

Chapitre 1

1 Introduction

L'augmentation de la population urbaine et de la forte concentration de nombreuses activités humaines dans certaines zones des territoires mène à des problèmes de pollution de l'air et de l'eau. Par conséquent, étudier l'impact anthropique sur l'environnement urbain est nécessaire. Les impacts sanitaires de la pollution atmosphérique urbaine ont été étudiés dans 25 villes européennes dans le cadre du projet Aphekom (Improving Knowledge and Communication for Decision Making on Air Pollution and Health in Europe) dont neuf villes françaises. Ce projet a montré qu'une diminution des concentrations moyennes de particules fines ($PM_{2.5}$) jusqu'au seuil recommandé ($10 \mu g m^{-3}$) par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pourrait rallonger l'espérance de vie de 22 mois pour les personnes de 30 ans. De plus, 16 500 décès prématurés seraient attribuables chaque année en France liés à la pollution urbaine (Declercq et al., 2012). Par ailleurs, les polluants atmosphériques peuvent se déposer sur les bassins versants urbains et être transférés dans les eaux de ruissellement qui se chargent de polluants lors de leur précipitation sur les surfaces urbaines.

La gestion de l'environnement urbain est complexe. Une première étape consiste à comprendre les phénomènes de pollution, les mesurer, quantifier leurs niveaux et identifier leurs sources. Dans un second temps, on peut proposer des modèles qui simulent l'impact des émissions de polluants sur la qualité de l'environnement pour des études d'impact, des scénarios de prospective ou de la prévision à court terme. Grâce à ces modèles, différents scénarios peuvent être testés dans le but de réduire ou d'optimiser les émissions de polluants. Ces études de modélisation peuvent alors fournir les bases scientifiques nécessaires pour élaborer des politiques publiques environnementales efficaces.

Une grande partie de la pollution dans les villes est due au trafic routier et sa contribution est susceptible d'augmenter encore car plus de 70% de la population mondiale en 2050 habitera dans les villes. L'objectif de ce travail est d'améliorer nos connaissances par la modélisation de l'impact des pollutions liées à la circulation automobile sur la qualité de l'air et des eaux de ruissellement. Pour cela, ce travail de thèse se propose de relier quatre composantes qui sont: (1) la position et les paramètres cinématiques des véhicules (modèle de trafic), (2) les quantités de différents types de polluants émis par les véhicules (modèle d'émission), (3) la dispersion et la transformation de ces polluants dans l'air ainsi que le transfert de ces polluants vers les surfaces par dépôts sec et humide (modèle de dispersion atmosphérique), et (4) la propagation des polluants qui entrent dans les eaux de ruissellement (modèle hydrologique et qualité de l'eau). Les couplages entre ces modèles au moyen d'interfaces et d'harmonisation des échelles spatio-temporelles conduisent au développement d'une chaîne

de modélisation qui permet alors de simuler l'impact des polluants émis par les véhicules sur la pollution de l'air et des eaux de ruissellement.

Cette thèse est donc consacrée à la construction de telles chaînes de modélisation, de leur évaluation avec des mesures expérimentales, de l'identification des difficultés qui peuvent être rencontrées et de la réalisation d'un ensemble de recommandations pour des travaux futurs sur cette problématique.

Le reste de ce chapitre est organisé comme suit. Les processus d'émissions de polluants par les véhicules sont brièvement décrits, puis les principaux polluants sont documentés. Ensuite, les effets sanitaires et les réglementations concernant la qualité de l'air et de l'eau sont exposés. Les systèmes de mesures de la pollution en zone urbaine et les stratégies de surveillance des concentrations de polluants dans l'air et l'eau sont brièvement présentés. Enfin, les objectifs généraux, la stratégie et les méthodologies adoptées dans cette thèse pour répondre à ces questions sont exposés.

Le second chapitre présente brièvement les modèles utilisés lors de ces travaux. Il s'agit des modèles Symuvia pour le trafic, CopCETE et PHEM pour les émissions de polluants, Polyphemus-Gaussien pour la dispersion atmosphérique et SWMM pour la modélisation de la quantité et de la qualité de l'eau. Une formulation améliorée d'un modèle gaussien de source linéique a aussi été appliquée pour la modélisation de la dispersion atmosphérique des particules.

Le chapitre trois présente un état de l'art des différents modèles de trafic, d'émission, de dispersion atmosphérique et d'hydrologie existants. Ensuite, différentes catégories de modèles sont considérées afin de développer des chaînes de modélisation en fonction des échelles spatio-temporelles. Ce chapitre aborde aussi de manière spécifique les couplages entre trafic et émissions, émissions et qualité de l'air, et qualité de l'air et qualité de l'eau à travers trois cas d'études.

Le chapitre 4 est consacré à la simulation de la qualité de l'air à proximité d'une autoroute urbaine à l'aide de données mesurées de trafic et des modèles d'émission et de dispersion atmosphérique. Le modèle d'émissions a été modifié pour tenir compte de la resuspension de particules par le trafic et le modèle de dispersion a été amélioré pour des conditions de vents faibles. Les résultats de cette chaîne de modélisation ont été comparés avec les mesures de concentrations de polluants atmosphériques obtenues dans le cadre des projets MOCOPO et PM-DRIVE.

Le chapitre 5 présente trois méthodes différentes pour modéliser l'impact du trafic sur la qualité des eaux de ruissellement. La première méthode utilise des données expérimentales de dépôts atmosphériques liés au trafic à proximité de routes. La deuxième méthode est basée sur l'utilisation d'un modèle boîte (0D) qui calcule les concentrations de polluants et les dépôts de manière uniforme sur le domaine de l'étude. La troisième méthode crée une chaîne de modélisation complète qui inclut les modèles de trafic, d'émission, de qualité de l'air et de

qualité de l'eau. Cette chaîne de modélisation est évaluée avec les données expérimentales du bassin versant de Grigny en région parisienne.

Un dernier chapitre présente les conclusions générales qui résument les principaux résultats mis en avant dans cette thèse ainsi qu'une discussion des perspectives à donner à ce travail.

