IRIS AperTO

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO

AperTO - Archivio Istituzionale Open Access dell'Università di Torino

ETUDE CLIMATOLOGIQUE DE L'ENNEIGEMENT DANS LE NORD DU PIEMONT (ITALIE) DANS LE CONTEXTE DU PROJET INTERREG STRADA «STRATEGIES D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES POUR LA GESTION DES RISQUES NATURELS»: PREMIERS RESULTATS

This is the author's manuscript

Original Citation:

Availability:

This version is available http://hdl.handle.net/2318/131663 since

Publisher:

Stamperia Romana Srl

Terms of use:

Open Access

Anyone can freely access the full text of works made available as "Open Access". Works made available under a Creative Commons license can be used according to the terms and conditions of said license. Use of all other works requires consent of the right holder (author or publisher) if not exempted from copyright protection by the applicable law.

(Article begins on next page)

06 October 2026

ETUDE CLIMATOLOGIQUE DE L'ENNEIGEMENT DANS LE NORD DU PIEMONT (ITALIE) DANS LE CONTEXTE DU PROJET INTERREG '*STRATEGIES D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES POUR LA GESTION DES RISQUES NATURELS (STRADA)*' : PREMIERS RESULTATS

CORDOLA M.[1], FRATIANNI S.[2], CANEVAROLO N.[2], BARBERO S.[3], ACQUAOTTA F.[2], TERZAGO S.[2]

[1] *Regione Piemonte, Settore Protezione Civile e Sistema Anti-incendi Boschivi, C.so Marche, 79 - 10146, Torino, Italie.* marco.cordola@regione.piemonte.it
[2] *Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Torino, via Valperga Caluso 35 - 10125, Torino, Italie.* simona.fratianni@unito.it
[3] *Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale (ARPA) del Piemonte, Via Pio VII, 9 - 10134, Torino, Italie.* s.barbero@arpa.piemonte.it

Résumé : *Dans cette étude, nous présentons les premiers résultats relatifs à une des actions prévues par le projet stratégique STRADA. Il s'agit de l'analyse des variations nivométriques et thermométriques dans la Vallée d'Ossola (Nord du Piémont) et en particulier pour la station de Alpe Cavalli (1500 m) qui présente une série de donnés longue et complète (1932-2009). Cette série était disponible jusqu'à présent seulement sur papier ; nous avons effectué le recouvrement et la digitalisation des données climatiques journalières, conservées dans les archives du Bureau Hydrographique du Bassin du Po de Milan. Sur cette station, nous avons entrepris une recherche historique, le contrôle de qualité et l'homogénéisation des données, qui a permis d'effectuer l'analyse climatique complète, avec la détermination des tendances et de leur significativité statistique. Après l'extension de l'étude à différentes stations du Piémont, il sera possible d'évaluer des corrélations entre les variations climatiques et les conditions d'enneigement favorables au déclenchement d'avalanches.*

Mots-clés : *température, neige, changement climatique, avalanches, Piémont.*

Abstract : ***Climatological study of snow in northern Piedmont (Italy) in the context of the Interreg project "Strategies of adaptation to climate change for the management of natural hazards (STRADA)": first results.*** *In this study we will present the first results of an activity of the strategic project STRADA. This is the analysis of variations in snow depth and temperature in Ossola Valley (Northern Piedmont) and in particular for the Alpe Cavalli station (1500 m) that presents a long and complete series (1932 to 2009). This series was available until now, only on paper: we made the recovery and digitization of daily climatic data kept in the archives of the Po Hydrographic Basin in Milan. On this station we undertook historical research, quality control and data homogenization, which allowed a complete climate analysis, with the identification of trends and their statistical significance. After extending the study to many stations in the Piedmont, we will try to assess the possible correlation between changes in climate and snow conditions favourable for triggering avalanches.*

