

# Représentation de la turbulence dans des couches stables d'altitude par les modèles météorologiques

Soutenance de thèse  
**Léo Rogel**

le **vendredi 3 février 2023 à 14h00**  
**Salle Joël Noilhan**, bâtiment Navier  
CNRM, UMR 3589  
42, avenue Coriolis  
31057 Toulouse

BlueJeans :  
ID : 300642043 ; Code : 1878  
[https://bluejeans.com/300642043/1878?src=join\\_info](https://bluejeans.com/300642043/1878?src=join_info)

Jury :

## *Rapporteurs*

**Joan Cuxart**, UIB  
**Elena Masciadri**, INAF  
**Chantal Staquet**, LEGI

## *Examineurs*

**Jean-Pierre Chaboureau**,  
LAERO  
**Riwal Plougonven**, LMD

## *Encadrants*

**Didier Ricard**, CNRM  
**Éric Bazile**, CNRM  
**Irina Sandu**, ECMWF

## Résumé en français

Mieux représenter la turbulence dans les conditions atmosphériques stables constitue un enjeu majeur pour les modèles atmosphériques, pouvant permettre d'améliorer aussi bien les prévisions des conditions météorologiques près de la surface, les prévisions de la circulation générale de l'atmosphère, que les prévisions aéronautiques. En particulier, en altitude, les forts cisaillement de vent peuvent générer une intense turbulence pouvant causer des dommages importants aux avions et occasionner des blessures aux passagers. En outre, la turbulence joue un rôle dans la diffusion et le mélange d'espèce chimiques au niveau de la tropopause, ou encore dans la dissipation d'une partie de l'énergie cinétique des systèmes météorologiques de moyenne et grande échelle.

Cette thèse a pour objet l'analyse du comportement de la paramétrisation actuelle de la turbulence dans des couches stables au niveau de la tropopause. Peu de travaux de recherche se sont en effet intéressés à la caractérisation de la turbulence sous des conditions de forte stabilité en altitude. La principale originalité de ces travaux de thèse réside dans la réalisation d'une simulation à très fine résolution avec le modèle atmosphérique de recherche Meso-NH de phénomènes turbulents au niveau de la tropopause, adoptant la méthodologie des simulations aux grandes échelles de la turbulence. La simulation obtenue est une giga-LES (Large Eddy Simulation), et sa mise en oeuvre au cours de cette thèse constitue un challenge numérique en termes de capacité de calcul et de traitement de données.

La simulation reproduit un cas météorologique réel de jet hivernal pour lequel des observations d'avions de ligne indiquent la présence de turbulences en sortie de ce jet, proche d'un front d'altitude. Cette turbulence en ciel clair (CAT) est liée à la présence d'instabilité de cisaillement s'amplifiant dans une zone de stabilité dynamique réduite. Les simulations réalisées atteignent 130m de résolutions horizontale et verticale, sur une grande grille numérique, afin d'inclure les conditions météorologiques de grande échelle menant à cet épisode de CAT ainsi que les fluctuations de toutes petites échelles. L'étude se focalise sur la comparaison des champs moyens, des gradients

verticaux, et des flux turbulents diagnostiqués à différentes résolutions spatiales. A cette fin, une méthode de filtrage spatial a été utilisée pour 1) quantifier la part de la variabilité résolue aux échelles kilométriques par les modèles atmosphériques sur ces phénomènes de CAT, et 2) évaluer les flux turbulents paramétrés par le schéma de turbulence à la résolution horizontale opérationnelle du modèle AROME de Météo-France, à 1.3km.

Un déficit systématique de mélange turbulent est diagnostiqué pour les modèles AROME et Méso-NH à résolution kilométrique. On montre que ce manque de mélange turbulent est principalement imputable à une dissipation turbulente trop forte. De plus, on met aussi en évidence une forte anisotropie des variances de vent à l'échelle kilométrique. Une surestimation de la longueur de mélange par la formulation actuellement opérationnelle compense partiellement cette mauvaise fermeture de la dissipation, sans parvenir à maintenir des niveaux d'énergie cinétique sous-maille et de diffusion turbulente suffisants. Les résultats de cette étude montrent aussi un impact important de la résolution verticale sur le cisaillement vertical de vent par le modèle, bien supérieur à la prise en compte des effets tridimensionnels dans le schéma de turbulence à la résolution kilométrique. Enfin, des perspectives de travail sont esquissées sur une fermeture de la dissipation de la turbulence, qui devra nécessairement prendre en compte les conditions fortement anisotropes de la turbulence en conditions stables pour ces phénomènes d'altitude.

## English abstract

The improvement of the turbulence representation in stable atmospheric conditions is a major challenge for atmospheric models, which can improve both forecasts of near-surface weather conditions, forecasts of the general circulation of the atmosphere, and aviation forecasts. In particular, at high altitudes, strong wind shear can generate intense turbulence that can cause significant damage to aircraft and injuries to passengers. In addition, turbulence plays a role in the diffusion and mixing of chemical species at the tropopause, or in the dissipation of part of the kinetic energy of medium and large-scale weather systems.

The aim of this thesis is to analyze the behavior of the current parameterization of turbulence in stable layers at the tropopause. Few research works have indeed been interested in the characterization of turbulence under conditions of high stability at altitude. The main originality of this thesis work lies in the realization of a very fine resolution simulation with the atmospheric research model Meso-NH of turbulent phenomena at the tropopause level, adopting the methodology of large scale simulations of turbulence. The simulation obtained is a giga-LES (Large Eddy Simulation), and its implementation during this thesis is a numerical challenge in terms of computing capacity and data processing.

The simulation reproduces a real meteorological case of winter jet for which observations of airliners indicate the presence of turbulence at the exit of this jet, close to an upper front. This clear air turbulence (CAT) is linked to the presence of shear instability amplifying in a zone of reduced dynamic stability. The simulations reach 130m of horizontal and vertical resolution, on a large numerical grid, in order to include the large-scale meteorological conditions leading to this CAT episode as well as the fluctuations at very small scales. The study focuses on the comparison of mean fields, vertical gradients, and turbulent fluxes diagnosed at different spatial resolutions. To this end, a spatial filtering method has been used to 1) quantify the part of the variability resolved at kilometer scales by the atmospheric models on these clear air turbulence phenomena, and 2) evaluate the turbulent fluxes parameterized by the turbulence scheme at the operational horizontal resolution of the Météo-France AROME model, at 1.3km.

A systematic deficit of turbulent mixing is diagnosed for the AROME and Méso-NH models at kilometer resolution. This underestimation of the turbulent mixing is mainly due to a too strong turbulent dissipation. Moreover, a strong anisotropy of the wind variances at the kilometer scale is diagnosed. An overestimation of the mixing length by the current operational formulation partially compensates for this poor dissipation closure, without managing to maintain sufficient levels of subgrid kinetic energy and turbulent diffusion. The results of this study also show a significant impact of the vertical resolution on the vertical wind shear by the model, far superior to the consideration of three-dimensional effects in the turbulence scheme at the kilometer resolution. Finally, prospects for further work are outlined on a turbulence dissipation closure, which will necessarily have to take into account the strongly anisotropic turbulence conditions for these upper air phenomena.