



HAL
open science

**Master Sciences de la terre et des planètes,
Environnement (M1+M2) Module Cryosphère Le
permafrost de montagneENS-PSL**

Florence Magnin

► **To cite this version:**

Florence Magnin. Master Sciences de la terre et des planètes, Environnement (M1+M2) Module Cryosphère Le permafrost de montagneENS-PSL. Master. France. 2020. hal-03413345

HAL Id: hal-03413345

<https://hal.science/hal-03413345v1>

Submitted on 28 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Le permafrost de montagne

23 novembre 2020

Florence Magnin

Laboratoire EDYTEM (CNRS, Université Savoie Mont Blanc)

florence.magnin@univ-smb.fr



Structure et objectifs du cours

1. Contexte historique et définitions
2. Formation, évolution et dynamiques du permafrost
3. Distribution et évolution du permafrost, de l'échelle globale à l'échelle locale
4. Spécificités du permafrost de montagne
5. Enjeux sociétaux du permafrost de montagne
6. Méthodes d'investigations

- ➔ Acquérir une connaissance fondamentale sur le permafrost et ses spécificités en montagne
- ➔ Comprendre les approches et questions de la géomorphologie périglaciaire



1. Contexte historique et définitions

1. Contexte historique et éléments de définition
2. Permafrost et géomorphologie
3. Dégradation du permafrost

2. Formation du permafrost

1. Bilan d'énergie
2. Formation de la glace du permafrost

1. Contexte historique et définitions

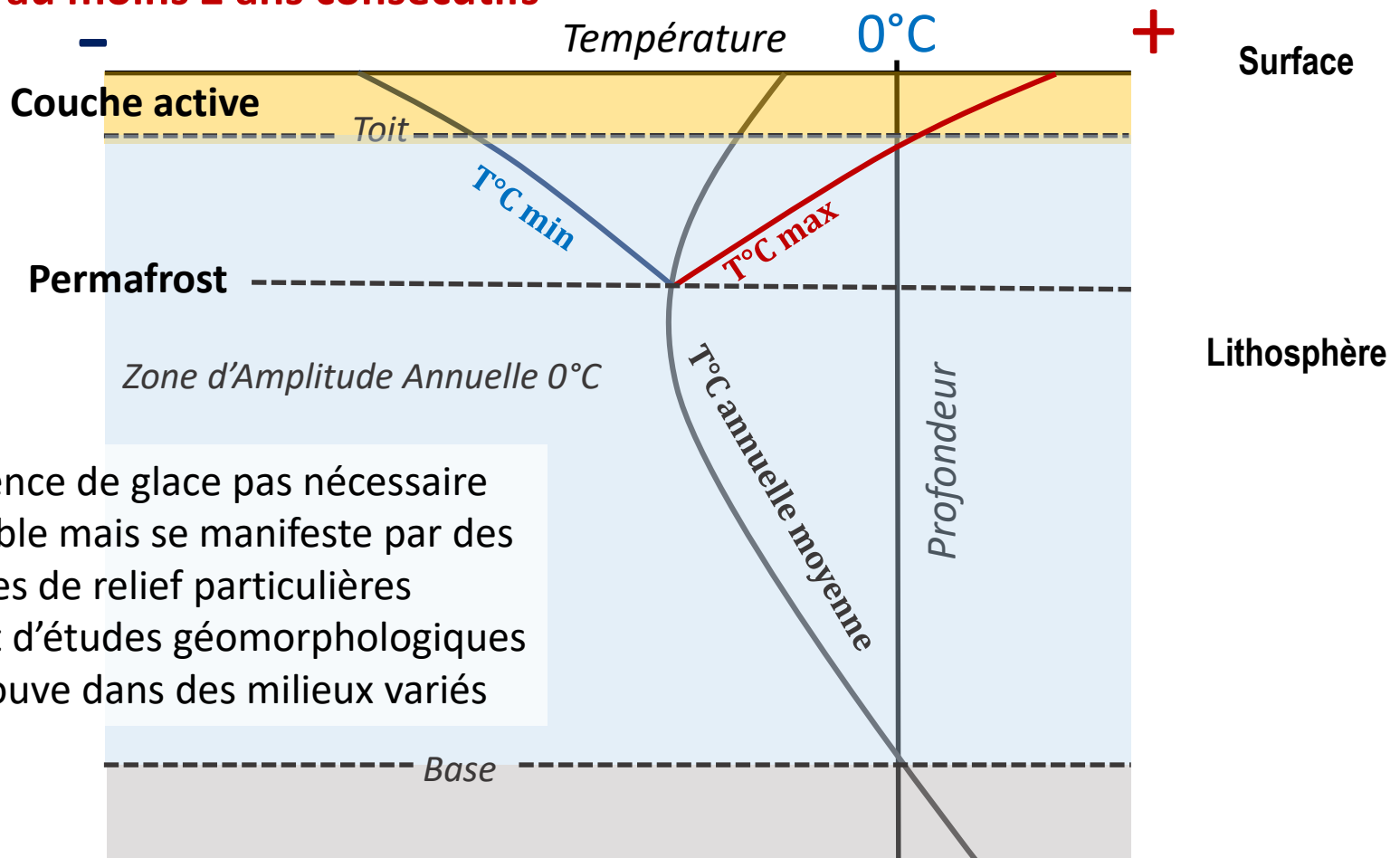
1. Contexte historique et éléments de définition

- **Permafrost** : Contraction de « **Permanently** » et « **Frozen** » → **Pergélisol** en français
Le terme a été publié pour la 1^{ère} fois en 1943 par Siemon Muller (géologue, géotechnicien américain)
- **Périglacière** : milieu dans lequel l'influence du gel et du dégel est prédominante (Tricart, 1968)
- **Géomorphologie** : étude des formes et de l'évolution du relief (extra-)terrestre et des processus qui le façonnent
- **Géomorphologie périglacière** : concerne l'étude des processus de gel, de la glace souterraine associée et des formes de relief qui en résultent. Le permafrost occupe une position centrale mais non essentielle à sa définition (French, 2013).
- 1^{ères} descriptions scientifiques dès le 19^{ème} s. mais l'essor académique au 20^{ème} s. notamment avec les projets industriels d'après-guerre
- 1^{ère} conférence internationale sur le permafrost tenue en 1963 (USA)
- Premières publications scientifiques sur le permafrost des Alpes européennes fin 1960s – début 1970s
- Encore très peu enseigné en France et largement méconnu des citoyens français

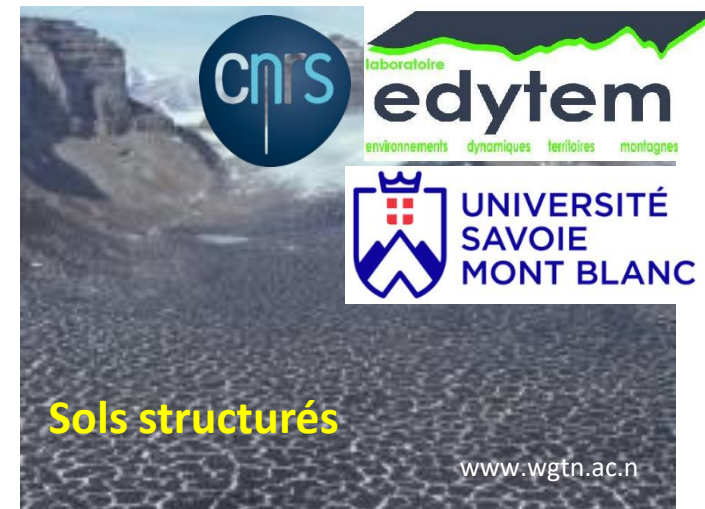
1. Contexte historique et définition

2. Permafrost et géomorphologie

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

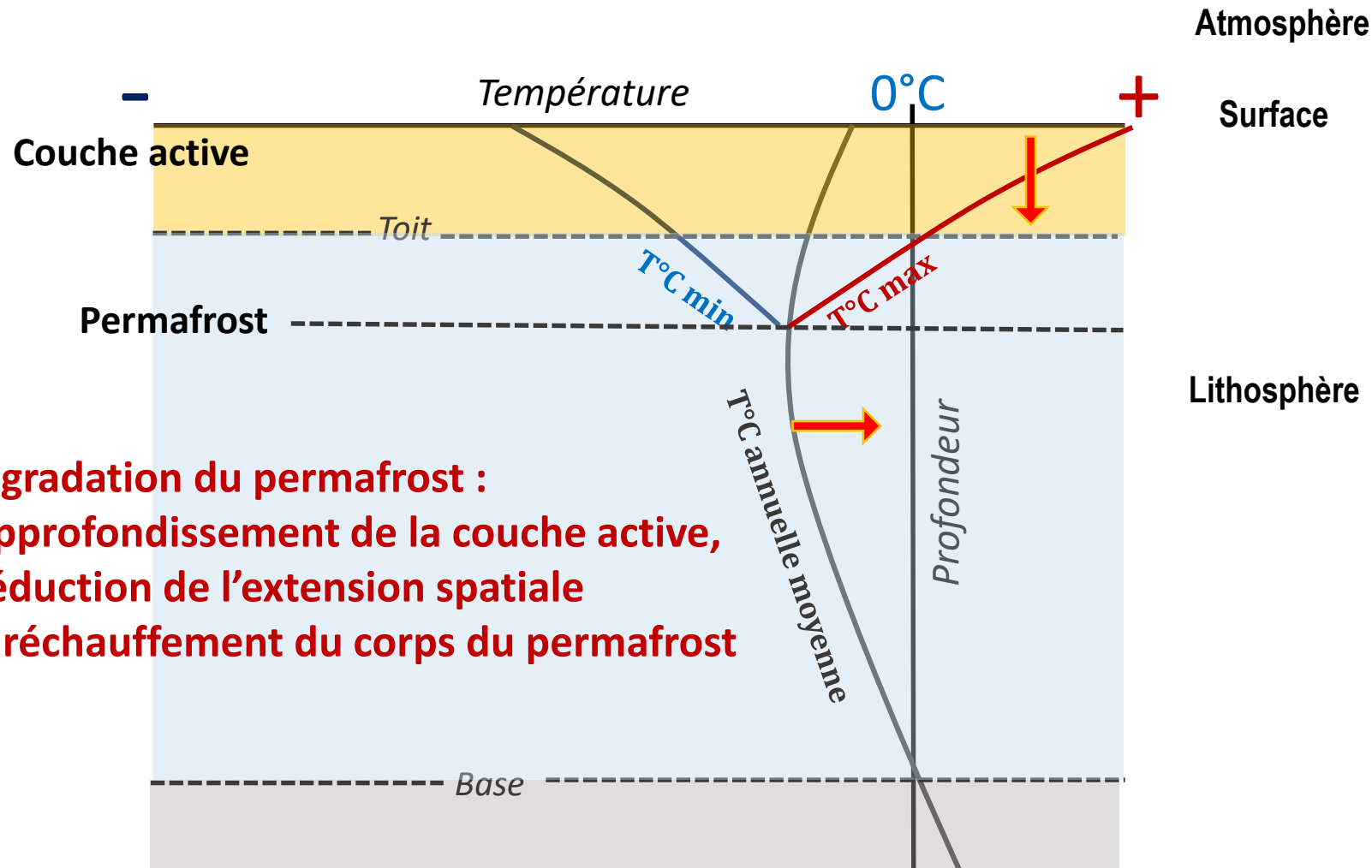


- Présence de glace pas nécessaire
- Invisible mais se manifeste par des formes de relief particulières
- Objet d'études géomorphologiques
- Se trouve dans des milieux variés

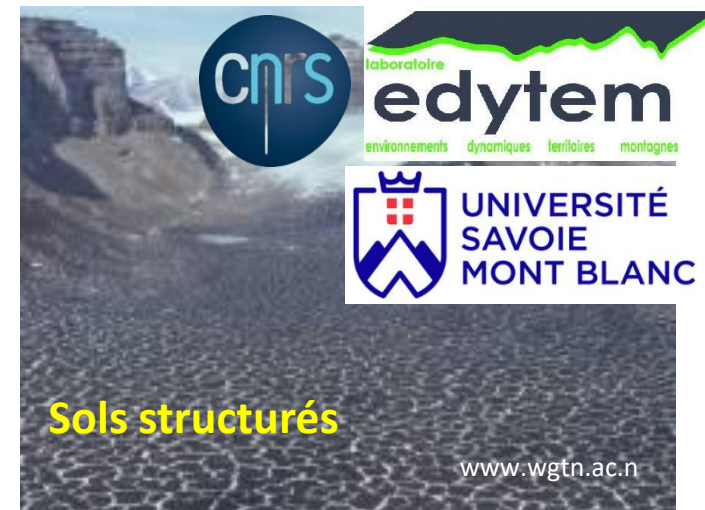


1. Contexte historique et définition

3. Dégradation du permafrost



→ **Dégradation du permafrost :**
approfondissement de la couche active,
réduction de l'extension spatiale
≠ réchauffement du corps du permafrost

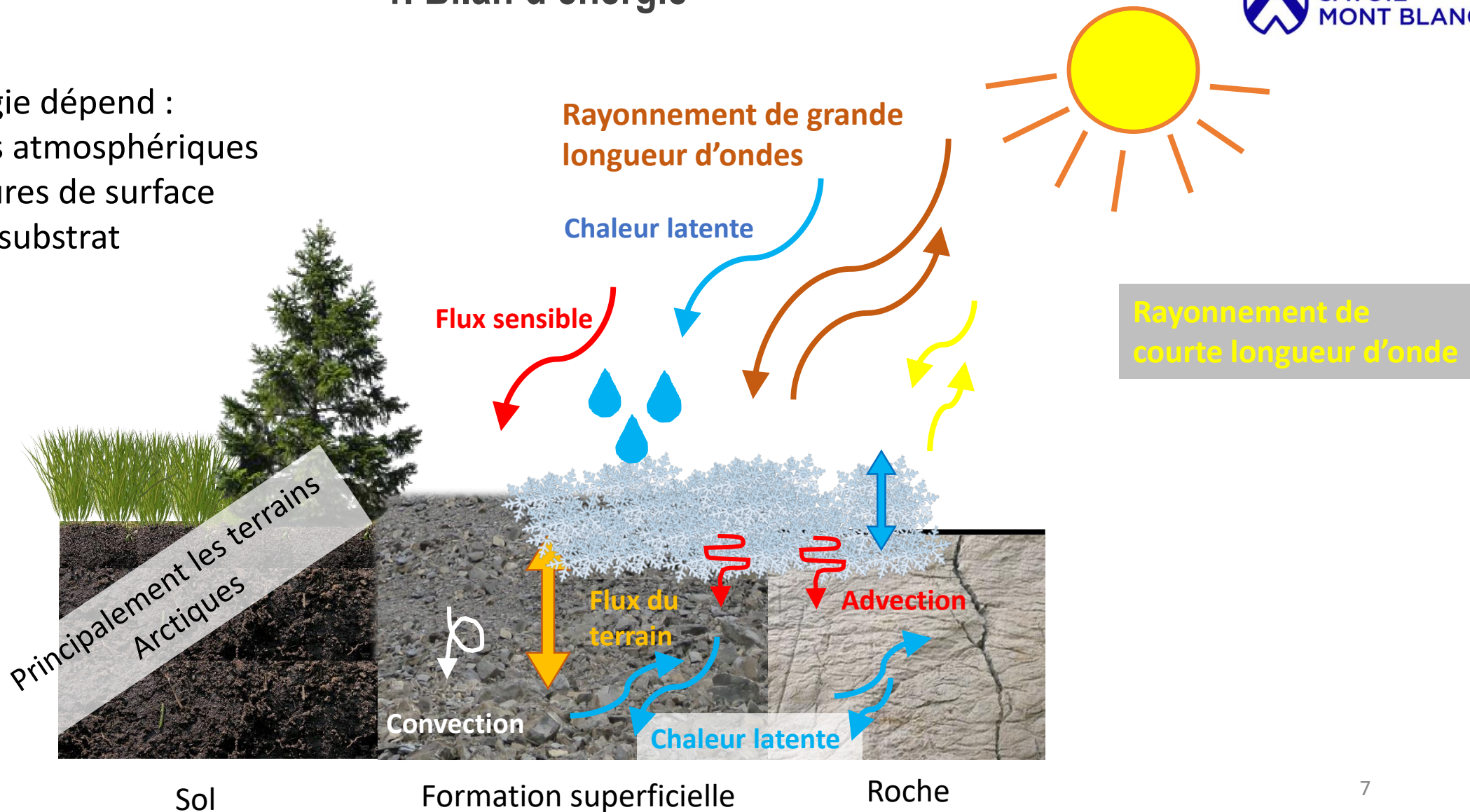


2. Formation du permafrost

1. Bilan d'énergie

Le bilan d'énergie dépend :

- des variables atmosphériques
- des couvertures de surface
- des type de substrat



2. Formation du permafrost

2. Formation de la glace du permafrost

La présence de glace n'est pas nécessaire pour définir un terrain comme permafrost (définition basée sur la température) mais c'est sur elle que repose les enjeux sociétaux (cf. partie 5 de ce cours)

Deux origines principales de la glace :

- **Sédimentation (1) :**
recouvrement d'un névé ou glacier.
- **Congélation :**
regel des eaux infiltrées avec deux processus possibles :

→ **Ségrégation (2)** (migration et regel de l'eau le long du front de gel, forme des lentilles de glace)

→ **Glace interstitielle (3)** (granulométrie grossière, ciment de glace)



3. Distribution et évolution du permafrost

3.1. Distribution du permafrost dans l'hémisphère nord

3.2. Evolution du permafrost dans l'hémisphère nord

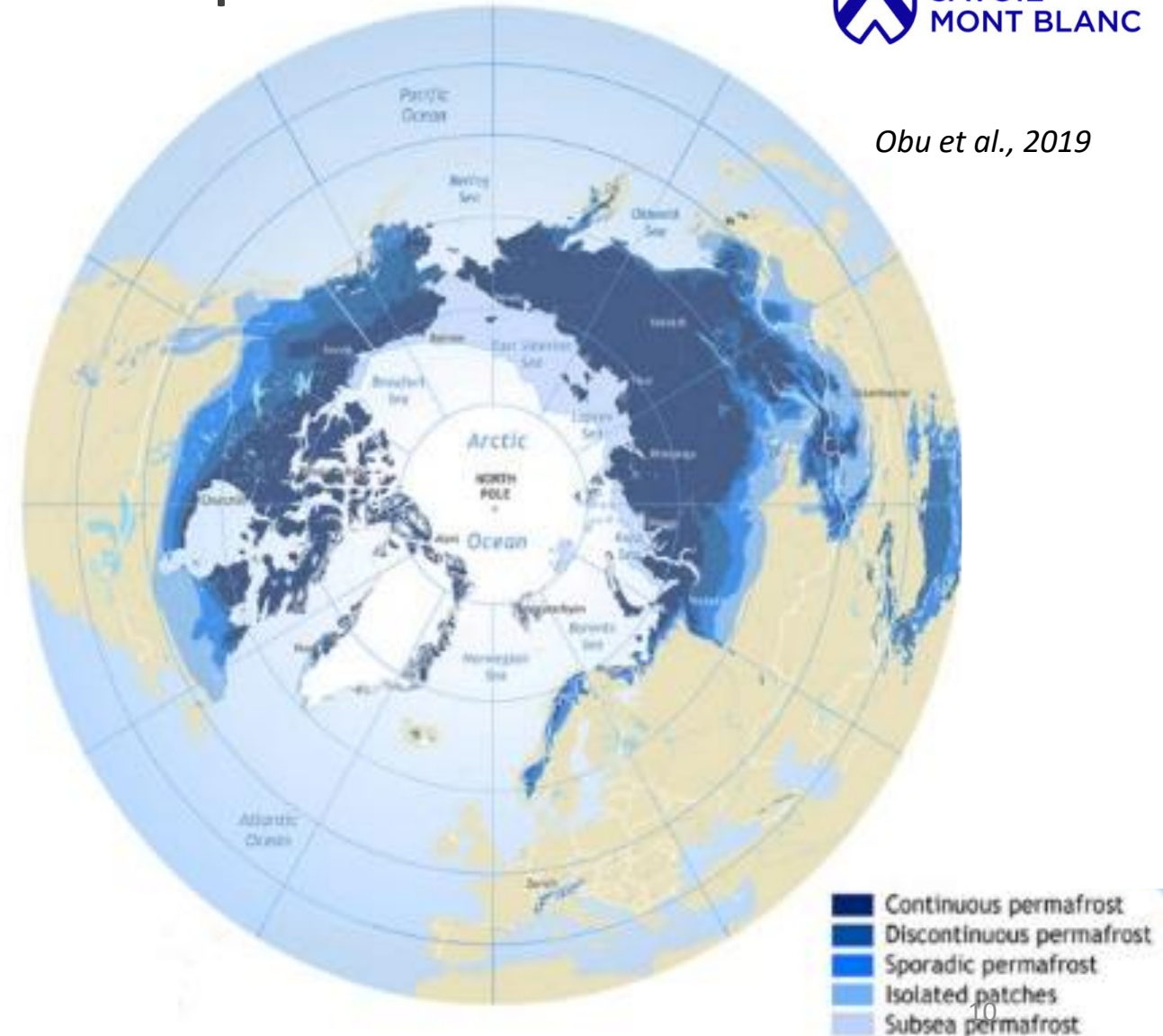
3.3. Distribution et évolution du permafrost dans l'hémisphère sud

