



HAL
open science

L'évolution de la chaîne de prévision numérique du temps sur la période 2022-2025

François Bouyssel, Matthieu Plu

► **To cite this version:**

François Bouyssel, Matthieu Plu. L'évolution de la chaîne de prévision numérique du temps sur la période 2022-2025. Comité Scientifique Consultatif de Météo-France. 2022. hal-04589808

HAL Id: hal-04589808

<https://hal.science/hal-04589808>

Submitted on 27 May 2024

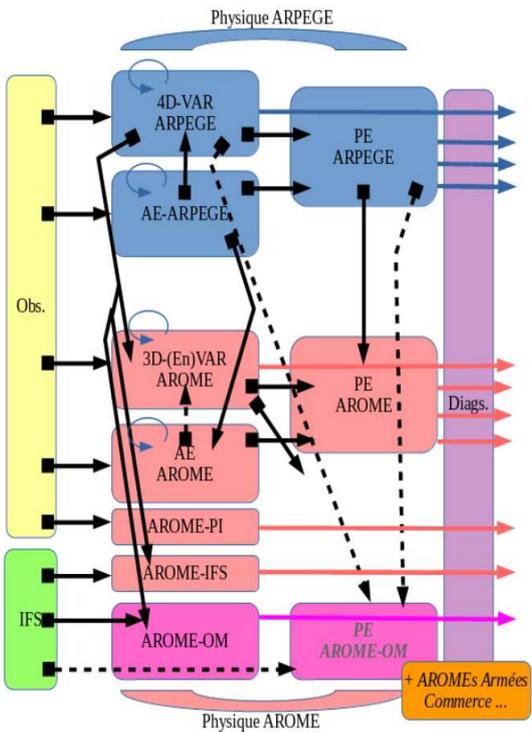
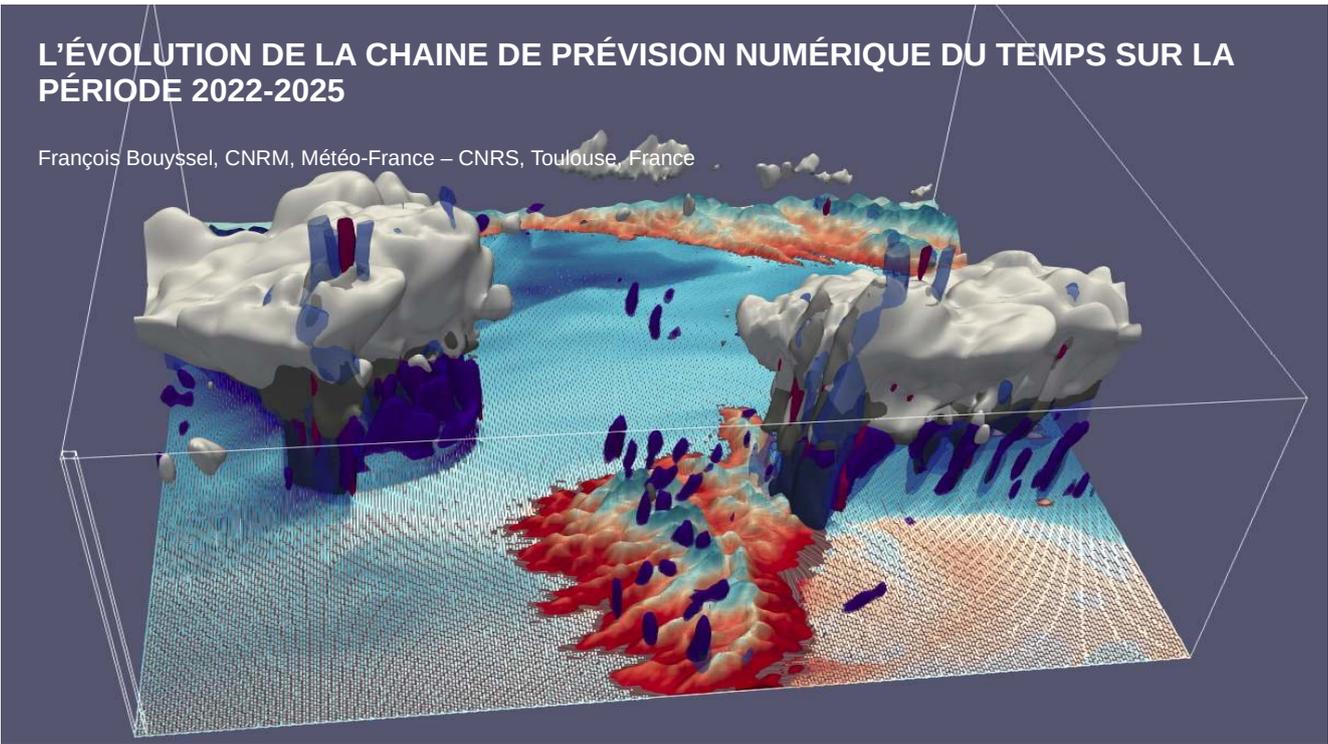
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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.

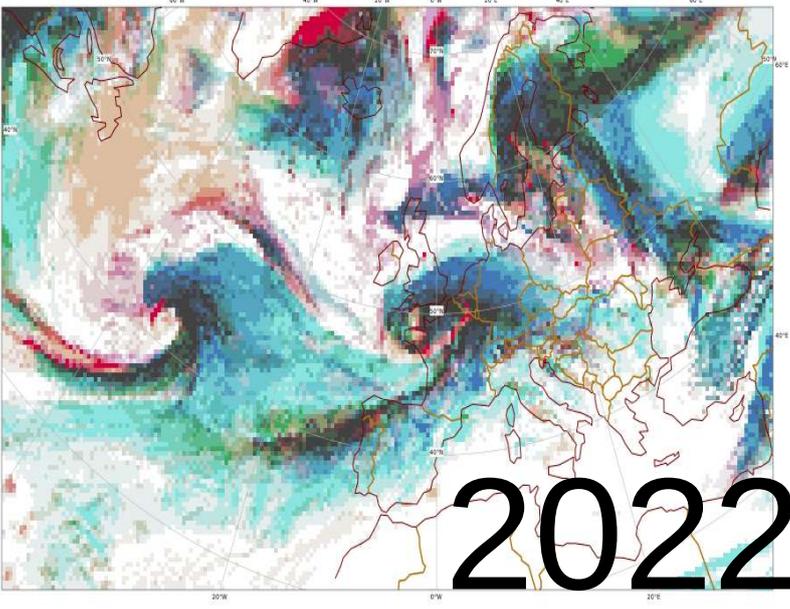
COMITÉ SCIENTIFIQUE CONSULTATIF DE MÉTÉO-FRANCE

L'ÉVOLUTION DE LA CHAÎNE DE PRÉVISION NUMÉRIQUE DU TEMPS SUR LA PÉRIODE 2022-2025

François Bouyssel, CNRM, Météo-France – CNRS, Toulouse, France



mercredi 6 avril 2022 00UTC Prévission Arpege double t+60h: vendredi 8 avril 2022 12UTC
 Nuages: Bas, B+M, Moyens, M+H, Hauts, H+B, H+M+B



Remerciements

Ce rapport a été réalisé à partir des travaux de l'ensemble des collègues du groupe de modélisation et d'assimilation pour la prévision (GMAP), mais aussi de nombreux collègues des autres groupes et centres de recherche du CNRM et de la DESR. Beaucoup de ces activités sont menées dans le cadre de relations étroites avec différentes équipes européennes de prévision numérique, notamment le CEPMMT et les services météorologiques du Consortium ACCORD. Une partie de ces travaux de recherches est menée dans le cadre de projets nationaux ou internationaux avec d'autres équipes du CNRS ou des Universités.

L'auteur tient à remercier les collègues ayant contribué à l'élaboration du rapport, notamment Jean-François Mahfouf, Matthieu Plu, Loïk Berre, Laure Raynaud, Yves Bouteloup, Ghislain Faure, Ludovic Auger, Alain Joly, Yann Seity, Carole Labadie, Laurent Descamps, Pierrick Cébron, Pierre Brousseau, Valérie Vogt, Olivier Coopman, Joël Stein, Véronique Ducrocq.

Ce rapport a également bénéficié des relectures attentives de Marc Pontaud, Samuel Morin, Nadia Fourrié et Marie-Pierre Lefebvre.

Sommaire

1	La chaîne opérationnelle actuelle de prévision numérique du temps.....	5
1.1	Les systèmes opérationnels (au 1er mai 2022).....	5
1.2	Les observations assimilées.....	7
1.3	Les modèles Arpège et Arome.....	8
1.4	Evolution des indicateurs globaux (IP18) et régionaux (IP16).....	9
2	La chaîne en double en cours « CY46T1 » (2022).....	12
2.1	Les observations.....	12
2.2	Les modifications physiques des modèles Arpège et Arome.....	12
2.3	Les assimilations d'ensemble Arpège et Arome.....	14
2.4	Le système de prévision d'ensemble global : PEARP.....	15
2.5	Le système de prévision d'ensemble régional : PEARO.....	16
2.6	Les systèmes de prévision Arome Outre-Mer.....	17
2.7	Le rejeu.....	18
3	Indices de prévision d'évènements extrêmes EFI/SOT (2022).....	19
4	Nouveaux systèmes de prévision d'ensemble Arome Outre-Mer (2023).....	20
5	Chaîne en double « CY48T1 » en préparation (2023).....	21
5.1	Aboutissement du projet OOPS.....	21
5.2	Evolution majeure du système d'assimilation d'Arome.....	21
5.3	Assimilation des données avion Mode-S dans Arome.....	22
5.4	Autres modifications.....	23
6	Nouveaux systèmes Arome-500m (2024).....	25
6.1	Les attendus.....	25
6.2	Options dynamiques.....	25
6.3	Options paramétrisations physiques.....	25
6.4	Domaines géographiques.....	26
7	chaîne en double « CY49T1 » (2024).....	28
7.1	Assimilation 4D-EnVar dans Arome.....	28
7.2	Assimilation hybride 4D-Var/4D-EnVar dans Arpège.....	28
7.3	Assimilation des données du satellite MTG-I.....	30
7.4	Amélioration de la représentation des erreurs de modélisation dans la prévision d'ensemble Arome.....	31
7.5	Autres modifications.....	31
8	Autres évolutions à l'horizon 2025.....	33
8.1	Assimilation des observations du sondeur hyperspectral infrarouge IRS de Meteosat 3ème génération MTG-S.....	33
8.2	Amélioration de la représentation des échanges sol-végétation-atmosphère.....	34
9	La précision mixte.....	35
10	Conclusions et perspectives.....	36

Introduction

Météo-France est le service météorologique et climatologique national. A ce titre, il est chargé de fournir aux pouvoirs publics, à l'aéronautique, aux entreprises et au grand public, des services adaptés pour gérer les risques en matière de sécurité des personnes et des biens. La prévision numérique du temps (PNT) est l'outil privilégié pour l'anticipation du risque météorologique, ainsi que pour les prévisions fournies à divers secteurs économiques météo-sensibles (agriculture, production et consommation d'énergie, transports). La PNT couvre une gamme d'échéances allant de quelques heures à plusieurs jours (jusqu'à 15 généralement). Météo-France, pour répondre à ses différentes missions, développe, maintient et opère un système de prévision numérique global, Arpège, qui couvre les échéances jusqu'à 4 jours, et des systèmes de prévision numérique à haute résolution Arome, sur la métropole et les territoires outre-mer, jusqu'à 2 jours d'échéance. Pour les échéances moyennes (5 jours et au-delà), Météo-France s'appuie sur les prévisions numériques du CEPMMT (Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme), la France étant l'un de ses pays membres fondateurs. Aux échéances mensuelles et saisonnières, Météo-France produit des prévisions, exploitées conjointement avec celles d'autres services.

Cette note donne un aperçu des caractéristiques de la chaîne opérationnelle de PNT à Météo-France et de ses évolutions principales prévues sur la période 2022-2025. Cette période correspond à l'exploitation du calculateur Bull-Atos devenu opérationnel en 2021 et dont la justification a été portée par un certain nombre de progrès attendus de la chaîne de PNT. Météo-France opère aussi des systèmes numériques en aval de la chaîne de PNT (modèles de prévision marine, de qualité de l'air, de nivologie, d'hydrologie et d'agrométéorologie), qui ne sont pas présentés dans cette note.

1 La chaîne opérationnelle actuelle de prévision numérique du temps

1.1 Les systèmes opérationnels (au 1^{er} mai 2022)

Les principales applications pour la prévision numérique du temps (PNT) à courte-échéance à Météo-France sont les suivantes (figure 1) :

- Un système déterministe global **Arpège** réalisant des prévisions jusqu'à 4 jours d'échéance, 5 fois par jour, avec une résolution variable de 5 km sur la métropole et 24 km aux antipodes, 105 niveaux verticaux. Ce modèle global fournit aussi la base de la composante atmosphérique des simulations mensuelles, saisonnières et climatiques effectuées par Météo-France, Arpège-Climat. Les conditions initiales sont fournies par des assimilations variationnelles 4D (4D-Var) à 2 minimisations avec une résolution des incréments d'analyse de 40 km au minimum.
- Un système ensembliste global composé d'un ensemble d'assimilation et d'un ensemble de prévision. L'ensemble d'assimilation **AEARP** basé sur un 4D-Var simplifié (une seule minimisation) de 50 membres, ainsi que l'assimilation de référence et des calculs de perturbations permettent d'exécuter, 4 fois par jour, une prévision d'ensemble **PEARP**, de 35 membres, jusqu'à 4 jours d'échéance. La résolution horizontale actuelle de PEARP est environ de 7.5 km sur la métropole et de 37 km aux antipodes, avec 90 niveaux verticaux.
- Un système déterministe régional couvrant largement la métropole, **Arome-France**, réalisant des prévisions non-hydrostatiques jusqu'à 48h d'échéance, 5 fois par jour, avec une résolution de 1.3 km et 90 niveaux verticaux. Ces prévisions utilisent des conditions aux limites latérales données par Arpège pour le même « réseau » de départ et des conditions initiales obtenues par un cycle d'assimilation 3D-Var propre à Arome, avec une fréquence de 1 h.
- Un système déterministe régional pour la prévision immédiate, **Arome-PI**, sur le même domaine couvrant la métropole, composé d'analyses 3D-Var et de prévisions à 6 h d'échéance, précoces, réalisées à fréquence horaire.
- Un système régional ensembliste, sur le même domaine couvrant la métropole, composé d'un ensemble d'assimilation et d'un ensemble de prévision. L'ensemble d'assimilation **AEARO** basé sur un algorithme 3D-Var avec 25 membres à 3.25 km permet de lancer, 4 fois par jour, une prévision d'ensemble Arome, **PEARO**, de 16 membres à 2.5 km, jusqu'à 51 h d'échéance.
- Cinq systèmes régionaux déterministes sur l'outre-mer, **Arome-OM**, réalisant des prévisions à 2.5 km, 4 fois par jour, jusqu'à 48h d'échéance en mode nominal et 78h en conditions cycloniques, en adaptation dynamique du modèle IFS du CEPMMT pour l'altitude et d'Arpège pour la surface, sur des domaines géographiques de l'Océan Indien, des Antilles, de la Guyane, de la Nouvelle Calédonie et de la Polynésie Française.
- Un système déterministe régional, sur le même domaine couvrant la métropole, réalisant des prévisions à 2.5 km, 4 fois par jour, jusqu'à 48 h d'échéance, en adaptation dynamique du modèle IFS du CEPMMT et de l'analyse de surface Arome-France (**Arome-IFS**).
- De nombreux systèmes Arome en adaptation dynamique du modèle Arpège, à résolution de 2.5 km, au service des Armées ou à des fins commerciales.

Ce système opérationnel actuel a été installé en juillet 2019 ; il sera remplacé en juin 2022 par la nou-

velle chaîne « CY46T1 » (voir partie 2).

Deux caractéristiques importantes de la PNT à Météo-France méritent un rappel :

- disposer d'un système de prévision mondial permet à l'Établissement d'en ajuster les horaires et de choisir les enchaînements de ses applications. Ainsi, Arpège déterministe effectue des prévisions après un délai plus court que dans les services comparables, disposant ainsi de prévisions mondiales plus précoces. Arome-France, par ailleurs, est plutôt tardif, car le choix affirmé est d'en maximiser la qualité en attendant les conditions aux limites bénéficiant des observations les plus récentes. « Précoce » et « tardif » s'entendent ici en regard des pratiques les plus courantes dans les autres centres de prévision du temps ;
- les différentes applications, Arpège, Arome et leurs assimilations de données sont obtenues comme des options d'un code source unique, partagé avec le CEPMMT et les pays du consortium Accord. Ceci permet de mutualiser les développements, tant entre applications qu'entre services utilisateurs.

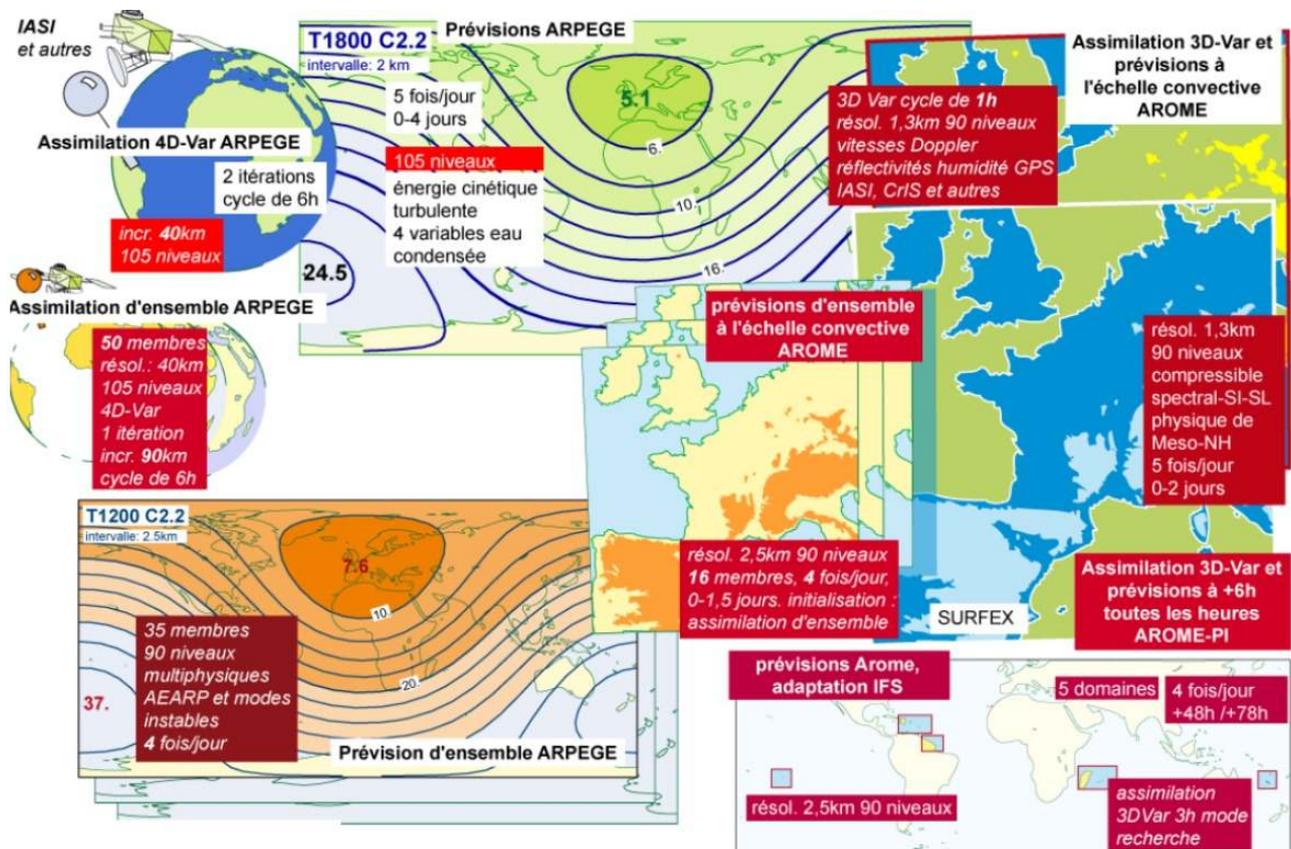


Figure 1 : Le système de prévision numérique du temps, opérationnel de juillet 2019 à juin 2022 (figure A. Joly).

