

Impact sur la qualité de l'air de deux centrales électriques à l'aide d'une modélisation sous-maille

Air quality impact of two power plants using a sub-grid

Jérôme DREVET⁽¹⁾, Luc MUSSON-GENON⁽¹⁾

Résumé

Modéliser les rejets ponctuels de polluants atmosphériques avec des modèles eulériens régionaux est source d'erreurs, car un modèle eulérien 3D ne permet pas de reproduire l'évolution d'un panache de fumée à proximité de sa source. Afin de s'affranchir de ces difficultés, nous avons testé un modèle gaussien – intégré à un modèle eulérien 3D – pour une étude d'impact des centrales de production thermiques EDF de Porcheville et Vitry, en Ile-de-France. Nous avons simulé une année de processus atmosphériques pour un domaine couvrant la région parisienne avec la plate-forme Polyphémus avec laquelle nous avons conduit différents scénarios de simulation en intégrant, ou non, un modèle gaussien sous-maille, appelé Plume-in-grid, traitant indépendamment les principaux rejets ponctuels d'Ile-de-France.

Notre étude se focalise sur quatre composés chimiques que sont NO, NO₂, SO₂ et O₃. L'utilisation du modèle gaussien est importante, surtout pour les composés primaires et peu réactifs, comme SO₂, d'autant plus que les cheminées d'usine représentent une part importante des émissions de ce composé. Les concentrations de SO₂ simulées avec le modèle gaussien sont plus proches des concentrations mesurées par les stations du réseau de mesure des Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA), même si celles-ci restent largement surestimées. De manière générale, l'utilisation du modèle gaussien augmente les concentrations à proximité des sources et abaisse les concentrations de fond des différents composés chimiques (sauf O₃). Les concentrations simulées peuvent varier ponctuellement de plus de 30 % selon que l'on considère ou non le modèle gaussien pour les composés primaires tels que SO₂ et NO et de l'ordre de 2 % pour les composés secondaires comme NO₂ et O₃. Concernant l'impact des centrales thermiques à flammes, les concentrations simulées sont supérieures de 1 µg/m³ lorsque l'on utilise le modèle gaussien pour SO₂ en moyenne annuelle à proximité de la centrale de Porcheville, et sont plus faibles de l'ordre de 0.5 µg/m³ lorsque l'on s'éloigne de celles-ci, mettant en lumière le caractère moins diffusif du modèle gaussien par rapport au modèle eulérien. L'intégration d'un modèle gaussien sous-maille a notamment le mérite d'éviter les artefacts liés aux choix de niveaux verticaux et de la trop grande diffusivité numérique des modèles eulériens, surtout pour les résolutions horizontales grossières.

Mots-clés

Modélisation eulérienne. Modélisation gaussienne. Centres de production thermique. Sources ponctuelles. Impact. Région Ile-de-France.

⁽¹⁾ CEREa – Joint Laboratory – École des Ponts ParisTech-EDF R&D – université Paris-Est – 6-8, avenue Blaise Pascal – Cité Descartes Champs-sur-Marne 77455 Marne-la-Vallée Cedex 2 – jerome.drevet@cerea.enpc.fr – luc.musson-genon@edf.fr

Abstract

Modeling point source emissions of air pollutants with regional Eulerian models is likely to lead to errors because a 3D Eulerian model is not able to correctly reproduce the evolution of a plume near its source. To overcome these difficulties, we applied a Gaussian puff model – imbedded within a 3D Eulerian model – for an impact assessment of EDF fossil fuel-fired power plants of Porcheville and Vitry, Ile-de-France. We simulated an entire year of atmospheric processes for an area covering the Paris region with the Polyphemus platform with which we conducted various scenarios with or without a Gaussian puff model, referred as Plume-in-grid, to independently handle with major point source emissions in Ile-de-France.

Our study focuses on four chemical compounds (NO, NO₂, SO₂ and O₃). The use of a Gaussian model is important, particularly for primary compounds with low reactivity such as SO₂, especially as industrial stacks are the major source of its emissions. SO₂ concentrations simulated using Plume-in-grid are closer to the concentrations measured by the stations of the air quality agencies (*Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air*, AASQA), although they remain largely overestimated. The use of a Gaussian model increases the concentrations near the source and lowers background levels of various chemical species (except O₃). The simulated concentrations may vary by over 30 % depending on whether we consider the Gaussian model for primary compounds such as SO₂ and NO, and around 2 % for secondary compounds such as NO₂ and O₃. Regarding the impact of fossil fuel-fired power plants, simulated concentrations are increased by about 1 µg/m³ approximately for SO₂ annual averages close to the Porcheville stack and are lowered by about 0.5 µg/m³ far from the sources, highlighting the less diffusive character of the Gaussian model by comparison with the Eulerian model. The integration of a subgrid Gaussian model offers the advantage of avoiding artifacts related to the choice of vertical levels and the excessive numerical diffusivity of Eulerian models, especially for coarse horizontal resolutions.

Keywords

Eulerian model. Gaussian model. Fossil fuel-fired power plants. Point sources. Impact. Paris region.

Présentation de l'exercice

Les émissions atmosphériques des sources ponctuelles représentent une part importante des émissions totales dans une région fortement urbanisée comme l'Ile-de-France. La part de ces émissions dans la région représente 20 % des émissions de NO_x mais surtout 70 % des émissions de SO₂ selon l'inventaire des émissions AIRPARIF pour l'année 2005. Selon ce même inventaire, 5 % des émissions de NO_x et 35 % de celles de SO₂ proviennent des seules centrales thermiques de Porcheville et de Vitry.

Afin d'étudier l'impact des différentes sources d'émission, on utilise généralement une modélisation de type eulérienne. Dans le cas des sources ponctuelles élevées comme les cheminées d'usine (qui peuvent atteindre jusqu'à 220 m de hauteur comme dans le cas de la centrale thermique de Porcheville), le traitement eulérien présente certaines limites. Par exemple, dans un modèle eulérien 3D, la source est assimilée à la cellule qui la contient et les composés émis sont immédiatement mélangés dans toute la cellule contenant la source qui peut être de l'ordre de quelques centaines de mètres pour des calculs à l'échelle régionale. Il en découle par conséquent une représentation erronée de la composition du panache étudié qui va donc mener à une mauvaise estimation des réactions chimiques des composés.

Dans le but d'améliorer sensiblement ces estimations, surtout à proximité des sources ponctuelles d'émissions, nous proposons d'utiliser un modèle gaussien à bouffées (que nous appellerons plus simplement modèle gaussien ou modèle sous-maille, car la taille horizontale du panache traité en gaussien est en général inférieure à celle d'une cellule du modèle eulérien) couplé à un modèle eulérien 3D. Ce modèle gaussien va traiter le transport et l'évolution chimique

de chaque panache indépendamment, et, une fois le panache ayant atteint une taille suffisante (de l'ordre de la taille de la maille du modèle eulérien), celui-ci sera injecté dans le modèle eulérien.

