

Evolution du permafrost et implications pour les sociétés alpines

Florence Magnin

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

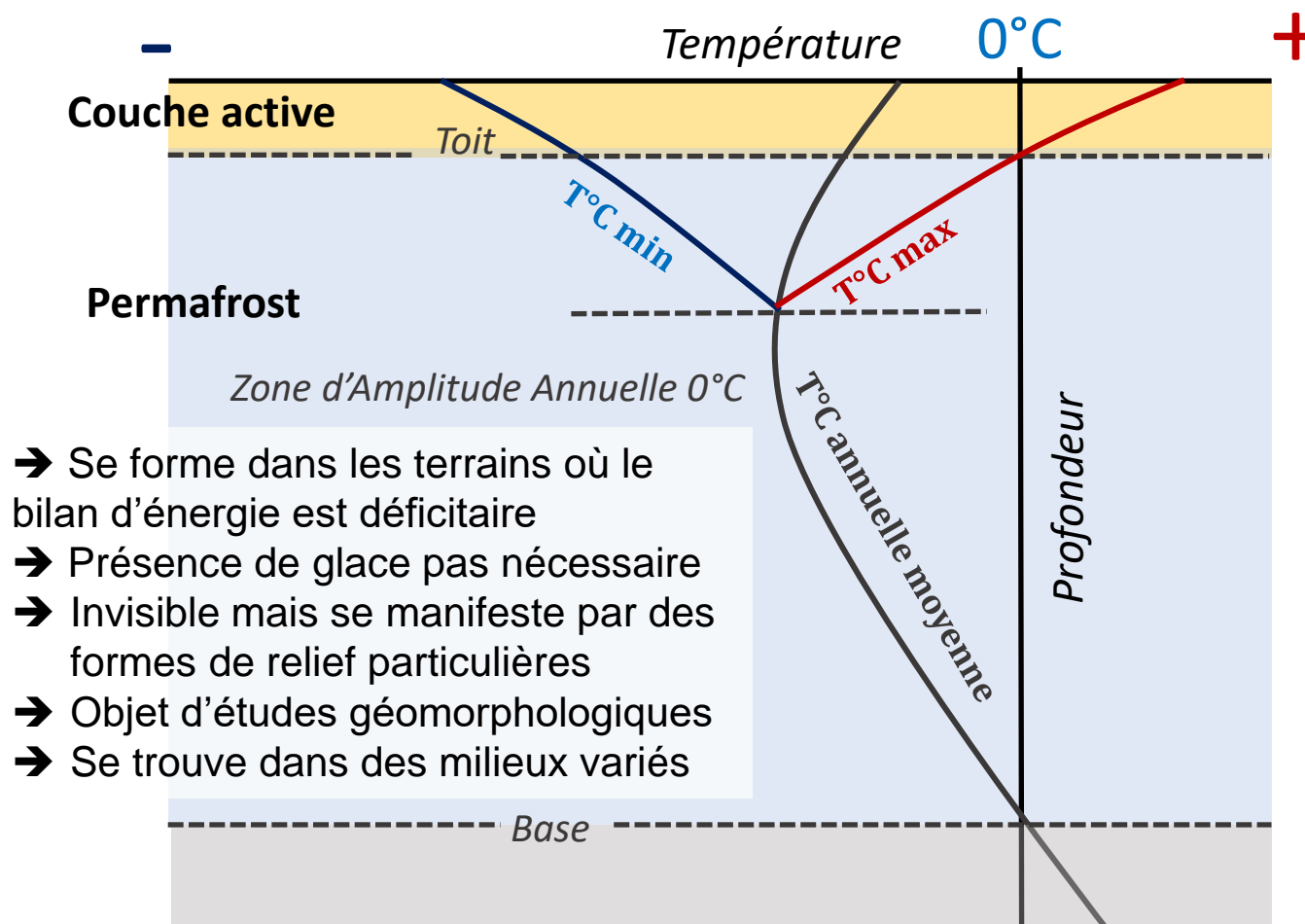


Evolution du permafrost et implications pour les sociétés alpines

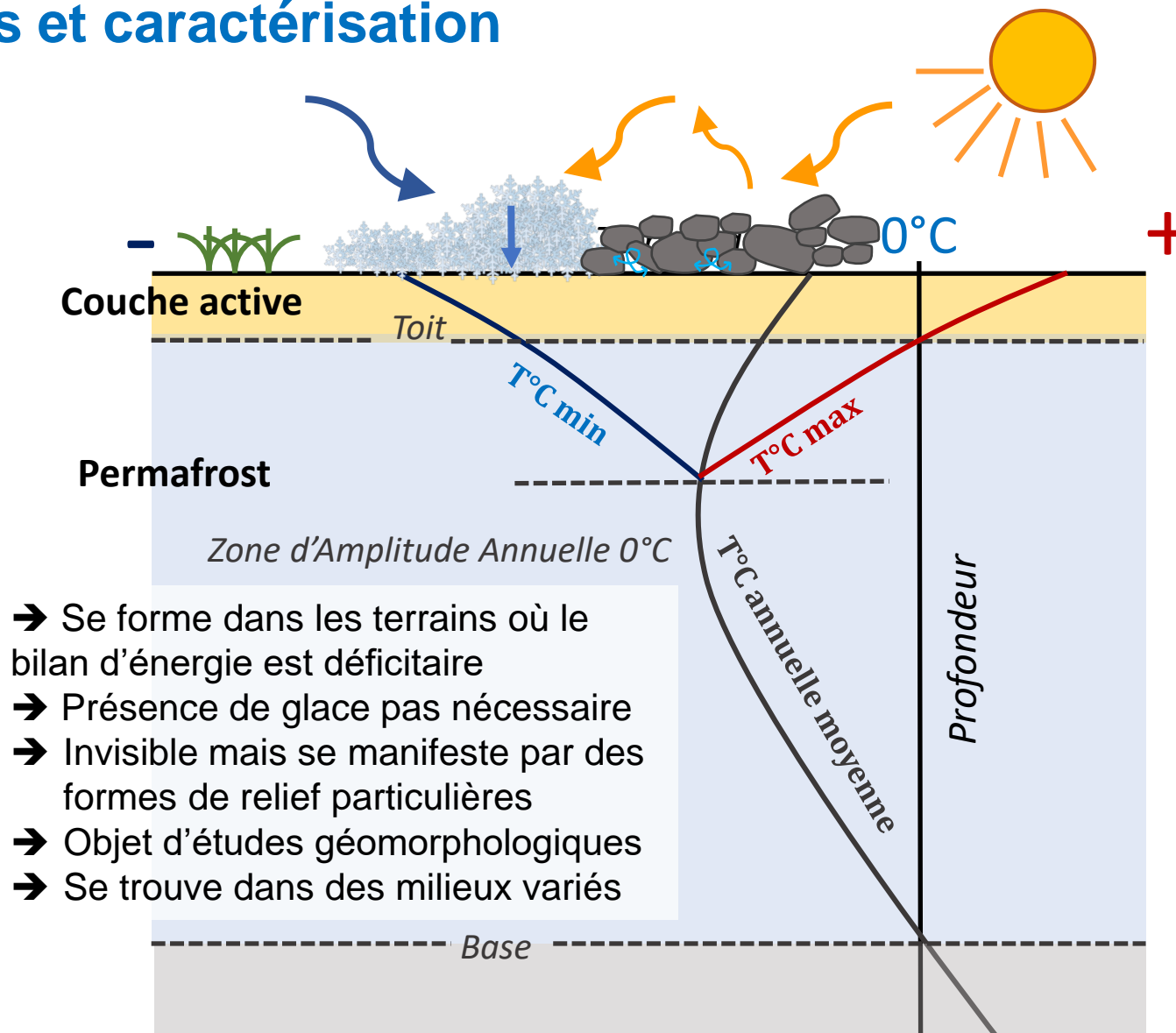
- 1) Eléments de définition et de caractérisation
- 2) Pourquoi étudier le permafrost en montagne ?
- 3) Où se trouve le permafrost alpin et comment évolue-t-il ?
- 4) Quelles sont les implications de sa présence et de son évolution pour les sociétés alpines ?
- 5) Développements en cours pour lever certains verrous scientifiques et opérationnels

1) Définitions et caractérisation

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

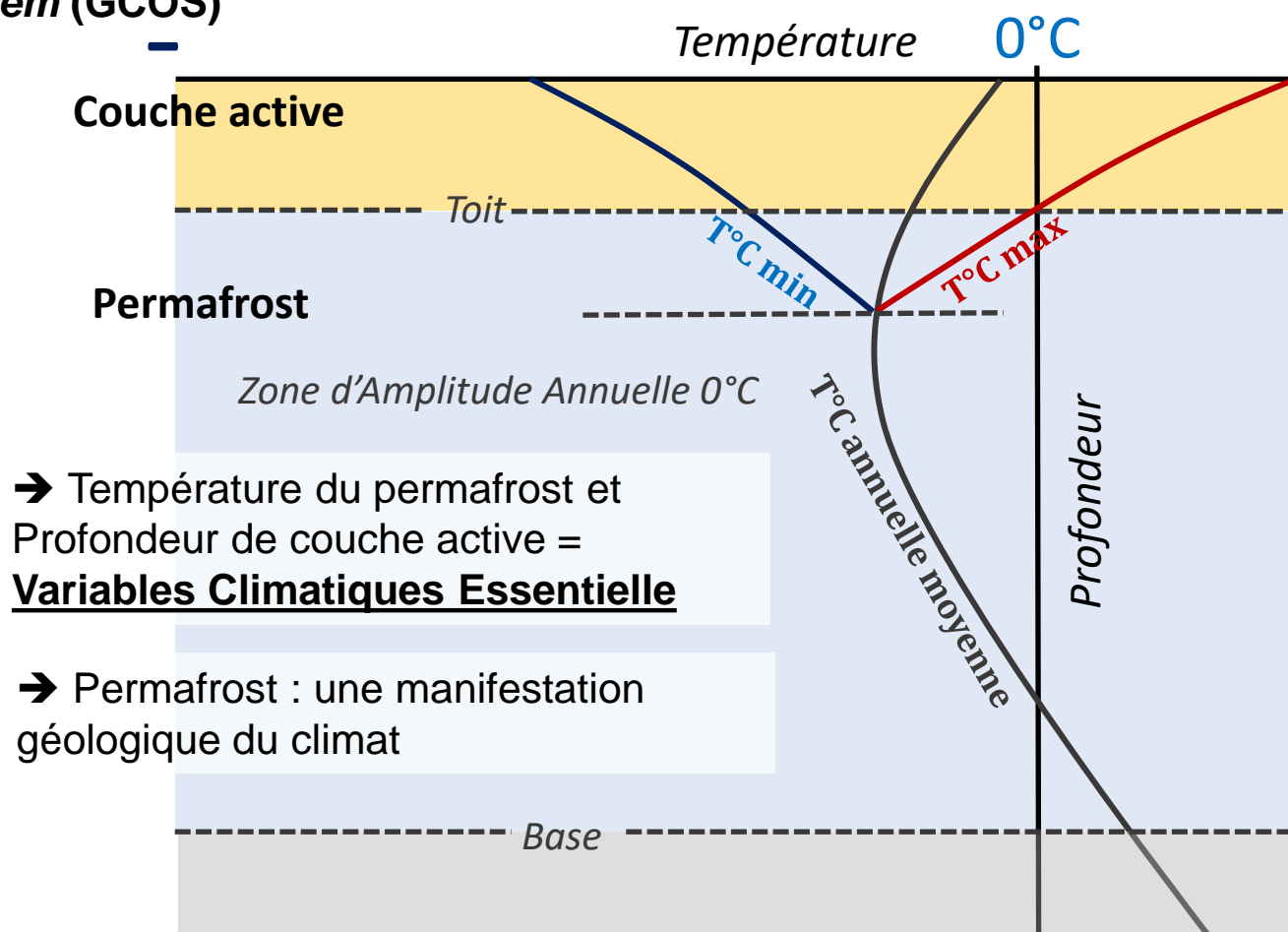


1) Définitions et caractérisation



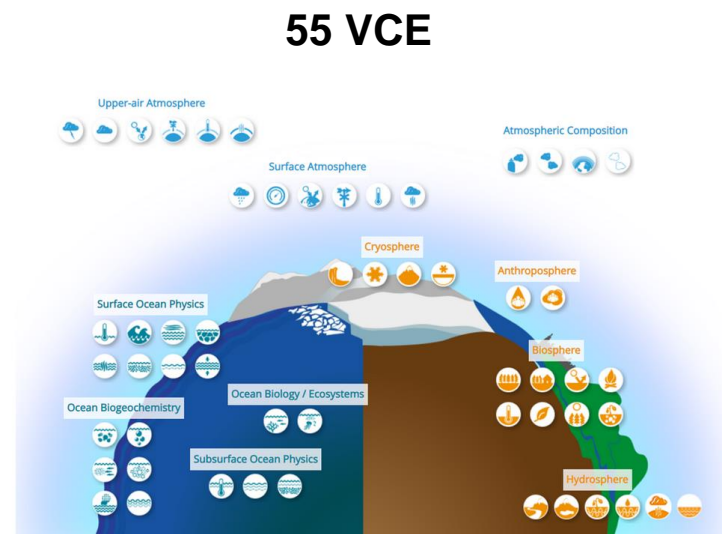
1) Définitions et caractérisation

- Dégénération du permafrost : approfondissement de la couche active (et réchauffement du permafrost)
- T°C du permafrost et profondeur de couche active = variables climatiques essentielles du *Global Climate Observing System (GCOS)*



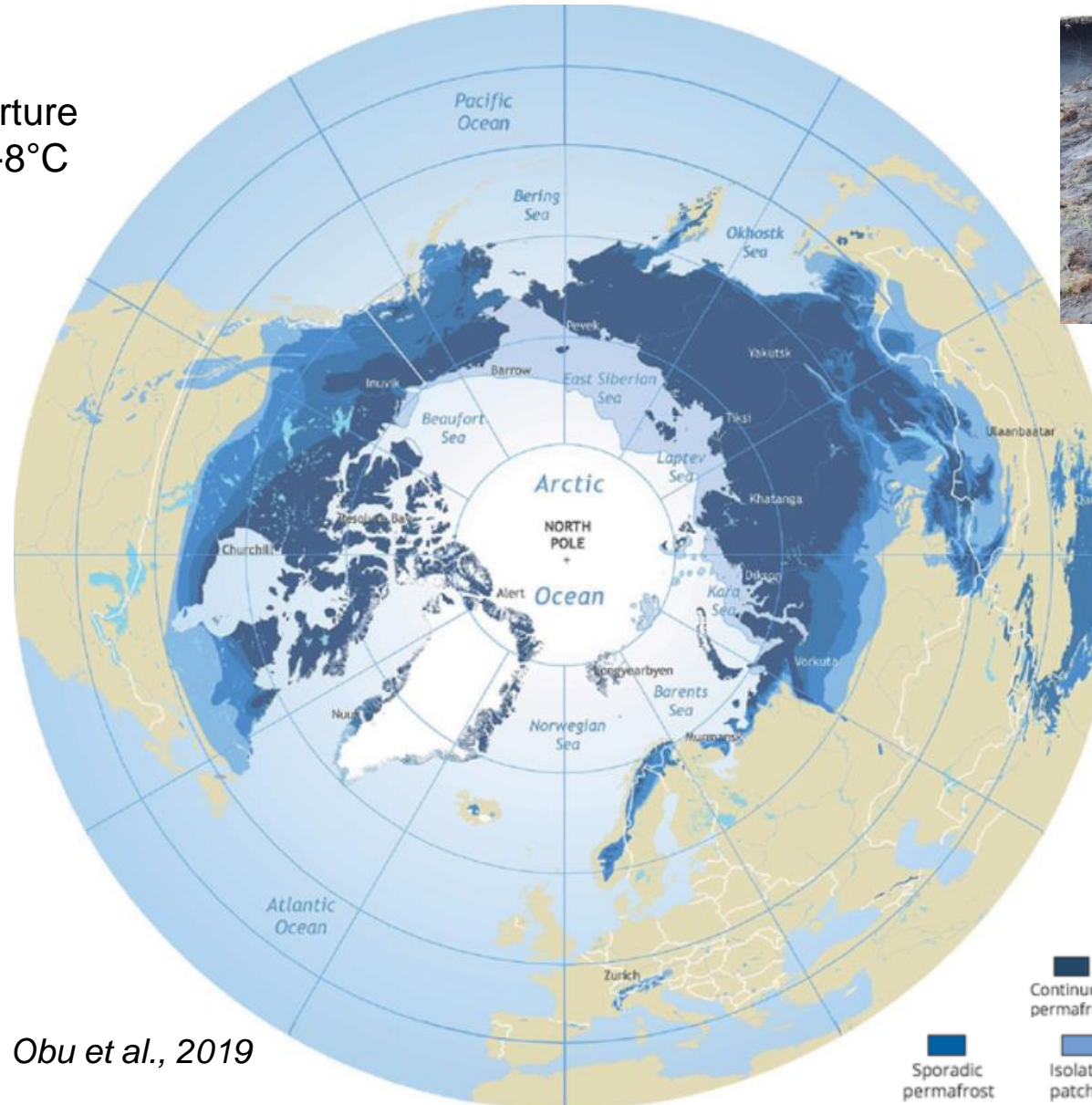
→ Température du permafrost et Profondeur de couche active = **Variables Climatiques Essentielle**

→ Permafrost : une manifestation géologique du climat

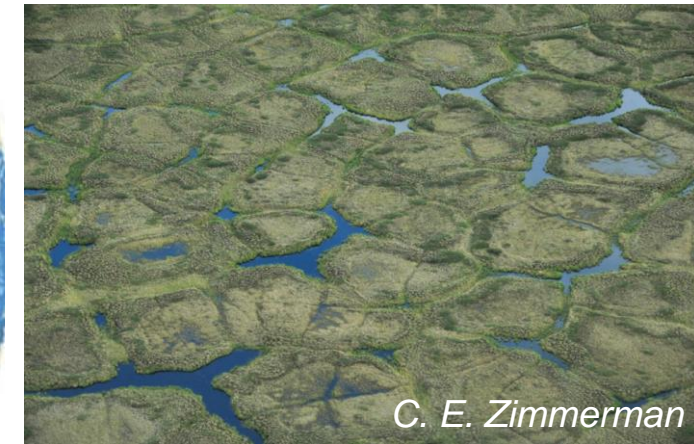


1) Définitions et caractérisation

- **Continu** : > 90 % de couverture
→ Température de l'air < -6 à -8°C
- **Discontinu** : 50 à 90 %
→ Température de l'air < -1°C
- **Sporadique** : 10 à 50 %
- **Isolé** : 0-10 %
- 15 à 22%
de l'hémisphère nord
(surface émergée)
(14 à 21×10⁶ km²)
- Effet marqué
de la continentalité
→ concurrence avec
les glaciers actuels et passés



