



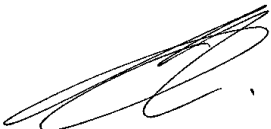
# Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l’Air

## ELEMENTS DE COMPREHENSION DES EPISODES DE POLLUTION PARTICULAIRE DE DEBUT DECEMBRE 2016 A PARTIR DES MESURES DE COMPOSITION CHIMIQUE

---

Olivier FAVEZ & Tanguy AMODEO (INERIS)

Février 2017

|         | Rédaction                                                                           | Vérification                                                                         | Approbation                                                                           |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| NOM     | Olivier FAVEZ                                                                       | Caroline MARCHAND                                                                    | Marc DURIF                                                                            |
| Qualité | Ingénieur de l’Unité CIME<br><br>Direction des Risques<br>Chroniques                | Responsable de l’Unité CIME<br><br>Direction des Risques<br>Chroniques               | Responsable du Pôle CARA<br><br>Direction des Risques<br>Chroniques                   |
| Visa    |  |  |  |



## LE LABORATOIRE CENTRAL DE SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L'AIR

---

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air est constitué des laboratoires de Mines Douai, de l'INERIS et du LNE. Il mène depuis 1991 des études et des recherches à la demande du Ministère chargé de l'environnement, et en concertation avec les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Ces travaux en matière de pollution atmosphérique ont été financés par la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (bureau de la qualité de l'air) du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (MEEM). Ils sont réalisés avec le souci constant d'améliorer le dispositif de surveillance de la qualité de l'air en France en apportant un appui scientifique et technique au MEEM et aux AASQA.

L'objectif principal du LCSQA est de participer à l'amélioration de la qualité des mesures effectuées dans l'air ambiant, depuis le prélèvement des échantillons jusqu'au traitement des données issues des mesures. Cette action est menée dans le cadre des réglementations nationales et européennes mais aussi dans un cadre plus prospectif destiné à fournir aux AASQA de nouveaux outils permettant d'anticiper les évolutions futures.

## TABLE DES MATIERES

---

|                                             |           |
|---------------------------------------------|-----------|
| <b>RESUME .....</b>                         | <b>7</b>  |
| <b>REMERCIEMENTS ET COLLABORATIONS.....</b> | <b>8</b>  |
| <b>1. INTRODUCTION .....</b>                | <b>9</b>  |
| <b>2. COMPOSITION CHIMIQUE .....</b>        | <b>11</b> |
| 2.1 Mesures chimiques en temps réel .....   | 12        |
| 2.2 Mesures sur filtres.....                | 15        |
| <b>3. SOURCES .....</b>                     | <b>17</b> |
| 3.1 Sources primaires de combustion.....    | 17        |
| 3.2 Nitrate d'ammonium.....                 | 19        |
| <b>4. CONCLUSIONS .....</b>                 | <b>21</b> |
| <b>ANNEXE 1.....</b>                        | <b>22</b> |
| <b>ANNEXE 2.....</b>                        | <b>32</b> |



## RESUME

---

Le présent rapport agrège les observations réalisées dans le cadre du programme CARA pour l'étude des épisodes de pollution ayant touché la métropole au cours des trois premières semaines de décembre 2016. Il reprend pour partie les données obtenues à l'aide d'analyseurs automatiques de la composition chimique des PM et présentées au travers de 3 notes techniques diffusées au fil de l'eau, ainsi que les résultats issus de l'analyse chimique de filtres prélevés entre le 29/11 et le 18/12/2016.

Comme observé précédemment, en particulier en décembre 2013, ces épisodes de début d'hiver se sont développés lors de situations météorologiques stables (régime anticyclonique) propices à l'accumulation des polluants. Les faibles températures conduisent à une importante utilisation du chauffage résidentiel. Cette conjonction induit une forte teneur en matière carbonée dans les particules. Malgré le caractère global des conditions météorologiques, des spécificités locales expliquent de fortes variations observées d'une station de mesure à l'autre, et d'une région à une autre.

Les résultats issus des analyses chimiques sur filtres confirment ceux issus des mesures automatiques, convergeant vers une influence majeure des émissions de combustion de biomasse (chauffage domestique) sur les niveaux de particules mesurés. Les émissions primaires liées au transport routier contribuent en second lieu aux fortes concentrations de particules carbonées mesurées sur chacun des sites de fond urbain étudiés. Enfin, et dans une moindre mesure, une contribution de nitrate d'ammonium, formé via des mécanismes photochimiques, est également observée sur le nord et l'est de la France. Les mesures d'isotopes stables de l'azote réalisées sur filtres suggèrent que l'ammonium présent au sein de ces particules est majoritairement issu de processus de combustion (dont le transport routier), lors des épisodes étudiés ici.

## REMERCIEMENTS ET COLLABORATIONS

---

Ce rapport résulte notamment de la collaboration avec les équipes :

- des AASQA participant au programme CARA, en particulier Atmo Nouvelle-Aquitaine, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, Atmo Grand-Est, Air Pays de la Loire, Atmo Normandie, et Atmo Hauts de France ;
- du SIRTAL/LSCE (site de recherche de l'Institut Pierre Simon Laplace, sur le plateau de Saclay, Essonne) ;
- de l'IGE (Institut des Géosciences de l'Environnement, Grenoble) ;
- du LaMP (Laboratoire de Météorologie Physique, Clermont-Ferrand).

Le LCSQA/INERIS remercie chaleureusement l'ensemble de ces équipes pour leur réactivité et la richesse des échanges avec elles.



## 1. INTRODUCTION

De fortes concentrations de  $PM_{10}$ , pouvant entraîner des dépassements de la valeur limite journalière, sont régulièrement observées entre mi-novembre et mi-avril du fait de la conjonction d'activités anthropiques (chauffage, transport, agriculture) et l'occurrence de conditions météorologiques favorables à l'accumulation et/ou à la transformation des polluants atmosphériques. Les événements de début d'hiver se développent lors de situations météorologiques stables et froides (régime anticyclonique), propices à l'accumulation de l'ensemble des émissions primaires et à une forte utilisation du chauffage résidentiel. Ces facteurs entraînent une forte teneur en matière carbonée dans les particules.<sup>1,2</sup>

Comme illustré par la Figure 1, de nombreuses régions métropolitaines (en particulier celles de la moitié nord de la France, Auvergne-Rhône-Alpes et Nouvelle Aquitaine) ont connu des niveaux de  $PM_{10}$  avoisinant ou dépassant les seuils d'information ( $50\mu g/m^3$ ) et d'alerte ( $80\mu g/m^3$ ) au cours des trois premières semaines du mois de décembre 2016.

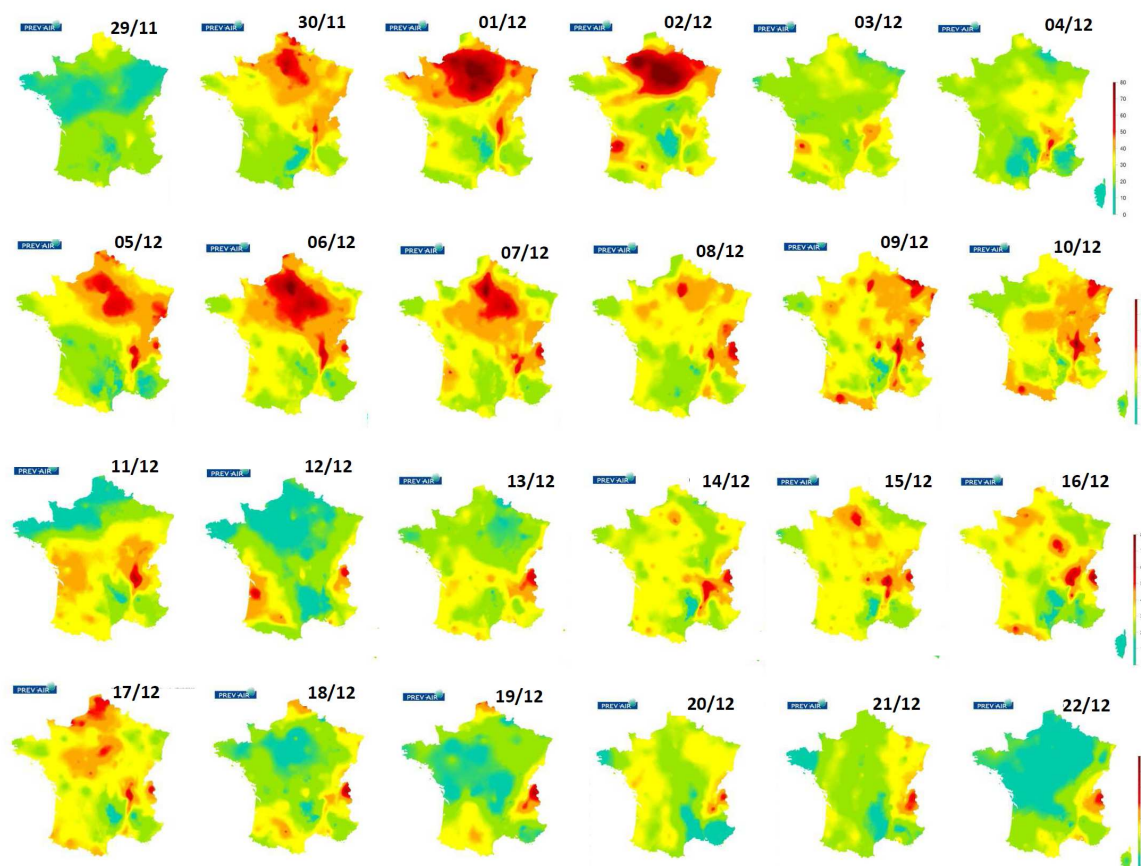


Figure 1: Cartes PREV'AIR analysées des moyennes journalières  $PM_{10}$  du 29/11 au 22/12/2016 (simulations Chimère dans lesquelles les données d'observation sont assimilées).

Afin d'améliorer la connaissance de la composition chimique et des sources de particules,

<sup>1</sup> Rapport LCSQA 2012 : <http://www.lcsqa.org/rapport/2015/ineris/programme-cara-bilan-travaux-2014-2015>.

<sup>2</sup> Note LCSQA 2015: <http://www.lcsqa.org/rapport/2015/ineris/elements-comprehension-episodes-pollution-particulaire-fin-decembre-2014-debut-j>

le dispositif national de surveillance de la qualité de l'air (MEEM, LCSQA et AASQA) s'est doté depuis 2008 du programme CARA, reposant initialement sur l'analyse différée de prélèvements sur filtres et s'enrichissant aujourd'hui de mesures en temps réel.<sup>3</sup>

Le présent rapport synthétise les observations réalisées dans le cadre de ce programme pour l'étude des épisodes de pollution ayant touché la métropole au cours des trois premières semaines de décembre 2016. Il reprend pour partie les données obtenues à l'aide d'analyseurs automatiques de la composition chimique des PM et présentés au travers de 3 notes techniques diffusés au cours des épisodes<sup>4,5,6</sup> (la dernière étant reproduite en Annexe 1) ainsi que les résultats obtenus grâce à l'analyse chimique de filtres prélevés entre le 29 novembre et le 18 décembre 2016.

---

<sup>3</sup> Note LCSQA 2014: <http://www.lcsqa.org/rapport/2014/ineris/description-programme-cara-dispositif-national-surveillance-qualite-air>

<sup>4</sup> Note LCSQA du 6 décembre 2016: <http://www.lcsqa.org/rapport/2016/ineris/episodes-pollution-particulaire-debut-decembre-2016-premiers-elements-comprehens>

<sup>5</sup> Note LCSQA du 9 décembre 2016: <http://www.lcsqa.org/rapport/2016/ineris/episodes-pollution-particulaire-debut-decembre-2016-elements-comprehension-parti>

<sup>6</sup> Note LCSQA du 13 décembre 2016: <http://www.lcsqa.org/rapport/2016/ineris/episodes-pollution-particulaire-debut-decembre-2016-elements-comprehension-par-0>

## 2. COMPOSITION CHIMIQUE

---

Les  $PM_{10}$  représentent la concentration massique des particules atmosphériques de diamètre aérodynamique inférieur à  $10\mu m$ . Elles sont essentiellement constituées de deux modes : le mode fin et le mode grossier, dont la frontière granulométrique se situe vers  $2.5\mu m$ . Ces deux modes ont des sources ou des processus de formation différents et des compositions chimiques différentes<sup>7,8</sup>.

