

## EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA DÉGRADATION DU PERGÉLISOL DANS LE N-O DE L'ITALIE : RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

FRATIANNI S. <sup>(1,2)</sup>, COLOMBO N. <sup>(1)</sup>, GIACCONE E. <sup>(1)</sup>, ACQUAOTTA F. <sup>(1)</sup>,  
GARZENA D. <sup>(1)</sup>, GODONE D. <sup>(2,3)</sup>, FREPPAZ M. <sup>(2,3)</sup>, GIARDINO M. <sup>(1,2)</sup>

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

(2) Centro di Ricerca sui Rischi Naturali in Ambiente Montano e Collinare (NatRisk), via Leonardo da Vinci 44 - 10095 Grugliasco, Italie [michele.freppaz@unito.it; marco.giardino@unito.it]

(3) Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari (DISAFA), ULF Chimica agraria e pedologia, largo Paolo Braccini 2 - 10095 Grugliasco, Italie

**Résumé** – Ce travail a pour but d'expliquer les premiers résultats obtenus au cours de l'étude des effets du changement climatique dans l'environnement périglaciaire du Col d'Olen, dans les Alpes nord occidentales italiennes. Il s'agit d'une analyse préliminaire de données climatologiques issues de stations météorologiques de haute altitude et d'un suivi de la température de la surface du sol d'un glacier rocheux (indicateur du pergélisol).

**Mots-clés** : changement climatique, températures, pergélisol, glaciers rocheux, Alpes.

**Abstract** – *Climate change effects on permafrost degradation in NW Italy.* The aim of this work is to explain the first results obtained on climate change effects in periglacial environment of the Col d'Olen, in NW Italian Alps. Here, climate data analysis of high altitude meteorological stations and ground surface temperature survey of a rock glacier, a reliable permafrost indicator, are being conducted.

**Keywords**: climate change, temperatures, permafrost, rock glacier, Alps.

### Introduction

Les zones de haute altitude dans les Alpes sont caractérisées par des environnements périglaciaires, qui sont très sensibles aux effets du changement climatique. L'évolution climatique récente du XX<sup>ème</sup> et XIX<sup>ème</sup> siècle a eu des effets sur ces zones, ce qui inclut des impacts sur les activités humaines.

L'environnement périglaciaire, se distingue par l'action du gel (*frost action*) et les processus cryogéniques et morphogénétiques (Péwé, 1969) et par le pergélisol, défini comme un sol ou une roche dont la température demeure au-dessous de 0°C pendant plus de deux années consécutives (Brown et Péwé, 1973), est affecté par le réchauffement, surtout depuis le dernière siècle (Haeberli, 1996; Avian et Kellerer-Pirklbauer, 2012). L'étude des effets du changement climatique sur la dégradation du pergélisol est devenue de plus en plus importante (Gruber et Haeberli, 2007; Harris *et al.*, 2009), même si dans les Alpes ces recherches sont encore peu nombreuses. L'instabilité des parois rocheuses, les variations de la vitesse des glaciers rocheux (formes indicatrices de pergélisol – Barsch, 1996) et les modifications des dépôts non consolidés des débris sont les sujets les plus étudiés.

Le but de cette étude est d'évaluer les effets du changement climatique sur la dégradation du pergélisol dans un site de haute altitude dans le N-O de l'Italie, le Col d'Olen, situé entre la Vallée d'Aoste et le Piémont, où un glacier rocheux est présent. Une recherche approfondie sur le climat de la zone et une campagne intensive de relevés sur les caractéristiques thermiques superficielles du glacier rocheux sont actuellement en cours.

### 1. Zone d'étude

Le Col d'Olen lie les régions italiennes de la Vallée d'Aoste et du Piémont et son altitude est de 2.881 m. Sur le côté de la Vallée, il y a le glacier rocheux où l'étude se déroule. Son front se trouve à 2.710 m d'altitude environ, ses dimensions sont 380 m de longueur et 165 m de largeur. Il couvre une surface de 42.000 m<sup>2</sup>. Un petit lac (60 x 40 m) est situé à sa base (Fig. 1).

