

La pollution atmosphérique particulaire sème le trouble

Pierre-Charles Maria

- Résumé** La pollution atmosphérique particulaire est un phénomène qui n'est pas nouveau mais qui évolue. La pollution soufrée est en baisse alors que la pollution carbonée tend à se maintenir avec une tendance à la production de particules ultra-fines. Les effets des aérosols d'origine anthropique sur la santé et le climat sont évoqués, ainsi que les solutions techniques et politiques susceptibles d'être mises en œuvre pour en réduire l'impact.
- Mots-clés** **Aérosols atmosphériques, pollution de l'air, changement climatique, effets sur la santé.**
- Abstract** **Particulate atmospheric pollution makes trouble**
Particulate atmospheric pollution is not a recent phenomenon but is evolving. Pollution by sulfur is dropping whereas carbonaceous pollution is keeping up with a tendency to produce ultra-fine particles. Health and climate effects of aerosols of anthropic origin are raised along with the technical and political solutions which can be used to cope with their impact.
- Keywords** **Atmospheric aerosols, air pollution, climate change, health effects.**

Histoire et origine des pollutions

La pollution atmosphérique n'est pas un phénomène nouveau, et les effets d'une pollution déjà ancienne sur un élément architectural peuvent être clairement mis en évidence lorsqu'un événement bien identifié a concouru à l'isoler de la pollution ambiante ultérieure. C'est le cas des statues représentant les rois de Juda qui ornent la façade principale de Notre-Dame de Paris. Celles qui sont visibles actuellement ont été mises en place par Viollet-le-Duc au XIX^e siècle ; les statues d'origine avaient été jetées à terre durant la Révolution française. Elles sont restées en tas sur le parvis seulement quelques années et enfouies par la suite. Vingt et une des têtes des vingt huit statues ont été retrouvées il y a trente ans lors de travaux de terrassement dans Paris et sont maintenant exposées au Musée national du Moyen Âge en l'Hôtel de Cluny. Les croûtes grises visibles sur ces fragments de statues ont été analysées au Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques, le LISA [1]. Elles sont essentiellement constituées d'une gangue de calcite (CaCO_3) emprisonnant des débris de bois imbrûlé. Le bois était le combustible quasi exclusivement utilisé à Paris avant la Révolution française. Les croûtes noires, souvent beaucoup plus épaisses, et moins denses observées actuellement sur les monuments ont une composition très riche en gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), indication d'une pollution soufrée, et contiennent des cendres volantes provenant de la combustion du charbon et des fiouls lourds. Elles se sont formées après la révolution industrielle. La pollution soufrée due à la combustion du charbon a prévalu en Europe et particulièrement en Angleterre pendant une grande partie du XIX^e siècle et jusqu'au milieu du XX^e siècle. Le brouillard londonien, le « pea-soup fog », est célèbre.

Le peintre français Claude Monet était fasciné par les couleurs produites par la diffraction de la lumière du soleil au travers de cet épais brouillard. Il a composé toute une série

de tableaux sur ce thème. L'un d'entre eux, *Londres, le Parlement. Trouée de soleil dans le brouillard*, daté de 1904, est visible au Musée d'Orsay. Un autre, une huile sur toile de 81 x 92 cm intitulée *Londres, le Parlement, effet de soleil dans le brouillard* (figure 1), datée également de 1904, a dépassé les 20 millions de dollars lors d'une vente aux enchères chez Christie's à New York en 2004. D'après une intéressante étude à la fois historique et astronomique menée par des collègues de l'Université de Birmingham [2], ce tableau aurait été peint d'après nature durant l'année 1900, en fait le 9 mars, lors de l'un des séjours du peintre à



Figure 1 - Claude Monet, *Londres, le Parlement, effet de soleil dans le brouillard* (1904) : une vision artistique du « pea-soup-fog » londonien du début du XX^e siècle.
Photo Production MY Arts Inc. (<http://www.productionmyarts.com/>).