1.1 Les émissions de polluants

Les émissions de polluants liés à la circulation automobile peuvent être catégorisées en quatre types selon les différents phénomènes qui génèrent ces émissions :

- **les émissions à l'échappement** : Ces émissions (ci-après dénommées simplement « émissions échappement ») sont liées au fonctionnement d'un moteur à explosion et aux phénomènes chimiques qui en découlent. Les émissions de certains polluants au cours de la période de chauffe (moteur froid) sont beaucoup plus élevées que pendant le fonctionnement à chaud du moteur ; il est donc nécessaire de distinguer ces deux types de production de polluants. Lorsque le moteur n'est pas suffisamment chaud (température inférieure à 80°C environ), il ne fonctionne pas à son rendement optimal, ce qui affecte les émissions liées au processus de combustion. Les émissions à chaud et à froid sont principalement liées aux technologies, motorisations, carburants, huiles, dispositifs de dépollution, et surtout aux modes d'utilisation du véhicule (vitesse et charge par exemple). Alors que les surémissions à froid peuvent être négligeables sur de longs trajets routiers ou autoroutiers, elles peuvent être majoritaires sur de courts trajets urbains.
- **les émissions par évaporation de carburant** : ce sont les émissions par évaporation dues aux systèmes de carburant des véhicules à essence (réservoir, système d'injection et conduites de carburant). Les émissions par évaporation provenant des véhicules diesel sont négligeables en raison de la présence d'hydrocarbures plus lourds et, par conséquent, d'une pression de vapeur du carburant diesel qui est relativement faible. Le processus d'évaporation est dû à la variation de température, soit par changement de température dans la journée, soit par évolution de celle du moteur des véhicules pendant la conduite et le stationnement. Une autre source importante est la perméation du carburant : diverses études montrent la fuite de carburant au travers de composants plastiques. Les évaporations sont de trois types : les évaporations au cours des déplacements, les évaporations lors du refroidissement du véhicule et les évaporations journalières dues aux variations de température ambiante.
- **les émissions « non-échappement »** : Les émissions « non-échappement » incluent des particules (PM), y compris des métaux lourds émis par l'usure des pneus, des plaquettes de freins et de l'embrayage des véhicules ainsi que des gaz émis suite à des fuites de gaz frigorigènes, carburant, huile, liquide de frein, etc. On inclut aussi dans ces émissions, l'usure de la chaussée par les véhicules. Ces émissions dépendent de la vitesse moyenne et du kilométrage parcouru par le véhicule.
- **les émissions par remise en suspension de particules** : La resuspension est la remise en état de suspension dans l'atmosphère de particules préalablement déposées sur le

sol. Cette resuspension peut représenter une bonne part des émissions de particules du trafic routier, jusqu'à environ 50% (par exemple, Polo, 2013).

1.2 Pollution émise par le trafic routier

Le trafic automobile contribue à la pollution atmosphérique à la fois par l'émission directe de polluants liée à l'utilisation des véhicules (polluants primaires) et par les polluants dérivés ou secondaires formés après réactions chimiques dans l'atmosphère à partir d'espèces chimiques (dites précurseurs) émises par les véhicules (e.g., ozone et la fraction secondaire des particules fines). Les polluants se classent en deux grandes catégories : les particules (émises à l'échappement ou issues de l'usure des véhicules, de la chaussée et de la resuspension.), et les polluants gazeux (échappement et évaporation des carburants). Certains polluants de l'échappement peuvent être semi-volatils et être par conséquent présents en tant que particules et gaz.

Plus précisément, les polluants émis par les véhicules roulants sont principalement :

- **Le dioxyde de carbone** (CO_2 , aussi appelé gaz carbonique) qui est émis par la combustion de carburants fossiles (émission échappement). Le dioxyde de carbone n'a pas d'impact sur la santé publique (sauf à des concentrations très élevées), mais il intervient dans l'effet de serre qui mène au changement climatique.
- **Le monoxyde de carbone** (CO) qui résulte d'une combustion incomplète (émission échappement). Il s'oxyde lentement en dioxyde de carbone dans l'atmosphère avec une durée de vie de l'ordre d'un mois. Il s'agit d'un polluant bien connu du point de vue de son effet néfaste sur la santé.
- **Les oxydes d'azote** (NO_x), qui se forment à des températures de combustion élevées par recombinaison de l'azote et de l'oxygène de l'air. Ils incluent le monoxyde d'azote (NO), qui est majoritaire, et le dioxyde d'azote (NO_2). On définit $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$; les fractions relatives de ces deux espèces chimiques dépendent du type de véhicule, du mode de conduite et du système de dépollution. L'origine de ces polluants était à 75 % due au trafic routier en 2005 (<http://www.citepa.org/fr/>). Les oxydes d'azote interviennent dans la formation d'ozone, de particules, de pluies acides et de dépôts azotés. NO_2 présente aussi des effets néfastes pour la santé.
- **L'ozone** (O_3) qui est un polluant secondaire issu de la réaction des oxydes d'azote et des composés organiques volatils (COV) sous l'effet du soleil (photochimie). La formation de l'ozone est un mécanisme complexe faisant intervenir de nombreux aspects chimiques et climatiques (température, ensoleillement, etc.). L'ozone n'est pas un polluant de proximité car il se forme au cours de plusieurs heures. Il réagit presque instantanément avec le monoxyde d'azote (NO) émis par les véhicules automobiles pour former le dioxyde d'azote (NO_2). L'ozone est un polluant à caractère plutôt

régional. C'est un oxydant qui a des effets néfastes sur la santé et la végétation ; c'est aussi un gaz à effet de serre.