Obu et al., 2019



C. E. Zimmerman



J. Franssen

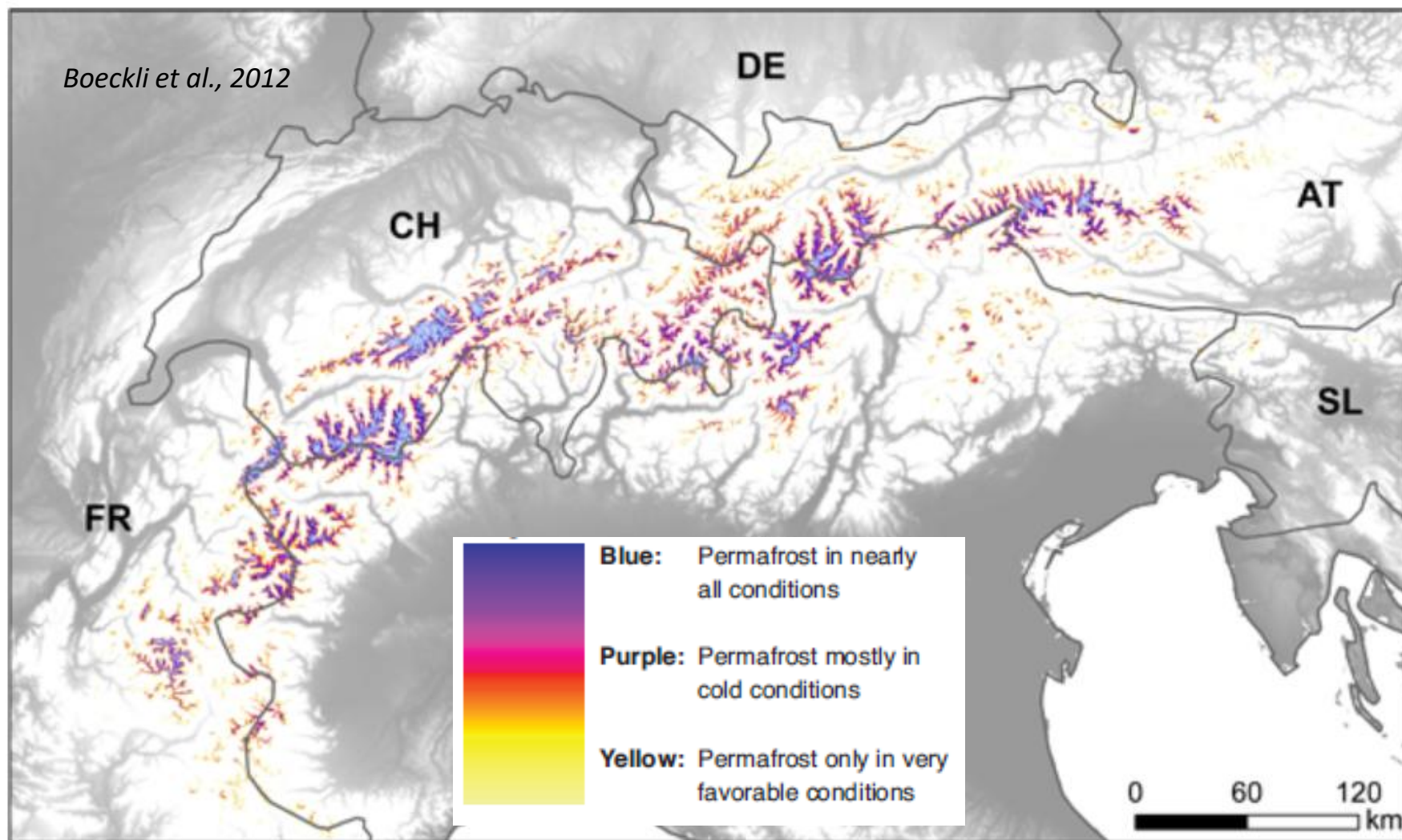


1) Définitions et caractérisation

- Occupe 5 à 6% du territoire (6220 km²)
- Occupe une **surface 3 fois plus importante que celle des glaciers**
- De la même manière qu'à l'échelle mondiale, une partie du permafrost actuel est en partie **héritée** de la dernière glaciation.



APIM : Alpine Permafrost Index Map



1) Définitions et caractérisation

Parois rocheuses

Glaciers rocheux actifs

1) Définitions et caractérisation

Glaciers rocheux actifs

Glaciers rocheux fossiles

2) Pourquoi étudier le permafrost en montagne ?

- 1) Archive climatique et Variables Climatiques Essentielles
→ Implications en Science du Climat et de la Cryosphère
- 2) Façonne le paysage
→ Implications Géomorphologiques
- 3) Stockage d'eau
→ Implications en Hydrogéologie et ressource en eau
- 4) Un rôle dans les aléas gravitaires
→ Implications pour les sociétés alpines

2) Un rôle dans les aléas gravitaires

Ecroulement



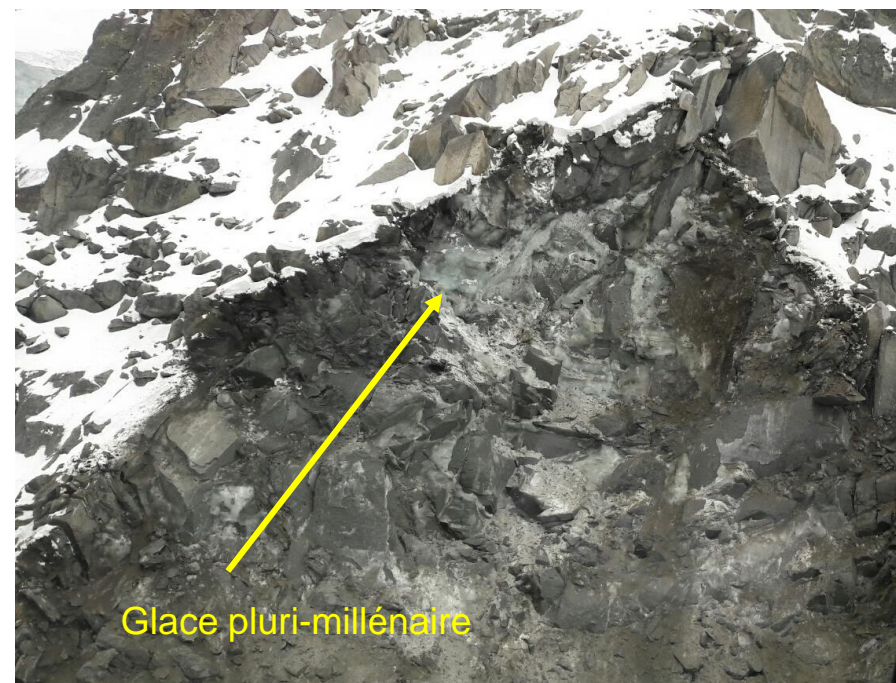
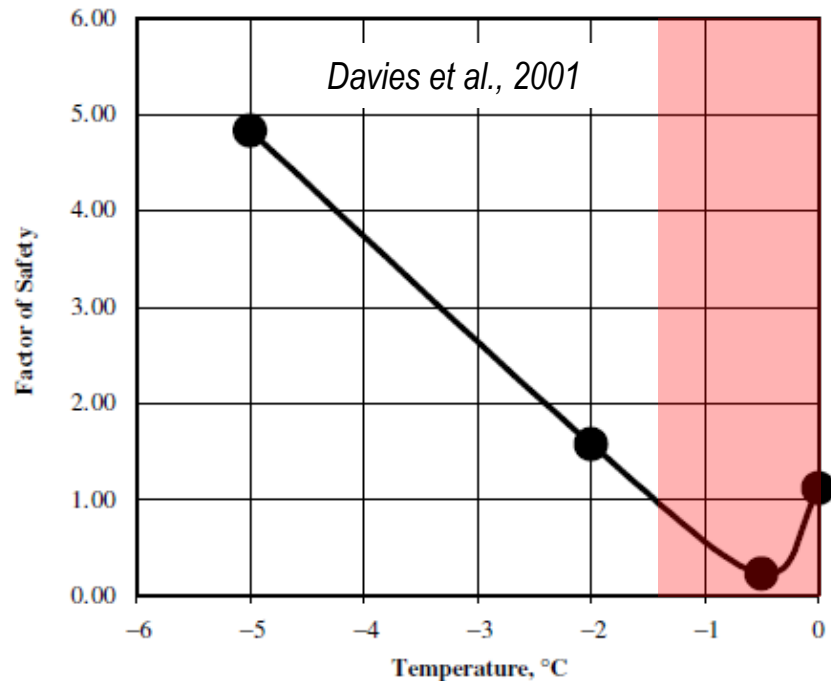
Coulées de boue/débris



2) Un rôle dans les aléas gravitaires

Hypothèses du rôle du permafrost dans les aléas gravitaires (écroulements) :

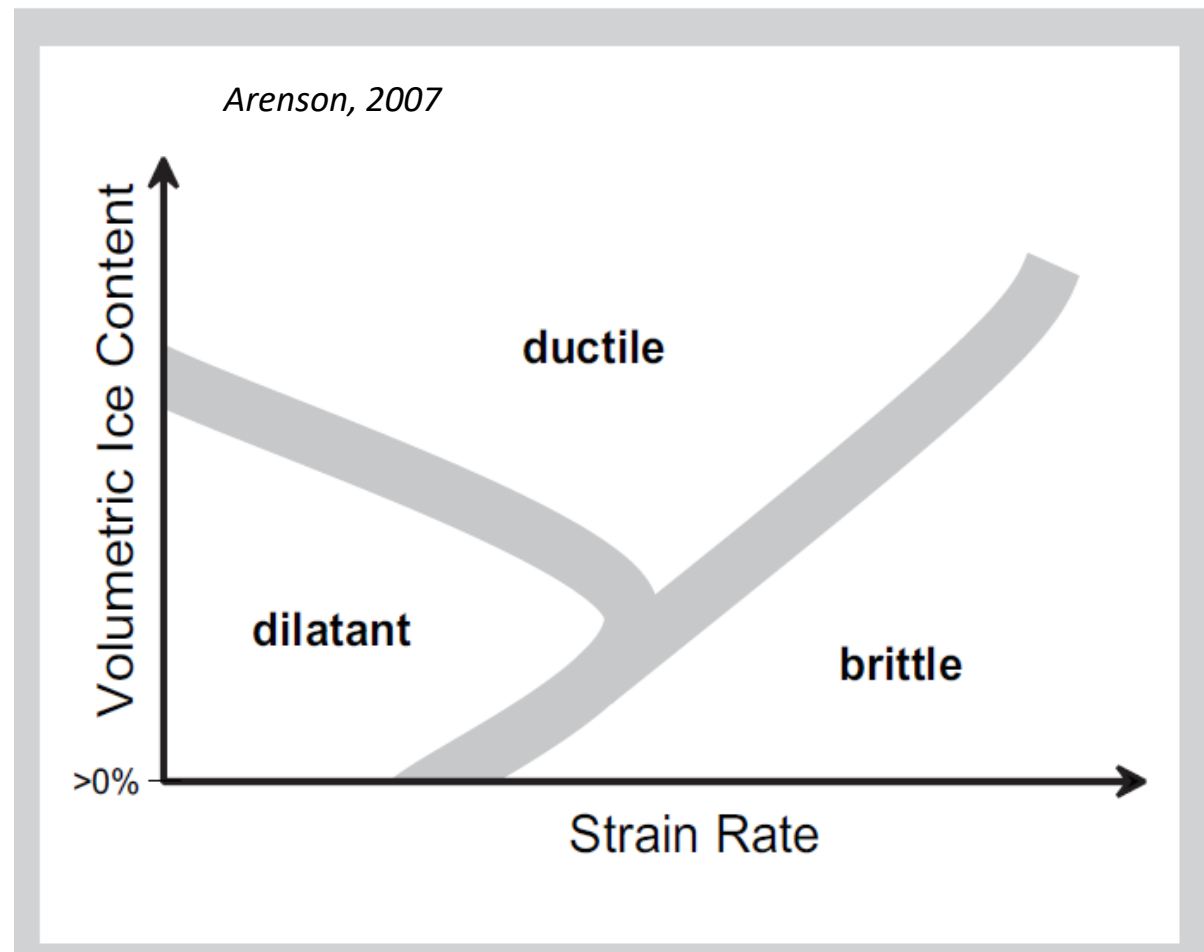
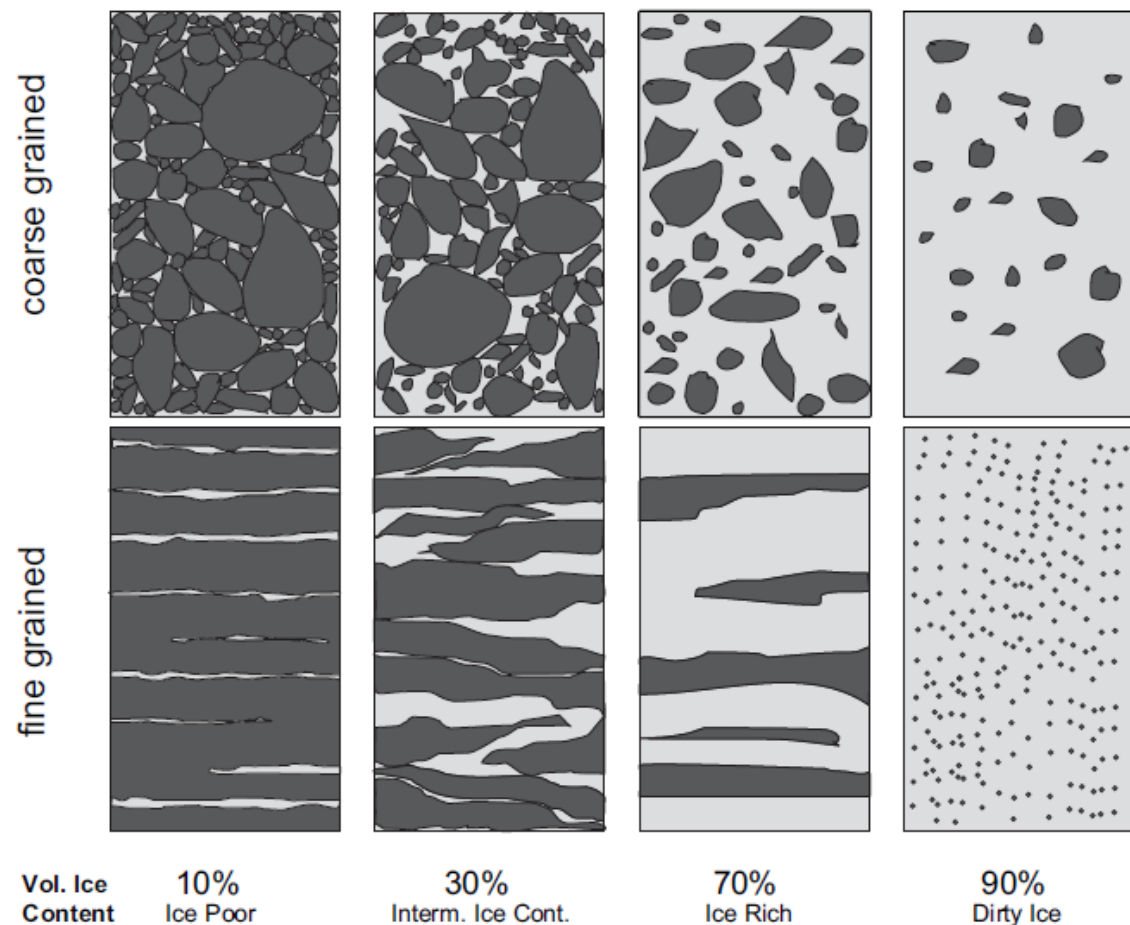
- Le réchauffement des joints de glace provoque la baisse de résistance au cisaillement
- La fonte de la glace dans les fractures provoque la perte de lien entre à l'interface roche-glace
- Les infiltrations d'eau peuvent accélérer la fonte des joints de glace ou provoquer des pressions hydrostatiques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



2) Un rôle dans les aléas gravitaires

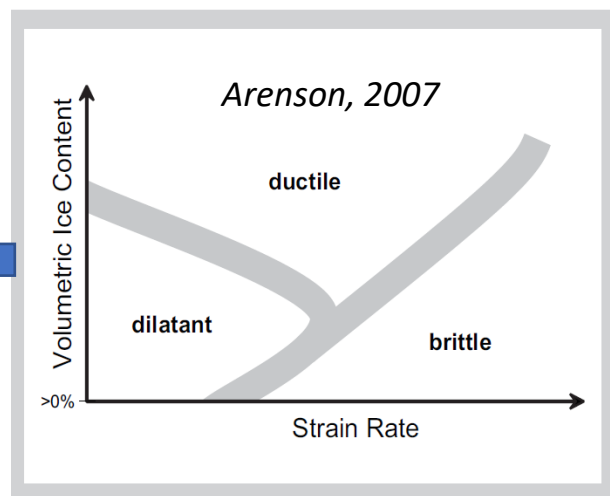
Mais un comportement mécanique des terrains à permafrost complexe car dépendant de la teneur en glace, de la granulométrie et de la (non-)cohésion :

→ Comportement mécanique dépend de la teneur en glace, de la cohésion et de la granulométrie du terrain



2) Un rôle dans les aléas gravitaires

Objectifs : passer de la connaissance théorique (de laboratoire) à l'explication des observations de terrain et à l'anticipation des aléas naturel



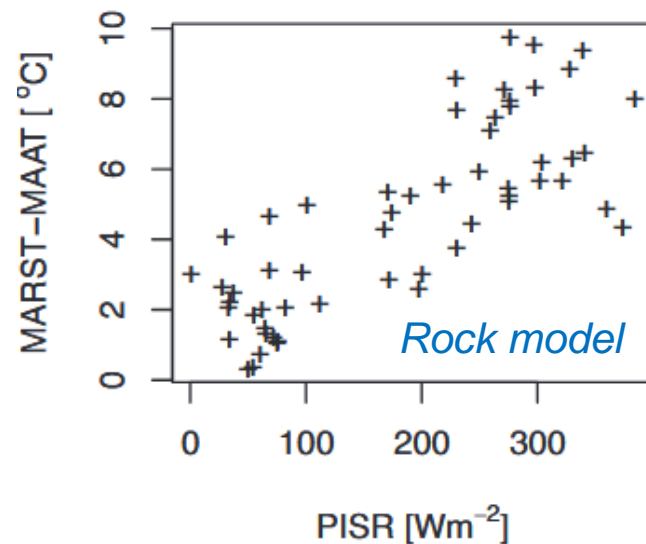
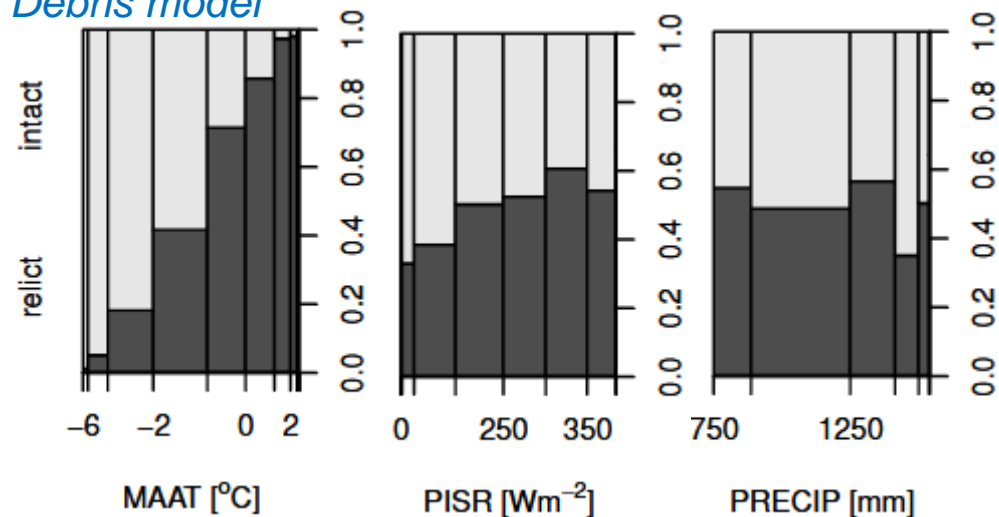
Questions de recherche pour aborder le rôle du permafrost dans les aléas gravitaires :

- ➔ **Où se trouve le permafrost en montagne ?** Notamment aux échelles spatiales fines (versant, subversant)
- ➔ **Comment évolue le permafrost ?** Selon le terrain ? A échelle temporelle fine (annuel, saisonnier) ?
- ➔ **Y-a-t-il une augmentation de la fréquence des aléas gravitaires** dans les terrains à permafrost ? Dans quelles conditions de permafrost ?
- ➔ **Comment anticiper les zones et périodes des déstabilisations à venir** (répondre aux besoins des acteurs, décideurs et pratiquants) ?

