

## CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE ET TEMPS NEIGEUX DANS LES ALPES DU SUD

**Guillaume GUERIN<sup>1</sup>, Nicolas MARTIN<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Université de Nice Sophia-Antipolis, France - UMR 7300 ESPACE

Email : guillaume.guerin@etu.univ-cotedazur.fr

<sup>2</sup> Université de Nice Sophia-Antipolis, France - UMR 7300 ESPACE

Email : Nicolas.MARTIN@univ-cotedazur.fr

**Résumé :** L'étude a pour objectif de révéler la fréquence passée (1972-2019) des précipitations solides pour le poste d'Isola 2000, situé dans les Alpes du Sud à 1912 m d'altitude. Les résultats montrent une hausse de leur occurrence lors des 25 dernières années. Le second d'objectif est de caractériser les mécanismes de formation des chutes de neige, de les cartographier puis de les expliquer, à partir du croisement entre les données d'observations du poste et les réanalyses ERA-INTERIM. Au total, six variables atmosphériques corrélées aux chutes de neige ont été identifiées, ainsi que deux types de circulation atmosphérique : les circulations d'ouest cyclonique, produisant les temps à neige faible et moyen (chutes < 21 cm) ; les circulations de sud (flux de sud-ouest) avec une dépression axée sur l'Islande et un talweg dépressionnaire sur l'Europe occidentale, qui entraînent les temps à fortes chutes de neige (chutes > 21 cm).

**Mots-Clés :** Circulation atmosphérique, chute de neige, réanalyses, cartographie.

### Introduction

Les Alpes du Sud, à l'instar de l'ensemble de la planète, connaissent une hausse de la température de l'air depuis l'époque pré-industrielle (GREC-SUD, 2018 ; volet 1 du 6<sup>e</sup> rapport du GIEC, 2021). Les projections climatiques pour le milieu et la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, indiquent une poursuite du réchauffement à l'œuvre pour les scénarios à faibles émissions de GES et une accentuation du réchauffement pour les scénarios à forts émissions de GES, avec un impact certain sur la cryosphère. Or, l'enneigement des massifs joue un rôle important pour les écosystèmes et les communautés installées en montagne, que ce soit pour la disponibilité de la ressource en eau, ou bien encore à travers le tourisme hivernal et la pratique des sports d'hiver (Barbier, 1982 ; François et al., 2016 ; Joye, 2019). Également, si le manteau neigeux diminue à l'avenir, l'albédo terrestre devrait augmenter, avec comme conséquence une amplification du forçage initial dans une boucle de rétroaction positive inquiétante pour le climat futur (Picard et al., 2015).

L'étude s'intéresse aux précipitations solides et se base sur le fait qu'un événement météorologique de méso et micro-échelle de ce type est le résultat d'un ensemble de processus se produisant parfois à des milliers de kilomètres et sur une surface géographique bien plus vaste (Planchon et al., 2015). En ce sens, la circulation atmosphérique d'échelle synoptique, en redistribuant au niveau planétaire le surplus énergétique provenant de l'intensification de l'effet de serre (plus spécifiquement de l'infrarouge émis vers l'espace) est décrite comme le moteur du temps, qu'il a fait et qu'il fera sur nos territoires (Pédelaborde, 1956 ; Peña et Schulte, 2019). Les chutes de neige, sont alors la résultante de l'action d'un type de circulation, qui agit sur la météo locale en synergie avec le substratum, la topographie, etc. (Planchon et al., 2015). En identifiant, le(s) type(s) de circulation propre au type de temps étudié pour le passé, il peut alors être possible de connaître son évolution future. Ce point est d'autant plus intéressant, puisqu'il est admis que les modèles régionaux comportent des biais sur la représentation de certaines variables sensibles du temps, comme les précipitations, et sont donc incapables de donner une projection précise à fine échelle (Barrier et al., 2014). Ils sont en revanche relativement robustes sur les variables typiques de la circulation (pression de surface, altitude du géopotential 500 hPa etc.) (Boé et Terray, 2008).

