M2 SOAC : Fiche de stage de recherche en laboratoire

Laboratoire : CNRM

Titre du stage : **Climatologie, cycle de vie et environnement des systèmes convectifs producteurs de grêle sévère**

Nom / statut / coordonnées (téléphone et email) du (des) responsable (s) de stage :

CAILLAUD Cécile Chercheuse (DESR/GMME/MOSCA) cecile.caillaud@meteo.fr 0561079375
AUGROS Clotilde Chercheuse (DESR/GMME/PRECIP), clotilde.augros@meteo.fr

1. Sujet du stage :

Contexte

La grêle sévère, c'est-à-dire avec un diamètre qui dépasse les 2 cm, est l'un des aléas orageux les plus destructeurs, avec des impacts majeurs sur l'agriculture, les infrastructures et la sécurité des personnes. En Europe, elle est un facteur clé de l'augmentation des pertes assurées liées aux orages ces dernières décennies (Pucik et al., 2019 ; Munich Re, 2026).

La caractérisation de la fréquence, de l'intensité et de la distribution spatiale et temporelle de la grêle sévère constitue donc un enjeu important pour l'étude des risques météorologiques actuels et futurs.

L'étude climatologique de la grêle reste cependant difficile. Les observations directes sont très hétérogènes et les observations radar, bien que permettant aujourd'hui de suivre les systèmes grêligènes à haute résolution spatiale et temporelle, ne donnent pas directement accès à l'ensemble des processus microphysiques et dynamiques responsables de la formation des gros grêlons.

Les travaux de Fluck et al. (2021) et plus récemment de Mohr et al. (2026) s'appuyant sur des observations radar, montrent notamment l'intérêt de construire des climatologies fondées sur les événements et les trajectoires des systèmes producteurs de grêle. Cette approche permet d'étudier la structure spatio-temporelle des systèmes grêligènes, leur durée de vie et leur évolution.

Les modèles à convection profonde résolue offrent une information complémentaire particulièrement intéressante. Ils permettent de suivre les systèmes convectifs dans l'espace et dans le temps et donnent accès à leur structure tridimensionnelle ainsi qu'à de nombreuses variables microphysiques, dynamiques et thermodynamiques. Des travaux récents ont notamment montré le potentiel de longues simulations kilométriques pour construire des climatologies de grêle et étudier les caractéristiques des systèmes convectifs producteurs de grêle (Kahraman et al. 2024, Feldmann et al., 2025 ; Cui et al., 2025).

Par ailleurs, les travaux de Raupach et al. (2021, 2023) montrent l'intérêt de caractériser l'environnement atmosphérique associé aux orages grêligènes, notamment à travers les conditions d'instabilité et de cisaillement favorables à la grêle. Plus récemment, Arnould et al. (2025) ont développé une approche objet appliquée aux simulations AROME-France permettant de suivre les systèmes convectifs au cours de leur cycle de vie et d'étudier l'évolution de leur environnement.

Une première étude réalisée au CNRM (stage master SOAC de Juliette Bonnet) a permis d'établir une climatologie du nombre de jours de grêle à partir d'une simulation du modèle de climat à échelle kilométrique CNRM-AROME (Caillaud et al., 2026) forcé par les réanalyses ERA5 sur la période 1959-2025, en utilisant notamment un diagnostic fondé sur le contenu intégré de graupel et

en le confrontant à des observations radar, dont le diagnostic MESH (Maximum Estimated Size of Hail, Witt et al., 1998).

Objectif

L'objectif du stage est de prolonger cette étude en construisant une **climatologie événementielle des systèmes orageux producteurs de grêle sur la France**, avec un intérêt particulier pour les événements de grêle sévère (≥ 2 cm).

La question scientifique centrale sera :

Quelles sont les caractéristiques du cycle de vie, de la structure et de l'environnement des systèmes convectifs producteurs de grêle sévère, et dans quelle mesure ces caractéristiques sont-elles représentées dans un modèle à convection profonde résolue ?

