



# Journées de l'IA à Météo-France

Centre International de Conférences 13-14 février 2025

31 janvier 2025

## Résumés

### *Session 2 : prévision d'ensemble*

- **Valorisation de la PE-AROME vers les services opérationnels: détection d'objets convectifs et clustering des membres avec des réseaux de neurones**

*A. Mounier – CNRM/GMAP/PREV*

L'objectif de la présentation est de revenir sur les travaux menés depuis 2019 sur la valorisation de la PE-AROME sous forme de produits innovants pour les services opérationnels de Météo-France, en particulier en lien avec la prévision générale. La synthétisation du risque d'écho arqué avec un U-Net et le produit qui tourne en temps réel depuis 2021 seront présentés. La détection des supercellules sera aussi évoquée avec des travaux toujours en cours. Concernant le clustering des membres, la méthode avec un autoencodeur et des cartes auto-adaptatives (SOM) sera introduite, ainsi que la première maquette qui tourne en temps réel depuis l'été 2024 sur le Sud-Est du pays. Les perspectives pour les mois à venir seront aussi présentées.

- **Scénarios de prévision d'ensemble adaptés aux besoins usagers**

*F. Roubelat – CNRM/GMAP/PREV*

Cette présentation portera sur l'avancée de mes travaux de thèse. L'objectif est de valoriser la prévision d'ensemble PE-AROME en scénarios pour des usagers extérieurs à Météo-France. La méthode choisie consiste à obtenir des scénarios de PE en assignant les membres de l'ensemble à des classes climatologiques, à la manière des régimes de temps. Ces classes sont définies après l'application d'une méthode de classification à une base de données météorologiques. À cause de la grande dimension de cette base de données et des difficultés de classification associées, on applique aux données une méthode de réduction de dimension. Cette méthode s'appuie sur un réseau de neurones de type autoencodeur. Pour que les scénarios obtenus soient adaptés à l'utilisateur, l'autoencodeur a été modifié pour prendre en compte une variable usager. Tout ce travail est mené en collaboration avec la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) sur un cas d'étude : l'énergie éolienne.

- **Distributional Regression U-Nets for the Postprocessing of Precipitation Ensemble Forecasts**

*M. Taillardat – DIROP/COMPAS/DOP*

Accurate precipitation forecasts have a high socio-economic value due to their role in decision-making in various fields such as transport networks and farming. We propose a global statistical postprocessing method for grid-based precipitation ensemble forecasts. This U-Net-based distributional regression method predicts marginal distributions in the form of parametric distributions inferred by scoring rule minimization. Distributional regression U-Nets are compared to state-of-the-art postprocessing methods for daily 21-h forecasts of 3-h accumulated precipitation over the South of France. Training data comes from the M'et'eo-France weather model AROME-EPS and spans 3 years. A practical challenge appears when consistent data or reforecasts are not available.

Distributional regression U-Nets compare favorably with the raw ensemble. In terms of continuous ranked probability score, they reach a performance comparable to quantile regression forests (QRF). However, they are unable to provide calibrated forecasts in areas associated with high climatological precipitation. In terms of predictive power for heavy precipitation events, they outperform both QRF and semi-parametric QRF with tail extensions.

- **Sélection d'échelle en prévision probabiliste des événements à fort impact**

*F. Bouttier – CNRM/GMME/PRECIP*

Malgré les progrès des modèles numériques pour prévoir les intensités des phénomènes à fort impact, ils souffrent par nature d'erreurs importantes de position et de timing. C'est un problème majeur pour les prises de décision vis à vis des systèmes à faible extension spatiale comme les orages et les précipitations intenses : leurs trajectoires répondent à des incertitudes physiques complexes, souvent sous-échantillonnées par les prévisions d'ensemble.

Des opérateurs de tolérance spatio-temporelles (ou "voisinages") empiriques sont généralement employés pour gérer ce problème lors de la conversion des ensembles en prévisions spatialisées. On teste ici une généralisation de ces post-traitements par apprentissage d'un réseau neuronal convolutif appliqué aux sorties de prévisions d'ensemble AROME. On examinera ses performances sur des cas de pluies extrêmes, son réalisme physique, ainsi que son explicabilité.