Les travaux s'appuient sur la plus longue série nivologique quotidienne d'observations du département des Alpes-Maritimes. Le premier objectif est l'analyse de l'occurrence des précipitations solides depuis 1972, afin de voir comment elles ont évolué à Isola 2000. Le second objectif est d'identifier puis d'expliquer les principaux mécanismes de formation de la neige pour la zone d'intérêt, en s'intéressant aux paramètres climatiques corrélés aux précipitations solides. Ces derniers seront cartographiés et permettront de mieux comprendre les mécanismes de circulations atmosphériques propres à plusieurs types de temps à neige. Cette étape finale se fera par le croisement entre les données d'observations et les réanalyses ERA-INTERIM de l'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts).

## 1. Données et méthode

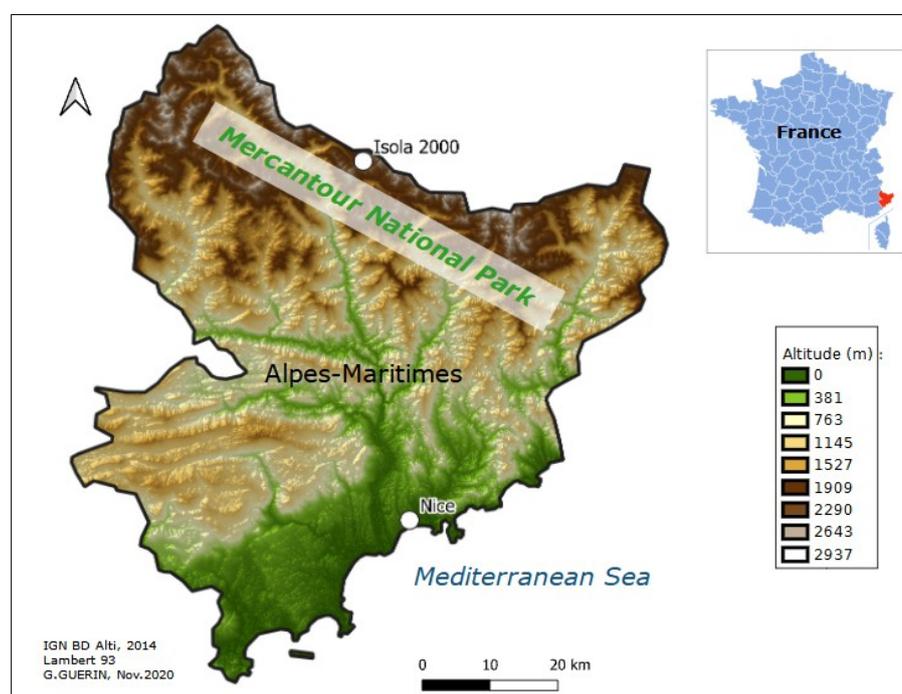


figure 1. Localisation du poste d'Isola 2000.

### 1.1. Zone d'étude et données

Les données d'observations des chutes de neige quotidiennes proviennent du poste Météo-France d'Isola 2000 (44.1892N ; 7.1496E), situé dans les Alpes du Sud, aux portes du Parc national du Mercantour, dans le département français des Alpes-Maritimes (cf. Figure 1). Le site dispose d'un contexte topographique particulier. En effet, il se trouve à une distance géodésique de 40 km de la mer Méditerranée. L'influence de ce réservoir d'eau tiède tout au long de l'année (la température de l'eau descend rarement sous les 12 °C même en hiver) sur les terres bordières, constitue un fait d'évidence, avec comme conséquence les précipitations record enregistrées dans la région, lors des épisodes méditerranéens (Trzpit, 1980 ; Kyselý et al., 2012 ; Piras, 2016, Chochon et al., 2021 ; Carrega et al., 2021).

