

# Paris-Fog : des chercheurs dans le brouillard

**Thierry Bergot<sup>(1)</sup>, M. Haeffelin<sup>(2)</sup>, L. Musson-Genon<sup>(3)</sup>, R. Tardif<sup>(1)</sup>, M. Colomb<sup>(4)</sup>, C. Boitel<sup>(2)</sup>, G. Bouhours<sup>(1)</sup>, T. Bourriane<sup>(1)</sup>, D. Carrer<sup>(1)</sup>, J. Challet<sup>(3)</sup>, P. Chazette<sup>(5)</sup>, P. Drobinski<sup>(6)</sup>, E. Dupont<sup>(3)</sup>, J.-C. Dupont<sup>(2)</sup>, T. Elias<sup>(2)</sup>, C. Fesquet<sup>(2)</sup>, O. Garrouste<sup>(1)</sup>, L. Gomes<sup>(1)</sup>, A. Guerin<sup>(7)</sup>, F. Lapouge<sup>(2)</sup>, Y. Lefranc<sup>(3)</sup>, D. Legain<sup>(1)</sup>, P. Morange<sup>(4)</sup>, C. Pietras<sup>(2)</sup>, A. Plana-Fattori<sup>(8)</sup>, A. Protat<sup>(8)</sup>, J. Rangognio<sup>(1)</sup>, J. C. Raut<sup>(5)</sup>, S. Remy<sup>(1)</sup>, D. Richard<sup>(9)</sup>, B. Romand<sup>(2)</sup>, X. Zhang<sup>(3)</sup>**

(1) Groupe d'étude de l'atmosphère météorologique - CNRM  
42, avenue Gaspard Coriolis — 31057 Toulouse Cedex  
thierry.bergot@meteo.fr

(2) Laboratoire de météorologie dynamique,  
Institut Pierre-Simon-Laplace - Paris

(3) Centre d'enseignement et de recherche en environnement atmosphérique - EDF R&D

(4) Laboratoire régional des Ponts et Chaussées - Clermont-Ferrand

(5) CEA, Institut Pierre-Simon-Laplace - Palaiseau

(6) Service d'aéronomie, Institut Pierre-Simon-Laplace - Paris

(7) Météo-France - Direction des systèmes d'observations - Trappes

(8) Centre d'étude des environnements terrestres et planétaires,  
Institut Pierre-Simon-Laplace - Vélizy

(9) Institut de physique du globe de Paris, université Paris 7 - Paris

## Résumé

Une campagne de mesures dédiée au brouillard, appelée Paris-Fog, s'est déroulée en région parisienne au cours de l'hiver 2006-2007. Cette campagne est ambitieuse de par les moyens qui ont été mis en œuvre et la longueur de la période documentée. On décrit ici les instruments utilisés ainsi que le mode de fonctionnement de la campagne de mesures regroupant des laboratoires de recherches d'horizons différents. Puis on présente un premier bilan, ainsi qu'un zoom sur une période d'observations intensives.

## Abstract

### Paris-Fog : researchers in the fog

A 6-month field experiment, named Paris-Fog, was carried out in winter 2006-2007 near Paris. This long-term field experiment is original. This article provides a detailed description of the instrumentation used and of the operation plan. A summary of the cases sampled is discussed and key physical processes involved in an intensive observational period are presented.

## La problématique

En France, le brouillard est un événement plutôt rare, qui se produit généralement de l'automne au printemps en présence d'une dorsale anticyclonique. Excepté dans les zones côtières et montagneuses, les brouillards sont des nuages « chauds » (la vapeur d'eau se condensant sous forme d'eau liquide) au sein desquels prédominent les processus radiatifs : ils sont pour cela classés sous le nom de « brouillard radiatif », bien que les autres processus, comme la circulation à mésoéchelle (de l'ordre de quelques kilomètres) ou le mélange vertical par exemple, jouent souvent un rôle non négligeable.

L'apparition d'une couche de brouillard est tout d'abord la signature d'un état thermodynamique de la couche limite atmosphérique. En effet, le brouillard ne pourra se former que s'il existe un équilibre bien particulier entre la turbulence et le refroidissement du sol. Par exemple, le brouillard ne pourra se créer si la turbulence est trop faible, même si la couche

atmosphérique près du sol est saturée en eau (on aura alors un abondant dépôt de rosée).

Une fois formée, une couche de brouillard est fortement influencée par les processus microphysiques et radiatifs ainsi que par la rétroaction de ces processus sur la dynamique du nuage. Le cycle de vie du brouillard dépend notamment des aérosols contenus dans l'atmosphère, via des effets indirects (condensation de vapeur d'eau autour d'une partie de l'aérosol conduisant à la formation de gouttelettes) et des effets semi-directs (albédo des gouttelettes de brouillard pouvant influencer la phase de dissipation). **L'hygroscopicité** (c'est-à-dire la capacité de l'aérosol à fixer l'eau) et la taille des éléments de l'aérosol vont jouer sur la taille et le nombre des gouttelettes du brouillard. Pour une sursaturation donnée, un aérosol composé de particules hydrophiles engendrera des gouttelettes plus nombreuses et plus petites. Un brouillard en milieu fortement pollué sera donc composé de nombreuses petites gouttelettes, alors qu'un brouillard côtier sera composé de gouttelettes moins nombreuses et plus grosses.

La nature chimique de l'aérosol présent au sein d'une couche de brouillard peut également avoir un effet non négligeable sur la phase de dissipation. Si l'aérosol est composé de particules absorbant fortement le rayonnement solaire telles que des suies, la couche de brouillard se réchauffera plus rapidement.

La composition chimique et la **granulométrie** de l'aérosol (répartition des différentes tailles de particules composant l'aérosol) vont donc influencer plus ou moins indirectement le cycle de vie du brouillard.

Le brouillard est un phénomène qui reste mal connu et mal prévu, malgré l'envolée des puissances de calcul numérique au cours des dernières années. En effet, si nous savons prévoir les périodes ou les régions où le brouillard est susceptible d'apparaître, nous sommes bien incapables d'en prévoir la durée et la localisation exactes. Les prévisionnistes et les modèles de prévision numérique peuvent aujourd'hui annoncer une période (de l'ordre de la demi-journée) et une localisation (de l'ordre de 100x100 km<sup>2</sup>) correspondant à un fort risque de brouillard, mais cette précision est bien insuffisante pour les autorités aéroportuaires, par exemple, afin qu'elles puissent prendre des mesures efficaces aux sens humain et économique. Ce manque de précision est l'une des difficultés majeures qui entravent la prise de décisions pouvant limiter les conséquences socio-économiques d'un épisode de brouillard. Le problème est d'autant plus sensible que les mesures prises tardivement sont le plus souvent impopulaires et coûteuses (annulation de vol, réduction du trafic routier ou maritime, par exemple).

Ainsi, les prévisions issues des modèles numériques actuels ne répondent pas aux besoins. Il existe une très forte pression de la part des autorités aéroportuaires pour que l'on améliore la prévision des conditions de faible visibilité, ceci afin de gérer au mieux les plates-formes aéroportuaires surchargées. Un exemple frappant, de conséquence fâcheuse, s'est produit sur l'aéroport d'Heathrow, à Londres, pendant la période de Noël 2006. Un épisode de brouillard a entraîné l'annulation d'un millier de vols et plus de 800 000 passagers ont été affectés par les perturbations (voir [http://www.wmo.ch/pages/mediacentre/newsdec06\\_fr.html](http://www.wmo.ch/pages/mediacentre/newsdec06_fr.html)). Par ailleurs, sur le plan sanitaire, les rejets de polluants, dans une atmosphère stable et saturée en eau, peuvent conduire à une accumulation de composés pouvant avoir des

effets nocifs pour la santé (épisode de pollution sur Pékin en octobre 2007, par exemple).

Afin d'améliorer la prévision des conditions de faible visibilité sur des sites sensibles, le système Cobel-Isba d'assimilation – prévision des brouillards à l'échelle locale – a été développé et mis en place sur l'aéroport de Paris-Charles-de-Gaulle (pour plus de détails, voir Bergot et al., 2005 ; Bergot, 2007) et sur l'aéroport de San Francisco (Ivaldi et al., 2006). Ce système est également en cours d'installation pour les aéroports de Lyon-Saint-Exupéry et de Paris-Orly. Cobel-Isba modélise les interactions au sein de la couche limite atmosphérique de manière très précise pour le rayonnement, la turbulence et les échanges à la surface en particulier, avec une résolution verticale très fine (20 niveaux de calcul pour les 200 premiers mètres de l'atmosphère, avec un premier niveau à 50 cm du sol). Une telle finesse dans la représentation de la couche limite atmosphérique est inaccessible avec des modèles de prévision numérique à méso-échelle comme Arome (Bouttier, 2007).