Londres. Il semble donc que Monet ait daté ses toiles au moment de leur vente et non pas au moment où il les a peintes. Baker et Thornes qui se sont attachés à déterminer avec rigueur l'emplacement d'où le peintre aurait pu avoir la vue reproduite sur la toile et à dater avec précision la position du soleil se proposent, maintenant qu'ils ont la quasi-certitude d'avoir là une fidèle représentation de la pollution atmosphérique particulière de l'époque, d'en déterminer la nature et l'intensité par l'étude des couleurs ; affaire à suivre !

Le brouillard londonien n'a hélas pas laissé beaucoup de souvenirs aussi exaltants. Un document au nom évocateur, *The London smog disaster of 1952 – Days of toxic darkness*, mis en ligne par la Faculté de médecine de l'Université d'Edinburgh, retrace les événements de 1952 [3]. Les décès suite à des bronchites ou des pneumonies avaient été multipliés par sept.

La combustion du charbon riche en soufre, produisant du dioxyde de soufre puis des sulfates et de l'acide sulfurique présents dans les aérosols et les pluies acides, a constitué la source principale de la pollution atmosphérique d'origine anthropique jusqu'au milieu du XX^e siècle. Des mesures énergiques ont été prises à partir de cette époque pour réduire sensiblement la pollution par le soufre (« Clean air act » de 1956 au Royaume-Uni par exemple). Les effets ont été bien visibles.

Un exemple d'adaptation des espèces à la pollution atmosphérique – bien connu des professeurs de SVT (sciences de la vie, de la Terre et maintenant de l'Univers) – est celui de la phalène du bouleau (*Biston betularia*) dont la forme *carbonaria*, noire, était dans les années 50 nettement plus abondante en Angleterre dans les zones industrielles polluées que la forme *typica*, blanche, alors que c'est cette variante qui prédomine très largement dans les zones rurales peu ou pas polluées [4]. Cependant, cette pollution soufrée étant en diminution constante de cette époque jusqu'à nos jours, l'adaptation inverse a pu être observée. La forme *carbonaria* de ce papillon est en baisse sensible dans les zones industrielles comme le montrent de nombreuses études, en particulier aux États-Unis [5]. Cette variation peut être corrélée de manière significative à la diminution des concentrations en SO₂ dans l'air ambiant. Dans les années 50, l'évaluation de la pollution atmosphérique était essentiellement liée au mesurage des oxydes de soufre et des fumées noires. Un suivi de l'évolution des niveaux moyens hivernaux des fumées noires dans Paris intra-muros permet de constater que les changements de combustibles ont permis d'abaisser cette pollution par un facteur 10, la faisant passer d'environ 180 µg/m³ pour l'hiver 1956-1957 à moins de 17 µg/m³ pour l'hiver 2004-2005 (figure 2).

L'évolution récente de la nature de la pollution atmosphérique peut à nouveau être observée par ses effets sur des éléments architecturaux du patrimoine, comme l'ont montré les études du LISA pour des changements plus anciens tels que la révolution industrielle et le passage du bois au charbon comme combustible principal. Après une visite au Musée de Cluny pour admirer les têtes des rois de Juda, passez donc dans la Cour Carrée du Louvre pour observer la statue d'Apollon, un marbre de Carrare du milieu du XIX^e siècle. La statue est située dans la deuxième niche à droite du pavillon de Saint Germain l'Auxerrois. Elle a subi un sablage lors de la grande restauration du Louvre en 1985. En 1994, la main droite de la statue a été cassée par un vandale. La main a été récupérée et mise à l'abri. Entre les doigts, inaccessibles au sablage, nos collègues du LISA ont pu observer une croûte noire épaisse formée avant 1985, constituée principalement de gypse cimentant des cendres volantes [6]. Le dos de cette main est recouvert d'une fine croûte gris foncé formée entre 1985 et 1994 et la section du bras cassé en 1994 a été à nouveau recouverte d'une poussière gris clair (l'analyse a été faite en 2003) contenant moins de cendres volantes micrométriques et plus de suies carbonées nanométriques, sans doute en liaison avec la diésélisation importante du parc automobile.

