

Observer la Terre et son atmosphère pour améliorer les prévisions météorologiques

Par Philippe CHAMBON, Quentin LIBOIS

Direction de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Météo-France, Toulouse

Et Bruno PIGUET

Direction des Systèmes d'Observation, Météo-France, Toulouse

Météo-France s'appuie sur des prévisions météorologiques pour assurer ses missions de protection des populations et des biens. Ces prévisions sont basées sur des modèles numériques, alimentés par des observations diverses, provenant en majeure partie des satellites d'observation de la Terre. Ces satellites sont en renouvellement continu grâce aux efforts des agences spatiales. L'agence EUMETSAT, opérant les satellites météorologiques opérationnels européens, s'apprête par exemple à lancer une nouvelle génération d'instruments spatiaux qui permettront d'améliorer les capacités de prévision. En parallèle, des travaux de recherche permettent d'améliorer ses modèles en utilisant des observations *in situ* et spatiales. Les progrès à venir en matière de prévision du temps s'appuieront sur des observations plus fréquentes et à plus haute résolution spatiale avec de nouvelles générations de satellites, ainsi que l'émergence de technologies comme l'IA.

INTRODUCTION

Afin d'assurer ses missions de protection des populations et des biens, Météo-France s'appuie sur des prévisions météorologiques réalisées grâce à des modèles numériques. Ces derniers permettent, à partir de conditions initiales, de prédire l'évolution des conditions météorologiques jusqu'à 4 jours à l'avance sur tout le globe avec une résolution variant de 5 à 25 km, et jusqu'à 2 jours à l'avance sur l'Europe de l'Ouest à une résolution beaucoup plus fine de 1,3 km. Ces conditions initiales sont obtenues grâce à des algorithmes qui combinent de manière optimale des observations et une prévision antérieure, en tenant compte de leurs erreurs respectives. On parle d'assimilation de données.

Aujourd'hui, plus de 90 % des observations utilisées pour initialiser le modèle global ARPEGE proviennent des satellites d'observation de la Terre. Dans le cas du modèle régional AROME, les données satellitaires sont en proportion moins nombreuses (environ 10 %) car des observations plus adaptées à ce modèle à fine échelle sont utilisées, telles que les observations des réseaux de radars français et européen. Le modèle AROME bénéficie tout de même largement des observations satellitaires de par ses conditions aux limites fournies par ARPEGE. Météo-France s'appuie également sur une grande variété d'observations complémentaires, qu'il s'agisse de valider des produits satellite, d'avoir une mesure plus précise, ou d'accéder à des variables qui peuvent difficilement être mesurées depuis l'espace : réseaux opérationnels installés au sol mais aussi, instruments pouvant être déployés lors de campagnes de mesure, au sol, sous des ballons, des drones ou des avions.

Grâce aux efforts des agences spatiales, le système d'observation de la Terre depuis l'espace est en perpétuel renouvellement. Une amélioration continue de la capacité des systèmes de prévision à intégrer de nouvelles observations satellitaires est ainsi nécessaire afin d'améliorer les prévisions météorologiques, aux bénéfices des usagers. Au niveau européen, le premier fournisseur de données satellitaires est l'agence EUMETSAT. Cette organisation européenne, fédérant 30 États membres européens, s'apprête à renouveler l'intégralité de sa flotte de satellites en orbite basse (Metop Seconde Génération (MetopSG), à environ 800 km de la Terre) et en orbite géostationnaire (Meteosat Troisième Génération (MTG), à environ 36 000 km de la Terre), en déployant des technologies nouvelles et très prometteuses. La Figure 1 montre les deux premiers satellites Metop-SG en tests dans les salles blanches d'Airbus Defence and Space (ADS) à Toulouse. 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) ou encore Copernicus, le programme d'observation de la Terre de l'Union européenne. Au niveau international, l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) définit les bonnes pratiques d'échanges de données d'observations entre nations depuis des décennies. C'est ainsi que d'autres acteurs, principalement Nord-américains et asiatiques, jouent aussi un rôle clé en partageant, tout comme les Européens, leurs données d'observation.



