

*Etablissement* **Institut National Polytechnique de Toulouse**

*École doctorale* **SDU2E - Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace**

*Spécialité* **Océan, Atmosphère, Climat**

*Domaine Scientifique* **Sciences de la terre et de l'univers, espace**

*Unité de recherche* **CNRM - Centre National de Recherches Météorologiques**

*Encadrement de la thèse* **Benoit VIE**

*Co-Encadrant* **Marie MAZOYER**

*Début de la thèse le* **1er octobre 2026**

*Date limite de candidature (à 23h59)* **1er juin 2026**

## Grands défis sociétaux

---

Climat, énergie, mobilité

## Mots clés - Keywords

---

aérosols, microphysique, rayonnement, prévision numérique du temps

aerosols, microphysics, radiative transfer, numerical weather prediction

## Description de la problématique de recherche - Project description

---

Les aérosols atmosphériques jouent un rôle central dans le système atmosphérique en interagissant étroitement avec le rayonnement et les nuages. En absorbant et en rétrodiffusant le rayonnement solaire, ils modulent l'énergie reçue à la surface ainsi que les profils de chauffage dans l'atmosphère. En tant que noyaux de condensation et de nucléation, ils influencent également le cycle de vie des nuages, depuis leur formation jusqu'à leur dissipation. Certains phénomènes illustrent particulièrement l'ampleur de ces interactions. Les panaches de poussières désertiques sahariennes, par exemple, perturbent fortement le bilan radiatif de surface tout en favorisant la formation de cirrus (Froyd et al., 2022). Les aérosols peuvent également intensifier la convection atmosphérique (Abbott et al., 2021) et moduler le cycle de vie des brouillards radiatifs ainsi que l'évolution des stratus (Boutle et al., 2018 ; Bhowmik, 2024). À travers leurs effets directs, indirects et semi-directs sur le rayonnement et les nuages, les aérosols constituent aujourd'hui l'une des principales sources d'incertitude des projections climatiques (Fiedler et al., 2023). Leur prise en compte réaliste représente donc un enjeu majeur, tant pour la compréhension du climat que pour l'amélioration de la prévision numérique du temps. Dans ce contexte, on s'intéresse au modèle opérationnel de Météo-France, AROME (Seity et al., 2011), qui permet une la prévision du temps à l'échelle kilométrique, dans lequel on introduira une représentation en ligne des aérosols et de leurs impacts.

Atmospheric aerosols play a central role in the atmospheric system by closely interacting with radiation and clouds. By absorbing and backscattering solar radiation, they modulate the energy reaching the Earth's surface as well as heating profiles in the atmosphere. As condensation and nucleation nuclei, they also influence the life cycle of clouds, from their formation to their dissipation. Certain phenomena particularly illustrate the extent of these interactions. Plumes of Saharan desert dust, for example, significantly disrupt the surface radiation balance while promoting the formation of cirrus clouds (Froyd et al., 2022). Aerosols can also intensify atmospheric convection (Abbott et al., 2021) and modulate the life cycle of radiative fog as well as the evolution of stratus clouds (Boutle et al., 2018; Bhowmik, 2024). Through their direct, indirect, and semi-direct effects on radiation and clouds, aerosols are currently one of the main sources of uncertainty in climate projections (Fiedler et al., 2023). Realistically accounting for them is therefore a major challenge, both for understanding the climate and for improving numerical weather prediction. In this context, we focus on Météo-France's operational model, AROME (Seity et al., 2011), which enables weather forecasting at the kilometer scale; we will incorporate an online representation of aerosols and their impacts into this model.

## Thématique / Contexte

---

Interactions aérosols-nuages-rayonnement, et leur impact sur la prévision du temps à échelle kilométrique

Les aérosols constituent une composante atmosphérique hautement variable, tant spatialement que temporellement, en fonction de leurs sources d'émission et des processus de transport. Ils incluent notamment les sels marins et les poussières désertiques mobilisés par le vent à la surface des océans et des régions arides, ainsi que les sulfates, le carbone suie (black carbon) et d'autres particules issues des activités anthropiques ou des feux de végétation. Dans sa configuration opérationnelle actuelle, le modèle AROME utilise une climatologie mensuelle des aérosols. Cette approche moyenne ne permet pas de représenter les variations rapides associées aux conditions météorologiques (vents forts, flux de sud favorisant les intrusions sahariennes) ni aux émissions ponctuelles telles que les feux de forêt. À l'inverse, des modèles de chimie-transport comme IFS-COMPO, MOCAGE ou ARPEGE-COMPO dès que cette configuration aura été finalisée et validée, simulent de manière réaliste l'évolution des aérosols, bien que leur développement soit historiquement orienté vers les problématiques de qualité de l'air.

