



**HAL**  
open science

## Météo-France : Rapport Recherche 2022

Pontaud Marc

► **To cite this version:**

| Pontaud Marc. Météo-France : Rapport Recherche 2022. Météo-France. 2023. hal-04659392

**HAL Id: hal-04659392**

**<https://hal.science/hal-04659392v1>**

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



Rapport **Recherche**  
**2022**



# Sommaire

---

**Edito Marc Pontaud** ● page 4

---

**La campagne PANAME 2022** ● page 7

---

**le brouillard** ● page 15

---

**L'assimilation de données** ● page 23

---

**Florilège de résultats illustrant les avancées de recherche en 2022** ● page 33

Prévision numérique du temps et assimilation de données ● page 34

Etude et modélisation des processus ● page 42

Climat et prévision saisonnière ● page 52

Chimie, aérosols et qualité de l'air ● page 64

Neige et montagne ● page 70

Météorologie instrumentale et observation ● page 78

Science Ouverte, Ethique scientifique, Médiation scientifique ● page 84

---

**Annexes** ● page 91

L'année 2022 marque le départ du nouveau Contrat d'Objectif et de Performance (COP) de Météo-France avec l'État pour la période 2022 à 2026. Il a été construit en cohérence avec la Stratégie Scientifique 2020-2030. La recherche y occupe une place privilégiée tant elle vient en support de l'ensemble des missions de l'établissement. 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.

Les entités de recherche de Météo-France sont engagées dans de nombreux projets de recherche nationaux et internationaux, notamment européens. Météo-France pilote, avec 26 partenaires européens, le projet DE330 « Destination Earth On Demand Extremes » en réponse à un appel d'offre du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) sous l'égide de la Commission Européenne. C'est un projet structurant pour l'évolution du modèle AROME en lien fort avec le consortium ACCORD coordonné par un scientifique de Météo-France. Un des enjeux de ces initiatives, et qui rejoint une préoccupation majeure de Météo-France partagée avec le CEPMMT, est l'adaptation des codes de prévision numérique aux architectures de calcul hybride-accélééré.

Au niveau national, après le succès en 2021 du Programme et Equipements Prioritaires de Recherche (PEPR) Exploratoire OneWater centré sur les enjeux de l'Eau, bien commun, ce sont trois nouveaux succès qui ont été obtenus en 2022 : TRACCS sur la modélisation du climat et les services climatiques (TRACCS) co-piloté par Météo-France et le CNRS ; IRIMA sur l'étude des risques ; BRIDGES sur l'étude de l'Océan Indien.



Ces programmes vont structurer les communautés scientifiques concernées pour la prochaine décennie. Autre élément initié en 2022, la préparation du regroupement de l'infrastructure de recherche SAFIRE et des « ballons du CNES » et de l'inclusion des futurs drones scientifiques d'envergure, dans une infrastructure nationale distribuée dont le nom est déjà trouvé : IN-AIR pour Infrastructure Nationale des Aéronefs Instrumentés pour la Recherche.

L'année 2022 a été marquée par la campagne PANAME à Paris dans le cadre du RDP (Research Demonstration Project de l'OMM) Paris Olympics 2024 et des projets qui s'y sont associés (notamment ANR H2C sur l'impact de l'îlot de chaleur urbain sur la santé, ANR et LEFE ACROSS sur la pollution urbaine et son transport). Un dispositif instrumental conséquent a été déployé : stations sol, instruments de télédétection, mâts instrumentés et vols avion. Un des objectifs est de progresser sur la mise au point de la version d'AROME à 500m qui passera en opérationnel en 2024.

Au cours de l'été 2022, un jalon important a été franchi avec la mise en œuvre en opérationnel de la nouvelle chaîne de prévision numérique du temps, qui comprend l'exploitation



© Christophe Ciais - Météo-France

opérationnelle de nombreux progrès scientifiques issus de recherches antérieures, et des éléments majeurs prévus avec l'installation des derniers supercalculateurs. En particulier, les résolutions des prévisions déterministes globales et régionales ont convergé vers celles des prévisions « déterministes ». Egalement, les prévisions régionales sur les domaines ultra-marins ont maintenant la même résolution qu'en métropole (1,3 km). Et en toute fin d'année, ces mêmes territoires ultramarins se sont vus dotés de prévisions d'ensemble déjà fortement appréciées par les services opérationnels concernés.

Au niveau toulousain, Météo-France, s'est inscrit dans la dynamique locale autour du projet *PIA4* « Excellence sous toutes ses formes » TIRIS (Toulouse Initiative for Research's Impact on Society) de l'Université de Toulouse. Le succès de TIRIS sera déterminant pour la structuration et la dynamique de l'enseignement supérieur et de la recherche toulousain, projet auquel participe Météo-France, au travers de la direction de la DESR, du CNRM et de l'ENM.

Ce rapport recherche 2022 présente une grande richesse et variété de résultats. Il s'agit de travaux sur l'assimilation de données, dont les nouveaux algorithmes

optimiseront la quantité d'observations assimilées, et en particulier celles fournies par la dernière génération de satellites géostationnaires européens, à commencer par MTG-I1 mis sur orbite en décembre 2022. Il s'agit de travaux sur les processus intervenant dans le brouillard, les nuages, les couches limites, ..., de travaux originaux dans le domaine climatique notamment sur l'augmentation de température, concernant en particulier la métropole. Il s'agit aussi de l'exploitation de différents algorithmes d'intelligence artificielle en lien avec nos modèles et nos données, que ce soit en post-traitement de nos prévisions météorologiques ou en appui à nos activités de descente d'échelle climatique. Il s'agit enfin de campagnes de mesures enrichissant notre connaissance du système Terre, d'innovation et synergie instrumentale, ... Impossible de résumer en quelques mots toute la richesse des articles proposés à votre lecture.

Mentionnons aussi que l'année 2022 a vu la célébration des 100 ans de l'Ecole Nationale de la Météorologie et les 40 ans du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) lors d'un colloque festif organisé les 17 et 18 octobre sur le campus de Météo-France à Toulouse. Ces journées ont permis de

célébrer plusieurs décennies de progrès scientifiques dans le domaine de la compréhension, de la modélisation, de la prévision météorologique et de l'étude de l'évolution passée et future du climat. Elles ont rassemblé à cette occasion plusieurs générations d'étudiants, étudiantes, et personnels de recherche et d'enseignement mobilisés pour ces activités.

Peut-être un dernier mot pour se projeter en 2023. Des articles, toute fin 2022, ont exposé comment « l'apprentissage machine » des ré-analyses du CEPMMT permettait de produire des prévisions du temps, concurrentielles des prévisions de ce même CEPMMT, reposant, elles, sur la résolution numérique et explicite des équations physiques de l'atmosphère ... de quoi nous inciter à une toujours plus grande appropriation de ces méthodes d'intelligence artificielle qui continuent de nous ouvrir de nouvelles perspectives.

Bonne lecture.



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



# La campagne PANAME 2022

La campagne expérimentale PANAME<sup>1</sup> 2022 s'est déroulée en région parisienne à l'été 2022, afin de mieux comprendre les processus gouvernant l'influence de la ville sur l'atmosphère, comme les îlots de chaleur urbains ou la qualité de l'air. De nombreux laboratoires de recherche ont contribué, via différents projets, à cette initiative combinant expérimentations de terrain et modélisation numérique. Trois périodes de canicule ont touché la région parisienne à l'été 2022, mi-juin (la plus précoce jamais enregistrée) ce qui correspondait au tout début de la campagne et des vols avions, mi juillet et début août.

Le CNRM a été un acteur majeur de PANAME 2022, impliqué dans 4 des projets phares de la campagne en collaboration avec de nombreux partenaires nationaux et internationaux : Heat and Health in Cities (ANR H2C, sur les liens entre chaleur et santé), Paris 2024 RDP (sur la modélisation du temps en ville), ANR et LEFE ACROSS (transformation des aérosols dans les panaches de pollution en aval de Paris) et ANR MOSAI (échanges surface-atmosphère en zones hétérogènes).

Le CNRM<sup>2</sup> a déployé de nombreux instruments. Des stations météorologiques ont été placées sur des lampadaires pour observer la variabilité de l'îlot de chaleur urbain entre les divers quartiers et observer l'effet des parcs, des grandes places et boulevards ou de la Seine. Le CNRM et la Direction des systèmes d'observation de Météo-France ont déployé des ballons de radio-sondages à Trappes et, pour la première fois depuis Paris intra-muros, et des systèmes de télédétection depuis des toits. Combiné avec les ballons et instruments similaires mis en œuvre par les autres laboratoires, en particulier l'IPSL, ceci permet d'observer l'effet de la ville sur l'atmosphère, en particulier l'extension verticale de l'îlot de chaleur et des îlots de fraîcheur. Dans le cadre de cette campagne et notamment du projet ACROSS, l'avion de recherche ATR-42 (Météo-France) de SAFIRE<sup>3</sup> a exploré les basses couches dans le panache de polluants sous le vent de Paris jusqu'à plus de 100km de la capitale.

Enfin, des simulations numériques de prévision du temps sur tout l'été à 500m de résolution horizontale avec le modèle AROME et à 100m avec le modèle MesoNH vont permettre à la fois de préfigurer les systèmes de prévisions opérationnels futurs mais aussi d'analyser les processus en jeu via une approche combinée observations-modèles. Des observations complémentaires seront aussi effectuées en 2023.

Pour en savoir plus au sujet de PANAME 2022 dans son ensemble, voir le dossier complet mis en ligne par l'INSU :

Paname : L'atmosphère et le climat de Paris à la loupe, <https://www.insu.cnrs.fr/fr/Paname>

et

Paname 2022 : premières observations d'une campagne de mesure inédite sur le climat et la qualité de l'air de Paris, <https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/paname-2022-premieres-observations-dune-campagne-de-mesure-inedite-en-plein-paris-et-en>

---

1. *Paris region urban Atmospheric observations and models for Multidisciplinary rEsearch : Observations atmosphériques de la région parisienne et modèles pour une recherche multidisciplinaire*

2. *Centre national de recherches météorologiques*

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

---

# Un déploiement expérimental pour étudier la variabilité horizontale et l'extension verticale de l'îlot de chaleur urbain

V. Masson, A. Lemonsu

L'existence du phénomène d'îlot de chaleur en ville est bien connu. Cependant, si son intensité maximale entre une agglomération et la campagne a fait l'objet de nombreuses études, sa variabilité à l'échelle infra-urbaine d'un quartier à l'autre est peu quantifiée. De plus, l'extension verticale de l'influence urbaine sur l'atmosphère, phénomène clef notamment la nuit, est très peu détaillée. Celle-ci est importante car elle conditionne sur quelle épaisseur la chaleur rejetée par la surface est répartie, et donc l'intensité locale de l'îlot de chaleur urbain.

Dans le cadre de la campagne PANAME 2022, le CNRM a installé des stations météorologiques connectées sur des lampadaires

dans les arrondissements centraux de Paris, afin d'observer la variabilité horizontale de l'îlot de chaleur urbain au sein de quartiers haussmanniens relativement homogènes, pour détailler l'effet des places, des boulevards, des parcs urbains, et de la Seine. D'autres, placées dans le 13<sup>e</sup> arrondissement, beaucoup plus hétérogène architecturalement, permettent d'observer et comparer l'effet de différentes formes urbaines, des maisons de ville aux gratte-ciels.

Des ballons météorologiques ont aussi été lancés du centre de Paris lors de périodes propices à l'îlot de chaleur urbain pour observer sa structure verticale. La

comparaison aux sondages de Trappes a montré que l'influence urbaine pouvait atteindre 200 m d'altitude la nuit. Quant aux mini-ballons opérés depuis le parc de Vincennes par les partenaires de PANAME, ils ont permis de quantifier un effet de rafraîchissement du parc jusqu'à 100 m de hauteur. Afin d'observer plus finement l'effet de parcs de différentes tailles, il est prévu à l'été 2023 d'utiliser aussi des stations in-situ et des drones.

1

---

## 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 météorologiques concernant 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'IR ACTRIS-FR et quatre stations de l'IR ICOS-FR. Le dispositif expérimental consiste à déployer 3 ou 4 stations sur une période d'une année autour des sites d'observations de 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. Pour concilier les objectifs des projets PANAME et du projet MOSAI, c'est autour du site du SIRT (Palaiseau, région Parisienne) que le déploiement instrumental s'est porté pour

l'année 2022. L'équipe GMEI/4M du CNRM a ainsi déployé 2 stations, l'une dans un champ de trèfle à quelques centaines de mètres du SIRT et une seconde sur le site de Polytechnique sur un mât de 30m comme le montre la figure 2 (gauche). Le dispositif a été opérationnel entre le 15 janvier et le 15 novembre 2022. Le LAERO a aussi déployé une station supplémentaire sur le toit du LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique) au sein du site de Polytechnique sur la même période. Dans le contexte MOSAI, les données ICOS de la station de Grignon (site agricole) et de Barbeau (site forêt) seront intégrées à la base de données du projet disponible sous: <https://mosai.aeris-data.fr/>. Dans le cadre du projet, un traitement homogénéisé des flux turbulents est effectué. L'exploitation de ce jeu de données est en cours via une thèse en collaboration LAERO/CNRM afin d'établir un indice permettant de déterminer l'incertitude

et la représentativité des échanges surface-atmosphère mesurés sur des paysages hétérogènes. Plus largement, dans le cadre du projet PANAME ces mesures compléteront le jeu de données des stations d'énergie de surface mis en œuvre par d'autres instituts dans des sites plus urbains qui permettra d'étudier les forts contrastes entre ville et périphérie dans des conditions d'îlot de chaleur urbains.

2

1



▲ Lancer de ballon météorologique pour observer la structure verticale de l'îlot de chaleur depuis les quais de Bercy (crédit photo : Cyril Frésillon, CNRS).

2



▲ Station de mesure du bilan d'énergie (gauche) sur un mat de 30m sur le site de Polytechnique, (droite) au milieu d'un champ agricole sur le plateau de Saclay.

## ACROSS-AO : la recherche aéroportée au cœur de PANAME

Jean-Christophe Canonici, Cyrielle Denjean

Au sein de l'initiative PANAME, le projet ACROSS-AO<sup>1</sup> financé par l'Agence Nationale de la Recherche vise à élucider les détails de l'évolution des propriétés des polluants atmosphériques au cours de leur transit au sein du panache de la ville de Paris.

Safire a intégré dans l'ATR42 de Météo-France une lourde configuration rassemblant deux tonnes de moyens de mesure de laboratoires français et internationaux : LISA<sup>2</sup>, UCP<sup>3</sup>, JHU<sup>4</sup>. Pendant près de deux ans avant le début des vols, les équipes de Safire ont ainsi réalisé la certification aéronautique de tous les instruments, préparé au mieux leur bon fonctionnement, mais aussi négocié avec les Autorités les très nombreuses autorisations de survol spécifiques inhérentes aux prélèvements nécessaires, dépendant par exemple de la direction du vent.

Du 15 juin au 7 juillet 2022, Safire a projeté sur l'aéroport de Pontoise l'avion, tous les spécialistes et moyens matériels nécessaires. Une cinquantaine d'heures de vol ont permis de produire un inventaire inédit des espèces chimiques gazeuses et particulaires issus de la pollution parisienne. La contribution du CNRM au projet est

d'étudier plus spécifiquement les processus physico-chimiques impliqués dans la formation, l'évolution et le bilan radiatif des aérosols.

1. *Atmospheric Chemistry of the Suburban Forest : chimie atmosphérique des forêts suburbaines.*

2. *Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques*

3. *Université de Chieti-Pescara*

4. *John Hopkins University*

3

## Apports de PANAME pour l'évaluation des modélisations à échelle hectométrique en ville

Jean Wurtz

Dans le cadre de PANAME2022, des simulations en quasi temps réel ont pu être réalisées à l'aide du futur modèle opérationnel AROME-500m et du modèle de recherche MESO-NH à 100 m de résolution sur Paris et sa petite couronne de mi-juin à fin août 2022.

Ces simulations ont montré, en particulier avec une résolution spatiale de 100 m, qu'il était possible de simuler de fortes hétérogénéités des conditions météorologiques de surface au sein de la ville.

L'évaluation de ces simulations aux échelles hectométriques est un véritable challenge. En effet, grâce à leurs plus fines résolutions elles sont a priori plus réalistes en permettant de résoudre des phénomènes physiques de fines échelles. Toutefois, elles doivent être évaluées avec attention en se basant sur des observations aux même échelles spatiales et sur des échantillons suffisamment longs et représentatifs.

PANAME2022 offre une opportunité pour vérifier si ces hétérogénéités simulées sont réalistes ou non. En effet, durant l'été 2022, 24 stations autonomes mesurant la température et l'humidité ont été installées dans Paris à des endroits judicieusement choisis permettant d'échantillonner à l'échelle hectométrique ces hétérogénéités. En effet, de nombreux paramètres peuvent fortement impacter le climat urbain local comme la structure de l'espace urbain, la hauteur des bâtiments ou les propriétés des matériaux.

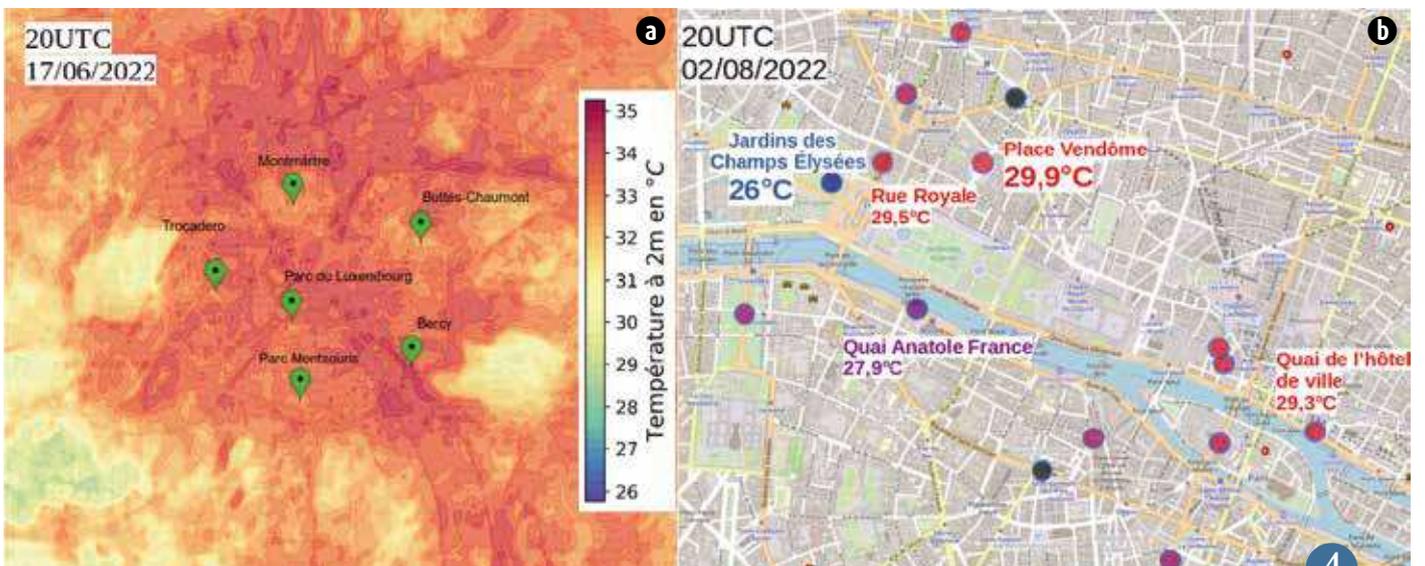
L'évaluation de ces modèles sur la verticale sera également possible à l'aide des nombreux profils verticaux obtenus sur Paris et sa région durant PANAME2022.

4

3



Figure principale : Préparation de l'avion de recherche ATR-42 de SAFIRE avant décollage.  
 Figure en bas à gauche : Concentration en nombre de particules mesurées au cours d'un vol scientifique.  
 Figure en bas au milieu : Préparation de l'instrumentation à bord de l'avion. En bas à droite : Calibration de l'HTDMA-SP2 nouvellement développé par le CNRM.



Température à 2 mètres simulée par MESO-NH à 100m sur Paris et sa petite couronne le 17/06/2022 à 20UTC (a) et température à 2 mètres mesurée dans Paris par plusieurs station autonomes le 02/08/2022 à 20UTC (b).

## AROME-500m en temps réel durant la campagne PANAME

Rachel Honnert, Jean Wurtz

Durant PANAME2022, des prévisions AROME ont été réalisées sur un domaine de 250 km de côté centré sur Paris avec une résolution horizontale de 500m et 120 niveaux verticaux. Cette configuration était couplée en adaptation dynamique à AROME-France (1,3 km 90 niveaux) du réseau de 00h. Une prévision en temps réel a ainsi pu être fournie jusqu'à 36 h d'échéance de mi-juin à début septembre 2022 pour les opérations de PANAME2022. Pour représenter finement la surface, des bases de données plus fines et plus récentes ont été utilisées : SRTM30m pour la topographie, Soilgrids pour les sols, ECOCLIMAP-SG pour les caractéristiques de la végétation. En milieu urbain, les données d'OpenStreetMap traitées par l'outil Geoclimate du Lab-STICC ont permis d'obtenir des données précises sur l'occupation des sols (ville, présence d'eau douce, etc) et sur des caractéristiques du bâti (hauteur, etc). Les jardins y ont également été modélisés. Les premiers résultats sont encourageants et montrent plus d'hétérogénéités de surface et une structure de la couche limite plus réaliste qu'avec la configuration de référence AROME-France.

A posteriori, ces simulations aideront à mieux comprendre les observations faites durant PANAME2022. Cette configuration fournit une base de travail pour les futures configurations de prévision AROME-500m. Ces dernières devraient permettre d'anticiper finement l'îlot de chaleur urbain sur Paris, mais aussi d'améliorer la représentation du brouillard, de la baisse du plafond nuageux, des conditions givrantes pour l'aéronautique ainsi que de mieux représenter les circulations côtières et les orages.

5

## Le projet H2C : « Heat and Health in Cities »

Valéry Masson, Aude Lemonsu

Le projet Heat and Health in Cities (H2C), coordonné par le CNRM et financé par l'ANR, étudie les liens entre fortes chaleurs, qualité de l'air et santé en ville, avec comme cadre d'étude la région parisienne. Le consortium regroupe des laboratoires de météorologie et climatologie urbaine, Airparif (pour la qualité de l'air), le CSTB (pour les conditions dans les bâtiments), Santé Publique France, l'institut Paris-Région et l'Observatoire Régional de Santé. Le projet vise à développer un prototype de système de prédiction des conditions environnementales et d'exposition en ville, en lien avec les risques sanitaires liés à la chaleur ; l'objectif final étant d'affiner les services climatiques pour soutenir la prévention et les politiques publiques de planification urbaine.

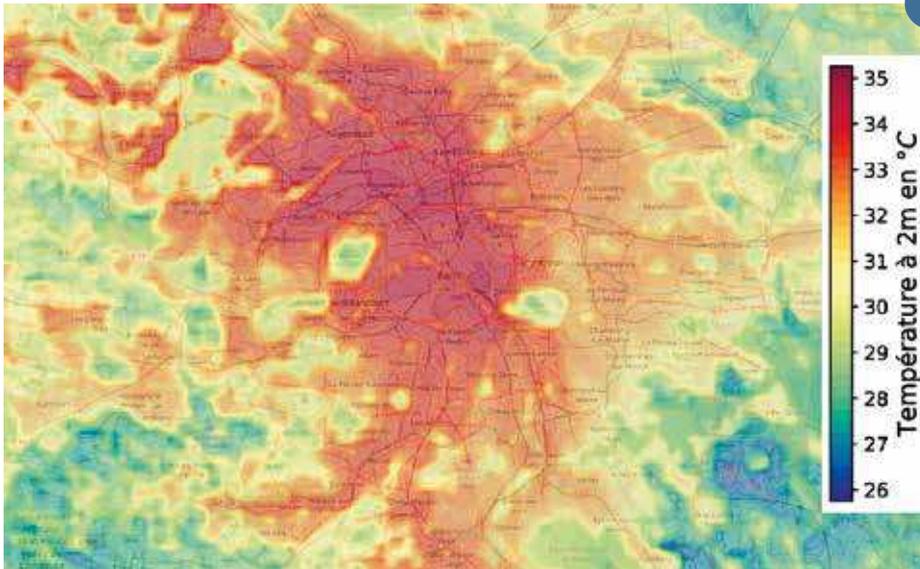
La vulnérabilité repose sur l'augmentation de l'exposition aux températures élevées, la sensibilité individuelle, et les capacités d'adaptation (individuelles ou collectives). Le projet étudie ces relations à l'échelle communale pour mieux comprendre les facteurs de variabilité régionale de la vulnérabilité et des risques sanitaires associés. Un enjeu important du projet

consiste à mieux caractériser l'exposition infra-communale, donc de mieux prévoir les conditions météorologiques à fine échelle, en particulier en fonction des influences urbaines.

Les mesures effectuées lors de PANAME permettent le suivi et la compréhension de la variabilité du climat urbain, ainsi que la validation des simulations numériques à résolution hectométrique. Les mesures envisagées en 2023 renforceront le système actuel pour suivre les conditions de confort thermique (dépendant de la température, mais aussi de l'humidité, du vent et du rayonnement) en divers quartiers.

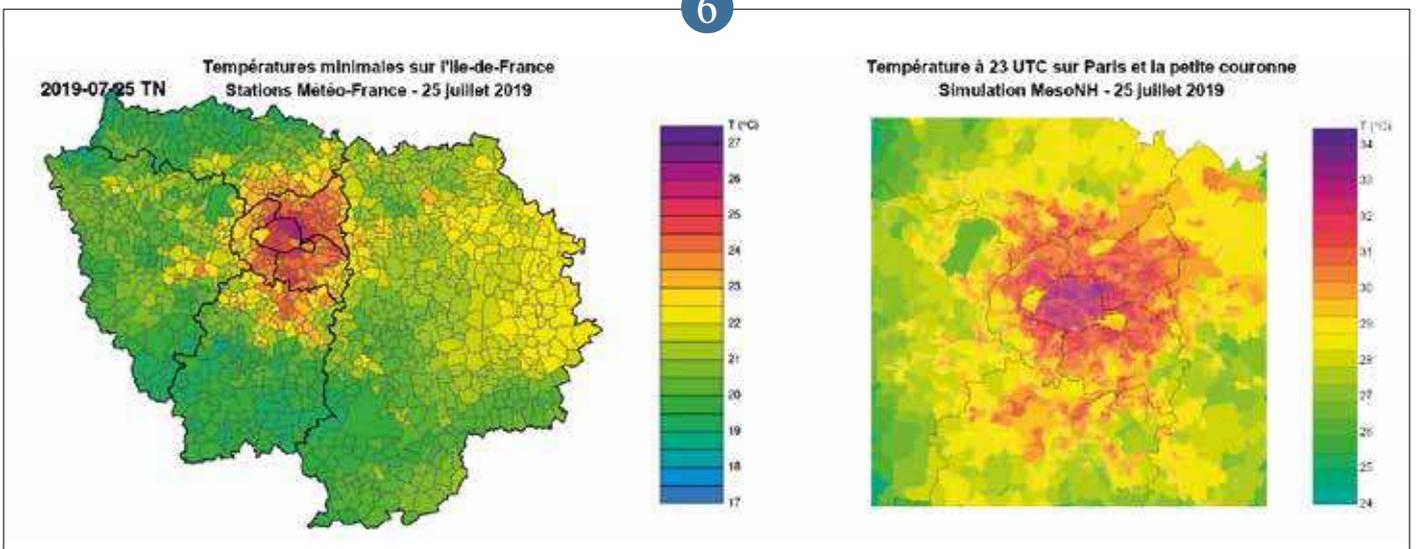
6

5



▲  
 îlot de chaleur urbain simulé par AROME-500m  
 à 22h locale le 17/06/2022.

6



▲  
 Cartographie de la température de l'air à l'échelle des communes (et arrondissements), échelle qui sera utilisée pour la comparaison avec les données épidémiologiques (à gauche : à partir des observations de température en fin de nuit ; à droite à partir des simulations hectométriques du modèle MesoNH au moment du maximum d'îlot de chaleur nocturne).



# Le brouillard

Le brouillard perturbe fortement les transports terrestres, aériens et maritimes. Mais malgré des progrès réguliers, sa prévision précise reste délicate du fait de sa forte variabilité spatio-temporelle, et il reste encore beaucoup d'incertitude sur les interactions entre les différents mécanismes pilotant la variabilité du brouillard aux très fines échelles.

L'exploitation des données récoltées pendant l'hiver 2019-2020 dans les Landes dans le cadre du programme de recherche SOFOG3D piloté par le CNRM s'est poursuivi en 2022 : l'impact des hétérogénéités de surface a été évalué à partir des 17 sites de mesures et cette étude a montré une tendance à une formation un peu tardive en forêt, liée à l'effet d'abri et au freinage qu'elle génère. La synergie entre télédétection et mesures in situ, obtenues par une instrumentation innovante sous un ballon captif, a permis de documenter l'évolution des profils thermodynamiques et microphysiques au cours de la transition de brouillard fin à optiquement épais, qui est une étape clef du cycle de vie des brouillards.

Une configuration d'AROME dédiée à la prévision du brouillard avec 500 m de résolution horizontale, 156 niveaux verticaux et le schéma microphysique à 2 moments LIMA, permet d'améliorer le nombre de cas de brouillard prévus et de réduire la sur-estimation des brouillards épais qui est constatée dans les prévisions de la configuration d'AROME actuellement opérationnelle. Enfin l'assimilation dans le système 3D-VAR d'AROME-France, actuellement opérationnel, des profils de température restitués par un réseau de 6 radiomètres micro-onde est prometteuse, et l'étape suivante sera d'assimiler en plus les données d'humidité et d'eau liquide.

Les campagnes passées continuent d'être valorisées : l'analyse d'une simulation à 100 m avec Méso-NH d'un cas observé dans le Nord-Est de la France en 2016 a mis en évidence le rôle clé des processus non locaux de transport de grande, mais aussi de fine échelle, dans la formation de brouillard par affaissement de stratus. Des mesures de visibilité de l'aéroport Paris-CdG ont par ailleurs permis d'étudier la variabilité spatiale à l'échelle kilométrique, soulignant l'attention qui doit être portée à la représentativité des mesures.

---

## Amélioration des prévisions de brouillard avec une configuration hectométrique du modèle AROME

Salomé Antoine, Rachel Honnert et Yann Seity

Le secteur aéronautique est fortement impacté par le brouillard. Au vu des enjeux, l'amélioration des prévisions de brouillard réalisées par le modèle AROME est un axe de travail prioritaire.

Une nouvelle configuration AROME a été construite en regroupant différentes améliorations adaptées à la prévision du brouillard : amélioration des résolutions horizontale et verticale du modèle, meilleure représentation du cycle de vie des gouttelettes nuageuses avec l'utilisation d'un schéma microphysique plus avancé (LIMA) et modélisation d'un processus de dépôt (captation de l'eau nuageuse par la végétation).

Les données collectées pendant la campagne de mesure du projet SoFog3D ont été utilisées pour évaluer les prévisions de la nouvelle configuration AROME (500L156, soit une résolution horizontale de 500 m

et 156 niveaux verticaux) et estimer son apport par comparaison à la configuration opérationnelle du modèle (1250L90). L'étude statistique a permis de mettre en avant une augmentation du nombre de cas de brouillard prévu par 500L156 et plus particulièrement des brouillards fins (moins de 50 m), sous-estimés par 1250L90 (figure). Nous avons aussi pu constater une diminution notable du nombre de brouillards épais (plus de 100 m), sur-estimés par 1250L90. Celle-ci induit une réduction des fausses alarmes associées et limite la mise en alerte des instances aéroportuaires concernant les procédures de faible visibilité. L'augmentation du nombre de cas de brouillard s'accompagne inévitablement d'une augmentation du nombre de fausses alarmes, néanmoins celles-ci concernent principalement les brouillards fins, les moins problématiques pour l'aéronautique. Les

concentrations en gouttelettes nuageuses et les contenus nuageux sont aussi plus proches des observations dans cette nouvelle configuration du modèle.

Même si l'utilisation du schéma microphysique LIMA n'est pas envisagée pour la première version de la configuration AROME-500m qui sera rendue opérationnelle en 2024, les améliorations apportées par le schéma sur la prévision du brouillard permettent d'envisager son implémentation future.

1

---

## Impact des hétérogénéités de surface sur le cycle de vie du brouillard durant la campagne de brouillard SOFOG3D

Marie Taufour

La campagne de mesures SOFOG3D, qui s'est déroulée de novembre 2019 à mars 2020 sur la région des Landes, a échantillonné 34 cas de brouillards sur une zone privilégiée incluant 17 sites d'observations situés en forêt ou dans des champs, répartis sur une zone de 70 x 20 km<sup>2</sup>. La variabilité de fine échelle du brouillard est analysée sur l'ensemble des cas grâce aux mesures de visibilité et de paramètres météorologiques sur ces 17 sites, permettant ainsi d'évaluer l'impact du couvert végétal sur le cycle de vie du brouillard.

L'occurrence de brouillard sur les 17 sites ne semble pas corrélée au type de végétation.

En revanche, lorsque les brouillards sont observés, les sites de forêt présentent un retard moyen sur l'heure de formation jusqu'à deux heures (figure a). A l'inverse, la variabilité à la dissipation, plus faible qu'à la formation, ne distingue pas les sites de forêts des autres. Les brouillards en forêt ont aussi tendance à y être plus courts et moins denses (visibilité moyenne jusqu'à 250 m supérieure) (figure b). Du point de vue des paramètres météorologiques, les sites forestiers présentent en moyenne des températures, des humidités et des vents plus faibles durant les trois heures qui précèdent la formation du brouillard

(figures c-d-e), à l'inverse des températures et humidités des sols un peu plus élevées sous couvert forestier.

Des simulations à 100 m de résolution sont utilisées dans un deuxième temps pour mieux comprendre l'impact des hétérogénéités de surface observé sur le cycle de vie du brouillard..

2



## Analyse des processus menant à un brouillard par affaissement de stratus durant la campagne Bure

Maroua Fathalli, Frédéric Burnet, Christine Lac

Les modèles de prévision numérique du temps ont encore des difficultés à prévoir correctement le brouillard formé par affaissement de stratus. Une étude numérique a été menée pour étudier les processus responsables de l'épisode, échantillonné la nuit du 1er au 2 décembre 2016 lors d'une campagne de mesures menée par le CNRM dans le nord-est de la France (Fathalli et al 2022).

Une simulation à une résolution de 100 m avec le modèle Méso-NH utilisant un schéma microphysique à 2 moments où la concentration des gouttelettes est pronostique, reproduit les principales caractéristiques observées du cycle de vie du stratus menant au brouillard, malgré un décalage temporel de 4h à la formation du stratus lié aux conditions de grande échelle (figure 3a).

Des analyses par bilans de variables thermodynamiques et microphysiques sur ce cas ont montré que l'advection d'eau nuageuse

dans le stratus et à son sommet est un processus majeur pilotant l'affaissement du stratus.

L'autre processus primordial est l'advection d'air froid vers la base et sous le stratus, induite par les circulations orographiques de fine échelle, et qui engendre une large variabilité spatio-temporelle de l'occurrence du brouillard du fait du terrain vallonné. Grâce à ces conditions non locales favorables, la sédimentation des gouttelettes favorise la formation du brouillard en entraînant un refroidissement et une humidification de la couche sous nuageuse par évaporation (figure 3b).

Compte tenu de la prédominance des processus non-locaux dans cette étude de cas, le modèle 3D à haute résolution s'avère nécessaire pour effectuer une prévision précise du brouillard par affaissement de stratus, au contraire d'un modèle basé sur une approche 1D.

### Références :

Fathalli, M., C Lac, F Burnet, B Vié. Formation of fog due to stratus lowering: An observational and modeling case study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Wiley, 2022, 148 (746), pp.2299 - 2324. [10.1002/qj.4304](https://doi.org/10.1002/qj.4304). [hal-03795958](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03795958)

3

## Étude de la transition de brouillard fin à épais durant SOFOG3D

Théophile Costablos

Durant les 15 périodes d'observations intensives (POI) de la campagne SOFOG3D, un ballon captif a été opéré au super-site avec un dispositif innovant composé d'une sonde de turbulence et d'un capteur CDP (Cloud Droplet Probe) mesurant les gouttelettes d'eau de 2 à 50  $\mu\text{m}$  en diamètre. Ces mesures ont permis de documenter l'évolution temporelle du profil vertical des propriétés thermodynamiques et microphysiques pour 8 brouillards fins (épaisseur inférieure à 50 m) et 7 brouillards développés dont 3 épisodes dépassant 200 m d'épaisseur. Ces données sont analysées pour étudier la transition de brouillard fin à optiquement épais.

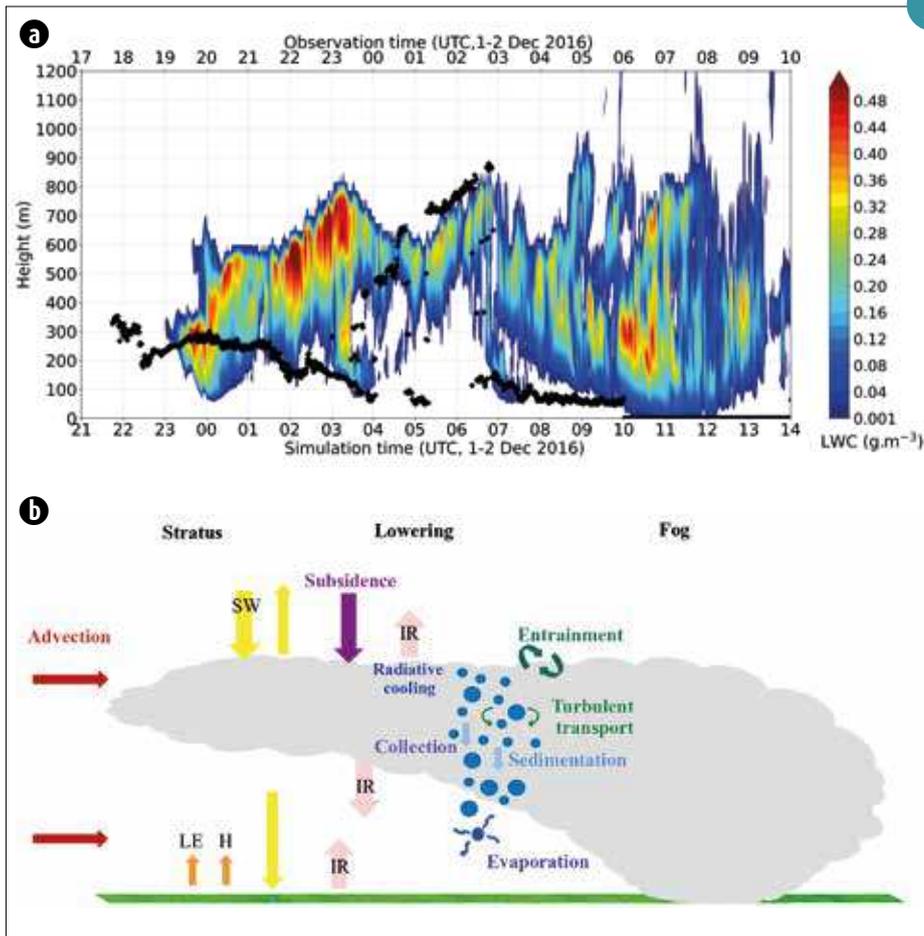
À partir des mesures sol, le brouillard devient optiquement épais lorsque le rayonnement infra-rouge (LW) descendant devient très proche du LW montant, soit vers 0h45 UTC pour l'épisode du 08-09/02/2020 (figure 4b). Les mesures du CDP révèlent que le profil du contenu en eau liquide (LWC) s'inverse au cours de cette transition. Au début de l'épisode, en condition stable, le LWC est maximum près du sol et décroît avec l'altitude (figure 4d), alors qu'en phase mature juste avant la dissipation en stratus, le profil de température est neutre et le LWC augmente avec l'altitude (figure 4e), excepté près du sommet à cause des processus de mélange.

La figure 4f) représente le gradient vertical de température potentielle ( $\theta$ ), en fonction de celui de LWC, normalisés par l'épaisseur de la couche, pour les 12 profils réalisés. Elle montre que pour cet épisode, la transition entre formation en condition stable ( $d\theta/dZ > 0$  et  $dLWC/dZ < 0$ ) et phase développée plus adiabatique ( $d\theta/dZ \sim 0$  et  $dLWC/dZ > 0$ ) n'est pas continue au cours du cycle de vie.

Ces observations uniques ont permis de mettre en évidence une évolution contrastée des profils thermodynamiques et microphysiques au cours de la transition de brouillard fin à optiquement épais. Cette analyse va être étendue à l'ensemble des POI afin de mieux comprendre les différents processus mis en jeu.

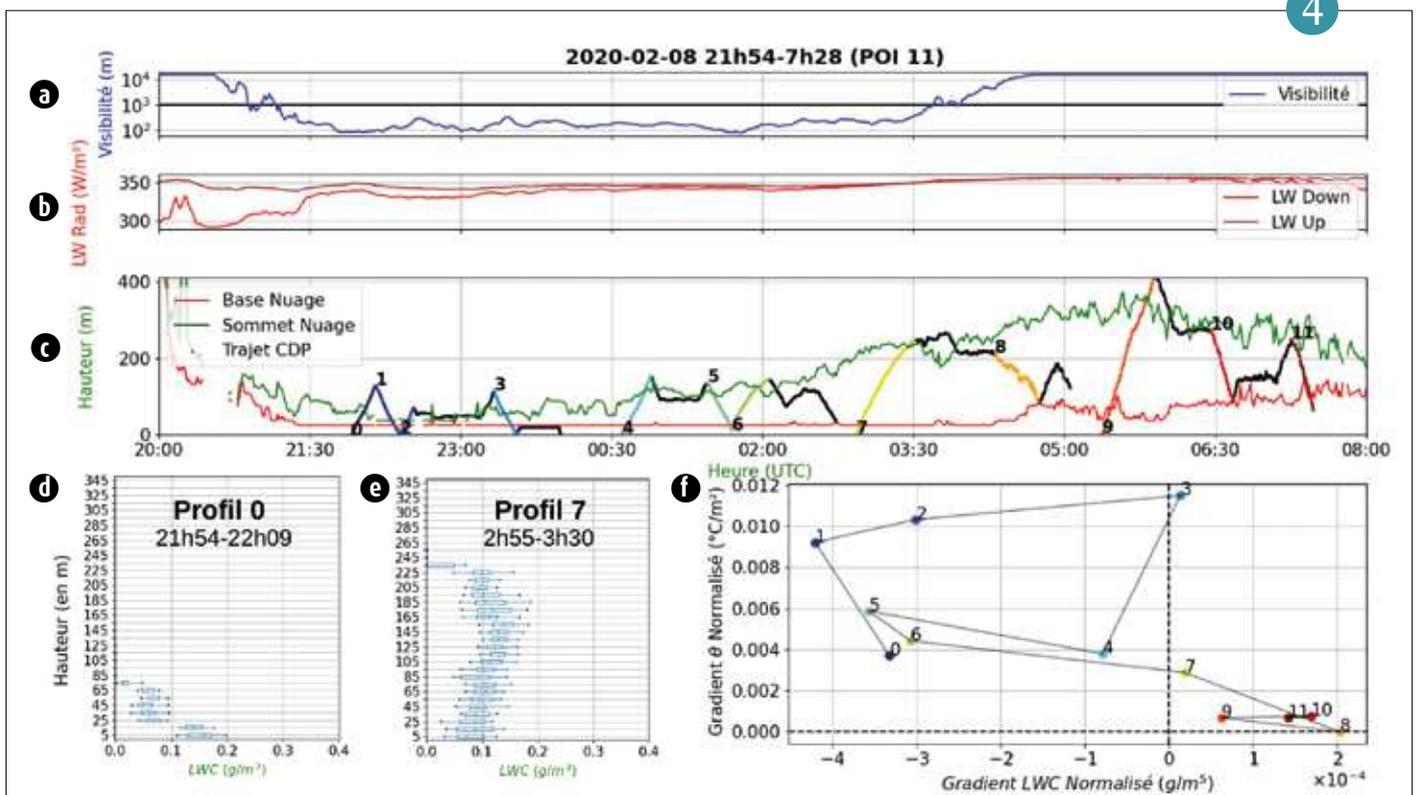
4

3



(a) Série temporelle de profil vertical de contenu en eau nuageuse LWC ( $\text{g.m}^{-3}$ ) simulé. L'axe temporel correspondant aux mesures est situé en haut de la figure et le temps des observations décalé de 4 heures correspondant au temps de la simulation est situé en bas de la figure. Les points noirs représentent la base nuageuse (CBH) détectée par le télémètre. (b) Schéma illustrant les processus impliqués dans l'affaissement de stratus jusqu'à la formation du brouillard.

4



Épisode de la nuit du 8 au 9 février 2020 (POI 11) : évolution temporelle (a) de la visibilité au sol, (b) du rayonnement infra-rouge montant et descendant, et (c) altitude de la base (rouge) et du sommet (vert) du nuage déterminés à partir du radar 95 GHz BASTA, et du ballon captif (noir) embarquant le compteur de gouttelettes CDP, avec les 12 sondages sélectionnés en couleur et numérotés ; Profil de LWC mesuré par le CDP (d) entre 21h54 et 22h09 et (e) entre 2h55 et 3h30 ; (f) Gradient de  $\theta$  en fonction du gradient de LWC, normalisés par l'épaisseur de la couche de brouillard.

---

# Impact de l'assimilation d'observations de radiomètres micro-ondes sol de la campagne SOFOG3D dans le système de prévision météorologique AROME-France

Guillaume Thomas, Pauline Martinet, Pierre Brousseau et Philippe Chambon

Malgré des progrès réguliers, la prévision du brouillard (phénomène à fort impact socio-économique, notamment pour le secteur du transport) reste délicate. Bergot et Guedalia (1994) ont montré que de meilleures conditions initiales dans la couche limite pouvaient être une source d'amélioration. Au cours de l'hiver 2019/2020, cette dernière a été particulièrement étudiée dans le cadre de la campagne SOFOG3D. De nombreux systèmes d'observations ont été déployés afin d'améliorer la connaissance des processus en lien avec le cycle de vie du brouillard. Parmi ces mesures, des profils de température ont été restitués à partir d'un réseau de radiomètres micro-onde sol (MWR).

Ces observations ont été utilisées dans le système d'assimilation 3D-Var du modèle AROME-France et leur impact sur la qualité des prévisions de ce dernier ainsi que leur apport pour la prévision du brouillard ont été évalués. Les figures a) et b) représentent les erreurs moyennes absolues des premières 24h de prévisions de température de deux expériences : une sans (a) et une avec (b) assimilation des MWR par rapport aux profils de température issus de MWR n'ayant pas été assimilés. La figure c) montre la différence entre les deux et met en évidence une diminution significative (carrés blancs) des erreurs de prévision en température pour les 5 à 6 premières heures.

Ces premières expériences n'ont pas permis de mettre en évidence une amélioration nette des prévisions de brouillard à proprement parler. Toutefois, les résultats encourageants sur les autres variables telles que les prévisions de température pourraient motiver de futurs travaux d'assimilation conjointe des profils de température et de variables en lien avec l'humidité issus des MWR pour essayer d'en tirer un meilleur parti.

## Références :

Bergot, T., & Guedalia, D. (1994). Numerical forecasting of radiation fog. Part I: Numerical model and sensitivity tests. *Monthly Weather Review*, 122(6), 1218-1230.

5

---

## Analyse de la variabilité à très fine échelle du brouillard sur Paris-CdG

Thierry Bergot, Renaud Lestringant

Les douze mesures de visibilité installées à Paris-CdG ont permis d'estimer la variabilité spatiale du brouillard à l'échelle kilométrique. Ce travail pionnier permet de quantifier la variabilité du brouillard à l'échelle locale.

La variabilité à l'échelle kilométrique est significative, quelles que soient les caractéristiques du brouillard étudié, indiquant l'importance de l'échelle locale dans l'évolution des événements brouillard. Cette étude a indiqué qu'un point de mesure n'est pas représentatif d'une zone à l'échelle kilométrique et peut créer des problèmes s'il est utilisé pour vérifier ou initialiser des modèles numériques. L'erreur

de représentativité suit clairement une distribution asymétrique et il est impossible de déduire les caractéristiques du brouillard à l'échelle kilométrique à partir d'une mesure locale, même pour des événements de très faible visibilité tels que les cas LVP (Low Visibility Procedure). Par conséquent, des biais importants peuvent être introduits dans les scores de prévisions, du même ordre de grandeur que la qualité actuelle de la prévision numérique du temps.

Les observations restent un point clé pour l'amélioration de la prévision du brouillard en fournissant des informations sur le comportement du brouillard. Cependant, il est très difficile de documenter tous les

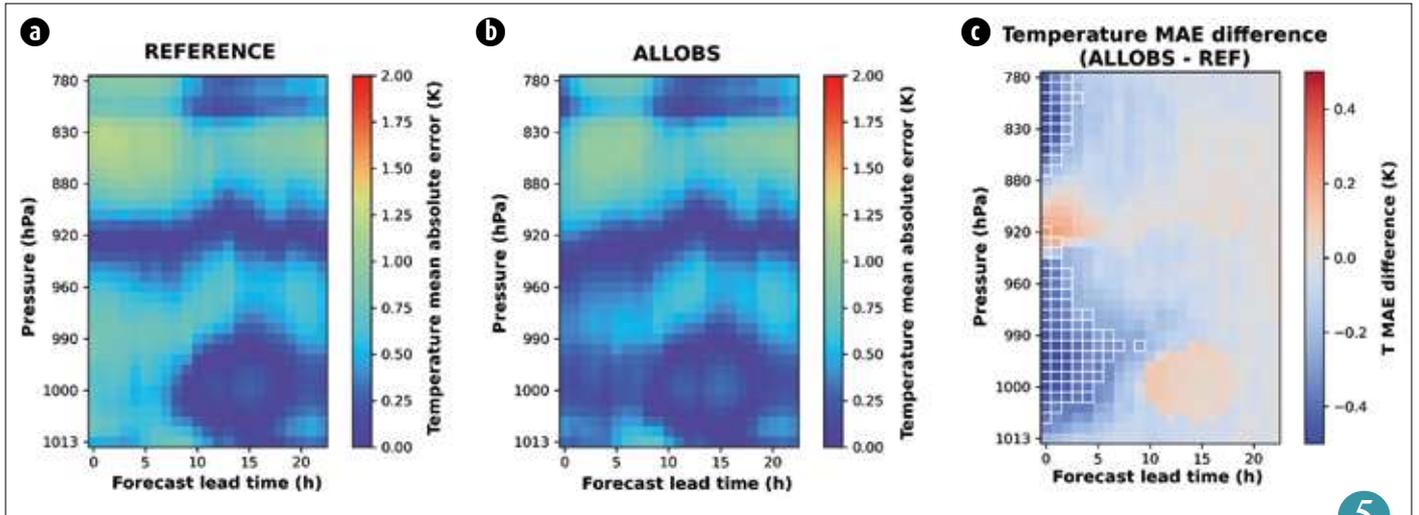
processus affectant le brouillard en raison de leur nature locale. En particulier, on peut s'interroger sur la représentativité des mesures microphysiques lors des campagnes de mesures car il existe une très forte variabilité à l'échelle locale.

Afin de progresser dans la prévision du brouillard, les paramétrisations physiques des modèles numériques doivent être ajustées pour prendre en compte la fonction de distribution des probabilités des propriétés microphysiques dans des schémas de physique stochastique.

## Références :

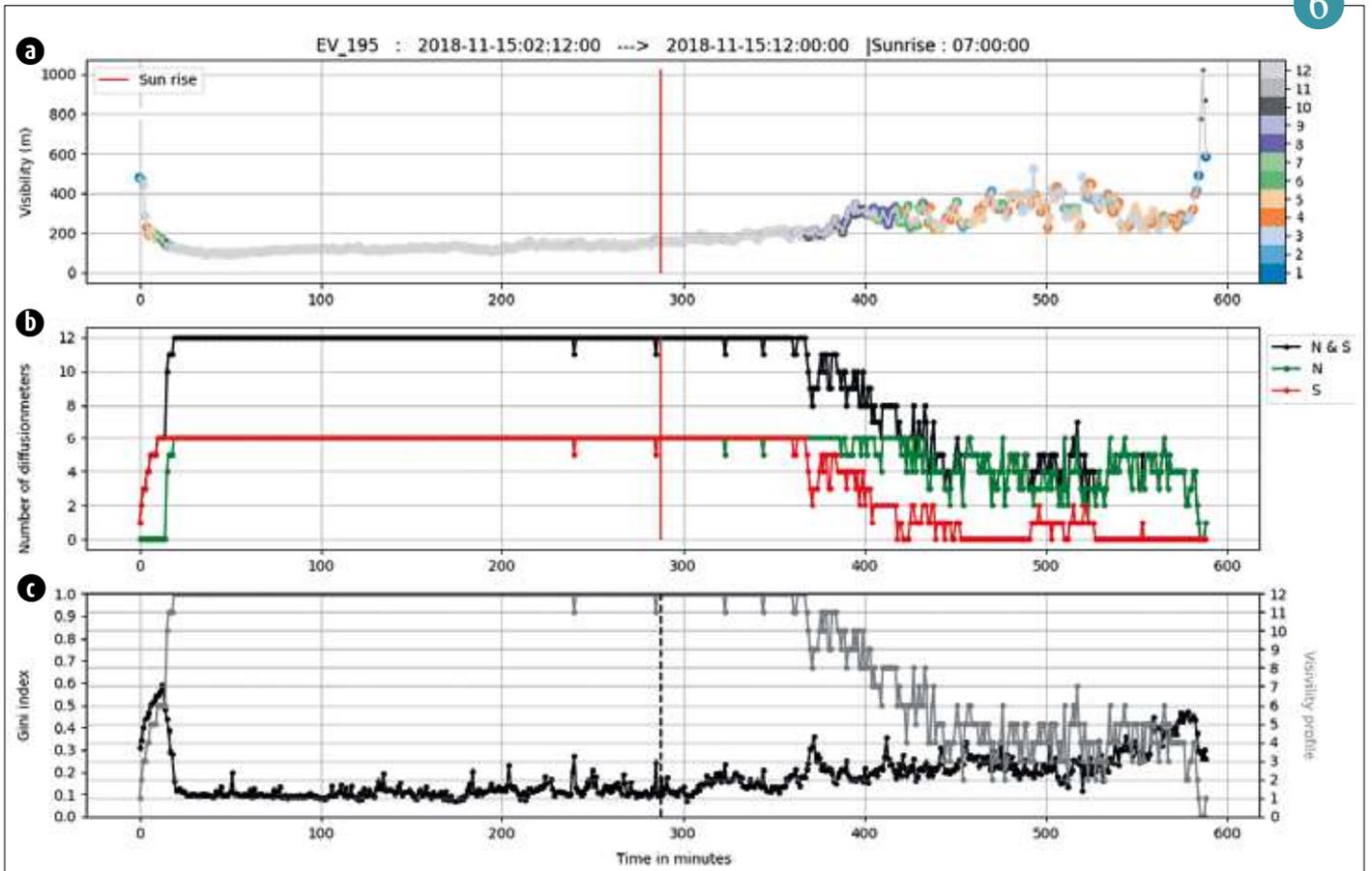
Lestringant, R.; Bergot, T. Analysis of Small-Scale Spatial Variability of Fog at Paris-Charles de Gaulle Airport. *Atmosphere* 2021, 12, 1406. <https://doi.org/10.3390/atmos12111406>

6



5

Erreurs moyennes absolues des prévisions de température par rapport aux profils de température non assimilés issus de MWR pour (a) l'expérience sans assimilation de MWR, (b) l'expérience avec assimilation de MWR et (c) la différence entre les deux (les carrés blancs indiquant les différences statistiquement significatives).



6

Exemple de cas de brouillard sur Paris-CdG. (a) évolution temporelle de la visibilité minimum colorée en fonction du nombre de visibilitémètres indiquant du brouillard (LVU) ; (b) évolution temporelle de LVU pour la partie nord (N), sud (S) et toute la zone aéroportuaire (N&S) ; (c) évolution temporelle de l'indice de Gini et de LVU.



# L'assimilation de données

Les modèles de prévision mis en œuvre par les différents services de Météo-France, permettant la prévision du temps, de l'état de la mer ainsi que de la qualité de l'air, nécessitent tous d'être initialisés. Afin de produire de bonnes prévisions, les conditions initiales de ces modèles doivent refléter le mieux possible la réalité, en recherchant une estimation précise de l'état géophysique courant. Cet état géophysique est obtenu à partir de la combinaison optimale de nouvelles observations et d'une prévision précédente à courte échéance (appelée ébauche). L'élaboration de cette combinaison prend en compte les incertitudes des différents éléments qu'elle fusionne. Cela comprend la mise en œuvre de systèmes ensemblistes, visant à simuler les incertitudes des observations et du modèle, et permettant ainsi de fournir un échantillon statistique des erreurs d'ébauche.

Ces dernières années, d'importants progrès en assimilation de données ont été réalisés grâce aux travaux menés au sein de Météo-France et du CNRM. Ces progrès concernent à la fois l'algorithmie mathématique de l'assimilation de données et également l'utilisation de nouvelles observations. Ces deux éléments sont par ailleurs fortement intriqués, car une amélioration en algorithmie peut permettre une amélioration dans l'exploitation du contenu en information des observations, comme nous le verrons dans ce chapitre.

Le premier article décrit l'évolution des schémas d'assimilation pour les modèles de prévision numérique du temps de Météo-France à l'aide d'une approche orientée objet et d'une formulation qui prend mieux en compte l'information issue des systèmes ensemblistes. Une illustration de l'intérêt de ce nouveau schéma pour l'utilisation des observations est donnée dans le deuxième article montrant les développements autour des données radars et du futur imageur d'éclair du nouveau satellite géostationnaire européen Meteosat Troisième Génération. Les deux articles suivants sont des exemples des travaux de recherches en cours autour de l'utilisation d'observations d'opportunité, les données des stations météorologiques personnelles et les données des avions récoltées par les services de la navigation aérienne. Un article montre ensuite les progrès récents autour de l'assimilation de données satellitaires micro-ondes en zones nuageuses et précipitantes. Enfin, les quatre articles qui ferment ce chapitre montrent les derniers travaux autour de l'utilisation des observations pour la prévision du manteau neigeux, la prévision des vagues et la prévision des aérosols, ainsi que des développements algorithmiques en lien avec l'assimilation en chimie de l'atmosphère.