Figure 1 : Photo des satellites Metop-SG A (positionné à l'horizontale à gauche) et Metop-SG B (positionné à la verticale à droite) en test dans les locaux d'Airbus Defence and Space le 10 novembre 2023 à Toulouse lors d'un évènement presse organisé par ADS, EUMETSAT et l'ESA (Crédits photographie EUMETSAT).

En amont de ces systèmes opérationnels de prévision, 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, si les mesures *in situ* ont joué et continuent de jouer un rôle important, en particulier à travers des campagnes de mesures ponctuelles, les mesures spatiales prennent une importance grandissante. En effet, elles permettent de systématiser l'observation de phénomènes, sur de longues périodes et de grandes zones géographiques. Certaines missions spatiales visent plus spécifiquement à suivre

l'évolution du climat, en assurant une continuité des mesures dans le temps. Il est ainsi possible de construire des séries temporelles de plusieurs décennies, indispensables pour détecter les changements climatiques et déterminer leurs causes ; ces séries temporelles sont largement utilisées pour contraindre les modèles qui simulent le climat futur. Pour ces missions, la qualité des mesures et leur inter-calibration avec les mesures passées sont fondamentales. En parallèle, d'autres missions visent à exploiter les dernières technologies disponibles afin d'enrichir notre compréhension du système Terre en déployant en orbite des instruments innovants permettant d'accéder à des informations nouvelles.

Le domaine de l'observation de la Terre est en évolution très rapide, et les perspectives en matière de recherche et d'applications en météorologie sont nombreuses, en particulier grâce à la miniaturisation des capteurs permettant d'envisager des constellations, et à l'essor de l'intelligence artificielle.

PHYSIQUE DE LA MESURE (*IN SITU* ET TÉLÉDÉTECTION) ET VARIABLES MESURÉES

Historiquement, les premières explorations de la dimension verticale de l'atmosphère ont été faites avec des mesures *in situ*, utilisant sur divers vecteurs (ballons, cerfs-volants, avions) des instruments similaires à ceux utilisés au sol. Ainsi Jean-Baptiste Biot et Louis Gay-Lussac utilisaient en 1804 une montgolfière pour des mesures de pression et de température jusqu'à 4 000 m d'altitude, et Robert Bureau et Pierre Idrac inventaient la radiosonde en 1929. Dans ces instruments, un élément sensible est au contact de l'air dont on veut mesurer les propriétés. Au fil du temps, ces capteurs ont été améliorés et adaptés aux conditions rencontrées : grande dynamique de mesure, besoin de plus grande rapidité de réaction. Ainsi, le capteur de température d'une radiosonde moderne est de très petite taille (pour diminuer son inertie), il n'a pas d'abri de protection du rayonnement (pour minimiser le poids et éviter les accrétions de givre), mais il est recouvert d'un film très réfléchissant, et les données sont corrigées *a posteriori* pour tenir compte des imperfections du capteur. Sur les avions, les carters de protection des sondes de température font encore l'objet de développements, pour s'approcher d'un *optimum* conciliant des besoins *a priori* antagonistes : amener un flux d'air le moins perturbé possible sur l'élément sensible, tout en le protégeant des gouttes d'eau, des cristaux de glace, et en ayant une partie réchauffée pour la protection contre le givrage, le tout en garantissant un temps de réponse suffisamment faible pour capturer la variabilité de l'atmosphère à l'échelle métrique sur un vecteur qui se déplace à une centaine de mètres par seconde.

Même si ces mesures restent locales, les progrès apportés par le spatial leur ont directement bénéficié. Le développement de la radionavigation par satellite, qui fournit la position et la vitesse de déplacement du ballon (donc le vent), a beaucoup apporté au radiosondage, avec une précision telle que depuis une vingtaine d'années les sondes n'ont plus besoin de capteur de pression : la pression calculée à partir de celle mesurée au sol et de l'intégration de la densité de l'air le long de la trajectoire de la sonde est plus précise que celle d'un baromètre embarqué. Les sondes s'en retrouvent allégées, les plus récentes pesant 36 g. Les données des avions sont aussi transmises en temps quasi-réel par satellite.

Les mesures par télédétection, réalisées depuis le sol ou l'espace se sont développées depuis le milieu du XX^e siècle, et s'appuient sur diverses gammes du spectre électromagnétique et plusieurs méthodes.

