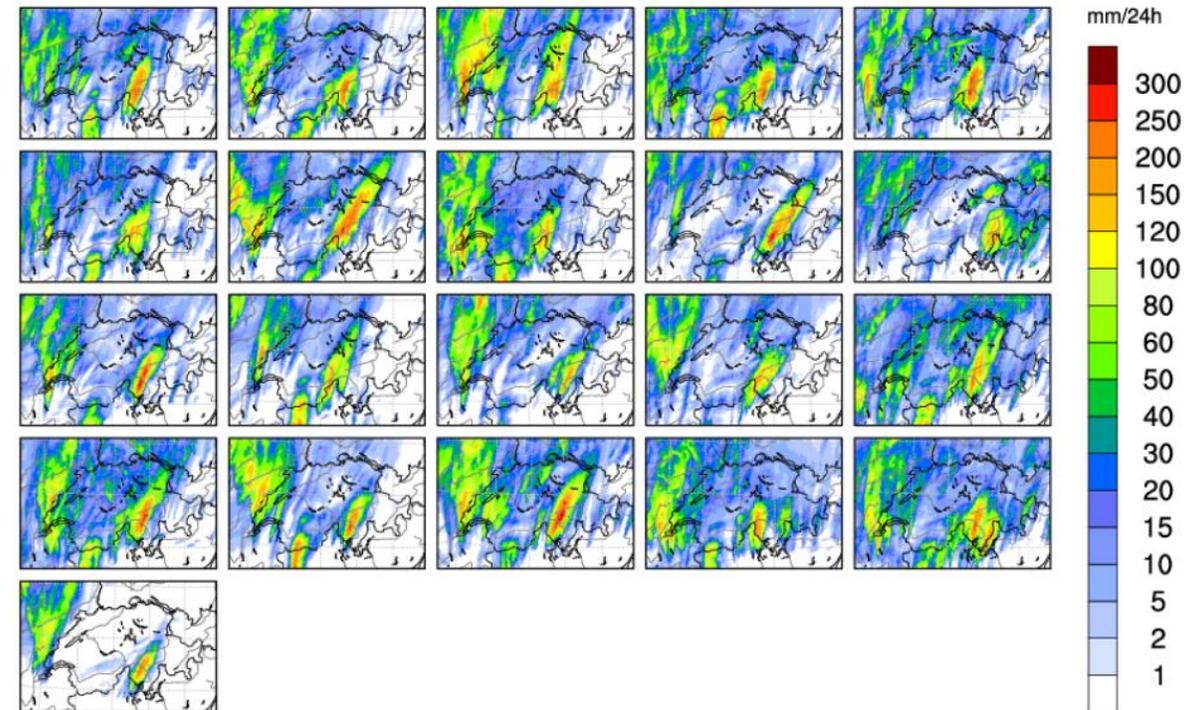
Situation avant l'événement

Prévisions météorologiques - Situation le 28.06 à 13.30 (vendredi)

- **Alerte de niveau 3 à partir de 15 heures samedi**
- Régions les plus touchées : Locarnese, Valle Maggia, Leventina, Verzasca. Cependant, tout le Tessin et le Moesano ont été alertés, car il n'est pas exclu que de violentes cellules orageuses se développent dans ces régions également.
- Intensité des précipitations (30-60 mm en 1 à 2 h). Cumul total (sur 12 h) 80-100 mm dans les régions les plus touchées.
- Rafales de vent jusqu'à 70-100 km/h - grêle non exclue.

ICON-CH2-EPS
24h Sum of Total Precipitation

Sun 30 Jun 2024 12UTC
28.06.2024 12UTC +48h



Accumulations de précipitations sur 24 heures prévues par le modèle ICON-2E, exécuté le 28.06.2024 à 12UTC (14 heure locale). (Source : ICON-2E @MeteoSwiss)

Situation avant l'événement

Prévisions météorologiques - Situation le 29.06 à 13.30 (samedi)

- **Alerte de degré 4 à partir de 15 heures.**
- L'ensemble du Tessin ainsi que la région du Moesano sont en alerte : S'agissant de phénomènes convectifs, la localisation exacte des zones les plus touchées est souvent difficile, sauf à très court terme.
- Premières averses ou orages en cours d'après-midi, surtout dans les vallées du nord-ouest (Maggia, Verzasca, Bedretto) ; entre la fin de l'après-midi et la première partie de la nuit, des orages très violents et étendus sont possibles.
- Fortes intensités de pluie (intensité 30-60 mm/h). Accumulations totales sur 12 heures jusqu'à 150-200 mm.
- **Rafales de vent de 70 à 100 km/h.**
- Gros grêlons (jusqu'à 3-5 cm).

Carte d'alerte de MétéoSuisse mise à jour le 11 juillet à 13 heures.

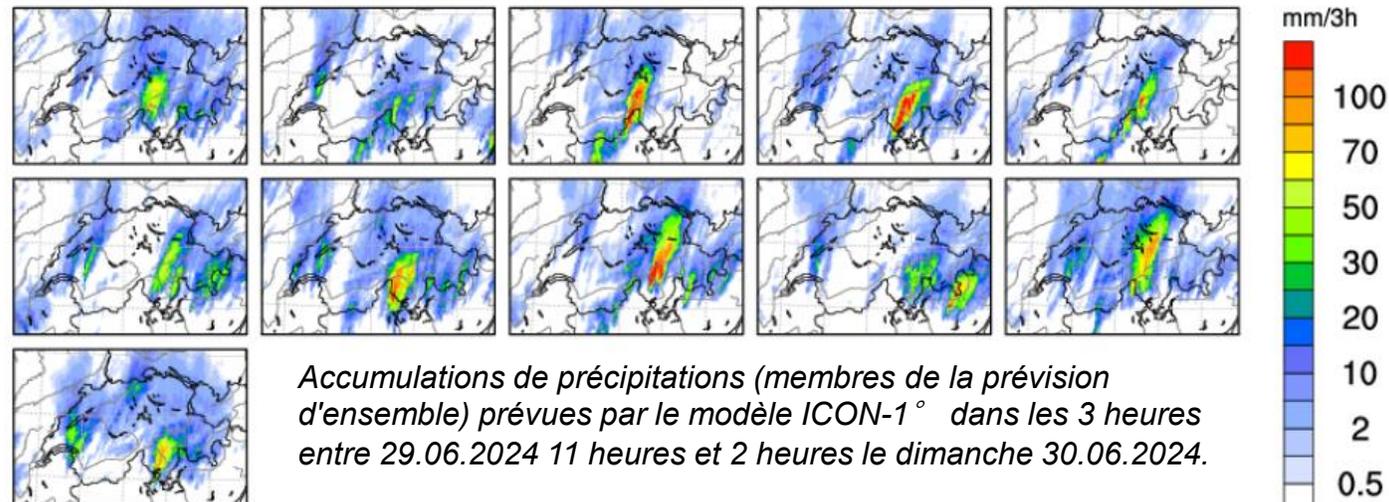


ICON-CH1-EPS

3h Sum of Total Precipitation

Sun 30 Jun 2024 00UTC

29.06.2024 03UTC +21h

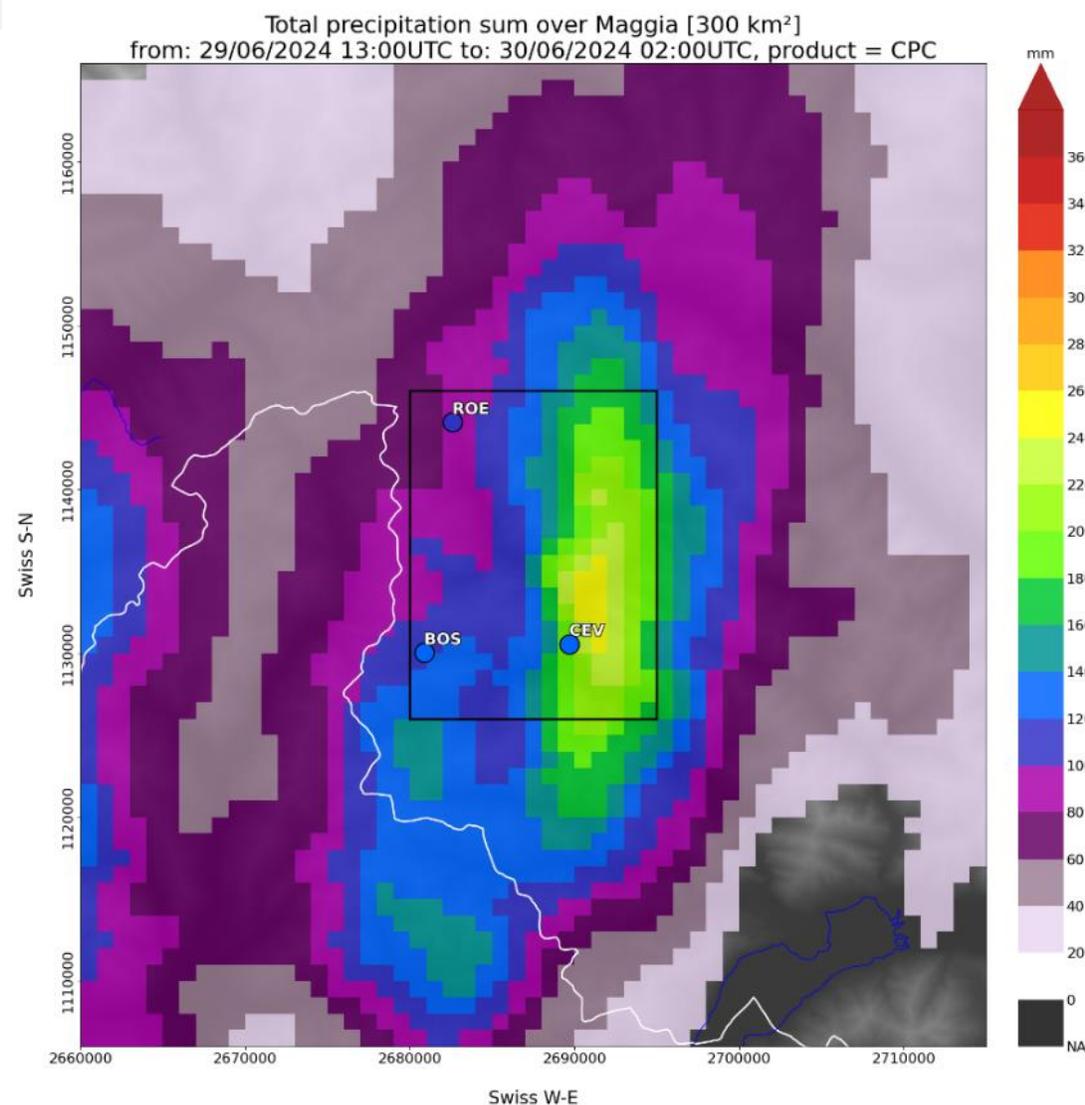


Accumulations de précipitations (membres de la prévision d'ensemble) prévues par le modèle ICON-1° dans les 3 heures entre 29.06.2024 11 heures et 2 heures le dimanche 30.06.2024.

Que s'est-il passé ?

Précipitations 29-30.06

- La haute vallée de la Maggia a été la région la plus touchée, avec des accumulations atteignant 200 mm en quelques heures.
- L'épicentre des précipitations se situe dans la région de Bignasco, entre Cevio et Lavizzara, où les précipitations ont atteint 260 mm.
- Les fortes accumulations de pluie par heure, jusqu'à 50-60 mm, ont affecté une région de quelques dizaines de kilomètres carrés.
- La durée des fortes précipitations a été d'environ 6 heures, de 20 heures le 29 à 2 heures le 30 juin.



Somma delle precipitazioni a monte di Cevio (fonte Meteosvizzera)

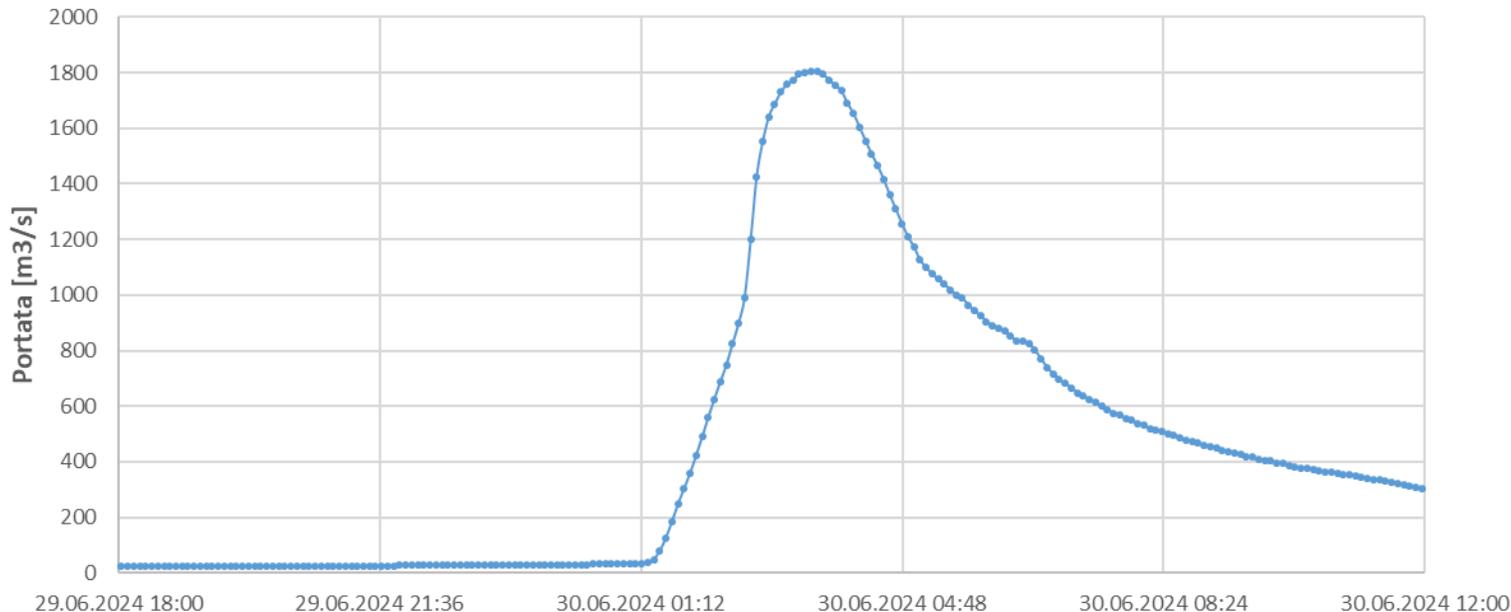
Que s'est-il passé ?

Réaction des cours d'eau

Les cours d'eau secondaires et la Maggia ont réagi brusquement aux précipitations.

En un peu plus de 2 heures, le débit de la Maggia à Solduno est passé d'environ 40 mc/s à 1800 mc/s.

Portata della Maggia a Solduno

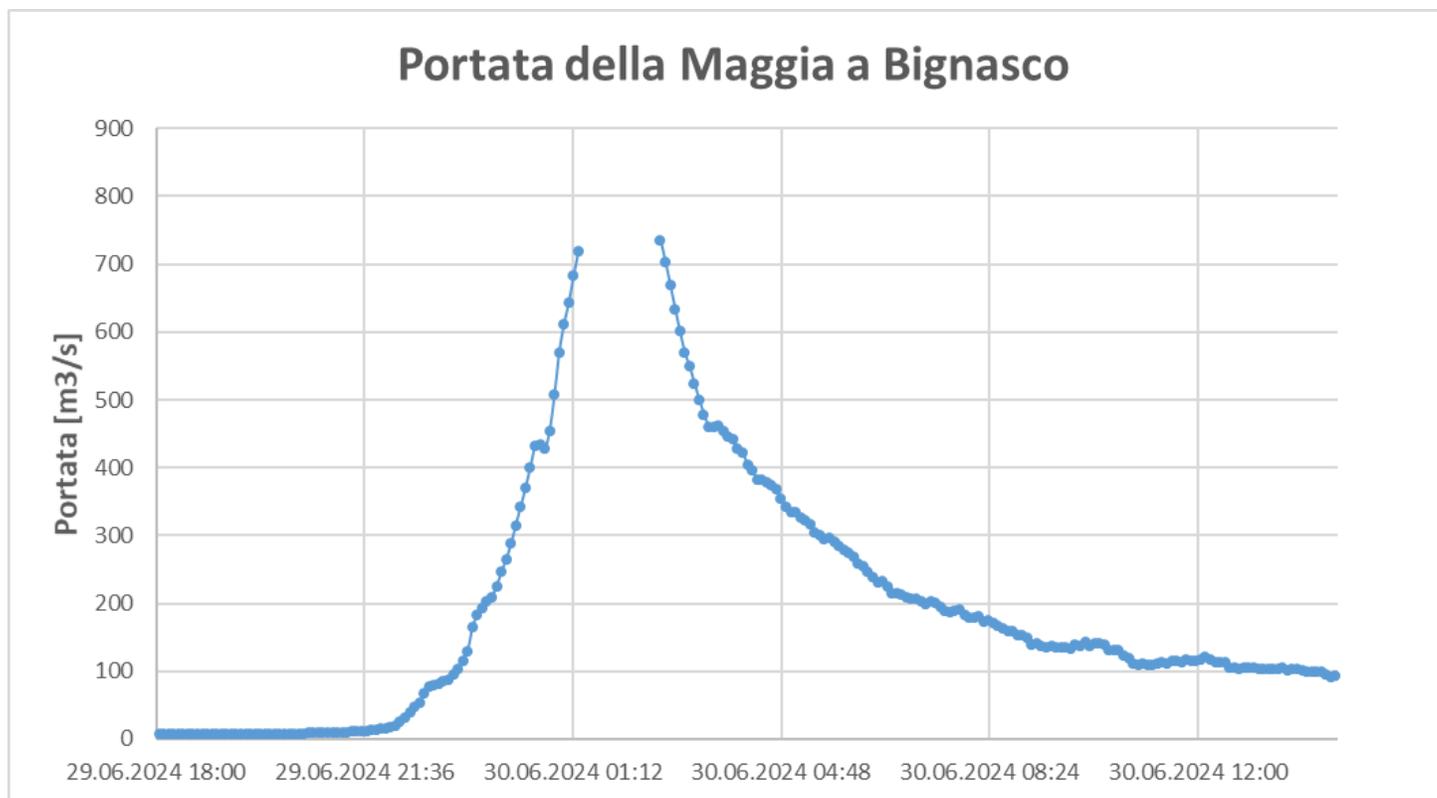


*Débit de la Maggia à Solduno
(données de l'OFEV)*

Que s'est-il passé ?

Réaction des cours d'eau

- A Bignasco, la Maggia a atteint au moins 734 m³/s, la valeur la plus élevée enregistrée depuis 1982.
- Cette valeur est également sous-estimée car le niveau d'eau a dépassé le profil calibré de la station de l'OFEV.
Débit de pointe estimé > 1000 mc/s



*Débit de la Maggia à Bignasco
(données de l'OFEV)*

Que s'est-il passé ?

Réaction des cours d'eau

Comparaison avec les temps de retour et les extrêmes annuels plus élevés pour la haute vallée et la basse vallée.

Maggia à Bignasco : débit 29-30.06.2024 > 1000 m³/s

Tabella dei valori di ritorno

Tabella dei maggiori estremi annuali

Periodo di ritorno [anni]	portata [m ³ /s]	Intervallo di confidenza [m ³ /s]	Data	portata [m ³ /s]	Periodo di ritorno stimato [anni]
2	313	258 - 367	31.08.1992	647	37
10	527	450 - 605	10.09.1983	632	31
30	629	501 - 757	13.07.2011	624	28
100	720	509 - 932	03.10.2020	537	11
300	789	489 - 1089	07.09.2008	519	9

Événement le plus important jamais enregistré !

Maggia à Solduno: debit 29-30.06.2024 1802 m³/s

Tabella dei valori di ritorno

Tabella dei maggiori estremi annuali

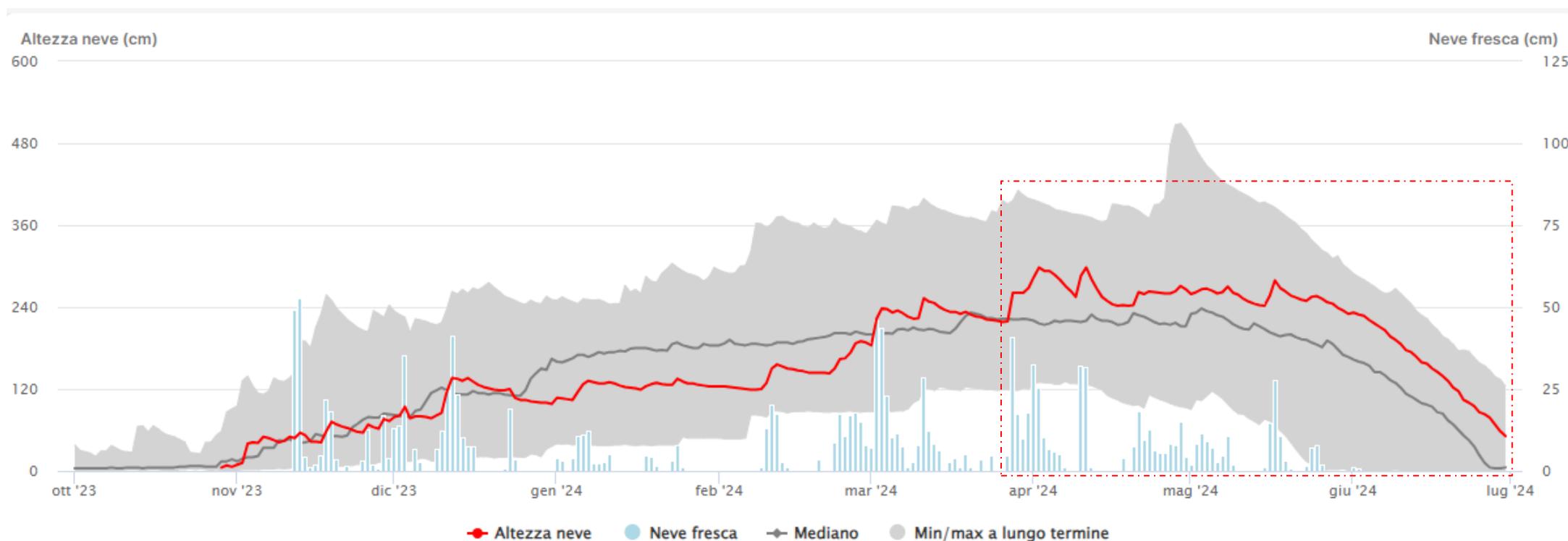
Periodo di ritorno [anni]	portata [m ³ /s]	Intervallo di confidenza [m ³ /s]	Data	portata [m ³ /s]	Periodo di ritorno stimato [anni]
2	1263	1057 - 1469	07.08.1978	4500	>150
10	2369	1931 - 2808	31.08.1992	3084	31
30	3072	2303 - 3841	11.09.1970	2500	12
100	3858	2522 - 5193	03.10.2020	2337	10
300	4599	2550 - 6649	27.09.2012	2261	8

Événement avec un temps de retour de 2 à 10 ans

Que s'est-il passé ?