---

# Evolution des assimilations ARPEGE et AROME vers une approche orientée objet et une première étape d'EnVar

L. Berre, E. Arbogast, V. Vogt, P. Brousseau

Des évolutions majeures sont en cours de préparation pour les assimilations de données ARPEGE et AROME. Il s'agit notamment, pour toutes les assimilations de données relatives à la prévision numérique du temps, de s'appuyer sur une surcouche logicielle appelée OOPS (Object Oriented Prediction System), développement conjoint du CEPMMT et de Météo-France codée en langage C++. Cette approche orientée objet facilite la maintenance et les évolutions des systèmes d'assimilation. En effet, elle repose sur la définition d'objets caractéristiques des algorithmes d'assimilation, qu'il est ensuite possible d'agencer de façon spécifique et flexible en fonction des configurations d'assimilation visées. Il est ainsi prévu de tirer parti de ce passage à OOPS pour réaliser une première évolution vers une formulation EnVar des assimilations AROME-France et ARPEGE.

Pour AROME-France, cela correspond au remplacement du 3D-Var actuel par un schéma 3D-EnVar. Alors que le 3D-Var s'appuie

sur des covariances horizontalement homogènes et statiques temporellement, le 3D-EnVar repose sur des covariances d'erreur d'ébauche qui sont anisotropes et qui permettent de spatialiser les observations de façon dépendante à la situation météorologique. En effet, ces covariances sont dans ce cas issues directement de l'ensemble d'ébauches du système AEARO et elles sont filtrées à l'aide d'une localisation en points de grille. Les tests intensifs menés sur le 3D-EnVar ont montré que ce nouveau schéma a un impact très positif sur la qualité des prévisions AROME, comme illustré sur la Figure 1a.

Pour ARPEGE, le passage à OOPS permet également de préparer une première étape d'EnVar, dans le cadre d'une formulation appelée « 4D-Var hybride ». L'hybridation porte en fait sur les covariances 3D d'erreur d'ébauche issues du système AEARP. Alors que les covariances ensemblistes actuelles sont quasi-isotropes et filtrées en ondelette, il est possible de les hybrider avec des

covariances ensemblistes localisées en points de grille. Cela permet de représenter de fortes anisotropies liées à l'écoulement, avec des courbures caractéristiques pour les cyclones tropicaux par exemple. Comme illustré dans la Figure 1b, ces nouvelles covariances ont aussi un impact positif très significatif sur la qualité du système d'assimilation ARPEGE.

Ces nouvelles versions d'ARPEGE et d'AROME seront déployées début 2023 dans une chaîne en double, permettant ainsi une évolution très importante des systèmes d'assimilation aux échelles globales et convectives. Ce passage à OOPS et à cette première étape d'EnVar permet également de préparer un autre changement majeur, correspondant à l'implémentation ultérieure d'approches 4D-EnVar pour AROME et ARPEGE, en plus d'autres développements facilités par OOPS.

1

---

## De nouvelles possibilités avec le 3d-EnVar dans AROME : assimilation des densités d'éclair de MTG/LI et assimilation directe des réflectivités radar

Maud Martet et Pauline Combarrous

Un des leviers principaux pour l'amélioration de la prévision des orages dans le modèle AROME-France réside dans l'utilisation d'observations spécifiques dans le système d'assimilation de données. Le nouveau schéma 3d-EnVar permet d'ajuster les hydrométéores (variables tri-dimensionnelles représentant l'eau atmosphérique sous forme condensée) lors du processus d'assimilation. Ceci ouvre des perspectives concernant l'assimilation d'observations présentant un contenu en information lié aux hydrométéores et dont deux exemples avec des travaux de recherches en cours sont donnés ci-dessous :

– A bord du satellite Meteosat Troisième Génération (MTG) d'EUMETSAT, un imageur d'éclair (Lightning Imager, LI) est embarqué. Il permet d'observer la densité d'éclairs dans un nuage. Cette densité est

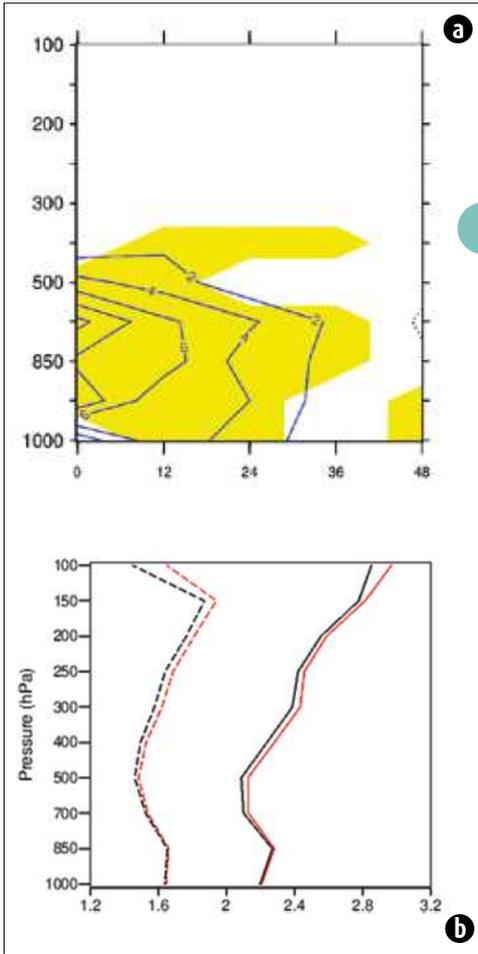
reliée à la quantité de particules glacées, intégrée sur la verticale. MTG étant un satellite géostationnaire, les observations du LI couvriront l'ensemble du domaine géographique d'AROME-France à haute cadence temporelle. Des travaux ont été amorcés au CNRM depuis plusieurs années avec le soutien du CNES pour préparer l'assimilation de ces données.

– Les radars météorologiques permettent d'observer une réflectivité qui est la puissance retournée quand le faisceau rencontre des hydrométéores, le lien avec ces variables du modèle est donc direct. Les instruments de Météo-France et des pays voisins permettent également de couvrir une grande partie du domaine AROME-France à une fréquence de 15 minutes. Ces données sont assimilées depuis de nombreuses années dans le modèle AROME-France et le

nouveau schéma d'assimilation permettra d'explorer une utilisation plus optimale de leur contenu en information.

Ainsi, ces deux types d'observation sont des candidats idéaux pour explorer les possibilités nouvelles permises par le 3d-EnVar et les hydrométéores. Les expériences assimilant ces données supplémentaires, dont un exemple est donné sur la Figure pour les données d'éclairs, montrent qu'elles permettent de mieux décrire les nuages convectifs et les précipitations dans les premières heures de prévision.

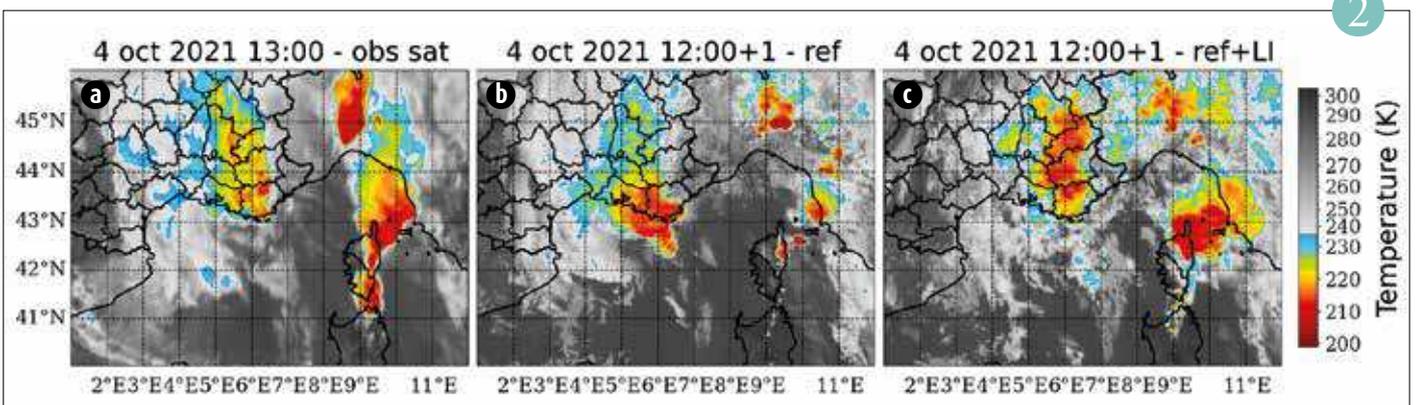
2



1

(a) Pourcentages de réduction des EQM (écarts quadratiques moyens) d'AROME, apportée par le 3DEnVar en comparaison du 3D-Var, mesurée sur une période de 6 mois par rapport aux radiosondages en humidité relative, en fonction de la hauteur de pression (en axe vertical) et de l'échéance de prévision (en axe horizontal). Le 3DEnVar inclut des covariances ensemblistes anisotropes, qui permettent de spatialiser les observations de façon dépendante à la situation météorologique. Les valeurs positives de réduction d'EQM traduisent les impacts positifs du 3DEnVar AROME.

(b) Profils verticaux des EQM ARPEGE des écarts entre analyses et observations (courbes tiretées) et des écarts entre prévisions 6h et observations (courbes pleines). Les observations servant au calcul des écarts sont des mesures de vent fournies par les avions sur les moyennes latitudes de l'hémisphère nord, sur une période de 2 mois. Les courbes rouges sont celles du 4D-Var standard actuel, et les courbes noires correspondent au 4D-Var hybride, qui inclut des covariances ensemblistes anisotropes, dépendantes de l'écoulement. Les valeurs plus petites des EQM du 4D-Var hybride ARPEGE traduisent l'impact positif de cette première étape d'EnVar pour ARPEGE.



2

Comparaison de l'image satellite MSG (a) et des images satellites prévues (ISP) par AROME-France sans assimilation des éclairs « ref » (b) et avec assimilation des éclairs « ref+LI » (c).

## Premières expériences d'assimilation d'observations de stations météorologiques personnelles dans le modèle AROME

Alan Demortier, Olivier Caumont, Vivien Pourret, Marc Mandement

De nombreux objets connectés à Internet équipés de capteurs météorologiques observent désormais les premiers mètres de l'atmosphère à haute résolution spatiale et temporelle. Parmi ces objets, plusieurs dizaines de milliers de stations météorologiques personnelles installées chez des particuliers transmettent en temps réel des observations, dorénavant collectées par Météo-France. Malgré leur qualité variable, car réalisées sans tenir compte des normes de l'OMM<sup>1</sup>, un contrôle de qualité rigoureux permet de tirer profit de ces observations pour observer des phénomènes météorologiques à fort impact – comme les orages – en complément des observations du réseau opérationnel de Météo-France.

Pour évaluer les bénéfices apportés par les observations des stations personnelles dans la description de l'état initial de l'atmosphère (appelée analyse) du modèle de prévision numérique du temps AROME, des expériences d'assimilation ont été

réalisées. Pour la pression de surface, première variable étudiée, un contrôle de qualité spécifique a été mis en place, tout en utilisant l'algorithme actuel de comparaison du modèle aux observations.

L'ajout des observations de pression des stations personnelles modifie le terme de correction qui rapproche l'état de l'atmosphère modélisé des observations (appelé incrément, voir figure). Une évaluation vis-à-vis d'observations opérationnelles au mois d'août 2020 montre une faible mais systématique amélioration des prévisions de géopotential, de température et d'humidité relative à 2 m et de force du vent à 10 m à 1 h d'échéance. Des expériences d'assimilation d'observations de température et d'humidité relative puis des expériences utilisant une nouvelle version du système d'assimilation sont prévues par la suite.

1. *Organisation Météorologique Mondiale*

### Références :

Demortier, A., O. Caumont, V. Pourret, M. Mandement, 2022: Added value of assimilating surface pressure observations from personal weather stations in AROME-France, EMS Annual Meeting 2022, Bonn, Germany, 5–9 Sep 2022, EMS2022-251, <https://doi.org/10.5194/ems2022-251>.

3

## Impact de l'assimilation des données avions Mode-S dans AROME

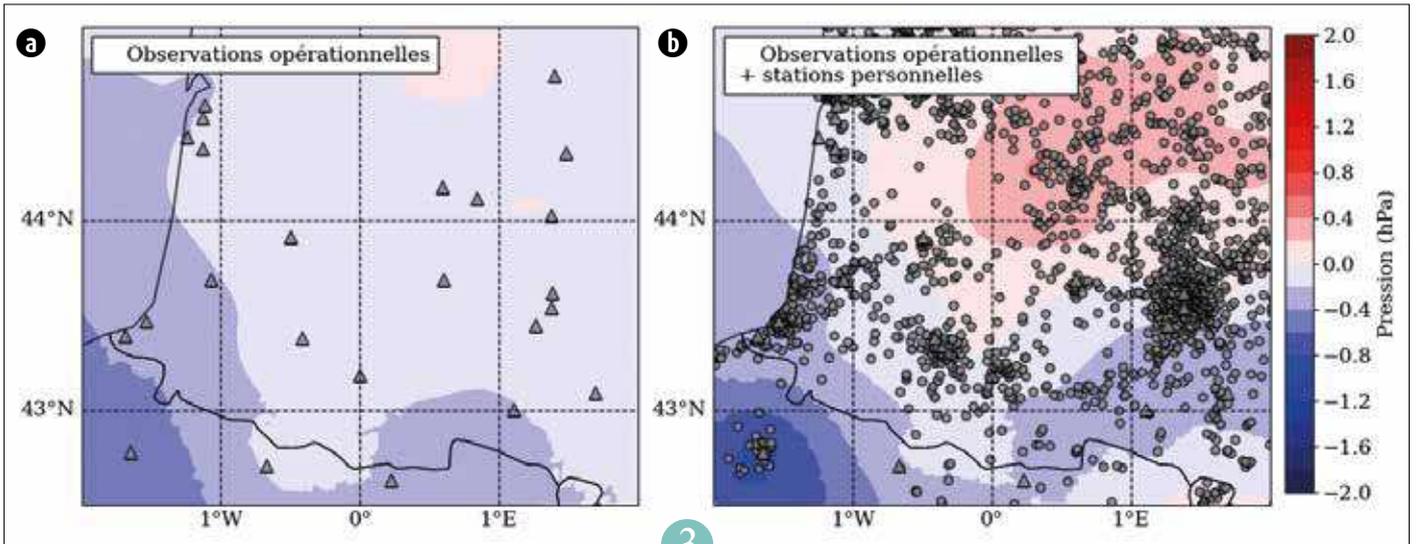
Vivien Pourret

Les données Mode-S/EHS<sup>1</sup> de vent et de température sont déduites des informations fournies par les avions commerciaux en réponse aux interrogations des radars de l'aviation civile toutes les 4 secondes. Ces données sont accessibles gratuitement via des conventions avec les aviations civiles européennes ou via la mise en œuvre d'antennes ADS-B ; elles représentent, en Europe, 50 million d'observations par jour. L'EMADDC (European Meteorological Aircraft Derived Data Center) géré par le KNMI (service météorologique des Pays Bas) est une composante du programme E-ABO (Aircraft Based Observations) d'EUMETNET qui concentre, contrôle et corrige ces données fournies par les centres météo ou les directions d'aviation civile européennes (conventions bilatérales). Ces données d'opportunité, de qualité comparable aux autres données avions disponibles mais avec une densité beaucoup plus élevée, présentent un très fort intérêt pour les modèles à aire limitée de petite échelle comme AROME.

Après filtrage et contrôle de qualité, deux millions d'observations sont assimilées par jour dans AROME multipliant par un facteur de 2 à 4 le nombre total d'observations assimilées. Les évaluations menées montrent que ces données permettent d'améliorer significativement les prévisions jusqu'à 24-30 heures d'échéance pour tous les paramètres sur toute la troposphère. Ces données seront utilisées dans la chaîne en double AROME en construction en 2023.

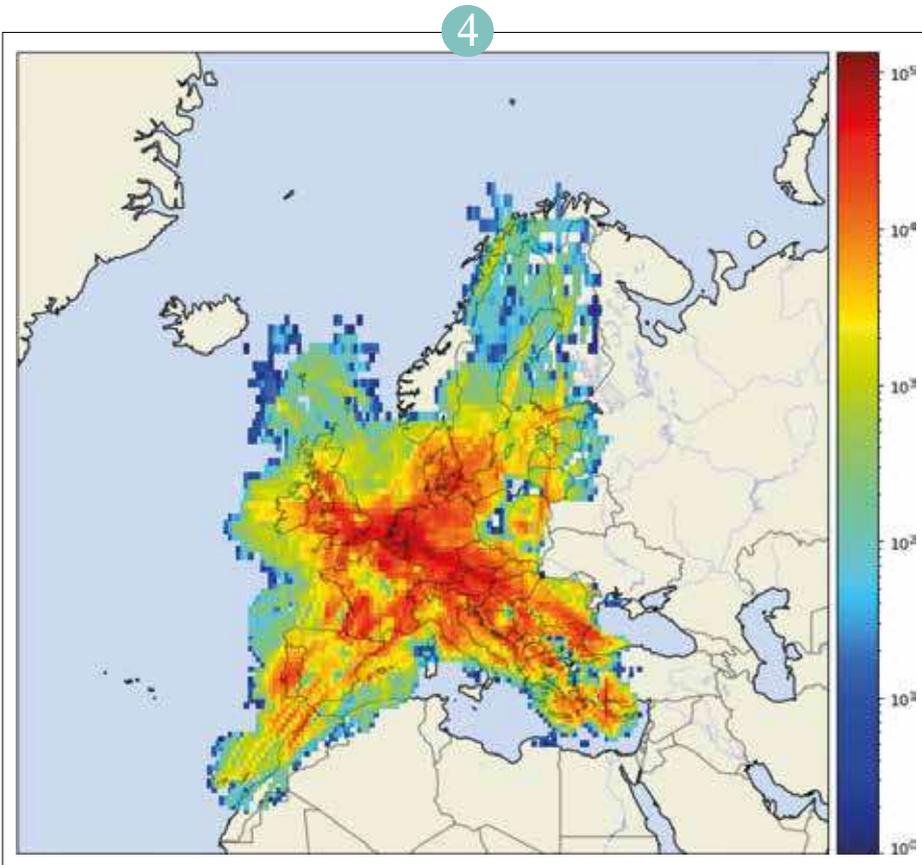
1. *Mode S Enhanced Surveillance (EHS) fournit un ensemble de fonctionnalités avancées pour les transpondeurs du Mode-S. Trois types de rapports différents sont inclus et conçus pour signaler la phase de vol, les performances en virage et les vitesses dans l'air.*

4



3

▲ Incréments de pression de surface sur le sud-ouest de la France le 1er août 2020 à 01:00 UTC de deux expériences d'assimilation démarrant du même état initial : (a) utilisant les *observations opérationnelles* et (b) ajoutant aux *observations opérationnelles* les *observations de pression de surface issues des stations personnelles*. Parmi l'ensemble des observations assimilées, celles issues des stations synoptiques de surface sont indiquées par des triangles gris, et celles issues des stations personnelles sont indiquées par des ronds gris. Les traits noirs indiquent les côtes et les frontières.



4

▲ Densité quotidienne d'observations Mode-S traitées par EMADDC (novembre 2022).

---

# Impact de l'assimilation directe des luminances micro-ondes nuageuses pluvieuses dans l'assimilation ARPEGE et AROME

Philippe Chambon et Mary Borderies

Les observations de télédétection spatiale dans le domaine des micro-ondes représentent une source d'information majeure pour la construction des conditions initiales du modèle ARPEGE. Ces observations, acquises actuellement depuis 13 plateformes satellitaires, présentent un contenu en information sur les profils de température et d'humidité par tout type de temps.

L'assimilation opérationnelle de ces données a été, jusqu'à récemment, cantonnée aux zones de ciel clair. Une première méthode d'assimilation en zone nuageuse a ensuite été développée pour le modèle ARPEGE, grâce aux recherches menées avec le soutien du CNES.

Cette première méthode va être remplacée dans la prochaine chaîne opérationnelle par une méthode d'assimilation plus directe et plus optimale des luminances micro-ondes nuageuses pluvieuses. Cette assimilation directe a été développée au Centre Européen, ce qui nous permet d'opérer à un rapprochement méthodologique avec le modèle IFS. Ces travaux conduisent à des améliorations significatives des prévisions du modèle ARPEGE, en particulier sur l'humidité dans les basses couches comme on peut le voir sur la Figure qui présente la réduction de l'écart-type des erreurs de prévision pour les différents capteurs pour lesquels ces développements ont été évalués.

Dans les années à venir, ces travaux seront étendus à l'intégralité de la constellation d'instruments micro-ondes ; ils seront également évalués dans AROME avec le schéma d'assimilation 3d-EnVar qui permettra de mettre à jour directement les hydrométéores dans les conditions initiales de la prévision.

5

---

## Assimilation d'observations télédétectées pour la simulation du manteau neigeux en montagne

M. Lafaysse et al.

La modélisation numérique est un complément nécessaire aux observations pour décrire l'état du manteau neigeux et sa variabilité spatiale pour les secteurs d'activité qui y sont sensibles (prévision du risque d'avalanches, optimisation des ressources en eau, etc.).

La qualité des simulations dépend de la possibilité de les contraindre par l'assimilation d'observations du manteau neigeux. Compte tenu de la forte variabilité spatiale de la neige à de multiples échelles spatiales, les observations ponctuelles ont une représentativité spatiale insuffisante pour y parvenir. Aussi, le CNRM mène depuis plusieurs années des recherches pour assimiler les propriétés du manteau

neigeux qui sont observables par satellite à des résolutions horizontales compatibles avec des topographies de montagne. Un algorithme d'assimilation spécifiquement dédié à cette problématique est maintenant consolidé, variante d'une méthode appelée « filtre à particules ».

Dans des travaux récents en collaboration avec le CESBIO, l'assimilation de hauteurs de neige obtenues par stéréo-imagerie Pléiades a montré qu'il était possible de sensiblement améliorer la variabilité spatiale des simulations par cette technique et de conserver une plus-value plusieurs mois après la date d'assimilation (voir figure).

Les travaux en cours et futurs cherchent à résoudre les challenges inhérents à

l'assimilation d'autres observations d'intérêt : réflectance optique de la surface, température de surface, variables dérivées des rétrodiffusions micro-ondes, mais aussi les quantités de précipitations estimées par les radars au sol. En raison des interactions complexes de la topographie avec ces différentes observations, le succès de l'assimilation dépend en particulier de notre capacité à bien caractériser les fortes dépendances spatiales des erreurs d'observations.

L'objectif à terme est d'assimiler ces différentes observations dans des simulations opérationnelles permettant en particulier de mieux prévoir les risques associés à la neige.

### Références :

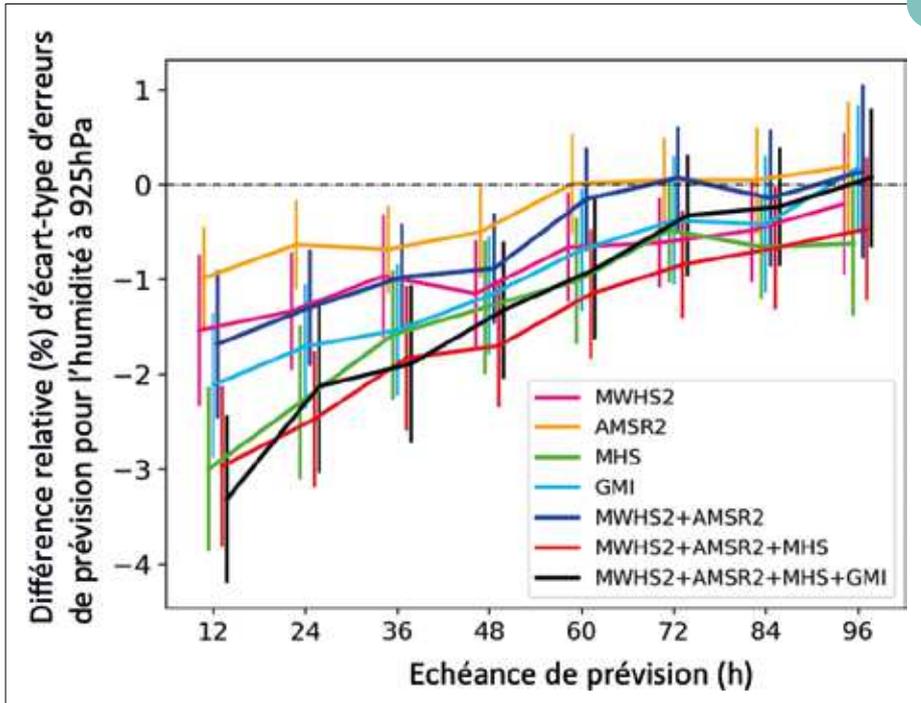
Cluzet, B., Lafaysse, M., Cosme, E., Albergel, C., Meunier, L.-F., and Dumont, M. : CrocO\_v1.0 : a particle filter to assimilate snowpack observations in a spatialised framework, *Geosci. Model Dev.*, 14, 1595–1614, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-1595-2021>, 2021

Cluzet, B., Lafaysse, M., Deschamps-Berger, C., Vernay, M., and Dumont, M. : Propagating information from snow observations with CrocO ensemble data assimilation system : a 10-years case study over a snow depth observation network, *The Cryosphere*, 16, 1281–1298, <https://doi.org/10.5194/tc-16-1281-2022>, 2022

Deschamps-Berger, C., Cluzet, B., Dumont, M., Lafaysse, M., Berthier, E., Fanise, P., & Gascoïn, S. Improving the spatial distribution of snow cover simulations by assimilation of satellite stereoscopic imagery. *Water Resources Research*, 58, e2021WR030271. <https://doi.org/10.1029/2021WR030271>, 2022

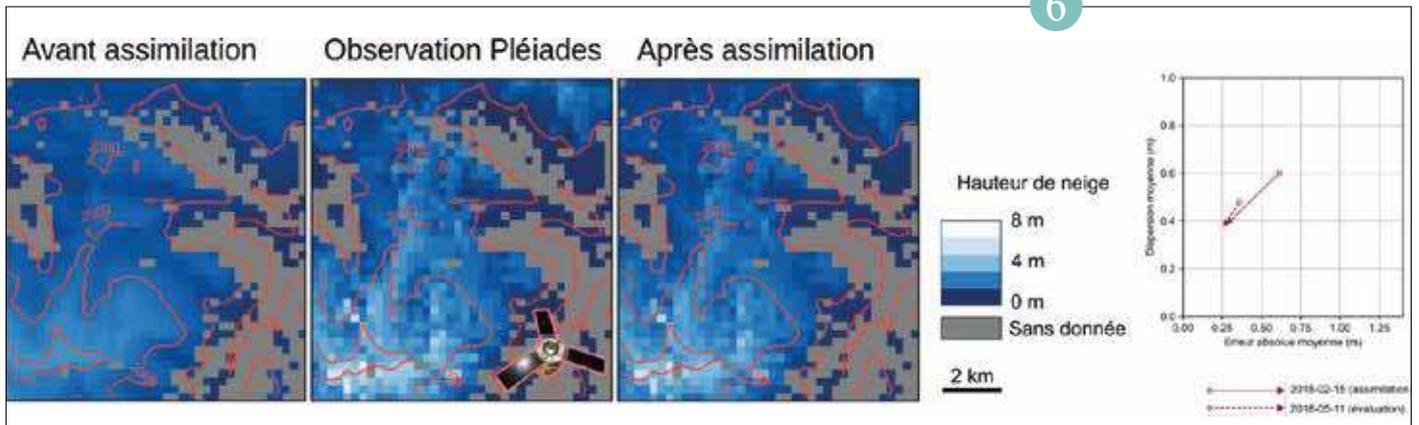
6

5



◀ Réduction relative de l'écart-type des erreurs de prévision du modèle ARPEGE pour l'humidité à 925 hPa dues à l'ajout des observations micro-ondes nuageuses dans la filière d'assimilation directe, en fonction des échéances de prévision. Chaque courbe correspond à une expérience avec un capteur micro-ondes donné (MHS, MWHS2, GMI, AMSR2) ou bien à une combinaison de ces capteurs. Les erreurs de prévisions sont calculées sur le domaine Europe Atlantique sur une période de deux mois en août et septembre 2021, par rapport aux analyses du Centre Européen.

6



▲ Hauteur de neige le 15/02/2018 simulée avant assimilation, observée par imagerie Pléiades, et simulée après assimilation, à la résolution de 250 mètres sur le massif de Bassiès en Ariège. A droite : réduction des erreurs par l'assimilation de données, à la date d'assimilation (train plein), et 3 mois après la date d'assimilation (tireté). Extrait de Deschamps-Berger et al., 2022.

## Assimilation des spectres directionnels de vagues en côtier

Lotfi Aouf

La variabilité directionnelle des vagues près des côtes est un sujet crucial pour l'amélioration de la vigilance vagues submersion et la prévision d'inondation sur le littoral provoqué par le débordement des vagues. Avec l'arrivée du satellite CFOSAT, Chinese-French Oceanic SATellite, mission des agences spatiales chinoise (CNSA) et française (CNES), des spectres directionnels de vagues décrivant l'énergie des vagues en direction et en longueur d'onde apportent des informations très utiles et exploitables dans un processus d'assimilation de données dans le modèle de vagues. L'utilisation de ces spectres dans une configuration du modèle MFWAM en côtier avec une résolution spatiale de 2.5 km et un forçage atmosphérique adapté fourni par le système AROME montre un impact significatif sur les paramètres intégrés de l'état de la mer comme la hauteur significative des vagues et la période moyenne des vagues. La validation avec les observations de vagues issues de bouées dérivantes déployées dans le cadre de la campagne en mer SUMOS dans le golfe de Gascogne indique une réduction significative du biais et de l'indice de dispersion de la hauteur significative des vagues. La figure montre la moyenne de différence de la période moyenne des vagues avec et sans assimilation de spectres de CFOSAT sur un événement de tempête en février 2021 dans l'atlantique Nord-Est près des côtes françaises. Il est clair de voir l'impact de l'assimilation sur les trains dominants de vagues se propageant d'Ouest en Est dans l'océan Atlantique, et la correction de la prévision du modèle MFWAM qui sous-estiment la période moyenne des vagues. On peut également identifier la correction de la croissance des vagues de vent sur un fetch (distance d'action du vent en mer) limité dans le golfe de Lion en mer Méditerranée. Ceci se traduit par un impact significatif sur la période moyenne des vagues sur la côte Ouest de la Corse, où le modèle de vagues a tendance à surestimer la période moyenne des vagues (différence négative indiquée sur la figure).

7

## Initialisation des aérosols dans MOCAGE par assimilation d'épaisseurs optiques satellitaires

Vincent Guidard

Le modèle de chimie-transport MOCAGE est utilisé en opérationnel à Météo-France pour fournir des prévisions à 4 jours d'échéance des espèces chimiques et des aérosols, à la fois sur le globe et sur un large domaine régional couvrant l'Europe à plus fine échelle. Les prévisions d'aérosols sont particulièrement intéressantes pour l'aéronautique, la défense nationale ou le secteur énergie, entre autres. Afin de disposer des meilleures prévisions des aérosols, une étape d'assimilation a été ajoutée à la chaîne opérationnelle MOCAGE en janvier 2022 pour construire des analyses initialisant les prévisions. Sur le domaine global, des données satellitaires d'épaisseur optique des aérosols sont assimilées : elles fournissent une information sur le contenu en aérosols, intégrée sur la verticale. Les

observations en temps réel des imageurs MODIS (plateformes Aqua et Terra) et VIIRS (S-NPP et NOAA-20) sont utilisées, dans une analyse 3D-VAR réalisée toutes les heures. La figure illustre les prévisions d'épaisseurs optiques des aérosols, en moyenne sur 5 mois, comparées à des données agrégées quotidiennement de MODIS. La distribution géographique des aérosols est grandement améliorée, notamment sur le Pacifique Sud et sur les régions d'export depuis l'Afrique vers l'Atlantique et depuis l'Asie vers le Pacifique Nord. Les prévisions des événements significatifs sont également améliorées. Ce transfert opérationnel concrétise plusieurs années de recherche sur le sujet au CNRM et ouvre la voie à un enrichissement du système d'assimilation par de nouvelles sources d'observations.

### Référence :

Laaziz El Amraoui, Matthieu Plu, Vincent Guidard, Flavien Cornut, Mickaël Bacles. A Pre-Operational System Based on the Assimilation of MODIS Aerosol Optical Depth in the MOCAGE Chemical Transport Model. *Remote Sensing*, 2022, 14 (8), pp.1949. [10.3390/rs14081949](https://doi.org/10.3390/rs14081949).

8

## Vers une formulation multivariée dans l'assimilation PKF

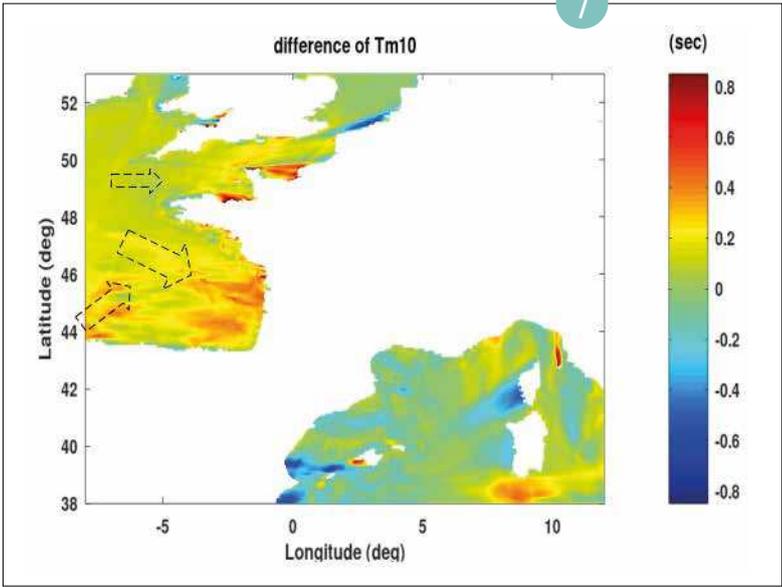
Olivier Pannekoucke, Antoine Perrot, Vincent Guidard

Le filtre de Kalman paramétrique (PKF) est une technique introduite et développée au CNRM en collaboration avec le CERFACS, et qui propose une approximation du filtre de Kalman, alternative à celles des méthodes d'ensemble (EnKF). Dans cette approche, un modèle de covariance est introduit, caractérisé par des paramètres (variance, anisotropie...). L'évolution temporelle des paramètres durant la prévision et l'analyse permet de reproduire les équations du filtre de Kalman, mais à un moindre coût de calcul comparé à l'utilisation d'un ensemble, et tout en dévoilant une part de la physique des incertitudes. Le travail de recherche que nous avons mené a permis d'étendre le formalisme du PKF au cadre multivarié, c'est-à-dire permettre de représenter les

liens statistiques entre plusieurs champs physiques. Dans l'application visée, la chimie atmosphérique, nous avons ainsi pu décrire, dans un cadre simplifié, l'évolution multivariée des statistiques d'erreurs affectant la prévision de composés chimiques, par exemple en prédisant les fonctions de corrélation croisée d'erreur de prévision du NO et du NO<sub>2</sub> (Figure). Dans la suite, nous allons explorer la faisabilité de l'approche dans le modèle de prévision de qualité de l'air MOCAGE.

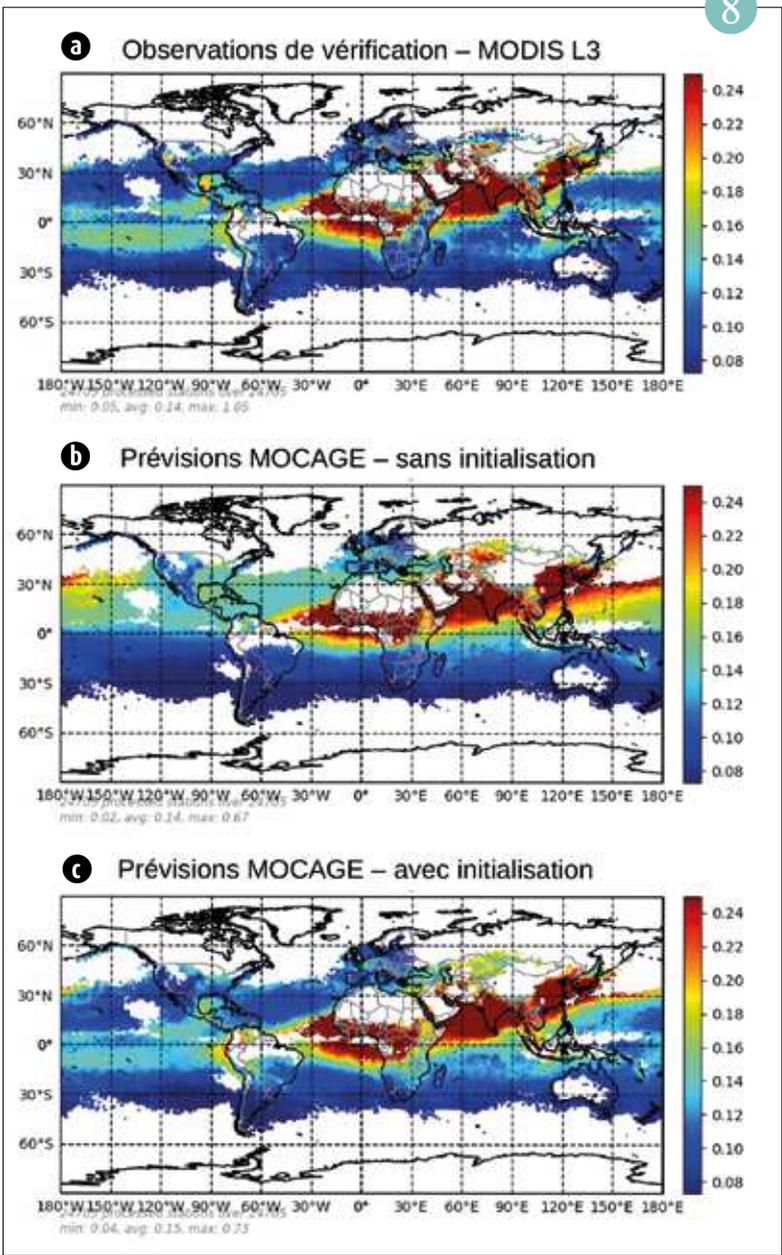
9

7



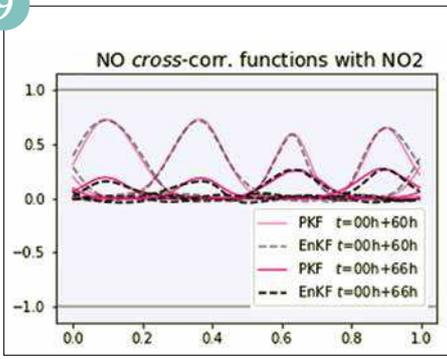
◀ Moyenne de différence (en seconde) de la période moyenne des vagues fournies par le modèle de vagues MFWAM avec et sans assimilation des spectres directionnels de vagues pendant l'évènement de tempête du 23 au 24 février 2021. Les valeurs négatives dans la barre de couleur indiquent une surestimation du modèle de vagues, tandis que les valeurs positives dans la barre de couleur indiquent une sous-estimation du modèle de vagues. Les flèches en pointillées montrent la direction des trains dominants de vagues pendant l'évènement.

8



◀ Moyenne des épaisseurs optiques des aérosols (sans unité) sur les mois de janvier à mai 2022 : issues du produit de vérification MODIS quotidien (a), issues des prévisions par MOCAGE (en colocalisation avec la vérification) sans utilisation de l'assimilation d'observations satellitaires (b) et issues des prévisions par MOCAGE (en colocalisation avec la vérification) avec initialisation par des assimilations d'observations satellitaires (c).

9



▲ Illustration de quelques fonctions de corrélation croisée caractérisant les liens statistiques d'erreur de prévision entre le NO et le NO2 pour deux échéances, où l'on observe que la prévision du PKF (lignes continues) est proche de la référence, ici les statistiques estimées à partir d'un ensemble de grande taille de 6400 membres (EnKF, lignes tiretées).



# Florilège de résultats illustrant les avancées de recherche en 2022

# Prévision numérique du temps et assimilation de données

La recherche en prévision numérique alimente directement les évolutions de la chaîne de prévision, afin d'enrichir et améliorer les produits et services rendus par Météo-France. Un cadre expérimental a été développé ces dernières années pour dimensionner les projets de missions spatiales dédiées à l'observation de l'atmosphère en collaboration avec les agences (CNES, ESA, EUMETSAT). Un autre axe d'avenir est de pouvoir prendre en compte les poussières d'origine désertique dans la prévision ; l'effet des remontées de sable saharien sur les prévisions de température en France a été démontré pour la première fois avec Arome. L'apport des systèmes d'ensemble Arome sur 5 domaines outre-mer pour la prévision des événements cycloniques et orageux est mis en évidence sur le dramatique événement Fiona en Guadeloupe ; ces systèmes deviendront opérationnels en 2023. Dans le domaine de la prévision des vagues aussi, des systèmes d'ensemble sont en développement. Enfin, plusieurs avancées ont été accomplies dans le domaine des prévisions probabilistes adaptées au besoin des utilisateurs, grâce à des traitements statistiques innovants : la détection et la visualisation de structures orageuses à fortes rafales (écho arqués), la prévision des précipitations adaptée aux besoins des services de prévision des crues et la sévérité de la convection pour la gestion du trafic aérien. Ces produits probabilistes permettent d'améliorer l'anticipation des phénomènes et d'accompagner efficacement la prise de décision dans chaque domaine d'application.

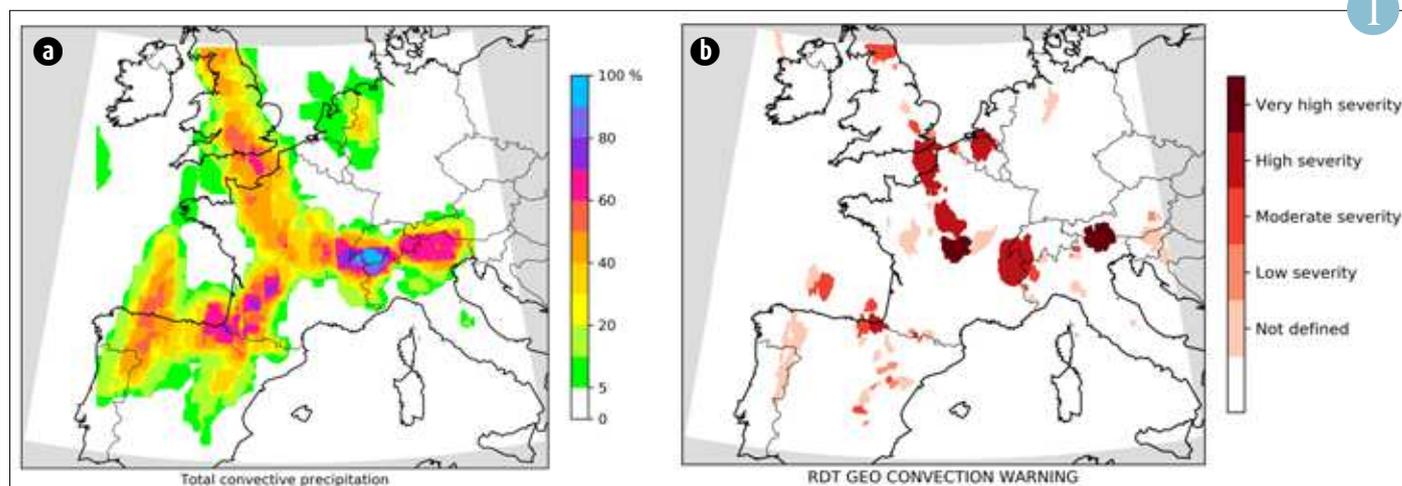
## Projet SESAR ISOBAR : valorisation des prévisions d'ensemble pour la gestion du trafic aérien

M. Ponzano, L. Raynaud

Les retards de vols sont l'une des préoccupations majeures pour la gestion du trafic aérien, en raison des préjudices financiers et moraux qu'ils induisent. Le projet SESAR ISOBAR (2020-2022) s'est concentré sur l'amélioration des prévisions météorologiques du risque convectif pour prévoir les déséquilibres entre la capacité et la demande du trafic aérien, et sélectionner des mesures d'atténuation appropriées. La chaîne de valeur développée dans ce cadre exploite le potentiel de l'intelligence artificielle à chaque étape. L'algorithme d'intelligence artificielle est entraîné à l'aide d'un jeu de données de situations convectives de l'été 2019, qui

comprend des prévisions d'ensemble (PE) de plusieurs systèmes (IFS,  $\gamma$ -SREPS et PE-AROME), la capacité déclarée dans le flux de trafic aérien et la demande initiale de trafic aérien. La chaîne de valeur produit une solution pour les opérations tactiques (jour 0) et pré-tactiques (jour -1). Météo-France a contribué au module météorologique du projet en fournissant les prévisions PE-AROME et en développant une prévision probabiliste innovante du risque de convection basée sur la détection automatique d'objets convectifs. Ce produit (voir figure) a été exploité par les autres partenaires comme

météorologiques calibrées. Un exercice de validation a été organisé au Hub d'innovation d'EUROCONTROL en mars 2022 avec la collaboration du service opérationnel du contrôle du trafic aérien et des contrôleurs du trafic aérien d'Europe. L'ensemble de la chaîne de valeur développée dans ISOBAR a été testée sur des situations de forte convection sur l'Europe, caractérisées par des retards importants. Grâce à la solution ISOBAR, les retards ont été réduits jusqu'à 75 %.



(a) Probabilité de convection à partir de PE-AROME pour le 25 juillet 2019 à 18:00 UTC (la simulation a débuté le 25 juillet 2019 à 03:00 UTC).  
(b) Cellules convectives observées à partir du produit RDT (Rapidly Developing Thunderstorm) issu de l'imagerie satellitaire.

# Détection des échos arqués dans PE-AROME et AROME

A. Mounier

L'utilisation pertinente de la grande quantité d'informations fournies par les modèles de prévision météorologique représente un défi à relever. Les produits existants pour synthétiser ces informations ne sont pas toujours appropriés, notamment pour reconnaître les systèmes orageux à fort impact tels que les échos arqués. Les échos arqués sont des systèmes particuliers en forme d'arc, souvent associés à de fortes rafales de vent.

Une manière d'améliorer la prévision de ces événements est de détecter automatiquement les échos arqués dans les sorties des modèles en utilisant des méthodes de traitement d'image. Cette approche est en adéquation avec les méthodes de travail des prévisionnistes car elle cherche à détecter

une structure orageuse particulière dont le schéma conceptuel est connu. Dans ces travaux, un réseau de neurones convolutif est développé pour détecter les échos arqués directement à partir des réflectivités simulées par AROME ou les membres de PE-AROME. La meilleure configuration du réseau de neurones convolutif a un taux de détections de 86% et un taux de fausses alarmes de 39%. Une analyse des performances de ce réseau de neurones convolutif sur plusieurs mois a montré que les plus grands échos arqués sont correctement détectés, tandis que les fausses alarmes et les non détections correspondent principalement à des échos arqués petits et faibles en intensité.

Sur la base d'une coopération avec les prévisionnistes, des graphiques sont proposés pour synthétiser les détections

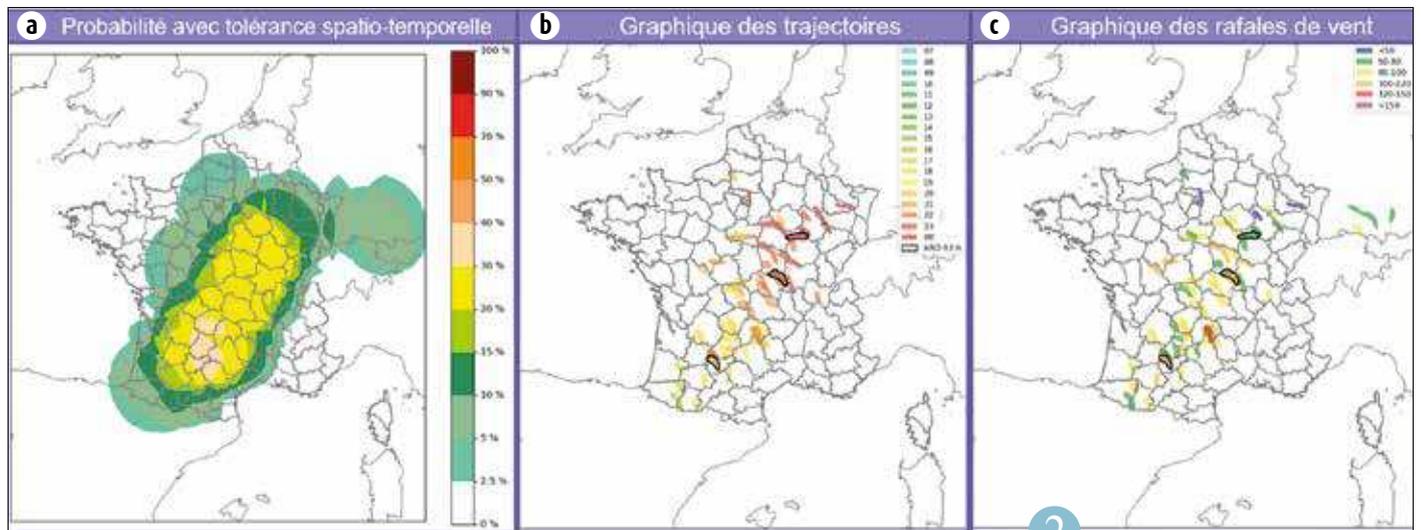
des échos arqués dans PE-AROME et AROME et identifier les zones à risque. Les prévisionnistes perçoivent ces produits comme pertinents et potentiellement utiles pour traiter la grande quantité de données disponibles.

Pour poursuivre l'évaluation de ces travaux en temps réel, une production quotidienne en mode recherche est en cours à Météo-France depuis l'été 2021. Dans le cadre de travaux futurs, d'autres réseaux de neurones convolutifs pourraient être développés pour détecter d'autres types de convection sévère.

## Référence :

Mounier, A., Raynaud, L., Rottner, L., Plu, M., Arbogast, P., Kreitz, M., Mignan, L., and Touzé, B. (2022). Detection of Bow Echoes in Kilometer-Scale Forecasts Using a Convolutional Neural Network. *Artificial Intelligence for the Earth Systems* 1, 2, e210010, available from: <https://doi.org/10.1175/AIES-D-21-0010>.

2



Exemple de 3 graphiques de synthèse du 4 juin 2022 à 07h UTC au 5 juin 2022 à 00h UTC.

(a) Probabilité d'occurrence d'écho arqué avec une tolérance spatio-temporelle.

(b) Toutes les détections d'écho arqué dans PE-AROME et AROME (contours noirs) sont superposées. Les couleurs correspondent à l'heure UTC des détections des échos arqués.

(c) Identique à (b) mais les couleurs correspondent aux rafales de vent attendues sous les détections des échos arqués. Les rafales de vent sont la plupart du temps autour de 80-100 km/h pour cette journée.

## Apport de l'utilisation d'aérosols du jour dans AROME

Y. Seity, Q. Libois

Le mois de mars 2022 a été marqué par plusieurs épisodes d'intrusion de poussières désertiques en provenance du Sahara. Les conséquences de ce type d'évènement sont multiples : diminution du rayonnement solaire et donc refroidissement en surface, modification de l'albédo de la neige, impacts sur la formation de nuages de glace...

Actuellement, les modèles de prévision numérique du temps comme AROME utilisent des champs d'aérosols suivant une climatologie mensuelle. Pour un jour et un endroit donnés, ils sont donc identiques quelle que soit l'année. Par construction, cette approche ne permet pas de représenter correctement les épisodes de mars 2022, pour lesquels les modèles AROME et ARPEGE ont très nettement sur-estimé la température et le rayonnement solaire incident en surface. Des modifications ont été effectuées afin d'alimenter le modèle AROME avec une information plus réaliste en aérosols : des aérosols du jour prévus par un modèle de chimie-aérosols (CAM5). La figure montre l'amélioration de la prévision de température à 2 m le 16 mars 2022 à 14 TU sur l'ensemble des stations du réseau d'observation. Sur les stations qui apparaissent en bleu, le fait de prendre en compte des aérosols du jour améliore la prévision de température, alors que pour celles en rouge, beaucoup moins nombreuses, cela dégrade les prévisions. On constate une nette amélioration des prévisions, avec sur certaines stations un gain de l'ordre de 2°C.

Dans cet exemple, les aérosols n'interagissaient qu'avec le rayonnement du modèle mais des travaux en cours permettent aussi de les faire interagir avec la formation des nuages. L'utilisation d'aérosols temps réel dans les modèles opérationnels de prévision du temps pourrait donc devenir prochainement une réalité.

3

## Mise en place d'une prévision d'ensemble de vagues au niveau global

A. Dalphiné

Jusqu'à présent, Météo-France n'opérait que des modèles de vagues déterministes. Les prévisionnistes en météorologie marine ne pouvaient s'appuyer en termes de prévision d'ensemble<sup>1</sup> (PE) que sur celle de vagues du Centre Européen de Prévision. Or cette dernière s'intéresse surtout à la moyenne échéance, jusqu'à 15 jours, à une résolution spatiale de 0,25°.

Une configuration basée sur la prévision d'ensemble atmosphérique de Météo-France<sup>2</sup> (PEARP) et sur le modèle de vagues MFWAM a été développée. Cette configuration globale à la résolution spatiale de 0,2° comprend 35 membres, forcés par les 35 scénarios de vent de la PEARP, et simule les états de mer jusqu'à 102h.

Les tests menés sur la période hivernale de janvier à avril 2021 ont montré l'intérêt de la PE-MFWAM par rapport au modèle déterministe MFWAM, surtout au delà de l'échéance 48h. A courte échéance, l'ensemble de vagues manque de dispersion car chaque membre part du même état initial. Après 48h, l'erreur moyenne de l'ensemble est inférieure à celle du modèle déterministe, d'après les observations aux bouées et aux altimètres proches de la France métropolitaine.

L'illustration jointe montre un cas de dispersion importante à 102h entre les membres de la PE-MFWAM, à l'approche

de la tempête Justine, fin janvier 2021. La prévision déterministe de hauteur des vagues (à gauche) est fortement en avance par rapport à l'analyse, considérée comme la référence (au centre). Or, les membres reflètent l'incertitude sur la chronologie et la possibilité d'une chronologie différente, comme le montre l'écart-type de hauteur des vagues à 102h (à droite).

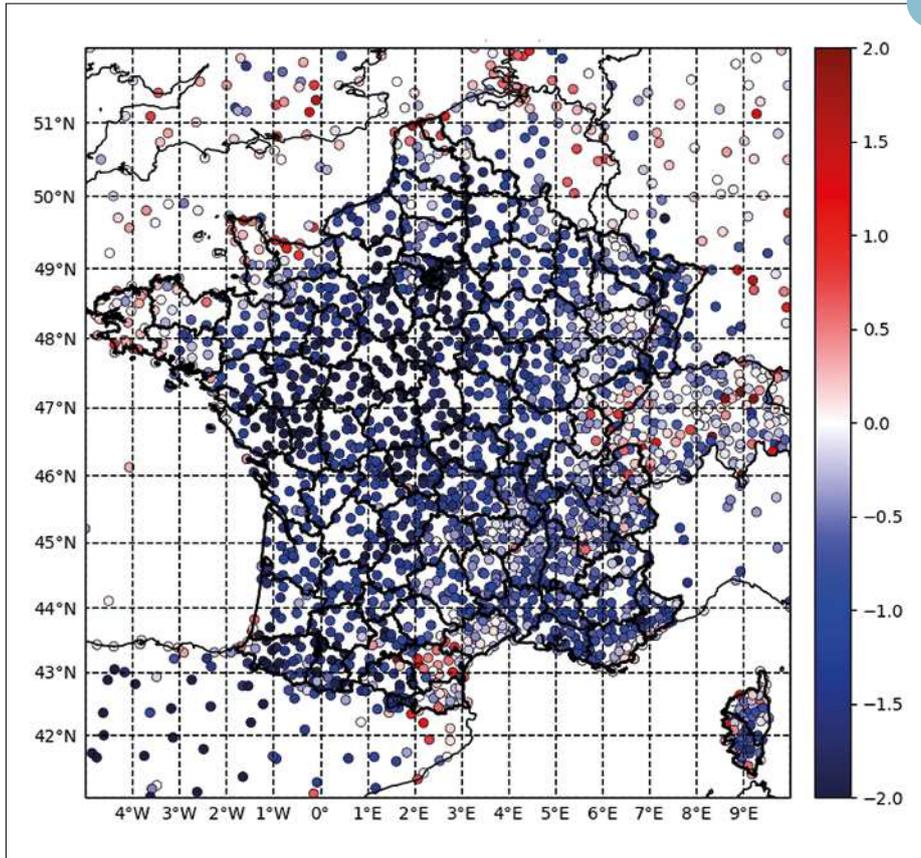
L'étude a aussi montré l'intérêt de prendre en compte l'incertitude sur le modèle de vagues en utilisant alternativement deux physiques du modèle de vagues pour les 35 membres. L'ensemble ainsi constitué présente de meilleurs scores.

La mise en place de cette configuration globale (le 16 novembre 2022 sur la chaîne opérationnelle) ouvre la voie à une prévision d'ensemble de vagues côtières sur la France métropolitaine et à l'outre-mer. De plus amples validations et des échanges avec les prévisionnistes sont aussi essentiels pour l'appropriation de ces prévisions complexes et pour développer des applications en aval comme un indice de mer dangereuse.

1. PE
2. PEARP

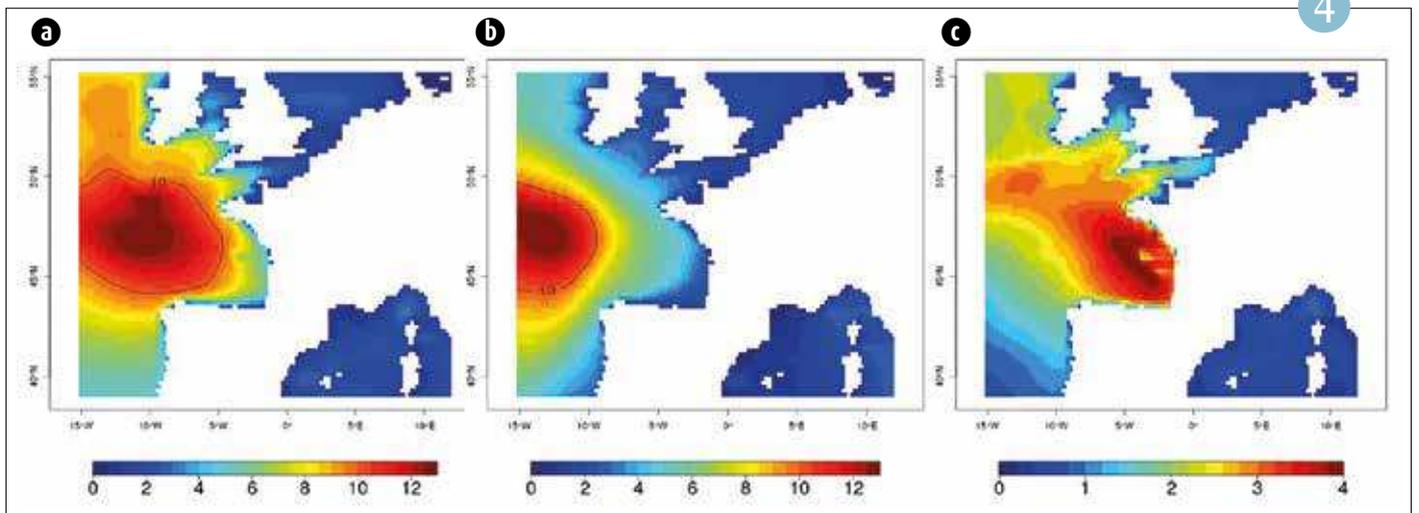
4

3



Différence de biais de température à 2m le 16 Mars 2022 à 14 TU.

