

Identification et quantification des contributions relatives des sources de poussières fines en milieu urbain

Identification and quantification of fine particles sources contributions in an urban site

Hervé GUÉGAN*, Quy LEMINH*, Marie CHAVENT**, Brigitte PATOUILLE**, Patrick BOURQUIN***

Résumé

La réponse à la question de l'identification et de la quantification des contributions relatives des sources de poussières fines à un environnement est apportée par la construction d'un protocole en trois phases : le prélèvement de particules fines sur le site d'intérêt (en optimisant les paramètres d'échantillonnage), l'analyse chimique de ces prélèvements à l'aide d'une technique multi-élémentaire sensible (la méthode PIXE) et enfin un traitement mathématique original des données issues de cette analyse PIXE. Ce traitement mathématique est construit en deux temps : en premier lieu une ACP (analyse en composantes principales) suivie d'une rotation VARIMAX permet d'identifier les sources, puis une approximation du modèle du récepteur basée sur la méthode PMF (*Positive Matrix Factorization*) définit ensuite quantitativement les sources sans que l'on dispose *a priori* d'informations sur celles-ci. Cette approximation fournit pour chaque source identifiée sa composition multi-élémentaire (son profil) ainsi que sa contribution relative à l'empoussièrement sur le site de prélèvements durant la période d'étude. Le traitement donnera également dans un deuxième temps la détermination quantitative de l'origine de chaque constituant élémentaire détecté sur le filtre.

Mots clés

Particules fines. Contribution des sources. Modèle du récepteur.

Abstract

In order to identify fine particulate sources and to quantify their contribution, we have applied a three steps process: collecting of PM_{2.5} with sequential fine particle samplers on the chosen site, measurement of the chemical composition with PIXE method and finally an original mathematical data processing resulting from this PIXE analysis.

This mathematical data processing is itself divided into two steps. First PCA (Principal Component Analysis) with Varimax rotation is useful to identify the sources. In a second time, an approximation of the receptor model based on the PMF (Positive Matrix Factorization) method defines quantitatively the sources without any *a priori* information about the sources. This approximation gives the profile of each source as well as its contribution to airborne particulate matter.

Keywords

Fines particles. Source apportionment. Receptor modelling.

* ARCANÉ-CENBG – Le Haut Vigneau – BP120 – 33175 Gradignan Cedex – E-mail : arcane@cenbg.in2p3.fr

** IMB – Université Bordeaux 1 – 351, cours de la libération – 33405 Talence.

*** AIRAQ – 13, allée J. Watt – 33692 Mérignac.

1. Introduction

Cet article est la synthèse des travaux d'une étude qui a été réalisée dans le cadre du programme PRIMEQUAL/PREDIT initié par le MEDAD et l'ADEME, plus particulièrement en réponse à un appel à proposition de recherche « Particules »*.

Nous présentons ici les résultats les plus marquants obtenus lors de cette étude, qui s'est déroulée sur deux ans et qui couvre deux campagnes de prélèvements à des saisons différentes (une en hiver et une en été). Elle est le fruit d'une collaboration entre un organisme agréé de surveillance de la qualité de l'air, un laboratoire de physique nucléaire spécialisé dans l'analyse élémentaire par faisceaux d'ions de haute énergie et une équipe de statisticiens d'un laboratoire de mathématiques appliquées.

Après avoir décrit la phase de prélèvement et d'analyse des filtres, nous présenterons les résultats du traitement mathématique obtenus à partir de la seule connaissance des concentrations élémentaires ainsi mesurées dans les filtres, à savoir :

- les sources, identifiées par une méthode d'analyse factorielle (ACP + rotation VARIMAX) ;
- leurs compositions en éléments chimiques (leurs profils) ainsi que leurs contributions aux filtres ou encore à l'empoussièrément sur la période d'analyse, obtenues à l'aide du modèle du récepteur et de la méthode PMF (*Positive Matrix Factorization*) ;
- enfin, l'information sur l'origine de chaque élément détecté sur un filtre.

