

En Franc e...

Analyse préliminaire de l'épisode de pollution francilien de décembre 2016

Durant la 1^{re} quinzaine de décembre, des conditions anticycloniques durablement calmes et stables ont persisté sur la majeure partie de la France. Elles ont entraîné, entre autres, des épisodes de pollution répétitifs et conséquents sur plusieurs régions comme l'Île-de-France (figure 1), le Nord-Est et Rhône-Alpes.



Figure 1. Photo prise du toit du bâtiment Lamarck de l'université Paris-Diderot dans le 13^e arrondissement de Paris, l'après-midi du 8 décembre 2016. © Groupe Ocapi, Pôle observation de la terre de l'IPSL (voir encadré).

Selon Airparif, l'Île-de-France a été concernée par une pollution importante du 29 novembre au 9 décembre 2016, avec un second épisode du 15 au 17 décembre 2016. Les pics de pollution les plus intenses ont été mesurés autour du 1^{er} et du 6 décembre. L'analyse des cartes de pollution représentant l'indice européen Citeair sur cette période (figure 2) illustre la dynamique de l'épisode de pollution. Les valeurs fortes de l'indice ont été dues très majoritairement à la présence de particules fines PM2.5 (particules de diamètre inférieur à 2,5 µm) et PM10 (particules de diamètre inférieur à 10 µm). Cet épisode de pollution aux particules est l'un des plus longs observés ces dix dernières années. Les concentrations moyennes journalières de particules PM10 mesurées par le réseau Airparif ont en effet dépassé à plusieurs reprises le seuil d'information (50 µg m⁻³), voire le seuil d'alerte (80 µg m⁻³). Certaines valeurs journalières ont été parmi les plus fortes de la décennie (146 µg m⁻³ à certaines stations) et les valeurs horaires maximales ont dépassé localement 250 µg m⁻³.

Les concentrations de ces particules fines sont largement influencées par des processus atmosphériques, comme l'advection sous l'effet du vent, la

La plate-forme Ocapi (Optimisation des cycles carbone, azote et phosphore en ville)

Le groupe collaboratif de recherche Ocapi du pôle d'observation de l'IPSL s'appuie sur un dispositif de quatre stations de recherche, complémentaires des réseaux opérationnels de surveillance de la qualité de l'air. Les quatre stations mettent en œuvre des mesures météorologiques et dynamiques, des mesures de la composition de l'aérosol et de certains de ses précurseurs. La station du Sirta, qui fait partie de plusieurs réseaux d'observations nationaux et internationaux, est une station péri-urbaine, caractéristique du fond régional, alors que la station Qualair de l'université Pierre-et-Marie-Curie est caractéristique du fond urbain et les stations Lisa-université Paris-Diderot (UPD) et Lisa-université Paris-Est-Créteil (Upec) sont plus fortement impactées par le trafic automobile. Cette diversité d'environnements, et donc d'exposition des populations, doit soutenir l'analyse du lien entre composition chimique de l'aérosol et l'impact sur la santé. De plus, la localisation de ces sites permet de mesurer des gradients de concentrations : entre le site Qualair au centre de Paris, le site de l'UPD situé dans le 13^e arrondissement, à 4 km au sud-est proche du périphérique, et le site de l'Upec situé à 5 km au sud-est à Créteil.

dilution liée au mélange vertical dans la couche limite et aux échanges entre la couche limite et l'atmosphère au-dessus (couche résiduelle ou troposphère libre), où des particules peuvent aussi être présentes. L'hiver, les conditions

de faible dispersion permettant l'accumulation de particules fines sont caractérisées par des vents très faibles et des épaisseurs de couche de mélange très faibles également, de nuit comme de jour.