Pour répondre aux besoins opérationnels, des diagnostics sont produits directement par les chaînes de prévision à partir des champs météorologiques des modèles générés sur la grille de calcul. C'est le cas par exemple de diagnostics de visibilité, de types de précipitations, de turbulence, de rayonnement, etc. Cela permet de tirer le meilleur parti des paramétrisations physiques des modèles et d'éviter des interpolations (à partir de champs sur des grilles régulières et des niveaux de pression constants) sources d'erreurs dans les calculs. Ces diagnostics servent particulièrement les domaines de l'aéronautique, de la gestion des routes, de l'énergie.

1.2 Les observations assimilées

L'assimilation de données du modèle global Arpège basée sur un algorithme 4D-Var assimile 7 millions d'observations toutes les 6 heures. La quantité de variables que l'on cherche à initialiser est d'environ 200 millions. La comparaison de ces deux chiffres montre à quel point le problème mathématique que l'on cherche à résoudre est sous-déterminé. Il devient un problème bien posé grâce à l'utilisation de l'information a-priori (qui est une prévision à échéance 6 h). Les observations assimilées par Arpège (figure 2) se répartissent comme suit : 93 % proviennent des données de satellites en orbites basse (LEO) ou géostationnaire (GEO) et 7 % proviennent de mesures in-situ (stations de surface, radiosondages, avions). On peut classer les observations satellitaires de la manière suivante : i) les radiances infra-rouges : informatives sur la température, la vapeur d'eau, les nuages, les surfaces (LEO, GEO) [70%] ; ii) les radiances micro-ondes : informatives sur la température, la vapeur d'eau, les nuages, les précipitations, les surfaces (LEO) [13%] ; les mesures de vents : à la surface des océans par radars micro-ondes, au niveau du sommet des nuages par imagerie VIS/IR, sous forme de profils par lidar Doppler [4%] ; Les angles de courbure des signaux issus des satellites de géo-positionnement (GPS) : informatifs sur la température de la moyenne troposphère à la stratosphère [5%].

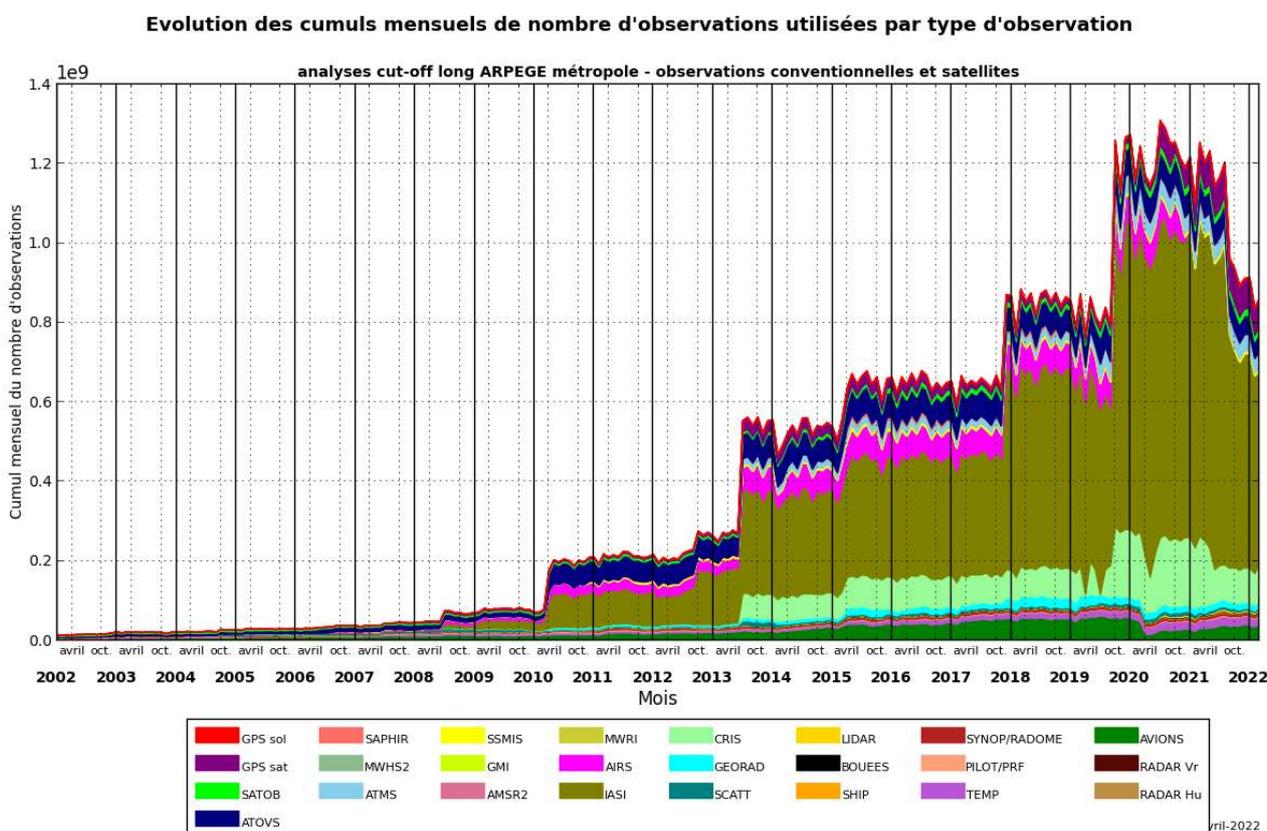


Figure 2 : Evolution mensuelle des cumuls de nombres d'observations assimilées dans l'analyse Arpège (DIROP/COMPAS)

L'assimilation de données du modèle Arome basée sur un algorithme 3D-Var assimile toutes les heures environ 1,5 millions d'observations. La quantité d'observations que l'on cherche à initialiser est de 750 millions. La sous détermination du problème de détermination des conditions initiales évoquée pour Arpège est encore plus importante avec ce modèle dont la résolution est de 1,3 km. L'enrichissement en observations du système d'assimilation du modèle Arome est donc plus urgent que celui du modèle Arpège.

pège, même si des informations provenant du modèle Arpège sont fournies à Arome par ses conditions aux limites latérales.

Les observations assimilées dans le modèle Arome (figure 3) se répartissent comme suit : 10 % proviennent des données de satellites, 60 % proviennent des données de radars au sol (informatives sur les précipitations et le vent), 30 % proviennent des mesures in-situ (stations de surface, avions commerciaux, radiosondages). Les radiances satellitaires se partagent pour moitié entre 17 instruments sur des satellites en orbite terrestre basse (LEO) qui ne sont présentes dans le domaine Arome qu'environ 4 fois par jour et l'instrument SEVIRI à bord du satellite MSG en orbite géostationnaire (GEO) qui couvre le domaine Arome en permanence (24 fois par jour).

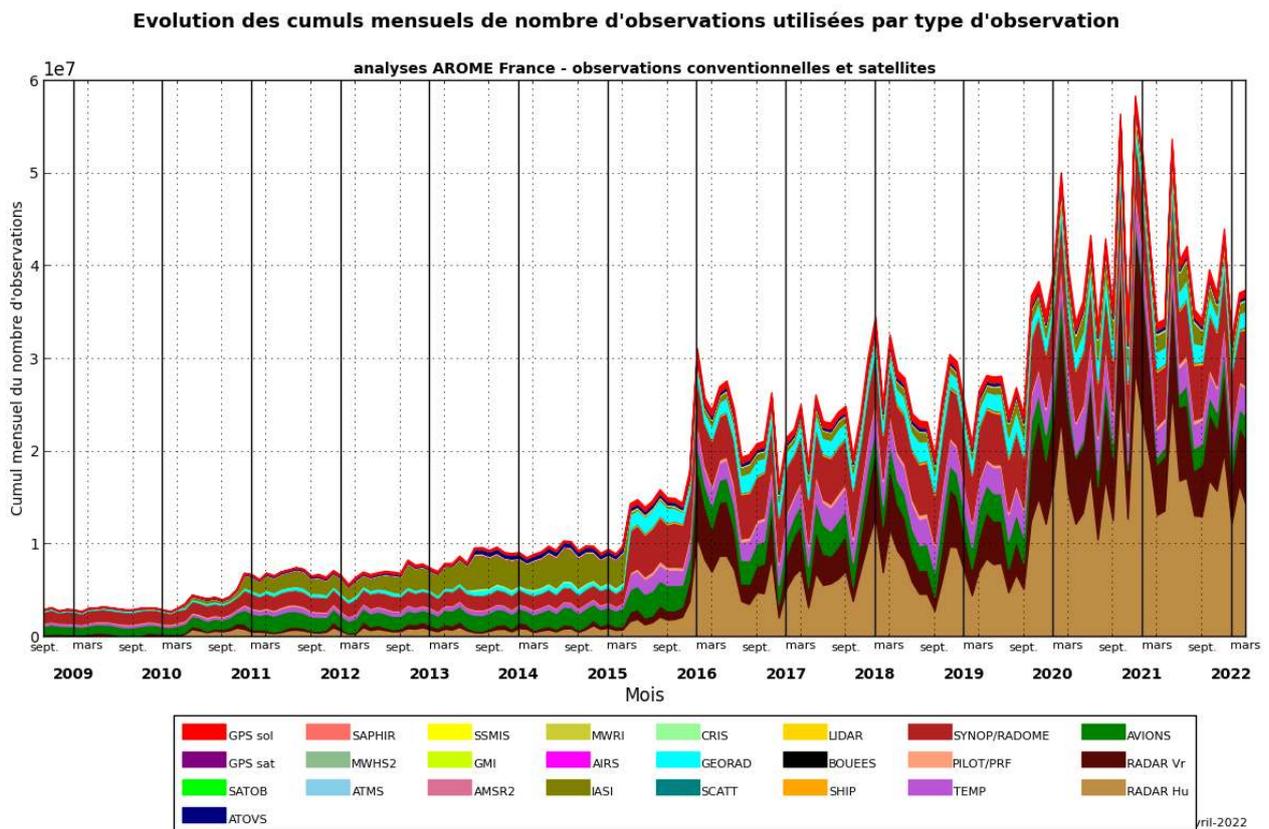


Figure 3 : Evolution mensuelle des cumuls de nombres d'observations assimilées dans l'analyse Arome (DIROP/COMPAS)

1.3 Les modèles Arpège et Arome

Le modèle Arpège (Courtier et al. 1991, Pailleux et al. 2000, Bouyssel et al. 2022) est un modèle global hydrostatique avec une résolution horizontale variable et une représentation en éléments finis sur la verticale. Le modèle Arome (Seity et al. 2011, Brousseau et al. 2016) est un modèle régional non-hydrostatique avec une résolution horizontale uniforme et une représentation en différences finies sur la verticale. Tous deux sont des modèles spectraux, avec une coordonnée verticale hybride. Ils utilisent un schéma temporel semi-lagrangien à deux niveaux, semi-implicite.

Les variables pronostiques sont les composantes horizontales du vent, la température, les humidités spécifiques de la vapeur d'eau et de quatre catégories d'hydrométéores (gouttelettes liquides, cristaux de glace, pluie, neige) et l'énergie cinétique turbulente. Le modèle Arome a une cinquième catégorie

d'hydrométéores pronostiques pour le grésil. Plusieurs variables pronostiques caractérisent les conditions de surface et du sol superficiel (températures, contenus en eau liquide et solide, contenu en eau et albédo du manteau neigeux, etc.). Les échanges de masse et d'énergie entre l'atmosphère et la surface terrestre, de types « océan », « lac », « nature », et également « ville » pour Arome, sont représentés par le modèle de surface SURFEX (Masson et al., 2013). Des climatologies mensuelles sont utilisées pour décrire les propriétés physiographiques du sol et de la végétation, l'ozone et les aérosols.

Les paramétrisations physiques représentent l'influence des processus physiques (rayonnement, microphysique, processus de surface) et du transport sous-maille (turbulence, convection, ondes de gravité) sur l'évolution des variables pronostiques du modèle. Les échanges radiatifs dans l'atmosphère (ciel clair, nuages, ozone, aérosols) et avec la surface sont calculés toutes les heures dans Arpège et toutes les 15 minutes dans Arome et effectués séparément pour les rayonnements solaire et thermique. Le transport turbulent dans la couche limite repose sur un schéma en diffusion dont les coefficients d'échange dépendent de l'énergie cinétique turbulente pronostique et d'une longueur de mélange, ainsi que sur un schéma de convection peu profonde en flux de masse. Les processus microphysiques associés aux nuages et aux précipitations sont représentés explicitement de manière plus détaillée dans le modèle Arome. Les effets sous-maille associés à la convection profonde et aux ondes orographiques sont représentés par des paramétrisations spécifiques dans Arpège, alors qu'ils sont explicitement résolus dans Arome.

1.4 Evolution des indicateurs globaux (IP18) et régionaux (IP16)

La qualité des prévisions globales et régionales opérationnelles est suivie quotidiennement de manière subjective par les utilisateurs des modèles, notamment les prévisionnistes, et de manière objective à travers le calcul de scores mesurant l'écart entre les prévisions et une référence, des observations ou une analyse, pour de nombreux paramètres atmosphériques et de surface, échéances et domaines géographiques.

Deux indicateurs, l'un global (IP18), l'autre régional (IP16), ont été développés pour les deux précédents contrats pluriannuels d'objectifs et de performance (COP) de Météo-France afin de suivre respectivement la qualité des modèles Arpège et Arome et fixer des objectifs sur leurs évolutions, tout en ayant conscience que l'analyse de la qualité d'un modèle peut difficilement se réduire à un seul indicateur. Ces indicateurs ont été mis en place à partir de 2014.

L'indicateur IP18 (global) est calculé à partir des erreurs quadratiques moyennes par rapport aux radiosondages sur un domaine géographique couvrant l'Europe pour les échéances de 48 et 72 h de 3 paramètres (géopotential à 500 hPa, vent à 250 hPa et température à 850 hPa) moyennés sur 12 mois et normalisés par les valeurs annuelles d'Arpège en 2008. La cible de 8 % de progrès par rapport à la valeur de référence, fixée pour fin 2021 pour cet indicateur, a été atteinte (figure 4). On note au cours des dernières années une convergence des valeurs de cet indicateur IP18 pour les modèles du Met Office, du DWD, du KMA et de Météo-France.

**Indicateur de performances sur J+2 et J+3 de divers modèles
à partir des scores de comparaison aux radiosondages**

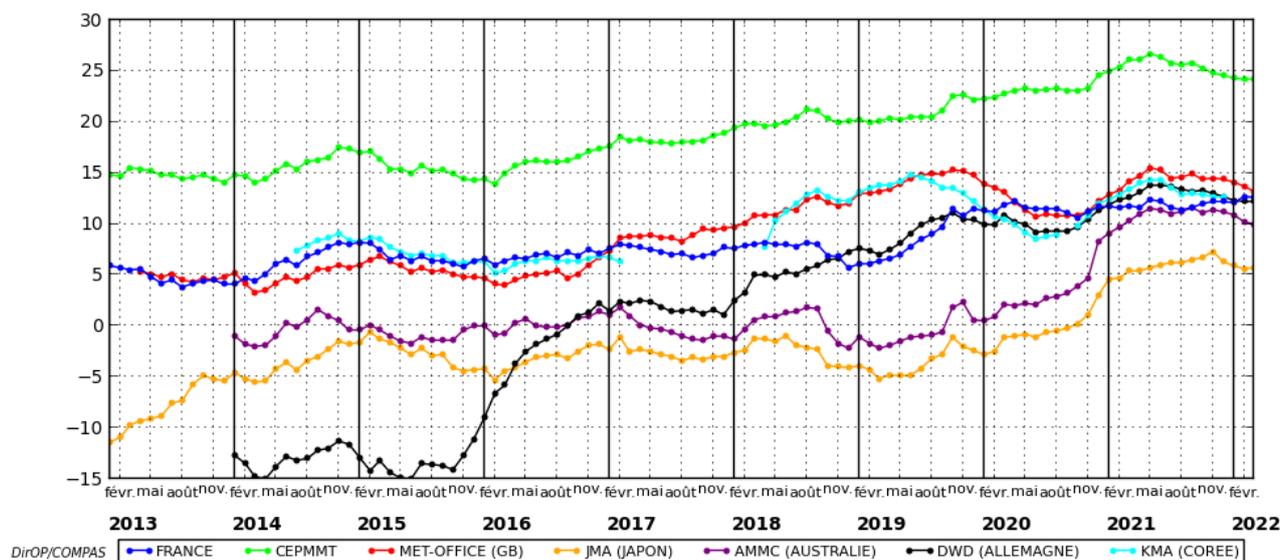


Figure 4 : Evolution de l'indicateur IP18 depuis 2013 pour plusieurs modèles opérationnels globaux

L'indicateur IP16 (régional) quantifie l'erreur de la prévision entre les fréquences observées et prévues d'un dépassement de seuil sur un paramètre météorologique de temps sensible (rafales d'au moins 40 km/h, cumul de pluie d'au moins 0,5 mm, 2 mm, et 5 mm en 6 heures pendant les 24 premières heures de la prévision Arome du réseau de 0 heure). Pour une échéance de prévision donnée et un seuil pour un paramètre météorologique donné, on examine l'occurrence ou la non-occurrence du phénomène météorologique, dans une zone de 50 km autour du point d'observation. L'écart entre la fréquence observée et la fréquence prévue du phénomène est calculé à travers un score de Brier (ie. la moyenne quadratique des différences entre fréquences prévue et observée de l'occurrence du phénomène météorologique), moyenné sur l'ensemble des points d'observation et sur les douze derniers mois. Ce score de Brier est normalisé par la persistance des phénomènes météorologiques, pour le rendre moins sensible à la variabilité interannuelle des conditions météorologiques. La cible de 80 % fixée pour fin 2021 pour l'indicateur IP16 n'a pas été atteinte (figure 5). On note une dégradation de l'indicateur IP16 à partir du mois d'avril 2020 liée notamment à une diminution sensible du trafic aérien du fait de la crise sanitaire et du nombre des observations avion assimilées. Toutefois la valeur de cet indicateur pour Arome reste sensiblement meilleure que les valeurs pour Arpège ou IFS.

