

## IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'ENNEIGEMENT DE MOYENNE MONTAGNE : L'EXEMPLE DU SITE DU COL DE PORTE EN CHARTREUSE

**Bernard LESAFFRE, Yves LEJEUNE, Samuel MORIN, Jean-Michel PANEL et Daniel PONCET**

*Météo-France - CNRS, CNRM-GAME, Centre d'Etudes de la Neige, 1441 rue de la piscine, 38400 Saint-Martin d'Hères, France*

*bernard.lesaffre@meteo.fr, yves.lejeune@meteo.fr, samuel.morin@meteo.fr, jean-michel.panel@meteo.fr, daniel.poncet@meteo.fr.*

**Résumé :** *Le Centre d'Etudes de la Neige (CEN) dispose d'un jeu de données nivo-météorologiques hivernales complètes et contrôlées depuis décembre 1960 sur le site expérimental du col de Porte (1325 m d'altitude, massif de la Chartreuse, près de Grenoble, France). Ce jeu de données permet d'étudier les conséquences du changement climatique sur les conditions d'enneigement sur un site de moyenne montagne. On y observe une tendance à la hausse des températures, et à la diminution de l'enneigement. La signification de ces tendances est confirmée par des tests statistiques (méthode de Monte Carlo). En revanche, si une tendance à la baisse des précipitations semble se dessiner, elle n'est pas confortée par ces mêmes tests.*

**Mots-clés :** *Climat, enneigement, moyenne montagne.*

**Abstract:** *Impact of climate change on snow cover in mid altitude mountain regions: example of the Col de Porte site in Chartreuse.*

*The Centre d'Etudes de la Neige (CEN; Snow Research Center) has a set of winter snow and weather data complete and controlled since December 1960 on the experimental site of Col de Porte (1325 m altitude, Chartreuse mountain ranges, near Grenoble, France). This dataset allows to study the consequences of climate change on snow conditions at a mid altitude mountain site. It appears that there is a trend to higher temperatures and less snow. The significance of these trends is confirmed by statistical tests (Monte Carlo). However, if a downward trend in precipitation appears to be emerging, it is not supported by these tests.*

**Keywords:** *Climate, snow, mid altitude mountain.*

### Introduction

Les mesures nivo-météorologiques en moyenne montagne en France sont effectuées au sein de différents réseaux d'observation (réseau nivo-météorologique, réseau CEDONIGLA (Navarre, 1984), réseau climatologique de Météo-France). Certains postes ont cessé leurs observations, d'autres ont été créés dans un passé assez proche ; par ailleurs certains postes du réseau nivo-météorologique, tributaires de l'activité des stations de ski, ont un fonctionnement parfois interrompu. De ce fait, les séries de données complètes sur des durées longues ne sont pas très nombreuses dans les différents massifs français.

Le site expérimental du col de Porte (1325 m d'altitude, massif de la Chartreuse, près de Grenoble, France) est consacré depuis 1960 à l'étude du manteau neigeux (Poggi, 1966 ; Obled, 1971 ; Martin et David, 1997 ; Morin *et al.*, 2012). En particulier, ce site expérimental intègre toute l'instrumentation nécessaire, parfois issue de développements spécifiques, pour mesurer en continu les conditions météorologiques (température de l'air, humidité relative, vitesse du vent, précipitations solides et liquides) et les propriétés essentielles du manteau neigeux (hauteur, équivalent en eau). En outre, des mesures hebdomadaires manuelles complètent la caractérisation de l'état du manteau neigeux (type de grain, température, masse volumique, teneur en eau liquide, résistance à l'enfoncement). Ce jeu de données rare a été utilisé dans le passé pour développer et évaluer les modèles numériques permettant de simuler l'évolution temporelle des propriétés du manteau neigeux, tel le modèle Crocus développé au CEN (Brun *et al.*, 1989, 1992, 2012).

Par ailleurs, ces données, complètes et contrôlées depuis 1960 au pas de temps quotidien sur la période allant de décembre à avril de chaque saison hivernale, permettent d'étudier l'impact des variations climatiques sur l'enneigement de moyenne montagne. De plus, la situation de ce laboratoire près d'un col évite de superposer des effets topographiques aux aléas climatiques. On n'y observe pas, l'hiver, de phénomènes de stagnation d'air froid, comme en fond de vallée ou sur les plateaux encaissés.