- **Le dioxyde de soufre** (SO₂) est lié à la teneur en soufre dans le carburant diesel et dans une moindre mesure dans les essences. Il est émis par l'échappement. Pendant de nombreuses années, les véhicules diesel ont contribué à la pollution par SO₂, mais les décrets réduisant la teneur en soufre des carburants ont permis de réduire de façon importante les émissions des automobiles. SO₂ a des effets néfastes sur la santé et est aussi un précurseur de sulfate, qui contribue aux niveaux de particules fines et aux pluies acides.
- L'**ammoniac** (NH₃) qui est émis par l'échappement. Il n'a pas d'incidence sur la santé, mais il joue un rôle actif dans le phénomène de neutralisation des acides, dans la formation des particules atmosphériques, et dans les dépôts azotés sur les eaux de surface et les sols. Il faut noter qu'il est faiblement présent dans le secteur des transports ; bien que les technologies de dépollution tendent à en augmenter l'émission, ses émissions sont actuellement dominées par l'agriculture.
- Le **protoxyde d'azote** (N₂O) : Une petite partie des émissions de protoxyde d'azote est attribuée au trafic routier, en particulier aux pots catalytiques. C'est un des plus importants gaz à effet de serre contribuant au réchauffement de la planète après la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄).
- **Les particules** (PM) proviennent de l'échappement (principalement des véhicules diesel sans filtre à particules), des émissions non-échappement et du phénomène de resuspension. Les particules fines provenant de l'échappement sont formées de noyaux solides carbonés sur lesquels d'autres composés sont fixés, tels que les hydrocarbures imbrûlés semi-volatils provenant des huiles et du carburant, et des produits de combustion oxydés et / ou aromatiques. Les particules ultra-fines provenant de l'échappement sont formées à partir d'une nucléation d'acide sulfurique suivie de condensation de produits semi-volatils (acide sulfurique, composés organiques) ; elles coagulent ensuite avec des particules fines. A noter qu'il convient de distinguer les particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm (PM₁₀) et celles avec un diamètre inférieur à 2.5 µm (PM_{2,5}). Par ailleurs, les particules contiennent des substances toxiques comme des métaux lourds, du carbone suie et des composés organiques.
- **Composés Organiques Volatils** (COV), qui résultent d'une part (et principalement) d'une combustion incomplète et se retrouvent à l'échappement (notamment à froid), et d'autre part de l'évaporation de carburant. Les émissions de COV par évaporation représentent environ 9% contre 91% d'émission par échappement (André et al., 2012). Les COV incluent tous les composés organiques gazeux de l'atmosphère. On distingue (COVNM) COV non méthaniques (e.g., propane, propène, benzène, formaldéhyde, acroléine, etc.) et méthane (CH₄). Les COVNM contribuent, avec les NO_x, à la

formation de l'ozone et de particules secondaires. Le méthane est peu réactif mais est un gaz à effet de serre. Les hydrocarbures sont des COV qui ne contiennent que du carbone et de l'hydrogène. Ils comprennent les hydrocarbures aliphatiques et hydrocarbures aromatiques. Ces derniers peuvent être monocycliques (HAM, tels que le benzène et le toluène) ou polycycliques (HAP) ; 16 principaux HAP sont présentés dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1. Liste des 16 principaux HAP (d'après Deletraz, 2002)

HAP légers, principalement sous forme gazeuse	HAP lourds, principalement sous forme particulaire
Naphtalène Acénaphtylène Acénaphène Fluorène Phénanthrène Anthracène Fluoranthène Pyrène (P) Chrysène Benzo(a)anthracène (BaA)	Benzo(a) pyrène (BaP) Benzo(b)fluoranthène (BbF) Benzo(k)fluoranthène (BkF) Dibenzo anthracène Indéno (1,2,3) pyrène (IP) Benzo(g,h,i)pérylène (BghiP)

- Les **métaux** sont émis par émission échappement ainsi que par émission non-échappement sous forme de particules (à l'exception du mercure qui est principalement sous forme gazeuse, mais émis en très faible quantité par les véhicules). Les métaux principaux impliqués dans la pollution automobile sont :
 - **Le plomb (Pb)** : Après la disparition des essences à base de plomb une baisse significative des concentrations moyennes annuelles a été notée. Le plomb atmosphérique ne représente donc plus un enjeu fort pour la qualité de l'air. Toutefois, compte tenu des émissions non-échappement et de la remise en suspension des particules dans les eaux, de l'absorption par les plantes et dans les sols, sa prise en compte dans les études d'impact est encore obligatoire.
 - **Le cadmium (Cd)** : En milieu interurbain, l'automobile émet très peu de cadmium par rapport aux autres activités (industrielles, agricoles). On en trouve essentiellement dans les additifs des lubrifiants et dans les pneumatiques et aussi dans les émissions échappement. En milieu urbain, le trafic peut être sa principale source de pollution de l'air et de l'eau. Ce métal a des effets sur des plantes à vocation alimentaire, ce qui peut entraîner un risque indirect pour l'homme.
 - **Le zinc (Zn)** : Les émissions du zinc liées au trafic sont essentiellement dues aux fuites de lubrifiants, à l'émission par échappement et à l'érosion des glissières de sécurité. On peut donc en retrouver dans les émissions échappement sous forme de particules. Le zinc n'est pas un métal qui sera réglementé dans les années à venir au titre de la loi sur l'air. Actuellement, on

suit sa présence surtout dans les eaux de ruissellement des routes. On peut trouver des quantités importantes dans les sols des emprises routières.

- Les métaux **fer** (Fe), **cuivre** (Cu), **antimoine** (Sb), **chrome** (Cr), **nickel** (Ni), **sélénium** (Se), **baryum** (Ba), **arsenic** (As), **mercure** (Hg), etc., peuvent être produits par les émissions échappement, non-échappement et par resuspension. Les métaux lourds des différentes sources véhiculaires sont listés par exemple par Polo (2013).

1.3 Effets sanitaires

1.3.1 Enjeux sanitaires de la pollution atmosphérique

L'impact de la pollution atmosphérique sur la santé publique est devenu un problème majeur. En effet, elle est la cause principale de près de 7 millions de décès dans le monde en 2012 selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) : "Ces chiffres représentent plus du double des estimations précédentes et confirment que la pollution de l'air est désormais le principal risque environnemental pour la santé dans le monde". L'exemple de l'étude de Bell et Davis (2001) montre le lien entre les concentrations de dioxyde de soufre (SO₂) et la mortalité lors du fameux épisode de pollution à Londres en 1952 (voir Figure 1.1).