Les méthodes actives consistent à émettre une onde, puis à mesurer ce qui est rétrodiffusé par l'atmosphère. Ainsi les radars, selon leur longueur d'onde (dans les micro-ondes), sont sensibles aux gouttes de pluie, aux gouttelettes des nuages ou aux propriétés de la surface. Les lidars (utilisant un laser) peuvent être sensibles aux nuages, aux aérosols

(poussières désertiques, cendre volcanique, feux de biomasse, pollution anthropique) ou à certaines espèces chimiques, lorsque leur fréquence correspond à une raie du spectre de la molécule, et même à la température ou la pression en mesurant une espèce chimique dont la proportion est stable (oxygène, azote). Lorsque ces instruments ont la capacité de mesurer le décalage en fréquence de l'onde reçue (capacité Doppler), ils donnent accès au vent. Ces méthodes actives ont été déployées dans l'espace pour effectuer des mesures météorologiques depuis la fin des années 1990.

Parmi les méthodes passives, une première catégorie consiste à mesurer les émissions naturelles des constituants atmosphériques (hydrométéores, aérosols, molécules), dépendant de leur température, leur concentration et leur forme, ce qui permet de remonter à ces informations. Les radiomètres permettent de mesurer ce rayonnement, du spectre solaire jusqu'aux micro-ondes. Ces instruments étant capables de fournir un profil vertical, ils sont souvent désignés sous le nom de « sondes ». La Figure 2 montre un exemple d'observations acquises dans le domaine des micro-ondes depuis un satellite défilant américano-japonais et dont les observations, informatives sur les nuages et les précipitations, sont utilisées à Météo-France.

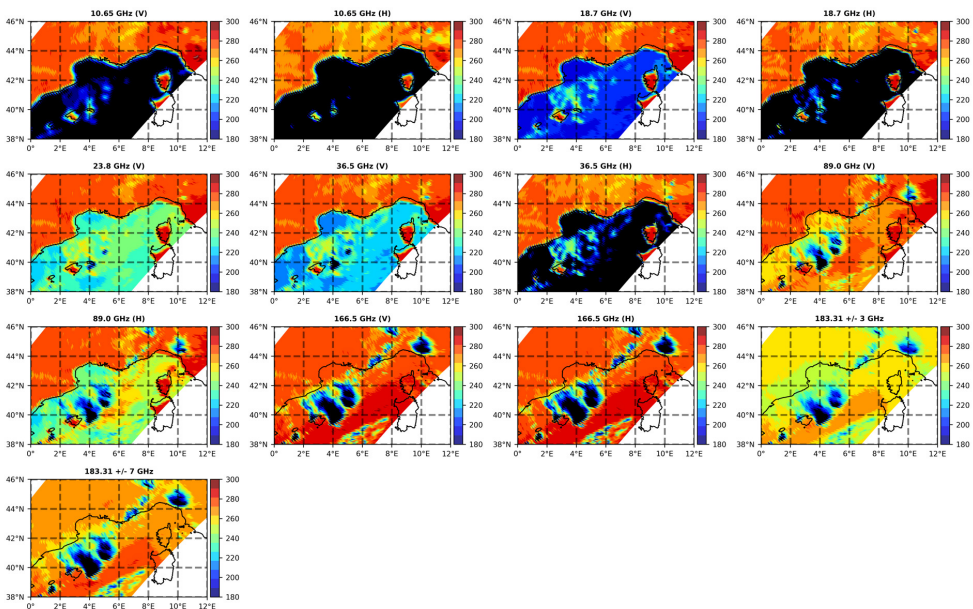


Figure 2 : Exemple d'observations du satellite GPM-Core en mer Méditerranée le 18 août 2022 à différentes bandes de fréquences permettant d'obtenir des informations sur le contenu en vapeur d'eau, en pluie et en glace au sein de l'événement convectif observé (Thèse Élisabeth Chardon-Légrand, Météo-France).

