



**HAL**  
open science

## Météo-France : Rapport Recherche 2023

Pontaud Marc

► **To cite this version:**

| Pontaud Marc. Météo-France : Rapport Recherche 2023. Météo-France. 2024. hal-04655378

**HAL Id: hal-04655378**

**<https://hal.science/hal-04655378v1>**

Submitted on 30 Jul 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



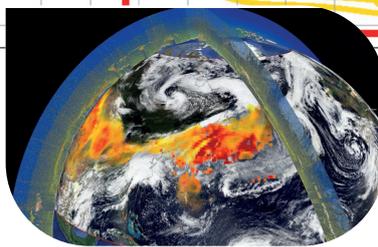
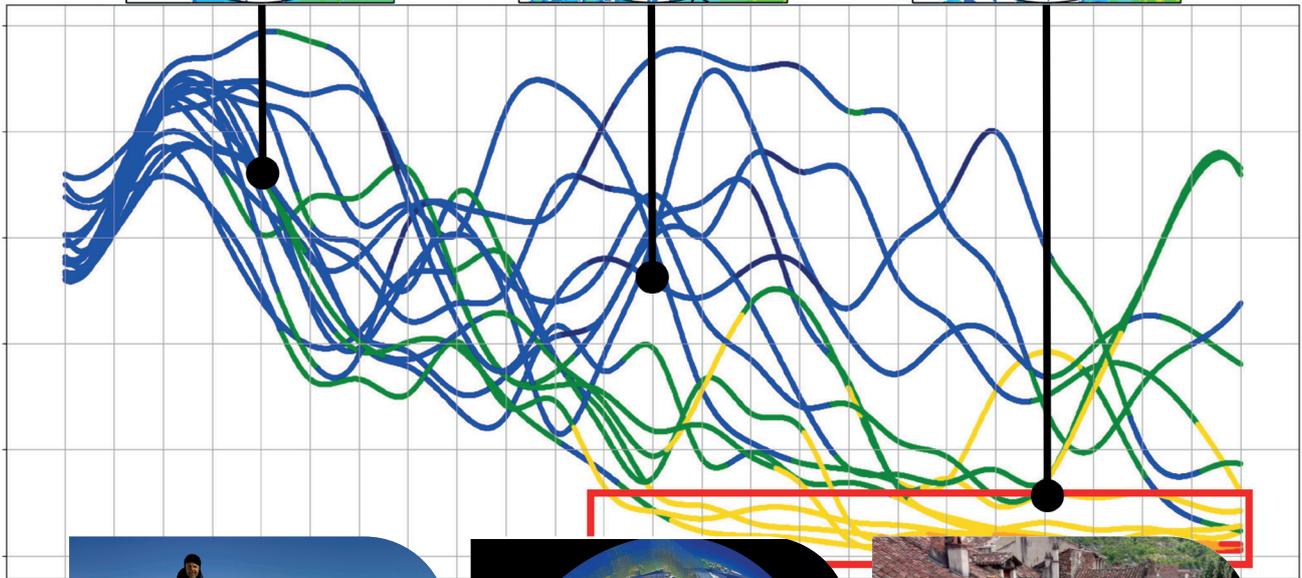
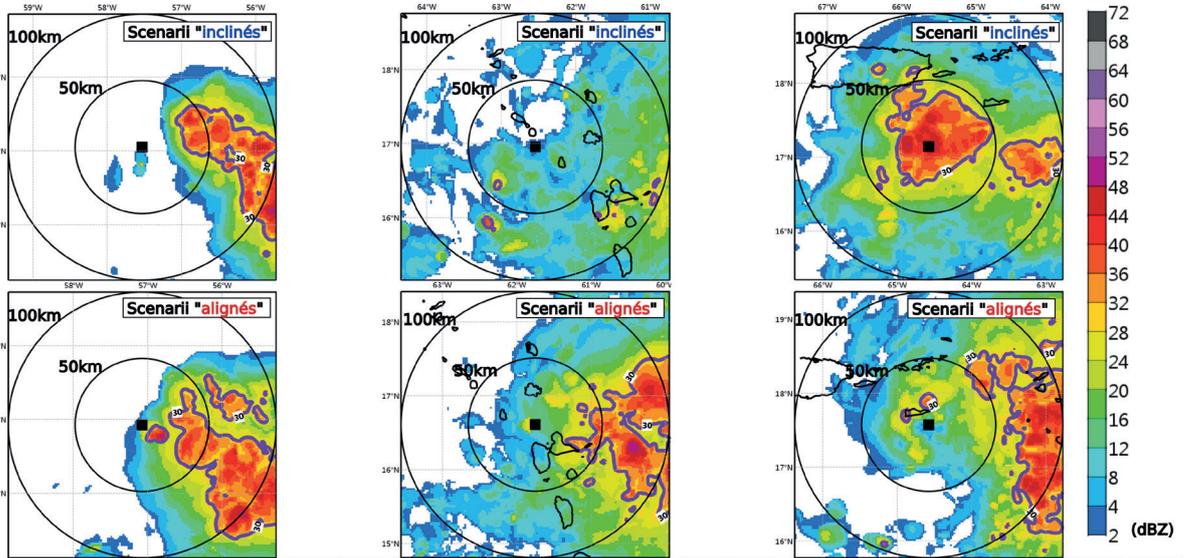
RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité



METEO  
FRANCE

À VOS CÔTÉS, DANS UN  
CLIMAT QUI CHANGE



# Rapport Recherche 2023



# Rapport Recherche 2023



# Sommaire

---

**Edito Marc Pontaud** ● page 4

---

**L'intelligence artificielle pour la prévision numérique du temps** ● page 7

---

**L'étude du climat régional** ● page 19

---

**Les aérosols** ● page 29

---

**Florilège de résultats illustrant les avancées de recherche en 2023** ● page 39

Prévision numérique ● page 40

Etude et modélisation des processus ● page 48

Climat et prévision saisonnière ● page 58

Composition atmosphérique (chimie et aérosols) ● page 64

Neige et montagne ● page 70

Météorologie instrumentale et observation ● page 78

---

**Annexes** ● page 89

L'année 2023 a été marquée par plusieurs jalons importants dans la communauté scientifique météo et climat mais celui qui aura été le plus disruptif est certainement la série de communications des « big tech » sur leurs travaux en prévision numérique du temps par apprentissage automatique (intelligence artificielle). Si l'utilisation de l'Intelligence Artificielle (IA) en météorologie n'est pas nouvelle, puisqu'elle est utilisée dans le post-traitement des prévisions depuis les années 1990, la démonstration est faite qu'il est possible de prévoir par IA une partie des variables météorologiques, avec une certaine qualité et dans des temps très courts. Les pistes ouvertes par ces méthodes sont nombreuses. Elles concernent le champ « classique » de la prévision numérique, la descente d'échelle, la très courte échéance (prévision immédiate), la production de membres supplémentaires pour les ensembles, l'assimilation de données, ... C'est un nouveau pan de recherche et d'applications qui s'ouvre devant les services météorologiques, mais qui ne doit pas faire perdre de vue la poursuite des travaux d'amélioration des modèles de prévision à bases physiques. Il ne s'agit pas de remplacer l'un par l'autre, mais de mettre en synergie ces deux approches. Pour réussir cela, Météo-France va devoir s'adapter et affiner ses ambitions scientifiques, et donc revisiter sa Stratégie Scientifique 2020-2030.

Dans la perspective du renouvellement des moyens de calcul de Météo-France, le besoin d'infrastructure en apprentissage automatique est une nouvelle donnée en prendre en compte. D'ores et déjà, Météo-France vise à faire évoluer ses codes numériques des modèles de prévision pour qu'ils soient compatibles avec les différentes architectures, qu'elles soient scalaires, vectorielles ou accélérées (GPU). L'enjeu est de doter l'Établissement de la puissance de calcul nécessaire à ses missions, mais à un coût énergétique et financier le plus bas possible. Un gros effort est en cours sur l'adaptation des codes aux architectures accélérées (GPU) pour permettre l'ouverture à la plus grande concurrence possible d'architectures et de fournisseurs pour le renouvellement de nos supercalculateurs. Il conviendra également d'affiner nos besoins en apprentissage machine et de les faire

prendre en compte au mieux dans cette étape majeure d'évolution de nos moyens de calcul. Une grande dynamique européenne a été mise en œuvre par les services météorologiques et de premières instances de prévision numérique par IA commencent à être opérées. Météo-France vise la mise en œuvre d'un prototype d'un tel système sur le même domaine que le modèle opérationnel de prévision AROME (Europe de l'Ouest) pour la fin de l'année 2024. Il s'agira d'évaluer cette première version et de tester le cadre de mise en œuvre.

Ce nouvel axe de travail ne doit pas occulter l'ensemble des autres travaux, notamment ceux qui visent à améliorer les systèmes de prévisions basés sur les équations de la physique. Il s'agit de progresser pour les implémentations à échelle hectométrique, en représentant mieux les effets 3D, notamment de la turbulence. Il s'agit aussi de consolider l'enrichissement du système AROME à l'échelle kilométrique avec toutes les composantes du système Terre (projet AROBASE), c'est à dire le couplage de l'atmosphère (AROME), avec la surface (SURFEX), l'océan 3D (NEMO), les vagues (MFWAM) et la chimie atmosphérique (objet du projet interne ACCALMIE). Un autre axe de travail majeur concerne particulièrement la surface (SURFEX) : le projet MASCOT (Modélisation et Assimilation des Surfaces Continentales pour l'Opérationnel) vise à l'amélioration de la représentation des surfaces continentales dans les modèles de prévision numérique du temps et s'articule avec le développement d'un nouveau système d'assimilation de surface (2DnVar).

En ce qui concerne le changement climatique, l'Établissement s'organise pour fournir des éléments mis à jour sur nos territoires d'intérêt (hexagone et outre-mer) en regard de la TRACC (Trajectoire de Réchauffement de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique). L'Établissement a reçu le renfort de 12 postes dédiés à ces enjeux en outre-mer, dont 5 seront dédiés aux activités de recherche et de production des simulations à haute résolution (échelle kilométrique, dite convective). L'objectif est de délivrer l'ensemble des indicateurs utiles via le portail DRIAS, d'ici fin



2025, sur l'hexagone et les territoires ultramarins. Si ce travail s'inscrit dans l'exploitation des simulations climatiques globale de l'exercice international CMIP6, la préparation de CMIP7 est en cours, notamment en support du prochain rapport d'évaluation du GIEC AR7. Les simulations climatiques globales CMIP7 devront commencer dès 2025, dans un cadre dénommé « fast-track ».

Rappelons que tous les nombreux travaux de recherche de Météo-France s'inscrivent dans des coopérations, nationales comme européennes. Le paysage national évolue avec la création des Agences de Programme qui sont appelés à remplacer les Alliances (notamment AllEnvi à laquelle Météo-France participait). Comme celles-ci, les nouvelles Agences viseront à favoriser des co-constructions inter-organismes intéressantes, mais cette fois, avec un possible soutien financier de l'État, qui leur permettront de dynamiser leurs actions. Météo-France poursuivra son engagement dans les Agences comme il l'a fait au sein des Alliances. Également Météo-France, très concerné et impliqué dans l'observation spatiale de la Terre, participe à diverses instances nationales, européennes et internationales sur le sujet, mais plus particulièrement en 2024, participera au Séminaire de Prospective Scientifique du CNES.

Météo-France poursuit son engagement aux côtés des autres Organismes Nationaux de Recherche, en co-pilotant avec le CNRS, le PEPR TRACCS dont les Projets Ciblés auront démarré d'ici mi-2024, et contribue également aux PEPR IRIMA sur les risques, OneWater sur les enjeux de ressources en eau et BRIDGES sur l'océan indien. Avec les deux autres tutelles de SAFIRE, le CNRS et le CNES, il conviendra de lancer le projet ANVOLE de renouvellement de l'avion haute altitude Falcon 20 et de sécuriser l'implantation de cette unité sur l'aéroport de Toulouse-Francazal. C'est aussi le temps des évaluations HCERES. Le LACy, dont l'équipe Cyclones et météorologie tropicale a été entièrement renouvelée,



déposera son dossier HCERES début 2024 et le CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques, dont Météo-France et le CNRS sont les tutelles) commencera sa préparation pour une audition à l'automne 2025. A ajouter à ce concert d'évaluations, le renouvellement de l'accréditation HCERES-CTI de l'Ecole Nationale de la Météorologie à délivrer le diplôme d'ingénieur également en 2025.

Au niveau européen, il conviendra de renouveler en 2024 le projet Destination Earth 330 (DEODE) pour une seconde phase et préparer le renouvellement du consortium ACCORD qui réunit 26 pays euro-méditerranéens autour de notre modèle à aire limitée AROME. Un premier objectif sera de faire approuver la stratégie scientifique qui sera à la base du prochain « Memorandum of Understanding » qui est à renouveler pour le 1er janvier 2026.

Dans ce contexte européen, il est important de rappeler la mise sur orbite du satellite gestionnaire MTG-I1 fin 2022, opéré par EUMETSAT, dont nous attendons avec impatience la mise à disposition des données des instruments FCI et LI. Probablement encore plus attendu, la mise sur orbite du satellite MTG-S1 d'ici la fin 2024 qui embarque avec lui l'instrument IRS dont on attend beaucoup pour l'amélioration des prévisions AROME. Ces observations seront pleinement valorisées avec les nouveaux algorithmes d'assimilation (3DEnVar automne 2024 et surtout 4DEnVar fin 2025/début 2026). Ces nouveaux algorithmes associés à l'extension de la variable de contrôle aux hydrométéores, vont permettre également d'assimiler pleinement les mesures radars, c'est à dire qu'au-delà de corriger les champs d'humidité, il deviendra possible de corriger les champs de précipitations durant la construction des conditions initiales pour les prévisions d'AROME. Le travail se poursuivra en vue d'exploiter les observations des objets connectés dont les stations individuelles. Des expériences d'assimilation de ce type

de données (notamment les stations météorologiques individuelles) seront conduites.

Nous poursuivrons notre étroite coopération avec le CEPMMT, que ce soit sur la convergence de nos codes, notamment sur la physique, ou notre action coordonnée sur l'adaptation de ceux-ci aux architectures accélérées (GPU), qui devra aboutir dans un cadre le mieux partagé possible. Un effort particulier a permis de définir une nouvelle méthode de travail avec le Centre mais aussi avec les partenaires ACCORD, facilitant ainsi les échanges et les évolutions du code. Avec l'avènement de la prévision numérique par intelligence artificielle, des pistes se font jour pour définir un cadre collaboratif efficace entre tous les services météorologiques européens : voici une co-construction à réussir rapidement.

Dans la perspective des Jeux Olympiques et Paralympiques Paris2024, il faut mentionner le bilan très positif de la campagne de terrain PANAME, version 2022 avec notamment le volet aéroporté mobilisant l'ATR42 de SAFIRE et version 2023 avec les mesures par drones, ainsi que de nombreuses mesures au sol et de radiosondages depuis le cœur de Paris, qui a apporté son lot d'informations pertinentes sur l'ilot de chaleur urbain en région parisienne et la modélisation à l'échelle hectométrique. Il s'agit maintenant de maintenir le dispositif instrumental fixe et de « dérouler » le projet « RDP PARIS 2024 » qui connaîtra son point d'orgue durant l'été 2024 avec la mise à disposition des prévisions à échelle hectométrique par plusieurs centres météorologiques, incluant AROME 500m et Meso-NH 100m. L'intercomparaison des modèles contribuera à l'amélioration de la modélisation des processus urbains pour la météorologie et le climat. Parallèlement, un échantillon suffisamment grand et représentatif issu de simulations Meso-NH hectométrique sera utilisé comme base d'apprentissage pour réaliser une descente d'échelle en milieu urbain, avec un focus sur les villes

d'Occitanie et de Paris.

Les travaux de recherche de l'année 2023 ont apporté leur contribution au Contrat d'Objectif et de Performance (COP) 2022-2026 de Météo-France avec l'État. Les jalons scientifiques prévus au COP sont pour la plupart toujours en construction mais tous sont bien engagés et devront être tenus. Tous les éléments mentionnés ci-dessus succinctement et détaillés dans la suite du document montrent que la recherche occupe une place privilégiée au sein de Météo-France, tant elle vient en support à l'ensemble de ses missions. Elle est la source des progrès qui sont ensuite mis en œuvre en matière d'observation, de modélisation, de prévision numérique du temps et d'étude de l'évolution du climat, et les impacts et risques associés. Elle permet à l'Etablissement d'améliorer sans cesse la qualité de ses produits et services opérationnels et d'ouvrir de nouveaux chantiers pour répondre aux attentes de la société et des pouvoirs publics. Mais des horizons nouveaux apparaissent et des attentes sociétales toujours grandissantes se font pressantes, dans un environnement scientifique -pas uniquement- qui évolue rapidement. Il est donc temps de remettre sur le métier notre stratégie scientifique et de porter le regard un cran plus loin, sur la période 2025-2035, et en se préservant une capacité d'adaptation toujours plus grande.

Il est maintenant temps de vous inviter à la lecture du Rapport Recherche 2023 de Météo-France. Cette année, nous vous proposons un focus sur « l'intelligence artificielle pour la prévision numérique du temps », un focus sur « le climat régional » et un focus sur « les aérosols » complété par un très riche et large « florilège de résultats illustrant les avancées de recherche en 2023 ».

Bonne lecture  
et belle continuation



Marc Pontaud  
Directeur de l'Enseignement  
Supérieur et de la Recherche



# L'intelligence artificielle pour la prévision numérique du temps

L'Intelligence Artificielle (IA), et en particulier les méthodes d'apprentissage profond utilisant des réseaux de neurones, ont investi ces dernières années un nombre croissant de domaines avec des résultats souvent spectaculaires. Cette évolution rapide a été notamment permise par le développement des processeurs graphiques et par la disponibilité de jeux de données massifs. Les applications de l'IA à la prévision du temps et du climat sont potentiellement nombreuses, et pourraient conduire à des ruptures méthodologiques fortes, associées à des gains de performance et de qualité significatifs. Tous les maillons de la chaîne de prévision sont concernés, depuis l'assimilation de données jusqu'à l'expertise des prévisions, ainsi que le développement des modèles, de la prévision immédiate à la projection climatique. Les travaux en IA au CNRM ont débuté il y a environ 5 ans, et concernent désormais la plupart des thématiques de recherche du laboratoire. Les articles présentés dans ce dossier font état des premières réalisations. La diversité des sujets témoigne de l'intérêt grandissant pour cette nouvelle thématique et les enjeux associés. Plusieurs articles font référence à l'exploitation des données de prévision et d'observation. La descente d'échelle des prévisions par IA est une autre piste prometteuse pour améliorer le réalisme des simulations, et fait l'objet d'études à différents horizons spatio-temporels. Enfin, le développement de modèles de prévision hybrides physique/IA, et récemment d'émulateurs complets d'un système de prévision globale, offre de nouvelles perspectives pour la prévision opérationnelle.

Qu'ils soient exploratoires ou proches de l'opérationnalisation, ces travaux illustrent le potentiel de l'IA pour plusieurs de nos activités de recherche, et ouvrent sur de nouvelles questions et défis concernant la place de l'IA dans les prochaines évolutions des chaînes de prévision.

Laure Raynaud

---

# Enrichissement des ensembles AROME avec des techniques d'apprentissage profond

Clément Brochet, Gabriel Moldovan, Laure Raynaud

La représentation des incertitudes en prévision numérique du temps repose sur une approche ensembliste, où plusieurs trajectoires du système atmosphérique (appelées « membres ») sont calculées en parallèle à l'aide de modèles physiques de l'atmosphère. Ceci permet *in fine* d'estimer la distribution des futurs possibles et de quantifier l'erreur qui entache toute prévision. Néanmoins, le coût numérique important des modèles limite la taille des ensembles opérationnels, bornant ainsi l'exploration des distributions. Dans ce contexte, les méthodes d'intelligence

artificielle (IA) offrent une piste prometteuse pour enrichir les ensembles à moindre coût. C'est l'objet du projet ANR POESY, porté par le CNRM, d'explorer la capacité de l'apprentissage profond à simuler des champs météorologiques cohérents pour compléter la prévision d'ensemble du modèle de prévision à aire limitée AROME. Les méthodes d'IA génératives, et en particulier les modèles de type 'Generative Adversarial Networks' (GAN), ont été exploitées avec succès dans plusieurs domaines. Une première application de ces modèles sur des données AROME a montré

leur potentiel pour générer des champs de température à 2 mètres et de vent à 10 mètres réalistes. Cela permet d'envisager la production d'ensembles enrichis de plusieurs dizaines, voire centaines, de membres générés par IA. Les premières évaluations de ces ensembles augmentés indiquent des améliorations significatives pour ces paramètres par rapport à l'ensemble AROME opérationnel (Figure). L'approche développée sera prochainement étendue pour s'appliquer au domaine AROME entier et pour inclure davantage de variables météorologiques, notamment les précipitations.

## Référence :

Brochet C., Raynaud L., Thome N., Plu M. et Rambour C.: Multivariate Emulation of Kilometer-Scale Numerical Weather Predictions with Generative Adversarial Networks: A Proof of Concept. *Artificial Intelligence for the Earth System*, 2, 230006, <https://doi.org/10.1175/AIES-D-23-0006.1>, 2023

1

---

# Assimilation de données radar satellitaires dans un modèle global du système sol-plante utilisant l'intelligence artificielle

Timothée Corchia, Bertrand Bonan, Nemesio Rodriguez-Fernandez (CESBIO), Gabriel Colas, Jean-Christophe Calvet

Dans le contexte du réchauffement climatique, la fréquence et l'intensité des événements extrêmes tels que les sécheresses augmentent, et une meilleure modélisation de la réponse de la végétation aux conditions météorologiques est nécessaire. Une solution consiste à assimiler les observations satellitaires dans les modèles des surfaces terrestres afin de combiner toutes les sources d'information disponibles. Au CNRM, l'assimilation de produits d'humidité du sol et d'indice foliaire est réalisée à l'aide du système d'assimilation de données LDAS-Monde. Ces produits satellitaires sont des produits transformés, dérivés de radiances

ou de réflectances. Ces dernières sont des produits de plus bas niveau, proches de ce qui est directement observé par les instruments embarqués. Cette transformation engendre une perte d'information ainsi qu'une cascade d'incertitudes qu'il est difficile de quantifier dans l'assimilation de données. Il est donc préférable d'assimiler les produits de plus bas niveau. Pour ce faire, un opérateur d'observation basé sur des réseaux de neurones permettant de faire le lien entre les produits satellitaires et les sorties du modèle a été développé. L'intégration de cet opérateur d'observation dans LDAS-Monde a permis d'assimiler

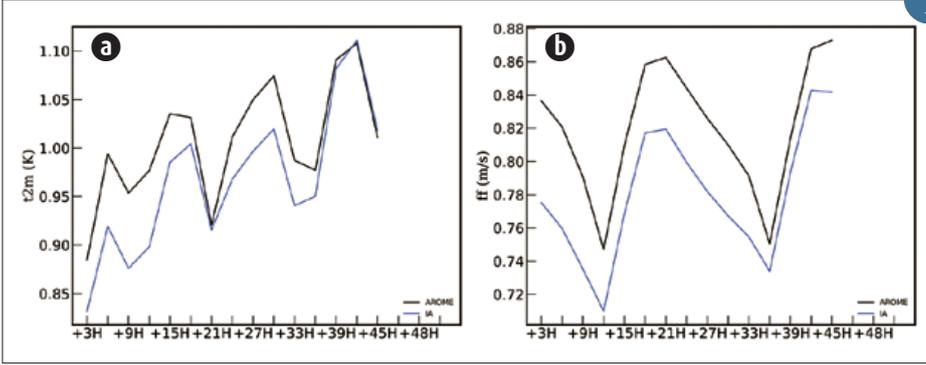
des coefficients de rétrodiffusion radar de l'instrument ASCAT à bord du satellite MetOp dans le modèle ISBA. Une première étude a été réalisée dans le sud-ouest de la France où l'on peut voir que l'assimilation mène à une amélioration des variables prédites par ISBA avec, en particulier, une forte correction des biais du modèle sur les indices foliaires dans les zones agricoles du domaine étudié. Cette méthode a été appliquée à l'échelle mondiale. Elle est en cours de généralisation avec pour objectif d'assimiler d'autres types d'observations satellitaires tels que des températures de brillances micro-ondes ou l'albédo de surface.

## Référence :

Corchia, T.; Bonan, B.; Rodríguez-Fernández, N.; Colas, G.; Calvet, J.-C. Assimilation of ASCAT Radar Backscatter Coefficients over Southwestern France. *Remote Sens.*, 15, 4258, <https://doi.org/10.3390/rs15174258>, 2023.

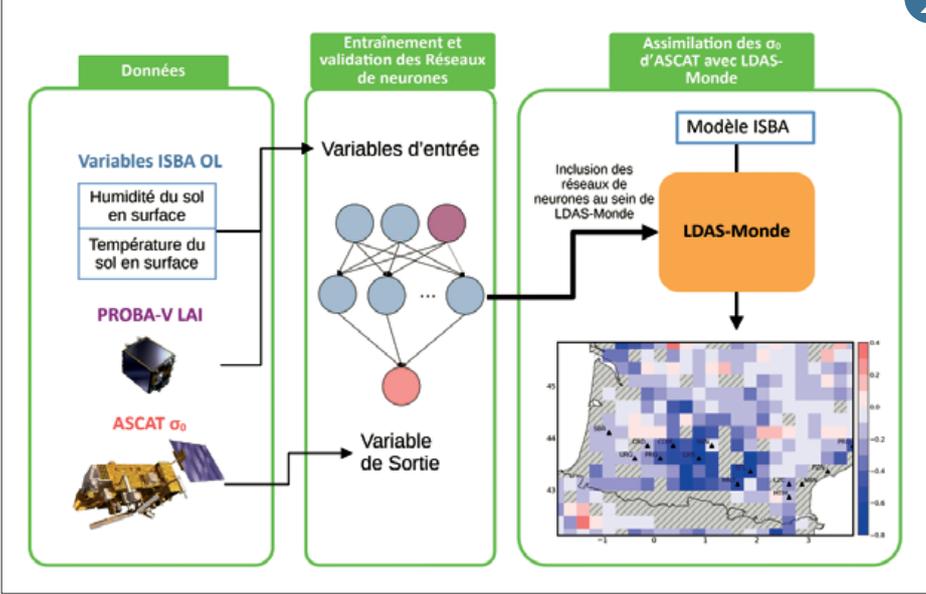
2

1



Performance des prévisions d'ensemble mesurée par le Continuous Ranked Probability Score pour la température à 2 mètres (a) et la vitesse du vent à 10 mètres (b), en fonction de l'échéance de prévision. La ligne noire correspond à l'ensemble AROME opérationnel et la ligne bleue correspond à l'ensemble enrichi avec la méthode GAN.

2



Assimilation des coefficients de rétrodiffusion radar ASCAT pour le suivi de la végétation dans le sud-ouest de la France : de gauche à droite, construction de la base de données, entraînement et la validation des réseaux de neurones, inclusion des réseaux de neurones entraînés en tant qu'opérateurs d'observations au sein de LDAS-Monde. La carte en bas à droite montre l'impact de l'assimilation sur la racine de l'écart quadratique moyen de l'indice de surface foliaire simulé par ISBA. Une nette amélioration de l'indice foliaire (en bleu) est observée dans les zones agricoles présentes dans le centre du domaine.

---

# Potentiel de l'apprentissage profond pour le suivi et la prévision immédiate des systèmes convectifs de mésoéchelle en France

Gabriel Arnould

Les orages violents se regroupent parfois en systèmes convectifs de mésoéchelle (MCS) couvrant des centaines de kilomètres et durant plusieurs heures. Pour produire la meilleure prévision à courte échéance des systèmes convectifs de mésoéchelle, la configuration « prévision immédiate » du système de prévision à aire limitée AROME (AROME-PI) fournit toutes les heures des prévisions à 6 heures d'échéance en mettant à jour AROME-France par l'assimilation des dernières observations disponibles. Le dernier réseau AROME-PI n'est cependant pas toujours le meilleur, notamment quand l'ébauche AROME-France est très éloignée de l'observation. L'évaluation de chaque nouveau réseau AROME-PI est donc une tâche nécessaire mais aussi chronophage pour le prévisionniste. Des produits synthétiques sont alors les bienvenus pour faciliter l'analyse opérationnelle d'AROME-PI dans la prévision immédiate des systèmes convectifs de mésoéchelle.

Sur la « carte confettis », au centre de la figure, les confettis colorés représentent les systèmes convectifs de mésoéchelle détectés dans les six prévisions AROME-PI valides à 1930 UTC le 06/09/2022. Chaque réseau est associé à une couleur spécifique. La détection des systèmes convectifs de mésoéchelle dans AROME-PI utilise un réseau de neurones convolutifs développé dans la continuité de travaux menés sur le post-traitement de modèles ensemblistes (Mounier et al., 2022<sup>1</sup>). Deux champs sont ici considérés en entrée : les réflectivités simulées, dont les fortes valeurs sont synonymes de précipitations convectives, et la température de brillance infrarouge pour identifier les sommets nuageux froids caractéristiques des orages. Les systèmes convectifs de mésoéchelle détectés dans l'observation par un réseau de neurones analogue figurent en contour noir. On voit aisément que le système convectif de mésoéchelle évoluant au nord-est de la

France est bien simulé par les six réseaux AROME-PI, en particulier le dernier (en bleu). Pour le système convectif de mésoéchelle stationnaire sur le sud-est du pays, il vaut mieux suivre les réseaux de 16 et 15 UTC (en orange et jaune) qui sont les seuls à simuler des systèmes assez importants pour être détectés, bien que mal situés. Un produit épuré comme la « carte confettis » est utile pour savoir si les derniers réseaux AROME-PI sont appropriés au suivi des systèmes convectifs de mésoéchelle observés et à la prévision immédiate de leur évolution. Par ailleurs, les caractéristiques associées aux systèmes observés et à leur environnement peuvent être employées comme données d'entrée d'un modèle statistique de prévision immédiate des systèmes convectifs de mésoéchelle. Des études complémentaires sur le sujet sont en cours

## Référence :

Arnould Mounier, Laure Raynaud, Lucie Rottner, Matthieu Plu, Philippe Arbogast, Michaël Kreitz, Léo Mignan, Benoît Touzé. Detection of Bow Echoes in Kilometer-Scale Forecasts Using a Convolutional Neural Network. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 2022, DOI:10.1175/AIES-D-21-0010.1. [meteo-03811214](https://doi.org/10.1175/AIES-D-21-0010.1)

3

---

## Détection des échos arqués et scénarios de pluies : deux approches pour extraire des informations pertinentes dans les ensembles à échelle convective

Arnould Mounier

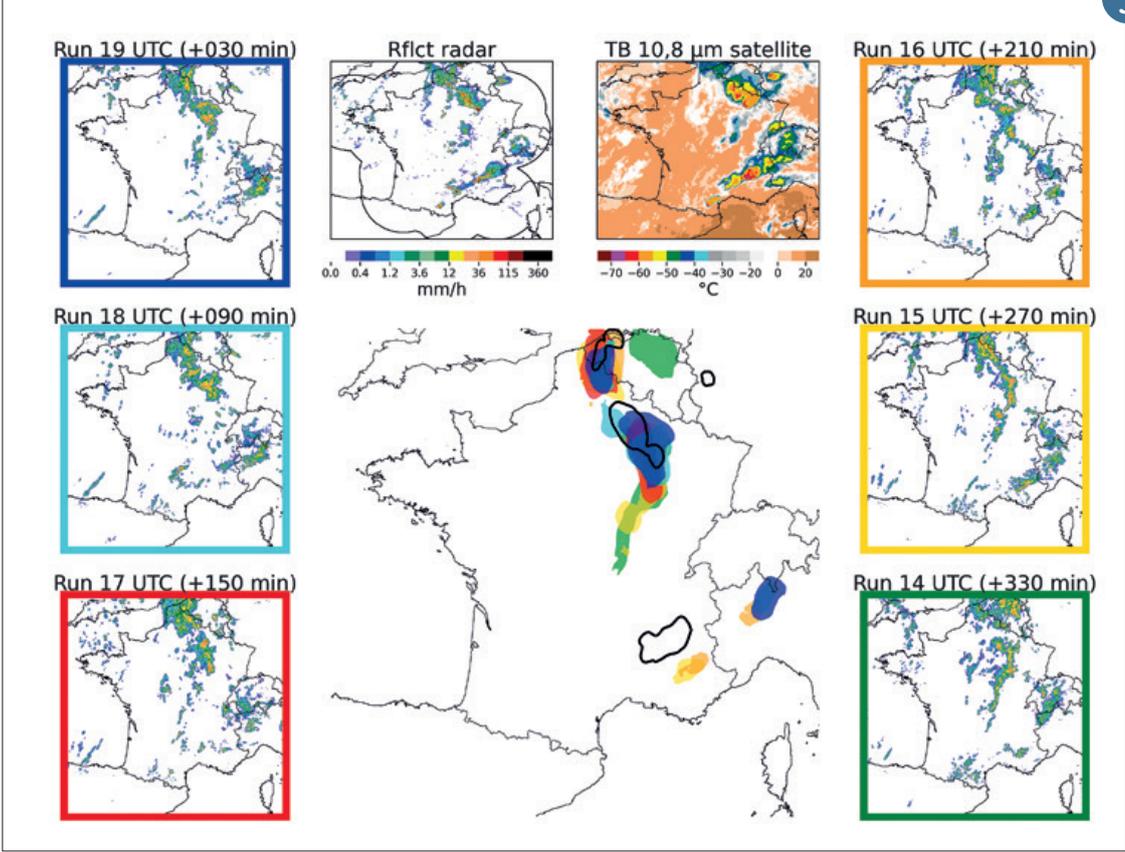
La caractérisation et l'analyse des incertitudes de prévision dans la production opérationnelle de Météo-France reste un exercice difficile. En particulier, l'utilisation des prévisions d'ensemble n'est pas immédiate et nécessite une mise en forme synthétique de l'information en adéquation avec les besoins des prévisionnistes. Les méthodes d'intelligence artificielle offrent de nouvelles perspectives pour extraire l'information pertinente des prévisions. Leur potentiel a été démontré pour le développement de deux produits innovants à partir de la prévision d'ensemble Arome (PEARO), ciblant les phénomènes orageux intenses et les précipitations. La première approche consiste à détecter automatiquement des objets météorologiques dans les prévisions

disponibles à l'aide de réseaux de neurones convolutifs. Cette approche a été développée sur les échos arqués (voir ci-dessus), qui sont des systèmes orageux souvent associés à de fortes rafales de vent, et dont l'exemple récent le plus connu est celui qui a traversé la Corse en août 2022. Des produits de synthèse issus de ces détections sont en production expérimentale depuis deux ans, avec des retours très positifs des prévisionnistes. La deuxième approche est une synthèse par scénarios de la PEARO, qui cherche à regrouper les prévisions similaires. La méthode a été appliquée au champ de précipitations avec des scénarios à l'échelle d'un quart de France. Un premier prototype sur la zone Sud-Est a été concrétisé sous la forme d'une visualisation synthétique et interactive, produite en temps réel et mis à

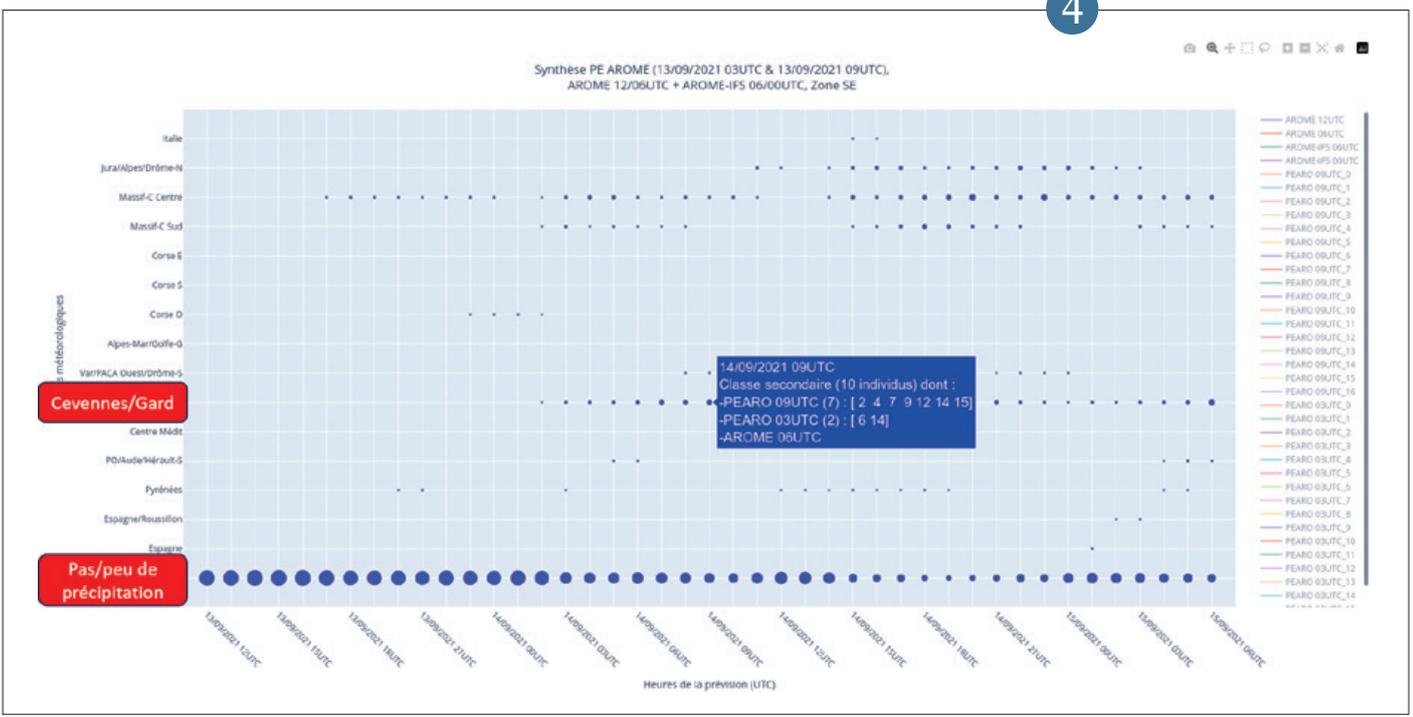
disposition des prévisionnistes depuis juin 2023. La figure montre que sur cet exemple le scénario majoritaire n'envisage pas ou peu de précipitation mais qu'un scénario alternatif avec des pluies sur les Cévennes existe. Compte tenu des observations faites a posteriori, le scénario alternatif était le bon.

Ces travaux seront prochainement étendus à d'autres enjeux, avec la détection des supercellules et la production de scénarios sur d'autres régions. Les futurs scénarios seront également enrichis d'un indice de sévérité et leur construction pourra inclure les contraintes des usagers.

4



Au centre : « carte confettis » indiquant les systèmes convectifs de mésoéchelle détectés dans les six réseaux consécutifs d'AROME-PI disponibles à 1930 UTC le 06/09/2022 (confettis colorés) et les systèmes convectifs de mésoéchelle détectés au même moment dans l'observation radar et satellite (contours noirs). En haut : réflectivités radar et température de brillance (canal 10,8 μm) mesurées par le satellite Météosat Seconde Génération. Sur les côtés : réflectivités simulées par les réseaux AROME-PI à la même date de validité (la couleur des cadres correspond à celle des confettis sur la carte centrale).



Visualisation interactive des scénarios identifiés dans les différentes prévisions disponibles incluant les réseaux PEARO du 13 septembre 2021 à 03 h et 09 h UTC. Les prévisions vont du 13 septembre à 12 h UTC jusqu'au 15 septembre 06 h UTC. Pour le 14 septembre à 09 h UTC, la synthèse par scénarios indique que le scénario majoritaire correspond à peu ou pas de précipitation (disque bleu le plus gros). Mais un scénario alternatif existe avec des pluies sur la zone Cevennes/Gard comprenant 10 prévisions différentes. Le détail des prévisions affectées à chaque scénario peut être visualisé de façon interactive.

---

# L'apprentissage profond en support de la modélisation des processus éoliens à fine échelle en montagne

Louis le Toumelin

En montagne, la topographie complexe induit une grande variabilité des champs météorologiques à fine échelle (c-à-d hectométrique et en-deçà), inatteignable pour les modèles de prévision numérique du temps actuellement à résolution kilométrique. Or, la connaissance de cette variabilité est primordiale pour certaines applications comme la prévision du risque d'avalanches, où des processus de fine échelle tels le transport de neige par le vent structurent les propriétés du manteau neigeux.

Pour accéder à ces résolutions, des descentes d'échelle existent, mais les plus sophistiquées, dynamiques, sont numériquement coûteuses.

Afin de pallier cet écueil, nous proposons d'apprendre les relations complexes entre le vent à haute résolution spatiale et la

topographie de fine échelle (30 m), sur des milliers de simulation réalisées avec un modèle atmosphérique à haute résolution. Cet apprentissage, appuyé sur des réseaux de neurones convolutifs, exploite la capacité des convolutions à détecter les structures spatiales complexes (pics, arêtes, cols) façonnant le vent en montagne.

Le modèle ainsi entraîné, appelé DEVINE (Descente d'Échelle du Vent pour la Nivologie et ses Enjeux, Figure A), s'avère très performant pour un faible coût numérique. Alimenté par des prévisions de vent d'AROME dans les Alpes, il fournit une représentation cohérente de la modulation du vent par la topographie de fine échelle (Figure B). Sa confrontation à des mesures de vent *in-situ*, se heurte cependant à une limite : le vent à haute résolution produit par DEVINE hérite des biais du modèle forceur AROME.

Pour y pallier, nous avons adjoint à DEVINE une correction de biais du vent AROME, constituée de réseaux de neurones simples situés en amont de la descente d'échelle (Figure A). Cette correction est apprise sur des observations de vent et en tenant compte des effets de la descente d'échelle. Les performances de l'ensemble descente d'échelle et correction de biais, baptisé DEVINE+, sont remarquables et proches de l'analyse AROME (Figure B).

Ces résultats incitent à poursuivre l'exploitation de méthodes d'apprentissage profond pour la descente d'échelle et correction de biais de différentes variables météorologiques en montagne, au bénéfice d'une meilleure connaissance de la météorologie à fine échelle.

## Référence :

Le Toumelin L., Isabelle Gouttevin, Nora Helbig, Clovis Galiez, Mathis Roux, and Fatima Karbou. Emulating the adaptation of wind fields to complex terrain with deep-learning. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 2(1):1-19, <https://dx.doi.org/10.1175/AIES-D-22-0034.1>, 2023.

5

---

# Vers un apprentissage par IA en météorologie urbaine hectométrique

Julia Garcia Cristobal, Valéry Masson

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 et à l'état de l'art scientifique comme le modèle de recherche Méso-NH 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.

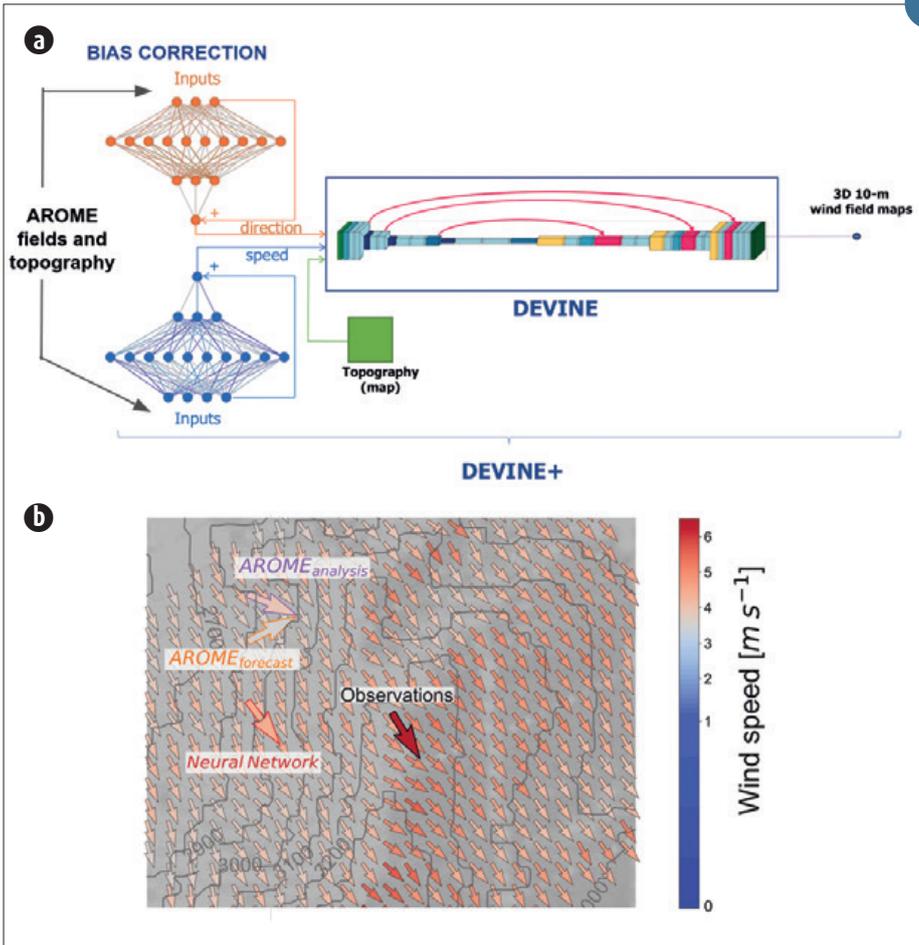
Le développement récent de l'Intelligence Artificielle (IA) appliquée à la météorologie permet de réaliser des descentes d'échelle statistiques. Ainsi il est possible d'obtenir à partir d'un champ à basse résolution, une estimation de ce champ à résolution plus fine. L'objectif du travail en cours est de concevoir un émulateur de Méso-NH par une descente d'échelle par IA afin de réduire significativement la puissance de calcul de ces prévisions urbaines.

Ainsi, en utilisant des simulations Méso-NH du mois d'août 2022 sur l'Île-de-France, une descente d'échelle statistique a été réalisée permettant d'obtenir un champ

de température à 300 m de résolution à partir de la température du modèle planétaire ARPEGE à 5 km de résolution sur la France. La température ainsi déduite par IA reproduit l'îlot de chaleur urbain et les hétérogénéités de température (cf. Figure) simulées dans Méso-NH. Afin de consolider ces résultats, la zone d'intérêt et l'échantillon d'apprentissage vont être élargis, et la résolution de Méso-NH passée jusqu'à 100 m.

6

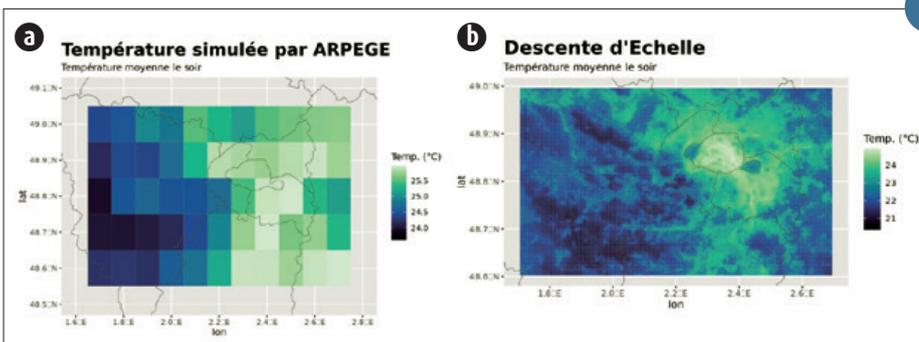
5



(a) : Correction de biais (à gauche) et descente d'échelle DEVINE (à droite) formant la chaîne DEVINE+.

(b) : Simulation du vent à haute résolution spatiale par DEVINE+ sur une zone de relief autour du Piz Corvatsch, en Suisse. Les flèches orange et violette représentent respectivement le modèle forceur (*AROME forecast*) et une référence de performance, l'analyse AROME (*AROME analysis*) au centre de la maille AROME la plus proche de la zone d'étude ; le *Neural Network* est la sortie intermédiaire de la correction de biais.

6



Champ de température moyenne le soir pendant le mois d'août 2022 sur la région Île-de-France issu du modèle ARPEGE (a) et champ issu de la descente d'échelle par IA (b)

# PanguWeather : Premiers enseignements d'un émulateur de modèle d'échelle planétaire

Vincent Chabot, Matthieu Plu, Laurent Descamps

Depuis 2022 divers émulateurs de prévision à l'échelle globale, construits par apprentissage sur plusieurs décennies d'ERA5, ont vu le jour.

Les premiers éléments disponibles (preprint publiés sur arxiv) laissant songeur (temps pour faire une prévision très faible, scores très bons), il est assez rapidement apparu intéressant de vérifier la capacité de ces modèles et commencer à appréhender ce que cette "avancée" pourrait changer dans le paysage de la prévision numérique du temps (PNT).

De ce fait, le CNRM et le LabIA, ont pris en main et évalué PanguWeather<sup>1</sup>, émulateur qui était à l'époque le meilleur disponible. Cet émulateur effectue des prévisions sur une maille lat/lon régulière de 0,25° en enchaînant des phases de prévisions de 6 h et de 24 h (si l'on souhaite disposer d'une prévision toutes les 6 h). Le jeu de variables prévu est assez restreint (géopotentiel, température, humidité et les deux composantes horizontales du vent) sur 13 niveaux verticaux ainsi que les variables de surface comme la pression réduite au niveau de la mer, la température à 2 mètres et le vent à 10 m). Pour ces émulateurs, la condition initiale peut provenir de n'importe quel modèle de PNT classique et nous avons donc dans un premier temps utilisé pour celle-ci diverses analyses (ARPEGE, IFS, ERA5). Dans tous les cas de figure, le modèle

se comporte de la manière attendue, c'est-à-dire qu'il n'a pas un mauvais comportement même lorsqu'on utilise une analyse autre qu'ERA5.

Nous avons commencé par évaluer la qualité des prévisions pour différentes variables de grande échelle. Bien souvent, après les premières 24 h, la prévision issue de PanguWeather montre de meilleurs scores d'écart quadratique moyen (EQM) que la prévision ARPEGE (quel que soit la référence). Ces prévisions ne sont pas exemptes de biais. Elles pourraient donc être améliorées par du postprocessing (telles des prévisions classiques). On note de plus sur l'analyse des scores une cyclicité : du fait du schéma de production très particulier de cet émulateur, l'EQM diminue toutes les 24 h. Une deuxième étude menée concerne la performance de ce type de modèle pour la prévision de la position des cyclones tropicaux, suivis par un algorithme automatique (VDG<sup>2</sup>). La figure 1 présente l'erreur de position totale et le long de la trajectoire (+/- 0.5\* std) en fonction de l'échéance de prévision. Les champs ont une résolution de 0,25° et les conditions initiales identiques. On observe une erreur moyenne de position totale bien plus faible pour les prévisions PanguWeather (courbe violette) par rapport à celles d'ARPEGE (courbe saumon). Cela peut être en partie expliqué par une erreur moyenne le long de la trajectoire peu

biaisée pour PanguWeather (courbe bleue) alors qu'ARPEGE à un biais négatif traduisant une tendance à faire évoluer moins vite les cyclones que dans les observations (courbe orange).

Malgré ces premiers éléments très positifs des limitations claires apparaissent : les précipitations et les rafales ne sont généralement pas ou mal prévues par les émulateurs globaux, les vents accompagnant cyclones et dépressions ont des intensités trop faibles, certains champs tel l'humidité semblent beaucoup trop lisses. Des interrogations subsistent sur le respect de réalités physiques, pouvant être aussi triviales que le cycle journalier, et vont nécessiter une étude plus approfondie. Enfin, il faudra aussi comprendre à quel point les conclusions que l'on peut tirer de l'étude de cet émulateur sont transposables à d'autres émulateurs (Graphcast, AIFS, ...) et comment faire pour contraindre ces modèles à mieux respecter certaines réalités physiques.

1. <https://github.com/198808xc/PanguWeather>

2. <https://github.com/UMR-CNRM/Traject>

7

## L'émulation de la physique pour les modèles de climat

Blanka Balogh

Les techniques d'intelligence artificielle (IA) peuvent être utilisées dans le cadre de la modélisation climatique. La représentation des processus de fine échelle non résolus (e.g., convection, turbulence, microphysique) est la principale source d'incertitude dans les simulations climatiques. L'effet de ces processus est décrit dans les modèles de climat par des représentations simplifiées appelées paramétrisations. Une nouvelle approche consiste à remplacer les paramétrisations physiques par des algorithmes d'IA entraînés avec des données issues de simulations résolvant explicitement certains de ces processus de fine échelle. Ces

simulations sont plus précises mais restent pour le moment trop coûteuses en temps de calcul pour être utilisées pour la réalisation de simulations climatiques longues.

Avant de pouvoir évaluer l'apport des paramétrisations IA par rapport à celles actuellement utilisées, un certain nombre de difficultés restent à surmonter. Les premiers résultats publiés dans le domaine montrent que les paramétrisations IA sont numériquement instables. Nos études ont permis d'obtenir une simulation d'une durée d'un an avec ARPEGE-Climat où le schéma de convection profonde a été remplacé par des réseaux de neurones.

Une autre difficulté vient des langages de programmation différents le plus souvent utilisés pour le développement du modèle de climat (FORTRAN) et pour les paramétrisations IA (python). Nous avons récemment réussi à mettre en place un couplage simple d'utilisation, dont l'efficacité numérique est en cours d'amélioration.

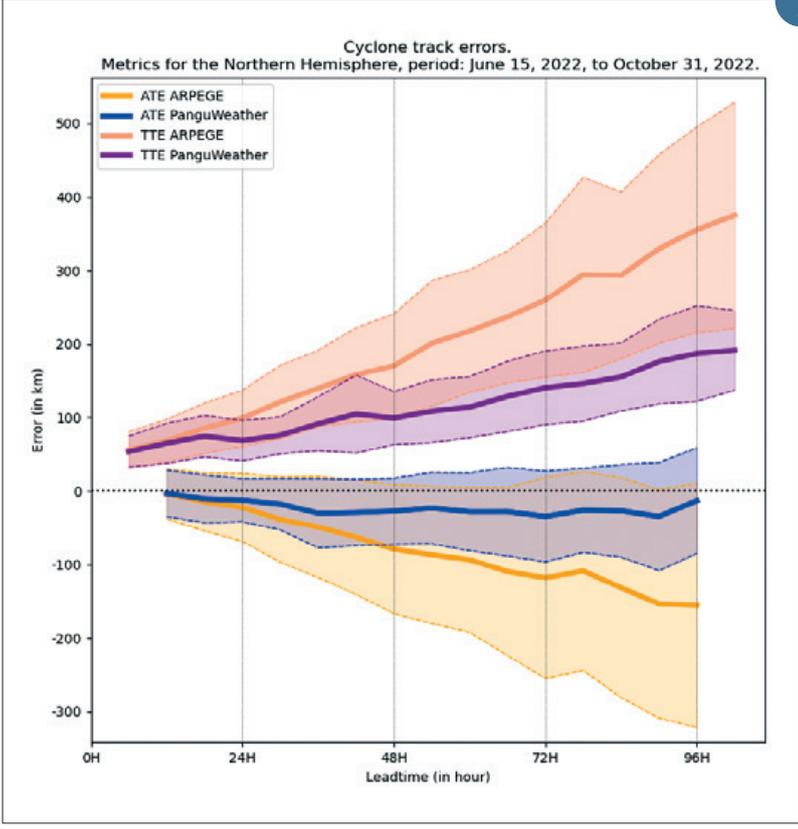
Ces développements techniques récents nous permettront de réaliser des tests plus ambitieux. Un projet en cours est l'implémentation et l'évaluation d'un schéma IA stochastique pour la convection, en collaboration avec l'Université Columbia.

