



HAL
open science

Qualité de l'air et climat : la modélisation des aérosols atmosphériques

Bertrand Bessagnet, Laurence Rouil

► **To cite this version:**

Bertrand Bessagnet, Laurence Rouil. Qualité de l'air et climat : la modélisation des aérosols atmosphériques. Rapport Scientifique INERIS, 2007, 2006-2007, pp.40-44. ineris-01869085

HAL Id: ineris-01869085

<https://ineris.hal.science/ineris-01869085>

Submitted on 6 Sep 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Qualité de l'air et climat: la modélisation des aérosols atmosphériques

Bertrand Bessagnet, Laurence Rouïl

Depuis 2004, le système PREV'AIR, système national de prévision de la qualité de l'air fournit, outre des prévisions des concentrations d'ozone, des prévisions des particules à l'échelle européenne et, depuis 2006, des cartes dites « analysées » de particules de diamètre inférieur à 10 microns – PM10 – (les seules réglementées à l'heure actuelle) à l'échelle de la France. Ces dernières sont établies à partir de résultats de simulations corrigés quotidiennement à l'aide des observations réunies dans une base par l'ADEME. Les particules, par les effets sanitaires qu'elles génèrent, font l'objet d'une attention de plus en plus grande des décideurs et des politiques. En particulier, les particules fines dont le diamètre est inférieur à 2,5 microns (PM2,5) seront certainement réglementées dans la future directive européenne unifiée de qualité de l'air. Cet intérêt croissant ainsi que le manque de connaissances sur bien des aspects de la pollution particulaire expliquent qu'au-delà de la question de la prévision et de la représentation cartographique des concentrations, des travaux de recherche et d'appui aux pouvoirs publics soient toujours activement menés à l'INERIS. Il s'agit de contribuer à une meilleure connaissance de la phénoménologie liée à la formation et au transport des aérosols, de leur mesure et de leur modélisation. L'objet du présent article est de proposer les résultats des travaux de modélisation menés à l'INERIS sur ce polluant, qui représente un réel enjeu scientifique, par la complexité des processus de formation des aérosols issus de transformations chimiques (dits secondaires), par

l'impact sanitaire et environnemental qui le caractérise et par les aspects réglementaires qui le concernent.

LA MODÉLISATION POUR UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION DES ÉPISODES DE POLLUTION PARTICULAIRE

Le modèle de Chimie-Transport CHIMERE utilisé dans le cadre de PREV'AIR, est développé conjointement par l'IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace) et l'INERIS. L'INERIS développe plus spécifiquement le module d'aérosol depuis 2001 ce qui a permis d'établir les premières prévisions opérationnelles de PM10 et PM2,5 en 2004. Ces développements ont fait l'objet de nombreuses publications scientifiques. Les efforts de l'Institut ont porté ces dernières années sur deux thèmes principaux: l'évaluation de l'outil de modélisation, et sa mise en œuvre pour l'analyse des épisodes de pollution particulaire survenant en France.

Validation du modèle

Une large partie des travaux de ces trois dernières années a été consacrée à l'évaluation de l'approche de modélisation retenue [1]. En effet, considérant les enjeux opérationnels de prévision et de cartographie auxquels est astreint PREV'AIR, il est indispensable de s'assurer de la fiabilité et de la pertinence des résultats simulés. La comparaison aux mesures disponibles montre que les concentrations en particules modélisées sont généralement inférieures aux concentrations mesurées. Il s'agit d'une limite actuelle bien connue de l'ensemble des modèles disponibles comme cela

NOTES

1 - Convention sur le transport des polluants à longue distance (CLRTAP) : programme mené par la Commission Économique pour l'Europe des Nations-Unies.

a été révélé au cours de plusieurs exercices européens d'intercomparaison. On citera en particulier les projets City-Delta et Eurodelta réalisés à la demande respectivement de la Commission européenne et de la Convention sur le transport des polluants à longue distance (CLRTAP)¹.