3.4. Distribution du permafrost dans les Alpes Européennes

3. Distribution et évolution du permafrost

1. Distribution dans l'hémisphère nord

- 1^{ère} carte en 1997 puis rééditée 2019
- **Permafrost continu** : > 90 % de couverture
→ Température moyenne de l'air < -6 à -8°C
- **Permafrost discontinu** : 50 à 90 %
→ Température moyenne de l'air < -1°C
- **Permafrost sporadique** : 10 à 50 %
- **Permafrost isolé** : 0-10 %
- De 15 à 22% de la surface émergée de l'hémisphère nord (14 à 21×10⁶ km²) d'après la toute dernière estimation.
- Effet marqué de la continentalité
→ concurrence avec les glaciers actuels et passés

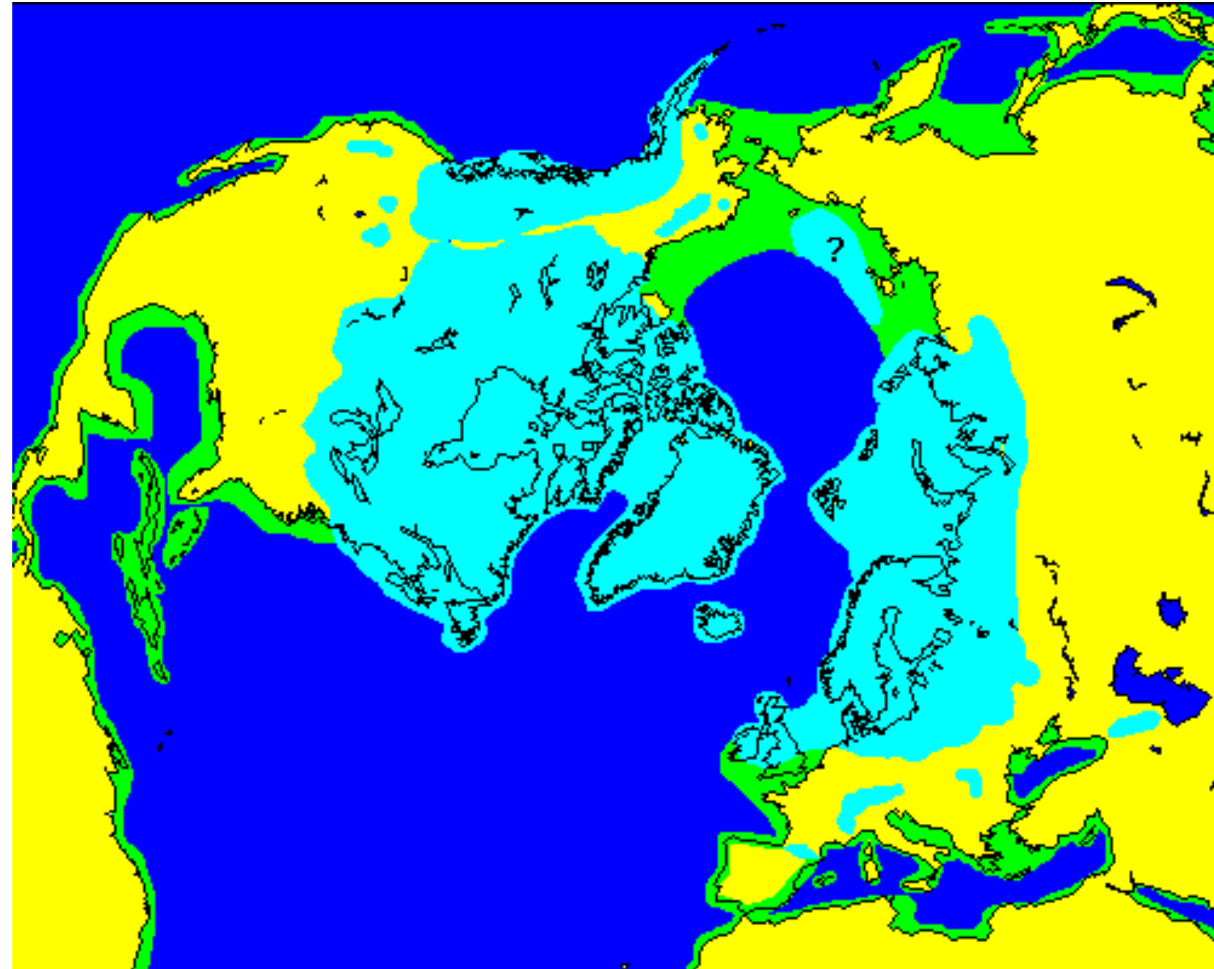


3. Distribution et évolution du permafrost

1. Distribution dans l'hémisphère nord

<http://www.glyfac.buffalo.edu>

- Etendue des glaciers au dernier maximum glaciaire ($\approx 20\ 000$ ans BP)
- Niveau de la mer environ 100 m plus bas
- Le permafrost le plus profond actuellement correspond aux terrains non englacés lors du dernier maximum glaciaire
- Epaisseur maximale du permafrost de 1,5 km relevée en Sibérie orientale, du fait de l'absence de glaciers au cours de la dernière glaciation



3. Distribution et évolution du permafrost

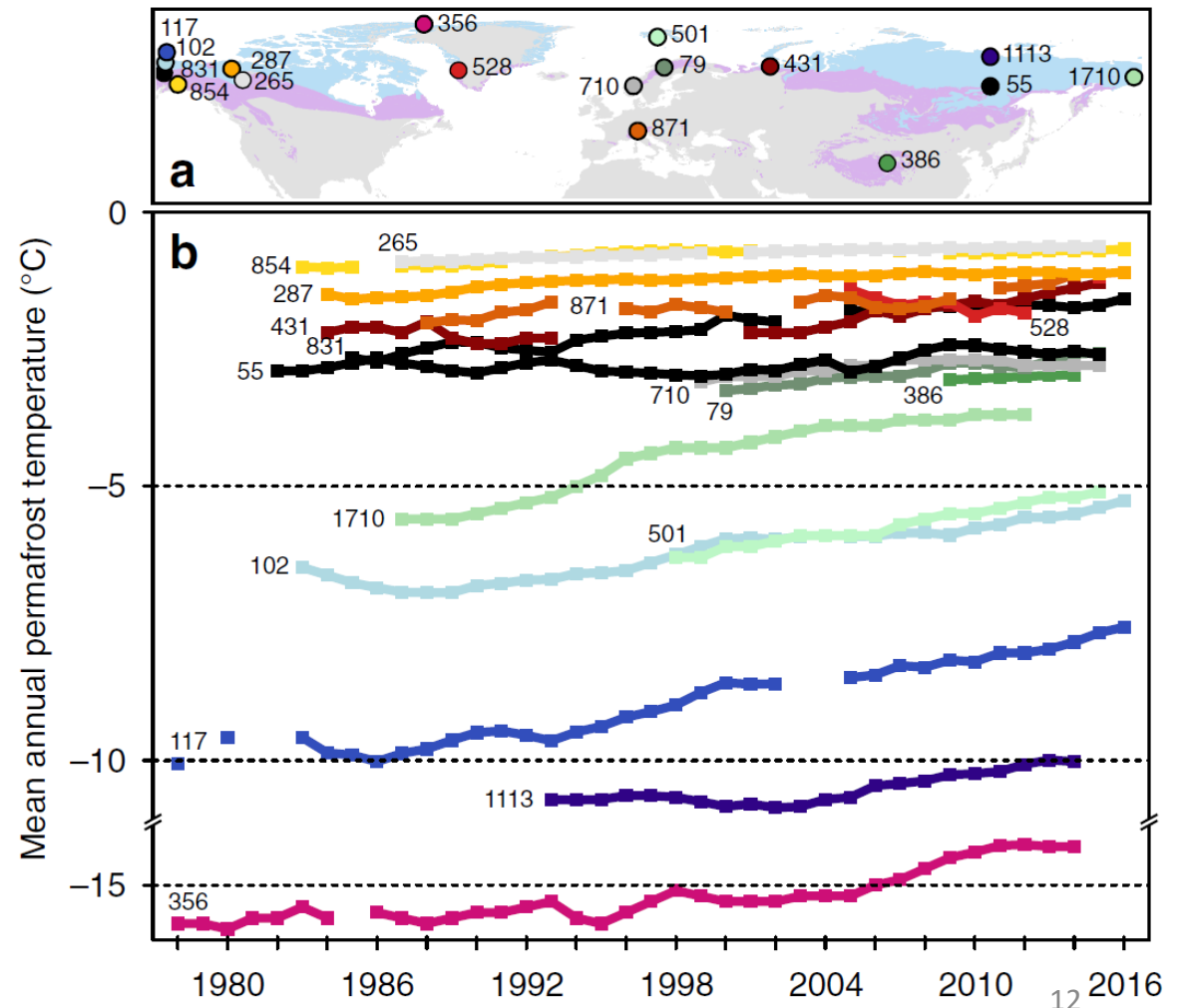
2. Evolution dans l'hémisphère nord

Entre 2007 et 2016 :

- Le permafrost continu a connu $+0.39^{\circ}\text{C} \pm 0.15^{\circ}\text{C}$
- Le permafrost discontinu a connu $+0.20^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$
- En montagne (à l'échelle globale) : $+0.19^{\circ}\text{C} \pm 0.05^{\circ}\text{C}$

➔ La chaleur latente retarde le réchauffement et le permafrost de type chaud (entre -2°C et 0°C) qui caractérise souvent le permafrost discontinu et celui de montagne se réchauffe donc moins vite!

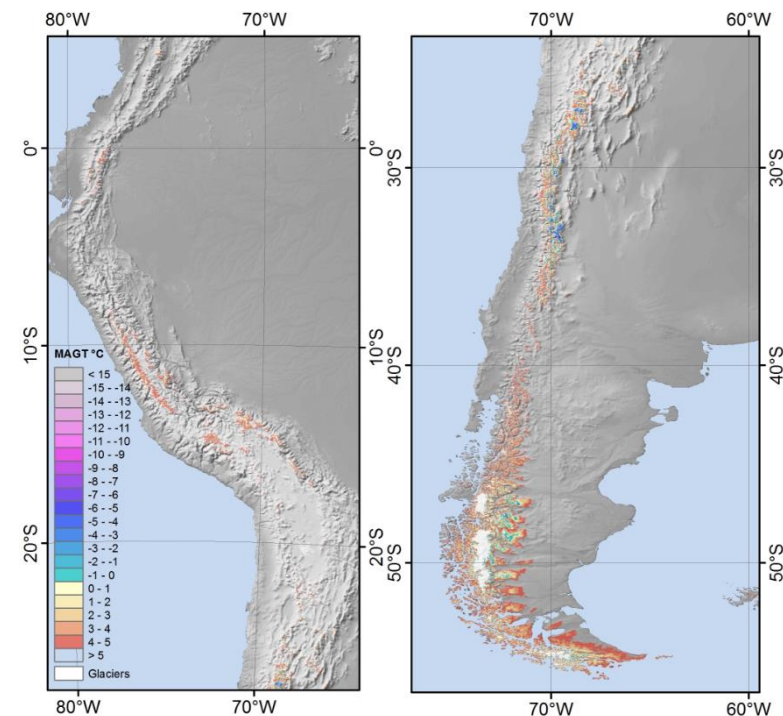
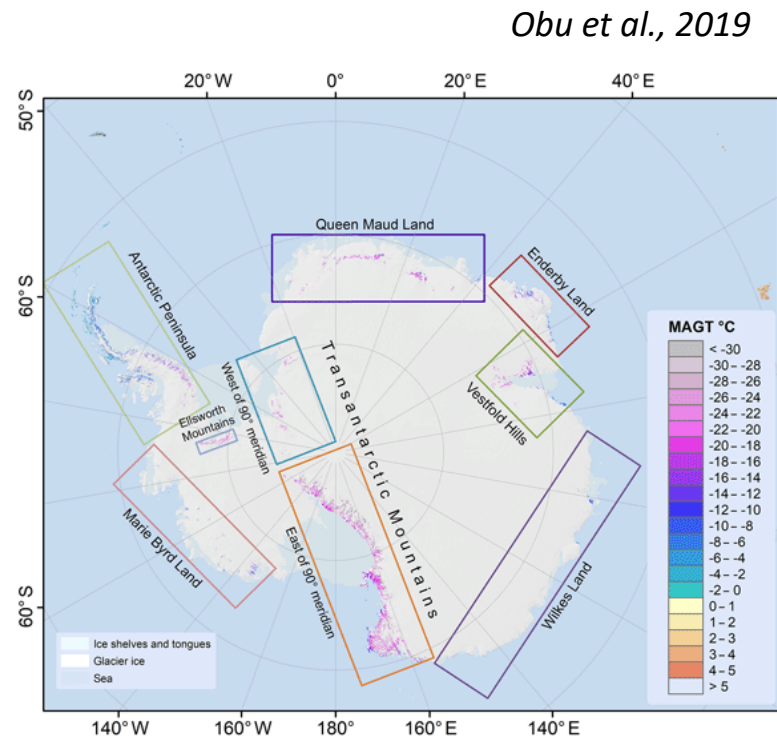
Biskaborn et al., 2019



3. Distribution et évolution du permafrost

3. Distribution et évolution dans l'hémisphère sud

- Bien moins connu et suivi que celui de l'hémisphère nord : manque de forages, notamment dans les Andes
- Dans les Andes : enjeux majeurs pour la ressource en eau



MAGT (°C) = Mean Annual Ground Temperature

Entre 2007 et 2016 :

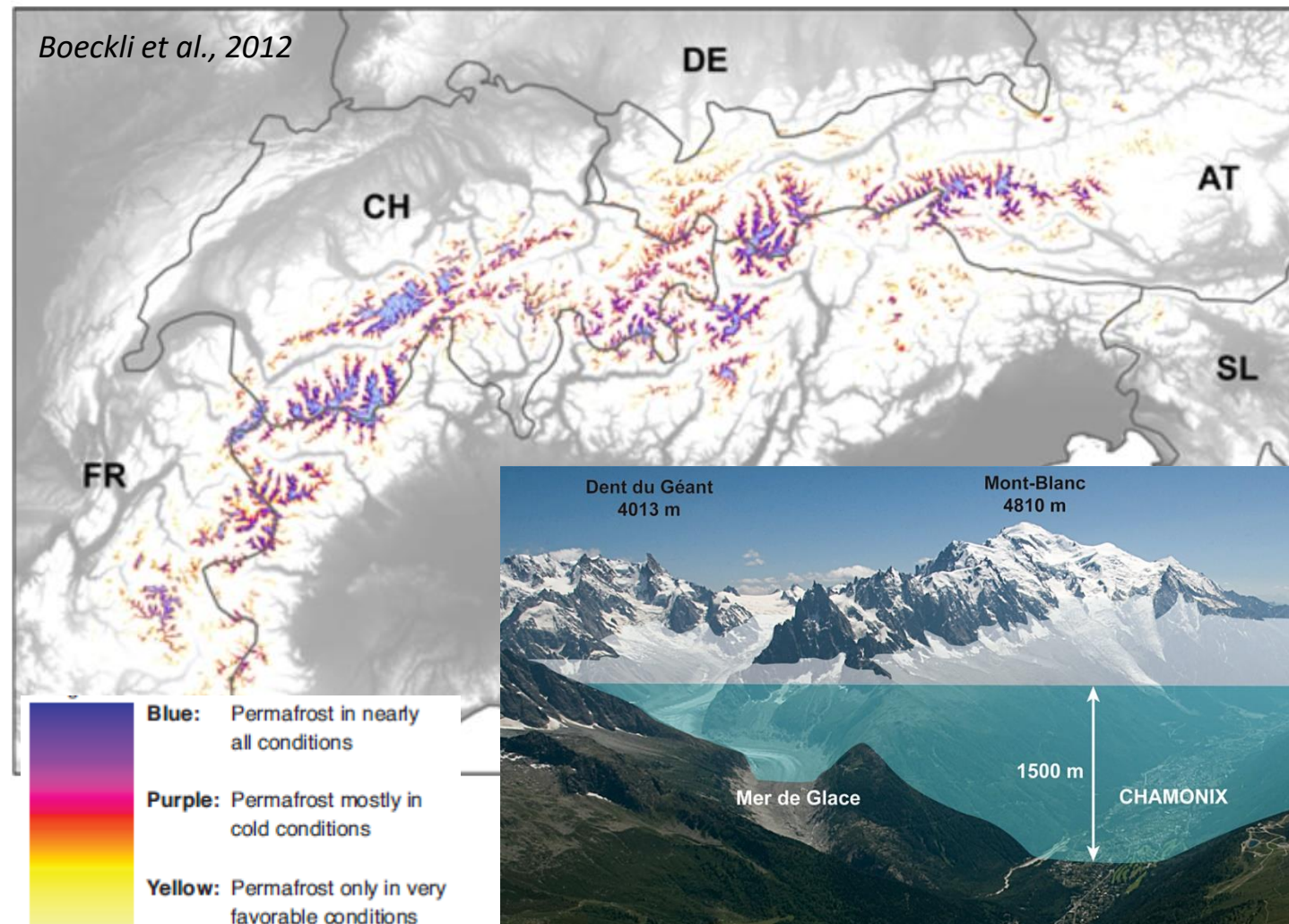
- Le permafrost d'Antarctique s'est réchauffé de $0.37^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$

(Biskaborn et al., 2019)

3. Distribution et évolution du permafrost

4. Distribution dans les Alpes Européennes

- 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. Il s'agit des nunataks, les sommets pointant au-dessus des glaciers



www.glaciers-climat.com



Biskaborn, B.K, et al., 2019. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications* 10, 264.

<https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>

Boeckli, L., Brenning, A., Gruber, S., Noetzli, J., 2012. A statistical approach to modelling permafrost distribution in the European Alps or similar mountain ranges. *The Cryosphere* 6, 125–140. <https://doi.org/10.5194/tc-6-125-2012>

French, H.M., 2013. Introduction, in: *The Periglacial Environment*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 1–15.

<https://doi.org/10.1002/9781118684931.ch1>

Murton, J.B., Ballantyne, C.K., 2017. Chapter 5 Periglacial and permafrost ground models for Great Britain. Geological Society, London, *Engineering Geology Special Publications* 28, 501–597. <https://doi.org/10.1144/EGSP28.5>

Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A., Delaloye, R., Elberling, B., Etzelmüller, B., Kholodov, A., Khomutov, A., Kääh, A., Leibman, M.O., Lewkowicz, A.G., Panda, S.K., Romanovsky, V., Way, R.G., Westergaard-Nielsen, A., Wu, T., Yamkhin, J., Zou, D., 2019. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. *Earth-Science Reviews* 193, 299–316. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>

Tricart, J., 1968. Periglacial landscapes, in: *Geomorphology*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 829–833.

https://doi.org/10.1007/3-540-31060-6_279

4. Spécificités du permafrost en montagne

4.1. Caractéristiques générales

- 4.1.1. Facteurs de contrôle
- 4.1.2. Le rôle central de la topographie

4.2. Permafrost de parois et substrat rocheux

- 4.2.1. Généralités sur le régime thermique
- 4.2.2. Spécificités du régime thermique

4.3. Glaciers rocheux

- 4.3.1. Définition et origine
- 4.3.2. Morphologies
- 4.3.3. Un indicateur du climat

4.4. Permafrost azonal

- 4.4.1. Eboulis froids
- 4.4.2. Glacières / Grottes de glace

4.5. Autres formes

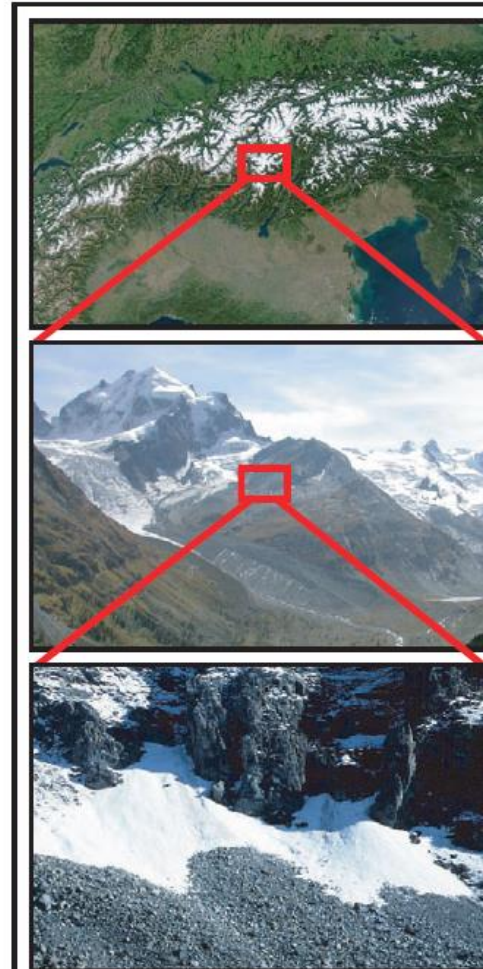
- 4.5.1. Moraines à cœur de glace
- 4.5.2. Sols structurés
- 4.5.3. Formes associées au gel-dégel

1. Caractéristiques générales

1. Facteurs de contrôle

La distribution du permafrost de montagne dépend de l'imbrication de 3 facteurs agissant à des échelles spatiales différentes

Gruber, 2005
Gruber et Haeberli, 2009



Le climat :

La température de l'air, les précipitations, le rayonnement solaire, la nébulosité....