Au niveau mondial, c'est certainement dans les grandes agglomérations que la pollution atmosphérique particulière pose le plus de problèmes au niveau sanitaire – la situation étant bien plus mauvaise dans les mégapoles des pays en développement (Shanghai, Delhi, Le Caire par exemple) que dans les grandes villes nord-américaines ou européennes pourtant réputées autrefois pour la mauvaise qualité de l'air (Los Angeles, Londres...). Dans son récent livre *Ma vérité sur la planète*, pamphlet contre une écologie intégriste, Claude Allègre évoque à grands traits, mais avec lucidité, la question.

Analyses et conséquences de la pollution

En France (métropole et départements et territoires d'outre-mer), la surveillance réglementaire de la pollution atmosphérique est assurée par les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) de compétence régionale ou infrarégionale, regroupées au sein de la Fédération ATMO⁽¹⁾. La pollution atmosphérique particulière est actuellement suivie en continu par la mesure en masse des particules qualifiées de grossières (PM 10) et/ou des particules fines (PM 2,5) au moyen d'analyseurs abrités dans des stations fixes ou mobiles. Les PM 10 et les PM 2,5 sont respectivement les particules en suspension dans l'air dont le diamètre aérométrique est inférieur ou égal à 10 et 2,5 µm (PM vient de l'anglais « particulate matter » et peut être traduit par « matière particulaire »). Dans les agglomérations de plus de 100 000 habitants, la qualité de l'air est communiquée chaque jour de manière synthétique au moyen de l'indice ATMO dont la valeur varie de 1, « très bon », à 10 « très mauvais ». Le pire des quatre sous-indices (SO₂, PM 10, NO₂, O₃) en fixe la valeur. Des cartes des prévisions de la pollution de l'air sont maintenant en accès libre grâce au dispositif Prev'Air⁽²⁾. Pour l'ozone, le dioxyde d'azote, les PM 10, les PM 2,5 et les particules désertiques – celles qui proviennent de l'érosion des sols arides –, les cartes sont disponibles à l'échelle européenne ou pour la France seulement. Des cartes de prévision à l'échelle du globe sont également disponibles pour l'ozone et les

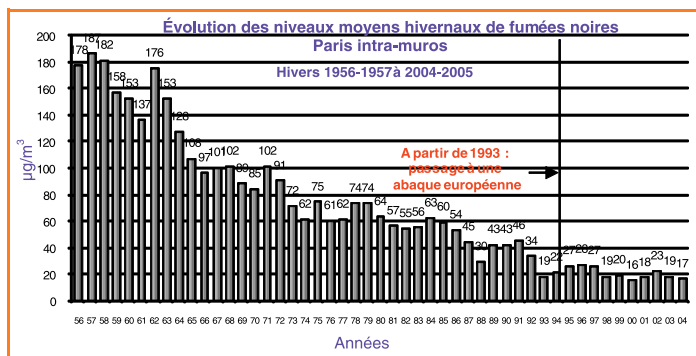


Figure 2 - Pendant les cinquante dernières années, les niveaux moyens hivernaux des fumées noires ont été divisés par un facteur 10 dans Paris intra-muros. Document AIRPARIF.

particules désertiques, ces polluants étant en effet susceptibles d'affecter de très vastes zones dépassant l'échelle du continent.

La matière particulaire en suspension dans l'air qui forme l'aérosol atmosphérique a deux origines, quoique parfois la frontière entre les deux ne soit pas nette. L'une est considérée comme naturelle – activité volcanique, érosion éolienne des sols, embruns marins, certains grands feux de végétation –, l'autre étant qualifiée d'anthropique, plus directement liée à l'activité humaine. Dans ce cas, on distingue l'aérosol primaire de l'aérosol secondaire. Le premier est émis directement sous forme solide : rejets à partir des cheminées et des pots d'échappement, remise en suspension des débris de pneus et des revêtements routiers... Le second est formé par des transformations physiques (condensation, nucléation...) et chimiques (oxydation photochimique, polymérisation...) à partir des composés volatils émis par les sources fixes et les sources mobiles [7]. Les particules en suspension dans l'air sont habituellement classées, selon leur taille, en trois catégories : grossières, fines et ultra-fines. Les particules grossières, au diamètre supérieur à 2,5 μm ont pour origine principale les sols et les sels marins. Les particules fines (entre 0,1 et 2,5 μm) et les particules ultra-fines (moins de 0,1 μm) proviennent principalement de l'utilisation des combustibles fossiles. La taille des particules, leur surface et leur forme, ainsi que leur composition chimique, déterminent les risques pour la santé.

