

Descente d'échelle du vent par méthodes d'apprentissage profond: implications pour la nivologie et ses enjeux

Une dissertation présentée
par
Louis Le Toumelin

En vue de l'obtention du
Doctorat de l'Université de Toulouse

Délivré par l'Université Toulouse 3 - Paul Sabatier

Ecole Doctorale: SDU2E - Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace

Spécialité: Océan, Atmosphère, Climat

Unité de recherche: CNRM - Centre National de Recherches Météorologiques

Thèse dirigée par: Isabelle Gouttevin et Fatima Karbou

Downscaling wind fields in complex terrain with deep learning for snow applications

ABSTRACT

The complex mountain winds are a key component of mountain weather, notably because of their significant influence on the seasonal snowpack dynamics. Current numerical weather prediction systems can not capture the full scales variability of winds in complex terrain, requiring the use of downscaling methods to account for processes at higher resolution. This doctoral thesis focuses on the development of different machine learning and deep learning models to downscale and correct wind fields in complex terrain, as well as to simulate wind-driven snow transport.

First, I introduce DEVINE, a downscaling scheme designed to increase the spatial resolution of wind simulations in complex terrain. DEVINE includes a convolutional neural network trained on a large database of wind simulations, generated with the atmospheric model ARPS on Gaussian topographies. DEVINE replicates key processes of terrain forced flows, which is reflected in the evaluation metrics, most notably at exposed observation stations. Despite limitations inherent to its training data, DEVINE stands as a lightweight and versatile downscaling scheme, of potential interest for diverse applications.

In a second part, I introduce a corrective strategy complementing DEVINE. This strategy uses artificial neural networks to compute corrective terms that compensate inaccuracies in large scale wind forcing. The innovation of this method comes from the fact that the effects of the downscaling scheme are taken into account during the optimization of the correction, as a way to maximise the performances of the full correction and downscaling chain. Extensive evaluation was performed and evidenced improved performances, both in terms of simulated speed and direction.

Finally, I explored different types of machine learning models in order to simulate drifting-snow occurrences and fluxes, that could ultimately be fed by DEVINE outputs. These models were trained using atmospheric and drifting-snow observations in addition to variables describing the snowpack. Best performing models outperform three other well know parameterizations of threshold speed for drifting-snow events characterization found in the literature. Comparison to a physics-based, state of the art drifting model at the Col du Lac Blanc experimental site show equal performance in simulating drifting-snow occurrence and better performances for simulating fluxes for the best machine learning models. Future applications will benefit from DEVINE wind model, its corrected version and the drifting-snow models to more accurately forecast drifting snow in complex terrain.

Descente d'échelle du vent par méthodes d'apprentissage profond: implications pour la nivologie et ses enjeux

RÉSUMÉ

Les systèmes actuels de prévision numérique du temps ne permettent pas de capturer la variabilité spatiale du vent à des échelles infra-kilométrique en zone de montagne. Par conséquent, de nombreuses applications s'appuient sur des modèles de descente d'échelle pour prendre en compte les processus à l'œuvre à ces échelles. C'est le cas en nivologie où les phénomènes de transport de neige par le vent jouent un rôle clef dans la structuration du manteau neigeux à l'échelle locale. Dans ce contexte, cette thèse de doctorat se concentre sur le développement de méthodes d'intelligence artificielle pour la descente d'échelle et la correction du vent en zones de montagne mais également sur la mise en œuvre de stratégies de modélisation du transport de neige par le vent.

Dans un premier temps, j'ai développé le modèle DEVINE, qui a pour but d'augmenter la résolution horizontale de simulations de vents en zone de montagne. Ce modèle s'appuie sur un réseau de neurones à convolutions, préalablement entraîné sur une large base de données contenant des simulations de vent obtenues avec le modèle ARPS sur des topographies Gaussiennes. Je montre que DEVINE reproduit fidèlement des processus clefs de l'interaction du vent et de la topographie, comme l'attestent ses performances en zones exposées. Bien qu'héritant de certaines limites liées à ses données d'entraînements, DEVINE est un modèle économe en temps de calcul, polyvalent, et présente un intérêt potentiel pour un large spectre d'applications.

La seconde partie de mon étude s'est consacrée au développement d'une stratégie corrective, venant s'articuler avec le modèle DEVINE pour compenser des erreurs de modélisation initiées dans le modèle de plus large échelle forçant DEVINE. Cette stratégie s'appuie sur des réseaux de neurones artificiels. Sa principale innovation repose sur le fait que la descente d'échelle est prise en compte dans le calcul de la correction à apporter au modèle large échelle. A la suite d'un exercice d'évaluation, je montre que les simulations de vitesse et de direction de vent en montagne sont améliorées par cette méthode corrective.

La dernière partie de mon travail s'est consacrée au développement de modèles d'intelligence artificielle visant à représenter le transport de neige par le vent. Ces modèles ont été entraînés en utilisant des observations de transport de neige, des variables atmosphériques et des informations sur l'état du manteau neigeux. Les architectures les plus performantes permettent d'obtenir des résultats compétitifs en termes d'occurrence de transport et d'intensité, par rapport aux méthodes pré-existantes. Des comparaisons avec un modèle de transport de neige récent, réalisées au site d'observation du Col du Lac Blanc, viennent en complément des premières évaluations. Le modèle de descente d'échelle de vent combiné à la méthode corrective également développée dans cette thèse, constituent des jeux de données idoines pour alimenter les modèles de transport de neige par le vent développés dans cette dernière partie.