

Modélisation de la composition chimique de la troposphère avec CHIMERE

Laurent Menut, Bertrand Bessagnet, Dmitry Khvorostiyanov, Solène Turquety, Jean-Louis Monge, Myrto Valari, Robert Vautard

▶ **To cite this version:**

Laurent Menut, Bertrand Bessagnet, Dmitry Khvorostiyanov, Solène Turquety, Jean-Louis Monge, et al.. Modélisation de la composition chimique de la troposphère avec CHIMERE. La Météorologie, 2011, 75, pp.23-32. 10.4267/2042/45802 . ineris-00963329

HAL Id: ineris-00963329
https://ineris.hal.science/ineris-00963329

Submitted on 4 Jun 2021

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution| 4.0 International License

Modélisation de la composition chimique de la troposphère avec CHIMERE

Laurent Menut[1], Bertrand Bessagnet[2], Dmitry Khvorostyanov[1], Solène Turquety[1], Jean-Louis Monge[1], Myrto Valari[1] et Robert Vautard[3]

(1) Laboratoire de météorologie dynamique (LMD), IPSL, CNRS École Polytechnique - 91128 Palaiseau Cedex
(2) Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), Division des risques chroniques — Verneuil-en-Halatte, France.
(3) Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), IPSL, CNRS, CEA — Gif-sur-Yvette, France

Résumé

La présence d'espèces gazeuses et particulaires (aérosols) dans l'atmosphère peut avoir des effets néfastes à la fois sur la santé, l'environnement et le climat. Pour limiter les effets de la pollution de l'air, il faut comprendre l'ensemble des mécanismes de formation des polluants atmosphériques. Lors d'épisodes de pollution à l'échelle régionale, une conjonction de phénomènes entre en jeu : de très fortes émissions anthropiques ou naturelles, un temps défavorable à la dispersion des polluants, une chimie et des dépôts plus ou moins rapides et efficaces. Tous ces facteurs sont très variables dans le temps et dans l'espace. Pour analyser finement l'ensemble des processus, il est nécessaire de construire des outils numériques intégrateurs de l'ensemble des causes, les modèles de chimie-transport.

Le modèle CHIMERE utilise des champs météorologiques et des flux d'émissions de polluants et calcule de manière déterministe leur devenir dans la troposphère. Les résultats sont des champs tridimensionnels de concentrations chimiques. Ils peuvent être comparés à des mesures pour analyser des périodes passées ou servir à réaliser des prévisions de pollution. CHIMERE a ainsi permis d'évaluer notre compréhension du transport de polluants lors des campagnes de mesures ESQUIF[1], ESCOMPTE[2], AMMA[3] ou MEGAPOLI[4]. Il est intégré à la plate-forme de prévision nationale PREV'AIR, délivrant des champs de polluants prévus jusqu'à trois jours à l'avance. Le modèle permet aussi de réaliser des études de scénarios et de comprendre des tendances d'évolution de la pollution sur le long terme. Si la modélisation de la pollution photo-oxydante a atteint un bon degré de maturité, les derniers projets impliquant CHIMERE visent maintenant à accroître nos connaissances sur l'impact de la pollution sur la santé à l'échelle urbaine et sur les émissions et le transport des pollens. À plus grande échelle, ces projets ont également pour objectif d'analyser et de prévoir le transport de panaches de polluants engendrés par les éruptions volcaniques et les feux de forêts.

...

L'industrialisation a augmenté le besoin de compréhension des phénomènes de pollution. Les premières études importantes ont porté sur la part anthropique de la pollution à l'échelle régionale et les premières mesures systématiques ont été mises en place par des réseaux régionaux, en privilégiant les lieux où les sources étaient les plus intenses et la population la plus dense. L'un des premiers polluants « cible » a été le dioxyde de soufre. Grâce à différentes mesures de réduction d'émissions, les concentrations en dioxyde de soufre sont aujourd'hui largement réduites. L'attention s'est ensuite portée sur des espèces gazeuses comme l'ozone et les oxydes d'azote. Plus récemment, ce sont les particules qui sont devenues le centre d'intérêt. En parallèle, et même si elles ont toujours existé, les recherches sur la pollution « naturelle » ont été plus modestes : contrairement aux sources anthropiques, ces sources ne sont pas contrôlables et elles ont longtemps été perçues (à tort) comme moins intenses.

Au même titre que les espèces à longue durée de vie (intéressantes pour les études climatologiques), l'ozone et certains de ses précurseurs peuvent être transportés d'une région ou d'un pays à l'autre. Cela signifie que l'étude locale, souvent urbaine, est importante, mais que l'agrandissement de la zone d'étude l'est tout autant : l'air respiré dans une ville peut avoir été pollué localement mais aussi à plusieurs centaines de kilomètres de là, que ce soit de manière anthropique ou biogénique. L'incertitude sur la composition et le devenir des masses d'air polluées prend alors plusieurs dimensions : locale car il faut comprendre les émissions et la météorologie à petite échelle, et régionale ou continentale car il faut pouvoir décrire correctement le transport des masses d'air sur de longues distances.

Afin d'intégrer ces différentes échelles d'études, des modèles de chimie-transport ont été développés ces dernières années. Si leur but est d'estimer au mieux la concentration des polluants, certains modèles s'attachent à bien reproduire des tendances continentales sur le long terme (quelques années) alors que d'autres simulent la dispersion à l'échelle de quartiers (quelques heures). Le modèle CHIMERE a été développé pour réaliser à la fois des analyses fines de cas, des prévisions, des scénarios et des analyses de tendances. Il comprend donc tous les mécanismes qui représentent le système physico-chimique tout en étant optimisé pour réaliser des simulations très rapidement. Ce modèle est

(1) ESQUIF : Étude et simulation de la qualité de l'air en Île-de-France.
(2) ESCOMPTE : Expérience sur site pour contraindre les modèles de pollution atmosphérique et de transport d'émissions.
(3) AMMA : Analyses multidisciplinaires de la mousson africaine.
(4) MEGAPOLI : Megacities, emissions, urban, regional and global atmospheric pollution and climate effects, and integrated tools for assessment and mitigation.

Abstract

Tropospheric chemical composition modeling with CHIMERE

The presence of some gases and particulates (aerosol) in the atmosphere can have adverse effects on both health, environment and climate. To limit the effects air pollution, all the mechanisms of pollutant formation must be included. During pollution episodes at the regional scale, a combination of phenomena comes into play: very high emissions, anthropogenic or natural, stagnation reducing the dispersion of pollutants, chemistry and deposition of various speeds and efficiency. All these factors are highly variable in time and space. To analyze in detail all these processes, it is necessary to build numerical tools to integrate all sources and sinks: the chemistry-transport models.

The CHIMERE model uses meteorological model fields and emissions fluxes and calculates deterministically their behavior in the troposphere. The results are three-dimensional fields of chemical concentrations. They can be compared to measurements to analyze past periods or used to make air quality forecasts. CHIMERE has enabled us to gauge our understanding of the transport of pollutants during the measurement campaigns ESQUIF, ESCOMPTE, AMMA and MEGAPOLI. It is a part of PREV'AIR French national forecast platform, delivering forecasts of pollutants' concentrations up to three days in advance. The model also allows scenario studies and long term simulations for pollution trends. The modeling of photochemical air pollution has reached a good level of maturity, the latest projects involving CHIMERE are now increasing our understanding of pollution impact on health at the urban scale, emissions and transport of pollen and, at a larger scale, allow us to analyze the transport of plumes emitted by volcanic eruptions and forest fires.

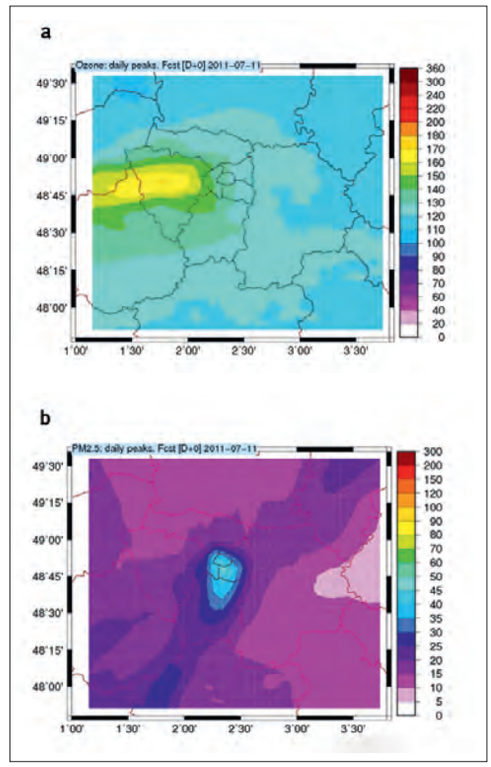
utilisé par des organismes opérationnels, il doit donc être « stable » dans ses simulations, c'est-à-dire estimer des pics de pollution au bon moment et au bon endroit uniquement. Développé au sein d'organismes de recherche, CHIMERE est aussi un outil privilégié pour de nombreux projets visant à mieux comprendre l'évolution de polluants gazeux ou particulaires.