Ces travaux ont permis de comparer les résultats produits par six modèles européens (dont CHIMERE) en réponse à différentes hypothèses de réduction des émissions de particules primaires et de polluants précurseurs de l'ozone et des aérosols secondaires. Ils ont permis de révéler les performances de ces modèles à l'échelle européenne et d'en proposer des interprétations selon les caractéristiques des paramétrisations physico-chimiques implantées dans les modèles [6, 3, 5].

Les raisons pour lesquelles les modèles sous-estiment globalement les concentrations massiques de particules sont multiples :

- Mauvaise connaissance et sous-estimation des émissions. Cela est vrai,

en particulier, pour certains secteurs d'activités tels que la combustion du bois (chauffage résidentiel et tertiaire), les activités agricoles et le trafic routier et non routier. De plus, les émissions en particules dont le diamètre est inférieur à une certaine taille (fraction granulométrique) résultent généralement de facteurs de spéciation affectés à la masse totale de particules émises. Cela impacte directement les niveaux de concentration de particules primaires simulés.

- Connaissance limitée des processus de formation des aérosols organiques secondaires qui résultent des émissions, généralement gazeuses, de composés organiques d'origine anthropique ou biotique.

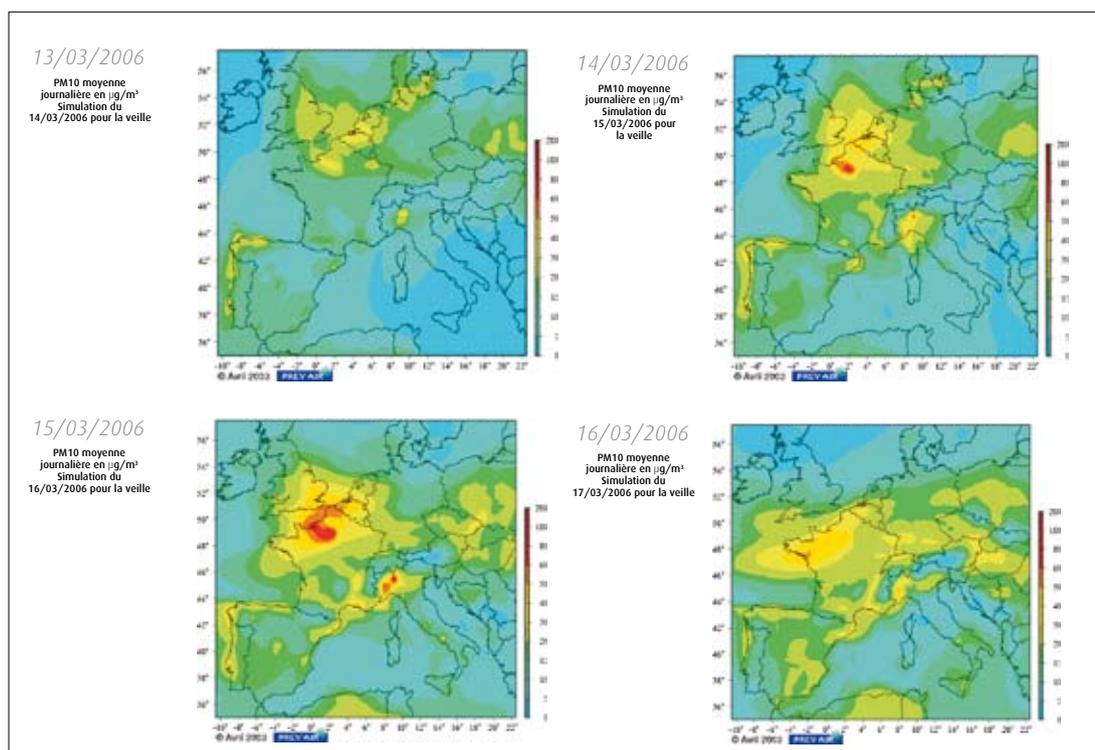
- Prise en compte parfois approximative des sources naturelles : sels marins, poussières sahariennes, débris végétaux.

