

## Abstract

Mountain regions are unique, and particularly sensitive to changes in climate conditions. Under the influence of climate change, these regions have already undergone important modifications of their snow-meteorological conditions, resulting in higher temperatures and a decline in snow cover at low and intermediate elevations. These past trends are expected to continue in the future. In this context, the quantification of past and future climate conditions is proving to be the foundation for the development of in-depth knowledge concerning climate impacts and risks for human societies and ecosystems.

Due to their geographical characteristics, mountain regions present numerous challenges for characterizing their climate and its evolution. The observation networks that provide the main material for studies of past climate in the European Alps are sparse, or even virtually non-existent above 3000 m altitude, both historically and currently.

Furthermore, the horizontal resolution of the regional climate models used until recently (of the order of 10 km), limits their ability to represent past and future changes in the mountain snowpack and its main explanatory variables, temperature and precipitation.

In the first part, this thesis evaluates the ability of global and regional reanalyses (ERA5, ERA5-Land, MESCAN-SURFEX, CERRA-Land) and regional climate simulations (CNRM-ALADIN, CNRM-AROME) to represent snow-meteorological conditions over recent decades in the European Alps. While winter temperature, precipitation and snow depth climatologies are well simulated in ERA5, MESCAN-SURFEX and CERRA-Land, we highlight several artifacts responsible for incorrect climate trends. Conversely, despite strong overestimations of snow accumulation in ERA5-Land, CNRM-ALADIN and CNRM-AROME, the latter provide past trends consistent with the literature. Finally, we show that no single modeling strategy outperforms all others within our sample, and that upstream choices have important consequences for the quality and use that can be made of the datasets produced.

We then explore the potential of new high horizontal resolution (2.5 km) regional climate simulations performed with the CNRM-AROME model to provide robust climate information on past and future snow and meteorological conditions in the French Alps.

Although the simulations carried out with CNRM-AROME offer several advantages over the outputs of coarser-resolution regional climate models, namely temperature and precipitation fields closer to observational references, their evaluation highlights biases in snow cover, limiting its potential. These biases, also present in the results of the AROME model used for numerical weather prediction, have multiple causes, involving atmospheric processes and their influence on the surface, in addition to deficiencies in the surface model itself.

In a final section, we present improved configurations of the SURFEX-ISBA continental surface model used in CNRM-AROME, evaluated using coupled simulations covering the two winters of 2018-2019 and 2019-2020 in the European Alps. Our results show an improvement in the model's performance compared with the default version, thanks not only to improved model components but also to a better representation of the influence of the snowpack on the energy balance. These results open up prospects for the use of such configurations in climate simulations and numerical weather prediction with AROME.

## Résumé

Les régions de montagne sont des régions singulières, particulièrement sensibles aux évolutions des conditions climatiques. Sous l'influence du changement climatique, ces régions ont déjà subi des modifications de leurs conditions nivo-météorologiques, se traduisant par une augmentation des températures et un déclin du manteau neigeux à basse et moyenne altitude. Il est projeté que ces tendances passées se poursuivent à l'avenir. Dans ce contexte, la quantification des conditions climatiques passées et futures se révèle être le socle indispensable à l'élaboration de connaissances approfondies concernant les impacts et risques climatiques pour les sociétés humaines et les écosystèmes.

En raison de leurs caractéristiques géographiques, les régions de montagne posent de nombreux défis pour caractériser leur climat et son évolution. Les réseaux d'observations qui fournissent le matériau principal des études sur le climat passé dans les Alpes Européennes sont éparés, voire quasi-inexistants au-dessus de 3000 m d'altitude, historiquement et actuellement.

De plus, la résolution horizontale des modèles climatiques régionaux utilisés jusqu'à récemment (de l'ordre de 10 km), limite leurs capacités de représentation des évolutions passées et futures du manteau neigeux en montagne et de ses principales variables explicatives, la température et les précipitations.

Dans une première partie, cette thèse évalue les capacités de réanalyses globales et régionales (ERA5, ERA5-Land, MESCAN-SURFEX, CERRA-Land) et de simulations climatiques régionales (CNRM-ALADIN, CNRM-AROME) à représenter les conditions nivo-météorologiques au cours des dernières décennies dans les Alpes Européennes. Si les climatologies de température, précipitations et hauteur de neige hivernales sont bien simulées dans ERA5, MESCAN-SURFEX et CERRA-Land, nous mettons en avant plusieurs artefacts responsables de tendances climatiques incorrectes. À l'inverse, malgré de fortes surestimations de l'accumulation de neige dans ERA5-Land, CNRM-ALADIN et CNRM-AROME, ces derniers fournissent des tendances passées cohérentes avec la littérature. Finalement, nous montrons qu'aucune stratégie de modélisation ne surpasse toutes les autres au sein de notre échantillon et que les choix en amont ont des conséquences importantes sur la qualité et l'usage qui peut être fait des jeux de données produits.

Nous explorons ensuite le potentiel de nouvelles simulations climatiques régionales à haute-résolution horizontale (2.5 km) réalisées avec le modèle CNRM-AROME pour fournir des informations climatiques robustes sur les conditions nivo-météorologiques passées et futures dans les Alpes françaises. Bien que les simulations réalisées avec CNRM-AROME présentent plusieurs avantages par rapport aux sorties des modèles climatiques régionaux à résolution plus grossière, à savoir des champs de températures et de précipitations plus proches des références observationnelles, leur évaluation met en évidence des biais en matière de couverture neigeuse, limitant son potentiel. Ces biais, également présent dans les résultats du modèle AROME utilisé pour la prévision numérique du temps, ont des causes multiples, impliquant des processus atmosphériques et leur influence sur la surface, en plus des déficiences du modèle de surface lui-même.

Nous présentons dans une dernière partie des configurations améliorées du modèle de surfaces continentales SURFEX-ISBA utilisé dans CNRM-AROME, évaluées au moyen de simulations couplées couvrant les deux hivers 2018-2019 et 2019-2020 dans les Alpes européennes. Nos résultats montrent une amélioration des performances du modèle par rapport à la version par défaut, grâce à l'amélioration des composants du modèle mais aussi à une meilleure représentation de l'influence du manteau neigeux sur le bilan d'énergie. Ces résultats ouvrent des perspectives pour l'utilisation de telles configurations pour les simulations climatiques et la prévision numérique du temps avec AROME.