Malgré l'avancée apportée par le système Cobel-Isba, il convient d'améliorer encore notre capacité de prévision des conditions de faible visibilité. L'amélioration de cette prévision, en particulier des heures de début et de fin du brouillard, demeure un enjeu majeur pour de nombreux organismes. Pour y parvenir, il faut progresser davantage dans la connaissance de la physique, qui régit le cycle de vie du brouillard.

Au travers de la campagne de mesures Paris-Fog, la communauté scientifique a impulsé une dynamique sur la thématique brouillard, en réunissant des scientifiques de différents instituts de recherche. L'ambition du projet est à la fois scientifique et sociétale. À l'aide des données recueillies lors de la période d'observations de Paris-Fog, on espère parvenir à de meilleures prévisions des nuages bas et du brouillard, et ainsi mieux anticiper les désagréments affectant les transports aérien, routier et marin, ainsi que les risques sanitaires.

## La stratégie expérimentale

### Objectifs

Le programme de recherche Paris-Fog s'est fixé comme objectifs :

- de mettre en place, de coordonner et de valoriser un ensemble d'observations permettant de documenter de manière simultanée l'ensemble des processus (turbulence, microphysique, radiatif) intervenant dans le cycle de vie du brouillard. Ceci a été possible grâce à la mutualisation de moyens d'observation des partenaires du projet et à l'intégration de ces moyens sur le Site instrumental de recherche par télédétection atmosphérique (Sirta) de Palaiseau (Haefelin et al., 2005), dans le cadre d'une campagne de mesures qui s'est déroulée de novembre 2006 à avril 2007. Contrairement aux précédentes campagnes de mesures, le site de la campagne Paris-Fog se situe dans un environnement hétérogène à l'échelle locale (présence de zones bâties) et à méso-échelle en particulier en raison de la proximité de la vallée de Chevreuse ;
- de construire une base de données accessible à tous et contenant l'intégralité des mesures réalisées au cours de l'expérience ;

- d'améliorer notre compréhension et notre capacité à modéliser numériquement le cycle de vie du brouillard et les phénomènes de petite échelle qui l'affectent. Les données issues de la campagne de mesures Paris-Fog permettront d'aborder des problèmes fondamentaux et de définir de nouvelles paramétrisations physiques adaptées aux brouillards et nuages bas. Elles serviront aux futurs modèles météorologiques.

Des objectifs aussi ambitieux ne pourront être atteints que dans le cadre d'une forte collaboration entre les différents partenaires de ce projet : le Centre d'enseignement et recherches en environnement atmosphérique (Cerea), le laboratoire commun ENPC-EDF R&D ; l'Institut Pierre-Simon-Laplace (IPSL), qui regroupe des laboratoires parisiens ; le Laboratoire régional des Ponts et Chaussée (LRPC) et le Centre national de recherche météorologique - Groupe d'étude de l'atmosphère météorologique (CNRM-GAME), laboratoire commun Météo-France et CNRS.

Le Cerea s'intéresse particulièrement aux problèmes de pollution atmosphérique à très petite échelle sur des thématiques « transports » et « risques industriels ». À ces échelles, des modèles de mécanique des fluides adaptés à l'atmosphère sont développés pour décrire explicitement les écoulements et la dispersion d'effluents en terrain complexe et milieu bâti (Milliez et Carissimo, 2006). Les rejets d'effluents en milieu industriel (tour de réfrigération, cheminée, site de stockage...) en

présence de brouillard ou de nuages bas, peuvent aujourd'hui être modélisés en incluant les processus microphysiques et la chimie atmosphérique.

L'IPSL étudie les processus dynamiques, radiatifs et microphysiques des nuages et leurs précurseurs (aérosols). Des recherches portent sur la structure de la turbulence au sein de la couche limite de surface exploitant des observations et de la modélisation numérique. Des études portent également sur les propriétés microphysiques et radiatives des aérosols (Randriamiarisoa et al., 2006). Les mesures réalisées pendant Paris-Fog permettront d'étudier les interactions entre les aérosols et les brouillards, particulièrement du point de vue radiatif.

Le LRPC de Clermont-Ferrand, spécialiste des problèmes de visibilité routière, s'intéresse à la granulométrie du brouillard, c'est-à-dire la taille et la répartition des gouttelettes qui composent le brouillard. En effet, une meilleure connaissance de cette granulométrie permettra d'améliorer les recherches en cours sur la sécurité routière (estimation de la distance de visibilité dans le contexte routier).

Le CNRM-GAME travaille plus particulièrement à la simulation numérique des brouillards en environnement hétérogène et à l'étude de l'impact des aérosols sur le cycle de vie du brouillard. La modélisation est effectuée à l'aide du code informatique du modèle MésosNH (<http://mesonh.aero.obs-mip.fr>). Les simulations en mode « Large Eddy Simulations » (LES) pour lesquelles les échanges turbulents sont résolus par le modèle et non plus paramétrés, permettront d'étudier les circulations à très petite échelle (de l'ordre de quelques mètres à quelques dizaines de mètres) présentes au sein d'une couche de brouillard lors des phases de formation, d'épaississement et de dissipation. Le couplage entre MésosNH et le modèle de chimie de l'aérosol Orilam (Tulet et al., 2005) permettra d'étudier plus en détail les interactions entre la microphysique nuageuse et les aérosols, en tenant compte notamment des hétérogénéités du sol.

Le site expérimental du Sirta à Palaiseau, constitué de zones bâties en terrain complexe (lac, zones boisées, haies, proximité de la vallée de Chevreuse), est représentatif d'un environnement proche des grandes agglomérations. Les données issues de Paris-Fog devront permettre de mieux comprendre l'influence des processus locaux et régionaux sur les mécanismes de formation, de développement et de dissipation d'une couche de brouillard. La mise en oeuvre, la validation et la comparaison des simulations numériques à partir des données de la campagne Paris-Fog devraient être riches d'enseignements. Elles nous permettront notamment de mieux décrire l'interaction aérosols-gouttes de brouillards et d'améliorer notre capacité à modéliser (ou paramétrer) les échanges au sein d'une couche de brouillard à petite échelle.

## Instruments

Afin de documenter l'ensemble des processus liés au cycle de vie du brouillard, un dispositif, composé d'instruments de mesures de dix laboratoires de recherches, a été mis en place. Étant donné la difficulté à prévoir précisément l'apparition et la dissipation d'une couche de brouillard, la campagne de mesures s'est déroulée en mode routine, c'est-à-dire de façon automatisée au maximum.

Tout d'abord, on a mis en place une série d'observations des processus physiques qui contribuent au cycle de vie du brouillard, de sa formation à sa dissipation, sur un hiver complet. De plus,

certains événements jugés particulièrement intéressants – incluant des épisodes proches du brouillard – ont été analysés plus précisément pendant les périodes d'observation intensive (POI).

Les instruments ont été installés sur trois zones d'observation couvrant un domaine d'environ 4 km<sup>2</sup> (figure 1). La zone 1 rassemble la majorité des instruments à proximité d'hétérogénéités de petite échelle (lac, forêt et milieu bâti). La zone 2 se caractérise par une forte concentration en bâtiments et dispose d'une plate-forme d'observation à 15 m au-dessus du sol, sur le toit d'un bâtiment. La zone 3 est située en plaine, à l'extrémité du campus. Ce dispositif permet d'étudier les hétérogénéités à l'échelle de chaque site de mesures.

Le tableau 1 résume les instruments déployés, le mode de fonctionnement et les processus documentés. Un aperçu des instruments fonctionnant en routine est illustré figure 2 ; ceux déployés en mode POI sont présentés figure 3. Deux mâts instrumentés de 30 m en zones 1 et 3 recueillent des données sur la structure verticale de la couche limite de surface, ainsi que l'état de la turbulence à l'aide d'anémomètres soniques. Ces mesures sont complétées par les radiosondages du réseau météorologique de Trappes, à environ une dizaine de kilomètres au nord-ouest du site, et en période d'observations intensives par des radiosondages classiques ou par ballons captifs réalisés sur le site.

