

## LE PERGELISOL AU SUD DES ALPES SUISSES (TESSIN) : ETUDE DE SEPT GLACIERS ROCHEUX ET RELATIONS AVEC LE CLIMAT

GIACCONE E.<sup>1,2</sup>, FRATIANNI S.<sup>2,3</sup>, MARI S.<sup>4</sup>, ANTOGNINI M.<sup>5</sup>, AMBROSI C.<sup>6</sup>, SCAPOZZA C.<sup>6</sup>

<sup>1</sup>*Institut des Dynamiques de la Surface Terrestre (IDYST), Université de Lausanne, Géopolis, 1015 Lausanne, Suisse, elisa.giaccone@gmail.com*

<sup>2</sup>*Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino, via Valperga Caluso 35, 10125 Torino, Italie, simona.fratianni@unito.it*

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

<sup>4</sup>*Department of Geosciences – Geography, University of Fribourg, Chemin du Musée 4, 1700 Fribourg, Suisse, stefano.mari@unifr.ch*

<sup>5</sup>*Museo cantonale di storia naturale, Viale Carlo Cattaneo 4, CP5487, 6901 Lugano, Suisse, marco.antognini@ti.ch*

<sup>6</sup>*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*

**Résumé** – Le but de ce travail est d'étudier l'évolution du pergélisol au Tessin (Suisse italienne) pour sept glaciers rocheux. Pour chacun, des mesures de la température du sol (GST, Ground Surface Temperature) et des vitesses de déplacement horizontales (mesurées au DGPS, Differential Global Positioning System) sont effectuées avec une fréquence annuelle ou pluriannuelle. En outre, une étude sur le climat du Tessin sur la période de référence 1981-2010 a été menée pour comprendre les dynamiques climatiques qui influencent la répartition et le comportement des glaciers rocheux.

**Mots-clés** : pergélisol, Tessin, température de la surface du sol, changement climatique.

**Abstract** – *The permafrost in Southern Swiss Alps (Ticino): the study of seven rock glaciers and relations with climate.* The aim of this work is to study the evolution of permafrost in Ticino (Italian Switzerland) in seven rock glaciers. For every rock glacier, the measurements of Ground Surface Temperature (GST) and of horizontal displacement velocities (with Differential Global Positioning System, DGPS) with annual or interannual frequency were performed. Furthermore, a study about Ticino climate (1981-2010 period) was carried out to understand the climate dynamics which affect the distribution and behavior of rock glaciers.

**Keywords**: permafrost, Ticino, ground surface temperature, climate change.

### Introduction

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 (Giaccone *et al.*, 2015). Ces changements climatiques affectent particulièrement la cryosphère, composée par les glaciers, le pergélisol et la neige pérenne et saisonnière, et les fragiles équilibres naturels des zones montagneuses. Pour cette raison, 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 (formes liées à la reptation d'un pergélisol sursaturé en glace ; par ex. Barsch, 1996) et les modifications des dépôts meubles sont les sujets les plus étudiés.

Au cours des dernières décennies, un suivi systématique de la température et des mouvements des glaciers rocheux actifs dans les Alpes Suisses a été étendu à la plupart des régions (PERMOS, 2013). Depuis 2006, les glaciers rocheux des Alpes Tessinoises sont également étudiés pour fournir des données sur l'évolution du pergélisol dans le contexte morphoclimatique sudalpin (Scapozza *et al.*, 2014a).