Le modèle CHIMERE

Caractéristiques du modèle

CHIMERE est un modèle eulérien de chimie-transport. À partir de champs météorologiques précalculés et de sources d'émissions prescrites, CHIMERE calcule à une résolution temporelle de l'ordre de la dizaine de secondes, le devenir de masses d'air polluées au cours de leur transport : diffusion turbulente, transformations chimiques, dépôt, etc. (Bessagnet et al., 2004). L'ensemble de ces calculs est limité à la troposphère, c'est-à-dire de la surface à une dizaine de kilomètres d'altitude. Ces masses d'air polluées sont constituées de composés chimiques gazeux (comme l'ozone, les oxydes d'azote, les composés organiques volatils) et de particules (comme les sulfates, les nitrates, l'ammonium et les particules carbonées) ainsi que le présente la figure 1.

Figure 1 - Exemples de modélisation de concentrations de surface de polluants en mode prévision sur la plateforme expérimentale COSY (Comparaison systématique) à l'IPSL/LMD à Palaiseau (Essonne). Valeurs maximales sur la journée (en µg.m^{-3}) du 11 juillet 2011 simulées le jour même : (a) pour l'ozone et (b) pour les $PM_{2.5}$ (particules de diamètre inférieur à 2,5 µm) en région parisienne.



L'ensemble des processus pris en compte est représenté sur la figure 2. Ces calculs sont réalisés sur des domaines allant de la région (comme l'Île-de-France, l'Alsace, la région PACA, la vallée du Pô, etc., avec une résolution de 3 km) au continent (comme l'Europe, l'Atlantique, etc., avec une résolution d'un degré), pour des mécanismes chimiques incluant quelques centaines de réactions pour quelques dizaines d'espèces chimiques (gaz, aérosols). Verticalement, le domaine s'étend de la surface terrestre au sommet de la troposphère (au maximum), sur un nombre de niveaux verticaux de 8 à 60 en fonction du phénomène étudié. Le maillage est raffiné en surface (la première couche simulée fait 20 m) puis se détend avec l'altitude. Ces niveaux verticaux, exprimés en coordonnées sigma-pression, sont d'épaisseurs variables (heure par heure) pour un même lieu, en fonction de la topographie et des conditions atmosphériques (la pression). Les résultats sont des champs de concentrations dans l'espace et dans le temps pour l'analyse d'événements de pollution et pour l'étude de processus particuliers, de scénarios et de prévisions.

Le développement du modèle répond aux contraintes suivantes :
– calculer avec une bonne précision des concentrations chimiques dans l'atmosphère ;
– être assez souple pour permettre des mises à jour au niveau du développement de nos connaissances dans ce domaine de recherche ;
– être assez rapide en temps de calcul pour permettre des études de scénarios prospectifs de réduction des émissions, des études climatologiques et des prévisions opérationnelles.

Les forçages du modèle

La mise en œuvre d'une simulation de chimie-transport nécessite de disposer d'informations sur ses principaux forçages :
– les conditions aux limites (pour un modèle à aire limitée, savoir ce qui peut venir de l'extérieur du domaine simulé) ;

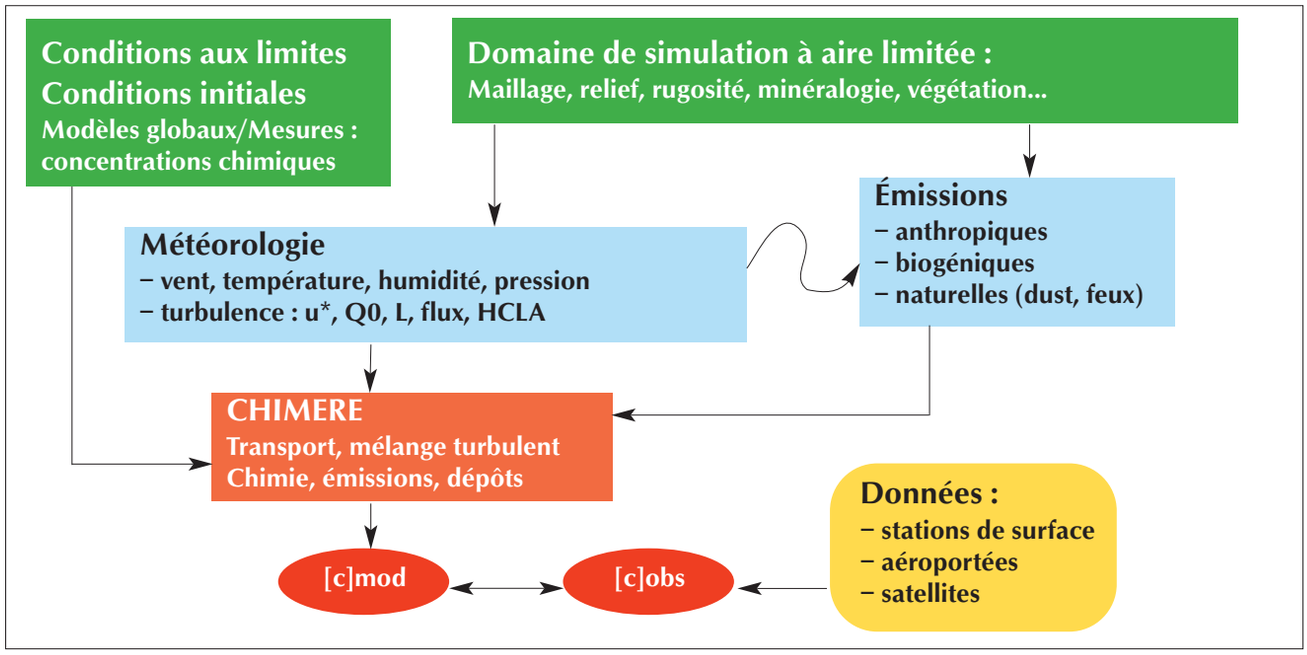


Figure 2 - Principe général d'un modèle de chimie-transport comme CHIMERE.

– les émissions (la seule source de polluants) ;
– la météorologie (pour estimer le transport et la diffusion des polluants dans l'atmosphère).

Ces forçages sont dépendants de la période de simulation : ils doivent être connus sur des grilles tridimensionnelles et à une fréquence temporelle proche de celle de la simulation à réaliser (de l'ordre de l'heure). D'autres forçages sont nécessaires mais sont moins variables dans le temps. Pour chaque domaine de simulation, il faut connaître la topographie, le type de surface (villes, campagnes, forêt, lac ou océan), le type de sol (la minéralogie pour le calcul des aérosols minéraux) et les caractéristiques de la végétation (dont l'indice foliaire pour le calcul du dépôt sec).

Météorologie et transport

Le transport et la diffusion sont estimés en utilisant des champs météorologiques prescrits et calculés en amont. De nombreux modèles météorologiques ont été utilisés avec CHIMERE : des modèles globaux (comme celui du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme ou ses analyses ERA-interim) ou des modèles régionaux (comme MM5[1] ou WRF[2]). Dans les deux cas, les champs météorologiques sont reprojetés sur la grille cible définie pour CHIMERE. L'adéquation entre la résolution utilisée pour les champs météorologiques et celle utilisée dans CHIMERE a fait l'objet de différentes études de sensibilité. Ainsi, il a été montré qu'une bonne description du champ de vent est la condition la plus importante pour une simulation correcte d'un panache dense de polluants, notamment en zone de relief ou près des côtes. Par ailleurs, une résolution très fine augmente en même temps l'incertitude et l'erreur et peut donc conduire à des transports de panaches globalement moins pertinents (Valari et Menut, 2008).

