



La prévision du brouillard sur site à enjeu : un défi scientifique

Christine Lac, Alain Dabas, Frédéric Burnet

► To cite this version:

Christine Lac, Alain Dabas, Frédéric Burnet. La prévision du brouillard sur site à enjeu : un défi scientifique. Météo-France. 2018. <hal-04638518>

HAL Id: hal-04638518

<https://hal.science/hal-04638518v1>

Submitted on 8 Jul 2024

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

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License

COMITÉ SCIENTIFIQUE CONSULTATIF DE MÉTÉO-FRANCE



**La prévision du brouillard sur site à enjeu :
un défi scientifique**

C. Lac, A. Dabas, et F. Burnet

La prévision du brouillard sur site à enjeu : un défi scientifique.

1 Introduction

Le brouillard est un phénomène particulièrement difficile à prévoir de par sa forte variabilité spatio-temporelle : son épaisseur est de quelques dizaines de mètres sur la verticale sur des étendues souvent inférieures à quelques kilomètres, il est présent par poches, à des degrés d'intensité divers, et peut se former ou se dissiper rapidement (quelques minutes à quelques dizaines de minutes). Très dépendant des conditions thermodynamiques à proximité du sol, il met en jeu des processus physiques hautement non linéaires, à effet de seuil, comme la formation des gouttelettes d'eau, la propagation des rayonnements visibles ou infrarouge sur son épaisseur ou encore la turbulence en couche stable, qui affectent sa prévisibilité. Il est enfin une manifestation d'une physique complexe et couplée, à l'interface entre le sol et l'atmosphère. La compréhension du brouillard constitue un défi scientifique important.

Le brouillard constitue un enjeu pour nos sociétés, avec des conséquences fortes et perceptibles de tous, sur la sécurité et sur l'économie de certains secteurs. Le transport aérien et le trafic routier sont particulièrement gênés. Dans le monde du transport aérien en particulier, la réduction de la visibilité ou un plafond nuageux très bas sur un aéroport conduit celui-ci, pour des raisons de sécurité, à adopter un mode de fonctionnement dégradé (appelé *Low Visibility Procedure* ou LVP). La capacité des pistes – le nombre d'avions qui peuvent décoller ou atterrir par unité de temps – est réduit. A Roissy Charles de Gaulle (CDG), le facteur de réduction est de l'ordre de 0,5. Sur les plateformes très fréquentées que sont les grands aéroports, généralement *hub* de grandes compagnies, les conséquences sont vite importantes et coûteuses. Les perturbations sont nombreuses, avec le retard ou l'annulation des vols, le déroutement des avions long-courriers déjà en vol ou leur mise en attente dans des « hippodromes » qui finissent par saturer. De nombreux passagers ratent leur correspondance et doivent être transportés vers d'autres aéroports ou hébergés. Le coût pour les compagnies aériennes peut vite se chiffrer en millions d'euros¹.

Afin d'en atténuer les conséquences, les compagnies aériennes sont demandeuses d'une prévision de la visibilité et de la hauteur des plafonds nuageux, à des échéances allant du très court terme (une heure, ce qui permet de maintenir au sol un vol court-courrier si le brouillard est prévu à l'arrivée) à environ 24 heures (ce qui permet de réorganiser au mieux le programme des vols du lendemain en évitant la saturation), avec une précision sur les heures de formation ou de dissipation du brouillard de quelques minutes à au plus une trentaine de minutes. Le franchissement des seuils 600m et 800m pour la visibilité et 200m et 300m pour la hauteur des plafonds nuageux sont particulièrement

1 Voir https://www.lesechos.fr/26/12/2006/LesEchos/19822-125-ECH_le-brouillard-a-heathrow-coute-cher-a-british-airways.htm.

critiques puisqu'ils conditionnent le passage en pré-LVP ou LVP. Les systèmes de prévisions actuels ont cependant encore beaucoup de difficultés à répondre à ces exigences.

La faible épaisseur du phénomène requiert un modèle de prévision finement résolu sur la verticale (nombreux niveaux de modèles dans les premières centaines de mètres) et doté de représentations fidèles de phénomènes complexes et non-linéaires. Il doit être par ailleurs initialisé avec un état de l'atmosphère précis et finement détaillé sur la verticale et s'appuyer sur une description des propriétés de surface à haute résolution spatiale.

La prévision numérique du temps met en œuvre aujourd'hui des modèles à mailles de plus en plus fines (1,3km pour la version opérationnelle actuelle d'AROME), et un nombre de niveaux verticaux de plus en plus élevé (90 niveaux verticaux pour AROME dont le premier est à 5 mètres). La représentation des processus physiques ne cesse d'y progresser, notamment les échanges avec la surface ou à la microphysique des gouttes d'eau. Les descriptions des types de surface se font à des échelles spatiales de plus en plus finement résolues (300m avec la version ECOCLIMAP de seconde génération en cours de développement). Ces progrès, couplés à la capacité croissante des calculateurs, laissent entrevoir une possible amélioration de la prévision du brouillard à une échéance de quelques années avec un modèle opérationnel de type AROME, à mailles et résolution verticales fines et opérant sur une aire limitée à quelques centaines de kilomètres de côté couvrant un aéroport et ses approches, et utilisant des observations locales finement résolues dans les basses couches pour son initialisation.

L'ensemble de ces éléments a conduit Météo-France à proposer à sa tutelle, dans le Contrat d'Objectifs et de Performances 2017-2021, de conduire « une action de R&D spécifique sur l'observation et la prévision du brouillard, en mobilisant des moyens expérimentaux innovants dont un radar dédié à l'observation des nuages ainsi que des moyens de modélisation spécifiques ».

2 La prévision du brouillard pour les grands aéroports.

2.1 Le système COBEL-ISBA (2002-2015)

Parmi les recommandations du rapport Bougeault (2002) sur l'analyse et la prévision du brouillard et des nuages bas figurait la mise en place sur CDG d'un système de modélisation dédié spécifiquement à la prévision du brouillard, le modèle COBEL couplé au modèle ISBA (surface). Fruit de recherches menées dans les années 90 en collaboration entre le CNRM et le Laboratoire d'Aérodynamique, ce modèle était uni-colonne, permettant d'atteindre une résolution verticale très fine (20 niveaux dans les 200 premiers mètres) et d'inclure une physique détaillée (turbulence en couche stable et schéma radiatif infrarouge) pour un coût numérique modeste (Bergot et Guedalia, 1994 ; Bergot et al., 2005). Le système mis en place comprenait également une instrumentation spécifique afin d'initialiser le modèle à l'aide d'une assimilation locale : un mât de 30 m permettant la mesure de la température et de l'humidité, des mesures radiatives au sol et à 40 m, des mesures dans le sol de température et contenu en eau, auxquelles fut rajoutée ensuite une mesure par sodar de l'épaisseur de la couche de brouillard une fois celui-ci formé (Dabas et al., 2012). Le système

délivrait une prévision de brouillard toutes les 15 minutes jusqu'à une échéance de 24h. Ce système fut aussi déployé sur les aéroports d'Orly et Lyon.