- Difficultés liées à la simulation de paramètres météorologiques influents tels que les nuages ou les précipitations. Malgré ces difficultés, les résultats

d'évaluation des modèles d'aérosols atmosphériques sont jugés très encourageants et parfois même satisfaisants lorsque, par exemple, on s'intéresse à la part inorganique des aérosols. CHIMERE est considéré comme conforme à l'état de l'art au niveau européen, avec un bon comportement lors des différents exercices d'intercomparaison auxquels l'INERIS a participé (Eurodelta, City-Delta). Ceci n'empêche pas l'INERIS de poursuivre ses efforts afin d'améliorer la qualité des résultats produits par le modèle.

Analyse d'épisodes de pollution particulaire

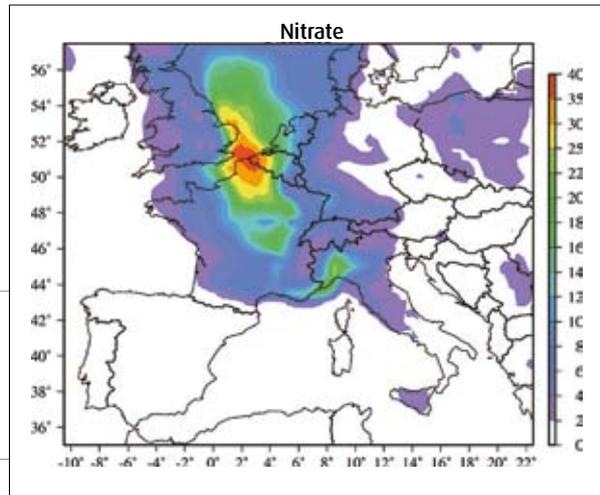
Les travaux de modélisation de l'INERIS concernent aussi l'étude d'événements spécifiques de pollution particulaire^[2]. Ils ont permis de montrer le développement de larges panaches de pollution particulaire à l'échelle de l'Europe (figure 1, par exemple, en 2006) notamment dus à la production de nitrate d'ammonium. La France est fréquemment impactée par ces panaches



1

Concentrations moyennes journalières de PM10 en µg/m³ sur l'Europe - Historique du panache.

2



Concentration de nitrate simulée par CHIMERE le 21 février 2003 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

qui prennent naissance dans des zones géographiques de forte émission d'oxydes d'azote (Pays-Bas, Europe de l'Est). Ils se forment généralement en fin de période hivernale lorsque les températures sont encore assez basses et l'ensoleillement suffisamment important pour générer les polluants secondaires nécessaires au développement de ces épisodes. La figure 2 montre le développement d'un épisode particulièrement important de ce type, apparu en février 2003. Cette représentation cartographique permet de bien identifier la source de l'événement et son amplification avec les apports des émissions locales.

PROSPECTIVE : INTERACTIONS CHIMIE-CLIMAT

L'INERIS, en collaboration avec l'ADEME et le Laboratoire d'Aérodologie (CNRS/LA/OMP), s'est engagé sur la voie des études prospectives de la qualité de l'air à l'échelle climatique.

Le climat est un thème majeur des études d'interaction aérosols-rayonnement. Le rayonnement solaire incident (ultraviolet, visible, infrarouge) réagit avec l'atmosphère (gaz et particules) et la surface de la Terre à différents degrés. L'ultraviolet est majoritairement absorbé dans la stratosphère (couche d'ozone), le proche ultraviolet résiduel

