

Les défis de la santé et du bien-être en ville : pollution atmosphérique, nuisances thermiques, odeurs

Jacques Moussafir est ingénieur civil de l'École des Mines de Paris et docteur-ingénieur de l'Université Pierre et Marie Curie. Il est l'un des trois fondateurs et le PDG de ARIA Technologies SA¹.

1 Pollution atmosphérique : de la planète à la rue

L'approche de l'étude de la pollution atmosphérique développée chez ARIA Technologies est celle de la modélisation, c'est-à-dire du calcul scientifique qui résout les équations de la mécanique des fluides et de la chimie de l'atmosphère pour calculer l'évolution de la pollution atmosphérique, à partir de données sur conditions initiales et les conditions de forçage concernant la météorologie (vent, température, humidité, turbulence, rayonnement, nuages), et les émissions de toutes origines. Cette approche scientifique est classique dans les problèmes multi-échelles, comme ceux

qui sont abordés en météorologie. On s'intéressera en priorité au transport et à la dispersion des polluants qui ont un effet sur la santé, et secondairement à la question des nuisances olfactives qui peuvent résulter de la concentration aérienne en substances odorantes.

Les **Figures 1** et **2** illustrent l'aspect multi-échelles du problème. La **Figure 1** est une extraction, à une heure donnée (ici le mercredi 9 novembre 2016 à 14 h 00), des calculs de prévision de la pollution atmosphérique du système COPERNICUS, système cogéré par plusieurs pays de l'Union Européenne et hébergé par le Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme. Ce système

1. www.aria.fr

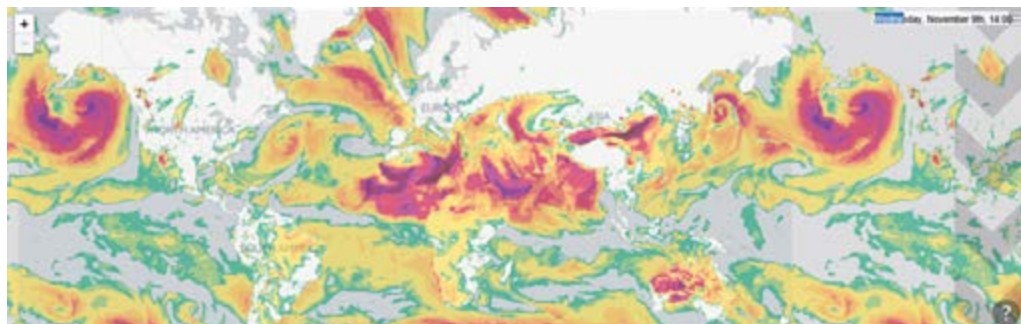


Figure 1

Carte du globe montrant la présence importante de la pollution atmosphérique sur l'Europe et l'Asie.

fait tourner un ensemble de modèles pour décrire l'évolution de la pollution atmosphérique sur le globe². La **Figure 1** représente un planisphère étalé, et les aplats de couleur sont fonction de la concentration massique en particules dénommées PM³10 (les particules dont le diamètre est inférieur à 10 microns).

La **Figure 2** présente une carte du nuage de PM_{2,5} sur l'Europe. Aujourd'hui, le système européen COPERNICUS est capable de faire des prévisions, avec une résolution de 10 km sur l'Europe et de 50 ou

80 km sur le reste du globe, de l'évolution de la pollution atmosphérique moyenne dite « de fond ». On utilise l'expression « pollution de fond » pour caractériser ces valeurs moyennes prévues sur des mailles représentant un rectangle de 10 km de côté (pour la meilleure résolution disponible en 2016), et donc ces valeurs moyennes sont inférieures aux valeurs moyennes plus fortes que l'on pourrait obtenir en examinant une maille de 200 mètres de côté placée sur une grande place d'une grande ville, tout près des émissions du trafic automobile par exemple. À la résolution de 10 km, l'ensemble de Paris intra-muros est représenté par une seule maille, et on affectera une seule valeur moyenne de concentration en PM₁₀ pour toute la ville, alors que si l'on veut comprendre les valeurs moyennes maximum observées le long des axes routiers ou sur la Place de l'Étoile à Paris, il faudra utiliser une résolution de quelques mètres ou quelques dizaines de mètres.

2. www.copernicus.eu

3. PM : particules en suspension : les microparticules de la taille du micromètre (µm) sont mesurées dans l'air à travers : des particules PM₁₀, de taille inférieure à 10 µm (6 à 8 fois plus petites que l'épaisseur d'un cheveu ou que la taille d'une cellule) et qui pénètrent dans l'appareil respiratoire ; des particules fines ou PM_{2,5}, inférieures ou égales à 2,5 µm (comme les bactéries) et qui peuvent se loger dans les ramifications les plus profondes des voies respiratoires (alvéoles).



Figure 2

Carte montrant la distribution spatiale instantanée de la concentration aérienne en particules de moins de 2,5 microns pour une heure donnée sur l'Europe. Au moment où cette carte est réalisée, la France paraît épargnée par rapport au reste de l'Europe, mais cela n'est pas significatif puisque la carte change toutes les heures.

On dispose ainsi d'un système météorologique mondial du calcul de la pollution atmosphérique où les européens ont une petite longueur d'avance.

Les deux cartes précédentes donnent des représentations de la pollution respectivement à l'échelle de la planète et à l'échelle de l'Europe. En fait, on veut souvent connaître la pollution à l'échelle de la rue – de l'école ou de la piste de jogging... En termes techniques de modélisateur, on dit qu'on a affaire à un problème de descente d'échelle. On part de champs météorologiques, ici en jaune sur la **Figure 3A**, sur le nord de la France, et de champs de pollution d'échelle moyenne, c'est-à-dire à mailles de plusieurs kilomètres de côté. On rajoute ensuite à haute résolution les émissions détaillées, celles du trafic (**Figure 3B**), des cheminées, du chauffage domestique. Cela permet de dresser des cartes de la qualité de l'air à l'échelle locale (**Figure 3C**),

ce qui constitue l'objectif principal.

Cette approche de calcul principalement déterministe, couplée aux mesures de pollution réalisées avec des micro-capteurs, est la méthode choisie pour établir une cartographie utilisable. Cette *prévision déterministe* a, tout au moins selon nos chercheurs, plus d'avenir que la seule *prévision statistique*. Les météorologues sont d'ailleurs engagés dans la même stratégie depuis le milieu du XX^e siècle : on obtient (ou on obtiendra sans doute à terme) des résultats de prévision de meilleure qualité en utilisant des calculs déterministes couplés à de l'assimilation de données de mesures, plutôt que des méthodes statistiques seulement. Le regain d'intérêt actuel pour les méthodes statistiques innovantes s'appuyant sur des quantités massives de données (sous la dénomination séduisante de Big Data) ne doit pas masquer cette réalité. Il est vrai que les calculs

