



HAL
open science

Recherches et développements pour l'exploitation future des observations par assimilation de données pour la prévision numérique du temps

Philippe Chambon, Marc Mandement

► To cite this version:

Philippe Chambon, Marc Mandement. Recherches et développements pour l'exploitation future des observations par assimilation de données pour la prévision numérique du temps. Comité Scientifique Consultatif de Météo-France. 2024. meteo-04610170

HAL Id: meteo-04610170

<https://meteofrance.hal.science/meteo-04610170v1>

Submitted on 12 Jun 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.

COMSI 2024

Recherches et développements pour l'exploitation future des observations par assimilation de données pour la prévision numérique du temps

Philippe Chambon¹ et Marc Mandement²

1 : Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision (GMAP)

2 : Groupe de Météorologie de Moyenne Échelle (GMME)

Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (DESR), Météo-France

Contributeurs :

DESR (Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche): Olivier Audouin, Clotilde Augros, Camille Birman, Mary Borderies, Thomas Buey, Thomas Carrel-Billiard, Marie Boisserie, Laurent Chapeau, Elisa Chardon--Legrand, Antoine Chemouny, Pauline Combarous, Olivier Coopman, Alan Demortier, Alexis Doerenbecher, Hélène Dumas, Nadia Fourrié, Vincent Guidard, Alain Joly, Jean-Marie Lalande, Quentin Libois, Sophie Marimbordes, Maud Martet, Pauline Martinet, Stéphane Martinez, Patrick Moll, Christophe Payan, Vivien Pourret, Dominique Raspaud, Zied Sassi, Nicolas Sasso, Guillaume Thomas, Jérôme Vidot

DIROP (Direction des Opérations pour la Prévision) : Hervé Bénichou

Relecteurs :

DESR (Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche) : Marc Pontaud, Samuel Morin, Nadia Fourrié, François Bouyssel, Matthieu Plu, Christine Lac, Hervé Roquet, Christophe Baehr

Résumé

Ce document décrit les recherches et développements menés à Météo-France en matière d'exploitation des observations par assimilation de données pour la prévision numérique du temps. Météo-France s'appuie en effet sur des systèmes de prévision afin d'assurer ses missions de protection des personnes et des biens. Ce document s'intéresse en particulier au système de prévision ARPEGE, à échelle mondiale, et au système de prévision AROME-France, à échelle régionale, qui sont tous deux dotés de systèmes d'assimilation de données à l'état de l'art pour définir les conditions initiales de leurs prévisions.

Ces systèmes d'assimilation nécessitent d'être enrichis régulièrement par de nouvelles données afin de bénéficier des dernières technologies en matière d'observation. Tout au long de ce document, nous illustrons les étapes scientifiques et techniques à franchir afin qu'un nouveau système d'observation soit exploité dans une chaîne de prévision du temps à Météo-France. Ces étapes sont régulièrement franchies à l'aide du soutien de nos partenaires nationaux et internationaux, en particulier le CNRS, le CNES, EUMETSAT, l'ESA, EUMETNET, le CEPMMT et le consortium ACCORD. Nous mettons en exergue tout au long du rapport la diversité et la richesse de ces partenariats et ce qu'ils apportent aux systèmes de prévision opérationnels de Météo-France.

Après un état des lieux du rôle et des impacts des différents systèmes d'observation utilisés actuellement, les futurs travaux de recherche et développement afin d'améliorer les conditions initiales des modèles sont présentés en trois axes : (i) ceux autour des observations que nous recevons déjà dans nos bases de données opérationnelles, mais que nous n'exploitons pas encore à leur plein potentiel, (ii) ceux autour des observations que nous recevrons dans les deux à trois années à venir et pour lesquelles nous devons nous préparer, (iii) ceux autour des systèmes d'observation encore en développement, et qui nous semblent prometteurs à long terme. Pour chacun de ces axes de réflexion et chaque nouveau type d'observations, nous proposons une évaluation subjective du niveau de maturité atteint à ce jour à Météo-France afin que le lecteur comprenne le chemin à parcourir jusqu'à l'assimilation opérationnelle de ces données.

Table des matières

1. Introduction	4
2. Vers une exploitation plus complète des observations déjà disponibles dans nos bases de données	10
2.1 Exemples de travaux en cours avec un transfert vers l'opérationnel à court terme	10
2.1.1 Données des avions « Mode-S » aux échelles régionale et mondiale	10
2.1.2 Données satellitaires micro-ondes en zones nuageuses et précipitantes	13
2.1.3 Évolution dans la méthode d'assimilation des réflectivités radars	15
2.1.4 Assimilation des produits de couverture neigeuse pour l'analyse de neige	17
2.2 Les chantiers de recherches ouverts autour des observations disponibles avec un transfert vers l'opérationnel à plus long terme	19
2.2.1 Vers l'exploitation des observations à haute densité spatiale et temporelle	19
2.2.2 Vers l'exploitation des observations de scènes géographiques et météorologiques complexes	21
2.2.3 Les domaines du spectre électromagnétique encore inexploités	24
2.2.4 Les variables observées encore inexploitées	26
2.2.5 Vers l'exploitation d'observations aux interfaces pour l'assimilation couplée	28
2.3 Synthèse sur l'exploitation des observations déjà disponibles dans nos bases	32
3. Vers l'exploitation des observations bientôt disponibles	35
3.1 Les observations depuis la surface	35
3.1.1 Les observations d'opportunité issues des stations connectées	35
3.1.2 Les observations issues du réseau de récepteur GNSS à la surface	40
3.2 Les observations depuis l'espace	41
3.3 Synthèse sur l'exploitation des observations bientôt disponibles	47
4. Les futures technologies pour l'observation à haute résolution et haute cadence temporelle	49
4.1 Les technologies d'observation depuis la surface	49
4.1.1 Les observations d'opportunité	49
4.1.2 Les observations <i>in situ</i> dans la couche limite	51
4.1.3 Les observations de télédétection	52
4.2 Les technologies d'observation depuis l'espace	53
4.3 Nos outils pour contribuer à la définition du futur système d'observation	59
4.5 Synthèse sur les futures technologies	62
5. Conclusions et perspectives	64
6. Bibliographie	67

1. Introduction

Afin d'assurer ses missions de protection des personnes et des biens, Météo-France s'appuie notamment sur des prévisions météorologiques réalisées grâce à des modèles numériques. Ces derniers permettent, à partir de conditions initiales, de prévoir l'évolution des conditions météorologiques jusqu'à 4 jours d'échéance sur tout le globe avec le système ARPEGE, et jusqu'à 2 jours d'échéance sur l'Europe de l'Ouest avec le système AROME-France. Le système ARPEGE a actuellement une résolution variant de 5 km sur l'Europe de l'Ouest à 25 km aux antipodes et le système AROME-France une résolution beaucoup plus fine de 1,3 km. Les conditions initiales de ces systèmes de prévision sont obtenues grâce à des algorithmes d'assimilation de données. Ceux-ci combinent de manière optimale des observations et une prévision antérieure, appelée « ébauche », en tenant compte des erreurs respectives de ces sources de données. L'amélioration de la qualité de ces conditions initiales, appelées « analyses », est une source majeure de progrès pour la qualité des systèmes de prévision numérique du temps (PNT) opérationnels tels qu'ARPEGE et AROME-France. Nous ne mentionnons pas dans ce document les autres implémentations d'AROME, en particulier outre-mer, qui ne disposent pas de leur propre assimilation de données.

Cette activité d'amélioration des analyses grâce aux observations constitue un champ de recherche et de développement essentiel pour améliorer les performances de ces systèmes de prévision et les maintenir à l'état de l'art international, au bénéfice des usagers des informations produites par Météo-France. Ces activités s'exercent dans un cadre international de coopérations et de collaborations comme nous pouvons le voir sur la Figure 1. En effet, Météo-France participe à différentes instances/consortia afin de (i) partager ses besoins stratégiques en observations, facilitant l'émergence de projets notamment au niveau européen, (ii) contribuer à la définition de spécifications variées permettant d'obtenir des données correspondant à nos attentes en termes de formats et de dissémination, (iii) contribuer à la définition des prétraitements de données par les centres producteurs dans un cadre mutualisé et (iv) préparer l'assimilation en mutualisant le développement de certains éléments critiques tels que les opérateurs d'observations.

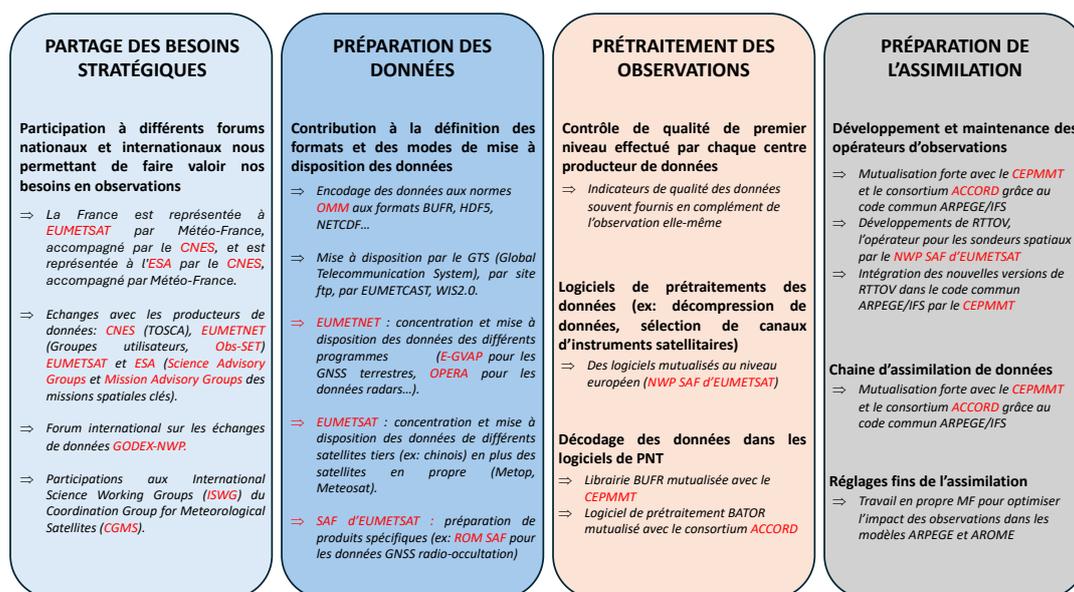


Figure 1: Illustration des différents cadres de collaborations internationales permettant à Météo-France de promouvoir ses besoins actuels et futurs en observations ainsi que d'avancer sur la préparation à l'assimilation de données en mutualisant une fraction significative des efforts nécessaires. Les différents organismes clés, nationaux et internationaux, sont indiqués en rouge.

La Figure 2 illustre les grandes familles d'observations qui sont actuellement utilisées pour initialiser les deux modèles ARPEGE et AROME. Il peut s'agir d'une part de mesures *in situ*, réalisées par des stations à la surface, des radiosondages, à bord d'avions ou d'autre part de mesures de télédétection, depuis la surface ou depuis l'espace. Les instruments de télédétection exploitent différentes parties du spectre électromagnétique (Figure 3) telles que le domaine visible, infrarouge ou encore le domaine micro-ondes. Ces instruments sont dits « actifs » si l'instrument émet une onde électromagnétique et mesure le signal rétrodiffusé par les cibles visées (ex : molécules, particules d'eau condensée) ; les radars, lidars et diffusiomètres sont trois exemples d'instruments actifs. Les instruments de télédétection sont au contraire dits « passifs » s'ils mesurent le signal résultant de l'émission et l'absorption des molécules ou de la diffusion des particules sans avoir leur propre source émettrice ; les sondeurs micro-ondes et infrarouge sont ainsi deux exemples d'instruments passifs.

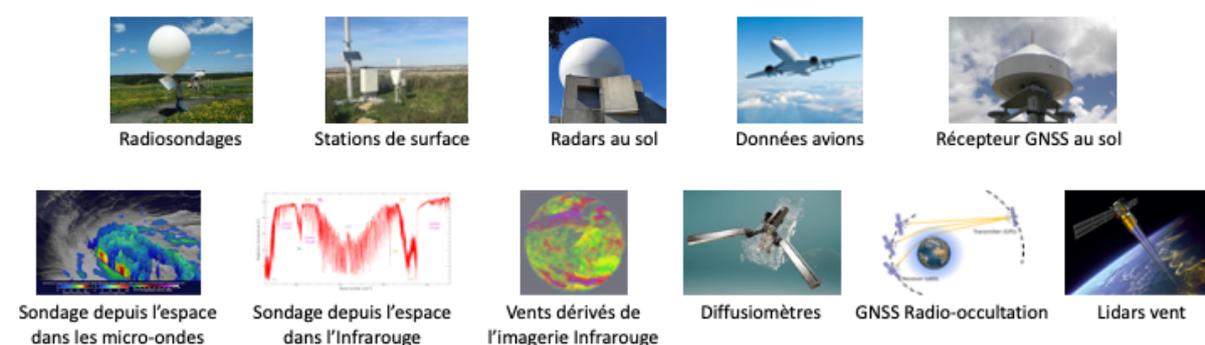


Figure 2 : Familles d'observations qu'il est actuellement possible d'assimiler dans les systèmes de prévision AROME-France et ARPEGE. Actuellement, seules les données issues des radars sont assimilées uniquement dans AROME-France et non dans ARPEGE.

Dans ce document, nous nous intéresserons principalement à l'utilisation des observations pour l'initialisation des modèles de prévision à travers l'assimilation de données. Cela étant, en amont de ces systèmes opérationnels de prévision, outre les recherches nécessaires pour développer ces systèmes d'assimilation, Météo-France mène également des recherches afin d'améliorer les modèles numériques eux-mêmes. Cela implique l'amélioration de la compréhension des processus physiques, dans l'objectif de mieux les modéliser. Pour ces recherches aussi, les mesures *in situ* et de télédétection jouent un rôle important, en particulier celles collectées lors de campagnes de mesures ponctuelles.

Pour que des observations soient utiles en assimilation de données pour la PNT opérationnelle, un certain nombre de contraintes doivent être satisfaites :

- Elles doivent être disponibles en temps réel, c'est-à-dire dans un délai allant jusqu'à 3 h selon l'application considérée, délai qui court entre le moment où la mesure est effectuée et celui où elle est stockée dans les bases de données opérationnelles et utilisable pour l'assimilation.
- Elles doivent être informatives sur les variables météorologiques représentées par le modèle, variables qu'il doit par ailleurs être capable de simuler assez précisément afin de disposer d'une ébauche exploitable.
- Elles doivent être suffisamment nombreuses et précises.
- Elles doivent être non biaisées ou avec des biais qui puissent être corrigés facilement.
- Les données provenant de systèmes d'observation complémentaires à ceux déjà disponibles sont les plus utiles.

- Le renforcement de systèmes d’observation existants permet la résilience du système d’observation global.

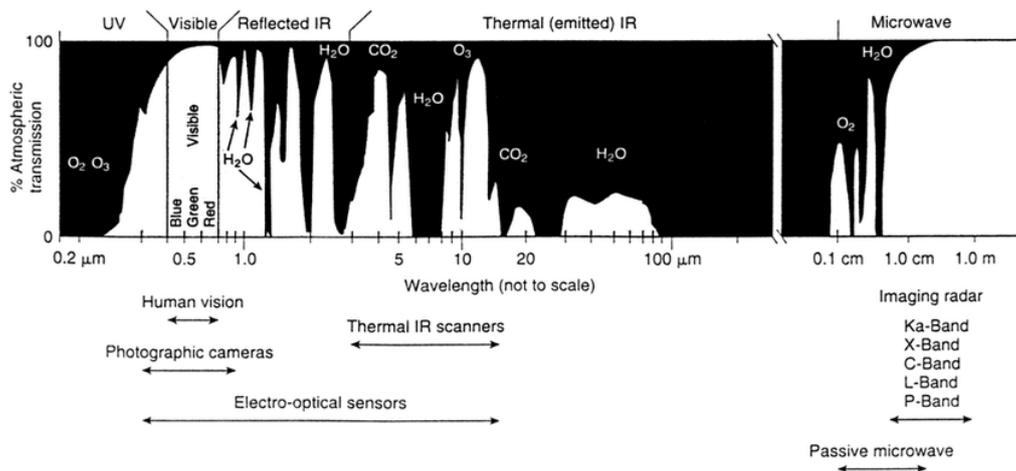


Figure 3: Spectre électromagnétique. Source : Holland (2003).

Le système d’assimilation 4D-Var du modèle global ARPEGE assimile 7 millions d’observations toutes les 6 h. La quantité de variables (caractérisant l’état de l’atmosphère et de la surface sur la grille 3D du modèle) que l’on cherche à initialiser est d’environ 200 millions. La comparaison de ces deux nombres 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 de l’ébauche. Les observations assimilées par ARPEGE se répartissent comme suit : 93 % proviennent des données de satellites en orbite basse dits défilants (LEO) ou géostationnaires (GEO) et 7 % proviennent de mesures *in situ* (stations de surface, radiosondages, avions). La Figure 4 montre qu’en termes de nombre d’observations, les instruments de mesure qui sont les plus gros contributeurs sont les instruments hyperspectraux dans le domaine spectral infrarouge (55 % pour l’instrument IASI seul). En revanche, en termes de capacité à modifier l’analyse (la métrique utilisée est appelée DFS pour *Degree of Freedom for Signal*), le partage entre les différents systèmes d’observation est plus équilibré. En complément, la Figure 5 montre un état des lieux de la contribution de chaque type d’observation à la réduction des erreurs de prévision d’ARPEGE à 24 h d’échéance (FSOi : *Forecast Sensitivity to Observations*). On peut voir que les observations *in situ* depuis la surface, dites conventionnelles (Conv.), ont une très forte contribution individuelle à cette réduction d’erreur, de même que les observations des avions de ligne ainsi que les mesures de télédétection spatiale dans les domaines micro-ondes et infrarouge.

Le système d’assimilation 3D-Var (et 3D-EnVar dans la chaîne en double actuelle en CY48T1) du système AROME-France assimile toutes les heures environ 1,5 million d’observations. La quantité de variables que l’on cherche à initialiser est de 750 millions. La différence entre le nombre de variables à initialiser et le nombre d’observations utilisées est donc encore plus importante pour AROME que pour ARPEGE. Dans le cas d’AROME, les données satellitaires sont moins nombreuses en proportion du total (environ 10 %) car des observations à plus haute fréquence temporelle et résolution spatiale sont utilisées, telles que les observations des réseaux de radars français et européen. De surcroît, les performances du modèle AROME dépendent fortement de celles du modèle de grande échelle qui l’alimente. La Figure 6 illustre cette différence majeure de proportion d’observations par rapport au

système ARPEGE, en particulier lors de journées pluvieuses durant lesquelles la majeure partie des observations utilisées provient des réseaux de radars.

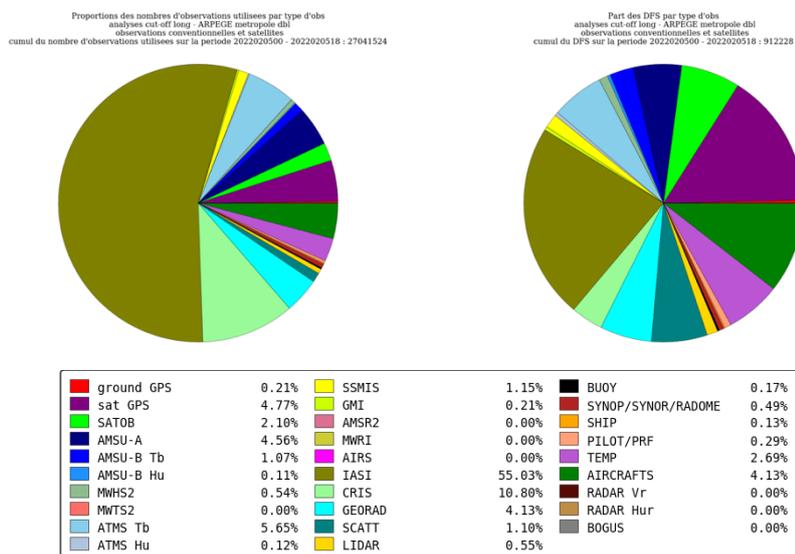


Figure 4 : À gauche : proportion de chaque type d'observation parmi le nombre total d'observations assimilées dans le système 4D-Var ARPEGE (chaîne en double actuelle en CY48T1). À droite : proportion du DFS (Degree of Freedom for Signal) total attribué à chaque type d'observation. Un DFS élevé indique une capacité importante du système d'observation à modifier l'analyse. En bas : les valeurs numériques de la proportion de chaque type d'observation sont indiquées par capteurs. Source : DIROP/COMPAS.

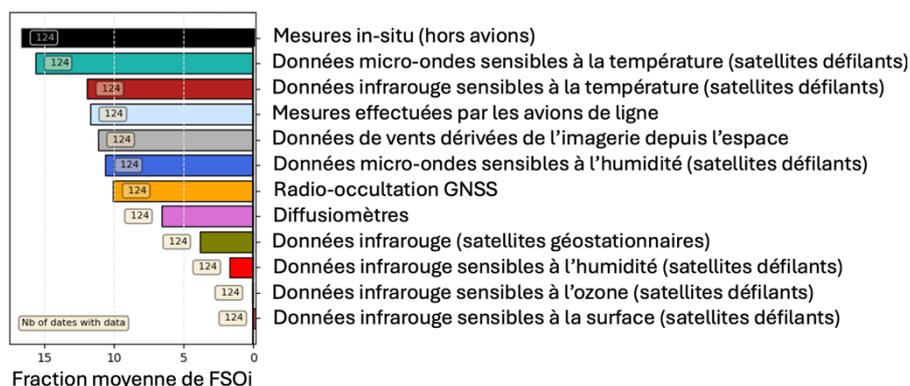


Figure 5: Fraction de FSOi (Forecast Sensitivity to Observations) totale par famille d'observations pour le 4D-Var ARPEGE. Les statistiques ont été calculées pour le mois de janvier 2024. Un FSOi élevé indique une capacité importante du système d'observation à réduire l'erreur de prévision à 24 h d'échéance. Sources : DESR/CNRM/GMAP et DIROP/COMPAS.

Afin de faire progresser les performances des systèmes de prévision ARPEGE et AROME, leurs analyses sont enrichies par de nouvelles observations, parfois issues de nouveaux systèmes d'observation, grâce à des travaux de recherche en amont, y compris concernant l'algorithme d'assimilation, ainsi que la mise au point de filières opérationnelles d'assimilation. Cela étant, une activité prioritaire au sein de la DESR et des directions impliquées dans la PNT opérationnelle (DIROP, Direction des

Opérations pour la Prévision, qui exerce la maîtrise d’ouvrage de la PNT à Météo-France, DSO, Direction des Systèmes d’Observation et DSI, Direction des Systèmes d’Information) consiste à maintenir l’assimilation des systèmes d’observations déjà utilisés à qualité au moins égale d’année en année. Il s’agit de s’adapter aux bascules (interventions, remplacements) de satellites opérationnels, aux changements de format opérés par les producteurs de données, aux changements de cycles de code d’assimilation, ainsi qu’aux problèmes de qualité des données qui peuvent se poser pour chaque système d’observation en fonction des circonstances. Cette activité, pouvant paraître anodine, requiert pourtant des ressources humaines substantielles, ce qui peut limiter les capacités de recherche et développement qui sont dédiées aux nouvelles observations.

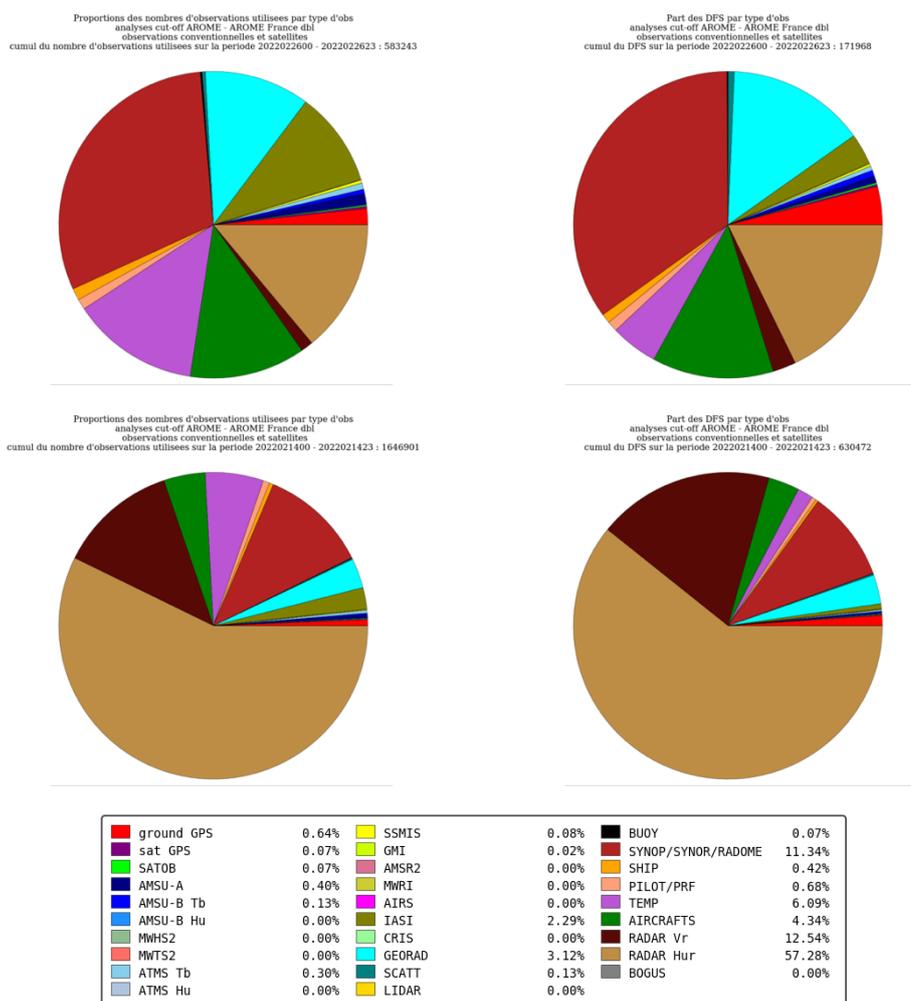


Figure 6: Colonne de gauche : proportion de chaque type d’observation dans le nombre total d’observations assimilées dans le système 3DEnVar AROME (chaîne en double actuelle en CY48T1), colonne de droite : proportion du DFS (Degree of Freedom for Signal) total attribué à chaque type d’observation. Un DFS élevé indique une capacité importante du système d’observation à modifier l’analyse. Ligne du haut : statistiques pour une journée non pluvieuse. Ligne du bas : statistiques pour une journée pluvieuse. Source : DIROP/COMPAS.

L’objectif de ce document est de dresser un panorama des observations que Météo-France n’utilise pas encore pour l’initialisation de ses modèles et qui présentent un potentiel de progrès à court, moyen et long terme :

- Il peut s’agir d’observations qui sont d’ores et déjà disponibles dans nos bases de données opérationnelles et pour lesquelles, soit des recherches et développements sont en cours, soit des travaux pourraient être amorcés. Ces observations font l’objet de la Section 2.
- Il peut également s’agir d’observations que nous ne recevons pas encore en temps réel dans nos bases, mais qui seront bientôt disponibles dans les 2 à 3 ans à venir et dont nous devons activement préparer l’exploitation. Ces observations font l’objet de la Section 3.
- Enfin, notre travail de veille technologique nous permet d’entrevoir différentes évolutions de long terme des systèmes d’observation. Tout comme les observations évoquées dans les Sections 2 et 3, certaines évolutions laissent présager des possibilités d’améliorations significatives de nos systèmes de prévision. Il est ainsi intéressant d’identifier les systèmes d’observation les plus prometteurs pour nos applications puis d’investir dans des travaux de long terme permettant de les exploiter, à l’instar des travaux pionniers initiés il y a plusieurs décennies, ayant permis d’accéder aux niveaux de performances des systèmes actuels de prévision. La Section 4 est ainsi dédiée à ces discussions d’orientations stratégiques de long terme. Cette section sera aussi l’occasion d’illustrer la capacité de Météo-France à réaliser des expériences d’impact, en particulier pour des systèmes d’observations n’existant pas encore ; ceci pouvant amener Météo-France à jouer un rôle de premier plan dans la spécification de futurs systèmes, comme nous le verrons en fin de section 4.

Dans chacune des sections, nous discuterons des observations depuis la surface et des observations satellitaires ainsi que de leurs complémentarités, notamment pour l’observation de la couche limite, difficilement accessible depuis l’espace. Les études sur de nouvelles sources d’observation qui seront évoquées font partie des objectifs du Contrat d’objectifs et de performance (COP) 2022 – 2026, signé entre l’État et Météo-France (Axe 1 – Objectif 5) avec l’ambition de mieux prendre en compte les informations fournies par les radars, les observations fréquentes, les observations dérivées du trafic aérien, les données issues de nouveaux instruments portés par les futurs satellites MTG et EPS-SG d’EUMETSAT ainsi que les nouvelles sources de données produites par des tiers (ex : données d’opportunités) et les méthodes innovantes d’observation (ex : missions Earth Explorer).

Pour que les travaux de recherche décrits dans ce document aboutissent à un transfert vers l’opérationnel, plusieurs éléments doivent être réunis. Un développement doit atteindre un niveau de maturité scientifique (maîtrise de la physique de la mesure, maîtrise de son impact sur la prévision du temps en fonction de la chaîne de traitement des données) et également un niveau de maturité technique (capacités à recevoir les données en temps réel, les stocker dans nos bases de données d’observation, prétraiter et assimiler les données dans l’environnement opérationnel, monitorer les données en aval de la chaîne de prévision, maintenir la filière d’assimilation sur le long terme). Nous proposerons une estimation de chacun des deux degrés de maturité (correspondant à la *Technology Readiness Level, TRL*), à l’état actuel, afin de documenter le chemin à parcourir pour parvenir à une assimilation opérationnelle de telles données.

Chaque section comportera un tableau de synthèse indiquant les degrés de maturité scientifique et technique atteints à ce stade à MF par système d’observation. Les tableaux des sections 2 et 3 présentent des sujets déjà priorisés il y a plusieurs années à MF alors que le tableau de la section 4 présente les sujets pour lesquels les priorités seront à affiner. Dans ce dernier tableau, seront distingués les systèmes d’observation pour lesquels une expérience d’impact a été réalisée, par MF ou par d’autres centres, et qui indique un bon potentiel pour nos systèmes, ainsi que les systèmes d’observation pour lesquels il n’y a pas encore d’expérience d’impact disponible mais pour lesquels nous avons l’intuition qu’ils pourraient se révéler importants dans l’avenir.

2. Vers une exploitation plus complète des observations déjà disponibles dans nos bases de données

Afin d'améliorer les conditions initiales des modèles, le réflexe le plus naturel est d'étudier les possibilités qui s'offrent à nous avec les observations que nous recevons déjà en temps réel. Plusieurs cas de figure sont possibles, il peut s'agir d'observations que nous exploitons aujourd'hui de façon sous-optimale ou bien d'observations que nous n'exploitons pas encore.

Concernant le premier cas de figure, améliorer le degré d'optimalité dans l'utilisation d'observations peut passer par des études avec différents niveaux de complexité. À titre d'exemples, cette recherche d'optimalité peut passer par :

- La révision des erreurs d'observation (poids donné aux observations dans l'assimilation de données).
- La révision de leur échantillonnage (densité d'observations assimilées) ou de leur contrôle de qualité.
- La révision de l'opérateur d'observation (opérateur mathématique permettant de transformer les variables géophysiques prévues par le modèle en un équivalent de la variable observée).
- La révision de la méthode d'assimilation elle-même.

Plusieurs exemples de travaux en cours à Météo-France appartenant à ce premier cas de figure sont présentés dans les Sections 2.1, 2.2 et 2.3.

Dans le second cas de figure, certaines observations sont effectivement reçues dans nos bases de données d'observations mais ne sont pas du tout exploitées car cela nécessite un investissement significatif en recherches et développements qui n'a pas été réalisé jusqu'à présent. Les Sections 2.4 et 2.5 présentent des recherches jugées importantes pour les années à venir.

2.1 Exemples de travaux en cours avec un transfert vers l'opérationnel à court terme

À chaque nouvelle version du système opérationnel de prévision du temps, un certain nombre de modifications concernant les observations sont implémentées. Actuellement, le système de PNT opérationnel est identifié sous le numéro de version CY46T1. La version du système actuellement en double, c'est-à-dire candidate à devenir opérationnelle à l'issue d'une période de test en temps réel en cours, est identifiée sous le numéro CY48T1, et a vocation à devenir opérationnelle à l'automne 2024. Les versions CY49T1 et CY50 sont d'ores et déjà en préparation. Ces versions font référence aux systèmes ARPEGE et AROME, qui sont gérés au sein du même code informatique, partagé d'une part avec le Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) et les partenaires du consortium ACCORD pour la prévision météorologique à aire limitée. Ici nous mettons en lumière quatre développements qui ont nécessité plusieurs années d'efforts avant d'atteindre un niveau de maturité et d'impact pertinent pour les performances des modèles ARPEGE ou AROME.

2.1.1 Données des avions « Mode-S » aux échelles régionale et mondiale

Les observations de température et de vent en altitude réalisées par les avions de ligne sont assimilées depuis de nombreuses années dans les systèmes de prévision ARPEGE et AROME-France. Ces observations proviennent du programme AMDAR (*Aircraft Meteorological Data Relay*) de

l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), reposant sur la capacité de certains avions de ligne à traiter leurs mesures puis les rediffuser en temps réel grâce à leurs moyens de calcul à bord. Ces données AMDAR ont un impact très important pour les prévisions ARPEGE et AROME, comme on peut le voir sur la Figure 5.