2. Prélèvements, analyse chimique et mise en forme des données

Le site de prélèvement choisi est celui d'Anglet. Ce dernier fait partie du réseau des stations fixes de l'Association agréée de surveillance de la qualité de l'air de la région Aquitaine : AIRAQ. Il a la particularité d'être situé en bordure d'une voie de grande circulation automobile et au cœur d'une agglomération de 170 000 habitants. Il est de plus soumis à l'influence de l'océan Atlantique à l'ouest et d'un site industriel au nord comportant entre autre une aciérie. Les prélèvements ont concerné les particules de la classe granulométrique $PM_{2,5}$ recueillies sur membranes en polycarbonate de porosité $0,8 \mu m$ par un préleveur de type Partisol+ fonctionnant à un débit d'un mètre cube par heure. Les séquences de prélèvement étaient de 12 heures : un prélèvement nuit de 19 h à 7 h et un prélèvement jour de 7 h à 19 h de manière à inclure plus spécifiquement la part du trafic automobile. Deux séries de prélèvements ont eu lieu en juin 2004 et décembre 2005 sur une période de quatre semaines chacune représentant donc au total une soixantaine de filtres par campagne.

L'analyse de ces prélèvements a ensuite été effectuée par technique PIXE (*Particle Induced X-ray Emission*). Le principe consiste à bombarder l'échan-

tillon (filtre et particules collectées) avec un flux d'ions de haute énergie (généralement un faisceau d'ions H^+ d'énergie égale à 2,5 MeV), et à mesurer le rayonnement X émis par les atomes de la cible sous cette irradiation. Cette méthode permet une analyse rapide (quelques dizaines de minutes par filtre) et non destructive (pas de mise en solution de l'échantillon). On accède ainsi au dosage simultané d'une quinzaine d'éléments majeurs, mineurs et traces, de masse supérieure à l'aluminium avec des limites de détection de l'ordre de quelques nanogrammes d'élément par filtre.

Les données des campagnes issues de l'analyse PIXE se présentent sous la forme d'un tableau indiquant pour chaque prélèvement les concentrations de 15 constituants. Pour les principaux éléments détectés par PIXE : silicium, aluminium, fer et soufre, nous avons calculé et introduit dans le tableau le poids d'une de leur forme oxydée SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_4 . De la masse totale obtenue par pesée du filtre avant et après prélèvement, nous avons soustrait à la fois la masse des éléments simples mesurés et la masse de l'oxygène liée à certains oxydes. La différence obtenue, notée C-Org, représente essentiellement la partie carbonée et organique des particules qui n'est pas détectée par la technique PIXE. Cette mise en forme des données a été nécessaire pour l'interprétation des résultats issus du traitement mathématique.

3. Identification des sources

L'objet de la première partie du traitement mathématique a été d'apporter une réponse à la question initiale : « *Quelles sont les sources participant à l'empoussièrément ?* ». Pour cela, nous avons utilisé une méthode d'analyse factorielle appelée analyse en composantes principales (ACP). Cette méthode, appliquée à une matrice de concentrations, permet une analyse des corrélations entre les éléments ou constituants chimiques mesurés. On s'intéressera ici aux corrélations entre éléments chimiques proches de 1, traduisant le fait que leurs concentrations augmentent et diminuent en même temps dans les filtres. Un groupe d'éléments ainsi corrélés pourra permettre d'identifier la présence d'une source dans le cas où ces éléments sont par ailleurs les traceurs connus d'une même source.

Cette ACP (suivie d'une rotation VARIMAX) a été appliquée en premier lieu au tableau de données obtenu à partir des prélèvements « hiver ». Les résultats (obtenus avec la procédure FACTOR du logiciel SAS) se présentent sous la forme d'une matrice dite des saturations. Cette matrice représente les corrélations des éléments ou constituants chimiques aux facteurs principaux (système d'axes portant le maximum de l'inertie des données initiales). Nous nous servons de cette matrice de saturation (Tableau 1) pour associer, lorsque c'est possible, des sources aux facteurs. Pour cela, nous regardons les éléments ou constituants chimiques, fortement corrélés aux

* Convention CV04000104.

Tableau 1.
Matrice des saturations obtenue sur les données « hiver ».
Saturation Matrix of winter data.