- **Comparaison d'approches génératives pour l'émulation d'ensemble de prévision AROME**

*M. Lame, A. Bonamy, V. Sanchez, C. Brochet, L. Raynaud – CNRM/GMAP/PREV*

La prévision d'ensemble AROME (PEARO) est un des outils majeur de la PNT à Météo France. L'utilité de cette approche peut néanmoins être limitée, dans certains cas, par un nombre de membres d'ensemble insuffisant, imposé par les ressources de calcul disponibles. A la suite des travaux initiés dans la thèse de Clément Brochet (soutenue en novembre en 2024), l'objectif du projet DE\_371 (Destination Earth) est de démontrer que des méthodologies utilisant les algorithmes d'IA générative à l'état de l'art peuvent aider à améliorer l'estimation de l'incertitude des prévisions, en permettant de produire des prévisions d'ensemble de grande taille et à haute résolution spatiale et temporelle, pour un coût de calcul raisonnable. Les résultats de Brochet et al. démontrent la viabilité de ces méthodes en montrant que les GANs et les modèles diffusifs permettent d'émuler efficacement des membres de PEARO, au prix d'un compromis performance/efficacité à trouver. Les modèles génératifs antagonistes (GANs) sont capables de générer des membres de bonne qualité mais souffrent d'un phénomène appelé "effondrement modal" rendant l'apprentissage instable. Les modèles diffusifs de débruitage (DDPMs) permettent quant à eux de générer efficacement des ensembles sans souffrir de l'instabilité observée avec les GANs. Ils sont cependant limités par le nombre d'étapes de débruitage mises en place et ont donc un coût computationnel plus élevé que les GANs. Des méthodes d'échantillonnage « rapides » de modèles diffusifs permettent de pallier en partie ce problème et de produire des membres pour un coût comparable à celui des GANs. Nous détaillons et comparons les performances respectives de ces deux méthodes pour l'enrichissement d'ensembles issus de la PEARO, en se focalisant sur la génération de variables de temps sensible (vent à 10m, température à 2m et précipitations).

## Session 3 : Applications de l'IA, partie 1

- **Projet DEEPAIR**

*R. Köth – DSM/CS/ENV, Z. Garcia, B. Pradel – DSM/Lab IA, M. Joly – CNRM/GMGEC/PLASMA,  
F. Meleux – Ineris*

Ce travail explore l'utilisation du Deep Learning pour optimiser les prévisions de qualité de l'air fournies par la plateforme PREV'AIR, dans le cadre du projet DEEPAIR mené par Météo-France et l'INERIS. L'objectif est d'améliorer les prévisions des concentrations de polluants atmosphériques (O3, NO2, PM10, PM2.5) en réduisant les biais et en augmentant la résolution spatiale.

Les modèles de Chimie-Transport (MOCAGE et CHIMERE) sont largement utilisés, mais leurs prévisions montrent des limites. Le Deep Learning offre des perspectives d'amélioration prometteuses. Des modèles CNN et Transformer, comme Half-Unet, Segformer et SwinUNETR, ont été entraînés pour optimiser les prévisions d'ozone à 15h, d'abord avec des données de qualité de l'air, puis en ajoutant des prévisions météorologiques du modèle AROME. La période considérée couvre 2021-2024.

Comparés aux baselines MOCAGE et CHIMERE interpolées à 2 km, les modèles IA réduisent significativement les erreurs en améliorant la distribution spatiale des polluants et détectent mieux les dépassements réglementaires (>120 µg/m<sup>3</sup>). L'ajout de données météorologiques améliore la représentation des pics de pollution. SwinUNETR a légèrement surpassé les autres modèles, bien qu'un entraînement prolongé soit nécessaire pour mieux prévoir les extrêmes.

Cette étude confirme l'efficacité du Deep Learning pour améliorer les prévisions de qualité de l'air et ouvre des perspectives pour d'autres échéances, polluants et données, tout en réduisant les coûts des méthodes actuelles.

- **Le projet RAINCELL : améliorer les lames d'eau avec des données d'opportunité issues d'un réseau de téléphonie mobile**

*P. Lepetit – DSO/MSO/PPC*

Les signaux micro-ondes échangés entre les antennes relai des réseaux de téléphonie mobile sont atténués par les précipitations. De décembre 2022 à juin 2024, des données d'atténuation portant sur 5.000 paires d'antennes ont été fournies par ORANGE pour évaluer leur apport en matière d'estimation quantitative des précipitations.

