

ÉVOLUTION DE L'ENNEIGEMENT MOYEN DANS LES ALPES AU COURS DU 20^E SIÈCLE À L'AIDE DU MODÈLE ATMOSPHÉRIQUE RÉGIONAL MAR

BELLEFLAMME A., WYARD C., DOUTRELOUP S., FETTWEIS X., ERPICUM M.

Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie, Département de Géographie, Université de Liège, Clos Mercator 3, 4000 Liège, Belgique, A.Belleflamme@ulg.ac.be, coraline.wyard@ulg.ac.be, S.Doutreloup@ulg.ac.be, xavier.fettweis@ulg.ac.be, michel.erpicum@ulg.ac.be

Résumé – L'évolution de l'enneigement dans les Alpes peut fortement affecter le tourisme, mais aussi la disponibilité en eau de la région. Dans cette étude, nous avons reproduit l'évolution du climat des Alpes au cours du 20^e siècle à l'aide du modèle atmosphérique régional MAR forcé par trois réanalyses (ERA-20C, NCEP/NCAR et ERA-Interim). Le MAR montre que la hauteur de neige a augmenté depuis le début du 20^e siècle, d'abord uniquement en haute altitude, puis également aux altitudes inférieures, avant de connaître une forte et brusque diminution entre 1985 et 1990. Cette évolution, qui est en accord avec les observations décrites dans la littérature, est directement liée aux fluctuations de la NAO et de l'AO. En effet, les changements de circulation atmosphérique que traduisent la NAO et l'AO entraînent des variations de température et de précipitations qui déterminent directement la hauteur de neige dans les Alpes.

Mots-Clés : hauteur de neige, MAR, Alpes.

Abstract - Evolution of the snow height in the Alps over the 20th century using the regional atmospheric model MAR. The evolution of the snow height over the Alps can strongly impact tourism, but also the water availability of the region. In this study, we have reproduced the evolution of the climate in the Alps over the 20th century with the help of the regional atmospheric model MAR forced by three reanalyses (ERA-20C, NCEP/NCAR, and ERA-Interim). MAR shows that the snow height has increased since the beginning of the 20th century, first only at higher altitudes, then also at lower levels, before knowing a strong and abrupt decrease between 1985 and 1990. This evolution, which is consistent with observations given in the literature, is directly linked with the trends of NAO and AO. In fact, the atmospheric circulation changes highlighted by NAO and AO induce temperature and precipitation changes that directly determine the snow height in the Alps.

Keywords : snow depth, MAR, Alps.

Introduction

L'enneigement dans les Alpes joue un rôle important, non seulement dans le secteur du tourisme des sports d'hiver, mais également pour la disponibilité en eau. Dans ce contexte, Beniston (1997) a analysé la hauteur de neige et la durée de la période d'enneigement pour plusieurs stations météorologiques en Suisse. Cette étude a été actualisée et complétée par Beniston (2012). Cet auteur a observé une augmentation de l'épaisseur du manteau neigeux depuis 1930 et jusqu'au milieu des années 1980 pour les stations situées plus haut en altitude. Les stations situées dans les vallées n'ont pas enregistré de tendances significatives. Entre 1985 et 1990, une forte diminution de la hauteur de neige et de la durée de l'enneigement a été constatée. L'analyse de ces constats a montré que ces variations de l'enneigement sont bien corrélées à l'oscillation nord-atlantique (NAO) et qu'elles sont donc essentiellement dues à des changements de la circulation atmosphérique (Beniston, 1997 ; 2012).

Steger *et al.* (2013) ont utilisé un ensemble de modèles climatiques régionaux afin de réaliser des projections futures de l'enneigement en Suisse. Il en ressort que, sous l'impact du réchauffement climatique, la hauteur de neige devrait fortement diminuer d'ici la fin du 21^e siècle, surtout dans les tranches d'altitudes moyennes, où la température moyenne hivernale approchera, voire dépassera, les 0°C. Vu leur température plus basse, les altitudes plus élevées devraient, du moins dans un premier temps, être épargnées par la diminution de l'enneigement.