	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P	SO ₄	Cl	K	Ca	Mn	Fe ₂ O ₃	Cu	Zn	Br	Pb	Corg
Factor 1	0,98	0,98	0,97	-0,03	-0,15	0,60	0,61	-0,28	0,20	0,21	-0,03	0,49	0,00	-0,02
Factor 2	0,09	0,01	0,09	0,77	-0,27	0,72	0,09	0,12	0,28	0,36	0,05	0,62	0,16	0,89
Factor 3	-0,04	-0,06	-0,02	0,25	-0,14	0,11	-0,11	0,60	0,29	0,16	0,98	0,10	0,97	0,02
Factor 4	0,07	0,10	0,07	0,18	-0,18	0,23	0,56	0,58	0,85	0,82	0,13	0,28	0,13	0,22
Factor 5	-0,04	-0,07	-0,09	-0,35	0,88	0,03	0,27	-0,24	-0,11	-0,15	-0,04	0,39	-0,05	-0,16



Figure 1.
Carte du site de prélèvement.
The French urban site.

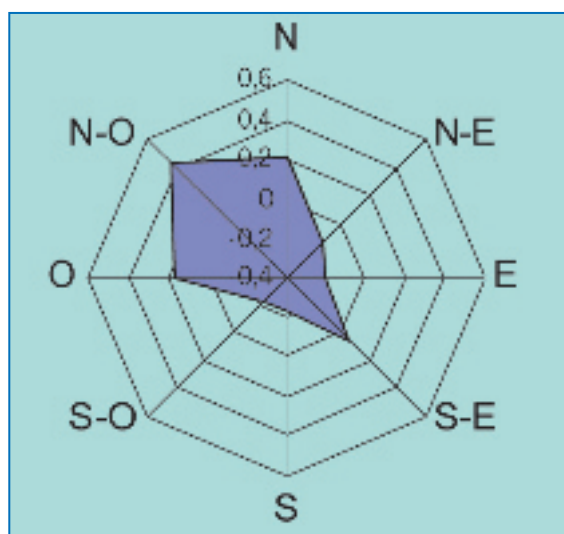


Figure 2.
Graphique des corrélations
entre les directions du vent et le facteur 5.
Correlations between rotated factor 5 associated
to the sea source and the 8 wind directions.

facteurs (que nous avons surlignés bleu dans le tableau) et lorsque ces éléments sont des traceurs connus d'une source, nous faisons une première proposition d'association d'une source aux facteurs.

Nous confirmerons ensuite ces hypothèses à l'aide de paramètres extérieurs tels que les données météorologiques (température et direction du vent), les valeurs de NO, NO₂, CO mesurées simultanément sur le site de prélèvement et la périodicité jour/nuit de l'échantillonnage.

3.1. Association du facteur 5 à la source marine

Ce premier facteur est le plus simple à identifier : l'élément chlore y est très fortement corrélé et du fait de la composition des sels marins NaCl, nous pouvons associer ce facteur à cette source. Cette hypothèse peut être confirmée en regardant la corrélation entre la direction du vent relevée sur la station de Météo-France localisée à 2,5 km au sud du site de prélèvement et le facteur 5. La carte visualisant la géographie du lieu (Figure 1) ainsi que le graphe de corrélation* associé (Figure 2) reportés ci-dessous parlent d'eux-mêmes.

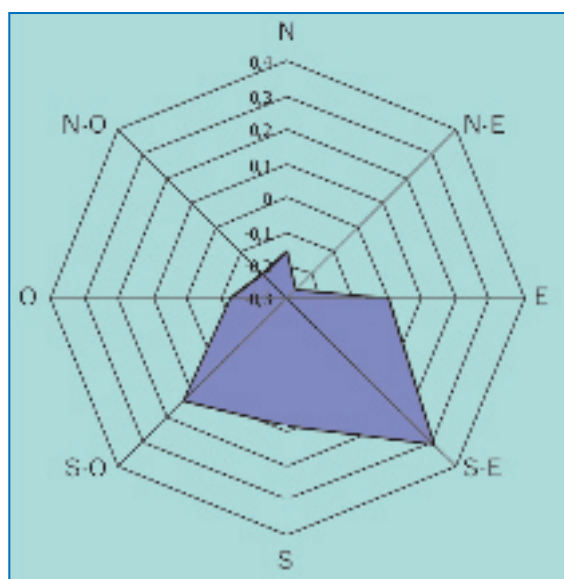


Figure 3.
Graphique des corrélations
entre les directions du vent et le facteur 1.
Correlation between rotated factor 1 associated
to the crustal source and the 8 wind directions.