Autres facteurs de prédisposition présents

- Saturation des sols (précipitations antérieures)
- Présence de dépôts de neige dans le lit des rivières et dans la partie supérieure des bassins versants à la suite de chutes de neige tardives.

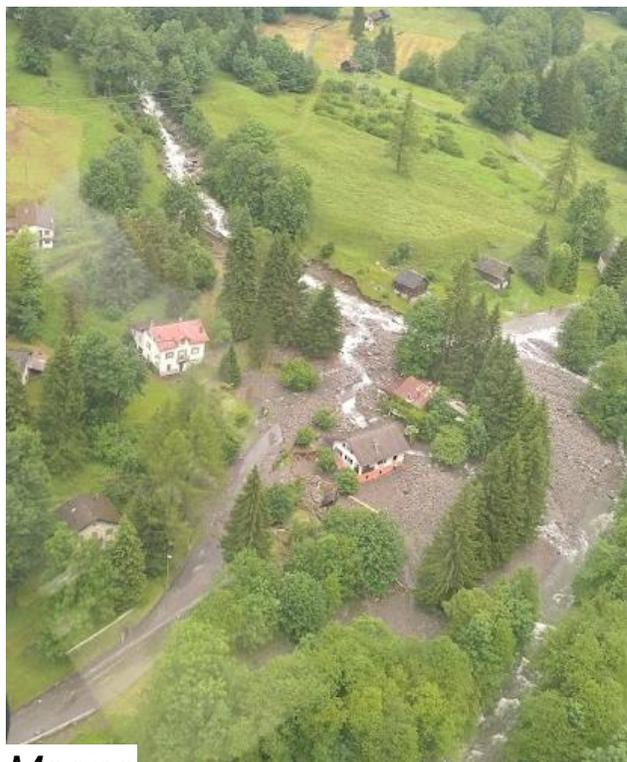


Evolution de l'épaisseur de la neige durant l'hiver 2023-2024 dans la région de l'Alpe di Röd (données SFL)

Conséquences sur le terrain

Environ 50 événements majeurs ont été cartographiés à la suite de la crue éclair. Il s'agit principalement de

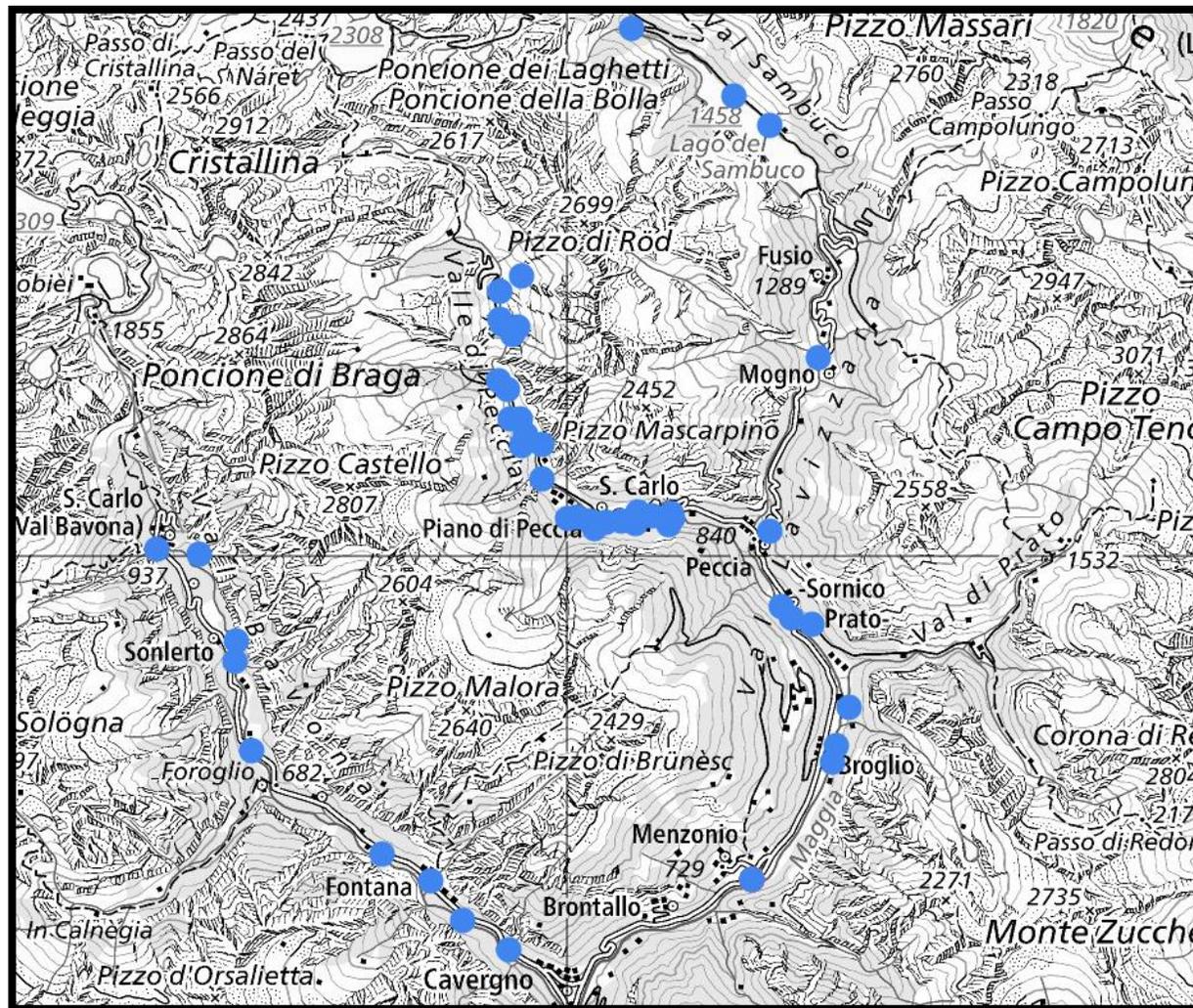
- Laves torrentielles le long des cours d'eau secondaires ;
- inondations et érosion des berges le long des rivières Lavizzara et Bavona.



Mogno



Piano di Peccia



Evénements naturels cartographiés suite aux pluies du 29-30.06

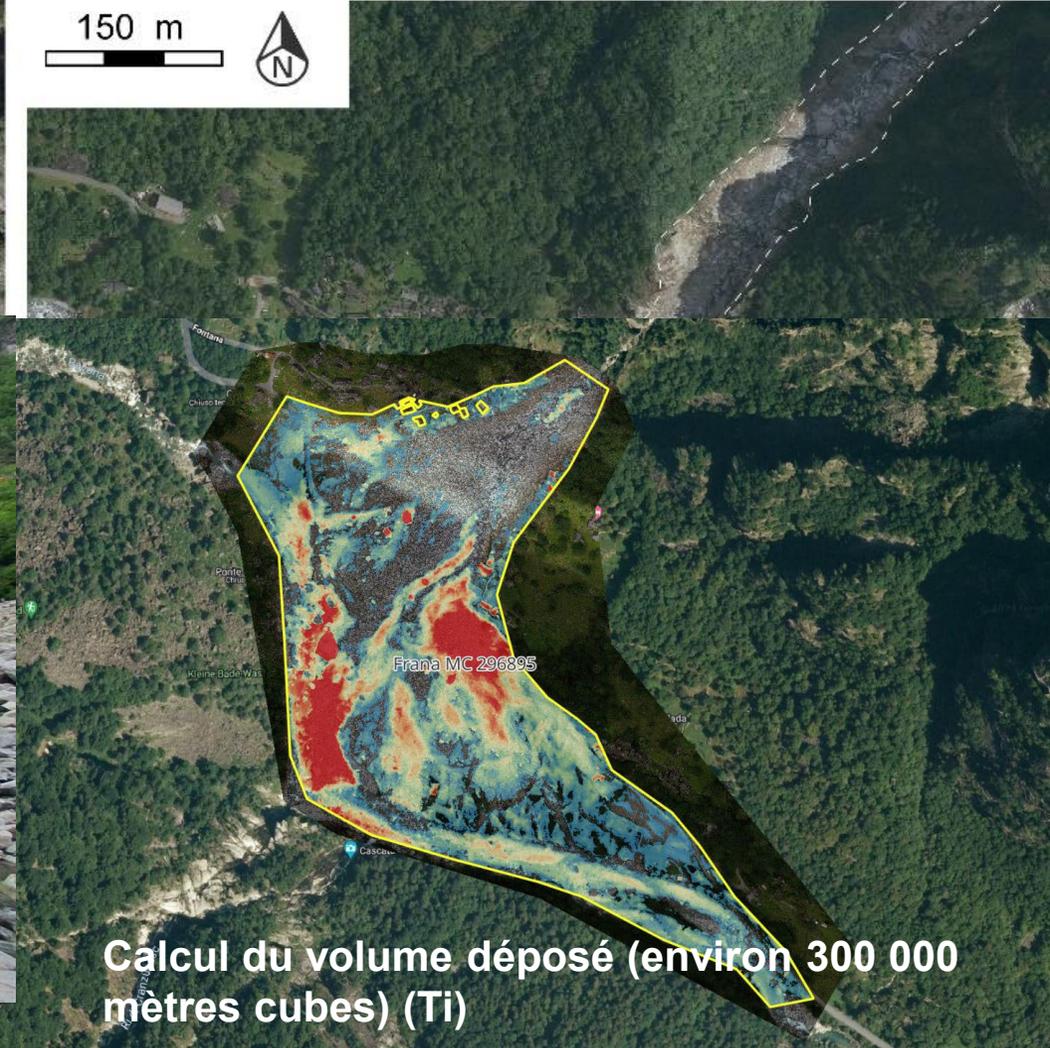
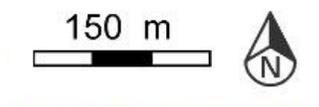
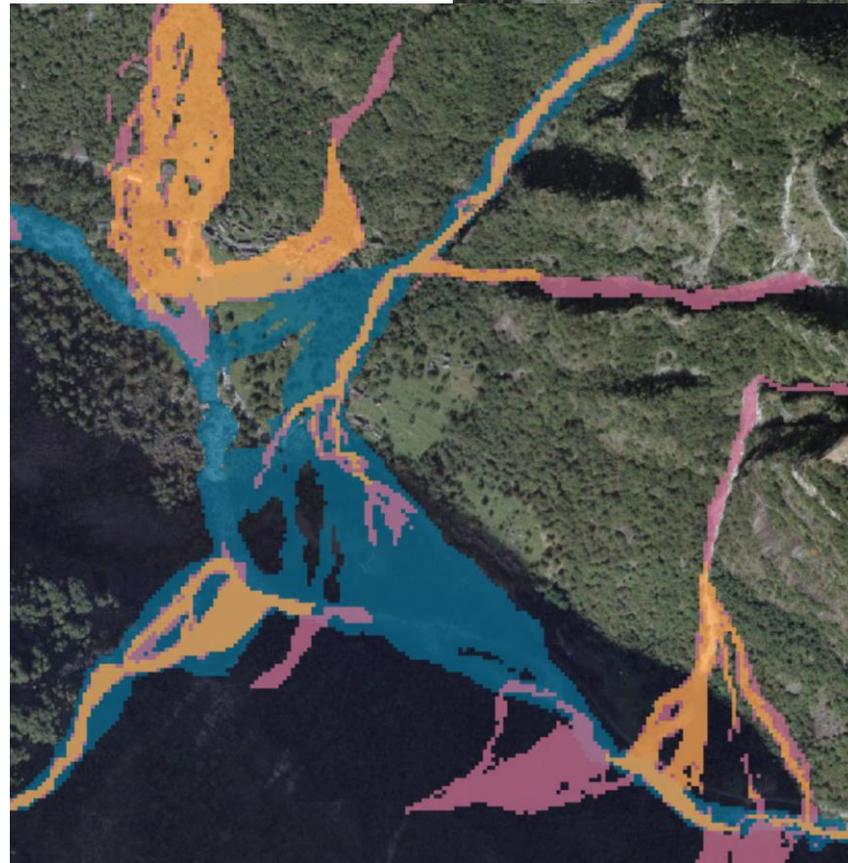
Conséquences sur le terrain

7 morts confirmés et 1 personne disparue

- 5 victimes à Fontana ;
- 2 victimes à Prato Sornico ;
- 1 disparu à Piano di Peccia.



Fontana



Lave torrentielle déclenchée par des précipitations très intenses et localisées le 29 juin 2014 à Fontana (Val Maggia, Suisse). a. avant l'événement, b. après l'événement (images de swisstopo). Cet événement exceptionnel a déplacé un bloc de 7000 m³ et a provoqué une érosion intense ainsi qu'un entraînement significatif de sédiments des berges du cours d'eau, comme illustré par les traits tillés. L'onde de crue a atteint une hauteur de 30-35 m au-dessus du lit de la rivière.

20 bâtiments ont été fortement touchés et au moins 8 ont été détruits.

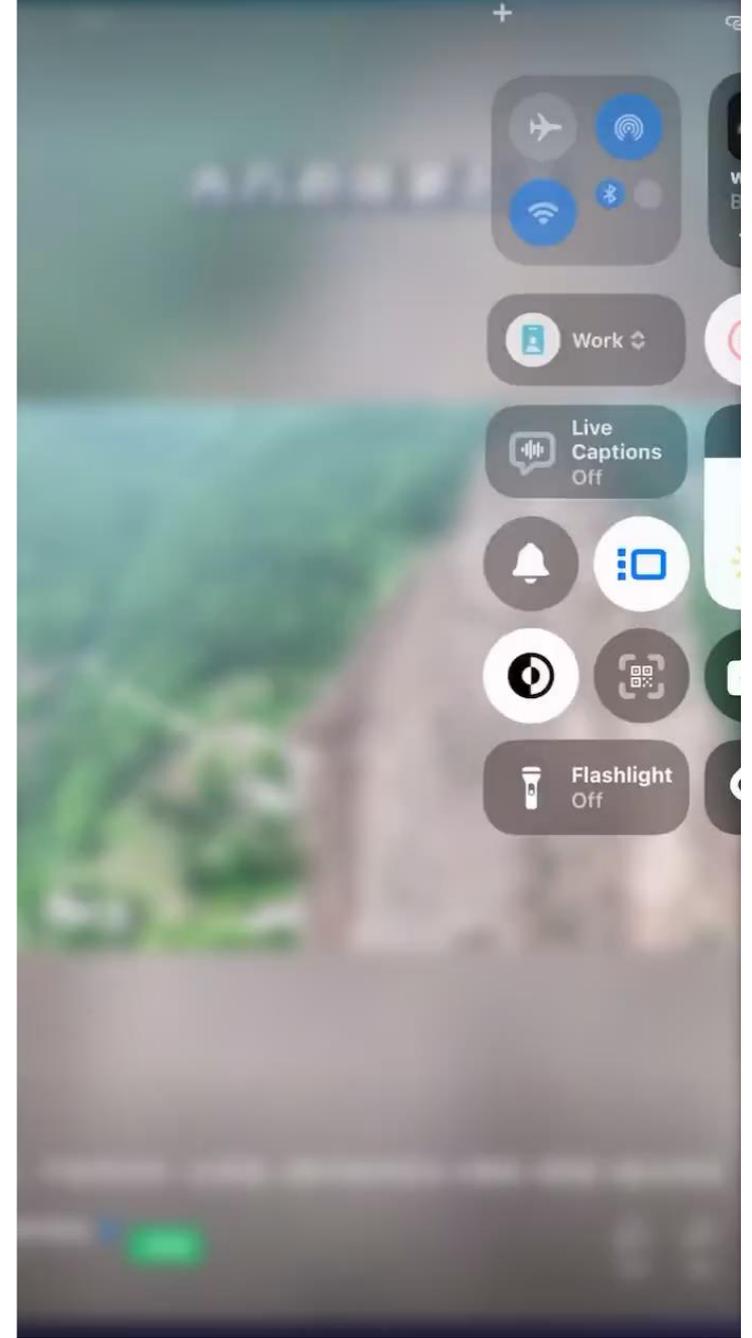
Probabilité de propagation

- Scenario
- Incertitude

Propagation à Blatten



22.05.2025: Glissement rocheux avalanche de débris (Province de Guizhou, au sud-ouest de la Chine)

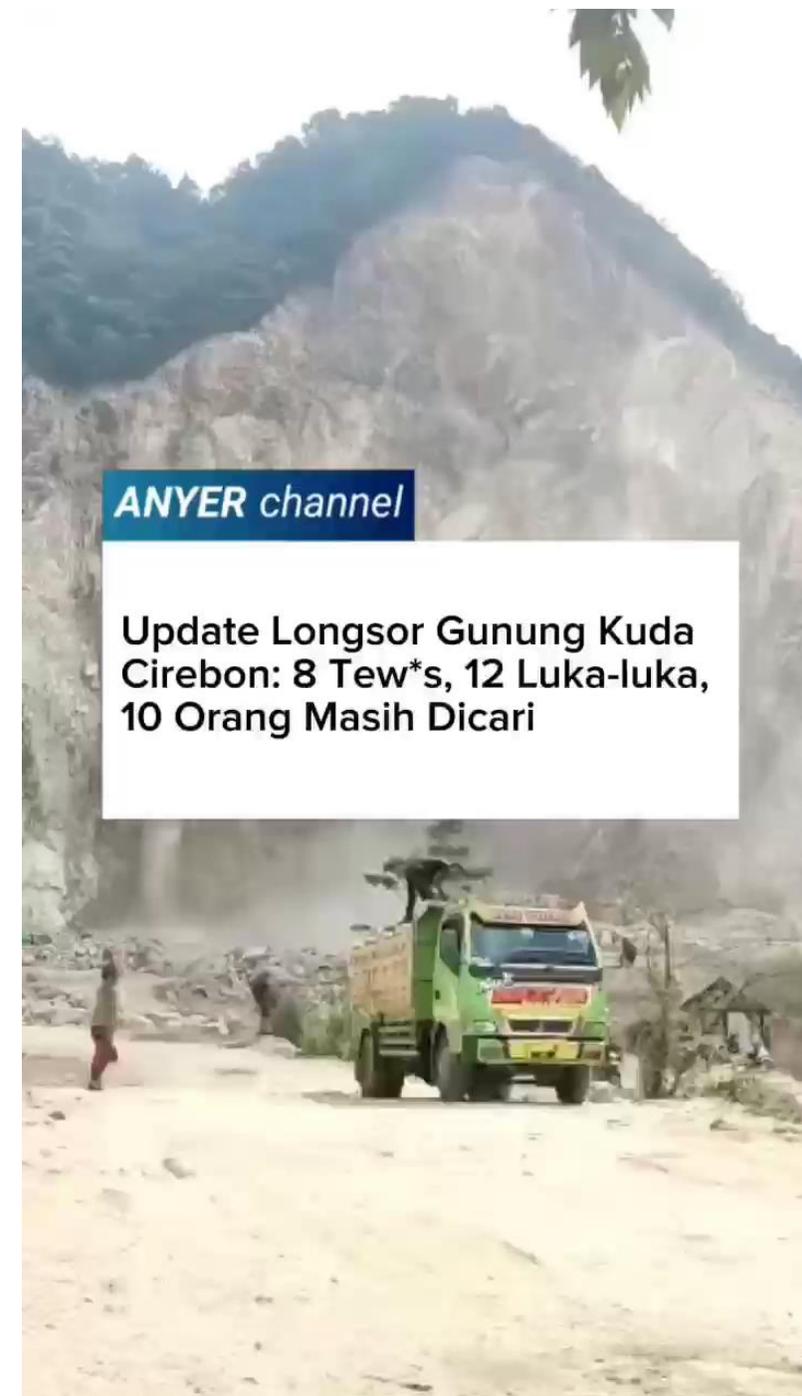


30 mai 2025: Glissement rocheux complexe et chutes de blocs

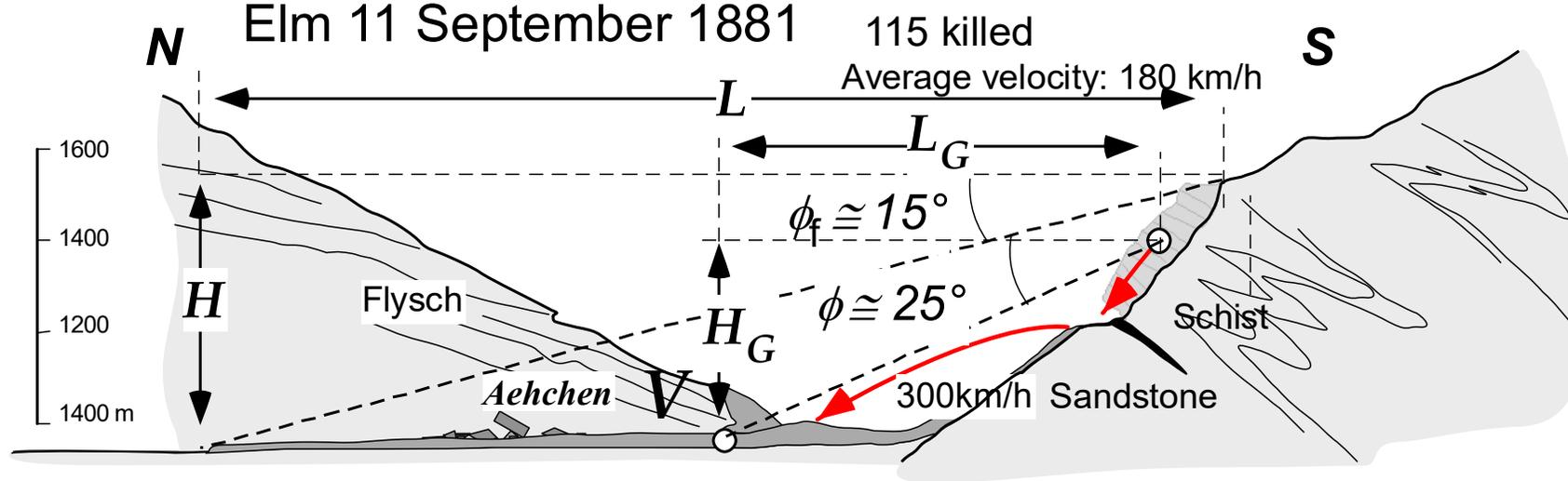
Une carrière de pierres naturelles dans la province indonésienne de Java Ouest s'est effondrée, causant la mort d'au moins 10 personnes et laissant six travailleurs portés disparus, selon les autorités.

