



Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère Prévisibilité 17 au 19 Mars 2026

Centre International de Conférences - Météopole de Toulouse

Résumés des présentations

Isabelle Gallagher - Université Paris-Cité, Société Mathématique de France

Présentation invitée : Résultats mathématiques plus ou moins récents autour des équations de Navier-Stokes

Parmi les grandes questions mathématiques ouvertes en Analyse des Équations aux Dérivées Partielles, on en trouve au moins trois qui sont directement reliées à la dynamique des fluides : la possibilité que certaines solutions des équations de Navier-Stokes incompressibles "explosent" en temps fini, la possible non unicité des solutions de ces mêmes équations, et la dérivation des équations de la mécanique des fluides à partir des lois de Newton régissant le mouvement des particules élémentaires. Dans cet exposé nous présenterons les résultats classiques sur ces questions, ainsi que quelques avancées récentes.

Prévisibilité météorologique : retour sur l'effet papillon et le chaos

Parmi les débats qui agitent la communauté météorologique, la prévisibilité est un thème récurrent depuis l'article fondamental de Lorenz en 1969, qui considérait que l'échéance de 15 jours était vraiment une limite absolue. Dans la prévision météorologique concrète au jour le jour, on rencontre parfois ce type de situations à la prévisibilité limitée : par exemple lors d'une période de blocage début mars 2023 quand on attendait l'arrivée de la pluie sur la France et que la prévision de cette arrivée changeait pratiquement chaque jour, où elle était repoussée d'un jour ! (Désir de pluie, *Marianne*, juillet 2023). Des chercheurs et prévisionnistes allemands (Selz et al. 2022) ont fait une étude concrète de cette question, alors que des articles récents (Sun et Zhang 2016) et (Zhang 2019 ; Leung 2019) discutent la limite de prévisibilité pour la prévision aux latitudes moyennes. L'effet papillon qualifie la sensibilité extrême aux conditions initiales des modèles de prévision (conférence de Lorenz, 1972) a donné lieu à une célébration scientifique lors du cinquantième anniversaire en 2022 (réf. *Atmosphere*). L'exposé présentera ces différentes explorations conceptuelles et numériques en se rattachant notamment aux théories de la turbulence bidimensionnelle et conclura sur la nature duale du fonctionnement de l'atmosphère (Shen et al., 2022).

Références:

Leung T. Y., M. Leutbecher., S. Reich and T. G. Shepherd, 2019: Atmospheric predictability: Revisiting the inherent finite-time barrier. *J. Atmos. Sci.*, **76**, 3883-3892.

Lorenz E. N., 1969 : The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*, **21**, 289-307.

Selz T., M. Riemer, and G. Craig, 2022: The transition from practical to intrinsic predictability limit of midlatitude weather. *J. Atmos. Sci.*, **79**, 2012-2030.

Shen B.-W. et al., 2022: The dual nature of chaos and order in the atmosphere. *Atmosphere*, **13** (11), 1892.

Sun Y. Q. and F. Zhang, 2016: Intrinsic versus practical limits of atmospheric predictability and the significance of the butterfly effect. *J. Atmos. Sci.*, **73**, 1419-1438.

Zhang F. et al., 2019: What is the predictability limit of midlatitude weather? *J. Atmos. Sci.*, **76**, 1077-1091.

Prévisibilité liée aux ondes équatoriales sur l'Outremer à échelle subsaisonnaire

Philippe Peyrillé, Damien Specq, Erwan Cornillault, Laura Bouzid

Dans les régions tropicales, la plupart des épisodes pluvieux, et en particulier les plus intenses, sont liés à des situations convectives locales. Le développement des systèmes convectifs peut cependant être stimulé par des facteurs environnementaux de grande échelle comme le cisaillement, le vent ou la température. Ces environnements sont mis en place par différents modes de variabilité de la convection, tels que les signaux de basse fréquence, l'Oscillation de Madden-Julian (MJO) ou les Ondes équatoriales de Rossby (ER). La MJO est la propagation vers l'Est d'anomalies de vent zonal avec un centre de convection profonde sur des périodes de 30 à 90 jours et les ER un exemple d'onde équatoriale couplée à la convection se déplaçant vers l'Ouest sur des périodes de 10 à 72 jours.

Ces modes lents jouent un rôle majeur sur toute la bande tropicale. Une méthodologie généralisable à l'ensemble de ces modes de variabilité a été mise en place afin d'étudier, pour un mode donné, l'impact de son état à l'initialisation en un lieu donné des tropiques sur la qualité des prévisions subsaisonnaire de pluie et d'eau précipitable de l'ensemble de la bande tropicale. Deux modèles ont été évalués dans le cadre de cette étude. Pour la MJO, quelque soit sa position et sa phase à l'initialisation, les phases de convection inhibée améliorent la prévisibilité tandis que ce n'est pas toujours le cas des phases où la convection est favorisée. Les signaux de basse fréquence se démarquent comme source de l'apport le plus robuste de prévisibilité. En revanche, il est difficile de dégager un réel impact des ER sur la qualité des prévisions.

Comment savoir à l'avance si une prévision saisonnière sera réussie ou non ?

Damien Specq, Constantin Ardilouze, Lauriane Batté

Aux échéances saisonnières, la circulation atmosphérique des moyennes latitudes a une forte influence sur les anomalies en surface. Cependant, la capacité des systèmes de prévision saisonnière à anticiper les bonnes structures de circulation est très intermittente d'une prévision à l'autre. Dans un contexte temps réel, la prévision saisonnière gagnerait à être accompagnée d'indications sur la performance de la prévision en cours, avant même que les observations ne soient disponibles. Ce travail propose une approche pour « prévoir » a priori le score de chaque prévision saisonnière en termes de circulation aux moyennes latitudes. Elle consiste à calculer le score de la moyenne d'ensemble de la prévision par rapport à chacun des membres qui la constituent, puis à en prendre la moyenne. Cet indicateur constitue une estimation du score en « modèle parfait » qui caractérise la prévisibilité d'une situation donnée dans le modèle.

L'approche proposée est appliquée aux prévisions saisonnières du service européen Copernicus Climate Change Service (C3S), dont Météo-France est l'un des fournisseurs. Elle est déclinée pour plusieurs variables de circulation atmosphérique et plusieurs domaines géographiques découpant les moyennes latitudes de l'hémisphère Nord. Le score considéré est l'Anomaly Correlation Coefficient (ACC), un score de corrélation spatiale qui quantifie à quel point les structures de circulation observées et prévues sont similaires. Les résultats aboutissent à une bonne capacité de prévision a priori du score ACC pour des variables de haute troposphère, et notamment la fonction de courant à 200 hPa. Au contraire, l'approche s'avère moins performante en moyenne troposphère (avec le géopotentiel à 500 hPa) et en surface (avec la pression au niveau de la mer). Par ailleurs, cette capacité à prévoir le score a une forte variabilité saisonnière, avec des estimations en modèle parfait qui sont les pertinentes durant l'été boréal. Ces conclusions sont similaires sur les six systèmes de prévision saisonnière C3S considérés ainsi que sur leur combinaison en multi-modèle, ce qui atteste de leur robustesse. En outre, au-delà de la prévision saisonnière, une telle approche d'estimation de score en modèle parfait est applicable à n'importe quelle prévision d'ensemble et n'importe quelle échéance.

