

Votre partenaire expert pour la R&D et l'innovation en géosciences



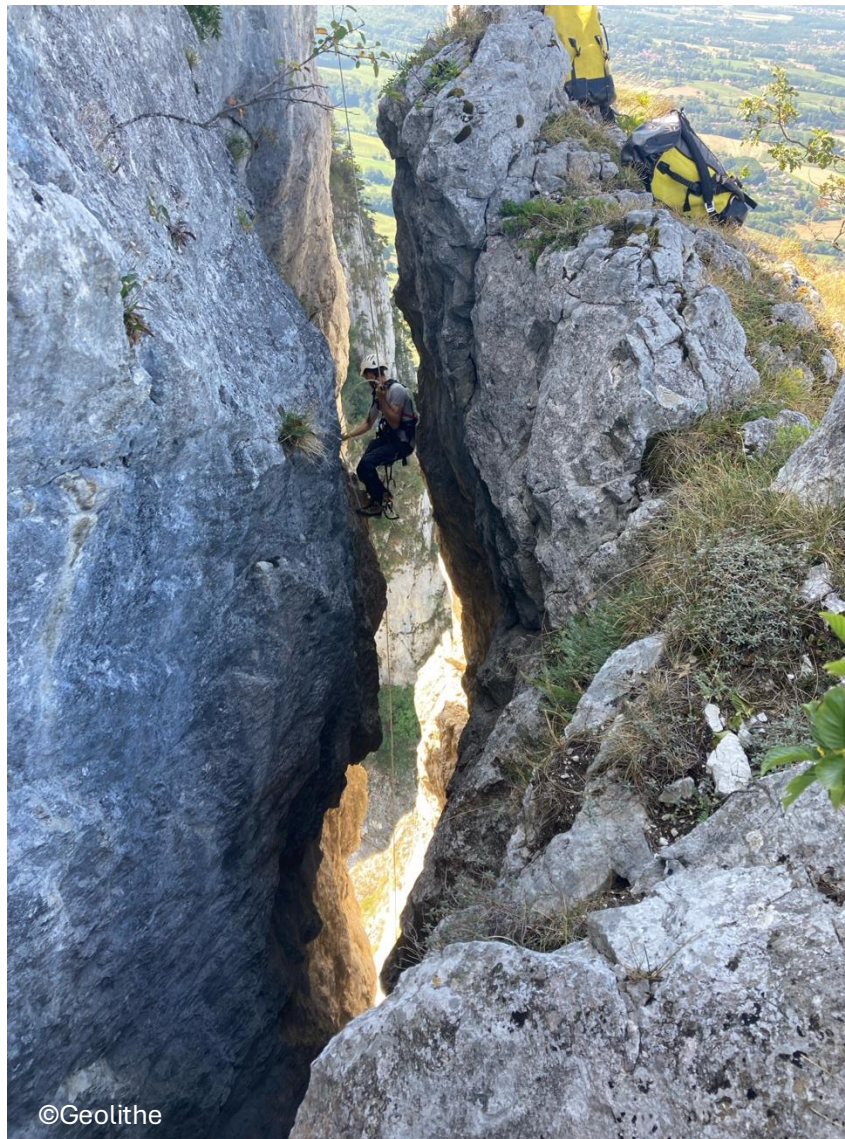
Journée Relais

Climat, météo et risque rocheux : état de la recherche et exemples de dispositifs de surveillance

Antoine GUILLEMOT

Abondance – 22 avril 2026

181 rue des bécasses
38 920 CROLLES - FRANCE
Tel. +33 (0)4 76 92 22 22
Mail. contact@geolithe.com



avec



Soutenu par



Qui suis-je ?

Plan de l'intervention

- 1. Gestion du risque rocheux : Exemples opérationnels**
- 2. Méthodes et dispositifs de surveillance R&D**
- 3. Etat des connaissances scientifiques et perspectives de recherche**

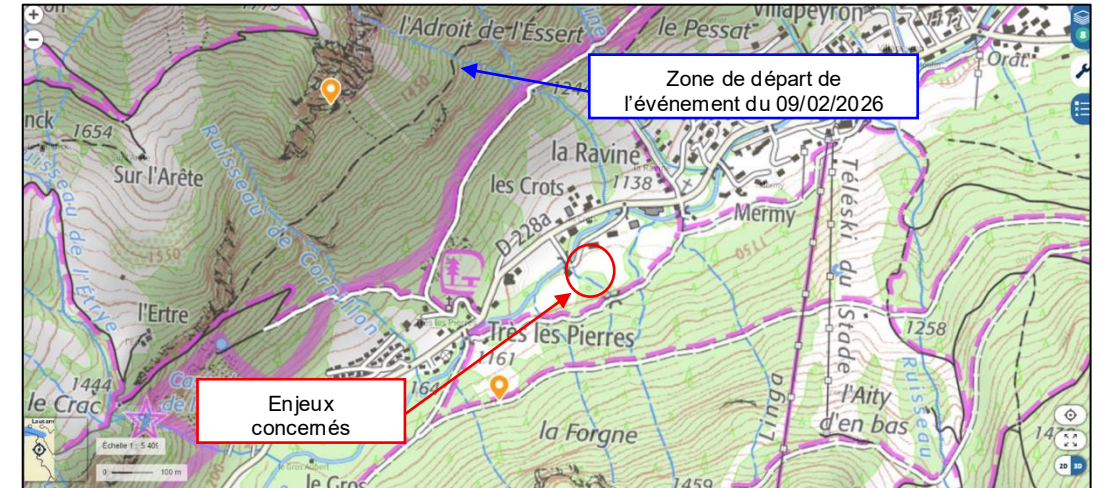


COMMUNE DE CHATEL – 74 - TRÈS-LES-PIERRES

SÉCURISATION CONRE LES ÉBOULEMENTS ROCHEUX

GESTION DU RISQUE - ETUDE DE FAISABILITE

L'évènement du 09/02/2026



Ecroulement d'un compartiment rocheux (orienté Sud)
Deux parties distinctes (pilier vertical + strate surplombante)
Aléa résultant important (compartiment résultant)
Facteur(s) déclenchant(s) : non identifié

