

LE PERGÉLISOL AU SUD DES ALPES SUISSES (TESSIN) : ÉTUDE DE SEPT GLACIERS ROCHEUX ET RELATIONS AVEC LE CLIMAT

Giaccone E. ^(1,2), Fratianni S. ^(2,3), Mari S. ⁽⁴⁾, Antognini M. ⁽⁵⁾,
Ambrosi C. ⁽⁶⁾, Scapozza C. ⁽⁶⁾

¹ Institut des Dynamiques de la Surface Terrestre (IDYST), Université de Lausanne, Géopolis, 1015 Lausanne, Suisse
[elisa.giaccone@unil.ch]

² Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino, via Valperga Caluso 35, 10125 Torino, Italie
[simona.fratianni@unito.it]

³ Centro di Ricerca sui Rischi Naturali in Ambiente Montano e Collinare (NatRisk), via Leonardo da Vinci 44, 10095 Grugliasco, Italie

⁴ Department of Geosciences – Geography, University of Fribourg, Chemin du Musée 4, 1700 Fribourg, Suisse [stefano.mari@unifr.ch]

⁵ Museo cantonale di storia naturale, Viale Carlo Cattaneo 4, CP5487, 6901 Lugano, Suisse [marco.antognini@ti.ch]

⁶ Institute of Earth Sciences (IST), University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland (SUPSI), Campus Trevano, 6952
Canobbio, Suisse [christian.ambrosi@supsi.ch ; cristian.scapozza@supsi.ch]

Introduction et objectifs

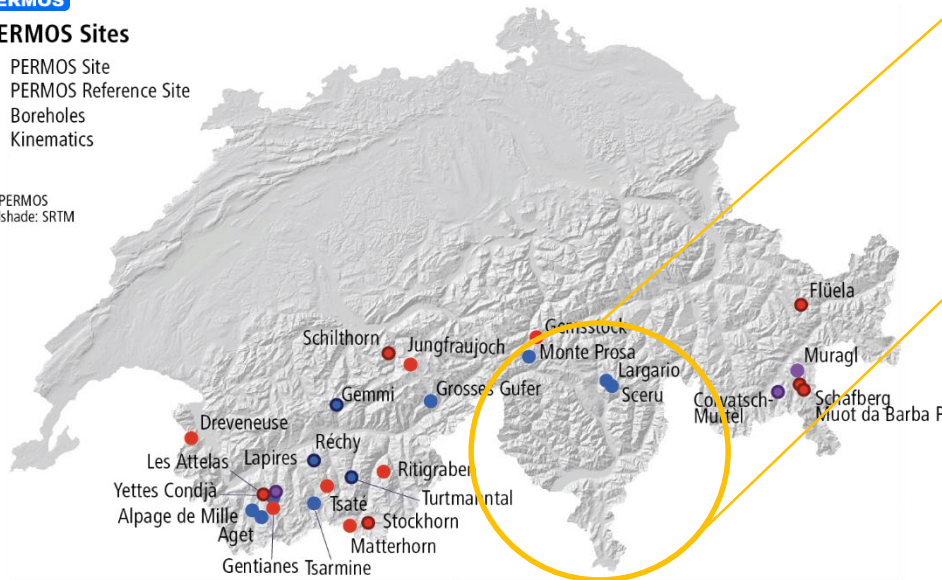
- Dans les Alpes, les températures de l'air sont en augmentation et les régimes des précipitations et de la neige sont en train de changer. Ces changements climatiques affectent particulièrement la cryosphère.
- L'étude des effets du changement climatique sur la dégradation du pergélisol est devenue de plus en plus importante (Harris *et al.*, 2009). L'instabilité des parois rocheuses, les variations de la vitesse des glaciers rocheux et les modifications des dépôts meubles sont les sujets les plus étudiés.