Présentation invitée : Proposition de méthodologie en vue de tirer parti de prévisions d'ensemble dans les décisions de vigilance

Alain Joly, Arnaud Mounier

Une des raisons de l'évolution des centres de prévision numérique vers les prévisions d'ensemble, évolution qui a commencé voici plus de 30 ans, est que ces dernières fournissent plus d'information. Elles donnent un éclairage plus large de la scène des futurs possibles de milieux naturels. Comment insérer cet apport dans le processus très contraint par le temps des décisions de vigilance, d'alertes dans un cadre cohérent avec la prévision générale ? La proposition qui sera présentée n'est pas nouvelle, certains de ces éléments ont été posés vers 2007. Elle ne vise pas non plus à fournir une solution clé en main, mais une base de concertation. En effet, la bonne utilisation de sources d'informations très riches ne peut se faire qu'en lien étroit avec les véritables décideurs.

Dans la mesure où les événements donnant lieu à de hauts niveaux de vigilance sont aussi rares, on rappellera qu'une approche statistique de la question se heurte aux limites posées par cette rareté. Mais le processus formel de décision, par analyse d'options ou par optimisation, n'est pas le seul. Il existe un autre cadre, au sein duquel sont prises sans doute bien plus de décisions, en particulier celles à gros enjeux immédiats avec très peu de temps pour agir. Ce cadre a été étudié par des méthodes qui relèvent de la sociologie et/ou de l'anthropologie, il s'applique très bien aux prises de décision de type vigilance. C'est ce cadre qui devrait, de façon naturelle, servir de base à toute évolution méthodologique visant à donner toute sa place à la prévision d'ensemble. On reviendra aussi, si possible, sur la nécessité de cette dernière et ce qu'elle tente de cerner. Ce qui est plus nouveau, c'est que suite aux évolutions de la prévision numérique abouties en 2022 d'une part, suite aux travaux précurseurs de l'équipe RECYF/PREV sur la reconnaissance automatique de structures météorologiques depuis au moins 2015, il est possible de donner une idée assez concrète de ce que pourrait donner, sur un exemple, la mise en œuvre de cette méthodologie. Cet exemple montre bien le potentiel de la prévision d'ensemble face aux situations rares, très incertaines, et les conditions pour matérialiser ce potentiel.

Prévisibilité : prise de décision en opérationnel, éléments de réflexion.

Cette courte présentation aborde le thème de la prévisibilité du point de vue de la prévision opérationnelle à échelle synoptique et méso-échelle. À partir d'une situation observée et d'un ensemble de simulations (ou d'inférences) numériques, le travail du prévisionniste consiste à fournir un scénario d'évolution des conditions météorologiques en prenant en compte les sensibilités de l'utilisateur à ces conditions: c'est une prévision qualifiée de 'conseil'. La Vigilance météorologique en est un exemple.

La méthodologie d'élaboration de la prévision repose sur la compréhension des phénomènes météorologiques en jeu, de la dispersion des simulations disponibles et de leur fiabilité. Des exemples décrivent différentes stratégies utilisables, selon que la prévision pourra être amendée ('régression' vers une solution 'moyenne', possibilité de report de la décision, prévision probabiliste) ou non (prise de décision basée sur le concept 'd'utilité espérée'). L'exploitation des prévisions 'extrêmes' (QMAX) est discutée. La problématique des biais cognitifs concernant la prise de décision en situation d'incertitude est abordée : ces biais peuvent affecter à la fois le prévisionniste et l'utilisateur. Au final, toute prévision ne comporte-t-elle pas encore une part d'imprévisibilité, non quantifiable, malgré les formidables moyens techniques mobilisables de nos jours ?

Prévision probabiliste et vérification des pluies extrêmes avec AROME

François Bouttier, Yingqian Yu

La prévision d'ensemble des fortes pluies est difficile à exploiter en raison de la richesse des informations à prendre en compte : biais du modèle et de l'ensemble, grand nombre de membres et de durées de cumul, diversité des vulnérabilités. On s'intéresse ici à la production d'alertes pluie/inondation à partir de l'ensemble PE AROME, aux échéances 3 à 48h.

Résumer l'ensemble par un quantile optimal permet de compresser l'information probabiliste en un scénario de qualité objectivement supérieure à la prévision AROME déterministe. On quantifie cette supériorité sur 5 ans d'archives de prévision, en examinant la variabilité des scores et la difficulté de vérifier des extrêmes, en ciblant des pluies d'intensité pertinente pour une alerte de niveau orange.

On examinera aussi la problématique de convertir une information probabiliste - le quantile - en une donnée adaptée à l'expertise humaine et au forçage de modèles de crues/inondations.

Avec ou sans IA, pour mieux prévoir l'aléatoire, comment réussir à échouer ?

Dans le cadre de la prévision opérationnelle, chaque jour propose une disparité impressionnante de futurs possibles. La méthode d'expertise humaine, tout comme les outils numériques autour de la prévisibilité, sont depuis des décennies assez robustes. Mais la demande sociétale s'accroît, dans un environnement informationnel et décisionnel hyper-réactifs. En quoi l'IA peut-elle aider ou non le prévisionniste pour choisir "le bon scénario" ? Quelques exemples de situations "récentes", liées à des enjeux de vigilance météorologique impactants, illustreront le propos.

Une nouvelle méthode de contrainte observationnelle pour décrire les changements de précipitations futures : l'exemple de la mousson Indienne

George Whittle, Hervé Douville, Pascal Terray

Beyond future emission pathways, projections of precipitation in a changing climate are still showing a large spread among CMIP's Global Circulation Models (GCMs), especially at the regional scale. This is mainly arising from the so-called model uncertainty, i.e. from our limited knowledge in but also from the plural representation of climate system's complex mechanisms. Those uncertainties represent a point of great concern for the design of responsible regional adaptation policies, and it is urgent to reduce these uncertainties to better assess future change in regional precipitation. While ongoing and future improvement of GCMs will surely allow for precision of climate change trajectory, here we suggest to make the best use of already existing information for uncertainty reduction now.

We will focus on the example of the Indian summer monsoon, being a regional phenomenon of importance for the livelihood of billions of people; yet its evolution under climate change is largely uncertain. Using the two latest generations of GCMs (CMIP5 and CMIP6), we suggest an original method for constraining models' projections of Indian summer precipitation change based on observations and using an inter-model Maximum Covariance Analysis (MCA) technique. Our method is compared to a straightforward emergent constraint approach and shows promising and robust results, both in terms of reduction in uncertainty and in the explanation of underlying physical mechanisms. Additionally, a robustness assessment is done through a perfect model validation i.e. by checking the ability of our method to reliably predict a left one out model. We believe robustness-checks are a needed procedure for an honest and trustworthy reduction in uncertainty of future change.

Évaluation systématique de la prévisibilité des dépressions méditerranéennes et impact sur les territoires

Benjamin Doiteau, Florian Pantillon, Matthieu Plu, Laurent Descamps, Thomas Rieutord

Les dépressions sont des composantes essentielles de la météorologie dans la région méditerranéenne. Elles apportent les précipitations nécessaires aux activités humaines et aux écosystèmes, mais les plus intenses d'entre elles sont aussi à l'origine de lourds dommages et de pertes humaines dans cette région densément peuplée. Prévoir le comportement de ces dépressions est une tâche cruciale mais complexe, et la précision des prévisions peut varier considérablement d'un cas à l'autre. Les causes de cette variabilité demeurent mal comprises, et les travaux antérieurs sur la prévisibilité des dépressions méditerranéennes se sont principalement basés sur l'analyse de cas intenses, qui peuvent ne pas être représentatifs du large éventail de dépressions se produisant dans la région.