Le mode fin est principalement constitué des émissions anthropiques ainsi que d'aérosols secondaires provenant de l'oxydation et/ou de la condensation de précurseurs gazeux (COVs,  $NO_x$ ,  $SO_2$ ,  $NH_3$ , ...) en phase particulaire. Il contient très majoritairement :

- du carbone suie (ou *Black Carbon*), issu de la combustion incomplète d'énergies fossiles ou de biomasse, et constitué quasi-exclusivement d'atomes de carbone,
- de la matière organique (contenant des atomes de carbone, mais également de l'oxygène, hydrogène, azote, ...) primaire, i.e., émis directement dans l'atmosphère (en particulier par les mêmes processus de combustion que pour le carbone suie) ou secondaire, i.e. provenant de l'oxydation de COVs émis par les activités humaines et par la végétation,
- et des espèces inorganiques secondaires (en particulier le nitrate d'ammonium et le sulfate d'ammonium).

Le mode grossier est principalement constitué de particules d'origines naturelles (sels de mer, poussières terrigènes, débris végétaux ...) mais peut être aussi lié à des activités humaines. Il contient également des espèces secondaires (dont nitrate, sulfate et composés organiques, provenant de réactions acido-basiques entre espèces gazeuses et particules minérales).

Comme illustré par la Figure 2, pour une sélection de stations de fond (péri-)urbain du dispositif national et pour la période comprise entre le 29 novembre et le 11 décembre, le ratio  $PM_{2.5}/PM_{10}$  variait significativement selon le jour et la localisation des mesures. Les contributions de particules grossières sont parfois importantes, jusqu'à 35% des  $PM_{10}$  en moyenne journalière et en ne considérant que les journées présentant des niveaux de  $PM_{10}$  supérieurs à  $40\mu g/m^3$ . Elles peuvent s'expliquer par l'accumulation de particules naturelles (sels de mer et ou poussières terrigènes) mais également par l'accumulation de poussières émises par le transport routier via l'usure de la chaussée des pneus, freins, etc... ainsi que d'autres activités humaines (chantiers de bâtiments et de travaux publics). Néanmoins, les  $PM_{2.5}$  représentaient partout plus de 70% des  $PM_{10}$  en moyennes journalières, excluant une influence majeure à l'échelle nationale d'intrusions de poussières désertiques ou volcaniques.

---

<sup>7</sup> Rapport LCSQA 2011: <http://www.lcsqa.org/rapport/2011/ineris-air-normand-lsce/note-suivi-composition-chimique-journaliere-pm25-pm10-station-p>

<sup>8</sup> Note LCSQA 2011: <http://www.lcsqa.org/rapport/2011/ineris/note-methodologies-determination-composition-chimique-particules-submicroniques->

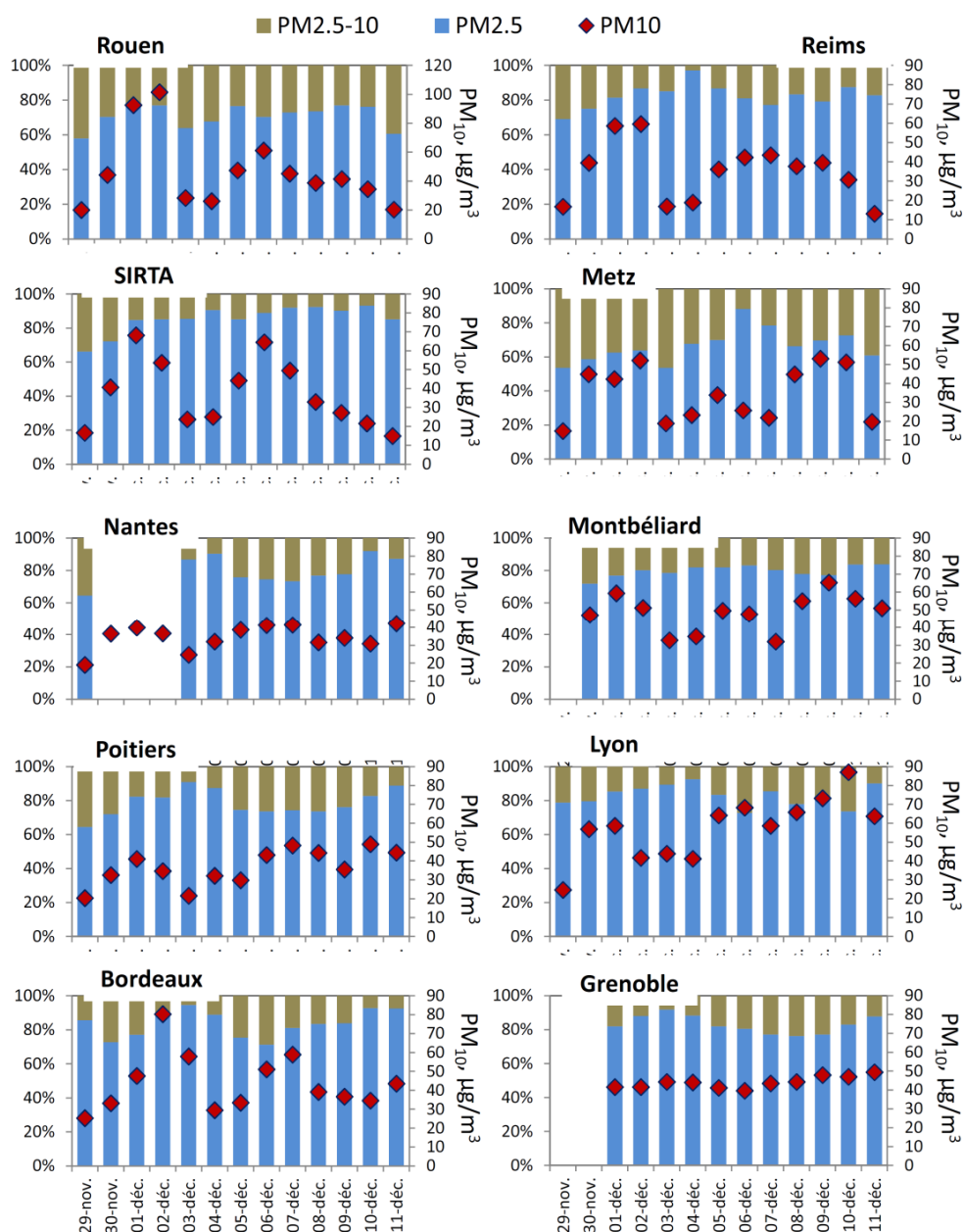


Figure 2 : Moyennes journalières des  $PM_{10}$  et des contributions de leurs fractions fines ( $PM_{2.5}$ ) et grossières ( $PM_{10-2.5}$ ) sur une sélection de stations de fond (péri-)urbain du dispositif national. Les trous correspondent à des données manquantes.

## 2.1 Mesures chimiques en temps réel

Les instruments de mesure automatique mis en œuvre au cours de ces dernières années au sein du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air permettent le suivi des espèces chimiques majeures du mode fin (et donc des principales influences anthropiques). Ils sont de 2 types :

- L'Aethalomètre multi-longueurs d'onde AE33, permettant la surveillance du *Black Carbon* (BC) dans les  $PM_{2.5}$  en tant qu'indicateur des émissions primaires de combustion.

- L'*Aerosol Chemical Speciation Monitor* (ACSM), basé sur la spectrométrie de masse et la quantification des espèces non-réfractaires (i.e., volatile à 600°C) dans les PM<sub>1</sub>. Ces espèces chimiques correspondent principalement au nitrate, au sulfate, à l'ammonium et à la matière organique.

La Figure 3 présente les données ACSM et AE33 disponibles pour période 29/11-17/12 dans le cadre du programme CARA.

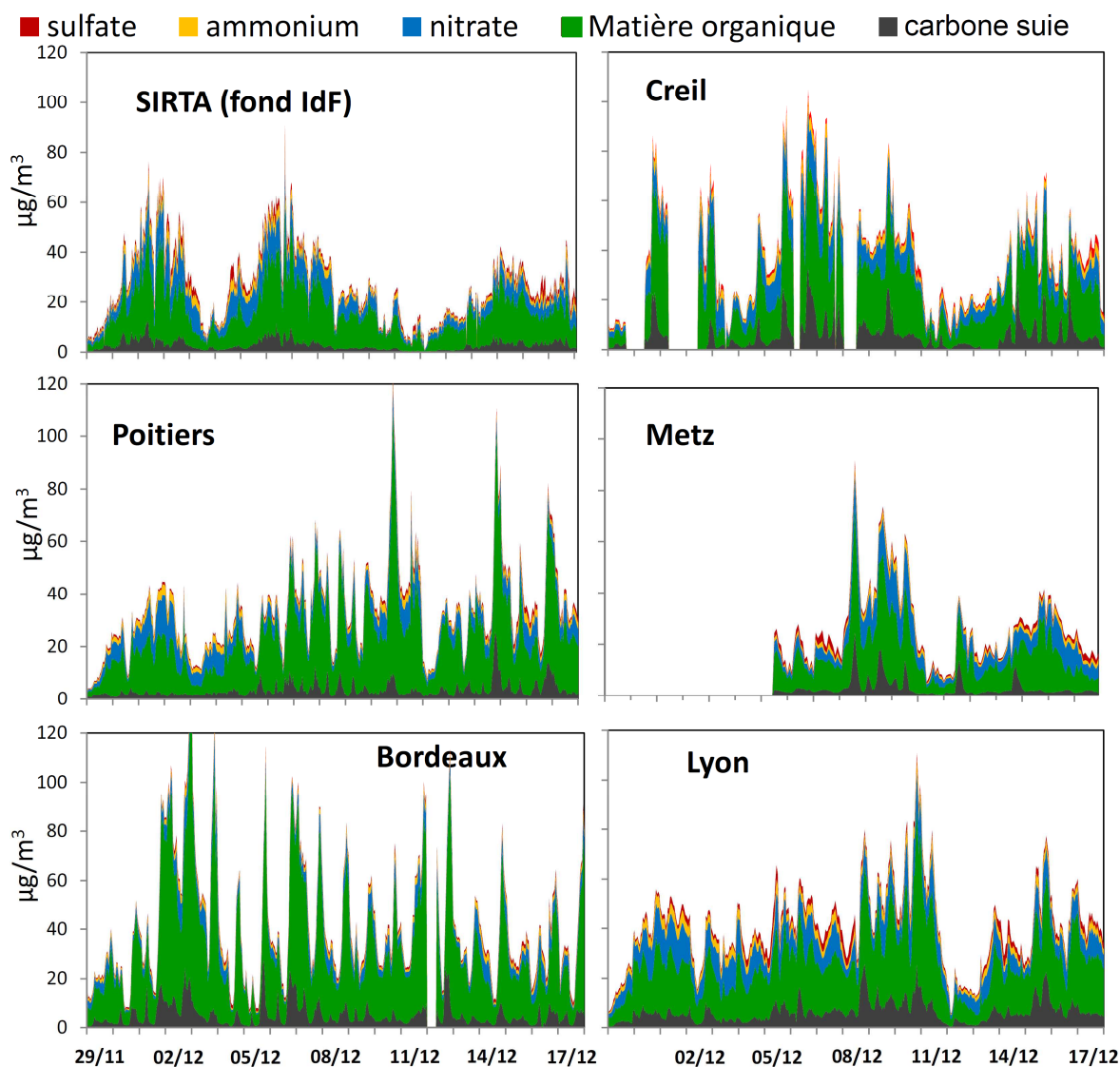


Figure 3: variations temporelles des espèces chimiques majeures des particules fines sur 6 sites de fond (péri-)urbain du dispositif CARA. Mesures ACSM (en PM<sub>1</sub>) et AE33 (en PM<sub>2.5</sub>) (courbes empilées).

Ces mesures sont réalisées par les AASQA volontaires sur des sites de fond urbain (à Creil, Poitiers, Metz, Lyon et Bordeaux) ou péri-urbain du dispositif national, ainsi qu'au Sirta. Cette dernière station située sur le plateau Saclay (78) fait partie de l'infrastructure européenne de recherche ACTRIS. Les mesures de composition chimique des particules y sont réalisées en continu depuis 2011 en collaboration entre le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) et l'INERIS. Ce site est représentatif du fond régional urbanisé en Ile de France, mais ne reflète pas totalement les niveaux de concentrations (en particulier des émissions primaires) pouvant être atteints au sein de l'agglomération parisienne.

On note tout d'abord de fortes différences de niveaux de concentrations et de variations temporelles entre des stations géographiquement proches (en particulier Creil - SIRTa et Bordeaux – Poitiers). Cette observation reflète le caractère très inhomogène de la répartition spatiale des niveaux de concentrations à l'échelle nationale, ainsi que des variations temporelles relativement importantes pour une région donnée (Figure 1). Ces résultats indiquent que malgré le caractère global des conditions météorologiques, il existe une forte influence des émissions locales sur les concentrations mesurées au niveau de chaque station de mesure.