PERMOS Sites

- PERMOS Site
- PERMOS Reference Site
- Boreholes
- Kinematics

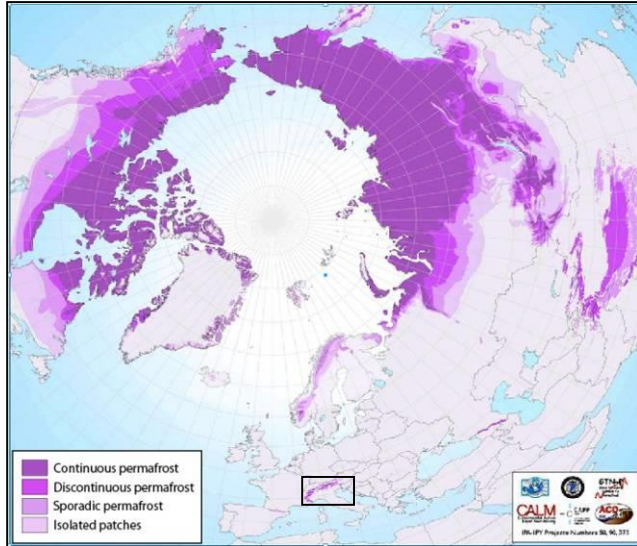
© PERMOS
Hillshade: SRTM



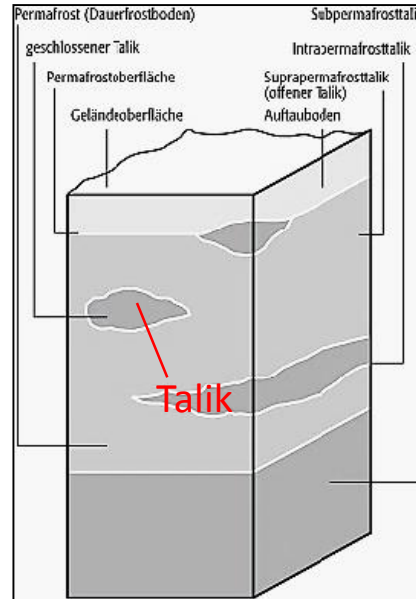
- Depuis le 2006, un important réseau de recherche a été mis en place pour étudier le pergélisol dans les Alpes Tessinoises avec l'objectif d'agrandir le réseau du monitoring suisse du pergélisol aussi au Sud des Alpes (PERMOS, 2013; Scapozza *et al.*, 2014).

- Le but de cette étude est de comprendre les relations entre les caractéristiques thermiques et cinématiques des glaciers rocheux du Sud des Alpes Suisses et le climat pour la période 2006-2015.

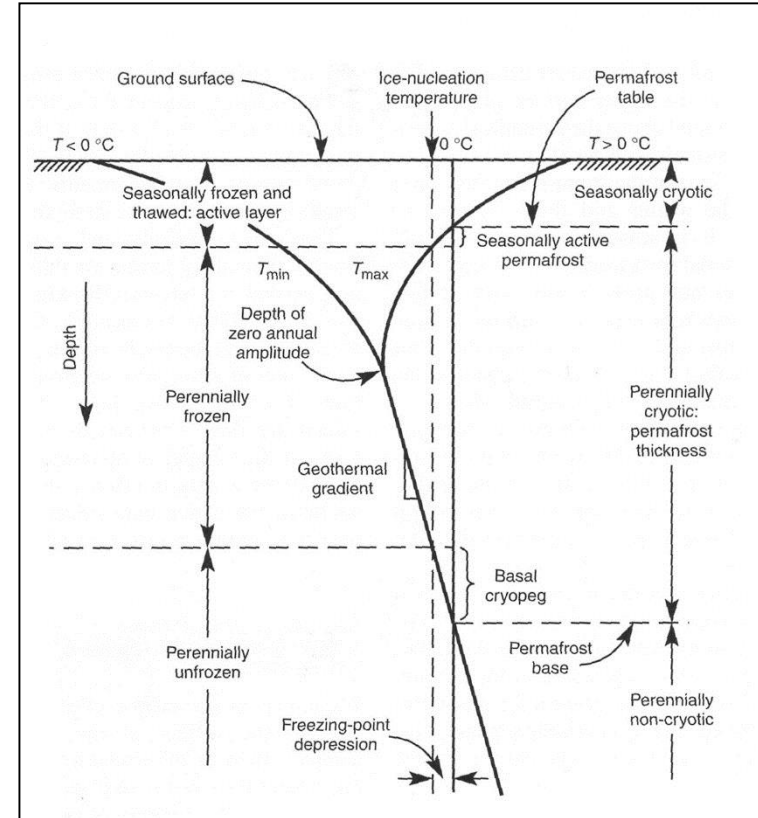
Pergélisol...