Près du Col d'Olen, au Piémont, l'Institut Mosso est présent à 2.900 m d'altitude. Il est un centre d'avant-garde de la recherche scientifique et il fait partie du réseau LTER (*Long Term Ecological Research*) depuis 2009. À côté de cette construction, une station météorologique automatique a été installée par le Comando Truppe Alpine du Service Meteomont. En fonction depuis 2004, elle enregistre les données des principaux paramètres climatiques à un pas de temps horaire.

## 2. Méthodes

### 2.1. Analyses climatiques

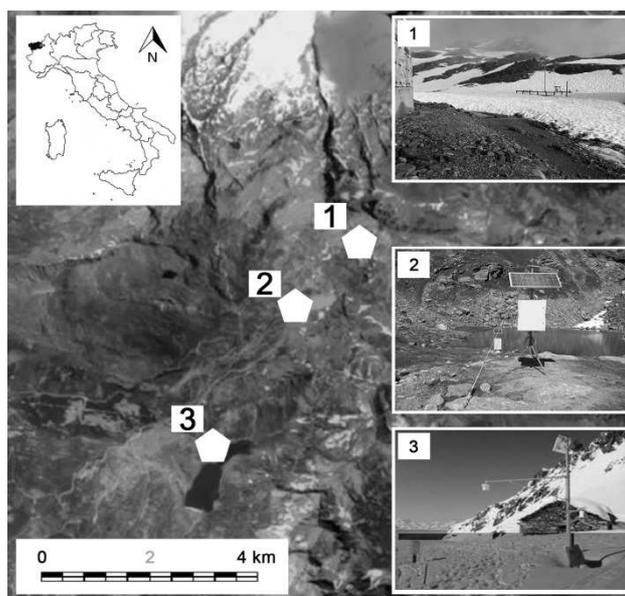
Les données de la station météorologique du Col d'Olen ont été récupérées et réunies sur une base de trois heures (période octobre 2005 – octobre 2014). Puisque le calcul des tendances n'est pas possible à cause de la brève durée de la série, après un contrôle de qualité avec le logiciel RCLimDex (Zhang et Yang, 2007), on a calculé les valeurs moyennes de température, FD0 *Frost Days* (jours de gel avec température minimale inférieure à 0°C), ID0 *Ice Days* (jours sans dégel avec température maximale inférieure à 0°C), l'épaisseur de neige au sol (HS) et la quantité de neige fraîche (HN).

À côté de cette station, les données de température et les précipitations neigeuses (HS et HN) de la station manuelle Gressoney-La-Trinité Lago Gabiet (2.379 m d'altitude ; période 1928-2013) ont été utilisées afin d'avoir des informations sur la variabilité climatique présente dans la zone d'étude. Les données journalières ont été homogénéisées avec la méthode SPLIDHOM (Mestre *et al.*, 2011 ; Venema *et al.*, 2012 ; Acquotta *et al.*, 2014) et successivement leurs tendances ont été calculées avec RCLimDex, qui a permis aussi le calcul des indices climatiques (Tab. 1).

En plus, une station météo portable a été installée pendant le mois de juillet 2014 à la base du glacier rocheux pour avoir des données plus ponctuelles. Elle mesure la température de l'air et l'humidité (Point 2 en Fig. 1). Leurs données ne sont pas encore téléchargées.

### 2.2. Analyses sur le glacier rocheux

Pour examiner l'état thermique de la surface du glacier rocheux, 70 capteurs thermiques (Maxim iButton® DS1922L) ont été installés à la fin du mois de juillet 2014 sur le terrain à une profondeur variant entre 5 et 10 cm selon l'état du sol (Ishikawa, 2003). Les instruments ont été programmés pour enregistrer la température à tous les trois heures, avec une précision de  $\pm 0,125^\circ\text{C}$  près de  $0^\circ\text{C}$  déterminée par Gubler *et al.* (2011).