L'étude est rendue possible par le croisement entre les observations du poste Météo-France et les réanalyses ERA-INTERIM de l'ECMWF, utilisées ici pour caractériser les paramètres atmosphériques intervenant dans les chutes de neige (non mesurés par le poste météorologique) et qui permettent par la suite d'identifier, puis de cartographier les types de circulation propres aux précipitations solides, à l'échelle de l'espace euro-atlantique. Les réanalyses ERA-INTERIM sont situées à l'interface entre l'observation et la modélisation (Nogueira, 2020). Elles sont exploitables à partir de 1979 et disposent d'une résolution de 79 km. Ainsi, pour une partie des traitements à venir, la maille d'extraction des paramètres atmosphériques est celle située au-dessus du poste météorologique d'Isola 2000. Bien qu'étant assez fidèle au contexte topographique et climatique du lieu, le pixel d'extraction représente l'état moyen de l'atmosphère pour une superficie de 6241 km<sup>2</sup>, ce qui ne reflète pas entièrement les paramètres du site d'étude. Il est néanmoins l'indicateur le plus proche spatialement, et il produit une série complète de données quotidiennes, pour un large choix de variables atmosphériques, à différents niveaux d'altitude.

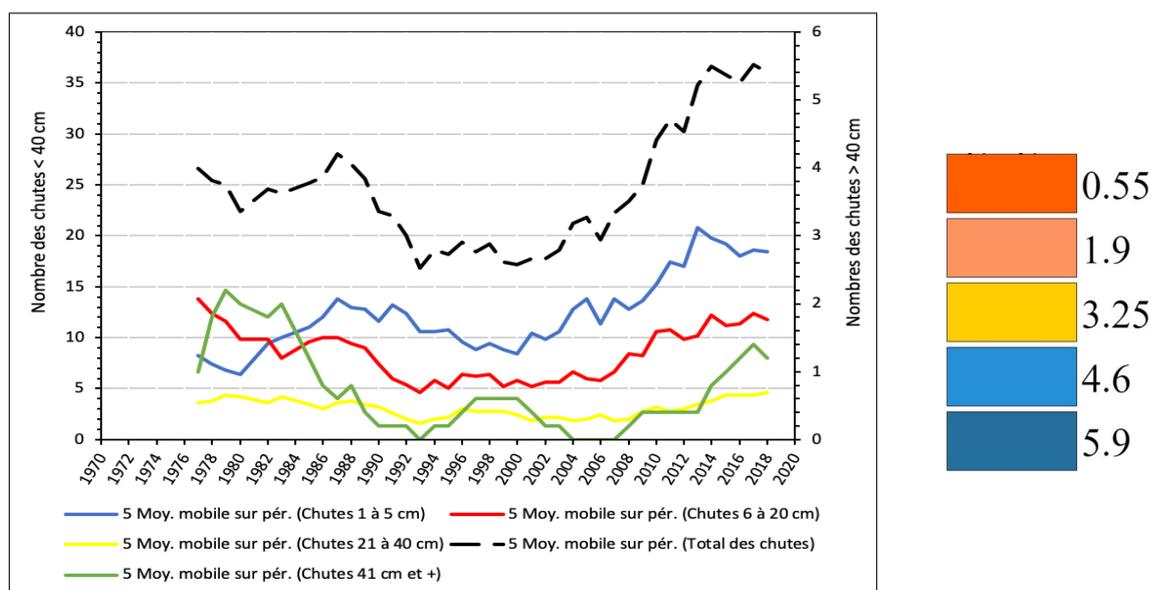
## 1.2. Méthodes

Les classes de chutes de neige sont réalisées à partir des observations du poste de mesure, en classant les jours selon la hauteur précipitée et en les discrétisant en fonction des ruptures de pente naturelles observables dans la distribution statistique. Ces ruptures composent alors les seuils des classes des types de temps à neige. La cartographie permettant la compréhension du mécanisme de formation des précipitations solides et l'identification des circulations propices aux chutes, est basée sur le processus suivant. Tout d'abord il s'agit de tester les variables atmosphériques ERA-INTERIM possiblement corrélées aux chutes de neige : Pression atmosphérique de surface ; Altitude du géopotential 500, 700, 850 hPa ; Ascendance verticale 700 et 850 hPa ; Température 700 et 850 hPa ; Composante U et V 700 et 850 hPa ; Humidité