Distribution du pergélisol dans l'hémisphère septentrionale (www.ipa.arcticportal.org)



Section du terrain avec pergélisol et talik (www.geodz.com)



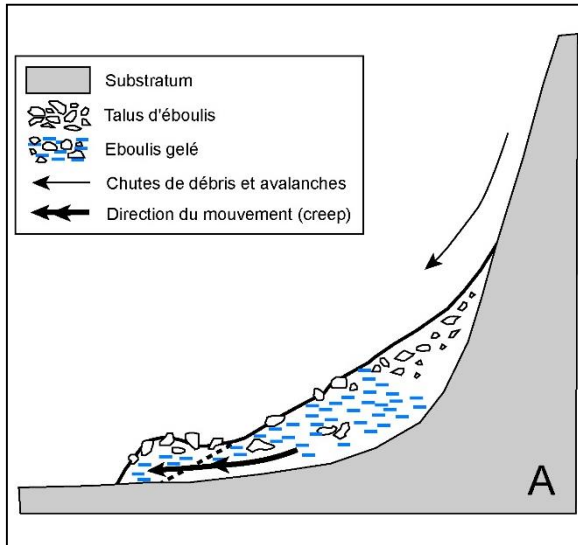
Régime thermique dans le pergélisol (Van Everdingen, 1998-2005)

Chaque sol qui reste au-dessous de 0°C pour plus de deux ans consécutifs (Brown & Pévé, 1973).

Il est affecté par le changement climatique en cours.

Ses altérations provoquent des impacts sur les équilibres naturels et les activités anthropiques.

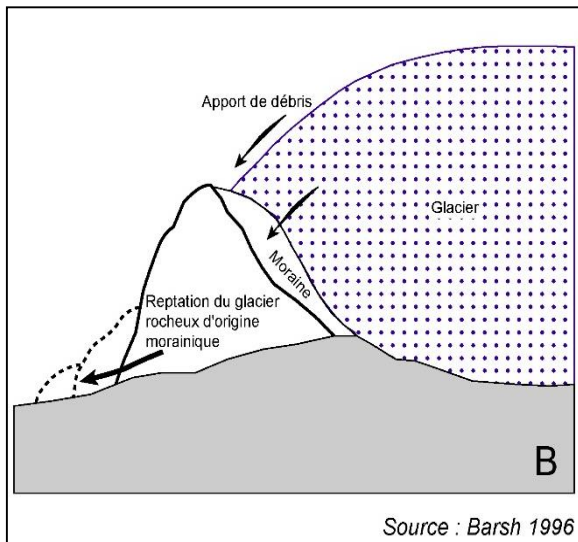
...et glaciers rocheux



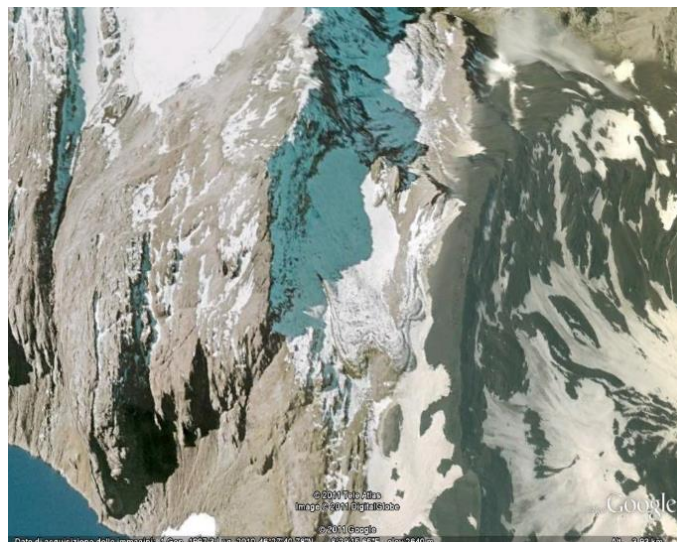
Ils sont les formes
cryotiques indicatrices
du pergélisol.

