

Comprendre le rôle du permafrost dans la déstabilisation des versants rocheux de haute montagne

Bilan et perspectives de près de deux décennies d'étude dans les Alpes françaises

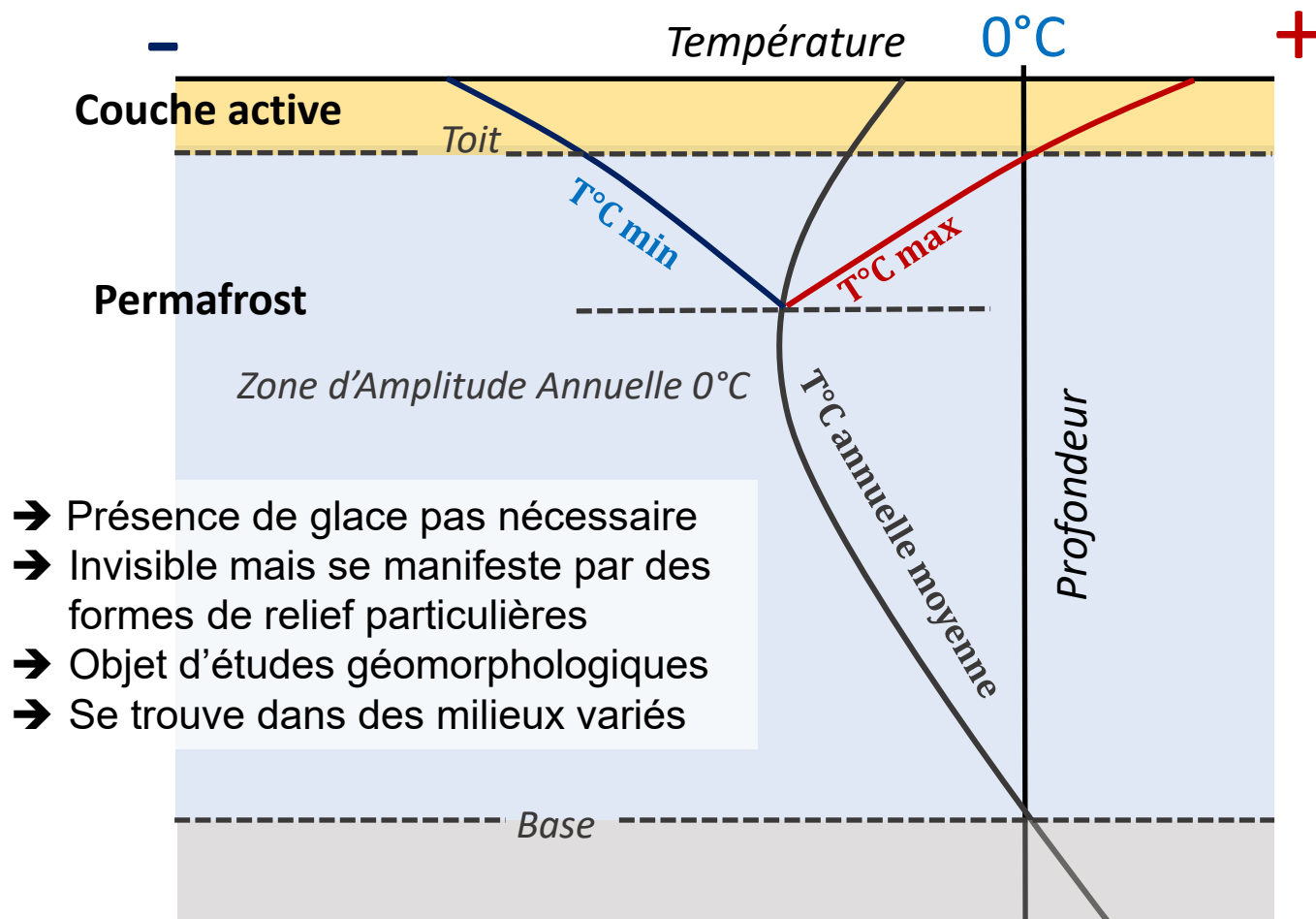
Florence Magnin

L. Ravanel, P. Deline, J-Y., Josnin, M. Ben-Asher, M. Cathala, J. Bock



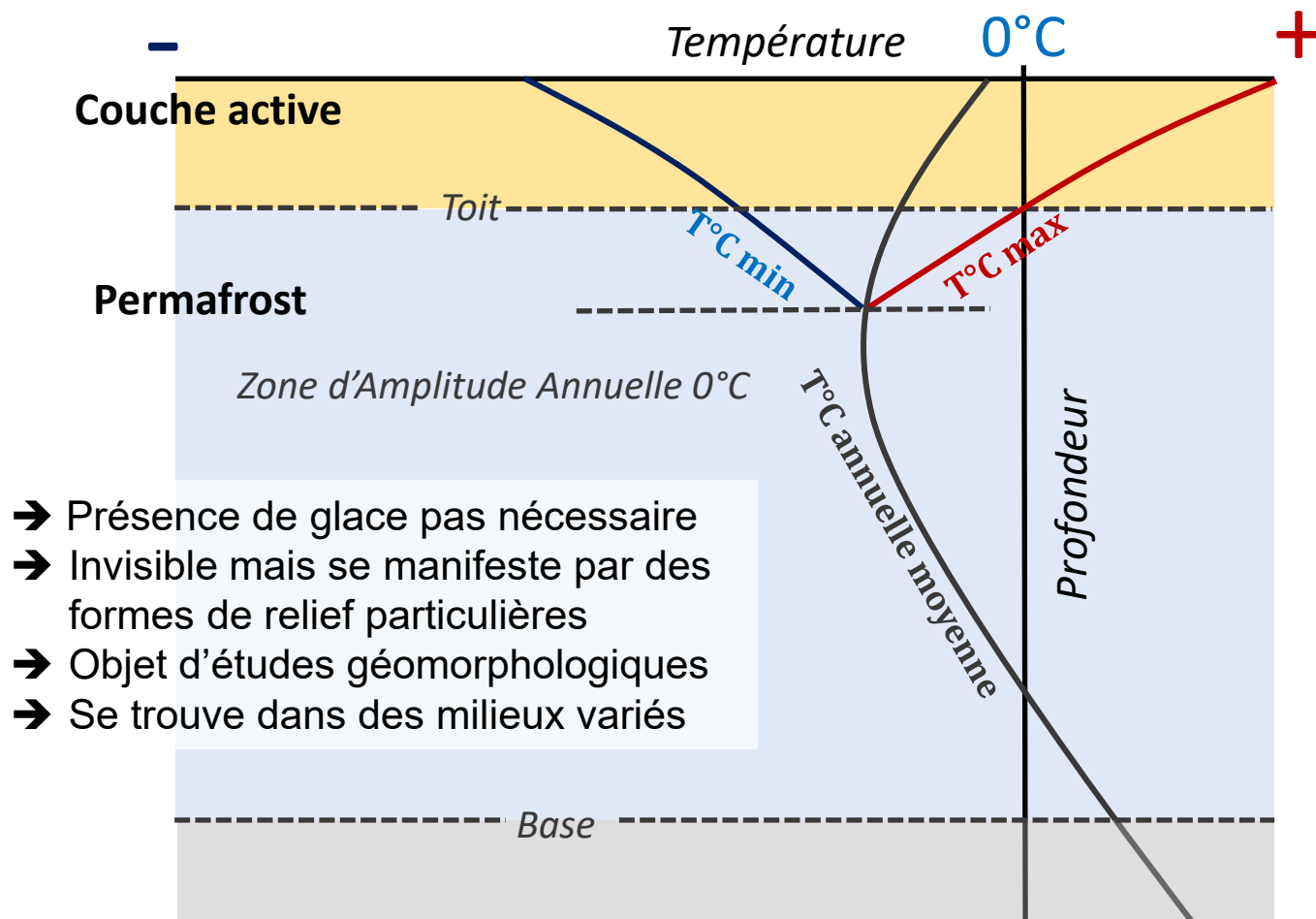
Eléments de définition

→ Tout matériau lithosphérique dont la température est $\leq 0^{\circ}\text{C}$ pendant au moins 2 ans consécutifs

