

Modéliser les émissions et les concentrations de polluants atmosphériques pour évaluer les politiques de transport. Eval-PDU et le cas nantais

Air pollutant emissions and concentrations modelling to assess transport policies. Eval-PDU and Nantes' case

L. Fouillé¹, T. Schmidt², A. Rebours²

Résumé

Cet article expose la méthode employée et quelques résultats obtenus dans le cadre du programme de recherche pluridisciplinaire Eval-PDU, ANR « villes durables 2008 », par Air Pays de la Loire, l'équipe responsable de la tâche consacrée à la modélisation des émissions/dispersions/concentrations de polluants atmosphériques. Les auteurs ne se contentent pas de présenter des méthodes et des résultats, ils discutent les apports, enjeux et limites de la méthode de modélisation employée à des fins d'évaluation environnementale des politiques de transports urbains.

Mots-clés

modélisation, polluants atmosphériques, transports urbains, émission, dispersion, concentration, évaluation environnementale, politique publique

Abstract

This article exposes the method used and some results obtained during the multidisciplinary research program Eval-PDU, ANR "sustainable cities 2008", by Air Pays de la Loire, the team responsible for the task dedicated to the modelling of emissions/dispersal/concentrations of atmospheric pollutants. The authors do not content with presenting methods and results, they discuss the contributions, the stakes and also the limits of the modelling method used in order to assess environmental impacts of urban transport policies.

Keywords

modelling, atmospheric pollutants, urban transports, emission, dispersal, concentration, environmental assessment, public policy

(1) École des Mines de Nantes, 4 rue Alfred Kastler BP 20722 44307 Nantes Cedex 3.

Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, École Centrale de Nantes, Bât. E, 1 rue de la Noë BP 92101 44321 Nantes.

(2) Air Pays de la Loire, 7 allée Pierre de Fermat CS 70709 44307 Nantes Cedex 3.

Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, École Centrale de Nantes, Bât. E, 1 rue de la Noë BP 92101 44321 Nantes.

1. Contexte politique et social

Les politiques de qualité de l'air, notamment en ville, ont été marquées par une accélération ces dernières années. De nombreux domaines de l'action publique ont été légitimés par leur volonté d'assainir l'atmosphère urbaine [1] rejoignant en cela la recomposition intense de la ville à l'œuvre sous l'influence des penseurs hygiénistes [2]. Les politiques de transports urbains constituent une des composantes principales de ces politiques menées au nom d'un air plus sain. Ainsi, les mesures prises pour améliorer la qualité de l'air en milieu urbain concernent prioritairement la régulation du trafic automobile. L'actualité récente des ZAPA (Zones d'Actions Prioritaires pour l'Air) nous le rappelle : le modèle retenu s'appuie sur les expériences européennes des LEZ (Low Emission Zone) basées souvent sur la restriction de circulation des véhicules les plus polluants : poids lourds, autobus, autocars dans le cas de Londres, catégories de véhicules diesel à l'origine d'émissions de particules dont les seuils sont souvent dépassés, notamment à proximité des voies de circulation.

Le renforcement des politiques d'amélioration de la qualité de l'air se conjugue avec une volonté croissante d'évaluation de ces politiques publiques et notamment de leur dimension environnementale. En effet, si l'action publique est largement menée au nom de l'environnement, son évaluation (*a priori* comme *a posteriori*) se fonde encore largement, lorsqu'elle a lieu, sur des indicateurs socio-économiques. L'action est-elle concertée ? Le programme est-il efficient ou rentable ? Ses objectifs sont-ils atteints ? Les coûts de l'enveloppe initiale n'ont-ils pas été dépassés ? Pour les politiques de transports qui nous intéressent ici, l'évaluation repose en général sur des estimations des évolutions du trafic, desquelles est déduit un bénéfice environnemental proportionnel.

L'évolution réglementaire traduit remarquablement l'exigence croissante d'évaluation environnementale : la directive européenne 2001/42/CE du 27/06/2001 « relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement » a finalement été transposée en droit français par l'ordonnance n° 2004-489 du 3/06/2004. Les Plans de Déplacements Urbains, documents cadres de l'action sur les transports dans la ville, font désormais l'objet d'une évaluation de leurs effets environnementaux, et leur action sera jugée en grande partie à l'aune de leur amélioration de la qualité de l'air [3].