(<https://abcnews.go.com/International/wireStory/officials-10-people-dead-6-missing-after-stone-122336002>)

«Cela s'est produit à la suite d'un effondrement sur une face rocheuse verticale en surplomb. Et il est vrai qu'ils n'ont pas respecté les procédures de sécurité ou les recommandations, bien qu'il s'agissait d'une exploitation minière locale légale au départ. Je pense également qu'aucune autre étude de risque n'a été appliquée ici en raison de la demande forte de matériaux de construction.» (PhD d'Indonésie à l'UNIL)



Elm: une carrière aussi



Avalanches de pierres d'Elm modifiées d'après Heim (1932)

L: distance horizontale de déplacement du sommet de la cicatrice à la fin du dépôt

H : distance verticale correspondant à L

LG : distance horizontale de déplacement entre le centre de masse du sommet de la cicatrice et la fin du dépôt.

H_G : distance verticale correspondant à L_G

V : volume du dépôt

$m = f = \tan \phi = (H_G/L_G)$ $f = \tan \phi_f = (H/L)$

ϕ_f = Farböschung

Relation propagation volume

$$\mu = f = \frac{H}{L} = 4.209 \cdot V^{-0.157}$$

D'après Scheidegger (1973)

L'incertitude sur la prédiction: exemple de prédiction dans la catastrophe de Pusa (Fan et al., 2019)

- Le 28 août 2017, un énorme glissement de terrain en Chine a provoqué l'effondrement de 500 000 m³ de roches, entraînant 800 000 m³ de débris d'une épaisseur allant jusqu'à 4 mètres. La catastrophe a fait 26 victimes et neuf personnes sont toujours portées disparues.
- Cet exemple illustre le problème de la prévision, en particulier pour la propagation et dans les zones peuplées.

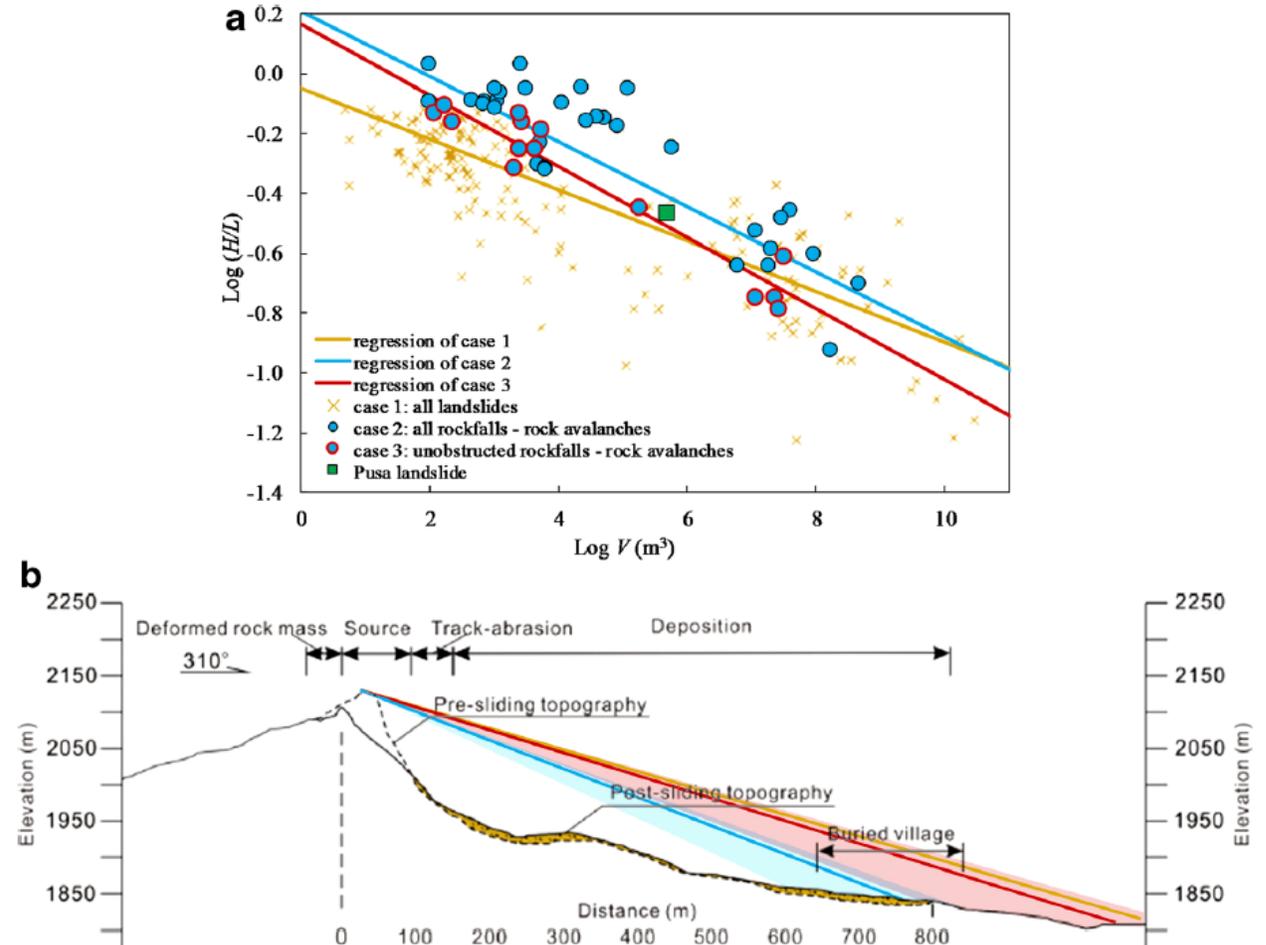
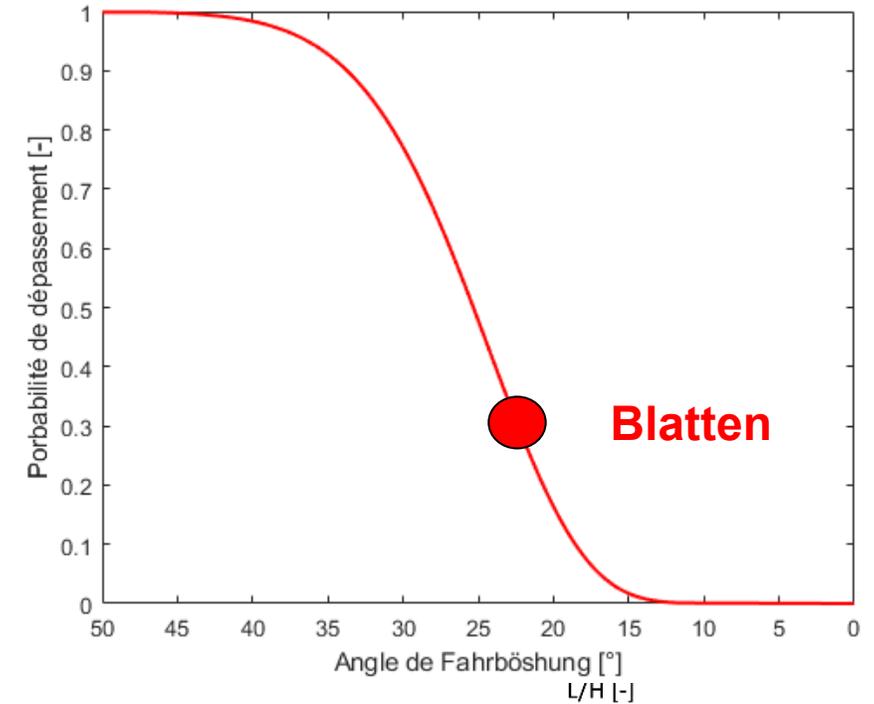
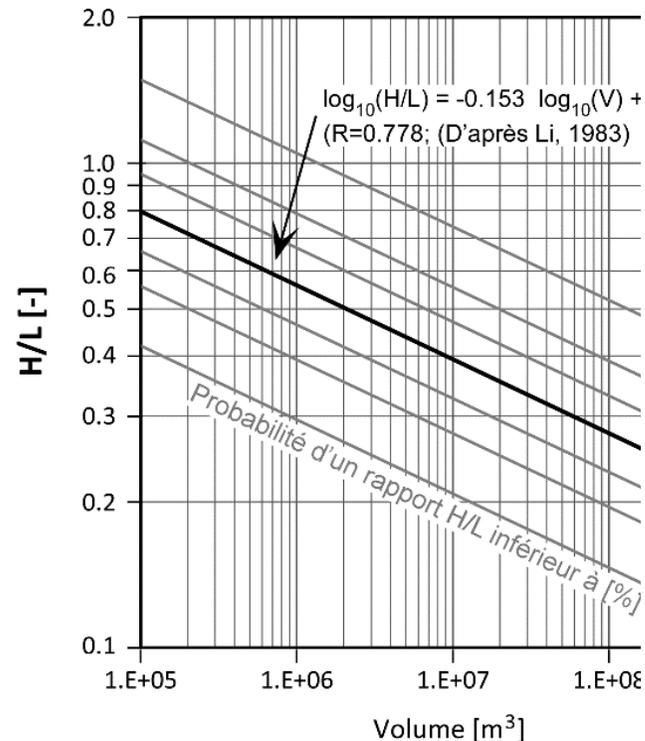


Fig. 14 a Relations between angle of reach and landslide volume, after Corominas (1996). The Pusa avalanche is indicated by a green marker. b Simple predictions of landslide runout based on the angle of reach and on the estimated landslide volume (b). Blue and red shadows represent the variation of expected reach of a landslide with volume ranging from 10⁵ to 10⁶ m³, using, respectively, the generic regression for rockfalls and rock avalanches, and the regression for unobstructed rockfalls and rock avalanches

Exemple de calcul de l'incertitude sur la propagation des avalanches rocheuses

Tiré de McDougall et al. (2012) :

« Exemple de la méthode volume-Fahrböschung pour les avalanches rocheuses basées sur les résultats de régression présentés par Li (1983). (a) Tracé log-log traditionnel du volume en fonction de H/L montrant les intervalles de confiance de la prédiction. (b) Représentation alternative montrant la probabilité d'excédance prédite du rapport inverse L/H soit d'excéder la distance médiane prédite, pour les avalanches rocheuses de volumes donnés. »

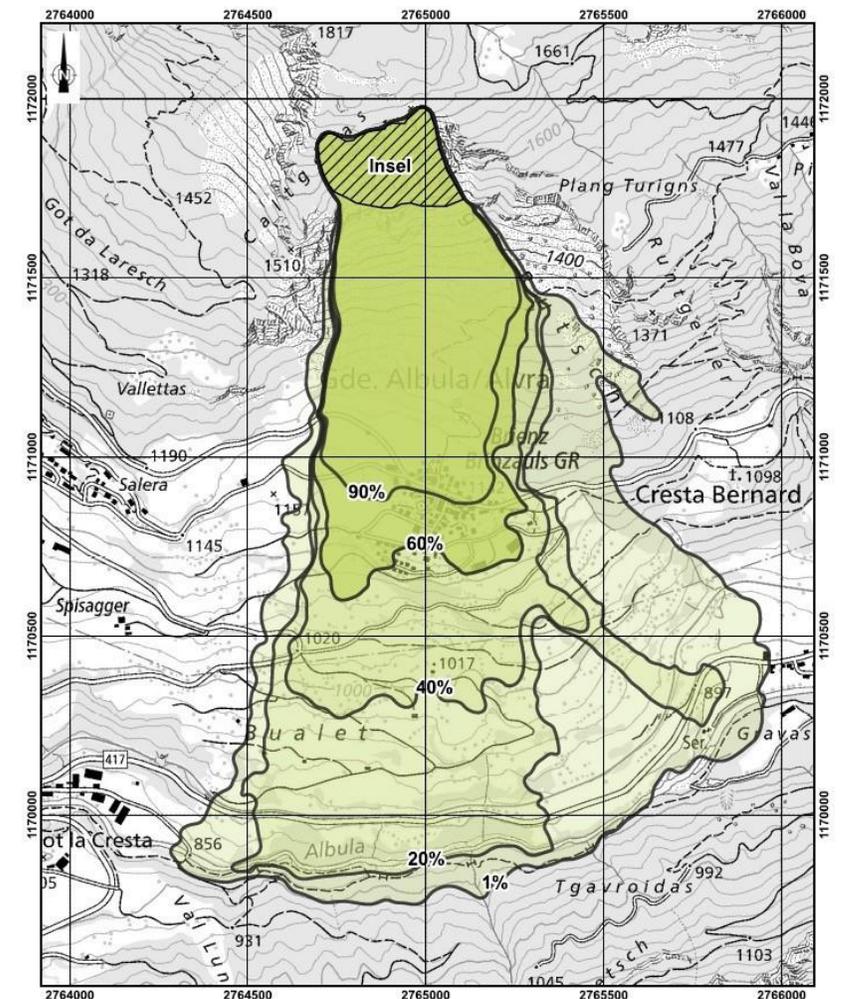
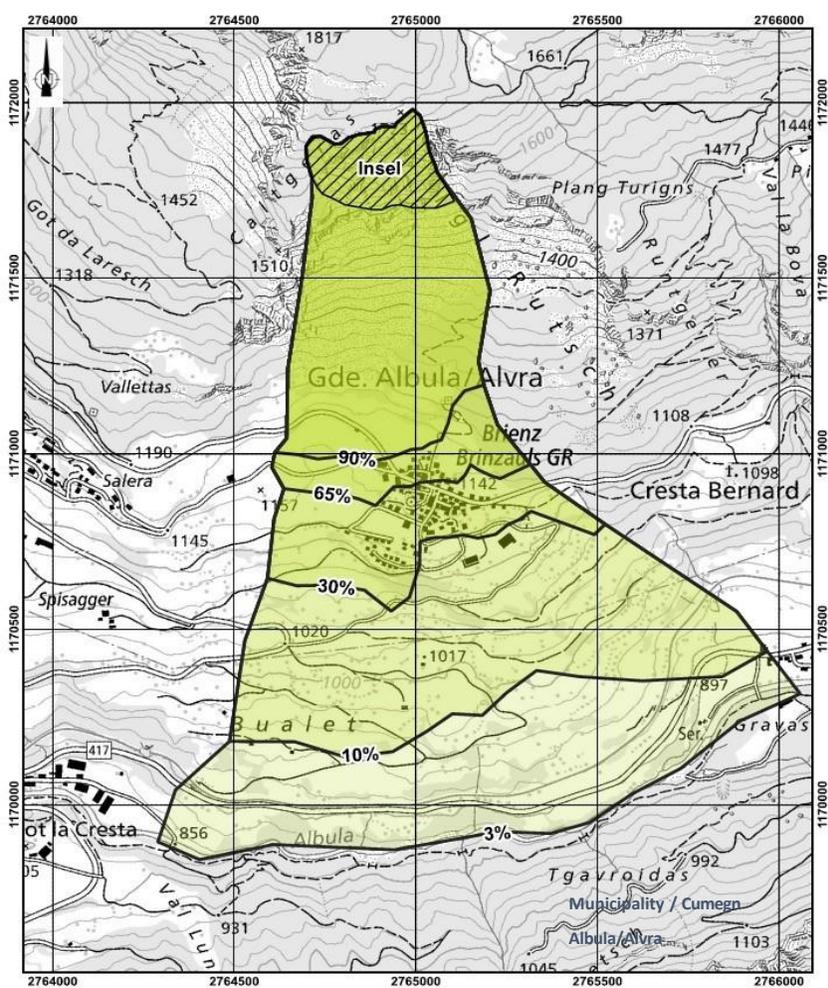


Une première estimation de la Fahrböschung indique environ 22.5° pour la remontée et pour l'extrémité du dépôt partant du sommet des éboulis, ce qui correspond à la prédiction utilisant la formule de Scheidegger (1973)

Impact de la rupture de l'«Insel» à Brienz



www.brienzer-rutsch.ch

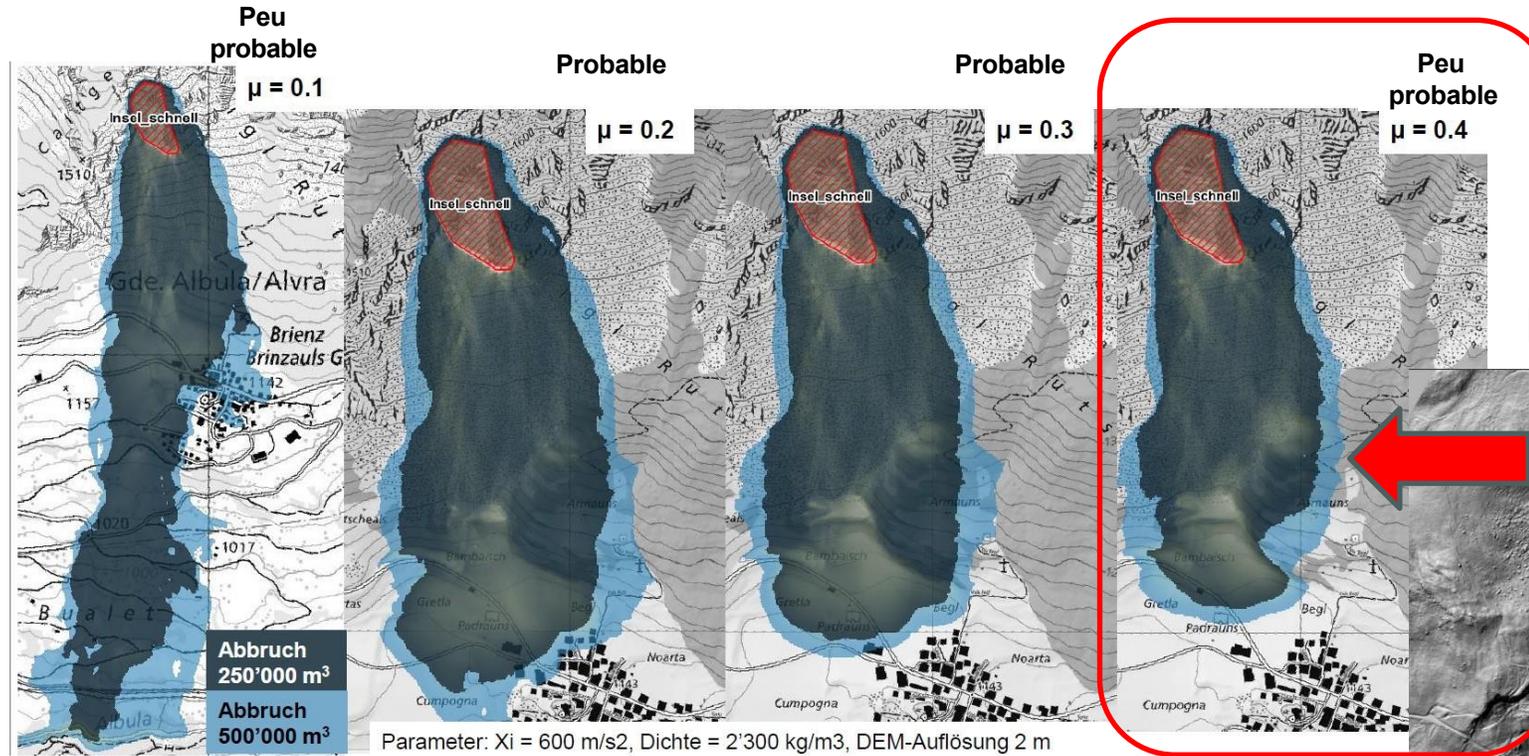


- Les avalanches de débris rocheux sont aussi destructrices que les avalanches rocheuses (malgré des vitesses nettement inférieures)
- Carte des probabilités d'atteindre une zone lorsque l'ensemble de l'île (1,9 million de m³) est déversé sous cette forme:
- Le village de Brienz/Brinzauls sera atteint par les masses de débris avec une probabilité de l'ordre de 30% à 90%..

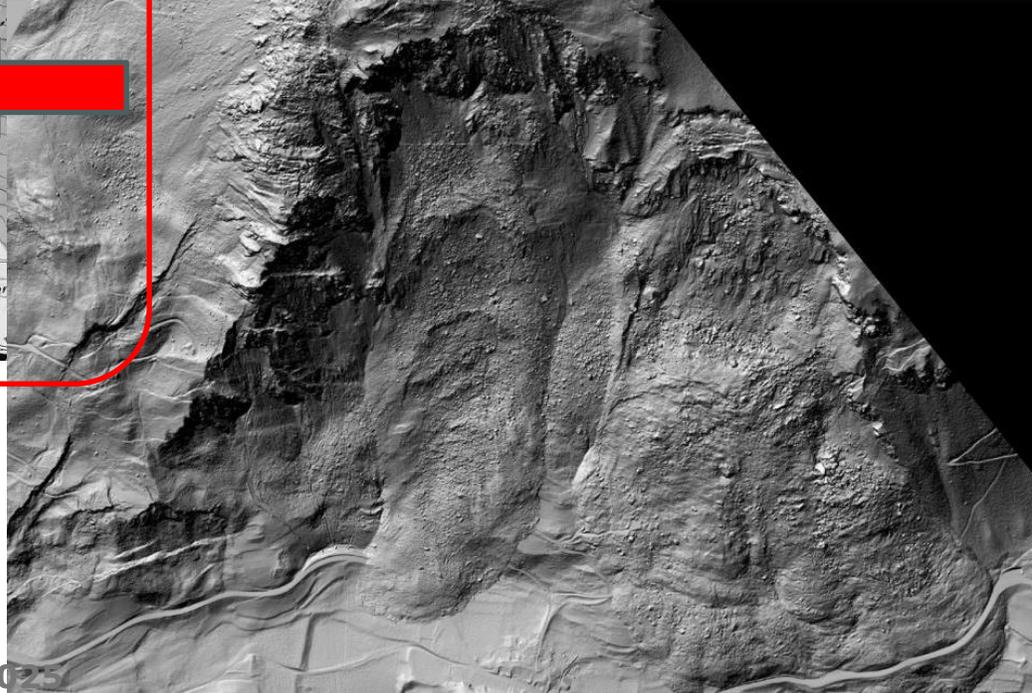
- La probabilité d'une avalanche rocheuse est la plus faible à Brienz/Brinzauls.
- Carte des probabilités d'atteindre une zone en cas de chute de l'ensemble de l'île (1.9 million de m³) sous forme d'avalanche rocheuse.
- Probabilité d'atteinte du village: 60% à 90%.
- La vallée est atteinte avec une probabilité d'environ 20%.