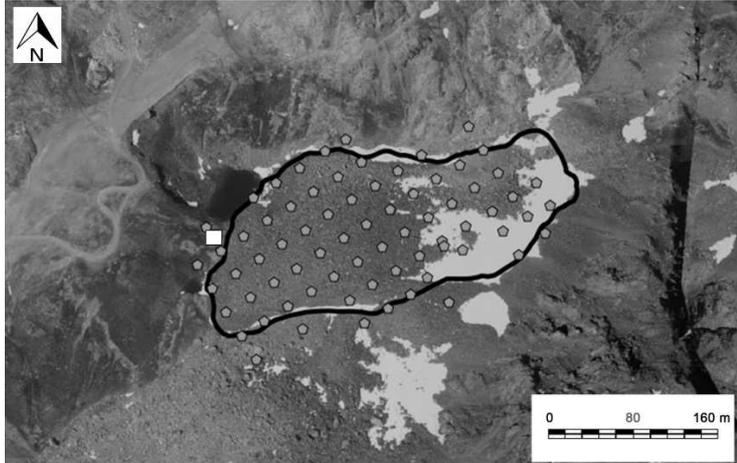


**Figure 1.** Localisation de la zone d'étude. 1) Institut Mosso et station météorologique du Service Meteomont; 2) station météorologique installée pendant l'étude à côté du glacier rocheux ; 3) station météorologique du Lac Gabiet (2 371 m d'altitude).

**Tableau 1.** Liste des indices climatiques.

Indices Climatiques	
<b>TX90P</b>	Journées chaudes
<b>TX10P</b>	Journées froides
<b>WSDI</b>	Indicateur des vagues de chaleur
<b>TN90P</b>	Nuits chaudes
<b>TN10P</b>	Nuits froides
<b>CDSI</b>	Indicateur des vagues de gel

La position de chaque instrument a été enregistrée avec la méthode GNSS (Global Navigation Satellite System) en phase différentielle. Les capteurs sont localisés sur les mailles d'une grille (Fig. 2). Cela nous permet d'assurer un suivi plus serré et une meilleure compréhension du corps gelé, avec des données des températures de surface mesurées chaque trois heures. Au début de l'automne 2014, un téléchargement préliminaire de 27 capteurs a été effectué. Les capteurs X1a et X10a sont localisés sur des sites sans pergélisol mais près des marges du glacier rocheux, tandis que les 25 autres instruments sont placés dans une zone où il y a présence de pergélisol sur le corps gelé et dans les alentours.



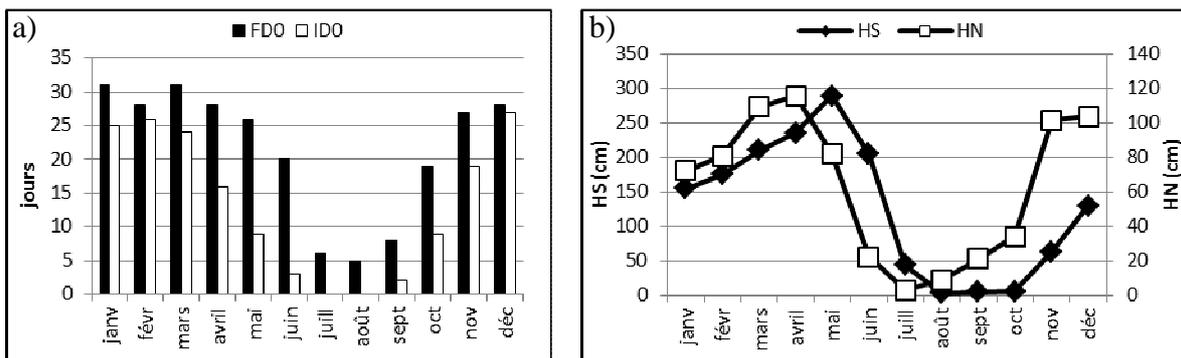
**Figure 2.** Localisation des datalogger sur le glacier rocheux (ligne noir). Le carré blanc est la station météorologique portable.

### 3. Résultats

#### 3.1. Analyses climatiques

Pour la station Col d'Olen, la température moyenne annuelle de l'air est de  $-2,4^{\circ}\text{C}$ . Le mois le plus froid est février avec  $-9^{\circ}\text{C}$  en moyenne, mais la température minimale absolue a été enregistrée en décembre ( $-23,2^{\circ}\text{C}$  le 28/12/2005) ; le mois le plus chaud est août avec  $5^{\circ}\text{C}$  en moyenne (valeur maximale absolue  $14,8^{\circ}\text{C}$  le 19/08/2012). Les jours de gel (FD0) par mois sont présentes pendant toute l'année surtout durant les mois d'hiver; dans les mois d'été ils descendent jusqu'à 5 jours/mois. Toutefois les jours sans dégel (IDO) sont présents toute l'année sauf durant les mois de juillet et d'août (Fig. 3a).