spécifique 700 et 850 hPa, soit au total 7 variables, avec 14 combinaisons de variable possibles en fonction du niveau de pression. S'ensuit la récupération des 28 combinaisons de variables sur le site de l'ECMWF. Les données en sortie sont des grilles au format NETCDF, centrées sur l'espace euro-atlantique. Ensuite, il s'agit d'extraire les valeurs quotidiennes des 28 combinaisons de variable pour le point de grille le plus proche spatialement d'Isola 2000, puis d'effectuer une analyse de corrélation entre les 28 combinaisons et les chutes de neige quotidiennes. Les variables avec les meilleurs coefficients de corrélation sont par la suite cartographiées selon la moyenne de toutes les situations quotidiennes constituant les 4 classes de types de temps à neige. Les circulations obtenues à la fin du processus sont alors dites « discriminantes », puisqu'elles sont identifiées en fonction de la variable d'intérêt.

## 2. Résultats

### 2.1. Occurrence des chutes de neige quotidiennes

Le nombre total de jours avec précipitations solides relevées par le poste d'Isola 2000, de janvier à mars, entre 1972 et 2019, s'élève à 1006. La discrétisation en 4 classes de hauteur par l'observation des ruptures de pente naturelles de la distribution statistique, permet d'obtenir quatre types de temps neigeux : de 1 à 5 cm (temps à faible chute de neige) ; de 6 à 20 cm (temps à moyenne chute de neige) ; de 21 à 40 cm (temps à forte chute de neige) et de 41 à 93 cm (temps à très forte chute de neige). La figure 3 illustre la moyenne mobile sur 5 ans du nombre de chutes journalières par classe et par an, pour la même plage d'étude. La courbe des chutes journalières totales (courbe noire) est marquée par une franche diminution jusqu'au début des années 90, passant de 25 chutes par an en 1972 à moins de 20 en 1993. Elle se stabilise autour de 20 chutes par an jusqu'en 2006, puis connaît un accroissement important, la faisant passer au-delà de 35 chutes entre 2006 et 2018. Ainsi, la tendance sur les 25 dernières années est à une augmentation de la fréquence d'apparition des précipitations neigeuses toutes classes confondues à Isola 2000.