4



Hauteur significative des vagues (m) de la prévision à 102h de MFWAM déterministe (a), de l'analyse de MFWAM (b) et écart-type de hauteur des vagues (m) des 35 membres de la prévision à 102h de la PE-MFWAM (c) pour le 30/01/2021 à 06h UTC

---

## Les Expériences de Simulations de Systèmes d'Observations (OSSE) à l'échelle globale : un environnement simulé pour contribuer à la définition de futures missions spatiales

P. Chambon, O. Audouin, T. Carrel-Billiard, O. Coopmann, N. Fourrié, R. Marty, et L. Rivoire

L'équipe OBS du CNRM est régulièrement sollicitée par les agences spatiales (CNES, ESA, EUMETSAT) afin de préciser nos besoins futurs en matière de télédétection spatiale. Des éléments quantitatifs en termes de bénéfices sur la qualité de nos prévisions sont souvent attendus afin de répondre à un certain nombre de questions, par exemple : (i) de quel taux de revisite et de quelle résolution spatiale des observations aurez-vous besoin ? (ii) accepteriez-vous des observations de qualité moindre qu'aujourd'hui si elles sont plus nombreuses, (iii) quelles longueurs d'onde préférez-vous ?... Des éléments de réponses sur des bases objectives peuvent être fournis à partir d'expérimentations numériques permettant

d'évaluer l'impact de futurs systèmes aux côtés de toutes les observations actuelles. Celles-ci se nomment Expériences de Simulations de Systèmes d'Observations (OSSE). À travers plusieurs travaux de recherches passés, en partenariat avec EUMETSAT et l'ESA, le CNRM a acquis une expertise unique en Europe dans la construction de ce type de cadre. Actuellement, trois projets d'OSSE sont en cours avec le modèle de prévision global ARPEGE. Le premier, mené avec le soutien du CNES, concerne la préparation de l'assimilation du sondeur hyperspectral IASI-NG à bord de la nouvelle génération de satellites défilant MetOp-SG et l'étude de son impact sur la prévision. Le deuxième, mené

également avec le CNES, concerne une Phase 0 nommée CMIM pour Constellation de Mini sondeurs pour la Météorologie; elle consiste à étudier l'impact de différents instruments miniaturisés infrarouge et micro-ondes. Le troisième, mené avec EUMETSAT, consiste à étudier l'impact du nombre de satellites et de leurs orbites dans une constellation de sondeurs micro-ondes pour le projet EPS-Sterna. Cette constellation sera proposée aux états membres d'EUMETSAT en complément des programmes MTG et EPS-SG, avec nos résultats d'OSSE à l'appui.

5

---

## Prévisions immédiates d'ensemble pour l'anticipation des crues soudaines

François Bouttier

L'amélioration de la prévision des pluies intenses et de leurs impacts sur les crues éclaircies à échéances inférieures à 6 heures est un objectif majeur de Météo-France. La recherche sur ce sujet s'effectue en partenariat entre Météo-France (en tant que fournisseur de prévisions de pluies), INRAE<sup>1</sup> et l'Université Gustave Eiffel (en tant qu'experts en modélisation hydrologique), et le support de la DGPR<sup>2</sup>. Actuellement les modèles de prévision de ce type de crues sont généralement alimentés par des observations (et non des prévisions) de pluie. L'objectif est d'améliorer les alertes aux inondations par une approche probabiliste, indispensable pour gérer

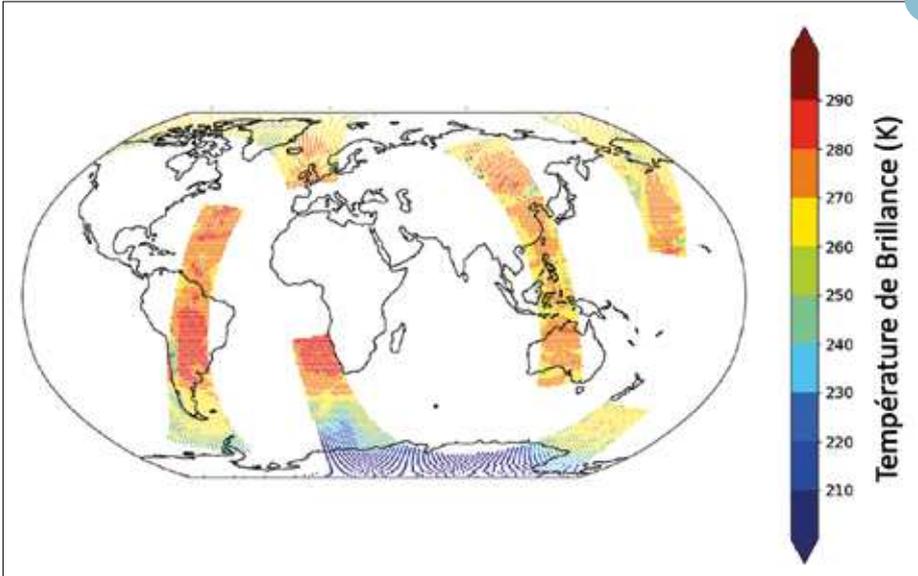
les fortes incertitudes sur la chronologie, l'intensité et la localisation des plus forts cumuls de précipitations. Pour cela, un nouveau système de prévision d'ensemble couplant modèles atmosphériques et hydrologiques à haute résolution a été construit, il s'appuie sur le système PIAF de prévision immédiate des pluies de Météo-France, qui combine les données observées par radar et le modèle numérique d'atmosphère AROME-PI. Ses prévisions ont été évaluées sur un large échantillon d'épisodes de pluies méditerranéennes intenses, via son couplage au modèle hydrologique SMASH adapté aux alertes de pluies/inondations. Cette étude a montré

que ce système fournit une meilleure anticipation des crues que les méthodes basées sur les observations seules. Il présente des possibilités intéressantes d'amélioration qualitatives et d'application pour la prévision opérationnelle des crues et inondations.

- 
1. Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
  2. Direction Générale de la Prévention des Risques

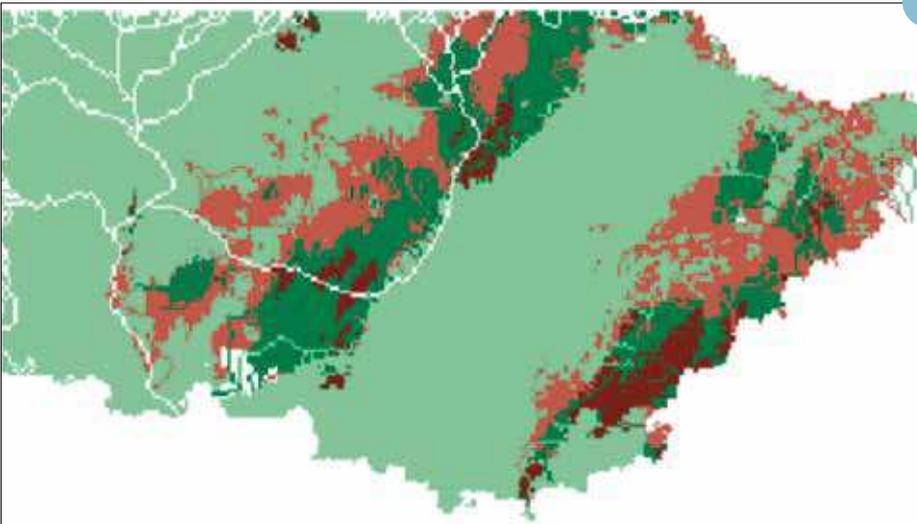
6

5



Exemple de simulation de transfert radiatif à la fréquence de 176 GHz pour une configuration à 4 satellites de la constellation EPS-Sterna à partir du modèle global ARPEGE.

6



Cartographie à résolution kilométrique des taux de succès d'une prévision probabiliste des débits (basée sur un quantile de l'ensemble de prévisions hydrologiques) sur un cas de fortes précipitations sur les Alpes Maritimes. Vert foncé : bonne prévision des forts débits, violet : prévision manquée, saumon : fausse alarme (crédit: J. Godet, INRAE).

---

## Prévisibilité des pluies diluviennes des 16-17 septembre 2022 sur la Guadeloupe lors de la tempête tropicale Fiona

Olivier Nuissier

Une avancée majeure en matière de prévision numérique du temps (PNT) pour les régions d'Outre-Mer sera la mise en exploitation opérationnelle en 2023 de 5 systèmes de prévision d'ensemble avec le modèle Arome-OM. Depuis 2020, des produits probabilistes issus de démonstrateurs sont déjà mis à disposition des prévisionnistes en Outre-Mer, en temps-réel, pour aider à mieux quantifier l'incertitude lors de certaines situations à enjeux.

Fiona était un phénomène cyclonique atypique avec une activité pluvio-orageuse très significative et concentrée à l'arrière du centre de la tempête (Fig. 1a). Durant la nuit du 16 au 17 septembre 2022, la Guadeloupe a reçu des précipitations quasi record (> 100

mm en 1h) sur le sud Basse-Terre (Fig. 1b). Une personne est décédée emportée par la crue de la Rivière des Pères à Basse-Terre.

Les travaux présentés ici proposent une approche originale, dite « objet », pour quantifier l'incertitude sur la structure des cyclones. Les prévisions du centre cyclonique des différents membres sont alors ramenées sur un même scénario de trajectoire (ici la trajectoire observée). La Figure 1d montre que le calcul d'un quantile 90 % dans ce référentiel du cyclone cible beaucoup mieux le risque de très fortes pluies sur le sud Basse-Terre, contrairement à l'approche classique de calcul en point de grille fortement impactée par la variabilité spatio-temporelle (Fig. 1c).

Au-delà de l'analyse de la prévisibilité des processus à haute résolution au sein des cyclones, ces travaux contribueront à faciliter la prise en main et l'utilisation de cette prévision d'ensemble Outre-Mer par les prévisionnistes dans un contexte opérationnel.

7

---

## Prévision opérationnelle de l'effet météorologique des éclipses de Soleil

Jean-Marcel Piriou, Yann Michel, Marie Cassas, Adrien Marcel

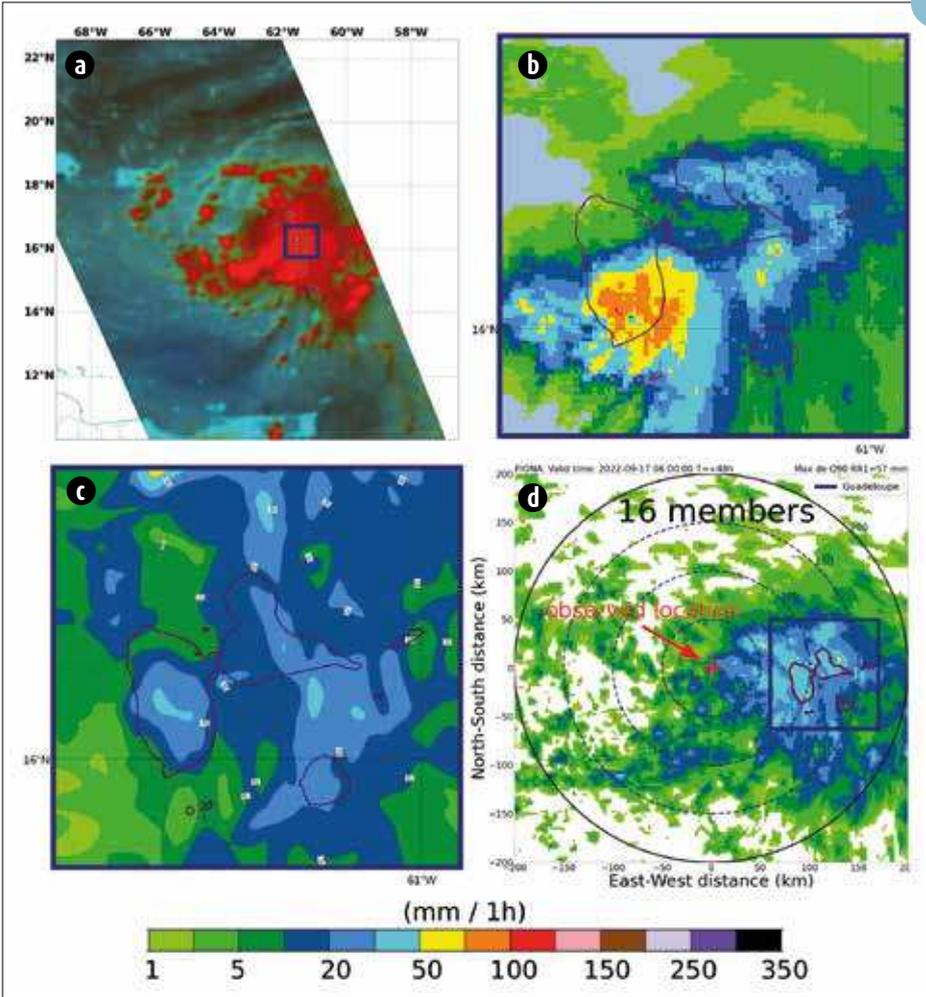
Faisant suite la demande des usagers de Météo-France dans le domaine de l'énergie, le CNRM/GMAP prépare pour la prochaine chaîne en double du modèle de prévision ARPEGE-AROME la prise en compte de toutes les éclipses de Soleil (totales, partielles, annulaires). Le rayonnement solaire entrant au sommet de l'atmosphère est réduit du degré d'obscurcissement solaire, ce à chaque pas de temps de ces modèles, permettant la

prise en compte déterministe de l'effet non linéaire 3D des éclipses sur la température, le vent, la nébulosité, etc. A l'occasion de l'éclipse partielle récente du 25 octobre 2022 de la France à la Russie, de telles prévisions ont été effectuées, on présente sur la figure l'impact de l'éclipse sur ce cas. L'éclipse réduit la température, elle fait également baisser la force du vent, car la couche limite atmosphérique devient plus stable. Elle a

ainsi un triple effet sur la consommation électrique: augmentation de consommation par baisse de la température, baisse de la production photovoltaïque, baisse de la production éolienne.

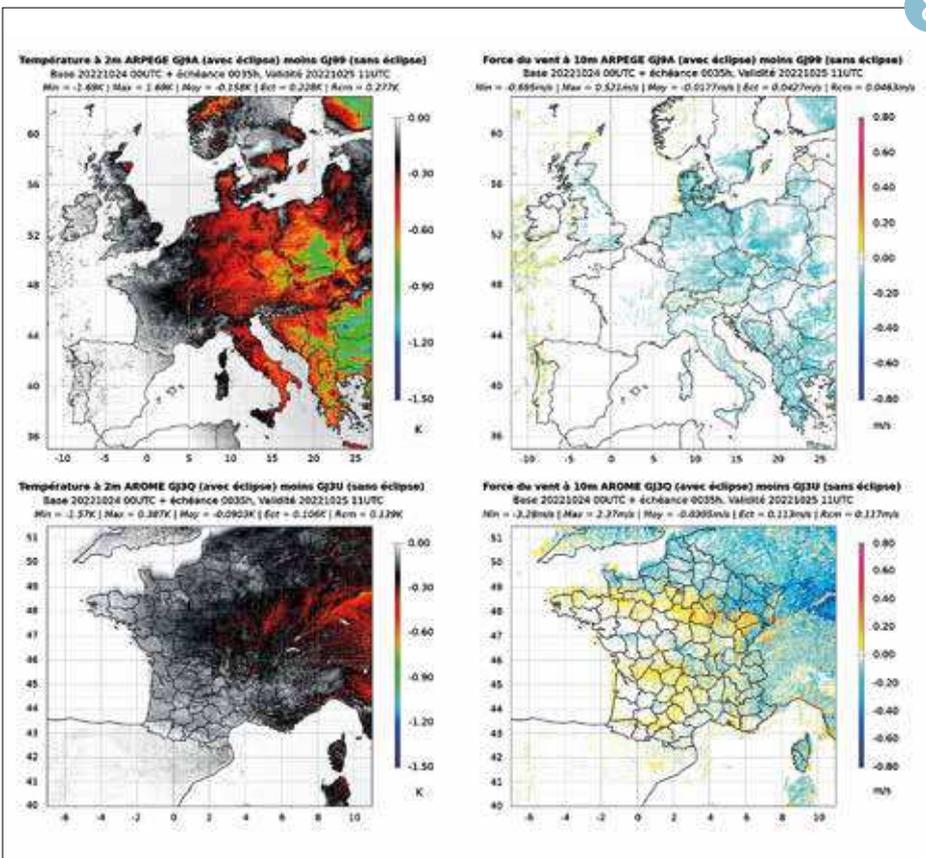
8

7



(a) Image satellite GMP/GMI à 89 GHz pour le 17/09/22 à 07:40 UTC, (b) lame d'eau Antelope horaire observée le 17/09/22 à 06 UTC, (c) quantile 90 % du cumul de pluie 1h calculé de manière classique en points de grille pour le 17/09/22 à 06 UTC et (d) comme (c) mais dans le référentiel du cyclone. Le point (0,0) indique le centre de tous les cyclones dans chacun des membres de l'ensemble repositionné sur l'observation.

8



Impact en température et vent de l'éclipse du 25 octobre 2022, prévu par le modèle global ARPEGE (vignettes du haut) et AROME-France (vignettes du bas). A gauche l'impact en température de l'éclipse à 11 UTC le 25 octobre 2022, et à droite l'impact en force du vent à cet instant.

# 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, jusqu'à concevoir des services météo-climatiques pertinents. 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.

Un objectif essentiel pour la prévision numérique du temps est d'améliorer la représentation des phénomènes météorologiques à enjeux. Parmi eux, les orages de longue durée de vie associés à des supercellules sont particulièrement violents et présentent une signature caractéristique bien observée par les radars polarimétriques, mais ils sont également difficiles à prévoir. Un simulateur d'observation radar polarimétrique a permis d'établir que l'utilisation de schémas microphysiques plus avancés et précis améliore leur représentation dans le modèle AROME. Un autre phénomène à enjeux est la turbulence en ciel clair pour l'aéronautique, généralement sous-estimée par les modèles atmosphériques. La comparaison à des observations de dissipation turbulente mesurées par les avions de ligne a mis en évidence la nécessité de disposer d'une résolution verticale fine en altitude, et d'améliorer la représentation de la dissipation dans la paramétrisation de la turbulence, afin de mieux prévoir ces zones turbulentes. Les attentes sont également fortes dans le domaine de l'énergie telle que la prévision de la production photovoltaïque, fortement dépendante de la bonne représentation des nuages. Ainsi, les mesures de rayonnement par le réseau de pyranomètres de Météo-France ont été utilisées pour mieux identifier les principaux défauts de prévision de nuages par le modèle AROME et pouvoir ainsi mieux cibler les paramétrisations physiques à améliorer.

Bien comprendre la formation des nuages est également important dans un contexte de changement climatique. La modélisation à résolution hectométrique à l'échelle régionale de la forêt des Landes a offert la possibilité de mieux comprendre et quantifier l'impact des dégâts forestiers générés par la tempête Klaus sur la réduction de la couverture nuageuse au-dessus de la forêt, par ailleurs observée sur dix années d'images satellitaires. Aux latitudes tropicales, une priorité est de mieux caractériser les périodes de fortes précipitations associées aux anomalies climatiques pilotant l'activité cyclonique. Le programme de recherche ESPOIRS est ainsi déployé dans le bassin sud-ouest de l'océan Indien, en se basant sur un réseau avancé de mesures de vapeur d'eau et de précipitations. Un autre enjeu climatique est de mieux comprendre le phénomène de retrait-gonflement des argiles pour mieux l'anticiper. Un indicateur a ainsi été établi à partir d'humidités du sol produites par le modèle de surface continentale, permettant de faire le lien entre sécheresse et sinistralité. Les études d'impact du changement climatique et de gestion des ressources en eau ont aussi besoin de disposer de séries longues et homogènes de variables atmosphériques et de surface : les réanalyses CERRA ont ainsi été produites sur la période 1984 à 2021, montrant des hauteurs de neige très réalistes.

Les feux de forêt constituent un autre enjeu essentiel dans le contexte du changement climatique. Un système couplé feu-atmosphère, permettant de représenter la rétroaction du feu sur l'atmosphère a été développé. Utilisé à haute résolution, il permet de mieux comprendre les processus atmosphériques associés à un incendie de végétation.

## Évaluation des prévisions de flux de rayonnement solaire dans AROME

M-A. Magnaldo.

Les prévisions de rayonnement solaire sont essentielles pour faciliter l'intégration de l'énergie solaire dans le mix électrique et assurer la stabilité du réseau. Cependant, les modèles de prévision numérique du temps (PNT) ont aujourd'hui des performances limitées en matière de rayonnement solaire, principalement du fait de la complexité à représenter correctement les nuages et leur impact radiatif. Il est donc essentiel d'évaluer ces performances et de mieux comprendre les défauts.

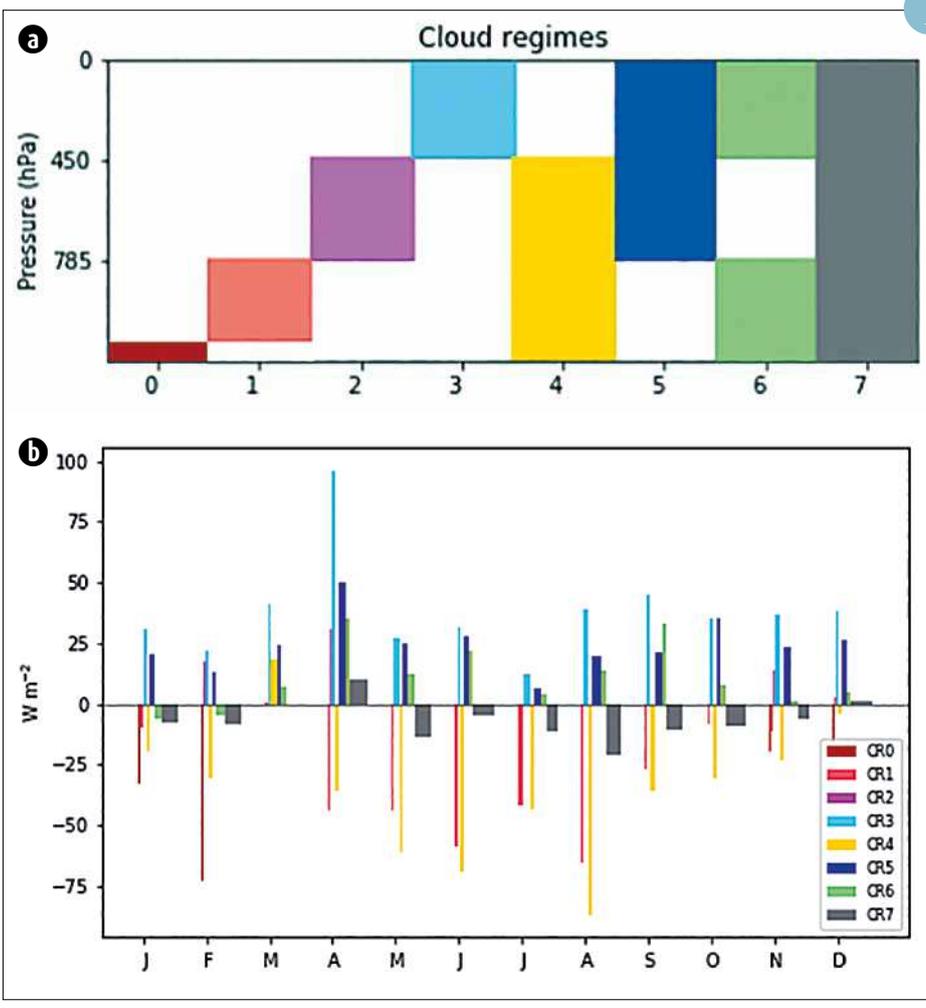
Le modèle AROME a été spécifiquement évalué, en comparant des prévisions sur un an aux mesures de 168 pyranomètres du réseau de Météo-France. Afin de caractériser les situations nuageuses, nous nous appuyons sur les produits satellites développés par le SAF (Satellite Application Facilities) NWC (Nowcasting) d'Eumetsat

à partir d'observations géostationnaires. Ceci permet d'associer chaque erreur de rayonnement solaire près de la surface d'AROME à une situation nuageuse.

Une première analyse a montré que les erreurs sont prédominantes lorsque le ciel est nuageux dans les prévisions et dans les observations. Pour aller plus loin, une classification selon les régimes nuageux prévus par AROME (basée sur l'altitude des nuages simulés) a permis de montrer, en cas de ciel couvert, que les nuages hauts sont en moyenne optiquement trop fins, avec un biais de rayonnement solaire à la surface positif, tandis que les nuages bas sont généralement optiquement trop épais, induisant un biais négatif. Ceci met en évidence des comportements antagonistes selon les situations, dont les erreurs se compensent partiellement.

Plusieurs sources d'erreurs peuvent expliquer le biais de rayonnement positif pour les nuages hauts, comme la non prise en compte de la neige dans le schéma radiatif d'AROME ou la sédimentation trop rapide des cristaux de glace. Des tests seront effectués avec des modifications des paramétrisations physique d'AROME dans le but d'améliorer les prévisions météorologiques de rayonnement lorsque des nuages hauts sont présents.

1



(a) Définition des 8 régimes nuageux AROME : 7 sont basés sur la distribution verticale des nuages dans AROME, et le régime 0 correspond à la présence de brouillard.  
 (b) Biais mensuels de rayonnement moyen solaire incident à la surface (hauteur des barres) et occurrence relative (épaisseur des barres) pour chaque régime nuageux sur l'année 2020.

---

## Etude d'un cas de turbulence en ciel clair en altitude avec les modèles AROME et Méso-NH

Léo Rogel, Didier Ricard, Eric Bazile

Mieux prévoir la turbulence en ciel clair (CAT, Clear-Air Turbulence) dans les conditions atmosphériques stables est un enjeu majeur pour les activités aéronautiques. Cette étude a pour objectif d'évaluer le comportement de la paramétrisation actuelle de la turbulence dans des couches stables au niveau de la tropopause dans les modèles météorologiques à résolution kilométrique utilisés à Météo-France : le modèle de prévision numérique du temps AROME et le modèle de recherche à fine échelle Méso-NH. On s'intéresse à un cas de turbulence au-dessus de la Belgique associé à un jet hivernal. Cette turbulence en ciel clair est liée à la présence d'instabilités de cisaillement s'amplifiant dans une zone de stabilité réduite. Des observations d'avions de ligne de dissipation turbulente

indiquent la présence d'une zone de turbulences en sortie de ce jet, proche d'un front d'altitude, assez bien reproduite par les simulations à résolution kilométrique. Cependant, les résultats montrent aussi l'impact important de la résolution verticale des modèles sur le cisaillement vertical de vent, notamment autour de la tropopause. La résolution verticale opérationnelle d'AROME (90 niveaux) ne permet pas de capturer l'événement de turbulence en ciel clair. A l'aide de simulations à résolution hectométrique, un déficit systématique de mélange turbulent est diagnostiqué pour les modèles AROME et Méso-NH à résolution kilométrique. On montre que ce manque de mélange turbulent est principalement imputable à une dissipation turbulente trop forte.

En termes de perspectives, il s'agira d'améliorer la fermeture de la dissipation de la turbulence en prenant en compte la forte anisotropie de la turbulence en conditions stables pour ces phénomènes d'altitude.

2

---

## Impact de la tempête Klaus sur les nuages de couche limite en forêt des Landes

Gaëtan Noual, Christine Lac, Patrick Le Moigne

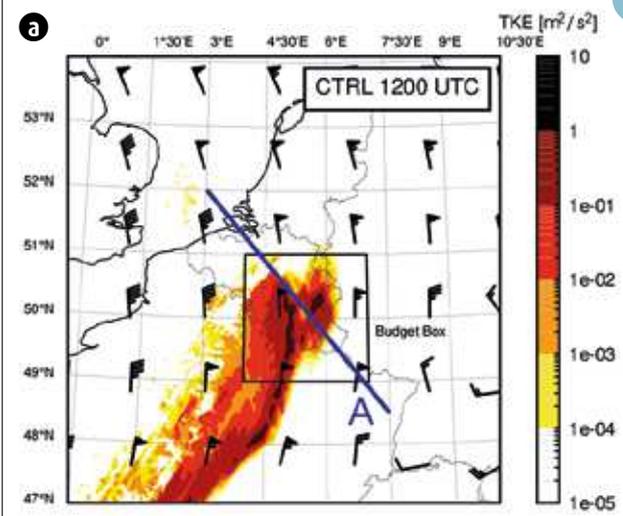
Des études antérieures ont montré que les changements de couvert continental, par exemple induits par une déforestation, peuvent avoir un impact sur les nuages et les précipitations. Mais les résultats peuvent être contradictoires selon la région du monde considérée. Une étude a été menée sur la forêt tempérée des Landes dans le sud-ouest de la France, où des nuages de couche limite sont régulièrement observés pendant la période estivale. Elle s'appuie sur de la modélisation à une résolution horizontale de 500 mètres, à partir des modèles couplés SURFEX et Meso-NH. Les modèles parviennent à représenter les nuages de couche limite se formant préférentiellement

au-dessus de la forêt (Fig. a,b). L'étude du lien entre la forêt et les nuages générés a mis en évidence le rôle prépondérant du flux de chaleur sensible et de la rugosité plus importants au-dessus des zones boisées. Ces facteurs clés génèrent des ascendances convectives et de la turbulence qui favorisent la formation de nuages. Enfin, les dommages causés par la tempête Klaus, qui a détruit un tiers de la forêt landaise dans sa partie centrale en 2009, sont considérés. Quinze jours d'été avec des nuages observés sur les Landes sont simulés et montrent que les dégâts induisent une diminution du flux de chaleur sensible de surface et une augmentation du flux de chaleur latente sur

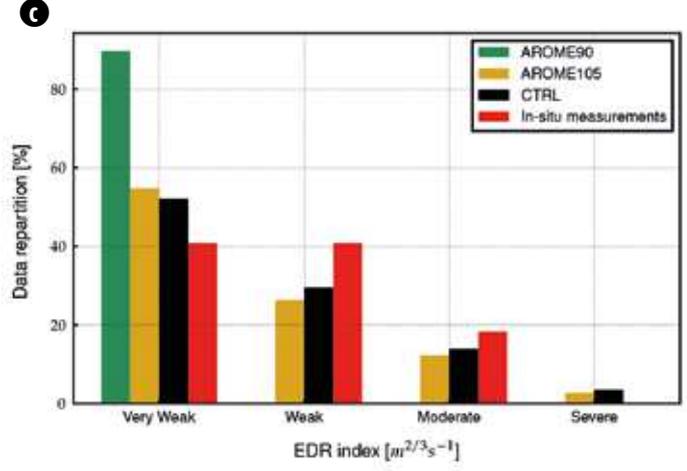
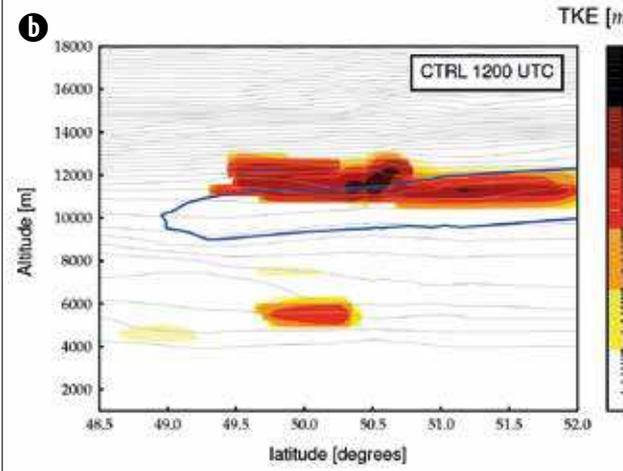
la forêt (Fig. c), conduisant à une diminution de la couverture nuageuse, comme le montre la variation de quantité d'eau nuageuse intégrée sur la verticale (Fig. d). Ces résultats sont en accord ceux d'une étude précédente basée sur l'analyse de 10 années d'images satellitaires. A l'échelle régionale, la modélisation peut donc être utilisée pour étudier et quantifier l'impact de la déforestation sur la nébulosité.

3

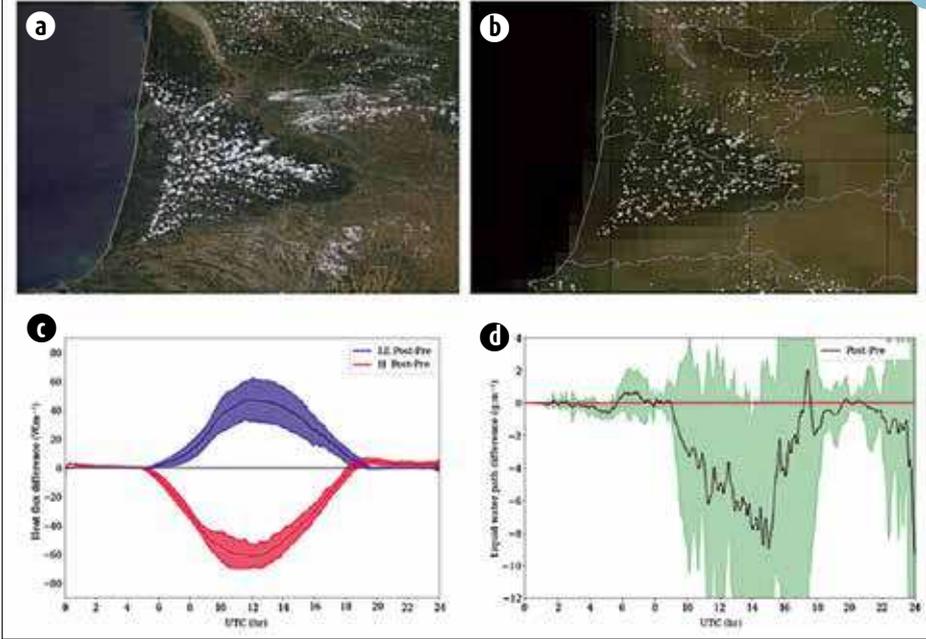
2



(a) Coupe horizontale à 12 UTC le 27 janvier 2018 de l'énergie cinétique turbulente TKE (couleurs en  $m^2/s^2$ ) à 225 hPa et barbules de vent ( $m/s$ ) à 250 hPa pour l'expérience CTRL réalisée avec le modèle Méso-NH (1.3 km, 105 niveaux verticaux).  
 (b) Coupe verticale à 12 UTC le long de la ligne A (indiquée figure a) pour l'expérience CTRL de TKE (couleurs en  $m^2/s^2$ ), des isothermes (lignes grises tous les 3 K) et module du vent (ligne bleue,  $45 m/s$ ).  
 (c) Comparaison de la répartition en pourcentage selon 4 classes (très faible, faible, modérée, sévère) des valeurs de dissipation turbulente (EDR) entre 10 et 14 UTC observées in-situ par les avions et issues des simulations à résolution kilométrique (1.3 km) AROME avec 90 niveaux (AROME90) et avec 105 niveaux (AROME105) et Méso-NH avec 105 niveaux (CTRL) dans la boîte noire (indiquée figure a). Les valeurs en dessous de  $0,01 m^{2/3} s^{-1}$  ont été filtrées.



3



(a) Image satellitaire MODIS et (b) fraction nuageuse simulée à 13 UTC le 9 juillet 2013. Évolutions temporelles simulées pendant 24 heures de la moyenne (en noir) et de l'écart-type (zones claires) de la différence post-pré Klaus sur la forêt landaise pour 15 cas estivaux de (c) flux de chaleur sensible (rouge) et de chaleur latente (bleu) (en  $W m^2$ ), et (d) quantité d'eau nuageuse intégrée sur la verticale ( $g m^2$ ).

---

## Simulation couplée feu-atmosphère à haute résolution

Christine Lac

Les incendies de forêt font partie des phénomènes naturels destructeurs représentant un enjeu écologique majeur et un problème pour la sécurité des personnes et des biens. Modéliser de manière réaliste la propagation d'un incendie suppose de prendre en compte l'impact de la météorologie sur la propagation du feu, mais également la rétroaction du feu sur l'atmosphère. Dans ce cadre, un modèle de feu, nommé Blaze, a été développé et intégré au modèle atmosphérique Méso-NH. Le système couplé a été validé à haute résolution horizontale (10 m) sur un cas réel de feu expérimental sur une prairie d'une trentaine d'hectares (Fig. 4a).

Dans sa version standard, le modèle atmosphérique Méso-NH repose sur l'hypothèse anélastique. Celle-ci permet de supprimer les ondes acoustiques dans l'atmosphère en négligeant les variations horizontales et temporelles de densité de l'air dans l'équation de conservation de la masse. La validité de cette hypothèse est discutable au voisinage des zones de flammes sujettes à d'importants dégagements de chaleur. Une nouvelle version compressible de Méso-NH, sans hypothèse sur la densité de l'air, a été comparée à la version standard anélastique en mode couplé. Les effets compressibles deviennent importants à très haute résolution spatiale (10 m),

en induisant une augmentation du vent horizontal à l'avant du front de feu qui accélère la propagation du front de flamme, et y déclenche une activité ondulatoire réaliste (Fig. 4b,c). A résolution spatiale moins fine (dès 25 m), les différences entre les deux versions deviennent négligeables, légitimant la version anélastique de Méso-NH moins coûteuse. Le système couplé feu-atmosphère fournit ainsi un cadre numérique adapté pour mieux comprendre les processus atmosphériques associés à un incendie.

### Référence :

Costes, A., M. Rochoux, C. Lac, and V. Masson: Subgrid-scale fire front reconstruction for ensemble coupled atmosphere-fire simulations of the FireFlux I experiment. *Fire Safety Journal*, 2021, 103475, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103475>

Costes, A., Q. Rodier, V. Masson, C. Lac, and M. C. Rochoux, Effects of high-density gradients on wildland fire behavior in coupled atmosphere-fire simulations, *J. Adv. Model Earth Syst.*, 14, e2021MS002955, 2022. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021MS002955>

4

---

## Utilisation des observations polarimétriques radar pour l'évaluation des schémas microphysiques de Méso-NH sur un cas de supercellule

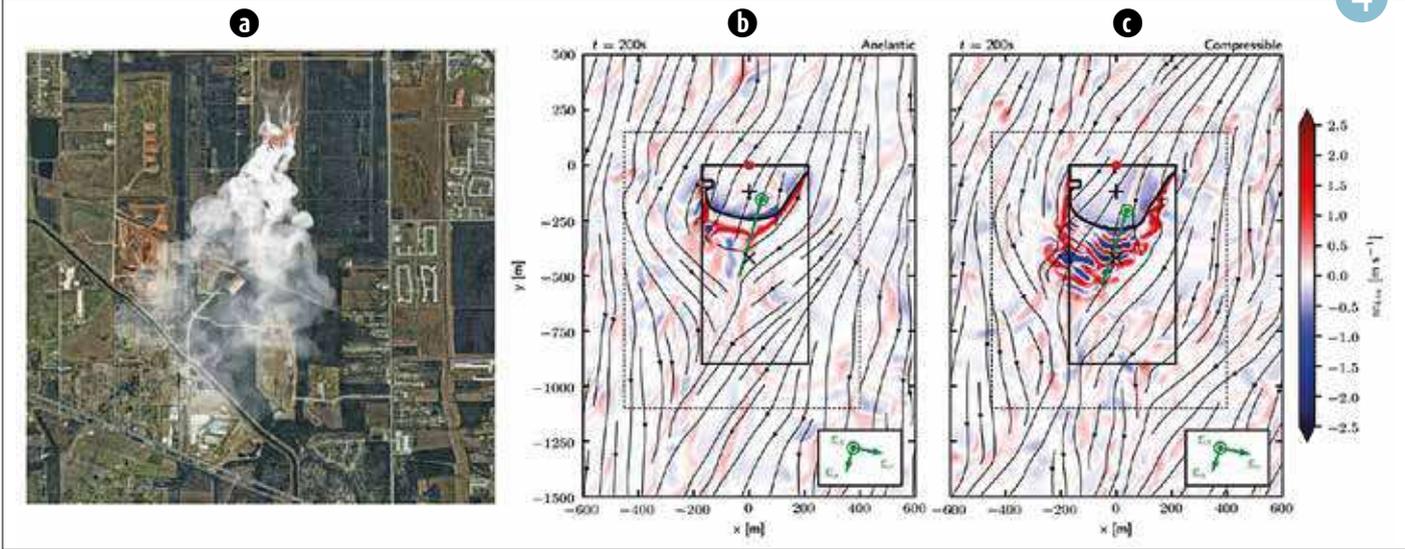
Clotilde Augros, Cloé David, Benoît Vié

Les supercellules sont des orages de longue durée de vie particulièrement violents. La qualité de leur prévision est en partie déterminée par la performance des schémas microphysiques, qui représentent les nuages dans les modèles. ICE3, le schéma opérationnel du modèle AROME, prévoit uniquement la masse des hydrométéores. LIMA, utilisé pour la recherche, simule l'évolution de leur masse et de leur nombre. Ces schémas peuvent (en option) représenter la grêle de manière explicite. Les observations radar polarimétriques (notamment la réflectivité différentielle Zdr) des supercellules présentent des signatures

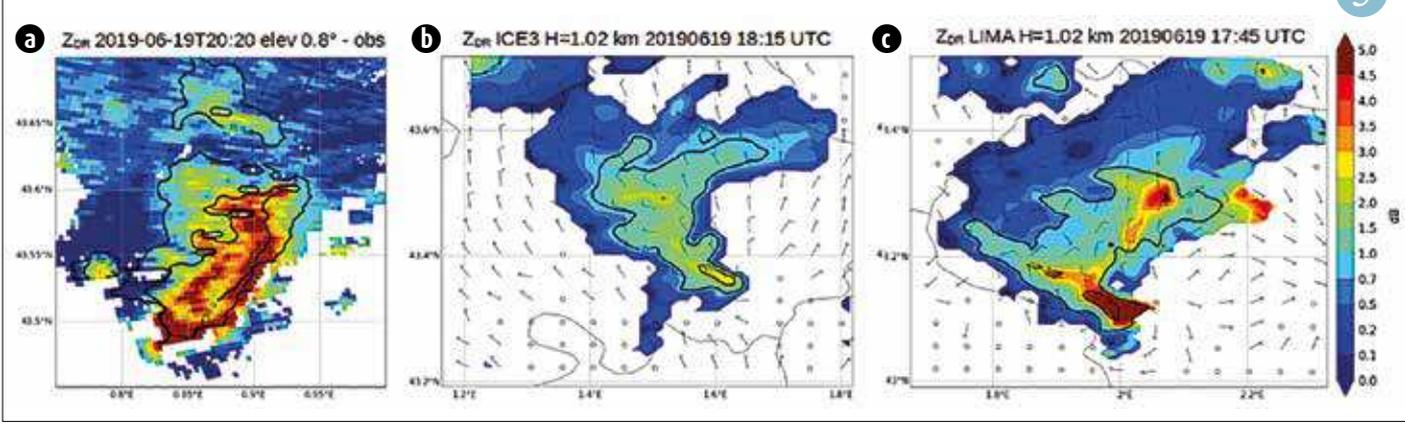
caractéristiques, telles que l'« arc de Zdr » lié au tri par taille des hydrométéores précipitants, ou la « colonne de Zdr » associée à une présence de forts contenus en grêle et eau surfondue dans l'ascendance. Le réalisme de quatre simulations Meso-NH est ainsi évalué par leur capacité à reproduire ces signatures pour un cas réel de supercellule. Seul le schéma LIMA, qui prévoit le nombre d'hydrométéores et permet d'estimer leur taille, est capable de reproduire l'arc de Zdr, avec de fortes valeurs localisées sur le bord de la supercellule (Fig. a-c). Pour bien simuler la colonne de Zdr, il est en plus nécessaire

d'activer la représentation pronostique de la grêle et sa croissance humide par une forte collection d'eau liquide surfondue. Cette étude, qui montre la capacité de LIMA et du simulateur radar à représenter les signatures radar polarimétriques caractéristiques des supercellules, sera poursuivie par une évaluation plus systématique dans AROME, afin d'étudier l'intérêt d'utiliser ces observations dans l'assimilation pour la prévision des orages violents.

5



(a) Vue aérienne de la simulation à 10 m de résolution horizontale du brûlage avec en rouge le front de flamme, et en blanc le panache de fumée.  
 (b et c) Vitesse verticale simulée à 4 m au dessus du sol (en  $m s^{-1}$ ), 200 s après l'allumage, avec les versions anélastique (b) et compressible (c) de MésO-NH.



(a) Réflectivité différentielle  $Z_{dr}$  (dB) observée par le radar de Toulouse le 19/06/2019 à 20:20 UTC à l'angle d'élévation  $0,8^\circ$ .  
 (b) et (c)  $Z_{dr}$  simulée avec MésO-NH pour les simulations avec ICE3 (b) et LIMA (c) à 1 km au-dessus du sol, avec un zoom au niveau de la supercellule ayant la structure la plus proche de celle observée.

---

# Comprendre le phénomène de retrait-gonflement des argiles par le biais d'un indicateur agrégé à la commune : la magnitude des sécheresses

Sophie Barthelemy<sup>1</sup>, Bertrand Bonan<sup>1</sup>, Gilles Grandjean<sup>2</sup>, David Moncoulon<sup>3</sup> et Jean-Christophe Calvet<sup>1</sup>

1. CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France

2. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2, France

3. Caisse Centrale de Réassurance (CCR), Dpt R&D Modeling Cat & Agriculture, 75008 Paris, France

Le phénomène de retrait-gonflement des argiles est le second péril le plus coûteux à charge du régime d'indemnisation des Catastrophes Naturelles, avec plus de 15 milliards d'euros d'indemnisations depuis 1989. Comme l'illustre la sécheresse de l'année 2022 en France, une augmentation de ces coûts est attendue sous l'effet du changement climatique, en raison de l'amplification des cycles annuels de sécheresse-réhydratation des sols. Avec l'objectif de développer de nouveaux outils d'estimation de la sinistralité sur le bâti liée au phénomène de sécheresse géotechnique, le modèle ISBA de Météo-France est utilisé

conjointement aux modèles et données géotechniques du BRGM et à la base de données de sinistralité nationale constituée par CCR.

Les premiers résultats permettent d'appréhender le lien entre sécheresse et sinistralité à l'échelle communale de façon statistique. Un indicateur, la magnitude, est construit à partir de chroniques d'humidité du sol à plusieurs profondeurs produites par le modèle ISBA. La magnitude est obtenue par calcul de l'intégrale annuelle de l'indice d'humidité du sol sous une certaine valeur seuil associée à une fréquence de sécheresse. La meilleure corrélation de cet indicateur

avec la sinistralité est obtenue lorsque l'on considère l'humidité de couches de sol situées au-dessous de 0,4 m de profondeur, en utilisant des valeurs basses de seuil de l'indice d'humidité du sol. Les couches de sol plus superficielles présentent une variabilité temporelle plus marquée, davantage liée aux variations météorologiques rapides. On montre également que la variabilité interannuelle de la végétation a un fort impact sur la magnitude.

6

---

## CERRA-Land : une nouvelle réanalyse de la surface terrestre à une résolution de 5,5 km sur l'Europe

A. Verrelle, M. Glinton, E. Bazile, P. Le Moigne

Le service changement climatique du programme Copernicus de la Commission européenne a pour objectif de produire et de livrer une réanalyse régionale terrestre du climat passé sur l'Europe à une résolution horizontale de 5,5 km. Une réanalyse est un moyen de reconstruire des variables atmosphériques et de surface pour des périodes passées couvrant plusieurs années.

Le besoin de connaître les précipitations et les variables de surface à une résolution spatiale et temporelle toujours plus grande est une demande récurrente. En effet, elles permettent, entre autres, d'aborder les questions de gestion des ressources en eau et de réaliser des études d'impact du changement climatique. Les réanalyses régionales de surface permettent de répondre à ces demandes.

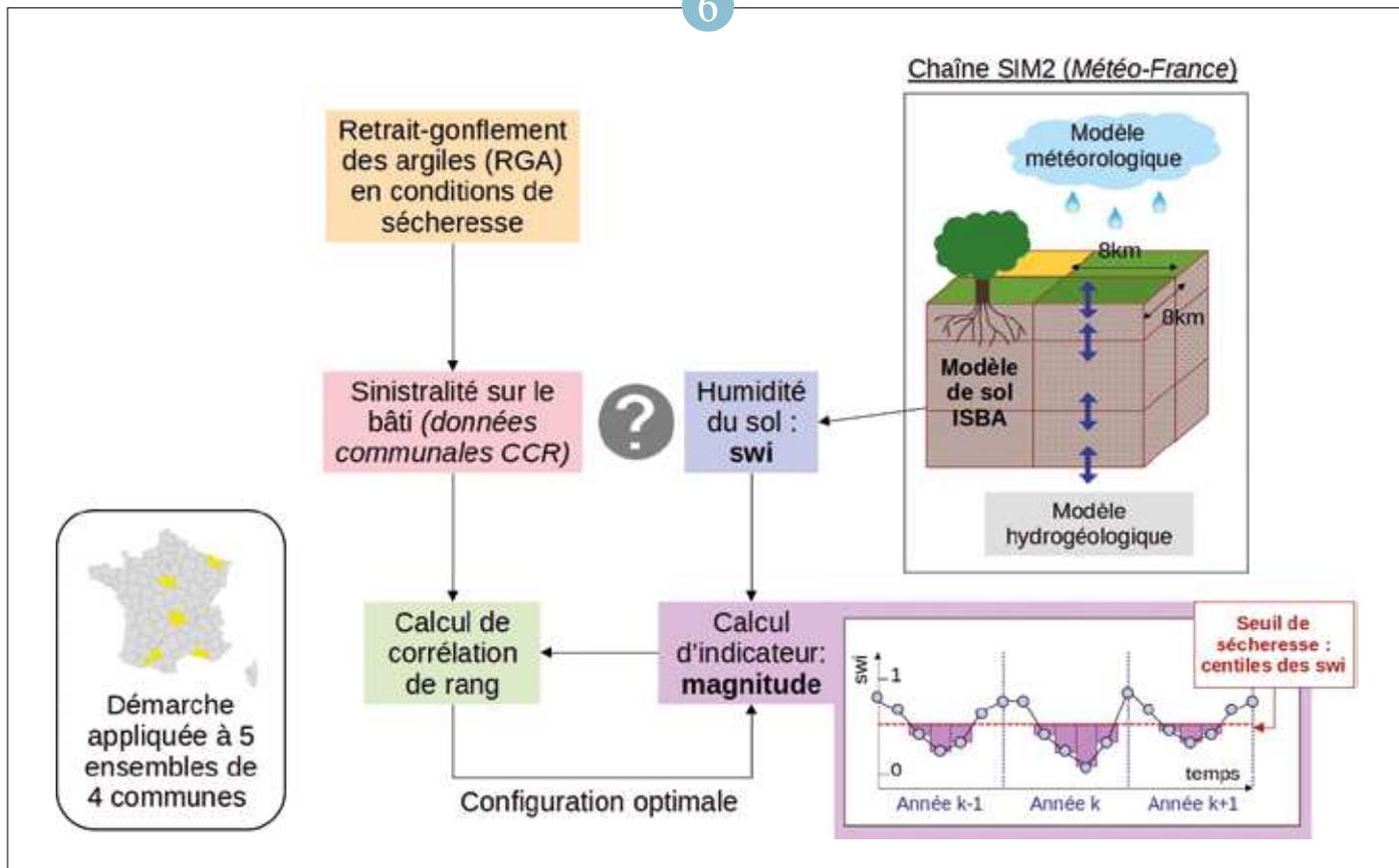
Météo-France a travaillé dans le cadre du projet CERRA (<https://climate.copernicus.eu/>

copernicus-regional-reanalysis-europe-cerra), basé sur le savoir faire d'un précédent projet nommé UERRA (<https://uerra.eu/>), en collaboration avec les services météorologiques suédois et norvégiens pour mettre en place le système CERRA-Land dans le but de produire des champs spatialisés réalistes des variables météorologiques proches de la surface. Ce nouveau système est une simulation du modèle de surface SURFEX développé à Météo-France couvrant la période 1984 à 2021 et dont les données d'entrée (température, vent, humidité, rayonnements solaire et infrarouge incidents, précipitations liquide et solide) et les données de sorties (températures et humidités du sol, neige ...) sont disponibles sur le « climate data store » (<https://cds.climate.copernicus.eu/>), l'espace de stockage des données climatiques mises à disposition des utilisateurs. Une première validation (voir figure) à partir d'une observation de la

hauteur de neige à environ 3000m d'altitude dans les Alpes Française (points noir) montre que le système est capable de simuler des hauteurs de neige réalistes (courbe rouge). L'objectif pour les années à venir est de poursuivre cette activité de réanalyse avec en particulier, dans le cadre du projet ARRA de Météo-France, la production de 50 ans de données atmosphériques et de surface sur la France métropolitaine, basée sur les données du modèle opérationnel AROME à la résolution de 1.3 km.

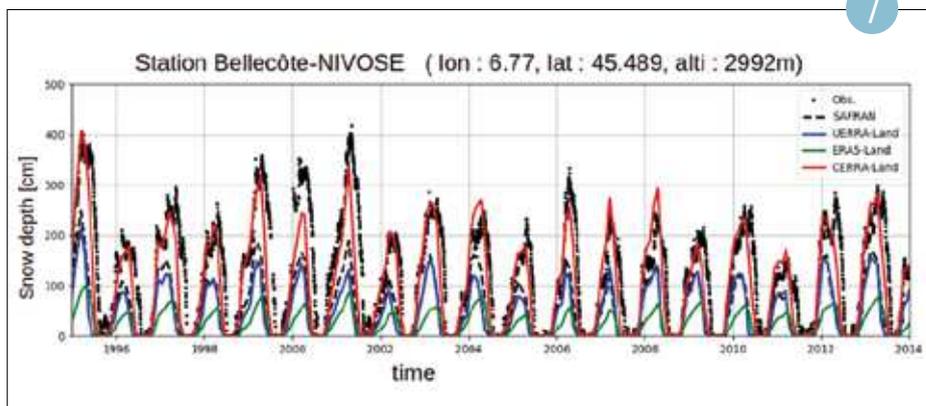
7

6



▲ Méthode de calcul de l'indicateur de sécheresse magnitude à partir du modèle ISBA, et détermination de sa configuration optimale pour caractériser la sinistralité liée au retrait-gonflement des argiles.

7



▲ Évolution temporelle de la hauteur de neige observée à la station NIVOSE Bellecôte (points noir) et simulées par différentes réanalyses de surface (en couleurs).

---

## ESPOIRS

# Etude des Systèmes Précipitants dans l'Océan Indien par Radar et Satellites

Joël Van Baelen, Olivier Bousquet, Guillaume Lesage, Ambinintsoa Volatiana Ramanamahefa, Thiruvengadam Padmanabhan

Le programme de recherche ESPOIRS est un projet collaboratif, élaboré et conduit en partenariat avec des centres de recherche seychellois, malgaches, et réunionnais. Ce projet vise à l'obtention d'une meilleure connaissance de la variabilité, des propriétés statistiques et des mécanismes de formation des précipitations tropicales aux échelles régionale et locale. ESPOIRS s'intéresse ainsi à l'ensemble du cycle de vie des précipitations à plusieurs échelles spatio-temporelles. A travers l'analyse de la distribution du champ d'humidité de grande échelle, qui pilote la formation des précipitations à l'échelle régionale, il ambitionne de comprendre, et de mieux anticiper, l'apparition de périodes de fortes précipitations généralement associées aux anomalies climatiques pilotant l'activité cyclonique dans le bassin sud-ouest de l'océan Indien (SOOI). En s'intéressant aux processus internes (dynamique, microphysique) et externes (interactions avec le relief), qui pilotent la formation et le cycle de vie des événements météorologiques extrêmes à l'échelle locale, ESPOIRS conduira à une meilleure prévision

des systèmes fortement précipitants et de leurs Impacts dans trois zones d'études : La Réunion, Les Seychelles et la région nord/nord-est de Madagascar.

Le projet ESPOIRS se structure autour de trois actions majeures.

La première action vise à améliorer notre compréhension du cycle de l'eau dans le bassin SOOI afin de mieux appréhender son impact sur la formation des précipitations aux échelles régionales et, dans une moindre mesure, locale. Cette action repose essentiellement sur l'exploitation d'observations collectées par le réseau GNSS d'observation de la vapeur d'eau déployé par le LACy et ses partenaires dans tout l'océan Indien.

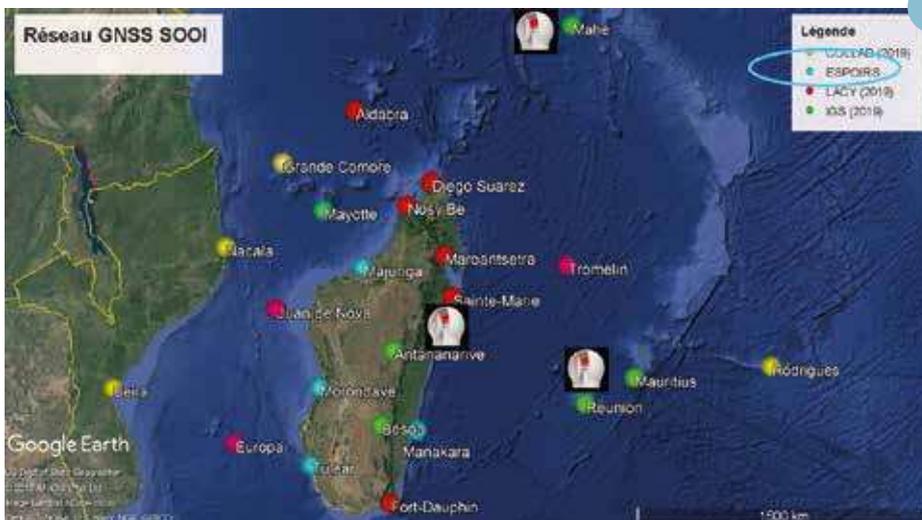
La seconde action vise à améliorer notre compréhension des mécanismes de formation des précipitations intenses à l'échelle locale en documentant précisément les propriétés physiques et statistiques des systèmes précipitants sur trois îles distinctes au relief très marqué (Réunion, Mahe, Madagascar). Cette action repose sur la mise en place d'une stratégie d'observation dédiée

des nuages et des précipitations s'appuyant sur un nouveau radar précipitation en bande X unique dans la région SOOI.