Sur la base de ces recherches, nous avons dès lors tenté de reproduire le climat du 20^e siècle dans les Alpes à l'aide du Modèle Atmosphérique Régional MAR afin d'y modéliser

l'évolution de la hauteur de neige, avec un double objectif. D'une part, nous voulons évaluer la capacité du MAR à reproduire le climat d'une région avec un relief très accidenté et, d'autre part, nous voulons vérifier si les changements de la hauteur de neige observés aux stations suisses par Beniston (1997 ; 2012) sont généralisables à l'ensemble de la région alpine.

1. Méthode

Afin de reconstituer l'évolution de la hauteur de neige au cours du 20^e siècle sur le massif alpin, nous avons modélisé le climat de la région à l'aide du Modèle Atmosphérique Régional (MAR) utilisé essentiellement au Groenland (Fettweis *et al.*, 2013), mais qui a été récemment adapté à l'Europe (Wyrd *et al.*, 2017). Nous utilisons le MAR à une résolution horizontale de 7 km, ce qui est la résolution la plus fine possible pour le MAR sur une région au relief aussi accidenté que les Alpes. Le domaine initial s'étend de 43°N à 48°30'N et de 2°E à 15°E sur 140 x 90 points de grille. Afin que les résultats ne soient pas influencés par les effets de bord, le domaine utilisé par la suite a été rogné de 15 points de grille sur chaque bord (30 sur le bord ouest).

Le MAR est forcé à ses frontières toutes les six heures par les réanalyses ERA-20C du Centre Européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF) sur la période 1902-2010. Afin d'évaluer la fiabilité des simulations du MAR forcé par cette réanalyse, nous les avons comparées au MAR forcé par les réanalyses ERA-Interim du ECMWF sur la période 1981-2010, d'une part, et par les réanalyses des National Centers for Environmental Prediction – National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) sur la période 1950-2010, d'autre part.

Dans le cadre de cette étude, nous utiliserons les valeurs journalières de hauteur de neige, de température de l'air à 2 m et de précipitations totales fournies par le MAR. Nous avons moyenné ces données sur les mois de janvier à avril car, même si la hauteur maximale d'enneigement dans les Alpes est atteinte en moyenne au cours du mois de mars, il peut y avoir de fortes variations d'une année à l'autre et, par ailleurs, notre objectif est d'étudier la hauteur de neige moyenne au cours de l'hiver. En outre, nous limiterons notre analyse aux altitudes supérieures à 500 m.

Pour l'interprétation de nos résultats, nous utilisons les moyennes sur janvier-avril des valeurs mensuelles des indices de téléconnexion suivants :

- l'oscillation nord-atlantique (NAO) du CRU (Climate Research Unit, www.cru.uea.ac.uk) qui représente la différence de pression atmosphérique entre les Açores et l'Islande, sur la période 1902-2015 ;
- la NAO du CPC (Climate Prediction Center, www.cpc.noaa.gov) sur la période 1950-2015 ;
- l'oscillation arctique (AO) du CPC qui mesure la différence de pression atmosphérique entre 20°N et le pôle Nord, sur la période 1950-2015.

2. Résultats

2.1. Évolution de la hauteur de neige

Une comparaison entre les simulations du MAR forcé par les trois réanalyses montre que, même si les valeurs absolues d'enneigement peuvent parfois varier d'une simulation à une autre, suite à des biais de température et d'humidité présents dans les données initiales des réanalyses, les variations de la hauteur de neige sont similaires sur la période commune entre

ERA-20C, NCEP/NCAR et ERA-Interim (figure 1). Par la suite, nous nous limiterons donc à l'analyse des simulations du MAR forcé par ERA-20C.