Ce fort impact des émissions locales sur les niveaux de  $PM_{10}$  est confirmé par les profils « en dents de scie » observés sur chaque station et reflétant les périodes maximales d'émissions (pics de circulation automobile ou chauffage nocturne).

Parmi les différentes espèces chimiques mesurées, la matière organique prédomine nettement. Le même type d'observation a été réalisé par le Laboratoire de Météorologie Physique (LaMP), en partenariat avec Atmo Auvergne Rhône-Alpes, sur un site de fond de l'agglomération de Clermont-Ferrand (Figure 4). Compte tenu de la saison, l'ensemble de ces observations constituent un premier indice de la forte influence des émissions primaires de combustion sur les niveaux de concentration mesurés au cours des épisodes de début décembre 2016.

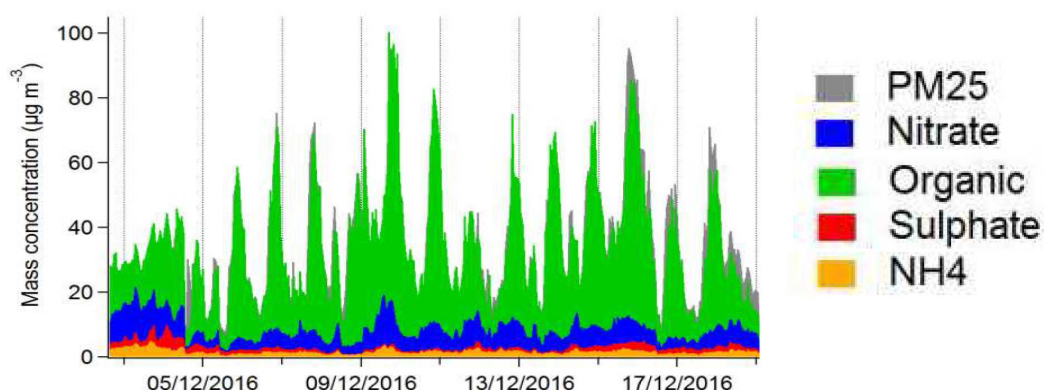


Figure 4: variations temporelles des espèces chimiques majeures des particules fines sur un site de fond urbain de Clermont-Ferrand. Mesures ACSM en  $PM_{10}$ . (Courbes empilées fournies par le LaMP).



## 2.2 Mesures sur filtres

Les Figures 5 et 6 synthétisent les résultats issus de l'analyse des espèces chimiques majeures sur les filtres disponibles pour l'étude de ces épisodes de pollution.

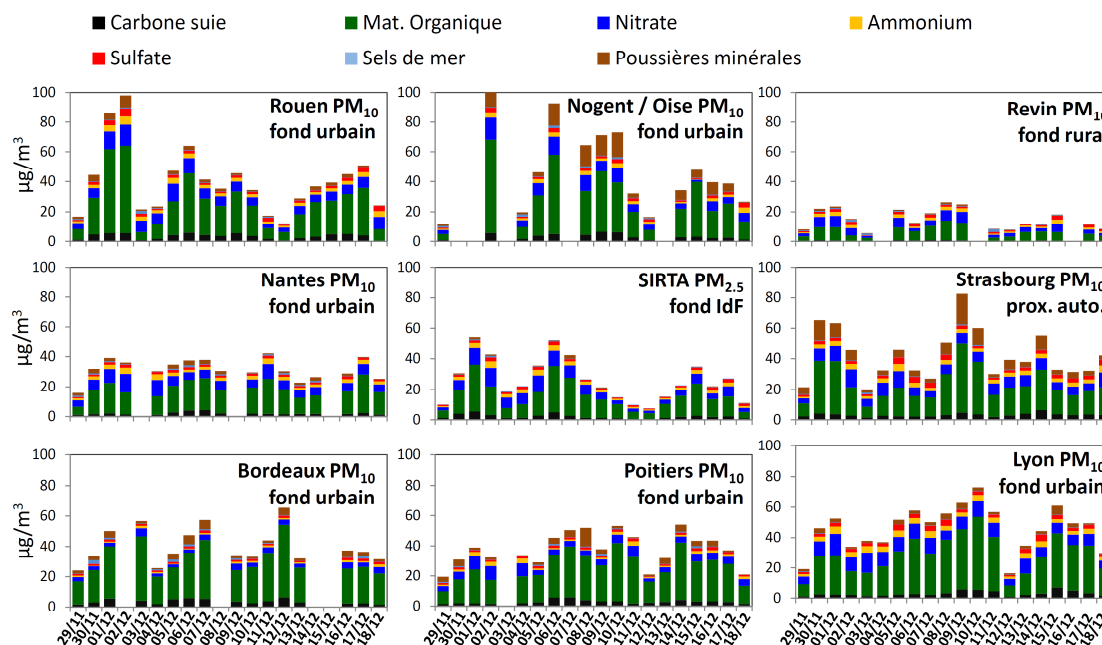


Figure 5 : moyennes journalières des espèces chimiques majeures mesurées sur filtres pour 8 sites du dispositif CARA et au SIRTa entre le 29 novembre et le 18 décembre 2016.

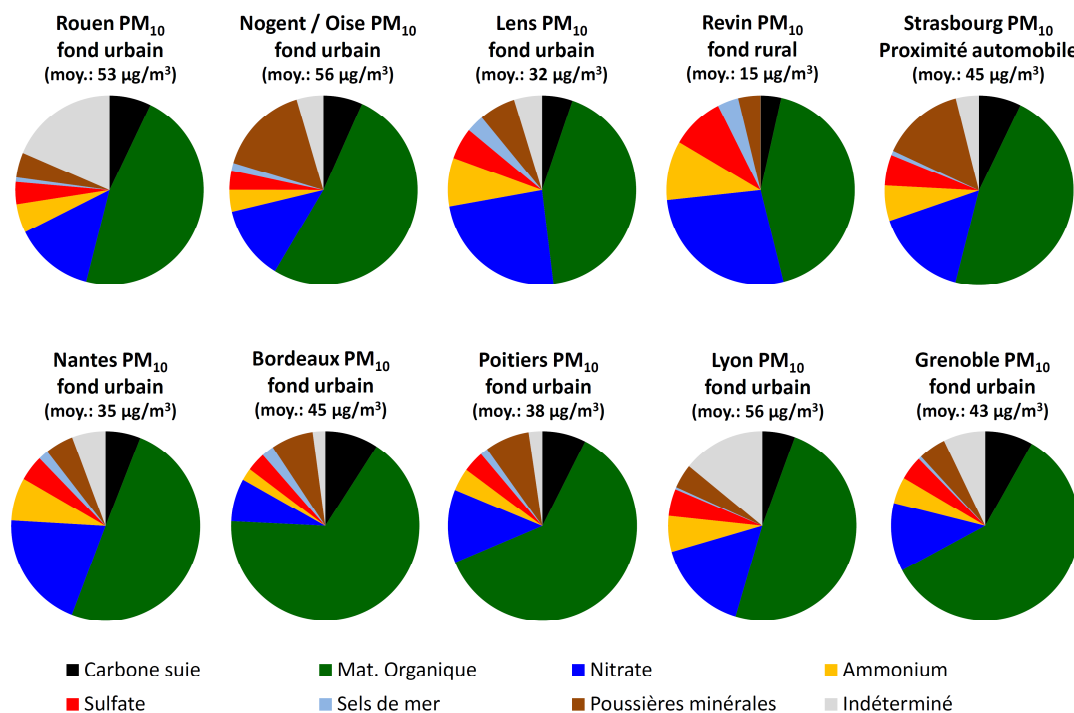


Figure 6 : contributions relatives moyennes des espèces chimiques majeures au sein des PM<sub>10</sub> mesurées sur filtres pour 10 sites du dispositif CARA entre le 30 novembre et le 17 décembre 2016.

Ces résultats confirment ceux obtenus à l'aide des mesures ACSM, avec :

- Pour les sites disposant des deux méthodes de mesure, une très bonne concordance des données issues des mesures sur filtres et ACSM (cf. Figure 7).
- Pour les sites ne disposant que de mesures sur filtres, et comme pour les autres sites, une contribution majeure de la matière organique.

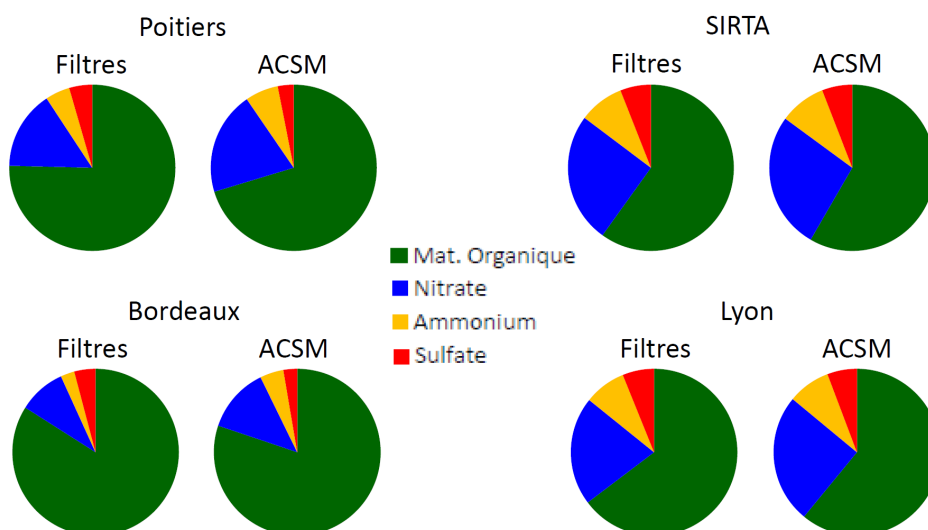


Figure 7: Comparaison des répartitions relatives entre matière organique, nitrate, ammonium et sulfate obtenues par mesures différées (filtres  $PM_{10}$  pour Poitiers, Bordeaux et Lyon, et filtres  $PM_{2.5}$  pour SIRTa) et par mesures ACSM ( $PM_1$ ).

Bien que moins fréquents que les épisodes de pollution printaniers l'occurrence de ce type d'épisodes hivernaux a déjà été observée au cours des années précédentes, notamment au début du mois de décembre 2013 (cf. Figure 8).

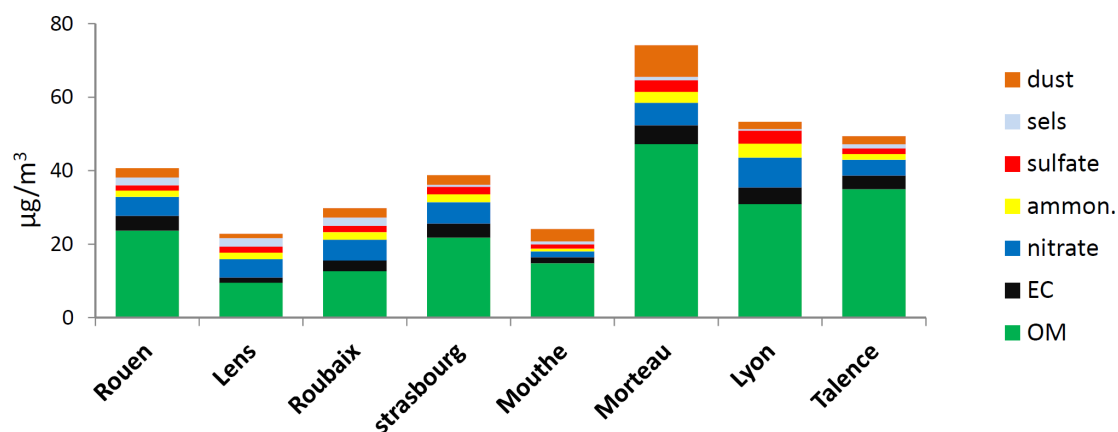


Figure 8 : répartition moyenne des principales espèces chimiques des  $PM_{10}$  entre le 8 et le 15 décembre 2013 sur différents sites du dispositif national. (Tiré du rapport de synthèse des travaux 2013 du programme CARA).

On note une contribution relative non négligeable du nitrate d'ammonium sur certains sites, en particulier sur ceux présentant les plus faibles niveaux de  $PM_{10}$  (cf. Fig.6). Les sources potentielles de précurseurs gazeux à l'origine de la formation de ce composé secondaire sont discutées dans le chapitre suivant, après l'estimation de l'impact des émissions primaires de combustion sur les niveaux de PM mesurés.