Les émissions

Les émissions ont différentes origines et contiennent de nombreuses espèces gazeuses et particulaires, chimiquement actives ou inertes. Elles peuvent être surfaciques ou selon des profils verticaux. À l'échelle d'une région, différentes sources sont à prendre en compte pour obtenir une représentation correcte des polluants émis dans l'atmosphère :
– les émissions anthropiques ont pour origine les activités humaines comme le trafic automobile, les industries et le chauffage. Selon les échelles spatiales, les émissions anthropiques sont issues de bases de données différentes (Airparif[3] pour la région parisienne, EMEP[4] [Vestreng, 2003] pour l'Europe, EDGAR[5] à l'échelle globale, par exemple) ;
– les émissions biogéniques représenteront les flux liés à la végétation. Ces flux sont calculés en utilisant le modèle MEGAN[6] (Guenther et al., 2006) ;
– les émissions d'aérosols minéraux seront paramétrées en fonction des caractéristiques du sol et de la surface, ainsi que du module du vent en surface (Menut et al., 2009) ;
– les émissions ponctuelles comme les feux de forêt et les éruptions volcaniques sont estimées à partir de données satellitaires. Ces émissions, très intenses mais limitées spatialement, doivent être définies le long de profils verticaux : la météorologie doit être prise en compte afin de calculer l'extension verticale de l'injection de ces gaz et aérosols.

Les conditions aux limites

Étant un modèle à aire limitée, CHIMERE utilise des conditions aux limites issues de modèles globaux, comme LMDz-INCA[7], MOZART[8] ou GOCART[9], par exemple. En fonction de la dimension spatiale du domaine d'étude, ces conditions aux limites

(1) MM5 : Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model.
(2) WRF : Weather Research Forcast.
(3) Airparif : Association interdépartementale pour la gestion du réseau automatique de surveillance de la pollution atmosphérique et la gestion d'alerte en région Île-de-France.
(4) EMEP : European Monitoring and Evaluation Programme.
(5) EDGAR : Emissions Database for Global Atmospheric Research.
(6) MEGAN: Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature.
(7) LMDz-INCA : LMDz est un modèle de circulation générale du Laboratoire de météorologie dynamique (LMD) ; INCA (Interaction Chimie-Aérosols) est un modèle de chimie-aérosols couplé à LMDz.
(8) MOZART : Model for OZone And Related chemical Tracers.
(9) GOCART : Global Ozone Chemistry Aerosol Radiation and Transport.

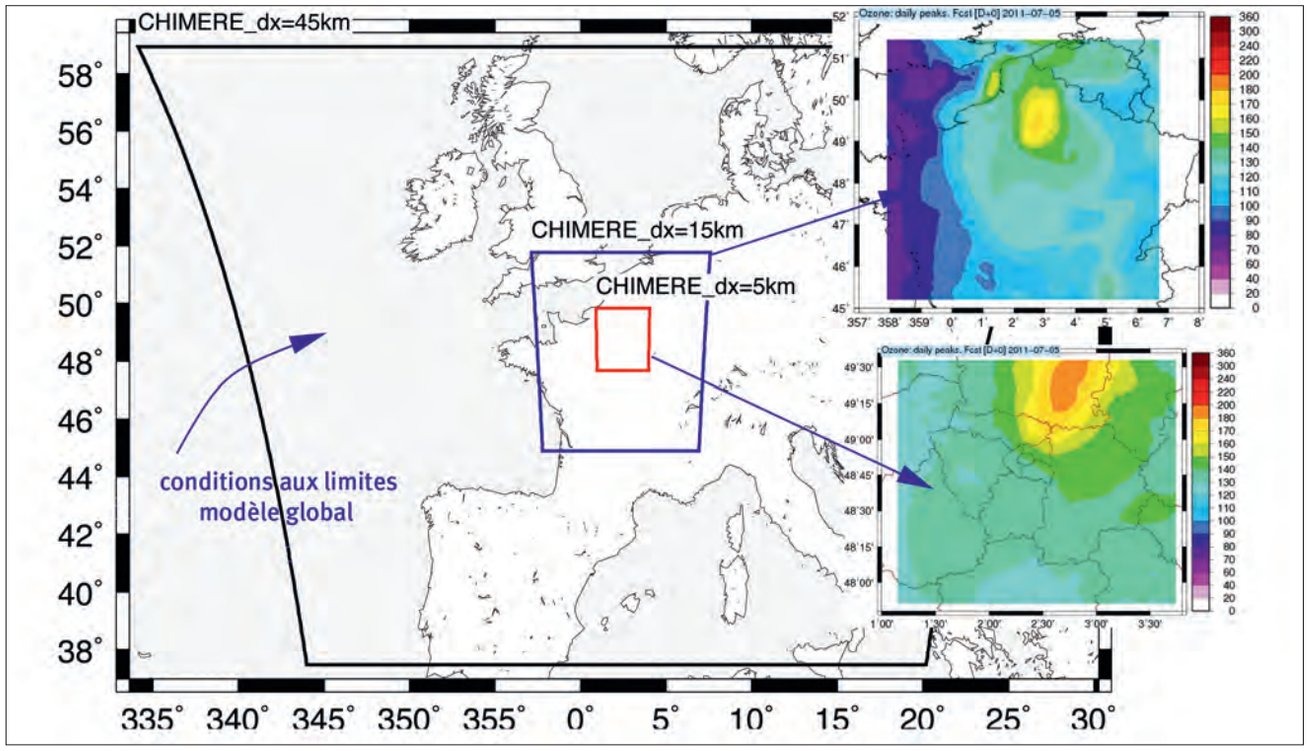


Figure 3 - Domaines de simulation de CHIMERE et cartes de concentrations d'ozone de surface. Prévision de juillet 2011 réalisée sur le site de prévision expérimentale COSY au Laboratoire de météorologie dynamique (Palaiseau, Essonne).

peuvent avoir un impact important (Szopa et al., 2009). Ainsi, les conditions aux limites délivrées par les modèles globaux (souvent des climatologies) ne permettent des résultats réalistes que pour des domaines continentaux. Les processus importants sont alors librement représentés dans le domaine de CHIMERE. Pour les domaines plus petits, comme l'Île-de-France, il est alors nécessaire de prévoir différents domaines « imbriqués », comme le montre la figure 3 : le plus grand domaine (de résolution 45 km) aura des conditions aux limites provenant d'un modèle global. Il calculera des concentrations chimiques horaires qui contraindront un domaine de résolution 15 km à ses bords, lui-même délivrant ses concentrations au domaine de résolution 5 km. La simulation du domaine central aura donc, à la fois, un calcul fin dans son domaine et des imports/exports les plus réalistes possibles à ses limites.

Analyse de processus physico-chimiques régionaux

La modélisation intègre un ensemble de processus complexes et fournit un bilan, sous forme de concentrations chimiques. La comparaison des résultats à des mesures permet :

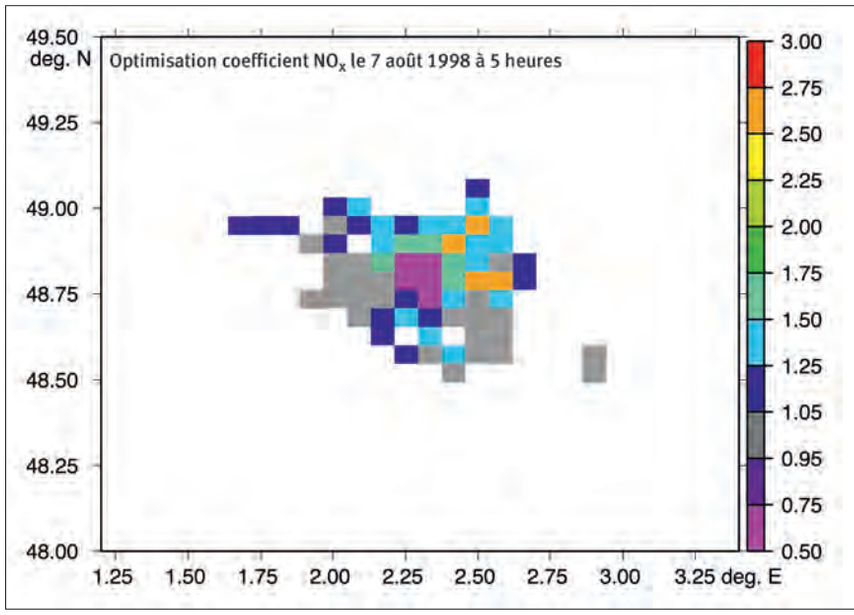
– l'analyse : comprendre des chaînes de processus complexes et non-linéaires et tester des hypothèses théoriques en géophysique ;
– la validation : quantifier le comportement du modèle pour les mailles coïncidant avec des mesures ;
– la sensibilité : estimer la part relative de chacun des processus et voir quels sont les processus les plus sensibles pour calculer une concentration.

Analyse de mesures

Afin de comprendre des processus complexes, on réalise des comparaisons entre les simulations du modèle CHIMERE et des mesures de campagnes ou des mesures de routine (grâce aux réseaux de surveillance de la qualité de l'air et aux instruments embarqués sur des satellites comme IASI(1) pour les gaz, MODIS(2) et CALIOP(3) pour les aérosols). Les mesures de campagnes sont plus ponctuelles mais elles regroupent des instruments différents pour obtenir la « photographie » la plus riche possible d'un seul événement.