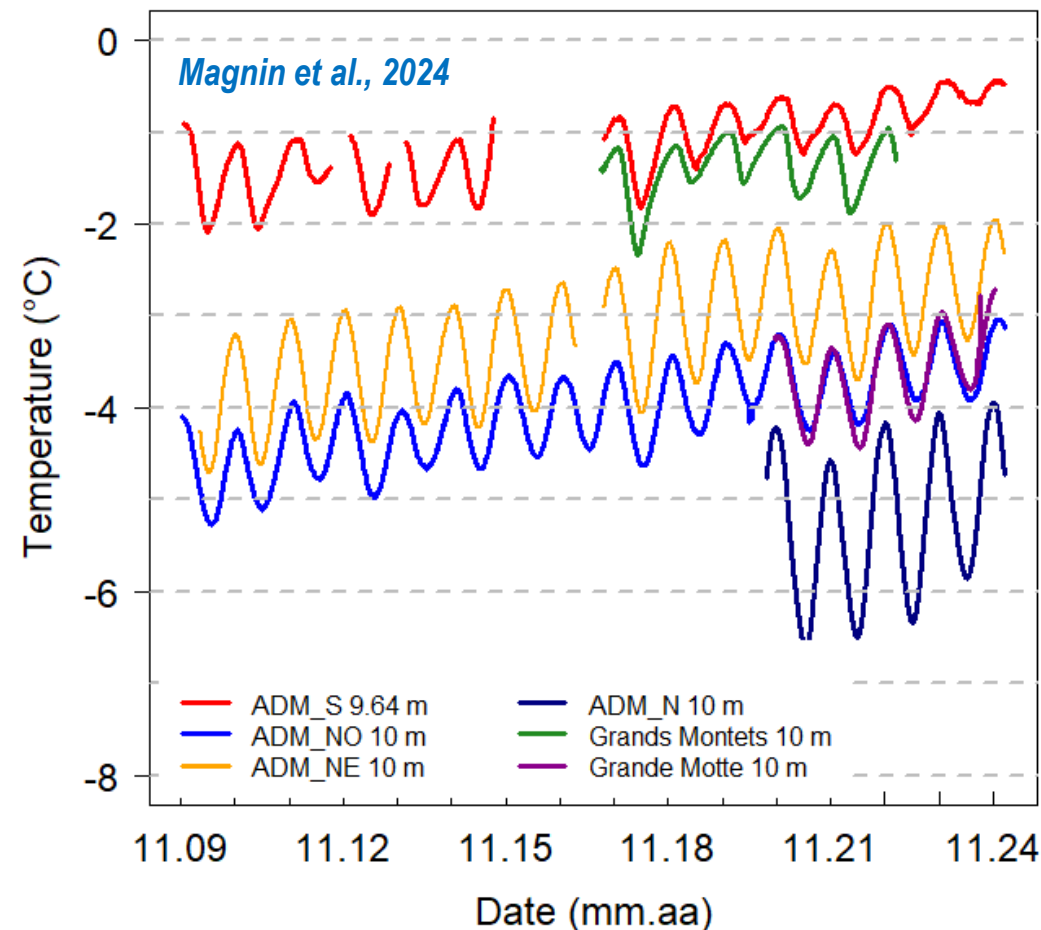


Eléments de définition

→ Dégénération du permafrost : approfondissement de la couche active (et réchauffement du permafrost)

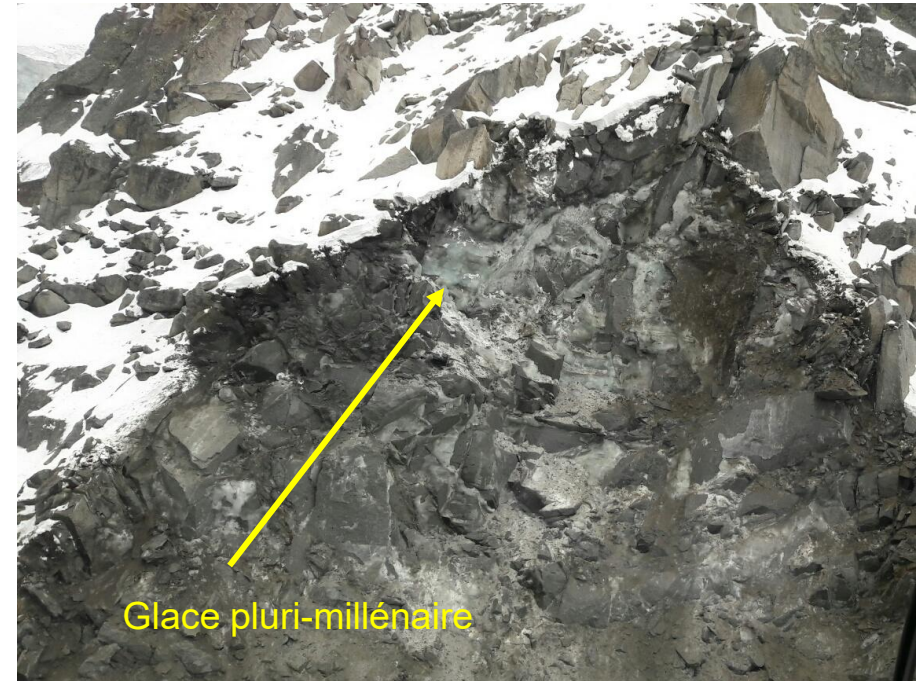
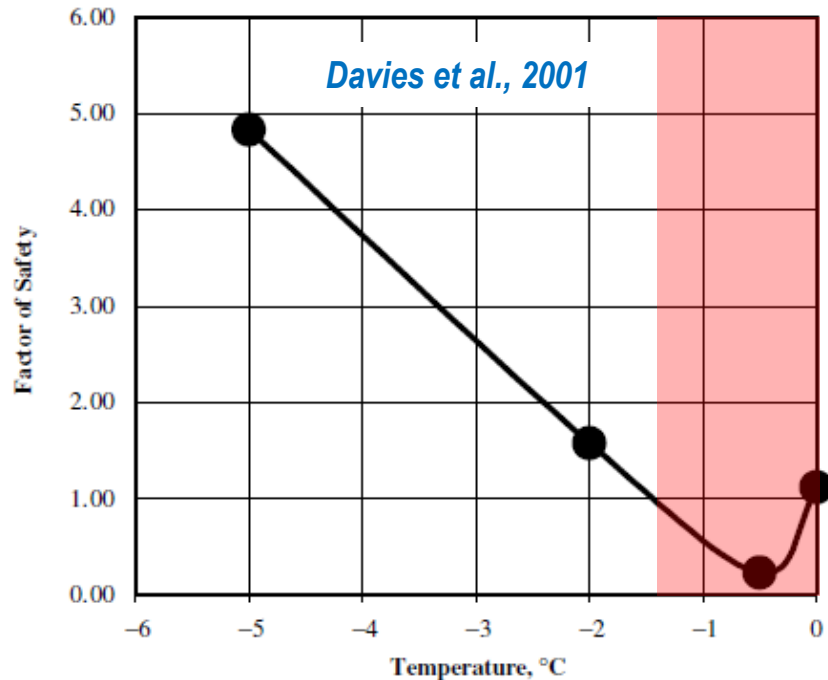


Evolution de la T°C à 10 m de profondeur dans les Alpes



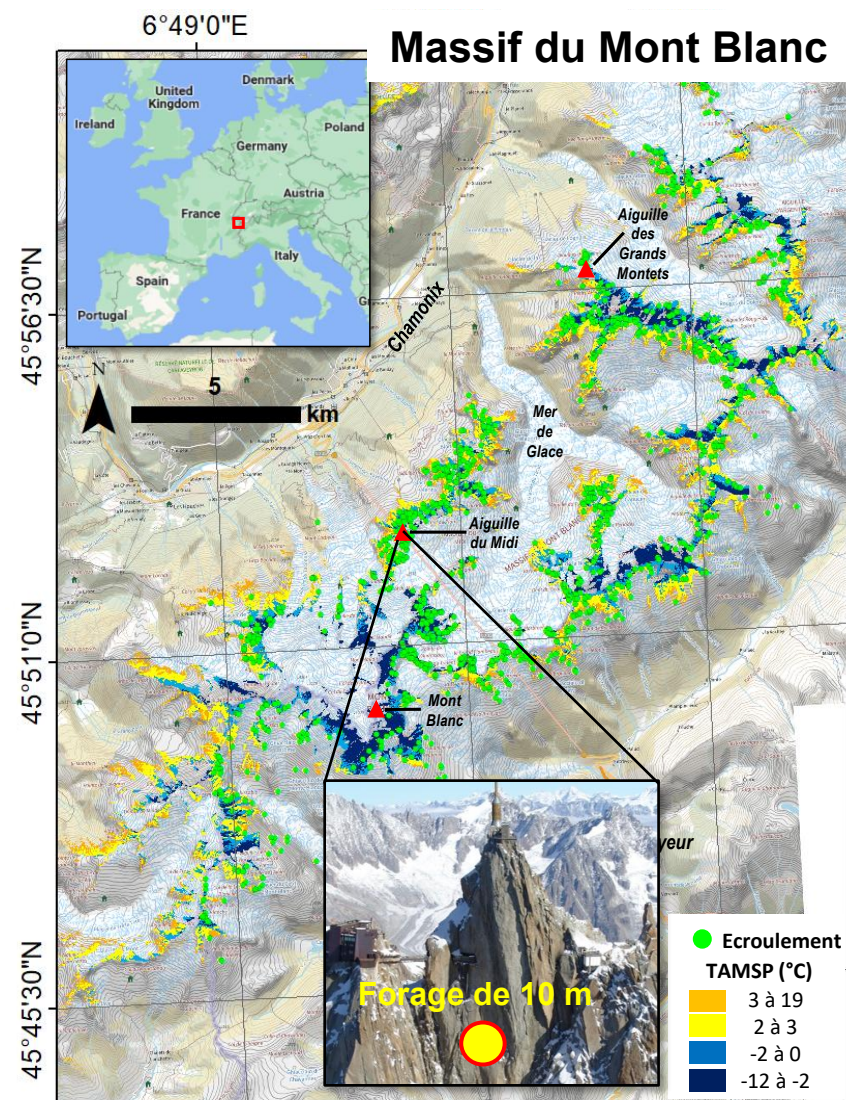
Approche mécanique du lien entre permafrost et déstabilisations rocheuses

- Le réchauffement des joints de glace provoque la baisse de résistance au cisaillement
- La fonte de la glace dans les fractures provoque la perte de lien entre à l'interface roche-glace
- Les infiltrations d'eau peuvent accélérer la fonte des joints de glace ou provoquer des pressions hydrostatiques suffisantes pour déstabiliser les parois rocheuses



- Peut-on valider ces hypothèses sur le lien entre dégradation du permafrost et écoulements rocheux à partir des observations de terrain et de modèles de permafrost ?