CLASSIFICATION SELON L'ORIGINE DES MATÉRIAUX

Typologie A: glacier
rocheux de pied de
versant. Ex: glacier
rocheux de Piancabella



Source : Barsh 1996



Typologie B: glacier
rocheux de débris
morainiques.
Ex: glacier rocheux de
Cristallina

...et glaciers rocheux

CLASSIFICATION SELON L'ACTIVITE

MAGST : température
moyenne annuelle de
la surface du sol

BTS : Bottom

Glacier rocheux actif

$MAGST \leq 0^{\circ}C$
 $BTS < -3^{\circ}C$

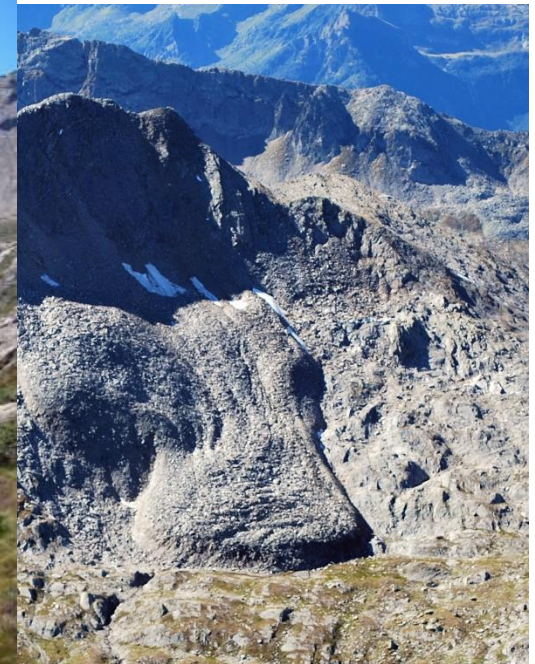
Glacier rocheux inactif

$MAGST > 0^{\circ}C$
 $BTS \leq -2^{\circ}C$

Glacier rocheux fossile

$MAGST > 0^{\circ}C$
 $BTS > -2^{\circ}C$

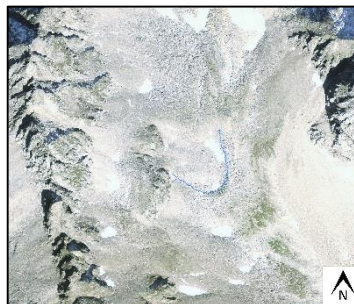
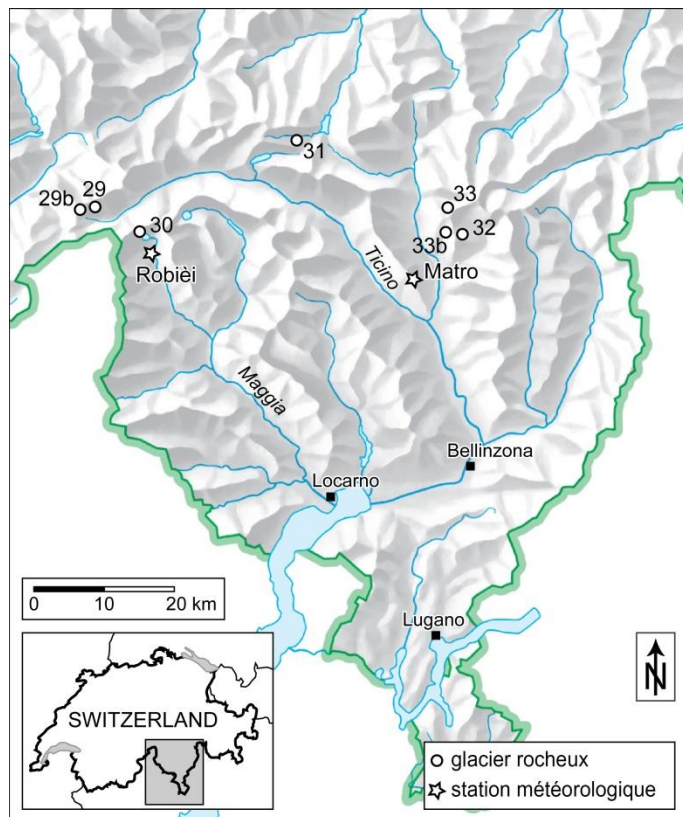
CA



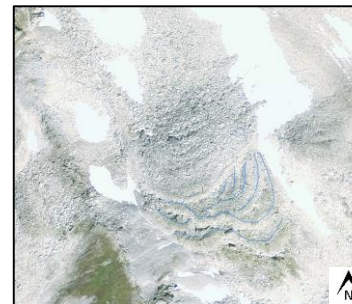
Source :
Ikeda & Matsuoka 2002

Profil transversal

Localisation des sept glaciers rocheux tessinois étudiés.