La topographie :

Modifie le climat régional (redistribution des précipitations, du rayonnement solaire, du vent...) et les caractéristiques de la surface

Les caractéristiques de la surface du terrain :

L'enneigement, la végétation, les formations superficielles, etc., qui impactent localement le bilan d'énergie et les transferts de chaleur en profondeur.

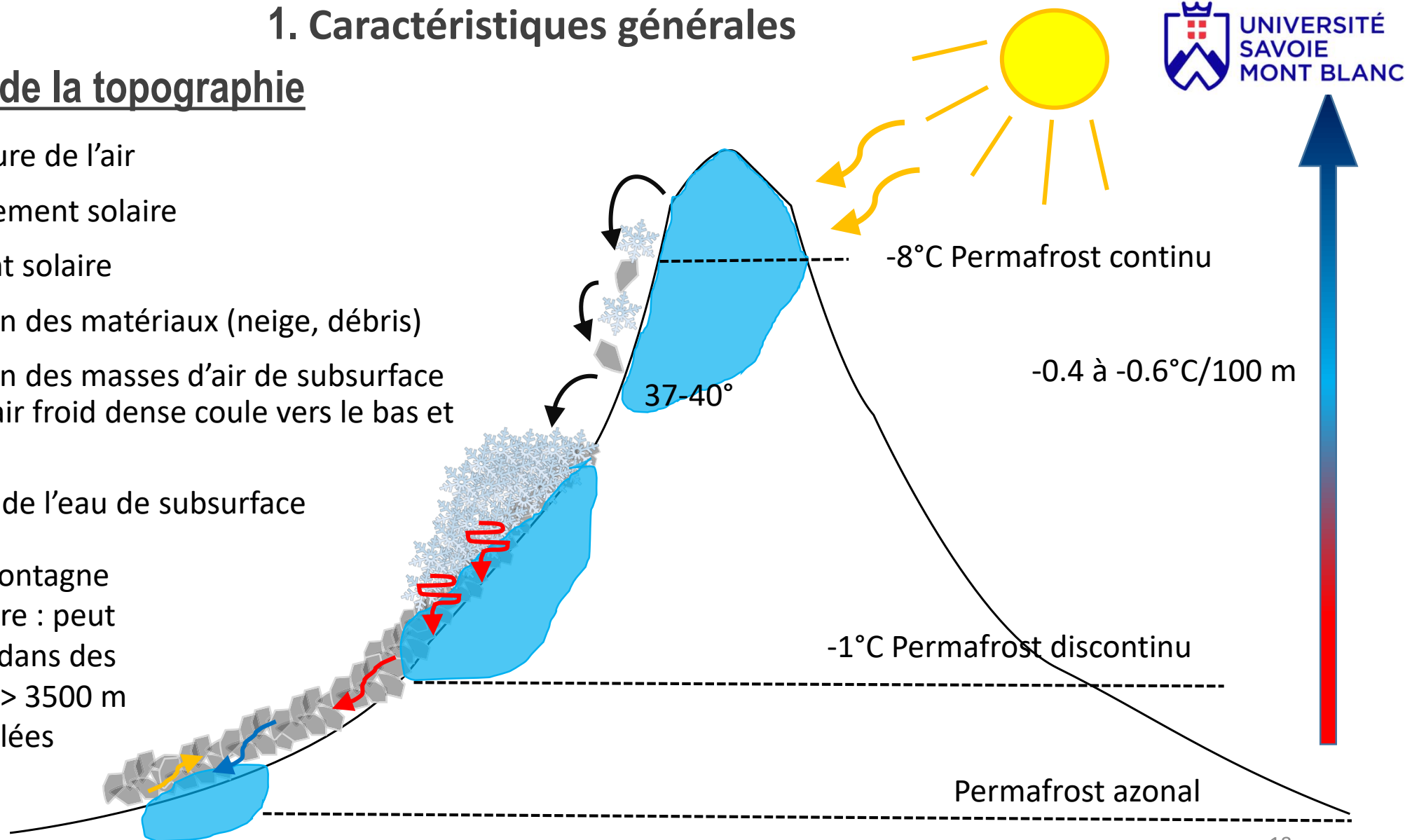
4. Spécificités du permafrost en montagne

1. Caractéristiques générales

2. Le rôle centrale de la topographie

- **Altitude** et température de l'air
- **Exposition** et rayonnement solaire
- **Pente** et rayonnement solaire
- **Pente** et redistribution des matériaux (neige, débris)
- **Pente** et redistribution des masses d'air de subsurface (effet cheminée → l'air froid dense coule vers le bas et l'air chaud remonte)
- **Pente** et écoulement de l'eau de subsurface

→ Le permafrost de montagne est discontinu par nature : peut être présent < 1500 m dans des éboulis froids et absent > 3500 m dans les parois ensoleillées

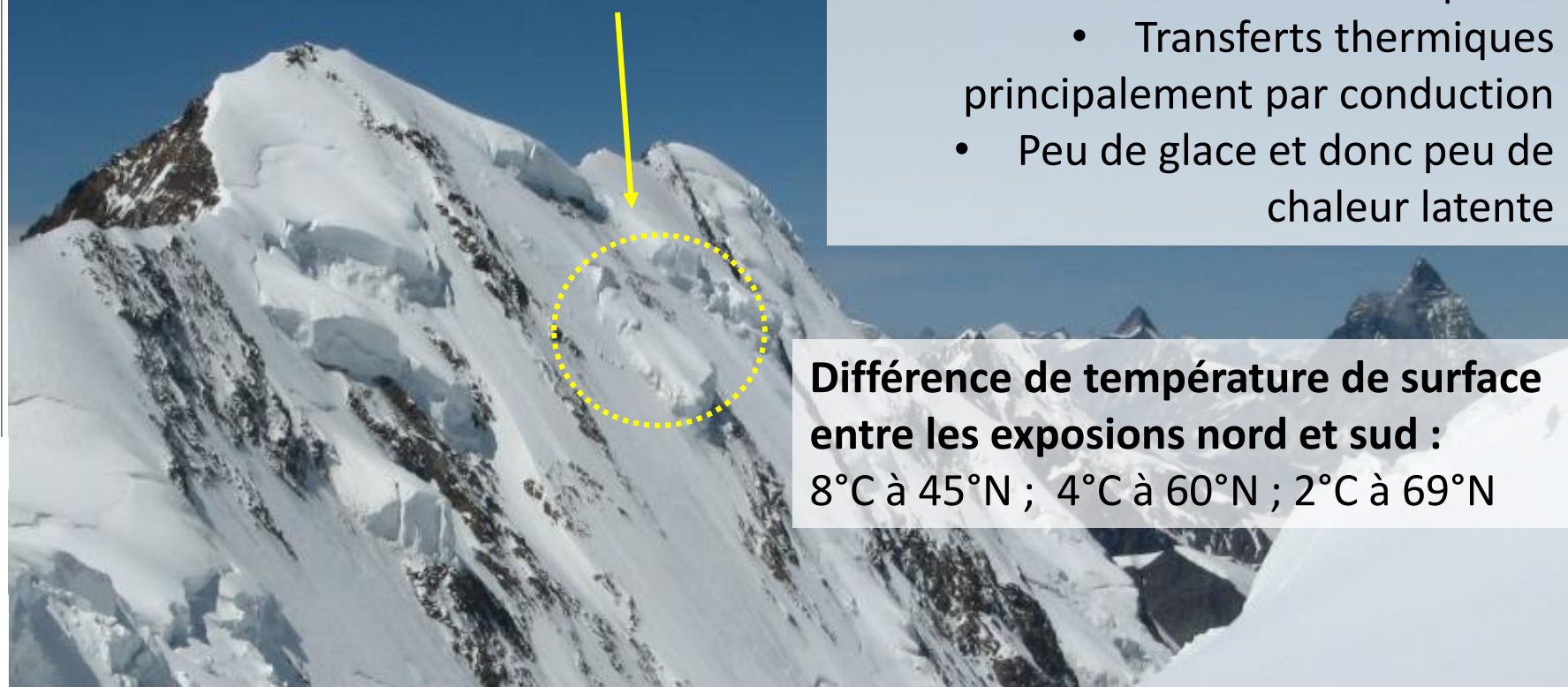
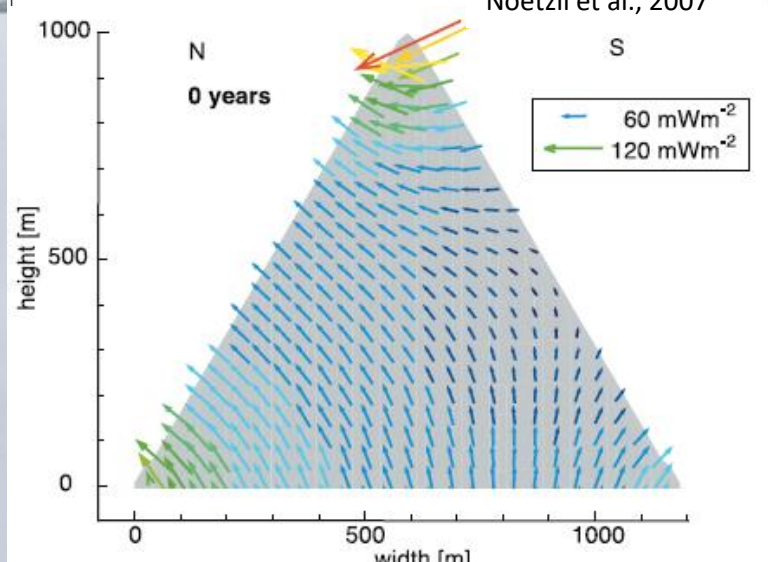
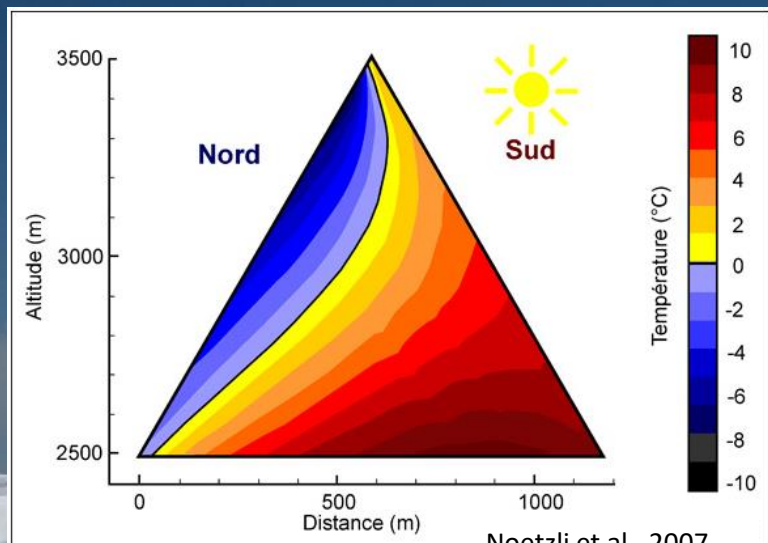


1. Généralités sur le régime thermique

Glacier suspendu :

Unique indicateur de surface

- Contact direct avec l'atmosphère
 - Transferts thermiques principalement par conduction
 - Peu de glace et donc peu de chaleur latente



Différence de température de surface entre les expositions nord et sud :
8°C à 45°N ; 4°C à 60°N ; 2°C à 69°N

Magnin et al., 2019

Limite inférieure du permafrost :

- 45°N (Alpes européennes) : 2500/3500 m en face nord/sud
- 60°N (sud de la Norvège) : 1400/1800 m en face nord/sud
- 69°N (nord de la Norvège) : 600/800 m en face nord/sud

2. Permafrost de paroi et substrat rocheux

1. Spécificités sur le régime thermique

Effets de la neige sur le bilan d'énergie

- Modifie considérablement le bilan d'énergie avec des effets très variables selon l'épaisseur d'accumulation et l'exposition au rayonnement solaire des parois
- Réchauffe les faces nord (prédominance de l'effet isolant quand l'accumulation est suffisante (> 50-60 cm))
- Refroidit les faces sud (effet prédominant de l'albédo, notamment au printemps)

*Hasler et al., 2011
Magnin et al., 2015*

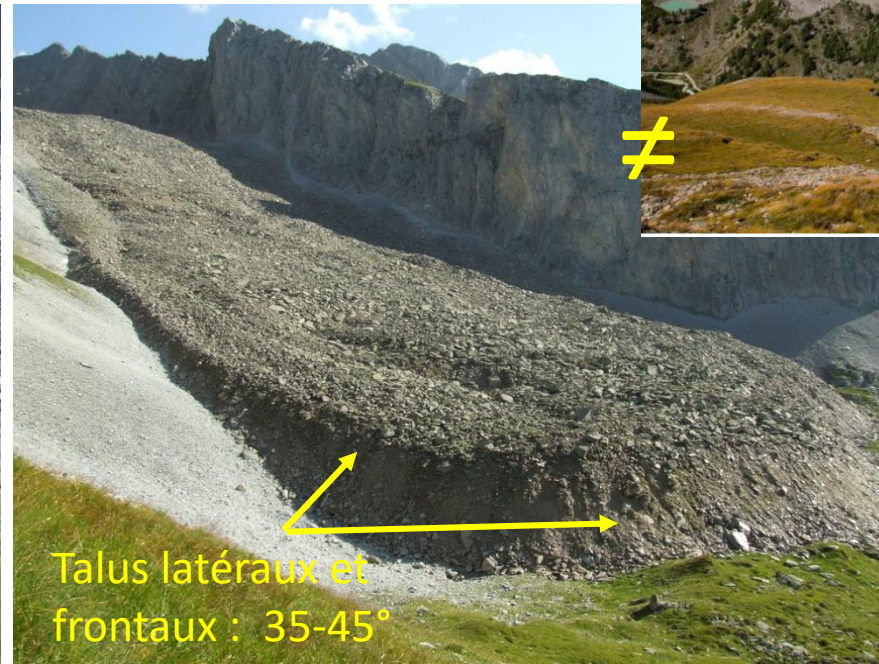
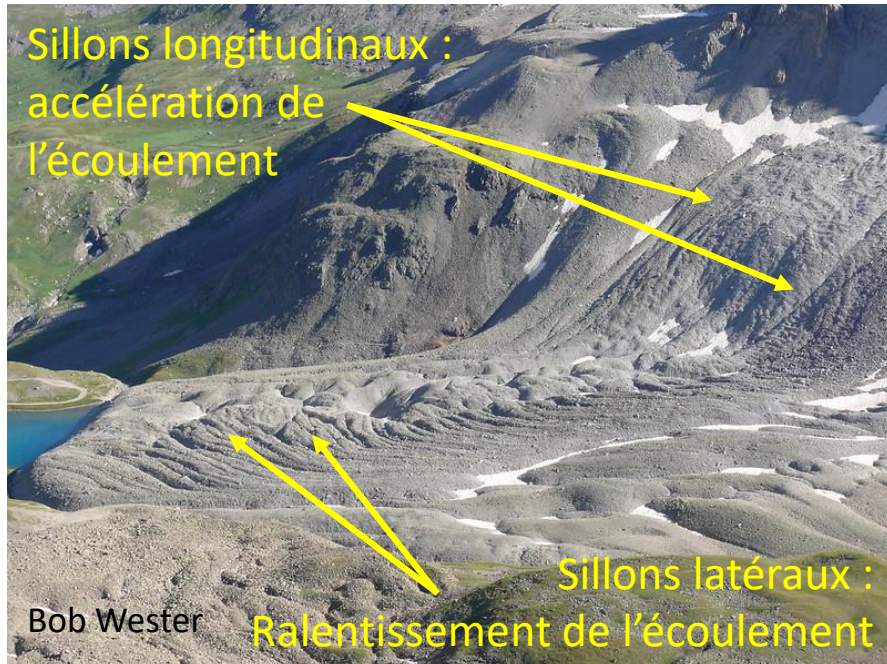
Processus thermiques dans les fractures

- Infiltration d'eau : advection de chaleur qui réchauffe
 - Circulation d'air : convection qui refroidit
- Joints de glace : chaleur latente localement marquée

3. Glaciers rocheux

1. Définition et origine

- Un mélange de débris rocheux et de glace qui s'écoule (généralement de qq cm/an) sous l'effet de la gravité et du comportement visco-plastique de la glace
- Forme emblématique du permafrost de montagne (≠ glaciers couverts)
- Origine glaciaire (enfouissement de la glace de glacier) ou périglaciaire (éboulis riches en glace)



Glacier couvert

Bodin, 2007

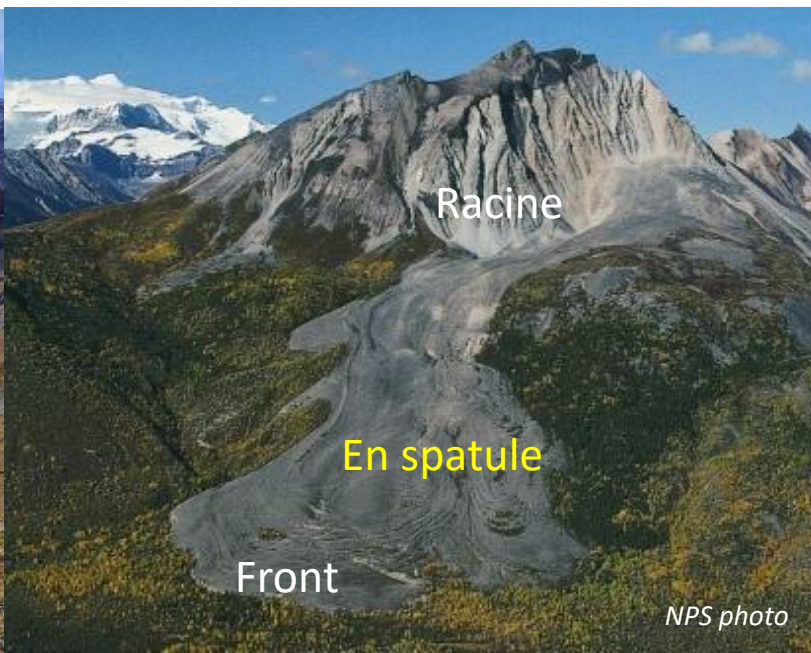
2. Morphologies et régime thermique

La morphologie des glaciers rocheux est définie par :

- La topographie
- La géologie (production de débris)
- Le climat (alimentation en glace, température)

- Permafrost tempéré
- Très sensible à l'enneigement (caractère précoce ou tardif en hiver, durée au cours de l'année)
- Importance de la teneur en glace souvent élevée

Barsch, 1996



3. Glaciers rocheux

3. Un indicateur du climat

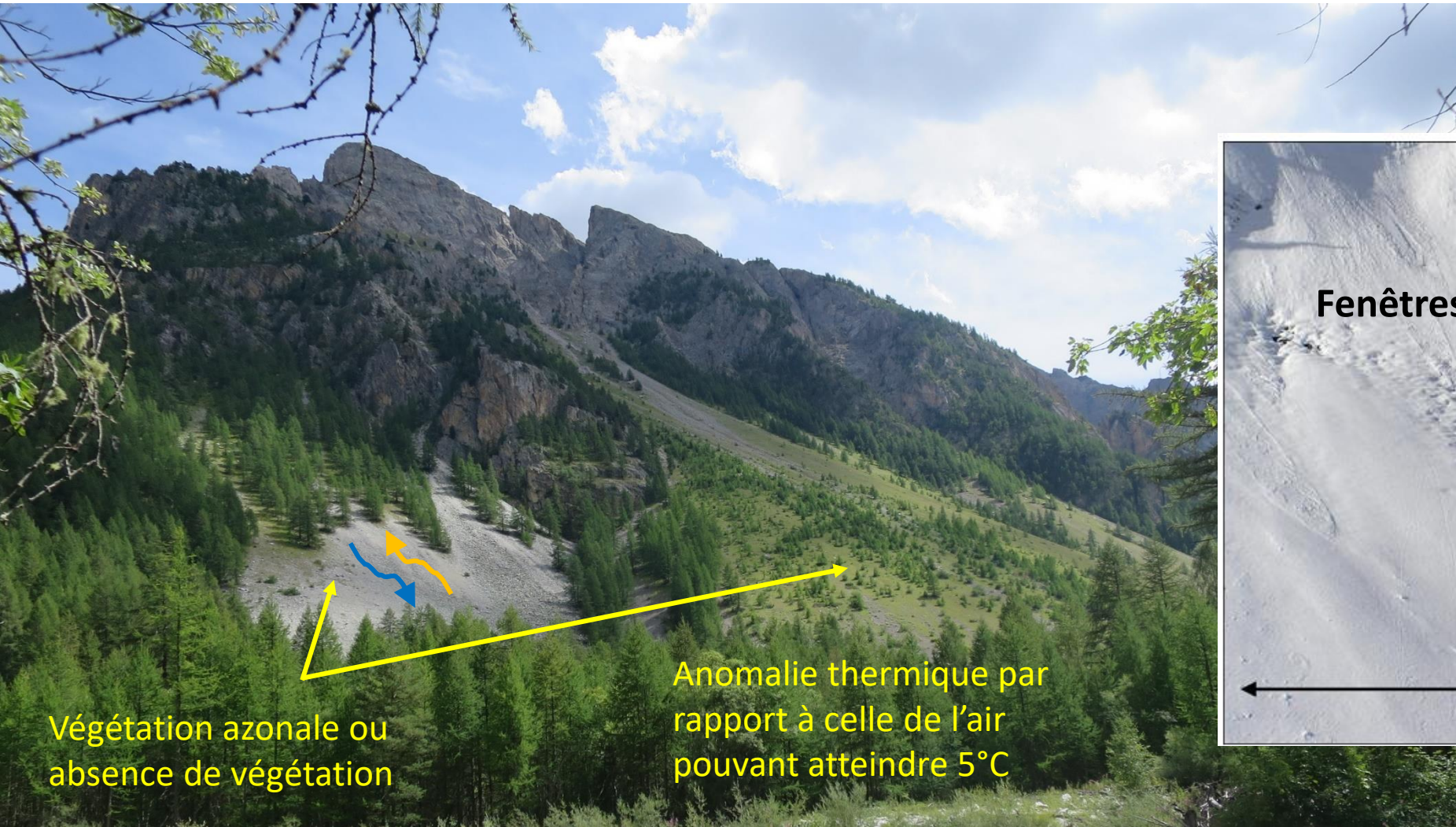
En France, le service RTM a recensé 3261 glaciers rocheux dont 814 actifs, 671 inactifs, 1776 fossiles



