



Regards croisés sur les risques liés à la dégradation du permafrost de paroi : *entre perception, observation, modélisation et anticipation de l'aléa*

B. Ribeyre, M. Cathala, F. Magnin





1. Perception et enjeux socio-professionnels : exemple de l'écroulement sur la voie normale de la Meije en 2018



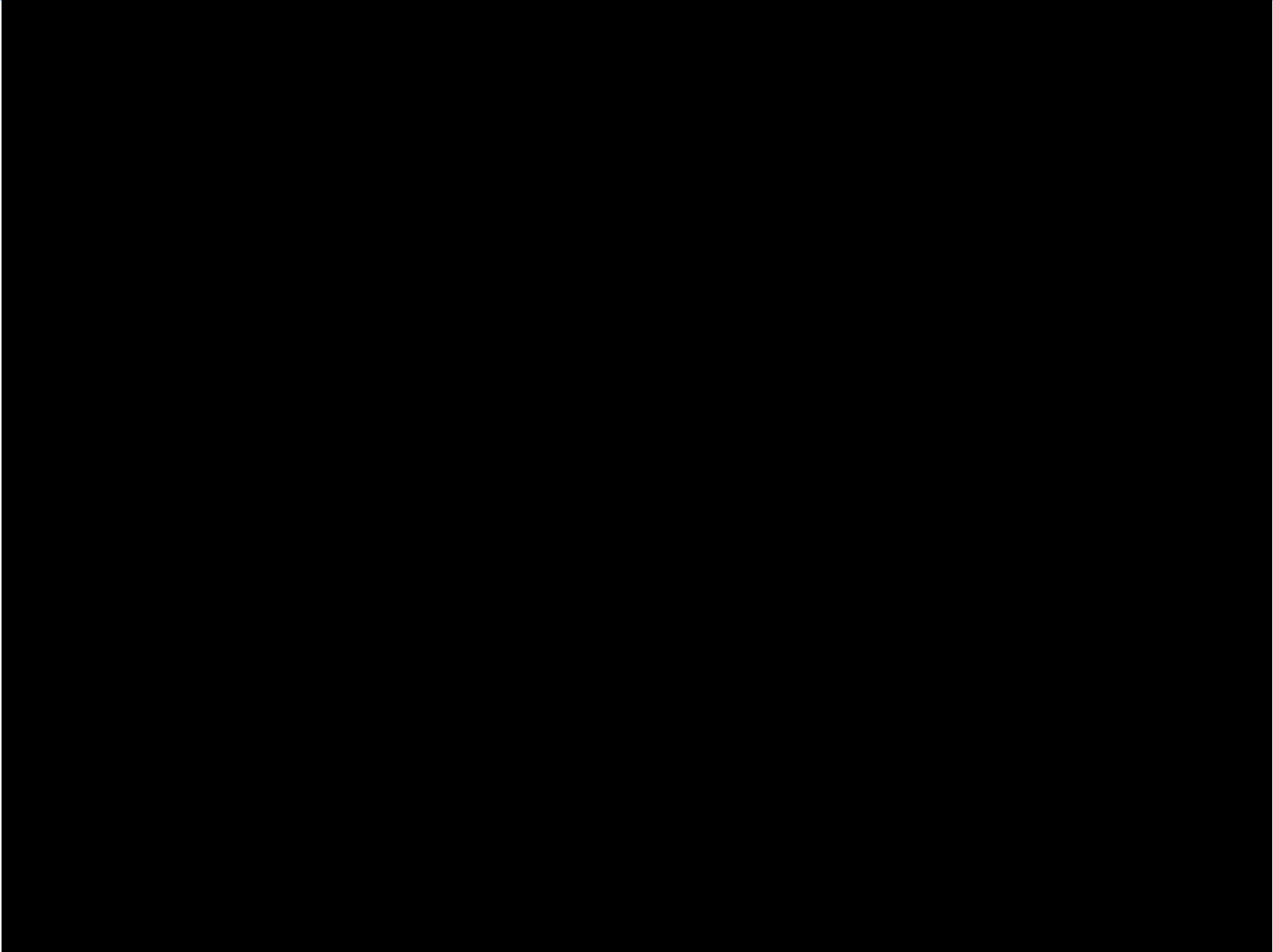
Écroulement de plusieurs dizaines de mètres cube de roche et de glace

Le 7 août 2018 à 6h15 dans le coin supérieur gauche du Glacier Carré à l'altitude approximative de 3750 m

Une cordée (Un guide et son client) est touchée par des blocs au niveau de la muraille Castelnau. Évacuation par les airs, plus de peur que de mal...

Aucune estimation possible du volume de matériel mobilisé





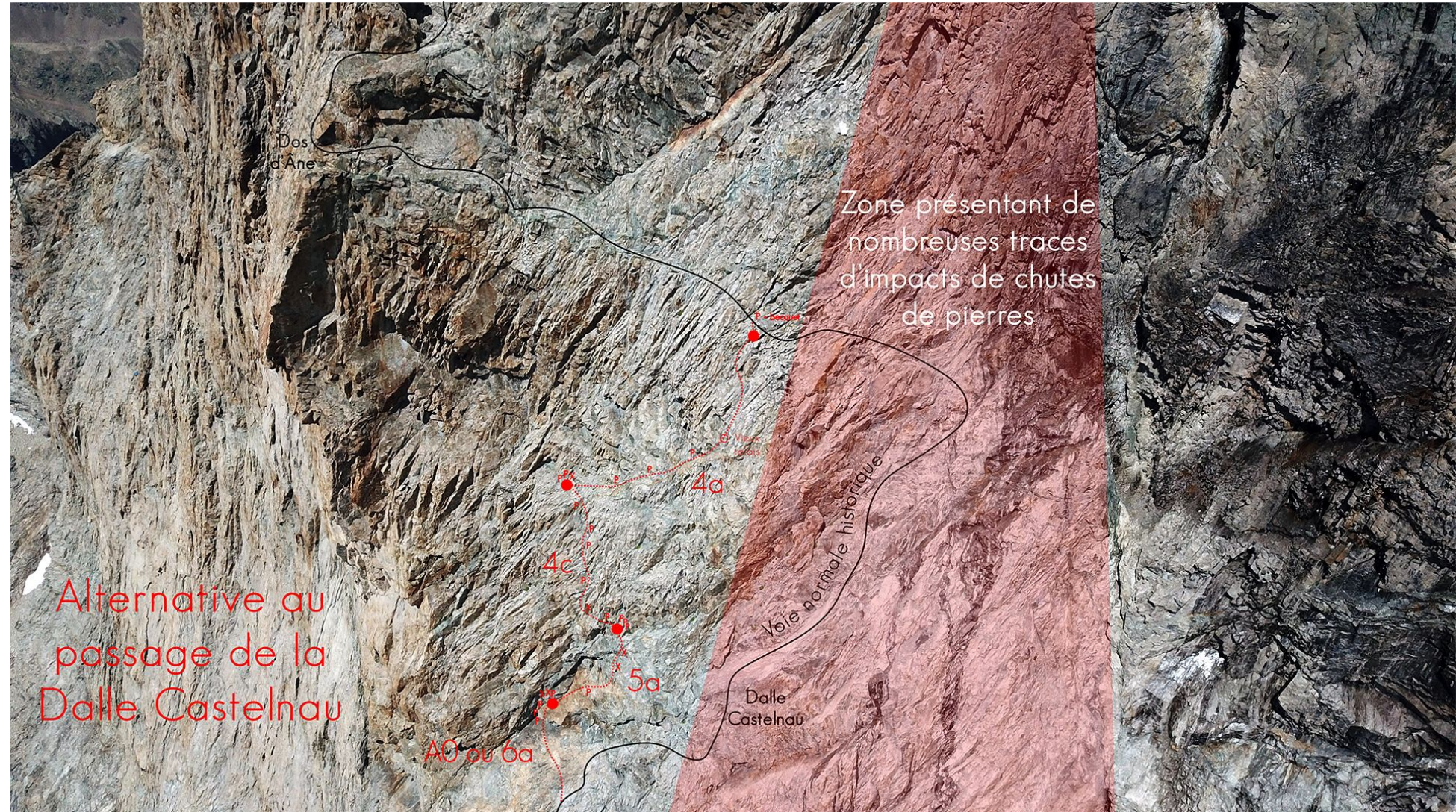




Concertations entre tous les acteurs (fédérations, syndicats, associations, services de secours, état, etc.)

Explorations

Equipement d'une variante





Impact économique

Impact sociologique

Impact sur l'imaginaire

Quel futur pour la Meije et sa voie normale ?

Toujours aménager

Une approche scientifique



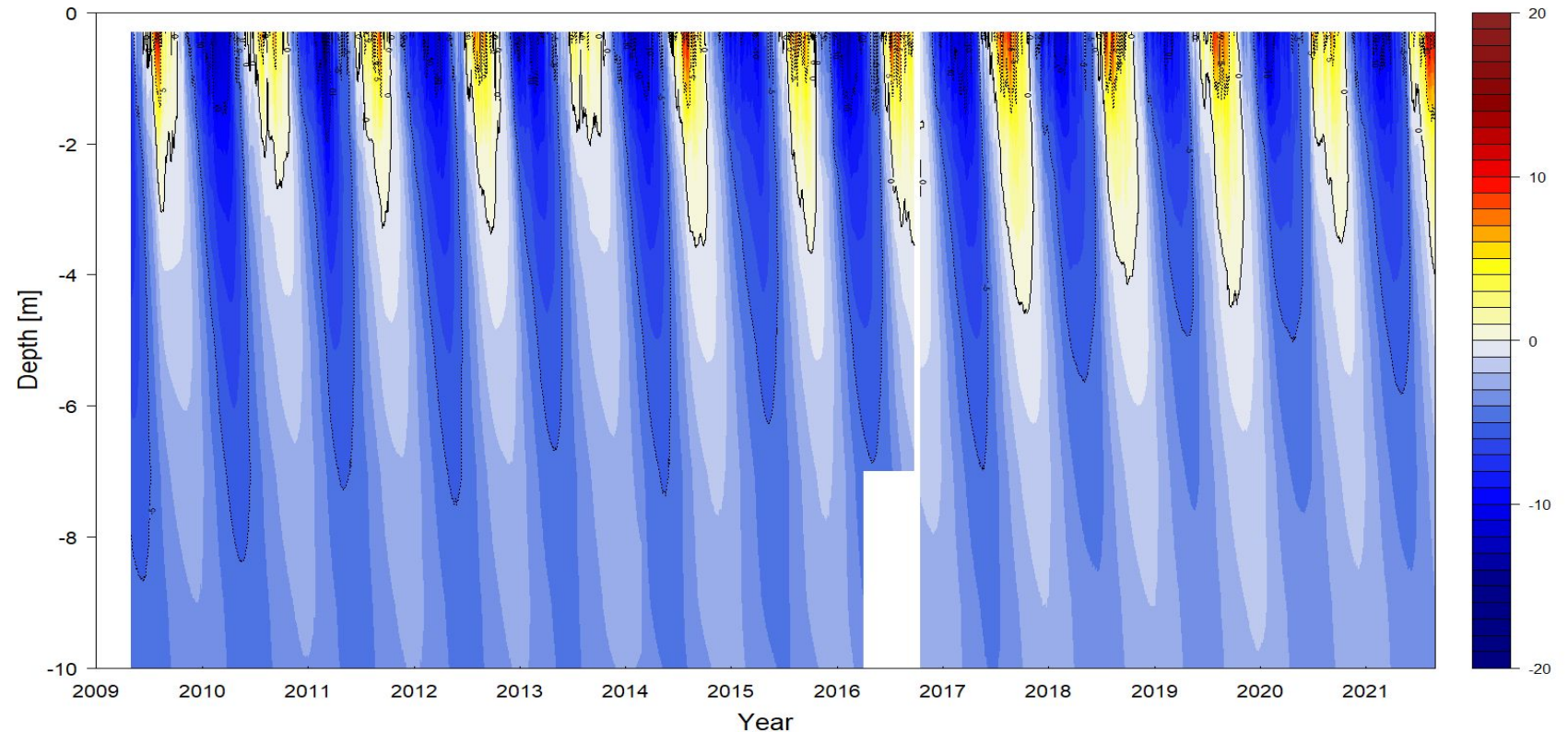
2. Observer et modéliser le permafrost de paroi