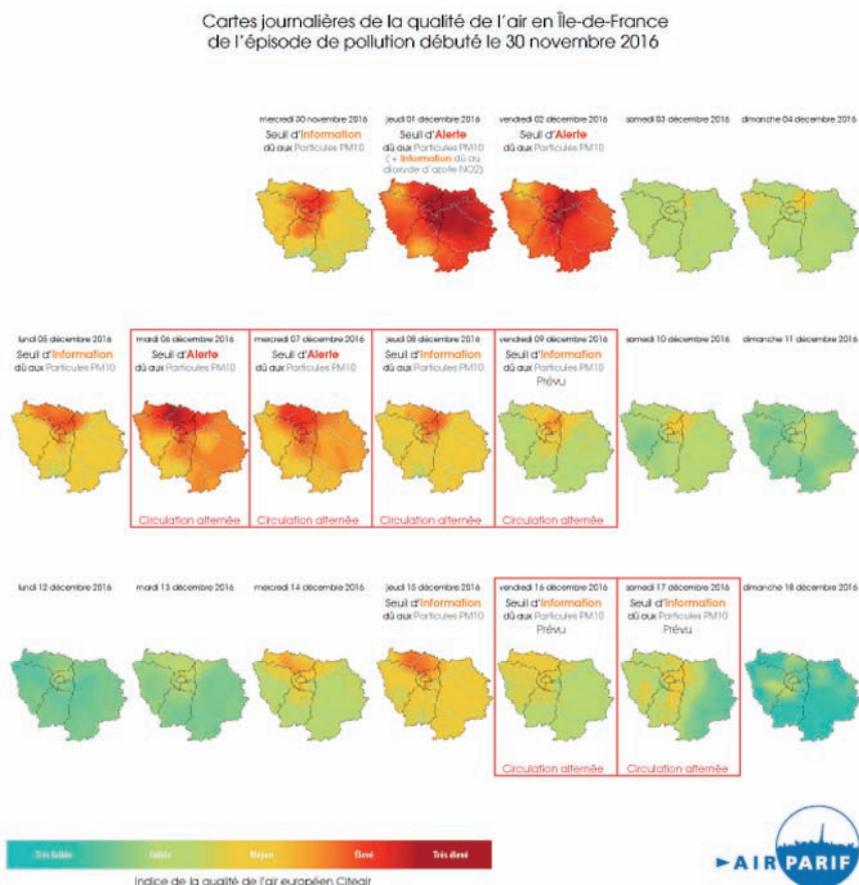


Figure 2. Cartes journalières de l'indice européen de la qualité de l'air (Citeair) en Île-de-France pour l'épisode de pollution du 30 novembre au 17 décembre 2016. Source : Airparif¹.

1. www.airparif.asso.fr

Intéressons-nous donc aux conditions météorologiques, forcément particulières, qui ont été à l'origine de cet épisode de pollution remarquable. Le suivi de la pression atmosphérique réduite au niveau de la mer (P_{mer}) est très instructif (figure 3). En effet, durant toute la première décade de décembre, nous retrouvons la présence d'un très puissant anticyclone sur la France. En

raison de sa position sur le nord de la France (ou à proximité immédiate), le vent est extrêmement faible sur le nord et l'est du pays. Ainsi, en cette période de l'année où le rayonnement solaire est le plus faible, les déficits radiatifs s'accumulent et une pellicule froide se forme dans les très basses couches. La quasi-absence de vent lui permet de se renforcer et de persister, y compris au

cœur de la journée. Les nuits claires qui induisent un refroidissement radiatif plus important lui permettent de gagner en amplitude.

La comparaison plus fine entre la situation météorologique et les pics de pollution quotidiens nous permet de comprendre les journées les plus sensibles. Lors du pic des 1^{er} et