29 Pizzo Nero



29b Pizzo Gallina



30 Passo di Grandinagia



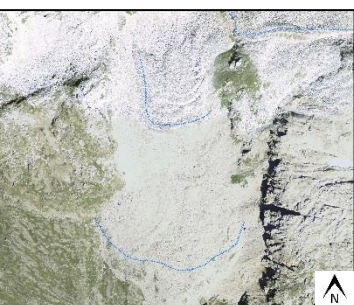
31 Ganoni di Schenadüi



32 Piancabella *



33 Stabbio di Largario *



33b Alpe Pièi

N°	Site	Altitude [m snm]	Ori.
29	Pizzo Nero	2600–2700	S
29b	Pizzo Gallina	2660–2760	SE
30	Passo di Grandinagia	2560–2800	NE
31	Ganoni di Schenadüi	2480–2640	N
32	Piancabella*	2440–2550	NE
33	Stabbio di Largario*	2240–2550	N
33b	Alpe Pièi	2340–2500	S

* Sites intégrés au réseau



Etude et instrumentation des glaciers rocheux

- Chaque glacier rocheux est étudié avec plusieurs capteurs thermiques de type UTL-3 (*Universal Temperature Logger*, Geotest AG), qui enregistrent les températures de la surface du sol (en anglais GSTM, *Ground Surface Temperature Monitoring*). La GSTM est monitorée toutes les deux heures avec une précision de $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Les capteurs ont été installés sur le terrain à une profondeur variable entre 10 et 50 cm selon l'état du sol.
- En outre, avec une fréquence annuelle ou pluriannuelle, une campagne de mesures DGPS (*Differential Global Positioning System*) est effectuée pour évaluer les vitesses horizontales de déplacement des glaciers rocheux (modèle GPS Leica SR530).

N°	Site	GSTM (N° logger)	DGPS (mesure)
29	Pizzo Nero	–	Chaque 5 an
29b	Pizzo Gallina	4	Annuelle
30	Passo di Grandinagia	4	Bi-annuelle
31	Ganoni di Schenadüi	4	Annuelle
32	Piancabella*	10	Annuelle
33	Stabbio di Largario*	4	Annuelle
33b	Alpe Pièi	–	Chaque 3 an