L'autre catégorie de méthodes passives consiste à mesurer une modification (absorption, réfraction) apportée par l'atmosphère à une onde connue. Ainsi, depuis le sol, avec un récepteur GNSS, il est possible de mesurer le délai induit sur le signal par l'humidité de la troposphère, et donc d'en déduire une mesure de celle-ci. Depuis l'espace, également avec un récepteur GNSS, les techniques dites de radio-occultation mesurent la courbure du trajet d'une onde traversant l'atmosphère entre deux satellites pour en déduire un gradient d'indice de réfraction puis un profil de température. De même, l'atténuation du rayonnement solaire renseigne sur la composition atmosphérique.

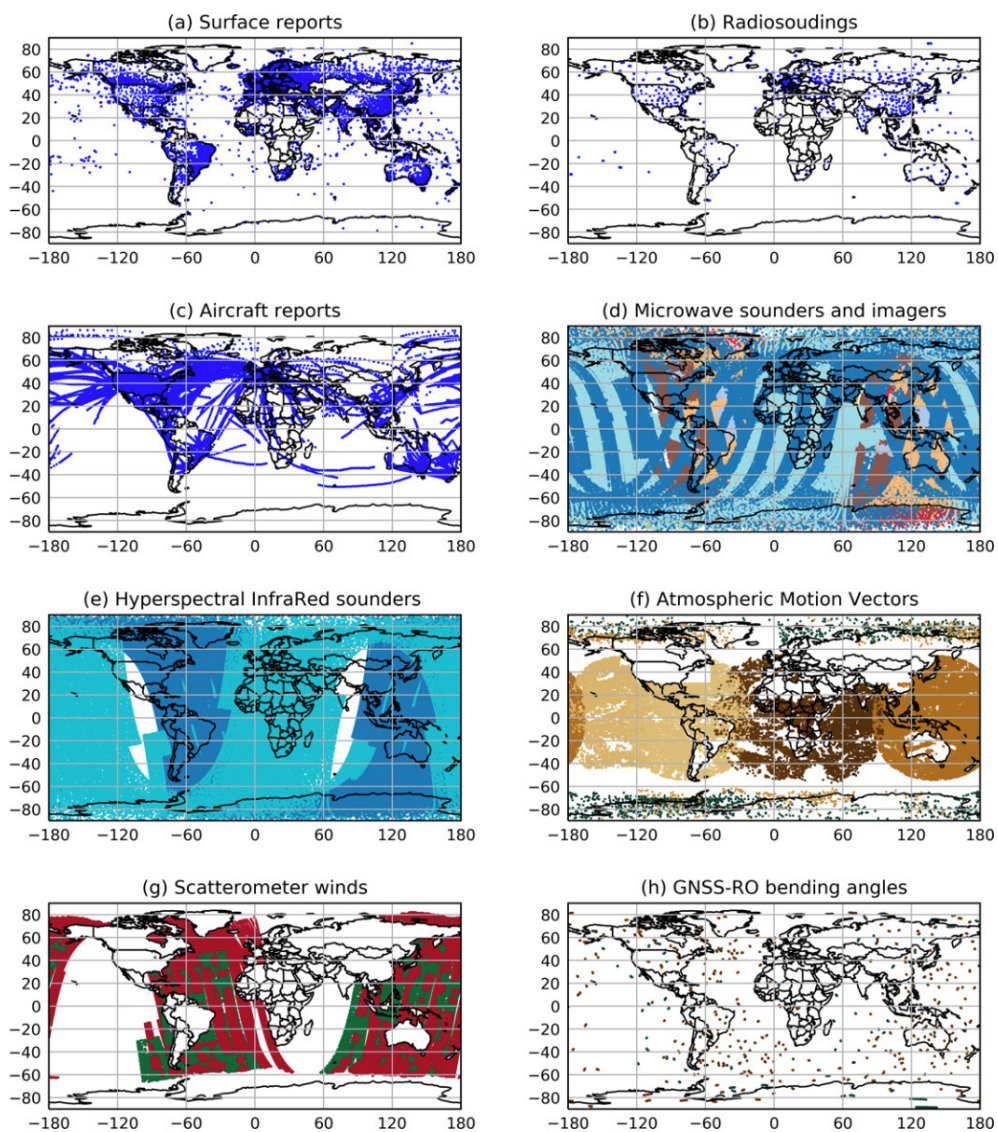


Figure 3 : Illustration de la couverture géographique obtenue sur une période de 6 heures pour différents types d'observations utilisés pour initialiser le modèle ARPEGE :

- a) les observations provenant des stations de surface, b) des radiosondages,
- c) des avions de ligne, d) des instruments de télédétection dans le domaine des micro-ondes à partir de satellites défilants en orbite basse,
- e) comme d) mais dans le domaine infrarouge, f) les observations issues des satellites géostationnaires, g) de vent de surface provenant des instruments de type diffusiomètres à partir de satellites défilants en orbite basse,
- h) utilisant le principe de radio-occultation grâce à la constellation de satellites du système de navigation global (GNSS) (Source : Chambon *et al.*, 2022

<https://doi.org/10.1175/MWR-D-22-0087.1>).