Observation de l'évolution du permafrost

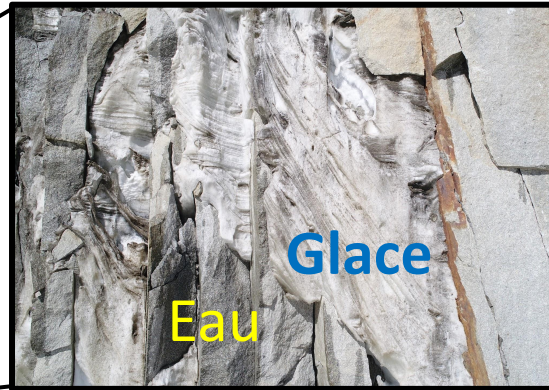
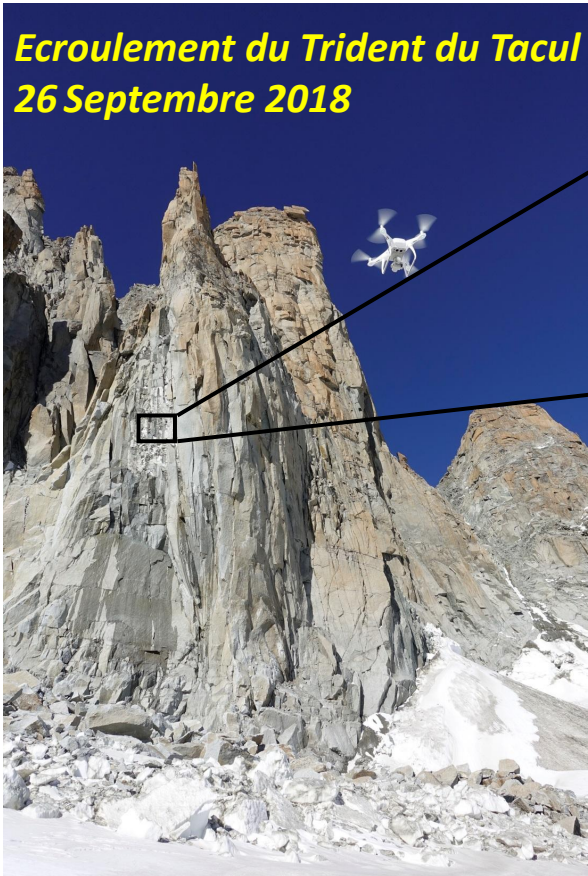
Un état thermique : Tout terrain dont la température reste $\leq 0^{\circ}\text{C}$ pendant au moins 2 ans consécutifs

- **Couche active** : + 1.5 m ; max entre fin juillet et mi septembre (novembre face S)
- **Température** : +1°C; max annuel à 10 m entre janvier et mars





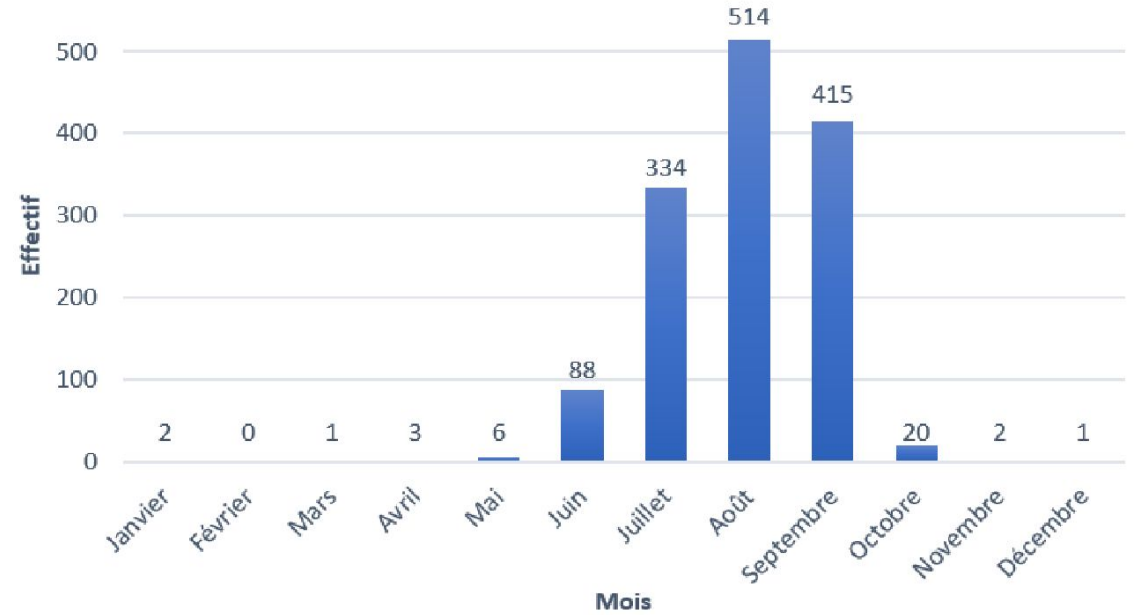
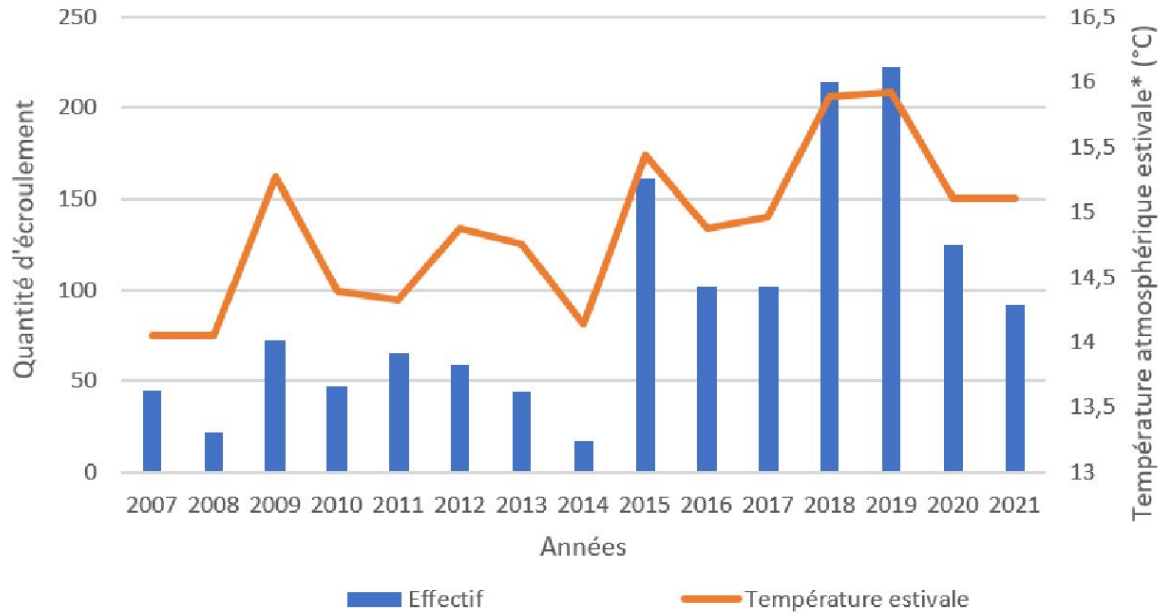
Dégradation du permafrost et écroulements : les hypothèses



- Réchauffement de la roche et de la glace des fractures depuis la surface
 - Altération des propriétés mécaniques (roche et glace)
 - Perte de lien roche-glace
 - Redistribution des volumes rocheux
- Infiltration et circulation d'eau
 - Pression hydrostatique
 - érosion de glace des fractures (perte lien roche-glace)



Observation des écroulements dans le MMB



* Température atmosphérique estivale : moyenne des températures des mois de juillet, août et septembre (°C)

Inventaire des écroulements : L. Ravanel
Graphes : modifier de L. Bednarek

- Nb d'écroulements directement en lien avec la chaleur estivale
- Survenue généralement pendant ou avant le maximum de couche active



Modéliser et cartographier la distribution du permafrost

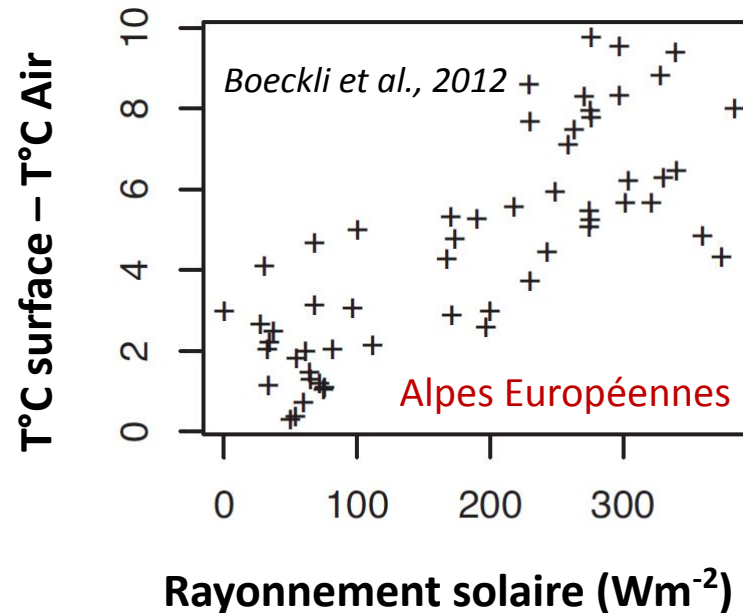
1. Monitoring de la T°C de surface



Limites altitudinales :

- ≈ 2500-2800 m faces Nord
- ≈ 3500-3800 m faces Sud

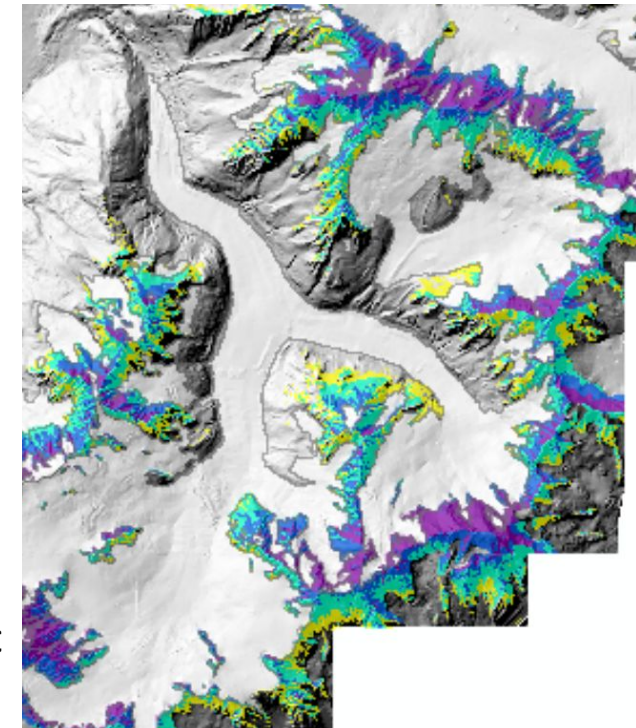
2. Modélisation statistique de la T°C de surface



3. Cartographie de la T°C de surface/permafrost

T°C annuelle moyenne

- 0 à 3°C
- 2 à 0°C
- 5 à -2°C
- < -5 °C



Difficulté de prendre en compte les effets de la neige!