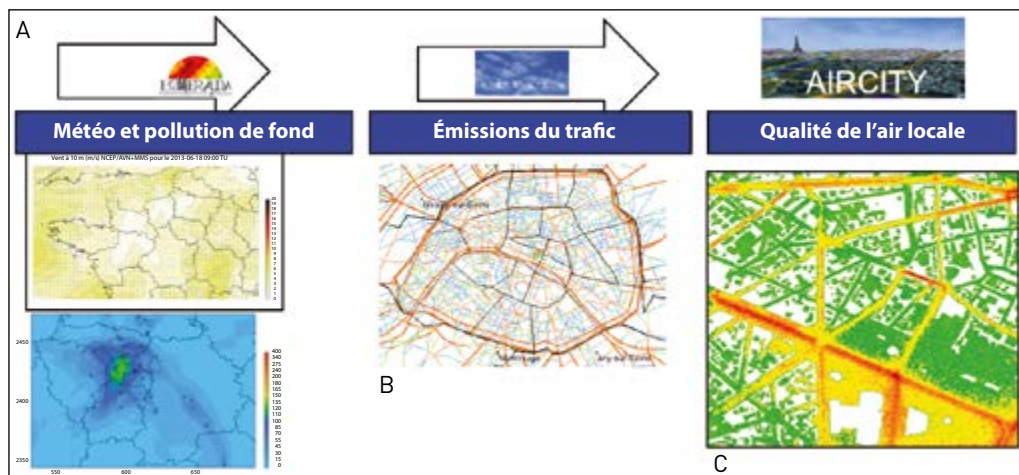


Figure 3

Cartes de qualité de l'air à différentes échelles. A) Cartes du champ de vent (en haut, en jaune) et de la pollution de fond (en bas, en bleu) dans le nord de la France : on distingue la Région Parisienne ; B) carte à haute résolution des émissions du trafic de Paris, brin par brin, à un instant donné ; C) calcul d'une carte de la qualité de l'air locale à haute résolution (3 m), faisant apparaître que la qualité de l'air est moins bonne sur les axes routiers qu'au niveau des habitations.

de prévision déterministe de la météorologie et de la qualité de l'air sont complexes et lourds et qu'ils demandent des calculateurs géants (les ordinateurs utilisés par les grands centres météorologiques sont parmi les plus puissants de la planète). Il en est ainsi en particulier du fait de la complexité de la chimie de l'atmosphère⁴.

2 Transport de polluants et chimie de l'atmosphère

Afin d'illustrer cette complexité, on peut considérer la question des émissions urbaines d'oxydes d'azote (NO_x) et des composés organiques volatils (COV), ainsi que celle de leur contribution à la pro-

duction d'ozone (O_3) en aval d'une grande ville (Figure 4). Il n'existe pratiquement pas d'émetteur d'ozone et donc ce constituant est uniquement produit et détruit par le jeu des réactions chimiques dans l'atmosphère. Si les masses d'air que les vents apportent sur une grande ville contiennent une certaine quantité d'ozone (résultant du transport à longue distance évoqué au paragraphe 1 à propos des sorties du système COPERNICUS), alors les fortes émissions d'oxydes d'azote de la ville vont réduire considérablement la concentration en ozone en ville, à cause du mécanisme de titration, mais le total des oxydants présents en aval de la ville en sera augmenté. Lorsque les vents transportent ce mélange de constituants réactifs en aval de la ville, où se trouve par exemple une forêt émettant beaucoup de composés or-

4. Voir aussi *La chimie et la nature*, chapitre d'É. Villenave, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2010.



Figure 4

Émissions d'oxydes d'azote et d'ozone. Au-dessus de la ville, les émissions d'oxydes d'azote NO_x consomment de l'ozone O_3 en arrivant sur la ville. En aval, les composés organiques volatils (COV) émis par les forêts réagissent avec les oxydes d'azote pour former des points d'ozone ruraux.

ganiques volatils comme sur la **Figure 4**, le jeu des réactions chimiques peut aboutir à la création d'une pointe d'ozone rurale. Le citoyen croit ainsi trouver un air sain en forêt, mais il récupère en fait, à plusieurs dizaines de kilomètres du centre-ville, les effets secondaires des émissions de pollution de la ville, encore plus qu'en ville mais sous une autre forme (ozone au lieu d'oxydes d'azote). De telles situations sont mises en évidence par les simulations effectuées quotidiennement par des organismes comme Airparif pour l'Île-de-France⁵, ou comme l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) pour la France et l'Europe⁶. Tous ces phénomènes sont très complexes, et l'objectif de la modélisation numérique est de les comprendre en détail pour tenter de les maîtriser.

Avec la diversité des polluants, la chimie vient compliquer encore les choses. Les polluants ne se contentent pas en effet de se déplacer d'un point à un

autre sous l'action du vent, ils se transforment chimiquement du fait d'une multitude de réactions chimiques possibles. Le modélisateur doit donc se préoccuper de toute la riche chimie de ces transformations qu'il faut identifier, dont il faut connaître les paramètres (thermodynamiques) et dont il faut évaluer l'importance par le calcul.

Bien entendu, les résultats des calculs dépendent en premier lieu de l'état initial du système et des quantités de polluants mises à l'atmosphère : il faut connaître aussi bien que possible la nature et la quantité des polluants émis par les différentes sources, ainsi que l'évolution dans le temps de la pollution de fond. Les polluants parmi les plus surveillés aujourd'hui sont l'ozone (**Figure 5**) et les particules fines ; ce sont des polluants dits secondaires car non émis directement, mais résultant d'un ensemble de transformations et réactions chimiques.

La **Figure 6**, limitée au mécanisme de production de l'ozone, illustre la complexité des mécanismes de la chimie atmosphérique. Les modèles

5. www.airparif.asso.fr

6. www.prevoir.org

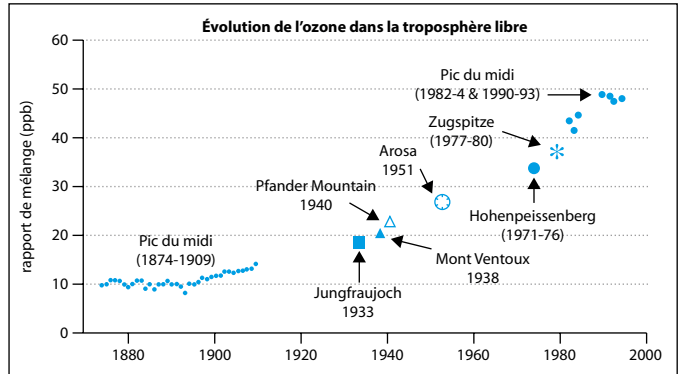


Figure 5

Évolution de l'ozone dans la stratosphère libre. On observe une augmentation de la pollution de fond à l'échelle mondiale au fil des années.

Source : Marengo A., Gouget H., Nédélec P., Pagés J-P. (1994).

Evidence of a long-term increase in tropospheric ozone from Pic du Midi series: consequences: positive radiative forcing. *J. Geophys. Res.*, 99 : 16,617-16,632.

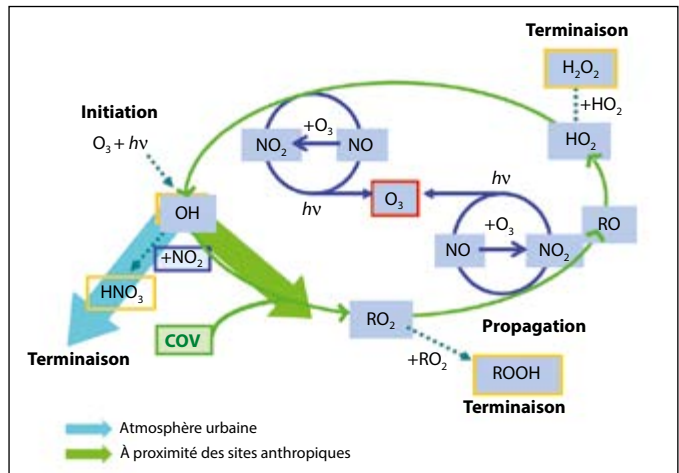


Figure 6

La chimie atmosphérique de l'ozone. Réactions des différentes espèces contribuant à la pollution atmosphérique. La composition de l'atmosphère urbaine dépend des activités humaines du voisinage (activités anthropiques).

de simulation les plus avancés comportent des dizaines d'espèces et de groupements chimiques, ainsi que des centaines de réactions. Pour des calculs significatifs, il est

nécessaire de connaître avec autant de précision que possible toutes les émissions : du trafic, du chauffage domestique, des industries, des zones agricoles voisines...