La troisième action vise à renforcer l'expertise régionale dans le domaine de la télédétection et de la météorologie tropicale en collaboration avec les universités de la zone océan Indien partenaires du LACy. Elle repose sur la mise en œuvre d'actions de formation et d'enseignement, adossées à des actions de communication auprès du grand public, des professionnels et de la communauté scientifique, permettant de renforcer les capacités de recherche et opérationnelle dans la sous-région SOOI. Elle vise également à fournir aux responsables territoriaux des pistes en vue de la définition d'outils d'aide à la décision novateurs.

### Référence :

Ramanamahefa, A.V., T. Padmanabhan, G. Lesage, M-A. Mant, O. Bousquet, and J. Van Baelen, 2022: LACy X band meteorological radar 2022 observations of cyclonic rains in La Réunion, 11th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD), Locarno, Switzerland, Aug. 29 – Sept. 2, 2022.



(a) Carte du dispositif instrumental ESPOIRS dans le SOOI et  
 (b) Radar météorologique recherche en bande X du LACY à Saint-Joseph, La Réunion.



# Climat et prévision saisonnière

L'année 2022 a été l'année la plus chaude observée sur la France, avec une température moyenne sur le pays de 14,5 °C, proche du niveau attendu pour 2050. Avec ses trois canicules estivales, 2022, qui a aussi été sèche et ensoleillée, bat largement le précédent record de 2020. Ce nouveau record est cohérent avec le réchauffement de long terme observé depuis un demi-siècle, qui s'avère plus rapide que celui simulé par les modèles régionaux de climat de l'ensemble EURO-CORDEX. Ce constat a motivé des travaux d'ajustement des projections futures par les observations jusqu'à présent. C'est ainsi que l'estimation du réchauffement pour 2100 a été revue à la hausse, et approche +4 °C par rapport à 1900 dans un scénario d'émissions de gaz à effet de serre médian. De nouvelles études s'appuyant sur le jeu de données DRIAS-2020 complètent ce tableau et confirment notamment l'augmentation future du nombre de vagues de chaleur et de leur intensité, ainsi qu'une aggravation des sécheresses météorologiques, particulièrement en été, et des sécheresses des sols toute l'année, ces évolutions étant d'autant plus marquées que les émissions futures de gaz à effet de serre sont élevées.

Ces estimations sur l'hexagone mais aussi sur les territoires ultra-marins demandent à être régulièrement revues à la lumière des nouvelles connaissances, des observations et des progrès de la modélisation. Météo-France dispose pour cela d'une capacité unique en France de modélisation des changements climatiques passés et futurs de l'échelle globale à l'échelle locale avec une gamme cohérente d'outils, sur des périodes s'étalant entre quelques semaines (variabilité infra-saisonnière et sa prévision) et quelques siècles, notamment pour alimenter les rapports d'évaluation du GIEC.

Les modèles d'échelle globale sont les seuls capables d'estimer le changement climatique passé et futur uniquement à partir de l'évolution des forçages d'origine humaine et anthropiques. Cependant, ils doivent être complétés par des modèles à plus haute résolution, qui représentent explicitement certains phénomènes dont il est important d'estimer l'évolution en lien avec l'évolution du climat, notamment pour alimenter des stratégies d'adaptation. Ainsi, une configuration de modèle océanique à haute résolution prenant en compte l'effet des marées, des surcotes de tempête et des processus liés aux vagues, ainsi que leurs interactions, a été développée en collaboration avec Mercator Ocean International de manière à fournir de meilleures informations sur la hausse future du niveau marin sur la façade ouest de l'Europe. Côté atmosphère, une étude précédente menée avec AROME a pu être généralisée en exploitant les simulations d'autres modèles permettant de résoudre la convection dans le cadre du projet FPS-Convection de CORDEX, avec à la clé des messages robustes sur l'augmentation du nombre, de l'intensité maximale et de la taille des cellules convectives. Cependant, les simulations étudiées sont courtes en raison du coût informatique de cette génération de modèles, ce qui constitue un verrou pour l'estimation des incertitudes. C'est pour cette raison que des travaux innovants sur l'émulation de la descente d'échelle ont été initiés au CNRM il y a plusieurs années. Ces travaux, qui ont abouti en 2022, ont démontré que l'émulation du lien entre les échelles globale et régionale permet de représenter correctement la variabilité quotidienne et les valeurs moyennes de la température et des précipitations. Ces travaux ont pour perspective d'atteindre des résolutions spatiales telles que celles d'AROME pour un coût informatique négligeable, donc une utilisation beaucoup plus sobre des moyens de calcul.

## Etude et modélisation du climat

### Combiner modèles et observations pour préciser le réchauffement en France au 21<sup>e</sup> siècle

Aurélien Ribes

Afin de fournir la meilleure estimation possible du réchauffement passé et futur, le 6<sup>e</sup> rapport du GIEC (2021) s'est appuyé sur de nouvelles méthodes statistiques permettant de combiner modèles et observations. Il s'agit, en pratique, de déterminer quelles trajectoires climatiques sont cohérentes avec les observations récentes.

Dans une étude récente, une méthode similaire a été utilisée pour préciser le réchauffement sur la France métropolitaine. Les résultats indiquent que le réchauffement, par rapport à 1900-1930, atteint +1,7°C en 2020 (et +1,8°C en 2023). La quasi totalité de ce réchauffement est d'origine anthropique. Jusqu'à la décennie 1980, cependant, l'effet

réchauffant des gaz à effet de serre a été largement masqué par l'effet refroidissant des aérosols (particules en suspension dans l'atmosphère), donnant une impression trompeuse de stabilité. Depuis, la France a connu un réchauffement rapide et marqué.

Selon cette étude, le réchauffement attendu au 21<sup>e</sup> siècle s'élève à +3,8 [2,9 à 4,8] °C en 2100 par rapport à la référence 1900-1930, dans un scénario d'émissions intermédiaires (SSP2-4,5 ; soit 2°C supplémentaires par rapport au climat actuel). Selon les scénarios, l'amplitude du réchauffement varie entre +2,3 [+1,5 à +3,1] °C (faibles émissions) à +6,7 [5,2 à 8,2] °C (très fortes émissions). Dans tous les scénarios, le réchauffement attendu

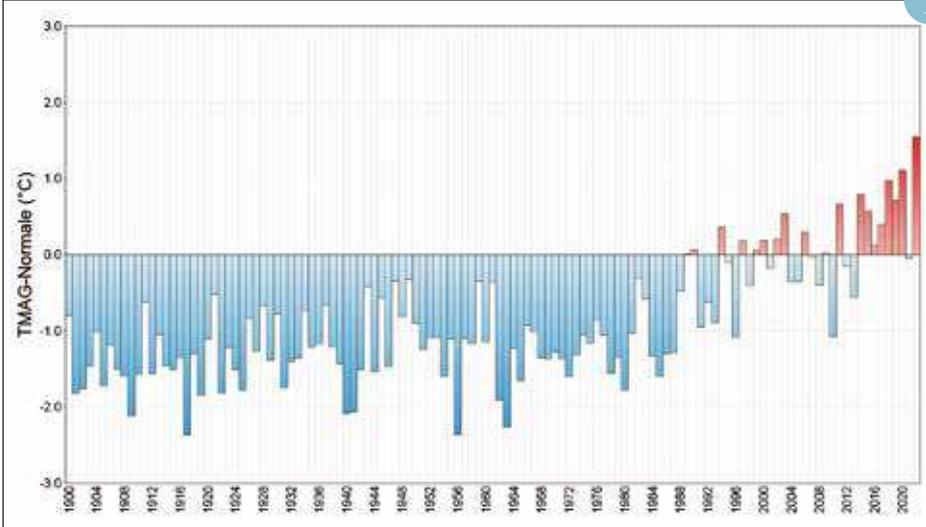
en France est plus élevé qu'en moyenne planétaire (environ +20%) ; il est plus marqué l'été (environ +30% par rapport à la moyenne annuelle) que l'hiver (environ -15%). Ces chiffres constituent une révision à la hausse des estimations issues des précédentes générations de modèles de climat, et situent le réchauffement attendu en France plutôt dans le haut de la fourchette simulée par les modèles actuels.

Ces résultats s'inscrivent dans des progrès de long terme dans la connaissance de l'évolution du climat, et pourront alimenter l'élaboration des stratégies d'adaptation au changement climatique.

#### Référence :

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.

1

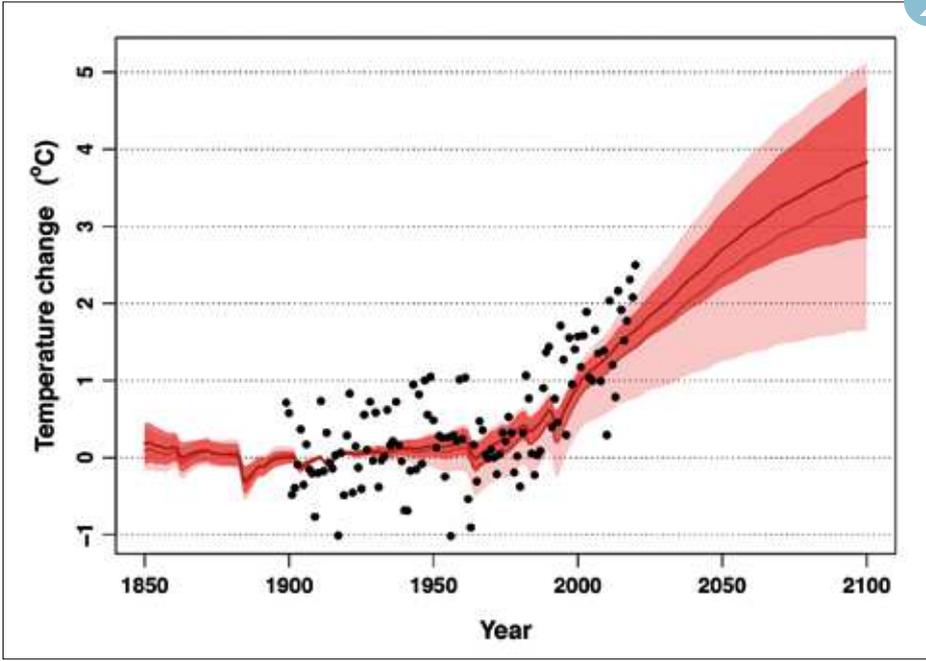


Écart à la moyenne annuelle de référence 1991-2020 de la température moyenne annuelle sur la France (1900 à 2022). © Météo-France.



Le « Lac de l'Entonnoir » asséché, à Bouverans, dans le département du Doubs, le 3 août 2022. [afp.com/SEBASTIEN BOZON](http://afp.com/SEBASTIEN_BOZON)

2



Évolution de la température moyenne annuelle en France métropolitaine entre 1850 et 2100, par rapport à la référence 1900-1930, dans un scénario intermédiaire d'émissions de gaz à effet de serre (SSP2-4.5). Réchauffement simulé par les modèles globaux de dernière génération (CMIP6) : moyenne (marron clair) et intervalle de confiance 5-95% (rose). Réchauffement estimé en combinant modèles et observations : moyenne (marron foncé) et intervalle de confiance 5-95% (rouge). Points noirs : observations Météo-France de température moyenne annuelle France pour chaque année entre 1899 et 2020.

## Évaluation du modèle ARPEGE-Climat à partir des observations IASI

L. Leonarski, Q. Libois, R. Roehrig

Reproduire le bilan radiatif du système climatique, dans toute sa complexité (spectre solaire/infrarouge, ciel clair/nuageux, structures spatiales) est une contrainte essentielle pour la modélisation du climat. En pratique, les modèles de climat sont évalués au regard d'observations large bande de ce bilan. Cependant, la distribution spectrale du rayonnement, mesurée par les sondes infrarouges satellitaires, contient une information considérable sur l'état de l'atmosphère. C'est le cas de l'instrument IASI développé par le CNES en collaboration avec Eumetsat et déjà largement utilisé dans la communauté de la prévision numérique du temps. Nous analysons ici l'apport de ce type de mesures spectralement résolues pour l'évaluation des modèles de climat.

Le logiciel RTTOV est utilisé pour simuler plusieurs millions de spectres IASI à partir des propriétés atmosphériques et de surface fournies par une simulation du modèle ARPEGE-Climat couvrant 2008-2014. Ces spectres sont comparés statistiquement aux mesures IASI, en conditions de ciel clair (figure a). La comparaison souligne une structure spectrale des biais du modèle (figure b) traduisant des erreurs de représentation des variables géophysiques dans ARPEGE-Climat (e.g., température, humidité). La distribution spatiale du biais pour trois nombres d'onde spécifiques est présentée sur la figure c. Elle indique par exemple des températures de surface trop froides sur les continents des hautes latitudes ou à haute altitude, des températures trop froides en haute atmosphère, et une atmosphère souvent trop sèche sous les tropiques.

Les mesures infrarouges hyperspectrales sont prometteuses pour mieux documenter les erreurs systématiques des modèles de climat. La future mission FORUM (Libois et al., 2020) couvrira la totalité du spectre infrarouge, permettant ainsi de mieux contraindre le bilan radiatif des modèles de climat.

### Référence :

Libois, Q., Labonnote L. C., & Camy-Peyret, C. (2020). Forum mesurera l'infrarouge lointain émis par la Terre. *La Météorologie*, (108), 4-6, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03187068>

3

## Une approche de downscaling hybride afin de produire une information robuste du changement climatique local

Antoine Doury, Samuel Somot

Un des grands défis pour la communauté scientifique du climat est de produire une information fiable concernant les impacts locaux du changement climatique global. Les modèles de climat sont les principaux outils pour étudier son évolution en fonction de scénarios liés aux activités humaines et émissions de gaz à effet de serre. Les modèles de climat globaux (GCM) produisent des simulations couvrant l'ensemble du globe à des résolutions trop faibles pour représenter correctement certains événements météorologiques extrêmes qui impactent fortement nos sociétés. Aujourd'hui, nous utilisons des modèles de climat régionaux (RCM) pour transformer une simulation globale à basse résolution en simulation à haute résolution sur une zone géographique d'intérêt. Cependant, la haute résolution de ces modèles implique des coûts de calcul très élevés limitant le nombre de simulations réalisables et donc l'exploration nécessaire des différentes sources d'incertitudes.

Pour palier cette limite, une étude récente [1] a proposé une stratégie pour créer à moindre coût, des simulations haute résolution à partir d'autres à basse résolution. Le RCM-émulateur, introduit ici, cherche à estimer la fonction de descente d'échelle incluse dans un RCM en utilisant notamment les récents développements concernant les réseaux de neurones. Cette étude introduit le concept

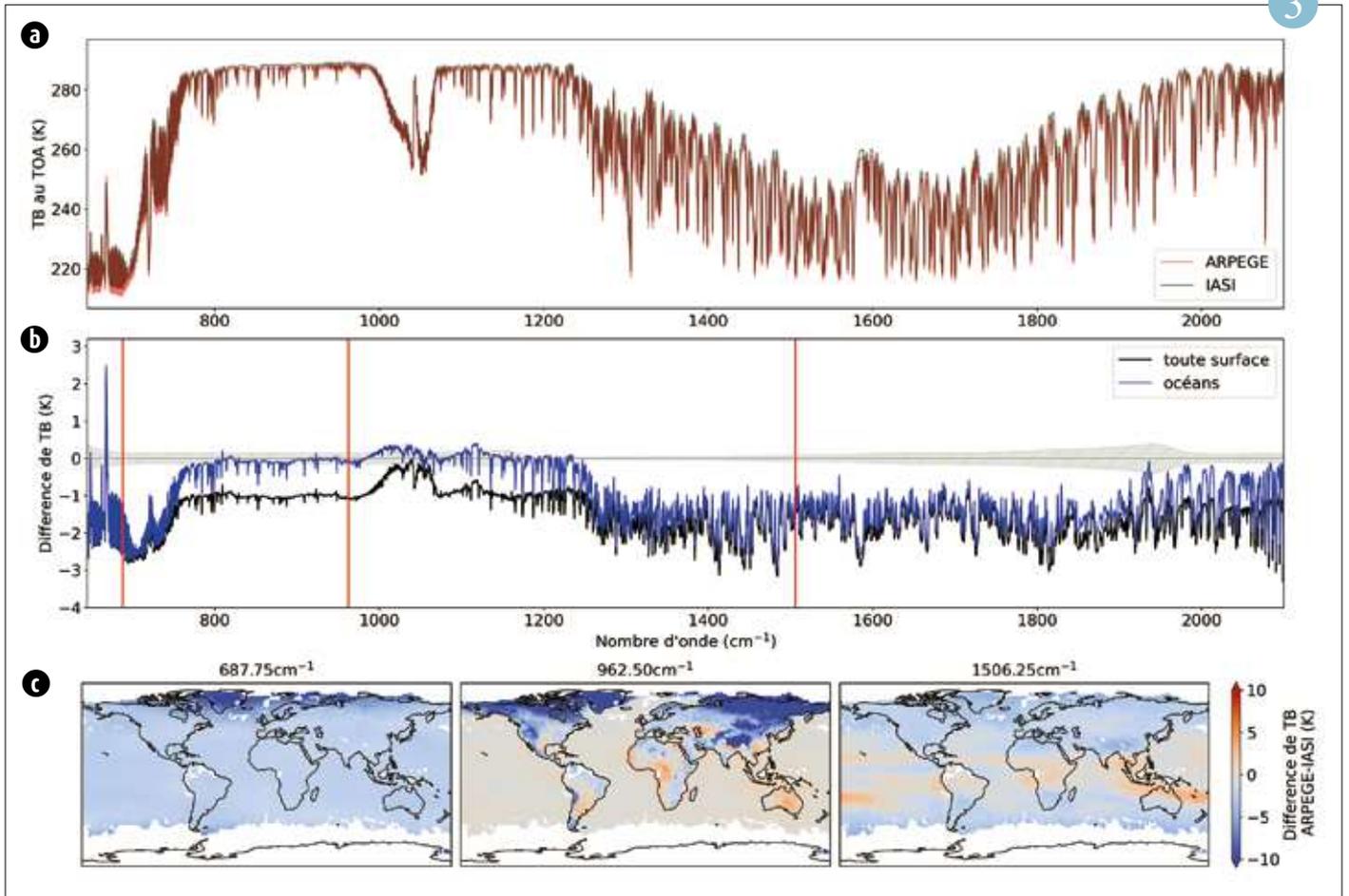
### Référence :

Doury, A., Somot, S., Gadat, S. et al. Regional climate model emulator based on deep learning: concept and first evaluation of a novel hybrid downscaling approach. *Clim Dyn* (2022). <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06343-9>

4

de l'émulateur et présente un cadre pour le construire, l'entraîner et l'évaluer. Le résultat principal de cette étude est que l'émulateur est une approche crédible pour relever ce défi. En effet, il montre une excellente capacité à créer des champs de température et précipitation à haute résolution cohérent avec la simulation basse résolution d'origine. De plus, puisqu'il ne se concentre que sur la fonction de downscaling du RCM, l'émulateur ne reproduit pas les éventuels biais que peut introduire le RCM.

Les résultats de cette étude ouvrent la porte à de nouveaux développements mais aussi à diverses applications prometteuses. En effet, le RCM-émulateur rend possible la production de messages robustes concernant les impacts locaux du changement climatique. De plus, un autre résultat important de ce travail est l'importance du jeu de données d'apprentissage sur les performances de l'émulateur. Il est essentiel de définir le meilleur ensemble de simulation pour construire un émulateur robuste ce qui implique peut-être de revoir la manière de choisir quelle simulation faire avec un RCM.



(a) Spectre global moyen en température de brillance (2007-2014) mesuré par le sondeur IASI (rouge) et simulé à partir des sorties du modèle ARPEGE-Climat (noir).  
 (b) Différence entre les spectres moyens simulés et mesurés (ARPEGE-Climat - IASI) en moyenne globale (noir) et au-dessus des océans uniquement (bleu). Le bruit instrumental du sondeur IASI donné pour la température de référence 280 K est indiqué en grisé.  
 (c) Distribution spatiale de la différence de température de brillance pour trois nombres d'onde différents (les nombres d'onde sont repérés en rouge sur la figure b).

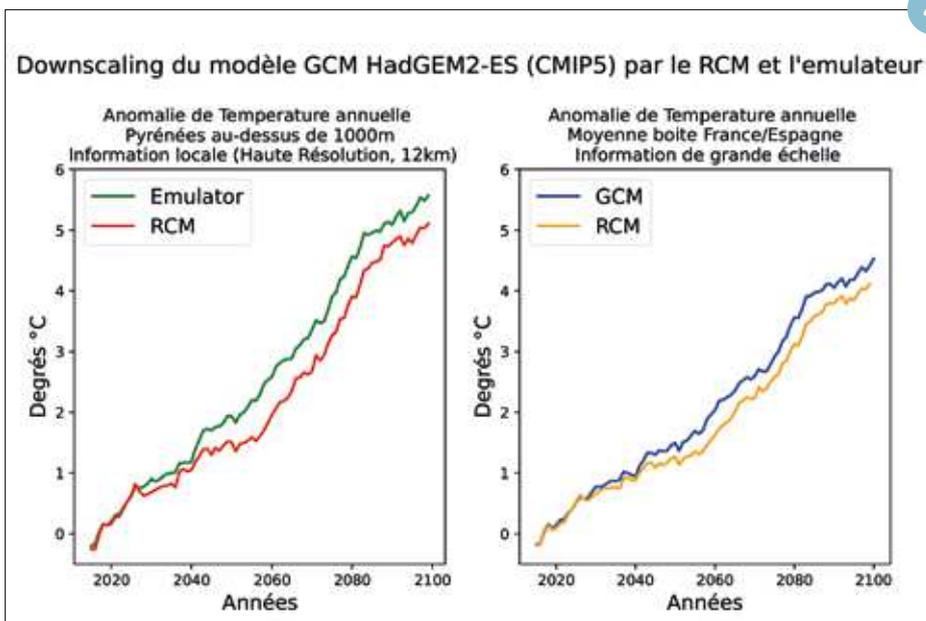


Illustration des performances de l'emulateur pour le downscaling du modèle basse résolution HadGEM2-ES (CMIP5, RCP85). Le graphe de gauche montre l'anomalie de température annuelle sur les points de moyenne et haute altitude (>1000m) des Pyrénées produite par le RCM et par l'emulateur. Le graphe de droite montre quant à lui la même anomalie pour le RCM et le GCM mais sur une boîte grande échelle centrée sur les Pyrénées et couvrant la France et l'Espagne. La haute résolution du RCM permet de bien représenter un réchauffement plus fort en altitude par rapport au réchauffement moyen, ce que l'emulateur reproduit correctement. Il est aussi remarquable que l'emulateur produit un réchauffement plus fort (+0,5°C en fin de siècle) sur les Pyrénées. Ce biais est cohérent avec celui observé entre le RCM et le GCM sur la plus grande boîte. Il semble donc que l'emulateur soit plus fidèle au réchauffement du GCM tout en apportant l'information de haute résolution contenue dans le RCM.

---

## Le changement climatique a un impact sur la structure verticale des gammes thermique des écosystèmes marins

Yeray Santana, Roland Sférian

À travers la tolérance thermique des organismes marins, les températures de l'océan jouent un rôle fondamental dans la distribution géographique de la biodiversité marine.

On prévoit que le changement climatique induit par les émissions humaines de gaz à effet de serre modifiera l'environnement thermique marin, affectant ainsi l'habitabilité de l'océan pour les écosystèmes marins.

Les connaissances actuelles suggèrent une expansion des ectothermes marins, comme les poissons, vers les océans des hautes latitudes, à la recherche d'eaux plus froides, mais les recherches se sont principalement appuyées sur des données observées ou modélisées de la température à la surface de la mer.

Dans cette nouvelle étude, publiée en septembre 2022 dans *Nature Climate Change*

(<https://www.nature.com/articles/s41558-022-01476-5>), nous faisons un pas en avant pour combler cette lacune en examinant la structure verticale des enveloppes thermiques environnementales de la surface de la mer à 1000 m de profondeur dans six stations océaniques de long terme fournissant des mesures quasi-journalières sur plus de 10 ans.

Grâce à des simulations de modèles validés sur ces sites océaniques, les auteurs ont été en mesure d'estimer les horizons temporels à partir desquels le changement climatique va induire des bouleversements substantiels dans les enveloppes thermiques environnementales auxquelles les organismes marins sont actuellement adaptés.

Les simulations montrent que ces changements émergent en dessous de 50 m de profondeur dans les prochaines décennies

avec des émissions anthropiques élevées, mais qu'ils sont retardés de plusieurs décennies si les émissions sont réduites.

Les auteurs montrent qu'en fin de siècle les changements simultanés sur les limites des enveloppes thermiques pourraient exposer les écosystèmes pélagiques à des environnements thermiques jamais connus auparavant alors que les écosystèmes de surface pourraient encourir des changements d'une moindre ampleur compte tenu des grandes enveloppes thermiques caractéristiques des biomes de surface.

Ainsi, ce travail révèle une image beaucoup plus complexe des impacts du changement climatique sur les écosystèmes marins lorsqu'on ajoute la dimension verticale en raison de l'altération différentielle des enveloppes thermiques marines à travers la colonne d'eau.

### Référence :

Santana-Falcón, Y., Sférian, R. Climate change impacts the vertical structure of marine ecosystem thermal ranges. *Nat. Clim. Chang.* 12, 935–942 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01476-5>

5

---

## Episodes méditerranéens et changement climatique : premiers résultats issus d'un ensemble de modèles de climat à résolution kilométrique

Caillaud C., Somot S., Douville H., Alias A.

Les épisodes méditerranéens qui touchent le sud-est de la France à l'automne sont des événements extrêmes à fort impact. L'augmentation déjà observée de ces précipitations intenses (Ribes et al. 2019) incite à s'intéresser à leur évolution future.

Depuis quelques années, il est possible d'utiliser une nouvelle génération de modèles de climat à résolution kilométrique (2-3km) qui a démontré une forte valeur ajoutée pour représenter les épisodes méditerranéens par rapport aux modèles à maille plus grossière utilisés auparavant (Pichelli et al. 2021, Caillaud et al. 2021). Grâce au programme CORDEX Flagship Pilot

Study on Convection, un premier ensemble est disponible comprenant une dizaine de simulations de 10 ans pour les périodes historique, milieu de siècle et fin de siècle selon le scénario de fortes émissions RCP8.5, sur un domaine couvrant le nord-ouest de la Méditerranée. Une approche objet est mise en place afin d'étudier les caractéristiques de ces systèmes fortement précipitants. S'il faut noter une dispersion parfois forte entre les réponses des différentes simulations pour la fin de siècle, l'approche multi-modèle indique, avec un bon accord général, une fréquence accrue des épisodes de pluie intense de l'automne sur le nord-ouest de

la Méditerranée, ainsi qu'une extension spatiale des zones potentiellement affectées par des événements méditerranéens (cf. figure). Sur le sud-est de la France, l'intensité moyenne et maximale, la surface, le volume et la sévérité sont attendus à la hausse, mais on note peu de changement pour la durée ou la vitesse de déplacement. Toutefois, la courte durée des simulations (10 ans) est un facteur limitant pour apporter des réponses robustes à l'évolution de ces phénomènes extrêmes. Dans les prochaines années, des simulations plus longues et plus nombreuses de ces modèles de climat à haute résolution devraient permettre d'y remédier.

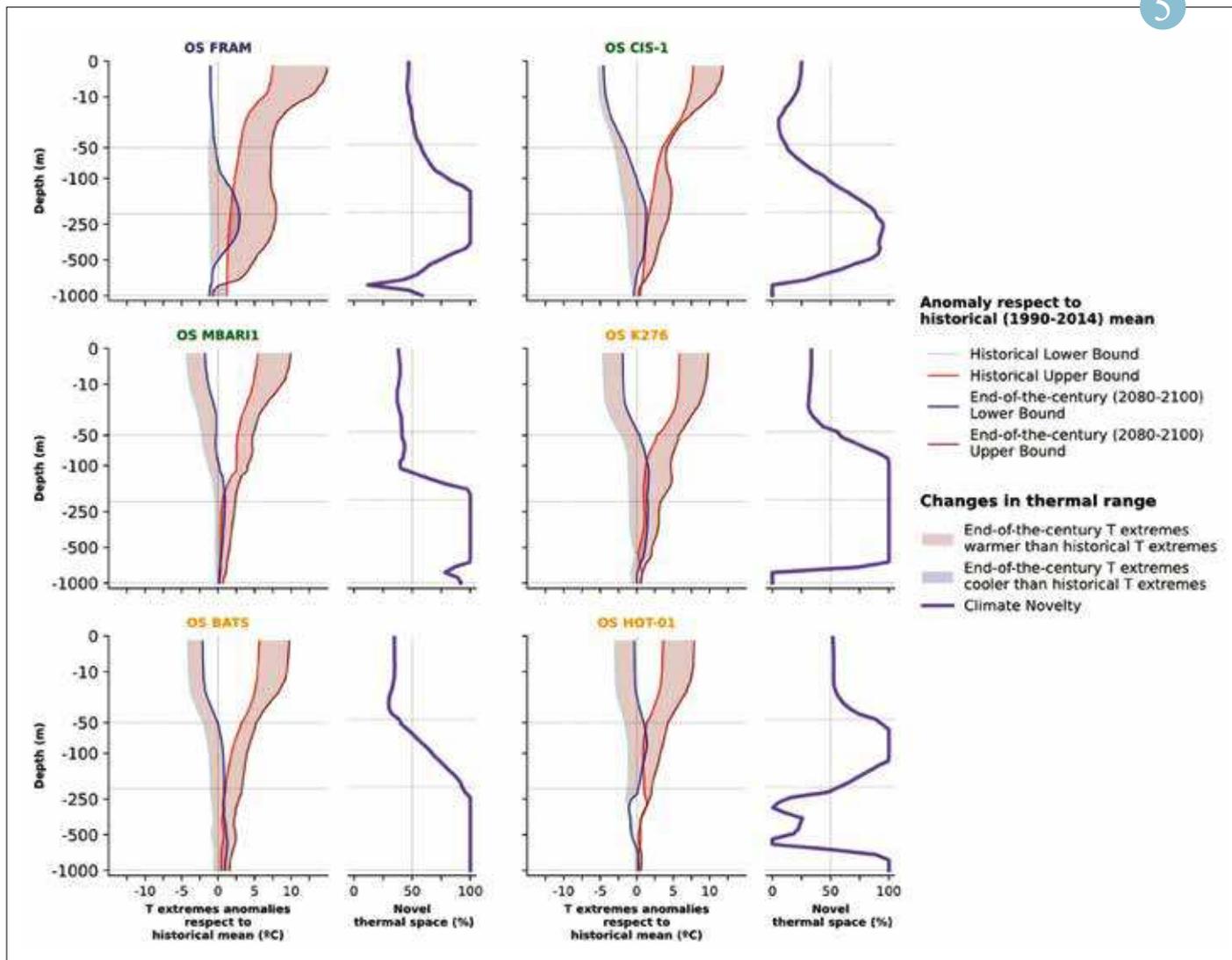
### Référence :

Ribes, A. et al. (2019). Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean. *Climate dynamics*, 52(1), 1095-1114. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4179-2>

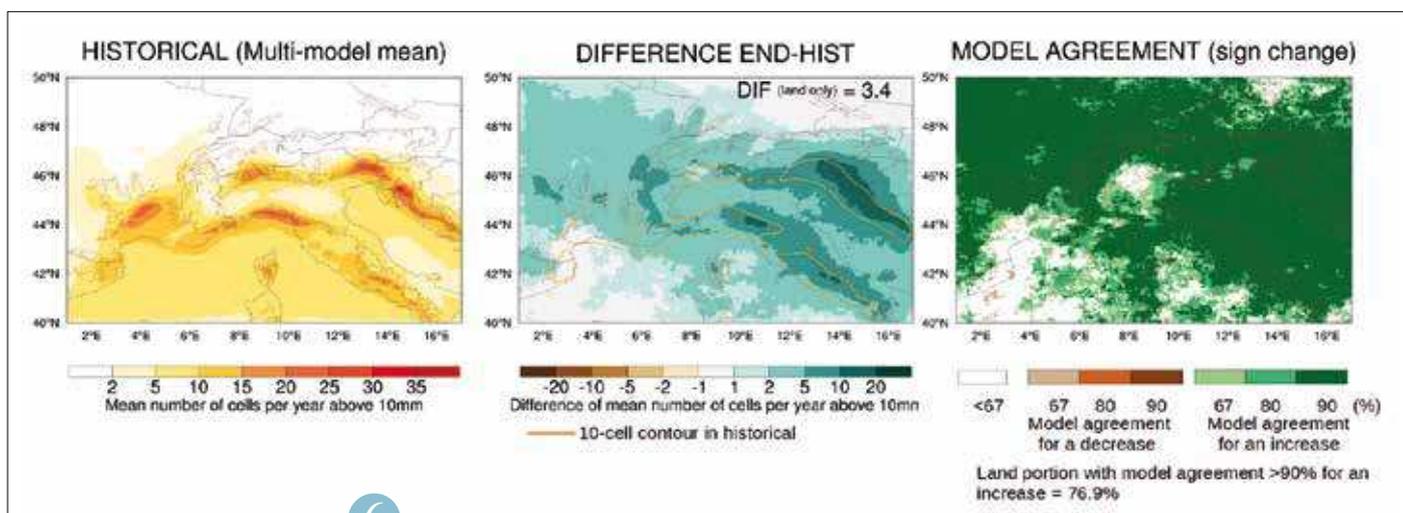
Pichelli, E. et al. (2021). The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution part 2: historical and future simulations of precipitation. *Climate Dynamics*, 56(11), 3581-3602. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05657-4>

Caillaud, C., Somot, S., Alias, A., Bernard-Bouissières, I., Fumière, Q., Laurantin, O., ... & Ducrocq, V. (2021). Modelling Mediterranean heavy precipitation events at climate scale: an object-oriented evaluation of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model. *Climate Dynamics*, 56(5), 1717-1752. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-020-05558-y>

6



▲ Changement des limites des enveloppes thermiques simulées pour la fin de siècle (2080-2100) dans un scénario de fortes émissions de gaz à effet de serre par rapport leurs caractéristiques actuelles. Les panneaux à droite de chaque profil quantifient la nouveauté climatique, c'est-à-dire à quel point l'enveloppe thermique à une profondeur donnée sera transformée à cause du changement climatique.



▲ Distribution spatiale des systèmes précipitants supérieurs à 10mm/h pour l'automne (mois de septembre à décembre). Le première figure indique la moyenne de l'ensemble multi-modèle du FPS Convection pour les simulations historiques (1996-2005). La seconde figure représente les différences entre les simulations fin de siècle (2090-2099, RCP8.5) et historiques. La dernière figure s'intéresse à l'accord des modèles sur le signe de changement attendu à la fin de siècle.

---

## Les modèles de prévision météo à haute résolution au service de la modélisation climatique de grande échelle

S. Blein, R. Roehrig, A. Voltaire, G. Faure

Les modèles atmosphériques utilisés pour la simulation climatique planétaire ont une résolution horizontale (maille) de l'ordre de 100 km. Toute une gamme de processus physiques atmosphériques de plus petite échelle (tels que la turbulence ou la convection) ne sont donc pas résolus explicitement. Pourtant, leurs effets sur l'échelle résolue ne sont pas négligeables. Les travaux présentés ici s'appuient sur le modèle de prévision météorologique à résolution kilométrique AROME, mis en œuvre par Météo-France sur la France et plusieurs territoires d'outre-mer. Ces simulations offrent une base de données unique pour aller au-delà de quelques cas d'étude et ainsi développer certaines paramétrisations sur la base d'une grande variété de conditions atmosphériques. Une paramétrisation est une représentation simplifiée de processus non résolus explicitement dans un

modèle numérique. Dans ces travaux (voir références), les prévisions AROME sur l'Océan Indien et les Antilles sont exploitées comme une référence pour quantifier les impacts de phénomènes de méso-échelle (typiquement de 1 à 10 km) sur les interactions air-mer et pour développer une paramétrisation correspondante, à l'échelle d'une maille de modèle de climat. Ces phénomènes correspondent par exemple à des systèmes convectifs isolés ou organisés, ou à des processus dynamiques associés au passage de fronts. Les échanges de quantité de mouvement, d'énergie et d'eau à l'interface air-mer sont amplifiés au premier ordre par l'impact de ces phénomènes sur le vent proche de la surface, conduisant très souvent à une intensification de ces échanges de plus de 10% (et jusqu'à un facteur 10 dans certains cas) par rapport à des estimations les ignorant. Un tel effet n'est actuellement

pas pris en compte dans les modèles de climat. La base de données constituée de plusieurs mois de prévisions AROME permet de construire une paramétrisation robuste, mêlant à la fois des bases physiques (choix des prédicteurs) et statistiques (sélection objective des prédicteurs, modélisation statistique).

La paramétrisation est performante et doit maintenant être implémentée et testée dans le modèle de climat du CNRM (ARPEGE-climat). L'objectif est d'augmenter le réalisme des flux à l'interface air-mer, ce qui aura probablement des répercussions sur les performances du modèle (climatologie, variabilité).

### Référence :

Blein, S., R. Roehrig, and A. Voltaire, 2022: Parameterizing the mesoscale enhancement of oceanic surface turbulent fluxes: a physical-statistical approach. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1002/qj.4273>

Blein, S., R. Roehrig, A. Voltaire and G. Faure, 2020: Meso-scale contributions to air-sea fluxes at GCM-scale. *Quarterly Journal of the Meteorological Society*, 146(730), 2466-2495. <https://doi.org/10.1002/qj.3804>

7

---

## Evolution future des extrêmes du niveau de la mer sur les côtes européennes

A. Chaigneau, A. Voltaire, A. Melet, G. Reffray, S. Law-Chune, L. Aouf

Des études à l'échelle globale montrent que les événements qualifiés d'extrêmes du niveau marin au 20<sup>e</sup> siècle vont devenir beaucoup plus fréquents au 21<sup>e</sup> siècle. Cependant, ces études sont souvent basées sur les projections climatiques provenant de modèles de climat globaux qui ne représentent pas tous les processus contribuant à l'évolution du niveau de la mer : au mieux, ils sont capables de simuler les effets de la circulation générale océanique, de la fonte de la cryosphère et de l'expansion thermique des océans. Pour représenter l'évolution du niveau de la mer et de ses extrêmes à l'échelle des côtes

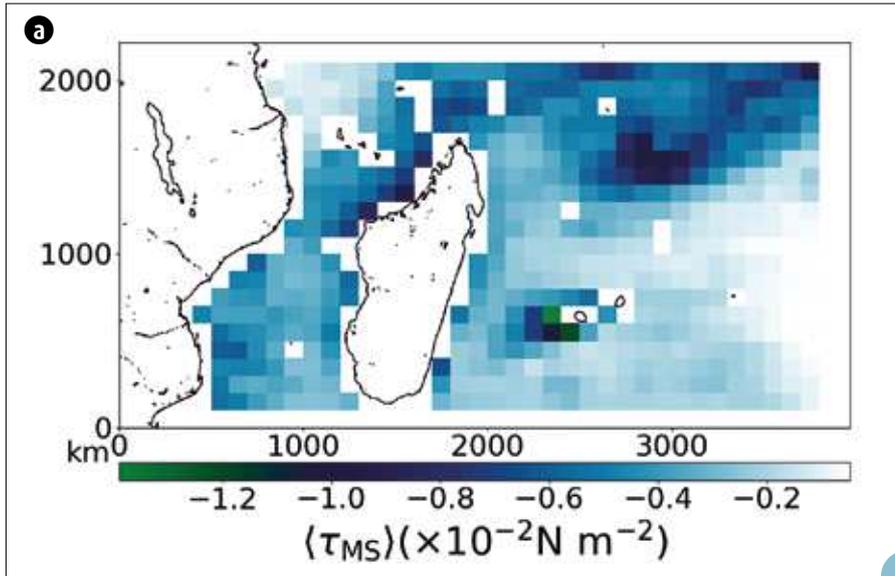
européennes, il est nécessaire de prendre en compte plus de processus comme l'effet des marées, des surcotes de tempête et des processus liés aux vagues, ainsi que leurs interactions. Pour ce faire, une chaîne de modélisation dédiée a été développée en collaboration entre Météo-France et Mercator Ocean. Cette chaîne repose sur une version régionale à 6 km de résolution du modèle d'océan NEMO, développée à Mercator Ocean (Chaigneau et al., 2022a), IBI-CCS, et sur une version régionale du modèle de vagues MF-WAM à 10 km de résolution développée à Météo-France (Chaigneau et al., 2022b), IBI-CCS-WAV. A

partir de projections climatiques réalisées avec le modèle de climat global CNRM-CM6-1-HR, ce nouvel outil a permis de mettre en avant l'importance de l'inclusion de tous les processus en jeu pour bien estimer l'évolution future du niveau marin et de ses extrêmes. En particulier, il a été montré qu'il était important de prendre en compte tous les processus pour bien estimer la variabilité du niveau de la mer sur la période passée. Cette bonne estimation conditionne également l'évaluation de l'amplification des niveaux extrêmes attendue au 21<sup>e</sup> siècle.

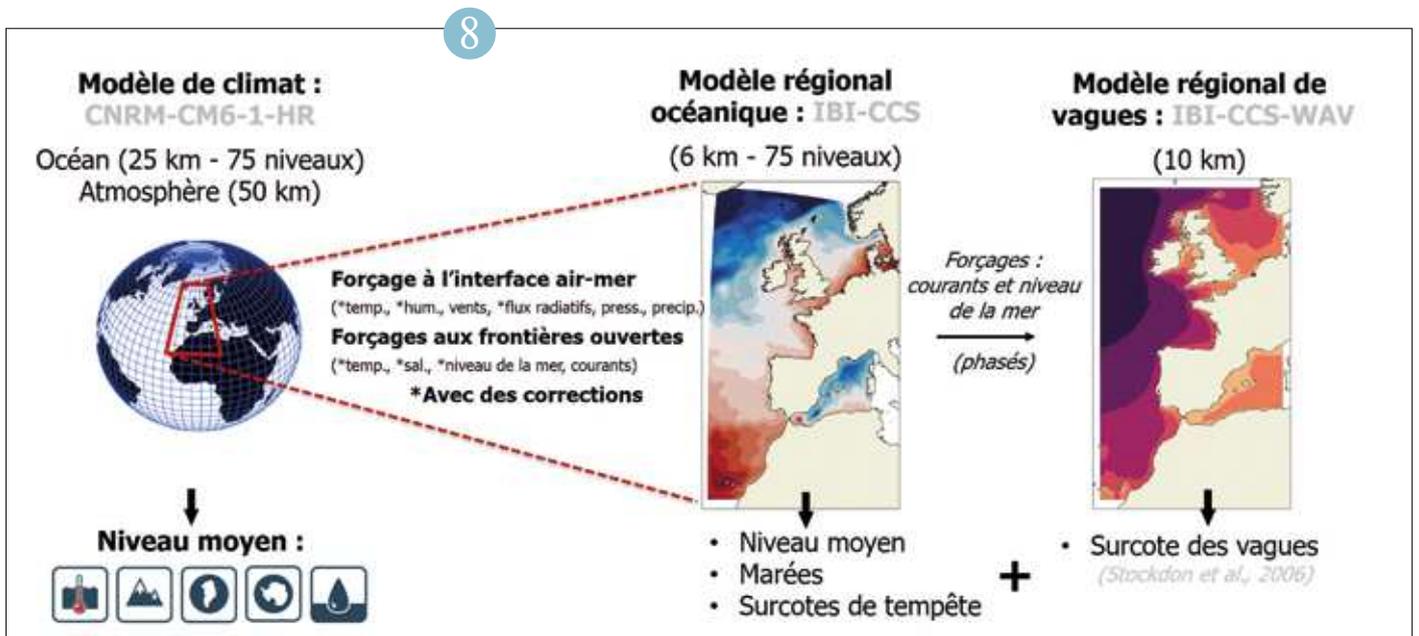
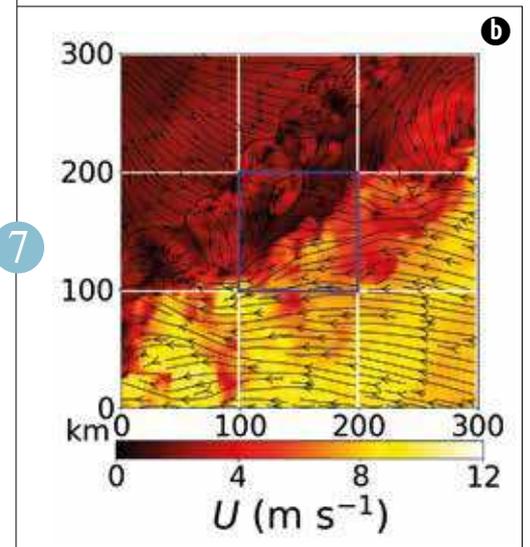
### Référence :

Chaigneau A., G. Reffray, A. Voltaire, and A. Melet, 2022a, IBI-CCS : a regional high-resolution model to evaluate western Europe sea level changes, *Geosci. Model Dev.*, 15, 2035–2062, DOI:10.5194/gmd-15-2035-2022.

8



- ◀ (a) Quantification de l'effet de la variabilité méso-échelle (sous-maille) sur le flux de quantité de mouvement à l'interface air-mer en moyenne sur un mois, à une résolution horizontale de 100 km.
- (b) Visualisation à fine résolution (2.5 km de résolution horizontale) par le modèle de prévision du temps AROME du vent proche de la surface pour un événement particulier (front météorologique).
- ▼



▲ Chaîne de modélisation développée pour produire des informations régionales du niveau de la mer, en combinant les sorties du modèle régional océanique IBI-CCS et du modèle régional de vagues IBI-CCS-WAV.

## Evolution des sécheresses météorologiques et agricoles en France en contexte de changement climatique

J.-M. Soubeyroux, A. Drouin, F. Rousset

Le 6<sup>e</sup> rapport du GIEC a mis en évidence l'aggravation des sécheresses en lien avec le changement climatique dans de nombreuses régions du monde. En France, les sécheresses des sols sont devenues deux fois plus probables aujourd'hui que dans les années 1960 et l'année 2022 a établi de nouveaux records historiques en déficit d'humidité des sols. Le lien avec le changement climatique a été démontré dans de nombreux travaux dont notamment le projet ClimSec en 2011, spécifiquement dédié au sujet de la sécheresse des sols. En 2020, un nouveau jeu de projections climatiques régionalisés, DRIAS-2020 a été produit sur la France s'appuyant sur l'ensemble EuroCordex. Dans le cadre d'un projet national sur les futurs de l'eau (Explore2) ces simulations ont été utilisées en entrée du modèle hydrologique SIM2 pour déterminer l'évolution de la ressource en eau en France et notamment la composante humidité des sols.

A partir de ces jeux de données DRIAS-2020 et DRIAS-2020-SIM2, des indicateurs de sécheresse standardisés sur les précipitations (SPI) et l'humidité des sols (SSWI) ont été calculés sur 12 couples GCM/RCM et trois scénarios climatiques (RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6).

Hors RCP2.6, les résultats confirment une aggravation en climat futur des sécheresses météorologiques notamment en été et des sécheresses du sol toute l'année, ainsi que d'un contraste nord-sud sur le pays.

En RCP8.5 et fin de siècle (figure jointe), la médiane de l'ensemble DRIAS-2020 indique qu'une sécheresse du sol de niveau décennal sera plus de trois fois plus probable qu'en climat récent (occurrence de 10 années sur un horizon de 30 ans).

9

## Nouvelles simulations climatiques pour le projet explore 2

Lola Corre, Agathe Drouin, Paola Marson et Jean-Michel Soubeyroux.

Le projet Explore2 vise à étudier l'impact du changement climatique futur sur la ressource en eau, en France Métropolitaine. Il s'appuie sur des projections hydroclimatiques alimentées par des données atmosphériques à haute résolution débiaisées couvrant la période de 1976 à 2100.

La production de telles données a été menée précédemment dans plusieurs pays avec différentes méthodes.

Pour la France métropolitaine, le portail DRIAS propose le jeu DRIAS-2020 composé de 30 projections climatiques qui couvrent 3 scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols (RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5). Ce jeu est basé sur une sélection de 12 couples modèle global / modèle régional issus de l'ensemble EURO-CORDEX. Pour le projet Explore2, DRIAS-2020 a été enrichi par 7 nouveaux couples. Les simulations

ont été projetées sur une grille de 8 km de résolution, et corrigées de leur biais à partir de la réanalyse SAFRAN en utilisant les méthodes ADAMONT (Verfaillie et al., 2017) et R2D2 (Vrac 2018).

Les sélections DRIAS-2020 et Explore2 couvrent bien la gamme des changements simulés par l'ensemble EURO-CORDEX. L'ajout des nouvelles simulations dans Explore2 influe peu sur la gamme des changements futurs de température et précipitations.

L'impact des corrections sur les changements futurs a aussi été quantifié. Malgré quelques différences, les changements projetés par les deux jeux corrigés sont proches. En médiane sur l'ensemble des simulations, ils projettent des réchauffements annuels d'environ 4°C en sur la France métropolitaine (changement calculé entre les périodes 1976-2006 et 2070-2099, pour le scénario RCP 8.5).

### Référence :

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>].

Vrac, M. 2018 : "Multivariate bias adjustment of highdimensional climate simulations : the Rank Resampling for Distributions and Dependences (R2D2) bias correction". In : *Hydrol Earth Syst Sci* 22.6, p. 31753196. DOI : 10.5194/hess-22-3175-2018.

11

## Evolution des vagues de chaleur en climat futur

A. Drouin, Lola Corre, J.-M. Soubeyroux, M. Schneider

La France a toujours en mémoire la vague de chaleur exceptionnelle d'août 2003, occasionnant près de 15000 décès supplémentaires. Une nouvelle vague de chaleur est survenue en juillet 2006. À la suite de ces événements, une méthode d'identification et de caractérisation des vagues de chaleur utilisant les températures moyennes quotidiennes observées a été progressivement développée et enrichie. Cette méthode permet aujourd'hui de comparer les caractéristiques des épisodes historiques (date d'occurrence, durée, intensité maximale et sévérité).

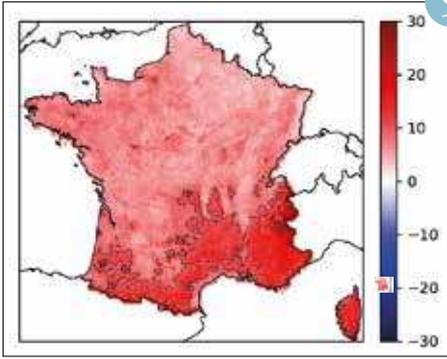
Cette méthode, appliquée aux simulations climatiques du jeu de référence de projections climatiques sur la France DRIAS 20201, permet d'estimer les évolutions des vagues de chaleur en climat futur en fonction des horizons et scénarios considérés. Pour chaque simulation de l'ensemble DRIAS 2020, les vagues de chaleur ont été identifiées pour 3 horizons futurs : proche (2021-2050), moyen (2041-2070) et lointain (2071-2100) et pour les trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre : RCP4.5 et RCP8.5.

Pour chacune des simulations, le nombre de vagues de chaleur et toutes les caractéristiques associées sont en forte augmentation. Certains modèles simulent ainsi des vagues de chaleur se prolongeant plus de deux mois en RCP8.5 alors même que celles simulées en période de référence ne dépassent guère trois semaines, durée très proche de l'observation elle-même. D'une manière générale, les vagues de chaleur les plus sévères observées par le passé seront vues dans le climat futur comme des événements mineurs.

Cette étude montre à quel point la fréquence, la durée, l'intensité, la sévérité et la période calendaire de survenue des épisodes de vagues de chaleur augmentent de manière préoccupante en climat futur.

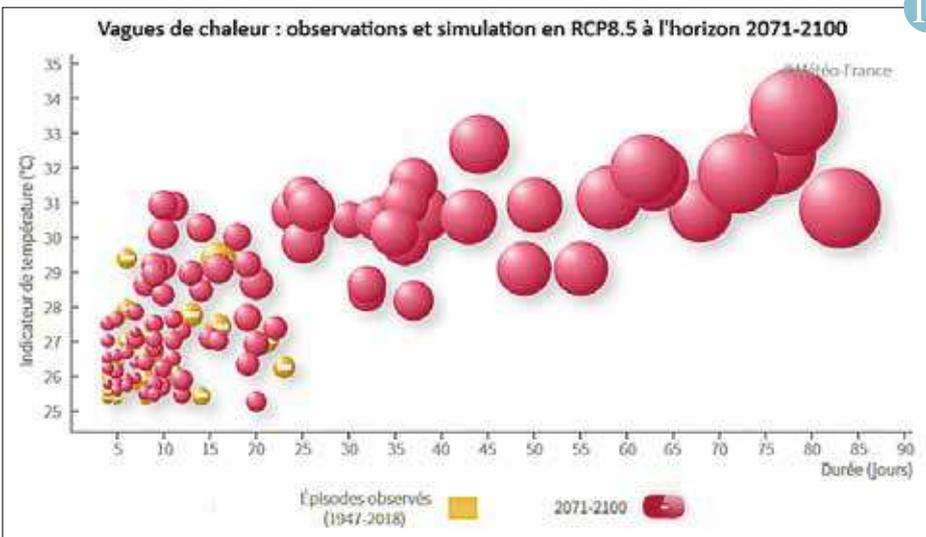
10

9



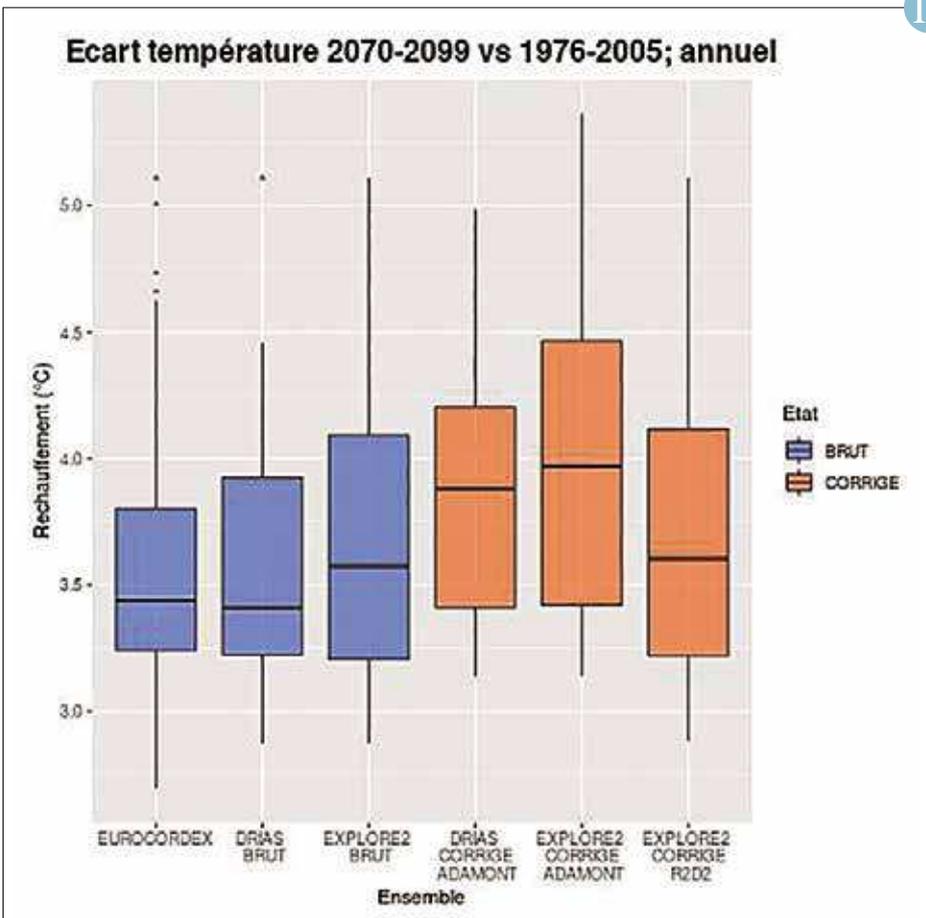
◀ Médiane de l'ensemble DRIAS-2020 sous RCP8.5 à l'horizon fin de siècle (2071-2100) pour le temps passé en sécheresse des sols de niveau au moins décennal. La légende indique le nombre d'années sur 30 ans d'occurrence de sécheresse au moins décennale.

10



◀ Vagues de chaleur simulées par un modèle (modèle Aladin-Climat de Météo-France) à l'horizon 2071-2100 en RCP8.5 comparées à celles observées entre 1947 et 2018.

11



◀ Changements de température entre les périodes 1976-2005 et 2070-2099 (RCP 8.5), en moyenne sur la France métropolitaine pour l'ensemble EURO-CORDEX (67 simulations non corrigées), la sélection DRIAS-2020 brute (12 simulations non corrigées), la sélection Explore2 brute (19 simulations non corrigées), le jeu DRIAS-2020 (12 simulations corrigées par ADAMONT), le jeu Explore2-ADAMONT (19 simulations corrigées par ADAMONT), le jeu Explore2-R2D2 (19 simulations corrigées par R2D2).