* Et non pas une rose des vents « classique ».

3.2. Association du facteur 1 à la source terrigène

Ce facteur est caractérisé par les éléments aluminium et silicium (traduits sous forme d'oxyde) qui sont révélateurs des aluminosilicates, les traceurs des phénomènes d'érosion de la croûte terrestre. La Figure 3 confirme cette hypothèse et fait apparaître le phénomène bien connu d'effet de Foehn dans le sud-ouest de la France qui se caractérise par un apport de poussières qui viennent se redéposer lors d'épisodes pluvieux par vents de secteur Sud. Ce phénomène de transport de matière « sable du Sahara » à longue distance est clairement mis en évidence ici.

3.3. Association du facteur 4 à la source automobile

Les éléments les plus fortement corrélés à ce facteur sont les éléments métalliques fer et cuivre dont on sait qu'ils peuvent être émis par les phénomènes d'usure de pièces en mouvement dans un véhicule, essentiellement au niveau des organes de freinage (plaquettes et tambours de freins). Pour conforter cette première hypothèse, nous avons regardé la variation relative de ce facteur sur la période d'échantillonnage en distinguant les prélèvements correspondant aux nuits de ceux correspondant aux jours. On voit alors très nettement sur la Figure 4 que le facteur 4 est toujours plus important le jour (lorsque le trafic automobile est plus intense) que la nuit. Nous avons également utilisé les données concernant les molécules CO, NO, NO₂ mesurées dans le cadre réglementaire en les associant aux autres constituants pour appliquer de nouveau une ACP. Nous avons observé sur la matrice des saturations ainsi obtenue que ces composants, traceurs du trafic automobile, sont effectivement bien corrélés au même facteur que le fer et le cuivre.

3.4. Association du facteur 3 à la source industrielle

L'identification de cette source ne pose pas de difficultés dans la mesure où les deux éléments qui sont le plus fortement corrélés à ce facteur (le plomb et le zinc) ne sont pas présents à des quantités élevées à l'état naturel dans l'environnement. En

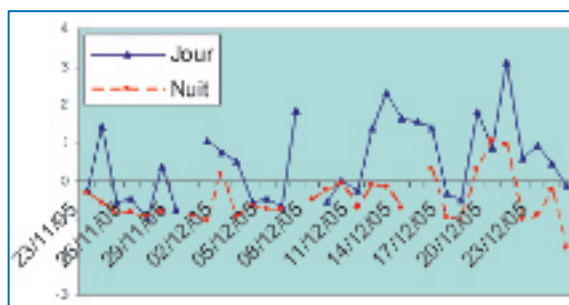


Figure 4.
Évolution jour/nuite du facteur 4-hiver
associé à la source automobile.
Night and day evolution
of the rotated factor 4 associated to the car source.

revanche nous disposons de données DRIRE pour l'année 2004 qui font état du rejet dans l'atmosphère des Acières De l'Atlantique situées au Nord du site de prélèvement. Les 13,2 tonnes par an de zinc et 3,2 tonnes pour le plomb sont suffisamment significatives pour permettre une signature non ambiguë de cette source.

Par ailleurs la Figure 2 montre qu'il existe effectivement un lien plus marqué entre ce facteur et la direction Est/Nord-Est. Malgré tout, la localisation de la zone industrielle Bayonnaise est nettement plus au Nord. L'explication de ce graphe n'est ainsi pas complètement satisfaisante, et il se pourrait que l'influence de la topographie locale (notamment à cause de la rivière Adour) permette d'expliquer le phénomène.