La description détaillée de ces mécanismes sort du cadre de cet article, mais nous recommandons au lecteur la page Wikipédia et le site Internet du modèle communautaire français CHIMERE consacré à la représentation des phénomènes de pollution atmosphérique à l'échelle régionale, où l'on trouvera un ensemble de références⁷ complet sur ces questions. Le modèle communautaire CHIMERE est utilisé dans le système PREV'AIR en France et parmi d'autres dans le système européen COPERNICUS. C'est le résultat d'une collaboration tout à fait remarquable et durable des laboratoires de géophysique d'Île-de-France regroupés au sein de l'IPSL (Institut Pierre et Simon Laplace⁸), qui développe cet outil depuis plus de vingt ans, et de l'INERIS⁹.

Le modèle CHIMERE est en développement continu : si la modélisation régionale des espèces gazeuses est relativement maîtrisée, il reste encore de grandes incertitudes sur la modélisation des aérosols. Les aérosols ont des origines différentes (anthropiques et urbaines,

ou des aérosols de combustion de feux, ou des aérosols minéraux) et des temps de vie différents, rendant complexe leur modélisation fine. Les recherches actuelles se tournent vers les impacts sur la santé, cela incluant la conception de modèles d'exposition de la population aux différents polluants mais aussi à la prise en compte de nouvelles particules à suivre comme les pollens, très allergisants.

3 La pollution atmosphérique en ville

La pollution atmosphérique en ville porte la trace des émissions du trafic automobile (pollution de proximité). Cela est illustré par la carte de la **Figure 7**, qui représente les concentrations en oxydes d'azote sur Paris, calculées avec une résolution de 3 mètres par le sys-

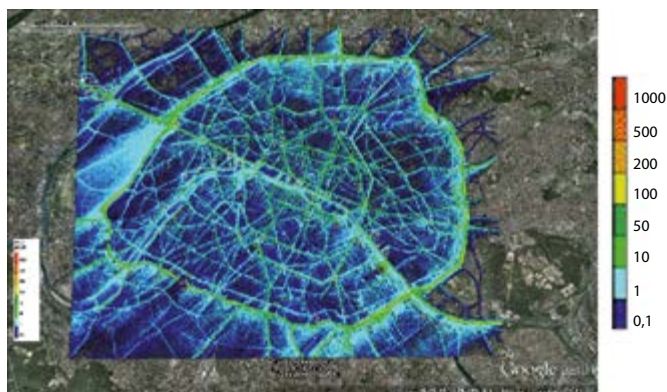


Figure 7

Concentrations en oxydes d'azote sur Paris – vue générale. La pollution atmosphérique urbaine porte la trace des émissions du trafic automobile (« pollution de proximité »). Une animation cartographique a été réalisée pour visualiser les concentrations en oxydes d'azote sur Paris, calculées avec une résolution de 3 mètres par le système AIRCITY.

7. www.lmd.polytechnique.fr/chimere/
8. www.ipsl.fr

9. Colette A., Bessagnet B., Meleux F., Terrenoire E., Rouil L (2014). Frontiers in air quality modelling, *Geosci. Model Dev.*, 7 : 203-210 ; Menut L., Bessagnet B., Khvorostyanov D., Beekmann M., Blond N., Colette A., Coll I., Curci G., Foret G., Hodzic A., Mailler S., Meleux F., Monge J.-L., Pison I., Siour G., Turquety S., Valari M., Vautard R., Vivanco M.G. CHIMERE 2013: a model for regional atmospheric composition modelling, *Geosci. Model Dev.*, 6 : 981-1028.

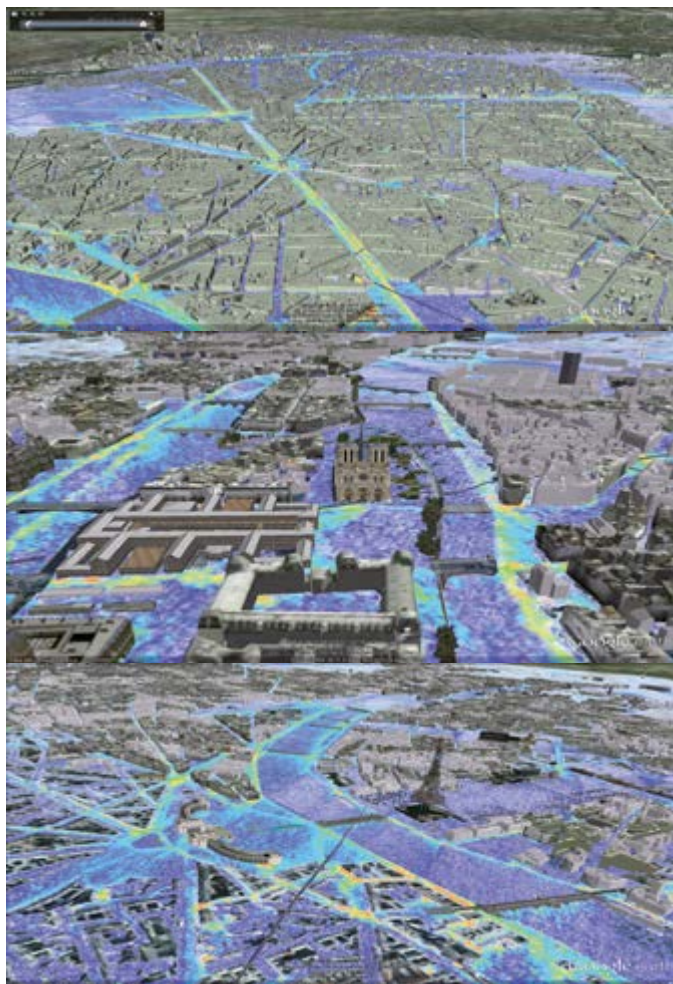


Figure 8

Concentrations en oxydes d'azote sur Paris vues à une résolution de 3 m (système AIRCITY). Les concentrations sont les plus importantes sur les axes routiers et aux grands carrefours.

tème AIRCITY¹⁰, co-développé par ARIA Technologies avec Airparif, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et la société Leosphère, qui développe des lasers spéciaux (LIDAR) permettant de mesu-

rer à distance les paramètres atmosphériques¹¹.

Pour ces calculs, il a été nécessaire de prendre en compte tout le bâti, afin de faire ressortir les situations où le polluant est confiné sur une avenue ou sur une rue. Les calculs sont à très haute résolution pour bien identifier les endroits où les émissions du trafic ne peuvent pas être dispersées, c'est-à-dire où les polluants s'accumulent. Les aplats de couleurs de la **Figure 8** reflètent les concentrations en oxydes d'azote calculées.

À partir de ces modélisations, qui représentent un volume immense de données (plusieurs centaines de millions de valeurs numériques par jour), il est nécessaire de développer les technologies pour extraire *via* Internet (**Figure 9**) des visualisations partielles ou des séries chronologiques de valeurs en vue de répondre simplement aux demandes des clients et des utilisateurs : la puissance des supercalculateurs utilisés ne devient tangible que si l'information qu'ils produisent peut être distribuée de manière très large, et c'est sur ce point que la situation a complètement changé ces dernières années. N'importe qui peut

11. Moussafir J., Otry C., M. Nibart M., A. Albergel A., Armand P., Duchenne C., Mahé F., Thobois L., Loaëc S., Oldrini O. (2014). « AIRCITY: a very high resolution atmospheric dispersion modelling system for Paris », dans : *Proceedings of the 4th Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting - ASME - Track 28 - Urban Fluid Mechanics Symposium*, August 3-7, 2014, Chicago, IL, USA.