Impacts des propagations en fonction des masses mobilisées

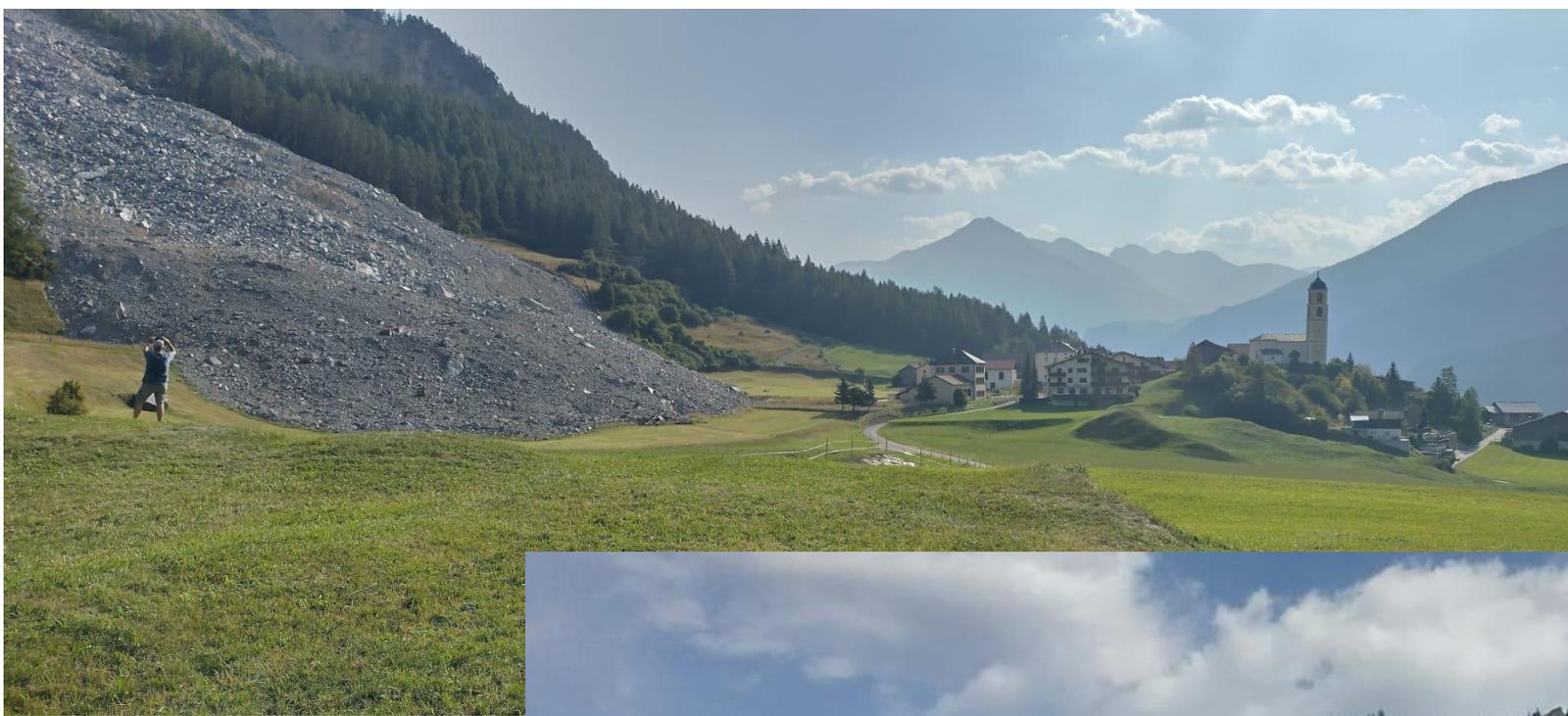
En cas de volume de 250 000 à 500 000 m³ en provenance de l'île, il est probable que la partie nord du village de Brienz soit atteinte.



Effondrement le 15 juin 2023 (1.2 M m³)



Avalanche de débris rocheux le 15 juin 2023



$1.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$



Picture A, Pedrazzini

Les incertitudes et les appréciations

Une interrogation

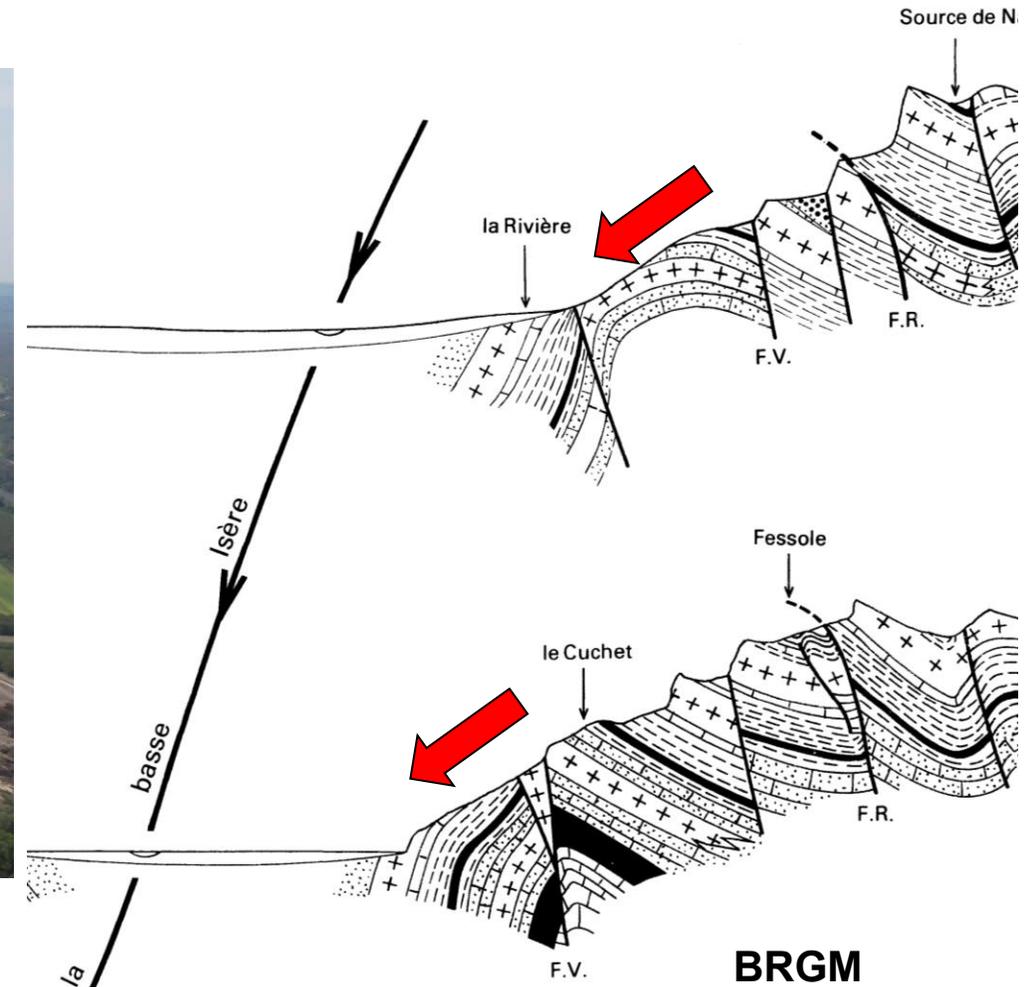
Les habitants des régions voisines de Weissenried et d'Eisten ne sont pas touchés, selon Alertswiss, l'application d'alerte du gouvernement fédéral. Ils sont situés sur le versant opposé de la montagne. En raison de la basse saison, pratiquement aucun vacancier n'est concerné (<https://www.swissinfo.ch/eng/various/imminent-landslide-threat-authorities-order-full-evacuation-of-swiss-mountain-village/89343820>)



Lieu présumé du décès (RTS)



Autre exemple: La Rivière

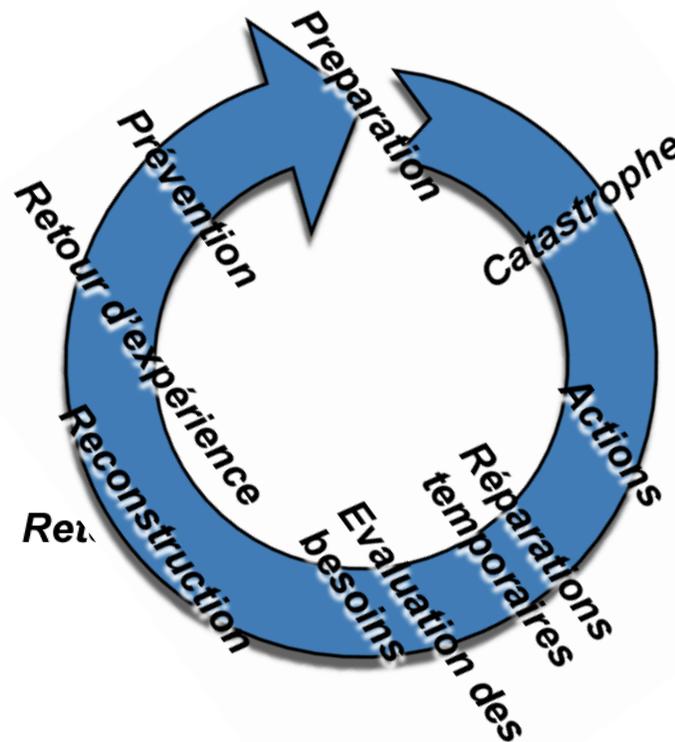
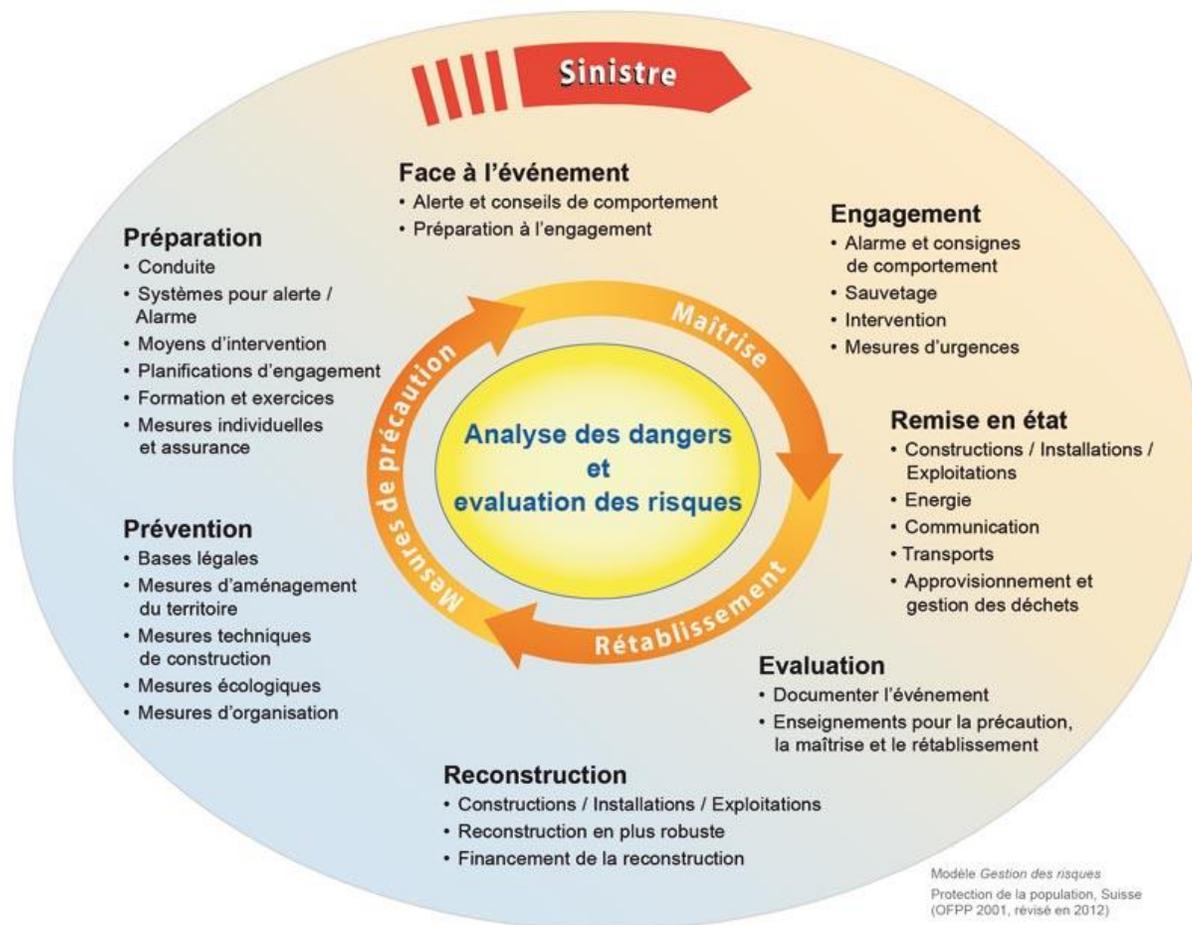


Imprécisions ou ce qui devrait être corrigé

- Blatten: l'évacuation se base sur un scénario d'avalanche rocheuse donc 22° de Fahrböschung, les effets de l'événement depuis le glacier étaient en effet moins évidents à prévoir
- Bondo: Il n'y pas eu prise en compte de la situation décrite par les autorités elles-mêmes, la cause est en justice
- Brienz: les prévisions étaient bonnes, mais le volume était plus important (1.2 Mm^3), correspond à un scénario le moins probable des 4 proposés, pour 200'000 à 500'000 m^3 et $\mu=0.4$.
- Fontana: la philosophie suisse ne dresse pas de carte précise sur le territoire, ce qui induit des conflits avec l'occupation du territoire liée aux loisirs

Le cycle de la gestion intégrée de risques suisse à modifié

La gestion du risque contient de nombreux aspects



Gestion intégrale des risques : Importance pour la protection de la population et des bases d'existence. (2014). Berne: Office fédéral de la protection de la population.

Les erreurs de jugement

- **Les erreurs font partie de la gestion des risques**
 - Mais il faut savoir les reconnaître...
- Les décisions doivent être fondées sur des arguments et basées sur les faits disponibles ainsi que sur les connaissances techniques et scientifiques existantes au moment de leur prise.
- Sur cette base:

Prendre ses responsabilités, c'est s'en dégager.

Vivre en Montagne: les dommages

Dommmages dans le village de Brienz



"En raison des forts mouvements du glissement de terrain, l'infrastructure de Brienz et des environs a été sévèrement touchée, comme le montre ici la fondation en briques de la grange".

<http://btgeo.ch/index.php/projekte/aktuelle-blog/216-aktuelles-projekt-18>



"Les dommages causés aux bâtiments et aux infrastructures rendent de plus en plus visibles les effets du village touché par le glissement de terrain.

Bündner Wald, Jahrgang 74 | Dezember 2021



Conséquences sur le terrain

Pont routier cantonal à Cevio - Visletto



30JUN2024 AUTO VIC
12:04:33 MAN
UTC+2.0

EOW

26.5 COL AUTO 1025
DFLT 50 53%
FS03



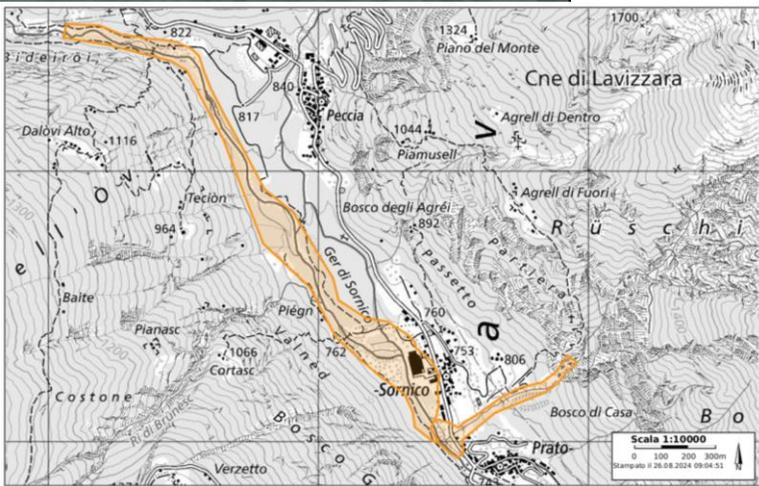
-025°



279°

ACFT
46:24:02N 191°
8:38:37E 4805FT

2467FT 102



Types de dommages

Illustration de différents impacts que peuvent produire des mouvements de terrain sur des bâtiments en fonction du contexte et du phénomène.

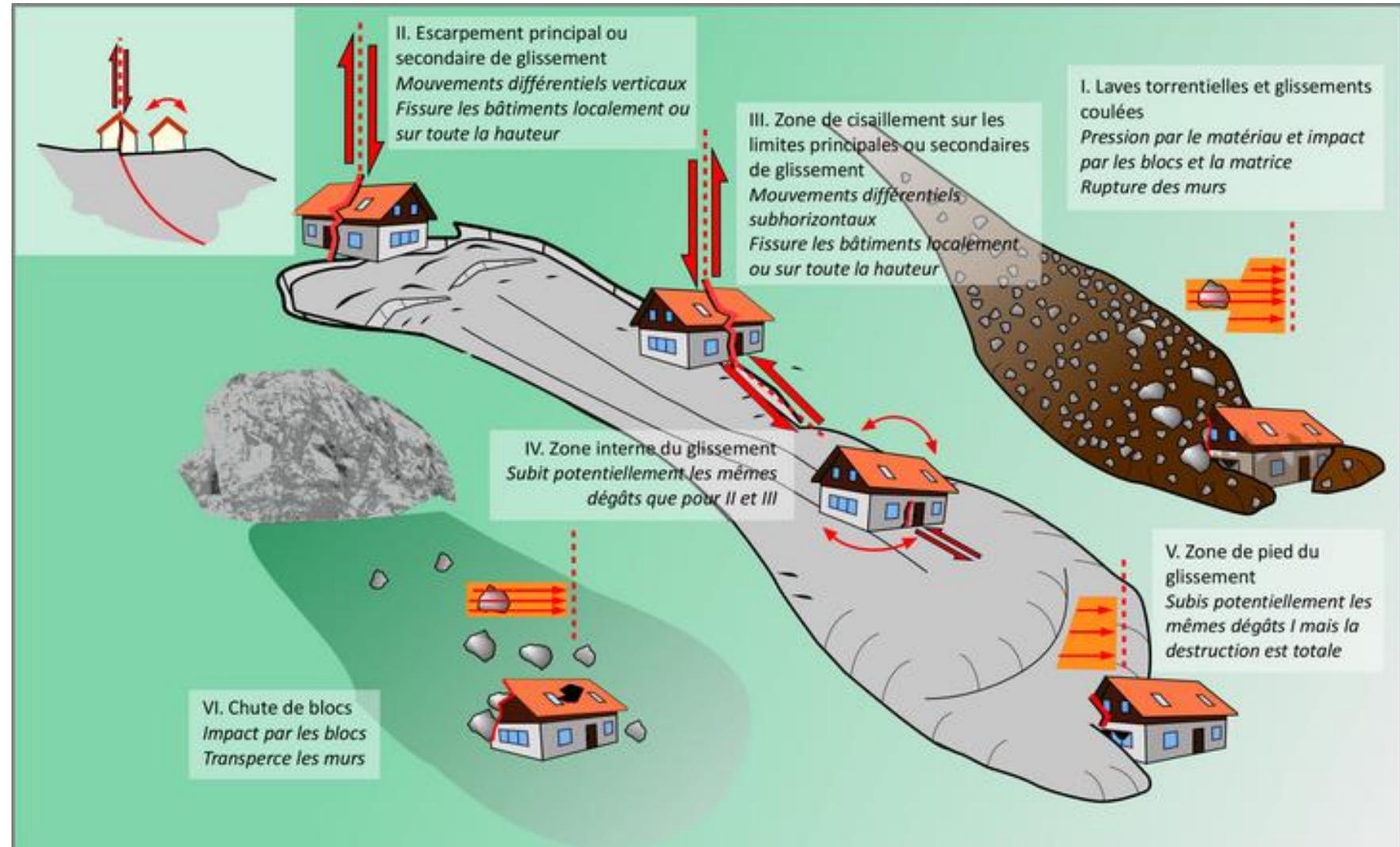
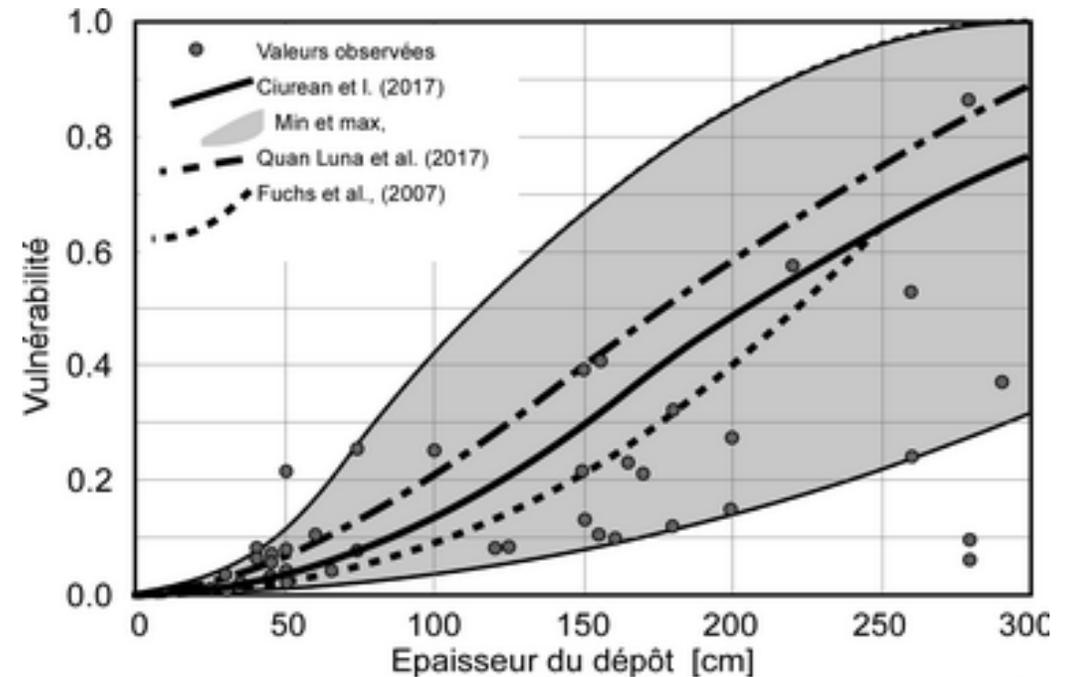
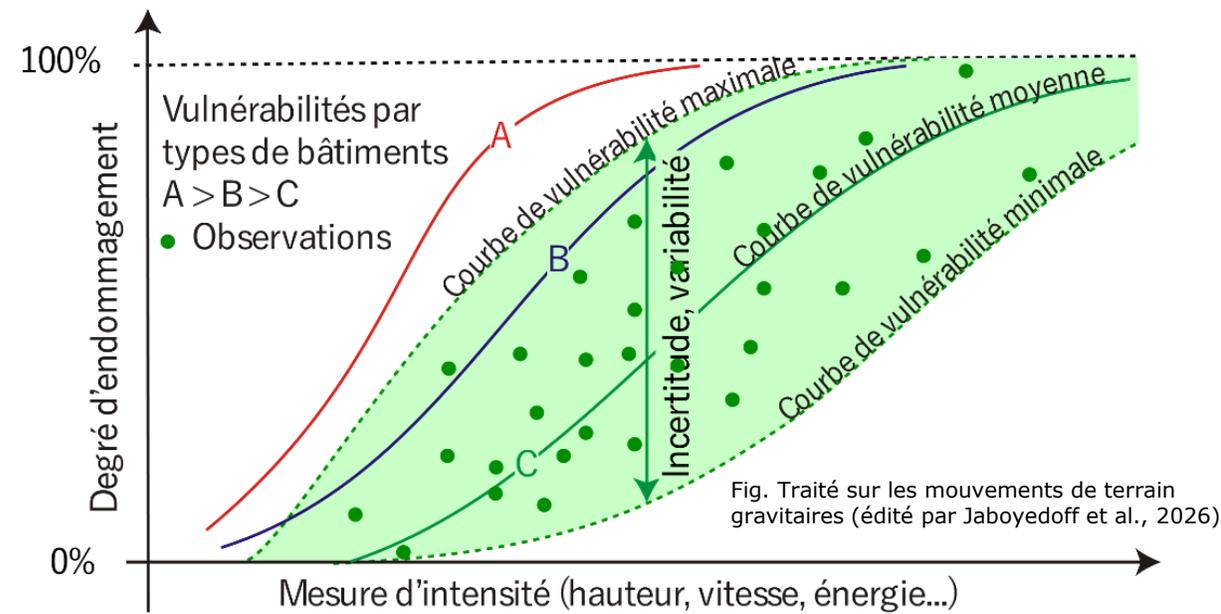


Fig. Traité sur les mouvements de terrain gravitaires (édité par Jaboyedoff et al., 2026)

Courbes de vulnérabilité

Illustration synthétique de courbes de vulnérabilité pour des types de bâtiments dont la vulnérabilité décroît de A à C. La zone verte indique la variabilité de la classe C et les points des observations.