Ce travail vise à apporter la première évaluation systématique de la prévisibilité des dépressions méditerranéennes. L'approche systématique nécessite un grand nombre de dépressions et de prévisions pour évaluer la prévisibilité de manière robuste. Les dépressions sont ici d'abord suivies sur la base du tourbillon relatif dans la réanalyse ERA5, ces données météorologiques offrant une homogénéité sur plusieurs décennies. Les dépressions sont ensuite suivies dans les reprévisions d'ensemble du CEPMMT, qui fournissent des données de prévision sur 20 ans en utilisant un modèle fixe pour toute la période. Au total, 1960 dépressions méditerranéennes sont détectées entre 2001 et 2021, à la fois dans les champs météorologiques de la réanalyse et des reprévisions. Ces dépressions forment un catalogue, au sein duquel la position et l'intensité (pression au cœur de la dépression) sont enrichies d'une métrique qui quantifie la sévérité des dépressions.

La prévisibilité est évaluée dans un premier temps sur les 1960 dépressions méditerranéennes en quantifiant les erreurs sur la position et l'intensité. Les résultats montrent que l'erreur médiane de position augmente à un taux constant de 40 km par jour pendant les 72 premières heures de prévision, puis plus lentement pour des échéances plus longues. En ce qui concerne l'erreur sur l'intensité, le biais atteint -0,5 hPa après 12 heures de prévision, indiquant une légère surestimation de l'intensité par rapport aux données ERA5. Ce biais continue de croître lentement à un taux de -0,1 hPa par jour pour des échéances plus longues. La qualité des prévisions est ensuite comparée entre plusieurs catégories de dépressions. La vitesse de déplacement se révèle être un facteur déterminant de la prévisibilité de la position des dépressions. En particulier, la position des dépressions quasi stationnaires, localisées principalement dans le golfe de Gênes, est bien mieux prévue que dans n'importe quelle autre catégorie. En ce qui concerne l'intensité, les résultats montrent que les dépressions très creusées et sévères, qui se produisent principalement en hiver, sont les plus mal prévues.

L'évaluation systématique de la prévisibilité présentée dans ce travail montre des différences significatives entre plusieurs catégories de dépressions. Cette approche pourrait être adaptée à d'autres bassins afin de faciliter l'identification des contextes météorologiques qui affectent la prévisibilité.

Prévision immédiate ensembliste des précipitations à l'échelle de la commune : application en complément du système d'avertissement aux pluies intenses APIC

Thibaut Montmerle, Renaud Tzanos, Gaspard Desmoulins, Olivier Mazé

Le service APIC de Météo-France permet d'avertir les communes lorsque les précipitations en cours sur leur territoire revêtent un caractère exceptionnel. Ce service, basé sur la comparaison de cumuls de pluie de différentes profondeurs avec des valeurs climatologiques, est proposé en visualisation au grand public sur apic.meteofrance.fr et sous forme d'abonnement à l'institutionnel sur apic-pro.meteofrance.fr. Depuis octobre 2025, une nouvelle version permet, pour les communes concernées par un APIC en cours, d'afficher les pluies prévues à 3h d'échéance dans une bulle d'information accessible par clic sur la commune. Cette information est également incluse dans les avertissements par email envoyés aux abonnés au service. Le but de cette nouvelle fonctionnalité est d'informer les usagers si des pluies vont prochainement s'ajouter aux cumuls déjà exceptionnels signalés par un APIC.

Toutes les 15 min, cette prévision est déduite de l'ensemble de prévision immédiate PIE, constitué à partir de la production opérationnelle déterministe PIAF2, qui fusionne des images de lames d'eau ANTILOPE extrapolées et prévues par le modèle numérique AROME-PI. Cet ensemble est obtenu par time-lagging des runs successifs PIAF2 et en appliquant des perturbations spatiales dépendantes de l'écoulement. L'information probabiliste point de grille est ensuite agrégée à l'échelle de la commune sous forme de valeurs privilégiées de dépassement de seuils, à laquelle est attribué un indice de confiance. Cette approche s'avère pertinente jusqu'aux 3h d'échéances visées, notamment pour la prévision d'occurrence de pluie. Après avoir présenté les grandes lignes de la méthodologie, les résultats de l'évaluation objective, ainsi que des illustrations sur quelques cas concrets, seront montrés.

Sur l'usage de jeux de données satellites indépendants pour l'étude des couplages sol/atmosphère

Cette présentation portera sur différents jeux de données satellites, indépendants entre eux (précipitation, humidité du sol, vapeur d'eau précipitable). Je m'intéresse à leurs potentiels apports pour les modèles actuels, notamment concernant le sujet des couplages sol/atmosphère. En particulier, je présenterai quelques cas d'étude concernant le recyclage de l'eau en Afrique Tropicale (couplage précipitation/humidité du sol/vapeur d'eau précipitable), que ce soit en local ou en *remote*.

Modélisation régionale WRF d'un épisode de précipitations extrêmes à Djibouti (novembre 2019)

La République de Djibouti, dans la Corne de l'Afrique, a un climat aride mais enregistre épisodiquement des pluies extrêmes à l'origine d'inondations dévastatrices. En novembre 2019, la zone côtière de Djibouti a été affectée par un épisode de précipitations d'une intensité exceptionnelle, avec des cumuls atteignant 300 mm en trois jours, soit deux fois la moyenne annuelle. Cet événement a provoqué des inondations éclair et d'importants impacts socio-économiques. Cette étude vise à analyser les mécanismes atmosphériques à l'origine de cet épisode, en combinant analyses synoptiques issues des réanalyses ERA5 et la modélisation régionale à haute résolution à l'aide du modèle WRF.

Les analyses montrent que l'événement résulte d'interactions entre dynamiques tropicales et extratropicales, constituant une source de prévisibilité à l'échelle synoptique. Un talweg d'altitude positionné sur la péninsule Arabique a temporairement inhibé les flux secs continentaux, favorisant une instabilité accrue, tandis qu'une dorsale anticyclonique sur le sud de la péninsule Arabique a renforcé les flux d'est en basse troposphère, assurant une advection persistante d'air chaud et humide depuis l'océan Indien vers le sud du golfe d'Aden.

L'épisode a été simulé à l'aide du modèle WRF, configuré avec trois domaines imbriqués de 9, 3 et 1 km de résolution horizontale et forcé, guidé par ERA5. Les résultats indiquent que WRF reproduit de manière satisfaisante les principales structures atmosphériques associées à l'événement (eau précipitable, vents à 700 hPa et CAPE). La résolution explicite de la convection (1 km), améliore significativement la représentation spatio-temporelle des précipitations par rapport à ERA5 et aux produits satellites (CHIRPS, MSWEP, IMERG). Ces résultats mettent en évidence une bonne prévisibilité de la situation synoptique à grande échelle, mais une prévisibilité plus limitée des maxima pluviométriques locaux sans résolution explicite des processus convectifs et orographiques. L'étude souligne ainsi l'intérêt de la modélisation WRF en "convection-permitting" pour l'amélioration de la prévision des événements extrêmes et des systèmes d'alerte précoce dans la Corne de l'Afrique.

Prévisibilité des événements à enjeu des prévisions basées sur la physique et par IA

Sara Akodad, Clément Brochet, Laurent Descamps, Benjamin Devillers, Carole Labadie, Eliott Lumet, Olivier Pannekoucke, Laure Raynaud, Thomas Rieutord, Grégory Roux, David Salas y Melia, Corentin Seznec

La prévision météorologique par intelligence artificielle (IA) s'est développée rapidement et montre des résultats remarquables, selon des scores quantitatifs agrégés. Cependant, ses performances qualitatives sont plus mitigées, tout particulièrement sur les événements extrêmes. De fait, ils sont peu nombreux dans les bases d'apprentissage.