3.5. Association du facteur 2 à la source phénomènes de combustion

C-Org et SO₄ sont les constituants chimiques les plus fortement corrélés à ce facteur. Ces deux constituants sont d'une façon générale révélateurs de résidus de combustion d'hydrocarbures qui contiennent tous du soufre à des teneurs diverses. Les

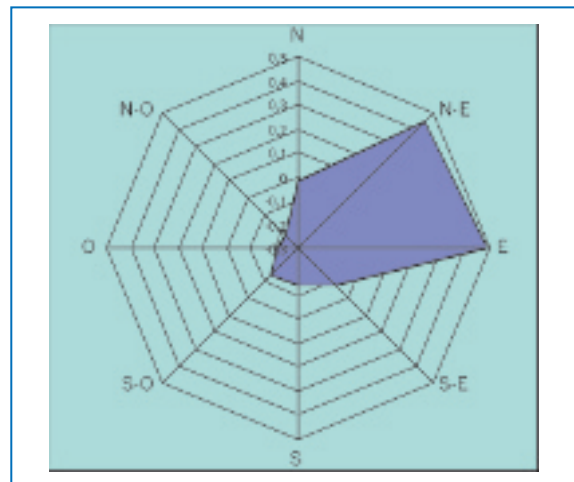


Figure 5.
Graphique des corrélations
entre les directions du vent et le facteur 3.
Correlations between rotated factor 3 associated
to the industrial source and the 8 wind directions.

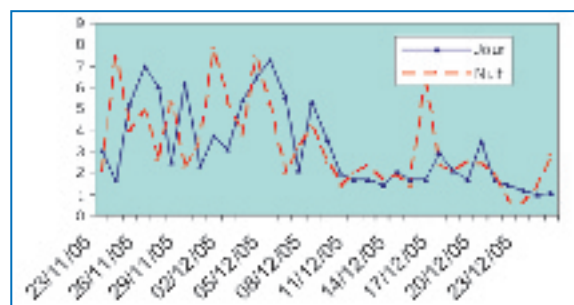


Figure 6.
Évolutions jour/nuite des températures
sur la période « hiver ».
Night and day evolution
of the temperature on winter period

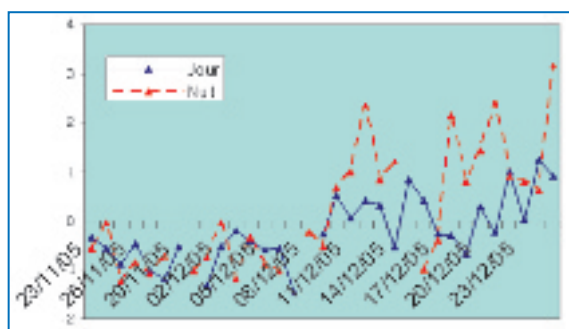


Figure 7.
Évolutions jour/nuit du facteur 2
associé à la source de combustion.
Night and day evolution of the rotated factor 2
associated to the combustion source.

phénomènes de combustion produisent ainsi des résidus carbonés et soufrés ; ces derniers, généralement sous forme de SO_2 vont ensuite partiellement se transformer à la suite de processus chimiques complexes en aérosols secondaires de type SO_4 par exemple. Les systèmes de chauffage urbain sont une des composantes possibles de cette source. En effet, sur la période de prélèvement considérée ici : l'hiver, a eu lieu une forte variation des conditions météorologiques qui s'est traduite par une chute des températures (Figure 6) et nous observons sur la Figure 7 une augmentation simultanée de la part relative de ce facteur, ce qui confirme l'hypothèse initiale d'association du facteur à la source combustion.

4. Quantification

L'ACP, communément employée pour traiter la question de la détection des sources de pollution, permet d'identifier, voire de caractériser les sources mais jamais de les quantifier. Les profils et les contributions des sources ont été obtenus dans la seconde partie du traitement mathématique à partir de l'approximation du modèle du récepteur basée sur la méthode PMF (*Positive Matrix Factorization*) (Paatero et Tapper, 1994). Le modèle du récepteur permet d'exprimer une matrice de concentrations \mathbf{X} sous la forme $\mathbf{X} = \mathbf{GF} + \mathbf{E}$ où \mathbf{G} est la matrice à partir de laquelle on définira les contributions des p sources aux n filtres, \mathbf{F} est la matrice à partir de laquelle on définira les profils des p sources en fonction des m composants et \mathbf{E} est la matrice des erreurs d'approximation de \mathbf{X} par le produit \mathbf{GF} . Il est important de noter que cette approche nécessite uniquement la

connaissance *a priori* du nombre p de sources.