Comparaison IP16 avec les autres modèles

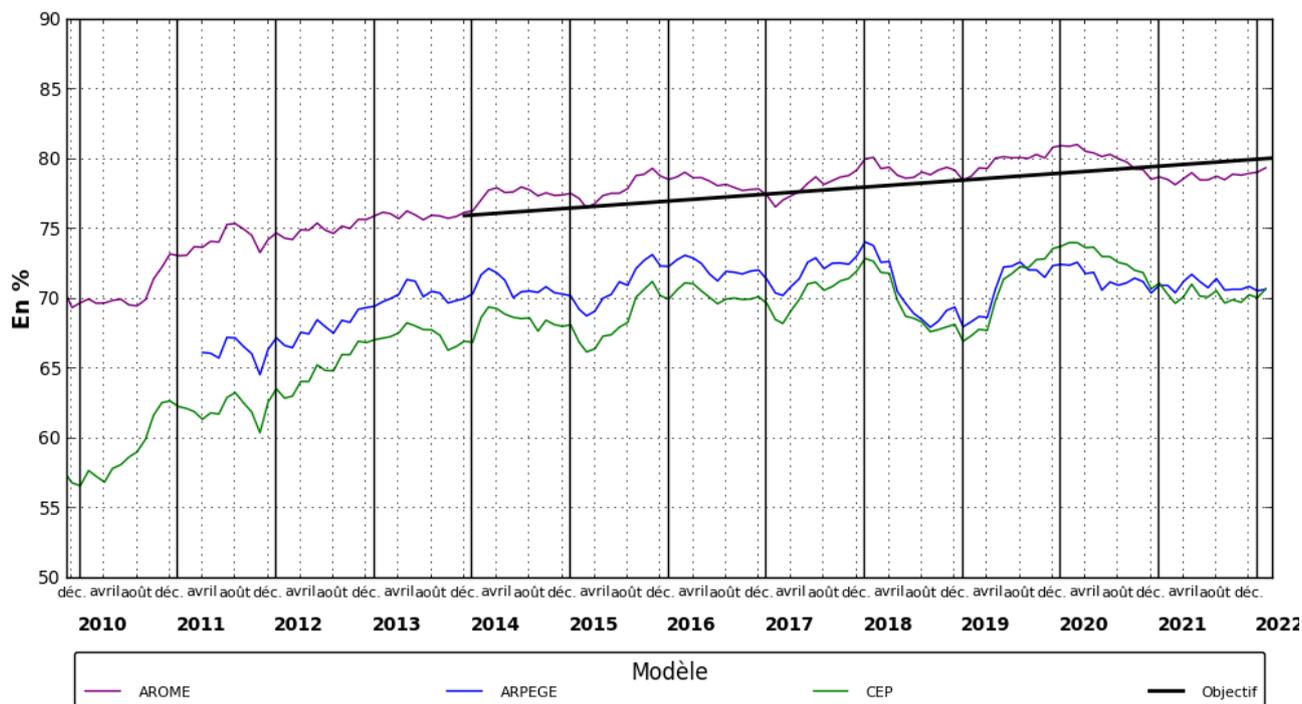


Figure 5 : Evolution de l'indicateur IP16 pour les modèles Arome-France, Arpège et IFS

De nouveaux indicateurs sont en préparation par l'équipe DIROP/COMPAS pour suivre la fiabilité des prévisions probabilistes des systèmes de prévision d'ensemble PEARP et PEARO. Le besoin de ces indicateurs est justifié par l'orientation stratégique de l'Établissement d'une production essentiellement basée sur des ensembles. Ces indicateurs ne sont pas totalement finalisés, mais certaines de leurs caractéristiques semblent maintenant fixées.

L'indicateur pour PEARP concernera son positionnement parmi les autres systèmes de prévision d'ensemble globaux. Le score utilisé pour réaliser le classement sera un Score des Rangs Continus des Probabilités (CRPS), permettant de quantifier la qualité de la distribution prévue par un ensemble. Le calcul se fera sur une grille de résolution 0,5° régulière en latitude et longitude, sur un domaine incluant l'Europe, en utilisant comme référence les analyses de chacun des modèles comparés. Le score final sera la moyenne des 6 CRPS à J+2 et J+3 pour la température à 850 hPa, le géopotential à 500 hPa et le vent à 250hPa, chacune des composantes étant normalisée par la valeur de cette composante pour Arpège pour une année de référence.

L'indicateur sur PEARO reposera sur des scores de Brier pour mesurer l'erreur de la prévision entre les fréquences observées et prévues d'un dépassement de seuil sur un paramètre météorologique de temps sensible (rafales d'au moins 40 km/h, cumul de pluie d'au moins 0,5 mm, 2 mm, et 5 mm en 6 heures), et un score de type CRPS normalisé pour la température à 2 m.

2 La chaîne en double en cours « CY46T1 » (2022)

L'année 2021 a marqué une nouvelle étape à Météo-France pour les modèles de prévision numérique du temps. Déclaré opérationnel en février 2021, le nouveau système de calcul haute performance ATOS Bull Sequana XH2000, offrant une puissance de calcul environ 5 fois supérieure au calculateur précédent, a permis de préparer des évolutions majeures des systèmes de prévisions régionales Arome et globales Arpège. La nouvelle chaîne de prévision numérique finalisée en 2021 a été installée en double à partir de l'été 2021. Il s'agit de la première étape de la mise en œuvre de la prospective calcul de 2016 à l'origine des calculateurs Bull.

Cette nouvelle chaîne marque un tournant inédit pour les systèmes de prévision d'ensemble Arome et Arpège, puisque, pour la première fois depuis leur mise en place, leurs résolutions verticale et horizontale seront les mêmes que celles du système de prévision déterministe qui leur est associé. Les prévisions d'ensembles deviennent ainsi pleinement représentatives de l'incertitude des prévisions Arome et Arpège. De plus, les incertitudes de la modélisation dans Arpège sont représentées par un nouvel algorithme.

Cette chaîne bénéficie aussi d'une évolution majeure de la physique Arpège, avec notamment une refonte de la paramétrisation de la convection, un composant-clé du modèle. Les systèmes Arome Outre-mer, quant à eux, voient leur résolution passer de 2,5 km à 1,3 km, ce qui bénéficie en particulier au réalisme des précipitations. Le système d'assimilation d'observations voit aussi de nombreuses évolutions qui contribuent à l'amélioration des prévisions.

Les modifications principales de cette chaîne en double sont décrites dans les chapitres suivants. Une description plus précise est consultable dans la seconde Newsletter du Consortium en prévision numérique ACCORD : <http://www.accord-nwp.org/meshtml/coordoper/ACCORD-NL2.pdf>.

2.1 Les observations

Les modifications introduites visent à une meilleure utilisation des observations déjà assimilées et à assimiler de nouvelles observations dans les assimilations Arpège et Arome.

Cette chaîne en double voit ainsi l'aboutissement des travaux initiés depuis plusieurs années (Chambon and Geer, 2017, Duruisseau et al, 2019, Barreyat et al, 2021) sur les radiances en ciel nuageux et précipitants pour un ensemble de 5 sondeurs d'humidité micro-ondes au moyen d'une inversion bayésienne générant des profils d'humidité relative assimilés dans le 4D-Var Arpège. Le système d'observations est enrichi des radiances micro-ondes (ciel clair) du sondeur d'humidité MWHS-2 sur le satellite chinois FY-3D lancé en 2017. Les observations issues des radiosondages à la descente sont assimilées dans Arpège et Arome pour un ensemble d'environ 20 sites, situés pour la majorité en Europe. L'ensemble de observations satellitaires ainsi que les données radar bénéficient d'une révision de l'algorithme d'écrémage spatial permettant d'éviter de garder dans l'assimilation des observations trop proches géographiquement. Plus spécifiquement pour le modèle Arome les angles de courbure issus des récepteurs GNSS-RO sont assimilés ainsi qu'un produit vent océanique ASCAT à haute résolution (grille à 12,5 km pour une résolution effective de 25 km) et l'ajout du diffusiomètre ASCAT/Metop-C (conduisant à une augmentation d'un facteur quatre des vents océaniques assimilés dans ce modèle).

2.2 Les modifications physiques des modèles Arpège et Arome

En ce qui concerne le système de prévision à échelle globale Arpège quatre éléments fondamentaux de la physique du modèle ont été changés. En premier lieu le schéma de convection profonde utilisé depuis les origines du modèle, avec certes des évolutions, a été remplacé par un schéma dérivé de celui du modèle IFS du CEPMMT. Cette paramétrisation est également utilisée dans le modèle global ICON du DWD. L'amélioration de la qualité du modèle dans la zone intertropicale qui en découle est très importante.

Le deuxième élément est une évolution de la paramétrisation des flux d'énergie et de masse à l'interface océanique développée au CNRM (ECUME). Une nouvelle technique d'ajustement des coefficients aux observations des campagnes de mesure en mer permet une bien meilleure prévision de ces flux. L'amélioration résultante du modèle est significative à toutes les latitudes.

Le troisième élément est le remplacement de l'ancien code de rayonnement utilisé pour la partie visible du spectre par le schéma RRTM, ce qui permet d'activer le solveur McIca qui calcule plus précisément les effets de recouvrement des différentes couches nuageuses. Ce changement, et surtout les réglages du modèle qui en découlent, est un premier pas vers l'utilisation du code de rayonnement modulaire EcRad partagé par un grand nombre de modèles météorologiques et qui fait l'objet de travaux de recherche destinés à alimenter les futurs systèmes de prévision de Météo-France.

La dernière évolution concerne l'activation de la version 1D du modèle de glace de mer GELATO (Salas y Méliá, 2002), intégrée à la plateforme de modélisation des surfaces SURFEX. La température de surface de la banquise est désormais une variable du modèle qui évolue au fil des prévisions. Auparavant, elle était issue de climatologies relativement anciennes et restait constante au cours d'une prévision. La variabilité de la température de surface est désormais beaucoup plus importante, spatialement et temporellement. Ceci est illustré sur la figure 6 où est tracée la température mesurée lors de la dérive du brise-glace de recherche Polarstern au cours de la campagne internationale MOSAIC en 2019 et 2020 (<https://mosaic-expedition.org/>) ainsi que les prévisions correspondantes de l'actuel système opérationnel Arpège et d'une version utilisant la paramétrisation GELATO.

Ces modifications ont amélioré les performances du système de prévision utilisant le modèle Arpège de manière significative (figure 6).

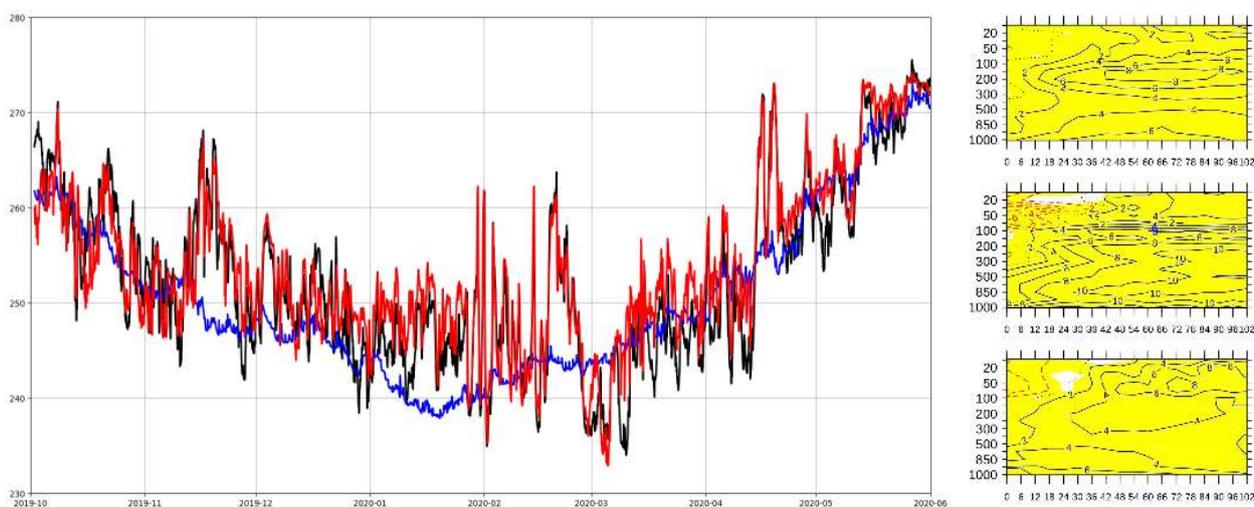


Figure 6 (à gauche) : Températures observées et prévues le long de la trajectoire du brise-glace Polarstern pendant la campagne MOSAIC. En noir les observations effectuées sur le bateau, en bleu les températures prévues par la version actuellement opérationnelle d'Arpegge et en rouge celles prévues par la nouvelle version d'Arpegge avec le modèle GELATO pour représenter la glace de mer. (à gauche)

Figure 6 (à droite) : Réduction normalisée d'erreurs de prévision de vent (en %) de la chaîne en double Arpegge en cours (cy46t1_op1) par rapport au modèle actuellement utilisé en opérationnel sur les domaines Nord20 (en haut), Tropic (au milieu) et Sud20 (en bas).

La modification principale du modèle Arome concerne des réglages de la dynamique pour les champs

nuageux. Des investigations ont été menées en réponse à des signalements par les prévisionnistes, depuis 2016, d'une sous-estimation des précipitations dans des situations de convection diurne estivale sans forçage synoptique.

La source du problème a pu être identifiée grâce à des simulations semi-idéalisées. Celle-ci se situait dans le choix de la méthode d'interpolation des champs du modèle dans le schéma d'advection semi-lagrangien. Des expériences numériques ont montré que le schéma de transport était responsable d'une création artificielle de masse sur les champs nuageux (par nature plus discontinus que les autres champs). Ce défaut présent depuis 2008, était 'masqué' par les réglages de la diffusion numérique des champs nuageux. Ce réglage ayant été modifié lors du passage d'Arome à 1,3 km en 2016, le défaut est devenu plus visible que dans la version initiale du modèle à 2,5 km.

La mise en œuvre d'un nouvel interpolateur du schéma d'advection semi-lagrangien conservant la masse, a permis de proposer de nouveaux réglages et de supprimer la diffusion numérique appliquée sur les champs nuageux. Les tests ont montré que les performances du modèle étaient grandement améliorées dans les situations problématiques reportées par les prévisionnistes (figure 8), sans être dégradées dans le cas général. Cette amélioration illustre le bénéfice de la prise en compte des retours d'expérience des prévisionnistes utilisateurs du modèle, ainsi que la grande complexité inhérente au réglage et la mise en œuvre de tels systèmes de prévision.

La nouvelle version d'Arome bénéficie, comme Arpège, de la paramétrisation révisée des flux océaniques ECUME.

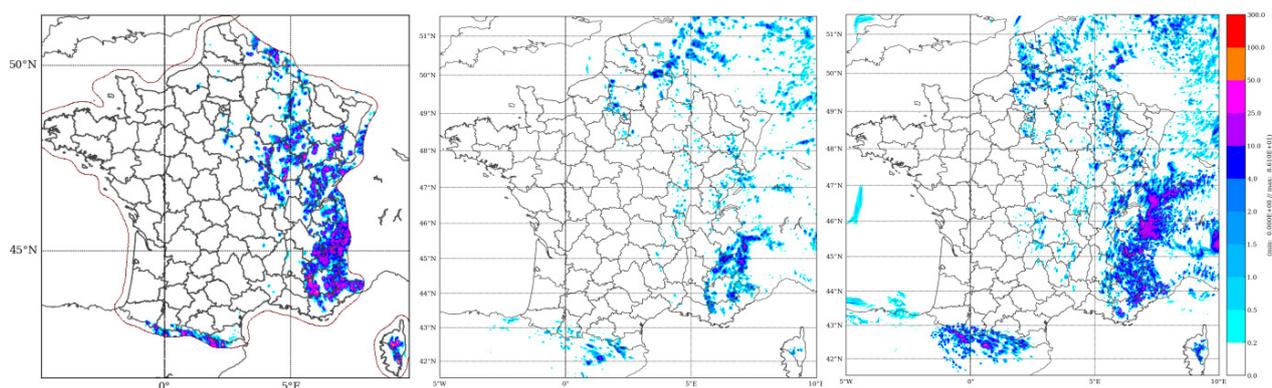


Figure 8 : Cumuls de précipitations en 24h pour la journée du 25 juillet 2018. A gauche Observations, au centre Arome-oper, à droite nouvelle version d'Arome.

2.3 Les assimilations d'ensemble Arpège et Arome

En plus des modifications des observations utilisées et de la physique, deux modifications ont été introduites spécifiquement en lien avec l'assimilation d'ensemble Arpège, AEARP, (Berre et al., 2006 ; Berre et Desroziers, 2010) :

- des facteurs d'inflation individuelle sont calculés et appliqués spécifiquement pour chaque membre de l'ensemble, en remplacement du jeu unique de facteurs qui était le même pour tous les membres. L'inflation permet de représenter dans l'ensemble les effets des erreurs modèle, qui s'accumulent pendant chaque étape de prévision du cycle d'assimilation. Cette inflation permet d'améliorer le réalisme de la dispersion de l'ensemble, ainsi que les structures spatiales des perturbations. L'inflation individuelle permet de mieux ajuster la dynamique des perturbations propres à chaque membre, au cours du cyclage. Il a été noté que cette modification a aussi un impact positif significatif sur l'assimilation déterministe Arpège (via les covariances d'erreur issues de l'AEARP) et sur la prévision d'ensemble Arpège (via les perturbations initiales issues

de l'AEARP).

- La formulation ondelette des covariances d'erreur d'ébauche, issues de l'AEARP, est maintenant hybride en fonction de l'échelle spatiale horizontale considérée : dans les petites échelles, un poids plus important est donné aux covariances ensemblistes dépendantes de la situation météorologique, tandis que, dans les grandes échelles, les covariances climatologiques reçoivent un poids relatif plus grand. Cette hybridation des covariances en ondelette remplace une hybridation verticale des perturbations en amont du calcul des covariances. Cette nouvelle approche permet aux corrélations verticales d'être plus robustes et plus continues dans les différentes couches atmosphériques. Le nouveau code de calcul des covariances ondelettes est également nettement plus rapide en temps réel.

La représentation des erreurs modèle dans l'assimilation d'ensemble Arome (AEARO) a également été modifiée : elle repose maintenant sur une perturbation des tendances de la physique, ainsi que sur une inflation des perturbations initiales qui sont utilisées dans la PEARO et qui sont issues de l'AEARO. Cela permet notamment d'avoir une représentation plus continue, au cours des étapes de prévision du cyclage de l'AEARO, de l'accumulation de certaines erreurs modèle liées aux processus physiques.