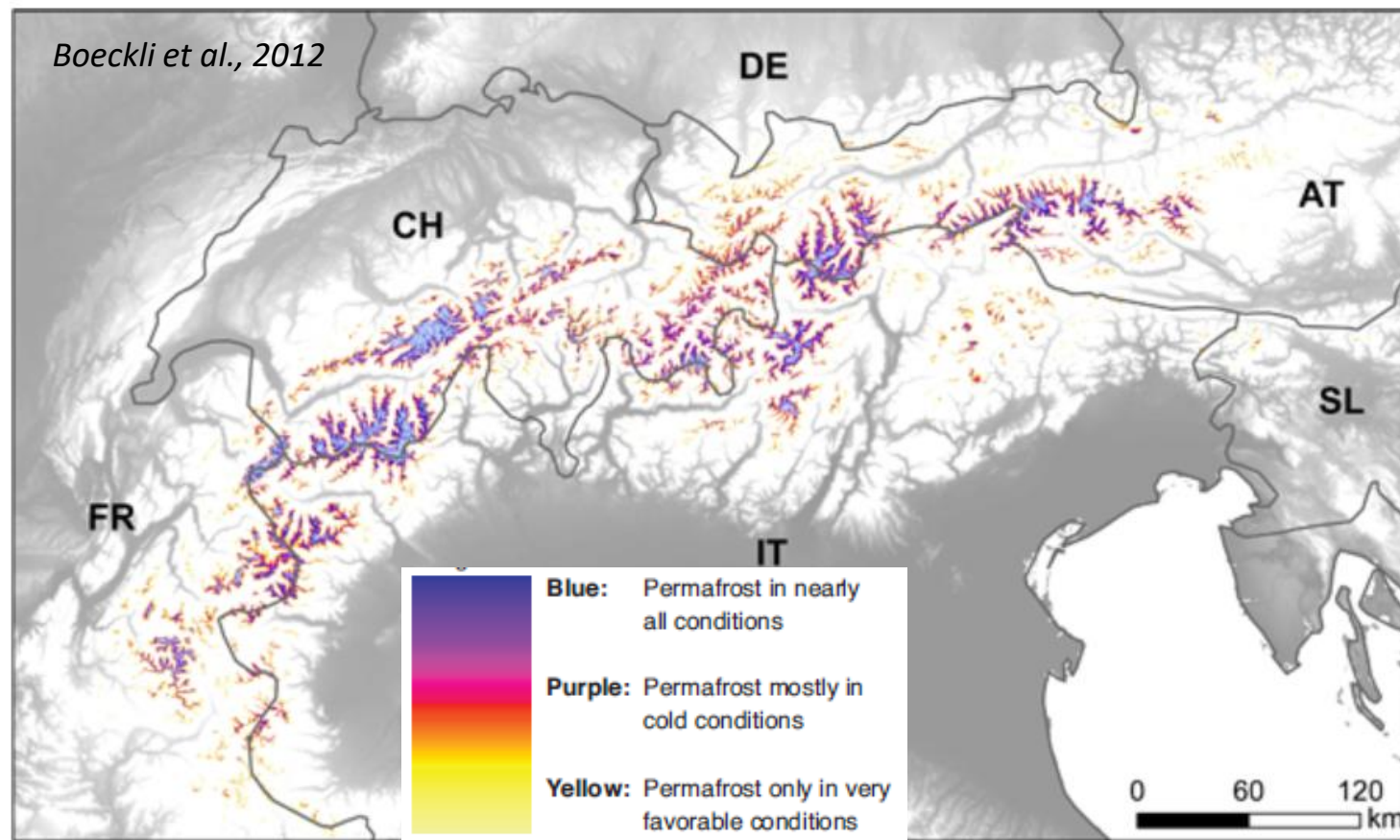
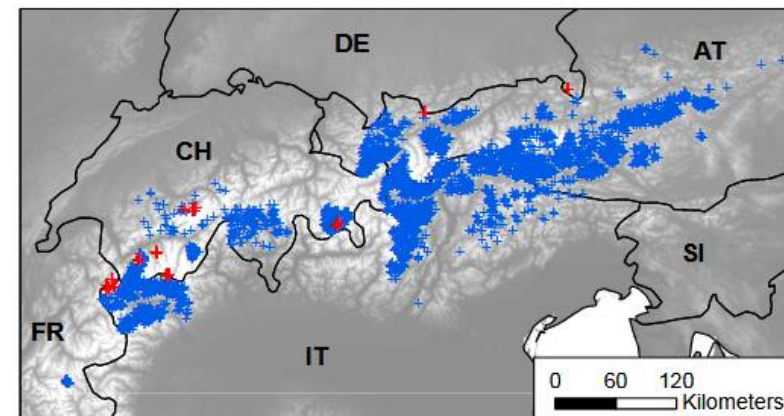
3) Où se trouve le permafrost et comment évolue-t-il ?

APIM (Alpine Permafrost Index Map)

Debris model

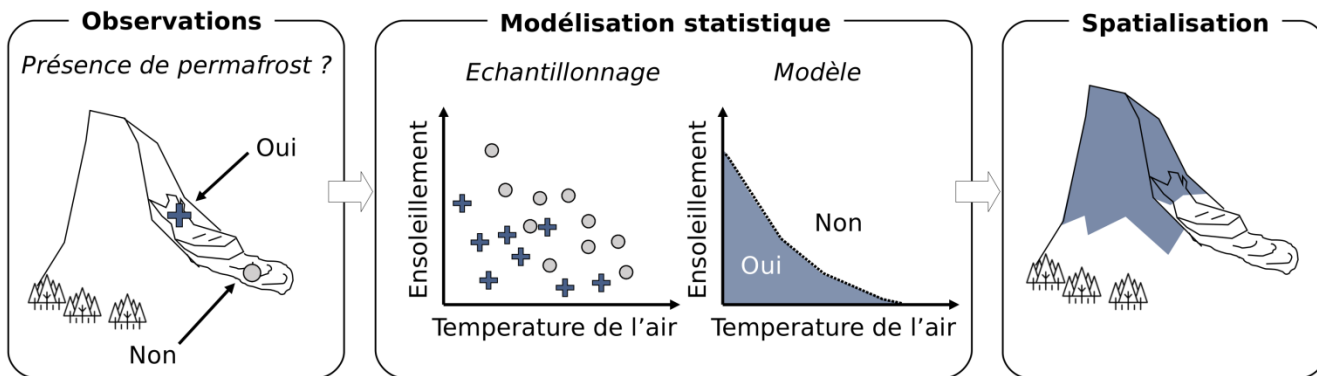


- 4218 glaciers rocheux (2184 intacts)
- 57 points de température annuelle à la surface des parois



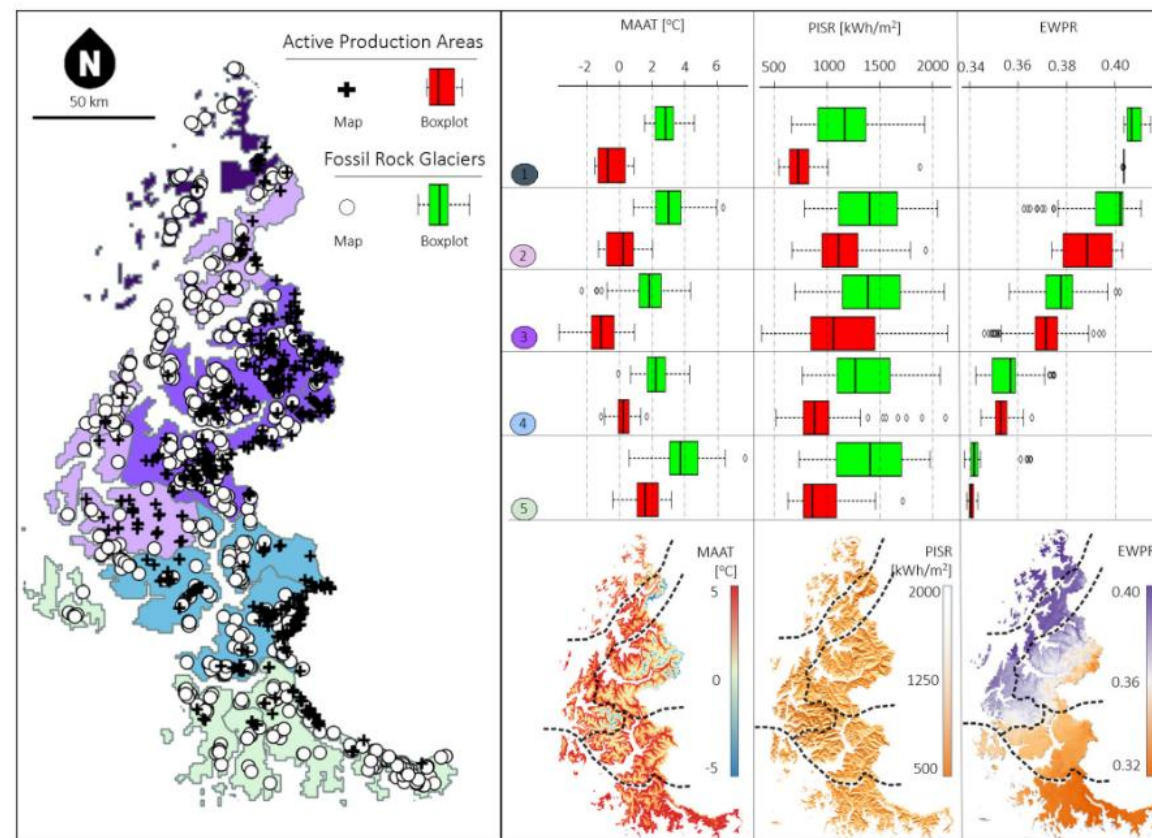
3) Où se trouve le permafrost et comment évolue-t-il ?

Distribution du permafrost dans les formations superficielles (glaciers rocheux) des Alpes Fr.



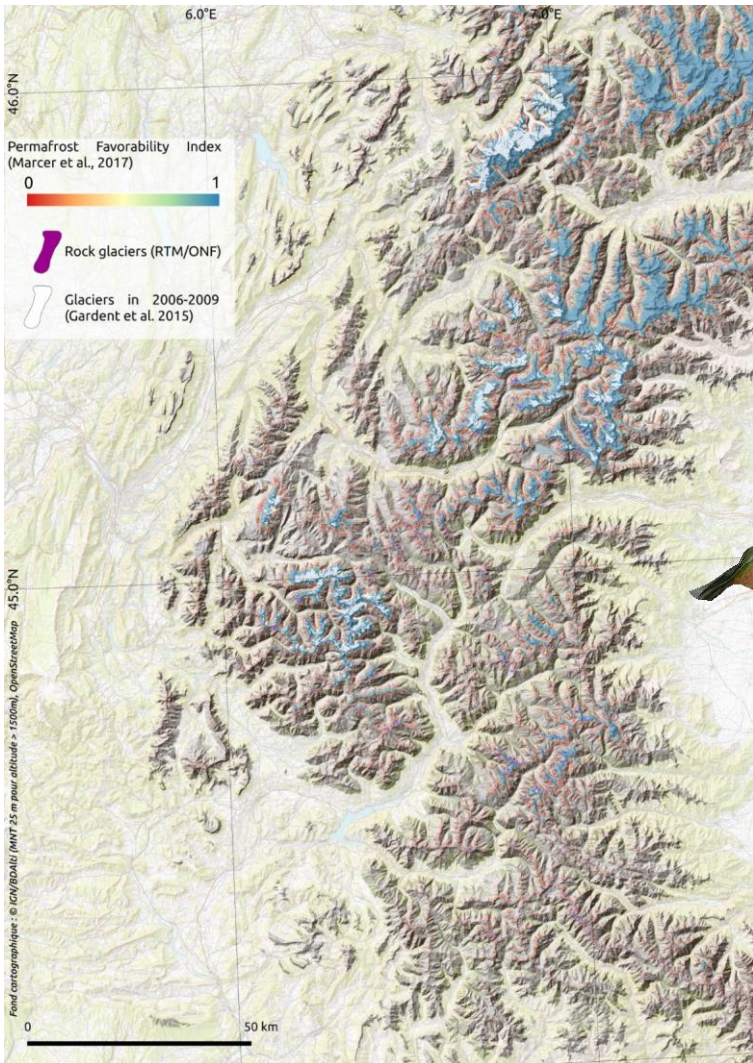
Marcer et al., 2017

- ➔ 3261 glaciers rocheux inventoriés en France dont la moitié contient de la glace
- ➔ Lien avec la température de l'air, le rayonnement solaire et les précipitations

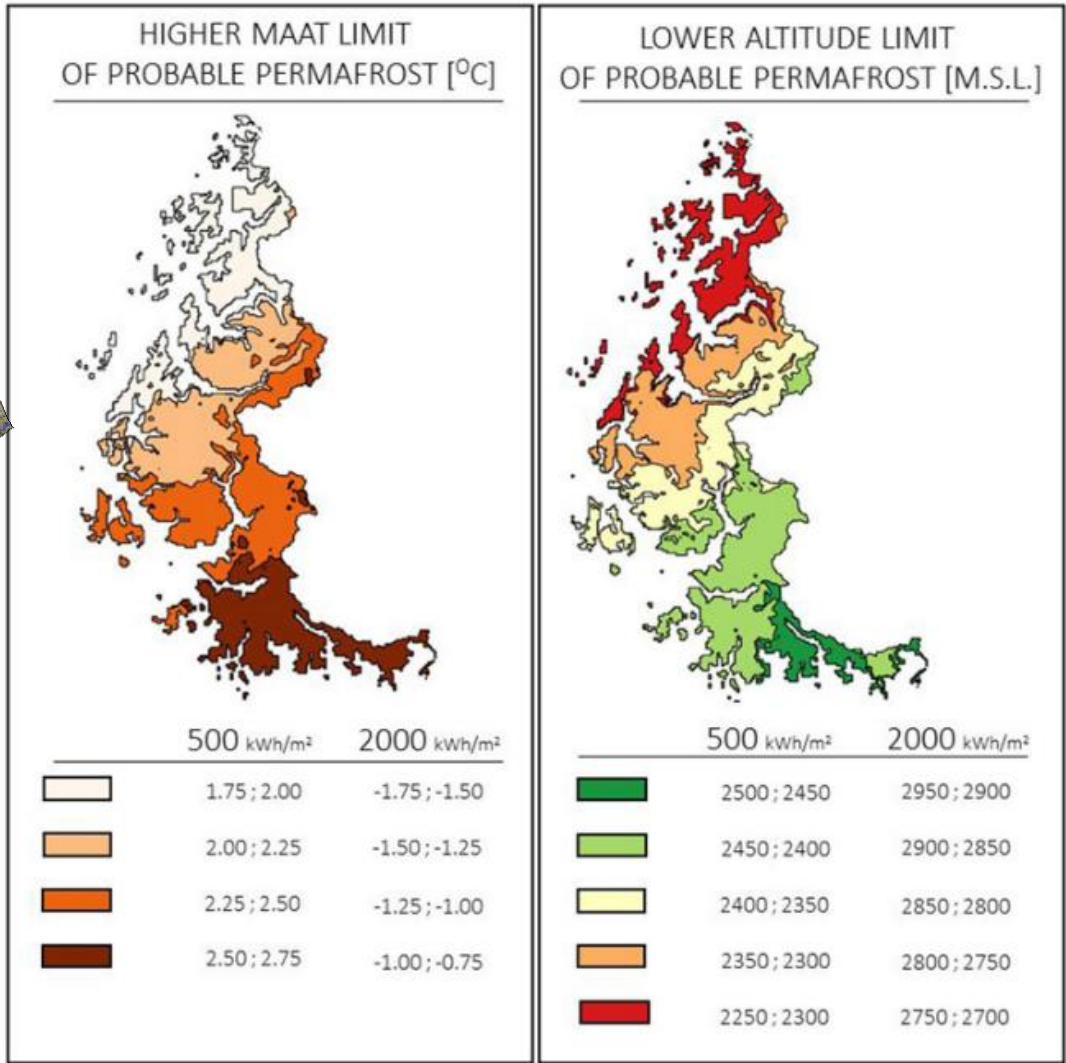
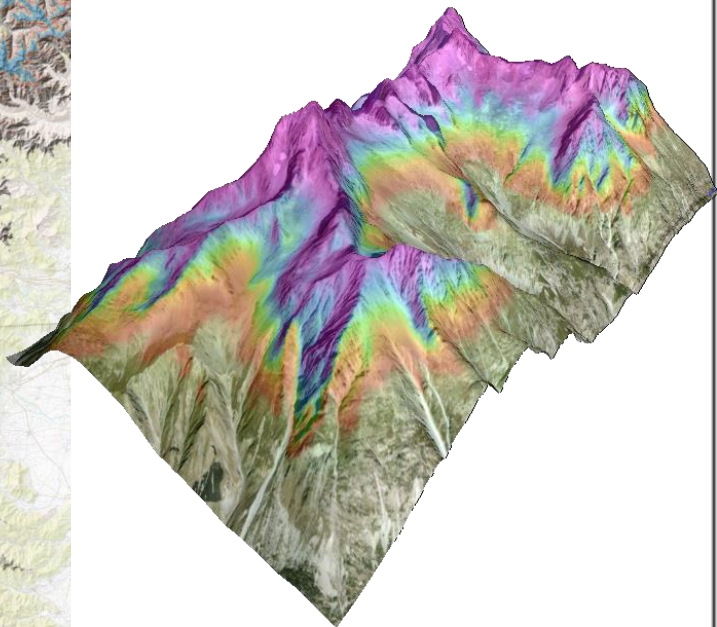


3) Où se trouve le permafrost et comment évolue-t-il ?

Distribution du permafrost dans les formations superficielles (glaciers rocheux) des Alpes Fr.