Pour cette évaluation, deux méthodes de construction de lame d'eau intégrant les atténuations sont actuellement développées. La première méthode est basée sur une modélisation physique et des étapes de détection et d'estimation à l'échelle de la paire d'antennes suivie d'une étape de fusion dans ANTILOPE. La seconde méthode est entièrement pilotée par les données. Elle est fondée sur une régression des données d'atténuation et des données radar sur les données issues des pluviomètres et elle tente de répondre à deux difficultés :

- les données d'atténuations sont de qualités très hétérogènes ;
- une régression standard débouche sur des lames d'eau lissées.

Après une présentation rapide de ces méthodes, les derniers résultats disponibles seront comparés et discutés. Les possibilités et défis d'un passage à l'opérationnel seront abordés en conclusion.

- **Does deep learning ease the assimilation of new observation in LDAS-monde?**

*P. Vanderbecken, J. Vural, O. Rojas Munoz, B. Bonan, T. Corchia, J.-C. Calvet – CNRM/GMME/VEGEO*

In recent years, the VEGEO team implemented the assimilation of new remote sensing observations of the surface and vegetation in the land surface model ISBA. Instead of using a physical model as an observation operator, the team used deep learning to design their observation operators. We succeeded on the assimilation of microwave observation (SMAP, SMOS, ASCAT) as well as Sentinel-5P Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) product. The SIF results from the chlorophyll photosynthesis activity. The recent level 2 SIF product from the TROPOMI instrument onboard SENTINEL-5P provides a daily estimate of SIF all around the globe. SIF results from a complex small-scale physics unresolved in our land surface model. To design the observation operator we adopt a feed-forward neural network architecture. The predictors (aka features) we used as inputs of the operator are either geographical parameters or observed Leaf Area Index (LAI). Using observed LAI instead of its model counterparts avoids learning LDAS-Monde model bias. This observation-driven operator is trained on croplands all around the globe for a whole year of observations and evaluated for another year. The predictions exhibit satisfying accuracy with the observations, while the operator architecture remains simple enough to be linearised by finite differences in our SEKF data assimilation scheme.

The main asset of TROPOMI-SIF is its temporal coverage, which results in a more frequent correction of the vegetation than the usual vegetation product we used (i.e. LAI 10-day synthesis). To assess its assimilation benefit, we run experiments with varying error formulations and co-assimilation with other observations. The vegetation monitoring is not always improved by the assimilation of TROPOMI-SIF only, but it has a significant positive impact when co-assimilated with sparse and less noisy observation. This leads us to consider using deep learning techniques for other surface variables that are hard to simulate and constrain.

- **Un nouvel algorithme de détection de la grêle sévère à partir de réseaux de neurones convolutifs appliqués à des Observations radar à double-polarisation**

*V. Forcadell, C. Augros, O. Caumont, M. Ouradou – CNRM/GMME/PRECIP, P. Lepetit – DSO/MSO/PPC*

La grêle cause des dommages importants aux cultures et aux infrastructures chaque année en France. Entre janvier et juin 2022, les dégâts totaux causés par la grêle ont été estimés à 5,2 milliards d'euros (France Assureurs). Les techniques actuelles de détection et d'estimation de la taille des grêlons s'appuient sur des observations des radars météorologiques. Elles présentent de nombreuses difficultés à détecter et à estimer la taille des grêlons au sol avec précision. L'algorithme Al-Sakka et al. (2013), utilisé de manière opérationnelle à Météo-France pour alimenter le produit HYDRE qui indique le type d'hydrométéores au sol, ne comporte actuellement qu'une seule classe pour les « gros grêlons », qui comprend toutes les tailles supérieures à 2 cm.

Dans le cadre de la thèse de Vincent Forcadell, de nouveaux algorithmes s'appuyant sur des réseaux de neurones convolutifs (CNN) ont été développés. Un premier algorithme permet la détection d'occurrence de grêle sévère (> 2 cm), à partir d'un grand nombre de prédicteurs radar. La construction d'une base de données soigneusement validée d'événements de grêle sévère ou non grêle sévère et la mise en œuvre d'un plan expérimental rigoureux, ont permis de montrer que les CNN sont plus performants que les algorithmes de référence tels que MESH (Maximum Estimated Size of Hail, Witt 1998, Morillo et Homeyer, 2019). En outre, il a été constaté que les architectures de CNN peu profondes sont plus efficaces que les CNN complexes, et que l'incorporation d'indicateurs de grêle existants en entrée des CNN permettent d'améliorer leurs performances (Forcadell et al, 2024).