En matière de toxicité, il est reconnu que ce sont les particules les plus fines qui présentent le plus de danger par inhalation [8] et l'on voit même un nouveau champ disciplinaire émerger : la nanotoxicologie [9]. Compte tenu du temps passé dans les environnements clos, la question des expositions humaines aux particules ultra-fines dans l'air intérieur se pose nécessairement. Un état des connaissances a été présenté récemment dans la revue *Pollution Atmosphérique* [10]. En ce qui concerne l'air extérieur, les spécialistes de l'effet de la pollution de l'air sur la santé, s'appuyant sur les travaux du réseau APHEIS (« Air Pollution and Health: a European Information System ») [11], dont la coordination est assurée par l'Institut de veille sanitaire, font pression sur l'Union européenne pour que le projet de directive CAFE (« Clean Air for Europe ») soit plus contraignant en matière de PM 2,5. L'abaissement des

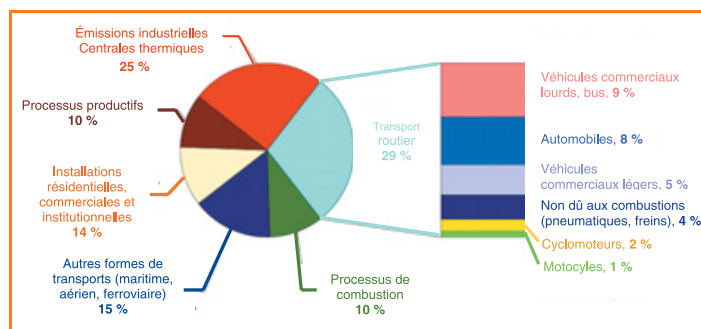


Figure 4 - Contributions d'origine anthropique aux émissions de PM 10 exprimées en pourcentage : l'exemple de l'Italie.

valeurs réglementaires envisagé a déjà pour effet d'augmenter les exigences en matière de métrologie de la surveillance en continu : correction des mesures par TEOM⁽³⁾ pour tenir compte de la composante particulaire volatile et densification des sites de mesurage PM 2,5.

La fraction grossière des PM 10 (diamètre compris entre 2,5 et 10 μm) est majoritairement constituée de poussières minérales et de sels de mer alors que la fraction fine (moins de 2,5 μm) contient principalement de la matière organique et une proportion importante de suies carbonées (figure 3).

En moyenne, si les mesures sont effectuées en un même lieu, la quantité en masse des PM 2,5 est très grossièrement égale à la moitié de ce que l'on observe pour les PM 10. Le rapport PM 2,5/PM 10 change en cas d'évènement particulier. Par exemple à Marseille, on a pu noter une diminution sensible de ce rapport lors de feux de forêt ou de l'arrivée de masses d'air chargées de poussières en provenance du sud de la Méditerranée (les particules désertiques du dispositif Prev'Air).

Comme le montre une étude rendue publique en Italie en 2005, les transports, tous modes confondus (aérien, maritime, ferroviaire et routier) représentent près de 45 % des émissions d'origine anthropique de PM 10. Les transports routiers à eux seuls sont à l'origine de 29 % de ces émissions. L'étude Cirillo donne le détail des contributions à cette pollution d'origine routière en distinguant ce qui provient de la combustion des carburants des divers véhicules (poids lourds et autobus, voitures particulières, véhicules utilitaires légers, cyclomoteurs et motos) de ce qui est dû à l'usure des pneumatiques et des freins (figure 4). Ce sont bien sûr les véhicules diesel relativement anciens, ne correspondant pas aux normes récentes et pas encore équipés de filtres à particules, qui émettent le plus. La norme Euro 4, applicable pour les véhicules neufs depuis le 1^{er} octobre 2006, permet d'abaisser les émissions de particules de 80 %. Ce sont les nanoparticules (diamètre aérométrique inférieur à 50 nm) qui sont de loin les plus nombreuses alors qu'elles ne représentent qu'une faible partie de la masse totale.

