

N° SPÉCIAL COLLOQUE “ PARTICULES ET AÉROSOLS ”

ROUEN 2 ET 3 OCTOBRE 2007

Editorial

PARTICULES : VERS UNE CONNAISSANCE MOINS PARCELLAIRE

Je renouvelle d'abord mes remerciements à Alain Le Vern pour son accueil à la Région ainsi qu'à Eric Vindimian du Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables pour avoir décidé de venir à Rouen pour la tenue de ce colloque dont le thème a suscité un grand intérêt comme le démontrent les nombreux participants sur ces deux journées.

Il est important que les associations de surveillance de la qualité de l'air tissent des liens avec le monde de la recherche et qu'elles puissent dans ses résultats des éléments permettant d'ajuster au mieux leurs actions de surveillance et de développer leur expertise. Je me réjouis qu'Air Normand ait participé à plusieurs projets labellisés PRIMEQUAL, avec notamment le professeur Alexis Coppalle de l'Insa ou actuellement dans le cadre d'un programme de l'AFSSET avec Jean-Paul Morin de l'Inserm et l'équipe du Certam. Ces projets font progresser nos connaissances et sont très utiles pour répondre peu à peu aux diverses questions liées à la pollution particulaire.

PRIMEQUAL : UN PROGRAMME DE RECHERCHE INTER-ORGANISMES POUR UNE MEILLEURE QUALITÉ DE L'AIR À L'ÉCHELLE LOCALE

Le colloque national de 2 jours qui s'est déroulé à Rouen dans les locaux de la Région avait pour objectif la restitution des travaux menés dans le cadre du PRIMEQUAL2-PREDIT lancé en 2003 et ayant pour thème “ Aérosols et particules ”.

L'intitulé PRIMEQUAL signifie : programme de recherche inter-organismes pour une meilleure qualité de l'air à l'échelle locale. Lancé en 1995, ce programme a rejoint en 1996 le PREDIT, programme interministériel de recherche et d'innovation dans les transports terrestres en constituant l'axe 1 du groupe thématique Energie-Environnement.

Ce programme est soutenu par le Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables (MEDAD) et l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). Il est animé par l'Ineris, l'Institut National de l'environnement industriel et des risques. PRIMEQUAL vise à fournir les bases scientifiques et les outils nécessaires aux décideurs et aux gestionnaires de l'environnement pour surveiller et améliorer la qualité de l'air afin de réduire les risques pour la santé et l'environnement.

Il présente la particularité de rassembler plusieurs communautés scientifiques concernées par la pollution de l'air et ses impacts : sciences physiques (météorologie, chimie, dynamique, météorologie, ...), sciences de la vie (biologie, médecine, épidémiologie, écologie, ...), mathématiques (modélisation, statistiques) et sciences sociales (économie, sociologie, psychologie,...).

Quel air fait-il ?

AIR NORMAND

Tél. 02 35 07 94 30
www.airnormand.fr

Dominique Randon
Président d'Air Normand

Pour en savoir plus : www.primequal.fr

PARTICULES ET AÉROSOLS AU BANC DES ACCUSÉS : LES EXPERTS FONT LE POINT

Concourant à certaines maladies, les particules, plus communément appelées “poussières” ont fait l'objet d'un colloque à Rouen les 2 et 3 octobre. Leur “ portrait-robot ” était jusqu'alors imprécis. Taille : variable, plutôt petite, non visible à l'œil nu. Composition : variable aussi car issue de sources multiples. Des investigations complémentaires, à travers le programme Primequal et financées par le MEDAD, ont permis d'affiner la connaissance, tant d'un point de vue de leurs effets sur la santé que leur impact sur les écosystèmes et le bâti.