L'objectif de cette thèse est de tirer parti de ces modèles pour fournir à AROME une description spatio-temporelle réaliste des aérosols. Ceux-ci pourront alors être pris en compte dans les calculs radiatifs ainsi que dans la représentation de la microphysique nuageuse. Ces deux effets ne ciblent pas les mêmes types d'aérosols : par exemple les particules très fines et fortement absorbantes peuvent dominer l'effet radiatif, tandis que des particules plus grosses, solubles ou cristallines peuvent être cruciales pour la formation des gouttelettes ou de cristaux. La représentation choisie des aérosols doit donc convenir aux deux usages et refléter de manière réaliste la diversité des tailles, compositions et concentrations.

Le couplage d'AROME avec IFS-COMPO existe déjà sous une forme avancée, notamment grâce aux travaux de Martin-Perez et al. (2024) sur le schéma microphysique à un moment ICE3 (Pinty et al., 1998) et de Vié et al. (2018) pour le schéma microphysique à deux moments LIMA (Vié et al., 2016, Taufour et al., 2024). Toutefois, la description des aérosols dans IFS-COMPO ou MOCAGE fait des hypothèses fortes sur les distributions dimensionnelles et la densité des aérosols, qui sont actuellement sous-contraintes par les observations dans ces systèmes, alors qu'une description précise de ces quantités est nécessaire pour leur utilisation comme noyaux de condensation et congélation. De plus, pour LIMA qui représente la consommation des aérosols par nucléation et lessivage, il est indispensable de représenter les sources d'aérosols en cours de prévision (Hoarau et al., 2018).

Les observations du réseau ACTRIS () réparties sur plusieurs sites en France, offrent un cadre d'évaluation unique, fournissant des mesures de concentrations massiques (ACSM) et en nombre (SMPS), ainsi que des informations sur la composition chimique des aérosols. L'origine des masses d'air peut être déterminée grâce au modèle de rétro-trajectoires FLEXPART (Bakels et al., 2024), utilisable en ligne dans AROME.

## Méthode

---

Dans un premier temps, la représentativité des espèces d'aérosols issues des modèles de chimie-transport sera évaluée au regard des observations. Une description simplifiée, adaptée aux besoins de la microphysique nuageuse et du rayonnement, sera alors construite. Des simulations AROME seront ensuite réalisées sur un ensemble de cas d'étude pour lesquels des observations abondantes seront disponibles (radar, observations in-situ), incluant différentes situations météorologiques sensibles aux aérosols. La configuration simplifiée sera comparée à une approche plus détaillée, telle que celle de Martin-Perez et al. (2024).

L'analyse des interactions entre processus reposera sur des outils diagnostiques avancés, tels que les diagnostics DDH, permettant d'accéder aux contributions individuelles des différents processus physiques.

Une évaluation plus robuste sera ensuite menée sur une large base de cas ou sur des périodes prolongées, afin de quantifier l'impact des modifications proposées sur la qualité globale des prévisions.

L'évaluation s'appuiera sur de nombreuses sources d'observations : mesures in situ aérosols et microphysique via le réseau ACTRIS, observations radar polarimétriques (via l'opérateur operadar de Augros et al, 2016), données satellitaires pour la couverture nuageuse, ainsi que les réseaux de pyranomètres pour le rayonnement via le logiciel PYRANO développée par Magaldo et al., 2024

## Résultats attendus - Expected results

---

Les retombées attendues concernent directement l'amélioration de la prévision opérationnelle. Une représentation plus réaliste des aérosols devrait entre autres permettre de mieux prévoir :

\* Le rayonnement et la température en surface, notamment lors des épisodes de remontées de poussières désertiques sahariennes et de feux de forêts

\* La formation et l'évolution du brouillard, notamment à proximité de sources d'aérosols anthropiques

\* Le cycle de vie des orages, les aérosols pouvant modifier sensiblement l'initiation et l'intensité des précipitations, l'activité électrique, la production de grêle

Au-delà des applications opérationnelles, cette thèse contribuera à une meilleure compréhension du rôle des aérosols dans un climat en évolution. L'amélioration de leur représentation constitue un levier essentiel pour affiner la prévision du temps sensible et réduire les incertitudes associées.

## Références bibliographiques

---

Augros, C., Caumont, O., Ducrocq, V., Gaussiat, N., & Tabary, P. (2016). Comparisons between

S, C, and X band polarimetric radar observations and convective-scale simulations of HyMeX\ first special observing period. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 142, Issue S1, 347–362.

Bakels, L., Tatsii, D., Tipka, A., Thompson, R., Dütsch, M., Blaschek, M., Seibert, P., Baier, K., Bucci, S., Cassiani, M., Eckhardt, S., Groot Zwaafink, C., Henne, S., Kaufmann, P., Lechner, V., Maurer, C., Mulder, M. D., Pisso, I., Plach, A., Subramanian, R., Vojta, M., and Stohl, A.: FLEXPART version 11: improved accuracy, efficiency, and flexibility, Geosci. Model Dev., 17, 7595–7627, , 2024.