CHIMERE a été associé à plusieurs campagnes de mesures, que ce soit pour réaliser des prévisions de déclenchement de mesures (ESQUIF, AMMA, MEGAPOLI) ou pour analyser des résultats (les mêmes campagnes plus ESCOMPTE). Lors de la campagne de mesures ESQUIF (1998-2000), en région parisienne, la part relative de la pollution produite localement par rapport à celle des pollutions venant de régions éloignées était mal connue (Menut et al., 2000 ; Vautard et al., 2003). Cette campagne a déployé de nombreux systèmes de mesures en surface et aéroportés, à la fois pour la météorologie et pour la chimie. Cela a permis de comprendre la dynamique du panache d'ozone, issu des sources de trafic automobile et d'industries dans et autour de Paris, qui peut parcourir plusieurs centaines de kilomètres en aval. Les mesures de surface et aéroportées ont permis de quantifier la distribution verticale des polluants dans la couche limite. Quelques années plus tard, dans la région de Fos-Berre Marseille, la campagne ESCOMPTE a permis d'analyser d'autres typologies de pollution régionale, en ajoutant une dimension supplémentaire à la compréhension du problème avec l'interface terre-mer et de grandes zones urbanisées ou industrialisées près de cette interface (Menut et al., 2005). Actuellement, les analyses de la

(1) IASI : Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge.
(2) MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.
(3)CALIOP : Cloud Aerosol LIdar with Orthogonal Polarization.



◀Figure 4 - Modélisation inverse des émissions liées au trafic automobile en région parisienne (Paris est au centre de la carte). Répartition spatiale des corrections pour les NO_x le 7 août 1998, à 5 h 00 : les résultats montrent que les émissions du cadastre d'origine sont surestimées au centre de Paris mais sous-estimées en banlieue. D'après Pison et al. (2007).

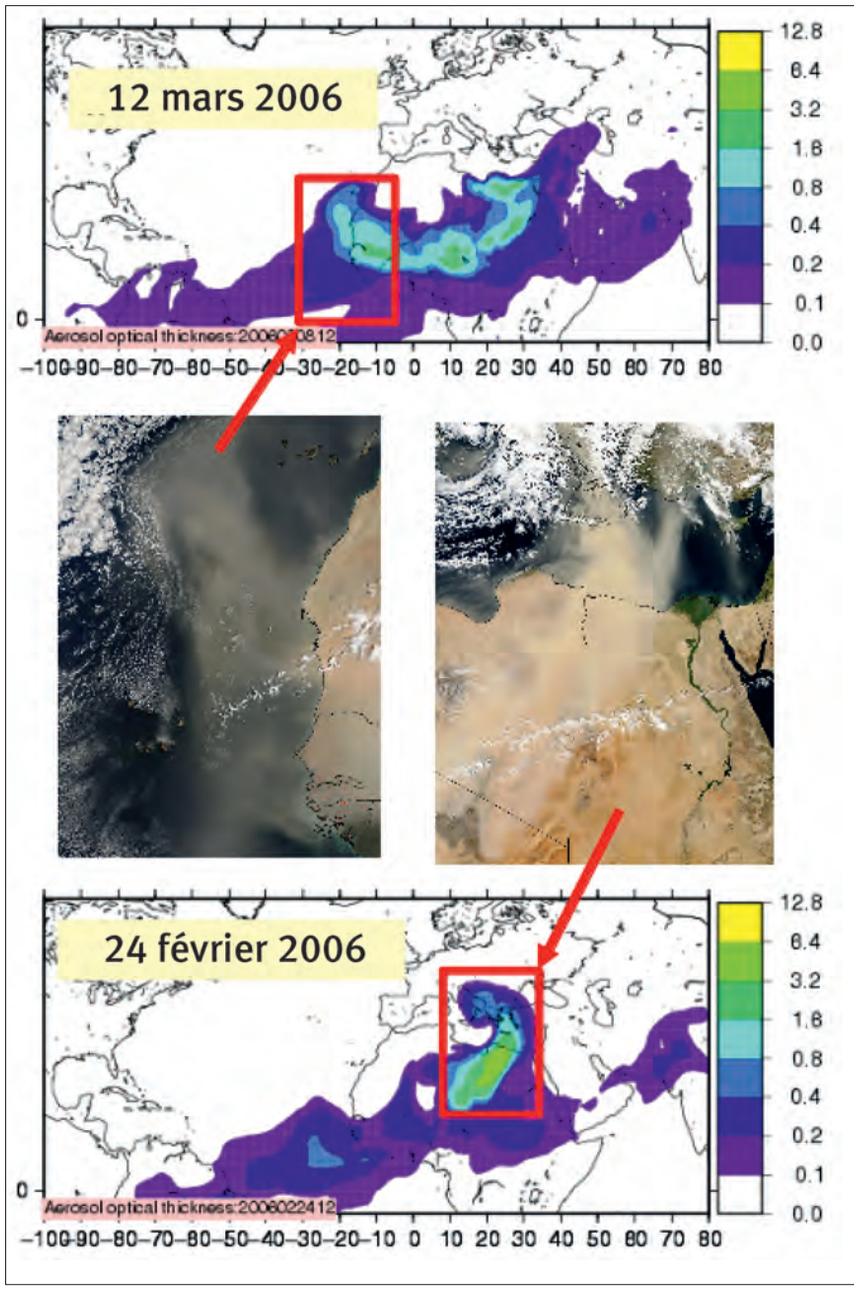
campagne MEGAPOLI en région parisienne devraient permettre de mieux comprendre les processus de chimie rapide.

Optimisation des sources

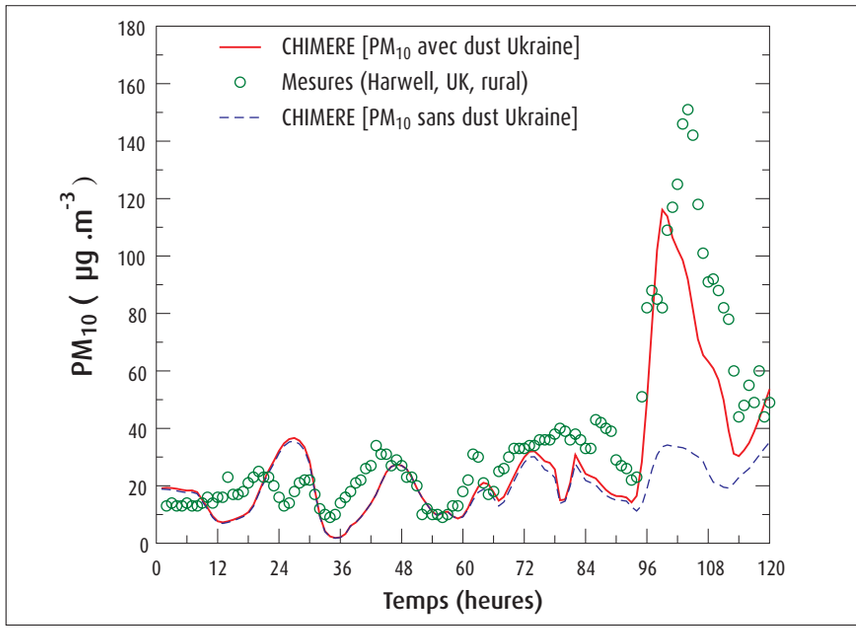
Les émissions sont la seule source de polluant : les concentrations simulées seront donc très sensibles à ce forçage. Plusieurs approches ont été développées pour optimiser ces valeurs que l'on ne sait pas mesurer. La modélisation inverse utilise des mesures pour contraindre le modèle à s'en approcher au fur et à mesure d'une simulation. Le paramètre d'ajustement est alors le flux d'émissions. Cela a permis de montrer, par exemple, que la distribution horaire de ces émissions n'était pas toujours adaptée en région parisienne : les émissions liées au trafic étaient surestimées dans Paris mais sous-estimées en banlieue proche (Pison et al., 2007), voir figure 4.