2.4 Le système de prévision d'ensemble global : PEARP

Dans le cadre de la mise en œuvre opérationnelle des nouveaux systèmes de prévision en 2022, la résolution horizontale de la prévision d'ensemble Arpège, PEARP (Descamps et al., 2015), est augmentée dans la chaîne en double en cours, se traduisant par une résolution horizontale de 5 km sur la France métropolitaine et 24.5 km aux antipodes, et une modélisation des mouvements atmosphériques sur des niveaux verticaux couvrant la gamme d'altitude de 10 m au-dessus du sol jusqu'à 65 km d'altitude. Les prévisions d'ensemble PEARP sont ainsi à la même résolution que le système déterministe Arpège. La prévision d'ensemble devient pleinement représentative de l'incertitude du processus de prévision et la prévision Arpège déterministe est de facto intégrée dans l'ensemble PEARP.

La modélisation physique des processus du système ensembliste de prévisions bénéficie également de progrès. La moitié des membres de l'ensemble des prévisions adopte comme Arpège déterministe un nouveau schéma de convection profonde, Tiedtke-Bechtold, offrant une amélioration importante pour la chaîne de prévision numérique mondiale. Les autres membres de l'ensemble de prévisions sont basées sur un schéma de convection déjà utilisé dans l'ensemble PEARP, PCMT. En supplément, la méthodologie de la représentation des erreurs de modélisation évolue : le jeu de dix « paramétrisations physiques » utilisé jusqu'ici laisse place à une approche plus exhaustive utilisant des perturbations stochastiques de plusieurs paramètres des schémas de paramétrisations.

Une évaluation sur dix mois de cette nouvelle configuration de PEARP montre une amélioration nette par rapport à la version opérationnelle sur la plupart des scores, pour plusieurs domaines et variables météorologiques. La figure 9 montre l'apport relatif en pourcentage du score CRPSS pour six variables représentatives de l'état de l'atmosphère (le géopotential au milieu de l'atmosphère (Z500), la température et le vent dans les basses couches (T850) et (FF850), la pression réduite au niveau de la mer (PMER), le vent à 10m (FF10m) et la pluie cumulée sur 24h, (RR24). Cet apport est mesuré sur un large domaine qui englobe l'Océan Atlantique Nord et l'Europe de l'Ouest.

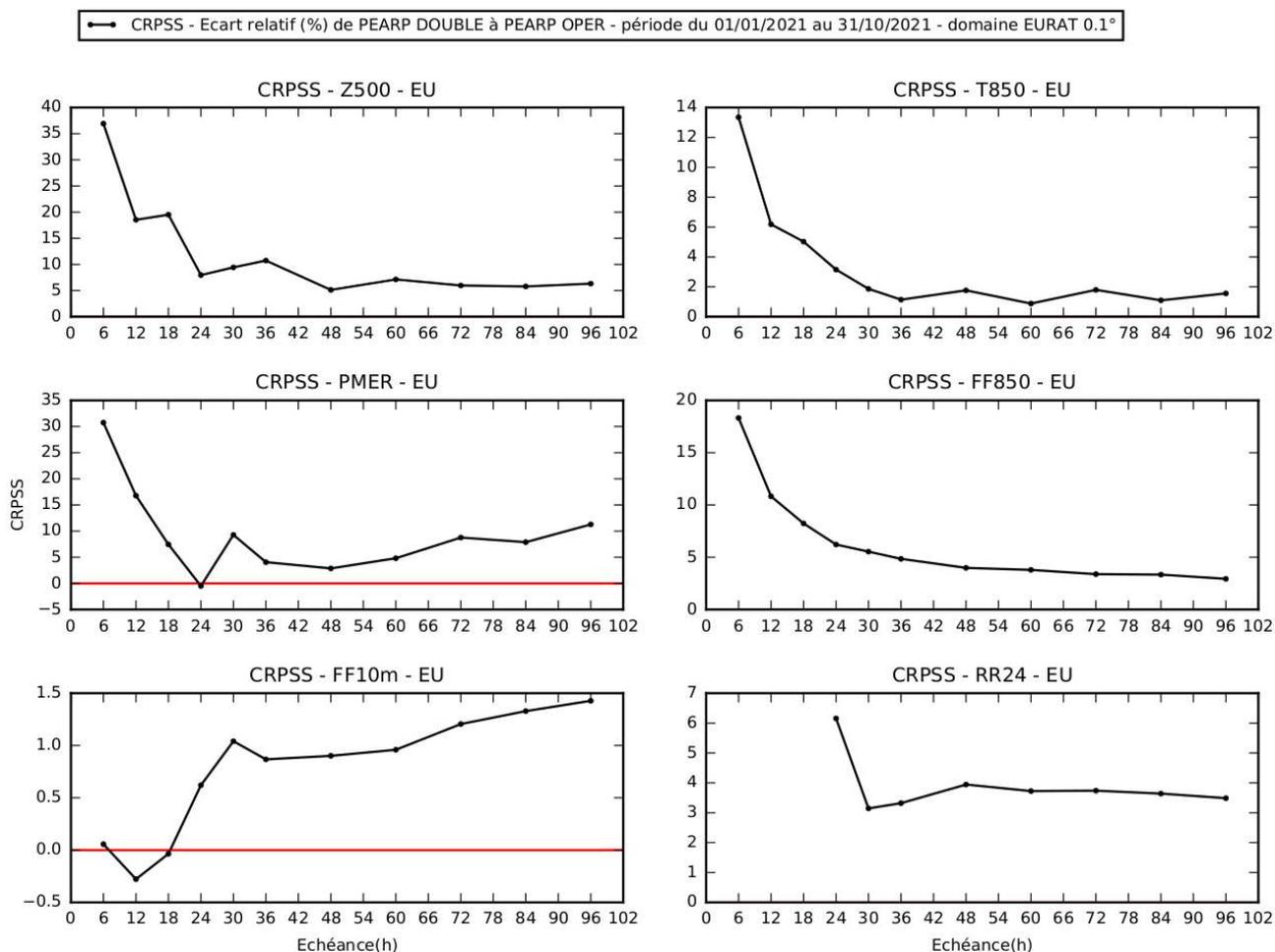


Figure 9 : Apport relatif en pourcentage de PEARP double par rapport à PEARP oper calculé avec le score CRPSS pour 6 paramètres sur un domaine couvrant l'Océan Atlantique Nord et l'Europe de l'Ouest sur les 10 premiers mois de l'année 2021.

2.5 Le système de prévision d'ensemble régional : PEARO

Dans le cadre de la mise en œuvre opérationnelle des nouveaux systèmes de prévision en 2022, la résolution horizontale du système PEARO (Bouttier et al., 2012, 2016) est augmentée dans la chaîne en double en cours, passant de 2,5 km à 1,3 km. Cette convergence avec le système déterministe s'accompagne d'une augmentation de la taille de l'ensemble passant de 16 à 17 membres, incluant les 16 membres perturbés et le membre de contrôle fourni par la prévision déterministe. Le système PEARO haute résolution hérite par ailleurs des améliorations des systèmes auxquels elle est couplée, et bénéficie ainsi de conditions initiales plus précises, de la nouvelle physique Arome et des conditions aux limites fournies par la nouvelle version de PEARP haute résolution. Les nouveaux diagnostics aéronautiques et convectifs sont également calculés pour chaque membre.

Les performances probabilistes du système PEARO haute résolution ont été évaluées sur plusieurs mois, et mettent en évidence des améliorations significatives, en particulier pour le vent à 10 m et les précipitations. L'analyse de plusieurs situations de fortes pluies indique également de meilleures prévisions des cumuls (figure 10).

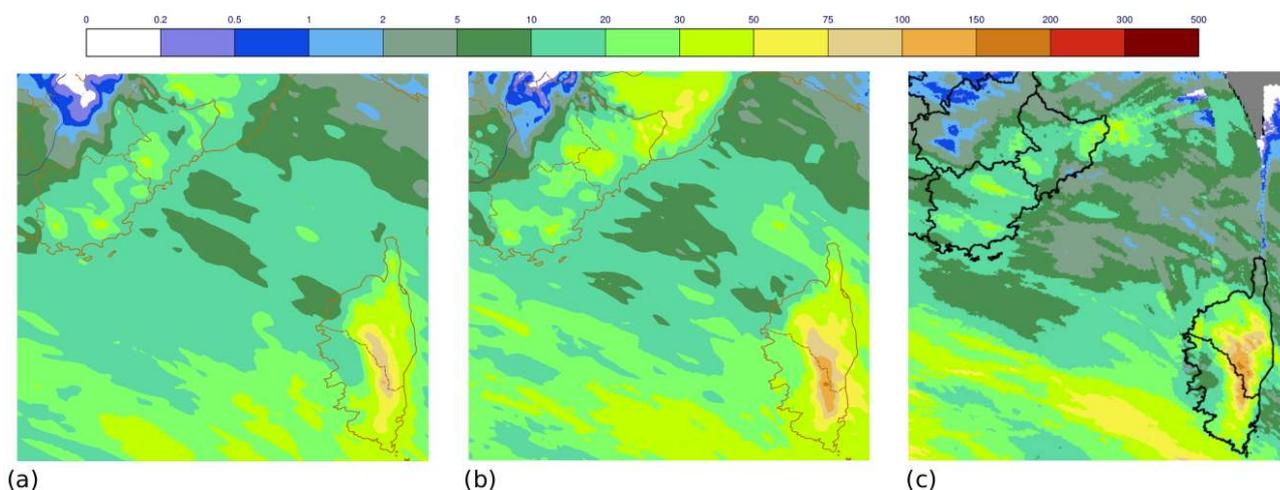


Figure 10 : Précipitations cumulées en 24 h valides le 11/11/2021 à 00 UTC (unité : mm). Quantile 75 prévu par (a) PEARO opérationnelle et (b) PEARO double, réseau du 08/11/2021 à 21 UTC. (c) Observations : analyse de précipitations Antilope (radars et pluviomètres).

2.6 Les systèmes de prévision Arome Outre-Mer

Les territoires ultramarins français (Antilles, Guyane, Indien, Nouvelle-Calédonie et Polynésie) bénéficient depuis 2016 de prévisions déterministes du modèle Arome à une résolution horizontale de 2,5 km (Faure et al., 2020). Elles ont permis des améliorations de la prévision sur ces zones tropicales dans lesquelles, outre les cyclones, la convection se conjugue souvent à des reliefs notables pour générer des épisodes pluvieux très intenses.

Le nouveau supercalculateur de Météo-France, ainsi que d'importantes optimisations du coût de calcul du modèle Arome dont notamment la réalisation des calculs en précision mixte, vont permettre d'améliorer ces systèmes de prévision selon 2 axes. Le premier, déployé dans cette chaîne en double, consiste à améliorer le réalisme des simulations déterministes existantes, avec l'utilisation, toutes choses égales par ailleurs, d'une résolution horizontale de 1,3 km, comme en métropole. La figure 11 représente un exemple d'amélioration de ce réalisme lors d'un épisode pluvieux en Guadeloupe en février 2021. Le caractère persistant de cet épisode de pluies intenses, très inhabituel en cette saison, a été simulé de manière beaucoup plus réaliste par le modèle à 1,3 km, à la fois en étendue et en intensité. Le second axe d'amélioration correspond au déploiement opérationnel de prévisions d'ensemble Arome pour les 5 domaines ultramarins (cf chapitre 4).

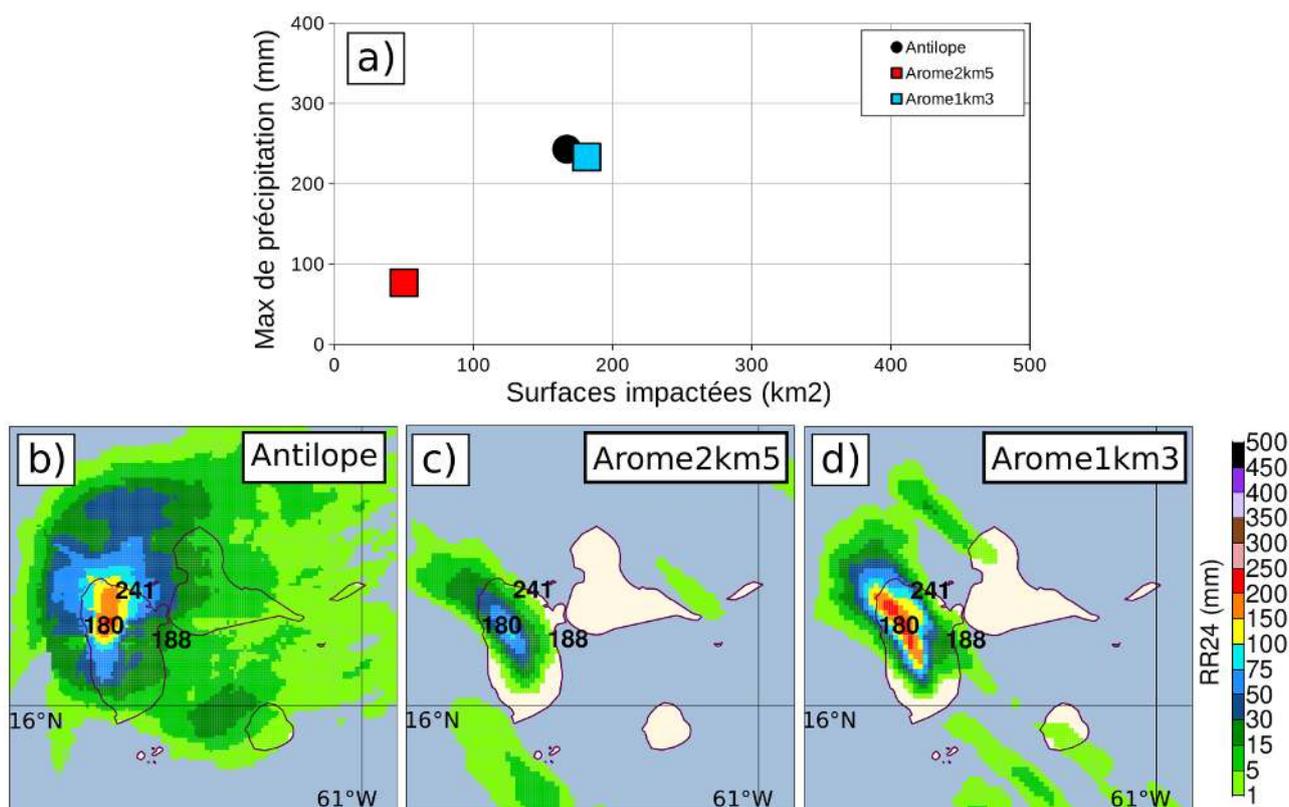


Figure 11 : (a) : Maxima de pluie sur 24 h sur la période allant du 03/02/2021 06 UTC au 04/02/2021 06 UTC, en fonction des surfaces impactées par les précipitations supérieures à 100 mm, observés à partir de l'analyse de précipitations Antilope (disque noir) et prévus par Arome oper 2,5 km (carré rouge) et Arome double 1,3 km (carré bleu). Distribution spatiale des pluies sur la même période respectivement représentée pour (b) Antilope, (c) Arome oper 2,5 km et (d) Arome double 1,3 km. Les nombres pointés en noir représentent des valeurs remarquables de pluviomètres pour les communes de Sainte-Rose, Petit-Bourg et Pointe-Noire.

2.7 Le rejeu

La chaîne en double s'exécute sur le super-calculateur dans un environnement opérationnel, en parallèle de la chaîne opérationnelle. Elle suit ainsi le temps réel. Un rejeu sur une période passée de 6 à 10 mois selon les applications a été réalisé pour disposer d'une année complète de simulations afin de réaliser une calibration des nouvelles prévisions d'ensemble, qui est une étape indispensable avant leur utilisation afin de ne pas propager, voire amplifier, ces erreurs dans les applications aval. La calibration permet en effet de corriger le biais et la dispersion des systèmes de prévision d'ensemble.

La bascule opérationnelle de cette chaîne en double est prévue en juin 2022.

3 Indices de prévision d'évènements extrêmes EFI/SOT (2022)

Le transfert vers l'opérationnel d'indicateurs, par ailleurs bien connus (Lalaurette 2003, Zsoter 2006), en sortie des prévisions d'ensemble Arpège et Arome est prévu au second semestre 2022 pour aider à la synthèse et à l'exploitation des prévisions d'ensemble au sein de Météo-France, en soutien à la détection de risques météorologiques. Il s'agit de l'indicateur d'évènements extrêmes (EFI en anglais) et du décalage de la queue de distribution (SOT). Le principe de ces indicateurs repose sur la mesure des écarts de la prévision du jour avec le climat du modèle sous-jacent. Ils peuvent être utilisés comme un signal d'alerte pour les évènements extrêmes sans avoir à définir de seuil en fonction du temps ou de l'espace pour les différents paramètres.

Ces diagnostics, EFI et SOT, seront disponibles pour un ensemble de variables concernés par la vigilance météorologique à partir des deux systèmes de prévision d'ensemble :

- pour PEARO : la température à 2m, le vent à 10m, les précipitations totales et neigeuses cumulées en 6h et en 24h, la réflectivité maximale, à une fréquence tri-horaire, sur une grille régulière d'environ 2.5 km de résolution ;
- pour PEARP : la température à 2m, le vent à 10m, les précipitations totales et neigeuses cumulées en 24h, à une fréquence tri-horaire, sur une grille régulière d'environ 10 km de résolution sur l'Europe et le proche Atlantique.

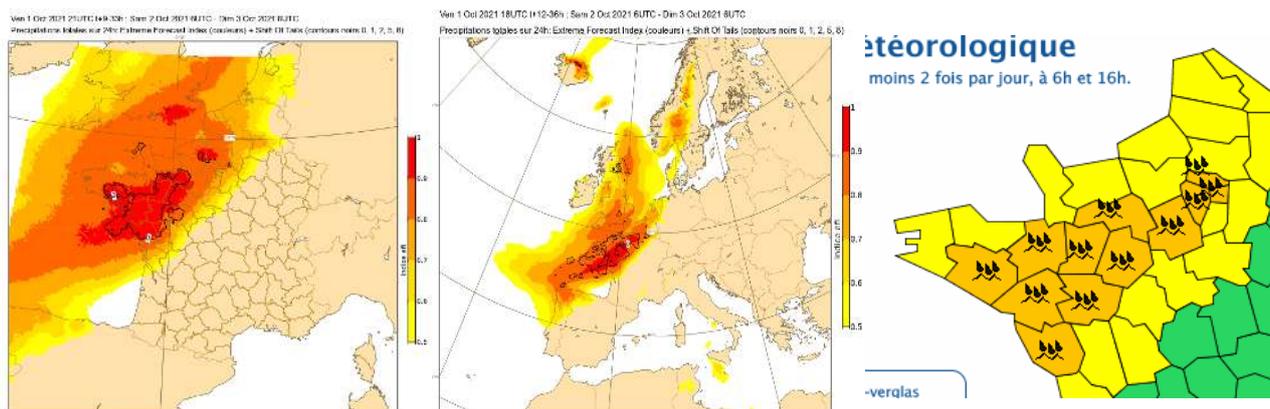


Figure 12 : Diagnostics EFI de précipitations cumulées en 24h pour le 03/10/21 6TU calculés à partir de PEARO (à gauche), PEARP (au centre) et la carte de vigilance (à droite).