Courbe de vulnérabilité en fonction de l'épaisseur du dépôt de laves torrentielles pour différents auteurs avec des données de Ciurean et al. (2017).



Vulnérabilité aux laves torrentielles

- A. Histogramme en nombre de cas analysé des intensités possibles pour chaque classe de dégâts par les laves torrentielles.
- B. Ajustement log normal sur les distributions d'intensité par classe. Les écarts types en logarithme sont en moyenne de 1.8, et les médianes sont égales respectivement à 0.6, 4.5, 37, 315 $\text{m}^3 \text{s}^{-2}$ et augmentent en moyen de 8.5 fois d'une classe à l'autre (modifié d'après Jakob et al., 2012).

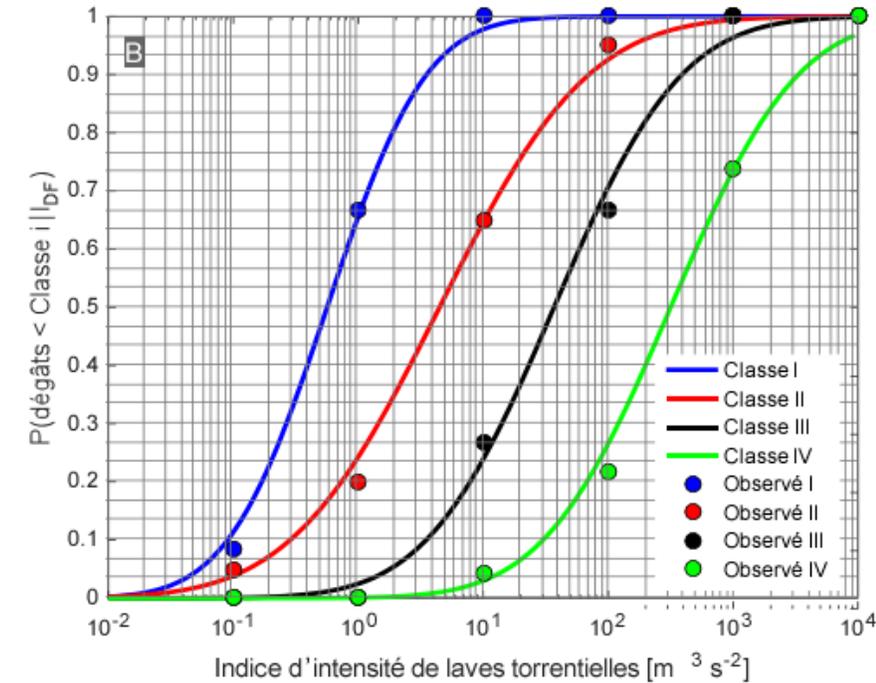
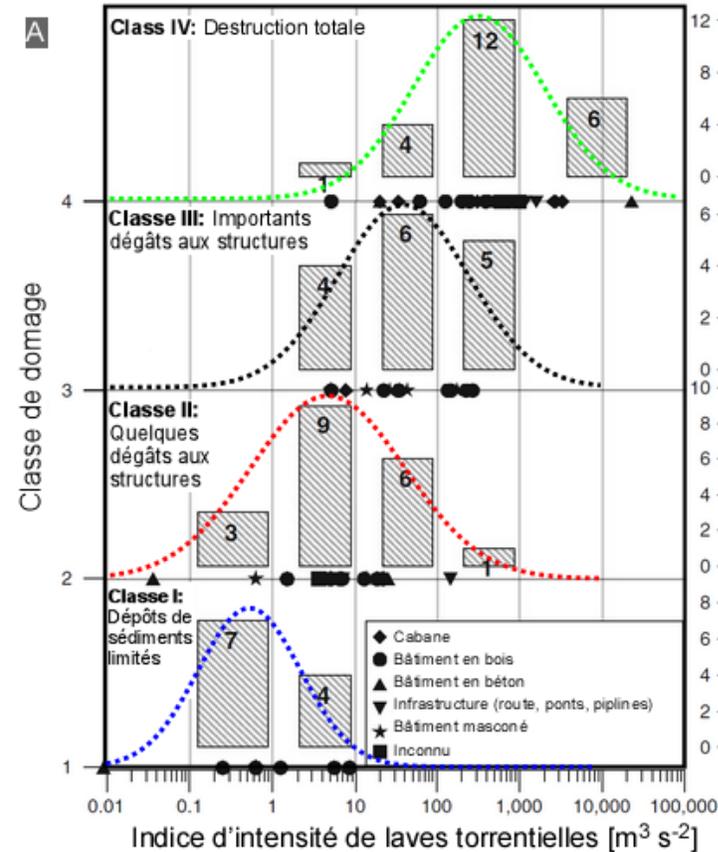


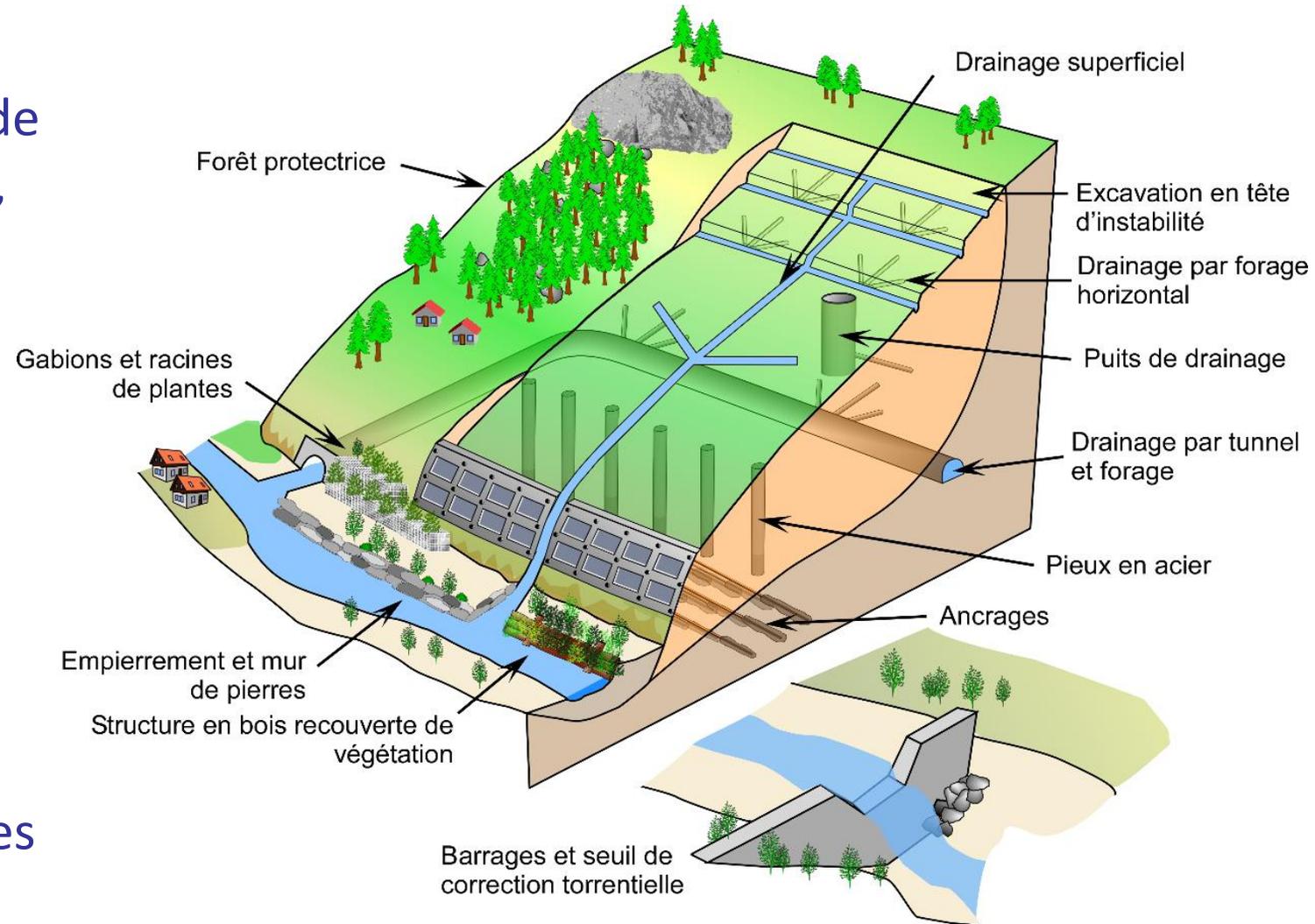
Fig. Traité sur les mouvements de terrain gravitaires (édité par Jaboyedoff et al., 2026)

$$I_{DF} = h \times v^2$$

Exemples de différentes mesures d'atténuation de mouvements gravitaires (traduit de Capobianco et al., 2025)

Il s'agit notamment de techniques de drainage à différentes profondeurs, de reprofilage des pentes, de murs de soutènement, d'ancrage, de barrages de retenue, etc. qui peuvent être combinées (modifier de <http://www.sabo-int.org/dott/landslide.html>).

Les solutions fondées sur la nature (SfN) sont de plus en plus fréquentes



Agencement d'une maison qui minimise l'exposition

L'agencement d'un bâtiment peut aussi avoir un impact sur l'exposition: il est préférable de disposer du côté des murs extérieurs menacés par des chutes de blocs ou coulées de débris, les pièces les moins occupées : salles de bain, couloir, WC, etc. (Egli, 2007), néanmoins il est important que les chemins de fuite soient préservés.

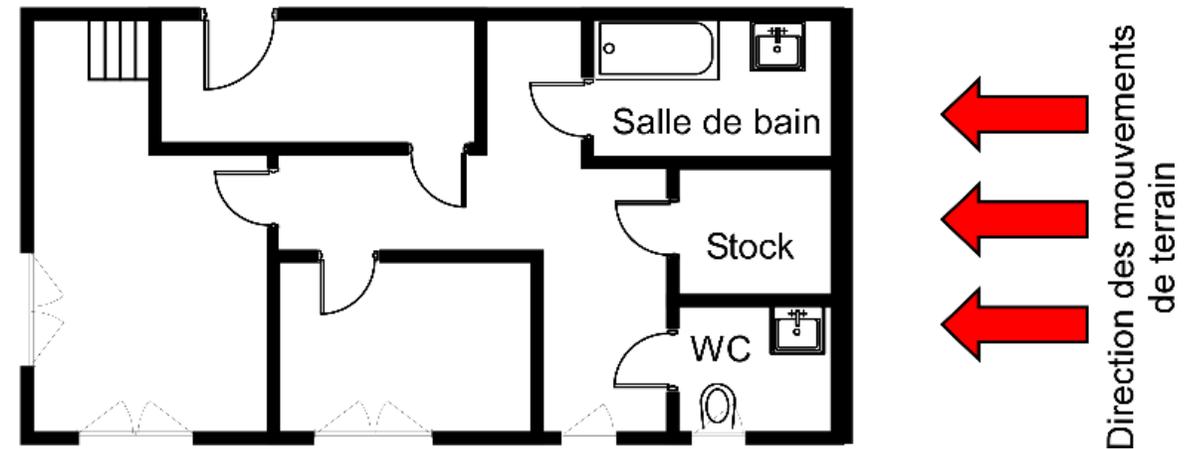


Fig. Traité sur les mouvements de terrain gravitaires (édité par Jaboyedoff et al., 2026)

Vulnérabilité et léthalité

Valeurs des vulnérabilités moyennes $Vp_b(V_b)$ selon les trois classes de **vulnérabilité Vp_i dans les bâtiments, dont la troisième équivaut à la léthalité**, et en fonction de la vulnérabilité des bâtiments V_b . La colonne [%] indique les proportions relatives parmi les personnes atteintes pour chaque Vp_i . La probabilité totale d'être atteinte pour une personne se trouve à la colonne (1)+(2)+(3) (modifié d'après Ragozin et Tikhvinsky, 2000 et Li et al., 2010).

$$Vp_b(V_b) = \sum_{i=1}^3 Vp_i \times P_{ai}(V_b)$$

Degré d'atteinte des personnes									
V_b	(1) légèrement		(2) gravement		(3) tué		(1) + (2) + (3)	Vp_b	
	$P_{a1}(V_b)$ [%]		$P_{a2}(V_b)$ [%]		$P_{a3}(V_b)$ [%]		Prob.		
	$Vp_1= 0.2$		$Vp_2= 0.8$		$Vp_3= 1.0$				
0.1	0.0012	85.7%	0.00016	11.4%	0.00004	2.9%	0.00140	0.0004	
0.3	0.0138	85.7%	0.00184	11.4%	0.00046	2.9%	0.01610	0.0047	
0.5	0.0686	85.7%	0.00914	11.4%	0.00229	2.9%	0.08003	0.0233	
0.7	0.2229	85.7%	0.02971	11.4%	0.00743	2.9%	0.26004	0.0758	
0.9	0.3900	54.5%	0.22000	30.8%	0.10500	14.7%	0.71500	0.3590	
1	0.4000	40.0%	0.40000	40.0%	0.20000	20.0%	1.00000	0.6000	

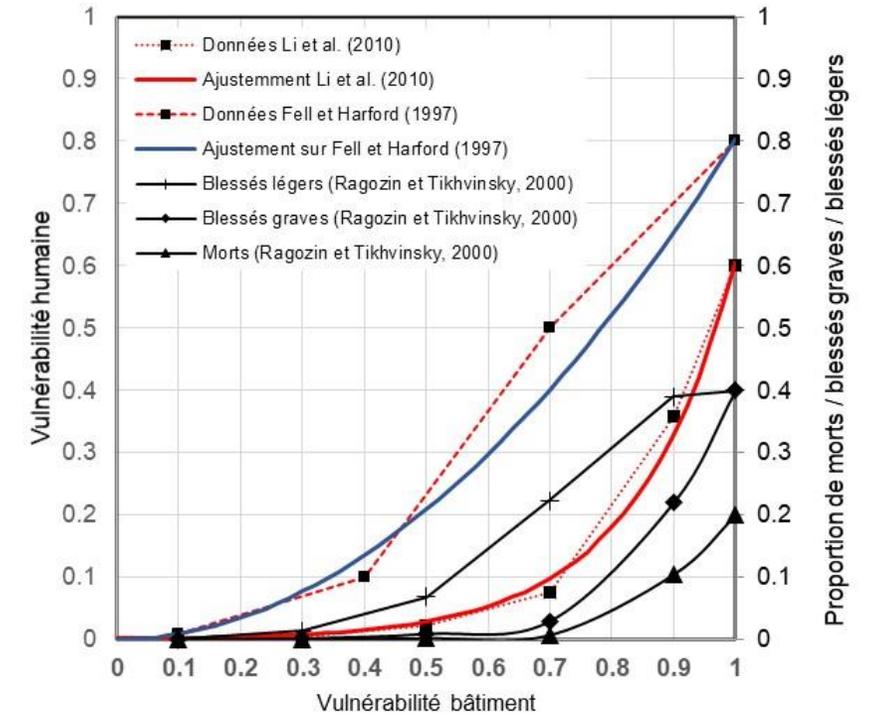


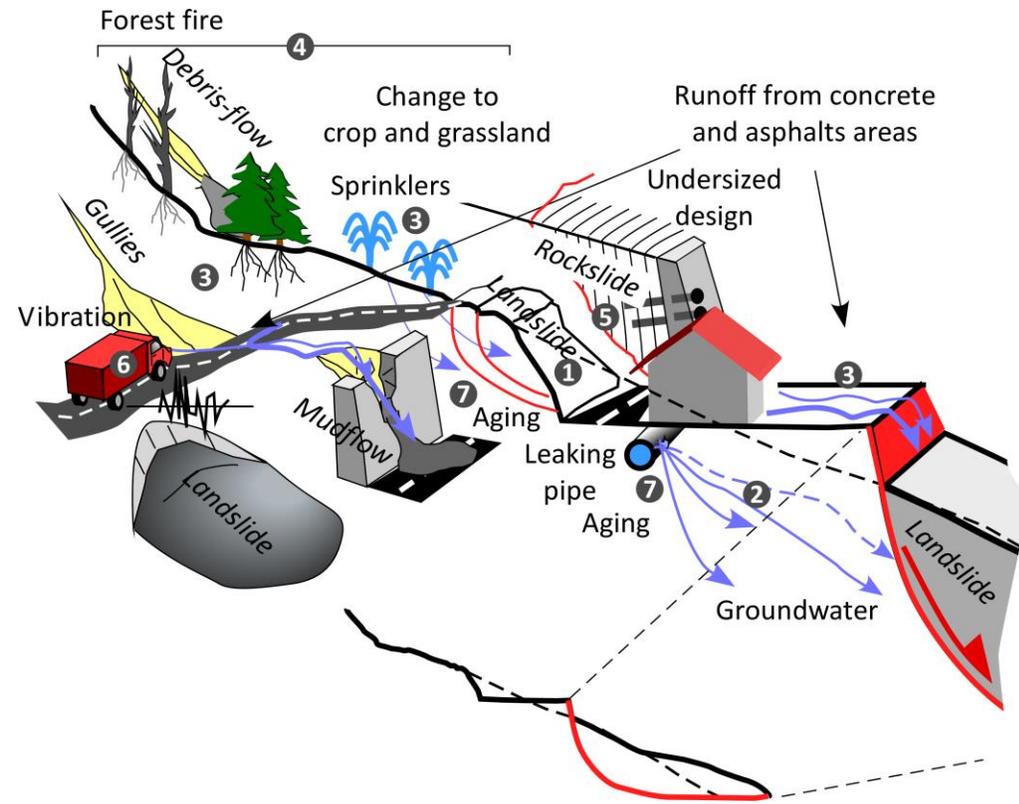
Fig. Traité sur les mouvements de terrain gravitaires (édité par Jaboyedoff et al., 2026)

Vulnérabilité des personnes dans des bâtiments et proportion de blessés et morts correspondants.

Les mouvements de terrain induits par l'humain (MTIH): un besoin de réduction des risques

Les 7 types de changements (chiffres) qui peuvent conduire à une MTIH (italique), et certaines caractéristiques importantes conduisant à la déstabilisation (Modifié d'après Sidle et Ochiai, 2006).

7 changements ou actions d'origine humaine pouvant affecter la stabilité des talus. Les entrées secondaires ont été principalement inspirées par les "modes d'action" de Terzaghi (1950). Elles doivent être considérées comme des exemples (Modifié d'après Jaboyedoff et al., 2016).



1. Reprofilage de talus
a. Remblais ; c. Excavations ; d. Travaux de construction ; e. Travaux d'excavation ; f. Terril
2. Perturbation de l'écoulement des eaux souterraines et changements rapides de la pression interstitielle
a. Fuites de canalisations ; b. Lac de barrage ; c. Fuites dans des anciens réseaux de canalisation ; d. Rupture de canalisations.
3. Modifications de l'écoulement des eaux de surface
a. Système de drainage déficient ; b. Détournement de la rivière
4. Les changements d'affectation des parcelles et la dégradation des sols ;
a. Déforestation ; b. Feux de forêt ; c. Urbanisation
5. Structures artificielles inappropriées
a. Mur de soutènement inapproprié ; b. Rupture d'infrastructure
6. Vibrations et explosions
a. Dynamitage ; b. Trafic intense.
7. Le vieillissement et la dégradation des infrastructures
a. Affaiblissement d'un mur en terrasses ; b. Remplissage de barrages de retenue torrentielle.