---

# Prévision saisonnière

## Scénarios saisonniers de températures et de précipitations sur l'Europe

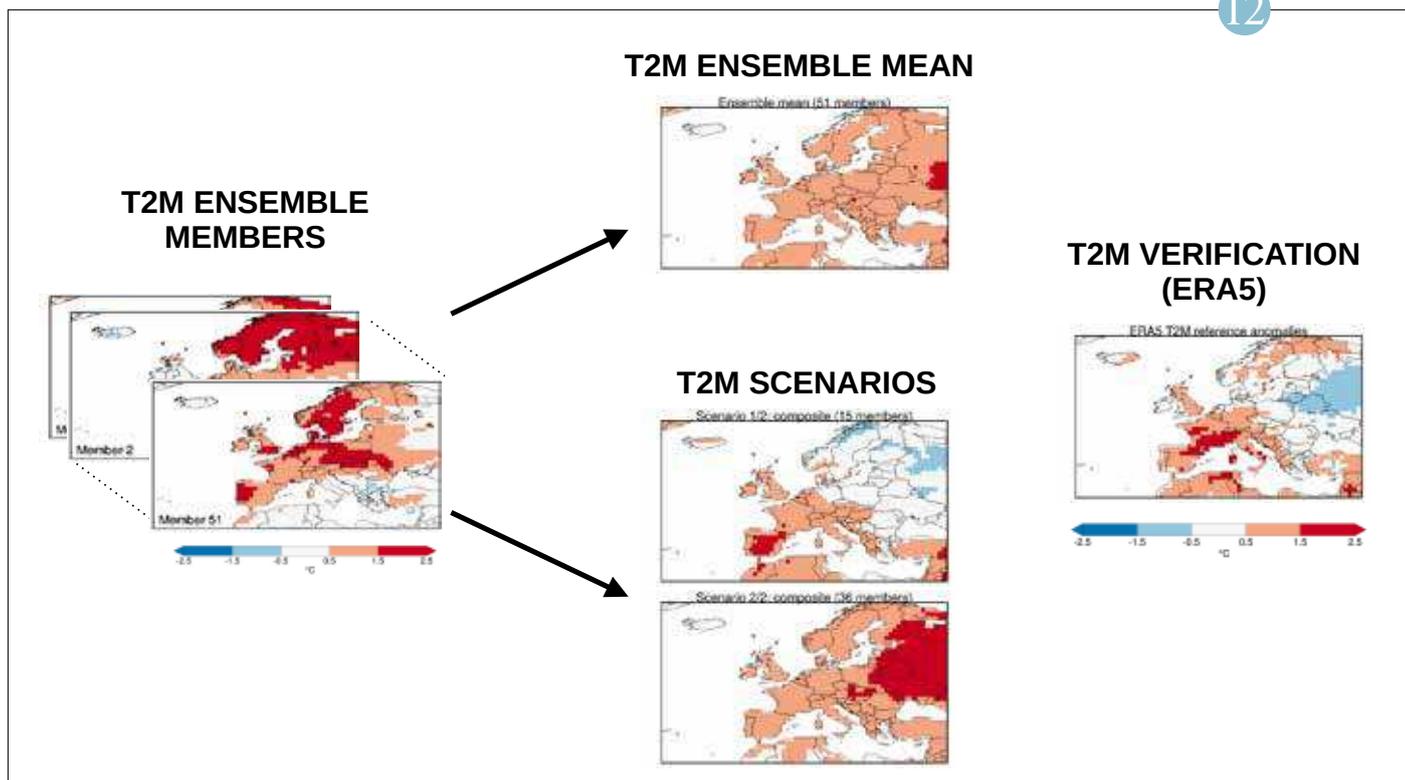
D. Specq

Les prévisions saisonnières renseignent sur les conditions climatiques de la saison à venir, telle que l'anomalie moyenne de température sur le prochain trimestre. Météo-France réalise chaque mois ce type de prévisions par intégration du modèle de climat global couplé CNRM-CM, initialisé de manière réaliste et perturbé pour générer des ensembles qui échantillonnent la distribution des possibles. Ces prévisions sont notamment fournies au programme européen Copernicus Climate Change Services (C3S). L'information de ces prévisions est typiquement proposée sous forme de

moyenne des membres ou de synthèse des terciles prévus. Le CNRM s'est intéressé à une méthode pour extraire des scénarios saisonniers à partir des ensembles, afin de proposer un diagnostic plus informatif sur les différentes trajectoires de l'atmosphère tout en restant synthétique. Les scénarios sont définis par un algorithme de classification hiérarchique ascendante des membres selon les températures trimestrielles prévues sur l'Europe. Des composites sur chaque classe décrivent les scénarios cohérents en températures et en précipitations. Cette approche est actuellement expérimentée lors

de l'établissement du bulletin opérationnel de prévision saisonnière de Météo-France. Il s'avère qu'un scénario minoritaire prévoit parfois mieux la situation à venir, comme le montre l'exemple en illustration. Des travaux en cours vont enrichir la démarche, en reliant les scénarios à des phénomènes de grande échelle ainsi qu'en étendant la méthodologie au multi-modèle des prévisions de Copernicus C3S issues de plusieurs centres de prévision, pour plus de robustesse.

12



▲  
 Anomalies de température de surface (T2M) en avril-mai-juin 2022.  
 Gauche : 51 membres de la prévision saisonnière de Météo-France initialisée en mars 2022.  
 Milieu, haut : Moyenne d'ensemble des 51 membres.  
 Milieu, bas : Composites des deux scénarios obtenus.  
 Droite : Vérification dans la réanalyse ERA5.  
 Le scénario minoritaire n°1 (15 membres sur 51) prévoit mieux la structure spatiale des anomalies de température observées.

# Chimie, aérosols et qualité de l'air

Les 14 et 15 janvier 2022, le volcan Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (archipel des Tonga) a connu une éruption majeure, qui fut atypique à plusieurs titres. Le magma expulsé a interagi avec l'eau de mer, produisant une série d'explosions particulièrement violentes et projetant de grandes quantités de vapeur d'eau dans l'atmosphère (donc une augmentation de l'effet de serre). L'oxydation du SO<sub>2</sub> émis a été particulièrement rapide et a conduit à un enrichissement de la stratosphère en particules sulfatées. Lors des éruptions volcaniques intenses « classiques », c'est ce dernier effet qui domine, avec à la clé un léger refroidissement du climat pendant 1 à 3 ans. Mais l'éruption du Hunga Tonga a constitué une exception, puisque ses effets combinés ont produit un forçage radiatif de l'ordre de +0,2 W/m<sup>2</sup> (soit environ 7 % de l'ensemble des effets des activités humaines sur le climat), donc un léger réchauffement planétaire, ce qui n'avait jamais été observée auparavant pour une éruption volcanique. De plus, la violence de l'éruption fut telle que les gaz ont été injectés jusqu'à 57 km d'altitude, atteignant la mésosphère, soit beaucoup plus haut que l'éruption du Pinatubo en 1991 (35 km). Enfin, l'éruption s'est traduite par la propagation d'ondes infrasonores, qualifié de « tsunami météorologique », et qui était encore détectable plus de treize jours après l'éruption en combinant l'imagerie satellitaire, des réseaux de stations au sol ainsi que des plateformes aéroportées. Les panaches émis lors des éruptions volcaniques peuvent perturber le trafic aérien mais aussi affecter la santé humaine, d'où l'importance de prévoir au mieux l'évolution de ces événements. Météo-France est en charge du centre de surveillance des cendres volcaniques (VAAC) de Toulouse couvrant une vaste zone incluant le sud et l'est de l'Europe, la partie ouest de l'Asie et l'Afrique. Ce VAAC a notamment pour mission d'émettre des messages d'avertissement pour la sécurité du trafic aérien. Lors de l'éruption du Hunga Tonga, les équipes opérationnelles et de recherche se sont de nouveau mobilisées prévoir au mieux la dispersion des panaches volcaniques de cendres et de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>). Afin d'être exploité opérationnellement, Mocage Accident a été adapté aux conditions très atypiques de l'éruption, avec notamment la prise en compte de l'altitude de rejet particulièrement élevée. Une version de Mocage Qualité de l'Air avec assimilation de la colonne de SO<sub>2</sub> issue de S5P a également été mise en œuvre. Cette instance du modèle a permis de fournir des prévisions de qualité de l'air jusqu'à une échéance de 4 jours, et d'anticiper que les risques seraient très réduits pour la santé humaine, ce qu'ont confirmé les observations. L'année 2022 a été riche en développements pour le progrès des connaissances en composition chimique de l'atmosphère et pour la mise en place de futures applications opérationnelles, mais citons-en deux qui concernent l'ozone. Le premier concerne la compréhension et la représentation de l'évolution de l'ozone dans les basses couches de l'atmosphère, donc son impact sur la qualité de l'air. Il s'agit d'un enjeu important, que ce soit sur de courtes échelles de temps ou en lien avec les évolutions climatiques de long terme. À ce niveau de l'atmosphère, l'ozone réagit chimiquement notamment avec les oxydes d'azote et les composés organiques volatils. Ces derniers, liés au type et à l'état de la végétation, sont rarement pris en compte pour les projections climatiques. À cette fin, la plate-forme de modèles de surface SURFEX, qui gère les émissions et les dépôts d'espèces chimiques a été couplée avec MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). Cela pourra donner lieu à des applications avec MOCAGE mais aussi avec le modèle de système Terre CNRM-ESM, ce qui est prévu dans le cadre du programme national TRACCS sur la modélisation du climat pour les services climatiques (<https://climeri-france.fr/pepr-traccs/>). Le second développement avait pour objectif de décrire plus finement la stratosphère dans MOCAGE via une augmentation de la résolution verticale. La mise en œuvre de cette nouvelle version a permis de mieux représenter la colonne totale d'ozone et sa variabilité temporelle, et de produire de nouvelles simulations de l'évolution du trou d'ozone sur l'Antarctique.

1

## Évaluation des émissions biogéniques par MEGAN-SURFEX

Joaquim Arteta, Safae Oumami

La prévision de la qualité de l'air et de son évolution dans le cadre du changement climatique est un enjeu sanitaire et sociétal important. C'est notamment le cas pour les épisodes de pollution à l'ozone.

La formation de l'ozone est régie par des réactions chimiques impliquant des oxydes d'azotes, majoritairement d'origine humaine, et des composés organiques volatiles, issus à près de 90 % de la nature en présence d'un fort rayonnement solaire. Or les projections climatiques de qualité de l'air, si elle considère les évolutions de météorologie et des émissions liées aux activités humaines, ne prennent que rarement en compte l'évolution des émissions de composés

biogéniques liées à l'impact du changement climatique sur les écosystèmes.

Dans l'optique de réaliser des projections climatiques de qualité de l'air prenant en compte les évolutions des émissions biogéniques, le modèle de calcul de flux biogéniques MEGAN, dans sa version 2,1, a été couplé au modèle de sol de Météo-France, SURFEX. Ce couplage permet de prendre en compte l'impact des changements liés au changement climatique sur la végétation, et donc in fine sur les flux de composés biogéniques. Afin de valider ce couplage, les émissions globales d'isoprène, principal composé organique volatile biogénique, ont été calculées avec le modèle SURFEX-MEGAN

avec plusieurs forçages météorologiques (IFS opérationnel, ERA5 et MERRA) pour l'année 2019, comme l'illustre la figure a et comparées aux cadastres d'émissions existants. Les résultats obtenus montrent un bilan global variant de 341 Tg à 436 Tg suivant le forçage météorologique utilisé. Les cadastres globaux actuels situent les émissions globales d'isoprène entre 310 Tg et 627 Tg (cf. figure b). Les résultats obtenus avec SURFEX-MEGAN sont dans la fourchette des bilans publiés précédemment.

2

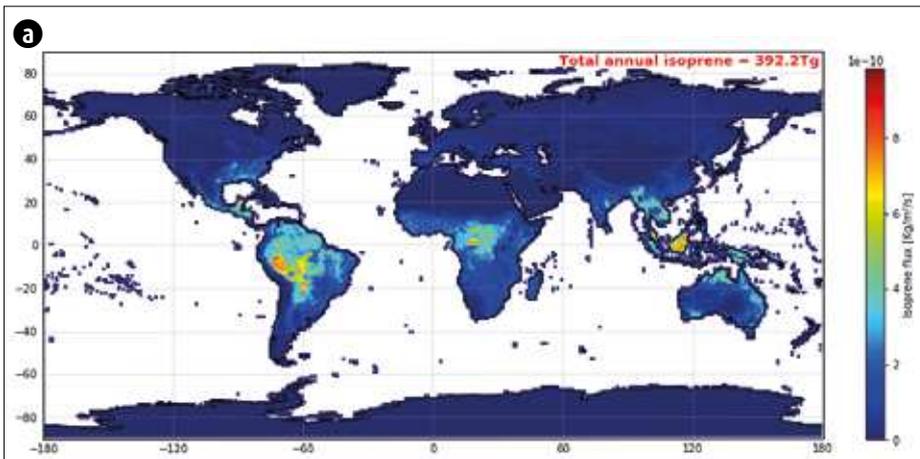
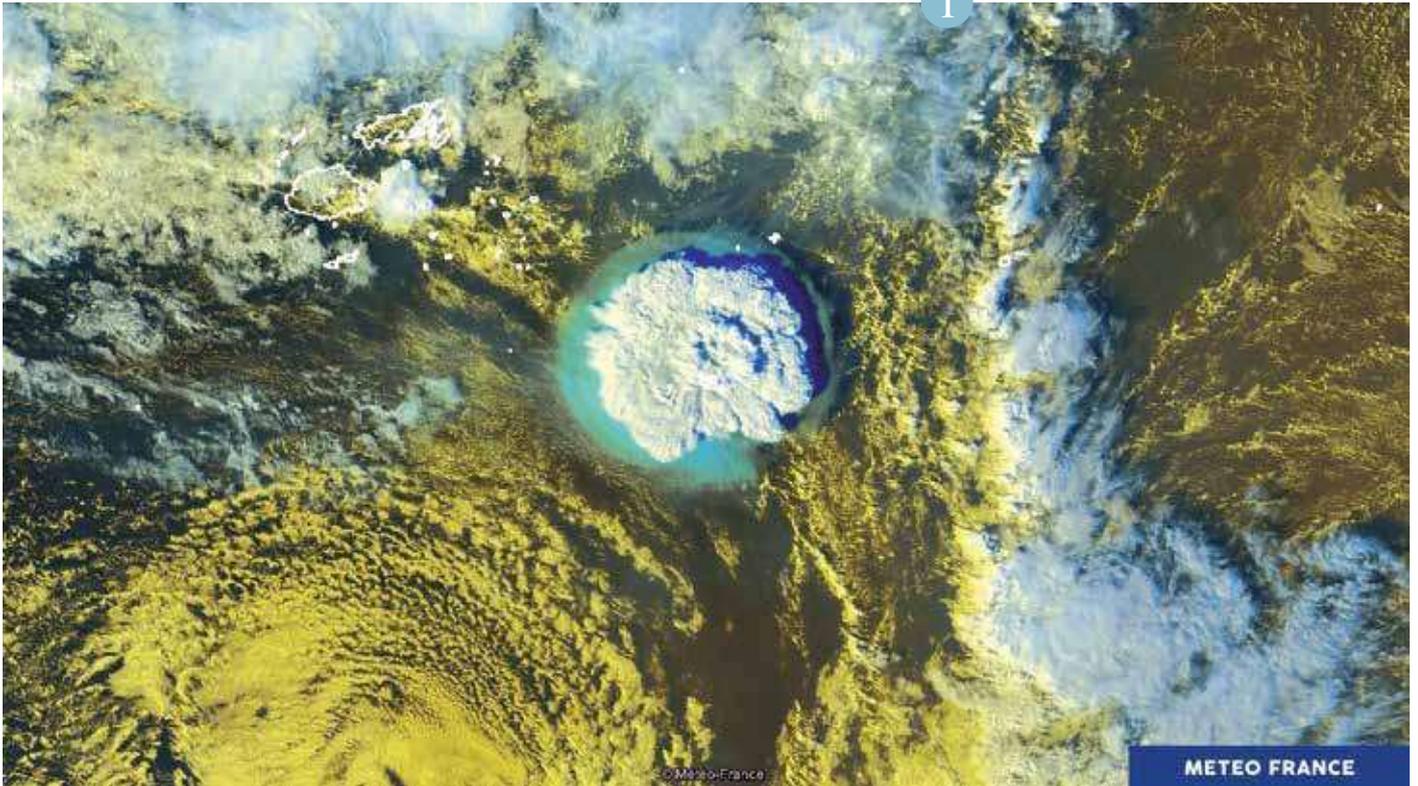
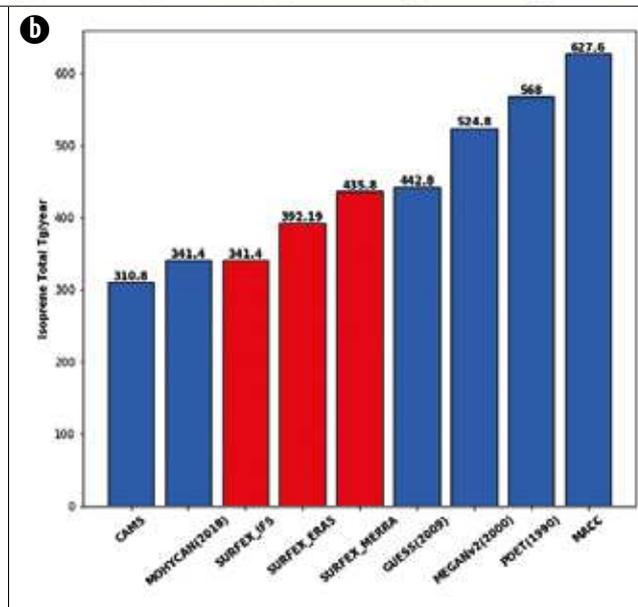


Image satellite HIMAWARI8 du 15/01/2022 à 05h00 UTC. 50 minutes après le début de son éruption, le volcan Hunga Tonga-Hunga Ha'apai a libéré une énorme quantité de cendres dans l'atmosphère, et le panache atteint déjà 400 km de diamètre. © Météo-France.



(a) Émissions globales annuelles d'isoprènes modélisées avec le modèle SURFEX-MEGAN forcé par ERAS.  
 (b) Comparaison des résultats obtenus avec les principaux cadastres d'émission existants.

---

## Modélisation des aérosols désertiques dans AROME, évaluation sur le Sahel

Jonathan Guth, Vincent Guidard

Les épisodes de soulèvement et de transport de poussières désertiques ont un impact sur les prévisions météorologiques, sur la température ou la visibilité par exemple. Il est donc crucial de prévoir ces processus pour la sécurité des personnes et des biens. La représentation de ces poussières désertiques peut être intégrée dans le modèle de prévision du temps à fine échelle AROME. Dans cette version améliorée d'AROME, les émissions de poussières désertiques sont modélisées à l'aide du modèle SURFEX1. Dans l'atmosphère, l'interaction entre les poussières désertiques et le rayonnement

est prise en compte, permettant de décrire de manière plus réaliste les températures en basses couches, entre autres.

L'évaluation et la caractérisation du comportement du modèle AROME à modéliser le soulèvement et le transport des poussières désertiques ont été réalisées sur un domaine Sahélien, englobant le Tchad et le Niger, afin de cerner un certain nombre de zone émettrices de poussières désertiques. Une simulation de 5 mois sur le domaine Sahélien, comparée à des observations d'épaisseurs optiques des aérosols depuis les satellites ou depuis le sol montre des

résultats très positifs. La figure permet de noter la bonne concordance des poussières désertiques sur le Tchad et le sud de l'Algérie. Cette nouvelle version du modèle AROME est destinée à améliorer les prévisions de poussières désertiques dont l'impact peut être sensible, et est en particulier pour les Forces Armées et de l'aéronautique.

---

1. SURFEX : Surface Externalisée

3

---

## Assimilation des télémètres européens pour les prévisions de qualité de l'air

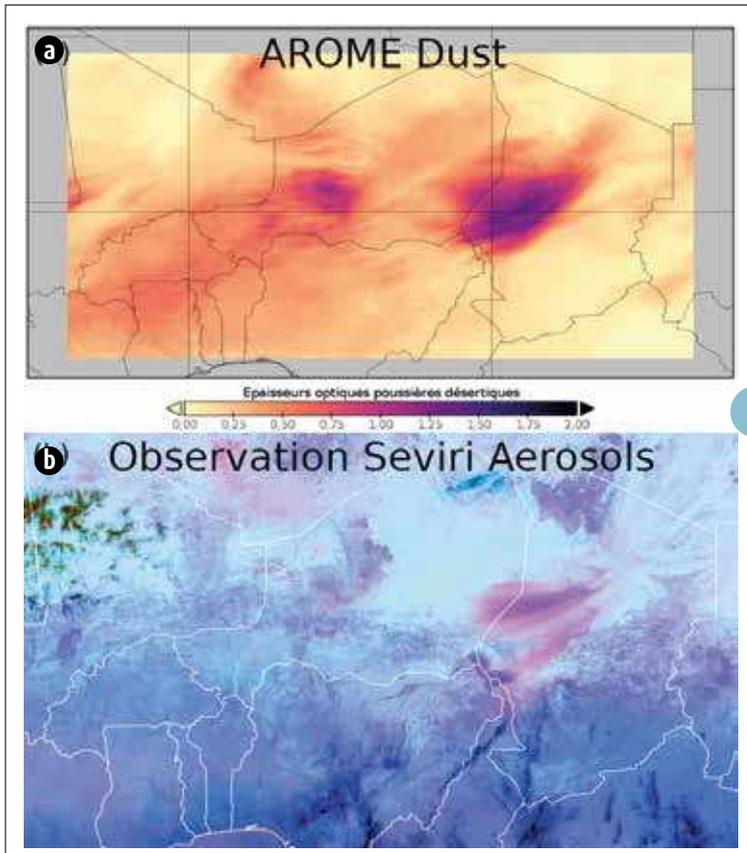
Mickaël Bacles

Les aérosols sont des particules en suspension dans l'air, à différentes altitudes, ayant une origine naturelle (déserts, feux de forêts, éruptions volcaniques) ou anthropique (industries, chauffage, transport). Proche de la surface, les aérosols peuvent réduire la visibilité et même avoir un impact sur notre santé. Il est donc important d'anticiper ces épisodes de pollution aux particules fines. Cependant, la prévision des aérosols comporte de nombreuses incertitudes qui peuvent être réduites grâce à l'assimilation de profils verticaux observés par les lidars et les télémètres du réseau E-PROFILE dont la localisation est représentée sur la figure a. L'apport de l'assimilation de ces instruments a été évalué lors d'un épisode particulier,

entre le 1<sup>er</sup> mars 2022 et le 19 mars 2022, dans le modèle de chimie-transport MOCAGE et les simulations obtenues sont comparées à des observations indépendantes provenant de l'Agence Européenne de l'Environnement (AEE). Les cartes suivantes représentent des concentrations médianes en PM10 à la surface observées (figure b) et simulée sans assimilation (figure c) et avec assimilation des instruments du réseau E-PROFILE (figure d). On remarque que pour cette période, le modèle sous estime la concentration en PM10 à la surface. Toutefois, l'assimilation permet d'augmenter la concentration en PM10 à la surface et donc de se rapprocher des valeurs observées à la surface, notamment là où le réseau E-PROFILE est dense.

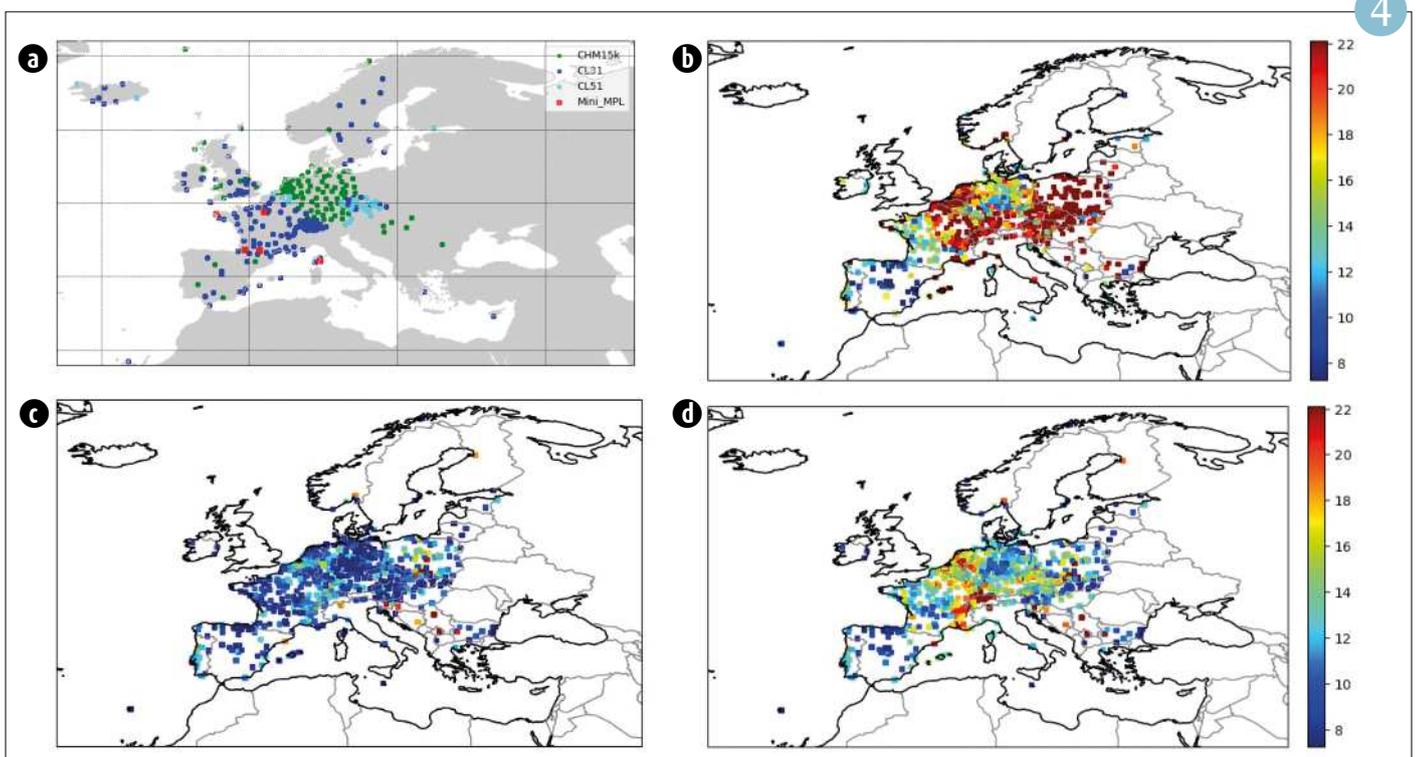
L'assimilation de ces instruments ne permet de modifier que la masse totale des aérosols, pour le moment. Cependant, les aérosols ont un comportement différent selon leur type et leur taille. La prévision des aérosols pourrait être améliorée grâce à l'utilisation d'une information sur la taille et le type d'aérosol dans le modèle.

4



3

Épaisseur optique des poussières désertiques simulée par AROME (a) et image aérosols issues des observations Sevir (satellite Météosat-11, (b) pour le 10 février 2022 à 14h.



4

Localisation des instruments du réseau de lidars et de télémètres E-PROFILE (figure a) et concentration en PM10 observée par le réseau AEE (figure b) et simulée par MOCAGE sans assimilation (figure c) et avec assimilation des lidars et des télémètres (figure d).

## Participation à la phase 2 du projet CCM-I (Chemistry-Climate Model Initiative)

Béatrice Josse et Françoise Chéroux

Afin de soutenir l'activité de l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale) et du PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) sur l'évaluation scientifique de l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'initiative internationale CCM-I (Chemistry Climate Model Initiative, <https://blogs.reading.ac.uk/ccmi>) a demandé aux différents groupes de modélisation de réaliser une série de simulations, dans le but d'une intercomparaison des résultats.

Le modèle MOCAGE a été utilisé pour représenter à la fois l'évolution passée (1960-2020), la projection future (jusqu'en 2100) de la composition chimique de l'atmosphère, ainsi que des simulations de type 'geo-engineering' (jusqu'en 2100), pour lesquelles on suppose une injection massive d'aérosols sulfatés dans la stratosphère. Pour ces 3 types de simulation, un mini-ensemble de 4 simulations a été effectué afin de proposer une estimation de variabilité. Pour cet exercice, les forçages météorologiques sont issus du modèle de climat CNRM-CM. La version du modèle MOCAGE utilisée possède

une extension verticale jusqu'à 0.1 hPa, soit environ 60 km, dont la stabilité sur de très longues périodes a ainsi été démontrée.

Les premières analyses des résultats de MOCAGE sont très satisfaisantes. En effet, l'évolution passée de la couche d'ozone est bien représentée comparativement aux observations, aussi bien en chronologie qu'en intensité. L'évolution future, et notamment la date à laquelle la couche d'ozone devrait revenir au niveau de 1980, sont cohérentes avec celles des autres modèles. Cette date est estimée seulement autour de 2050 (cf figure associée), tant l'impact des émissions de CFC est durable, puisque leur interdiction a été entérinée par le protocole de Montréal en 1987.

L'inter-comparaison des résultats des différents modèles est en cours et se poursuivra en 2023.

5

## Une nouvelle version de MOCAGE, jusqu'à 0.1 hPa

Béatrice Josse  
et la structure transverse MOCAGE

Une nouvelle version du modèle MOCAGE, modèle de Chimie-Transport développé à Météo-France, a été mise au point. Son extension verticale est passée de 47 niveaux, avec un sommet à 5 hPa soit environ 35 km, à 60 niveaux, avec un sommet à 0.1 hPa, soit environ 60 km.

Ceci permet de mieux décrire les phénomènes chimiques de la stratosphère, en particulier l'évolution de la couche d'ozone et des oxydes d'azote, très présents en haute stratosphère. La présence de ces oxydes d'azote à ces altitudes est au centre du système chimique de la zone et a nécessité de longs travaux de développements pour obtenir une description sans couture du système chimique sur l'ensemble de la troposphère et la stratosphère.

Les résultats obtenus sont de plusieurs natures. D'une part, le système chimique en tant que tel est mieux décrit sur l'ensemble du globe. En particulier, sur la figure associée, qui représente l'évolution quotidienne sur un an de la colonne totale d'ozone au-dessus de la station antarctique de Dumont d'Urville, on remarque une meilleure représentation de la chronologie des variations brutales d'ozone liées au positionnement du vortex stratosphérique et du trou d'ozone associé. D'autre part, cela a également des conséquences sur la représentation de la qualité de l'air à la surface, puisque le système chimique en tout point dépend fortement des réactions de photodissociation, elles-mêmes modulées par la quantité d'ozone au dessus de ce point. Enfin, cette extension verticale correspondant à celle du modèle de prévision numérique du temps ARPEGE pourra permettre de fournir à ce dernier des informations pertinentes d'ozone en temps réel. Ainsi, le passage en opérationnel de cette version à 60 niveaux est prévu pour l'année 2023.

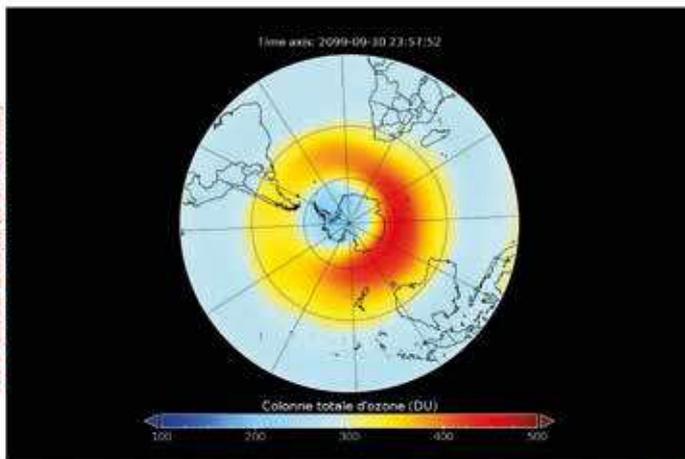
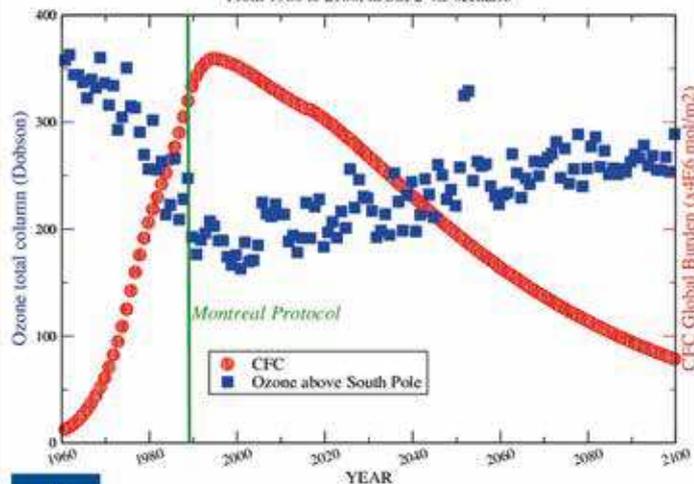
6

## MOCAGE Simulations using SSP2-4.5 scenario of IPCC

2099

### Evolution of Ozone above South Pole and global CFC burden

From 1960 to 2100, in SSP2-4.5 scenario

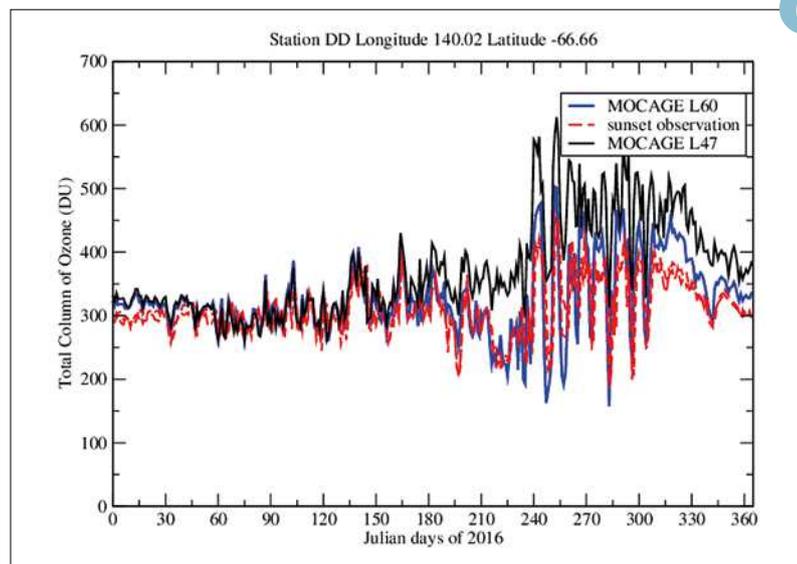


5

A gauche : Selon MOCAGE, évolution temporelle de 1960 à 2100 pour les mois d'octobre de la quantité globale de CFC (en rouge) et de la colonne totale d'ozone au-dessus du pôle Sud (en bleu). En vert est représentée la date de signature du protocole de Montréal.

A droite : Selon MOCAGE, colonne totale d'ozone au dessus du pôle Sud en Octobre 2099. Le 'trou d'ozone' n'est plus perceptible : les valeurs au cœur et à l'extérieur du vortex sont à nouveau équivalentes.

6



Évolution quotidienne sur l'année 2016 de la colonne totale d'ozone au dessus de la station antarctique de Dumont d'Urville.

En rouge, selon les observations du réseau de mesures in-situ SAOZ (<http://saoz.obs.uvsq.fr/>). En noir, selon MOCAGE dans sa version à 47 niveaux. En bleu selon MOCAGE dans sa version à 60 niveaux.

# Neige et montagne

Matériau complexe en perpétuelle évolution, mélange d'air et de glace dont la couleur blanche remplit les histoires d'hiver, la neige est un pilier du fonctionnement du système climatique terrestre. Régulateur du climat, ressource en eau, menace pour les hommes, les animaux et les infrastructures de par les avalanches, la neige interagit avec toutes les composantes de la cryosphère : glaciers, calottes, pergélisol, contrôlant ainsi en partie l'évolution de ces différents systèmes.

Météo-France, notamment le Centre d'Études de la Neige (CEN, Météo-France – CNRS, toutes les autres composantes CNRM), 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 2022, nous avons étudié en détail l'évolution de la neige sur les 40 dernières années, en particulier en lien avec les dépôts de poussières minérales sahariennes et de carbone suie. Nous avons aussi poursuivi de nombreuses études sur le changement climatique et la neige en montagne pour différentes applications, de l'exploitation des domaines skiables à la vulnérabilité des systèmes agropastoraux. L'intelligence artificielle combinée à la modélisation physique nous a permis d'ouvrir de nouvelles perspectives d'outils numériques pour la prévision du risque d'avalanche. L'observation progresse également à toutes les échelles, de l'observation satellitaire des dépôts d'avalanches qui permettra de mieux qualifier l'activité avalancheuse, à l'observation à micro-échelle par tomographie rayons-X qui nous permet de mieux comprendre son évolution sous des conditions de températures données.

## Modélisation phase-field des métamorphoses de la neige et application à l'évolution de ses propriétés physiques au cours du temps

L. Bouvet, N. Calonne, F. Flin

Une fois déposée au sol, la neige forme un matériau poreux complexe, constitué d'air, de glace et parfois d'eau liquide, qui ne cesse de se métamorphoser au cours du temps, induisant une modification significative de ses propriétés physiques, avec des conséquences importantes sur l'évolution macroscopique du manteau neigeux. Dans le cadre du projet ANR MiMESis-3D, qui porte sur l'étude de la microstructure la neige et de ses propriétés physiques à l'aide d'images 3D, et qui fédère les expertises de plusieurs laboratoires (CNRM/CEN, 3SR, INRAE/ETNA, IGE, ICJ), nous nous sommes récemment intéressés à la modélisation de la métamorphose d'isothermie (MI).

Sensiblement active par très faible gradient thermique, cette métamorphose conduit à un arrondissement et un grossissement des grains et joue un rôle crucial dans l'évolution du manteau neigeux. Basé sur l'évaluation de la courbure de l'interface air-glace, le modèle « phase-field » utilisé permet de reproduire, à partir d'images obtenues par tomographie, les évolutions caractéristiques observées lors de la MI. La description de ce type de métamorphose repose classiquement sur le coefficient de condensation, un paramètre mal contraint, qui pilote l'intensité de l'évolution. La confrontation de ce modèle à une série temporelle obtenue expérimentalement

nous a permis d'estimer la valeur à  $-2^{\circ}\text{C}$  de ce paramètre, et de la valider à l'aide d'un jeu de données indépendant. Ce modèle permet maintenant d'étudier l'effet de la MI à  $-2^{\circ}\text{C}$  sur toutes sortes de microstructures de neige afin notamment d'en déduire, par simulation numérique, son impact sur les propriétés de transport effectives de la neige (conductivité thermique, diffusivité, perméabilité...).

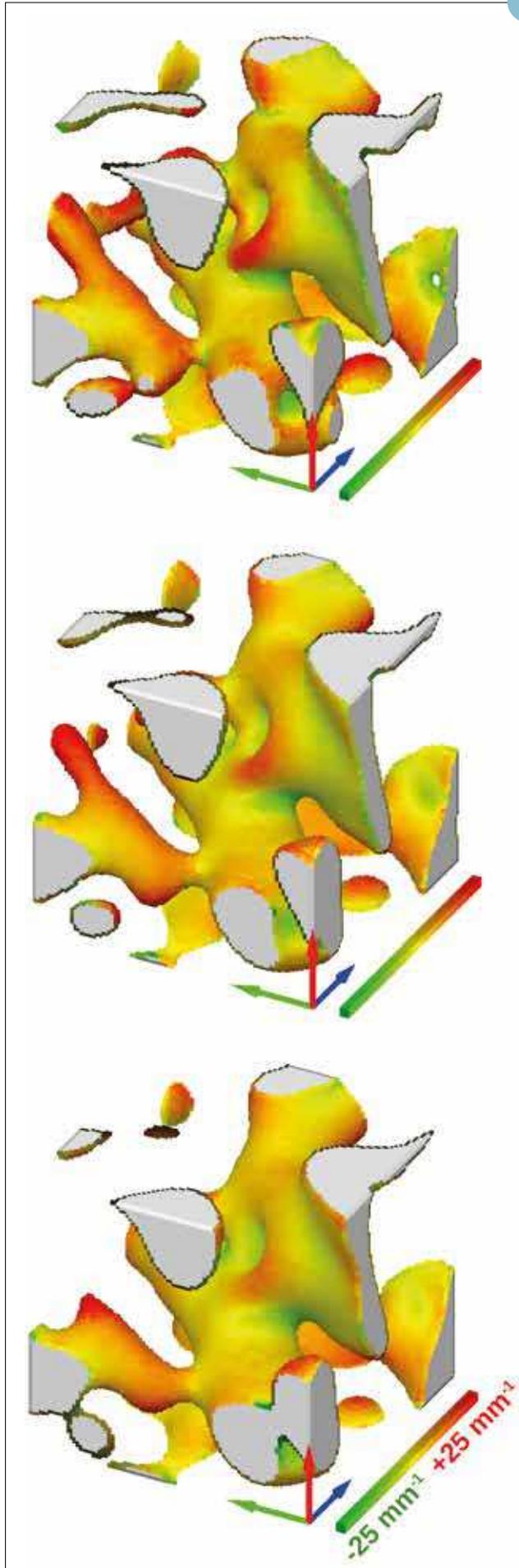
Ce travail sera prochainement étendu à d'autres métamorphoses et d'autres propriétés physiques. Il devrait ainsi fournir des outils particulièrement efficaces pour l'amélioration des modèles de manteau neigeux.

### Référence :

Bouvet, L., N. Calonne, F. Flin and C. Geindreau, 2022. Snow equi-temperature metamorphism described by a phase-field model applicable on micro-tomographic images: Prediction of microstructural and transport properties, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14(9), e2022MS002998, <https://doi.org/10.1029/2022MS002998>

Projet ANR MiMESis-3D : <https://anr.fr/Project-ANR-19-CE01-0009>





Représentation 3D d'un échantillon de neige récente soumis à une métamorphose d'isothermie.

Le modèle phase-field appliqué permet ici d'obtenir, à partir de l'image tomographique initiale (en haut), les évolutions à  $-2^{\circ}\text{C}$  de la microstructure après 8 et 16 jours.

Les surfaces convexes, représentées en rouge se subliment, tandis que les surfaces concaves, en vert, correspondent à des zones de dépôt de vapeur. Les zones planes, en jaune, évoluent relativement peu au cours du temps.

La barre d'échelle colorée mesure  $0.7\text{ mm}$ . Les flèches bleue, verte et rouge indiquent les directions  $x$ ,  $y$  et  $z$ ,  $z$  pointant vers le haut de l'échantillon.

---

# Vers des indicateurs spatialisés de l'activité avalancheuse avec Sentinel 1 (Karas et al., 2021)

A. Karas, F. Karbou

Les données SAR de Sentinel-1 ont un énorme potentiel pour identifier les zones de dépôts d'avalanche en montagnes et les méthodes classiquement utilisées dans la littérature utilisent des méthodes de seuillage simple et des indicateurs explicites expertisés. La complexité de l'interaction du signal radar avec le milieu neige et la topographie des montagnes militent pour la mise en place de méthodes statistiques avancées qui permettent de mieux gérer le flux de données volumineuses et de lier le contenu en information des observations avec les changements du milieu neige. Les liens entre observations satellites et présence de dépôt sont complexes et nécessitent de connaître plusieurs

paramètres (conditions atmosphériques influençant l'état de la neige (gel/dégel, présence d'eau...), événements précipitants (pluie, neige fraîche), nature de la neige, du sol, pente du terrain, son orientation, son altitude, ...) que l'on peut difficilement définir avec précision partout pour dériver une méthode explicite établissant l'ensemble de ces liens. Au-delà de l'identification de pixels correspondant à un dépôt, l'enjeu est de dériver de nouveaux indicateurs spatialisés de l'activité avalancheuse à l'échelle des massifs de montagne. Une méthode novatrice de segmentation a été développée pour détecter automatiquement les zones de débris d'avalanches à partir des mesures à 20m de Sentinel-1 (Karas

et al. 2022a-b). Les estimations de débris ont été évaluées avec succès à l'aide d'une base de données indépendante issues d'observations optiques SPOT-6. Par la suite, des indicateurs spatialisés de l'activité avalancheuse à l'échelle d'une zone d'intérêt (échelle des couloirs et échelle des massifs) ont été dérivés (Karas et al. 2022c). Ces lignes de débris ont été analysées et évaluées à l'aide de données d'observation in-situ et se sont avérées pertinentes pour suivre l'activité avalancheuse, en complément des données in-situ et des bulletins du risque d'avalanches à l'échelle régionale.

2

---

## Changement climatique et neige en montagne

Samuel Morin, Raphaëlle Samacoïts, Diego Monteiro, Jean-Michel Soubeyroux

Les effets du changement climatique sur les territoires de montagne sont multiples et souvent lourds de conséquences localement et autour de ces régions. Des recherches sont menées via le prisme de l'évolution de l'enneigement en montagne, et ses effets sur les risques naturels (avalanche), écosystèmes, ressources en eau et activités socio-économique (stations de sport d'hiver). En 2022, les résultats ont porté notamment sur la publication d'une synthèse des projections climatiques de l'ensemble EURO-CORDEX sur les conditions de température, de précipitations et d'enneigement dans les Alpes (Kotlarski et al., 2022). Ce travail a été mené sous l'égide de chercheurs de Météo-Suisse et du service météorologique autrichien (ZAMG). Il inclut une étude de cas sur le massif du Mont-Blanc, obtenu par l'application de la méthode d'ajustement ADAMONT appliqué aux projections EURO-CORDEX en utilisant la réanalyse SAFRAN comme base de référence. Ce travail illustre l'effet de l'altitude sur l'ampleur des effets

du changement climatique sur l'enneigement hivernal, particulièrement prononcé à basse et moyenne altitude (voir Figure). Une version mise à jour de ces projections climatiques a été mise en ligne sur le site Drias, avec un jeu étendu de simulations climatiques utilisées et l'extension aux massifs de moyenne altitude (<http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/341>). Par ailleurs, des travaux sont en cours pour analyser la valeur ajoutée de simulations réalisées avec le modèle AROME en configuration climat, qui montrent un gain de réalisme pour certaines variables tout en affichant des faiblesses dans la représentation de certains processus sur les Alpes françaises, par exemple concernant la modélisation du manteau neigeux (Monteiro et al., 2022). Ces recherches s'inscrivent également dans un cadre interdisciplinaire et en amont du développement de services climatiques à l'instar du service ClimSnow. Par exemple, un travail a été conduit en collaboration

avec INRAE sur l'évolution des conditions hydroclimatiques et d'enneigement des alpages dans les Alpes, permettant de mieux apprécier la vulnérabilité des systèmes agropastoraux à l'évolution du climat (Deléglise et al., 2022). Dans le domaine du tourisme hivernal, le travail mené dans le cadre de la thèse de Lucas Berard-Chenu, co-encadré à INRAE Grenoble et au CEN, a permis de quantifier l'évolution passée de l'enneigement dans 16 stations de Savoie, en tenant compte de l'évolution de leur taux de couverture en production de neige. Ce travail met en évidence la grande hétérogénéité d'équipement et d'effet de la production de neige sur les conditions d'exploitation des domaines skiables (Berard-Chenu et al., 2022a). Ces travaux contribuent à alimenter les réflexions sur les transitions des territoires de montagne dans le contexte de l'évolution climatique, y compris les risques de maladaptation (Berard-Chenu et al., 2022b).

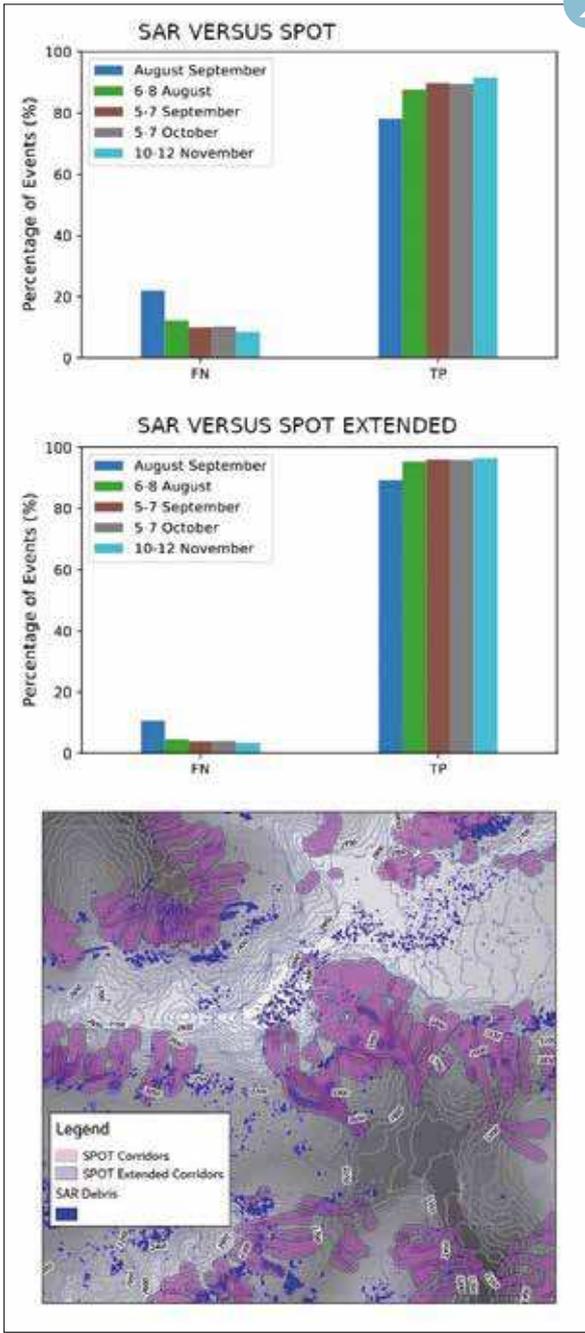
3

### Référence :

- Berard-Chenu, L., François, H., George, E., and Morin, S.: Past changes in natural and managed snow reliability of French Alps ski resorts from 1961 to 2019, *The Cryosphere*, 16, 863–881, <https://doi.org/10.5194/tc-16-863-2022>, 2022a.
- Berard-Chenu, Lucas, Hugues François, Samuel Morin et Emmanuelle George, The deployment of snowmaking in the French ski tourism industry: a path development approach, *Current Issues in Tourism*, <https://dx.doi.org/10.1080/13683500.2022.2151876>, 2022b.
- Deléglise, C., François, H., Dodier, H., Crouzat, E., Samacoïts, R., Morin, S., Bray, F. and Nettier, B., Agro-climatic profiles of summer mountain pastures in the French Alps : towards a monitoring tool to contribute to climate risk assessment. *Agron. Sustain. Dev.*, 42, 40, <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00776-6>, 2022.
- Kotlarski, S., Gobiet, A., Morin, S., Olefs, M., Rajczak, J. and Samacoïts, R., 21st Century alpine climate change, *Clim Dyn.*, <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06303-3>, 2022.
- Monteiro, D., Caillaud, C., Samacoïts, R., Lafaysse, M., and Morin, S., Potential and limitations of convection-permitting CNRM-AROME climate modelling in the French Alps, *Int. J. Climatol.*, <https://doi.org/10.1002/joc.7637>, 2022.

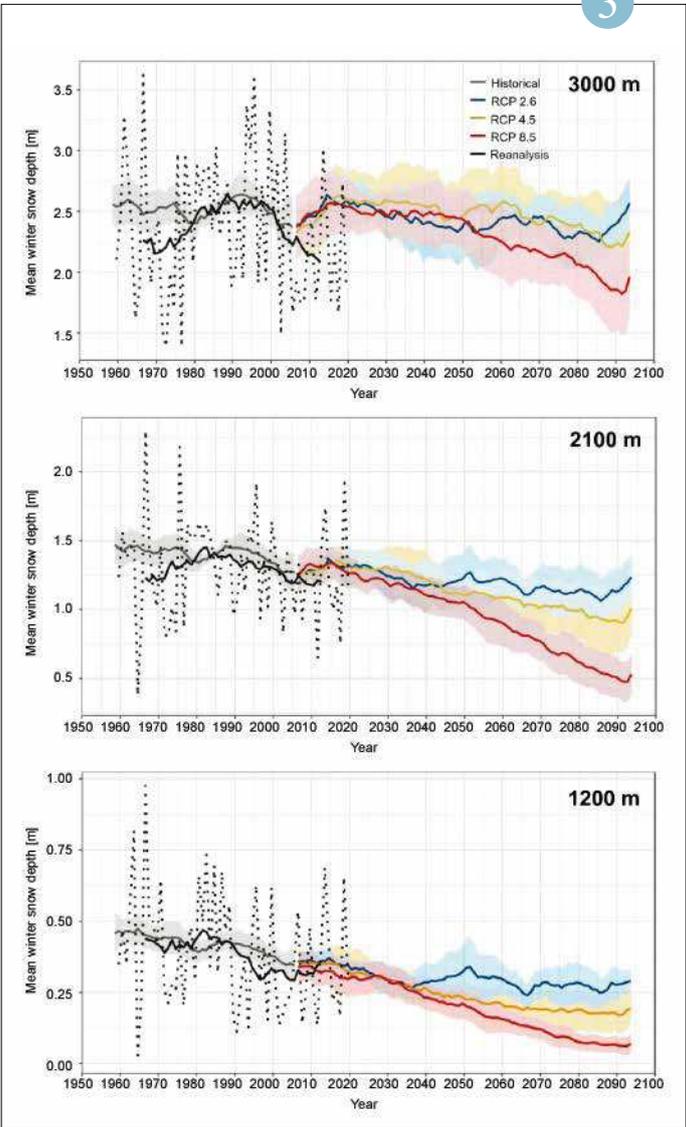
3

2



▲ Pourcentage de détection des événements avalanches TP (True Positive : détection SAR correspond à un couloir observé dans l'image SPOT) et FN (False Negative : pas de détection SAR dans les couloirs SPOT) en utilisant l'orbite ascendante SAR de janvier 2018 sur une partie de la Suisse (en utilisant différents paramétrage de la méthode de détection en faisant varier les dates de référence).  
 Les valeurs TN et TP sont calculées par rapport aux avalanches cartographiées par SPOT (en haut) et avec l'ajout d'une zone tampon de 50m autour des couloirs SPOT (en bas). La carte illustre un exemple sur une partie de la zone d'étude en montrant les couloirs d'avalanches observés par SPOT ainsi que les zones de dépôt détectées par Sentinel-1.

3



▲ Évolution de l'enneigement dans le massif du Mont-Blanc à trois altitudes (3000 m, 2100 m et 1200 m d'altitude), de 1950 à 2100. La ligne pointillée correspond aux valeurs annuelles de l'épaisseur moyenne de la neige en hiver (nov.-avr.). La ligne noire continue montre la moyenne mobile correspondante sur 15 ans. Les lignes grises (historiques) et colorées (projections futures) correspondent à la moyenne multimodèle (entourée d'un écart type) des valeurs pluriannuelles sur 15 ans de tous les couples GCM/RCM disponibles pour chaque RCP.

---

# Le rôle des poussières et du carbone suie dans l'impact du réchauffement climatique sur l'enneigement

Marie Dumont et Marion Réveillet

Les particules telles que le carbone suie (résidus de combustion) et les poussières sahariennes assombrissent le manteau neigeux lorsqu'elles se déposent à sa surface. Par conséquent, une plus grande proportion de l'énergie solaire est absorbée par la neige, ce qui en accélère la fonte au printemps. Toutefois, le rôle de ces dépôts sur la dynamique annuelle de l'enneigement et les tendances climatiques de la durée d'enneigement est encore mal connu. En combinant des observations in-situ du manteau neigeux, des observations par satellites, et de la modélisation détaillée du manteau neigeux, nous avons quantifié cet effet sur la durée d'enneigement des Alpes françaises et des Pyrénées pour les

40 dernières années. Les résultats montrent que les dépôts de carbone suie et de poussières sahariennes avancent la date de fin de la période enneigée annuellement d'en moyenne 17 jours.

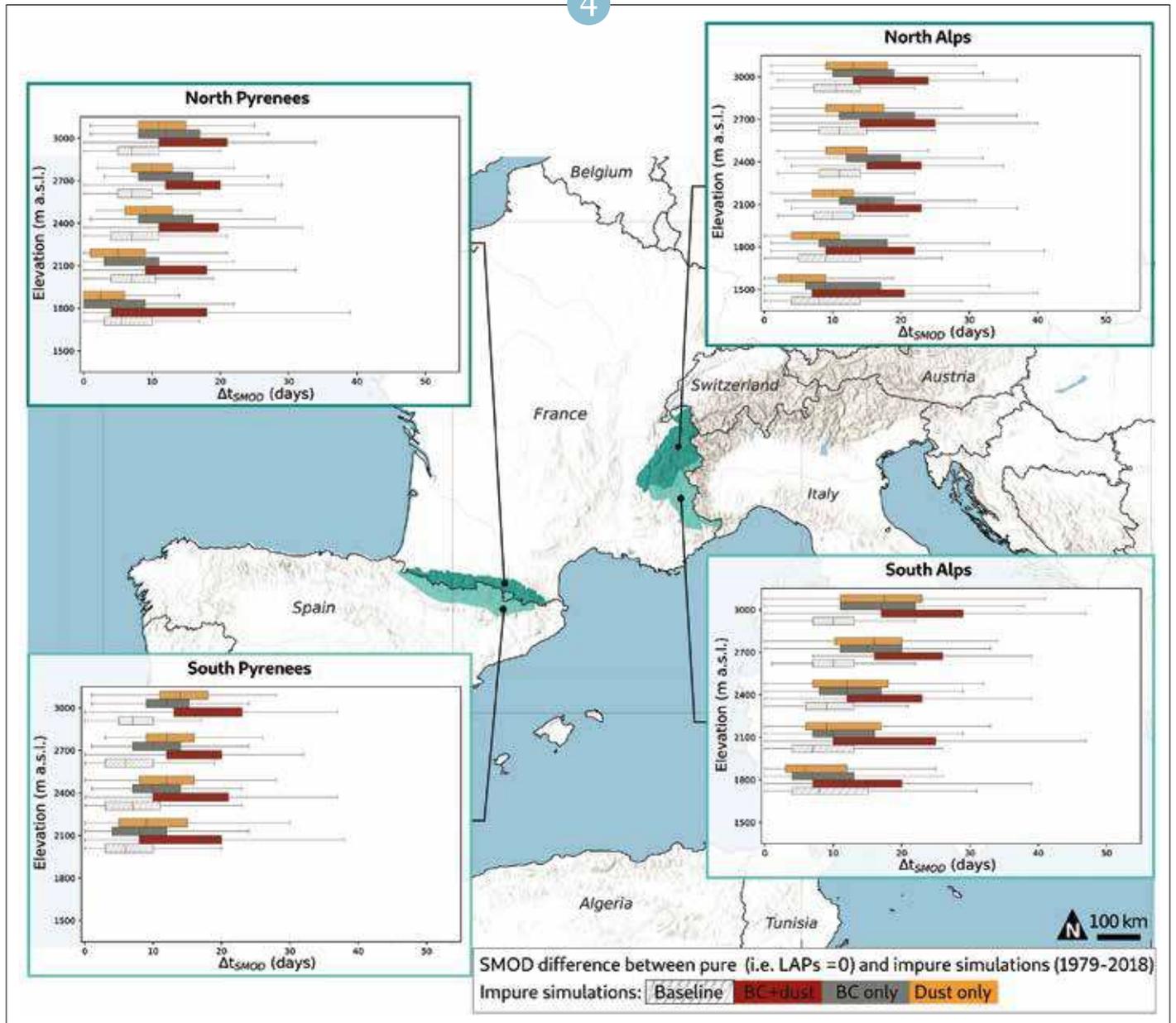
Bien que ces particules accélèrent la fonte et diminuent la durée d'enneigement annuelle, on constate que les dépôts de carbone suie, moins importants aujourd'hui, accélèrent donc moins la fonte annuelle que dans les années 1980. À l'inverse, la diminution de la couverture neigeuse est plus prononcée aujourd'hui qu'il y a 40 ans, principalement en raison de la hausse des températures liées au changement climatique. Ainsi, la diminution des dépôts de carbone suie depuis 40 ans compense en partie l'effet

du changement climatique sur la durée d'enneigement. Le raccourcissement de la durée d'enneigement liée au changement climatique actuel serait donc encore plus prononcé sans la diminution des dépôts de carbone suie depuis les années 1980. En revanche, bien que les dépôts de poussières désertiques influencent la durée de l'enneigement annuel, ils n'ont pas non plus d'effet détectable sur la tendance de long terme de la durée de l'enneigement.