Dispositif de surveillance



Dispositif de surveillance par radar interférométrique IBIS-FM

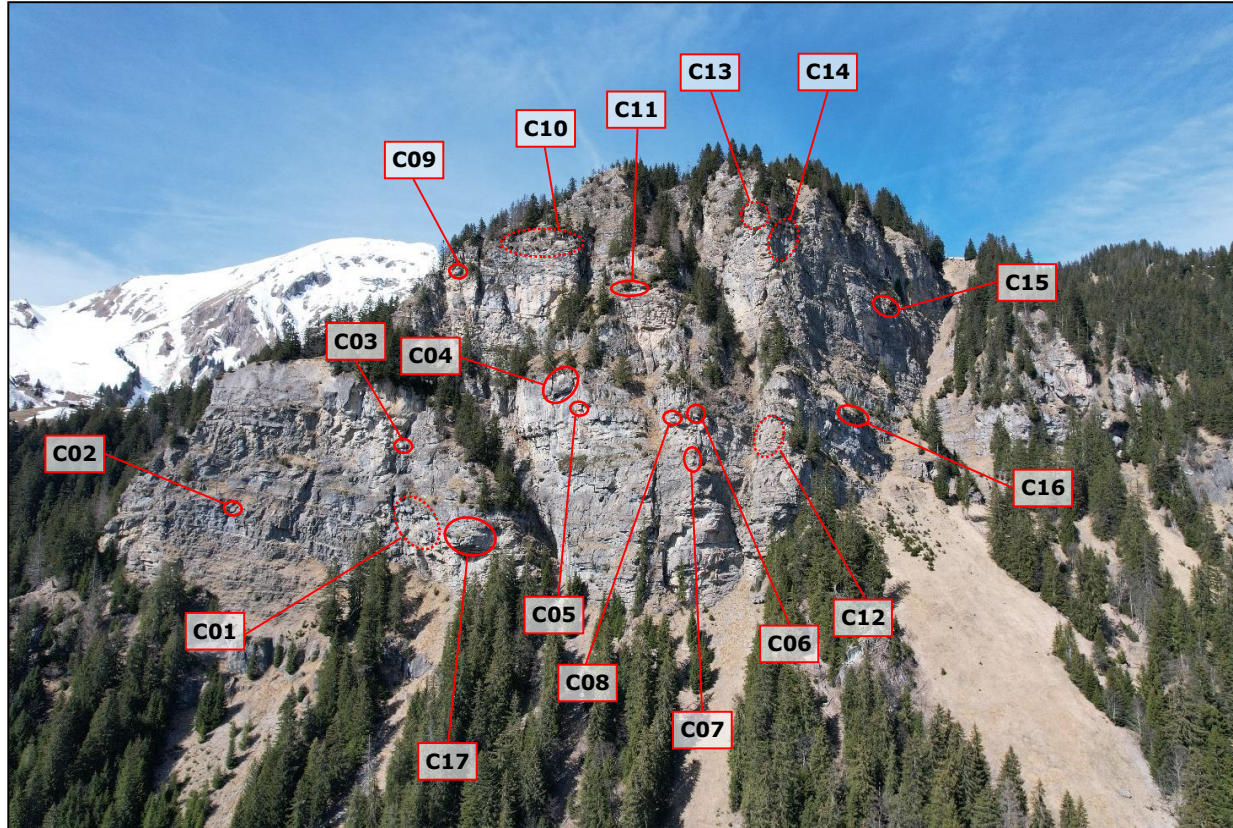


Dispositif extensométrique installé

Dispositif de surveillance

ALERTE FONCTIONNELLE	ALERTE OPÉRATIONNELLE	ALARME OPÉRATIONNELLE
Détection automatique d'un dysfonctionnement du système	Détection automatique d'un dépassement de seuil	Détection automatique d'un dépassement de seuil → Déclenchement automatique du dispositif de sécurisation
Envoi SMS aux récipiendaires Géolithe	Envoi SMS/mail aux récipiendaires	Envoi SMS/mail à tous les récipiendaires
Analyse distante par Géolithe	Analyse distante par Géolithe	Analyse distante par Géolithe
Mode dégradé ou sécurisation si surveillance insuffisante	Alerte infirmée → Clôture Alerte confirmée → Vigilance renforcée	Alarme infirmée → Réouverture RD Alarme confirmée → Intervention in situ géologue
Clôture de l'alerte	Clôture de l'alerte	Clôture de l'alarme – Réouverture RD228a

Les phénomènes



DIAGNOSTIC GÉOLOGIQUE DE L'ALÉA CHUTES DE BLOCS

Nom comp.	Volume	Volume résiduel	Classe Instabilité	Aléa d'écroulement	Mécanisme de départ
C1	-	2 à 5 m ³	Zone de départ de blocs à masses	Elevé	Rupture de toit / basculement
C2	10.0 m ³	2 à 5 m ³	Masse	Moyen	Glissement/basculement
C3	20.0 m ³	< 10 m ³	Masse à grande masse	Faible	Rupture de pied / Basculement
C4	300 à 400	10 à 20 m ³	Très grande Masse	Faible	Glissement
C5	15.0 m ³	< 10 m ³	Masse	Faible	Basculement
C6	10.0 m ³	2 à 4 m ³	Masse	Moyen	Rupture de toit / basculement
C7	40 à 50	< 10 m ³	Grande Masse	Moyen	Rupture de pied / Glissement
C8	5.0 m ³	1 à 3 m ³	Masse	Elevé	Rupture de toit
C9	20.0 m ³	~ 10 m ³	Grande Masse	Faible	Rupture de toit
C10	-	1 à 2 m ³	Zone de départ de blocs	Elevé	Rupture de toit
C11	20 à 30	< 5 m ³	Grande Masse	Moyen	Rupture de toit
C12	-	< 5 m ³	Zone de départ de blocs à masses	Moyen	Rupture de toit / basculement
C13	-	< 5 m ³	Zone de départ de blocs à masses	Elevé	Basculement
C14	-	1 à 2 m ³	Zone de départ de blocs à masses	Très Elevé	Rupture de toit / basculement
C15	60.0 m ³	< 10 m ³	Grande Masse	Moyen	Rupture de toit
C16	100 à 150	~ 10 m ³	Très grande Masse	Très Faible	Rupture de toit
C17	300 à 400	10 à 20 m ³	Très grande Masse	Elevé	Glissement / Basculement