Cette étude sera appliquée sur le cas de l'étude d'impact de deux Centres de Production Thermique (CPT) d'Ile-de-France : les centrales de production d'électricité de Porcheville et de Vitry. Ces deux sites ont comme caractéristique d'être équipés de cheminées très hautes, respectivement 220 et 160 m, car historiquement dimensionnées pour des combustibles plus soufrés que ceux qui sont aujourd'hui utilisés. On se focalisera donc sur la différence entre une étude d'impact faite à partir d'un simple traitement avec un modèle eulérien et une étude conduite avec un modèle eulérien couplé avec un modèle gaussien. Cet exercice sera mené pour l'année 2005, année pour laquelle un cadastre des émissions anthropiques AIRPARIF est disponible.

Description des modèles de dispersion utilisés

Présentation de la plate-forme Polyphémus

Polyphémus est un système complet de simulation de la qualité de l'air, mis au point au Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique (CEREA).

Il s'agit d'une plate-forme de modélisation qui repose sur l'utilisation d'un modèle eulérien de chimie et de transport, Polair3D [1] et de données extérieures (données météorologiques, inventaires d'émissions, conditions aux limites...). Afin d'être utilisées en entrée de Polair3D, ces données doivent être traitées en amont de la simulation de qualité de l'air, lors d'une phase de prétraitement. Au cours de cette

étape, il s'agit pour l'essentiel d'extraire des données, fournies avec leurs propres résolutions spatiales et temporelles, de les interpoler et de les projeter sur le maillage de Polair3D, pour la période considérée.

Le modèle Plume-in-grid est partie intégrante du système Polyphémus et permet de coupler au modèle eulérien un modèle gaussien. Plume-in-grid a été décrit et évalué pour des traceurs passifs à échelle européenne [2] et pour des polluants chimiques à échelle régionale [3]. Notre étude repose en partie sur les travaux présentés dans ce dernier article.

Fonctionnement du couplage des modèles eulérien et gaussien.

Le modèle gaussien (figure 1) est décrit par Korsakissok et Mallet [4]. Il représente les émissions ponctuelles comme une série de bouffées, émises les unes à la suite des autres. Chaque panache transporte une quantité donnée de chacune des espèces étudiées et évolue physiquement (forme, taille, déplacement) en fonction des vents en leur centre et indépendamment des autres panaches. La chimie est prise en compte à l'intérieur de chaque bouffée, de même qu'entre deux panaches lorsque ceux-ci se recouvrent, ainsi qu'entre les polluants d'un panache et ceux du modèle eulérien.

Lorsque le panache a atteint une certaine taille (de l'ordre de la taille d'une maille horizontale du modèle eulérien), les polluants sont relâchés dans le modèle eulérien. Ce temps d'injection (noté t_{inj}) doit être choisi de façon à ce que le panache ait atteint une taille suffisamment grande, mais pas trop, de façon à ce que les probabilités d'erreurs concernant le calcul de la trajectoire de la bouffée ne deviennent pas trop importantes. On considère que le temps d'injection idéal correspond au temps mis par un panache pour traverser une maille horizontale du modèle eulérien.

Un autre paramètre temporel est à prendre en compte, c'est le temps qui sépare l'émission de deux bouffées (Δt). Dans le cas d'espèces réactives notamment, il est important qu'il y ait un recouvrement

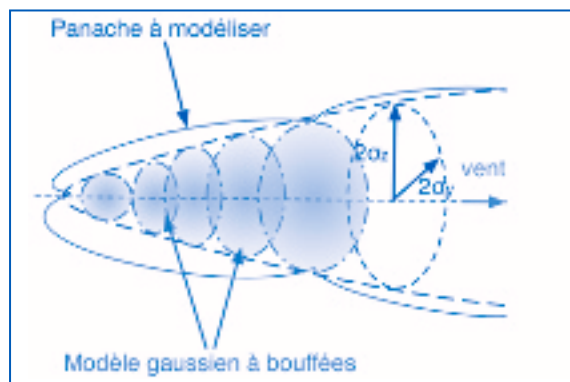


Figure 1.

Modèle gaussien à bouffées : le panache est discrétisé en une série de bouffées gaussiennes dans les trois directions.

Gaussian puff model : the plume is discretized into a series of puffs, Gaussian in the three directions.

suffisant entre deux bouffées successives. Une mauvaise estimation de ce recouvrement pourrait induire de sérieux changements dans le traitement de la chimie. Il faut donc que ce laps de temps soit suffisamment petit par rapport à t_{inj} .

Les vents au centre du panache sont interpolés à partir des données météorologiques fournies par le modèle eulérien, tout comme la turbulence qui va faire évoluer la taille du panache. Il y a donc des échanges permanents entre les deux modèles. À chaque pas de temps, le modèle gaussien récupère des données météorologiques et, si le temps d'injection est atteint, libère les polluants dans le modèle eulérien.

Validation du modèle couplé

Korsakissok et Mallet [3] ont étudié les différences de concentrations obtenues en conduisant une simulation avec le modèle Polair3D uniquement et une simulation utilisant un couplage entre modèles eulérien et gaussien. Dans cette seconde simulation, 89 émissions ponctuelles sont traitées par le modèle sous-maille. Cette étude est conduite pour un domaine couvrant l'Île de France, pour une période allant d'avril à septembre 2001.

Dans cette étude, l'utilisation d'un modèle gaussien induit une légère modification des concentrations à la surface. Les résultats obtenus sont plus proches des observations faites à différentes stations de mesure du réseau AIRPARIF, même si la différence entre la simulation de référence et celle prenant en compte un modèle sous-maille reste faible par rapport à la différence entre les concentrations observées et simulées.

SO₂ est l'espèce la plus sensible à l'utilisation du modèle gaussien. Les concentrations de SO₂ à la surface se retrouvent sensiblement diminuées lorsque l'on utilise un modèle sous-maille. SO₂ est un polluant essentiellement émis par des sources ponctuelles et est donc plus sensible aux traitements de ces sources. De plus, il s'agit d'un polluant primaire et ceux-ci sont plus influencés par l'utilisation d'un modèle sous-maille (NO et SO₂ plus influencés que O₃ et NO₂).

L'article fait aussi une analyse de sensibilité et se focalise notamment sur l'impact des pas de temps (temps entre l'émission de deux panaches dans le modèle gaussien ainsi que du temps de traitement dans le modèle gaussien avant injection dans le modèle eulérien), de la paramétrisation gaussienne (Briggs, Doury, *Similarity theory*), ou de la diffusion verticale. L'article montre qu'en termes de pas de temps, les espèces peu réactives comme SO₂ sont sensibles au temps de traitement avant l'injection dans le modèle eulérien mais peu à l'intervalle entre deux panaches, alors que les espèces plus réactives sont sensibles à cet intervalle car sensibles à la chimie induite par le recouvrement des panaches.

Concernant la paramétrisation gaussienne, l'article nous informe que les paramétrisations de Briggs et *Similarity theory* donnent de meilleurs résultats (avec

un léger avantage pour *Similarity theory*) pour une étude à l'échelle régionale, la formulation de Doury étant plus adaptée aux traitements à échelle continentale.

Il est important de noter que cette étude comporte quelques limites. En effet, le cadastre des émissions AIRPARIF utilisé est un cadastre ancien, fait à partir des émissions de l'année 2000. Il ne fournit notamment pas d'indications sur la configuration des émissions de cheminée (section de la cheminée, vitesse d'injection, etc.), ce qui rend approximatif le calcul de surhauteur fait dans cette étude, d'autant plus que le calcul de surhauteur (voir section 3.2 sur la paramétrisation de la surhauteur) ne concerne que les sources traitées par le modèle gaussien.