### Référence :

Balogh, B. *Vers une utilisation de l'Intelligence Artificielle dans un modèle numérique de climat*. Climatologie. Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), 2022. Français. <https://theses.hal.science/tel-04066421>

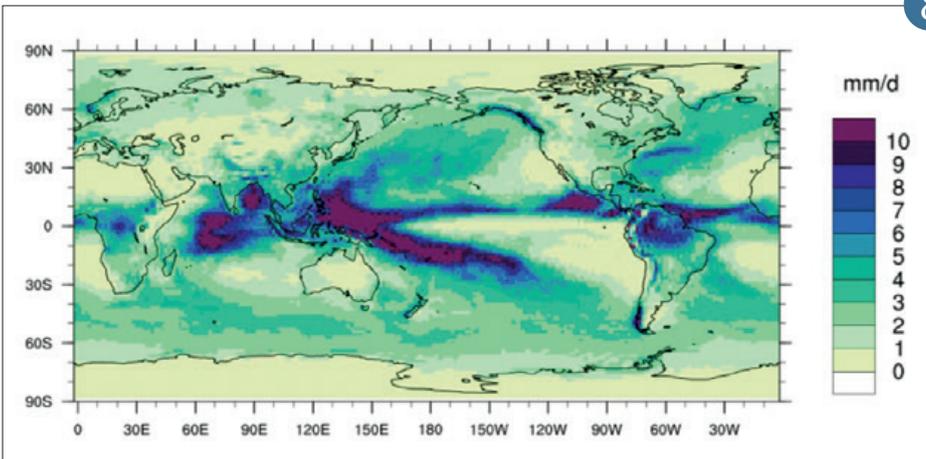
8

7



Erreur le long de la trajectoire (ATE) et erreur total (TTE), en utilisant l'algorithme VDG de Traject, par rapport à la base de données IBTRACS.

8



Carte de moyenne annuelle de précipitations (année simulée : 2000). Les données sont issues d'une simulation ARPEGE-Climat où la paramétrisation de la convection profonde a été remplacée par un réseau de neurones.

---

## Diagnostic de grêle en temps réel à l'aide de réseaux de neurones convolutifs appliqués aux données radar polarimétriques

Vincent Forcadell

Détecter la grêle en temps-réel est un enjeu crucial pour les collectivités et les assureurs afin de déployer des moyens d'assistance appropriés à grande échelle. L'objectif de ce travail est d'entraîner des réseaux de neurones convolutifs sur des données radar afin d'augmenter les performances des méthodes de détection de grêle existantes. Dans ce contexte, une base de données a été construite à l'aide des données du radar de Toulouse. Un élément de la base de données correspond à une vignette de données radar de 20 km x 20 km (Figure). En construisant des vignettes positives (Oui grêle) et négatives (Non grêle), il est devenu possible d'entraîner un réseau de neurones

convolutifs à les différencier. Cette capacité à différencier la grêle et la non grêle peut être généralisée au territoire national en temps-réel.

Une architecture de réseaux de neurones convolutifs légère a été proposée et entraînée avec en entrée les vignettes radar et en sortie la probabilité que la vignette ait produit de la grêle au sol. Une comparaison a été réalisée avec deux algorithmes opérationnels de Météo-France.

Les performances sont bonnes, avec un meilleur compromis entre le taux de détection et le taux de fausses alarmes que les méthodes existantes (Figure). Une interprétation des résultats a permis de

mettre en avant les zones de l'orage utilisées par le réseau de neurones convolutifs pour prendre sa décision, et de montrer qu'il reproduisait des schémas physiques cohérents afin de détecter la grêle.

Ce travail a posé les fondations d'un travail en cours plus complexe pour détecter la taille maximale des grêlons en temps réel.

**Partenariat:** thèse CIFRE avec Descartes Underwriting

9

---

## Scénarios de cyclogénèses et de trajectoires : Clustering appliqué à la prévision d'ensemble ENS pour les cyclones tropicaux

Quoc-Phi Duong, Mike Payet, Adrien Colomb

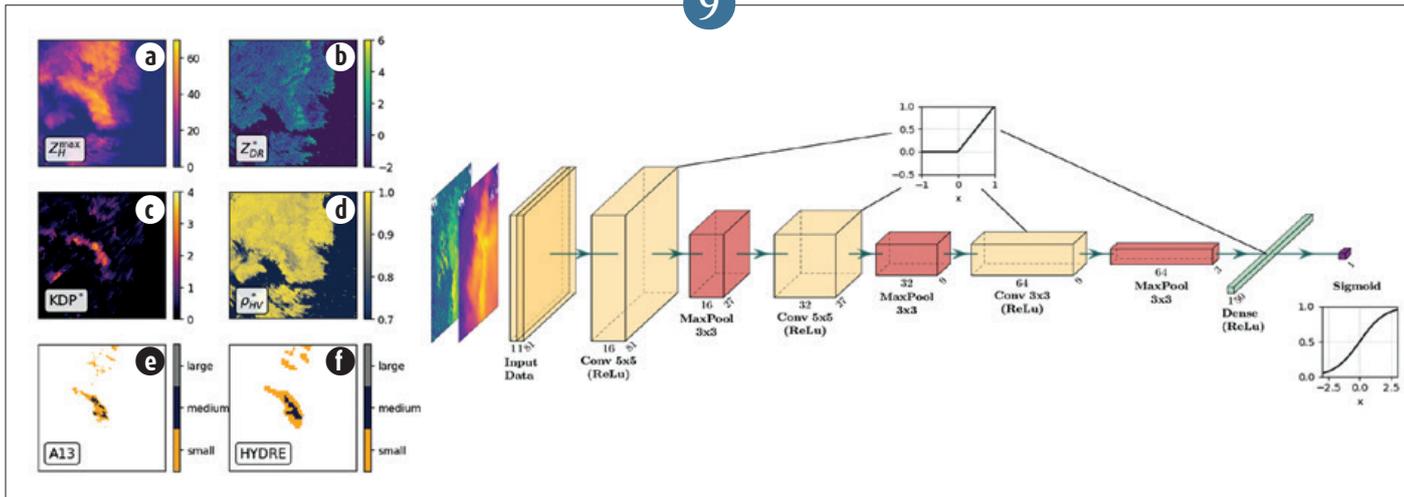
Pour les acteurs de la gestion du risque cyclonique, il est crucial d'avoir des alertes précoces qui permettent la mise en place de mesures opérationnelles anticipées, telles que le déclenchement d'une veille renforcée et le pré-positionnement de moyens d'intervention logistiques et humanitaires. La nouvelle configuration de la prévision probabiliste ENS du CEPMMT sert actuellement de base à l'élaboration de prévisions mensuelles d'activité cyclonique. Cependant, avec désormais deux ensembles distincts mis à jour quotidiennement et comptant respectivement 51 et 101 membres, la quantité d'informations à traiter est devenue colossale pour les prévisionnistes.

Dans ce contexte, une méthode de clustering en post-traitement a été développée au LACy dans le cadre du projet PISSARO afin de concentrer l'information pertinente au sein de scénarios distincts, chacun associé à une probabilité d'occurrence propre. Cette classification des trajectoires prévues s'opère en deux temps. La première étape utilise l'algorithme DBSCAN pour extraire des zones privilégiées de cyclogenèse, en se basant sur un critère de similitude spatio-temporelle des points d'origine. La deuxième étape établit des scénarios médians de trajectoires pour chaque zone en utilisant une classification ascendante hiérarchique. Les résultats peuvent être exploités via l'outil web de cartographie interactive CYPHER.

D'abord testée sur la région Sud-Ouest de l'Océan Indien, cette méthode a récemment été étendue aux autres bassins cycloniques, et pourra potentiellement l'être sur d'autres sources de données dans le futur (la Prévision d'Ensemble ARPEGE et GEFS notamment). Les prévisionnistes du CMRS Cyclones La Réunion vont évaluer en pratique son intérêt durant la prochaine saison cyclonique (2023-2024). La définition de critères objectifs pour son évaluation est en cours.

10

9



À gauche : exemple de vignettes radar avec les variables radar (a, b, c, d) et les algorithmes opérationnels à Météo-France (e, f) ; à droite : architecture du réseau de neurones convolutifs.

10



L'analyse de la prévision du 16 janvier 2023 issue de la prévision mensuelle ENS montre 3 zones potentielle de début de cyclogenèse. La zone la plus proche de Madagascar (avec une probabilité de 37 %) a bien donné lieu au développement du système CHENESO qui a été suivi par le CMRS la Réunion à partir du 17 janvier 2023. 2 scénarios principaux de trajectoires sont envisagés : une trajectoire rectiligne où le système traverse Madagascar pour rejoindre le canal du Mozambique et une trajectoire plus parabolique où le système longe la côte Est de Madagascar. Dans les faits, le système a traversé l'île Rouge en s'affaiblissant puis s'est ré-intensifié le long de la côte Ouest en ressortant dans le canal le 23 janvier 2023 à 13 h UTC avant de s'évacuer vers le Sud et les hautes latitudes.



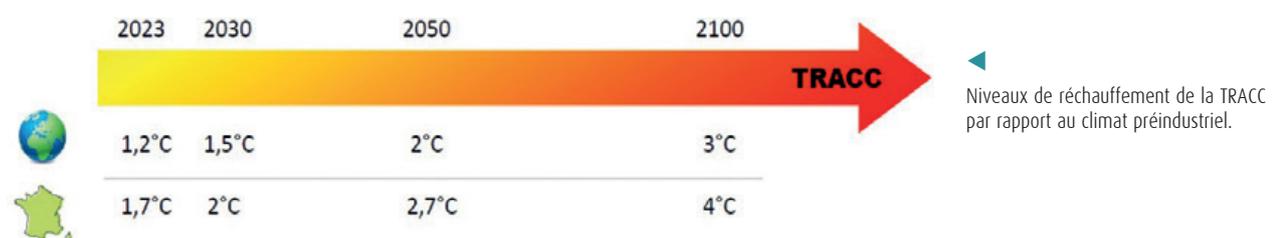
# L'étude du climat régional

L'année 2023 a été la deuxième la plus chaude sur l'hexagone après 2022, avec notamment un été qui s'est étiré de juin jusqu'à mi-octobre et a été ponctué de nombreux records tous mois confondus, souvent largement battus comme à Toulouse le 23 août (42,4 °C, effaçant le record précédent de 40,7 °C, qui datait de la canicule d'août 2003). Face à un climat qui change, la France devra continuer à s'adapter, ce qui a motivé la définition d'une trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC), dans le cadre du 3e Plan National d'Adaptation au Changement Climatique. Il s'agit ainsi de mettre à jour les référentiels de risque, normes et réglementations techniques en tenant compte des effets du changement climatique dans tous les domaines, et d'accompagner l'adaptation des collectivités territoriales et de l'activité économique dans tous les domaines. Pour cela, différents indicateurs pertinents seront développés pour décrire les évolutions climatiques en termes de changement moyens et d'extrêmes dans un climat réchauffé de 4 °C sur l'hexagone par rapport au préindustriel, dans un contexte de réchauffement mondial d'environ 3 °C.

Au cours de l'année écoulée, beaucoup de travaux ont été menés à Météo-France pour répondre à cette demande, en exploitant notamment la base de données de simulations régionales DRIAS-2020, qui offre une échelle pertinente pour la décision jusqu'à l'échelle locale. Par ailleurs, une réflexion associant plusieurs directions de Météo-France a été coordonnée par le CNRM, avec pour objectif d'élaborer une stratégie de développement de nouveaux jeux de données de projections climatiques répondant aux besoins actuellement satisfaits par DRIAS-2020 et par les simulations longues à climat constant. Cette réflexion a été présentée au comité scientifique de Météo-France (COMSI) en 2023 (Ribes et al.) et a débouché sur les projets SOCLE-métropole et SOCLE-outremers, qui valoriseront plusieurs avancées récentes de la recherche. Parmi ces avancées, des simulations climatiques longues menées avec AROME seront exploitées, et des approches d'intelligence artificielle seront mises en œuvre pour la descente d'échelle, en complément de la modélisation climatique régionale, de manière à mieux explorer les incertitudes liées à la modélisation.

## Référence :

Ribes et al., Projections climatiques : de la recherche aux services climatiques, Rapport présenté au COMSI 2023 : <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article1224>



---

# La spatialisation du diagnostic du changement climatique avec la méthode RSOI

Brigitte Dubuisson, Agathe Drouin, Jean-Michel Soubeyroux

Pour pouvoir utiliser des données en points de grille dans une étude d'analyse de l'évolution climatique, il est nécessaire que ces données couvrent plusieurs décennies et satisfassent des critères d'homogénéité temporelle. Les produits spatialisés disponibles utilisent un réseau d'observations variable dans le temps et leur homogénéité temporelle n'est donc pas garantie.

La méthode d'interpolation optimale à espace réduit (RSOI<sup>1</sup>, Reduced Space Optimal Interpolation) permet d'obtenir des

données spatialisées adaptées à l'étude de l'évolution climatique. Elle est appliquée ici sur la France métropolitaine et sur les paramètres précipitations, températures minimale et maximale. Pour cela elle combine deux types de données : l'information spatiale issue de données en points de grille à résolution kilométrique (PRESCILIA<sup>2</sup> pour les précipitations et ANASTASIA<sup>3</sup> pour les températures) et l'information temporelle issue des séries mensuelles homogénéisées sur la période commune à l'ensemble des séries de métropole : 1959-2014. La figure

présente la tendance estimée sur les cumuls hivernaux et estivaux de précipitations sur la période 1960-2014 sur les données spatialisées. Les analyses spatialisées sont cohérentes et plus détaillées par rapport à une spatialisation directe des séries homogénéisées.

Le jeu des séries homogénéisées est en cours de réactualisation, une de ses valorisations sera la mise à jour des données spatialisées par la méthode RSOI permettant une analyse prolongée sur une période plus récente.

## Références :

1. Isotta, F.A., Begert, M., et Frei, C., 2019a. Long-term consistent monthly temperature and precipitation grid datasets for Switzerland over the past 150 years. *J. Geophys. Res. : Atmos.*, 124, 3783-3799. <https://doi.org/10.1029/2018JD029910>
2. PRESCILIA, PRÉcipitations Spatialisées Contraintes par une Initialisation Aurelhy
3. ANASTASIA, ANALyse Spatiale des Température de Surface avec Initialisation Aurelhy

1

---

# Les données climatiques en appui à la Trajectoire de Réchauffement de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique (TRACC)

Sébastien Bernus, Lola Corre, Agathe Drouin, Jean-Michel Soubeyroux

Trois niveaux de réchauffement planétaire sont pris en compte par la Trajectoire de Réchauffement de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique (TRACC) : +1,5 °C, +2 °C et +3 °C par rapport à l'ère pré-industrielle, correspondant à des valeurs moyennes de réchauffement pour la France métropolitaine respectivement de +2 °C, +2,7 °C et +4 °C par rapport à 1900-1930.

Afin d'illustrer ce que ces trois niveaux de réchauffement représentent en termes d'impacts sur la France, il est nécessaire de s'appuyer sur un ensemble de projections climatiques : le jeu de données Explore2 - ADAMONT.

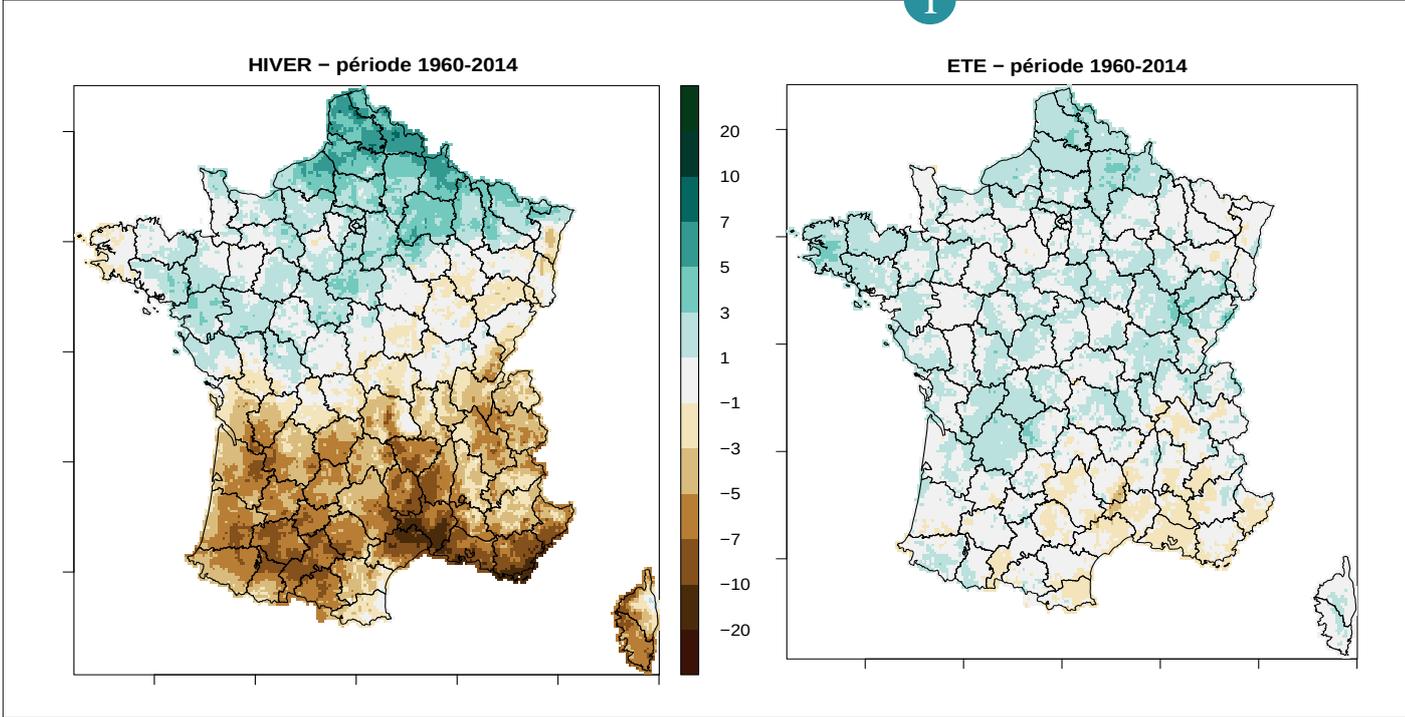
Ce jeu repose sur l'ensemble EURO-CORDEX-CMIP5 constitué de simulations climatiques régionales qui déclinent à l'échelle de l'Europe les simulations globales de

l'exercice international CMIP5 (5<sup>e</sup> phase du Coupled Model Intercomparison Project). Ce jeu s'appuie sur DRIAS-2020 auquel ont été ajoutés sept couples supplémentaires notamment pour permettre de mieux analyser les incertitudes et prendre en compte des simulations régionales plus récentes. Deux couples ont, au contraire, été écartés, car leurs projections de température et précipitations (pour la période estivale) sont en dehors des intervalles de confiance des projections CMIP6. Pour l'ensemble des simulations sélectionnées, les données EURO-CORDEX ont été projetées sur une grille de 8 km de résolution couvrant la France métropolitaine, et corrigées de leur biais par la méthode statistique ADAMONT (Verfaillie et al., 2017) à partir de l'analyse de données d'observation SAFRAN (Vidal et al. 2010).

Le jeu Explore2 - ADAMONT contient 17 simulations historiques qui couvrent la période 1971-2005, et 41 projections du climat futur jusqu'en 2100 selon 3 scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6). Dans le cadre de la TRACC, pour s'assurer que l'ensemble soit constitué des mêmes simulations quel que soit le niveau de réchauffement ciblé, seules les projections pour le scénario de fortes émissions (RCP8.5) sont utilisées. Ce scénario a été choisi car c'est celui pour lequel le plus grand nombre de simulations est disponible (17 couples modèles de climat globaux/régionaux), et le seul qui permet de traiter des niveaux de réchauffement planétaire élevés (+3 °C notamment).

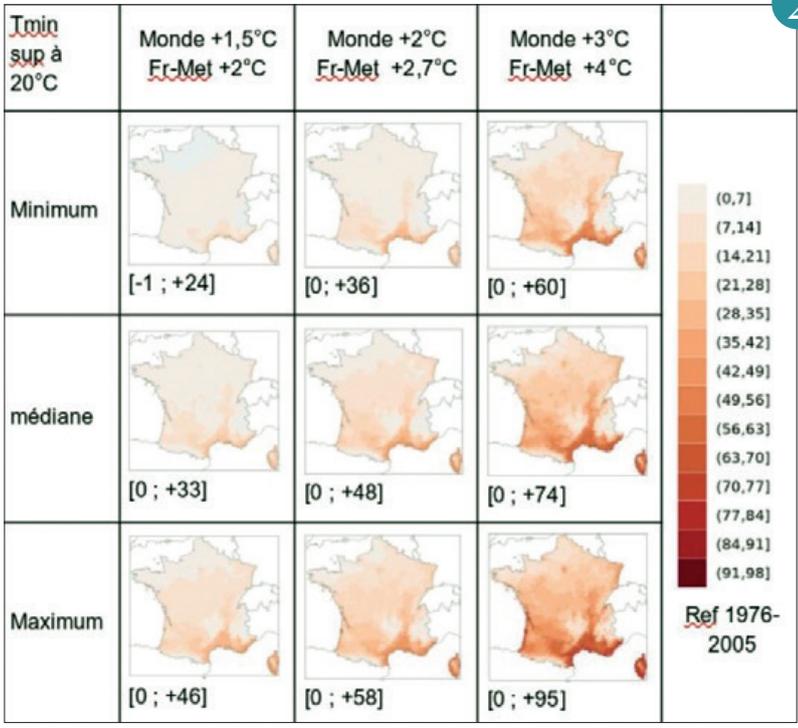
2

1



▲ Evolution des précipitations hivernales (à gauche) et estivales (à droite) sur la période 1960-2014. Les tendances sont estimées par la méthode Theil-Sen et exprimées en % par décennie.

2



▲ Pour chaque niveau de réchauffement (global ou France métropolitaine), sur chaque ligne sont indiqués le minimum, la moyenne et le maximum de l'évolution du nombre de nuits tropicales (T<sub>min</sub> supérieure à 20°C) par rapport à la période de référence 1976-2005, entre parenthèses les valeurs minimales et maximales locales.

---

# L'approche "narrative" pour décrire les futurs du climat

Lola Corre, Paola Marson, Fabienne Rousset, Jean-Michel Soubeyroux, Agathe Drouin

Délivrer des informations exploitables sur les futurs possibles du climat implique de synthétiser des projections climatiques qui présentent des changements futurs contrastés, voire contradictoires.

L'approche "probabiliste" décrit les changements futurs à l'aide de statistiques (moyenne ou médiane des simulations, quantiles, etc.). Pour faciliter l'utilisation des projections dans le cadre d'études d'impact, une alternative dite approche « narrative » est proposée. Un narratif est défini comme un déroulement physiquement cohérent d'événements passés ou futurs. Cette approche cherche à développer des « récits » descriptifs de climats futurs possibles<sup>1</sup>. Plusieurs narratifs doivent être envisagés afin d'explorer plusieurs futurs possibles. De plus, il est important de décrire comment ils

ont été sélectionnés et comment ils se situent au sein de la distribution de l'ensemble des modèles.

Le jeu Explore2-Climat est basé sur 17 projections climatiques EURO-CORDEX à 12 km de résolution qui ont été corrigées de leurs biais (méthodes ADAMONT2 et CDFt3). Dans le cadre du projet Explore2, quatre narratifs ont été choisis via une sélection d'experts (subjective) basée sur un travail de co-construction avec des hydrologues. Le critère de sélection porte sur les changements moyens de température et précipitations futurs : les quatre narratifs doivent correspondre à des changements contrastés, pour rendre compte de la dispersion de l'ensemble Explore2-Climat tout en restant cohérent avec l'intervalle de confiance des projections CMIP6 (Figure).

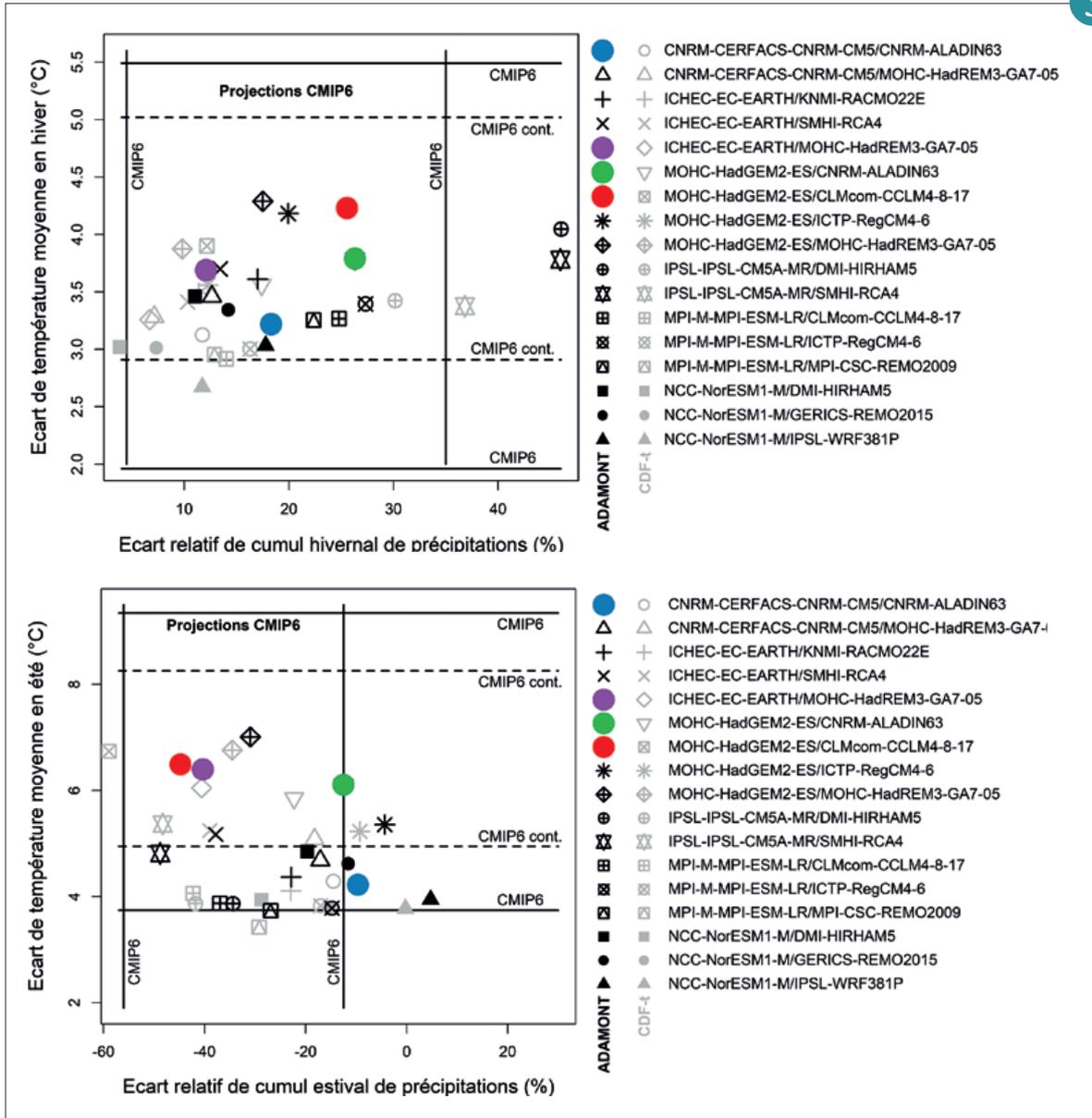
Les narratifs sélectionnés ont été nommés par un code couleur :

1. **Narratif "violet"**: fort réchauffement et fort assèchement en été (et en annuel),
2. **Narratif "bleu"**: changements futurs relativement peu marqués,
3. **Narratif "rouge"**: fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations,
4. **Narratif "vert"**: réchauffement marqué et augmentation des précipitations.

Ces quatre narratifs sont destinés à être utilisés en entrée de projections hydro-climatiques qui illustreront des futurs possibles de l'eau en France métropolitaine.

## Références :

1. Shepherd, T.G., Boyd, E., Calel, R.A. et al. Storylines: an alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change. *Climatic Change* 151, 555–571 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2317-9>
2. Michelangeli, P.-A., Vrac, M., and Loukos, H. (2009), Probabilistic downscaling approaches: Application to wind cumulative distribution functions, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L11708, [doi:10.1029/2009GL038401](https://doi.org/10.1029/2009GL038401).
3. Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., and Lafaysse, M. 2017 : The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, *Geosci. Model Dev.*, 10, 4257-4283, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>.
4. Ribes, A., Boé, J., Qasmi, S., Dubuisson, B., Douville, H., and Terray, L.: An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint, *Earth Syst. Dynam.*, 13, 1397–1415, <https://doi.org/10.5194/esd-13-1397-2022>, 2022.



▲ Changements moyens en température et précipitation sur la France des 17 projections climatiques Explore2 corrigées par les méthodes ADAMONT (en noir) et CDF-t (en gris clair) sur les saisons hiver (en haut) et été (en bas), comparés aux quantiles 5 % et 95 % (Q5 et Q95) de l'ensemble CMIP6 (« CMIP6 ») et CMIP6 contraint4 par les observations pour les températures (« CMIP6 cont. »). Les changements correspondent aux écarts (ou écarts relatifs) entre les périodes 1976-2005 et 2070-2099 pour le RCP8.5. Les quatre narratifs sélectionnés par le projet Explore2 sont identifiés par des points de couleur.

---

# L'utilisation de réanalyses et simulations climatiques pour reconstruire l'évolution du climat des dernières décennies dans les Alpes européennes : apports et limites

Diego Monteiro et Samuel Morin

Au cours des dernières décennies, les différents environnements qui composent les régions montagneuses ont subi des changements rapides sous l'influence du changement climatique anthropique. Dans ce contexte, une connaissance fine de la distribution, de la variabilité et des tendances passées de la couverture neigeuse saisonnière est essentielle, étant donné son impact majeur sur l'ensemble des écosystèmes humains et non humains.

Nous avons comparé la capacité de différents systèmes de modélisation (réanalyses globales et régionales ERA5, ERA5-Land, ERA5-Crocus, CERRA-Land, UERRA MESCAN-SURFEX, MTMSI et simulations de modèles climatiques régionaux CNRM-ALADIN et CNRM-AROME) à reproduire les conditions de couverture neigeuse, de température et de précipitations hivernales au cours

des dernières décennies dans les Alpes européennes.

Les ensembles de données ERA5, MESCAN-SURFEX, CERRA-Land et MTMSI fournissent une climatologie satisfaisante des tendances mensuelles de la neige, bien qu'une comparaison spatiale avec les observations satellitaires montre que tous les ensembles de données surestiment la durée de la couverture neigeuse, en particulier la date de fonte.

L'analyse de la variabilité interannuelle indique que la modélisation de la couverture neigeuse reste complexe à plusieurs échelles, et qu'aucun des modèles évalués ne parvient à reproduire complètement. Nous mettons en lumière plusieurs artefacts responsables de tendances climatiques à long terme erronées dans plusieurs produits de réanalyse (ERA5 et MESCAN-SURFEX),

que nous attribuons principalement à des hétérogénéités dans les ensembles de données d'observation assimilées

Finalement, une partie des jeux de données utilisés montrent des tendances passées conformes à l'état actuel des connaissances. Sur la base de ceux-ci, au cours des 50 dernières années (1968-2017), les Alpes européennes ont connu un réchauffement hivernal de 0,3 °C à 0,4 °C par décennie, plus marqué à basse altitude, et une légère réduction des précipitations hivernales. La diminution de l'épaisseur de neige hivernale et de la durée de la couverture neigeuse varie de -7 % à -15 % par décennie et de -5 jours à -7 jours par décennie, respectivement, toutes deux montrant une diminution plus importante à basse et moyenne altitude.

## Référence :

Monteiro D. and Morin S. Multi-decadal analysis of past winter temperature, precipitation and snow cover data in the European Alps from reanalyses, climate models and observational datasets. *The Cryosphere*, 17(8):3617-3660, <https://dx.doi.org/10.5194/tc-17-3617-2023>, 2023.

4

---

# Modélisation climatique couplée et à haute résolution pour les études d'impacts en ville

Yohanna Michau, Léa Corneille, Aude Lemonsu

Les villes concentrent les populations et les activités, de sorte qu'elles contribuent fortement aux émissions de gaz à effet de serre, tout en étant très vulnérables aux effets locaux du changement climatique. Ces effets pourraient être accentués localement en réponse à l'artificialisation des sols (surchauffe urbaine, ruissellement de surface). Pour étudier ces interactions complexes entre climat urbain et climat régional, le modèle de climat régional à haute résolution CNRM-AROME (2,5 km) est couplé au système de modélisation des surfaces SURFEX, qui inclut le modèle de canopée

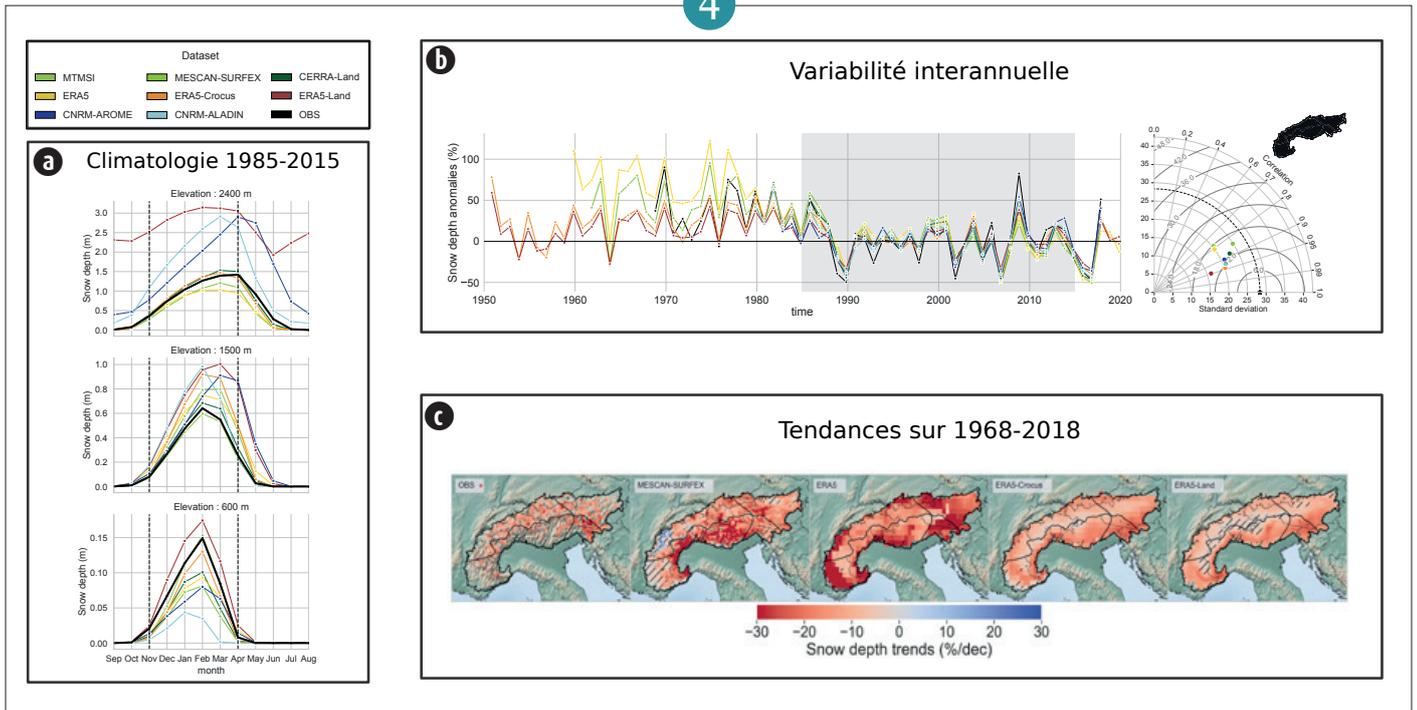
urbaine TEB. Les projections climatiques sont analysées entre la période historique 1986-2005 et la période future 2080-2099 selon un scénario RCP8.5, pour un ensemble de villes de France métropolitaine. Elles montrent une recrudescence des vagues de chaleur, plus fréquentes mais aussi plus intenses et plus longues, selon un calendrier beaucoup plus étendu (de mai à octobre, en fin de siècle). Le nombre de jours de vagues de chaleur par an, comptabilisé sur 2080-2099, présente des contrastes régionaux importants (Figure 1), les villes du Nord de la France étant un peu moins touchées, tandis que la région

Méditerranéenne paraît particulièrement exposée en fin de siècle. Néanmoins, sur la majorité des villes étudiées, une atténuation de l'îlot de chaleur urbain est constatée entre 1986-2005 et 2080-2099, en réponse à un assèchement des sols naturels et donc un réchauffement plus rapide des environnements naturels. Cette configuration, déjà prometteuse pour les études climatiques urbaines, est actuellement raffinée pour permettre la prise en compte de la dynamique d'urbanisation et le calcul d'indicateurs d'impacts multi-sectoriels à l'échelle des villes et de leur territoire.

## Référence :

Michau Y, Lemonsu A, Lucas-Picher P, Caillaud C, Alias A Evaluation of the Urban Heat Island of 12 cities of France in a high-resolution regional climate model simulation. *Urban Climate*, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101386>, 2023.

5



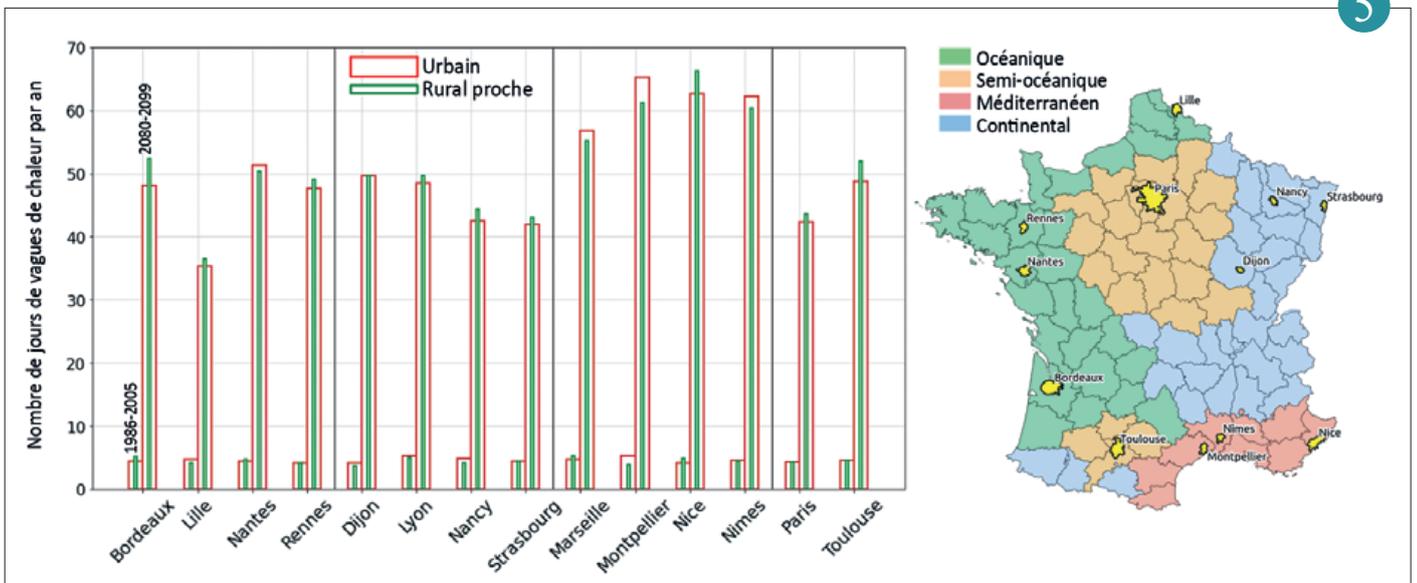
(a) Climatologies du cycle annuel de la hauteur de neige pour trois bandes d'altitudes (600 m, 1 500 m, 2 400 m, toutes +/-150 m) sur la période 1985-2015.

Les jeux de données évalués sont les courbes continues colorées, la référence est la courbe continue noire.

(b) Anomalies de la hauteur de neige moyenne hivernale dans les Alpes européennes de 1950-2020 par rapport à la période 1985-2015. Les jeux de données évalués sont les courbes continues colorées, la référence est la courbe continue noire. Un diagramme de Taylor permet de situer chacun des jeux de données sur un graphe représentant les scores de corrélations, de déviations standard et de RMSE.

(c) Cartes des tendances de hauteurs de neige moyenne hivernale sur la période 1968-2018 pour différents jeux de données.

Les tendances considérées non significatives sont hachurées.



Evolution du nombre de jours de vagues de chaleur en moyenne par an entre la période historique 1986-2005 et la période future 2080-2099 selon le scénario RCP8.5, pour 14 villes de France métropolitaine classées selon leur zonage climatique (comme indiqué sur la carte de droite).

---

# Régionalisation du changement climatique et développement de services climatiques dans le sud-ouest de l’océan Indien et ses territoires insulaires

Marie-Dominique Leroux et François Bonnardot

Le projet BRIO (2018-2022, Agence française de développement, Commission Océan Indien, Météo-France) a entrepris d’affiner les signaux passés et futurs du changement climatique sur l’ensemble des terres habitées du sud-ouest de l’océan Indien (SOOI) comprenant des îles au relief très accidenté.

BRIO a doté le SOOI de simulations climatiques à haute résolution sur le XXI<sup>e</sup> siècle couvrant 3 scénarios d’émissions de gaz à effet de serre. Des ensembles de données climatiques à une résolution de 3 à 4 km ont été créés à partir d’observations passées consolidées et des experts nationaux ont été formés à l’utilisation d’outils météorologiques et statistiques de pointe.

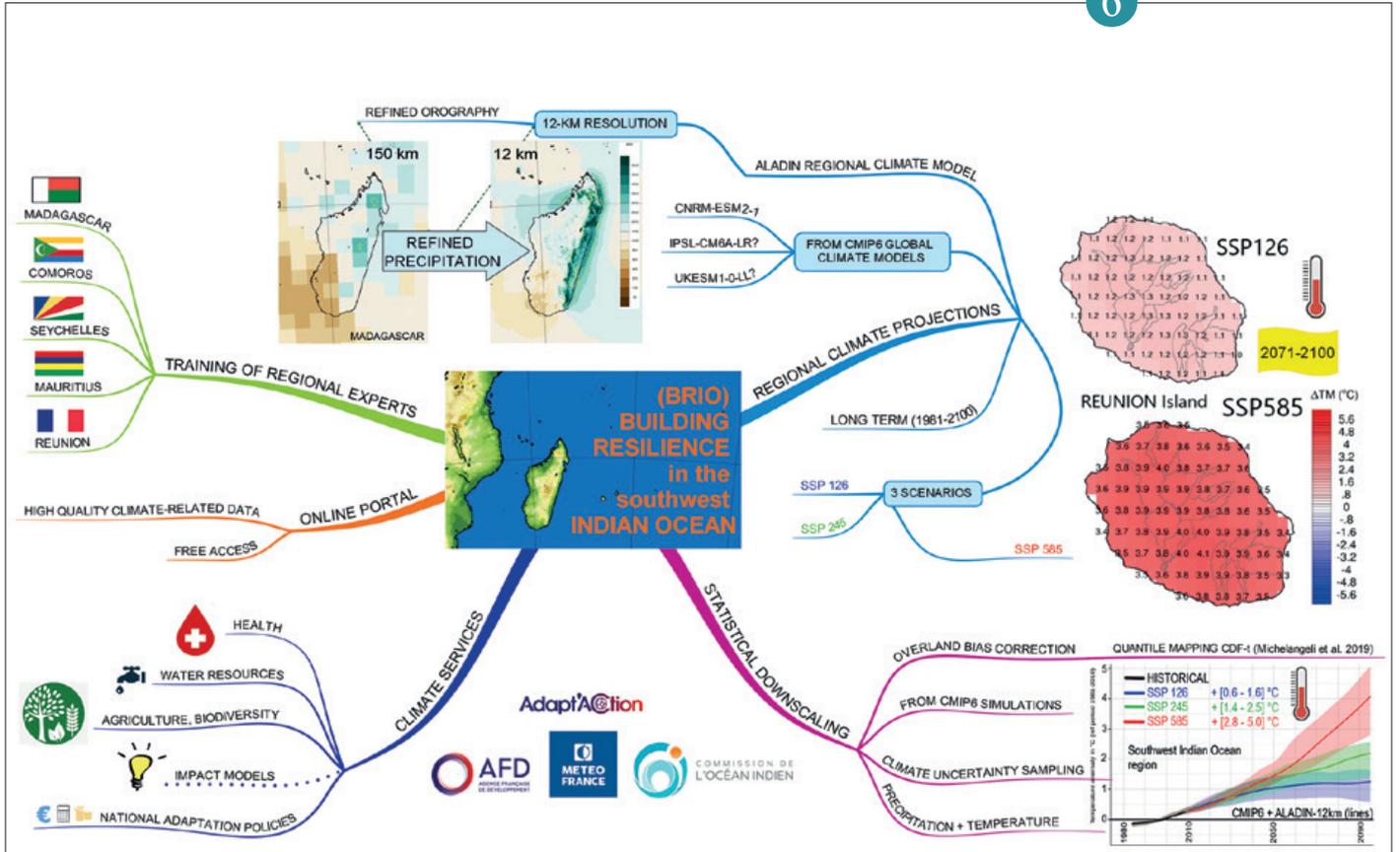
Les diagnostics du changement climatique dans le SOOI signalent une augmentation des températures dans un contexte de chaleur humide, une baisse marquée des précipitations en saison sèche, une intensification des épisodes de fortes pluies, une augmentation de l’intensité des systèmes cycloniques (vents, houle, précipitations) et de la proportion des systèmes les plus intenses avec une migration vers les Mascareignes de la zone privilégiée des cyclones les plus intenses. Les risques vent, inondations, glissement de terrain, sécheresse, feux de forêt, submersion littorale, santé (hyperthermie et maladies vectorielles) augmenteront sur La Réunion. Les collaborations avec d’autres

projets ont permis d’évaluer l’impact sur la végétation, la canne à sucre et la propagation de la dengue.

Les jeux de données BRIO continueront à alimenter des services climatiques et études d’impact sur l’agriculture, l’eau, la santé et l’énergie. Dans le futur, l’intelligence artificielle et la résolution accrue des modèles permettront de mieux représenter l’incertitude climatique et les phénomènes extrêmes tels que cyclones et pluies intenses, pour guider les stratégies d’adaptation dans la région.

## Référence :

Marie-Dominique Leroux, François Bonnardot, Stephason François Kotomangazafy, Abdoul-Oikil Said Rhidoine, Philippe Veerabadren et al.. Régionalisation du changement climatique et développement de services climatiques dans le sud-ouest de l’océan Indien et ses territoires insulaires. Météo-France. 2023. <https://hal.science/hal-03966983>  
<https://meteofrance.fr/fr/climat/le-changement-climatique>



Carte heuristique du projet BRIO résumant les principaux éléments du projet. La figure centrale montre la zone d'intérêt sud-ouest de l'océan Indien.



# Les aérosols

Les aérosols atmosphériques interagissent avec le rayonnement solaire et terrestre, les nuages et les différents gaz atmosphériques, influençant ainsi la météorologie, le climat et la qualité de l'air. Ils peuvent être de nature, de taille, de forme et de composition chimique diverses, complexifiant l'étude des processus associés et de leurs impacts.

En 2023, les aérosols issus des feux de biomasse, de plus en plus fréquents et intenses sous l'effet du changement climatique, ont fait l'objet de travaux spécifiques. Les données satellitaires sont précieuses pour suivre ces panaches d'aérosols transportés sur des milliers de kilomètres comme ceux issus des feux californiens de l'été 2020. Elles permettent aussi d'apporter les données nécessaires au développement de la modélisation de ces aérosols. Leur représentation a récemment été améliorée dans le schéma TACTIC (Tropospheric Aerosols for Climate In CNRM) utilisé dans le modèle de climat CNRM-ESM, grâce à une meilleure prise en compte de leurs propriétés d'absorption. Ainsi couplés avec les autres composantes du système climatique, ces aérosols jouent un rôle important sur le climat de nombreuses régions, dont l'Afrique tropicale.

En Europe, les effets du carbone-suie, aérosol absorbant issu des feux de biomasse et des activités humaines, ont été étudiés à partir d'observations long-terme au Pic du Midi et de simulations issues des modèles de climat régional ALADIN et de chimie-transport MOCAGE. Par ailleurs, cette région est affectée régulièrement par des épisodes de pollution, notamment dans les villes où les émissions anthropiques sont localement plus fortes, mais aussi par le transport d'aérosols désertiques du Sahara. Les campagnes de mesures aéroportées comme AERO-HDF réalisée en 2023 dans les Hauts-de-France, ainsi que les observations satellitaires à haute résolution et leur assimilation dans les modèles permettent de mieux suivre et documenter ces épisodes de fortes concentrations en aérosols, afin d'améliorer ensuite les prévisions de ces épisodes.

Enfin, les éruptions volcaniques majeures comme celle du Hunga Tonga-Hunga Ha'apai en 2022 modifient également la composition de l'atmosphère, et sont étudiées pour mieux comprendre leurs effets sur le bilan radiatif de la Terre et le climat.

Tous ces travaux ont vocation à réduire les incertitudes dans nos connaissances des effets des aérosols sur la météorologie, le climat et la qualité de l'air. La synergie entre observations et modélisation mise en place à Météo-France est essentielle pour avancer sur ce sujet.

---

# Surveillance des fumées des méga-feux de forêt par satellite

Xavier Ceamanos

Le réchauffement de la planète allonge la saison des feux de forêt et les zones géographiques menacées, comme au Canada en 2023 ou dans les Landes en 2022. Les fumées émises par ces méga-feux, un mélange de particules fines et de gaz, peuvent parcourir plusieurs milliers de kilomètres et dégrader la qualité de l'air jusqu'à des régions très éloignées des feux. Pour étudier le transport à longue distance et l'évolution de ces panaches, des chercheurs issus de plusieurs centres de recherche dont le CNRM ont analysé un épisode récent de méga-feux, à partir de mesures issues de différents instruments spatiaux.

L'étude est illustrée par les multiples incendies de forêt qui ont eu lieu en 2020 dans l'ouest des États-Unis dont les fumées ont traversé l'océan Atlantique jusqu'en Europe. Pour suivre ces panaches, les chercheurs ont utilisé des mesures de monoxyde de carbone et de particules fines acquises depuis l'espace. C'est le cas par exemple des données issues d'une constellation de satellites à orbite géostationnaire permettant d'avoir une couverture planétaire. Les observations satellitaires ont été complétées par des simulations du modèle numérique du service européen de surveillance de l'atmosphère de

Copernicus, ainsi que d'instruments au sol et de trajectoires de masse d'air simulées. Les résultats indiquent que les mesures satellitaires et les modèles atmosphériques – qui simulent l'évolution de ces panaches – sont en accord avec toutefois des différences parfois notables à proximité des sources d'émission de fumée. La synergie entre ces deux sources d'information est identifiée comme un moyen d'améliorer les prévisions du transport des panaches afin de mieux documenter, en temps réel comme a posteriori, les effets des feux de forêts parfois à grande distance.

## Référence :

Ceamanos, X., Coopman, Q., George, M. et al. Remote sensing and model analysis of biomass burning smoke transported across the Atlantic during the 2020 Western US wildfire season. *Sci Rep* 13, 16014 (2023) <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39312-1>

1

---

# Amélioration de la représentation de l'absorption des aérosols dans le modèle CNRM-ESM

Thomas Drugé

La représentation des aérosols et de leurs propriétés est encore aujourd'hui une forte source d'incertitudes dans les modèles de climat. Ainsi, des études récentes ont montré que certains aérosols organiques, appelés carbones bruns (Brown Carbon, BrC), et provenant des feux de biomasse et de l'utilisation de bio-carburants, pouvaient absorber le rayonnement solaire dans les petites longueurs d'onde alors qu'ils étaient jusque-là considérés comme exclusivement diffusants.

Le BrC a ainsi été implémenté dans le schéma d'aérosols TACTIC<sup>1</sup> du modèle de climat CNRM-ESM<sup>2</sup>, grâce à une paramétrisation basée sur l'étude de Saleh et al. (2014), à laquelle a été ajouté l'effet de « bleaching » qui fait décroître l'absorption du BrC au cours du temps.

Ces développements ont permis d'améliorer significativement les propriétés optiques des aérosols à 350 et 440 nm en termes d'albédo de simple diffusion et d'épaisseur optique d'absorption, comme le montre la comparaison aux stations AERONET des régions d'Afrique et d'Amérique du Sud (Figure 1), où de grandes quantités d'aérosols organiques sont émises par les feux de biomasse.

Les simulations réalisées ont aussi permis de montrer les effets du BrC sur le climat. D'une part, le BrC exerce un forçage radiatif direct positif au sommet de l'atmosphère, principalement dû aux interactions aérosols-rayonnement. D'autre part, l'effet semi-direct du BrC a été mis en évidence avec une hausse significative de la fraction nuageuse basse sur l'Atlantique Sud-Est durant la saison

des feux, causée au moins en partie par une baisse d'environ 10% de la vitesse verticale à 700 hPa. Ces changements contribuent à une augmentation du taux de réchauffement solaire et de la température de l'air à 700 hPa sur cette région.

Ces résultats (Drugé et al, 2022) soulignent la nécessité de prendre en compte au mieux les propriétés optiques des aérosols pour améliorer notre compréhension du rôle des aérosols dans le système climatique.

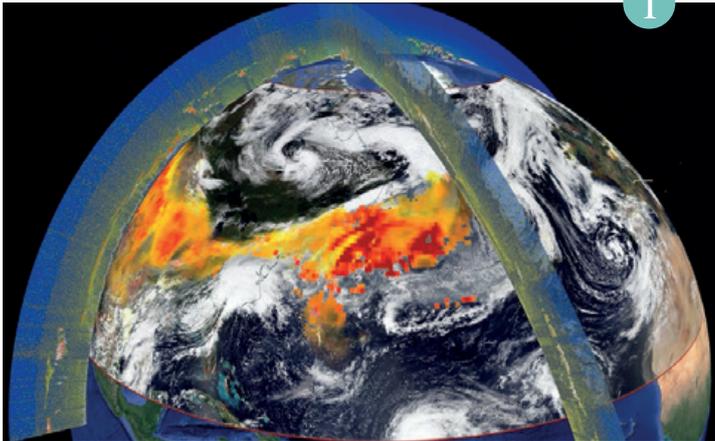
1. TACTIC: Tropospheric Aerosols for Climate In CNRM

2. CNRM-ESM: Earth System Model (Modèle de système Terre)

## Référence :

Drugé, T., Nabat, P., Mallet, M., Michou, M., Rémy, S., and Dubovik, O.: Modeling radiative and climatic effects of brown carbon aerosols with the ARPEGE-Climat global climate model, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 12167–12205, <https://doi.org/10.5194/acp-22-12167-2022>, 2022.