En complément de cette filière, une approche alternative a été explorée par la communauté scientifique depuis une dizaine d'années ; celle-ci consiste à exploiter les rapports issus de l'interrogation des transpondeurs des avions par les services de la navigation aérienne. Ainsi, le nombre d'avions transmettant leurs données par cette filière appelée Mode-S, est potentiellement beaucoup plus grand que par la filière AMDAR car elle ne nécessite pas de matériel particulier à bord. En revanche, ce type de transmission nécessite d'être à portée de radars de la navigation aérienne, les couvertures géographiques des données AMDAR et Mode-S sont donc potentiellement très complémentaires : les AMDAR sont émis principalement "en-route" notamment en altitude et le long des couloirs aériens transocéaniques alors que les Mode-S sont reçus essentiellement au-dessus des continents, notamment "en approche" avec une densité importante des données dans les basses couches de l'atmosphère au voisinage des aéroports. .

Les données avions Mode-S reçues au sol correspondent à des données de navigation telles que les informations relatives au cap et à la vitesse par rapport à l'air, en plus de l'altitude, du nombre de Mach, de la vitesse par rapport au sol et de la route. Des chaînes de traitement ont été développées au niveau européen sous l'égide d'EUMETNET (fédération des services météorologiques européens, dont Météo-France fait partie) à travers une structure appelée l'EMADDC (*European Meteorological Aircraft Derived Data Center*), actuellement pilotée par le service météorologique des Pays-Bas (KNMI). Aujourd'hui, nous recevons en temps réel les observations de vent et de température issues de cette filière, avec une très bonne couverture géographique du domaine AROME-France (Figure 7).

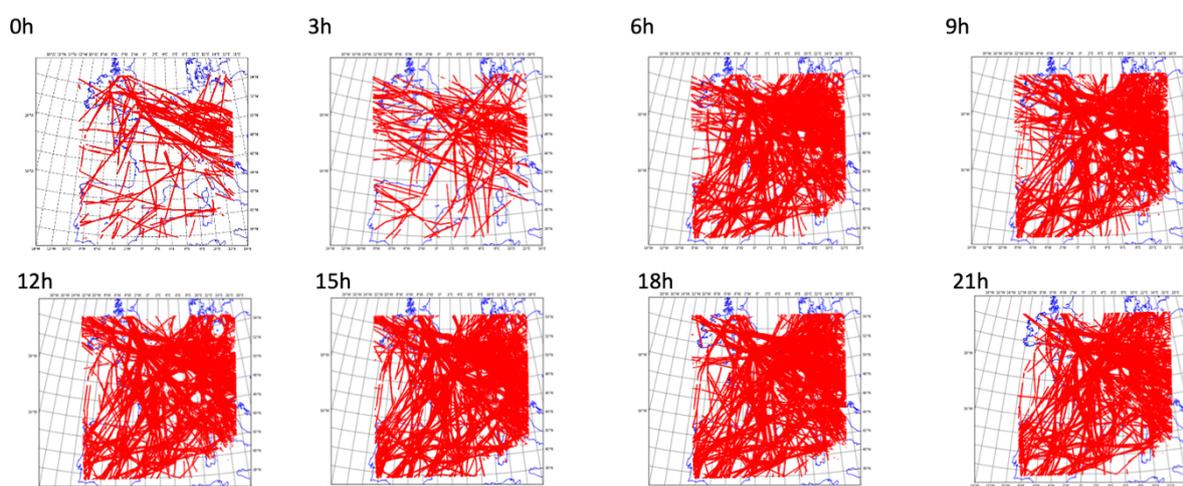


Figure 7 : Couverture spatiale journalière des données avions Mode-S assimilées par AROME-France dans le 3DEnVar de la chaîne en double actuelle en CY48T1. Source : DIROP/COMPAS.

Les premiers tests d'assimilation de ces données dans AROME-France amenaient initialement à des impacts négatifs. Cela a aussi été le cas au CEPMMT qui a d'abord activé l'assimilation opérationnelle de ces données puis l'a désactivée en urgence dans leur système de prévision global. Des recherches menées à Météo-France ont montré que la densité spatiale et temporelle très importante de ces données, couplée à une forte concentration de données à l'altitude typique de navigation des avions, avait pour effet de dégrader l'analyse AROME-France. En effet, l'assimilation de données à haute densité est possible d'un point de vue algorithmique si et seulement si la description mathématique

de la matrice de variances/covariance des erreurs d'observations prend en compte cette haute densité. Ceci implique de modéliser les corrélations d'erreurs entre observations géographiquement proches ce qui est un problème complexe avec des recherches en cours comme nous le verrons section 2.2.1. Les effets combinés d'un travail spécifique sur l'échantillonnage strict des données avec des calculs d'interdistances minimales entre observations assimilées, d'un travail sur les erreurs d'observations, ainsi que de l'exploitation du nouvel algorithme d'assimilation 3DVar pour AROME-France, ont permis de tirer parti des données Mode-S. Une amélioration significative de la qualité des prévisions de vents AROME, en particulier dans les basses de l'atmosphère, a été notée. Ceci est important pour les applications en aval d'AROME telles que le forçage des modèles de propagation de feux de forêt (modèle BLAZE) grâce à des prévisions atmosphériques améliorées. Ces données ont ainsi été retenues pour la chaîne en double actuelle en CY48T1, avec un impact très nettement positif pour les prévisions d'AROME-France. Ces nouvelles données multiplient par un facteur allant de 2 à 4 le nombre d'observations assimilées dans AROME-France selon la situation météorologique.

La couverture géographique des données Mode-S produites par l'EMADDC étant plus large que le domaine géographique d'AROME-France, ces données présentent également un intérêt pour le système ARPEGE. Des travaux de recherche sur ces observations ont donc été engagés à Météo-France pour ce modèle. L'expérience acquise avec AROME a permis d'obtenir rapidement des réglages satisfaisants pour le système d'assimilation d'ARPEGE. La Figure 8 montre en particulier l'impact des données Mode-S sur la qualité des prévisions de vent d'ARPEGE à 300 hPa sur le domaine Europe/Atlantique, pour une période de deux mois en mai et juin 2023. On peut voir sur cette figure que la réduction d'erreur de prévision atteint 3 % aux premières échéances ; on peut aussi noter que cet impact peut être optimisé en modifiant les erreurs d'observation avec une méthode de poids adaptatif (on considère que toutes les observations dans une boîte ne comptent que pour une seule en termes de poids dans l'analyse). Ainsi, la configuration optimale des poids adaptatifs pour ces données semble être l'utilisation de boîtes de 20 km de côté pour ARPEGE.

Il est important de noter que le UK Met Office a annoncé il y a quelques mois vouloir acheter et mettre à disposition de la communauté internationale un jeu de données Mode-S au niveau global. La Figure 8 donne une idée de la couverture de ces données, sans doute incomplète à ce jour, en particulier aux États-Unis. Ce projet renforce ainsi l'intérêt de déployer l'assimilation des données Mode-S dans ARPEGE.

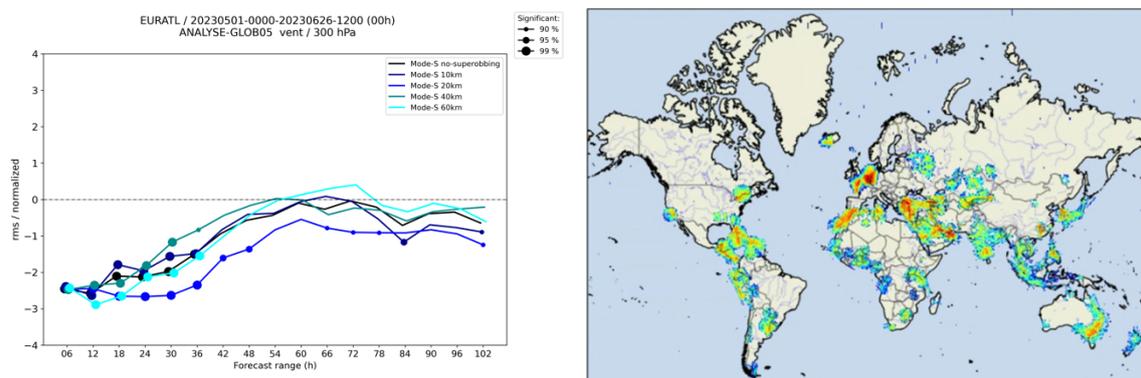


Figure 8 : À gauche : impact des données Mode-S actuellement reçues (couverture européenne) sur les prévisions du système ARPEGE, sur la réduction d'erreurs des prévisions de vent à 300 hPa sur le domaine Europe/Atlantique. Source : DESR/CNRM/GMAP. À droite : couverture potentielle des données Mode-S, telles qu'elles seraient fournies pour le UK Met Office dans le cadre du projet "Global Mode-S Project". Source : UK Met Office.

2.1.2 Données satellitaires micro-ondes en zones nuageuses et précipitantes

Les observations des radiomètres dans le domaine spectral des micro-ondes, embarqués à bord de satellites défilants (LEO), sont précieuses pour la PNT, en particulier pour ARPEGE. Ces données sont informatives sur les profils de température, d'humidité, les nuages et les précipitations solides (neige) et liquides (pluie). Comme le montre la Figure 5, elles arrivent très haut dans la liste parmi les données à plus fort impact (barre verte pour le sondage micro-ondes en température et barre bleu foncé pour le sondage en humidité). Ces impacts importants proviennent de deux facteurs : (i) ce domaine spectral permet le sondage de l'atmosphère en température et en humidité, malgré la présence de nuages, (ii) ces radiomètres sont pour le moment nombreux (15 satellites fournissent actuellement des mesures micro-ondes dans différentes fréquences ; satellites européens : MetOp-B, MetOp-C ; satellites américains : NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19, NPP, NOAA-20, NOAA-21, DMSP F17, DMSP F18, GPM-Core ; satellites asiatiques : GCOM-W1, FY3-C, FY3-D, FY3-E). Il faut noter que cette constellation est actuellement en déclin, 6 satellites américains sur 9 étant en fin de vie et sans remplaçants prévus à ce jour. Ce point est abordé à la Section 4.

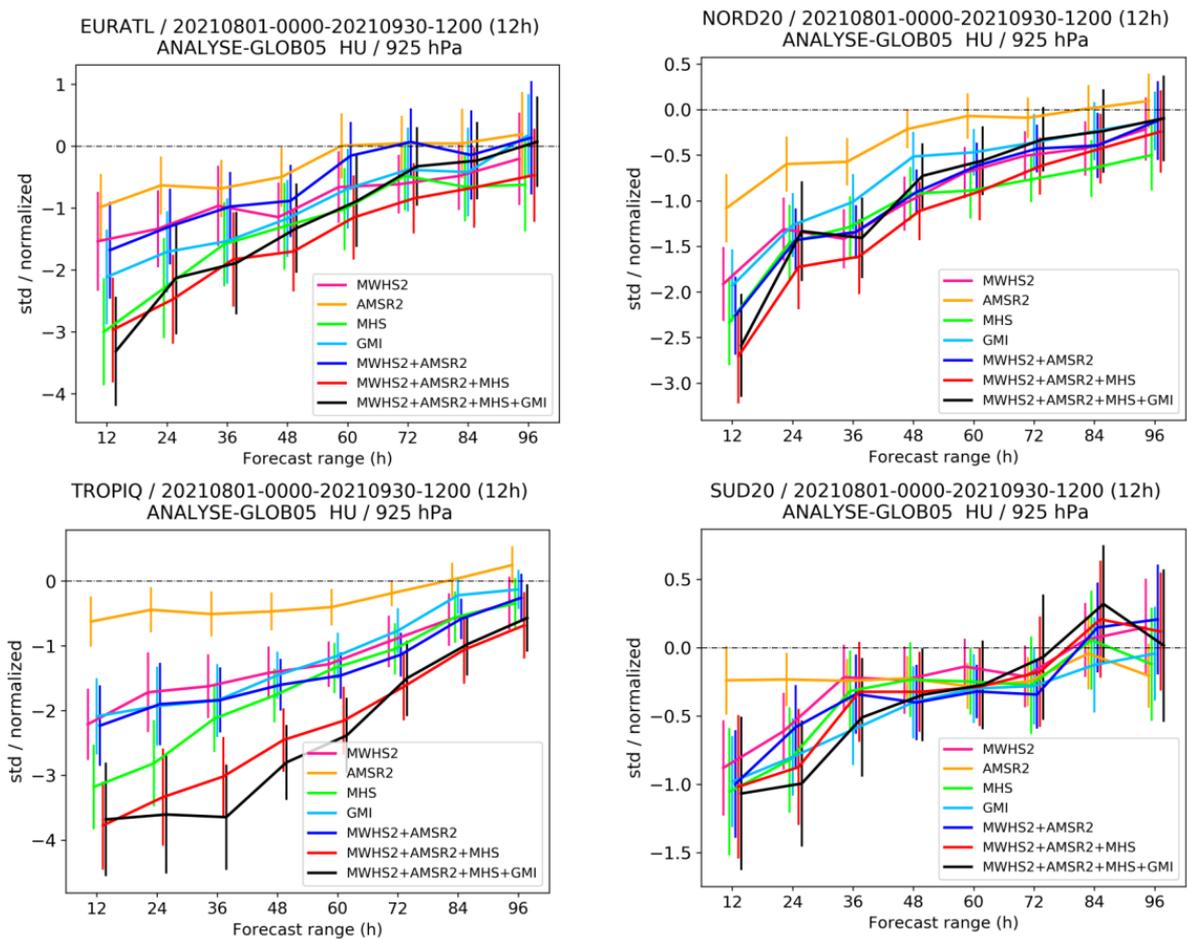


Figure 9 : Réductions des erreurs de prévision d'ARPEGE sur l'humidité dans les basses couches (925 hPa), obtenues grâce à l'assimilation des observations micro-ondes nuageuses et précipitantes pour plusieurs capteurs satellitaires (MWHS2, MHS, AMSR2, GMI), sur le domaine Europe/Atlantique (en haut à gauche), sur le domaine NORD20 (en haut à droite), dans les Tropiques (en bas à gauche), sur le domaine SUD20 (en bas à droite). Les impacts sont montrés pour chaque capteur séparément, puis combinés. Source : DESR/CNRM/GMAP.

Pendant longtemps, les données micro-ondes étaient assimilées exclusivement en zone de ciel clair ou en zone faiblement nuageuse. Les difficultés à utiliser les mesures en zone nuageuse et pluvieuse étaient multiples : (i) difficultés à simuler les observations de façon réaliste en prenant en compte les effets de diffusion du rayonnement par les cristaux de glace, (ii) difficultés à linéariser l'opérateur d'observation, (iii) difficultés à prendre en compte des distributions d'écarts entre le modèle et les observations fortement non gaussiennes (iv) difficultés à exploiter le contenu en information des nuages et des précipitations dans une analyse ne disposant pas des nuages et des précipitations comme variables de contrôle.

Au CEPMMT, une approche d'assimilation directe des observations micro-ondes s'est développée progressivement et a permis une première assimilation de données nuageuses ou pluvieuses de certains capteurs dès 2010 (Bauer et al., 2010). Cette approche a ensuite été généralisée petit à petit à la quasi-totalité de la constellation évoquée plus haut (Geer et al., 2017 ; Duncan et al., 2022).

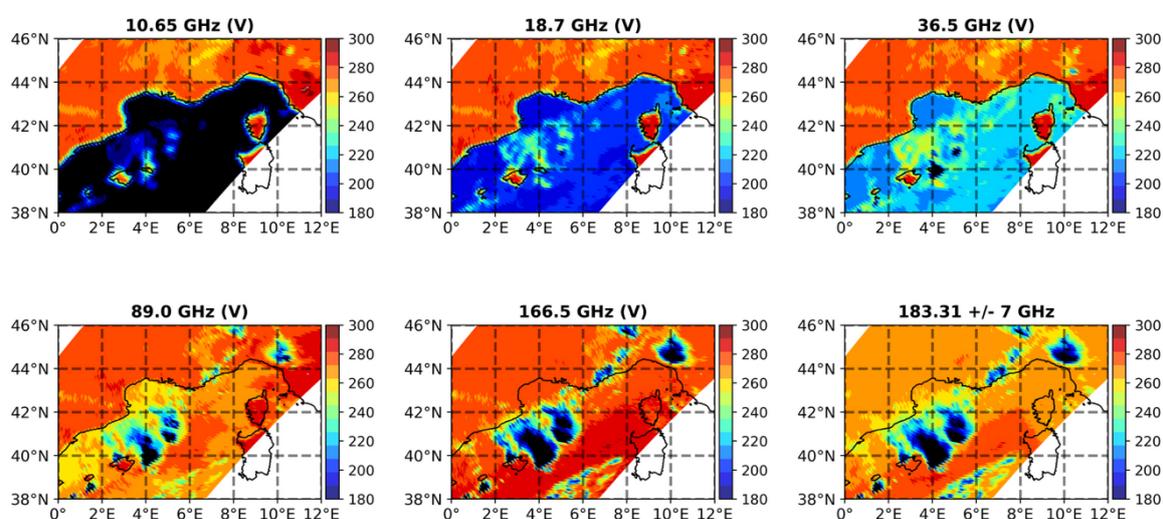


Figure 10 : Observations du radiomètre micro-ondes GMI à bord du satellite américano-japonais GPM Core Observatory lors de son passage au-dessus de l'évènement de convection intense en mer Méditerranée le 18 août 2022 à 02:00 UTC. Source : DESR/CNRM/GMAP.

À Météo-France, des recherches ont été réalisées sur le thème depuis 2013 afin de définir une méthode d'assimilation spécifique pour les observations micro-ondes nuageuses, en se basant sur l'expertise autour de l'assimilation des données radar. Ces travaux ont été fortement soutenus par le CNES dans le cadre de la mission franco-indienne Megha-Tropiques. Ils ont fait l'objet de 2 thèses et 2 ans de contrat d'ingénieur de recherche : la thèse co-financée par le CNES et Météo-France de Jérémy Guerbette de 2012 à 2016 (Guerbette et al., 2016), le CDD d'ingénieur de recherche de Fabrice Duruisseau de 2016 à 2018 financé par l'Appel à Propositions de Recherche (APR) CNES Megha-Tropiques (Duruisseau et al., 2019) et la thèse co-financée par la Région Occitanie et Météo-France de Marylis Barreyat de 2019 à 2022 (Barreyat et al., 2021). La méthode développée a été déployée en opérationnel pour deux premiers radiomètres en CY46T1 à l'été 2022. Elle a notamment permis d'améliorer la prévision de la trajectoire des cyclones tropicaux ainsi que les prévisions de vent d'ARPEGE (Duruisseau et al., 2019). Ces premiers travaux ont aussi permis d'augmenter l'expertise sur ces données et leur utilisation. Plus récemment, une convergence méthodologique supplémentaire avec la filière d'assimilation développée par le CEPMMT a été opérée pour ARPEGE dans la chaîne en double actuelle en CY48T1, afin de faciliter la gestion du code et les collaborations. La Figure 9 montre

notamment les impacts de l'assimilation d'observations nuageuses pour 4 radiomètres (européen : MHS, chinois : MWHS2, japonais : AMSR2, américain : GMI) sur la réduction d'erreurs de prévision de l'humidité relative à 925 hPa pour le domaine Europe/Atlantique, l'hémisphère Nord, les tropiques et l'hémisphère Sud. On peut voir en particulier que l'impact est cumulatif lorsque l'on active les radiomètres les uns après les autres. Dans la chaîne ARPEGE en CY48T1 (actuellement en double), 4 radiomètres sont assimilés en zones nuageuses et pluvieuses sur les 9 différents en vol (un radiomètre donné peut se trouver à bord de plusieurs satellites). Les autres radiomètres seront activés progressivement dans les prochaines chaînes de prévision – chaque radiomètre, doté de caractéristiques spécifiques, devant faire l'objet de développements et de réglages spécifiques.

Des travaux sont en cours à Météo-France dans le cadre de la thèse d'Elisa Chardon--Legrand (financée par l'Université de Toulouse) afin de généraliser les développements réalisés pour le système ARPEGE au bénéfice au système AROME-France. La Figure 10 montre par exemple un passage du satellite américano-japonais et son radiomètre GMI au-dessus de la zone de formation du système orageux ayant frappé la Corse le 18 août 2022. Un des objectifs de cette thèse est de mesurer l'impact de ces données sur l'analyse et la prévision de ce type d'évènement intense. Une condition nécessaire afin de mener ces travaux pour le système AROME-France est l'utilisation des hydrométéores dans la variable de contrôle de l'assimilation, ce que permet le nouvel algorithme d'assimilation 3DVar d'AROME développé à Météo-France depuis 2016 (Montmerle et al., 2018 ; Destouches et al., 2023), actuellement implémenté sur la chaîne en double CY48T1.

Ainsi, il est important de noter que la généralisation aux deux modèles AROME ou ARPEGE de travaux d'assimilation peut se faire dans les deux sens, avec soit des travaux initiaux dans ARPEGE tels que ceux sur les données micro-ondes, ou bien des travaux initiaux dans AROME comme ceux sur les données Mode-S.

2.1.3 Évolution dans la méthode d'assimilation des réflectivités radars

Les données du réseau de radars français ont été exploitées dès l'implémentation initiale du système d'assimilation 3D-Var dans AROME-France en 2010 (Seity et al., 2011). Un effort particulier a été conduit à l'époque afin de définir une méthode spécifique (méthode dite bayésienne) pour assimiler les réflectivités 3D mesurées par ces instruments (thèse d'Olivier Caumont, 2007 ; Caumont et al., 2010). Cette méthode d'assimilation, encore opérationnelle aujourd'hui, se déroule en deux étapes avec une première inversion 1D des profils de réflectivité observés en une variable géophysique (humidité relative), puis une assimilation de ces profils d'humidité relative dans le 3D-Var (Wattrelot et al., 2014). L'intérêt principal de cette méthode est de bénéficier des observations radar en zone précipitante, sans pour autant réaliser une analyse des hydrométéores, ce qui n'était pas accessible d'un point de vue algorithmique jusqu'à l'introduction récente du 3DVar. Elle a d'abord été implémentée pour le réseau de radars français, puis a été généralisée aux données des radars européens produits par le programme OPERA d'EUMETNET.

Dans cette méthode actuellement opérationnelle, le mécanisme principal permettant de corriger la localisation des zones précipitantes dans les prévisions est le suivant :

- Lorsqu'une cellule pluvieuse est observée, mais n'est pas présente dans la prévision à courte échéance servant d'ébauche à l'assimilation, la colonne atmosphérique correspondante est saturée en humidité dans l'analyse.
- Lorsqu'une zone de ciel clair est observée alors que la prévision à courte échéance présente une cellule pluvieuse, la colonne atmosphérique correspondante est asséchée dans l'analyse.

Cette méthode est relativement efficace, mais exploite de façon sous-optimale la richesse du contenu en information des réflectivités radars, car elle réduit l'information transmise à l'analyse à une information de saturation ou non-saturation de la colonne atmosphérique.

Des recherches ont été conduites à Météo-France depuis 2020 afin de remplacer cette méthode d'assimilation historique des réflectivités radar par une méthode dite directe. Ces recherches ont nécessité un travail important de développement logiciel afin de définir les modèles tangent linéaire et adjoint de l'opérateur d'observation pour les réflectivités radars. Des jalons scientifiques et techniques importants ont été franchis ces deux dernières années, notamment avec l'introduction de ce nouvel opérateur d'observation dans le système d'assimilation 3DENVAR avec les hydrométéores dans la variable de contrôle (eau liquide nuageuse, glace nuageuse, pluie, neige). Les premiers résultats issus de l'exploitation de cette méthode d'assimilation se sont rapidement révélés prometteurs. Le développement initial s'est alors poursuivi par un réglage fin des différents paramètres (erreurs d'observation, contrôle de qualité) nécessaires à la méthode à la fois sur des cas d'études et des périodes longues, en vue d'un déploiement opérationnel.

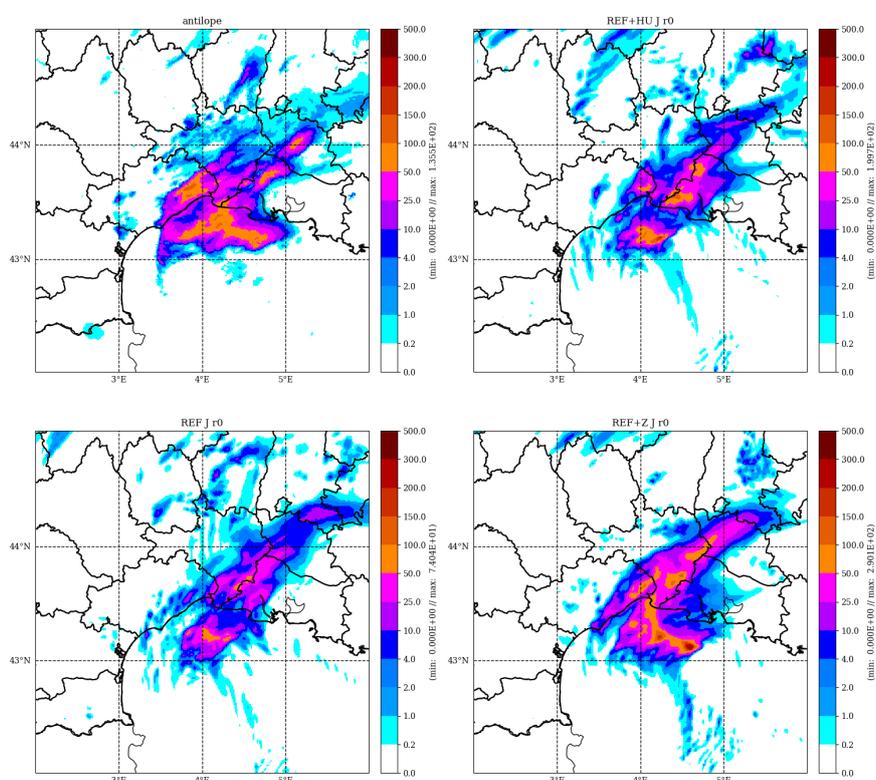


Figure 11 : Cumuls de précipitations observés (en haut à gauche) et prévus sur une période de 12 h le 7 septembre 2022 de 00:00 UTC à 12:00 UTC pour 3 expériences de prévision AROME-France : sans assimilation des réflectivités radar (en bas à gauche), avec assimilation des réflectivités radar par la méthode bayésienne en deux étapes actuellement opérationnelle (en haut à droite), avec assimilation des réflectivités radar par une méthode directe (en bas à droite). Source : DESR/CNRM/GMAP.

La Figure 11 montre un épisode de fortes précipitations dans le sud de la France, observé par les radars et pluviomètres et prévu par trois expériences de prévision du système AROME-France. L'expérience n'assimilant pas de données radars (en bas à gauche) sous-estime fortement les précipitations, en particulier sur terre. L'expérience assimilant les données de réflectivités radars avec la méthode actuellement opérationnelle (en haut à droite) prévoit des maxima de précipitations sur terre, mais principalement sur le mauvais département (Bouches-du-Rhône au lieu de l'Hérault). L'expérience

utilisant la nouvelle méthode d'assimilation prévoit une structure précipitante plus proche des observations, avec en particulier un maximum de pluie sur l'Hérault comme observé.

Outre cette comparaison sur une étude de cas, qui à elle seule ne permet pas de conclure, la Figure 12 montre des statistiques d'impact du changement de méthode sur une période de deux mois. La figure de gauche montre que les prévisions de pluie sont améliorées de façon statistiquement significative, même pour des seuils de pluie intenses (20 mm). La figure de droite montre le même impact, mais pour les prévisions de nuages d'AROME. Cette évaluation est réalisée en utilisant comme référence les observations du canal à 10,8 μm de l'instrument SEVIRI à bord du satellite Météosat Seconde Génération. Les observations de ce canal sont sensibles à la température du sommet des nuages et permettent de mesurer les progrès dans la qualité des prévisions quant à leur localisation géographique et leur extension verticale. Une évaluation supplémentaire, non montrée sur cette figure, indique également une amélioration significative des prévisions d'humidité dans les basses couches de l'atmosphère grâce à ce changement de méthode d'assimilation des données radars. Comme pour l'assimilation des données Mode-S et les vents dans les basses couches, ceci est un élément important pour certaines applications en aval d'AROME-France telles que le forçage des modèles de propagation de feux de forêt (modèle BLAZE) grâce à de meilleures prévisions atmosphériques.

Les choix scientifiques et techniques de la configuration à déployer vers une chaîne en double sont finalisés depuis décembre 2022. Depuis, les travaux en lien avec cette nouvelle méthode d'assimilation se sont essentiellement portés sur la vérification de son impact sur chaque nouvel épisode de fortes précipitations, en particulier ceux faisant l'objet de Vigilances météorologiques de niveau orange ou rouge. Le dossier de validation est donc particulièrement solide quant à cette transition, sensible pour AROME-France, qui sera proposée pour la chaîne en double en CY49T1.

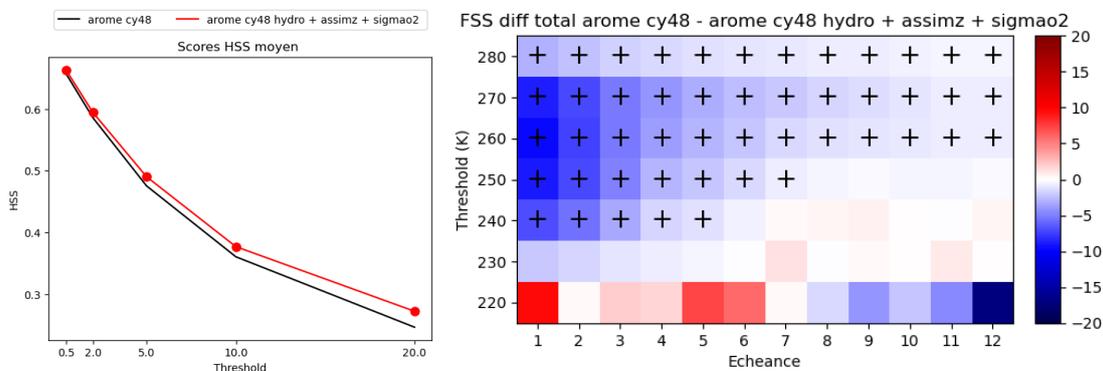


Figure 12 : À gauche : impact moyen du changement de méthode d'assimilation des réflectivités radars dans AROME-France sur les prévisions de précipitations à 6 h d'échéance pour la période de juillet à décembre 2022. Plus la valeur du score employé (Heidke Skill Score — HSS) est proche de 1, plus la prévision AROME-France est proche des observations. À droite : impact moyen du changement de méthode d'assimilation des réflectivités radars dans AROME-France sur les prévisions de nuages pour la période de juillet à décembre 2022. La comparaison entre les observations et le modèle est effectuée dans l'espace des observations SEVIRI/Météosat. Une différence négative correspond à une amélioration du score employé, le Fractions Skill Score (FSS). Un signe « + » indique que l'amélioration du score est statistiquement significative à 95%. Source : DESR/CNRM/GMAP.

2.1.4 Assimilation des produits de couverture neigeuse pour l'analyse de neige

L'état de la surface, et notamment la présence de neige, joue un rôle important sur les basses couches de l'atmosphère, en particulier la température. Disposer d'une analyse de neige est donc bénéfique

pour la qualité de l'analyse et des prévisions des variables de surface. Depuis que la chaîne en CY46T1 est devenue opérationnelle, le système ARPEGE bénéficie d'une analyse de neige alimentée par les observations des messages SYNOP des stations de surface. Ce réseau de stations émettant des SYNOP est dense en métropole et nous recevons également des observations de certains pays européens, d'Asie et d'Amérique du Nord. La Figure 13 (à gauche) montre en particulier l'emplacement des stations émettant des SYNOP fournissant une observation de hauteur de neige et qui sont actuellement assimilés. On peut voir que de nombreuses zones sur le globe ne sont pas couvertes par les observations contenues dans nos bases.

Afin de spatialiser à l'échelle mondiale ces mesures, l'utilisation d'observations satellitaires se révèle pertinente. Si la mesure de hauteur de neige est difficile depuis l'espace, sauf avec certains instruments actifs faisant l'objet d'investigations préliminaires encore peu matures pour un usage opérationnel, l'occurrence ou la non-occurrence de neige à la surface peut tout de même être déduite avec moins de difficultés par imagerie optique dans le visible et le proche-infrarouge. Cette information est évidemment moins riche qu'une hauteur de neige, mais elle permet tout de même d'obtenir des impacts importants sur les prévisions du système ARPEGE, en particulier dans les basses couches. Des travaux sont en cours à Météo-France afin d'assimiler le produit d'occurrence de neige américain IMS (*Interactive Multi-sensor Snow and Ice Mapping System*) de la NOAA/NESDIS. Ce produit est déjà assimilé au CEPMMT, mais n'avait pas pu être considéré à Météo-France jusqu'à présent.

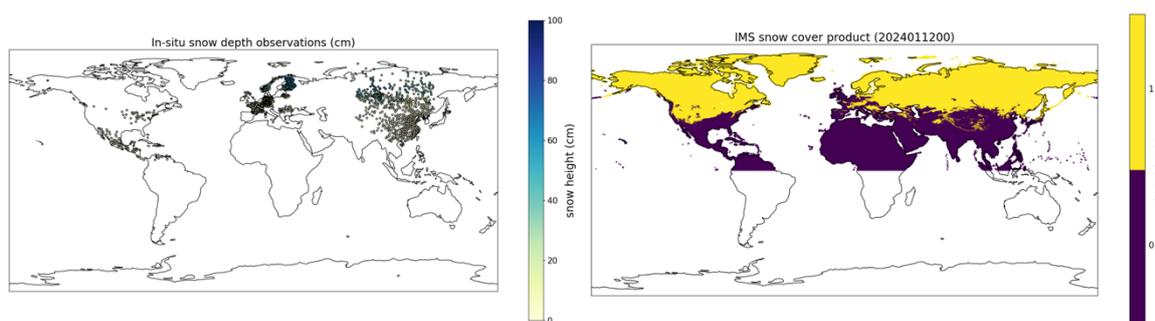


Figure 13 : À gauche : pointage des observations in situ de hauteur de neige actuellement assimilées dans ARPEGE pour réaliser l'analyse de neige. À droite : surface terrestre couverte par la neige (en jaune) déduite de la fusion de différentes observations satellitaires. Ces mesures sont valides le 12 janvier 2024 à 0h UTC. Source : DESR/CNRM/GMAP.

