



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Prospective de recherche pour les applications météorologiques au domaine de l'aéronautique

30 avril 2024

Document en vue du COMSI 2024

Remerciements

Auteur principal : Matthieu Plu (DESR/CNRM/GMAP)

La météorologie pour l'aéronautique implique de nombreuses thématiques de recherche. L'élaboration de ce document de prospective a été possible grâce aux contributions de nombreuses personnes de Météo-France, à la DESR, DSO, DIROP et DSM. En particulier, il faut mentionner : Nadine Aniort (DSM/AERO), Christophe Baehr (DESR), Yves Bouteloup (CNRM/GMAP), François Bouter (CNRM/GMME), Frédéric Burnet (CNRM/GMEI), Pierre Crispel (DSM/AERO), Alain Dabas (CNRM/GMEI), Ingrid Etchevers (CNRM/GMAP), Vincent Guidard (CNRM/GMGEC), Emmanuel Fontaine (CNRM/CEMS), Olivier Jaron (CNRM/GMAP), Yassine Kadri (D2I/DF), Philippe Héreil (DSM/AERO), Jean-Baptiste Hernandez (DIROP/CMS), Christine Lac (CNRM/GMME), Sylvain Le Moal (DIROP/CMS), Pauline Martinet (CNRM/GMEI), Valéry Masson (CNRM/GMME), Olivier Mestre (DIROP/COMPAS), Jean-Marc Moisselin (DIROP/PI), Thibaut Montmerle (DIROP/PI), Laure Raynaud (CNRM/GMAP), Elvis Renard (DSM/AERO), Didier Ricard (CNRM/GMME), Lucie Rottner-Peyrat (DSM/AERO), David Salas y Melia (CNRM/GMGEC), Valérie Scavarda (DSM/AERO), Pierre Tabary (DSM/AERO), Olivier Traulle (DSO), Benoît Vié (CNRM/GMME), Christophe Vincent (D2I/DF).

Le document a été relu par Christophe Baehr, Christine Lac, François Bouyssel, Samuel Morin, Olivier Jaron, Pierre Crispel, David Salas y Méliá, Marc Pontaud dont les remarques ont été intégrées.

Toutes ces personnes sont chaleureusement remerciées pour leur contribution.

Résumé

La prestation de service météorologique à la navigation aérienne est une activité clé au sein de l'établissement Météo-France. La stratégie de Météo-France dans le domaine aéronautique pour 2024-2027 affirme le besoin de services innovants, adaptés aux besoins des usagers, pour faire face aux défis de la sécurité et d'optimisation des coûts en lien avec l'augmentation continue du trafic de l'aviation commerciale (transport de voyageurs, fret) et du besoin de réduire l'impact environnemental de l'aviation. Cela passe par des activités de recherche pour que Météo-France reste à l'état de l'art des applications aéronautiques et propose des services innovants.

La recherche pour l'aéronautique est par définition une recherche applicative orientée vers les besoins des utilisateurs, institutionnels et commerciaux. Elle se concrétise par le progrès des connaissances, des modèles et systèmes de prévision et par des travaux spécifiques dédiés aux enjeux de l'aéronautique. A l'horizon 2030, la prospective de recherche pour l'aéronautique se décline en 6 axes majeurs :

- Améliorer les prévisions des risques en route ;
- Améliorer les prévisions des risques sur en approche et sur aéroport ;
- Exploiter davantage les observations (actuelles et futures) issues de l'aviation ;
- Participer à la réduction de l'impact environnemental de l'aviation ;
- Participer à l'adaptation au changement climatique
- Poursuivre le développement de services intégrés pour participer au « Ciel Unique digital ».

En plus d'être alignés sur la stratégie de Météo-France dans le domaine aéronautique pour 2024-2027, ces axes de recherche spécifiques au domaine aéronautique sont cohérents avec la Stratégie Scientifique de Météo-France 2020-2030, le COP Météo-France 2022-2026 et la prospective Météo-France Horizon 2030.

Le présent document décline ces actions de recherche à l'horizon de 2030 permettant de progresser sur ces 6 axes stratégiques. L'écoute des usagers permettra d'affiner les actions concrètes de développement. Les opportunités de ressources complémentaires dans ce domaine (par exemple dans le cadre de projets internationaux, européens ou nationaux) seront recherchées et priorisées au regard de ces objectifs stratégiques.

Table des matières

Remerciements.....	2
Résumé.....	3
1 Une recherche orientée utilisateurs: de la science météorologique ... aux services aux usagers.....	5
2 Les besoins des usagers aéronautiques : enjeux actuels et futurs.....	6
2.1 Aspects réglementaires.....	6
2.2 Phénomènes dangereux et autres variables météorologiques.....	7
Les phénomènes dangereux “en route”.....	8
Les phénomènes dangereux en approche ou sur aéroport.....	9
Les paramètres importants pour l’optimisation du trafic.....	10
2.3 Enjeux liés au changement climatique.....	10
L’impact climatique de l’aviation.....	11
Adaptation du secteur au changement climatique.....	11
2.4 Produits et services rendus hors règlements.....	11
2.5 L’aéronautique : un secteur en évolution.....	12
2.6 Positionnement actuel de la recherche à Météo-France.....	13
2.7 La recherche pour relever les défis de la météorologie pour l’aéronautique.....	19
3 Axes et priorités de recherche pour l’aéronautique.....	19
3.1 Améliorer les prévisions des risques en route.....	21
3.2 Améliorer les prévisions des risques en approche et sur aéroport.....	23
3.3 Poursuivre l’exploitation des observations issues de l’aviation.....	25
3.4 Participer à la réduction de l’impact environnemental de l’aviation.....	26
3.5 Participer à l’adaptation du secteur au changement climatique.....	29
3.6 Poursuivre le développement de services intégrés pour participer au ciel unique digital.....	31
4 Conclusion.....	33
Références.....	33
Annexes.....	35
Annexe 1: Les modèles à l’horizon 2030.....	35
Annexe 2 : Les satellites à l’horizon 2030.....	36

1 Une recherche orientée utilisateurs: de la science météorologique ... aux services aux usagers

La prestation de service météorologique à la navigation aérienne est une activité clé au sein de l'établissement Météo-France. La stratégie de Météo-France dans le domaine aéronautique pour 2024-2027, validée fin 2023, énonce comme priorité la délivrance de services dans le périmètre d'exclusivité conformes aux exigences réglementaires et aux attentes des utilisateurs permettant le maintien de la certification « Ciel unique européen » (CUE). Ces règlements, qui s'imposent directement aux États membres de l'Union européenne et aux prestataires de services de navigation aérienne autorisés à opérer dans l'espace aérien de l'Union, laissent la liberté aux États de désigner un prestataire exclusif dans leur espace aérien. Pour la France, Météo-France, prestataire certifié et désigné par l'administration au titre du CUE, est chargé de rendre le service météorologique à la navigation aérienne dans l'espace aérien français. Il met ainsi en œuvre son expertise en matière d'observation et de prévision, pour fournir aux usagers aéronautiques les informations météorologiques dont ils ont besoin pour assurer la sécurité et la régularité des vols et améliorer leur pertinence et leur performance. Dans sa stratégie aéronautique 2024-2027, Météo-France souhaite poursuivre le développement d'une activité commerciale, en synergie avec les activités institutionnelles, et conditionnée à la disponibilité d'effectifs. Les priorités sont, en premier lieu, la sécurité des vols et les services visant à aider les opérateurs aériens à réduire leur empreinte climatique, les services d'accompagnement ou d'assistance ponctuelle pour aider les compagnies et les aéroports à s'adapter au changement climatique, et le développement d'un nombre limité de produits et services d'aide à la décision : outils d'aide à la décision sur les phénomènes dangereux, accompagnement des opérateurs (assistance téléphonique ou en ligne par des prévisionnistes). Pour préparer l'avenir des services à la navigation aérienne, Météo-France maintient un effort constant en matière de recherche et de développement, à l'écoute des besoins des différents usagers. L'essentiel des axes de recherche identifiés comme pouvant bénéficier à l'aviation commerciale bénéficieront aussi, de facto, aux activités militaires (aéromaritimes, aéroterrestres, aériennes et aérospatiales).

Les produits et services pour l'aéronautique se basent sur les chaînes de prévision numérique du temps ainsi que sur les systèmes d'observation, in-situ et par télédétection depuis le sol (radar, lidar, etc) ou par satellite. L'aéronautique bénéficie donc directement des progrès faits en prévision numérique et dans le domaine de l'observation. Des travaux de recherche sont aussi spécifiquement dédiés à l'aéronautique, que ce soit dans le domaine de l'amélioration de la connaissance et de la représentation des processus critiques par les modèles numériques et les systèmes de prévision (via l'organisation de campagnes de mesure, par exemple sur le brouillard ou le givrage), du développement de produits d'observations dédiés, de l'assimilation de nouvelles données, de post-traitement dédiés des prévisions météorologiques probabilistes (calibration, optimisation de route, par exemple), de l'étude des impacts climatiques de l'aviation, etc. Ces travaux de recherche s'inscrivent dans le temps long et bien souvent dans le cadre de partenariats avec des laboratoires nationaux ou des instituts étrangers (services météorologiques nationaux par exemples). Le CNRM s'y investit par le biais de son personnel permanent notamment dans le cadre de projets de recherche associant des stages, thèses de doctorats, CDD.

Le Département Aéronautique de la Direction des Services Météorologiques (DSM/AERO) est en charge des prévisions opérationnelles ainsi que du développement de produits finalisés à destination des prévisionnistes, des partenaires institutionnels aéronautiques (Direction Générale de l'Aviation Civile, DGAC) et de clients commerciaux (compagnies aériennes en particulier, mais aussi le « grand public » : montgolfières, pilotes amateurs, etc). La recherche faite au CNRM, à ses différents niveaux de maturité (études de processus, campagnes de mesure, amélioration de la PNT et des produits d'observation, développement de diagnostics) alimente le développement de ces produits finalisés. Par des partenariats avec des organismes de recherche dans le domaine de l'aéronautique, Météo-France (DSM/AERO, CNRM, DSO, etc) prépare aussi les progrès et de nouveaux usages des futures données.

Le présent document a pour but d'exprimer une vision macroscopique des besoins actuels et futurs et de décrire des axes et actions de recherche de Météo-France pour y répondre.

2 Les besoins des usagers aéronautiques : enjeux actuels et futurs

2.1 Aspects réglementaires

Pour la France, Météo-France, prestataire certifié et désigné par l'administration au titre du CUE, est chargé de rendre le service météorologique à la navigation aérienne dans l'espace aérien français. En métropole, Météo-France fournit donc aux aérodromes un service météorologique totalement conforme à la réglementation OACI (Organisation de l'aviation civile internationale) et CUE (messages d'observation et de prévision servant à la planification des vols, messages d'avertissement sur des phénomènes dangereux pouvant affecter l'aérodrome, réponses téléphoniques aux contrôleurs, aux pilotes et aux exploitants d'aérodrome...). Pour assurer ce service, l'établissement a équipé ou contribué à équiper les aérodromes de stations météorologiques automatiques et de matériels spécifiques (télémètres, diffusomètres, capteurs). Météo-France assure aussi ces missions sur les territoires ultra-marins.

Ces productions prennent la forme de bulletins ou de cartes émis à cadence régulière chaque jour :

- des cartes informant sur le temps sensible en route (TEMSEI),
- des messages sur aérodromes décrivant la situation météorologique en cours et prévue (METAR et TAF),
- des messages en cas d'événements significatifs sévères prévus (MAA sur aérodrome, SIGMET dans un secteur aérien pour les risques en route).

Ces productions nationales sont assurées par les services de prévisions sous l'égide de DSM/AERO (au Centre National de Prévision ou dans les centres de rattachement) à partir des diverses sources d'information traitées ou collectées à Météo-France (mesures in-situ, images satellite et radar, systèmes de prévision). Dans le cadre de son soutien à la Défense, Météo-France fournit ses données via le Centre Interarmées de Soutien Météo-Océanographique des Forces (CISMF) : sorties de modèles, données d'observations de tout type et produits de fusion de données.

Météo-France assure aussi une mission internationale de surveillance des cendres volcaniques (VAAC). En cas d'éruption sur son domaine de responsabilité (Europe continentale, Afrique, essentiellement), des messages et cartes spécifiques sont émis. Cette production est essentiellement basée sur l'analyse des observations satellitaires et sur les prévisions du modèle MOCAGE-Accident. Météo-France est aussi en charge de la veille cyclonique sur le Sud-Ouest de l'Océan Indien (TCAC) et se base, pour cela, sur les outils de d'observation et de prévision météorologique outre-mer.

Les services météorologiques britanniques (UK Met Office) et allemands (DWD) sont aussi prestataires nationaux désignés pour le service à l'aviation. Le UK Met-Office et la NOAA (Etats-Unis) sont les deux « Weather Area Forecasting Center » (WAFC) désignés par l'OACI ; à ce titre ils délivrent des produits pour l'aviation sur l'ensemble du globe : cartes d'événements significatifs (SIGWX), données de différentes variables météorologiques (nuages, turbulence, vent, température, etc). Ces deux centres jouent aussi le rôle de VAAC sur leur domaine de responsabilité.

2.2 Phénomènes dangereux et autres variables météorologiques

La raison première du besoin de la surveillance météorologique pour l'aviation est la sécurité. Plusieurs phénomènes météorologiques peuvent être à l'origine d'accidents ou incidents dont les conséquences peuvent être matérielles et/ou humaines. Les phénomènes météorologiques dangereux pour le domaine de l'aéronautique sont divers et concernent différentes échelles temporelles et spatiales. On distingue communément les phénomènes "en route" (qui peuvent avoir un impact à la navigation) et "en approche/sur aéroports" (pertinents à l'atterrissage et au décollage).