Impact santé

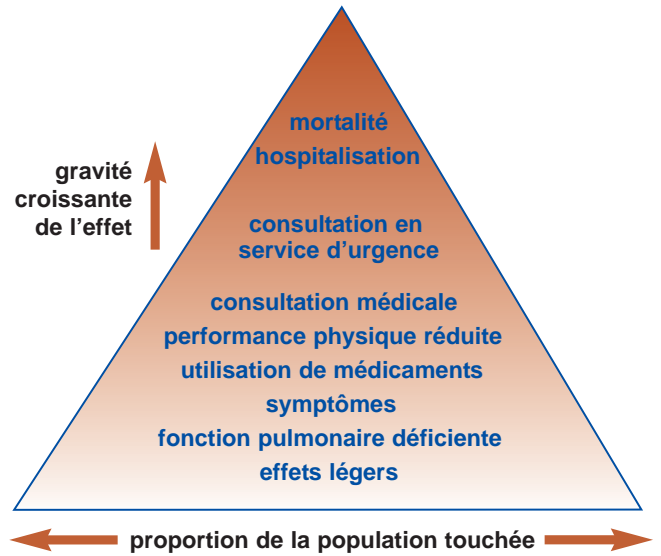


Particules Diesel phagocytées par des cellules épithéliales bronchiques humaines.

On le sait, environ 12 000 litres d'air circulent chaque jour dans nos poumons qui représentent, si on les mettait à plat, une surface d'échange de 100 m², en moyenne. La pyramide ci-contre est classiquement utilisée pour représenter les effets de la pollution atmosphérique sur la santé.

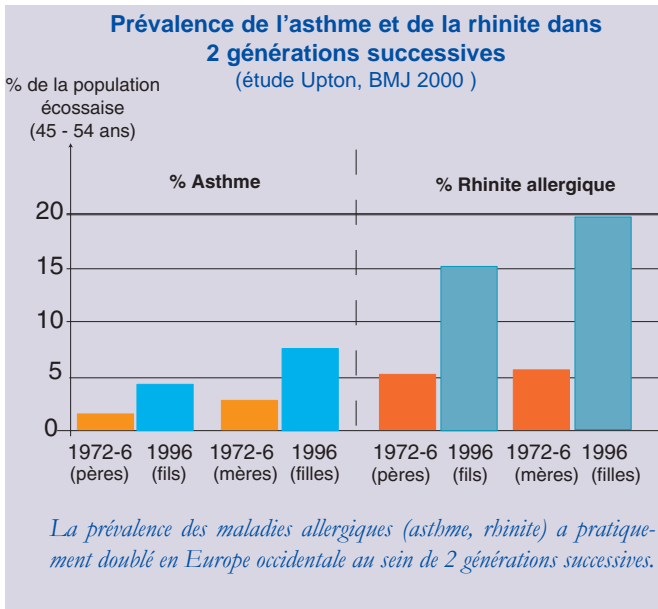
On reconnaît aux particules deux grandes actions : soit sur l'appareil respiratoire soit sur le système cardio-vasculaire. Ainsi à leur charge, une contribution à l'asthme et à la Broncho-Pneumopathie Chronique Obstructive. L'obstruction bronchique peut s'avérer réversible ou être au contraire permanente avec un phénomène dit de remodelage, c'est-à-dire d'épaississement du tissu bronchique. En plus de réponses inflammatoires, d'autres mécanismes ont été démontrés dans les études les plus récentes - à la

Représentation classique des effets de la pollution atmosphérique sur la santé



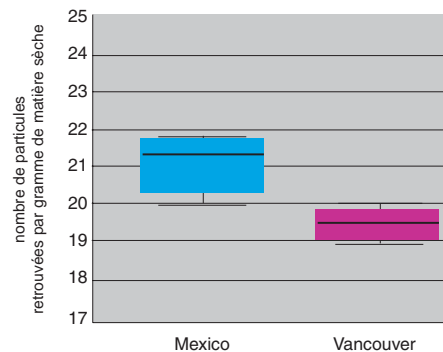
La base de la pyramide représente différents effets, modérés et courants, pouvant affecter une large part de la population. Vers le sommet, les effets sont plus sévères mais aussi plus rares, concernant moins de monde. Même s'il est fréquent de distinguer les effets à court-terme de ceux à plus long terme, cette représentation privilégie une sorte de continuum sans véritable séparation.

fois in vivo : chez l'animal et l'homme, volontaire sain ou asthmatique (chambres d'exposition, instillations nasales ou intra-trachéales) et in vitro avec des cultures de cellules respiratoires d'origine animale ou humaine. Des réactions se produisent à la surface ou à l'intérieur même des cellules dans lesquelles les particules peuvent pénétrer grâce à leur petite taille. Le patrimoine génétique, à l'abri dans le noyau de la cellule, peut lui aussi se trouver menacé. Reconnues comme corps étrangers, les particules déclenchent