2. Contexte scientifique

Évaluer l'action publique sur les déplacements urbains selon des critères environnementaux sup-

pose de mettre au point des méthodes pour mesurer les effets recherchés et produits. Cette « demande sociale » a été formulée dans le cadre d'un appel à projet de l'Agence Nationale de la Recherche dans la thématique « Villes durables ». Le projet méthodologique Eval-PDU est un projet interdisciplinaire qui se propose d'y répondre en mettant au point une méthode d'évaluation environnementale applicable aux PDU, et de la tester à Nantes. Nous passerons sous silence une grande partie du projet (pour en savoir plus, cf. Mestayer [4]), pour nous concentrer ici sur sa dimension qualité de l'air, prise en charge par Air Pays de la Loire, organisme agréé pour la surveillance et l'information sur la qualité de l'air dans les Pays de la Loire. Nous devons préciser toutefois qu'en amont du travail réalisé sur l'air, la simulation du trafic, prise en charge par le CETE de l'Ouest, a permis de produire des données portant sur les évolutions de la circulation automobile représentatives de jeux de scénarios correspondant à différentes situations, réelles ou hypothétiques, en termes de demande et d'offre de transport. Ces situations se présentent ainsi : une référence « avant mise en œuvre du PDU » en 2002, une référence « après mise en œuvre du PDU » en 2008 et sept variantes pour cette même année (deux scénarios intégrés, modifiant plusieurs paramètres et cinq tests de sensibilités n'en modifiant qu'un seul). C'est à partir de ces neuf jeux de données relatives au trafic (débit et vitesse sur le réseau) qu'ont été réalisées les modélisations des émissions, puis de la dispersion permettant le calcul des concentrations de polluants atmosphériques. Sans modélisation préalable du trafic, il aurait été impossible de réaliser le travail ici présenté, c'est d'ailleurs un des points que nous développerons plus loin.

La méthode employée, que nous décrivons dans le paragraphe suivant et qui s'appuie sur une approche par modélisation n'est pas une méthodologie surgissant *ex nihilo*. Elle s'inscrit dans la filiation directe de recherches menées antérieurement à Florence [5], [6], à Brisbane [7], [8], à Saint-Étienne [9], à Lille [10] et plus récemment à Toronto [11]. Elle applique des outils qui ont fait leurs preuves ailleurs à des fins nouvelles d'évaluation environnementale.

3. Le PDU nantais : 2000-2010

L'objectif du projet Eval-PDU n'est pas de réaliser l'évaluation environnementale du PDU de Nantes, mais de mettre en œuvre une méthode à partir de ce cas. Cela nécessite toutefois de le présenter dans ses grandes lignes. Les actions réalisées dans le cadre du PDU achevé sur la période 2000-2010 sont de plusieurs types : modifications d'infrastructures, renforts d'offre de transport collectif et management de la demande.

Les aménagements ont été nombreux et se déclinent comme suit : la création d'un Bus à Haut Niveau de Service (BHNS, voir ci-dessous), la prolongation de deux lignes de tramway existantes, l'aménagement ponctuel de couloirs de bus, l'aménagement simultané de la voirie pour la circulation générale (réduction de capacité et/ou de vitesse), la remise en service de la ligne de chemin de fer Vertou-gare de Nantes, mais aussi des augmentations de capacité routière, avec l'élargissement du pont de Bellevue, franchissement Est de la Loire par le périphérique. Les aménagements en faveur des transports en commun ont été accompagnés de la mise en service de neuf parkings relais supplémentaires, soit une capacité accrue de 2 000 places.

Les réseaux de transport en commun (tramway, bus TAN, TER et cars interurbains Lila) ont bénéficié de renforts de fréquence.

Enfin, comme cela se fait de plus en plus, des mesures de management de la demande de mobilité ont été mises en place pour optimiser l'effort réalisé sur l'offre (centrale de mobilité, plans de déplacements pour les entreprises, écoles, administrations, site de covoiturage, service d'autopartage, pédibus, promotion des modes doux...).