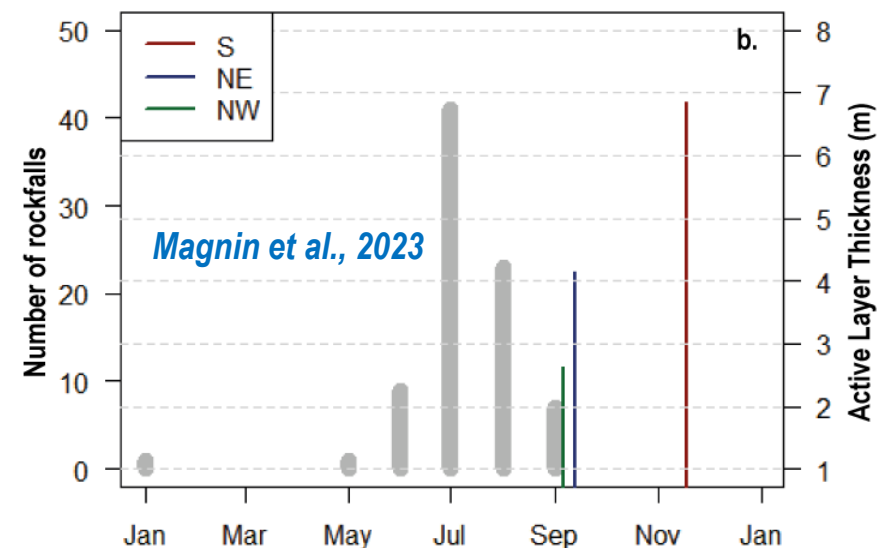
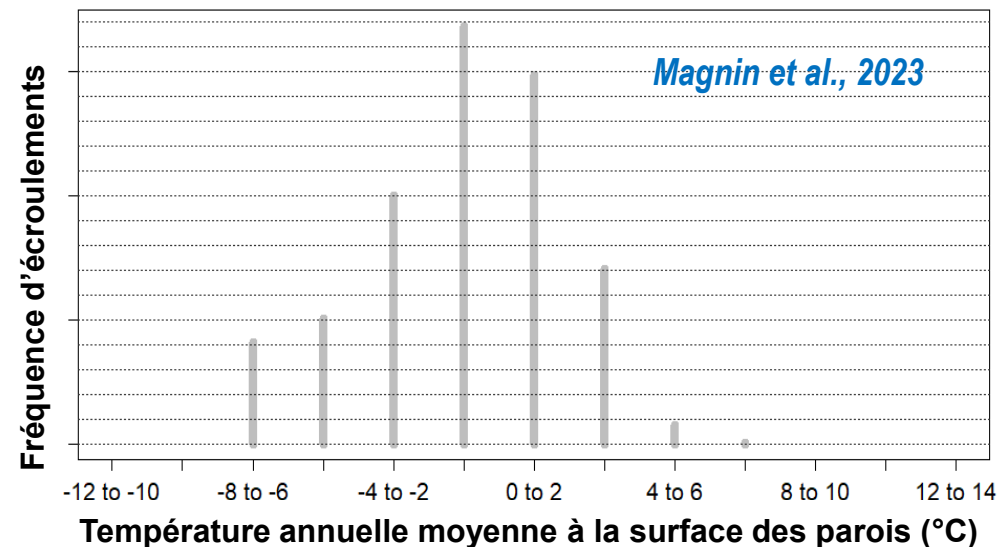
Observations du lien entre distribution des écoulements rocheux et des mesures de température en forage



- Inventaire d'écroulements rocheux dans le massif du Mont Blanc depuis 2007
- Carte de température des parois (permafrost)
- Mesures de température en forage de 10 m de profondeur et calcul de couche active

- **Écroulements essentiellement concentrés dans le permafrost**
→ valide le lien avec la dégradation du permafrost

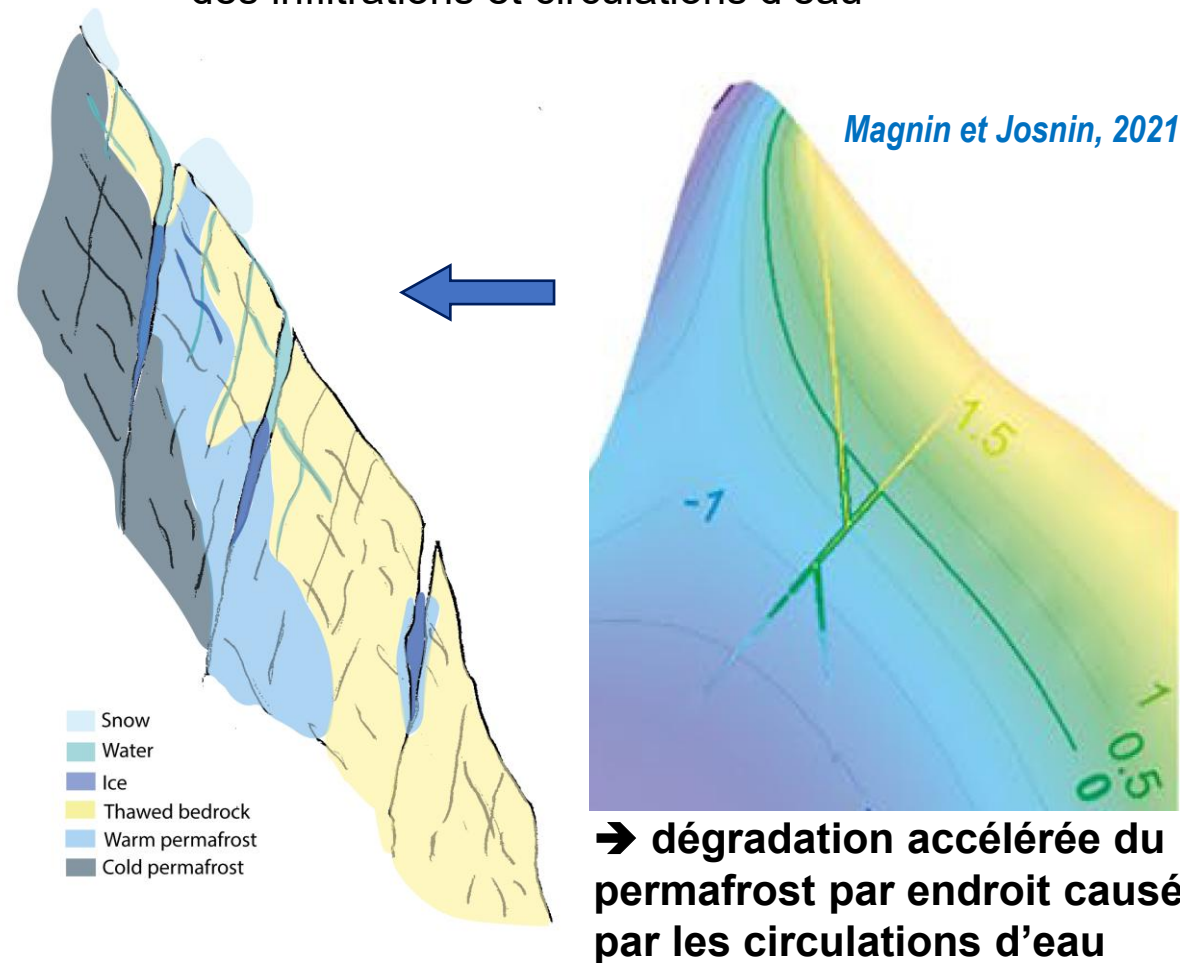
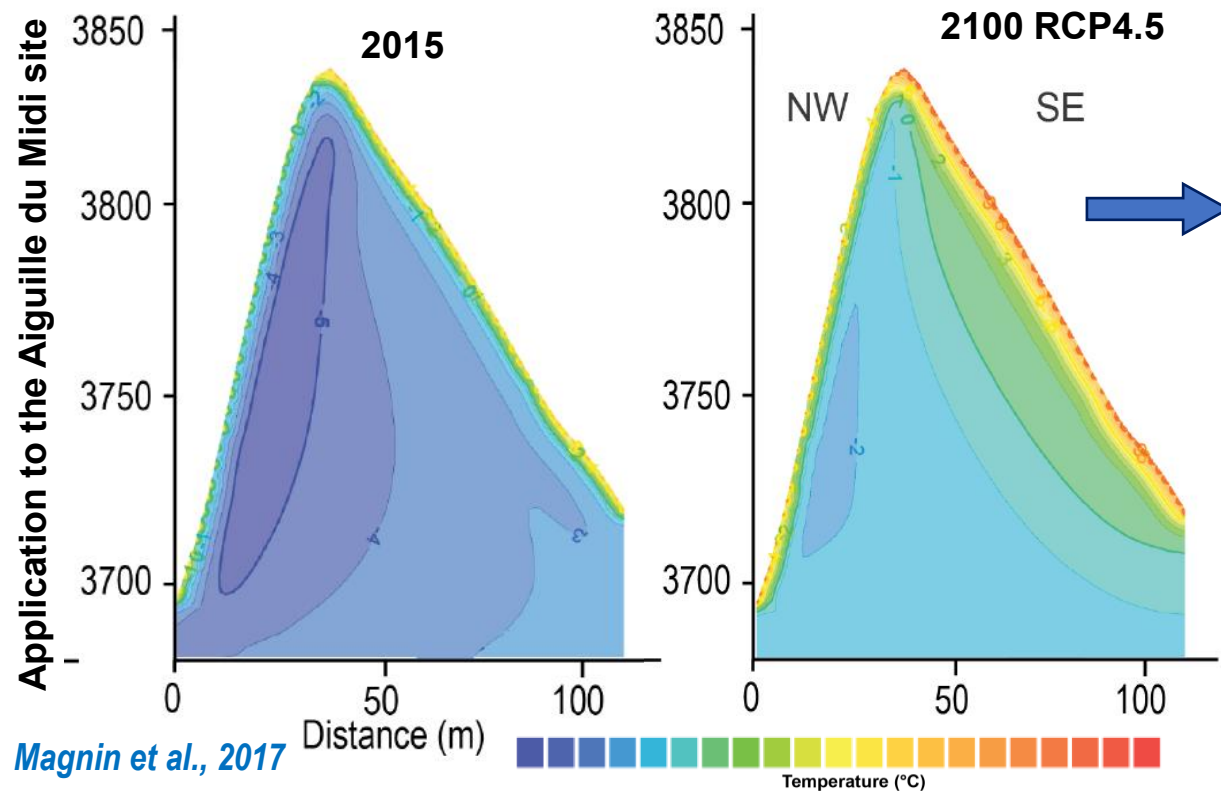
- **Pic d'écroulements avant le max de couche active**
→ dégradation accélérée du permafrost par endroit ?