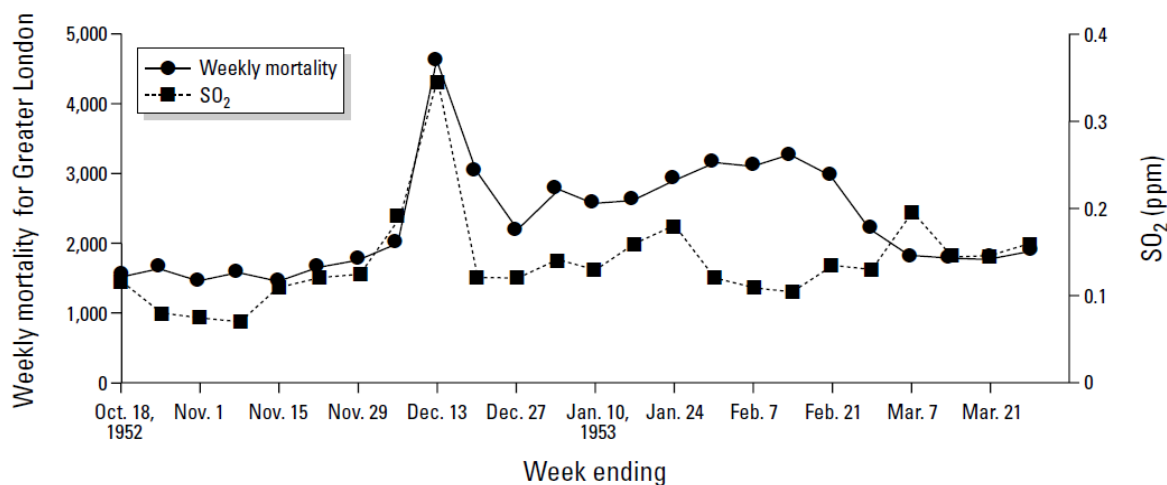


Figure 1.1. Nombre de décès et évolution de la concentration en dioxyde de soufre lors de l'épisode de smog de l'hiver 1952 à Londres. Source: Bell et Davis, 2001.

1.3.2 Enjeux sanitaires de la pollution des eaux

Les polluants qui sont transportés par les eaux de ruissellement affectent la qualité des eaux des milieux récepteurs. Ils occasionnent différents problèmes pour les écosystèmes, touchant à la fois les espèces animales et les espèces végétales, et peuvent par ailleurs limiter les activités humaines. Par exemple, l'augmentation de la toxicité des eaux de ruissellement entrant au barrage Fashafuyeh, due aux activités urbaines d'une banlieue de Téhéran, Iran, a tué 2 millions poissons en avril 2014 (voir Figure 1.2). Ce barrage est utilisé aussi pour la pisciculture.



Figure 1.2. L'effet toxique des eaux de ruissellement sur les espèces aquatiques (barrage Fashafuyeh, Iran)

1.3.3 Effets sur la santé des polluants émis par les véhicules

Les effets des principaux polluants liés au trafic routier sur la santé sont brièvement présentés dans cette partie.

CO₂ est un gaz peu toxique à faible dose mais il est un des principaux gaz à effet de serre. A très forte concentration, il peut cependant provoquer des malaises et des maux de tête.

CO se fixe sur l'hémoglobine du sang, avec une affinité 200 fois supérieure à celle de l'oxygène, ce qui peut influencer le cerveau et le cœur. L'inhalation de CO entraîne des maux de tête et des vertiges et peut mener à la mort.

NO₂ provoque une hyperréactivité bronchique chez les asthmatiques. Le dioxyde d'azote se transforme dans l'atmosphère en acide nitrique, qui retombe au sol assez rapidement (durée de vie atmosphérique de l'ordre d'une journée), et la pluie en ruisselant va entraîner cet acide dans les eaux de ruissellement et les milieux récepteurs. Par ailleurs, NO_x (NO et NO₂) sont des précurseurs de O₃ et de particules.

O₃ est capable de pénétrer profondément dans les poumons. Il affecte les voies respiratoires car c'est un oxydant puissant. Il affecte aussi la végétation car il détériore la surface des feuilles et aiguilles des plantes.

SO₂ est un gaz irritant, notamment pour l'appareil respiratoire. Les fortes pointes de pollution peuvent déclencher une gêne respiratoire chez les personnes sensibles (asmathiques, jeunes enfants). L'étude de Tertre et al. (2014) montre qu'il y a un rapport linéaire entre l'augmentation de concentration de SO₂ et la mortalité. Le dioxyde de soufre se transforme principalement en acide sulfurique qui contamine les eaux de ruissellement et contribue à la formation de particules fines.

NH_3 est un gaz incolore et odorant, qui est très irritant pour le système respiratoire, la peau, et les yeux à très fortes concentrations. Ce n'est pas un polluant primaire aux concentrations atmosphériques observées mais il est un précurseur de particules. Il est peu généré par le transport routier. Sa présence dans les eaux de l'ammoniac affecte la vie aquatique. Pour les eaux douces courantes, sa toxicité aiguë provoque chez les poissons notamment des lésions branchiales et une asphyxie des espèces sensibles. Pour les eaux douces stagnantes, le risque d'intoxication aiguë est plus marqué en été car la hausse des températures entraîne l'augmentation de la photosynthèse. Ce phénomène, s'accompagne d'une augmentation du pH qui privilégie la forme NH_3 (toxique) aux ions ammonium (NH_4^+).