OBSERVATIONS UTILISÉES POUR LA MÉTÉOROLOGIE OPÉRATIONNELLE

Pour que des observations soient utiles en prévision numérique du temps opérationnelle, un certain nombre de contraintes doivent être satisfaites. Les observations doivent en premier lieu être disponibles en temps réel (délai compris entre 10 minutes et 3 heures selon l'application considérée, entre l'acquisition de la mesure et son stockage). Elles doivent aussi être suffisamment nombreuses et bien réparties géographiquement. Un exemple de la répartition des observations utilisées à Météo-France pour le modèle ARPEGE est montré Figure 3.

Les observations doivent aussi être informatives sur les paramètres météorologiques dont le modèle a besoin à différentes altitudes et jusqu'à la surface : la température, l'humidité, la pression, le vent, les nuages et les précipitations. Toutes ces variables ne sont pas mesurées de façon directe depuis l'espace, c'est notre connaissance des interactions entre les ondes électromagnétiques et la matière qui nous permet, à partir de ce qui est observé, d'inférer une information utile pour la météorologie.

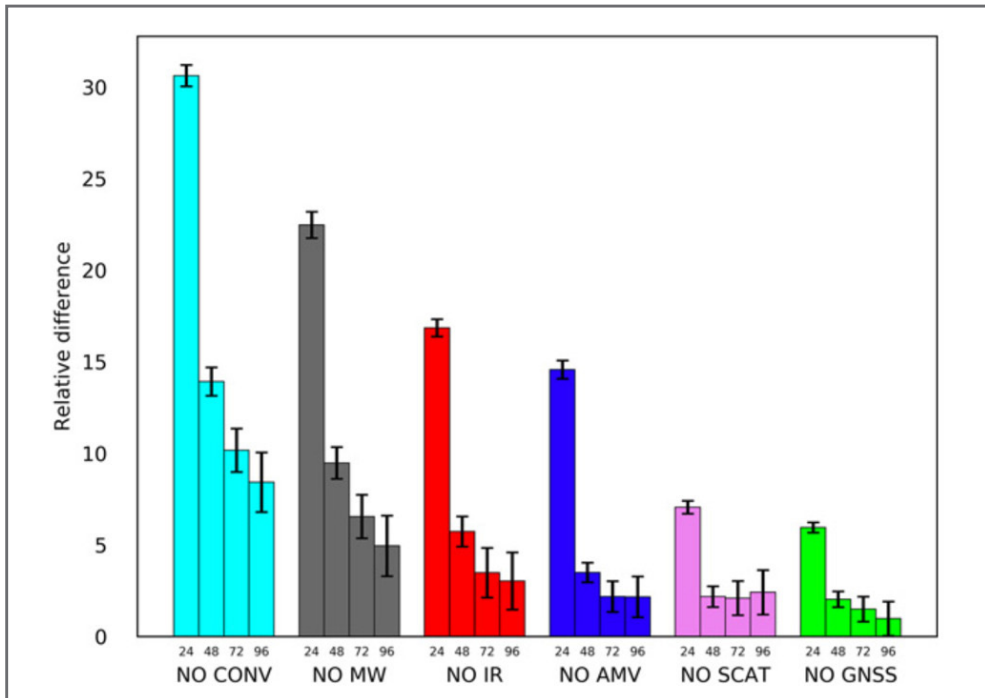


Figure 4 : Impact du retrait de différents systèmes d'observations sur la qualité des prévisions du modèle ARPEGE pour les échéances de + 24 h à + 96 h,

NO CONV indique l'impact du retrait de toutes les données *in situ* du modèle ARPEGE (stations de surfaces, radiosondages, données avions),

NO MW indique l'impact du retrait de la constellation de sondeurs micro-ondes,

NO IR indique celui du retrait des sondeurs infrarouges,

NO AMV indique celui du retrait des données de vents en altitude dérivées de l'imagerie satellitaire, NO SCAT celui des vents de surfaces dérivées des satellites, et

NO GNSS l'impact du retrait des données spatiales de radio-occultation

(Source : Météo-France).