### 3. SOURCES

#### 3.1 Sources primaires de combustion

L'AE33 permet de distinguer deux fractions du carbone suie (BC) que l'on peut relier à la combustion d'hydrocarbures ( $BC_{ff}$ ) et à la combustion de biomasse ( $BC_{wb}$ ). Ces fractions peuvent ensuite être utilisées pour estimer (à l'aide d'un facteur multiplicatif et avec une précision de l'ordre de  $\pm 50\%$ ) les concentrations de  $PM_{10}$  attribuables à ces deux familles de sources, notées respectivement  $PM_{ff}$  et  $PM_{wb}$ , tel que :

$$PM_{ff} = a \times BC_{ff}$$

$$\text{Et } PM_{wb} = b \times BC_{wb}$$

où  $PM_{ff}$  et  $PM_{wb}$  représentent la concentration massique de particules  $PM_{10}$  issues respectivement de la combustion d'hydrocarbures et de la combustion de biomasse. Outre le BC,  $PM_{ff}$  et  $PM_{wb}$  sont constituées principalement d'aérosols organiques primaires. Les coefficients  $a$  et  $b$  sont issus (i) de la littérature scientifique pour la contribution fossile, et (ii) d'études LCSQA précédentes pour la contribution biomasse.<sup>9,10</sup>

Pour cette étude, les concentrations de  $PM_{wb}$  estimées à partir des mesures AE33 peuvent être directement comparées aux concentrations de  $PM_{wb}$  estimées, selon une approche mono-traceur classique<sup>10</sup>, à l'aide des concentrations de lévoglucosan (espèces chimiques caractéristiques de la combustion de biomasse) mesurées sur filtres. Comme présenté par la Figure 9, un très bon accord est obtenu ici entre les deux méthodologies (cf. Annexe 2).

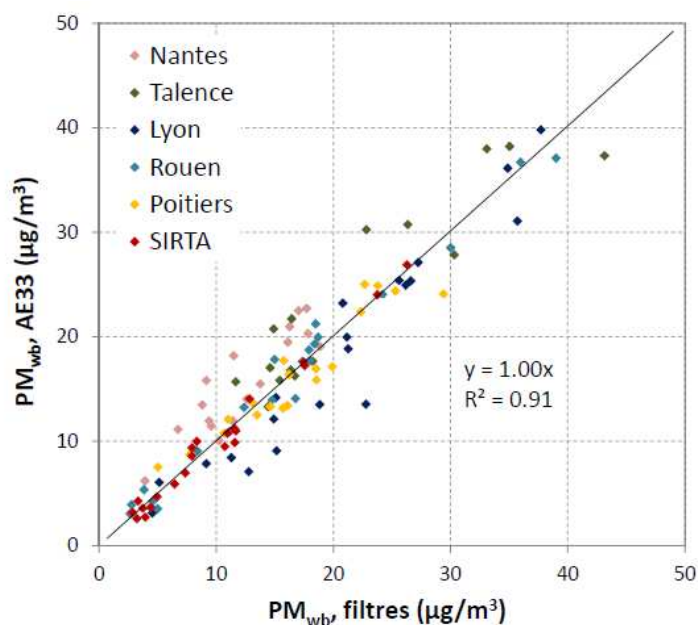


Figure 9: comparaison des concentrations journalières de  $PM_{wb}$  estimées à l'aide des mesures de lévoglucosan sur filtres et des mesures AE33 pour la période 29/11 au 18/12/2016.

<sup>9</sup> Rapport LCSQA 2015 : <http://www.lcsqa.org/rapport/2015/ineris/programme-cara-bilan-travaux-2014-2015>

<sup>10</sup> Note LCSQA 2015 : <http://www.lcsqa.org/rapport/2015/ineris/impact-combustion-biomasse-concentrations-pm10-programme-cara-hiver-2014-2015>

La Figure 10 présente les variations temporelles de  $PM_{wb}$  et  $PM_{ff}$  estimées à l'aide des mesures AE33 sur 8 sites de fond entre le 29/11 et le 18/12/2017, illustrant l'importance de l'impact des émissions primaires de combustion sur les niveaux élevés de  $PM_{10}$  lors des épisodes étudiés ici.

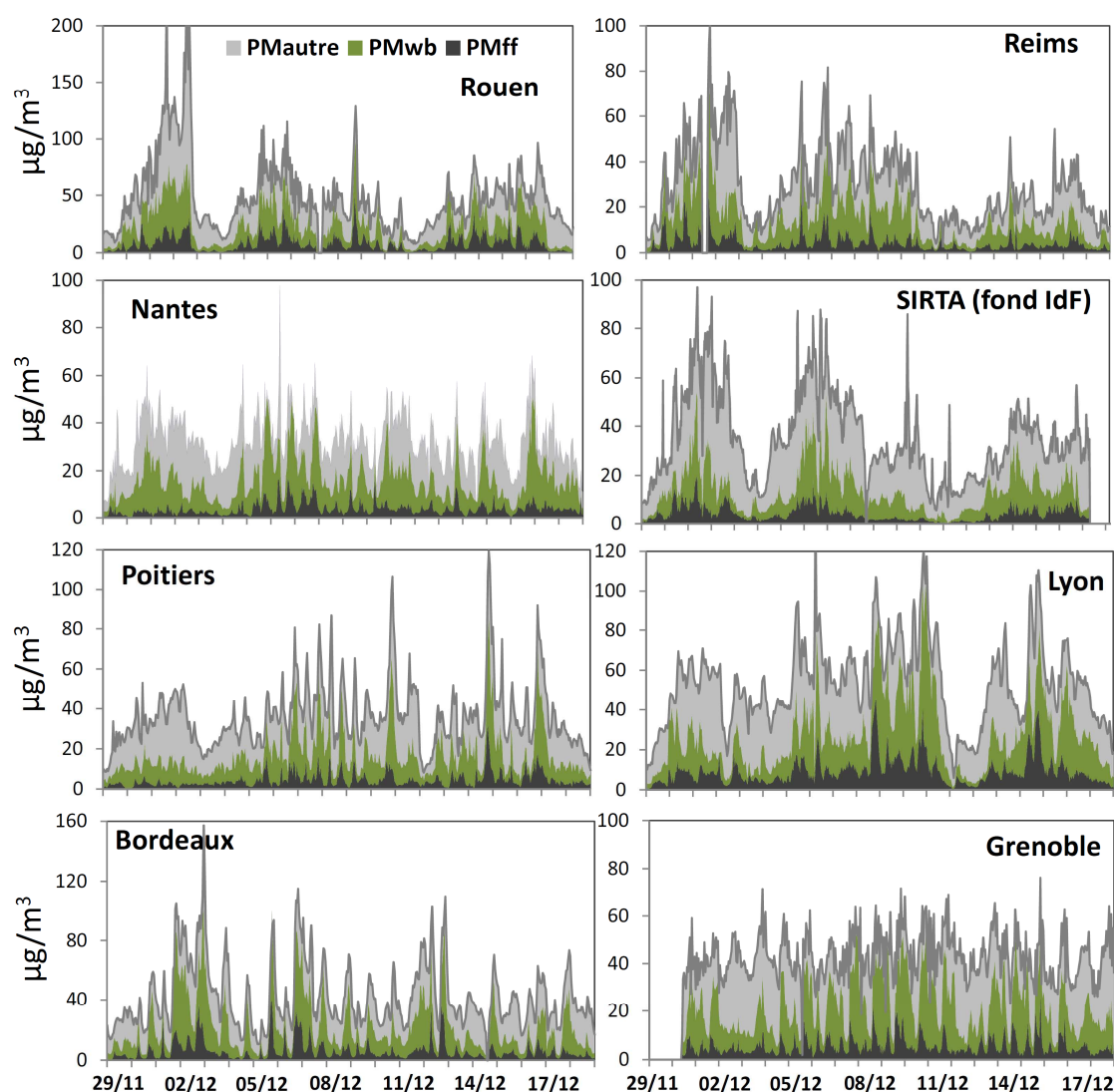


Figure 10 : suivi temporel des concentrations  $PM_{10}$  et estimations des contributions des fractions issues des émissions primaires liées à la combustion d'hydrocarbures ( $PM_{ff}$ ) et de biomasse ( $PM_{wb}$ ) sur différents sites de fond (péri-urbain) entre le 29/11 et le 18/12. (Courbes empilées).

Selon les sites, les combustions d'hydrocarbures et de biomasse représentent entre 55% et 75% des  $PM_{10}$  en moyenne pour l'ensemble des trois premières semaines du mois de décembre, avec une prépondérance des émissions liées à la combustion de biomasse (entre 30% et 55% des  $PM_{10}$  selon les sites étudiés). Le maximum de contribution de  $PM_{wb}$  est obtenu pour Bordeaux, avec des concentrations maximales pouvant dépasser les 50  $\mu g/m^3$  en moyenne horaire. L'ensemble de ces résultats est en bon accord avec ceux obtenus précédemment dans le cadre du programme CARA.<sup>11</sup>

<sup>11</sup> e.g., apport LCSQA 2013 : <http://www.lcsqa.org/rapport/2013/ineris/synthese-travaux-2013-programme-cara>

### 3.2 Nitrate d'ammonium

Les estimations de  $PM_{ff}$  ne tiennent pas compte de l'influence de l'échappement automobile sur la formation d'aérosols secondaires à partir des émissions de précurseurs gazeux. En particulier, les émissions de  $NO_x$ , issues environ à 60% de cette source au niveau national, sont pour partie responsables de la formation de nitrate d'ammonium, dont une contribution relativement importante est observée sur la moitié nord et la façade est de la France (jusqu'en zone Rhône-Alpes, cf. Figures 3 à 7). Comme décrit dans cette section, l'analyse des isotopes stables de l'azote au sein de l'ammonium prélevé sur filtres suggère également une influence des processus de combustion en tant que sources d'ammoniac pour ces stations au cours des épisodes de décembre 2016.

La présence de nitrate d'ammonium dans les PM est à mettre en relation avec des conditions météorologiques favorisant les processus de transformations photochimiques, permettant notamment l'oxydation des  $NO_x$  en radicaux nitrate. Ces derniers se combinent ensuite avec l'ammoniac ( $NH_3$ ) pour donner du nitrate d'ammonium ( $HNO_3 + NH_3 \rightarrow NH_4NO_3$ ). L'azote composant l'ammonium est ainsi celui de l'ammoniac. D'après les inventaires nationaux, les sources d'ammoniac sont très majoritairement liées aux activités agricoles (97%, CITEPA 2016) mais il est également émis par le transport routier ou des sources industrielles. A l'échelle locale et en fonction des périodes de l'année ces proportions peuvent varier sans changer cette hiérarchie.

De récents résultats du programme INACS (ADEME CORTEA 2011-2016) suggèrent qu'en dehors des épisodes de pollution printaniers, l'azote de l'ammonium particulaire pourrait provenir d'ammoniac émis par les sources de combustion dans des proportions plus importantes que prévues au regard de ces inventaires annuels nationaux d'émission.

Pour vérifier l'importance de ce phénomène au cours des épisodes de décembre 2016, l'analyse des isotopes stables de l'azote au sein de l'ammonium a pu être réalisée par l'IGE (Institut des Géosciences de l'Environnement, CNRS-Université) sur une grande partie des filtres disponibles dans le cadre du programme CARA, ainsi que sur une série de filtres prélevés sur le site de fond urbain de Gennevilliers (agglomération parisienne). La Figure 11 synthétise les résultats de ces analyses, par comparaison à de précédents résultats obtenus pour un épisode de pollution printanier (avril-mai 2013).

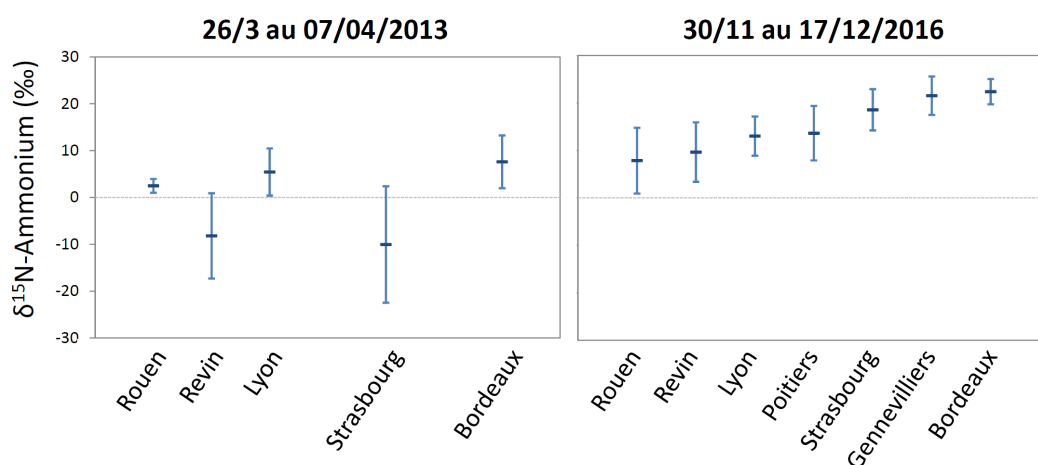


Figure 11 : composition isotopique en  $\delta^{15}N$  de l'ammonium (prélevé sur filtres) pour différents sites lors d'épisodes printaniers de fin avril - début mai 2013 et lors des épisodes de décembre 2016.