Exposition chronique à une pollution atmosphérique particulaire

(Churg et coll., 2003)

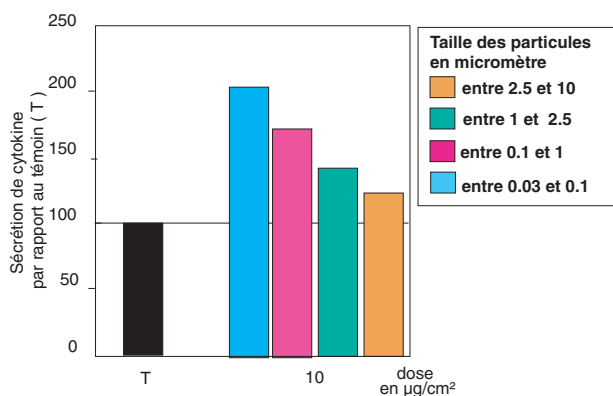


Les analyses ont été faites post mortem sur des échantillons de poumon de femmes non fumeuses vivant à Mexico ou à Vancouver. Les premiers contiennent bien plus de particules que les seconds.

une cascade d'événements avec l'activation des cellules du poumon et des cellules immunitaires suivie de la sécrétion de nombreuses protéines dont des molécules de l'inflammation (cytokines...). La production d'oxydants secondaires est aussi mise en évidence (espèces activées de l'oxygène, comme l'eau oxygénée...) à l'extérieur et dans les cellules. Selon la nature réelle de la molécule invasive à détruire (hydrocarbure aromatique polycyclique, pesticide...), des sous-produits résiduels peuvent persister de cette " bataille " et être eux aussi toxiques. Les hypothèses actuelles ne réfutent pas une migration des particules elles-mêmes, ou de ces divers produits, dans le sang, c'est-à-dire à travers tout l'organisme, ou même une action de cancérogénèse.

Réponse pro-inflammatoire par sécrétion de cytokine d'une culture de cellules épithéliales bronchiques humaines à l'exposition d'une même masse de particules de tailles différentes, issues de l'aérosol parisien

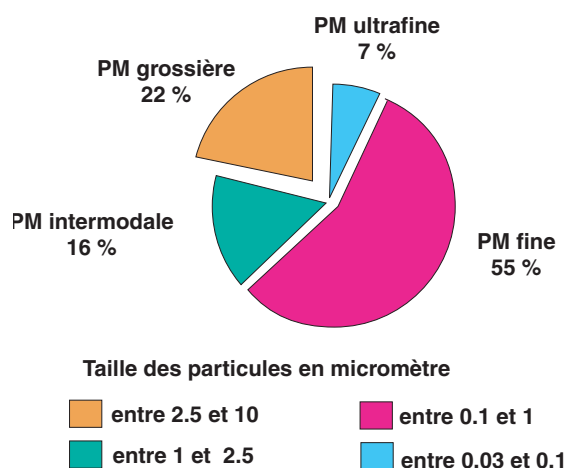
(A.Baeza, F.Marano, K.Ramgolam, LCTC 2006)



Parmi la grande variabilité des particules, ce sont les plus fines qui semblent induire le plus de réponses biologiques comme le montre le graphique précédent. Or l'analyse de la composition particulaire de l'air parisien révèle justement la prédominance de ce type de particules avec 55 % pour celles comprises entre 0.1 et 1 micromètre (µm) de diamètre et 7 % pour celles d'une taille de 0.03 à 0.1 µm (cf. graphe ci-dessous).

Distribution relative en masse de l'aérosol parisien de fond

(H. Cachier, O. Favez, LSCE)



Impact sur les écosystèmes

Des questions sont également posées sur la santé non plus humaine mais végétale. Comme avec les polluants gazeux (voir L'Air Normand n° 24), le fonctionnement de la plante peut être directement affecté par les particules mais cela reste en général peu significatif et surtout en lien avec une pollution intense, très localisée (diminution de l'activité respiratoire de la feuille par blocage des stomates ou diminution de la photosynthèse du fait de salissures...). D'autres impacts, indirects ceux-ci, s'avèrent plus importants et plus courants. Ainsi, un dépôt des particules, que ce soit en milieu aquatique ou dans les couches supérieures du sol, se révèle, selon la dose, nutritif ou à l'opposé néfaste avec par exemple un effet acidifiant et diminution de pH. Il peut, à l'extrême, être toxique par contamination de la chaîne alimentaire (voir illustrations ci-dessous).