L'épaisseur moyenne annuelle de neige au sol (HS) est 127 cm; elle atteint le maximum dans le mois de mai avec 290 cm en moyenne. La quantité moyenne de neige fraîche (HN) est de 758 cm; le mois le plus enneigé est avril (116 cm en moyenne) (Fig. 3b).



**Figure 3.** a) graphique jours de gel (FD0) et jours sans dégel (IDO); b) graphique sur la distribution mensuelle de la neige au sol (HS) et de la neige fraîche (HN).

Les tendances des paramètres climatiques de la station Gressoney-La-Trinité Lago Gabiet sont illustrées dans le tableau 2. Les températures maximales (TX) indiquent une augmentation statistiquement significative (seuil de signification de 95%) de  $0,015^{\circ}\text{C}/\text{an}$ . L'accroissement de la température maximale est observable aussi par les indices climatiques des journées chaudes (TX90P, augmentation de  $0,047$  jours/an) et journées froides (TX10P,

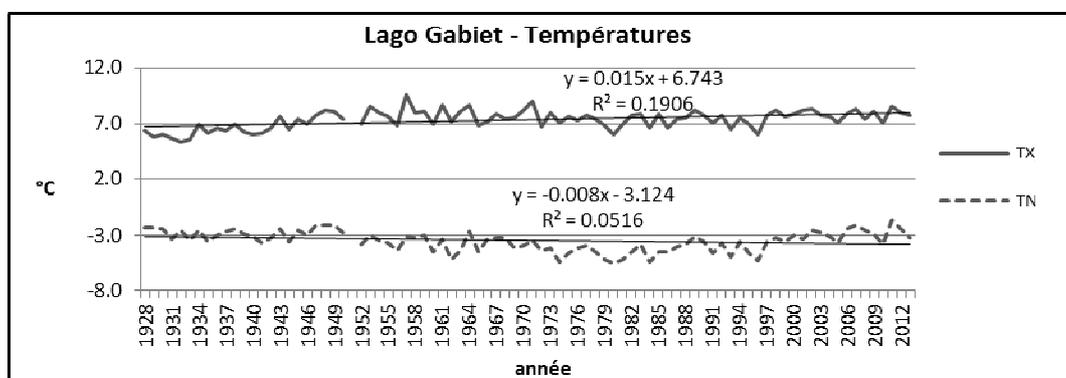
diminution significative de -0,089 jours/an). La tendance pour la température minimale (TN) est faible et non significative mais à partir de la fin des années 1970 elle connaît un accroissement. Cette tendance est bien visible dans les graphiques des nuits chaudes (TN90P) et froides (TN10P), dont les tendances ne sont pas significatives (Fig. 5). Les tendances des vagues de chaleur (WSDI) et des vagues de froid (CSDI) sont non significatives statistiquement et elles semblent être stables depuis les années 1970.

L'épaisseur de neige au sol (HS) a connu une légère diminution mais elle est non significative (-0,009 cm/an); la quantité de neige fraîche (HN) montre une tendance négative plus forte mais également non significative statistiquement (-1,750 cm/an).

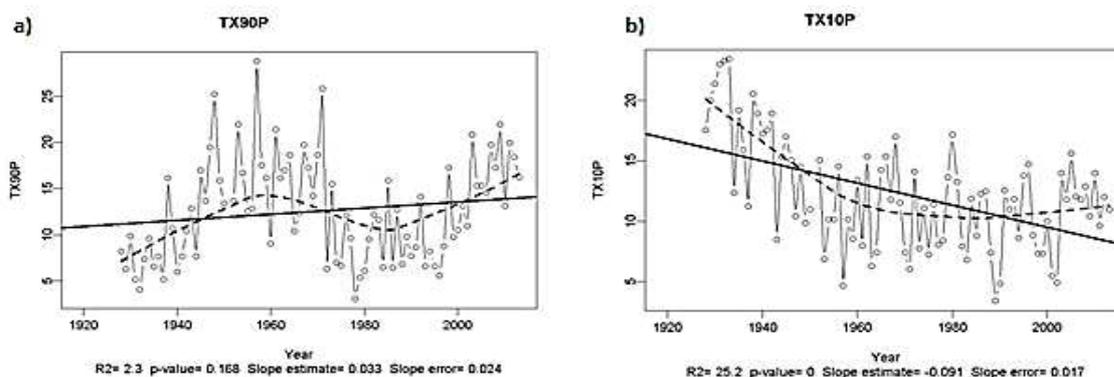
**Tableau 2.** Tendances des paramètres climatiques de la station Lago Gabiet (période 1928-2013).