Ainsi, alors que les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  étaient proches de 0 ou clairement négatives lors de l'épisode printanier de 2013, elles sont largement positives dans le cas des épisodes décembre 2016. Des valeurs comparables ont été obtenues lors des épisodes de décembre 2013 (e.g., environ 10‰ à Lyon, 15‰ à Rouen et 25‰ à Strasbourg).

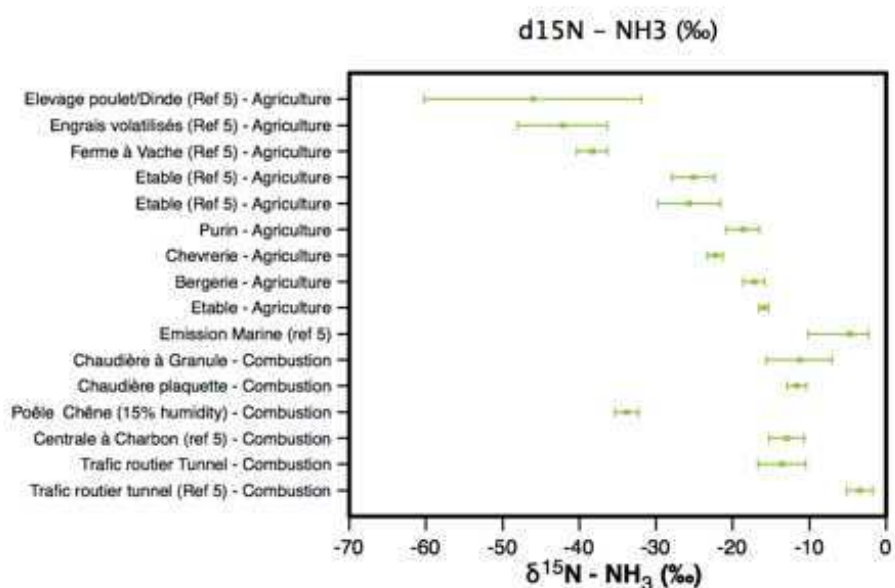


Figure 12 : composition isotopique en  $\delta^{15}\text{N}$  de l'ammoniac pour différentes sources d'émission.  
 NB : dans l'air ambiant, le passage de  $\text{NH}_3$  (gazeux) en phase particulaire (ammonium) induit une augmentation du  $\delta^{15}\text{N}$  de l'ordre de +30‰ (Source : programme INACS et INACS-2)

Compte-tenu des valeurs mesurées à l'émission de certaines sources lors du projet INACS (cf. Figure 12), ces résultats suggèrent que l'azote de l'ammonium serait ici majoritairement issu de processus de combustion. Au regard des inventaires d'émission locaux disponibles et des sources caractérisées, il semble raisonnable de penser que le transport routier puisse jouer un rôle plus important que la combustion de biomasse dans ce phénomène.

## 4. CONCLUSIONS

---

Les résultats obtenus par les analyses chimiques des filtres réalisées en laboratoire en janvier 2017 confirment ceux obtenus en temps quasi-réels pendant les épisodes de début décembre 2016 à l'aide des instruments automatiques (AE33 et ACSM).

Les épisodes de pollution particulaire ayant touché une grande partie du territoire national au cours des trois premières semaines du mois de décembre 2016 étaient caractérisés par une forte augmentation des concentrations d'aérosols carbonés, et en particulier de la matière organique.

Ces épisodes sont à relier en premier lieu aux conditions météorologiques favorisant l'accumulation des émissions primaires anthropiques. Malgré le caractère global du régime anticyclonique, des spécificités locales d'émission peuvent expliquer les fortes variations observées d'une région à une autre. Selon les sites, les combustions d'hydrocarbures et de biomasse représentent entre 55% et 75% des  $PM_{10}$  en moyenne avec une prépondérance des émissions liées à la combustion de biomasse (entre 30% et 55% des  $PM_{10}$  selon les sites étudiés).

Outre les fortes teneurs en particules carbonées liées aux émissions de combustion, on note une contribution relative non négligeable du nitrate d'ammonium, formé via des mécanismes photochimiques. Elle est observée sur la plupart des sites étudiés, en particulier sur ceux présentant les plus faibles niveaux de  $PM_{10}$ . Les résultats des mesures d'isotopes stables de l'azote au sein de l'ammonium prélevé sur filtres suggèrent que les mêmes sources de combustion jouent ici également un rôle prépondérant dans la formation de ces particules inorganiques secondaires. Encore à l'état de recherche, ces résultats sur cette contribution saisonnière ne remettent pas en cause la forte proportion du secteur agricole dans les émissions d'ammoniac estimées en moyenne annuelle dans les inventaires nationaux.

Enfin, il est probable que l'accumulation et la transformation photochimique de composés organiques volatils émis par les sources de combustion aient également favorisé la formation d'aérosols organiques secondaires, dans des proportions comparables à celles ayant conduit à la présence de nitrate d'ammonium (cf. Annexe 1).

## ANNEXE 1



## Note technique

*Travaux financés par le ministère chargé de l'environnement*

### ÉPISODES DE POLLUTION PARTICULAIRE DE DÉBUT DÉCEMBRE 2016

Éléments de compréhension à partir des mesures automatiques (période du 30 novembre au 12 décembre 2016), 13 Décembre 2016

Olivier Favez - Tanguy Amodeo (INERIS)

#### SYNTHÈSE

Depuis le 30 novembre, d'importants épisodes de pollution particulaire impactent la métropole, en particulier le bassin parisien et la zone Rhône-Alpes. La présente note synthétise un ensemble de résultats disponibles au 13 décembre à l'aide d'analyseurs automatiques de la composition chimique des PM implantés sur différentes stations du dispositif national. Cette note résulte notamment du travail et de la réactivité des équipes d'Atmo Nouvelle-Aquitaine, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, d'Atmo Grand-Est, d'Atmo Franche-Comté, d'Air Pays de la Loire, d'Air Normand, d'Atmo Picardie et du SIRTAL/LSCE (site de recherche de l'Institut Pierre Simon Laplace, sur le plateau de Saclay, Essonne). L'ensemble des résultats obtenus convergent vers une forte influence des émissions primaires de combustion (chauffage résidentiel et transport routier), notamment en début d'épisode (30/11-02/12) et depuis le 5 décembre. Une contribution non négligeable de nitrate d'ammonium, sous l'effet de mécanismes photochimiques, est également observée sur tous les sites étudiés, hormis l'agglomération bordelaise qui reste très majoritairement impactée par la combustion de biomasse.

Le caractère local de ces épisodes de pollution entraîne de fortes variations d'une station à l'autre, avec par exemple des maxima d'émissions de combustion à Metz entre le 8 et le 11 décembre, alors que des niveaux plus faibles par rapport aux jours précédents sont observés au même moment sur le site de Saclay (SIRTAL). Un net accroissement de l'influence de l'ensemble des émissions de combustion est également observé entre le 5 et le 11 décembre sur la façade Atlantique et en zones Franche-Comté et Rhône-Alpes.

Les résultats présentés ici sont issus de mesures partiellement validées et seront complétés d'une analyse approfondie à l'aide de données obtenues à partir de mesures sur filtres. À noter enfin que ces résultats sont représentatifs de stations de fond (péri-)urbain. Par conséquent, ils ne correspondent pas aux endroits où sont enregistrés les maxima de concentrations, en particulier sur les stations de proximité automobile.

DÉCEMBRE 2016 - Ref. INERIS-DRC-16-159637-11973A

## 1. INTRODUCTION

De fortes concentrations de  $PM_{10}$ , pouvant entraîner des dépassements de la valeur limite journalière, sont régulièrement observées entre mi-novembre et mi-avril du fait de la conjonction entre les activités anthropiques (chauffage, transport, agriculture) et l'occurrence de conditions météorologiques favorables à l'accumulation et/ou à la transformation des polluants atmosphériques. Les événements de début d'hiver se développent lors de situations météorologiques stables et froides (régime anticyclonique), propices à une forte utilisation du chauffage domestique et à l'accumulation de l'ensemble des émissions primaires (dont le transport routier), entraînant une forte teneur en matière carbonée au sein des particules.<sup>1,2</sup>

Le dispositif national de surveillance de la qualité de l'air (MEEM, LCSQA et AASQA) s'est doté depuis 2008 d'un programme d'amélioration des connaissances de la composition chimique et des sources de particules (« programme CARA »). Reposant initialement sur l'analyse différée de prélèvements sur filtres, ce programme s'enrichit aujourd'hui de mesures en temps réel au sein des AASQA et au SIRTa.<sup>1</sup>

Comme illustré par la Figure 1, depuis le 30 novembre, les régions de la moitié nord de la France, Nouvelle Aquitaine, Auvergne-Rhône-Alpes, et, dans une moindre mesure, l'Occitanie, connaissent des niveaux de  $PM_{10}$  avoisinant ou dépassant les seuils d'information ( $50\mu g/m^3$ ) et d'alerte ( $80\mu g/m^3$ ).

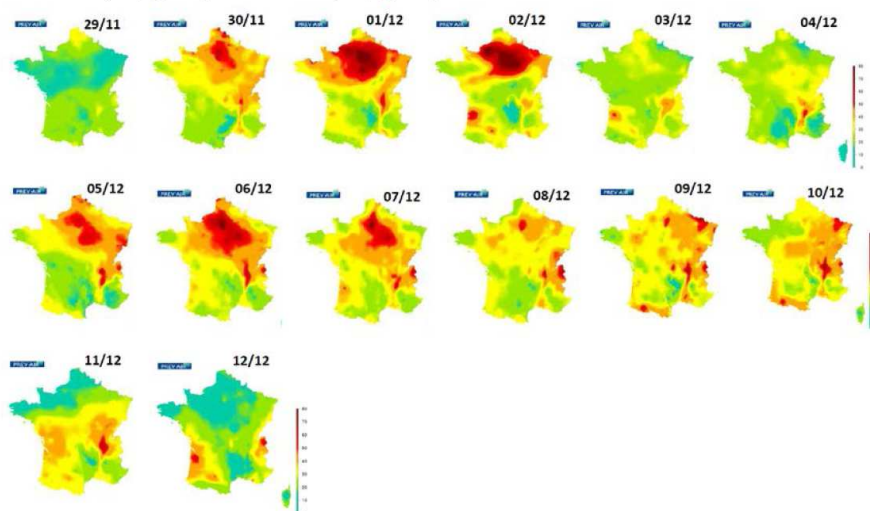


Figure 1: Cartes PREV'AIR analysées des moyennes journalières  $PM_{10}$  depuis le 29/11/16 (simulations Chimère dans lesquelles les données d'observation sont assimilées)

La présente note permet de réaliser un point d'étape sur ces épisodes de pollution à partir des mesures automatiques de composition chimique disponibles au 13 décembre (sur la base nationale de données Geod'Air ou transmises directement par les opérateurs de stations).

<sup>1</sup> Note LCSQA 2014: <http://www.lcsqa.org/rapport/2014/ineris/description-programme-cara-dispositif-national-surveillance-qualite-air>.

<sup>2</sup> Note LCSQA 2015: <http://www.lcsqa.org/rapport/2015/ineris/elements-comprehension-episodes-pollution-particulaire-fin-decembre-2014-debut-j>



## 2. MESURES EN TEMPS RÉEL DES ESPÈCES CHIMIQUES MAJEURES DES PARTICULES FINES

### **PM<sub>10</sub>, granulométrie, origines, et compositions chimiques**

Les PM<sub>10</sub> représentent la concentration massique des particules atmosphériques de diamètre aérodynamique inférieur à 10µm. Elles sont essentiellement constituées de deux modes : le mode fin et le mode grossier, dont la frontière granulométrique se situe vers 2.5µm. Ces deux modes ont des origines et donc des compositions chimiques différentes<sup>3,4</sup>.

Le mode fin est principalement constitué des émissions anthropiques ainsi que d'aérosols secondaires provenant de l'oxydation et/ou de la condensation de précurseurs gazeux (COVs, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, ...) en phase particulaire. Il contient très majoritairement :

- du carbone suie (ou *Black Carbon*), issu de la combustion incomplète d'énergies fossiles ou de biomasse, et constitué quasi-exclusivement d'atomes de carbone,
- de la matière organique (contenant des atomes de carbone, mais également de l'oxygène, hydrogène, azote, ...) primaire, i.e., émis directement dans l'atmosphère (en particulier par les mêmes processus de combustion que pour le carbone suie) ou secondaire, i.e. provenant de l'oxydation de COVs émis par les activités humaines et par la végétation,
- et des espèces inorganiques secondaires (en particulier le nitrate d'ammonium et le sulfate d'ammonium).