10. www.aria.fr/projets/aircity/



Figure 9

Présentation Internet des données du système de mesure de la concentration en oxydes d'azote. On met en évidence des pics de pollutions entre 10 h et 12 h, et entre 16 h et 17 h.

maintenant avoir accès, à partir de son smartphone, à des informations détaillées sur l'environnement là où il se trouve. Des validations sur des stations de l'hypercentre parisien (Figure 10), ainsi que des séries chronologiques (voir des exemples sur la Figure 11), ont été réalisées en collaboration avec Airparif. Les outils de modélisation peuvent être utilisés non seulement pour la prévision mais aussi pour la prospective, c'est-à-dire pour déterminer ce qu'il convient de faire sur le trafic, sur des aménagements urbains, sur des tunnels, sur des modifications de la circulation. C'est même là la principale différence entre des outils statistiques et des outils déterministes, pour revenir sur la discussion

abordée précédemment : un outil déterministe cherche à établir la liaison de cause à effet entre les émissions et la pollution atmosphérique observée, de façon à pouvoir valider des politiques de réduction des émissions, ce qui ne semble pas à la portée d'un outil statistique pur.

Il est possible, avec ces outils numériques, de construire des cartographies dynamiques – par exemple du dioxyde d'azote NO_2 (Figure 12) – et par exemple de simuler l'effet de la fermeture des voies sur berges à partir d'une estimation de la façon dont le trafic s'est déporté géographiquement et du nombre de personnes qui ont renoncé définitivement à prendre leurs voitures. Ces comparaisons « avant/après » montrent ce



Figure 10

Les stations d'Airparif, situées dans l'hypercentre parisien le long du trafic, permettent de valider les calculs de concentrations en oxydes d'azote dans l'air.

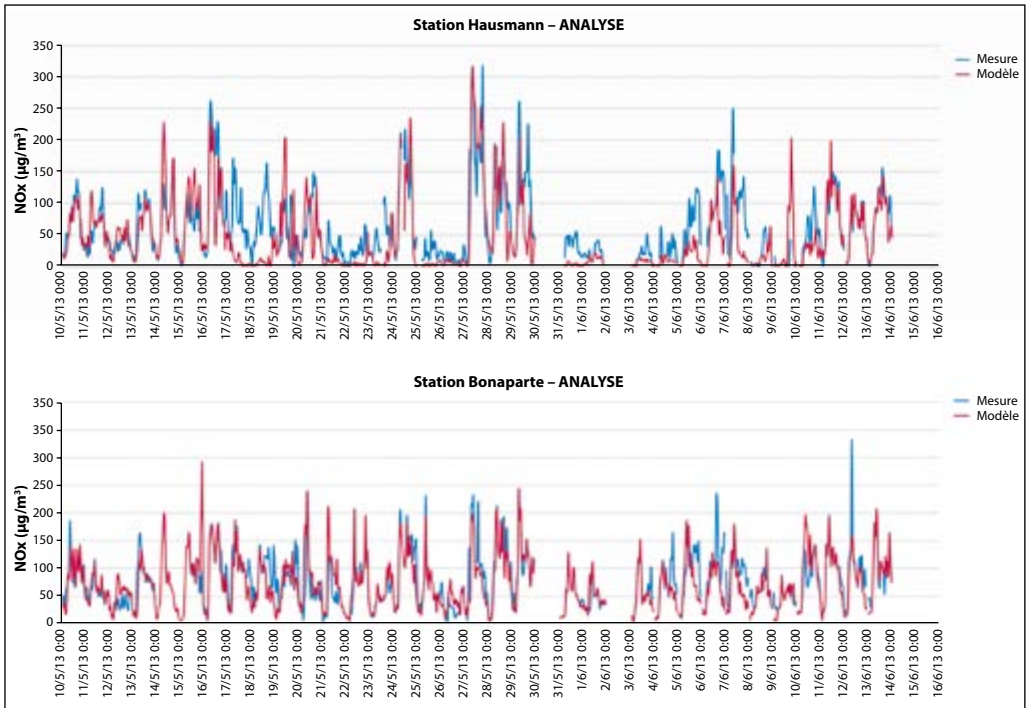


Figure 11

Séries chronologiques des évaluations des concentrations en oxydes d'azote sur deux mois sur les stations Hausmann et Bonaparte.

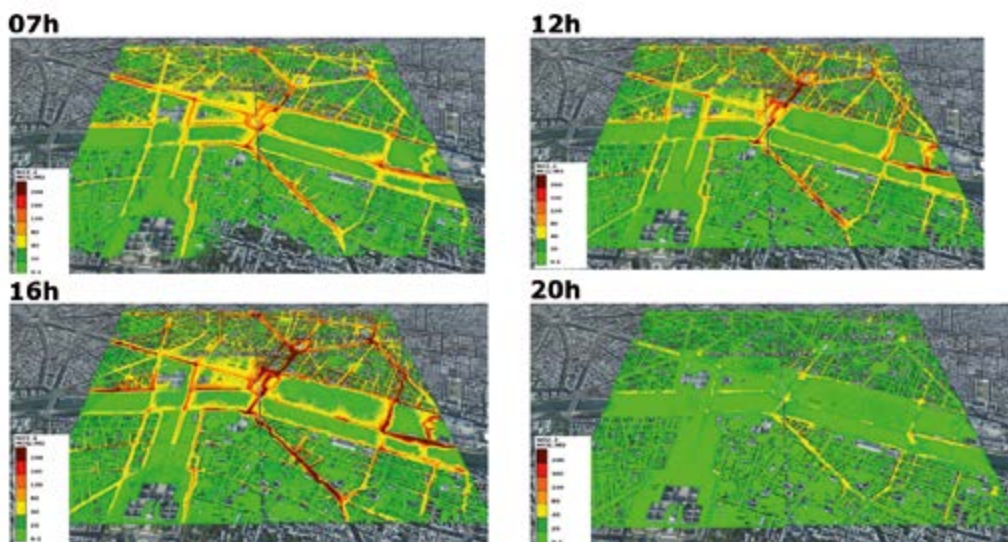


Figure 12

Évolution de la concentration en oxydes d'azote sur la zone centrale de Paris à différentes heures de la journée.

qu'on gagne ou ce qu'on perd, avec telle ou telle mesure, sur la pollution de l'air ou, si on le souhaite, sur le bruit.

Les données obtenues à partir des capteurs situés dans les stations de mesure au sol, les données fournies par des calculs de modélisation sont complétées de façon très prometteuse par des techniques de mesure « à longue distance », qui permettent d'explorer les basses couches de l'atmosphère urbaine par télédétection. On utilise ainsi largement des systèmes laser, du type LIDAR (Figure 13), qui permettent de réaliser des découpes en éventail sur des étendues importantes, en surface ou en volume.

La Figure 14 montre la visualisation de la pollution atmosphérique calculée par le système AIRCITY, à une heure donnée, dans différents

quartiers du centre de Paris (six images). On peut repérer les quartiers par leurs bâtiments caractéristiques. On représente, près du sol, la concentration calculée en oxydes d'azote avec des couleurs différenciées. La vidéo dont sont extraites ces images est publique et dis-



Figure 13

Les systèmes laser du type LIDAR permettent de faire des validations à distance.