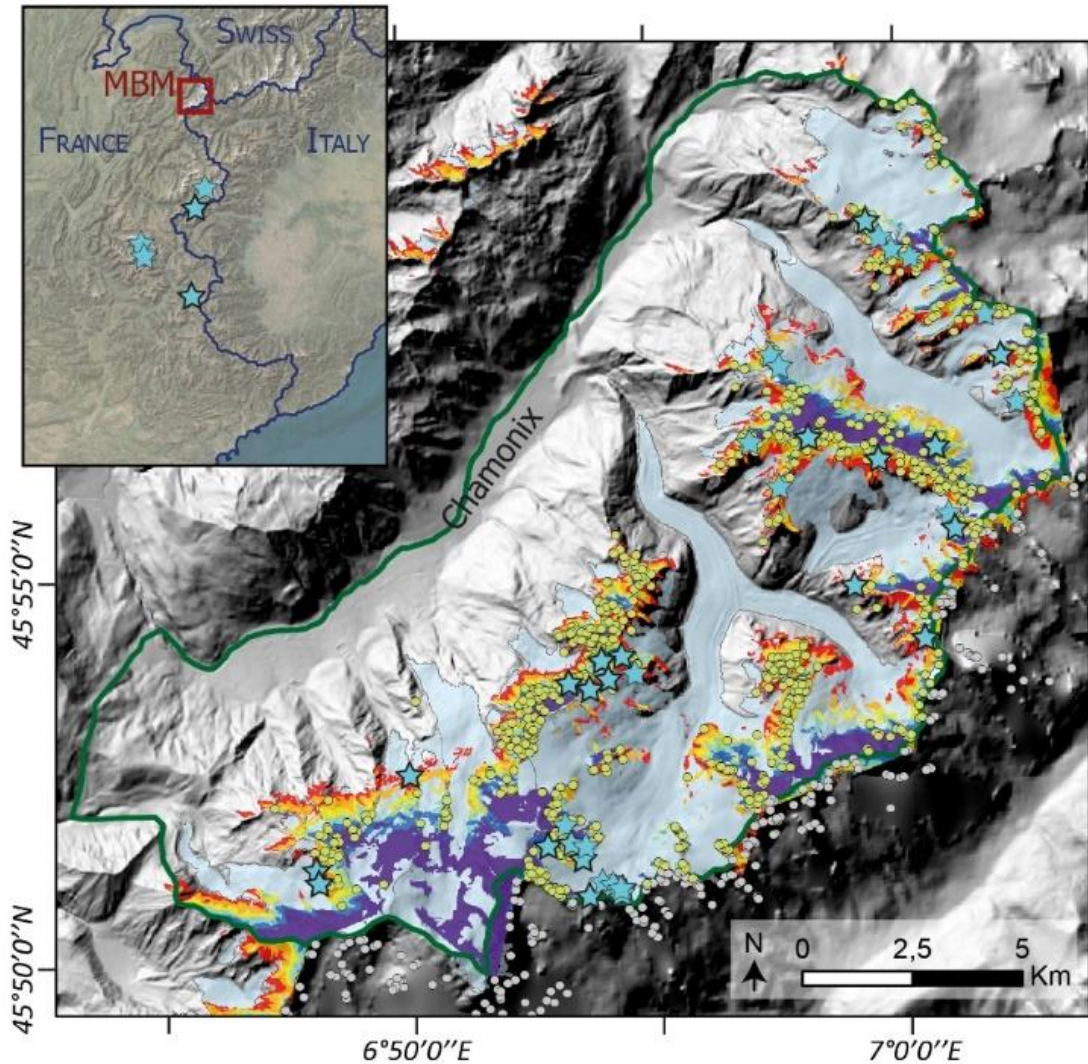


3. Appréhender et anticiper les risques actuels et à venir

Cartographie et modélisation de la propagation des écroulements
rocheux dans les Alpes Françaises



Conditions de déclenchement des écroulements



MBM rockfall database

- Rockfalls used for statistical analysis
- Rockfalls outside of the raster extent
- Extend of the DEM used to analyse the MBM rockfall database

Propagation database

- ★ Rockfall used to analyse the mobility
- ☆ Rockfall used for RockavELA calibration or validation

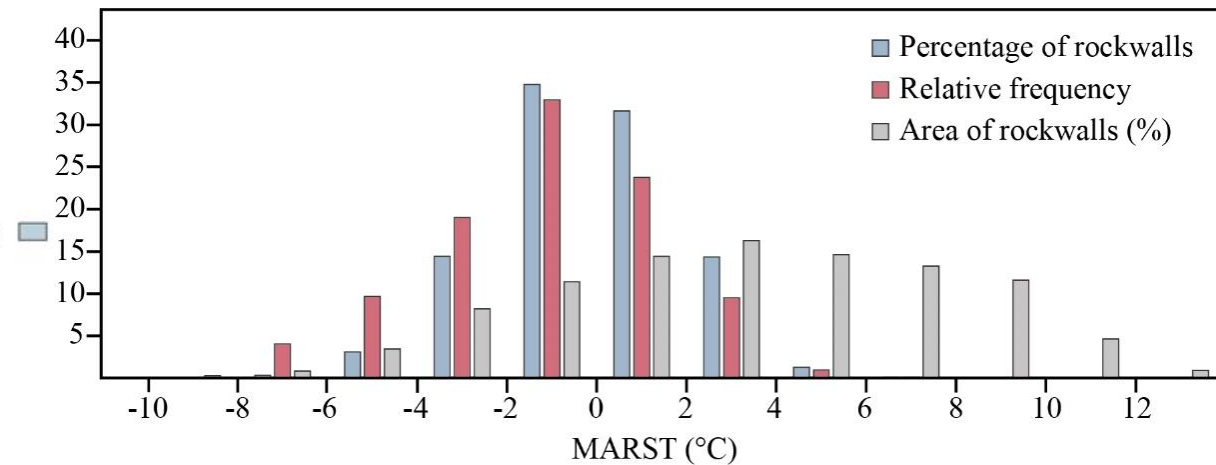
Permafrost: MARST; °C

- < -2
- -2 to -1
- -1 to 0
- 0 to 1
- 1 to 2
- 2 to 3

Glacierized areas:

-

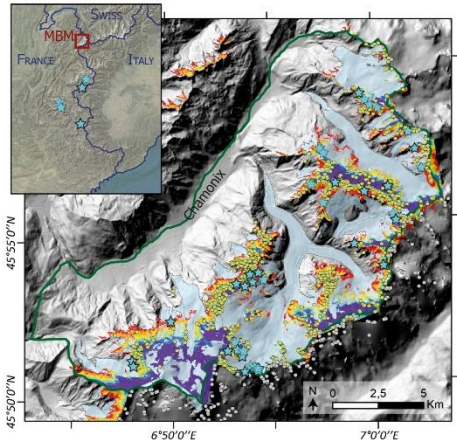
→ Déclenchement d'écroulements rocheux principalement entre **-4°C et 2°C**
 → Fréquence d'écroulements rocheux élevée entre **-2°C et 0°C**





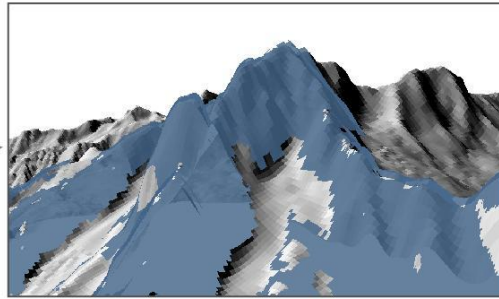
Cartographier les secteurs potentiellement instables

ANALYSE DE LA FRÉQUENCE DES ÉCROULEMENTS ROCHEUX

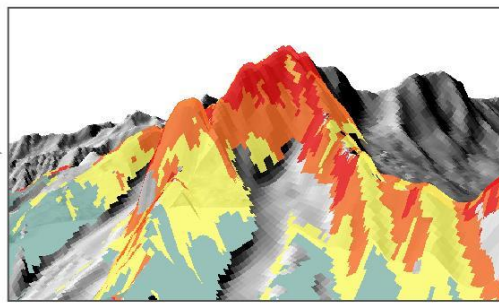


Topographical analysis

MARST analysis



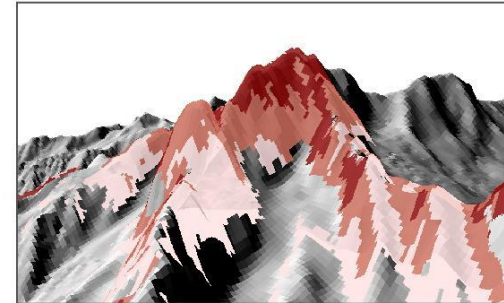
Slope >30°



MARST (°C)	RELATIVE FREQUENCY
-8 to -6	4
-6 to -4	9
-4 to -2	19
-2 to 0	33
0 to 2	24
2 to 4	9
4 to 6	1

CARTOGRAPHIE DES ZONES DE DÉPART

ROCK SLOPE FAILURE SUSCEPTIBILITY INDEX



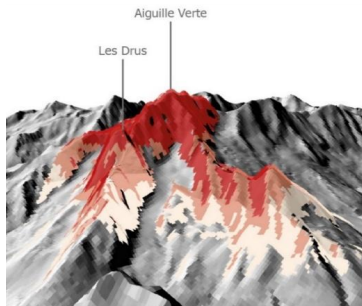
- 1 : Conserve le maximum de parois dans lesquelles se déclenchent des écoulements rocheux
- 2 : Scénario moyen
- 3 : Parois les plus "actives"