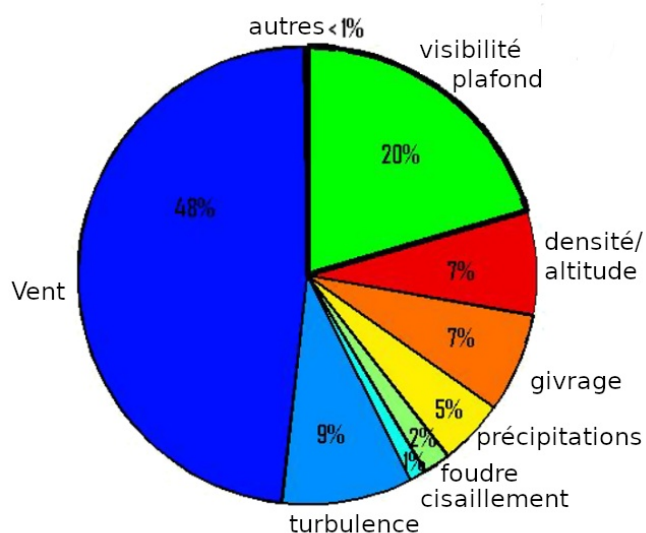


Figure 1: Origine des accidents de l'aviation civile qui sont en lien avec les conditions météorologiques de 1994 à 2003 aux USA. Le nombre d'accidents en lien avec la météorologie ont été environ de 6000 sur la période. Source : Conseil National de la Sécurité des Transports cité par Gultepe et al, 2019.

La Figure 1 présente l'origine des accidents de l'aviation civile en lien avec les conditions météorologiques de 1994 à 2003 aux Etats-Unis d'Amérique ; les statistiques sur l'Europe ou la France ne sont pas disponibles, mais elles sont vraisemblablement similaires. Le vent (rafales, travers, ou autre) sur plateforme et les basses visibilités (et plafonds bas) sont à l'origine de la majorité des accidents. En altitude, la turbulence est le phénomène le plus fréquent, et il a un fort impact en termes de blessés.

Sont listés ci-après les principaux phénomènes dangereux pour l'aviation et leur origine météorologique.

Les phénomènes dangereux "en route"

- La convection profonde, par les mouvements turbulents, la grêle, les hydrométéores glacés et la foudre qu'elle génère, présente un risque important pour la sécurité et le confort de l'aviation. De plus, la présence de cumulonimbus dans les secteurs contrôlés amène à une surcharge de travail pour les contrôleurs liée aux demandes d'évitements des avions. Prévenir des zones d'occurrence de la convection profonde, de sa sévérité et de sa distribution spatiale permet d'éviter les zones les plus dangereuses. Il est important de déterminer l'impact à venir sur les capacités des secteurs de contrôle et de gérer en temps réel l'évitement voire le déroutement des avions. Il s'agit aussi de pouvoir anticiper le retour à la normale.
- La turbulence en ciel clair (CAT pour Clear-Air Turbulence) est un risque majeur du secteur avec des dizaines de millions de dollars de coûts pour les compagnies (Gultepe, 2019) liés aux indemnisations faisant suite à des blessures. Elle est particulièrement dangereuse car non détectable par les pilotes. Elle peut avoir de multiples origines, comme la convection, les ondes orographiques, et les bordures de courant-jet. Dans ces zones, le piégeage ou le déferlement d'ondes génère une forte énergie cinétique turbulente. On estime quantitativement la turbulence dans les sorties de systèmes de prévision au travers de l'EDR (Eddy Dissipation Rate).
- Le givrage par eau surfondue a pour effet la congélation sur les bords d'attaque de l'eau en état surfondu. En cas de grosses gouttelettes (« Supercooled Large Droplet », SLD), la congélation est retardée et se fait sur les bords intra et extrados des ailes, ce qui modifie le profil et donc la portance et traînée de l'avion. Les conditions SLD se trouvent dans des conditions où l'eau surfondue est présente en forte quantité et où le nombre d'aérosols est faible, favorisant de grosses gouttes.
- Le givrage par cristaux de glace a lieu lorsque de petits cristaux rencontrent l'avion et peuvent s'agréger sur les ailes, être ingérés par les moteurs et boucher les sondes de mesure. Ce phénomène peut se rencontrer à très haute altitude, principalement en région tropicale dans les enclumes des systèmes convectifs, là où la convection profonde a transporté de la vapeur d'eau qui s'est solidifiée. On peut aussi avoir de tels cristaux dans des nuages à fort contenu en neige.
- En cas d'éruption volcanique, les cendres émises peuvent engendrer des risques importants pour les vols : ingestion dans les réacteurs perturbant (voire arrêtant) leur fonctionnement, abrasion des réacteurs et de la carlingue, réduction de visibilité. Les conséquences diffèrent selon le niveau de concentration des cendres. On notera aussi que les aérosols désertiques

ont le même effet sur les moteurs que les cendres volcaniques, toutefois les concentrations d'aérosols désertiques restent très faibles aux altitudes de vol en croisière.

On notera que, pour l'aviation légère ainsi que pour les Armées, la prévision de ces phénomènes « en-route » peut concerner des altitudes bien plus basses que pour les vols de croisière de l'aviation civile : aéronefs de transport, hélicoptères, drones peuvent être concernés par les risques de givrage, turbulence, précipitations, à de basses altitudes (de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres). Donc améliorer la prévision de ces risques « en-route » doit être considéré sur une large gamme d'altitudes.

Les phénomènes dangereux en approche ou sur aéroport

- La visibilité en approche de piste et sur piste est cruciale pour la sécurité et pour la régularité du trafic, ce qui se traduit par le besoin d'information sur la visibilité au sol (fonction à la fois du contenu et du nombre de gouttelettes du brouillard) et sur la hauteur de la base des nuages (plafond). Suivant des seuils prédéfinis de visibilité et de plafond, des procédures « basse visibilité » (« low visibility procedures », LVP) sont appliquées, qui peuvent allonger les délais entre atterrissages ou décollages, par exemple. Un enjeu est de pouvoir observer et prévoir la dégradation et l'amélioration des conditions de visibilité, et donc les classes de LVP. Les aérosols, d'origine désertique ou marine, peuvent aussi réduire fortement la visibilité (y compris dans l'infrarouge) à proximité des zones d'émission, jusqu'à une altitude de plusieurs centaines de mètres.
- Le cisaillement de vent pose un problème de sécurité, puisqu'il peut être à l'origine de décrochages au décollage ou à atterrissage, ou d'approches ratées avec besoin de remise de gaz. De tels phénomènes de cisaillement vertical (Figure 2) sont liés à des structures de vent turbulent, qui dépendent de l'environnement de l'aéroport (orographie, rugosité) et des champs synoptiques. Bien que les cisaillements puissent apparaître à toutes les altitudes, c'est dans les 500 premiers mètres qu'ils deviennent dangereux pour les avions du fait de la vitesse réduite et de la proximité du sol. En métropole, le risque est prégnant sur certaines plateformes (Nice, Clermont-Ferrand, Marseille, par exemple), plus faible sur d'autres.

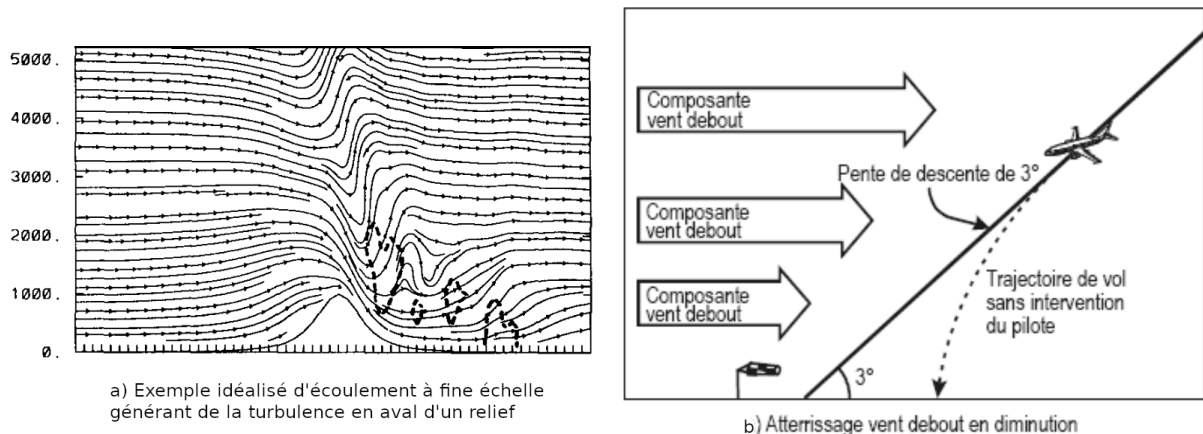


Figure 2: (a) Illustration du phénomène de cisaillement de vent généré par du relief (extrait de la thèse d'A. Boilley soutenue au CNRM en 2011, qui fait référence à Olafson et Bougeault, 1996). (b) Exemple d'impact sur le pilotage d'un avion (manuel OACI).

- Plusieurs autres phénomènes au sol peuvent influencer sur le fonctionnement des aéroports et la régularité du trafic : les orages violents (foudre, grêle et fortes pluies), le verglas/givrage au sol et la neige.

Les paramètres importants pour l'optimisation du trafic

Au-delà de ces phénomènes dangereux, certaines informations du trafic sont importantes à prendre en compte pour optimiser le trafic et réduire les retards et les coûts.

- Sur plateforme, la force du vent, projetée sur l'axe des pistes et en leur travers, est un paramètre important pour la capacité des plateformes en atterrissage et décollage. Des seuils de valeur de vent imposent des procédures particulières.
- En altitude, plusieurs paramètres peuvent influencer sur la route. Il s'agit surtout du vent, qui permet d'estimer avec précision les instants d'entrée/sortie des zones de contrôle et d'éviter les entrées/sorties par « grappe ». La température et l'humidité sont aussi des paramètres importants pour l'efficacité des moteurs et pour la consommation de carburant.

Le besoin porte sur des observations temps réel, des prévisions de quelques heures à quelques jours, aux échelles saisonnières et sur des projections climatiques.

2.3 Enjeux liés au changement climatique

Le changement climatique concerne l'aviation sur deux aspects : l'effet de l'aviation sur le climat d'une part, l'impact du changement climatique sur les activités aéronautiques d'autre part. Ces deux enjeux sont d'actualité et leur importance va croissante, pour l'ensemble du secteur (industrie, compagnies aériennes, régulateurs, etc) et demandent des recherches et services météorologiques appropriés.

L'impact climatique de l'aviation

L'aviation, activité de transport consommatrice d'énergies fossiles, émet du CO₂ dans l'atmosphère, contribuant au réchauffement climatique par effet de serre. A cet effet s'ajoutent les effets « non-CO₂ », liés aux cirrus induits par les traînées de condensation, aux émissions d'oxydes d'azote (NO_x), de vapeur d'eau, de dioxyde de soufre et d'autres aérosols. On estime en 2018 que l'aviation contribue aux émissions de CO₂ à hauteur de 2,4 % et qu'elle contribue de 3 à 4 % au forçage radiatif lié aux activités humaines (Lee et al, 2021), ce qui montre l'importance des effets non-CO₂ sur le climat. La quantification des effets non-CO₂ sur le climat demeure empreinte d'incertitudes importantes.

En accord avec le Green Deal Européen (SESAR JU, 2021), l'objectif au niveau Européen et national est maintenant de parvenir à un impact nul de l'aviation sur le climat en 2050. Les leviers principaux sont l'usage de carburants alternatifs durables (CAD ou SAF pour Sustainable Aviation Fuels), le renouvellement des flottes par des appareils plus sobres, et l'optimisation des routes permettant de prendre en compte les effets non-CO₂, dont l'impact dépend des propriétés atmosphériques, des altitudes de vol, entre autres. Les services météorologiques et climatiques sont appelés à jouer un rôle important pour définir ces « trajectoires vertes ». L'impact des SAF sur les effets non-CO₂ reste encore à caractériser. Le développement de l'aviation électrique régionale pourra aussi demander des services météorologiques spécifiques.

Adaptation du secteur au changement climatique

Les modifications des conditions météorologiques induites par le changement climatique auraient des conséquences sur les infrastructures terrestres, les opérations aériennes et les conditions de vol des avions. A partir longues séries de données passées et de projections climatiques, la littérature scientifique (EUROCONTROL, 2021) a mis en évidence certains effets du changement climatique sur les paramètres importants pour la sécurité aérienne (décrits en section 2.2). L'augmentation de la fréquence ou de l'intensité des événements météorologiques sévères, des orages, de givrage ou de turbulence dans des régions à fort trafic aérien accroîtra les attentes vers les services de prévision météorologique de la part des opérateurs. Les évolutions climatiques portent aussi sur les circulations de vent à toutes les échelles (changement de position et d'intensité du courant-jet, par exemple), les températures en basses couches pour les procédures de poids au décollage. Répondre aux besoins de tous les acteurs du secteur (industriels, compagnies aériennes, contrôle aérien) demandera des études spécifiques.

2.4 Produits et services rendus hors règlements

Au-delà des aspects réglementaires institutionnels rendus aux opérateurs de l'État, Météo-France exerce une activité commerciale vers des acteurs privés de l'aéronautique civile. Les clients majeurs sont les compagnies aériennes, à qui Météo-France propose des services dédiés. Les grandes compagnies aériennes disposent de leur propre service d'assistance météorologique, qui peuvent s'appuyer sur des services de prévision météorologique. Parmi les innovations les plus récentes développées à Météo-France, on peut noter la fourniture de données sur les tablettes des pilotes via le service eWAS, dont Air France et plusieurs autres compagnies (Iberia, Singapore, etc) sont clients.

Par ailleurs, pour les opérations des compagnies aériennes, les prévisions de plafond et de visibilité ont une grande importance ; ce sera un axe à développer dans la prospective.

Dans ce domaine commercial, Météo-France, soumis à la concurrence d'autres services météorologiques nationaux et d'entreprises privées, se doit de proposer des produits et services innovants et différenciants. A cet égard, les perspectives d'évolution du WAFC seront assez structurantes : production globale des risques en route à 0,25°, pas de temps horaire et haute résolution verticale (1000ft) et objets automatiques TEMSI dès 2024, et prévisions probabilistes de turbulence et givrage en 2027.

Pour ce qui concerne les eVTOL (electrical Vertical Take-off and Landing), drones ou ballons dirigeables rigides, des demandes commerciales pourraient émerger, avec des enjeux de visibilité, plafond, convection, qui sont similaires à celles de l'aviation légère. La problématique spécifique de vent et turbulence en milieu urbain peut demander des moyens spécifiques (modélisation très haute résolution, de type "Large Eddy Simulation").