À Météo-France, un tel modèle est en cours de développement pour l'échelle régionale et les échéances J1/J2. Il s'agit d'un réseau de neurones graphique sur une grille dite étirée : d'une résolution de 2,5km sur la France métropolitaine, et 30 km sur le reste du globe. L'apprentissage a été effectué sur une archive de 4,5 ans d'analyses opérationnelles AROME (partie régionale) et sur la ré-analyse ERA5 (partie globale).

Cette présentation vise à comparer la prévisibilité de situations à enjeux vues par trois systèmes de prévisions : la PEARP, prévision d'ensemble globale Arpege ; la PEARO, prévision d'ensemble régionale Arome ; et une prévision d'ensemble IA. Cette dernière sera construite en initialisant le modèle IA (déterministe) avec les conditions initiales de la PEARP et de la PEARO sur les parties globale et régionale respectivement. Nous étudierons sur quelques situations si les couplages jouent un rôle important dans la prévisibilité d'évènements à enjeu par intelligence artificielle. Enfin, nous observerons si les limitations qualitatives observées en prévision déterministe (faibles intensités, texture des champs) se retrouvent dans un contexte ensembliste. Cette présentation vise à comparer la prévisibilité de situations à enjeux vues par trois systèmes de prévisions : la PEARP, prévision d'ensemble globale Arpege ; la PEARO, prévision d'ensemble régionale Arome ; et une prévision d'ensemble IA. Cette dernière sera construite en initialisant le modèle IA (déterministe) avec les conditions initiales de la PEARP et de la PEARO sur les parties globale et régionale respectivement. Nous étudierons sur quelques situations si les couplages jouent un rôle important dans la prévisibilité d'évènements à enjeu par intelligence artificielle. Enfin, nous observerons si les limitations qualitatives observées en prévision déterministe (faibles intensités, texture des champs) se retrouvent dans un contexte ensembliste.

Régimes de temps des extrêmes de pluie en Outre-Mer : caractéristiques physiques et prévisibilité

Erwan Cornillault, Philippe Peyrillé, Romain Roehrig, Fleur Couvreur

Une classification non supervisée des régimes de temps associés aux épisodes de pluie extrême (EPEs) a été mise en place, pour tous les territoires Outre-Mer, basée sur les cartes auto-organisatrices (SOMs) appliquées aux champs d'eau précipitable et de vent, et leurs composantes filtrées pour les ondes équatoriales. À la Réunion, 4 régimes d'été austral et 2 régimes entre intersaisons et hiver sont identifiés. La majorité de ces régimes implique une interaction entre ondes de Rossby des moyennes latitudes (MLR) et variabilité tropicale (en particulier la MJO). La répartition des EPEs selon le régime montre que ces derniers sont associés à des régimes préférentiels selon la zone de la Réunion considérée. Enfin, une méthode de prévision par analogue basée sur ces régimes a été testée. Ces régimes améliorent la prévisibilité des EPEs, en définissant notamment des fenêtres temporelles d'environ 5 jours, avec une probabilité d'occurrence accrue. Cette méthode offre un cadre intéressant d'évaluation des modèles de climat et de prévision du temps et la possibilité de prévoir des périodes favorables à l'occurrence des EPEs à plus longue échéance qu'actuellement.

Prévisibilité de l'épisode BELAL (2024) à l'approche et lors de son passage sur l'île de La Réunion

Olivier Nuissier, Hélène Vérèmes, Sébastien Langlade

La Réunion a été impactée par les effets du cyclone BELAL entre le 13 et le 16 janvier 2024, avec un atterrissage sur l'île dans la journée du 15 janvier. La question de la prévisibilité de BELAL en matière d'intensification à l'approche de l'île et de trajectoire finale a été bien difficile à cerner. La précision de ces éléments sont clefs pour l'anticipation des impacts à l'échelle de l'île. Dans les modèles de prévision, l'environnement semblait favorable à une intensification significative du phénomène à l'approche de La Réunion jusqu'au stade de Cyclone Tropical Intense (CTI). Cependant, l'intensification observée du phénomène a été moins forte que prévue. Avant l'impact, BELAL a connu une bifurcation plein Est avec un passage juste au nord de La Réunion, tout en accélérant. Le météore longea ensuite les côtes nord-est, en incurvant son déplacement vers le sud et en ralentissant.

L'approche par le nord-ouest est rare pour des phénomènes abordant l'île de La Réunion en impact direct. L'épisode BELAL représente donc un cas d'étude intéressant pour mieux comprendre ce type d'événement. Durant ces AMA, il sera présenté des éléments de compréhension de la déviation de trajectoire et des modifications d'intensité du cyclone BELAL à l'approche de La Réunion.

Présentation du prix André Prud'homme 2025 : Simulation et compréhension physique de la dynamique des événements de chaleur extrême dans un contexte de changement climatique

Une grande partie des impacts du changement climatique provient des modifications de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes plutôt que de l'évolution de l'état moyen. Cependant, la compréhension des mécanismes physiques sous-jacents aux événements météorologiques et climatiques extrêmes, ainsi que leur évolution potentielle sous l'effet des forçages anthropiques, est entravée par un problème de sous-échantillonnage à la fois dans les observations et dans les simulations des modèles climatiques. Ce problème limite notre capacité à distinguer l'évolution forcée et non forcée dans la dynamique des événements extrêmes et à faire des projections fiables dans un contexte de réchauffement climatique. Dans cet exposé, je présenterai des avancées méthodologiques basées sur des algorithmes d'événements rares pour simuler un grand nombre d'événements extrêmes à coût réduit dans les modèles de climat. J'illustrerai l'utilisation d'un algorithme d'événements rares via l'étude de l'évolution de la dynamique des étés extrêmes simulés dans le modèle de l'IPSL. Pour ces étés, je montrerai des changements dans les mécanismes dynamiques et thermodynamiques qui vont dans le sens d'une "localisation" en réponse au réchauffement global, avec un rôle plus important des flux de chaleur de surface et un rôle moins important de la dynamique atmosphérique de grande échelle dans le futur.

Impacts du schéma temporel d'AROME sur la prévisibilité des ondes de gravité dans l'atmosphère

La prévision opérationnelle à Météo-France repose grandement sur l'utilisation d'une variété de modèles de Prévision Numérique du Temps (PNT).

A la DIRIF (Direction Inter-régionale de l'Ile-de-France), la prévision synoptique fournie par le cadrage national du CNP (Centre National de Prévision) est raffinée à l'échelle de la région parisienne en utilisant notamment le système AROME et ses déclinaisons. Une attention particulière porte sur la prévision des phénomènes de méso-échelle à fort impact pour la sécurité des personnes et des biens et les activités sociaux-économiques.

En particulier, les ondes de gravité qui peuvent être piégées et déferler mais qui peuvent aussi servir de précurseur à la convection, interviennent dans de nombreux phénomènes de méso-échelle à impact. Ces ondes font intervenir des mécanismes de flottabilité non-hydrostatiques couvrant des échelles de quelques mètres à une centaine de kilomètres. Des modèles non-hydrostatiques à maille plus fine comme AROME ont ainsi été créés pour enrichir la description de ces ondes par rapport aux modèles hydrostatiques moins bien résolus comme ARPEGE, IFS, etc.