Les changements futurs des dépôts de carbone suie liés aux activités humaines doivent donc être considérés pour évaluer l'évolution de la couverture neigeuse dans les décennies à venir.

## Référence :

Réveillet, M., Dumont, M., Gascoin, S. et al. [Black carbon and dust alter the response of mountain snow cover under climate change](https://doi.org/10.1038/s41467-022-32501-y). *Nat Commun* 13, 5279 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32501-y>



▲ Raccourcissement de la durée d'enneigement lié au dépôt de carbone suie et de poussière minérale en fonction de la région et de l'altitude. Le raccourcissement est estimé par le décalage de la date de disparation du manteau neigeux (Snow Melt Out Date, SMOD).

---

# Prévision de l'activité avalancheuse par analyse mécanique de la stabilité du manteau neigeux et machine learning

Léo Viallon-Galinier, Pascal Hagenmuller, Benjamin Reuter

Les avalanches représentent une préoccupation pour les habitants et les pratiquants de la montagne ainsi que pour les gestionnaires d'infrastructures dans ces régions. Pour limiter les impacts, Météo-France a pour mission d'éditer des bulletins d'estimation du risque d'avalanche et d'assurer la production de la vigilance avalanche. Pour ce faire, les prévisionnistes peuvent s'appuyer sur différents réseaux d'observation, ainsi que sur la modélisation de la stratigraphie du manteau neigeux développée au Centre d'Études de la Neige (CNRM, Grenoble). Il peut toutefois être difficile d'interpréter ces simulations en termes de stabilité et de les synthétiser en une information sur l'activité avalancheuse attendue.

Sur la base des connaissances des processus mécaniques à l'œuvre dans la formation des avalanches, une nouvelle méthode d'analyse de stabilité a été développée pour réduire

et mieux exploiter l'information produite par les modèles numériques de manteau neigeux. Cette analyse s'appuie sur des indices de stabilité relatifs aux différents processus de la formation des avalanches. Une prévision de l'activité avalancheuse attendue est ensuite réalisée en croisant l'ensemble de ces informations de stabilité (complétée d'informations nivologiques et météorologiques) à l'aide d'un algorithme d'apprentissage statistique de type random forest. Cela permet de calibrer le résultat sur l'observation des phénomènes avalancheux passés issus du réseaux d'observateurs nivo-météorologiques de Météo-France et de l'Enquête Permanente Avalanche (EPA, ONF - INRAE). La prévision est réalisée à haute résolution spatiale, par bande d'altitude et d'orientation.

Une évaluation approfondie des résultats du modèle permet de montrer une probabilité d'identification des situations avalancheuses

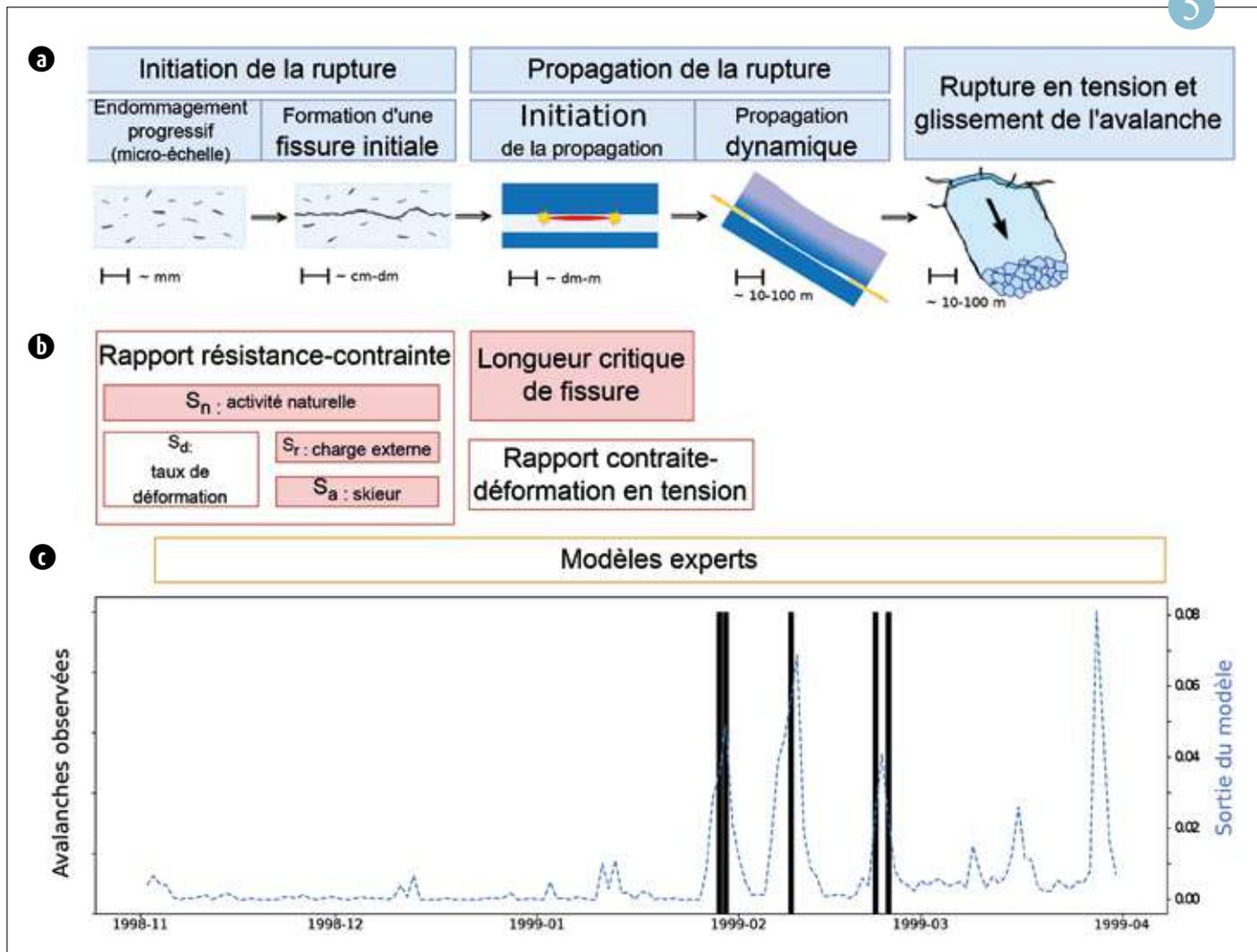
de 75% et une probabilité d'identification des situations non avalancheuses de 76%. La plus-value apportée par les indices de stabilité a été démontrée par rapport à un apprentissage s'appuyant sur uniquement sur des variables nivo-météorologiques plus traditionnelles. Les résultats, initialement produits sur la Haute-Maurienne sont en cours d'extension à d'autres régions des Alpes et des Pyrénées.

Ces travaux ouvrent des perspectives pour le développement de nouveaux outils d'aide à la décision pour les prévisionnistes en charge de la rédaction des bulletins en zone de montagne ainsi que pour la vigilance avalanche.

## Référence :

Léo Viallon-Galinier, Pascal Hagenmuller, Benjamin Reuter et Nicolas Eckert. Modelling snowpack stability from simulated snow stratigraphy: Summary and implementation examples. *Cold Regions Science and Technology*, 201, pp. 103596, 2022. doi: 10.1016/j.coldregions.2022.103596.

Léo Viallon-Galinier. 2022. Apport croisé de la modélisation physique et de l'apprentissage automatique pour la prévision du risque d'avalanches, PhD thesis, Université Toulouse III - Paul Sabatier. <https://www.theses.fr/s295176>



(a) processus impliqués dans la formation des avalanches et (b) indices de stabilité associés à chaque processus. Sont surlignés les indices de stabilité retenus pour être utilisés dans l'approche d'apprentissage. (c) Exemple de prédiction réalisée par le modèle random forest pour la Haute-Maurienne à 2400m en Nord-Ouest sur l'année 1998-1999. La sortie est comparée aux observations d'avalanche (barres noires) de l'Enquête permanente avalanche.

# Météorologie instrumentale et observations

Si la campagne PANAME, amplement présentée au début de ce rapport, a été au cœur des activités de Météo-France durant l'été 2022, l'année dans son ensemble a été très riche sur le volet observationnel. Pour SAFIRE<sup>1</sup> tout d'abord, l'année fut placée sous le signe de l'Arctique. L'ATR 42 est en effet allé se frotter aux hautes latitudes par deux fois, pour une campagne dédiée à la mesure des isotopes de l'eau dans les masses d'air dans un premier temps, puis pour étudier les tempêtes et leurs interactions avec la glace de mer. Plus au Sud, 2022 fut aussi l'été de tous les records en termes de température. La Méditerranée n'y a pas échappé, avec une vague de chaleur océanique sans précédent, que des observations satellites ont permis de caractériser en détail. Les données dites opportunes continuent également de faire l'objet d'une attention particulière à Météo-France, par exemple avec l'utilisation des liens commerciaux micro-ondes des opérateurs téléphoniques pour estimer l'intensité des précipitations. Plus conventionnels, les radars du réseau ARAMIS<sup>2</sup>, en plus des précipitations, permettent d'estimer la vitesse du vent. Cette estimation devient néanmoins incertaine pour des vitesses élevées, c'est pourquoi une nouvelle méthode a été mise en place pour améliorer la qualité des estimations dans de telles conditions. Enfin les radars ne sont pas sensibles qu'aux conditions météorologiques. Les oiseaux aussi réfléchissent le signal, ce qui permet aujourd'hui de suivre les grandes routes de migration, et contribuera peut-être à l'avenir à anticiper ces déplacements et à réduire par exemple l'impact des activités anthropiques sur ces populations d'oiseaux.

1. Service des avions français instrumentés pour la recherche en environnement

2. Application Radar à la Météorologie Infra-Synoptique

## L'ATR42 de Météo-France : un laboratoire volant au service de la recherche arctique

Jean-Christophe Canonici, Aurélien Bourdon

Du 21 mars au 10 avril 2022, la campagne ISLAS<sup>1</sup> financée par l'ERC<sup>2</sup> visait à mieux décrire le cycle de l'eau à l'échelle d'une région nordique en caractérisant la vapeur d'eau par sa composition isotopique, pour en améliorer la représentation dans les modèles climatiques et une meilleure prévision du climat futur. L'ATR42 de Météo-France basé à Kiruna, en Suède, constituait le principal outil d'investigation pour tracer le voyage des molécules d'eau depuis leur évaporation sur l'océan arctique jusqu'à sa précipitation sur la banquise.

Du 4 au 26 août 2022, la campagne THINICE financée par l'ONR<sup>3</sup>, le Cnes<sup>4</sup>, le CNRS<sup>5</sup> et le Nerc<sup>6</sup> traquait les dépressions arctiques et les processus nuageux associés ainsi

que leur interaction avec la banquise. Il embarquait en particulier la plateforme de télédétection RALI composée entre autres d'un radar Doppler à nuages et d'un lidar à haute résolution, ainsi qu'un radiomètre infra-rouge. La représentation de ces phénomènes-clés pour la fonte des glaces de mer en été est primordiale et doit être améliorée. L'équipe de Safire opérait l'ATR42 depuis le Svalbard.

Ces deux campagnes ont mobilisé les moyens de l'unité Safire au-delà du cercle polaire arctique. Ces projections d'une base opérationnelle à plusieurs milliers de kilomètres de Franczal, des conditions météorologiques parfois très rudes et un environnement aéronautique spécifique

ont nécessité une préparation soignée et une grande rigueur dans l'exécution des missions.

1. Responsable scientifique : H. Sodemann, Univ. Bergen

2. European Research Council

3. Office of Naval Research, USA

4. Centre national d'études spatiales, France

5. Centre national de la recherche scientifique, programme LEFE de l'Institut national des sciences de l'Univers, France, projet Cyclonice

6. Natural Environmental Research Council, Royaume-Uni



1



## Caractérisation de la vague de chaleur océanique en Méditerranée pendant l'été 2022 à travers les observations satellites

T.Guinaldo, F.Vergneault, S.Somot, S.Saux Picart, H.Roquet

La Méditerranée a subi une vague de chaleur océanique particulièrement intense au cours de l'été 2022. Dans le cadre du projet OSI SAF piloté par Météo-France et financé par EUMETSAT, des techniques sont développées pour estimer les températures de surface de la mer à partir des données satellites. Afin d'identifier la réponse des températures de surface de la mer aux conditions synoptiques exceptionnelles de l'été une étude a été menée sur la caractérisation des températures de surface de la mer des différents littoraux français avec un focus accentué sur la Méditerranée.

L'analyse des températures de surface de la mer en Méditerranée (figure 1) montre une anomalie saisonnière moyenne, entre Juin et Août, de 2°C plus chaude par rapport à la climatologie sur la période 1982-2011 avec une température maximale de 30.8°C observée le 4 août 2022 dans le Golfe du Lion. Cette longue séquence de températures de surface de la mer élevées s'est manifestée par des anomalies journalières de l'ordre de

3°C au cours de l'été et l'apparition de vagues de chaleurs marines.

Les vagues de chaleur marines sont bien connues et régulièrement observées en mer Méditerranée depuis de nombreuses années. Cependant la vague de chaleur marine de 2022, qui a débuté le 25 juin 2022, est exceptionnelle par son intensité moyenne (+2.8°C). Elle constitue un record absolu autant par sa durée (59 jours au total sur l'été) que par son intensité maximale (+3.6°C) et les impacts forts, déjà rapportés, de cet évènement sur les écosystèmes marins côtiers.

La réponse des surfaces océaniques à ces vagues de chaleur démontre la nécessité d'engager des efforts sur les projets de développement d'un système couplé océan-atmosphère intégrant systématiquement les mesures satellites pour anticiper les modifications menaçant les océans et les écosystèmes marins dans le contexte de changement climatique.

2

## Quantifier et anticiper la migration des oiseaux à l'aide des mesures radar pour limiter la mortalité induite par les installations éoliennes

T. Désert, J. Figueras i Ventura, T. Nicolau

Afin de réduire la perte de biodiversité due à l'expansion mondiale du secteur de l'énergie éolienne, la diminution des risques des projets de parcs éoliens est un enjeu majeur. Des milliards d'oiseaux traversent chaque année la France pour rejoindre des habitats optimaux selon la saison. Ces mouvements migratoires sont très complexes à tracer, encore plus au-dessus de la mer que sur terre. Ainsi, un outil précis de détection des oiseaux est un enjeu stratégique pour la planification des projets et l'émission d'alertes de passage imminent d'oiseaux migrateurs. Les radars météorologiques captent toute cible rétrodiffusant son impulsion électromagnétique : cela va des précipitations aux oiseaux migrants. Un réseau de radars météorologiques offre donc la possibilité d'étudier et de quantifier la biomasse sur de longues périodes.

Le projet SEMAFOR réunit les institutions France Énergie Marine, Météo-France, Biotope et la Station ornithologique suisse. Son ambition est de développer un observatoire en temps réel des oiseaux migrants à haute résolution à partir du

réseau de radars météorologiques français, et de proposer un outil de prévision des passages migratoires.

Dans un premier temps, les algorithmes existants de détection des oiseaux seront adaptés aux données brutes du réseau de radars météorologiques exploité par Météo-France et calibrés avec les radars ornithologiques de Biotope. Une fois l'algorithme validé, la localisation spatiale et l'évolution temporelle des mouvements migratoires seront étudiées à l'échelle nationale pendant un cycle de vie complet. Dans un second temps, un modèle prédictif de la probabilité de passage des oiseaux migrants sera développé par la Station ornithologique suisse. Ce modèle tiendra compte des mesures en temps réel des radars météorologiques, mais aussi des paramètres météorologiques et environnementaux locaux et des obstacles orographiques, ainsi que de la connaissance des principales voies de migration.

4

## Utilisation des liens commerciaux micro-ondes pour estimer les précipitations

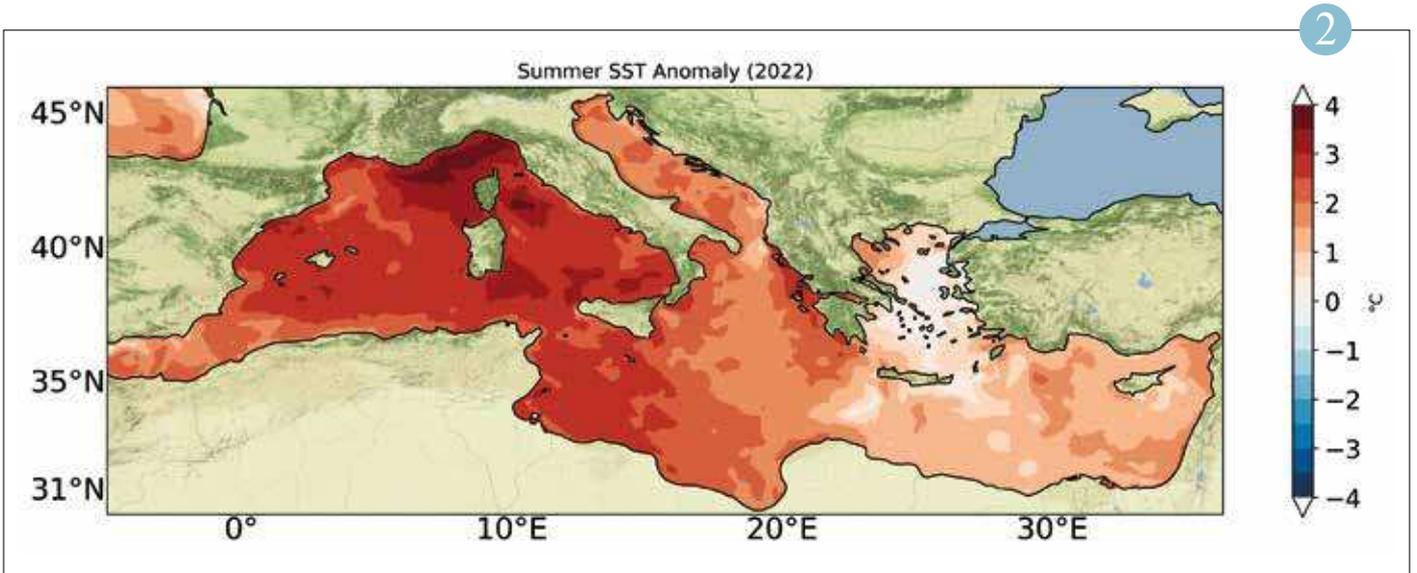
Dominique Faure

Ce projet nommé Raincell s'insère dans le cadre des actions de Météo-France pour exploiter des données dites opportunes, afin de compléter les réseaux de mesures standards existants, et renforcer les produits de fusion de données.

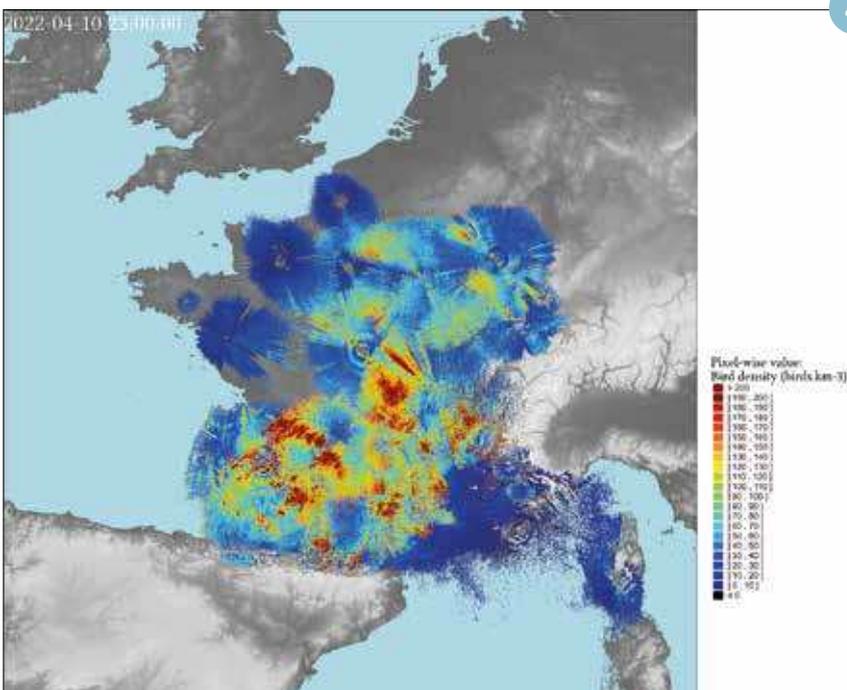
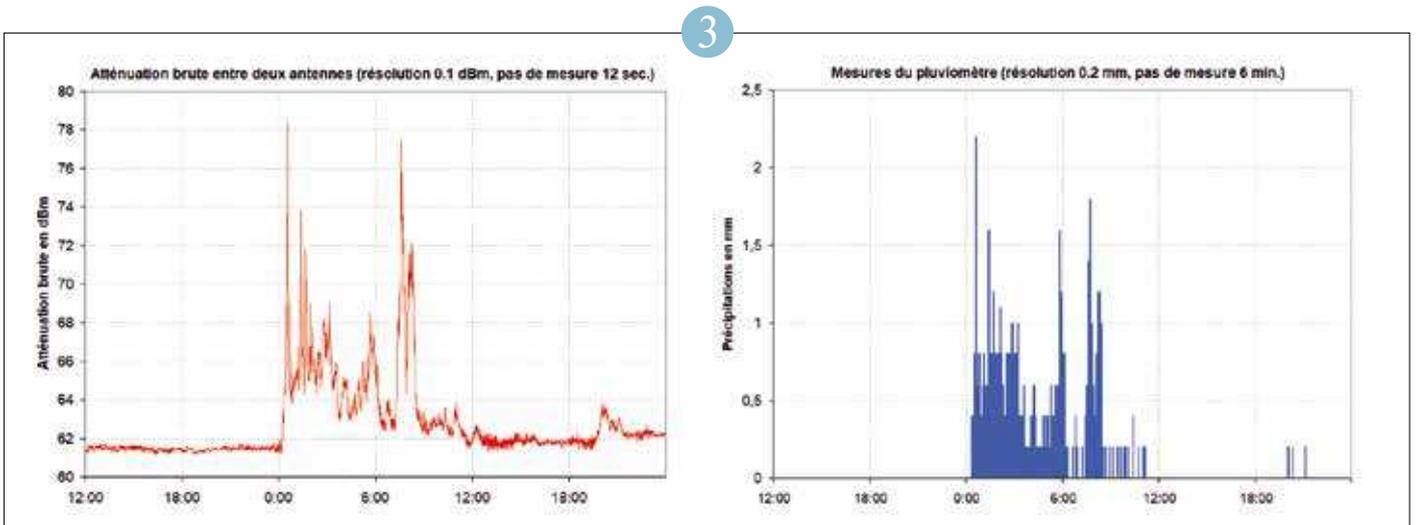
La possibilité d'estimer les précipitations à partir des perturbations enregistrées par les réseaux hertziens des opérateurs de téléphonie mobile a été démontrée par différentes équipes internationales. La méthode repose sur l'estimation de l'atténuation du signal entre deux antennes relai qui constituent un lien micro-onde commercial (CML). L'atténuation étant liée au taux de précipitation rencontré par le signal au cours de son trajet entre les deux antennes, il est possible à partir de l'atténuation totale sur la longueur du lien, d'estimer l'intensité moyenne des précipitations liquides sur la longueur de ce lien.

En 2022, Météo-France a finalisé la signature d'un contrat avec Orange, et d'un contrat de collaboration avec l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), afin de collecter et traiter en quasi temps réel les données de plus de 4200 liens CML d'Orange disponibles en métropole et outre-mer. Un concentrateur de données dédié a été développé par Orange, et un flux temps réel de données a été établi fin novembre 2022 entre les installations d'Orange et Météo-France. En 2023 le travail portera sur le développement et la validation d'une chaîne logicielle traitant ce flux de données, afin d'obtenir des estimations de pluie exploitables opérationnellement à partir des mesures d'atténuations brutes, en bénéficiant de l'expérience acquise par l'IRD dans ce domaine.

3



▲ Anomalie saisonnière de températures de surface de la mer (TSM) en Méditerranée pour la période Juin-Août 2022. La climatologie est calculée sur la période 1982-2011.



▲ Comparaison sur un événement pluvieux les 23 et 24 octobre 2022. En haut, atténuation brute observée pour un lien de 23 GHz, de longueur 4 km, avec une précision de 0.1 dBm, et un pas de mesure de 12 secondes. En bas, mesure du pluviomètre situé près du centre de ce lien, précision 0.2 mm, pas de 6 minutes.

▲ 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 représentent un secteur de 1kmx1km au sol.

---

## Amélioration de la qualité des données Doppler par la correction des erreurs de dépliement

Tony Le Bastard

L'estimation de la vitesse Doppler se fait grâce à la mesure du déphasage entre deux impulsions radar successives. Le déphasage maximal entre 2 ondes étant de  $\pm\pi$ , la vitesse maximale directement mesurable ne peut excéder  $\pm V_N$ , la vitesse de Nyquist (environ 3 à 8 m.s<sup>-1</sup> pour les radars du réseau ARAMIS). Pour des vitesses observées supérieures, la vitesse mesurée sera donc « repliée » dans l'intervalle  $\pm V_N$ .

Pour « déplier » la vitesse mesurée et ainsi retrouver la vitesse réelle, Météo-France s'appuie sur un schéma triple-PRT (Tabary et al., 2006). L'utilisation de 3 fréquences d'émissions entremêlées, avec chacune sa propre vitesse de Nyquist, permet d'obtenir

3 mesures distinctes. En testant les différents dépliements possibles d'une des vitesses mesurées et en exploitant les deux autres mesures, il est possible de restituer des vitesses jusqu'à  $\pm 60$  m.s<sup>-1</sup>. Toutefois, des erreurs de dépliements peuvent survenir, principalement en raison du bruit dans les 3 vitesses mesurées.

Pour traiter ces erreurs, une nouvelle méthode a été développée. Les erreurs sont tout d'abord identifiées en comparant les valeurs en chaque pixel avec un ensemble de médianes calculées à partir des pixels du voisinage. Si le pixel s'éloigne trop de ces médianes, il est considéré comme étant affecté par une erreur. Puis, sachant que

l'erreur commise est un multiple de  $2V_N$ , on corrige la valeur jusqu'à se rapprocher au plus près de la médiane du voisinage.

Cette méthode de correction permet d'obtenir un champ bien moins bruité tout en conservant un bon niveau de détail par rapport à l'application d'un simple filtre médian (figure). Elle sera déployée en opérationnel dans une nouvelle version de SERVVAL courant 2023.

### Référence :

Tabary, P., Guibert, F., Perier, L., & Parent-du-Chatelet, J. (2006). An operational triple-PRT Doppler scheme for the French radar network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23(12), 1645-1656.

5

---

## Analyse de l'éruption volcanique exceptionnelle du Hunga Tonga survenue le 15 janvier 2022

Jean-Marie Lalande, Jérôme Vidot, Samuel Morin

L'éruption explosive du volcan sous-marin Hunga Tonga, le 15 janvier 2022 a engendré plusieurs phénomènes atmosphériques et géophysiques exceptionnels. C'est en particulier ce que révèle une étude internationale menée par une équipe de 76 scientifiques de 17 pays, à laquelle ont participé deux chercheurs du CNRM (Centre d'Etudes en Météorologie Satellitaire, Lannion). Les travaux compilés dans un laps de temps très court, détaillent l'ampleur des ondes provenant de l'éruption, qui, selon les auteurs, sont comparables à celles du Krakatoa (Indonésie), survenue en 1883, il y a plus d'un siècle. Les données fournissent une résolution et une couverture du champ d'ondes en évolution sans commune mesure par rapport à ce qui était disponible à l'époque. L'article, publié dans la revue Science, est le premier compte rendu complet des ondes atmosphériques générées par l'éruption.

Cette vaste étude analyse l'explosion volcanique, la plus puissante enregistrée depuis le siècle dernier, en faisant appel à divers réseaux d'instruments terrestres et

spatiaux : sismomètres, microbaromètres, hydrophones, GNSS (Global Navigation Satellite System), bouées DART, satellites météorologiques.

Les premiers éléments suggèrent qu'une éruption survenue le 14 janvier a fait descendre l'évent principal du volcan sous le niveau de la mer, amorçant l'explosion massive survenue le lendemain. L'éruption du 15 janvier a généré une grande variété d'ondes atmosphériques, y compris des bangs entendus à 10 000 km de distance en Alaska. Elle a également créé une impulsion qui a provoqué l'apparition inhabituelle d'une perturbation ressemblant à un tsunami une heure avant le début du véritable tsunami d'origine sismique.

Les scientifiques se sont intéressés aux ondes générées par cette éruption majeure, entre autres : les ondes sonores et infrasonores, les ondes de Lamb, etc. Les signatures ionosphériques de la plupart de ces ondes ont également été observées à l'aide des satellites GNSS. Les résultats publiés exploitent la synergie entre différentes technologies de mesures pour

étudier des phénomènes rarement observés (notamment l'onde de Lamb). L'analyse du couplage dynamique des ondes générées aux interfaces océan-terre-atmosphère permet de mieux caractériser la source éruptive du Hunga ainsi que la réponse impulsionnelle de l'enveloppe fluide planétaire à une éruption d'une intensité exceptionnelle. Cette étude met également en évidence les nouvelles méthodes d'investigation géophysiques et leurs apports combinés pour caractériser le mécanisme et les conséquences à court terme de l'éruption de ce volcan.

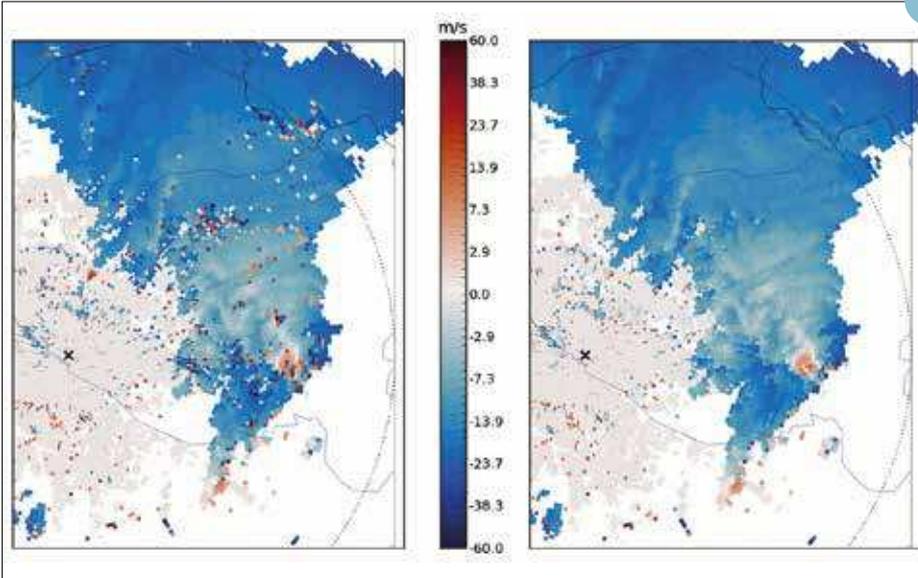
Le CNRM a également participé à la coordination et la rédaction d'une synthèse des enseignements scientifiques tirés de cette éruption, sous la forme d'une note inter-organisme réalisée sous l'égide du Groupe Thématique « Atmosphère » d'AllEnvi, rendue publique fin 2022 : <https://www.allenvi.fr/note-inter-organismes-sur-leruption-explosive-du-volcan-hunga-tonga/>

### Référence :

Matoza et al., Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga, Science, <https://doi.org/10.1126/science.abo7063>, 2022.

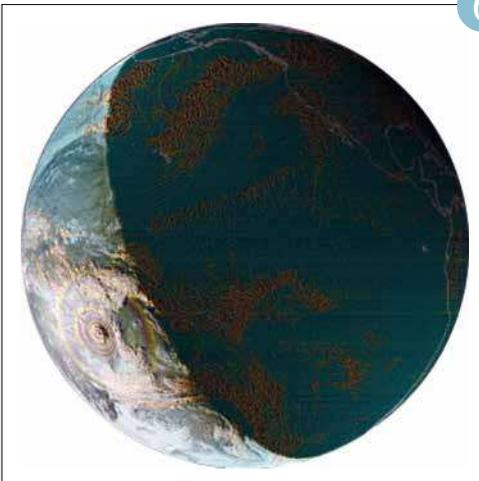
6

5



◀ Vitesses radiales avant et après correction des erreurs de dépliements lors du passage d'une tornade au-dessus de Bihucourt le 23/10/2022 à 16h15 UTC. Radar d'Abbeville à l'élévation 0.4°.

6



◀ Ondes générées par l'éruption du Hunga Tonga superposées à la composition colorée en vraie couleur vue par le satellite géostationnaire GOES-17

# Science Ouverte, Ethique scientifique, Médiation scientifique

La science ouverte, l'éthique scientifique et la médiation scientifique sont des enjeux importants pour les activités de recherche conduites à Météo-France.

La science ouverte, c'est l'idée que les produits de la recherche scientifique doivent être disponibles, gratuitement pour la recherche publique, facilement identifiables, accessibles à tous et réutilisables, sans restriction ni barrière financière. Les entités de recherche de Météo-France mettent en œuvre de façon croissante les principes de la science ouverte, qu'il s'agisse de favoriser l'accès aux publications scientifiques au travers d'une nouvelle politique de publications scientifiques (principes « open access »), l'accès aux données de recherche selon les principes FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*), et le développement collaboratif des codes informatiques, l'inclusion des préceptes de la science reproductible. Ces principes sous-tendent le 2ème Plan National Science Ouverte 2021-2024 et sont déclinés de façon croissante dans les organismes de recherche dont Météo-France.

Par ailleurs, en 2022, Météo-France s'est doté d'un référent à l'intégrité scientifique, en vertu des dispositions de la loi de programmation de la recherche pour les années 2021 à 2030. Celle-ci contient un nouvel article concernant les exigences de l'intégrité scientifique, qui visent à garantir le caractère honnête et scientifiquement rigoureux des activités de la recherche publique, et à consolider le lien de confiance avec la société. Elles s'appliquent à tous les établissements publics contribuant au service public de la recherche, dont Météo-France. Ces exigences concernent notamment la formation et la sensibilisation des personnels, la promotion des pratiques de la science ouverte en termes de publications scientifiques et de mise à disposition des données et des codes sources associés aux résultats de recherche, la prévention et la détection des manquements à ces exigences, ainsi que l'instruction des signalements reçus.

Enfin, la médiation scientifique des activités de recherche de Météo-France est essentielle, qui vise à rendre accessible au grand public les résultats de ses recherches et à promouvoir la culture scientifique. Les personnels des entités de recherche de Météo-France ont participé en 2022 à plusieurs événements de communication et de sensibilisation, notamment la Nuit européenne des chercheurs en septembre 2022, mais aussi la Fête de la science, le Festival Toulouse Innovante et Durable etc. Dans un autre registre, des personnels de Météo-France ont participé à l'ouvrage « Tout comprendre, ou presque, sur le climat », paru en mars 2022. Cet ouvrage graphique coordonné par le CNRS rend compte de ce que l'on sait vraiment sur le changement climatique, de la manière dont ont été construites ces connaissances, et détricote certaines idées reçues.

## La nouvelle politique de publications scientifiques à Météo-France

S. Morin

En 2022, Météo-France s'est doté d'une politique pour ses publications scientifiques. Les publications scientifiques jouent un rôle essentiel pour la diffusion de connaissances scientifiques, issues de recherches ou de développements techniques, et sont régies par un processus vertueux de relecture par les pairs et de description robuste des méthodes et résultats obtenus. La politique de Météo-France stipule que les publications scientifiques doivent répondre aux impératifs de l'accès ouvert (open access), conformément aux objectifs du Plan National pour la Science Ouverte et en cohérence avec la Loi pour une République Numérique. Deux options sont possibles : publier dans des revues donnant directement accès gratuitement au contenu des articles (« voie dorée », Gold Open Access) ou publier dans

des revues traditionnelles à accès payant aux articles ou hybrides, et placer le texte de l'article accepté (non mis en forme par la revue) sur un site de dépôt (« voie verte », Green Open Access).

La procédure stipule que le principe retenu en premier lieu est de privilégier les publications dans les revues nativement Gold Open Access, ou à défaut d'utiliser l'approche Green Open Access.

Le site de dépôt choisi pour l'ensemble des publications de Météo-France est l'archive ouverte pluridisciplinaire HAL (<https://hal.science/>), qui dispose d'un sous-domaine spécifique pour les productions de Météo-France (<http://hal-meteofrance.archives-ouvertes.fr/>). Cette archive ouverte rassemble l'ensemble des publications des organismes scientifiques nationaux et permet d'accéder

directement aux publications co-signées par une personne membre d'une entité dépendant de Météo-France, par son portail dédié.

Cette nouvelle politique, et les procédures associées, permet de faciliter la dissémination des résultats scientifiques et de recherche des entités de Météo-France, et contribuer ainsi à la visibilité et la crédibilité scientifique de l'organisme, garante de la qualité de ses productions.



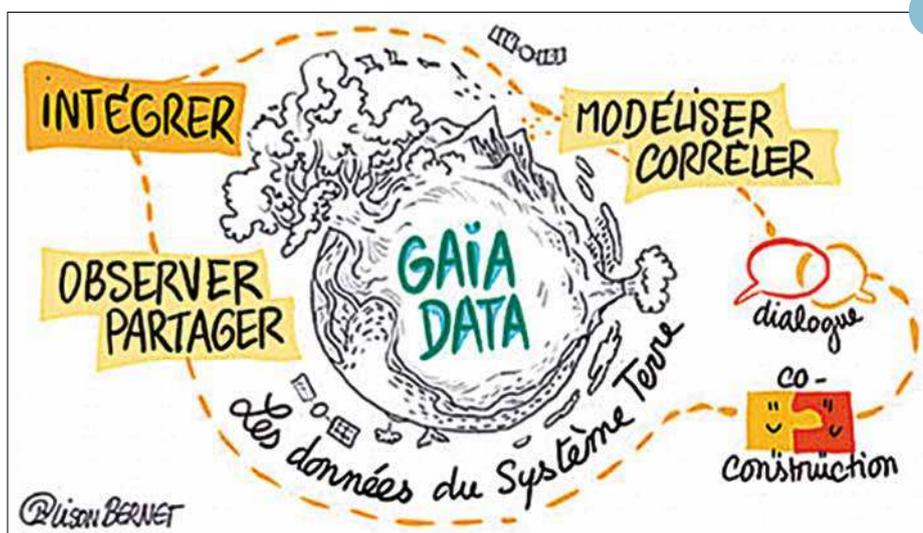
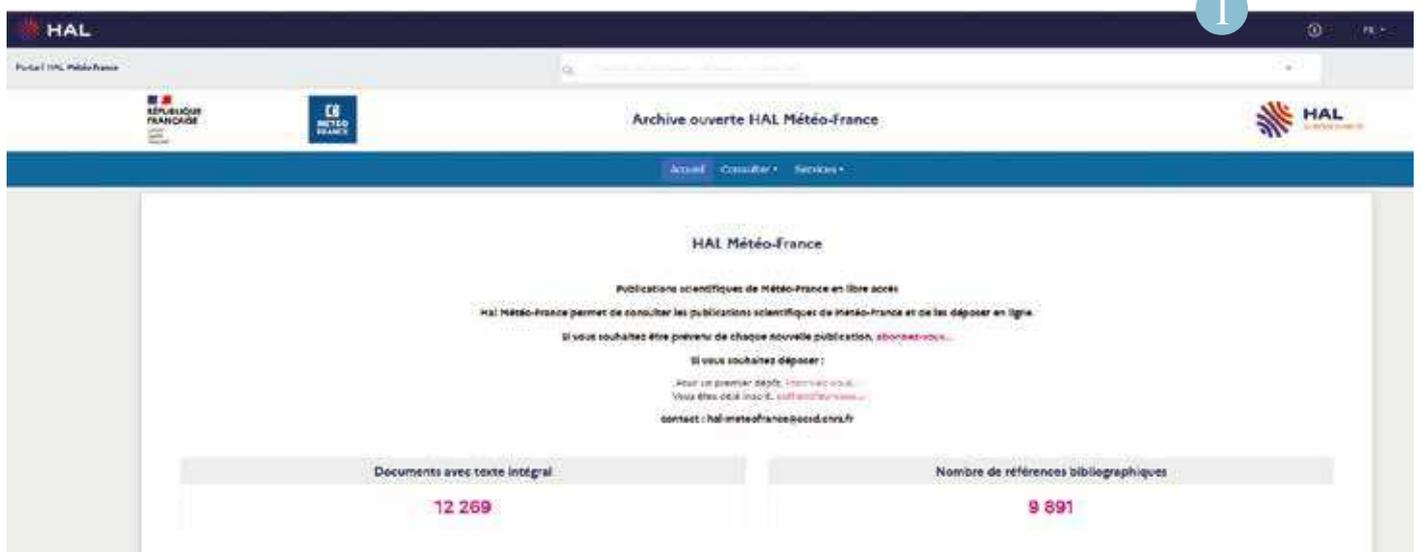
# La contribution de Météo-France aux démarches de diffusion des données (Data Terra, Gaïa Data, SAFIRE+)

Hervé Roquet

Dans le cadre de la nouvelle loi de programmation de la recherche, la mise à disposition des données associées aux résultats de la recherche est désormais une obligation de tous les établissements publics contribuant au service public de la recherche, et est un élément indissociable de la politique de la Science Ouverte. Depuis plus de 10 ans, Météo-France contribue de façon active au développement et au fonctionnement des pôles de données et de services pour la recherche, non seulement avec la mise à disposition de données issues de ses activités de recherche, mais aussi de ses réseaux opérationnels d'observation pour répondre aux besoins de la communauté scientifique.

De plus, il soutient directement le pôle AERIS (<https://www.aeris-data.fr/>), dédié aux données d'observation de l'atmosphère, à travers l'affectation de l'un de ses agents à l'OMP. AERIS héberge également la base de données SAFIRE+ et son portail d'accès aux mesures des avions de recherche de l'Unité SAFIRE, opérée conjointement par Météo-France, le CNRS et le CNES. Aujourd'hui, les quatre pôles de données et de service du système terre (AERIS, THEIA, ODATIS et FORMATER) sont fédérées au sein de l'Infrastructure de Recherche nationale Data Terra, ce qui a permis de consolider leur financement, de mutualiser de nombreux développements, et d'unifier les portails d'accès et les catalogues de données. De

plus, Data Terra est aujourd'hui porteur du projet Gaïa Data, financé par l'ANR dans le cadre du PIA3 pour une durée de 8 ans, et dont Météo-France est partenaire. L'objectif du projet est de rendre interopérables les bases de données de Data Terra, du Pôle National de Données de Biodiversité (PNDB) et de CLIMERI (Infrastructure de Recherche nationale pour la modélisation du climat), et de développer de nouveaux services, notamment pour permettre le traitement massif de données à la demande des utilisateurs.



Vue d'artiste du projet Gaïa Data et de ses objectifs.

---

# Les « data papers », un nouvel outil au service de la science ouverte

S. Morin

Parmi les enjeux de la science ouverte figure l'accès facilité aux données de recherche. Dans ce contexte, afin de mettre en œuvre les principes FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*) pour les jeux de données, les dernières années ont vu l'émergence d'un nouveau type de publications scientifiques, les « data papers ». Ces publications sont soumises aux mêmes principes de relecture par les pairs et publiées dans des revues spécialisées, telle que *Earth System Science Data*, *Scientific Data*, *Data in Brief* etc. Les critères d'évaluation sont globalement similaires

aux publications traditionnelles, tout en se focalisant sur les modalités de production, d'évaluation et de mise à disposition des données décrites. Dans de nombreux cas, les données en question sont au préalable déposées sur des portails de données spécialisés, notamment, en France, ceux mis en œuvre par l'infrastructure de recherche DataTerra (AERIS, Theia, Form@ter, Odatis). Le service SEDOO de l'Observatoire Midi Pyrénées participe à ces efforts. Ces jeux de données sont dotés d'un DOI (*digital object identifier*) pérenne permettant d'y faire référence sans ambiguïté. En 2022, plusieurs

data papers ont été publiés par les équipes des entités de Météo-France (CNRM, SAFIRE). Les « data papers » facilitent la réutilisation de jeux de données originaux dans la communauté scientifique internationale et peuvent faire partie intégrante du Plan de Gestion des Données.

## Référence :

Martinet, P., et al., A dataset of temperature, humidity, and liquid water path retrievals from a network of ground-based microwave radiometers dedicated to fog investigation. *Bull. of Atmos. Sci. & Technol.*, <https://doi.org/10.1007/s42865-022-00049-w>, 2022. Cet article décrit un jeu de données original de données collectées par un réseau de radiomètres micro-ondes déployés pendant la campagne SOFOG3D en 2019 et 2020 pour étudier le brouillard et les performances des modèles à ce sujet. Ces données sont diffusées sur la plateforme de données AERIS.

Vernay M., et al., The S2M meteorological and snow cover reanalysis over the French mountainous areas: description and evaluation (1958–2021). *Earth System Science Data*, <https://doi.org/10.5194/essd-14-1707-2022>, 2022. Cet article décrit la réanalyse S2M de conditions météorologiques et d'enneigement dans les massifs montagneux français depuis 1958. Les données de cette réanalyse sont diffusées via la plateforme de données AERIS.

Munier S. et B. Decharme. River network and hydro-geomorphological parameters at 1/12° resolution for global hydrological and climate studies. *Earth System Science Data*, <https://doi.org/10.5194/essd-14-2239-2022>, 2022. Ce jeu de données mis à disposition permet de faciliter la mise en œuvre de systèmes de modélisation hydrologique à échelle planétaire.

Bony et al., EUREC4A observations from the SAFIRE ATR42 aircraft, *Earth System Science Data*, <https://doi.org/10.5194/essd-14-2021-2022>, 2022. Cette étude décrit les données acquises à bord de l'avion de recherche ATR42 de SAFIRE pendant la campagne EUREC4A en 2020 à la Barbade, y compris les traitements appliqués à ces données brutes afin de les rendre exploitables (outil AIDA développé au CNRM). Ces données sont fournies via la plateforme de données AERIS.

Enfin, notons la production annuelle de données de référence sur le cycle du carbone au niveau mondial, avec la participation de personnels de recherche du CNRM au data paper emblématique que représente l'étude annuelle du Global Carbon Project, également publiée dans *Earth System Science Data* : Friedlingstein P., et al., Global Carbon Budget 2022, *Earth Syst. Sci. Data*, <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>, 2022.

3

---

## Ethique et intégrité scientifique

Hervé Roquet, Jean-Marcel Piriou

L'intégrité scientifique est au cœur de tout travail de recherche : établir des connaissances honnêtes, démontrées et reproductibles, le faire en respectant les acteurs (citation, remerciement), et de plus en plus, au fil des années, en partageant non seulement les publications, mais aussi les données et algorithmes afférents (science ouverte). Ce besoin d'intégrité trouve sa justification et sa motivation dans une réflexion éthique, processus plus large et amont visant à déterminer quelles actions doivent être encouragées et déconseillées. Cette réflexion éthique doit ainsi sous-tendre l'écriture de toute constitution, des lois, ainsi que des déontologies professionnelles

dont l'intégrité scientifique est un élément. En 2022, Météo-France a décidé de mettre en œuvre une politique explicite en matière d'intégrité scientifique. Un Référent Intégrité Scientifique (RIS) a été nommé, et l'établissement a adhéré à la Charte française de déontologie des métiers de la recherche :

[https://www.hceres.fr/sites/default/files/media/downloads/2015\\_Charte\\_nationale\\_deontologie\\_190613.pdf](https://www.hceres.fr/sites/default/files/media/downloads/2015_Charte_nationale_deontologie_190613.pdf)

Cette charte concerne l'ensemble des personnels de Météo-France, qu'ils soient permanents ou non, qui contribuent à l'activité de recherche. Les premières réflexions ont été conduites en ce qui

concerne les actions de sensibilisation et de formation à mener sur les questions d'éthique et d'intégrité scientifique à Météo-France, ainsi qu'en ce qui concerne la procédure de recueil et de traitement des signalements relatifs à l'intégrité scientifique. Leur mise en œuvre est envisagée à partir de 2023.

RESEARCH ARTICLE



### A dataset of temperature, humidity, and liquid water path retrievals from a network of ground-based microwave radiometers dedicated to fog investigation

Pauline Martinet<sup>1</sup> · Vinciane Unger<sup>1</sup> · Frédéric Burnet<sup>1</sup> · Jean-François Georgis<sup>2</sup> · Maxime Hervo<sup>3</sup> · Thierry Huet<sup>4</sup> · Ulrich Löhnert<sup>5</sup> · Eugene Miller<sup>6</sup> · Emiliano Orlandi<sup>7</sup> · Jeremy Price<sup>8</sup> · Mathias Schröder<sup>9</sup> · Guillaume Thomas<sup>1,10,11</sup>

Earth Syst. Sci. Data, 14, 2021–2064, 2022  
https://doi.org/10.5194/essd-14-2021-2022  
© Author(s) 2022. This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.



### EUREC<sup>4</sup>A observations from the SAFIRE ATR42 aircraft

Sandrine Bony<sup>1</sup>, Marie Lethien<sup>2</sup>, Julien Delanoé<sup>3</sup>, Pierre Coutris<sup>4</sup>, Jean-Claude Etienne<sup>5</sup>, Franziska Aemisegger<sup>6</sup>, Anna Lea Albright<sup>7</sup>, Thierry André<sup>8</sup>, Hubert Bellec<sup>9</sup>, Alexandre Baron<sup>10</sup>, Jean-François Bourdoin<sup>11</sup>, Pierre-Etienne Brédou<sup>12</sup>, Aurélien Bourdon<sup>13</sup>, Jean-Christophe Canonica<sup>14</sup>, Christophe Caudoux<sup>15</sup>, Patrick Chazette<sup>16</sup>, Michel Cluzeau<sup>17</sup>, Céline Cornet<sup>18</sup>, Jean-Philippe Desbiens<sup>19</sup>, Dominique Duchanoy<sup>20</sup>, Cyrille Flamant<sup>21</sup>, Benjamin Fédier<sup>22</sup>, Christophe Gourbeyre<sup>23</sup>, Laurent Guiraud<sup>24</sup>, Tetyana Jiang<sup>25</sup>, Claude Lalaurie<sup>26</sup>, Christophe Le Gac<sup>27</sup>, Christian Lendout<sup>28</sup>, Julien Lemaire<sup>29</sup>, Thierry Perrin<sup>30</sup>, Frédéric Pouvesle<sup>31</sup>, Pascal Richard<sup>32</sup>, Nicolas Rochetin<sup>33</sup>, Kevin Sakai<sup>34</sup>, Alfons Schwarzenböck<sup>35</sup>, Guillaume Seurat<sup>36</sup>, Bjorn Stevens<sup>37</sup>, Julien Totems<sup>38</sup>, Ludovic Touzet-Pfeiffer<sup>39</sup>, Gilles Vargoz<sup>40</sup>, Jessica Vial<sup>41</sup>, Leonie Villiger<sup>42</sup>, and Raphaela Vogel<sup>43</sup>

Earth Syst. Sci. Data, 14, 4811–4900, 2022  
https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022  
© Author(s) 2022. This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.



### Global Carbon Budget 2022

Pierre Friedlingstein<sup>1,2</sup>, Michael O'Sullivan<sup>1</sup>, Matthew W. Jones<sup>3</sup>, Robbie M. Andrew<sup>4</sup>, Luke Gregg<sup>5</sup>, Judith Hauck<sup>6</sup>, Corinne Le Quéré<sup>7</sup>, Ingrid T. Lujckx<sup>8</sup>, Arne Olsen<sup>9</sup>, Glen P. Peters<sup>4</sup>, Wouter Peters<sup>10</sup>, Julia Pongratz<sup>11,12</sup>, Clemens Schwingshackl<sup>13</sup>, Stephan Sieck<sup>14</sup>, Joseph G. Canadell<sup>15</sup>, Philippe Clair<sup>16</sup>, Robert R. Jackson<sup>17</sup>, Simone E. Alin<sup>18</sup>, Ramona Alkama<sup>19</sup>, Almut Arneth<sup>20</sup>, Vivek K. Arora<sup>21</sup>, Nicholas R. Bates<sup>22,23</sup>, Meike Becker<sup>24</sup>, Nicolas Bellouin<sup>25</sup>, Henry C. Bittig<sup>26</sup>, Laurent Bopp<sup>27</sup>, Frédéric Chevallier<sup>28</sup>, Louise P. Chini<sup>29</sup>, Margot Crutwin<sup>30</sup>, Wiley Evans<sup>31</sup>, Stefanie Falk<sup>32</sup>, Richard A. Feely<sup>33</sup>, Thomas Gasser<sup>34</sup>, Marion Gehlen<sup>35</sup>, Thomas Gkritzalis<sup>36</sup>, Lucas Gligo<sup>37,38</sup>, Giacomo Grassi<sup>39</sup>, Nicolas Gruber<sup>40</sup>, Özgür Gürses<sup>41</sup>, Ian Harris<sup>42</sup>, Matthew Hefer<sup>43</sup>, Richard A. Houghton<sup>44</sup>, George C. Hurtt<sup>45</sup>, Yosuke Iida<sup>46</sup>, Estiana Ilyina<sup>47</sup>, Anil K. Jain<sup>48</sup>, Anika Jerski<sup>49</sup>, Koji Kadono<sup>50</sup>, Hisashi Kato<sup>51</sup>, David Keeney<sup>52</sup>, Kees Klein Goldewijk<sup>53</sup>, Jürgen Knauer<sup>54,55</sup>, Jan Ivar Korsbakken<sup>56</sup>, Peter Landschützer<sup>57,58</sup>, Nathalie Lefèvre<sup>59</sup>, Keith Lindsay<sup>60</sup>, Junjie Liu<sup>61</sup>, Zhu Liu<sup>62</sup>, Gregg Marland<sup>63,64</sup>, Nicolas Mayot<sup>65</sup>, Matthew J. McGrath<sup>66</sup>, Nicolas Metzl<sup>67</sup>, Natalie M. Moncrieff<sup>68</sup>, David R. Munro<sup>69,70</sup>, Noin-Isabelle Nakaoka<sup>71</sup>, Yusuke Niwa<sup>72,73</sup>, Kevin O'Brien<sup>74,75</sup>, Tsunee Ono<sup>76</sup>, Paul L. Palmer<sup>77,78</sup>, Naigang Pan<sup>79,80</sup>, Denis Pierrot<sup>81</sup>, Katie Poeschl<sup>82</sup>, Benjamin Poulter<sup>83</sup>, Laure Resplandy<sup>84</sup>, Eddy Robertson<sup>85</sup>, Christian Rödenbeck<sup>86</sup>, Carmen Rodriguez<sup>87</sup>, Théo M. Rosan<sup>88</sup>, Jörg Schwinger<sup>89,90</sup>, Roland Séfirian<sup>91</sup>, Jamie D. Shuttler<sup>92</sup>, Iugan Skjellvan<sup>93</sup>, Tobias Stieglitz<sup>94</sup>, Qing Sun<sup>95,96</sup>, Adrienne J. Sutton<sup>97</sup>, Colin Sweeney<sup>98</sup>, Shōtarō Takao<sup>99</sup>, Toste Tansaa<sup>100</sup>, Pieter P. Tans<sup>97,98</sup>, Xiangjun Tian<sup>101</sup>, Hangjun Tian<sup>102</sup>, Bronte Tilbrook<sup>103</sup>, Hiroyuki Tujino<sup>104</sup>, Francesco Tubiello<sup>105</sup>, Guido R. van der Werf<sup>106</sup>, Anthony P. Walker<sup>107</sup>, Rik Wanninkhof<sup>108</sup>, Chris Whitehead<sup>109</sup>, Anna Wilbrandt Wranne<sup>110</sup>, Rebecca Wright<sup>111</sup>, Weiping Yuan<sup>112</sup>, Chao Yue<sup>113</sup>, Xu Yue<sup>114</sup>, Sönke Zaché<sup>115</sup>, Jiyi Zeng<sup>116</sup>, and Bo Zhang<sup>117</sup>

Earth Syst. Sci. Data, 14, 1707–1733, 2022  
https://doi.org/10.5194/essd-14-1707-2022  
© Author(s) 2022. This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.



### The S2M meteorological and snow cover reanalysis over the French mountainous areas: description and evaluation (1958–2021)

Matthieu Vermy<sup>1</sup>, Matthieu Lafaysse<sup>1</sup>, Diego Monteiro<sup>1</sup>, Pascal Hagenmüller<sup>1</sup>, Rafik Nébzi<sup>1</sup>, Raphaëlle Sumacoin<sup>1,2</sup>, Deborah Verfaillie<sup>1</sup>, and Samuel Morin<sup>1</sup>

Earth Syst. Sci. Data, 14, 2239–2258, 2022  
https://doi.org/10.5194/essd-14-2239-2022  
© Author(s) 2022. This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.



### River network and hydro-geomorphological parameters at 1/12° resolution for global hydrological and climate studies

Simon Munier and Bertrand Decharme  
CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France

---

## La Nuit européenne des Chercheur.e.s 2022

N. Boullot, C. Labadie, M. Marquillie, J.-M. Piriou, H. Pierre<sup>1</sup>

L'édition 2022 de la Nuit européenne des Chercheur.e.s s'est tenue le 30 septembre dernier autour du thème national « Les imprévus ». Cet événement annuel se déroule en simultané, dans plus de 200 villes d'Europe, dont 16 villes en France métropolitaine. C'est l'occasion pour le public de rencontrer et d'échanger avec des scientifiques de toutes les disciplines, de découvrir leur métier et de partager leur passion pour la recherche. L'Université de Toulouse, ses établissements et ses partenaires ont organisé cette 18<sup>e</sup> édition sur les sites de Toulouse et Albi. À Toulouse, la Cité de l'espace accueillait l'événement cette année, avec une fréquentation en hausse du public à hauteur de 3150 visiteurs, soit 900 de plus qu'en 2019, dernière édition 100 % en présentiel. Le CNRM participe de longue date à cet événement.