Présentation de la stratégie des études d'impact

Météorologie

C'est le modèle WRF (*Weather Research and Forecasting model*) qui a été utilisé pour produire les données météorologiques régionales nécessaires à la conduite des modèles eulérien et gaussien. Ce modèle utilise des résultats de modèles globaux pour recalculer les champs de vent à échelle régionale. Ce modèle est mis au point au National Center for Atmospheric Research (NCAR).

Les données météorologiques à notre disposition sont issues de réanalyses globales réalisées soit par le CEPMMT (Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme), soit par le NCAR (National Center for Atmospheric Research, États-Unis). Les champs météorologiques sont archivés avec une résolution spatiale optimale de 0,36° pour l'un et 1° pour l'autre. Ces résolutions n'étant pas satisfaisantes pour des études à l'échelle régionale, nous avons utilisé les champs générés par WRF [5]. WRF est un code météorologique, largement utilisé et validé par la communauté scientifique, qui résout les équations des écoulements atmosphériques. C'est un modèle méso-échelle non hydrostatique qui permet de simuler l'ensemble des champs météorologiques nécessaires au calcul de la chimie atmosphérique. On peut alors affiner la résolution des champs jusqu'à quelques kilomètres (5 km dans notre cas). La contribution de WRF est alors de mieux rendre compte des phénomènes météorologiques à cette échelle : les épisodes convec-

tifs (orages), les recirculations locales du vent et l'impact de l'agglomération parisienne. Afin d'améliorer l'analyse des données météorologiques, nous avons appliqué la méthode dite du « nudging », c'est-à-dire que nous « relaxons » l'état du modèle vers des données d'observation en ajoutant aux équations des termes de rappel. Les réanalyses du modèle WRF sont affinées en utilisant des observations à la surface et aériennes mises à disposition par le National Center for Environmental Prediction (NCEP) américain.

Spécificité des émissions

Caractérisation spécifique des émissions des CPT

Cette étude s'attarde tout particulièrement sur l'impact des centres de production thermique de Porcheville et de Vitry. Ces deux centrales ont des caractéristiques différentes et ceci a un impact dans le rejet de polluants (tableau 1).

La centrale thermique de Porcheville comprend quatre tranches de production d'environ 600 MW chacune. La production de l'électricité en 2005 a été assurée par deux d'entre elles et l'énergie est produite par la combustion du fioul lourd.

La centrale de Vitry comprend, elle aussi, quatre tranches dont deux de 250 MW sont mises en fonctionnement en 2005. L'énergie est en revanche produite par combustion de charbon.

Les émissions des centrales de Vitry et de Porcheville sont calculées à partir des données fournies par EDF. Ces données concernent les principaux polluants primaires comme NO, CO, SO₂, les PM et plusieurs métaux lourds. Les données fournies sont des données d'émissions annuelles pour chaque tranche de chacune des CPT étudiés ainsi qu'un listing de leurs horaires et puissances de fonctionnement respectifs. En répartissant les émissions, proportionnellement aux puissances de fonctionnement, on peut reproduire un programme des émissions des différents polluants au cours de l'année d'étude.

La centrale de Porcheville dispose d'une puissance largement supérieure à celle de Vitry mais est moins sollicitée (tableau 1). Il en résulte que les deux centrales ont des taux d'émission cumulés presque semblables pour certaines espèces comme SO₂. Concernant les NO_x, le fait que les deux centrales utilisent des combustibles différents a pour conséquence une signature différente des émissions et un taux d'émission différent.

Tableau 1.
Principales caractéristiques des CPT de Porcheville et Vitry.
[Main characteristics of Vitry and Porcheville power plants.](#)

	Latitude	Longitude	Hauteur des cheminées	Puissance maximale des tranches	Nombre d'heures de fonctionnement par tranche en 2005
Porcheville	48,97	1,758	220 m	600 MW	Tranche 3 : 1 830 Tranche 4 : 2 012
Vitry	48,79	2,417	160 m	250 MW	Tranche 3 : 4 785 h Tranche 4 : 4 497 h

Lorsque d'autres émissions entrent en jeu

Concernant les autres sources d'émission, nous disposons, pour la région Ile-de-France, d'un inventaire kilométrique des émissions réalisé par AIRPARIF, l'organisme chargé de l'environnement pour la surveillance de la qualité de l'air en Ile-de-France. Les émissions, fournies pour les polluants CO, CO₂, NO_x, SO_x, COVNM, NH₃, CH₄, PM_{2,5}, PM₁₀, sont répertoriées par secteur d'activités, suivant la nomenclature SNAP (*Selected Nomenclature for sources of Air Pollution*). Les émissions des grandes sources ponctuelles (telles que les centrales thermiques) sont répertoriées à part, ce qui nous permet d'extraire les émissions de notre choix afin de les traiter séparément. Les dix plus grosses sources ponctuelles seront soit émises directement dans le modèle eulérien, soit traitées avec le modèle gaussien. Le choix de ces dix principales sources a été fait au regard des émissions de NO et SO₂. La figure 2 montre la chronologie des différentes sources d'émissions traitées par le modèle sous-maille.

La notion de surhauteur : un paramètre important pour les émissions ponctuelles

Dans le cas de l'étude d'impact des émissions de cheminées, il est important de noter le choix de la hauteur des émissions traitées dans le modèle. En effet, il est possible de simplement considérer les hauteurs des cheminées fournies par le cadastre AIRPARIF et d'injecter les polluants correspondants aux différentes sources ponctuelles directement dans les mailles correspondantes aux localisations et hauteurs des cheminées. Cependant, certains paramètres, comme la vitesse d'éjection des fumées, la différence de température entre la fumée et l'air environnant, ainsi que les conditions de stabilité de la couche atmosphérique dans laquelle sont rejetés les traceurs provoquent une élévation du panache de fumée avant que celui-ci ne se disperse dans

l'atmosphère. Cette différence de hauteur, entre la hauteur de la cheminée et l'altitude réelle à laquelle le panache se dissipe dans l'atmosphère s'appelle la surhauteur d'émission et nous la calculons selon la paramétrisation HPDM (*Hybrid Plume Dispersion Model*) [6], tant pour les émissions eulériennes (en prétraitement) que pour les émissions traitées par le modèle gaussien. Nous proposons aussi d'estimer l'impact de l'utilisation du calcul de la surhauteur, pour les CPT (partie 4.3).

Définition du domaine d'étude et des paramètres d'entrée

Notre domaine d'étude comprend la majeure partie de la région Ile-de-France (figure 3). L'objectif, dans le choix de la délimitation du domaine, était d'inclure les deux centres de production thermique que sont les centrales de Vitry et de Porcheville, une zone d'influence suffisamment grande autour de ces centrales ainsi que Paris et sa proche banlieue. Notre domaine d'étude s'étend donc de 1.535°E à 2.885°E et de 48.485°N à 49.175°N. Le choix de la résolution, quant à lui, devait permettre à la fois d'obtenir des résultats précis tout en obtenant des temps de calcul acceptables. Nous avons opté pour une résolution horizontale de 0.03° (soit environ 3 400 m du nord au sud et 2 400 m d'est en ouest). Notre grille eulérienne comprend ainsi 45 cellules d'est en ouest et 23 du nord au sud. Concernant la résolution verticale, nous avons 7 niveaux compris entre 0 et 3 000 m d'altitude (les limites des niveaux verticaux sont à 0, 50, 150, 300, 500, 1 000, 2 000 et 3 000 m d'altitude).