Toutefois, pour respecter les contraintes inhérentes à la prévision opérationnelle, de nombreuses approximations sont commises pour intégrer temporellement les équations de la PNT. Celles-ci génèrent des erreurs sur la phase et l'amplitude de ces ondes.

Dans cette présentation, on quantifie les erreurs du schéma temporel utilisé dans AROME sur un cas simple d'une onde de gravité interne stationnaire générée par un relief sinusoïdal. On montre que les erreurs de discrétisation générées par ce schéma sont telles qu'elles impactent la prévisibilité de ces ondes en modifiant la transition entre les différents régimes de l'écoulement. On montre également que dans le cas d'une atmosphère très stratifiée, les erreurs de discrétisation sont telles qu'elles masquent en partie les bénéfices de l'utilisation d'un modèle non-hydrostatique par rapport à un modèle hydrostatique.

Impact de la résolution horizontale sur la modélisation des aérosols dans MOCAGE

Vincent Guidard, Jonathan Guth

Une réanalyse de 4 années a été menée dans le cadre d'une étude sur les aérosols dans MOCAGE en utilisant le domaine global à 0.5 degré de résolution horizontale et un domaine régional à 0.1 degré de résolution horizontale sur une zone couvrant une partie du sud de l'Europe, du nord de l'Afrique et de l'ouest de l'Asie. Nous présenterons les différences et les similitudes des champs modélisés d'aérosols, notamment des poussières désertiques, au travers de ces deux résolutions horizontales différentes.

Prévisions d'ensemble de dispersion de cendres volcaniques

Mathieu Deslandes, François Besson, Marine Jeoffrion, Cécile Cazalet, Gaëlle Collin, Elvis Renard

L'OACI impose aux Centres d'Avertissement de Cendres Volcaniques (Volcanic Ash Advisory Center - VAAC) de fournir un service de prévisions probabilistes de panaches de cendres à compter de novembre 2026, appelé Quantitative Volcanic Ash (QVA).

Le service doit contenir en particulier des informations de fréquence de dépassement de 4 seuils de concentrations de cendres, jusqu'à 24 heures d'échéance.

À ces échéances, les incertitudes sur la prévision de dispersion des panaches de cendres sont principalement liées à celles sur l'estimation du panache initial émis dans l'atmosphère (terme source). C'est pourquoi le VAAC de Toulouse a développé un ensemble de prévision de dispersion constitué de 100 membres, basés sur des simulations de Mocage-Accident, version adaptée pour l'accidentel de MOCAGE, le modèle de chimie-transport de Météo-France.

Cet ensemble repose sur la variation des paramètres décrivant le terme source. Nous présentons ici les caractéristiques de ce système de prévision d'ensemble mis en œuvre pour répondre à la demande.

Nous analysons ensuite le comportement du système en se focalisant sur quelques cas d'étude, en regardant l'impact des différentes variations apportées au terme source. Nous le confrontons également avec un système, basé sur la prévision d'ensemble numérique du temps PEARP, avec un terme source fixé.

Nous le comparons ensuite sur un cas d'études avec les systèmes mis en œuvre par les différents VAAC internationaux, la plupart développant des ensembles de prévisions basés sur l'incertitude des forçages météorologiques.

Nous évoquons enfin quelques perspectives, aussi bien en termes d'amélioration du système opérationnel, qu'en termes de développement d'outil de diagnostic, d'aide à la décision du prévisionniste aéronautique.

Maëlle Coulon-Decorzens, Fleur Couvreur – Centre National de Recherches Météorologiques

High-Tune-explorer: présentation, illustrations et réflexions sur son potentiel pour la prévision

L'Assimilation d'Ensemble ARPEGE, utilisation et évolutions

Nicole Girardot, Loïk Berre

Les méthodes ensemblistes sont utilisées pour quantifier les incertitudes dans les systèmes de prévision, mais aussi dans ceux d'assimilation.

A ce titre, elles peuvent fournir une estimation de l'erreur d'ébauche lors de l'élaboration de l'analyse, état initial du modèle de PNT. Le modèle global ARPEGE utilise ainsi une assimilation d'ensemble, appelée AEARP (Assimilation d'Ensemble ARPege).

Après avoir présenté les différentes utilisations de cet ensemble d'assimilation, nous regarderons comment il est construit, et soulignerons ses dernières évolutions, actuellement dans la chaine en double, consistant à perturber la physique du modèle.

La description de cette évolution sera l'occasion de montrer d'une part, les interactions nécessaires avec les physiciens, d'autre part, les différentes façons d'évaluer ce système et les outils associés.

Évaluation du schéma RPP pour représenter l'erreur modèle dans l'Assimilation d'Ensemble AROME

Valérie Vogt, Loïk Berre

L'assimilation d'ensemble AROME (AEARO) est un élément de la chaîne de PNT qui fournit les covariances d'erreur d'ébauche du 3DEnVar d'AROME déterministe, ainsi que des perturbations initiales pour la prévision d'ensemble AROME (PEARO). Les éléments du cycle d'assimilation qui sont perturbés dans l'AEARO, afin de tenir compte des incertitudes liées, sont les observations, les conditions limites latérales et le modèle de prévision. Pour ce dernier, l'erreur modèle est estimée à partir d'un schéma SPPT (Stochastically Perturbed Parameterisation Tendencies). Un autre schéma de représentation de l'erreur modèle, utilisant la perturbation de certains paramètres du modèle (RPP), est étudié. La qualité de l'AEARO ainsi modifiée sera présentée au travers de divers diagnostics tirés à la fois de l'AEARO ou d'études d'impact sur AROME.

La future chaîne de prévision d'ensemble AROME

Grégory Roux, Laure Raynaud

La prochaine version opérationnelle du système de Prévision d'Ensemble Arome (PEARO) est actuellement en cours de test à Météo-France. Elle bénéficie des améliorations apportées à ses systèmes de couplage : analyse 4DENVAR Arome, assimilation des réflectivités, SDL dans AEARO (Assimilation d'Ensemble Arome), évolution de PEARP (Prévision d'Ensemble globale, basée sur Arpège), et une évolution de sa représentation des erreurs de modélisation.

Pour améliorer cette composante du système, nous avons développé une méthode appelée RPP (Random Perturbation Parameters) qui applique des perturbations directement aux entrées des schémas de paramétrisation, permettant une meilleure cohérence avec les aspects physiques du modèle (perturbation de 19 paramètres issus des schémas de turbulence, de microphysique, de rayonnement, de surface et de convection superficielle).

Cette méthode apporte une amélioration de la représentation de l'incertitude dans PEARO avec une meilleure dispersion dans les basses couches et de meilleures performances sur les variables de temps sensible telles que la température à 2 mètres, la nébulosité et le vent à 10 mètres.

Dans cette présentation, nous évaluons cette nouvelle version sur deux périodes, estivale et hivernale et différentes études de cas.

Fleur Couvreur – Centre National de Recherches Météorologiques

Evaluation de la transition de la convection peu profonde à profonde sur 4 cas contrastés dans les nouvelles versions des modèles de climat français

Fleur Couvreur, Catherine Rio, Romain Roehrig, Arthur Jardot, Aude Champouillon, Nathan Phillippot, Najda Villefranque

Dans ce travail, nous proposons un cadre d'évaluation de la représentation de la transition de la convection peu profonde à profonde. Pour ce faire, 4 cas issus de la littérature sont utilisés pour évaluer les versions récentes des modèles de climat français en version uni-colonne. Ces 4 cas sont disponibles au format commun DEPHY et des simulations LES de référence sont disponibles. Une analyse de sensibilité à la résolution horizontale utilisée et au choix dans la microphysique permet de définir l'incertitude associée à ces références et peut nourrir les algorithmes de tuning.