Assimilation de données

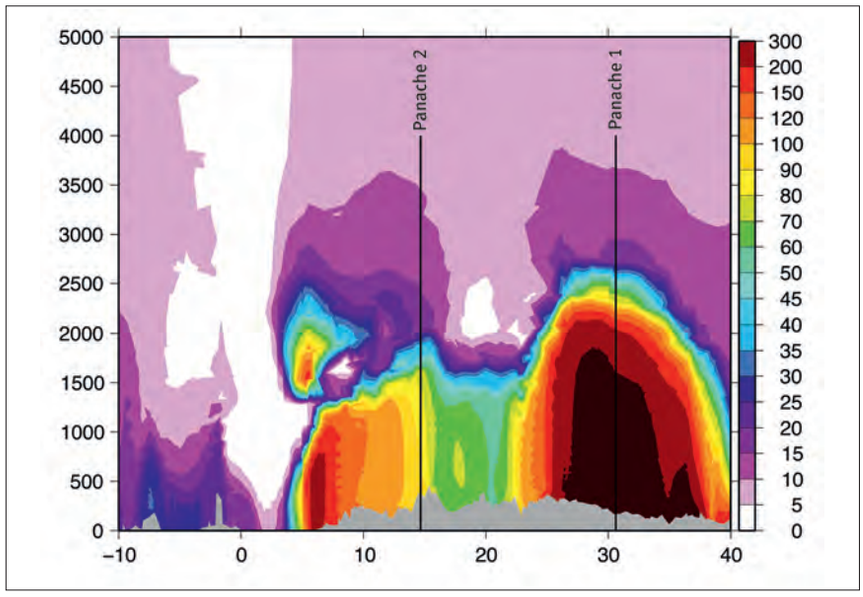
Le modèle est mis en oeuvre pour des études d'assimilation de données. Le but est d'hybrider des mesures et des champs simulés afin d'accroître le réalisme de la simulation. Les mesures peuvent être hétérogènes dans l'espace. Cela permet d'avoir une meilleure confiance dans le modèle pour l'espèce assimilée et là où il n'y avait pas de mesures pour cette espèce. Pour les autres espèces, cela permet aussi d'accroître la confiance dans la simulation puisque l'une de ces espèces est mieux représentée. Une étude de Foret et al. (2009) a ainsi exploré l'intérêt des mesures de l'instrument IASI (au niveau de la troposphère et de la stratosphère) pour mieux contraindre la simulation de l'ozone en surface. Un paramètre très sensible lors de la phase d'assimilation d'une espèce est la représentation de l'erreur de covariance. Basée sur des simulations d'ensemble, une étude (Boynard et al., 2011) a récemment permis de réduire l'incertitude de cette erreur.



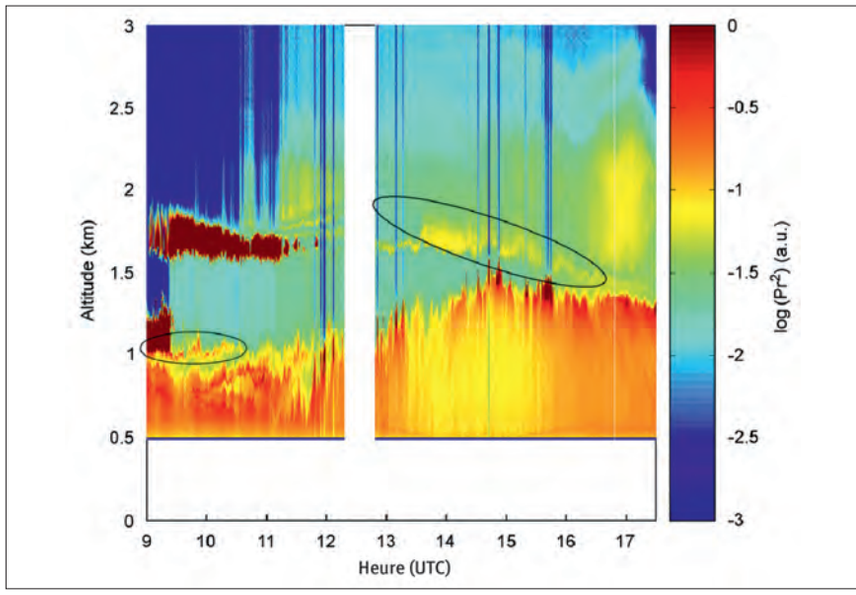
◀Figure 5 - Panaches d'aérosols minéraux émis en Afrique, simulés pour le 24 février et 8 mars 2006 avec CHIMERE. Images satellites NASA/MODIS.



◀Figure 6 - Série chronologique de concentrations de surface (en µg/m³) de PM_{10} (particules de dimensions inférieures à 10 µm) simulés et observés du 21 au 26 mars 2007. La différence entre les deux simulations correspond à la prise en compte d'une nouvelle source d'aérosols minéraux chernozémiques en Ukraine. D'après Bessagnet et al. (2008).



▲Figure 7 - Coupe verticale à iso-latitude des concentrations de surface (en µg/m³) de PM_{10} simulés le 24 mars 2007. Le maximum d'émissions se situe en Ukraine et le panache d'aérosols terrigènes s'étend jusqu'à 2 km d'altitude. D'après Bessagnet et al. (2008).



◀Figure 8 - Série chronologique de signal lidar corrigé et mesuré au SIRTA le 5 mars 2003. Les deux ovales marquent des couches d'aérosols identifiées par l'algorithme STRAT (STRucture of the Atmosphere, algorithme d'analyse de données lidar) comme étant des couches minces d'aérosols désertiques. D'après Colette et al. (2008).

Transport à longue distance

Initialement focalisé sur la pollution régionale, CHIMERE a vu ses domaines d'études s'agrandir pour calculer explicitement le transport de polluants à grande distance. Les derniers développements de cet article concernent donc les émissions et le transport des aérosols minéraux, des produits de feux de forêts et des panaches volcaniques. Le modèle est largement utilisé pour le suivi et la révision des directives européennes sur la qualité de l'air dans le cadre de la Convention sur le transport à longue distance de la pollution atmosphérique (CLRTAP).

Les aérosols minéraux

Leur analyse a été l'objectif du développement du modèle CHIMERE-Dust (aujourd'hui intégré dans CHIMERE). L'enjeu est double : comprendre les mécanismes de soulèvement près des sources en Afrique (figure 5), mais aussi pouvoir évaluer plus finement la part relative des concentrations d'aérosols minéraux dans les bilans mesurés à des milliers de kilomètres de distance, en Europe par exemple (figures 6 et 7).

Souvent sous-estimée (ou pas prise en compte du tout) dans les modèles régionaux européens, l'émission d'aérosols en Europe peut constituer une part non négligeable du bilan en particules, comme l'a montré l'étude de Colette et al. (2008), comparant des mesures lidar du SIRTA(1) avec des concentrations de surface d'Airparif en région parisienne (figure 8). Afin d'estimer, en première approximation, ce que pouvait être cette contribution, un schéma de saltation a été implanté dans CHIMERE (Vautard et al., 2005). Cette première

(1) SIRTA : Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique, situé à Palaiseau dans l'Essonne.

étude simplifiée a eu le mérite d'ouvrir une voie jusqu'alors inexplorée : représenter avec des modèles régionaux les émissions de particules terrigènes en Europe et leur resuspension. Plus précisément, l'émission terrigène en Europe a été testée par l'adjonction de sources ukrainiennes de l'érosion de sols chernozémiques (figure 6), qui montre que ce soulèvement important pourrait expliquer des mesures soudainement très fortes de particules en Europe de l'Ouest (Bessagnet et al., 2008).

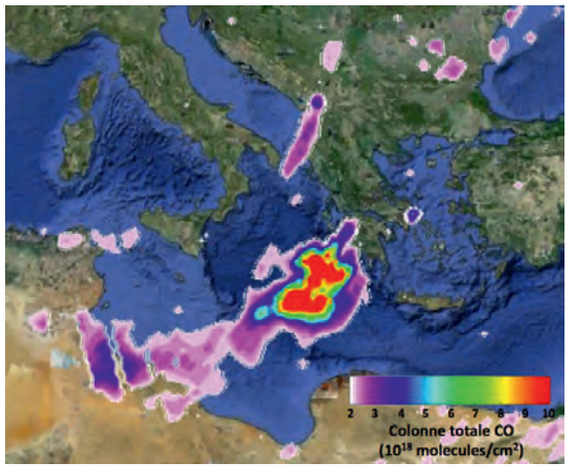


Figure 9 - Rapport de mélange de monoxyde de carbone (CO) observé par l'instrument IASI/*MetOp* le 25 août 2007 pendant les incendies en Grèce.

Analyse des feux de forêts

Les feux représentent une source importante de gaz traces et de particules, avec des conséquences sur la qualité de l'air et le bilan radiatif à l'échelle locale mais aussi régionale et parfois globale (exemple. Turquety et al., 2007, 2009). La figure 9 illustre le transport rapide d'un panache de pollution extrêmement dense associé à des feux intenses, ici en Grèce pendant l'été 2007. Des études basées sur CHIMERE ces dernières années ont permis de quantifier l'impact régional considérable de différents épisodes de feux sur la qualité de l'air, au Portugal (Hodzic et al., 2007) et plus récemment en Russie (Konovalov et al., 2011).