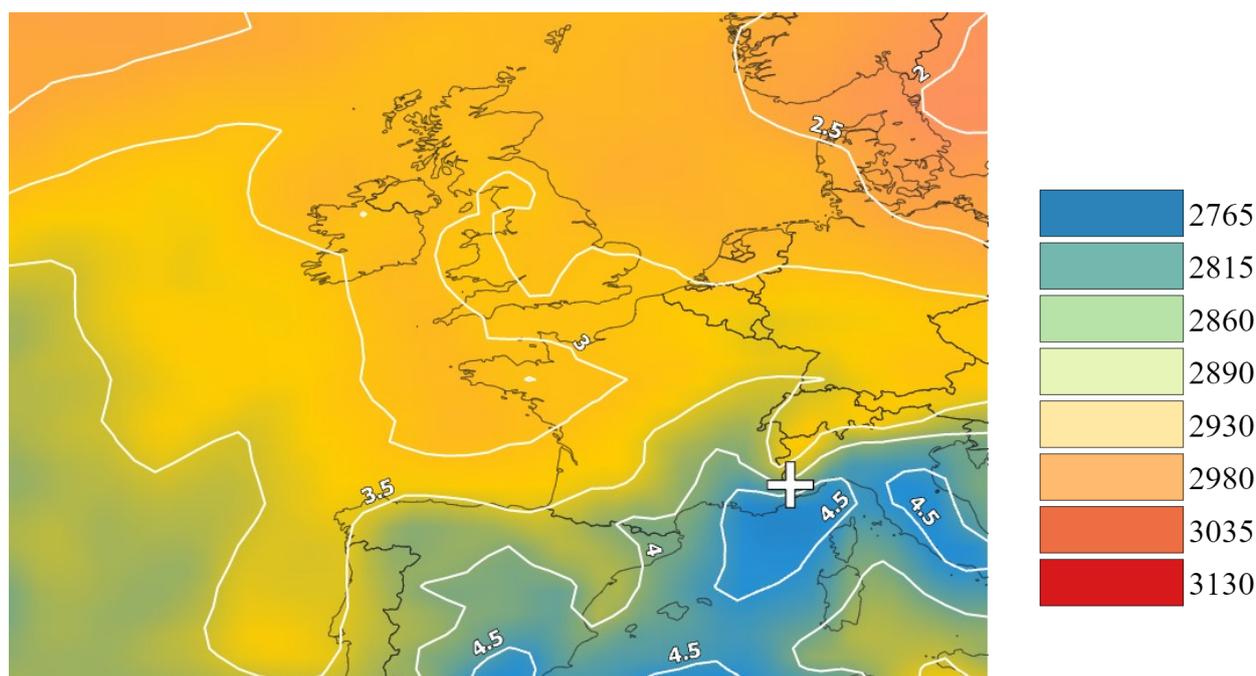


**figure 2.** Évolution du nombre de chutes de neige quotidiennes par classe et par an à Isola 2000 entre 1972 et 2019, pour les mois de janvier à mars. Pour les chutes supérieures à 40 cm les chiffres se lisent sur l'axe des ordonnées à droite alors que pour les 3 autres classes l'axe de référence est à gauche (Source : METEO-FRANCE).

## 2.2. Cartographie de la circulation atmosphérique en fonction des types de temps à neige

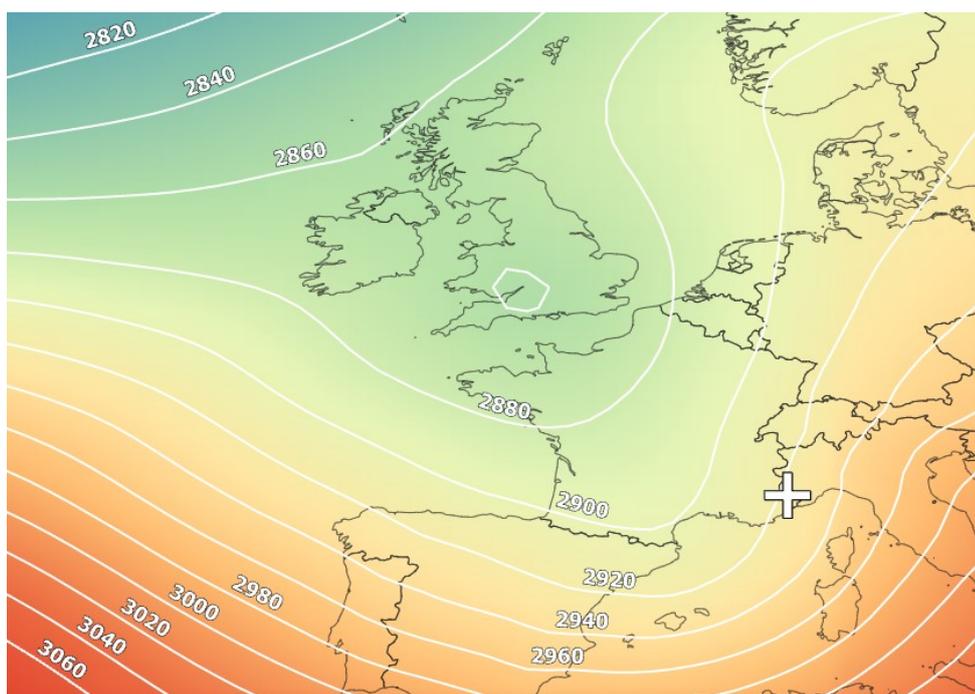
Le croisement entre les chutes quotidiennes d'Isola 2000 et les 28 combinaisons des réanalyses ERA-INTERIM, met en évidence six covariations dont les coefficients ( $r$ ) sont intéressants : la vitesse verticale de la masse d'air à 700 hPa ( $r = -0.35$ ) ; l'humidité spécifique à 850 hPa ( $r = 0.28$ ) ; la température à 850 hPa ( $r = -0.23$ ) ; l'altitude du géopotential 700 hPa ( $r = -0.31$ ) ; la composante V à 700 hPa ( $r = 0.28$ ), la pression de surface ( $r = -0.25$ ). Ces 6 paramètres, tirés des grilles NETCDF des réanalyses ERA-INTERIM, ont été moyennés en fonction des quatre types de temps à neige, pour obtenir des cartes à l'échelle de l'espace euro-atlantique et mettre en exergue les circulations propices à ce type d'événement.