L'analyse de l'évolution de la hauteur de neige au cours du 20^e siècle permet de dégager plusieurs constats (figure 1). D'abord, il apparaît que la variabilité interannuelle a toujours été très importante. Ensuite, les moyennes glissantes sur 10 ans permettent de diviser la période d'étude en quatre sous-périodes relativement homogènes. Les années 1900 à 1940 qui n'indiquent pas de tendance claire, suivies par une augmentation relativement continue de la hauteur de neige au cours des années 1950 à 1980. Ensuite, la décennie 1980 est marquée par une diminution abrupte et nettement supérieure à la variabilité interannuelle, avant de retrouver une tendance à la hausse après 1990.

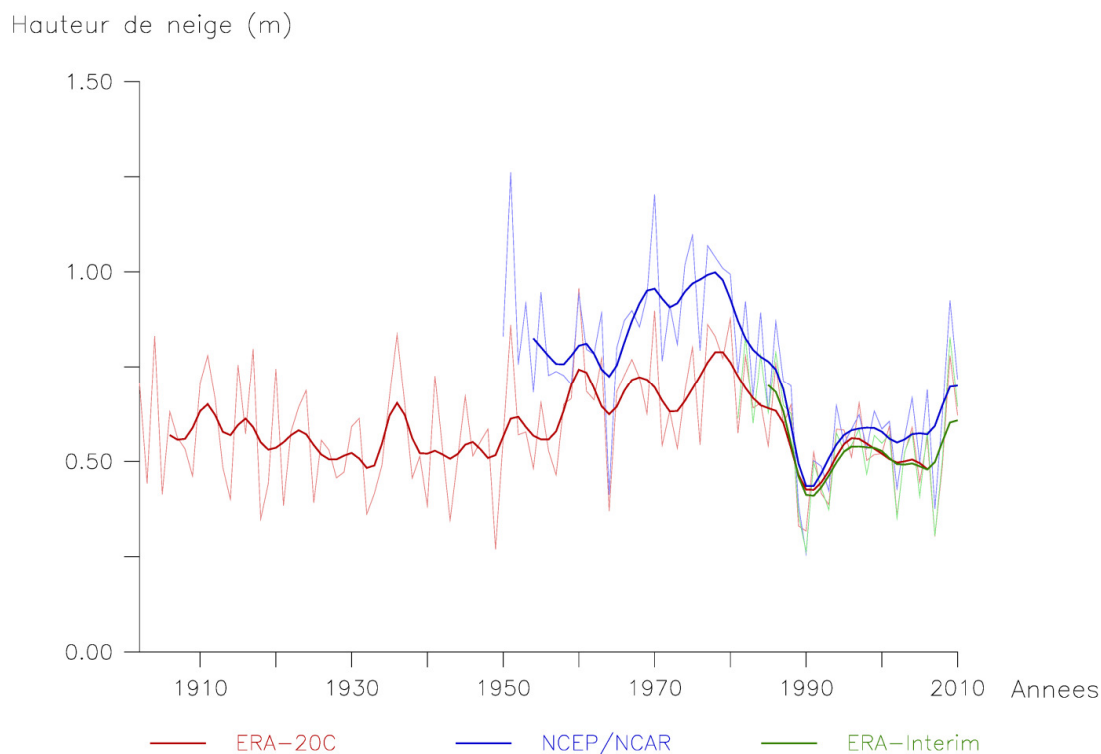


Figure 1. Évolution de la hauteur de neige moyenne des mois de janvier à avril simulée par le MAR forcé par les réanalyses ERA-20C, NCEP/NCAR et ERA-Interim. Les traits fins représentent les valeurs annuelles et les traits épais représentent les moyennes glissantes sur 10 ans.