La Figure 13 (à droite) montre le masque binaire estimé depuis l'espace pour un jour donné ; ce masque est disponible uniquement dans l'hémisphère Nord dans ce produit IMS. La Figure 14 montre les impacts indirects de l'utilisation de l'analyse de neige améliorée sur les prévisions atmosphériques d'ARPEGE. On peut voir que la prévision de certaines variables, comme le géopotential, est améliorée par rapport à l'analyse du CEPMMT. On peut aussi voir que pour certaines variables, le signal résultant de cette nouvelle utilisation est plus complexe. C'est en particulier le cas pour les scores de températures à 2 m par rapport aux stations de surface. Si cette dégradation pourra être atténuée, en particulier en proposant des réglages un peu différents de l'analyse de neige, avec des réglages des erreurs d'observations sur le produit IMS par exemple, cet impact reflète aussi le besoin de réaliser une analyse multivariée étendue pour la surface. En effet à ce stade, la hauteur de neige est analysée séparément des autres variables. Les travaux menés durant la thèse de FCPLR (Formation Complémentaire Par La Recherche accessible aux ingénieurs des travaux de la météorologie en fin de scolarité de l'École Nationale de la Météorologie) de Sophie Marimbordes (DESR/CNRM/GMAP) autour de la modernisation de l'analyse de surface, et du remplacement du logiciel d'interpolation

optimale CANARI par un système d'assimilation 2DnVar, permettront d'analyser en même temps de manière cohérente la neige, la température à 2 m continentale et potentiellement d'autres variables. Ceci représente un défi scientifique et technique nécessaire afin de renforcer la cohérence de l'analyse de surface.

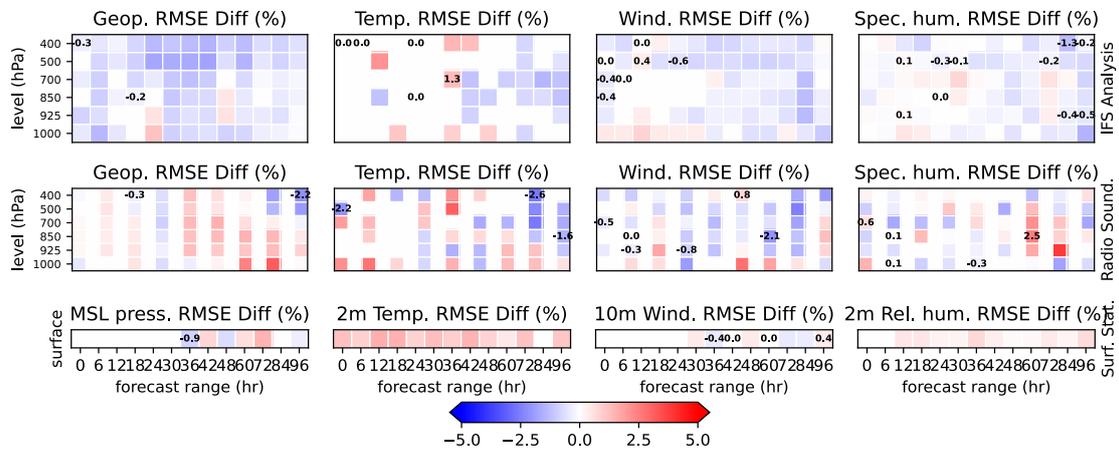


Figure 14 : Impact de l'analyse de neige améliorée par l'utilisation du produit satellite IMS sur la prévision des champs atmosphériques d'altitude sur une période de 1,5 mois en janvier et février 2023. Ces impacts sont représentés sous forme de différences relatives d'écarts quadratiques moyens entre deux expériences ARPEGE avec et sans l'analyse de neige améliorée. Ces différences sont calculées sur le domaine Europe/Atlantique. La première ligne de scores représente les scores avec l'analyse du CEPMMT en référence, la deuxième avec les radiosondages en référence, et la troisième avec les observations des stations de surface SYNOP en référence. Source : DESR/CNRM/GMAP.

À Météo-France, ces travaux de recherche sur l'analyse de neige utilisant des observations spatiales ont démarré en 2020 et pourront aboutir pour la future chaîne en double en CY49T1. Un projet transverse structurant à Météo-France nommé MASCOT (Modélisation et Assimilation des Surfaces Continentales pour l'Opérationnel) a vu le jour fin 2023. Ce projet, détaillé dans la Section 2.2.5, permettra de coordonner les efforts d'assimilation des observations de surface.

2.2 Les chantiers de recherches ouverts autour des observations disponibles avec un transfert vers l'opérationnel à plus long terme

Comme mentionné plus haut, certains sujets de recherche concernant l'utilisation des observations déjà disponibles ont été abordés à Météo-France, parfois depuis plusieurs années, mais nécessitent encore un travail de fond afin de pouvoir bénéficier à la qualité de la prévision de nos modèles de prévision. Nous discutons ci-dessous du potentiel de chacun des sujets abordés.

2.2.1 Vers l'exploitation des observations à haute densité spatiale et temporelle

Un point commun à l'assimilation de toutes les observations est le besoin de spécifier une matrice de variances et covariances (ou corrélations) des erreurs d'observation. Les termes diagonaux de cette matrice reflètent les erreurs d'observations, comprenant à la fois les erreurs de mesures liées à l'instrument, les erreurs liées à l'opérateur d'observation, ainsi que les erreurs de représentativité de

la mesure par rapport à la maille du modèle numérique. Les termes non diagonaux de cette matrice reflètent quant à eux les corrélations entre les erreurs d'observations précédemment citées. Chaque terme de cette matrice peut être diagnostiqué a posteriori (Desroziers et al., 2005). Ces diagnostics peuvent ensuite être partiellement utilisés dans l'assimilation des données.

Certaines autres corrélations d'erreurs d'observation sont en revanche beaucoup plus complexes à prendre en compte, en particulier car la répartition géographique des mesures est beaucoup moins régulière que celle évoquée ci-dessus. Chaque nouvelle observation devient alors un cas particulier pour lequel une estimation des corrélations d'erreurs avec les observations voisines doit être réalisée, notamment en fonction de la distance entre deux mesures. Ceci rend le problème complexe à résoudre mathématiquement (thèse d'Olivier Goux au CERFACS, Goux et al., 2024) et appelle à une modélisation dédiée de ces corrélations (Guillet et al., 2019). Afin de contourner le problème, un « écrémage » des observations est en général appliqué à tous les types d'observations, en imposant une distance minimale entre les observations sélectionnées par les algorithmes de contrôle de qualité. La Figure 15 (à gauche) montre un exemple de la densité spatiale d'observations disponibles pour plusieurs sondes en orbite basse dans le domaine des micro-ondes, et les observations effectivement assimilées (à droite) avec un espacement imposé d'environ 100 km.

Avec un tel écrémage d'environ 100 km (resp. 80 km), appliqué aujourd'hui à toutes les mesures spatiales dans le système ARPEGE (resp. AROME), les structures météorologiques observées d'humidité, de température, de vent, de nuages et de précipitations sont en partie perdues. Un grand nombre de données reçues dans nos bases sont donc stockées, mais immédiatement écartées de l'assimilation. Progresser sur ces questions de corrélation d'erreurs d'observation est donc prioritaire afin d'optimiser notre utilisation des observations disponibles.

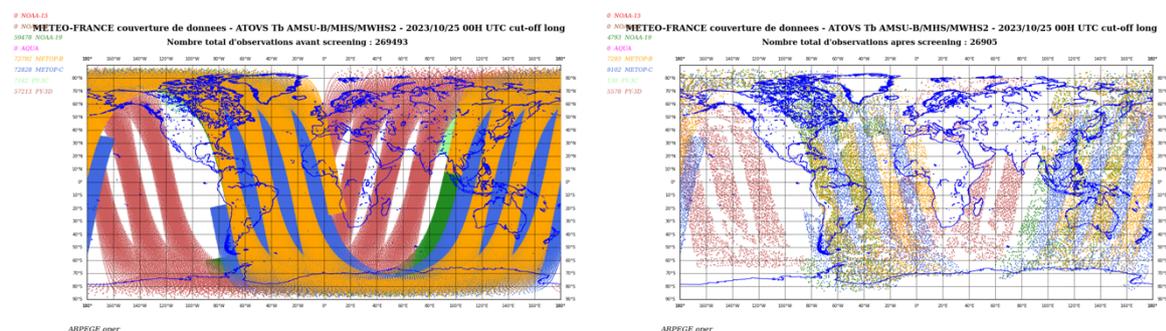


Figure 15 : Observations de la constellation actuelle de sondes micro-ondes (à gauche) disponibles dans nos bases de données et (à droite) réellement assimilées, après écrémage. Source : DIROP/COMPAS.

Des travaux de recherche ont été menés sur le thème depuis plusieurs années au CERFACS, et sont menés désormais à Météo-France, en particulier avec le démarrage fin 2023 de la thèse de FCPLR de Thomas Buey (DESR/CNRM/GMAP). Dans cette thèse, la problématique est appliquée aux instruments de sondage infrarouge sur orbite géostationnaire, avec pour cible une application à l'instrument hyperspectral IRS à bord de Météosat Troisième Génération, afin de préparer l'arrivée de ces nouvelles données (voir Section 3). Cela étant, les réflexions menées autour des corrélations d'erreurs d'observation et de leur modélisation sont générales. La matrice de covariance d'erreur d'observation complète sera ainsi prise en compte dans les algorithmes d'assimilation. Ces concepts pourront donc être repris pour d'autres types d'observations que l'on voudrait assimiler à plus haute densité spatiale, par exemple les observations des radars dans le système AROME-France.

2.2.2 Vers l'exploitation des observations de scènes géographiques et météorologiques complexes

Un deuxième point commun à l'assimilation de nombreuses observations est le contrôle de qualité appliqué à celles-ci, permettant de filtrer des observations dans différents cas de figure. Il peut s'agir de zones géographiques spécifiques ou bien de scènes météorologiques données. Ces filtres sont en général mis en œuvre dans les cas de figure où l'assimilation de données n'est pas encore maîtrisée.

Concernant les filtres de zones géographiques, on retrouve souvent les zones montagneuses, les surfaces enneigées ou encore les zones côtières qui se révèlent être complexes à traiter pour de nombreux types d'observations à cause de l'hétérogénéité de type de surface dans le champ de vue des instruments. Vue de l'espace, l'assimilation d'observations dans ces régions nécessite une bonne modélisation des conditions de surface et de ses effets sur les observations. À Météo-France, des travaux spécifiques ont été conduits il y a plusieurs années afin de progresser sur l'assimilation d'observations sur les surfaces glacées (Karbou et al., 2014). Au CEPMMT, un chantier spécifique a été lancé récemment sur le thème appelé "All Surface Data Assimilation". Ce chantier vise à se doter d'une assimilation au-dessus des surfaces complexes de tout type (Geer, 2023). Dans la communauté ACCORD, des développements sont menés autour d'une composante des opérateurs d'observation permettant par exemple de mieux prendre en compte les observations le long des côtes (Mile et al., 2021). Il sera important pour Météo-France d'effectuer une veille sur ces deux projets afin de pouvoir bénéficier des avancées à leur maturité.

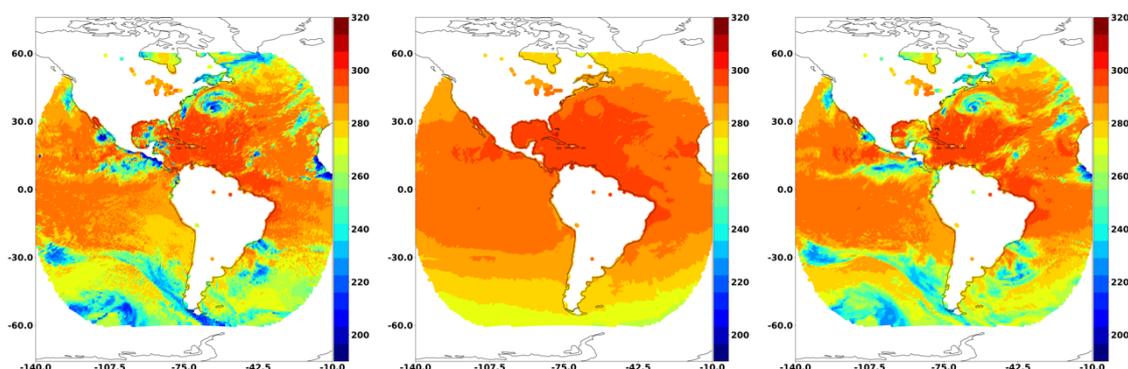


Figure 16 : (Gauche) Observations du satellite géostationnaire américain GOES-17 le 10 septembre 2021 pour le canal à 10,3 μm . (Milieu) Simulation de ce même canal avec le système ARPEGE, telle que réalisée en opérationnel sans la prise en compte des nuages prévus. (Droite) Simulation avec prise en compte des nuages grâce au code de transfert radiatif RTTOV-Cloud. Source : thèse d'Ethel Villeneuve (2023), DESR/CNRM/GMAP.

Concernant les filtres de situations météorologiques, les scènes nuageuses et précipitantes sont détectées et retirées de l'assimilation de données pour de nombreux instruments de mesure, en particulier ceux dans le domaine de l'infrarouge. En effet, l'assimilation de données en zones nuageuses et précipitantes a progressé plus rapidement dans le domaine spectral des micro-ondes, avec les données radars au sol et les données des sondeurs passifs depuis l'espace. C'est en partie le cas, car les non-linéarités sont moins fortes dans les micro-ondes que dans d'autres domaines spectraux (infrarouge, visible et submillimétrique). Cela étant, le contenu en information des observations Infrarouge en zones nuageuses est en partie exploité dans nos modèles de prévision de façon détournée, à travers l'utilisation de produits d'estimations de vents en altitude, déduits du

déplacement des structures nuageuses observées. Bien que sous-optimale, cette exploitation partielle amène déjà des impacts importants comme on peut le voir sur la Figure 5.

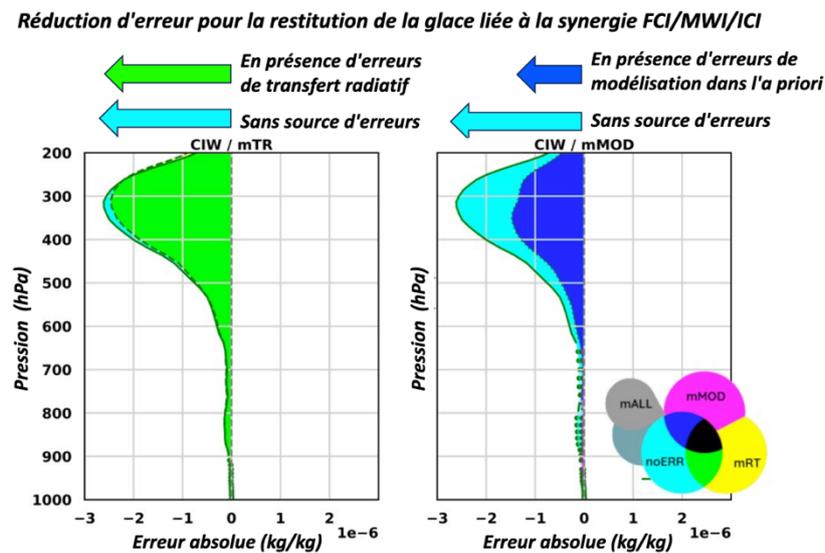


Figure 17 : (Gauche) Illustration de la réduction d'erreur sur l'analyse des profils de glace nuageuse, obtenue grâce à la synergie d'observations nuageuses simulées dans l'Infrarouge et Micro-ondes, en présence d'erreurs de modélisation du transfert radiatif et (droite) en présence d'erreurs dans la prévision à courte échéance servant d'ébauche. Source : Villeneuve et al. (2024).

Les Figure 16 et Figure 17 montrent des travaux récents sur l'assimilation de données Infrarouge en zones nuageuses, dans le cadre de la thèse d'Ethel Villeneuve co-financée par Météo-France et la Région Occitanie (2020–2023). La Figure 16 illustre la possibilité actuelle d'activer la prise en compte des nuages dans les simulations de transfert radiatif de l'assimilation de données dans le code de prévision numérique ARPEGE/IFS. Cette activation dans ARPEGE (à droite) donne des résultats bien plus proches des observations (à gauche) que la version opérationnelle actuelle (au milieu). Il est important de noter que la simulation de transfert radiatif est réalisée avec le logiciel RTTOV V12 (Saunders et al., 2018), développé et maintenu par le SAF NWP d'EUMETSAT, pour lequel Météo-France est un important contributeur à travers les travaux du DESR/CNRM/CEMS.

La simulation seule de scènes nuageuses en Infrarouge ne suffit cependant pas à permettre l'assimilation de ces observations. Plusieurs autres éléments doivent être réunis : (i) les prévisions de nuages et de précipitations doivent être réalistes, avec un équilibre entre les variables microphysiques au plus proche de ce qui se produit dans la nature, (ii) les erreurs d'observations spécifiées doivent permettre de prendre en compte les erreurs de positionnement géographique entre structures nuageuses observées et prévues, (iii) les corrélations d'erreurs d'observation doivent être prises en compte, car les pics de sensibilité des canaux infrarouge varient fortement en présence de nuages par rapport aux zones de ciel clair, (iv) une bonne synergie avec les autres observations déjà assimilées en zone nuageuse doit être recherchée.

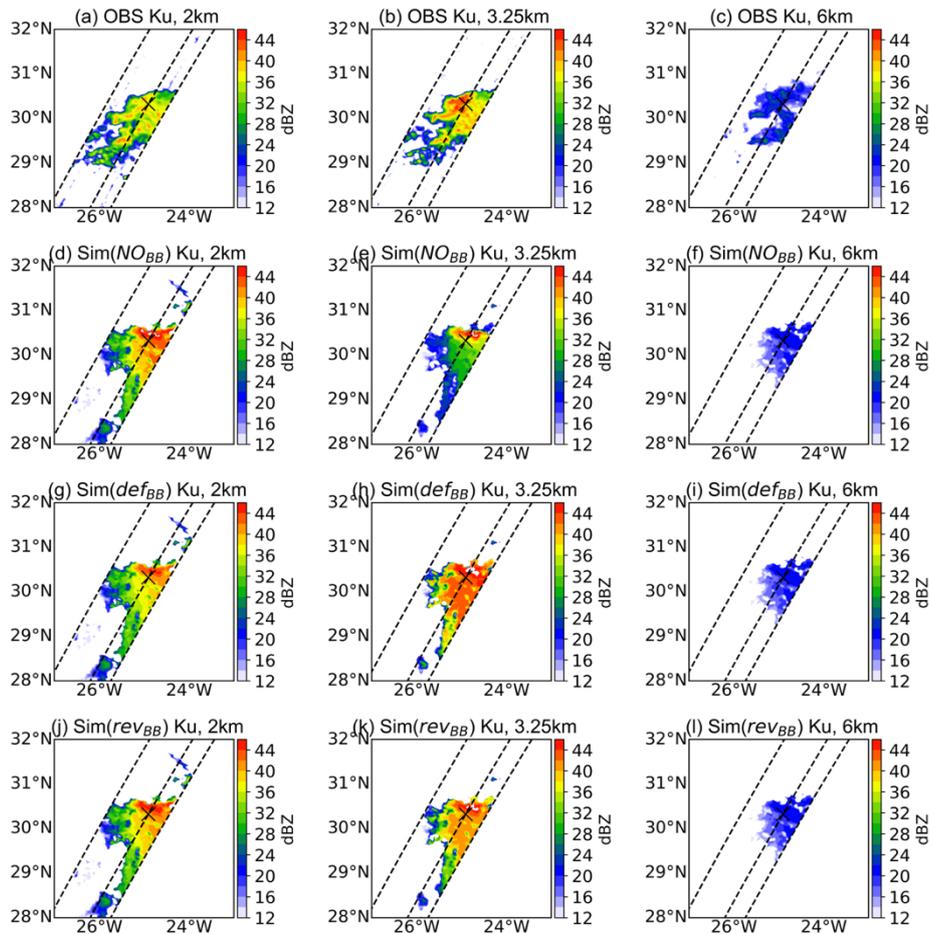


Figure 18 : Coupes horizontales à 3 niveaux verticaux (2 km d'altitude à gauche, 3,25 km au milieu, 6 km à droite) d'un nuage précipitant observé par le radar spatial du satellite GPM Core Observatory. Première ligne : observations, deuxième ligne : simulation ARPEGE sans modélisation de la couche de fonte, troisième ligne : simulation ARPEGE avec modélisation de la couche de fonte, quatrième ligne : simulation ARPEGE avec modélisation de la couche de fonte améliorée. Sources : DESR/CNRM/GMAP et CEPMMT.

La Figure 17 montre la réduction d'erreur d'analyse qui pourra être obtenue pour la glace nuageuse, avec une synergie multi-instruments Infrarouge et micro-ondes, et comment elle peut être influencée par différentes sources d'erreur. En particulier, on peut voir que la réduction d'erreur d'analyse est préservée en cas d'erreurs sur le transfert radiatif (figure de gauche). Cette dernière peut être grandement affectée en cas d'erreurs de modélisation (figure de droite). Ceci illustre l'importance de poursuivre des travaux de recherche sur la modélisation physique et microphysique, en particulier pour la bonne exploitation des observations spatiales. Ces travaux, soutenus par le CNES dans le cadre de l'APR IMOTEP, vont se poursuivre autour de l'infrarouge dans le cadre de la thèse d'Antoine Chemouny (DESR/CNRM/GMAP) cofinancée par le CNES et Météo-France, qui a démarré à l'automne 2023.

Un autre type d'observation pourrait se révéler très utile pour la prévision des scènes météorologiques nuageuses et précipitantes. Il s'agit des observations des radars embarqués à bord de satellites. Jusqu'à présent, ces radars étaient embarqués à bord de quelques satellites seulement, étant donné leur coût élevé de développement. On peut citer les satellites américano-japonais TRMM (1997–2015), GPM Core Observatory (2013–présent), le satellite Cloudsat (2006–2023). Les observations du satellite GPM sont encore réalisées aujourd'hui et des travaux de simulation de ces observations ont été réalisés à Météo-France, avec le soutien du SAF NWP d'EUMETSAT. La Figure 18 montre un exemple de cellule pluvieuse dans l'océan Atlantique, hors de portée des radars au sol mais observée par le radar de GPM Core Observatory ; ses observations permettent l'analyse de la structure

tridimensionnelle de cette cellule, que l'on visualise sur la figure à l'aide de coupes horizontales à 2 km, 3,25 km, et 6 km d'altitude. La première ligne montre les réflectivités radar observées et les lignes suivantes montrent les réflectivités radar simulées par trois simulations ARPEGE avec des hypothèses différentes dans le code de transfert radiatif, en particulier concernant la modélisation des interactions matière/rayonnement dans la couche de fonte près de l'isotherme 0 °C.

Plusieurs nouveaux radars spatiaux seront disponibles dans les années à venir à travers les programmes de recherche d'observation de la Terre des agences spatiales (EarthCare, ESA/JAXA ; PMR/FY-3G, NSMC ; AOS, NASA/JAXA/CNES) mais également à travers des initiatives du secteur privé (ex : Tomorrow.io). La poursuite de ces travaux à Météo-France afin de se doter d'une filière d'assimilation de ces données est donc stratégique pour l'avenir. Une telle filière existe au CEPMMT pour le satellite EarthCare (Fielding et al., 2020) mais n'a pas encore été partagée dans un cycle du code commun IFS/ARPEGE ; une autre existe aussi à la *Japan Meteorological Agency* pour le satellite GPM (Ikuta et al., 2021) où les données des radars spatiaux sont assimilées de façon opérationnelle depuis 2015.

2.2.3 Les domaines du spectre électromagnétique encore inexploités

Plusieurs domaines spectraux (Figure 3) n'ont pas encore été exploités en PNT, il s'agit du domaine visible, du domaine des hautes fréquences micro-ondes (fréquences submillimétriques) ainsi que de l'infrarouge lointain.

Concernant le domaine des fréquences submillimétriques (>200 GHz), peu d'observations étaient disponibles jusqu'à présent. On peut citer les sondeurs micro-ondes miniaturisés TROPICS (Blackwell et al., 2018) qui présentent un canal d'observation au-dessus de 200 GHz. Dans un avenir proche, l'Arctic Weather Satellite (AWS) de l'ESA, qui sera lancé en juin 2024, permettra de sonder l'atmosphère jusqu'à 325 GHz, avec un contenu en information très riche sur les nuages de glace. AWS est le précurseur de la constellation EPS-Sterna mentionnée plus en détail dans la Section 4. À bord de EPS-SG-B, l'instrument ICI (Ice Cloud Imager) sondera les nuages de glace jusqu'à 664 GHz ; cet instrument est évoqué dans la Section 3.

Concernant le domaine infrarouge lointain, très peu d'observations étaient également disponibles. La prochaine mission spatiale qui fournira des mesures dans cette partie du spectre est la mission FORUM qui a été sélectionnée pour devenir le 9^{ème} Earth Explorer de l'ESA. Cette mission fournira des observations très riches pour la validation des modèles, en particulier les modèles de climat, mais sera caractérisée par un échantillonnage spatio-temporel trop faible (visée au nadir sans fauchée) pour qu'elle soit pertinente pour la PNT opérationnelle.

Concernant le domaine visible, les images fournies par les satellites géostationnaires et certains satellites défilants sont disponibles depuis plusieurs décennies dans cette partie du spectre. Celles-ci sont très utilisées par les prévisionnistes qui les exploitent directement, mais n'ont pour autant jamais été exploitées en assimilation de donnée par la communauté internationale jusqu'à peu. Les difficultés d'exploitation sont multiples, en particulier liées à des effets géométriques complexes combinant la structure tridimensionnelle des nuages et l'angle zénithal solaire.

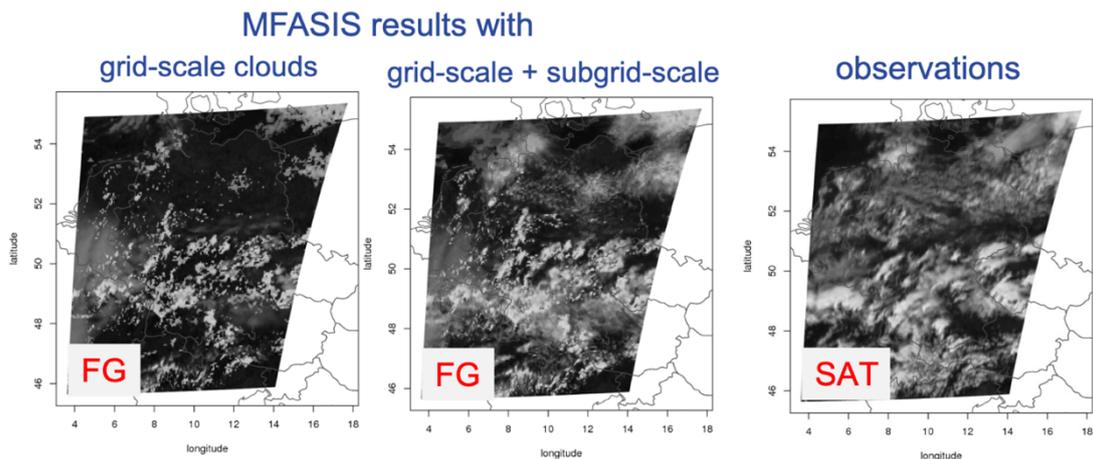


Figure 19 : (Gauche et milieu) Simulation d'observations satellitaires du domaine visible avec le code de transfert radiatif MFASIS et le modèle ICON-D2 et (droite) observations du capteur SEVIRI à bord de Météosat Seconde Génération. Source : L. Bach, DWD, présentation à l'International TOVS Conference 2023.

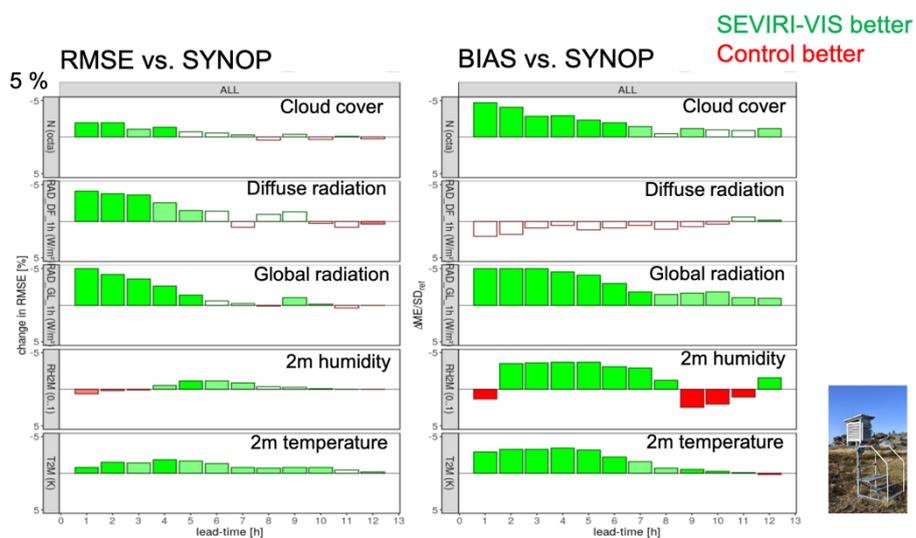


Figure 20 : Exemple d'impacts de l'assimilation des données visible sur les erreurs de prévisions du modèle allemand ICON-D2. En photographie une station SYNOP utilisée pour la vérification. Source : L. Bach, DWD, présentation à l'International TOVS Conference 2023.

Ce domaine est pourtant particulièrement pertinent en termes de contenu en information pour les nuages et la surface. Pour les nuages, les observations dans le domaine visible comblent un manque dans les systèmes d'observations actuellement assimilés. Si l'on considère le cycle de vie de la convection : (i) l'environnement thermodynamique avant son initiation peut être sondé grâce aux radiomètres micro-ondes et infrarouge, (ii) une fois la convection mature, les précipitations peuvent être observées grâce au domaine micro-ondes. En revanche dans la phase de développement de la convection, le domaine visible permet d'observer les petites gouttes dans leur processus de formation et durant leur ascendance. Le *Deutsche Wetterdienst* (DWD), service météorologique allemand, est pionnier en Europe dans l'exploitation des données dans le visible pour leur modèle à méso-échelle ICON-D2. La Figure 19 à droite montre un exemple d'observations issues de Météosat Seconde Génération, tandis qu'à gauche et au milieu ce sont deux simulations du modèle ICON-D2, prenant en

compte ou non la variabilité des nuages à petite échelle. Ces simulations sont réalisées grâce au code de transfert radiatif MFASIS, disponible au sein du logiciel RTTOV évoqué précédemment.

Le DWD a mis plusieurs années à développer une filière d'assimilation des données visible et qui paraît extrêmement bénéfique pour les prévisions de leur modèle à méso-échelle. La Figure 20 montre l'impact de ces données sur la qualité des prévisions d'ICON-D2, sur plusieurs variables liées aux nuages, mais aussi des variables de surface. On peut voir que les améliorations sont nettes, jusqu'à plus de 6 h d'échéance. Le CEPMMT a également amorcé des travaux sur le visible dans le cadre du programme *Destination Earth*, ces observations ayant l'avantage d'être à plus haute résolution horizontale que celles des canaux micro-ondes ou infrarouge (ex : 1 km de résolution pour les canaux visible de MTG/FCI contre 2 km pour les canaux infrarouge et typiquement 10 km pour des canaux micro-ondes).

À Météo-France, l'angle d'attaque choisi afin d'amorcer des travaux sur le domaine visible pour la PNT est dans un premier temps de générer des Images satellitaires prévues (ISP) dans ce domaine spectral, afin de pouvoir les comparer aux observations. Ces travaux sont menés de façon conjointe entre DESR/CNRM/CEMS et DESR/CNRM/GMAP. Il faudra ensuite construire une filière d'assimilation de ces données comme le font certains partenaires européens. D'autres utilisations des observations dans le domaine visible autour de la surface ont été réalisées à Météo-France par le passé. Le projet MASCOT récemment lancé (Section 2.2.5) devrait permettre sur le long terme de bénéficier de cette expertise interne sur le sujet pour la surface.

2.2.4 Les variables observées encore inexploitées

Dans l'atmosphère, les hydrométéores sont détectés par les radars météorologiques de Météo-France du réseau ARAMIS, tous équipés depuis quelques années de la technologie de double polarisation. En plus de la réflectivité « Zhh », variable à laquelle on peut relier l'intensité des précipitations, de nouvelles variables dites polarimétriques sont disponibles telles que la réflectivité différentielle « Zdr » (sensible à l'aplatissement des hydrométéores, Figure 21) ou la différence de phase spécifique de rétrodiffusion « Kdp » (sensible au contenu en eau liquide au sein du volume échantillonné). Ces nouvelles variables (Figure 22) peuvent fournir des informations précieuses sur le type et la quantité d'hydrométéores (Park et al., 2009 ; Al-Sakka et al., 2013), ainsi que sur les processus microphysiques à l'œuvre dans les nuages et les précipitations (Kumjian et al., 2022).

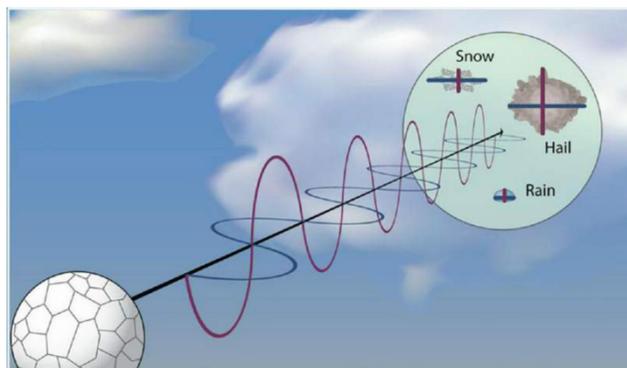


Figure 21 : Schéma de principe de la sensibilité des observations radar aux formes des particules cibles. Source : NOAA.