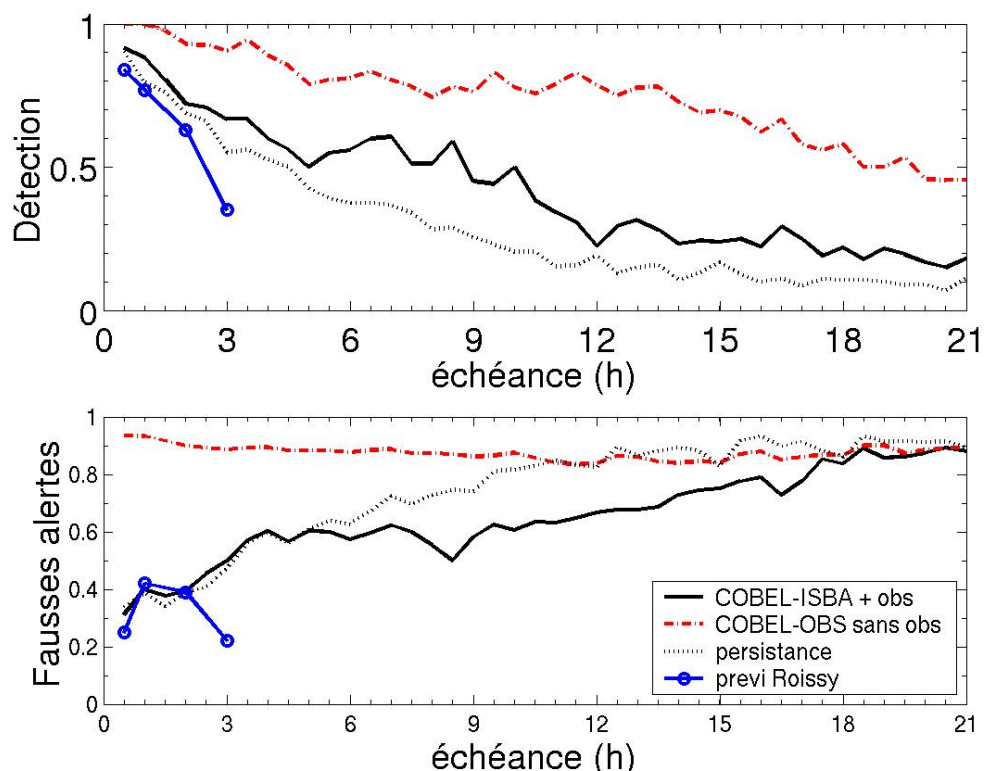


Illustration 1: Evolution des taux de bonnes détections et de fausses alarmes sur Paris-CdG calculés sur 3 hivers (2002-2005) en fonction de l'échéance de prévision. Bleu : prévision opérationnelle (par le prévisionniste), noir pointillé : prévision par persistance (il n'y aura pas de brouillard à l'échéance s'il n'y en a pas au moment où la prévision est faite, et inversement le brouillard présent va persister jusqu'à l'échéance considérée), noir : prévision du système Cobel-Isba, rouge : prévision Cobel-Isba sans les observations spécifiques. Le taux de détection est le rapport entre le nombre de brouillards prévus et effectivement observés à l'échéance de la prévision. Le taux de fausses alarmes est le rapport entre le nombre de brouillards prévus mais non effectifs et le nombre total de brouillards prévus. Une prévision parfaite aurait un taux de détection de 1 (tous les brouillards effectivement observés à une échéance ont été prévus, et toutes les prévisions de brouillard ont effectivement donné lieu à un brouillard à l'échéance prévue).

Les conclusions de l'évaluation objective conduite sur trois hivers, de 2002 à 2005, pour la prévision du brouillard sur Roissy se résument à (voir Illustration 1) :

- Le système intégré assimilation-prévision COBEL-ISBA permettaient d'améliorer la qualité de la prévision du brouillard sur Paris-CDG par rapport à la prévision existante ;
- L'assimilation d'observations locales était indispensable pour obtenir une prévision précise du brouillard ;

La qualité des prévisions du système COBEL-ISBA est faible après 6h d'échéance (taux de détection au même niveau que le taux de fausse alerte). Ce système présentait quelques limites. La plus importante, liée à l'approche uni-colonne, était la difficulté à bien prévoir les cas de brouillards

d'advection et à représenter les circulations de basses couches tri-dimensionnelles dont plusieurs études ont montré depuis le rôle dans le développement du brouillard à Roissy. Ce point fut notamment souligné par les prévisionnistes de CDG.

COBEL fut également déployé hors de France (Maroc, Canada, US), et des études furent menées sur une possible prévision d'ensemble qui donnèrent quelques résultats intéressants, mais ne furent pas suivies d'un transfert à l'opérationnel à cause du temps de calcul trop élevé.

Le système COBEL-ISBA fut arrêté en 2015 en raison de son coût jugé trop élevé (maintenance de l'instrumentation spécifique) par rapport à son bénéfice et de la disponibilité nouvelle de prévisions AROME. En 2015, le système AROME passa en effet de la résolution horizontale 2.5 km à 1.3 km et sa grille verticale de 60 niveaux à 90 niveaux avec un premier niveau à l'altitude de 5 mètres au-dessus du sol et 20 niveaux en dessous de 500m. Tridimensionnel, AROME devait par ailleurs permettre de traiter les brouillards advectifs que COBEL ne pouvait pas correctement simuler, et mieux traiter par ailleurs les autres types de brouillard pour lesquels les effets 3D sont assez systématiquement présents ainsi que les hétérogénéités de surface.

2.2 La prévision du brouillard par AROME.

Aujourd'hui, la prévision du brouillard sur les 24 prochaines heures repose sur les systèmes de prévision AROME (Illustration 2) et ARPEGE, et sur des observations locales fournies la plupart du temps par les instruments de mesure météorologiques réglementaires sur l'aéroport (hauteur de la base des nuages, température, vent, visibilité), ou par des moyens spécifiques comme par exemple une station de mesure de visibilité déportée à quelques kilomètres au Nord de CDG d'où arrive souvent le brouillard. Le brouillard est diagnostiqué à partir du contenu en eau nuageuse à 20m, l'humidité relative à 2m, 20m et 50m ainsi que du vent à 10m prévus par les différents systèmes de prévision basés sur le modèle AROME (prévisions déterministes, d'ensemble ou immédiates). Une prévision de visibilité par adaptation statistique des prévisions d'AROME-France est aussi disponible. Parallèlement, un nouveau diagnostic de visibilité est en train d'être développé et sera disponible dans la prochaine version des modèles fin 2018. Il ouvre la voie à une comparaison avec des observations de ce paramètre et l'assimilation de telles données.

Les différentes études de cas et le retour des prévisionnistes indiquent que dans la prévision du modèle AROME-France :

- L'occurrence des nuages bas et des brouillards en journée sur terre a tendance à être sous-estimée. Une partie de ce défaut vient du fait que le schéma de convection peu profonde est trop actif, et dissipe donc excessivement les nuages bas/brouillards par un mélange trop puissant.
- Quand les brouillards sont bien développés, les contenus en eau nuageuse sont généralement trop élevés. Une piste d'amélioration pourrait être la prise en compte du dépôt des gouttelettes d'eau sur la végétation (cf. §3.3).
- Il a aussi été remarqué qu'AROME avait surtout du mal à simuler les affaissements de stratus (évaluation sur la région parisienne par Philip, 2016). Les brouillards radiatifs étaient mieux prévus.

- Plusieurs situations de brouillards anormalement persistants sur mer ont été reportées par les prévisionnistes. Le brouillard commence à se former et se développe dans le modèle, découplant ainsi la surface et l'atmosphère. Il est difficile pour l'assimilation de le dissiper car très peu d'observations entrent dans le système sur mer.