Apports atmosphériques sur un site forestier (Douglas) dans les Monts du Beaujolais (en kg/ha/an)

(Ranger et al. 2002)

Élément	Moyenne sur 6 ans	Min/Max par an
N (azote)	21.8	18.1 / 29.5
P (phosphore)	0.9	0.2 / 2.1
K (potassium)	3.3	1.5 / 7.4
Ca (calcium)	7.5	4.4 / 16.7
Mg (magnésium)	1.2	0.6 / 3.2

Présence des espèces en eau douce selon le pH

	pH 6.5	pH 6.0	pH 5.5	pH 5.0	pH 4.5	pH 4.0
truite	Présente					
bar	Présente					
perche	Présente					
grenouille	Présente					
salamandre	Présente					
palourde	Présente					
écrevisse	Présente					
escargot	Présente					
éphémère	Présente					

Plus difficile à appréhender, les particules ont aussi à leur actif des modifications climatologiques. Elles peuvent ainsi modifier le régime des précipitations en accroissant par captation le nombre de gouttelettes dans les nuages, allongeant leur durée de vie et retardant la tombée de la pluie. Elles agissent également sur l'ensoleillement dont elles absorbent une partie du rayonnement. Des diminutions au sol entre 10 et 20 watts par m² en moyennes annuelles ont été mesurées dans certaines zones du globe.

Recherche de bio-marqueurs et bio-intégrateurs de la pollution particulaire

Afin de mettre au point un système de mesures et de suivi des particules, à l'attention par exemple des AASQA¹, du même type que ce qui est appliqué avec les lichens, une étude², poursuivie actuellement par une thèse, est menée à la fois sur les Bryophytes³ et leurs micro-organismes associés. En effet, quelques cm² de ces Bryophytes peuvent abriter plusieurs dizaines d'espèces différentes (bactéries, micro-algues, ciliées...) représentant des milliers d'individus. Ces organismes ont l'avantage de se renouveler rapidement, en quelques heures pour certains et quelques semaines pour les autres, ce qui limite les temps " exposition-observation ".



Photos de Daniël Gilibert, UIC.

Amibes à thèque.

L'accumulation en éléments traces métalliques (ETM) a été examinée sous l'influence de situations types (industrielle, rurale et de trafic routier). Des teneurs significatives ont été retrouvées mais aussi, comme pour les études sur la santé humaine citées précédemment, la production au niveau cellulaire d'espèces réactives de l'oxygène, capables de produire un stress oxydant. Des dommages au niveau des membranes plasmiques des bryophytes sont observés, dommages pouvant atteindre le noyau et provoquer une génotoxicité. Ainsi, une forte fragmentation de l'ADN a été révélée chez les bryophytes exposées aux plus fortes concentrations en ETM, en proximité industrielle. Du côté des micro-organismes, les résultats en laboratoire recourent ceux obtenus in situ, à savoir une diminution significative de la biomasse totale. Les groupes les plus affectés par une pollution particulaire sont les bactéries hétérotrophes et les protistes : microalgues et protozoaires, parmi lesquels les amibes à thèque.

1. AASQA : Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air

2. Nadine Bernard, Université de Franche-Comté, EA3184USC INRA

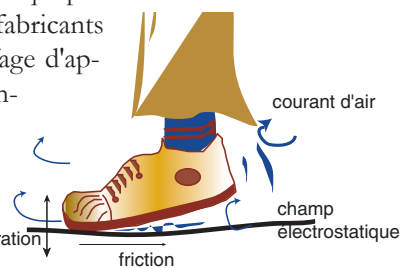
3. Bryophytes : embranchement végétal formé notamment par les mousses. Dans l'étude présentée ici, ce sont les espèces *Ceratodon purpureus* et *Scleropodium purum* qui ont été utilisées.