4. Spécificités du permafrost en montagne

1. Eboulis froids

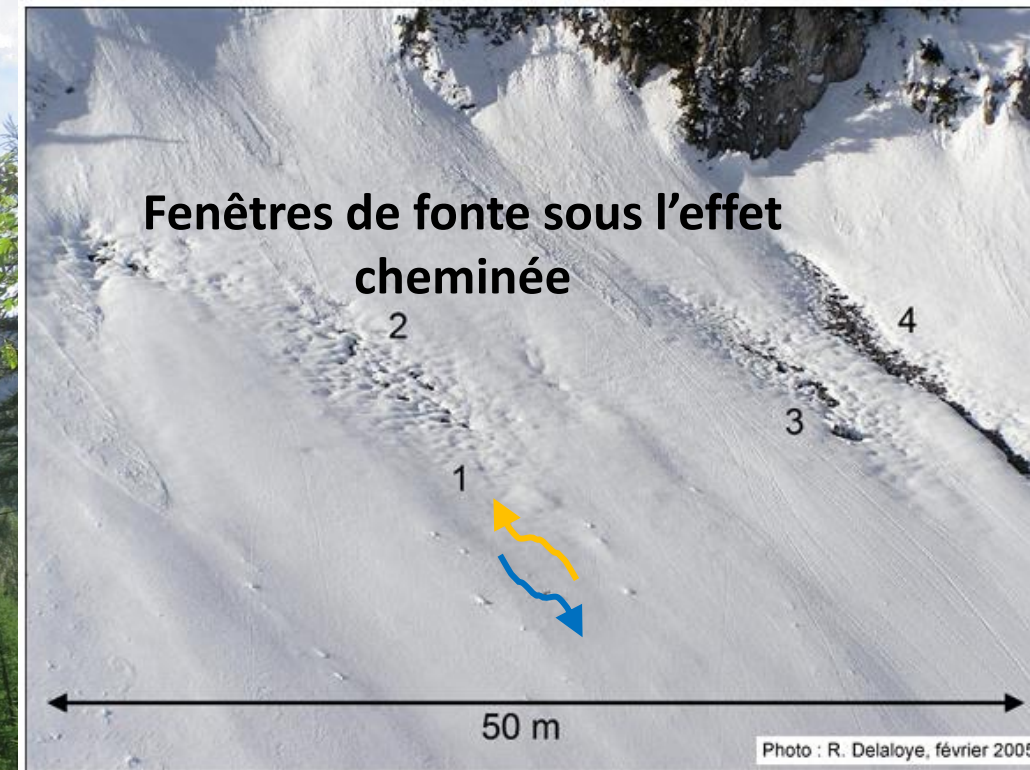
4. Permafrost azonal



Végétation azonale ou absence de végétation

Anomalie thermique par rapport à celle de l'air pouvant atteindre 5°C

Delaloye, 2004
Morard, 2011



Fenêtres de fonte sous l'effet cheminée

50 m

Photo : R. Delaloye, février 2005

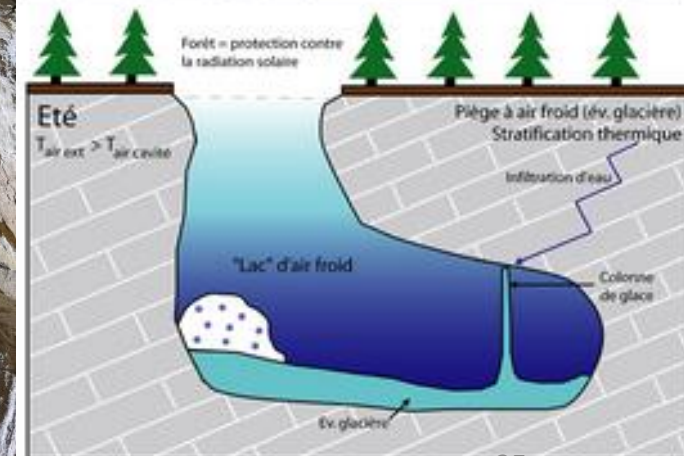
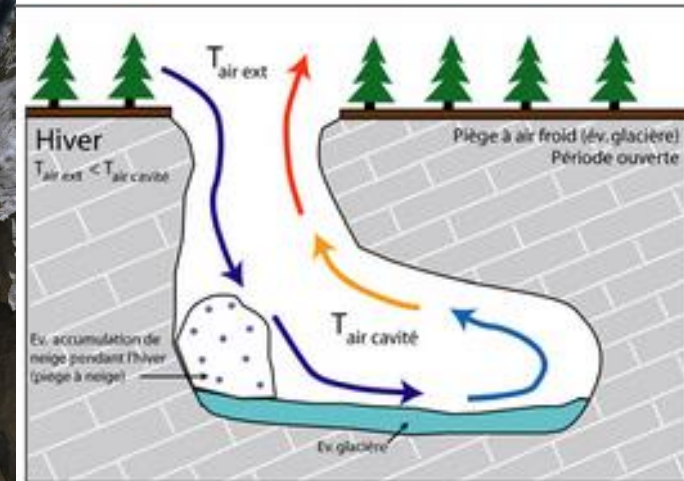
4. Spécificités du permafrost en montagne

4. Permafrost azonal

2. Glacières / grottes de glace



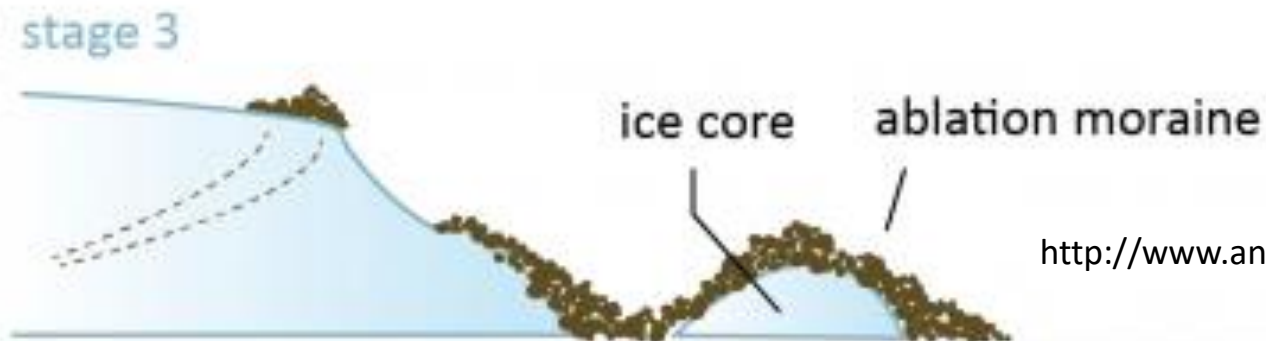
Photo: S. Morard



5. Autres formes

1. Moraines à cœur de glace

French, 2013



<http://www.antarcticglaciers.org>

2. Sols structurés

Plus commun dans les terrains polaires (plats) mais peut aussi se retrouver en montagne



Relique – Carpathes (Roumanie)
Ph: P. Urdea



2. Autres formes

3. Formes associées au gel-dégel

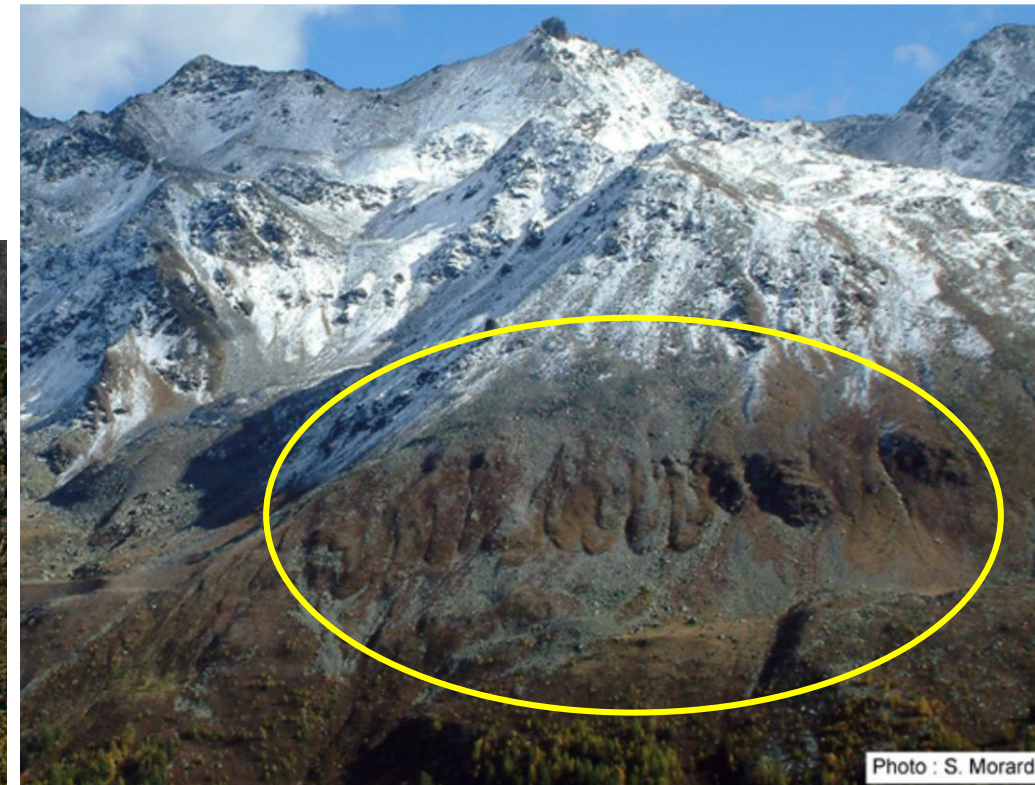
Propres aux milieux périglaciaires (alternance gel-dégel) mais pas nécessairement associées au permafrost (gel permanent)

French, 2013

Cryoturbation (Svalbard)

Cryoclastie (Islande)

Loupes / Coulées de gélifluxion (Valais suisse)



- Barsch, 1996. *Rock-glaciers: Indicators of the present and former geocology in high mountain environments*. Springer, Berlin, 331 p.
- Bodin, X. Géodynamique du pergélisol de montagne : fonctionnement, distribution, et évolution récente (...). L'exemple du massif du Combeynot (Hautes Alpes), thèse de Doctorat, Université Paris Diderot Paris 7, 274 p
- Delaloye, R., 2004. Contribution à l'étude du pergélisol de montagne en zone marginale. Thèse de Doctorat, Université de Fribourg, 240 p
- French, H.M., 2013. *The Periglacial Environment*. John Wiley & Sons, Ltd, <https://doi.org/10.1002/9781118684931.ch5>
- Gruber, S., 2005. Mountain permafrost: transient spatial modelling, model verification and the use of remote sensing, Thèse de Doctorat, Université de Zurich, 121 p. <https://doi.org/10.5167/uzh-18100>
- Gruber, S., Haeberli, W., 2009. Mountain Permafrost, in: Margesin, R. (Ed.), *Permafrost Soils, Soil Biology*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 33–44. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69371-0_3
- Hasler, Andreas, Gruber, S., Font, M., Dubois, A., 2011. Advective Heat Transport in Frozen Rock Clefts: Conceptual Model, Laboratory Experiments and Numerical Simulation: Advective Heat Transport in Frozen Rock Clefts. *Permafrost and Periglac. Process.* 22, 378–389. <https://doi.org/10.1002/ppp.737>
- Hasler, A., Gruber, S., Haeberli, W., 2011. Temperature variability and offset in steep alpine rock and ice faces. *The Cryosphere* 5, 977–988. <https://doi.org/10.5194/tc-5-977-2011>
- Lismonde, B., 2002. *Aérologie des systèmes karstiques*. CDS Isère, 362 p
- Luetscher, M., 2005. *Processes in ice caves : and their significance for paleoenvironmental reconstructions (Dissertation)*. Luetscher, Marc. *Processes in ice caves : and their significance for paleoenvironmental reconstructions*. 2005, University of Zurich, Faculty of Science. University of Zurich, La Chaux-de-Fonds. <https://doi.org/10.5167/uzh-163383>
- Magnin, F., Deline, P., Ravanel, L., Noetzli, J., Pogliotti, P., 2015. Thermal characteristics of permafrost in the steep alpine rock walls of the Aiguille du Midi (Mont Blanc Massif, 3842 m a.s.l.). *The Cryosphere* 9, 109–121. <https://doi.org/10.5194/tc-9-109-2015>
- Magnin, F., Etzelmüller, B., Westermann, S., Isaksen, K., Hilger, P., Hermanns, R.L., 2019. Permafrost distribution in steep slopes in Norway: measurements, statistical modelling and geomorphological implication. *Earth Surface Dynamics Discussions* 1–35. <https://doi.org/10.5194/esurf-2018-90>
- Morard, S., 2011. *Effets de la circulation d'air par effet de cheminée dans l'évolution du régime thermique des éboulis froids de basse et moyenne altitude*. Thèse de Doctorat, Université de Fribourg, 224 p.
- Noetzli, J., Gruber, S., Kohl, T., Salzmann, N., Haeberli, W., 2007. Three-dimensional distribution and evolution of permafrost temperatures in idealized high-mountain topography. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 112. <https://doi.org/10.1029/2006JF000545>

5. Enjeux sociétaux

5.1. Propriétés mécaniques : généralités

5.2. Ecoulements rocheux et autres ruptures de versant

5.3. Impacts socio-économiques des instabilités de paroi

5.3.1. Atteintes directes des infrastructures

5.3.2. Modifications des pratiques de la haute montagne

5.4. Aléas en cascade

5.5. *Surge* (accélération) et rupture de glaciers rocheux

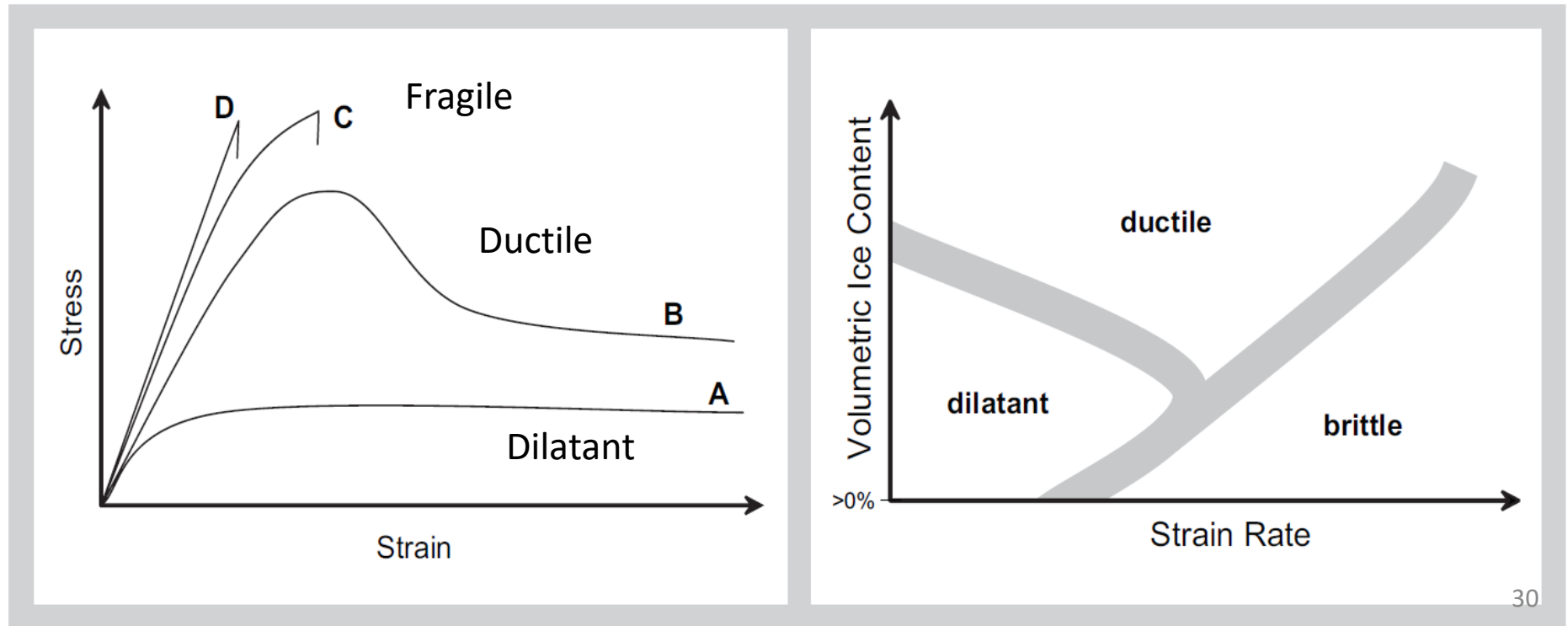
5.6. Dépressions et lacs thermokarstiques

5. Enjeux sociétaux

1. Propriétés mécaniques : généralités

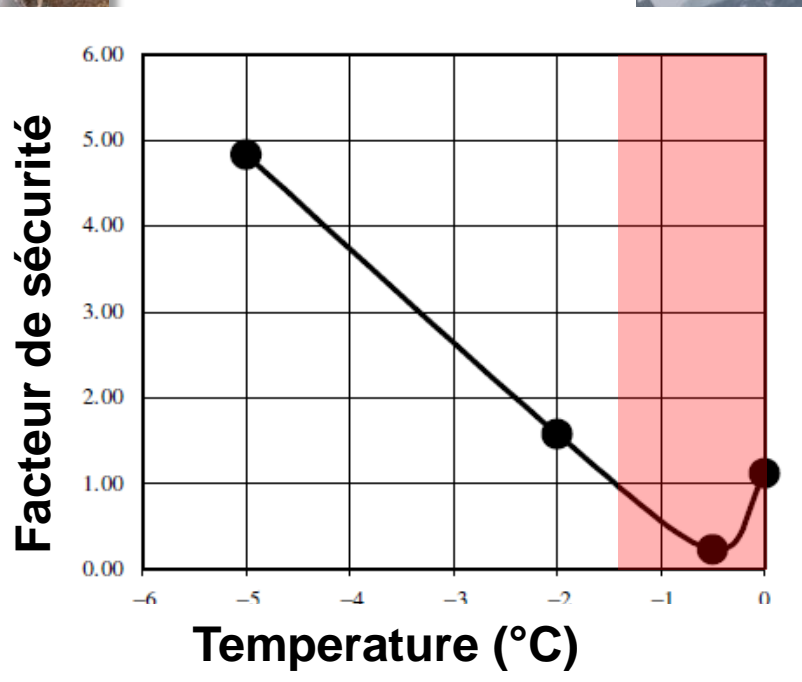
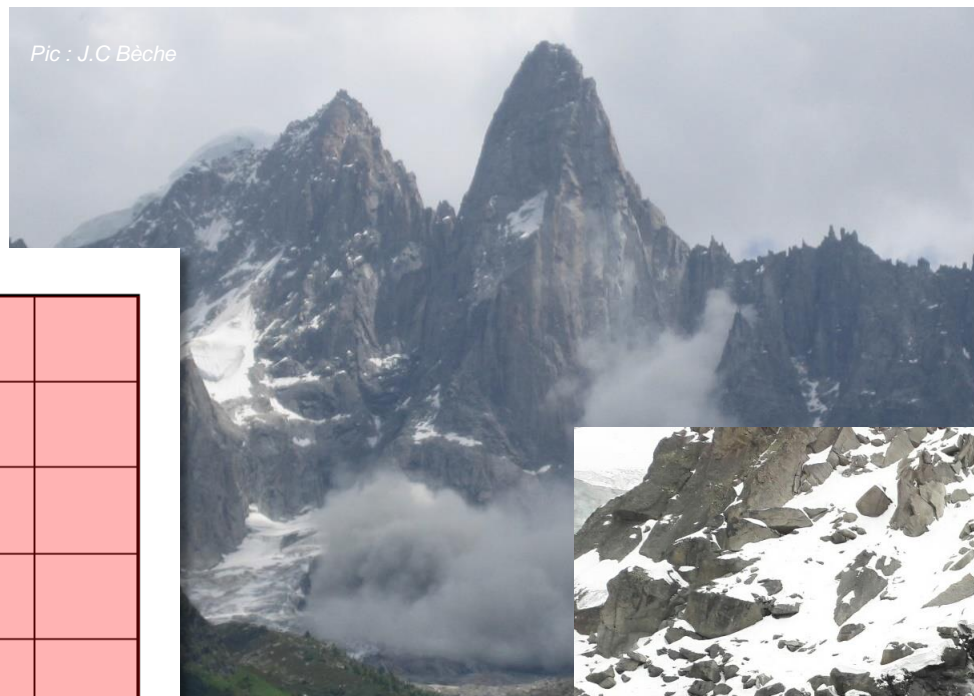
- Le comportement mécanique (contrainte-déformation) dépend principalement de la teneur en glace, mais aussi de la teneur en eau (surfusion), laquelle dépend en grande partie de la liaison granulaire et des caractéristiques du gel
- Du fait du caractère invisible de la glace du permafrost, ses propriétés mécaniques sont encore mal comprises, notamment car les propriétés physiques de la glace sont très variables et difficiles à définir