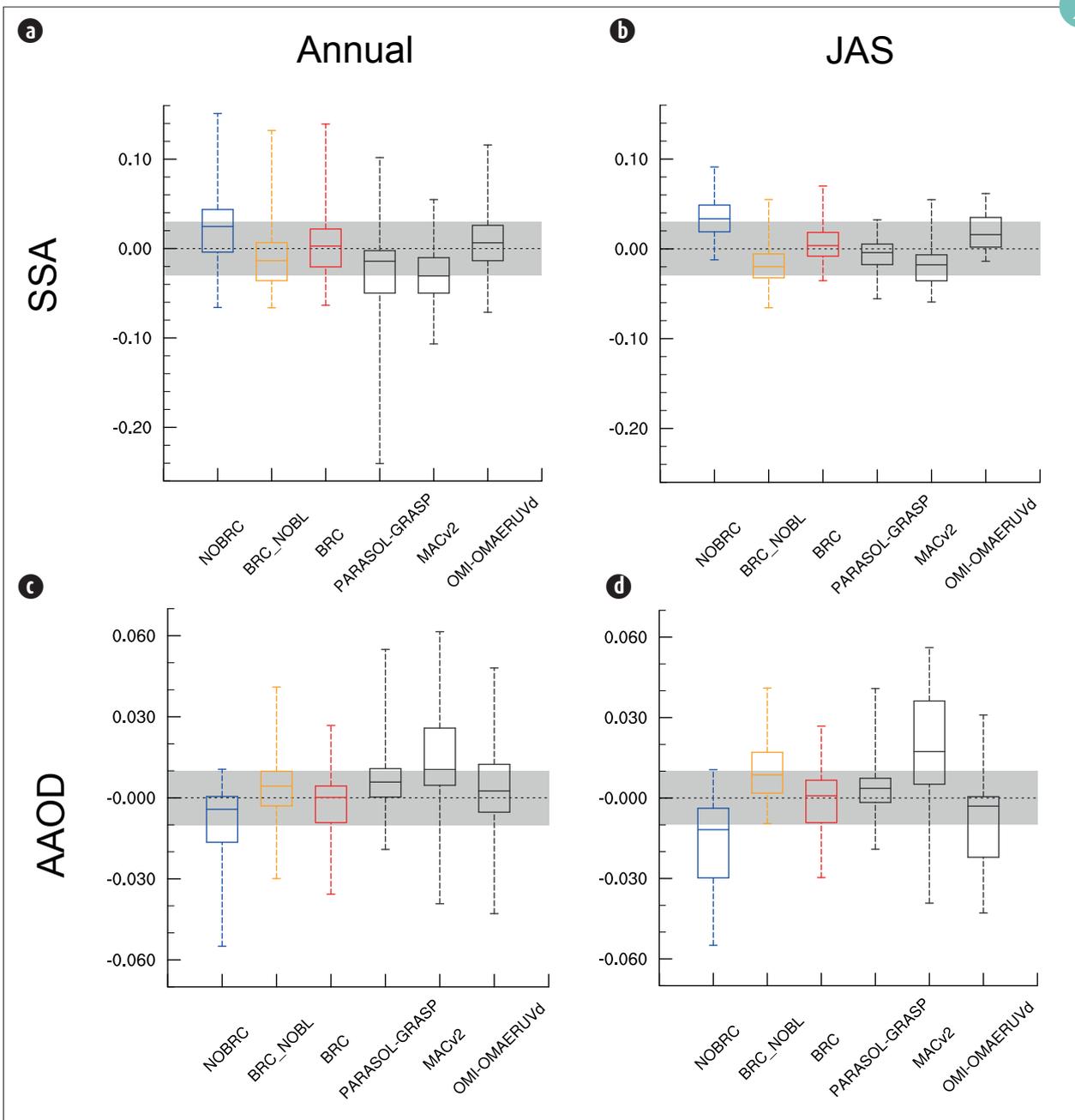
2



1

Illustration du panache de fumée observé le 17 septembre 2020. L'épaisseur optique des aérosols mesurée à partir d'une constellation de satellites géostationnaires est représentée dans les tons de jaune (épaisseur faible) à rouge (épaisseur élevée). L'image du capteur « Visible Infrared Imaging Radiometer Suite » du satellite NOAA-20 en couleurs réelles en arrière-plan permet de voir la circulation atmosphérique à grande échelle dans laquelle le panache est transporté. Deux rideaux verticaux illustrent les observations de rétrodiffusion atténuée totale du lidar spatial « Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization » utilisées pour déterminer l'altitude du panache de fumée.

2



Albédo de simple diffusion (SSA 440nm, a, b) et épaisseur optique d'absorption (AAOD, 440nm, c, d) comparés aux observations AERONET en moyenne annuelle (a, c) et sur la période juillet-août-septembre (b, d). Simulations : NOBRC (sans BrC), BRC\_NOBL (avec BrC et sans bleaching) et BRC (avec BrC et avec bleaching). Données satellites : PARASOL-GRASP, MACv2, OMI-OMAERUVd. Incertitude des données AERONET en grisé.

---

## Impact des aérosols de feux de biomasse sur le bilan radiatif et le climat de l'Afrique tropicale

M. Mallet, A. Voldoire, F. Solmon, P. Nabat, T. Drugé et R. Roehrig

Les feux d'Afrique centrale sont l'une des principales sources d'aérosols de combustion de biomasse dans le monde. Après leurs émissions, ces panaches sont transportés au-dessus de l'Atlantique sud-est entre juin et octobre, modifiant l'équilibre énergétique régional de l'Afrique tropicale à travers plusieurs mécanismes complexes. L'impact de ces aérosols sur le climat de cette région a été analysé pour la période 1990-2014 à l'aide du modèle climatique global couplé (océan-atmosphère) CNRM-CM incluant le schéma interactif d'aérosols TACTIC. Ces simulations montrent que les aérosols émis entraînent une augmentation significative de la fraction nuageuse basse (environ +5 à 10 %, Figure 1a) sur une grande partie de l'océan tropical pendant la saison principale des feux (juin-août).

Cette rétroaction positive des feux de biomasse est principalement due à la réponse de la température de surface de l'océan (diminution d'environ 0,5 K, Figure 1b) associée au chauffage diabatique solaire à 700 hPa, qui augmente la stabilité de la basse troposphère. De plus, ces panaches augmentent également l'épaisseur optique des nuages (d'environ 2 à 3 unités) au sud de l'équateur (Figure 1c), et diminuent les précipitations, en particulier sur la côte ouest-africaine (-1 à -2 mm/jour en moyenne saisonnière, figure 1d). Enfin, cette étude met également en évidence la persistance de cet impact des feux de biomasse sur les nuages bas pendant la période septembre-novembre principalement expliqué par un refroidissement résiduel de la température de surface de l'océan. Au final, les aérosols

de feux de biomasse modulent fortement le rayonnement solaire, les nuages et les précipitations sur l'ensemble de l'Afrique Tropicale, à travers le rôle important de la réponse de la température de l'océan. Cela confirme la nécessité d'utiliser des plateformes de modélisation couplées pour étudier l'impact de ces panaches sur le climat de l'Afrique tropicale, ainsi que dans d'autres régions du monde.

3

---

## Observations long-termes du carbone suie au Pic du Midi et implications pour la modélisation

Cyrielle Denjean, Sarah Tinorua, Pierre Nabat, Béatrice Josse

Les particules de carbone suie contribuent de manière importante mais incertaine au changement climatique. Quantifier les effets radiatifs du carbone suie nécessite de bien modéliser ses concentrations et sa capacité d'absorption du rayonnement solaire. Dans le cadre du projet h-BC (hygroscopic properties of Black Carbon, financé par le LEFE), des mesures ont été effectuées pendant deux années à la station du Pic du Midi dans les Pyrénées (2 850 m d'altitude). L'analyse de ces données montre un contraste saisonnier important dans les propriétés du carbone suie, avec des concentrations massiques et des capacités d'absorption plus élevées en été qu'en hiver, dû à des sources

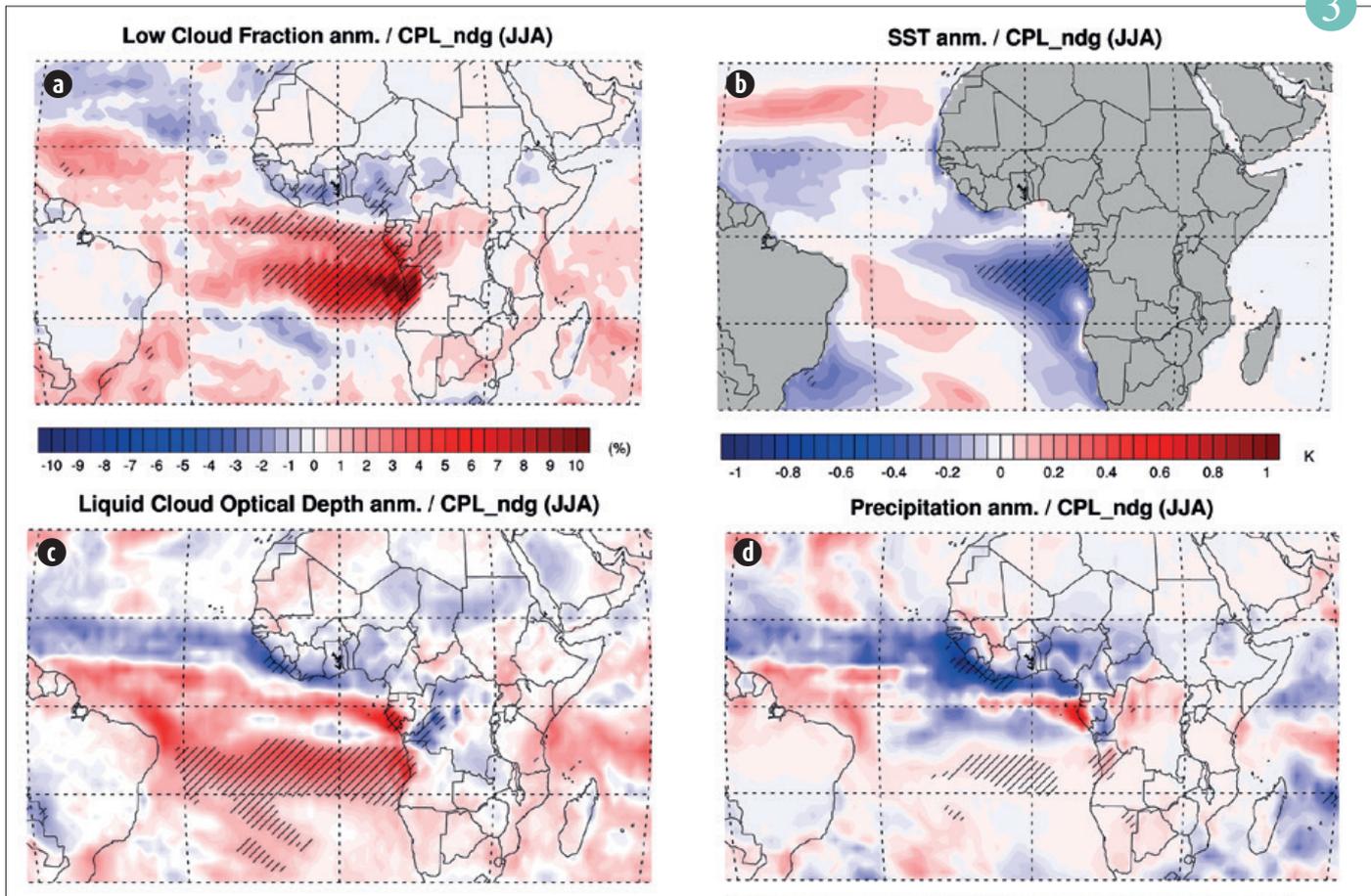
d'émission du carbone suie, de la dynamique atmosphérique et des conditions chimiques de l'atmosphère différentes (Tinorua et al, 2023). Parallèlement, la comparaison de trois méthodes couramment utilisées pour mesurer la concentration de carbone suie montre des biais allant jusqu'à un facteur 8 entre les instruments, dont les principales causes ont été identifiées. Ces deux années de données ont été utilisées pour évaluer le modèle régional de climat ALADIN et le modèle de chimie-transport MOCAGE. Les concentrations de carbone suie au Pic du Midi sont bien reproduites par les deux modèles. Cependant, en ce qui concerne les effets radiatifs, représentés uniquement

dans ALADIN, la capacité d'absorption de carbone suie est fortement sous-estimée. La modification dans ALADIN de cette absorption selon les observations au Pic du Midi conduit à un effet radiatif direct deux fois plus grand, et à des différences significatives dans les profils verticaux de température et la couverture nuageuse en Europe (effet semi-direct). Ces résultats démontrent la nécessité d'une représentation plus réaliste de l'absorption du carbone suie dans les modèles de climat, et fournissent des recommandations sur l'utilisation des mesures de carbone suie provenant de différents instruments pour les communautés expérimentales et de modélisation.

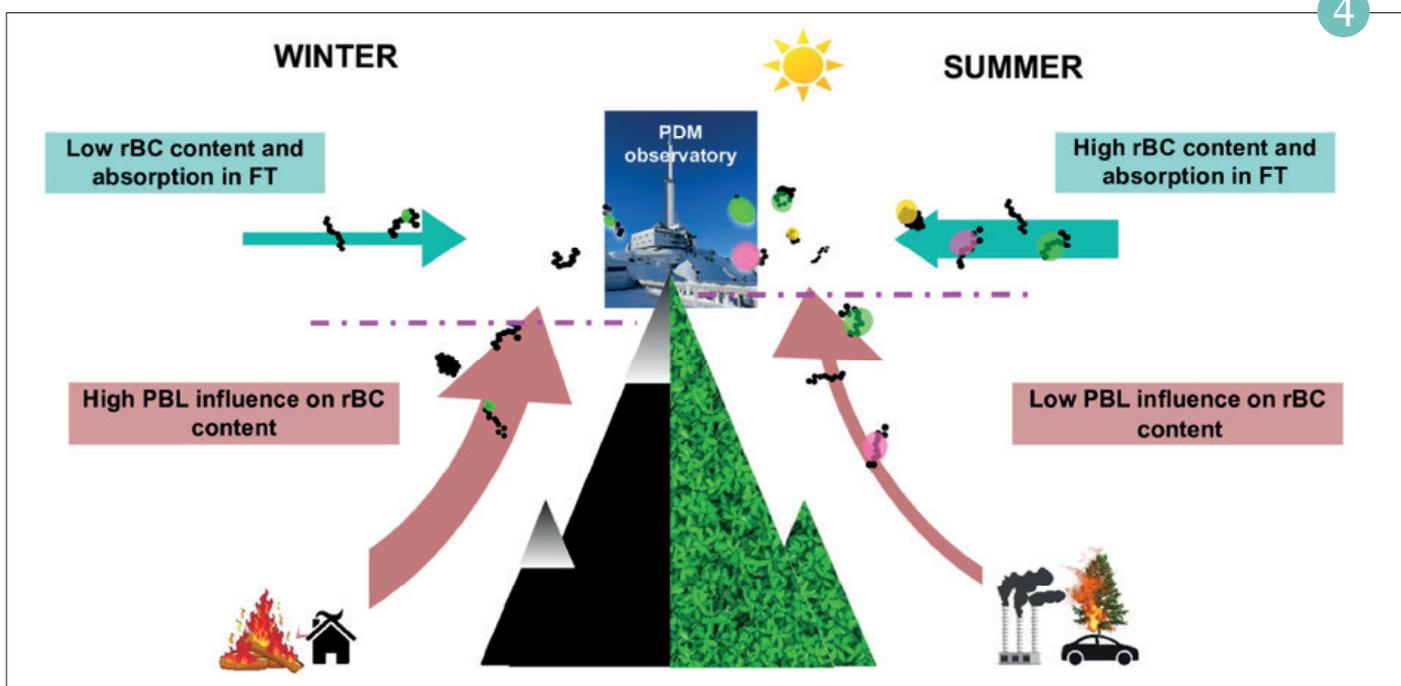
### Référence :

Tinorua, S., Denjean, C., Nabat, P., Bourriane, T., Pont, V., Gheusi, F., and Leclerc, E.: Higher absorption enhancement of black carbon in summer shown by 2-year measurements at the high-altitude mountain site of Pic du Midi Observatory in the French Pyrenees, *Atmos. Chem. Phys.*, 24, 1801–1824, <https://doi.org/10.5194/acp-24-1801-2024>, 2024.

4



▲ Impact des feux de biomasse sur a) la fraction nuageuse basse, b) la température de surface de l'océan, c) l'épaisseur optique des nuages d'eau liquide et d) des précipitations sur la saison juin-juillet-août. La période considérée est 1990-2014. Les zones hachurées sont significatives.



▲ Illustration des processus contrôlant les concentrations et la capacité d'absorption des particules de carbone-suie (BC) au Pic du Midi

---

# Assimilation d'observations synthétiques d'un Lidar satellitaire à Haute Résolution Spectrale dans le cadre de la mission AOS (Atmosphere Observing System) pour la caractérisation des aérosols

F. Cornut, L. El Amraoui

Le programme spatial international AOS (Atmosphere Observing System) vise à envoyer une nouvelle constellation d'instruments destinés à l'observation des nuages et des aérosols, dont une meilleure description de la distribution verticale permettra de mieux comprendre leurs impacts sur le climat et la qualité de l'air. Parmi les instruments candidats, un lidar HSRL émettant à 532 nm a fait l'objet d'une étude sur ses capacités à contraindre un Modèle de Chimie Transport. La figure résume un cas d'étude d'assimilation dans le Modèle de Chimie Transport MOCAGE d'observations synthétiques suivant les trajectoires (a) dans une configuration instrumentale type AOS avec Lidar à Haute résolution Spectrale (b) et à rétrodiffusion élastique classique de type CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal

Polarization, c), sur un évènement de poussières sahariennes au-dessus du bassin Méditerranéen. Les observations HSRL présentent une meilleure stabilité, moins de divergences, et une meilleure distribution verticale. Le panneau de droite représente à quel point l'Assimilation Run avec Lidar à Haute résolution Spectrale ( $AR_H$ ) s'est rapproché de la simulation de référence notée NR, par rapport à l'assimilation sans Lidar à Haute résolution Spectrale ( $AR_B$ ), en considérant les champs de concentration de poussières désertiques sur 24 heures d'analyse le 25/03/2018 en moyenne zonale (d), méridienne (e) et colonne totale (f). La couleur verte montre que l' $AR_H$  est plus proche de la référence que l' $AR_B$  et inversement pour la couleur rose. Une nette amélioration au sud de l'Italie est mise en

évidence, principalement entre la surface et environ 6 km d'altitude où se situe le panache. La région verte s'étend au-delà des fauchées lidar, ce qui témoigne de la propagation de l'information apportée sur les 24 heures. La voie Lidar à Haute résolution Spectrale n'a finalement pas été retenue dans le programme AOS, mais la prochaine mission EarthCare comportant un Lidar à Haute résolution Spectrale à 355 nm permettra de poursuivre ces investigations.

5

---

## AERO-HDF, campagne d'observation aéroportée des aérosols lors d'évènements de pollution en région Hauts-de-France

Jean-Christophe Canonici.

Cet été, les habitants de la région Hauts-de-France (HdF) ont vu évoluer à basse altitude l'ATR42 de Météo-France. Cet avion laboratoire exploité par SAFIRE<sup>1</sup> réalisait des mesures d'aérosols, des analyses de rayonnement et de particules.

Les aérosols, particules de dimensions inférieures à un micron qui impactent le climat, les nuages, les précipitations et la qualité de l'air, sont émises par de nombreuses sources de pollution issues de l'industrie, de l'agriculture et du trafic routier. Des aérosols naturels peuvent également être observés (transport de poussières désertiques, embruns en mer du Nord).

Ce projet porté par le LOA<sup>2</sup> visait à étudier les aérosols et leurs précurseurs à toutes les échelles possibles (du laboratoire à l'observation spatiale, labex CaPPA<sup>3</sup>).

L'instrument phare de cette campagne était le radio-polarimètre imageur OSIRIS développé au LOA, prototype aéroporté de l'instrument spatial 3MI qui sera lancé en 2025 pour EUMETSAT<sup>4</sup>. D'autres instruments de télédétection et de mesure in situ (du LISA<sup>5</sup>, du CNRM<sup>6</sup> et de SAFIRE) ont aussi été installés sur l'ATR. Le projet AERO-HDF a permis de mieux caractériser les aérosols et de préparer la future mission spatiale MetOp-SG.

1. Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement, unité d'appui et de recherche CNRS / Météo-France / CNES

2. Laboratoire d'Optique Atmosphérique, unité mixte de recherche CNRS / Université de Lille

3. Laboratoire d'excellence – Physique et Chimie de l'environnement atmosphérique – 7 laboratoires : LOA, PC2A, PhLAM, SAGE, LPCA, ICARE, LASIR, 5 établissements partenaires en région HdF : CNRS, Université de Lille, IMT Lille Douai, ULCO, CNES

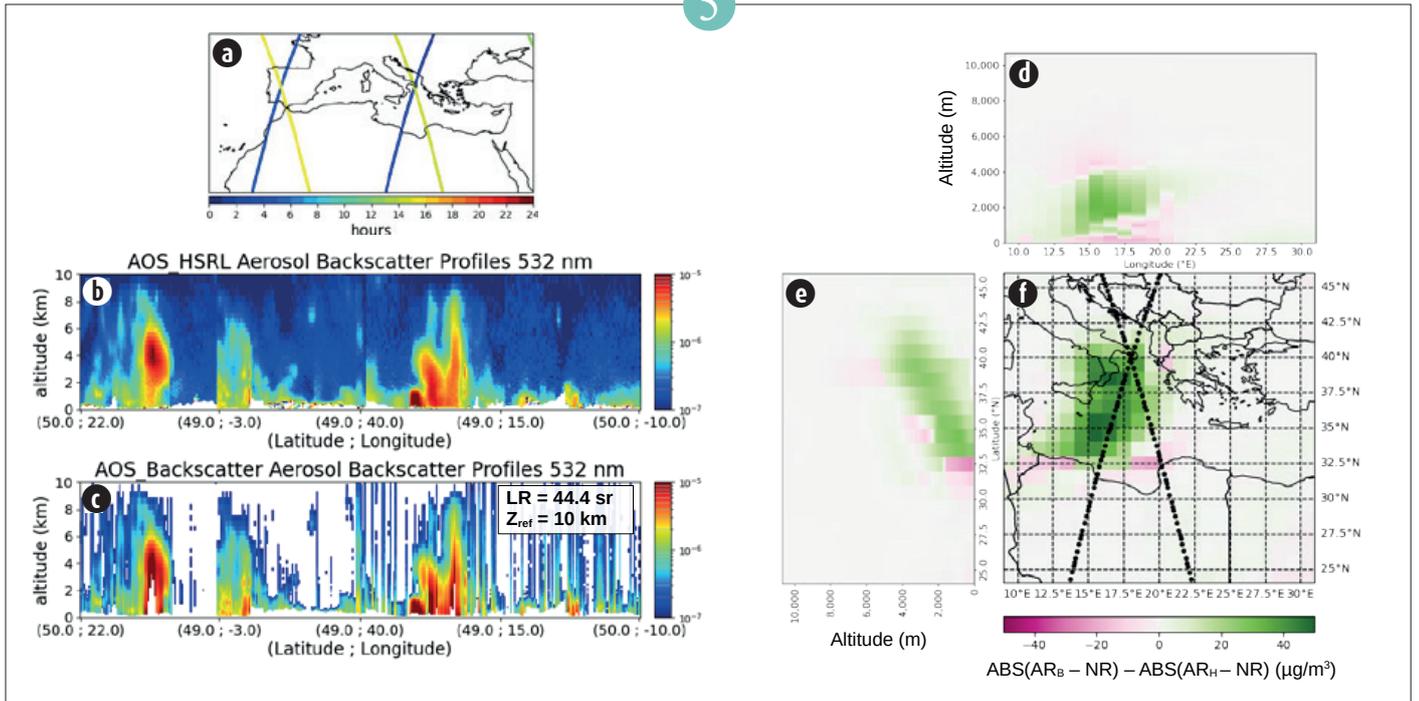
4. Agence météorologique spatiale européenne

5. Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques, unité mixte recherche Université Paris-Est Créteil / Université Paris Cité / CNRS

6. Centre national de recherches météorologiques, Unité mixte de recherche Météo-France / CNRS.

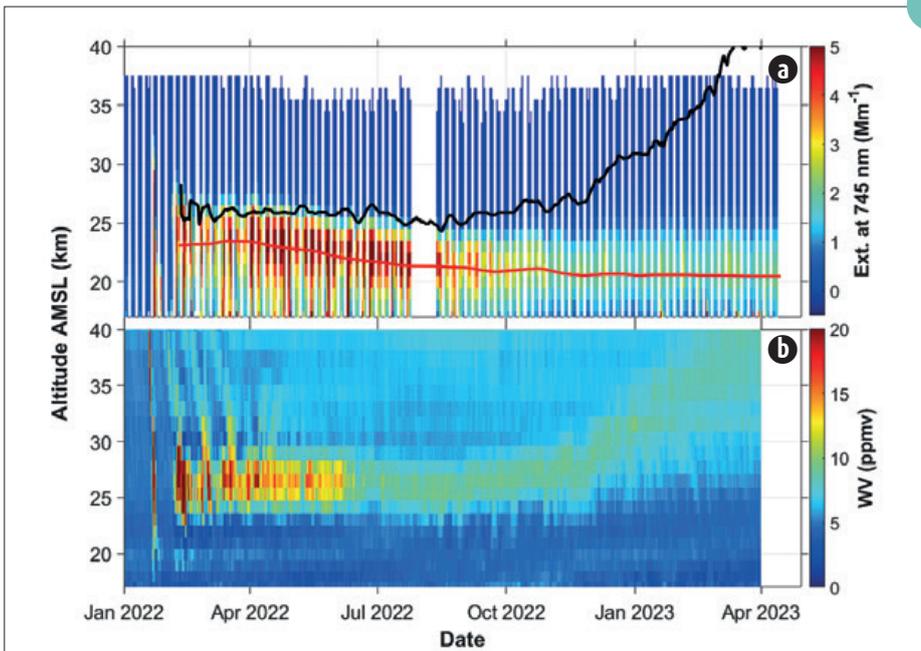
6

5



(a) Trajectoire d'échantillonnage du NR pour la simulation des observations synthétiques avec (b) et sans (c) HSRL en configuration AOS. A droite sont représentées la différence entre l'écart en valeur absolue du champ de concentrations de poussières désertiques ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de chaque AR avec le NR, pour une moyenne zonale (d), méridienne (e) et colonne totale (f), pour 24 heures d'analyses le 25/03/2018.

6



H

---

## Potentiel des observations satellitaires pour le suivi des aérosols en région parisienne

Marine Claeys

La pollution atmosphérique aux particules en milieu urbain, en lien avec les émissions locales, est un enjeu majeur de santé publique. Les réseaux de surveillance de la qualité de l'air assurent un suivi des concentrations en surface en particules (ou aérosols). Les observations satellitaires d'épaisseur optique des aérosols (AOD), fournies quotidiennement par l'algorithme MAIAC (Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction) à une résolution spatiale kilométrique, renseignent sur la concentration en particules sur toute la colonne atmosphérique, ce qui peut constituer une information spatialisée complémentaire très pertinente. Le

potentiel de ces observations satellitaires à capturer la pollution urbaine a été évalué sur la région parisienne sur la période climatologique 2006-2020, par comparaison aux concentrations en PM10 mesurées en surface. Les cycles annuels des concentrations en PM10 et des épaisseurs optiques des aérosols sur Paris présentent des variabilités mensuelles significativement différentes (figure a), la mesure d'épaisseur optique des aérosols étant fortement influencée par les particules présentes au-dessus de la couche limite atmosphérique (contrairement aux concentrations en PM10). Le calcul de la différence d'AOD entre Paris et la campagne environnante permet de

s'affranchir en partie de cette influence. Dans ce cas, une bonne concordance, à l'échelle climatologique, est relevée avec la différence de concentrations en PM10 entre la ville et la campagne (figure b). Néanmoins, des disparités entre les deux signaux peuvent être constatées sous certaines conditions météorologiques influençant le mélange, le transport et les propriétés des aérosols dans la colonne atmosphérique. Des analyses sont en cours pour mieux quantifier ces facteurs d'influence.

7

---

## Impact radiatif des aérosols injectés dans la stratosphère suite à l'éruption du Hunga Tonga-Hunga Ha'apai : rôle des aérosols et de la vapeur d'eau dans la région sud-ouest de l'Océan Indien

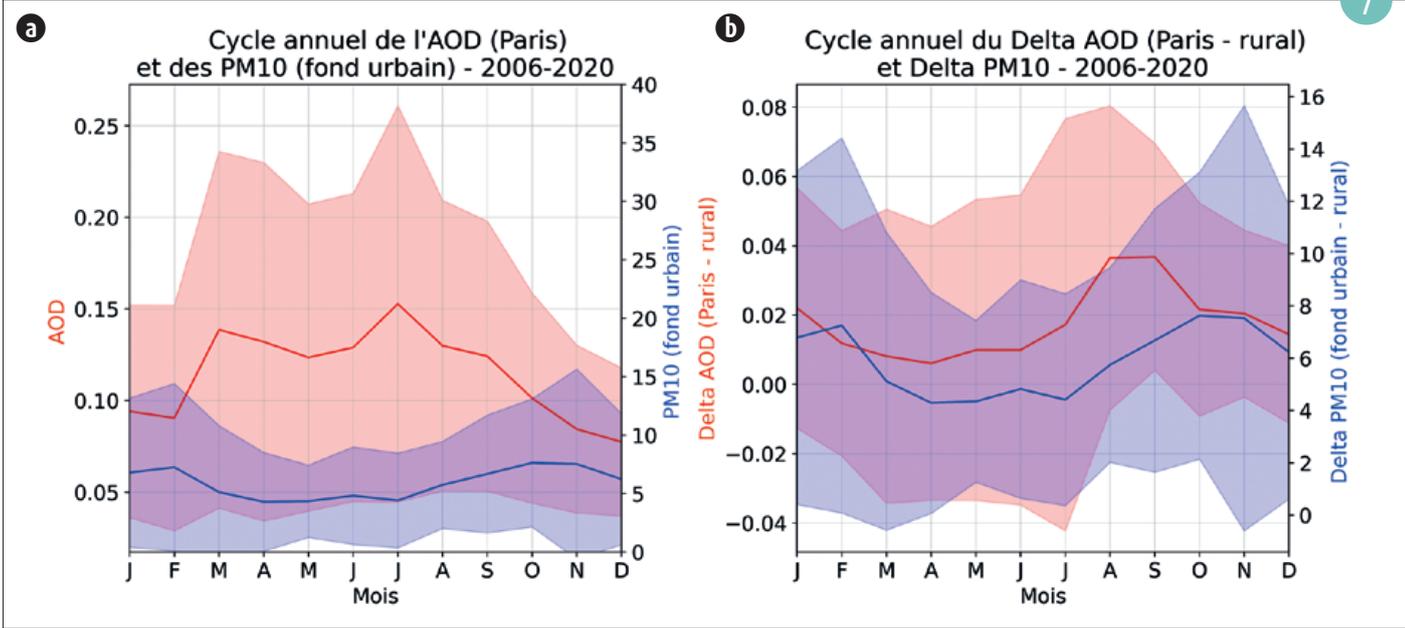
Michaël Sicard, Alexandre Baron, Marion Ranaivombola, Dominique Gantois, Tristan Millet, Pasquale Sellitto, Nelson Bègue, Guillaume Payen, Nicolas Marquestaut, Valentin Dufлот

Tous les composants atmosphériques interagissent de nombreuses façons avec le rayonnement en se propageant verticalement dans l'atmosphère. L'éruption du volcan Hunga Tonga-Hunga Ha'apai le 15 janvier 2022 a injecté une quantité sans précédent d'aérosols et de vapeur d'eau dans la stratosphère (la couche de l'atmosphère située entre environ 12 et 50 km). Des mesures effectuées depuis le sol à l'île de la Réunion (21°S, 55°E) ainsi que des données satellites sont utilisées

pour quantifier la distribution verticale et le contenu des aérosols et de la vapeur d'eau en fonction du temps au cours de la première année après l'éruption. Ces données servent à paramétrer un modèle de transfert radiatif pour quantifier, dans toutes les couches de l'atmosphère, le bilan radiatif dans trois scénarios « avec/sans » : aérosols, vapeur d'eau et aérosols et vapeur d'eau. Les résultats montrent que la couche d'aérosols décroît verticalement à un rythme qui suggère que les aérosols pourraient

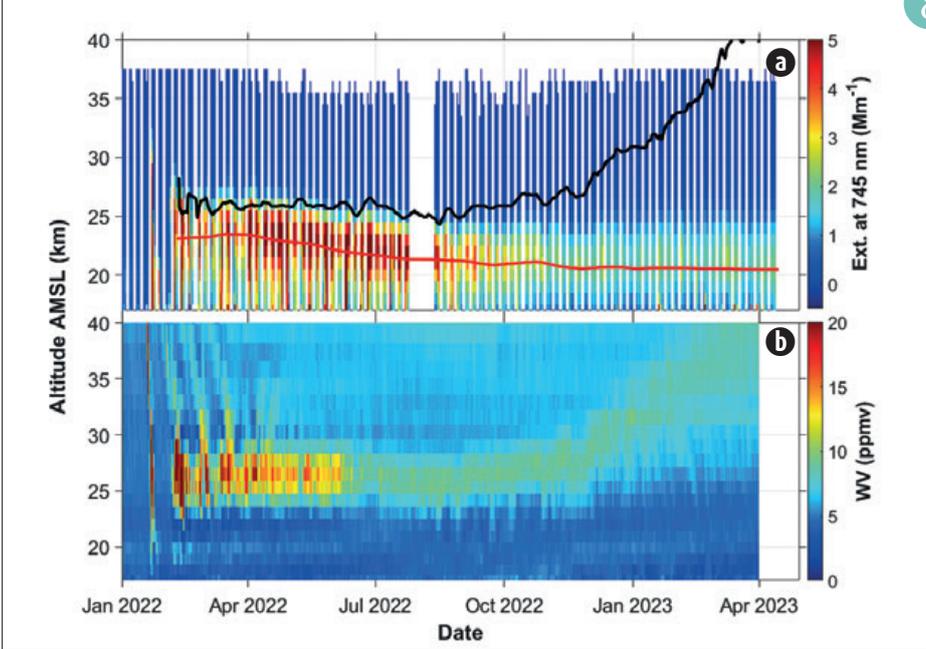
persister dans la stratosphère jusqu'à mi-2025. La couche de vapeur d'eau, elle, s'élève. Le modèle montre que le système Terre-Atmosphère gagne de l'énergie et se réchauffe, et que cet effet diminue avec le temps. La majeure partie de ce réchauffement est stockée dans la stratosphère, tandis qu'à la surface de la Terre, une perte d'énergie, donc un refroidissement, est observée.

8



(a) Cycle annuel de l'épaisseur optique des aérosols au-dessus de Paris (en rouge) et de la concentration en PM10 observé par les stations AirParif à Paris (en bleu). Ces deux variables suivent des tendances différentes, si l'épaisseur optique des aérosols est plus important au printemps et en été, les valeurs les plus fortes de PM10 sont observées en automne et hiver.

(b) Cycle annuel de la différence d'épaisseur optique des aérosols (Paris - rural) (en rouge), et de la différence des PM10 (Paris - rural) (en bleu). Ces deux cycles annuels suivent un schéma proche : on note notamment des valeurs plus importantes à l'automne et l'hiver pour les deux variables.



(a) Coefficient d'extinction à 745 nm à partir d'OMPS au-dessus de l'île de la Réunion ;  
 (b) contenu en vapeur d'eau à partir de M2-SCREAM.  
 Les lignes rouges et noires dans le graphique d'extinction indiquent respectivement la hauteur du pic des panaches d'aérosols et de vapeur d'eau.



# Florilège de résultats illustrant les avancées de recherche en 2023

# Prévision numérique

Faire évoluer les systèmes de prévision numérique est un des objectifs majeurs de la recherche à Météo-France, afin d'améliorer les prévisions et de fournir des outils d'aide à la décision les plus adaptés aux enjeux auxquels nous devons répondre : sécurité des personnes et des biens, gestion de la ressource en eau, agriculture, états de la mer. Les activités mises en avant cette année illustrent les innovations préparées pour la future chaîne de prévision numérique qui doit devenir opérationnelle en 2024 ainsi que des travaux pour le renforcement des couplages en modèle de prévision et l'océan. Les modèles d'état de la mer (vagues et surcotes), forcés par les prévisions atmosphériques, sont complétés par des systèmes sur Tahiti Moorea et par des améliorations de la représentation de processus. On remarque aussi de nombreux développements de produits d'aide à la décision basés sur les prévisions d'ensemble : pour les prévisions de surcote, l'irrigation, les crues rapides ou les phases d'intensification des cyclones tropicaux. Qu'ils aident à prendre en compte les incertitudes des prévisions ou qu'ils servent à élaborer de meilleures prévisions déterministes, ces produits améliorent in fine les services que Météo-France peut rendre à ces usagers.

## Une nouvelle chaîne de Prévision Numérique du Temps en préparation

Matthieu Plu

La chaîne de Prévision Numérique du Temps, constituée du système de prévision global ARPEGE et régional AROME, fait l'objet d'évolutions régulières afin d'assimiler de nouvelles observations, d'améliorer la représentation des processus physiques, des méthodes d'assimilation et de perturbation des ensembles, tout en poursuivant l'optimisation des algorithmes employés. La nouvelle chaîne, dite « en double », préparée en 2023, contient des innovations majeures. ARPEGE bénéficie d'un nouveau schéma de rayonnement, issu d'EcRad du Centre Européen pour les Prévisions

Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT), ainsi que d'une refonte technique de son système d'assimilation, co-développé aussi avec le CEPMMT. AROME voit son système d'assimilation rénové, puisque l'algorithme 3D-VAR opérationnel depuis 2008 est remplacé par un algorithme 3D Ensemble Variational (3DEnVar), qui prend en compte les covariances d'erreur qui dépendent de la situation météorologique. De nouveaux systèmes d'observations sont assimilés, comme les données Mode-S collectées par les systèmes de gestion du trafic aérien. La prévision d'ensemble AROME passe

à 25 membres, pour le même coût de calcul, grâce au passage à une précision réduite des calculs. Tous les systèmes utilisent dorénavant les températures océaniques fournies par Mercator Océan. L'amélioration des scores objectifs de prévision est remarquable, tant pour les prévisions des systèmes déterministes que pour les scores probabilistes issues des ensembles. Cette nouvelle chaîne doit devenir opérationnelle en 2024.

1

## Les prémices d'un couplage atmosphère-océan dans la prévision numérique du temps globale ARPEGE

Lola Ormières, Adrien Napoly, Carole Labadie

L'océan couvre environ 70 % de la surface terrestre et la température de surface de la mer joue un rôle prépondérant dans de nombreux phénomènes atmosphériques à toutes les échelles. Si la représentation du couplage océan-atmosphère est aujourd'hui prise en compte à Météo-France dans les modèles de prévision numérique du temps de méso-échelle comme la PEARO-OM ou dans les modèles de climat, elle reste absente à l'échelle de temps intermédiaire qu'est la courte échéance. Afin de mesurer l'apport d'une telle représentation à cette échelle, le modèle de couche de mélange océanique 1D

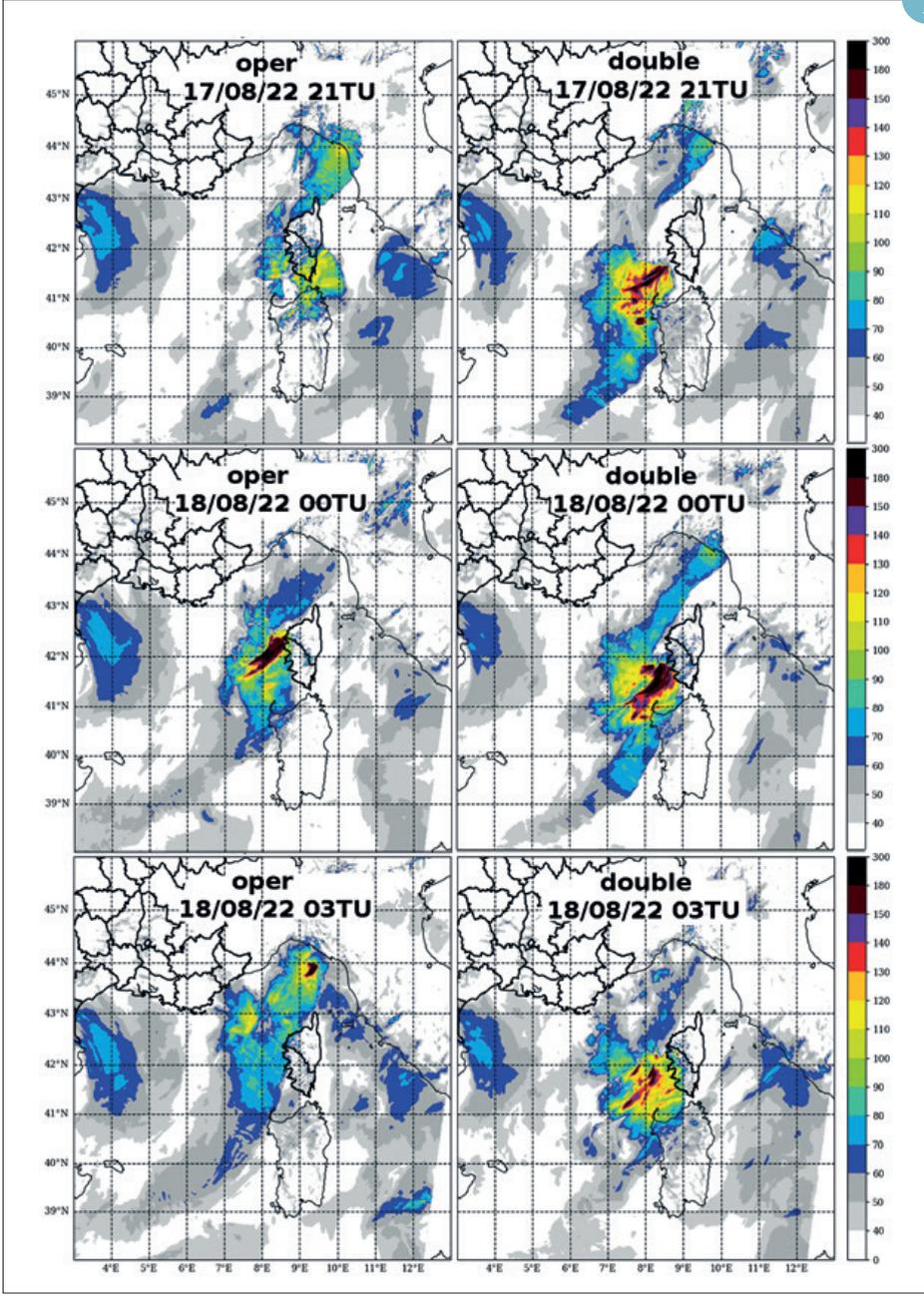
(CMO-1D) développé par Lebeaupin Brossier (2007) a été couplé au modèle global ARPEGE. Une configuration optimale a été définie qui tient compte des contraintes de temps de calcul et de stockage, en vue d'un éventuel passage opérationnel. Le couplage est réinitialisé à chaque réseau de prévision avec un rappel vers la SST Mercator ainsi que l'assimilation de bouées. Pour contrôler la concordance de la SST prévue par ARPEGE-CMO-1D avec les observations et Mercator, des outils d'évaluation ont été développés et éprouvés sur plusieurs périodes entre septembre

2022 et février 2023. Les premiers résultats sont encourageants et montrent que la SST évolue de façon cohérente avec les données de référence. Le modèle est capable de reproduire les variabilités diurne et saisonnière avec une légère sous-estimation (Fig. a) et améliore la prévision atmosphérique d'ARPEGE. Ce couplage présentera en particulier un intérêt pour générer de la dispersion dans les membres de prévision d'ensemble près de la surface, où elle est généralement insuffisante.

### Référence :

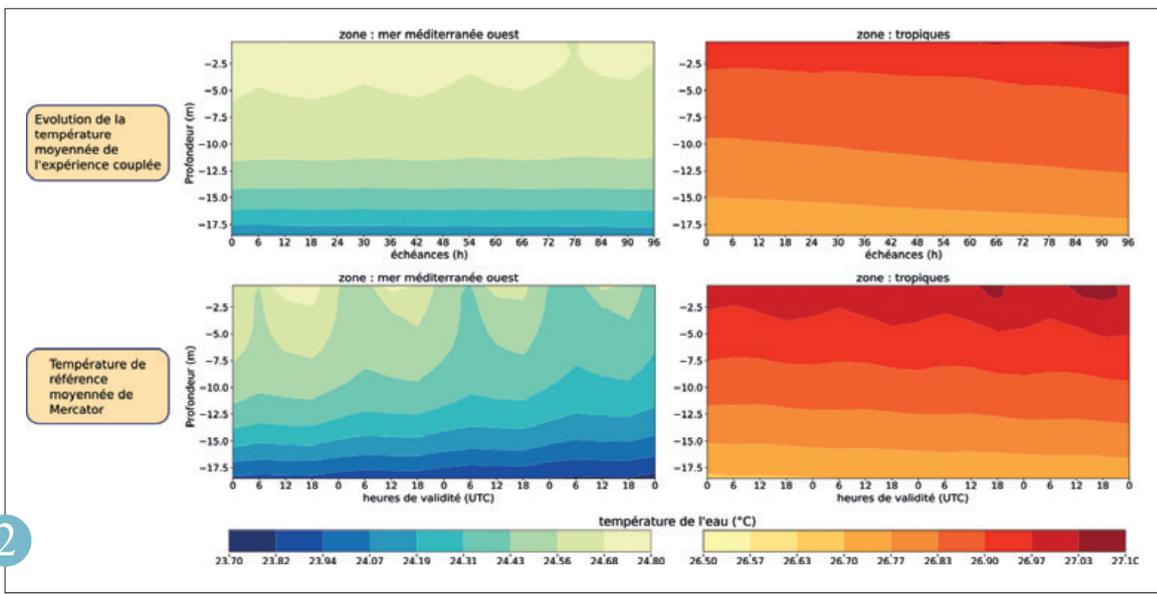
Cindy Lebeaupin Brossier. 2007. Etude du couplage océan-atmosphère associé aux épisodes de pluie intense en région méditerranéenne. Thèse <https://theses.hal.science/tel-00248618/>

2



Comparison des prévisions AROME, partant d'instant initiaux successifs espacés de 3 heures, sur le derecho qui a touché la Corse le 18/08/2022. À gauche, la chaîne opérationnelle, qui propose un scénario de violentes rafales seulement pour la prévision partant du 18/08/2022 à 00TU. À droite, la nouvelle chaîne, qui prévoit des scénarios cohérents pour les prévisions successives. Cela illustre l'apport de la nouvelle chaîne pour des scénarios plus cohérents dans les heures qui précèdent un événement violent.

Moyenne glissante sur septembre et octobre 2022 de l'évolution de la température de la colonne d'eau au cours de la prévision pour l'expérience couplée ARPEGE-CMO-1D (haut) et même moyenne pour la température de référence Mercator à chaque heure de validité correspondante (bas) ; pour les zones mer méditerranée ouest (à gauche) et tropiques (à droite).



---

## Propagation des incertitudes des prévisions météorologiques dans un modèle d'irrigation

Bachar Tarraf, Laure Raynaud

L'agriculture est fortement influencée par les aléas climatiques et est également exposée aux risques liés aux conditions météorologiques. En particulier, la sécheresse apparaît de plus en plus fréquemment comme une contrainte et une tendance dans l'agriculture en Europe. Les outils d'aide à la décision (DST) deviennent donc nécessaires pour la gestion de l'irrigation, en conjonction avec les prévisions météorologiques.

La prise en compte de l'incertitude des forçages météorologiques dans les DST est encore assez peu développée, ou repose sur des approches simples et non

optimisées. L'exploitation des prévisions météorologiques d'ensemble apparaît ainsi comme une évolution naturelle pour améliorer la qualité des DST.

Dans le cadre d'une collaboration avec l'ACTA, Association de Coordination Technique Agricole, et l'INRAE, le modèle de bilan hybride WaLiS, utilisé en viticulture, a été alimenté par les prévisions météorologiques d'ensemble du CEPMMT. Les performances de ces simulations, évaluées sur dix vignobles du sud de la France et quatre saisons estivales, montrent un apport significatif des prévisions d'ensemble par rapport aux approches utilisées actuellement (Figure).

Une méthode de correction des erreurs systématiques des prévisions a également été mise en œuvre, et appliquée soit sur les entrées météorologiques soit directement sur la sortie du modèle WaLiS. Les deux approches conduisent à des résultats similaires, avec un impact positif pour 40 % des vignobles considérés, et un impact neutre à légèrement négatif dans les autres cas.

Les futurs travaux s'attacheront à améliorer les méthodes de correction d'une part, et à développer la prise en compte des autres sources d'incertitude, en particulier celles du modèle WaLiS lui-même.

### Référence :

Tarraf, Bachar, François Brun, Laure Raynaud, Sébastien Roux, Yulin Zhang, Loic Davadan, Olivier Deudon, Assessing the impact of weather forecast uncertainties in crop water stress model predictions, *Agricultural and Forest Meteorology*, 349 (109934), <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.109934>, 2024.

3

---

## Atténuation des vagues par la glace de mer dans la zone marginale de glace

Lotfi Aouf

L'amélioration de la prévision des vagues dans les océans polaires, et en particulier dans les zones marginales de glace est d'une importance cruciale pour le couplage vagues/océan et une meilleure description de la couche de mélange océanique. L'implémentation d'un terme source prenant en compte les interactions vagues/glace basé sur Yu et al. 2022, et l'atténuation des vagues par la couche de glace dans le modèle de vagues MFWAM a été réalisée pour enrichir la physique du modèle dans des régions océaniques qui sont affectées par les effets du changement climatique. Cette mise à jour du modèle MFWAM a été évaluée pendant des périodes d'été

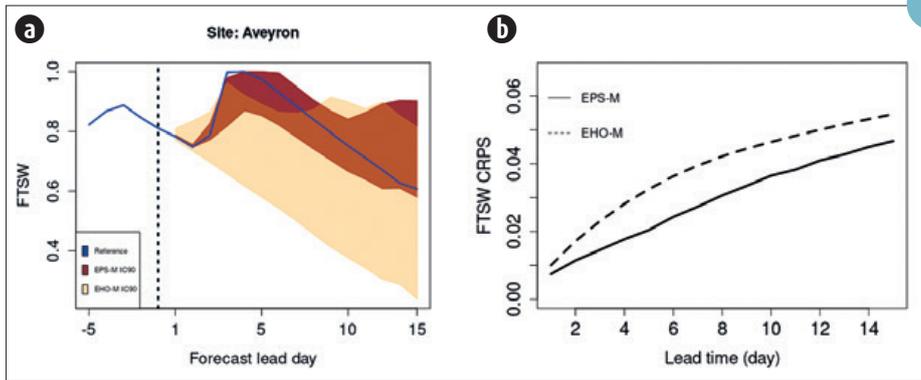
austral et boréal, où la présence de dérive de banquise/icebergs est souvent visible à partir des images satellitaires de Sentinel-1. Nous avons analysé un exemple de tempêtes dans l'océan Austral générant des fortes vagues dans la mer de Weddell du 16 au 18 janvier 2020. La figure montre les hauteurs significatives de vagues (SWH) dans la mer de Weddell pendant l'évènement, où on peut remarquer des SWH d'environ 7 m avant une grande banquise de glace. On peut voir clairement que les hauteurs de vagues après la banquise de glace sont fortement atténuées et atteignent des valeurs comprises entre 0,5 et 2 m dans une mer fermée et libre de glace, comme l'illustre

la figure. La validation avec les données altimétriques de Sentinel-3 montre que l'utilisation du terme source d'atténuation des vagues réduit significativement le biais sur les SWH et améliore l'indice de dispersion des SWH dans la mer de Weddell. La validation a révélé la même tendance d'amélioration pour les mers d'Amundsen et de Ross dans l'Antarctique. Cette nouvelle version de modèle MFWAM ouvre des perspectives d'applications intéressantes pour les modèles couplés de prévision du temps et du climat, et permet aussi de fournir un état de la mer plus précis pour la restitution du niveau de la mer à partir de l'altimétrie.

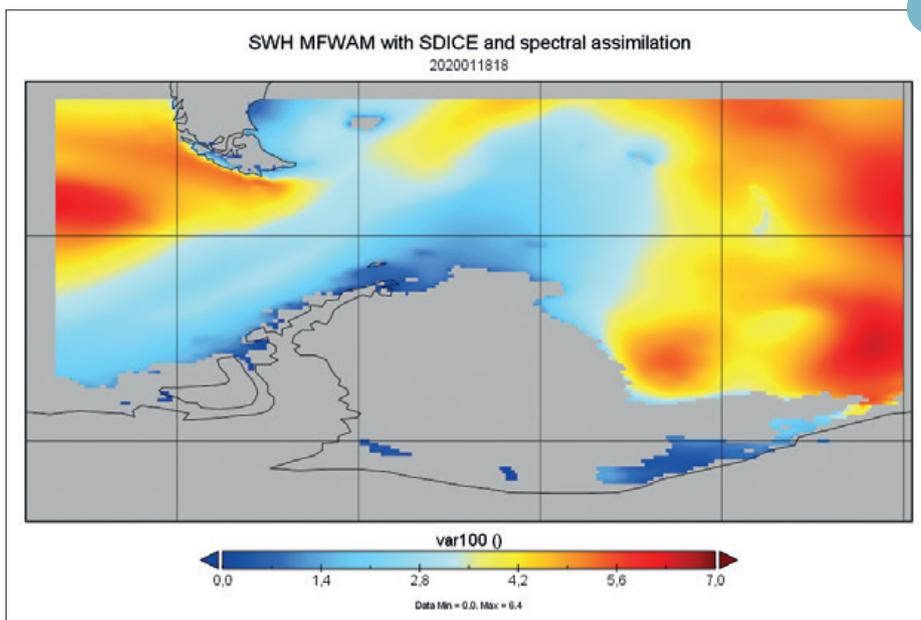
### Référence :

Jie Yu, W. Erick Rogers, David W. Wang, A new method for parameterization of wave dissipation by sea ice, *Cold Regions Science and Technology*, Volume 199, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103582>.

4



- (a) Fraction d'eau du sol disponible (FTSW), prévue par le modèle WaLis en fonction de l'échéance de prévision, pour le vignoble 'Aveyron'. Deux prévisions probabilistes sont comparées, en jaune l'approche actuellement utilisée et en marron l'approche exploitant la prévision d'ensemble du CEPMMT. L'observation est représentée en bleu.
- (b) Comparaison des performances de deux prévisions probabilistes de la variable FTSW, en fonction de l'échéance de prévision. En trait tireté l'approche actuellement utilisée et en trait plein l'approche exploitant la prévision d'ensemble du CEPMMT. La performance est mesurée avec le score CRPS, moyenné sur dix vignobles et quatre années. Plus le score est bas meilleure est la prévision.



- Hauteur significative des vagues (en m) du modèle MFWAM incluant les interactions vagues/glace lors d'une tempête dans la mer de Weddell le 18 janvier 2020. La couleur grise représente la glace de mer.

---

## Amélioration de la prévision des vagues à Tahiti par des modèles à fine échelle

Alice Dalphinet

Les modèles de vagues mis à disposition des prévisionnistes de Polynésie française ont été fortement améliorés en 2023. Le modèle de vagues régional MFWAM a vu sa résolution raffinée à 0,025° au lieu de 0,1°. Par ailleurs, un nouveau modèle de vagues WW3 (WaveWatch3) haute résolution a été déployé sur les îles de Moorea et Tahiti. Celui-ci utilise une maille irrégulière qui atteint jusqu'à 200 m à la côte.

Le maillage a été rendu possible par la livraison du Service hydrographique et océanographique de la marine d'une bathymétrie de résolution à 100 m sur les

deux îles, début 2023. Les vagues sont ainsi simulées à une échelle suffisamment fine pour représenter les états de mer dans le lagon, avec des passes de 200 m ou plus.

Des situations marquantes de houles de sud et de nord de ces dernières années ont été rejouées. Les états de mer de quelques situations ont été validés en côtier grâce à des observations in-situ sur l'extérieur de la barrière récifal fourni par le projet MAEVA (CNRS).

Les fortes houles de juillet 2022 ont ainsi été bien représentées, avec 4,2 m de hauteur de vagues modélisée au sud de Moorea,

pour 4,8 m observée. La chronologie de l'événement est aussi bien vue, avec des houles puissantes de 22 s dans le modèle et l'observation.