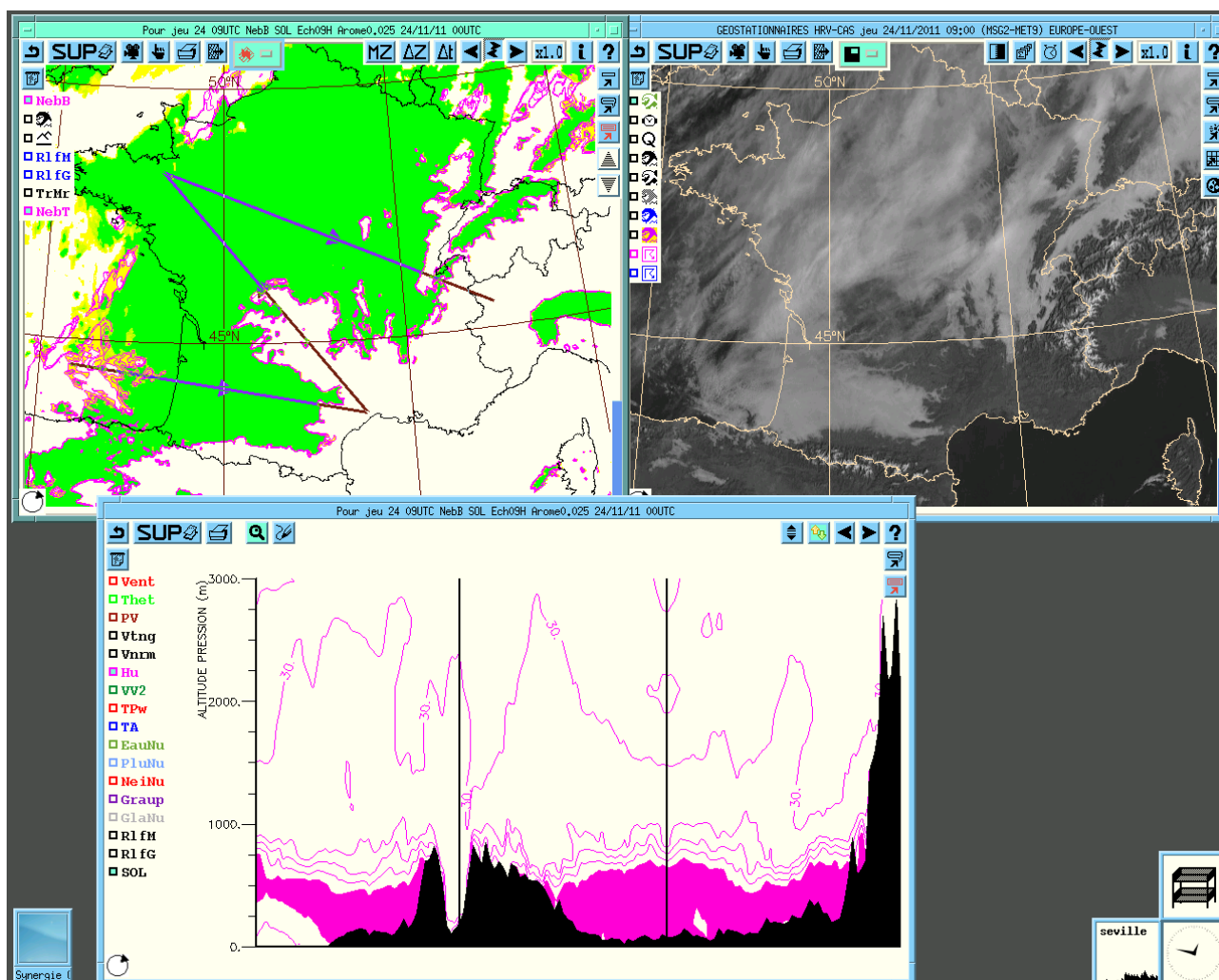


Illustration 2: Prévion à 09UTC de la nébulosité basse parAROME le 24 novembre 2011 (en haut à gauche) comparée à l'image satellite correspondante (en haut à droite), et coupes verticales du champ d'humidité relative prévu le long des segments dans la figure au-dessus à gauche (la zone colorée en rose est à 100 % d'humidité relative).

2.3 La prévision de brouillard dans d'autres pays voisins

En Angleterre, une version du Unified Model à 330 m et 70 niveaux verticaux a été adaptée sur Londres (Boutle et al., 2016) et New Delhi (Jayakumar et al., 2017), avec un schéma microphysique à un moment (de même type que celui d'AROME). Le modèle tourne deux fois par jour (6UTC et 21UTC) jusqu'à une échéance de 36h. Un module d'aérosols pronostiques traite les sources urbaines et industrielles, le transport résolu et turbulent, et le lessivage (Clark et al., 2008). Le modèle lui-même n'assimile aucune observation, mais fonctionne en descente d'échelle à partir du modèle opérationnel britannique à 1,5km de résolution qui assimile quant à lui des observations,

notamment de visibilité avec correction de la concentration en aérosols. Les concentrations de gouttelettes sont diagnostiquées à partir de la concentration pronostique d'aérosols. Un diagnostic de visibilité est fonction de l'humidité et de la concentration pronostique d'aérosols.

En Allemagne, le système de prévision du brouillard opérationnel à Munich est de type COBEL-ISBA, c'est-à-dire reposant sur un modèle uni-colonne et l'assimilation de données locales (Rohm et al., 2010). Un projet existe cependant avec la Suisse ambitionnant de façon similaire à ce qui est prévu en France de passer à une modélisation tri-dimensionnelle en combinant les paramétrisations microphysiques du modèle uni-colonne précédent (PAFOG) avec le modèles non-hydrostatique opérationnel COSMO à résolution kilométrique.

3 Les avancées récentes de la recherche

3.1 Amélioration de la compréhension des processus à partir des LES

La compréhension des mécanismes physiques impliqués dans le brouillard est un élément clé pour l'amélioration de la prévision. De nombreuses caractéristiques du brouillard ont pu être mises en évidence avec les simulations uni-colonne de type COBEL ; plus récemment, l'avènement des simulations LES (*Large Eddy Simulations*, de résolution métrique) avec le modèle de recherche Més0-NH a permis de progresser significativement sur la compréhension des structures organisées dans la couche de brouillard, qui ne pouvaient être résolues en 1D. Bergot (2013, 2016) a ainsi pu simuler un cas de formation du brouillard à Roissy et montré la capacité de ces outils à reproduire la grande hétérogénéité horizontale du phénomène au cours de formation avec notamment des effets très locaux dus aux bâtiments qui peuplent la plateforme. Sur la base d'observations réalisées au SIRTa pendant les campagnes PREVIBOSS, Mazoyer *et al.* (2017) ont pu faire le lien entre les processus dynamiques et microphysiques.

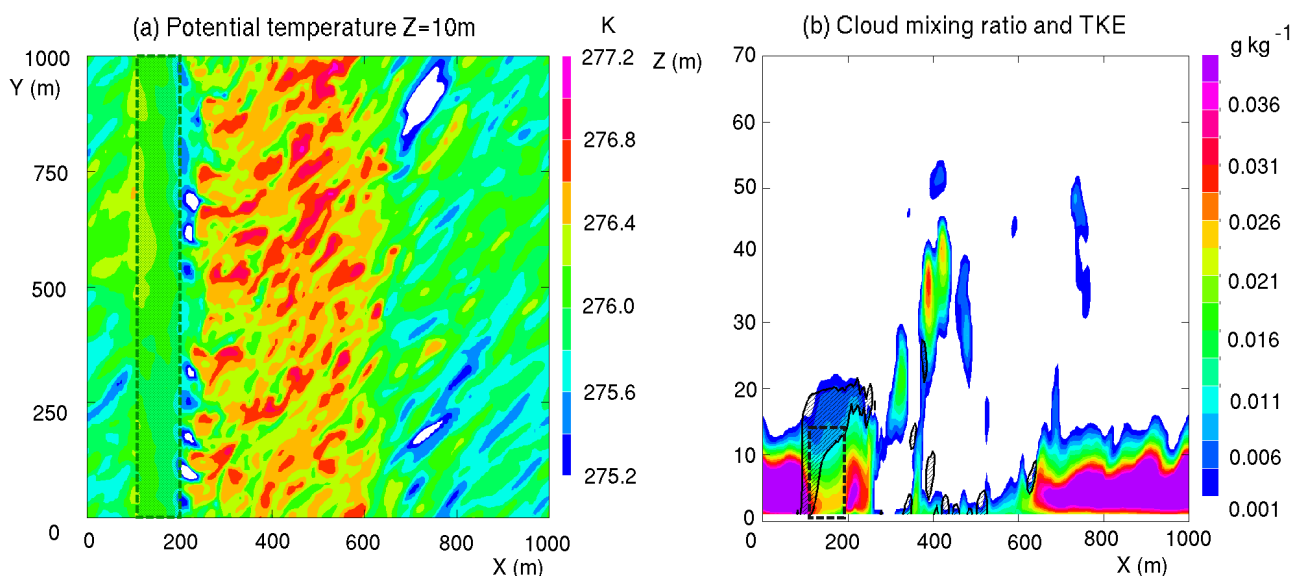
3.2 Hétérogénéités de surface

Pour bien prévoir le brouillard, les modèles doivent représenter correctement le couplage entre la surface et l'atmosphère, et le couplage entre les différentes paramétrisations (microphysique, turbulence, rayonnement) qui détermine l'évolution du brouillard.

La résolution verticale fine qu'impose la modélisation du brouillard implique que les hétérogénéités de surface comme des bâtiments ou des arbres traversent plusieurs niveaux du modèle atmosphérique et doivent être prises en compte explicitement. Classiquement, les effets de la canopée sur l'écoulement sont représentés par le modèle de surface à partir d'une longueur de rugosité. La prise en compte d'une force de traînée dans le modèle atmosphérique, développée par Aumond *et al.* (2013) permet de représenter la circulation de sillage autour des obstacles. Bergot *et al.* (2015) l'ont utilisé pour étudier l'effet de la canopée urbaine sur le cycle de vie du brouillard autour de l'aéroport CDG à partir d'une LES : sur le brouillard radiatif étudié, les éléments de surface entraînent des hétérogénéités sur la hauteur du brouillard durant la phase de formation, et une durée de formation de l'ordre de 1h30 sur la zone aéroportuaire. Le brouillard se forme préférentiellement en amont des bâtiments, mais la turbulence qu'ils génèrent favorise ensuite son

développement vertical. L'effet des hétérogénéités de surface disparaît ensuite durant la phase de développement. De la même manière, Mazoyer *et al.* (2017) ont montré une amélioration de la représentation du vent et de la turbulence lorsque l'effet d'une barrière d'arbres au SIRTa est prise en compte, induisant un décalage temporel lors de la formation du brouillard sur le parc instrumental situé à proximité de cette barrière (Illustration 3, campagnes PREVIBOSS).