Modéliser la propagation des écroulements rocheux

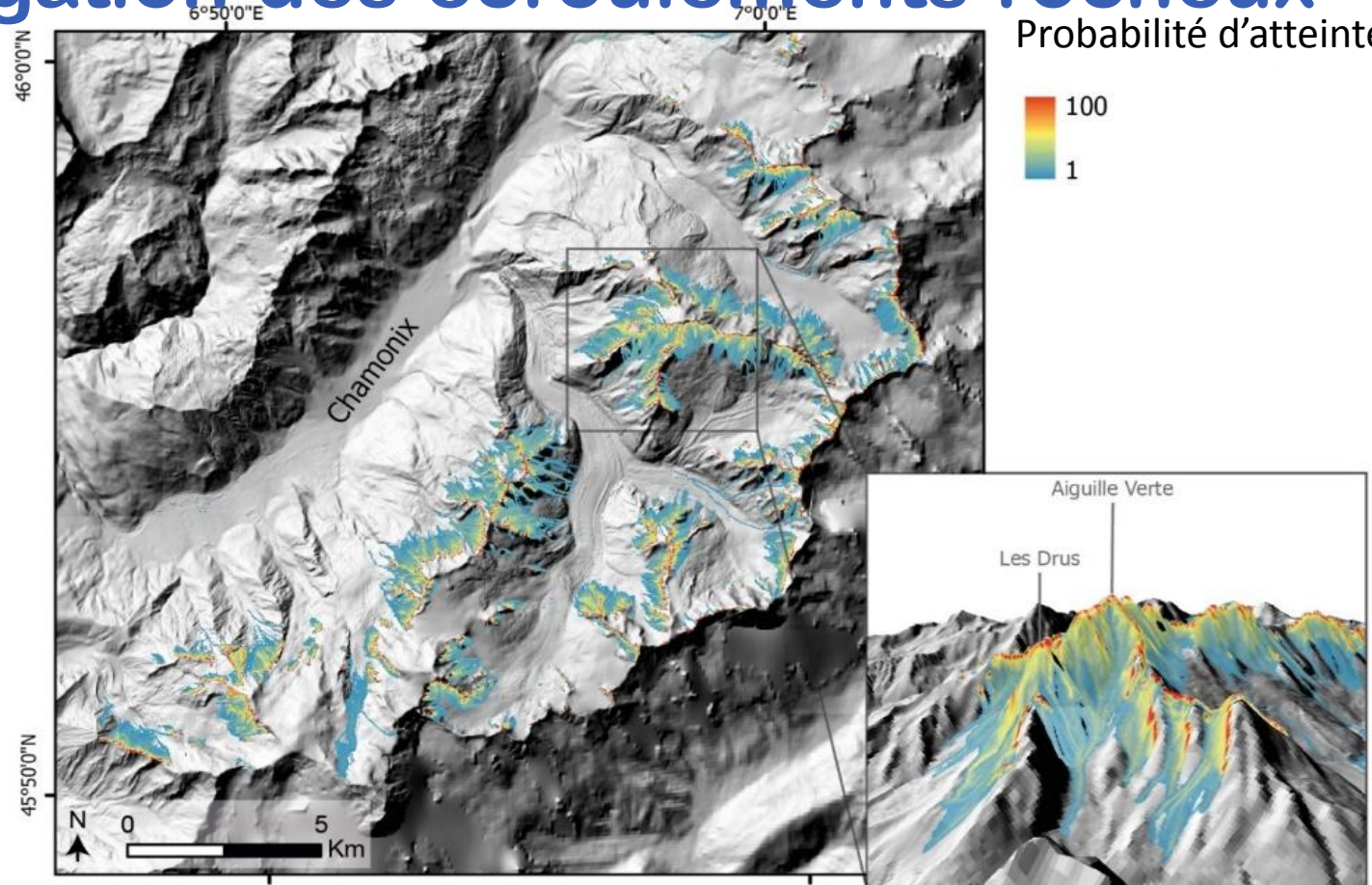
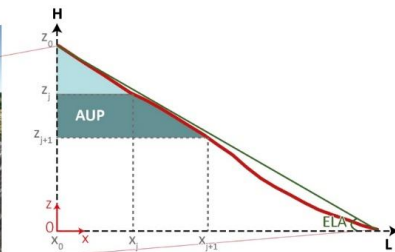
En entrée du modèle :

- Modèle Numérique de Terrain
- Les zones de départ



Les principes du modèle :

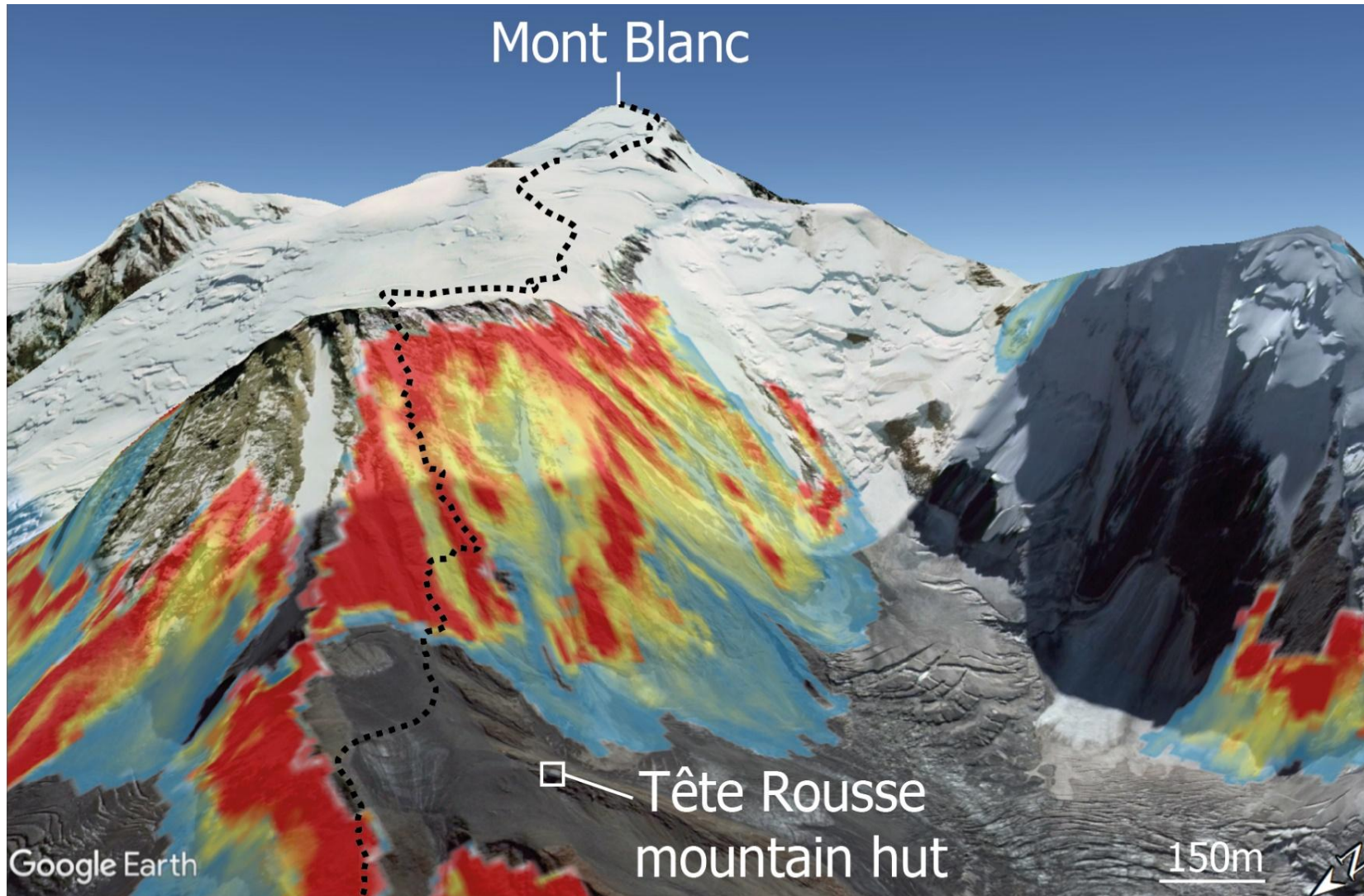
- Calcul des trajectoires à partir de la pente
- Autorise un étalement latéral



→ Cartographier des zones qui peuvent être impactées par des écroulements rocheux dans les Alpes Françaises

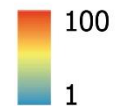


Appréhender les risques à venir



□ Quels itinéraires ou infrastructures peuvent être impactés ?

Reach probability (%)^{*5}:

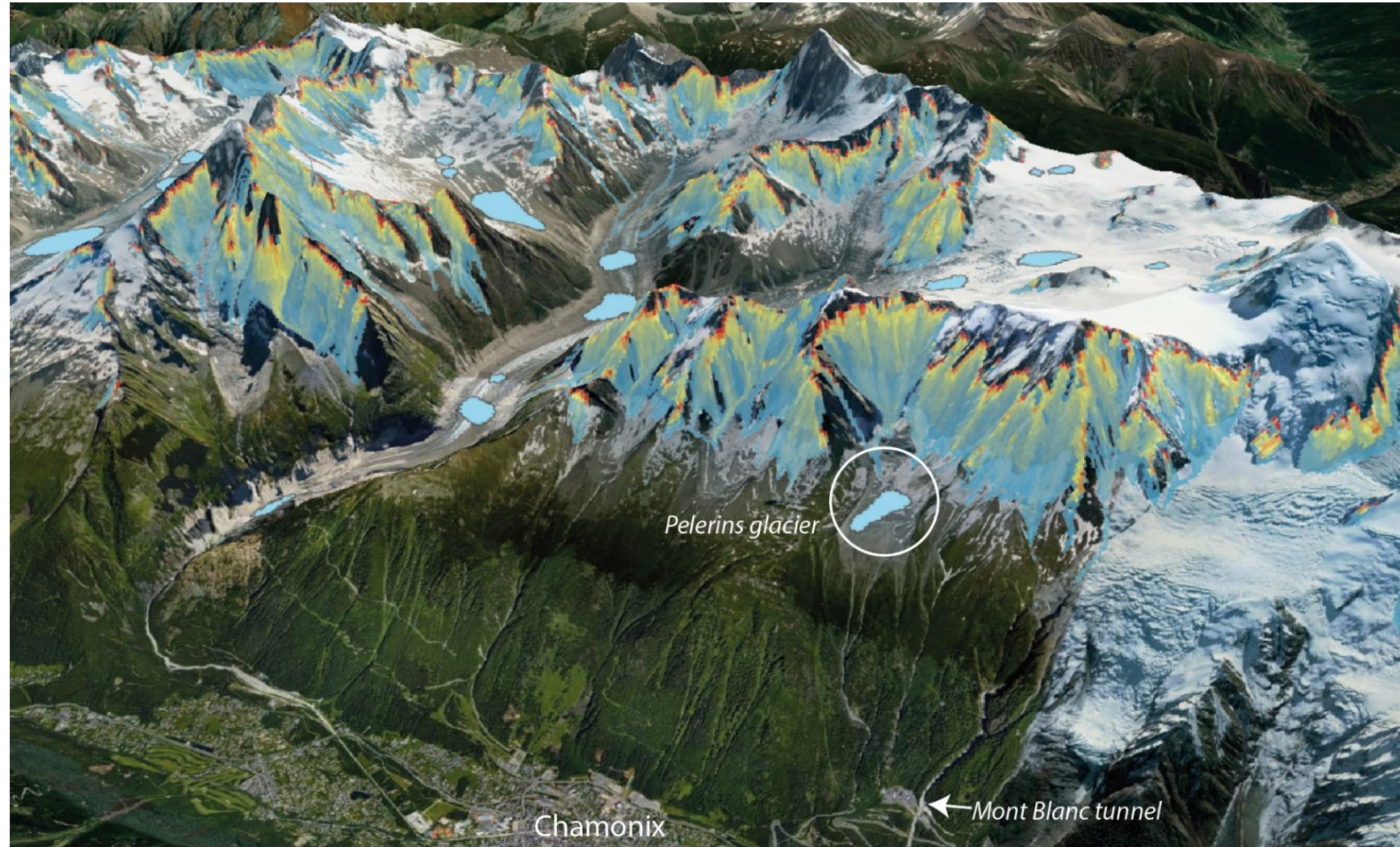


..... Normal route to the Mont Blanc summit



Appréhender les risques à venir

□ Existe-t-il des risques d'aléas en cascade ?