Ces nouvelles configurations sont un outil essentiel pour la mise en place en 2024 d'une vigilance vagues-submersion avec une prévision raffinée sur les côtes de Tahiti et Moorea.

5

---

## Calibration de la Prévision d'Ensemble de surcotes

Komlan Agbéko Kpogo-Nuwoklo, Denis Paradis, Patrick Ohl, avid Ayache, Michaël Zamo

Conduit par Météo-France et le SHOM, le projet HOMONIM (Historique, Observation et MODélisation du Niveau Marin) vise à améliorer les capacités de prévision opérationnelle des submersions marines. Dans le cadre de ce projet, une chaîne opérationnelle de prévision d'ensemble de surcotes a été mise en place en juillet 2016 pour les domaines Atlantique et Méditerranée. Elle utilise le vent à 10 m et la pression au niveau de la mer issus de la prévision d'ensemble Arpège en entrée du modèle de surcotes Hycom 2D.

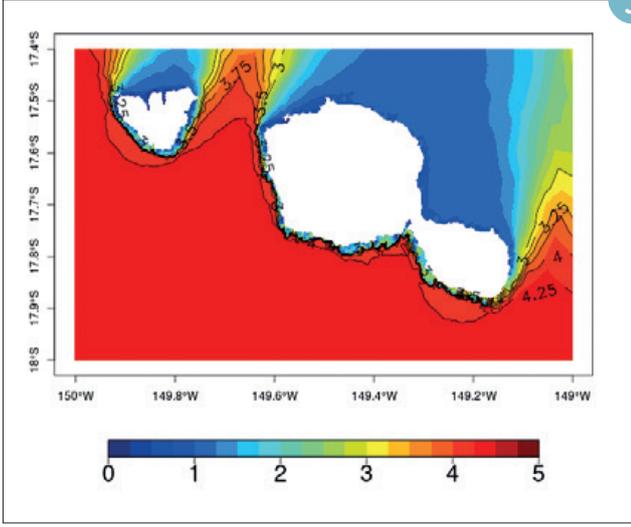
L'évaluation statistique de la prévision d'ensemble de surcotes a montré que les prévisions sont sous-dispersives et souvent biaisées, conséquence de plusieurs sources d'erreurs parmi lesquelles la sous-dispersion des forçages prévision d'ensemble Arpège, la dynamique 3D manquante dans le modèle Hycom 2D ou encore l'absence de prise en compte de l'effet des vagues.

Une calibration de la prévision d'ensemble de surcotes a été développée afin de corriger à la fois le biais et la sous-dispersion des prévisions brutes par un post-traitement. Pour ce faire, deux méthodes d'apprentissage statistique ont été testées : Ensemble Model Output Statistics (EMOS) et Quantile Regression Forests (QRF). L'étude s'est basée sur un échantillon de données couvrant la période de janvier 2016 à juin 2022 et incluant des prédicteurs tels que le vent à 10 m et la pression au niveau de la mer issus du modèle déterministe Arpège ou encore la hauteur significative et la période des vagues issues du modèle WAVEWATCH III ®. Les résultats ont montré que la calibration avec ces deux méthodes permet de réduire le biais et d'avoir une meilleure dispersion de la prévision d'ensemble de surcotes. La méthode QRF a donné les meilleurs résultats sur l'ensemble des scores aussi bien en Atlantique qu'en Méditerranée.

Ce travail sera poursuivi en introduisant des prédicteurs liés à la dynamique 3D de l'océan, notamment le niveau d'eau, la température et le courant. Il portera également sur le prochain modèle de surcotes pour l'Atlantique, basé sur le code TOLOSA-SW (<https://tolosa-project.com/>).

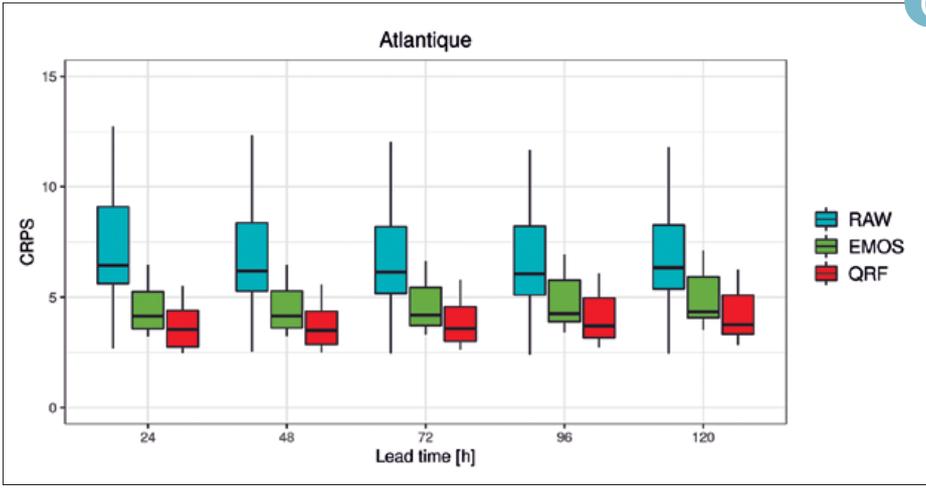
6

5



Hauteur significative des vagues (m) du modèle de vagues haute résolution WaveWatch3 Tahiti/Moorea le 14/07/2022 à 00 h UTC.

6



CRPS=Continuous Ranked Probability Score (en ordonnée) des 3 ensembles (brut (RAW), calibré par EMOS et par QRF) en fonction des échéances de prévision (en abscisse) pour le domaine Atlantique (18 sites utilisés). Les calculs reposent sur l'échantillon complet couvrant la période de janvier 2016 à juin 2022 et sont présentés sous la forme de boîtes à moustaches (quantiles 10, 25, 50, 75 et 90).

---

## Des prévisions hydrométéorologiques sans couture pour anticiper les crues soudaines

François Bouttier

Les inondations et crues soudaines sont des catastrophes naturelles responsables de nombreuses victimes et dégâts. L'amélioration de leur prévision est un axe de collaboration important entre communautés météorologiques et hydrologiques. Avec le soutien de la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques), Météo-France étudie comment transmettre plus efficacement les prévisions de précipitations aux modèles hydrologiques et hydrauliques exploités par l'Université Gustave Eiffel et INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement), car dans ceux-ci la pluie est une source fréquente d'erreurs d'anticipation des crues.

Dans une étude publiée par le journal *Natural Hazards and Earth System Sciences*, une nouvelle représentation des pluies sous forme d'un ensemble de scénarios probables a été testée sur des cas passés de crues soudaines entre 2019 et 2021. Ces scénarios combinent sans discontinuité les pluies les plus récentes observées par radar avec des prévisions numériques du modèle AROME et des méthodes d'apprentissage statistique adaptées aux pluies intenses. L'évaluation des prévisions s'est faite dans un cadre proche du système de surveillance des crues Vigicrues Flash actuellement opérationnel. Les résultats montrent qu'inclure une représentation des incertitudes sur l'évolution

des pluies permet d'améliorer fortement via les scénarios prévus l'anticipation des crues et inondations, si la fréquence des fausses alertes a été correctement optimisée. Une suite de cette étude, en cours de publication, démontre comment optimiser cette fréquence. Une autre étude a simulé les impacts des inondations et le comportement d'un groupe d'équipes de secours en réponse à différents types de prévisions des crues. Elle a démontré sur un cas marquant d'octobre 2021 que la représentation des incertitudes dans la chaîne de prévision hydrométéorologique permet d'améliorer l'efficacité des secours si ces derniers bénéficient de moyens suffisants pour optimiser leurs interventions.

### Référence :

Godet, J., Payrastré, O., Javelle, P., and Bouttier, F., 2023: Assessing the ability of a new seamless short-range ensemble rainfall product to anticipate flash floods in the French Mediterranean area, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23, 3355–3377, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-3355-2023>

7

---

## Diagnostiques sur les cyclones tropicaux en sortie de la prévision d'ensemble PE AROME-OM

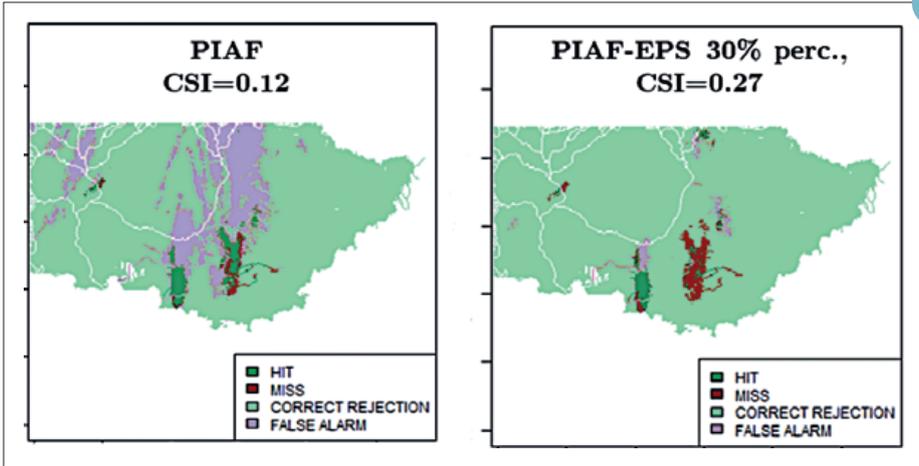
Tom Rémond, Tarik Kriat, Sébastien Langlade, Adrien Colomb, Olivier Nuissier

Les cyclones tropicaux comptent parmi les phénomènes météorologiques les plus destructeurs, rendant leur anticipation primordiale. Afin de fournir des outils d'aide à la décision toujours plus performants aux prévisionnistes du Centre Météorologique Régional Spécialisé La Réunion (DIROI/PREVI), les équipes du GMAP et du LACy s'emploient à améliorer les modèles de prévision numérique du temps de Météo-France, notamment la chaîne opérationnelle Arome Outremer, et dernièrement sa version ensembliste baptisée PE Arome-OM. En effet, la prise en compte de l'incertitude liée aux phénomènes de petite échelle au sein des cyclones tropicaux s'avère capitale pour anticiper des changements d'intensité. Au cours de l'année 2023, une collaboration étroite entre prévisionnistes et modélisateurs

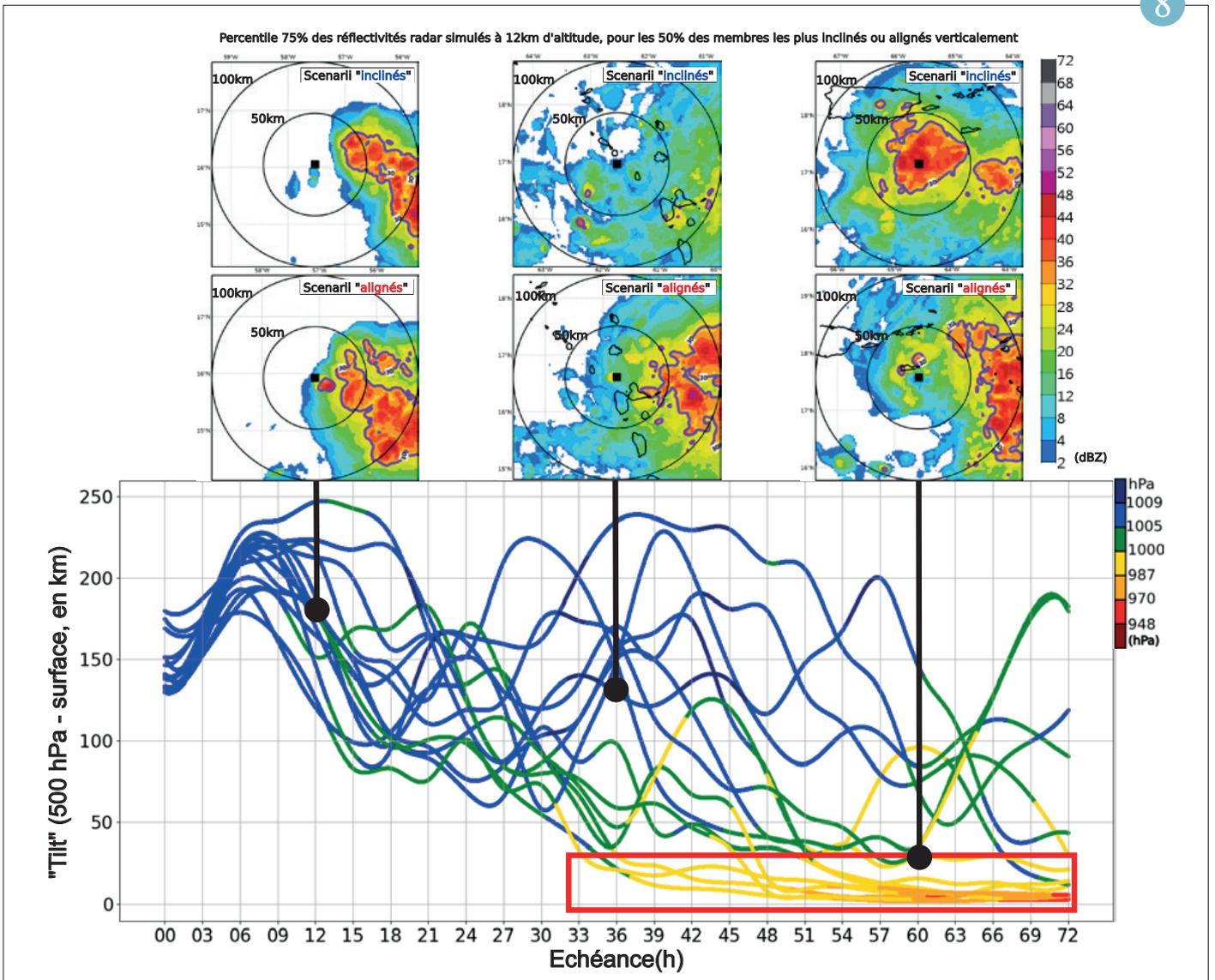
s'est mise en place à l'occasion du projet de fin d'études IENM de Tom Rémond, visant à élaborer des diagnostics opérationnels issus de la PE Arome-OM. Cette première étude se focalise sur le développement de produits facilitant l'appréhension du lien entre le cisaillement vertical de vent et les changements d'intensité du système tropical. Lors de l'étude de cas des systèmes Fiona (Atlantique Nord, Sept. 2022) et Batsirai (Sud-Ouest Océan Indien, Jan. 2022), une des réponses de la structure du cyclone au cisaillement s'est avérée particulièrement pertinente pour expliquer les différents scénarios d'intensification. Il s'agit de l'inclinaison verticale (ou 'tilt' en anglais), définie comme la mesure du décalage horizontal entre le centre au niveau isobare 500hPa et son pendant en surface.

D'ici 2024, ces nouveaux diagnostics seront produits quotidiennement à partir de la PE Arome-OM. Ils permettront aux prévisionnistes de quantifier l'impact du cisaillement de façon probabiliste, et donc de mieux anticiper les potentiels changements d'intensité en particulier. Cette méthodologie sera étendue aux autres phénomènes se déroulant au sein des cyclones tropicaux comme les cycles de remplacement du mur de l'œil ou encore les « tours chaudes » (« vortical hot tower »).

8



Comparaison aux observations des pluies prévues par la meilleure prévision déterministe (gauche) et le meilleur seuillage de la prévision d'ensemble (droite). Les pluies sont seuillées à l'intensité de durée de retour 10 ans, sur le cas du 3-4 octobre 2021. Les couleurs indiquent les points de bonne prévision, non-détection et fausse alarme. Le CSI (Critical Success Index) est un score objectif de la prévision.



Panache de la norme du tilt (en km) coloré selon l'intensité (pression, hPa) et calculé à partir de la PE AROME Antilles du 15/09/2022 à 18UTC pour le cyclone FIONA. Les vignettes du haut montrent le quantile 75 % de la réflectivité radar simulée à 12 km d'altitude pour les 50 % des membres les plus alignés et/ou penchés verticalement, respectivement à 12 h, 36 h et 60 h. Un alignement de la structure verticale du cyclone, suivi du déclenchement et de la symétrisation de la convection profonde près du centre apparaît comme un très bon indicateur du risque d'une potentielle intensification rapide

# Etude et modélisation des processus

Les travaux de recherche sur les études de processus visent à améliorer la compréhension des phénomènes et leur représentation dans les modèles de prévision numérique du temps et de climat. Les études de processus s'appuient généralement sur une approche complémentaire entre observation et modélisation : les simulations numériques à échelle fine, validées par les observations, apportent une description détaillée permettant de mieux caractériser les processus, et ainsi de mieux les représenter dans les modèles de plus grande échelle grâce à des paramétrisations améliorées.

Un objectif essentiel pour la prévision numérique du temps est d'améliorer la représentation des phénomènes météorologiques à enjeu. Pour le givrage par eau surfondue, qui constitue l'un de ces enjeux pour l'aéronautique, l'avion de recherche ATR 42 de Météo-France a été doté de capteurs innovants pour mieux mesurer les caractéristiques des zones givrantes lors de campagnes de mesures dédiées, et ainsi contribuer à l'amélioration de leur représentation dans les modèles. Le brouillard, qui est un autre phénomène à risque pour les transports, bénéficie pour son observation de mesures innovantes par télédétection, déployées dans le cadre de la campagne de mesures SOFOG3D, permettant de mieux discriminer les processus pilotant son cycle de vie. Une autre campagne phare des dernières années, LIAISE, qui a documenté les interactions entre surfaces continentales et atmosphère en environnement semi-aride dans le bassin de l'Èbre en Espagne, a permis de mieux caractériser l'impact de l'irrigation et d'améliorer l'estimation de l'évapotranspiration dans un contexte de plus en plus fréquent de stress hydrique. Les villes, qui regroupent l'essentiel de la population mondiale, des activités et infrastructures, présentent aussi des enjeux importants d'adaptation au changement climatique. Le modèle de ville TEB peut ainsi être utilisé pour simuler le comportement énergétique des quartiers et participer à l'étude de la rénovation des centres-villes anciens. Des simulations numériques à échelle hectométrique ont par ailleurs mis en évidence l'impact de l'agglomération parisienne sur l'augmentation des précipitations convectives au-dessus et un peu en aval de la ville.

Au dessus d'une surface océanique, l'état de développement des vagues a été pris en compte pour améliorer les échanges à l'interface avec l'atmosphère, ce qui participe au développement d'une plate-forme couplée océan-vagues-atmosphère. Des simulations à haute résolution ont aussi permis de quantifier l'impact de l'humidité dans la troposphère libre sur le développement de la convection nuageuse. Enfin, une étude à plus grande échelle a prouvé que la conjonction simultanée de plusieurs ondes équatoriales a généré le cyclone tropical Seroja depuis l'équateur jusqu'au Timor Oriental, montrant l'intérêt de la surveillance des ondes tropicales pour la prévision des cyclones tropicaux.

## L'ATR 42 de Météo-France, laboratoire d'essai pour une meilleure compréhension et détection du givrage sévère en aéronautique

Les avions modernes font bien face aux conditions givrantes les plus courantes, sauf en présence de grosses gouttelettes d'eau surfondues (SLD<sup>1</sup>), très dangereuses. Une nouvelle réglementation a été mise en place afin d'améliorer la sécurité aérienne, mais les technologies nécessaires n'existent pas encore.

Dans le projet européen H2020 SENS4ICE<sup>2</sup> des capteurs novateurs basés sur des principes différents de détection en mesure des conditions de givrage naturel (cristaux de glace et surtout SLD) ont été ainsi développés, testés en soufflerie et validés sur avions, afin de répondre à ce besoin.

SAFIRE<sup>3</sup> les a intégrés dans l'ATR42 de Météo-France pour des mesures directes, indirectes (en détectant le comportement de l'avion

dans son ensemble) ou hybrides (directes + indirectes) de SAFRAN, INTA<sup>4</sup>, DLR<sup>5</sup>, ONERA<sup>6</sup>, ainsi que des instruments de référence pour caractériser les conditions atmosphériques. DSM<sup>7</sup> Aéro et le CNRM<sup>8</sup> fournissant la prévision de givrage avant et pendant les vols de ces conditions givrantes SLD, l'ATR 42 a réalisé environ 50 heures de vols en avril 2023 en toute sécurité.

Les différents capteurs du projet ont ainsi été validés, et la compréhension et la prévision de ce type de givrage vont progresser grâce aux données collectées. Ces capteurs, une fois industrialisés, pourront être installés sur de futurs avions.

1. SLD : Super Large Droplet : gouttelette d'eau liquide surfondue (ayant une température  $< 0^{\circ}\text{C}$ ).

2. SENS4ICE : SENSors and certifiable hybrid architectures for safer aviation in ICing Environment, <https://www.sens4ice-project.eu/>

3. Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement – UAR 2859 Météo-France, CNRS, CNES.

4. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (Espagne)

5. Centre allemand aérospatial

6. Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales

7. Direction des Services Météorologiques de Météo-France

8. Centre National de Recherches Météorologiques (Météo-France - CNRS)





---

## Une paramétrisation des flux turbulents air mer pour le couplage avec les vagues

Marie-Noëlle Bouin

Pour une même vitesse de vent à la surface de la mer, l'état de développement des vagues change la rugosité de surface et rétroagit sur le vent et les échanges turbulents de chaleur et de quantité de mouvement à l'interface. Pour tenir compte de ces effets dans les modèles de prévision et de climat, le CNRM prépare le couplage des modèles d'atmosphère et de vagues de Météo France à travers le projet AROBASE (Application de la Recherche à l'Opérationnel pour l'assemblage d'AROME avec des Systèmes Environnementaux).

Une paramétrisation des échanges turbulents avec dépendance à l'état de mer a été développée pour le modèle de

surface SURFEX, commun aux modèles opérationnels AROME et ARPEGE, et au modèle de recherche Meso-NH. WASP (Wave-Age dependent Stress Parameterization, Bouin et al. 2024) permet de représenter des coefficients d'échange turbulents proches des observations (plus de 27 000 données), et sensibles à l'état de développement de la mer du vent. Cette paramétrisation a été testée avec chacun des trois modèles évoqués, sur des cas d'étude connus, afin de vérifier son bon comportement depuis l'échelle du processus jusqu'à celle du climat. Les comparaisons avec la paramétrisation actuelle ECUME, qui ne permet pas de prendre en compte l'effet des

vagues, montrent une légère amélioration des scores avec les modèles AROME OI pour l'atmosphère et WAVEWATCHIII pour les vagues : sur la saison cyclonique 2021-2022 dans le Sud de l'Océan Indien, les comparaisons de vent maximal et pression minimale avec les valeurs de la Best Track, pour 3 cyclones majeurs, donnent un léger avantage à WASP par rapport à ECUME et aux sorties opérationnelles IFS.

Cette paramétrisation vient combler un manque au niveau de la représentation des flux turbulents dans un schéma couplé vagues-atmosphère. Elle sera intégrée dans la plateforme océan-vagues-atmosphère en cours de développement.

### Référence :

Bouin, M.-N., Lebeaupin Brossier, C., Malardel, S., Voldoire, A., and Sauvage, C.: The wave-age-dependent stress parameterisation (WASP) for momentum and heat turbulent fluxes at sea in SURFEX v8.1, *Geosci. Model Dev.*, 17, 117–141, <https://doi.org/10.5194/gmd-17-117-2024>, 2024.

2

---

## Hétérogénéité du brouillard à l'échelle régionale durant la campagne SOFOG3D

Gaëtan Noual, Christine Lac, Patrick Le Moigne

Un cas d'étude de cycle de vie du brouillard a été échantillonné entre le 28 et le 30 décembre 2019, lors de la campagne SOFOG3D dans le Sud-Ouest de la France, avec des scénarii différents entre deux sites distants d'environ 100 km, le Supersite dans la forêt des Landes et le site d'Agen. Les mesures de télédétection par le radar nuage Basta et le radiomètre micro-ondes déployés sur les deux sites montrent qu'un brouillard radiatif s'est produit la première nuit, se levant en stratus dans la matinée. Mais le stratus a persisté toute la journée au Supersite avant de s'abaisser l'après-midi pour former un nouveau brouillard lors de la deuxième nuit. En revanche, sur le

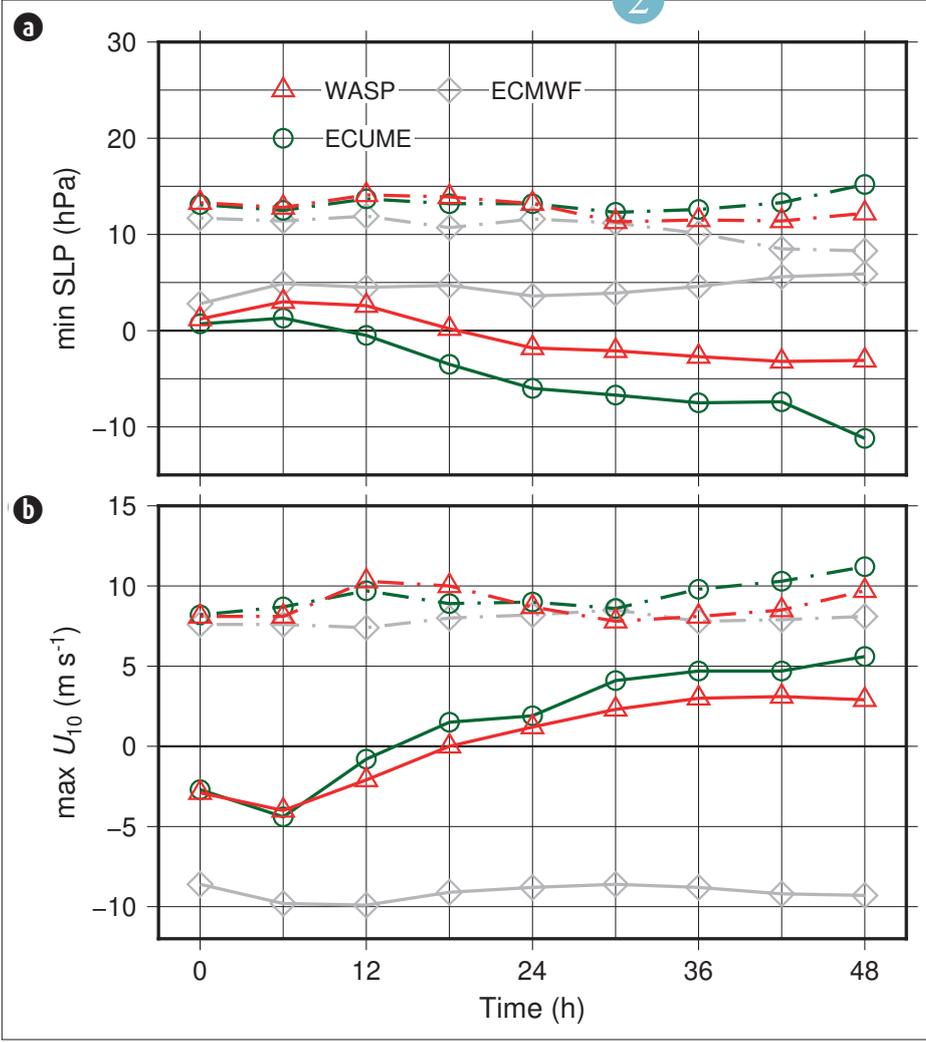
site d'Agen, le stratus s'est complètement dissipé et un brouillard radiatif s'est formé lors de la seconde nuit (Fig a et d).

L'évolution des profils verticaux de température explique en grande partie ces différences (Fig c et f). Au Supersite, une inversion de température prononcée freine le développement vertical du brouillard, au contraire d'Agen, où l'air plus froid dans les 100 premiers mètres et une inversion moins marquée le favorisent. Consécutivement, le contenu en eau liquide intégré plus important permet la formation de plus grosses gouttelettes, favorisant la sédimentation (Fig d) et la dissipation précoce et complète du brouillard à Agen. Lors de la deuxième nuit,

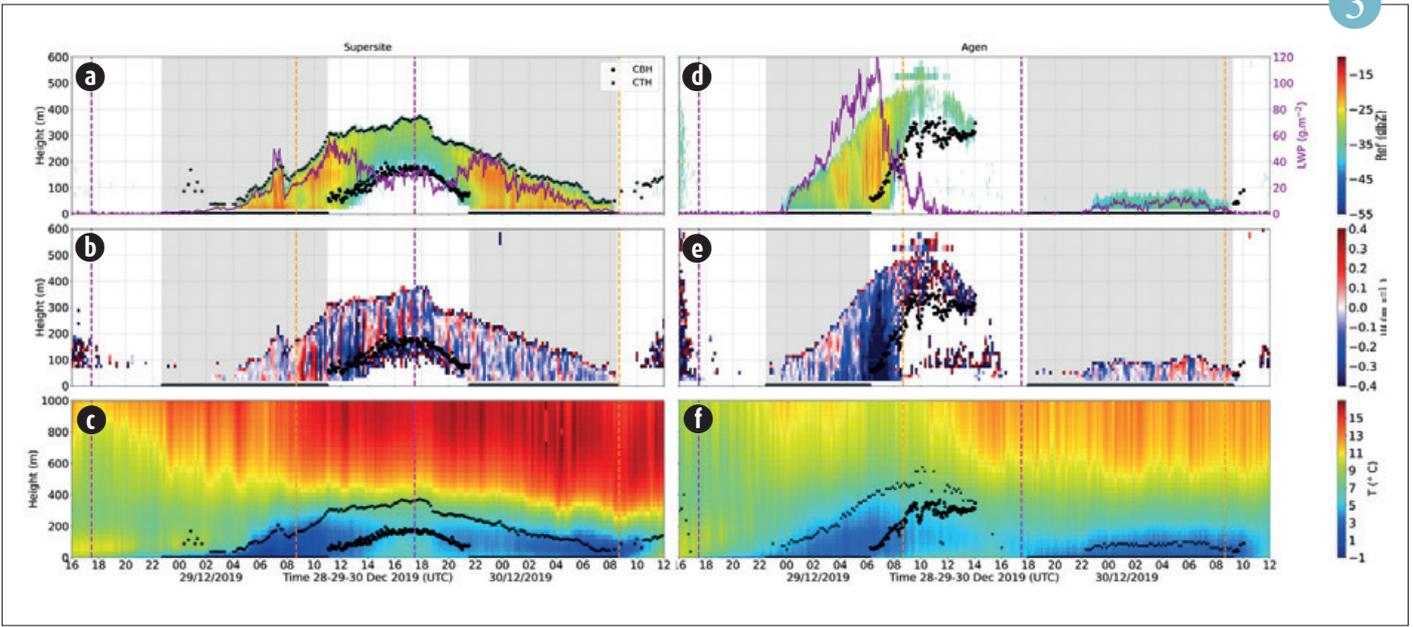
la couche d'air chaud en altitude empêche le développement vertical du brouillard à Agen, de même qu'elle favorise la dissipation du brouillard par son sommet au Supersite.

Ces résultats illustrent la richesse des nouvelles observations par télédétection, qui enrichiront la prévision du brouillard dans les prochaines années, par l'assimilation de données et par l'IA.

3



▲ Biais moyen (trait continu) et écart quadratique (tireté) pour les simulations de cyclones Batsirai, Emnati and Dumako avec AROME OI avec ECUME (cercles verts), ou WASP (triangles rouges) et IFS (diamants gris), pression minimale (a) et vent maximal (b).



▲ Série temporelle des profils verticaux au Supersite à gauche et à Agen à droite de (a,d) réflectivité (dBz), (b,e) vitesse verticale (de l'air et des hydrométéores) mesurées par le radar ( $m \cdot s^{-1}$ ), et (c,f) température ( $^{\circ}C$ ) mesurée par le radiomètre micro-ondes. En (a,d) sont superposées les évolutions temporelles du contenu en eau liquide intégré (LWP,  $g \cdot m^{-2}$ ), de la hauteur de la base et du sommet des nuages (CBH et CTH). Les traits pointillés verticaux violets et oranges représentent respectivement les heures de coucher et de lever du soleil.

---

## Amélioration de l'estimation de l'évapotranspiration en milieu semi-aride

Belén Martí, Aaron Boone

Les environnements semi-arides sont caractérisés par un déficit hydrique pendant une partie de l'année. L'irrigation fournit l'eau nécessaire aux cultures, mais pour le faire sans gaspiller cette ressource, il faut connaître les processus qui régissent le bilan hydrique. Celui-ci comprend l'eau drainée et stockée par le sol, celle stockée par les plantes et celle échangée sous forme de vapeur entre l'atmosphère et les plantes et le sol. Ce dernier échange est connu sous le nom d'évapotranspiration ou de flux de chaleur latente.

Le flux de chaleur latente peut être observé à l'aide d'instruments de recherche tels qu'un système d'eddy-covariance, mais en raison de son coût élevé, il ne s'agit pas d'une solution qui peut être mise en œuvre à grande échelle. Une façon de caractériser

le flux de chaleur latente pour un plus grand nombre de sites est d'utiliser un modèle de surface terrestre, tel que ISBA dans SURFEX. Le modèle prend en compte les caractéristiques du site et paramétrise les processus à l'origine des échanges. Les sites semi-arides, en raison du manque d'eau, sont caractérisés par des processus qui sont uniques par rapport aux paysages bien arrosés et qui ne sont généralement pas pris en compte dans les modèles de surface à l'état de l'art. Pour cette étude, nous avons profité de la récente campagne de terrain LIAISE (Boone et al., 2022) pour implémenter une nouvelle résistance (Swenson and Lawrence, 2014) dans le calcul du flux de chaleur latente et ainsi obtenir une meilleure caractérisation du flux provenant du sol nu. Sur la Figure 1, les observations (trait noir)

du flux de chaleur latente d'un champ de luzerne qui a été coupé le 6 juillet et a été irrigué par inondation le 11 sont représentées avec l'indice de surface foliaire (trait rouge) pour indiquer la croissance de la végétation. Le modèle sans couche de sol sec montre un flux de chaleur latente plus élevé (plus de perte d'eau) que celui observé en raison de l'évaporation excessive du sol (trait bleu). L'utilisation de la couche de sol sec (trait orange) permet d'obtenir une estimation précise du flux. Cela permet de caractériser correctement l'eau évaporée pendant la période de croissance de la luzerne. L'application de cette nouvelle paramétrisation à d'autres sites peut contribuer à améliorer les estimations du bilan hydrique, en particulier dans les régions semi-arides.

### Référence :

Boone, A., G. Canut-Rocafort, M. Lothon, J. Bellvert, M. Best, J. Brooke, J. Cuxart, O. Hartogensis, P. Le Moigne, J. R. Miró, J. Polcher, J. Price, P. Quintana Seguí, M. Wooster, 2022: Campagne internationale de terrain sur les interactions de la surface terrestre avec l'atmosphère. *La Météorologie*, 116, 5-7. DOI:10.37053/lameteorologie-2022-0005  
Swenson, S. C., & Lawrence, D. M. (2014). Assessing a dry surface layer based soil resistance parameterization for the Community Land Model using GRACE and FLUXNET MTE data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(17), 10-299.

4

---

## Influence de l'irrigation sur la couche limite atmosphérique et les circulations de brise dans un environnement semi-aride

Tanguy Lunel, Aaron A. Boone, Patrick Le Moigne

L'irrigation des cultures devient de plus en plus courante dans le monde entier et la connaissance de son impact sur la météorologie locale est un sujet de recherche très actuel.

En partenariat avec de nombreux laboratoires internationaux, le CNRM a monté et participé à la campagne LIAISE (Land-surface Interaction with the Atmosphere over the Iberian Semi-arid Environment) qui s'est notamment intéressée à l'impact de l'irrigation sur les interactions entre surfaces continentales et atmosphère dans le bassin de l'Ebre en Espagne. En couplant données d'observations variées et

modélisation hectométrique avec le modèle de recherche Méso-NH, il a été possible de mieux comprendre et quantifier l'impact de l'irrigation sur la basse atmosphère allant de 0 à 2 000 m au-dessus du sol.

En particulier les résultats ont montré que l'irrigation peut réduire la température de l'air de 5 °C et augmenter l'humidité de 50 % près de la surface pendant les journées chaudes et ensoleillées d'été. En outre, l'irrigation limite la convection et stabilise significativement l'atmosphère au-dessus des zones irriguées. L'étude menée a également permis d'observer et d'attribuer pour la première fois la création d'un vent

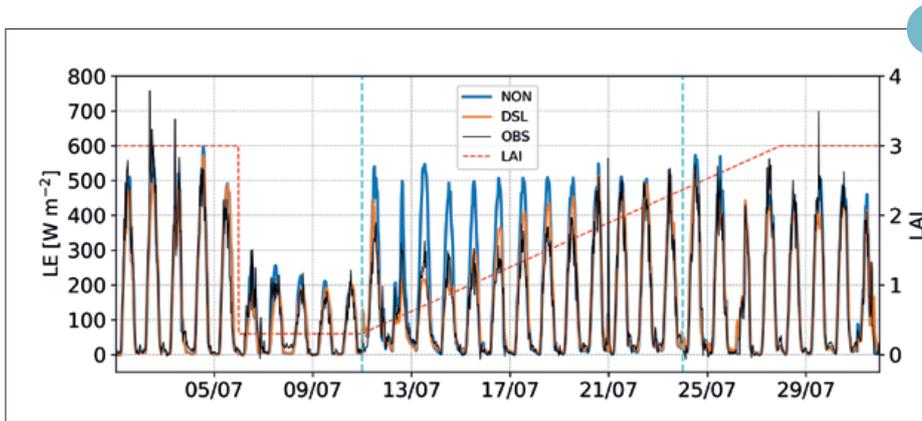
proche de la surface dû à l'hétérogénéité entre zone irriguée et sèche. Ce vent provient du même phénomène physique que pour la brise de mer, c'est-à-dire de la différence de vitesse de réchauffement de l'air au-dessus d'une zone fraîche (mer, ou zone irriguée ici) par rapport à une zone plus chaude (côte, ou zone non-irriguée ici).

Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte l'irrigation dans les modèles numériques pour les prévisions météorologiques, la modélisation du climat, et la planification agricole durable.

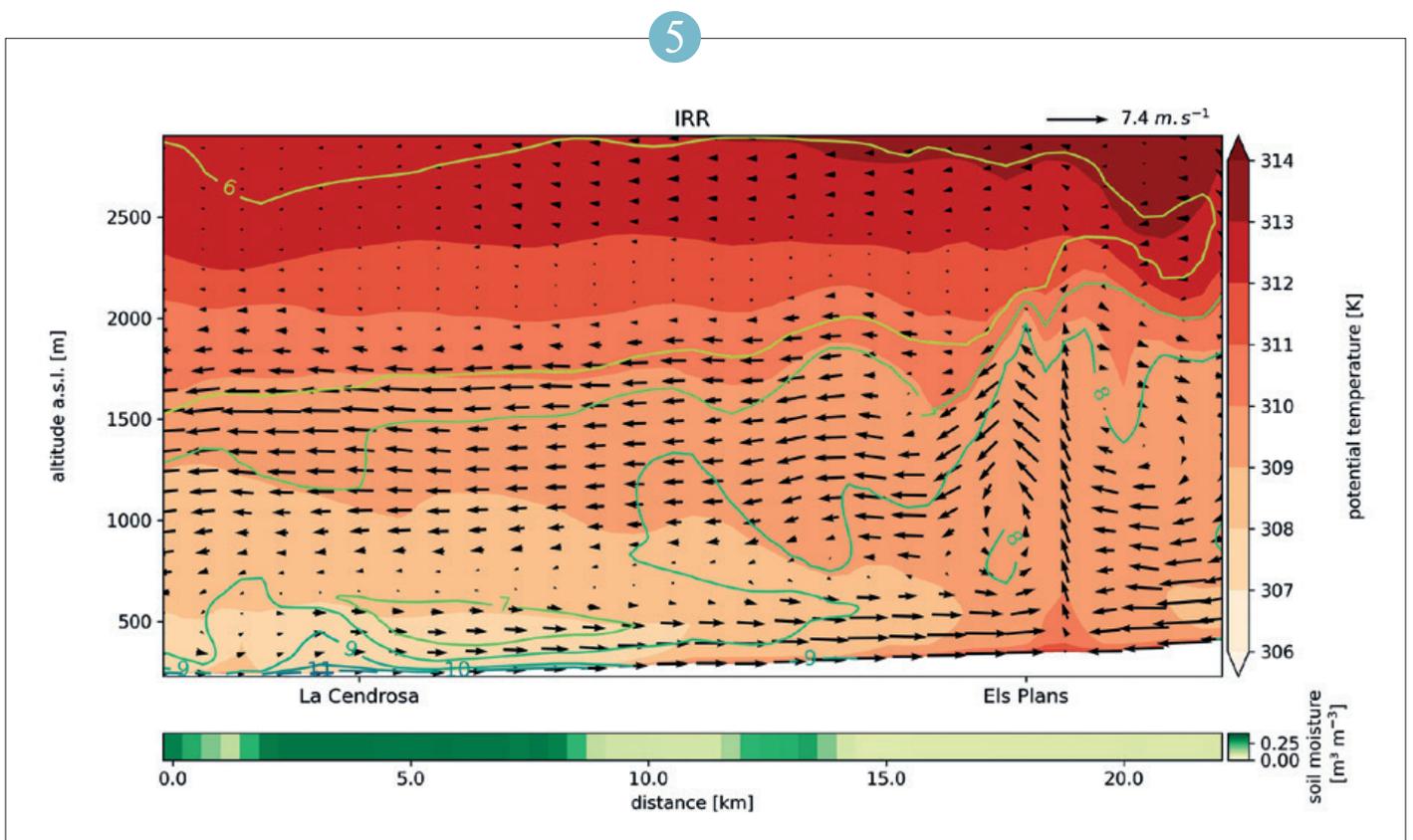
### Référence :

Lunel, T., Jimenez, M. A., Cuxart, J., Martinez-Villagrasa, D., Boone, A., and Le Moigne, P.: The marinada fall wind in the eastern Ebro sub-basin: physical mechanisms and role of the sea, orography and irrigation, *Atmos. Chem. Phys.*, 24, 7637–7666, <https://doi.org/10.5194/acp-24-7637-2024>, 2024.

5



Flux de chaleur latente (LE) observé (trait noir) et simulé sans (NON, trait bleu) ou avec couche de sol sec (DSL en anglais, trait orange) d'un champ de luzerne en Catalogne pendant la campagne LIAISE. L'indice de surface foliaire (LAI en anglais, trait rouge pointillé) indique la croissance de la luzerne. Les inondations sont marquées par des lignes verticales bleues pointillées.



Coupe transversale de la température potentielle de l'air simulée (K, en couleur), du contenu en vapeur d'eau ( $\text{g.kg}^{-1}$  en isolignes), et du vent (avec les flèches), pour le 22 Juillet 2021 à midi. La zone irriguée se situe à gauche, autour du site de La Cendrosa, et la zone sèche à droite autour d'Els Plans. Le bandeau indique l'humidité du sol, en  $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ .

---

## Modélisation des transferts d'humidité dans les murs dans TEB : cas du centre médiéval de Cahors

Margot Ruiz

Les centres des villes moyennes sont particulièrement vulnérables au phénomène d'îlot de Chaleur Urbain et se composent généralement de bâtiments ayant une faible performance énergétique. De plus, les habitants quittent ces quartiers pour des logements plus modernes. De ces constats est né une collaboration entre le LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions), le CNRM et le Grand Cahors, dans l'objectif d'étudier la rénovation de ces bâtiments au vu des enjeux énergétiques et microclimatiques.

Le modèle TEB (Town Energy Balance), paramétrant les surfaces urbanisées dans le code SURFEX, peut être utilisé pour simuler

le comportement énergétique des quartiers et donc pour comparer l'impact de plusieurs solutions de rénovation des bâtiments. Néanmoins, TEB considère seulement les transferts thermiques à travers les murs et néglige les transferts hydriques, qui sont pourtant un phénomène clé pour étudier la rénovation des murs anciens. Pour mieux prendre en compte les spécificités des centres anciens, les transferts d'humidité à travers les murs sont intégrés dans TEB, en utilisant une méthode de résolution numérique spécifiquement adaptée à l'échelle urbaine.

L'exemple du centre-ville médiéval de Cahors, dont plusieurs bâtiments sont

instrumentés (Figure a), est ensuite simulé par TEB. L'intégration des transferts d'humidité à travers les murs dans TEB améliore significativement l'humidité relative intérieure simulée (Figure b), et le comportement hygrothermique des bâtiments construits en briques anciennes. Les modifications apportées à TEB permettent également d'estimer le risque de croissance de moisissures dans les murs anciens, qui est un enjeu majeur lors du choix de l'isolation de ces bâtiments historiques. Ainsi, le modèle TEB peut contribuer au sein d'outils d'aide à la décision, lors de l'étude de la rénovation des centres-villes anciens.

### Référence :

Ruiz Margot, Valery Masson, Marion Bonhomme, and Stephane Ginestet. Numerical method for solving coupled heat and mass transfer through walls for future integration into an urban climate model. *Building and Environment*, 110028, 2023. <https://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110028>

6

---

## Simulations d'ensemble à l'échelle hectométrique sur un cas d'étude pour étudier l'influence de l'environnement urbain parisien sur la convection

Arnaud Forster

En météorologie, le milieu urbain peut avoir différents effets sur l'atmosphère (îlot de chaleur urbain, ralentissement des vents, modification des concentrations en aérosols). Un impact moins connu concerne l'effet de celui-ci sur la convection atmosphérique et la quantité de pluie qui tombe au-dessus et autour de la ville. Plusieurs études basées sur les observations ont montré que la région parisienne semble favoriser l'augmentation des précipitations et des impacts de foudre au-dessus et sous le vent de la capitale.

Pour tenter de vérifier ces affirmations, un ensemble de simulations numériques à résolution horizontale de 300 m est mis

en place avec le modèle atmosphérique Méso-NH sur un cas d'étude de convection diurne, le 7 mai 2022. Les simulations numériques permettent d'évaluer l'impact de l'environnement urbain sur l'atmosphère et sur la convection à travers des tests de sensibilité avec (URB) et sans (NOURB) la représentation des villes dans le modèle. En parallèle, l'approche ensembliste permet de réaliser un grand nombre de simulations et d'en tirer des conclusions sur les résultats avec un certain degré de confiance.

L'étude de cas, montre effectivement un impact de la région parisienne sur l'initiation de la convection avec comme conséquence

une augmentation des précipitations au-dessus de la ville et légèrement en aval. L'analyse des processus montre un effet important de la ville sur les flux près de la surface et sur les vitesses verticales permettant ainsi de déclencher plus facilement la convection lorsque la ville est représentée dans le modèle.

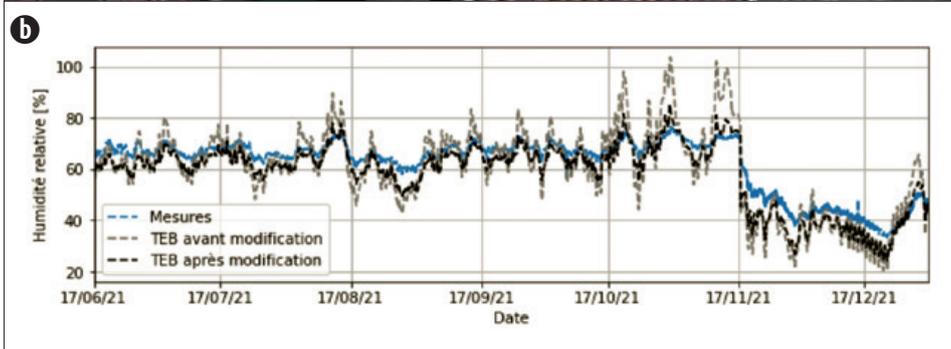
Par la suite de nouveaux cas d'études seront étudiés avec la même approche afin d'évaluer l'effet de la région urbanisée parisienne sur d'autres situations convectives et de comprendre de manière plus globale les processus en jeu.

### Référence :

Forster, A., Augros, C., & Masson, V., Urban influence on convective precipitation in the Paris region: Hectometric ensemble simulations in a case study, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, <https://doi.org/10.1002/qj.4749>, 2024

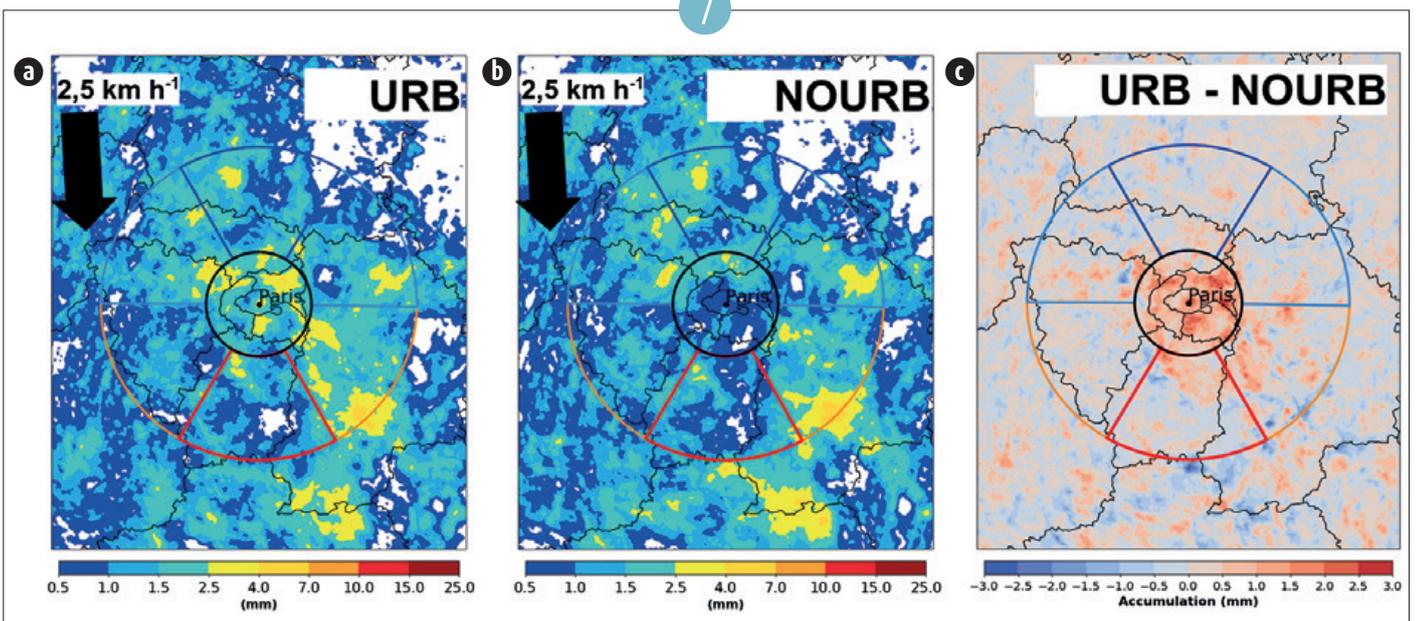
7

6



(a) Ilot Chico Mendes incluant les bâtiments instrumentés (Cahors)  
 (b) Evolution temporelle de l'humidité relative mesurée dans la pièce étudiée (en bleu), simulée par TEB avant modification (en gris) et par TEB après modification (c'est-à-dire en incluant les transferts hydriques à travers les murs) (en noir), du 17/06/2021 au 01/01/2022

7



Précipitations accumulées sur 6 heures pour l'ensemble URB (a), NOURB (b) et la différence entre URB et NOURB (c). Les secteurs amont (en bleu), au-dessus (en noir) et aval sont visibles en arrière plan et dépendent de la direction du vent calculée entre 1 500 et 3 000 m dans le grand cercle.

---

## Sensibilité de l'humidité troposphérique sur le développement de la convection profonde

Malo Sellier, Didier Ricard, Christine Lac

Des simulations à haute résolution (50 m) sont réalisées avec le modèle de recherche Méso-NH pour évaluer l'impact de l'humidité de la troposphère libre sur le développement des nuages convectifs.

Ces simulations idéalisées sont initialisées avec des profils verticaux de température et d'humidité représentant une atmosphère instable. Une étude de sensibilité est réalisée en faisant varier ces profils d'humidité relative pour atteindre entre 5 et 45 % à la tropopause (par pas de 5 %). Il est important de noter qu'en basses couches l'instabilité est la même pour toutes les simulations, les nuages se déclenchent donc de façon similaire mais sont ensuite influencés lors

de leur phase de développement par des environnements troposphériques plus ou moins humides.

Ainsi, avec ce jeu de 9 simulations, on constate des différences marquées pour la dynamique des nuages et leurs échanges avec leur environnement. Plus l'environnement est humide, plus les vitesses verticales sont fortes dans la moyenne troposphère au sein des nuages convectifs (Figure a). L'inverse est constaté dans la haute troposphère, les vitesses les plus intenses se produisant pour les environnements les plus secs. Ainsi, le sommet des nuages s'élève plus rapidement lorsque la troposphère est plus humide (Figure b), consécutivement à un

flux de masse convectif plus puissant. Au contraire, une inversion de flottabilité plus marquée freine l'ascension des nuages pour des environnements plus secs. Dans ces cas, la turbulence est aussi plus forte dans la haute troposphère, ce qui suggère des échanges plus intenses entre les nuages et leur environnement.

Ces études sur le développement des nuages convectifs vont se poursuivre en s'intéressant à l'impact d'intrusions sèches à certaines altitudes et au cisaillement de vent.

8

---

## Le rôle des ondes équatoriales dans la genèse du cyclone tropical Seroja

Philippe Peyrillé

Au printemps 2021, le cyclone tropical Seroja s'est formé près de l'équateur, entraînant des dégâts et pertes humaines élevés en Indonésie et au Timor oriental. Sa genèse quasi-équatoriale inhabituelle a été étudiée à partir d'observations (satellite GPM) et réanalyses (ERA5) en décomposant la circulation atmosphérique en contributions provenant de systèmes météorologiques de grande échelle, appelés ondes équatoriales. L'étude montre que la cyclogenèse était associée à des conditions « idéales », pilotées par la conjonction simultanée de plusieurs ondes équatoriales d'une intensité rare, observée en moyenne une fois tous les 10 ans sur la région.

La figure 1 représente la chronologie de la cyclogenèse avec le passage de chacune des ondes équatoriales impliquées. Le 28 mars 2021 correspond à un stade « PRE-SEROJA » : un intense système orageux associé à un pic de convection orageuse (CONV. BURST) se développe au-dessus des eaux indonésiennes anormalement chaudes (SST MAX). Ce système se déplace vers l'ouest et arrive sur le Timor le 2 avril au moment où trois ondes équatoriales se croisent : une onde de Rossby équatoriale (ER) se déplaçant lentement vers l'ouest ; et deux autres ondes se propageant vers l'est qui favorisent une forte intensification du système orageux (Onde de Kelvin, KW#1, et

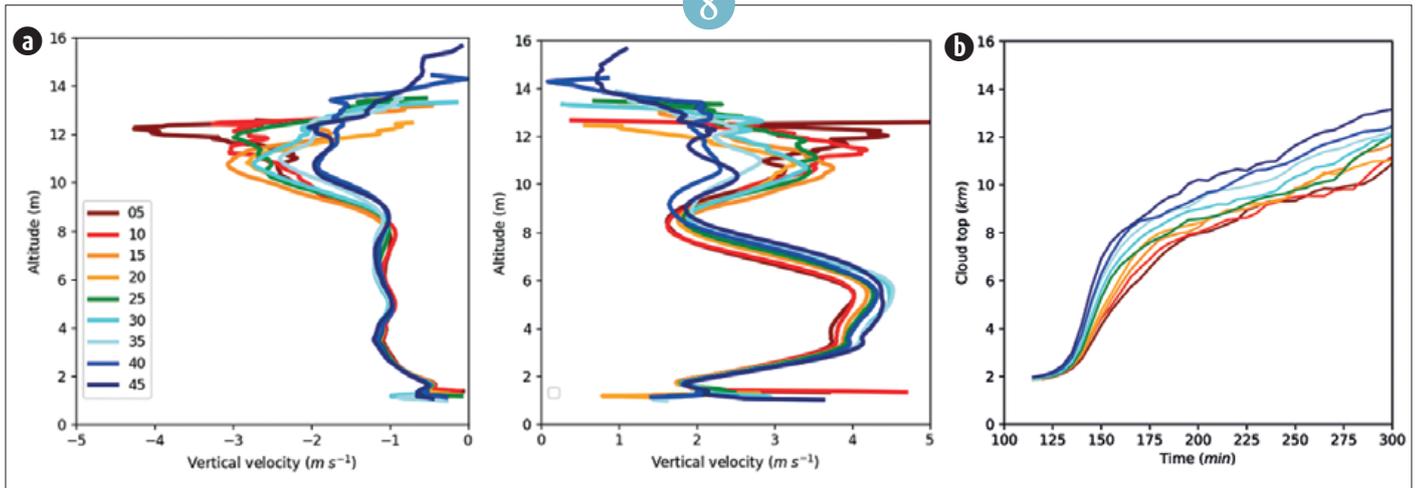
l'Oscillation de Madden-Julian, MJO). Dans la nuit du 3 au 4 avril, la tempête tropicale passe au stade de cyclone tropical suite aux effets combinés d'une deuxième onde de Kelvin (KW#2) et de l'onde ER déjà sur place. Les résultats de l'étude fournissent des outils pour une meilleure prévision des cyclones tropicaux passant par la surveillance des ondes tropicales.