La thèse de L. Ducongé (« Impact des hétérogénéités de surface sur la modélisation du brouillard dans le cadre de la campagne LANFEX ») conduite actuellement au CNRM est consacrée à l'étude de l'impact de l'orographie sur le cycle de vie du brouillard en région vallonnée, à partir des données de la campagne LANFEX conduite par le MetOffice en 2014-2016. Les chercheurs du MetOffice ont investi cette thématique depuis de nombreuses années, avec la campagne COLPEX consacrée à l'étude de la formation des nappes froides dans les vallées étroites, puis la campagne LANFEX focalisée sur les brouillards dans la même région du Pays-de-Galles. Un des objectifs est de mieux comprendre comment une même masse d'air peut donner lieu ou non à du brouillard suivant les vallées. Différents effets se combinent : locaux, liés aux écoulements de drainage et catabatiques et non locaux, advectifs. Un premier constat déduit de la campagne LANFEX, que l'on cherche à mieux comprendre, est que les vallées les plus étroites, qui connaissent les refroidissements nocturnes les plus rapides, sont moins touchées par le brouillard.



*Illustration 3: Simulation LES (résolution 5m) lors de la formation du brouillard sur le site du SIRTa le 15 novembre 2011 à 0200 UTC : (a) Coupe horizontale de température potentielle à 10 m montrant les structures turbulentes induites par les arbres, amenant de l'air plus chaud depuis le dessus. (b) Coupe verticale du contenu en eau nuageuse montrant l'hétérogénéité spatiale sur la formation du brouillard. La barrière d'arbre est marquée par un rectangle. Extrait de Mazoyer *et al.* (2017).*

3.3 Paramétrisations physiques : Microphysique – Turbulence – Nuages

3.3.1 Microphysique

Pour une même quantité d'eau, un brouillard avec un petit nombre de grosses gouttelettes sera optiquement fin (i.e. transparent au rayonnement thermique entre 8 et 12 μm), alors qu'un grand nombre de petites particules mènera à un brouillard optiquement épais (i.e. opaque au rayonnement thermique). Price (2011) a montré que ces différences pouvaient mener à une bifurcation significative dans le comportement du brouillard : un brouillard optiquement fin reste généralement fin et hétérogène, thermiquement stable avec une durée de vie relativement faible, alors qu'un brouillard optiquement épais mène à un profil de température neutre (par réchauffement en surface et refroidissement au sommet) et à un brouillard plus persistant. Une bonne prévision du nombre de gouttelettes est donc cruciale pour simuler correctement le cycle de vie du brouillard.

Dans les paramétrisations microphysiques à un moment, tels que dans la plupart des schémas des modèles de Prévision Numérique du Temps (PNT) comme AROME, le nombre de gouttelettes est fixe, ce qui ne permet pas d'appréhender les différences entre un brouillard optiquement fin ou épais. Les paramétrisations microphysiques à 2 moments, tel que le schéma LIMA (Vié *et al.*, 2016) initialement développé dans Méso-NH et implanté dans AROME, traitent de manière prognostique la concentration des gouttelettes. Celle-ci est déterminée par le processus d'activation des aérosols qui intervient dans le brouillard à des niveaux très faibles de sursaturation. Pour une concentration d'aérosols donnée, le nombre de gouttelettes activées est plus faible dans le brouillard que dans les autres types de nuages, en l'absence de fortes ascendances pour forcer le refroidissement des parcelles d'air.

L'autre point fort de LIMA est son approche multimodale des aérosols : la population d'aérosols est représentée par la superposition de différents modes (généralement Aitken, accumulation et grossier), chaque mode étant défini par sa composition chimique et sa capacité à servir de noyau de condensation ou de noyau glaçogène, en fonction de sa solubilité. Une méthode d'initialisation réaliste des aérosols a été développée dans Méso-NH et AROME à partir des analyses MACC et MOCAGE, permettant d'introduire une variabilité spatiale (même si les résolutions spatiales sont plus grossières). L'évaluation de LIMA sur des cas réels de brouillard est en cours, dans AROME à partir de cas de la campagne BURE, et dans Méso-NH à partir de cas de LANFEX

Différentes campagnes de mesure ont permis de constater que les contenus en eau nuageuse prévus par les modèles dans le brouillard sont généralement surestimés près du sol. Un terme manquant dans la plupart des modèles, le dépôt des gouttelettes, a été introduit de manière simple dans Méso-NH au premier niveau du modèle par Mazoyer *et al.* (2017) et dans AROME. Ce processus correspond à la captation des gouttelettes par les éléments de surface (herbe, arbres, bâtiments), dont Katata (2014) présente une revue détaillée, et qui peut être un terme puits très important comme montré par l'étude expérimentale de (Tav. et al 2018). Il a été évalué dans AROME à partir des observations de la campagne Bure 2015 : il améliore la restitution des contenus en eau à 10m, diminue les surestimations mais augmente un peu les sous-estimations. Il s'ajoute à la sédimentation des gouttelettes déjà prise en compte dans AROME, qui est active sur toute la couche de brouillard et essentielle lors de la phase de dissipation. Si les contenus en eau nuageuse

du modèle s'avèrent encore surestimés, une autre cause possible est le dépôt de rosée qui pourrait être sous-estimé avant la formation du brouillard (Guedalia et Bergot, 1994).

Un autre enjeu important d'un schéma microphysique à 2 moments comme LIMA est de pouvoir prendre en compte la concentration de gouttelettes et peut-être même d'aérosols dans le diagnostic de visibilité. Cette approche permettra de distinguer la nature d'un brouillard dont le caractère optiquement fin ou épais est lié au nombre de gouttelettes et devrait améliorer sensiblement les diagnostics de visibilité actuels.

3.3.2 Turbulence

La qualité du refroidissement nocturne au sol simulé par un modèle dépend de la qualité de la paramétrisation de la turbulence en couche limite stable. Les modèles produisant une turbulence trop active présentent généralement un biais chaud la nuit (Holtslag *et al.*, 2013) et vont avoir plus de mal à former un brouillard. Inversement, des brouillards formés et optiquement trop épais peuvent mener à un excès de turbulence (par refroidissement radiatif au sommet) et favoriser son extension verticale.

En couche limite stable, le cisaillement vertical de vent est la seule production de turbulence. Cet effet n'était jusqu'alors pas pris en compte dans la longueur de mélange du schéma de turbulence de Méso-NH/AROME, qui est la longueur caractéristique des tourbillons les plus énergétiques. A partir de simulations LES, Rodier *et al.* (2017) ont proposé une modification de cette longueur de mélange, qui introduit une contribution locale du cisaillement vertical de vent au terme non-local basé sur la flottabilité. Elle permet de diminuer la surestimation du mélange constatée en condition stable. Son impact sur les situations de brouillard est à évaluer.

3.3.3 Nuages

La prévision des nuages de couche limite et des nuages bas de type stratus constitue un autre enjeu important pour la prévision du brouillard. D'une part, la présence d'un nuage de couche limite diminue le refroidissement en surface et empêche la formation du brouillard, ou bien l'advection d'un nuage de couche limite au dessus d'un brouillard existant favorise sa dissipation. D'autre part, les stratus s'affaissant jusqu'au sol constituent une situation fréquente d'occurrence de brouillard en zone continentale. Aux résolutions kilométriques, les nuages de couche limite sont en partie des nuages sous-maille, produit par un schéma statistique de nuage. Celui-ci utilise la variabilité nuageuse sous-maille produite par le schéma de turbulence et le schéma de convection peu profonde. Mais en condition nocturne, ces schémas sont très peu actifs, et un déficit de nuages bas avait été noté par les utilisateurs d'AROME dans la communauté HIRLAM. Un terme supplémentaire, basé sur une humidité relative critique de 96 %, a été introduit dans AROME (de Rooy *et al.*, 2010), qui corrige en partie ce défaut.

3.4 Impact de la résolution verticale dans AROME

De nombreuses études 1D ont montré l'impact de la résolution verticale sur les principaux processus impliqués lors de la phase de formation du brouillard, comme le refroidissement radiatif et le transport d'eau liquide. Philip *et al.* (2016) ont étudié l'impact d'une résolution verticale plus

fine près de la surface pour des simulations 3D d'AROME sur CDG (voir Illustration 4). Le jet nocturne et la turbulence créée par cisaillement au sommet de la couche nocturne sont plus prononcés avec une résolution verticale fine, ainsi que la turbulence près du sol. Cela induit des circulations locales déterminantes lors de la formation du brouillard, soulignant ainsi la nécessité d'une approche 3D, même pour des brouillards classés comme radiatifs. L'impact de la résolution verticale semble pouvoir améliorer sensiblement la prévision de la dissipation mais être moins efficace pour la formation, qui dans Illustration 4 est encore prévue avec retard. Une étude statistique sur un hiver montre que la résolution verticale fine simule des brouillards dont la formation est plus précoce, la durée plus longue et la spatialité plus hétérogène.