Les particules sont un des polluants majeurs dans les villes (An et al., 2013). La toxicité des particules dépend de leur taille et de leur composition. Leur rôle a été démontré dans certaines atteintes fonctionnelles respiratoires, le déclenchement de crises d'asthme et la hausse du nombre de décès pour cause cardio-vasculaire ou respiratoire. Les particules fines, $\text{PM}_{2.5}$, sont les plus dangereuses (voir Figure 1.3). Les particules fines sont capables de pénétrer au plus profond de l'appareil respiratoire, elles atteignent les voies aériennes terminales et peuvent pénétrer dans le système sanguin. Ces particules peuvent véhiculer des composés toxiques, allergènes, mutagènes ou cancérigènes, comme des polluants organiques persistants (POP) tels que les HAP et des métaux lourds (tels que Fe, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se et Zn). Il faut noter que HAP et métaux sont les principaux polluants dans les eaux. Les phénomènes de ruissellement et de lessivage des sols sont à l'origine de la contamination des cours d'eau et des nappes phréatiques et à plus long terme des eaux potables.

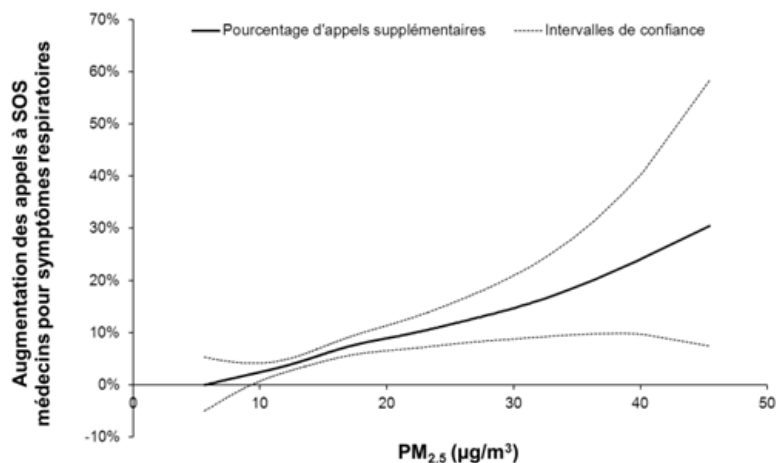


Figure 1.3. Illustration d'appels à SOS médecins en fonction de la concentration de $\text{PM}_{2.5}$. Source : ORS Île-de-France

Les métaux lourds s'accumulent dans les organismes vivants et ont des effets toxiques à court et long terme. Certains, comme le cadmium et le chrome hexavalent sont cancérigènes.

Certains COV ont des effets irritants sur la peau, les yeux et le système respiratoire. Certains COV comme le benzène et le formaldéhyde sont cancérigènes (Vlachokostas et al., 2012).

Les HAP sont des molécules biologiquement actives qui, une fois accumulées dans les tissus organiques, se prêtent à des réactions de transformation en métabolite. Ces métabolites ainsi formés peuvent avoir un effet plus ou moins marqué en se liant à des molécules telles que les protéines, l'ARN ou l'ADN, menant à des dysfonctionnements cellulaires. Le benzo(a)pyrène est un des composés les plus toxiques de cette famille car il est mutagène et fortement cancérigène.

Le trafic routier est une des sources majeures de la pollution urbaine. L'étude de Yim and Barrett (2012) suggère qu'environ 7500 morts par an résultent des émissions liées au transport routier en Angleterre. Plusieurs études comparent généralement l'apparition d'effets indésirables sur la santé des populations qui vivent, travaillent ou vont à l'école près de routes très fréquentées. Baldauf et al. (2008) présentent 26 études différentes concernant les effets du trafic routier sur la santé qui incluent l'asthme et d'autres symptômes respiratoires, le poids des nouveaux nés, la mortalité prématurée, des effets cardiovasculaires et des cancers. Cet état de fait a amené les pouvoirs publics à considérer l'urgence de la mise en place de moyens visant à réduire ce type de pollution.

1.4 Réglementations de la qualité des eaux et de l'air ambiant

Les effets de la pollution atmosphérique et des eaux pluviales polluées sur la santé ainsi que sur les écosystèmes engendrent une pression pour la mise en place de réglementations.

Les réglementations européennes portant sur la qualité de l'air sont : la Directive n° 2004/107/CE du 15 décembre 2004 concernant l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant et la Directive n° 2008/50/CE du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe. Cette directive est transposée par le décret n°2010-1250 du 21 octobre 2010.

La Directive cadre sur l'eau (DCE 2000/60/CE) fixe au niveau européen et la circulaire du 7 mai 2007 au niveau national des NQEp (normes de qualité environnementale provisoires) pour les objectifs de réduction des émissions pour l'eau. Les substances polluantes pour l'eau et la réglementation de la qualité des eaux en milieu urbain ont été étudiées par Zgheib (2009). Les NQEp sont établies pour trois types d'eaux : les eaux de surfaces intérieures (cours d'eau, plans d'eau, canaux, réservoirs), les eaux de transition (eaux de surface situées à proximité des embouchures de rivières ou de fleuves) et les eaux marines intérieures et territoriales.

Ces réglementations pour différents polluants liés au trafic sont illustrées dans le Tableau 1.2 pour les eaux de surfaces intérieures et l'air ambiant. Dans ce tableau NQE-MA représente la norme de qualité environnementale pour une concentration moyenne annuelle, SEI est le seuil d'évaluation inférieur, c'est-à-dire un niveau en deçà duquel il est suffisant, pour évaluer la qualité de l'air ambiant, d'utiliser des techniques de modélisation ou d'estimation objective, et SES est le seuil d'évaluation supérieur, c'est-à-dire un niveau en deçà duquel il est permis,

pour évaluer la qualité de l'air ambiant, d'utiliser une combinaison de mesures fixes et de techniques de modélisation et/ou de mesures indicatives. Une valeur limite est un niveau à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser (plus d'un certain nombre de fois pour les valeurs portant sur des périodes courtes), et fixé sur la base des connaissances scientifiques afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble. Une valeur cible est un niveau à atteindre, dans la mesure du possible, dans un délai donné, et fixé afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou l'environnement dans son ensemble. Il faut noter que 14 COV (éthylbenzène, isopropylbenzène, toluène, xylènes, 1,2-dichloroéthane, chlorure de méthylène, hexachlorobutadiène, chloroforme, tétrachlorure de carbone, tétrachloroéthylène, trichloréthylène, 1,2,4-trichlorobenzène, 1,2,3-trichlorobenzène, 1,3,5-trichlorobenzène) possèdent des NQEp fixées par la circulaire du 7 mai 2007 mais l'émission de ces polluants n'est pas encore étudiée pour le trafic routier.