Les propriétés thermiques et hydriques du sol sont mesurées jusqu'à 50 cm de profondeur. Ces mesures sont complétées



Figure 1  
Site expérimental et localisation  
des trois zones de mesures.

Paramètres	Localisation	Fonctionnement	
Couche limite de surface	- température et humidité à 1, 2, 5, 10 et 30 m (mât)	Z1 et Z3	routine
	- anémomètres soniques (turbulence) à 10 et 30 m	Z1 et Z3	routine
	- abri météo classique (pression, température, humidité, précipitation)	Z1 et Z2	routine
Surface et sol	- température et contenu en eau à 0, -10, -20, -30 et -50 cm	Z1	routine
	- bilan d'énergie en surface (station Bowen)	Z1	routine
Radiatif	- flux radiatif montant et descendant, de courte et longue longueur d'onde	Z1	routine
	- flux radiatif descendant, de courte et longue longueur d'onde	Z2	routine
Profil atmosphérique	- radiosondages Météo-France 00 h 00 et 12 h 00 UTC	Trappes (78)	routine
	- radiosondages ParisFog toutes les trois heures	Z1	POI
	- sondages sous ballon captif jusqu'à 150 m	Z1	POI
Télé-détection	- télémètre CT25K	Z1	routine
	- Sodar	Z1	routine
	- radar UHF	Z1	routine
	- radar Rasta 95 GHz	Z1	routine
	- Lidar rétrodiffusion	Z2	POI
Microphysique	- visibilité météorologique	Z1	routine
	- granulomètre gouttelettes 0,25-40 $\mu\text{m}$	Z1	POI
	- aethalomètre (coefficient d'absorption)	Z1	routine
	- néphélomètre (coefficient de diffusion)	Z1	routine
	- granulomètre aérosol 0,01-0,5 $\mu\text{m}$	Z1	routine
	- granulomètre aérosol 0,25-32 $\mu\text{m}$	Z1	routine
	- prélèvements pour analyse	Z1	POI

Tableau 1 - Instruments déployés pendant la campagne Paris-Fog.

par une station Bowen qui enregistre les flux de chaleur sensible et latent à l'interface sol-atmosphère et sur les zones 1 et 2, des radiomètres mesurent les flux radiatifs dans le domaine visible et infrarouge. Différents instruments de télé-détection active depuis le sol (Sodar, Lidar, Radar UHF et 95 GHz) observent en détail l'évolution des conditions atmosphériques, en particulier le champ de vent et les couches nuageuses.

En parallèle, les propriétés microphysiques de l'aérosol et des gouttelettes de brouillard sont analysées. Des prélèvements sur filtres apportent un complément sur la nature chimique des particules (carbone suie, ions majeurs tels que les sulfates...).

Figure 2 - Instruments employés en routine. À gauche les instruments de télé-détection active avec de haut en bas : radar Rasta, Sodar, télémètre et radar UHF. Au milieu, les deux mâts de 30 m avec un zoom sur un anémomètre sonique (en haut) et un abri pour la mesure de température et d'humidité (en bas). À droite, les mesures en surface avec de haut en bas : les mesures radiatives en surface ainsi qu'un pluviomètre, les mesures de température et d'humidité à 1 m et 2 m du sol, la station de flux de Bowen et la fosse de mesures de température et de contenu en eau dans le sol.

Malheureusement, la combinaison d'un printemps peu favorable aux brouillards denses, ainsi que des problèmes techniques (surtensions sur le réseau électrique du site du Sirta en début

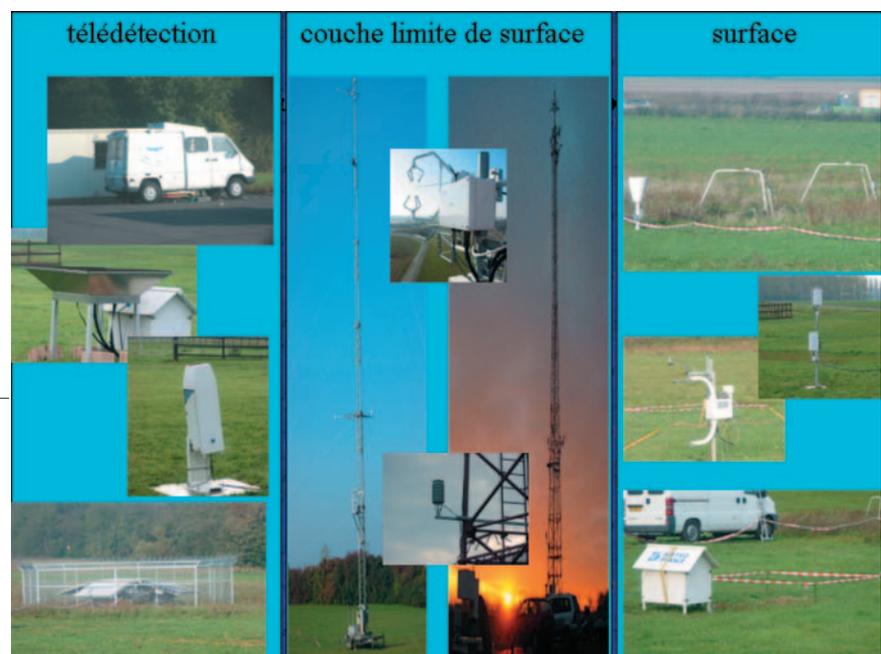
d'expérience...) et instrumentaux (tempêtes au mois de décembre 2007 endommageant certains instruments, problème d'étanchéité sur certains granulomètres...) n'ont permis de documenter de manière nominale le volet microphysique que pour quatre événements brouillard. Les données recueillies devraient cependant permettre de mieux comprendre l'impact des aérosols (en nombre, taille et composition) sur le cycle de vie du brouillard.

## Organisation

La majeure partie des instruments a fonctionné de manière automatique et continue pendant toute la période hivernale. Cependant, il a fallu planifier des interventions techniques (maintenance...) ainsi que le déclenchement de périodes d'observations intensives, correspondant à des situations pour lesquelles on désire mettre en oeuvre des moyens d'observations supplémentaires.

Les organismes de recherche participant à la campagne de mesures étant nombreux et dispersés géographiquement, un poste de coordination virtuel (PCV) a été mis en place. Il s'appuyait sur le site web dédié à la campagne de mesures Paris-Fog (<http://parisfog.sirta.fr>), permettant un suivi quotidien du fonctionnement des instruments, une visualisation des observations réalisées et incluant plusieurs outils de communication (forum, briefing météorologique avec le Centre départemental météorologique d'Orly - CDM91 - ...).

Comment fonctionne une journée de Paris-Fog ? Tout d'abord, la planification de la campagne est réalisée par



deux responsables : un localisé sur Toulouse en charge du suivi météorologique et un sur Paris en charge du suivi des instruments. Chaque jour le responsable de campagne situé à Toulouse consulte les prévisions météorologiques des modèles opérationnels français et européen et discute de la situation météorologique avec les prévisionnistes du CDM91. Il dispose également de plusieurs produits outils expérimentaux testés pendant la période de l'expérience : une cartographie du brouillard construite à partir, entre autres, de la classification nuageuse MSG, les prévisions du réseau 00 UTC d'un prototype Arome centré sur la région parisienne et des prévisions toutes les trois heures du système de prévision numérique local Cobel-Isba. Le responsable situé à Paris, quant à lui, vérifie l'état des installations et s'assure du bon fonctionnement des instruments. Il dirige la mise en sécurité du site en fonction de la situation météorologique (trois tempêtes avec des vents supérieurs à 100 km/h sont passées au-dessus du site expérimental au cours de l'hiver 2006-2007...). Il s'assure également du bon fonctionnement du site web de la campagne, cœur de l'organisation de l'expérience.

Si la situation est favorable à la formation d'un brouillard et que l'état des instruments est satisfaisant, les deux responsables prennent ou non la décision de passer en période d'alerte, ce qui déclenche alors le branle-bas de combat... La décision, encore révoicable, est prise deux jours avant le début de l'épisode, de façon à permettre la planification de la période d'observations intensives (POI) : création des équipes de sondeurs, contrôle des différents instruments, réservation d'un espace aérien pour le ballon captif... À partir du moment où le mode alerte est déclenché, deux briefings quotidiens sont réalisés, ce qui permet d'affiner les heures des radiosondages, la période de déploiement du ballon captif (devant être communiquée au centre de contrôle aérien d'Athis-Mons) et la planification des prélèvements chimiques. Après le briefing de l'après-midi du jour J, le point de non-retour est atteint : la POI ne peut plus être arrêtée, les moyens d'observations spécifiques sont mis en place jusqu'au lendemain matin.