Le bâti

Pour le patrimoine bâti, depuis longtemps déjà et de façon très visuelle, on ne peut ignorer le rôle des particules : salissures,

encroûtement, dissolution de la pierre... des coûts prohibitifs d'entretien et de restauration y sont consécutifs. Les questions ont évolué en rapport avec les matériaux : qu'en est-il des verres, bétons et autres enduits. La vitesse de leur encrassement est étudiée et même modélisée avec plus ou moins de réussite puisque les phénomènes au voisinage des parois sont encore mal maîtrisés (la température de la surface a son importance). Si certains conservateurs des grands musées parisiens s'interrogent sur l'influence des particules issues du trafic automobile ou du tourisme de masse sur le maintien de l'intégrité des œuvres, il est vrai que cette pollution se retrouve dans nos airs intérieurs à la fois lors des transferts avec l'air extérieur mais aussi du fait d'autres sources très variées (matériaux de construction, activités d'entretien...voir L'Air Normand n°49). La pollution intérieure qui relève d'une préoccupation récente inclut pleinement les particules. 21 activités domestiques ont été testées en enceinte : chauffage au pétrole, encens, bougies, cigarette, cuisson, désodorisant, insecticide, dépollueur, aspirateur, imprimante... De multiples paramètres ont été mesurés : la concentration en nombre des particules, leur distribution en taille, leur composition élémentaire, les espèces ioniques présentes et hydrocarbures aromatiques polycycliques. Toutes les activités se sont révélées émettrices de particules ultrafines (entre 7 et 120 nanomètres), avec des taux d'émissions s'élevant jusqu'à 8.10¹¹ particules par seconde. La vitesse de dépôt peut varier selon les supports (ciment, bois contre-plaqué, bois aggloméré, plâtre, plexiglas, linoléum, papier-peint...) Des recherches en modélisation ont été conduites. Quelques difficultés sont signalées comme le devenir des particules lors de phénomènes de coagulation et de condensation ou la remise en suspension lors des déplacements dans la pièce. Le taux de renouvellement d'air et le cheminement emprunté par les flux d'air s'avèrent essentiels. Une incidence de la température des parois est aussi démontrée. Ces recherches dont la finalité peut sembler assez vague, ont en réalité des applications très concrètes qui pourraient être : une réglementation pour les fabricants sur les émissions (chauffage d'appoint à pétrole par exemple), une meilleure conception de la ventilation (disposition des bouches d'extraction, dimensionnement des hottes...).

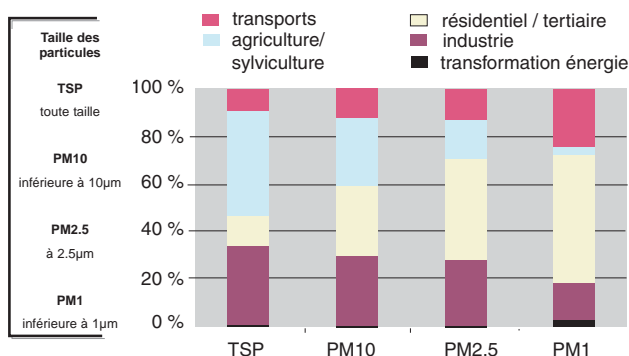


Mise en suspension de particules au cours du déplacement

MESURES VISANT À RÉDUIRE LES REJETS DE PARTICULES DANS L'AIR

Différentes actions des pouvoirs publics visent à réduire de manière pérenne les émissions de particules dans l'air mais aussi les polluants favorisant la formation des aérosols ou particules secondaires. Les textes adoptés et les actions menées se déclinent d'une part dans un plan européen et d'autre part aux échelles nationale et locale. Trois exemples peuvent ainsi être cités, dans les trois domaines fortement émetteurs que sont le transport, l'industrie et le résidentiel.

Répartition des sources de particules
(inventaire CITEPA pour le MEDAD, données 2005)



C'est le diesel qui est en cause pour les transports. Des normes européennes successives, les normes EURO, tendent à réduire les émissions des véhicules neufs mis sur le marché. Les négociations, en 2005/2006, pour Euro 5, ont abouti à la généralisation des filtres à particules sur toutes les voitures neuves d'ici 2010. La réglementation pour les poids lourds doit suivre la même évolution avec un temps de décalage, les négociations auront lieu fin 2007.