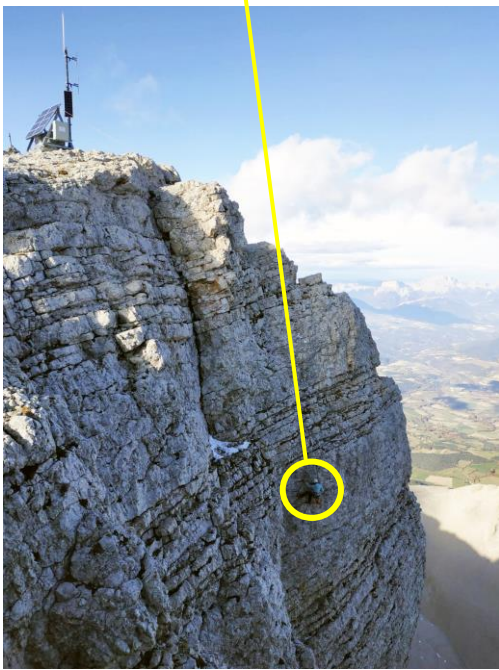
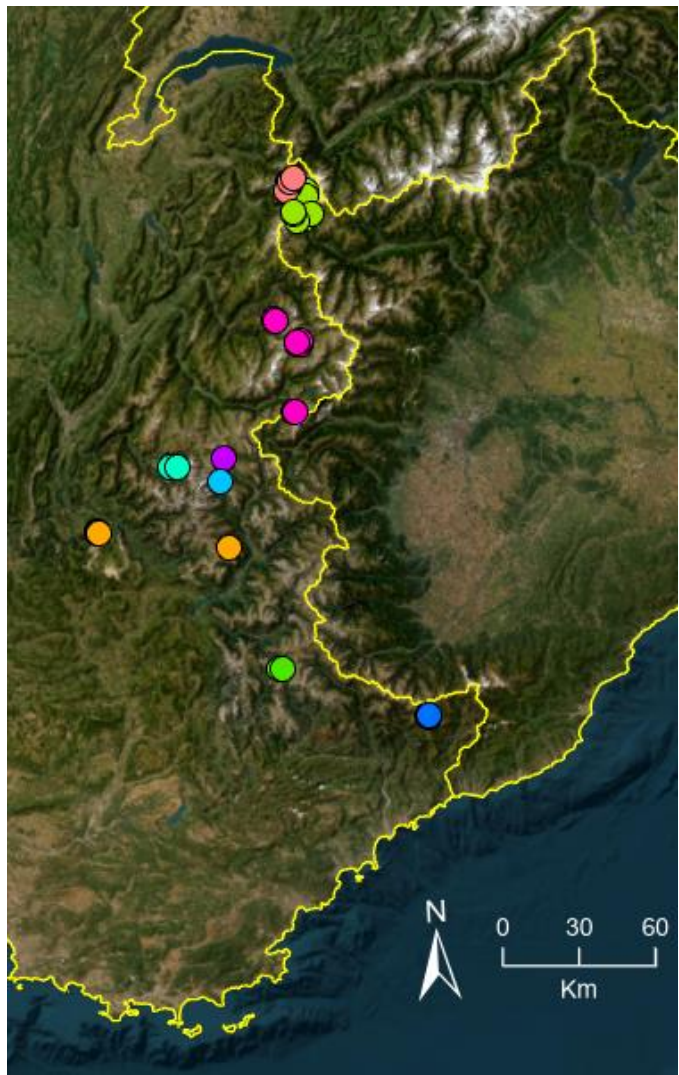


Marcer et al., 2017



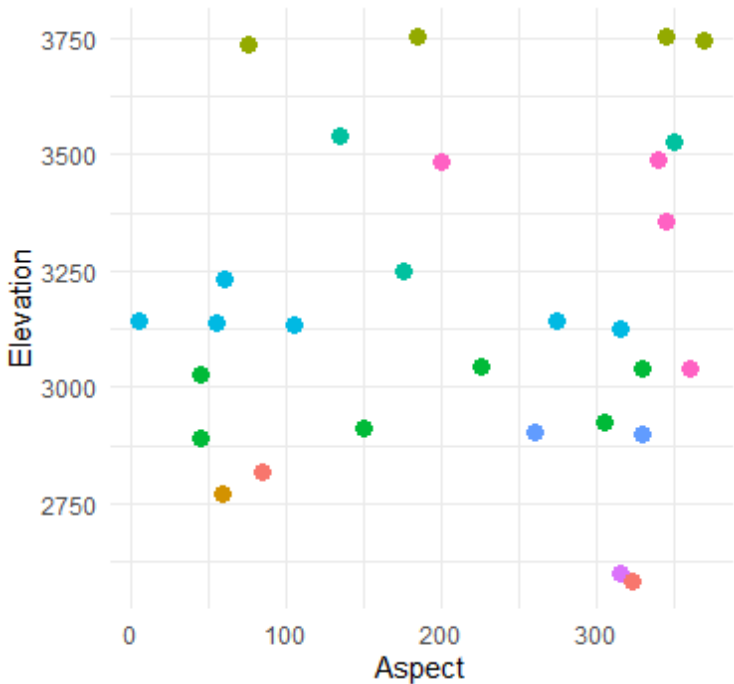
3) Où se trouve le permafrost et comment évolue-t-il ?

Distribution du permafrost dans les parois rocheuses des Alpes Fr.



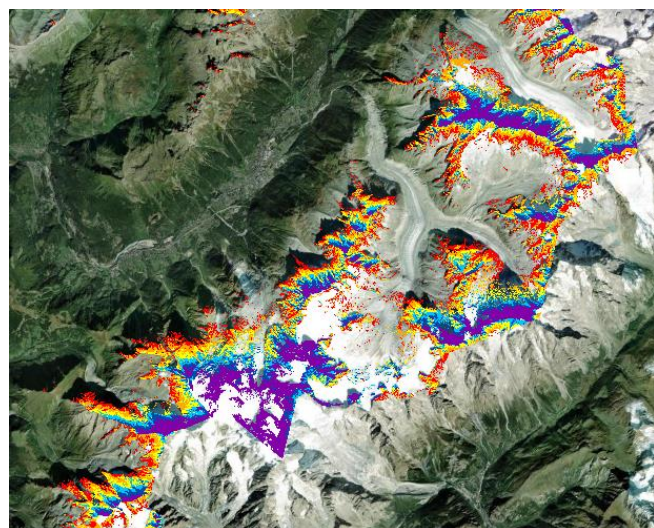
Variable	min	max	Moy	Méd
Air T. (TAMA) (°C)	-9.16	0.55	-4.5	-3.63
Ray. Solaire (RSIP) (w/m²)	13.33	357.67	176.36	151
T surf (TAMSP) (°C)	-6.61	3.81	0.05	0.58

Cathala et al., in prep

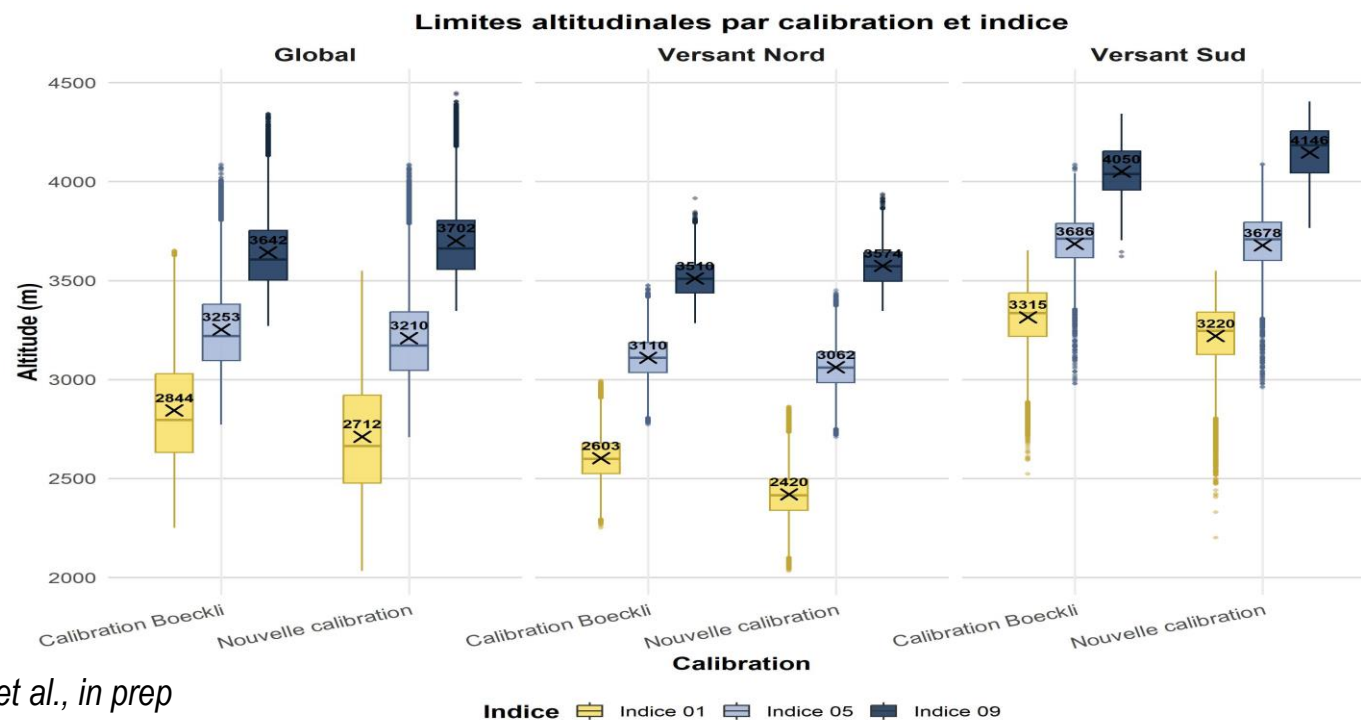
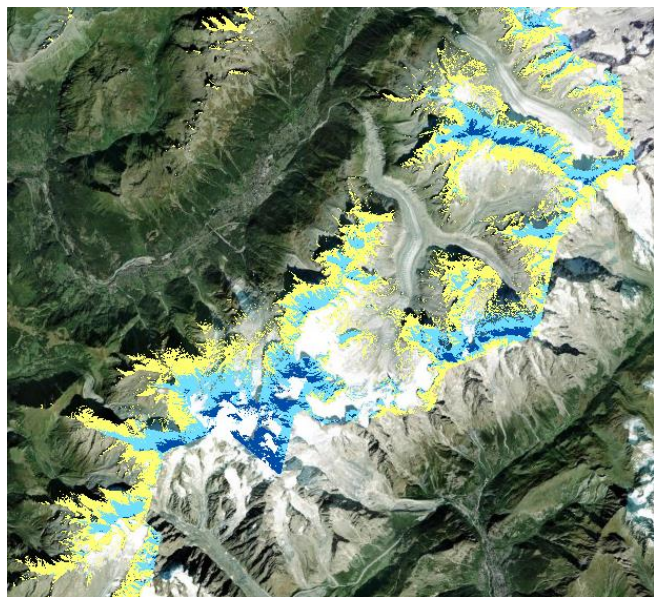


	Boeckli 2012 (57 pts)	Alpes Fr (72 pts)
Ord. Or	1.677	1.001
TAMA	1.096	0.856
RSIP	0.019	0.016
R²	0.82	0.90
R² adj	0.81	0.9
RMSE (°C)	1.57	0.77
σ (°C)	1.66	2.34

3) Où se trouve le permafrost et comment évolue-t-il ?

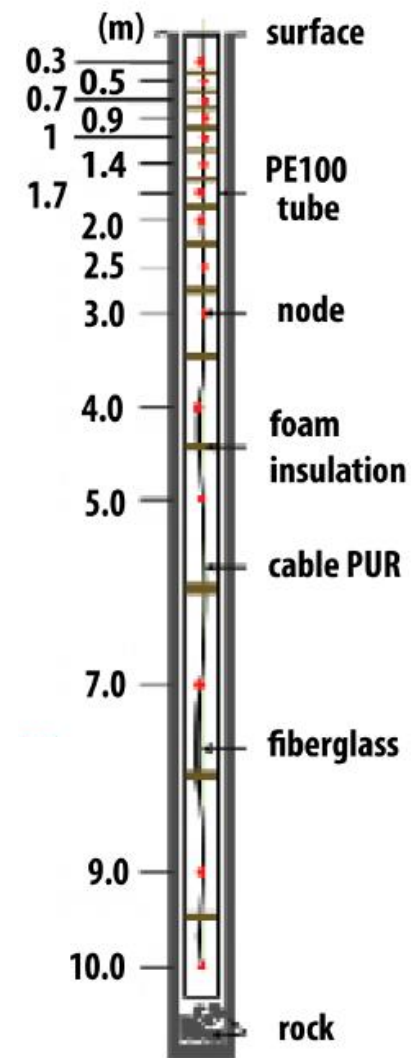
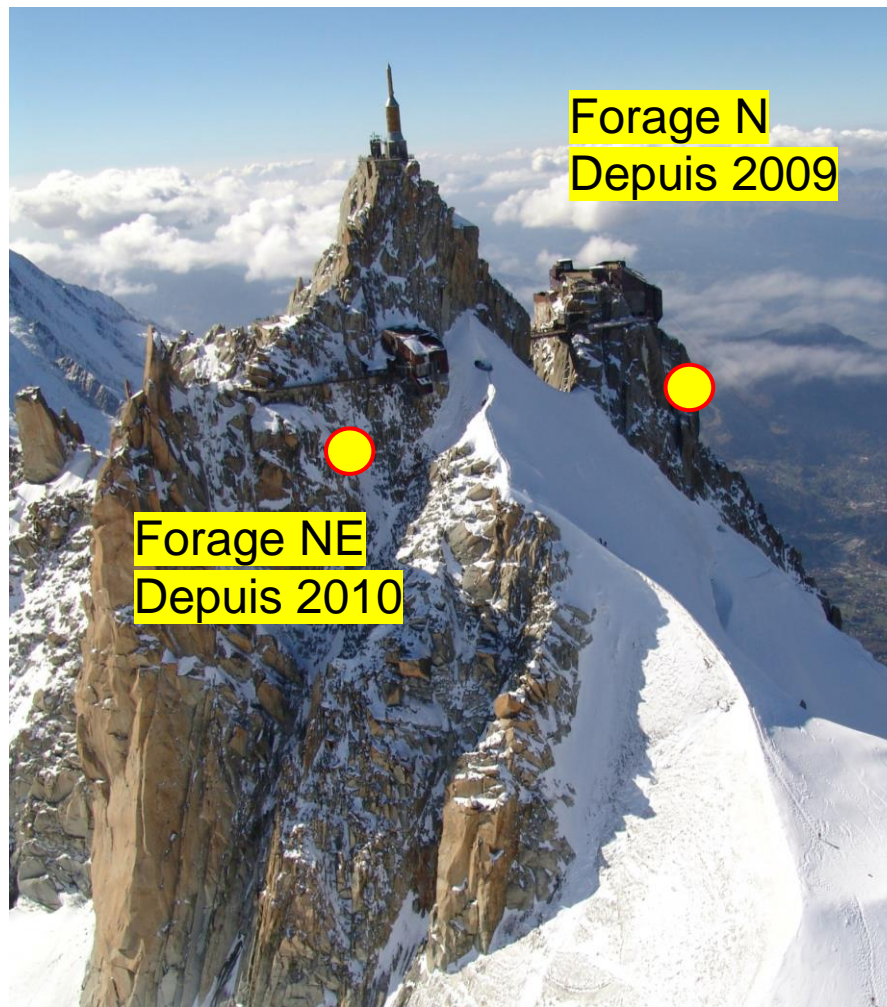
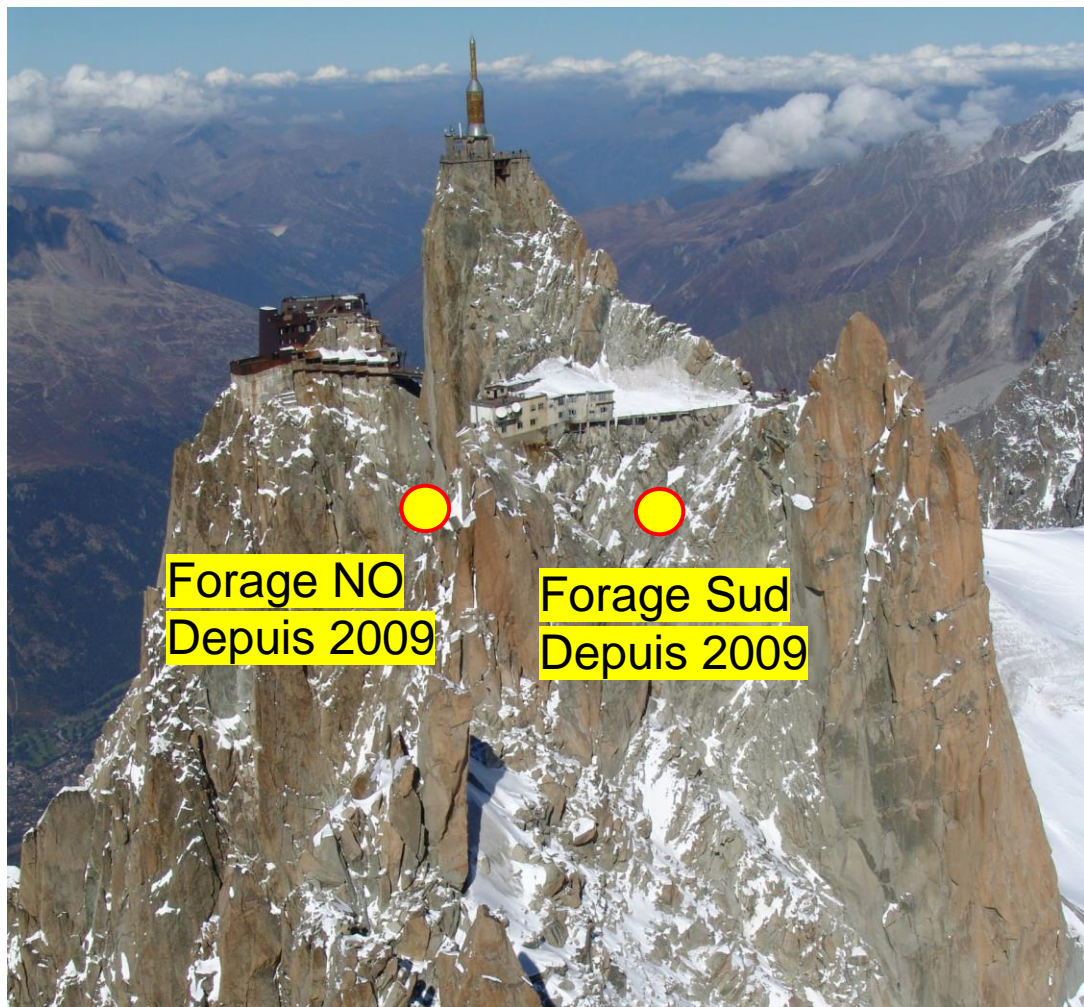


A interpréter
en fonction
des conditions
locales de la
roche



3) Où se trouve le permafrost et comment évolue-t-il ?