Keywords : *temperature, snow, climate changes, avalanches, Piedmont.*

Introduction

La caractérisation du changement climatique dans les Alpes en relation avec le risque d'avalanche est une des activités de recherche conduites par la Région Piémont avec des partenaires publiques italiens et suisses dans le contexte de déroulement du projet stratégique « *STRADA : STRAtégies d'ADAptation aux changements climatiques pour la gestion des risques naturels* », en vertu du Programme opérationnel Interrégional de coopération transfrontalière Interreg Italie-Suisse 2007-2013. Le but du projet est l'étude des avalanches de petites et moyennes dimensions, en relation avec les problèmes techniques qu'elles posent à ceux qui s'occupent de l'aménagement du risque d'avalanche, surtout sur les routes et dans les domaines skiables. Le Département des Sciences de la Terre de l'Université de Turin a été chargé par l'Agence Régional pour la Protection de l'Environnement (ARPA Piemonte) de l'analyse des variations nivométriques et thermométriques dans la Vallée d'Ossola, par le recouvrement et la digitalisation de longues séries de données climatiques journalières, à partir des premières années du 20ème siècle, disponibles dans les archives du Bureau Hydrographique du Bassin du Po de Turin et Milan.

Dans cette étude, nous présentons les premiers résultats obtenus sur l'élaboration de données nivométéorologiques de la station de Alpe Cavalli où a été effectuée l'analyse climatique complète, avec la détermination des tendances et de leur significativité statistique. Dans une deuxième étape, en étendant l'étude à l'ensemble du Piémont, il sera possible d'évaluer des corrélations entre les variations climatiques et les conditions d'enneigement favorables au déclenchement d'avalanches.

1. Zone d'étude et données

L'Ossola est un ensemble de vallées dans la province de Verbano-Cusio-Ossola, située à l'extrémité nord du Piémont, qui confine à l'Ouest, au Nord et à l'Est avec la Suisse et au Sud avec la Valsesia. Le territoire de la vallée de l'Ossola correspond au bassin de la rivière Toce et est divisé en sept vallées, y compris la vallée Antrona, dans les Alpes Pennines (figure 1).

Figure 1 : Contexte géographique de la vallée Antrona : à gauche, localisation à l'échelle du Piémont ; à droite, vue satellitaire de la vallée Antrona (source : Google Maps modifié).

L'étude de la variabilité climatique dans la haute vallée Antrona a été réalisée à partir des données de la station de l'Alpe Cavalli (1500 m), située dans le village de l'Alpe Cheggio (46°05' / 08°07'). La station a été installée en 1928 suite à la construction d'un barrage par la société Edison. Il s'agit d'une station nivométéorologique manuelle, avec un thermomètre à maximum et à minimum, un pluviographe, une barre graduée fixe pour mesurer la hauteur du manteau neigeux et une tablette de bois pour la quantité de neige fraîche.

Figure 2 : A gauche : station de Alpe Cavalli située près de la maison des opérateurs du barrage ; en centre : le pluviographe à bascule, situé sur le côté Sud ; à droite : le poste climatologique, situé sur le côté Nord.

2. Méthodologie

Les données analysées étaient disponibles seulement sur des fiches inédites, conservées dans les archives du Bureau Hydrographique du Bassin du Po de Milan. Les séries des données journalières ont été récupérées et digitalisées : les paramètres considérés concernent la température, la hauteur de précipitation, la hauteur de la neige au sol et de la neige fraîche. Les valeurs journalières couvrent une période de 77 années, de 1932 à 2008. Tout d'abord, nous avons évalué la cohérence de la série, en calculant le pourcentage de données par mois, saison et année. Les seules données inférieures à 80% (Sneyers, 1990), et donc invalides, sont celles présentes en mars 1946 pour les températures et en juillet, août et septembre 1944 pour la neige fraîche.

L'étape suivante du travail a consisté dans le contrôle de qualité des données journalières, exécuté par le logiciel RClimdex (Zhang et Yang, 2004). Le logiciel a vérifié les erreurs "pas raisonnables" (par exemple, les valeurs de la température journalière maximale inférieure ou égale à celles de la température minimale et les données de précipitations liquides négatives) et les "*outliers*" (valeurs de température qui sont éloignées de la moyenne de ± 3 écarts-types).