Concernant le modèle sous-maille, nous avons choisi comme paramètres temporels un temps d'injection $t_{inj} = 20$ min, et un temps entre deux bouffées de $t = 100$ s. Pour la modélisation gaussienne, nous utilisons la paramétrisation de Briggs.

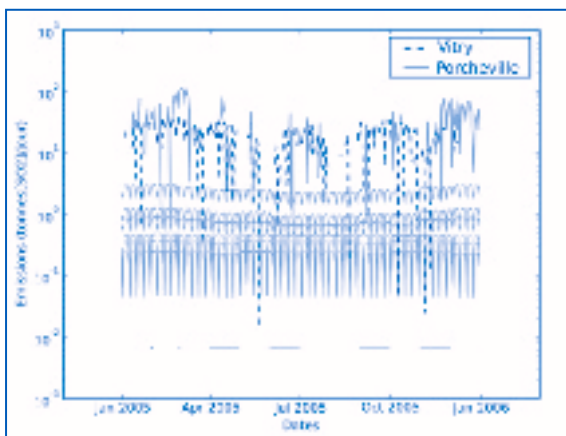


Figure 2.

Chronologie des émissions de SO₂, exprimées en tonnes par jour, pour Vitry, Porcheville et les dix autres sources ponctuelles traitées par le modèle sous-maille.

Timeries of SO₂ emissions, in Tons per day, for Vitry, Porcheville, and the ten other point sources handled with the subgrid model.



Figure 3.

Domaine d'étude montrant la position des CPT de Porcheville et de Vitry (en noir) et des dix autres sources d'émissions ponctuelles les plus importants du domaine (gris).

Domain of study showing the location of the Porcheville and Vitry power plants (black) and the ten most important other point sources (grey).

Quatre simulations pour déterminer l'influence des traitements gaussiens et eulériens

Nous présentons dans cette étude les résultats de quatre simulations conduites avec ou sans traitement en sous-maille des sources ponctuelles et avec ou sans la prise en compte des émissions des CPT de Vitry et de Porcheville. Le tableau 2 liste ces différentes simulations.

On regardera la différence de résultats entre les résultats des différents scénarios de manière à en déduire l'impact de divers paramètres. Par exemple, la différence entre les simulations E1 et E0 nous montrera l'impact des émissions des CPT quand celles-ci sont traitées dans un modèle eulérien. La différence entre les résultats des simulations P0 et E0 nous montrera la différence d'impact des sources ponctuelles (hors CPT) lorsque celles-ci sont traitées en gaussien ou en eulérien. Le tableau 3 résume les différentes informations que l'on peut obtenir en comparant les résultats des simulations.

Tableau 2.
Caractéristiques des quatre simulations.
Characteristic of the four simulations.

	Prise en compte des CPT	Traitement des sources ponctuelles en sous-maille
E0	Non	Non
E1	Oui	Non
P0	Non	10 principales sources ponctuelles (hors CPT)
P1	Oui	CPT + les 10 autres principales sources ponctuelles

Tableau 3.
Informations obtenues en comparant les résultats des différentes simulations.
Information obtained by comparing results from the different simulations.

Opération sur les scénarios	Information obtenue
P0-E0	Différence d'impact entre traitements gaussien et eulérien des sources ponctuelles (hors CPT).
P1-E1	Différence d'impact entre traitements gaussien et eulérien des sources ponctuelles (CPT inclus).
E1-E0	Impact des CPT lorsque ceux-ci sont traités en eulérien
P1-P0	Impact des CPT lorsque ceux-ci sont traités en gaussien
(E1-E0)-(P1-P0)	Différence d'impact entre traitements gaussien et eulérien des CPT.

Résultats des études d'impact

L'influence du modèle sous-maille : comparaisons et discussion

Notre modèle ne prenant pas en compte la chimie des aérosols, nous nous attarderons principalement sur les résultats concernant SO_2 qui est un des polluants primaires les moins sensibles à la chimie hétérogène, et donc à la prise en compte des aérosols dans le modèle. La figure 4 montre les concentrations obtenues avec les scénarios E1 et P1 ainsi que la différence entre les deux. Nous voyons que les concentrations à proximité de la surface (entre 0 et 50 m d'altitude) sont globalement plus élevées dans notre domaine d'étude dans le cas d'une simulation purement eulérienne, par rapport au cas d'une simulation prenant en compte le modèle gaussien pour les principales sources ponctuelles. En revanche, à proximité de ces sources ponctuelles, le modèle eulérien présente des concentrations plus faibles. Le modèle

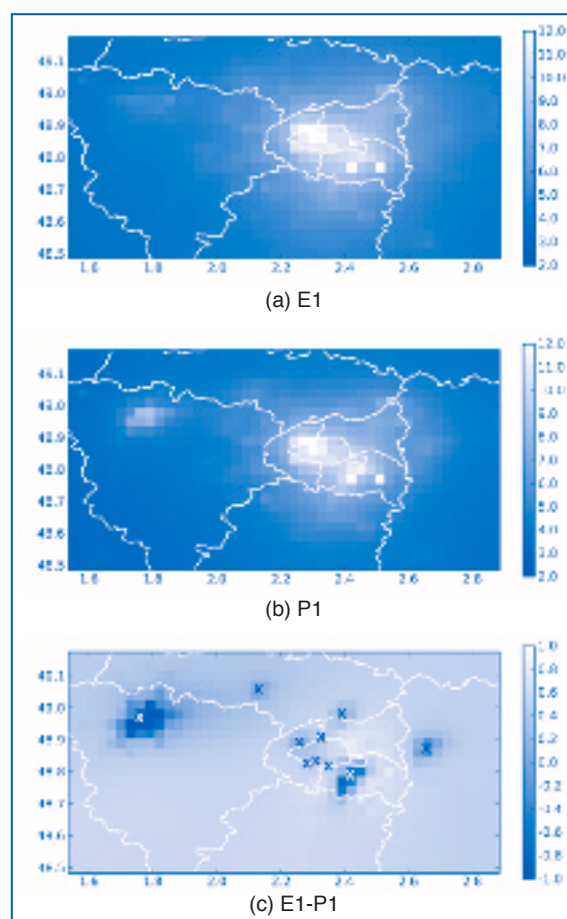


Figure 4.

Concentrations de SO_2 à la surface ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), en région parisienne, moyennées pour l'année 2005, obtenues en utilisant le modèle purement eulérien (a), en intégrant le modèle sous-maille (b) et différence entre les deux scénarios (c).

SO_2 concentration near the surface ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), in the Paris region, averaged over the year 2005, obtained by using the Eulerian model only (a), the Eulerian model coupled with the Gaussian model (b), and the difference between the two scenarios (c).

sous-maille est en effet moins diffusif numériquement que le modèle strictement eulérien, et les polluants sont donc plus concentrés à proximité des sources.