Tout d'abord, les chutes de neige ont besoin pour se produire de matière première assimilée à de la vapeur d'eau (Martin et Carrega, 2011), et d'une température basse dans les moyennes et basses couches de l'atmosphère pour former les flocons (Verfaillie et al., 2018 ; Tang, 2020). Ainsi, pour les temps à faible et moyenne chute de neige, il est constaté une Europe sèche autour de 0,5 à 2 g/kg d'air humide au maximum. Pour les temps à forte et très forte chute de neige (cf. Figure 4), l'humidité dépasse assez largement les 3 g/kg d'air humide. De même, un noyau d'humidité se concentre sur la région PACA et le golfe de Gênes, avec des valeurs supérieures à 4,5 g/kg d'air humide autour d'Isola 2000, qui expliqueraient donc l'importance des cumuls sur 24 H pour les plus fortes classes. De plus, les températures moyennes à 850 hPa, signalent l'apparition d'une poche d'air froide (0 °C/-2 °C) centrée sur Isola 2000 pour les classes de neige les plus élevées. Cette configuration est importante puisqu'elle permet la formation des flocons de neige. De même, cette poche est entourée d'air plus chaud, ce qui renforce le mécanisme de convection de la masse d'air en provenance de la mer Méditerranée par une confrontation air froid/air chaud synonyme d'instabilité thermique.



**figure 4.** Humidité spécifique à 850 hPa (en g/kg) lors des chutes supérieures à 40 cm. La croix blanche situe le poste de mesure d'Isola 2000 (ERA-INTERIM, 2019 ; G. GUERIN, 2020).

La pression atmosphérique de surface, le géopotential à 700 hPa (cf. Figure 5), la vitesse verticale et la direction du flux sont les quatre variables susceptibles d'exprimer le déplacement et l'ascendance des masses d'air, donc en d'autres termes la circulation atmosphérique lors des épisodes neigeux. Ainsi, la pression en surface dessine un champ avec un vaste secteur dépressionnaire situé sur l'Atlantique nord, au NW des côtes britanniques. Un talweg axé NW-SE de la Bretagne à la mer Méditerranée se détache et se renforce en passant des classes les plus faibles vers les plus fortes. Ce talweg est encadré par des hautes pressions localisées au niveau des Açores et sur la mer Noire. Pour les temps à forte et très forte chute de neige, une goutte froide centrée sur les côtes languedociennes se forme, permettant (grâce à l'enroulement cyclonique des masses d'air) à un flux de secteur Sud de se mettre en place, alimentant d'autant plus la région en vapeur d'eau provenant de la mer Méditerranée. De même, l'orientation du flux force mécaniquement les masses d'air chargées en vapeur d'eau à s'élever au-dessus des Alpes. La vitesse du flux s'accélère également en Méditerranée en passant d'une classe à l'autre, jouant certainement un rôle dans le renouvellement constant d'air humide au-dessus de la station pendant les événements les plus importants. De plus, le creusement du géopotential à 700 hPa, indique que les centres d'action décrits précédemment sont d'ordre dynamique, ce qui conduit à un phénomène d'ascendance profonde au sein de la troposphère. Cela se constate avec la représentation de la vitesse verticale à 850 hPa (en Pa/s), qui montre un net renforcement des ascendances négatives (- 0.4 Pa/s) pour les temps à forte et très forte neige.