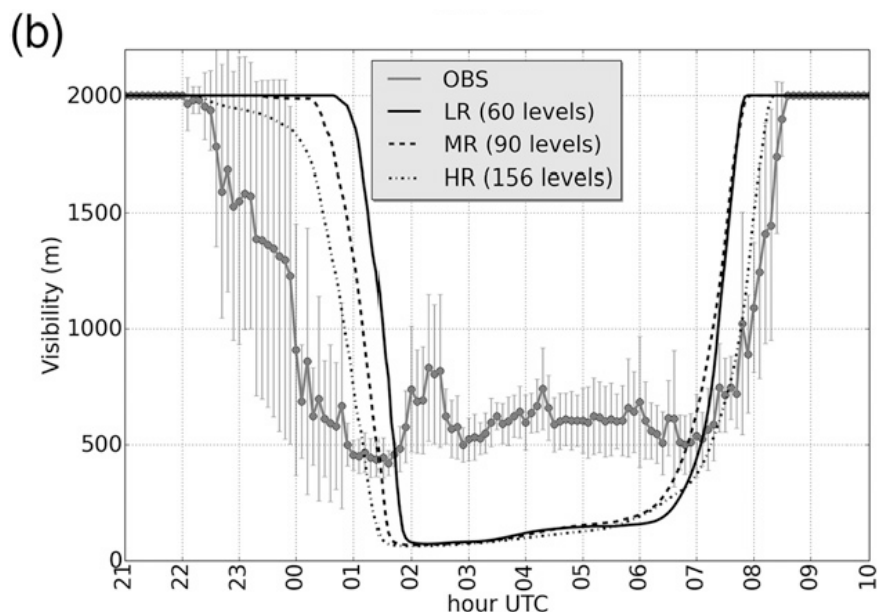


Illustration 4 : Visibilité moyenne observée et prévue sur l'aéroport de Roissy CDG pendant la nuit du 22 au 23 octobre 2012. Les barres d'erreurs sur la visibilité observée donne l'écart-type des visibilités mesurées par les visibilimètres de l'aéroport. Les visibilités prévues l'ont été avec AROME à 1,3km de résolution et un nombre croissant de niveaux (LR=60, MR=90 et HR=156). D'après Philipp et al. (2016).

3.5 Les moyens d'observation expérimentaux

Les moyens d'observation du brouillard ont nettement progressé au cours des 10 à 15 dernières années. La combinaison de plusieurs capteurs de microphysique permet désormais de caractériser le spectre dimensionnel des noyaux de condensation et des gouttes d'eau et de suivre leur évolution tout au long du cycle de vie du brouillard (Mazoyer *et al.*, 2016). Le contenu en eau liquide peut être mesuré au sol ou sur la totalité de l'épaisseur du brouillard grâce à des ballons captifs équipés de capteurs d'eau liquide miniaturisés et allégés². Le développement de capteurs in-situ miniaturisés pour les principales variables thermodynamiques et le rayonnement, et les vols coordonnés de plusieurs petits drones ouvrent la voie à une exploration tridimensionnelle et multi-paramètres du brouillard et ainsi à la documentation d'une variabilité spatiale révélée par la modélisation LES

² Burnet et al. 2018 voir http://www.meteo.fr/cic/meetings/2018/AMA/presentations/AMA_1402/5-%20ProfilVerticalBrouillard_Burnet_20180214.pdf

mais très peu observée jusqu'à aujourd'hui faute de moyens adaptés. La télédétection n'est pas en reste. La radiométrie microonde basée au sol a démontré sa capacité à restituer des profils verticaux de température dans les basses couches de l'atmosphère, notamment en conditions stables et en présence d'inversions thermiques prononcées, avec une résolution temporelle élevée et une résolution verticale suffisamment fine (Martinet *et al.*, 2017). En combinant le radiomètre microonde avec un radar en bande W (95GHz, sensible aux gouttes d'eau du brouillard) nouvellement commercialisé, il devrait être possible de restituer des profils verticaux automatiques d'eau liquide à une résolution temporelle de quelques minutes. Les lidars Doppler scannant ont démontré leur capacité à explorer précisément les écoulements de basse couche à l'échelle hectométrique dans des volumes de quelques kilomètres de côté (Sabatier *et al.*, 2018). Ils devraient ainsi pouvoir documenter les écoulements dans la phase qui précède la formation du brouillard.

Il est à noter que si certains des moyens mentionnés ci-dessus ne peuvent se concevoir que dans le cadre d'expérimentations pour la recherche, d'autres comme le radiomètre microonde et le radar en bande W pourrait tout à fait intégrer les réseaux d'observation opérationnels des aéroports et fournir à terme des observations intéressantes pour l'initialisation des prévisions.

Des études ont par ailleurs cherché à développer des techniques de prévision immédiate du brouillard. Combinant des mesures météorologiques classiques au sol et les signaux de rétrodiffusion des télémètres, un algorithme a ainsi été développé détectant les signes avant-coureurs de la formation du brouillard (Haefelin *et al.*, 2016). De même, des études en cours cherchent à détecter dans les mesures des radars en bande W le grossissement et la sédimentation accélérée des gouttes d'eau conduisant à brève échéance à la dissipation du brouillard.

3.6 Conditions initiales

Les observations qui ont le plus d'impacts sur la prévision du brouillard quand elles sont assimilées par AROME sont les observations des stations de surface qui entrent toutes les 3h dans l'analyse de surface (T2m/Hu2m) et toutes les heures dans l'analyse d'altitude (T2m/Hu2m/V10m), ainsi que les premiers niveaux des radiosondages et des profils des avions en phase de décollage/atterrissage. Les autres observations, comme les radiances satellitaires (par exemple les canaux IR 4, 6 et 7 de SEVIRI qui pointent plutôt sur les basses couches) ne sont pas utilisées en cas de nuage et les données des radars météorologiques ne fournissent pas d'observations hors des zones de précipitations. Les radiomètres micro-onde ou les radars nuage en bande W ont été identifiés comme potentiellement pourvoyeurs d'amélioration des conditions initiales en basses couches et des recherches ont été initiées pour développer leur assimilation (Borderies *et al.*, 2017 ; Martinet *et al.*, 2017).

La prévision du brouillard est sensible à la température et l'humidité des sols dont l'évolution au cours de la simulation dépend de la nature et l'occupation des sols. L'ensemble des modèles de Météo-France utilise la base de données ECOCLIMAP pour décrire les écosystèmes à la surface terrestre à la résolution kilométrique. Elle est intégrée à la plate-forme de modélisation des surfaces SURFEX. Afin de répondre aux besoins de la modélisation sub-kilométrique qui requiert une description plus fine de la surface, une nouvelle base de données à plus haute résolution et plus riche en terme de paramètres est en cours de développement. ECOCLIMAP-SG (Seconde

Génération) est à 300m de résolution et basée sur des paramètres issues de données satellitaires indépendantes (indice foliaire, albédo, hauteur des arbres...).

4 Le programme de R & D

Inscrit au COP 2017-2021 de Météo-France, le programme de recherche et développements vise à progresser dans la prévision du brouillard pour les besoins de l'aéronautique. Il comprend i) la réalisation et l'exploitation d'une campagne de mesures et ii) le développement et l'évaluation d'une configuration du système de PNT AROME à la résolution hectométrique pour la prévision du brouillard. La campagne de mesures doit permettre d'évaluer le système de PNT AROME, de mieux caractériser certains processus afin d'améliorer les paramétrisations physiques du modèle et de tester l'apport de nouvelles techniques instrumentales à la caractérisation des conditions de basse couche dans la perspective d'une assimilation opérationnelle future pour la prévision du brouillard.