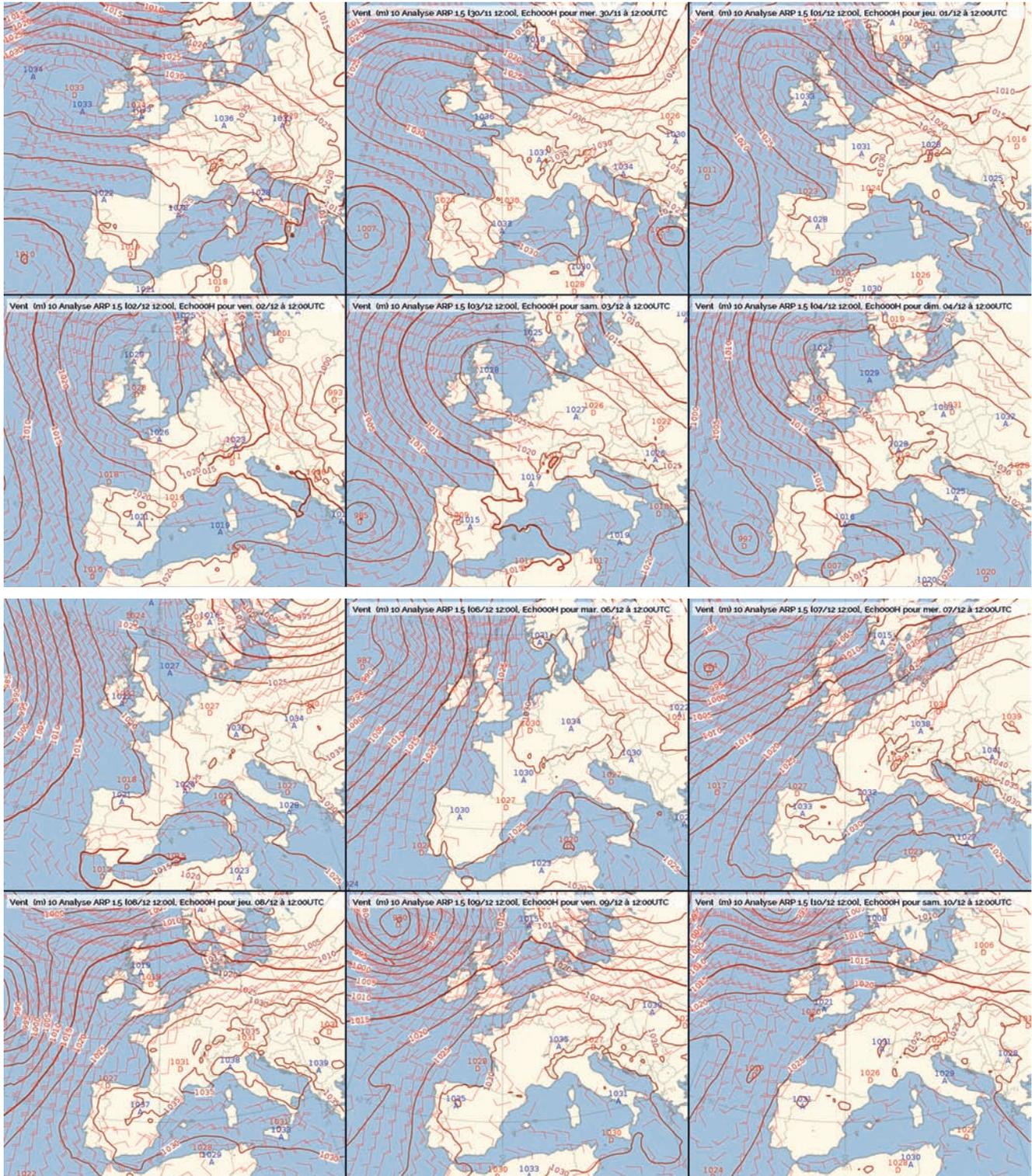


Figure 3. Cartes de pression au niveau de la mer (P_{mer}) et vent à 10 m (supérieurs à 5 nœuds²) analysés par le modèle Arpege toutes les 24 heures du 29 novembre 12 h UTC au 10 décembre 2016 12 h UTC. Source : Météo-France.

2. 1 nœud (kt) correspond à un mille marin par heure, soit $0,514 \text{ m s}^{-1}$.