Les résultats numériques présentés ici ont été obtenus en appliquant l'algorithme PMF proposé par Jianhang et Laosheng (2004) sur le même tableau de concentrations que pour l'ACP. Le nombre de sources recherchées étant fixé par l'utilisateur de l'algorithme, nous avons choisi cinq sources au vu des résultats obtenus avec l'ACP.

4.1. Profil des sources

La matrice de profils \mathbf{F} (Tableau 2, représentant ici les résultats obtenus l'hiver) indique les proportions d'émission de chaque élément pour chacune des sources. L'information apportée par cette matrice est donc la réponse à la question : « *Quelles sont les concentrations des constituants de chacune des sources ?* ».

L'identification de ces sources a été facilitée par l'étude préalable des corrélations entre les variations des facteurs issus de l'ACP et les variations des sources calculées par l'approximation du modèle du récepteur. On observe ainsi que la source embruns est composée majoritairement du chlore composant le sel. La source terrigène est également majoritairement composée des alumino-silicates produits par les phénomènes d'érosion. Le plomb et le zinc qui étaient fortement corrélés à la source industrielle mise en évidence par l'ACP, ne représentent qu'une faible part en masse des particules de cette origine, qui est en fait composée principalement de dérivés soufrés. De la même façon, le fer et le cuivre qui caractérisaient bien la source « trafic routier » ne représentent qu'une part mineure de sa composition. Ces particules sont en réalité majoritairement constituées de composés organiques et carbonés, ce qui est bien cohérent avec la nature des particules diesel ou essence émises par les moteurs. Enfin, la composante plus globale liée aux phénomènes de combustion est également majoritairement composée de carbone, éléments organiques et aérosols secondaires, ce qui est également tout à fait cohérent avec la connaissance que l'on a aujourd'hui de ce type de particules et de leur mode de formation.

4.2. Contribution des sources à l'empoussièrément

La matrice \mathbf{G} des contributions donne les approximations des concentrations dans chaque filtre de ce

Tableau 2.
Matrice des profils des cinq sources (%).
Profile matrix of 5 sources.

	Al_2O_3	SiO_2	P	SO_4	Cl	K	Ca	Mn	Fe_2O_3	Cu	Zn	Br	Pb	Corg
Terrigène	41,6	18,5	6,2	10,1	0,0	12,9	2,4	0,0	6,7	0,3	0,7	0,2	0,3	0,0
Automobile	0,0	0,0	0,0	15,3	0,0	0,0	1,6	0,2	15,0	0,7	0,0	0,1	0,0	67,1
Industrie	0,0	0,0	0,7	59,6	0,0	3,6	0,0	0,3	12,7	0,4	16,3	0,2	6,2	0,0
Combustion	0,0	0,0	0,0	12,2	0,0	1,5	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	85,9
Embruns	0,0	0,0	0,6	22,6	74,5	0,1	1,4	0,0	0,0	0,0	0,3	0,5	0,0	0,0

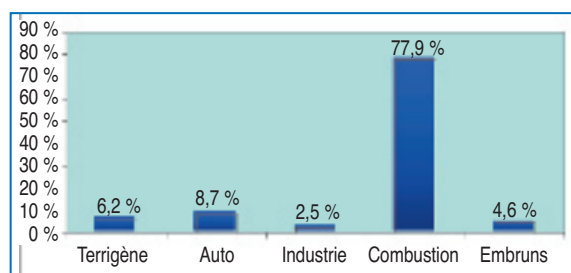


Figure 8a.
Contributions hivernales des sources.
Winter contributions of sources.