Chaque période d'observation intensive nécessite la participation d'une dizaine de personnes sur le terrain. Une fois la POI déclarée, cinq opérations sont à réaliser : l'activation des mesures de chimie atmosphérique, la mise en place

du ballon captif, l'activation des mesures de granulométrie du brouillard, la planification des radiosondages et l'ultime vérification du bon fonctionnement des instruments automatiques.

Pour les mesures de chimie atmosphérique, des filtres sont installés dans les systèmes de prélèvement dès le matin, afin d'échantillonner les particules pendant une dizaine d'heures avant la formation du brouillard. De nouveaux filtres sont mis en place lors de l'apparition du brouillard. Enfin, les filtres sont de nouveau changés à la fin de l'épisode brouillard pour un prélèvement d'une durée de dix heures.

le contrôle aérien), permettant d'effectuer des mesures entre 50 et 130 m. L'équipe 2 prend la relève à 22 h 00 pour une période de huit heures, puis est à son tour relevée par l'équipe 1 à 6 h 00 jusqu'à la fin de la période d'observation. Des radiosondages sont réalisés toutes les trois heures. Le vol du ballon est suivi en permanence. On surveille en particulier la force du vent (un vent de l'ordre de 2  $\text{ms}^{-1}$  au niveau du ballon est nécessaire pour assurer une bonne stabilité du système de mesures, mais un vent supérieur à 10  $\text{ms}^{-1}$  de manière continue accentue dangereusement la tension du câble retenant le ballon). Au cours d'une POI, le ballon peut

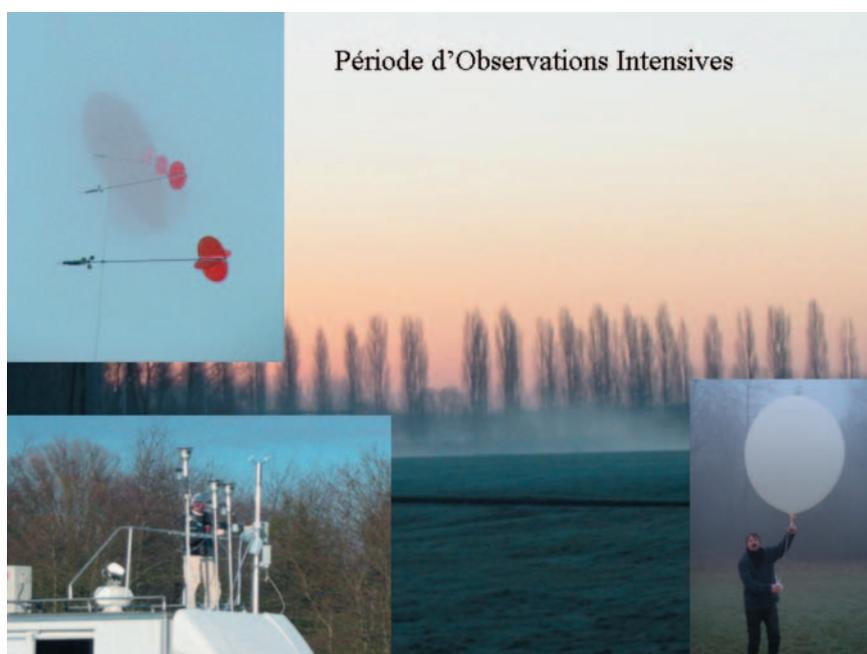


Figure 3 - Instruments employés en période d'observation intensive (POI). En haut à gauche, une vue du ballon captif dans le brouillard. En bas à droite, un lâcher de radiosondage au petit matin après une nuit d'observation intensive. En bas à gauche, installation de filtres sur les systèmes de prélèvement.

L'équipe prépare et étalonne les cinq sondes installées sous le ballon captif. Elles mesurent la pression, la température, l'humidité relative, ainsi que la vitesse et la direction du vent à cinq altitudes différentes. L'équipe vérifie également l'état du treuil et du câble qui sert à maintenir le ballon en position au cours de la nuit.

Au cours d'une période d'observation intensive, deux équipes se relayent pendant une quinzaine d'heures (de 17 h 00 à 10 h 00 le lendemain matin) sur le site. L'équipe 1 (quatre à cinq personnes) arrive à 17 h 00 pour la mise en place du ballon captif. Les sondes sont accrochées tous les 20 mètres le long du câble sous le ballon. Le déploiement maximal est obtenu quand le ballon atteint 150 m d'altitude (limite fixée par

descendre de plus de 50 m (l'enveloppe du ballon se chargeant en eau liquide du fait de la présence de brouillard), ce qui peut conduire à enlever une ou plusieurs sondes sur le câble afin d'alléger le système.

## Les premiers résultats

### Les données acquises

L'hiver 2006-2007 sur le site du Sirta a été en moyenne de 1,7 °C plus chaud que la normale avec environ 25 % de situations zonales perturbées en plus. Cependant, plus de 160 heures de brouillard (visibilité inférieure à 1 km) et plus de 518 heures de brume (visibilité

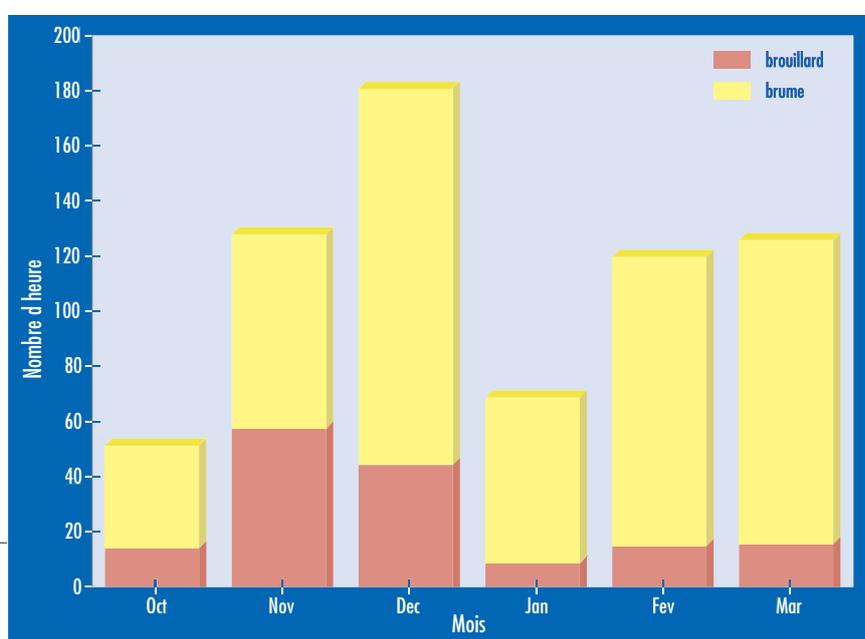
Date (année/mois/jour)	Heure de formation (UTC)	Durée (min)	Visibilité minimale (en m)	Type de brouillard
2006/10/27	01 h 50	370	90	stratus
2006/10/28	01 h 00	440	90	radiatif
2006/10/29	17 h 40	50	170	radiatif
2006/11/03	21 h 50	70	120	radiatif
+ 2006/11/03	23 h 30	70	140	radiatif
+ 2006/11/04	01 h 50	140	210	divers
2006/11/04	22 h 30	760	50	radiatif
2006/11/05	17 h 50	670	60	radiatif
2006/11/06	17 h 30	80	180	stratus
2006/11/07	18 h 10	240	90	stratus
+ 2006/11/08	07 h 00	40	320	stratus
2006/11/29	20 h 20	850	70	radiatif
2006/11/30	12 h 20	510	110	stratus
2006/12/03	00 h 50	40	580	stratus
2006/12/14	18 h 00	230	90	radiatif
+ 2006/12/15	01 h 30	30	390	radiatif
+ 2006/12/15	02 h 30	450	90	stratus
2006/12/16	21 h 50	140	70	radiatif
2006/12/18	02 h 50	180	200	stratus
+ 2006/12/18	07 h 30	280	150	stratus
2006/12/24	04 h 10	80	230	stratus
2006/12/25	18 h 50	500	200	stratus
2006/12/28	01 h 50	90	710	stratus
2006/12/28	16 h 00	730	150	stratus
+ 2006/12/29	05 h 00	120	710	stratus
2007/01/07	07 h 10	50	450	advection
2007/01/27	07 h 50	220	140	stratus
2007/01/27	23 h 30	260	70	divers
2007/02/02	10 h 00	230	880	divers
2007/02/08	02 h 20	120	350	brume
2007/02/18	22 h 40	630	70	radiatif
2007/03/04	06 h 30	40	150	radiatif
2007/03/08	07 h 00	90	140	advection
2007/03/13	23 h 10	510	100	radiatif
2007/03/16	07 h 10	160	70	évaporation
2007/03/25	03 h 10	200	580	divers