Apport de l'équilibre radiatif-convectif-dynamique pour la réduction des biais de précipitations des modèles globaux

Catherine Rio, Frédéric Hourdin, Jean-Yves Grandpeix, Mamadou Lamine Thiam

La version CMIP6 du modèle de circulation générale LMDZ présente des biais importants de précipitations dans les Tropiques, concernant à la fois leur distribution moyenne et leur variabilité à différentes échelles, en particulier sur océan. Une meilleure prise en compte des processus physiques à l'oeuvre dans la convection et les nuages a pourtant été introduite dans les paramétrisations physiques, mais des améliorations restent à faire, notamment pour une meilleure prise en compte du rôle respectif des différents processus et de leur couplage.

L'équilibre radiatif-convectif souvent utilisé pour étudier la convection est peu représentatif des conditions rencontrées à l'échelle d'une maille de modèle grande-échelle dans les Tropiques. Dans cette étude nous explorons la pertinence d'utiliser le cadre 1D idéalisé d'équilibre radiatif-convectif-dynamique pour comprendre et caractériser le comportement du modèle global.

L'équilibre atteint entre les paramétrisations de la couche limite, la convection, la condensation grande-échelle, le rayonnement et la dynamique associée à une vitesse verticale ascendante de différentes intensités est exploré et utilisé pour ajuster le rôle respectif de chaque paramétrisation, en comparaison avec des simulations à échelle kilométrique réalisées avec le modèle MESO-NH utilisées dans un premier temps comme référence. Les impacts des modifications guidées par les simulations en équilibre radiatif-convectif-dynamique sur les biais de précipitations du modèle global sont ensuite analysés.

Utilisation de profils nuageux issus de mesures par télédétection pour mieux comprendre les erreurs de prévision de l'irradiance solaire à la surface des modèles de PNT

Manua Ewart, Quentin Libois, Sébastien Riette, Christine Lac

Des marchés de l'énergie à l'exploitation du réseau, la prévision de la production photovoltaïque revêt un intérêt croissant et nécessite des prévisions plus fiables d'irradiance solaire à la surface (SSI). À l'échelle nationale, les estimations de SSI issues des modèles de prévision numérique du temps (PNT) restent parmi les plus robustes, mais des erreurs subsistent, en particulier en présence de nuages. Elles s'expliquent en grande partie par la difficulté à représenter correctement la géométrie des nuages (fraction, extension verticale, multicouches) et leur composition (eau liquide et glace). Des études récentes indiquent par exemple que le modèle opérationnel AROME présente des biais négatifs associés aux nuages bas et des biais positifs associés aux nuages hauts. D'autres travaux, basés sur les observations du SIRTa, montrent en outre une forte corrélation entre les biais de SSI et ceux des contenus intégrés en eau (LWP, IWP).

Dans cette étude, nous exploitons l'information verticale issue de la télédétection depuis le sol (synergie radar-télémètre-radiomètre micro-ondes), via les produits L2 et L3 du réseau Cloudnet dont fait partie le SIRTa. L'objectif est (i) d'identifier des scènes nuageuses (CSc) représentatives des principales situations et (ii) de relier les erreurs de SSI à des biais dans la structure verticale et les contenus en eau. Pour chaque heure de l'année 2025, une CSc est attribuée à l'aide d'un clustering multivarié basé sur des informations géométriques et microphysiques. Cette classification permet ensuite de quantifier la contribution de chaque CSc aux erreurs de SSI.

Les premiers résultats montrent que, parmi les nuages bas, certaines CSc sont associées à des biais de SSI strictement négatifs, tandis que d'autres présentent des distributions plus équilibrées. La comparaison des profils simulés et observés met également en évidence des erreurs de positionnement vertical du maximum de nuage, globalement corrélées aux erreurs de contenu en eau, en particulier sur le LWP. Ces diagnostics suggèrent plusieurs pistes, notamment une condensation sous-maille insuffisante, une convection peu profonde trop active et/ou un couplage inadéquat. Par ailleurs, un déficit d'eau surfondue et un excès de glace sont observés et pointent vers des faiblesses du schéma microphysique d'AROME, notamment une accréation trop importante.

Cette approche, basée sur des profils verticaux observés, permet d'attribuer plus finement les biais radiatifs à des scènes nuageuses représentatives et à des erreurs de structure. Elle est également reproductible en ce sens qu'elle peut être appliquée à d'autres modèles et à d'autres sites Cloudnet. Pour améliorer davantage la représentativité, les travaux futurs porteront sur l'extension spatiale de l'identification des erreurs à l'aide de produits satellitaires.

Programmation des paramétrisations physiques facilitant mutualisation et tests

Frédéric Hourdin, Nicolas Nanou, Laurent Fairhead, Remi Kazeroni, Yann Meurdesoif, Patryk Kiepas

Les modèles de circulation grande échelle sont basés sur une séparation en deux mondes : celui du noyau dynamique qui intègre explicitement sur la sphère (ou sur un domaine à aire limité ou LAM) les équations primitives de la météorologie d'un côté, et de l'autre un ensemble de paramétrisations physiques uni-dimensionnelles sur la verticale, portant sur des colonnes de la grille tri-dimensionnelle vues comme des mondes indépendants. Cette séparation est souvent actée dans les modèles de climat par le fait que l'indice horizontal de la grille est unique et non structuré.

Dans LMDZ, la formalisation de cette séparation entre noyau dynamique et paramétrisations s'est traduite en une séparation en deux mondes informatiques le plus orthogonaux possibles. Cette séparation a été pensée dès le début du développement des premières versions planétaires dans les années 90. Elle a permis depuis d'intégrer au fil des années, dans le même code source, différents noyaux dynamiques (dynamique 3D longitude-latitude, version axi-symétrique latitude-altitude et plus récemment Dynamico et sa version LAM) et différents jeux de paramétrisations physiques (pour la terre, pour d'autres planètes, pour une version isotopique du modèle terrestre, ou encore pour des versions idéalisées utilisées par exemple pour l'enseignement).

Plus récemment, nous avons réalisé qu'une écriture un peu normalisée des codes de ces paramétrisations permet de les modifier automatiquement et à la demande de façon relativement simple. L'outil replay de LMDZ permet ainsi depuis plusieurs années de rejouer une paramétrisation ou une sous partie de paramétrisation, en stockant les arguments d'entrée dans une première simulation. Il permet également de sortir automatiquement à chaque pas de temps d'exécution dans un fichier netcdf toutes les variables tableaux utilisées dans le code de la paramétrisation.

La définition de deux interfaces uniquement (argument de sous-programmes fortran) l'une pour l'initialisation et l'autre pour la paramétrisation, permet d'envisager également une mutualisation entre des modèles hôtes très différents. Facilement et automatiquement également, on peut rejouer la paramétrisation en modifiant certaines variables d'entrée, par exemple en lisant les profils d'entrée dans une simulation LES. Cette fonctionnalité introduite récemment dans l'outil replay de LMDZ, permet d'envisager de faire facilement de la calibration de paramètres, directement dans la LES et sans couplage avec les autres paramétrisations, en utilisant les outils htexplo. On illustrera en particulier dans cet exposé le potentiel offert par cette extension.