### Référence :

Latos, B., Peyrillé, P., Lefort, T. et al. The role of tropical waves in the genesis of Tropical Cyclone Seroja in the Maritime Continent. *Nat. Commun.* 14, 856, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36498-w>, 2023.

9

8



(a) Profils verticaux des vitesses verticales moyennes subsidentes (à gauche) et ascendantes (à droite) dans les nuages pour les 9 simulations avec l'humidité relative à la tropopause variant de 5 à 45 % (lignes en couleur).  
 (b) Evolution temporelle de l'altitude moyenne du sommet des nuages pour les 9 simulations dont l'humidité relative varie entre 5 et 45 % (lignes en couleur).

9

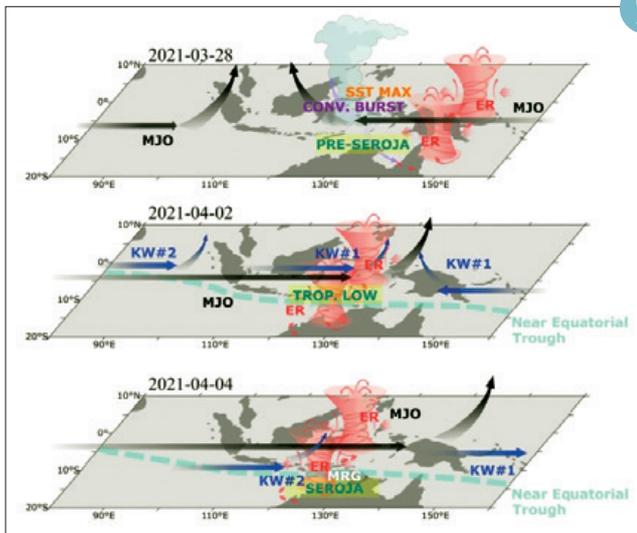


Diagramme conceptuel des moteurs météorologiques amenant à la genèse du cyclone tropical Seroja à trois instants décisifs de la genèse.  
 Haut : stade Pre Seroja, naissance du système orageux (CONV. BURST).  
 Milieu : Stade de tempête tropicale (TROP. LOW) et formation d'un système dépressionnaire à fort tourbillon.  
 Bas : Stade de cyclone tropical (SEROJA).  
 Les flèches et couleurs représentent les ondes équatoriales impliquées : deux ondes de Kelvin successives (bleu, KW#1 et KW#2), l'Oscillation de Madden-Julian (noir, MJO) ont modulé les vents le long de l'équateur, et une onde de Rossby équatoriale (rouge, ER) renforce la circulation cyclonique à son passage.

# Climat et prévision saisonnière

Au cours de l'année 2023, la température moyenne de la planète a dépassé de 1,45 °C le niveau préindustriel, battant largement le précédent record qui datait de 2016. Cette valeur proche de l'objectif de 1,5 °C de l'accord de Paris a été naturellement très commentée. Toutefois, dans le cadre des négociations climatiques, le réchauffement doit être estimé sur une période d'au moins 20 ans, et non sur une année, dont la température peut être influencée par des variations climatiques naturelles, dans le sens d'un réchauffement temporaire comme lors d'un phénomène El Niño, ou d'un refroidissement lors d'un événement La Niña ou d'une éruption volcanique très intense. En 2023, c'est l'effet d'un El Niño d'intensité modérée conjugué à la tendance au réchauffement anthropique de long terme qui explique le nouveau record. Mais certains faits marquants observés en 2023 sont pour l'instant difficiles à interpréter, comme les températures de surface de la mer particulièrement élevées en Atlantique, notamment dans sa partie nord-est, ou l'englacement largement inférieur au record précédent sur les mers australes de juin à novembre. De plus, le rythme du réchauffement mondial sur les 15 dernières années (de l'ordre de 0,3 °C par décennie, mais avec des incertitudes compte-tenu de la courte période considérée) semble plus rapide que sur les quatre décennies précédentes (environ 0,18 °C par décennie). Cela pose la question des contributions respectives de la variabilité spontanée du climat et de la variabilité forcée liées aux émissions humaines de gaz à effet de serre, aux aérosols et aux changements d'usages de terres. Au début des années 2010, les nombreuses études consacrées au ralentissement du réchauffement observé sur la période 1998-2013 et à ses mécanismes avaient notamment permis de conclure que ce « hiatus » relevait de la variabilité spontanée du climat. En revanche, plusieurs éléments suggèrent qu'une partie de l'accélération du réchauffement depuis 2009 pourrait être forcée. En effet, la charge atmosphérique en aérosols d'origine humaine, dont la contribution d'ensemble est de refroidir le climat, a diminué au cours de ce siècle, avec pour effet d'augmenter le déséquilibre énergétique au sommet de l'atmosphère et donc la quantité de chaleur stockée par l'ensemble du système climatique. La charge en aérosols d'origine humaine va probablement continuer à diminuer au cours de la décennie à venir, et on peut donc s'attendre à ce que dans le même temps le réchauffement planétaire se poursuive à un rythme élevé, à moins d'une compensation partielle par un phénomène de variabilité climatique naturelle.



## Etude et modélisation du climat

### Un avenir plus sec que prévu, confirmé par les observations d'humidité relative à 2 m

Hervé Douville

Les conséquences du changement climatique sur les écosystèmes terrestres et les sociétés humaines se manifestent en particulier par des modifications du cycle de l'eau<sup>1,2</sup>. L'assèchement potentiel des continents sous l'effet d'une évaporation croissante (incluant la transpiration des végétaux) représente ainsi une menace de premier ordre. Dans les projections issues des deux dernières générations (CMIP5 et CMIP6) de modèles de climat, l'assèchement est très variable d'un modèle à l'autre, mais d'autant plus flagrant qu'on le mesure en surface.

Une étude récente publiée dans la revue *Science Advances* (Douville et Willett, 2023)

analyse l'assèchement récent des continents sur la base de l'humidité relative de l'air en surface. Elle confirme un résultat déjà étayé concernant les modèles CMIP5, à savoir une sous-estimation générale des tendances observées à l'échelle globale, notamment dans les régions déjà arides sur tout ou partie de l'année<sup>4</sup>. Ce constat s'appuie sur des observations in situ (HadISDH) disponibles depuis 1973, a priori plus fiables que les reconstructions d'humidité des sols.

L'application d'une méthode statistique Bayésienne (Ribes et al, 2021) montre que l'assèchement est principalement provoqué

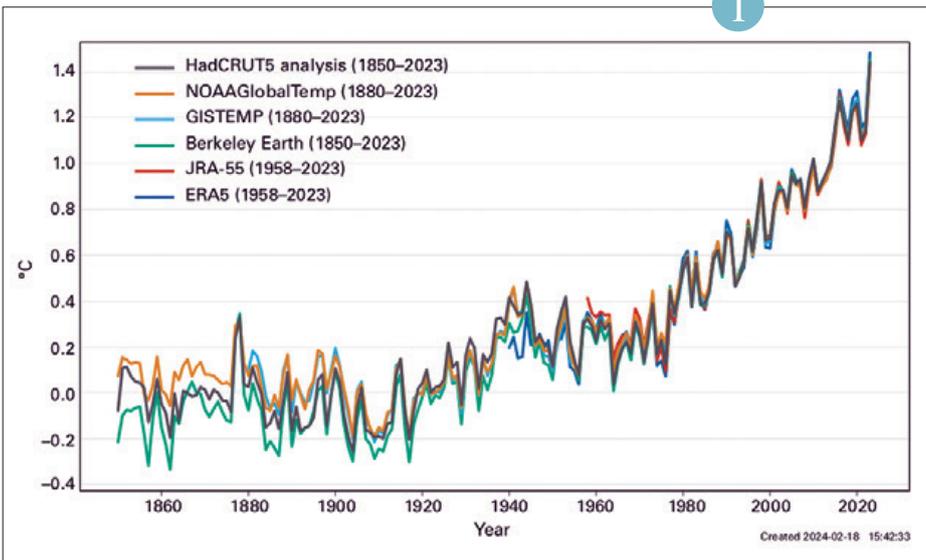
par les émissions anthropiques de gaz à effet de serre, mais n'a émergé que récemment en raison des effets antagonistes de la pollution atmosphérique particulière. La méthode permet aussi de contraindre les projections conditionnellement à l'assèchement observé et révèle que les modèles les plus crédibles sont ceux qui montrent l'assèchement le plus fort. Ces résultats ont des implications importantes en termes d'adaptation mais aussi pour le potentiel d'atténuation lié au stock de carbone continental dans des régions où la limitation en eau devient une menace croissante pour la végétation (mortalité des arbres et feux de forêt).

#### Référence :

1. Douville, H., et al., 2021: Water Cycle Changes. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1055-1210, doi:10.1017/9781009157896.010
2. Douville H., et al. (2022) Water remains a blind spot in climate change policies. *PLOS Water*, 1(12), e0000058, <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000058>
3. Douville H. and K. Willett (2023) A drier than expected future, supported by near-surface relative humidity observations. *Sc. Adv.*, doi:10.1126/sciadv.ade6253
4. Douville H., M. Plazzotta (2017) Midlatitude summer drying: An underestimated threat in CMIP5 models? *Geophys. Res. Lett.*, 44, 9967-9975, doi:10.1002/2017GL075353
5. Ribes A., S. Qasmi, N. Gillett (2021) Making climate projections conditional on historical observations, *Sc. Adv.*, 7, eabc0671

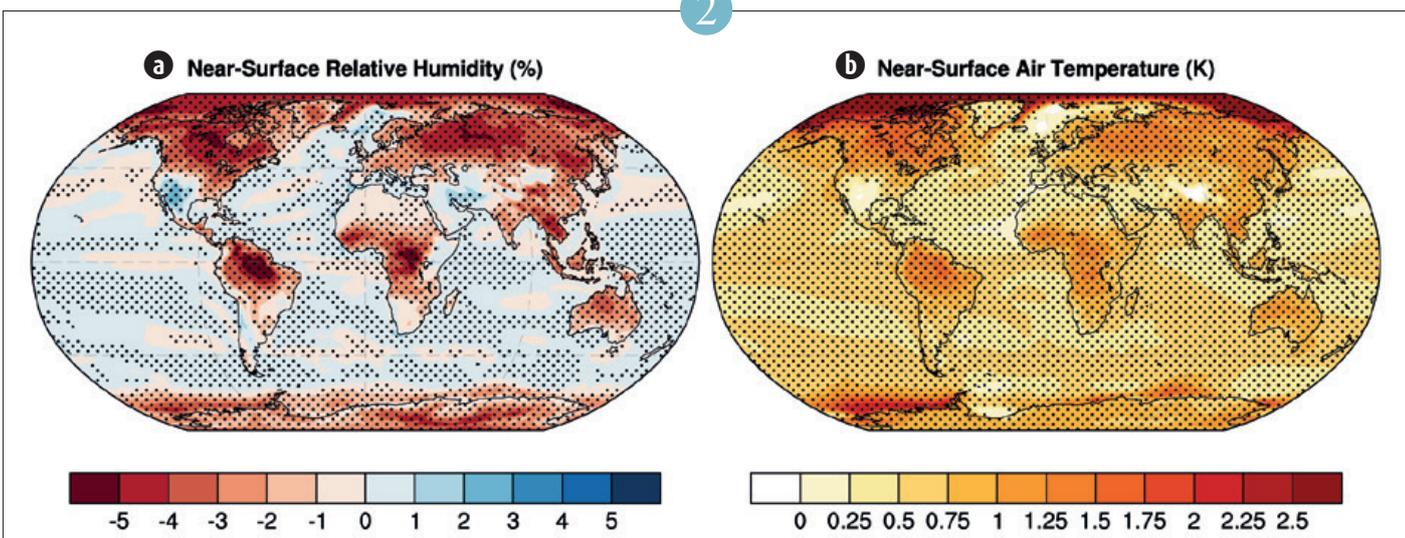


1



Écart de la température moyenne annuelle mondiale par rapport à 1850-1900, selon six jeux de données. Source : State of the Global Climate 2023 © Organisation Météorologique Mondiale, 2024

2



Différence sur les anomalies moyennes (climatologie 2081-2100 moins climatologie 1995-2014) entre un sous-ensemble de dix modèles CMIP6 montrant le plus fort assèchement continental moyen global dans le scénario SSP5-8.5 et l'ensemble des modèles CMIP6 disponibles pour le même scénario : a) humidité relative proche de la surface (%); b) température proche de la surface (K). Les pointillés indiquent les régions où la différence est significative au niveau de 5 %.

---

## Prévision saisonnière

### Prévision saisonnière de l'indice de surface foliaire : une étude de faisabilité

Constantin Ardilouze

L'Indice de Surface Foliaire est une mesure utilisée en écologie et en agronomie pour quantifier la quantité de feuillage végétal présente dans une zone donnée. Il est généralement exprimé comme le rapport entre la surface totale de feuillage par unité de surface au sol. L'indice de surface foliaire peut varier considérablement en fonction du type de végétation, de la saison et des conditions environnementales. Il joue un rôle clé dans l'amplitude des échanges d'eau et d'énergie à l'interface surface-atmosphère. Prévoir les anomalies d'indice de surface foliaire à l'horizon saisonnier ouvre des perspectives en matière de services climatiques pour les secteurs agricoles et de gestion forestière, voire pour la gestion des ressources en eau.

Des re-prévisions saisonnières ont été effectuées sur les 25 étés boréaux (Juin-Juillet-Août) de la période 1993-2017, à

l'aide du modèle couplé de climat CNRM-CM6-1 initialisé au 1<sup>er</sup> Mai, pour lequel on a activé le schéma de végétation interactive. Cela signifie que l'indice de surface foliaire évolue de façon pronostique, en fonction de l'assimilation de carbone par la photosynthèse et de la mortalité des feuilles, contrairement au modèle classique, pour lequel un indice de surface foliaire climatologique est prescrit à la fréquence décadaire à partir d'une base de données de paramètres de surface appelée Ecoclimap. Pour initialiser l'indice de surface foliaire et les autres variables d'état des surfaces continentales, on a procédé au préalable à une simulation longue du modèle de surface SURFEX seul, avec un forçage atmosphérique horaire issu de la réanalyse ERA5. Cette simulation fournit une série temporelle d'indice de surface foliaire (SfxLai) qui nous sert de vérification des prévisions, dans un

cadre de « modèle parfait ». On remarque une assez bonne prévisibilité potentielle de l'indice de surface foliaire sur la plupart des régions non-désertiques pour l'été boréal (a), ce qui est confirmé par la comparaison à un système de prévision fruste consistant en une simple persistance des anomalies initiales d'indice de surface foliaire superposée à la climatologie Ecoclimap. Les différences de corrélation (b) confirment la plus-value de notre modèle dynamique pour prévoir l'indice foliaire, sur une grande partie des régions des moyennes latitudes.

3

---

### Initialisation de la composante glace de mer du futur système de prévision saisonnière de Météo-France

Fousiya T S, Jonathan Beuvier, Damien Specq  
et l'équipe CNRM/GMGEC/PASTEL

L'actuel système opérationnel de prévision saisonnière de Météo-France (Système 8) est en cours d'évolution vers la prochaine version (Système 9), avec un effort sur l'initialisation de ses composantes. Parmi celles-ci, la glace de mer nécessite une attention particulière. Afin d'obtenir des états initiaux de glace de mer cohérents avec le modèle de prévision, notre procédure consiste à réaliser une simulation préliminaire dans lequel les modèles d'océan et de glace de mer sont intégrés seuls, avec un forçage à la surface venant d'une réanalyse atmosphérique. Cependant, dans l'actuel Système 8 – basé sur le modèle d'océan NEMO 3.6 et le modèle de glace de mer GELATO – les états initiaux de glace de mer générés avec cette procédure

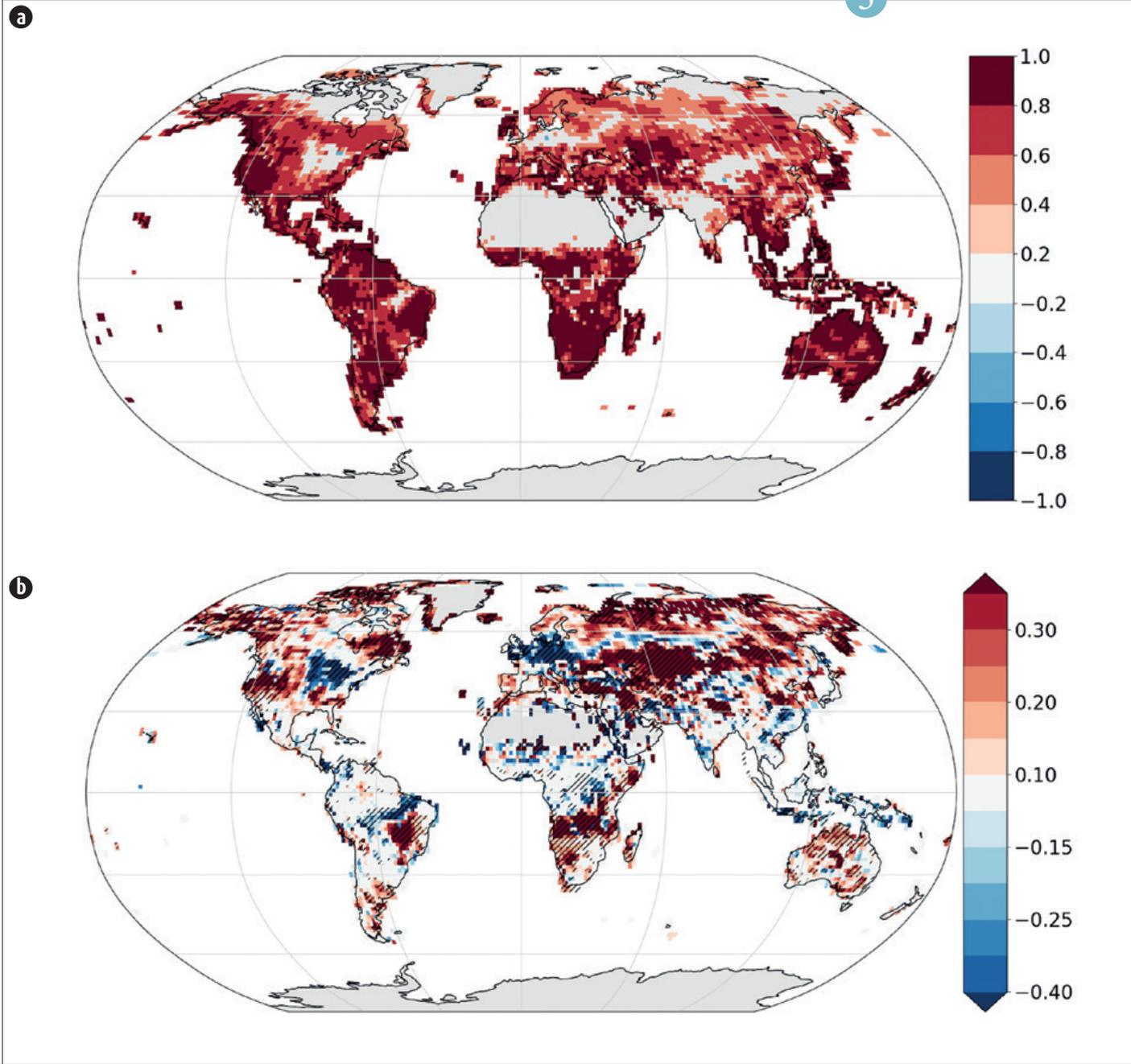
ne sont pas assez réalistes. La Figure montre l'épaisseur de glace de mer, moyennée sur la région arctique, dans les états initiaux du Système 8 (NEMO3.6-GELATO, courbe orange pointillée). Comparée aux données de référence du Pan-Arctic Ice Ocean Modeling and Assimilation System (PIOMAS, courbe bleue continue), la quantité de glace de mer est sous-estimée.

Pour le nouveau Système 9, nous envisageons de passer à une nouvelle version du modèle océanique (NEMO 4.2), intégrant une nouvelle composante glace de mer (SI<sup>3</sup>). Ces nouvelles versions ont également été testées en mode forcées par l'atmosphère, et l'épaisseur de glace de mer dans les nouveaux états initiaux est représentée

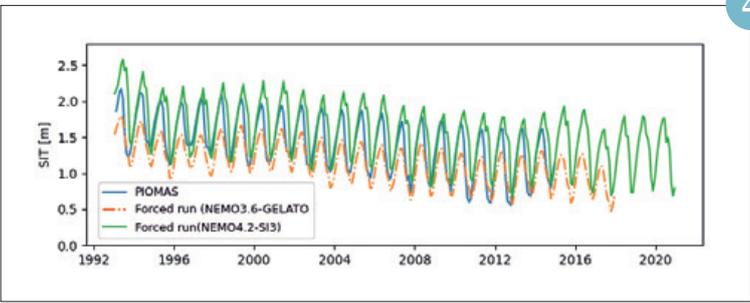
par la courbe verte continue (NEMO4.2-SI). Les résultats sont encourageants, la représentation des variables de glace de mer dans l'Arctique est améliorée par rapport à l'ancienne version, *i.e.* la courbe verte est plus proche de la courbe bleue de référence que ne l'est la courbe orange.

Ces résultats incitent notre équipe à intégrer les modèles NEMO4.2 et SI<sup>3</sup> dans le Système 9. La même procédure d'initialisation que précédemment, mais utilisant ces nouveaux modèles, fournira alors des états initiaux de glace de mer plus proches de ceux observés.

4



(a) Corrélation d'anomalies d'Indice de Surface Foliaire pour l'été boréal entre la re-prévision et la référence *SfxLai*. Les corrélations non significatives au niveau de confiance de 95 % ont été masquées.  
 (b) Différence de corrélation d'anomalies avec une prévision basée sur la persistance. Les hachures indiquent des différences significatives (test de Fisher au niveau de confiance de 95 %).



Épaisseur de glace de mer en Arctique, dans PIOMAS (courbe bleue continue), dans le run forcé NEMO3.6-GELATO (courbe orange pointillée) et dans le run forcé NEMO4.2-SI (courbe verte continue).

---

# La construction de scénarios sans couture pour la prévision saisonnière hydrologique

Lauriane Batté

L'amélioration de l'anticipation des situations d'étiage est un enjeu majeur en France et en Europe dans un contexte récurrent de tension sur la ressource en eau. L'approche "sans couture", consiste à l'utilisation de séries continues de champs atmosphériques en forçage de modèles de surface et d'hydrologie en regroupant plusieurs échéances de prévisions. Elle présente un intérêt indéniable du fait de l'influence des premiers pas de temps de modélisation sur les tendances hydrologiques à plus long terme.

Dans le cadre du projet CIPRHES (<https://www6.inrae.fr/ciprhes/Le-projet>) deux approches ont été implémentées pour combiner la prévision d'ensemble à moyenne échéance du CEPMMT (EPS) et la prévision d'ensemble à échéance saisonnière de Météo-France (MF-Sys7

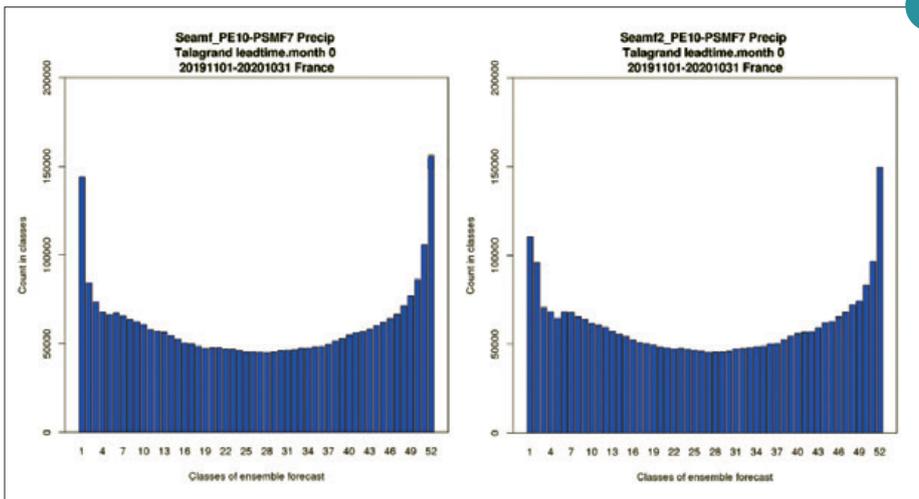
sur la période d'étude). La première, déjà employée en hydrologie (Wetterhall and Giuseppe, 2018), a consisté à concaténer aléatoirement les séries de chaque membre de l'EPS à un membre corrigé par calibration quantile-quantile de MF-Sys7. Elle induit parfois de fortes discontinuités au moment de la transition entre les jeux de données. Une seconde approche plus élaborée s'est appuyée sur la méthode appelée Ensemble Copula Coupling (ECC, Schefzik et al., 2013, Wilks, 2015). Elle raccorde les membres de l'EPS aux membres de MF-Sys7 de manière à mieux préserver les dépendances spatio-temporelles des variables, en conservant les rangs.

Les deux approches ont été évaluées en calculant des scores pour les précipitations sur la France. Si l'impact sur les scores est modeste, la méthode ECC permet d'améliorer

la dispersion d'ensemble : l'observation (la réanalyse SAFRAN) est plus souvent comprise dans la dispersion de l'ensemble prévu. La figure illustre ce résultat à l'aide de diagrammes de rang de Talagrand pour les précipitations moyennes du premier mois des prévisions sur une année entière de prévisions initialisées tous les jours.

L'évaluation sur des prévisions hydrologiques permettra d'approfondir les résultats obtenus sur les variables atmosphériques. Une mise en œuvre en temps réel est prévue dans les prochains mois.

4



Diagrammes de Talagrand pour les précipitations du premier mois de prévision pour des séries de prévisions initialisées du 1<sup>er</sup> novembre 2019 au 31 octobre 2020, avec deux approches de combinaison de l'EPS et de la prévision saisonnière au jour 10 : la concaténation à gauche, l'ECC à droite. Ces diagrammes sont des histogrammes des rangs des observations parmi les valeurs de la prévision, et une structure en U indique une sous-dispersion de l'ensemble.

# Composition atmosphérique (chimie et aérosols)

L’ozone a des effets contrastés selon le niveau de l’atmosphère où il se trouve. Il est considéré comme un polluant et dégrade la qualité de l’air lorsqu’il est en forte quantité dans les basses couches de l’atmosphère. Plus haut dans la troposphère, il participe à l’effet de serre et contribue au changement climatique, tandis que dans la stratosphère il constitue une couche protectrice filtrant les rayonnements ultra-violet nocifs. Au CNRM, les premières recherches sur l’ozone ont porté sur la dernière activité, cela dès les années 1980. Il s’agissait alors d’étudier l’évolution du trou d’ozone stratosphérique au-dessus des régions polaires et subpolaires, pour estimer à la fois les changements induits de rayonnements ultra-violet et les impacts climatiques liés aux couplages entre la chimie de l’ozone et la dynamique stratosphérique. A cette époque, un schéma simple de chimie de l’ozone avait été implémenté dans ARPEGE-Climat. Désormais, une chimie complexe, tri-dimensionnelle peut être activée dans le code, notamment au sein de CNRM-ESM. Une représentation similaire de la chimie de l’ozone stratosphérique est également présente dans MOCAGE, pour des études spécifiques de la colonne totale d’ozone aux échelles de temps climatiques mais aussi pour la prévision de la dynamique du trou d’ozone à l’échéance de quelques jours. Une nouvelle version améliorée de MOCAGE-CAMS à plus haute résolution verticale dans la stratosphère est d’ailleurs devenue opérationnelle fin novembre 2023 et produit notamment des prévisions de colonnes d’ozone pour le Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). Vers la fin des années 1990, un autre objectif majeur a consisté à mieux comprendre et modéliser les mécanismes gouvernant l’évolution de l’ozone troposphérique, notamment dans les basses couches lors des pics de pollution à l’ozone. Ces épisodes se produisent régulièrement lors des période de forte chaleur caractérisée par un fort ensoleillement et une grande stabilité atmosphérique. Ces conditions favorisent la production d’ozone, qui se forme à partir de réactions chimiques entre les oxydes d’azote (principalement issus des activités humaines) et les composés organiques volatils (dont 90 % sont des composés biogéniques), sous l’effet du rayonnement solaire. L’intégration progressive dans MOCAGE d’une meilleure représentation de la chimie de l’ozone dans les basses couches de l’atmosphère a permis d’améliorer les prévisions opérationnelles produites à la fois dans le cadre européen de CAMS et le cadre national Prév’Air. D’autres travaux de recherche récents permettront de futures versions de MOCAGE de mieux représenter l’ozone, notamment via l’assimilation de données de NO<sub>2</sub> dans le modèle, et une meilleure prise en compte de la formation des oxydes d’azote par les éclairs dans la troposphère libre, ou du rôle des gaz halogénés (émis en particulier lors des éruptions volcaniques) dans la chimie de l’ozone.

1

## Assimilation des colonnes troposphériques de NO<sub>2</sub> observées par TROPOMI sur l’Europe

Michaël Bacles

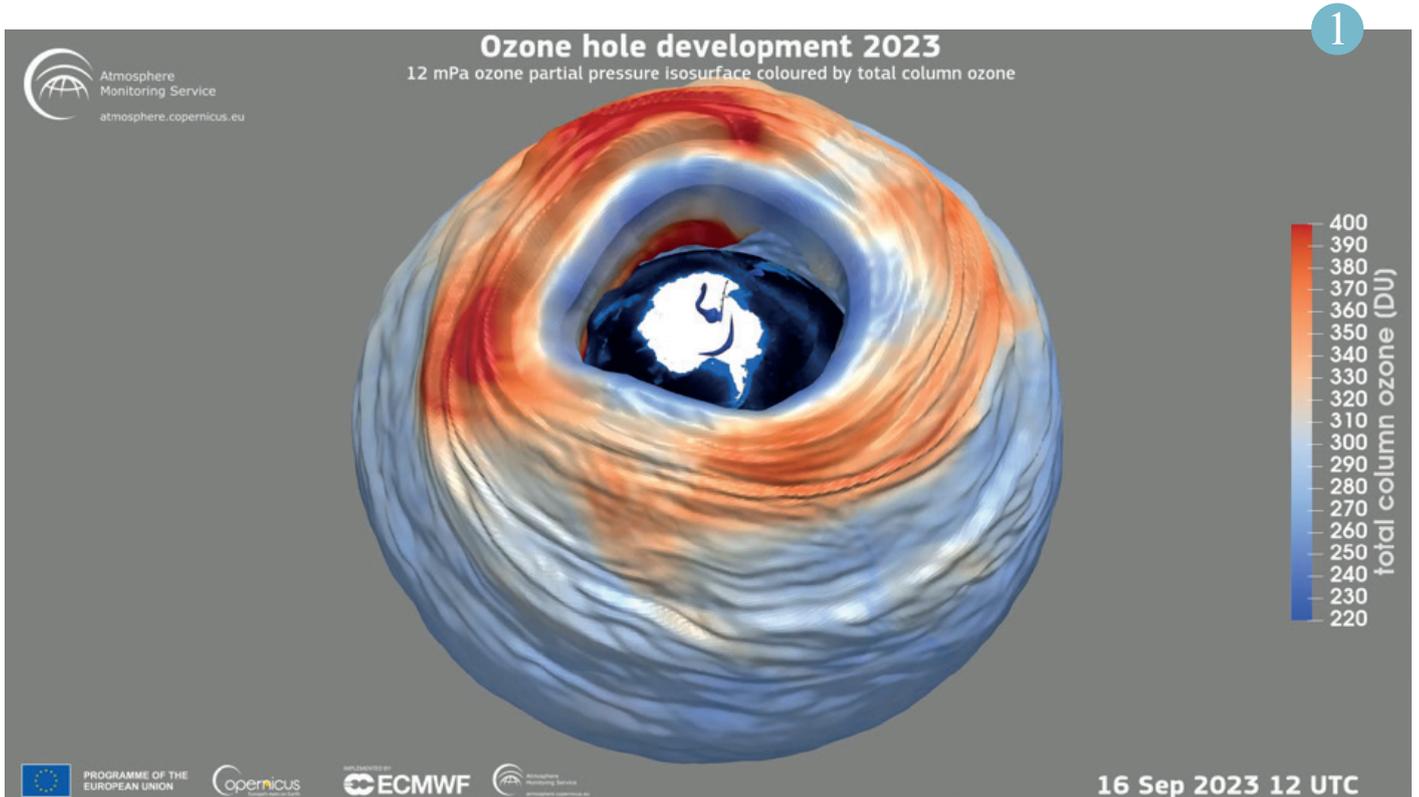
La présence du dioxyde d’azote (NO<sub>2</sub>) dans l’atmosphère est principalement due aux activités humaines. Ce gaz nocif peut provoquer des problèmes cardiovasculaires et respiratoires. Il favorise également dans certaines conditions la formation près de la surface d’ozone qui est nocif pour la faune et la flore. Il est donc important d’anticiper les épisodes de fortes concentration en NO<sub>2</sub>. Pour cela, les observations de colonnes troposphériques de NO<sub>2</sub> de l’instrument satellitaire TROPOMI et les observations de concentration en NO<sub>2</sub> à la surface du réseau de l’Agence Européenne de l’Environnement (AEE) sont assimilées dans le modèle de chimie transport MOCAGE entre le 1<sup>er</sup> mars et le 30 avril 2020. La localisation des stations AEE assimilées sont en rouge sur la figure a,

les stations en bleu sont uniquement utilisées pour valider le modèle. La figure B montre que sans assimilation (WoAssim) et avec l’assimilation de TROPOMI (TROPOMI\_assim), les concentrations en NO<sub>2</sub> à la surface sont faibles comparées aux observations. Toutefois, l’ajout des observations AEE dans l’assimilation (Joined\_assim sur la figure b) permet au modèle de se rapprocher des observations.

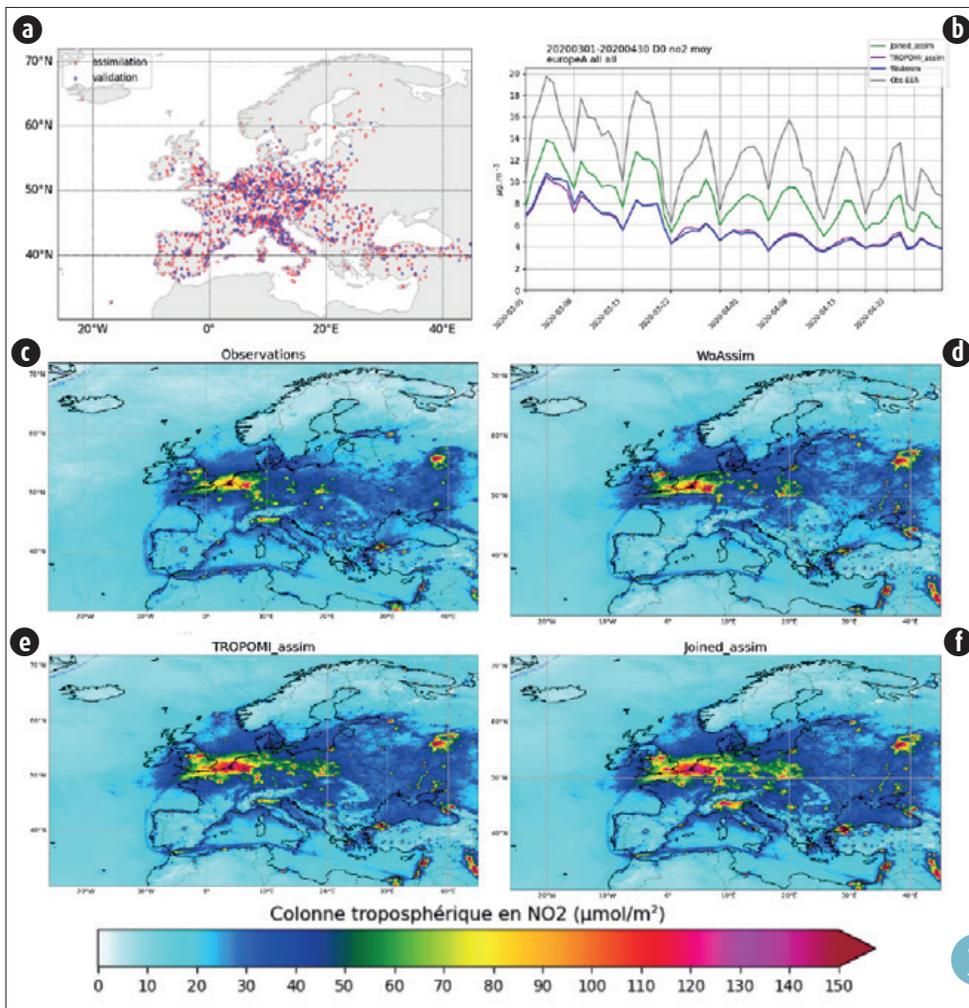
Les figures c à f montrent des colonnes troposphériques de NO<sub>2</sub> observées par TROPOMI et simulées par MOCAGE. Sans assimilation (figure d), le modèle et les observations (figure c) sont cohérentes sauf dans la plaine du Pô où les colonnes troposphériques en NO<sub>2</sub> sont sous-estimées. L’assimilation de TROPOMI (figure e)

améliore la colonne troposphérique modélisée dans cette région, mais surestime les colonnes en NO<sub>2</sub>, en particulier sur le Benelux. L’assimilation conjointe (figure f) surestime les colonnes troposphériques dans les zones peuplées. Des améliorations possibles de l’assimilation sont identifiées, comme modifier la concentration en NO<sub>2</sub> dans la couche limite grâce aux observations AEE puis de corriger la concentration en NO<sub>2</sub> dans la troposphère libre grâce à l’assimilation de TROPOMI.

2



Le maximum annuel de la surfacédu trou d’ozone antarctique (défini par la région au sud de 60 °S où la colonne totale d’ozone est inférieure à 220 unités Dobson) pour 2023 a été atteint le 16/09 avec 26,15 millions de km<sup>2</sup>. Source : CAMS, <https://atmosphere.copernicus.eu/monitoring-ozone-layer>.



La figure a montre la localisation des instruments du réseau AEE. La figure b montre les moyennes quotidiennes de la concentration en NO<sub>2</sub> observées à la surface par le réseau AEE et simulées par MOCAGE entre le 1<sup>er</sup> mars et le 30 avril 2020. Moyennes des colonnes troposphériques en NO<sub>2</sub> observées par TROPOMI (figure c) et modélisées sans assimilation (figure d), en assimilation des observations de TROPOMI (figure e) et en assimilant les observations AEE et TROPOMI (figure f). Ces moyennes ont été calculées pour la période allant du 1<sup>er</sup> mars au 30 avril 2020.

---

## Modélisation régionale de la chimie des halogènes dans le panache volcanique de l'éruption de l'Etna de Noël 2018

Herizo Narivelo, Virginie Marécal

Parmi les nombreuses sources de gaz et d'aérosols atmosphériques, les volcans présentent un intérêt tout particulier en raison des fortes quantités émises d'espèces variées, dont des halogènes.

Dans cette étude réalisée dans le cadre du projet ANR VolcHalClim, le modèle de transport chimique MOCAGE est utilisé pour simuler l'éruption volcanique du Mont Etna du 25-30 décembre 2018 associée à de fortes émissions de bromure d'hydrogène (HBr). Cette simulation, en très bon accord avec les mesures satellitaires TROPOMI de colonnes troposphériques de SO<sub>2</sub> et d'oxyde de brome (BrO), montre que le

partitionnement des espèces de brome résultant du cycle de bromine-explosion est modulé par l'évolution temporelle des émissions pendant l'éruption, par le cycle diurne, par la météorologie et par la distance du panache à l'événement avec une diminution de la production de BrO et de la destruction d'ozone au fur et à mesure que le panache s'éloigne de l'événement. Des tests de sensibilité indiquent que la formation de BrO est très sensible à la composition des émissions avec en particulier une production plus importante en cas de fortes émissions volcaniques d'aérosols sulfatés. Enfin, ces simulations montrent

un impact régional à l'échelle du bassin méditerranéen de l'éruption volcanique sur la capacité oxydante de l'atmosphère avec une réduction de la charge en OH et ozone conduisant à une réduction de la charge en méthane.

Ces résultats motivent donc d'autres études afin de rendre compte de l'impact des halogènes émis par les volcans à l'échelle mondiale non seulement en termes de bilan des espèces halogénées, mais aussi en termes de modification de la composition atmosphérique dans la troposphère et la stratosphère.

### Référence :

Narivelo, H., Hamer, P. D., Marécal, V., Surl, L., Roberts, T., Pelletier, S., Josse, B., Guth, J., Bacles, M., Warnach, S., Wagner, T., Corradini, S., Salerno, G., and Guerrieri, L.: A regional modelling study of halogen chemistry within a volcanic plume of Mt Etna's Christmas 2018 eruption, *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 10533–10561, <https://doi.org/10.5194/acp-23-10533-2023>, 2023.

3

---

## Première quantification de l'incertitude affectant la concentration d'ozone de surface simulée en Europe à l'aide d'une approche d'ensemble

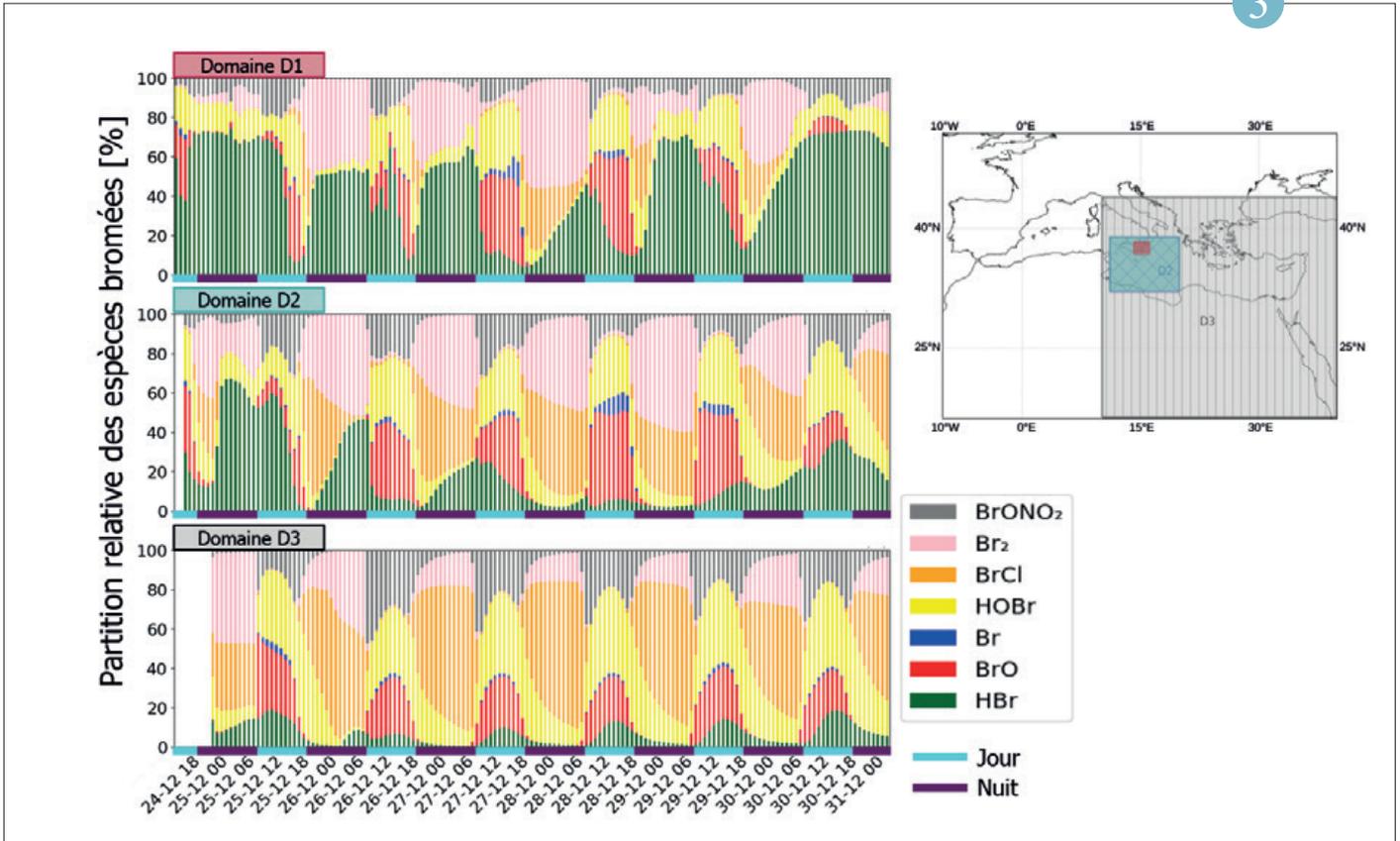
Mehdi Meziane, Sophie Pelletier

L'évaluation de la performance des modèles de prévision en chimie atmosphérique avant leur utilisation en mode opérationnel est une question cruciale qui doit être abordée par les modélisateurs non seulement en termes de valeur intrinsèque mais aussi en termes d'incertitude des champs chimiques simulés. Cette étude, menée dans le cadre du projet CAMS2\_35, se focalise sur la prévision de l'ozone de surface en été sur l'Europe en 2019. Pour des raisons de coûts numériques, seules trois sources a priori majeures d'incertitude sont prises en compte ici, à savoir la vitesse du dépôt sec, les émissions de CO, d'oxydes d'azote et de composés organiques volatils (COV), et le schéma chimique choisi. Les aspects numériques et

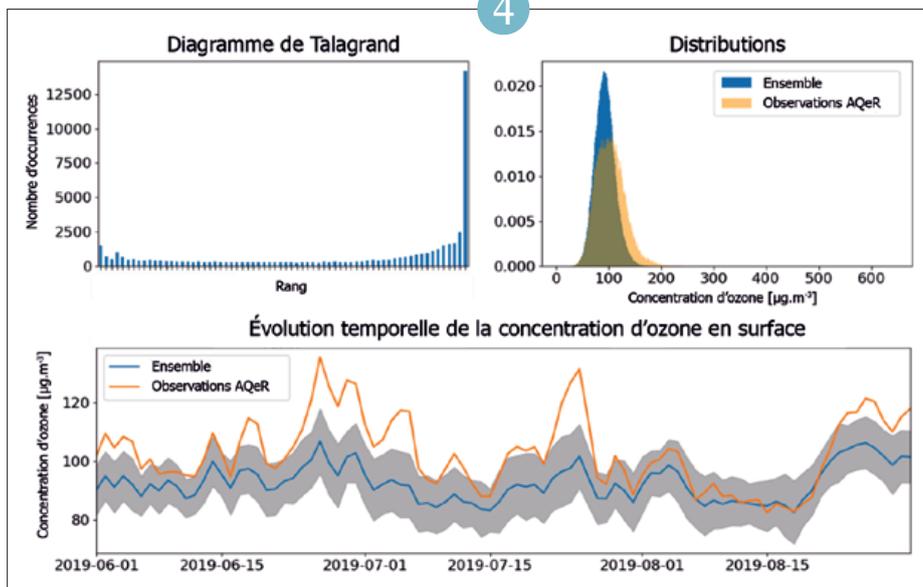
météorologiques n'entrent pas dans le cadre de cette étude. La dispersion des prévisions quotidiennes des valeurs moyennes et maximales de l'ozone de surface simulé, d'abord évaluée à l'aide de simulations individuelles, s'avère être principalement due à la vitesse du dépôt sec, les émissions et le schéma chimique ayant moins d'impact. Les diagnostics d'ensemble, incluant le calcul de l'incertitude et les diagrammes de Talagrand, mettent quant à eux en évidence l'incapacité de l'ensemble à représenter toute la gamme des valeurs observées. Enfin, la performance de l'ensemble évaluée à l'aide de scores statistiques s'avère assez bonne en dehors des événements de pollution.

L'incapacité de l'ensemble à prévoir les pics d'ozone de surface semble donc indiquer qu'au moins un processus impliqué dans la représentation des événements extrêmes fait encore défaut dans chacune des trois configurations chimiques de l'IFS ; il s'agit probablement du problème le plus prioritaire à tenter de résoudre dans un avenir proche.

4



Évolution temporelle de la répartition relative des concentrations simulées pour les espèces bromées à partir du 24 décembre à 12 UTC pour le domaine D1 (à proximité du volcan), à 14 UTC pour le domaine D2 (panache jeune), et à 20 UTC pour le domaine D3 (panache vieillissant).



Comportement de l'ensemble en termes de prévision du maximum journalier d'ozone de surface par rapport aux observations du réseau AQeR.  
 En haut à gauche : diagramme de Talagrand ;  
 en haut à droite : distribution de l'ensemble par rapport aux valeurs observées ;  
 en bas : série temporelle de la moyenne spatiale sur l'Europe des observations (ligne orange) et de la médiane des membres de l'ensemble calculée à chaque station (ligne bleue).  
 La zone grisée correspond à la valeur moyenne de l'ensemble +/- un demi écart-type et fournit donc une estimation de la dispersion de l'ensemble.

---

## Résultats du projet SEEDS

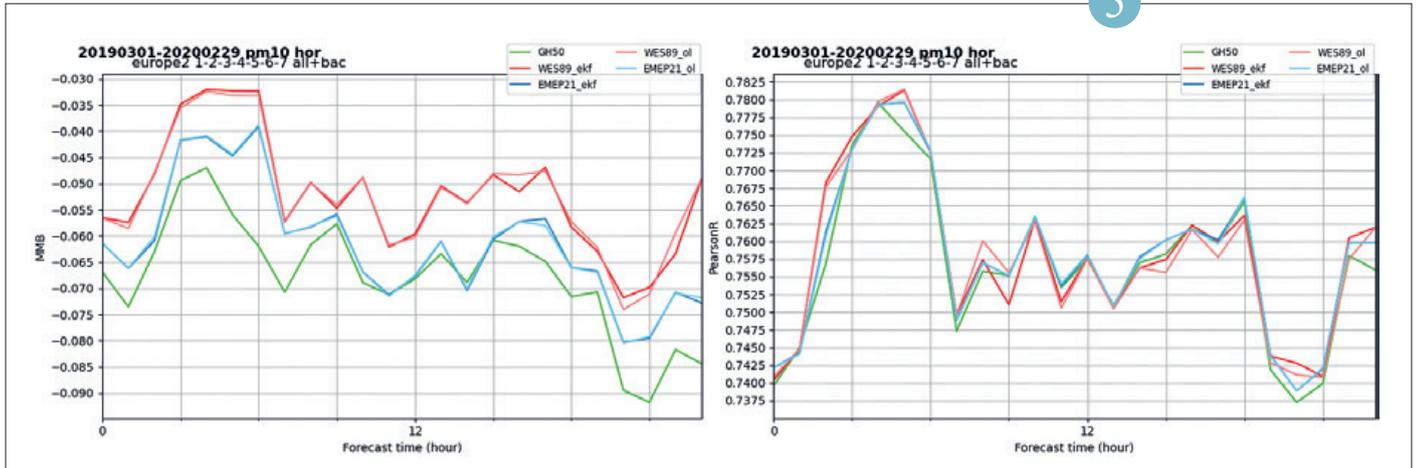
Joaquim Artéta

La prévision de la qualité de l'air est un enjeu sanitaire et sociétal important. Dans ce cadre, des prévisions opérationnelles sont réalisées quotidiennement à Météo-France sur l'Europe dans le cadre du programme européen Copernicus CAMS2\_40. L'année 2023 a vu la conclusion du projet Horizon 2020 SEEDS (Sentinel EO-based Emission and Deposition Service). Ce projet support au service européen CAMS2\_40 visait à tester de nouveaux produits d'émissions et de dépôt issus de mesures satellitaires et de modélisation, dans le but d'améliorer le service. Des émissions d'oxydes d'azote (NOx), d'ammoniac (NH3) et d'isoprène (C5H8) issues d'inversions de mesures satellite ont été réalisées par des instituts européens partenaires. Des émissions de composés

biogéniques volatiles (BVOC) et des vitesses de dépôts ont également été calculées avec le modèle de Météo-France SURFEX, couplé au modèle MEGAN de modélisation des flux biogéniques, et assimilant des observations de LAI et d'humidité du sol. Ces différents produits ont été testés sur une période de 18 mois allant de mars 2019 à août 2020 avec le modèle de chimie-transport de Météo-France MOCAGE en mode quasi opérationnel. Les résultats obtenus ont été confrontés aux mesures afin d'évaluer leur impact sur les prévisions quotidiennes. Malheureusement, ces nouveaux produits n'ont pas permis d'améliorer significativement les scores statistiques de la chaîne CAMS, à l'exception des nouvelles vitesses de dépôt sec. Deux paramétrisations (Wesely et Emep), avec et sans assimilation (EKF et OL) ont

été testées. Celles-ci ont permis de réduire fortement le biais des prévisions de PM10, notamment en version Wesely, passant d'un biais de  $-0,065$  à  $-0,050$  (Fig. 1). Les corrélations sont également légèrement plus élevées (Fig 2). Les résultats obtenus devront être confirmés par les 10 autres modèles participant au programme CAMS2\_40. Les produits d'émission, quant à eux, pourront être utilisés indirectement en améliorant le cadastre d'émissions utilisé et basé sur les rapports annuels d'émissions des pays.

5



▲ Biais et corrélation horaire moyennes sur le domaine de prévision de la simulation de référence (GH50), et les 4 simulations de test Wesely et EMEP, avec et sans assimilation de données de sol (respectivement WES89\_ekf, EMEP21\_ekf, WES89\_ol et EMEP21\_ol)

# Neige et montagne

Féerique, toujours changeante, parfois menaçante, souvent synonyme des joies d'enfant, matériau essentiel à la glisse, la neige est bien plus que cela. Elle est un pilier du système climatique terrestre, à la fois acteur et victime du réchauffement climatique. Elle est aussi un élément essentiel pour les ressources en eau en zone de montagne ainsi que pour les risques naturels, tels que les avalanches.

Météo-France, notamment le Centre d'Études de la Neige (CEN, CNRM, Météo-France – CNRS), conduit des recherches pour mieux comprendre l'évolution de la neige dans le passé et prévoir son évolution future à court et plus long terme ainsi que sa contribution aux risques naturels actuels et futurs.