Il est intéressant de remarquer que l'évolution de la hauteur moyenne de neige donnée par le MAR correspond tout à fait à celle observée aux stations suisses par Beniston (1997 ; 2012). Néanmoins, une comparaison avec les stations alpines situées à une altitude supérieure à 500 m disponibles dans la banque de données de l'ECA&D (European Climate Assessment & Dataset) indique une grande variabilité entre les stations. Ainsi, pour certaines stations, la hauteur de neige affiche plutôt un pic au début des années 1980 et la forte diminution entre 1985 et 1990 y représente plutôt un retour à la normale (non montré ici). Les variations spatiales des tendances calculées par tranche de 20 ans, excepté pour la décennie 1980, permettent de préciser l'évolution décrite ci-dessus (figure 2). En effet, avant 1980, l'augmentation de la hauteur de neige est surtout marquée pour les altitudes les plus élevées (> 2000 m). Nous remarquons également que les tendances à ces altitudes sont plus marquées sur la moitié ouest du domaine d'étude. Les tranches d'altitude inférieures (500-2000 m) ont d'abord connu une diminution de la hauteur de neige, avant que cette tendance ne s'inverse progressivement de l'amont vers l'aval entre les années 1920 et 1960. La forte diminution de la hauteur de neige des années 1980 était généralisée sur l'ensemble de l'arc alpin, et elle était d'autant plus marquée que l'altitude était élevée. Finalement, depuis 1990, les tendances sont

très faibles et plutôt marquées par un gradient ouest-est que par un gradient altitudinal, avec des tendances négatives sur l'ouest et positives sur l'est.