Aiguille du Midi : 4 forages de 10 m de profondeur

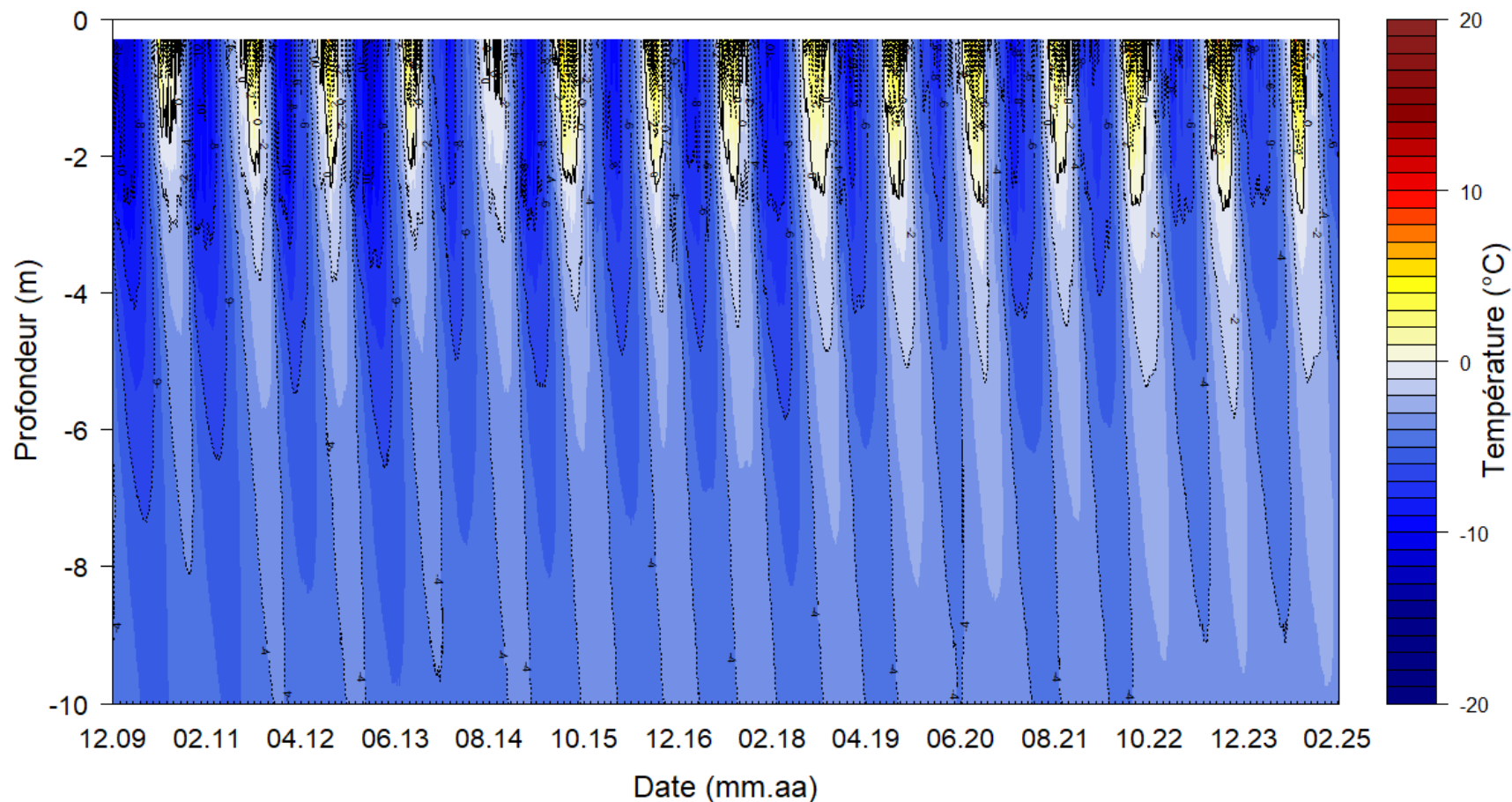


3) Où se trouve le permafrost et comment évolue-t-il ?

Aiguille du Midi : forage NO

- Couche active : +1,1 m/décennie, accélération depuis 2015
- T°C à 10 m : +1°C

Magnin et al., 2024

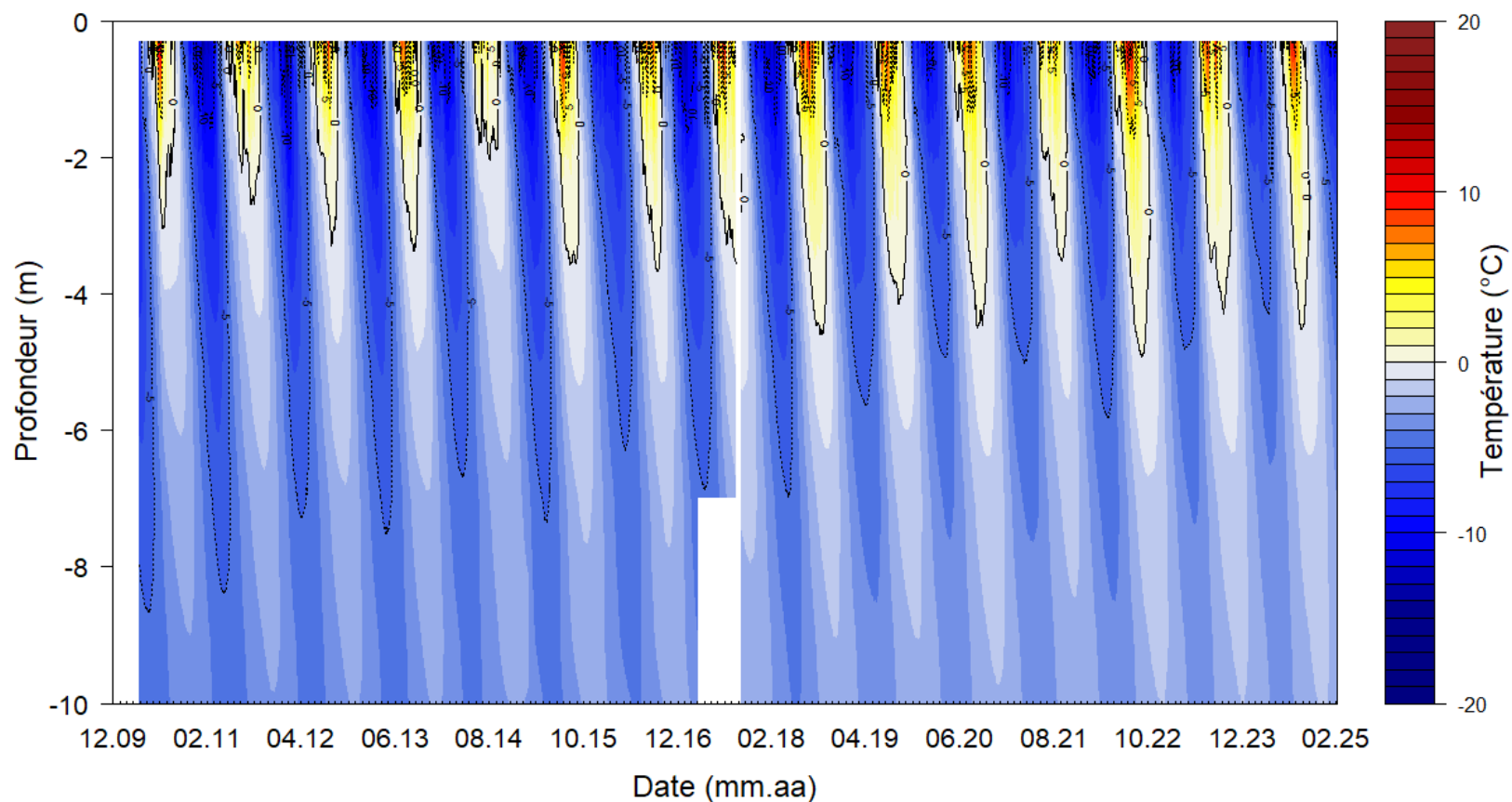
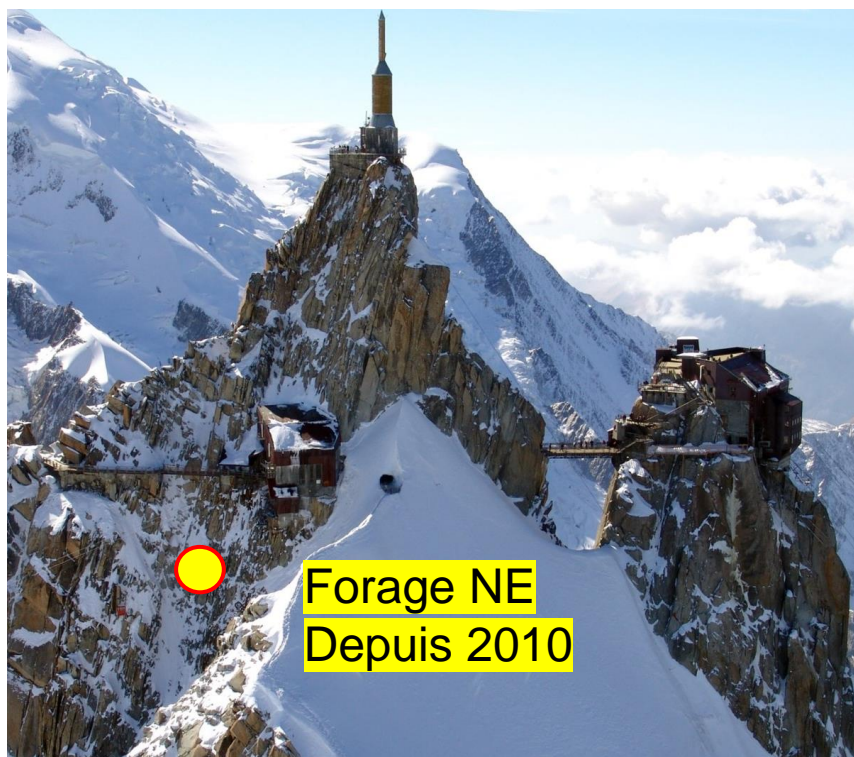


3) Où se trouve le permafrost et comment évolue-t-il ?

Aiguille du Midi : forage NE

- Couche active : +2,1 m/décennie, accélération depuis 2015
- T°C à 10 m : +1,1°C

Magnin et al., 2024



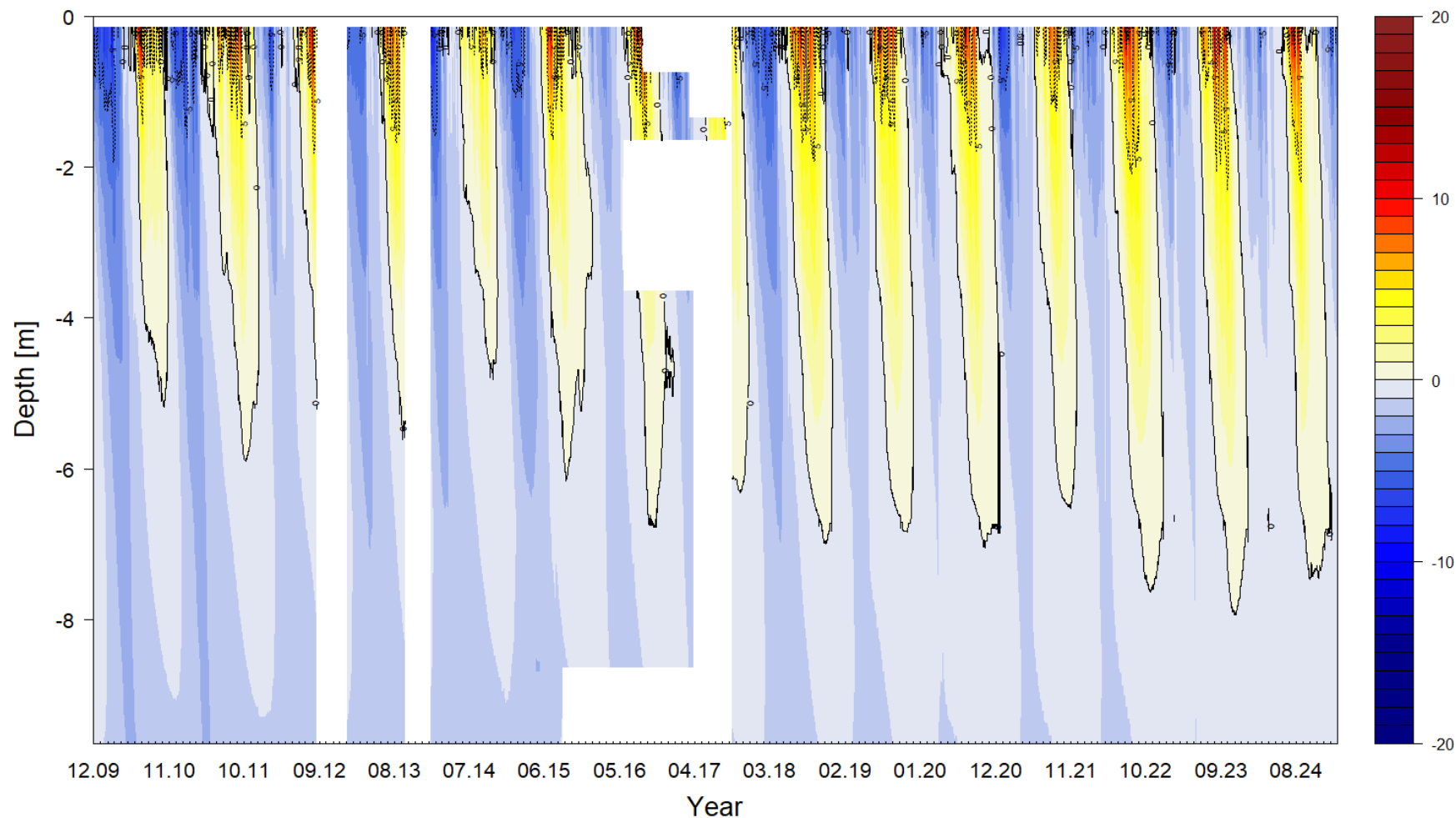
3) Où se trouve le permafrost et comment évolue-t-il ?

Aiguille du Midi : forage NE

→ Couche active : +1,9 m/décennie, accélération depuis 2015

→ T°C à 10 m : +0,7°C

Magnin et al., 2024

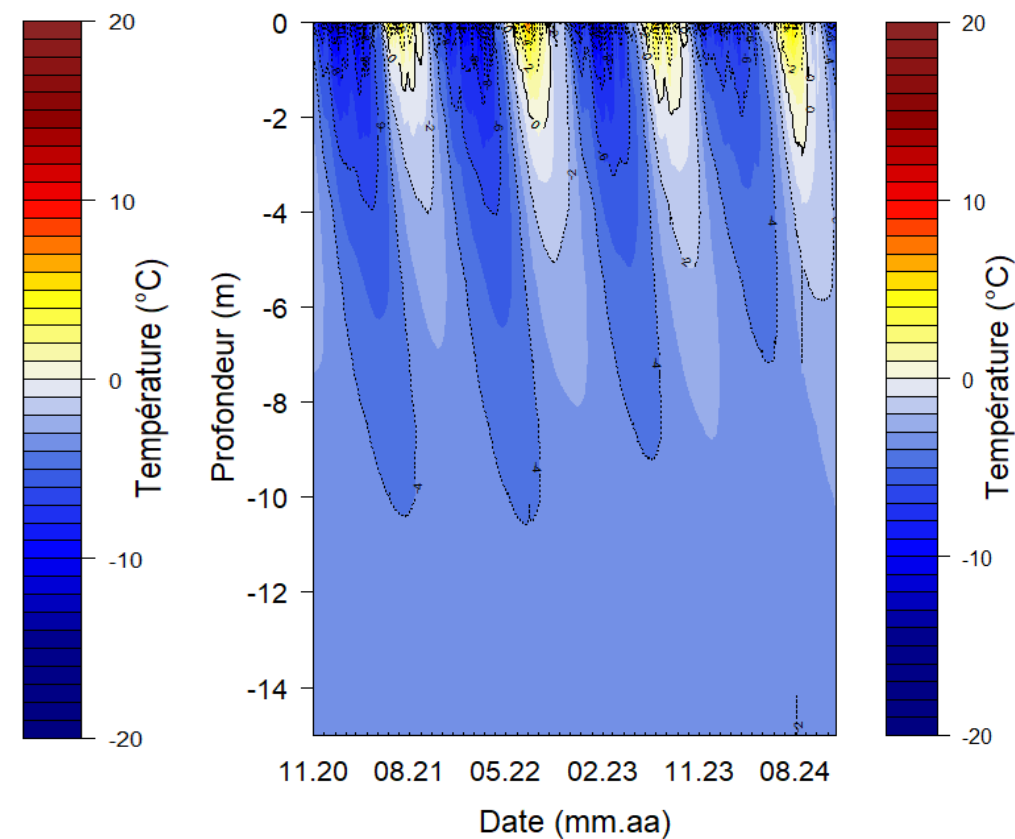
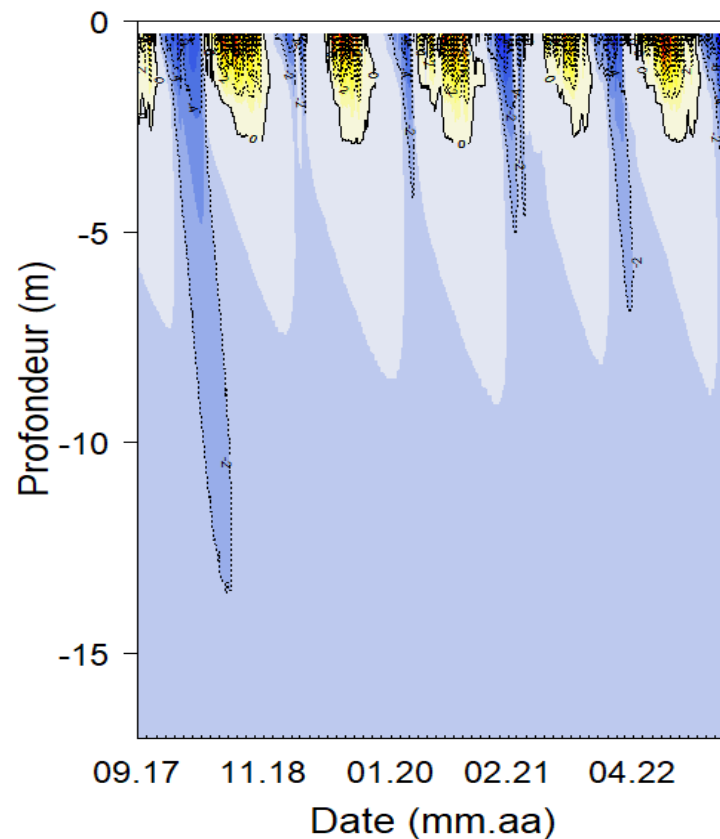


3) Où se trouve le permafrost et comment évolue-t-il ?