Toute la difficulté de l'élaboration de ces diagnostics (EFI et SOT) est de calculer le « climat du modèle ». Différentes études réalisées au CNRM ont permis d'étudier les différentes options pour l'estimer au mieux malgré le coût de calcul rédhibitoire correspondant à une reprévision intégrale et exhaustive sur une durée suffisamment longue pour réaliser de telles statistiques climatiques des systèmes de prévision.

Le climat de PEARP repose sur un système de reprévisions pour PEARP initialisées par les réanalyses du CEPMMT, ce qui permet de produire un jeu de reprévisions sur une période de 20 ans, pouvant explorer une distribution d'évènements incluant des extrêmes (tempêtes, fortes précipitations, vagues de froid, canicules, etc). Il inclut seulement 10 membres pour en limiter le coût.

Le climat de PEARO, contrairement à celui de PEARP, se base sur l'archive opérationnelle de profondeur temporelle restreinte (5 ans de PEARO 2.5 km et un an de PEARO 1.3 km au moment de la bascule). On notera que ce climat, contrairement à celui de PEARP, est hétérogène en raison des évolutions régulières de la chaîne sur la période considérée.

4 Nouveaux systèmes de prévision d'ensemble Arome Outre-Mer (2023)

Un axe important d'amélioration des systèmes de prévision pour l'outre-mer, après l'augmentation de résolution des systèmes déterministes à 1.3 km, sera le déploiement opérationnel de prévisions d'ensemble Arome (Bouttier et al, 2012, Bouttier and Raynaud, 2018, Bousquet et al., 2020) pour les 5 domaines ultramarins à partir de fin 2022 et début 2023. Concrètement, 2 fois par jour, 16 prévisions Arome à 2,5 km de résolution horizontale seront calculées simultanément, chacune contenant différentes perturbations qui permettront au final d'appréhender l'incertitude de la situation du jour (figure 13). Ces systèmes seront couplés au système PEARP.

Ces systèmes ensemblistes auront la même emprise géographique que les systèmes déterministes. Par ailleurs, l'arrivée de cette PE-Arome-OM sera l'occasion de l'agrandissement du domaine Indien (+20 % vers le nord), pour l'ensemble et le déterministe. L'augmentation du domaine Indien permettra une meilleure couverture de certaines cyclogenèses, notamment pour Mayotte.

Des démonstrateurs ont été développés et fonctionnent en temps réel (1 fois par jour) depuis mi-2021 au CNRM et sont mis à disposition pour aider les prévisionnistes à prendre en main ce nouveau système et préparer son usage opérationnel.

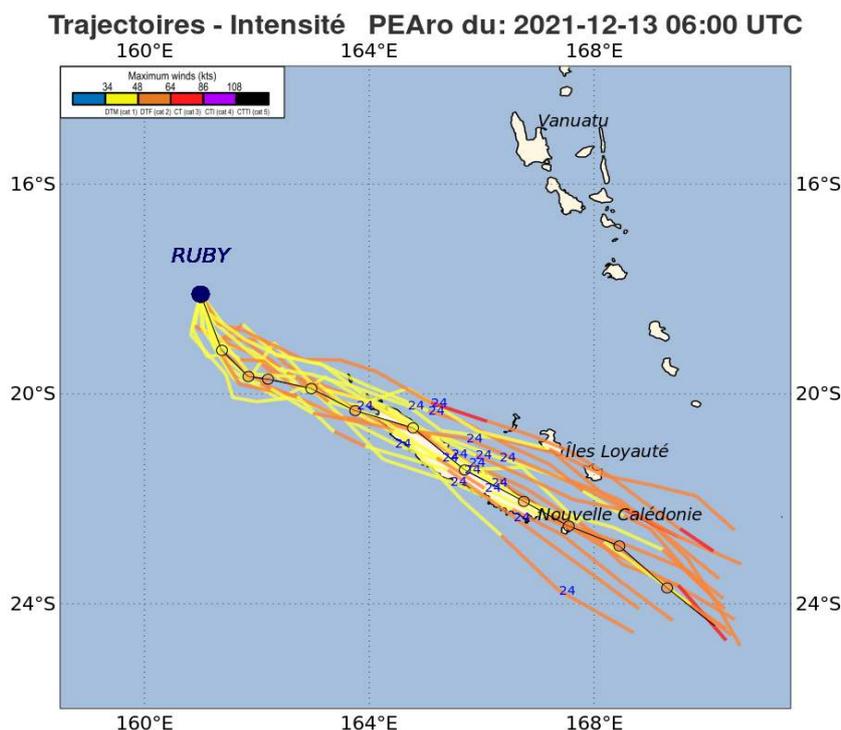


Figure 13 : Trajectoires et intensités du cyclone Ruby simulées par le démonstrateur de prévision d'ensemble Arome sur le domaine de la Nouvelle Calédonie à partir du réseau r6 du 13 décembre 2021.

5 Chaîne en double « CY48T1 » en préparation (2023)

5.1 Aboutissement du projet OOPS

Au cours des 10 dernières années, l'évolution du code commun IFS/Arpège de prévision numérique co-développé avec le CEPMMT et les partenaires du consortium ACCORD a été marquée par un effort de transformation sans précédent dans l'histoire de plus de 30 années de coopération avec le CEPMMT. L'objectif principal de ce travail a consisté à rendre les codes (en FORTRAN) compatibles avec une programmation orientée-objet (OO) tout en maintenant leur qualité opérationnelle. Les bénéfices attendus incluent d'une part une amélioration sensible des conditions de maintenance des codes, grâce aux aspects orientés objet qui permettent de mieux gérer la complexité des algorithmes et des codes en jeu. Les bénéfices comprennent aussi et surtout la possibilité de développer de façon plus rapide et robuste de nouveaux algorithmes en assimilation de données pour Arome et Arpège, avec une approche en grande partie mutualisée pour ces deux systèmes en termes de science et de code. Ce projet est connu sous son acronyme OOPS (Object Oriented Prediction System).

Les fonctionnalités offertes par OOPS sont activement utilisées pour effectuer des recherches sur les algorithmes ensemblistes-variationnels, appelés « EnVar » (e.g. Desroziers et al 2016, Arbogast et al 2017, Montmerle et al 2018). Ces algorithmes EnVar s'appuient sur un ensemble de plusieurs ébauches perturbées, pour mieux représenter les covariances d'erreur d'ébauche ; ces covariances permettent en effet de propager spatialement (en 3D), ou spatio-temporellement (en 4D), les informations issues des observations. L'amélioration des aspects 3D en EnVar porte notamment sur les anisotropies des covariances spatiales d'erreur, qui dépendent de la situation météorologique. Les EnVar peuvent également être étendus à des aspects 4D, s'appuyant sur un ensemble de trajectoires non linéaires, afin de mieux représenter les processus 4D au sein de la fenêtre temporelle d'assimilation. Enfin, en plus de ces travaux sur les EnVar, OOPS est aussi au cœur d'une transformation des méthodes de validation des développements sur le code commun.

Un objectif principal de la chaîne en double en préparation, basée sur le cycle de code commun 48T1, est de passer à OOPS et d'en tirer parti pour améliorer l'assimilation de données. Une évolution majeure associée pour Arome consiste ainsi à passer sous OOPS à un schéma appelé 3DEnVar, comme détaillé ci-dessous. Des améliorations de l'assimilation 4D-Var Arpège permises par OOPS sont également envisagées.

5.2 Evolution majeure du système d'assimilation d'Arome

Depuis sa mise en opérationnel en 2008, le système d'assimilation 3D-Var d'Arome-France utilise des statistiques d'erreur d'ébauche, éléments clés d'un système d'assimilation, qui sont représentées par modélisation statistique, en effectuant de nombreuses hypothèses, d'homogénéité spatiale et temporelle par exemple. Une autre représentation de ces statistiques, dépendante cette fois de la situation météorologique, peut être obtenue par un schéma combinant les approches variationnelle et ensembliste, dit 3DEnVar, en utilisant les perturbations issues d'un ensemble d'assimilations.

Des travaux préparatoires ont d'abord été initiés sous OOPS sur les EnVar dans Arpège (e.g. Desroziers et al 2014), puis ils ont pu être transposés rapidement au 3DEnVar pour Arome grâce au code commun. Cela a permis de prouver l'intérêt de ce schéma pour Arome (Montmerle et al, 2018, Michel et Brousseau, 2021), sur la base de versions précédentes du code (CY43T2). La poursuite de ces développements logiciels à Météo-France a ensuite permis d'obtenir une version plus aboutie pour les nouveaux cycles 46T1 et 48T1 dans le cadre OOPS. Le 3DEnVar Arome sous OOPS est actuellement évalué dans une expérimentation longue en vue d'une prochaine mise en œuvre opérationnelle.

Une trentaine d'expériences, basées sur une configuration pré-opérationnelle, ont été lancées sur une période de 3 mois couvrant l'automne et l'hiver 2020, afin de régler un grand nombre de paramètres,

comme le nombre de membres de l'ensemble, la localisation ou l'hybridation des covariances d'erreurs d'ébauche qui permettent de filtrer le bruit d'échantillonnage.

Les premiers résultats montrent un avantage significatif du schéma 3DEnVar sur le schéma 3DVar (figure 14). L'écart quadratique moyen des prévisions à 12 h d'échéance par rapport aux radiosondages est ainsi amélioré de 13 % pour la température, et de 10 % pour le vent et l'humidité à 850hPa. L'indicateur IP16, qui mesure les performances du modèle Arome pour la prévision des précipitations et des rafales sur 6 heures est ainsi directement amélioré de 3 %, à comparer à la cible d'une augmentation de 0,5 % par an. .

Des travaux en partie analogues sont menés dans l'assimilation Arpège, à l'aide du code commun Arpège/Arome dans le cadre OOPS, afin de mieux représenter les anisotropies des covariances 3D d'erreur d'ébauche, avec là aussi des résultats encourageants. Cela correspond à une formulation « hybride 3D » des covariances d'erreur utilisées par le 4D-Var Arpège. Ces développements conjoints dans Arome et Arpège illustrent l'intérêt de OOPS et des EnVar pour mutualiser à la fois les recherches scientifiques en assimilation aux échelles globales et régionales, ainsi que le développement et la maintenance des codes associés, permettant in fine d'améliorer les assimilations de données de façon majeure.

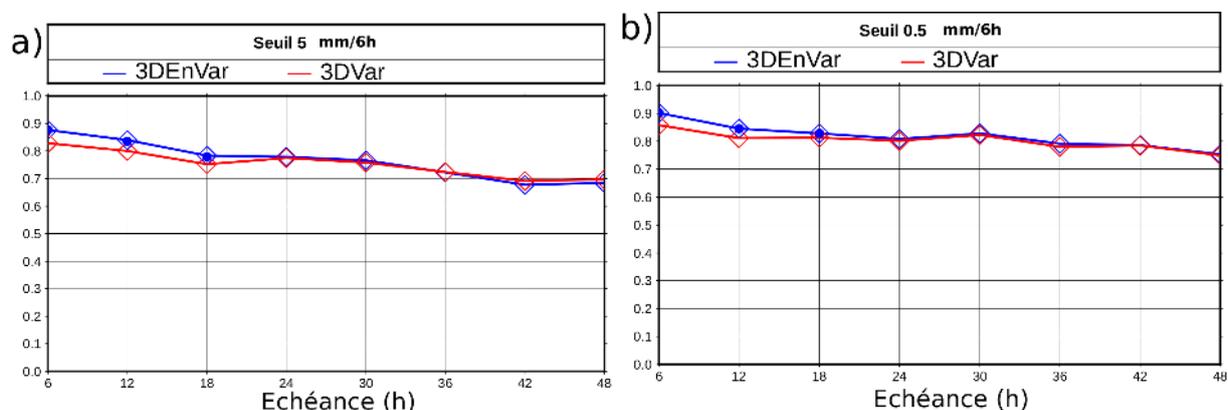


Figure 14 : Evolution du score de Brier régional normalisé calculé sur un voisinage de 50 km pour les seuils de précipitation de 5 mm/6h (a) et 0,5 mm/6h (b) en fonction de l'échéance de prévision du modèle (abscisse) au réseau de 0 h. La courbe rouge (resp. bleue) représente la configuration 3DVar (resp. 3DEnVar). Des valeurs supérieures indiquent de meilleures performances, et la significativité statistique des différences de performance entre les deux versions testées est indiquée par le point à l'intérieur des losanges représentant chaque seuil et échéance.

5.3 Assimilation des données avion Mode-S dans Arome

Les observations d'aéronefs ont toujours été utilisées dans les systèmes d'assimilation de données globaux et régionaux, puisqu'elles fournissent des mesures précieuses et précises de la température et des composantes horizontales du vent en altitude. Outre les rapports classiques AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay) où les mesures à bord sont traitées pour en déduire des paramètres météorologiques, puis transmises à une station au sol, une nouvelle approche a été explorée au cours des dix dernières années, où les données brutes disponibles à partir des rapports Mode-S peuvent être transmises au sol et traitées pour dériver des paramètres météorologiques (de Haan, 2011). L'avantage principal est de pouvoir collecter potentiellement beaucoup plus de données que les rapports conventionnels qui ne sont disponibles qu'à partir d'avions spécifiques équipés de logiciels dédiés embarqués. L'interrogation directe des transpondeurs des aéronefs par les radars secondaires de surveillance de l'ATC (Tracking and Ranging (TAR)) permet d'obtenir des rapports Mode-S/EHS (Enhanced Surveillance) dans lesquels les informations relatives au cap et à la vitesse par rapport à l'air sont disponibles, en plus de l'altitude, du nombre de Mach, de la vitesse sol et de la route. Il a été démontré que

la précision de ces paramètres météorologiques dérivés est comparable à celle des rapports AMDAR pour les composantes du vent (environ 1,5 m/s), mais est moins bonne pour la température (environ 3 K) qui est déduite du nombre de Mach non enregistré avec une précision suffisante. Toutefois des études récentes ont permis d'améliorer significativement la précision de la température.

Un des problèmes historiques des données Mode-S était leur disponibilité en temps quasi réel pour les centres météorologiques des différents pays. L'évolution du système EUMETNET ABO (Aircraft Based Observation) permet maintenant l'échange en temps quasi réel de données Mode-S entre les pays européens par le biais d'un Centre européen de données météorologiques dérivées d'aéronefs (EMADDC : European Meteorological Aircraft Derived Data Centre) (de Jong et al., 2018).

Un certain nombre d'études ont été entreprises dans le contexte de la PNT régionale (de Haan, 2011 ; Lange et Janjic, 2016) où l'assimilation des vents Mode-S conduit à des impacts positifs en termes de scores de compétence de prévision puisque la quantité de données pouvant être assimilées est environ dix fois supérieure à celles fournies par AMDAR.

Un travail de recherche est conduit au GMAP pour assimiler les données Mode-S dans Arome-France. Un algorithme original de débiaisage variationnel des données de vents dérivés des données Mode-S a notamment été développé (Pourret et al., 2021). Les expérimentations encourageantes réalisées permettent d'envisager une mise en œuvre de l'assimilation de ces données dans Arome dans la chaîne en double « CY48T1 ».

5.4 Autres modifications

Plusieurs modifications sont préparées pour enrichir le système d'observations, en complément de l'assimilation dans Arome des vents Mode-S produits par l'EMADDC. Celles-ci concernent notamment l'assimilation des radiances brutes de l'imageur ABI à bord du satellite géostationnaire américain GOES-17, les radiances du sondeur hyperspectral infra-rouge CrIS embarqué sur les satellites défilants américains S-NPP et NOAA-20 au format FSR (Full Spectral Resolution), les angles de courbure des récepteurs GNSS par radio-occultation (GRACE-C, Sentinel-6, Spire) et les vents diffusiomètres à haute résolution des satellites défilants chinois HY-2B et HY-2C.

L'assimilation d'observations déjà assimilées sera améliorée à travers la révision de la sélection des canaux vapeur d'eau pour IASI, des nouveaux réglages des erreurs d'observations pour les AMVs (vents nuageux), un nouveau modèle d'erreurs pour les angles de courbure GNSS par radio-occultation, l'utilisation d'une correction de biais variationnelle pour les données de radiosondages et d'avions et un nouvel écrémage dynamique des stations GNSS terrestres.

Des modifications du code seront introduites pour préparer l'assimilation de nouveaux instruments. Certains instruments sont déjà lancés mais les données ne sont pas encore disponibles, comme celles du diffusiomètre bande Ku sur NSOAS/HY-2D, des instruments sur FY-3E : sondeurs micro-ondes (MWS-2, MWTS-3, GNOS-2, diffusiomètre 2 fréquences WindRad, sondeur IR hyperspectral HIRAS-2). Certains Instruments seront lancés sur la période 2022-2024, comme les diffusiomètres indiens OSCAT sur OceanSat-3 (04/2022) et OceanSat-3A (2023), CrIS et ATMS sur JPSS-2 (09/2022), petits sondeurs micro-ondes (STPH8 sur ISS en 2022, constellation TROPICS en 2022, AWS début 2024), FCI et LI sur MTG-I (lancement fin 2022 - opérationnel fin 2023), IRS sur MTG-S (début 2024 - opérationnel en 2025).

Les perturbations des états initiaux de PEARP sont calculées comme une combinaison de vecteurs singuliers et de perturbations fournies par AEARP. Les contributions de ces deux méthodes de perturbation seront revues, en particulier le besoin de conserver les vecteurs singuliers sera évalué. De premières expériences montraient un impact positif de la suppression des vecteurs singuliers, mais cela doit être ré-examiné, notamment à la lumière des nouveaux indicateurs probabilistes et de l'impact dans PEARO.

La température de surface de la mer (SST) est initialisée à partir d'une analyse par interpolation optimale des observations issues de bateaux et de bouées et d'une relaxation vers la SST analysée OSTIA produite par le Met Office, elle est constante au cours de la prévision. L'utilisation du schéma de couche de mélange océanique (CMO) (Lebeau-pin, 2007), déjà opérationnel dans les systèmes Arome-OM, est envisagée dans les systèmes globaux. Les variables pronostiques de ce schéma seraient cyclées et mises à jour à partir de l'analyse par interpolation optimale des observations issues de bateaux et de bouées, et d'une relaxation vers les champs Mercator. Il s'agira d'une première étape de couplage océan/atmosphère, plus particulièrement adapté à la prévision à courte échéance, ouvrant des perspectives de recherche en matière d'assimilation couplée dans un cadre simplifié, avant de mettre en œuvre un couplage avec un modèle complet d'océan. Le couplage de modèle Arome avec le modèle océanique NEMO et le modèle de vagues MFWAM fait l'objet d'un projet transverse, AROBASE, au CNRM, qui a débuté en 2022.