Conclusions

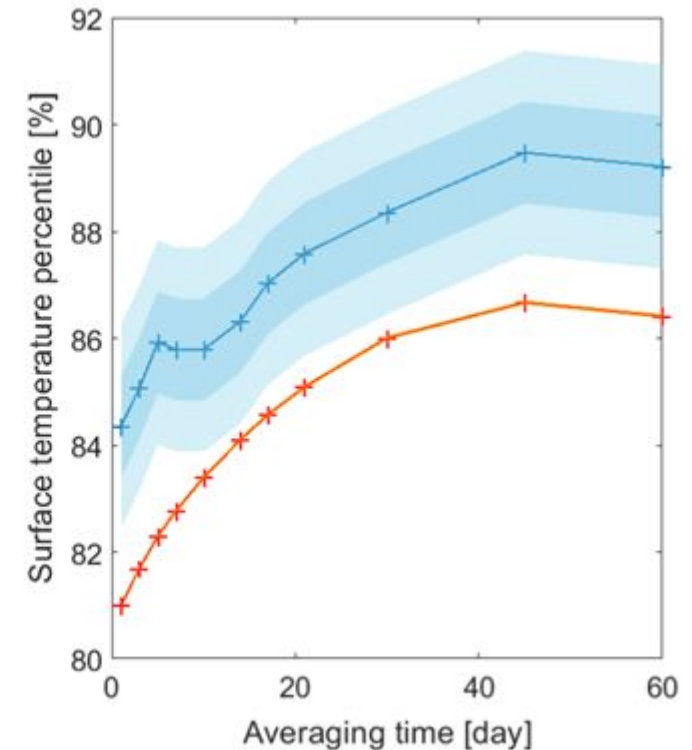
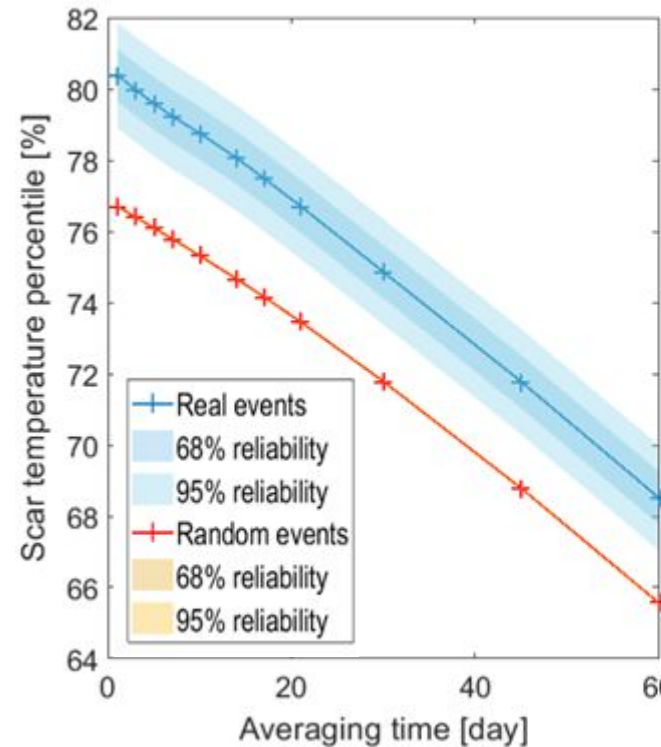
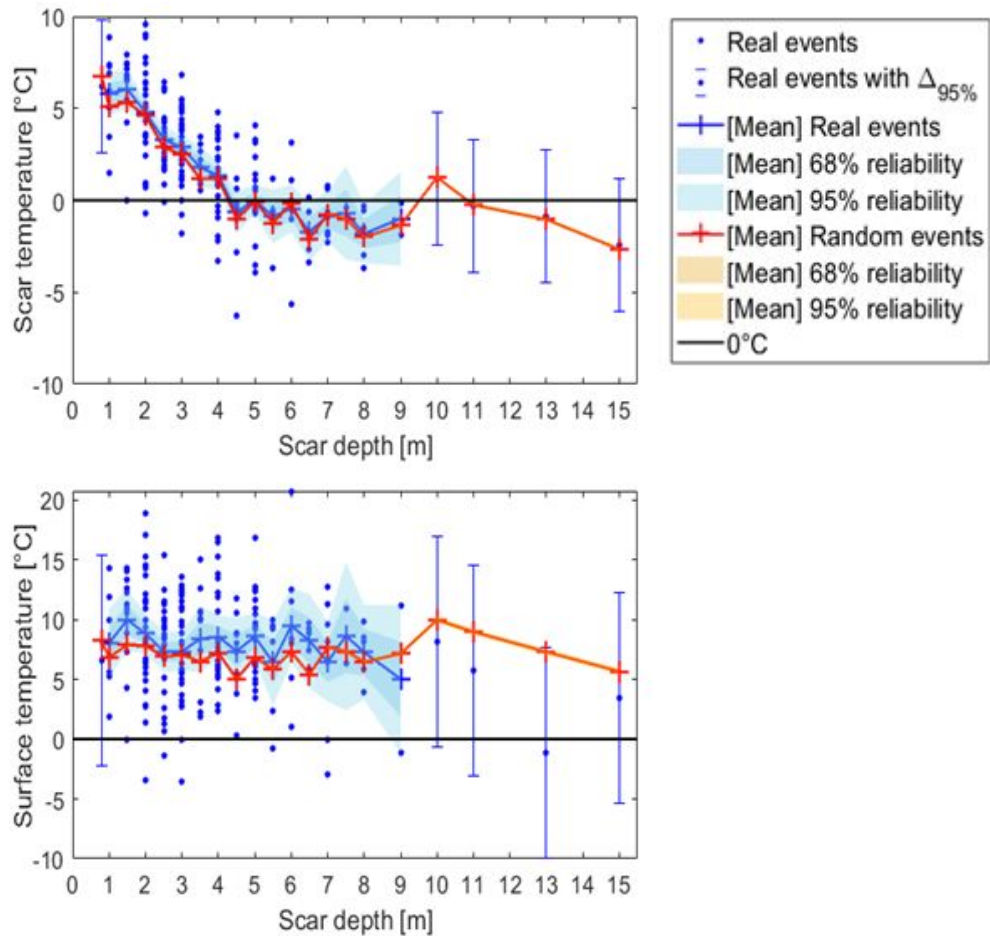
- Des écroulements de plus en plus fréquents voire volumineux qui touchent tous les hauts massifs alpins
- Des activités socio-professionnelles impactées
- Des inventaires d'écroulements et des cartes de permafrost qui permettent de prédire où les écroulements sont les plus susceptibles de se déclencher
- Des travaux en cours pour :
 - Mieux comprendre les mécanismes de déstabilisation
 - Essayer d'anticiper quand les écroulements peuvent se déclencher



Slides complémentaires



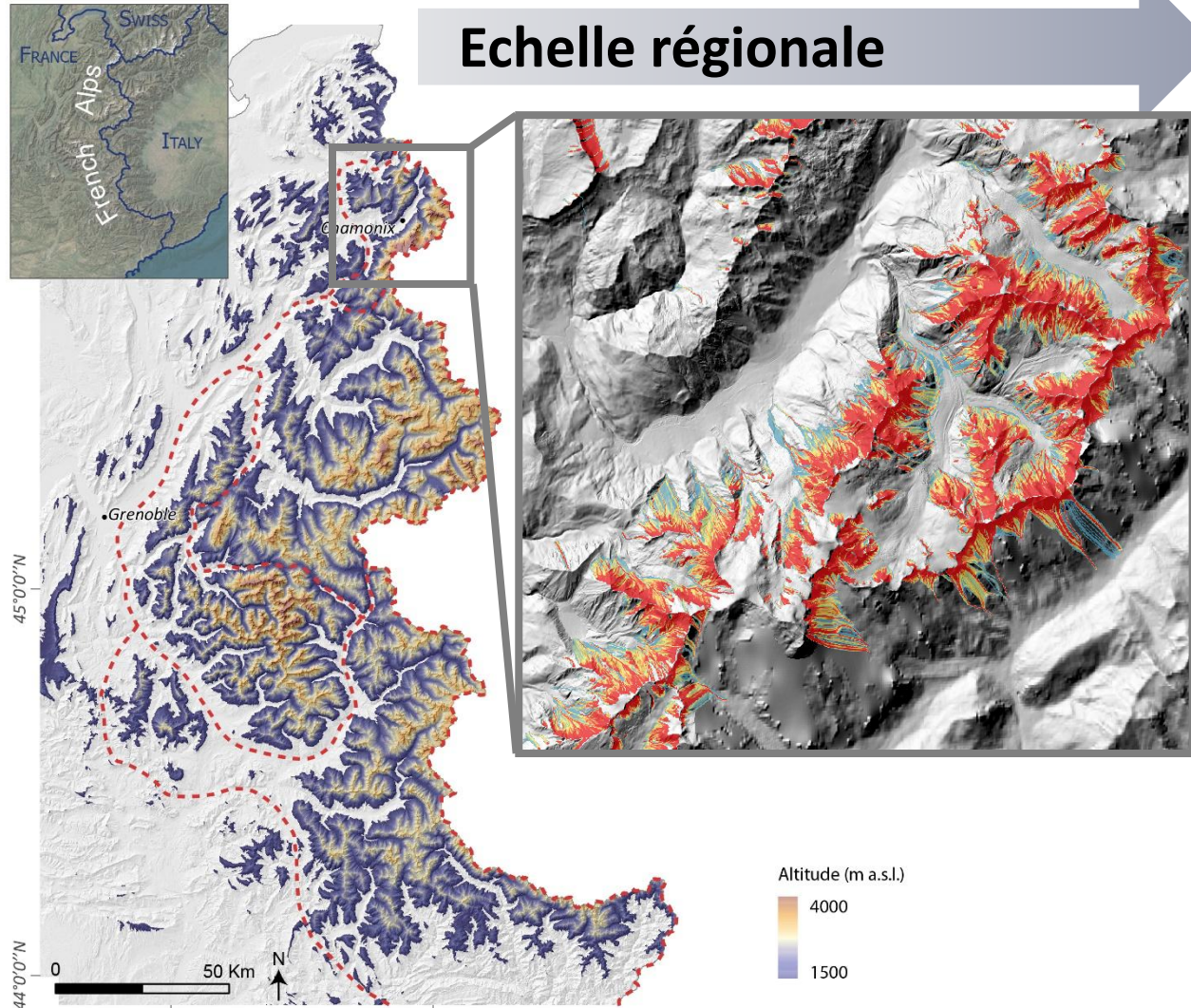
Quand se déclenchent les écroulements ?