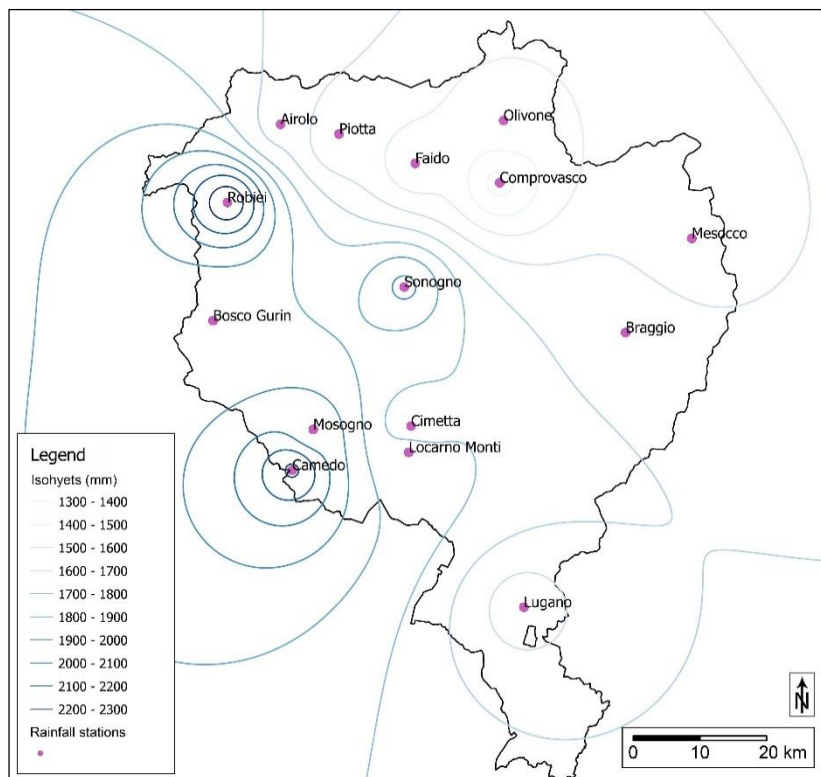
Analyse climatique

Station météorologique	Altitude [m snm]	Canton	T moyenne annuelle [°C]	Précipitation [mm/an]
Airolo	1139	TI	–	1681
Bosco Gurin	1505	TI	5,8	1917
Braggio	1315	GR	–	1662
Camedo	590	TI	–	2300
Cimetta	1661	TI	5,5	1749
Comprovasco	575	TI	10,8	1290
Faido	760	TI	–	1468
Locarno Monti	367	TI	12,9	1868
Lugano	273	TI	12,9	1564
Matro	2171	TI	2,4	–
Mesocco	830	GR	–	1520
Mosogno	760	TI	–	2087
Olivone	905	TI	–	1443
Piotta	990	TI	8,1	1478
Robièi	1896	TI	3,5	2426
Sonogno	925	TI	–	2087

- 16 stations automatiques et pluviométriques manuelles
- Altitude entre 273 et 2171 m s.n.m.
- Période de référence 1981-2015
- Données téléchargées depuis la base de données de MétéoSuisse via le portail IDAWEB
- Contrôle de qualité avec RClimDex (Zhang et Yang, 2004)
- Homogénéisation avec la procédure HOMER (*HOMogenization softwarE in R* – Venema et al., 2012)
- Calcule des tendances de température, précipitation et neige avec test de Mann-Kendall pour vérifier la significativité statistique
- Distribution spatiale des précipitations avec la méthode IDW (*Inverse Distance Weight*)

Analyse climatique

- La température moyenne annuelle de l'air augmente de $0,5^{\circ}\text{C}$ chaque 100 m d'altitude. Selon ce gradient, dans les Alpes Tessinoises, les isothermes de 0° , -1° et -2°C se situent respectivement à 2540, 2720 et 2900 m d'altitude.



- Les précipitations moyennes annuelles augmentent de 31 mm chaque 100 m d'altitude, mais de manière non significative. Les précipitations, plus que par l'altitude, sont influencées par l'orographie du territoire et par la circulation des masses d'air.
- Le résultat de l'interpolation avec la méthode IDW (Inverse Distance Weighting) souligne qu'une différence existe entre les Alpes Tessinoises Occidentales et Orientales. En fait, dans la partie occidentale, les moyennes de précipitations sont plus élevées par rapport à la partie orientale et septentrionale.

Analyse climatique

Station	TM	Tm	P	HS	HN
Airolo	-	-	-7.98±6.26	-0.11±0.12	-2.47±1.51
Bosco Gurin	0.07±0.03	0.08±0.03	-6.93±6.83	-0.13±0.22	-2.48±1.96
Braggio	-	-	-6.96±5.79	-	-
Camedo	-	-	-8.22±10.07	-	-
Cimetta	0.05±0.01	0.03±0.01	-2.96±6.85	-	-
Comprovasco	0.02±0.01	0.03±0.01	4.04±6.84	-	-
Faido	-	-	-1.19±5.7	-	-
Locarno	0.05±0.01	0.05±0.01	-0.73±6.91	-0.03±0.01	-0.37±0.5
Lugano	0.05±0.01	0.05±0.01	1.15±5.43	-0.01±0.01	-0.05±0.42
Matro	-0.06±0.03	-0.01±0.03	-	-	-
Mesocco	-	-	-4.82±5.37	-	-
Mosogno	-	-	-6.13±9.02	-	-
Olivone	-	-	-3.89±4.76	-	-
Piotta	0.03±0.01	0.02±0.01	-4.9±4.94	0.01±0.12	-0.14±1.54
Robièi	0.02±0.02	0.02±0.02	-2.16±13.66	-	-
Sonogno	-	-	6.62±11.42	-	-

TM: température maximale; Tm: température minimale; P: précipitation;
HS: neige au sol; HN: neige fraîche.

En gras, les valeurs significatives selon le test de Mann-Kendall.