jouant cependant un rôle essentiel dans les réactions photochimiques de la troposphère (e.g. dans l'équilibre photostationnaire $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{O}_3$). Le rayonnement infrarouge est absorbé et réémis (rayonnement thermique) sélectivement par certaines molécules atmosphériques (gaz à effet de serre GES/GHG: CO_2 , CH_4 , vapeur d'eau...). Schématiquement, la notion de forçage radiatif (IPCC, 2001) exprime toute modification apportée au bilan énergétique du système climatique par des facteurs externes, e.g. l'évolution des concentrations en gaz à effet de serre et/ou la charge de l'atmosphère en aérosols. Ce concept de forçage radiatif traduit ainsi les effets anthropiques sur le climat des pollutions photochimique et particulaire associées aux activités humaines, notamment les divers types de combustion. Dans la troposphère, les gaz à effet de serre ont un effet positif de réchauffement.

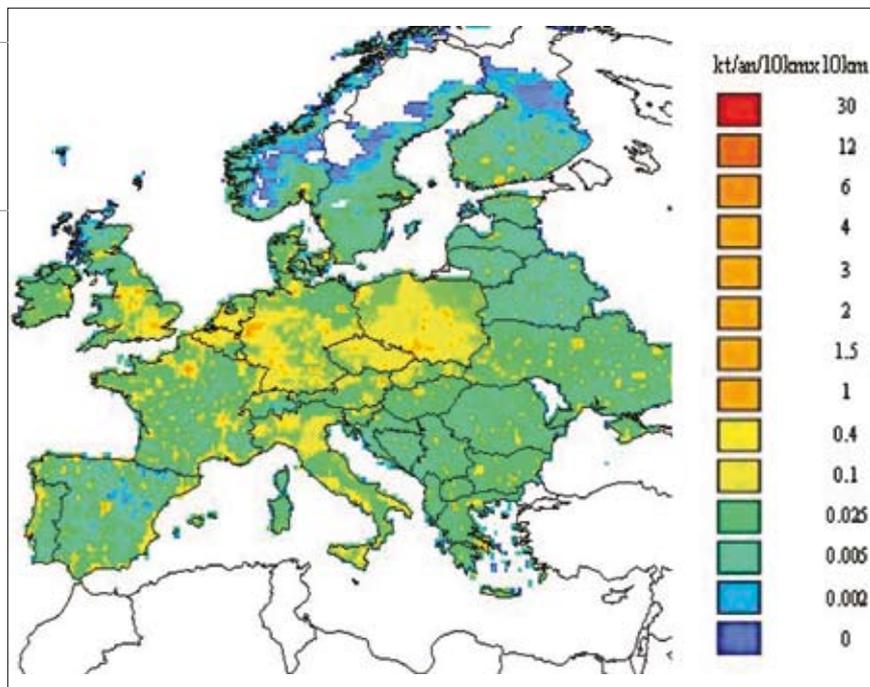
En revanche, les aérosols ont un comportement sensiblement plus complexe, positif et/ou négatif, avec des effets directs, semi-directs et indirects. Ainsi, pour les sulfates, du fait d'une diffusion prépondérante, le forçage radiatif est négatif (refroidissement). Les aérosols carbonés peuvent avoir des effets soit positifs (carbone suie -BC), soit négatifs (carbone organique -OC). De plus, les incertitudes sur l'impact radiatif des aérosols sont encore très grandes, d'où leur importance dans les études climatiques. Et ce, d'autant plus, qu'à la différence des gaz à effet de serre, les aérosols présentent des distributions localisées et régionalisées.

Plus spécifiquement, il a ainsi été établi, notamment durant ces 20 dernières années, que les aérosols jouent un rôle crucial dans le changement climatique, selon trois formes de forçage :

- Le forçage lié à l'interaction directe des aérosols avec l'énergie solaire incidente et le rayonnement terrestre. La présence d'aérosols, principalement

Distribution des émissions de carbone suie en 1995: hypothèse pessimiste (1024 kt/an).