Le Busway est un BHNS mis en service en 2007 et qui relie le Sud de Nantes (Vertou) au pied de la cathédrale (centre-ville). Cet aménagement est une des mesures phares du PDU nantais, puisque ce site propre a conduit au réaménagement complet d'une pénétrante de type autoroutier (le boulevard de Vendée) en un boulevard urbain. Les capacités (et donc les vitesses en charge) ont été considérablement restreintes sur cet axe pour les automobiles en passant de deux voies par sens à une seule. Le Busway se substitue également à plusieurs lignes de bus (n° 26, 27, 28, 29).

Toutes les actions portant sur l'infrastructure et l'offre de transport ont été modélisées, à l'exception des parkings relais dont l'intégration au modèle de trafic ne peut se faire qu'à la main entre deux étapes. En revanche, les mesures de management de la demande n'ont pas été intégrées, puisque le modèle en est incapable.

Malgré de nombreux aménagements, le PDU 2000-2010 de Nantes ne constitue pas une modification radicale du système de transport de l'agglomération, puisque trois lignes de tramway diamétrales étaient déjà en service préalablement. Le Busway, infrastructure principale de ce PDU, n'est qu'un site propre radial venant renforcer ce réseau. Nous précisons cela pour relativiser les résultats obtenus qui peuvent paraître modestes.

4. Méthodes, modèles et approches

Le périmètre de l'étude regroupe les 24 communes de la communauté urbaine de Nantes Métropole, soit un domaine de 27 km du nord au sud et 39,5 km d'est en ouest. Un zoom sur la zone intra-périphérique est effectué pour observer plus en détail l'impact des scénarios testés au centre de l'agglomération.

4.1. Description des outils et de leur utilisation

Nous avons utilisé deux modèles, le premier pour estimer les émissions de polluants d'origine routière, le second pour calculer la dispersion, le transport et les concentrations des polluants dans l'air.

4.1.1 Modélisation des émissions routières

Les émissions d'origine routière, dont la qualité de l'évaluation est déterminante, sont estimées à partir de la méthodologie européenne de référence COPERT IV [12].

COPERT IV est une base de données d'équations intégrant des facteurs d'émissions fonctions de la vitesse moyenne de circulation des véhicules pour différentes catégories (voitures particulières, véhicules utilitaires légers, poids lourds, bus, cars et deux-roues motorisés) faisant également intervenir le type de carburant, la cylindrée, le poids total en charge et la classe technologique (norme EURO).

La méthodologie COPERT permet de calculer les émissions des véhicules « à chaud », mais également les surémissions des moteurs « à froid » pour les véhicules légers, les surémissions dues à la pente pour les poids lourds, les surémissions dues à l'évaporation de l'essence, les émissions d'usure, ainsi que les surémissions dues à l'âge du véhicule. Ces différentes catégories ont été prises en compte de façon exhaustive.

Les polluants modélisables sont les suivants : CO, NO_x, COVNM (dont benzène, toluène, xylène), formaldéhyde, SO₂, CH₄, CO₂, N₂O, NH₃, PM₁₀, PM_{2,5}, particules totales, HAP, POP, dioxines, furannes, et métaux toxiques. Les consommations énergétiques sont aussi calculées. Les facteurs d'émission et de consommation de carburant pour les différents polluants sont rassemblés dans le guide EMEP CORINAIR [12]. Les données retenues pour la comparaison des scénarios concernent les consommations énergétiques, les émissions de gaz à effet de serre ainsi que les émissions des principaux polluants atmosphériques : CO, NO_x, C₆H₆, SO₂, particules (PM₁₀ et PM_{2,5}), COV.