\* significatif à un taux de 95%.

Paramètres	Tendances
TX	0,015*
TX90P	0,047
TX10P	-0,089*
WSDI	0,002
TN	-0,008
TN90P	-0,027
TN10P	0,037
CSDI	0
HS	-0,009
HN	-1,75



**Figure 4.** Tendances des températures maximales et minimales du Lago Gabiet (période 1928-2013).

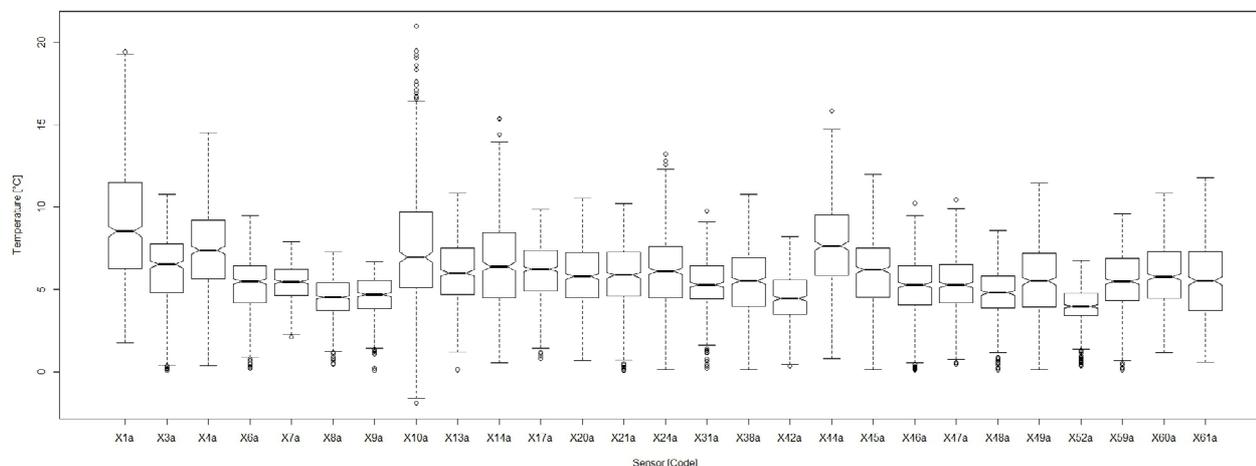


**Figure 5.** a) tendance des journées chaudes; b) tendance des journées froides.

### 3.2. Analyses sur le glacier rocheux

Les résultats préliminaires (Fig. 6), couvrant la période du 1<sup>er</sup> août au 9 octobre 2014, montrent que la GST moyenne mesurée par les capteurs X1a et X10A est légèrement plus élevée que la moyenne GST enregistrée par les autres capteurs. Ces données pourraient démontrer que, même pour une période relativement courte de mesure, un été, quelques différences thermiques peuvent être mises en évidence entre les zones de pergélisol et celles sans pergélisol. Cela pourrait également être issu de l'effet de refroidissement par l'évaporation pendant l'été, dans un champs de blocs (felsenmeer) qui est caractérisé par une

porosité élevée offrant une bonne ventilation et favorisant des échanges de chaleur spécifique dans ces dépôts grossiers. En outre, ces mesures peuvent aussi représenter la grande variabilité des températures de la surface du sol à une échelle très fine, sur des distances de moins de 30 m dans une zone de transition entre le pergélisol à des zones sans pergélisol, compte tenu des différentes caractéristiques du sol.



**Figure 6.** Boxplots des données téléchargées des capteurs thermiques. Les capteurs X1a et X10a ont une moyenne de température plus élevée par rapport aux autres.