Une modélisation en ligne des poussières désertiques dans le modèle Arome a été développée au cours des dernières années. Les processus d'émission des poussières désertiques sont gérés par le modèle DEAD qui est intégré dans le système couplé Arome-SURFEX par Grini et al. (2006). Les processus de transports, de dépôt et de lessivage sont gérés par le schéma d'aérosol log-normal ORILAM (Organic Inorganic Log-normal Aerosol Model, Tulet and al. (2010)). Un prototype a été développé par A. Ambar and M. Mokhtari (2017) et L. Thouron (note interne, 2018). Le portage de ce prototype sur le cycle 48T1, son évaluation et un couplage au modèle de chimie transport MOCAGE sont prévus pour permettre une modélisation en ligne des poussières désertiques dans certains systèmes Arome, notamment pour l'assistance aux Armées.

6 Nouveaux systèmes Arome-500m (2024)

6.1 Les attendus

Une résolution horizontale de 500 m permet d'améliorer la représentation de phénomènes d'échelle fine (par exemple, les orages) et des phénomènes de basses couches très fortement influencés par les caractéristiques topographiques locales, comme le brouillard, les îlots de chaleur urbains en situations caniculaires, la circulation des vents dans les vallées ou les flux radiatifs en zone de relief qui influencent l'évolution du manteau neigeux, ainsi que les circulations côtières. Si pour certaines situations météorologiques (circulations en vallées ou îlots de chaleur urbain par exemple), cette représentation plus réaliste des phénomènes se traduira par une meilleure prévision, pour d'autres, comme les orages, elle sera insuffisante dans la majorité des cas pour améliorer la prévision précise de la localisation et de l'intensité du phénomène. Pour ces phénomènes, une prévision d'ensemble est recommandée, mais elle ne peut être considérée à 500m avec les moyens de calcul actuels, car trop coûteuse. De ce point de vue, la mise en place d'Arome-500m est préparatoire à des évolutions des chaînes de PNT après 2025.

Les phénomènes de réduction de visibilité et de baisse de plafond constituent un enjeu crucial dans l'exploitation des plateformes aéroportuaires (déclenchement de procédures de type « Low Visibility Procedures » LVP), en particulier sur les grands aéroports (Paris, Lyon Saint Exupéry, Bâle-Mulhouse, ...). Afin d'améliorer les diagnostics actuels de visibilité et de plafond, une meilleure description de la topographie locale, combinée à une meilleure prise en compte des processus microphysiques qui régissent la formation, la dissipation des brouillards (et des phénomènes LVP plus généralement) et leur éventuelle advection vers les zones aéroportuaires, sera possible avec une résolution à 500 m, et plus encore grâce à l'augmentation de la résolution verticale dans les basses couches.

Les procédures d'approche peuvent être également impactées par les conditions givrantes et le cisaillement de vent. En effet, la prévision des conditions givrantes permettrait d'optimiser la gestion par les services aéroportuaires de la mise en place des outils de dégivrage/anti-givrage. De même, la connaissance de conditions favorables à l'occurrence de cisaillement de vent limite les cas de remises de gaz et autorise des réductions d'espacement entre les avions. Un modèle avec une résolution horizontale de 500 m, accompagnée d'une augmentation de résolution verticale devrait bénéficier à la prévision de ces conditions.

6.2 Options dynamiques

Suite aux nombreux tests effectués récemment, l'option actuellement retenue consiste à ajouter une itération dans la phase « correcteur » du schéma temporel prédicteur-correcteur pour une plus grande précision et stabilité. Cette option augmente significativement le coût numérique de l'exécution du modèle, et contraint donc le nombre de configurations/prévisions possibles pour Arome-500 m.

6.3 Options paramétrisations physiques

Les paramétrisations physiques d'Arome-500 m seront autant que possible identiques aux paramétrisations d'Arome-France ou Arome-PI à 1,3 km de résolution pour mutualiser les travaux de maintenance, de développement et de validation de ces systèmes et disposer de conditions initiales adaptées aux Arome-500m. C'est en particulier nécessaire pour l'initialisation des variables contenu en eau et température du sol de la configuration à 500 m à partir de ceux de la configuration Arome à 1,3 km. Les mêmes bases de données physiographiques ECOCLIMAP (Masson et al. 2003) seront utilisées à 1.3 km et à 500m de résolution. Toutefois, certaines évolutions sont envisagées pour Arome-France et Arome-500 m d'ici 2024, comme l'utilisation du schéma de transfert radiatif ecRad, des nouveautés du

schéma de ville TEB (Masson, 2000), ainsi que des options non dimensionnantes en termes de temps de calcul concernant la représentation de certains processus physiques atmosphériques.

Les évolutions spécifiques à Arome-500 m seraient une adaptation du schéma de convection peu profonde à la zone grise de la turbulence (Honnert, 2016), une amélioration des flux océaniques pour le domaine méditerranéen utilisant une analyse de SST issue de Mercator au 1/36° et l'utilisation d'un modèle de couche de mélange océanique 1D.

Des travaux de recherche sont en cours pour évaluer l'apport dans les systèmes Arome de PNT de schémas de surface plus évolués de représentation des échanges sol-végétation-atmosphère (schéma multi-couches du sol superficiel « ISBA-DIF ») et du manteau neigeux (schéma multi-couches « ISBA-ES ») avec une amélioration de représentation des paramètres physiographiques (base de données à 300 m Ecoclimap-SG).

6.4 Domaines géographiques

Les travaux de thèse récents sur des situations de brouillard des campagnes SOFOG3D et Bure ont montré une amélioration des scores de prévision de brouillards radiatifs et par affaissement de stratus à 500 m de résolution et avec 156 niveaux verticaux, l'augmentation de la résolution verticale étant à l'origine des principales améliorations. Les derniers tests sur les brouillards radiatifs de SOFOG3D avec 120 niveaux au lieu de 150 niveaux ont confirmé l'amélioration. Deux distributions verticales avec 120 niveaux ont été testées, celle avec davantage de niveaux dans les basses couches conduit à de meilleurs résultats et a été retenue pour les configurations Arome-500 m.

Les nombreuses expériences réalisées par le passé avec Arome 500 m sur des domaines de petite taille ont montré que la faible amélioration sur de nombreux paramètres météorologiques s'expliquait par plusieurs facteurs : les incertitudes dans les conditions initiales à ces échelles plus fines, la petite taille des domaines très contraints qui sont pénalisés par le couplage aux limites. Certains paramètres sont cependant significativement améliorés en zones de relief près du sol : la force et surtout la direction du vent.

Compte tenu des contraintes de coût (enveloppe calcul dédiée aux systèmes Arome-500m) et afin de répondre aux engagements du COP et de s'inscrire dans la dynamique des JO 2024, deux domaines ont été retenus :

- un **domaine** couvrant la région Parisienne (PARIS-500 m, figure 15) ;
- un « **grand** » **domaine** couvrant une partie du pourtour **Méditerranéen** et des **Alpes** (MEDI-TALP-500m), incluant Marseille, Nice et Lyon.

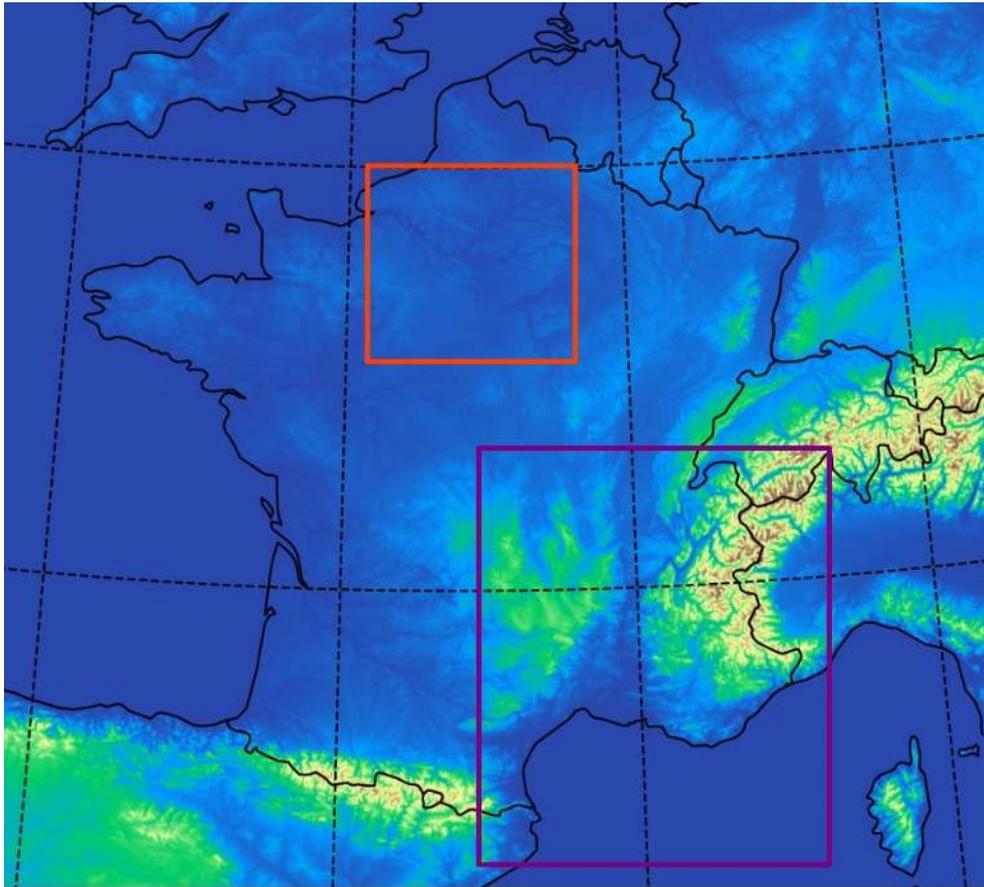


Figure 15 : Domaine PARIS-500m (carré rouge de 250 km x 250 km) et MEDITALP-500m (rectangle violet de 480 km x 576 km)

Deux modes de mise en œuvre sont envisagés :

- **un mode « Prévision Immédiate »**, avec de nouvelles prévisions réalisées toutes les heures jusqu'à 6 heures d'échéance, en adaptation dynamique de l'analyse Arome-PI à 1,3 km de résolution ;
- **un mode « Prévision courte échéance »** : avec une prévision par jour, jusque 24-36 heures d'échéance à partir de l'analyse Arome-France.

Le déploiement de ces nouveaux systèmes Arome-500 m est prévu à partir de fin 2023 pour être totalement opérationnel pour les JO 2024.

7 chaîne en double « CY49T1 » (2024)

7.1 Assimilation 4DEnVar dans Arome

Depuis avril 2015, le système d'assimilation d'Arome-France fournit des analyses rafraîchies à une fréquence horaire en utilisant les observations disponibles les plus récentes possibles. Certaines de ces observations, comme les observations des radars de précipitations, sont disponibles à des fréquences plus élevées (toutes les 15 minutes). Une meilleure utilisation de ces observations passe par le remplacement du schéma d'assimilation 3D par une version 4D, prenant en compte la dimension temporelle dans la construction de l'analyse.

Pour Arome-France, cette transition se fera vers un schéma dit 4DEnVar, qui associe l'approche variationnelle utilisée traditionnellement à Météo-France aux approches ensemblistes utilisées par un nombre croissant de services opérationnels de prévision numérique du temps. Les statistiques d'erreur d'ébauche sont directement déduites des perturbations issues d'un ensemble d'assimilations. En outre, les corrélations d'erreur temporelles permettent de prendre en compte la dimension temporelle dans le processus d'analyse sans avoir besoin de développer les versions linéaire tangente et adjointe du modèle de prévision.

Le prototype d'un tel système, assimilant les observations disponibles toutes les 15 minutes et plus, a été développé et ses performances prometteuses commencent à être évaluées sur certains événements. Sur la situation du 28 mai 2018 par exemple, la répartition géographique et l'intensité des plus forts cumuls observés y sont bien mieux simulées (figure 16).

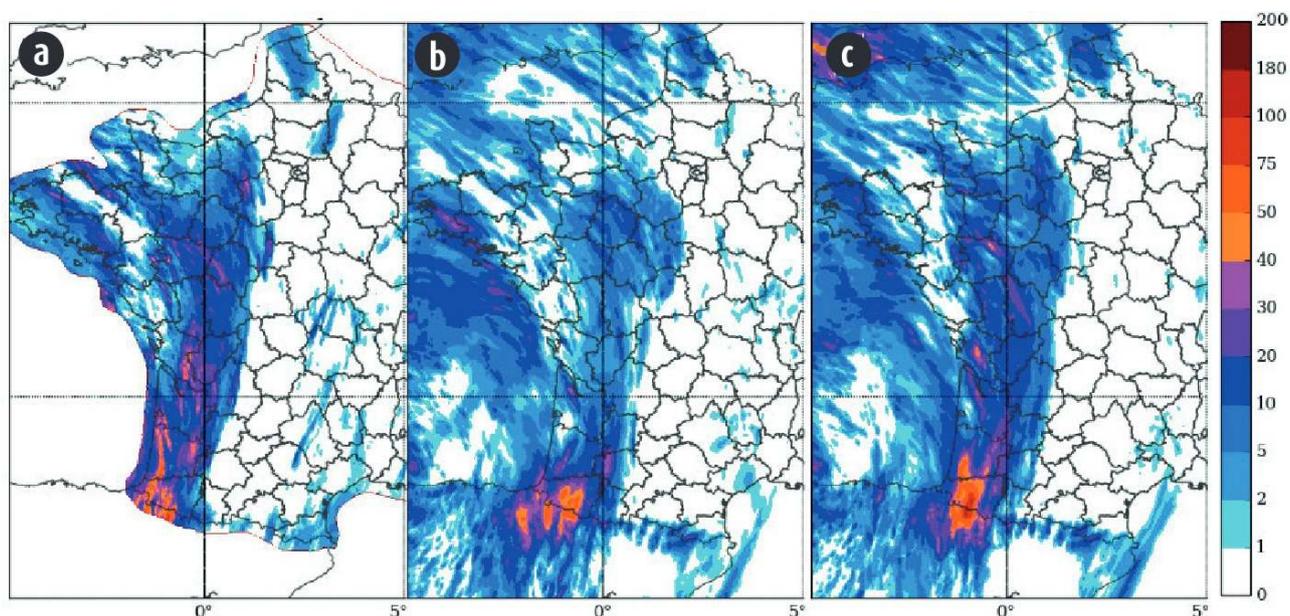


Figure 16 : Précipitations accumulées sur une période de 24h le 28 mai 2018 observées par les radars (a) et simulées par le cumul des prévisions 1h issues des 24 cycles d'assimilation successifs en 3D-Var (b) et en 4DEnVar (c)

7.2 Assimilation hybride 4D-Var/4DEnVar dans Arpège

Les travaux sur le 4DEnVar Arpège ont aussi beaucoup progressé grâce à OOPS, sur la base d'une

configuration complète, intégrant tous les ingrédients de l'assimilation multi-incrémentale Arpège. Cela a notamment permis de mettre au point une nouvelle formulation appelée « hybride 4D », que l'on peut voir comme une émulation de l'approche 4D-Var actuelle, permettant d'intégrer de façon pondérée les informations 4D apportées par un ensemble de trajectoires non linéaires.

Cette formulation hybride 4D repose en effet sur la combinaison des covariances propagées de façon linéaire (comme dans le 4D-Var actuel) et des covariances ensemblistes 4D, filtrées par localisation. Cela permet d'améliorer, dans l'assimilation de données, la représentation des processus 4D, et notamment les processus non linéaires et d'échelle fine : cela est particulièrement important pour les phénomènes diabatiques humides liés à la convection par exemple, qu'un ensemble de prévisions non linéaires représente mieux qu'un modèle linéaire tangent construit à l'aide de linéarisations et de simplifications assez drastiques. Les covariances propagées linéairement s'avèrent utiles quant à elles pour décrire une partie de la dynamique des covariances de grande échelle, qui évoluent de façon assez linéaire ; ces covariances sont relativement faibles et peuvent être difficiles à estimer de façon robuste par un ensemble de petite taille.

Cette formulation « hybride 4D » s'avère ainsi permettre de lever un verrou scientifique et technique important, car les méthodes précédentes d'hybridation dans la communauté étaient plutôt statiques. Cette nouvelle formulation peut ainsi être vue comme un changement de paradigme : il ne s'agit plus vraiment de choisir entre 4D-Var et 4D-EnVar, mais plutôt de tirer parti des avantages respectifs de ces deux schémas. Cette nouvelle formulation a pu être codée dans OOPS, grâce à la flexibilité apportée par l'approche orientée objet. Son expérimentation produit des résultats encourageants, comme l'illustre l'amélioration significative ci-dessous de l'IP18 et de toutes ses composantes.

Il apparaît ainsi à nouveau que la réalisation d'expérimentations EnVar sous OOPS, en parallèle pour Arome et Arpège, permet de mutualiser les progrès sur les aspects scientifiques et techniques de la modélisation des covariances d'erreur et de l'assimilation de données. Cela facilite les travaux de recherche sur de nouveaux algorithmes, ainsi que le développement et la maintenance des codes associés. Ces perspectives démontrent le bénéfice de l'investissement lourd et de long terme qui a été consenti dans le cadre du projet OOPS depuis plus de 10 ans en collaboration avec le CEPMMT, et dont les premiers fruits commencent à être récoltés.