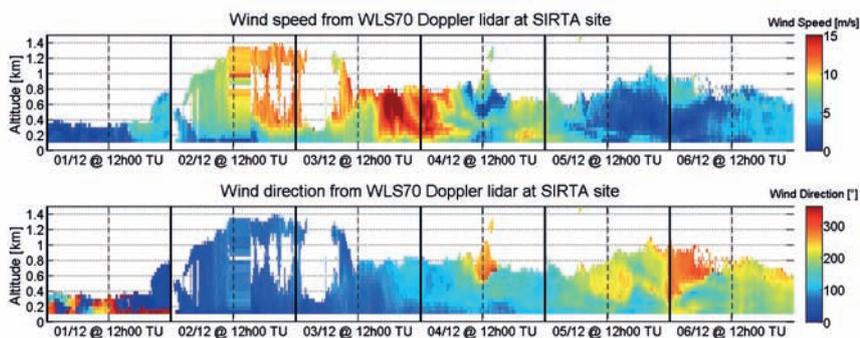


Figure 4. Profils verticaux de la vitesse (en haut) et de la direction (en bas) du vent par lidar Doppler WLS70 réalisées au Sirta (Palaiseau). Source : EDF R&D/Cerea. © J.-C. Dupont, LMD/IPSL.

2 décembre, l’anticyclone est vissé vers le Bassin parisien et le vent y est donc très faible. Puis, les 3 et 4 décembre, il se décale légèrement vers le nord, permettant une amélioration temporaire de la qualité de l’air en raison de la mise en place d’un faible courant d’est. À partir du 5, l’anticyclone se rapproche à nouveau de la France, venant se positionner vers le Centre-Est. Le vent devient à nouveau très faible sur le Bassin parisien, tout en s’orientant au sud. D’ailleurs, la qualité de l’air la plus dégradée se décale vers le nord de l’Île-de-France au cours de ce pic du 5 au 9 décembre (figure 2). C’est ce courant de sud qui sera à l’origine de la fin d’épisode de pollution en Île-de-France à partir du 10 décembre.

Les mesures de profils verticaux de vitesse et direction de vent effectuées par lidar Doppler (figure 4) depuis le site du Sirta³ à Palaiseau (situé à 20 km au sud-sud-ouest de Paris) indiquent effectivement des vents très faibles (< 2 m s⁻¹) en surface et sur les premières centaines de mètres les 1^{er} et 2 décembre puis 5 et 6 décembre, avec une parenthèse de vent un peu plus fort (5 m s⁻¹ à 10 m et 10 m s⁻¹ à 100 m) les 3 et 4 décembre. La direction de nord-est à est tourne progressivement au sud-est à sud lors du second pic.

L’analyse des radiosondages apporte des informations très pertinentes concernant la structure de la couche limite. Plus l’inversion de température est de basse altitude, marquée et durable – le tout dans un contexte peu venté –, plus la concentration des polluants est importante. Lors du premier pic de pollution, les 1^{er} et 2 décembre, les radiosondages réalisés à Trappes (Yvelines) montrent la présence d’une pellicule froide très peu épaisse mais marquée (figure 5). La nuit, l’inversion de température était de l’ordre de 10 °C le 1^{er} décembre, un peu moins le

lendemain, le tout sur 20 à 30 hPa environ, soit approximativement 150 à 250 m. En journée, même si l’inversion remonte un peu en hauteur, elle persiste très près du sol. Le 3 décembre à 12 h UTC, l’amélioration de la qualité de l’air s’explique par un pied convectif et un vent plus établi, permettant le brassage sur une plus grande épaisseur (dilution) et l’advection des polluants vers d’autres régions.