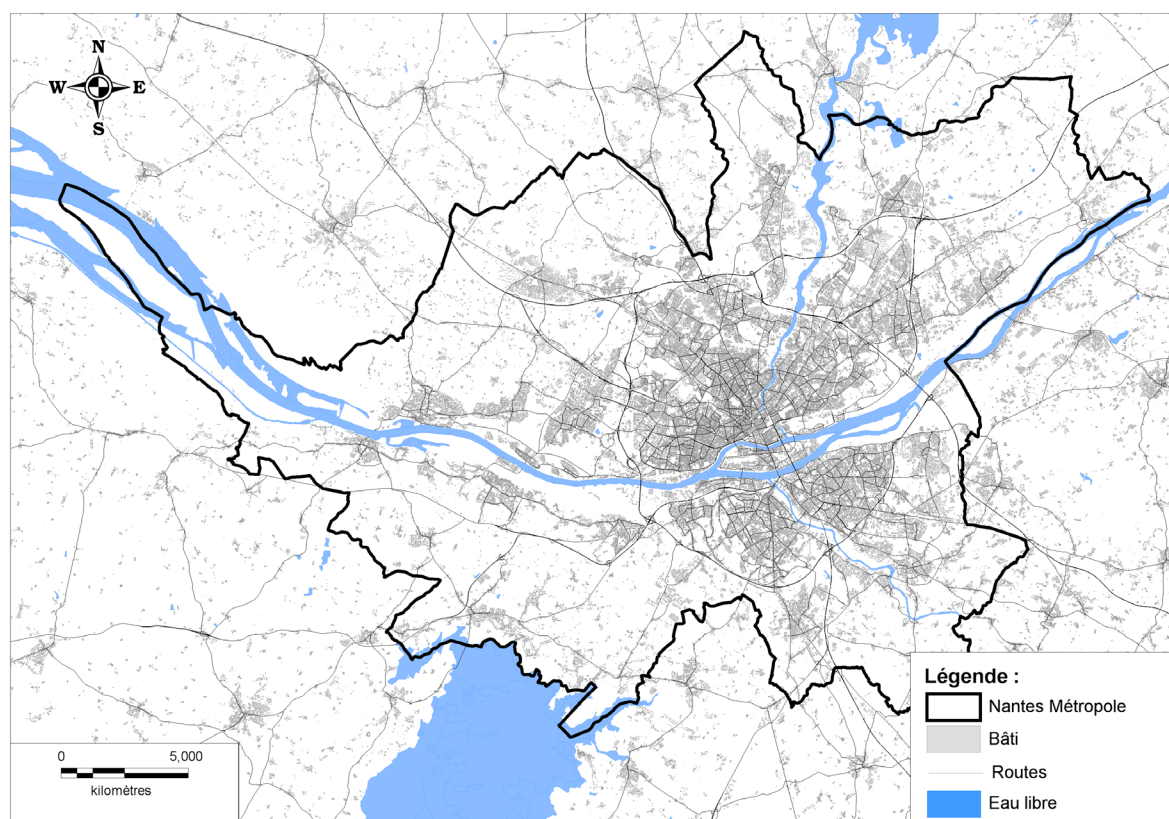


Figure 1. Périmètre d'étude.
Studied area.