Arenson, 2007



5. Enjeux sociétaux

2. Ecoulements rocheux et autres ruptures de versant



Davies et al., 2001

Altération mécanique des « joints de glace » :
 perte de lien, baisse de la résistance au cisaillement avec l'élévation de la température, rupture

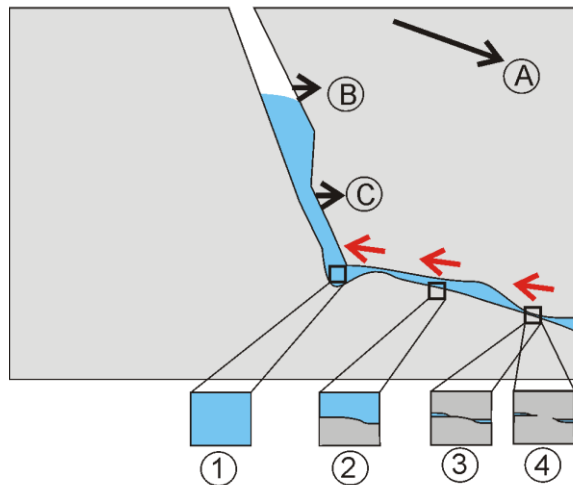


Facteur (ou coefficient) de sécurité :
 résistance/contrainte

2. Ecoulements rocheux et autres ruptures de versant

Un rôle certain mais mal compris :

- Des pressions hydrostatiques
- De la visco-plasticité des joints de glace
- Des liaisons granulaires aux interfaces roche-glace, roche-roche et glace-glace



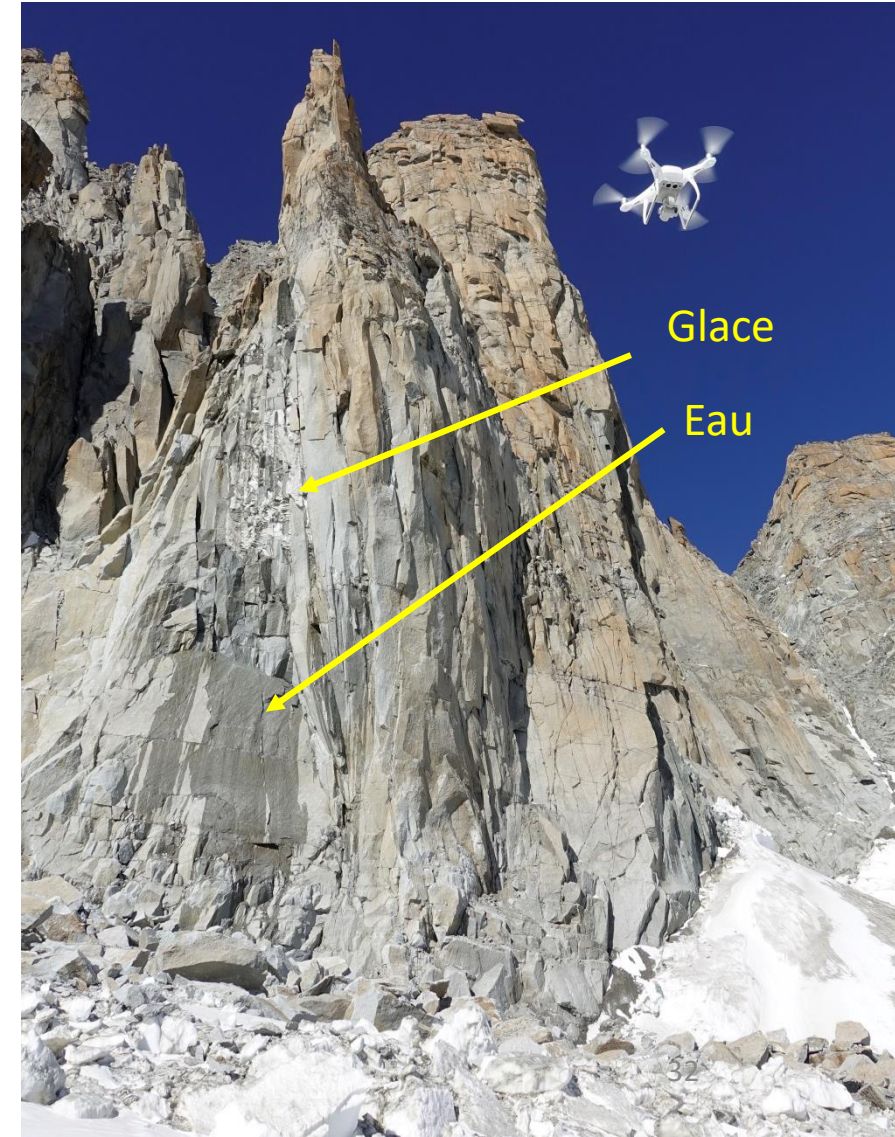
Krautblatter et al., 2013

Shear force

- A. gravitational force
- B. hydrostatic pressure
- C. ice segregation

Shear resistance

- force needed for
1. creep and fracture of ice itself
 2. fracture along rock-ice contacts
 3. friction along rock fractures (rock-rock)
 4. fracture of rock bridges (rock-rock)



➔ la baisse de la résistance des joints de glace et de la liaison roche – glace lors du réchauffement reste l’hypothèse la plus acceptée

5. Enjeux sociétaux

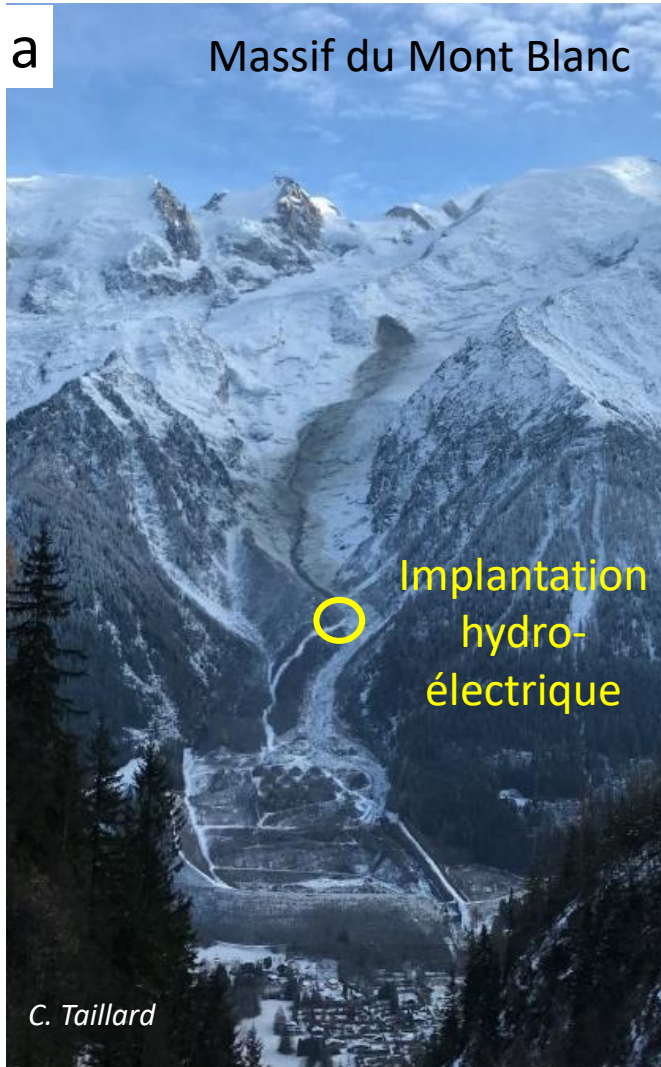
2. Ecoulements rocheux et autres ruptures de versant

- Les types de **mouvements de masse** associés à la dégradation du permafrost sont variés : écoulements, glissements, avalanches rocheuses



3. Impacts socio-économiques des instabilités de paroi

1. Atteintes directes des infrastructures



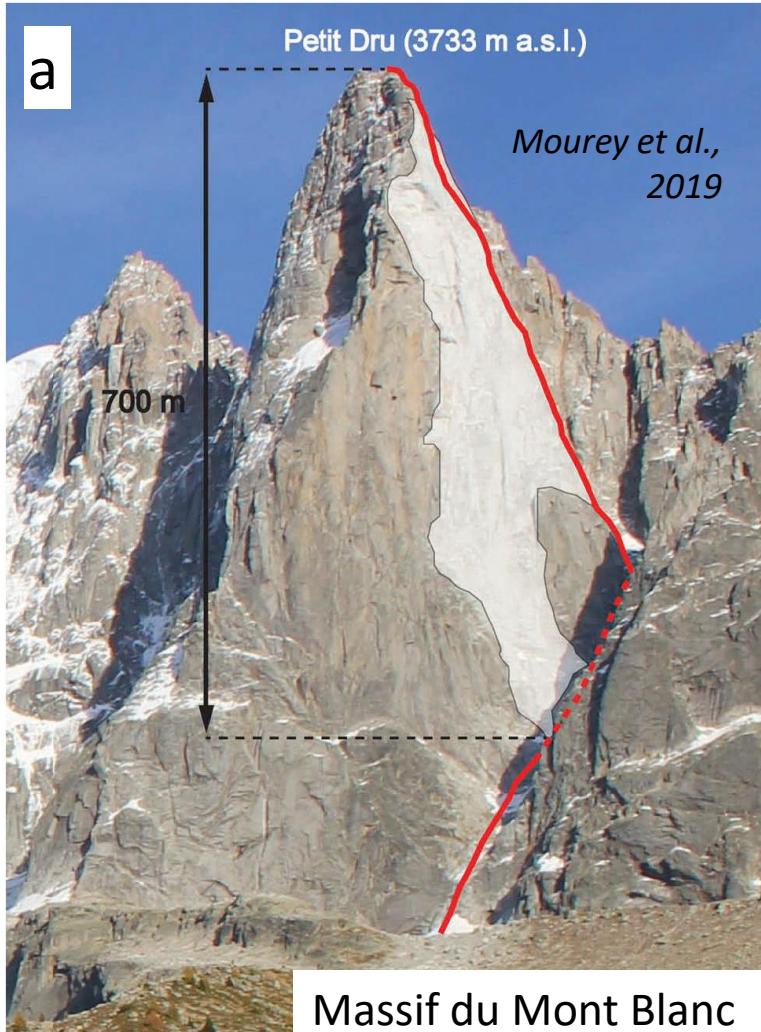
- a. Eroulement de Tacconnaz en novembre 2018 menaçant une implantation hydroélectrique
- b. Déstabilisation du refuge des Cosmiques suite à un éroulement en août 1998
- c. Déstabilisation du bivouac des Périades suite à un éroulement en juillet 2019
- d. Ensevelissement partiel d'un bivouac dans le secteur du Mont Cook en Nouvelle Zélande suite à un éroulement en juillet 2014

3. Impacts socio-économiques des instabilités de paroi

2. Modification des pratiques de la haute montagne

Les effets combinés du retrait glaciaire et de la dégradation du permafrost conduisent à :

- Une modification des pratiques de alpinisme : devient dangereux en été
- Une adaptation des guides en matière de saisonnalité de leur activité (report des activités de fin d'été sur l'hiver et diversification des activités).



a. Ecoulement du Pilier Bonatti aux Drus en juin 2005 (voie normale en rouge)

b. Ecoulement obstruant la voie normale de la Meije en août 2018 (voie normale en rouge)

5. Enjeux sociétaux

4. Aléas en cascade

Avalanche rocheuse du Piz Cengalo en août 2017 (Suisse)

- impact du glacier sous-jacent → liquéfaction de la masse en mouvement
- entrainement du matériel détritique (moraine à l'aval du glacier)
- lave torrentielle dévastatrice

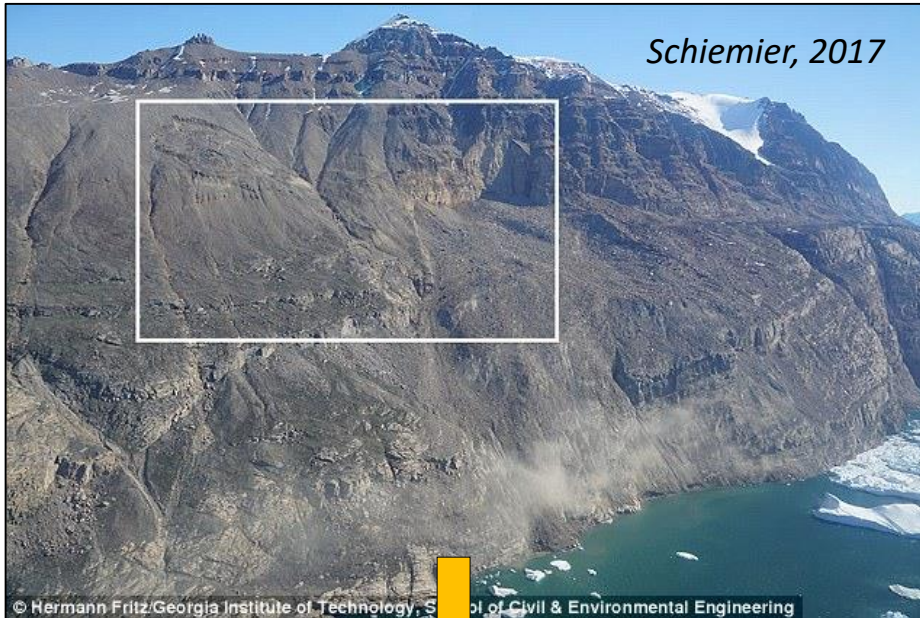


Lien vers vidéo de l'avalanche rocheuse du Piz Cengalo en août 2017:
<https://www.geopraevent.ch/project/rockfall-and-debris-flow-monitoring-bondoal-bondasca/?lang=en>

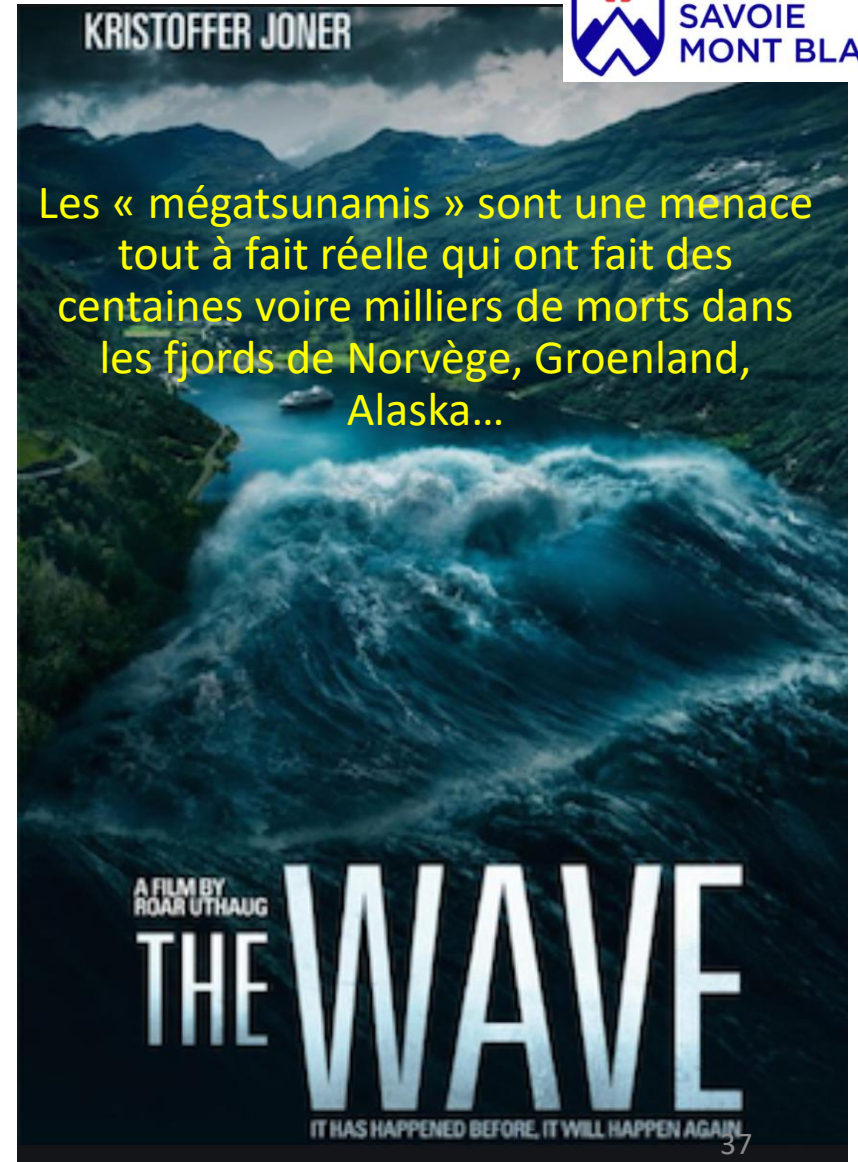
5. Enjeux sociétaux

4. Aléas en cascade

Avalanche rocheuse dans le fjord Karrat (Groenland) en juin 2017
→ vague de 100 m → tsunami sur plusieurs dizaines de km



32 km plus loin



5. Enjeux sociétaux

5. *Surge* et rupture de glaciers rocheux

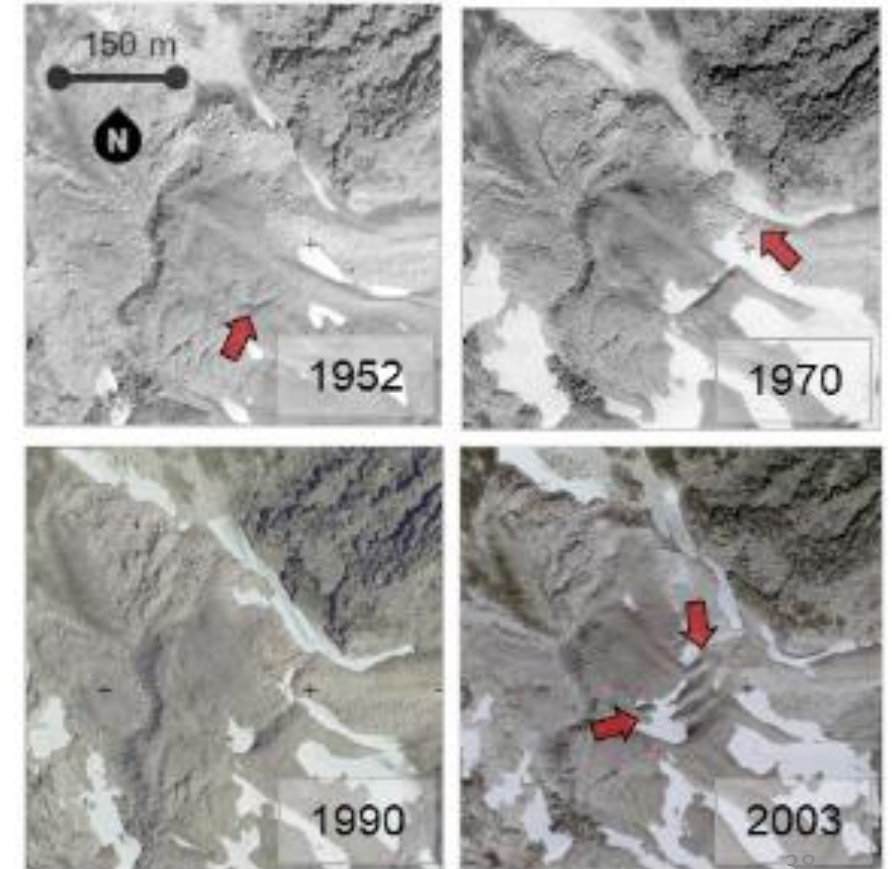
Accélération (*surge* → déplacement de plusieurs mètres/an) puis rupture du glacier rocheux de la Bérard en 2006 (vallée de l'Ubaye)