Un deuxième algorithme portait sur l'estimation de la taille des grêlons au sol. Un nouvel ensemble de données radar a été construit à partir d'images radar autour des barycentres des cellules orageuses détectées par un algorithme de suivi des cellules. De nouvelles informations temporelles sont ainsi intégrées dans l'apprentissage des CNNs. Une phase de réglage a montré que les CNN peu profonds entraînés avec des pas de temps antérieurs de la chute de grêle étaient les plus robustes, par rapport à l'utilisation d'un seul pas de temps. Les résultats d'une étude d'importance ont révélé que l'echotop45 était la variable la plus importante pour l'estimation de la taille des grêlons, suivie de près par les variables radar polarimétriques au-dessous de l'isotherme 0°C.

- **Intercomparaison de différentes méthodes IA de prévision immédiate de lame d'eau menée par DSM/LABIA, DirOP/COMPAS/COM et DirOP/PI**

*N. Merlet – DIROP/PI*

Le modèle PIAF de DirOP/PI se base sur une fusion entre des extrapolations d'images observées et l'équivalent prévu par AROME-PI. Il fournit toutes les 5 min des prévisions jusqu'à 3h d'échéance de réflectivités radar et de lames d'eau. Afin de progresser sur les premières échéances, deux modèles convolutifs de type encodeur-décodeur nommés DEEPLABV3+ ont été respectivement entraînés sur deux ans de mosaïques de réflectivités et de lames d'eau SERVAL. Malgré un post-traitement par transfert d'histogrammes, ces deux modèles, qui sont maintenus en intégration par DirOP/PI, ont tendance à diluer les intensités des précipitations assez rapidement au fil des échéances. C'est pourquoi DirOP/PI, en collaboration avec DSM/LABIA, étudie l'utilisation sur le domaine français d'autres types de modèles déjà entraînés sur d'autres domaines, comme le modèle génératif DGMR de Google et le modèle de diffusion LDCAST de Météo Suisse. Ces deux modèles appliqués à la prévision de la lame d'eau ANTILOPE sont objectivement comparés par DirOP/COMPAS/COM avec PIAF lame d'eau, le produit LEPPA (Lame d'Eau Prévue Par Advection) et le modèle DEEPLABV3+. Cette intercomparaison s'appuie sur des rejeux de prévisions à cadence horaire démarrant en février 2024. Ces scores sont complétés par des études de cas sur différentes situations d'intérêt (convection organisée, cellules précipitantes isolées, blocage orographique ...).

- **Estimation de la contribution de la circulation atmosphérique sur les variations observées de températures en Europe avec un UNET**

*E. Cariou, J. Cattiaux, S. Qasmi, A. Ribes – CNRM/GMGEC/CLIMSTAT*

En Europe, les variations de température sont principalement pilotées par la circulation atmosphérique de l'Atlantique Nord. Nous étudions ici un réseau de neurones convolutif (un UNET) pour reconstruire les anomalies de température quotidiennes en Europe à partir de la pression au niveau de la mer, comme indicateur de la circulation atmosphérique, et nous comparons les résultats avec la traditionnelle méthode des Analogues de circulation.

Cette étude, réalisée dans un cadre idéalisé (c'est-à-dire avec des simulations numériques d'un modèle climatique) met en évidence l'excellente capacité du UNET à estimer les variations de température à partir d'informations provenant uniquement de la pression au niveau de la mer. Cette nouvelle méthode est plus performante que la méthode des Analogues, tant à l'échelle journalière qu'à l'échelle interannuelle. Ce travail ouvre des perspectives prometteuses pour l'estimation de la contribution de la variabilité atmosphérique aux variations observées de température. Mais l'une des difficultés réside dans le fait qu'il y a beaucoup moins de données dans la série temporelle observée et donc que les scores sont affectés par cette réduction importante de la taille de l'échantillon d'apprentissage. Pour surmonter ce problème, nous appliquons la technique de "Transfer Learning" : nous entraînons le UNET pré-entraîné sur des simulations climatiques, sur quelques années d'ERA5 et nous le testons sur les années que nous voulons reconstruire. Cette méthode améliore considérablement les résultats obtenus par un entraînement sur ERA5 uniquement.