L'étude APHEIS portant sur vingt six villes situées dans quinze des pays de l'Union européenne et totalisant 41,5 millions d'habitants [11] a montré que si l'on pouvait réduire à 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ la teneur annuelle moyenne en PM 2,5, 4 400 décès imputables à la pollution particulaire pourraient y être évités. Ce « plafond de concentration » pour la protection de la santé humaine fixé à 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ qui est un objectif à atteindre au 1^{er} janvier 2010 est encore souvent dépassé près des axes de circulation intense (27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne en 2005 à Auteuil sur le boulevard périphérique, 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM 10) et 22 000 décès prématurés

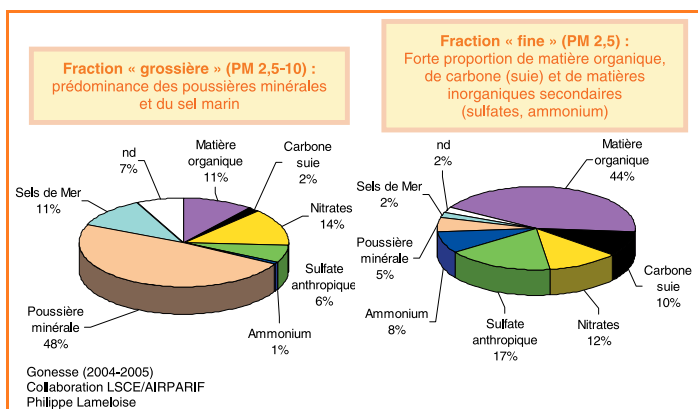


Figure 3 - Analyse type de la composition chimique de l'aérosol en région parisienne (Gonesse) – Collaboration entre AIRPARIF et le Laboratoire des sciences du climat et l'environnement (LSCE).

La fraction grossière des PM 10 est majoritairement inorganique alors que la fraction fine (PM 2,5) contient principalement de la matière organique et une proportion importante de suies carbonées.

pourraient être évités dans les vingt six villes, objet de l'étude, si l'on était en mesure de descendre à $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Rappelons que l'effort à faire dans les grandes agglomérations des pays en développement est sans commune mesure. Alors que, pour comparaison, la concentration moyenne des PM 10 obtenue à partir d'un échantillon constant de stations urbaines dans Paris intra-muros en 2005 était de $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM 2,5), la concentration en PM 10 dans New Delhi, à proximité d'un hôpital récent, peut dépasser les $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ comme c'était le cas au début du mois de janvier 2007.

La pollution atmosphérique particulaire n'est pas le seul fait de l'Homme. Elle provient aussi de phénomènes naturels, parfois cataclysmiques. La palme revient alors aux grandes éruptions volcaniques : El Chichon au Mexique en 1982, le mont Pinatubo aux Philippines en 1991, pour ne citer que les plus récentes. Après l'éruption du Pinatubo, les observations ont montré que la température moyenne de notre planète avait baissé de $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Ces épisodes d'intense pollution atmosphérique d'origine naturelle sont-ils les seuls à influencer le climat ? La réponse est non.

Daniel Rosenfeld de l'Université hébraïque de Jérusalem et ses collaborateurs ont montré que les précipitations orographiques – celles qui se manifestent lorsque des masses d'air humide se refroidissent et forment des nuages en remontant le long des pentes des reliefs – sont perturbées par la pollution atmosphérique particulaire d'origine anthropique. La diminution, au cours des années, des précipitations de ce type sur les versants des reliefs sous les vents provenant de grandes villes comme en Californie, en Israël ou en Chine en est la preuve [12].

Des solutions techniques et politiques

Les évolutions de la pollution atmosphérique sont-elles de nature à modifier durablement le climat ? Les prévisions actuelles sur l'évolution du climat sont préoccupantes [13], et le coût sociétal induit par ce changement peut devenir considérable. Sans pour cela céder au catastrophisme que dénonce Claude Allègre, force est de reconnaître que des orientations drastiques doivent être prises dès maintenant. Comme l'indique le rapport de l'économiste Sir Nicholas Stern, elles apparaissent comme économiquement supportables.