Tableau 2 - Chronologie des événements documentés au cours de Paris-Fog. Le type de brouillard est dit « radiatif » en cas de brouillard radiatif, « stratus » en cas d'affaissement de stratus, « advectif » en cas de brouillard d'advection, « brume » en cas de réduction de visibilité associée à des précipitations, « évaporation » en cas de brouillard d'évaporation et « divers » correspond à un cas non classifiable pour lequel on ne peut dégager de processus pilotant l'apparition du brouillard. Dans la colonne « Date », les symboles « + » indiquent des événements se déroulant au cours de la même nuit.

Une classification des événements documentés selon la méthode décrite par Tardif et Rasmussen (2007) est présentée dans le tableau 2. Cette méthode consiste à classer objectivement et automatiquement les événements brouillard en fonction de l'évolution des observations réalisées. Le début est défini par au moins trente minutes de visibilité inférieure à 1000 m sur une période de 50 minutes, la fin par une visibilité supérieure à 1000 m et une visibilité maximale supérieure à 2000 m sur une période de 30 minutes. Appliquée aux données de Paris-Fog, cette méthode a permis d'identifier trente-six événements brouillard. Le type radiatif est majoritaire (environ 75 heures). Le second type de brouillard concerne les cas où un stratus très bas est descendu jusqu'au sol, réduisant la visibilité en dessous de 1 000 m (environ 65 heures). Ces cas d'affaissement de stratus ont eu lieu principalement pendant la période de Noël. Les autres types de brouillard (par advection et par évaporation) ont été marginaux lors de la campagne.

entre 1 et 5 km) ont pu être documentées (figure 4). Les périodes de brouillard les plus longues ont eu lieu au mois de novembre (plus de 57 heures de brouillard observé) et au mois de décembre (plus de 47 heures de brouillard observé). En janvier et février, les épisodes ont été moins longs et souvent moins denses, avec une prédominance de phénomènes de brume et de bancs de brouillard très localisés. On peut noter cependant un épisode de brouillard très dense au cours de la nuit du 18 au 19 février, qui a fait l'objet d'une période d'observation intensive, décrite en détail au paragraphe suivant.

Figure 4  
Répartition mensuelle du nombre d'heures de brouillard et de brume documentées pendant la campagne Paris-Fog.



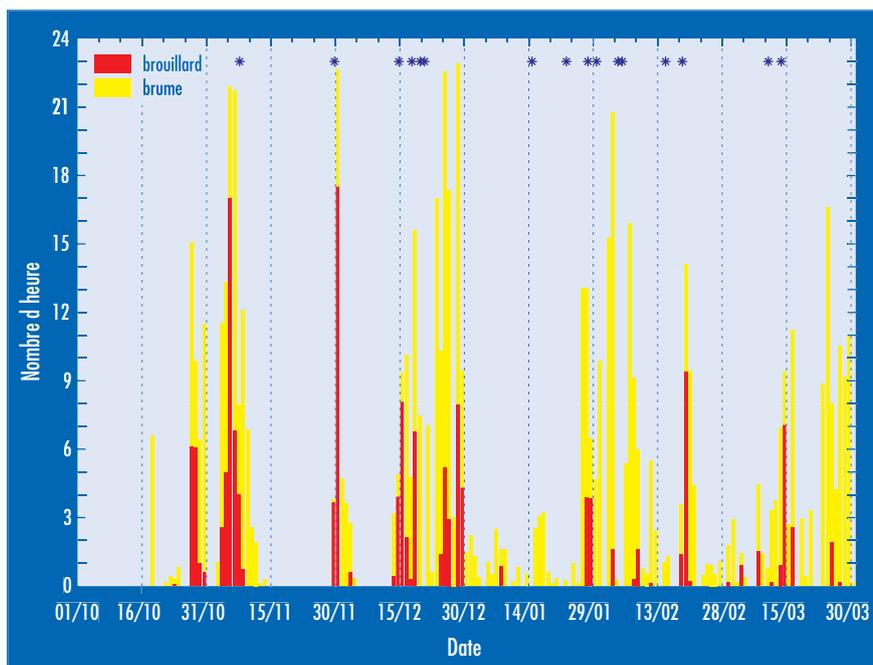


Figure 5 - Nombre d'heures de brouillard et de brume documentées pendant la campagne Paris-Fog. Les étoiles (en haut) correspondent aux périodes d'observations intensives.

La répartition des brumes et brouillards au cours de Paris-Fog, ainsi que les périodes d'observations intensives, sont résumées en figure 5. Quinze POI ont été réalisées au cours de l'hiver 2006-2007. Elles ont permis d'étudier des situations très variées allant de l'épisode de brouillard dense généralisé (POI 1, 2, 3, 8, 13) aux bancs de brouillards locaux (POI 6, 14, 15).

Des conditions propices à la formation d'un brouillard, pour lesquelles un brouillard dense était prévu mais n'est

pas apparu sur le site, même si la visibilité a été réduite à moins de 5 km, ont également été observées (POI 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12). Pendant ces épisodes, des brouillards denses ont très souvent été signalés en région parisienne, mais la visibilité n'a jamais été durablement réduite sur le site de la campagne. L'étude de ces cas de brume est aussi importante que celle des cas de brouillard dense. En effet, la prévision, lors de ces situations est très difficile. À l'aide des observations effectuées, on peut espérer mieux comprendre pour-

quoi le brouillard n'est pas devenu dense sur le site de mesures (déplacement de l'îlot de chaleur urbain parisien vers le site, création d'un jet nocturne et apparition de nuages au sommet de la couche limite résiduelle – entre 500 et 1 000 mètres –, par exemple).

Lors des quinze périodes d'observations intensives, cinquante-sept radiosondages ont été réalisés avec succès. Le ballon captif a volé huit fois, pour une durée totale d'environ 80 heures, et trente-cinq prélèvements chimiques ont été effectués. Toutes ces données sont aujourd'hui en cours de dépouillement.

### Zoom sur la POI 13

La période d'observation intensive n° 13 s'est déroulée dans la nuit du dimanche 18 février au lundi 19 février 2007. Après le passage d'une perturbation sur le golfe de Gascogne, la situation météo générale sur le nord de l'Europe s'est caractérisée par le gonflement temporaire d'une dorsale anticyclonique sur le proche atlantique, engendrant des conditions faiblement anticycloniques sur le site de mesures, avant l'arrivée d'une nouvelle perturbation dans la nuit du lundi 19 au mardi 20 février (figure 6).

L'alerte POI a été déclenchée le vendredi 16 février au matin. Cependant à ce moment, il existe encore une forte incertitude sur la chronologie des événements. La fenêtre propice au brouillard est assez réduite et le moindre décalage dans le gonflement de la dorsale anticyclonique peut compromettre le déroulement de la POI. L'alerte POI est confirmée le samedi 17 matin et après-midi.