En 2023, nous avons étudié en détail l'impact de la microstructure de la neige, c'est-à-dire l'arrangement tridimensionnel de la glace et de l'air sur les propriétés optiques de la neige, autrement dit, l'impact de la forme de la neige sur sa couleur. Nous avons aussi mené de nombreux travaux, basés à la fois sur la physique et les mathématiques appliquées, afin de développer un nouveau modèle de neige, offrant une représentation plus universelle des différents types de neige sur terre. Dans le cadre du développement d'un nouveau système de simulation de la neige en montagne à 250 m de résolution, nommé EDELWEISS, nous avons fortement progressé sur la représentation du transport de neige par le vent. Nous avons effectué l'évaluation détaillée du bilan d'énergie de surface tel que modélisé par Crocus, dans les zones de tourbières et les forêts boréales subarctiques.

Des travaux ont également été menés portant sur l'impact du changement climatique sur les conditions d'exploitation des domaines skiables en Europe, ainsi que l'effet hydrologique du damage et de la production de neige en aval des stations.

## La forme optique de la neige

Alvaro Robledano et Marie Dumont

Les modèles climatiques représentent de manière rudimentaire la neige comme un ensemble de particules de glace à la forme géométrique idéale, et notamment des sphères. Cette simplification n'est pas sans conséquence puisque le fait de changer la forme des grains de neige d'une sphère à d'autres formes non-sphériques impacte fortement les prévisions des températures futures. Cependant la neige, composée d'air et de glace, possède en fait une microstructure très complexe et variable, ce qui contrôle la manière dont les photons vont se propager à travers le manteau neigeux. Dans le cadre du projet ANR MiMESis-3D<sup>1</sup>, afin de mieux comprendre comment la lumière interagit

avec la microstructure de la neige, nous avons simulé avec précision la propagation de la lumière dans une collection d'images tridimensionnelles de la microstructure de différents types de neige, obtenues par tomographie à rayons X. Ces travaux ont révélé que, pour la lumière solaire, la neige n'est pas équivalente ni aux sphères ni aux autres formes simples couramment utilisées dans les modèles climatiques actuels (Figure a). La vraie influence de la microstructure, que nous avons nommée la forme optique de la neige, a été déduite, et des valeurs précises qui quantifient cette influence ont été calculés. Ces valeurs précises de la forme optique de la neige peuvent être intégrées

directement dans les modélisations, au détriment de l'hypothèse de la sphéricité.

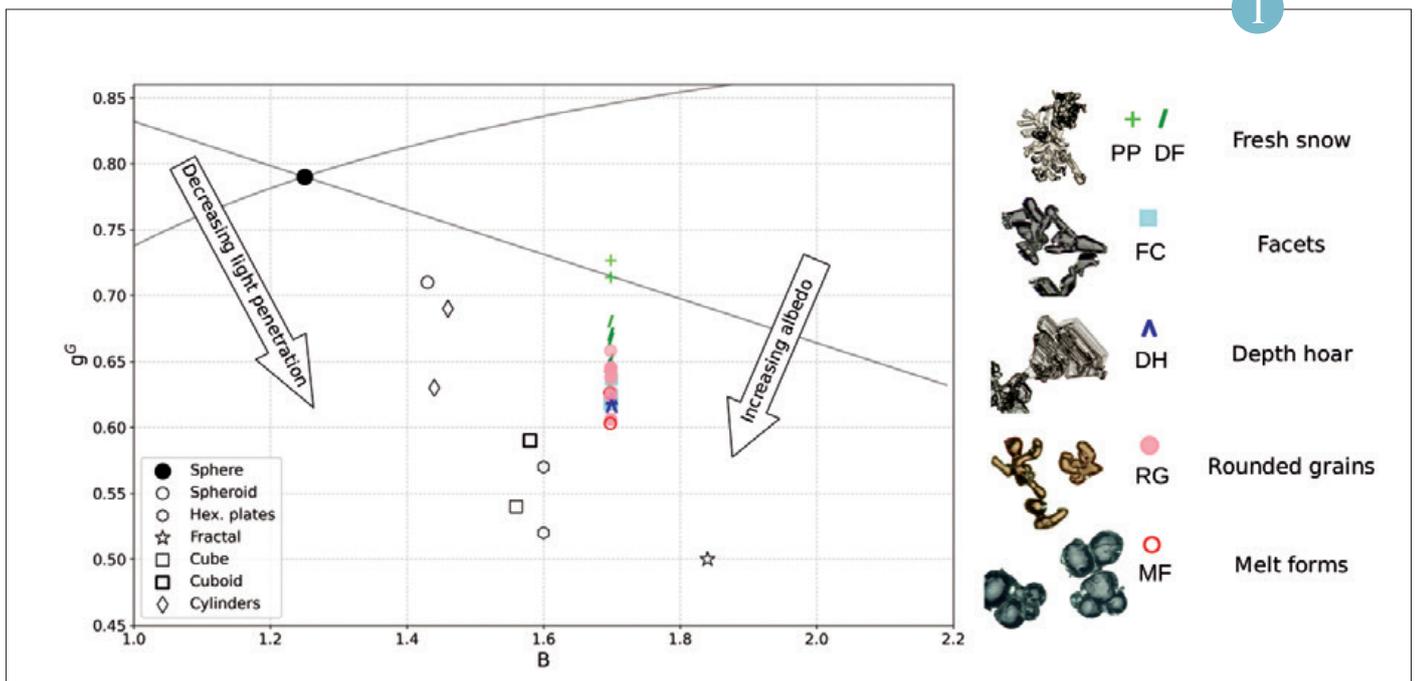
Ces travaux constituent un changement de paradigme dans la manière dont la neige est représentée dans les modèles optiques. Au-delà des modélisations climatiques, ces résultats peuvent être bénéfiques partout où l'optique de la neige est importante, de la photochimie de la neige aux algorithmes de télédétection.

1. *MiMESis-3D: Métamorphoses et propriétés de la neige à partir d'images 3D* (ANR-19-CE01-0009)

### Référence :

Robledano, A., Picard, G., Dumont, M., Flin, F., Arnaud, L. and Libois, Q.: Unraveling the optical shape of snow. *Nat Commun* 14, 3955 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39671-3>





Deux paramètres qui décrivent la forme optique de la neige.

La neige naturelle (en couleur) s'étale dans une région de la figure totalement différente à celle des formes géométriques idéales.

Cela entraîne des conséquences pour les propriétés optiques de la neige (albédo et pénétration de la lumière dans le manteau neigeux).

---

## Les écueils numériques de la simulation du manteau neigeux

K. Fourteau, J. Brondex et M. Dumont

La neige joue un rôle clé dans le système Terre, les modèles numériques représentant les manteaux neigeux jouent donc un rôle crucial, de la prédiction du risque d'avalanche à la projection climatique. Dans le cadre du projet ERC (European Research Council) IVORI, un modèle de neige de nouvelle génération est en cours de développement, avec pour ambition une meilleure représentation physique combinée à une implémentation numérique assurant stabilité, précision, et robustesse des simulations. En particulier, un travail récent sur la représentation des flux de vapeurs (Brondex et al., 2023), essentiels

pour comprendre les manteaux neigeux de la zone arctique, s'est intéressé aux problèmes pouvant apparaître dans le cas d'un modèle numérique non-optimal. Entre autres, l'article démontre que l'équation gouvernant l'évolution de la vapeur d'eau dans la neige doit être résolue de manière simultanée avec l'équation gouvernant l'évolution de la température, et ce sous-peine de voir le modèle numérique s'emballer de manière irréaliste comme illustré sur la figure. Nous avons aussi travaillé sur les interactions entre la surface et la partie interne du manteau neigeux et proposé une formulation et

des méthodes numériques permettant de résoudre le problème de manière robuste tout en conservant un temps de calcul convenable. Ces travaux, effectués en collaboration avec l'Institut suisse de recherche sur la neige et les avalanches (WSL/SLF) et le laboratoire Paul Painlevé de Lille, soulignent le fait que la justesse des équations physiques ne fait pas tout pour la validité d'un modèle numérique de neige, mais que les méthodes numériques jouent également un rôle clé. Ils montrent également qu'il est possible de proposer des implémentations numériques précises et stables pour un coût numérique raisonnable.

### Référence :

Brondex, J., Fourteau, K., Dumont, M., Hagenmuller, P., Calonne, N., Tuzet, F., and Löwe, H.: A finite-element framework to explore the numerical solution of the coupled problem of heat conduction, water vapor diffusion, and settlement in dry snow (IvoriFEM v0.1.0), *Geosci. Model Dev.*, 16, 7075–7106, <https://doi.org/10.5194/gmd-16-7075-2023>, 2023.

2

---

## Un nouveau modèle de transport de neige par le vent applicable sur de grands domaines aux échelles hectométriques

Matthieu Lafaysse, Matthieu Baron, Ange Haddjeri, et al.

Le CNRM développe un nouveau système de modélisation du manteau neigeux sur les massifs montagneux français à une résolution horizontale de 250 mètres. À cette échelle spatiale, le transport de neige par le vent affecte significativement la variabilité du manteau neigeux en haute montagne.

Aussi, un nouveau module de transport neige par le vent, SnowPappus, a été développé et couplé au modèle de manteau neigeux Crocus. Il simule sur chaque point de grille l'arrachement de la neige, les flux horizontaux de neige transportée et la sublimation associée en fonction des vitesses du vent et des propriétés de surface de la neige,

tout en conservant un coût numérique compatible avec de grands domaines et de longues périodes de simulation. Les quantités simulées de neige transportée sont du même ordre grandeur que celles observées sur l'Observatoire du Col du Lac Blanc (Alpe d'Huez, Isère). À plus grande échelle, les évaluations du modèle portent sur des variables indirectes observables par imagerie satellite, en collaboration avec le CESBIO, comme la présence de neige dérivée de l'imagerie optique Sentinel 2 ou les hauteurs de neige obtenues par stéréo-imagerie sur les satellites Pléiades. Si l'on peut identifier une amélioration de

la variabilité spatiale du manteau neigeux simulée à haute altitude et près des crêtes, les résultats obtenus sont affectés par la variabilité spatiale non résolue (Figure) et restent dépendants des fortes incertitudes dans l'estimation des précipitations en haute montagne.

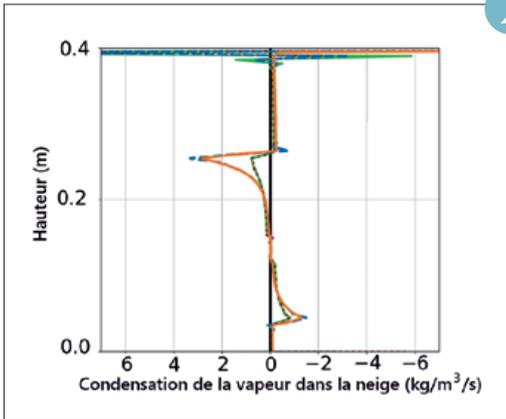
Aussi, les travaux en cours et à venir visent à assimiler davantage d'observations (radars et observations satellites) pour mieux contraindre les simulations. À terme ces simulations à haute résolution permettront de mieux renseigner sur l'état du manteau neigeux tous les principaux acteurs de la montagne hivernale.

### Référence :

Baron, M., Haddjeri, A., Lafaysse, M., Le Toumelin, L., Vionnet, V., and Fructus, M.: SnowPappus v1.0, a blowing-snow model for large-scale applications of the Crocus snow scheme, *Geosci. Model Dev.*, 17, 1297–1326, <https://doi.org/10.5194/gmd-17-1297-2024>, 2024.

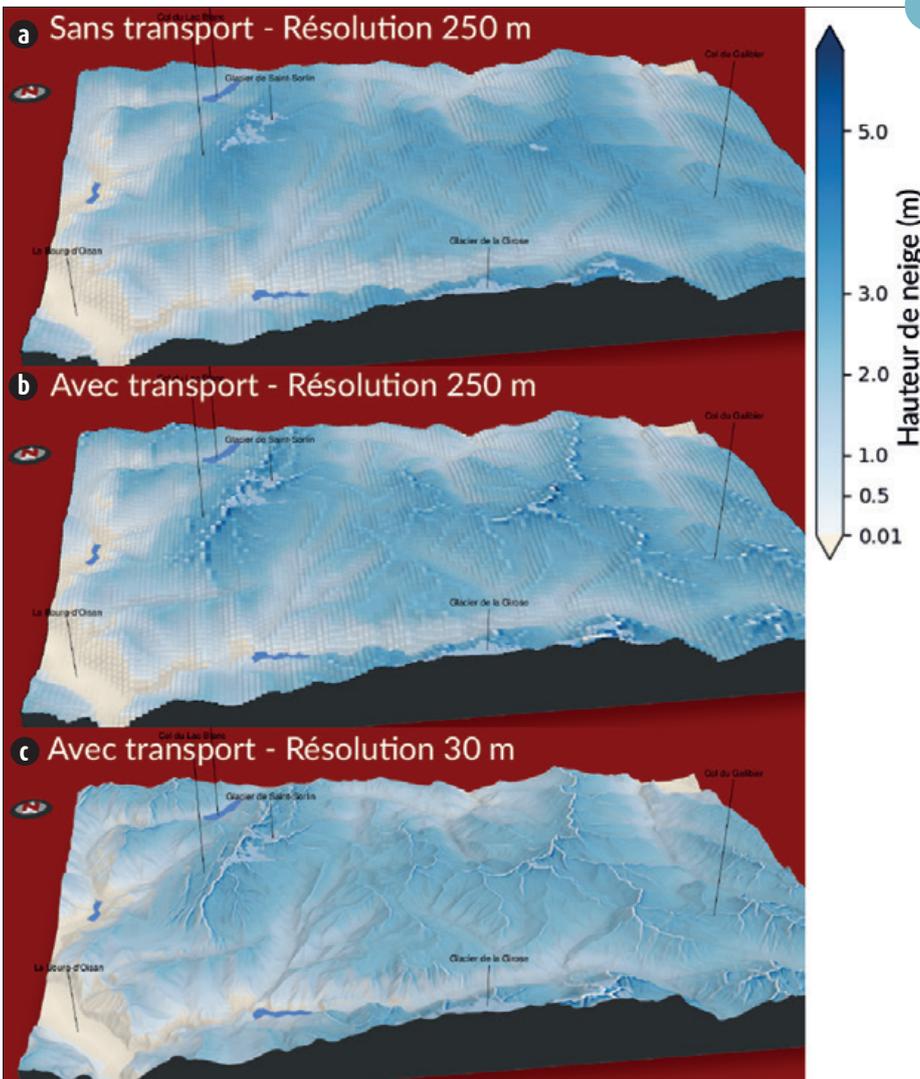
3

2



Des choix a priori anodins lors de la programmation d'un modèle de neige peuvent entraîner des phénomènes d'instabilité (oscillations des courbes verte, rouge et bleu), contraires à la physique. Un choix plus adapté (courbe orange) enlève ce problème d'oscillation numérique ; d'après Brondex et al., 2023.

3



Hauteur de neige simulée le 15/04/2018 sur le massif des Grandes Rousses (a) sans le module de transport SnowPappus ; (b) avec le module de transport SnowPappus à 250 m de résolution, (c) avec le module de transport SnowPappus à 30 m de résolution. Le modèle SnowPappus simule une érosion importante du manteau neigeux à proximité des crêtes et de fortes accumulations sous les vents dominants. La résolution de 250 mètres reste toutefois insuffisante pour représenter toutes les échelles spatiales de ce processus.

---

## Forces et faiblesses des modèles de surface du CNRM pour représenter le bilan d'énergie des tourbières et des forêts boréales et subarctiques

Matthieu Lafaysse, Jari-Pekka Nousu et al.

Le manteau neigeux modifie fortement le bilan d'énergie des surfaces continentales et sa modélisation est donc essentielle dans les projections climatiques ou les études hydrologiques, en particulier aux hautes latitudes.

Une collaboration entre le CNRM et l'Université d'Oulu (Finlande) a permis une évaluation inédite de tous les flux d'énergie simulés par différentes configurations du modèle de surface du CNRM (SURFEX) sur 4 observatoires en Finlande dont 2 tourbières ouvertes et 2 forêts d'épicéas. Ces observatoires ont la spécificité de disposer de séries de mesures des flux turbulents sur surface enneigée d'une qualité et d'une longueur

exceptionnelles. Sur les zones ouvertes, les résultats montrent que l'incertitude d'estimation des flux turbulents de chaleur sensible et de chaleur latente est plus grande en hiver qu'en été et qu'elle domine l'incertitude du bilan d'énergie à la surface de la neige (Figure). Les paramétrisations qui se rapprochent le mieux des observations ne sont pas celles qui sont appliquées dans la majorité des applications de SURFEX. Dans les forêts boréales, seule la version de SURFEX incluant une représentation explicite de la végétation haute (module MEB) permet de concilier des flux d'énergie réalistes entre la surface et l'atmosphère et un état de surface réaliste en termes de quantités de neige

au sol et de températures dans le sol. Les configurations sol-végétation « composites » qui étaient utilisées jusqu'à présent dans différentes applications du CNRM ne parviennent qu'à privilégier l'un ou l'autre des objectifs et sont excessivement sensibles à des paramétrisations très incertaines de la fraction de surface enneigée.

Ces résultats encouragent d'une part à corriger l'estimation des flux turbulents sur neige en conditions stables et d'autre part à généraliser la représentation explicite de la végétation haute. Ces recommandations seront bénéfiques à toutes les applications atmosphériques et hydrologiques de SURFEX en terrain enneigé.

### Référence :

Nousu, J.-P., Lafaysse, M., Mazzotti, G., Ala-aho, P., Marttila, H., Cluzet, B., Aurela, M., Lohila, A., Kolari, P., Boone, A., Fructus, M., and Launiainen, S.: Modeling snowpack dynamics and surface energy budget in boreal and subarctic peatlands and forests, *The Cryosphere*, 18, 231–263, <https://doi.org/10.5194/tc-18-231-2024>, 2024.

4

---

## Le changement climatique exacerbe les défis concernant l'enneigement et l'empreinte environnementale de l'industrie des sports d'hiver en Europe

Samuel Morin, Hugues François (INRAE), Raphaëlle Samacoïts

La réduction de l'enneigement sous l'effet du changement climatique perturbe les conditions d'exploitation des domaines skiables, qui recourent de façon croissante à la production de neige (également appelée neige de culture ou neige artificielle), présentée comme démarche d'adaptation pour fiabiliser l'enneigement actuel et futur. Toutefois, l'efficacité de la production de neige est très variable et cette pratique est controversée.

Une étude parue en 2023 dans *Nature Climate Change* (collaboration Météo-France, INRAE, Joanneum Research, Autriche) indique que le risque climatique sur l'enneigement des stations de sport d'hiver en Europe est très hétérogène en fonction des massifs montagneux et en leur sein, et croît plus ou moins rapidement en fonction du niveau de réchauffement. Sans production de neige, 53 % des 2234 stations de ski étudiées dans 28 pays européens seraient confrontées à un niveau de risque très élevé de faible enneigement dans le cas d'un réchauffement climatique planétaire

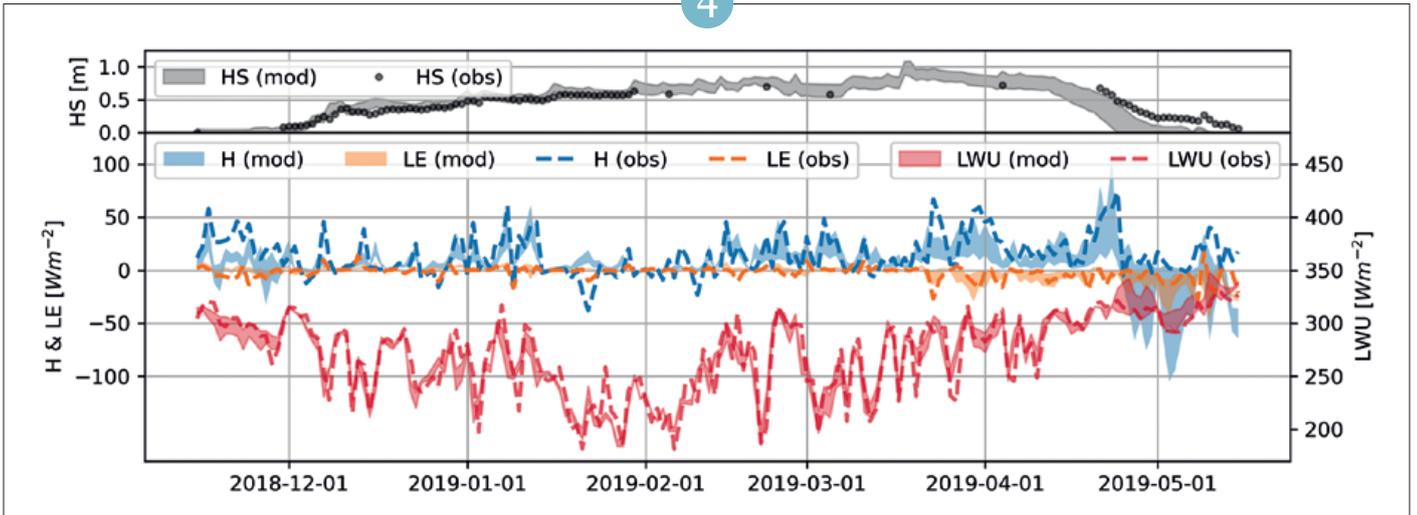
de 2°C par rapport au niveau pré-industriel (1850-1900), ce qui est attendu autour de 2050. Ici un niveau de risque très élevé est défini comment atteint quand une année sur deux, en moyenne, l'enneigement d'une station est aussi défavorable que ce qu'il était en moyenne une année sur cinq pendant la période de référence 1961-1990, âge d'or du développement des stations. Avec 50% de de la surface de pistes équipée pour la production de neige, ceci représente alors 27 % des stations, mais s'accompagne toutefois d'une augmentation de la demande en eau et en électricité, et de l'empreinte carbone correspondante, pour la production de neige. Les impacts, risques et empreinte environnementale sont d'autant plus élevés que le niveau de réchauffement est élevé (voir Figure). A l'échelle européenne, avec 50% de surface de piste équipée pour la production de neige, cette dernière mobilise annuellement, pour la période de référence 1961-1990, environ 100 millions de m<sup>3</sup> d'eau, ce qui représente en moyenne 13% des précipitations

annuelles atteignant les pistes équipées pour la production de neige. Une partie de cette eau est néanmoins restituée aux milieux, dans des proportions qui restent à estimer plus finement à l'échelle locale. Le besoin annuel en eau croît de +8% à +25% à 2°C de réchauffement selon les pays, +14% à +42% à +4°C. La consommation électrique et l'empreinte carbone évoluent dans les mêmes proportions, à partir d'une valeur de référence de l'ordre de 300 GWh pour la consommation électrique et 80 kt eq. CO<sub>2</sub> pour l'empreinte carbone correspondante, fortement variable d'un pays à l'autre. Bien qu'elle ne représente qu'une fraction modeste de l'empreinte carbone globale des sports d'hiver, dominée par le transport et le logement, la production de neige fait partie intégrante de l'industrie du tourisme de ski. Elle illustre certains des principaux défis à relever au croisement des enjeux d'adaptation et de décarbonation. NB que cette étude globale à l'échelle européenne n'est pas destinée à l'analyse de la situation de stations individuelles.

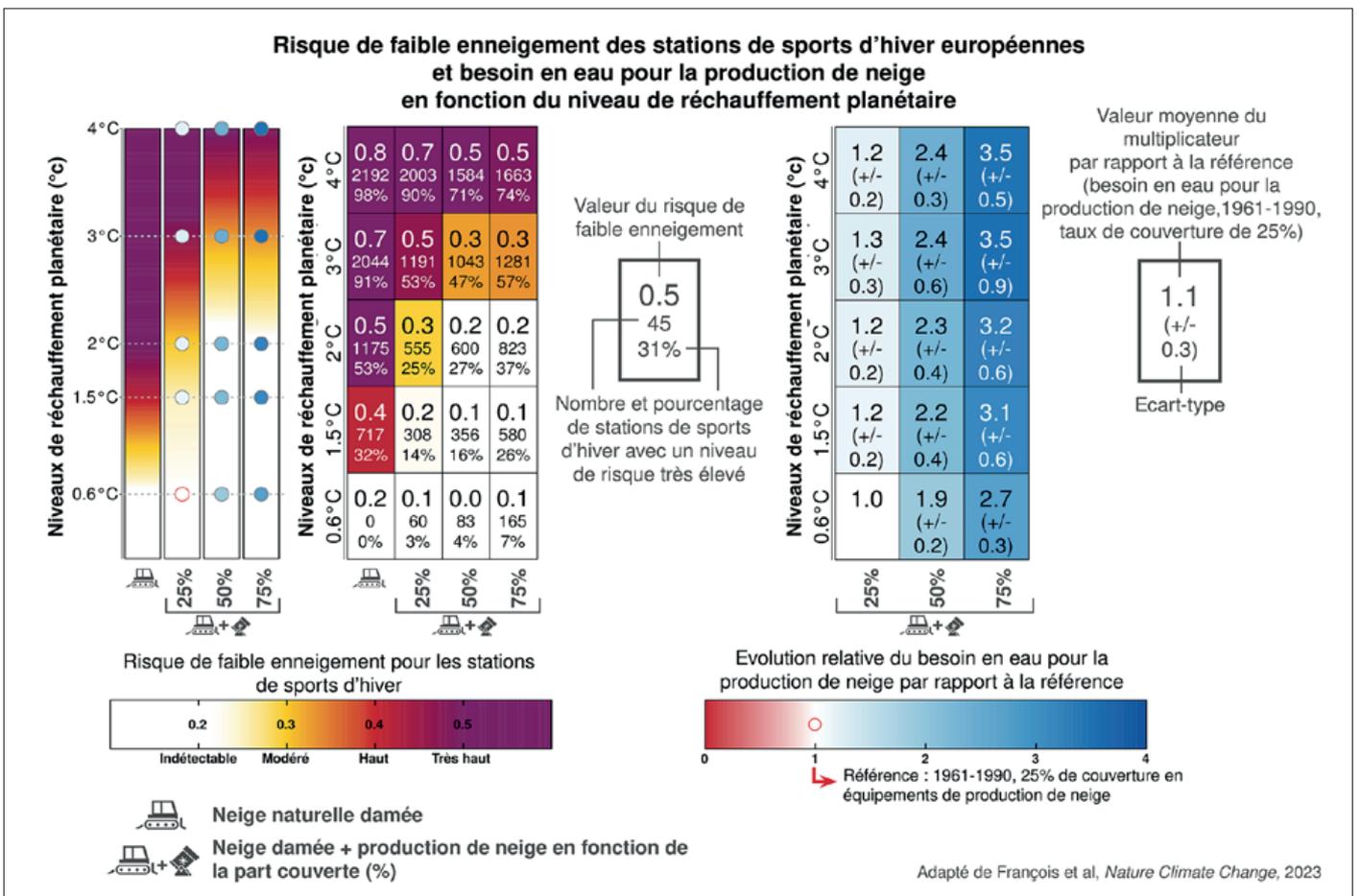
### Référence :

François, H., Samacoïts, R., Bird, D.N., Köberl, J., Pretenthaler, F. and S. Morin, Climate change exacerbates snow-water-energy challenges for European ski tourism. *Nat. Clim. Change*, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01759-5>, 2023. Texte complet de l'étude accessible à cette adresse : <https://hal.science/hal-04192000v1>

5



▲ Hauteur de neige (HS, gris), flux turbulents de chaleur sensible (H, bleu), de chaleur latente (LE, orange), et rayonnement infrarouge émis par la surface (LWU, rouge) pour un ensemble de 35 simulations (enveloppes) et les observations (tireté) sur le site de Lompolojännkä, Finlande, au cours de l'hiver 2018-2019. L'incertitude du flux de chaleur sensible (enveloppe bleue) est la plus importante et les simulations les plus proches de l'observation sont celles qui augmentent fortement la turbulence en conditions stables par rapport aux paramétrisations habituelles.



▲ Représentation graphique du niveau de risque de faible enneigement pour les 2234 stations de sport d'hiver en Europe, en fonction du niveau de réchauffement planétaire par rapport à 1850-1900, et du besoin en eau correspondant. Sur la gauche, chaque case correspond à un niveau de réchauffement et un taux d'équipement en production de neige, appliqué de façon homogène à toutes les stations (0, 25%, 50% et 75% de couverture). La couleur de chaque case fait référence au niveau de risque agrégé par station, et le texte dans chaque case représente aussi la proportion de stations pour lesquelles le niveau de risque de faible enneigement est « très élevé ». La figure de droite représente la variation du besoin en eau pour la production de neige, en fonction du taux d'équipement en équipements de production de neige et du niveau de réchauffement, par rapport à une situation de référence sur la période 1961-1990 avec une couverture hypothétique de 25% de la surface des pistes.

---

# Quel effet du damage et de la production de neige sur le débit des cours d'eau en aval des stations de sports d'hiver ?

Samuel Morin

Parmi les nombreux enjeux socio-environnementaux liés à l'industrie des sports d'hiver en montagne les questions liées aux ressources en eau sont nombreuses et pertinentes. Une question régulièrement posée et peu traitée concerne l'effet hydrologique en aval d'une station de sport d'hiver. Une étude parue en 2023 s'y est attaquée dans le cadre d'un partenariat avec la Compagnie des Alpes portant sur une étude du cas à La Plagne, impliquant des équipes du CNRM, d'INRAE (Grenoble et Lyon) et de l'IGE Grenoble. Ainsi nous avons pu mobiliser les données hydrologiques disparates disponibles sur le principal bassin versant influencé par l'activité de station (Bonnegarde), ainsi que des outils de modélisation de l'enneigement, permettant de quantifier l'effet hydrologique de la gestion de la neige (damage et production de neige).

Les principaux résultats issus de cette étude et valables pour cette étude de cas sont:

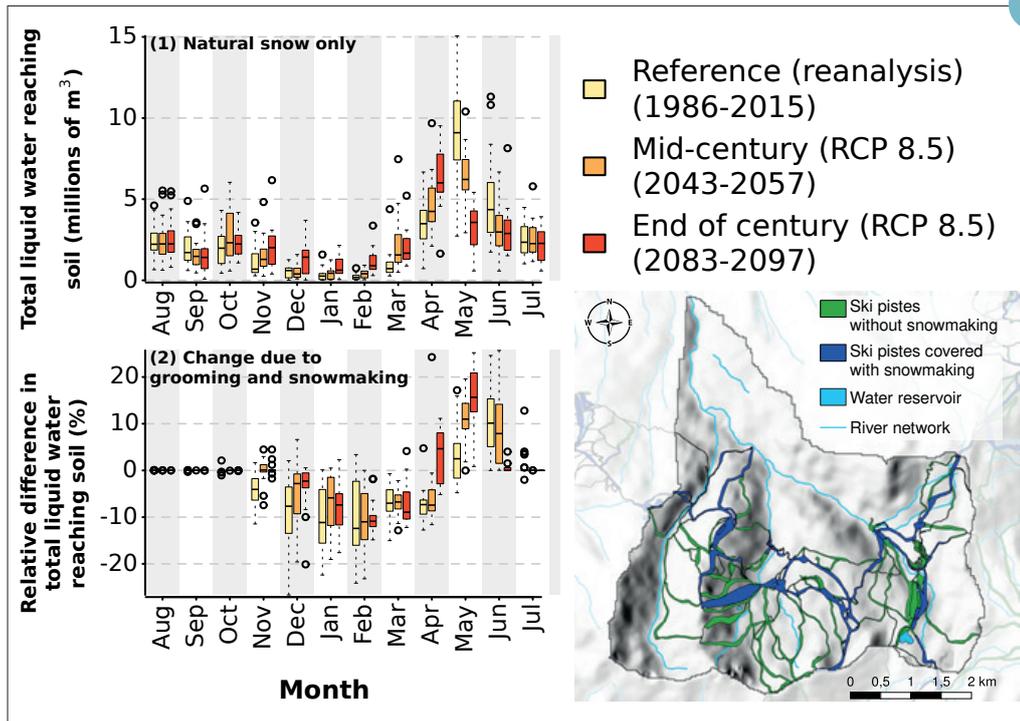
- Le damage tend à supprimer l'écoulement à la base du manteau neigeux des pistes damées pendant l'hiver, et conduit donc à réduire pendant l'hiver le débit des cours d'eau proportionnellement à la surface de piste damée dans le bassin versant (typiquement, de l'ordre de 10%). Ce retard est compensé au moment de la fonte.
- L'eau mobilisée pour la production de neige est quasiment intégralement restituée aux cours d'eau lors de la fonte, à l'exception d'environ 10 % de l'eau employée pour la production, restituée à l'atmosphère lors du processus de congélation des gouttelettes d'eau. Le principal effet hydrologique aval de la production de neige, hors transfert d'eau d'un bassin versant à l'autre, est une fonte retardée conduisant à un apport différé dans les cours d'eau. L'accroissement de

débit peut atteindre 10 à 20 %, au moment du pic de fonte nivale (avril – juin), pour des bassins versants situés en cœur de station.

- Le changement climatique provoque déjà une baisse de l'enneigement, une fonte printanière plus précoce et une augmentation du débit hivernal car les précipitations tombent d'avantage sous forme de pluie. L'effet du changement climatique sur le débit des cours d'eau surpasse l'effet actuel et futur de la production de neige dans l'état actuel des pratiques et technologies de production de neige. Cette étude spécifique ne documente qu'un des multiples enjeux socio-environnementaux de l'industrie des sports d'hiver et ouvre la voie à une caractérisation plus systématique de ses effets hydrologiques dans un cadre d'études intégré et élargi.

## Référence :

Morin, S., François, H., Réveillet, M., Sauquet, E., Crochemore, L., Branger, F., Leblois, É., and Dumont, M. : Simulated hydrological effects of grooming and snowmaking in a ski resort on the local water balance, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 27, 4257–4277, <https://doi.org/10.5194/hess-27-4257-2023>, 2023. Cette étude a été lauréate du prix Jim Dooge 2023 de l'EGU : [https://www.hydrology-and-earth-system-sciences.net/about/jim\\_dooge\\_award.html](https://www.hydrology-and-earth-system-sciences.net/about/jim_dooge_award.html).



▲ Effet simulé du damage et de la production de neige sur l'écoulement dans le bassin versant de Bonnegarde (La Plagne, Savoie, France), en climat actuel et futur.

En haut à gauche, cumul mensuel de l'écoulement en ne considérant que la neige naturelle.

En bas à gauche, effet combiné du damage et de la production de neige sur l'écoulement.

En bas à droite, carte du bassin versant et emplacement des pistes avec et sans installation de production de neige.

# Météorologie instrumentale et observations

Météo-France s'appuie sur une grande diversité de systèmes d'observations pour caractériser l'atmosphère et ses interactions avec la surface. En 2023 s'est déroulé autour du Centre de Recherches Atmosphériques à Lannemezan le dernier volet du projet MOSAI<sup>1</sup>, qui vise à caractériser les hétérogénéités de flux de surface à fine échelle spatiale, en instrumentant en particulier des champs et des zones boisées. Durant l'été, la campagne PANAME<sup>2</sup> a été l'occasion de déployer des drones au centre de Paris pour quantifier l'effet rafraîchissant des parcs en période de canicule. Des profils de température et d'humidité par drone ont aussi été réalisés dans des conditions plus fraîches, plus précisément autour de la station Concordia, dans l'objectif d'étudier l'eau surfondue dans les nuages au-dessus de l'Antarctique. Météo-France opère également un réseau de radars météorologiques, qui permettent de quantifier les précipitations grâce à l'amélioration continue des algorithmes d'inversion, mais peuvent aussi renseigner sur la sévérité des épisodes orageux. En plus d'être sensibles aux hydrométéores de toutes sortes ces radars sont utilisés dans le cadre du projet SEMAFOR<sup>3</sup> pour suivre les oiseaux migrateurs et prédire leurs trajectoires grâce à des méthodes d'apprentissage supervisé. Depuis quelques années Météo-France s'intéresse aussi à une autre forme de migration, celle des Sargasses, des algues brunes dont les bancs profilèrent dans les Antilles et viennent parfois s'échouer sur les côtes. Leur suivi à l'aide de satellites nouvelle génération à très haute résolution spatiale permet d'anticiper ce risque d'échouement. D'autres observations satellite, beaucoup plus anciennes, ont été réhabilitées dans le cadre des services climatiques de Copernicus afin d'évaluer les réanalyses atmosphériques des années 70, et pourraient même permettre prochainement de les améliorer.

1. *Model and Observation for Surface-Atmosphere Interactions*

2. *PARis region urbaN Atmospheric observations and models for Multidisciplinary rEsearch*

3. *Observation et prédiction de la migration de l'avifaune à partir des radars météorologiques*

## Détection haute résolution des bancs de Sargasses pour les Antilles françaises

F. Vergneault, T. Guinaldo, S. Saux Picart

Depuis 2011, les Antilles françaises subissent des échouements de bancs de Sargasses récurrents et d'intensité croissante. Ces algues brunes, flottant librement à la surface de l'océan, constituent une niche écologique unique en haute mer, mais leur arrivée en zones côtières et leurs échouements ont un impact profond sur la résilience de ces territoires. Depuis mai 2023, la convention entre le Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires et Météo France est devenue une mission institutionnelle visant à détecter et à prévoir opérationnellement le risque d'échouements, dans laquelle le CNRM joue un rôle essentiel.

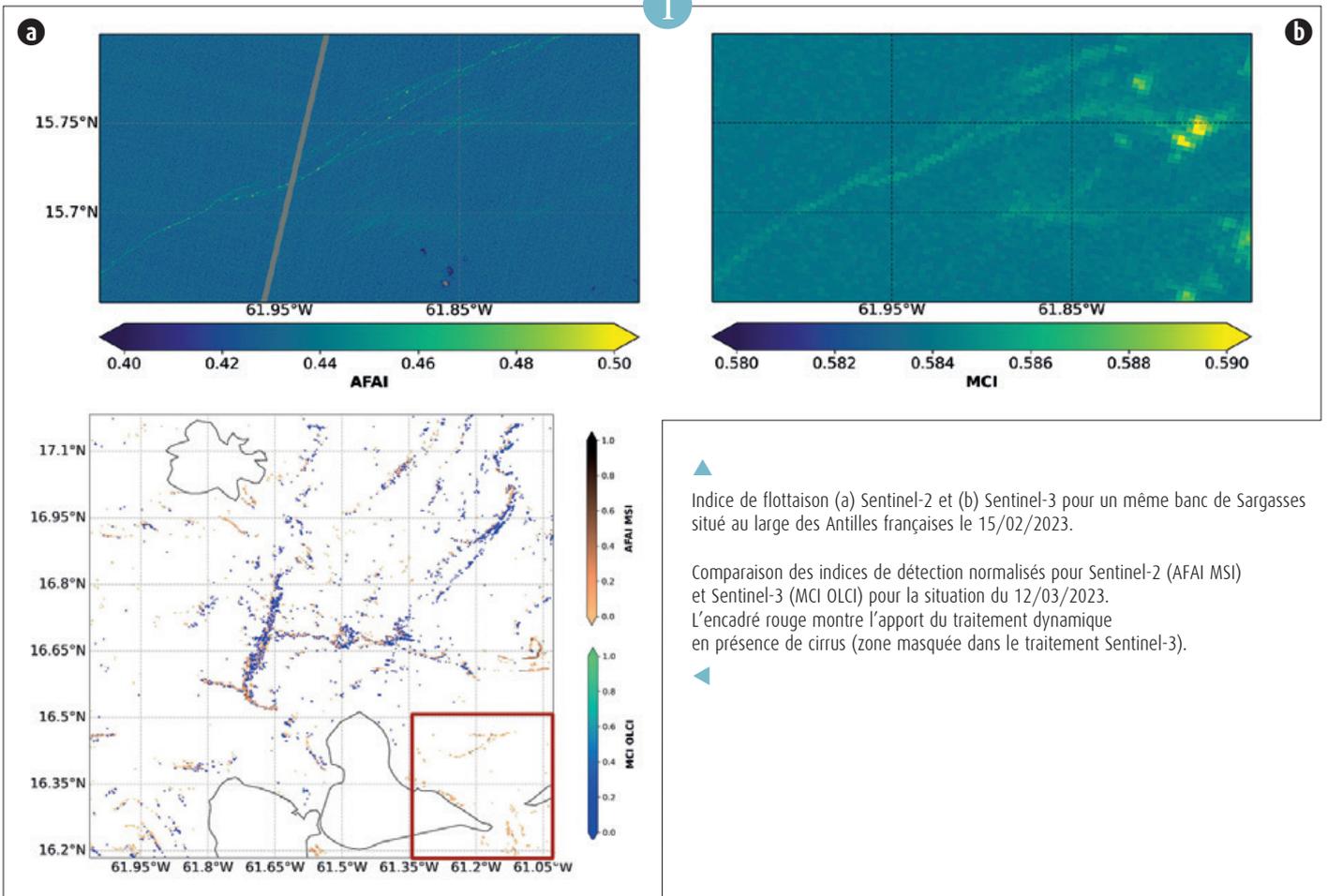
La détection est actuellement assurée par des capteurs optiques de moyenne résolution (entre 300 m et 1 000 m) qui présentent des limites dans la détection des bancs proches des côtes. Ainsi, une méthode unique et novatrice a été développée pour exploiter

la haute résolution (20 m) du capteur optique embarqué sur le satellite Sentinel-2. Habituellement, un indice est construit sur les propriétés optiques des sargasses dans le domaine du rouge et du proche-infrarouge. Cet indice est ensuite seuillé, puis des masques (pour les nuages, la distinction terre-mer, la réflexion spéculaire) sont appliqués pour produire une information exploitable. Cette nouvelle méthode propose l'établissement d'un seuil non pas statique sur le plan spatial, mais dynamique, s'adaptant aux conditions d'observation locales. Ainsi, cette méthode garantit une meilleure détection des bancs sous les nuages transparents (cirrus) et prend en compte plus précisément les états de mer (comme la présence de vagues) et les conditions atmosphériques (comme le cycle saisonnier de la réflexion spéculaire). De plus, elle permet une caractérisation plus fine des bancs, favorisant ainsi une meilleure évaluation des risques.

Ce travail met en évidence la nécessité de développer un outil de détection multi-capteur, d'élaborer des produits composites et de prendre en compte des capteurs offrant une résolution temporelle plus élevée pour améliorer la qualification et la prévention des risques liés aux échouements.

1

1



▲ Indice de flottaison (a) Sentinel-2 et (b) Sentinel-3 pour un même banc de Sargasses situé au large des Antilles françaises le 15/02/2023.

▲ Comparaison des indices de détection normalisés pour Sentinel-2 (AFAI MSI) et Sentinel-3 (MCI OLCI) pour la situation du 12/03/2023. L'encadré rouge montre l'apport du traitement dynamique en présence de cirrus (zone masquée dans le traitement Sentinel-3).

▲

---

## Comparaison des différents algorithmes de type « profileur » pour l'estimation de pluie par radar polarimétrique en bande S

N. Yu

La qualité des estimations des lames d'eau a progressé fortement grâce aux radars polarimétriques. Un radar à double polarisation est capable d'émettre simultanément deux impulsions en polarisation verticale et horizontale. La différence sur les retours des deux impulsions permet d'enrichir des informations supplémentaires sur les hydrométéores (leur type, taille, forme, homogénéité, etc.) par rapport à la seule réflectivité horizontale ( $Z_h$  en dBZ). Dans cette étude, on s'intéresse particulièrement à la comparaison des lames d'eau estimées grâce à la polarimétrie par deux

types d'algorithmes : algorithmes avancés et algorithmes simples pour les radars en bande S, également comparés à une loi classique n'utilisant pas la polarimétrie (loi Z-R). Les algorithmes avancés (ZPHI linéaire : L\_ZPHI, ZPHI non-linéaire : NL\_ZPHI et la méthode de «self-consistency» : Self-Cons) optimisent un paramètre microphysique de la distribution granulométrique des pluies (DSD) selon la situation de précipitation. Les algorithmes simples (méthode de la phase différentielle spécifique :  $\Phi_i(KDP)$  et méthode de l'atténuation spécifique :  $\Phi_i(Ah)$ ) n'utilisent que des paramètres climatologiques et

statiques sans optimisation. Selon les résultats des simulations numériques basées sur la DSD à double moments (Figure), les qualités des lames d'eau estimées par des algorithmes avancés dépendent fortement de l'homogénéité de DSD et sont de plus très sensibles aux erreurs de mesures des radars. Les algorithmes simples n'utilisant que des paramètres climatologiques sont plus robustes et de qualité similaire, par conséquent, plus adaptés pour l'estimation de lame d'eau dans un contexte opérationnel.

### Référence :

Yu, N. & Gaussiat, N. (2024) Comparison of four radar profiling algorithms in the S-band. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(758), 112–125. <https://doi.org/10.1002/qj.4588>

2

---

## La détection, la quantification et la prévision de la migration avifaune à grande échelle à l'aide du réseau français de radars météorologiques

T. Désert

Chaque année, des milliards d'oiseaux traversent la France pour rejoindre leurs habitats saisonniers. La compréhension de ce phénomène fragile d'échelle mondiale permettrait de diminuer l'impact des constructions humaines, en particulier dans le contexte actuel d'expansion mondiale du secteur de l'énergie éolienne. Les radars météorologiques de Météo-France sont capables de détecter la présence d'oiseaux dans le ciel à des distances de l'ordre de cent kilomètres. Ils offrent donc la possibilité d'étudier et de quantifier la répartition à grande échelle de la biomasse volante.

Le projet SEMAFOR réunit plusieurs partenaires dans l'objectif de développer un observatoire en temps réel des oiseaux migrateurs à haute résolution, et de proposer un outil de prévision des

passages migratoires. Dans le cadre du projet, les méthodes de référence de la littérature ont été étudiées et évaluées, et des méthodes innovantes permettant d'augmenter la résolution et la fiabilité de la chaîne de traitement ont été implémentées :

- Classification des échos de radar : mise en place d'une chaîne de traitement des échos radars pour différencier l'air clair des précipitations grâce à des méthodes d'apprentissages supervisées (forêt d'arbres de décisions et deep-learning) ;

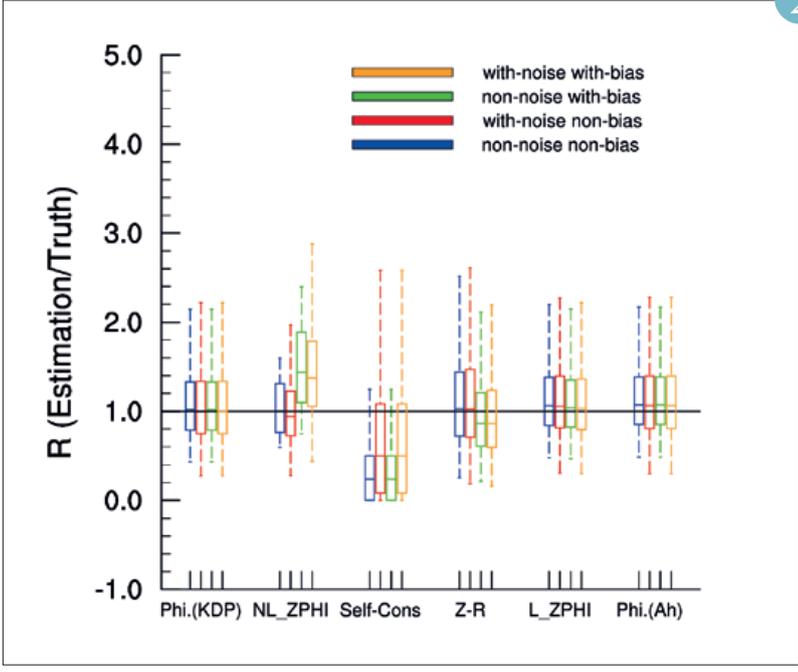
- Quantification du nombre d'individus dans un volume radar : modélisation du fonctionnement du radar et des propriétés électromagnétiques d'individus afin de construire un opérateur inverse calibré sur des mesures locales de radars verticaux spécialisés pour la détection d'oiseaux ;

- Prévision de passage migratoire : implémentation d'une méthode de prévision du flux migratoire en fonction des conditions météorologiques basée sur une forêt d'arbres de décisions.

Une interface de visualisation de la migration en temps réel est en cours de déploiement de façon pré-opérationnel sur un extranet Phoenix. Le projet SEMAFOR n'est qu'une première pierre pour construire une expertise au sein de la communauté de l'aéro-écologie française, et la participation de Météo-France au projet national d'étude de la migration sur la côte Atlantique (MIGRATLANE) assure la continuité pour l'application des méthodes innovantes développées.

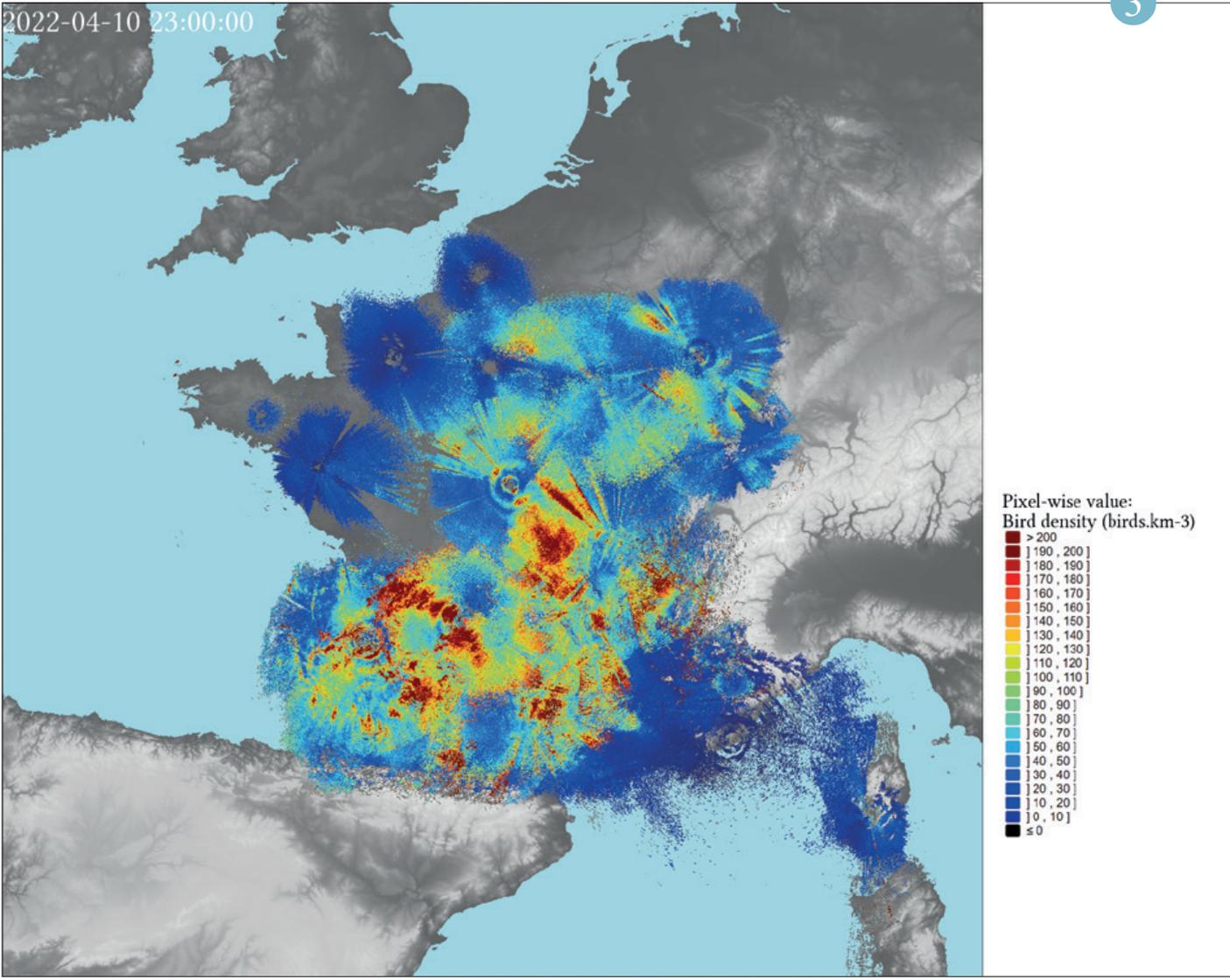
3

2



Évaluation des lames d'eau estimées par différents algorithmes dans les simulations numériques. Le médian, les quantiles de 25 % et de 75 % des ratios entre l'estimation de pluie et la référence sont indiqués par des boîtes à moustaches. La sensibilité de chaque algorithme aux erreurs des mesures est indiquée par différentes couleurs.

3



Mosaïque des mesures radars d'une nuit de très forte migration (nuit du 10/04/2022 au 11/04/2022). Les pixels sont colorés par la densité estimée d'oiseaux par km<sup>3</sup>, chaque pixel représentant un secteur de 1kmx1km au sol.

---

# Comparaison de la hauteur maximale d'échos radar à 18 dBZ observée par des radars au sol et des radars spatiaux

Marc Mandement

La hauteur maximale d'échos radar dépassant un seuil standard de réflectivité (par exemple : 18, 30, 50 ou 60 dBZ), en anglais echo-top height, peut être observée par des radars météorologiques. Suivant le seuil choisi, cette variable donne des informations sur la répartition spatiale des hydrométéores au sommet ou dans la partie haute des nuages. Dans les cumulonimbus, la répartition des hydrométéores étant liée aux propriétés du courant ascendant, cette variable est utilisée comme diagnostic de sévérité orageuse, de grêle ou de turbulence, et intéresse particulièrement le secteur aéronautique.

Dans le cadre d'un stage de l'École Nationale de la Météorologie réalisé au

sein de l'Université d'Oklahoma et du NOAA<sup>1</sup> *National Severe Storm Laboratory*, la hauteur maximale d'échos radar à 18 dBZ du produit opérationnel MRMS<sup>2</sup> intégrant les observations d'environ 180 radars nord-américains en bande S a été comparée à celle observée par le radar en bande Ku à bord du satellite *GPM*<sup>3</sup> *Core Observatory*. La comparaison, d'une durée de 19 mois aux États-Unis a utilisé ces observations spatiales comme référence.

Aucun biais majeur n'est trouvé entre les deux produits d'observation (Figure). Un cycle annuel de leurs écarts est mis en évidence, du fait d'une hauteur maximale d'échos radar à 18 dBZ sous-estimée par MRMS pour les nuages classifiés

comme stratiformes et sur-estimée pour les nuages classifiés comme convectifs. Ces écarts systématiques sont en partie expliqués par les stratégies de balayage volumique de l'atmosphère des radars américains et les méthodes d'interpolation employées par MRMS à haute altitude. La méthode pourrait être employée pour évaluer les produits équivalents disponibles en France.

1. *National Oceanic and Atmospheric Administration*

2. *Multi-Radar Multi-Sensor*

3. *Global Precipitation Measurement*

## Référence :

Mandement, M., P. Kirstetter, and H. Reeves, 2023: Intercomparison between Ground-Based and Spaceborne Radars' Echo-Top Heights: Application to the Multi-Radar Multi-Sensor and the Global Precipitation Measurement. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 62, 917–928, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-22-0146.1>.

4

---

# Évaluer les réanalyses avec les premières observations satellitaires

Jérôme Vidot et Jean-Marie Lalande

Le service sur le changement climatique de Copernicus (C3S) finance depuis 2019 un projet ambitieux de récupération et d'utilisation d'observations satellitaires anciennes avec pour objectif final leur assimilation dans la prochaine réanalyse ERA-6 du CEPMMT (<https://climate.copernicus.eu/c3s-satellite-data-rescue-program-depth>). L'équipe Sondage du CNRM/CEMS participe à ce projet en préparant le modèle de transfert radiatif rapide RTTOV à simuler les observations obtenues à partir d'une variété importante de sondes infrarouges (sondeurs multispectraux, sondeurs à modulation de pression de cellules de CO<sub>2</sub>, spectromètres à transformée de Fourier).

Une première étape avant l'éventuelle assimilation de ces observations anciennes dans les modèles de prévision numérique du temps consiste à évaluer leurs qualités dans

l'espace des observations sous forme de différence entre observations et simulations des températures de brillance. Ainsi, nous pouvons estimer des biais potentiels sur les observations qui peuvent être par exemple dus à une mauvaise caractérisation technique de ces vieux instruments ou un mauvais traitement de leurs données à l'époque (fonction de réponse spectrale, géolocalisation, étalonnage). Lorsque les instruments sont suffisamment bien caractérisés et précis, ces simulations peuvent alors mettre aussi en lumière des biais dans les réanalyses.

