

Soutenance de thèse CNRM

mercredi 14 octobre 2026 à 15h

MODÉLISER LA CONVECTION ATMOSPHERIQUE EN MONTAGNE

par Nathan PHILIPPOT (CNRM/GMME et IGE)

au CIC

Lien visio:

<https://meteo.webex.com/meteco-fr/j.php?MTID=m3a7c03900cce8f8fb5f32e1afd92b102>

devant le jury composé de:

Daniel KIRSHBAUM, McGill University, Rapporteur
Nicolas ROCHETIN, LMD, Rapporteur
Marie LOTHON, LAERO, Examinatrice
Frédéric HOURDIN, LMD, Examineur
Fleur COUVREUX, CNRM, Directrice de thèse
Martin MÉNÉGOZ, IGE, Co-directeur de thèse
Catherine RIO, CNRM, Invitée - Co-encadrante de thèse

Résumé:

Les montagnes influencent l'atmosphère à différentes échelles à travers des processus dynamiques (e.g. blocages, soulèvement, ondes orographiques, foehn) ou des processus thermiques (e.g. brises anabatiques et catabatiques, initiation d'orages, hétérogénéités de surface). Cependant, la résolution limitée des modèles d'atmosphères (2 à 20 km pour les modèles de prévision météorologique et 50 à 200 km pour les modèles de climat) ne permet pas de représenter précisément la forme réelle des montagnes et les processus physiques associés. C'est pourquoi il faut représenter l'impact du relief non-résolu, dit "sous-maille", à l'aide de paramétrisations. Ces dernières décennies la recherche sur les paramétrisations du relief sous-maille s'est focalisée sur les conditions de vent fort où les processus dynamiques dominent, et a abouti à des paramétrisations du freinage orographique qui se sont révélées essentielles car elles ont un impact global sur les circulations atmosphériques de grande échelle. Cependant aucune paramétrisation n'a été développée pour les conditions de vent faible et ensoleillées où les processus convectifs sont largement impactés par le relief sous-maille. C'est donc l'objectif de cette thèse de combler ce

Pour tout renseignement, contacter Y. Poirier (05 61 07 96 55)

Centre National de Recherches Météorologiques
42, Avenue G. Coriolis - 31057 Toulouse Cedex

CNRM, UMR 3589

manque de paramétrisation. Les développements pourront profiter à la prévision météorologique qui reste actuellement imprécise en montagne car même à échelle kilométrique une grande partie du relief de petite échelle est sous-maille, et pourra aussi bénéficier aux projections du réchauffement climatique pour lesquelles les montagnes jouent un rôle très important pour les ressources en eau via leur rôle dans la formation des précipitations.

Afin d'étudier les processus convectifs en montagne et de guider le développement de paramétrisations, nous utilisons la méthodologie de comparaison LES/SCM (Large Eddy Simulation / Single Column Model). Cette méthode confronte des simulations LES de référence réalisées à une résolution suffisamment fine pour simuler explicitement l'essentiel des circulations convectives, avec des simulations SCM d'une colonne d'atmosphère où seules les paramétrisations physiques sont actives (i.e. la colonne d'atmosphère est isolée de toute interaction avec une dynamique de plus grande échelle). Les LES servent donc à la fois de source de compréhension des processus physiques clés, permettant d'établir le schéma conceptuel sur lequel se base une paramétrisation ensuite développée, et de référence pour évaluer la qualité de la paramétrisation dans le SCM. Nous avons réalisé un ensemble de simulations LES (ici avec une résolution de 100 m) avec des reliefs plus ou moins idéalisés qui nous ont permis d'identifier les processus convectifs à l'œuvre dans la couche limite montagnaise. Puis nous avons développé nos paramétrisations au sein d'un SCM et cherché à reproduire avec ce modèle 1D l'évolution diurne des profils moyens des variables pronostiques diagnostiqués dans les LES.