Aiguille des Grands Montets et Grande Motte

- ➔ Effet atténuant des blocs superficiels à l'Aiguille des Grands Montets
- ➔ Année record de 2024 à la Grande Motte et des effets d'infiltration d'eau

Magnin et al., 2024

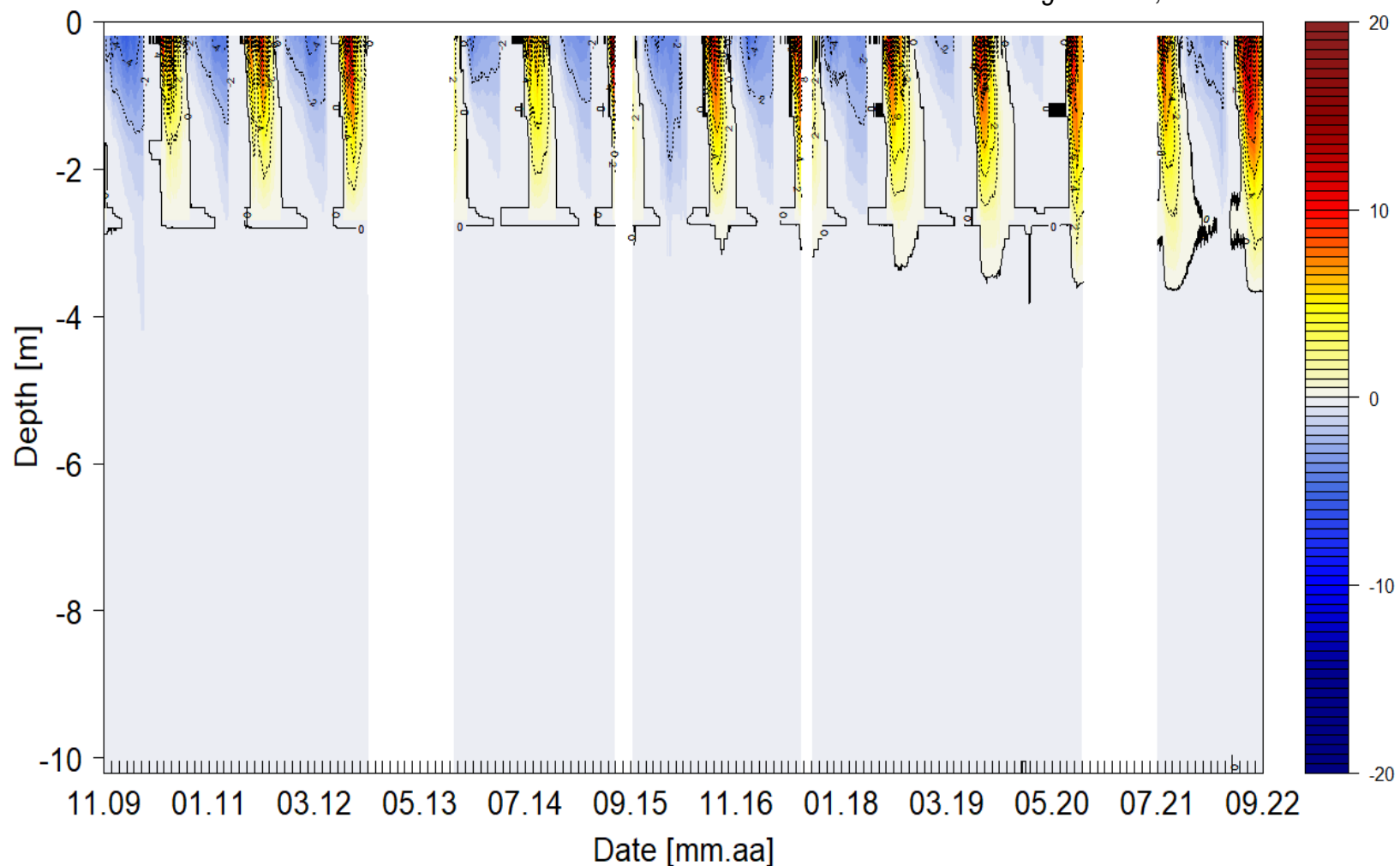


3) Où se trouve le permafrost et comment évolue-t-il ?

Glacier rocheux aux Deux Alpes

- Couche active : +1,2 m/décennie, accélération depuis 2015
- T°C à 10 m : 0

Magnin et al., 2024



4) Implications du permafrost pour les sociétés alpines

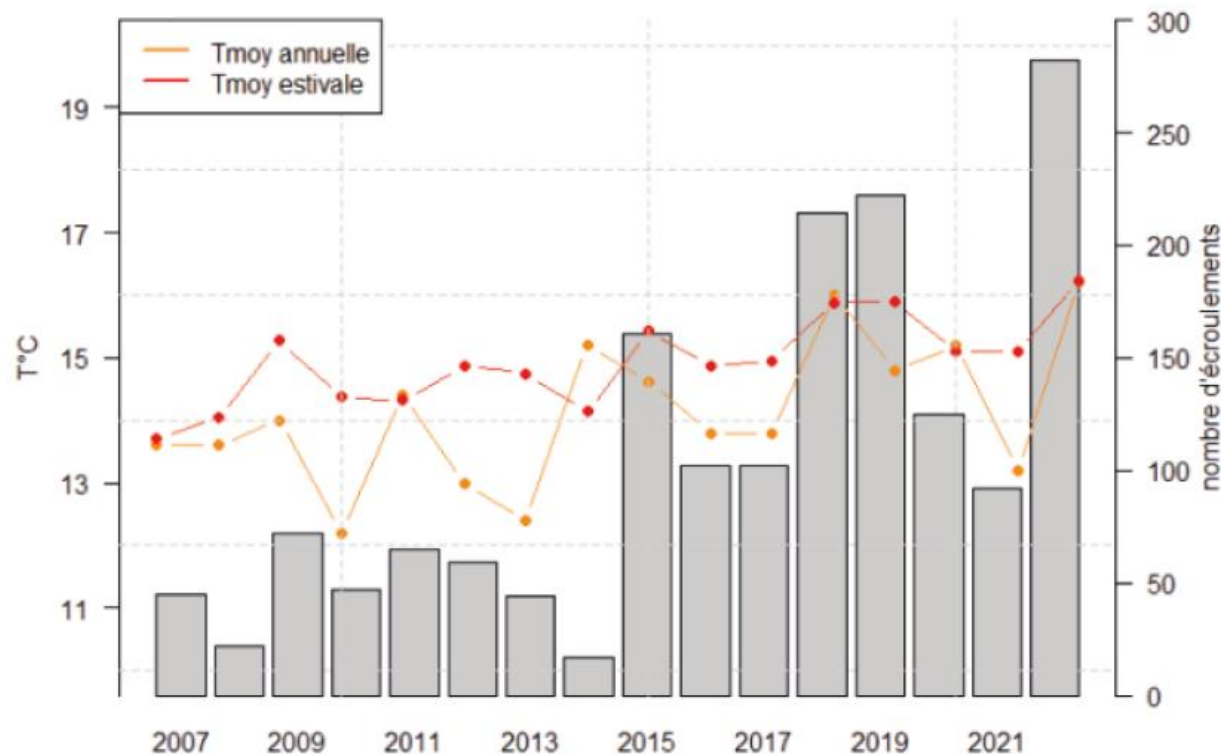
➔ Etudes initiées suite aux effets à la canicule de 2003

➔ Plus les étés sont chauds plus il y a d'écroulements



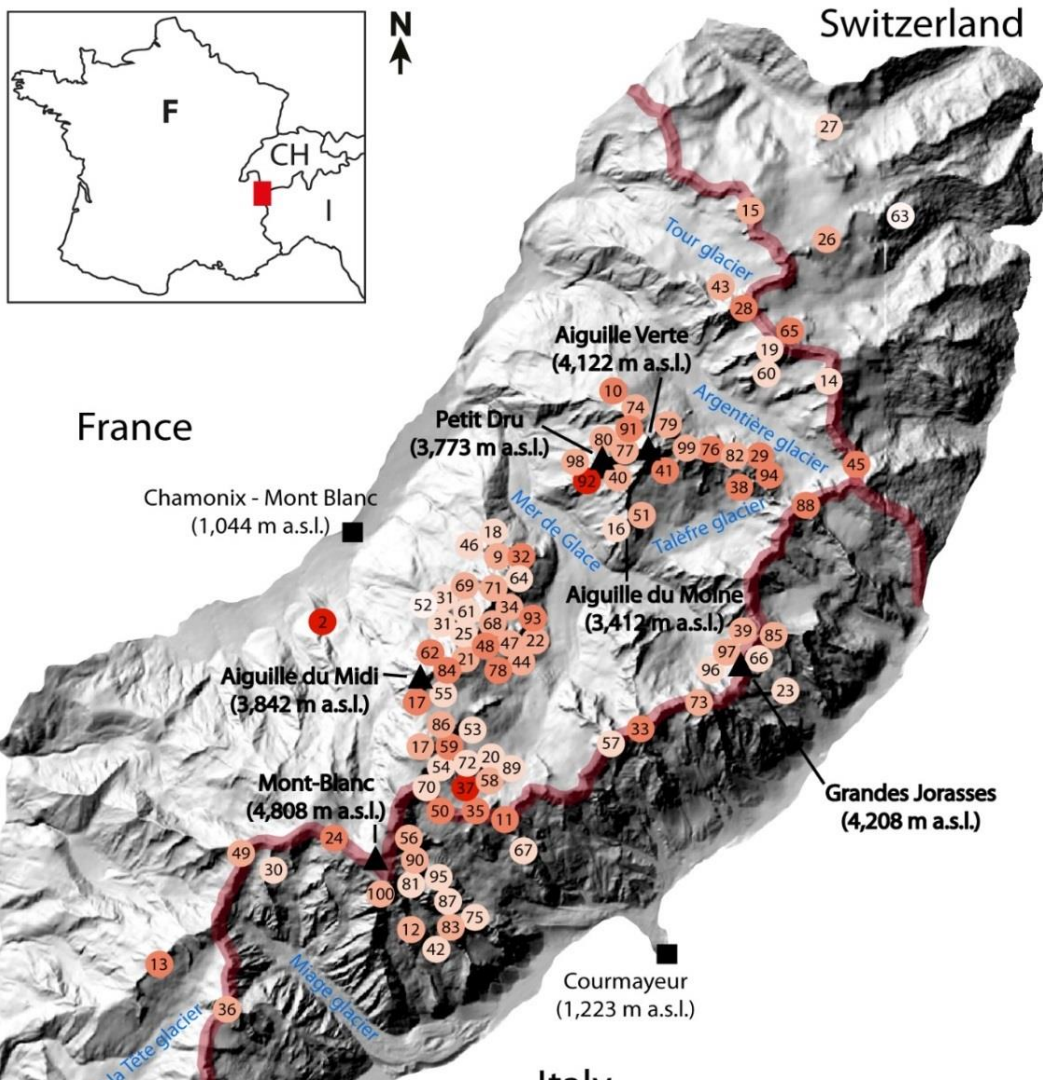
- 2003 : 182 écroulements

Jean, 2025 (MSc)



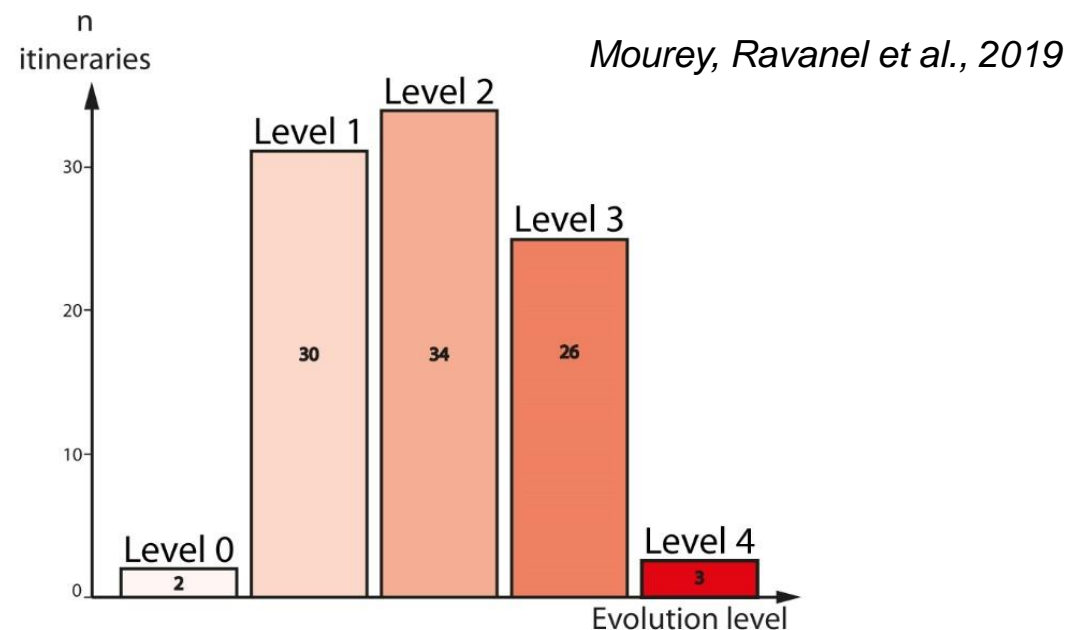
4) Implications du permafrost pour les sociétés alpines

Implication pour la pratique récréative/pro de la haute montagne



Etude de l'évolution des 100 plus belles courses du massif du Mont Blanc :

- ➔ 1/3 des itinéraires ont disparu ou sont devenus plus dangereux
- ➔ L'adaptation consiste à changer la saisonnalité des pratiques
- ➔ Implications importantes pour les professionnels (guides)
- ➔ Fermeture temporaires d'itinéraires



3) Implications du permafrost pour les sociétés alpines

Implication pour la pratique récréative/pro de la haute montagne

➔ Endommagement, destruction ou menace sur les infrastructures voire les populations

Ravanel *et al.*, 2013

Déstabilisation du
refuge des Cosmiques
1998

22 août 1998



Ecoulement
de Taconnaz
2018

Implantation hydro-
électrique

Habitations



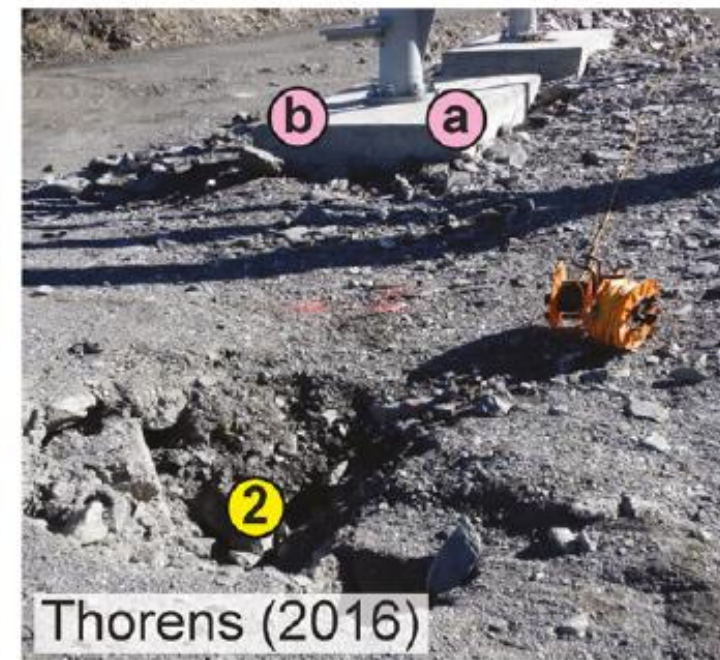
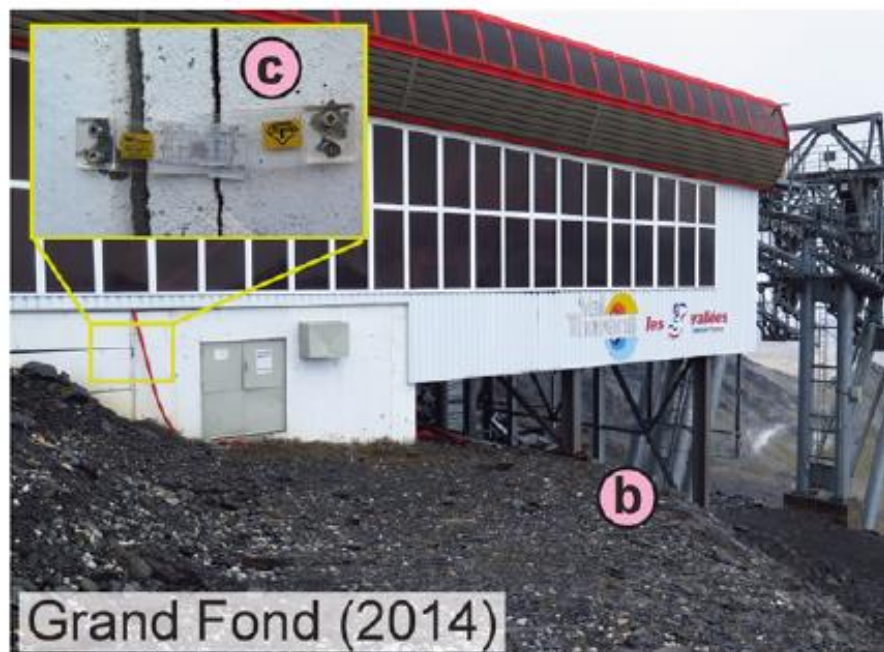
Disparition du
bivouac de la
Fourche en
2022

4) Implications du permafrost pour les sociétés alpines

Implication pour l'exploitation économique de la haute montagne

- ➔ Endommagement et déformation des infrastructures de haute montagne
- ➔ Lacs et formations thermokarstiques

Duvillard et al., 2019



4) Implications du permafrost pour les sociétés alpines

Implication pour les infrastructures et habitations en fond de vallée

→ Coulées de boue, débris, laves torrentielles, vidanges de lacs thermokarstiques



Rupture du front du glacier rocheux du Col du Lou (Val Cenis, Vanoise) Août 2015



Vidange brutale du lac thermokarstique du glacier rocheux de Chauvet en 2008 (vallée de l'Ubaye)

4) Implications du permafrost pour les sociétés alpines

Implication pour les infrastructures et habitations en fond de vallée

→ Aléas en cascade



Avalanche de roche puis de glace à Blatten 14 au 28 mai 2025

Déstabilisation du Kleines Nesthorn (3342 m) le 14/05

Evacuation de Blatten le 17/05

19-21/05 : dépôts des déstabilisations stockées sur le glacier et accélération de son fluage

Effondrement du glacier le 28/05

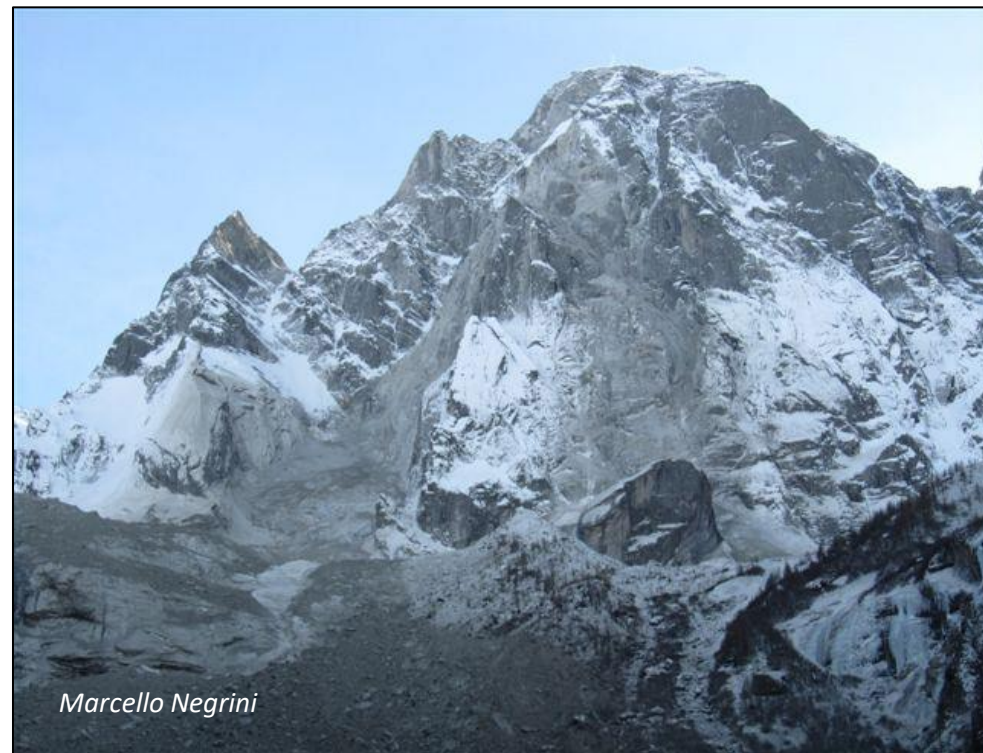
4) Implications du permafrost pour les sociétés alpines

Implication pour les infrastructures et habitations en fond de vallée

→ Aléas en cascade



8 morts
~100 habitations
détruites
système d'alerte a
permis l'évacuation
du village



Avalanche rocheuse du Piz Cengalo en Août 2017
→ Impact du glacier au pied de la face →
liquéfaction → entraînement du matériel
morainique déjà saturé en eau au front du glacier
→ lave torrentielle