La figure 5 montre ensuite l'impact relatif de l'utilisation d'un modèle sous-maille, dans nos simulations, par rapport à un modèle totalement eulérien, pour les 4 polluants majeurs que sont SO₂, NO, NO₂ et O₃. Cet impact relatif, exprimé en pourcentage, est calculé de la manière suivante :

$$\text{Imp} = (E1 - P1) / E1 * 100$$

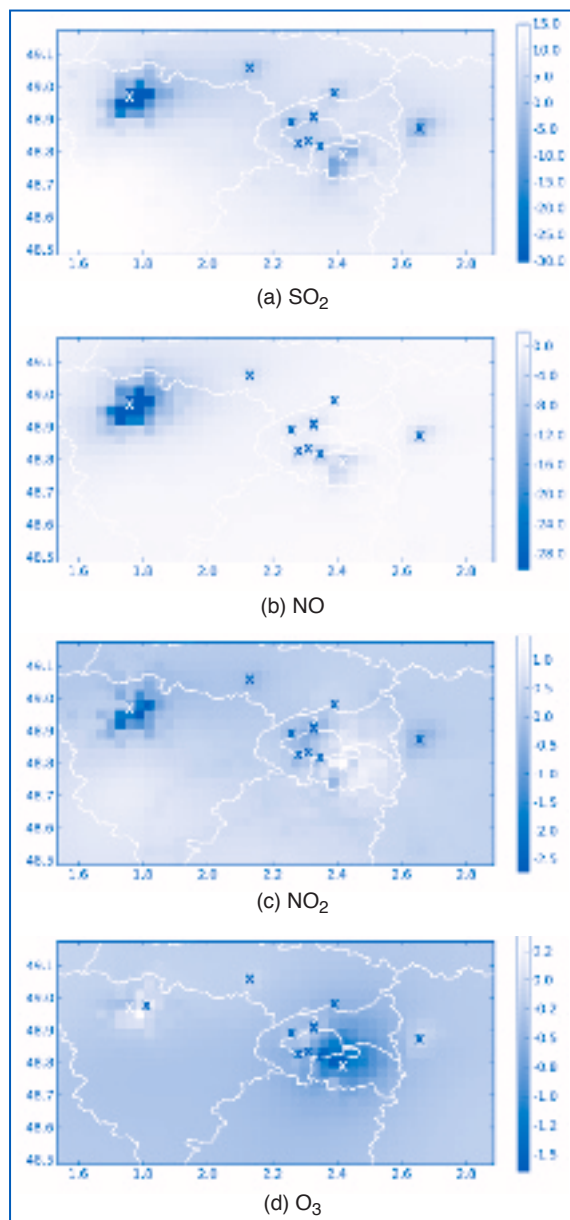


Figure 5.

Influence relative de l'utilisation d'un modèle gaussien sous-maille (en %), sur la concentration annuelle moyenne, au voisinage de la surface, pour SO₂ (a), NO (b), NO₂ (c) et O₃ (d).

Relative influence of the use of a subgrid Gaussian model (in %) on the yearly mean concentrations, near the surface, of SO₂ (a), NO (b), NO₂ (c) et O₃ (d).

Les figures montrent des résultats très différents, tant en terme de grandeurs, que de la localisation géographique de l'impact, pour chacun des 4 composés étudiés. Comme attendu, SO₂ est le traceur pour lequel l'impact relatif du modèle sous-maille est le plus important. En effet, SO₂ est un polluant primaire et peu réactif, donc les concentrations sont directement liées aux émissions. De plus, la part des émissions ponctuelles par rapport à toutes les sources d'émission est très importante, puisque la source majeure de SO₂ est l'industrie, et donc les rejets de cheminées. Les variations de concentration de SO₂ vont ainsi de moins de -30 % (c'est-à-dire une hausse supérieure à 30 % des concentrations lorsque l'on utilise le modèle gaussien pour les émissions ponctuelles) à proximité de la station de Porcheville, jusqu'à + 18 % (c'est-à-dire une baisse de 18 % des concentrations lorsque l'on utilise le modèle gaussien) loin des zones les plus polluées. La façon de modéliser les sources d'émission pour un composé comme SO₂ a donc un impact très important sur ses concentrations. Le fait que l'impact relatif soit plus important autour de Porcheville que de Vitry est d'autant plus logique que Porcheville est une station plus éloignée de Paris, et se situe donc dans un environnement moins pollué. La pollution émise par les sources ponctuelles dans la zone de Porcheville est donc très importante par rapport à la pollution de fond.

Concernant NO, on voit que l'impact peut être très important (les concentrations sont plus fortes de plus de 20 % quand on utilise un modèle sous-maille), mais reste très limité géographiquement. En effet, d'après la figure 5b, on voit que c'est surtout autour de la station de Porcheville que le choix de la modélisation des sources ponctuelles est le plus important. Dès que l'on s'éloigne des sources d'émission, l'impact diminue fortement. NO est un composé beaucoup plus réactif que SO₂ et, de plus, les émissions ponctuelles ne représentent qu'une faible partie des émissions, d'où ce déclin rapide de l'impact, dès que l'on s'éloigne des cheminées.

Enfin, concernant les polluants secondaires que sont NO₂ et O₃, on voit que l'impact relatif est beaucoup plus faible. Pour NO₂, il va de -1,2 à 1,6 % tandis que pour O₃, il va de 0 à -1,6 %. L'impact relatif est important autour de Vitry, surtout pour O₃, car la pollution de fond y est plus importante et donc, le cycle de formation/destruction de O₃ y est de fait, supérieur.

Évaluation

Le tableau 4 montre les différences entre concentrations observées en surface par les stations du réseau de la Base de Données de la Qualité de l'Air (BDQA) et les concentrations simulées à ces mêmes stations, en utilisant les scénarios d'émission E1 et P1. On voit que pour SO₂, l'utilisation d'un modèle sous-maille abaisse les concentrations simulées et les rapproche des observations, même si l'écart entre les

Tableau 4.

Comparaison entre moyennes des concentrations mesurées en stations et concentrations simulées aux mêmes lieux en utilisant les scénarios E1 et P1.

Comparison between yearly mean measured concentrations, and simulated concentrations at the same places, using both scenarios E1 and P1.

	Mesures	E1	P1
SO ₂	5.8	11.3	10.3
NO	34.4	11.4	10.5
NO ₂	40.8	36.3	35.0
O ₃	43.0	52.1	54.6

Tableau 5.

Différence entre concentrations annuelles de SO₂ mesurées et simulées à quatre stations de mesures de la BDQA à proximité d'une source d'émission ponctuelle. Les concentrations sont données en µg/m³.

Difference between yearly mean SO₂ concentrations as measured and simulated at four BDQA stations, near a point source emission. Concentrations are in µg/m³.