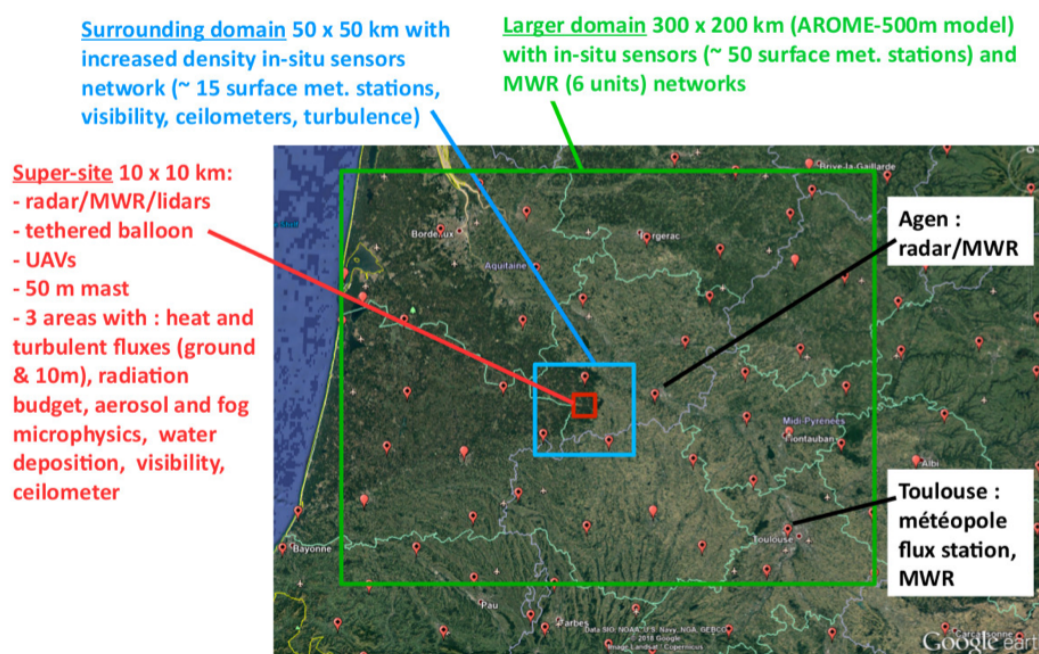


Illustration 5: Aire du modèle AROME à 500m de résolution horizontale qui sera opéré en temps réel pendant la campagne du programme brouillard (rectangle vert), super-site instrumenté (carré rouge) et domaine d'observation renforcé autour (carré bleu).

4.1 La stratégie d'observation

Le cœur du projet sera une campagne de mesure à réaliser au cours de l'hiver 2019-2020 dans le sud-ouest de la France (Illustration 5), région retenue en raison de sa forte probabilité d'occurrence du brouillard (parmi les plus élevées de France), de sa proximité avec Toulouse où sont basés les équipes instrumentales du CNRM, et de sa faible densité de population et des moindres contraintes aéronautiques qui faciliteront l'utilisation des ballons captifs et des drones.

La campagne de mesure articulera une période d'observation systématique de longue durée, et des phases d'observations intensives de quelques jours déclenchées dès que des conditions propices à un évènement de brouillard seront prévues.

L'observation de longue durée vise à mettre en œuvre des moyens demandant peu de maintenance et couvrant l'ensemble du domaine de prévision : le réseau opérationnel d'observation de Météo-France (stations automatiques, radiosondage de Bordeaux), des stations « sol » mobiles de la recherche, dont certaines mesureront les flux d'énergie (flux de chaleur sensible et latente, bilan radiatif) à la surface et en altitude (tours instrumentées) ainsi que la température et l'humidité dans le sol (Illustration 9), la station pérenne Météopole-Flux³ à Toulouse (spécialisée dans la mesure des échanges avec la surface comparés en routine aux flux analysés par la version opérationnelle d'AROME), un réseau de 6 radiomètres microondes (Illustration 7), dont un ou deux seront complétés par un radar en bande W (Illustration 8) et des capteurs de microphysique (aérosols, noyaux de condensation (CCN) et gouttes d'eau) au sol et à plusieurs dizaines de mètres de hauteur (tours instrumentées). Le réseau des télémètres « nuage » et des visibilimètres de Météo-France sera densifié afin d'acquérir une information sur l'évolution temporelle de la couverture spatiale du brouillard.

Les phases d'observation intensives concentreront leurs moyens sur une zone cible d'environ 100km² située vers le centre de l'aire du modèle (lieu précis à définir à la limite entre forêts des Landes et coteaux du Gers). L'objectif sera d'y acquérir des observations les plus détaillées possibles à l'aide de moyens requérant éventuellement de nombreux opérateurs. C'est là que seront opérés le ballon captif (Illustration 10) équipé de mesure thermodynamique et microphysique (aérosols, CCN et gouttes d'eau) et les drones (Illustration 11) pour l'exploration tridimensionnel du brouillard (mesures thermodynamiques et radiatives). Le site comportera plusieurs stations météorologiques « sol », dont des stations équipées pour la mesure des flux de surface, la température et l'humidité dans le sol, et des instruments de télédétection (un radiomètre microonde couplé à un radar en bande W et un petit profileur lidar Doppler, un lidar Doppler scannant pour l'observation des circulations de basse couche – voir l'Illustration 6). L'ensemble sera opéré 24h/24h pendant la totalité de l'épisode de brouillard pour en observer toutes les phases. Les observations démarreront si possible avant la formation du brouillard afin de documenter les conditions amont, ce qui permettra d'étudier tout autant les éventuels cas de brouillard prévus mais non manifestés.

Le super-site sera entouré d'un domaine d'observation renforcée (50km x 50km ; stations de mesure sol) permettant de différencier sur le super-site les effets locaux des effets de plus grande échelle (i.e. advection du brouillard).

Le projet ne prévoit pas à ce stade l'observation de la chimie des aérosols. Les compteurs d'aérosols et de CCN permettront de caractériser la granulométrie et les propriétés hygroscopiques des aérosols. Mazoyer et al. (2016) ont montré que ce dispositif était suffisant car les sursaturations en brouillard sont très faibles. L'impact des propriétés chimiques des aérosols sur le cycle de vie et la prévision du brouillard est certes réel mais il est jugé de moindre importance que les échanges avec

3 Voir <http://www.umn-cnrm.fr/spip.php?article874>.

la surface, la dynamique locale, la turbulence ou la granulométrie des aérosols en regard des objectifs principaux du projet de recherche.

4.2 La stratégie de modélisation

L'objectif est de contribuer à la définition d'une prochaine version d'AROME à résolution infra kilométrique avec pour objectif d'améliorer la prévision du brouillard sur les grands aéroports français, et en particulier sur l'aéroport CDG.

Une version d'AROME à 500m de résolution horizontale sera spécialement préparée et mise en œuvre en temps réel pendant toute la période de la campagne de mesures (voir l'Illustration 5). Le modèle sera initialisé avec les analyses du modèle AROME-France opérationnel à 1,3km. Cette version intégrera les avancées de la recherche présentées en section 3 afin de capitaliser les progrès réalisés dans la représentation des processus pertinents (turbulence, microphysique, échanges avec la surface) pour la prévision du brouillard jusqu'à 24h d'échéance avec une précision suffisante pour les besoins de l'aéronautique, en particulier les seuils de visibilité et plafonds pertinents pour la LVP.

Les observations de la campagne seront exploitées pour évaluer la capacité du modèle à prévoir les conditions thermodynamiques de basse couche, préalable à toute prévision correcte du brouillard, tester les nouvelles paramétrisations et l'apport des résolutions horizontale et verticale affinées, et hiérarchiser ces nouveautés en regard des bénéfices pour la prévision du brouillard et du coût numérique. Elles serviront également à identifier les limites des paramétrisations actuelles des différents processus mis en jeu dans le brouillard et à comprendre par exemple pourquoi les brouillards par affaïssement de stratus, une des sources importantes de brouillard à CDG, sont mal prévus. Des simulations LES des situations de brouillard observées seront réalisées pour aider à l'interprétation des observations, à l'identification des défauts et proposer des pistes d'amélioration des paramétrisations.

Une attention particulière sera apportée à la description de la surface. En particulier, la nouvelle base de données de paramètres physiographiques ECOCLIMAP – Seconde Génération à 300m de résolution en cours de développement sera utilisée et améliorée le cas échéant. L'apport d'analyses d'humidité des sols à haute résolution assimilant des observations satellites pourra être évalué. Une version de SURFEX/ISBA avec une meilleure discrétisation du sol que celle utilisée actuellement dans AROME-France sera également testée. Avec la résolution verticale fine envisagée pour la version d'AROME, il devient pertinent également d'introduire la traînée des éléments urbains et de végétation dans le modèle atmosphérique, sous conditions de disposer d'une base de données de couverts très fine.

La campagne de mesures sera aussi l'occasion de collecter des observations d'instruments candidats à être assimilés dans les systèmes de PNT AROME opérationnels (AROME-France, AROME-PI, PE-AROME) si le bénéfice pour la prévision du brouillard est avéré. Cela nécessitera le développement des opérateurs d'observations et d'expériences d'assimilation dans la phase d'exploitation des observations de la campagne. En particulier, l'impact sur la prévision de l'amélioration des conditions initiales, grâce aux observations combinées de radiomètres micro-

ondes et de radar nuage, sera évalué par assimilation dans AROME à l'aide du schéma d'assimilation variationnelle d'ensemble innovant EnVar.