Le dimanche 18 février est une journée douce, bien ensoleillée, avec une température qui atteint un peu plus de 16 °C (figure 7) et un faible vent de nord-ouest d'environ 2 à 3 ms<sup>-1</sup>. Pas vraiment un temps pour partir à la chasse au brouillard ! En outre, l'après-midi,

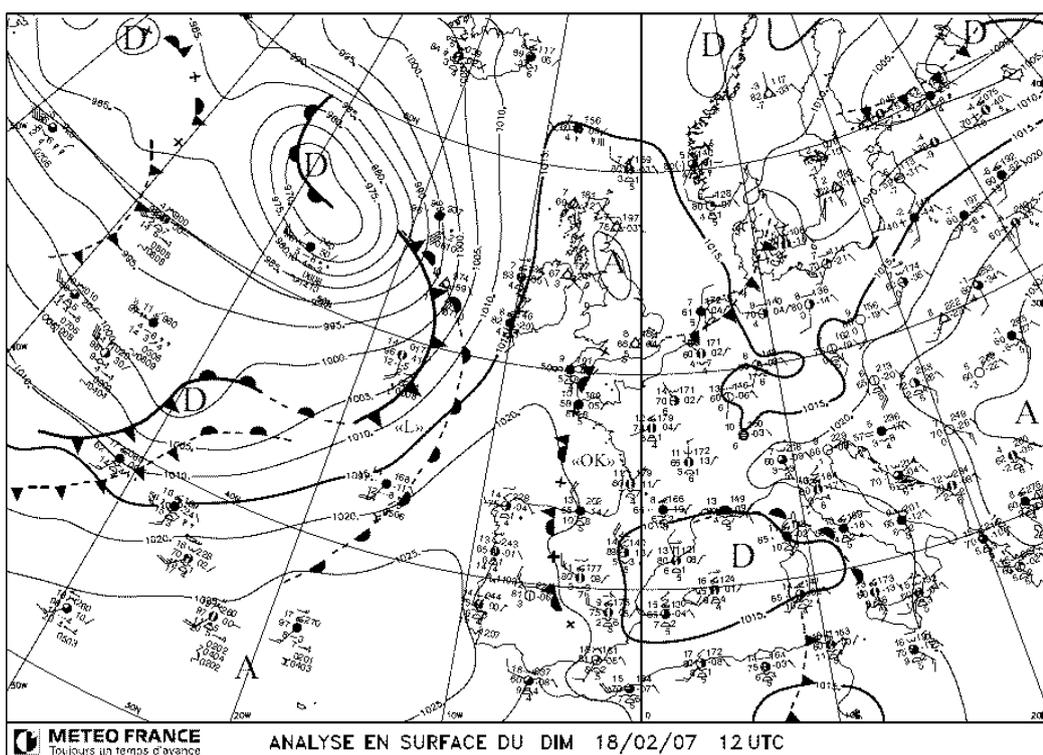


Figure 6 - POI13. Carte synoptique du 18 février 2007 à 12 h 00 UTC.

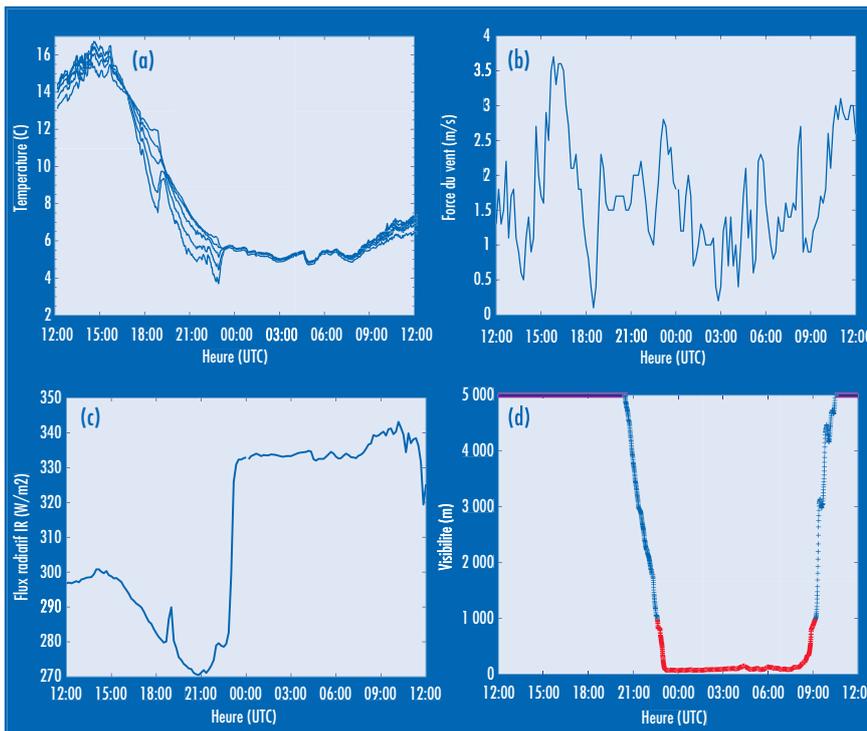


Figure 7 - POI13. (a) Température à 1, 2, 5, 10 et 30 m d'altitude ; (b) force du vent à 10 m d'altitude ; (c) flux radiatif infrarouge descendant à 2 m d'altitude, avec (1) passage de stratocumulus et (2) apparition du brouillard ; (d) visibilité météorologique : les points rouges correspondent à une visibilité inférieure à 1000 m.. signification des points noir / rouge ?

seconde inversion, située vers 300 m d'altitude, est associée à un assèchement marqué de l'atmosphère (figure 8). On remarque la création de deux « jets » nocturnes bien marqués au niveau de ces deux inversions, associés à un cisaillement de vent.

Puis, peu après 22 h 30, le brouillard s'installe ! Tout est en place et l'excitation est à son comble aussi bien à Paris qu'à Toulouse. L'apparition du brouillard va conduire à une disparition très rapide de l'inversion nocturne et à une augmentation très nette du flux radiatif infrarouge descendant : il est de 270 W/m<sup>2</sup> avant le brouillard et passe à

l'humidité relative chute pour atteindre un minimum d'environ 50 %, ce qui conduit à d'intenses discussions lors des briefings pour savoir s'il faut ou non maintenir cette alerte dominicale... À la mi-journée, le modèle de prévision numérique local Cobel-Isba prévoit un fort refroidissement en début de nuit suivi de la formation d'un brouillard dense en milieu de la nuit. La décision est prise en début d'après-midi de maintenir l'alerte. Des radiosondages sont réalisés toutes les trois heures et le ballon captif mis en place en première partie de nuit. Première frayeur en tout début de nuit : après un fort refroidissement au coucher du soleil (d'environ 8 °C en trois heures), un passage nuageux de stratocumulus – bien visible sur le flux radiatif infrarouge descendant, figure 7c – vient détruire l'inversion nocturne. Mais le passage nuageux est de courte durée et, sous un ciel à nouveau clair, les premiers mètres de l'atmosphère recommence à se refroidir fortement avec la création d'un fort gradient vertical de température (environ 6 °C entre 1 et 30 m en zone 3). À partir de 20 h 30 UTC, la visibilité devient inférieure à 5 km (figure 7d) ; il se crée un important dépôt de rosée au sol et le vent se maintient à environ 2 ms<sup>-1</sup>.

Le radiosondage effectué à 21 h 00 UTC montre deux inversions dans les basses couches de l'atmosphère. La première inversion, qui concerne les 50 premiers mètres de l'atmosphère, est due au refroidissement radiatif de la surface. La