Dans un premier temps, nous nous sommes focalisés sur les processus convectifs à l'échelle aérologique, notamment les brises de pente anabatiques et catabatiques, ainsi que les thermiques bien connus des parapentistes. En partant de la paramétrisation dite EDMF (Eddy Diffusivity Mass Flux), qui modélise les propriétés d'un thermique moyen afin d'obtenir les flux de chaleur et d'humidité dans la couche limite convective, et des études précédentes qui modélisent les brises de pente, nous avons développé une paramétrisation de la convection sèche en montagne qui couple les anabatiques et les thermiques. Cette paramétrisation repose sur une nouvelle prise en compte du relief sous-maille, l'approche "alpha", qui consiste à définir les profils pronostiques à partir de l'altitude sous-maille minimale (au lieu de l'altitude moyenne) et de considérer la fraction d'atmosphère à chaque altitude $\alpha(z)$ qui part de 0 en bas et atteint 1 au sommet des montagnes. Cette approche semble idéale pour modéliser les montagnes dans les modèles d'atmosphère, mais elle nécessiterait un travail important pour être mise en place dans le cœur dynamique et dans l'ensemble des paramétrisations physiques concernées. A ce stade, la paramétrisation donne de bons résultats dans les conditions étudiées mais montre des limites pour des montagnes sous-mailles larges de dizaines de kilomètres où l'hétérogénéité à méso-échelle de la couche limite n'est pas négligeable.

Dans un second temps, nous nous sommes focalisés sur les processus convectifs de méso-échelle, notamment les brises de plaine et de montagne ainsi que leurs liens avec l'initiation de la convection profonde. Ces échelles sont approximativement résolues par les modèles météorologiques à résolution kilométrique, mais ce n'est pas le cas des modèles de climat pour lesquels les circulations méso-échelles sont sous-maille et devraient donc être paramétrisées, une lacune majeure des modèles de climat actuels. Nous avons développé, avec une approche bi-colonne, une paramétrisation des circulations méso-échelle permettant d'obtenir le profil vertical de vent de ces circulations. La paramétrisation permet de reproduire fidèlement le cycle diurne des brises ainsi que le processus de convergence d'humidité qui rend les chaînes de montagne si favorables à l'initiation de convection profonde. Par manque de temps, ce couplage a essentiellement été testé en plaine avec des contrastes de flux de surface. Le développement

Pour tout renseignement, contacter Y. Poirier (05 61 07 96 55)

Centre National de Recherches Météorologiques
42, Avenue G. Coriolis - 31057 Toulouse Cedex

CNRM, UMR 3589

couplant brise de méso-échelle et représentation des montagnes est brièvement présenté dans ce manuscrit au travers de résultats préliminaires, il constitue une perspective prometteuse de ce travail de thèse.

Enfin, cette thèse a aussi été l'occasion de participer à une campagne de mesure internationale dans les Alpes durant l'été 2025 (TeamX). J'ai passé trois semaines en Italie au Monte Baldo à conduire des mesures de brise de pente. Ce qui a permis d'analyser les propriétés réelles de ces vents de surface qui sont mal résolus dans les LES.

Ces travaux, bien que réalisés en mode uni-colonne, ouvrent la voie vers une meilleure représentation de la couche limite en montagne et du déclenchement de convection profonde, que ce soit dans les modèles de prévision du temps ou de climat.

Abstract:

Mountains influence the atmosphere on various scales through dynamic processes (e.g. blocking, uplift, orographic waves, foehn winds) or thermal processes (e.g. anabatic and catabatic slope winds, deep convection initiation, surface heterogeneities). However, the limited resolution of atmospheric models (2 to 20 km for weather forecast models and 50 to 200 km for climate models) does not allow for an accurate representation of the actual shape of mountains and the associated physical processes. This is why the impact of unresolved orography, known as sub-grid orography, must be modelled using parameterisations. In recent decades, research into sub-grid orography parameterisations has focused on strong-wind conditions where dynamic processes dominate, and has led to parameterisations of orographic drag which have proved essential as they have a global impact on large-scale atmospheric circulations. However, no parameterisation has been developed for light-wind and sunny conditions, where convective processes are significantly influenced by sub-grid-scale orography. It is therefore the aim of this PhD to address this gap in parameterisation. The findings will benefit weather forecasting, which currently remains imprecise in mountainous areas because, even at the kilometre scale, an important part of the small-scale orography is not resolved; they will also benefit projections of global warming, in which mountains play a very important role in water resources through their influence on precipitation formation.