OBJECTIFS

Les objectifs de sécurisation sont :

- Pour la RD 228a et la route communale : revenir à un aléa équivalent à ce qui préexistait avant l'événement du 09/02/2026.
- Pour les bâtiments d'habitation : protéger les bâtiments et leurs abords contre des phénomènes naturels gravitaires de période de retour centennale.
- La sécurisation temporaire des enjeux bâtis afin de permettre le retour des habitants (de l'hôtel notamment), dans l'attente de la réalisation d'un ouvrage définitif.

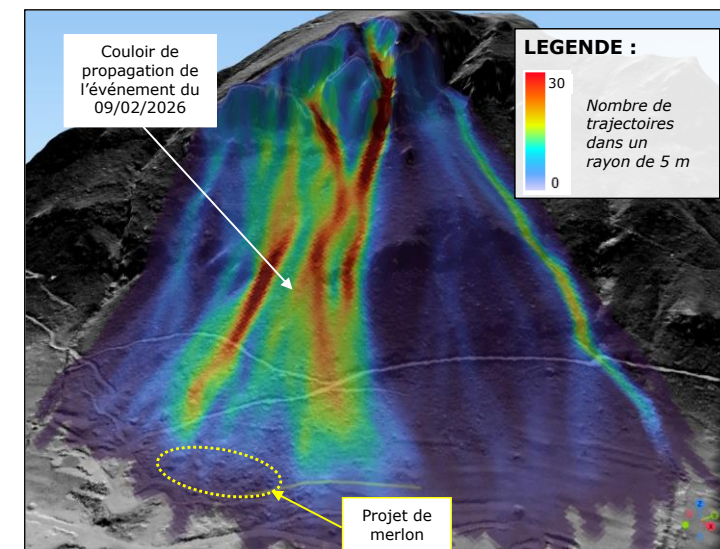
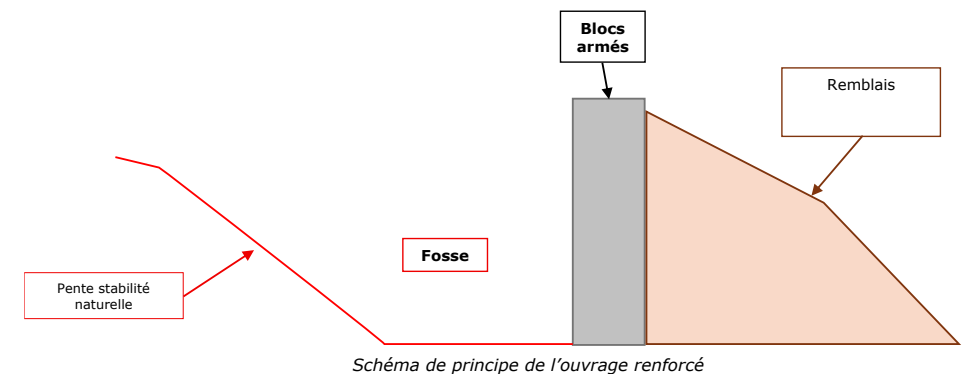
Sécurisation durable