Les valeurs limites d'émission en poussières dans le secteur de l'industrie, en particulier sur les installations classées, sont elles aussi plus restrictives et obligent les exploitants à s'équiper en systèmes de dépoussiérage. Globalement, des diminutions, de 33 % pour les PM10 et de 56 % pour les PM1, ont été enregistrées entre 2005 et 1990. Pour exemple, un arrêté ministériel a imposé aux verriers un seuil de 30 mg/Nm³ en 2003 au lieu des 50 ou 150 mg/Nm³ autorisés (en 1996). Il est prévu que les émissions de ce secteur à l'horizon 2008 soient divisées par 4, passant de 2 à 0.5 kT.

65 % des émissions de particules ultrafines (PM1) sont dues au résidentiel / tertiaire, et principalement à la combustion du bois. Jusqu'alors soutenu par l'Etat par des subventions, ce domaine connaît actuellement une réorientation en faveur des installations les moins polluantes avec la mise en place de critères de performance. L'usage du bois-combustible semble privilégié dans les chaudières industrielles ou de collectivités dont la taille est suffisante pour permettre, à un coût économiquement acceptable, l'équipement de procédés de dépollution (électro-filtres, filtres à manche...).

“ Particules et aérosols ” : les projets PRIMEQUAL retenus

11 projets ont été retenus par PRIMEQUAL2 lancé en 2003 sur le thème “Aérosols et particules”. Ils ont bénéficié d'un soutien financier s'élevant à 1.9 millions d'euros.

Projets “ impact santé ”

■ Caractérisation physico-chimique et effets biologiques des fractions fines et ultra fines de l'aérosol urbain - A. BAEZA, L. MARTINON.

■ Impact de l'exposition par inhalation d'aérosols contenant des particules ultrafines sur le cœur, le rein et le système reproducteur chez le rat et le cobaye -JP. MORIN.

Projets “ impacts écosystèmes et bâti ”

■ Développement d'outils biologiques pour l'évaluation de l'impact des aérosols et des particules atmosphériques dans les écosystèmes - N. BERNARD.

■ Etude du dépôt sec des aérosols sur les enduits de façade et surface de verre - C. SACRE.

■ Caractérisation physico-chimique et étude du transport des particules à l'intérieur des locaux - O. RAMALHO.

Projets “ origine, évolution et outils de mesures ”

■ Mise au point d'un outil de détermination de la contribution des sources de poussières fines - H. GUEGAN.

■ Origine et quantification de contributions des sources d'aérosols en milieu urbain - D. WIDORY.

■ Evolution des suies émises par les avions en zones aéroportuaires -AL. BRASSEUR.

■ Génération, vieillissement et analyse des aérosols organiques secondaires - B. PICQUET-VARRAULT.

■ Etude des cinétiques de dégradation des produits phytosanitaires - A. MONOD, H. WORTHAM.

■ SPLAM Single particle laser ablation mass spectrometry - M. SHWELL.

Les coordonnées des chercheurs et résumés de leurs travaux seront prochainement mis en ligne sur www.primequal.fr



Les instruments de mesure

Lorsque l'on veut qualifier et quantifier précisément les particules, on se heurte encore à beaucoup d'inconnues notamment la part des aérosols dits organiques secondaires (principalement issus des composés organiques volatils). En effet, après leurs émissions, quelle que soit leur source, les particules subissent pléthores de transformations (condensation, nucléation, coagulation...) d'où le terme de particules (ou aérosols) secondaires. Les scientifiques ont à leur disposition

Instrument de mesure en continu des particules, PM10, équipé du module FDMS pour intégrer la fraction volatile : équipement installé en France par les AASQA depuis janvier 2007.

toute une batterie de moyens techniques, très sophistiqués pour travailler à partir de prélèvements sur filtre : extraction par fluide supercritique couplée à la chromatographie gazeuse et à la spectrométrie de masse par exemple ou l'analyse PIXE qui étudie le rayonnement X émis après exposition dans un accélérateur de particules associée à un traitement statistique. Ceci permet de relier les données trouvées aux sources référencées. Une autre technique, récente et prometteuse, se base sur les propriétés physiques des atomes et de leurs isotopes (voir encart ci-contre).

Parmi les mesures, la modélisation est bien sûr en bonne place avec ses nombreuses applications : étude de scénarii de réduction, prévision des épisodes de pollution... mais des améliorations sont encore à apporter notamment sur les processus physico-chimiques et les particules secondaires : connaissances devant s'appuyer sur des données expérimentales.