L'homogénéité des séries a été vérifiée avec le logiciel AnClim (Stèpànek, 2005), par l'application du test en *t* de Student (Wang *et al*., 2007) : après la détermination des inhomogénéités a été appliqué la méthode d'homogénéisation SPLIDHOM (SPLIne Daily HOMogenization) (Mestre *et al*., 2009). Cette méthode, basée sur une régression non linéaire, effectue une correction journalière des données, qui se base sur une série de référence sélectionnée, pour chaque période hétérogènes, avec les séries des stations météorologiques limitrophes. La sélection a été basée sur le coefficient de corrélation en préférant, pour chaque période, la série limitrophe qui a la meilleure corrélation avec la série candidate. La technique d'homogénéisation a été appliquée aux données journalières de température maximale et minimale, mais pas aux données de précipitation pour lesquelles n'ont pas encore été mises au point des méthodes qui ne modifient pas radicalement le comportement réel de la variable.

Les données homogénéisées ont été agrégées pour obtenir les paramètres mensuels : nous avons calculé les valeurs moyennes de toute la période considérée (1932-2008) et sur la période trentenaire (1971-2000) comme défini par la WMO (2007). Pour définir les caractéristiques climatiques de la zone d'étude, nous mettons en relation la température moyenne mensuelle et la précipitation grâce à un climogramme accompagnés par la grille de Péguy (Péguy, 1970) qui indique le degré d'aridité. Afin d'obtenir les tendances principales à l'échelle annuelle, nous analysons le développement de toutes les variables climatiques disponibles (température et précipitations solides et liquides, jours de pluie et jours de neige), en définissant les tendances existantes et en évaluant si les résultats sont statistiquement significatifs, avec le test de Mann-Kendall (Sneyers 1990, 1992).

3. Résultats

De l'élaboration des données climatiques, nous obtenons donc les paramètres suivants (tableau 1). L'analyse climatique des paramètres thermométriques montre que les températures moyennes mensuelles sont inférieures à 0°C en janvier, février et décembre. Juillet est le mois pendant lequel les températures sont les plus élevées (TM = 20,4°C et Tm = 11°C), tandis que janvier, par contre, est le mois le plus froid (TM = 1,9°C Tm = -5,9°C). L'augmentation de température au printemps est plus lente que la diminution de l'automne, cela est lié à la permanence de la neige au sol qui est présente jusqu'en mai. Les épisodes de gel ne sont pas limités uniquement à la saison d'hiver, mais aussi aux mois de mars, avril, octobre et novembre. Les amplitudes sont faibles et restent constantes tout le long de l'année.

Les valeurs de précipitations liquides montrent un régime des précipitations de type subalpin (Mori, 1969), caractérisé par un minimum principal en hiver (170 mm), un minimum secondaire en été (373 mm), un maximum principal en automne (465 mm) et secondaire en printemps (429 mm). L'intensité moyenne des précipitations varie de 9 mm/jour en hiver à 18 mm/jour en automne. Les mois les moins pluvieux sont janvier et février (51 et 50 mm) et par contre, le mois le plus pluvieux (193 mm) est mai suivi d'octobre (181 mm): ces deux mois, ensemble, représentent la période durant laquelle tombe 26% du total des précipitations annuelles.

Tableau 1 : Principaux paramètres climatiques calculés pour Alpe Cavalli pendant toute la période d'étude et également sur la période trentenaire 1971-2000.