Cette écriture normalisée a également contribué à rendre possible le portage des paramétrisations de LMDZ sur GPU grâce à l'outil GPU-Morphosis développé par Rémi Kazeroni et Yann Meurdesoif à l'IPSL, utilisant un outil "source to source" développé au CEPPMMT. Cet outil inclut lui aussi depuis peu une fonctionnalité permettant de rejouer tout ou partie des codes. Elle permet également d'envisager dans un avenir proche de remplacer

de façon relativement automatique une paramétrisation physique par un émulateur statistique entraîné sur une première simulation.

Développement et évaluation d'une nouvelle paramétrisation du mélange dans le modèle du thermique de LMDZ

Nicolas Nanou, Frédéric Hourdin et Catherine Rio

Dans le cadre de mes travaux de thèse, je m'intéresse aux couplages entre variabilité (horizontale) du contenu en eau de l'atmosphère et le cycle de vie de la convection. Il s'agira à la fois de travailler sur le contrôle de la distribution sous maille de l'eau par la convection (déentraînement des cumulus et cumulonimbus, poches froides, réévaporation des pluies convectives) et sur le contrôle de la convection par l'humidité et sa variabilité sous maille. Dans ce contexte général, nous avons entrepris dans un premier temps de revisiter la paramétrisation du mélange (entraînement et déentraînement latéral) dans le "modèle du thermique" qui paramétrise la convection peu profonde avec pour but de :

- restituer fidèlement la physique gouvernant les processus ;
- améliorer les performances du modèle du thermique et en particulier sa sensibilité à l'humidité de l'environnement

Ce travail nous a amené en particulier à :

- revisiter un terme de la formulation du déentraînement rendant compte de la sensibilité du déentraînement à l'humidité de l'environnement, qu'on souhaite rendre plus physique sur la base d'idée de tri par flotabilité (Kain et Fritsch 1990) ;
- prendre en compte l'énergie cinétique turbulente et son transport par les thermiques dans les formulations du mélange au bord des panaches thermiques. Ce travail s'appuie en particulier sur une analyse d'une LES du cas ARM cumulus à 8m de résolution.

Pour évaluer ces nouvelles paramétrisations, j'utilise le modèle LMDZ en configuration unicolonne que je confronte à des LES, et l'outil HighTune explorer (méthode de tuning objective) décrit dans Hourdin et al. 2021.

Apports et limites des flux turbulents verticaux de Leonard dans AROME à différentes échelles de convection

Louis Lutun, Didier Ricard, Fabrice Voitus

Le modèle AROME utilise le schéma de turbulence Cuxart-Bougeault-Redelsperger (CBR, 2000) dans sa version 1D avec une diffusion turbulente purement verticale, c'est-à-dire sans prise en compte des flux turbulents horizontaux. Cette formulation en K-gradient n'est pas suffisante pour représenter le flux turbulent vertical (et à fortiori l'ensemble de la turbulence) non résolu à échelle kilométrique et hectométrique dans la convection profonde (Verrelle et al. 2015). Dans la continuité des travaux menés au CNRM (Verrelle et al. 2017, Strauss et al. 2019, stage de Gallego 2022, ...), nous étudions l'intérêt de la formulation du flux turbulent de Leonard (Leonard 1974) dans un modèle kilométrique comme AROME (1.3 km) pour les flux verticaux de chaleur et d'humidité. Ce flux de Leonard peut être représenté par des produits de gradients horizontaux de vitesse verticale avec ceux de température et d'humidité.

Nous avons déjà défini un schéma numérique robuste et stable pour implanter le flux turbulent vertical de Leonard dans AROME. Nous proposons donc une évaluation dans différents contextes de convection atmosphérique : de la convection profonde mature, jusqu'aux thermiques de la couche limite, incluant les structures convectives de la zone grise du modèle kilométrique.

Nous présentons les changements structuraux apportés par cette formulation dans le schéma de turbulence, et dans ses interactions avec les autres paramétrisations.

Nous examinons les intérêts pour la prévision numérique du temps et retrouvons certains résultats obtenus dans d'autres modèles météorologiques (Hanley et al. 2019). Enfin, nous mettons également en lumière certaines limites de cette paramétrisation.

Paramétrisation bi-colonne d'une brise méso-échelle

Les circulations méso-échelles sont absentes des modèles de climat à large maille car elles ne sont ni résolues ni paramétrisées. Et pourtant elles jouent un rôle climatique important à travers l'organisation à méso-échelle de la convection nuageuse, favorisant les précipitations et modifiant le bilan radiatif.

Nous étudions différentes LES idéalisées de brises méso-échelles créés par des hétérogénéités de flux de surface ou par le relief, et conduisant parfois à l'initiation de convection profonde.

Nous avons développé une paramétrisation 1D bi-colonne capable de reproduire le comportement des différentes LES, notamment l'évolution diurne du profil de vitesse de la brise et des hétérogénéités de la couche limite convective, reproduisant ainsi les processus favorable à l'initiation de convection profonde.

Nous pensons que cette paramétrisation pourrait aussi être utilisée pour modéliser les circulations méso-échelles d'origine purement nuageuses: SMOCs et MCS.

Vers une variable pronostique de l'organisation de la convection dans ARPEGE

Meryl Wimmer, Jean-Marcel Piriou, Yves Bouteloup

Une prise en compte de l'organisation de la convection profonde est proposée dans le schéma de convection profonde de Tiedke (1989). Celle-ci se base sur une variable 3D, dite MO (meso-scale organisation), représentant le degré d'organisation de la convection (allant de floculaire à organisée comme les systèmes convectifs de méso-échelle). Son évolution temporelle dépend de l'évaporation des pluies et de la vitesse verticale environnementale résolue par le modèle.

Cette paramétrisation a été implémentée et testée dans ARPEGE. Afin de calibrer les paramètres de l'équation d'évolution de MO, un ensemble de 110 prévisions à paramètres perturbés a été généré. Contrairement aux méthodes habituelles, la calibration employée ici repose sur une minimisation de scores du modèle 3D, basés sur des critères tels que la fréquence des pluies, l'énergie cinétique, ou encore le cycle diurne de la convection.

Cette nouvelle paramétrisation représente de façon plus réaliste la temporalité de la convection ainsi que la taille et la mobilité des systèmes convectifs de méso-échelle. La fréquence des pluies est améliorée en produisant de plus forts cumuls et en résolvant le biais d'ARPEGE produisant trop de bruines au niveau des côtes. Différentes études de cas, ainsi que des scores statistiques seront présentés.