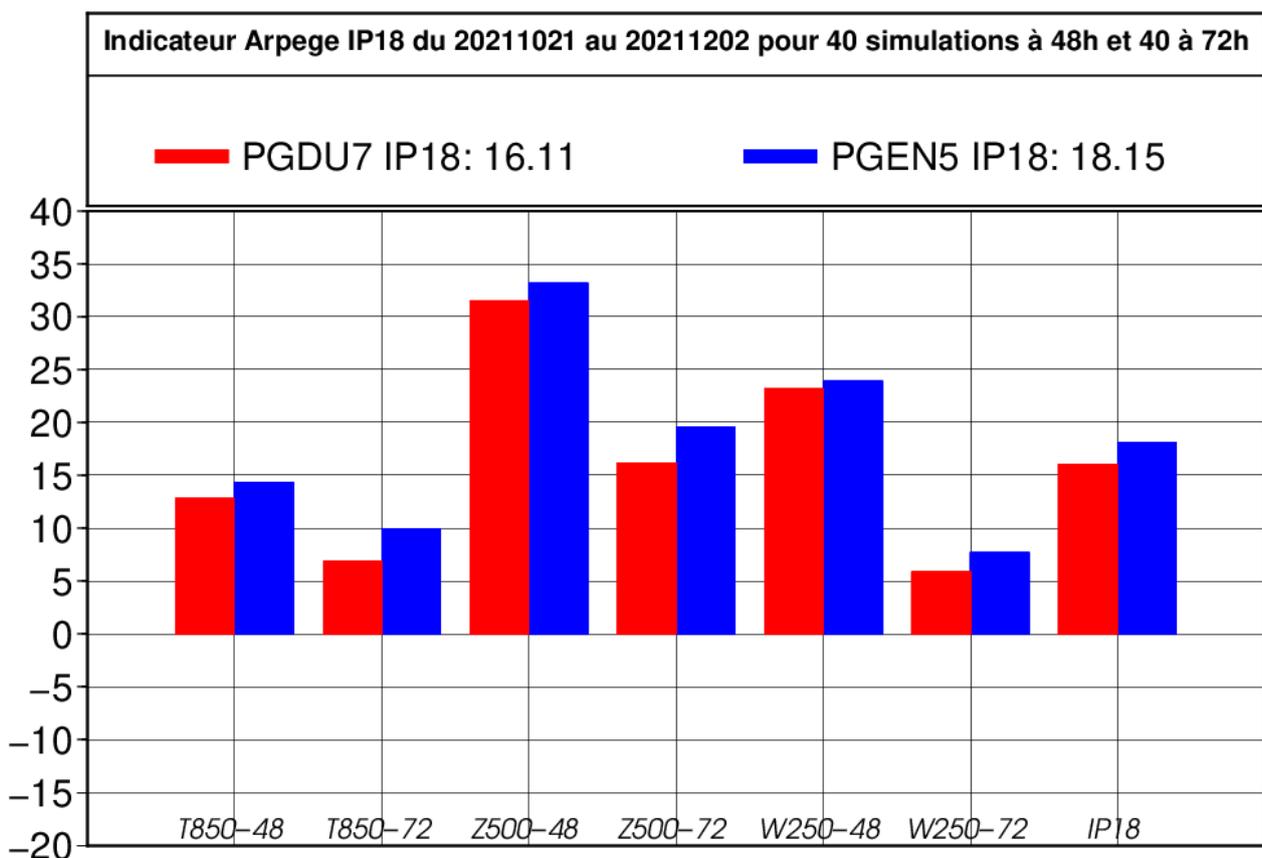


Figure 17 : Score Indicateur Arpege IP18 pour une expérimentation avec des covariances hybrides 4D (formulation « hybride 4D », avec 50% de covariances ensemblistes 4D localisées, et 50% de covariances propagées linéairement) en bleu, comparée au "4D-Var actuel" (avec 100% de covariances propagées linéairement) en rouge.

7.3 Assimilation des données du satellite MTG-I

L'imageur FCI embarqué à bord du satellite MTG-I1 dont le lancement est prévu à la fin de l'année 2022 a des capacités améliorées par rapport à l'imageur SEVIRI mais principalement dans le domaine du spectre visible (avec plus de canaux, une fréquence accrue et une meilleure résolution horizontale), qui n'est pas encore exploité en PNT à Météo-France. On devrait avoir de plus petits pixels (2 km vs 2.5 km) sauf pour un canal de surface IR 10.5 où ce sera 1 km, mais l'apport par rapport à SEVIRI devrait être relativement limité dans Arome ou Arpege.

Les données de l'imageur d'éclairs LI, nouvel instrument sur un satellite géostationnaire européen, offre un potentiel très intéressant pour Arome en fournissant des informations complémentaires sur les systèmes convectifs par rapport au réseau de radars au sol (e.g. sur mer et dans les régions montagneuses). Une thèse est en cours pour préparer l'assimilation de ces données. L'utilisation d'un algorithme d'assimilation 4DEnVar devrait permettre une meilleure assimilation de ces données, via la prise en compte de la dimension temporelle et la possibilité d'ajouter des hydrométéores dans la variable de contrôle (la densité d'éclairs étant reliée indirectement via l'activité électrique au contenu en grésil dans les nuages).

7.4 Amélioration de la représentation des erreurs de modélisation dans la prévision d'ensemble Arome

Une prévision d'ensemble est construite de manière à représenter les différentes sources d'incertitudes inhérentes à la prévision numérique du temps, en particulier celles dues à l'imperfection des modèles de prévision. Une des sources d'incertitude importante réside dans les paramétrisations physiques, qui représentent l'effet de certains processus physiques (turbulence, convection peu profonde, rayonnement, etc) sur les variables d'état résolues par le modèle. Afin de dépasser la méthode utilisée dans le système PEARO opérationnel, une approche alternative plus physique s'appuyant sur la perturbation de paramètres intervenant dans la représentation des phénomènes physiques, a été développée et testée dans le cadre de la thèse de M. Wimmer (Wimmer et al, 2021).

Sur la base de la connaissance experte des processus physiques dont la représentation est la plus incertaine dans le modèle Arome, une vingtaine de paramètres a été sélectionnée. Des analyses de sensibilité ont permis d'identifier les paramètres ayant le plus fort impact sur les prévisions Arome, et donc les plus susceptibles de contribuer à l'erreur de modélisation. Ces paramètres influent sur les paramétrisations de la turbulence, la microphysique, la convection peu profonde, l'état de la surface, le rayonnement et la diffusion numérique.

Différentes techniques de perturbations des paramètres ont été mises en place et évaluées dans la version opérationnelle de PEARO. Comparées à l'approche opérationnelle, celles-ci améliorent les prévisions pour la plupart des variables de temps sensible, en particulier le vent et les précipitations (voir figure 18).

Cette méthode reste à évaluer dans la future version de PEARO à plus haute résolution horizontale (1.3 km au lieu de 2.5 km actuellement). Une prochaine étape consistera également à appliquer des perturbations spatio-temporelles aux paramètres.

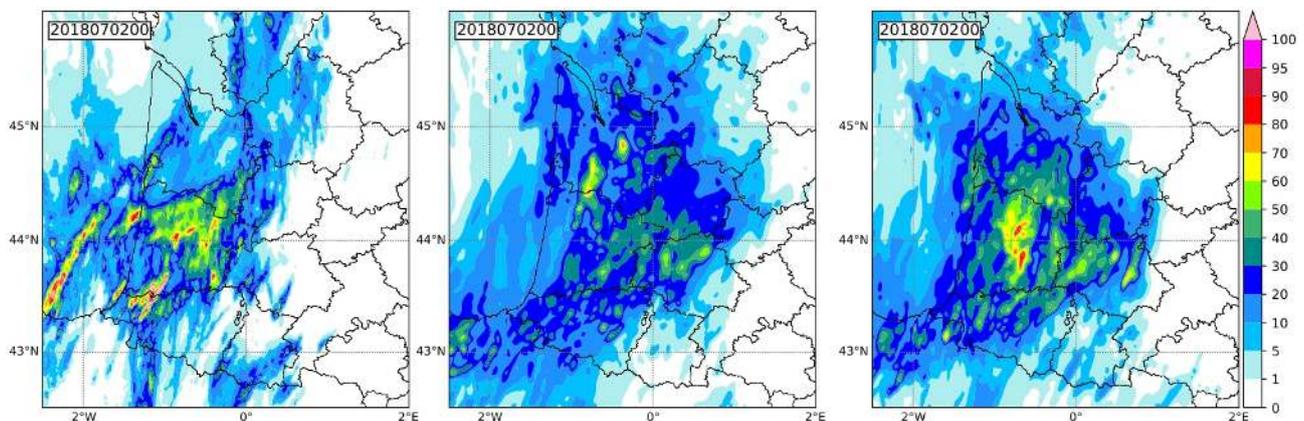


Figure 18 : Précipitations cumulées en 24 h valides le 2 juillet 2018 à 00 h TU : a) Lame d'eau Antilope ; b) Quantile maximal de la PEARO avec représentation actuelle de l'erreur de modélisation (perturbations des tendances des paramétrisations physiques) ; c) Quantile maximal de la PEARO avec nouvelle représentation de l'erreur de modélisation basée sur la perturbation de paramètres.

7.5 Autres modifications

Une évolution importante de la représentation des erreurs de modélisation est envisagée dans la prévision d'ensemble globale, PEARP, avec le remplacement de la méthode mise en œuvre dans la chaîne

en double en cours de perturbation des paramètres de la physique constants spatialement et temporellement au cours de la prévision par une méthode de perturbations stochastiques des paramètres de la physique (SPP) évoluant spatialement et temporellement au cours de la prévision. Il est difficile d'anticiper l'impact scientifique, l'ampleur du travail de réglage et d'évaluation, ainsi que le surcoût de calcul.

8 Autres évolutions à l'horizon 2025

8.1 Assimilation des observations du sondeur hyperspectral infrarouge IRS de Meteosat 3ème génération MTG-S

Une prochaine grande étape dans l'amélioration des performances des systèmes de PNT et particulièrement les modèles à fine échelle tels que Arome, sera franchie grâce à l'arrivée des nouvelles générations de sondeurs à bord de satellites météorologiques. L'un d'eux sera à bord de MTG-S dont le lancement est prévu en 2024. Il s'agit du sondeur infrarouge hyperspectral IRS (1960 informations par point d'observation) qui permettra de fournir une vision 4D unique de l'atmosphère. Il mesurera le disque terrestre avec une très haute fréquence spatiale de 4 km au-dessus de l'Afrique et temporelle de 30 minutes sur l'Europe. Il sera capable d'observer cette région du système terrestre à l'aide de longueurs d'onde sensibles à la température et l'humidité atmosphérique, aux nuages, aux surfaces, à la composition chimique et bien d'autres paramètres et il a le potentiel de combler une partie du manque de données à assimiler dans Arome.

Le traitement des informations les plus pertinentes pour la PNT à partir des volumes très importants de données qui seront générés par IRS représente un défi technique et scientifique pour les centres de météorologie. Il est donc essentiel de se préparer à l'arrivée d'un tel instrument. Pour cela, nous utilisons une méthode qui permet à partir d'un état de l'atmosphère réaliste de simuler l'ensemble des observations, y compris IRS, pouvant être assimilées dans le système d'assimilation 3D-Var Arome. Le principal objectif est d'évaluer l'impact des observations IRS sur les prévisions météorologiques en complément des observations assimilées actuellement dans Arome. La première étape a consisté à simuler les observations IRS dans les différentes longueurs d'ondes (figure 19) et à réaliser une première sélection de canaux les plus informatifs (Coopmann et al., 2022).

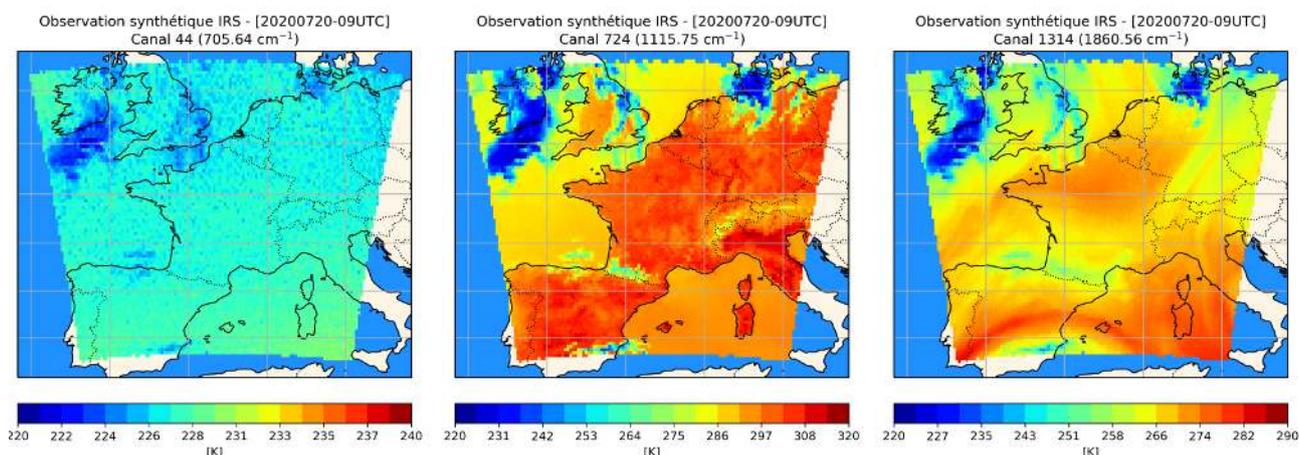


Figure 19 : Carte des observations IRS sur le domaine Arome pour le canal 44 (sensible à la température) à gauche, 724 (sensible à la surface) au milieu et 1314 (sensible à la vapeur d'eau) à droite le 20 juillet 2020 à 09 UTC.

Les expériences d'assimilation d'observations simulées ont ensuite été menées et indiquent qu'un apport important de MTG/IRS sur la qualité des prévisions du modèle Arome est attendu (par un renforcement significatif du nombre d'observations satellitaires). Une continuité de service de MTG/IRS, non garantie à ce jour avec seulement deux satellites MTG-S de prévus contre quatre MTG-I, pourrait se révéler stratégique pour la qualité de nos prévisions sur l'Europe.

Un travail similaire est en cours avec les futurs satellites à bord de Metop-SG dont les lancements sont prévus au-delà de 2024. Une sélection de canaux a été élaborée (Vittorioso et al 2021) et un cadre d'expériences de simulation de système d'observations est actuellement utilisé pour étudier l'apport du futur sondeur IASI-NG et de futures constellations (AWS et CMIM).

8.2 Amélioration de la représentation des échanges sol-végétation-atmosphère

L'objectif est d'évaluer dans les systèmes Arpège et Arome opérationnels des modules de surface plus évolués et disponibles dans la plateforme SURFEX. Pour la physique, il s'agit du module DIF représentant de manière discrétisée les échanges verticaux d'énergie et d'eau dans le sol, du module FLAKE représentant les échanges d'énergie à la surface des lacs, du module multi-couches de neige ISBA-ES et peut-être du module MEB pour un bilan d'énergie multiple de la surface. Pour la biophysique, on pourra inclure au moins le module AST pour le calcul de la résistance stomatique à partir de la photosynthèse mais avec un indice foliaire prescrit, comme au CEPMMT.

Cette implémentation nécessitera de développer des stratégies d'initialisation des nouvelles variables de surface, notamment les plus lentes (sol profond, neige). Il s'agira d'examiner l'apport combiné des nouveaux modules avec des initialisations adaptées. Une approche ensembliste pour l'initialisation des variables de surface serait très utile pour faire ces évolutions, car plus indépendante des nouveaux schémas utilisés au niveau du calcul des covariances d'erreur de prévision.

Il s'agira également d'utiliser la base de données physiographiques ECOCLIMAP-SG, globale à 300 m de résolution basée sur ESA CCI Land Cover version 1.6.1 (2016), développée au CNRM pour une meilleure représentation de l'occupation des surfaces continentales, des caractéristiques du sol et de la végétation. Pour arriver à des résolutions spatiales plus fines (hectométriques) il faudra aussi de nouvelles bases de données physiographiques. Le service Copernicus Global Land Monitoring Service fournira des cartes d'occupation des sols à 100 m de résolution dans un futur proche qui pourraient être intégrées dans ECOCLIMAP-SG.

Il sera également important de travailler à une mise à jour de ces bases climatologiques avec des produits satellitaires en temps quasi-réel pour mieux contraindre notamment la phénologie de la végétation (albédo, indice foliaire, fraction de végétation). Cela pourrait en effet constituer un aspect tout aussi utile pour l'amélioration de la prévision des paramètres du temps sensible que l'utilisation de nouveaux modules de SURFEX.

La validation de ces évolutions et la mise au point des adaptations nécessaires représente un travail très conséquent, reposant sur la mise en œuvre d'une hiérarchie de configurations, de la plus simple (mode forcé) et la moins coûteuse en temps calcul (basse résolution) en allant vers des configurations plus complexes (mode couplé) et plus coûteuses en temps calcul (haute résolution).

9 La précision mixte

Le calcul électronique à des fins scientifiques s'effectue depuis les années 1950 sur 64 bits au moins. Il revient à T. Palmer, du CEPMMT et de l'Université d'Oxford d'avoir lancé l'idée, dans les années 2010, que la précision « scientifique » servait peut-être la stabilité des intégrations des systèmes de prévision, mais en aucun cas la précision « météorologique » : la prévisibilité limitée de l'atmosphère rend la précision numérique illusoire. Un collègue tchèque formé dans le consortium ALADIN, F. Vána, a montré la faisabilité de cette idée autour de 2015 avec OpenIFS.

Le gain de temps de calcul est réduit de 40 % environ, et cela, sans affecter la qualité des résultats.

Cette approche n'est pas sans risques, car l'intervalle de valeurs réelles admissibles se réduit beaucoup : il devient plus facile d'obtenir un résultat qui sera équivalent soit à zéro, soit à l'infini. Selon le contexte, cela peut arrêter aussitôt l'algorithme ou amorcer une instabilité, source de bruit ou d'une interruption ultérieure. Des adaptations des micro-algorithmes sont nécessaires pour éviter ces dégénérescences.

Le CEPMMT a réalisé un travail de fond sur ce sujet, qui a permis de mettre en évidence qu'un certain nombre d'opérations devaient rester en précision de 64b. C'est pourquoi on doit parler de précision mixte. Le CEPMMT reste prudent sur l'utilisation de la précision de 32b dans les modèles linéaires utilisés dans l'algorithme d'assimilation variationnel, car le test d'adjonction tend à échouer dans ce cas, c'est à dire qu'une minimisation ne convergerait pas. Toutefois, la précision mixte dans les prévisions est devenue opérationnelle au CEPMMT en 2021.

Il est important de souligner que la précision mixte est un des aspects de l'adaptation aux architectures de calcul avec accélérateurs (par exemple GPU). Les accélérateurs donneront une meilleure efficacité avec la précision 32b, qui est la référence pour des calculs avec des nombres réels. La précision mixte entraîne également une moindre demande de mémoire (limitée sur les accélérateurs) et une réduction des échanges de données entre mémoire de la carte et accélérateur, qui sont source de diminution des performances.

Les premières prévisions Arpège et Arome en 32b ont été réalisées en 2017 après avoir effectué plusieurs adaptations dans le code de prévision numérique. L'expérimentation en précision réduite s'est poursuivie en corrigeant au fur et à mesure les problèmes identifiés dans des expérimentations longues. L'utilisation de la précision mixte est encouragée au GMAP dans les expérimentations de type recherche afin de renforcer sa validation, car l'expérience montre que certains problèmes peuvent être extrêmement rares. Une première étape de l'utilisation de la précision mixte s'est concrétisée dans les prévisions des Arome-OM de la chaîne en double en cours. Le déploiement de la précision mixte va se poursuivre avec l'objectif de l'inclure dans les prochaines chaînes en double sur les machines actuelles ATOS/Bull combinée à une mise en œuvre anticipée d'une ou plusieurs caractéristiques des évolutions envisagées sur le prochain calculateur. Cela pourrait être l'augmentation de résolution verticale ou l'augmentation du nombre de membres de la prévision d'ensemble PEARO.

Une augmentation de résolution verticale avec un passage à 120 niveaux est en effet envisagée sur le prochain calculateur, afin de mieux décrire les basses couches, notamment pour la prévision du brouillard dans Arome, et dans la stratosphère pour améliorer l'assimilation des observations satellites pour laquelle le calcul des radiances simulées nécessite une bonne représentation de l'atmosphère dans toute son extension verticale. Un changement de niveaux verticaux représente toujours un travail très conséquent car cela nécessite généralement un ajustement des paramètres de la physique et une révision significative de l'assimilation avec notamment le calcul de nouvelles covariances d'erreur de prévision et d'observation.