Perspectives

Echelle régionale

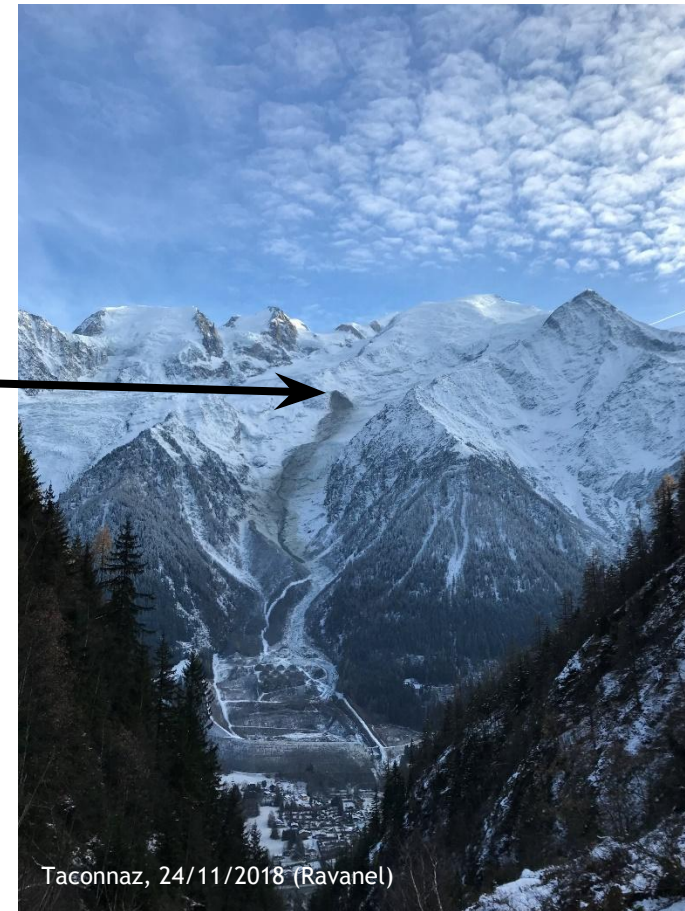
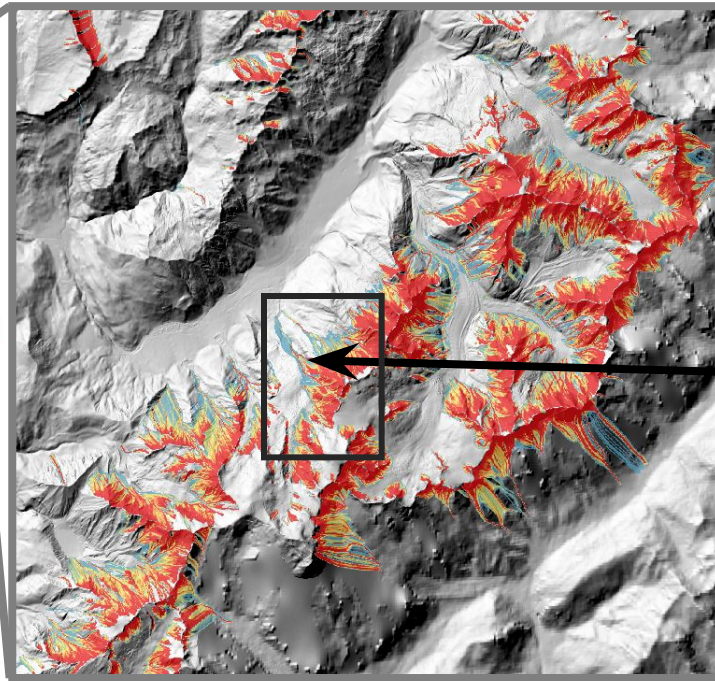
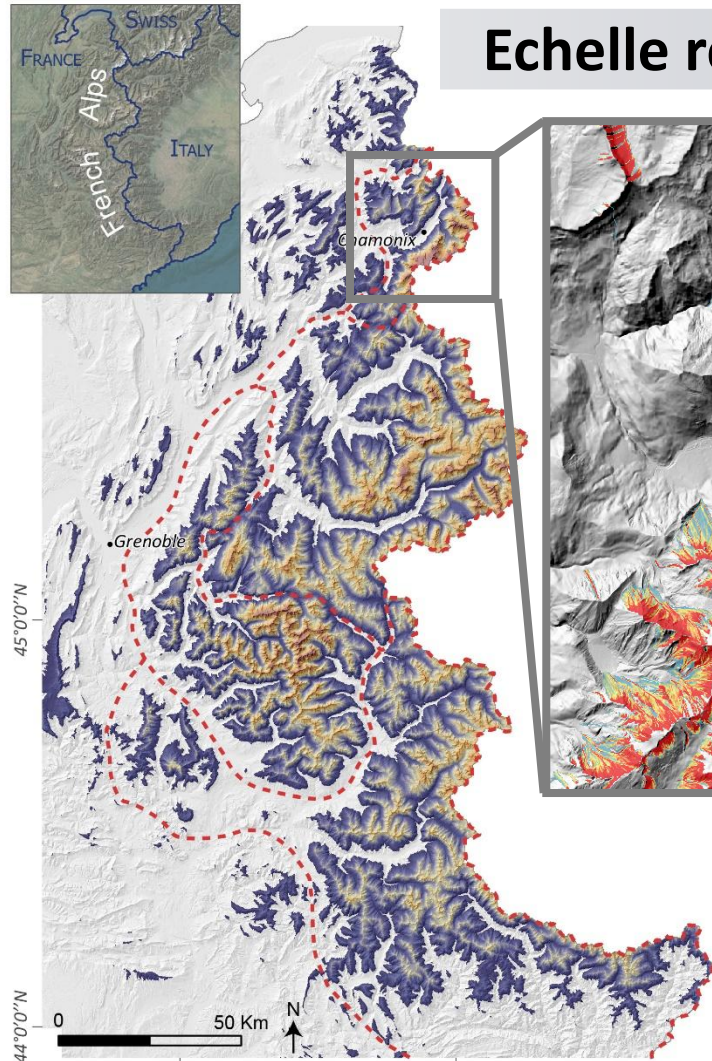