L'assimilation d'observations polarimétriques dans AROME-France a eu un succès limité jusqu'à présent : Augros et al. (2018) puis Thomas et al. (2020) n'ont pas montré d'amélioration significative des analyses et des prévisions des orages lorsque les variables Kdp et Zdr sont assimilées en plus de la réflectivité radar via les méthodes 1D+3D-Var (Caumont et al., 2010) ou 1DEnVar. Cependant, l'apport de ces observations a été démontré avec d'autres approches : Carlin et al. (2017) ont obtenu une amélioration des analyses et des prévisions sur deux cas orageux en modifiant l'analyse nuageuse d'un système de prévision régional par rapport à sa forme originale basée sur la réflectivité, pour fournir des ajustements d'humidité et de chaleur latente basés sur la détection de colonnes de Zdr, qui peuvent servir d'indicateurs pour les courants ascendants dans la convection humide profonde et, par la suite, les zones de saturation et de libération de la chaleur latente. Putnam et al. (2019) ont montré une amélioration des analyses en assimilant des observations de Zdr en dessous de l'isotherme 0 °C via un système d'assimilation appelé filtre de Kalman d'ensemble. Des travaux visant à progresser sur la prise en compte des observations polarimétriques pour la prévision des orages sont également menés en Allemagne (Trömel et al., 2021).

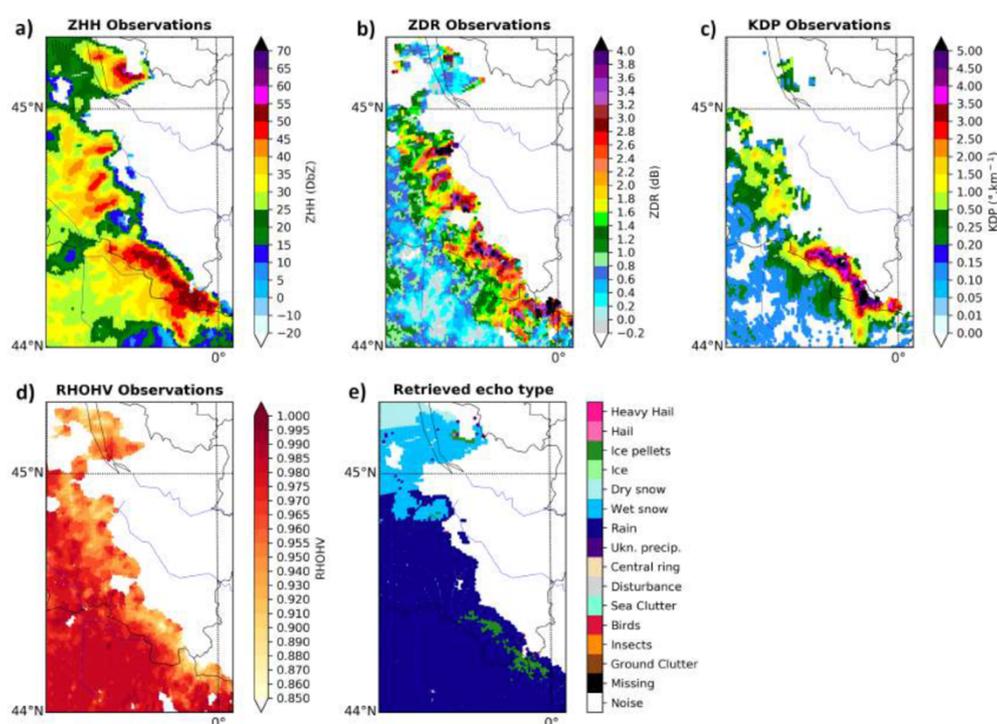


Figure 22 : Illustration du contenu en information des observations radars polarimétriques pour une situation convective dans la région de Bordeaux le 26 mai 2018. Source : thèse de Guillaume Thomas, DESR/CNRM/GMAP.

Par ailleurs, des développements récents à Météo-France, à la fois sur les schémas microphysiques des modèles (LIMA qui permet de prévoir le nombre d'hydrométéores en plus de leur masse pour l'eau liquide, l'eau nuageuse et la glace ; Vié et al., 2016) ainsi que sur les systèmes d'assimilation (3DEnVar puis à terme 4DEnVar ; Montmerle et al., 2018 ; Destouches et al., 2023) permettent de mieux prendre en compte la variabilité de l'atmosphère lors de la recherche de l'état analysé. La Figure 23 illustre que les valeurs simulées de Zhh et Zdr dans la pluie, lorsque LIMA est utilisé, sont plus proches des observations (en dessous de 4 km d'altitude) lorsque la représentation de la distribution des tailles de gouttes de pluie est plus précise. Ces éléments permettent d'envisager qu'à terme, l'assimilation de ces variables polarimétriques améliore les états analysés et prévus de l'atmosphère

dans AROME-France, d'autant plus si cela est accompagné d'une augmentation de la fréquence de prise en compte des observations dans l'assimilation (une prise en compte toutes les 15 min est envisagée, alors qu'aujourd'hui, celle-ci a lieu toutes les heures).

Les travaux en cours consistent à évaluer : (i) la capacité de l'opérateur d'observation à simuler les signatures polarimétriques observées dans les orages sévères (en particulier les colonnes de Z_{dr} qui sont un proxy des courants ascendants), (ii) quelles options microphysiques (schéma ICE3 à un moment, LIMA à deux moments avec ou sans grêle explicite) permettent de mieux reproduire les signatures observées et (iii) quantifier les écarts entre observations et simulations. Ces travaux sont préparatoires à de futures expériences longues d'assimilation dans AROME-France. Un préalable à l'assimilation directe de ces variables polarimétriques dans le système AROME-France, dans le cadre exposé Section 2.1.3, sera de développer un opérateur d'observation doté de ses modèles tangent linéaire et adjoint. Pour ce faire, des méthodes exploitant l'intelligence artificielle pourraient être envisagées, en se basant sur l'opérateur détaillé existant (Augros et al., 2018) pour construire une base d'apprentissage.

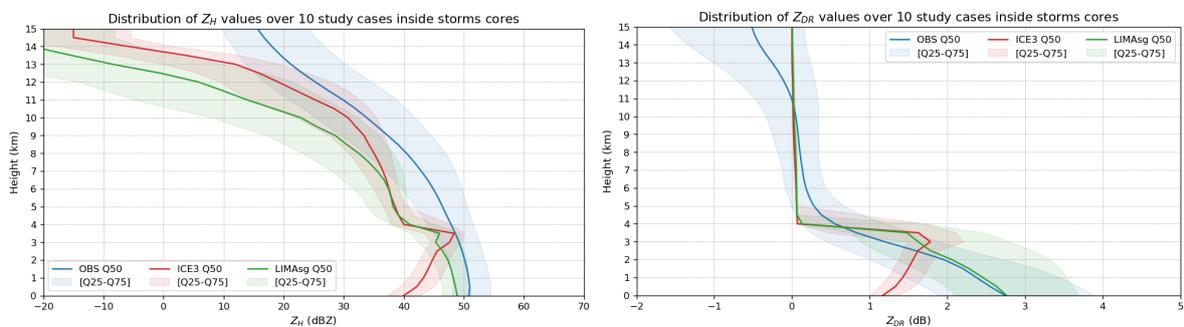


Figure 23 : Distribution des profils verticaux de réflectivité (Z_{hh}) et réflectivité différentielle (Z_{dr}) au sein de cellules convectives : observations et simulations avec AROME-France utilisant le schéma microphysique opérationnel ICE3 (rouge) ou en développement LIMA (vert). Source : thèse de Cloé David (2022–2025), DESR/CNRM/GMME.

2.2.5 Vers l'exploitation d'observations aux interfaces pour l'assimilation couplée

Un certain nombre d'observations utilisées aujourd'hui dans les chaînes de prévisions ARPEGE et AROME sont caractérisées par un contenu en information aux interfaces des différents compartiments du système Terre. À titre d'exemple, et de façon non exhaustive :

- Les mesures des radiomètres passifs dans le domaine des micro-ondes, en particulier en dessous de 18 GHz, sont sensibles à l'humidité dans le sol, la végétation, la température de la surface de la mer et à la glace de mer.
- Les diffusiomètres traditionnellement utilisés pour la mesure des vents de surface sont également sensibles à l'humidité dans le sol, la végétation, la température de la surface de la mer et à la glace de mer.
- Les observations de ces mêmes diffusiomètres sont sensibles à l'état de la mer, ainsi la prise en compte des sorties d'un modèle de vagues dans l'assimilation des données de diffusiomètres pourrait améliorer l'analyse des vents de surface.
- Les mesures des sondeurs passifs dans le domaine infrarouge, en particulier les canaux de surface des sondeurs hyperspectraux, sont sensibles à la température de surface et à la végétation.

- Ces mêmes instruments dans l'infrarouge possèdent également une forte sensibilité à un nombre important de composés atmosphériques (gaz et aérosols).
- Les mesures des futurs sondeurs dans le domaine micro-ondes submillimétriques permettront d'observer les plus grosses particules des panaches volcaniques.

Une priorité forte pour Météo-France est la meilleure initialisation des conditions de surface dans les modèles de PNT, celle-ci étant un milieu très hétérogène nécessitant des conditions initiales raffinées. La méthode d'assimilation utilisée actuellement en opérationnel est une interpolation optimale combinant une ébauche et des observations in-situ, assurée par le logiciel CANARI. Ce logiciel étant de conception ancienne, il limite les possibilités d'ajout de nouvelles observations, notamment spatiales. Ainsi, comme évoqué dans la section 2.1.4, Météo-France s'est lancée dans une rénovation algorithmique ambitieuse visant à remplacer l'interpolation optimale bidimensionnelle par une assimilation basée sur les ensembles de type 2DEnVar. Ces travaux font l'objet de la FCPLR de de Sophie Marimbordes (DESR/CNRM/GMAP) et s'inscrivent dans le cadre du projet MASCOT (Modélisation et Assimilation des Surfaces Continentales pour l'Opérationnel). Le 2DEnVar, associé à des techniques ensemblistes de propagation des incréments dans les couches profondes du sol, permettra d'enrichir les analyses de surface d'ARPEGE et d'AROME en observations, en particulier celles évoquées plus haut sensibles à l'humidité des sols (radiomètres micro-ondes basses fréquences et diffusiomètres) et à la température de surface (radiomètres infrarouge).

Pour aller plus loin, dans le cas d'un modèle de prévision intégré (« Système Terre »), qui serait initialisé grâce à un système d'assimilation couplé comprenant toutes les interfaces entre atmosphère, océan, surfaces continentales, composition atmosphérique, ces observations aux interfaces seraient exploitées à leur plein potentiel.

À Météo-France, les 3 projets transverses AROBASE (Application de la Recherche à l'Opérationnel pour l'assemblage d'AROME avec des Systèmes Environnementaux, présenté au COMSI 2023), ACCALMIE (Approche Coordonnée pour la Chimie et les Aérosols dans Les Modèles du CNRM, Inline et offlinE) et MASCOT évoqué précédemment, ont pour ambition d'avancer dans cette direction. Cet objectif étant un objectif de long terme, des travaux intermédiaires sont menés à Météo-France afin de bénéficier du contenu en information de certaines observations aux interfaces sans attendre les couplages complets et/ou multiples évoqués plus haut. Ces travaux intermédiaires reposent sur des méthodes de « couplage asynchrone » avec plusieurs étapes, dont deux exemples sont décrits ci-dessous.

Le premier exemple concerne le couplage atmosphère/surface. Le LERMA et Météo-France ont été pionniers dans l'exploitation des canaux de surface d'instruments de sondage pour l'estimation de la température et de l'émissivité de surface. Ces travaux ont d'abord été conduits dans le domaine spectral des micro-ondes (Prigent et al., 1997 ; Karbou et al., 2005). Ils ont ensuite été généralisés à l'infrarouge avec l'inversion de la température de surface, d'abord pour les imageurs avec peu de canaux (thèse de Stéphanie Guedj soutenue en 2011, Guedj et al., 2011) puis plus tard aux instruments hyper-spectraux de type IASI. Cependant, ces informations restituées, qu'elles soient de type émissivité ou bien température de surface, étaient conservées dans l'analyse atmosphérique sans être transmises à l'analyse de surface à proprement parler. Il est important de préciser que la température de surface restituée était et est encore aujourd'hui utilisée pour les calculs de transfert radiatif des canaux de sondage en température et humidité de ces instruments, ceci permettant d'améliorer les analyses atmosphériques.

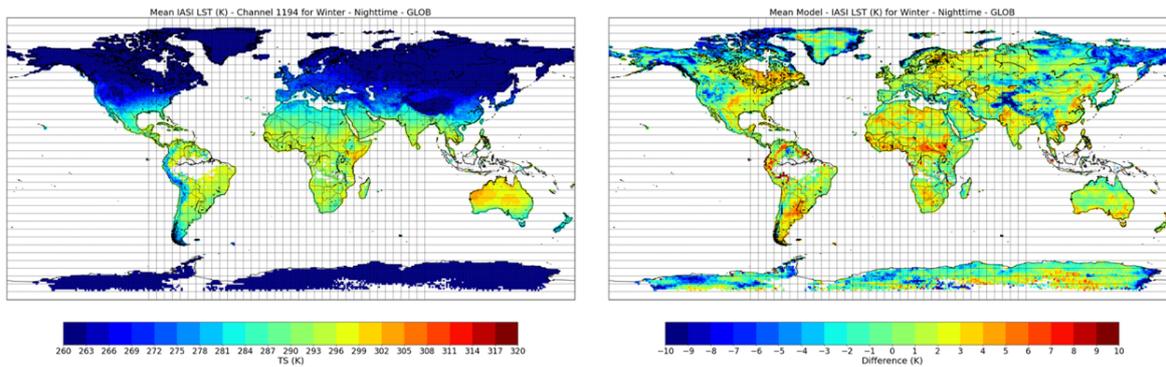


Figure 24 : (Gauche) Exemple de moyenne des températures de surface observées par IASI à bord des satellites Metop sur une période de 3 mois de janvier à mars 2023 et (droite) différences moyennes avec les températures de surface du système ARPEGE. Source : DESR/CNRM/GMAP.

Dans le cadre de travaux autour de l'instrument IASI soutenus par le CNES, des études ont été menées à Météo-France afin de réaliser un « couplage asynchrone ». L'idée est que le contenu en information à l'interface atmosphère/surface soit exploité dans l'analyse de surface, en cohérence avec l'analyse atmosphérique. Dans le cas décrit ici, les deux étapes sont : (i) estimer une température de surface avec un canal « fenêtre » de IASI, (ii) utiliser cette température de surface restituée dans l'analyse de surface.

Les premières études en ce sens dans AROME-France ont mis en évidence le potentiel de ce couplage (Sassi et al., 2023). Ces travaux sont en train d'être étendus au système ARPEGE avec le soutien du CNES (APR IASI-PNT) ; la Figure 24 montre un exemple de moyenne des températures de surface observées par IASI à bord des satellites Metop sur une période de 3 mois de janvier à mars 2023 (figure du haut), et des différences moyennes avec l'analyse de surface d'ARPEGE sur la même période (figure du bas). On peut voir que si les différences sont relativement faibles dans les zones où beaucoup d'observations *in situ* contraignent l'analyse de surface, ces différences peuvent atteindre plus de 5 °C dans certaines zones géographiques comme les zones de montagne. Ces études se poursuivent afin d'évaluer l'impact de ce premier couplage indirect sur la qualité des prévisions du système ARPEGE.

Un second exemple de « couplage asynchrone » mené à Météo-France est en lien avec le couplage entre les variables d'état de l'atmosphère et la composition chimique atmosphérique. Les canaux de sondage dans le domaine infrarouge sont pour certains caractérisés par des sensibilités à plusieurs composés atmosphériques. Ainsi, un canal intéressant pour le sondage en température et en humidité peut aussi présenter une sensibilité à l'ozone. Des travaux à Météo-France ont permis d'utiliser des champs d'ozone plus réalistes que les valeurs utilisées par défaut (profil climatologique) dans les calculs de transfert radiatif du logiciel RTTOV pour l'assimilation des observations de sondage dans l'infrarouge (Coopmann et al., 2018, 2020).

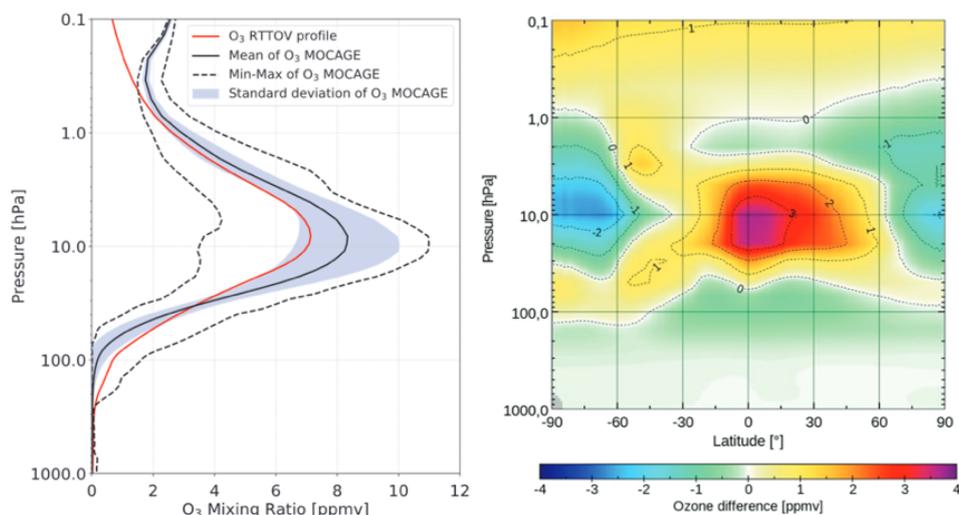


Figure 25 : (Gauche) Profil moyen d’ozone utilisé dans le code de transfert radiatif RTTOV et prévu par le modèle MOCAGE. (Droite) Moyenne zonale des différences entre le profil moyen de RTTOV et les prévisions MOCAGE pour le mois de juillet 2016. Source : Coopmann et al. (2020).

Le « couplage asynchrone » pourrait ainsi être le suivant : (i) les canaux des données IASI seraient assimilés dans un modèle de chimie-transport comme le modèle MOCAGE, (ii) le champ d’ozone prévu par le modèle de chimie-transport serait utilisé dans le code de transfert radiatif RTTOV pour l’assimilation des données IASI dans le modèle d’atmosphère. La Figure 25 à gauche montre la différence entre le profil climatologique d’ozone utilisé aujourd’hui dans le logiciel RTTOV et, à droite, la variabilité géographique de ce champ, représenté par bandes de latitude. La Figure 5 présentée en introduction sépare en effet les impacts des canaux d’ozone d’autres canaux de sondage ; ceux-ci sont aujourd’hui neutres pour la qualité de la prévision ARPEGE (voire négatifs certains mois). D’après les résultats obtenus (Coopmann et al., 2018), la prise en compte d’un champ d’ozone plus réaliste devrait permettre d’améliorer ces résultats, au bénéfice des prévisions d’ARPEGE et d’AROME. Ce « couplage asynchrone » nécessite cependant un travail technique non négligeable, en particulier pour alimenter les chaînes ARPEGE et AROME avec des champs d’ozone, qui pourraient provenir soit du modèle de prévision MOCAGE, soit du modèle IFS-COMPO.

Les techniques d’assimilation ensemblistes, telles que le 3DEnVar utilisé pour AROME-France dans la chaîne en double en CY48T1, ou le 4DEnVar à l’étude pour AROME mais aussi de manière plus prospective pour ARPEGE, permettent d’explorer des couplages plus élaborés que les couplages en asynchrone. Ainsi, le projet Horizon Europe CAMAERA (impliquant le DESR/CNRM/GMGEC), permettra d’explorer l’utilisation de canaux de l’instrument hyper-spectral IASI, sensibles aux aérosols, dans un prototype d’assimilation 4DEnVar ARPEGE couplant l’atmosphère et la composition atmosphérique. Un impact potentiel serait de voir les prévisions de vent d’ARPEGE améliorées grâce à l’information sur la dynamique inférée par le transport des aérosols dans l’atmosphère.

Pour conclure sur cette section, les perspectives sont nombreuses en matière de « couplages asynchrones », travaux qui sont pour rappel préliminaires à l’assimilation couplée des différents compartiments du Système Terre. Une priorité pour les années à venir sera l’enrichissement de l’analyse de surface, en exploitant les observations aux interfaces évoquées dans le système d’assimilation 2DEnVar en cours de construction. C’est en effet cette analyse dont l’amélioration pourra bénéficier le plus rapidement à la partie atmosphérique des modèles. Ainsi, les travaux autour des observations aux interfaces vont se poursuivre dans l’infrarouge pour la température de surface et seront étendus aux micro-ondes pour l’humidité dans le sol. Une meilleure représentation de

l'humidité des sols devrait notamment bénéficier aux applications en aval exploitant les prévisions AROME-France, notamment celles permettant d'identifier les risques de feux de forêt à partir de l'état des sols et de l'état du combustible (végétation). Ces travaux autour de l'analyse de surface seront coordonnés à Météo-France dans le cadre du projet transverse MASCOT.

2.3 Synthèse sur l'exploitation des observations déjà disponibles dans nos bases

Dans cette section, nous avons présenté différents travaux de recherche sur l'utilisation des observations pour la PNT ayant pour point commun d'utiliser des observations déjà présentes dans nos bases de données, ce qui est un atout non négligeable pour que les recherches associées soient transférées vers l'opérationnel. Ces travaux sont à différents degrés de maturité : certains sont prêts pour être transférés vers l'opérationnel (niveaux de maturité scientifique et technique de 10/10) ; d'autres nécessiteront encore plusieurs années de recherche pour aboutir à une contribution bénéficiant à la qualité des prévisions. Les recherches citées sont néanmoins toutes prometteuses.

Deux tableaux de synthèse (Tableau 1, Tableau 2) sont présentés ci-dessous résumant les impacts attendus ainsi que les niveaux de maturité scientifique et technique de chacun des développements évoqués dans cette section. Le Tableau 2 rassemble spécifiquement les développements exploitant un contenu en information aux interfaces des différents compartiments du Système Terre.

Comme nous l'avons vu à travers les trois exemples de développements prêts à être transférés vers l'opérationnel (Section 2.1), l'exploitation nouvelle de différents types d'observations peut aisément mettre plusieurs années à aboutir à des résultats satisfaisants dans un cadre de recherche. La mise en place de nouvelles utilisations d'observations dans un cadre opérationnel repose actuellement sur le déploiement de chaînes en double ARPEGE et AROME. Le calendrier de déploiement de ces chaînes est l'objet d'un compromis complexe entre les contraintes des différentes directions de Météo-France impliquées, ainsi que la disponibilité de nouveaux cycles communs développés avec le CEPMMT et les partenaires du consortium ACCORD.

Au rythme actuel d'installation des dernières chaînes opérationnelles, des fenêtres de contribution aux chaînes d'environ 6 mois sont ouvertes tous les 2 ans. Les trois développements cités précédemment (données Mode-S dans le système ARPEGE, changement de méthode d'assimilation des réflectivités radar, enrichissement de l'analyse de neige grâce à un produit satellitaire) seront proposés pour la future chaîne en double en CY49T1 car ils ont un potentiel indubitable pour l'amélioration de la qualité des prévisions ARPEGE et AROME, avec une cible de déploiement opérationnel en 2025 ou 2026.

Tableau 1: Synthèse des recherches et développements autour des observations déjà disponibles dans nos bases. Sont indiqués en rouge les développements mûrs pour un déploiement dans le cadre de la chaîne CY49T1 (prochaine chaîne en double).

Famille d'observation	Type d'observations	Impact démontré / Impact potentiel	Niveau de maturité scientifique	Niveau de maturité technique	Projets structurants en cours	Projets structurants à venir
<i>In situ</i>	Données avions « Mode-S » dans ARPEGE	Fort impact sur les prévisions de vents et de température sur les prévisions d'ARPEGE (données déjà dans AROME double en CY48T1).	10	10	EMADDC (EUMETNET)	EMADDC et « Global Mode-S project » du UK Met Office
Télédéttection depuis le sol	Assimilation directe des données radars	Fort impact du changement de méthode de l'assimilation des données radars dans AROME.	10	10	DSO/CMR et EUMETNET OPERA	DSO/CMR et EUMETNET OPERA
	Données radars polarimétriques	Impact potentiel sur les événements intenses, besoin d'un schéma microphysique plus élaboré pour AROME et d'un opérateur d'observation compatible avec l'assimilation.	5	4	Thèse de Cloé David (DESR/CNRM/GMM E) 2022–2025	
Télédéttection passive depuis l'espace	Produit d'occurrence de neige	Fort impact sur l'analyse de neige d'ARPEGE et bon impact sur la prévision atmosphérique.	10	10	Thèse de FCPLR de Sophie Marimbordes sur le 2DEnVar (2022–2025)	MASCOT
	Données micro-ondes en zone nuageuse pour AROME	Bon impact potentiel sur les prévisions de précipitations.	7	7	Thèse d'Elisa Chardon—Legrand (2022–2025) financé par l'Université de Toulouse (ED SDU2E)	
	Données micro-ondes submillimétriques	Impact potentiel sur les nuages de glace.	4	7		<i>Scientific Framework</i> EUMETSAT
	Données infrarouges en zone nuageuse pour ARPEGE et AROME	Bon impact potentiel sur les prévisions de précipitations.	5	5	Thèse d'Antoine Chemouny (2023–2026) financé par le CNES et MF	
	Données dans le visible pour AROME	Bon impact potentiel sur l'initiation de la convection et sur les variables de surface.	1	1	Génération des images simulées des prévisions dans le visible (CEMS et GMAP)	
Télédéttection active depuis l'espace	Données des radars spatiaux (GPM, EarthCare, AOS)	Impact sur les prévisions de précipitations, diagnostics sur les nuages et les précipitations prévues, en soutien aux développements des modèles.	6	4	NWP SAF pour les travaux sur l'opérateur d'observation	<i>Scientific Framework</i> EUMETSAT
Tout type de données	Prise en compte des corrélations d'erreurs d'observations sur l'horizontale	Fort impact potentiel grâce à la densification potentielle de tous les types d'observation.	3	1	Thèse de FCPLR de Thomas Buey (2024–2027)	

Tableau 2: Synthèse des recherches et développements autour des observations déjà disponibles dans nos bases et qui exploitent le contenu en information aux interfaces des différents compartiments du Système Terre.

Couplage	Type d'obs	Impact démontré / Impact potentiel	Niveau de maturité scientifique	Niveau de maturité technique	Projets structurants en cours	Projets structurants à venir
Atmosphère/ surface	Données Infrarouge pour la température de surface	Bon impact potentiel sur les variables de surface et l'analyse atmosphérique.	7	6	Contrat d'Ingénieur de Recherche de Zied Sassi (APR CNES IASI) 2023–2024	MASCOT (ressources à identifier)
	Données des diffusiomètres	Impact sur l'analyse de l'humidité des sols.	1	1	Travaux non amorcés à ce jour mais amorcés dans d'autres centres	MASCOT (ressources à identifier)
	Données micro-ondes basses fréquences pour l'humidité des sols et la neige	Impact sur l'analyse de l'humidité des sols et la neige.	1	1	Travaux non amorcés à ce jour mais amorcés dans d'autres centres	MASCOT (ressources à identifier)
Atmosphère/ vagues	Données des diffusiomètres	Impact sur l'analyse des vents de surface.	1	1	Travaux non amorcés à ce jour mais amorcés dans d'autres centres	
Atmosphère/ Composition atmosphérique	Données Infrarouge et ozone réaliste	Meilleure analyse atmosphérique dans les basses grâce à une meilleure prise en compte des canaux d'ozone des sondeurs hyperspectraux.	7	4	Travaux menés à Météo-France dans le cadre de la thèse d'Olivier Coopmann soutenue en 2019.	
Atmosphère/ Composition atmosphérique	Données Infrarouge et observations des aérosols	Meilleure analyse atmosphérique des vents grâce à l'information sur le transport des aérosols.	1	1	Pas actuellement.	Projet Horizon Europe CAMAERA (2024-2026)

3. Vers l'exploitation des observations bientôt disponibles

Cette partie du document est consacrée aux observations qui seront disponibles en temps réel sous peu (3 ans maximum), et à travers une filière de distribution dont nous savons qu'elle sera exploitable dans les modèles opérationnels. Il peut s'agir d'observations *in situ*, ou bien de données de télédétection. Pour certaines d'entre elles, des travaux ont démarré de longue date à Météo-France comme présenté ci-dessous, avec par exemple les observations de surface issues des stations connectées (début des travaux en 2017 à DESR/CNRM/GMME), ou bien des observations spatiales telles que celles du sondeur hyperspectral IRS à bord du satellite Météosat Troisième Génération MTG-S (début des travaux en 2014 à DESR/CNRM/GMAP), ou encore de l'imageur d'éclairs LI à bord du satellite Météosat Troisième Génération MTG-I (début des travaux en 2017 à DESR/CNRM/GMME). Pour chaque type d'observations évoqué dans cette section, un bilan de l'état actuel des connaissances est effectué et une esquisse du chemin restant à parcourir afin d'arriver à une exploitation opérationnelle des données est proposée.

3.1 Les observations depuis la surface

Les observations depuis la surface sont précieuses pour la prévision numérique et complémentaires des observations spatiales (voir la synthèse récemment publiée par Chambon et al., 2023). Elles permettent d'effectuer des mesures dans la couche limite de différentes variables géophysiques qui présentent une forte variabilité spatiale et temporelle. La mesure de cette forte variabilité nécessite un réseau d'observations dense, qui existe d'ores et déjà dans les deux cas présentés ci-dessous.

Les travaux de Météo-France autour des stations connectées sont tout d'abord présentés ; celles-ci présentent un fort potentiel pour l'amélioration des prévisions du modèle AROME et sont en passe d'être disponibles en temps réel grâce aux efforts du CEPMMT et d'EUMETNET, efforts auxquels Météo-France est associé. Nous présentons ensuite l'amorce de travaux autour des récepteurs GNSS au sol, dont les mesures sont déjà exploitées en opérationnel aujourd'hui, mais dont l'utilisation pourrait être fortement améliorée dans l'avenir.

3.1.1 Les observations d'opportunité issues des stations connectées

Près de la surface, les réseaux de stations météorologiques conventionnelles déployés et entretenus par les services météorologiques nationaux (SMN) sont loin de réaliser des observations à l'échelle spatiale de nombreux phénomènes météorologiques, dont certains à très fort impact comme les orages. Une solution pour pallier ce manque d'observations pourrait venir d'observations dites d'opportunité, car existant indépendamment des SMN. Une partie de ces observations sont issues de la science citoyenne, autrement appelée observation participative. Cette science citoyenne se développe car un nombre croissant d'objets dotés de capteurs météorologiques sont désormais connectés à Internet via des réseaux filaires ou sans fil (Bluetooth, Wi-Fi, téléphonie mobile, réseaux étendus à basse consommation comme Sigfox ou LoRaWAN, etc.). La mise en réseau de ces objets dits connectés est appelée Internet des Objets (ou *IoT* pour *Internet of Things*). Ces objets connectés, effectuant des observations automatisées, peuvent être divisés en trois grandes familles : (1) les stations personnelles ou agricoles connectées installées par des particuliers ou exploitants agricoles, aussi appelées mini-stations ou stations amateur, (2) les véhicules connectés et (3) les smartphones, tablettes et leurs accessoires. Les recherches à Météo-France pour l'exploitation de ces observations

en PNT concernent la première famille, les autres sont présentées à la Section 4. Les travaux sont coordonnés à Météo-France entre tous les services par l'intermédiaire d'un plan d'action sur ces données d'opportunité.

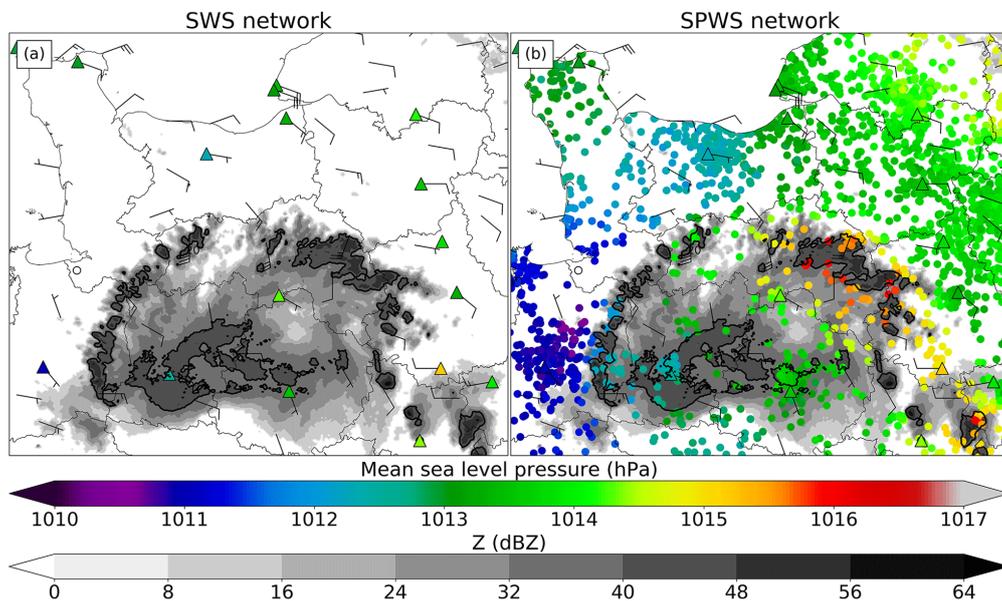


Figure 26 : Observations de réflectivité de la mosaïque radar nationale de Météo-France superposées aux observations de pression réduite au niveau de la mer issues (a) des stations conventionnelles de Météo-France et (b) des stations conventionnelles combinées aux stations personnelles connectées, au passage d'un système orageux de méso-échelle comprenant un écho arqué, et se propageant vers la région Normandie, le 26 mai 2018 à 18:15 UTC. Les réflectivités dépassant 40 dBZ sont entourées en noir. Source : Mandement et Caumont (2020).