Le mode grossier est principalement constitué de particules d'origines naturelles : sels de mer, poussières terrigènes, débris végétaux, etc .... Il contient également des espèces secondaires (dont nitrate, sulfate et composés organiques, provenant de réactions acido-basiques entre espèces gazeuses et particules minérales).

En milieu urbain, le mode fin constitue la part majeure (50-90%) des PM<sub>10</sub>.

### **Dispositif de mesure en temps réel**

Les instruments de mesure mis en œuvre au cours de ces dernières années au sein du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air permettent le suivi des espèces chimiques majeures de ce mode fin (et donc des principales influences anthropiques). Ils sont de 2 types :

- L'Aethalomètre multi-longueurs d'onde **AE33**, permettant la surveillance du *Black Carbon* (BC) en tant qu'indicateur des émissions primaires de combustion.
- L'*Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM)*, basé sur la spectrométrie de masse et la quantification des espèces non-réfractaires (i.e., volatile à 600°C) au sein des PM<sub>1</sub>. Ces espèces chimiques correspondent principalement au nitrate, au sulfate, à l'ammonium et à la matière organique.

Ces mesures sont réalisées par les AASQA volontaires sur des sites de fond urbain ou péri-urbain du dispositif national ainsi qu'au SIRTa. Cette dernière station située sur le plateau Saclay (78) fait partie de l'infrastructure européenne de recherche ACTRIS. Les mesures de composition chimique des particules y sont réalisées en continu depuis 2011 en collaboration entre le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) et l'INERIS. Ce site est représentatif du fond régional urbanisé en Ile de France, mais ne reflète pas totalement les niveaux de concentrations (en particulier des émissions primaires) pouvant être atteints au sein de l'agglomération parisienne.

<sup>3</sup> Rapport LCSQA 2011: <http://www.lcsqa.org/rapport/2011/ineris-air-normand-lsce/note-suivi-composition-chimique-journaliere-pm25-pm10-station-p>

<sup>4</sup> Note LCSQA 2011 : <http://www.lcsqa.org/rapport/2011/ineris/note-methodologies-determination-composition-chimique-particules-submicroniques->

Comme illustré par la Figure 2 pour une sélection de stations de fond (péri-)urbain du dispositif national, le ratio  $PM_{2.5}/PM_{10}$  varie significativement selon le jour et la localisation des mesures. Les contributions parfois importantes de particules grossières (jusqu'à 35% des  $PM_{10}$  en moyenne journalière et en ne considérant que les journées présentant des niveaux de  $PM_{10}$  supérieurs à  $40\mu g/m^3$ ) peuvent s'expliquer par l'accumulation de particules naturelles (sels de mer et ou poussières terrigènes) mais également par l'accumulation de poussières émises par le transport routier via l'usure de la chaussée des pneus, freins, etc ... ainsi que l'accumulation de particules émises par les chantiers de bâtiments et de travaux publics. Néanmoins, les  $PM_{2.5}$  représentent partout plus de 70% des  $PM_{10}$  en moyenne pour cet épisode, excluant une influence majeure à l'échelle nationale d'intrusions de poussières désertiques ou volcaniques.

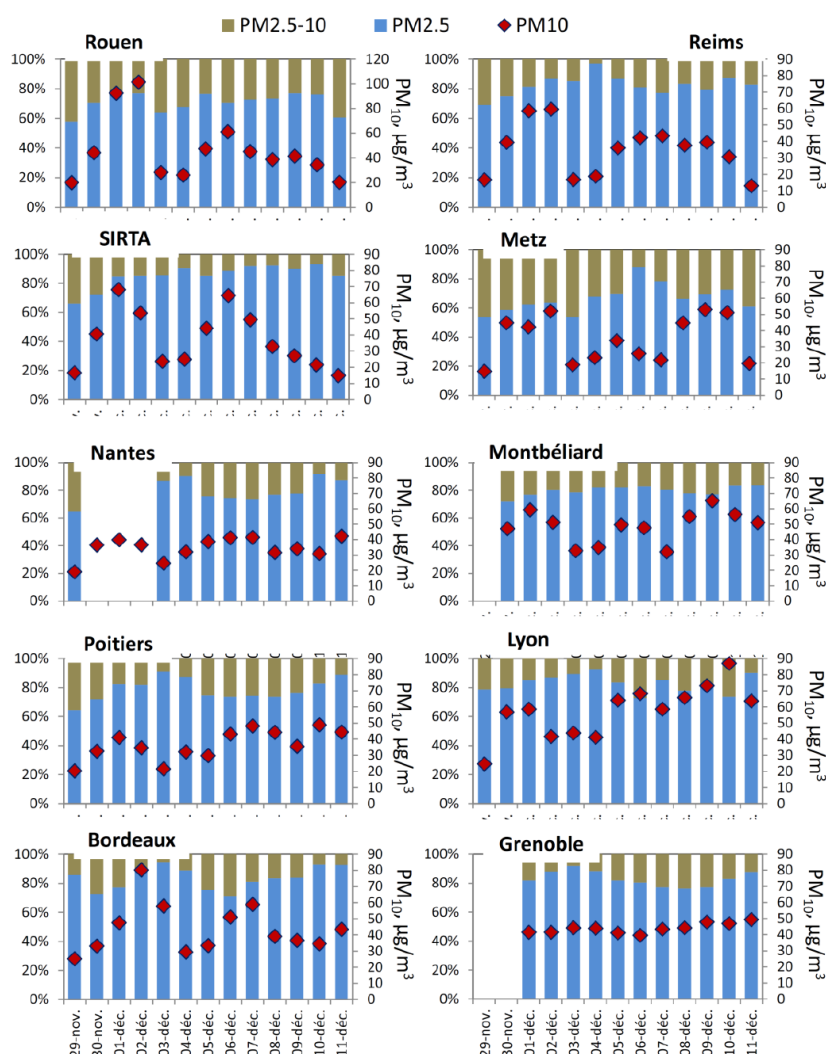


Figure 2 : Moyennes journalières des  $PM_{10}$  et de contributions de leurs fractions fines ( $PM_{2.5}$ ) et grossières ( $PM_{2.5-10}$ ) sur une sélection de stations de fond (péri-)urbain du dispositif national

La Figure 3 présente les données ACSM et AE33 disponibles au 13 décembre 2016 sur 6 sites de fond (péri-)urbain : Creil, Saclay (SIRTA), Metz, Poitiers, Lyon, et Bordeaux.

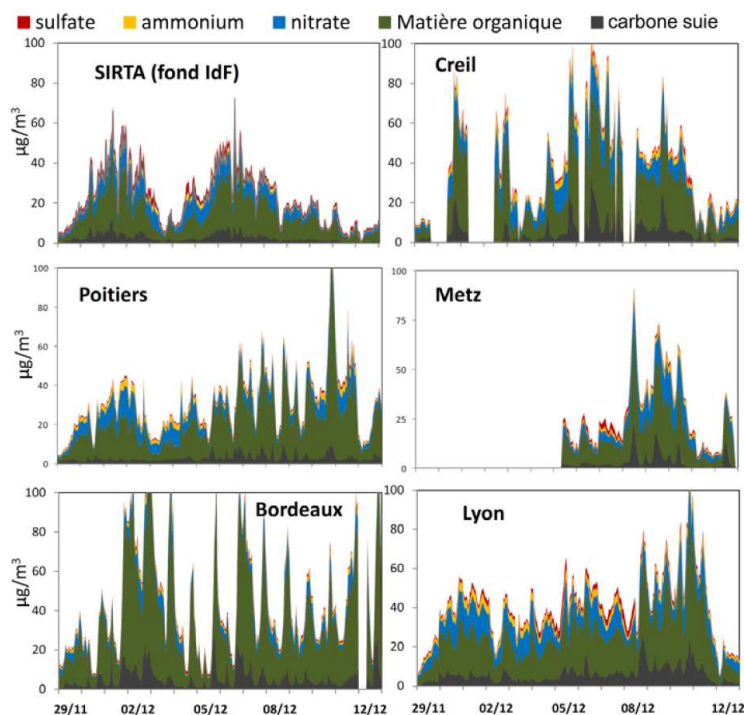


Figure 3: variations temporelles des espèces chimiques majeures des particules fines sur 6 sites de fond (péri-)urbain. Mesures ACSM (en PM1) et AE33 (en PM2.5) (courbes empilées).

On note tout d'abord des fortes différences de niveaux de concentrations et de variations temporelles entre des stations géographiquement proches (en particulier Creil - SIRTA et Bordeaux – Poitiers). Cette observation reflète le caractère très inhomogène de la répartition spatiale des niveaux de concentrations à l'échelle nationale, ainsi que des variations temporelles relativement importantes pour une région donnée (Figure 1). Ces résultats confirment **la forte influence des émissions locales sur les concentrations mesurées au niveau de chaque station.**

Parmi les différentes espèces chimiques mesurées, **la prédominance de la matière organique** est frappante. Compte tenu également des résultats détaillés des mesures AE33 (présentés ci-après), ces observations suggèrent une **forte influence des émissions primaires et donc des activités humaines.**

A Bordeaux, cette fraction organique est ultra-majoritaire depuis le début de l'épisode, avec des concentrations dépassant les 100 µg/m<sup>3</sup> en moyenne horaire pour la somme carbone suie + matière organique, en particulier le 2 décembre. Ces résultats sont à relier en premier lieu au rôle majeur joué par le chauffage résidentiel au bois sur la qualité de l'air au sein de cette agglomération.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Note LCSQA 2015 : <http://www.lcsqa.org/rapport/2015/ineris/impact-combustion-biomasse-concentrations-pm10-programme-cara-hiver-2014-2015>

Sur les 5 autres sites étudiés, on constate également **une influence non négligeable des aérosols inorganiques secondaires, et en particulier du nitrate (d'ammonium)**. Cette observation est à mettre en relation avec des conditions météorologiques favorisant les processus de transformations photochimiques, permettant notamment l'oxydation des NO<sub>x</sub> en radicaux nitrate. Ces derniers se combinent ensuite avec l'ammoniac, majoritairement issu des activités agricoles à l'échelle nationale mais dont les différentes sources d'émission à cette période de l'année restent à investiguer. Il est à noter que de récents résultats du programme INACS (ADEME CORTEA) suggèrent que les processus de combustion (dont transport routier) pourraient jouer un rôle non négligeable dans la disponibilité de l'ammoniac lors des épisodes de début d'hiver. Néanmoins, la quasi-absence de nitrate d'ammonium à Bordeaux, alors que l'influence du transport routier n'y est pas négligeable (cf. ci-dessous), semble ici remettre en cause cette hypothèse. L'étude des signatures isotopiques de l'azote à partir des prélèvements sur filtres devrait permettre de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu pour la formation du nitrate d'ammonium dans la moitié Nord de la France et en zone Rhône-Alpes au cours de cet épisode.

### 3. INFLUENCE DES ÉMISSIONS PRIMAIRES DE COMBUSTION

#### Black Carbon, biomasse et hydrocarbures

L'AE33 permet de distinguer deux fractions du Black carbon que l'on peut relier à la combustion d'hydrocarbures (BC<sub>ff</sub>) et à la combustion de biomasse (BC<sub>wb</sub>). Ces fractions peuvent ensuite être utilisées pour estimer (à l'aide d'un facteur multiplicatif et avec une précision de l'ordre de ± 50%) les concentrations de PM<sub>10</sub> attribuables aux deux familles de sources (notées respectivement PM<sub>ff</sub> et PM<sub>wb</sub>), tel que :

$$PM_{ff} = a \times BC_{ff}$$

$$\text{Et } PM_{wb} = b \times BC_{wb}$$

où PM<sub>ff</sub> et PM<sub>wb</sub> représentent la concentration massique de particules PM<sub>10</sub> issues respectivement de la combustion d'hydrocarbures et de la combustion de biomasse. Outre le BC, PM<sub>ff</sub> et PM<sub>wb</sub> sont constituées principalement d'aérosols organiques primaires. Les coefficients *a* et *b* sont issus (i) de la littérature scientifique pour la contribution fossile, et (ii) d'études LCSQA précédentes pour la contribution biomasse.<sup>6</sup>

Les émissions primaires à l'échappement automobile sont comprises au sein de la fraction liée à la combustion d'hydrocarbures (PM<sub>ff</sub>), mais ces estimations n'intègrent pas les émissions hors-échappement, i.e., particules issues de l'abrasion de la chaussée, des pneus, des freins, ... . Ces estimations ne tiennent non plus compte de l'influence de l'échappement automobile sur la formation d'aérosols secondaires à partir des émissions de précurseurs gazeux (i.e., NO<sub>x</sub>, issus à 60% du transport au niveau national), dont l'influence sur les PM<sub>10</sub> est impossible à évaluer à partir de mesures en temps réel.