In order to study convective processes in mountainous regions and to guide the development of parameterisations, we use the LES/SCM (Large Eddy Simulation / Single Column Model) comparison methodology. This method compares reference LES simulations carried out at a resolution fine enough to explicitly simulate the main convective circulations, with SCM simulations of a single atmospheric column in which only the physical parameterisations are active (i.e. the atmospheric column is isolated from any interaction with larger-scale dynamics). The LES simulations therefore serve both as a means of understanding key physical processes—enabling us to establish the conceptual framework on which a subsequently developed parameterisation is based—and as a reference for assessing the quality of the parameterisation in the SCM. We carried out a series of LES simulations (here with a resolution of 100 m) using more or less idealised orography, which enabled us to identify the convective processes at work in the mountainous boundary layer. We then developed our parameterisations within a SCM and sought to reproduce, using this 1D model, the diurnal evolution of the mean profiles of the prognostic variables diagnosed in the LES simulations.

Pour tout renseignement, contacter Y. Poirier (05 61 07 96 55)

Centre National de Recherches Météorologiques
42, Avenue G. Coriolis - 31057 Toulouse Cedex

CNRM, UMR 3589

Firstly, we focused on convective processes at the aerological scale, in particular anabatic and catabatic slope winds, as well as the thermals well known to paraglider pilots. Building on the so-called EDMF (Eddy Diffusivity Mass Flux) parameterisation, which models the properties of an average thermal to derive heat and moisture fluxes in the convective boundary layer, and on previous studies modelling slope winds, we have developed a parameterisation of dry convection in mountainous terrain that couples anabatic and thermals. This parameterisation is based on a new approach to account for sub-grid-scale orography, the ‘alpha’ approach, which involves defining prognostic profiles based on the minimum sub-grid-scale elevation (rather than the average elevation) and considering the fraction of the atmosphere at each altitude $\alpha(z)$, which starts at 0 at the base and reaches 1 at the mountain summit. This approach appears ideal for modelling mountains in atmospheric models, but it would require significant work to implement it in the dynamic core and across all the relevant physical parameterisations. At this stage, the parameterisation yields good results under the conditions studied but shows limitations for sub-grid mountains tens of kilometres wide, where the mesoscale heterogeneity of the boundary layer is not negligible.

We then turned our attention to mesoscale convective processes, in particular plain and mountain breezes, and their links to the initiation of deep convection. These scales are approximately resolved by weather models with kilometre-scale resolution, but this is not the case for climate models, in which mesoscale circulations are sub-grid and should therefore be parameterised – a major shortcoming of current climate models. Using a two-column approach, we have developed a parameterisation of mesoscale circulations that uses the wind profile as a prognostic variable. The parameterisation faithfully reproduces the diurnal cycle of breezes as well as the process of moisture convergence that makes mountain ranges so conducive to the initiation of deep convection. Due to time constraints, this coupling has mainly been tested in lowland areas with contrasts in surface fluxes. The development of a model coupling mesoscale breezes with mountain representation is briefly presented in this manuscript through preliminary results; it represents a promising perspective of this PhD research.

Finally, this PhD research also provided an opportunity to take part in an international measurement campaign in the Alps during the summer of 2025 (TeamX). I spent three weeks in Italy at Monte Baldo conducting measurements of slope winds. This enabled us to analyse the actual properties of these surface winds, which are poorly modelled in LES simulations.

Although this research was carried out using a single-column approach, it paves the way for a better representation of the boundary layer in mountainous terrain and the initiation of deep convection, whether in weather or climate forecast models.