Plusieurs formats d'animations ont rythmé la soirée. *Le grand Labo* regroupait des activités auxquelles le jeune public pouvait participer. Le stand du « vendeur de glaces » animé par P. Cébron, L. Descamps et C. Labadie du CNRM a accueilli un public amusé à travers toutes les générations. Il s'agit d'un jeu aidant à comprendre la notion de prévision météorologique probabiliste, et qui montre la richesse de ce type de prévision. On peut mesurer que l'objectif est atteint

lorsque les joueurs et joueuses changent avantageusement de stratégie pendant la partie. Pour plus d'informations, voir [https://lameteorologie.fr/issues/2017/96/meteo\\_2017\\_96\\_21](https://lameteorologie.fr/issues/2017/96/meteo_2017_96_21)

Le *Speed-Searching* permettait à un petit groupe de visiteurs et visiteuses de rencontrer et d'échanger avec des chercheur.e.s lors d'un tête-à-tête de 10 minutes autour d'un objet. Pour le CNRM, J.-M. Piriou, B. Balogh, C. Brochet, M.-A. Magnaldo et M. Marquillie ont partagé leurs recherches sur la météorologie et le climat. Pour Jean-Marcel Piriou, participer au *Speed-Searching* est à chaque fois une expérience enrichissante. Chaque personne est différente. Depuis le lycéen, déjà passionné de météo, qui demande quelles filières permettent de venir travailler à Météo-France, aux étudiant.e.s en mathématiques qui, goguenards, viennent poser des questions sur notre capacité à intégrer efficacement sur les ordinateurs de Météo-France les équations de Navier-Stokes, réputées difficiles, en passant par la collégienne avec sa maman qui demandent s'il y a toujours eu des terres émergées, ou pourquoi il y a du vent, la variété des questions est exceptionnelle. La curiosité et la complicité du public lors de ces Nuits des Chercheur.e.s sont une intarissable source de joie.

Maëva Marquillie, doctorante en météorologie, partage son goût pour la vulgarisation scientifique, qui permet selon elle, « de faire un pont entre la science et le grand public ». « Face aux défis que représente l'adaptation au changement climatique, nous avons besoin, plus que jamais, que les chercheur.e.s fassent ce travail de médiation et de vulgarisation, pour que le propos soit juste et entendu par tous et toutes » précise-t-elle. Lors de sa session de *Speed-Searching*, elle a pu noter un fort intérêt du public pour l'application des effets du changement climatique à la météorologie en France notamment via la question récurrente sur le lien potentiel entre le changement climatique et l'intensification des phénomènes météorologiques extrêmes. La prochaine édition se tiendra le 29 septembre 2023 à la Cité de l'espace pour le site de Toulouse autour du thème national « Nos futurs ».

---

1. Université de Toulouse

### Référence :

<https://nuitdeschercheurs-france.eu/?2022>



▲ Au fond, site de la Cité de l'espace à Toulouse.

Médaille à gauche : Jean-Marcel Piriou pendant la séance de Speed-Searching @ photo Adrien Basse Cathalinat.

Médaille centrale : Clément Brochet au Speed-Searching @ photo Université de Toulouse.

Médaille à droite : Pierrick Cébron et Carole Labadie animant le jeu du vendeur de glace @ photo N. Bouillot.



# Annexes

## Liste des publications scientifiques 2022

- ALAOUI, B., BARI, D., BERGOT, T., GHABBAR, Y. Analog Ensemble Forecasting System for Low-Visibility Conditions over the Main Airports of Morocco. *Atmosphere* 2022, 13, 1704. <https://doi.org/10.3390/atmos13101704>
- ALLAIRE F., FILIPPI J.-B., MALLET V., VAYSSE F. (2022) Simulation-based high-resolution fire danger mapping using deep learning. *International Journal of Wildland Fire* 31, 379-394. <https://doi.org/10.1071/WF21143>
- ANDREWS T., BODAS-SALCEDO A., GREGORY J. M., DONG Y., ARMOUR K. C., PAYNTER D., LIN P., MODAK A., MAURITSEN T., COLE J. N. S., MEDEIROS B., BENEDICT J. J., DOUVILLE H., ROEHRIG R., KOSHIRO T., KAWAI H., OGURA T., DUFRESNE J.-L., ALLAN R. P., LIU C. (2022). On the Effect of Historical SST Patterns on Radiative Feedback. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127 (18), e2022JD036675, 10.1029/2022JD036675. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03847095>
- ARBOLEDA-OBANDO P., DUCHARNE A., CHERUY F., JOST A., GHATTAS J., COLIN J., NOUS C. (2022-09). Influence of hillslope flow on hydroclimatic evolution under climate change. *Earth's Future*, 10, e2021EF002613, 10.1029/2021ef002613. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03797413>
- ARDYNA, M., HAMILTON, D.S., HARMEL, T. et al. Wildfire aerosol deposition likely amplified a summertime Arctic phytoplankton bloom. *Commun Earth Environ* 3, 201 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00511-9>
- BALADIMA F., THOMAS J., VOISIN D., DUMONT M., JUNQUAS C., KUMAR R., LAVAYSSE C., MARELLE L., PARRINGTON M., FLEMMING J. (2022). Modeling an extreme dust deposition event to the French alpine seasonal snowpack in April 2018: Meteorological context and predictions of dust deposition. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127 (8), e2021JD035745, 10.1029/2021JD035745. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03617771>
- BALAJI, COUVREUX F., DESHAYES J., GAUTRAIS J., HOURDIN F., RIO C., 2022: Are GCM obsolete? *PNAS* 119 (47). <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2202075119>
- BALBINOT C., MARTOIA F., DUMONT P. J., ORGEAS L., BLOCH J.-F., ROLLAND DU ROSCOAT S., BOLLER E., FLIN F., CARION P., LATIL P. (2022). In situ 3D observations of capillary-driven flows in parallel arrangements of rigid fibres using X-ray microtomography. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 157, 106941, 10.1016/j.compositesa.2022.106941. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03659779>
- BALOGH, B., SAINT-MARTIN, D., RIBES, A. (2022). How to calibrate a dynamical system with neural network based physics? *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL097872. <https://doi.org/10.1029/2022GL097872>
- BARREYAT, M., CHAMBON, P., MAHFOUF, J.-F., & FAURE, G. (2022). A 1D Bayesian inversion of microwave radiances using several radiative properties of solid hydrometeors. *Atmospheric Science Letters*, e1142. <https://doi.org/10.1002/asl.1142>
- BECQUET J., LAMOUREUX N., CONDOM T., GOUTTEVIN I., FORCELLINI M., LAUNAY B., RABATEL A., CAUVY-FRAUNIE S. (2022-10). Macroinvertebrate distribution associated with environmental variables in alpine streams. *Freshwater Biology*, 67 (10), 1815 - 1831, 10.1111/fwb.13977. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03799448>
- BEHERA A., RIVIERE E., KHAYKIN S., MARECAL V., GHYSELS M., BURGALAT J., HELD G. (2022). On the cross-tropopause transport of water by tropical convective overshoots: a mesoscale modelling study constrained by in situ observations during the TRO-Pico field campaign in Brazil. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22 (2), 881–901, 10.5194/acp-22-881-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03298933>
- BELL A., MARTINET P., CAUMONT O., BURNET F., DELANOE J., JORQUERA S., SEITY Y., UNGER V. (2022). An Optimal Estimation Algorithm for the Retrieval of Fog and Low Cloud Thermodynamic and Micro-physical Properties. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15 (18), 5415–5438, 10.5194/amt-15-5415-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03577615>
- BELLON G., COPPIN D. (2022). Sensitivity of convective self-aggregation to subsidence. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03851192>
- BELLON G., REBOREDO B. (2022). Scale Sensitivity of the Gill Circulation. Part II: Off-Equatorial Case. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 79 (1), 19 - 30, 10.1175/jas-d-21-0068.1. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03761060>
- BENCHERIF, H., BOUNHIR, A., BÈGUE, N., MILLET, T., BENKHALDOUN, Z., LAMY, K., PORTAFAIX, T., GADOUALI, F. Aerosol Distributions and Sahara Dust Transport in Southern Morocco, From Ground-Based and Satellite Observations. *Remote Sens.* 2022, 14, 2454. <https://doi.org/10.3390/rs14102454>
- BERARD-CHENU L., FRANCOIS H., GEORGE E., MORIN S. (2022). Past changes in natural and managed snow reliability of French Alps ski resorts from 1961 to 2019. *The Cryosphere*, 16 (3), 863-881, 10.5194/tc-16-863-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03609937>
- BERARD-CHENU L., FRANCOIS H., GEORGE E., MORIN S. (2022). Trajectoires de développement de la production de neige dans les stations de ski des Alpes françaises : l'influence des spécificités locales et des politiques régionales de soutien. *Revue de Géographie Alpine / Journal of Alpine Research*, 4, 10.4000/rga.10434. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03758579>
- BERARD-CHENU L., FRANCOIS H., MORIN S., GEORGE E. (2022-12-10). The deployment of snowmaking in the French ski tourism industry: a path development approach. *Current Issues in Tourism*, 1 - 18, 10.1080/13683500.2022.2151876. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03894285>
- BERNARD A., HAGENMULLER P., MONTAGNAT M., CHAMBON G. (2022). Disentangling creep and isothermal metamorphism during snow settlement with X-ray tomography. *Journal of Glaciology*, 10.1017/jog.2022.109. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03906971>
- BERNARD E., MUNCK C. D., LEMONSU A. (2022-09). Detailed Mapping and Modeling of Urban Vegetation: What Are the Benefits for Microclimatic Simulations with Town Energy Balance (TEB) at Neighborhood Scale?. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 61 (9), 1159-1178, 10.1175/JAMC-D-21-0134.1. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03836508>
- BERNARD J., BOCHER E., LE SAUX WIEDERHOLD E., LECONTE F., MASSON V. (2022). Estimation of missing building height in OpenStreetMap data: a French case study using GeoClimate 0.0.1. *Geoscientific Model Development*, 15 (19), 7505-7532, 10.5194/gmd-15-7505-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03811271>
- BERTHOU S., J ROBERTS M., VANNIERE B., BAN N., BELUÏC D., CAILLAUD C., CROCKER T., DE VRIES H., DOBLER A., HARRIS D., J KENDON E., LANDGREN O., MANNING C. (2022-11-16). Convection in future winter storms over Northern Europe. *Environmental Research Letters*, 17 (11), 114055, 10.1088/1748-9326/aca03a. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03937071>
- BEUCHER F., COUVREUX F., BOUNIOL D., FAURE G., FAVOT F., DAUHUT T., AYET A. (2022-07-05). Process Oriented evaluation of the oversea AROME configuration: focus on the representation of cloud organisation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, , 10.1002/qj.4354. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03869111>

- BLEIN S., ROEHRIG R. & VOLDOIRE A. (2022) Parametrizing the mesoscale enhancement of oceanic surface turbulent fluxes: A physical–statistical approach. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(745), 1683–1708. Available from: <https://doi.org/10.1002/qj.4273>
- BOLIBAR J., RABATEL A., GOUTTEVIN I., ZEKOLLARI H., GALIEZ C. (2022). Nonlinear sensitivity of glacier mass balance to future climate change unveiled by deep learning. *Nature Communications*, 13 (1), 409, 10.1038/s41467-022-28033-0. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03668394>
- BONY S., LOTHON M., DELANOE J., COUTRIS P., ETIENNE J.-C., AEMISEGGER F., ALBRIGHT A., ANDRE T., BELLEC H., BARON A., BOURDINOT J.-F., BRILOUET P.-E., BOURDON A., CANONICI J.-C., CAUDOUC C., CHAZETTE P., CLUZEAU M., CORNET C., DESBIOS J.-P., DUCHANOY D., FLAMANT C., FILDIER B., GOURBEVRE C., GUIRAUD L., JIANG T., LAINARD C., LE GAC C., LENDROIT C., LERNOULD J., PERRIN T., POUVESLE F., RICHARD P., ROCHETIN N., SALAUN K., SCHWARZENBOECK A., SEURAT G., STEVENS B., TOTEMS J., TOUZE-PEIFFER L., VERGE G., VIAL J., VILLIGER L., VOGEL R. (2022). EUREC4A observations from the SAFIRE ATR42 aircraft. *Earth System Science Data*, 14 (4), 2021–2064, 10.5194/essd-14-2021-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03517872>
- BOONE A., CANUT-ROCAFORT G., LE MOIGNE P., BELLVERT J., BEST M., BROOKE J., PRICE J., CUXART J., HARTOGENSIS O., MIRO J. R., POLCHER J., QUINTANA-SEGUI P., WOOSTER M., LOTHON M. (2022-02). Campagne internationale sur les interactions de la surface terrestre avec l'atmosphère La Météorologie, (116), 005, 10.37053/lameteorologie-2022-0005. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03841675>
- BOPP L., AUMONT O., KWIATKOWSKI L., CLERC C., DUPONT L., ETHE C., GORGUES T., SEFERIAN R., TAGLIABUE A. (2022). Diatom phytoplankton as a key driver of the response of marine net primary productivity to climate change. *Biogeosciences*, 19 (17), 4267–4285, 10.5194/bg-19-4267-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03811137>
- BOSSER P., Van Ballen J., BOUSQUET O. Routine Measurement of Water Vapour Using GNSS in the Framework of the Map-Io Project. *Atmosphere* 2022, 13, 903. <https://doi.org/10.3390/atmos13060903>
- BOURDIN S., FROMANG S., DULAC W., CATTIAUX J., CHAUVIN F. (2022-09-06). Intercomparison of four algorithms for detecting tropical cyclones using ERA5. *Geoscientific Model Development*, 15 (17), 6759–6786, 10.5194/gmd-15-6759-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03775278>
- BOUTLE I., ANGEVINE W., BAO J.-W., BERGOT T., BHATTACHARYA R., BOTT A., DUCONGÉ L., FORBES R., GOECKE T., GRELL E., HILL A., IJEL A., KUDZOTSA I., LAC C., MARONGA B., ROMAKKANIEMI S., SCHMIDL J., SCHWENKEL J., STEENEVELD G.-J., and VIÉ B.: Demistify: an LES and SCM intercomparison of radiation fog, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 319–333, 2022.
- BOUITIER F., FLEURY A., BERGOT T., RIETTE S. (2022). A Single-Column Comparison of Model-Error Representations for Ensemble Prediction. *Boundary-Layer Meteorology*, 183 (2), 167–197, 10.1007/s10546-021-00682-6. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03806323>
- BOUVET L., CALONNE N., FLIN F., GEINDREAU C. (2022). Snow equi-temperature metamorphism described by a phase-field model applicable on micro-tomographic images: Prediction of microstructural and transport properties. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14, 10.1029/2022MS002998. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03863738>
- BROGNIÉZ H., ROCA R., AUGUSTE F., CHABOUREAU J.-P., HADDAD Z., MUNCHAK STEPHEN J., LI X., BOUNIOL D., DEPEE A., FOLLEAU T., KOLLIAS P. (2022). Time-Delayed Tandem Microwave Observations of Tropical Deep Convection: Overview of the C2OMODO Mission. *Frontiers in Remote Sensing*, 3, 854735, 10.3389/frsen.2022.854735. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03717924>
- BROGNIÉZ C., DORÉ J.-F., AURIOL F., CESARINI P., MINVIELLE F., PORTAFAIX T., DEROO C., CATALFAMO M., METZGER J.-M., DA CONCEICAO P. Rayonnement UV solaire en France métropolitaine et à La Réunion : érythème et synthèse de la vitamine D. *La Météorologie*, 117, 33–41, 2022.
- CALLOT C., SCHOETTER R., FOREST V., EYMET V., CHUNG T.-Y. (2022-10-13). Model of Spectral and Directional Radiative Transfer in Complex Urban Canopies with Participating Atmospheres. *Boundary-Layer Meteorology*, 10.1007/s10546-022-00750-5. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03813906>
- CALLEWAERT S., BRIOUDE J., LANGEROCK B., DUFLOT V., FONTEYN D., MÜLLER J.-F., METZGER J.-M., HERMANS C., KUMPS N., RAMONET M., LOPEZ M., MAHIEU E., and De Mazière, M.: Analysis of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and CO surface and column concentrations observed at Réunion Island by assessing WRF-Chem simulations, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 7763–7792. <https://doi.org/10.5194/acp-22-7763-2022>, 2022 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03702817>
- CALONNE N., BURR A., PHILIP A., FLIN F., GEINDREAU C. (2022). Effective coefficient of diffusion and permeability of firn at Dome C and Lock In, Antarctica, and of various snow types - estimates over the 100–850 kg m<sup>-3</sup> density range. *The Cryosphere*, 16, 967–980, 10.5194/tc-16-967-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03668389>
- CHAIGNEAU A. A., REFFRAY G., VOLDOIRE A., MELET A. (2022). IBI-CCS: a regional high-resolution model to simulate sea level in western Europe. *Geoscientific Model Development*, 15, 2035–2062, 10.5194/gmd-15-2035-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03668390>
- CHALINEL R., ATTIE J.-L., RICAUD P., VIDOT J., KANGA Y., HAUGLUSTAINED, THOMPSON R., ROMANO F., RICCIARDELLI E. (2022-03-14). Evaluation and Global-Scale Observation of Nitrous Oxide from IASI on Metop-A. *Remote Sensing*, 14 (6), 1403, 10.3390/rs14061403. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03620532>
- CHAMBON P., MAHFOUF J.-F., AUDOUIN O., BIRMAN C., FOURRIE N., LOO C., MARTET M., MOLL P., PAYAN C., POURRET V., RASPAUD D. (2022-10-06). Global Observing System Experiments within the Météo-France 4D-Var Data Assimilation System. *Monthly Weather Review*, 10.1175/MWR-D-22-0087.1. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03859189>
- CHAZETTE P., BARON A., and FLAMANT C.: Mesoscale spatio-temporal variability of airborne lidar-derived aerosol properties in the Barbados region during EUREC4A, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 1271–1292. <https://doi.org/10.5194/acp-22-1271-2022>, 2022.
- CHENAL J., MEYSSIGNAC B., RIBES A., GUILLAUME-CASTEL R. (2022). Observational Constraint on the Climate Sensitivity to Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentrations Changes Derived from the 1971–2017 Global Energy Budget. *Journal of Climate*, 35, 4469–4483, 10.1175/JCLI-D-21-0565.1. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03863749>
- CHOUZA F., LEBLANC T., BREWER M., WANG P., MARTUCCI G., HAEFELE A., VÉRÈMES H., DUFLOT V., PAYEN G., and KECKHUT P.: The impact of aerosol fluorescence on long-term water vapor monitoring by Raman lidar and evaluation of a potential correction method, *Atmos. Meas. Tech.*, 15, 4241–4256. <https://doi.org/10.5194/amt-15-4241-2022>, 2022.
- CHRISTOPHE S., GAUTIER J., CHAPRON P., RILEY L., MASSON V. (2022-03-16). 3D geovisualization for visual analysis of urban climate. *Cybergeo : Revue européenne de géographie / European journal of geography*, document 1008, 10.4000/cybergeo.38518. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03657965>
- Chuxian LI, Maxime ENRICO, Olivier MAGAND, Beatriz F ARAUJO, Gaël LE ROUX, Stefan OSTERWALDER, Aurélien DOMMERGUE, Yann BERTRAND, Jérôme BRIOUDE, François DE VLEESCHOUWER, Jeroen E SONKE (2022). A peat core Hg stable isotope reconstruction of Holocene atmospheric Hg deposition at Amsterdam Island (37.8oS), *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, 341, pp.62 - 74. 10.1016/j.gca.2022.11.024
- CLUZET B., LAFAYSSE M., DESCHAMPS-BERGER C., VERNAY M., DUMONT M. (2022). Propagating information from snow observations with CroCO ensemble data assimilation system: a 10-years case study over a snow depth observation network. *The Cryosphere*, 16 (4), 1281–1298, 10.5194/tc-16-1281-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03636922>
- COLLIANDER A., REICHEL R., CROW W., COSH M., CHEN F., CHAN S., DAS N. N., BINDLISH R., CHAUBELL J., KIM S., LIU Q., OANEILL P., DUNBAR S., DANG L., KIMBALL J., JACKSON T., AL-JASSAR H., ASANUMA J., BHATTACHARYA B., BERG A., BOSCH D., BOURGEOU-CHAVEZ L., CALDWELL T., CALVET J.-C., COLLINS C., JENSEN K., LIVINGSTON S., LOPEZ-BAEZA E., MARTINEZ-FERNANDEZ J., MCNAIRN H., MOGHADDAM M., MONTZKA C., NOTARNICOLA C., PELLARIN T., GREIMEISTER-PFEIL I., PULLIAINEN J., RAMOS J., ZENGFRIED M., STARKS P., SU Z., VAN DER VELDE R., SEYF Y., THIBEAULT M., VREUGDENHIL M., WALKER J., ZRIBI M., ENTEKHABI D., YUEH S. (2022). Validation of Soil Moisture Data Products From the NASA SMAP Mission. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 364–392, 10.1109/JSTARS.2021.3124743. <https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03512208>
- COMBARNOUS P., ERDMANN F., CAUMONT O., DEFER E., MARTET M. (2022). A satellite lightning observation operator for storm-scale numerical weather prediction. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22 (9), 2943–2962, 10.5194/nhess-22-2943-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03770451>
- COOPMANN O., FOURRIE N., GUIDARD V. (2022-04-10). Analysis of MTG-IRS observations and general channel selection for Numerical Weather Prediction models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148 (745), 1864–1885, 10.1002/qj.4282. <https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03659003>

- COPPIN D., ROEHRIG R. (2022). Convection self-aggregation in CNRM-CM6-1: Equilibrium and transition sensitivity to surface temperature. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10.1029/2022MS003064. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03859964>
- COQUILLAT S., PONT V., LAMBERT D., HOUEL R., PARDE M., KREITZ M., RICARD D., GONNEAU E., DE GUIBERT P., PRIEUR S. (2022). Six years of electrified convection over the island of Corsica monitored by SAETTA: General trends and anomalously electrified thunderstorms during African dust south flow events. *Atmospheric Research*, 275, 10.1016/j.atmosres.2022.106227. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03863742>
- COSTES A., RODIER Q., MASSON V., LAC C., ROCHOUX M. (2022). Effects of High-Density Gradients on Wildland Fire Behavior in Coupled Atmosphere-Fire Simulations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14 (11), e2021MS002955, 10.1029/2021MS002955. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03928859>
- DABAS A., EHLERS F., FLAMENT T., TRAPON D., LACOUR A., BAARS H., STRAUME-LINDNER A. G. (2022). Optimization of Aeolus' aerosol optical properties by maximum-likelihood estimation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15 (1), 185-203, 10.5194/amt-15-185-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03541545>
- DANDINI P., CORNET C., BINET R., FENOUIL L., HOLODOVSKY V., SCHECHNER Y. Y., RICARD D., ROSENFELD D. (2022). 3D cloud envelope and cloud development velocity from simulated CLOUD (C3IEL) stereo images. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15, 6221-6242, 10.5194/amt-15-6221-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03863735>
- DAYAL K., CATER J., KINGAN M., BELLON G., SHARMA R. (2022-08). An analysis of the 10 MW Butoni wind farm in the Tropical Southwest Pacific Island of Fiji. *Wind Engineering*, 46 (4), 1264-1280, 10.1177/0309524X221075808. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03755668>
- DE LANNOY G., BECHTOLD M., ALBERGEL C., BROCCA L., CALVET J.-C., CARRASSI A., CROW W., DE ROSNAY P., DURAND M., FORMAN B., GEPPERT G., GIROTTO M., HENDRICKS FRANSSSEN H.-J., JONAST, KUMAR S., LIEVENS H., LU Y., MASSARI C., PAUWELS V., REICHLER R., STEELE-DUNNE S. (2022-09-16). Perspective on satellite-based land data assimilation to estimate water cycle components in an era of advanced data availability and model sophistication. *Frontiers in Water*, 10.3389/frwa.2022.981745. <https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03842227>
- DELAGE O., PORTAFAIX T., BENCHERIF H., BOURDIER A., and LAGRACIE E.: Empirical adaptive wavelet decomposition (EAWD): an adaptive decomposition for the variability analysis of observation time series in atmospheric science, *Nonlin. Processes Geophys.*, 29, 265–277. <https://doi.org/10.5194/npg-29-265-2022>, 2022.
- DELÉGLISE C., FRANÇOIS H., DODIER H., CROUZAT E., SAMACOÏTS R., MORIN S., BRAY F. and NETTIER B. (2022). Agro-climatic profiles of summer mountain pastures in the French Alps: towards a monitoring tool to contribute to climate risk assessment. *Agron. Sustain. Dev.*, 42, 40. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00776-6>
- DEROUBAIX A., MENUT L., FLAMANT C., KNIPPERTZ P., FINK A., BATENBURG A., BRITO J., DENJEAN C., DIONE C., DUPUY R., HAHN V., KALTHOFF N., LOHOU F., SCHWARZENBOECK A., SIOUR G., TUCCELLA P., VOIGT C. (2022). Sensitivity of low-level clouds and precipitation to anthropogenic aerosol emission in southern West Africa: a DACCWA case study. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22 (5), 3251–3273, 10.5194/acp-22-3251-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03198739>
- DESCHAMPS-BERGER C., CLUZET B., DUMONT M., LAFAYSSÉ M., BERTHIER E., FANISE P., GASCOIN S. (2022-03). Improving the Spatial Distribution of Snow Cover Simulations by Assimilation of Satellite Stereoscopic Imagery. *Water Resources Research*, 10.1029/2021WR030271. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03602822>
- DIEZ-SIERRA J., ITURBIDE M., GUTIERREZ J., FERNANDEZ J., MILOVAC J., COFINO A., CIMADEVILLA E., NIKULIN G., LEVAVASSEUR G., KJELLSTROM E., BULOW K., HORANYI A., BROOKSHAW A., GARCIA-DIEZ M., PEREZ A., BANO-MEDINA J., AHRENS B., ALIAS A., ASHFAQ M., BUKOVSKY M., BUONOMO E., CALLUWAERTS S., CHOU S. C., CHRISTENSEN O., CIARLO J., COPPOLA E., CORRE L., DEMORY M.-E., DJURDJEVIC V., EVANS J., FEALY R., FELDMANN H., JACOB D., JAYANARAYANAN S., KATZFEY J., KEULER K., KITTEL C., KURNAZ M. L., LAPRISE R., LIONELLO P., MCGINNIS S., MERCOGLIANO P., NABAT P., ONOL B., OZTURK T., PANITZ H.-J., PAQUIN D., PIECZKA I., RAFFAELE F., REMEDIO A. R., SCINOCCA J., SEVAULT F., SOMOT S., STEGER C., TANGANG F., TEICHMANN C., TERMONIA P., THATCHER M., TORMA C., VAN MEIJGAARD E., VAUTARD R., WARRACH-SAGI K., WINGER K., ZITTIS G. (2022). The Worldwide C3S CORDEX Grand Ensemble: A Major Contribution to Assess Regional Climate Change in the IPCC AR6 Atlas. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103 (12), E2804-E2826, 10.1175/BAMS-D-22-0111.1. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03932124>
- DOHERTY S. J., SAIDE P. E., ZUIDEMA P., SHINOZUKA Y., FERRADA G. A., GORDON H., MALLETT M., MEYER K., PAINEMAL D., HOWELL S. G., FREITAG S., DOBRACKI A., PODOLSKIE J. R., BURTON S. P., FERRARE R. A., HOWES C., NABAT P., CARMICHAEL G. R., DA SILVA A., PISTONE K., CHANG I., GAO L., WOOD R., and REDEMANN J. (2022) Modeled and observed properties related to the direct aerosol radiative effect of biomass burning aerosol over the Southeast Atlantic. *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 1-46. <https://doi.org/10.5194/acp-22-1-2022>
- DOMEISEN D. I., WHITE C., AFARGAN-GERSTMAN H., MUNOZ A., JANIGA M., VITART F., WULF C. O., ANTOINE S., ARDILOUZE C., BATTE L., BLOOMFIELD H., BRAYSHAW D., CAMARGO S., CHARLTON-PEREZ A., COLLINS D., COWAN T., DEL MAR CHAVES M., FERRANTI L., GOMEZ R., GONZALEZ P. L., GONZALEZ ROMERO C., INFANTI J., KAROZIS S., KIM H., KOLSTAD E., LAJOIE E., LLEDO L., MAGNUS-SON L., MALGUZZI P., MANRIQUE-SUNEN A., MASTRANGELO D., MATERIA S., MEDINA H., PALMA L., PINEDA L., SFETSOS A., SON S.-W., SORÉ A., STRAZZO S., TIAN D. (2022-03-03). Advances in the subseasonal prediction of extreme events: Relevant case studies across the globe. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 10.1175/BAMS-D-20-0221.1. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03601088>
- DOMINE F., FOURTEAU K., PICARD G., LACKNER G., SARRAZIN D., POIRIER M. (2022). Permafrost cooled in winter by thermal bridging through snow-covered shrub branches. *Nature Geoscience*, 15 (7), 554 - 560, 10.1038/s41561-022-00979-2. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03870786>
- DOMINUTTI P., RENARD P., VAILINGOM M., BIANCO A., BARAY J.-L., BORBON A., BOURIANNE T., BURNET F., COLOMB A., DELORT A.-M., DUFLOT V., HOUDIER S., JAFFREZO J.-L., JOLY M., LEREMBOURE M., METZGER J.-M., PICHON J.-M., RIBEIRO M., ROCCO M., TULET P., VELLA A., LERICHE M., DEGUILLAUME L. (2022). Insights into tropical cloud chemistry in Réunion (Indian Ocean): results from the BIO-MAÏDO campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22 (1), 505-533, 10.5194/acp-22-505-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03543373>
- DOMINUTTI P., CHEVASSUS E., BARAY J.-L., JAFFREZO J.-L., BORBON A. et al.. Evaluation of the Sources, Precursors, and Processing of Aerosols at a High-Altitude Tropical Site. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2022. <https://hal.science/hal-03777980>
- DOURY A., SOMOT S., GADAT S., RIBES A., CORRE L. (2022). Regional climate model emulator based on deep learning: concept and first evaluation of a novel hybrid downscaling approach. *Climate Dynamics*, 10.1007/s00382-022-06343-9. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03863754>
- DOUVILLE H., ALLAN R.P., ARIAS P.A., BETTS R.A., CARETTA M.A., CHERCHI A., MUKHERJI A., RAGHAVAN K., RENWICK J. (2022). Water remains a blind spot in climate change policies. *PLOS Water*, 1(12), e0000058. <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000058>
- DOUVILLE H., QASMI S., RIBES A., BOCK O. (2022). Global warming at near-constant tropospheric relative humidity is supported by observations. *Communications Earth & Environment*, 3, 10.1038/s43247-022-00561-z. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03824245>
- DRUEL A., MUNIER S., MUCIA A., ALBERGEL C., CALVET J.-C. (2022-11-21). Implementation of a new crop phenology and irrigation scheme in the ISBA land surface model using SURFEX\_v8.1. *Geoscientific Model Development*, 15 (22), 8453-8471, 10.5194/gmd-15-8453-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03885122>
- DRUGET T., NABAT P., MALLETT M., MICHOU M., REMY S., DUBOVIK O. (2022). Modeling radiative and climatic effects of brown carbon aerosols with the ARPEGE-Climat global climate model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22 (18), 12167-12205, 10.5194/acp-22-12167-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03782434>
- DUNIĆ N., SUPIĆ N., SEVAULT F., VILIBIĆ I. (2022-10-07). The northern Adriatic circulation regimes in the future winter climate. *Climate Dynamics*, 10.1007/s00382-022-06516-6. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03830478>
- EL AMRAOUI L., PLU M., GUIDARD V., CORNUT F., BACLES M. (2022-04). A Pre-Operational System Based on the Assimilation of MODIS Aerosol Optical Depth in the MOCAGE Chemical Transport Model. *Remote Sensing*, 14 (8), 1949, 10.3390/rs14081949. <https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03805828>
- EL-OUARTASSY Y., KORSAKISSOK I., PLU M., CONNAN O., DESCAMPS L., & RAYNAUD L. (2022). Combining short-range dispersion simulations with fine-scale meteorological ensembles: probabilistic indicators and evaluation during a 85 Kr field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(24), 15793-15816. <https://doi.org/10.5194/acp-22-15793-2022>
- EL-SAÏD A., BROUSSEAU P., RIDAL M., & RAN-DRIAMAMPINANINA, R. (2022). Towards Full Flow-Dependence: New Temporally Varying EDA

- Quotient Functionality to Estimate Background Errors in CERRA. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14(2), e2021MS002637. <https://doi.org/10.1029/2021MS002637>
- ELSAESSER G., ROCA R., FIOLEAU T., GENIO A., WU J. (2022). A Simple Model for Tropical Convective Cloud Shield Area Growth and Decay Rates Informed by Geostationary IR, GPM, and Aqua/AIRS Satellite Data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127 (10), e2021JD035599, 10.1029/2021jd035599. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03717964>
- EMERY C., PARIS A., BIANCAMARIA S., BOONE A., CALMANTS S., GARAMBOIS P.-A., SILVA J. S. D., DAVID C. (2022). Discharge Estimation via Assimilation of Multisatellite-Based Discharge Products: Case Study Over the Amazon Basin. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19, 1-11, 10.1109/LGRS.2020.3020285. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02953999>
- ERDMANN F., O. CAUMONT, and É. DEFER, 2022-01: A Geostationary Lightning Pseudo-Observation Generator Utilizing Low-Frequency Ground-Based Lightning Observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 39, 3–30. <https://doi.org/10.1175/jtech-d-20-0160.1> <https://hal.science/hal-03970458v1>
- FAIN X., RHODES R., PLACE P., PETRENKO V., FOURTEAU K., CHELLMAN N., CROSIER E., MCCONNELL J., BROOK E., BLUNIER T., LEGRAND M., CHAPPELLAZ J. (2022). Northern Hemisphere atmospheric history of carbon monoxide since preindustrial times reconstructed from multiple Greenland ice cores. *Climate of the Past*, 18 (3), 631-647, 10.5194/cp-18-631-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03651284>
- FATHALLI M., LAC C., BURNET F., VIE B. (2022-07-12). Formation of fog due to stratus lowering: An observational and modeling case study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148 (746), 2299 - 2324, 10.1002/qj.4304. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03795958>
- FLAOUNAS E., DAVOLIO S., RAVEH-RUBIN S., PANTILLON F., MARCELLO MIGLIETTA M., GAERTNER M. A., HATZAKI M., HOMAR V., KHODAYAR S., KORRES G., KOTRONI V., KUSHTA J., REALE M., RICARD D. (2022). Mediterranean cyclones: current knowledge and open questions on dynamics, prediction, climatology and impacts. *Weather and Climate Dynamics*, 3, 173-208, 10.5194/wcd-3-173-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03610727>
- FLEURY A., BOUTTIER F., COUVREUX F. (2022). Process-oriented stochastic perturbations applied to the parametrization of turbulence and shallow convection for ensemble prediction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 10.1002/qj.4242. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03558571>
- FOURTEAU K., HAGENMULLER P., ROULLE J., DOMINE F. (2022). On the use of heated needle probes for measuring snow thermal conductivity. *Journal of Glaciology*, 68 (270), 705 - 719, 10.1017/jog.2021.127. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03870771>
- FRIEDLINGSTEIN P., JONES M. W., O'SULLIVAN M., ANDREW R. M., BAKKER D. C. E., HAUCK J., LE QUERE C., PETERS G. P., PETERS W., PONGRATZ J., SITCH S., CANADELL J. G., CIAIS P., JACKSON R. B., ALIN S. R., ANTHONI P., BATES N. R., BECKER M., BELLOUIN N., BOPP L., TUYET TRANG CHAU T., CHEVALLIER F., CHINI L. P., CRONIN M., CURRIE K. I., DECHARME B., DJEUTCHOUANG L. M., DOU X., EVANS W., FEELY R. A., FENG L., GASSER T., GILFILLAN D., GKRTZALIS T., GRASSI G., GREGOR L., GRUBER N., GURSES O., HARRIS I., HOUGHTON R. A., HURTT G. C., IIDA Y., ILYINA T., LUIJKX I. T., JAIN A., JONES S. D., KATO E., KENNEDY D., KLEIN GOLDEWIJK K., KNAUER J., KORSBAKKEN J. I., KORTZINGER A., LANDSCHUTZER P., LAUVSET S. K., LEFÈVRE N., LIENERT S., LIU J., MARLAND G., MCGUIRE P. C., MELTON J. R., MUNRO D. R., NABEL J. E. M. S., NAKAOKA S.-I., NIWAY, ONO T., PIERROT D., POULTER B., REHDER G., RESPLANDY L., ROBERTSON E., RODENBECK C., ROSAN T. M., SCHWINGER J., SCHWINGSHACKL C., SEFERIAN R., SUTTON A. J., SWEENEY C., TANHUA T., TANS P. P., TIAN H., TILBROOK B., TUBIELLO F., VAN DER WERF G. R., VUICHARD N., WADA N., WANNINKHOF R. H., WATSON A. J., WILLIS D., WILTSHIRE A. J., YUAN W., YUE C., YUE X., ZAEHLE S., ZENG J. (2022). Global Carbon Budget 2021. *Earth System Science Data*, 14, 1917-2005, 10.5194/essd-14-1917-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03668388>
- FRIEDLINGSTEIN P., O'SULLIVAN M., JONES M. W., ANDREW R. M., GREGOR L., HAUCK J., LE QUERE C., LUIJKX I. T., OLSEN A., PETERS G. P., PETERS W., PONGRATZ J., SCHWINGSHACKL C., SITCH S., CANADELL J. G., CIAIS P., JACKSON R. B., ALIN S. R., ALKAMA R., ARNETH A., ARORA V. K., BATES N. R., BECKER M., BELLOUIN N., BITTIG H. C., BOPP L., CHE-VALLIER F., CHINI L. P., CRONIN M., EVANS W., FALK S., FEELY R. A., GASSER T., GEHLER M., GKRTZALIS T., GLOEGE L., GRASSI G., GRUBER N., GURSES Ö., HARRIS I., HEFNER M., HOUGHTON R. A., HURTT G. C., IIDA Y., ILYINA T., JAIN A. K., JERSILD A., KADONO K., KATO E., KENNEDY D., KLEIN GOLDEWIJK K., KNAUER J., KORSBAKKEN J. I., LANDSCHÜTZER P., LEFÈVRE N., LINDSAY K., LIU J., LIU Z., MARLAND G., MAYOT N., MCGRATH M. J., METZ L. N., MONACCI N. M., MUNRO D. R., NAKAOKA S.-I., NIWA Y., O'BRIEN K., ONO T., PALMER P. I., PAN N., PIERROT D., POCOCCO K., POULTER B., RESPLANDY L., ROBERTSON E., RÖDENBECK C., RODRIGUEZ C., ROSAN T. M., SCHWINGER J., SÉFÉRIAN R., SHUTLER J. D., SKJELVAN I., STEINHOFF T., SUN Q., SUTTON A. J., SWEENEY C., TAKAO S., TANHUA T., TANS P. P., TIAN X., TIAN H., TILBROOK B., TSUJINO H., TUBIELLO F., VAN DER WERF G. R., WALKER A. P., WANNINKHOF R., WHITEHEAD C., WILLSTRAND WRANNE A., WRIGHT R., YUAN W., YUE C., YUE X., ZAEHLE S., ZENG J., and ZHENG B.: Global Carbon Budget 2022, *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.
- GANGNERON F., PIERRE C., ROBERT E., KERGOAT L., GRIPPA M., GUICHARD F., HIERNAUX P., LEAUTHAUD C. (2022-09-21). Persistence and success of the Sahel desertification narrative. *Regional Environmental Change*, 22, 10.1007/s10113-022-01969-1. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03815007>
- GAONA J., QUINTANA-SEGUI P., ESCORIHUELA M., BOONE A., LLASAT M. (2022-10-21). Interactions between precipitation, evapotranspiration and soil-moisture-based indices to characterize drought with high-resolution remote sensing and land-surface model data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22, 3461 - 3485, 10.5194/nhess-22-3461-2022 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03825969>
- GARCIA-BENADI A., BECH J., UDINA M., CAMPISTRON B., PACI A. (2022). Multiple Characteristics of Precipitation Inferred from Wind Profiler Radar Doppler Spectra. *Remote Sens.* 2022, 14, 5023. doi: 10.3390/rs14195023
- GASCOIN S., MONTEIRO D., MORIN S. (2022). Reanalysis-based contextualization of real-time snow cover monitoring from space. *Environmental Research Letters*, 17, 10.1088/1748-9326/ac9e6a. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03863697>
- GIORDANI H., PEYRILLE P. (2022). Dynamics of the Atlantic Marine Intertropical Convergence Zone. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, 10.1029/2021JD036392. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03863746>
- GIORIO C., DOUSSIN J.-F., D'ANNA B., MAS S., FILIPPI D., DENJEAN C., MALLET M. D., BOURRIANNE T., BURNET F., CAZAUNAU M., CHIKWILWA C., DESBOEUF S., FERON A., MICHOU V., NAMWOONDE A., ANDREA M. O., PIKETH S. J., and FORMENTI P. (2022). Butene emissions from coastal ecosystems may contribute to new particle formation. *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL098770 <https://doi.org/10.1029/2022GL098770>, <https://hal.science/insu-03749606/>
- GONZALEZ N., WALDMAN R., SANNINO G., GIORDANI H. and SOMOT S.: Understanding tidal mixing at the Strait of Gibraltar: A high-resolution model approach, 2023.
- GRANT L., L. GUDMUNDSSON, E.L. DAVIN, D.M. LAWRENCE, N. VUICHARD, E. ROBERTSON, R. SÉFÉRIAN, A. RIBES, A.L. HIRSCH, W. THIERY, 2022: Biogeophysical effects of land-use and land-cover change not detectable in warmest month. *Journal of Climate*, 1--38, doi:10.1175/JCLI-D-22-0391.1
- GUIMARAES P. V., ARDHUIN F., PERIGNON Y., BENETAZZO A., BOUIN M.-N., GARNIER V., REDELSPERGER J.-L., ACCENSI M., THOMSON J. (2022-08). Relative current effect on short wave growth. *Ocean Dynamics*, 72 (8), 621-639, 10.1007/s10236-022-01520-0. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03846433>
- HA M., BASTIN S., DROBINSKI P., FITA L., POLCHER J., BOCK O., CHIRIACO M., BELUIĆD., CAILLAUD C., DOBLER A., FERNANDEZ J., GOERGEN K., HODNEBROG O., KARTSIOS S., KATRAGKOU E., LAVIN-GULLON A., LORENZ T., MILOVAC J., PANITZ H.-J., SOBOLOWSKI S., TRUHETZ H., WARRACHSAGI K., WULFMEYER V. (2022). 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*, 10.1007/s00382-022-06594-6. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03916220>
- HAFFAR I., F. FLIN, C. GEINDREAU, N. PETILLON, P.-C. GERVAIS and V. EDERY, (2022). 3D micro-structure evolution of ice in jet A-1 fuel as a function of applied temperature over time, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 183(B), 122158. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122158>
- HAFFAR I., P. LATIL, F. FLIN, C. GEINDREAU, F. BONNEL, N. PETILLON, P.-C. GERVAIS and V. EDERY, (2022). Characterization of ice particles in jet fuel at low temperature: 3D X-ray tomography vs. 2D high-speed imaging, *Powder Technology*, 397, 116995. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.11.039>
- HARDOUIN L., DELIRE C., DECHARME B., LAWRENCE D., NABEL J., BROVKIN V., COLLIER N., FISHER R., HOFFMAN F., KOVEN C., SEFERIAN R., STACKE T. (2022-08-10). Uncertainty in land carbon budget simulated by terrestrial biosphere models. the role

- of atmospheric forcing. *Environmental Research Letters*, 10.1088/1748-9326/ac888d.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03749645>
- HATTENBERGER G., VERDU T., MAURY N., NARVOR P., COUVREUX F., BRONZ M., LACROIX S., CAYEZ G., ROBERTS G. (2022-01). Field report: Deployment of a fleet of drones for cloud exploration. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 14, 175682932110708, 10.1177/17568293211070830  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03520657>
- HAWKINS T.W., GOUIRAND I., ALLEN T., & BELMADANI, A. (2022). Atmospheric drivers of oceanic North swells in the Eastern Caribbean. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(2), 183.  
<https://doi.org/10.3390/jmse10020183>
- HERRERA-LORMENDEZ P., N. MASTRANTONAS, H. DOUVILLE, A. HOY, J. MATSCHULLAT (2022) Synoptic circulation changes over Central Europe from 1900 to 2100 - Reanalyses and Coupled Model Intercomparison Project phase 6, *Int. J. Climatol.*, 42, 4062-4077, DOI: 10.1002/joc.7481
- HITCHCOCK P., BUTLER A., CHARLTON-PEREZ A., GARFINKEL C., STOCKDALE T., ANSTEY J., MITCHELL D., DOMEISEN D., WU T., LU Y., MASTRANGELO D., MALGUZZI P., LIN H., MUNCASTER R., MERRYFIELD B., SIGMOND M., XIANG B., JIA L., HYUN Y.-K., OH J., SPECQ D., SIMPSON I., RICHTER J., BARTON C., KNIGHT J., LIM E.-P., HENDON H. (2022). Stratospheric Nudging And Predictable Surface Impacts (SNAPS): a protocol for investigating the role of stratospheric polar vortex disturbances in subseasonal to seasonal forecasts. *Geoscientific Model Development*, 15 (13), 5073-5092, 10.5194/gmd-15-5073-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03712677>
- HUBANS A., BERRE L., BOUTELOUP Y. & LOO C. (2022) Simulation of analysis error contributions arising from uncertainties in the parametrisation of deep convection. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(748) 3071–3086.
- JEZEQUEL E., BLONDEL F., MASSON V. (2022-06-02). Analysis of Wake Properties and Meandering under Different Cases of Atmospheric Stability: a Large Eddy Simulation Study. *Journal of Physics: Conference Series*, 2265 (2), 022067, 10.1088/1742-6596/2265/2/022067.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03735531>
- JOHN A., DOUVILLE H., RIBES A., YIOU P. (2022). Quantifying CMIP6 model uncertainties in extreme precipitation projections. *Weather and Climate Extremes*, 36, 10.1016/j.wace.2022.100435.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03775065>
- JONES A., HAYWOOD J., SCAIFE A., BOUCHER O., HENRY M., KRAVITZ B., LURTON T., NABAT P., NIEMEIER U., SEFERIAN R., TILMES S., VISIONI D. (2022). The impact of stratospheric aerosol intervention on the North Atlantic and Quasi-Biennial Oscillations in the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) G6sulfur experiment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22 (5), 2999-3016, 10.5194/acp-22-2999-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03617467>
- JUNCU D., CEAMANOS X., TRIGO I., GOMES S., FREITAS S. (2022). Upgrade of LSA-SAF Meteosat Second Generation daily surface albedo (MDAL) retrieval algorithm incorporating aerosol correction and other improvements. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 11 (2), 389-412, 10.5194/gi-11-389-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03871349>
- KAUSHIK S., CERINO B., TROUVE E., KARBOU F., YAN Y., RAVANEL L., MAGNIN F. (2022-06-30). Analysis of the Temporal Evolution of Ice Aprons in the Mont-Blanc Massif Using X and C-Band SAR Images. *Frontiers in Remote Sensing*, 3, 10.3389/frsen.2022.930021  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03709780>
- KHAYKIN, S., PODGLAJEN, A., PLOEGER, F. et al. Global perturbation of stratospheric water and aerosol burden by Hunga eruption. *Commun Earth Environ* 3, 316 (2022).  
<https://doi.org/10.1038/s43247-022-00652-x>
- KITTEL C., AMORY C., HOFER S., AGOSTA C., JOURDAIN N., GILBERT E., LETOUMELIN L., VIGNON E., GALLEE H., FETTWEIS X. (2022-07-07). Clouds drive differences in future surface melt over the Antarctic ice shelves. *The Cryosphere*, 16 (7), 2655 - 2669, 10.5194/tc-16-2655-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03722984>
- KOCHENDORFER J., EARLE M., RASMUSSEN R., SMITH C., YANG D., MORIN S., MEKIS E., BUISAN S., ROULET Y., LANDOLT S., WOLFF M., HOOVER J., THÉRIAULT J. M., LEE G., BAKER B., NITU R., LANZA L., COLLI M., & MEYERS T., How Well Are We Measuring Snow Post-SPIE ? (2022). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(2), E370-E388.  
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0228.1>
- KOLMAŠOVÁ I., SOULA S., SANTOLÍK O., FARGES, T., BOUSQUET O., DIENDORFER G., et al. (2022). A frontal thunderstorm with several multi-cell lines found to produce energetic preliminary breakdown. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2021JD035780.  
<https://doi.org/10.1029/2021JD035780>
- KONSTA D., DUFRESNE J.-L., CHEPFER H., VIAL J., KOSHIRO T., KAWAI H., et al. (2022). Low-level marine tropical clouds in six CMIP6 models are too few, too bright but also too compact and too homogeneous. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL097593.  
<https://doi.org/10.1029/2021GL097593>
- KOTLARSKI S., GOBIET A., MORIN S., OLEFS M., RAJCZAK J., SAMACOITS R. (2022). 21st Century alpine climate change. *Climate Dynamics*, 10.1007/s00382-022-06303-3.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03664434>
- KOVEN C., ARORA V., CADULE P., FISHER R., JONES C., LAWRENCE D., LEWIS J., LINDSAY K., MATHESIOUS S., MEINSHAUSEN M., MILLS M., NICHOLLS Z., SANDERSON B., SEFERIAN R., SWART N., WIEDER W., ZICKFELD K. (2022). Multi-century dynamics of the climate and carbon cycle under both high and net negative emissions scenarios. *Earth System Dynamics*, 13 (2), 885-909, 10.5194/esd-13-885-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03699493>
- KUMAR S., KOLASSA J., REICHLER R., CROW W., DE LANNOY G., DE ROSNAY P., MACBEAN N., GIROTTO M., FOX A., QUAIFE T., DRAPER C., FORMAN B., BALSAMO G., STEELE-DUNNE S., ALBERGEL C., BONAN B., CALVET J., DONG J., LIDDY H., RUSTON B. (2022-10-27). An Agenda for Land Data Assimilation Priorities: Realizing the Promise of Terrestrial Water, Energy, and Vegetation Observations From Space. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14, 10.1029/2022ms003259.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03842193>
- LACKNER G., DOMINE F., NADEAU D., LAFAYSSE M., DUMONT M. (2022). Snow properties at the forest-tundra ecotone: predominance of water vapor fluxes even in deep, moderately cold snowpacks. *The Cryosphere*, 16 (8), 3357-3373, 10.5194/tc-16-3357-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03768793>
- LACKNER G., DOMINE F., NADEAU D., PARENT A.-C., ANCTIL F., LAFAYSSE M., DUMONT M. (2022). On the energy budget of a low-Arctic snowpack. *The Cryosphere*, 16 (1), 127 - 142, 10.5194/tc-16-127-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03529922>
- LALANDE, J.-M., BOURMAUD, G., MINVIELLE, P., and GIOVANNELLI, J.-F.: A kriging-based analysis of cloud liquid water content using CloudSat data, *Atmos. Meas. Tech.*, 15, 4411–4429.  
<https://doi.org/10.5194/amt-15-4411-2022>, 2022
- LANGFORD A. O., SENFF C. J., ALVAREZ II R. J., AIKIN K. C., BAIDAR S., BONIN T. A., BREWER W. A., BRIOUDE J., BROWN S. S., BURLEY J. D., CAPUTI D. J., CONLEY S. A., CULLIS P. D., DECKER Z. C. J., EVAN S., KIRGIS G., LIN M., PAGOWSKI M., PEISCHL J., PETROPAVLOVSKIKH I., PIERCE R. B., RYERSON T. B., Sandberg S. P., STERLING C. W., WEICKMANN A. M., and ZHANG L.: The Fires, Asian, and Stratospheric Transport–Las Vegas Ozone Study (FAST-LVOS), *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 1707–1737.  
<https://doi.org/10.5194/acp-22-1707-2022>, 2022
- LATIL P., A. ZENNOUNE, F.-T. NDOYE, F. FLIN, C. GEINDREAU and H. BENKHELIFA, (2022). X-ray microtomography of ice crystal formation and growth in a sponge cake during its freezing and storage, *Journal of Food Engineering*, 325, 110989.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.110989>
- LE MOIGNE P., BAZILE E., CHENG A., DUTRA E., EDWARDS J., MAUREL W., SANDU I., TRAUILLÉ O., VIGNON E., ZADRA A., ZHENG W. (2022-06-10). GABLS4 intercomparison of snow models at Dome C in Antarctica. *The Cryosphere*, 16 (6), 2183-2202, 10.5194/tc-16-2183-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03693663>
- LE ROUX E., EVIN G., ECKERT N., BLANCHET J., MORIN S. (2022). A non-stationary extreme-value approach for climate projection ensembles: application to snow loads in the French Alps. *Earth System Dynamics*, 13 (3), 1059-1075, 10.5194/esd-13-1059-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03740012>
- LE TOUMELIN L., GOUTTEVIN I., HELBIG N., GALIEZ C., ROUX M., & KARBOU F. (2022). Emulating the adaptation of wind fields to complex terrain with deep-learning. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 1-39.
- LEMONSU A., DE MUNCK C., REDON E., MASSON V., KERAVEC P., RODRIGUEZ F., PINEAU L., LE-GAIN D. (2022-01). Influence of the Local Urban Environment on the Thermoradiative and Hydrological Behavior of a Garden Lawn. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 61, 25 - 42, 10.1175/jamc-d-21-0067.1.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03559703>
- LEPETIT P., LY C., BARTHES L., MALLET C., VILTARD N., LEMAITRE Y., ROTTNER L. (2022). Using Deep Learning for Restoration of Precipitation Echoes in Radar Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 5100914, 10.1109/TGRS.2021.3052582.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03151106>
- LIBOIS Q., DAVIS A. (2022). Photon path distributions in optically thin slabs. *Optics Express*, 30 (22), 40968, 10.1364/OE.464033.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03836304>