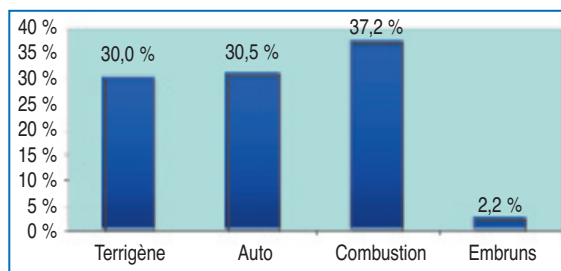


Figure 8b.
Contributions estivales des sources.
Summer contributions of sources.

chacune des sources précédemment identifiées. À partir de ces contributions on calcule les masses de particules $PM_{2,5}$ émises par chaque source et recueillies dans chaque filtre. On en déduit le pourcentage de poussières fines émises par chaque source et recueillies dans la totalité des filtres sur la période de prélèvement. Par extrapolation, on peut considérer que ces pourcentages correspondent aux contributions des sources à l'empoussièrisme sur le site durant la période d'étude. Cette information est la réponse à la question : « Sur la période d'échantillonnage, quelle est la contribution de chacune des sources à l'empoussièrisme en $PM_{2,5}$? ». Ces contributions à l'empoussièrisme sont données sur les figures 8a et 8b respectivement pour les périodes hiver et été.

Concernant la phase de prélèvement hivernale, le phénomène marquant observé est la place prépondérante prise par la source combustion. Ceci s'explique assez facilement par la longue période de basse température et l'augmentation associée de la source de chauffage urbain. La contribution de la source industrielle est très faible, comme pouvait le laisser présager sa composition dépourvue de matière carbonée ou organique. En revanche, il est surprenant d'observer que la source naturelle cumulant la source terrigène et la source embruns contribue plus fortement à l'empoussièrisme que la source automobile, sur ce site à proximité du trafic. L'explication se trouve en partie dans la masse des atomes constituant les particules. En effet, les oxydes d'alumino-silicate et le chlore du sel pèsent en masse bien plus que les composés à base de carbone. Cette réalité exprimée en masse n'est sûrement pas transposable si l'on considère le nombre de particules concernées.

En comparant avec le graphe de la contribution des sources obtenu l'été, on observe qu'on ne visualise plus la source « embruns » au niveau précédent, où elle était exacerbée du fait des tempêtes hivernales. Néanmoins, la seule source terrigène reste du même niveau que la source automobile, comme l'était l'hiver la somme des sources d'origine naturelle. De même, la source industrielle est également invariable en proportion de l'empoussièrisme global par rapport à son niveau hivernal. À l'inverse, on observe bien une très forte diminution de la contribution de la source que l'on a nommé « phénomènes de combus-

tion » à cause de l'absence des chauffages urbains l'été. Malgré cela, cette contribution reste majoritaire et trouve donc son origine dans d'autres sources : parmi celles-ci, les autres sources de combustion de produits pétroliers contenant du soufre, tels que tous ceux qu'on peut trouver dans une zone industrielle. Il faut également souligner que cette source contient sans doute une partie des molécules émises à l'échappement par les véhicules et qui ont subi les processus de transformation chimique sous l'action du rayonnement lumineux et de la température pour former des aérosols organiques secondaires. De fait, une partie des émissions de la source automobile n'est pas comptabilisée dans la source que nous avons pourtant clairement identifiée précédemment, mais se retrouve également dans cette source « combustion », sans qu'il soit possible de la déconvoquer de celle-ci.

4.3. Origine des éléments détectés

La dernière information qui est apportée par le traitement PMF est la réponse à la question : « De quelle source provient un élément collecté sur le filtre ? ». Ces contributions des sources à la présence d'un élément sont regroupées dans le tableau ci-contre :

L'étude de ce tableau permet d'extraire les principales informations suivantes :

- l'aluminium et le silicium proviennent exclusivement de la source terrigène, de même que le chlore des embruns de la source marine ;
- les deux éléments zinc et plomb sont eux aussi très spécifiques de la source d'émission industrielle, même s'ils peuvent avoir d'autres origines, au contraire des trois précédents ;
- la partie carbonée provient principalement de la source combustion et de la source automobile, ce qui confirme le fait que cette dernière ne contient pas seulement la partie phénomènes de freinage (Mn, Fe, Cu) et remise en suspension (Ca). Cette fraction carbonée associée à l'oxygène et qui représente la plus grosse partie de la masse des particules provient quand même majoritairement de la source phénomènes de combustion, ce qui vient bien confirmer l'hypothèse de la prédominance de celle-ci pendant la saison hiver.

Tableau 3.
Contribution des cinq sources « hiver » à la présence d'un élément (%).
Contribution of five sources "winter" to the presence of an element (%).