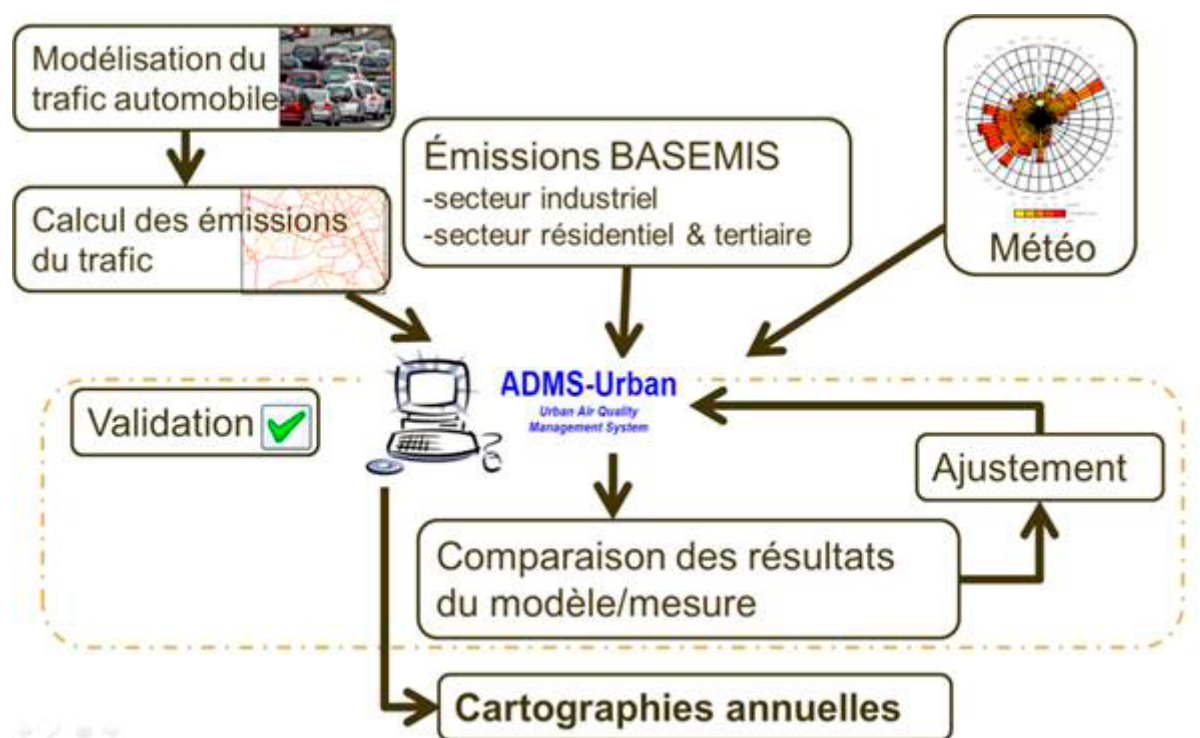


Figure 2. Schéma général du système de modélisation mis en œuvre.
General scheme of the implemented modelling system.

Dans le cadre du projet, la méthodologie COPERT a été mise en application à travers l'outil CIRCULAIR, développé et mis à disposition par l'ASPA, organisme en charge de l'évaluation de la qualité de l'air de la région Alsace. Cet outil intègre un module de calcul de la vitesse horaire moyenne de circulation préalablement nécessaire à l'utilisation des équations COPERT.

Les données d'entrée recueillies, nécessaires au calcul des émissions, concernent le réseau routier (typologie des voies, vitesse à vide, capacité, courbe débit/vitesse), le trafic considéré (nombre de véhicules journalier par voie de circulation, profils de variation temporelle du trafic, parc roulant, pourcentage de poids lourds, bus, autocars), les combustibles (teneurs en soufre, benzène, etc.) et les conditions météorologiques (température). Le modèle de trafic, mis en œuvre par le CETE de l'Ouest, est à l'origine de la majeure partie de ces informations. La description du parc roulant provient du CITEPA, qui propose une description basée sur les immatriculations les plus récentes. Les données de température ambiante sont fournies par la station Météo-France de l'aéroport Nantes-Atlantique.

Un travail spécifique sur la décomposition horaire des données journalières de trafic fournies par le modèle a été réalisé. Le modèle de trafic simule un jour ouvré type décomposé en quatre tranches horaires (heures de pointe du matin, heures creuses jour, heures de pointe du soir, heures creuses nuit). Cette finesse n'est pas suffisante dans notre cas, du fait de l'utilisation d'un modèle de dispersion atmosphérique (partie 4.1.2 Modélisation des concentrations). En effet, en milieu urbain en particulier, les niveaux de pollution atmosphérique varient rapidement sur des pas de temps très courts, de l'ordre de l'heure. Il est de ce fait nécessaire d'effectuer un calcul heure par heure. Ce calcul rend également possible la description de courts épisodes de pollution et la comparaison des niveaux atteints avec les seuils réglementaires exprimés en percentiles horaires. Dans ces conditions, nous avons jugé que les informations fournies par le modèle de trafic étaient insuffisantes, notamment parce que la distribution du trafic le week-end, en jours fériés et pendant les différentes périodes de l'année, était indisponible. De ce fait, les 300 stations fixes de comptages du trafic de la Direction Interdépartementale des Routes Ouest et de Nantes Métropole ont été exploitées statistiquement pour retenir celles dont les profils horaires se rapprochent de la description temporelle du modèle de trafic et donc aptes à caractériser les variations horaires du trafic tout au long de l'année.

Ces différents profils temporels issus des stations de comptage de trafic ont été appliqués de façon uniforme à l'ensemble des scénarios tests.

Le pourcentage des kilomètres réalisés à froid est également estimé constant entre les scénarios tests. La méthode de calcul utilisée et les données d'entrée disponibles pour déterminer cette proportion ne permettent pas de descendre à un niveau d'information suffisamment fin pour distinguer des variations entre les scénarios.