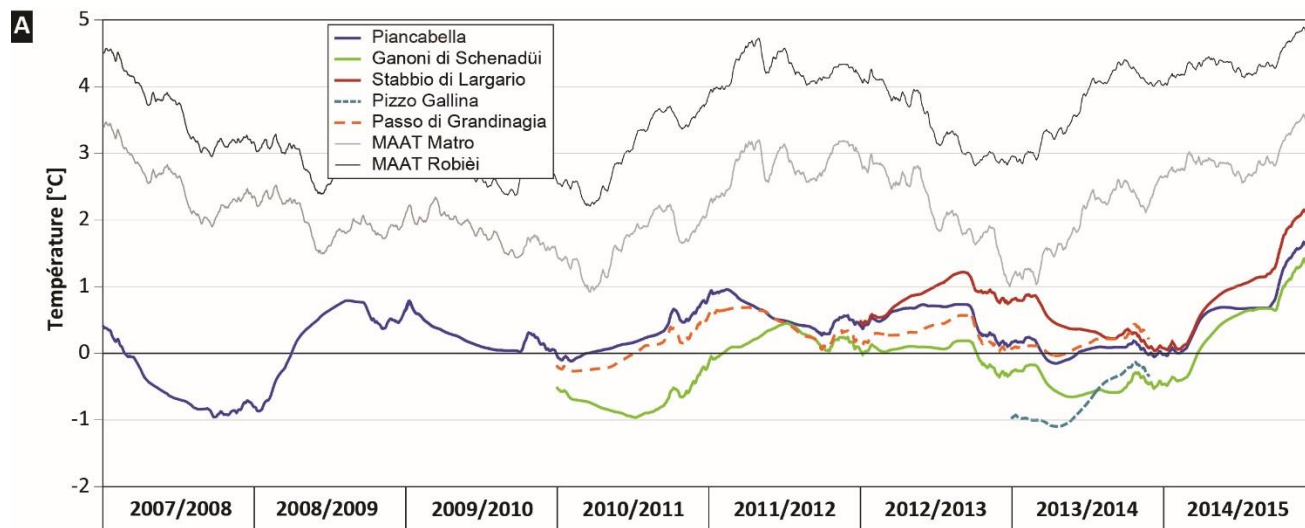
Les résultats du calcul des tendances climatiques montrent:

- une augmentation générale des températures moyennes annuelles, même si celles-ci n'évoluent pas de façon homogène sur le territoire;
- une diminution non significative des précipitations à cause de leur forte variabilité interannuelle;
- et une diminution non significative aussi pour la neige au sol et la neige fraîche, surtout aux moyennes altitudes.

Etude du pergélisol

Figure A.

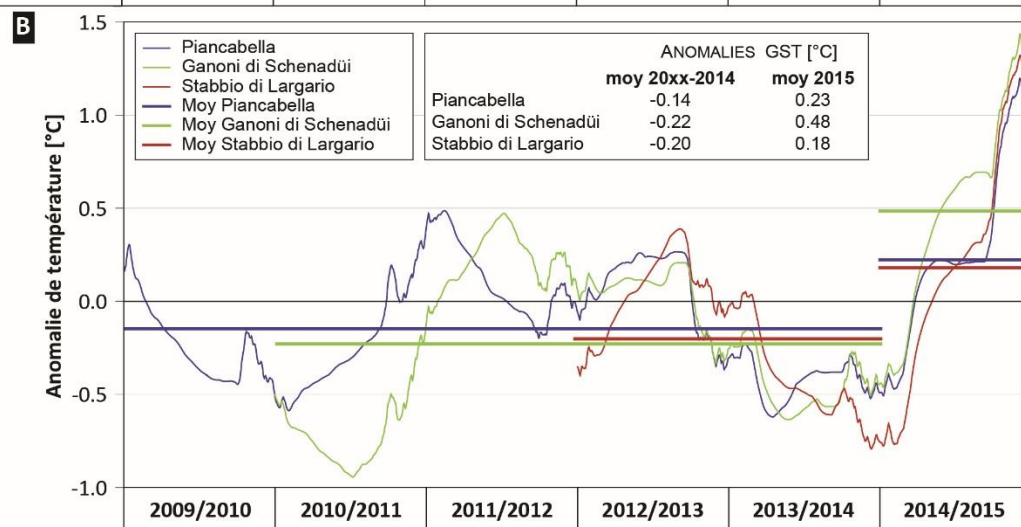
L'évolution des valeurs MAGST (*Mean Annual Ground Surface Temperature*), calculées avec une moyenne mobile sur 365 jours, montrent les tendances saisonnières du régime thermique du pergélisol. Les années sont calculées comme des années hydrologiques (octobre-septembre).



MAAT indique la température moyenne annuelle de l'air, obtenue avec une moyenne mobile sur 365 jours.

Figure B.

Focalisation sur trois glaciers rocheux et mise en évidence des anomalies positives de la dernière année hydrologique.