La réduction de la pollution due au trafic est nécessaire afin de respecter les niveaux de polluants ci-dessus. Plusieurs générations de directives (70/220/EEC et 98/69/EC) se sont succédées en coordination avec les États, les constructeurs automobiles et les producteurs de pétrole pour déterminer 6 niveaux d'émissions (appelés normes Euro). Ces normes s'expriment en unité de masse par distance (g/km) pour les véhicules légers et en unité de masse par énergie (g/kWh) pour les poids lourds ; elles sont définies pour des cycles de conduite bien définis. Les véhicules les plus récents respectent la norme Euro 5 en vigueur depuis 2011, et plus contraignante que les réglementations antérieures. La norme Euro 6 est prévue pour septembre 2014, avec des émissions en particules réduites de 97% en masse par rapport à celles d'un véhicule Euro 1 pour un moteur diesel. La Figure 1.4 montre l'évolution des émissions en fonction des normes Euro pour les véhicules légers.

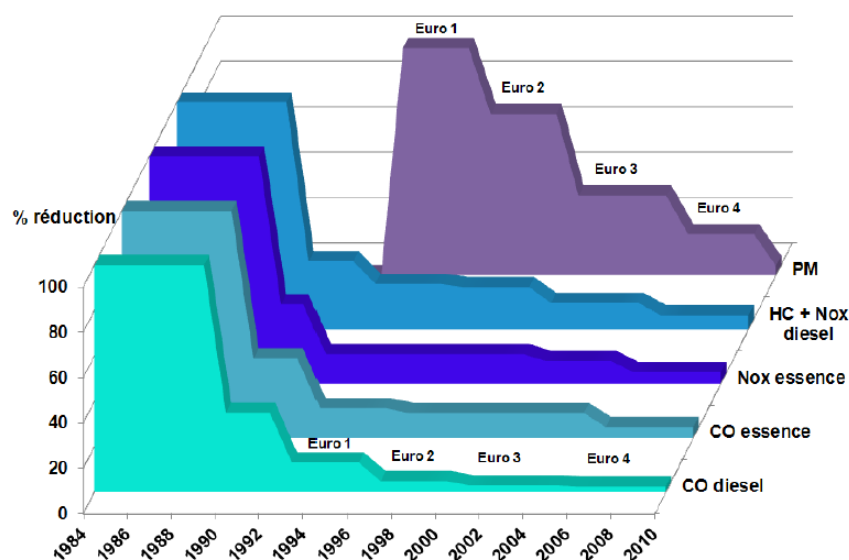


Figure 1.4. Évolution des émissions CO, NO_x, PM (masse) en fonction des normes européennes pour les véhicules légers (www.senat.fr).

Tableau 1.2. Réglementations des polluants dus au trafic pour les eaux de surfaces intérieures et l'air ambiant.

Polluants	Directives 2004/107/CE et 2008/50/CE et décret n°2010-1250 du 21 octobre 2010 air ambiant				Directive 2008/105/CE et la circulaire du 7 mai 2007 pour les eaux de surfaces intérieures (µg/L)	
	Moyenne critique – air	SEI	SES	Valeurs limites Valeurs cibles*	NQE- MA	NQEp
CO	Moyenne sur 8 heures	5 mg/m ³	7 mg/m ³	10 mg/m ³		
NO _x	Moyenne annuelle (protection de la végétation)	19,5 µg/m ³	24 µg/m ³		-	-
NO ₂	Moyennes horaires à ne pas dépasser plus de 18 fois par année civile (protection de la santé humaine)	100 µg/m ³	140 µg/m ³	200 µg/m ³	-	-
	Moyenne annuelle (protection de la santé humaine)	26 µg/m ³	32 µg/m ³	40 µg/m ³	-	-
SO ₂	Moyennes journalières à ne pas dépasser plus de 3 fois par année (protection de la santé humaine)	50 µg/m ³	75 µg/m ³	125 µg/m ³	-	-
	Moyenne hivernale (protection des écosystèmes)	8 µg/m ³	12 µg/m ³		-	-
PM ₁₀	Moyennes sur 24 heures à ne pas dépasser plus de 35 fois par année civile	25 µg/m ³	35 µg/m ³	40 µg/m ³	-	-
	Moyenne annuelle	20 µg/m ³	28 µg/m ³	50 µg/m ³	-	-
PM _{2,5}	Moyenne annuelle	12 µg/m ³	17 µg/m ³	26, 20* µg/m ³	-	-
Benzène (C ₆ H ₆)	Moyenne annuelle	2 µg/m ³	3.5 µg/m ³	5 µg/m ³	10	10
Benzo[a]pyrene	Moyenne annuelle	0.4 ng/m ³	0.6 ng/m ³	1* ng/m ³	0,05	0,05
Benzo[b]fluoranthene	-	-	-		Σ = 0,03	Σ= 0,03
Benzo[g,h,i]perylene	-	-	-		Σ =	Σ =
Indeno[1,2,3cd]pyrene	-	-	-		0,002	0,002
Pb	Moyenne annuelle	0.25 µg/m ³	0.35 µg/m ³	0.5 µg/m ³	7,2	7,2
Cd	Moyenne annuelle	2 ng/m ³	3 ng/m ³	5* ng/m ³	0,15	5
As	Moyenne annuelle	2,4 ng/m ³	3,6 ng/m ³	6* ng/m ³	-	-
Ni	Moyenne annuelle	10 ng/m ³	14 ng/m ³	20* ng/m ³	20	20
Hg	-	-	-		0,05	1

La réduction des polluants par les constructeurs automobiles et les pétroliers inclut plusieurs systèmes : (1) la conception de systèmes de combustion efficaces pour réduire les émissions à l'échappement, (2) l'utilisation de systèmes de récupération des vapeurs d'essence d'évaporation, (3) l'utilisation des technologies informatiques pour surveiller et contrôler les performances du moteur, (4) les technologies efficaces de « post-traitement » ou de dépollution, comme les convertisseurs catalytiques et filtres à particules, et dispositifs de réduction des oxydes d'azotes (SCR, De-NOx) qui éliminent ou convertissent les polluants avant leur émission dans l'atmosphère et (5) l'amélioration de la qualité du carburant (suppression / remplacement de composés toxiques, utilisation de carburants de substitution).