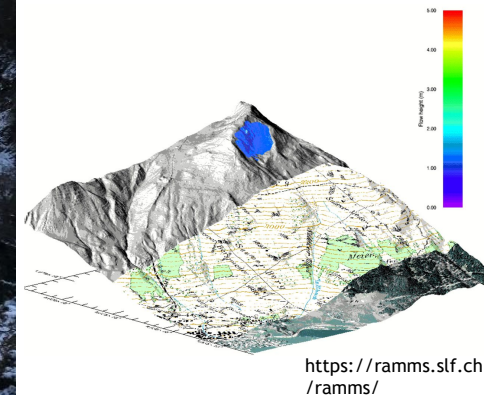
Perspectives

Echelle régionale

Echelle du site



- Etudes approfondies
- Monitoring
- Modélisation à base physiques

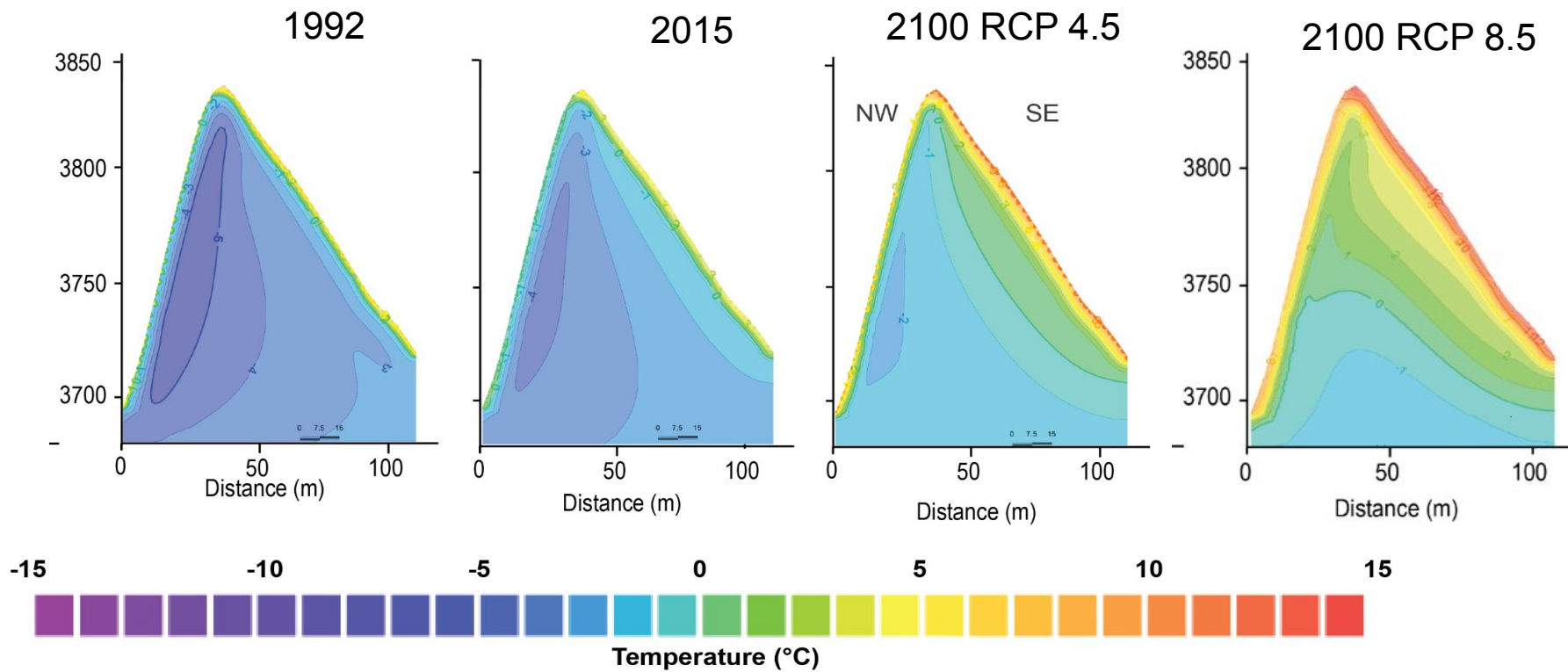


<https://ramms.slf.ch/ramms/>



Modéliser l'évolution du permafrost

□ Disparition quasi-certaine à la fin du siècle





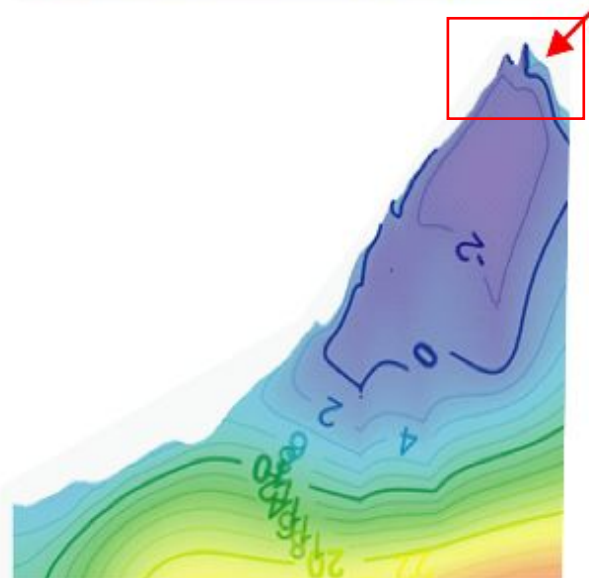
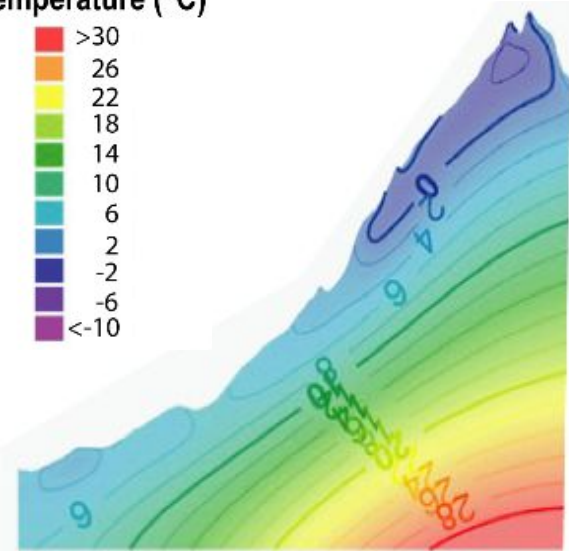
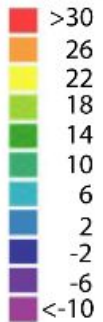
Intégrer l'eau dans les modèles thermiques

Dégel progressif
(dégradation du permafrost)

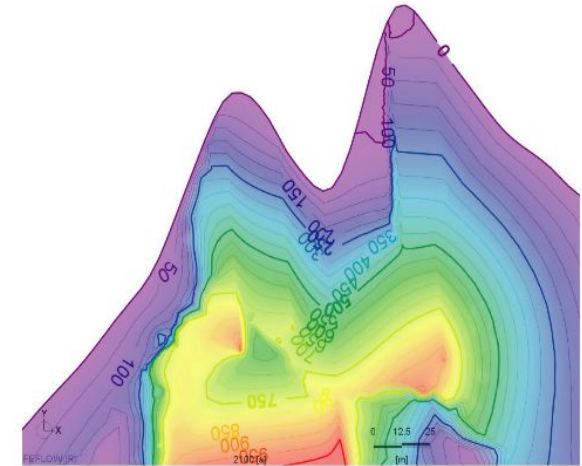
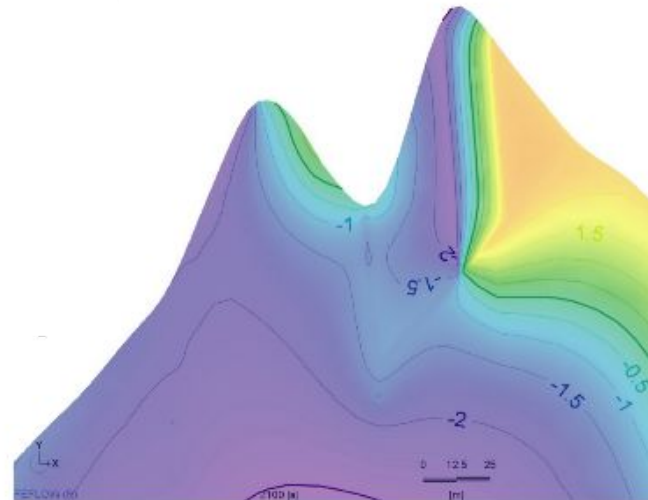
Sans eau

Avec eau

Temperature (°C)



Temperature (°C)



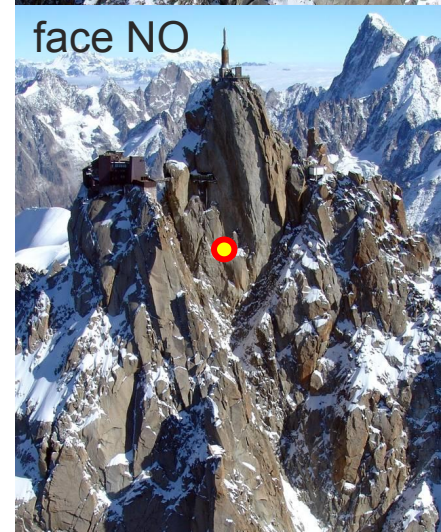
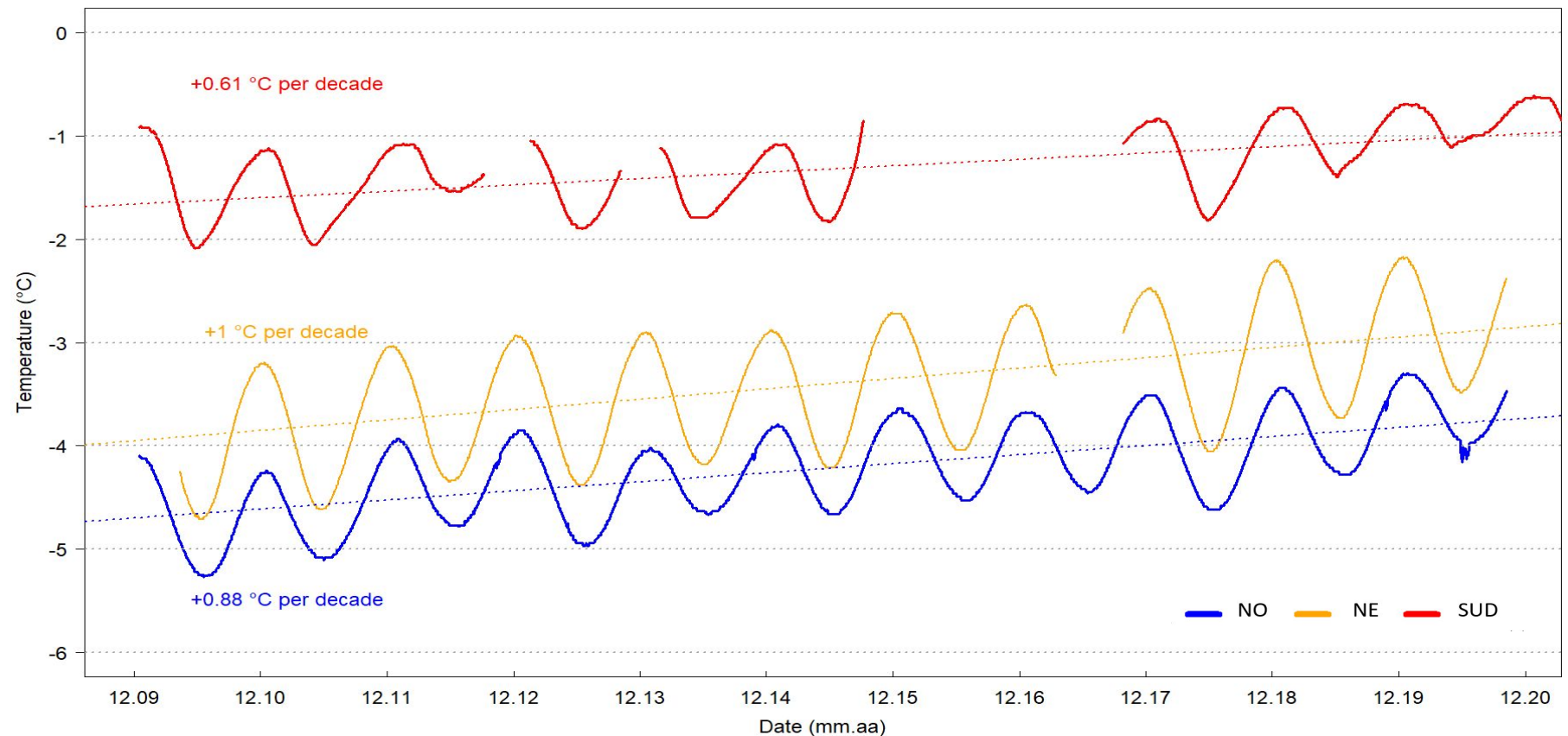
Pressure (kPa)





Evolution du permafrost à 10 m de profondeur

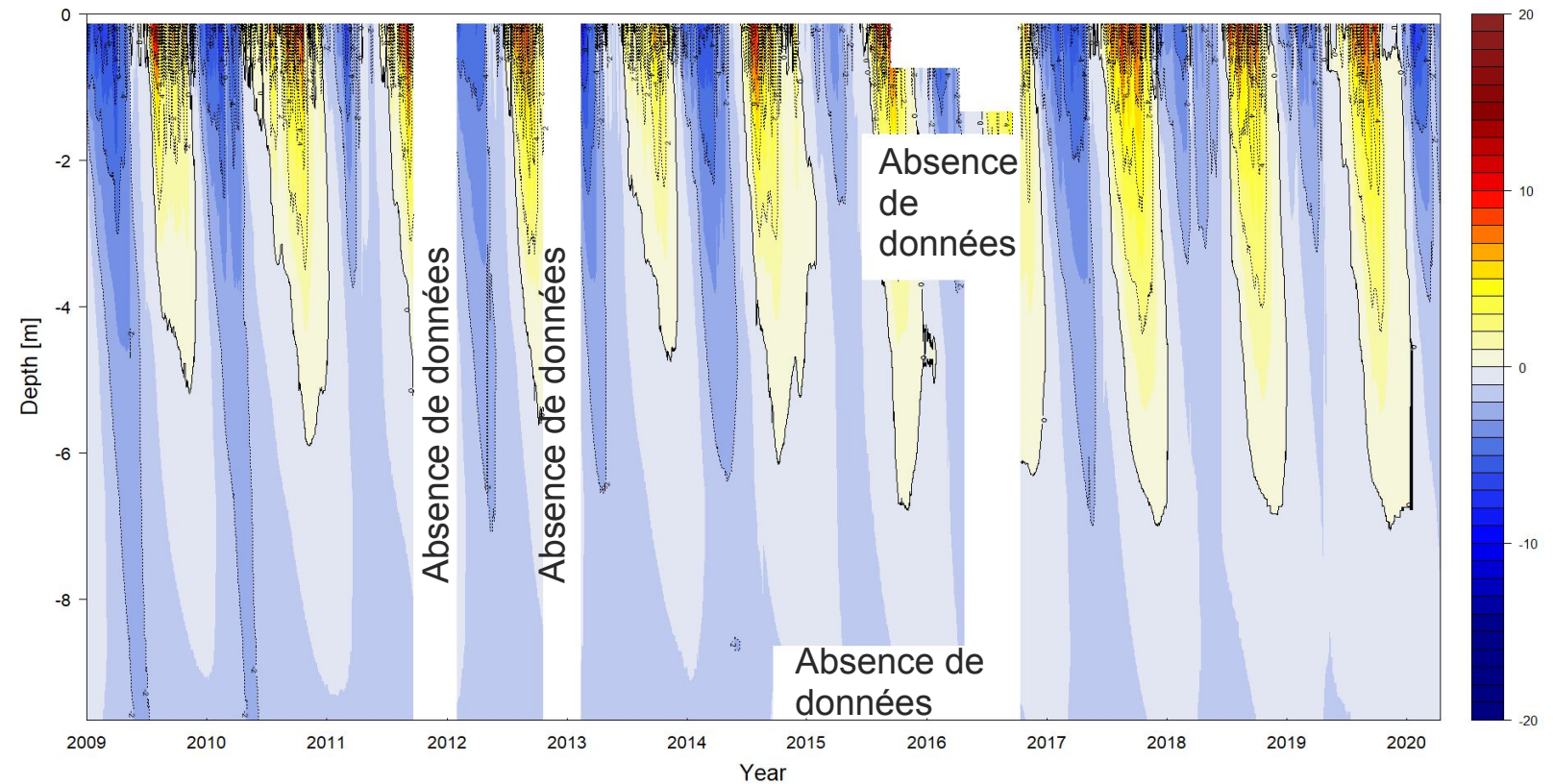
Jusqu'à +1°C en 10 ans! Réchauffement le plus important enregistré à l'échelle planétaire !