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

## 1. Méthodes

### 1.1. Analyse des séries climatiques

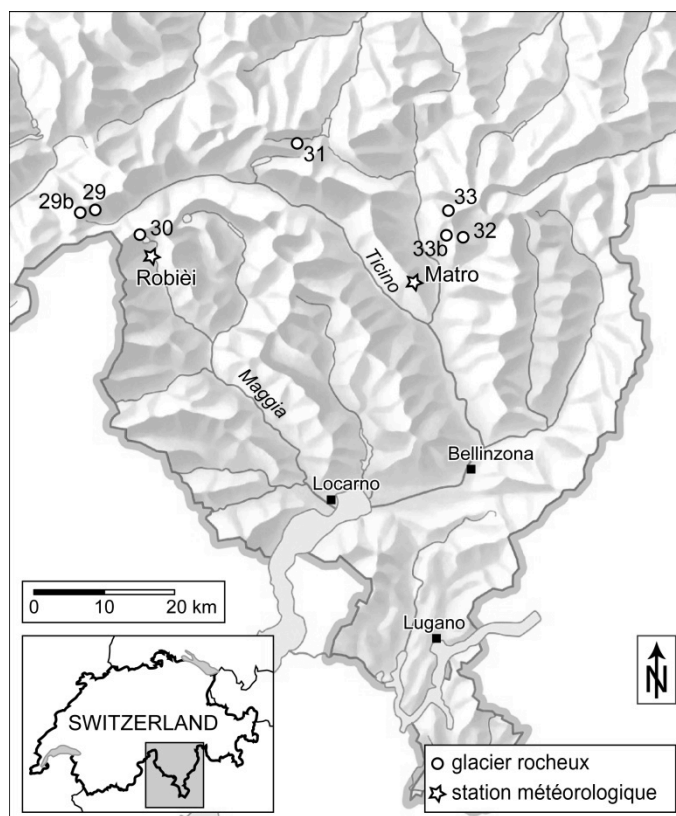
Les données de 16 stations automatiques et pluviométriques manuelles, situées dans les Cantons du Tessin et des Grisons, entre 273 et 2171 m d'altitude, ont été analysées pour l'actuelle période de référence (1981-2010) selon la *World Meteorological Organization* (WMO). Les données météorologiques ont été téléchargées depuis la base de données de l'Office fédérale de météorologie et climatologie MétéoSuisse via le portail IDAWEB [<https://gate.meteoswiss.ch/idaweb/login.do>].

Les données de température et de précipitation ont été contrôlées et analysées avec le logiciel RClimDex (Zhang et Yang, 2004) et homogénéisées avec la procédure HOMER (HOMogenization softwarE in R – Venema *et al.*, 2012), en éliminant les éventuelles erreurs non liées à des variations climatiques, pour obtenir un bilan climatique général de la région d'étude.

Les tendances de température et de précipitation ont été calculées en appliquant le test de Mann-Kendall pour vérifier leur significativité statistique ; la distribution spatiale des précipitations a été interpolée avec la méthode IDW (*Inverse Distance Weight*).

### 1.2. Étude et instrumentation des glaciers rocheux

Les sept glaciers rocheux actifs analysés sont situés dans le haut Tessin, entre 2240 et 2800 m d'altitude. Chacun d'entre eux est étudié avec plusieurs capteurs thermiques de type UTL-3 (*Universal Temperature Logger*, Geotest AG), qui enregistrent les températures du sol 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) (Fig. 1 et Tableau 1).



**Figure 1.** 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.

## 2. Résultats

### 2.1. Analyse climatique

La température moyenne annuelle de l'air est comprise entre un minimum de 2,3°C à Matro (2171 m) et un maximum de 12,5°C à Lugano (273 m). Elle augmente de 0,5°C chaque 100 m d'altitude (Tableau 2). 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.

**Tableau 1.** Caractéristiques des glaciers rocheux étudiés. Le N° fait référence à la classification nationale suisse de Delaloye *et al.* (2010). GSTM = *Ground Surface Temperature Monitoring* (monitoring de la température de la surface du sol). DGPS = *Differential Global Positioning System* (GPS différentiel). \* sites intégrés au réseau suisse de monitoring du pergélisol PERMOS.

N°	Site	Région	Altitude [m snm]	Ori.	GSTM (N° logger)	DGPS (mesure)
29	Pizzo Nero	Val Bedretto	2600–2700	S	–	5 fois par an
29b	Pizzo Gallina	Val Bedretto	2660–2760	SE	4	Annuelle
30	Passo di Grandinagia	Val Bavona	2560–2800	NE	4	Bi-annuelle
31	Ganoni di Schenadüi	Val Cadlimo	2480–2640	N	4	Annuelle
32	Piancabella*	Val Malvaglia	2440–2550	NE	10	Annuelle
33	Stabbio di Largarìo*	Val Soi	2240–2550	N	4	Annuelle
33b	Alpe Pièi	Valle di Blenio	2340–2500	S	–	3 fois par an

**Tableau 2.** Liste et caractéristiques des stations météorologiques utilisées. Coordonnées exprimées selon le système métrique suisse CH1903.

