

# Résumé

Le brouillard est un phénomène météorologique qui pose des problèmes aussi bien financiers que sécuritaires. Cependant, sa formation, puis son cycle de vie mettent en jeu des processus complexes qui le rendent difficile à prévoir. Le travail réalisé au cours de cette thèse a pour objectif d'améliorer les prévisions de brouillard du modèle à aire limitée opérationnel de Météo-France, AROME (Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle).

Au cours de cette thèse, nous avons implémenté diverses améliorations dans le modèle de prévision AROME: nous avons à la fois raffiné les résolutions horizontales et verticales, utilisé le schéma microphysique à 2 moments LIMA (Liquid Ice Multiple Aerosols) et ajouté un processus important pour la représentation du cycle de vie et de la structure du brouillard, le dépôt.

Cette nouvelle configuration du modèle a été évaluée sur l'hiver 2019-2020 à partir des données d'observation de la récente campagne de mesure SoFog3D. Cette campagne de mesure, dédiée à l'observation du brouillard et à la compréhension des processus tridimensionnels en jeu s'est déroulée dans le Sud-Ouest de la France entre octobre 2019 et mars 2020.

Une étude statistique a permis de mettre en évidence les défauts de la configuration actuelle d'AROME et d'évaluer l'apport de développements récents sur la prévision de brouillard. D'une part, l'amélioration de la résolution verticale du modèle permet de réduire à la fois les retards à la formation et la sous-estimation des brouillards fins. En effet, abaisser le premier niveau du modèle et réduire l'épaisseur des niveaux au-dessus de la surface facilite la propagation du refroidissement radiatif de la surface à l'atmosphère. D'autre part, l'utilisation du schéma à 2 moments LIMA et la prise en compte du dépôt permettent de rendre plus réalistes les concentrations en gouttelettes dans le nuage et de réduire la surestimation des contenus en eau nuageuse.

Dans un second temps, l'analyse de différentes Périodes d'Observations Intensives (POIs) de la campagne SoFog3D a permis de tester de nouvelles améliorations possibles et de comprendre quelques problèmes résiduels du modèle.

Il est apparu que les concentrations d'aérosols qui initient la formation des gouttelettes de brouillard étaient surestimées. Nous avons testé sur un cas d'étude l'impact de l'utilisation d'une population d'aérosols plus réaliste sur les prévisions de brouillard. Cet impact est très marqué sur les champs de contenu en eau nuageuse et sur les champs de concentration en gouttelettes.

À la suite de la campagne SoFog3D, et d'une première évaluation des simulations AROME, il est apparu que ce dernier tendait à sur-estimer la présence de brouillard dans la zone d'étude. Plusieurs POIs ont ainsi été déclenchées sans que le brouillard ne se forme ou ne se développe vraiment au site principal de mesure. Si dans certains cas une mauvaise prévision de la situation synoptique peut impacter fortement la prévision de brouillard dans le modèle, le non-développement du brouillard au Super-site pendant les différentes POIs étudiées était le plus souvent dû soit à l'advection ou à la formation d'un nuage de type stratocumulus, soit à la présence d'un jet de basse couche. Même si les processus en jeu lors de ce type de situations sont relativement bien représentés dans les simulations AROME, les brouillards prévus étaient généralement trop persistants. Différentes explications ont pu être mises en avant: des brouillards trop épais et/ou au contenu en eau trop important et des processus turbulent, peut-être pas assez actifs, mais conduisant à une dissipation trop lente du brouillard. Nous avons néanmoins pu noter l'apport de l'utilisation du schéma microphysique LIMA et de la prise en compte du dépôt sur les situations étudiées. Les brouillards prévus sont plus fins, moins homogènes, avec des contenus en eau plus faibles et plus proches de la réalité, ce qui contribue à une dissipation plus précoce.

## Abstract

Fog is a high stakes meteorological phenomenon, both financial and safety. However, it is difficult to predict it due to complex processes involved at formation and during its life cycle. The objective of this thesis is to improve the fog forecasts of the operational limited-area model of Météo-France, AROME (Application of Research to Operations at Mesoscale).

During this thesis, various improvements were implemented in the AROME model: resolutions were improved, both horizontally and vertically, the 2 moment microphysical scheme LIMA (Liquid Ice Multiple Aerosols) was used, and an important process for the representation of the fog life cycle and structure was added, the deposition. This new model configuration was evaluated over the winter 2019-2020 using observational data from the recent SoFog3D field campaign. This campaign, dedicated to fog observation and the understanding of the three-dimensional processes involved, took place in the South-West of France between October 2019 and March 2020.

A statistical study was performed, in order to compare the current AROME configuration and the new one, to assess the contribution of recent developments to fog forecasting. On the one hand, the improvement of the vertical resolution allows to reduce both the formation delays and the underestimation of thin fogs: lowering the first model level and reducing the thickness of the levels above the surface facilitates the propagation of radiative cooling from the surface to the atmosphere. On the other hand, the use of the 2 moment scheme LIMA and the deposition parametrisation allow to make the droplet concentrations in the cloud more realistic and to reduce the overestimation of the cloud water contents.

In a second step, the analysis of different Intensive Observations Periods (IOPs) of the SoFog3D campaign allowed to test new possible improvements and to understand some residual problems of the model.

Using a constant value to initialize aerosols drive to overestimate their concentration. An other way was tested, with the use of a more realistic aerosol population and the impact on fog forecast was evaluated on a case study. Impact is significant on the cloud water content and on the droplet concentration fields.

Following the SoFog3D campaign and the statistical evaluation of AROME simulations, it appeared that the model tends to overestimate fog in the study area. Several IOPs took place without fog forming or developing at the main measurement site. In some cases, a bad forecast of the synoptic situation explained model errors. However, the lack or no-development of fog at the main site during the different IOPs was most often due either to the advection or the formation of stratocumulus clouds, or to the presence of a low level jet. Even if the processes involved in this situation are relatively well represented in the AROME simulations, the fog forecasts were generally too persistent. Different explanations have been put forward: fogs that are too thick and/or have too much water content, turbulent processes which seem not active enough. This led to a too slow dissipation of the fog. Nevertheless, significant improvements due to the use of LIMA and deposition parametrisation, could be noted on the studied situations: the predicted fogs are finer, less homogeneous, with lower water contents and closer to reality, which contributes to an earlier dissipation.