Figure 14

Images extraites d'une animation de la distribution en oxydes d'azote au niveau du sol dans les rues de Paris.

ponible au téléchargement¹². La concentration calculée en oxydes d'azote est disponible en tout point de la ville, près du sol et au niveau de chaque étage, avec une résolution de 3 mètres, ce qui représente plusieurs millions de valeurs numériques à chaque échéance de calcul du modèle, par exemple toutes les 15 mi-

nutes. Dans la vidéo citée, il est possible d'apercevoir des flotteurs bleu et blanc, qui représentent la position des stations de référence permanentes d'Airparif (8 ou 10 stations dans Paris intramuros). Même si ce dispositif de mesures peut être densifié de manière très importante, avec des moyens mobiles légers, pour des campagnes temporaires (jusqu'à 80 points de mesure pour les campagnes

12. www.youtube.com/watch?v=qvqHBwwh3_c

au voisinage des voies sur berge par exemple), on voit bien que seule la modélisation numérique peut permettre de bien représenter la distribution spatiale de la pollution atmosphérique, et de constituer une cartographie complète de la qualité de l'air urbaine, rue par rue, adresse par adresse. Les techniques de modélisation doivent certes constamment s'appuyer sur les mesures des capteurs, que ce soit pour mettre en œuvre des méthodes d'assimilation qui conduisent les modèles à honorer les valeurs mesurées en tout point (*a posteriori*), ou pour vérifier les prévisions effectuées et améliorer ainsi les modèles. Les résultats présentés montrent bien que la pollution calculée est plus faible dans les jardins que sur la place de la Concorde : c'est une conclusion évidente mais elle prouve bien que la modélisation permet également de bien déterminer l'emplacement de mesures complémentaires et d'aider à leur interprétation.

L'analyse de l'origine de la pollution de l'air urbain fait ressortir la nécessité de maîtriser les problèmes à la fois à deux échelles. Premièrement, la qualité de l'air en ville dépend des valeurs de pollution à l'échelle planétaire et régionale. La moitié seulement (environ) des particules mesurées dans le centre de Paris provient des émissions locales. Le reste peut aussi bien venir de Londres ou d'Allemagne, ou d'autres régions de France... La modélisation, qui fournit des images globales, continues, et leur variation temporelle, est à la

base de politiques raisonnées de gestion de la qualité de l'air (non extrémistes), et est notamment utilisée dans le cadre des négociations internationales sur les réductions d'émissions. Cependant, les cartographies planétaires sous-estiment la pollution de proximité, et sont inexactes au cœur de grandes villes. On doit alors élaborer des cartographies dynamiques 3D détaillées à haute résolution – pour l'analyse comme pour la prévision –, et pour cela travailler sur les émissions à l'échelle locale, connaître ce qui est émis par les bus, les voitures, les teintureries, les stations-service, les usines, les incinérateurs, les stations de traitement des eaux... Cela exige de disposer d'un grand nombre de données sur les activités émettrices : on appelle ces grandes bases de données géographiques des *inventaires d'émissions spatialisés*. Il est souvent nécessaire d'intégrer des mesures de capteurs en ligne pour intégrer les données d'émission qui peuvent être très variables, par exemple pour des centrales thermiques ou des unités industrielles dont le fonctionnement n'est pas régulier.

Un système de modélisation efficace à l'échelle urbaine doit donc être couplé aux modèles régionaux de pollution de fond. Par exemple, si on considère une émission d'oxydes d'azote en ville (mélange de NO et NO₂), on n'aura pas le même taux de conversion en NO₂ suivant la quantité d'ozone de fond présente, qui peut être d'origine fort lointaine (autres régions

françaises, Grande-Bretagne, Allemagne...).

Afin d'illustrer l'utilité des systèmes de modélisation de la pollution atmosphérique, nous présentons des exemples issus des travaux réalisés pour Renault sur le couplage entre le trafic automobile et la pollution atmosphérique dans les villes. Renault est fortement engagé avec Nissan dans la promotion du véhicule électrique en ville et veut contribuer à faire percevoir les réductions d'exposition et de risques pour la

santé qui résulteraient d'une forte pénétration du véhicule électrique en ville. À Rome par exemple, où le centre historique est particulièrement concentré, avec un très grand nombre de piétons, en particulier les touristes, les calculs réalisés en tenant compte des émissions actuelles du trafic (**Figure 16A**) indiquent des valeurs d'exposition qui peuvent être conséquentes (**Figure 16B**) et une forte réduction avec une introduction importante de véhicules électriques. L'existence de zones à trafic limité (ZTL) dans plusieurs grandes villes italiennes (dont Rome) est un autre levier en faveur de l'adoption de véhicules « zéro émissions », auxquels des droits de circulation très étendus peuvent être accordés. Ces études servent à évaluer l'effet de l'introduction de véhicules électriques dans différentes villes, dans différentes situations de population et de circulation – à l'évidence une question d'actualité. Pour approcher les problèmes de pollution atmosphérique d'une grande ville asiatique, où la structure du tissu urbain est très différente de celle du bâti parisien (architecture en tours sur un espace limité, contexte topographique complexe, situation en bord de mer), un travail a été également effectué sur la ville de Hong-Kong en collaboration avec l'alliance Renault-Nissan (**Figure 17**), toujours pour évaluer les effets potentiels sur la qualité de l'air d'une plus grande diffusion des véhicules électriques (**Encart : « Le projet "Green Trip" »**).

LE PROJET « GREEN TRIP »

Renault a souhaité tester le prototype d'un système qui permette de calculer les concentrations cumulées en polluants le long de différents trajets urbains et interurbains proposés par des calculateurs d'itinéraires (**Figure 15**), en France et en Chine. ARIA Technologies (en collaboration avec Airparif) a réalisé le prototype « Green Trip » permettant de visualiser sur son smartphone la pollution prévue sur le parcours A, sur le parcours B, etc., et de prendre sa décision en connaissance de cause.

Airparif a eu une démarche similaire avec son application Itiner'air, consacrée aux piétons et aux vélos, et téléchargeable sur son site Internet (www.airparif.fr).



Figure 15

« Green Trip », prototype de système permettant la détermination des concentrations en polluants le long de différents itinéraires.

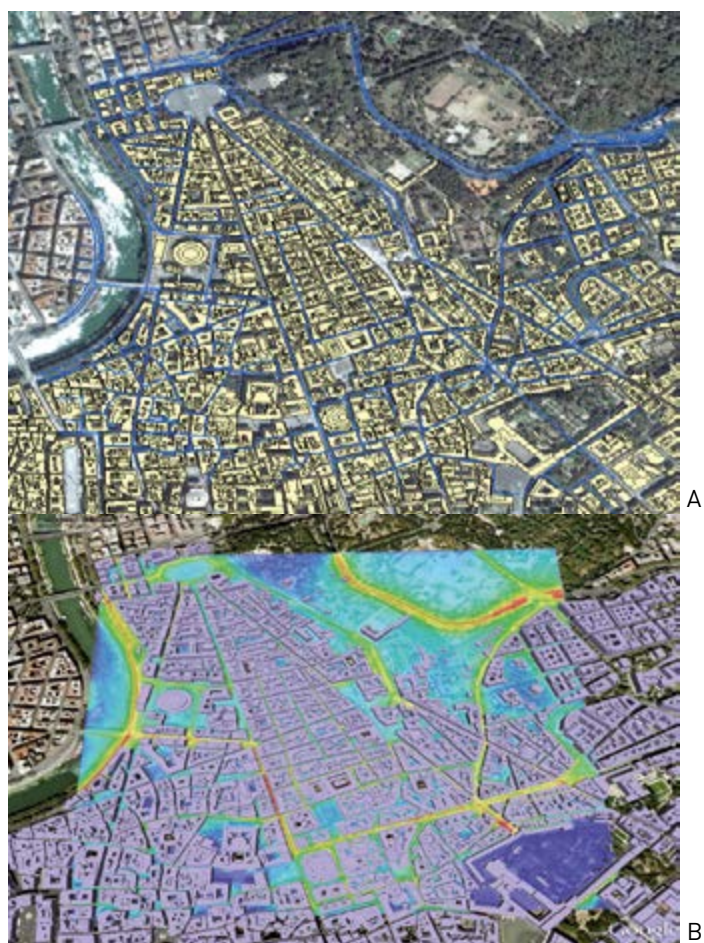


Figure 16

La pollution de l'air dans le centre de Rome.