Observation de l'évolution du permafrost

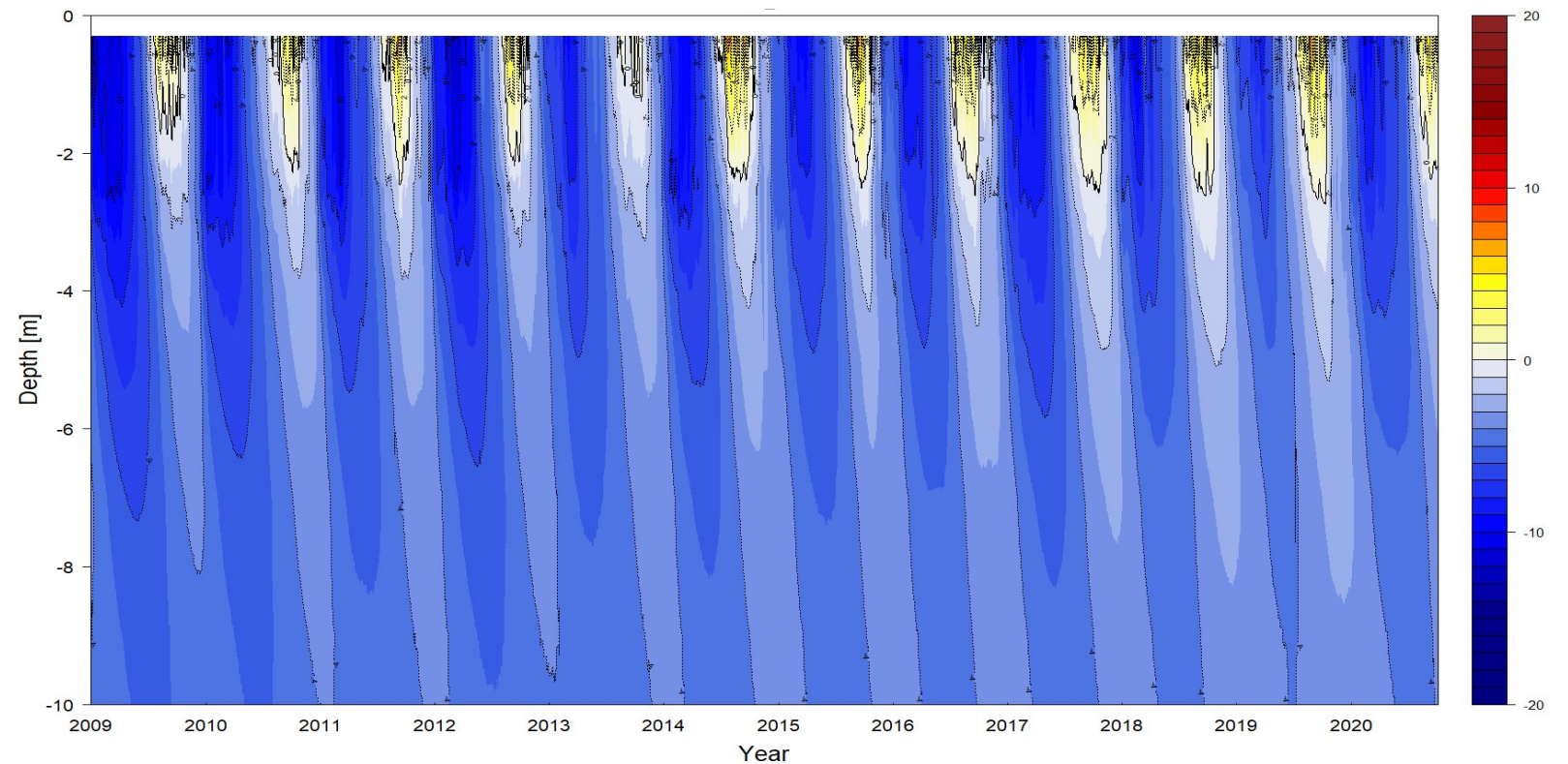
□ Couche active : de 5.2 à 7 m





Observation de l'évolution du permafrost

□ Couche active : de 1.8 à 2.6 m, +1°C 10 m de profondeur





Situation géologique

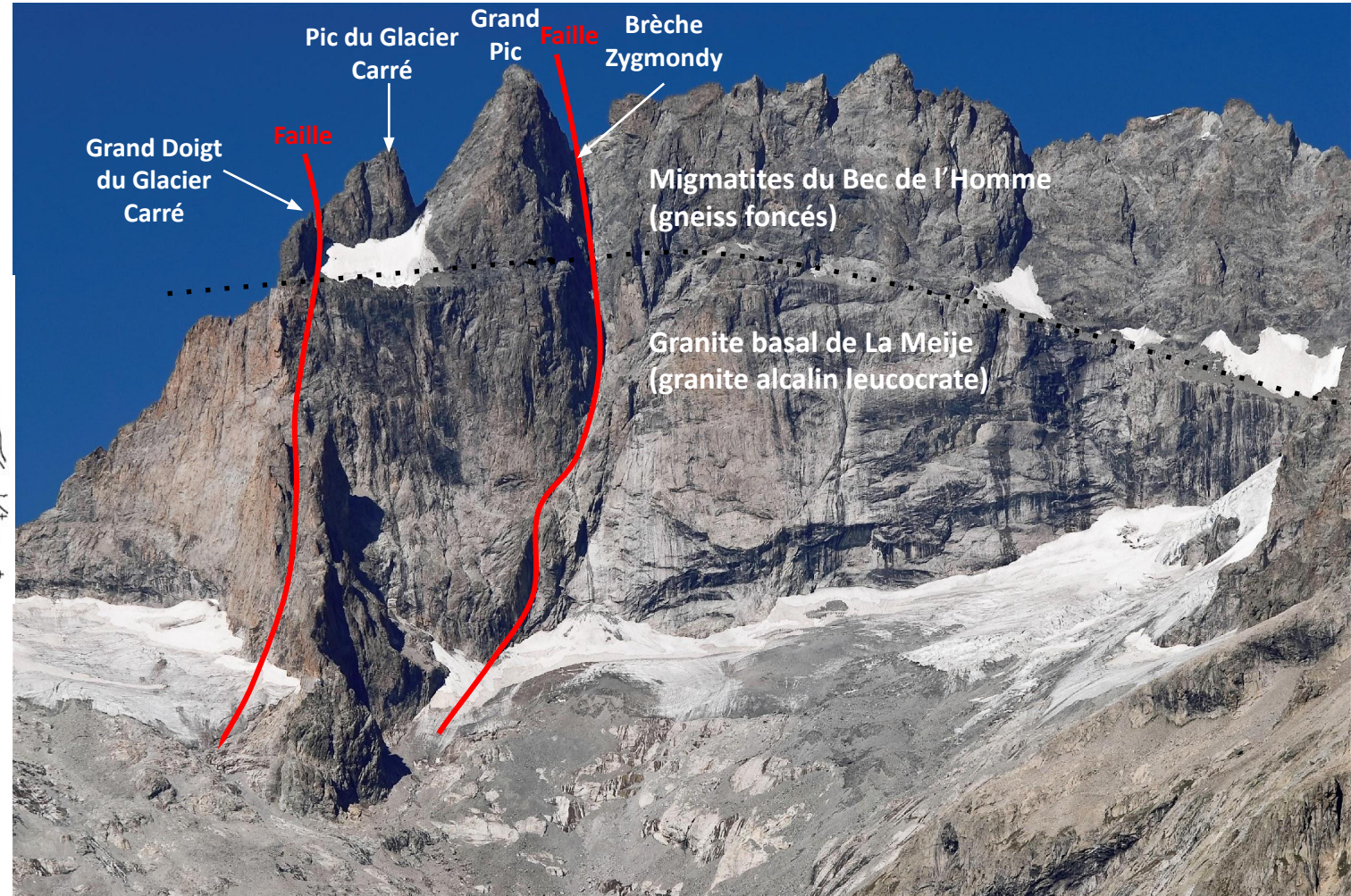
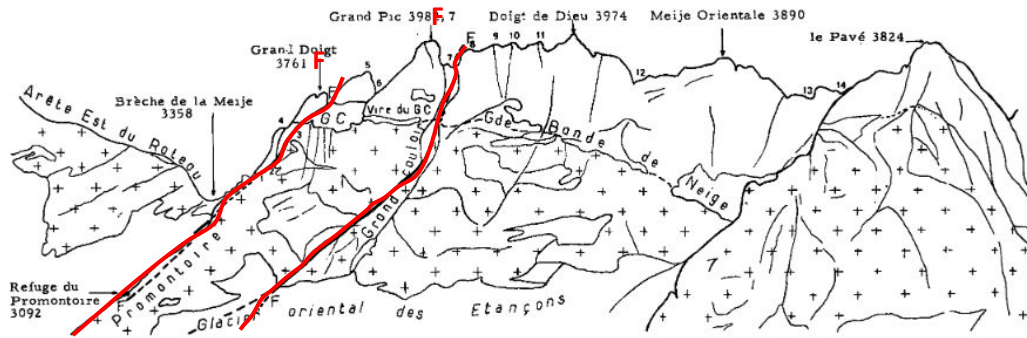


Schéma d'interprétation de Patrick LE FORT et Arnaud PECHER grâce à une photo de Jérôme BIJU DUVAL
Géologie des terrains cristallins de la Meije, Note préliminaire