Développements méthodologiques : Modélisation des transferts de chaleur et d'eau

- Modèle de diffusion thermique considérant la conduction thermique, les échanges de chaleur latente (teneur en glace de 5% répartie de manière homogène)
- Forçage par l'évolution de la température de surface dont l'évolution est contrôlée par celle de la température de l'air

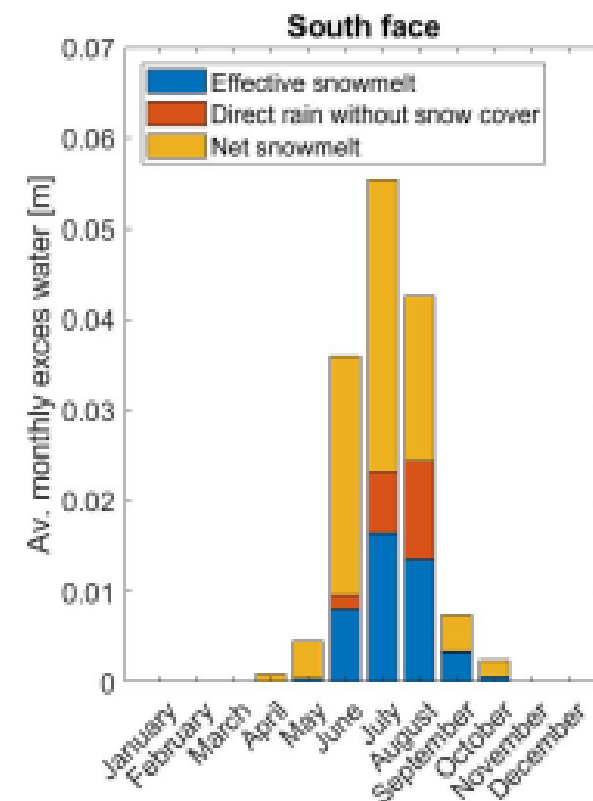
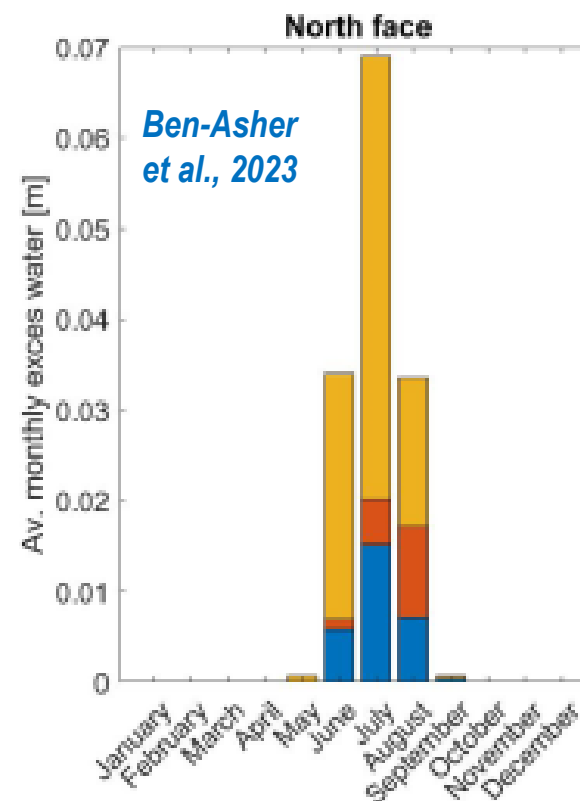
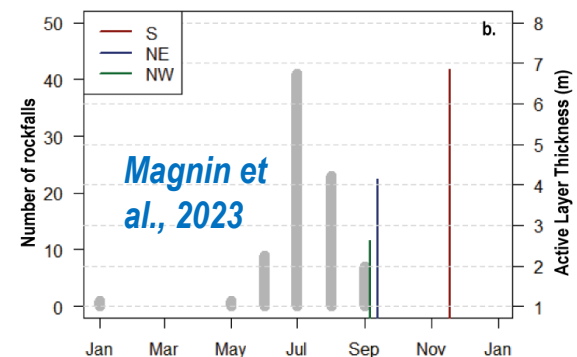
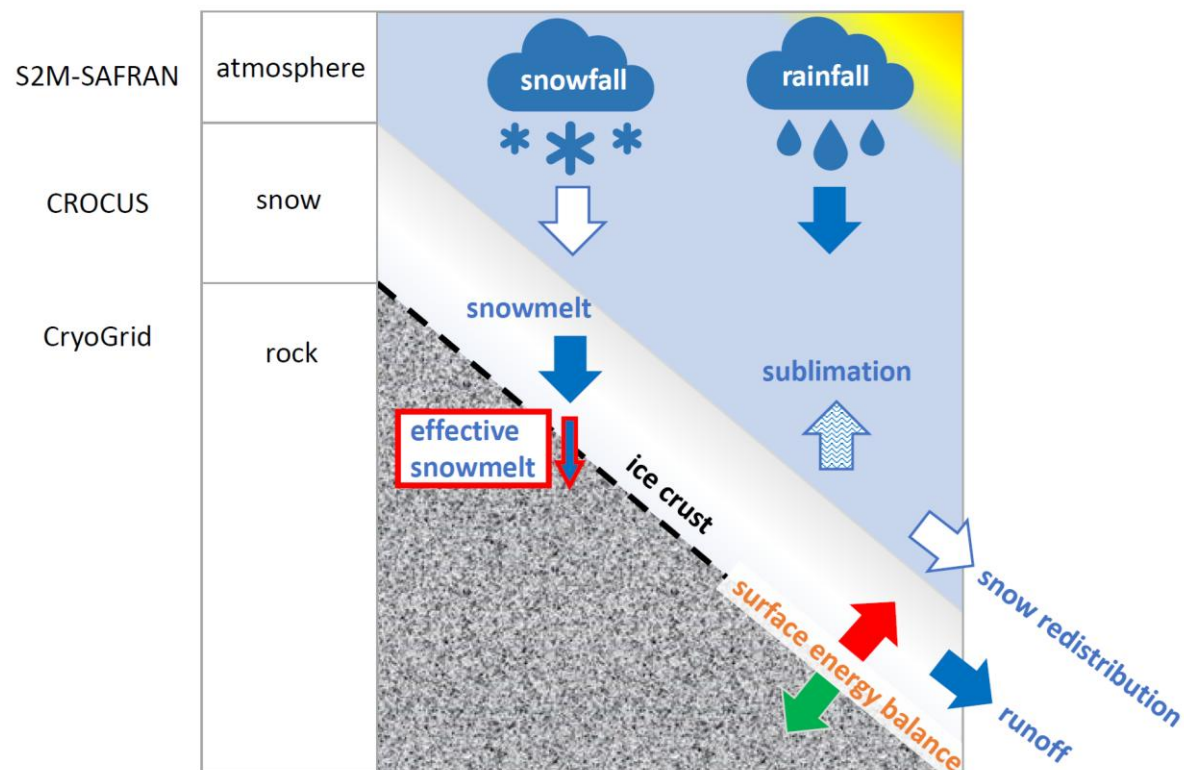
- Couplage des transferts de chaleur et d'eau pour appréhender les effets thermiques et mécaniques des infiltrations et circulations d'eau