## **1. Définitions des paramètres mesurés**

Le site expérimental du Col de Porte, créé en 1959, a pour objet l'étude de la neige et de ses propriétés, à des fins d'hydrologie, de prévision du risque d'avalanche et, plus récemment, d'étude de l'interaction avec le climat. De ce fait, les mesures n'y sont effectuées qu'une partie de l'année. Dans le passé, elles n'avaient lieu qu'au cours de la période d'enneigement, donc variable selon les hivers. Depuis 1993, elles sont complètes entre le 20 septembre et le 10 juin de chaque saison. Toutefois, sur l'ensemble des hivers, de 1960 à nos jours, les données sont complètes du 1<sup>er</sup> décembre au 30 avril, même en l'absence de neige au sol.

### **1.1. Températures**

La température de l'air est mesurée dans un abri météorologique classique des réseaux météorologiques. La particularité sur ce site réside dans le fait que la hauteur de cet abri au-dessus du manteau neigeux est ajustable. Ceci permet de maintenir cet abri à environ 1,50 m du manteau neigeux ou du terrain.

Pour chaque journée la température moyenne est définie comme étant la moyenne entre sa valeur minimale et sa valeur maximale.

Pour chaque hiver, la température moyenne est définie comme étant la moyenne des températures moyennes quotidiennes entre le 1<sup>er</sup> décembre et le 30 avril (151 ou 152 valeurs).

### **1.2. Hauteurs de neige**

La hauteur de neige au sol est actuellement mesurée au pas horaire, de façon automatique (capteur à ultra-sons). Cette mesure était auparavant effectuée par lecture de perches graduées.

Pour chaque journée la hauteur de neige est définie par sa valeur à une heure fixe (en général, 6 h U.T.C.).

Pour chaque hiver, la hauteur de neige moyenne est définie comme étant la moyenne des hauteurs de neige quotidiennes entre le 1<sup>er</sup> décembre et le 30 avril (151 ou 152 valeurs).

### **1.3. Précipitations**

Les précipitations sont mesurées par un pluviomètre à augets basculeurs ou à pesée en continu, doté d'un système de chauffage pour les précipitations neigeuses (voir Morin *et al.*, 2012, pour de plus amples détails sur l'instrumentation). Cette donnée, disponible au pas horaire, s'exprime pour la neige comme pour la pluie par la lame d'eau équivalente, en millimètres ou  $\text{kg m}^{-2}$ .

Pour chaque hiver, on retiendra le cumul des précipitations entre le 1<sup>er</sup> décembre et le 30 avril.

### **1.4. Durée d'enneigement au-dessus d'un seuil**

Pour les durées d'enneigement au-dessus d'un seuil, la période peut démarrer avant le 1<sup>er</sup> décembre ou se terminer après le 30 avril. Cette durée est définie comme étant le nombre de

jours pour lesquels la hauteur de neige a été supérieure à ce seuil, même si l'enneigement a présenté des interruptions. Nous avons retenu les seuils de 0 cm et 100 cm.

### ***1.5. Le rapport entre le cumul de neige fraîche et le cumul des précipitations***

Les hauteurs de neige fraîche quotidiennes sont mesurées au pas de 24 heures sur une planche à neige dégagée après chaque mesure. En l'absence de mesures directes, cette donnée peut être correctement estimée par l'analyse des hauteurs de neige fournies par le capteur à ultrason et des mesures de tassement des couches internes du manteau neigeux.

Pour s'affranchir un peu de la grande variabilité inter annuelle du cumul des précipitations et se focaliser sur la part neigeuse des précipitations pour un hiver donné, il est possible d'examiner le rapport entre le cumul de neige fraîche exprimé en centimètres et le cumul des précipitations totales exprimé en millimètres.

En moyenne, lorsqu'il y a des chutes de neige, on a une relation proche de 1 cm de neige pour 1 mm de lame d'eau équivalente (Pahaut, 1975). Le rapport entre cumul de neige fraîche et précipitations totales est proche de 1 s'il n'y a que des chutes de neige, et diminue si les occurrences de pluie jouent un rôle plus important.

## **2. Les tendances observées**

### ***2.1. Méthode***

Pour chacune des variables retenues, une droite de régression linéaire en fonction du temps a été établie. La pente de cette droite représente la tendance, qui est exprimée en variation de la variable par décennie. A cette droite de régression est associé un coefficient de corrélation avec la série chronologique de la donnée.