2.5 L'aéronautique : un secteur en évolution

L'aviation civile de transport est un secteur en évolution continue. Même si le secteur est sensible à des événements internationaux qui peuvent l'impacter transitoirement (exemple : éruption volcanique à fort impact sur l'Europe en 2010, crise Covid-19 de 2020-2021), des tendances de fond persistent. Les grandes évolutions envisagées dans les décennies qui viennent à l'horizon 2050 sont (SESAR, 2020) :

- une tendance à l'augmentation continue du trafic (SESAR, 2020). Même si la crise sanitaire a engendré une réduction importante du trafic en 2020 et 2021, les niveaux pré-covid ont été retrouvés depuis fin 2023. Les tendances de fond du trafic restent croissantes, de façon différenciées selon les continents (~2 % par an en Europe, croissance plus soutenue en Asie).
- le développement de moyens aéroportés nouveaux (drones, systèmes pilotés automatiquement) dont l'articulation avec l'espace aérien actuel devra être précisée¹,
- la nécessité de réduire l'impact de l'aviation sur le climat, en cohérence avec le Green Deal Européen,
- l'adaptation du secteur de l'aviation au changement climatique.

Ces grandes tendances poussent à des évolutions importantes des services météorologiques pour l'aéronautique, comme en attestent les documents de stratégie internationale de l'OACI (ICAO Met Panel, 2018) et de l'OMM (2019). Ces documents dégagent les priorités de recherche et développement suivantes concernant les services météorologiques à l'aviation :

- poursuivre l'amélioration des capacités d'observation et de prévision, à toutes les échéances, des phénomènes météorologiques dangereux pour l'aviation,
- accroître la valorisation du développement des capacités d'observation in-situ à bord des avions (« aircraft as a weather sensor »),

1 le CNRM opère des drones instrumentés pour ses activités de recherche et constitue une pôle de recherche et d'expertise à ce sujet.

- développer des approches permettant de rendre compte des incertitudes des prévisions météorologiques ; les produits probabilistes doivent être calibrés et évalués par des méthodes appropriées,
- renforcer les échanges entre recherche-service-usagers afin d'améliorer la prise en compte dès l'amont des besoins des usagers et de la traduction des impacts des aléas sur l'aviation,
- améliorer l'accès aux produits météorologiques (à bord et au sol) et leur intégration dans les outils de planification ou de gestion du trafic aérien, à cet effet explorer des méthodes nouvelles d'apprentissage profond,
- affiner notre compréhension de l'impact du changement climatique sur l'aviation, et développer des méthodes d'adaptation.

Pour résumer cette vision des organismes internationaux (OACI, OMM, SESAR), les services météorologiques du futur n'ont plus de frontières, mais ils sont basés sur les phénomènes météorologiques et sur leurs impacts. Les produits météorologiques pour l'aviation doivent ainsi être intégrés dans un système interopérable, le System Wide Information Management (SWIM), qui couvre les aléas aux différentes échelles de temps utiles aux usagers.

Ces stratégies se déclinent au niveau européen, en particulier dans le cadre du programme SESAR (Single European Sky Air Traffic Management Research), qui vise à moderniser la gestion du trafic en Europe, à préserver la sécurité des vols et à réduire les coûts et l'impact environnemental du domaine de l'aviation. En 2011, l'impact du programme a fait l'objet d'une évaluation (SESAR JU, 2011). L'optimisation individuelle des vols peut potentiellement réduire les coûts (consommation moindre de carburant, risques moindres de retard) pour les compagnies aériennes et réduire l'impact environnemental par une réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'impact estimé de l'implémentation de SESAR était d'une réduction de l'impact environnemental de 10%, un bénéfice de €530 par vol, et une réduction des émissions de CO₂ de l'ordre de 50 millions de tonnes par an.

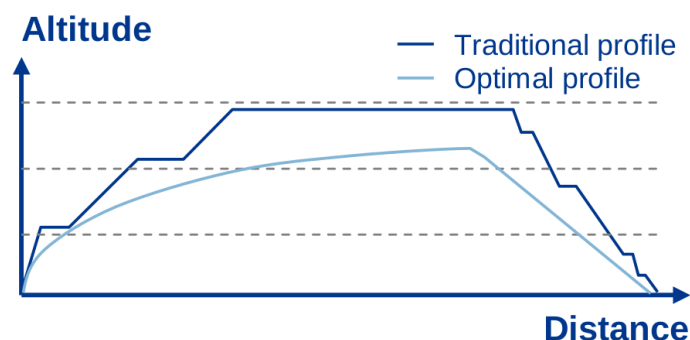


Figure 3: Concept d'optimisation de route abordé dans SESAR.

2.6 Positionnement actuel de la recherche à Météo-France

Les productions et services pour l'aéronautique se basent sur les chaînes de prévision numérique et sur des moyens d'observation variés (in-situ, télédétection satellite et au sol). Ainsi, l'ensemble des

efforts faits en recherches et développements sur les chaînes de traitement (amélioration de l'assimilation de données, des paramétrisations physiques dans les modèles, etc) bénéficient globalement aux services pour l'aéronautique.

Les domaines d'Arpege et d'Arome (Figure 4) permettent de développer des services globaux jusqu'à 4 jours d'échéance avec un rafraîchissement des prévisions toutes les 6 heures (Arpege), des services régionaux jusqu'à 2 jours d'échéance avec un rafraîchissement toutes les 3 heures (Arome) et des services régionaux jusqu'à 6 heures d'échéance avec un rafraîchissement toutes les heures (Arome-PI). Le domaine Arome s'étend largement au-delà du domaine métropolitain, afin de couvrir le bloc d'espace fonctionnel aérien d'Europe Centrale (FABEC). La figure 5 illustre l'enchaînement temporel des productions de la chaîne de prévision numérique du temps et son adéquation en fonction de la temporalité de la gestion du trafic aérien (ATFCM : échéances stratégiques, planification du trafic, de 72h à 24h ; ATC : échéances tactiques, contrôle aérien, de quelques heures). Les modèles de prévision numérique opérationnels, leur fonctionnement actuel et leur évolution à l'horizon 2030 figurent en annexe.

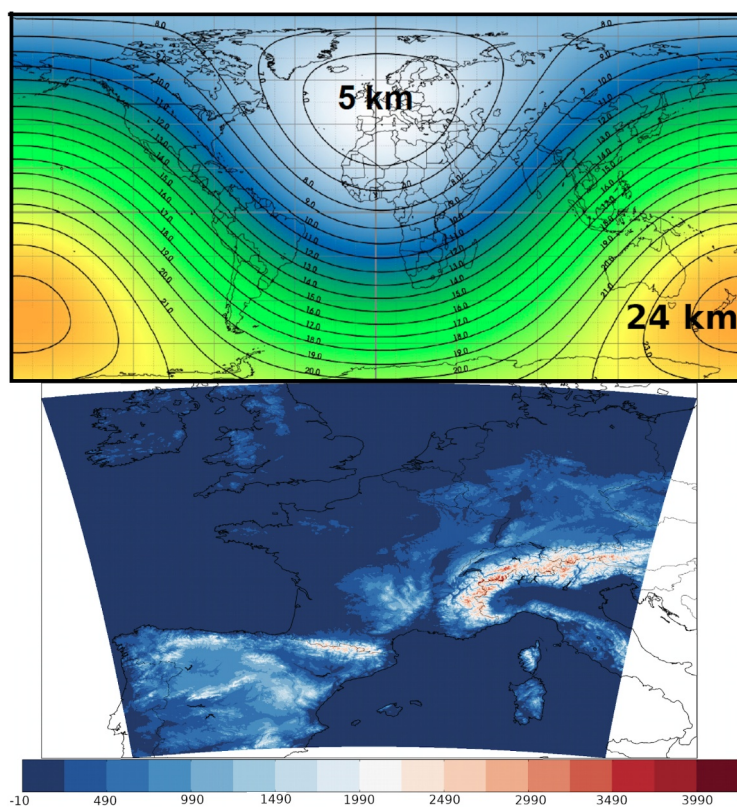


Figure 4: Résolution horizontale variable du modèle Arpege sur le globe (en haut) ; domaine et altitude des points du domaine Arome à 1,3 km de résolution (en bas). Arome-PI couvre le même domaine.

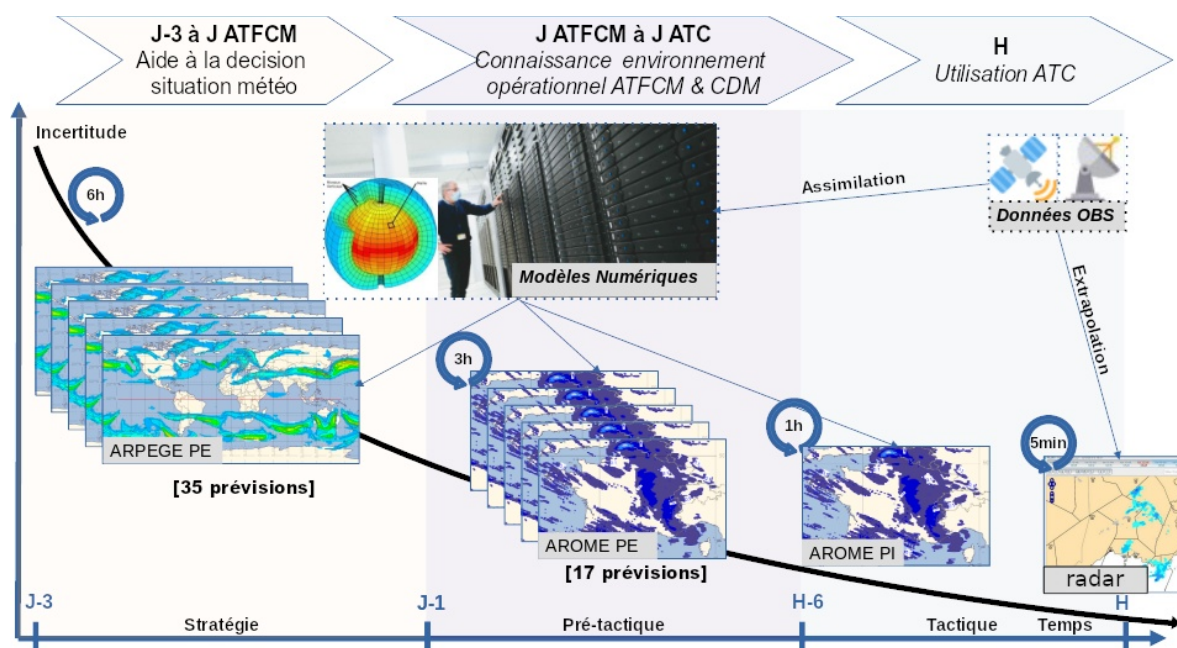


Figure 5: Illustration de la chaîne de prévision numérique du temps à Météo-France et de ses déclinaisons possibles en fonction des échéances de décision du domaine aéronautique.

Depuis quelques années, un effort particulier a été fait pour fournir des diagnostics spécifiques à l'aéronautique au cœur des modèles, plutôt qu'en post-traitement. Ainsi, ont été développées des variables diagnostiques pour la convection, la turbulence, la visibilité, le givrage, qui sont calculées au cœur des modèles de prévision, au plus près des paramétrisations physiques. Contrairement à des post-traitements a posteriori sur des variables standard des modèles (T, hu, etc) dont ne sont conservées les valeurs pour exploitation ultérieure qu'à une résolution cible inférieure à la résolution native des modèles, ces diagnostics réduisent certaines erreurs (changement de grille, hypothèses de reconstruction des variables, etc) et tirent le meilleur parti de la physique des modèles Arpege et Arome. Certains de ces diagnostics ont aussi été développés sous une forme probabiliste à partir des prévisions d'ensemble Arpege et Arome ; ils entrent en production opérationnelle en 2024. A partir de ces diagnostics, des produits adaptés au besoin des usagers sont développés.

Plusieurs productions font appel à des post-traitements des sorties de modèles, basés sur des méthodes d'apprentissage statistique, dans la gamme de l'« Intelligence Artificielle » (IA).

Tableau 1 : Produits diagnostics opérationnels en 2023 pour les applications aéronautiques calculée à partir des modèles Arpege et Arome (et de leur version ensembliste PEARP et PEARO respectivement) et de données satellitaires.

Diagnostic	Domaine globe	Domaine Arome
Convection		“RiskAero” : Indice de convection sectorisé basé sur PEARO (Figure 6)
Turbulence	Indice probabiliste de turbulence en ciel clair basé sur PEARP (opérationnel en 2024)	
Givrage (eau surfon-	Produit d'analyse SIGMA	

due)	Indice probabiliste de givrage basé sur PEARP (opérationnel en 2024)	
Visibilité sur en ap- proche/sur aéroport		Produits calibrés (apprentissage statistique) de visibilité basés sur Arome et PEARO
Traînée de condens- ation	“WIMCOT” : risque de traînée persistantes	
Cisaillement		Produits d’observation

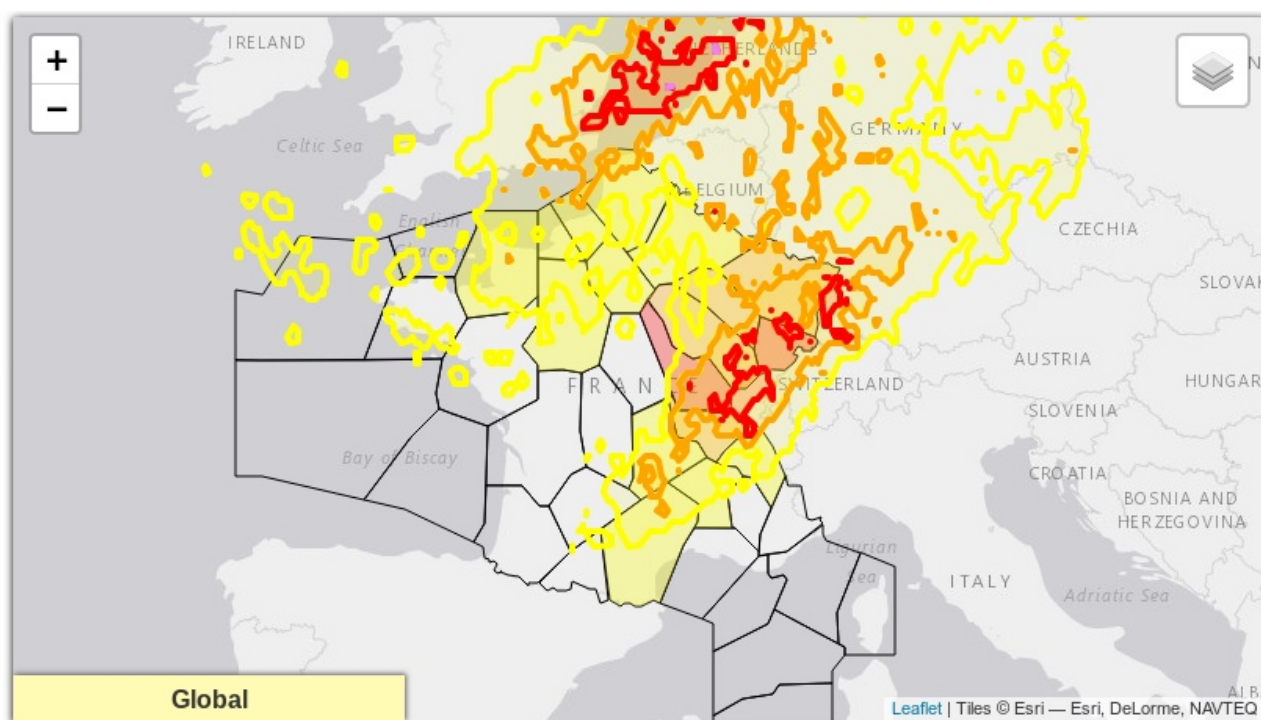


Figure 6: Produit opérationnel « RiskAero » de convection sectorisée 3D basée sur la PEARO (complété par expertise des prévisionnistes jusqu’à 12h d’échéance). Il couvre la métropole sur J-1 et J, par pas de 3h. Dans chaque zone du contrôle aérien (polygones noir), le risque convectif, pondéré par la dimension verticale, est indiqué par une couleur (codification par la matrice de risque EUMETNET, intégrant sévérité et probabilité, Figure 10). Le champ de probabilité de convection PEARO est indiqué en contours de couleur.