Des marques d'accélération dans le fluage sont visibles



Figure 6 : Rupture du glacier rocheux du Berard (04)
(source : J-M Krysiecki., 2008)

Marcer et al.,
2019



5. Enjeux sociétaux

5. *Surge* et rupture de glaciers rocheux

Rupture frontale du glacier rocheux du col du Lou (massif de la Vanoise) le 14 août 2015 et lave torrentielle



Suite à 3 semaines de pluie consécutives à une vague de chaleur

Ribeyre, 2016

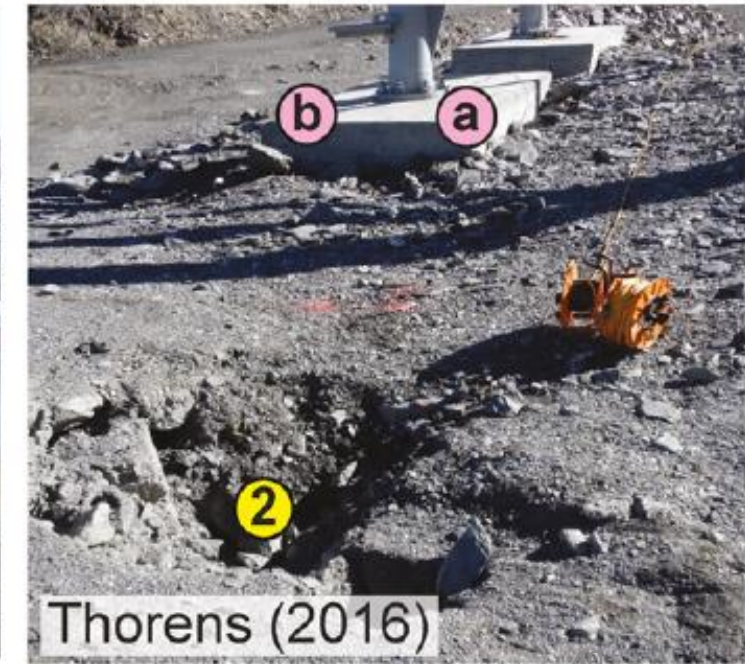
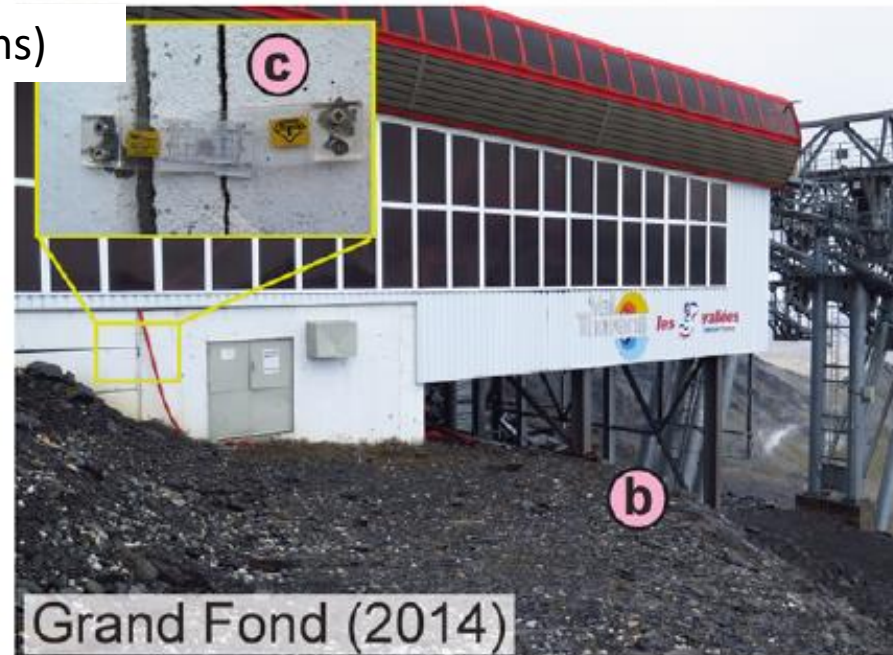
5. Enjeux sociétaux

6. Dépressions et lacs thermokarstiques

- **Thermokarst** : dépression qui résulte de la dégradation d'un permafrost roche en glace ou la fonte de glace massive, généralement de la glace de glacier enterrée qui subsiste grâce à des conditions de permafrost.
- **Lac thermokarstique** : se forme dans une formation thermokarstique, la présence de glace de subsurface forme un niveau imperméable
- Le fluage (1) et les thermokarsts (2) des terrains sur lesquels sont implantés les infrastructures provoquent des inclinaisons (a), des subsidences (2) et des fissures (2)

Duvillard et al., 2019

Massif de la Vanoise (Tignes et Val Thorens)



5. Enjeux sociétaux

6. Vidange de lacs thermokarstiques



- Exemple d'une vidange brutale du lac Chauvet (vallée de l'Ubaye) en juillet 2008 causant une crue torrentielle en aval). *Ph: M. Peyron*

- Arenson, L.U., Springman, S.M., Segó, D.C., 2007. The Rheology of Frozen Soils. *Applied Rheology* 17, 12147–1. <https://doi.org/10.1515/arh-2007-0003>
- Davies, M.C.R., Hamza, O., Harris, C., 2001. The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities. *Permafrost and Periglacial Processes* 12, 137–144. <https://doi.org/10.1002/ppp.378>
- Duvillard, P.-A., Ravel, L., Marcer, M., Schoeneich, P., 2019. Recent evolution of damage to infrastructure on permafrost in the French Alps. *Reg Environ Change*. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01465-z>
- Krautblatter, M., Funk, D., Günzel, F.K., 2013. Why permafrost rocks become unstable: a rock–ice-mechanical model in time and space. *Earth Surface Processes and Landforms* 38, 876–887. <https://doi.org/10.1002/esp.3374>
- Marcer, M., Serrano, C., Brenning, A., Bodin, X., Goetz, J., Schoeneich, P., 2019. Evaluating the destabilization susceptibility of active rock glaciers in the French Alps. *The Cryosphere* 13, 141–155. <https://doi.org/10.5194/tc-13-141-2019>
- Mourey, J., Marcuzzi, M., Ravel, L., Pallandre, F., 2019. Effects of climate change on high Alpine mountain environments: Evolution of mountaineering routes in the Mont Blanc massif (Western Alps) over half a century. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 51, 176–189. <https://doi.org/10.1080/15230430.2019.1612216>
- Ravel, L., Deline, P., Lambiel, C., Vincent, C., 2013. Instability of a High Alpine Rock Ridge: the Lower Arête Des Cosmiques, Mont Blanc Massif, France. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 95, 51–66. <https://doi.org/10.1111/geoa.12000>
- Ribeyre, C., 2016. La lave torrentielle du 24 août 2015 (Lanslevillars, Savoie): un cas de dégradation du pergélisol dans le contexte du réchauffement climatique? Étude de l'évolution des dynamiques du glacier-rocheux du col du Lou entre 1970 et 2016: approche par photogrammétrie. Mémoire de Master, Université Grenoble Alpes, 78 p.dumas-01520648
- Schiermeier, Q., n.d. Huge landslide triggered rare Greenland mega-tsunami. *Nature News*. <https://doi.org/10.1038/nature.2017.22374>

6. Méthodes d'investigation

6.1. Pour détecter le permafrost

- 6.1.1. *Bottom Snow Temperature*
- 6.1.2. Mesures de température *in-situ*
- 6.1.3. Mesures géophysiques

6.2. Pour suivre l'évolution du permafrost

- 6.2.1. Monitoring de la température dans les forages
- 6.2.2. Répétition de mesures géoélectriques
- 6.2.3. Suivi de la vitesse des glaciers rocheux

6.3. Modélisation statistique pour cartographier le permafrost

- 6.3.1. A partir d'inventaires de glaciers rocheux
- 6.3.2. A partir de mesures de température de surface

6.4. Modélisation numérique pour prédire l'évolution passée ou future

- 6.4.1. Bilan d'énergie
- 6.4.2. Simulation des transferts thermiques

6. Méthodes d'investigation

1. Pour détecter le permafrost

1. Bottom Snow Temperature

Haerberli, 1973

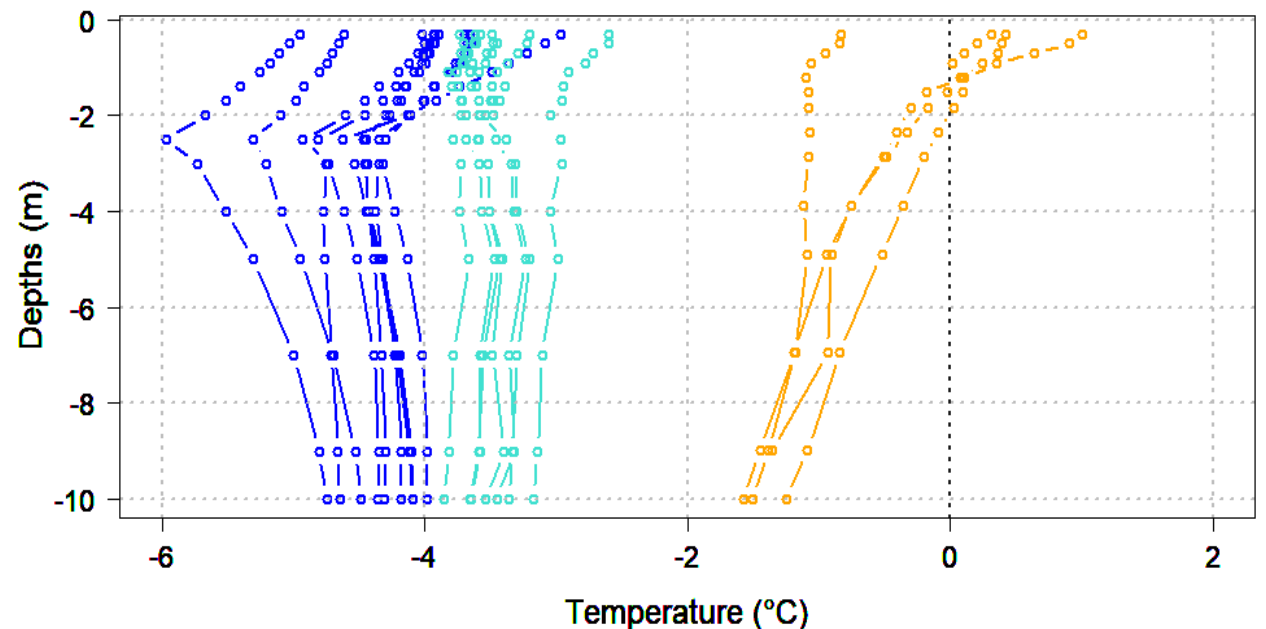
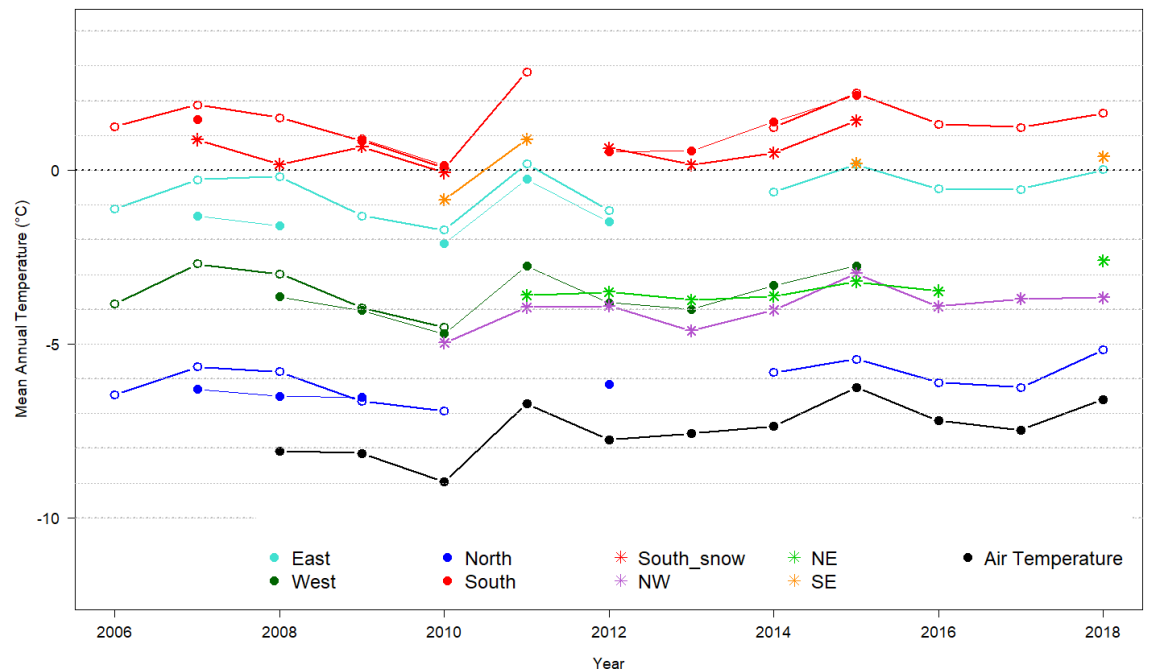
- Méthode développée dans les années 1970s dans les Alpes et qui consiste à mesurer la température à l'interface neige-terrain sous un manteau d'au moins 80-100 cm au milieu de l'hiver. Une règle générale à alors été établie :
 - $< -3^{\circ}\text{C}$: présence de permafrost probable
 - de -3 à -2°C : présence de permafrost possible
 - $> -2^{\circ}\text{C}$: présence de permafrost improbable



1. Pour détecter le permafrost

2. Mesures de température *in-situ*

- La méthode de détection la plus directe : mais au moins une année complète de mesure à pas de temps horaire est nécessaire
- Une température annuelle moyenne à la surface < 0°C indique la présence de permafrost
- Mais le plus évident reste une mesure en profondeur

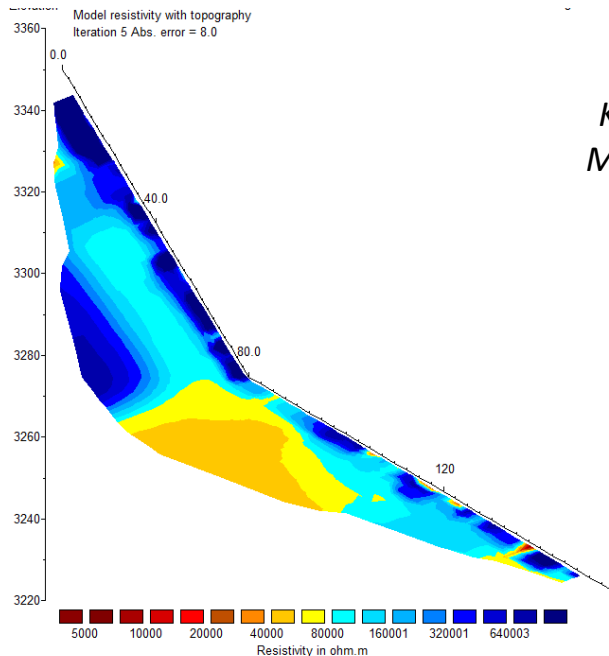


6. Méthodes d'investigation

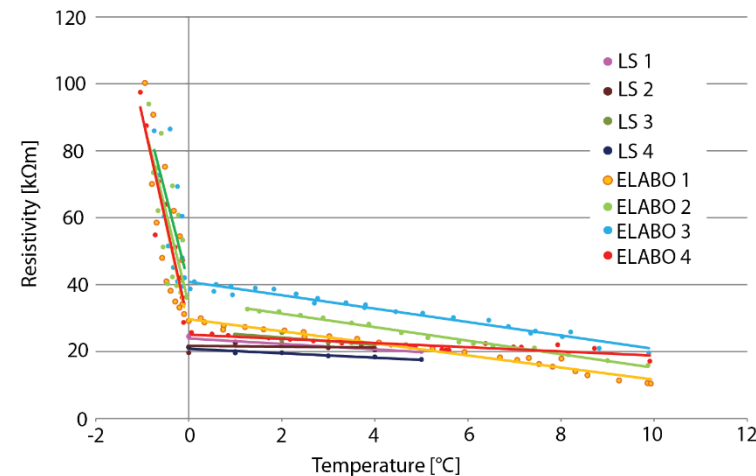
1. Pour détecter le permafrost

3. Sondages géophysiques

- Parmi les différentes méthodes géophysiques, la géoélectrique est la plus utilisée du fait d'une très haute résistivité de la glace
- La résistivité dépend de la lithologie, la porosité (teneur en eau/glace potentielle) et la température (état de l'eau)



Kneisel et al., 2008
Magnin et al., 2015



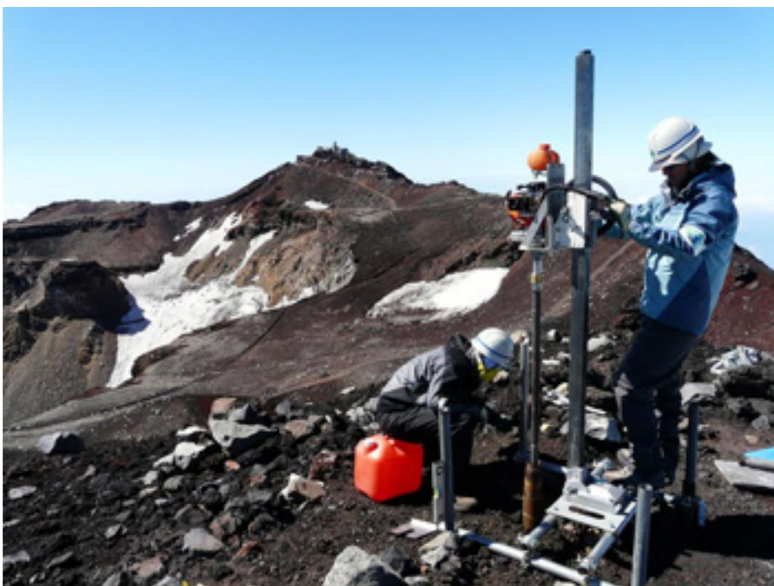
6. Méthodes d'investigation

2. Pour suivre l'évolution du permafrost

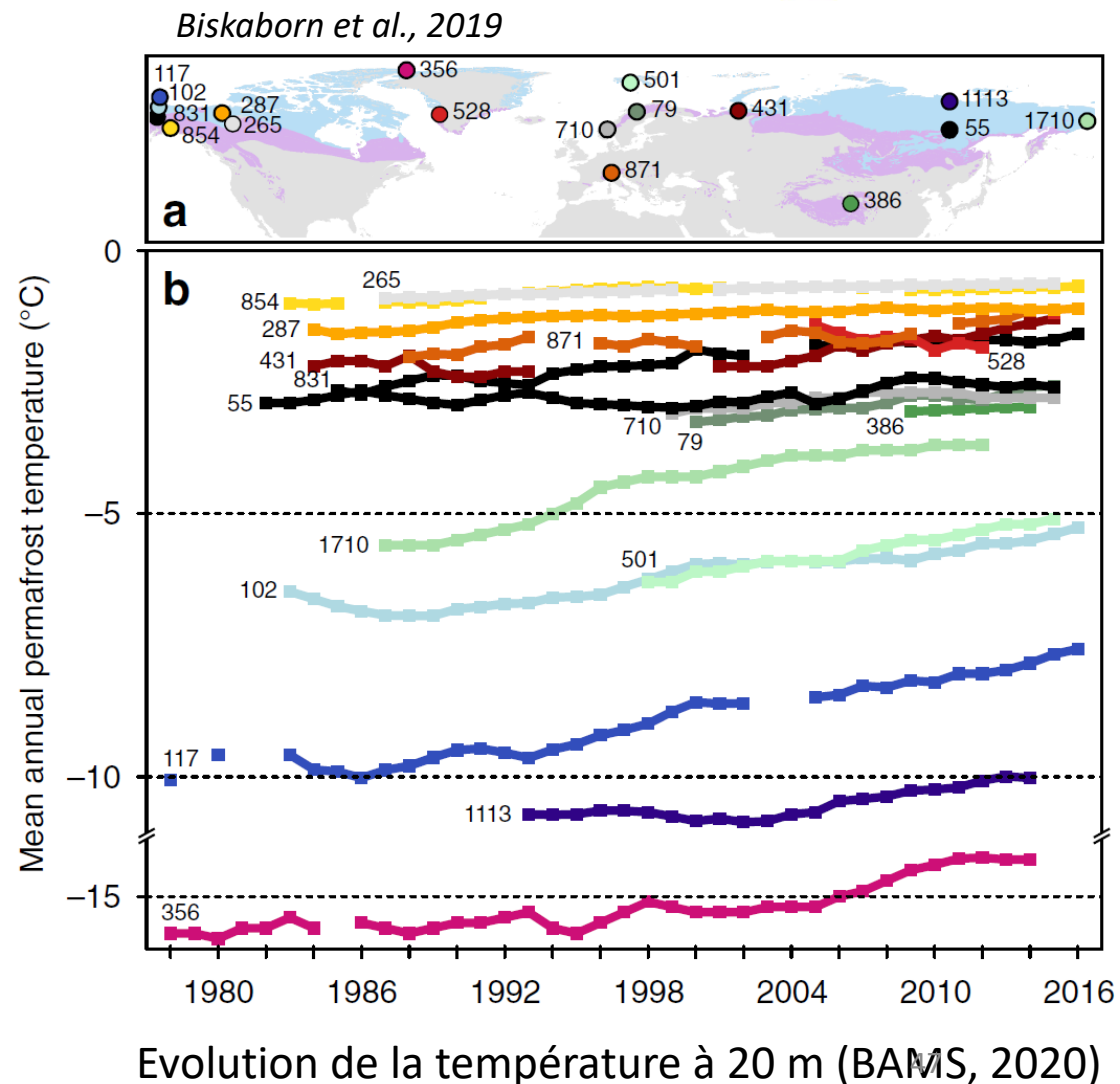
1. Monitoring de la température dans des forages

- La méthode de suivi la plus directe
- Il s'agit de suivre l'évolution de la profondeur de couche active (dégel saisonnier) et l'évolution de la température du corps du permafrost

Forage à l'Aiguille du Midi



Drilling a 10-m deep borehole on the top of Fuji volcano.