Chaque observation reçue se voit immédiatement comparée à une observation simulée à partir des champs du modèle par un opérateur d'observations. Les différences entre la réalité observée et l'état du modèle permettent de corriger ce dernier pour la prévision suivante. Dans ce domaine, la modélisation physique du transfert radiatif joue un rôle clé mais l'émergence de l'Intelligence Artificielle devrait permettre dans les années à venir de construire des opérateurs plus rapides et plus performants qu'aujourd'hui.

Les missions spatiales fournissant des informations sur l'atmosphère doivent être d'une durée suffisamment longue (au moins 1 an pour des instruments connus et 3 ans pour de nouveaux instruments). Cette nécessité provient des besoins en recherche et développement avant de pouvoir ingérer de nouvelles données (développement de nouveaux opérateurs d'observations, caractérisation des erreurs de mesure, évaluation des améliorations amenées par le nouveau capteur sur des situations météorologiques passées).

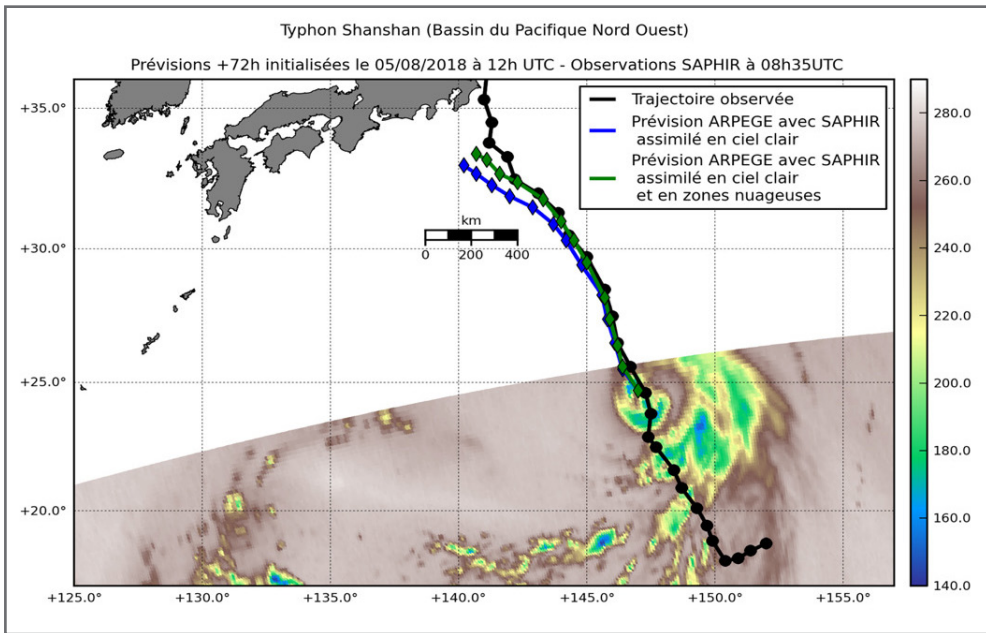


Figure 5 : Exemple de typhon observé depuis l'espace le 5 août 2018 par le satellite franco-indien Megha-Tropiques et dont la prévision de la trajectoire a été améliorée d'une centaine de kilomètres grâce à l'exploitation des observations de ce satellite (Source : Météo-France).

Les données spatiales sont aujourd'hui centrales pour la prévision du temps. Les Figures 4 et 5 montrent ainsi à la fois l'impact statistique de différents types de données mais aussi l'impact sur un cas d'étude. On peut ainsi voir que les données de sondage dans les domaines micro-ondes et infrarouge pèsent à elles seules pour près de 40 % de la qualité des prévisions à 24 h d'échéance.