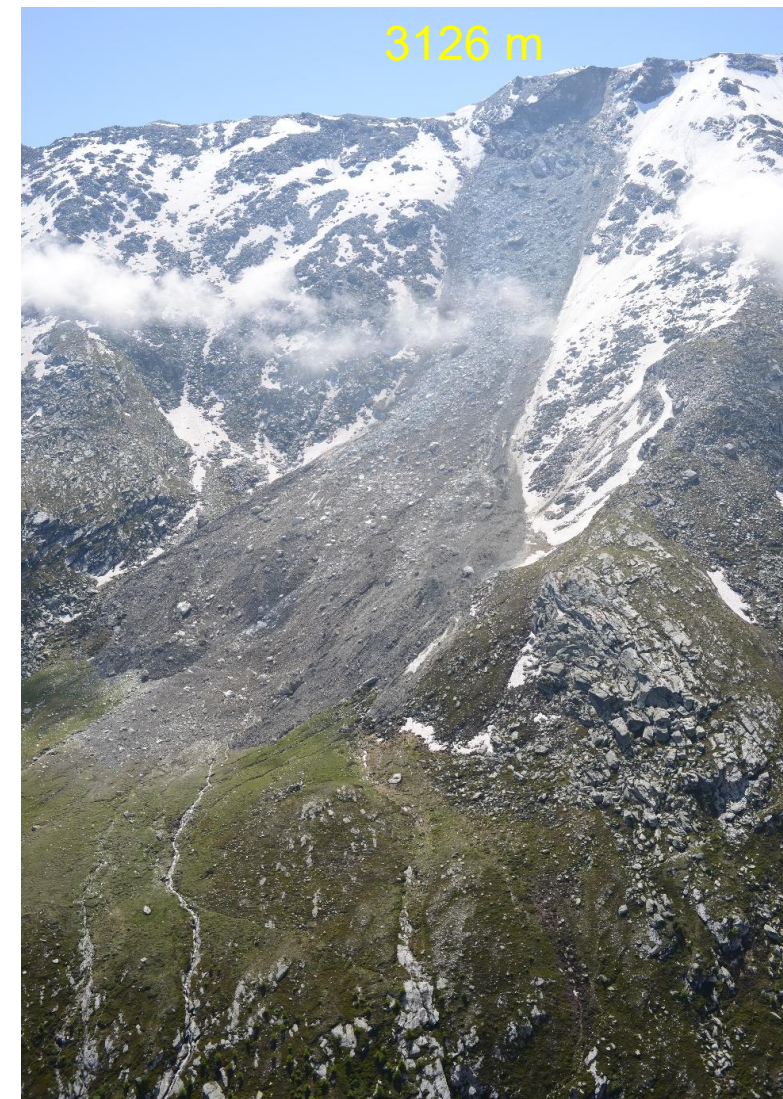
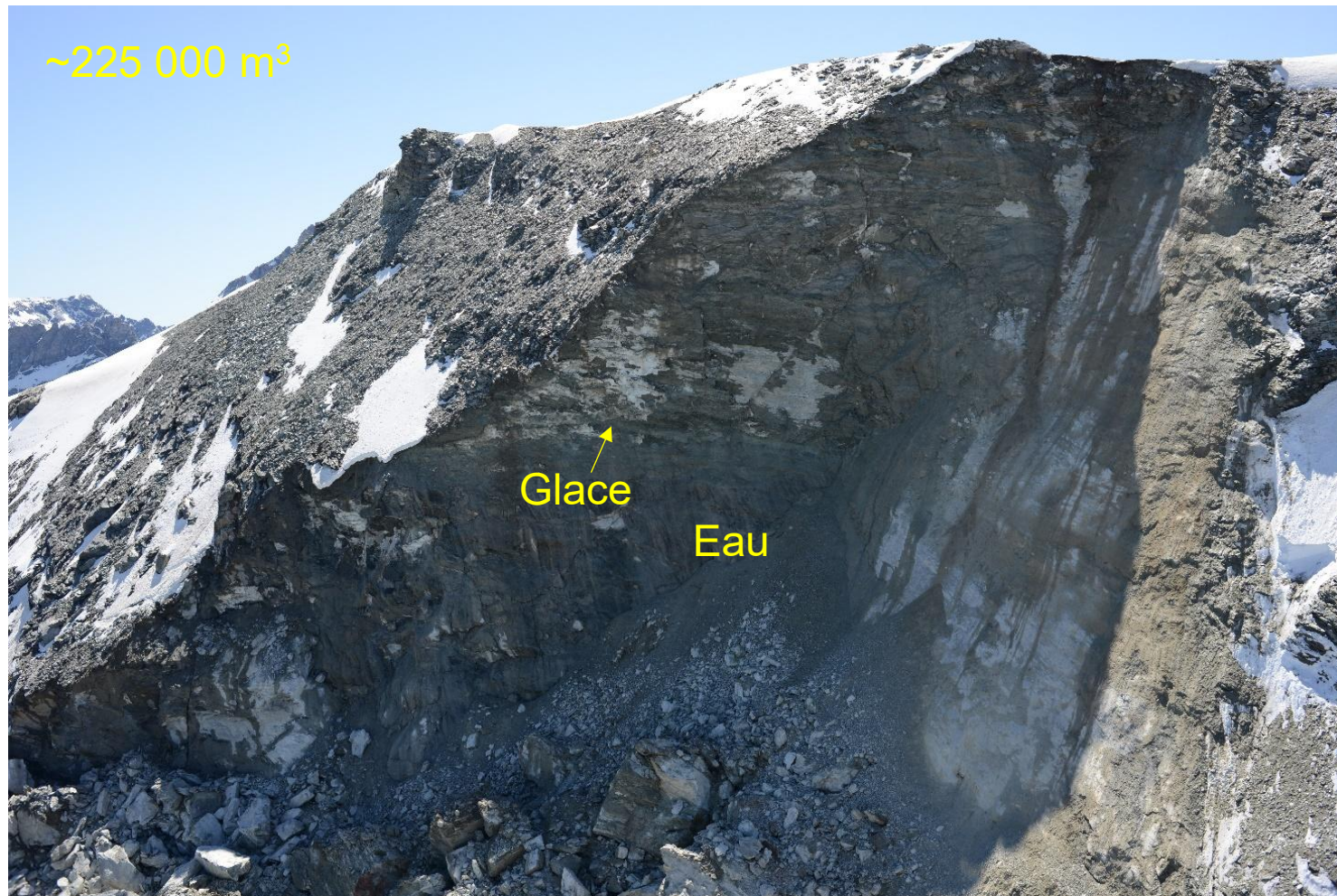
Développements méthodologiques : Modélisation du bilan d'énergie et hydrologique

- Modèle de bilan d'énergie et bilan hydrologique pour :
 - 1) appréhender les effets de la neige sur la dynamique de la température des versants alpins
 - 2) calculer la quantité et la temporalité de l'eau pouvant s'infiltrer dans les versants

➔ Pic d'infiltration d'eau potentielle correspondant au pic d'écroulements



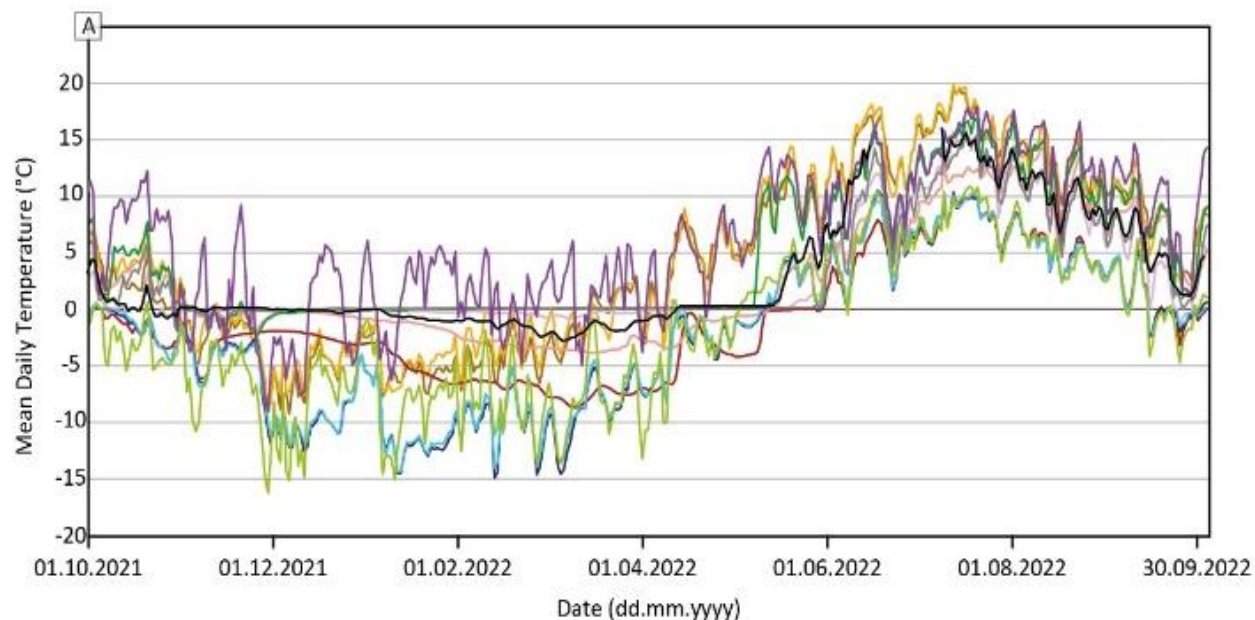
Application des modèles récemment développés à l'avalanche rocheuse du vallon d'Etache (Vanoise, juin 2020)