Vivre en Montagne: aspects sociaux

- Gestion des risques intégrée
- WtP
- Hyper com

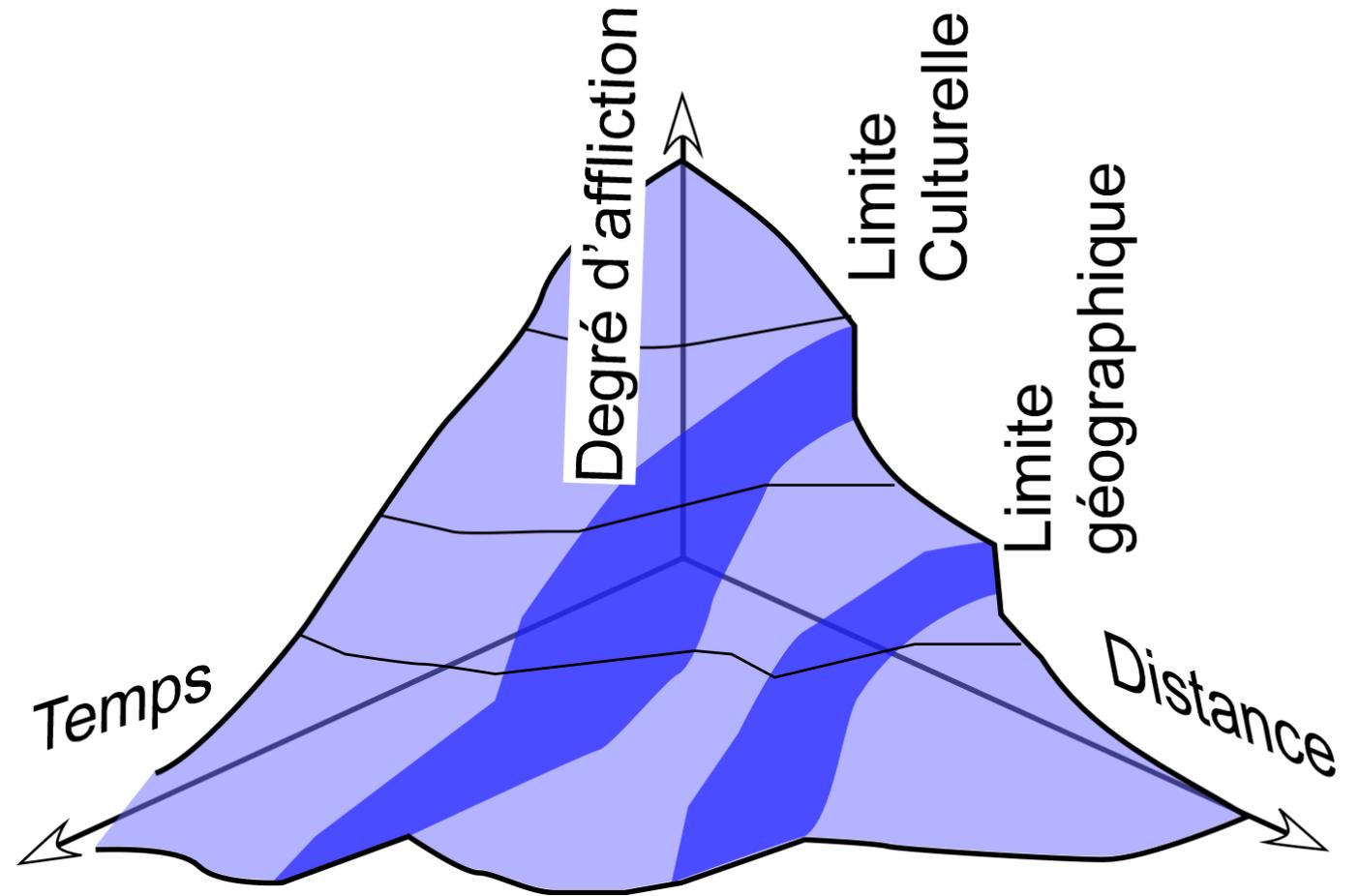
Degré d'affliction: Jusqu'où peut-on être concerné par les catastrophes?

Petit Robert:

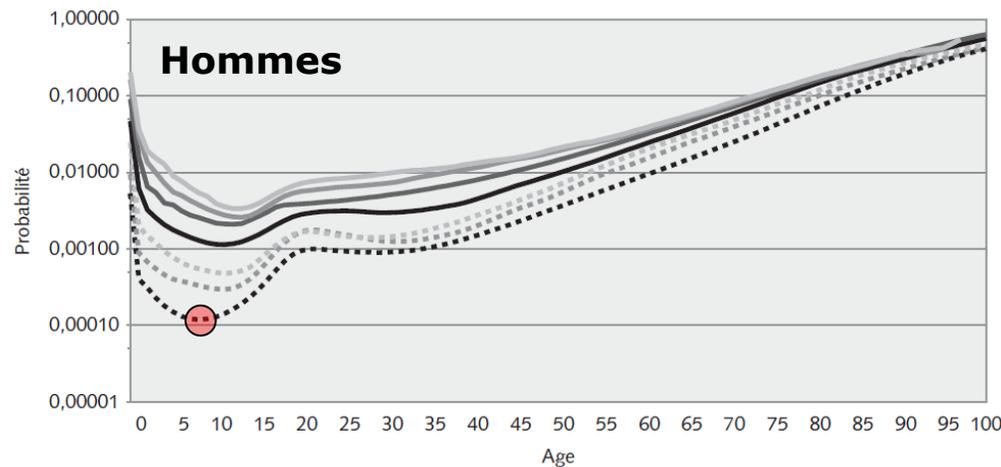
affliction n. f.

- 1050; bas lat. *afflictio* → affliger
- ◆ Littér. Peine profonde, abattement à la suite d'un coup du sort, d'un grave revers. P détresse, tristesse.
Être plongé dans une profonde affliction. « De l'accablement on monte à l'abattement, de l'abattement à l'affliction » (Hugo).

Cela s'apparente au concept de «Santé comportementale, mais avec un sens plus large (Behavioral Health: HHS disaster behavioral health concept of operations. 2014)

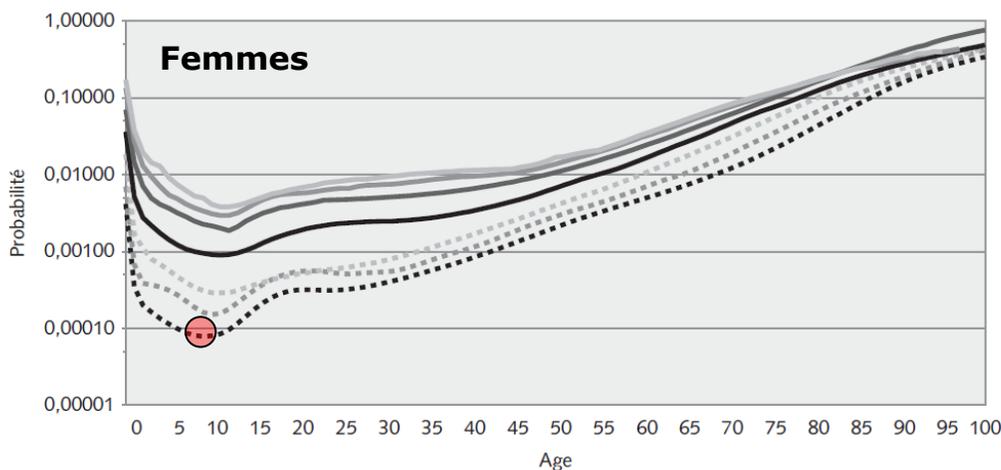


Taux de mortalité pour 100'000 par classe d'âge



- 1876/80
- 1889/00
- 1920/21
- 1939/44
- 1958/63
- 1978/83
- 1998/03

10⁻⁴



- 1876/80
- 1889/00
- 1920/21
- 1939/44
- 1958/63
- 1978/83
- 1998/03

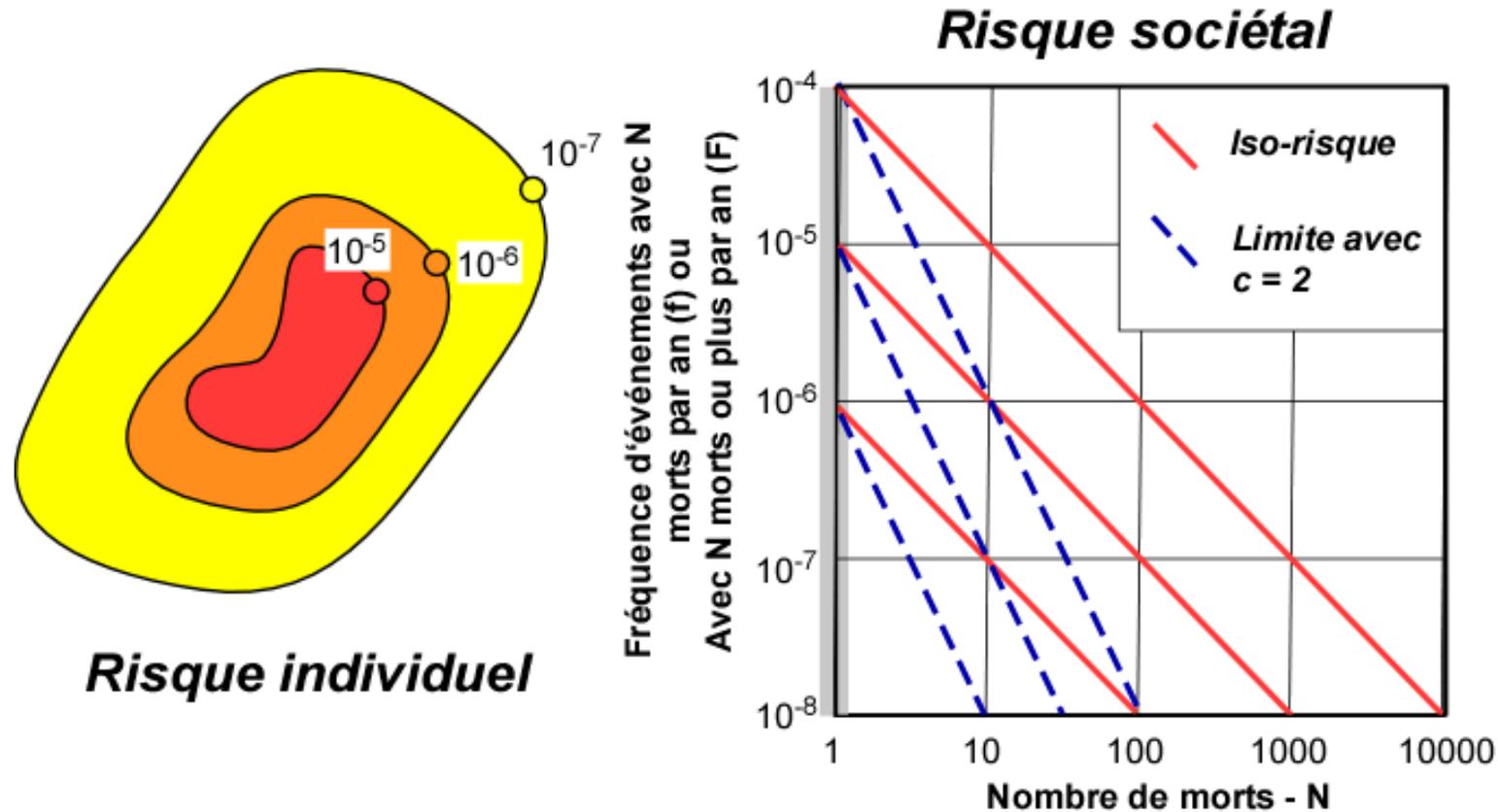
10⁻⁴

Le risque *individuel acceptable* doit être largement inférieur au risque « normal » de la vie quotidienne. Par conséquent, puisque les individus sont exposés tous les jours à des risques qui, **individuellement, sont des incréments de risque, on ne peut pas accepter que l'un d'entre eux dépasse 1% du taux de mortalité moyen**. Le taux de mortalité le plus bas étant de environ 10^{-4} , la limite pour le risque individuel acceptable vaut souvent 10^{-6} décès/an

Le **taux de mortalité le plus bas et de: $\sim 1 \times 10^{-4}$ pour la classe d'âge 5-9 ans, soit environ 0.1%** pour le risque intolérable pour une personne (taux de mortalité minimum de la courbe de mortalité (TMCM))

Kohli R., Tables de mortalité pour la Suisse 1998/2003, Office Fédéral de la Statistique, Neuchâtel, 2005, p.16

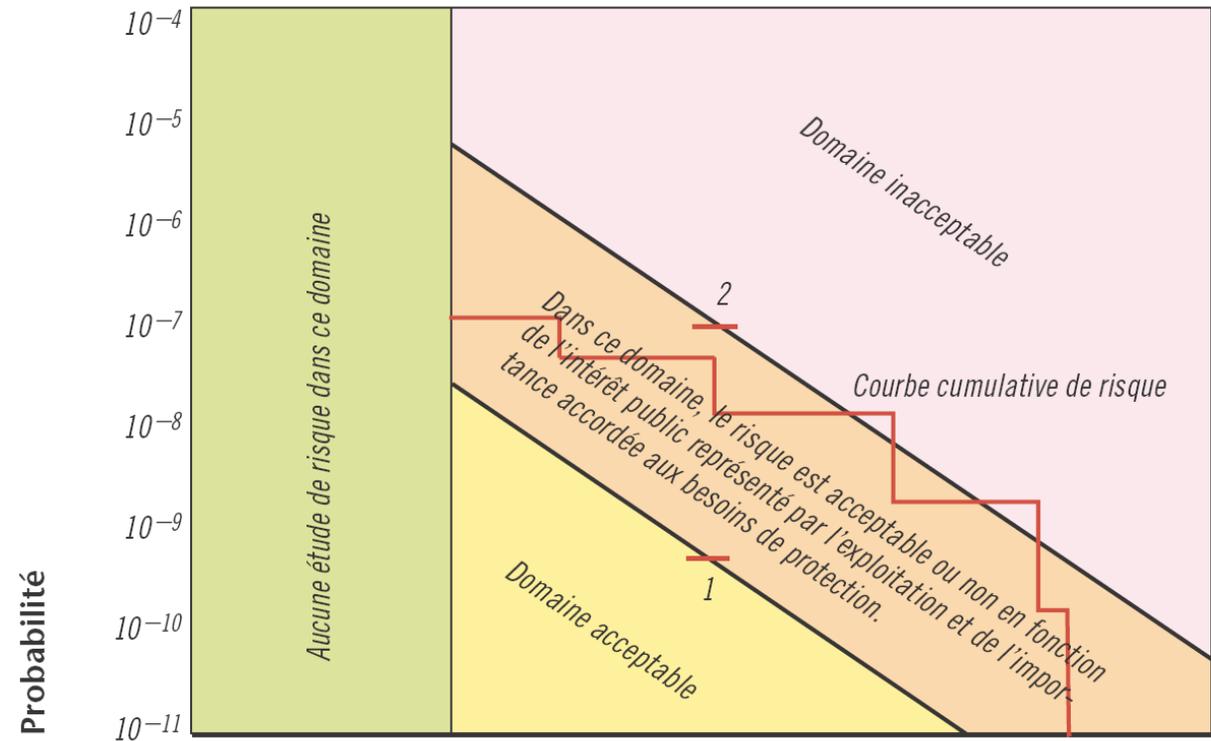
Différence entre risque individuel et sociétal (d'après Dauphiné, 2001)



- Risque individuel pour une personne qui vit 24h/24h dans un lieu. Le risque sociétal et celui qu'encourt un la société ou un groupe particulier de personnes.
- En principe on devrait multiplier le risque individuel tolérable ou acceptable par la population pour trouver l'origine des limites dans un diagramme F-N, mais ce n'est pas toujours le cas!

Risque d'accident chimique entraînant la mort de N ou plusieurs personnes: y a-t-il un sens de donné des « probabilité » qui vont au-delà de l'âge de la terre $4.5 \cdot 10^9$ ans

Selon les critères d'évaluation de l'OFEV, le risque d'un accident chimique entraînant la mort de 100 personnes ou causant 500 millions de francs de dommages n'est acceptable que si sa probabilité est inférieure à 10^{-9} par entreprise et par an. Cela correspond à un seul accident majeur tous les milliards d'années. Lorsque la fréquence calculée est supérieure à une fois par 10 millions d'années (10^{-7}), les autorités considèrent que le risque est inacceptable.



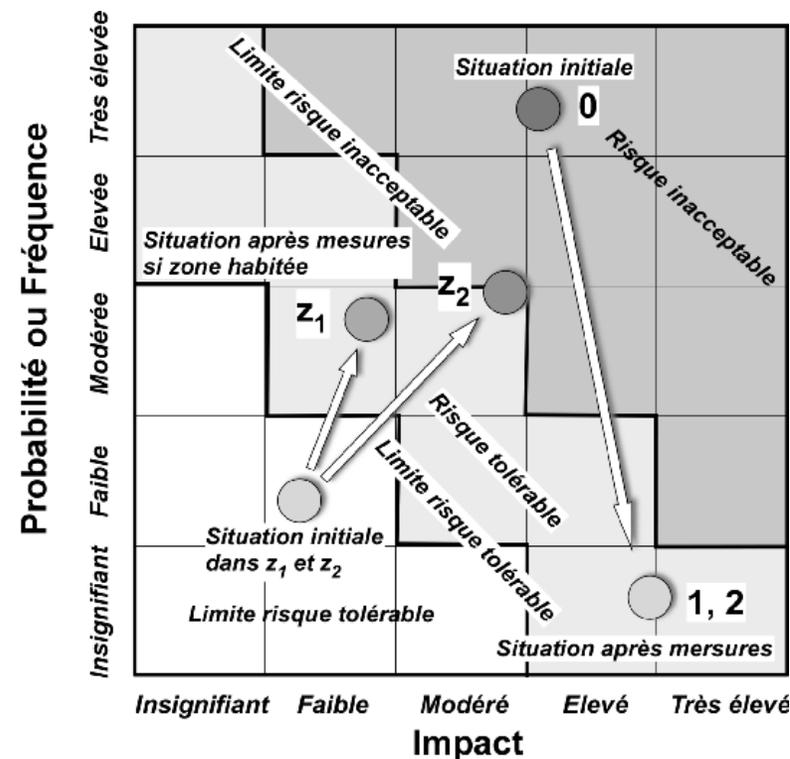
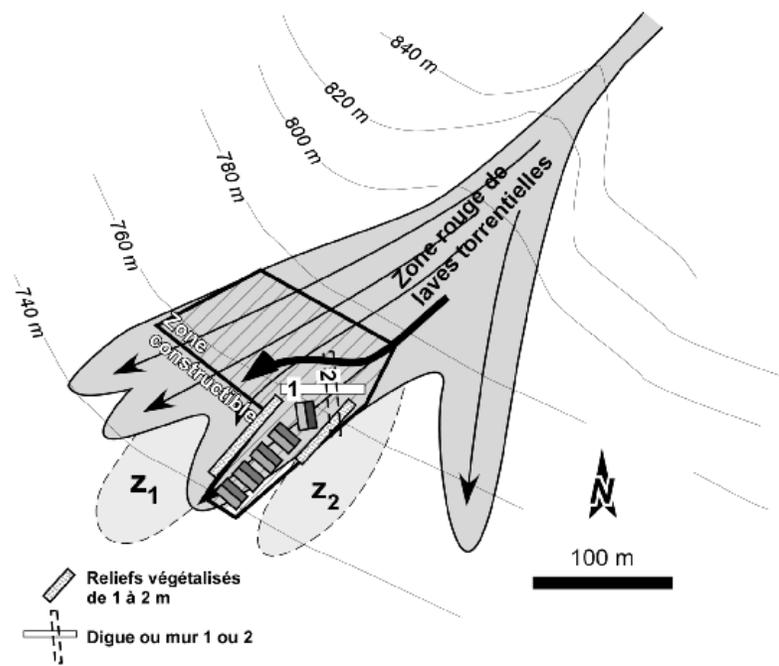
Étendue des dommages (choix de critères)

Décès	10	100	1000
Pollution d'eaux superficielles (km ²)	1	10	100
Dégâts en millions de francs	50	500	5000

From Magazine ENVIRONNEMENT 2/2006

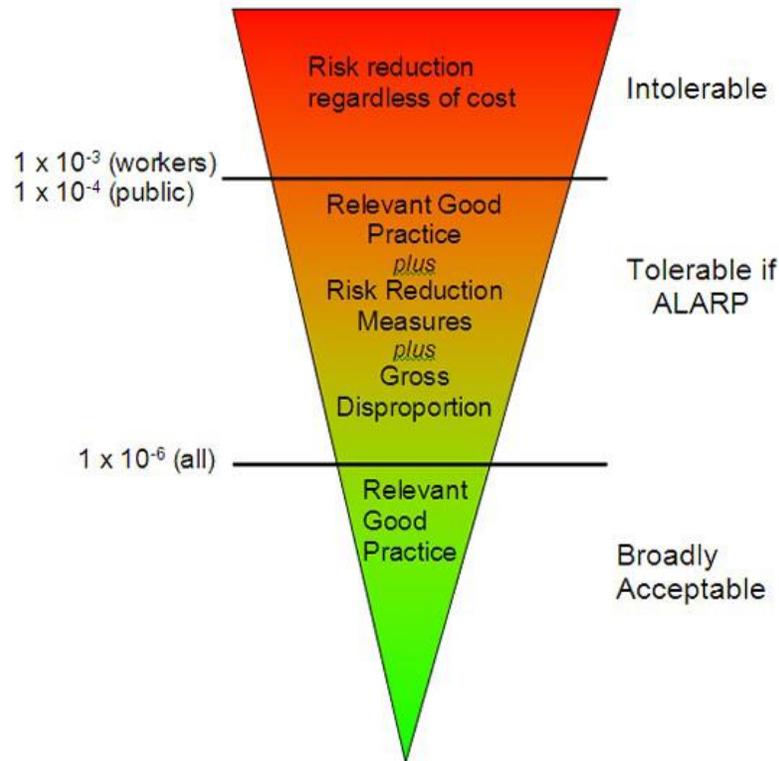
Comment représenter et communiquer l'évolution des risques dans des matrices

Exemple synthétique de zone à bâtir potentielle dans une zone d'aléa élevé et illustration des solutions proposées (z1 et z2). A droite, représentation des degrés de risque à l'aide de la matrice impact-fréquence. Le champ du risque acceptable (gris clair) est compris entre la limite de tolérance et celle d'acceptabilité (Tiré de Jaboyedoff et al., 2014).



Principe du niveau le plus bas qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre (ALARP) et questions relatives aux limites

En fixant les limites de risque pour la matrice de risque et les courbes F-N, les CFM présentent certaines faiblesses : **Co = N**



HSE (www.hse.gov.uk/)

L'échelle des risques (couleurs) n'est souvent pas cohérente (Cox, 2008). Un point situé à l'angle d'une classe peut appartenir à trois classes de risque différentes (de faible à élevé directement).

En principe, les classes de risque doivent respecter autant que possible le principe selon lequel les limites d'isorisques sont des hyperboles, c'est-à-dire $H = R/Co = R/N$.