Paramétrisation d'une distribution sous-maille du vent de surface intégrant les rafales engendrées par les poches froides

Mamadou Lamine Thiam, Frédéric Hourdin, Jean-Yves Grandpeix et Adriana Sima

Le contenu physique du modèle LMDZ fait l'objet d'améliorations continues, notamment grâce au développement de nouvelles paramétrisations. L'intégration des processus sous-nuageux à travers les paramétrisations des thermiques (Rio et Hourdin, 2008), qui représentent la convection peu profonde, et des poches froides (Grandpeix et Lafore, 2010), qui représentent les courants de densité associés aux descentes précipitantes issues de la convection profonde, a par exemple permis d'améliorer significativement la représentation de la convection dans le modèle. Ces travaux ont servi de base au développement d'une "Nouvelle Physique" qui ne cesse d'être améliorée depuis. Nous présentons ici une nouvelle paramétrisation de la distribution sous-maille du vent de surface intégrant les rafales engendrées par les poches froides. Le développement de cette paramétrisation repose principalement sur des simulations de grands tourbillons (Large Eddy Simulations, LES), qui permettent une représentation explicite des processus liés aux poches froides, ainsi que sur une approche Monte Carlo, utilisée afin de contourner des calculs analytiques complexes des fonctions de densité de probabilité des distributions de vent. Le modèle ainsi développé, qui fournit uniquement le vent à l'intérieur des poches froides, est ensuite combiné à un second modèle intégrant les rafales associées aux thermiques, majoritairement présentes en dehors des poches. Ce dernier a été développé en parallèle de ce travail par Adriana Sima, permettant ainsi d'obtenir une distribution complète du vent à l'échelle de la maille. Le modèle combiné est testé et validé dans la configuration 1D du modèle LMDZ, en comparaison avec les LES. L'outil High-Tune Explorer est utilisé pour calibrer les paramètres libres du modèle. Cette nouvelle paramétrisation de la distribution du vent, intégrant à la fois les rafales induites par les poches froides et celles associées aux thermiques, est désormais intégrée dans LMDZ. Elle peut être utilisée pour la modélisation du soulèvement de poussière ainsi que du soulèvement des vagues, les rafales engendrées par les poches froides étant susceptibles d'initier ces processus.

Poster : Intelligence artificielle en prévision numérique du temps

Sara Akodad, Julien Avrit, Angélique Bonamy, Clément Brochet, Nicolas Colomb, Benjamin Devillers, Petr Dolezal, Maxence Lame, Eliott Lumet, Olivier Pannekoucke, Laure Raynaud, Thomas Rieutord, David Salas y Melia, Yoel Zerah

L'intelligence artificielle (IA) trouve beaucoup d'applications en prévision numérique du temps, tout particulièrement en matière de prévisibilité. Ce poster propose d'illustrer trois de ces applications et de montrer leur complémentarité. La plus médiatique de ces applications est la prévision numérique par IA (PNIA) : elle consiste à émuler les modèles de prévisions numériques basés sur de la physique. La seconde application est la descente d'échelle : elle consiste à générer des champs haute résolution à partir de champs basse résolution grâce à de l'IA générative. La troisième et dernière application est l'enrichissement d'ensemble : elle consiste aussi à utiliser de l'IA générative, cette fois pour générer des membres selon la distribution d'un ensemble donné. Ces approches sont explorées en parallèle pour leur complémentarité : la descente d'échelle améliorerait les performances de la PNIA en fin d'échéance, la PNIA fait des prévisions avec une bonne cohérence temporelle mais faible sur les extrêmes, la génération d'ensemble améliorerait la représentation des queues de distributions et donc la prévision d'évènements extrêmes.

Poster : Système 9, le nouveau système de prévision saisonnière de Météo-France

Jonathan Beuvier, Damien Specq, Laurent Dorel, Fousiya Thottuvilampil Shahul Hameed, Jean-François Guérémy, Constantin Ardilouze, Lauriane Batté

Le CNRM développe, conçoit, et implémente le système de prévision d'ensemble saisonnière utilisé à Météo-France. Le CNRM est également un centre contributeur aux exercices communs de prévision en Europe et participe à l'ensemble multi-systèmes du Copernicus Climate Change Service (C3S). Dans le cadre de C3S, le CNRM a effectué en 2025 une importante mise à jour de son système de prévision saisonnière, passant de l'ancien Système 8 au nouveau Système 9. Ce poster vise à présenter les principaux changements apportés entre les deux systèmes, ainsi que les améliorations obtenues en terme de climat moyen du modèle et de ses capacités prédictives aux échelles saisonnières.

Poster : Évaluation de la contribution du changement climatique dans les anomalies de prévisions saisonnières

Louis Ledoux--Xatard, Damien Specq, Saïd Qasmi et Hervé Giordani

La prévision saisonnière numérique consiste à prédire la distribution attendue de plusieurs variables climatiques (par exemple, la température, les précipitations) sur les six mois suivants, en utilisant un modèle climatique global qui est initialisé avec des observations en temps réel. Les prévisions saisonnières sont souvent communiquées sous forme d'anomalies par rapport à la climatologie du modèle, estimée à partir de prévisions initialisées sur une période passée (reprévisions).

Ces anomalies sont affectées par des tendances de long terme dues au changement climatique anthropique. Par conséquent, la plupart des prévisions saisonnières de température actuellement émises par Copernicus Climate change services (C3S) ces dernières années indiquent des conditions plus chaudes que la normale en Europe, quelle que soit la saison.

Ici, nous utilisons trois méthodes pour quantifier la contribution du changement climatique dans les anomalies de prévisions saisonnières, et les comparons à la référence habituelle basée sur la climatologie des reprévisions. La première méthode consiste en une tendance linéaire sur la période des reprévisions. Cette approche est généralement utilisée dans la littérature pour évaluer la qualité des prévisions, car elle fournit une estimation de la réponse au changement climatique. Cependant, cette méthode repose sur l'hypothèse majeure que la réponse forcée anthropique est linéaire, ce qui n'est pas toujours raisonnable. La deuxième méthode repose sur une technique bayésienne qui combine des simulations climatiques CMIP6 et les reprévisions pour estimer la réponse forcée au sein du modèle, en supposant qu'elle est indiscernable de l'ensemble CMIP6. La troisième méthode est fondée sur des expériences de prévision saisonnière numérique initialisées dans un monde contrefactuel non affecté par des forçages anthropiques : les conditions initiales dynamiques sont les mêmes que celles des prévisions saisonnières factuelles, mais les conditions initiales thermodynamiques correspondent à un climat plus froid représentatif de la climatologie des reprévisions. À partir de ce protocole, la contribution du changement climatique peut être estimée grâce à la différence entre les prévisions factuelles et contrefactuelles. Dans ce travail, les trois méthodes sont mises en œuvre sur la prévision saisonnière opérationnelle de Météo-France. Bien que les méthodes bayésiennes et les expériences numériques montrent des résultats cohérents dans l'estimation de la réponse forcée, les résultats de la méthode linéaire pourraient être inappropriés ou trop simplistes dans certains cas.

Poster : Addressing the Air Pollution in Marseille Metropolitan Area

Parth Sanjev Menghal, Agathe Bousquet, Olivier Boiron, Fabien Anselmet, Elliot Chevet

Air pollution has been a persistent issue in Marseille and its surrounding for decades, with maritime traffic, road traffic, industries and residences recognized as the four key contributors to this issue. The density of the Marseille metropolitan area, its proximity with the cruise port on a side and with the mountain chains on the other side concentrates the pollutants and has raised significant concerns and sparked extensive public debate.

Coastal breezes play an important role on the advection of pollutants as the highest pollution episodes happen when the synoptic winds are weak. In those cases, the ventilation of pollutants in the city is provided mainly by the daily cycles of thermal breezes, thus the breezes are the main concern of our study.

In this project, we attempt to improve the forecast in Marseille area of the main air pollutant which are SO_x, NO_x, Ozone, CO, VOC and particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) using the WRF ecosystem. Our approach will be to regionalize the model by adapting the geodata, the land use, the physical model and particularly the turbulence model to the area studied and provide a forecast of breeze phenomenon. This approach will rely on the installation of a pollution and wind sensor network throughout the city to assimilate the real-time observations into our forecasts. In the medium term, we are particularly interested in the future of these sea breeze regimes, especially in connection with a significant increase in sea surface temperature linked to global warming.

The resulting analyses and forecast, developed under multiple scenarios, are intended to provide a robust evidence base for policymakers and strategic planning.