4) Implications du permafrost pour les sociétés alpines

Implication pour les infrastructures et habitations en fond de vallée

→ Aléas en cascade



→ Dans le fjord Karrat (Groenland) en June 2017 → déplacement de la vague sur 100 m → déplacement de la vague sur

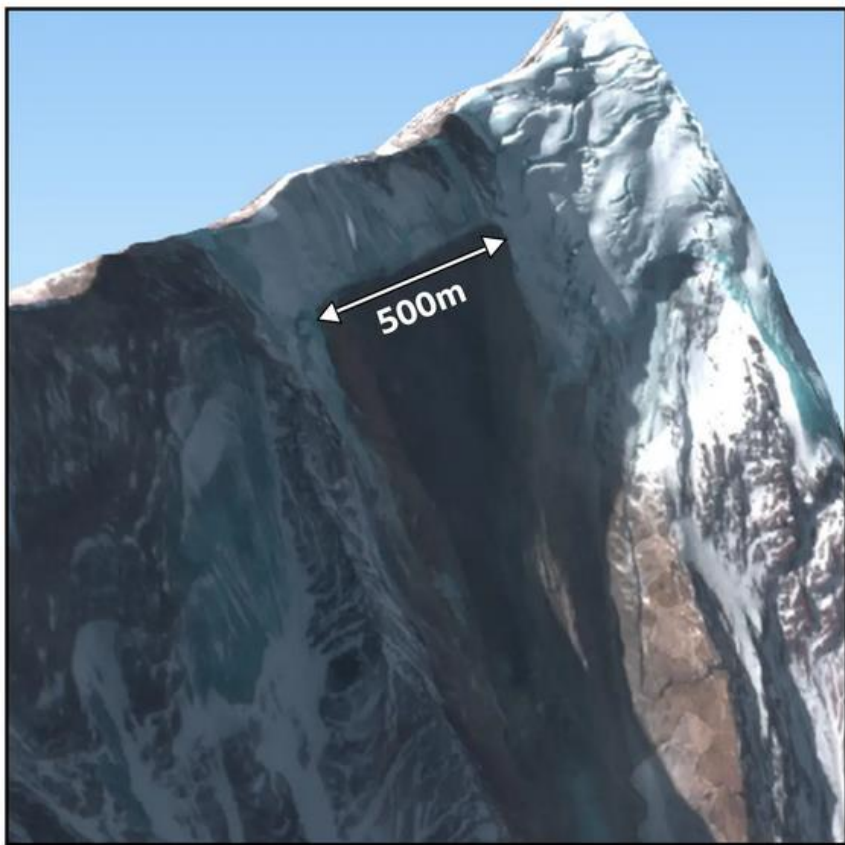


4) Implications du permafrost pour les sociétés alpines

Implication pour les infrastructures et habitations en fond de vallée

→ Aléas en cascade

Avalanche de roche et glace du Pic Ronti (Himalaya Indienne) en février 2021 → lave torrentielle



- > 200 morts
- 2 chantiers hydroélectriques détruits

4) Implications du permafrost pour les sociétés alpines

Implication pour les infrastructures et habitations en fond de vallée

→ Aléas en cascade



Cordillère Blanche
du Pérou, avril 2025

Eroulement →
vague d'impact
dans le lac glaciaire
sous-jacent →
débordement →
lave torrentielle



- 2 morts
- ~20 blessés
- route d'accès centre
formation guide coupée

4) Implications du permafrost pour les sociétés alpines

Implication pour les infrastructures et habitations en fond de vallée

→ Aléas en cascade



Vidange du lac
Palcacocha en 1941
→ destruction d'1/3
de la ville de Huaraz
→ 6000 à 8000
morts

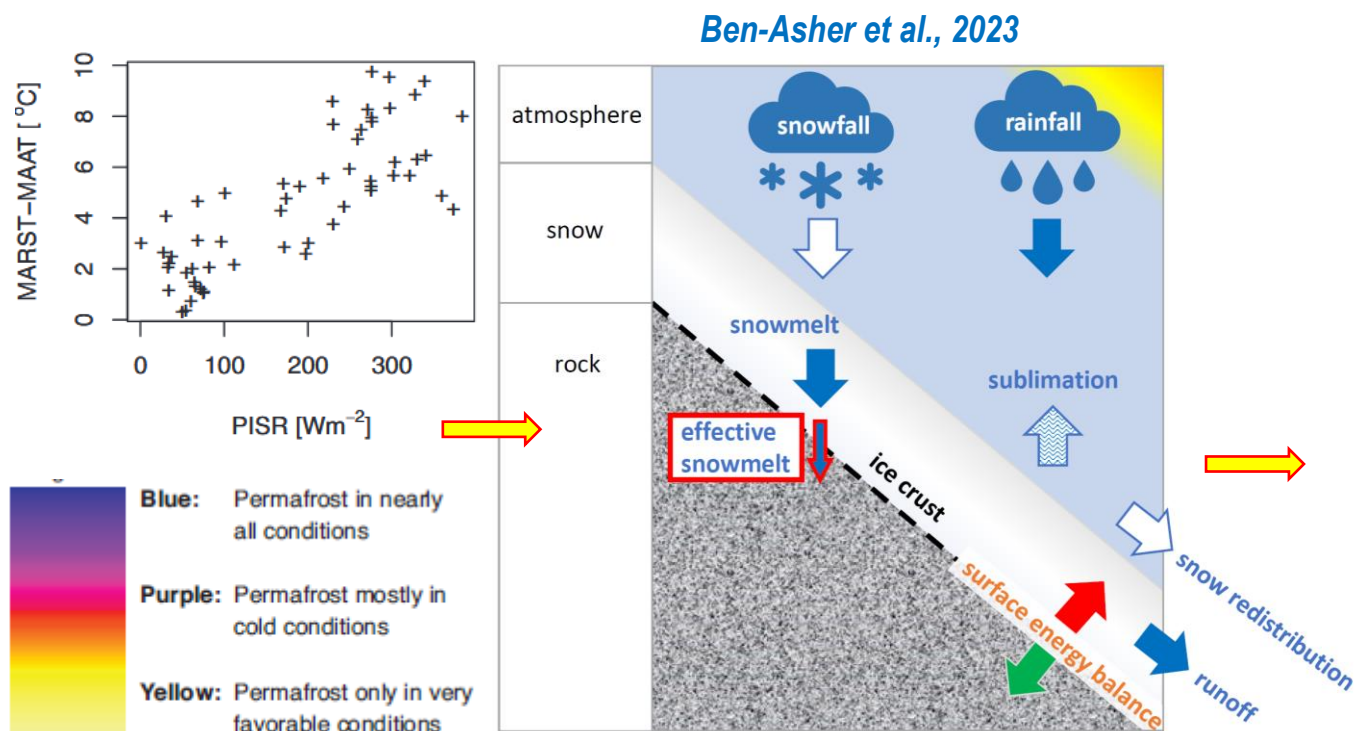


(Foto: Arnold Heim 1947).

5) Développements récents et en cours

Améliorer cartographie et la caractérisation du permafrost

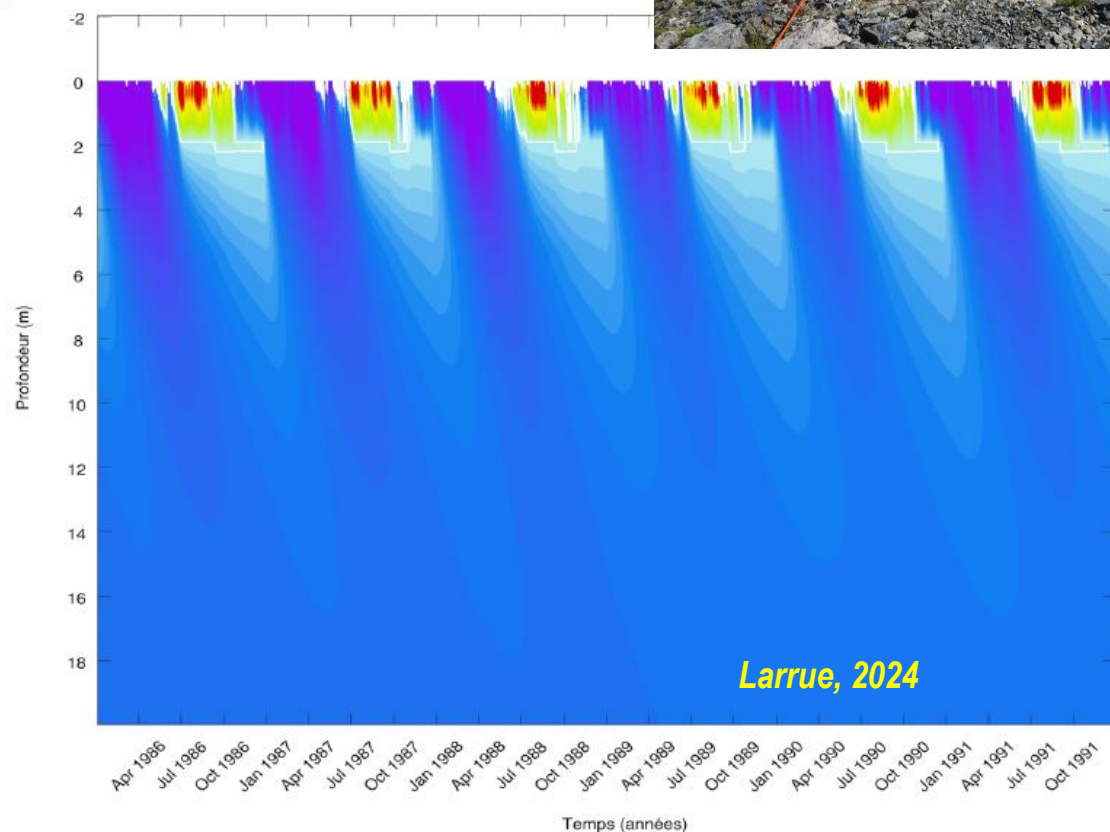
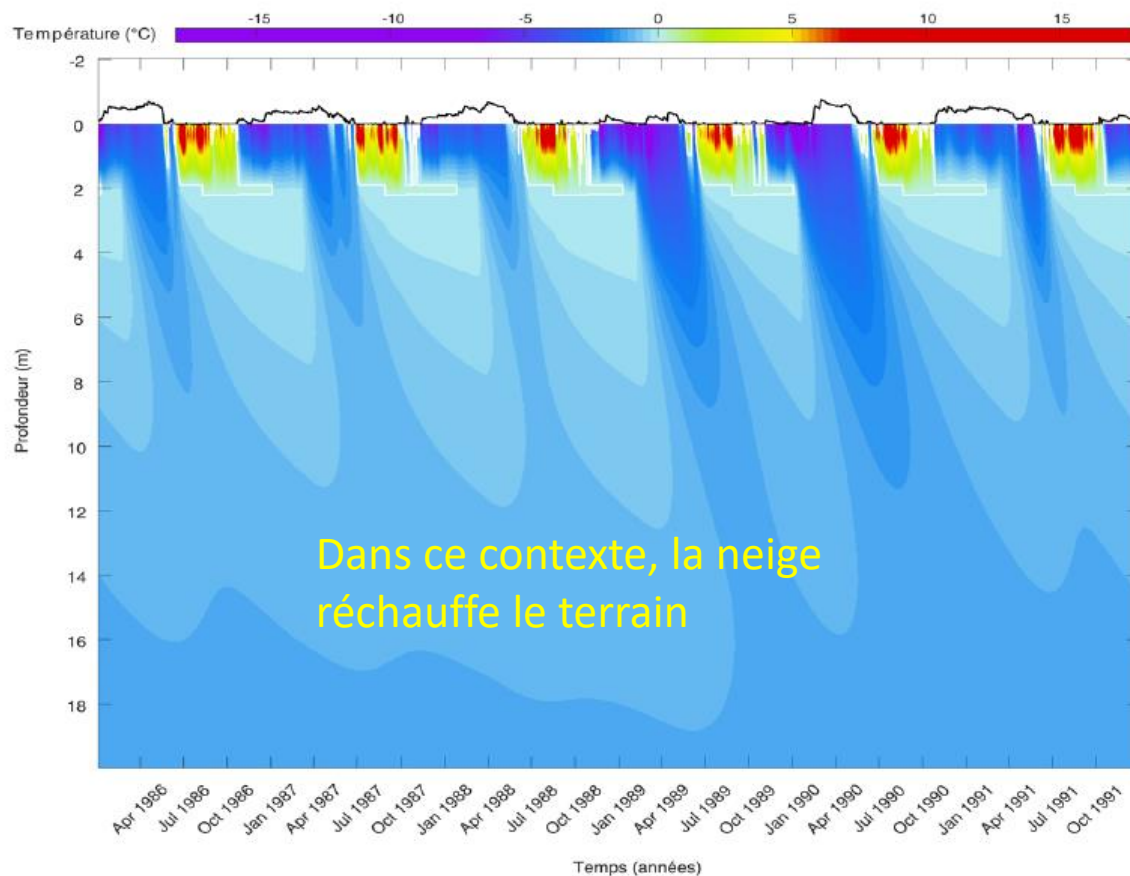
- Des modèles statistiques aux modèles physiques
- Modèle de bilan d'énergie pour appréhender les effets thermiques de la neige, de la variabilité temporelle du rayonnement solaire, etc.
- Pouvoir cartographier et comprendre la distribution et la caractérisation du permafrost quel que soit le terrain



5) Développements récents et en cours

Comprendre les effets de la neige sur l'évolution du permafrost

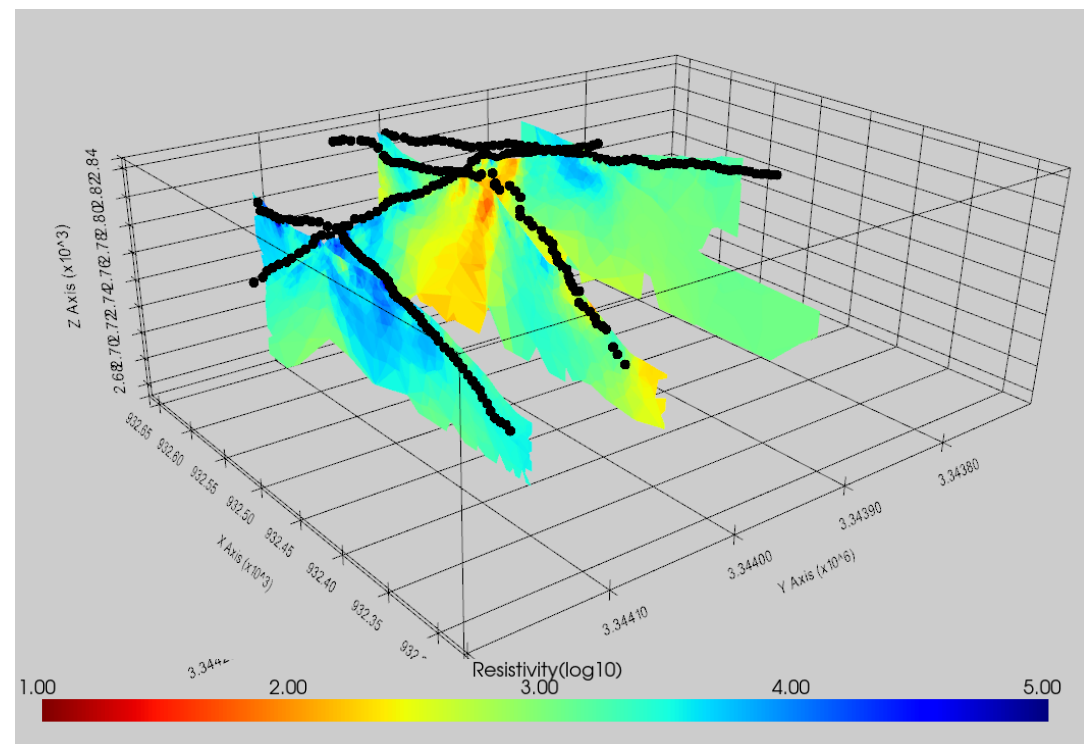
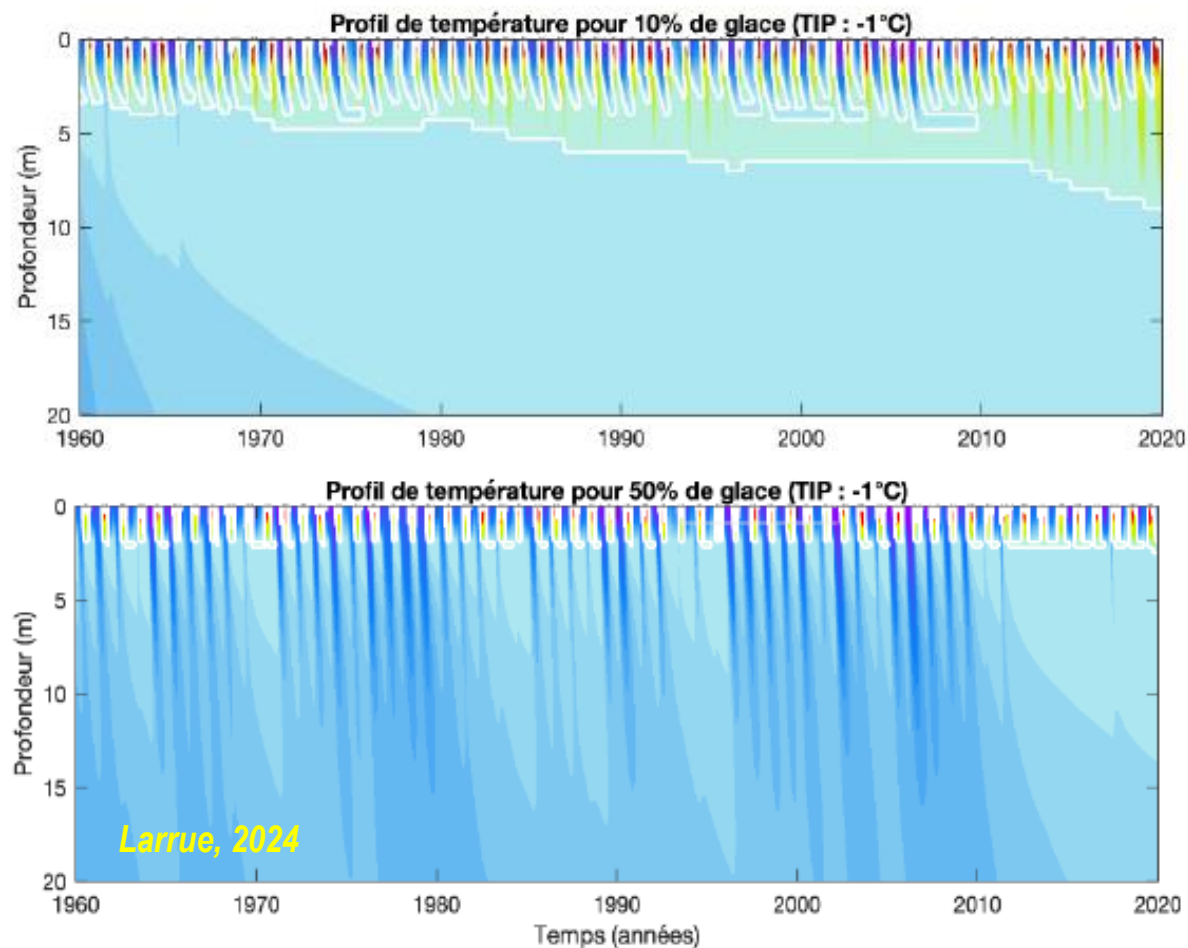
- ➔ Exemple de simulation montrant les effets de la neige pour un sommet rocheux avec très peu de déclivité
- ➔ Les effets dépendent de la hauteur de neige, de la période d'accumulation et de fonte et des interactions avec le rayonnement solaire