A) Simulation du trafic dans le centre historique de Rome ; B) distribution des concentrations (haute résolution) permettant de calculer l'exposition de proximité des populations dans les rues de Rome à la pollution atmosphérique.



Figure 17

Modélisation à haute résolution de la qualité de l'air à Hong-Kong pour évaluer l'effet de l'introduction de véhicules électriques.

Un autre exemple d'application de la simulation numérique à la compréhension de l'environnement des grandes villes est constitué par les études de confort thermique. Pour ces études, exactement comme pour l'étude de la pollution atmosphérique en ville, il est nécessaire de comprendre comment s'organisent la micro-météorologie et les écoulements d'air sur la ville, à très haute résolution, en fonction de la géométrie des bâtiments, et de leur effet sur le vent et la température. Pour la ville de Wuhan, où une zone va être complètement réaménagée en haute qualité environnementale, une équipe d'ARIA Technologies a effectué des calculs d'indice de confort environnemental en fonction du vent, de la température et de la pollution atmosphérique. Un ensemble de situations météorologiques de référence apparaissant sur la ville de Wuhan a été identifié à travers une méthode de classification automatique

(encore un emprunt aux méthodes « Big Data »), et des calculs détaillés à très haute résolution ont été produits pour chacune des situations, en insérant les nouveaux bâtiments prévus dans le projet d'aménagement. Un exemple de résultat est présenté sur la **Figure 18** : les aplats de couleurs sont fonction de la vitesse du vent en mètres par seconde, et sont superposés aux lignes de courant donnant la canalisation par le bâti.

L'emploi des techniques à haute résolution permet non seulement de prévoir le niveau de pollution attendu dans une cour de récréation ou dans un square, mais aussi d'alimenter les modèles de la qualité de l'air intérieur pour des bâtiments particuliers. On les couple en effet à la qualité de l'air extérieur. Souvent, les prises d'air des bâtiments ne sont pas au rez-de-chaussée mais au niveau des étages supérieurs, et les modélisations en 3D pour l'air extérieur (comme AIRCITY) permettent de tenir compte de ces situations. La **Figure 19** est une représentation schématique, en 3D, de l'intérieur d'un bâtiment de bureaux de quatre étages et de ses espaces intérieurs principaux. Le code de couleur du « sol » de chaque pièce est fonction de la concentration moyenne en polluant qu'on y calcule. Cette figure est issue d'une animation numérique donnant l'évolution de la concentration en fonction du temps au cours d'une journée type.

À l'évidence, il ne semble pas indispensable de faire des modélisations de la qualité de l'air intérieur pour tous

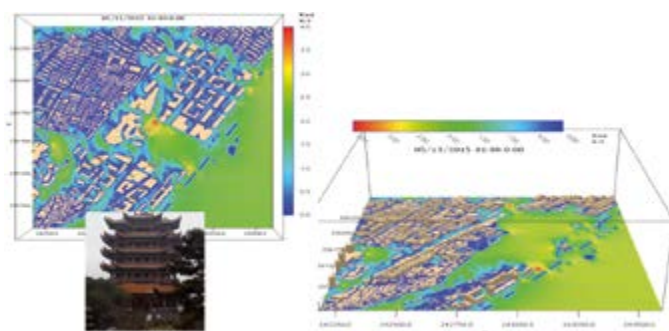


Figure 18

Cartes d'indices de confort. Calcul d'indices de confort environnemental pour les urbanistes en fonction du vent, de la température et de la pollution atmosphérique dans une zone HQE (Haute Qualité Environnementale) (ici : Wuhan, Chine). On représente ici en vue de dessus et en 3D les champs de vitesse du vent en m/s (aplats de couleur) et les lignes de courant.

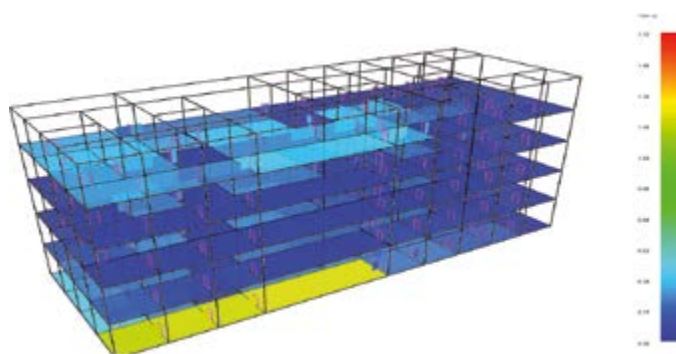


Figure 19

Modélisation au niveau d'un bâtiment. Évolution des concentrations de polluants à l'intérieur des bâtiments en fonction de la qualité de l'air extérieur. Seul un calcul à haute résolution pour l'extérieur permet de piloter le calcul intérieur, étage par étage.

les bâtiments d'une grande ville, mais cela peut être intéressant pour les grands bâtiments publics, les établissements recevant du public, les hôpitaux où des populations sensibles séjournent, les écoles, les universités...

Par exemple, une simulation intéressante a été réalisée autour de l'immeuble emblématique du Conseil Régional de Lombardie, à Milan, un bâtiment à l'architecture moderne complexe représenté sur les **Figures 20** et **21**, dans lequel

16/3/2016

01:00



Figure 20

Concentration en surface en NO_2 à 1h du matin autour du Conseil Régional de Lombardie à Milan (Italie).