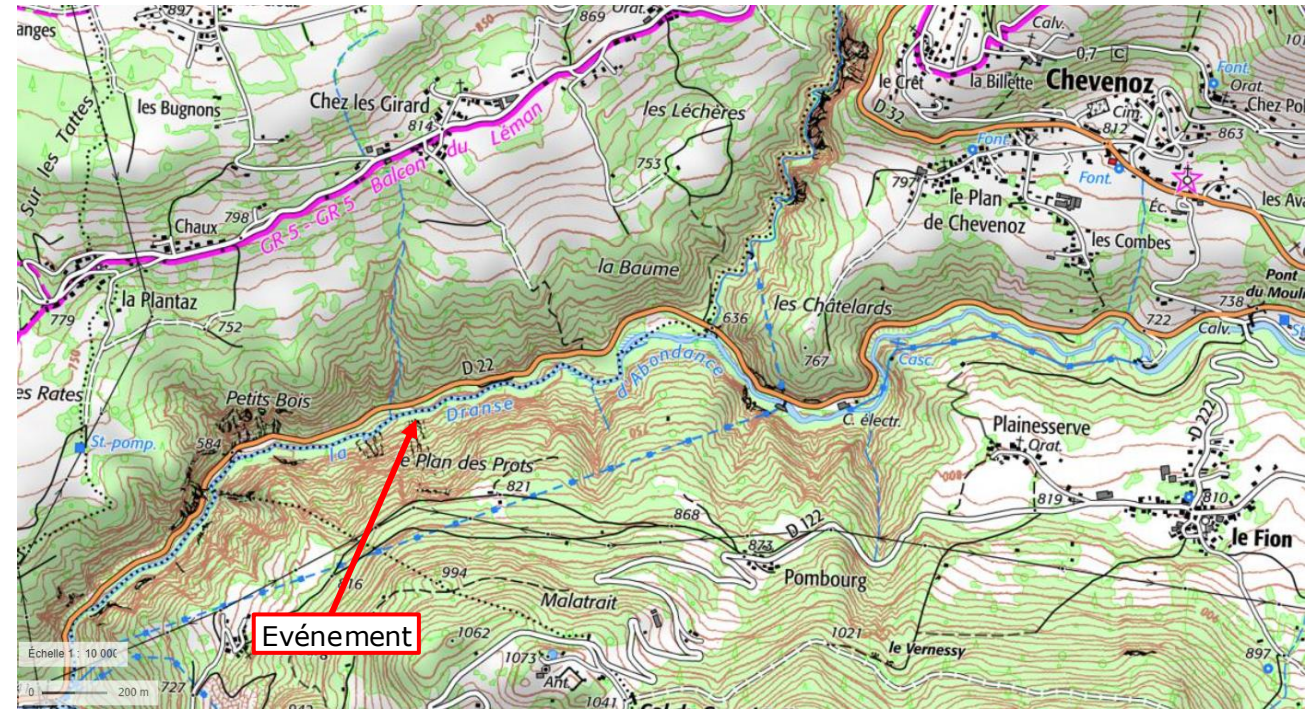
SOLUTION 1

- Surveillance jusqu'au merlon
- Protection par ouvrages en amont du merlon
- Renforcement des ouvrages existants
- Durée 2 à 4 semaines

SOLUTION 2

- Surveillance jusqu'au déroctage
- Déroctage
- Durée 3 mois





COMMUNE DE CHEVENOZ – 74 – PLAN DES PROTS

MOUVEMENTS DE TERRAIN EN RIVE GAUCHE DE LA DRANSE

Etudes après les évènements

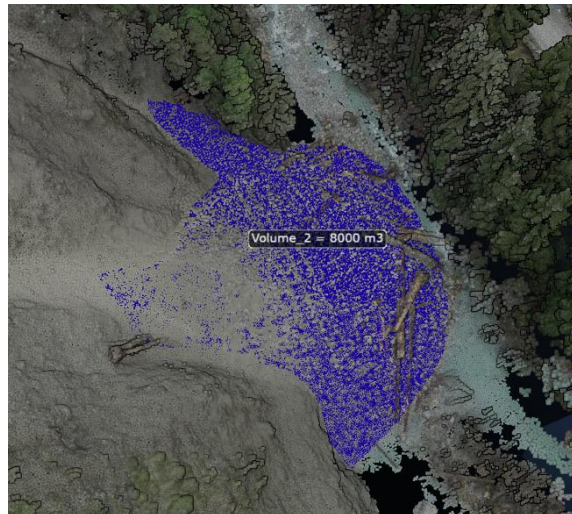
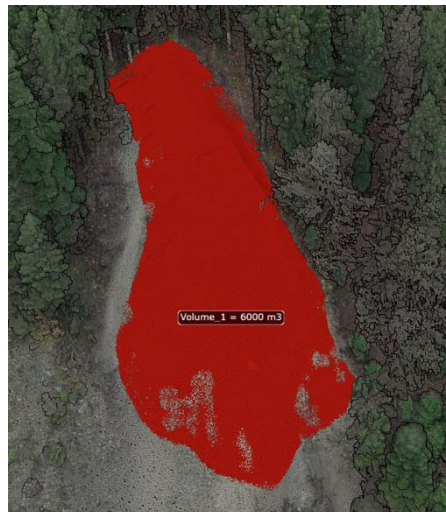
Date et heure de l'évènement : 03/02/2026 et 16/02/2026

Météo des jours précédents l'évènement : Fortes pluies

Diagnostic naturaliste -> identification de l'aléa : phénomène de glissement et de chute de blocs, vraisemblablement effondrement en masse d'une colonne rocheuse.

Acquisition topographique LiDAR sous drone -> MNT de la zone, calculs volumiques

Préconisations : maintien d'un suivi régulier avec constats visuels et la réalisation d'un nouveau levé LiDAR en cas d'évolution notable



Vues drone du 20/02/26 après le second évènement du 16/02/26
En haut : Vue générale / En bas à gauche : Détail de la zone de départ / En bas à droite :
Cône d'éboulis dans le lit de la Dranse

Bilan de cet aperçu de l'opérationnel

- Diversité des enjeux et risques
- Sécurisation en urgence, gestion de l'aléa résultant, sécurisation durable
- Prise en compte des risques en cascade (embâcles, laves torrentielles, ...)
- Facteurs météo/climat : parfois évidents, parfois non identifiés
- Difficultés de trouver des signaux précurseurs