La prise en compte de telles perturbations dans les études de la pollution atmosphérique nécessite cependant un travail conséquent sur les émissions. Que les feux soient d'origine naturelle (foudre) ou anthropique (feux accidentels ou criminels et pratiques agricoles), leur localisation et leur étendue sont très variables et souvent imprévisibles. Les émissions doivent donc être réévaluées pour chaque événement. Les observations satellitaires disponibles depuis plus de dix ans ont permis la construction d'inventaires globaux de plus en plus précis et, ces dernières années, le développement d'approches favorisant l'estimation quasi en temps réel. De nombreuses incertitudes sur les paramètres clés demeurent cependant : quantité et type de végétation brûlée, type de combustion, espèces gazeuses émises, etc.

Afin de réduire les incertitudes sur les émissions de gaz traces et de particules, mais aussi sur leur transport et leur impact radiatif, le développement d'un module complet de feux a été entrepris dans CHIMERE, avec notamment le projet APIFLAME (Analyse et prévision de l'impact des feux en Europe et Méditerranée). Ce module de feux comprend un calcul des émissions à partir de leur localisation et sera adapté à l'intégration des feux dans les prévisions expérimentales et opérationnelles. Dans le cadre d'APIFLAME, l'objectif est également de cartographier l'influence des feux sur la qualité de l'air et sa variabilité en Europe et en Méditerranée sur la période 2005-2010. Bien qu'ils soient moins étendus que dans les régions tropicales ou dans les forêts boréales, les feux de végétation en Europe représentent une source additionnelle non négligeable, plus particulièrement dans les pays du sud, soumis à un risque de feux considérable en été, mais également, de plus en plus, en Europe de l'Est et en Russie. Il apparaît donc important de mieux tenir compte de leur impact pendant la saison des feux (typiquement mai-septembre), qui coïncide avec les périodes de risques élevés de développement d'épisodes de pollution photo-oxydante.

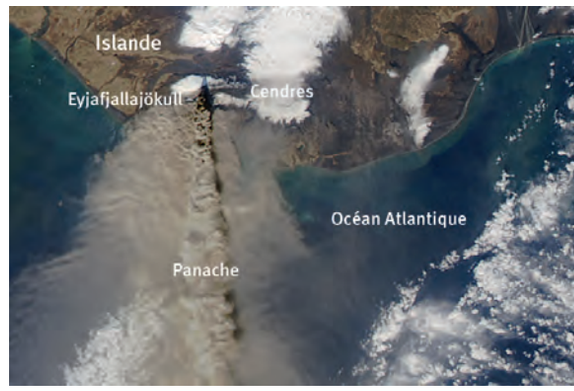


Figure 10 - Image MODIS du panache de cendre du volcan islandais Eyjafjallajökull, le 17 avril 2010. (© NASA/MODIS)

Transport de panaches volcaniques

Les émissions liées aux panaches volcaniques ont récemment été intégrées dans CHIMERE. Des difficultés sont à considérer : la masse émise est inconnue et difficilement mesurable, tout comme l'altitude d'injection qui peut varier de plusieurs kilomètres en quelques heures. Les émissions sont composées de gaz, d'aérosols et d'eau, mais on ne dispose pas de plus d'informations sur la composition chimique de l'ensemble ni sur la distribution en taille des particules. Différents projets de recherche visent actuellement à mieux caractériser ces panaches, à la fois pour l'analyse et la prévision des émissions volcaniques actuelles, figure 10, (Colette et al., 2011), et pour celles du passé, avec la modélisation de l'éruption du Laki en 1783, par exemple.

Impacts sur la santé

La pollution urbaine due au trafic automobile

L'un des enjeux actuels est de créer des modèles fiables d'impact de la pollution sur la santé. Il est tout d'abord nécessaire de mieux estimer ce que respirent réellement les populations. Si le modèle CHIMERE est capable de simuler des événements de pollution jusqu'à une résolution de 1 à 2 km, la concentration modélisée reste une moyenne spatiale. Et pour des tissus urbanisés complexes, une surface de 2 × 2 km^2 reste très hétérogène en terme de nature des sources de pollution, de localisation et de transport. Afin de pouvoir représenter à la fois cette concentration moyenne et la variabilité autour de cette moyenne, les émissions surfaciques ont été désagrégées par secteur d'activité pour des mailles urbaines parisiennes.

Les résultats, figure 11, montrent que l'on arrive tout à fait à retrouver les concentrations simulées tout en y associant leur variabilité sous-maille. Si une portion de la maille est occupée par du trafic automobile et le reste par des espaces verts,

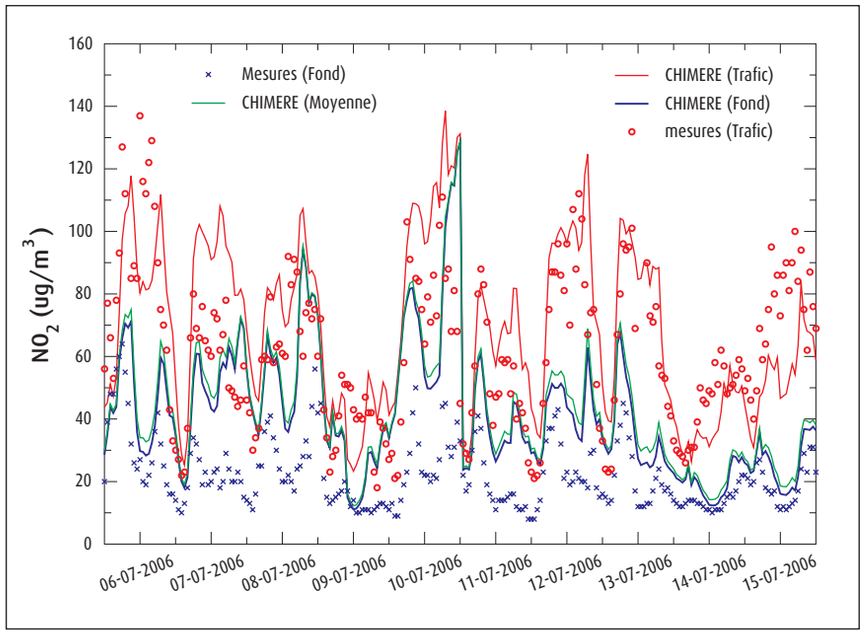
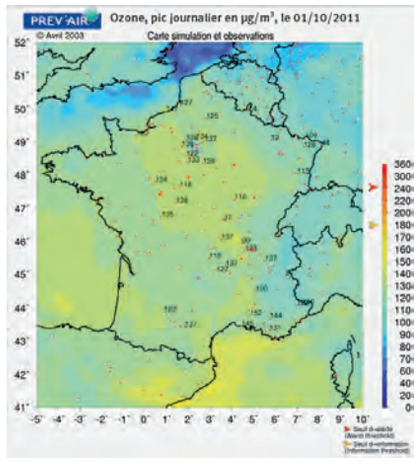


Figure 11 - Série chronologique de variabilité sous-maille du NO_2 pour une maille de 3 km² à Paris. Les symboles reprennent les mesures Airparif réalisées par des stations à faible distance l'une de l'autre. Les simulations de même couleur que les symboles montrent les simulations « sous-maille » représentant ces environnements différents. D'après Valari et al., (2010).

deux « chimies » vont être traitées indépendamment, puis les concentrations seront recombinées par espèce. On peut donc savoir si une population a réellement été exposée au maximum à 10 % ou 100 % (par exemple) de la valeur moyenne dans la maille. En croisant cette information avec des densités de population, on obtient des cartes horaires d'exposition à la pollution (Valari et Menut, 2010 ; Valari et al., 2011). L'enjeu est ensuite de créer un modèle complet reliant les concentrations aux données de problèmes de santé.