Les observations issues des stations personnelles ou agricoles sont concentrées puis diffusées par de multiples acteurs : des fabricants ou vendeurs de stations (Netatmo, Davis Instruments, Sencrop, Weenat, etc.), des associations de passionnés de météorologie (réseau StatIC d'Infoclimat décrit par Garcelon et al. (2023), réseau ROMMA, etc.), des entreprises du secteur de la météorologie (Weather Underground, Météociel, Weathercloud, etc.), des SMN (*Weather Observation Website* du UK Met Office, *Citizen Weather Observing Program* de la NOAA, etc.). Ces stations permettent d'observer les premiers mètres de l'atmosphère à haute résolution spatiale : par exemple lors de 4 journées de l'année 2018, le nombre de stations actives du réseau Netatmo, réseau le plus dense en France métropolitaine, dépassait d'environ un facteur 40 celui des stations conventionnelles (Mandement et Caumont, 2020 ; dans le cadre d'une thèse de FCPLR). La période entre deux observations, souvent inférieure ou égale à 10 min, est proche de celle des stations conventionnelles françaises qui est de l'ordre de 1 min, et inférieure à celle entre deux réseaux du cycle d'assimilation d'AROME-France (1 h).

Toutefois, la qualité des observations des stations personnelles ou agricoles ne répondant généralement pas aux standards édictés par l'OMM, est très inégale (qualité variable des capteurs physiques, environnement d'installation très hétérogène, maintenance variable, etc.). Plusieurs méthodes automatiques de contrôle de qualité ont été développées dans la littérature (ex : Båserud et al., 2020). Parmi elles, l'algorithme développé à Météo-France contrôle les observations de pression de surface, température et humidité relative vis-à-vis des observations des stations conventionnelles. Une fois contrôlées, et en complément des observations de stations conventionnelles, ces observations de stations personnelles apportent un bénéfice à l'observation près de la surface de variations de pression, de température et d'humidité relative associées à des phénomènes

météorologiques comme les orages (Mandement et Caumont, 2020, 2021 ; Caumont et al., 2021), ou associées à la propagation d'ondes de gravité qui peuvent jouer le rôle d'initiateur de la convection profonde atmosphérique (Lac et al., 2022). Dans les villes, où la densité d'observations est la plus importante, elles permettent d'observer la variabilité des températures à l'échelle de quartiers (thèse d'Éva Marquès, 2023). Des structures météorologiques partiellement visibles ou invisibles jusqu'alors avec les observations de stations conventionnelles seules sont détectées (Figure 26, Figure 27 et Figure 28). L'utilisation des observations de stations personnelles permet désormais d'évaluer le réalisme des prévisions des modèles numériques opérationnels ou de recherche à des échelles spatiales inédites près de la surface (Figure 29). Enfin, d'autres variables observées par ces stations, comme les cumuls de précipitations, sont aussi très prometteuses (Caumont et al., 2021), et font l'objet de travaux actifs à l'étranger dont nous suivons l'évolution (réseau COST Opensense).

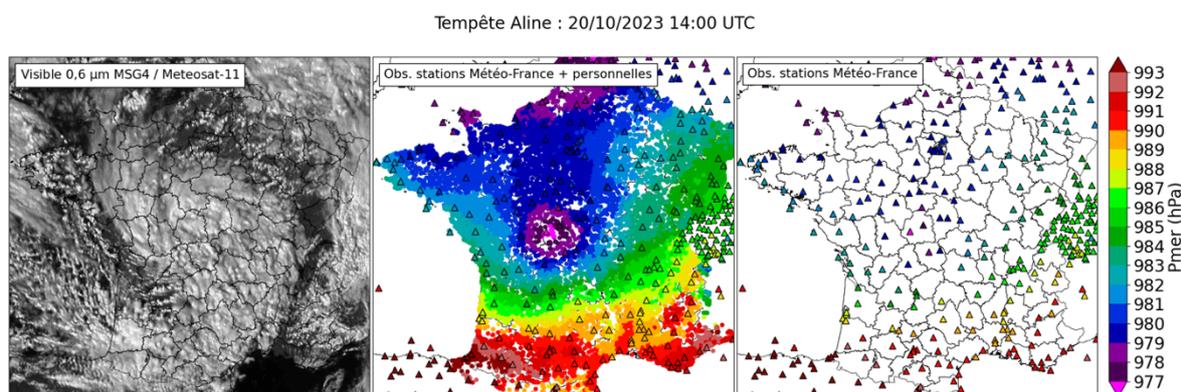


Figure 27 : Passage de la tempête Aline en France métropolitaine le 20 octobre 2023 à 14:00 UTC. (a) Enroulement nuageux observé par le canal visible 0,6 μm du satellite géostationnaire MSG4 (b, c) Observations de pression réduite au niveau de la mer issues (b) des stations personnelles combinées au réseau de stations conventionnelles et (c) des stations conventionnelles seules. En combinant les réseaux, on distingue de façon très précise la localisation, la forme, et les gradients de pression autour du minimum dépressionnaire. Source : DESR/CNRM/GMME.

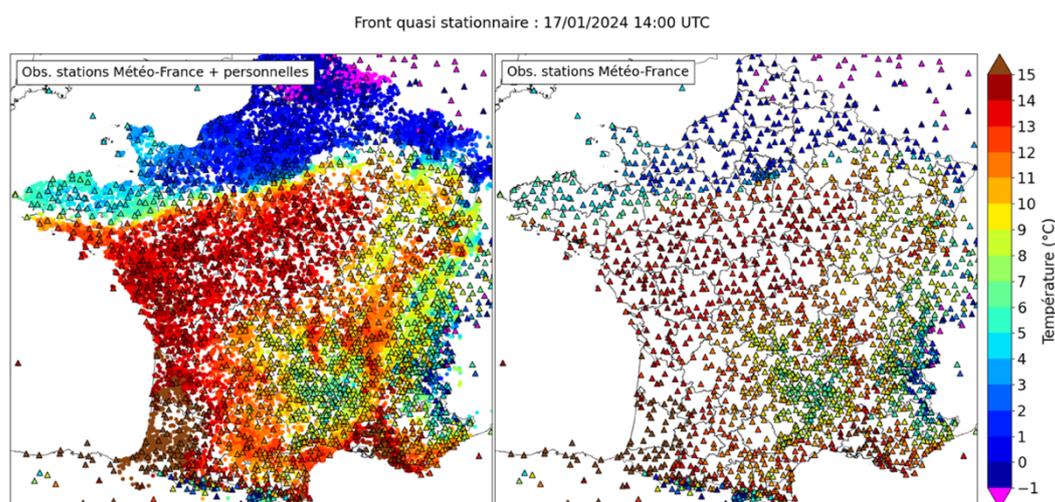


Figure 28 : Déplacement sur le nord de la France métropolitaine d'un front quasi stationnaire provoquant des phénomènes hivernaux (neige, verglas) le 17 janvier 2024 à 14:00 UTC : observations de température à environ 1,5 m issues (a) des stations personnelles combinées au réseau de stations conventionnelles et (b) des stations conventionnelles seules. En combinant les réseaux, on distingue de façon très précise la localisation du front et les différences de température de part et d'autre du front. Source : DESR/CNRM/GMME.

Ces travaux ont ouvert la voie à des expériences d'assimilation des observations issues de stations personnelles dans le système d'assimilation actuel 3D-Var et le système 3DEnVar en cours de test du modèle opérationnel AROME-France dans le cadre de la thèse de FCPLR d'Alan Demortier (2021–2024). Des contrôles de qualité, adaptés des précédents en utilisant les informations issues de prévisions à courte échéance (ébauches) ont été développés. Des expériences d'un mois d'assimilation d'observations de pression de surface (la variable assimilée est le géopotential à la pression observée), ont été menées.

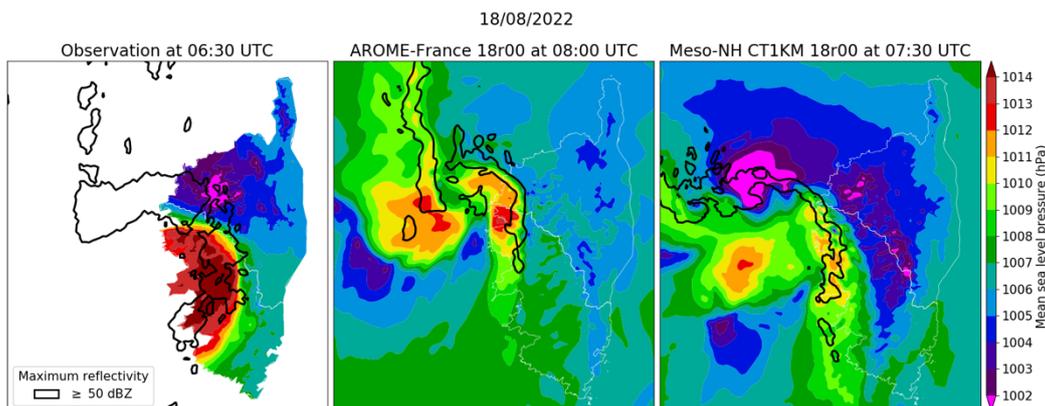


Figure 29: Pression réduite au niveau de la mer (couleurs) et réflectivité maximale sur la verticale dépassant 50 dBZ au moment de l'arrivée du violent système orageux du 18 août 2022 en Corse issues (a) des observations à 06:30 UTC, (b) de la prévision à 8 h d'échéance par le réseau opérationnel du 18 août 2022 à 00:00 UTC d'AROME-France et (c) de la prévision à 7,5 h d'échéance par une configuration du modèle de recherche Mésos-NH. Les observations de réflectivité sont issues de la mosaïque ODYSSEY d'OPERA et les observations de pression sont issues d'une interpolation spatiale des stations personnelles et des stations conventionnelles de Météo-France, réalisée uniquement sur terre. Source : DESR/CNRM/GMME.

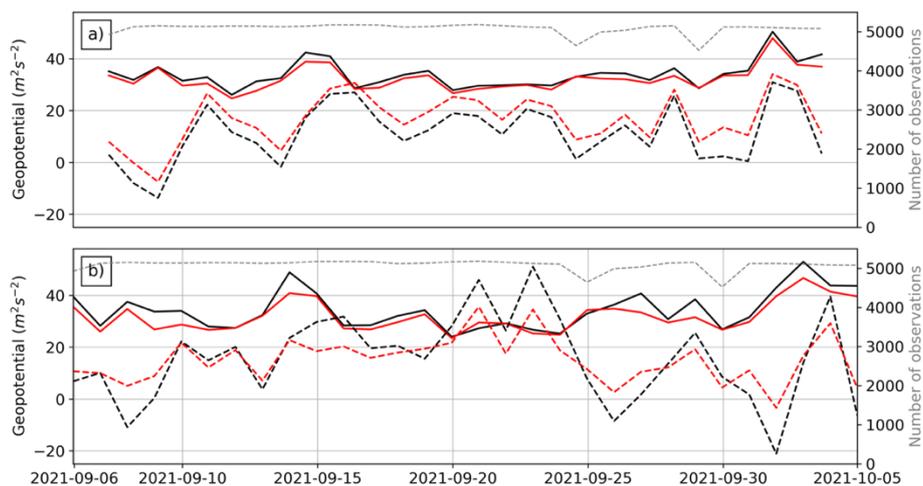


Figure 30: Moyenne (traits tiretés) et écart-type (traits pleins) des différences entre observation et prévision de géopotential à 1 h d'échéance du système AROME-France (à la position de l'observation), en moyenne sur les 24 réseaux du cycle d'assimilation de chaque journée d'une période d'étude d'1 mois de septembre à octobre 2021. Plus les moyennes et les écarts-types sont proches de 0, meilleure est l'ébauche. Expérience avec le système d'assimilation (a) 3D-Var et (b) 3DEnVar dans une configuration opérationnelle (noire) et en assimilant en plus les observations de pression des stations personnelles (rouge). Source : Demortier et al. (2024).

L'étude des différences entre observation et prévision de géopotentiel à 1 h d'échéance, appelée OmB, illustrée par la Figure 30, révèle une amélioration quasi systématique des écarts-types des OmB (traits pleins) dans les deux expériences et une légère amélioration de la moyenne des OmB (traits tiretés), cette fois seulement dans l'expérience 3DEnVar. Ainsi, le bénéfice apporté par l'assimilation de ces nouvelles observations (courbes rouges pleines par rapport aux courbes noires pleines) semble substantiellement varier suivant la capacité du système d'assimilation à introduire dans l'analyse des structures spatiales de fine échelle, ce qui est permis par les réglages du système 3DEnVar (Figure 30b).

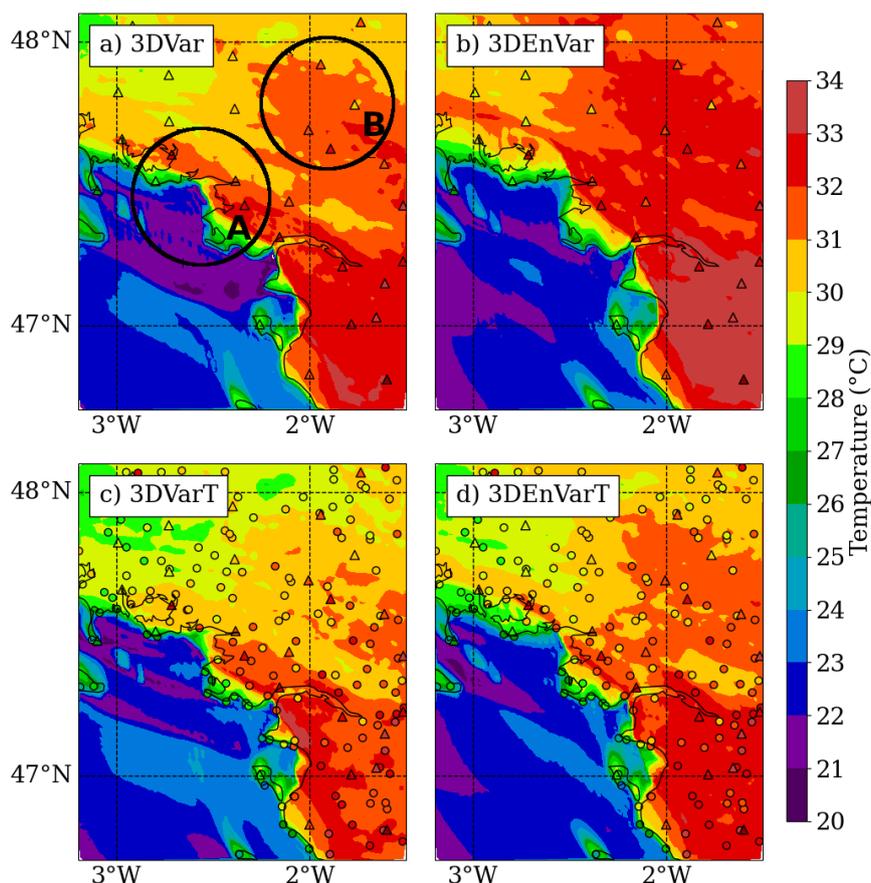


Figure 31 : Analyses de température au premier niveau atmosphérique du système AROME-France (niveau 90, à environ 5 m au-dessus du relief) le 7 septembre 2021 à 15:00 UTC sur les Pays de la Loire. Les observations de température à 1,5 m des stations conventionnelles sont pointées par des triangles et celles des stations personnelles par des ronds. Ces analyses diffèrent par le schéma d'assimilation utilisé : (a, c) 3D-Var et (b, d) 3DEnVar, et les observations des stations de surface utilisées : (a, b) stations conventionnelles seules et (c, d) stations conventionnelles et personnelles. Source : thèse de FCPLR d'Alan Demortier, DESR/CNRM/GMME.

Des expériences dans le même cadre expérimental d'assimilation, cette fois des observations de température et d'humidité relative issues des stations personnelles, ont été réalisées. Ces travaux prolongent ainsi les travaux idéalisés (sans assimilation des stations conventionnelles) de Sgoff et al. (2022) dans le modèle allemand ICON-D2. On peut voir Figure 31 les modifications induites par l'assimilation d'observations de température à 1,5 m plus denses sur l'analyse de température au premier niveau d'AROME-France (5 m) avec deux systèmes d'assimilation différents. On constate des améliorations faibles mais significatives des erreurs quadratiques moyennes des OmB de la variable assimilée (température ou humidité relative) avec le système 3DEnVar. Des expériences d'assimilation

conjointe des trois variables (pression de surface, température et humidité relative) vont désormais être réalisées.

Cette exploitation en PNT de multiples variables issues des observations participatives devrait permettre à un très grand nombre d'acteurs de contribuer à l'observation météorologique, dans la lignée des réseaux d'observation bénévoles établis en France depuis 1853. En effet, sous réserve de fournir des observations de qualité suffisante, celles-ci pourraient être très largement utilisées dans des produits d'observation et assimilées pour améliorer les analyses des modèles de PNT.

Météo-France dispose actuellement d'un flux d'observations de stations personnelles principalement situées en France métropolitaine, en temps réel, issues de plusieurs sources et utilisables pour des usages non commerciaux. Pour disposer d'observations le plus rapidement possible après leur réalisation, sur toute l'Europe, pour tous types d'usages, Météo-France participe au projet pilote *IoT observations for NWP* du CEPMMT et d'EUMETNET, lancé fin 2023, dont les objectifs sont d'établir des liens avec les producteurs d'observations et des flux de données d'objets connectés (incluant des stations connectées), en temps réel.

3.1.2 Les observations issues du réseau de récepteur GNSS à la surface

Concernant la mesure de l'humidité dans les basses couches de l'atmosphère, un type d'observations se révèle être précieux pour la qualité actuelle des prévisions AROME et ARPEGE. Il s'agit des observations des récepteurs GNSS à la surface. La Figure 32 à droite montre le réseau exploité actuellement dans l'assimilation du système AROME-France. Ces données sont collectées, traitées et formatées par une chaîne commune par EUMETNET à travers le programme E-GVAP puis redistribuées aux États membres en temps réel.

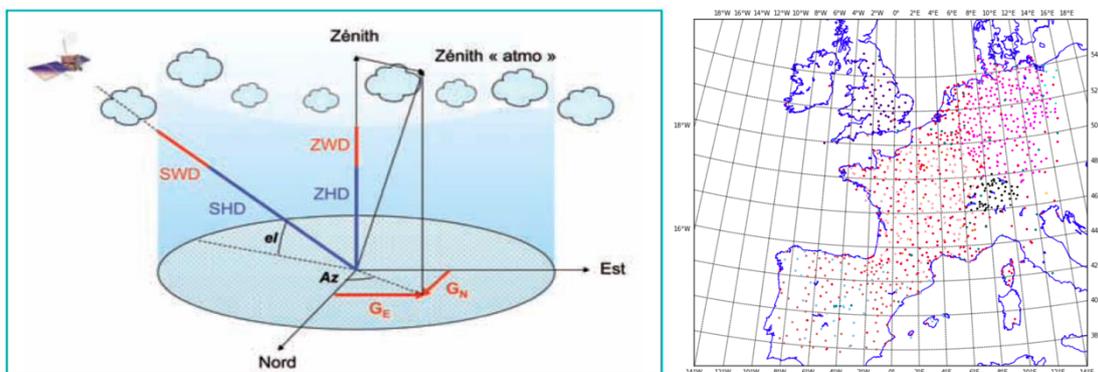


Figure 32 : (Gauche) Schéma de principe illustrant la mesure acquise par les récepteurs GNSS au sol. (Droite) Carte de densité des observations GNSS sol actuellement assimilées dans le système AROME-France. Source : DIROP/COMPAS.

Chaque récepteur peut potentiellement recevoir les signaux GNSS d'une ou plusieurs constellations émettrices (constellation américaine : GPS, constellation européenne : GALILEO, constellation russe : GLONASS, constellation chinoise : BEIDU). La mesure assimilée est un délai de transmission du signal GNSS à travers l'atmosphère : le retard pris par le signal le temps d'arriver au récepteur a une variabilité principalement due à la vapeur d'eau sur son chemin. La Figure 32 à gauche illustre le fait que le signal peut arriver de différents récepteurs avec un chemin plus ou moins oblique par rapport au zénith. Historiquement, lors de la mise en commun des besoins pour l'assimilation de données

opérationnelle, la communauté scientifique a choisi de transmettre les données GNSS sol sous la forme intégrée de délai zénithal total, en ramenant l'information issue de plusieurs délais obliques en une seule information de délai dont la variation est liée à l'évolution de l'humidité en basse couche dans l'atmosphère. C'est cette information qui est aujourd'hui reçue dans les bases de données de Météo-France, grâce au programme E-GVAP d'EUMETNET.

Avec l'amélioration de la résolution spatiale des modèles de prévision numérique, et la maturité scientifique acquise dans l'assimilation de délais zénithaux totaux, la communauté scientifique européenne s'interroge aujourd'hui sur l'exploitation plus complète des mesures de ces capteurs GNSS. Deux possibilités sont considérées : (i) compléter l'assimilation des délais zénithaux par l'assimilation de gradients troposphériques permettant d'inférer une information sur les structures fines d'humidité dans les basses couches, (ii) remplacer l'assimilation des délais zénithaux par une assimilation des délais obliques, prenant en compte la pleine géométrie de la mesure. Un projet de recherche piloté par EUMETNET, et auquel Météo-France contribue devrait permettre de trancher entre les deux options. Celle privilégiée par Météo-France aujourd'hui est la première option qui permet une continuité dans l'assimilation des délais zénithaux, et qui serait complétée par la nouvelle information des gradients troposphériques.

Il est visé dans ce projet EUMETNET de comparer les deux options en termes d'impact sur les prévisions à méso-échelle, avec l'objectif de faire un choix au niveau européen dès l'année 2024. Suivant le choix effectué, les futures données produites par EUMETNET comporteront la nouvelle information, soit de gradients troposphériques, soit de délais obliques.

3.2 Les observations depuis l'espace

Sous l'égide des programmes mis en œuvre par les agences spatiales notamment pour répondre aux besoins exprimés par les SMN, le système d'observation de la Terre depuis l'espace est en perpétuel renouvellement. Simultanément, une amélioration continue de la capacité des systèmes de prévision à ingérer ces nouvelles observations satellitaires est ainsi nécessaire afin d'améliorer les prévisions météorologiques, aux bénéfices des usagers. La Figure 33 montre une frise temporelle des lancements de satellites et instruments dont nous devons nous préparer à intégrer les données, afin de maintenir à l'état de l'art les systèmes de prévision ARPEGE et AROME dans les prochaines années.

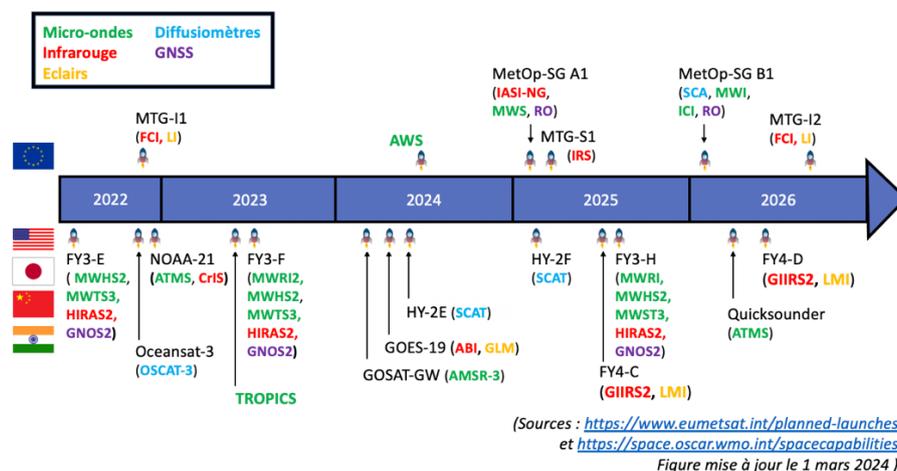


Figure 33 : Frise temporelle présentant les dates de lancement de différents satellites d'intérêt pour la PNT opérationnelle, telles que connues à ce jour. Ces dates sont sujettes à des changements fréquents et doivent régulièrement être mises à jour.

Au niveau européen, le premier fournisseur de données satellitaires est l'agence EUMETSAT. Cette organisation européenne a amorcé le renouvellement de l'intégralité de sa flotte de satellites en orbite basse (LEO, EUMETSAT Polar System Seconde Génération — EPS-SG) et en orbite géostationnaire (GEO, Météosat Troisième Génération — MTG), en déployant des technologies nouvelles et très prometteuses pour la qualité de la PNT. EUMETSAT s'appuie sur les développements instrumentaux de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) ainsi que d'autres partenaires tels que le Centre National d'Études Spatiales (CNES), le *Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt* (DLR), et inscrit son action en partenariat avec Copernicus, le programme d'observation de la Terre de l'Union Européenne.

Si la programmation des missions spatiales des États-Unis pour la météorologie semble montrer un ralentissement par rapport aux dernières années, celle de la Chine est en plein essor, avec une programmation très dense et sur tous les types d'instruments pertinents pour la PNT. Un bon exemple est l'instrument GIIRS, lancé en 2017 à bord du satellite géostationnaire FY-4A, qui se trouve être le premier instrument hyperspectral infrarouge à bord d'un satellite géostationnaire, précurseur d'IRS présenté ci-dessous.

Au niveau international, l'OMM définit les bonnes pratiques d'échanges de données d'observations entre États depuis des décennies. Ainsi les autres acteurs nord-américains et asiatiques jouent aussi un rôle clé en partageant, tout comme les Européens, leurs données d'observation. Actuellement, les données des satellites européens ou américains deviennent généralement disponibles entre 3 et 6 mois après le lancement. Les données des satellites chinois arrivent plutôt dans nos bases par l'intermédiaire d'EUMETSAT environ 1,5 ans après leur lancement grâce à des accords spécifiques de rediffusion des données.

La migration des systèmes d'observations MSG vers MTG et Metop vers EPS-SG représente un défi pour Météo-France car il est nécessaire (i) d'adapter toutes nos chaînes de traitement aux nouveaux flux de données, même pour les instruments présentant une continuité avec un instrument existant, (ii) de s'adapter aux nouvelles fonctionnalités de MTG et EPS-SG afin que les systèmes ARPEGE et AROME en bénéficient rapidement.

Concernant les nouveaux instruments passifs dans les domaines infrarouge et micro-ondes, Météo-France bénéficie d'un atout important grâce à sa contribution au SAF Prévision Numérique d'EUMETSAT et au logiciel de transfert radiatif RTTOV. Le DESR/CNRM/CEMS joue un rôle central dans le développement de ce logiciel qui se trouve être au cœur des opérateurs d'observation utilisés pour ces sondeurs.

Le Tableau 3 liste les instruments de MTG-I, MTG-S, EPS-SG-A et EPS-SG-B que nous considérons dans nos chaînes de PNT. Il est important de noter que certains instruments ne sont pas les héritiers d'un instrument précédent sur lequel nous pouvons directement nous baser pour la filière d'assimilation opérationnelle. Il s'agit de l'imageur d'éclairs LI (*Lightning Imager*), du sondeur infrarouge IRS (*Infrared Sounder*) et de l'imageur de nuages de glace ICI (*Ice Cloud Imager*).

Malgré les retards importants de passage en opérationnel de MTG-I1 (lancement fin décembre 2022), liés à divers problèmes techniques rencontrés par EUMETSAT et l'ESA, le premier des trois instruments dont nous recevrons les données sera l'imageur d'éclairs LI. Des travaux préparatoires à l'assimilation des données de MTG-I/LI ont démarré à Météo-France dès 2017, avec le soutien du CNES. Deux thèses de doctorat successives à Météo-France (DESR/CNRM/GMME), co-financées par le CNES et Météo-France et par la Région Occitanie et Météo-France, ont permis (i) de monter en compétence sur l'utilisation des données d'éclairs à partir des mesures en surface du réseau Météorage, (ii) de développer un opérateur d'observation pertinent pour les données MTG/LI, (iii) de mener des

expériences d'assimilation AROME-France dans un cadre de recherche (Erdmann et al., 2023 ; Combarrous et al., 2024).

Tableau 3: Synthèse des instruments à bord de MTG-I, MTG-S, EPS-SG A et EPS-SG B qu'il est prévu d'exploiter dans les systèmes d'assimilation ARPEGE et AROME. Les nouveaux instruments, ne prenant pas la suite d'instruments désignés dans la colonne héritage (c'est-à-dire correspondant à la génération actuelle d'instruments), sont indiqués en bleu.

Satellite	Nom de l'instrument	Héritage	Usage actuel en PNT de l'instrument « héritage »	Usage à venir en PNT
MTG-I	FCI	SEVIRI	Sondage en température et vapeur d'eau dans la troposphère en zone de ciel clair à basse résolution sur la verticale et haute cadence temporelle.	Sondage en température et vapeur d'eau dans la troposphère en zone de ciel clair à basse résolution sur la verticale et haute cadence temporelle (10 min) et sondage du sommet des nuages.
	LI	/	/	Convection, assurera une bonne complémentarité avec les radars dans AROME-France, en assurant une résilience de l'assimilation sur terre et une complémentarité de couverture sur océans.
MTG-S	IRS	/	/	Température et vapeur d'eau à haute résolution spatiale, haute résolution verticale, et à haute cadence temporelle (30 min sur la zone Europe), en zone de ciel clair et au-dessus des nuages.
EPS-SG A	IASI-NG	IASI	Sondage en température et vapeur d'eau à haute résolution sur la verticale en zone de ciel clair et au-dessus des nuages.	Température et vapeur d'eau à plus haute résolution sur la verticale que IASI, en zone de ciel clair et au-dessus des nuages.
	MWS	MHS et AMSU-A	Sondage en température et vapeur d'eau par tout type de temps.	Sondage en température et vapeur d'eau par tout type de temps avec une meilleure précision que AMSU-A et MHS.
EPS-SG B	SCA	ASCAT	Estimation des vents de surface par tout type de temps.	Estimation des vents de surface par tout type de temps avec une meilleure précision que ASCAT.
	MWI	MADRAS (Megha-Tropiques)	/	Sondage des nuages et des précipitations, en particulier des précipitations intenses.
	ICI	/	/	Sondage des nuages de glace.
EPS-SG A et B	RO	GRAS	Sondage de la température dans la stratosphère et la haute troposphère.	Sondage de la température dans la stratosphère et la haute troposphère avec une meilleure précision que GRAS.

La Figure 34 illustre, sur un cas de convection intense dans le sud de la France et sur la Corse, l'impact potentiel de MTG-I/LI. Dans la prévision de référence sans données d'éclairs (figure du milieu), l'intensité de la convection est sous-estimée et présente une extension horizontale trop faible. Dans le cas d'une prévision intégrant des données d'éclairs (Météorage en attendant la disponibilité des données MTG-I/LI), la convection est beaucoup plus intense (voire un peu trop intense) et présente une extension horizontale plus réaliste. Il sera nécessaire d'avancer sur les réglages de la filière d'assimilation des éclairs avec les données MTG/LI réelles ; cela étant, les résultats obtenus à Météo-France montrent le potentiel de ces données en complément des observations radars pour AROME-France. Il faut noter que l'opérateur d'observation utilisé pour le moment a des bases physiques, mais un opérateur d'observations statistique à base d'intelligence artificielle pourrait être construit dans le cadre d'un projet Horizon Europe nommé MINERS soumis récemment (*Maximising the Impact of New European Satellites*). Ces travaux sont pionniers à méso-échelle, et complémentaires à ceux menés au CEPMMT pour l'assimilation à plus grande échelle dans le modèle IFS (Lopez, 2016).

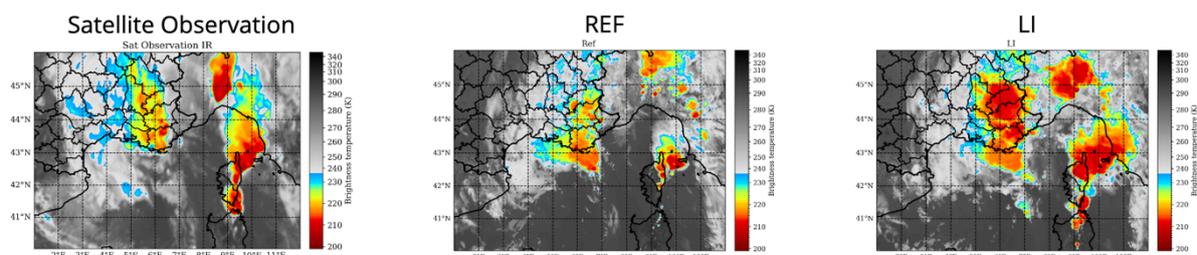


Figure 34 : Illustration de l'impact de l'assimilation de données d'éclairs sur une prévision à courte échéance d'AROME-France. À gauche : imagerie SEVIRI/Météosat ; au milieu : prévision AROME-France projetée dans l'espace des observations SEVIRI, sans observations d'éclairs assimilées ; à droite : prévision AROME-France projetée dans l'espace des observations SEVIRI, avec observations d'éclairs assimilées. Source : Combarous et al. (2024).