OBSERVATIONS UTILISÉES POUR LA RECHERCHE EN MÉTÉOROLOGIE

Les progrès des systèmes de prévision opérationnels reposent largement sur l'amélioration continue des modèles numériques qui permettent de simuler l'évolution de l'atmosphère et ses interactions avec la surface. Ces modèles physiques sont d'une grande complexité

et essaient d'intégrer tout ce qui dans notre environnement peut impacter les propriétés physiques de l'atmosphère et de la surface. Une grande partie des processus physiques concernés opèrent à des échelles de temps et d'espace très inférieures à la résolution des modèles de prévision, qui est typiquement kilométrique. Ils doivent donc être paramétrisés. Le développement de ces paramétrisations physiques s'appuie très fortement sur des observations de fine échelle qui permettent de comprendre les processus.

Parmi ces observations on retrouve des satellites orientés recherche qui visent à mesurer depuis l'espace des variables jusque-là non mesurées et qui reposent souvent sur des technologies avant-gardistes mais à haut risque. Ces satellites permettent de raffiner notre connaissance du système Terre, et d'explorer des régions difficiles à observer autrement (haute atmosphère, régions polaires, océans). On peut citer par exemple le tandem lidar-radar CALIPSO-CloudSat qui a permis des avancées remarquables dans notre compréhension des interactions entre aérosols, nuages, et rayonnement, ou l'instrument CryoSat qui a permis de mieux comprendre le cycle saisonnier de la glace de mer.

Plus généralement, le développement des paramétrisations physiques repose aussi largement sur des campagnes de mesure rassemblant ponctuellement des instruments de pointe permettant de répondre à une question scientifique bien spécifique. De telles campagnes, qui sont au cœur des activités de Météo-France depuis des décennies, se focalisent sur des phénomènes météorologiques bien identifiés : mousson africaine, tempêtes des moyennes latitudes, brouillard, convection profonde, climat urbain (voir la Figure 5), émission et transport des aérosols, etc. Ces activités de recherche s'appuient régulièrement sur des observations aéroportées (en France *via* l'unité d'appui à la recherche SAFIRE et ses avions scientifiques). Ces dernières années se développent les observations à partir de drones (voir la Figure 6) ou sous des ballons captifs, qui permettent d'explorer des régions complémentaires de celles accessibles en avion, avec une complexité logistique et un coût financier souvent moindres. Ces mesures dédiées initialement à la recherche ont vocation, pour certaines, à devenir opérationnelles, une fois la technologie suffisamment mature ou les algorithmes de traitement consolidés. À Météo-France, les liens sont ainsi très forts entre la Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et la Direction des Systèmes d'Observation, en particulier pour ce qui concerne le développement des réseaux d'instruments de télédétection (lidar aérosol, radiomètre micro-ondes, etc.). De la même manière, les instruments spatiaux éprouvés dans des programmes de recherche peuvent devenir opérationnels, comme c'est envisagé pour AEOLUS, un satellite du programme Earth Explorer qui a permis de mesurer le vent horizontal sur tout le globe à partir de mesures d'un lidar Doppler.

Les observations *in situ*, en particulier aéroportées ou depuis des ballons stratosphériques (opérés en France par le CNES), sont aussi largement utilisés en parallèle des développements d'instruments spatiaux. L'enjeu est alors de simuler des observations satellite pour préparer ou tester des algorithmes d'inversion de propriétés physiques, de tester les performances d'un prototype dans des conditions d'opération exigeantes ou de valider les inversions faites par satellite à partir d'une réalité de terrain. On parle de campagnes de calibration/validation. Réciproquement, les observations satellite permettent de systématiser spatialement des mesures *in situ* souvent très locales.

Si les observations demeurent indispensables pour mieux comprendre les processus physiques et les représenter dans les modèles, elles sont aussi utilisées pour évaluer les modèles, tant pour la météo que pour le climat. Les climatologies (par exemple de nébulosité, de précipitations, de rayonnement solaire réfléchi par la Terre) développées à partir des observations satellite sont ainsi largement utilisées pour calibrer les modèles de climat, et ainsi leur donner du crédit pour les projections futures. Les modèles de prévision du temps sont eux aussi comparés en continu à des produits satellite de référence, ce qui permet de suivre de manière objective et cohérente l'évolution des développements et de juger de leur amélioration.