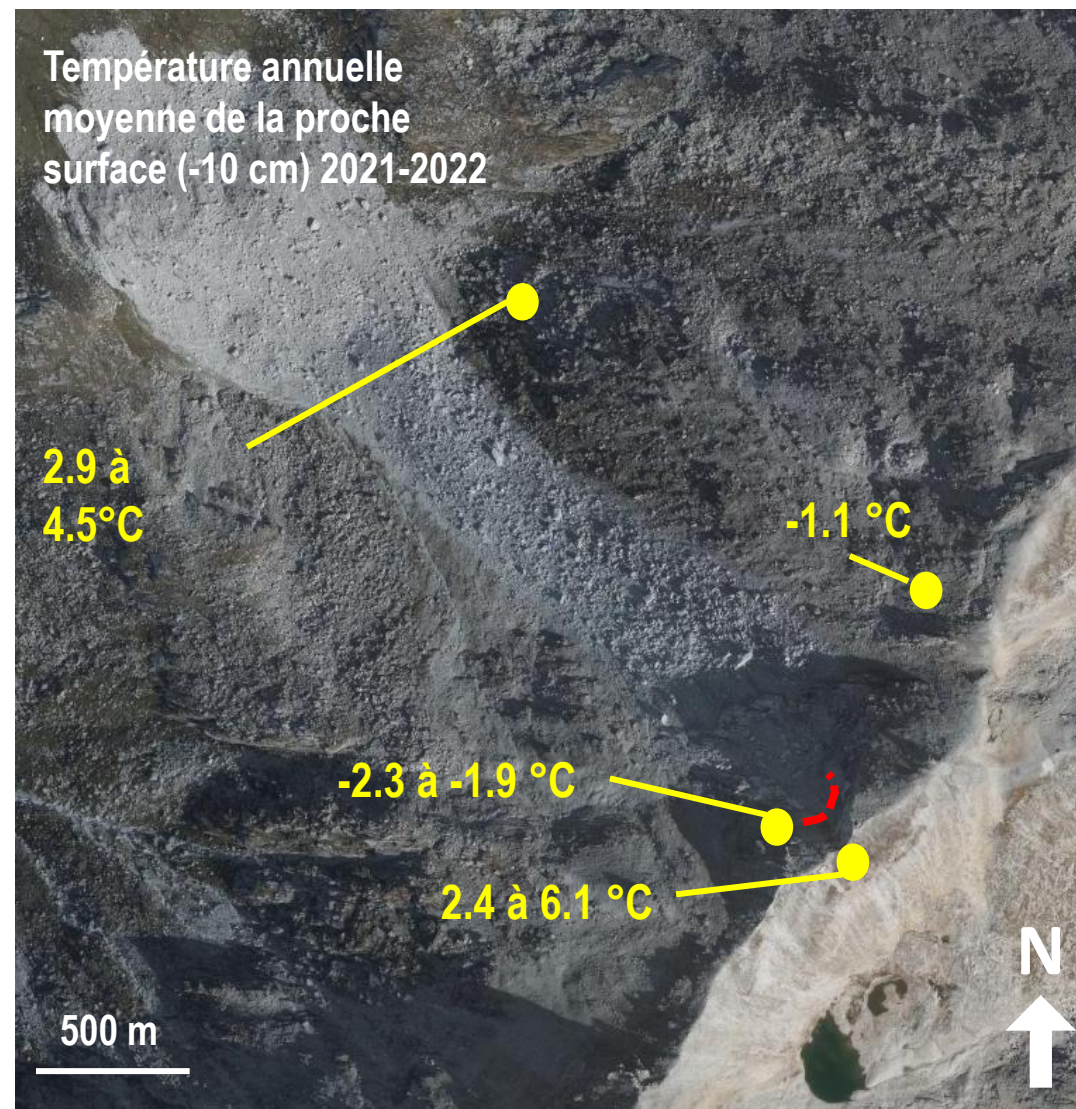
Application des modèles récemment développés à l'avalanche rocheuse du vallon d'Etache (Vanoise, juin 2020)

Cathala et al., 2024

- Mesures continues de température en proche surface (2021-2022)



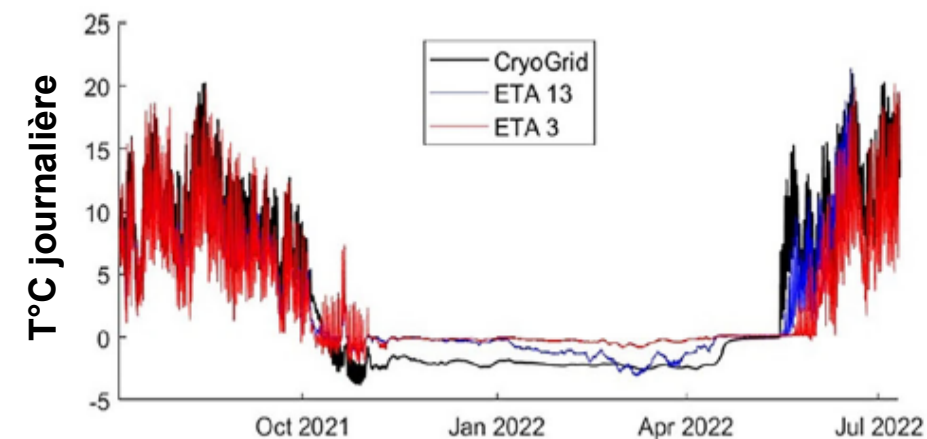
- ➔ Conditions de permafrost en face nord
- ➔ Absence de permafrost en face sud



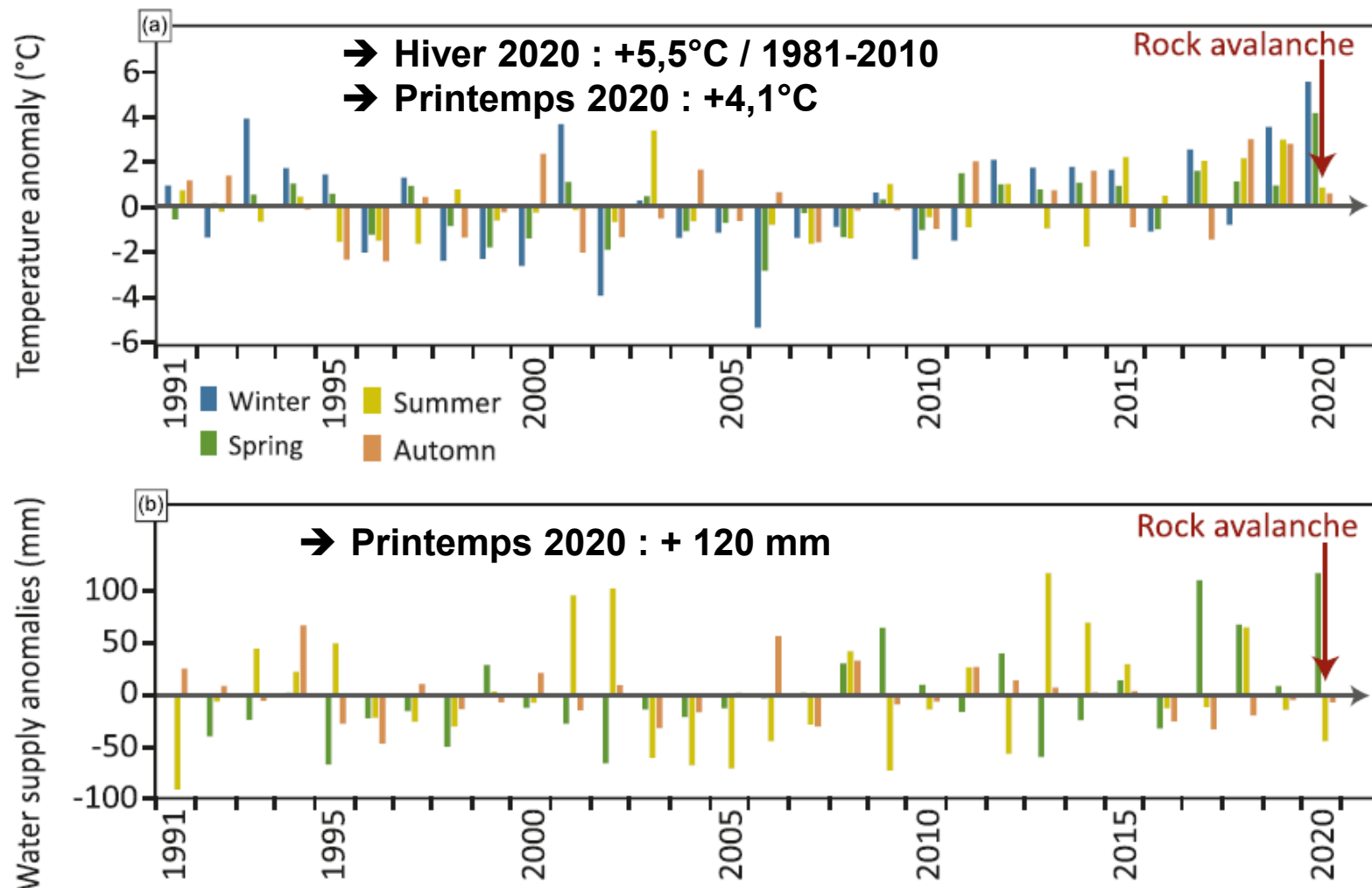
Application des modèles récemment développés à l'avalanche rocheuse du vallon d'Etache (Vanoise, juin 2020)