La réduction massive des émissions de gaz à effet de serre est la voie actuellement préconisée pour tenter de stabiliser le réchauffement de la planète. Toutefois, comme l'indique le rapport annuel 2006 du secrétariat de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), les émissions de gaz à effet de serre dans les pays industrialisés sont reparties à la hausse.

Le rôle joué par les aérosols sur le forçage radiatif du climat est complexe [14] et a donné lieu à de nombreuses études, mais il est encore insuffisamment compris. Dans ce contexte, l'éditorial [15] volontairement provocateur (on peut le supposer), publié par le néerlandais Paul Crutzen qui a partagé en 1995 avec Molina et Rowland le prix Nobel de chimie attribué pour l'ensemble de leurs travaux sur la chimie atmosphérique de l'ozone, a fait couler beaucoup d'encre. Il rappelle que le réchauffement dû à l'émission des gaz à effet de serre est en partie compensé par un refroidissement provoqué par les particules émises dans l'atmosphère, que l'origine en soit anthropique ou naturelle comme les éruptions volcaniques. Notons que souvent dans l'esprit du public, ce sont uniquement les activités humaines qui sont considérées comme source de pollution atmosphérique.

Crutzen propose d'étudier sérieusement la possibilité de disperser dans la stratosphère suffisamment de particules soufrées afin de constituer un parasol venant contrecarrer l'effet de serre dont la maîtrise peut s'avérer difficile. Il estime cependant, et il n'est pas le seul, qu'il est urgent de réduire la pollution atmosphérique particulaire dans la troposphère à cause de son incidence néfaste, en particulier sur la santé humaine. Malheureusement, si cet objectif est atteint comme nous le souhaitons tous, cela n'ira pas dans le sens d'une diminution du réchauffement de la planète.

Les chiffres avancés par Crutzen font prendre conscience de l'ampleur du problème. L'utilisation des combustibles fossiles provoque chaque année le rejet dans l'atmosphère de 25 milliards de tonnes de CO_2 , mais aussi de 55 millions de tonnes de soufre sous forme de SO_2 dont environ la moitié produit des particules de sulfate de taille inférieure à un micron. En se basant sur l'expérience acquise après l'éruption du Pinatubo, Crutzen évalue à $0,75 \text{ W}/\text{m}^2$ le pouvoir de refroidissement de 1 million de tonnes de soufre dans la stratosphère. Pour compenser l'élimination quasi complète des aérosols sulfatés d'origine anthropique dont la diminution sensible à l'échelle planétaire est bien visible [16], il faudrait, si on n'arrive pas à réduire les émissions de gaz à effet de serre, disperser chaque année 1 à 2 millions de tonnes de soufre dans la stratosphère faute de quoi, une amélioration complète de la qualité de l'air pourrait conduire à une augmentation de $0,8 \text{ }^\circ\text{C}$ sur la plupart des continents et de $4 \text{ }^\circ\text{C}$ dans les régions arctiques en dix ans.

Pour éviter un tel scénario, il va falloir porter un regard nouveau sur notre environnement : améliorer l'efficacité énergétique, réduire les rejets atmosphériques, optimiser les cycles de vie des produits... La communauté des chimistes dispose d'une feuille de route bien tracée que l'on pourrait résumer par l'acronyme ACME, souvent utilisé par ailleurs et pouvant correspondre dans ce cas à Analyser, Concevoir, Modéliser et Éduquer ! Un développement durable ne peut se concevoir sans une chimie innovante. Doit-on, pour autant, avoir recours à la géo-ingénierie ? Les mesures étudiées par Crutzen choquent, probablement parce qu'elles correspondent à des émissions de matière dans l'environnement atmosphérique vues comme un gaspillage supplémentaire. Par contre, la capture et la séquestration du gaz carbonique choquent moins. En quelque sorte, on a le sentiment de ranger, de mettre de côté, de restituer à la Terre ce qu'on lui a pris. C'est probablement le moyen de contrôler les effets anthropiques sur le climat qui risque le moins de brider le développement des pays émergents, condition indispensable à un équilibre durable de notre planète. Il autoriserait une utilisation plus propre des vastes réserves mondiales de charbon. Les modes de séquestration du CO_2 sont multiples et certains particulièrement prometteurs comme l'injection du CO_2 dans des réservoirs naturels d'hydrates de méthane. Les hydrates de CO_2 sont thermodynamiquement beaucoup plus stables que les hydrates de méthane. D'une pierre deux coups : un stockage sûr du CO_2 et une récupération assistée du méthane [17].