10 Conclusions et perspectives

Les évolutions des systèmes opérationnels de PNT prévues au cours de la période 2022-2025 sont riches et multiples. Elles visent à améliorer la qualité météorologique des sorties brutes de ces modèles et des produits et services élaborés à partir de celles-ci. Elles concrétisent les différentes étapes de mise en œuvre de la prospective calcul de 2016 à l'origine de l'acquisition des calculateurs BULL-AMD. L'assimilation optimale et en plus grand nombre des données disponibles, actuelles et futures, est au cœur de ces évolutions (OOPS, 3D/4D-EnVar, Mode-S, IRS/MTG, etc.). L'amélioration de la physique des modèles et des diagnostics est aussi un axe important de progrès. Ces évolutions correspondent au transfert vers l'opérationnel de développements et travaux de recherche menés sur de nombreuses années, arrivés à maturité, et généralement réalisés dans le cadre de collaborations avec différentes équipes européennes de prévision numérique, dont le CEPMMT et les services météorologiques du Consortium ACCORD, mais également de projets nationaux ou internationaux avec d'autres équipes du CNRS ou des Universités. Il faut souligner que ces évolutions ne sont envisageables que grâce à un travail de fond réalisé sur les aspects techniques (hors performance des codes : gestion des modifications de code, environnement de lancement des expérimentations, production automatisée de diagnostics d'évaluation, etc.).

En parallèle de la préparation de ces évolutions, un travail très conséquent d'adaptation du code de prévision numérique sera conduit avec l'objectif de permettre d'ouvrir le prochain appel d'offres de moyens de calcul de Météo-France au plus large éventail de technologies de calcul intensif possible. Parmi ces technologies, on peut envisager les processeurs CPU (central processing unit), CPU-ARM (ARM : advanced RISC machine), vectoriels, vectoriels ARM, CPU avec accélérateur GPU (graphical processing unit). Dans cet éventail, l'adaptation la plus difficile est l'adaptation aux architectures mixtes, CPU-GPU, qui correspond à une part importante du marché. Il faut la mener d'une manière intelligente pour que l'adaptation soit maintenable sur la durée et qu'il soit plus aisé, sur la base ainsi créée, de l'adapter à d'autres technologies cibles, sans reculer sur les capacités actuelles du code. La stratégie choisie par le CEPMMT, Météo-France et les partenaires ACCORD consiste à restructurer le flux de données à haut niveau sans dégrader les performances sur architectures CPU et vectorielles, et concevoir sur cette base une insertion automatique des directives nécessaires pour un accélérateur donné sur une machine hybride. Un premier objectif, très ambitieux, compte tenu de l'ampleur de la tâche et du calendrier de renouvellement du calculateur, est de pouvoir faire tourner les prévisions Arome et Arpège sur CPU-GPU avec les programmes étalonnage mis à disposition des constructeurs pour le prochain appel d'offre Calcul de Météo-France.

Les évolutions des systèmes opérationnels de PNT au-delà 2025 s'inscriront dans la stratégie scientifique 2020-2030 de Météo-France. Elles dépendront de l'augmentation de la puissance de calcul, qui détermine largement les possibilités d'augmentation de résolution spatiale des systèmes de PNT et du nombre de membres des ensembles, mais également l'utilisation de schémas numériques plus coûteux en temps calcul (schéma microphysique à deux moments, couplages à d'autres composantes du système Terre, etc.). Les travaux de recherche en PNT viseront notamment à assimiler un nombre croissant d'observations issues de nouveaux satellites et de nouvelles sources de données, à généraliser la prévision probabiliste (y compris pour la prévision immédiate), à valoriser l'intelligence artificielle, à progresser sur les processus de l'échelle hectométrique et consolider des systèmes à cette échelle sur des domaines ciblés. Des couplages avec d'autres composantes du système Terre, comme l'océan, les vagues, les aérosols ou la chimie, seront développés en incluant les problématiques d'initialisation, d'assimilation, de post-traitement, dans le cadre de projets transverses (AROBASE, ACCALMIE). Enfin, un aspect très important consistera à refonder le cœur de nos modèles dans le cadre d'une coopération européenne. La perspective de supercalculateurs exaflopiques inscrit cet enjeu majeur d'adaptation des modèles dans un horizon allant au-delà de 2030.

Principaux acronymes

3D-Var Assimilation de données variationnelle tri-dimensionnelle
3DEnVar Assimilation de données variationnelle ensembliste tri-dimensionnelle
4D-Var Assimilation de données variationnelle quadridimensionnelle
4DEnVar Assimilation de données variationnelle ensembliste quadridimensionnelle
ACCORD A Consortium for CONvection-scale modelling Research and Development
AEARO Assimilation d'Ensemble AROME
AEARP Assimilation d'Ensemble ARPège
AMDAR Aircraft Meteorological Data Relay
AMV Atmospheric Motion Vector
AROBASE AROME-BASed coupled SystEm
AROME Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Mesoéchelle
AROME-OM AROME Outre-Mer
AROME-PI AROME Prévision Immédiate
ARPEGE Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle
ASCAT Advanced SCATterometer
ATC Air Traffic Control
AWS Arctic Weather Satellites
CEPMMT Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme
CMIM Constellation de Mni sondes pour la Météorologie
CMO Couche de Mélange Océanique
CNRM Centre National de Recherches Météorologiques
COMPAS CONtrôle, Monitoring Prévisibilité et Adaptations Statistiques
COP Contrat pluriannuel d'Objectifs et de Performance
CRIS Cross-track Infrared Sounder
CRPS Continuous Ranked Probability Score
CRPSS Continuous Ranked Probability Skill Score
DCSC Direction de la Climatologie et des Services Climatiques
DESR Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
DIROI Direction Interrégionale pour l'Océan Indien
DIROP Direction des Opérations pour la Prévision
DSM Direction des Services Météorologiques
DWD Deutsche Wetter Dienst
ECRAD ECMWF atmospheric radiation scheme
EFI Extreme Forecast Index
EMADDC European Meteorological Aircraft Derived Data Center
EPS Ensemble Prediction System
EUMETNET EUropean METeorological NETwork
FCI Flexible Combined Imager
FCPLR Formation Complémentaire Par La Recherche
FSR Full Spectral Resolution
FY Feng Yun (satellite polaire chinois)
GELATO Global Experimental Leads and ice for ATmosphere and Ocean
GMAP Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision
GMGEC Groupe de Météorologie de Grande Échelle et Climat
GMME Groupe de Météorologie de Moyenne Échelle
GNOS GNSS Radio Occultation Sounder
GNSS Global Navigation Satellite System
GOES Geostationary Environmental Satellite System
GRACE Gravity Recovery and Climate Experiment
IASI Infrared Atmospheric Sounding Instruments
ICON ICosahedral NOhydrostatic model
IFS Integrated Forecasting System

IRS Hyperspectral Infrared Sounder
IPSL Institut Pierre-Simon Laplace
ISBA Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère
JMA Japan Meteorological Agency
JPSS Joint Polar Satellite System
KMA Korea Meteorological Administration
LI Lightning Imager
LVP Low Visibility Procedure
McICA Monte-Carlo Independent Column Approximation
MEB Multiple Energy Balance
METOP Meteorological Operational Polar Satellite (Satellite Météorologique Polaire Opérationnel)
MFWAM Météo-France WAve Model
MOCAGE Modèle de Chimie Atmosphérique de Grande Echelle
MOSAIC Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate
MTG Meteosat Third Generation
MWHS Micro-Wave Humidity Sounder
MWTS Micro-Wave Temperature Sounder
NCEP National Centers for Environmental Prediction
NEMO Nucleus for European Modelling of the Ocean
OMM Organisation Météorologique Mondiale
OOPS Object Oriented Prediction System
ORILAM ORganic and Inorganic Log-normal Aerosols Model
OSTIA Operational Sea Surface Temperature and Ice Analysis
PEARO Prévision d'Ensemble ARome
PEARP Prévision d'Ensemble ARPège
PNT Prévision Numérique du Temps
RRTM Rapid Radiative Transfer Model
SEVIRI Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
SNPP Suomi National Polar-orbiting Partnership
SOFOG3D South FOGs 3D experiment for fog processes study
SOT Shift Of Tail
SST Sea Surface Temperature
SURFEX SURFace EXternalisée
TEB Town Energy Balance
WCRP World Climate Research Programme
WWRP World Weather Research Programme

Références

- Ambar, A., Mokhtari M. (2017) : Modélisation des aérosols désertiques dans AROME: Apport du schéma physique à l'échelle convective et impact radiatif. JAMA, Vol. 1, 35-40, 2017
- Arbogast, Etienne & Desroziers, Gérald & Berre, Loïc. (2017). A parallel implementation of a 4D-EnVar ensemble. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 143. 10.1002/qj.3061.
- Barreyat, M., P. Chambon, J.-F. Mahfouf, G. Faure, and Y. Ikuta, 2021: A 1D Bayesian inversion applied to GPM Microwave Imager observations: Sensitivity studies. J. Meteor. Soc. Japan, 99, 1045–1070. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2021-050>
- Berre, L., O. Pannekoucke, G. Desroziers, S. E. Stefanescu, B. Chapnik, and L. Raynaud, 2007: A variational assimilation ensemble and the spatial filtering of its error covariances: Increase of sample size by local spatial averaging. Proc. ECMWF Workshop on Flow-Dependent Aspects of Data Assimilation, Reading, United Kingdom, ECMWF, 151–168.
- Berre, L., & Desroziers, G. (2010). Filtering of Background Error Variances and Correlations by Local Spatial Averaging: A Review, Monthly Weather Review, 138(10), 3693-3720. Retrieved Apr 27, 2022, from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/138/10/2010mwr3111.1.xml>
- Bousquet, O, Barbary, D, Bielli, S, et al. An evaluation of tropical cyclone forecast in the Southwest Indian Ocean basin with Arome-Indian Ocean convection-permitting numerical weather predicting system. Atmos Sci Lett. 2020; 21:e950. <https://doi.org/10.1002/asl2.950>
- Bouttier F, Vié B, Nuissier O, Raynaud L. 2012. Impact of stochastic physics in a convection-permitting ensemble. Mon. Weather Rev. 140: 3706–3721, doi: 10.1175/mwr-d-12-00031.1.
- Bouttier, F., L. Raynaud, O. Nuissier, and B. Ménétrier, 2016: Sensitivities of the AROME ensemble to initial and surface perturbations during HyMeX. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 142, 390–403, <https://doi.org/10.1002/qj.2622>.
- Bouttier, F., and L. Raynaud, 2018: Clustering and selection of boundary conditions for limited-area ensemble prediction. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 144 (717), 2381–2391. doi: 10.1002/qj.3304
- Bouyssel F., L. Berre, H. Bénichou, P. Chambon, V. Guidard, C. Loo, J.-F. Mahfouf, P. Moll, C. Payan, D. Raspaud, 2020 : The 2020 global operational NWP data assimilation system at Météo-France. Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. IV), book edited by Seon Park and Liang Xu, Springer International Publishing.
- Brousseau, P., Seity, Y., Ricard, D. and Léger, J. (2016), Improvement of the forecast of convective activity from the Arome-France system. Q.J.R. Meteorol. Soc., 142: 2231-2243. <https://doi.org/10.1002/qj.2822>
- Chambon, P., & Geer, A. (2017). All-sky assimilation of Megha-Tropiques/SAPHIR radiances in the ECMWF numerical weather prediction system. ECMWF Technical Memoranda, 802, 1-47.
- Coopmann, O., Fourrié, N. and Guidard, V. (2022), Analysis of MTG-IRS observations and general channel selection for Numerical Weather Prediction models. Q J R Meteorol Soc. Accepted Author Manuscript. <https://doi.org/10.1002/qj.4282>
- Courtier P., C. Freydier, J. Geleyn, F. Rabier, and M. Rochas, The Arpège project at Météo-France, ECMWF Workshop Proceedings : Workshop on numerical methods in atmospheric models, pp.193-

231, 1991. <https://www.ecmwf.int/file/21847/download?token=b-fL4L1U>

de Haan, S. 2011. High resolution wind and temperature observations from aircraft tracked by Mode-S air traffic control radar. *J. Geophys. Res.* 116, D10111. doi:<https://doi.org/10.1029/2010JD015264>

de Jong, P. M. A., de Haan, S., Sondij, J., Koutek, M., Hoekstra, A. and co-authors. 2018. Operational use of aircraft derived data from meteorological and other applications. Online at: https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/documents/O2_5DeJong_etal_ExtendedAbstract.pdf

Descamps, L., C. Labadie, A. Joly, E. Bazile, P. Arbogast, and P. Cébron, 2015: PEARP, the Météo-France short-range ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 141, 1671–1685, <https://doi.org/10.1002/qj.2469>.

Desroziers, G., Camino, J.-T. and Berre, L. (2014), 4DEnVar: link with 4D state formulation of variational assimilation and different possible implementations. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 140: 2097-2110. <https://doi.org/10.1002/qj.2325>

Desroziers, G., Arbogast, E. and Berre, L. (2016), Improving spatial localization in 4DEnVar. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 142: 3171-3185. <https://doi.org/10.1002/qj.2898>

Duruiseau, F., Chambon, P., Wattrelot, E., Barreyat, M., & Mahfouf, J. (2019). Assimilating cloudy and rainy microwave observations from SAPHIR on board Megha Tropiques within the ARPEGE global model. *Q J R Meteorol Soc*, 145, 620 - 641.

Faure, G., Chambon, P., & Brousseau, P. (2020). Operational Implementation of the AROME Model in the Tropics: Multiscale Validation of Rainfall Forecasts, *Weather and Forecasting*, 35(2), 691-710. Retrieved Apr 27, 2022, from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/35/2/waf-d-19-0204.1.xml>

Honnert, R.: Representation of the grey zone of turbulence in the atmospheric boundary layer, *Adv. Sci. Res.*, 13, 63–67, <https://doi.org/10.5194/asr-13-63-2016>, 2016.

Masson, V. 2000. A physically-based scheme for the urban energy balance in atmospheric models. *Bound. Layer Meteor.* 94:357–397.

Piriou, J.-M., Redelsperger, J.-L., Geleyn, J.-F., Lafore, J.-P. and Guichard, F. (2007) An approach for convective parameterization with memory: separating microphysics and transport in grid-scale equations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64, 4127–4139. <https://doi.org/10.1175/2007JAS2144.1>

Grini, A., Tulet, P., and Gomes, L. (2006), Dusty weather forecasts using the MesoNH mesoscale atmospheric model, *J. Geophys. Res.*, 111, D19205, doi:10.1029/2005JD007007.

Gueremy J.-F. 2011, "A continuous buoyancy based convection scheme: one-and three-dimensional validation," *Dynamic Meteorology and Oceanography*, vol. 63, no. 4, pp. 687-706, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2011.00521.x>

Lalaurette, F. (2003). Early detection of abnormal weather conditions using a probabilistic extreme forecast index. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129.

Lange, H. and Janjic, T. 2016. Assimilation of Mode-S EHS aircraft observations in COSMO-KEN-DA. *Mon. Wea. Rev.* 144, 1697–1711. doi:<https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0112.1>

Lebeaupin, C.. Etude du couplage océan-atmosphère associé aux épisodes de pluies intenses en région méditerranéenne. PhD thesis, University Paul Sabatier, Toulouse, France, 2007.

Masson, V., Champeaux, J., Chauvin, F., Meriguet, C., & Lacaze, R. (2003). A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models, *Journal of Climate*, 16(9), 1261-1282. Retrieved Apr 27, 2022, from https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/16/9/1520-0442_2003_16_1261_agdols_2.0.co_2.xml

Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouyssel, F., Brousseau, P., Brun, E., Calvet, J.-C., Carrer, D., Decharme, B., Delire, C., Donier, S., Essaouini, K., Gibelin, A.-L., Giordani, H., Habets, F., Jidane, M., Kerdraon, G., Kourzeneva, E., Lafaysse, M., Lafont, S., Lebeaupin Brossier, C., Lemonsu, A., Mahfouf, J.-F., Marguinaud, P., Mokhtari, M., Morin, S., Pigeon, G., Salgado, R., Seity, Y., Taillefer, F., Tanguy, G., Tulet, P., Vincendon, B., Vionnet, V., and Voldoire, A.: The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes, *Geosci. Model Dev.*, 6, 929–960, <https://doi.org/10.5194/gmd-6-929-2013>, 2013.

Michel, Y., and Brousseau, P. (2021). A Square-Root, Dual-Resolution 3DEnVar for the Arome Model: Formulation and Evaluation on a Summertime Convective Period. *Monthly Weather Review*, 149(9), 3135-3153. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0026.1>

Montmerle, T., Michel, Y., Arbogast, E., Ménétrier, B., & Brousseau, P. (2018). A 3Densemble variational data assimilation scheme for the limited area Arome model: Formulation and preliminary results. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(716), 2196-2215.

Pailleux, Jean ; Geleyn, Jean-François ; Legrand, Emmanuel ; La prévision numérique du temps avec les modèles Arpège et Aladin - Bilan et perspectives, *La Météorologie*, 2000, N° 30 ; p. 32-60
10.4267/2042/36123

Pourret V., Mahfouf J.-F., Guidard V., Moll P., Doerenbecher A., Piguet B. (2021) Variational bias correction for Mode-S aircraft derived winds, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 73:1, 1-27, DOI: 10.1080/16000870.2021.1886808

Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., & Masson, V. (2011). The Arome-France Convective-Scale Operational Model, *Monthly Weather Review*, 139(3), 976-991. Retrieved Apr 18, 2022, <https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/139/3/2010mwr3425.1.xml>

Tiedtke, M. (1989). A Comprehensive Mass Flux Scheme for Cumulus Parameterization in Large-Scale Models, *Monthly Weather Review*, 117(8), 1779-1800. Retrieved Apr 18, 2022, from https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/117/8/1520-0493_1989_117_1779_acmfsf_2_0_co_2.xml

Thouren L. (2018) : Modélisation des poussières désertiques dans Arome-Dust. Rapport de travail de post-doctorat. Météo-France.

Tulet P., K. Crahan-Kaku, M. Leriche, B. Aouizerats, S. Crumeyrolle. Mixing of dust aerosols into a mesoscale convective system: Generation, filtering and possible feedbacks on ice anvils. *Atmospheric Research*, Elsevier, 2010, 96 (2-3), pp.302-314. (10.1016/j.atmosres.2009.09.011).

Wimmer, M., Raynaud, L., Descamps, L., Berre, L. & Seity, Y.(2022) Sensitivity analysis of the convective-scale Arome model to physical and dynamical parameters. *Q J R Meteorol Soc*, 920– 942. Available from: <https://doi.org/10.1002/qj.4239>

Zsoter, E., 2006: Recent developments in extreme weather forecasting. *ECMWF Newsletter*, No. 107, ECMWF, Reading, United Kingdom, 8–17, <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/14618-newsletter-no-107-spring-2006>.