- **Prévision du risque orageux à l'aide de réseaux de neurones**

*M. BOSCH, A. Chan-Hon-Tong, A. Bouchard – ONERA, D. Bérézia – LIP6*

Les avions de ligne, frappés par la foudre en moyenne une fois par an, subissent parfois des dommages structurels ou électriques. Bien que ces incidents ne compromettent généralement pas la sécurité grâce aux certifications existantes, ils entraînent des immobilisations et des opérations de maintenance obligatoires, coûteuses pour l'industrie aéronautique. Anticiper la présence des zones de risque orageux permettrait de minimiser ces impacts. Aujourd'hui, prévoir la localisation de l'activité électrique dans l'atmosphère est une tâche complexe, car les éclairs sont des phénomènes non linéaires se produisant dans des environnements chaotiques liés aux orages. De nombreux paramètres influencent le déclenchement des décharges électriques, rendant difficile leur modélisation précise à l'aide d'équations physiques. Ce constat motive l'utilisation de réseaux de neurones pour établir des relations entre les divers paramètres atmosphériques et l'activité électrique. Dans le cadre de la sécurité aérienne, cette étude porte sur le développement d'une méthode de prévision du risque orageux à très court terme (moins d'une heure, avec une résolution de 5 minutes) au-dessus des océans. La méthodologie proposée repose sur l'application de techniques de vision par ordinateur, notamment des réseaux de neurones, afin de générer des cartes de probabilité d'apparition de la foudre dans l'heure suivante. Un réseau de type encodeur-décodeur nommé ED-DRAP (Che, H et al. 2022) est utilisé car en plus d'intégrer des opérations de convolution, il utilise aussi des mécanismes d'attention spatiale et séquentielle qui permettent de traiter des séquences spatio-temporelles. Les données d'entrée proviennent du satellite géostationnaire GOES-R de la NOAA et incluent la température de brillance mesurée par le capteur ABI et la localisation de l'activité électrique passée détectée par le capteur GLM. Des sorties du modèle de Prévision Numérique du Temps, Global Forecasting System sont également intégrées pour compléter les informations fournies par les images satellites. Enfin, les sorties du modèle sont calibrées afin d'obtenir des cartes de probabilité de risque foudre représentatives de la réalité physique, permettant une meilleure interprétation des risques.

## Session 4 : Applications de l'IA, partie 2

- **Combining physics and machine learning in hybrid geoscientific models**

*J. Le Sommer – IGE / MIAI*

In recent years, scientific machine learning has emerged as a transformative approach in climate science and geoscientific modeling. Among its most impactful applications are emulators for weather forecasting, which now rival traditional physics-based models in accuracy and efficiency. Beyond emulation, this paradigm shift has led to the development of hybrid climate models, where physics-based frameworks are augmented with trainable components, offering a new frontier in climate model design. After a quick review of the progress and challenges in this rapidly evolving field, with a focus on ocean climate models, this webinar will explore the benefits of hybrid modelling, from parameterisations to bias correction, and provide insights into the practical design of trainable components. Additionally, it will address the technical complexities of integrating these components with existing model architectures. Looking ahead, I will argue that current hybrid models foreshadow a new generation of AI-native climate models, powered by differentiable programming. These models promise seamless integration of trainable components and transformative capabilities, but they also pose significant challenges. This presentation will highlight the expected benefits of this emerging class of models and discuss the roadmap to harnessing their full potential in advancing climate modelling.

- **Apprentissage automatique interprétable pour la modélisation environnementale**

*D. Wilson – ISAE-Supaéro*

L'apprentissage automatique a permis de mieux comprendre les systèmes terrestres à partir de données d'observation, mais l'utilité de ces connaissances est souvent entravée par la nature de boîte noire des grands modèles paramétriques. Dans cette présentation, je discuterai d'une méthode alternative pour la découverte basée sur les données. Je présenterai des applications dans la modélisation du littoral côtier et la prédiction de l'indice El Niño.