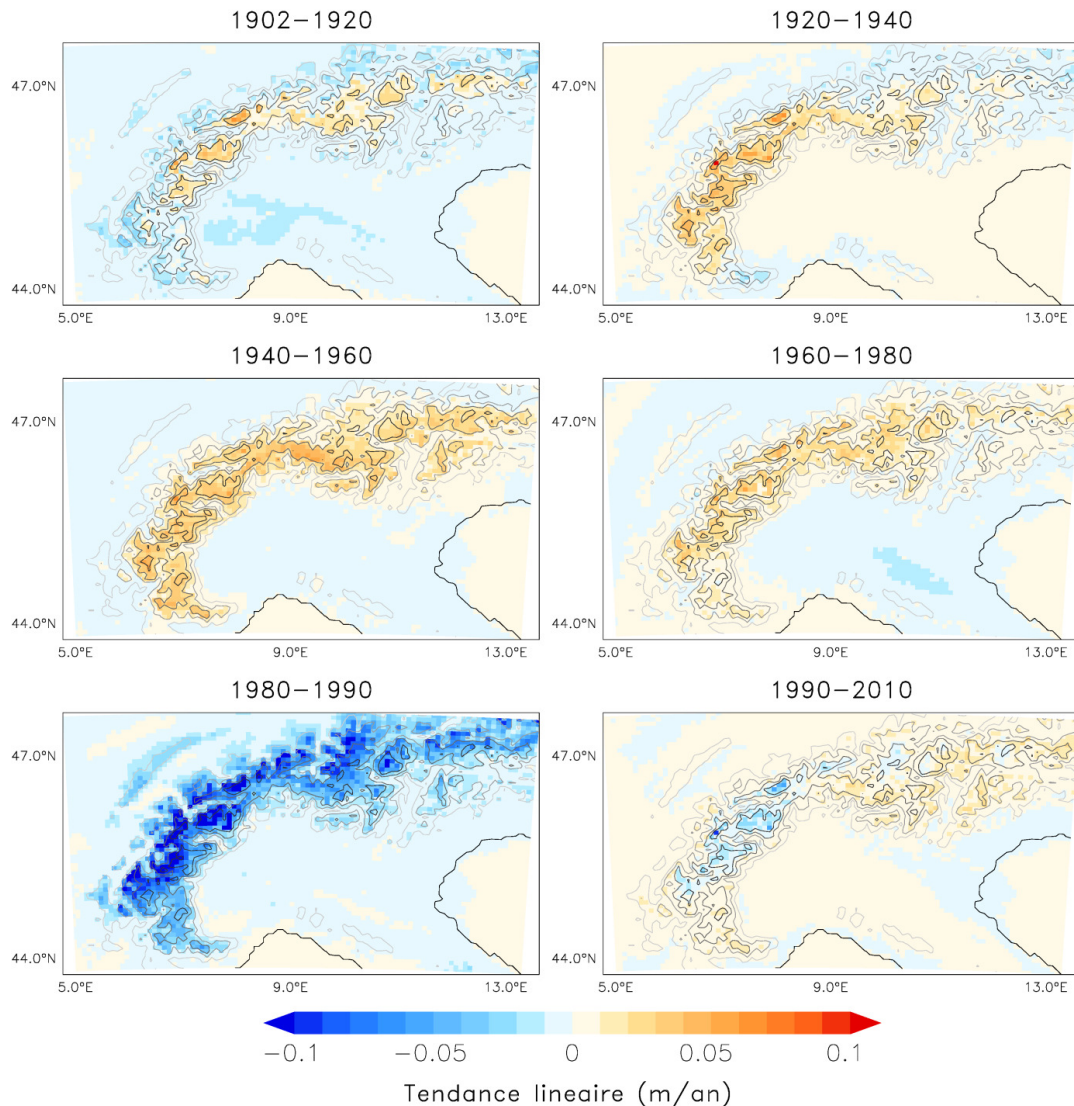


Figure 2. Tendances linéaires de la hauteur de neige moyenne de janvier à avril simulée par le MAR forcé par ERA-20C sur des périodes successives de 20 ans (respectivement 10 ans pour la décennie 1980). Les tranches d'altitude sont représentées par les courbes de niveau de 500, 1000, 1500, 2000 et 2500 m (de gris clair à gris foncé).

2.2. Lien avec la température et les précipitations

L'évolution de la hauteur de neige peut être expliquée par les changements conjoints de la température à 2 m et des précipitations (figure 3). Notons qu'il n'y pas de différences significatives de l'évolution, ni pour la température, ni pour les précipitations, entre les tranches d'altitude.

La température n'affiche pas de tendance à long terme claire sur l'ensemble de la période. Tout au plus peut-on deviner une légère tendance négative avant 1985 et une légère tendance positive depuis 1990. Toutefois, notre période d'étude est entrecoupée par deux sauts d'environ 4°C, l'un – négatif – autour de 1950 et l'autre – positif – entre 1985 et 1990. Au niveau des précipitations, on constate une augmentation entre les années 1940 et 1980, suivie d'une diminution au cours de la décennie 1980.