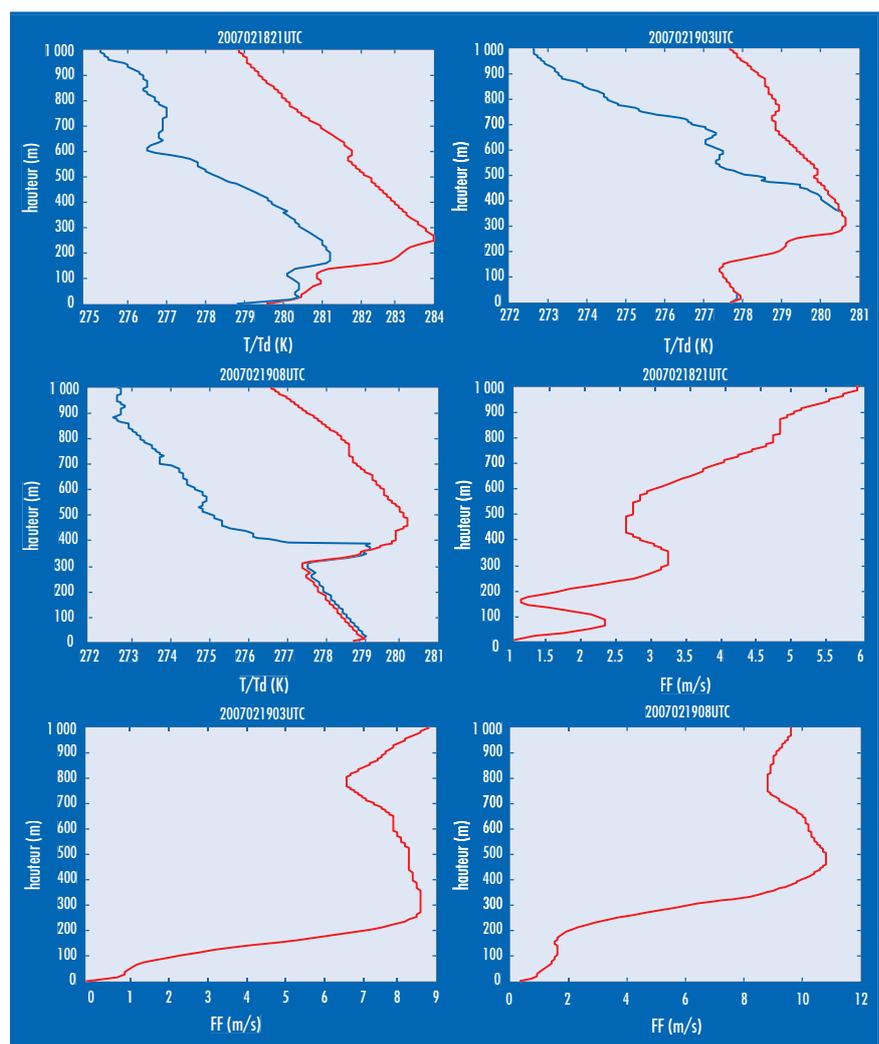


Figure 8 - POI13. Profils issus des radiosondages de 21 h 00 UTC, 03 h 00 UTC et 08 h 00 UTC (à gauche : température et température du point de rosée ; à droite : force du vent). On remarque les « jets » (flèches 1 et 2 à 21 h 00) au sommet des deux inversions de température.

330 W/m<sup>2</sup> au sein du brouillard (figure 7c). Le brouillard est très dense, avec une visibilité horizontale n'atteignant parfois pas les 50 m au cours de la nuit (figure 7d). Le développement vertical du brouillard est très rapide (figure 8). À l'aide des radiosondages, on peut estimer la hauteur de la couche de brouillard à partir de l'altitude de la première inversion : environ 200 m à 03 h 00 UTC et environ 300 m à 08 h 00 UTC. Les radiosondages montrent également que la vitesse du vent en altitude augmente au cours de la nuit, ce qui est lié à l'arrivée de la zone perturbée au large des côtes bretonnes.

L'évolution du nombre de particules (aérosol) et du nombre de gouttelettes nuageuses au cours de la période d'observation intensive n° 13 est présentée figure 9. L'aérosol est caractéristique d'une atmosphère urbaine, avec une prédominance de particules inférieures à 0,25 µm. Durant l'après-midi du 18 février, la concentration est à peu près stable autour de 6 000 particules par centimètre cube d'air, puis elle augmente en début de nuit pour atteindre 20 000 particules, en raison de l'affaiblissement de la turbulence et de la formation d'aérosols primaires dus à la circulation automobile. La diminution progressive de la visibilité (brume) est associée à une augmentation du nombre de particules, composées d'un mélange d'aérosol solide et d'eau liquide, d'une taille comprise entre 0,5 et 1 µm (figure 10). L'apparition du brouillard va conduire à une augmentation du nombre de gouttelettes, qui va atteindre 1 000 gouttes par centimètre cube (figure 9a), et à une diminution du nombre de particules (figure 9b) sans doute **lessivées** par le brouillard (les aérosols piégés dans les gouttelettes de brouillard se trouvent déposés sur le sol). La répartition des particules et des gouttelettes selon leur taille est présentée figure 10. On remarque que la taille des gouttelettes se répartit en deux modes : un mode autour de 1 µm pour lequel les gouttelettes sont très nombreuses, mais représentent une quantité d'eau liquide assez faible, et un mode vers 4 µm pour lequel les gouttelettes sont peu nombreuses mais contiennent la majorité de l'eau liquide du brouillard.

Les images, obtenues à l'aide de la webcam installée sur le site (figure 11), montrent un brouillard très dense le 19 février à 08 h 00 UTC. Le brouillard évolue alors très lentement, en se levant tout d'abord en stratus (image de 09 h 30 UTC). La visibilité au sol devient

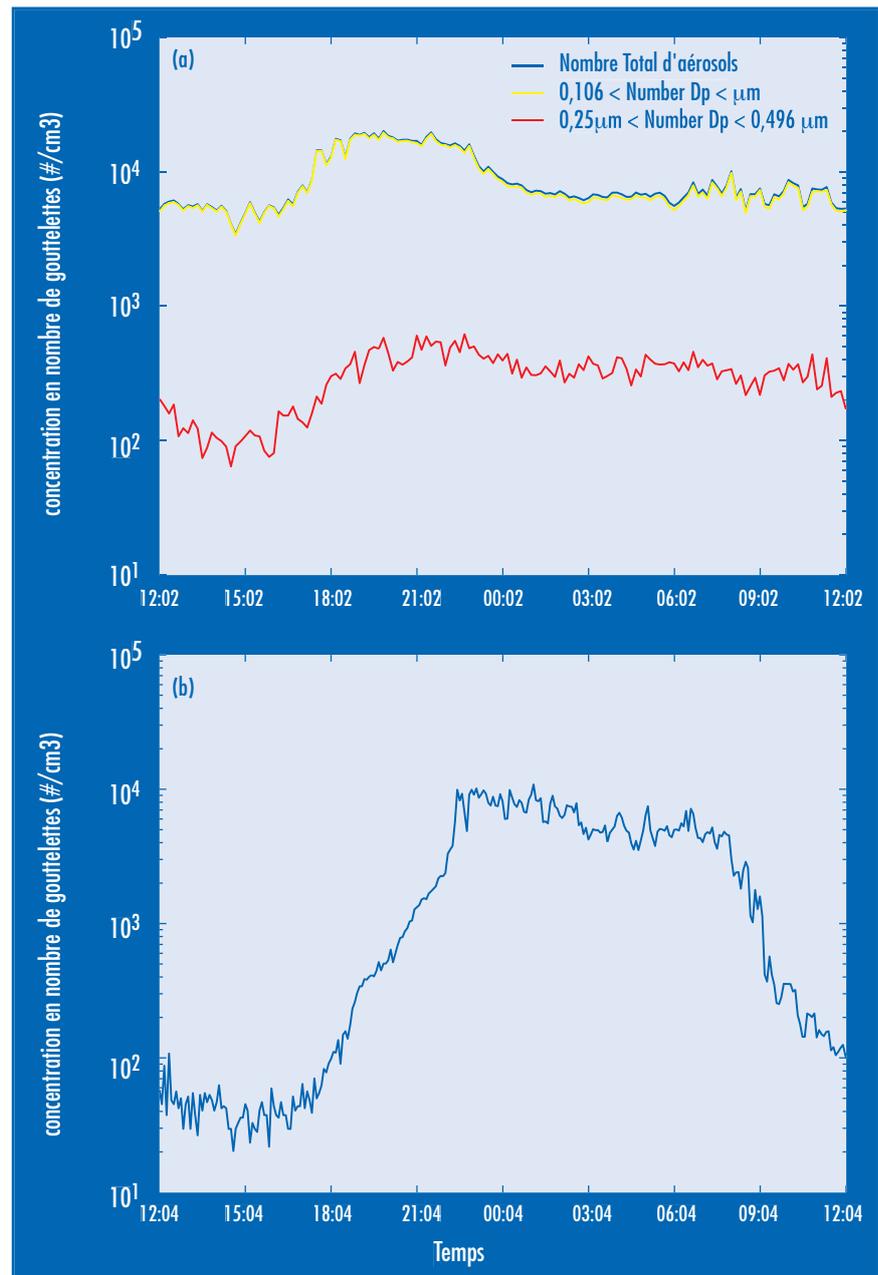


Figure 9 - POI13. Évolution du nombre de particules (inférieures à 0,25 µm) (a) et de gouttelettes (supérieures à 0,5 µm) (b), entre le 18 février à 12 h 00 UTC et le 19 février à 12 h 00 UTC. L'échelle des ordonnées est logarithmique.

alors supérieure à 1 000 m et on n'observe plus que de la brume. Une fois que le réchauffement de la surface du sol par le rayonnement solaire est suffisant, le stratus se morcelle en stratocumulus (image de 14 h 00 UTC). Les traqueurs de brouillard ont bien mérité une bonne sieste et une bonne nuit de repos !