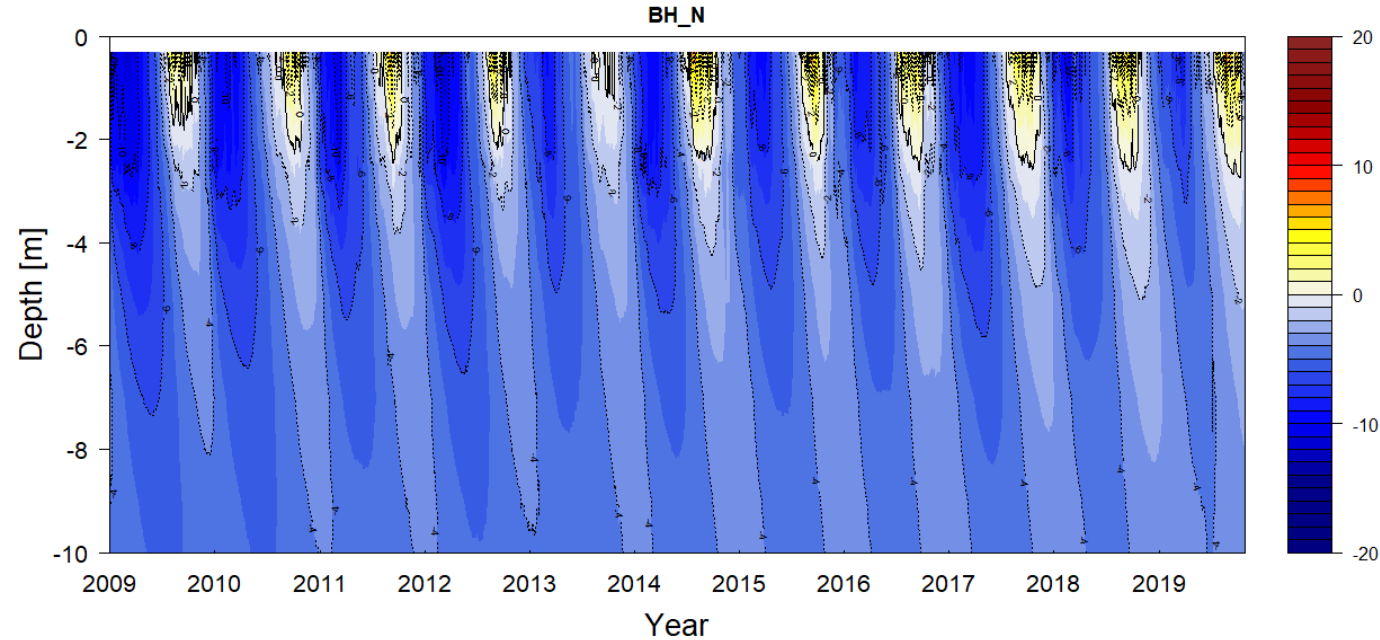
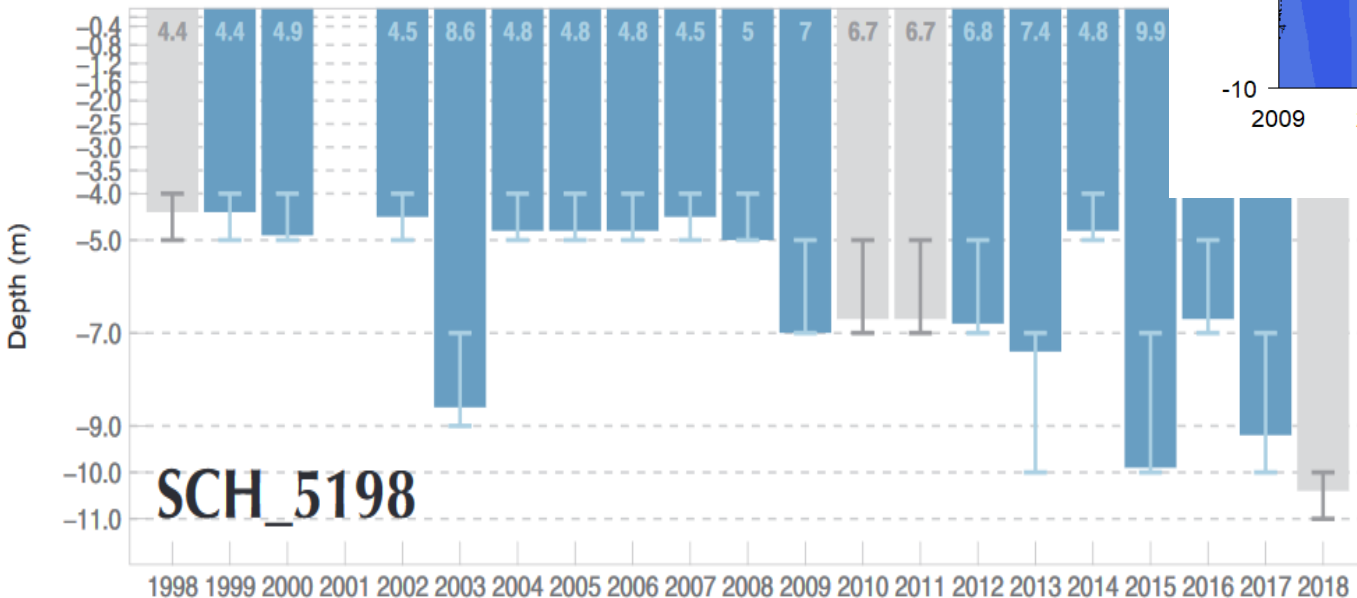


6. Méthodes d'investigation

2. Pour suivre l'évolution du permafrost

1. Monitoring de la température dans des forages

Evolution de la couche active au Schilthorn en Suisse (la barre d'erreur situe la profondeur des capteurs de température entre lesquels est interpolée la profondeur de la couche active)



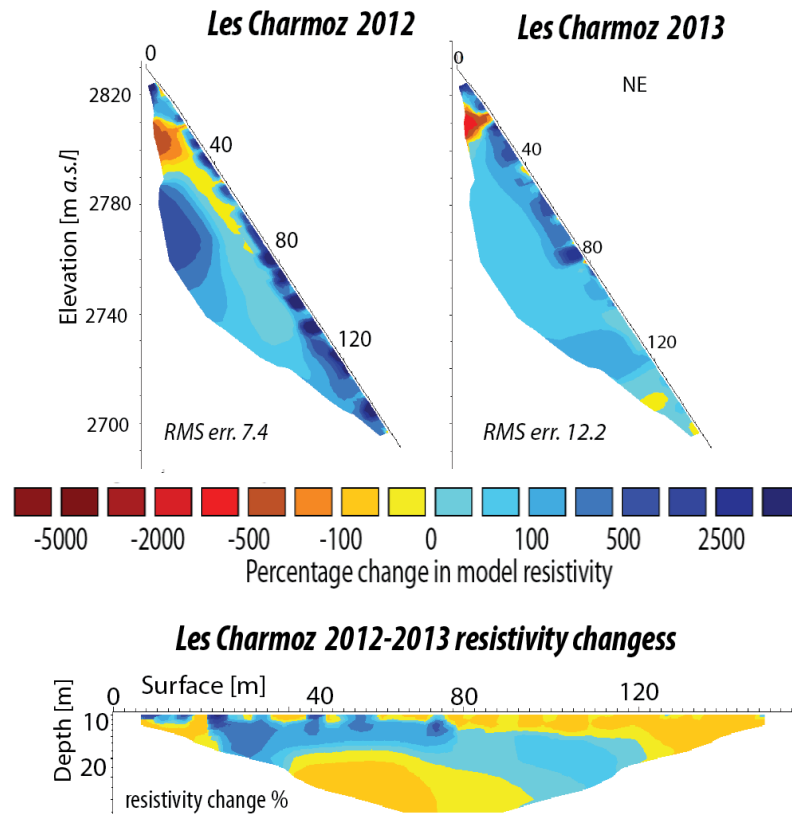
Evolution de la température dans un forage à l'Aiguille du Midi (massif du Mont Blanc)

6. Méthodes d'investigation

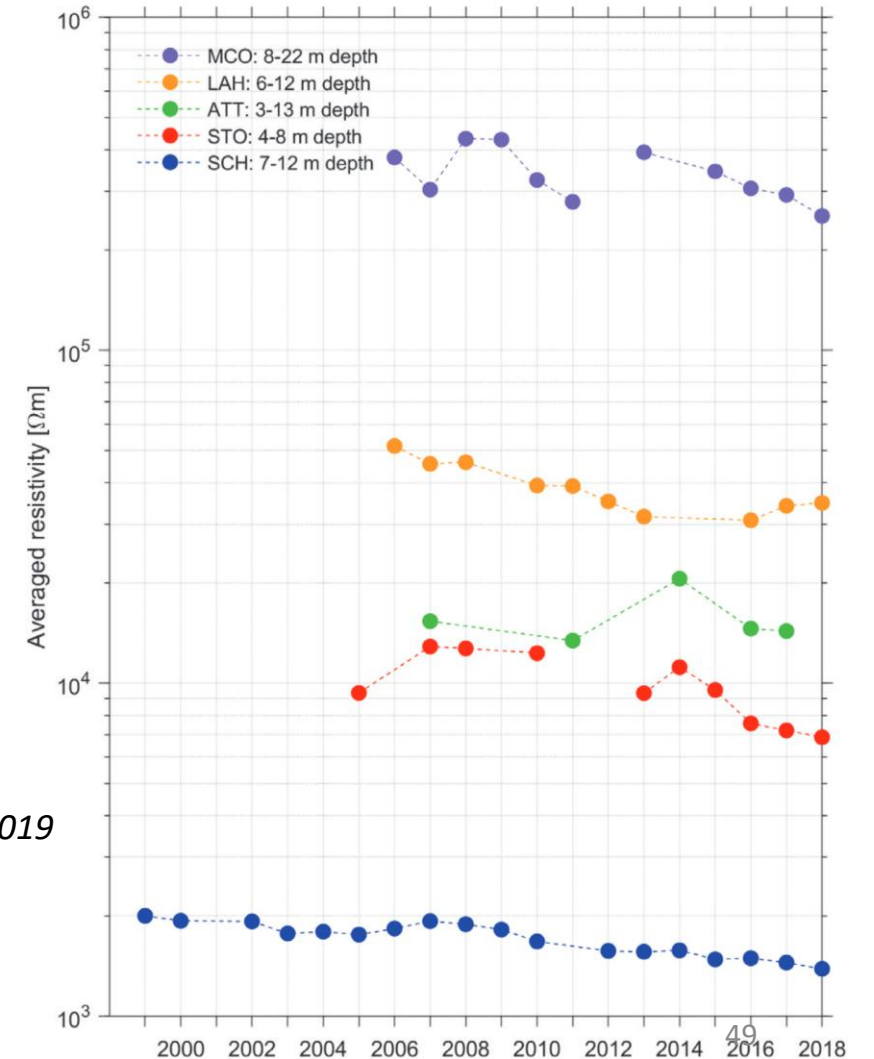
2. Pour suivre l'évolution du permafrost

2. Répétition des mesures géoélectriques

- Un abaissement de la résistivité est associé à une augmentation de la température



PERMOS, 2019
Mollaret et al., 2019



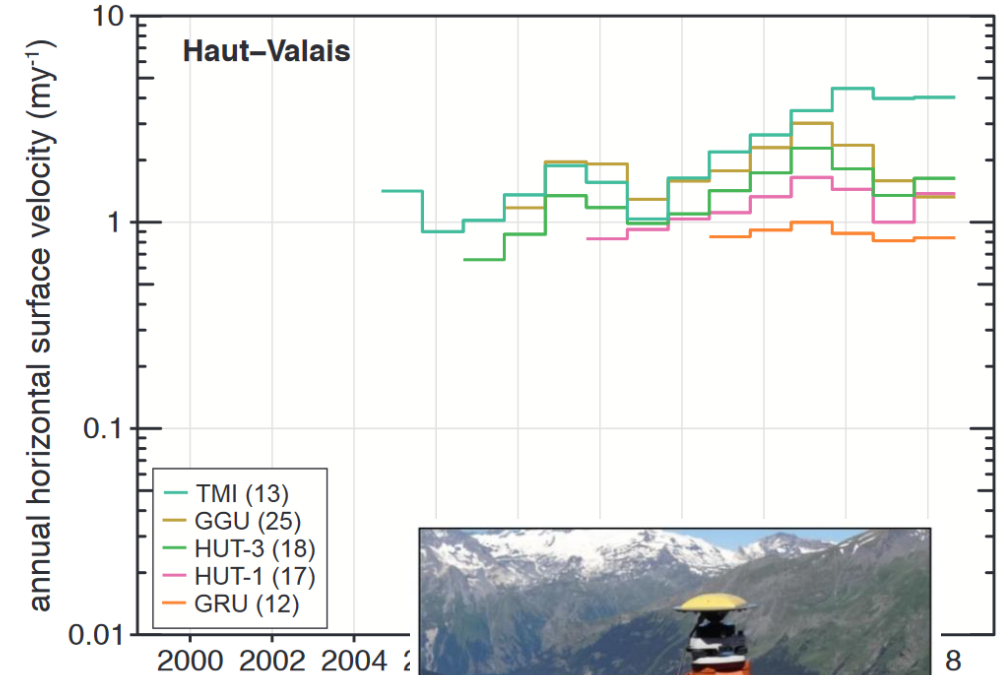
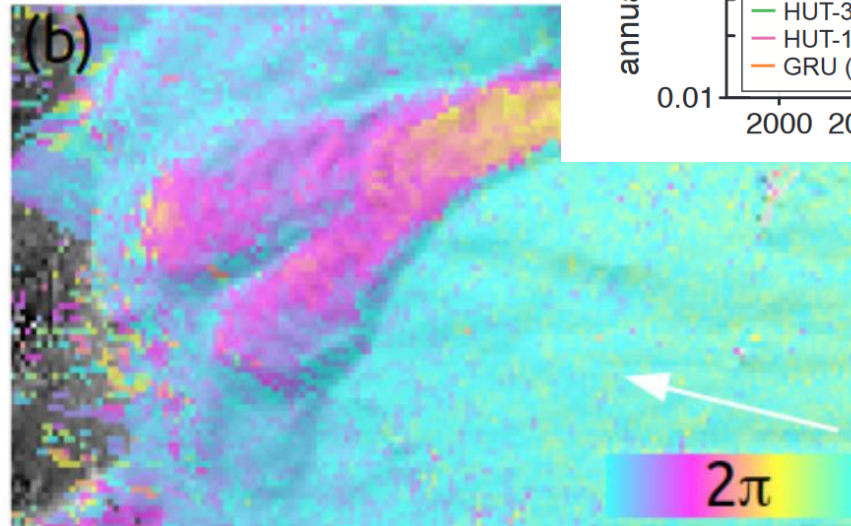
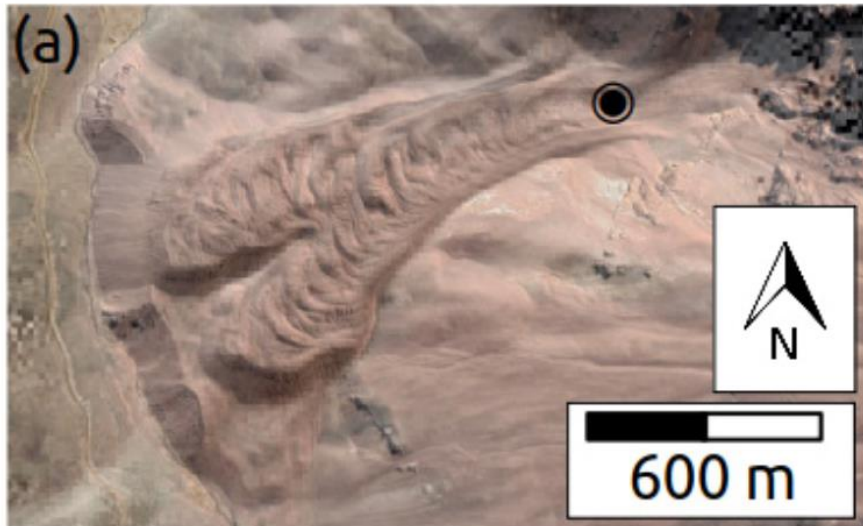
6. Méthodes d'investigation

2. Pour suivre l'évolution du permafrost

3. Suivi de la vitesse des glaciers rocheux

- Une augmentation de la vitesse est associée à un réchauffement de la glace interstitielle
- Plusieurs méthodes de suivi sont possibles : interférométrie radar différentielle (images satellitaires), GPS différentiel (mesures ponctuelles), photogrammétrie, laserscanning terrestre....