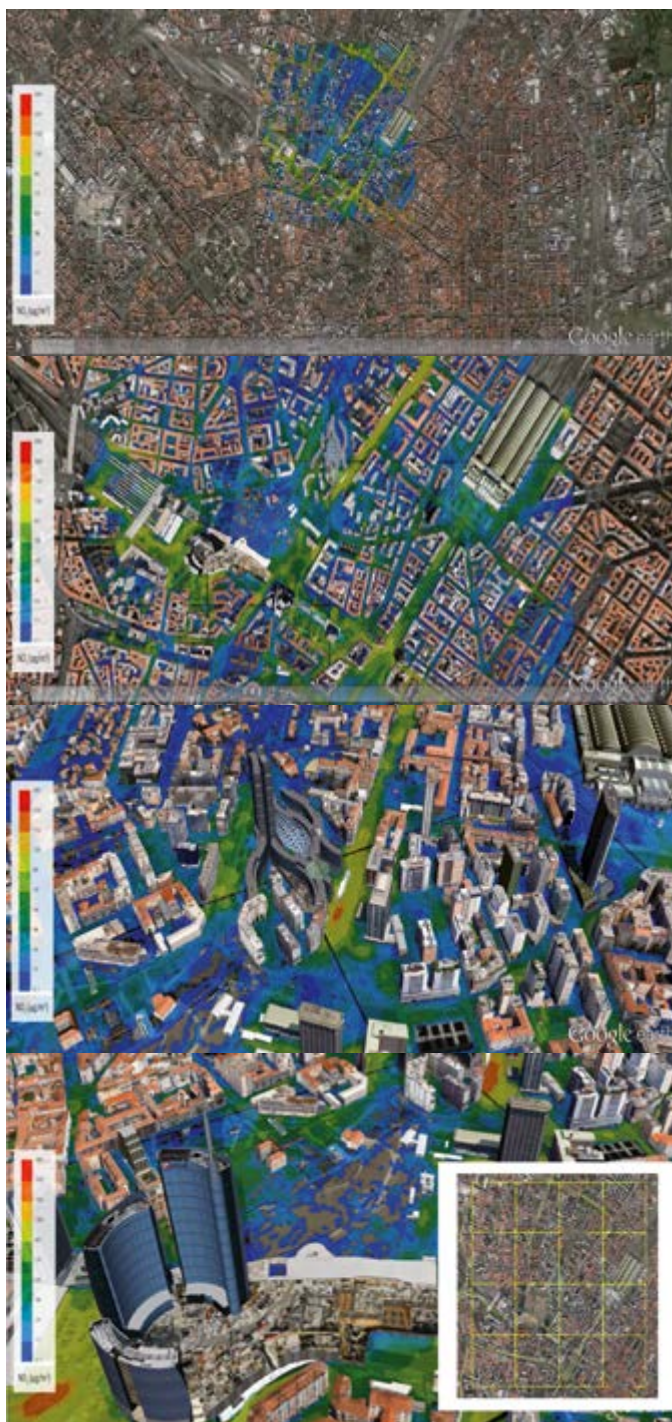


Figure 21

Images extraites d'une animation des prévisions (J, J+1) des concentrations NO_2 présentes heure par heure dans la ville de Milan.

se tenait un Congrès consacré à la Qualité de l'Air, qui bénéficiait ainsi d'une prévision quotidienne de qualité de l'air. Le calcul extérieur portait sur un domaine carré de deux kilomètres centré sur le bâtiment, et alimenté par les données à plus grande échelle d'une simulation régionale. La pollution (ici la concentration en NO_2 au voisinage du sol) est calculée avec une résolution suffisante pour qu'on voie bien la différence entre les endroits très exposés et les endroits relativement tranquilles, et il est clair que les contrastes sont très importants d'un point à un autre. Les résultats sont également disponibles sous forme d'animation en fonction du temps (*Figure 21*).

4 La propagation des substances odorantes

La question de la pollution par les odeurs peut être traitée avec des méthodes très proches de celles utilisées pour les polluants réglementés ayant un effet sur la santé. Elle est associée à l'émission de substances chimiques odorantes particulières qui le plus souvent n'ont pas d'effets sur la santé à faibles concentrations, et généralement à des sources localisées (*Figure 22*). Pour les espèces en jeu, on peut citer par exemple le sulfure d'hydrogène H_2S , qui a une odeur très désagréable à faible concentration (les « boules puantes »), mais qui peut être toxique (et mortel) à de très fortes concentrations ; ou encore l'ammoniac NH_3 , ainsi

que différents autres composés organiques volatils.

Les problèmes d'odeurs sont associés à des sources très localisées parce qu'ils proviennent souvent de stations d'épuration, de décharges, de certaines activités industrielles ou agricoles (fermes d'élevage intensif) : à l'inverse de ce qui se produit pour les problèmes de pollution atmosphérique urbaine, la question de la pollution de fond, à l'échelle continentale ou nationale, n'est pas pertinente pour les problèmes d'odeurs, parce que les concentrations de fond en substances odorantes sont tout à fait négligeables par rapport à celles que l'on peut observer au voisinage immédiat d'un site industriel. La question de la propagation des odeurs peut donc généralement être traitée avec des modèles purement locaux, qui déterminent le champ de concentration en substances odorantes quelques kilomètres autour du site. L'étude de la propagation des odeurs doit également faire appel à une instrumentation spécifique, adaptée aux processus en jeu dans la génération de substances odorantes : il sera souvent nécessaire par exemple de mesurer l'ammoniac NH_3 , certains composés organiques volatils, H_2S ...

À titre d'illustration, un système de surveillance spécifique, baptisé NOSE®, a été développé par ARIA Technologies et SUEZ pour les stations d'épuration des eaux (*Figure 22*). Il permet de réunir dans une plateforme informatique commune les données de site (topographie,



Figure 22

Système NOSE® (SUEZ) simulant la propagation des substances odorantes depuis leur source.

géométrie 3D des bâtiments et des unités industrielles), d'émission (mesures au plus près des unités émettrices ou dans les conduits de rejet à l'atmosphère), de météorologie (vent, température, humidité, turbulence), ainsi que les données mesurées par des capteurs dans l'air ambiant autour du site. Ces données sont utilisées pour alimenter un modèle de dispersion des substances odorantes, qui peut fonctionner à la fois en mode direct (on calcule le panache attendu si les données d'entrée sont parfaites) et en mode inverse (on corrige les données d'émission à partir des mesures dans l'environnement du site afin d'obtenir la meilleure image possible de l'impact du panache). Le panache calculé apparaît en bleu sur l'écran de commande reproduit sur la [Figure 22](#), ainsi que la trace du réseau de micro-capteurs installés autour de la station ; sur la gauche, l'opérateur peut afficher l'historique des valeurs observées et calculées au fil du temps, et la contribution éventuelle de plusieurs sources différentes aux concentrations calculées

en un point donné (diagramme circulaire).

Il est important de souligner que les progrès dans le domaine des micro-capteurs sont essentiels pour épauler les progrès dans la compréhension des phénomènes de dispersion atmosphérique et dans leur modélisation : c'est parce que le prix de revient de chaque point de mesure a été divisé par vingt en dix ans qu'il est maintenant possible de concevoir des systèmes intégrés comme le système NOSE®, et de disposer une dizaine de capteurs autour d'un site industriel pour le surveiller. Sans ces mini-réseaux d'un prix acceptable, il ne serait pas possible de déployer des systèmes de surveillance utilisant de la modélisation inverse, qui impose d'avoir plusieurs mesures pour fonctionner convenablement.

Les prochaines étapes dans le développement des systèmes de surveillance des odeurs sont sans doute représentées par la possibilité de prendre en compte les réactions chimiques entre substances odorantes et leur transformation.

5 Les micro-capteurs, les supercalculateurs : les révolutions en marche

Pour comprendre l'avenir de la surveillance de la qualité de l'air dans les grandes villes (et dans les installations industrielles qui en sont proches), il faut porter attention au développement des micro-capteurs permettant de mesurer les concentrations en polluants atmosphériques, avec un faible coût. La technologie de mesure des polluants atmosphériques connaît un mouvement important vers la miniaturisation en suscitant un engouement extraordinaire, tant l'idée de micro-capteurs « personnels », très légers, à très faible consommation, portables à la boutonnière et connectables sans fil à un smartphone, laisse entrevoir un marché gigantesque associé à celui des « objets connectés ». Il suffit de songer au volume de marché représenté par 100 millions de micro-capteurs à 25 € pièce pour comprendre que les investisseurs se bousculent. Les annonces de nouveaux micro-capteurs se multiplient donc, sans que les matériels disponibles à ce jour soient toujours à maturité, l'essentiel étant des préempter une position sur le marché. Mais ce n'est qu'une question de temps : les micro-capteurs deviendront bientôt suffisamment fiables et leurs conditions d'usage suffisamment simples pour qu'ils puissent se généraliser. On peut donc imaginer à partir de 2020 une situation où plusieurs milliers de micro-capteurs « personnels », connectés à Internet, produisent simultanément

des données sur une grande ville comme Paris, chacun des utilisateurs ayant acheté son capteur personnel pour se protéger, mais acceptant de rendre publiques ses mesures à travers son téléphone portable.