**figure 5.** Altitude du géopotential 700 hPa (en mètres) lors des chutes supérieures à 40 cm. La croix blanche situe le poste de mesure d'Isola 2000 (ERA-INTERIM, 2019 ; G. GUERIN, 2020).

Ainsi, il est possible d'identifier deux types de circulation à l'œuvre : une circulation d'ouest de type cyclonique, par temps à faible et moyenne chute de neige (chutes < 21 cm) ; une circulation de sud avec une dépression axée sur l'Islande et un talweg sur l'Europe occidentale, par temps à forte et très forte chute de neige (chutes > 21 cm).

## Conclusion

En définitive, il est mis en exergue des covariations entre les temps à neige à Isola 2000 et les six variables atmosphériques suivantes : la vitesse verticale ; l'humidité spécifique ; la pression atmosphérique de surface ; la température ; l'altitude du géopotential 700 hPa ; la composante V du flux. Un renforcement de ses paramètres dans le sens de la relation conduit à une intensification des précipitations neigeuses. Ces variables, qui entraînent localement de la neige, sont guidées par la circulation atmosphérique générale. Ainsi, la présence d'une dépression sur l'Islande, encadrée par deux anticyclones (un situé sur les Açores et l'autre sur la mer Noire) forme un talweg dépressionnaire de la Bretagne au Sud-Est de la France. Pour les plus importantes chutes de neige, une goutte froide se détache au niveau des côtes languedociennes, permettant par un jeu d'enroulement cyclonique, de diriger les masses d'air de la mer, où elles s'enrichissent en vapeur d'eau, vers les Alpes du Sud. Le forçage orographique entraîne ensuite l'ascendance de la masse d'air humide, son refroidissement, sa condensation puis des précipitations solides abondantes. Au total, deux types de circulation atmosphérique produisent des chutes de neige : les circulations d'ouest cyclonique pour les temps à neige faible et moyen ; les circulations de sud (flux de sud-ouest) avec une dépression axée sur l'Islande et un talweg sur l'Europe occidentale pour les temps à forte et très forte neige.

En parallèle, suite à une diminution au début des années 90, puis une stabilisation jusqu'au milieu des années 2000, la fréquence d'apparition des chutes de neige est repartie à la hausse depuis le milieu des années 2000. L'atmosphère est-elle davantage chargée en vapeur d'eau favorisant la production des chutes de neige ? Les circulations favorables voient-elles leur fréquence augmenter ? Ce dernier point mériterait d'être approfondi, avec en guise de perspective une possible classification des types de circulations

atmosphériques propres aux chutes, puis un calcul précis de leur fréquence pour le passé, mais également pour le futur, avec l'appui des sorties de modèles climatiques les plus récentes (CMIP6).

## Bibliographie

Barbier B., 1982 : L'impact des activités humaines (sports d'hiver) sur le milieu montagnard (Control of the mountain ecosystem by winter-sports). Bulletin de l'Association de Géographes Français 485-486 pp. 121-124.

Barrier N., Tréguier A-N., Cassou C., Deshayes J., 2014 : Influence des régimes de temps atmosphériques sur la circulation océanique de l'Atlantique Nord. La Météorologie, Météo et Climat, 2014, **8** (87), pp.38-44.

Boé J., Terray L., 2008 : Régimes de temps et désagrégation d'échelle. La Houille Blanche, N°2 (Avril 2008), pp. 45-51.