1.5 Surveillance des concentrations

1.5.1 Air

En réponse aux enjeux sanitaires, la loi française est « codifiée aux articles L220-1 et suivants du Code de l'Environnement » ; c'est la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE), parue le 30 décembre 1996, qui vise à rationaliser l'utilisation de l'énergie et à définir une politique publique intégrant l'air en matière de développement urbain. Elle invoque le droit de respirer un air qui ne nuise pas à la santé. Elle rend obligatoires : (1) la définition de normes de qualité de l'air (voir plus haut), (2) la surveillance de la qualité de l'air, et (3) l'information du public, dont l'État est le garant, qui doit être réalisée périodiquement et le déclenchement d'une alerte en cas de dépassement de seuil réglementaire. Le dispositif de surveillance de la qualité de l'air regroupe l'ensemble des acteurs impliqués dans ce domaine : le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE), les DREAL, l'ADEME, les AASQA et le LCSQA. Pour garantir la qualité des mesures, l'État a mis en place le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA). Les Associations Agréées de Surveillance de Qualité de l'Air (AASQA) comprennent 26 associations (<http://www.lcsqa.org/aasqa>) qui sont chargées de surveiller la qualité de l'air dans les différentes régions françaises. Les cartes de synthèse de la pollution enregistrée pour chaque région sont disponibles sur le lien suivant : http://www.lcsqa.org/surveillance/dispositif/plans_surveillance. La loi prescrit également l'élaboration pour les agglomérations de plus de 250 000 habitants de Plans de Protection de l'Atmosphère (PPA) et pour les agglomérations de plus de 100 000 habitants de Plans de Déplacements Urbains (PDU). Le PDU vise à développer les transports collectifs et les modes de transport propres, à organiser le stationnement et à aménager la voirie (<http://www.developpement-durable.gouv.fr>). Il affecte donc indirectement la qualité de l'air.

Un indice de qualité de l'air est un chiffre utilisé par les agences gouvernementales pour communiquer au public le niveau de pollution. Différents pays ont leurs propres indices de qualité de l'air qui ne sont pas tous compatibles. En France, pour les agglomérations de plus de 100 000 habitants, il s'agit de l'indice Atmo et pour les agglomérations de moins de 100 000 habitants, il s'agit de l'indice IQA (« indice de qualité de l'air simplifié ») calculé sur la base d'un à quatre sous-indices. L'indice européen est aussi communiqué par les AASQA.

L'indice de qualité de l'air croît de 1 (très bon) à 10 (très mauvais). Il permet de caractériser de manière simple et globale la qualité de l'air d'une agglomération urbaine. L'indice est déterminé par le maximum d'un ensemble de sous-indices, chacun d'entre eux étant représentatif d'un polluant de l'air : dioxyde de soufre (SO₂), dioxyde d'azote (NO₂), ozone (O₃) et poussières respirables (PM₁₀). Les sites de mesure sélectionnés pour son calcul caractérisent la pollution atmosphérique de fond des zones fortement peuplées (sites urbains) ou sites périurbains (<http://www.atmo-france.org>). La Figure 1.5. **Cartographies de l'indice de qualité de l'air** montre un exemple des informations fournies par l'indice de qualité de l'air.

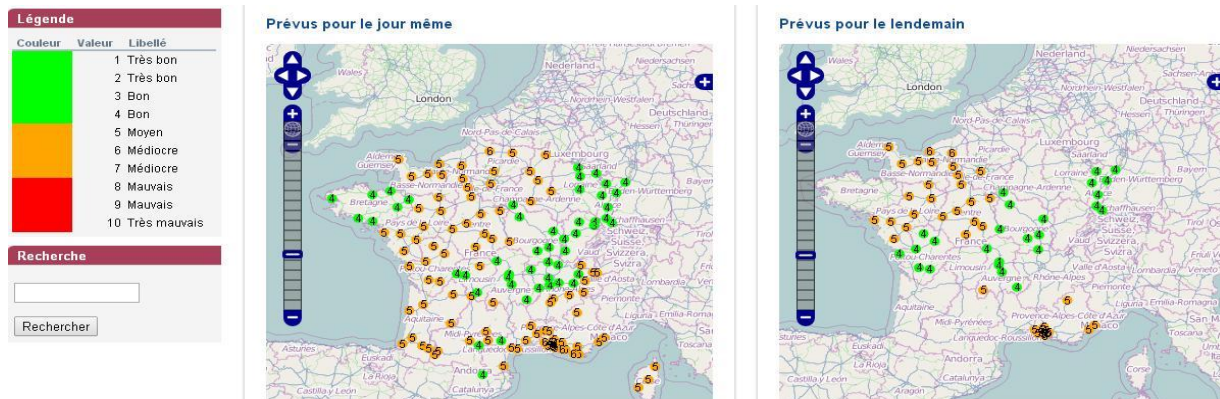


Figure 1.5. Cartographies de l'indice de qualité de l'air (source : <http://www.lcsqa.org/>)

Des prévisions de qualité de l'air sont fournies à la population pour l'informer et l'aider à minimiser les risques pour la santé publique. Elles peuvent par ailleurs être utilisées par les pouvoirs publics pour mettre en place des actions ponctuelles de réduction de la pollution (par exemple circulation alternée). Le système PREV' AIR (<http://www.prevoir.org/fr/index.php>) a été mis en place en 2003 à l'initiative du Ministère de l'écologie (MEDDE) afin de générer et de diffuser quotidiennement des prévisions et des cartographies de qualité de l'air par simulation numérique à différents échelles spatiales. Par ailleurs, les AASQA ont leur propre système de prévision (par exemple, www.airparif.asso.fr) et certains laboratoires, tels que le CEREA, fournissent aussi des prévisions (<http://cerea.enpc.fr/>).