L’observation satellitaire fournit des données d’importance pour l’aéronautique, puisqu’elle sert directement à des produits utilisables (en fusion avec d’autres types de données parfois), et que l’assimilation des informations satellitaires est un facteur essentiel de la qualité des modèles de prévision. On notera en particulier l’arrivée prochaine de la nouvelle génération de satellites géostationnaires MeteoSat, qui doit apporter des améliorations importantes au travers de l’assimilation de données.

Au delà des travaux d'amélioration des prévisions par les innovations apportées aux chaînes de PNT, des projets de recherches plus amont ont été menées récemment ou sont en cours. Ces recherches sont indispensables pour préparer des améliorations futures. Parmi les sujets importants, on notera :

- la campagne SOFOG3D et la valorisation de ses résultats

L'enjeu de l'amélioration de la prévision du brouillard a été présenté au COMSI en 2018. La campagne SOFOG3D, conçue afin de lever certains des verrous sur ce sujet, a eu lieu pendant l'hiver 2019-2020 dans le Sud-Ouest de la France. Elle a permis le déploiement d'un dispositif expérimental innovant pour l'étude du brouillard (radar nuage, mesures par ballons captifs, drones). L'exploitation scientifique de la campagne est menée par l'analyse des données d'observation et par des simulations numériques de cas d'étude avec des configurations d'Arome dédiées, conformément à la stratégie exposée en 2018, et avec des simulations à très haute résolution (de 10 m à 100 m) réalisées avec le modèle de recherche communautaire Méso-NH. On s'intéresse ainsi aux processus de surface, de microphysique nuageuse et de turbulence impactant le cycle de vie des brouillards. Les configurations de Méso-NH et Arome à 500m de résolution horizontales (thèses de Maroua Fathalli pour les brouillards par affaïssement de stratus et Salomé Antoine pour les brouillards radiatifs) confirment que la résolution **verticale** des modèles est déterminante pour la prévision du brouillard. Des études de sensibilité (Letillois, 2021) ont aussi montré que la prévision du brouillard est surtout sensible aux conditions de surface et aux conditions initiales atmosphériques (température, humidité et vent). Au second ordre, l'augmentation de la résolution horizontale et l'enrichissement de la microphysique nuageuse peuvent améliorer les prévisions. En particulier, l'apport de l'utilisation d'un schéma représentant les processus microphysiques dit « à 2 moments » LIMA par rapport au schéma actuellement utilisé dans Arome ICE3, est avéré pour les prévisions de brouillard. Des travaux sont aussi en cours pour évaluer l'apport de l'assimilation de nouveaux types d'observations (comme les radiomètres micro-ondes) dans Arome. Étant données les échelles multiples et les interactions non-linéaires entre les processus impactant le cycle de vie du brouillard, il y a des limites inévitables à sa prévisibilité (Bergot et Lestringant 2021), ce qui doit encourager à explorer davantage l'utilisation de la prévision d'ensemble pour la prévision des seuils de visibilité.

- Travaux de recherche sur la turbulence en altitude

La modélisation de la turbulence en ciel clair reste un sujet de recherche actif. La thèse de Léo Rogel (2019-2022) s'est intéressée à la dissipation turbulente au voisinage des jets d'altitude en conditions stables, à partir de modélisation à très haute résolution utilisant le modèle Meso-NH (100m à 200m). De telles résolutions permettent de résoudre la cascade d'énergie vers les fines échelles et ainsi d'améliorer la représentation du déferlement au voisinage des courants-jets dans les modèles actuels. Ces travaux doivent, à terme, aboutir à des améliorations des diagnostics de dissipation turbulente (EDR) dans Arpege et Arome.

- Givrage

Concernant le givrage par eau surfondue, le produit de fusion de données développé à Météo-France SIGMA (Système d'Identification du Givrage pour la Météorologie Aéronautique, Le Bot, 2004) permet d'identifier les zones de givrage sur les domaines Europe-Atlantique et France. SIGMA est basé sur de l'imagerie satellitaire (canal IR, produits classification nuageuse, PSN, TSN et

nuages givrants), de l'imagerie radar (réflectivité 2D), des données de T, Hu, VV des modèles (Arpege sur Europe-Atlantique et Arome sur le domaine France) utilisées pour calculer l'indice de givrage prévu. En complément, dans le cas d'Arome, le contenu du nuage en eau, pluie, neige et glace est utilisé. En termes de prévision, il existe un indice opérationnel de risque de givrage par eau liquide surfondue dans Arpege. Cet indice est décliné dans les membres PEARP de la chaîne mise en opérations en 2022 ; la mise en forme d'un produit probabiliste est prévue en 2024. Cet indice est une combinaison de l'humidité relative et de la température donnant une condition nécessaire, en général, mais non suffisante, à un givrage significatif. En effet, un nuage peut être à des températures faiblement négatives, complètement saturé et être composé uniquement de glace. De plus des événements de givrage sont observés à des températures très basses (-25°C), où cet indice ne réagit pas. Les schémas microphysiques actuels tendent à consommer l'eau surfondue pour produire des espèces givrées trop rapidement à température négative, ce qui ne permet pas de construire un indice basé directement sur le contenu en eau liquide surfondue. C'est la raison pour laquelle les indices de givrage actuels emploient plutôt des indicateurs indirects (utilisant les données de température et humidité) plutôt que les variables microphysiques du modèle.

Pour le givrage par cristaux de glace, la thèse de Jean Wurtz à GMME a permis d'améliorer la modélisation numérique de cristaux de glace avec le schéma microphysique actuel d'Arome (Wurtz et al., 2021) en exploitant les données de la campagne de mesures aéroportées HAIC sur la Guyane. Pour l'instant, il n'est cependant pas pertinent de proposer des diagnostics de givrage par cristaux pour l'opérationnel car la prévisibilité de la convection est jugée trop faible en regard de la précision attendue par les usagers.

- Cisaillement

Divers systèmes d'observation, expérimentaux ou opérationnels, sont ou ont été déployés par les équipes de Météo-France (CNRM, DSO notamment) sur les plateformes propices au cisaillement. Sur l'aéroport de Nice, dans le cadre d'expériences de recherche (Boilley et Mahfouf, 2013) un lidar Doppler, un radar UHF et un réseau de 4 anémomètres avaient montré leur intérêt pour caractériser les événements de cisaillement, le lidar produisant des profils de vent en ciel clair, et le radar permettant de caractériser les champs de vent en conditions pluvieuses. Depuis lors, un système opérationnel combinant lidars Doppler et radars à été installé à Nice par la DSO. Sur l'aéroport de Clermont-Ferrand, une expérience a été menée en 2018 par la DSO, DSM/AERO et le CNRM, à l'aide d'un radar UHF et un lidar Doppler, montrant que le radar UHF seul a tendance à sous-estimer les valeurs de cisaillement. Une méthode de détection du cisaillement par l'observation, basée sur l'utilisation des données de deux anémomètres est en cours d'évaluation au CRA de Nice (l'évaluation est faite sur plusieurs aéroports français). Ces approches reposent systématiquement sur de la fusion de données provenant de différents capteurs.

Les expériences d'assimilation faites à ce jour avec Arome montrent qu'il est possible, en assimilant des profils de vent (mesurés par radar UHF, lidar, par exemple) de contraindre les analyses, mais l'impact de la correction sur les prévisions est perdu en moins d'une heure, ce qui rend ce type de configuration peu utile. Pour tirer bénéfice de l'assimilation pour la prévision, il semble nécessaire de disposer de plus d'observations qu'on puisse assimiler dans le voisinage de l'aéroport.

Une première étude sur l'apport d'Arome-500m pour la prévision sur l'aéroport de Nice a été conduite en 2023. La haute résolution améliore la finesse de la représentation des circulations, mais a surtout été mise en évidence la faible prévisibilité des conditions de cisaillement.

- Aérosols (cendres volcaniques et poussières désertiques)

La surveillance des cendres volcaniques par le VAAC repose principalement sur l'observation satellitaire (produits issus de l'imagerie géostationnaire) et sur les prévisions du modèle MOCAGE-Accident lançable à la demande. Météo-France a installé en 2016 un réseau de 6 lidars sur la France, avec l'objectif de faire face à d'éventuelles futures éruptions majeures touchant le continent Européen. Ces données d'aérosols sont dorénavant assimilées dans le modèle MOCAGE. Les informations lidars seraient directement exploitables en cas de crise sur la métropole, par visualisation directe et aussi par l'utilisation des analyses MOCAGE après assimilation pour initialiser MOCAGE-Accident. Les VAAC de Toulouse et de Londres sont les seuls à produire des cartes quantitatives de concentration massique de cendres dans différentes couches atmosphériques.

Le modèle MOCAGE sert aussi aux prévisions des concentrations des autres types aérosols : poussières désertiques et aérosols marins, utilisables par les Armées sur les théâtres d'opérations pour estimer la visibilité.

2.7 La recherche pour relever les défis de la météorologie pour l'aéronautique

Les enjeux d'avenir du secteur aéronautique (Section 2.5) guident les recherches à mener. Pour faire face aux défis de la sécurité et d'optimisation des coûts en lien avec l'augmentation continue du trafic et du besoin de réduire l'impact de l'aviation sur le climat, la stratégie de recherche pour l'aéronautique se décline en 6 axes majeurs :

- Améliorer les prévisions des risques en route ;
- Améliorer les prévisions des risques en approche et sur aéroport ;
- Exploiter davantage les observations (actuelles et futures) issues de l'aviation ;
- Participer à la réduction de l'impact environnemental de l'aviation ;
- Participer à l'adaptation du secteur au changement climatique
- Poursuivre le développement de services intégrés pour participer au ciel unique digital.

La mise en œuvre de ces 6 axes est déclinée au travers d'actions concrètes décrites ci-après.

3 Axes et priorités de recherche pour l'aéronautique

Il convient d'abord de rappeler que les services à l'aéronautique bénéficient directement du développement des modèles de prévision numérique du temps ainsi que des avancées dans le domaine de l'observation satellitaire. De facto, dans l'hypothèse incongrue où la prévision météorologique n'aurait pour seule application que la fourniture de services pour les activités aéronautiques, la grande majorité des travaux de recherche pour améliorer leurs performances seraient convergente

avec les programmes de recherche développés pour une palette d'applications beaucoup plus larges. Par exemple, les progrès pour la prévision des orages (prévisions d'ensemble Arome et produits associés, produits satellitaires) sont tout aussi cruciaux pour l'aéronautique, l'hydrologie et à la sécurité des personnes et des biens. Nous rappelons ci-dessous les axes d'évolution de la prévision numérique et des programmes satellitaires, permettant d'y inscrire les développements spécifiques au domaine de l'aéronautique. Les perspectives d'évolution de la chaîne de prévision numérique du temps ont été présentées au COMSI en 2022, sans détailler les aspects spécifiques à l'aéronautique.

L'évolution majeure, notamment en termes de dimensionnement des ressources de calcul, est l'augmentation de résolution des prévisions d'ensemble Arpege et Arome pour atteindre la résolution des prévisions déterministes, soit environ 5km sur la France pour Arpege et 1,3km pour Arome. Opérée en 2022, cette évolution marque le passage à une production « tout ensemble » et ouvre un potentiel de développement de produits probabilistes dans tous les domaines. En particulier pour l'aéronautique, plusieurs diagnostics (voir Table 1) ont été développés dans les prévisions d'ensemble Arpege et Arome et des produits probabilistes en ont été déclinés. A l'horizon 2026, d'autres évolutions structurantes sont prévues, comme l'implémentation d'un nouvel algorithme d'assimilation (EnVar) dans Arome, permettant d'améliorer la qualité des prévisions d'Arome² dans les premières échéances. A partir de 2024, deux instances d'Arome à 500m de résolution, l'une sur un large domaine Alpes-Méditerranée, l'autre sur la région parisienne, sont déployées à des échéances courtes. Il est prévu d'évaluer, à partir de ces configurations d'Arome-500m, le bénéfice de telles résolutions pour des phénomènes à enjeu sur plateforme (surtout visibilité et cisaillement). Ce sont ici les évolutions les plus marquantes, parmi d'autres.