Certains scientifiques évoquent la possibilité de développer la mesure des particules par satellite. D'autres rêvent de "super-stations de mesures" intégrant le suivi en masse des PM10, PM2.5 ; PM1 et de compteurs de particules (fines et ultrafines) ainsi qu'une analyse du carbone, des sulfates, nitrates...

Déjà les chiffres de l'Ademe reflètent l'évolution du parc d'instruments de mesure des AASQA qui recherchent des particules de tailles sans cesse plus fines : 383 analyseurs de PM10 (mesure des particules aux diamètres inférieurs à 10µm), 57 PM2.5 (< à 2.5 µm) en 2007, contre 37 PM10 en 1997. Mais des interrogations nouvelles accompagnent l'avancée des connaissances et certains commencent à plébisciter la mesure des PM1 (< à 1 µm). D'autres prônent des normes européennes plus sévères avec l'abaissement de l'objectif de qualité. Bien qu'aucun consensus n'ait été trouvé, les résultats des différents travaux de recherches ne sont pas remis en cause.

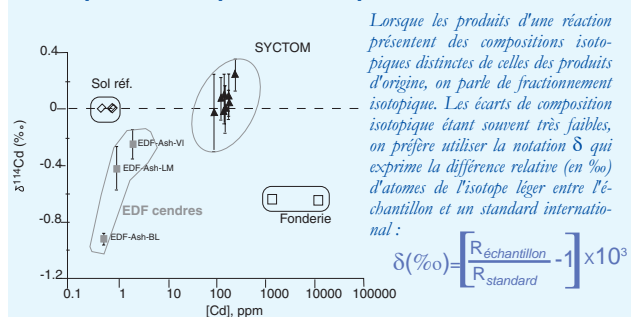
Approche multi-isotopique des aérosols*

Contrairement aux propriétés chimiques liées au cortège électronique, les propriétés physiques d'un élément dépendent de son noyau. Les isotopes des éléments, possédant le même nombre de protons, mais un nombre variable de neutrons, auront des propriétés chimiques identiques, mais des propriétés physiques telles que la viscosité, la pression de vapeur ou encore la masse, différentes.

La mesure préalable des compositions isotopiques doit être effectuée sur les sources de pollution afin d'établir des signatures propres à chacune d'elles. Les isotopes utilisables dans le domaine de la pollution de l'air sont ceux du carbone, de l'azote, du plomb et du strontium. Les isotopes du carbone montrent que le trafic diesel est une source prépondérante de pollution dans la fraction PM10 et PM2.5. L'origine du strontium, exclusivement présent dans la fraction PM10, est mixte, en provenance des émissions d'incinérateurs urbains et de celles du chauffage au fioul domestique. Les isotopes du plomb présentent moins d'intérêt en France depuis la disparition en 2000 de ce composé dans les carburants. Il reste néanmoins intéressant à suivre dans d'autres contrées du monde, comme en Chine par exemple. Les isotopes de l'azote sont plus difficiles à interpréter car contenant à la fois une information sur l'origine de l'azote primaire (directement émis par les processus de combustion), mais montrant aussi des processus variables selon les saisons issus de diverses réactions secondaires de dégradation des oxydes d'azote en nitrate (NO₃) et ammoniac (NH₄). Des développements récents permettent maintenant des analyses isotopiques précises, sensibles (allant jusqu'au nanogramme, c'est-à-dire des quantités que l'on retrouve dans l'air ambiant) pour des éléments tels que le fer, le chrome, le mercure, le zinc ou le cadmium - métaux connus pour leurs effets d'accumulation dans l'organisme.

* Widory *et al.* Using cadmium and zinc isotopes for tracking their origins in particles (PM10) in the atmosphere of Paris, *in preparation.*

Discrimination des sources de pollution particulaire par les isotopes du cadmium



Le cadmium émis par une centrale thermique est chimiquement identique à celui d'un incinérateur mais totalement différent dans sa composition isotopique.



L'Air Normand
Trimestriel nov.-déc 2007 - janv 2008
ISSN 1169 9280
Tirage 4000 exemplaires
Remerciements aux chercheurs
Primequal concernés.

Directeur de la publication
Dominique Randon
Rédacteur en chef
Véronique Delmas
Rédaction
Céline Léger