Pour conclure, disons que l'amélioration de la qualité de l'air est une nécessité absolue, en raison avant tout de ses effets sur la santé humaine. La pollution atmosphérique d'origine particulaire joue à cet égard un rôle crucial. Elle est aussi assurément impliquée dans les phénomènes climatiques, mais ses déterminants et ses conséquences sont encore insuffisamment connus. Le développement des pays émergents, qui s'impose, implique que la gestion mondiale de l'énergie soit en cohérence avec les enjeux sanitaires et environnementaux et par là même, durable.

En ce qui concerne la France, faisons référence au « Rapport Richert » [18]. En 2006, Philippe Richert, sénateur du Bas-Rhin et président du Conseil national de l'air, a reçu mission du Premier Ministre de dresser un bilan de la politique menée en France depuis 10 ans en ce qui concerne la réduction de la pollution atmosphérique et de proposer des pistes d'amélioration. Le rapport érige en principes la transparence des choix sanitaires, environnementaux, économiques et sociaux liés aux politiques d'amélioration de la qualité de l'air, ainsi qu'une approche intégrée « air, climat, énergie » et une gouvernance commune. Souhaitons qu'à l'avenir nous n'en restions pas aux principes, fussent-ils clairvoyants, et que les propositions et mesures énoncées dans ce rapport soient prises en compte.

Notes et références

- (1) <http://www.atmo-france.org>
 (2) <http://www.prevoir.org>
 (3) *TEOM* : Tapered element oscillating microbalance.
- [1] Del Monte M., Ausset P., Lefèvre R.A., Thiébaud S., Evidence of the pre-industrial air pollution from the heads of the Kings of Juda statues from Notre Dame Cathedral in Paris, *The Science of the Total Environment*, **2001**, 273, p. 101.
- [2] Baker J., Thornes J.E., Solar position within Monet's houses of parliament, *Proceedings of the Royal Society A*, **2006**, 462, p. 3775.
- [3] The London smog disaster of 1952 – Days of toxic darkness, *Electronic Medical Curriculum at the University of Edinburgh Faculty Of Medicine*, <http://www.portfolio.mvm.ed.ac.uk/studentwebs/session4/27/greatsmog52.htm>
- [4] Gallien A., Distribution de la phalène du bouleau dans les îles britanniques, *Banque de schémas SVT, Académie de Dijon*, **2006**, <http://svt.ac-dijon.fr/schemassvt/>
- [5] Grant B.S.; Wiseman L.L., Recent history of melanism in American peppered moths, *The Journal of Heredity*, **2002**, 93, p. 86.
- [6] Lefèvre R.A., Ausset P., Recent changing in air pollution in Paris recorded on a statue of Apollo in the Cour Carrée, Louvre Palace, *6th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, Lisbonne, **2004**, <http://www.lisa.univ-paris12.fr/>
- [7] Pöschl U., Atmospheric aerosols, composition, transformation, climate and health effects, *Angewandte Chemie Int. Ed.*, **2005**, 44, p. 7520.
- [8] Nel A., Air pollution-related illness: effects of particles, *Science*, **2005**, 308, p. 804.
- [9] Oberdörster G., Oberdörster E., Oberdörster J., Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles, *Environmental Health Perspectives*, **2005**, 113, p. 823.
- [10] Mandin C., Ramalho O. et al., *Pollution Atmosphérique, avril-juin 2006*, 190, p. 139.
 Voir également le bulletin « Info Santé Environnement Intérieur », une publication trimestrielle qui rassemble des synthèses de travaux scientifiques récents menés sur le thème de l'environnement intérieur (<http://rsein.ineris.fr>).
- [11] a) Medina S., Health impact assessment on the benefits of reducing PM_{2.5} in 26 European cities (Summary Apehis HIA on PM_{2.5}), <http://www.apehis.net/>; b) Commission européenne, Qualité de l'air : fronde des scientifiques, *RDT Info, Magazine de la Recherche européenne*, déc. **2006**, 51, p. 26.
- [12] a) Givati A., Rosenfeld D., Quantifying precipitation suppression due to air pollution, *Journal of Applied Meteorology*, **2004**, 43, p. 1038; b) Rosenfeld D., Dai J., Yu X., Yao Z., Xu X., Yang X., Du C., Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation, *Science*, **2007**, 315, p. 1396. Pour avoir accès à l'ensemble des travaux de l'équipe de Daniel Rosenfeld : <http://earth.huji.ac.il/staff-details.asp?topic=3&id=149>
- [13] Rahmstorf S., Cazenave A., Church J.A., Hansen J.E., Keeling R.F., Parker D.E., Somerville R.C.J., Recent climate observations compared to projections, *Science*, **2007**, 316, p. 709.
- [14] a) Schrope M., Trouble in the greenhouse, *Nature*, **2000**, 407, p. 10; b) Andreae M.O., The dark side of aerosols, *Nature*, **2001**, 409, p. 671; c) Andreae M.O., Jones C.D., Cox P.O., Strong present-day aerosol cooling implies a hot future, *Nature*, **2005**, 435, p. 1187; d) Ramanathan V., Ramanathan M., Roberts G., Kim D., Corrigan C., Chung C., Winker D., Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption, *Nature*, **2007**, 448, p. 575.