A l'horizon 2030, il est prévu que la résolution des modèles, horizontale et verticale, continuent à augmenter. Ces évolutions doivent bénéficier directement à la prévision de nombreux phénomènes : convection, turbulence, brouillard, cisaillement, entre autres. Selon le scénario retenu, Arome-PI pourrait passer à une résolution hectométrique et prendre aussi une orientation ensembliste. Ces évolutions majeures d'Arome-PI doivent encourager à renforcer son utilisation pour la prévision des enjeux en approche et sur aéroport en lien avec les procédures LVP ou interruption/reprise d'activité. Des évolutions des schémas microphysiques dans Arome et dans Arpege seront certainement envisagées, en fonction des moyens de calcul qui pourront y être consacrées et du bénéfice associé (par exemple pour l'amélioration de la prévision du brouillard et du givrage).

2 On entend par "prévision Arome" toutes les productions faites par Arome sur la France : prévisions d'ensemble et Arome-PI, à partir du moment où la production est considérée comme "tout ensemble"

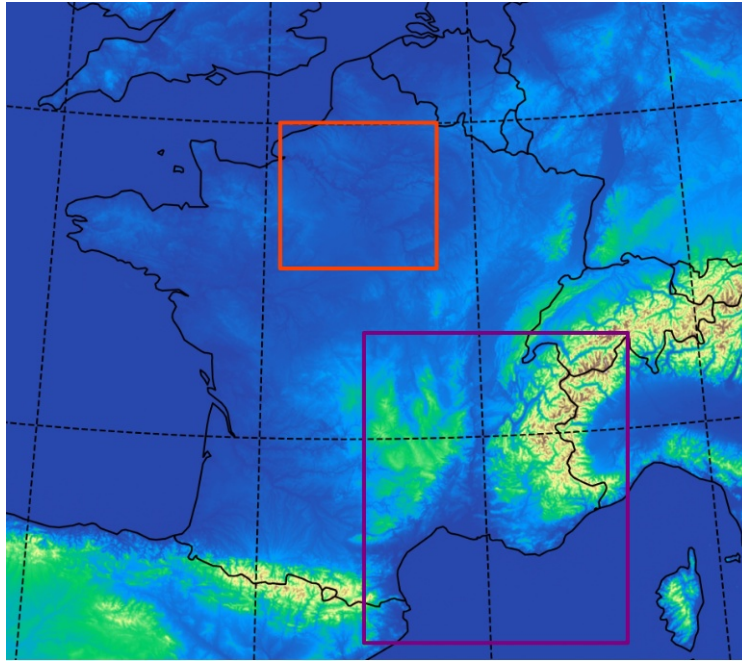


Figure 7: Domaines des configurations Arome-500m qui seront déployées à partir de 2024.

Entre 2024 et 2030, la 3^e génération de satellites géostationnaires MeteoSat (MTG) sera mise en service opérationnel. MTG-I permettra à partir de 2024 de disposer de nouveaux produits satellitaires mieux résolus (spatialement et temporellement) et d'en développer de nouveaux (caractéristiques nuageuses en particuliers). De nouveaux canaux seront disponibles sur MTG-I/FCI ; la meilleure caractérisation des propriétés microphysiques des nuages (produit CMIC) pourra bénéficier aux algorithmes de détection du givrage (eau surfondue et cristaux de glace). L'arrivée d'un imageur d'éclairs MTG-I/LI pourra aussi permettre d'améliorer les produits de caractérisation de la convection. L'assimilation des données du sondeur hyperspectral IRS sur MTG-S, à partir de 2026 ou 2027, combinée à un algorithme EnVar devrait permettre des améliorations des champs initiaux d'humidité et de température dans le modèle, pour de meilleures prévisions des variables d'altitude et des précipitations. L'assimilation des données de la future série de satellites défilants EPS-SG est aussi prometteuse pour la qualité des analyses et prévisions.

D'une manière générale, l'enrichissement des bases de données d'observation (satellites, radars, caméras, à bord) va encourager le développement d'approches basées sur l'Intelligence Artificielle, pour l'identification automatique d'objets ou de zones d'intérêt (convection, traînées de condensation par exemple), pour la calibration des prévisions, mais aussi plus directement pour des prévisions directement émulées par les données.

3.1 Améliorer les prévisions des risques en route

La prévision des risques en route (convection, turbulence, givrage) est particulièrement importante pour le contrôle aérien et pour les compagnies, tant en vue de la planification des vols que pour la navigation tactique. Hormis les évolutions des systèmes de PNT (voir plus haut), d'autres travaux de recherche, principalement liés à la représentation des processus de turbulence et de microphysique dans les modèles visent à améliorer les diagnostics de convection, de turbulence et de givrage

dans Arome et Arpege. En fonction des résultats, leur implémentation dans les chaînes de PNT pourra être envisagés.

Au cours des prochaines années, des travaux au CNRM continueront à évaluer l'impact des aspects 3D (ou quasi 3D) de la turbulence dans le modèle Arome, notamment dans les nuages convectifs. Des travaux préalables ont en effet montré une augmentation de la turbulence sous maille, généralement sous-estimées, en utilisant une formulation des flux turbulents prenant en compte les gradients horizontaux de vent, de température et d'humidité (Verrelle et al, 2017 ; Strauss et al, 2019). Ces travaux pourront se décliner en des améliorations des diagnostics de turbulence en ciel clair dans Arome.

Concernant le givrage (par eau surfondue), les principaux travaux récents visent à représenter plus explicitement l'eau liquide surfondue dans le modèle et à en décliner des diagnostics (dans Arome et Arpege) qui permettraient d'en caractériser la sévérité. Deux thèses ont démarré au CNRM/GMME en 2021/2022 en lien avec ce sujet. La première s'intéresse à des améliorations du schéma microphysique actuel d'Arome, ICE3, et à la représentation de l'incertitude de la prévision du givrage. Motivés initialement pour les enjeux de gestion de parcs éoliens, les travaux seront déclinés pour la prévision aéronautique. La seconde (FCPLR) vise à améliorer le schéma de microphysique à deux moments LIMA, qui s'appuie sur une population réaliste d'aérosols pour prévoir les nombres de gouttelettes et de petits cristaux dans les nuages, paramètres importants pour prévoir le risque de givrage par grosses gouttelettes. Sa physique plus détaillée permet à LIMA de mieux prévoir l'occurrence d'eau liquide à température négative que le schéma ICE3 opérationnel, mais elle reste actuellement sous-estimée. Ces deux thèses s'appuieront notamment sur les observations de la campagne In-Cloud ICing and Large-drop Experiment (ICICLE), organisée aux États-Unis d'Amérique en février 2019, ainsi que celles de la campagne SENS4ICE, réalisée en 2023, à laquelle participe Météo-France (mobilisation de l'ATR 42 de SAFIRE, de DSM/AERO et du CNRM en appui à la prévision).

Une extension à la PI du produit actuel de caractérisation de risque de cristaux de glace est envisagée, basée notamment sur une approche d'IA.

Le développement des prévisions probabilistes basée sur les prévisions d'ensemble doivent aboutir à des productions plus adaptées pour l'utilisateur (voir 3.6). On peut aussi mentionner des diagnostics dédiés au vol à voile, comme par exemple la prévision de la vitesse des thermiques, qui devrait être mise en opérationnel en 2024.

Concernant les émissions volcaniques, l'exigence réglementaire prioritaire est de fournir des prévisions probabilistes de dépassement de seuil de concentrations de cendres volcaniques. Un système de prévision d'ensemble MOCAGE-Accident sera construit, d'abord en perturbant le terme source (sur laquelle l'incertitude est la plus grande), puis en exploitant des forçages météorologiques ensemblistes. Pour contraindre le terme source ou les concentrations de cendres par les observations satellitaires, l'assimilation ou l'inversion des données satellitaires, mise en œuvre dans MOCAGE, seront explorées. Ces travaux pourront faire l'objet d'intercomparaisons internationales. Enfin, émerge aussi le besoin de diagnostics de dioxyde de soufre (SO₂), en particulier pour des enjeux de santé des passagers et équipages, ce qui demande à développer des termes source et l'assimilation de ces données (capteurs satellitaires TROPOMI, IASI et leurs successeurs). Fumées liées aux feux de forêt et ozone stratosphérique peuvent aussi être des enjeux en vol ; les prévisions de composition atmosphérique à échelle globale peuvent être exploitées pour cela. On note que les probléma-

tiques de gaz (SO₂ volcanique) et particules (cendres et fumées) nocives pour la santé concernent aussi les plateformes, nécessitant des modèles de dispersion locale des polluants (voir 3.2)

3.2 Améliorer les prévisions des risques en approche et sur aéroport

La sécurité et l'exploitation optimale des plateformes aéroportuaires demandent des services météorologiques performants, autant pour la planification de l'utilisation des aéroports que pour le contrôle aérien. En dehors des améliorations attendues par l'évolution des systèmes de PNT, **la prévision du brouillard et du cisaillement sur plateforme feront l'objet de travaux spécifiques.**

Pour la prévision du brouillard, étant donnés les travaux récents et l'exploitation en cours de la campagne SOFOG3D, plusieurs perspectives de recherche se dégagent pour les années futures. Les prévisions d'ensemble Arome devraient bénéficier d'améliorations au sein du modèle : il s'agira de consolider les pistes déjà identifiées, comme par exemple l'augmentation de la résolution verticale du modèle et l'enrichissement de la microphysique. Les apports des configurations Arome à 500m de résolution horizontale (et 120 niveaux verticaux au lieu de 90 dans Arome-France) devront être qualifiées pour la prévision du brouillard. De même, l'utilisation de LIMA, schéma à deux moments, permettra de revoir la formule du diagnostic de visibilité en tenant compte de la concentration en plus de la masse de gouttelettes (Gultepe et al, 2021). L'implémentation réalisée du schéma de rayonnement EcRad dans Arome offre l'opportunité d'utiliser des propriétés optiques des nuages plus cohérentes avec la microphysique dans Arpege et Arome dans la continuité de la thèse de Erfan Jahangir (CNRM/GMME).

Concernant l'assimilation des observations dans Arome, les pistes principales sont de poursuivre les travaux sur l'assimilation des radiomètres micro-ondes au sol, et de caractériser leur apport dans la perspective de l'assimilation d'ensemble variationnelle (3DEnVAR puis 4DEnVAR) Arome. L'implémentation dépendra de la mise en œuvre opérationnelle de radiomètres micro-ondes (DSO). D'un point de vue plus prospectif, il faudra poursuivre des travaux sur la synergie instrumentale pour l'étude du brouillard et pour l'assimilation combinée (radiomètres micro-ondes, mesures par drones, et radar nuages) afin de mieux initialiser à la fois les profils thermodynamiques (température, humidité) mais aussi microphysiques (*liquid water path*) pour permettre l'amélioration des prévisions de brouillard à quelques heures d'échéance.

La FCPLR d'A. Gentric (2023-2026) visera à combiner Arome-PI avec des observations, grâce à des méthodes d'apprentissage machine (« IA »).

A des échéances plus lointaines (au-delà de quelques heures), la prévision d'ensemble Arome doit permettre de caractériser le risque d'occurrence des situations de brouillard et d'appuyer la prise de décision des procédures LVP. Étant donnés les biais des prévisions du brouillard, la calibration par des méthodes statistiques permet de compenser en partie les erreurs. Ces travaux de calibration sont prévus dans le cadre d'ALPHA et pourront servir aux besoins de l'aéronautique.

Des avancées sont aussi attendues concernant la visibilité liée aux aérosols, en particulier en conditions désertiques. Il est prévu d'inclure, dans des configurations Arome opérationnelles en région désertique, les émissions de sables ainsi qu'un diagnostic de visibilité incluant l'effet de ces poussières. Le diagnostic sera développé et évalué sur plusieurs niveaux verticaux pour répondre aux be-

soins, près du sol et à des altitudes de vol en basses couches. L'effet des sels marins sur la visibilité pourra aussi être inclus dans un second temps. Les diagnostics de visibilité demande à être adaptés à aux gammes de longueurs d'onde d'intérêt (infrarouge), ainsi qu'à des visées verticales et obliques. Le bénéfice de cette configuration Arome pour les applications aéronautiques, en particulier pour les armées, sera évalué.

Pour la prévision du cisaillement, le premier enjeu est de poursuivre l'exploitation des observations pour la prévision immédiate, comme par exemple les radars profileurs de vent UHF ou les lidars Doppler scannant pour des plateformes à fort enjeu. De nouvelles observations, que ce soit pour une utilisation directe ou pour l'assimilation de données, resteront une source de données à explorer. En particulier, l'exploitation des données de vent dérivées des systèmes « Mode-S » et ADS-B dont la densité sur les aéroports à fort trafic est importante, peut être particulièrement intéressante. Ces données peuvent à la fois servir à la construction de profils virtuels de vent (prototype réalisé sur le cas de l'aéroport de Roissy par DirOp/PI dans le cadre du projet SESAR Time-Based Separation) et à l'assimilation dans Arome. L'assimilation dans Arome des données Mode-S, voire ADS-B, sera conduite et leur apport pour la prévision du cisaillement caractérisée. L'assimilation des données des radars bande X, en particulier celui de Nice, sera explorée si les données d'observation (réflectivités et vents radiaux) sont suffisamment qualifiées. Il est attendu aussi que des travaux sur la turbulence 3D dans Arome bénéficie à la représentation des écoulements et de la turbulence dans les prévisions. Aux échéances de quelques heures, pour un phénomène qui est aussi local, transitoire, et dont l'occurrence est fortement sensible à de faibles différences dans les conditions synoptiques, une prévision de risque d'occurrence devra être probabiliste. La valorisation d'Arome-PI, en particulier dans sa configuration à 500m (sur Roissy, Orly, Nice, Marseille), sera aussi particulièrement à encourager.

D'un point de vue général, la représentation des caractéristiques et de la modélisation des surfaces en zones urbaines, dont les chaussées routières et les pistes d'aéroports, via le schéma de surface « Town-Energy Balance » (TEB), a été améliorée dans le cadre de la FCPLR de Gabriel Colas qui a implémenté un schéma de verglas et de neige multi-couches dans TEB, et développé la prise en compte de certains facteurs anthropiques liés au trafic routier (influence de la présence des véhicules sur le bilan, sources de chaleur, frottement des pneus sur la chaussée) et aéronautique (mélange induit, flux de chaleur). Cette thèse, qui devrait améliorer les prévisions d'état des pistes d'aéroports, fait l'objet d'échanges réguliers avec le Service Technique de l'Aviation Civile (STAC), en attente de progrès dans le domaine de la prévision de la contamination des pistes par de la neige et du verglas. De plus les prévisions de neige, verglas, orages, enjeux importants pour les aéroports, bénéficieront des améliorations d'Arome à leur sujet, qui sont un enjeu météorologique qui impacte de nombreux domaines applicatifs.