Figure 12 - Exemple de prévision réalisée par la plateforme nationale PREV'AIR : maximum journalier d'ozone en surface (en µg/m³), pour le 30 septembre 2011. Les mesures des Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) sont superposées à la simulation. (© PREV'AIR, www.prevair.org)



Les pollens

Une nouvelle direction de recherche concerne la modélisation des pollens puisque 15 % de la population européenne est affectée par les allergies liées à ces derniers. Cette modélisation rejoint les études d'impact de la pollution sur la santé. Même si les pollens sont naturels, leur émission et leur transport peuvent être calculés de manière déterministe. Plusieurs défis sont à relever pour, au final, mettre en place une chaîne de modélisation puis de prévision des concentrations de pollens dans l'atmosphère. Leur émission va dépendre de la végétation (type de plante et sa phénologie) et des conditions météorologiques de surface (humidité, vent et précipitations). Cette émission est un processus de déclenchement à seuils après un cumul de plusieurs semaines : elle doit donc être décrite de manière horaire tout en prenant en compte l'intégralité de la saison de pollinisation. Cela rend ce processus très sensible à la météorologie présente mais aussi passée (contrairement aux émissions de trafic automobile ou d'aérosols minéraux qui sont « instantanées »). Le transport des pollens sera différent de celui des autres aérosols. En effet, les pollens sont de grosses particules (~25 µm de diamètre) de faible densité, ce qui favorise leur transport à longue distance. Leur vieillissement reste mal connu ainsi que leur degré de nocivité en tant qu'allergènes. Par ailleurs, des interactions entre les pollens et d'autres types de pollution (comme le trafic automobile) seraient aussi un facteur aggravant, rendant l'impact des pollens sur la santé humaine difficile à estimer aujourd'hui.

Prévision expérimentale et opérationnelle

CHIMERE est utilisé pour réaliser des prévisions quotidiennes de la qualité de l'air. Différentes plates-formes numériques ont été développées, d'un point de vue expérimental (Vautard et al., 2001) mais aussi opérationnel avec la plate-forme nationale PREV'AIR, par exemple, figure 12, (Rouïl et al., 2009 ; Menut et Bessagnet, 2010), et les projets européens GEMS(1) et MACC(2) (projets EU FP7(3)). Ces plates-formes permettent d'informer des risques de pollution et aussi d'évaluer les performances du modèle au jour le jour. On peut non seulement calculer la « qualité » du modèle mais aussi quantifier sa « variabilité » et donc estimer la « prévisibilité ». En Europe, les prévisions sont bonnes et stables dans le temps, d'une échéance à l'autre, pour des espèces comme l'ozone et les oxydes d'azote car leurs sources sont bien localisées et leur intensité est relativement bien connue (Honoré et al., 2008).

Une des principales difficultés de prévision réside dans la modélisation des épisodes de pollution particulaires dus à des masses d'air stagnantes. Les modèles météorologiques ne sont pas conçus pour estimer finement les vents faibles ni certaines variables clés comme le mélange vertical et les hauteurs de couche limite, durant ces événements. À cette difficulté, s'ajoute le problème de quantification de certaines émissions parfois difficilement appréciables (chauffage domestique au bois, par exemple) pendant des épisodes essentiellement hivernaux.

Deux difficultés majeures subsistent pour la prévision des aérosols minéraux : leurs émissions et leur transport à longue distance. Comme le montre la

(1) GEMS: Global Earth-system Monitoring using Satellites.
(2) MACC : Monitoring Atmospheric Composition and Climate.
(3) EU FP7 : (7th) European Union Framework Programmes for research and technological development.

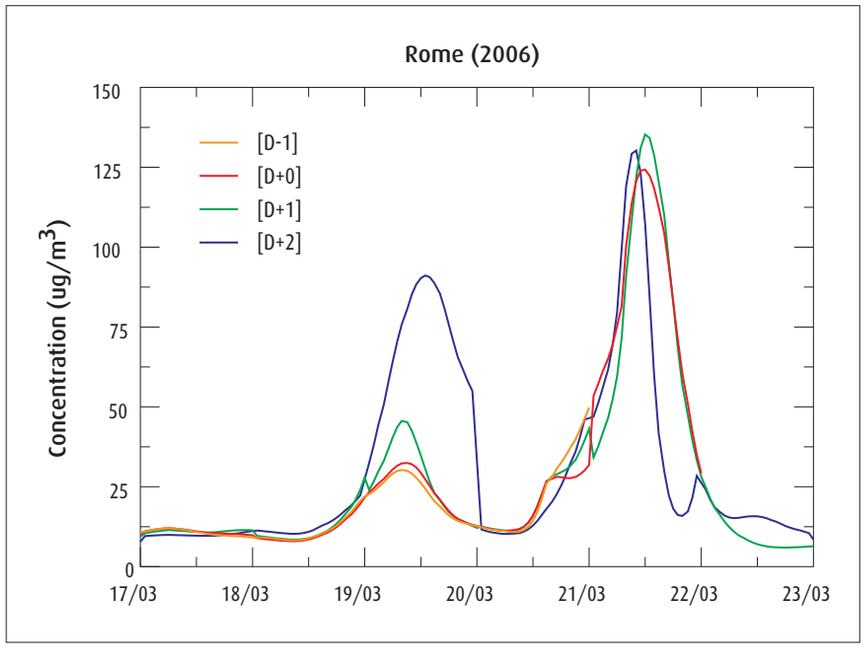


Figure 13 - Séries chronologiques de concentrations de surface d'aérosols désertiques émis en Afrique et simulés à Rome. Pour chaque échéance de prévision, une série temporelle de concentrations est présentée. D'après Menut et al. (2009).

figure 13, la prévision d'un jour à l'autre peut donner des résultats différents : près des sources, les concentrations vont être très importantes et variables. Cette variabilité va se retrouver loin des sources (à Rome, en Italie, par exemple) : la variabilité d'un jour à l'autre est du même ordre de grandeur que celle des seuils d'alerte à la pollution aux particules (Menut et al., 2009). Parmi les causes de cette variabilité, l'impact des paramètres météorologiques utilisés et la difficulté à simuler des panaches fins au-dessus de l'Atlantique ont pu être quantifiés grâce à des études réalisées avec CHIMERE par comparaison avec des mesures du satellite *CALIPSO*[1] (Vuolo et al., 2009).

Questions ouvertes et développements à venir

Si le modèle CHIMERE a été initialement conçu pour les échelles régionales, les évolutions futures cibleront de plus petites échelles spatiales (pour les impacts sur la santé, par exemple) mais aussi de plus grandes (notamment pour l'intégration du transport à longue distance). De même, les échelles temporelles des études vont changer : les simulations ont été successivement réalisées pour quelques jours, puis quelques mois, quelques années. Les projets futurs seront des analyses de simulations de plusieurs décennies dans un système de plus en plus intégré. CHIMERE fait déjà partie d'un réseau de modèles dans un système intégré permettant de relier les émissions d'air pollué aux impacts et aux coûts à l'échelle de l'Europe (projet EU LIFE EC4MACS[2], www.ec4macs.eu).

Le climat régional est aujourd'hui au centre des questions sur l'environnement. Des simulations sur les vingt dernières années ont permis de quantifier les tendances des concentrations de polluants à la surface avec le projet européen GEOMON[3]. Dans la continuité, le projet SALUT'AIR[4] va permettre d'étendre ces études sur des périodes futures. Les émissions et la végétation seront alors scénarisées pour représenter au mieux ce que l'on imagine des prochaines décennies en Europe.

En parallèle, l'allongement des périodes simulées nécessite d'inclure plus de rétroactions entre les différents compartiments géophysiques :
– les interactions entre chimie et végétation vont être renforcées. Le couplage direct entre les modèles CHIMERE et ORCHIDEE[5] a été réalisé récemment dans le cadre du projet CIRCE[6] et sera pérennisé avec le développement de la plate-forme de modélisation régionale MORCE[7] ;
– les interactions entre aérosols, nuages et rayonnement vont être calculées directement lors d'une simulation, notamment en mettant à jour les taux de photolyse en fonction des nuages et des panaches denses d'aérosols (Péré et al., 2010).

En lien avec l'ensemble de ces thèmes de recherche, la prochaine version du modèle CHIMERE, en développement, permettra de répondre aux questions liées aux rétroactions des concentrations de gaz et d'aérosols sur la météorologie et sur la végétation.

Où trouver et comment utiliser CHIMERE ?

Pour permettre une diffusion simple du code, CHIMERE est un logiciel libre sous licence GPL. Il est disponible sur un site Internet dédié, www.lmd.polytechnique.fr/chimere, avec son code source, sa documentation, la liste des articles publiés et des cas d'exemples. Une liste e-mail permet aux utilisateurs d'échanger facilement. « Outil national » de l'Institut national des sciences de l'Univers (INSU) depuis 2007, le modèle CHIMERE fait l'objet de formations organisées deux fois par an. D'un point de vue informatique, le code est écrit en Fortran 90 et parallélisé : toutes les bibliothèques utilisées sont aussi issues de logiciels libres.