	Mesures	E1	P1
Paris 12 ^e	5.3	9.5	9.1
Bd Auteuil	5.0	10.3	9.9
Neuilly	6.8	11.7	11.5
La Défense	5.5	10.8	10.6

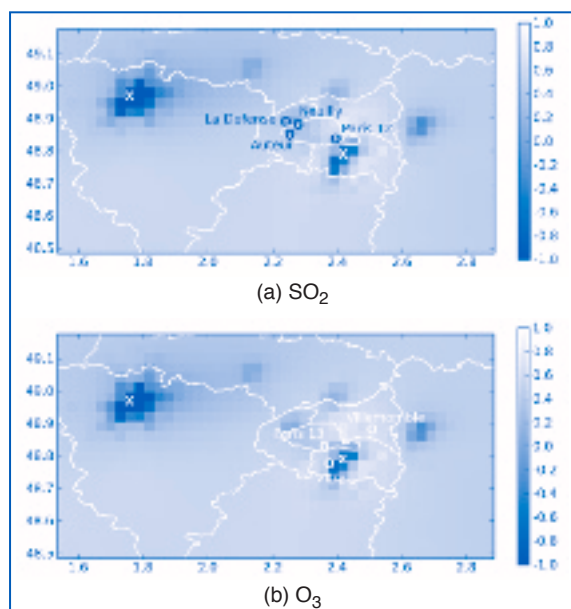


Figure 6.

Impact de l'utilisation d'un modèle sous-maille (E1-P1) sur les concentrations annuelles (µg/m³) de SO₂ (a) et d'O₃ (b) avec localisation des stations de la BDQA mesurant SO₂ (a) et O₃ (b) (cercles noirs pour SO₂ et blancs pour O₃) retenues pour notre évaluation.

Impact of the use of a subgrid model (E1-P1) on the SO₂ (a) and O₃ (b) yearly mean concentrations with location of the BDQA measurement stations (black circles for SO₂ and white circles for O₃).

concentrations simulées par les différents scénarios reste faible devant l'écart entre simulations et observations. Concernant les autres composés, l'utilisation du modèle gaussien n'améliore pas les résultats.

La figure 6 montre la localisation de certaines stations de mesure de la BDQA qui quantifient les concentrations de SO₂ et O₃. On montre sur la figure l'emplacement des stations les plus impactées par le changement de traitement des émissions ponctuelles. Comme la figure 6 montre la différence de concentrations entre une simulation eulérienne et gaussienne, on peut voir à quelles stations le changement de traitement des émissions ponctuelles a le plus

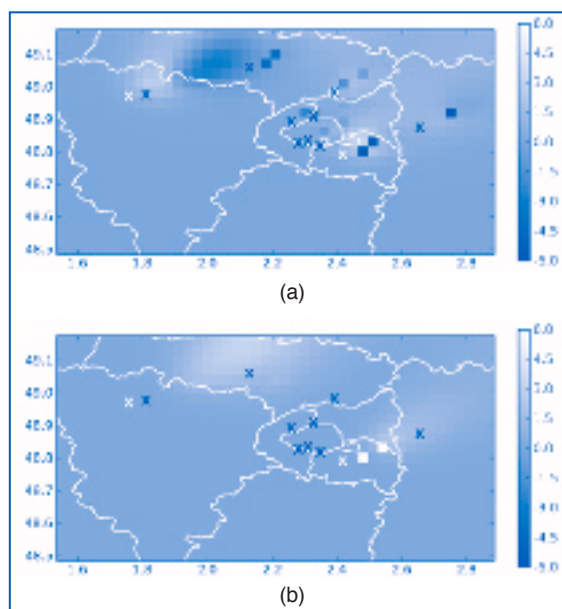


Figure 7.

Influence du traitement des sources ponctuelles (E1-P1) sur les concentrations de SO₂ au voisinage du sol, pour des simulations où la surhauteur n'est pas prise en compte (haut) et où elle est calculée (bas), le 6 avril 2005 à 20 h. Les centrales de Porcheville et de Vitry sont représentées par les croix blanches.

Influence of the point source way of modeling (E1-P1) on the SO₂ concentrations near the surface, for simulations where the plume rise is not considered (a) and where it is taken into account (b), on 6th April 2005, at 8 pm. Porcheville and Vitry power plants are represented by white crosses.

d'impact. On se focalise ici sur SO₂ et O₃ car l'impact du changement de traitement des émissions ponctuelles a lieu sur NO uniquement à proximité des stations, et l'impact sur NO₂ est trop faible pour être significatif.

Bien qu'il y ait peu de stations qui mesurent les concentrations de SO₂, et aucune à proximité de Porcheville, on peut néanmoins regarder les résultats de la station de Paris 12^e, à proximité de Vitry, ainsi que de trois stations au nord-ouest de Paris (Boulevard Périphérique Auteuil, Neuilly et La Défense), se situant à proximité d'une des sources ponctuelles traitées en gaussien dans le scénario P1.

Le tableau 5 montre une comparaison entre des concentrations mesurées et simulées à ces 4 stations de mesure parisiennes. On constate que dans les 4 cas, le traitement eulérien des sources provoque une baisse des concentrations de surface, ce qui améliore sensiblement les résultats, même si cette amélioration est faible par rapport à la différence constatée entre mesures et simulations. Cette différence entre observations et résultats du modèle a plusieurs causes, comme le traitement du mélange vertical dans le modèle eulérien, qui est probablement trop faible, ou le profil temporel des émissions de SO₂ dans l'inventaire d'AIRPARIF qui n'est pas assez réaliste, etc.

Les concentrations d'O₃ sont mesurées dans un plus grand nombre de stations. Les plus grandes différences entre concentrations simulées et observées se situent au sud-est de Paris, autour de la centrale de Vitry (figure 6b). Nous focalisons donc notre attention sur les trois stations situées dans ce domaine. Le tableau 6 montre ainsi les résultats pour ces stations qui sont celles de Paris 13^e, Vitry et Villemomble.

On voit ici que la simulation eulérienne (E1) avait déjà tendance à surestimer les concentrations d'O₃. La simulation P1 accentue cette surestimation et n'améliore donc pas les résultats.

Sensibilité aux calculs de surhauteur

Pour illustrer l'impact de la surhauteur dans le cas de l'étude d'impact, nous considérons l'exemple du panache du CPT de Porcheville, simulé le 6 avril 2005 à 20 h. La figure 7a montre la différence des concentrations, à la surface, obtenues avec les scénarios E1 et P1, dans le cas où le calcul de la surhauteur n'est pas pris en compte. La figure 7b montre la même chose mais avec prise en considération de la surhauteur. Sur la figure 7a, on voit que les scénarios E1 et P1 donnent des résultats relativement proches. Dans le cas d'une simulation purement eulérienne, la concentration est plus forte à proximité de la source (environ + 2 µg/m³) alors qu'elle est plus forte dans le cas du traitement gaussien lorsque l'on s'éloigne de la source (environ + 3 µg/m³), dans la direction du panache. Sur la figure 7b, on voit que l'impact du traitement eulérien est partout plus fort que le traitement gaussien (jusqu'à + 5 µg/m³ environ).