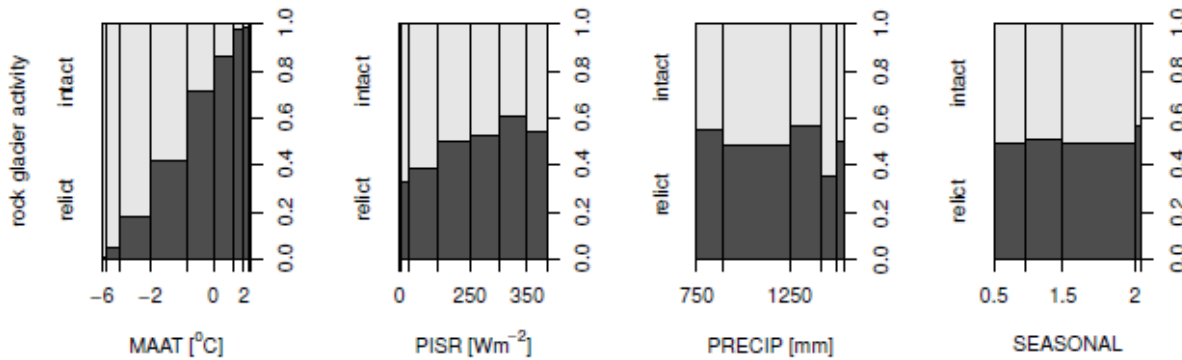
PERMOS, 2019
Strozzi et al., 2020



3. Modélisation statistique pour cartographier le permafrost

1. A partir d'inventaires de glaciers rocheux

Boeckli et al., 2012

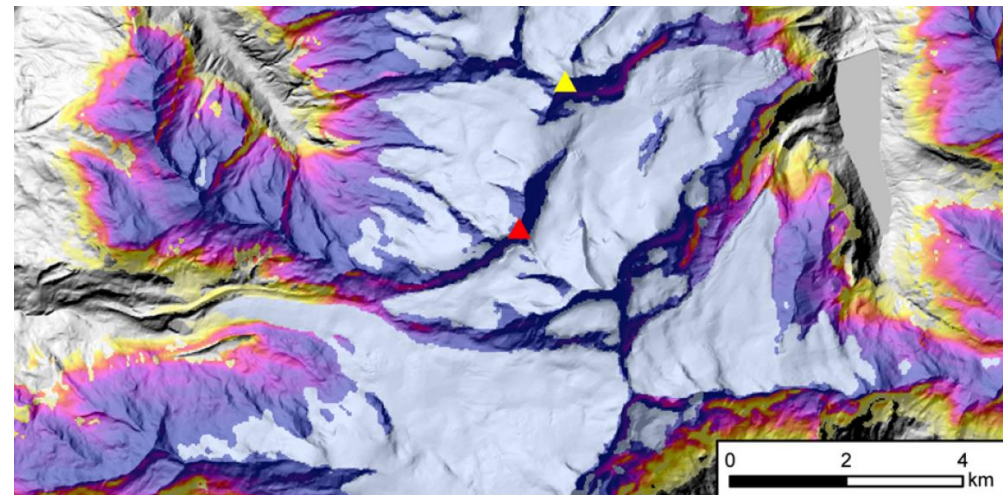


Distribution des glaciers rocheux intacts (actifs et inactifs) et reliques en fonction de certaines variables topoclimatiques : MAAT (température annuelle moyenne de l'air), PISR : rayonnement solaire incident potentiel, PRECIP : précipitation, SEASONAL : saisonnalité des précipitations

Coefficients et statistiques calculés à partir d'un échantillon de d'environ 3500 glaciers rocheux et leurs conditions topoclimatiques

	Debris model 1	Debris model 2	Debris model 3
Intercept	0.817 (0.192)***	0.821 (0.182)***	1.366 (0.320)***
MAAT [°C]	-0.906 (0.046)***	-0.882 (0.035)***	-0.885 (0.035)***
PISR [W m ⁻²]	-0.007 (0.001)***	-0.007 (0.001)***	-0.007 (0.001)***
cPRECIP [mm]	0.001 (0.0002)***	-	-
SEASONAL	-	-	-0.391 (0.187)*
AUROC	0.91	0.90	0.90
AUROC _{cv}	0.91	0.91	0.90
Inventory-level standard deviation	0.212	0.413	0.442
Residual standard deviation	1.758	1.377	1.372

Significance of Wald test: * < 0.05, ** < 0.01, *** < 0.001



Implémentation d'un modèle statistique dans un système d'information géographique pour cartographier le permafrost



6. Méthodes d'investigation

3. Modélisation statistique pour cartographier le permafrost

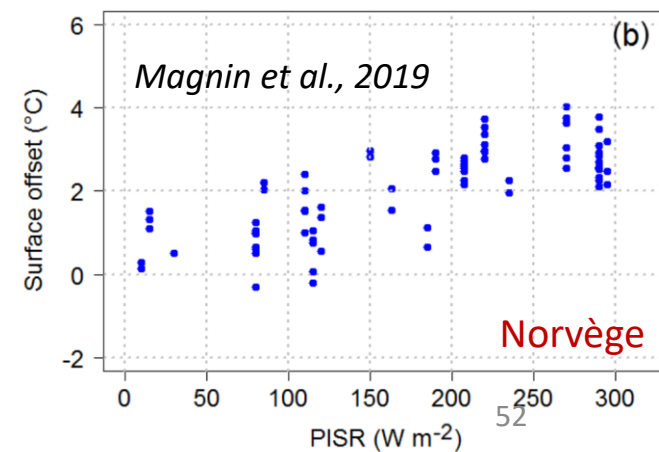
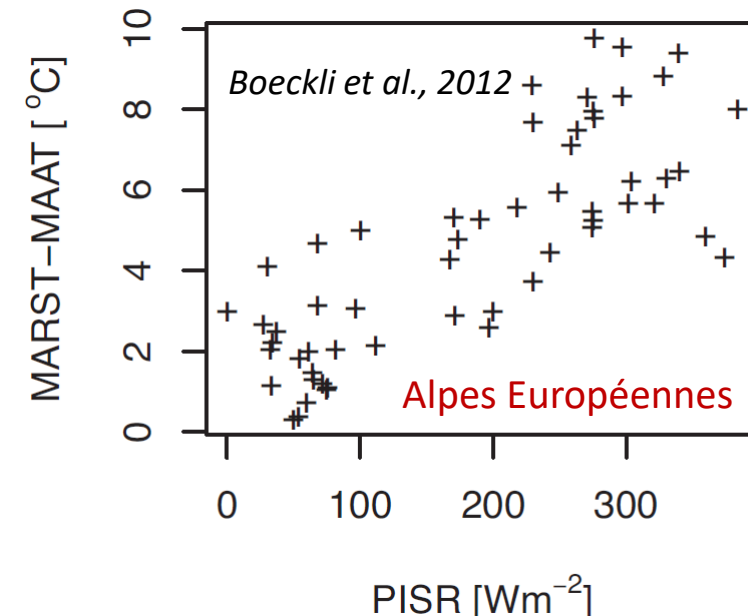
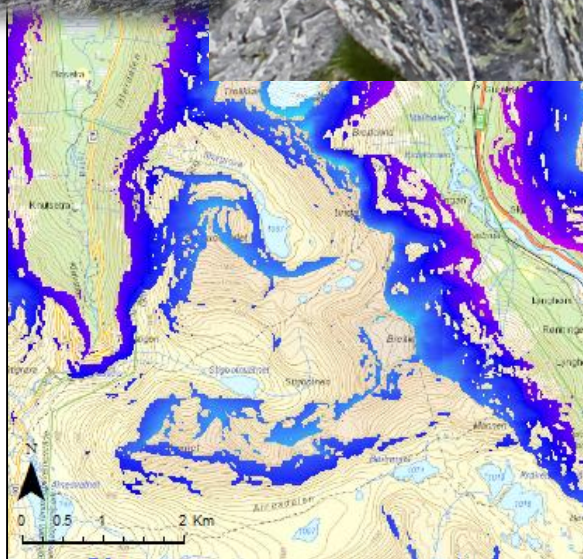
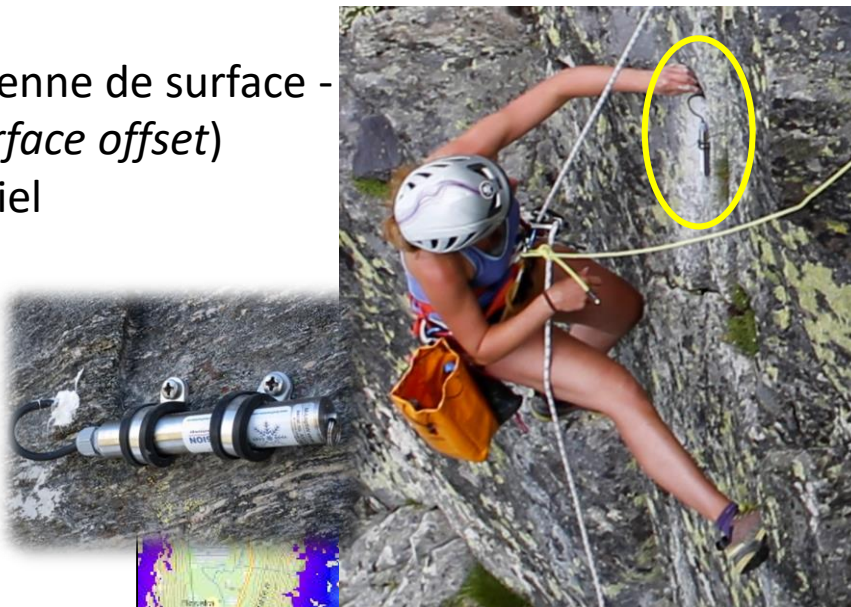
2. A partir de mesures de température de surface

MARST- MAAT : Température annuelle moyenne de surface -
 Température moyenne annuelle de l'air (*surface offset*)
 PISR : Rayonnement solaire incident potentiel

Température de l'air (°C)
 8.5
 -9

Rayonnement solaire (W.m²)
 300
 0

Température de surface (°C) des pentes > 40°
 12.6
 -8

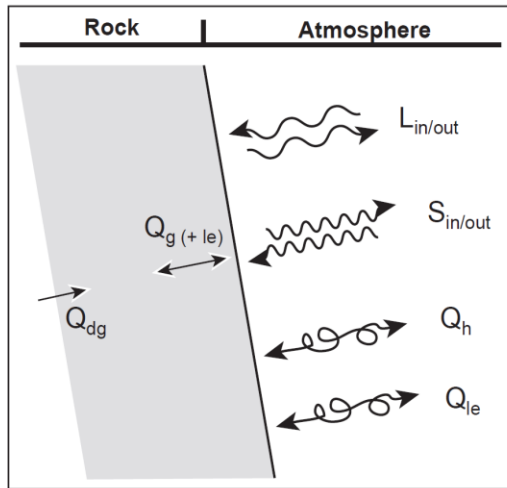


4. Modélisation numérique pour prédire l'évolution

1. Bilan d'énergie

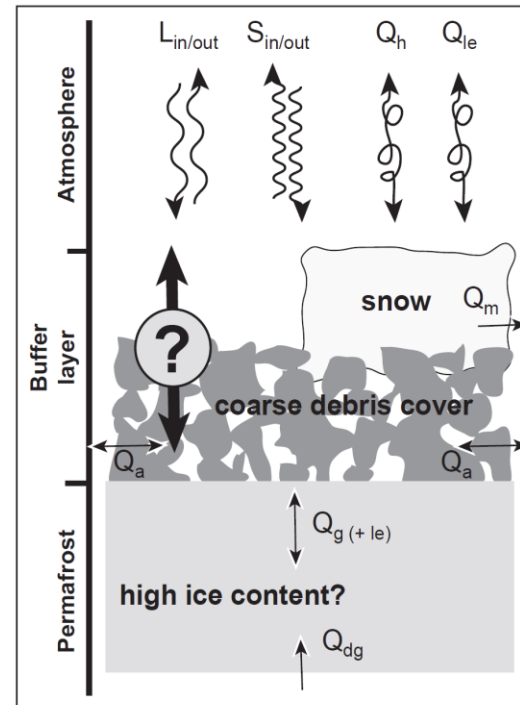
- Très difficile à simuler dans les formations superficielles en raison de l'importance des processus de convection en d'advection agissant verticalement mais aussi latéralement

A) Steep rock Gruber, 2005

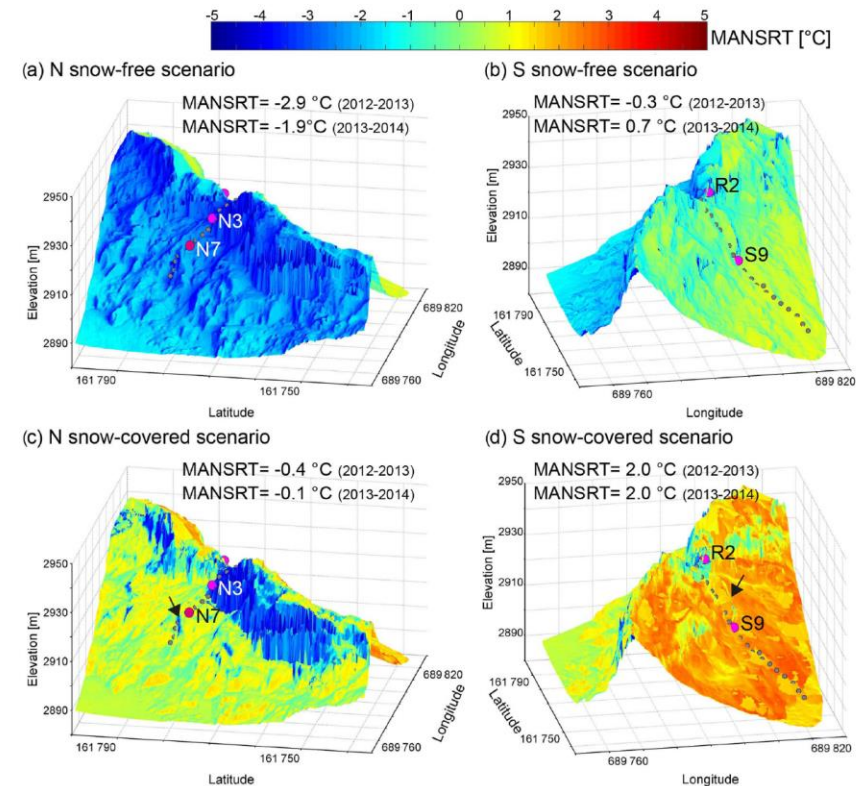


$L_{in/out}$: Long-wave radiation (incoming/outgoing)
 $S_{in/out}$: Short-wave radiation (incoming/outgoing)
 Q_h : Sensible heat flux
 Q_{le} : Latent heat flux
 Q_g : Ground heat flux
 Q_{dg} : Geothermal heat flux
 Q_m : Melt heat flux
 Q_a : Lateral advection of heat

B) Coarse blocky surface



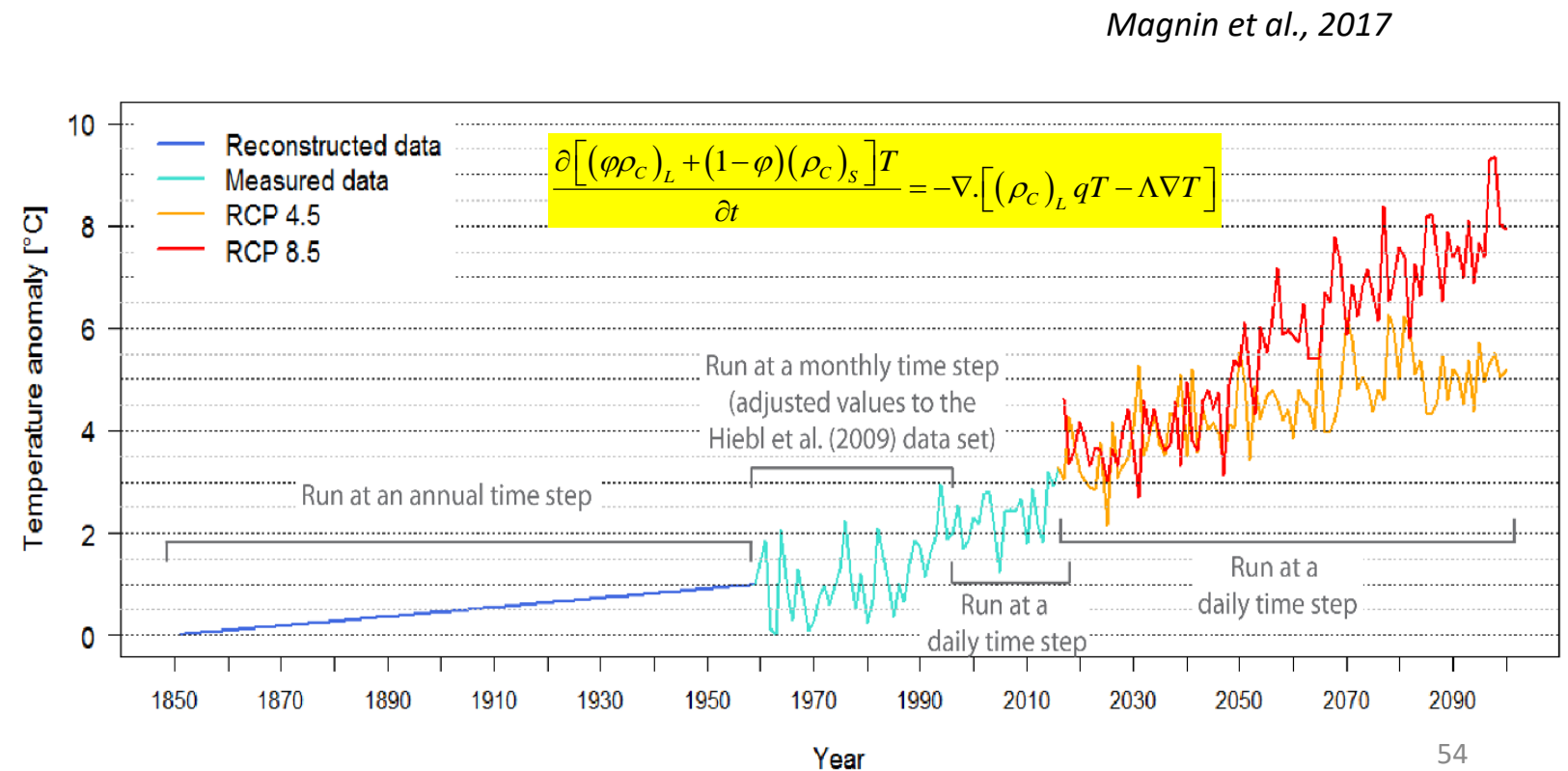
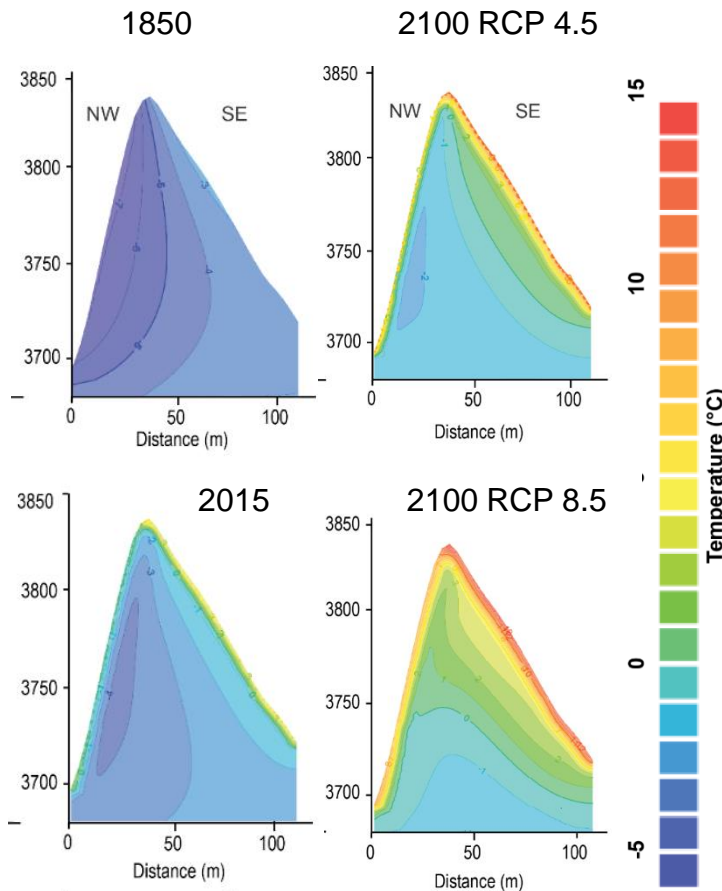
Haberkorn et al., 2016



4. Modélisation numérique pour prédire l'évolution

2. Simulation des transferts thermiques

- Très difficile à simuler dans les formations superficielles en raison de l'importance des processus de convection en d'advection agissant verticalement mais aussi latéralement



- Biskaborn, B.K. et al., 2019. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications* 10, 264. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>
- Boeckli, L., Brenning, A., Gruber, S., Noetzli, J., 2012. A statistical approach to modelling permafrost distribution in the European Alps or similar mountain ranges. *The Cryosphere* 6, 125–140. <https://doi.org/10.5194/tc-6-125-2012>
- Gruber, S., 2005. Mountain permafrost: transient spatial modelling, model verification and the use of remote sensing (Dissertation). Gruber, S. Mountain permafrost: transient spatial modelling, model verification and the use of remote sensing. 2005, University of Zurich, Faculty of Science. University of Zurich. <https://doi.org/10.5167/uzh-18100>
- Haberkorn, A., Wever, N., Hoelzle, M., Phillips, M., Kenner, R., Bavay, M., Lehning, M., 2017. Distributed snow and rock temperature modelling in steep rock walls using Alpine3D. *The Cryosphere* 11, 585–607. <https://doi.org/10.5194/tc-11-585-2017>
- Haeberli W. (1973) – Die Basis-Temperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 9, p. 221-227.
- Kneisel, C., Hauck, C., Fortier, R., Moorman, B., 2008. Advances in geophysical methods for permafrost investigations. *Permafrost and Periglacial Processes* 19, 157–178. <https://doi.org/10.1002/ppp.616>
- Magnin, F., Etzelmüller, B., Westermann, S., Isaksen, K., Hilger, P., Hermanns, R.L., 2019. Permafrost distribution in steep rock slopes in Norway: measurements, statistical modelling and implications for geomorphological processes. *Earth Surface Dynamics* 7, 1019–1040. <https://doi.org/10.5194/esurf-7-1019-2019>
- Magnin, F., Josnin, J.-Y., Ravel, L., Pergaud, J., Pohl, B., Deline, P., 2017. Modelling rock wall permafrost degradation in the Mont Blanc massif from the LIA to the end of the 21st century. *The Cryosphere* 11, 1813–1834. <https://doi.org/10.5194/tc-11-1813-2017>
- Mollaret, C., Hilbich, C., Pellet, C., Flores-Orozco, A., Delaloye, R., Hauck, C., 2019. Mountain permafrost degradation documented through a network of permanent electrical resistivity tomography sites. *The Cryosphere* 13, 2557–2578. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2557-2019>
- PERMOS, 2019. Permafrost in Switzerland, 2014/2015 to 2017/2018 (No. 16–19), Glaciological Report Permafrost. Commission of the Swiss Academy of Sciences.
- Strozzi, T., Caduff, R., Jones, N., Barboux, C., Delaloye, R., Bodin, X., Käab, A., Mätzler, E., Schrott, L., 2020. Monitoring Rock Glacier Kinematics with Satellite Synthetic Aperture Radar. *Remote Sensing* 12, 559. <https://doi.org/10.3390/rs12030559>