Station météorologique	Altitude [m snm]	Coord. X	Coord. Y	Canton	Température moy annuelle [°C]	Précipitation [mm/an]
Airolò	1139	688,914	153,412	TI	–	1674
Bosco Gurin	1505	680,871	130,014	TI	5,4	1922
Braggio	1315	729,974	128,585	GR	–	1671
Camedo	590	690,295	112,205	TI	–	2311
Cimetta	1661	704,434	117,466	TI	5,4	1713
Comprovasco	575	714,990	146,442	TI	10,4	1273
Faido	760	704,948	148,750	TI	–	1426
Locarno Monti	367	704,166	114,342	TI	12,3	1862
Lugano	273	717,870	095,877	TI	12,5	1557
Matro	2171	714,262	140,930	TI	2,3	–
Mesocco	830	737,853	139,817	GR	–	1513
Mosogno	760	692,796	117,060	TI	–	2049
Olivone	905	715,445	153,863	TI	–	1435
Piotta	990	695,881	152,253	TI	7,8	1474
Robièi	1896	682,583	144,088	TI	3,3	2363
Sonogno	925	703,635	134,037	TI	–	2018

Les précipitations moyennes annuelles sont comprises entre un minimum de 1273 mm à Comprovasco (575 m) et un maximum de 2363 mm à Robièi (1896 m). Elles 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 souligne qu'une différence existe entre les Alpes Tessinois Occidentales et Orientales (Fig. 2). En fait, dans la partie occidentale, les moyennes de précipitations sont plus élevées par rapport à la partie orientale et septentrionale.

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, et une diminution non significative des précipitations à cause de leur forte variabilité interannuelle (Tableau 3).

## 2.2. Étude du pergélisol

Les mesures GST sont disponibles depuis 2006 sur le glacier rocheux de Piancabella. 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 (Figure 3).



**Figure 2.** Distribution des précipitations au Tessin (valeurs moyennes annuelles).

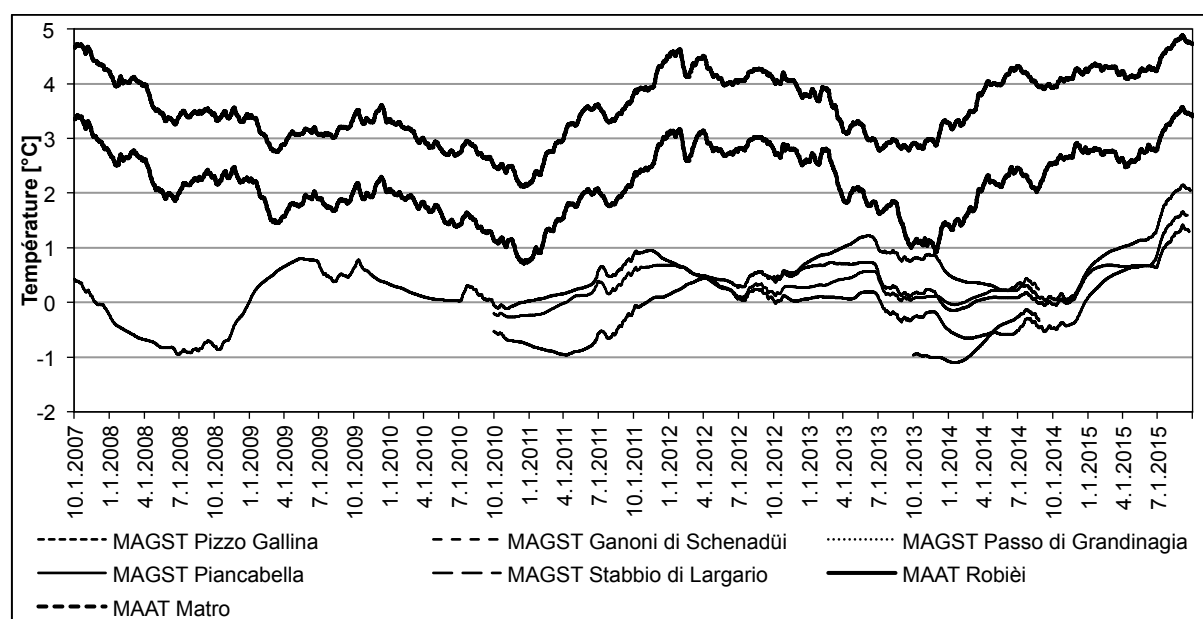
**Tableau 3.** Valeurs des tendances pour la température moyenne (T. moy) et les précipitations (P) sur la période 1981-2010. En gras, les valeurs significatives selon le test de Mann-Kendall.

