

M2 SOAC : Fiche de stage de recherche en laboratoire

Laboratoire : CNRM

Titre du stage : **Évaluation du diagnostic et du potentiel de grêle dans les simulations du modèle de climat à échelle kilométrique CNRM-AROME sur la France**

Nom et statut du (des) responsable (s) de stage :

Coordonnées (téléphone et email) du (des) responsable (s) de stage :

Cécile CAILLAUD, chercheuse DESR/GMGEC/MOSCA

Téléphone : 05 61 07 93 75, Mél : cecile.caillaud@meteo.fr

Clotilde AUGROS, chercheuse DESR/GMME/PRECIP

Téléphone : 05 61 07 84 89, Mél : clotilde.augros@meteo.fr

Sujet du stage :

La grêle contribue de manière importante aux pertes assurées associées aux orages violents dans le monde chaque année. Elle a représenté le phénomène naturel le plus coûteux en France en 2022. Répondre aux questions sur une possible augmentation déjà observée du nombre d'épisodes ou de la taille des grêlons est complexe, car la grêle est un phénomène très localisé. La détection de la grêle et en particulier de la taille des grêlons reste difficile avec les réseaux d'observation opérationnels (radars météorologiques au sol), et les observations directes de la grêle au sol via les bases de données collaboratives sont relativement récentes.

Toutefois, plusieurs produits récemment développés permettent d'avoir des informations spatialisées sur la grêle en France sur des périodes couvrant quelques années. Le produit de fusion de données HYDRE, disponible depuis 2016, fournit des informations sur l'occurrence de grêle sur la France métropolitaine à une résolution kilométrique. Ce produit distingue trois classes de taille ($< 5\text{mm}$, entre 5 mm et 2 cm , et $> 2\text{ cm}$). Depuis mai 2025, des données sur la taille des grêlons sont fournies par l'algorithme MESH (Maximum Estimated Size of Hail : Witt 1998, Morillo et Homeyer, 2019) qui s'appuie sur des données de réflectivité 3D et des isothermes de température 0°C et -20°C . Enfin, soigneusement validé à partir des rapports de grêle de la base de données ESWD (European Severe Weather Database), un nouvel algorithme de détection de la grêle sévère avec de l'intelligence artificielle a permis, à partir des observations radars, de construire une base de données avec des "vignettes" de 30 km sur 30 km en y associant "Oui grêle" et "Non grêle" (thèse de Vincent Forcadell, Forcadell et al, 2024, stages M2 Maxandre Ouradou en 2024 et de Louis Tariot, 2025).

En parallèle, une nouvelle génération de modèles régionaux de climat à résolution kilométrique ($2\text{-}3\text{ km}$) a été récemment développée et permet, notamment grâce à des résolutions plus fines et la représentation explicite de la convection profonde, de représenter correctement les nuages d'orages au sein desquels se forment la grêle (Prein et al, 2015). De premières études ont utilisé ces outils pour caractériser le potentiel de grêle sévère ou de supercellules sur l'Europe (Kahraman et al. 2024, Feldmann et al. 2025).

Au CNRM, une longue simulation d'évaluation du modèle régional de climat à résolution kilométrique CNRM-AROME à $2,5\text{ km}$ de résolution (Caillaud et al. 2021), forcée directement par la réanalyse ERA5, a été réalisée sur la période 1959-2022 (et bientôt jusqu'à 2024) sur un domaine France élargie. Si son aptitude à représenter les extrêmes de précipitations au pas de temps quotidien et horaire a déjà été évaluée (stages M2 Mathis Chevé et Nicolas Decoopman en 2025), l'évaluation des données de diagnostic de grêle ou de potentiel de grêle n'a encore jamais été faite.

L'objectif du stage proposé est donc d'évaluer l'aptitude du modèle de climat kilométrique CNRM-AROME à représenter la grêle en comparant à l'ensemble des données observées à notre disposition et si l'évaluation est satisfaisante, d'établir, à partir du modèle, une climatologie de la grêle en France sur toute la période disponible.

Un rapport présentant l'approche et les différents résultats à diverses étapes sera rédigé. Le stage se conclura par une présentation générale devant jury.

Méthodologie et plan de travail prévisionnel :

- Deux premiers mois : études bibliographiques, prise en main de l'environnement et des outils utilisés à GMGEC.MOSCA et GMME/PRECIP, des sorties du modèle CNRM-AROME au format netcdf et des bases de données de grêle disponibles.
- 3^{ème} mois : mise en place d'une méthodologie d'évaluation spatialisée du diagnostic de grêle issu directement du modèle et/ou du potentiel de grêle, défini à partir de proxy adaptés par exemple de ceux mis en place dans les études déjà réalisées avec des modèles de climat (Kahraman et al. 2024, Feldmann et al. 2025) ou de ceux définis pour la détection des supercellules développés par Arnaud Mounier (DESR/CNRM/GMAP/PREV) ou des indices de convection développés à DIROP/PG/LABO.
- 4^{ème} et 5^{ème} mois : Évaluation du diagnostic de grêle et/ou du potentiel de grêle par comparaison aux bases de données observées et réalisation d'une climatologie de la grêle sur la France.
- Derniers mois : documentation de cette climatologie de grêle, illustration pour quelques cas sévères, rédaction du rapport, préparation de la soutenance.

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

Lieu du stage, durée ou période :

Le stage durera 6 mois à partir de février et se déroulera dans l'équipe MOSCA (MODélisation du Système Climatique régional) du Centre National de Recherche Météorologique (CNRM), à Toulouse, en collaboration avec l'équipe PRECIP.

Références :

Caillaud, C., Somot, S., Alias, A. *et al.* Modelling Mediterranean heavy precipitation events at climate scale: an object-oriented evaluation of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model. *Clim Dyn* 56, 1717–1752 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05558-y>

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

Forcadell, V., Augros, C., Caumont, O., Dedieu, K., Ouradou, M., David, C., Figueras i Ventura, J., Laurantin, O., & Al-Sakka, H. (2024). Severe hail detection with C-band dual-polarisation radars using convolutional neural networks. *EGUsphere*, 1–43. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1336>

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

Prein, A. F., et al. A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of geophysics*, 53(2), 323-361 2015. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014RG000475>