3



dans les basses couches de l'atmosphère, abaisse localement la température atmosphérique (« forçage négatif ») du fait d'aérosols essentiellement diffusants (sulfates et carbone organique) ou bien l'augmente localement (« forçage positif ») du fait d'aérosols absorbants (du type carbone suie ou poussières). Ce forçage est qualifié d'« effet direct ».

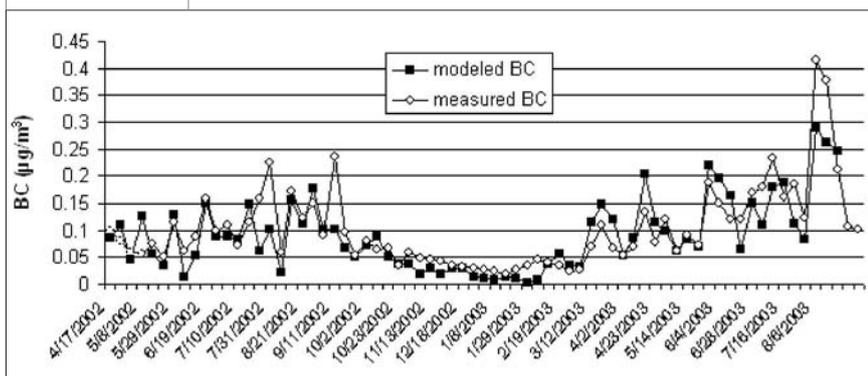
- Le forçage exercé par les aérosols sur le profil vertical de température, agissant ainsi sur la formation et le type des nuages : c'est l'« effet semi-direct » étudié notamment lors de la campagne INDOEX sur l'océan Indien. Une étude similaire a été réalisée sur l'Atlantique Nord.

- Les forçages de type « effet indirect » par les aérosols, du fait des interactions aérosols/nuages. Les aérosols servent de noyaux de condensation dans la formation des nuages. Une forte charge en aérosols en air pollué détermine un grand nombre de petites gouttelettes d'eau et, par suite, donne lieu à la formation d'un nuage fortement réfléchissant. C'est le premier effet indirect, refroidissant. De plus, les gouttelettes étant plus petites, elles n'atteignent pas la taille critique au-delà de laquelle se déclenchent les précipitations, la durée de vie du nuage est, de ce fait, augmentée et la couverture nuageuse moyenne de la Terre est ainsi accrue. Ce processus constitue le second effet indirect des aérosols sur le climat, positif ou négatif, selon l'altitude des nuages.

De nombreuses estimations ont été avancées pour ces trois types distincts de forçage, compte tenu des niveaux de connaissance très différents et des fortes incertitudes. Le forçage direct est le plus étudié, à l'opposé des forçages indirects et du forçage semi-direct.

L'INERIS, dans le cadre d'un projet de recherche et par l'intermédiaire d'une thèse de doctorat cofinancée par l'ADEME et co-encadrée par le laboratoire d'Aérodologie, s'est intéressé à la contribution de l'aérosol carboné sur le climat. En effet, il regroupe des espèces dont l'effet peut être contradictoire, d'où la difficulté de traiter de cette question de manière exhaustive. La première étape a été de mettre au point une procédure permettant d'établir un cadastre d'émission sur l'Europe de ces différentes espèces (figure 3).

Un nouveau modèle de chimie-transport incluant les aérosols à l'échelle globale a été développé à partir du modèle TM4 [4]. Ce modèle détaille plus précisément les espèces carbonées d'origines primaire



4

Série temporelle de carbone suie au Pic du Midi (simulation et observations).