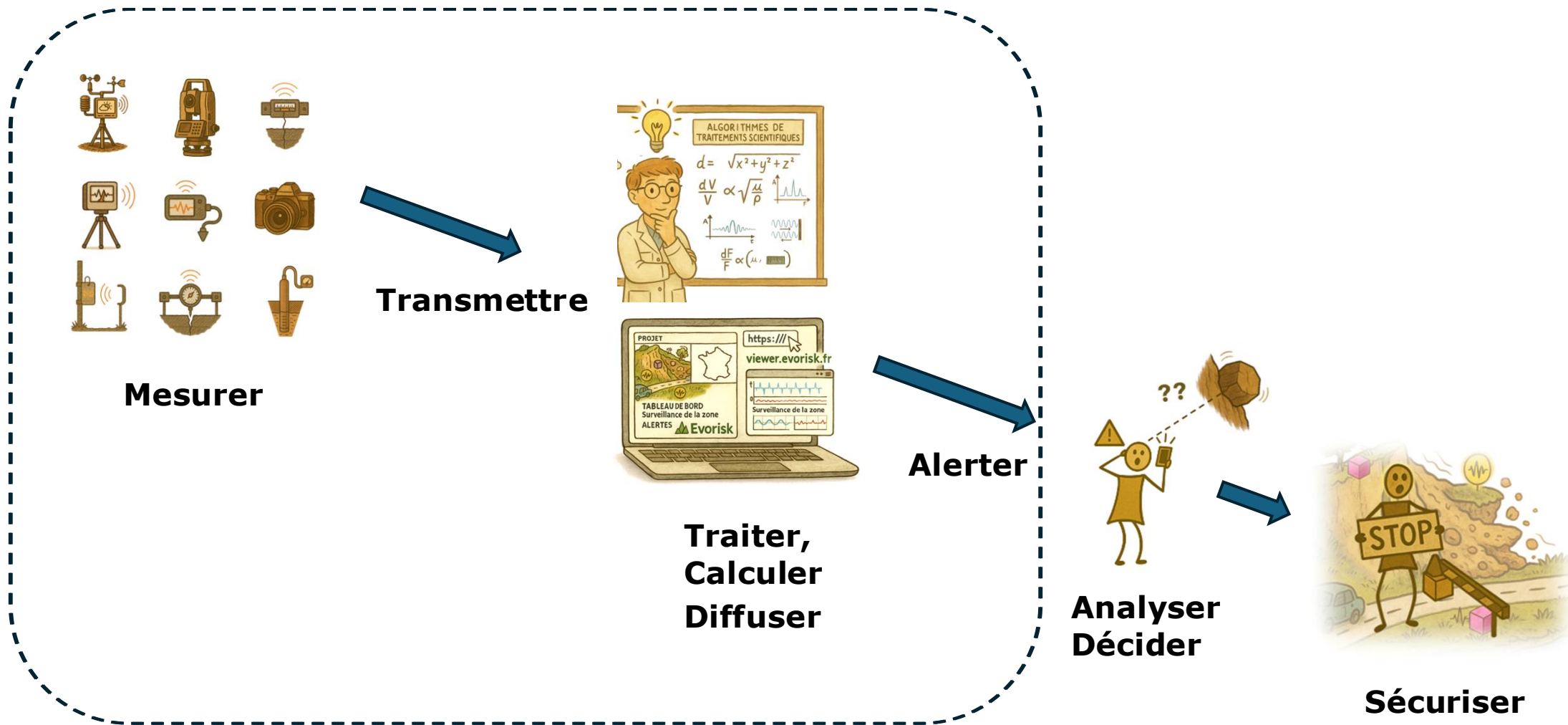


Dispositifs de surveillance

R&D

Processus de surveillance d'un aléa naturel

Chaine d'actions (phase exploitation)



Panorama des méthodes de surveillance

Autres que mesure des déplacements de surface

Type de suivi

– En surface

– En profondeur

– Hydraulique

- Instrumentation géophysique :
 - **Méthodes actives**
 - Tomographie de Résistivité Électrique, de chargeabilité, ... (w%, Sr)
 - **Méthodes passives : Sismologie Environnementale (bruit de fond sismique)**
 - Suivi de la rigidité du terrain en profondeur (dV/V) → *précurseur déstabilisation*
 - Suivi des fréquences de résonance de compartiments rocheux (dF/F) → *idem*
 - Ecoute sismologique (fracturation, éboulements)

Méthodes volumiques non destructives

- Instrumentation géotechnique :
 - **Inclinomètre** : *manuel ou automatisé*
→ *détermination de la profondeur déformée / cisailée*

Méthodes ponctuelles (forages)
→ *risque élevé de cisaillement du tubage*

- **Piézomètre** : *manuel ou automatisé* (hauteur nappe)
- **Débitmètre/limnigraphe** (débit)
- **Météo / pluviométrie**
- **Observations/suivi naturaliste(s)**

Méthodes indirectes

Intérêt des dispositifs **multi-méthodes**
(*idéal : surface + sous-sol + hydro*)

Suivi de résonance par bruit de fond sismique (dF/F)

Objectif : Analyse de l'état vibratoire de compartiments rocheux (précurseur)

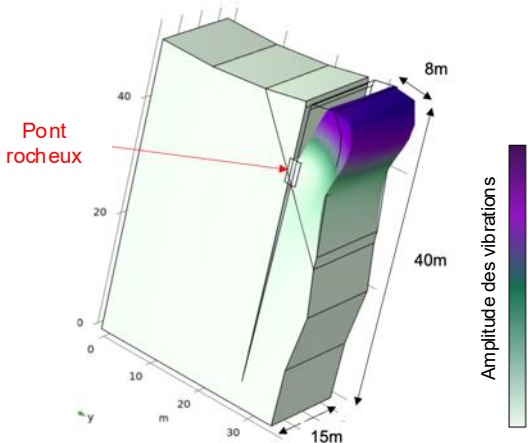


$$F_i \propto \text{rigidité, géométrie}$$



Modélisation numérique 3D d'une écaille rocheuse

$$f_0 = 9,45 \text{ Hz}$$



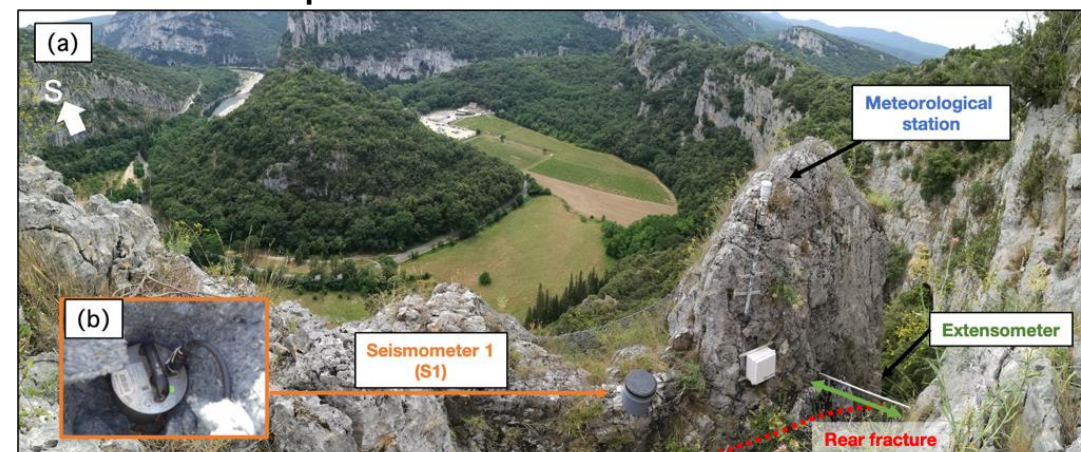
Analyse modale : $F_0 \sim 10 \text{ Hz}$