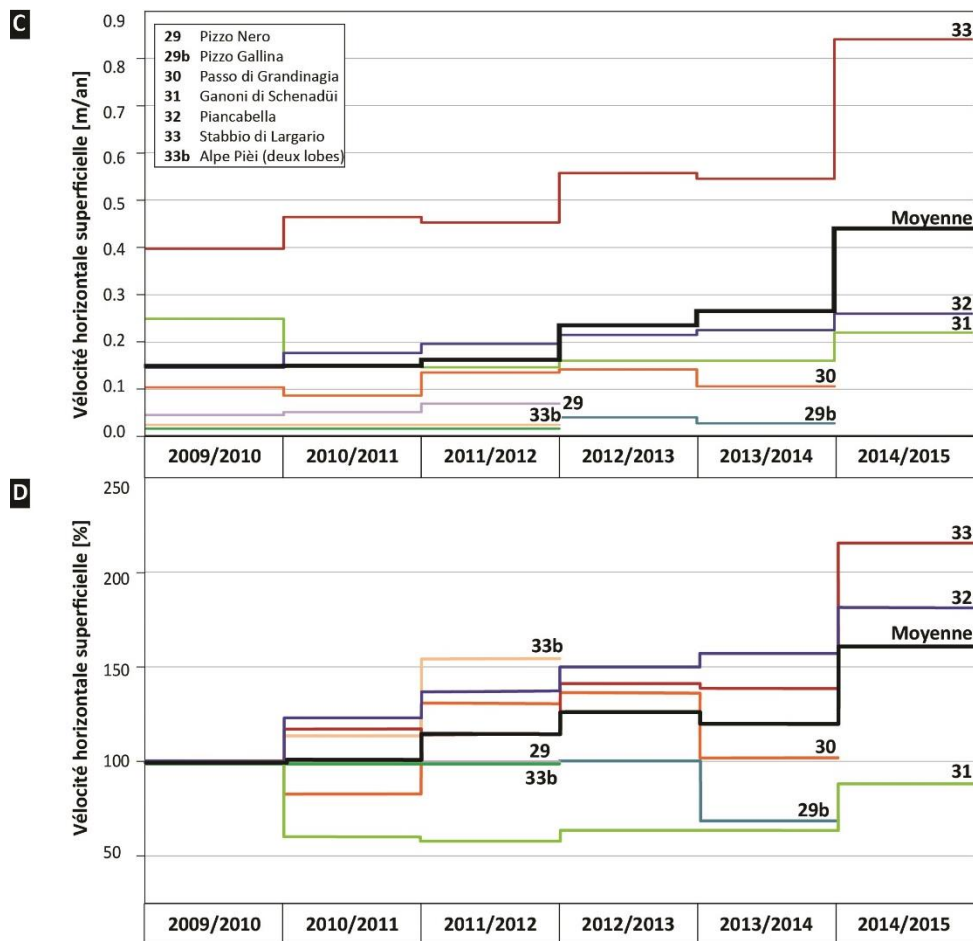
Etude du pergélisol

Figure C.

Evolution des vitesses horizontales superficielles par année. A partir du 2009, une accélération est présente, en moyenne, sur tous les glaciers rocheux.

Figure D.

Les déplacements des glaciers rocheux sont exprimés en pourcentage de variation de la vitesse de surface horizontale. Une augmentation générale des vitesses relatives est en cours depuis 2009; après un ralentissement pendant l'année hydrologique 2013-2014 la vitesse a à nouveau augmenté par la suite.



Conclusions

- Les mouvements des glaciers rocheux étudiés sont très liés aux variations de MAGST, avec un retard de quelque mois.
- En revanche, la MAGST est influencé pas seulement par la température de l'air mais aussi par la profondeur du manteaux neigeux et de sa durée.
- Notamment pendant la dernière année 2014-2015, la forte augmentation de MAGST, liée surtout à une augmentation des températures de l'air, a causé une accélération conséquente des vitesses horizontales des glaciers rocheux.
- En tenant compte que le comportement des glaciers rocheux tessinois est similaire à ce qui est observé dans le reste des Alpes suisses sur la même période (Scapozza *et al.*, 2014), cela nous indique un lien significatif entre l'augmentation de température, enregistrée dans les Alpes pendant les dernières décennies et confirmée pendant cette étude, et l'accélération des vitesses horizontales des glaciers rocheux, probablement induite par une augmentation de plasticité de la glace du pergélisol.

Merci de votre attention!