Une attention particulière sera portée à la capacité du diagnostic actuel fondé sur le contenu intégré de graupel à caractériser les événements de grêle sévère, ainsi qu'à l'identification des variables dynamiques et thermodynamiques associées à ces événements.

Le stage s'inscrit dans un ensemble de travaux complémentaires consacrés à la modélisation et à la prévision de la grêle au CNRM. Une **thèse** qui doit démarrer fin 2026 porte sur l'amélioration de la modélisation des processus liés à la croissance de la grêle dans le modèle. En parallèle, des travaux visent à développer un **diagnostic de grêle fondé sur l'intelligence artificielle à partir des variables du modèle**. Le stage adoptera une approche complémentaire : il se concentrera sur la **caractérisation des événements, leur cycle de vie, leur comparaison aux observations et l'identification des variables de l'environnement associées aux orages de grêle sévère**.

Les résultats pourront ainsi fournir un cadre de référence indépendant pour évaluer et interpréter les développements réalisés dans le cadre de la thèse et de l'approche IA. La climatologie événementielle développée au cours du stage pourra constituer une première étape vers l'étude de l'évolution future des systèmes producteurs de grêle dans des simulations climatiques à convection profonde résolue, prévue dans le cadre d'une thèse envisagée pour fin 2027.

Méthodologie et plan de travail prévisionnel :

Premier mois : Prise en main et définition des événements

Étude bibliographique, prise en main des données du modèle (CNRM-AROME) et observations de grêle (MESH). Définition des critères d'identification des événements grêligènes dans les observations et le modèle, et mise en place de la méthode objet pour identifier et suivre les systèmes convectifs. La méthodologie pourra s'inspirer des approches développées à partir des observations radar par Fluck et al. (2021), Raupach et al. (2021), et Mohr et al. (2026), ainsi que des méthodes de suivi appliquées aux simulations à convection résolue par Thurnherr et al. (2025). On pourra aussi s'appuyer sur l'outil de tracking **tobac** (Tracking and Object-Based Analysis of Clouds, Heikenfeld 2019), déjà utilisé à PRECIP dans des travaux précédents (David et al., 2025).

Mois 2 : Suivi des systèmes et comparaison aux observations

Construction des trajectoires des orages grêligènes identifiés dans le modèle et caractérisation de leur durée de vie, extension spatiale et évolution temporelle. Première comparaison avec les événements de grêle identifiés dans les observations radar, en particulier pour les événements de grêle sévère.

Mois 3 : Analyse du cycle de vie

Analyse des différentes phases du cycle de vie des systèmes producteurs de grêle. Étude de l'évolution du graupel et des caractéristiques dynamiques du système, et comparaison entre événements de petite grêle (ou pluie intense) et événements de grêle ≥ 2 cm.

Mois 4 : Analyse de l'environnement

Caractérisation de l'environnement des systèmes au cours de leur cycle de vie, en s'appuyant notamment sur les approches de Raupach et al. (2023) et Arnould et al. (2025). Analyse de l'instabilité, du cisaillement, de l'humidité et des autres variables pertinentes dans l'environnement des objets convectifs.

Mois 5 : Synthèse et climatologie

Identification des signatures les plus caractéristiques des événements de grêle sévère et évaluation de l'apport des différentes variables par rapport au diagnostic fondé sur le graupel intégré. Application de la méthodologie à l'ensemble de la période simulée pour construire une climatologie événementielle.

Mois 6 : Interprétation et valorisation

Synthèse des résultats, comparaison approfondie modèle–observations, analyse des limites et perspectives. Finalisation du rapport et préparation d'une présentation des résultats.

Tous les outils à adapter ou à mettre en œuvre seront en langage python.

2. Lieu du stage:

Le stage durera 6 mois à partir de février et se déroulera dans l'équipe **MOSCA** (**MOdélisation du Système Climatique régionAl)** ou **PRECIP** (**PREcipitations Convectives et ImPacts**) du Centre National de Recherche Météorologique (CNRM), à Toulouse.