## Conclusion

Les résultats de l'étude climatique confirme la présence d'un environnement de pergélisol, puisque la température moyenne annuelle est inférieure à 0°C (Guglielmin, 2004), ainsi qu'un réchauffement climatique en cours depuis les années 1970, suivi par une diminution de la précipitation neigeuse (Terzago *et al.*, 2013). L'analyse préliminaire des caractéristiques thermiques du glacier rocheux nous permet de faire seulement, pour l'instant, de formuler des hypothèses sur la différence de température entre les où il y a présence de pergélisol par rapport à celles libres de pergélisol. Ces données représentent les résultats préliminaires d'une recherche expérimentale qui va poursuivre au cours des deux prochaines années. Des suivis plus précis et détaillés seront réalisés prochainement avec des échantillonnages et des évaluations futures, qui devraient nous permettre d'estimer de manière plus précise les effets du changement climatique sur le pergélisol.

## Remerciements

Cette recherche a été financée par le projet italien MIUR (PRIN 2010-11): « Réponse de la dynamique des systèmes morphoclimatiques aux changements globaux et les risques géomorphologiques connexes » et par le projet Nextsnow. Remerciements particuliers aux Service Meteomont, Arpa Piemonte et Arpa Valle d'Aoste pour la fourniture de données météorologiques.

## Références bibliographiques

- Acquaotta, F., Fratianni, S., Garzena, D., 2014 : Temperature change in the North-Western Italian Alps from 1961 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology*, doi: 10.1007/s00704-014-1316-7.
- Avian M., Kellerer-Pirklbauer, 2012 : Modelling of potential permafrost distribution during the Younger Dryas, the Little Ice Age and at present in the Reisseck Mountains, Hohe Tauern Range, Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences*, **105**, 140-153.

- Barsch D., 1996 : *Rockglaciers: Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments*. Springer, Berlin, 331 p.
- Brown R.J.E., Péwé T.L., 1973 : *Distribution of permafrost in North America and its relationship to the environment: a review*. Permafrost, North American Cont. To II Int. Conf. On Permafrost, Yakustsk, 13-28 July 1973, 71-100.
- Gruber S., Haeberli W., 2007 : Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research*, **112**, F02S18, doi:10.1029/2006JF000547
- Gubler S., Fiddes J., Keller M., Gruber S., 2011 : Scale dependent measurement and analysis of ground surface temperature variability in alpine terrain. *The Cryosphere*, **5**, 431-443.
- Guglielmin M., 2004 : Observation on permafrost ground thermal regimes from Antarctica and the Italian Alps, and their relevance to global climate change. *Global and Planetary Change*, **40**, 159-167.
- Haeberli W., 1996 : On the morphodynamics of ice/debris-transport systems in cold mountain areas. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, **50**, 3-9.
- 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.J., Phillips M., Ross N., Seppälä M., Springman S.M., Vonder Mühll D., 2009 : Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews*, **92**, 117-171.
- Ishikawa M., 2003: Thermal regimes at the snow-ground interface and their implications for permafrost investigation. *Geomorphology*, **52**, 105-120.
- Péwé T.L., 1969 : The periglacial environment. In Péwé, T.L. (Editor), *The periglacial environment*. McGill-Queen's University Press, Montreal, 1-9.
- Terzago, S., Fratianni, S., and Cremonini, R., 2013 : Winter precipitation in Western Italian Alps (1926-2010): trends and connections with the North Atlantic/Arctic Oscillation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **119**, 125-136.
- Venema V.K.C., Mestre O., Aguilar E., Auer I., Guijarro J.A., Domonkos P., Vertacnik G., Szentimrey T., Stèpànek P., Zahradnicek P., Viarre J., Müller-Westermeier G., Lakatos M., Williams C.N., Menne M.J., Lindau R., Rasol D., Rustemeier E., Kolokythas K., Marinova T., Andresen L., Acquafredda F., Fratianni S., Cheval S., Klancar M., Brunetti M., Gruber C., Prohom Duran M., Likso T., Esteban P., Brandsma T., 2012 : Benchmarking homogenization algorithms for monthly data. *Clim. Past.*, **8**, 89-115.
- Zhang X., Yang F., 2007 : *RclimDex (1.0). User manual*. Climate Research Branch Environment Canada Downsview, Ontario, Canada, 23 p.