5) Développements récents et en cours

Appréhender la teneur et la distribution de la glace

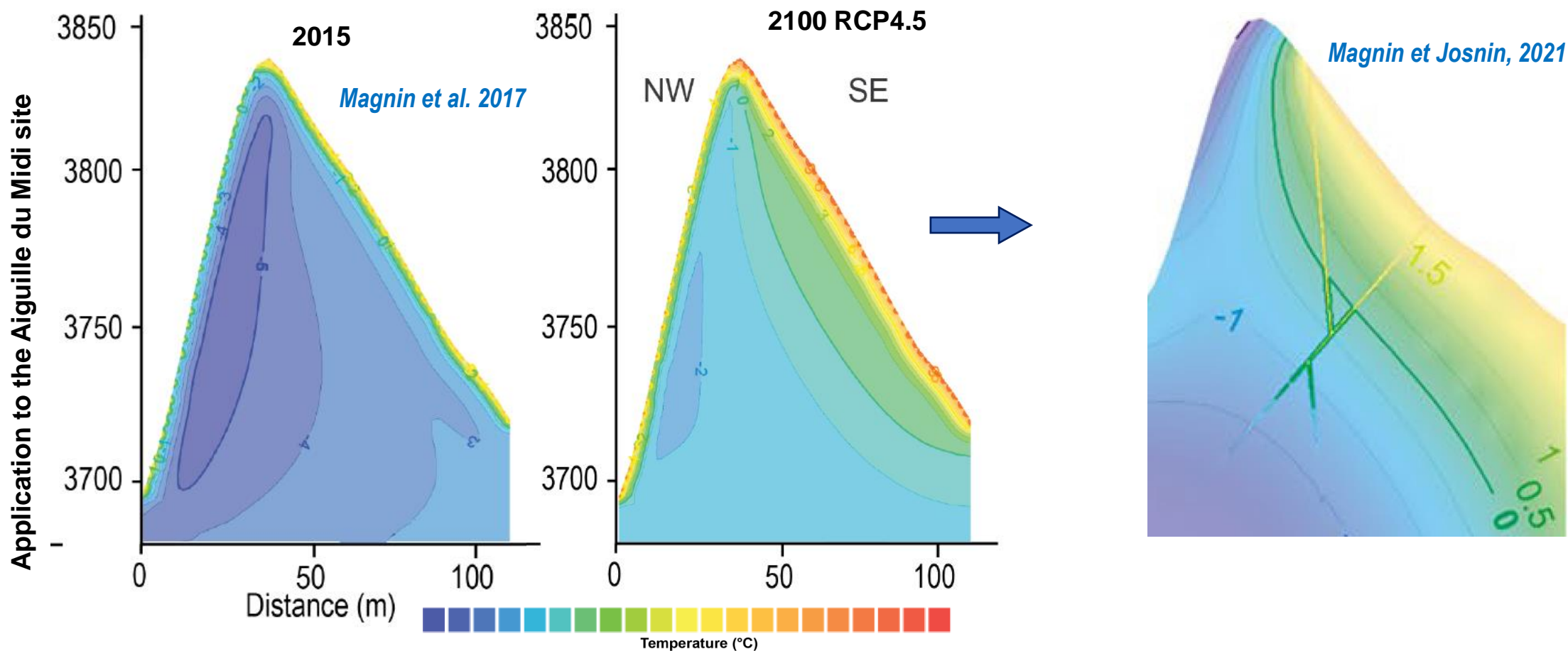
- Exemple d'un effet de différentes teneur en glace sur un modèle de permafrost
- Les développements reposent sur les méthodes géophysiques



5) Développements récents et en cours

Appréhender les effets thermiques et mécaniques des infiltrations d'eau

- Développements en modélisation numérique couplant les transferts de chaleur et d'eau
- Exemple de simulations montrant la dégradation du permafrost le long de fractures remplies d'eau

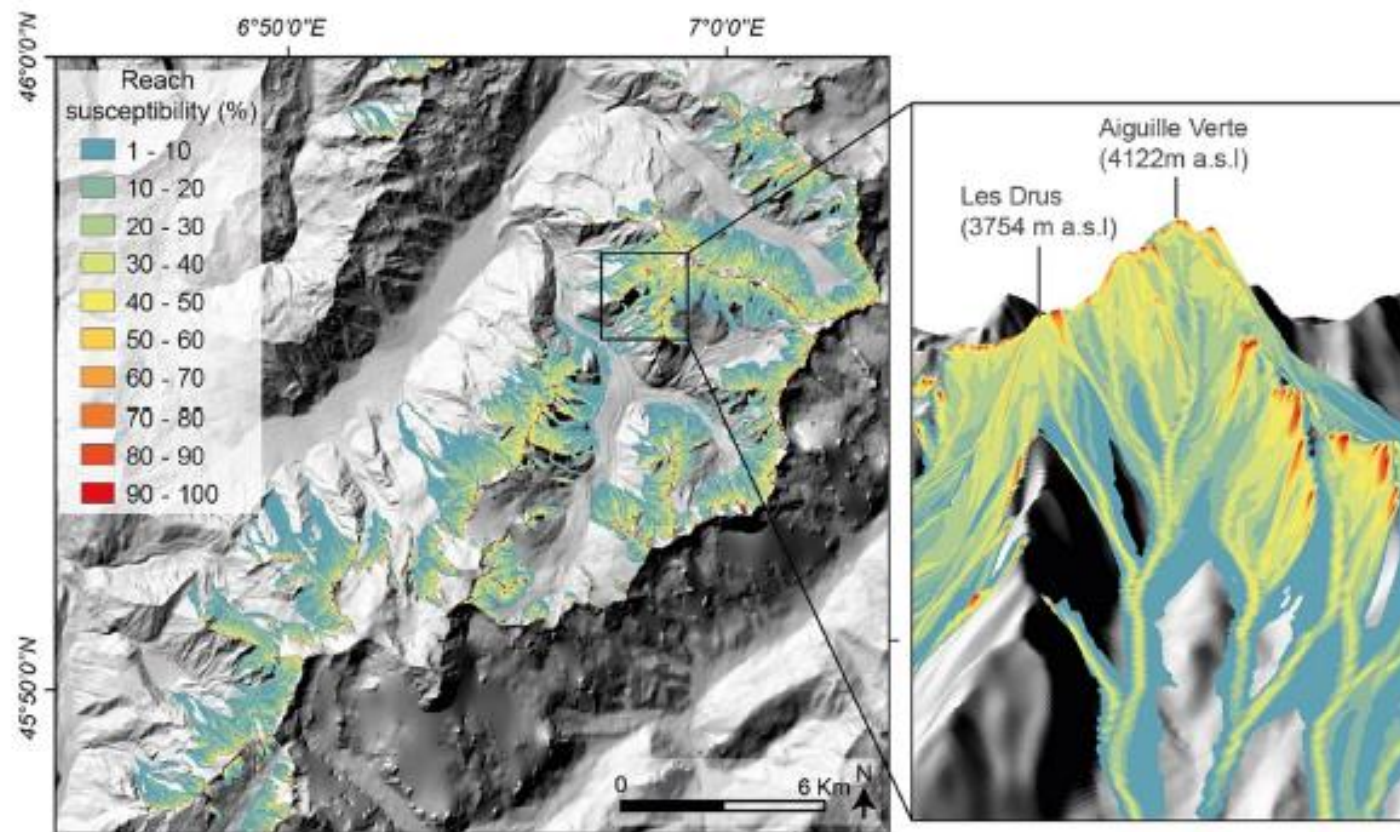
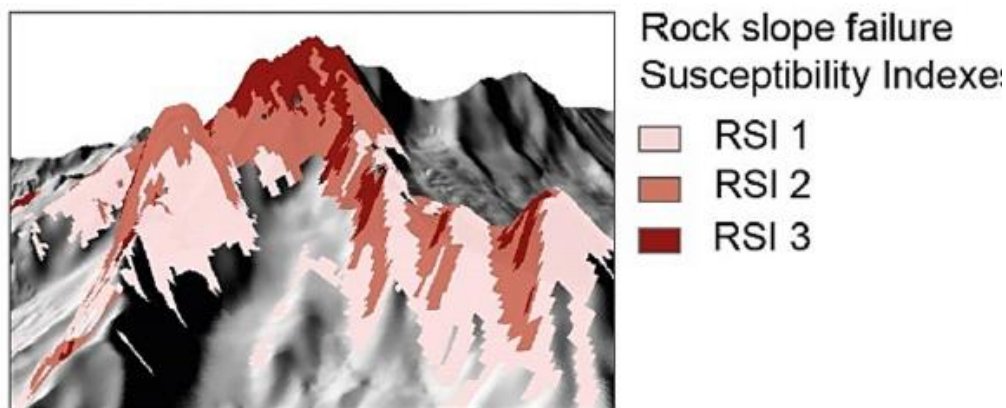
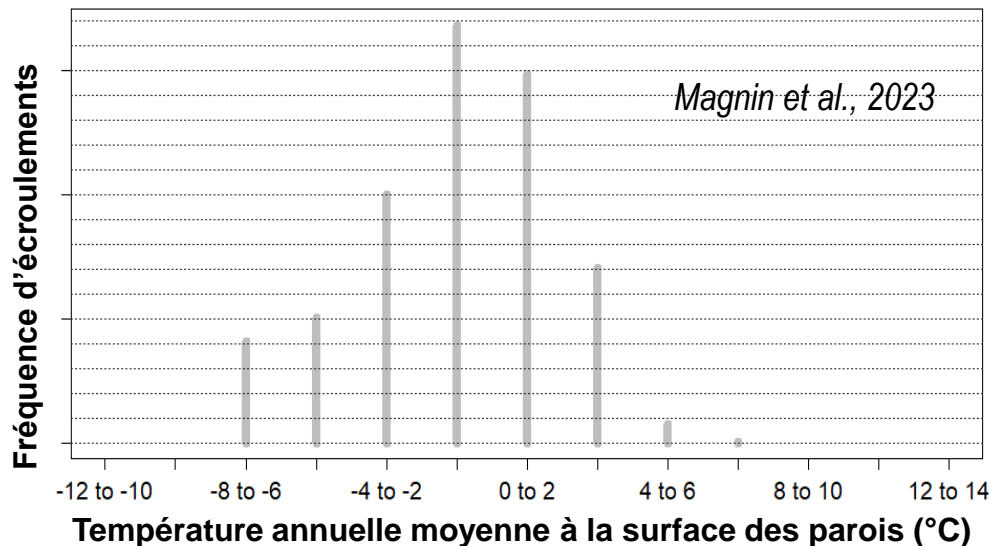


5) Développements récents et en cours

Anticiper les zones pouvant être déstabilisées et les zones de propagation potentielles

→ Identifier les hot spots et croiser avec les enjeux (infrastructures, lacs, etc.)

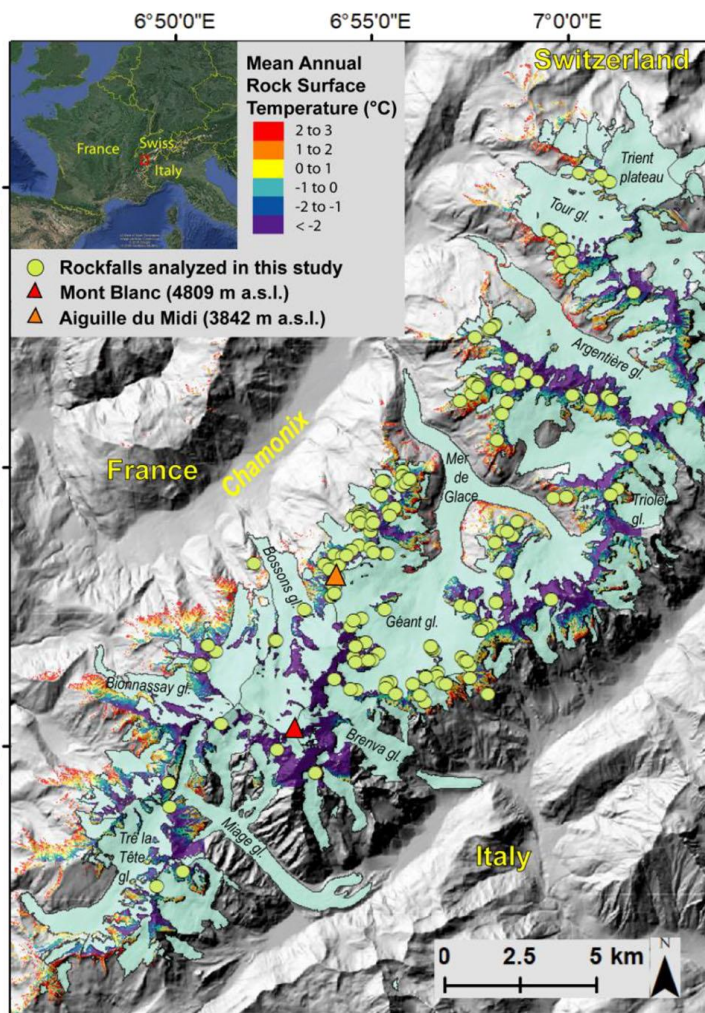
Cathala et al., 2024



5) Développements récents et en cours

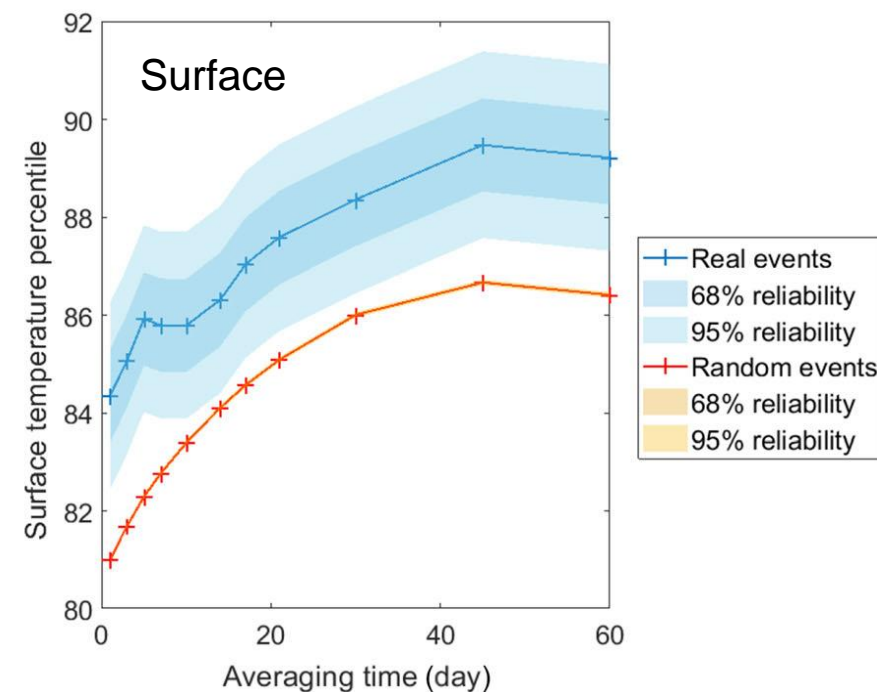
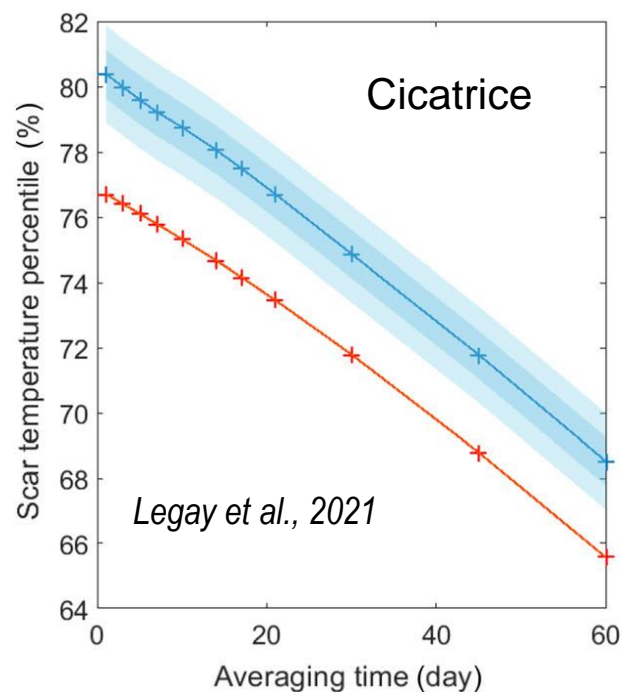
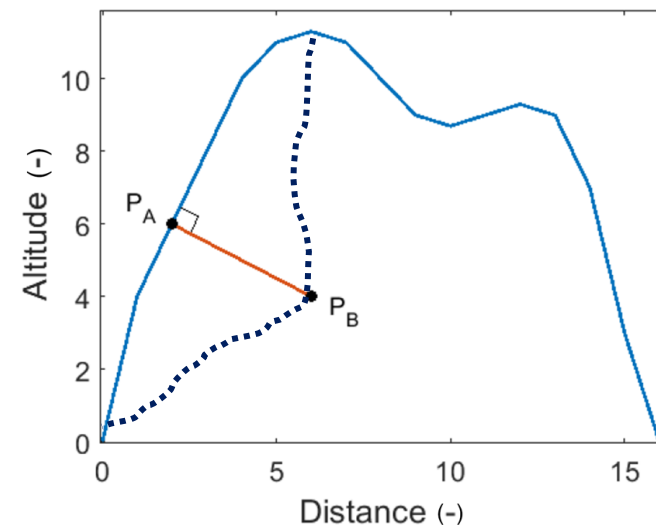
Anticiper les périodes les plus dangereuses

→ Analyse statistique des conditions avant les évènements



→ Modélisation de la température à la surface et à la profondeur de cicatrice de 209 écroulements entre 1 jour et 2 mois avant l'évènement

→ Comparaison à un échantillon de température modélisé aléatoire pour juger de la robustesse statistique



5) Synthèse

- En montagne, **la distribution du permafrost est très discontinue** et relativement mal comprise à échelle spatiale fine
- Le permafrost alpin est le **type de permafrost se dégradant le plus rapidement à l'échelle planétaire**
- Mais la **réponse aux signaux climatiques est très variable** en fonction du type de terrain
- Il est certain que la dégradation du permafrost cause une **augmentation de la fréquence des aléas gravitaires**, qui peuvent, dans certains cas, avoir des conséquences catastrophiques jusque dans les fonds de vallée
- Ces aléas impactent les pratiquants et professionnels de la montagne, les infrastructures en montagne et les fonds de vallée via les aléas en cascade
- Les décideurs ont besoin de mieux appréhender les **secteurs pouvant être soumis à l'émergence de ces risques, notamment ceux en cascade**
- Les pratiquants et professionnels de la montagne ont besoin d'appréhender **les périodes et les secteurs les plus dangereux**
- Les géotechniciens ont besoin de **comprendre les teneurs et la distribution de la glace**
- Les **effets thermiques de la neige, des infiltrations d'eau et la définition des teneurs en glace sont des verrous** majeurs à la mise en place de solutions opérationnelles



Merci pour votre attention !
Questions ?

Florence Magnin
florence.magnin@univ-smb.fr