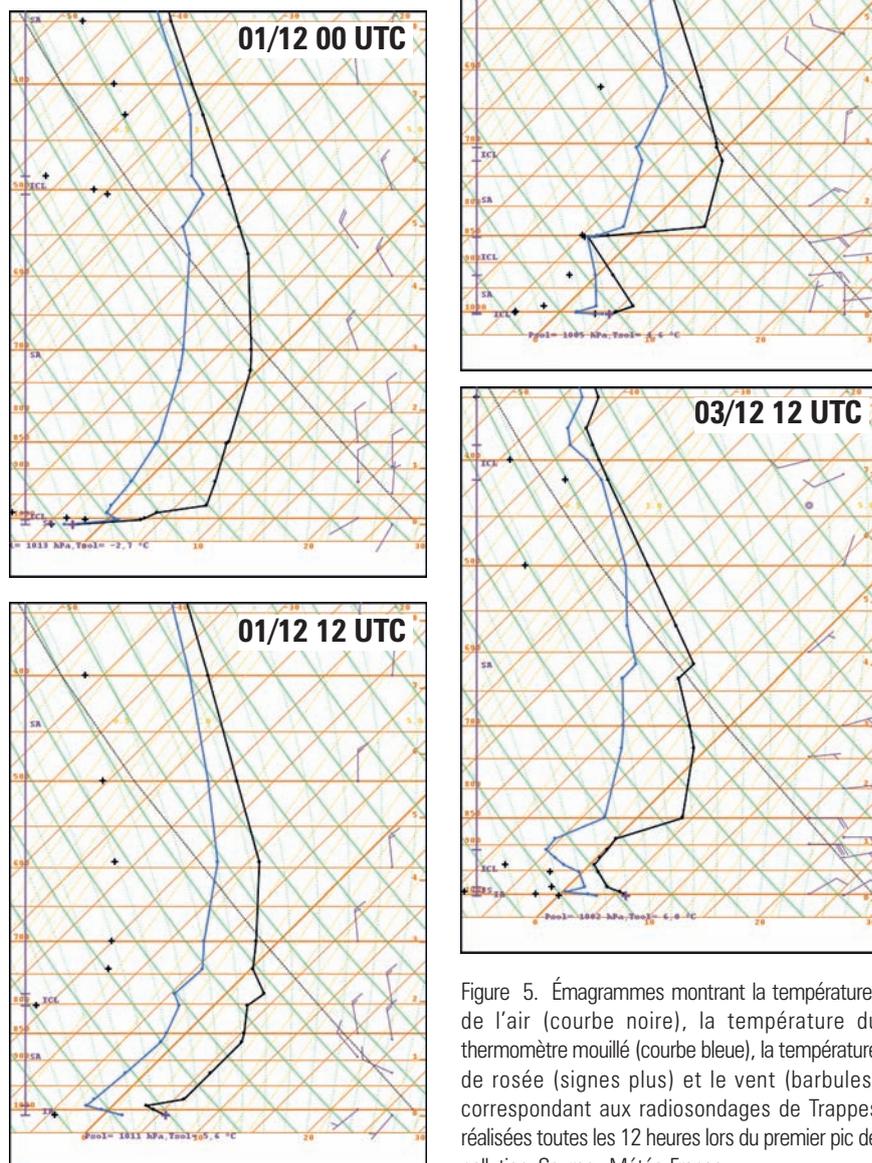


Figure 5. Émagrammes montrant la température de l’air (courbe noire), la température du thermomètre mouillé (courbe bleue), la température de rosée (signes plus) et le vent (barbules) correspondant aux radiosondages de Trappes réalisées toutes les 12 heures lors du premier pic de pollution. Source : Météo-France.