Remerciements

Le développement du modèle a pu être réalisé grâce aux contributions de nombreux collaborateurs : Mireille Lattuati, Matthias Beekmann, Cécile Honoré, Hauke Schmidt, Claude Derognat, Nadège Blond, Isabelle Pison, Alma Hodzic, Gabriele Curci, Augustin Colette, Frédérik Meleux, Laurence Rouïl, Eric Chaxel et Gilles Forêt.

(1) CALIPSO : Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations.
(2) EU LIFE EC4MACS : European Union - L'Instrument Financier pour l'Environnement - European Consortium For Modelling of Air pollution and Climate Strategies.
(3) GEOMON : Global Earth Observation and Monitoring of the Atmosphere.
(4) SALUT'AIR : Stratégies de lutte contre la pollution de l'air.
(5) ORCHIDEE : ORganizing Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms.
(6) CIRCE : Climate change and Impact Research: the Mediterranean Environment.
(7) MORCE : Model of the Regional Coupled Earth system.

Bibliographie

Bessagnet B., A. Hodzic, R. Vautard, M. Beekmann, S. Cheinet, C. Honoré, C. Liousse et **L. Rouïl**, 2004 : Aerosol modeling with CHIMERE: preliminary evaluation at the continental scale. *Atmos. Environ.*, 38, 2803-2817.

Bessagnet B., L. Menut, G. Aymoz, H. Chepfer et **R. Vautard**, 2008 : Modelling dust emissions and transport within Europe: the Ukraine March 2007 event. *J. Geophys. Res.*, 113, D15202, doi:10.1029/2007JD009541.

Boynard A., M. Beekmann, G. Foret, A. Ung, S. Szopa, C. Schmechtig et **A. Coman**, 2011 : An ensemble of regional ozone model uncertainty with an explicit error representation, *Atmos. Environ.*, 45, 784-793.

Colette A., L. Menut, M. Haeffelin et **Y. Morille**, 2008 : Impact of the transport of aerosols from the free troposphere towards the boundary layer on the air quality in the Paris area. *Atmos. Environ.*, 42/2, 390-402, doi:10.1016/j.atmosenv.2007.09.044.

Colette A., O. Favez, F. Meleux, L. Chiappini, M. Haeffelin, Y. Morille, L. Malherbe, A. Papin, B. Bessagnet, L. Menut, E. Leoz et **L. Rouïl**, 2011 : Assessing in near real time the impact of the April 2010 Eyjafjallajokull ash plume on air quality. *Atmos. Environ.*, 45, 1217-1221.

Foret G., L. Hamaoui, C. Schmechtig, M. Eremenko, C. Keim, G. Dufour, A. Boynard, A. Coman, A. Ung et **M. Beekmann**, 2009 : Evaluating the potential of IASI ozone observations to constrain simulated surface ozone concentrations. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 8479-8491.

Guenther A., T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P. I. Palmer et **C. Geron**, 2006 : Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 3181-3210.

Hodzic A., S. Madronich, B. Bohn, S. Massie, L. Menut et **C. Wiedinmyer**, 2007 : Wildfire particulate matter in Europe during summer 2003: Meso-scale modeling of smoke emissions, transport and radiative effects. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 4043-4064.

Honoré C., L. Rouïl, R. Vautard, M. Beekmann, B. Bessagnet, A. Dufour, C. Elichegaray , J.-M. Flaud, L. Malherbe, F. Meleux, L. Menut, D. Martin, A. Peuch, V.-H. Peuch et **N. Poisson**, 2008 : Predictability of European air quality: The assessment of three years of operational forecasts and analyses by the PREV'AIR system. *J. Geophys. Res.*, 113, D04301, doi:10.1029/2007JD008761.

Konovalov I. B., M. Beekmann, I. N. Kuznetsova, A. Yurova et **A. M. Zvyagintsev**, 2011 : Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires: integrating modelling and measurements of the extreme air pollution episode in the Moscow megacity region. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 11, 12141–12205

Menut L., R. Vautard, C. Flamant, C. Abonnel, M. Beekmann, P. Chazette, P. H. Flamant, D. Gombert, D. Guedalia, D. Kley, M. P. Lefebvre, B. Lossec, D. Martin, G. Megie, M. Sicard, P. Perros et **G. Toupance**, 2000 : Measurements and modelling of atmospheric pollution over the Paris area: an overview of the ESQUIF Project. *Annales Geophysicae*, 18, 1467-1481.

Menut L., I. Coll et **S. Cautenet**, 2005 : Impact of meteorological data resolution on the forecasted ozone concentrations during the ESCOMPTE IOP 2a and 2b. *Atmos. Res.*, 74, 139-159.

Menut L., I. Chiapello et **C. Moulin**, 2009 : Previsibility of mineral dust concentrations: The CHIMERE-DUST forecast during the first AMMA experiment dry season. *J. Geophys. Res.*, 114, D07202, doi:10.1029/2008JD010523.

Menut L. et **B. Bessagnet**, 2010 : Atmospheric composition forecasting in Europe. *Annales Geophysicae*, 28, 61-74.

Péré J. C., M. Mallet, V. Pont et **B. Bessagnet**, 2010 : Evaluation of an aerosol optical scheme in the chemistry-transport model CHIMERE. *Atmos. Environ.*, 44, 3688-3699.

Pison I., L. Menut et **G. Bergametti**, 2007 : Inverse modeling of surface NOx anthropogenic emissions fluxes in the Paris area during the ESQUIF campaign. *J. Geophys. Res.*, 112, D24302, doi:10.1029/2007JD008871.

Rouïl L., C. Honoré, R. Vautard, M. Beekmann, B. Bessagnet, L. Malherbe, F. Meleux, A. Dufour, C. Elichegaray, J.-M. Flaud, L. Menut, D. Martin, A. Peuch, V.-H. Peuch et **N. Poisson**, 2009 : PREV'AIR : an operational forecasting and mapping system for air quality in Europe. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90, 73-83, doi:10.1175/2008BAMS2390.1.

Szopa S., G. Foret, L. Menut et **A. Cozic**, 2009 : Impact of large scale circulation on European summer surface ozone: consequences for modeling. *Atmos. Environ.*, 43, 1189-1195, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.10.039.

Turquety S., J. A. Logan, D. J. Jacob, R. C. Hudman, F. Y. Leung, C. L. Heald, R. M. Yantosca, S. Wu, L. K. Emmons, D. P. Edwards et **G. W. Sachse**, 2007 : Inventory of boreal fire emissions for North America in 2004: the importance of peat burning and pyro-convective injection. *J. Geophys. Res.*, 112, D12S03.

Turquety S., D. Hurtmans, J. Hadji-Lazaro, P.-F. Coheur, C. Clerbaux, D. Josset et **C. Tsamalis**, 2009 : Tracking the emission and transport of pollution from wildfires using the IASI CO retrievals: analysis of the summer 2007 greek fires. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 9, 7413-7455.

Valari M. et **L. Menut**, 2008 : Does an increase in air quality models' resolution bring surface ozone concentrations closer to reality? *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 25, 1955-1968, doi:10.1175/2008JTECHA1123.1.

Valari M. et **L. Menut**, 2010 : Transferring the heterogeneity of surface emissions to variability in pollutant concentrations over urban areas through a chemistry transport model. *Atmos. Environ.*, 44, 3229-3238.

Valari M., E. Chatignoux et **L. Menut**, 2011 : Using a chemistry transport model to account for the spatial variability of exposure-concentrations in epidemiologic air pollution studies. *J. Air and Waste Management Association*, 61, 164-179.

Vautard R., M. Beekmann, J. Roux et **D. Gombert**, 2001 : Validation of a hybrid forecasting system for the ozone concentrations over the Paris area. *Atmos. Environ.*, 35, 2449-2461.

Vautard R., L. Menut, M. Beekmann, P. Chazette, P. H. Flamant, D. Gombert, D. Guedalia, D. Kley, M. P. Lefebvre, D. Martin, G. Megie, P. Perros et **G. Toupance**, 2003 : A synthesis of the ESQUIF field campaign. *J. Geophys. Res.*, 108, D17.

Vautard R., B. Bessagnet, M. Chin et **L. Menut**, 2005 : On the contribution of natural Aeolian sources to particulate matter concentrations in Europe: testing hypotheses with a modelling approach. *Atmos. Environ.*, 39, 3291-3303.

Vestreng V., 2003 : Review and revision. Emission data reported to CLRTAP. *EMEP Status report*.

Vuolo M., H. Chepfer, L. Menut et **G. Cezana**, 2009 : Comparison of mineral dust layers vertical structures modelled with CHIMERE-DUST and observed with the CALIOP lidar. *J. Geophys. Res.*, 114, D09214, doi:10.1029/2008JD011219.