STATION ALPE CAVALLI																				
	PERIODE 1932-2008										PERIODE 1971-2000									
	TM	Tm	Jg	Jsd	P	Jp	HS	HSM	HN	Jn	TM	Tm	Jg	Jsd	P	Jp	HS	HSM	HN	Jn
JANVIER	1,9	-5,9	29	10	51	6	61	93	67	5	1,8	-5,2	29	9	59	6	56	93	79	5
FÉVRIER	3,1	-5,6	26	8	50	6	73	104	62	5	2,2	-5,5	26	9	50	6	75	107	70	5
MARS	6,1	-3,1	23	4	89	8	71	110	63	5	4,8	-3,0	23	4	96	8	74	118	73	4
AVRIL	8,8	0,0	13	2	147	10	43	80	47	4	7,0	-0,6	14	0	149	10	51	94	60	4
MAI	12,8	4,2	3	0	193	13	8	25	7	2	11,6	3,9	1	0	193	14	10	29	7	1
JUIN	17,3	8,2	2	0	150	11	0	0	0	0	15,9	7,8	0	0	146	11	0	0	0	0
JUILLET	20,4	11,0	0	0	94	9	0	0	0	0	19,5	10,7	0	0	99	9	0	0	0	0
AOUT	19,6	10,8	1	0	129	10	0	0	0	0	18,9	10,9	0	0	126	11	0	0	0	0
SEPTEMBRE	15,1	7,9	1	0	147	9	0	0	0	0	14,8	7,7	0	0	158	8	0	1	1	0
OCTOBRE	10,1	4,0	5	2	181	9	1	7	8	2	10,1	3,8	3	0	217	9	1	6	7	1
NOVEMBRE	5	-0,3	15	3	137	8	13	39	49	5	5,0	-0,6	15	3	97	8	10	34	43	3
DÉCEMBRE	2,9	-4,2	26	7	69	7	38	70	66	6	2,9	-3,9	26	7	61	6	30	63	60	5

TM = Température maximum (°C), Tm = Température minimum (°C), Jg = Jours de gel (Tm≤0°C), Jsd = Jours sans décongélation (TM≤0°C), P = Précipitations (mm), Jp = Jours de pluie (Pj≥1mm), HS = Epaisseur de la neige au sol (cm), HSM = Epaisseur maximum de la neige au sol (cm), Hn = Hauteur cumulée mensuelle de la neige au sol (cm), Jn = Jours neigeux (Hn≥1 cm).

Le régime nivométrique est à maximum étalé (Besancenot, 1990), avec une précipitation neigeuse environ équivalente durant les mois de décembre, janvier, février et mars. La couverture neigeuse au sol est assurée pendant toute la saison – de novembre à mai – avec une épaisseur du manteau neigeux qui oscille entre 8 cm de mai à 73 cm de février. La même analyse a été réalisée sur une période trentenaire 1971-2000 (OMM, 2007) et les résultats sont comparables à ceux de toute la période d'observation.

La synthèse climatique montre comme la haute vallée d'Antrona est caractérisée par un climat froid et tempéré, avec des précipitations abondantes, qui rendent très humide les mois de septembre à juin et humide juillet et août ; donc il n'y a pas de situations de sécheresse (figure 3).

Les tendances climatiques des différents paramètres sont indiquées dans le tableau 2. La tendance de la température a changé en 1978, année pendant laquelle il y a un changement majeur dans la valeur moyenne de la série. Les températures maximum et minimum révèlent une diminution au cours de la période comprise entre 1932 et 1977, respectivement égale à -0,03 ± 0,01 °C/an et -0,02 ± 0,01 °C/an. Depuis 1978, il y a eu une inversion significative de la tendance de 0,05 ± 0,01 °C/an pour les températures maximales et 0,03 ± 0,01 °C/an pour les minimales.