Un autre des instruments générant des attentes fortes pour la prévision numérique, en particulier pour la qualité des prévisions AROME-France est l'instrument de sondage infrarouge IRS à bord de MTG-S. Cette nouvelle génération d'instrument a fait l'objet du recrutement d'un agent à Météo-France en 2024 afin de préparer l'arrivée de ce capteur. IRS permettra de sonder l'atmosphère en amont de l'initiation des nuages et des précipitations, mais également dans leur environnement tout au long de leur cycle de vie. Cet instrument apportera un nombre très élevé de nouvelles observations qui vont permettre de combler en partie le déficit en observations dans le système AROME-France. Avec un sondage hyperspectral infrarouge toutes les 30 min, couvrant la partie du globe visible depuis l'orbite de Météosat et par conséquent l'intégralité de la surface du modèle AROME, l'assimilation des données MTG-S/IRS devrait améliorer de façon majeure les analyses de température et d'humidité de ce modèle, d'après les deux études successives réalisées à Météo-France, avec le soutien d'EUMETSAT dans le cadre de bourses (*fellowships*), contrats post-doctoraux d'une durée de 2 ans (Guedj et al., 2014 ; Coopmann et al., 2023). Pour ces deux études, Météo-France a exploité sa capacité à évaluer l'impact de futurs capteurs en construisant une expérience dite d'OSSE (*Observing System Simulation Experiment*). Ces OSSE permettent de préparer la filière d'assimilation dans AROME (Figure 35) et ARPEGE, mais également d'effectuer des statistiques sur le nombre d'observations qui seront assimilées, et d'estimer la réduction d'erreurs de prévision à laquelle on peut s'attendre. La

Figure 36 montre ainsi que les observations d'IRS devraient représenter plus du tiers des observations dans le 3DnVar d'AROME-France, en été comme en hiver. IRS sera également important pour le système ARPEGE et à terme, l'intégralité de la ceinture des satellites géostationnaires devrait être couverte par des instruments hyperspectraux de cette catégorie (voir programme GEO-XO aux États-Unis, programme Himawari-10 au Japon et programme FY-4 en Chine).

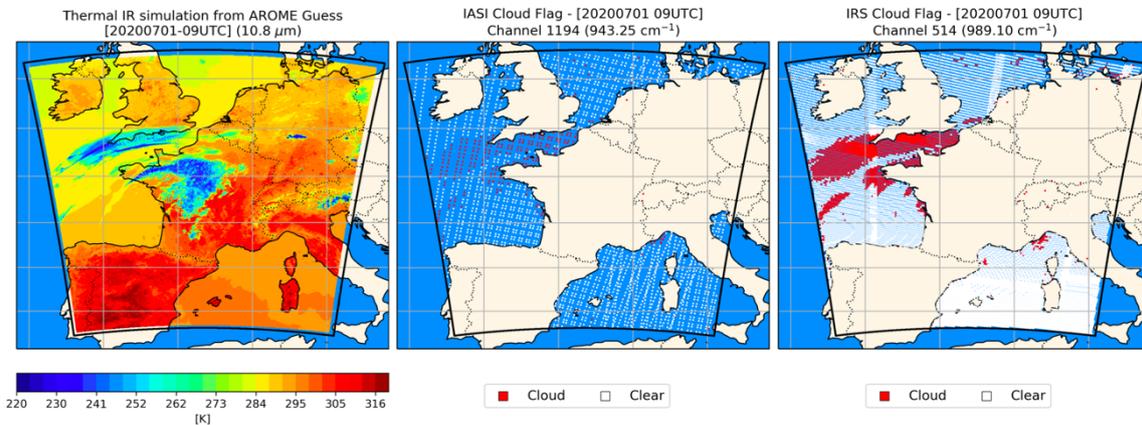
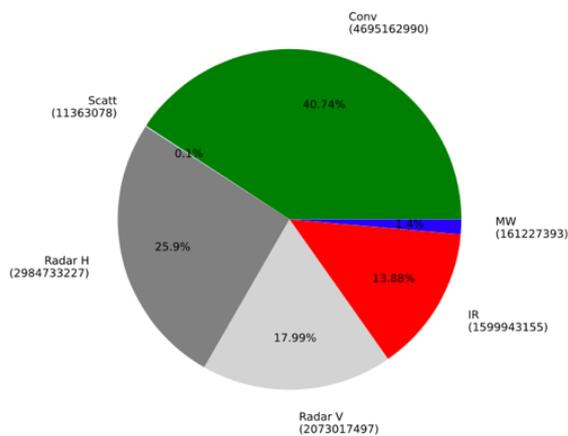


Figure 35 : Simulation des observations de MTG-S/IRS pour un canal à partir d'une prévision à courte échéance du système AROME-France (à gauche). Détection de la zone nuageuse nécessitant un filtrage des observations (à droite). Vérification de la cohérence de la zone filtrée avec un filtrage équivalent effectué sur les observations IASI (au milieu). Source : Coopmann et al. (2023).

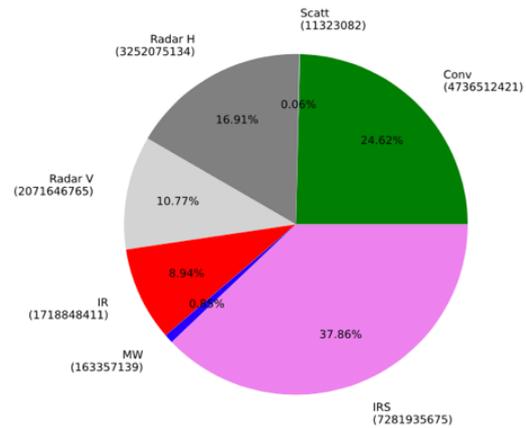
Grâce aux recherches conduites à Météo-France, la maturité scientifique pour assimiler ces données a atteint un niveau élevé. Des aspects techniques seront à instruire avec soin pour que les modèles ARPEGE et AROME bénéficient de ces observations au plus tôt. La période de calibration et validation des données de l'instrument sera importante et il nous faudra partager nos résultats avec nos partenaires européens (CEPMMT, UK Met Office, DWD), en particulier grâce aux évaluations que nous réaliserons dans le système ARPEGE. Il s'agira aussi de s'assurer que nos bases de données d'observation sont prêtes à prétraiter et accueillir un volume important de données, mais aussi que notre système de monitoring des observations, en aval des chaînes de prévision, est également prêt à suivre la qualité des observations d'IRS.

Enfin, le troisième nouvel instrument (sans « héritage ») à bord d'EPS-SG B sera ICI (*Ice Cloud Imager*) qui fournira des observations uniques des nuages de glace, mais également un sondage en vapeur d'eau avec de nouvelles fréquences. Des travaux préliminaires ont été menés à Météo-France pour évaluer le potentiel de ces observations aux fréquences submillimétriques avec le soutien d'EUMETSAT, dans le cadre de l'évaluation de l'impact potentiel de la future constellation EPS-Sterna qui est évoquée dans la Section 4. Des études complémentaires ont aussi été réalisées au CEPMMT et les résultats indiquent leur fort potentiel. Une montée en compétence dans l'exploitation de ces fréquences se révèle être stratégique pour l'avenir, en particulier car avec ces fréquences, une montée en résolution spatiale est possible alors que les limitations sont fortes dans le domaine des micro-ondes à cause des tailles d'antenne en jeu. Les fréquences submillimétriques offrent également des perspectives de miniaturisation des capteurs ce qui est dans la stratégie de nombreuses agences spatiales à ce jour.

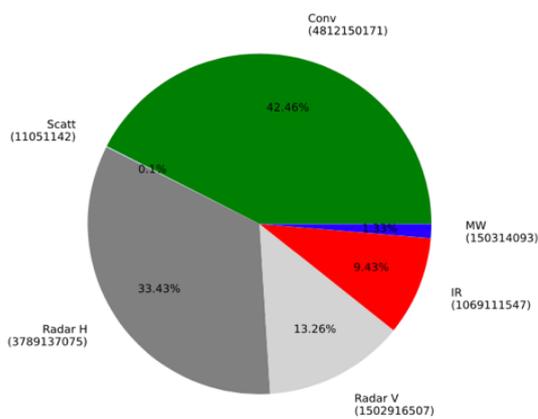
CTL run from 20200701 to 20200731
Total number of observations used: 11525447340



EXP IRS run from 20200701 to 20200731
Total number of observations used: 19235698627



CTL run from 20200101 to 20200131
Total number of observations used: 11334680535



EXP IRS run from 20200101 to 20200131
Total number of observations used: 18264116176

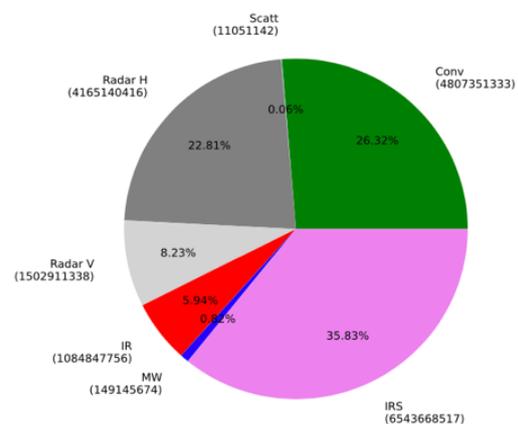


Figure 36 : Projection de l'évolution de la répartition des observations assimilées dans le système AROME-France (colonne de gauche) sans MTG-S/IRS et (colonne de droite) avec MTG-S/IRS, (première ligne) durant l'été et (deuxième ligne) durant l'hiver. Source : Coopmann et al., 2023.

Le Tableau 3 indique également l'intérêt de plusieurs autres instruments à bord d'EPS-SG, et qui sont les héritiers d'un instrument précédent (colonne « héritage »). Nous pourrions dans ces cas construire notre filière d'assimilation grâce à l'expertise acquise. EUMETSAT a mis à disposition des jeux de données de test pour presque tous les instruments, ce qui permet de préparer certains aspects techniques. Cela étant, les données de chacun de ces instruments devront être évaluées et des réglages proposés afin d'arriver à une assimilation opérationnelle de qualité au moins égale à celle réalisée aujourd'hui. Ceci représentera un travail très important à mener, dans un temps vraisemblablement contraint. Certains instruments tels que IASI-NG ont déjà fait l'objet d'études à Météo-France, avec le soutien du CNES, et sur lesquelles il sera nécessaire de s'appuyer au moment de la réception des données réelles.

La Figure 33 illustre également que la future programmation d'observation de la Terre hors Europe se révèle très dense, en particulier en Chine. Si la priorité pour les années à venir sera d'assurer la transition MSG vers MTG-I et MTG-S, et Metop vers EPS-SG A et EPS-SG B, il sera important d'intégrer autant que possible les données des satellites des programmes FY et HY. Ces données sont souvent complémentaires aux données européennes et américaines, en particulier en termes d'orbite. Elles assurent aussi la résilience de nos systèmes d'assimilation en apportant de la redondance d'information dans les observations assimilées.

3.3 Synthèse sur l'exploitation des observations bientôt disponibles

Dans cette section, nous avons décrit différents travaux de recherches sur les observations pour la PNT, effectués autour des observations qui seront disponibles d'ici environ 3 ans. Certaines observations s'inscrivent dans la continuité des observations existantes ; elles devront être intégrées pour maintenir notre système de prévision à l'état de l'art. D'autres observations vont offrir un contenu en information complètement nouveau pour nos modèles, en particulier pour le système AROME-France. Le Tableau 4 fournit une synthèse des éléments évoqués dans cette section.

Une des priorités sera d'envisager un transfert vers l'opérationnel de l'assimilation des données des stations personnelles connectées, une fois qu'EUMETNET aura assuré une filière pérenne de diffusion des données compatibles avec notre environnement opérationnel.

Il sera aussi important que nous continuions à contribuer aux travaux sur l'évolution de l'assimilation des données GNSS à la surface, avec nos partenaires du consortium ACCORD. Selon les choix de diffusion de données qui seront pris par EUMETNET pour le futur (gradients troposphériques ou délais obliques), ceci pourrait nous inciter à revoir notre filière d'assimilation de ces observations, précieuses pour les basses couches et la méso-échelle.

Deux autres priorités seront d'intégrer les nouvelles observations de MTG-I/LI et MTG-S/IRS, chacun apportant une forte valeur ajoutée pour le système de prévision AROME. Comme évoqué plus haut, le cas particulier des données d'éclairs devra être traité en termes de ressources allouées pour le développement et la maintenance pérennes d'une filière d'assimilation opérationnelle.

Tableau 4: Synthèse des recherches et développements avec les observations des observations disponibles à l'échéance de 2 à 3 ans.

Famille d'obs	Type d'obs	Impact démontré / Impact potentiel	Niveau de maturité scientifique	Niveau de maturité technique	Projets structurants en cours	Projets structurants à venir
<i>In situ</i>	Pression de surface (Ps) des stations personnelles connectées	Impact positif des données de Ps sur les prévisions du système AROME-France, lorsqu'un contrôle de qualité élaboré est mis en place.	8	6	Thèse de FCPLR d'Alan Demortier (2021–2024) Plan d'action Données d'Opportunité MF	Projet pilote CEPMMT–EUMETNET « <i>IoT observations for NWP</i> » (2024–2025)
	T et Q des stations personnelles connectées	Impact positif des données de T et Q sur les prévisions du système AROME-France, lorsqu'un contrôle de qualité élaboré est mis en place.	7	6		
Téledétection depuis le sol	Gradients troposphériques ou délais obliques des GNSS terrestres	Mise en place de la filière d'assimilation des gradients en cours. Impact potentiel sur l'humidité dans les basses couches et les structures de fine échelle.	5	5	EUMETNET EGVAP	EUMETNET EGVAP
Téledétection passive depuis l'espace	MTG-I / FCI	Continuité du bon impact de SEVIRI dans ARPEGE et AROME.	9	6	/	/
	MTG-I / LI	Fort impact attendu sur la prévision des orages. Complémentarité avec les radars, en particulier au-dessus des océans hors de portée des radars.	7	5	APR CNES SOLID	Projet Horizon Europe MINERS soumis en février 2024 et futur projet soumis au CNES sur les observations d'éclairs
	MTG-S / IRS	Très fort impact attendu sur les analyses et les prévisions de température et d'humidité d'AROME et d'ARPEGE.	8	7	/	/
	EPS-SG A / IASI-NG	Impact amélioré par rapport à IASI sur les analyses de température et d'humidité d'ARPEGE en ciel clair et au-dessus des nuages.	8	7	APR CNES IASI-PNT	APR CNES IASI-PNT
	EPS-SG A / MWS	Impact amélioré par rapport à MHS et AMSU-A sur les analyses de température et d'humidité d'ARPEGE par tout type de temps.	8	5		<i>Scientific Framework</i> EUMETSAT
	EPS-SG B / MWI	Fort impact attendu sur les prévisions des orages pour ARPEGE.	9	5	/	<i>Scientific Framework</i> EUMETSAT
	EPS-SG B / ICI	Fort impact attendu sur les nuages de glace pour ARPEGE.	2	5	/	Projet Horizon Europe MINERS (soumis en février 2024) et <i>Scientific Framework</i> EUMETSAT
	EPS-SG A et EPS-SG B / RO	Impact amélioré par rapport à GRAS sur les analyses de température en haute troposphère et dans la stratosphère.	9	5	/	/

4. Les futures technologies pour l'observation à haute résolution et haute cadence temporelle

Dans cette dernière section du document, nous abordons un certain nombre de technologies d'observation à venir dans les 10 ans et qui nous paraissent prometteuses pour l'assimilation et la PNT. Pour certaines d'entre elles, un investissement en recherches et en développements sur le temps long est nécessaire, afin de lever des verrous scientifiques dans leur future utilisation. Un tel investissement a été décisif par le passé afin de pouvoir exploiter les données des instruments actuellement déployés, quand ils étaient en phase amont de développement, et ont conduit au niveau de performance des systèmes actuels de PNT en France comme dans d'autres pays de niveau scientifique comparable. Un exemple récent en la matière est la mission AEOLUS (lancement en 2018 et fin de mission en 2023) dont le lidar vent a permis des améliorations des prévisions du système ARPEGE très significatives (Pourret et al., 2022), grâce aux travaux amorcés par la communauté française et la communauté internationale dès 1992 (Dabas et al., 2023).

Cette section aborde en premier lieu certaines technologies d'observation depuis la surface (Section 4.1) puis certaines technologies d'observations depuis l'espace (Section 4.2). Cette section évoque la tendance actuelle aux constellations de petits satellites qui sont un atout à considérer afin d'obtenir des observations à haute cadence temporelle, mais qui comportent aussi des défis pour les utilisateurs. Enfin la Section 4.3 aborde les outils disponibles à Météo-France et qui permettent de contribuer à façonner ce futur système d'observations afin qu'il réponde au mieux à nos besoins, au bénéfice de la qualité des systèmes de prévision de Météo-France et de leurs résultats.

4.1 Les technologies d'observation depuis la surface

4.1.1 Les observations d'opportunité

Parmi les observations dites d'opportunité, diverses familles d'objets connectés au-delà des stations personnelles ou agricoles (Section 3.1) pourraient bientôt fournir des observations utilisables en PNT. Parmi elles figurent les véhicules connectés. Météo-France dispose d'observations de voitures connectées, obtenues via des partenariats, désormais terminés, avec des constructeurs (PSA désormais Stellantis, période 2016–2019) ou des équipementiers automobiles (Continental, période 2016–2020). Ces voitures réalisent essentiellement des observations de température entre 1 et 1,5 m de hauteur au-dessus d'un sol bitumé, et de variables pouvant être liées aux conditions météorologiques (luminosité, état des phares et essuie-glaces, déclenchement des systèmes ABS ou ESP, etc.).

À l'occasion d'une thèse à DESR/CNRM/GMME, Marquès et al. (2022) ont utilisé les observations de température à bord de voitures du groupe PSA sur une partie de l'Europe de l'Ouest (Figure 37). Ces observations ont été comparées à des observations issues de réseaux de stations personnelles dédiées à l'étude de l'îlot de chaleur urbain. Des techniques de contrôle de qualité de ces observations en mouvement ont été proposées. Une fois mises en œuvre, elles ont permis d'obtenir des cartographies de l'îlot de chaleur urbain dans plusieurs villes à très fine échelle (200 m). Ces observations pourront

être utilisées en PNT dès lors que les fournisseurs de données auront démontré leur capacité à fournir des flux en temps réel.

Dans un avenir plus lointain, il existe un intérêt certain à collecter les observations météorologiques réalisées par d'autres véhicules dans des zones où les observations *in situ* actuelles sont rares : voiliers et bateaux en mer, véhicules non motorisés utilisés en vol libre et aviation légère dans les airs.

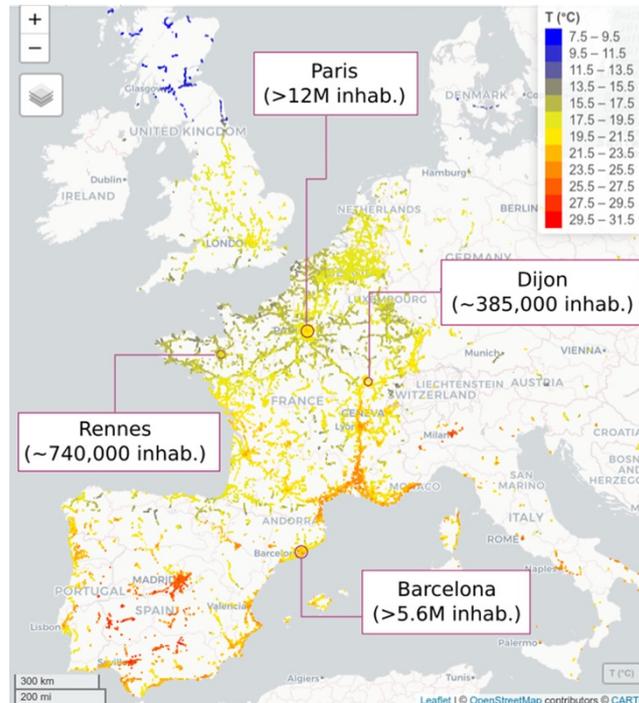


Figure 37 : Observations de température issues des voitures connectées du groupe PSA entre 20:00 et 21:00 UTC le 19 juin 2018. Les villes de Dijon et Rennes possèdent des réseaux de stations météorologiques urbaines permettant d'évaluer quantitativement les observations réalisées par les voitures. Source : Marquès et al. (2022).

Concernant les observations réalisées par les smartphones, l'intérêt porte essentiellement sur les observations de pression. Les premiers travaux réalisés sont prometteurs (Madaus et Mass, 2017 ; Hintz et al., 2019) ; des flux en temps réel pourraient être obtenus via le projet *IoT observations for NWP* du CEPMMT et d'EUMETNET (Section 3.1), et permettraient de démarrer des travaux sur le sujet à Météo-France.

Plusieurs autres systèmes d'observations d'opportunité ont fait ou font l'objet de travaux de recherche et développement de la DSO. Ils pourraient être utilisés à l'avenir pour la vérification des prévisions des systèmes de PNT :

- L'atténuation des signaux micro-ondes entre antennes de télécommunication, aussi appelés liens commerciaux micro-ondes (ou CML pour *Commercial Microwave Links*), fournit une observation des précipitations proches du sol (Gosset et al., 2016 ; Uijlenhoet et al., 2018 ; Chwala et Kunstmann, 2019). Des liens micro-ondes similaires entre paraboles installées au sol et satellites géostationnaires (ou SML pour *Satellite Microwave Links*) commencent également à être exploités par l'entreprise française HD Rain. Si l'apport est démontré, il est prévu, dans le cadre d'un projet interne de Météo-France appelé Raincell, que ces observations contribuent à l'analyse de précipitations ANTILOPE, principalement basée pour

l'instant sur une combinaison des observations des radars et des pluviomètres, déjà utilisée pour l'évaluation de la PNT.

- Les caméras et webcams, via des algorithmes de reconnaissance d'image, fournissent des observations de temps présent et ses impacts, tels la visibilité, l'état du sol ou l'état de mer côtier, entre autres (thèse de FCPLR de Pierre Lepetit au LATMOS, 2021).
- Les observations participatives humaines fournissent des observations de temps présent et ses impacts, accompagnées parfois de photographies, observations qui sont concentrées via des applications mobiles « grand public » ou spécialisées (Giard et al., 2018 ; Bernède, 2022). Ces observations présentent l'avantage d'être déjà stockées dans nos bases de données opérationnelles. Nous les plaçons toutefois dans cette Section 4 car les variables de temps sensible demeurent encore éloignées de l'assimilation. Ce type d'observations peut également être collecté à partir de forums web spécialisés ou des réseaux sociaux (Twitter, Facebook, Snapchat, etc.). Cette collecte fait l'objet du projet interne de Météo-France intitulé « Réseaux Sociaux pour la prévision et la gestion de crise ».

4.1.2 Les observations *in situ* dans la couche limite

L'utilisation de drones pour effectuer des sondages automatiques réalisant des observations de température, humidité relative, pression et vent dans la couche limite et la basse troposphère, essentiellement les 3 premiers kilomètres, est en plein essor : leur nombre pourrait augmenter très fortement dans les 5 à 10 prochaines années (Leuenberger et al., 2020 ; Jensen et al., 2022). À Météo-France, des recherches sont réalisées par DESR/CNRM/GMEI à ce sujet : en particulier, des drones sont déjà utilisés dans le cadre de campagnes de mesure comme PANAME en 2022–2023 (Figure 38). Les observations de ces premières campagnes commencent tout juste à être utilisées pour réaliser des travaux d'évaluation des modèles de PNT utilisés pendant ces campagnes.



Figure 38: Drone permettant de caractériser l'effet rafraîchissant des parcs végétalisés en conditions de canicule déployé durant la campagne PANAME. Source : DESR/CNRM/GMEI.

La DSO s'intéresse également à ce type de technologie dans le cadre de ses réflexions autour des instrumentations du futur car les drones, parfois en flotte coordonnée, permettent un échantillonnage spatial inaccessible par avion et une répétition de la mesure souvent impossible avec d'autres systèmes, y compris les radiosondages traditionnels (pour des raisons financières et

environnementales). Certaines de ces mesures par drones sont déjà réalisées dans un cadre opérationnel dans certains pays (par exemple, radiosondages Meteomatics en Suisse, Menapia en Angleterre) et l'on peut imaginer que des drones puissent être déployés à la demande dans des régions et à des moments particuliers pour apporter une information optimale dans des situations météorologiques critiques (observation adaptative). En vue d'embarquer à bord des drones une instrumentation toujours plus complexe, et donc informative, les défis technologiques liés à la miniaturisation et à la consommation d'énergie des capteurs sont nombreux, mais le potentiel est immense.

4.1.3 Les observations de télédétection

Les technologies exploitant la télédétection évoluent et permettront aussi à l'avenir d'effectuer des mesures pertinentes pour l'observation de la surface et de la couche limite. Depuis la surface, divers capteurs pourraient en effet être déployés afin d'effectuer des mesures dans la couche limite et la basse troposphère. Ces capteurs exploitent soit la télédétection passive, soit la télédétection active.

La radiométrie passive dans le domaine des micro-ondes est un des types de capteurs dont l'utilisation a été explorée à Météo-France, au CNRM (Martinet et al., 2022) et à la DSO, en particulier dans le cadre de la campagne de mesures SOFOG3D à l'hiver 2019–2020 dans le sud-ouest de la France. Selon la bande de fréquence utilisée, les mesures peuvent être informatives sur la température ou l'humidité ainsi que sur le brouillard et les nuages bas. Les points forts de ces instruments sont leur capacité à effectuer des mesures à très haute cadence temporelle (de l'ordre de la minute), ainsi que leur faible coût relatif par rapport à d'autres systèmes d'observations.

La Figure 39 à gauche montre le réseau de 8 radiomètres qui a été déployé dans le sud-ouest de la France pendant la campagne SOFOG3D. À la suite de cette campagne, un effort particulier de traitement des données a été réalisé afin de générer des produits restitués de température, humidité et d'eau liquide. La preuve de concept est détaillée par Thomas et al. (2024) qui montre qu'il est possible d'avoir un impact sur les prévisions AROME-France, dans les zones proches de ces radiomètres. La Figure 39 à droite montre ainsi une réduction de l'erreur de prévision de température d'AROME, allant jusqu'à 6 h d'échéance en basses couches, au niveau des 8 radiomètres déployés.

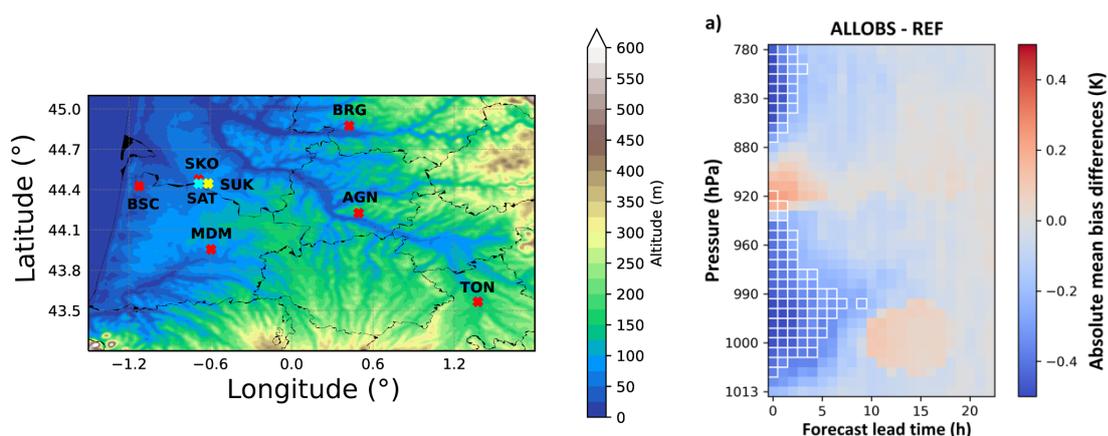


Figure 39 : Illustration de l'impact de l'assimilation de plusieurs radiomètres micro-ondes au sol (réseau représenté à gauche) pour la prévision de la température avec AROME-France (réduction du biais à droite). Les scores de prévisions ont été moyennés sur les sites des 8 radiomètres déployés. Source : Thomas et al. (2024).

Pour aller plus loin dans cette preuve de concept, il faudrait que plusieurs conditions soient réunies : (i) 3 radiomètres sont actuellement disponibles sur le territoire (Lille, Roissy, Toulouse), un réseau plus dense serait nécessaire pour que l'impact soit significatif sur nos prévisions sur le domaine AROME-France, (ii) pour l'utilisation de produits inversés de température et d'humidité, il faudrait développer une filière complète d'assimilation de ces radiomètres, avec un code de transfert radiatif dédié et dérivé du logiciel RTTOV. Ces deux conditions combinées rendent complexe la priorisation sur ce sujet car (i) un réseau dense ne saurait être justifié sans la garantie d'obtenir des impacts statistiquement significatifs pour AROME, (ii) pour réaliser des simulations d'un réseau dense, il faudrait investir dans le développement de la filière d'assimilation ce qui est également un effort très significatif. Le DWD et MétéoSuisse travaillent également sur la thématique des radiomètres micro-ondes au sol, comme Météo-France dans le cadre du programme E-PROFILE d'EUMETNET. Il sera important de suivre les résultats obtenus à partir de leurs propres réseaux et de participer aux échanges scientifiques sur ce système d'observation.

Deux autres systèmes de télédétection depuis la surface continuent à être explorés à Météo-France. Il s'agit des lidars « vapeur d'eau » et des radars « nuages ».

Les lidars « vapeur d'eau » permettent d'estimer un profil d'humidité à haute résolution sur la verticale et à haute cadence temporelle. Les lidars « vapeur d'eau », tout comme les radiomètres micro-ondes, sont des instruments très pertinents pour l'évaluation des modèles de prévisions ; ils pourraient aussi se révéler être un atout pour l'assimilation de données si un réseau bien maillé sur le territoire était déployé.

Les radars « nuages » en bande W peuvent fournir une information sur l'eau condensée (Bell et al., 2021) et sa distribution sur la verticale, aussi à haute résolution et haute cadence temporelle. Ces deux instruments sont donc très complémentaires. Cette complémentarité est actuellement à l'étude dans le cadre de la thèse de FCPLR d'Agathe Gentric sur la fusion de données instrumentales pour la prévision immédiate du brouillard (DESR/CNRM/GMEI).

4.2 Les technologies d'observation depuis l'espace

Depuis l'espace, de nouveaux systèmes d'observation émergent pour l'observation de la surface et de la couche limite. Ainsi, deux variables mal observées à ce jour pourraient voir leurs mesures à l'échelle globale progresser de façon majeure. Concernant l'observation de la température de surface à haute résolution, la mission TRISHNA (CNES/ISRO) permettra d'effectuer des mesures globales à une résolution inédite de moins de 100 m. Avec un lancement en 2025, ce satellite sera suivi de la mission Copernicus *Land Surface Temperature Monitoring* (LSTM) en 2028 avec une résolution entre 30 et 50 m. La finesse du contenu en information de ces deux instruments à venir, et dont deux vues d'artiste sont montrées Figure 40, nécessitera des recherches dédiées car l'assimilation à l'échelle globale demeure pour le moment à assez basse résolution (la résolution des incréments de la 2^{ème} minimisation du 4D-Var incrémental ARPEGE est d'environ 20 km).

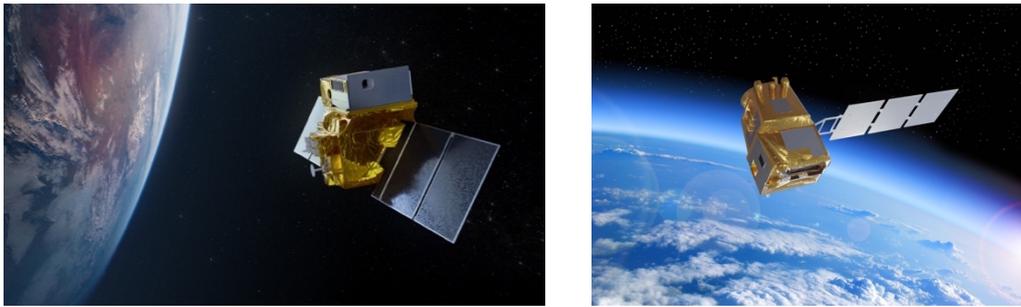


Figure 40 : (Gauche) Vue d'artiste du satellite Trishna. Source : CNES/ISRO. (Droite) Vue d'artiste du satellite LSTM. Source : ESA.

Concernant l'observation de la glace de mer, ainsi que l'observation de l'humidité du sol, des observations à beaucoup plus haute résolution qu'aujourd'hui devraient être disponibles dans quelques années grâce à la mission Copernicus *Imaging Microwave Radiometer* (CIMR). Grâce à son antenne déployable de plus de 7 m de diamètre (Figure 41 à gauche), la résolution des observations dans le domaine des micro-ondes sera améliorée d'un facteur supérieur à 3 (exemple pour la bande à 10,6 GHz de CIMR avec des observations à 7 km en comparaison d'observations à 24 km pour le radiomètre AMSR2 à bord du satellite japonais GCOM-W1). Ce radiomètre est aussi un instrument d'intérêt pour les projets d'assimilation couplée évoqués dans la Section 2, car il fournira des observations des précipitations à échelle fine (exemple pour la bande à 36,5 GHz de CIMR avec des observations à 4 km en comparaison d'observations à 40 km pour le radiomètre MWI qui sera à bord de EPS-SG).

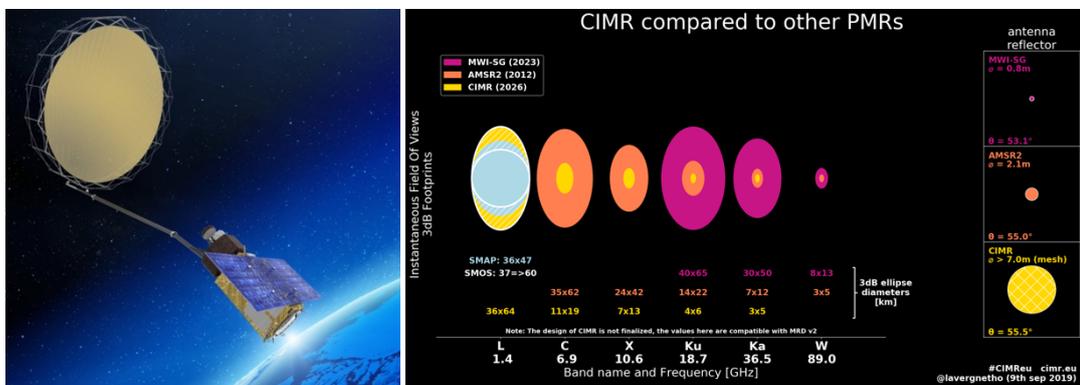


Figure 41 : (Gauche) Vue d'artiste de la mission CIMR (Copernicus Imaging Microwave Radiometer). (Droite) Taille comparée des pixels entre ceux de l'instrument de CIMR et ceux de radiomètres existants. Source : ESA.