RÉFÉRENCES

- [1] Bessagnet B., Hodzic A., Vautard R., et al. (2004). "Aerosol modeling with CHIMERE- preliminary evaluation at the continental scale". *Atmospheric Environment*, 38 (18): pp. 2803-2817.
- [2] Bessagnet B., Hodzic A., Blanchard O., et al. (2005). "Origin of particulate matter pollution episodes in wintertime over the Paris Basin," *Atmospheric Environment*, 39 (33): pp. 6159-6174.
- [3] Cuvelier C., Thunis P., Vautard R., Amann M., Bessagnet B., Bedogni M., Berkowicz R., Brandt J., Brocheton F., Builtjes P., et al. (2007). "CityDelta: A model intercomparison study to explore the impact of emission reductions in European cities in 2010". *Atmospheric Environment*, volume 41, Issue 1, pp. 189-207.
- [4] Guillaume B. (2007). « Les aérosols: émissions, formation d'aérosols organiques secondaires, transport longue distance - Zoom sur les aérosols carbonés en Europe ». Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- [5] Vautard R., Builtjes P.H.J., Thunis P., Cuvelier C., Bedogni M., Bessagnet B., Honoré C., Moussiopoulos N., Pirovano G., Schaap M., et al. (2007). "Evaluation and intercomparison of Ozone and PM10 simulations by several chemistry transport models over four European cities within the CityDelta project". *Atmospheric Environment*, volume 41, Issue 1, pp. 173-188.
- [6] Thunis P., Rouil L., Cuvelier C., Stern R., Kerschbaumer A., Bessagnet B., Schaap M., Builtjes P., Tarrason L., Douros J., et al. (2007). "Analysis of model responses to emission-reduction scenarios within the CityDelta project". *Atmospheric Environment*, volume 41, Issue 1, pp. 208-220.

SUMMARY

ATMOSPHERIC AEROSOL MODELLING: BEYOND THE PREV'AIR SYSTEM

Since 2004, the French national air quality forecasting system, PREV'AIR, has been providing maps of forecasted ozone and particulate matter (PM) concentrations throughout Europe. At the national level, "analysed maps" based on simulations corrected with observations are also available daily. These products have been elaborated using modelling capacities developed within INERIS. Significant efforts have been placed on particulate matter modelling, considering the growing interest of the people in charge of air quality management and monitoring for these tools. Thus, beyond the PREV'AIR applications, research studies are being conducted within INERIS for improving knowledge in the fields of aerosol phenomenology, modelling and monitoring. The evaluation and the improvement of the CHIMERE-aerosol model is a priority. Comparison with available measurements generally shows that models underestimate the measured concentrations. This is a well-known limit of the current modelling systems, highlighted by several European model inter-comparison exercises: City-Delta and Eurodelta. INERIS participated in these projects, which enabled several phenomena to be clarified: uncertainties in emissions (wood burning, traffic), secondary aerosol formation processes, natural sources, cloud chemistry, etc. These topics are likely to be considered as future priorities for model development.

Nevertheless the current performance of the CHIMERE model is satisfactory enough to use its results for analysing large scale pollution events involving PM (fig. 1), and especially secondary compounds such as ammonium nitrate (fig. 2). INERIS is also involved in research activities related to the links between air pollution and climate change. Aerosols, depending on their nature, play a special role through three main pathways: 1) Affecting the impact of solar radiation and having a cooling (sulphate, organic carbon) or warming (black carbon) effect on the atmosphere. 2) Impacting the vertical distribution of temperature and cloud formation 3) Changing the reflecting properties and lifetime of clouds, inducing a positive or negative effect on climate warming. INERIS has elaborated with the Laboratoire d'Aérodologie (CNRS/LA) and with the support of ADEME a new aerosol model that can take the carbonaceous fraction accurately into account (fig. 4). A first step to reach a more accurate representation of links between future climate and air pollution.

et secondaire. La figure 4 représente une série temporelle de carbone suie durant l'été 2003 au pic du Midi simulée par le modèle développé dans le cadre de ce travail de recherche et comparée à des observations.

Ce travail de thèse a permis de développer un modèle d'aérosol global complet particulièrement détaillé sur la fraction carbonée. Ce type de modèle permettra de travailler plus précisément sur l'évolution du climat et de la qualité de l'air à l'échelle régionale en Europe.