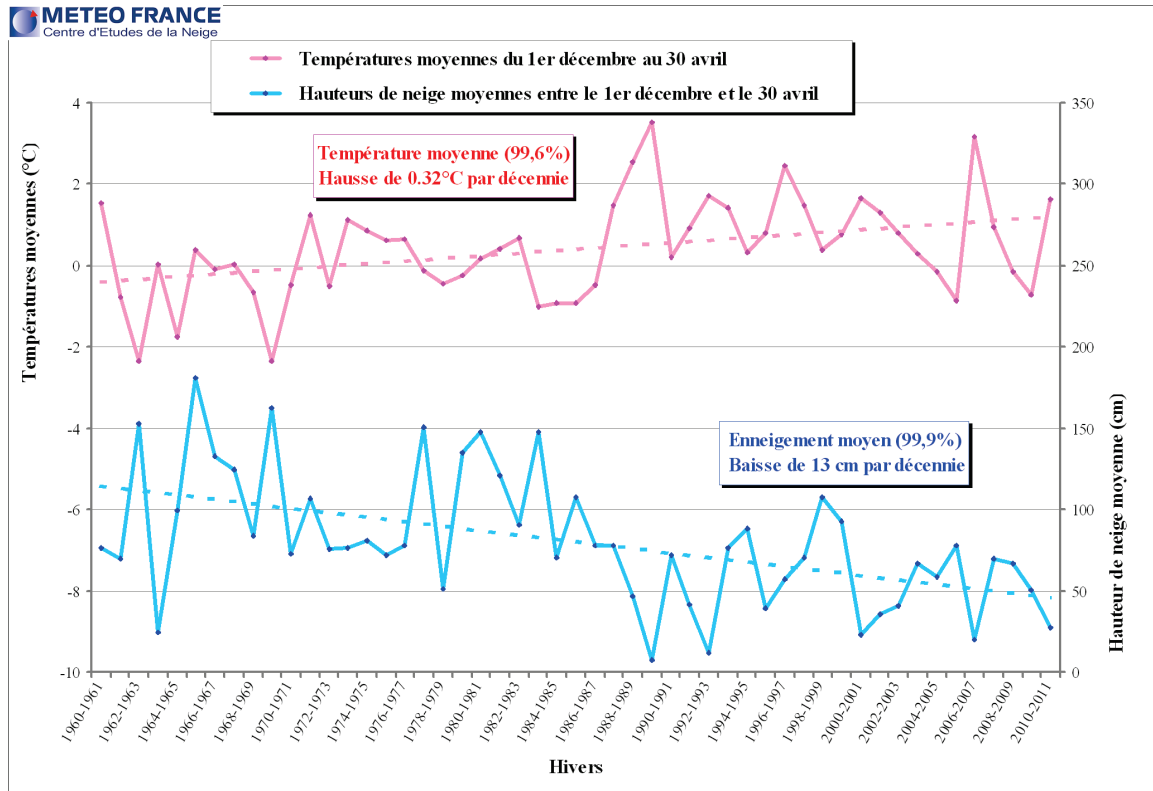
Dans le but de qualifier le degré de confiance accordée à cette tendance, on utilise la méthode de Monte Carlo ainsi définie : on procède à un grand nombre (10000) de tirages aléatoires de l'ordre de la série de données. Pour chacun de ces tirages, on établit la droite de régression linéaire et on calcule le coefficient de corrélation correspondant. Le degré de confiance de la tendance est défini comme étant le pourcentage de tirages pour lesquels on obtient un coefficient de corrélation inférieur à celui relatif à la série chronologique. La tendance est jugée significative si ce pourcentage est supérieur à 95 %.