Il pourrait être intéressant d'amorcer des travaux autour de TRISHNA, LSTM et CIMR dans les années à venir pour enrichir notre analyse de surface.

D'autres technologies qui pourraient être disponibles à plus long terme permettraient également d'effectuer des mesures de la pression de surface. Cette variable climatique essentielle n'a jusqu'à présent jamais été observée depuis l'espace à l'échelle globale alors que les observations de pression de surface ont un impact extrêmement important sur la qualité des prévisions, que ce soit à l'échelle globale ou bien régionale. Un concept de radar spatial à absorption différentielle est en réflexion à la fois aux États-Unis (Millán et al., 2014) ainsi qu'en Europe avec une proposition de mission pour le programme de l'ESA Earth Explorer 12. La Figure 42 à droite montre à travers des simulations de type

OSSE que ce type d'instrumentation pourrait devenir le 2^{ème} système d'observation le plus informatif par observations s'il venait à être lancé dans l'espace. Selon les résultats de la sélection des missions passant en Phase 0 au programme Earth Explorer 12, il pourrait être stratégique de démarrer une étude à Météo-France sur ce sujet afin de promouvoir cette technologie.

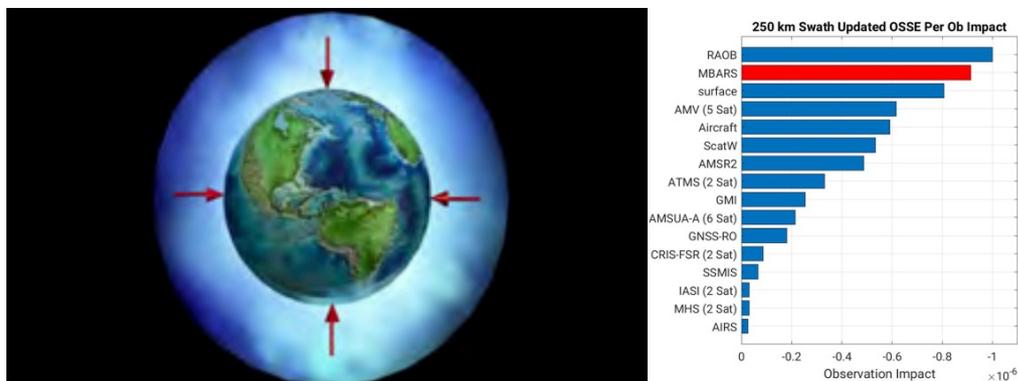


Figure 42 : Exemple d'étude OSSE produite par le NASA/GMAO afin d'estimer l'impact d'un potentiel radar à absorption différentielle, permettant d'inférer une information sur la pression de surface. Le graphique de droite montre les statistiques FSOi des différents systèmes d'observations assimilés, avec en particulier le FSOi pour le nouveau radar représenté en rouge. Source : NASA/GMAO.

D'autres observations des surfaces continentales, qui font actuellement l'objet d'études à DESR/CNRM/GMME pourraient bénéficier un jour à la PNT, en particulier dans le cadre d'un modèle intégré avec les différents compartiments du système Terre. En particulier, les observations de la végétation (ex : indice foliaire et données de fluorescence) pourraient être assimilées dans le schéma de surface ISBA, afin de permettre le suivi et la prévision des sécheresses agricoles et des ressources en eau, comme cela est actuellement réalisé pour la prévision saisonnière dans le cadre du projet CERISE avec le CEPMMT. Les observations de la végétation seront également importantes afin de conduire à une meilleure représentation du combustible disponible pour la propagation des feux sur le territoire. Une thèse financée par la région Occitanie débutera fin 2024 sur la construction d'opérateurs d'observation pour l'assimilation de données satellitaires de végétation dans le modèle de végétation de SURFEX à partir d'IA. Dans le même temps, une thèse FCPLR démarrera en collaboration entre la DESR et le CERFACS afin d'améliorer la représentation du combustible végétation dans le modèle couplé atmosphère-feu Méso-NH/SURFEX-BLAZE, avec à plus long terme, l'objectif de porter ces travaux vers le couplage d'AROME et BLAZE. Le suivi du cycle hydrologique pour le suivi de la ressource en eau pourrait aussi bénéficier des observations de hauteurs et surfaces d'eau des lacs et débit des rivières à partir du satellite SWOT lancé en décembre 2022.

L'amélioration continue des instruments de télédétection devrait aussi permettre des avancées pertinentes pour l'observation de la troposphère. Si la preuve de concept de nouvelles instrumentations se révèle dans la grande majorité des cas issue de la recherche des agences spatiales et des laboratoires publics, les exemples cités dans cette section montrent que de nombreuses initiatives du secteur privé pourraient venir enrichir un jour nos systèmes. Nous citons les projets de quelques sociétés, mais cette liste n'est pas exhaustive. Un point de vigilance important concernant les données produites par ces nouveaux acteurs sera la politique de partage des observations, en particulier pour la recherche amont à une utilisation opérationnelle. L'OMM a récemment mis à jour sa politique en la matière et Météo-France a notamment contribué à la définition des « Core satellite

data », en rapportant les besoins fondamentaux en données satellitaires au nom des centres météorologiques européens exploitant un modèle de prévision global.

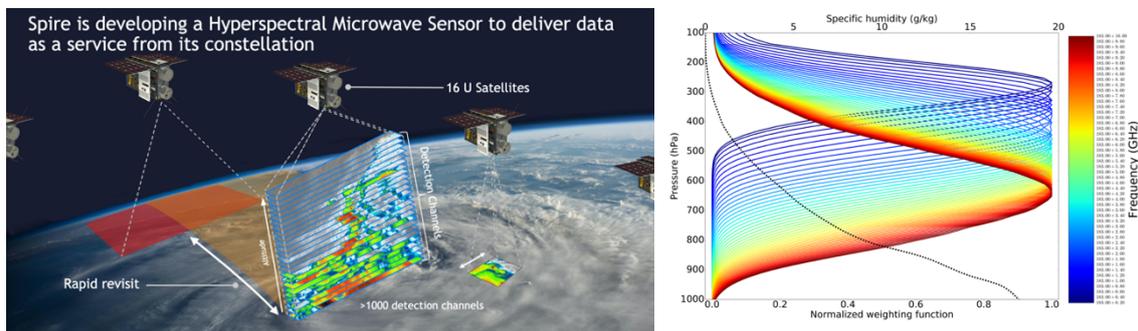


Figure 43 : (Gauche) Illustration de la future constellation d'instruments micro-ondes hyperspectraux prévue par la société américaine Spire. (Droite) Illustration de la sensibilité verticale du sondage micro-ondes hyperspectral à 183,31 GHz. La technologie hyperspectrale permet d'obtenir plusieurs milliers de canaux dans une bande d'absorption donnée, au prix d'un bruit élevé sur les mesures. Ici, un compromis entre nombre d'observations et bruit instrumental est représenté avec une soixantaine de canaux représentés alors que le nombre typique de canaux dans cette bande d'absorption de la vapeur d'eau est de 6 maximum. Source : DESR/CNRM/GMAP.

Un premier exemple concerne le sondage dit « hyperspectral » qui permet un sondage en continu dans un intervalle de longueurs d'ondes donné. Ce sondage est pratiqué dans le domaine spectral infrarouge depuis de nombreuses années et l'instrument à l'état de l'art en la matière est l'instrument IASI. Dans le domaine des micro-ondes, les bandes d'absorption de l'oxygène et de la vapeur d'eau étaient jusqu'à présent échantillonnées avec moins d'une dizaine de canaux. Certains composants électroniques dédiés permettent aujourd'hui de scanner une bande d'absorption en quasi-continu, à la façon des instruments hyperspectraux infrarouge. La Figure 43 illustre ce type de sondage qui permettrait d'obtenir plusieurs milliers de mesures à une localisation géographique donnée, en apportant une résolution fine sur la verticale pour l'observation de la température, de la vapeur d'eau, des nuages et des précipitations (Birman et al., 2017). La société américaine Spire a récemment racheté tous les développements en la matière qui ont été réalisés au UK Rutherford Appleton Laboratory (RAL) Space depuis plusieurs années (brevets et embauche des personnels clés). Cette entreprise privée, qui nous fournit déjà en temps réel des données de radio-occultation à travers les achats de données d'EUMETSAT, est donc en passe de devenir un acteur important dans la production de données micro-ondes. Spire prévoit le lancement d'un prototype de radiomètre hyperspectral dans l'espace fin 2024. À terme, Spire a pour projet de déployer une constellation de ces sondeurs mais pour ce faire, des clients « d'ancrage » devront être identifiés.

L'exploitation des données hyperspectrales dans le domaine des micro-ondes représente un défi scientifique, avec le besoin de modéliser les matrices de covariances d'erreurs d'observation à la façon des sondeurs hyperspectraux Infrarouge, à la différence que celles-ci doivent être modélisées par tout type de temps, du ciel clair eu ciel nuageux et précipitant. Cette technologie s'accompagne aussi d'une augmentation du bruit instrumental sur chaque mesure individuelle, il sera donc nécessaire de trouver le bon compromis entre le nombre de mesures et la précision instrumentale requise. Airbus Defense and Space s'intéresse de près à cette technologie, en particulier pour la détection des zones de l'atmosphère propices à la persistance des traînées de condensation des avions de ligne ; il pourrait être intéressant de se rapprocher de leurs développements afin d'amorcer des recherches sur ce sujet.



Figure 44 : (Gauche) Vue d'artiste de la constellation TROPICS pour le sondage de l'humidité, les nuages et les précipitations par radiométrie micro-ondes passive. (Droite) Vue d'artiste de la constellation de radars de Tomorrow.io.

En concurrence directe avec le projet de constellation de Spire, la société privée américaine Tomorrow.io prévoit elle aussi de déployer une constellation mixte de petits radiomètres micro-ondes et de petits radars pour les précipitations (Figure 44). Tomorrow.io se base, elle, sur un partenariat public/privé avec le MIT et en particulier le laboratoire Lincoln. Ce laboratoire a en effet développé une très forte expertise en miniaturisation instrumentale depuis plus d'une dizaine d'années, avec un succès récent autour de la constellation NASA TROPICS de 4 petits satellites (10 cm x 10 cm x 30 cm) déployée en 2023 (Blackwell et al., 2018).

L'intérêt de la constellation TROPICS, dont une vue d'artiste est montrée Figure 44, est en cours d'évaluation à DESR/CNRM/GMAP. Une des difficultés quant à l'utilisation de ces données dans un contexte opérationnel est la courte durée de vie de ces satellites (moins de 2 ans) qui rendent quasi impossible le passage par une chaîne en double pour leur exploitation en prévision numérique.

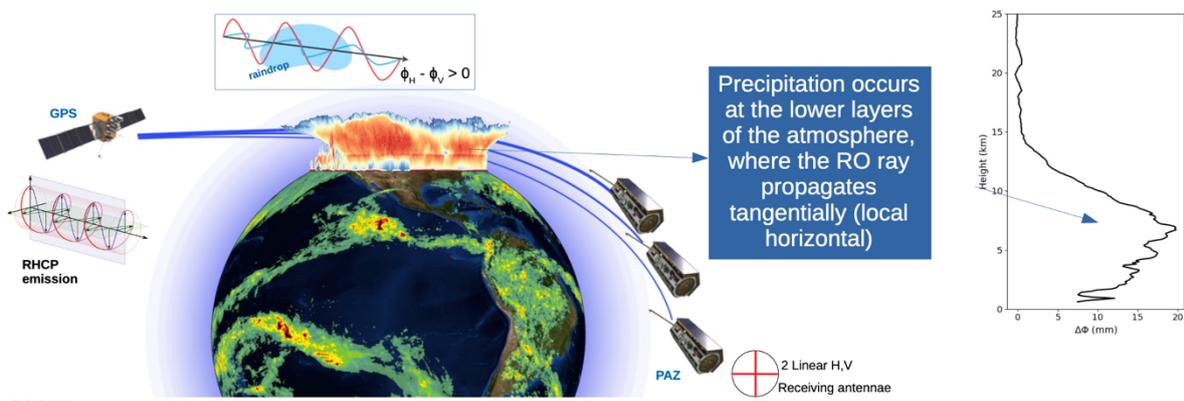


Figure 45: Schéma de principe illustrant le principe de la mesure GNSS radio-occultation polarisée. Source : séminaire d'Estel Cardellach (Institut d'études spatiales de Catalogne, Barcelone) au CNRM en octobre 2023.

La société Spire investit également en ce moment dans plusieurs autres technologies prometteuses pour nos systèmes de prévision. Elle s'intéresse notamment à la radio-occultation GNSS polarisée dont la preuve de concept a été réalisée grâce au satellite espagnol PAZ (Cardellach et al., 2019). Un schéma de principe est montré Figure 45 avec le signal GNSS envoyé par la constellation émettrice qui voit sa polarisation modifiée en traversant des zones nuageuses et précipitantes. Le CEPMMT a amorcé une étude afin d'évaluer l'intérêt de ce type d'observations (Hotta et al., 2024). En effet ce type de mesure

permet de sonder les nuages avec une haute résolution sur la verticale et pourrait être complémentaire du sondage micro-ondes et infrarouge plus classique. À terme, tous les récepteurs GNSS radio-occultation pourraient être équipés de cette fonctionnalité. Des échanges sont en cours entre Météo-France, la société Spire et l'équipe de recherches du satellite espagnol PAZ afin d'obtenir des échantillons de données à analyser.

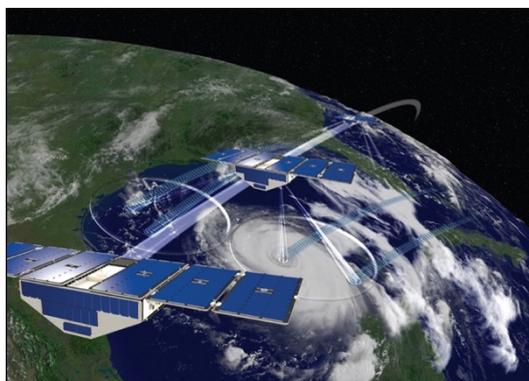


Figure 46 : Vue d'artiste de la constellation CYGNSS pour la mesure des vents de surface grâce à la réflectométrie GNSS. Source : NASA.

Un dernier exemple concernant la société Spire est la réflectométrie GNSS. Le principe de mesure est de capter les signaux GNSS qui sont réfléchis à la surface des océans, pour obtenir une information sur les vents de surface. La preuve de concept avait été réalisée par la mission CYGNSS de la NASA (Figure 46), avec des résultats encourageants sur la qualité des mesures (Ruf et al., 2013). Une étude a récemment démarré entre le UK Met Office et le CEPMMT afin d'évaluer la qualité des estimations de vent de surface issues des trois premiers prototypes déjà dans l'espace et utilisant ce concept de réflectométrie. La qualité des estimations de vent de surface sera comparée à la qualité de celles dérivées des diffusiomètres qui sont des instruments actifs et de taille bien plus importante. Si cette qualité s'avérait être proche des instruments de référence (diffusiomètres), alors Spire pourrait envisager le déploiement d'une constellation. Il nous paraît donc stratégique d'effectuer une veille sur ce sujet et les résultats qu'obtiendront le UK Met Office et le CEPMMT.



Figure 47 : (Gauche) Vue d'artiste du train de satellites C3IEL (Source : CNES/ISA). (Droite) Vue d'artiste de l'architecture de l'observatoire AOS. Source : NASA (<https://aos.gsfc.nasa.gov/>).

Enfin, concernant des missions spatiales de recherche qui seront pertinentes pour la validation des modèles de PNT et dans lesquelles Météo-France est impliqué, on peut citer la mission franco-israélienne C3IEL (*Cluster for Cloud evolution, Climate and Lightning*) (Figure 47, à gauche), ainsi que la mission AOS (*Atmosphere Observing System*) qui est le futur observatoire international des nuages, des précipitations et des aérosols (NASA, JAXA, CNES, CSA, DLR) (Figure 47, à droite). Météo-France est impliqué dans les groupes mission de ces deux projets.

La mission de recherche C3IEL vise à fournir de nouvelles informations sur les nuages convectifs, à des résolutions spatiales et temporelles élevées. Son lancement est prévu par le CNES et l'ISA entre 2026 et 2027. Les objectifs de la mission concernent la caractérisation de la dynamique des nuages convectifs, les interactions entre nuages et vapeur d'eau environnante et l'activité électrique. La mission C3IEL repose sur un train de 2 nanosatellites synchronisés pour observer de jour la même scène nuageuse pendant 200 s toutes les 20 s et de nuit en continu pendant 20 min. Chaque nanosatellite embarquera une caméra visible (670 nm) à une résolution spatiale d'environ 20 m, des imageurs de vapeur d'eau dans le proche infrarouge (1,04, 1,13 et 1,37 μm) mesurant dans et près des bandes d'absorption de la vapeur d'eau à une résolution d'environ 125 m, ainsi qu'un imageur d'éclairs (777,4 nm) et deux photomètres (337 et 777,4 nm). Les connaissances acquises grâce aux mesures de C3IEL pourraient se révéler utiles afin d'évaluer le degré de réalisme de la représentation des nuages convectifs dans nos modèles à haute résolution.

La mission AOS est une mission spatiale ayant pour objectif de répondre aux questions scientifiques émanant du NASA « *Decadal Survey* » publié en 2017 autour des aérosols, des nuages et des précipitations. Comme il est possible de le voir sur la Figure 47 (à droite), AOS est un système d'observations avec plusieurs plateformes satellitaires et de nombreux instruments actifs (radars et lidars) et passifs (radiomètres, imageurs dans plusieurs bandes spectrales). La contribution française à AOS retenue par la NASA est un tandem de radiomètres micro-ondes appelé C2OMODO (*Convective Core Observations through Microwave Derivatives in the Tropics*). Ce tandem permettra d'effectuer des mesures sensibles aux précipitations glacées, à quelques minutes d'intervalle, dans l'objectif de pouvoir estimer les flux de masses d'eau condensée au cœur des nuages (Brogniez et al., 2022).

Ainsi, les observations de C3IEL et C2OMODO seront complémentaires pour documenter les aspects dynamiques des nuages, le premier pour leur enveloppe externe et le second pour leurs flux de précipitations internes. Des travaux ont été amorcés à Météo-France (DESR/CNRM/GMME) sur ces deux systèmes qui seront exploités pour évaluer nos modèles de prévision à fine échelle.

4.3 Nos outils pour contribuer à la définition du futur système d'observation

Certains des progrès instrumentaux cités ci-dessous ne sauraient être déployés à grande échelle (réseaux en surface, constellation dans l'espace) sans de bonnes garanties que les déploiements en question engendreront un retour sur investissement suffisant. Météo-France est à ce jour le seul SMN européen à actuellement avoir la maîtrise de deux outils permettant d'évaluer l'impact de futures observations, dans un environnement simulé proche de l'environnement opérationnel.

Une première méthode d'estimation d'impact est une expérience de simulation de système d'observation (OSSE pour *Observing System Simulation Experiment*). Le CNRM a acquis une maîtrise de cette technique à travers plusieurs projets financés par le CNES, EUMETSAT et l'ESA (Guedj et al., 2014 ; Duruisseau et al., 2019 ; Coopmann et al., 2023 ; Rivoire et al., 2024). La seconde méthode est l'ensemble d'assimilation (EDA pour *Ensemble Data Assimilation*). Cette dernière a été développée par le CEPMMT ; celle-ci a aussi été appliquée à Météo-France (Sasso et al., 2024) dans le cadre d'un projet financé par l'ESA durant la Phase 0 de la mission WIVERN, candidate pour devenir le 11^{ème} Earth Explorer de l'ESA.

L'objectif des deux méthodes est de mesurer la réduction d'erreurs obtenue avec l'ajout d'un nouveau système d'observation en supplément des mesures existantes. Dans le cas de l'OSSE, l'environnement d'assimilation est entièrement simulé ce qui implique de devoir simuler l'intégralité des types d'observations en plus du nouveau capteur alors que la méthode EDA ne nécessite que la simulation des nouvelles observations.

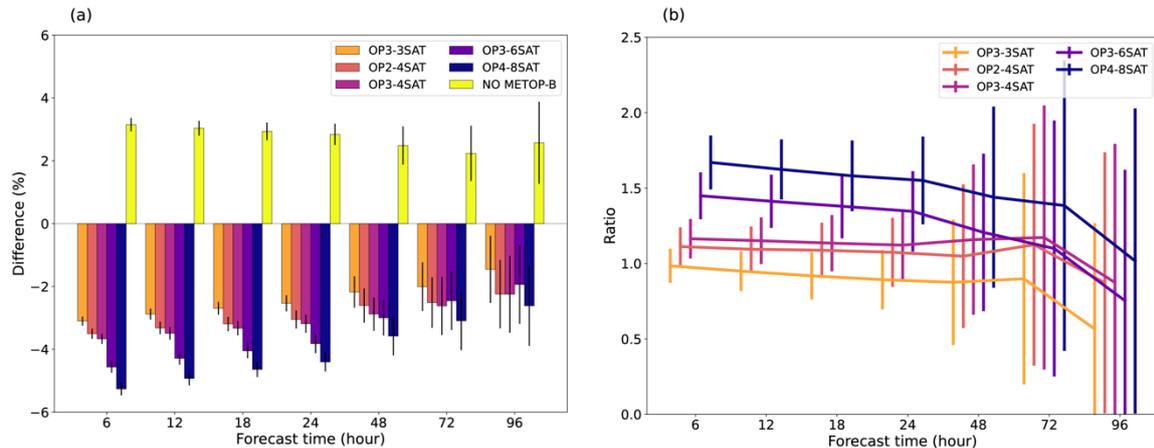


Figure 48: Impacts de la constellation EPS-Sterna dans différentes configurations sur la réduction d'erreur de prévision du système ARPEGE, comparés à l'impact d'un satellite Metop. L'impact a été estimé à partir du système OSSE ARPEGE. La variable utilisée pour synthétiser les scores sur la température, l'humidité, les vents et la pression de surface est la norme énergétique utilisée dans les calculs de statistiques FSOi. Les statistiques sont produites sur l'hémisphère Sud pour une période de 3 mois d'été et 3 mois d'hiver. Source : Rivoire et al. (2024).

Les deux méthodes permettent de mesurer les impacts sur les variables géophysiques de type vent, humidité, température ; la méthode OSSE permet en plus d'évaluer l'impact sur les nuages et les précipitations. La méthode EDA se focalise uniquement sur la courte échéance alors que la méthode OSSE permet d'estimer des impacts aux échéances maximum du système de prévision considéré (par exemple : 102 h pour ARPEGE). La Figure 48 et la Figure 49 illustrent les résultats de deux études de Météo-France qui ont été particulièrement remarquées au niveau européen en 2023, dans le contexte des réflexions et discussions préalables aux choix stratégiques de missions spatiales à vocation opérationnelle dans le domaine météorologique (mobilisant des arbitrages des organes exécutifs d'EUMETSAT et de l'ESA).

La Figure 48 montre un résultat obtenu pour une des dernières OSSE en date réalisée à Météo-France à la demande d'EUMETSAT. Cette étude a consisté à évaluer l'impact de la constellation EPS-Sterna qu'EUMETSAT propose à ses états membres en complément du programme EPS-SG. La figure de gauche montre les réductions d'erreurs de prévision obtenues grâce à EPS-Sterna dans différentes configurations de constellation (3 à 8 satellites). Ces impacts sont comparés à l'impact du retrait d'un satellite Metop du système d'assimilation d'ARPEGE. Cette mise en perspective permet d'évaluer les coûts et les bénéfices d'EPS-Sterna ; ces résultats ont d'ailleurs nourri l'étude des bénéfices socio-économiques réalisés par EUMETSAT en 2023 pour EPS-Sterna et EPS-Aeolus. Une étude d'impact complémentaire a aussi été menée par le CEPMMT sur ces sujets (Lean et al., 2022), en testant des configurations de constellation EPS-Sterna avec un nombre encore plus grand de satellites (jusqu'à 20 satellites sur 10 plans orbitaux). Les résultats ont montré une certaine saturation de l'amélioration de la qualité des prévisions à l'ajout de nouveaux capteurs au-delà d'une dizaine supplémentaire ce qui est intéressant pour faire des choix stratégiques de système d'observation.

D'autres études OSSE sont en cours à Météo-France, avec notamment le projet CMIM (Constellation de Mini sondeurs pour la Météorologie) du CNES qui vise en particulier à avancer sur la miniaturisation des sondeurs hyperspectraux infrarouge.

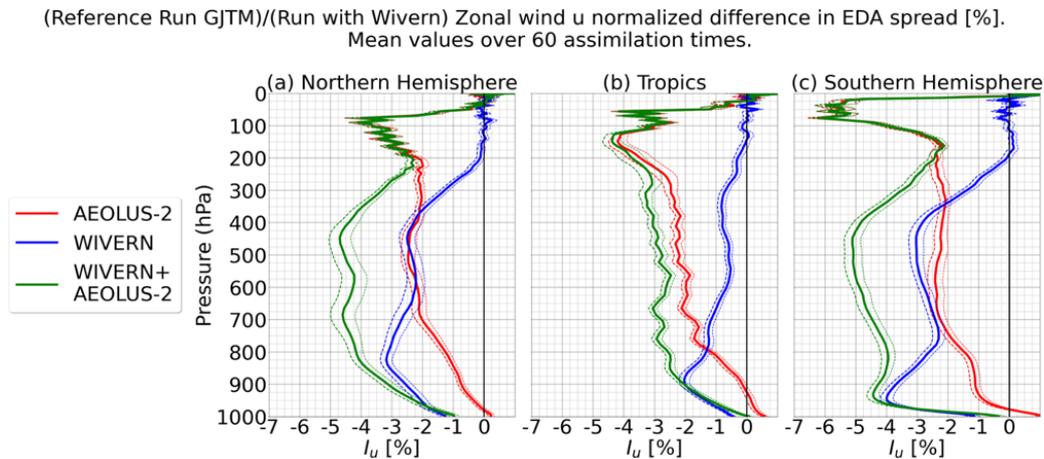


Figure 49 : Impacts du radar Doppler WIVERN candidat au programme de l'ESA Earth Explorer 11, comparés aux impacts attendus du lidar vent EPS-Aeolus. L'impact a été estimé à partir du système EDA ARPEGE. La variable géophysique considérée est le vent zonal et la métrique d'impact est la réduction de la dispersion des prévisions dans l'ensemble d'assimilation AEARP. Les statistiques sont produites pour une période de 1 mois d'été en 2022. Source : Sasso et al. (2024).

La Figure 49 montre la première mise en œuvre de la méthode EDA à Météo-France dans le cadre de la mission WIVERN qui a été sélectionnée pour passer en Phase 0 en 2021, puis en Phase A en 2023 dans le cadre du programme de l'ESA Earth Explorer 11. WIVERN est un radar Doppler à balayage conique qui permettrait d'obtenir des mesures de vents au cœur des nuages à fine résolution et à l'échelle globale. Ses observations seraient donc très complémentaires aux observations d'EPS-Aeolus, suite proposée par l'ESA et EUMETSAT au programme Aeolus et qui observe les vents, principalement en zone de ciel clair. L'étude EDA a permis de quantifier cette complémentarité qui est illustrée Figure 49. On peut y voir que les observations de WIVERN impactent plus les basses couches qu'EPS-Aeolus. On peut également noter que la combinaison des deux systèmes de mesure amène à une réduction d'erreurs plus importante que chacun des deux systèmes considérés séparément. La contribution de Météo-France à la mission WIVERN s'est révélée être décisive pour la sélection de WIVERN en Phase A à l'*User Consultation Meeting* de l'ESA qui s'est tenu en octobre 2023.

L'expertise acquise à Météo-France sur ces expériences d'impact est unique en Europe. EUMETSAT a récemment choisi de contribuer à la pérenniser en nous proposant de construire un Cadre Scientifique (*Scientific Framework*) de 5 ans. Cela permettra de réaliser des études sur les technologies que cette agence pourrait vouloir déployer dans les cadres de futurs systèmes tels que Météosat Quatrième Génération et EPS Troisième Génération. L'horizon pour ces futurs systèmes est lointain (au-delà de 2040) mais leur justification ainsi que les grandes orientations technologiques doivent être réalisées en amont. Il paraît stratégique de poursuivre ce type d'étude afin que nos besoins soient pris en compte le plus possible dans ces futurs systèmes.

4.5 Synthèse sur les futures technologies

Cette section a permis de dresser un panorama de différentes technologies qui pourraient se révéler pertinentes dans l'avenir pour la PNT. Ce panorama est non-exhaustif, le domaine des développements instrumentaux étant relativement vaste. Comme aux sections précédentes, une synthèse des réflexions sur ce sujet est proposée dans le Tableau 5.

Il est important de noter que la montée en maturité scientifique et/ou technique nécessiterait pour chacun des sujets abordés un investissement significatif ; il est donc critique de bien estimer à l'avance le rapport « coût/bénéfice » de chaque nouveau jeu d'observations. Pour certaines futures observations, une estimation subjective de ce rapport peut être réalisée grâce à notre expertise ainsi que l'expertise et les études menées par d'autres SMN. Pour d'autres systèmes pour lesquels trop peu d'études ont été menées, une estimation subjective du rapport « coût/bénéfice » est beaucoup plus difficile.

En ce qui concerne les observations de télédétection depuis l'espace, si certaines missions spatiales citées ci-dessous en sont à une phase de décision avancée (exemple : LSTM et CIMR dans le cadre du programme Copernicus Sentinel Expansion), d'autres ne sont qu'au stade de propositions (BARODAR proposé au programme ESA Earth Explorer 12), de Phase 0 (exemple : constellation CMIM), de Phase A (WIVERN proposé au programme ESA Earth Explorer 11), ou encore à l'initiative du secteur privé (constellation de radars précipitations par Tomorrow.io ou constellation de sondeurs micro-ondes hyperspectraux par Spire). Ainsi, le degré de priorité sur les études à conduire sera à ajuster au fil de l'eau en fonction de l'évolution de la programmation spatiale internationale.

En ce qui concerne les observations de télédétection depuis la surface, et qui nécessiteraient le déploiement de futurs réseaux d'instruments dans les dix prochaines années, le degré de priorité sur les études d'assimilation de données à conduire sera à évaluer en concertation entre les directions thématiques de Météo-France en fonction de leurs contraintes respectives.

Tableau 5: Synthèse sur les futures technologies pour l'observation à haute cadence temporelle et la haute résolution. Les systèmes d'observation identifiés par un fond vert sont ceux pour lesquels une expérience d'impact a été réalisée, par MF ou par d'autres centres, et dont les résultats indiquent un bon potentiel pour nos systèmes. Ceux identifiés par un fond jaune sont ceux pour lesquels il n'y a pas encore d'expérience d'impact disponible mais pour lesquels nous avons l'intuition qu'ils pourraient se révéler importants dans l'avenir. Ceux identifiés par un fond blanc sont ceux pour lesquels les potentiels impacts ne sont pas encore connus ou estimés comme faibles à ce stade.

Famille d'obs.	Type d'obs.	Impact démontré / Impact potentiel	Niveau de maturité scientifique	Niveau de maturité technique	Projets structurants en cours	Projets structurants à venir
<i>In situ</i>	Véhicules connectés	Observations de température de bonne qualité après contrôles. Fort intérêt pour la météorologie urbaine et routière.	4	1	Plan d'action Données d'Opportunité MF	
	Smartphones	Impact positif de l'assimilation des observations de pression de surface montré à l'étranger.	4	1		Projet pilote CEPMMT – EUMETNET « IoT observations for NWP » (2024–2025)
	Webcam et caméras	Déjà utilisé pour vérification humaine de la PNT. Variables de temps sensible encore éloignées de l'assimilation.	1	2	Plan d'action Données d'Opportunité MF	
	Observations participatives humaines	Déjà utilisé pour vérification humaine de la PNT. Variables de temps sensible encore éloignées de l'assimilation.	1	2	Plan d'action Données d'Opportunité MF	

Téledétection passive depuis la surface	Liens micro-ondes entre antennes de télécommunication (CML) ou avec des satellites (SML)	Évaluation de la PNT via potentielle intégration dans ANTILOPE.	3	1	Plan d'action Données d'Opportunité MF Projets Raincell et COST Opense (2021–2025)	
	Radiométrie micro-ondes	Impact démontré localement pendant la campagne SOFOG3D sur l'amélioration des biais de température et la génération du brouillard dans les prévisions AROME.	6	4	EUMETNET E-PROFILE	EUMETNET E-PROFILE
Téledétection active depuis la surface	Lidars « vapeur d'eau »	Intérêt potentiel pour les prévisions d'humidité dans la couche limite, évaluation en cours de l'assimilation de 6 lidars dans AROME-France (projet WALINEAS).	4	1	Projet ANR WALINEAS Thèse de FCPLR Agathe Gentic sur la fusion de données instrumentales pour la prévision immédiate	
	Radars « nuages »	Intérêt potentiel pour l'évaluation des modèles et de leur schéma microphysique et la prévision immédiate par fusion de données.	4	1		
Téledétection passive depuis l'espace	Radiométrie micro-ondes à haute résolution pour la surface (CIMR)	Premières mesures à haute résolution horizontale aux basses fréquences micro-ondes, intérêt pour la surface (glace de mer, humidité dans le sol mais aussi précipitations).	6	6		APR CNES 2026
	Imagerie très haute résolution pour la température de surface (TRISHNA et LSTM)	Premières mesures à très haute résolution horizontale (<100 m) pour l'analyse de surface.	1	1	Cadre à construire	
	Radiométrie micro-ondes hyperspectrale pour la troposphère (Spire, UK RAL Space)	Premières mesures à haute résolution verticale du profil de température et d'humidité par tout type de temps. Intérêt démontré par méthode 1D.	3	6		Éventuelle collaboration avec Airbus Defense and Space
	Constellation de sondeurs IR/MW (EPS-Sterna, CMIM)	Fort intérêt démontré par OSSE pour la densification des mesures existantes grâce à des constellations de petits satellites.	9	7	Projet CMIM CNES	Scientific Framework EUMETSAT et Phase 0 CNES CMIM
	Radio-occultation GNSS polarisée	Intérêt potentiel pour les nuages et les précipitations. Instrument compact pouvant être déployé en constellation.	1	5		Éventuelle collaboration avec Spire
	Réflexométrie GNSS pour les vents de surface	Intérêt potentiel pour l'estimation des vents de surface. Instrument compact pouvant être déployé en constellation.	1	5		Éventuelle Collaboration avec Spire
	Téledétection active depuis l'espace	Lidar spatial EPS-Aeolus	Fort intérêt démontré grâce à Aeolus, avec un potentiel encore plus important grâce à des mesures plus précises. Nouvelles capacités de mesures pour les aérosols à explorer.	8	8	
Radars spatiaux Doppler (WIVERN EE11)		Premières mesures des vents dans les nuages à l'échelle globale. Fort intérêt démontré par EDA.	5	6	Projet Phase A WIVERN	Projet Phase A WIVERN
Radars spatiaux pour la pression de surface (BARODAR EE12)		Premières mesures de la Pression de surface depuis l'espace. Fort intérêt démontré par OSSE.	4	4	Projet BARODAR déposé à l'ESA pour Earth Explorer 12 mais non retenu	Futur projet de Phase 0 BARODAR EE13
Radars spatiaux miniaturisés pour les précipitations		Premières mesures globales de réflectivité dans les nuages. Intérêt pour les nuages et les précipitations.	4	3		

5. Conclusions et perspectives

Ce document a dressé un panorama des recherches et de développements pertinents pour l'exploitation des observations pour la prévision numérique du temps. Ce panorama a été présenté en trois temps : la Section 2 a décrit l'exploitation possible des observations déjà disponibles dans nos bases de données, la Section 3 a illustré les recherches et développements autour des observations qui seront disponibles d'ici environ 3 ans, enfin la Section 4, plus prospective, a été l'occasion de mettre en avant certains systèmes d'observation d'avenir dans lesquels il nous paraît pertinent d'investir.