Cathala et al., 2024

- Calibration du modèle de bilan d'énergie et hydrologique
- Calcul des anomalies de température de surface et de colonne d'eau disponible



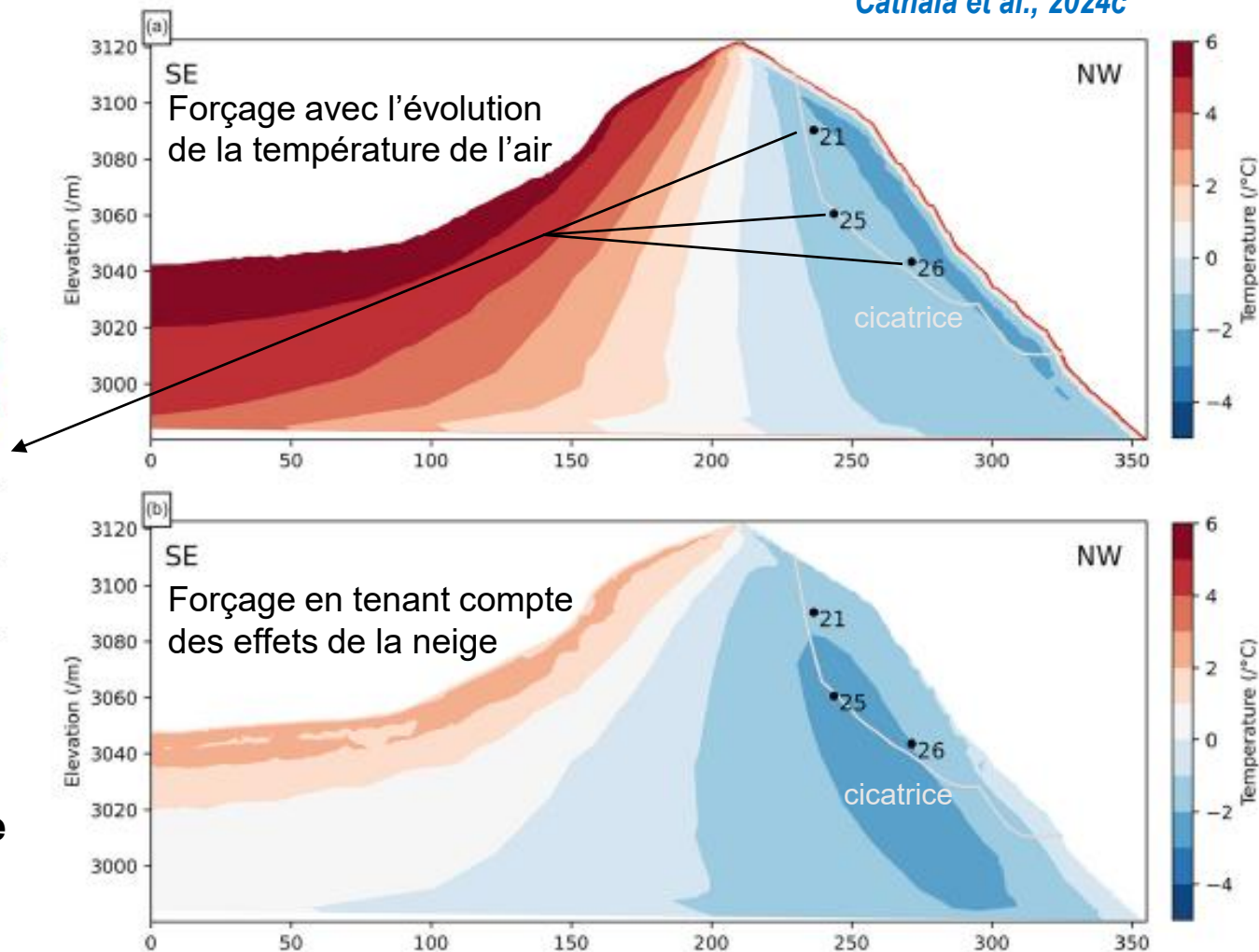
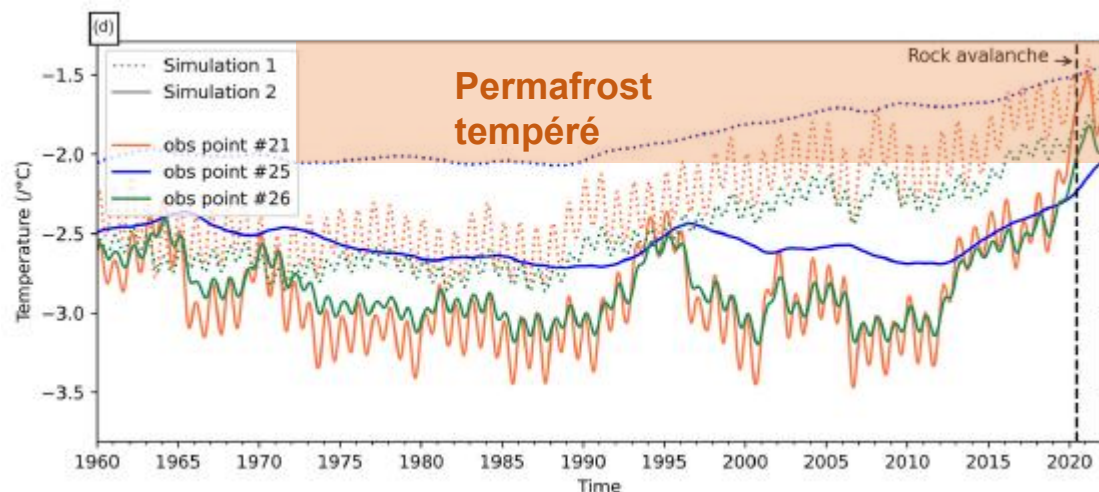
→ Evènement survenu après une anomalie saisonnière record de température de surface et de colonne d'eau disponible pour l'infiltration



Application des modèles récemment développés à l'avalanche rocheuse du vallon d'Etache (Vanoise, juin 2020)

Cathala et al., 2024c

- Modèle de diffusion thermique forcé avec l'évolution de la température de l'air (a) et avec la température calculée par bilan d'énergie (prise en compte de la neige) (b)



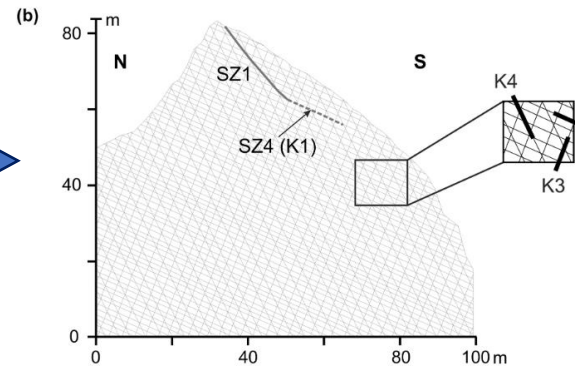
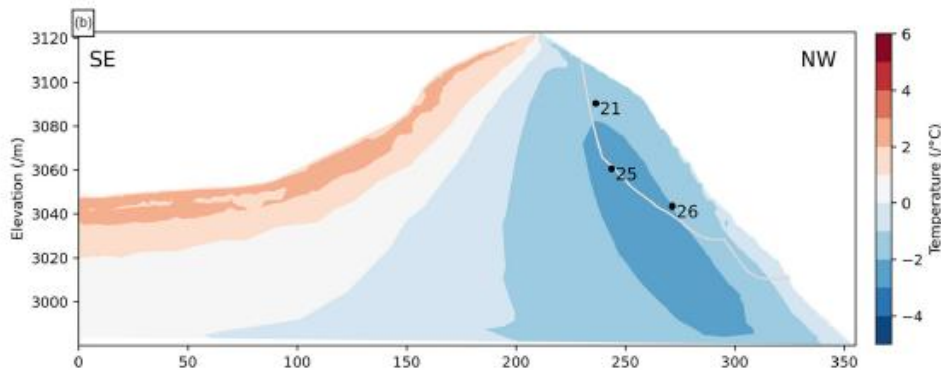
- Evènement survenu pendant une transition de permafrost froid à tempéré et pendant une période de réchauffement intense ($+0,6^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ à 30 m de profondeur depuis 2012)
- Mise en évidence de l'importance de considérer l'effet de la neige dans la dynamique thermique des versants

Synthèse et perspectives

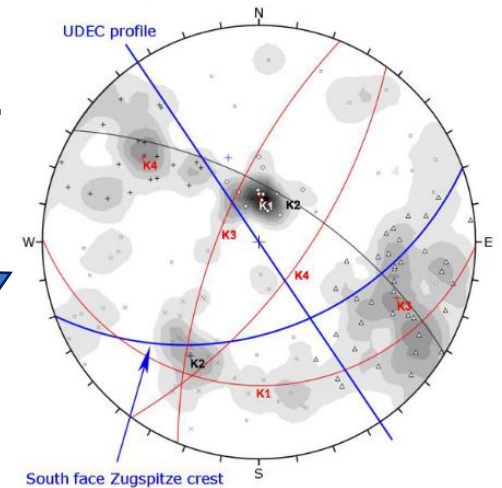
- Ecoulements essentiellement concentrés dans le permafrost de type tempéré (-2 à 0°C), mais pas seulement...
- Ecoulements surviennent souvent avant le maximum de couche active, suggérant le rôle des infiltrations d'eau comme accélérateur de la dégradation du permafrost
- Développement de modèles de bilan d'énergie + bilan hydrologique + transferts de chaleur et d'eau pour appréhender le rôle des circulations d'eau dans les versants rocheux gelés → à appliquer sur des cas observés

→ Une perspective prioritaire de ces deux décennies de développement est désormais :
→ d'intégrer des réseaux de fractures réalistes dans les simulations,
→ de coupler les modèles thermo-cryo-hydro(géo)logiques avec des modèles mécaniques.