Systèmes instrumentaux déployés par le CNRM à Paris en 2022 et 2023
lors de la campagne PANAME dédiée à l'étude du climat urbain :



Figure 6 : Drone permettant de caractériser l'effet rafraîchissant des parcs végétalisés en conditions de canicule (Source : Météo-France).



Figure 7 : Radar à 95 GHz permettant d'étudier les propriétés physiques des nuages, en particulier en conditions orageuses (Source : Météo-France).

UTILISATION FUTURE DES OBSERVATIONS

La place centrale des observations pour la météorologie et le climat va certainement être accentuée dans les années à venir. Tout d'abord, les nouvelles générations de satellites se caractérisent souvent par des observations plus fréquentes (par exemple le sondeur IRS sur MTG permettra d'avoir un profil de température et d'humidité sur tout le disque terrestre toutes les 30 minutes) et à plus haute résolution spatiale (par exemple FCI sur MTG à la suite de SEVIRI sur MSG réalisera de l'imagerie en continu à résolution hectométrique). Cela permettra une avancée déterminante pour les prévisions du modèle AROME qui saura tirer pleinement bénéfice de ces observations spatiales à haute fréquence et à haute résolution, notamment sur l'Europe de l'Ouest, avec un nouveau système innovant d'assimilation de données. Le développement de nouvelles technologies peut aussi permettre d'accéder à de nouvelles variables (observation des nuages de glace avec ICI, de l'intégralité du spectre d'émission infrarouge avec FORUM ou de la pression de surface avec le projet BARODAR). On peut aussi s'attendre à une multiplication des acteurs dans le domaine de l'observation spatiale avec l'émergence du *New Space*, en particulier *via* le développement massif de petits satellites (nanosats, microsats, cubesats), bien moins coûteux à développer et à mettre en orbite que les satellites météorologiques opérationnels. Ces satellites peuvent se focaliser sur des questions scientifiques très spécifiques (par exemple PREFIRE pour le bilan d'énergie de l'Arctique), et peuvent aussi être envisagés en constellations, parfois de plusieurs dizaines d'instruments (par exemple EPS-Sterna pour mesurer la température et l'humidité). De telles constellations peuvent répondre à la limitation des satellites opérationnels dont l'échantillonnage spatio-temporel demeure souvent limité, ne permettant pas de suivre le cycle journalier.

Plus proche de la surface, on voit aussi émerger des capteurs à bas coût (par exemple certains capteurs "Internet of Things"), ainsi que des données dites d'opportunité, pouvant provenir de stations météo de particuliers, de véhicules connectés ou d'avions de ligne. On voit aussi une recrudescence des mesures réalisées par des drones, parfois en flotte coordonnée, qui permettent un échantillonnage spatial inaccessible par avion et une répétition de la mesure souvent impossible avec d'autres systèmes. Certaines de ces mesures par drones sont déjà opérationnelles (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. En vue d'embarquer une instrumentation toujours plus complexe, et donc informative, sur les drones, les défis technologiques liés à la miniaturisation et à la consommation d'énergie des capteurs sont nombreux, mais le potentiel est immense.

Avec l'abondance et la diversité de ces données et de leur qualité se pose la question de leur gestion, de leur traitement et de leur utilisation. On réalise que dans ce domaine comme dans bien d'autres l'IA peut apporter beaucoup, que ce soit pour l'accélération des traitements ou l'extraction de l'information utile des observations. Une chose est certaine, il reste encore énormément de processus physiques mal compris dans les domaines de la météorologie et du climat, et les observations, avec des liens toujours plus forts entre mesures satellites et *in situ*, resteront centrales pour l'amélioration des systèmes de prévision.

D'ici à 2026, l'ESA et EUMETSAT démarreront leurs réflexions pour les futurs programmes Meteosat Quatrième Génération et Metop Troisième Génération. Météo-France contribuera à la définition de ces futurs systèmes (prévus pour 2040 et au-delà) en exprimant ses besoins futurs en observations. Les capacités de simulation de l'établissement, unique en Europe, permettront également d'évaluer l'intérêt de ces futurs capteurs spatiaux en apportant des éléments quantitatifs clés pour leur définition.