### ***2.2. Résultats***

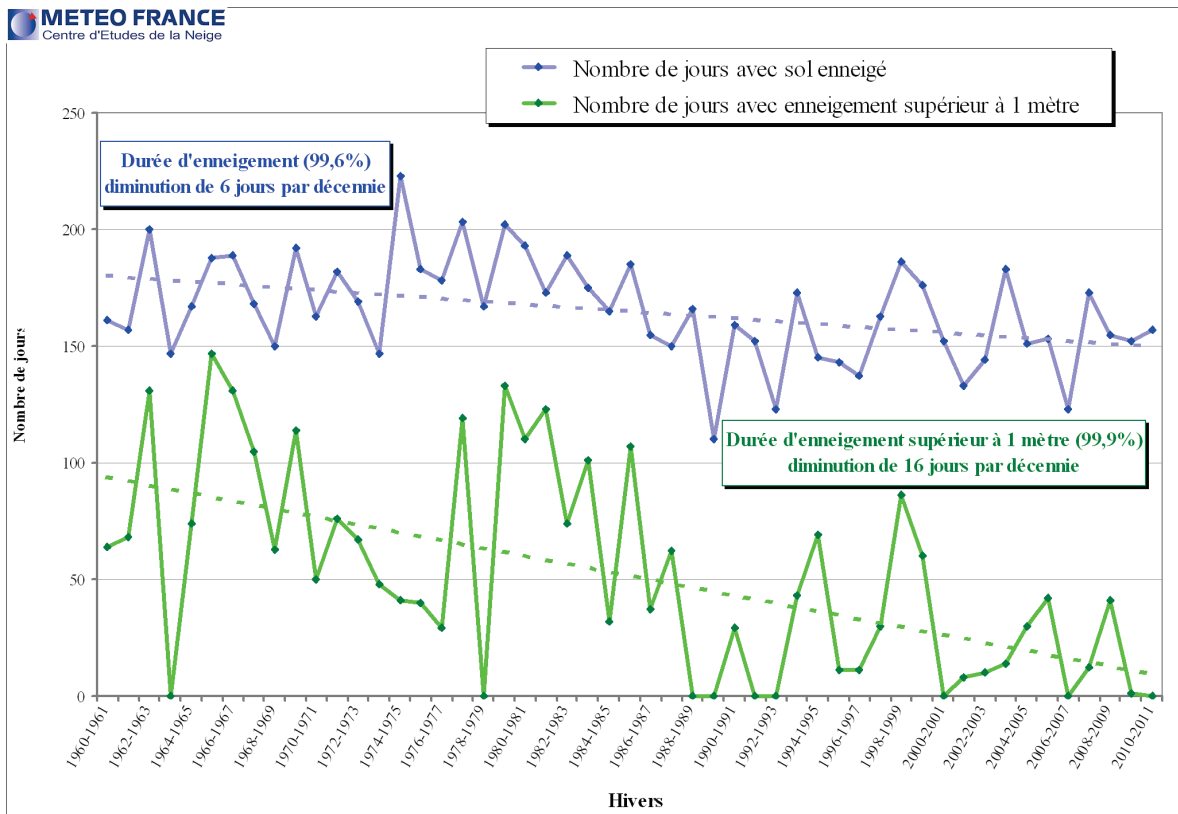
La figure 1 représente les tendances sur la température et la hauteur de neige moyennes entre le 1<sup>er</sup> décembre et le 30 avril pour la période de 1960 à 2011. La première chose que l'on observe, et cela vaut également pour les autres variables, est la grande variabilité interannuelle des valeurs. Cette variabilité s'observe également à l'échelle de plusieurs années. Cependant, la tendance à la hausse des températures moyennes ainsi que la tendance à la baisse des hauteurs de neige moyennes sont claires, avec un degré de confiance élevé.

La figure 2 représente les tendances sur les durées d'enneigement au-dessus de 0 et 100 cm. Là encore, les tendances sont nettes surtout en ce qui concerne les enneigements supérieurs ou égaux à 100 cm dont la durée a baissé de plus de 2 mois et demi au cours des 51 années. Ici encore, les degrés de confiance sont très élevés.