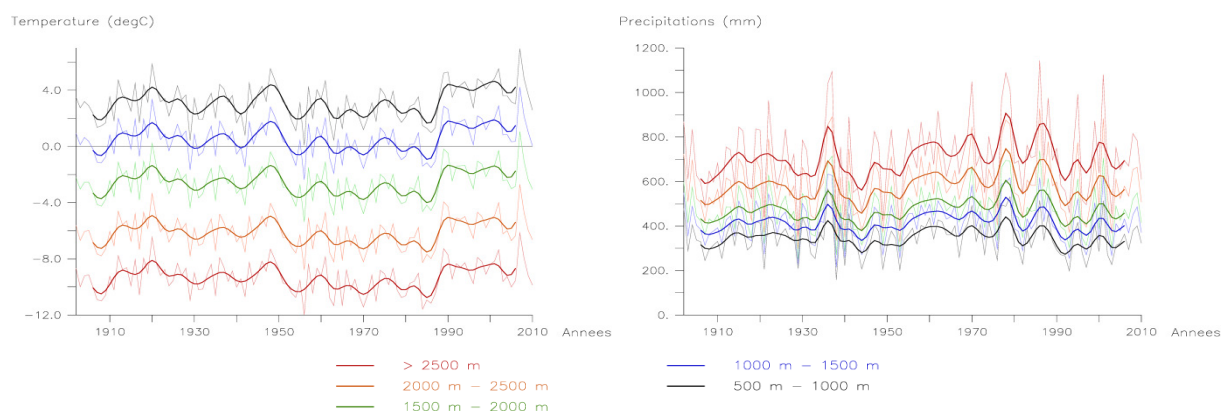


Figure 3. Évolution de la température moyenne de l'air à 2 m (gauche) et du cumul des précipitations (droite) des mois de janvier à avril simulées par le MAR forcé par les réanalyses ERA-20C pour différentes tranches d'altitude. Les traits fins représentent les valeurs annuelles et les traits épais représentent les moyennes glissantes sur 10 ans.

Ainsi, l'augmentation de la hauteur de neige constatée avant 1980 pour les altitudes les plus élevées peut être expliquée par l'augmentation des précipitations sur la même période. La température étant suffisamment basse à ces altitudes, elle n'a pas dû jouer de rôle déterminant dans l'évolution du manteau neigeux. Par contre, la diminution de température observée vers 1950 peut expliquer pourquoi l'augmentation de la hauteur de neige a gagné les tranches d'altitude plus faible entre 1940 et 1960. Finalement, la forte diminution de la hauteur de neige au cours des années 1980 peut clairement être attribuée au réchauffement de 4°C et à la diminution des précipitations observées concomitamment, en particulier de 1985 à 1990.

2.3. Lien avec la NAO et l'AO

L'évolution des indices de la NAO et de l'AO montre que les variations de température et de précipitations qui ont induit les changements de la hauteur de neige peuvent être imputées à des changements de la circulation atmosphérique (figure 4), comme l'a également indiqué Beniston (1997 ; 2012). Il apparaît effectivement que la NAO a connu une légère tendance à la baisse jusqu'à atteindre des valeurs négatives avant 1980, ce qui correspond bien à une augmentation des précipitations dans les Alpes. On retrouve également une diminution claire de la NAO (CRU) autour de 1950, associée à la chute de la température moyenne. À l'inverse, la fin des années 1980 est marquée par des valeurs très positives de la NAO et de l'AO, ce qui se traduit par des températures plus élevées en Europe et des précipitations plus faibles en Europe du Sud, et donc aussi dans les Alpes.

Conclusion

Pour cette contribution, nous avons modélisé le climat des Alpes à l'aide du Modèle Atmosphérique Régional MAR forcé par les réanalyses ERA-20C, NCEP/NCAR et ERA-Interim, dans le but d'analyser l'évolution de la hauteur de neige. Il en ressort que la hauteur de neige a augmenté depuis le début du 20^e siècle, d'abord uniquement en haute altitude (> 2000 m), et depuis les années 1940-1960 aussi aux altitudes moyennes (500-2000 m). Toutefois, les années 1985-1990 sont marquées par une inversion de cette tendance, avec une diminution forte et généralisée de la hauteur de neige.

Cette évolution de la hauteur de neige est notamment due à des changements de la circulation atmosphérique, comme le montre l'analyse des indices NAO et AO. Ces changements de circulation ont probablement induit des variations de température et de précipitations qui ont un effet direct sur la hauteur de neige. Ainsi, ils pourraient expliquer, du moins partiellement, la hausse de température observée au cours des années 1980. Toutefois,

une analyse plus détaillée de ces changements de circulation, et en particulier de la période 1985-1990, mériterait d'être menée