	Terrigène	Automobile	Industrie	Combustion	Embruns
Al ₂ O ₃	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SiO ₂	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
P	81,5	0,5	3,9	8,2	6,0
SO ₄	4,5	9,5	10,7	67,9	7,5
Cl	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
K	38,8	0,0	4,4	56,7	0,2
Ca	42,0	39,6	0,0	0,0	18,4
Mn	0,0	54,9	33,1	8,5	3,5
Fe ₂ O ₃	19,0	59,2	14,4	7,4	0,0
Cu	18,5	56,8	9,1	15,6	0,0
Zn	9,0	0,5	87,5	0,0	3,1
Br	19,4	12,1	5,7	33,4	29,4
Pb	10,7	0,0	81,4	7,9	0,0
C-Org	0,0	8,0	0,0	92,0	0,0

5. Conclusion

Cette étude démontre bien la validité du protocole que nous avons choisi de mettre en place dans le but d'identifier et de quantifier les différentes sources d'empoussièrément. En effet, l'application du traitement mathématique aux séries de données obtenues, permet de retrouver les cinq grandes sources d'empoussièrément auxquelles on pouvait s'attendre sur ce site choisi à cet effet : une source naturelle se décomposant en source marine et source terrigène, une source trafic automobile, une source industrielle et une source plus globale que l'on a appelée « phénomènes de combustion ». Cette dernière regroupe les résidus issus de la combustion d'hydrocarbures qui peuvent eux-mêmes avoir plusieurs origines (chauffage urbain, production d'énergie dans l'industrie). Elle comporte également une part des rejets automobiles qui auront subi des transformations par processus chimiques sous l'action du rayonnement lumineux et de la température et que l'on regroupe sous le terme aérosols organiques secondaires. La contribution à l'empoussièrément de cette source

« phénomènes de combustion » est prédominante et fortement liée à l'origine spécifique du chauffage urbain l'hiver. La source industrielle est relativement faible, et il est intéressant de noter que, malgré le site de prélèvement de proximité automobile, la source naturelle contribue à l'empoussièrément à une hauteur voisine de cette source anthropique.

Au final nous avons retrouvé par le traitement statistique les sources attendues et ce sans utiliser de connaissance *a priori* sur ces sources (ni leur nombre, ni leur nature, ni leur profil). Nous apportons ici les premiers éléments chiffrés concernant l'empoussièrément en particules fines sur un site français, mais il est évident que ces mesures doivent se poursuivre à plus grande échelle en améliorant certains paramètres expérimentaux, en ajoutant éventuellement d'autres marqueurs plus spécifiques. Il est ainsi envisageable de déconvoluer la source « phénomènes de combustion » qui regroupe elle-même plusieurs sources, afin d'aller plus loin dans le détail des causes, dès lors que la validité de l'approche est désormais démontrée.

Références

- Chavent M, Guégan H, Kuentz V, Patouille B, Saracco J. Apportionment of Air Pollution by Source at a French Urban Site. *Case Studies in Business, Industry and Government Statistics* 2007 ; 1 (2) : 119-29.
- Henry RC, Kim BM. Extensions of self-modeling curve resolution to mixtures of more than three components-finding the basic feasible region. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 1990 ; 8 : 205-16.
- Henry RC. Multivariate receptor modelling by N-dimensional edge detection. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 2003 ; 65 : 179-89.
- Jianhang L, Laosheng W. Technical details and programming guide for a general two-wat positive matrix factorization algorithm. *Journal of Chemometrics* 2004 ; 18 : 519-25.
- Polissar AV, Hopke PK, Malm WC, Sisler JF. Atmospheric Aerosol over Alaska:2. Elemental Composition and Sources. *J. Geophys. Res.* 1998 ; 103 : 19045-57.
- Watson JG, Robinson NF, Chow JC, Henry RC, Kim BM, Nguyen Q, Meyer EL, Pace TG. Receptor Model Technical Series, Vol. III, CMB7 User's Manual. US Environmental Protection Agency 1990. Report No. EPA-450/4-90-004.
- Watson JG, Chow JC, Fujita EM. Review of volatile organic compound source apportionment by chemical mass balance. *Atmospheric Environment* 2001 ; 35 : 1567-84.