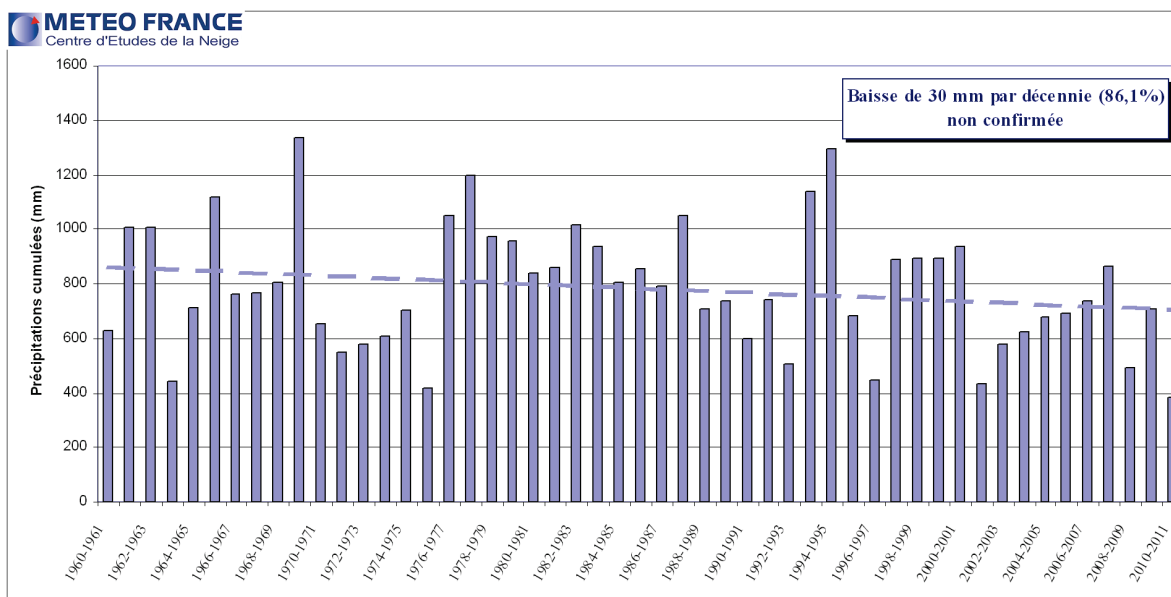
La figure 3 montre l'évolution du cumul des précipitations sur la période allant du 1<sup>er</sup> décembre au 30 avril. Cette fois, si la grande variabilité s'observe toujours, la tendance à la baisse montrée par la droite de régression n'offre pas un degré de confiance suffisant (86,1 %) pour être validée.



**Figure 1 :** Evolution de la température moyenne (courbe du haut) et de la hauteur de neige moyenne (courbe du bas) de la saison 1960-1961 à la saison 2010-2011. Le degré de confiance des tendances est indiqué entre parenthèses.

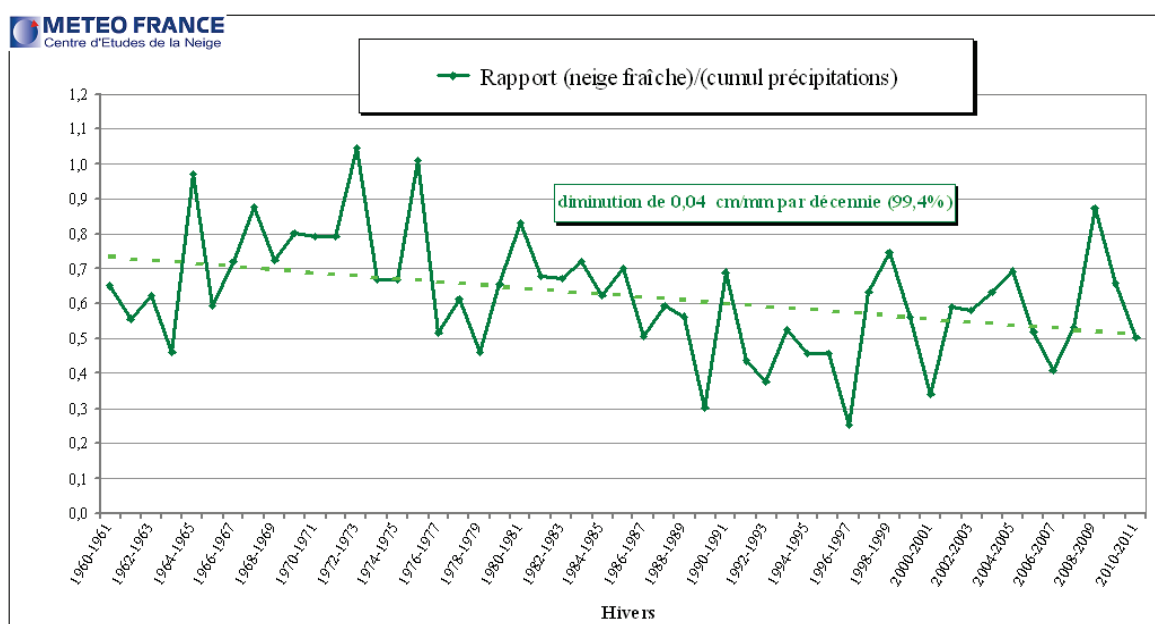


**Figure 2 :** Evolution des durées d'enneigement au-dessus de 0 cm (courbe du haut) et 100 cm (courbe du bas) de la saison 1960-1961 à la saison 2010-2011. Le degré de confiance des tendances est indiqué entre parenthèses.



**Figure 3 :** Evolution du cumul des précipitations de la saison 1960-1961 à la saison 2010-2011. Le degré de confiance des tendances est indiqué entre parenthèses.