1.5.2 Eau

L'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (Onema) a été créé pour une gestion globale et durable de la ressource en eau et des écosystèmes aquatiques et la reconquête de la qualité des eaux. En France, des programmes de surveillance (DCE) de l'état des eaux - cours d'eau, plans d'eau, eaux de transition, eaux côtières, eaux souterraines - ont été mis en œuvre dans chaque bassin hydrographique depuis 2007. Le réseau de contrôle de surveillance est constitué de l'ordre de 1500 sites pérennes « cours d'eau » répartis sur le territoire français (métropole). Les méthodes de surveillance et les substances prioritaires de l'état physico-chimique (température, oxygène, salinité, matières en suspension...), et l'état chimique (micropolluants tels que métaux lourds, pesticides, hydrocarbures...) sont prescrites pour les eaux douces de surface par la circulaire du 29 janvier 2013. Les observations de chaque bassin versant sont accessibles sur le lien suivant : <http://www.surveillance.eaufrance.fr/>.

L'état chimique est l'appréciation de la qualité d'une eau sur la base des concentrations de 41 substances incluant des polluants liés au trafic tels que des métaux lourds et certains HAP. Les concentrations ne doivent pas dépasser les NQE établies par la directive de 2008/105/CE. Le dépassement de la norme pour une seule substance suffit à déclarer une station du réseau en mauvais état chimique, quelle que soit la situation des autres substances sur cette même station. Il n'existe donc que deux classes de l'état chimique : bon état ou mauvais état.

Par ailleurs, les plans d'urbanisme doivent être compatibles avec les objectifs de protection définis par le SAGE (schéma d'aménagement et de gestion des eaux). Le SAGE est un document de planification de la gestion de l'eau à l'échelle d'un bassin versant qui fixe des objectifs de protection quantitative et qualitative de la ressource en eau et il doit être compatible avec le schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE).

1.6 Objectifs généraux du travail de thèse

Les enjeux environnementaux et sanitaires liés à la circulation automobile nous obligent à connaître et surveiller ses impacts. Les mesures de polluants liés au trafic dans l'air et dans l'eau peuvent nous informer sur les niveaux de concentrations dans ces milieux mais cette méthode reste limitée à certains points. En revanche, la modélisation est complémentaire des mesures et essentielle pour comprendre les processus en jeu et fournir les éléments d'information nécessaires au développement de politiques publiques. En effet, la modélisation permet d'estimer les concentrations dans des gammes d'échelles spatio-temporelles plus vastes que celles possibles pour les mesures. La modélisation peut aussi être utilisée pour prévoir l'émergence d'enjeux environnementaux liés aux transports, contribuer à l'objectif de maîtrise de la qualité de l'air et de l'eau (étude de prospective) ou bien simuler l'impact de nouvelles émissions (étude d'impact). Par ailleurs, la modélisation est généralement moins coûteuse que la réalisation de mesures expérimentales.

Différents outils de modélisation ont été utilisés pour cette thèse. Ils couvrent la modélisation du trafic, des émissions de polluants, des concentrations des polluants dans l'atmosphère et des concentrations de polluants dans les eaux de ruissellement. Ces outils permettent d'obtenir les données d'entrées nécessaires pour l'outil simulant les phénomènes suivants ; par exemple, un modèle de trafic fournit les informations nécessaires pour calculer les émissions de polluants liés au trafic. Nous avons donc ciblé notre recherche pour développer une chaîne de modélisation qui permet de quantifier les impacts environnementaux du trafic routier sur la pollution atmosphérique et la contamination des bassins versants urbaines en prenant en compte le trafic, les émissions des véhicules, les processus de transport et de transformation atmosphériques, les dépôts atmosphériques sur les bassins versants et les processus de transport et de transformation dans les eaux de ruissellement. Il s'agit également d'évaluer la faisabilité et pertinence de ces chaînes de modèles à différentes échelles et pour différentes conditions.

La première partie de cette thèse a consisté à réaliser un état de l'art des outils de modélisation des différents phénomènes pertinents (trafic, émissions, pollution atmosphérique, qualité des

eaux de ruissellement), mettant en exergue les enjeux liés à l'intégration des différents modèles pour constituer une chaîne cohérente en termes de polluants et d'échelles spatio-temporelles. Deux exemples de chaînes de modélisation sont proposés, l'une statique avec des pas de temps horaires, la seconde envisageant une approche dynamique du trafic et des pollutions associées. Ces chaînes de modèles ont été testées pour trois configurations partielles : (1) Couplage trafic / émissions avec une simulation d'une voie urbaine utilisant un modèle dynamique de trafic en lien avec des modèles d'émissions instantané et moyenné, (2) couplage émissions / pollution atmosphérique en bordure d'une autoroute, et (3) couplage dépôts atmosphériques / qualité des eaux de ruissellement pour un bassin versant urbain. Dans la suite du travail de thèse, des outils automatisés d'interfaçage ont été développés pour construire une chaîne de modèles simulant la qualité de l'air et aussi différentes méthodes pour estimer la qualité de l'eau en fonction des données détaillées disponibles sur un bassin versant. Les résultats de ces chaînes de modélisation ont été comparés aux mesures obtenues lors de cinq campagnes de mesures : MOCOPO et PM-DRIVE à Grenoble, SIVOA à Grigny, Promeprat (2001) à Metz (Autoroute A31), et INOGEV à Sucy-en-Brie.

Cette thèse aura permis une avancée significative dans la connaissance et l'intégration de l'ensemble des modèles permettant le calcul des concentrations atmosphériques et dans les eaux de certains contaminants liés au trafic routier, mettant en avant certaines limites et recommandant certaines précautions lors de la réalisation de telles chaînes de modélisation. Par ailleurs, la nécessité de données expérimentales robustes pour la validation de l'ensemble apparaît comme un point important qui doit être adressé dans les futurs programmes de recherche.