- [15] Crutzen P.T., Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change*, **2006**, 77, p. 211.
- [16] Mishchenko M.I., Geogdzhayev I.V., Rossow W.B., Cairns B., Carlson B.E., Laci A.A., Liu L., Travis L.D., Long-term satellite record reveals likely recent aerosol trend, *Science*, **2007**, 315, p. 1543.
- [17] Kvamme B., Graue A., Buanes T., Kuznetsova T., Erslund G., Storage of CO₂ in natural gas hydrate reservoirs and the effect of hydrate as an extra sealing in cold aquifers, *Intern. Journal of Greenhouse Gas Control*, **2007**, 1, p. 236.
- [18] Richert P., Qualité de l'air et changement climatique : un même défi, une même urgence – Une nouvelle gouvernance pour l'atmosphère, Rapport au Premier Ministre, *Collection des rapports officiels, La Documentation française*, Paris, **2007**, <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/074000137/index.shtml>



Pierre-Charles Maria

est professeur à l'Université de Nice Sophia Antipolis¹ et président d'ATMO PACA².

¹ Laboratoire de radiochimie, sciences analytiques et environnement, Université de Nice Sophia Antipolis, Faculté des Sciences, Parc Valrose, 06108 Nice Cedex 2.

Courriel : pccmaria@unice.fr

² www.atmopaca.org



Nous utilisons des matières premières renouvelables issues de la nature et les transformons en produits ultra-performants dans le plus grand respect de l'environnement.



Acteur mondial de premier plan dans le secteur de la chimie de spécialités, Cognis axe sa démarche sur des tendances internationales comme le bien-être et le développement durable. Avec nos produits, nos concepts marketing et nos solutions personnalisées, nous apportons des impulsions nouvelles sur de nombreux marchés industriels : cosmétiques, soins corporels, détergents et lessives, denrées alimentaires, nutrition et santé, vernis et peintures, lubrifiants, textiles, phytosanitaire ou extraction pétrolière.



Tous les sites de Cognis sont soumis aux mêmes exigences très strictes en terme de qualité, environnement, santé, social et sécurité. Nous apportons la même attention à tous : collaborateurs, clients, toutes personnes directement concernées par nos activités.



En 2000, Cognis devient la première entreprise de chimie à recevoir deux certifications mondiales, ISO 14001 et ISO 9001 pour ses cycles de gestion qualité et environnement.



Cognis France
 185 avenue de Fontainebleau
 F-77310 Saint Fargeau Ponthierry
 TEL : +33 1 60 65 21 00
 FAX : +33 1 60 65 21 01
<http://www.cognis.com>