La figure 4 représente l'évolution du rapport entre la somme des hauteurs de neige fraîche quotidiennes en cm et le cumul des précipitations totales en mm (pluie et neige). Cette fois, l'évolution de ce rapport montre une nette tendance à la baisse, avec un degré de confiance élevé.



**Figure 4 :** Evolution du rapport entre le cumul des hauteurs de neige fraîche (en cm) et celui des précipitations (en mm) de la saison 1960-1961 à la saison 2010-2011. Le degré de confiance des tendances est indiqué entre parenthèses.

## Conclusion

L'ensemble des données présentées ici montre clairement la hausse de la température moyenne hivernale observée au cours de ces 51 années ainsi que la baisse de l'enneigement qui en résulte. En revanche, aucun signal probant ne peut être établi en ce qui concerne les précipitations, même si une tendance à la baisse semble apparaître. Ces observations sont

cohérentes avec le signal climatique mis en évidence à échelle régionale (Durand *et al.*, 2009 ; Dumas, 2012), ainsi que son impact sur les variations glaciaires (Vincent, 2007) ce qui permet d'étendre ce constat à l'ensemble des zones de moyenne altitude des Préalpes du nord.

Les conséquences de l'élévation de températures sur l'enneigement sont également cohérentes avec les simulations effectuées à l'aide des modèles d'évolution du manteau neigeux tels que Crocus (Martin *et al.*, 1994). En effet, en raison de l'altitude modérée du site d'étude, la tendance à l'augmentation de température se traduit par une occurrence plus fréquente des précipitations sous la forme liquide plutôt que solide, responsable au premier ordre de la diminution de l'enneigement.

Des données plus complètes, d'autres graphiques et informations sur le laboratoire du Col de Porte sont disponibles sur le site du CNRM-GAME à l'adresse : <http://www.cnrn-game.fr/spip.php?rubrique218>.

### Références bibliographiques

- Brun E., E. Martin, V. Simon, C. Gendre C. and C. Coléou, 1989 : An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting. *J. Glaciol.*, 35(121), 333-342.
- Brun E., P. David, M. Sudul and G. Brunot, 1992 : A numerical model to simulate snowcover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *J. Glaciol.*, 38(128), 13-22.
- Brun E., V. Vionnet, S. Morin, A. Boone, E. Martin, S. Faroux, P. Le Moigne and J. -M. Willemet, 2012 : Le modèle de manteau neigeux Crocus et ses applications. *La Météorologie*, 76, 44-54.
- Dumas D., 2012 : Changes in temperature and temperature gradients in the French Northern Alps during the last century. *Theor. Appl. Climatol.*, doi:10.1007/s00704-012-0659-1.
- Durand Y., M. Laternser, G. Giraud, P. Etchevers, B. Lesaffre, L. Mérindol, 2009 : Reanalysis of 44 Yr of Climate in the French Alps (1958–2002): Methodology, Model Validation, Climatology, and Trends for Air Temperature and Precipitation. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48, 429-449.
- Martin E., Brun E., Durand Y., 1994 : Variabilité de l'enneigement et variation du climat. *La Météorologie*, 8<sup>ème</sup> série, N°5, mars 1994.
- Martin E. et David, P., 1997 : *Le laboratoire du col de Porte : historique et climatologie*. Note du Centre d'Etudes de la Neige.
- Morin S., Lejeune, Y., Lesaffre, B., Panel, J.-M., Poncet, D., David, P., and Sudul, M., 2012 : A 18-yr long (1993–2011) snow and meteorological dataset from a mid-altitude mountain site (Col de Porte, France, 1325 m alt.) for driving and evaluating snowpack models. *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, 5, 29-45, doi :10.5194/essdd-5-29-2012.
- Navarre J.P., 1984 : *Etude climatologique de l'enneigement des Alpes à partir du réseau CEDONIGLA*. Données et statistiques / Direction de la Météorologie, 3.
- Obled C., 1971 : *Modèles mathématiques de la fusion nivale*. Thèse de Docteur/Ingénieur, Université de Grenoble.
- Pahaut E., 1975 : *Les cristaux de neige et leurs métamorphoses*. Monographie de la Météorologie nationale, n°96.
- Poggi A., 1966 : *L'évolution de la neige déposée à moyenne altitude*. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble.
- Vincent C., 2007 : L'impact du climat sur les variations des glaciers alpins depuis 100 ans. *La Houille Blanche*, 6, 78-82.