3. Références :

Arnould, G., Montmerle, T., Rottner, L., & Moisselin, J. M. (2025). An object-based method to study the life cycle of mesoscale convective systems and their environment from cloud-resolving AROME-France simulations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *151*(767), e4919. https://doi.org/10.1002/qj.4919

Caillaud, C., Harader-Coustau, E., Li, S., *et al.* (2026). Technical note : configuration and first evaluation of the kilometre-scale regional climate model CNRM-AROME46t1. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.20448598

Cui, R., Thurnherr, I., Velasquez, P., Brennan, K. P., Leclair, M., Mazzoleni, A., Schmid, T., Wernli, H., & Schär, C. (2025). A European Hail and Lightning Climatology From an 11-Year Kilometer-Scale Regional Climate Simulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *130*(14), e2024JD042828. https://doi.org/10.1029/2024JD042828

David, C., Augros, C., Vié, B., Bouttier, F., and Le Bastard, T. (2025). Improved simulation of thunderstorm characteristics and polarimetric signatures with LIMA two-moment microphysics in AROME, Atmos. Meas. Tech., 18, 3715–3745, https://doi.org/10.5194/amt-18-3715-2025

Feldmann, Monika, et al. (2025). European Supercell Thunderstorms—A Prevalent Current Threat and an Increasing Future Hazard. *Science Advances*, vol. 11, no. 35, p. eadx0513, https://doi.org/10.1126/sciadv.adx0513.

Fluck, E., Kunz, M., Geissbuehler, P., & Ritz, S. P. (2021). Radar-based assessment of hail frequency in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *21*(2), 683–701. https://doi.org/10.5194/nhess-21-683-2021

Heikenfeld, M., Marinescu, P. J., Christensen, M., Watson-Parris, D., Senf, F., van den Heever, S. C., and Stier, P. (2019). tobac v1.2: towards a flexible framework for tracking and analysis of clouds in diverse datasets, Geosci. Model Dev., https://doi.org/10.5194/gmd-12-4551-2019

Kahraman, Abdullah, et al. (2024). Climatology of Severe Hail Potential in Europe Based on a Convection-Permitting Simulation. *Climate Dynamics*, vol. 62, no. 7, pp. 6625–42, https://doi.org/10.1007/s00382-024-07227-w.

Munich Re. (2026, April). *Risks from severe thunderstorms on the rise*. https://www.munichre.com/en/risks/natural-disasters/thunderstorms-hail-tornados.html

Mohr, S., Tonn, M., Augenstein, M., Sperka, C., Kavil Kambrath, G., & Kunz, M. (2026). A 20-year spatio-temporal analysis of 3D radar-based hail tracks in Germany: Trends and regional differences. *Frontiers in Environmental Science*, *14*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2026.1736782

Púčik, T., Castellano, C., Groenemeijer, P., Kühne, T., Rädler, A. T., Antonescu, B., & Faust, E. (2019). Large Hail Incidence and Its Economic and Societal Impacts across Europe. *Monthly Weather Review*, *147*(11), 3901–3916. https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0204.1

Raupach, T. H., Martynov, A., Nisi, L., Hering, A., Barton, Y., & Martius, O. (2021). Object-based analysis of simulated thunderstorms in Switzerland: Application and validation of automated thunderstorm tracking with simulation data. *Geoscientific Model Development*, *14*(10), 6495–6514. https://doi.org/10.5194/gmd-14-6495-2021

Raupach, T. H., Soderholm, J., Protat, A., & Sherwood, S. C. (2023). An Improved Instability–Shear Hail Proxy for Australia. *Monthly Weather Review*, *151*(2), 545–567. https://doi.org/10.1175/MWR-D-22-0127.1

Witt, A., Eilts, M. D., Stumpf, G. J., Johnson, J. T., Mitchell, E. D. W., & Thomas, K. W. (1998). An Enhanced Hail Detection Algorithm for the WSR-88D. *Weather and Forecasting*. https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013%25253C0286:AEHDAF%25253E2.0.CO;2