Enfin, certaines nouveautés et améliorations apportées au modèle AROME-500m pourront bien sûr bénéficier aux systèmes de PNT kilométrique et en particulier à la prévision d'ensemble PE-AROME pour la prévision probabiliste du brouillard.



Illustration 6: Lidar Doppler scannant. D'une portée de quelques kilomètres, le lidar peut explorer le champs de vent à la résolution de 100m dans n'importe quelle direction.



Illustration 7: Radiomètre microonde. Fonctionnant automatiquement, le radiomètre microonde délivre des profils verticaux de température et d'humidité et des contenus intégrés en eau liquide à haute résolution temporelle.



Illustration 8: Radar en bande W (95GHz). Ce radar, dont la tête peut-être orientée dans n'importe quelle direction, détecte les gouttes d'eau du brouillard et en mesure la vitesse.



Illustration 9: Station de mesure de flux à la surface.



Illustration 10: Ballon captif avec sa charge utile combinant mesure de la turbulence et contenu en eau liquide.



Illustration 11: Drone instrumenté en vol à basse altitude dans le brouillard. Ces petits drones peuvent être équipés de capteurs de température, d'humidité et de rayonnement, et de contenu en eau liquide.

4.3 Etudes de processus et amélioration des paramétrisations physiques

Des simulations LES des cas les mieux documentés de la campagne seront réalisées avec Méso-NH afin de fournir une description 3D de la couche de brouillard et de l'atmosphère au dessus et aider à l'interprétation des observations de la campagne de mesures. Validées par les observations, elles offriront des diagnostics pertinents pour l'analyse en complément des études expérimentales. Elles permettront de valider des avancées récentes sur les paramétrisations physiques (schémas radiatifs, de turbulence et microphysique LIMA), et d'évaluer l'impact des hétérogénéités de surface (types de végétation, nature du sol, cours d'eau, relief) sur le cycle de vie du brouillard.

Les études de processus viseront à identifier les paramètres clés qui vont déterminer le type de cycle de vie du brouillard, tels que les brouillards optiquement fins ou les brouillards adiabatiques plus épais, les affaissements de stratus ou les stratus persistants, les brouillards se dissipant le jour ou les brouillards persistants. Elles se concentreront notamment sur l'impact de l'entraînement au sommet du brouillard, le bilan d'énergie en surface, l'impact des aérosols sur le refroidissement radiatif et sur la microphysique, et sur la période de dissipation. Les brouillards par affaissement de stratus feront l'objet d'une attention particulière compte tenu de la méconnaissance actuelle des processus qui les pilotent, et de leur difficulté de prévision.

Ces études apporteront ainsi des éléments d'amélioration des paramétrisations physiques pour AROME.

4.4 Originalités du projet

Le brouillard a fait l'objet dans un passé récent de plusieurs programmes de recherche, tant en France qu'à l'étranger. En France, deux projets de recherche ont été conduits sur le site instrumenté du SIRTa, pendant l'hiver 2006-2007 (projet PARISFOG ; voir Heaffelin et al. 2010) et pendant les 3 hivers de 2010 à 2013 (projet PREVIBOSS ; voir Elias et al. 2012). Le CNRM fut impliqué dans les deux. Pour chacune des deux campagnes, l'objectif était d'étudier les différents processus (turbulence, microphysique et rayonnement) à partir d'observations locales de la seule structure verticale du brouillard. Le lien entre la microphysique et le rayonnement fut l'objet d'une attention particulière, grâce aux progrès réalisés dans l'observation de la concentration et de la distribution en taille des aérosols et des gouttes d'eau (Elias et al., 2009). Plus récemment, le CNRM s'est investi dans le projet PASSY (hiver 2015) au cours duquel les circulations en conditions stables furent étudiés dans la vallée de l'Arve en aval de Chamonix, puis BURE (hivers 2015 et 2016) spécifiquement dédié au brouillard avec une attention particulière portée sur les processus de dépôt de l'eau au sol (Tav et al., 2018).

Au Royaume-Uni, deux programmes expérimentaux, COLPEX (hiver 2009-2010) et LANFEX (hivers 2014 à 2016 ; voir Price et al., 2018) ont récemment été conduits. Le premier ne portait pas spécifiquement sur le brouillard mais plutôt sur la dynamique à petite échelle dans les basses couches de l'atmosphère en conditions stables. LANFEX, dans la continuité de COLPEX, était dédié au brouillard avec une attention particulière sur les effets de la dynamique en relation avec la topographie. La campagne a donné lieu à des simulations à la résolution de 100m par le modèle MésoNH.

Par rapport à ces campagnes passées, le programme de recherche actuel maintient la volonté d'étudier le caractère tridimensionnel du brouillard qu'avait LANFEX, mais en lui ajoutant un volet qui lui manquait et qui était au contraire présent dans PREVIBOSS ou BURE, à savoir une observation fine de la microphysique. Ce sera donc le premier projet de recherche complet du point de vue des processus en jeu avec des observations détaillées de la dynamique, du rayonnement, de la microphysique, et du couplage avec la surface.

4.5 Collaborations et partenariats

Le projet de recherche a fait l'objet cette année d'une proposition à l'ANR. Soumise en octobre 2017, la lettre d'intention a été retenue par l'ANR, une proposition complète a été soumise fin mars 2018 (résultat attendu en juillet). Porté par le CNRM, le projet s'appelle SOFOG3D et s'appuie sur une collaboration avec le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD), le Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS), et l'Institut de Recherche sur la Sécurité Nucléaire IRSN.

Au sein du CNRM, le projet de recherche implique des personnels de GMEI (conduite du projet), GMME et GMAP. D'autres services de Météo-France ont été sollicités, dont la Direction des Service d'Observation (accès au réseau opérationnel d'observation, radiosondages supplémentaires à Bordeaux), la Direction Sud-Ouest (soutien aux opérations et à la maintenance, prévisions lors de la campagne).

Au niveau national, des contacts ont été pris avec l'ONERA (accès aux radiomètres microonde de Toulouse et Fauga), l'INRA (capteurs de brouillard et mesures de teneur en eau du sol) et le CEREMA (apport de capteurs de microphysique, contacts avec VINCI pour la récupération des observations du réseau météorologique autoroutier).

Des contacts ont également été pris en dehors de la France. Le Met-Office a déclaré son intérêt et participera à la campagne avec un dispositif expérimental important proche de celui de LANFEX. Le réseau des radiomètres microonde coordonné par P. Martinet du CNRM/GMEI impliquera 3 unités appartenant à des instituts européens (Université de Cologne, MeteoSwiss et l'Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale IMAA). Des contacts ont été pris avec Environnement Canada.

5 Les retombées attendues.

La campagne brouillard de l'hiver 2019-2020 mettra en œuvre une version d'AROME à échelle 500m pour la première fois en temps réel sur une période de temps relativement longue (6 mois). Cette version sera évaluée prioritairement sur ses capacités à prévoir le brouillard, mais le jeu de données récolté par les instruments de mesure en fonctionnement permanent permettront aussi d'étudier le comportement du modèle sur d'autres aspects, comme par exemple la qualité des champs de vent dans les premières centaines de mètres de l'atmosphère dont l'aéronautique et l'industrie éolienne ont besoin pour la gestion des opérations sur aéroports ou la prévision de la production d'énergie.

Si le projet de recherche porte sur une version PNT d'AROME à haute résolution, l'amélioration de la représentation des processus physiques profitera également aux instances d'AROME dédiée à la prévision immédiate et à la prévision d'ensemble. Une meilleure connaissance de la sensibilité de la prévision du brouillard aux paramétrisations physiques et à la caractérisation des surfaces pourra permettre de prescrire les erreurs de modélisations dans les systèmes d'assimilation et de prévision d'ensemble. La prévision d'ensemble pourrait apporter une quantification de l'incertitude des prévisions pour les opérateurs aéroportuaires .

La qualité d'une prévision dépend non seulement de la qualité du modèle mais aussi de son initialisation. Plus le modèle résout des phénomènes de petite taille, plus il faut lui apporter un état initial détaillé et résolu verticalement. Le programme de recherche apportera des jeux de données qui permettront de travailler sur l'assimilation de données d'instruments qui ne sont pas utilisées en opérationnel aujourd'hui mais pourraient le devenir d'ici quelques années, étant capables d'apporter une information de petite échelle.

Météo-France s'est donné pour objectif d'affiner la résolution de ses modèles opérationnels. Le programme de recherche est un pas dans la direction d'un modèle à 500m de résolution couvrant des zones d'intérêt de plusieurs centaines de kilomètres de côté comprenant, par exemple, un ou deux aéroports majeurs comme Roissy et Orly, et une ville densément peuplée comme Paris. Un tel modèle pourrait être mis en œuvre pour les jeux Olympiques de 2024 et servir de vitrine du savoir-faire de Météo-France et de la communauté nationale.