Station	T. moy (°C)	P (mm)
Airolo	-	-14,61
Bosco Gurin	<b>0,07</b>	-10,08
Braggio	-	-9,31
Camedo	-	-11,00
Cimetta	0,02	-7,13
Comprovasco	0,00	3,14
Faido	-	-2,88
Locarno	<b>0,04</b>	-2,72
Lugano	<b>0,04</b>	0,43
Matro	<b>-0,08</b>	-
Mesocco	-	-9,28
Mosogno	-	-10,38
Olivone	-	-8,01
Piotta	<b>0,03</b>	-9,42
Robièi	-0,01	-13,93
Sonogno	-	8,73

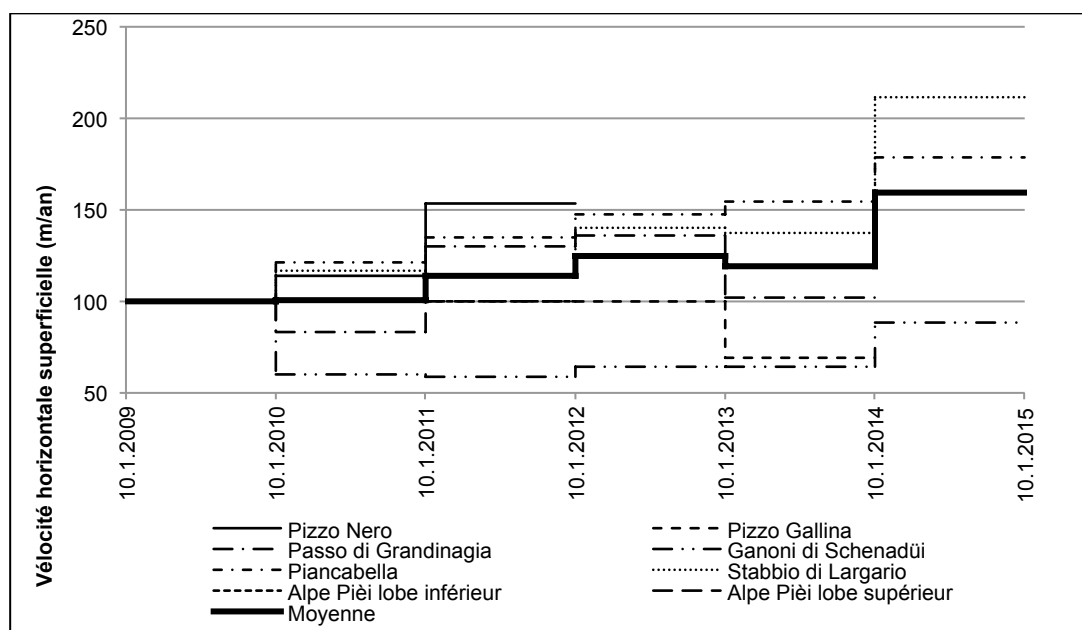
Les séries de données (Scapozza *et al.*, 2014a) montrent un refroidissement pendant l'hiver 2007-2008, un réchauffement pendant l'hiver 2008-2009 et le printemps 2009, dû à l'enneigement précoce et à l'été chaud. L'hiver 2009-2010 a été plus froid et a permis une stabilisation de MAGST jusqu'au printemps 2011, pour se réchauffer par la suite en 2011. Après l'hiver froid de 2012, les valeurs de MAGST ont augmenté dans le reste de l'année.