La figure présente des différences observations moins simulations pour l'instrument SI-1 (Spektrometer Instrument), un spectromètre à transformée de Fourier embarqué sur un satellite est-allemand (Meteor-28) dans les années 1970. Le biais

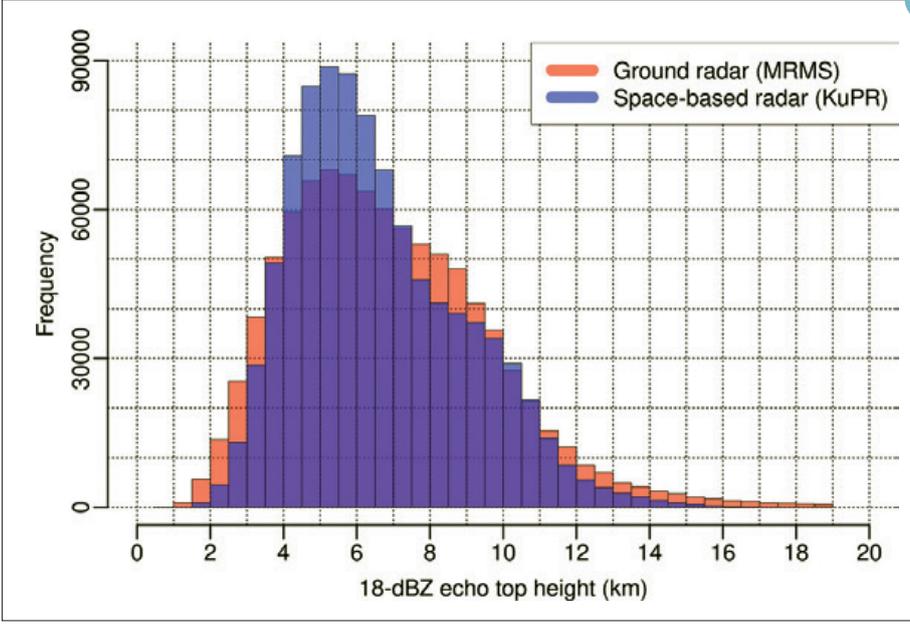
spectral (a) a été obtenu à partir de 123 spectres en ciel clair couvrant le domaine infrarouge (entre 400 et 1 200 cm<sup>-1</sup> à une résolution spectrale 2,8 cm<sup>-1</sup>). La figure montre que les versions les plus récentes des réanalyses européennes et japonaises ont été améliorées dans leurs prévisions des températures (en vert/orange pour ERA pour la partie du spectre inférieur à 650 cm<sup>-1</sup>) ou les concentrations en ozone (en rouge/violet pour JRA visible entre 1000 et 1 100 cm<sup>-1</sup>) avec des biais plus proches de zéro pour les nouvelles réanalyses (ERA-5 et JRA-3Q). Ces travaux ainsi que des travaux similaires sur plusieurs instruments infrarouges et micro-ondes ont été publiés dans Poli et al. (2023). Il est à noter que ces données seront accessibles à la communauté scientifique au travers du pôle de données ICARE/AERIS et du Climate Data Store.

## Référence :

Poli, P.; Roebeling, R.; John, V. O.; Doutriaux-Boucher, M.; Schulz, J.; Lattanzio, A.; Petraityte, K.; Grant, M.; Hanschmann, T.; Onderwaater, J.; Sus, O.; Huckle, R.; Coppens, D.; Théodore, B.; August, T.; Simmons, A. J.; Bell, W.; Mittaz, J.; Hall, T.; Vidot, J.; Brunel, P.; Johnson, J. E.; Zamkoff, E. B.; Al-Jazrawi, A. F.; Esfandiari, A. E.; Gerasimov, I. V. and Kobayashi, S., Radiance Simulations in Support of Climate Services, (2023). *Earth and Space Science*, 10, e2023EA002868. <https://doi.org/10.1029/2023EA002868>

5

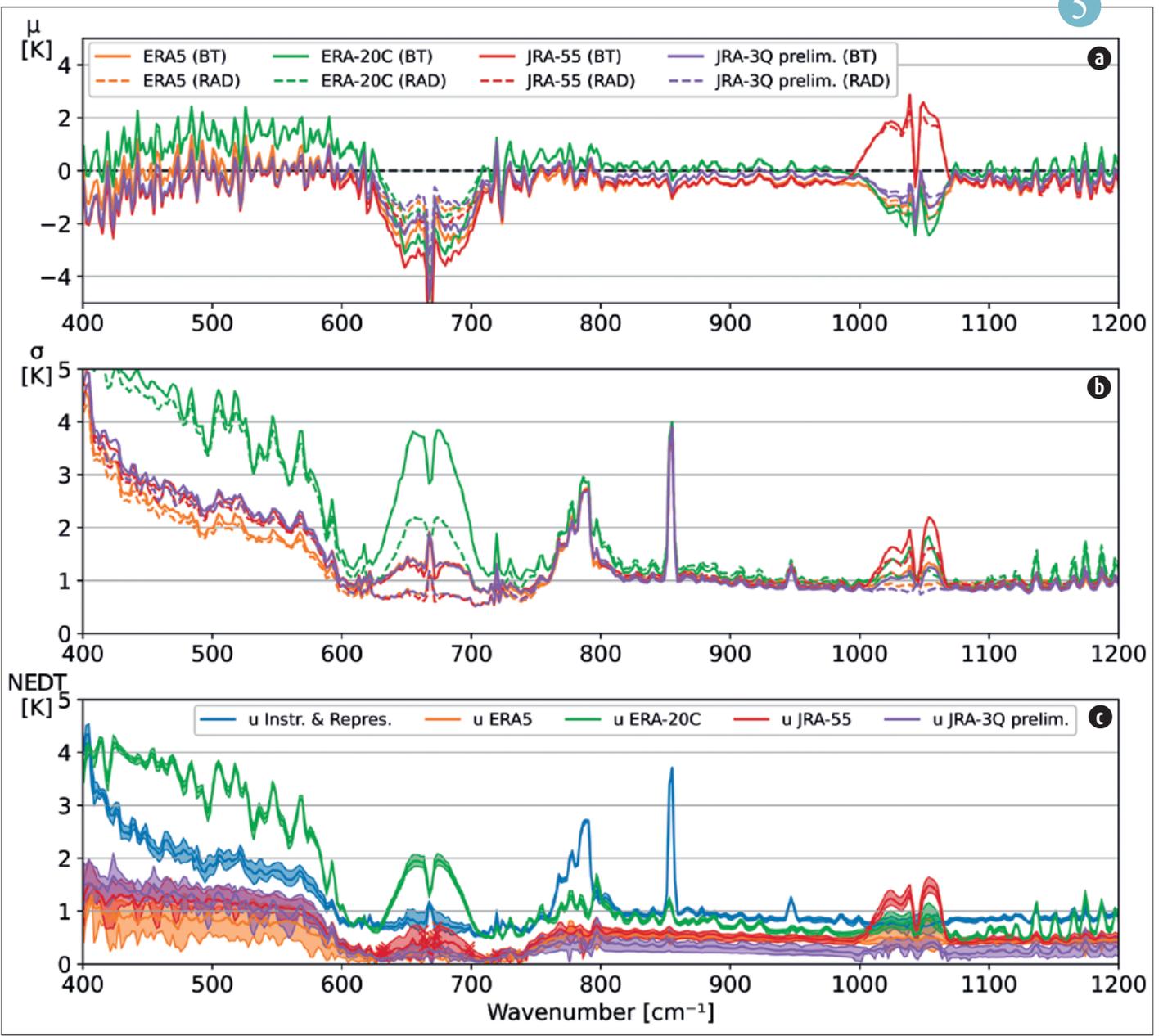
4



Distribution de la hauteur maximale d'échos radar à 18 dBZ observée par MRMS (rouge) et le radar spatial en bande Ku (bleu), durant la période étudiée de 19 mois. L'aire de superposition des deux histogrammes est en violet.

(a) Biais spectral en température de brillance (K) entre observations SI-1 et simulations RTTOV avec différentes réanalyses, (b) écart-type spectral (K) et (c) équivalent en NEDT (K).

5



---

## Hétérogénéité du bilan d'énergie de surface

Guylaine Canut

Le projet MOSAI (Model and Observation for Surface-Atmosphere Interactions) vise à contribuer à la quantification détaillée et la réduction des biais des modèles sur les flux de surface. Ce projet coordonné par le LAERO a été financé par l'ANR pour une durée de 4 ans (2021-2025) et regroupe les 3 stations d'étude du bilan d'énergie de surface de l'Infrastructure de Recherche ACTRIS-FR et quatre stations de l'Infrastructure de Recherche ICOS-FR.

Le dispositif expérimental consiste à déployer 3 ou 4 stations sur une période d'une année autour des sites long terme afin de documenter la représentativité des mesures locales dans un paysage hétérogène, à l'échelle de la maille de la grille allant de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres. C'est le volet 3 de cette campagne

qui s'est déroulé cette année autour du mat instrumenté de 60 m de la station P2OA (Plate-forme Pyrénéenne d'Observations Atmosphériques) à Lannemezan (Hautes-Pyrénées) après avoir fait une année sur le site de la météopole et une année sur le site du SIRT. L'équipe GMEI/4M du CNRM a ainsi déployé 2 stations, l'une dans un champ de maïs à quelques centaines de mètres du mat de 60 m et une seconde dans une clairière dans une forêt de conifère haute de 32 m avec un mat de 42 m sur une longue période de mars 2023-mars 2024. Les laboratoires partenaires (LAERO, INRAE, University of Bergen) ont aussi déployés des stations sur un champ de blé, une prairie et une forêt de conifère. En complément de ces mesures sur une année, 3 périodes d'observations renforcées au printemps, en été et en hiver

ont eu lieu. Au cours de ces périodes les basses couches de l'atmosphère ont été décrites finement avec 5 radiosondages récupérables par jour, plusieurs dizaines de profils réalisées par drones, le déploiement d'un lidar vent et des mesures de turbulence sous ballon captif.

Les données sont mises à disposition via le portail AERIS (<https://www.aeris-data.fr/>). Plusieurs études en cours utilisant ces données permettent d'étudier l'hétérogénéité des flux de surface et d'évaluer leur représentation dans les différents modèles de prévisions numérique du temps et du climat AROME, ARPEGE et LMDz.

6

---

## Déployer des drones pour mesurer le rafraîchissement apporté par les parcs urbains en été (PANAME 2023)

Greg Roberts, Marine Goret

Des drones multicoptères ont été déployés durant l'été 2023 lors du programme expérimental PANAME sur la région parisienne afin de quantifier l'effet rafraîchissant des parcs et espaces verts au sein des îlots de chaleur urbains. Des profils verticaux, effectués jusqu'à 120m de hauteur et simultanément au-dessus d'un parc et d'un site urbain proche, permettent de mesurer la pression, la température, l'humidité relative et les vents horizontaux toutes les 30 minutes entre 18h15 et 21h45. Ces observations montrent la différence de l'évolution du refroidissement de l'atmosphère en soirée entre les deux sites. En amont de la campagne, des conventions

ont été établies entre Météo France et les sites d'accueil des mesures. Les demandes d'autorisation de vol, délivrées entre autres par la Préfecture de Police de Paris, ont été coordonnées par Météo-France.

Plus de 300 profils verticaux ont été réalisés sur huit sites différents situés dans Paris et sa première couronne. Les profils simultanés des basses couches de l'atmosphère au-dessus du parc Montsouris et d'un site urbain à proximité illustrent l'effet rafraîchissant des parcs en soirée. Pour le parc, le rafraîchissement en surface est d'environ 3 °C, alors qu'il est de moins de 1 °C sur le site urbain. Le refroidissement en surface du parc génère une inversion locale jusqu'à

environ 40 m de hauteur, alors qu'aucune inversion n'est constatée au site urbain. Des résultats similaires ont également été observés entre le Parc du Luxembourg et l'Université de la Sorbonne. En revanche, lorsque la couche limite est bien mélangée, les taux de refroidissement sont similaires pour le parc et le site urbain.

La quantification de la fraîcheur relative des parcs en milieu urbain permettra de construire des villes plus résilientes face à l'augmentation attendue de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur. Ce projet a été financé par Météo France et l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-20-CE22-0013).

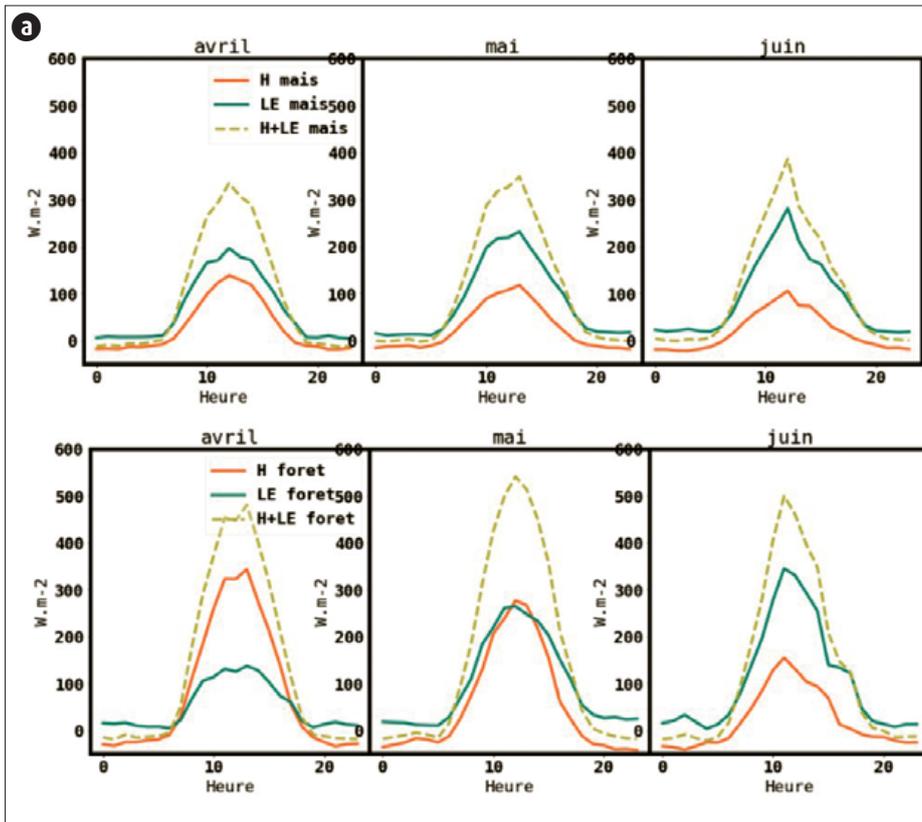
### Référence :

Le Parisien : <https://www.leparisien.fr/paris-75/des-drones-pour-mesurer-les-temperatures-a-paris-19-07-2023-R724MRHRIFPBHRFQJYDYGRQP4.php>

TF1 : <https://www.tf1info.fr/meteo/video-ilots-de-fraicheur-en-ville-un-impact-positif-qui-se-mesure-2263006.html>

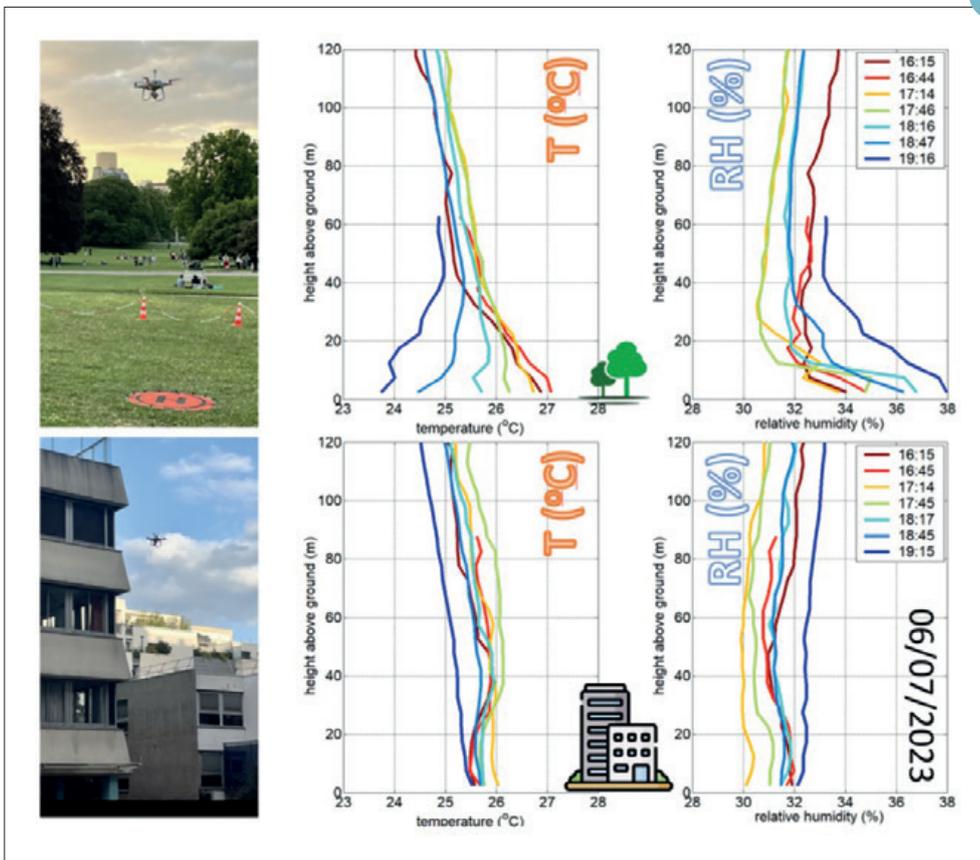
7

6



Cycle diurne de la moyenne mensuelle des flux de chaleur sensible et latent sur le maïs et la forêt lors de la campagne MOSAI pour le mois d'avril, mai et juin 2023. Photo du dispositif expérimental en forêt déployé par l'équipe DESR/CNRM/GMEI/4M.

7



Les profils verticaux illustrant l'effet rafraîchissant des parcs par rapport à un site urbain.

---

## Observations in situ par drone de la température et de l'humidité relative au-dessus du Dôme C, Antarctique

Philippe Ricaud CNRM/GMGEC/COMETS

Les nuages en Antarctique sont des éléments clés qui influencent le forçage radiatif et donc l'évolution du climat. Bien que la grande majorité des nuages soit composée de cristaux de glace, une fraction non négligeable est constituée d'eau surfondue (eau maintenue sous forme liquide en dessous de 0 °C ; supercooled liquid water (SLW) en anglais). Les modèles numériques de prévision météorologique ont de grandes difficultés à calculer les nuages d'eau surfondue au-dessus de l'Antarctique, favorisant la glace au détriment de l'eau liquide, et estimant donc incorrectement le forçage radiatif des nuages. La station Concordia est située sur le plateau de l'Antarctique oriental (75°S, 123°E, 3 233 m au-dessus du niveau de la

mer). Afin d'observer in situ les nuages, la température, l'humidité relative et le SLW avec une haute résolution verticale, un nouveau projet basé sur l'utilisation d'un drone à décollage et atterrissage verticaux de la société DeltaQuad a été mis en place à Concordia (Figure a). Un capteur standard de pression, de température et d'humidité relative Vaisala a été inséré à bord du drone, couplé au capteur SLW d'Anasphere. 13 vols ont été effectués du 24 décembre 2022 au 17 janvier 2023 : 9 vols technologiques et 4 vols scientifiques. Les profils de température et d'humidité relative basés sur le drone ont été comparés à : 1) les observations météorologiques par ballon à 12h00 UTC, 2) le radiomètre micro-ondes au sol

HAMSTRAD, et 3) les sorties des modèles de prévision numérique du temps ARPEGE et AROME. Aucun nuage SLW n'était présent pendant la période d'observation. Malgré les problèmes techniques liés à l'utilisation du drone en raison des conditions difficiles rencontrées (altitude, température et champ géomagnétique), les observations par drone étaient très cohérentes avec les observations par ballon de la température et de l'humidité relative (Figure b). Notre étude a montré le grand potentiel d'un drone pour sonder in situ l'atmosphère antarctique à très haute résolution verticale (quelques mètres). Une nouvelle campagne est prévue pour l'été 2025-26 afin de sonder les nuages SLW à l'aide de drones.

### Référence :

Ricaud, P., Medina, P., Durand, P., Attié, J.L., Bazile, E., Grigioni, P., Del Guasta, M. and Pauly, B.: In Situ VTOL Drone-Borne Observations of Temperature and Relative Humidity over Dome C, Antarctica. *Drones*, 7(8), 532; <https://doi.org/10.3390/drones7080532>, 2023.

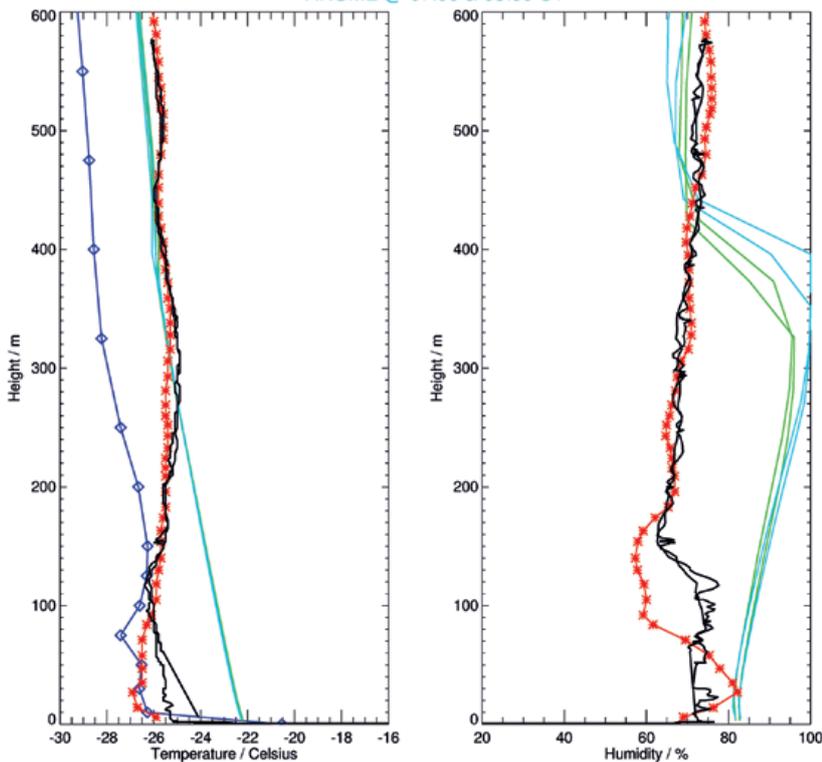


a

8

b

20230113  
 Drone Flight D13 @ 07:30 UT  
 HAMSTRAD @ 07:20-07:40 UT  
 Radiosonde @ 12:00 UT  
 ARPEGE @ 07:00 & 08:00 UT  
 AROME @ 07:00 & 08:00 UT



(a) Le drone posé au sol à la station Concordia pendant la campagne d'été 2022-23.  
 (b) Profils verticaux de la température (à gauche, °C) et de l'humidité relative (à droite, %) mesurés par la sonde Vaisala à bord du drone pendant les phases de montée et de descente du vol D13 le 13 janvier 2023 à 07:30 UTC (en noir) et tels qu'observés par la sonde embarquée sur le ballon à 12:00 UTC (en rouge). La mesure de température HAMSTRAD entre 07:20-07:40 UTC est également représentée en bleu (à gauche). Les profils ARPEGE et AROME calculés à 07:00 et 08:00 UTC sont affichés respectivement en vert et en bleu.



# Annexes

## Liste des publications scientifiques 2023

- Annane, Amina, Mouna Kamel, Cassia Trojahn, Nathalie Aussenac-Gilles, Catherine Comparot, et al.: Improving FAIRness of the SYNOP meteorological data set with semantic metadata. *International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies*, 16 (2), pp.118-137. <https://dx.doi.org/10.1504/IJMSO.2023.135332>, 2023.
- Antoine, S., R. Honnert, Y. Seity, B. Vié, F. Burnet, and P. Martinet: Evaluation of an Improved AROME Configuration for Fog Forecasts during the SOF0G3D Campaign. *Wea. Forecasting*, 38, 1605–1620. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-22-0215.1>, 2023.
- Ardilouze, C., Boone, A.A. Impact of initializing the soil with a thermally and hydrologically balanced state on subseasonal predictability. *Clim Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-023-07024-x>, 2023.
- Asher E., Michael Todt, Karen Rosenlof, Troy Thornberry, Ru-Shan Gao, et al.: Unexpectedly rapid aerosol formation in the Hunga Tonga plume. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 120 (46). <https://dx.doi.org/10.1073/pnas.2219547120>, 2023.
- Bari D, Bergot T, Tardif R. Fog Decision Support Systems: A Review of the Current Perspectives. *Atmosphere*, 14(8):1314. <https://doi.org/10.3390/atmos14081314>, 2023.
- Baron A., P. Chazette, Sergey Khaykin, G. Payen, N. Marquestaut, N. Begue, and V. Duot. Early Evolution of the Stratospheric Aerosol Plume Following the 2022 Hunga Tonga Hunga Ha'apai Eruption: Lidar Observations From Reunion (21°S, 55°E). *Geophysical Research Letters*, 50(10): e2022GL101751. <https://dx.doi.org/10.1029/2022gl101751>, 2023.
- Barreyat M., Philippe Chambon, Jean-Francois Mahfouf, and Ghislain Faure. A 1D Bayesian inversion of microwave radiances using several radiative properties of solid hydrometeors. *Atmospheric Science Letters*. <https://dx.doi.org/10.1002/asl.1142>, 2023.
- Becker, JS, DeLang MN, Chang, K-L., Serre, ML, Cooper ,OR, Wang, H, Martin G. Schultz, MG, Schröder, S, Lu, X, Zhang, L, Deushi, M, Josse, B, Keller, Lamarque, J-F, Lin, M, Liu, J, Marécal, V, Strode, SA, Sudo, K, Tilmes, S, Zhang, L, Brauer M, Brauer and West, J.: Using Regionalized Air Quality Model Performance and Bayesian Maximum Entropy data fusion to map global surface ozone concentration. *Elem Sci Anth*, 11: 1. <https://doi.org/10.1525/elementa.2022.00025>, 2023.
- Belusic Vozila A., Danijel Belusic, Maja Telisman Prtenjak, Ivan Guttler, Sophie Bastin, ErwanBrisson, Marie-Estelle Demory, Andreas Dobler, Hendrik Feldmann, ivind Hodnebrog, StergiosKartsios, Klaus Keuler, Torge Lorenz, Josipa Milovac, Emanuela Pichelli, Mario Ra a, Pedro Soares,Merja Tolle, Heimo Truhetz, Hylke de Vries, and Kirsten Warrach-Sagi: Evaluation of the near-surface wind field over the Adriatic region: local wind characteristics in the convection-permitting model ensemble. *Climate Dynamics*. <https://dx.doi.org/10.1007/s00382-023-06703-z>, 2023.
- Bernard, A., Hagenmuller, P., Montagnat, M., Chambon, G.: Disentangling creep and isothermal metamorphism during snow settlement with X-ray tomography. *Journal of Glaciology* 69, 899–910. <https://doi.org/10.1017/jog.2022.109>, 2023.
- Berre, L. et Arbogast, E.: Formulation and use of 3D-hybrid and 4D-hybrid ensemble covariances in the Météo-France global data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1002/qj.4603>, 2023.
- Berthet, S., Jouanno, J., Sférian, R., Gehlen, M., and Llovel, W.: How does the phytoplankton–light feedback affect the marine N2O inventory?. *Earth Syst. Dynam.*, 14, 399–412. <https://doi.org/10.5194/esd-14-399-2023>, 2023.
- Berthomier, Léa and Perier, Laurent. Espresso: A Global Deep Learning Model to Estimate Precipitation from Satellite Observations. *Meteorology*, 2, 421-444. <https://dx.doi.org/10.3390/meteorology2040025>, 2023.
- Bouvet L., Neige Calonne, Frédéric Flin, Christian Geindreau, Heterogeneous grain growth and vertical mass transfer within a snow layer under a temperature gradient. *The Cryosphere*, 17, 3553-3573, doi: 10.5194/tc-17-3553-2023, 2023.
- Bretagne G., Hidalgo J., Haoues-Jouve S., Dumas G., Debrye L., Hanna A., Masson V. : Enjeu de l'adaptation à la chaleur en ville et action publique : apports de l'interdisciplinarité et de la recherche-action - Cas de la métropole toulousaine. *Climatologie*, 20, 7, 2023.
- Brient F, Couvreur F, Rio C, Honnert R, 2023: Coherent subsiding structures in large-eddy simulations of atmospheric boundary layers, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1002/qj.4625>, 2023.
- Brilouet P.-E., Redelsperger J L, Bouin M N, Couvreur F, Villefranque N: A numerical study of ocean surface-layer response to atmospheric shallow convection: Impact of cloud shading, rain, and cold pools, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1002/qj.4651>, 2023.
- Brilouet, P.-E., Bouniol, D., Couvreur, F., Ayet, A., Granero-Belinchon, C., Lothon, M., & Mouche, A., Trade wind boundary layer turbulence and shallow precipitating convection: New insights combining SAR images, satellite brightness temperature, and airborne in situ measurements. *Geophysical Research Letters*, 50, e2022GL102180. <https://doi.org/10.1029/2022GL102180>, 2023.
- Brochet C., Raynaud L., Thome N., Plu M. et Rambour C.: Multivariate Emulation of Kilometer-Scale Numerical Weather Predictions with Generative Adversarial Networks: A Proof of Concept. *Artificial Intelligence for the Earth System*, 2, 230006. <https://doi.org/10.1175/AIES-D-23-0006.1>, 2023.
- Brondex, J., Fourteau, K., Dumont, M., Hagenmuller, P., Calonne, N., Tuzet, F., and Löwe, H.: A finite-element framework to explore the numerical solution of the coupled problem of heat conduction, water vapor diffusion, and settlement in dry snow (IvoriFEM v0.1.0). *Geosci. Model Dev.*, 16, 7075–0106. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-7075-2023>, 2023.
- Brooke, J. K., S. R. Osborne, M. J. Best, J. Price, G. Canut-Rocafort, A. P. Lock, J. Cuxart, O. Hartogensis, A. Boone, and A. Roy: Irrigation contrasts through the morning transition. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, <https://dx.doi.org/10.1002/qj.4590>, 2023.
- Brun, F., King, O., Réveillet, M., Amory, C., Planchot, A., Berthier, E., Dehecq, A., Bolch, T., Fourteau, K., Brondex, J., Dumont, M., Mayer, C., Leinss, S., Hugonnet, R., and Wagnon, P.: Everest South Col Glacier did not thin during the period 1984–2017, *The Cryosphere*, 17, 3251–3268. <https://doi.org/10.5194/tc-17-3251-2023>, 2023.
- Burgot T., Ludovic Auger, Pierre Bénard : Stability of Constant and Variable Coefficient Semi-Implicit Schemes for the Fully Elastic System of Euler Equations in the Case of Steep Slopes. *Monthly Weather Review*, 151(5), 1269-1286. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-22-0150.1>, 2023.
- Cacilda Godinho Dos Reis G., Hassan Bencherif, Kevin Lamy, Lucas Vaz Peres, Marco Antonio Godinho Dos Reis, et al.. UV index seasonal variability in an Amazonian city of Brazil based on satellite data. *Ciencia e Natura*, 45 (esp. 2), pp.e76670. <https://dx.doi.org/10.5902/2179460X76670>, 2023.

- Ceamanos X., Bruno Six, Suman Moparthy, Dominique Carrer, Adele Georgeot, Josef Gasteiger, Jérôme Riedi, Jean-Luc Attie, Alexei Lyapustin, and Iosif Katsev: Instantaneous aerosol and surface retrieval using satellites in geostationary orbit (IAERUS-GEO) – estimation of 15 min aerosol optical depth from MSG/SEVIRI and evaluation with reference data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16(10): 2575-2599, 2023b. <https://dx.doi.org/10.5194/amt-16-2575-2023>, 2023.
- Ceamanos X., Quentin Coopman, Maya George, Jérôme Riedi, Mark Parrington, and Cathy Clerbaux. Remote sensing and model analysis of biomass burning smoke transported across the Atlantic during the 2020 Western US wildfire season. *Scientific Reports*, 13:16014, 2023a. <https://dx.doi.org/10.1038/s41598-023-39312-1>, 2023.
- Chaigneau, A. A., Law-Chune, S., Melet, A., Voldoire, A., Reffray, G., and Aouf, L.: Impact of sea level changes on future wave conditions along the coasts of western Europe, *Ocean Sci.*, 19, 1123–1143. <https://doi.org/10.5194/os-19-1123-2023>, 2023.
- Champouillon, A., C. Rio, and F. Couvreur : Simulating the Transition from Shallow to Deep Convection across Scales: The Role of Congestus Clouds. *J. Atmos. Sci.*, 80, 2989–3005. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-23-0027.1>, 2023.
- Chane Ming F., Alain Hauchecorne, Christophe Bellisario, Pierre Simoneau, Philippe Keckhut, Samuel Tremoulu, Constantino Listowski, Gwenaél Berthet, Fabrice Jegou, Sergey Khaykin, Mariam, Tidiga, and Alexis Le Pichon. Case Study of a Mesospheric Temperature Inversion over Maïdo Observatory through a Multi-Instrumental Observation. *Remote Sensing*, 15:2045. <https://dx.doi.org/10.3390/rs15082045>, 2023.
- Chang, I., Gao, L., Flynn, C. J., Shinozuka, Y., Doherty, S. J., Diamond, M. S., Longo, K. M., Ferrada, G. A., Carmichael, G. R., Castellanos, P., da Silva, A. M., Saide, P. E., Howes, C., Xue, Z., Mallet, M., Govindaraju, R., Wang, Q., Cheng, Y., Feng, Y., Burton, S. P., Ferrare, R. A., LeBlanc, S. E., Kacenelenbogen, M. S., Pistone, K., Segal-Rozenhaimer, M., Meyer, K. G., Ryo, J.-M., Pfister, L., Adebijyi, A. A., Wood, R., Zuidema, P., Christopher, S. A., and Redemann, J.: On the differences in the vertical distribution of modeled aerosol optical depth over the southeastern Atlantic, *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 4283–4309. <https://doi.org/10.5194/acp-23-4283-2023>, 2023.
- Chao Tang, Béatrice Morel, Swati Singh, Alexandre Graillet, Julien Pergaud, et al.. High-resolution dynamical downscaling experiment outputs data over Reunion and Mauritius islands in the South-West Indian Ocean. *Data in Brief*, 51, pp.109665. <https://dx.doi.org/10.1016/j.dib.2023.109665>, 2023.
- Charpentier-Noyer, M., Peredo, D., Fleury, A., Marchal, H., Bouttier, F., Gaume, E., Nicole, P., Payrastre, O., and Ramos, M.-H.: A methodological framework for the evaluation of short-range flash-flood hydrometeorological forecasts at the event scale, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23, 2001–2029. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-2001-2023>, 2023.
- Cole, J. N. S., Barker, H. W., Qu, Z., Villefranque, N., and Shephard, M. W.: Broadband radiative quantities for the EarthCARE mission: the ACM-COM and ACM-RT products, *Atmos. Meas. Tech.*, 16, 4271–4288. <https://doi.org/10.5194/amt-16-4271-2023>, 2023.
- Colin, J., B. Decharme, J. Cattiaux and D. Saint-Martin: Groundwater feedbacks on climate change in the CNRM global climate model. *Journal of Climate*, 36(21), 7599-7617. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0767.1>, 2023.
- Comerón, Adolfo, Constantino Muñoz-Porcar, Alejandro Rodríguez-Gómez, Michaël Sicard, Federico Dios, et al.. An explicit formulation for the retrieval of the overlap function in an elastic and Raman aerosol lidar. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16 (11), pp.3015-3025. <https://dx.doi.org/10.5194/amt-16-3015-2023>, 2023.
- Coopmann O., N. Fourrie, P. Chambon, J. Vidot, P. Brousseau, M. Martet, and C. Birman. Preparing the assimilation of the future MTG-IRS sounder into the mesoscale NWP AROME model. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. <https://dx.doi.org/10.1002/qj.4548>, 2023.
- Coquillat, Sylvain, Véronique Pont, Mickaël Pardé, Michaël Kreitz, Dominique Lambert, Ronan Houel, Didier Ricard, Eric Gonneau, Pierre de Guibert, Serge Prieur, Découverte d'une anomalie électrique dans des orages méditerranéens, *La Météorologie*, 120, 46-55. <https://doi.org/10.37053/lameteorologie-2023-0016>, 2023.
- Corale L., Sylvie Malardel, Soline Bielli, and Marie-Noëlle Bouin. Evaluation of a Mesoscale Coupled Ocean-Atmosphere Configuration for Tropical Cyclone Forecasting in the South West Indian Ocean Basin. *Earth and Space Science*, 2023, <https://dx.doi.org/10.1029/2022EA002584>.
- Corchia, T.; Bonan, B.; Rodríguez-Fernández, N.; Colas, G.; Calvet, J.-C. Assimilation of ASCAT Radar Backscatter Coefficients over Southwestern France. *Remote Sens.*, 15, 4258. <https://doi.org/10.3390/rs15174258>, 2023.
- Córdoba-Jabonero, Carmen, Michaël Sicard, África Barreto, Carlos Toledano, María Ángeles López-Cayuela, et al.. Fresh volcanic aerosols injected in the atmosphere during the volcano eruptive activity at the Cumbre Vieja area (La Palma, Canary Islands): Temporal evolution and vertical impact. *Atmospheric Environment*, 300, pp.119667. <https://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119667>, 2023.
- Cornut, F.; El Amraoui, L.; Cuesta, J.; Blanc, J. Added Value of Aerosol Observations of a Future AOS High Spectral Resolution Lidar with Respect to Classic Backscatter Spaceborne Lidar Measurements. *Remote Sens.*, 15, 506. <https://doi.org/10.3390/rs15020506>, 2023.
- Costantini M., Jeanne Colin, and Bertrand Decharme. Projected Climate-Driven Changes of Water Table Depth in the World's Major Groundwater Basins. *Earth's Future*, 11(3). <https://dx.doi.org/10.1029/2022EF003068>, 2023.
- Dauhut T, Couvreur F, Bouniol D, Beucher F, Volkmer L, Portge V, Schafer M, Ayet A, Brilouet P.E, Jacob M, Wirth M : Flower trade-wind clouds are shallow mesoscale convective systems, Quarterly *Journal of the Royal Meteorological Society*, 149, 325-347. <https://doi.org/10.1002/qj.4409>, 2023.
- De Souza A. M., Lucas V. Peres, Gabriela D. Bittencourt, Damaris K. Pinheiro, Bibiana C. Lopes, et al.. Impacts of the Antarctic ozone hole influence events over southern Brazil in October 2015. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 95 (suppl 3), 2023.
- Delbeke, L., Wang, C., Tulet, P., Denjean, C., Zouzoua, M., Maury, N., and Deroubaix, A.: The impact of aerosols on stratiform clouds over southern West Africa: a large-eddy-simulation study, *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 13329–13354. <https://doi.org/10.5194/acp-23-13329-2023>, 2023.
- Demaeyer, J., Bhend, J., Lerch, S., Primo, C., Van Schaebroeck, B., Atencia, A., Ben Bouallègue, Z., Chen, J., Dabernig, M., Evans, G., Faganeli Pucer, J., Hooper, B., Horat, N., Jobst, D., Merše, J., Mlakar, P., Möller, A., Mestre, O., Taillardat, M., and Vannitsem, S.: The EUPPBench postprocessing benchmark dataset v1.0, *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 2635–2653. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2635-2023>, 2023.
- Dick O., Leo Viallon-Galinier, Francois Tuzet, Pascal Hagenmuller, Mathieu Fructus, Benjamin Reuter, Matthieu Lafaysse, and Marie Dumont. Can Saharan dust deposition impact snowpack stability in the French Alps? *The Cryosphere*, 17(4):1755-1773. <https://dx.doi.org/10.5194/tc-17-1755-2023>, 2023.
- Dione, C., Haeffelin, M., Burnet, F., Lac, C., Canut, G., Delanoë, J., Dupont, J.-C., Jorquera, S., Martinet, P., Ribaud, J.-F., and Toledo, F.: Role of thermodynamic and turbulence processes on the fog life cycle during SOFOG3D experiment, *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 15711–15731. <https://doi.org/10.5194/acp-23-15711-2023>, 2023.
- Douville H.: Robust and perfectible constraints on human-induced Arctic climate change. *Communications Earth & Environment*, 4, 283. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00949-5>, 2023.
- Douville H. and K. Willett: A drier than expected future, supported by near-surface relative humidity observations. *Sc. Adv.*, 9, eade6253. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ade6253>, 2023.
- Douville H., R. Chadwick, M. Saint-Lu, B. Medeiros, Drivers of dry day sensitivity to increased CO2. *Geophys. Res. Lett.*, 50, e2023GL103200. <https://dx.doi.org/10.1029/2023GL103200>, 2023.
- Dulac W., Julien Cattiaux, Fabrice Chauvin, Stella Bourdin, and Sebastien Fromang. Assessing the representation of tropical cyclones in ERA5 with the CNRM tracker. *Climate Dynamics*. <https://dx.doi.org/10.1007/s00382-023-06902-8>, 2023.
- Dumont, M., Gascoin, S., Réveillet, M., Voisin, D., Tuzet, F., Arnaud, L., Bonnefoy, M., Bacardit Peñarroya, M., Carmagnola, C., Deguine, A., Diacre, A., Dürr, L., Evrad, O., Fontaine, F., Frankl, A., Fructus, M., Gandois, L., Gouttevin, I., Gherab, A., Hagenmuller, P., Hansson, S., Herbin, H., Josse, B., Jourdain, B., Lefevre, I., Le Roux, G., Libois, Q., Liger, L., Morin, S., Petitprez, D., Robledano, A., Schneebeli, M., Salze, P., Six, D., Thibert, E., Trachsel, J., Vernay, M., Viallon-Galinier, L., and Voiron, C.: Spatial variability of Saharan dust deposition revealed through a citizen science campaign, *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 3075–3094. <https://doi.org/10.5194/essd-15-3075-2023>, 2023.

- Dutot E. and H. Douville, Revisiting the potential to narrow uncertainty in annual runoff projections of Arctic rivers, *Geophys. Res. Lett.*, 50, e2023GL104039. <https://dx.doi.org/10.1029/2023GL104039>, 2023.
- Erdmann, F., Caumont, O., and Defer, E.: Assimilation of Meteosat Third Generation (MTG) Lightning Imager (LI) pseudo-observations in AROME-France – proof of concept, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23, 2821–2840. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-2821-2023>, 2023.
- Evan S., Jerome Brioude, Karen Rosenlof, Ru-Shan Gao, Robert Portmann, et al. Rapid ozone depletion after humidification of the stratosphere by the Hunga Tonga Eruption, *Science*, 382 (6668). <https://dx.doi.org/10.1126/science.adg2551>, 2023.
- Ezzedine, J.A., Uwizeye, C., Si Larbi, G. et al. Adaptive traits of cysts of the snow alga *Sanguina nivaloides* unveiled by 3D subcellular imaging. *Nat Commun* 14, 7500. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43030-7>, 2023.
- Faïn, X., Etheridge, D. M., Fourteau, K., Martinerie, P., Trudinger, C. M., Rhodes, R. H., Chellman, N. J., Langenfelds, R. L., McConnell, J. R., Curran, M. A. J., Brook, E. J., Blunier, T., Teste, G., Grilli, R., Lemoine, A., Sturges, W. T., Vanni re, B., Freitag, J., and Chappellaz, J.: Southern Hemisphere atmospheric history of carbon monoxide over the late Holocene reconstructed from multiple Antarctic ice archives, *Clim. Past*, 19, 2287–2311. <https://doi.org/10.5194/cp-19-2287-2023>, 2023.
- Flaounas, E., Arag o, L., Bernini, L., Dafis, S., Doiteau, B., Flocas, H., Gray, S. L., Karwat, A., Kouroutzoglou, J., Lionello, P., Miglietta, M. M., Pantillon, F., Pasquero, C., Patlakas, P., Picornell, M.  ., Porc , F., Priestley, M. D. K., Reale, M., Roberts, M. J., Saaroni, H., Sandler, D., Scoccimarro, E., Sprenger, M., and Ziv, B.: A composite approach to produce reference datasets for extratropical cyclone tracks: application to Mediterranean cyclones, *Weather Clim. Dynam.*, 4, 639–661. <https://doi.org/10.5194/wcd-4-639-2023>, 2023.
- Forceville G., Aude Lemonsu, Sarah Gorla, Morgane Stempfelet, Sabine Host, Jean-Marie Alessandrini, Erwan Cordeau, and Mathilde Pascal. Spatial contrasts and temporal changes in fine-scale heat exposure and vulnerability in the Paris region. *Science of the Total Environment*, page 167476. <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167476>, 2023.
- Fran ois H., Rapha lle Samacots, David Neil Bird, Judith Koberl, Franz Pretenthaler, and Samuel Morin. Climate change exacerbates snow-water-energy challenges for European ski tourism. *Nature Climate Change*. <https://dx.doi.org/10.1038/s41558-023-01759-5>, 2023.
- Friedel, M., Chiodo, G., Sukhodolov, T., Keeble, J., Peter, T., Seeber, S., Stenke, A., Akiyoshi, H., Rozanov, E., Plummer, D., J ckel, P., Zeng, G., Morgenstern, O., and Josse, B.: Weakening of springtime Arctic ozone depletion with climate change, *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 10235–10254. <https://doi.org/10.5194/acp-23-10235-2023>, 2023.
- Friedlingstein, P., O’Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landsch tzer, P., Le Qu er , C., Luijckx, I. T., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitoh, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., Barbero, L., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Decharme, B., Bopp, L., Brasika, I. B. M., Cadule, P., Chamberlain, M. A., Chandra, N., Chau, T.-T., Chevallier, F., Chini, L. P., Cronin, M., Dou, X., Enyo, K., Evans, W., Falk, S., Feely, R. A., Feng, L., Ford, D. J., Gasser, T., Ghattas, J., Gkritzalis, T., Grassi, G., Gregor, L., Gruber, N., G rres,  ., Harris, I., Hefner, M., Heinke, J., Houghton, R. A., Hurtt, G. C., Iida, Y., Ilyina, T., Jacobson, A. R., Jain, A., Jarn kov , T., Jersild, A., Jiang, F., Jin, Z., Joos, F., Kato, E., Keeling, R. F., Kennedy, D., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J. I., K rtzinger, A., Lan, X., Lef vre, N., Li, H., Liu, J., Liu, Z., Ma, L., Marland, G., Mayot, N., McGuire, P. C., McKinley, G. A., Meyer, G., Morgan, E. J., Munro, D. R., Nakaoka, S.-I., Niwa, Y., O’Brien, K. M., Olsen, A., Omar, A. M., Ono, T., Paulsen, M., Pierrot, D., Pocock, K., Poulter, B., Powis, C. M., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., R odenbeck, C., Rosan, T. M., Schwinger, J., S f rian, R., Smallman, T. L., Smith, S. M., Sospedra-Alfonso, R., Sun, Q., Sutton, A. J., Sweeney, C., Takao, S., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., Tsujino, H., Tubiello, F., van der Werf, G. R., van Ooijen, E., Wanninkhof, R., Watanabe, M., Wilmart-Rousseau, C., Yang, D., Yang, X., Yuan, W., Yue, X., Zaehle, S., Zeng, J., and Zheng, B.: Global Carbon Budget 2023, *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 5301–5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>, 2023.
- Garestier F., S. Guillaso, E.A. Zakharova, A.V. Kouraev, B. Decharme, R.V. Desyatkin, A. Desyatkin, T. Chevalier: Imaging permafrost active layer thickness under forest for climate model improvement, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 125, 103582, ISSN 1569-8432. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103582>, 2023.
- Garisoain, R., Delire, C., Decharme, B., Ferrant, S., Granouillac, F., Payre-Suc, V., & Gandois, L.: A study of dominant vegetation phenology in a Sphagnum mountain peatland using in situ and Sentinel-2 observations. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 128, e2023JG007403. <https://doi.org/10.1029/2023JG007403>, 2023.
- Godet J., Olivier Payrastr , Pierre Javelle, Fran ois Bouttier, Assessing the ability of a new seamless short-range ensemble rainfall product to anticipate flash floods in the French Mediterranean area. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-3355-2023>, 2023.
- Gonzalez N, Waldman R, Sannino G, Giordani H, Somot S : Understanding tidal mixing at the Strait of Gibraltar: A high-resolution model approach. *Progress in Oceanography* 212:102,980. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2023.102980> 2023.
- Gonz lez-Alem n, J. J., D. Insua-Costa, E. Bazile, S. Gonz lez-Herrero, M. Marcello Miglietta, P. Groenemeijer, and M. G. Donat : Anthropogenic Warming Had a Crucial Role in Triggering the Historic and Destructive Mediterranean Derecho in Summer 2022. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 104, E1526–E1532. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0119.1>, 2023.
- Gouttevin, I., V. Vionnet, Y. Seity, A. Boone, M. Lafaysse, Y. Deliot and H. Merzisen : To the origin of a wintertime screen-level temperature bias at high altitude in a kilometric NWP model. *J. Hydrometeorol.*, 24(1), 53-71. <https://dx.doi.org/10.1175/JHM-D-21-0200.1>, 2023.
- Grant L., Lukas Gudmundsson, Edouard L Davin, David M Lawrence, Nicolas Vuichard, Eddy Robertson, Roland Seferian, Aurelien Ribes, Annette L Hirsch, and Wim Thiery. Biogeophysical Effects of Land-Use and Land-Cover Change Not Detectable in Warmest Month. *Journal of Climate*, 36(6):1845-1861. <https://dx.doi.org/10.1175/jcli-d-22-0391.1>, 2023.
- Gu rou, Adrien, Benoit Meyssignac, Pierre Prandi, Micha l Ablain, Aur lien Ribes, et al., Current observed global mean sea level rise and acceleration estimated from satellite altimetry and the associated measurement uncertainty. *Ocean Science*, 19, pp.431-451. <https://dx.doi.org/10.5194/os-19-431-2023>, 2023.
- Guinaldo T., Aurore Voldoire, Robin Waldman, Stephane Saux Picart, and Herve Roquet, Response of the sea surface temperature to heatwaves during the France 2022 meteorological summer. *Ocean Science*, 19(3):629-647. <https://dx.doi.org/10.5194/os-19-629-2023>, 2023.
- Ha M., Sophie Bastin, Philippe Drobinski, Llus Fita, Jan Polcher, Olivier Bock, Marjolaine Chiriaco, Danijel Belusic, Cecile Caillaud, A. Dobler, J. Fernandez, K. Goergen, Hodnebrog, S. Kartios, E. Katragkou, A. Lavin-Gullon, T. Lorenz, J. Milovac, H.-J. Panitz, S. Sobolowski, H. Truhetz, K. Warrach-Sagi, and V. Wulfmeyer. Precipitation frequency in Med-CORDEX and EURO-CORDEX ensembles from 0.44  to convection-permitting resolution: impact of model resolution and convection representation. *Climate Dynamics*. <https://dx.doi.org/10.1007/s00382-022-06594-6>, 2023.
- Herrera-Lormendez P., A. John, H. Douville, J. Matschullat, Projected changes in synoptic circulations over Europe and their implications for summer precipitation: A CMIP6 perspective. *Int. J. Climatol.* <https://dx.doi.org/10.1002/joc.8033>, 2023.
- Herrera-Lormendez, P., Douville, H., Matschullat, J.: European summer synoptic circulations and their observed 2022 and projected influence on hot extremes and dry spells. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL104580. <https://doi.org/10.1029/2023GL104580>, 2023.
- Hidalgo, Julia, Najla Touati, Sinda Haou s-Jouve, Laurent Jegou, Genevi ve Bretagne, Erwan Bocher, Val ry Masson, Arnaud Mayis, Renaud Jougl , Gwendall Petit et Robert Schoetter, Mapping the urban climate to address summer comfort management in French urban planning documents, *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.40319>, 2023.
- Hochet, A., Dodet, G., S vellec, F., Bouin, M.-N., Patra, A., & Arduin, F., Time of emergence for altimetry-based significant wave height changes in the North Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 50, e2022GL102348. <https://doi.org/10.1029/2022GL102348>, 2023.
- K hnert, M., Sodemann, H., Remes, T.M. Fortelius C. Bazile E., Essau I. Spatial Variability of Nocturnal Stability Regimes in an Operational Weather

Prediction Model. *Boundary-Layer Meteorol* 186, 373–397. <https://doi.org/10.1007/s10546-022-00762-1>, 2023.

Koenig A. M., Olivier Magand, Clemence Rose, Andrea Di Muro, Yuzo Miyazaki, Aurelie Colomb, Matti Rissanen, Christopher F Lee, Theodore K Koenig, Rainer Volkamer, Jerome Brioude, Bert Verreyken, Tjarda Roberts, Brock A Edwards, Karine Sellegri, Santiago Arellano, Philippe Kowalski, Alessandro Aiuppa, Jeroen E Sonke, and Aurelien Dommergue. Observed in-plume gaseous elemental mercury depletion suggests significant mercury scavenging by volcanic aerosols. *Environmental Science: Atmospheres*. <https://dx.doi.org/10.1039/D3EA00063J>, 2023.

Krampe D., Frank Kauker, Marie Dumont, and Andreas Herber. Snow and meteorological conditions at Villum Research Station, Northeast Greenland: on the adequacy of using atmospheric reanalysis for detailed snow simulations. *Frontiers in Earth Science*, 11. <https://dx.doi.org/10.3389/feart.2023.1053918>, 2023.

Kuhlbrodt T., Aurore Voldoire, Matthew D Palmer, Olivier Geoffroy, and Rachel E Killick. Historical Ocean Heat Uptake in Two Pairs of CMIP6 Models: Global and Regional Perspectives. *Journal of Climate*, 36(7):2183–2203. <https://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0468.1>, 2023.

Laforge, Antoine, Philippe Gaspar, Anne Barat, Julien Temple Boyer, Tony Candela, et al. Uncovering loggerhead (*Caretta caretta*) navigation strategy in the open ocean through the consideration of their diving behaviour. *Journal of The Royal Society Interface*, 20 (209), pp.20230383. <https://dx.doi.org/10.1098/rsif.2023.0383>, 2023.

Lamare, M., F. Domine, J. Revuelto, M. Pelletier, L. Arnaud, and G. Picard : Investigating the Role of Shrub Height and Topography in Snow Accumulation on Low-Arctic Tundra using UAV-Borne Lidar. *J. Hydrometeorol.*, 24, 853–871. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-22-0067.1>, 2023.

Lamotte C., Virginie Marecal, Jonathan Guth, Giuseppe Salerno, Stefano Corradini, Nicolas Theys, Simon Warnach, Lorenzo Guerrieri, Hugues Brenot, Thomas Wagner, and Mickael Bacles. Impact of SO<sub>2</sub> Flux Estimation in the Modeling of the Plume of Mount Etna Christmas 2018 Eruption and Comparison against Multiple Satellite Sensors. *Remote Sensing*, 15(3):758. <https://dx.doi.org/10.3390/rs15030758>, 2023.

Lamy K., Annelise Tran, Thierry Portafaix, M.D. Leroux, and Thierry Baldet. Impact of regional climate change on the mosquito vector *Aedes albopictus* in a tropical island environment: La Reunion. *Science of the Total Environment*, 875:162484. <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162484>, 2023.

Latos, B., Peyrillé, P., Lefort, T. et al. The role of tropical waves in the genesis of Tropical Cyclone Seroja in the Maritime Continent. *Nat Commun* 14, 856. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36498-w>, 2023.