Dans les deux cas de figure, la simulation E1 donne exactement les mêmes résultats. La cheminée de Porcheville culmine à 220 mètres de hauteur, dans une couche verticale comprise entre 150 à 300 m d'altitude. La surhauteur, telle que nous la calculons, a un ordre de grandeur de quelques dizaines de mètres. Ainsi, que l'on prenne ou non en compte la surhauteur, les effluents émis par la centrale de Porcheville sont toujours rejetés dans le même niveau vertical du modèle eulérien. Alors que dans le modèle gaussien, la hauteur d'émission est indépendante de la discrétisation verticale du modèle eulérien et varie en fonction de la surhauteur. La différence de résultat observée entre les figures 7a et 7b provient

Tableau 6.

Différence entre concentrations d'O₃ mesurées et simulées à trois stations de mesures de la BDQA à proximité d'une source d'émission ponctuelle. Les concentrations sont données en µg/m³.

Difference between yearly mean O₃ concentrations as measured and simulated at three BDQA stations, near a point source emission. Concentrations are in µg/m³

	Mesures	E1	P1
Paris 13 ^e	38.1	43.4	44.0
Vitry	41.9	53.4	54.0
Villemomble	42.3	55.8	56.2

donc uniquement de la simulation avec traitement gaussien, particulièrement sensible à la hauteur des émissions.

Le calcul de la surhauteur n'est visible en traitement eulérien que lorsque le calcul induit un changement de niveau vertical.

La contribution de nos deux centrales

La figure 8 nous montre l'impact des CPT de Porcheville et de Vitry, en termes de concentration à la surface, dans le cas des traitements eulériens et gaussiens de ces deux sources. Les concentrations montrées ici sont moyennées sur l'année. On n'observe pas de tendance particulière en termes de direction de vent et de déplacement moyen du panache de pollution.

L'utilisation du modèle eulérien montre une dissymétrie entre les impacts du CPT de Porcheville et celui de Vitry pour SO₂. En effet, l'impact de la centrale de Vitry est plus important, alors qu'avec une simulation gaussienne, les deux centrales ont un impact voisin. Les deux centrales émettent approximativement la même quantité de SO₂ sur une année mais de manière différente puisque Porcheville émet plus de SO₂ ponctuellement, et fonctionne moins longtemps. Le modèle eulérien conserve mieux les polluants émis sur la durée que ceux émis en masse mais de façon ponctuelle.

La figure 8c montre la différence d'impact calculé avec un modèle eulérien et un modèle intégrant le traitement gaussien des sources ponctuelles ([E1-E0]-[P1-P0]). On constate donc sur cette carte que l'utilisation d'un modèle gaussien augmente fortement les concentrations de SO₂ au voisinage de la surface, à proximité de la centrale de Porcheville (> 1 µg/m³). Concernant Vitry, l'utilisation du modèle à sous-maille provoque aussi une hausse de concentration à la surface à proximité de la source, mais de manière moins importante (~1 µg/m³). Lorsque l'on s'éloigne de la source (en Val-de-Marne, en Seine-Saint-Denis et à Paris) au contraire, c'est l'utilisation d'un modèle eulérien qui provoque une hausse des concentrations à la surface. Sur l'ensemble du domaine, le modèle eulérien augmente l'impact des CPT en SO₂ (d'environ 0,5 µg/m³).

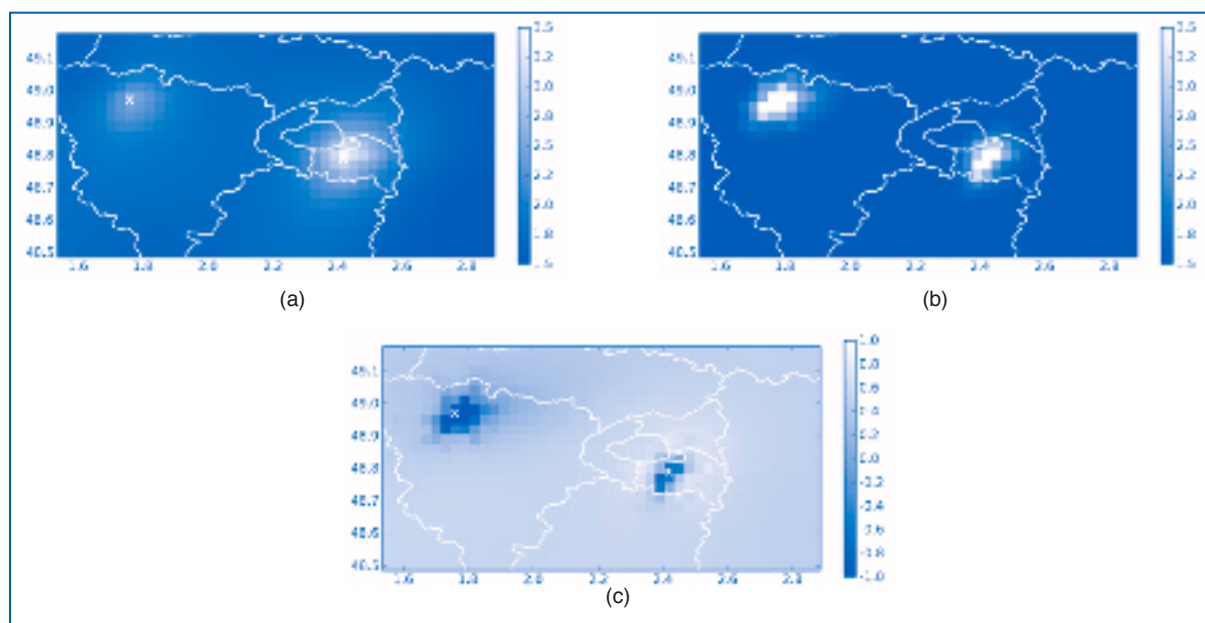


Figure 8.

Influence des deux CPT de Porcheville et de Vitry dans le cas d'un traitement purement eulérien (E1-E0 - a), dans le cas d'un traitement gaussien (P1-P0 - b), et différence entre les deux (E1-E0)-(P1-P0) en bas, pour SO_2 .

Influence of Porcheville and Vitry power plants in the case of an Eulerian simulation (E1-E0 - a), in the case of a Gaussian simulation (P1-P0 - b) and the difference between both of them (E1-E0)-(P1-P0) (c), for SO_2 .