- LOVAT A., B. VINCENDON V. DUCROCQ, 2022: Hydrometeorological evaluation of two nowcasting systems for Mediterranean heavy precipitation events with operational considerations. *Hydro. Earth Syst. Sci.*, 26, 2697–2714. DOI : [10.5194/hess-26-2697-2022](https://doi.org/10.5194/hess-26-2697-2022)
- LUU L. N., VAUTARD R., YIOU P., and SOUBEYROUX J.-M.: Evaluation of convection-permitting extreme precipitation simulations for the south of France. *Earth Syst. Dynam.*, 13, 687–702. <https://doi.org/10.5194/esd-13-687-2022>, 2022
- MALLET M., NABAT P., DI SARRA A. G., SOLMON F., GUTIÉRREZ C., MAILLER S., MENUT L., KAS-KAOUTIS D., ROWLINSON M., RAP A. and DULAC F. (2022) : Aerosol and Tropospheric Ozone Direct Radiative Impacts, In : Dulac, F., Sauvage, S., Hamonou, E. (eds) *Atmospheric Chemistry in the Mediterranean Region*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-82385-6\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-82385-6_19)
- MARQUES E., MASSON V., NAVEAU P., MESTRE O., DUBREUIL V., RICHARD Y. (2022-02-02). Urban heat island estimation from crowdsensing thermometers embedded in personal cars. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 10.1175/BAMS-D-21-0174.1. <https://hal.archives-ouvertes.fr/halshs-03582141>
- MARQUET P., MARTINET P., MAHFOUF J.-F., BARBU A. L., MENETRIER B. (2022). Towards the use of conservative thermodynamic variables in data assimilation: a case study using ground-based microwave radiometer measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15 (7), 2021-2035, 10.5194/amt-15-2021-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03633490>
- MARQUET P., STEVENS B. (2022-04). On Moist Potential Temperatures and Their Ability to Characterize Differences in the Properties of Air Parcels. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 79 (4), 1089-1103, 10.1175/JAS-D-21-0095.1. <https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03633493>
- MARTEL J.-L., BRISSETTE F., TROIN M., ARSENAULT R., CHEN J., SU T., LUCAS-PICHER P. (2022). CMIP5 and CMIP6 Model Projection Comparison for Hydrological Impacts Over North America. *Geophysical Research Letters*, 49, 10.1029/2022GL098364. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03863747>
- MARTINEAU C., LANGLOIS A., GOUTTEVIN I., NEAVE E., JOHNSON C. (2022-03-14). Improving Peary Caribou Presence Predictions in MaxEnt Using Spatialized Snow Simulations. *Arctic*, 75 (1), 55-71, 10.14430/arctic74868. <https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03930133>
- MARTINET P., UNGER V., BURNET F., GEORGIS J.-F., HERVO M., HUET T., LÖHNERT U., MILLER E., ORLANDI E., PRICE J., SCHRÖDER M., and THOMAS G. A dataset of temperature, humidity, and liquid water path retrievals from a network of ground-based microwave radiometers dedicated to fog investigation. *Bull. of Atmos. Sci. & Technol.* 3, 6 (2022). <https://doi.org/10.1007/s42865-022-00049-w>
- MATOZA R.S., D. FEE, J.D. ASSINK, A.M. IEZZI, D.N. GREEN, K. KIM, L. TONEY, T. LECOQC, S. KRISHNAMOORTHY, J.-M. LALANDE, K. NISHIDA, K.L. GEE, M.M. HANEY, H.D. ORTIZ, Q. BRISSAUD, L. MARTIRE, L. ROLLAND, P. VERGADOS, A. NIPPRESS, J. PARK, S. SHANI-KADMIEL, A. WITSIL, S. ARROWSMITH, C. CAUDRON, S. WATADA, A.B. PERTTU, B. TAISNE, P. MIALLE, A. LE PICHON, J. VERGOZ, P. HUPE, P.S. BLOM, R. WAXLER, S. DE ANGELIS, J.B. SNIVELY, A.T. RINGLER, R.E. ANTHONY, A.D. JOLLY, G. KILGOUR, G. AVERBUCH, M. RIPEPE, M. ICHIHARA, A. ARCINIEGA-CEBALLOS, E. ASTAFYEVA, L. CERANNA, S. CEVUARD, I.-Y. CHE, R. DE NEGRI, C.W. EBELING, L.G. EVERS, L.E. FRANCO-MARIN, T.B. GABRIELSON, K. HAFNER, R.G. HARRISON, A. KOMJATHY, G. LACANNA, J. LYONS, K.A. MACPHERSON, E. MARCHETTI, K.F. MCKEE, R.J. MELLORS, G. MENDO-PÉREZ, T.D. MIKESSELL, E. MUNAIBARI, M. OYOLA-MERCEDES, I. PARK, C. PILGER, C. RAMOS, M.C. RUIZ, R. SABATINI, H.F. SCHWAIGER, D. TAILPIED, C. TALMADGE, J. VIDOT, J. WEBSTER, D.C. WILSON (2022), Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga, *Science*, doi:10.1126/science.abo7063
- MAURY N., ROBERTS G., COUVREUX F., VERDU T., NARVOR P., VILLEFRANQUE N., LACROIX S., HATTENBERGER G. (2022-01-21). Use of Large-Eddy simulations to design an adaptive sampling strategy to assess cumulus cloud heterogeneities by Remotely Piloted Aircraft. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10.5194/amt-15-335-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03156025>
- MAZOYER M., BURNET F., DENJEAN C. (2022). Experimental study on the evolution of droplet size distribution during the fog life cycle. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22 (17), 11305 - 11321, 10.5194/acp-22-11305-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03772261>
- MAZOYER M., ROEHRIG R., DUFFOURG F., NUISSEIER O. (2022). Simulating a Mediterranean heavy-precipitating event with parametrized convection: role of subgrid-scale topography. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, , 10.1002/qj.4369. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03860082>
- MELNIKOVA I., BOUCHER O., CADULE P., TANAKA K., GASSERT, HAJIMA T., QUILCALLEY Y., SHIOGAMA H., SEFERIAN R., TACHIRI K., VUICHARD N., YOKOHATA T., CIAIS P. (2022). Impact of bioenergy crop expansion on climate-carbon cycle feedbacks in overshoot scenarios. *Earth System Dynamics*, 13 (2), 779-794, 10.5194/esd-13-779-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03650362>
- MONTEIRO D., CAILLAUD C., SAMACOITS R., LAFAYSSE M., MORIN S. (2022). Potential and limitations of convection-permitting CNRM-AROME climate modelling in the French Alps. *International Journal of Climatology*, 10.1002/joc.7637. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03660661>
- MORGENSTERN O., KINNISON D. E., MILLS M., MICHOU M., HOROWITZ L. W., LIN P., DEUSHI M., YOSHIDA K., O'CONNOR F. M., TANG Y., ABRAHAM N. L., KEEBLE J., DENNISON F., ROZANOV E., EGOROVA T., SUKHODOLOV T., ZENG G. (2022). Comparison of Arctic and Antarctic Stratospheric Climates in Chemistry Versus No-Chemistry Climate Models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, 10.1029/2022JD037123. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03863727>
- MOUNIER A., RAYNAUD L., ROTTNER L., PLU M., ARBOGAST P., KREITZ M., MIGNAN L., TOUZE B. (2022-02-01). Detection of bow echoes in kilometer-scale forecasts using a convolutional neural network. *Artificial Intelligence for the Earth Systems (AIES)*, 10.1175/AIES-D-21-0010.1. <https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03811214>
- MUCIA, A., BONAN, B., ALBERGEL, C., ZHENG, Y., and CALVET, J.-C.: Assimilation of passive microwave vegetation optical depth in LDAS-Monde: a case study over the continental USA, *Biogeosciences*, 19, 2557–2581. <https://doi.org/10.5194/bg-19-2557-2022>, 2022
- MULLER S. K., CAILLAUD C., CHAN S., DEVRIES H., BASTIN S., BERTHOU S., BRISSON E., DEMORY M.-E., FELDMANN H., GOERGEN K., KARTSIOS S., LIND P., KEULER K., PICHELLI E., RAFFA M., TOLLE M. H., WARRACH-SAGI K. (2022). Evaluation of Alpine-Mediterranean precipitation events in convection-permitting regional climate models using a set of tracking algorithms. *Climate Dynamics*, 10.1007/s00382-022-06555-z. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03863724>
- MUNIER S., DECHARME B. (2022). River network and hydro-geomorphological parameters at 1/12° resolution for global hydrological and climate studies. *Earth System Science Data*, 14 (5), 2239 - 2258, 10.5194/essd-14-2239-2022. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03665953>
- NABAT P., KANJI Z.A., MALLET M., DENJEAN C., SOLMON F. (2022): *Aerosol-Cloud Interactions and Impact on Regional Climate*, In : Dulac, F., Sauvage, S., Hamonou, E. (eds) *Atmospheric Chemistry in the Mediterranean Region*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-82385-6\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-82385-6_20)
- NAGEL T., SCHOETTER R., MASSON V., LAC C., CARISSIMO B. (2022). Numerical Analysis of the Atmospheric Boundary-Layer Turbulence Influence on Microscale Transport of Pollutant in an Idealized Urban Environment. *Boundary-Layer Meteorology*, 10.1007/s10546-022-00697-7. <https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03625286>
- ORTEGA P., BLOCKLEY E. W., KOLTZOW M., MASSONNET F., SANDU I., SVENSSON G., ACOSTA NAVARRO J. C., ARDUINI G., BATTE L., BAZILE E., CHEVALLIER M., CRUZ-GARCIA R., DAY J. J., FICHEFET T., FLOCCO D., GUPTA M., HARTUNG K., HAWKINS E., HINRICHS C., MAGNUSON L., MORENO-CHAMARRO E., PEREZ-MONTERO S., PONSONI L., SEMMLER T., SMITH D., STERLIN J., TJERNSTROM M., VALISUO I., JUNG T. (2022). Improving Arctic Weather and Seasonal Climate Prediction: Recommendations for Future Forecast Systems Evolution from the European Project APPLICATE. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103, E2203-E2213, 10.1175/BAMS-D-22-0083.1. <https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03863729>
- OSULLIVAN M., FRIEDLINGSTEIN P., SITCH S., ANTHONI P., ARNETH A., ARORA V., BASTRIKOV V., DELIRE C., GOLL D., JAIN A., KATO E., KENNEDY D., KNAUER J., LIENERT S., LOMBARDOZZI D., MCGUIRE P., MELTON J., NABEL J., PONGRATZ J., POULTER B., SEFERIAN R., TIAN H., VUICHARD N., WALKER A., YUAN W., YUE X., ZAEHLE S. (2022-08-15). Process-oriented analysis of dominant sources of uncertainty in the land carbon sink. *Nature Communications*, 13 (1), 4781, 10.1038/s41467-022-32416-8. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03763263>
- PEATIERS, SANDERSON B. M., TERRAYL, & ROEHRIG R. (2022). Investigating parametric dependence of climate feedbacks in the atmospheric component of CNRM-CM6-1. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL095084. <https://doi.org/10.1029/2021GL095084>
- PEREZ-ZANON N., CARON L.-P., TERZAGO S., VAN SCHAEYBROECK B., LLEDO L., MANUBENS N., ROULIN E., ALVAREZ-CASTRO M. C., BATTE L., BRETONNIERE P.-A., CORTI S., DELGADO-TORRES C., DOMINGUEZ M., FABIANO F., GIUNTOLI I., VON HARDENBERG J., SANCHEZ-GARCIA E., TORRALBA

- V., VERFAILLIE D. (2022). Climate Services Toolbox (CSTools) v4.0: from climate forecasts to climate forecast information. *Geoscientific Model Development*, 15 (15), 6115-6142, 10.5194/gmd-15-6115-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03752392>
- PIANEZZE J., BEUVIER J., LEBEAUPIN BROSSIER C., SAMSON G., FAURE G., GARRIC G. (2022-04-12). Development of a forecast-oriented kilometre-resolution ocean-atmosphere coupled system for western Europe and sensitivity study for a severe weather situation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22 (4), 1301-1324, 10.5194/nhess-22-1301-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03640576>
- PIC R., DOMBRY C., NAVEAU P., & TAILLARDAT M. (2022). Distributional regression and its evaluation with the CRPS: bounds and convergence of the minimax risk. *International Journal of Forecasting*. ISSN 0169-2070.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2022.11.001>
- POURRET, V., ŠAVLI, m., MAHFOUF, J.-F., RASPAUD, D., DOERENBECHER, A., BÉNICHOU, H., PAYAN, C. Operational assimilation of Aeolus winds in the Météo-France global NWP model ARPEGE. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume 148, Issue 747 p. 2652-2671.  
<https://doi.org/10.1002/qj.4329, 2022>
- QASMI S., A. RIBES, 2022: Reducing uncertainty in local climate projections, *Science Advances*, 8(41), doi:10.1126/sciadv.abo6872.
- RADICE C., BROGNIÉZ H., KIRSTETTER P.-E., CHAMBON P. (2022). Novel assessment of numerical forecasting model relative humidity with satellite probabilistic estimates. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22 (6), 3811–3825, 10.5194/acp-22-3811-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03364623>
- REBOREDO B., BELLON G. (2022). Scale Sensitivity of the Gill Circulation. Part I: Equatorial Case. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 79 (1), 3-17, 10.1175/JAS-D-21-0067.1.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03761067>
- RÉMY S., KIPLING Z., HUIJNEN V., FLEMMING J., NABAT P., MICHOU M., ADES M., ENGELEN R., and PEUCH V.-H. (2022): Description and evaluation of the tropospheric aerosol scheme in the Integrated Forecasting System (IFS-AER, cycle 47R1) of ECMWF, *Geosci. Model Dev.*, 15, 4881-4912.  
<https://doi.org/10.5194/gmd-15-4881-2022>
- REUTER B., VIALON-GALINIER L., HORTON S., VAN HERWIJNEN A., MAYER S., HAGENMULLER P., MORIN S. (2022). Characterizing snow instability with avalanche problem types derived from snow cover simulations. *Cold Regions Science and Technology*, 194, 103462, 10.1016/j.coldregions.2021.103462.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03794746>
- REVEILLET M., DUMONT M., GASCOIN S., LA-FAYSSE M., NABAT P., RIBES A., NHEILI R., TUZET F., MENEGOUZ M., MORIN S., PICARD G., GINOUX P. (2022). Black carbon and dust alter the response of mountain snow cover under climate change. *Nature Communications*, 13 (1), 5279, 10.1038/s41467-022-32501-y.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03783979>
- RIBES A., BOE J., QASMI S., DUBUISSON B., DOUVILLE H., TERRAY L. (2022). An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint. *Earth System Dynamics*, 13 (4), 1397-1415, 10.5194/esd-13-1397-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03815381>
- RIEUTORD T., MARTINET P., PACI A. (2022). Toward instrument combination for boundary layer classification. *Atmospheric Science Letters*, e1144.  
doi: 10.1002/asl.1144
- RINDRAHARISAONA E. J., RÉCHOU A., FONTAINE F. R., BARRUOL G., STAMENOFF P., BOUDEVILLAIN B., et al. (2022). Seismic signature of rain and wind inferred from seismic data. *Earth and Space Science*, 9, e2022EA002328.  
<https://doi.org/10.1029/2022EA002328>
- ROBLEDANO A., PICARD G., ARNAUD L., LARUE F., OLLIVIER I. (2022). Modelling surface temperature and radiation budget of snow-covered complex terrain. *The Cryosphere*, 16, 559-579, 10.5194/tc-16-559-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03668391>
- ROCCO M., BARAY J.-L., COLOMB A., BORBON A., DOMINUTTI P., TULET P., et al. (2022). High resolution dynamical analysis of volatile organic compounds (VOC) measurements during the BIO-MAÏDO field campaign (Réunion Island, Indian Ocean). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2021JD035570.  
<https://doi.org/10.1029/2021JD035570>
- ROTACH M. W., SERAFIN S., WARD H. C., ARPAGAU M., COLFESCU I., CUXART J., DE WEKKER S. F. J., GRUBIIC V., KALTHOFF N., KARL T., KIRSHBAUM D. J., LEHNER M., MOBBS S., PACI A., PALAZZI E., BAILEY A., SCHMIDLING J., WITTMANN C., WOHLFAHRT G., ZARDI D. (2022). A Collaborative Effort to Better Understand, Measure, and Model Atmospheric Exchange Processes over Mountains. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103, E1282-E1295, 10.1175/BAMS-D-21-0232.1.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03863769>
- RUGGIERI P., BENASSI M., MATERIA S., PEANO D., ARDILOUZE C., BATTE L., GUALDI S. (2022-01-31). On the role of Eurasian autumn snow cover in dynamical seasonal predictions. *Climate Dynamics*, 10.1007/s00382-021-06016-z.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03551442>
- SANOGO S., PEYRILLÉ P., ROEHRIG R., GUICHARD F., & OUEDRAOGO O. (2022). Extreme Precipitating Events in Satellite and Rain Gauge Products over the Sahel, *Journal of Climate*, 35(6), 1915-1938.  
<https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/35/6/JCLI-D-21-0390.1.xml>
- SANTANA-FALCON Y., SEFERIAN R. (2022). Climate change impacts the vertical structure of marine ecosystem thermal ranges. *Nature Climate Change*, 10.1038/s41558-022-01476-5.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03792134>
- SCHNEIDER R., MASSELOT P., VICEDO-CABRERA A. M., SERA F., BLANGIARDO M., FORLANI C., DOUROS J., JORBA O., ADANI M., KOUZNETSOV R., COUVIDAT F., ARTETA J., RAUX B., GUEVARA M., COLETTE A., BARRE J., PEUCH V.-H., GASPARRINI A. (2022). Differential impact of government lockdown policies on reducing air pollution levels and related mortality in Europe. *Scientific Reports*, 12, 10.1038/s41598-021-04277-6.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03668393>
- SEBOK E., HENRIKSEN H., PASTEN-ZAPATA E., BERG P., THIREL G., LEMOINE A., LIRA-LOARCA A., PHOTIADOU C., PIMENTEL R., ROYER-GASPARD P., KJELLSTROM E., CHRISTENSEN J., VIDAL J., LUCAS-PICHER P., DONAT M., BESIO G., POLO M., STISEN S., CABALLERO Y., PECHLIVANIDIS I., TROLDORGBORG L., REFSGAARD J. (2022-11-09). Use of expert elicitation to assign weights to climate and hydrological models in climate impact studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26 (21), 5605 - 5625, 10.5194/hess-26-5605-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03869478>
- SEILER C., MELTON J. R., ARORA V. K., SITCH S., FRIEDLINGSTEIN P., ANTHONI P., GOLL D., JAIN A. K., JOETZJER E., LIENERT S., LOMBARDOZZI D., LUYSSAERT S., NABEL J. E. M. S., TIAN H., VUICHARD N., WALKER A. P., YUAN W., ZAEHLE S. (2022). Are Terrestrial Biosphere Models Fit for Simulating the Global Land Carbon Sink?. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14 (5), e2021MS002946, 10.1029/2021MS002946.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03721929>
- SELBONNE S., GUINDÉ L., BELMADANI A., BONINE C., CAUSERET F., DUVAL M., SIERRA J., & BLAZY J.M. (2022). Designing scenarios for upscaling climate-smart agriculture in a small tropical island. *Agricultural Systems*, 199, 103408.  
<https://doi.org/10.1016/j.agry.2022.103408>
- SELLITTO, P., PODGLAJEN, A., BELHADJI, R. et al. The unexpected radiative impact of the Hunga Tonga eruption of 15th January 2022. *Commun Earth Environ* 3, 288 (2022).  
<https://doi.org/10.1038/s43247-022-00618-z>
- SHAN X., STEELE-DUNNE S., HUBER M., HAHN S., WAGNER W., BONAN B., ALBERGEL C., CALVET J.-C., KU O., GEORGIEVSKA S. (2022-06-30). Towards constraining soil and vegetation dynamics in land surface models: Modeling ASCAT backscatter incidence-angle dependence with a Deep Neural Network. *Remote Sensing of Environment*, 279, 113116, 10.1016/j.rse.2022.113116.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03737850>
- SILVEIRA B. B., FOURRIÉ N., GUIDARD V., CHAMBON P., MAHFOUF J.-F., BROUSSEAU P., MOLL P., AUGUST T., HULTBERG T. (2022-04). Preliminary Assessment of MetOp-Based Temperature and Humidity Statistical Retrievals within the 3D-Var AROME-France Prediction System. *Monthly Weather Review*, 150 (4), 733-752, 10.1175/MWR-D-20-0189.1.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03753645>
- SOARES P., CARETO J., CARDOSO R., GOERGEN K., KATRAGKOU E., SOBOLOWSKI S., COPPOLA E., BAN N., BELUÍC D., BERTHOU S., CAILLAUD C., DOBLER A., HODNEBROG O., KARTSIOS S., LENDERINK G., LORENZ T., MILOVAC J., FELDMANN H., PICHELLI E., TRUHETZ H., DEMORY M.-E., DEVRIES H., WARRACH-SAGI K., KEULER K., RAFFA M., TOLLE M., SIECK K., BASTIN S. (2022-12-23). The added value of km-scale simulations to describe temperature over complex orography: the CORDEX FPS-Convection multi-model ensemble runs over the Alps. *Climate Dynamics*, 10.1007/s00382-022-06593-7.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/insu-03913367>
- SOLIDORO C., COSSARINI G., LAZZARI P., GALLI G., BOLZON G., SOMOT S., SALON S. (2022). Modeling Carbon Budgets and Acidification in the Mediterranean Sea Ecosystem Under Contemporary and Future Climate. *Frontiers in Marine Science*, 8, 781522, 10.3389/fmars.2021.781522.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03932110>
- SPECQ D., BATTE L. (2022-01-10). Do subseasonal forecasts take advantage of Madden-Julian oscillation windows of opportunity?. *Atmospheric Science Letters*, 10.1002/asl.1078.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03593972>

- STRAUSS C., RICARD D. and LAC C.: Dynamics of the Cloud-Environment Interface and turbulent effects in a LES of a growing cumulus congestus. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 79(3), 593-619.
- TAILLARDAT M., FOUGERES A.-L., NAVEAU P., DE FONDEVILLE R. (2022-08). Evaluating probabilistic forecasts of extremes using continuous ranked probability score distributions. *International Journal of Forecasting*, , 10.1016/j.ijforecast.2022.07.003.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03775400>
- TARANU I. S., SOMOT S., ALIAS A., BOE J., DELIRE C. (2022-10-12). Mechanisms behind large-scale inconsistencies between regional and global climate model-based projections over Europe. *Climate Dynamics*, 10.1007/s00382-022-06540-6.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03852777>
- THOMAN, R., DRUCKENMILLER, M., MOON, T., ANDREASSEN, L., BAKER, E., et al.. The Arctic. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2022, 103 (8), pp.S257-S306.  
10.1175/BAMS-D-22-0082.1  
[hal-03982226](https://hal-03982226)
- TIBÉRI-WADIER A.-L., N. GOUTAL, S. RICCI, P. SERGENT, J. VIATGÉ, C. MONTEIL & F. BOUITIER, 2022 : Etude de sensibilité globale comparée des modèles hydrologiques GRP et MORDOR-TS, La Houille Blanche LHB Hydrosience, 107 : 1, 1-11. Published online on 10 Jan 2022.  
<https://doi.org/10.1080/27678490.2021.1977014> et  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03520636v1>
- TIDIGA M., BERTHET G., JÉGOU F., KLOSS C., BÈGUE N., VERNIER J.-P., RENARD J.-B., BOSSOLASCO A., CLARISSE L., TAHA G., et al. Variability of the Aerosol Content in the Tropical Lower Stratosphere from 2013 to 2019: Evidence of Volcanic Eruption Impacts. *Atmosphere* 2022, 13, 250.  
<https://doi.org/10.3390/atmos13020250>
- TILMES S., VISIONI D., JONES A., HAYWOOD J., SEFERIAN R., NABAT P., BOUCHER O., MONICA BEDNARZ E., NIEMEIER U. (2022-04-08). Stratospheric ozone response to sulfate aerosol and solar dimming climate interventions based on the G6 Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10.5194/acp-22-4557-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03640125>
- TOMASINI M., GUICHARD F., COUVREUX F., ROEHRIG R., BARBIER J. (2022-08-24). Spurious effects of the deep convection parameterisation on the simulation of a Sahelian heatwave. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 10.1002/qj.4365.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03821218>
- TSANG L., DURAND M., DERKSEN C., BARROS A., KANG D.-H., LIEVENS H., MARSHALL H.-P., ZHU J., JOHNSON J., KING J., LEMMETYINEN J., SANDELLS M., RUTTER N., SIQUEIRA P., NOLIN A., OSMANOGLU B., VUYOVICH C., KIM E., TAYLOR D., MERKOURIADI I., BRUCKER L., NAVARI M., DUMONT M., KELLY R., KIM R. S., LIAO T.-H., BORAH F., XU X. (2022). Review article: Global monitoring of snow water equivalent using high-frequency radar remote sensing. *The Cryosphere*, 16 (9), 3531-3573, 10.5194/tc-16-3531-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03768795>
- TSCHANZ L., ARLLOT M.-P., PHILIPPE F., VIDAUD L., MORIN S., MALDONADO E., GEORGE E., SPIEGELBERGER T. (2022). A transdisciplinary method, knowledge model and management framework for climate change adaptation in mountain areas applied in the Vercors, France. *Regional Environmental Change*, 22 (1), 15, 10.1007/s10113-021-01862-3.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03543278>
- VERNAY M., LAFAYSSE M., MONTEIRO D., HAGENMULLER P., NHEILI R., SAMACOITS R., VERFAILLIE D., MORIN S. (2022). The S2M meteorological and snow cover reanalysis over the French mountainous areas: description and evaluation (1958–2021). *Earth System Science Data*, 14 (4), 1707-1733, 10.5194/essd-14-1707-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03639748>
- VIALON-GALINIER L., HAGENMULLER P., REUTER B., ECKERT N. (2022-09). Modelling snowpack stability from simulated snow stratigraphy: Summary and implementation examples. *Cold Regions Science and Technology*, 201, 103596, 10.1016/j.coldregions.2022.103596.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03795545>
- VILLEFRANQUE N., HOURDIN F., BLANCO S., BOUCHER O., CALIOT C., COUSTET C., DAUCHET J., EL-HAFI M., EYMET V., FARGES O., FOREST V., FOURNIER R., GAUTRAIS J., MASSON V., PIAUD B., SCHOETTER R. (2022). The “teapot in a city”: A paradigm shift in urban climate modeling. *Review. Science Advances*, 8 (27), 10.1126/sciadv.abp8934.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03718009>
- VIONNET V., VERVILLE M., FORTIN V., BRUGMAN M., ABRAHAMOWICZ M., LEMAY F., THERIAULT J., LAFAYSSE M., MILBRANDT J. (2022-12). Snow Level From Post-Processing of Atmospheric Model Improves Snowfall Estimate and Snowpack Prediction in Mountains. *Water Resources Research*, 58 (12), 10.1029/2021WR031778.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03894345>
- VIVIROLI D., SIKORSKA-SENONER A., EVIN G., STAUDINGER M., KAUZLARIC M., CHARDON J., FAVRE A.-C., HINGRAY B., NICOLET G., RAYNAUD D., SEIBERT J., WEINGARTNER R., WHEALTON C. (2022). Comprehensive space-time hydrometeorological simulations for estimating very rare floods at multiple sites in a large river basin. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10.5194/nhess-2022-99.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03740021>
- Voltaire, A., Roehrig, R., Giordani, H., Waldman, R., Zhang, Y., Xie, S., and Bouin, M.-N.: Assessment of the sea surface temperature diurnal cycle in CNRM-CM6-1 based on its 1D coupled configuration, *Geosci. Model Dev.*, 15, 3347–3370.  
<https://doi.org/10.5194/gmd-15-3347-2022>, 2022.
- WAGNER W., LINDORFER R., MELZER T., HAHN S., BAUER-MARSCHALLINGER B., MORRISON K., CALVET J.-C., HOBBS S., QUAST R., GREIMEISTER-PFEIL I., VREUGDENHIL M. (2022-04-22) Widespread occurrence of anomalous C-band backscatter signals in arid environments caused by subsurface scattering. *Remote Sensing of Environment*, 10.1016/j.rse.2022.113025.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03650778>
- WANG Y., MAO J., HOFFMAN F.M., BONFILS C.J.W., DOUVILLE H., et al. (2022) Quantification of human contribution to soil moisture based terrestrial aridity. *Nature Communications*, 6848.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-34071-5>
- WESTON M., PIKETH S., BURNET F., BROCCARDO S., DENJEAN C., BOURRIANNE T., FORMENTI P. (2022-08-10). Sensitivity analysis of an aerosol-aware microphysics scheme in Weather Research and Forecasting (WRF) during case studies of fog in Namibia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22 (15), 10221 - 10245, 10.5194/acp-22-10221-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03836137>
- WILLIAMS J. E., HUIJINEN V., BOUARAR I., MEZIANE M., SCHREURS T., PELLETIER S., MARECAL V., JOSSE B., FLEMMING J. (2022-06-17). Regional evaluation of the performance of the global CAMS chemical modeling system over the United States (IFS cycle 47r1). *Geoscientific Model Development*, 15 (12), 4657 - 4687, 10.5194/gmd-15-4657-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03768158>
- WIMMER M., RIVIERE G., ARBOGAST P., PIRIOU J.-M., DELANOE J., LABADIE C., CAZENAVE Q., PELON J. (2022). Diabatic processes modulating the vertical structure of the jet stream above the cold front of an extratropical cyclone: sensitivity to deep convection schemes. *Weather and Climate Dynamics*, 3 (3), 863–882, 10.5194/wcd-3-863-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03435603>
- WITSCHAS B., LEMMERZ C., LUX O., MARKSTEINER U., REITEBUCH O., WEILER F., FABRE F., DABAS A., FLAMENT T., HUBER D., VAUGHAN M. (2022). Spectral performance analysis of the Aeolus Fabry–Pérot and Fizeau interferometers during the first years of operation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15, 1465 - 1489, 10.5194/amt-15-1465-2022.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/meteo-03612371>
- XIE Y., LIN M., DECHARME B., DELIRE C., HOROWITZ L., LAWRENCE D., LI F., SEFERIAN R. (2022-03-28). Tripling of western US particulate pollution from wildfires in a warming climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119 (14), 10.1073/pnas.2111372119.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03624043>
- XUE Y., DIALLO I., BOONE A., YAO T., ZHANG Y., ZENG X., DAVID NEELIN J., LAU W. K., PAN Y., LIU Y., PAN X., TANG Q., VAN OEVELEN P., SATO T., KOO M.-S., MATERIA S., SHI C., YANG J., ARDILLOUZE C., LIN Z., QI X., NAKAMURA T., SAHA S., SENAN R., TAKAYA Y., WANG H., ZHANG H., ZHAO M., PRASAD NAYAK H., CHEN Q., FENG J., BRUNKE M., FAN T., HONG S., NOBRE P., PEANO D., QIN Y., VITART F., XIE S., ZHAN Y., KLOCKE D., LEUNG R., LI X., EK M., GUO W., BALSAMO G., BAO Q., CHAN CHOU S., DE ROSNAY P., LIN Y., ZHU Y., QIAN Y., ZHAO P., TANG J., LIANG X.-Z., HONG J., JI D., JI Z., QIU Y., SUGIMOTO S., WANG W., YANG K., YU M. (2022-09-17). Spring Land Temperature in Tibetan Plateau and Global-Scale Summer Precipitation – Initialization and Improved Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, , 10.1175/BAMS-D-21-0270.1.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03841503>
- YANG H., CIAIS P., WIGNERON J.-P., CHAVE J., CARTUS O., CHEN X., FAN L., GREEN J., HUANG Y., JOETZJER E., KAY H., MAKOWSKI D., MAIGNAN F., SANTORO M., TAO S., LIU L., YAO Y. (2022-06-28). Climatic and biotic factors influencing regional declines and recovery of tropical forest biomass from the 2015/16 El Niño. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119 (26), 108301, 10.1073/pnas.2101388119.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03702327>
- YANO J. (2022). Well-Mixed Boundary–Layer Top Entrainment Instability: Hydrodynamic Analysis. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 10.1175/jas-d-21-0246.1.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03790577>
- YANO J., YANO J.-I., MANZATO A. (2022-03). Does More Moisture in the Atmosphere

Lead to More Intense Rains?. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 79 (3), 663-681, 10.1175/JAS-D-21-0117.1.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03591391>

YIN S., REN C., ZHANG X., HIDALGO J., SCHOETTER R., KWOKY. T., LAU K.-L. (2022-03-16). Potential of Synthesizing Climatopes and Local Climate Zones for Urban Climatic Planning Recommendations: A Case Study in Toulouse, France. *Cybergeo : Revue européenne de géographie / European journal of geography*, 10.4000/cybergeo.39417.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03930001>

ZENNOUNE A., P. LATIL, F. FLIN, J. PERRIN, T. WEIT-KAMP, M. SCHEEL, C. GEINDREAU, H. BENKHELIFA

and F.-T. NDOYE, (2022). Investigating the influence of freezing rate and frozen storage conditions on a model sponge cake using Synchrotron X-rays micro-computed tomography, *Food Research International*, 162(B), 112116.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112116>

ZGHEIB T., GIACONA F., GRANET-ABISSET A.-M., MORIN S., LAVIGNE A., ECKERT N. (2022). Spatio-temporal variability of avalanche risk in the French Alps. *Regional Environmental Change*, 22 (1), 8, 10.1007/s10113-021-01838-3.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03810644>

ZGHEIB T., GIACONA F., MORIN S., GRANET-ABISSET A.-M., FAVIER P., ECKERT N. (2022). Diachronic

quantitative snow avalanche risk assessment as a function of forest cover changes. *Journal of Glaciology*, , 1-19, 10.1017/jog.2022.103.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03924185>

ZRIBI M., DEHAYE V., DASSAS K., FANISE P., PAGE M. L., LALUET P., BOONE A. (2022). Airborne GNSS-R Polarimetric Multiincidence Data Analysis for Surface Soil Moisture Estimation Over an Agricultural Site. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 8432-8441, 10.1109/JSTARS.2022.3208838.  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03841512>

---

## Thèses de doctorat

BALOGH, B., « Vers une utilisation de l'Intelligence Artificielle dans un modèle numérique du climat ». INP, Toulouse, 2022.  
<https://www.theses.fr/s233719>

BARREYAT, M., « Prise en compte des incertitudes du transfert radiatif par une approche ensembliste pour l'assimilation des données satellitaires micro-ondes en ciel nuageux ». Université de Toulouse, 2022.  
<https://www.theses.fr/s294953>

BELL, A., « Towards Fog Forecast Improvement through the Instrumental Synergy of Cloud Radars and Microwave Radiometers ». Université de Toulouse, 2022.  
[http://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/bell\\_0222.pdf](http://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/bell_0222.pdf)

CHAIGNEAU, A., « Projections régionales haute-résolution spatiale du niveau de la mer sur les côtes d'Europe de l'Ouest sur le 21<sup>e</sup> siècle. » INP, Toulouse, 2022.

CORALE, L., « Robust estimation of regional climate change : construction of a hybrid approach between deep neural networks and climate models ». Université de Toulouse, 2022.  
<https://www.theses.fr/s309686>

DOURY, A., « Estimation robuste du changement climatique régional: construction d'une approche hybride entre réseaux de neurones profonds et modèles de climat. » Université de Toulouse, 2022.  
<https://www.theses.fr/s309686>

FATHALLI, M., « Les brouillards formés par affaissement de stratus : étude expérimentale et simulation numérique de leur cycle de vie ». Université de Toulouse, 2022.  
<https://www.theses.fr/s294627>

FLEURY, A., « Approche physique de la représentation des erreurs de modélisation en prévision d'ensemble atmosphérique ». Université de Toulouse, 2022.  
<https://www.theses.fr/s295041>

HUBANS, A., « Influence des paramétrisations physiques sur la qualité des conditions initiales d'un système global de prévision numérique du temps ». INP, Toulouse, 2022.  
<https://www.theses.fr/s212331>

JAHANGIR, E., « Improvement of liquid clouds shortwave optical properties parameterization ». Université de Toulouse, 2022.  
<https://www.theses.fr/2022TOU30107>

JEZEQUEL, E., « Simulations de sillages d'éoliennes en conditions atmosphériques réelles : des simulations aux grandes échelles aux modèles analytiques ». INP, Toulouse, 2022.  
[http://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/jezequel\\_1022.pdf](http://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/jezequel_1022.pdf)

JOHN, A., « Réponse des fortes précipitations et des sécheresses météorologiques à un accroissement du CO<sub>2</sub> atmosphérique et au réchauffement global associé ». Université de Toulouse, 2022.  
<https://www.theses.fr/s295140>

LEROUX, E., « Non-stationary modelling of snow-related extremes in the French Alps : analysis of past and future trends ». Université de Toulouse, 2022.  
[http://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/le\\_roux-0122-2.pdf](http://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/le_roux-0122-2.pdf)

MOUNIER, A., « Synthèse des prévisions d'ensemble par scénarios physiquement cohérents. Mise en pratique au moyen d'approches objets et d'apprentissage statistique ». INP, Toulouse, 2022.

SANOGO, S., « Observations et modélisation des extrêmes de précipitation aux échelles saisonnière à interannuelle au Sahel ». INP, Toulouse, 2022.  
<https://www.theses.fr/s217653>

VIALLON, L., « Apport croisé de la modélisation physique et de l'apprentissage automatique pour la prévision du risque d'avalanches. » Université de Toulouse, 2022.  
<https://www.theses.fr/s295176>

---

## Habilitation à diriger des recherches soutenue en 2022

HONNERT, R., 2022 : « De la zone grise de la turbulence à AROME hectométrique ».  
<https://hal.science/tel-03600147v1>

HAGENMULLER, P., 2022 : « Snow mechanics : from snow microstructure to avalanche formation »  
[http://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/q35\\_22\\_hdr.pdf](http://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/q35_22_hdr.pdf)

MALARDEL, S., 2022 : « A propos de résolution »  
[http://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/malardel\\_hdr\\_1222.pdf](http://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/malardel_hdr_1222.pdf)

VOLDOIRE, A., 2022 : « Couplage océan-atmosphère-continent dans le système climatique »  
[http://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/hdr\\_voldoire\\_1122.pdf](http://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/hdr_voldoire_1122.pdf)

# Glossaire

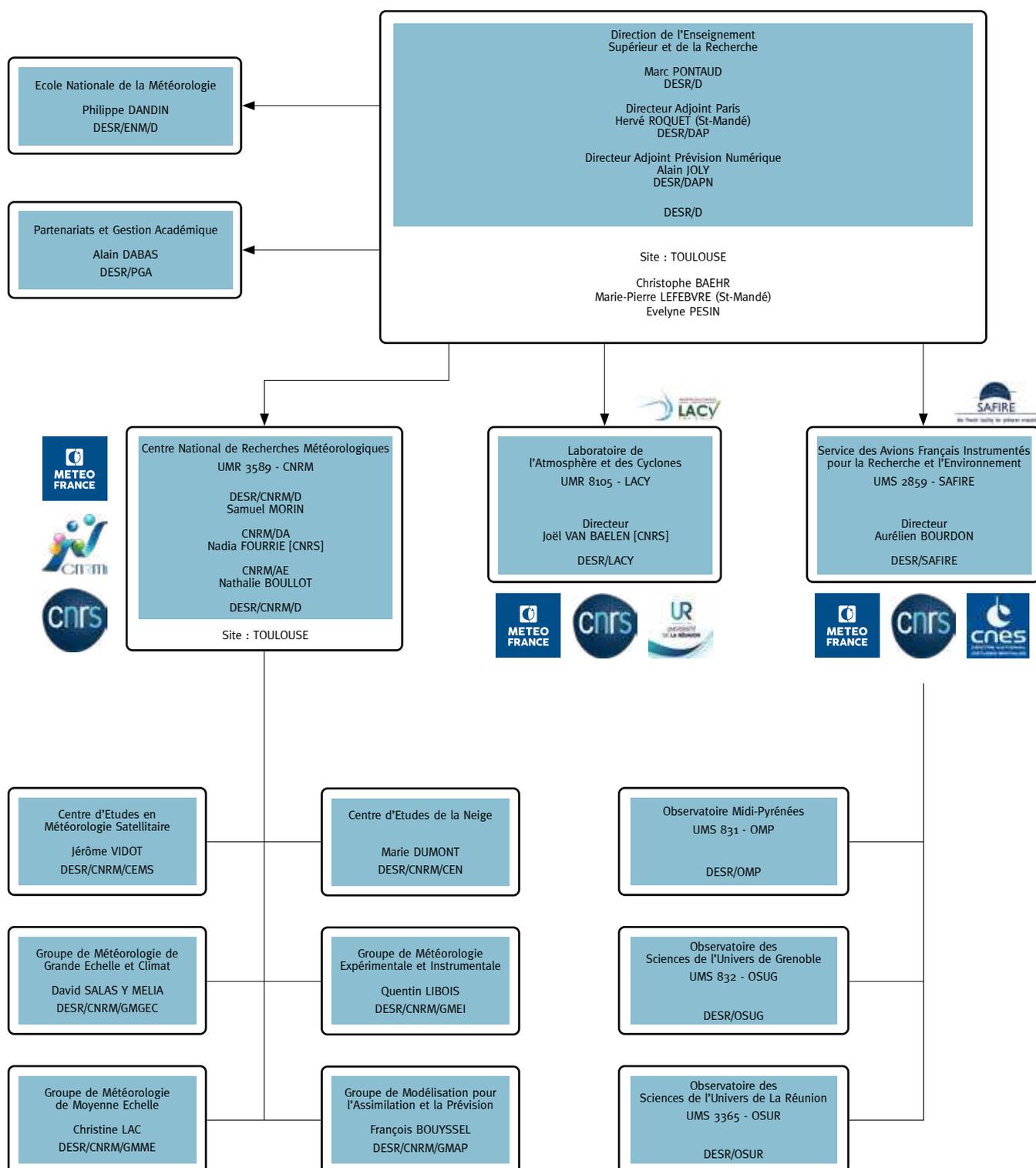
<b>3DEnVar</b>	Schéma d'assimilation variationnel ensembliste tridimensionnel	<b>CNRM-RCSM6</b>	sixième version du système couplé de modélisation régionale
<b>ABO</b>	Aircraft Base Observation	<b>CNRS</b>	Centre National de Recherches Scientifiques
<b>ACROSS-AO</b>	Atmospheric Chemistry of the Suburban Forest : chimie atmosphérique des forêts suburbaines	<b>CNSA</b>	Agence spatiale chinoise
<b>4DEnVar</b>	Schéma associant l'approche variationnelle utilisée traditionnellement à Météo-France aux approches ensemblistes utilisées	<b>CO</b>	Monoxyde de Carbone
<b>ADAMONT</b>	Impacts du changement climatique et adaptation en territoire de montagne	<b>COMSI</b>	Comité scientifique
<b>ADEME</b>	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie	<b>COP</b>	Conférence des Parties
<b>ADM</b>	Atmospheric Dynamics Mission	<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>ADS-B</b>	Antennes	<b>CORDEX</b>	COordinated Regional climate Downscaling EXperiment
<b>AEE</b>	Agence Européenne de l'Environnement	<b>CROCUS</b>	Modèle de simulation numérique du manteau neigeux développé par Météo-France.
<b>AEOLUS</b>	Atmospheric Explorer Observations with a Lidar UV System	<b>CTRIP</b>	CNRM-Total Routing Integrated Pathway
<b>AERIS</b>	pôle de données et de service du système terre	<b>DATA TERRA</b>	Infrastructure de Recherche nationale
<b>ALADIN</b>	Aire Limitée Adaptation Dynamique et développement InterNational	<b>DCSC</b>	Direction de la Climatologie et des Services Climatiques
<b>AMSR</b>	Advanced Microwave Scanning Radiometer	<b>DCT</b>	Diffraction Contrast Tomography
<b>ANR</b>	Agence Nationale de la Recherche	<b>DEAL</b>	Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
<b>AOS</b>	Atmosphere Observing Systems	<b>DESR</b>	Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
<b>ARAMIS</b>	Application Radar à la Météorologie Infra-Synoptique	<b>DGPR</b>	Direction Générale de la Prévention des Risques
<b>AROME</b>	Application de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Échelle	<b>DIRAG</b>	Direction Inter-Régionale Antilles Guyane
<b>AROME-PI</b>	Configuration AROME Prévision Immédiate	<b>DIROI</b>	Direction InterRégionale Océan Indien
<b>ARPEGE</b>	Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle	<b>DMSP</b>	Defense Meteorological Satellite Program
<b>ARRA</b>	ARome ReAnalysis	<b>DRE</b>	Effet radiatif direct
<b>ASCAT</b>	Advanced SCATterometer	<b>DRIAS</b>	Portail d'accès à des données climatiques
<b>AVHRR</b>	Advanced Very High Resolution Radiometer	<b>DSM</b>	Direction des Services Météorologiques
<b>BLAZE</b>	Modèle de feu	<b>DSO</b>	Direction des Systèmes d'Observation
<b>BRGM</b>	Bureau de Recherche Géologique et Minière	<b>DWD</b>	service météorologique allemand
<b>C3S</b>	Copernicus Climate Change Service	<b>E-PROFILE</b>	Réseau d'instruments
<b>CALIPSO</b>	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations	<b>Eas</b>	Echos Arqués
<b>CAMS</b>	projet Européen Copernicus	<b>ECMWF</b>	European Centre for Medium-range Weather Forecasts
<b>CART</b>	Classification And Regression Trees	<b>ECOLIMAP-SG</b>	Base de données pour les caractéristiques végétation
<b>CAT</b>	Clear Air Turbulence, Turbulence en Air Clair	<b>EDMF</b>	Eddy-Diffusivity-Mass-Flux
<b>CCM-I</b>	Chemistry-Climate Model Initiative	<b>EDR</b>	Eddy Dissipation Rate
<b>CCR</b>	Caisse Centrale de Réassurance	<b>EMADD</b>	European Meteorological Aircraft Derived Data Center
<b>CDP</b>	Cloud Droplet Probe	<b>ENAC</b>	Ecole Nationale Aviation Civile
<b>Cedre</b>	Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux	<b>ENSO</b>	El Nino Southern Oscillation
<b>CEMS</b>	Centre d'Etude en Météorologie Satellitaire	<b>EOF</b>	Fonction Orthogonale Empirique
<b>CEN</b>	Centre d'Etudes de la Neige	<b>EOM</b>	Ecart quadratique moyen
<b>CEPMMT</b>	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme	<b>EPA</b>	Enquête Permanente Avalanche
<b>CERES</b>	Satellite	<b>EPS-SG</b>	Système polaire de 2ème génération d'EUMETSAT
<b>CERRA</b>	Réanalyse en prévision	<b>ERA</b>	European Re-Analysis
<b>CESBIO</b>	Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère	<b>ERC-IVORI</b>	projet sur les transformations physiques du manteau neigeux
<b>CGLS</b>	Copernicus Global Land Service	<b>ESA</b>	European Space Agency
<b>CLA</b>	Couche Limite Atmosphérique	<b>ESGF</b>	Earth System Grid Federation,
<b>CLIMERI</b>	Infrastructure de Recherche nationale pour la modélisation du climat	<b>ESPOIRS</b>	projet collaboratif visant à l'obtention d'une meilleure connaissance de la variabilité, des propriétés statistiques et des mécanismes de formation des précipitations tropicales aux échelles régionale et locale.
<b>CLIMSNOW</b>	Adaptation au changement climatique et projections de l'évolution de enneigement	<b>ETP</b>	Évapotranspiration Potentielle
<b>CLIO</b>	Lidar	<b>EUMETNET</b>	European Meteorological Network
<b>CMCC</b>	Centre euro-Méditerranéen sur le Changement Climatique (Italie)	<b>EUMETSAT</b>	Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques
<b>CMIM</b>	Constellation de MIni sondeurs pour la Météorologie	<b>EUREC4A</b>	Elucidating the role of clouds-circulation coupling in climate
<b>CMIP</b>	Coupled Model Intercomparaison Project	<b>EUROCONTROL</b>	Organisation européenne pour la sécurité de la navigation aérienne
<b>CMIP6</b>	Climate Models Intercomparaison Project n°6	<b>EUROCORDEX</b>	Modèle régional de climat
<b>CML</b>	lien micro-onde commercial	<b>FCI</b>	Flexible Combined Imager
<b>CMO</b>	Couche Limite Océanique	<b>FN</b>	False Negative : pas de détection SAR dans les couloirs SPOT
<b>CNES</b>	Centre National d'Études Spatiales	<b>FORMATER</b>	pôle de données et de service du système terre
<b>CNRM</b>	Centre National de Recherches Météorologiques	<b>FORUM</b>	Sondeur Infrarouge
<b>CNRM-CM6</b>	Version 6 du Modèle de Climat du CNRM	<b>FTP</b>	File Transfert Protocol
		<b>GAIA DATA</b>	projet porté par Data Terra et financé par l'ANR

<b>GCM</b>	Modèle de circulation Générale	<b>LISA</b>	Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques
<b>GELATO</b>	Global Experimental Leads and ice for ATmosphere and Ocean	<b>LMC</b>	Laboratoire de Météorologie Dynamique
<b>GEO</b>	Group on Earth Observations	<b>LMI</b>	Lifetime Maximum Intensity
<b>GET</b>	laboratoire de Géosciences Environnement Toulouse	<b>LSA</b>	Land Surface Analysis
<b>GHG</b>	Green House Gases	<b>LSCE</b>	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
<b>GIEC</b>	Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat	<b>LVP</b>	Low Visibility Procedure
<b>GMAP</b>	Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision	<b>LWC</b>	Liquid Water Content
<b>GMEI</b>	Groupe de Météorologie Expérimentale et Instrumentale	<b>MAE</b>	Erreur Moyenne Absolue
<b>GMI</b>	Capteur micro-ondes	<b>MCT</b>	Modèle de Chimie Transport
<b>GNSS</b>	systèmes mondiaux de navigation par satellite	<b>MEB</b>	Multi-Energy-Balance
<b>GOES</b>	Satellites météorologiques géostationnaires américains	<b>MEDSCOPE</b>	Mediterranean Services Chain based On climate Predictions
<b>GPCP</b>	Global Precipitation Climatology Project	<b>MEPRA</b>	Modèle Expert d'Aide à la Prévision du Risque d'Avalanche
<b>GTG</b>	Graphical Turbulence Guidance	<b>MERCATOR-OCEAN</b>	Société Civile Française d'océanographie opérationnelle
<b>HCERES</b>	Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur	<b>MERRA</b>	Modèle avec forçages météorologiques
<b>HCL</b>	Hauteur de Couche Limite	<b>MESO-NH</b>	Modèle à MESO-échelle Non Hydrostatique
<b>HIRLAM</b>	High Resolution Limited Area Model	<b>Met Office</b>	Service national britannique de météorologie
<b>HITRAN</b>	High-resolution TRANsmission molecular absorption database	<b>METAR</b>	METEorological Aerodrome Report
<b>HOMONIM</b>	Historique Observation MOdélisation des Niveaux Marins	<b>METEOSAT</b>	Programme de collecte et de diffusion de données à des fins météorologiques reposant sur une famille de satellites spécifiques
<b>HRIR</b>	High Resolution Infrared Radiometer	<b>METOP</b>	METEorological Operational Polar satellites
<b>HSRL</b>	High Spectral Resolution Radar	<b>MFWAM</b>	Météo-France Wave Model
<b>HYCOM</b>	HYbrid Coordinate Ocean Model	<b>MHS</b>	Capteur micro-ondes
<b>HyMeX</b>	Hydrological cYcle in the Mediterranean EXperiment	<b>MIMESIS-3D</b>	Etude de la microstructure la neige et de ses propriétés physiques à l'aide d'images 3D
<b>IAGOS</b>	In-service Aircraft for Global Observing System	<b>MJO</b>	Madden-Julian Oscillation
<b>IASI</b>	Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge	<b>MOCAGE</b>	MOdélisation de la Chimie Atmosphérique de Grande Echelle (modélisation)
<b>IASI-NG</b>	Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge nouvelle génération	<b>MODCOU</b>	MOdèle hydrologique COUplé surface-souterrain
<b>ICE3</b>	Schéma de nuages	<b>MODIS</b>	MOdérat-resolution Imaging Spectro-radiometer (instrument)
<b>ICICLE</b>	Campagne de mesures	<b>MOSAI</b>	Model and Observation for Surface-Atmosphere Interactions
<b>ICON</b>	Modèle du DWD	<b>MOTHY</b>	Modèle Océanique de Transport d'HYdrocarbure
<b>ICOS</b>	Infrastructure de recherche qui observe les flux des gaz à effet de serre en Europe et dans les régions adjacentes	<b>MPI</b>	Max Planck Institute
<b>Ifremer</b>	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER	<b>MRIR</b>	Medium Resolution Infrared Radiometer
<b>IFS</b>	Integrated Forecasting System	<b>MSG</b>	Météosat Seconde Génération
<b>IFTS</b>	Institut de la Filtration et des Techniques Séparatives	<b>MSU</b>	Microwave Sounder Unit
<b>IGE</b>	Institut des Géosciences de l'Environnement	<b>MTES</b>	Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire
<b>INRA</b>	Institut National de la Recherche Agronomique	<b>MTG</b>	Météosat Troisième Génération
<b>INRAE</b>	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement	<b>MTG-I</b>	Meteosat Third Generation – Imager
<b>IODC</b>	Indian Ocean Data Coverage	<b>MW</b>	Micro Ondes
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat)	<b>MWHS2</b>	Capteur micro-ondes
<b>IPSL</b>	Institut Pierre Simon Laplace	<b>MWR</b>	radiomètre micro-ondes
<b>IR</b>	Infra Rouge	<b>N2O</b>	Protoxyde d'azote
<b>IR-ACTRIS</b>	Infrastructure de Recherche	<b>NAO</b>	Oscillation Nord-Atlantique
<b>IRD</b>	Institut de Recherche pour le Développement	<b>NAWDEX</b>	North Atlantic Waveguide and Downstream Impact Experiment
<b>IRIS</b>	InfraRed Interferometer Spectrometer	<b>NCAR</b>	National Center for Atmospheric Research
<b>IRS</b>	InfraRed Sounder	<b>NEMO</b>	Nucleus for European Modelling of Ocean
<b>ISBA</b>	Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère	<b>NERC</b>	Natural Environmental Research Council
<b>ISOBAR</b>	Projet pour l'amélioration des prévisions météorologiques du risque convectif	<b>NOAA</b>	National Ocean and Atmosphere Administration
<b>ISP</b>	Images Satellite Prévue	<b>NWC</b>	Nowcasting (produit satellite)
<b>JHU</b>	John Hopkins University	<b>OACI</b>	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
<b>KNMI</b>	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut	<b>OAD</b>	Outils d'Aide à la Décision
<b>LA</b>	Laboratoire d'Aérodynamique	<b>ODATIS</b>	pôle de données et de service du système terre
<b>LAAS</b>	Laboratoire Analyse Architecture Systèmes	<b>OLCI</b>	capteur satellitaire
<b>LACY</b>	Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones – UMR 8105	<b>OMM</b>	Organisation Météorologique Mondiale
<b>LAERO</b>	Laboratoire d'Aérodynamique	<b>ONERA</b>	Office national d'études et de recherches aérospatiales
<b>LAI</b>	Leaf Area Index	<b>ONERC</b>	Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique
<b>LAMP</b>	Laboratoire de Météorologie Physique	<b>OOPS</b>	object-oriented Prediction System restructuring the IFS
<b>LARGE</b>	Laboratoire de recherche en géosciences et énergie	<b>OPAR</b>	Observatoire de Physique de l'Atmosphère de la Réunion
<b>LATMOS</b>	Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales	<b>OPG</b>	Orages Points de Grille
<b>LDAS</b>	Land Data Assimilation System.	<b>OSSE</b>	Simulations des Systèmes d'observation
<b>LEFE</b>	programme national « Les Enveloppes Fluides et l'Environnement »	<b>OSTIA</b>	Operational Sea surface Temperature sea Ice Analysis
<b>LES</b>	Large Eddy Simulation	<b>OSUG</b>	Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble
<b>LI</b>	Lightning Imager	<b>PANAME</b>	PARis region urbaN Atmospheric observations and models for Multidisciplinary rEsearch
<b>LIAISE</b>	Land surface Interactions with the Atmosphere over the Iberian Semi-arid Environment	<b>PE</b>	Prévision d'Ensemble
<b>LIDAR</b>	light detection and ranging	<b>PEARO</b>	Prévision d'Ensemble Arome
<b>LIMA</b>	schémas microphysiques	<b>PEARP</b>	Prévision d'Ensemble ARPège
		<b>PI</b>	Prévision Immédiate

<b>PIROI</b>	Plateforme d'Intervention Régionale dans l'Océan Indien de la Croix-Rouge	<b>SMOD</b>	Snow Melt Out Date
<b>PKF</b>	Filtre de Kalman paramétrique	<b>SNO</b>	Service National d'Observation
<b>PM10</b>	PM10 (particules aérosols de moins de 10 microns) ca	<b>SOFOG3D</b>	SOuth westFOGs 3D (compréhension des processus de petites échelles pour améliorer les prévisions du brouillard)
<b>PNDB</b>	Pôle National de Données de Biodiversité	<b>SOOI</b>	Sud-Ouest Océan Indien
<b>PNRC</b>	Parc Naturel Régional de Chartreuse	<b>SPOT 6</b>	base de données indépendante issues d'observations optiques
<b>PNT</b>	Prévision Numérique du Temps	<b>SREPS</b>	Système de prévision d'ensemble
<b>POI</b>	Période d'Observation Intensive	<b>SRON</b>	Space Research Organisation Netherlands
<b>PRESCILIA</b>	jeu de données de pluie quotidienne	<b>SSH-Aerosols</b>	Module du modèle MOCAGE
<b>PROSNOW</b>	Provision of a prediction for Snow management	<b>SSM</b>	Special Sensor Microwave
<b>RADOME</b>	Réseau d'Acquisition de Données d'Observations Météorologiques Étendu	<b>SSP</b>	Shared Socio-economic Pathway
<b>RALI</b>	RADAR + LIDAR embarqués	<b>SURFEX</b>	code de SURFace EXternalisé
<b>RCM</b>	Modèle de Climat Régional	<b>SWI</b>	Soil Wetness Index
<b>RCP</b>	Representative Concentration Pathway	<b>SWIM</b>	Surface Wave Investigation and Monitoring
<b>RCP8.5</b>	8.5 W/m <sup>2</sup> Representative Concentration Pathway corresponding to a 8.5 W/m <sup>2</sup> radiative forcing at the end of the 21st century compared to preindustrial climate	<b>SYNOP</b>	Données d'observations issues des messages internationaux d'observation en surface
<b>RDP</b>	Projet modélisation du temps en ville	<b>TAF</b>	Terminal Aerodrome Forecast
<b>RDT</b>	Rapidly Developing Thunderstorm	<b>TCCON</b>	Total Carbon Column Observing Network
<b>RGB</b>	Red Green Blue (satellite)	<b>TEB</b>	Town Energy Balance
<b>RHT</b>	Relative Humidity Threshold	<b>TEMPSI</b>	TEMps Significatif (aéronautique)
<b>RIS</b>	Référent Intégrité Scientifique	<b>THEIA</b>	pôle de données et de service du système terre
<b>RTTOV</b>	Radiative Transfer for TOVS	<b>THIR</b>	Temperature-Humidity Infrared Radiometer
<b>S2S</b>	Sub-seasonal to Seasonal	<b>TIROS</b>	Television InfraRed Operational Sounder
<b>SAF OSI</b>	Satellite Application Facility for Ocean and Sea Ice	<b>TP</b>	True Positive : détection SAR correspond à un couloir observé dans l'image SPOT
<b>SAFIRE</b>	Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement	<b>TSEN</b>	système d'observation de haute précision sur ballon
<b>SAFRAN</b>	Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques pour la Neige	<b>TSM</b>	Températures de Surface de la Mer
<b>SAR</b>	Synthetic Aperture Radar	<b>UCP</b>	Université de Chieti-Pescara
<b>SBG</b>	Subgrid (phénomènes sous-grille)	<b>UERRA</b>	Uncertainties in Ensembles of Regional Re-Analyses
<b>SCO</b>	Spatial Climate Observatory	<b>UK</b>	United Kingdom
<b>SDI</b>	Sahara Dust Index	<b>UMR</b>	Unité Mixte de Recherche
<b>SEMAFOR</b>	Observation et prédiction de la migration de l'avifaune à partir des radars météorologiques	<b>UTC</b>	Temps universel coordonné
<b>SESAR</b>	Single European Sky ATM Research	<b>UTCI</b>	Universal Thermal Climate Index
<b>SEVIRI</b>	Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager	<b>UTLS</b>	Haute Troposphère Basse Stratosphère
<b>Shom</b>	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine	<b>VAAC</b>	Volcanic Ash Advisory Centre
<b>SIRS</b>	Satellite InfraRed Spectrometer	<b>VIIRS</b>	Visible Infrared Imager Radiometer Suite
<b>SIRTA</b>	Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique.	<b>WCB</b>	Warm Convection Belts
<b>SMA</b>	Seychelles Meteorological Authority	<b>WIRE</b>	Winter Risks for Energy
<b>Smart4RES</b>	Projet d'amélioration de la prévision de production à court terme d'énergie renouvelable solaire et éolienne	<b>WW3</b>	Modèle de prévisions de vagues côtières
		<b>ZAMG</b>	service météorologique autrichien
		<b>ZDR</b>	réflectivité différentielle

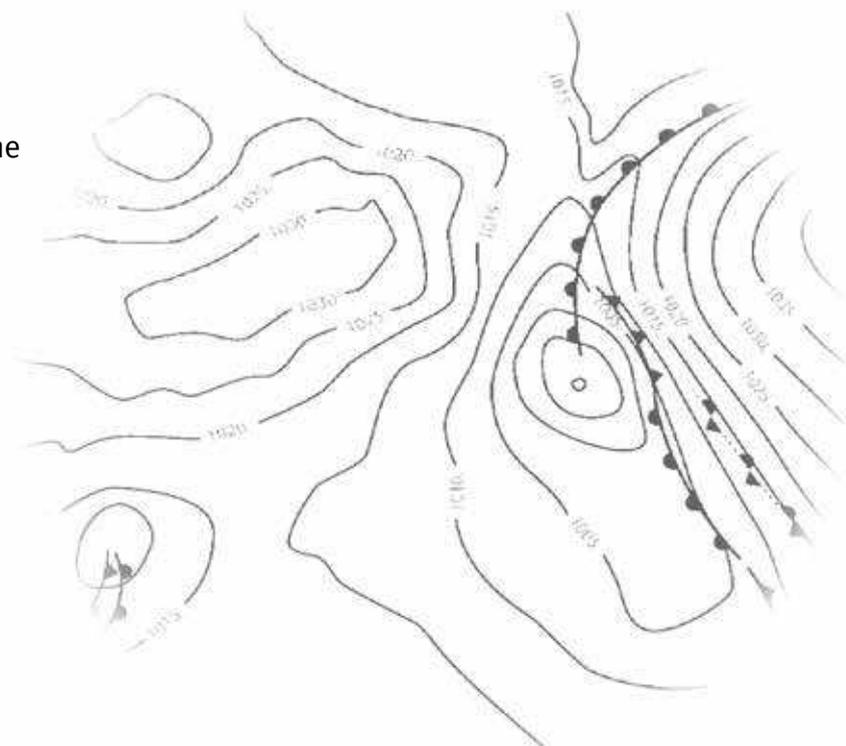
# Organigramme de la Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (DESR)

1<sup>er</sup> Octobre 2022



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 2023  
Copyright juin 2023  
ISSN : 2116-438X