- Précurseur à une déstabilisation (qq jours, qq % baisse)
- Sensible à la géométrie et l'endommagement
- Complémentaire des mesures de surface (extensomètres, ...)

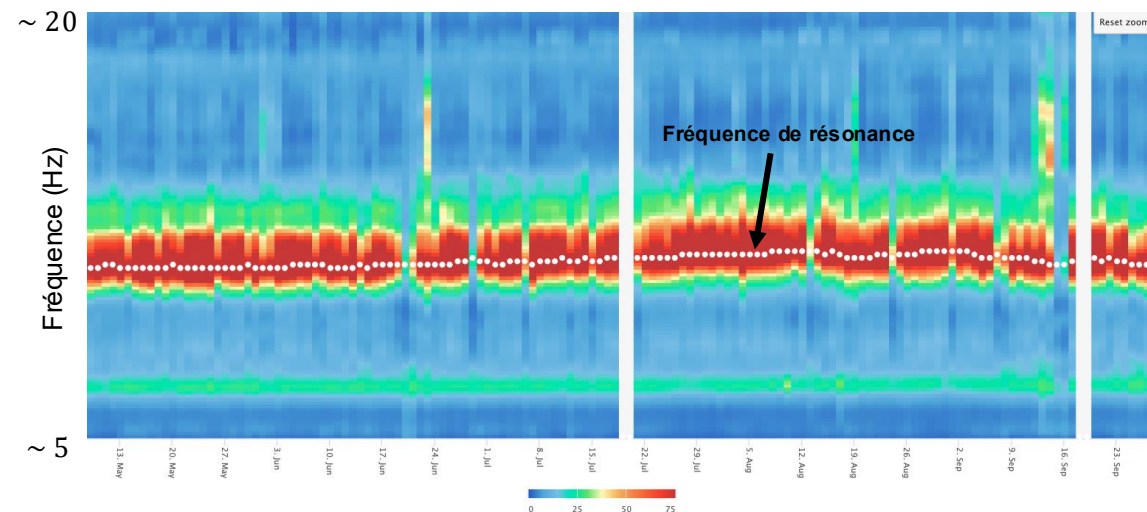


- Volume de données
- Périodicité des données (heure à jour)
- Données parfois bruitées (T°, météo,...)

Exemple d'instrumentation sur écaille rocheuse

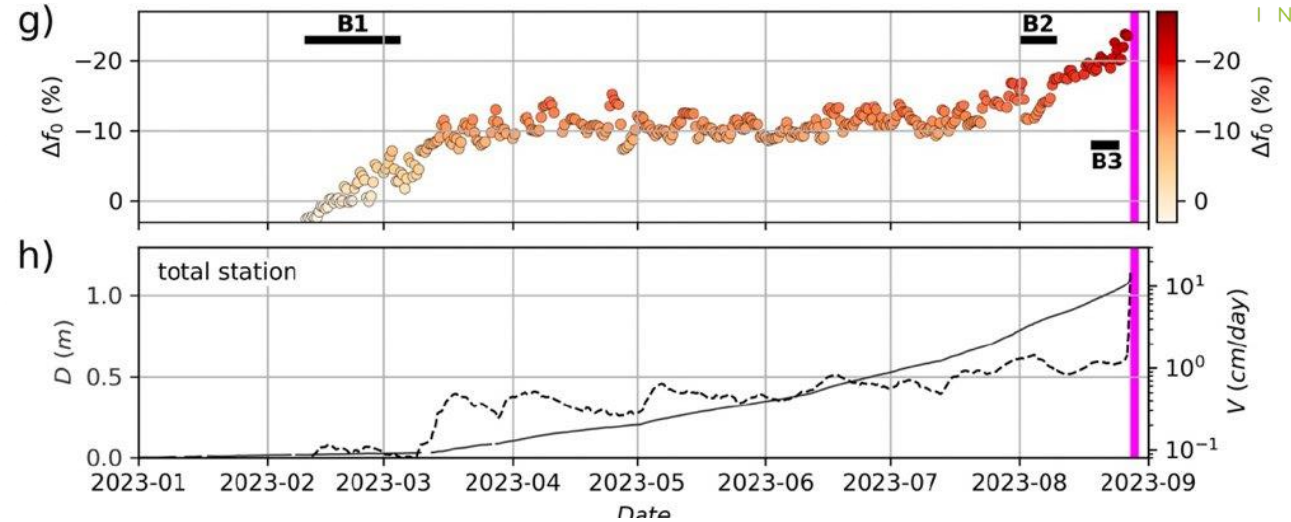


Exemple de surveillance par dF/F



Surveillance d'un versant rocheux instable

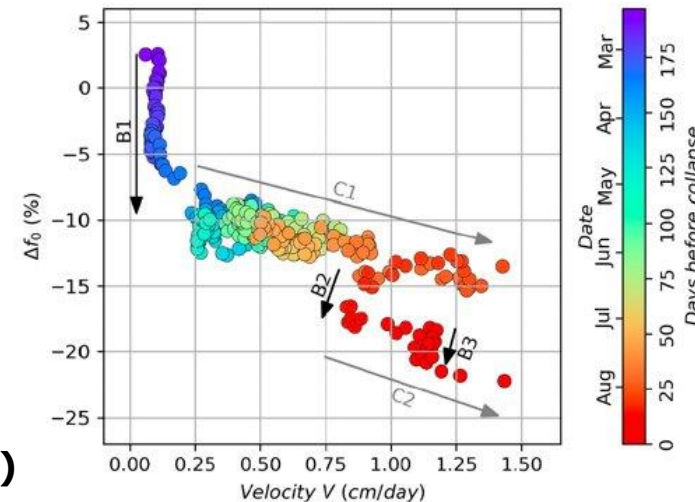
Versant rocheux amont d'une autoroute + voie ferrée