Boutle, I., Price, J., Kudzotsa, I., Kokkola, H., and Romakkaniemi, S.: Aerosol–fog interaction and the transition to well-mixed radiation fog, Atmos. Chem. Phys., 18, 7827–7840, , 2018.

Bhowmik, M., Hazra, A., Ghude, S.D., Wagh, S., Chowdhury, R., Parde, A.N. et al. (2024) Is a more physical representation of aerosol chemistry needed for fog forecasting?. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 150(762), 2690–2711. Available from:

Magnaldo, M.-A., Libois, Q., Riette, S., and Lac, C.: Evaluation of surface shortwave downward radiation forecasts by the numerical weather prediction model AROME, Geosci. Model Dev., 17, 1091–1109, , 2024.

Martín Pérez, D., Gleeson, E., Maalampi, P., & Rontu, L. (2024). Use of CAMS near Real-Time\ Aerosols in the HARMONIE-AROME NWP Model. Meteorology, 3(2), 161-190.\

Fiedler, S., vanNoije, T., Smith, C. J., Boucher, O., Dufresne, J.-L., Kirkevåg, A., et al. (2023). Historical changes and reasons for model differences in anthropogenic aerosol forcing in CMIP6. Geophysical Research Letters, 50, e2023GL104848. \

Froyd, K.D., Yu, P., Schill, G.P. \*et al.\* Dominant role of mineral dust in cirrus cloud formation revealed by global-scale measurements. \*Nat. Geosci.\* 15, 177–183 (2022).

Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., and Masson, V.: The AROME-France Convective-Scale Operational Model, Mon. Weather Rev., 139, 976–991, , 2011. [a]([https://gmd.copernicus.org/articles/17/1091/2024/#xref\\_paren.13](https://gmd.copernicus.org/articles/17/1091/2024/#xref_paren.13)), [b]([https://gmd.copernicus.org/articles/17/1091/2024/#xref\\_paren.24](https://gmd.copernicus.org/articles/17/1091/2024/#xref_paren.24))

Vié, B., Pinty, J.P., Berthet, S. and Leriche, M. (2016) LIMA (v1.0): a quasi-two-moment microphysical scheme driven by a multimodal population of cloud condensation and ice freezing nuclei. \*Geoscientific Model Development\*, 9(2), 567–586.

Taufour, M., Pinty, J. P., Barthe, C., Vié, B., & Wang, C. (2024). LIMA (v2. 0): A full two-moment cloud microphysical scheme for the mesoscale non-hydrostatic model Meso-NH v5-6. \*Geoscientific Model Development\*, \*17\*(23), 8773-8798.

Tristan H. Abbott, Timothy W. Cronin, Aerosol invigoration of atmospheric convection through increases in humidity.\*Science\*\*\*371\*\*,\*83-85(2021).DOI:[10.1126/science.abc5181](<https://doi.org/10.1126/science.abc5181>)

## Contexte du poste : Modalités d'encadrement, de suivi de la formation et d'avancement des recherches du doctorant - Details on the thesis supervision

---

La thèse sera réalisée au CNRM, sous la direction de Benoît Vié et Marie Mazoyer, spécialiste en physiques des nuages et responsables de l'amélioration de la microphysique et des aérosols dans AROME. En plus des deux directeurs de thèse, des chercheurs du CNRM ayant une expertise des aérosols et de leur représentation dans les modèles de chimie-transport et de projection climatique participeront au suivi régulier des travaux. Un comité de thèse incluant des chercheurs extérieurs sera également mis en place.

## Conditions scientifiques matérielles et financières du projet de recherche

---

La thèse se déroulera au CNRM. Les infrastructures de Météo-France (superordinateurs, serveur de stockage notamment) serviront à la réalisation et à l'exploitation des simulations.

## Objectifs de valorisation des travaux de recherche du doctorant : diffusion, publication et confidentialité, droit à la propriété intellectuelle,...

---

Publication des travaux dans des revues à comité de lecture (1 à 2 publications envisagées)  
Participation à des séminaires, conférences nationales et internationales

## Profil et compétences recherchées - Profile and skills required

---

Connaissances en physique de l'atmosphère, bases en algorithmie et codage. Capacité à manipuler différents jeux de données, à utiliser des outils existants et à développer ses propres outils de traitement, d'analyse et de visualisation, essentiellement en python.  
Knowledge of atmospheric physics, as well as a foundation in algorithms and coding. Ability to work with various datasets, use existing tools, and develop custom tools for data processing, analysis, and visualization, primarily in Python.