- **Observation des traînées de condensation pour l'amélioration des modèles prédictifs**

*Matthieu Lamothe, Rémi Chevallier, Marc Wetterwald – Airbus*

Les modèles et les prédictions météo jouent un rôle déterminant pour la prise en compte des émissions autres que le CO<sub>2</sub> de l'aviation civile, et en particulier pour la prédiction et la mesure d'impact des traînées de condensation des avions. Dans ce contexte, nous présentons plusieurs méthodes d'observation des traînées de condensation des avions - à partir d'images sols et satellite - qui visent à valider et améliorer les modèles et participent ainsi à la réduction de l'effet de serre que ces traînées génèrent.

- **Probabilistic Weather Forecasting via Latent Space Perturbations of Machine Learning Emulators**

*S. Adamov – MeteoSwiss*

Simon Adamov presents a novel approach of perturbing pre-trained ML weather emulators by directly adding noise to weight-tensors in the latent space. The Burglind windstorm is used to showcase this approach in both Graph Neural Networks and Fourier Neural Operators. First results suggest that introducing such perturbations allows the previously deterministic emulator to create a probabilistic ensemble weather forecast. These forecasts are evaluated and compared against IFS ENS, with careful analysis of error growth and propagation of the perturbations.

- **First look at MeteoSwiss' Machine Learning Weather Forecasting Emulator**

*A. Pennino – MeteoSwiss*

Alberto Pennino (tbd) presents the initial results of a regional data-driven weather forecasting emulator for the Swiss Alpine domain, building on MET Norway's stretched-grid limited-area model (LAM) approach using graph neural networks. The emulator is trained on COSMO reanalysis data to produce forecasts at 2 km spatial and 6-hour temporal resolution, employing a transfer learning framework with pre-training on ERA5 data and further refinement using operational analysis. The first results of the trained emulator will be showcased, along with an initial verification of its performance.

## Session 5 : Downscaling & climat

- **Hybrid ARP-GEM1 : implémentation de paramétrisations IA dans un modèle de climat global**

*B. Balogh, D. Saint-Martin, O. Geoffroy – CNRM/GMGEC/GLOB-ATM*

Les paramétrisations sont la principale source d'incertitude dans les modèles de climat. L'utilisation des techniques de machine learning pourrait permettre de développer des paramétrisations plus précises, et ainsi améliorer la précision du modèle de climat.

Nous avons mis en place dans le modèle ARP-GEM1 (version globale, efficace et multi-échelle d'ARPEGE) une interface Fortran/python permettant le branchement simple de paramétrisations IA écrits en Python dans le modèle atmosphérique, en Fortran. Notre implémentation de l'interface permet également l'exécution d'ARP-GEM1 et de la paramétrisation IA à tester sur des ressources numériques hétérogènes. Pour tester cette implémentation, nous avons émulé un schéma de convection profonde physique avec des réseaux de neurones. Une simulation de 5 ans a été réalisée avec l'émulateur de convection profonde remplaçant le schéma physique. La simulation montre un bon accord avec le schéma émulé.

- **Descente d'échelle statistique pour la météorologie urbaine à l'échelle hectométrique**

*J. Garcia Cristobal, J. Wurtz, V. Masson – CNRM/GMME/VILLE*

La prévision du temps en milieu urbain est complexe, en particulier en raison des fortes hétérogénéités du tissu urbain. Pourtant, de nombreux enjeux sont inhérents à la météorologie en ville comme le confort thermique ou la consommation d'énergie des bâtiments.

Les modèles météorologiques à résolution hectométrique à l'état de l'art scientifique comme le modèle de recherche Méso-NH, couplés à un modèle urbain, comme TEB, permettent d'obtenir des prévisions précises de la météorologie urbaine. Toutefois, ils demandent une puissance de calcul trop importante pour pouvoir être déployés de manière opérationnelle. Le développement récent de l'Intelligence Artificielle (IA) appliquée à la météorologie permet de réaliser des descentes d'échelle statistiques, à partir de modèles météorologiques à maille plus large et moins coûteux, comme le modèle planétaire ARPEGE à 5km. Ainsi il est possible d'obtenir, à partir d'un champ à basse résolution, une estimation de ce même champ à résolution plus fine. L'objectif du travail en cours est de concevoir un émulateur de Méso-NH par une descente d'échelle par IA pour certains paramètres urbains pertinents comme la température.