Bottelin et al. (2024)

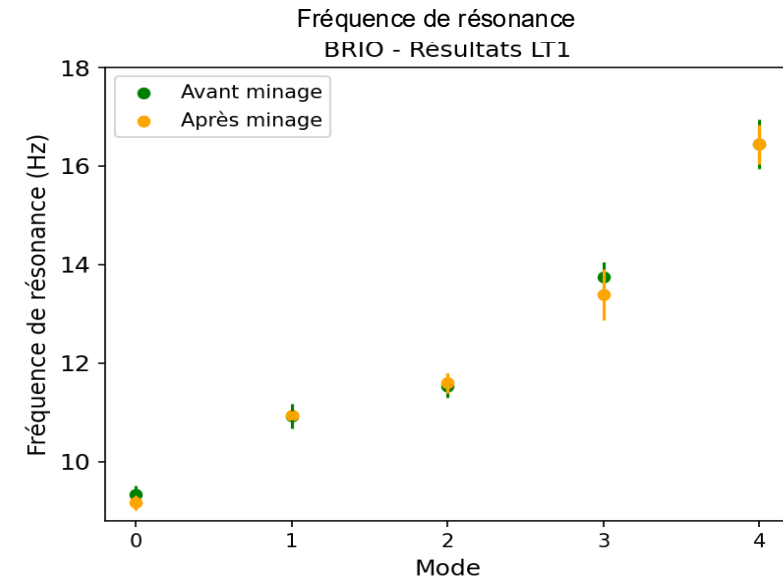
Exemple de précurseur à la rupture

Processus de rupture interne (perte de rigidité) B1, B2, B3
≠ Mouvements observés en surface (C1)



Suivi fréquentiel d'une instabilité rocheuse

Quantifier l'effet éventuel d'un minage sur la stabilité d'une masse rocheuse proche



Mesure ponctuelle (durée~20 min) avant / après minage
2 capteurs 3D + 1 centrale d'acquisition

➡ **Pas d'effet significatif du minage les compartiments rocheux avoisinants instrumentés**



Etat des connaissances scientifiques

Perspectives de recherche

Changement climatique en montagne

- **Haute montagne (> 2700 m) :**

- Permafrost
 - déstabilisation des parois rocheuses (Mont-Blanc, Vanoise, Ecrins) (Ravanel, Magnin)
 - accélération glaciers rocheux (Bodin, Marcer)
 - Déstabilisation d'infrastructures (stations, refuges)
- Glaciers :
 - retrait glaciaire : décompression de versant, déstabilisation de moraines
 - Fonte glaciaire : lacs supra-, péri-, poches sous-glaciaires, GLOF

- Crise érosive post-glaciaire
- Risques 'émergents' (mal connus, donc difficile à anticiper et gérer)

- **Moyenne montagne (< 2700 m) :**

- Instabilités gravitaires (Chutes de blocs, glissements de terrain)
- Risques en cascade
- Augmentation des phénomènes météo extrêmes (intensité, fréquence)

Risque rocheux en falaises

D'Amato et al., NHESS, 2016

- 1 évènement/jour (> 10 L)
- Loi puissance Volume = f(fréquence)
- Influence cycles gel/dégel : x7
- Influence fortes pluies : x25



Catalogue sur falaise calcaire de 5 km (St Eynard)

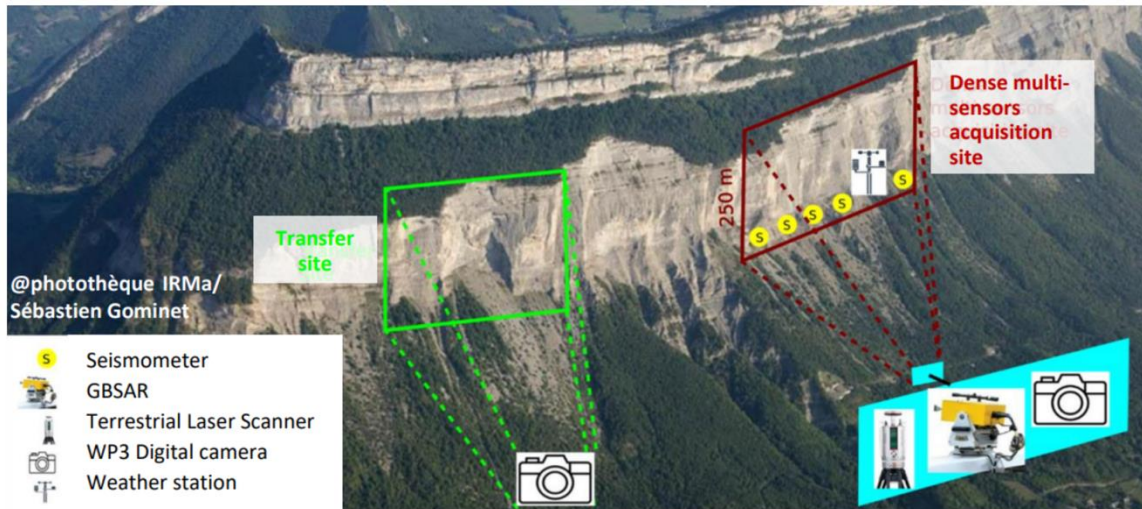
Projet collaboratif C2RIA

C2R-IA : Chutes de blocs et Risque Rocheux : utilisation de l'Intelligence Artificielle pour la gestion opérationnelle du risque.