Concernant les cendres volcaniques, émergent des demandes des gestionnaires d'aéroport d'avoir des informations sur les risques de contamination par les cendres. Cela nécessite des approches de modélisation à fine échelle avec Arome, un terme source bien maîtrisé, et un système de prévision de dispersion local. Le système de dispersion à haute résolution Flexpart couplé à Arome sera développé et qualifié.

3.3 Poursuivre l'exploitation des observations issues de l'aviation

Les mesures météorologiques à bord des avions produisent des données uniques, complémentaires des mesures faites au sol, par radiosondages (ponctuelles et peu fréquentes) et par satellite (mesures indirectes télédéteectées).

Mis en place dans le cadre d'accords communs entre l'OACI et l'OMM, le système *Aircraft Meteorological Data Relay* (AMDAR) collecte et distribue en temps réel aux services météorologiques des mesures de température et de vent faites à bord des avions de ligne. Actuellement, cela représente plus de 700 000 observations par jour dans le monde, qui sont disponibles pour l'assimilation dans les modèles. Des mesures d'humidité et de turbulence sont aussi faites par certains avions ; elles sont toutefois en nombre réduit et leur qualité est perfectible. En 2016, la société Panasonic, qui développe des services météorologiques pour l'aviation, avait créé un événement médiatique³ en annonçant la mise en œuvre d'un modèle météorologique surpassant ceux du CEPMMT et de la NOAA grâce à l'assimilation de données embarquées plus riches que les AMDAR (système TAM-DAR, incluant des mesures d'humidité, de turbulence, de givrage). A notre connaissance, la qualité du modèle n'a pas été évaluée de façon rigoureuse face à d'autres modèles globaux, mais l'événement met en évidence le fort bénéfice d'une meilleure disponibilité de données embarquées.

Au-delà du système AMDAR, le développement de mesures météorologiques à bord et leur distribution se poursuit ("aircraft as a weather sensor") ; pour un service météorologique comme Météo-France, un des enjeux est de tirer le meilleur bénéfice de l'acquisition et de l'exploitation de ces données. Certaines, si elles sont produites et qualifiées automatiquement, peuvent être envisagées pour une utilisation opérationnelle et pour l'assimilation dans les modèles, d'autres peuvent servir pour des études a posteriori, par exemple pour l'évaluation des performances des systèmes de prévision. Les différents types d'observations qui se développent sont les suivantes :

- Le système d'interrogation Mode-S des avions par le contrôle aérien transfère des informations de vol en temps réel, dont le nombre de Mach, la vitesse de l'avion par rapport à l'air, l'orientation de l'avion par rapport au nord magnétique. A partir de ces informations et après l'application de correctifs, il est possible de dériver des estimations de vent et de température à la position de l'avion. L'EMADDC (sous l'égide du KNMI) a en particulier développé un service de collecte, de calcul et de distribution de ces données. Disponibles à très haute fréquence, pour tous les avions, sur des domaines proches du contrôle aérien, ces données d'opportunité sont complémentaires des données AMDAR déjà assimilées dans les systèmes de prévision de Météo-France. La qualité des données de vent et de température issues des Mode-S est suffisante pour envisager leur assimilation dans Arome à partir de 2024, puis dans Arpege dans une chaîne ultérieure. Leur apport pour la prévision et en particulier pour le cisaillement de vent sur plateforme sera à évaluer. Le développement du 4DENVAR dans Arome doit aussi permettre de tirer le meilleur bénéfice de ces données.
- L'acquisition de données issues du système de surveillance des positions des avions ADS-B ; en temps réel les aéronefs transmettent leur position acquise par GNSS. Les informa-

3 <https://www.panasonic.aero/press-release/panasonic-weather-solutions-introduces-panasonic-global-4d-weather-the-worlds-most-advanced-global-weather-forecasting-platform/>

tions, précises et à haute cadence temporelles, permettent de reproduire des informations similaires au Mode-S (vent, température), mais aussi données de turbulence et de cisaillement de vent.

- De nouvelles données in-situ en vol rendues accessibles : réflectivités des radars embarqués, mesures d'humidité dans toute la troposphère, données de turbulence. La fourniture des données fait l'objet de discussions entre les communautés aéronautiques (constructeurs, compagnies, régulateurs) et météorologiques (OMM et services météorologiques nationaux) et de questionnement sur leur qualité pour un usage opérationnel. Les questions qui se posent sont les capteurs à employer pour des mesures de qualité (exemple des mesures d'humidité dans la haute troposphère, qui nécessite des capteurs de haute sensibilité), les possibilités d'installation des capteurs et les capacités de transfert de données.
- Les rapports temps-réels des pilotes (messages PIREP) renseignent sur les conditions météorologiques en vol (vent, nuages) et sur l'occurrence d'événement (turbulence, givrage). Regrouper les informations de ces messages est particulièrement intéressant pour l'évaluation des modèles. Mais la concentration et la diffusion en temps réel de ces informations, supervisées par IATA, sont coûteuses ; elle nécessitera la poursuite d'échanges avec la communauté météorologique.

L'exploitation de ces observations en temps réel doit permettre de rafraîchir plus fréquemment les informations. Avec le développement du wifi dans les cockpits, ces données à jour peuvent être rapidement accessibles aux pilotes. La pleine exploitation de ces données in-situ permettra aussi la mise en œuvre de systèmes automatiques d'évaluation des prévisions, permettant de qualifier les modèles et leur évolution.

3.4 Participer à la réduction de l'impact environnemental de l'aviation

L'information météorologique permet d'optimiser les routes, de réduire les coûts et la consommation de carburants ; c'est un des objectifs des services intégrés et inter-opérables (cf 3.6). La prévision des phénomènes, notamment orageux, permet d'anticiper au maximum les régulations de trafic et d'optimiser les changements de route ou de faire attendre les avions au sol, et donc d'optimiser les consommations et émissions de CO₂. Afin d'aller plus loin et de limiter l'impact environnemental des avions, il faut prendre en compte les effets "non-CO₂" de l'aviation sur le climat. Les traînées de condensation sont le principal de ces effets. En effet, les gaz d'échappement des avions contiennent des composés gazeux (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, oxydes d'azote, oxydes de soufre) et des aérosols (suies, poussières métalliques, sulfates, acide nitrique, etc). Selon le taux d'humidité ambiante, le mélange de ces gaz avec l'air froid environnant peut entraîner la condensation solide de l'eau en cristaux autour des aérosols, formant un nuage qui peut durer de quelques secondes à plusieurs heures. Ces traînées apparaissent à haute altitude, entre 7000 m et 12000 m, en atmosphère humide par des températures inférieures à -30°C et des basses pressions. Sous des conditions atmosphériques de sursaturation, ces traînées de condensation grossissent, s'étendent et peuvent persister plusieurs heures en évoluant en un voile de cirrus.

Les traînées de condensation sont ainsi un contributeur important au bilan énergétique de l'atmosphère et donc réchauffement climatique, et il est important pour l'aviation de les considérer afin de réduire l'impact climatique de ce secteur. Les dernières estimations (Figure 8) suggèrent même que les cirrus issus des traînées de condensation induisent le principal forçage radiatif associé à l'aviation, même si leur quantification est associée à de fortes incertitudes. Contrairement aux gaz à effets de serre dont l'émission a un impact de long terme, les nuages d'altitude ont un effet direct et immédiat (quelques heures) sur le bilan radiatif. Le forçage est globalement positif car, si les nuages réfléchissent une partie du rayonnement solaire le jour, ils réfléchissent le rayonnement terrestre infrarouge en permanence, induisant un réchauffement important en particulier la nuit. On estime que les cirrus formés dans les zones sursaturées génèrent un forçage radiatif environ 10 fois supérieur à celui créé par les traînées de condensation elles-mêmes (Schumann, 2005). Toutefois, l'impact radiatif varie beaucoup d'un cirrus l'autre et l'essentiel de l'impact radiatif est finalement dû aux 10 % des cirrus persistants (Wilhem et al, 2021).

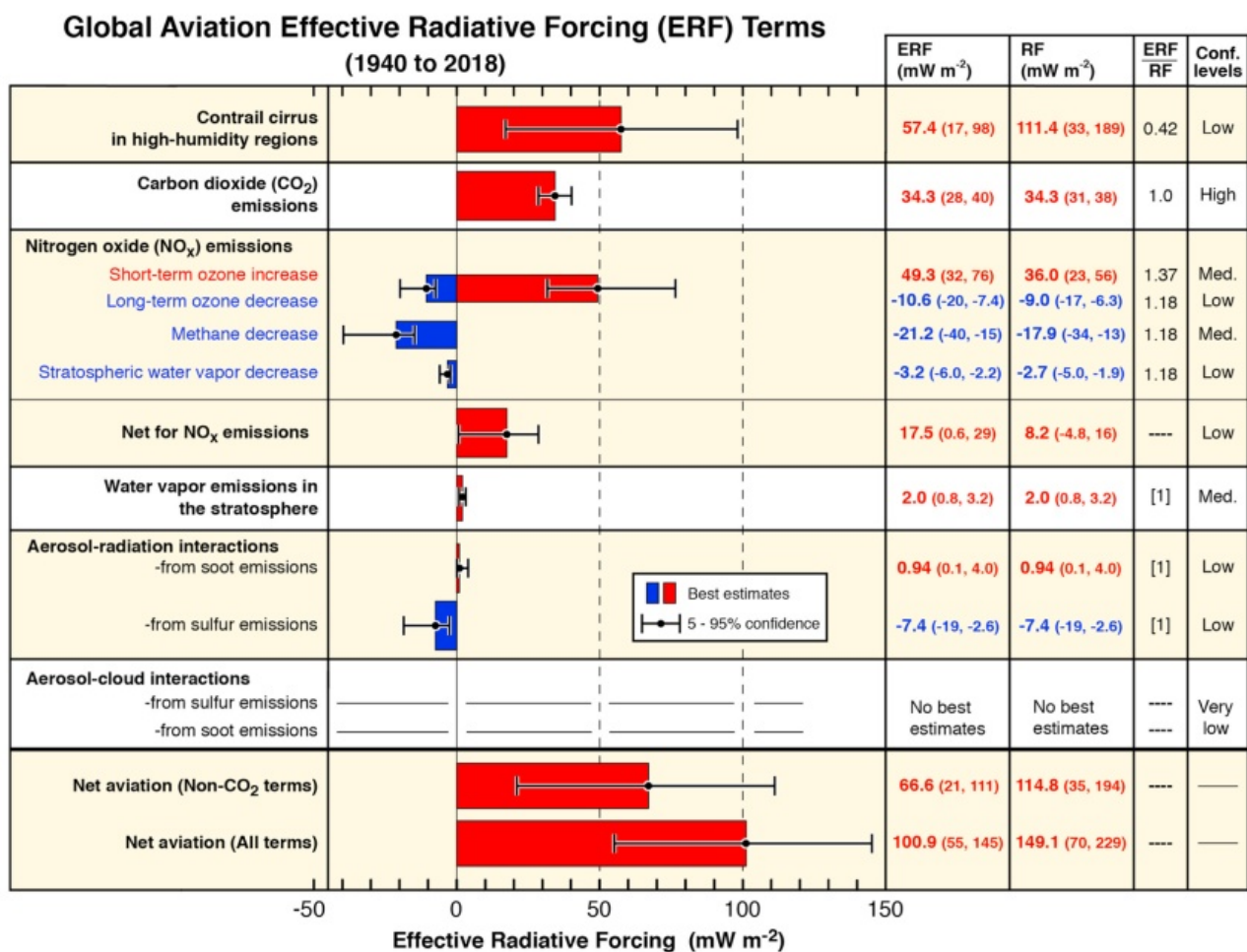


Figure 8: Estimation des forçages radiatifs effectifs (ERF) pour les différentes sources de forçage de l'aviation, sur la période 1940-2018. Source : Lee et al (2021).

Parmi les différentes approches possibles pour réduire l'impact de ces traînées de condensation sur le climat, une des plus efficaces serait d'éviter de voler dans les zones propices à la formation de ces cirrus à fort impact radiatif. Cela implique de connaître les zones sursaturées où la formation d'une

traînée de condensation aurait un fort impact radiatif. Actuellement, l'observation de traînées persistantes est un très bon indicateur de l'existence de ces régions sursaturées, clairement visibles (Figure 9) dans les régions à forte densité de trafic aérien sur l'Europe et le continent américain. Les stratégies d'évitement de la formation des traînées de condensation consistent à voler dans des régions plus chaudes (donc plus bas), alors que pour éviter la formation des cirrus, il importe d'éviter de voler dans les couches de sursaturation (qui sont généralement des couches de 500 à 1000 m d'épaisseur en haute troposphère). Ces détournements, qu'ils soient horizontaux ou verticaux, génèrent, en contrepartie, une augmentation de la longueur du trajet, de la consommation de carburant et donc des émissions de gaz à effet de serre. L'enjeu est alors d'identifier les routes évitant les régions sursaturées et pour lesquelles l'effet net sur le forçage radiatif demeure favorable. Pour mettre en œuvre une telle stratégie, il faut donc à la fois prévoir les zones possibles de formation des traînées de condensation, les zones sursaturées propices à la formation des traînées persistantes, leur étalement en cirrus, et pouvoir caractériser l'impact radiatif de ces cirrus (épaisseur optique et étendue horizontale). Cela doit être envisagé en tenant compte de l'incertitude des prévisions, qu'il reste difficile à caractériser.