Les diagrammes F-N sont cumulatifs, mais des courbes F-N non cumulatives sont utilisées (Framer, 1967 ; Ale et al., 2015),

Les limites F-N doivent-elles être l'intégrale de f-N (Ale et al., 2015) ?

Lors de la création de classes de risque pour les diagrammes de probabilité et de conséquences :

Les limites des classes doivent être fixées en fonction de l'une ou l'autre des remarques ci-dessus.

Ils doivent être conçus en fonction du domaine auquel ils s'appliquent, c'est-à-dire la population, la région, le pays, les infrastructures des objets, etc.

Les limites ne sont généralement pas définies par la loi et, comme indiqué ci-dessus, les règles doivent être fixées par un groupe ou un expert ou en utilisant une véritable approche participative (Mereu et al., 2007).

Traduire les souhaits des parties prenantes par des solutions techniques d'atténuation des risques (SAFELAND) (Tiré de Linnerooth-Bayer et al., 2016)

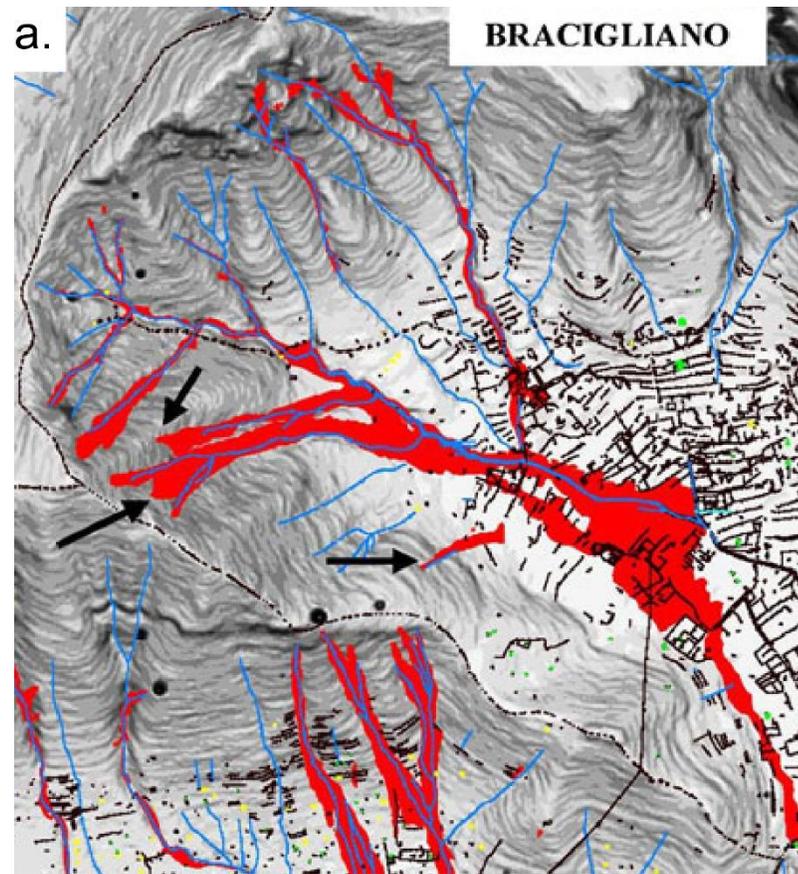
- **Compromis et non consensus.**
- Conception d'un processus participatif pour l'*atténuation* des risques de glissement de terrain

Approches participatives (d'après Linnerooth-Bayer et al., 2016)

- Les modèles traditionnels de gestion des risques, pilotés par des experts, excluent souvent l'apport des parties prenantes, ce qui entraîne des résistances et des difficultés de mise en œuvre.
- Le cas de Nocera Inferiore démontre un échange de connaissances inédit entre experts et parties prenantes, visant à coproduire des stratégies d'atténuation des risques.

Défis de la mise en œuvre: cas de Sarno

- Prendre en compte les différentes valeurs des parties prenantes et assurer une allocation équitable des ressources.
- Équilibrer la faisabilité technique et l'acceptabilité sociale des mesures, telles que la relocalisation.

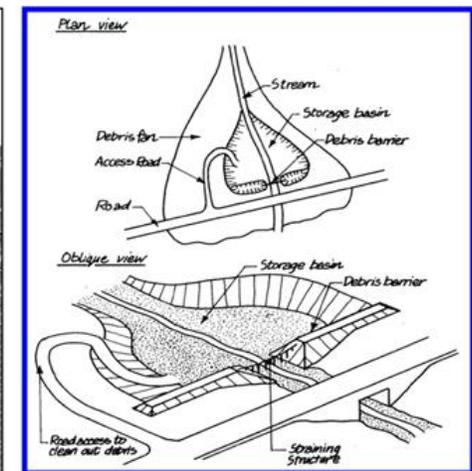
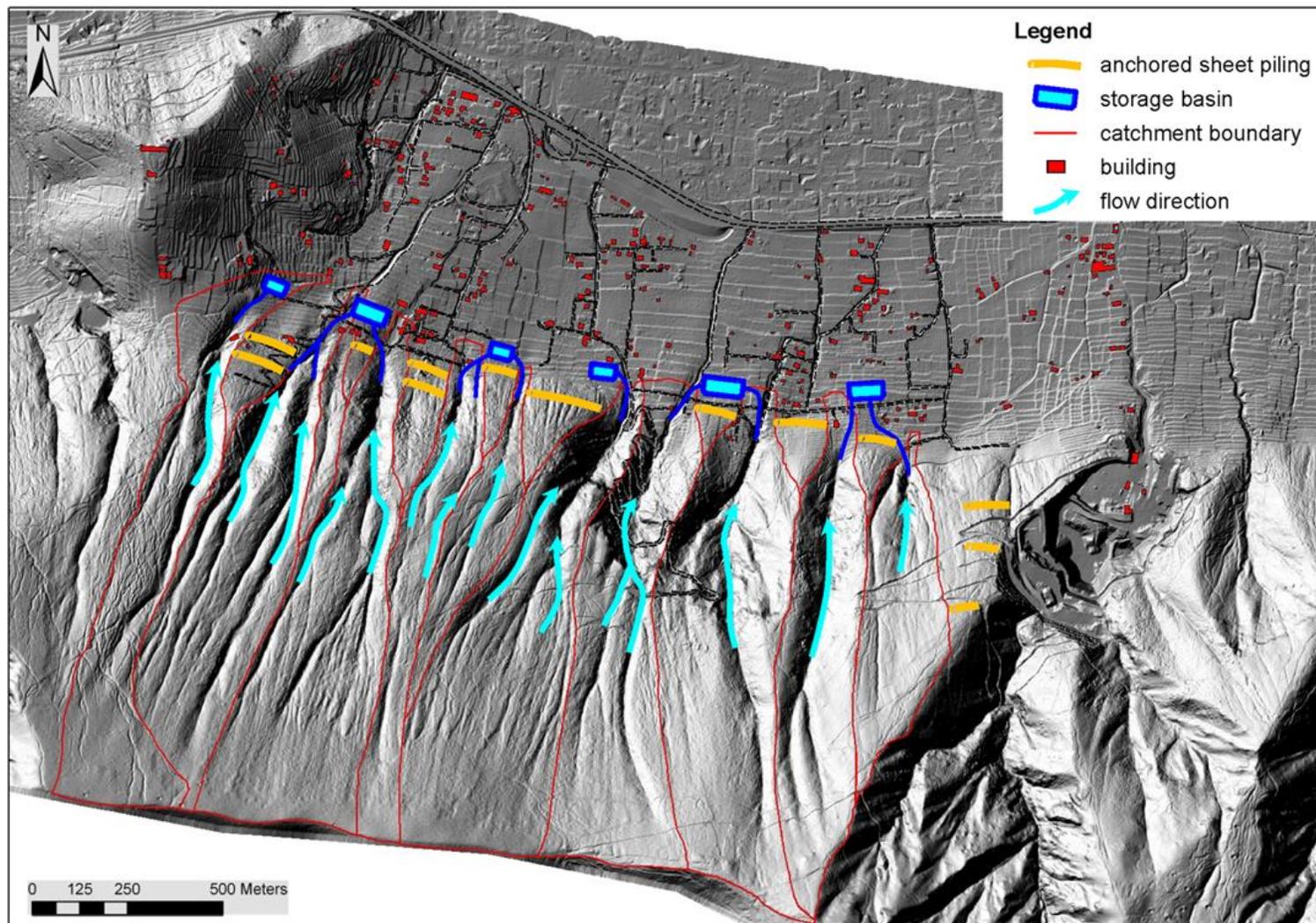


Cartographie d'avalanches de débris déclenchées affectant le village de Bracigliano (modifié de Cascini et al., 2013). B. Image de la région de Sarno en 1999 (source : Centro Documentazione, V.V.F. Napoli).

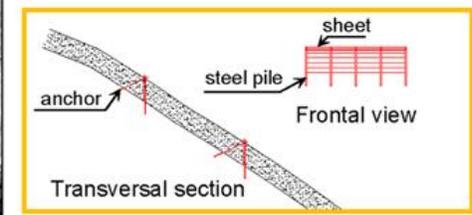
1999 → 130 victimes

Option d'atténuation des risques correspondant au discours

"la sécurité d'abord" (Tiré de Linnerooth-Bayer et al., 2016) c



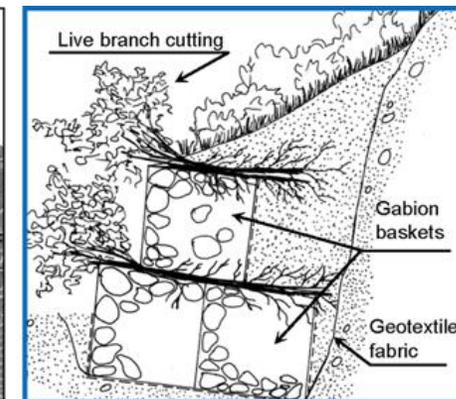
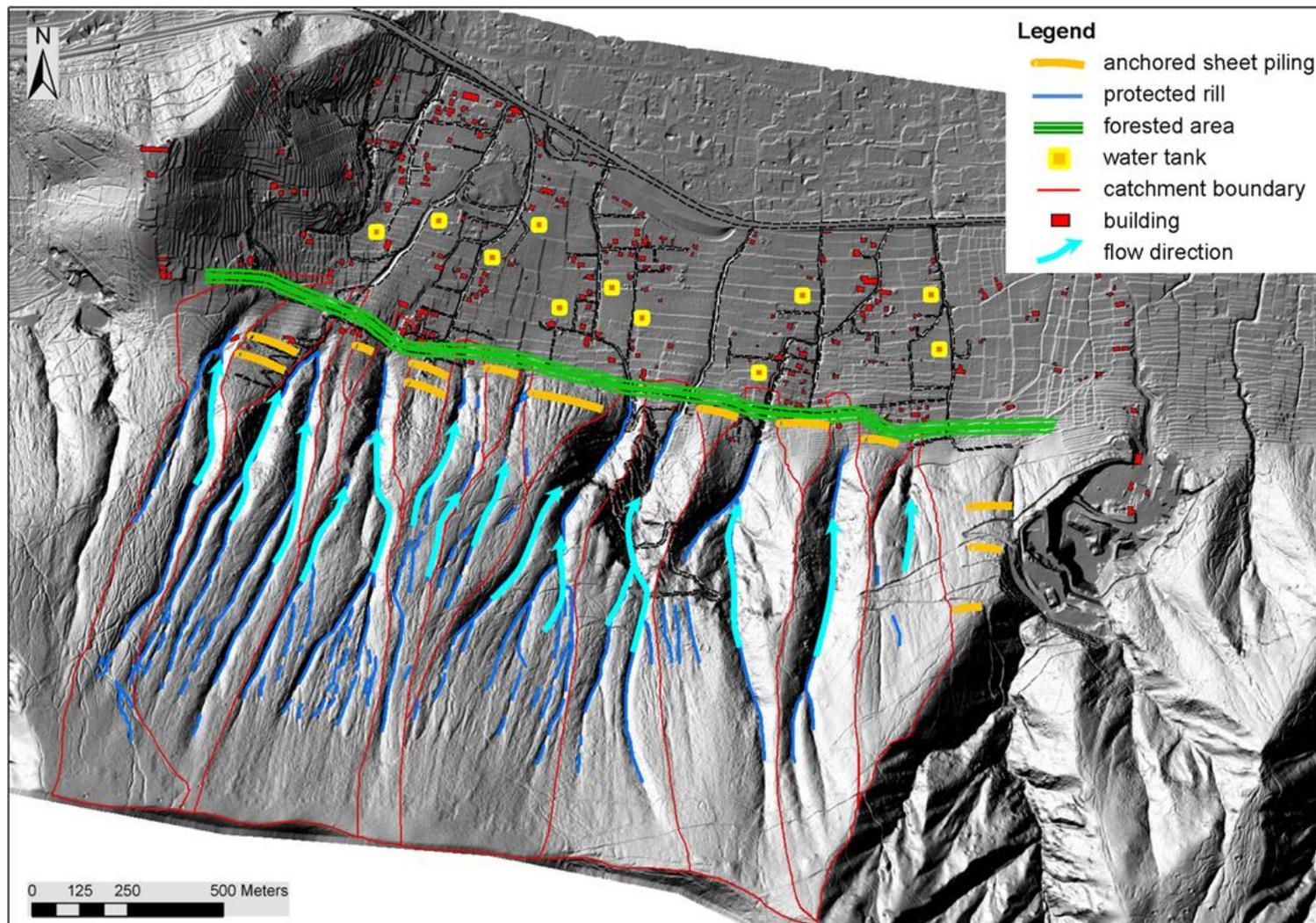
Plan and oblique view of storage basin components (from VanDine 1996)



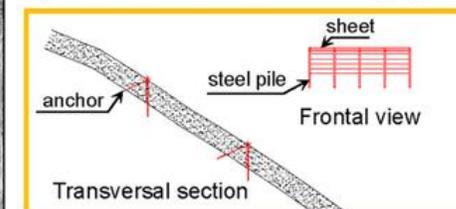
Transversal section and frontal view of anchored sheet piling

- Active control works**
 - over the open slopes
- Passive control works**
 - at the toe of the mountain
- Monitoring / Warning system**

Option d'atténuation des risques correspondant au discours sur la "gestion prudente de la montagne". (Tiré de Linnerooth-Bayer et al., 2016)



Cross section of vegetated gabion (modified from www2.ohiodnr.gov)



Transversal section and frontal view of anchored sheet piling

Active control works

- over the open slopes
- along the rills

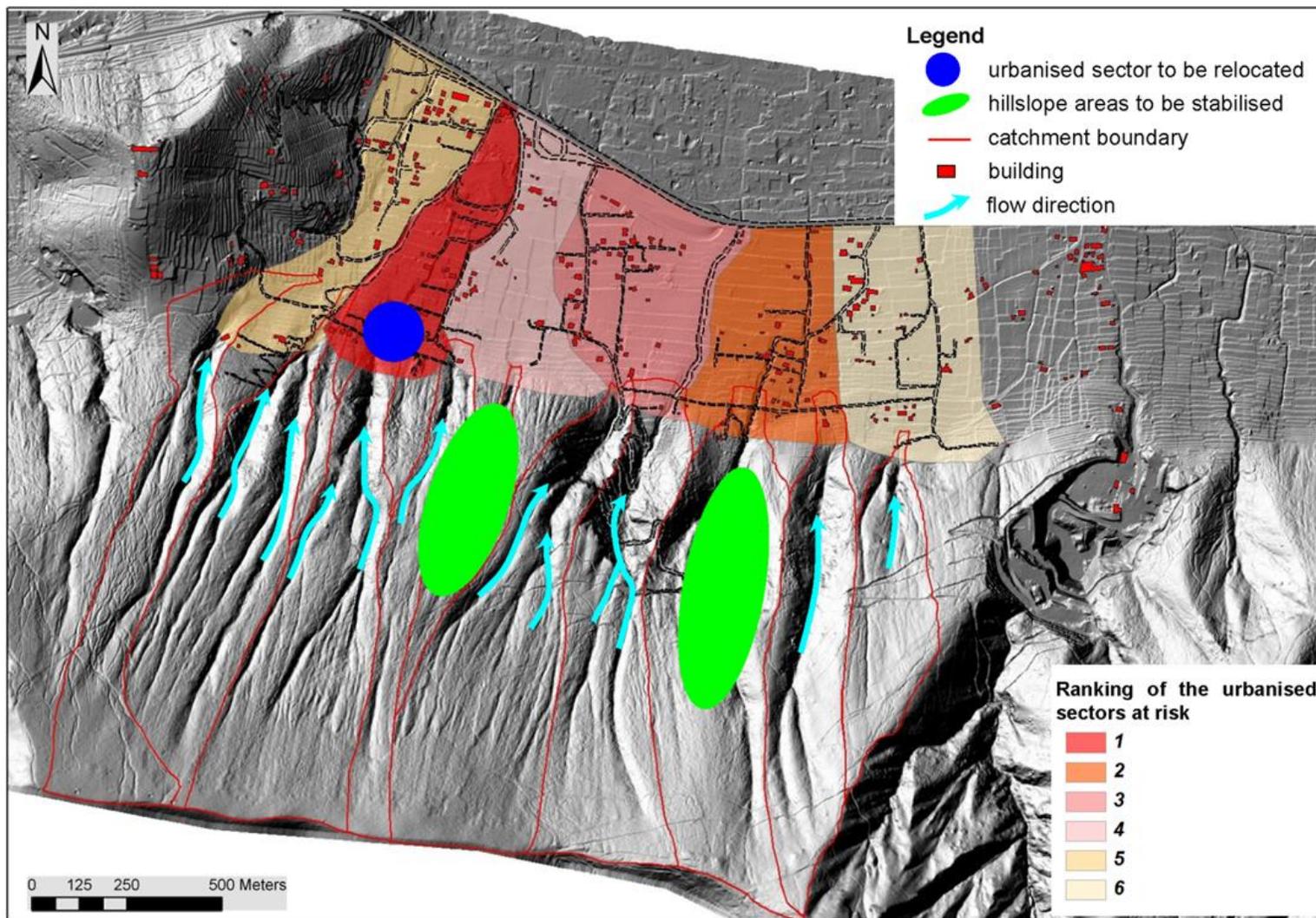
Passive control works

- in the urbanised area

Forestation

Monitoring / Warning system

Option d'atténuation des risques correspondant au discours sur la "relocalisation". (Tiré de Linnerooth-Bayer et al., 2016)



Mitigation measures

- the decision on what type of control works and where they must be localised should derive from cost-benefit analyses

Relocation

Monitoring / Warning system

Table 2 Cost estimate of the “safety first” risk mitigation option

Category	Typology	Cost [€] per typology	Cost [€] per category	Total cost [€]
Active mitigation measures	Anchored sheet piling	1,354,087	1,354,087	6,950,842
Passive mitigation measures	Storage basins	5,296,755	5,296,755	
Non-structural mitigation measures	Warning system	300,000	300,000	

Table 3 Cost estimate of the “careful stewardship of the mountain” risk mitigation option

Category	Typology	Cost [€] per typology	Cost [€] per category	Total cost [€]
Active mitigation measures	Anchored sheet piling	1,354,087	3,061,372	6,930,397
	Gabions	1,707,285		
Passive mitigation measures	Water tanks	2,000,000	2,000,000	
	Forestation	1,569,025		
Non-structural mitigation measures	Warning system	300,000	300,000	

Table 4 Costs of the “rational choice” risk mitigation option

Category	Typology	Cost [€] per typology
Active mitigation measures	To be established on the basis of cost-benefit analysis	–
Passive mitigation measures	To be established on the basis of cost-benefit analysis	–
Non-structural mitigation measures	Relocation of up to 29 households	3,480,000
	Warning system	300,000

(Tiré de
Linnerooth-Bayer
et al., 2016)

Finale : Co-construction

- Les parties prenantes sont parvenues à un compromis qui mettait l'accent sur une combinaison de mesures passives et actives, complétées par un système d'alerte amélioré. Les participants se sont déclarés satisfaits des options politiques coproduites, qui ont servi de base à leurs délibérations.

La méthode d'évaluation contingente (MEC)

- Qu'est-ce que le MEC ?
 - Une approche basée sur des enquêtes pour estimer la valeur économique des biens et services non marchands.
 - Évalue la volonté des gens de payer (WTP) pour des avantages ou d'accepter (WTA) une compensation pour des dommages.
 - Combine les concepts de l'économie du bien-être et de l'analyse coûts-bénéfices (ACB).
- Objet :
 - Quantifie les valeurs au-delà des transactions commerciales, y compris l'utilisation passive et les biens environnementaux.

Applications clés : Exemple notable : La marée noire de l'Exxon Valdez (1989)

Contexte :

La catastrophe a déversé 42 millions de litres de pétrole, affectant 2100 km de côtes en Alaska.

A tué 250 000 oiseaux de mer, 22 orques et des milliards d'œufs de poisson.

Détails de l'enquête :

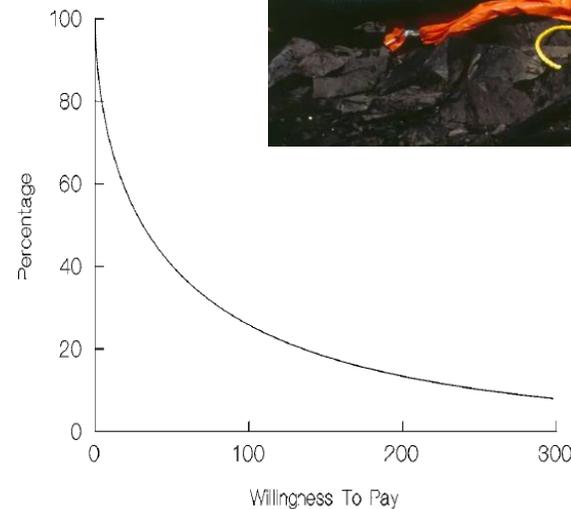
Format de la question : "Voteriez-vous en faveur d'un programme d'un coût de X dollars pour prévenir de tels dommages?"

CAP médian : 30 dollars par ménage.

Coûts totaux estimés : 7,9 milliards de dollars (en utilisant des modèles de distribution de Weibull).

Coûts réels :

Nettoyage : 3,8 milliards de dollars ; les fonds restants sont alloués à la restauration.