Comme présenté par la Figure 3, l'analyse des données AE33 indique un **impact majoritaire des émissions primaires de combustion sur les niveaux élevés de PM<sub>10</sub> enregistrés entre les 30 novembre et 2 décembre, puis à partir du 5 décembre**. Selon les sites étudiés, les combustions d'hydrocarbures et de biomasse représente alors entre 40% et 85% des PM<sub>10</sub>, avec **une prépondérance des émissions liées à la combustion de biomasse (PM<sub>wb</sub>)**.

<sup>6</sup> Rapport LCSQA 2015 : <http://www.lcsqa.org/rapport/2015/ineris/programme-cara-bilan-travaux-2014-2015>



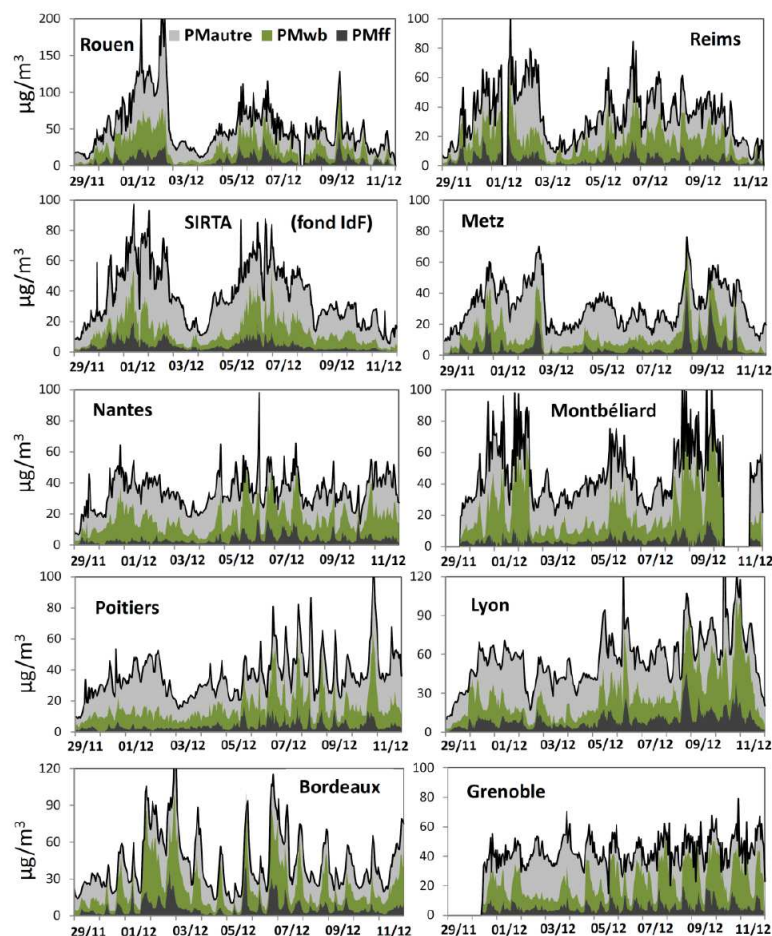


Figure 4 : suivi temporel des concentrations  $PM_{10}$  et estimations des fractions issues des émissions primaires liées à la combustion d'hydrocarbures ( $PM_H$ ) et de biomasse ( $PM_{wb}$ ) sur différents sites de fond (péri-jurbain) entre le 29/11 et le 11/12. (courbes empilées).

Le fort impact des émissions locales sur les niveaux de  $PM_{10}$  est confirmé par les profils « en dents de scie », reflétant les périodes maximales d'émissions (pics de circulation automobile ou chauffage nocturne). Cette prédominance des influences locales entraîne de fortes variations d'un site à l'autre, avec par exemple des maxima d'émissions de combustion à Metz entre le 8 et le 10 décembre, alors que des niveaux plus faibles que les jours précédents sont mesurés au même moment sur le site de Saclay (Sirta). De même, un net accroissement de l'influence de l'ensemble des émissions de combustion est observable à partir du 5 décembre à Nantes, Poitiers, Bordeaux, Montbéliard, Lyon et Grenoble (i.e., sur la façade Atlantique et en zones Franche-Comté et Rhône-Alpes), alors qu'on n'observe pas d'augmentation significative de la contribution de ces émissions, par rapport à la période 30 novembre - 2 décembre, dans le quart Nord-Ouest (Rouen et Saclay). Une analyse approfondie, au regard notamment des conditions météorologiques locales, reste à réaliser pour permettre de bien expliquer ces observations.

#### 4. ESTIMATION DES PRINCIPAUX CONSTITUANTS DES $PM_{10}$

##### Règles appliquées pour l'estimation

L'objectif ici est d'estimer la composition des  $PM_{10}$  à partir des mesures ACSM et AE33. On évalue d'abord  $PM_{ff}$  et  $PM_{wb}$  à partir des résultats AE33, comme indiqué précédemment. On reconstruit ensuite les concentrations de nitrate d'ammonium et de sulfate d'ammonium à partir des mesures ACSM de nitrate, de sulfate et d'ammonium et en respectant la stœchiométrie moléculaire. Puis, en considérant que la majeure partie du sulfate d'ammonium, du nitrate d'ammonium et des aérosols organiques secondaires est essentiellement présente au sein de la fraction  $PM_{2.5}$ , il est possible d'extrapoler les données ACSM (en  $PM_1$ ) pour déduire une concentration de ces dernières espèces dans la fraction  $PM_{10}$ . Pour ce faire, on multiplie les concentrations obtenues par l'ACSM par le ratio  $PM_{2.5}/PM_1$ . Les concentrations de nitrate d'ammonium et de sulfate d'ammonium dans la fraction  $PM_{10}$  sont alors considérées comme égales aux concentrations mesurées par l'ACSM corrigées de ce ratio. Les aérosols organiques secondaires (AOS), quant-à eux, peuvent être estimés par différence entre la matière organique totale issue des données ACSM corrigée par ce même ratio et l'estimation des contributions organiques primaires à partir des mesures AE33.

Les mesures de concentration totale de  $PM_1$  ne sont pour l'instant réalisées qu'à Poitiers et sur le site de Saclay (SIRTA). Ainsi, seuls les résultats obtenus pour ces deux sites sont présentés sur les Figures 5 et 6.

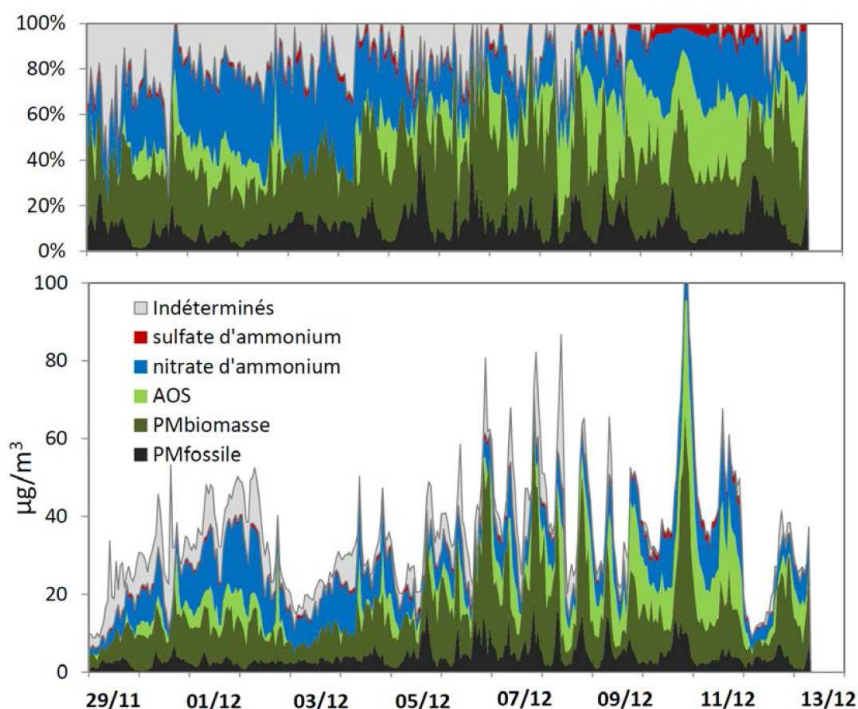


Figure 5 : suivi temporel des concentrations  $PM_{10}$  et résultats issus de l'estimation des concentrations de  $PM_{ff}$  ( $PM_{fossile}$ ),  $PM_{wb}$  ( $PM_{biomasse}$ ), AOS, nitrate d'ammonium et sulfate d'ammonium à Poitiers (courbes empilées)

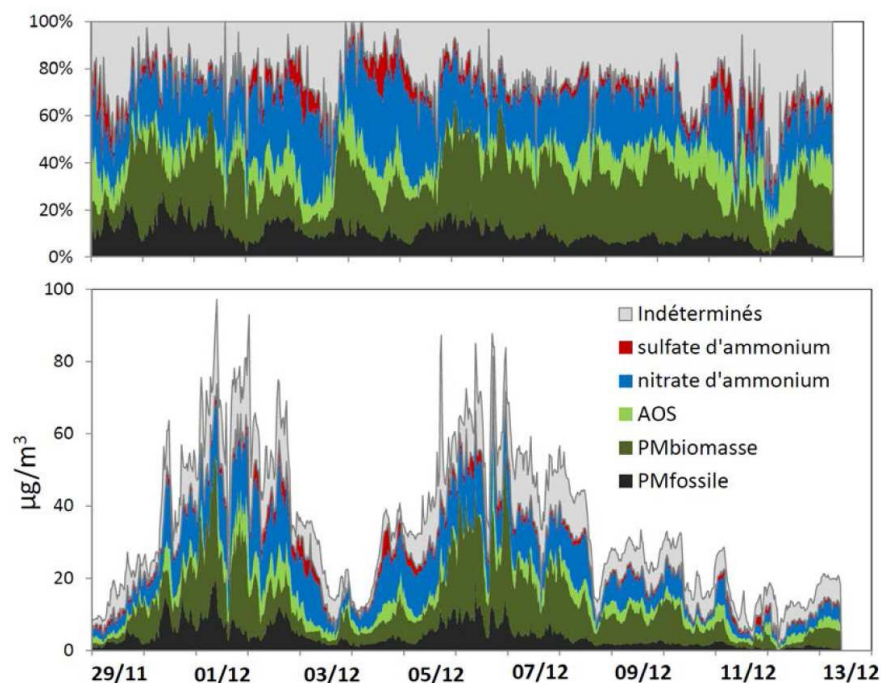


Figure 6 : suivi temporel des concentrations  $PM_{10}$  et résultats issus de l'estimation des concentrations de  $PM_{\#}$  ( $PM_{fossile}$ ,  $PM_{wb}$  ( $PM_{biomasse}$ ), AOS, nitrate d'ammonium et sulfate d'ammonium au SIRTa (courbes empilées)

Cette analyse plus élaborée des données permet de compléter les interprétations précédentes, en mettant en évidence une contribution non négligeable d'aérosols organiques secondaires, ainsi qu'une part importante d'espèces chimiques indéterminées. La fraction indéterminée appartient à la fraction grossière des particules, dont les sels de mer et les poussières terrigènes, qui ne peuvent pas être quantifiées via les instruments de mesure automatique utilisés aujourd'hui au sein du dispositif CARA.

## 5. ET ENSUITE ...

Les éléments présentés au sein de cette note sont issus d'un dispositif de mesure opérationnel en temps quasi-réel unique en Europe. La mise en œuvre de ce dispositif résulte de collaborations étroites entre les AASQA volontaires, le LCSQA et des équipes de recherche universitaires, avec le soutien du MEEM. Ce dispositif est en cours de consolidation, notamment via l'équipement en ACSM et/ou AE33 de nouvelles stations et une veille technologique sur de nouveaux analyseurs automatiques pour l'identification d'autres espèces chimiques et traceurs de sources (en particulier les éléments métalliques).

Une analyse plus approfondie de cet épisode de pollution est en cours. Elle nécessite notamment l'obtention des résultats de caractérisation chimique différée à l'aide des filtres  $PM_{10}$  prélevés au sein du dispositif CARA.