Cathala et al., 2024



Mamot et al., 2021



Merci pour votre attention 😊

Questions ?

florence.magnin@univ-smb.fr

Pour aller plus loin :

Magnin, F., et al. (2023). From Rockfall Observation to Operational Solutions: Nearly 20 years of Cryo-gravitational Hazard Studies in Mont-Blanc Massif, J. Alp. Res. Rev. Géographie Alp.

Ben-Asher, et al. (2023). Estimating surface water availability in high mountain rock slopes using a numerical energy balance model, Earth Surf. Dyn., 11, 899–915.

Cathala, et al. (2024). Predisposing, triggering and runout processes at a permafrost-affected rock avalanche site in the French Alps (Étache, June 2020), Earth Surf. Process. Landf., 49, 3221–3247, <https://doi.org/10.1002/esp.5881>

Davies, et al. (2021). The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities, Permafr. Periglac. Process., 12, 137–144

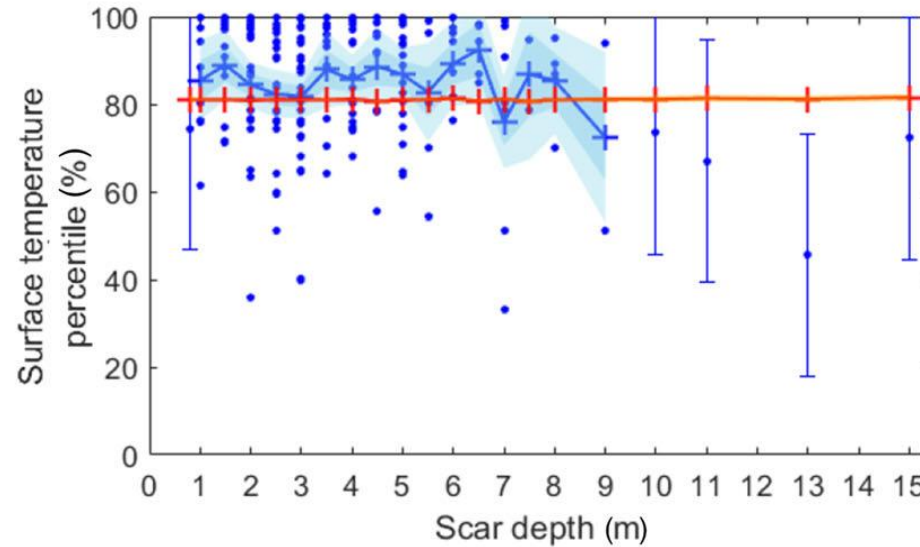
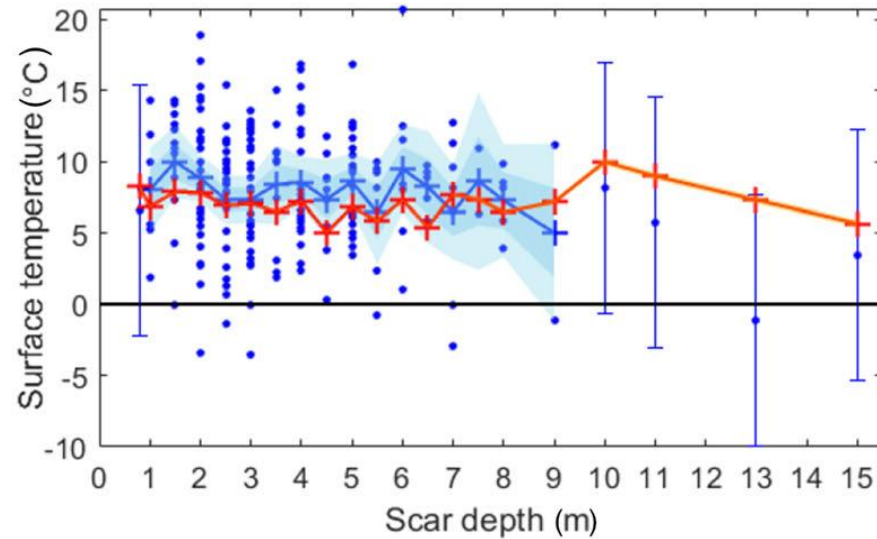
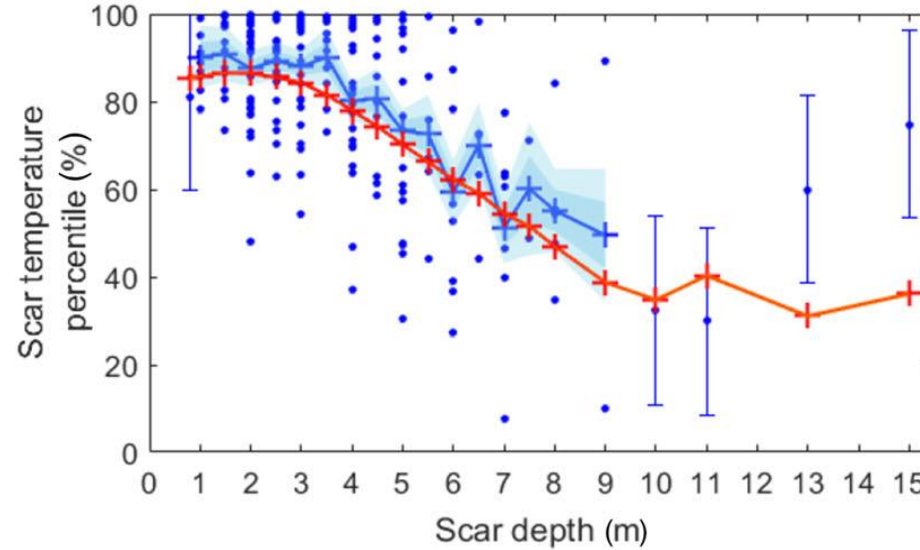
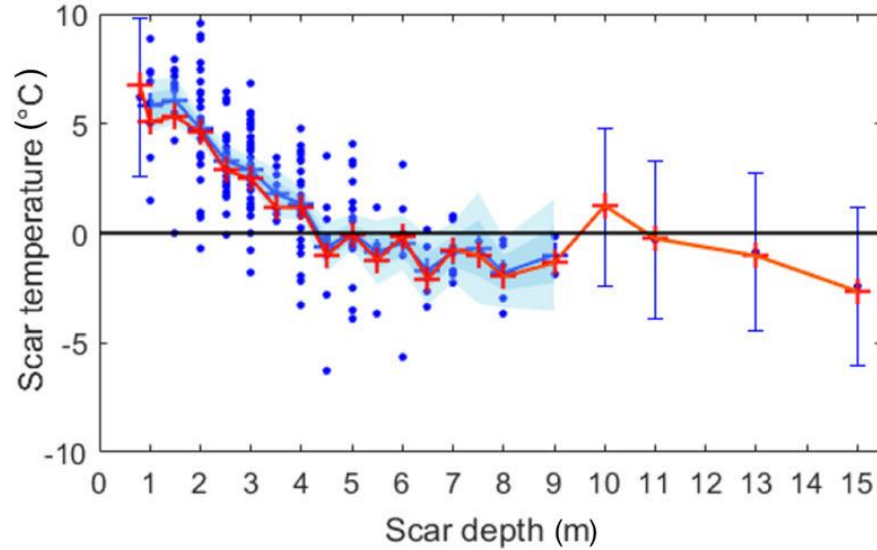
Magnin, F. and Josnin, J.-Y. (2021). Water Flows in Rock Wall Permafrost: A Numerical Approach Coupling Hydrological and Thermal Processes, J. Geophys. Res. Earth Surf., 126.

Magnin, F., et al.: Main results of permafrost monitoring in the French Alps through the PermaFrance network over the period 2010–2022, Permafr. Periglac. Process., 35, 3–23, 2024.

Mamot, P., Weber, S., Eppinger, S., and Krautblatter, M. (2021). A temperature-dependent mechanical model to assess the stability of degrading permafrost rock slopes, Earth Surf. Dyn., 9, 1125–1151, <https://doi.org/10.5194/esurf-9-1125-2021>.

18/11/2024 CNF-RTM

Legay et al., 2021



- Real events
- Real events with $\Delta_{95\%}$
- + [Mean] Real events
- [Mean] 68% reliability
- [Mean] 95% reliability
- + [Mean] Random events
- [Mean] 68% reliability
- [Mean] 95% reliability
- 0°C