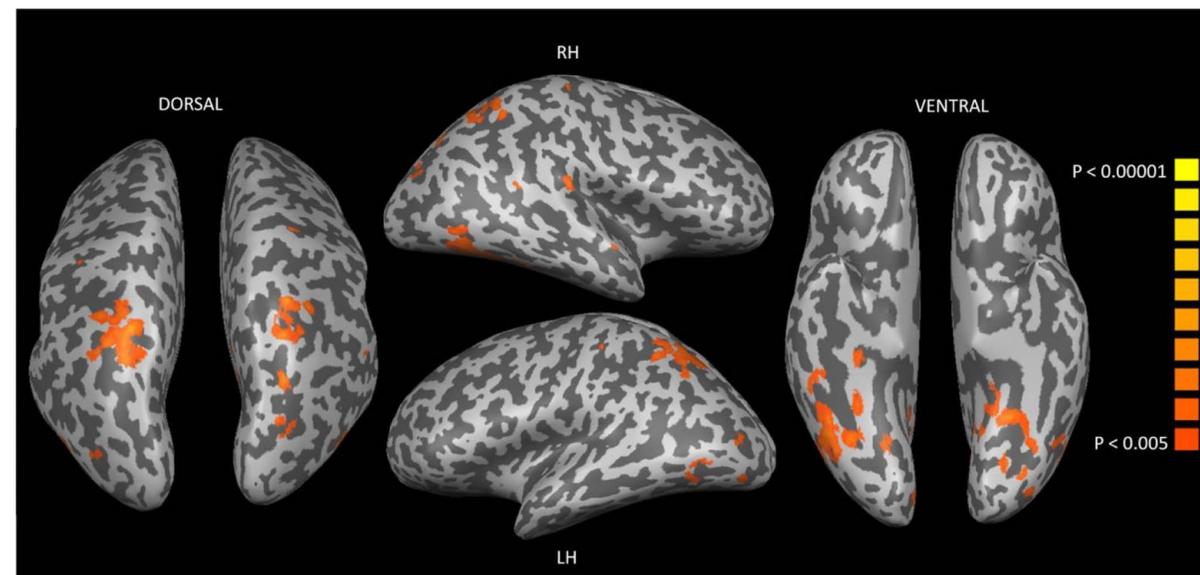


Dans les mois qui ont suivi la marée noire de l'Exxon Valdez, plus de 11 000 habitants de l'Alaska, ainsi que des employés de l'Exxon et des intervenants fédéraux, ont collaboré aux efforts de nettoyage de la catastrophe (voir <https://www.history.com/topics/1980s/exxon-valdez-oil-spill>).

Estimation de Weibull du pourcentage de personnes prêtes à payer en fonction du montant spécifié (d'après Carson et al., 1992))

Défis et limites : Principales questions

- **Biais de l'enquête :**
 - L'humeur des participants, l'influence des médias et les attitudes de la société peuvent fausser les résultats.
- **Présentation des données :**
 - Les stimuli moins réalistes (par exemple, les images en 2D) suscitent des réactions cérébrales plus faibles que les scénarios réels, ce qui peut entraîner une surestimation.
- **Préoccupations des parties prenantes :**
 - Les industries craignent que les valorisations exagérées leur imposent des risques incalculables.



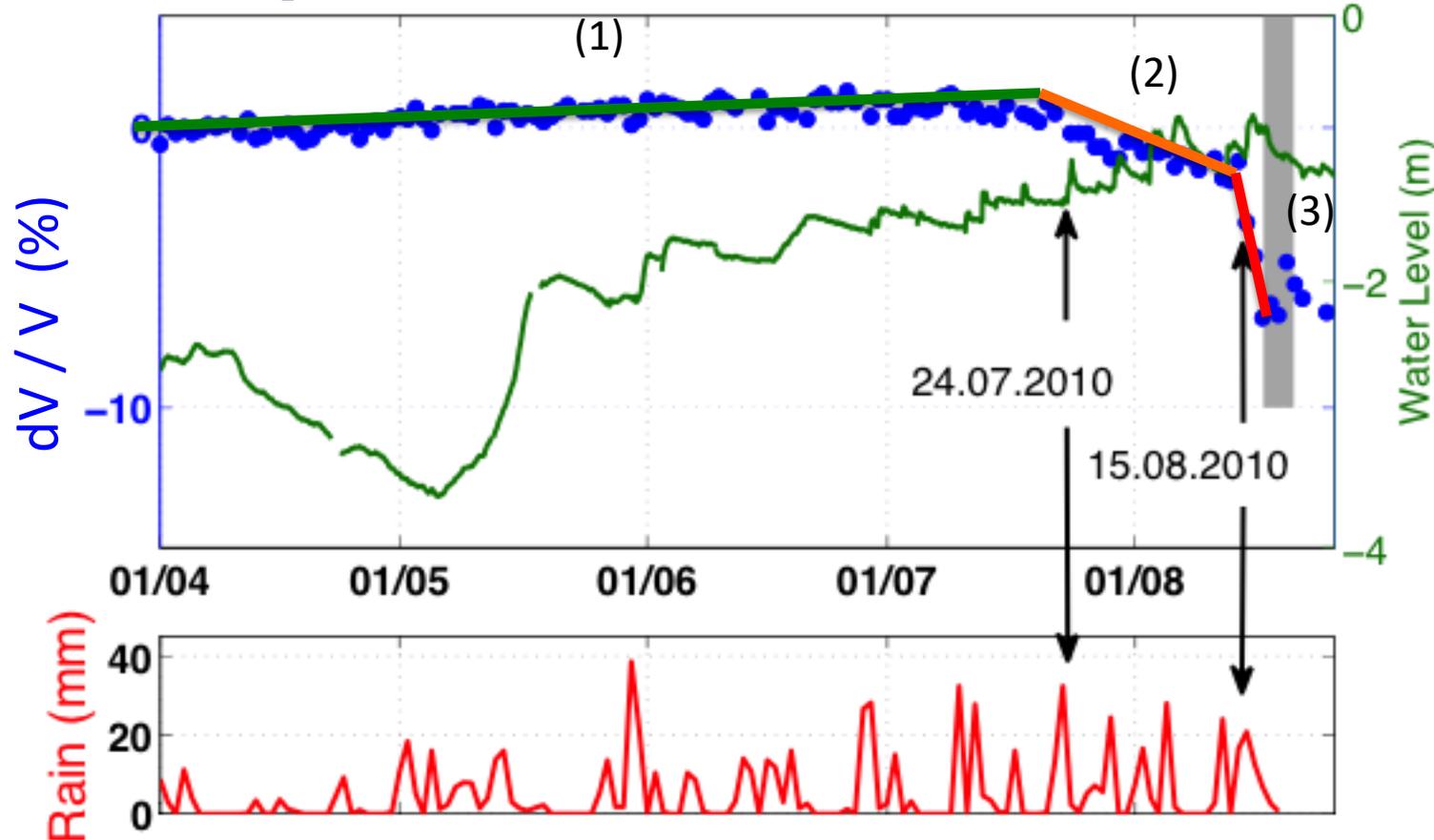
Différence d'activation du cerveau lors de l'affichage d'une image en 2D et lors de l'affichage d'une seconde image (d'après Snow et al., 2011)

Les enjeux de recherches

La surveillance



Résultats expérimentaux de surveillance par écoute sismique passive [10-12 Hz]



Tiré de Mainsant et al. (2011)

(3) Cinq jours avant : baisse de vitesse de 5%.

La propagation et les différents comportements des écoulements en fonction de leurs gammes de fractions volumiques (basé sur des données de Pierson, 2005, Hungr et al., 2014, Andreotti et al., 2001, Le Bouteiller et al., 2021).

Les abréviations signifient
 CFC : cubique face centrée,
 CS : cubique simple, RCP :
 random close packing
 (empilement aléatoire
 dense) ϕ_v n'atteint que 64%
 et pour un empilement dit
 aléatoire lâche, RLP : random
 loose packing (empilement
 aléatoire lâche) $\phi_v = 55%$ et
 Apoll. : empilement
 Apollonien atteint les 99%.

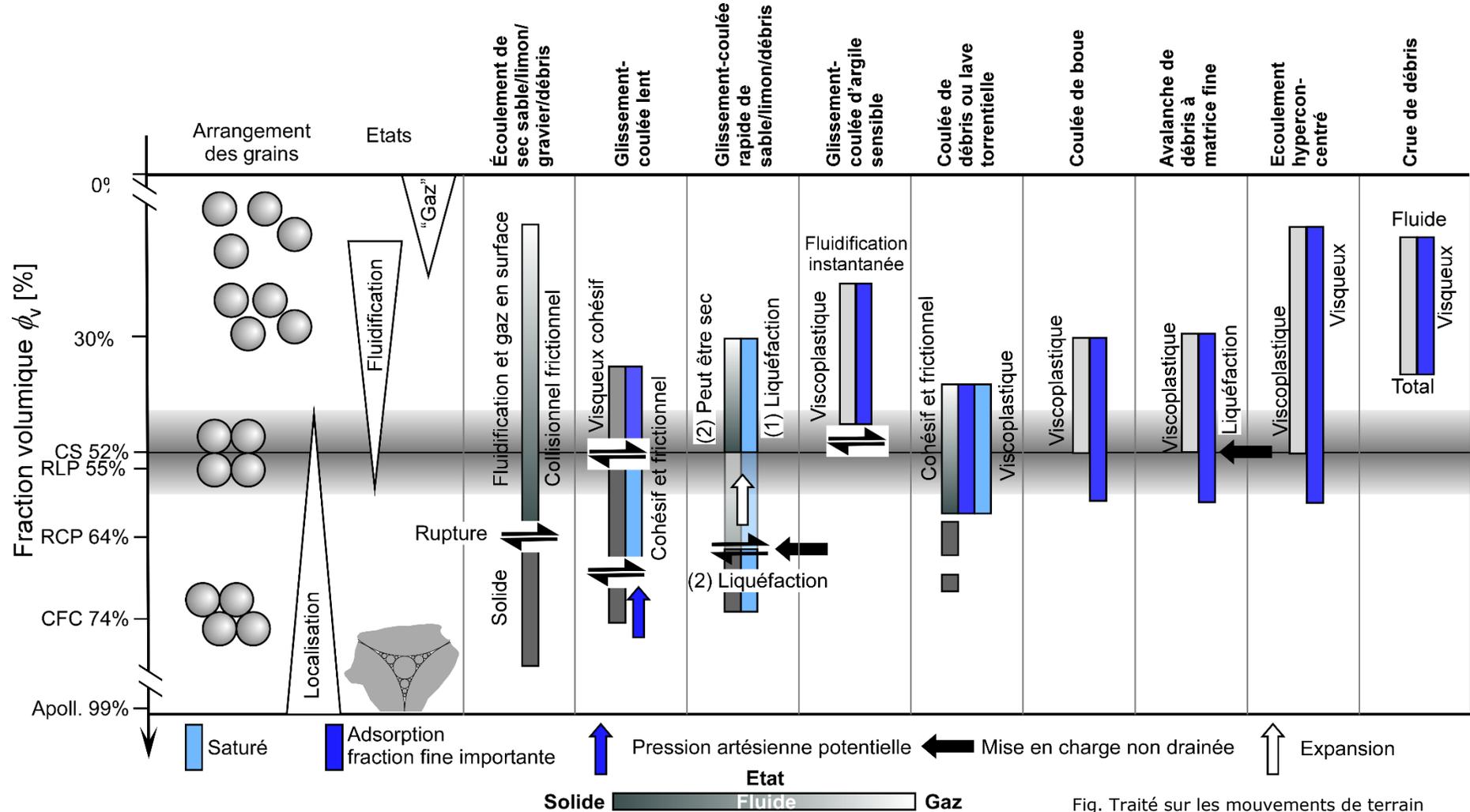
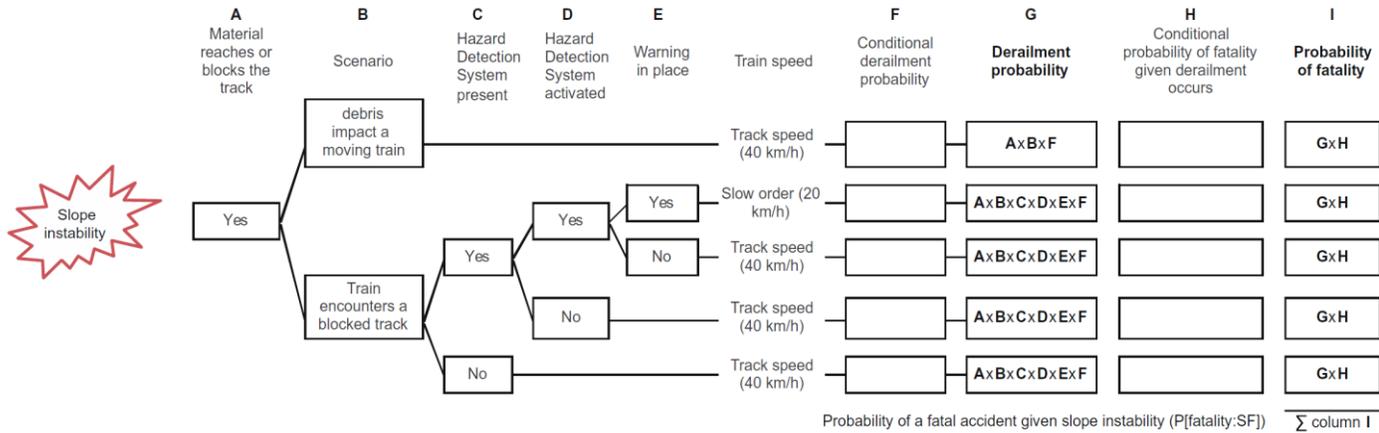


Fig. Traité sur les mouvements de terrain gravitaires (édité par Jaboyedoff et al., 2026)

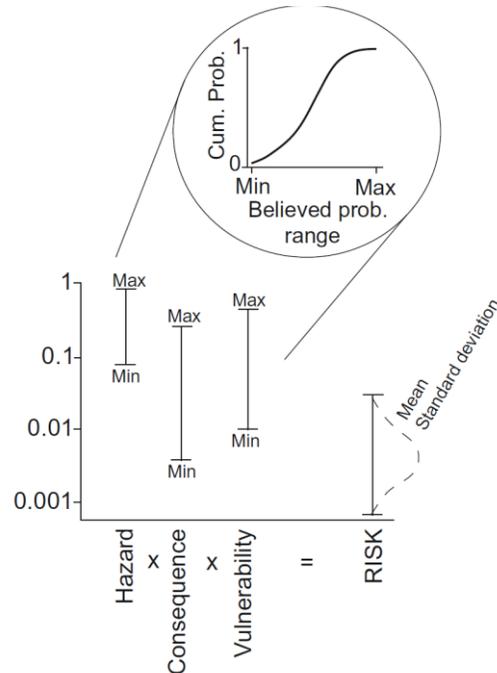
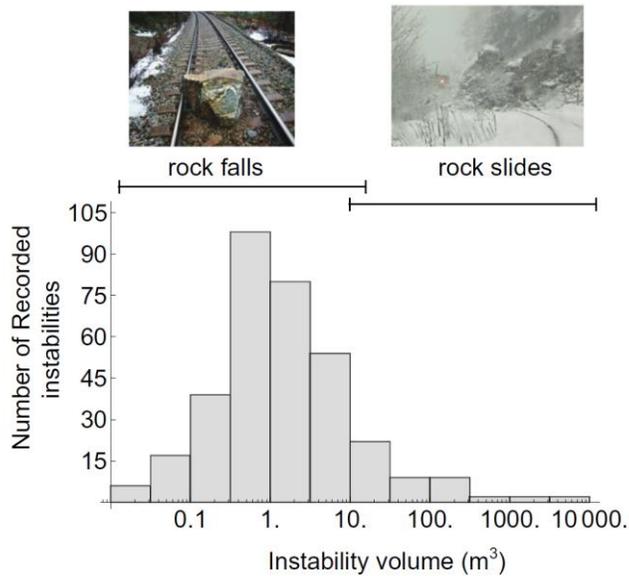
A l'exclusion des avalanches rocheuses qui restent encore mal comprise

Introduction de l'incertitude dans le calcul des risques locaux, c'est-à-dire **CAT Models locaux** (d'après Macciotta et al., 2016)

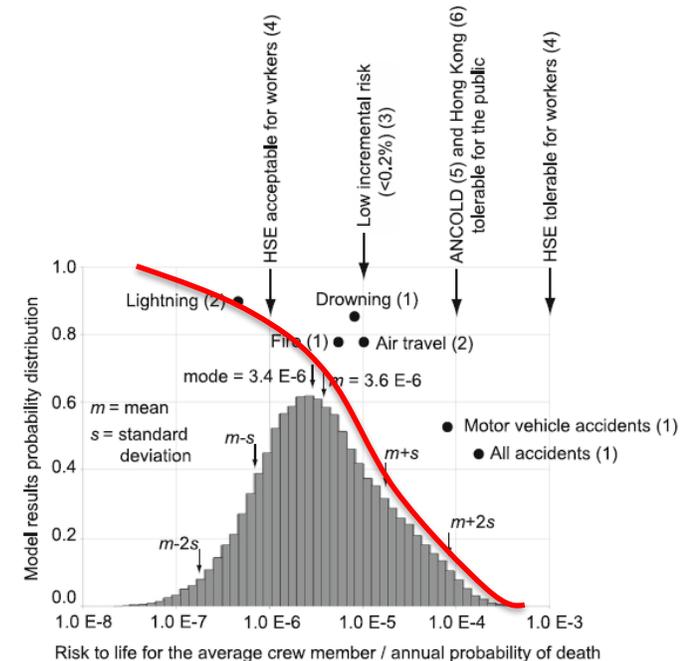


← Arbre d'événements utilisé pour estimer la probabilité d'un accident mortel donné

← Résultat : probabilité de décès



Incertain associée aux variables d'entrée des analyses de risque et aux estimations de risque : Probabilités subjectives définies sous la forme d'une fourchette de valeurs et d'une fonction de densité de probabilité.



Effets en cascade: par exemple barrage sur les cours d'eau



Décroissance avec le temps du nombre de barrages créés par les mouvements de terrain, suite au tremblement de terre de Wenchuan du 12 mai 2008 (modifié d'après Fan et al., 2012)

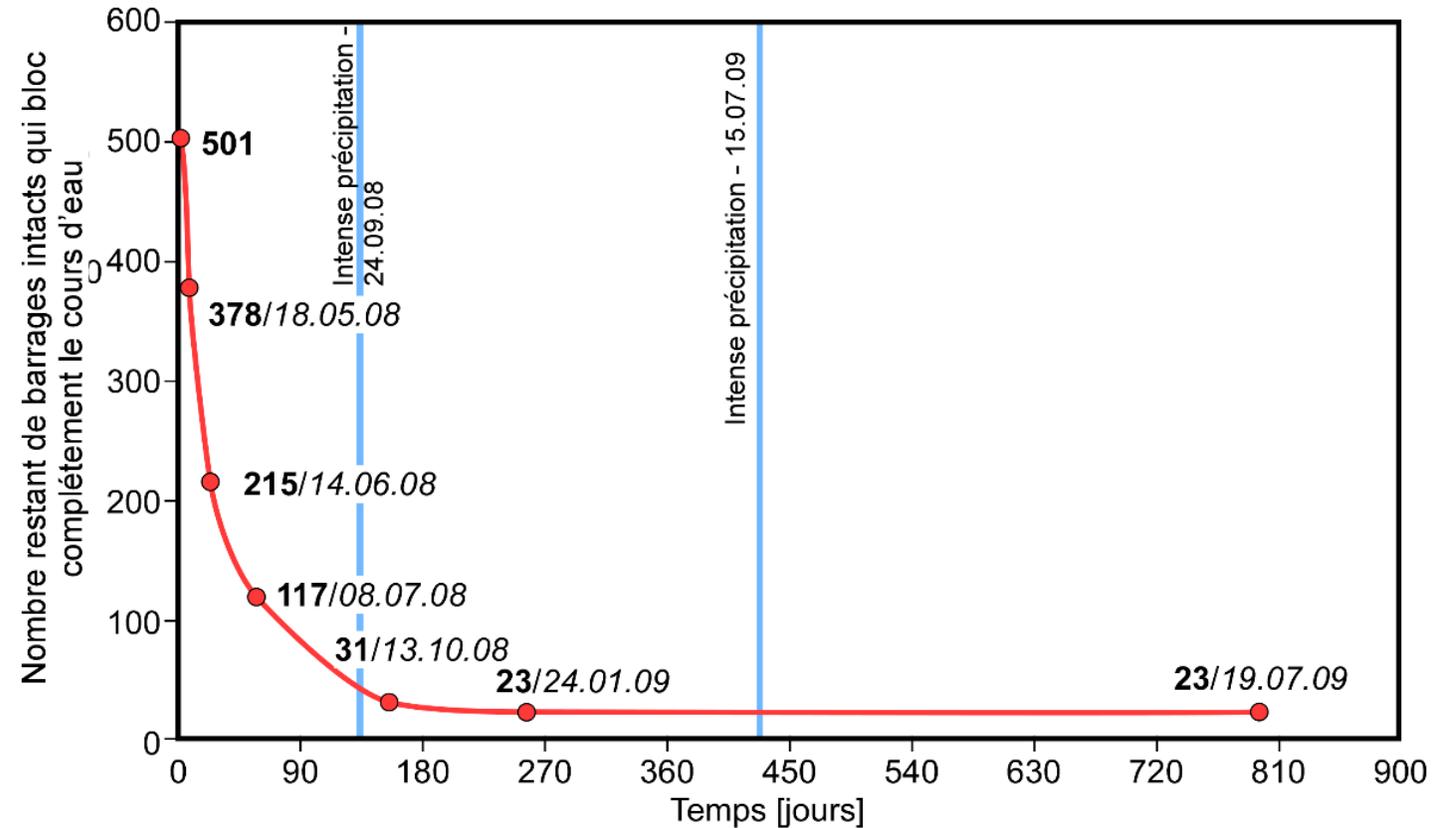


Fig. Traité sur les mouvements de terrain gravitaires (édité par Jaboyedoff et al., 2026)

Résumé des objectifs de recherche

- Développement de méthodologie d'établissement de modèles conceptuels
- Aléa de rupture:
 - Les différents facteurs de dégradation et la rupture
- Propagation:
 - Modèle physique qui tient compte des types de matériaux → rhéophysique
- Monitoring:
 - Augmentation du nombre de sites suivis
- Fonte de Neige (modèles peu satisfaisants; Zhou et al., 2021)
 - Température de:
 - neige ↑, substratum ↑, pluie chaude ↑, l'air ↑ → fonte rapide
- Précipitation:
 - Intensité et durée
- Laves torrentielles
 - → matériel disponible
- Déstabilisation de versant en altitude et plus bas
 - Climatic landscape
- La tolérance de populations → neurosciences
 - Approche participative
 - Evaluation des valeurs non monétisables