6 Références

- Aumond, P., V. Masson, C. Lac, B. Gauvreau, S. Dupont, and M. Béréngier, Including the drag effects of canopies: Real case large-eddy simulation studies, *Bound.-Layer. Meteor.*, **146**, 65-80, 2013.
- Bergot T. et D. Guédalia, 1994 : Numerical forecasting of radiation fog. Part 1 : numerical model and sensitivity tests. *Monthly Weather Review*, **122**, 1218-1230.
- Bergot T., D. Carrer, J. Noilhan, et P. Bougeault, 2005 : Improved site-specific numerical prediction of fog and low clouds : a feasibility study. *Weather and Forecasting*, **20**, 627-646.
- Bergot, T., J. Escobar, and V. Masson, Effect of small scale surface heterogeneities and buildings on radiation fog : Large-Eddy Simulation study at Paris-Charles de Gaulle airport, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 285-298, 2015.
- Bergot, T., Large-eddy simulation study of the dissipation of radiation fog, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142**, 1029-1040, 2016.
- Bergot, T., Small-scale structure of radiation fog: a large-eddy simulation study, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **139**, 1099-112, 2013.
- Borderies, M. , Caumont, O. , Augros, C. , Bresson, É. , Delanoë, J. , Ducrocq, V. , Fourrié, N. , Bastard, T. L. and Nuret, M., 2018 : Simulation of W-band radar reflectivity for model validation and data assimilation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* . doi:[10.1002/qj.3210](https://doi.org/10.1002/qj.3210)

- Bougeault, P. 2002 : Analyse et prévision du brouillard et des nuages bas, Note de Centre N° 67 – Groupe de Météorologie de Moyenne Echelle, Centre National de Recherches Météorologiques.
- Boutle, I., Finnenkoetter, A., Lock, A., and Wells, H. : The London Model : forecasting fog at 333m resolution, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142, 360–371, 2016.
- Clark, P. A., Harcourt, S., Macpherson, B., Mathison, C., Cusack, S., and Naylor, M. : Prediction of visibility and aerosol within the operational Met Office Unified Model. I : Model formulation and variational assimilation, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 134, 1801–1816, 2008.
- Dabas A., S. Rémy et T. Bergot, 2012 : Use of a sodar to improve the forecast of fogs and low clouds on airports. *Pure and Applied Geophysics*, **169**, 769-781, DOI 10.1007/s00024-011-0334-y.
- Elias, T., M. Haeffelin, P. Drobinski, L. Gomes, J. Rangognio, T. Bergot, P. Chazette, J.-C. Raut et M. Colomb, 2009 : Particulate contribution to extinction of visible radiation: Pollution, haze, and fog. *Atmospheric Research*, **92**, 443-454, doi:10.1016/j.atmosres.2009.01.006.
- Elias, T., D. Jolivet, J.-C. Dupont, M. Haeffelin, F. Burnet, 2012 : Preliminary results of the PreViBOSS project: description of the fog life cycle by ground-based and satellite observation. *Proc. SPIE 8534, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XVII; and Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing VIII*, **853406**. doi: 10.1117/12.974709.
- Guedalia, D. and T. Bergot, 1994: [Numerical Forecasting of Radiation Fog. Part II: A Comparison of Model Simulation with Several Observed Fog Events.](#) *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1231–1246
- Haeffelin, M., T. Bergot, T. Elias, R. Tardif, D. Carrer, P. Chazette, M. Colomb, P. Drobinsli, E. Dupont, J. C. Dupont, L. Gomes, L. Musson-Genon, C. Pietras, A. Plana-Fattori, A. Protat, J. Rangognio, J.-C. Raut, S. Rémy, D. Richard, J. Scaire et X. Zhang, 2010 : PARISFOG, shedding a new light on fog physical processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 768-783.
- Haeffelin, M., Q. Laffineur, J. A. Bravo-Aranda, M. A. Drouin, J. A. Casquero-Vera, J. C. Dupont, et H. De Backer, 2016 : Radiation fog formation alerts using attenuated backscatter power from automatic lidars and ceilometers. *Atmospheric Measurement Techniques*, **9**, 5347–5365, www.atmos-meas-tech.net/9/5347/2016/.
- Holtzlag, A.A., G. Svensson, P. Baas, S. Basu, B. Beare, A.C. Beljaars, F.C. Bosveld, J. Cuxart, J. Lindvall, G.J. Steeneveld, M. Tjernström, and B.J. Van De Wiel, 2013: [Stable Atmospheric Boundary Layers and Diurnal Cycles: Challenges for Weather and Climate Models.](#) *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 1691–1706
- Jayakumar, A., Rajagopal, E., Boutle, I. A., George, J. P., Mohandas, S., Webster, S., and Aditi, S. : An operational fog prediction system for Delhi using the 330 m Unified Model, *Atmospheric Science Letters*, 2017.
- Katata, G.: Fogwater deposition modeling for terrestrial ecosystems: A review of developments and measurements, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 119, 8137–8159, 2014.
- Martinet, P., D. Cimini, F. De Angelis, G. Canut, V. Unger, R. Guillot, D. Tzanos et A. Paci, 2017 : Combining ground-based microwave radiometer and the AROME convective scale model through

- 1DVAR retrievals in complex terrain: an Alpine valley case study. *Atmospheric Measurement Techniques*, **10**, 3385–3402, <https://doi.org/10.5194/amt-10-3385-2017>.
- Mazoyer, M., C. Lac, O. Thouron, T. Bergot, V. Masson, and L. Musson-Genon, Large eddy simulation of radiation fog: impact of dynamics on the fog life cycle, *Atmos. Chem. Phys.*, **17**, 13017-13035, 2017.
- Mazoyer, M., Burnet, F., Roberts, G. C., Haefelin, M., Dupont, J.-C., and Elias, T.: Experimental study of the aerosol impact on fog microphysics, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, doi:10.5194/acp-2016-103, in review, 2016.
- Philip, A., T. Bergot, Y. Bouteloup, and F. Bouyssel, 2016: [The Impact of Vertical Resolution on Fog Forecasting in the Kilometric-Scale Model AROME: A Case Study and Statistics](#). *Wea. Forecasting*, **31**, 1655–1671.
- Price, J.: Radiation fog. Part I: observations of stability and droplet size distributions, *Bound.-Lay. Meteorol.*, **139**, 167–191, 2011.
- Price J., S. Lane, I. Boutle, D. Smith, T. Bergot, C. Lac, L. Duconge, J. McGregor, A. Kerr-Munslow, M. Pickering, R. Clark (2017) : LANFEX: a field and modelling study to improve our understanding and forecasting of fog. *Bull.Amer.Meteor.Soc.*, in revision.
- Rodier Q, Masson V, Couvreur F and Paci A (2017) Evaluation of a Buoyancy and Shear Based Mixing Length for a Turbulence Scheme. *Front. Earth Sci.* **5**:65. doi: 10.3389/feart.2017.00065
- Rohm, M., G. Vogel, B. R. Beckmann, P. Röhner, C. Thoma, W. Schneider, and A. Bott, 2010 : iPort-VIS: Site Specific Fog Forecasting for Munich Airport. *5-th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*. Münster, Germany. 25–30 July 2010.
- Roquelaure, S., 2007 : Préviation d'ensemble locale des brouillards et nuages bas à l'aéroport International de Roissy Charles De Gaulle. *Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse*, soutenue le 3 décembre 2007.
- Rooy, W. D., Bruijn, C. D., Tijn, S., Neggers, R., Siebesma, P., and Barkmeijer, J. : Experiences with Harmonie at KNMI, *HIRLAM Newsletter*, **56**, 21–29, 2010.
- Sabatier, T., A. Paci, G. Canut, Y. Largeron, A. Dabas, J. M. Donier, et T. Douffet, 2018 : Wintertime Local Wind Dynamics from Scanning Doppler Lidar and Air Quality in the Arve River Valley. *Soumis à Atmosphere*, en révision.
- Tav, J., O. Masson, F. Burnet, P. Paulat, T. Bourrianne, S. Conil et L. Pourcelot, 2018 : Determination of Fog-Droplet Deposition Velocity from a Simple Weighing Method. *Aerosol and Air Quality Research*, **18**, 103–113, doi: 10.4209/aaqr.2016.11.0519.
- Vié, B., J.-P. Pinty, S. Berthet, and M. Leriche, LIMA (v1.0): a quasi two-moment microphysical scheme driven by a multimodal population of cloud condensation and ice freezing nuclei, *Geosci. Model Dev.*, **9**, 567-586, 2016.