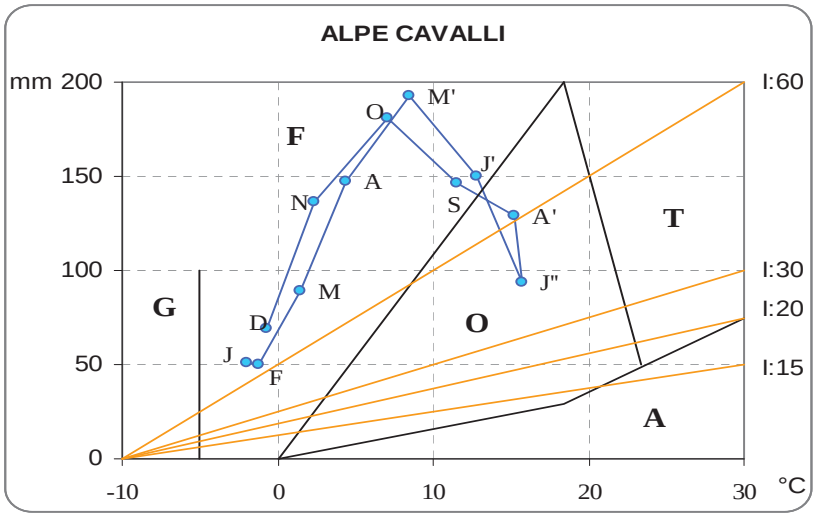

Figure 4 : Climogramme - Les quadrants identifie cinq champs marqués avec des lettres indiquant les mois froids (F), secs (A), glacés (G), chauds (T) et tempérés (O). Les bissectrices représentent les conditions de la sécheresse : de très humide (I> 60) à sec (I <15). J (Janvier), F (Février), M (Mars), A (Avril), M' (Mai), J' (Juin), J'' (Juillet), A' (Août), S (Septembre), O (Octobre), N (novembre), D (Décembre).

Les précipitations liquides et solides ne montrent pas une tendance claire à cause d'une forte variabilité interannuelle de ces paramètres. Pour la hauteur de neige au sol, l'analyse montre une tendance significative négative égale à -0,35 ± 0,1 cm/an.

Tableau 2 : Tendances des paramètres climatiques étudiés.

Paramètres	Période	Droite de régression	Err. a	Sign 5%	Moyenne	Ecart type
TM	1932-1977	y=11,31-0,03*x	0,01	*	10,6 °C	0,9
TM	1978-2008	y=8,85+0,05*x	0,01	*	9,7°C	0,8
Tm	1932-1977	y=2,64 -0,02*x	0,01	*	2,2 °C	0,7
Tm	1978-2008	y=1,82+0,03*x	0,01	*	2,3°C	0,6
P	1932-2008	y=1436,3+0,24*x	1,84		1436 mm	357
Jp	1932-2008	y=108,52-0,02*x	0,07		108	13
Hn	1932-2008	y=386,07-0,65*x	0,81		361 cm	159
Jn	1932-2008	y=33,07-0,10*x	0,04	*	30	8
Hs	1932-2008	y=57,24-0,35*x	0,10	*	44 cm	27

TM = Température maximum (°C), Tm = Température minimum (°C), P = Précipitations (mm), Jp = Jours de pluie, Hn = Hauteur cumulée mensuelle de la neige au sol (cm), Jn = Jours neigeux, Hs = Epaisseur de la neige au sol (cm). Err. a = erreur du paramètre a dans l'équation de la droite de régression; Sign 5% = niveau de confiance de 5% du test de Mann-Kendall, égal à 95% (* = tendance statistiquement significative).

Conclusion

Nous avons présenté les premiers résultats relatifs à une activité au sein du projet stratégique Interreg «STRADA : STRAtégies d'ADAptation aux changements climatiques pour la gestion des risques naturels», qui a pour but d'effectuer l'analyse des variations nivométriques et thermométriques dans la Vallée d'Ossola, par le recouvrement et la digitalisation de longues séries de données climatiques journalières. Dans ce travail est reportée la série d'Alpe Cavalli (1932-2009) où on a entrepris une recherche historique, le contrôle de qualité et l'homogénéisation des données, qui ont permis d'effectuer l'analyse climatique complète, avec la détermination des tendances et de leur significativité statistique. L'analyse effectuée montre que le climat est tempéré froid avec des précipitations abondantes : cette situation reflète le régime des précipitations typique du bassin Toce (Biancotti et al., 1998). Le régime nivométrique est proche du régime typique d'autres stations de la vallée Ossola (Testa *et al.*, 2009).