## ANNEXE 2

| N° PSE  | Site            | DATE     | PMwb<br>Levoglucozan<br>µg/m3 | PMwb<br>AE33<br>µg/m3 |
|---------|-----------------|----------|-------------------------------|-----------------------|
| 16ATS80 | ROUEN PQV       | 29/11/16 | 3,8                           | 5,4                   |
| 16ATS81 | ROUEN PQV       | 30/11/16 | 18,4                          | 19,3                  |
| 16ATS82 | ROUEN PQV       | 01/12/16 | 36,0                          | 36,7                  |
| 16ATS83 | ROUEN PQV       | 02/12/16 | 39,0                          | 37,1                  |
| 16ATS84 | ROUEN PQV       | 03/12/16 | 2,8                           | 3,9                   |
| 16ATS85 | ROUEN PQV       | 04/12/16 | 8,4                           | 9,1                   |
| 16ATS86 | ROUEN PQV       | 05/12/16 | 17,9                          | 18,7                  |
| 16ATS87 | ROUEN PQV       | 06/12/16 | 30,0                          | 28,5                  |
| 16ATS88 | ROUEN PQV       | 07/12/16 | 18,0                          | 17,7                  |
| 16ATS90 | ROUEN PQV       | 08/12/16 | 14,7                          | 13,9                  |
| 16ATS91 | ROUEN PQV       | 09/12/16 | 18,7                          | 20,0                  |
| 16ATS92 | ROUEN PQV       | 10/12/16 | 16,8                          | 14,1                  |
| 16ATS93 | ROUEN PQV       | 11/12/16 | 4,6                           | 4,3                   |
| 16ATS94 | ROUEN PQV       | 12/12/16 | 5,0                           | 3,5                   |
| 16ATS95 | ROUEN PQV       | 13/12/16 | 12,4                          | 13,3                  |
| 16ATS96 | ROUEN PQV       | 14/12/16 | 17,4                          | 17,7                  |
| 16ATS97 | ROUEN PQV       | 15/12/16 | 15,0                          | 17,8                  |
| 16ATS98 | ROUEN PQV       | 16/12/16 | 18,5                          | 21,2                  |
| 16ATS99 | ROUEN PQV       | 17/12/16 | 24,2                          | 24,1                  |
| 16AT600 | ROUEN PQV       | 18/12/16 | 2,6                           | 3,1                   |
| 17AE061 | SIRTA_ACTRIS    | 29/11/16 | 3,7                           | 3,6                   |
| 17AE062 | SIRTA_ACTRIS    | 30/11/16 | 11,7                          | 11,0                  |
| 17AE063 | SIRTA_ACTRIS    | 01/12/16 | 23,7                          | 24,0                  |
| 17AE064 | SIRTA_ACTRIS    | 02/12/16 | 11,6                          | 9,9                   |
| 17AE065 | SIRTA_ACTRIS    | 03/12/16 | 4,4                           | 3,7                   |
| 17AE066 | SIRTA_ACTRIS    | 04/12/16 | 6,4                           | 5,9                   |
| 17AE067 | SIRTA_ACTRIS    | 05/12/16 | 11,6                          | 11,2                  |
| 17AE068 | SIRTA_ACTRIS    | 06/12/16 | 26,3                          | 26,9                  |
| 17AE069 | SIRTA_ACTRIS    | 07/12/16 | 17,5                          | 17,6                  |
| 17AE070 | SIRTA_ACTRIS    | 08/12/16 | 11,0                          | 10,8                  |
| 17AE071 | SIRTA_ACTRIS    | 09/12/16 | 7,9                           | 9,4                   |
| 17AE072 | SIRTA_ACTRIS    | 10/12/16 | 7,4                           | 7,0                   |
| 17AE073 | SIRTA_ACTRIS    | 11/12/16 | 3,9                           | 2,8                   |
| 17AE074 | SIRTA_ACTRIS    | 12/12/16 | 3,2                           | 2,6                   |
| 17AE075 | SIRTA_ACTRIS    | 13/12/16 | 7,9                           | 8,6                   |
| 17AE076 | SIRTA_ACTRIS    | 14/12/16 | 12,8                          | 14,1                  |
| 17AE077 | SIRTA_ACTRIS    | 15/12/16 | 17,5                          | 17,2                  |
| 17AE078 | SIRTA_ACTRIS    | 16/12/16 | 8,3                           | 10,0                  |
| 17AE079 | SIRTA_ACTRIS    | 17/12/16 | 10,7                          | 9,5                   |
| 17AE080 | SIRTA_ACTRIS    | 18/12/16 | 3,3                           | 4,3                   |
| 17AE081 | SIRTA_ACTRIS    | 19/12/16 | 2,8                           | 3,2                   |
| 17AE082 | SIRTA_ACTRIS    | 20/12/16 | 4,9                           | 4,7                   |
| 16AO627 | Nantes - BOUT   | 29/11/16 | 3,9                           | 6,2                   |
| 16AO628 | Nantes - BOUT   | 30/11/16 | 11,5                          | 18,2                  |
| 16AO629 | Nantes - BOUT   | 01/12/16 | 16,1                          | 19,5                  |
| 16AO630 | Nantes - BOUT   | 02/12/16 | 9,4                           | 11,9                  |
| 16AO631 | Nantes - BOUT   | 03/12/16 | 11,0                          | 8,5                   |
| 16AO632 | Nantes - BOUT   | 04/12/16 | 10,2                          | 10,1                  |
| 16AO633 | Nantes - BOUT   | 05/12/16 | 16,3                          | 21,0                  |
| 16AO634 | Nantes - BOUT   | 06/12/16 | 17,0                          | 22,5                  |
| 16AO635 | Nantes - BOUT   | 07/12/16 | 17,7                          | 22,7                  |
| 16AO636 | Nantes - BOUT   | 08/12/16 | 12,6                          | 14,0                  |
| 16AO637 | Nantes - BOUT   | 09/12/16 | 13,7                          | 15,5                  |
| 16AO638 | Nantes - BOUT   | 10/12/16 | 18,9                          | 19,1                  |
| 16AO639 | Nantes - BOUT   | 11/12/16 | 9,6                           | 11,5                  |
| 16AO640 | Nantes - BOUT   | 12/12/16 | 6,7                           | 11,1                  |
| 16AO641 | Nantes - BOUT   | 13/12/16 | 8,8                           | 13,5                  |
| 16AO642 | Nantes - BOUT   | 14/12/16 | 15/12/16                      | 10,6                  |
| 16AO643 | Nantes - BOUT   | 16/12/16 | 9,1                           | 15,8                  |
| 16AO644 | Nantes - BOUT   | 17/12/16 | 17,8                          | 20,3                  |
| 16AO645 | Nantes - BOUT   | 18/12/16 | 11,4                          | 12,0                  |
| 16BB713 | POITIERS        | 29/11/16 | 5,0                           | 7,5                   |
| 16BB712 | POITIERS        | 30/11/16 | 13,5                          | 12,5                  |
| 16BB711 | POITIERS        | 01/12/16 | 15,7                          | 13,2                  |
| 16BB710 | POITIERS        | 02/12/16 | 10,7                          | 10,8                  |
| 16BB709 | POITIERS        | 03/12/16 | 8,1                           | 8,1                   |
| 16BB708 | POITIERS        | 04/12/16 | 14,6                          | 13,3                  |
| 16BB707 | POITIERS        | 05/12/16 | 13,1                          | 13,7                  |
| 16BB706 | POITIERS        | 06/12/16 | 22,7                          | 25,0                  |
| 16BB705 | POITIERS        | 07/12/16 | 23,8                          | 24,9                  |
| 16BB704 | POITIERS        | 08/12/16 | 22,3                          | 22,4                  |
| 16BB703 | POITIERS        | 09/12/16 | 16,1                          | 13,4                  |
| 16BB702 | POITIERS        | 10/12/16 | 29,4                          | 24,1                  |
| 16BB701 | POITIERS        | 11/12/16 | 18,5                          | 15,9                  |
| 16BB700 | POITIERS        | 12/12/16 | 11,0                          | 12,1                  |
| 16BB699 | POITIERS        | 13/12/16 | 16,2                          | 16,4                  |
| 16BB698 | POITIERS        | 14/12/16 | 25,3                          | 24,4                  |
| 16BB697 | POITIERS        | 15/12/16 | 18,5                          | 16,9                  |
| 16BB696 | POITIERS        | 16/12/16 | 15,8                          | 17,7                  |
| 16BB695 | POITIERS        | 17/12/16 | 19,9                          | 17,1                  |
| 16BB694 | POITIERS        | 18/12/16 | 7,7                           | 8,7                   |
| 16AO149 | LYON centre     | 29/11/16 | 5,1                           | 6,1                   |
| 16AO150 | LYON centre     | 30/11/16 | 21,2                          | 20,0                  |
| 16AO151 | LYON centre     | 01/12/16 | 18,8                          | 13,5                  |
| 16AO152 | LYON centre     | 02/12/16 | 11,3                          | 8,5                   |
| 16AO153 | LYON centre     | 03/12/16 | 12,8                          | 7,1                   |
| 16AO154 | LYON centre     | 04/12/16 | 15,1                          | 9,1                   |
| 16AO155 | LYON centre     | 05/12/16 | 21,3                          | 18,9                  |
| 16AO156 | LYON centre     | 06/12/16 | 26,2                          | 24,9                  |
| 16AO157 | LYON centre     | 07/12/16 | 15,1                          | 14,2                  |
| 16AO158 | LYON centre     | 08/12/16 | 20,8                          | 23,2                  |
| 16AO159 | LYON centre     | 09/12/16 | 34,9                          | 36,1                  |
| 16AO160 | LYON centre     | 10/12/16 | 37,7                          | 39,8                  |
| 16AO161 | LYON centre     | 11/12/16 | 35,7                          | 31,1                  |
| 16AO162 | LYON centre     | 12/12/16 | 4,5                           | 3,1                   |
| 16AZ900 | LYON centre     | 13/12/16 | 9,2                           | 7,9                   |
| 16AZ901 | LYON centre     | 14/12/16 | 22,8                          | 13,6                  |
| 16AZ902 | LYON centre     | 15/12/16 | 27,2                          | 27,1                  |
| 16AZ903 | LYON centre     | 16/12/16 | 25,6                          | 25,4                  |
| 16AZ904 | LYON centre     | 17/12/16 | 26,6                          | 25,4                  |
| 16AZ905 | LYON centre     | 18/12/16 | 14,9                          | 12,1                  |
| 16AU176 | TALENCE (Airaq) | 29/11/16 | 11,1                          | 10,9                  |
| 16AU178 | TALENCE (Airaq) | 30/11/16 | 18,2                          | 17,7                  |
| 16AU179 | TALENCE (Airaq) | 01/12/16 | 26,3                          | 30,7                  |
| 16AU180 | TALENCE (Airaq) | 02/12/16 | 52,4                          | 52,4                  |
| 16AU181 | TALENCE (Airaq) | 03/12/16 | 43,1                          | 37,3                  |
| 16AU182 | TALENCE (Airaq) | 04/12/16 | 15,4                          | 15,8                  |
| 16AU183 | TALENCE (Airaq) | 05/12/16 | 14,9                          | 20,8                  |
| 16AU184 | TALENCE (Airaq) | 06/12/16 | 22,8                          | 30,3                  |
| 16AU185 | TALENCE (Airaq) | 07/12/16 | 33,1                          | 38,0                  |
| 16AU186 | TALENCE (Airaq) | 08/12/16 | 20,8                          | 20,8                  |
| 16AU187 | TALENCE (Airaq) | 09/12/16 | 14,6                          | 17,0                  |
| 16AU188 | TALENCE (Airaq) | 10/12/16 | 16,4                          | 16,8                  |
| 16AU189 | TALENCE (Airaq) | 11/12/16 | 30,3                          | 27,9                  |
| 16AU190 | TALENCE (Airaq) | 12/12/16 | 35,0                          | 38,2                  |
| 16AU191 | TALENCE (Airaq) | 13/12/16 | 16,7                          | 16,3                  |
| 16AU192 | TALENCE (Airaq) | 14/12/16 | 17,8                          | 17,8                  |
| 16AU193 | TALENCE (Airaq) | 15/12/16 | 12,6                          | 12,6                  |
| 16AU194 | TALENCE (Airaq) | 16/12/16 | 11,7                          | 15,7                  |
| 16AU195 | TALENCE (Airaq) | 17/12/16 | 16,4                          | 21,7                  |
| 16AU196 | TALENCE (Airaq) | 18/12/16 | 14,4                          | 13,3                  |



---

direction et secrétariat du LCSQA

INERIS - parc technologique Alata - BP 2 - F60550 Verneuil-en-Halatte  
tél. 03 44 55 64 04 - [www.lcsqa.org](http://www.lcsqa.org)