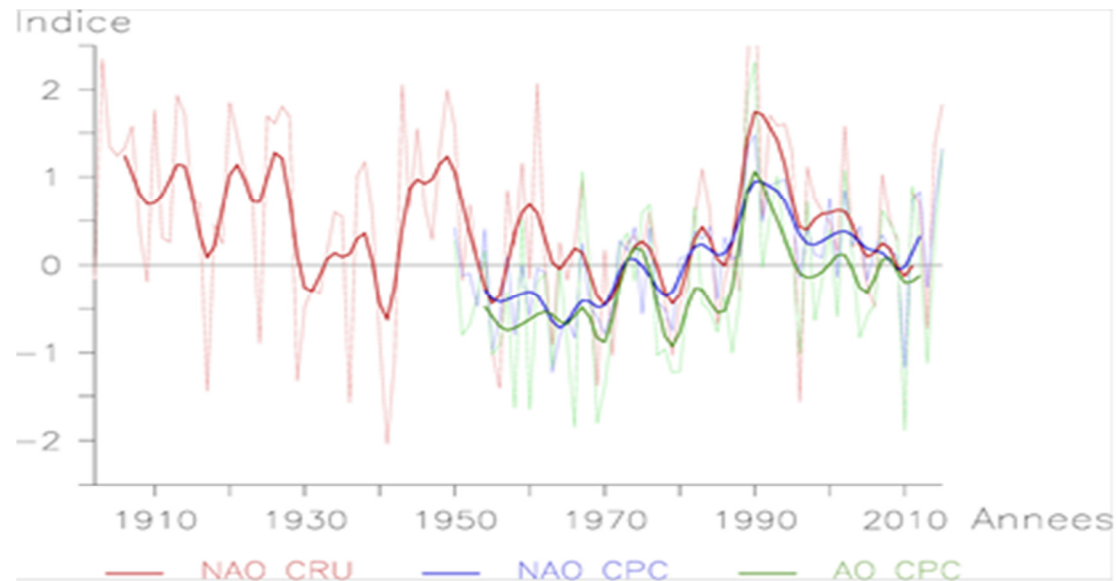


Figure 4. Évolution de l'oscillation nord-atlantique (NAO) du CRU et du CPC, ainsi que de l'oscillation arctique (AO) du CPC moyennes sur les mois de janvier à avril. Les traits fins représentent les valeurs annuelles et les traits épais représentent les moyennes glissantes sur 10 ans.

Finalement, il est intéressant de constater que les variations de hauteur de neige, de température et de précipitations données par le MAR forcé par les différentes réanalyses sont en accord avec les indices de téléconnexion issus d'autres jeux de données et, surtout, avec les observations issues de stations météorologiques (Beniston, 1997 ; 2012). Cela confirme à la fois la qualité des réanalyses sur notre domaine d'étude et la capacité du MAR à reproduire le climat d'une région au relief aussi accidenté que les Alpes. Néanmoins, il faut garder à l'esprit que la résolution du MAR (7 km) n'est pas assez fine pour représenter correctement les variations spatiales de la hauteur de neige dans les Alpes. Le relief est trop lissé et les influences locales de la topographie (effet d'abri / d'exposition au vent, adret / ubac) sont négligées.

Bibliographie

- Beniston M., 1997 : Variations of snow depth and duration in the Swiss Alps over the last 50 years: links to changes in large-scale climatic forcings. *Climatic Change*, **36**, 281-300
- Beniston M., 2012 : Is snow in the Alps receding or disappearing ? *WIREs Clim Change*, doi: 10.1002/wcc.179
- Fettweis X., Franco B., Tedesco M., van Angelen J., Lenaets J., van den Broeke M., Gallée H., 2013 : Estimating the Greenland ice sheet surface mass balance contribution to future sea level rise using the regional atmospheric climate model MAR. *The Cryosphere*, **7**, 469-489
- Steger C., Kotlarski S., Jonas T., Schär C., 2013 : Alpine snow cover in a changing climate: a regional climate model perspective. *Climate Dynamics*, **41**, 735-754
- Wyard C., Scholzen C., Fettweis X., Van Campenhout J., François L., 2017 : Decrease in climatic conditions favouring floods in the south-east of Belgium over 1959-2010 using the regional climate model MAR. *International Journal of Climatology*, **37**, 2782-2796, doi: 10.1002/joc.4879