Reste que cette situation très intéressante pose une série de problèmes d'interprétation sérieux pour produire une information de synthèse utilisable, parce que les micro-capteurs « personnels » seront inévitablement dans les conditions auxquelles sera exposé leur porteur : à la maison, sur la terrasse, dans la cave, dans sa voiture, sur son vélo, dans le métro, au bureau, à pied, au bord d'une avenue très fréquentée, au milieu d'un jardin... L'interprétation des flux de données correspondants suppose donc que l'on connaisse très bien la position géographique de la mesure (notamment par rapport aux sources émettrices). On retrouve là des questions qui se posent déjà dans l'interprétation de la position des téléphones portables pour aborder les problèmes de trafic automobile dans les villes, et pour lesquelles les nouvelles technologies d'analyse statistique de très grands flux de données seront sans doute très utiles (*les technologies « Big Data » n'ont pas que des défauts, loin s'en faut !*). On assiste déjà à plusieurs expérimentations avec quelques dizaines à quelques centaines de micro-capteurs déployés en ville, à Pékin comme à Paris.

Il importe de mentionner également le problème assez ardu de la calibration de ces micro-capteurs, en absolu et entre eux, de la comparabilité

de micro-capteurs fournis par différents fabricants, de leur dérive dans le temps, de leur hystérésis. En somme, entre un analyseur de gaz professionnel utilisé par un réseau de surveillance de la qualité de l'air comme Airparif, positionné avec soin dans un abri climatisé, alimenté par une prise d'air dont la hauteur par rapport au sol est réglementaire au niveau européen, régulièrement entretenu et calibré avec des gaz étalon, et le micro-capteur produit en très grande série et posé sur un bureau à l'intérieur d'une tour climatisée, ou bien transporté dans un sac à dos à vélo au milieu du trafic une heure plus tard, il va falloir faire la part des choses et veiller à combiner les informations issues de ces deux classes de mesures.

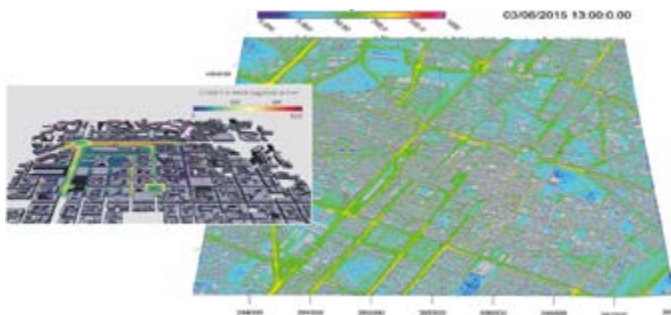
Un deuxième progrès important à attendre est la généralisation de l'usage des supercalculateurs dans le Cloud. Les calculs que réalisent aujourd'hui les équipes d'ARIA Technologies et les autres équipes engagées dans la simulation numérique de la pollution atmosphérique, nous n'en rêvions même pas il y a dix ans. Les puissances de calcul considérables des très grands calculateurs paral-

lèles en réseau sont maintenant disponibles à travers une simple connexion Internet, et constituent une ressource « à la demande », dont le coût réel d'utilisation connaît une baisse vertigineuse, sans imposer d'investissement informatique spécifique permanent. Pour une grande ville, les coûts de calcul nécessaires pour la simulation numérique continue de la pollution atmosphérique à très haute résolution représentent aujourd'hui quelques centimes d'euros par habitant et par an, très loin derrière les autres postes de dépense pour l'environnement.

Nous présentons ci-dessous l'exemple du projet ELISE, qui associe justement l'usage de micro-capteurs et celui de simulations numériques à très haute résolution. Les *Figures 23, 24 et 25*, sont extraites de ce travail effectué sur la ville de Turin (Italie). Un modèle de calcul 3D à haute résolution, semblable à celui utilisé dans le projet AIRCITY, a été appliqué sur le centre-ville de Turin, en prenant en compte le détail du bâti, et en utilisant l'inventaire des émissions de polluant (dues au trafic et aux autres sources) fourni par l'Agence Régionale de

Figure 23

Projet ELISE : cartographie des concentrations en oxydes d'azote dans les rues de Turin réalisée par modélisation numérique (modèle AIRCITY).



Protection de l'Environnement du Piémont.

Le caractère innovant du projet a consisté à collecter les données fournies par un réseau de micro-capteurs mobiles représenté sur la **Figure 24**, et à utiliser des techniques d'assimilation en combinant le champ calculé par le modèle et les données des micro-capteurs, afin d'obtenir une séquence de carto-

graphies semblables à celle présentée sur la **Figure 25**.

Quand ces techniques seront complètement opérationnelles, on pourra disposer d'informations complètes et précises, sous réserve de vérifier la qualité des micro-capteurs et la qualité des inventaires d'émissions, éléments indispensables pour garantir la qualité finale des résultats.



Figure 24

Projet ELISE : données des micro-capteurs (concentration en NO_2) sur une partie de la ville de Turin.

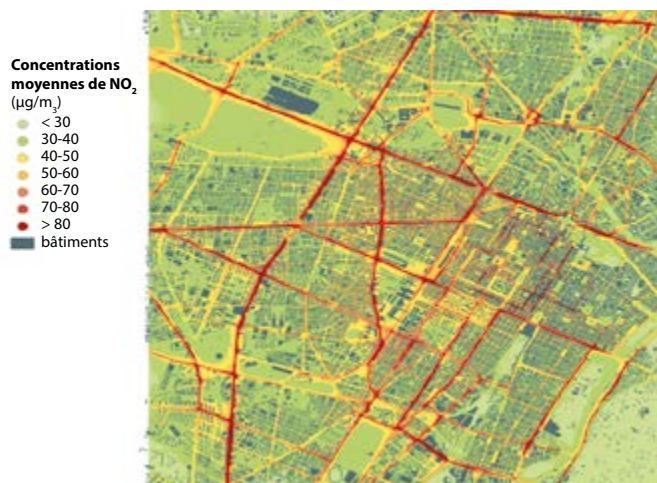


Figure 25

Projet ELISE : champ de concentration en NO_2 au sol résultant du modèle AIRCITY avec l'assimilation des données des micro-capteurs.

La technologie pour une meilleure connaissance de la pollution urbaine

La pollution urbaine a toujours été prise au sérieux, mais les méthodes utilisées pour la connaître sont aujourd'hui en évolution rapide : pour l'instrumentation, on passe de mesures effectuées en un nombre limité de sites « sensibles » à la possibilité d'utiliser un très grand nombre de mesures, mais dont la qualité doit être vérifiée ; pour la simulation numérique, on passe d'un mode où des spécialistes étudiaient de près quelques épisodes critiques à l'utilisation quotidienne de systèmes complexes et multi-échelles, qui balayent réellement toutes les échelles, de la planète à la rue. Le fossé spectaculaire qui existait entre la sophistication des études de modélisation météorologique et celle de l'étude des situations de pollution urbaine est en train de se combler rapidement.

L'évolution récente de l'instrumentation de mesure qui fournit des micro-capteurs abordables, pratiques et performants, l'évolution des calculateurs qui permettent les modélisations d'un grand nombre de données et de situations complexes, en chimie ou en aérodynamique, la capacité particulièrement pédagogique de présenter les résultats des modèles sous forme de cartes ou de films, les possibilités de prévision qui permettent d'anticiper les situations et d'éviter les excès... Toutes ces évolutions ont fait passer les prévisions de la pollution urbaine de l'âge artisanal à l'âge de la technologie avancée.

Les outils sont là, la parole est maintenant aux politiques chargés de réguler les comportements des citoyens. Ils ont en responsabilité le difficile arbitrage entre la qualité sanitaire idéale et le soutien raisonnable de la vie économique, qui ne peut négliger l'importance de la circulation des véhicules automobiles.