Une méthodologie en deux étapes sera mise en oeuvre pour faire la descente d'échelle de la température issue d'ARPEGE 5km vers la température Méso-NH à 300m. Un premier modèle apprenant les relations physiques entre le champ ARPEGE et Méso-NH dégradé à la même résolution. Cette première étape sera mise en place ultérieurement. Puis une descente d'échelle statistique par apprentissage profond est réalisée permettant d'obtenir un champ de température à 300m de résolution à partir d'un champ Méso-NH dégradé. Cette méthode a été appliquée sur des simulations Méso-NH couvrant 365 jours sur l'Île-de-France. L'algorithme a été appliqué à trois résolutions dégradées différentes : 1,2km, 2,4km et 5km. Les champs résultants sont alors évalués et comparés afin de quantifier l'impact de la résolution du champ de départ.

- **Émulateur de modèle de climat régional : Exemple d'application à un grand ensemble.**

*A. Doury – CNRM/GMGEC/MOSCA*

En climat, la compréhension de l'évolution des événements extrêmes et la quantification des incertitudes associées sont essentielles pour une prise de décision éclairée quant aux stratégies d'adaptation. Cet exposé présente l'application des techniques d'émulation des modèles climatiques régionaux (RCM) en tant qu'approche de descente d'échelle d'un grand ensemble de simulations de modèles climatiques globaux (GCM) dans un avenir proche. En exploitant l'émulateur RCM, nous visons à combler l'écart d'échelle entre les sorties de GCM à basse résolution et les phénomènes climatiques localisés, ce qui permet l'étude des événements extrêmes.

Les émulateurs RCM représentent une approche hybride de réduction d'échelle qui utilise un cadre statistique pour apprendre la fonction de descente d'échelle intégrée dans un RCM donné. Cette approche s'appuie sur les simulations RCM existantes pour estimer la relation entre les prédicteurs décrivant la circulation atmosphérique quotidienne à grande échelle et les variables d'intérêt à haute résolution. L'efficacité de l'apprentissage automatique permet la réduction d'échelle de très grands ensembles de simulations de GCM.

Dans cette présentation, nous utilisons l'émulateur présenté dans Doury et al. (2023, 2024) pour réduire l'échelle d'un grand ensemble GCM. L'émulateur est entraîné sur l'Europe occidentale à l'aide de simulations EURO-CORDEX historiques et RCP85 (1951-2100) réalisées avec le modèle climatique régional ALADIN63 piloté par CNRM-CM5. L'ensemble GCM comprend 30 membres pour chacun des scénarios SSP126, SSP245, SSP370 et SSP585 pour la période 2015-2039, soit un total de 120 simulations réalisées avec le CNRM-CM6.

Après une présentation de la construction de l'émulateur, nous étudions la probabilité d'occurrence et l'intensité des événements extrêmes localisés dans ce grand ensemble de simulations « émulés » à haute résolution. Ce travail contribue à illustrer le potentiel des émulateurs RCM pour faire progresser notre compréhension de l'évolution du climat local et des événements particulièrement extrêmes, y compris une meilleure quantification des incertitudes.

- **Premiers pas vers un émulateur de modèle de climat régional multivarié**

*C. Carty – CNRM/GMGEC/MOSCA*

Récemment, plusieurs études ont présenté le concept d'émulateur de modèle de climat régional, consistant à poser un cadre de descente d'échelle statistique au sein de simulations faites à l'aide d'un RCM. Cette approche utilise des simulations RCM pour l'apprentissage qui explorent de futurs climats et peuvent couvrir différentes régions du globe. Cependant, les méthodes présentées dans les différentes études existantes ne couvrent qu'une seule variable et ne présentent pas de modélisation du lien entre les différentes échances temporelles. Or les événements à fort impact sont souvent le résultat de l'interaction de plusieurs événements climatiques, il s'agit par exemple d'une période forte chaleur associée à une sécheresse qui favorisera les feux comme observé pendant l'été 2022 en France ou en Espagne. Ainsi, il est nécessaire que les émulateurs de modèles régionaux représentent de manière la plus fidèle possible la relation entre les différentes variables à toutes les échelles temporelles.

Nous proposons dans cette présentation une première étude visant à améliorer l'émulateur introduit dans Doury et al. 2023 afin d'émuler simultanément trois variables "proches" (tasmax, tas et tasmin) et d'évaluer la conservation des relations qui lient ces variables notamment lors d'événements extrêmes.