Laxenaire R, Chassignet EP, Dukhovskoy DS and Morey SL, Impact of upstream variability on the Loop Current dynamics in numerical simulations

of the Gulf of Mexico. *Front. Mar. Sci.* 10:1080779. <https://dx.doi.org/10.3389/fmars.2023.1080779>, 2023.

Le Breton, M., Larose, É., Baillet, L., Lejeune, Y., and van Herwijnen, A.: Monitoring snow water equivalent using the phase of RFID signals, *The Cryosphere*, 17, 3137–3156. <https://doi.org/10.5194/tc-17-3137-2023>, 2023.

Le Page, M., T. Nguyen, M. Zribi, A. Boone, J. Dari, S. Modanesi, L. Zapa, N. Ouadi and L. Jarlan, 2023: Irrigation Timing Retrieval at the Plot Scale Using Surface Soil Moisture Derived from Sentinel Time Series in Europe. *Remote Sens.*, 1449. <https://dx.doi.org/10.3390/rs15051449>, 2023.

Le Toumelin L., Isabelle Gouttevin, Nora Helbig, Clovis Galiez, Mathis Roux, and Fatima Karbou. Emulating the adaptation of wind fields to complex terrain with deep-learning. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 2(1):1-19. <https://dx.doi.org/10.1175/AIES-D-22-0034.1>, 2023.

Lemonsu A, Caillaud C, Alias A, Riette S, Seity Y, Le Roy B, Michau Y, Lucas-Picher P: What added value of CNRM-AROME convection-permitting regional climate model compared to CNRM-ALADIN regional climate model for urban climate studies? Evaluation over Paris area (France). *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06647-w>, 2023.

Lewis H., Bellon, G., Dinh, T., Upstream Large-Scale Control of Subtropical Low-Cloud Climatology. *Journal of Climate*, 36 (10), pp.3289-3303. <https://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0676.1>, 2023.

Lipson, Mathew J., Sue Grimmond, Martin Best, Gab Abramowitz, Andrew Coutts, Nigel Tapper, Jong-Jin Baik, Meiring Beyers, Lewis Blunn, Souhail Boussetta, Elie Bou-Zeid, Martin G. De Kauwe, Cécile de Munck, Matthias Demuzere, Simone Faticchi, Krzysztof Fortuniak, Beom-Soon Han, Margaret A. Hendry, Yukihiko Kikigawa, Hiroaki Kondo, Doo-Il Lee, Sang-Hyun Lee, Aude Lemonsu, Tiago Machado, Gabriele Manoli, Alberto Martilli, Valéry Masson, Joe McNorton, Naika Meili, David Meyer, Kerry A. Nice, Keith W. Oleson, Seung-Bu Park, Michael Roth, Robert Schoetter, Andrés Simón-Moral, Gert-Jan Steeneveld, Ting Sun, Yuya Takane, Marcus Thatcher, Aristofanis Tsiringakis, Mikhail Varentsov, Chenghao Wang, Zhi-Hua Wang, Andy J. Pitman: Evaluation of 30 urban land surface models in the Urban-PLUMBER project : Phase 1 results. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1–44. <https://doi.org/10.1002/qj.4589>, 2023.

Lolli, Simone, Michaël Sicard, Francesco Amato, Adolfo Comeron, Cristina Gíl-Díaz, et al. Climatological assessment of the vertically resolved optical and microphysical aerosol properties by lidar measurements, sun photometer, and in situ observations over 17 years at Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) Barcelona, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23 (19), pp.12887-12906. <https://dx.doi.org/10.5194/acp-23-12887-2023>, 2023.

López-Cayuela, María Ángeles, Carmen Córdoba-Jabonero, Diego Bermejo-Pantaleón, Michaël Sicard, Vanda Salgueiro, et al., Vertical characterization of fine and coarse dust particles during an intense Saharan dust outbreak over the Iberian Peninsula in springtime 2021. *Atmospheric*

*Chemistry and Physics*, 23 (1), pp.143-161. <https://dx.doi.org/10.5194/acp-23-143-2023>, 2023.

Lucas-Picher P., E. Brisson, C. Caillaud, A. Alias, P. Nabat, A. Lemonsu, N. Poncet, V. Cortes Hernandez, Y. Michau, A. Doury, D. Monteiro, and S. Somot. Evaluation of the convection-permitting regional climate model CNRM-AROME41t1 over Northwestern Europe. *Climate Dynamics*. <https://dx.doi.org/10.1007/s00382-022-06637-y>, 2023.

Mandement, M., P. Kirstetter, and H. Reeves: Intercomparison between Ground-Based and Spaceborne Radars' Echo-Top Heights: Application to the Multi-Radar Multi-Sensor and the Global Precipitation Measurement. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 62, 917–928. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-22-0146.1>, 2023.

Mangan, M. R., O. Hartogensis, A. Boone, O. Branch, G. Canut, J. Cuxart, H. de Boer, M. Le Page, D. Martínez-Villagrana, J. Ramon Miró, J. Price, J. Vilà and G. de Arellano : The surface-boundary layer connection across spatial scales of thermal heterogeneity. *Agri. and Forest Meteorology*, 335. <https://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.09452>, 2023.

Manta G, Durante G, Candela J, Send U, Sheinbaum J, Lankhorst M and Laxenaire R : Predicting the Loop Current dynamics combining altimetry and deep flow measurements through the Yucatan Channel. *Front. Mar. Sci.* 10:1156159. <https://dx.doi.org/10.3389/fmars.2023.1156159>, 2023.

Marécal, V., Voisin-Plessis, R., Roberts, T. J., Aiuppa, A., Narivelo, H., Hamer, P. D., Josse, B., Guth, J., Surl, L., and Grellier, L.: Halogen chemistry in volcanic plumes: a 1D framework based on MOCAGE 1D (version R1.18.1) preparing 3D global chemistry modelling, *Geosci. Model Dev.*, 16, 2873–2898. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-2873-2023>, 2023.

Marseille, G. J., J. de Kloe, A. Dabas, T. Flament, M. Rennie: Aeolus Rayleigh-channel winds in cloudy conditions. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1002/qj.4555>, 2023.

Mascaut, Faustine, Olivier Pujol, Jérôme Brioude, Andrew Jensen, Marc Lefranc, et al.. A competition-species model for water vapour-aerosol-cloud-rain interactions. *Atmospheric Research*, pp.106588. <https://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106588>, 2023.

Maury, N., Roberts, G.C., Couvreur, F., Verdu, T., Narvor, P., Lacroix, S., et al., Quantifying the mixing of trade-wind cumulus during the NEPHELAE-EUREC4A field campaign with remotely piloted aircraft. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 149(752), 809–829. <https://doi.org/10.1002/qj.4430>, 2023.

Mayot N., Corinne Corinne Le Quere, Christian Rodenbeck, Raaele Bernardello, Laurent Bopp, Laique M. Djeuthouang, Marion Gehlen, Luke Gregor, Nicolas Gruber, Judith Hauck, Yosuke Iida, Tatiana V. Ilyina, Ralph F. Keeling, Peter Landschutzer, Andrew C. Manning, Lavinia Patara, Laure Resplandy, Jorg Schwinger, Roland Seferian, Andrew J. Watson, Rebecca Mary Wright, and J.

- Zeng. Climate-driven variability of the Southern Ocean CO<sub>2</sub> sink. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 381(2249). <https://dx.doi.org/10.1098/rsta.2022.0055>, 2023.
- Mazoyer M., Didier Ricard, Gwendal Riviere, Julien Delanoë, Sebastien Riette, Clotilde Augros, Mary Borderies, and Benoit Vie. Impact of mixed-phase cloud parameterization on warm conveyor belts and upper-tropospheric dynamics. *Monthly Weather Review*, 151(5):1073-1091. <https://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-22-0045.1>, 2023.
- Mazoyer, M, Roehrig R, Duffourg F, Nuissier O: Simulating a Mediterranean heavy-precipitating event with parametrized convection: role of subgrid-scale topography. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 149(750), 1-18. <https://doi.org/10.1002/qj.4369>, 2023.
- Michau Y, Lemonsu A, Lucas-Picher P, Caillaud C, Alias A Evaluation of the Urban Heat Island of 12 cities of France in a high-resolution regional climate model simulation. *Urban Climate*. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101386>, 2023.
- Milford, Celia, Carlos Torres, Jon Vilches, Ann-Kathrin Gossman, Frederik Weis, et al.. Impact of the 2021 La Palma volcanic eruption on air quality: Insights from a multidisciplinary approach. *Science of the Total Environment*, 869, pp.161652. <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161652>, 2023.
- Monteiro D. and Morin S. Multi-decadal analysis of past winter temperature, precipitation and snow cover data in the European Alps from reanalyses, climate models and observational datasets. *The Cryosphere*, 17(8):3617-3660. <https://dx.doi.org/10.5194/tc-17-3617-2023>, 2023.
- Moon, T. A., et al.: The Arctic. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 104, S271–S321. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0079.1>, 2023.
- Morin, S., François, H., Réveillet, M., Sauquet, E., Crochemore, L., Branger, F., Leblois, É., and Dumont, M.: Simulated hydrological effects of grooming and snowmaking in a ski resort on the local water balance, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 27, 4257–4277. <https://doi.org/10.5194/hess-27-4257-2023>, 2023.
- Muller S. K., Cecile Caillaud, Steven Chan, Hylke de Vries, Sophie Bastin, Segolene Berthou, Erwan Brisson, Marie-Estelle Demory, Hendrik Feldmann, Klaus Goergen, Stergios Kartsios, Petter Lind, Klaus Keuler, Emanuela Pichelli, Mario Ra a, Merja H. Tolle, and Kirsten Warrach-Sagi. Evaluation of Alpine-Mediterranean precipitation events in convection-permitting regional climate models using a set of tracking algorithms. *Climate Dynamics*, 61:939[957]. <https://dx.doi.org/10.1007/s00382-022-06555-z>, 2023.
- Nagel, T., Schoetter, R., Bourgin, V. et al. Drag Coefficient and Turbulence Mixing Length of Local Climate Zone-Based Urban Morphologies Derived Using Obstacle-Resolving Modelling. *Boundary-Layer Meteorol* 186, 737–769. <https://doi.org/10.1007/s10546-022-00780-z>, 2023.
- Narivelo, H., Hamer, P. D., Marécal, V., Surl, L., Roberts, T., Pelletier, S., Josse, B., Guth, J., Bacles, M., Warnach, S., Wagner, T., Corradini, S., Salerno, G., and Guerrieri, L.: A regional modelling study of halogen chemistry within a volcanic plume of Mt Etna's Christmas 2018 eruption, *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 10533–10561. <https://doi.org/10.5194/acp-23-10533-2023>, 2023.
- Noual G., Yves Brunet, P. Le Moigne, and C. Lac. Simulating the Effects of Regional Forest Cover and Windthrow-Induced Cover Changes on Mid-Latitude Boundary-Layer Clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(13). <https://dx.doi.org/10.1029/2023JD038477>, 2023.
- Quaadi, Nadia, Lionel Jarlan, Saïd Khabba, Michel LE PAGE, Adnane Chakir, et al. : Are the C-band backscattering coefficient and interferometric coherence suitable substitutes of NDVI for the monitoring of the FAO-56 crop coefficient?, *Agricultural Water Management*, 282, pp.108276. <https://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108276>, 2023.
- Perrot A., Olivier Pannekoucke, and Vincent Guidard. Toward a multivariate formulation of the parametric Kalman filter assimilation: application to a simplified chemical transport model. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 30(2):139-166. <https://dx.doi.org/10.5194/npg-30-139-2023>, 2023.
- Peyrillé, P., Roehrig, R., & Sanogo, S., Tropical waves are key drivers of extreme precipitation events in the Central Sahel. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL103715. <https://doi.org/10.1029/2023GL103715>, 2023.
- Pfeffer, J., Cazenave, A., Blazquez, A., Decharme, B., Munier, S., and Barnoud, A.: Assessment of pluri-annual and decadal changes in terrestrial water storage predicted by global hydrological models in comparison with the GRACE satellite gravity mission, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 27, 3743–3768. <https://doi.org/10.5194/hess-27-3743-2023>, 2023.
- Pic, R., Dombry, C., Naveau, P., & Taillardat, M.: Distributional regression and its evaluation with the CRPS: Bounds and convergence of the minimax risk. *International Journal of Forecasting*, 39(4), 1564-1572. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijforecast.2022.11.001>, 2023.
- Pique, G.; Carrer, D.; Lugato, E.; Fieuzal, R.; Garisoain, R.; Ceschia, E. About the Assessment of Cover Crop Albedo Potential Cooling Effect: Risk of the Darkening Feedback Loop Effects. *Remote Sens.*, 15, 3231. <https://doi.org/10.3390/rs1513231>, 2023.
- Planchat A., Lester Kwiatkowski, Laurent Bopp, Olivier Torres, James R Christian, Momme Butenschon, Tomas Lovato, Roland Seferian, Matthew A Chamberlain, Olivier Aumont, Michio Watanabe, Akitomo Yamamoto, Andrew Yool, Tatiana Ilyina, Hiroyuki Tsujino, Kristen M Krumhardt, Jorg Schwinger, Jerry Tjiputra, John P Dunne, and Charles Stock. The representation of alkalinity and the carbonate pump from CMIP5 to CMIP6 Earth system models and implications for the carbon cycle. *Biogeosciences*, 20(7):1195-1257. <https://dx.doi.org/10.5194/bg-20-1195-2023>, 2023.
- Poli, P., Roebeling, R., John, V. O., Doutriaux-Boucher, M., Schulz, J., Lattanzio, A., et al.: Radiance simulations in support of climate services. *Earth and Space Science*, 10, e2023EA002868. <https://doi.org/10.1029/2023EA002868>, 2023.
- Qasmi, Saïd: Past and future response of the North Atlantic warming hole to anthropogenic forcing. *Earth System Dynamics*, 14 (3), pp.685-695. <https://dx.doi.org/10.5194/esd-14-685-2023>, 2023.
- Ranaivombola M., Nelson Begue, Hassan Bencherif, Tristan Millet, Venkataraman Sivakumar, Valentin Dufлот, Alexandre Baron, Nkanyiso Mbatha, Stuart Piketh, Paola Formenti, and Philippe Goloub. Aerosol Optical Properties and Types over Southern Africa and Reunion Island Determined from Ground-Based and Satellite Observations over a 13-Year Period (2008–2021). *Remote Sensing*, 15(6):1581. <https://dx.doi.org/10.3390/rs15061581>, 2023.
- Reuter B., Pascal Hagenmuller, Nicolas Eckert. Snow and avalanche climates in the French Alps using avalanche problem frequencies. *Journal of Glaciology*, pp.1-13. <https://dx.doi.org/10.1017/jog.2023.23>, 2023.
- Ricard, Simon, Philippe Lucas-Picher, Antoine Thibault, François Anctil, Producing reliable hydrologic scenarios from raw climate model outputs without resorting to meteorological observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27, pp.2375-2395. <https://dx.doi.org/10.5194/hess-27-2375-2023>, 2023.
- Ricaud P, Medina P, Durand P, Attié J-L, Bazile E, Grigioni P, Guasta MD, Pauly B. In Situ VTOL Drone-Borne Observations of Temperature and Relative Humidity over Dome C, Antarctica. *Drones*. 7(8):532. <https://doi.org/10.3390/drones7080532>, 2023.
- Ricaud, Philippe, Aude Sonnevile. Concordia : une station scientifique dans le froid extrême de l'Antarctique. *La Météorologie*, 123, pp.59. <https://dx.doi.org/10.37053/lameteorologie-2023-0095>, 2023.
- Robledano A., Picard, G., Dumont, M., Flin, F., Arnaud, L., & Libois, Q.: Unraveling the optical shape of snow, *Nature Communications*, 14(1), 3955. <https://dx.doi.org/10.1038/s41467-023-39671-3>, 2023.
- Rogel, L., Ricard, D., Bazile, É. & Sandu, I., Effects of subgrid-scale turbulence parametrization on the representation of clear-air turbulence using kilometre- to hectometre-scale numerical simulations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 149(757), 3301–3322. <https://doi.org/10.1002/qj.4557>, 2023.
- Rojas-Munoz, O.; Calvet, J.-C.; Bonan, B.; Baghdadi, N.; Meurey, C.; Napoly, A.; Wigneron, J.-P.; Zribi, M. Soil Moisture Monitoring at Kilometer Scale: Assimilation of Sentinel-1 Products in ISBA. *Remote Sens.*, 15, 4329. <https://doi.org/10.3390/rs15174329>, 2023.
- Roupioz L., Xavier Briottet, K Adeline, A Al Bitar, Delphine Barbon-Dubosc, R Barda-Chatain, Philippe Barillot, S Bridier, E Carroll, Charlene Cassante, A Cerbelaud, Philippe Deliot, Philippe Doublet, P E Dupouy, S Gadal, S Guernouti, A de Guilhem de Lataillade, A Lemonsu, R Llorens, R Luhahe, Aurelie Michel, Ahmed Moussous, M

- Musy, F Nerry, Laurent Poutier, A Rodler, Nicolas Riviere, Thomas Riviere, J L Roujean, A Roy, Anita Schilling, D Skokovic, and J Sobrino. Multi-source datasets acquired over Toulouse (France) in 2021 for urban microclimate studies during the CAMCATT/Al4GEO field campaign. *Data in Brief*, 48. <https://dx.doi.org/10.1016/j.dib.2023.109109>, 2023.
- Roussel M.-L., Valentin Wiener, Christophe Genthon, Etienne Vignon, Eric Bazile, Cecile Agosta, Alexis Berne, Claudio Duran-alarcon, Jean-louis Dufresne, and Chantal Claud. Assessing the simulation of snowfall at Dumont d'Urville, Antarctica, during the YOPP-SH special observing campaign. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 149(753):1391-1406. <https://dx.doi.org/10.1002/qj.4463>, 2023.
- Ruiz M., Valery Masson, Marion Bonhomme, and Stephane Ginestet. Numerical method for solving coupled heat and mass transfer through walls for future integration into an urban climate model. *Building and Environment*, page 110028. <https://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110028>, 2023.
- Sabathier, M., Pannekoucke, O., Maget, V., & Dahmen, N.: Boundary conditions for the parametric Kalman filter forecast, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 15, e2022MS003462. <https://doi.org/10.1029/2022MS003462>, 2023.
- Sadki Malak, Simon Munier, Aaron Boone, and Sophie Ricci. Implementation and sensitivity analysis of the Dam-Reservoir Operation model (DROP v1.0) over Spain. *Geoscientific Model Development*, 16(2): 427-448. <https://dx.doi.org/10.5194/gmd-16-427-2023>, 2023
- Saha S., Dharmendra Kumar Kamat, Som Sharma, Prashant Kumar, Kondapalli Niranjan Kumar, et al.. Response of the boundary layer clouds to the surface forcings: A case study of western India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, pp. 101073. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101073>, 2023.
- Salgueiro, V., J.L. Guerrero-Rascado, M.J. Costa, R. Román, A. Cazorla, et al., Characterization of Tajogaite volcanic plumes detected over the Iberian Peninsula from a set of satellite and ground-based remote sensing instrumentation, *Remote Sensing of Environment*, 295, pp.113684. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2023.113684>, 2023.
- Sánchez-Zapero, Jorge, Enrique Martínez-Sánchez, Fernando Camacho, Zhuosen Wang, Dominique Carrer, et al., Surface Albedo Validation (SALVAL) Platform: Towards CEOS LPV Validation Stage 4 – Application to Three Global Albedo Climate Data Records. *Remote Sensing*, 15. <https://dx.doi.org/10.3390/rs15041081>, 2023.
- Sassi M. Z., Nadia Fourrie, Vincent Guidard, and Camille Birman. Preliminary Assimilation of Satellite Derived Land Surface Temperature from SEVIRI in the Surface Scheme of the AROME-France Model. *Tellus A*, 75(1):88-107. <https://dx.doi.org/10.16993/tellusa.48>, 2023.
- Schlund M., Birgit Hassler, Axel Lauer, Bouwe Andela, Patrick Jockel, Remi Kazeroni, Saskia Loosveldt Tomas, Brian Medeiros, Valeriu Predoi, Stephane Senesi, Jérôme Servonnat, Tobias Stacke, Javier Vegas-Regidor, Klaus Zimmermann, and Veronika Eyring. Evaluation of native Earth system model output with ESMValTool v2.6.0. *Geoscientific Model Development*, 16(1):315 - 333. <https://dx.doi.org/10.5194/gmd-16-315-2023>, 2023.
- Schoetter, R., Caliot, C., Chung, TY. et al. Quantification of Uncertainties of Radiative Transfer Calculation in Urban Canopy Models. *Boundary-Layer Meteorol* 189, 103–138. <https://doi.org/10.1007/s10546-023-00827-9>, 2023.
- Sicart, J. E., Ramseier, V., Picard, G., Arnaud, L., Coulaud, C., Freche, G., Soubeyrand, D., Lejeune, Y., Dumont, M., Gouttevin, I., Le Gac, E., Berger, F., Monnet, J.-M., Borgniet, L., Mermin, É., Rutter, N., Webster, C., and Essery, R. : Snow accumulation and ablation measurements in a midlatitude mountain coniferous forest (Col de Porte, France, 1325 m altitude) : the Snow Under Forest (SnoUF) field campaign data set, *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 5121–5133. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5121-2023>, 2023.
- Sobaga A., Bertrand Decharme, Florence Habets, Christine Delire, Noele Enjelvin, Paul-Olivier Redon, Pierre Faure-Cattelain, and Patrick Le Moigne. Assessment of the interactions between soil–biosphere–atmosphere (ISBA) land surface model soil hydrology, using four closed-form soil water relationships and several lysimeters. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(13):2437-2461. <https://dx.doi.org/10.5194/hess-27-2437-2023>, 2023.
- Solomon, Amy, Matthew D. Shupe, Gunilla Svensson, Neil P. Barton, Yurii Batrak, Eric Bazile, Jonathan J. Day, James D. Doyle, Helmut P. Frank, Sarah Keeley, Teresa Remes, Mikhail Tolstykh; The winter central Arctic surface energy budget: A model evaluation using observations from the MOSAiC campaign. *Elementa: Science of the Anthropocene*; 11 (1): 00104. <https://doi.org/10.1525/elementa.2022.00104>, 2023.
- Strohmeier L., Eric Sauquet, Claire Bernard, Jeremie Bonneau, Flora Branger, Amelie Bresson, Pierre Brigode, Remy Buzier, Olivier Delaigue, Alexandre Devers, Guillaume Evin, Mate Fournier, Shu-Chen Hsu, Sandra Lanini, Alban de Lavenne, Thibault Lemaitre-Basset, Claire Magand, Guilherme Mendoza Guimaraes, Max Mentha, Simon Munier, Charles Perrin, Tristan Podechard, Leo Rouchy, Malak Sadki, Myriam Soutif-Bellenger, Francois Tilmant, Yves Trambly, Anne-Lise Veron, Jean-Philippe Vidal, and Guillaume Thirel. On the visual detection of non-natural records in streamflow time series: challenges and impacts. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(18):3375-3391. <https://dx.doi.org/10.5194/hess-27-3375-2023>, 2023.
- Subirade, C.; L'Hégaret, P.; Speich, S.; Laxenaire, R.; Karstensen, J.; Carton, X. Combining and Eddy Detection Algorithm with In-Situ Measurements to Study North Brazil Current Rings. *Remote Sens.*, 15, 1897. <https://doi.org/10.3390/rs15071897>, 2023.
- Suher-Carthy M., T. Lagelouze, J. Hidalgo, R. Schoetter, N. Touati, R. Jouglu and V. Masson: Urban heat island intensity maps and local weather types description for a 45 French urban agglomerations dataset obtained from atmospheric numerical simulations, *Data in Brief*, 50, 109437 <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109437>, 2023.
- Taillardat M., Anne-Laure Fougeres, Philippe Naveau, and Raphael de Fondeville. Evaluating probabilistic forecasts of extremes using continuous ranked probability score distributions. *International Journal of Forecasting*, 39(3):1448-1459. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijforecast.2022.07.003>, 2023.
- Takano, Y., Ilyina, T., Tjiputra, J., Eddebar, Y. A., Berthet, S., Bopp, L., Buitenhuis, E., Butenschon, M., Christian, J. R., Dunne, J. P., Groger, M., Hayashida, H., Hieronymus, J., Koenigk, T., Krasting, J. P., Long, M. C., Lovato, T., Nakano, H., Palmieri, J., Schwinger, J., Séférian, R., Suntharalingam, P., Tatebe, H., Tsujino, H., Urakawa, S., Watanabe, M., and Yool, A. : Simulations of Ocean Deoxygenation in the Historical Era: Insights from Forced and Coupled Models, *Frontiers in Marine Science*, Volume 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1139917>, 2023.
- Taranu, I.S., Somot, S., Alias, A. et al. Mechanisms behind large-scale inconsistencies between regional and global climate model-based projections over Europe. *Clim Dyn* 60, 3813–3838. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06540-6>, 2023.
- Tesekeri, Alexandra, Anna Gialitaki, Marco Di Paolantonio, Davide Dionisi, Gian Luigi Liberti, et al.. Combined sun-photometer–lidar inversion: lessons learned during the EARLINET/ACTRIS COVID-19 campaign. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16 (24), pp.6025 - 6050. <https://dx.doi.org/10.5194/amt-16-6025-2023>, 2023.
- Thiéblemont, R., Le Cozannet, G., D'Anna, M. et al. Chronic flooding events due to sea-level rise in French Guiana. *Sci Rep* 13, 21695. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48807-w>, 2023.
- Thornton J., J D Price, F. Burnet, and C. Lac. Contrasting the evolution of radiation fog over a heterogeneous region in southwest France during the SOFOG3D campaign. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. <https://dx.doi.org/10.1002/qj.4558>, 2023.
- Tilmant, F., Bourgin, F., François, D., Le Lay, M., Perrin, C., Rousset, F., et al. : PREMHYCE, une plateforme nationale pour la prévision des étiages. *Sciences Eaux & Territoires*, (42), 17–21. <https://doi.org/10.20870/Revue-SET.2023.42.7297>, 2023.
- Tregan J.-M., Jean Luc Amestoy, Megane Bati, Jean-Jacques Beziau, Stephane Blanco, Laurent Brunel, Cyril Caliot, Julien Charon, Jean-Francois Cornet, Christophe Coustet, Louis D'alencón, Jeremi Dauchet, Sebastien Dutour, Simon Eibner, Mouna El-Ha , Vincent Eymet, Olivier Farges, Vincent Forest, Richard Fournier, Loris Ibarra, Mathieu Galtier, Victor Gattepaille, Jacques Gautrais, Pascal Lavielle, Zili HE, Frederic Hourdin, Jean-Louis Joly, Paule Lapeyre, Marie-Helene Lecureux, Jacques Lluc, Marc Miscevic, Nada Mouratday, Yaniss Ny enegger-Pere, Lionel Pelissier, Pelissier, Lea Penazzi, Benjamin Piaud, Clement Rodrigues-Viguier, Gisele Roques, Maxime Roger, Thomas Saez, Guillaume Terree, Najda Villefranque, Thomas Vourc'h, and Daniel Yaacoub. Coupling radiative, conductive and convective heat-transfers in a single Monte Carlo algorithm: A general theoretical framework for linear situations. *PLoS ONE*, 18(4). <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0283681>, 2023.

- Trimmel H., Paul Hamer, Monika Mayer, Stefan F Schreier, Philipp Weihs, Josef Eitzinger, Hans Sanden, Anne Charlott Fitzky, Andreas Richter, Jean-Christophe Calvet, Bertrand Bonan, Catherine Meurey, Islen Vallejo, Sabine Eckhardt, Gabriela Sousa Santos, Safae Oumami, Joaquim Arteta, Virginie Marechal, Leonor Tarrason, Thomas Karl, and Harald E Rieder. The influence of vegetation drought stress on formaldehyde and ozone distributions over a central European city. *Atmospheric Environment*, 304. <https://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119768>, 2023.
- Van Hyfte, S., P. Le Moigne, E. Bazile, A. Verrelle, and A. Boone, High-resolution reanalysis of daily precipitation using AROME model over France. *Tellus A: Dynamic Meteorology & Oceanography*, 75(1), 27-49. <https://dx.doi.org/10.16993/tellusa.95>, 2023.
- Vautard R., Geert Jan van Oldenborgh, Remy Bonnet, Sihan Li, Yoann Robin, Sarah Kew, Sjoukje Philip, Jean-Michel Soubeyroux, Brigitte Dubuisson, Nicolas Viovy, Markus Reichstein, Friederike Otto, and Inaki Garcia de Cortazar-Atauri. Human influence on growing-period frosts like in early April 2021 in central France. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(3):1045-1058. <https://dx.doi.org/10.5194/nhess-23-1045-2023>, 2023.
- Vautard, R., Cattiaux, J., Happé, T. et al. Heat extremes in Western Europe increasing faster than simulated due to atmospheric circulation trends. *Nat Commun* 14, 6803. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42143-3>, 2023.
- Verbois, H., Saint-Drenan, Y.-M., Libois, Q., Michel, Y., Cassas, M. et al. Improvement of satellite-derived surface solar irradiance estimations using spatio-temporal extrapolation with statistical learning. *Solar Energy*, 258, 175-193. <https://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2023.04.037>, 2023.
- Viallon-Galinier L., Pascal Hagenmuller, and Nicolas Eckert. Combining modelled snowpack stability with machine learning to predict avalanche activity. *The Cryosphere*, 17(6):2245-2260. <https://dx.doi.org/10.5194/tc-17-2245-2023>, 2023.
- Villefranche, N., Barker, H. W., Cole, J. N. S., & Qu, Z. A functionalized Monte Carlo 3D radiative transfer model: Radiative effects of clouds over reflecting surfaces. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 15, e2023MS003674. <https://doi.org/10.1029/2023MS003674>, 2023.
- Villiger, L., Dütsch, M., Bony, S., Lothon, M., Pfahl, S., Wernli, H., Brilouet, P.-E., Chazette, P., Coutris, P., Delanoë, J., Flamant, C., Schwarzenboeck, A., Werner, M., and Aemisegger, F.: Water isotopic characterisation of the cloud-circulation coupling in the North Atlantic trades – Part 1: A process-oriented evaluation of COSMOiso simulations with EUREC4A observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 14643–14672. <https://doi.org/10.5194/acp-23-14643-2023>, 2023.
- Vincent C., Delphine Six, Olivier Laarman, Bruno Jourdain, Diego Cusicanqui, Samuel Morin, Deborah Verfaillie, and Emmanuel Le Meur. Disparition anticipée du glacier de Saint-Sorlin vers 2050. *La Météorologie*, 121, 39-47. <https://dx.doi.org/10.37053/lameteorologie-2023-0041>, 2023.
- Vishwakarma, P., Delanoë, J., Jorquera, S., Martinet, P., Burnet, F., Bell, A., and Dupont, J.-C.: Climatology of estimated liquid water content and scaling factor for warm clouds using radar-microwave radiometer synergy, *Atmos. Meas. Tech.*, 16, 1211–1237. <https://doi.org/10.5194/amt-16-1211-2023>, 2023.
- Waldman, R., et Giordani, H.: Ocean Barotropic Vorticity Balances: Theory and Application to Numerical Models. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 15, e2022MS003276. <https://doi.org/10.1029/2022MS003276>, 2023.
- Wilson, J., et al.: The YOPP Final Summit: Assessing Past and Forecasting Future Polar Prediction Research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 104, E660–E665. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0282.1>, 2023.
- Wurtz, J., Bouniol, D. & Vié, B.: Improvements to the parametrization of snow in AROME in the context of ice crystal icing. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 149(752), 878–893. <https://doi.org/10.1002/qj.4437>, 2023.
- Xue Y., I. Diallo, A. A. Boone, Y. Zhang, X. Zeng, W. K.M. Lau, J. D. Neelin, T. Yao , Q. Tang , T. Sato , M.-S. Koo, F. Vitart, C. Ardilouze, S. K. Saha, S. Materia, Z. Lin, Y. Takaya, J. Yang, T. Nakamura, X. Qi, Y. Qin, P. Nobre, R. Senan, H. Wang, H. Zhang, M. Zhao, H. P. Nayak, Y. Pan, X. Pan, J. Feng, C. Shi, S. Xie, M. A. Brunke, Q. Bao, M. J. Bottino, T. Fan, S. Hong, Y. Lin, D. Peano, Y. Zhan, C. R. Mechoso, X. Ren, G. Balsamo, S. C. Chou, P. de Rosnay, P. J. van Oevelen, D. Klocke, M. Ek, X. Li, W. Guo, Y. Zhu, J. Tang, X.-Z. Liang, Y. Qian, P. Zhao: Remote effects of Tibetan Plateau spring land temperature on global subseasonal to seasonal precipitation prediction and comparison with effects of sea surface temperature: The GEWEX/LS4P Phase I experiment. *Clim. Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06905-5>, 2023.
- Yano, J., and R. S. Plant: Interaction of the Convective Energy Cycle and Large-Scale Dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 80, 2685–2699. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-23-0066.1>, 2023.
- Yano, J.-I.; Similarity solutions of thermal vortex rings: Vorticity-dynamics-based derivation. *AIP Advances*, 13 (4): 045123. <https://doi.org/10.1063/5.0129309>, 2023.
- Yano, Jun-Ichi, Marta Waclawczyk, Symmetry Invariant Solutions in Atmospheric Boundary Layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 81 (2), pp.263-277. <https://dx.doi.org/10.1175/JAS-D-23-0168.1>, 2023.
- Zhang Z., Liming Jiang, Yafei Sun, Pascal Sirguey, Marie Dumont, Lin Liu, Ning Gao, and Songfeng Gao. Reconstruction of Annual Glacier Mass Balance from Remote Sensing-Derived Average Glacier-Wide Albedo. *Remote Sensing*, 15(1):31. <https://dx.doi.org/10.3390/rs15010031>, 2023.
- Zhu, Y., Portmann, R. W., Kinnison, D., Toon, O. B., Millán, L., Zhang, J., Vömel, H., Tilmes, S., Bardeen, C. G., Wang, X., Evan, S., Randel, W. J., and Rosenlof, K. H.: Stratospheric ozone depletion inside the volcanic plume shortly after the 2022 Hunga Tonga eruption, *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 13355–13367. <https://doi.org/10.5194/acp-23-13355-2023>, 2023.

## Thèses de doctorat soutenues en 2023

- ANTOINE Salomé, Amélioration de la prévision du brouillard à l'échelle hectométrique dans le modèle AROME. <https://www.theses.fr/s294834>, 2023.
- BARON Matthieu, Modélisation des régimes thermiques du sol dans les milieux ouverts d'altitude des Alpes françaises : influence du transport de neige par le vent et de la végétation. <https://www.theses.fr/s247920>, 2023.
- BERNARD Antoine, Etude multi-échelle de la transition ductile-fragile dans la neige. <https://www.theses.fr/2023GRALI027>, 2023.
- CAILLAUD Cécile, Sensibilité climatique des systèmes précipitants intenses : approche par la modélisation climatique à très haute résolution sur le nord-ouest de la Méditerranée. <https://www.theses.fr/2023INPT0111>, 2023.
- COMBARNOUS Pauline, Assimilation de données de l'imageur d'éclairs de Météosat Troisième Génération pour la prévision numérique des orages à l'échelle convective. <https://www.theses.fr/s295488>, 2023.
- CORNUT Flavien, Capacités à améliorer la caractérisation des aérosols par le futur lidar à Haute Résolution Spectrale de la mission AOS (the Atmosphere Observing System). <https://www.theses.fr/s295164>, 2023.
- COSTANTINI Maya, Etude de l'évolution de la ressource mondiale en eau dans un contexte de changement climatique. <https://www.theses.fr/s295343>, 2023.
- DULAC William, Méthodes pour l'évaluation de l'activité cyclonique tropicale en changement climatique. <https://www.theses.fr/s295216>, 2023.
- EL OUARTASSY Youness, Vers l'utilisation d'ensembles météorologiques pour la dispersion à courte distance de radionucléides en cas de rejets accidentels dans l'atmosphère : propagation des incertitudes et comparaison à des mesures radiologiques dans l'environnement. <https://www.theses.fr/s295590>, 2023.

GARISOAIN Raphael, Evolution du cycle du carbone des tourbières pyrénéennes dans un contexte de changement climatique global. Observation et Modélisation.  
<https://www.theses.fr/s253136>, 2023.

GONZALEZ Nicolas Multi-scale modelling of the Strait of Gibraltar and its role as a regulator of the Mediterranean climate.  
<https://www.theses.fr/2023TOU30090>, 2023.

LE TOUMELIN Louis, Descente d'échelle du vent par méthodes d'apprentissage profond : implications pour la nivologie et ses enjeux.  
<https://www.theses.fr/s295407>, 2023.

MAGNALDO Marie-Adèle, Evaluation et amélioration des prévisions météorologiques de rayonnement solaire pour la production d'énergie solaire.  
<https://www.theses.fr/s258484>, 2023.

MARQUES Eva, Étude à fine échelle de l'îlot de chaleur urbain par modélisation bayésienne à partir de données opportunes.  
<https://www.theses.fr/s232894>, 2023.

MICHAU Yohanna, Changements climatiques et événements extrêmes dans les villes françaises par une approche de modélisation couplée à haute résolution.  
<https://www.theses.fr/s295399>, 2023.

NARIVÉLO Hérizo, Etude de l'impact des espèces halogénées émises par les volcans sur la chimie troposphérique.  
<https://www.theses.fr/s294968>, 2023.

NOUAL Gaëtan, Occupation des terres et climat régional : Impact des surfaces forestières sur l'enneigement dans le sud-ouest de la France.  
<https://www.theses.fr/s346295>, 2023.

SADKI Malak, Amélioration de la représentation des écoulements en rivière par l'intégration des barrages-réservoirs et l'apport de la mission altimétrique SWOT.  
<https://www.theses.fr/s236048>, 2023.

ROGEL Léo, Représentation de la turbulence dans des couches stables d'altitude par les modèles météorologique.  
<https://www.theses.fr/s232788>, 2023.

SOBAGA Antoine, Observations et modélisations de la recharge des aquifères dans le Grand Est de la France à l'aide de données lysimétriques.  
<https://www.theses.fr/2023UPSLE001>, 2023.

TINORUA Sarah, Measurements and regional-scale modeling of atmospheric black carbon particles.  
<https://www.theses.fr/s295523>, 2023.

VILLENEUVE Ethel, Vers une synergie multi-missions infrarouge et micro-ondes pour l'assimilation des observations nuageuses.  
<https://www.theses.fr/s295294>, 2023.

VITTORIOSO Francesca, Apport de l'assimilation des luminances de MTG/IRS pour caractériser la composition chimique de l'atmosphère.  
<https://www.theses.fr/s295165>, 2023.

---

## Habilitation à diriger des recherches

BELLON Gilles, Quelques mystères de la variabilité atmosphérique tropicale.  
<https://www.hal.science/tel-04142297v1>, 2023.

CARRER Dominique, Écosystèmes, Climat et Rayonnement solaire global absorbé à la surface de la Terre : cartographie d'une entrée dans l'anthropocène.  
<https://www.hal.science/tel-04142297v1>, 2023.

GOUTTEVIN Isabelle, Météo, végétation et relief : sources de variabilité des manteaux neigeux et implications climatiques.  
<https://www.hal.science/tel-04142297v1>, 2023.

LAFAYSSÉ Matthieu, Modélisation numérique de la neige : La fin du déterminisme ?  
<https://www.hal.science/tel-04130109>, 2023.

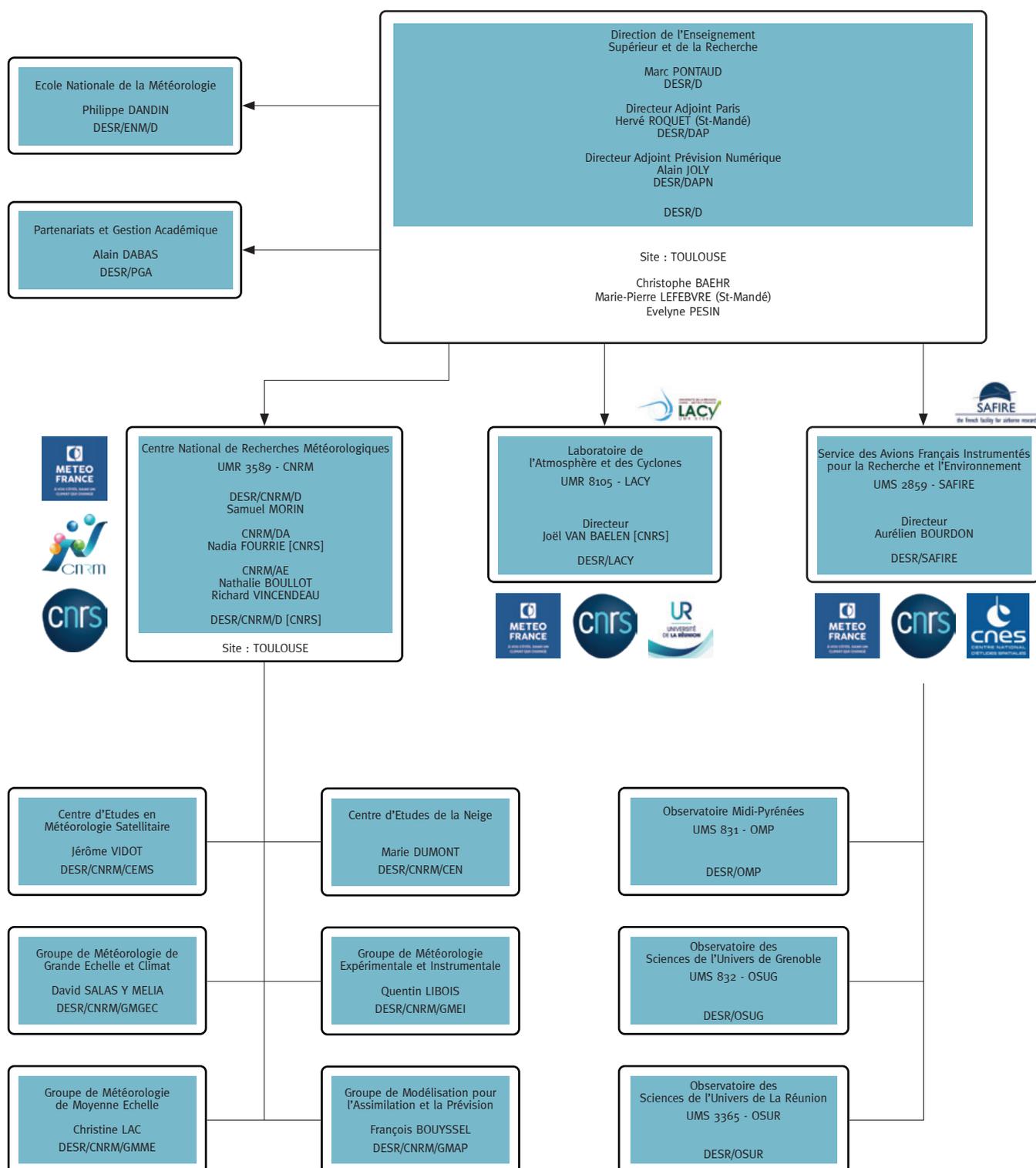
# Glossaire

<b>ACP</b>	Atmospheric, Chemistry and Physics	<b>EUMETSAT</b>	Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques
<b>ACTA</b>	Association de Coordination Technique Agricole,	<b>EUROCORDEX</b>	Modèle régional de climat
<b>ADAMONT</b>	Impacts du changement climatique et adaptation en territoire de montagne	<b>FORTRAN</b>	Langage de programmation
<b>AEE</b>	Agence Européenne de l'Environnement	<b>GAN</b>	Generative Adversarial Networks
<b>AERIS</b>	pôle de données et de service du système terre	<b>GCM</b>	Modèle de circulation Générale
<b>ALADIN</b>	Aire Limitée Adaptation Dynamique et développement InterNational	<b>GEFS</b>	Cartes d'ensemble
<b>ANASTASIA</b>	Jeu de données de température	<b>GELATO</b>	Global Experimental Leads and ice for ATmosphere and Ocean
<b>ANR</b>	Agence Nationale de la Recherche	<b>GMAP</b>	Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision
<b>AOD</b>	Aerosol Optical Depth	<b>GMEI</b>	Groupe de Météorologie Expérimentale et Instrumentale
<b>AOS</b>	Atmosphere Observing Systems	<b>GPM</b>	Global Precipitation Measurement
<b>AROME</b>	Application de la Recherche à l'Opérationnel à Meso-Échelle	<b>HOMONIM</b>	Historique Observation MODélisation des Niveaux Marins
<b>AROME-PI</b>	Configuration AROME Prévision Immédiate	<b>HSRL</b>	High Spectral Resolution Radar
<b>ARPEGE</b>	Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle	<b>HYCOM</b>	HYbrid Coordinate Ocean Model
<b>ASCAT</b>	Advanced SCATterometer	<b>IA</b>	Intelligence Artificielle
<b>ATE</b>	Erreur le long de la trajectoire	<b>ICOS</b>	Infrastructure de recherche qui observe les flux des gaz à effet de serre en Europe et dans les régions adjacentes
<b>BRC</b>	Brown Carbon	<b>IENM</b>	Ingénieur de l'École Nationale de la Météorologie
<b>BRIO</b>	Building Resilience in Indian Ocean	<b>IFS</b>	Integrated Forecasting System
<b>BVOC</b>	composées biogéniques volatiles	<b>INRA</b>	Institut National de la Recherche Agronomique
<b>C3S</b>	Copernicus Climate Change Service	<b>INRAE</b>	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement
<b>CAMS</b>	projet Européen Copernicus	<b>IR-ACTRIS</b>	Infrastructure de Recherche
<b>CAMS</b>	Centre d'Etude en Météorologie Satellitaire	<b>ISBA</b>	Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère
<b>CEN</b>	Centre d'Etudes de la Neige	<b>ISF</b>	Indice de Surface Foliaire
<b>CEPMNT</b>	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme	<b>LACY</b>	Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones – UMR 8105
<b>CERRA</b>	Réanalyse en prévision	<b>LAERO</b>	Laboratoire d'Aérodynamique
<b>CESBIO</b>	Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère	<b>LDAS</b>	Land Data Assimilation System.
<b>CIFRE</b>	Conventions Industrielles de Formation par la REcherche	<b>LEFE</b>	programme national « Les Enveloppes Fluides et l'Environnement »
<b>CIPRHES</b>	Projet de prévision saisonnière	<b>LIAISE</b>	Land surface Interactions with the Atmosphere over the Iberian Semi-arid Environment
<b>CMIP</b>	Coupled Model Intercomparaison Project	<b>LISA</b>	Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques
<b>CMIP6</b>	Climate Models Intercomparaison Project n°6	<b>LMDC</b>	Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions
<b>CMRS</b>	Centre météorologique régional spécialisé cyclones de La Réunion	<b>LOA</b>	Laboratoire d'Optique Atmosphérique
<b>CNN</b>	réseaux de neurones convolutifs	<b>M2-SCREAM</b>	(Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2) Stratospheric Composition Reanalysis of Aura MLS
<b>CNRM</b>	Centre National de Recherches Météorologiques	<b>MAIAC</b>	Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction
<b>CNRM-CM6</b>	Version 6 du Modèle de Climat du CNRM	<b>MCS</b>	systèmes convectifs de mésoéchelle
<b>CNRM-ESM</b>	Earth System Model	<b>MCT</b>	Modèle de Chimie Transport
<b>CNRS</b>	Centre National de Recherches Scientifiques	<b>MEB</b>	Multi-Energy-Balance
<b>COPERNICUS</b>	European Earth observation system <a href="http://www.copernicus.eu/pages-principales/services/climate-change/">http://www.copernicus.eu/pages-principales/services/climate-change/</a>	<b>MEGAN</b>	Modèle des flux biogéniques
<b>CROCUS</b>	Modèle de simulation numérique du manteau neigeux développé par Météo-France.	<b>MERCATOR-OCEAN</b>	Société Civile Française d'océanographie opérationnelle
<b>CRPS</b>	Continuous Ranked Probability Score	<b>MESO-NH</b>	Modèle à MESO-échelle Non Hydrostatique
<b>CSI</b>	Critical Success Index	<b>METOP</b>	METeorological Operational Polar satellites
<b>CYPHER</b>	outil web de cartographie interactive	<b>MF-Sys7</b>	prévision d'ensemble à échéance saisonnière de Météo-France
<b>DBSCAN</b>	Algorithme de prévision	<b>FWAM</b>	Météo-France Wave Model
<b>DESR</b>	Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche	<b>MIGRATLANE</b>	projet national d'étude de la migration sur la côte Atlantique
<b>DGPR</b>	Direction Générale de la Prévention des Risques	<b>MJO</b>	Madden-Julian Oscillation
<b>DIROI</b>	Direction InterRégionale Océan Indien	<b>MOCAGE</b>	MODélisation de la Chimie Atmosphérique de Grande Echelle (modélisation)
<b>DRIAS</b>	Portail d'accès à des données climatiques	<b>MOSAI</b>	Model and Observation for Surface-Atmosphere Interactions
<b>DST</b>	Outils d'aide à la décision	<b>MRMS</b>	Multi-Radar Multi-Sensor
<b>ECC</b>	Méthode en prévision saisonnière	<b>MSG</b>	Météosat Seconde Génération
<b>ECMWF</b>	European Centre for Medium-range Weather Forecasts	<b>MTMSI</b>	Données climatologiques
<b>ECUME</b>	ECUME paramétrisation des vagues		
<b>ENS</b>	Prévision probabiliste du CEPMMT		
<b>EPS-SG</b>	Système polaire de 2ème génération d'EUMETSAT		
<b>EQM</b>	Ecart Quadratique Moyen		
<b>ERA</b>	European Re-Analysis		
<b>ERC-IVORI</b>	projet sur les transformations physiques du manteau neigeux		

<b>NEMO</b>	Nucleus for European Modelling of Ocean	<b>SEEDS</b>	Sentinel EO-based Emission and Deposition Service)
<b>NO<sub>2</sub></b>	dioxyde d'azote	<b>SEMAFOR</b>	Observation et prédiction de la migration de l'avifaune à partir des radars météorologiques
<b>NOAA</b>	National Ocean and Atmosphere Administration	<b>SENTINEL-2</b>	European wide-swath, high-resolution, multi-spectral imaging mission
<b>NOURB</b>	Test de sensibilité de l'impact de l'environnement urbain	<b>SHOM</b>	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
<b>NR</b>	Nature Run	<b>SIRTA</b>	Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique.
<b>OMPS</b>	Ozone Mapper and Profiler Suite	<b>SLD</b>	Super Large Droplet
<b>P<sub>2</sub>OA</b>	Plate-forme Pyrénéenne d'Observations Atmosphériques	<b>SLW</b>	Supercooled Liquid Water
<b>PANAME</b>	PARis region urbaN Atmospheric observations and models for Multidisciplinary rEsearch	<b>SNOX PAPPUS</b>	nouveau module de transport neige par le vent
<b>PE</b>	Prévision d'Ensemble	<b>SOOI</b>	Sud-Ouest Océan Indien
<b>PEARO</b>	Prévision d'Ensemble Arome	<b>SSP</b>	Shared Socio-economic Pathway
<b>PEARP</b>	Prévision d'Ensemble ARPège	<b>SURFEX</b>	code de SURFace EXternalisé
<b>PIOMAS</b>	Pan-Arctic Ice Ocean Modeling and Assimilation System	<b>SWH</b>	Hauteurs significatives de vagues
<b>PISSARO</b>	Projet de prévision à l'échelle intra-saisonnière pour des applications sur le bassin sud-ouest de l'océan Indien (SOOI)	<b>TACTIC</b>	Tropospheric Aerosols for Climate In CNRM
<b>PM<sub>10</sub></b>	PM <sub>10</sub> (particules aérosols de moins de 10 microns) ca	<b>TEB</b>	Town Energy Balance
<b>PNT</b>	Prévision Numérique du Temps	<b>TRACC</b>	Trajectoire de Réchauffement de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique
<b>PRESCILIA</b>	jeu de données de pluie quotidienne	<b>TROPOMI</b>	TROPOspheric Monitoring Instrument
<b>QRF</b>	Quantile Regression Forests	<b>TTE</b>	Erreur totale
<b>RCM</b>	Modèle de Climat Régional	<b>UERRA</b>	Uncertainties in Ensembles of Regional Re-Analyses
<b>RCP</b>	Representative Concentration Pathway	<b>URB</b>	Test de sensibilité de l'impact de l'environnement urbain
<b>RSOI</b>	Reduced Space Optimal Interpolation	<b>UTC</b>	Temps universel coordonné
<b>RTTOV</b>	Radiative Transfer for TOVS	<b>VDG</b>	Algorithme automatique de Prévision
<b>SAFIRE</b>	Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement	<b>VIIRS</b>	Visible Infrared Imager Radiometer Suite
<b>SAFRAN</b>	Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques pour la Neige		

# Organigramme de la Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (DESR)

1<sup>er</sup> Octobre 2023

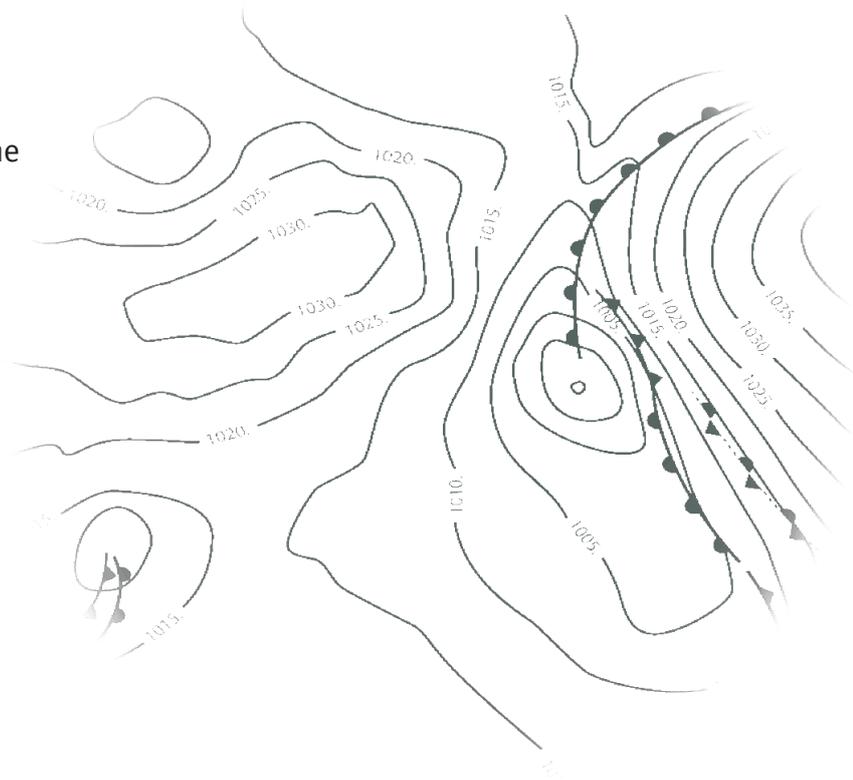


## Météo-France

73, avenue de Paris  
94165 Saint-Mandé Cedex  
Tél. : +33 (0) 1 77 94 77 94  
Fax : +33 (0) 1 77 94 70 05  
[www.meteofrance.com](http://www.meteofrance.com)

## Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

42, avenue Gaspard Coriolis  
31057 Toulouse Cedex 1 France  
Tél. : +33 (0) 5 61 07 93 70  
Fax : +33 (0) 5 61 07 96 00  
<http://www.meteofrance.fr/activites-recherche>  
Courriel : [desr\\_contact@meteo.fr](mailto:desr_contact@meteo.fr)



Création DIRCOM

Météo-France est certifié ISO 9001  
par AFNOR Certification  
© Météo-France 2024  
Copyright juillet 2024  
ISSN : 2116-438X