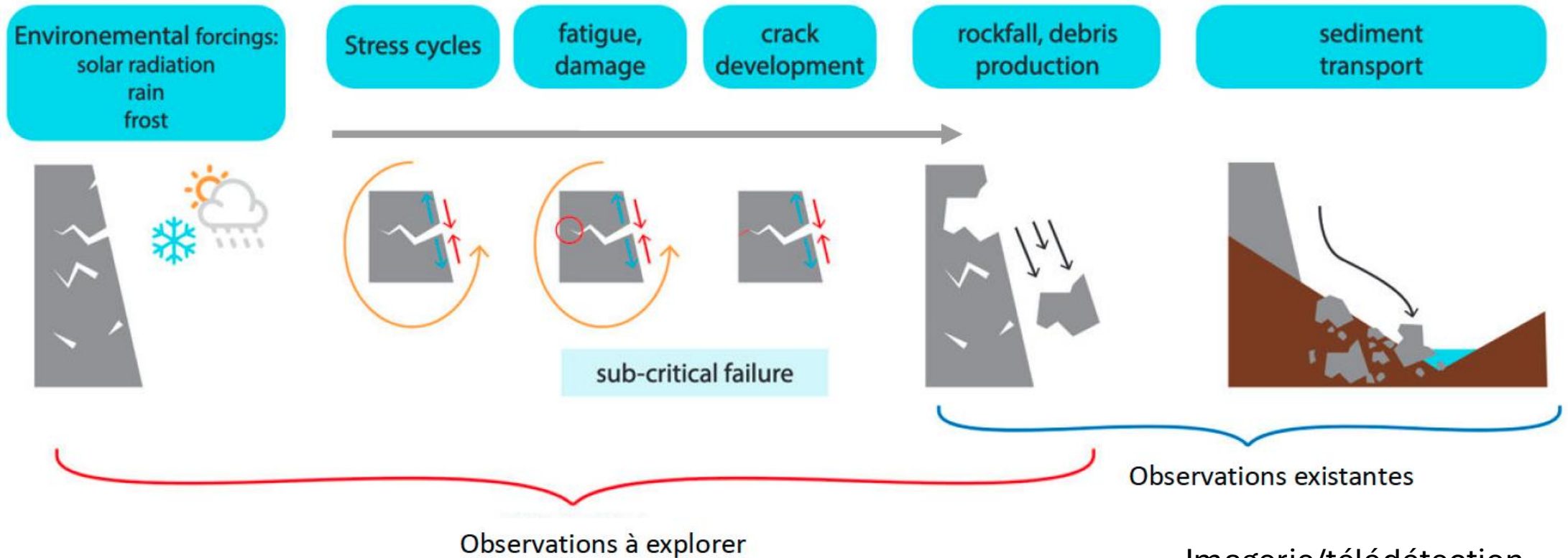
Projet de 4 ans (2024-2027)

But : mieux prendre en compte l'influence des conditions météorologiques sur le niveau de danger des chutes de pierres et à anticiper les augmentations temporaires du niveau de danger lors de tempêtes et autres conditions météorologiques spécifiques afin de mettre en œuvre des systèmes de réduction des risques (restriction d'accès, surveillance, mobilisation de kits d'urgence, maintenance prédictive).

Approche multidisciplinaire en réunissant différentes communautés : **des instituts de recherche académique en géosciences (ISTerre) et en Intelligence Artificielle (LIRIS, LISTIC), des instituts de recherche appliquée en géosciences (BRGM, Cerema) et Géolithe.**



D'après E. Larose (ISterre, CNRS)



À investiguer par différentes méthodes
(sismique, acoustique, thermographie, modélisation mécanique, ...)

Imagerie/télédétection
Méthodes de suivi automatique
Et observations humaines (!)



E. Larose (ISTerre, CNRS)

Projet collaboratif ERC Crack the Rock (2024-2029) :

Comment les roches s'endommagent progressivement avec les sollicitations environnementales ?
Comment le changement climatique pourrait modifier l'érosion des falaises et les risques naturels liés ?

Température, cycles thermiques

- Radiation et convection en surface
- Dilatation de la roche « empêchée »
- Augmentation des contraintes mécaniques, rigidité +
- Cyclicité -> fatigue
- Fissuration, fracturation

Pluie

- Refroidissement en surface
- Effet « lubrifiant »
- Si gros cumul, pressions interstitielles +
- Observations sismologiques, acoustiques, thermographiques

Gel

- Changement de phase eau liquide -> eau solide
- Dilation de la glace
- Augmentation des contraintes mécaniques ++
- Fissuration, fracturation

Bilan(s)

- **Aléa rocheux** : érosion des falaises par fracturation des matériaux
- Intrinsèquement lié aux **forçages environnementaux**, donc influence de la météo/climat
- Augmentation claire et bien documentée en haute montagne (**crise érosive**)
- Plus difficile à mettre en évidence hors cryosphère mais efforts de recherche et de méthodes de détection et surveillance
- **Perspectives de recherche** :
 - observations des processus **physiques**, interprétation et modélisation -> meilleure connaissance des influences respectives (facteurs prédisposants/déclenchants) selon le contexte géologique et environnemental
 - Approches **statistiques** avec augmentation des capacités d'observations et d'analyse de données -> meilleure prédiction ?
- Enjeu opérationnel : **signaux précurseurs**

Votre partenaire expert pour la R&D et l'innovation en géosciences



Merci beaucoup pour votre attention !

**Et merci à tous les contributeurs et acteurs
de ces travaux !...**

avec



Soutenu par