## Conclusions

L'hiver 2006-2007 a été épuisant pour tous les participants de la campagne Paris-Fog. Que ce soit à Paris ou à Toulouse, les nuits ont été longues pour les chasseurs de brouillard ! Mais la

campagne de mesures a permis de documenter précisément différents processus intervenant dans le cycle de vie d'un brouillard, de sa formation à sa dissipation. Grâce au mode routine, de nombreuses données ont été récoltées sur une période d'environ six mois, à une fréquence très élevée (de quelques minutes, pour les capteurs les plus lents, à une fraction de seconde, pour les plus rapides, ceux qui mesurent les échanges turbulents). Les mesures permettront de mieux caractériser les épisodes de réduction de visibilité. Lors de périodes d'observations intensives, des observations spécifiques (sondages verticaux de l'atmosphère, propriétés de l'aérosol et des gouttelettes) ont permis d'obtenir des données précises sur une gamme

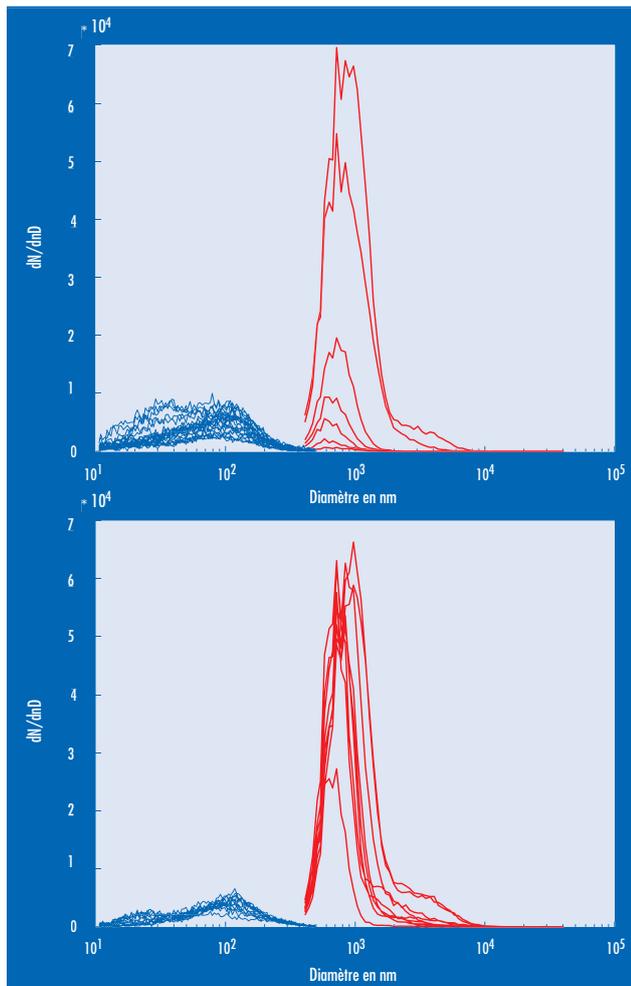


Figure 10 - POI13. Spectres granulométriques normalisés (le nombre de particules comprises entre deux diamètres donnés correspond à l'aire comprise sous la courbe) pour les particules d'aérosol (courbes jaunes) et gouttelettes de brouillard (courbes rouges). Les spectres sont moyennés toutes les heures pour : en haut, le 18 février avec la courbe rouge maximum correspondant à la période 23 h 00-00 h 00 UTC et en bas, le 19 février avec la courbe rouge minimum correspondant à la période 08 h 00-09 h 00 UTC.

ment. Le brouillard est un phénomène de très petite échelle, complexe de par les interactions entre les différents processus physiques. La progression dans la prévision du brouillard ne peut se faire qu'à l'aide d'observations détaillées – telles que celles réalisées lors de la campagne de mesures Paris-Fog – et grâce à des collaborations entre organismes de recherches. Nous sommes persuadés que notre travail aidera un jour les prévisionnistes dans leur dure tâche de prévision de ce phénomène très dangereux.

## Remerciements

données servent à de nombreuses études et que de nouvelles collaborations se tissent autour d'elles.

Mais le chemin est encore long avant d'arriver à une amélioration sensible des prévisions à des échelles fines de temps et d'espace. Des analyses sont en cours,

La campagne de mesures Paris-Fog a bénéficié du travail de plusieurs dizaines d'agents, appartenant à des instituts de recherches ou à des services météorologiques qui ont largement contribué à la réussite des périodes d'observations intensives. Nous remercions tout d'abord particulièrement les prévisionnistes du CDM91 (Orly) pour l'aide qu'ils nous ont fourni tout au long de la campagne, pour leur disponibilité et leur amabilité 7 jours sur 7 et 24 heures sur 24. Sont également remerciés le Shom et le CDMA de Villacoublay pour avoir apporté un soutien humain lors des périodes d'observations intensives. Paris-Fog a bénéficié du support financier du programme Lefe du CNRS-Insu.

variée de situations, des brouillards denses généralisés aux bancs de brouillards locaux, en passant par des cas proches de la saturation où des brouillards ont été prévus mais non observés sur le site de mesures. Des problèmes techniques ou instrumentaux ont malheureusement handicapé le volet microphysique pendant toute la campagne.

L'intégralité des mesures de Paris-Fog est rassemblé dans une base de données. Actuellement, l'accès aux données brutes est restreint aux organismes participant à la campagne, dans un but de validation et de mise en forme. Cependant, des représentations graphiques (quicklook) sont déjà disponibles librement sur le site Web : <http://parisfog.sirta.fr/>. Les données élaborées seront également disponibles dès que les différents responsables instrumentaux les auront validés. Il est en effet très important que ces

en particulier sur les POI 13 et 15, afin de mieux comprendre les phénomènes physiques et de les modéliser correcte-

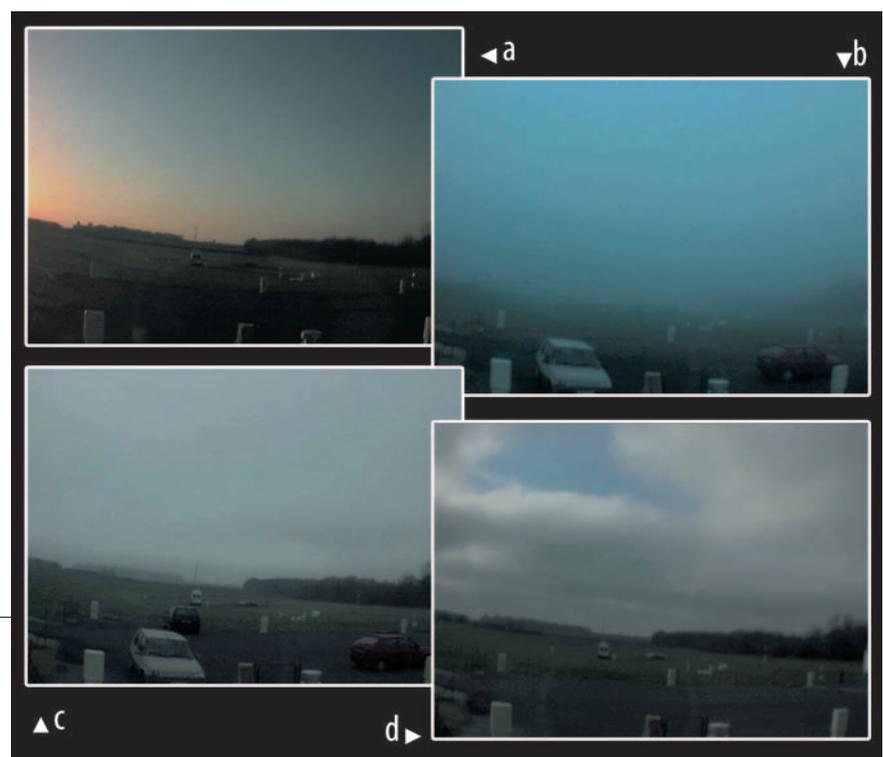


Figure 11 - POI13. Images issues de la webcam : le 18 février en fin d'après-midi (en haut à gauche), le matin du 19 février dans le brouillard (en haut à droite), en matinée lorsque le brouillard se lève en stratus (en bas à gauche), puis en début d'après-midi lorsque le stratus se morcelle en stratocumulus (en bas à droite).