3. Site instrumental de recherche par télé-détection atmosphérique, www.sirta.fr

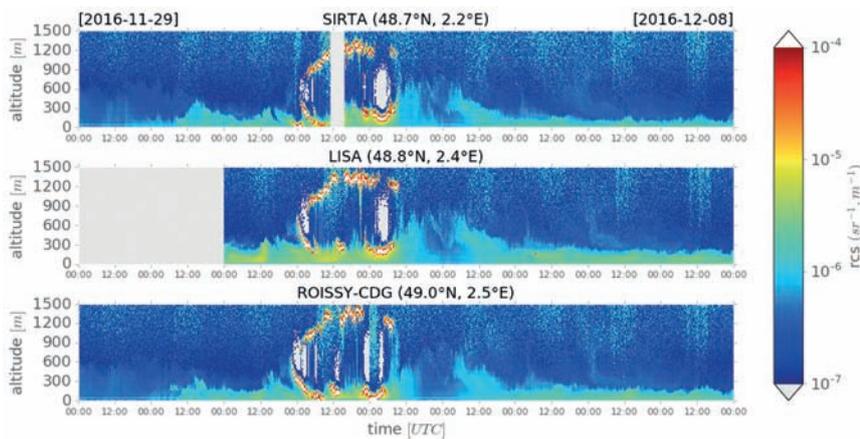


Figure 6. Mesures du profil vertical de rétrodiffusion (*attenuated backscatter* en $\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$) en fonction du temps et de l'altitude en mètres au-dessus du sol par télémètre automatique CL31 réalisées à Palaiseau (SIR), Paris 13^e arrondissement (UPD) et Roissy (CDG). Source : Météo-France (sites SIR et CDG) et Lisa-UPD (site UPD). © M.-A. Drouin, LMD/IPSL.

Ces mesures sont confirmées par celles des télémètres CL31 sur trois sites (Sirta à Palaiseau, Lisa-UPD dans le 13^e arrondissement de Paris et à l'aéroport Roissy-Charles-de-Gaulle). Ils montrent des structures (épaisseur de couche limite, couches d'aérosols, couches nuageuses) assez cohérentes entre les deux sites suburbains distants de 40 km et le site urbain (figure 6). Les 1^{er} et 2 décembre sont caractérisés par des couches de mélange très peu épaisses inférieures à 100 m la nuit et ne dépassant pas 300 m le jour. L'épaisseur de la couche de mélange de jour est environ 100 m plus épaisse au-dessus de Paris par rapport aux sites situés en périphérie. Les 5 et 6 décembre, l'épaisseur de la couche de mélange est inférieure à 100 m la nuit et ne dépasse pas 200 m à Paris et 150 m en banlieue. Les inversions de température la nuit, les faibles flux de chaleur le jour et un mélange turbulent faible induisent des couches atmosphériques peu mélangées et de faibles développements verticaux, limitant ainsi fortement la dilution verticale des polluants émis en surface.

Les 3 et 4 décembre, malgré les flux de chaleur sensibles toujours très faibles, mais sous l'effet de vents plus forts et d'un fort cisaillement de vent entre la surface et 100 mètres d'altitude, une atmosphère plus instable se met en place. La couche de mélange se développe pour atteindre 750 m l'après-midi du 3 décembre, qui correspond à la journée où la concentration en particule fine chute fortement.

En complément des mesures de masse des aérosols, des mesures de la composition de l'aérosol sont possibles pour mieux comprendre les sources de cette pollution, d'une part à partir des filtres du réseau Cara (qui sont en cours d'analyse), mais aussi à partir des observations « en ligne » des ACSM (*Aerosol Chemical Speciation Monitor*). Cette dernière mesure a été réalisée sur le site péri-urbain du Sirta à Orme-des-Merisiers (figure 7). Elle permet d'avoir accès à la composition de la partie non réfractaire de l'aérosol dit « ultra-fin » (PM1, particules de diamètre inférieure à