Pour chacune des sections, un tableau de synthèse a été proposé avec des indicateurs de niveau de maturité scientifique et technique à Météo-France. Certains systèmes d'observation présentent des niveaux élevés de maturité sur les deux aspects. Ceci indique qu'ils sont prêts pour un transfert vers l'opérationnel. Nous avons aussi souligné l'importance de pouvoir transférer des développements dans des délais raisonnables (dans l'idéal, dans un délai plus court que la durée des recherches elle-même). Une solution serait une intégration plus continue des développements liés aux observations dans nos chaînes opérationnelles.

Certains autres sujets ont à ce stade des niveaux de maturité beaucoup plus bas, soit sur les aspects scientifiques, soit sur les aspects techniques, soit les deux. Dans chacune des sections, nous avons montré de nombreux exemples de travaux de recherches qui nous ont permis de progresser sur les deux volets grâce au soutien de nos partenaires nationaux et internationaux, en particulier le CNRS, le CNES, EUMETSAT, l'ESA, EUMETNET, le CEPMMT et le consortium ACCORD. Les sujets répertoriés dans les tableaux de synthèses seraient a priori tous intéressants pour nourrir nos chaînes opérationnelles. Il sera donc important d'identifier des moyens pour le maximum d'entre eux, dans le cadre de partenariats pour des stages de recherches, thèses de doctorat, postdoctorats, contrats d'ingénieur d'étude et d'ingénieur de recherche, qui ont par le passé permis d'explorer efficacement des voies concrétisées ensuite dans un cadre opérationnel pérenne. Cela étant, pour les sujets caractérisés par des niveaux de maturités scientifiques et techniques très bas, il sera important de se poser la question du rapport « coût/bénéfice » en mettant en regard les potentiels gains en matière de qualité sur la prévision numérique et les possibilités de financement de projets de recherches. La disponibilité de résultats d'expérience d'impact comme indiqué dans le Tableau 5, réalisé par MF ou bien d'autres centres, se révèle être précieuse pour la priorisation des sujets.

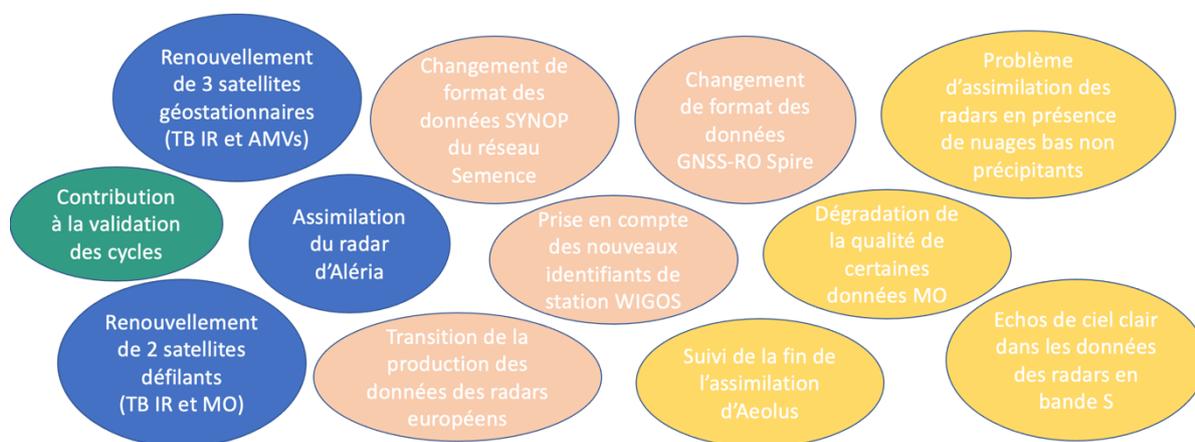


Figure 50 : Illustration des différents types de situations rencontrés en 2023 sur le système d'observation assimilé dans ARPEGE et AROME avec en bleu les capteurs renouvelés, en rose les changements de format opérés par les

producteurs de données, et en orange les problèmes rencontrés sur la qualité des observations. AMV : atmospheric motion vectors, IR : infrarouge, MO : micro-ondes, TB : température de brillance.

Pour chaque sujet arrivé à maturité, il sera nécessaire de bien identifier les moyens nécessaires afin de maintenir et de développer la nouvelle filière d'assimilation transférée vers l'opérationnel, jusqu'à son monitoring. Un exemple en la matière sont les observations d'éclairs qui paraissent très prometteuses pour la prévision des événements à fort impact.

Bien anticiper ces aspects est un élément clé à considérer, car les problèmes rencontrés avec les données d'observations sont fréquents, variés, et nécessitent une véritable veille, afin qu'une fois transféré, un développement innovant nourrisse la qualité de nos prévisions de façon pérenne. La Figure 50 illustre à titre d'exemple les grandes familles de situations rencontrées sur les observations durant l'année 2023 ; chacune de ces situations a nécessité une intervention sur la chaîne opérationnelle qui a permis de préserver la qualité de notre système en conservant les observations pour lesquelles les systèmes de prévision sont configurés. Ces adaptations, fréquentes et inévitables, ont également un impact sur les recherches de fond car leur résolution nécessite souvent d'être traitée en urgence, entrecoupant ainsi les études menées sur le temps long.

Nous avons aussi vu qu'un défi majeur pour l'établissement est le renouvellement complet en cours de la flotte de satellite opérationnel d'EUMETSAT avec Météosat Troisième Génération et EPS Seconde Génération. Cette transition répond à de fortes attentes et s'annonce prometteuse pour la qualité des chaînes de prévision de Météo-France, en particulier grâce à de toutes nouvelles technologies déployées telles que l'instrument hyperspectral infrarouge IRS. La disponibilité des données de tous les nouveaux instruments à bord de MTG et EPS-SG s'étalera jusqu'en 2026. Des réflexions sont en cours en vue de faciliter l'intégration des observations, afin que les usagers bénéficient de l'investissement financier majeur réalisé par EUMETSAT et ses États membres. Il est à noter que l'investissement supplémentaire proposé par EUMETSAT pour les programmes EPS-Sterna et EPS-Aeolus pourrait également apporter leurs lots respectifs d'améliorations importantes s'il venait à être financé. Il conviendra alors, le cas échéant, d'organiser l'exploitation des données ainsi produites, afin que l'investissement porte ses fruits dans les productions opérationnelles de Météo-France.

Les observations à la surface et dans la couche limite nécessiteront également une attention particulière dans les années à venir. L'assimilation des données d'opportunité issues des stations météorologiques personnelles de type Netatmo sera ainsi une priorité forte des prochaines années. La première étape sera de poursuivre notre implication dans les projets dédiés d'EUMETNET afin que ces données deviennent prochainement disponibles en temps réel avec la possibilité de les utiliser dans nos chaînes opérationnelles. Le projet transverse MASCOT, récemment amorcé à Météo-France, sera également un cadre important afin de progresser en direction d'une assimilation couplée surface/atmosphère.

Ce document a aussi été l'occasion de citer plusieurs développements à venir pour lesquels nous prévoyons d'exploiter l'intelligence artificielle pour le traitement des observations. Un projet récemment soumis par Météo-France et ses partenaires européens au programme Horizon Europe pourrait nous permettre, s'il est financé, de réaliser notre premier opérateur d'observations pour les observations d'éclairs en utilisant l'apprentissage automatique (*machine learning*), interfacé avec le code IFS/ARPEGE. Si l'expérience se révèle être fructueuse, il pourrait être intéressant d'élargir l'approche à d'autres observations telles que les observations polarimétriques des radars météorologiques. Notre montée en expertise en la matière pourra également se faire en utilisant des outils en intelligence artificielle développés par d'autres instituts. Le démarrage de travaux sur les

observations spatiales dans le domaine visible sera un banc d'essai avec l'utilisation de l'opérateur d'observations développé par le DWD et disponible au sein du code de transfert radiatif RTTOV. À terme, l'intelligence artificielle pourrait être utilisée pour bien d'autres aspects concernant les observations, afin par exemple d'automatiser les traitements de contrôle de qualité et la sélection des observations.

Au-delà de l'exploitation de l'intelligence artificielle pour remplacer des briques élémentaires des systèmes d'assimilation actuels, d'autres projets très exploratoires sont aussi en réflexion, en particulier au CEPMMT. Est notamment à l'étude l'idée de pouvoir inférer les conditions initiales d'un système de prévisions de manière directe grâce aux observations et l'intelligence artificielle, sans recourir à un système d'assimilation de données traditionnel (McNally et al., 2024). Les défis à relever sont nombreux pour que de telles méthodes voient le jour et sans être exhaustif, il est possible de citer les questionnements suivants : (i) quels choix de données observées pour l'inférence de quels paramètres géophysiques ? (ii) quelles archives de données pour l'apprentissage de ces modèles d'inférence de conditions initiales ? (iii) comment prendre en compte les géométries d'observations très variées des différents instruments de mesure ? Ainsi, si ce type d'applications de l'intelligence artificielle venaient à émerger, celles-ci pourraient s'appuyer sur l'expertise forte en physique de la mesure dont Météo-France est actuellement dotée.

6. Bibliographie

- Al-Sakka, H., Boumahmoud, A., Fradon, B., Frasier, S. J., & Tabary, P. (2013). A New Fuzzy Logic Hydrometeor Classification Scheme Applied to the French X-, C-, and S-Band Polarimetric Radars. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(10), 2328–2344. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0236.1>
- Augros, C., Caumont, O., Ducrocq, V., & Gaussiat, N. (2018). Assimilation of radar dual-polarization observations in the AROME model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(714), 1352–1368. <https://doi.org/10.1002/qj.3269>.
- Båserud, L., Lussana, C., Nipen, T. N., Seierstad, I. A., Oram, L., & Aspelien, T. (2020). TITAN automatic spatial quality control of meteorological in-situ observations. *Advances in Science and Research*, 17, 153–163. <https://doi.org/10.5194/asr-17-153-2020>.
- Bauer, P., Geer, A.J., Lopez, P. & Salmond, D. (2010). Direct 4D-Var assimilation of all-sky radiances. Part I: Implementation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(652), 1868–1885. <https://doi.org/10.1002/qj.659>.
- Barreyat, M., Chambon, P., Mahfouf, J.-F., Faure, G., & Ikuta, Y. (2021). A 1D Bayesian inversion applied to GPM Microwave Imager observations: Sensitivity studies. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 99(4), 1045–1070. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2021-050>.
- Barreyat, M., Chambon, P., Mahfouf, J.-F., & Faure, G. (2023). A 1D Bayesian inversion of microwave radiances using several radiative properties of solid hydrometeors. *Atmospheric Science Letters*, 24, e1142. <https://doi.org/10.1002/asl.1142>.
- Bell, A., Martinet, P., Caumont, O., Vié, B., Delanoë, J., Dupont, J.-C., & Borderies, M. (2021). W-band radar observations for fog forecast improvement: an analysis of model and forward operator errors, *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 4929–4946. <https://doi.org/10.5194/amt-14-4929-2021>.
- Birman, C., Mahfouf, J.-F., Milz, M., Mendrok, J., Buehler, S. A. & Brath, M. (2017). Information content on hydrometeors from millimeter and sub-millimeter wavelengths. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 69(1), 1271562. <https://doi.org/10.1080/16000870.2016.1271562>.
- Bernède, L. (2022). Observation participative et gestion des épisodes neigeux. *La Météorologie*, 117, 24–32. <https://doi.org/10.37053/lameteorologie-2022-0033>.
- Blackwell, W. J., Braun, S., Bennartz, R., Velden, C., DeMaria, M., Atlas, R., ... & Leslie, R. V. (2018). An overview of the TROPICS NASA earth venture mission. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144 (Suppl. 1), 16–26. <https://doi.org/10.1002/qj.3290>.
- Bormann, N., Collard, A., & Bauer, P. (2010). Estimates of spatial and interchannel observation-error characteristics for current sounder radiances for numerical weather prediction. II: Application to AIRS and IASI data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(649), 1051–1063. <https://doi.org/10.1002/qj.615>.
- Brognez, H., Roca, R., Auguste, F., Chaboureau, J.-P., Haddad, Z., Munchak, S. J., ... & Kollias, P. (2022). Time-delayed tandem microwave observations of tropical deep convection: Overview of the C2OMODO mission. *Frontiers in Remote Sensing*, 3, 854735. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.854735>.
- Carlin, J. T., Gao, J., Snyder, J. C., & Ryzhkov, A. V. (2017). Assimilation of ZDR columns for improving the spinup and forecast of convective storms in storm-scale models: Proof-of-concept experiments. *Monthly Weather Review*, 145(12), 5033–5057. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0103.1>.
- Chambon, P., Mahfouf, J.-F., Audouin, O., Birman, C., Fourrié, N., Loo, C., ... & Raspaud, D. (2023). Global observing system experiments within the Météo-France 4D-Var data assimilation system. *Monthly Weather Review*, 151(1), 127–143. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-22-0087.1>.

- Cardellach, E., Oliveras, S., Rius, A., Tomás, S., Ao, C. O., Franklin, G. W., ... & Cerezo, F. (2019). Sensing heavy precipitation with GNSS polarimetric radio occultations. *Geophysical research letters*, *46*(2), 1024–1031. <https://doi.org/10.1029/2018GL080412>.
- Caumont, O. (2007). Simulation et assimilation de données radar pour la prévision de la convection profonde à fine échelle. Thèse de Doctorat, Université Toulouse III. <https://www.theses.fr/2007TOU30217>.
- Caumont, O., Ducrocq, V., Wattrelot, É., Jaubert, G., & Pradier-Vabre, S. (2010). 1D+3DVar assimilation of radar reflectivity data: A proof of concept. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, *62*(2), 173–187. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2009.00430.x>.
- Caumont, O., Mandement, M., Bouttier, F., Eeckman, J., Lebeaupin Brossier, C., Lovat, A., ... & Laurantin, O. (2021). The heavy precipitation event of 14–15 October 2018 in the Aude catchment: a meteorological study based on operational numerical weather prediction systems and standard and personal observations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *21*(3), 1135–1157. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1135-2021>.
- Chambon, P., Mahfouf, J.-F., Audouin, O., Birman, C., Fourrié, N., Loo, C., ... & Raspaud, D. (2023). Global observing system experiments within the Météo-France 4D-Var data assimilation system. *Monthly Weather Review*, *151*(1), 127–143. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-22-0087.1>.
- Chwala, C., & Kunstmann, H. (2019). Commercial microwave link networks for rainfall observation: Assessment of the current status and future challenges. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, *6*(2), e1337. <https://doi.org/10.1002/wat2.1337>.
- Combarrous, P., Martet, M., Caumont, O., & Defer, É. (2024). Assimilation of satellite lightning data in a storm-scale numerical weather prediction system using a 3D-EnVar data assimilation scheme. *Monthly Weather Review*, *152*(2), 553–570. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-23-0100.1>.
- Coopmann, O., Guidard, V., Fourrié, N., & Plu, M. (2018). Assimilation of IASI ozone-sensitive channels in preparation for an enhanced coupling between numerical weather prediction and chemistry transport models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *123*(21), 12452–12473. <https://doi.org/10.1029/2017JD027901>.
- Coopmann, O., Guidard, V., Fourrié, N., & Josse, B. (2020). Use of variable ozone in a radiative transfer model for the global Météo-France 4D-Var system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *146*(733), 3729–3746. <https://doi.org/10.1002/qj.3869>.
- Coopmann, O., Fourrié, N., Chambon, P., Vidot, J., Brousseau, P., Martet, M., & Birman, C. (2023). Preparing the assimilation of the future MTG-IRS sounder into the mesoscale numerical weather prediction AROME model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *149*(757), 3110–3134. <https://doi.org/10.1002/qj.4548>.
- Dabas, A., Pourret, V., Mahfouf, J.-F., Payan, C., Chambon, P., Bénichou, H. & Khaykin, S. (2023). Mission spatiale Aeolus : bilan fructueux et prometteur pour l'étude de l'atmosphère et la prévision météorologique. *La Météorologie*, *123*, 5–6. <https://doi.org/10.37053/lameteorologie-2023-0085>.
- Demortier, A., Mandement, M., Pourret, V., & Caumont, O. (2024). Assimilation of surface pressure observations from personal weather stations in AROME-France. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *24*, 907–927. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-907-2024>.
- Desroziers, G., Berre, L., Chapnik, B., & Poli, P. (2005). Diagnosis of observation, background and analysis-error statistics in observation space. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *131*(613), 3385–3396. <https://doi.org/10.1256/qj.05.108>.
- Destouches, M., Montmerle, T., Michel, Y., & Caron, J.-F. (2023). Impact of hydrometeor control variables in a convective-scale 3D-EnVar data assimilation scheme. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *149*(752), 757–780. <https://doi.org/10.1002/qj.4426>.

- Duncan, D. I., Bormann, N., Geer, A. J., & Weston, P. (2022). Assimilation of AMSU-A in all-sky conditions. *Monthly Weather Review*, 150(5), 1023–1041. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0273.1>.
- Duruiseau, F., Chambon, P., Wattrelot, E., Barreyat, M., & Mahfouf, J.-F. (2019). Assimilating cloudy and rainy microwave observations from SAPHIR on board Megha Tropiques within the ARPEGE global model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(719), 620–641. <https://doi.org/10.1002/qj.3456>.
- Erdmann, F., Caumont, O., & Defer, E (2023). Assimilation of Meteosat Third Generation (MTG) Lightning Imager (LI) pseudo-observations in AROME-France – proof of concept. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(8), 2821–2840. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-2821-2023>.
- Fielding, M. D., & Janisková, M. (2020). Direct 4D-Var assimilation of space-borne cloud radar reflectivity and lidar backscatter. Part I: Observation operator and implementation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(733), 3877–3899. <https://doi.org/10.1002/qj.3878>.
- Garcelon, L., Brana, S., Didez, J., Ameye, F. (2023). StatIC : un réseau d'observation au service d'une information de proximité et de vulgarisation scientifique. *La Météorologie*, 122, 37–46. <https://doi.org/10.37053/lameteorologie-2023-0071>.
- Geer, A. J., Baordo, F., Bormann, N., Chambon, P., English, S. J., Kazumori, M., ... & Lupu, C. (2017). The growing impact of satellite observations sensitive to humidity, cloud and precipitation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143(709), 3189–3206. <https://doi.org/10.1002/qj.3172>.
- Geer, A. J. (2023). Simultaneous inference of sea ice state and surface emissivity model using machine learning and data assimilation. *ESS Open Archive*. <https://doi.org/10.22541/essoar.169945325.51725282/v1>.
- Giard, D., Poli, P., Morin, S., Cohuet, J. B., Marin, F., Souverain, C., ... & Créau, M. (2018). L'approche participative au service de l'observation météorologique. *La Météorologie*, 100, 105–110. <https://doi.org/10.4267/2042/65152>.
- Guedj, S., Karbou, F., & Rabier, F. (2011). Land surface temperature estimation to improve the assimilation of SEVIRI radiances over land. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D14). <https://doi.org/10.1029/2011JD015776>.
- Guedj, S., Guidard, V., Ménérier, B., Mahfouf, J.-F., & Rabier, F. (2014). Future benefits of high-density radiance data from MTG-IRS in the AROME fine-scale forecast model. Final Report. <https://meteofrance.hal.science/meteo-01133380/>.
- Guerbette, J., Mahfouf, J.-F., & Plu, M. (2016). Towards the assimilation of all-sky microwave radiances from the SAPHIR humidity sounder in a limited area NWP model over tropical regions. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 68(1), 28620. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v68.28620>.
- Guidard, V., Fourrié, N., Brousseau, P., & Rabier, F. (2011). Impact of IASI assimilation at global and convective scales and challenges for the assimilation of cloudy scenes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(661), 1975–1987. <https://doi.org/10.1002/qj.928>.
- Guillet, O., Weaver, A. T., Vasseur, X., Michel, Y., Gratton, S., & Gürol, S. (2019). Modelling spatially correlated observation errors in variational data assimilation using a diffusion operator on an unstructured mesh. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(722), 1947–1967. <https://doi.org/10.1002/qj.3537>.
- Gosset, M., Kunstmann, H., Zougmore, F., Cazenave, F., Leijnse, H., Uijlenhoet, R., ... & Hoedjes, J. (2016). Improving rainfall measurement in gauge poor regions thanks to mobile telecommunication networks. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(3), ES49–ES51. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00164.1>.

- Goux, O., Gürol, S., Weaver, A. T., Diouane, Y., & Guillet, O. (2024). Impact of correlated observation errors on the conditioning of variational data assimilation problems. *Numerical Linear Algebra with Applications*, 31(1), e2529. <https://doi.org/10.1002/nla.2529>.
- Hintz, K. S., Vedel, H., & Kaas, E. (2019). Collecting and processing of barometric data from smartphones for potential use in numerical weather prediction data assimilation. *Meteorological Applications*, 26(4), 733–746. <https://doi.org/10.1002/met.1805>.
- Holland, M. (2003). Geology of Kilauea caldera and Ka'u desert/Hawai'i (thesis mapping). Mémoire de master, Université RWTH Aachen. <https://publications.rwth-aachen.de/record/230226>.
- Hotta, D., Lonitz, K., & Healy, S. (2024). Forward operator for polarimetric radio occultation measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 17, 1075–1089. <https://doi.org/10.5194/amt-17-1075-2024>.
- Ikuta, Y., Okamoto, K., & Kubota, T. (2021). One-dimensional maximum-likelihood estimation for spaceborne precipitation radar data assimilation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(735), 858–875. <https://doi.org/10.1002/qj.3950>.
- Jensen, A. A., Pinto, J. O., Bailey, S. C., Sobash, R. A., Romine, G., Boer, G. D., ... & Steiner, M. (2022). Assimilation of a coordinated fleet of uncrewed aircraft system observations in complex terrain: Observing system experiments. *Monthly Weather Review*, 150(10), 2737–2763. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-22-0090.1>.
- Karbou, F., Prigent, C., Eymard, L., & Pardo, J. R. (2005). Microwave land emissivity calculations using AMSU measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(5), 948–959. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.837503>.
- Karbou, F., Rabier, F., & Prigent, C. (2014). The assimilation of observations from the Advanced Microwave Sounding Unit over sea ice in the French global numerical weather prediction system. *Monthly Weather Review*, 142(1), 125–140. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00025.1>.
- Kumjian, M. R., Prat, O. P., Reimel, K. J., van Lier-Walqui, M., & Morrison, H. C. (2022). Dual-polarization radar fingerprints of precipitation physics: A review. *Remote Sensing*, 14(15), 3706. <https://doi.org/10.3390/rs14153706>.
- Lac, C., Le Pichon, A., Listowski, C., Abbassi, G., Astafyeva, E., Baron, A., ... & Vergoz, J. (2022). L'éruption du volcan Hunga Tonga-Hunga Ha'apai le 15 janvier 2022 : un ébranlement du système Terre à l'échelle planétaire. *Note Allenvi Inter-organismes : Groupe Thématique Atmosphère*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7678770>.
- Lean, K., Bormann, N., Healy, S., & English, S. (2022). Final report: Study to assess earth observation with small satellites and their prospects for future global numerical weather prediction. ESA Contract Report. <https://doi.org/10.21957/kp7z1sn1n>
- Lepetit, P. (2021). Méthodes d'apprentissage profond pour l'estimation de paramètres météorologiques à partir d'images webcam. Applications au suivi des épisodes de neige en plaine. Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay. <http://www.theses.fr/2021UPASJ023/document>.
- Leuenberger, D., Haeefele, A., Omanovic, N., Fengler, M., Martucci, G., Calpini, B., ... & Rossa, A. (2020). Improving high-impact numerical weather prediction with lidar and drone observations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(7), E1036–E1051. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0119.1>.
- Lopez, P. (2016). A lightning parameterization for the ECMWF integrated forecasting system. *Monthly Weather Review*, 144(9), 3057–3075. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0026.1>.
- Madaus, L. E., & Mass, C. F. (2017). Evaluating smartphone pressure observations for mesoscale analyses and forecasts. *Weather and Forecasting*, 32(2), 511–531. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-16-0135.1>.

- Mandement, M., & Caumont, O. (2020). Contribution of personal weather stations to the observation of deep-convection features near the ground. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(1), 299–322. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-299-2020>.
- Mandement, M., & Caumont, O. (2021). A numerical study to investigate the roles of former Hurricane Leslie, orography and evaporative cooling in the 2018 Aude heavy-precipitation event. *Weather and Climate Dynamics*, 2(3), 795–818, <https://doi.org/10.5194/wcd-2-795-2021>.
- Marquès, E., Masson, V., Naveau, P., Mestre, O., Dubreuil, V., & Richard, Y. (2022). Urban heat island estimation from crowdsensing thermometers embedded in personal cars. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(4), E1098–E1113, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0174.1>.
- Marquès, E. (2023). Etude à fine échelle de l'îlot de chaleur urbain par modélisation bayésienne à partir de données opportunes. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse. <https://theses.fr/2023INPT0016>.
- Martinet, P., Unger, V., Burnet, F., Georgis, J.-F., Hervo, M., Huet, T., ... & Thomas, G. (2022). A dataset of temperature, humidity, and liquid water path retrievals from a network of ground-based microwave radiometers dedicated to fog investigation. *Bulletin of Atmospheric Science and Technology*, 3(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s42865-022-00049-w>.
- McNally T., Lessig, C., Lean, P., Chantry, M., Alexe, M., Lang, S. (2024). Red sky at night... producing weather forecasts directly from observations. *ECMWF Newsletter*, 178, 30–34. <https://doi.org/10.21957/tmc81jo4c7>.
- Millán, L., Lebsock, M., Livesey, N., Tanelli, S., & Stephens, G. (2014). Differential absorption radar techniques: surface pressure. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(11), 3959–3970. <https://doi.org/10.5194/amt-7-3959-2014>.
- Mile, M., Randriamampianina, R., Marseille, G. J., & Stoffelen, A. (2021). Supermodding—A special footprint operator for mesoscale data assimilation using scatterometer winds. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(735), 1382–1402. <https://doi.org/10.1002/qj.3979>.
- Montmerle, T., Michel, Y., Arbogast, E., Ménétrier, B., & Brousseau, P. (2018). A 3D ensemble 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. <https://doi.org/10.1002/qj.3334>.
- Park, H. S., Ryzhkov, A. V., Zrnić, D. S., & Kim, K. E. (2009). The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: Description and application to an MCS. *Weather and forecasting*, 24(3), 730–748. <https://doi.org/10.1175/2008WAF2222205.1>.
- Pourret, V., Mahfouf, J.-F., Guidard, V., Moll, P., Doerenbecher, A., & Pignatelli, B. (2021). Variational bias correction for Mode-S aircraft derived winds. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 73(1), 1–27. <https://doi.org/10.1080/16000870.2021.1886808>.
- Pourret, V., Šavli, M., Mahfouf, J. F., Raspaud, D., Doerenbecher, A., Bénichou, H., & Payan, C. (2022). Operational assimilation of Aeolus winds in the Météo-France global NWP model ARPEGE. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(747), 2652–2671. <https://doi.org/10.1002/qj.4329>.
- Putnam, B., Xue, M., Jung, Y., Snook, N., & Zhang, G. (2019). Ensemble Kalman filter assimilation of polarimetric radar observations for the 20 May 2013 Oklahoma tornadic supercell case. *Monthly Weather Review*, 147(7), 2511–2533. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0251.1>.
- Prigent, C., Rossow, W. B., & Matthews, E. (1997). Microwave land surface emissivities estimated from SSM/I observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D18), 21867–21890. <https://doi.org/10.1029/97JD01360>.
- Rivoire L., Marty R., Carrel-Billiard T., Chambon P., Fourrié N., Audouin O., Martet M., Birman C., Accadia C. & Ackerman J. (2024). A global Observing System Simulation Experiment for the EPS-Sterna microwave constellation. En révision pour publication dans *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.

- Ruf, C., Gleason, S., Jelenak, Z., Katzberg, S., Ridley, A., Rose, R., ... & Zavorotny, V. (2013). The NASA EV-2 cyclone global navigation satellite system (CYGNSS) mission. In *2013 IEEE Aerospace Conference* (pp. 1–7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AERO.2013.6497202>.
- Sassi, M. Z., Fourrié, N., Guidard, V., & Birman, C. (2023). Preliminary assimilation of satellite derived land surface temperature from SEVIRI in the surface scheme of the AROME-France model. *Tellus A*, *75*(1), 88–107. <https://doi.org/10.16993/tellusa.48>.
- Sasso N., Borderies M., Chambon P., Pourret V., Berre L., Mahfouf J-F., Illingworth A., Battaglia A., Pourshamsi M., & Rennie M. (2024). Impact of WIVERN wind observations on Arpege NWP model forecasts using an Ensemble of Data Assimilation method. En préparation pour publication dans *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.
- Saunders, R., Hocking, J., Turner, E., Rayer, P., Rundle, D., Brunel, P., ... & Lupu, C. (2018). An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version 12). *Geoscientific Model Development*, *11*(7), 2717–2737. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2717-2018>.
- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., ... & Masson, V. (2011). The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, *139*(3), 976–991. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3425.1>.
- Sgoff, C., Acevedo, W., Paschalidi, Z., Ulbrich, S., Bauernschubert, E., Kratzsch, T., & Potthast, R. (2022). Assimilation of crowd-sourced surface observations over Germany in a regional weather prediction system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *148*(745), 1752–1767. <https://doi.org/10.1002/qj.4276>.
- Thomas, G., Mahfouf, J.-F., & Montmerle, T. (2020). Toward a variational assimilation of polarimetric radar observations in a convective-scale numerical weather prediction (NWP) model. *Atmospheric Measurement Techniques*, *13*(5), 2279–2298. <https://doi.org/10.5194/amt-13-2279-2020>.
- Thomas, G., Martinet, P., Brousseau, P., Chambon, P., Géorgis, J-F., Hervo, M., Huet, T., Löhnert, U., Orlandi, E. & Unger, V. (2024). Assimilation of ground-based microwave radiometer temperature observations into a convective-scale NWP model for fog forecast improvement. En révision pour publication dans *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.
- Trömel, S., Simmer, C., Blahak, U., Blanke, A., Doktorowski, S., Ewald, F., ... & Quaas, J. (2021). Overview: Fusion of radar polarimetry and numerical atmospheric modelling towards an improved understanding of cloud and precipitation processes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *21*(23), 17291–17314. <https://doi.org/10.5194/acp-21-17291-2021>.
- Uijlenhoet, R., Overeem, A., & Leijnse, H. (2018). Opportunistic remote sensing of rainfall using microwave links from cellular communication networks. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, *5*(4), e1289. <https://doi.org/10.1002/wat2.1289>.
- Vié, B., Pinty, J.-P., Berthet, S., & Leriche, M. (2016). LIMA (v1. 0): A quasi two-moment microphysical scheme driven by a multimodal population of cloud condensation and ice freezing nuclei. *Geoscientific Model Development*, *9*(2), 567–586. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-567-2016>.
- Villeneuve, E. (2023). Vers une synergie multi-missions infrarouge et micro-ondes pour l'assimilation des observations nuageuses. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse. <https://www.theses.fr/s295294>.
- Villeneuve, E., Chambon, P., & Fourrié, N. (2024). Synergistic approach of hydrometeor retrievals: considerations on radiative transfer and model uncertainties in a simulated framework. Accepted dans *Atmospheric Measurement Techniques*, 1–26. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-446>.
- Wattrelot, E., Caumont, O., & Mahfouf, J.-F. (2014). Operational implementation of the 1D+3D-Var assimilation method of radar reflectivity data in the AROME model. *Monthly Weather Review*, *142*(5), 1852–1873. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00230.1>.