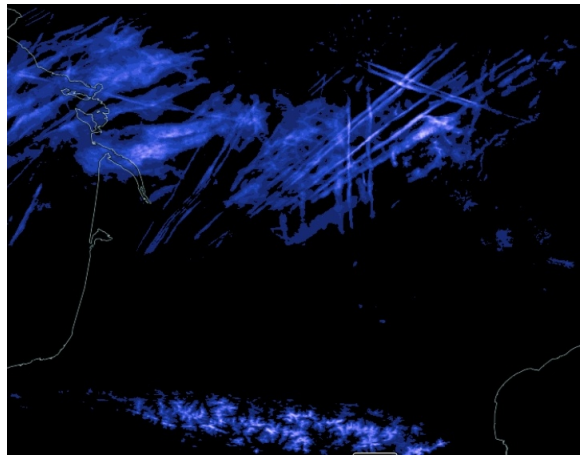


Figure 9: Image satellitaire dans le canal infra-rouge sur le Sud-Ouest de la France, illustrant une zone favorable à la persistance de traînées de condensation.

Par ailleurs, Météo-France, via la modélisation à l'échelle climatique au CNRM/GMGEC et en collaboration avec le CERFACS, a déjà une expertise reconnue sur la modélisation de l'impact radiatif des traînées de condensation. Pour décliner cette expertise vers une aide à la décision pour limiter les traînées de condensation persistantes, plusieurs axes de recherche sont nécessaires :

- Documenter les zones sursaturées et les traînées par des observations d'humidité in-situ (infrastructure de recherche IAGOS) ou des observations télédéteectées (satellites, lidars), dans un contexte de très faible humidité avec des températures basses ; ces observations pourront servir à l'évaluation des modèles ainsi qu'à l'assimilation de données,
- Modéliser et prévoir les zones sursaturées, en s'inspirant des approches développées dans Arpege-Climat et dans IFS. Une telle modification du modèle aura des impacts sur la représentation des cirrus d'origine naturelle, donc sur l'équilibre radiatif général du modèle. Il faudra évaluer ces changements dans le modèle.

- Modéliser le transfert radiatif des cirrus potentiellement formés dans ces zones.
- Développer des prévisions probabilistes indiquant le risque de formation des traînées et de leur impact ; il deviendra alors possible d'examiner des approches d'optimisation de route par des stratégies d'évitement des zones critiques et de limitation d'émission de gaz à effet de serre en portant une attention particulière à éviter l'effet double peine : émettre plus de CO₂ par déroutement et former des traînées à cause d'une mauvaise prévision.

Un diagnostic, nommé « WIMCOT », indiquant les zones favorables aux traînées persistantes a été développé en 2022-2023. Basé sur la prévision d'ensemble du CEPMMT, il combine un indice de sursaturation avec le critère de formation de Schmidt-Appelman (Schumann, 1996). Les approches futures développées, permettant de caractériser l'impact radiatif potentiel des traînées, se baseront sur les prévisions Arpege et d'autres outils, comme par exemple des modèles de transfert radiatif, mais aussi des modèles d'Intelligence Artificielle appliqués à des jeux d'observations et d'analyses.

En première approche, il faudra construire des preuves de concept avec la communauté aéronautique (constructeurs, compagnies aériennes, instituts académiques), ce qui permettra d'évaluer la faisabilité et les gains potentiels de l'évitement de ces zones propices à la formation des traînes persistantes, avant d'envisager un service opérationnel. Ces travaux de recherche ont démarré en 2023 par le démarrage du projet CICONIA dans le cadre de SESAR, piloté par AIRBUS et dont Météo-France coordonne un lot de travail. L'Institute for Sustainable Aviation dont Météo-France est partenaire, offre aussi un cadre interdisciplinaire porteur pour approfondir les enjeux opérationnels, économiques et sociétaux du sujet.

3.5 Participer à l'adaptation du secteur au changement climatique

Un autre axe de recherche sur lequel le secteur a des attentes fortes concerne l'impact du changement climatique sur l'aviation et le soutien à l'adaptation. Les compagnies aériennes expriment des attentes sur la caractérisation de l'évolution des régimes de vent (aux échelles climatiques, saisonnières et en temps réel), l'occurrence d'événements orageux, en particulier du fait que les avions de nouvelle génération sont plus sensibles à la foudre. Les constructeurs demandent à comprendre les évolutions de la sévérité et de la fréquence d'occurrence des phénomènes à enjeu (turbulence, givrage, foudre, etc) afin d'intégrer ces contraintes dans la conception des avions. Les gestionnaires d'aéroports peuvent avoir d'autres demandes (évolution des températures au sol, risques pour l'état des pistes, risques de submersion, etc). Les études sur les projections climatiques indiquent que la probabilité d'occurrence de la turbulence en ciel clair pourrait augmenter dans certaines régions du globe, avec des conséquences majeures sur la sécurité aérienne (Thèse de M. Foudad au CERFACS). Au sol, l'augmentation générale des températures et de la fréquence des températures extrêmes au sol auraient aussi des conséquences importantes pour le décollage sur la capacité en poids des avions, la longueur de pistes et les performances du moteur (thèses de V. Gallardo et S. Salles au CERFACS). Dans ce contexte, Météo-France et le CERFACS participent au chantier ICCA (Impact du Changement Climatique sur l'Aviation) coordonné par le CERFACS. Le chantier ICCA est le lieu où l'on croise les données et les expertises ; Météo-France y contribue par les simulations climatiques globales et régionales avec les modèles CNRM-CM (incluant Arpege-Climat) et Aladin-

Climat, ou sur la France avec Arome. Le CERFACS développe, quant à lui, des études sur l'impact du changement climatique sur l'aviation. Les méthodologies développées dans le cadre d'ICCA appliquées à des nouvelles simulations climatiques que Météo-France va produire, pourraient être utilisables pour des évaluations plus précises des impacts du changement climatique pour répondre aux besoins du secteur de l'aéronautique.

Encart : Le support météorologique pour une aviation durable (ISA et Météo-France)

Météo-France, via la DESR contribue à l'Institut for Sustainable Aviation (ISA) de Toulouse et dans le cadre des échanges avec les autres partenaires impliqués dans cet institut, nous avons détourné les évolutions que pourrait prendre cette nouvelle aviation durable et les conséquences que cette mutation pourrait avoir sur la fourniture de produits d'assistance aux vols commerciaux. Cet exercice réalisé sous l'égide de l'ISA donne des pistes pour de nouveaux axes de recherche ou de produits que Météo France pourra proposer pour cette aviation nouvelle. Face à l'adaptation nécessaire du transport aérien relative à son impact sur le climat, plusieurs axes de travail sont abordés :

1/ L'usage de carburants alternatifs produits sans recours aux énergies fossiles, comme les SAF (biofuels, carburants de synthèse) est identifié comme le levier principal pour limiter l'impact de l'aviation sur le climat. Cela limiterait les émissions de gaz à effet de serre, mais aurait des impacts sur les effets non-CO₂ sur le climat qui restent à explorer. Les biofuels contiennent peu de soufre ; l'effet sur la formation des traînées de condensation reste à comprendre, en prenant en compte les noyaux de condensation naturels. Quelle composition des carburants de synthèse en vue de produire des résidus en sortie de combustion permettent de réduire les effets non-CO₂? Des travaux de recherche peuvent être engagés sur l'estimation des effets non-CO₂ de ces carburants grâce aux outils de modélisation du CNRM (Arome, Meso-NH). A plus long terme, l'impact de la combustion du dihydrogène (H₂), qui apporte peu de particules (uniquement de l'acide nitrique) et plus de vapeur d'eau, est un sujet largement ouvert. Nous voyons là des thèmes qui réclameront de prolonger nos actions autour de l'estimation et de la modélisation de la chimie atmosphérique pour ces composés spécifiques.

2/ L'optimisation des trajectoires afin de minimiser le coût carbone des vols ou de réduire la production de traînées de condensation persistantes font partie de longue date du soutien que la recherche en météorologie apporte aux acteurs du monde aéronautique. Les stratégies d'adaptation sont variées et peuvent mener à des questions nouvelles sur la recherche ou la fourniture de produits pour l'aviation commerciale, en particulier en ajoutant des critères d'optimisation liés aux contraintes environnementales.

3/ Une nouvelle aviation pourrait voir le jour avec le développement de motorisation électrique pour les avions commerciaux. Le domaine opérationnel de ces avions commerciaux sera assez différent des avions de ligne actuels tant réacteurs que turbopropulseurs.

Avec l'exercice mené par l'ISA sur la définition attendue des appareils, et en considérant les capacités des batteries actuelles, nous pouvons inférer que les avions électriques commerciaux seront du type « commuter aircraft » (avion navette), d'un emport de 19 passagers sur des distances courtes de l'ordre de quelques centaines de km, des vols entre les niveaux 50 et 100 avec des temps de trajets courts de l'ordre de l'heure de vol. Dans cette plage opérationnelle, ce sont surtout les produits de type Prévision Immédiate, pour des avions légers qui seront sensibles aux phénomènes liés à la convection, au givrage, aux rafales, etc. Si les études de marché ne sont pas encore faites, on peut voir que sur les territoires maillés par les trains, notamment à grande vitesse, les lignes commerciales opérant avec des avions électriques auront du mal à s'implanter. Par contre dans les outre-mers, ces avions-navette auront pleinement leur place avec un coût d'exploitation environnemental réduit.

3.6 Poursuivre le développement de services intégrés pour participer au ciel unique digital

Les services météorologiques à l’aviation s’orientent vers des prévisions interoperables et intégrant une information au sujet de leur incertitude (voir 2.5). L’enjeu est d’être en capacité de participer au prochain service prévu par l’OACI, le *Hazardous Weather Information Service (HWIS)*, qui devrait remplacer les SIGMET à terme. De plus, l’orientation du ciel unique Européen vers un système digital sans frontière doit pousser Météo-France à développer des services et approches adaptées à ces enjeux, en tirant le meilleur parti de ses chaînes de prévision numérique. En effet, dès 2022, la chaîne de prévision numérique du temps et la chaîne de production de Météo-France deviennent “tout ensemble”, c’est-à-dire que les prévisions d’ensemble Arpege et Arome voient leur configuration (résolution en particulier) rejoindre celle du modèle de référence. Cela ouvre des perspectives de développement de produits probabilistes nouveaux à destination des usagers du secteur aéronautique, qui demande de poursuivre le développement d’approches co-construites avec les utilisateurs.

EUROCONTROL, par exemple, a réuni une équipe de travail au sujet de l’avenir des services météorologiques à la navigation aérienne (EUROCONTROL, 2021), qui recommande d’intégrer pleinement l’inévitable incertitude des prévisions dans les décisions du contrôle aérien. Cette incertitude peut prendre la forme de scénarios ou de matrices de risque comme le propose aussi EUMETNET pour la convection (Figures 6 et 10). Dans les deux cas, il est nécessaire d’intégrer le coût et le bénéfice des décisions de navigation en fonction de la probabilité de l’aléa.

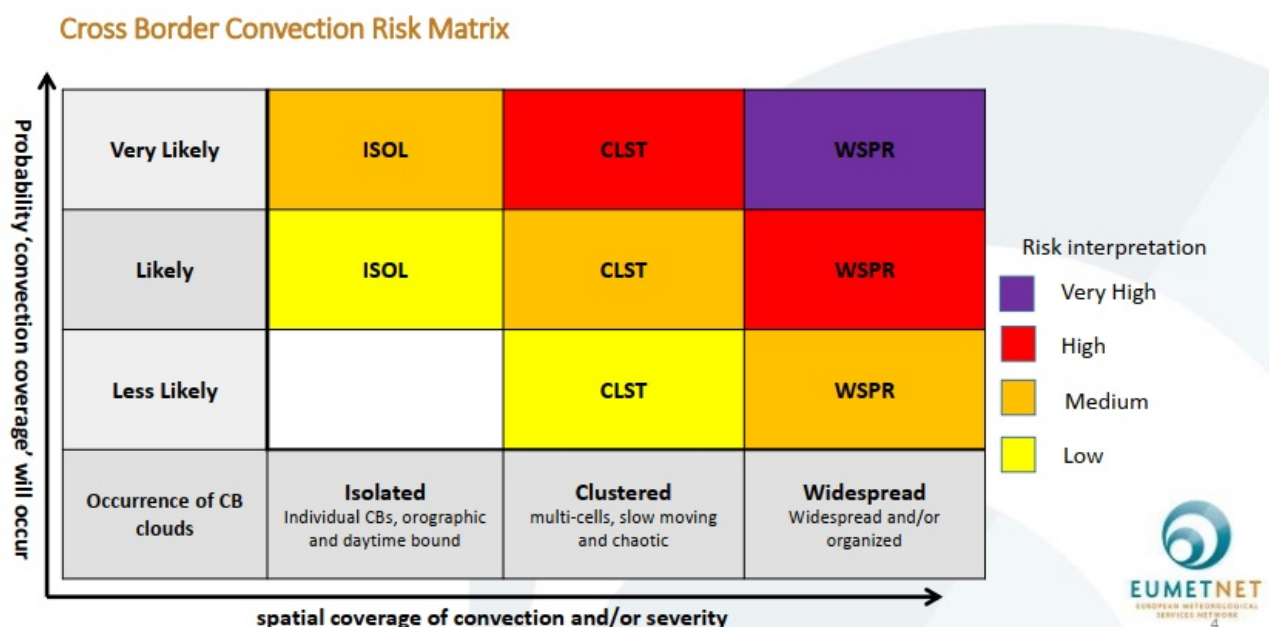


Figure 10: Matrice de risque associée au phénomène convectif développée dans le cadre d’EUMETNET.

L’intégration des prévisions météorologiques probabilistes dans des outils de gestion du trafic aérien doit reposer sur des productions largement automatiques, conçues sur mesure pour l’utilisateur, et mises à disposition dans un format standard et interoperable (SWIM) via des portails dédiés (de

type MetGate). Des techniques statistiques, relevant de l'intelligence artificielle (IA), pourront aussi être développées pour faciliter ou optimiser cette intégration.

D'une manière générale, le développement des approches « IA » pour les produits aéronautiques devrait se renforcer dans tous les domaines : visibilité/plafond, turbulence, convection, givrage, traînées de condensation. Dans le domaine de l'aéronautique, ces approches permettent en particulier de pouvoir intégrer rapidement dans le système de prévision des observations qu'on ne peut pas assimiler. Il faut toutefois disposer de bases de données fiables suffisamment longues pour développer ce type d'approche, d'où l'importance d'encourager l'exploitation des données d'observations aéroportées, mais aussi celles issues des radars et satellites.

La fourniture de telles données concerne aussi bien les risques (en route ou en approche/sur aéroport), mais aussi les paramètres qui peuvent influencer sur l'optimisation des routes (vent, température, par exemple).