L'hiver 2012-2013 a été caractérisé par des températures froides dans les Alpes et par une faible couverture neigeuse au Tessin. Les MAGST ont donc diminué pendant l'année 2013. Après un réchauffement pendant l'hiver 2013-2014, le long de l'année 2014, les conditions climatiques froides et pluvieuses ont causé une diminution de MAGST, qui a augmenté seulement au début 2015. Enfin, l'été exceptionnellement chaud en 2015 a causé une forte augmentation de la température du sol (Scapozza *et al.*, 2016).

Les déplacements des glaciers rocheux étudiés sont exprimés en pourcentage de variation de la vitesse de surface horizontale (Fig. 4). En observant la moyenne, une augmentation générale des vitesses relatives est en cours depuis 2009, même si pendant l'année hydrologique 2013-2014, la vitesse a ralenti à cause des conditions climatiques plus froides, et elle a à nouveau augmenté par la suite.



**Figure 3.** Evolution des températures moyennes annuelles de la surface du sol (MAGST) entre octobre 2007 et septembre 2015 dans les glaciers rocheux tessinois. MAAT indique la température moyenne annuelle de l'air, obtenue avec une moyenne mobile sur 365 jours.



**Figure 4.** Vélocities horizontales relatives des glaciers rocheux des Alpes Tessinoises sur la période 2009-2015.

Par la confrontation entre l'évolution de la température du sol et la variation des vitesses, les mouvements des glaciers rocheux étudiés sont très liés aux variations de MAGST, avec un retard de quelque mois. 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.

## Conclusion

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.*, 2014b), 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.

**Remerciements :** Cette recherche a été financée avec une bourse de la Fondation Gorla (Asti, IT) liée au projet « *Studio degli effetti del cambiamento climatico in ambiente alpino in alta quota* », à l'intérieur de l'appel « *Bando dei Talenti della Società Civile 2015* ».

## Bibliographie

- Barsch D., 1996. *Rockglaciers: Indicators for the present and former geocology in high mountain environments*. Berlin, Springer, 331 p.
- Delaloye R., Lambiel C., Roer I., 2010. Overview of rock glacier kinematics research in the Swiss Alps. Seasonal rhythm, interannual variations and trends over several decades. *Geographica Helvetica*, **65**, 135-145.
- Giaccone E., Colombo N., Acquaotta F., Paro L., Fratianni S., 2015. Climate variations in a high altitude Alpine basin and their effects on a glacial environment (Italian Western Alps). *Atmosfera*, **28**, 117-128.
- Harris H., Arenson L., Christiansen H. H., Etzelmüller B., Frauenfelder R., Gruber S., Haeberli W., Hauck C., Hoelzle M., Humlum O., Isaksen K., Kääb A., Kern-Lütschg M.A., Lehning M., Matsuoka N., Murton J., Nötzli J., Phillips M., Ross N., Seppälä M., Springman S. M., Vonder Mühl D., 2009. Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews*, **92**, 117-171.
- PERMOS, 2013. Permafrost in Switzerland 2008/2009 and 2009/2010. *Glaciological Report Permafrost 10/11*. Bern, Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences.
- Scapozza C., Mari S., Antognini M., Lepori V., Ambrosi C., 2014a. Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2011/2012 e 2012/2013). Rapporto No. 2 del Gruppo Permafrost Ticino. *Bollettino della Società ticinese di Scienze naturali*, **102**, 59-69.
- Scapozza C., Lambiel C., Bozzini C., Mari S., Conedera M., 2014b. Assessing the rock glacier kinematics on three different timescales: a case study from the southern Swiss Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, **39**, 2056-2069.
- Scapozza C., Giaccone E., Mari S., Antognini M., Fratianni S., Ambrosi C., 2016. Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2013/2014 e 2014/2015). *Bollettino della Società ticinese di Scienze naturali*, sous presse.
- Venema, V. K. C., Mestre, O., Aguilar, E., Auer, I., Guijarro, J. A., Domonkos, P., ... Brandsma, T. (2012). Benchmarking homogenization algorithms for monthly data. *Clim. Past*, **8**(1), 89-115. <http://doi.org/10.5194/cp-8-89-2012>
- Zhang X. et Yang F., 2004. *RclimDex (1.0). User manual*. Climate Research Branch Environment Canada Downsview, Ontario, Canada, 23 p.