Le travail confirme la tendance déjà indiqué dans d'autres études qui montrent que le climat a enregistré une augmentation significative de la température surtout au cours des trois dernières décennies (IPCC 2001, 2007). L'absence de tendances significatives pour les

données de précipitations est en accord avec les résultats obtenus par d'autres auteurs sur les Alpes (Beniston, 2005; Ronchi *et al.*, 2008 ; Smiraglia et Diolaiuti, 2009). La couverture neigeuse montre une diminution significative, évidemment lié à l'augmentation de la température.

Après l'extension de l'étude à de nombreuses stations du Piémont, il sera possible d'évaluer des corrélations entre les variations climatiques et les conditions d'enneigement favorables au déclenchement d'avalanches fréquentes. En particulier, nous voulons étudier l'influence du changement climatique par rapport aux caractéristiques physiques du manteau neigeux et à la fréquence des phénomènes avalancheux. Une meilleure connaissance de ces événements et des conditions nivo-météorologiques qui les favorisent est fondamentale pour une prévention efficace.

Bibliographie

Beniston M., 2005 : Mountain climates and climatic change: An overview of processes focusing on the European Alps, Pure and Applied Geophysics, 192, 1587-1606.

Besancenot J.-P., 1990 : *Climat et tourisme*. Paris, Masson, 224 p.

Biancotti A., Bellardone G., Bovo S., Cagnazzi B., Giacomelli L., Marchisio C., 1998 : *Distribuzione regionale di piogge e temperature*, "Studi climatologici in Piemonte 1", Regione Piemonte, 80 p.

IPCC, 2001 : C*limate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 94 p.

IPCC, 2007 : *Climate Change 2007. The physical science basis. Working Group I Contribution to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).* Cambridge University Press, Cambridge, UK, 996 p.

Mestre O., Prieur C., Gruber C., Caussinus H., Jourdain S., 2009 : *A method for homogenization of daily temperature observations*, submitted to Journal of Applied Meteorology and Climatology

Mori A. 1969 : *Carta del regime delle precipitazioni*, Roma, Centro Nazionale delle Ricerche.

Peguy Ch. P., 1970 : Précis de climatologie. Masson, Paris, 370 p.

Ronchi C., Ciccarelli N., Von Hardenberg J., Provenzale A., 2008 : *La variabilità climatica nell'Italia nordoccidentale. Analisi statistica di temperature e precipitazioni giornaliere su Piemonte e Valle D'Aosta nella seconda metà del XX secolo*. Neve e Valanghe, 63, 28-33.

Smiraglia C., Diolaiuti G., 2009 : Alta montagna, un sistema ambientale particolarmente delicato. In AA.VV., *I cambiamenti climatici in Italia: evidenze, vulnerabilità e impatti*, by Castellati S., Artale V., Bologna, Bononia University Press, 215–220.

Sneyers R., 1990 : *On the statistical analysis of series of observations*. WMO N° .415, Geneva, WMO.

Sneyers R., 1992 : *Use and misuse of statistical methods for the detection of climate change*. American Meteorological Society, 12th Conference on Probability and Statistics in the Atmospherics Sciences, Toronto, Boston, American Meteorological Society.

Stepanek P., 2005 : A*nClim – software for time series analysis*. Dept. of Geography, Fac. of Natural Sciences, Masaryk University, Brno.

Testa D., Fratianni S. Et Acquaotta F. 2010 : *Changement climatique en haute vallée d'Ossola (Italie): analyse d'enneigement et risque d'avalanches*. Actes du XXIII^{ème} Colloque International de Climatologie, Rennes, 613-618.

Wang X.L., Wen Q.H., Wu Y., 2007 : Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46, 916-931.

WMO, 2007 : *Guide to climatological practices.* Third edition, WMO N° 100, Geneva, 113 p.

Zhang X. Et Yang F., 2004 : *RClimDex (1.0) user manual.*