Tableau 2 : Plans pour les futurs produits de prévision pour les applications aéronautiques. Les diagnostics déjà opérationnels en 2024 (issus du Tableau 1) sont en italique.

Diagnostic	Domaine globe	Domaine Arome
Convection	Indice de convection basé sur PEARP	<i>“RiskAero” : Indice de convection sectorisé basé sur PEARO</i> Produit sur zone d'attente (atterrissage)
Turbulence	<i>Indice probabiliste de turbulence en ciel clair basé sur PEARP</i>	Produit PEARP sectorisé pour l'en-route ; exploitation ADS-B
Givrage (eau surfondue)	<i>Produit d'analyse SIGMA</i> <i>Indice probabiliste de givrage basé sur PEARP</i> Notion de sévérité de givrage et matrice risque	Produit sectorisé de givrage basé sur PEARO (incluant sévérité)
Visibilité en approche/sur aéroport	Inclure les aérosols dans les diagnostics de visibilité	<i>Produits calibrés de visibilité basés sur Arome et PEARO</i> (amélioration produits par IA)
Cisaillement	-	Alerte bascule de vent sur plateforme ; risque de cisaillement vertical par fusion de données (incluant ADS-B et Mode-S)
Autres risques sur plateforme : neige, verglas, température, etc		Indices de risques sur plateforme : déclinaison probabiliste et PI
Traînées de condensation	<i>“WIMCOT” : risque de traînées persistantes</i>	

4 Conclusion

La recherche pour l'aéronautique est, par définition, une recherche applicative orientée vers les besoins des utilisateurs, institutionnels et commerciaux. La recherche, par le progrès des connaissances, des modèles et systèmes de prévision et par des travaux spécifiques à l'aéronautique, est nécessaire pour que Météo-France reste à l'état de l'art des applications aéronautiques, qui est un secteur concurrentiel. Ces recherches impliquent CNRM, DSM, DSO, DirOP au moins, dont la coordination de l'action est essentielle.

Les travaux de recherche de Météo-France, principalement au CNRM, sont menés dans un cadre partenarial, notamment avec le CERFACS et l'ENAC. Des initiatives locales comme l'Institute for Sustainable Aviation permettent de structurer les actions sur certains thèmes. Ceci requiert de pouvoir tirer parti d'opportunités de participation à des projets nationaux et européens (dont SESAR), afin de pouvoir bénéficier des compléments de ressources qu'ils induisent, notamment les ressources humaines (stagiaires, doctorantes et doctorants, CDD post-doctorantes et post-doctorants, ou ingénieures et ingénieurs). La participation à de tels projets, et une production scientifique soutenue pour décrire les avancées de la recherche et des services, sont des facteurs différenciant mettant en exergue l'excellence scientifique de Météo-France en la matière.

La fluidité du transfert de la recherche vers l'opérationnel requiert à la fois une étroite coordination des services au sein de Météo-France, mais aussi de conserver des contacts réguliers et constructifs avec les bénéficiaires de ces services, au premier rang desquels les entités de la DGAC, mais aussi quelques clients commerciaux (constructeurs aéronautiques, motoristes, compagnies aériennes) pour recueillir leurs retours et attentes de progrès, et leur faire part d'opportunités de nouveaux transferts et en évaluer conjointement le potentiel et les bénéfices.

Il faut s'attendre aussi à ce que l'Intelligence Artificielle prenne de plus en plus d'importance dans le domaine des prévisions météorologiques pour l'aéronautique, ainsi que pour l'aide à la décision. Un premier axe est le renforcement des travaux sur l'identification automatique d'objets ou de zones d'intérêt ou la calibration des prévisions par apprentissage statistique, qui sont des domaines déjà explorés par Météo-France. L'émergence de méthodes pour émuler directement des prévisions à partir des données pourrait changer radicalement le paysage de la prévision aéronautique, en particulier aux échéances de la prévision immédiate.

Références

Boilley A. and J.-F. Mahfouf, 2013, Wind shear over the Nice Côte d'Azur airport: case studies, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 2223–2238, doi:nhess-13-2223-2013.

EUROCONTROL, 2021, Climate change risks for European Aviation.

ICAO Meteorology Panel, 2018, Future aeronautical meteorological information service delivery, White Paper.

Gultepe, I., R. Sharman, P. D. Williams, B. Zhou, G. Ellrod, P. Minnis, S. Trier, S. Griffin, Seong. S. Yum, B. Gharabaghi, W. Feltz, M. Temimi, Zhaoxia Pu, L. N. Storer, P. Kneringer, M. J. Weston, Hui-ya Chuang, L. Thobois, A. P. Dimri, S. J. Dietz, Gutemberg B. França, M. V. Almeida and F. L. Albuquerque Neto, 2019 . A Review of High Impact Weather for Aviation Meteorology. *Pure Appl. Geophys.* 176, 1869–1921, doi:10.1007/s00024-019-02168-6

Gultepe, Ismail & Heymsfield, Andrew & Fernando, H. & Pardyjak, Eric & Dorman, Clive & Wang, Qing & Creegan, Edward & Hoch, Sebastian & Flagg, David & Yamaguchi, R. & Krishnamurthy, Raghavendra & Gabersek, Sasa & Perrie, W. & Perelet, A. & Singh, D. & Chang, R. & Nagare, Baban & Wagh, Sandeep & Wang, S., 2021 : A Review of Coastal Fog Microphysics During C-FOG. *Boundary-Layer Meteorology.* 1-39. doi :[10.1007/s10546-021-00659-5](https://doi.org/10.1007/s10546-021-00659-5).

Lee, D.S., D.W. Fahey, A. Skowron, M.R. Allen, U. Burkhardt, Q. Chen, S.J. Doherty, S. Freeman, P.M. Forster, J. Fuglestvedt, A. Gettelman, R.R. De León, L.L. Lim, M.T. Lund, R.J. Millar, B. Owen, J.E. Penner, G. Pitari, M.J. Prather, R. Sausen and L.J. Wilcox, 2021, The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018, *Atmospheric Environment*, Volume 244, 117834, doi:10.1016/j.atmosenv.2020.117834.

Schumann, U. 1996: On conditions for contrail formation from aircraft exhausts, *Meteorol. Z.*, N. F. 5, 4–23.

Schumann, U., 2005: Formation, properties and climatic effects of contrails, *C. R. Acad. Sci. Physique*, 549-565, doi:10.1016/j.crhy.2005.05.002.

SESAR JU, 2011, Assessing the macroeconomic impact of SESAR, Final report. <https://www.sesarju.eu/news-press/documents/assessing-macroeconomic-impact-sesar-874>

SESAR JU, 2020, Strategic Research and Innovation Agenda (SRIA), Digital European Sky, doi:10.2829/117092.

Strauss, C., D. Ricard, C. Lac, and A. Verrelle (2019). Evaluation of turbulence parameterizations in convective clouds and their environment based on a large-eddy simulation, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 145, 3195-3217.

Verrelle, A., D. Ricard, and C. Lac, 2017. Evaluation and improvement of turbulence parameterization inside deep convective clouds at kilometer-scale resolution, *Mon. Weather Rev.*, 145, 3947-3967.

Wilhem, L., Gierens, K., Rohs, S., 2021: Weather Variability Induced Uncertainty of Contrail Radiative Forcing, *Aerospace*, 8, doi:10.3390/aerospace8110332

WMO CAeM, 2019, Long-term plan for aeronautical meteorology, AeM Series, n°5. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21476.

Wurtz, J., Bouniol, D., Vié, B. and Lac, C.(2021) Evaluation of the AROME model's ability to represent ice crystal icing using in situ observations from the HAIC 2015 field campaign. *Q J R Meteorol Soc*, 147 : 2796– 2817, [doi:10.1002/qj.4100](https://doi.org/10.1002/qj.4100).

Annexes

Annexe 1: Les modèles à l'horizon 2030

Afin de positionner les besoins aéronautiques évoqués dans le document, il est important de replacer le contexte des modèles de prévision numérique opérationnels. Le système de prévision mondial Arpege et le système de prévision régional Arome sont décrits ci-dessous, selon deux phases : l'existant et une évolution importante à partir de 2027 permise par l'installation programmée d'un nouveau supercalculateur.

Arpege

La configuration de référence d'Arpege a une résolution d'environ 5km sur l'Europe de l'Ouest et de 24km aux antipodes. Les 34 membres perturbés de la prévision d'ensemble Arpege (PEARP) ont la même résolution que le système Arpege de référence. La prévision d'ensemble Arpege est exécutée 4 fois par jour jusqu'à l'échéance 102h. Jusqu'en 2026, le système Arpege verra des évolutions de son assimilation de données et de ses paramétrisations physiques. L'implémentation de nouveaux diagnostics aéronautiques sera possible au gré des mises à jour du système de prévision.

A partir de 2027, la résolution des prévisions Arpege doit augmenter à 2,5km de résolution sur l'Europe de l'Ouest et de 12km aux antipodes.

Arome

Le domaine Arome-France comprend l'essentiel du bloc d'espace fonctionnel aérien d'Europe Centrale (FABEC). La configuration de référence d'Arome-France possède une résolution de 1,3km sur un large domaine couvrant la France métropolitaine, et une discrétisation verticale sur 90 niveaux. Les 16 membres perturbés de la prévision d'ensemble Arome (PEARO) ont la même résolution que l'Arome de référence. La prévision d'ensemble Arome est exécutée 4 fois par jour jusqu'à l'échéance 51h. Jusqu'en 2027, le système Arome verra des évolutions de son assimilation de données et de ses paramétrisations physiques. Il est envisagé aussi d'augmenter la taille de l'ensemble à 24 membres perturbés, soit donc 25 membres en tout. L'implémentation de nouveaux diagnostics aéronautiques sera possible au gré des mises à jour du système de prévision.

A partir de 2027, la résolution des prévisions Arome doit s'affiner à 750m sur l'horizontale et sur 120 niveaux verticaux. La taille de l'ensemble doit demeurer à 25 membres.

Arome-PI

Arome-PI est une configuration d'Arome pour la PI qui permet de corriger la prévision Arome-France la plus récente vers les dernières observations disponibles via l'assimilation de données. Arome-PI tourne 24 fois par jour jusqu'à l'échéance de 6h. Le domaine, la résolution et les paramétrisations physiques sont identiques à Arome-France. Les prévisions par Arome-PI de cumuls de pluie et de réflectivités radar sont par ailleurs exploitées dans le produit de fusion PIAF, en combinaison avec les observations extrapolées de ces mêmes paramètres. PIAF se base sur une pondération adaptative, ce qui permet de proposer toutes les 5 min les meilleures prévisions possibles de ces paramètres jusqu'à 3h d'échéance sur la métropole.

A partir de 2027, il est prévu qu’Arome-PI devienne un système ensembliste, disposant donc de plusieurs membres, à 500m de résolution. Le cœur du système aura 120 niveaux verticaux.

Arome-500m

A partir de 2024, des configurations d’Arome à 500m de résolution seront mises en place sur un large domaine Méditerranéen et sur la région Parisienne, avec une résolution verticale également plus fine qu’Arome-France (120 niveaux verticaux au lieu de 90). Pour chaque domaine, deux applications seront envisagées :

- une configuration « PN » qui tournerait une fois par jour jusqu’à (environ) 24h d’échéance, les conditions initiales viendraient de celles d’Arome-France à 1,3km.

- une configuration « PI » qui tournerait 24 fois par jour jusqu’à 6h d’échéance, dont les conditions initiales viendraient de celles d’Arome-PI à 1,3km.

Il est attendu qu’Arome-500m bénéficie à la représentation des phénomènes de brouillard, de plafond et de cisaillement. Ces productions pourraient s’intégrer à l’ensemble des modèles disponibles pour la prévision de certains phénomènes sur plateforme, aux différentes échéances visées.

Prévision Numérique par émulation

L’émulation de prévision par Intelligence Artificielle a véritablement émergée dans la littérature en 2023. Il est possible que certaines évolutions de la chaîne de PNT à partir de 2027 prendront la forme d’émulateurs, par exemple pour la descente d’échelle à 500m ou pour l’enrichissement de membres de prévision. Ce sujet de recherche démarre juste au CNRM ; il est trop tôt pour préciser les perspectives d’implémentation opérationnelle.

Annexe 2 : Les satellites à l’horizon 2030

L’observation satellitaire fournit des données cruciales pour l’aéronautique, puisqu’elle sert directement à des produits utilisables (en fusion avec d’autres types de données parfois), et que l’assimilation des informations satellitaires est un facteur essentiel de la qualité des modèles de prévision.

La 3^e génération de satellites MeteoSat (MTG) offrira des données à plus haute fréquence temporelle et à une meilleure résolution spatiale. MTG-I/FCI, dont la déclaration opérationnelle devrait intervenir en 2024, fournira aussi de nouveaux canaux par rapport à la génération précédente. Un nouvel instrument, l’imageur d’éclairs LI, est embarqué sur MTG-I ; il devrait fournir des premières données en 2024. Un sondeur hyperspectral, nommé IRS, sera disponible sur MTG-S, dont le lancement est prévu en 2026. De nouveaux produits seront développés à partir de ces données ; ils sont définis en particulier par les plans de développements de la 4^{ème} phase de développements continus d’EUMETSAT (CDOP 4) notamment au travers des Satellite Application Facilities (SAF).

La 2^e génération de satellites défilants européens (EPS-SG), emportant des capteurs plus précis en résolution spatiale et spectrale que la 1^{ère} génération Metop (imageur METIMAGE, sondeur hyperspectral infrarouge IASI-NG, sondeurs micro-onde MWS et MWI, diffusiomètre SCA et radio-occultation RO) mais aussi de nouveaux capteurs (imageur de nuages ICI). Une partie des satellites défilants lancés par les agences d’autres continents (USA et Chine surtout) vont être renouvelés.

L'assimilation de ces données dans Arpege et Arome sera poursuivie. Les images de ces satellites défilants pourront être exploitées pour des applications aéronautiques, ponctuellement.

L'assimilation des données FCI, LI et IRS dans les modèles de prévision numérique du temps fait l'objet de recherche dès aujourd'hui. En particulier, LI doit permettre de mieux contraindre les cellules convectives dans Arome et IRS de mieux initialiser les champs de température et d'humidité dans la troposphère.