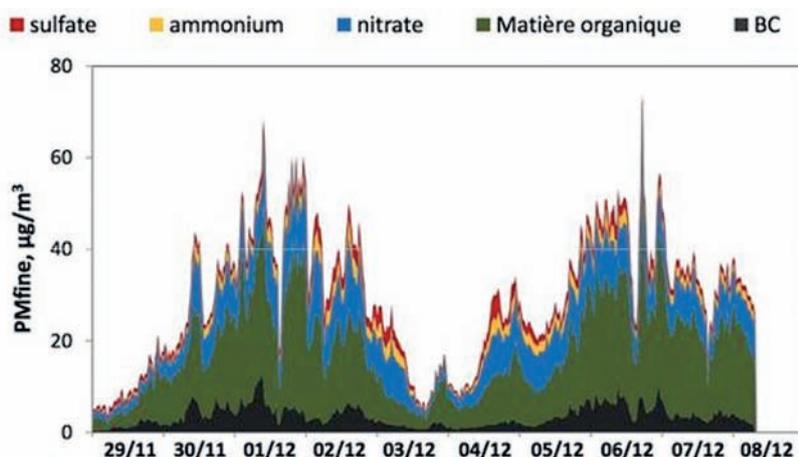


Figure 7. Concentrations et spéciation chimique des PM1 (particules de diamètre inférieur à $1 \mu\text{m}$) obtenues à partir des instruments AE33 et ACSM installés au Sirta (Orme-des-merisiers, Essonne). Source : LSCE/IPSL et Ineris

$1 \mu\text{m}$), c'est-à-dire les sulfates, les nitrates, l'ammonium et les aérosols organiques (excluant ainsi les poussières d'origine naturelles et anthropiques).

Les observations de la figure 7 présentent la même dynamique que l'indice Citeair (figure 2). La concentration massique de ces particules ultrafines (PM1) évolue de près d'un facteur 10 entre les minimas ($< 10 \mu\text{g} \text{m}^{-3}$) et maximas ($> 60 \mu\text{g} \text{m}^{-3}$) sur la période du 29 novembre au 8 décembre. Les concentrations massiques maximales sont atteintes les 1^{er}, 2 et 6 décembre, avec des valeurs minimales dans l'après-midi du 3 et au matin du 4 décembre en cohérence avec l'analyse météorologique proposée précédemment. Elles montrent notamment la part prépondérante de l'aérosol organique sur cette fraction de l'aérosol, ainsi que la présence de nitrates. L'analyse des observations réalisées par Airparif avec un appareil similaire situé à Gennevilliers (non montré) donne la même dynamique, mais avec des niveaux de concentrations plus élevés notamment pour la matière organique avec des niveaux importants de carbone suie. Cela semble indiquer l'importance des sources locales au cours de cet événement. Cette analyse est renforcée par les observations fournies par les instruments AE33 (aéthalomètre multilongueur d'onde).

Gilles Foret, Matthias Beekmann, Paola Formenti

Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques, université Paris-Est-Créteil

Martial Haefelin

Institut Pierre-Simon Laplace, CNRS / Ecole Polytechnique

Michaël Kreitz

École nationale de la météorologie, Météo-France

Olivier Boucher

Institut Pierre-Simon Laplace, CNRS / université Pierre-et-Marie-Curie

Renaud Bodichon, Juan-Antonio Bravo-Aranda

Institut Pierre-Simon Laplace, CNRS / UVSQ

Marc-Antoine Drouin, Jean-Charles Dupont

Laboratoire de météorologie dynamique, CNRS / École Polytechnique

Olivier Favez

Ineris

Véronique Gheris

Airparif

Aline Gratien, Vincent Michoud

*Laboratoire interuniversitaire des systèmes
atmosphériques, université Paris-Diderot*

Valérie Gros

*Laboratoire des sciences du climat et de
l'environnement, CNRS / CEA / UVSQ*

Yao Té

*Laboratoire d'études du rayonnement et de la
matière en astrophysique et atmosphères,
université Pierre-et-Marie-Curie*

MK a réalisé l'analyse météorologique. GF, MH, MB, PF, RB, JABA, MAD, JCD, OE, VG, AG, VM, VG et YT ont réalisé les mesures d'aérosols. GF, MH, MK et OB ont rédigé la brève.

Remerciements :

Les auteurs souhaitent remercier les équipes ayant réalisé les mesures sur les sites du Sirta (Palaiseau et Orme-des-merisiers), Qualair (Jussieu), Lisa-UPD et Lisa-Upec, l'équipe Espri-IPSL pour la gestion des données, la cellule de prévision Ocap qui s'occupe quotidiennement de l'activation du réseau de mesure Ocap, en se basant sur les prévisions Esmeralda, Prevoir, et Copernicus/Cams, en collaboration étroite avec Airparif, Météo-France, l'Ineris et EDF R&D pour l'accès à certaines données.