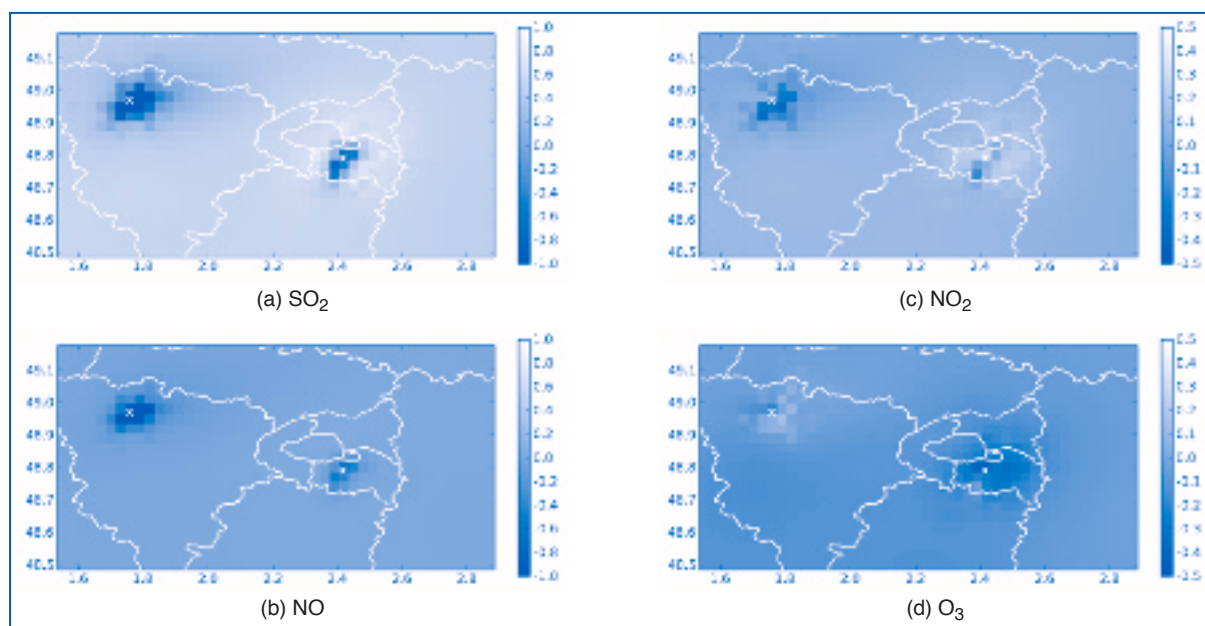


Figure 9

Impact des CPT de Porcheville et de Vitry à la surface : différence entre traitement eulérien et gaussien, i.e. (E1-E0)-(P1-P0) pour SO_2 (a), NO (b), NO_2 (c) et O_3 (d).

Impact of the Porcheville and Vitry power plants near the surface: difference between Eulerian and Gaussian modelling, e.g. (E1-E0)-(P1-P0) for SO_2 (a), NO (b), NO_2 (c) and O_3 (d).

La figure 9 montre les résultats de la formule (E1-E0)-(P1-P0) (i.e. différence d'impact entre traitements gaussien et eulérien des CPT) pour les quatre polluants majeurs. La figure 9 confirme que l'utilisation du modèle gaussien a un impact plus important autour de Porcheville dans le cas des polluants

primaires, alors que l'impact est plus important autour de Vitry pour les polluants secondaires. Cela est dû au fait que l'environnement autour de Vitry est plus pollué (car plus proche de Paris), et est donc plus réactif et plus à même de conduire rapidement à la formation et à la destruction de polluants secondaires.

Conclusion et perspectives

L'utilisation d'un modèle sous-maille, intégré au modèle eulérien, a une incidence non négligeable sur le traitement de la dispersion des concentrations de polluants à la surface. Cette différence en termes de modélisation des sources ponctuelles est surtout visible pour les polluants primaires, et particulièrement pour SO₂ qui est un composé peu réactif et dont les sources ponctuelles représentent la majorité des sources en région parisienne. En revanche, pour les composés secondaires, cet impact est moins important et a une localisation géographique différente. Le changement dans le traitement des émissions ponctuelles a un impact plus important autour de Porcheville pour les composés primaires, et plus important autour de Vitry pour les secondaires. Le modèle gaussien, moins diffusif que le modèle eulé-

rien, a pour conséquence une hausse de concentration des polluants à proximité des sources et, à l'opposé, une baisse lorsque l'on s'éloigne de celles-ci (sauf pour O₃ où c'est l'inverse).

Ce modèle, plus réaliste dans le traitement du calcul de la surhauteur des sources ponctuelles, lui confère un intérêt non négligeable.

Une de ses principales faiblesses est, en revanche, la non-prise en compte des espèces aérosols et donc de la chimie hétérogène. Une prise en compte de ces espèces chimiques (i.e., [7]) serait une évolution intéressante. L'utilisation du modèle est aussi limitée à la prise en compte des sources ponctuelles. Une adaptation du modèle pour la prise en compte des sources linéiques (qui permettrait notamment le traitement des émissions liées à la circulation automobile) est en cours au CEREAS.

Remerciements

La présente étude a notamment pu être réalisée grâce aux données fournies par EDF, qui nous a personnellement communiqué des inventaires annuels d'émissions et des chroniques de fonctionnement des centrales de Porcheville et de Vitry, ce qui nous a permis de reconstituer des scénarios réalistes d'émissions pour ces centrales. Nous remercions également AIRPARIF, le réseau de surveillance de la qualité de l'air en région Ile-de-France, pour la mise à disposition d'inventaires d'émissions anthropiques pour l'ensemble de la région.

Références

- [1] Boutahar J., Lacour S., Mallet V. *et al.* Development and validation of a fully modular platform for numerical modelling of air pollution: POLAIR. *Int J Env Pollut* 2004 ; 22 : 17-28.
- [2] Korsakissok I., Mallet V. Subgrid-scale treatment for major point sources in an Eulerian model: a sensitivity study on the ETEX and Chernobyl cases. *J Geophys Res* 2010a ; 115 D03303, doi:10.1029/2009JD012734.
- [3] Korsakissok I., Mallet V. Development and application of a reactive Plume-in-grid model: evaluation over greater Paris. *Atmos Chem Phys* 2010b ; 10 : 8917-31.
- [4] Korsakissok I., Mallet V. Comparative study of Gaussian dispersion formulas within the Polyphemus platform: evaluation with Prairie Grass and Kincaid experiments, *J Appl Meteor*, 2009 ; 48 : 2459-73.
- [5] Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., *et al.* A description of the Advanced Research WRF version 3, nCAR Technical note-475+STR available at http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf, 2008.
- [6] Hanna S.R. and Paine R.J. Hybrid Plume Dispersion Model (HPDM) Development and Evaluation, *J Appl Meteor*, 1988 ; 28 : 206-24.
- [7] Karamchandani P., Vijayaraghavan K., Chen S.T. *et al.* Plume-in-grid modelling for particulate matter, *Atmos Environ*, 2008 ; 40: 7280-97.



Quand l'air est mis à l'épreuve

mesurer, percevoir et délibérer sur la qualité
de l'air au XXe et XXIe siècle

Colloque international (Lyon)

La pollution atmosphérique a été décrite comme une perturbation d'un bien commun comme la santé ou le cadre de vie pour la population.

A ce titre elle est particulièrement sujette aux plaintes, à la mobilisation collective et au débordement citoyen par rapport aux initiatives des collectivités publiques ou des industriels. Elle prête à intervention hygiéniste ou civique dans les "affaires" qui peuvent éventuellement se déployer, dans le pilotage des sites industriels ou dans la gestion des foyers domestiques. C'est donc un enjeu, quelquefois de manière inédite, où s'agencent d'une part des subjectivités, des ressentis ou des affections, et d'autre part, des objectivités, des indices, des statistiques etc.

Le colloque articulera plusieurs séries de questions tirées de cette "mise à l'épreuve de l'air" au fil du XXe et XXIe siècle.

les 19 et 20 novembre 2012

Inscription obligatoire (places limitées) : leakamoun@gmail.com



Salle Elise Rivet, Institut des Sciences de l'Homme (ISH), 14 avenue Berthelot Lyon 7ème

Programme [concertation](#) [décision](#) [évaluation](#)