Carrega P., Michelot N., 2021 : Une catastrophe hors norme d'origine météorologique le 2 octobre 2020 dans les montagnes des Alpes-Maritimes », *Physio-Géo*, Volume **16** | -1, 1-70.

Chochon R., Martin N., Lebourg T., 2021 : Analysis of extreme precipitation during the Mediterranean event associated with the Alex storm in the Alpes-Maritimes : atmospheric mechanisms and resulting rainfall. SimHydro 2021 – Models for the complex and global water issues-Practices and expectations. 16-18 June 2021, Sophia-Antipolis France.

Francois H., Morin S., Spandre P., Lafaysse M., Lejeune Y., George-Marcelpoil E., 2016 : Croisement de simulations numériques des conditions d'enneigement avec une base de données socio-économiques spatialisée des stations de sports d'hiver : description de l'approche, application aux alpes françaises et introduction de la prise en compte des pratiques de gestion (damage et neige de culture). La Houille Blanche, n° 4, 2016, p. 66-84.

GIEC, 2014 : Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.

Groupe Régional d'Experts sur le Climat en région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur (GREC-SUD)., 2018 : Impacts du changement climatique et transition(s) dans les Alpes du Sud, Cahier Montagne, GeographR.

Joye J-F., 2019 : Enneigement artificiel, évaluation environnementale des projets d'aménagements touristiques en montagne. Le point après l'annulation partielle du décret UTN. Journal Spécial des Sociétés.

Kyselý J., Beguería S., Beranová R., Gaál L., López-Moreno J-I., 2012 : Different patterns of climate change scenarios for short-term and multi-day precipitation extremes in the Mediterranean. Global and Planetary Change, Volumes **98–99**.

Martin N., Carrega P., 2011 : L'enneigement dans les Alpes du Sud en France : Évolution temporelle et relation avec la circulation atmosphérique. XXIVe colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Sep 2011, Rovereto, Italie.

Marty C., Schlögl S., Bavay M., Lehning M., 2017 : How much can we save? Impact of different emission scenarios on future snow cover in the Alps. The Cryosphere, **11**, 517–529.

Planchon O., Cantat O., Quénol H., (2015) : Types de temps et types de circulation atmosphérique : essai de mise en relation à Angers et Bordeaux (France). Actes du XXVIIIème colloque de l'AIC, Liège, 381-386.

Nogueira M., 2020 : Inter-comparison of ERA-5, ERA-interim and GPCP rainfall over the last 40 years : Process-based analysis of systematic and random differences. Journal of Hydrology, Volume **583**.

Peña J-C., Schulte L., 2019 : Simulated and reconstructed atmospheric variability and their relation with large Pre-industrial summer floods in the Hasli-Aare catchment since 1300 CE. Global and Planetary Change, Volume **190**.

Pédelaborde P., 1956 : La circulation générale de l'atmosphère. L'information géographique, volume **20**, n°3.

Picard G., Domine F., Krinner G., Arnaud L., Libois Q., Morin S., 2015 : La taille des grains de neige et son influence sur le climat Antarctique. La Météorologie, N°**91**.

Piras M., Mascaro G., Deidda R., Vivoni E., 2016 : Impacts of climate change on precipitation and discharge extremes through the use of statistical downscaling approaches in a Mediterranean basin. Science of The Total Environment, Volume **543**, Part B.

Tang Z., Wang X., Deng G., Wang X., Jiang Z., Sang G., 2020 : Spatiotemporal variation of snowline altitude at the end of melting season across High Mountain Asia, using MODIS snow cover product. *Advances in Space Research*, Volume **66**.

Trzpit J.Paul., 1980 : La Méditerranée, un creuset d'humidité. In: *Méditerranée*, troisième série, tome 40. *Recherches climatiques en régions méditerranéennes*, sous la direction de A. Douguedroit. pp. 13-28.

Verfaillie D., Lafaysse M., Déqué M., Eckert N., Lejeune Y. and Morin S., 2018 : Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps, *The Cryosphere*, **12**, 1249-1271.