4.1.2 Modélisation des concentrations

Le modèle ADMS-urban (version 2.3) est utilisé pour la modélisation des concentrations. C'est un modèle de dispersion atmosphérique de type gaussien adapté à la modélisation des principaux phénomènes de pollution en milieu urbain [13]. Le logiciel intègre un préprocesseur météorologique permettant de caractériser la structure de la couche limite et la stabilité atmosphérique. Il permet de prendre en compte les mécanismes d'écoulement d'air dans les rues « canyons » (bordées de bâtiments) et possède un module photochimique régissant les équations de formation/destruction de l'ozone par les oxydes d'azote. Le calcul est effectué heure par heure.

Les données d'entrée nécessaires concernent tout d'abord la description des émissions sur le domaine d'étude. À noter qu'en complément des calculs d'émissions liées au transport routier, les émissions d'origine résidentielle, tertiaire et industrielle de l'agglomération nantaise ont également été prises en compte afin de tenir compte de l'ensemble des sources présentes en milieu urbain. Cette prise en compte a été réalisée à partir de l'inventaire BASEMIS développé par Air Pays de la Loire sur la base de la méthodologie française OMINEA du CITEPA [14].

À noter que les scénarios tests utilisent des données d'émissions identiques pour les secteurs hors transport routier correspondant à la situation de référence 2008.

Les conditions météorologiques sont définies à partir de la station Météo-France de l'aéroport Nantes-Atlantique. La pollution de fond des années 2002 et 2008 sur le domaine d'étude est déterminée à partir d'une combinaison de plusieurs stations du réseau de surveillance d'Air Pays de la Loire, combinaison donnant le meilleur accord mesure/modèle. Pour les scénarios tests, les paramètres 2008 sont réutilisés.

Les polluants retenus pour le calcul de dispersion sont le CO, le C₆H₆, les NO_x, le NO₂, les particules (PM₁₀, PM_{2,5}) et le SO₂. Lors des scénarios de référence, les résultats obtenus par le modèle sont comparés aux stations fixes d'Air Pays de la Loire présentes dans l'agglomération. Les critères de validation du modèle sont basés sur les objectifs de qualité

et d'incertitude de la Directive européenne 2008/50/CE. Ainsi, le principal indicateur est le biais fractionnel qui ne doit pas dépasser 30 % en moyenne annuelle. En complément, des profils journaliers et annuels des concentrations sont calculés afin d'assurer une bonne reproduction des évolutions temporelles des concentrations modélisées. Les biais observés sur les moyennes annuelles sont systématiquement inférieurs à 15 % pour le CO, le C₆H₆, les NO_x, le NO₂, et les particules (PM₁₀, PM_{2,5}) (figure 3).

4.2. Comparaison avec des travaux antérieurs

Si l'on compare nos travaux à ceux menés à Florence [5], [6] et à Brisbane [7], [8], nous observons qu'ils fournissent également des exemples de chaînes de modèles configurées de manière à comparer cartographiquement les impacts sur l'environnement urbain de différents scénarios de transport. Avec Eval-PDU, nous avons souhaité approfondir cette approche en nous différenciant dans différentes directions.

Premièrement, la modélisation du trafic fait partie intégrante du projet [15] et ne reste pas hors-champ et indiscutée comme nous le remarquons dans les études précitées. En effet, une grande partie des incertitudes en bout de chaîne provient de cette étape initiale et incontournable, qui doit donc être au cœur de l'analyse et retenir notre attention.

Deuxièmement, au niveau des émissions et concentrations de polluants de l'air qui nous concernent directement ici, nous avons pris le parti, en plus d'utiliser les facteurs et les modèles les plus récents, de prendre en compte les variations météorologiques horaires sur toute l'année. Nous différons donc des approches « conditions moyennes » ou « pires conditions » météo privilégiées jusqu'ici. Il faut préciser qu'à la différence de nos prédécesseurs, notre objectif n'est pas de réaliser une cartographie des points noirs ou de pointer des zones gagnantes ou perdantes d'un scénario de transport. Nous souhaitons élaborer une méthode capable de mesurer les effets environnementaux induits par l'application d'un plan de déplacements urbains. Cette reformulation française d'une problématique générale dont une autre variante, épidémiologique celle-là, a été explorée à l'aide d'une analyse de régression et d'interpolation à partir de mesures de terrain [16], nous a donc conduit à complexifier, là où d'autres cherchaient à simplifier davantage.

La revue de la littérature nous laisse penser que nous nous situons à un niveau de finesse cartographique comparable à des travaux plus récents à l'instar de ceux menés à Toronto, par exemple [11].

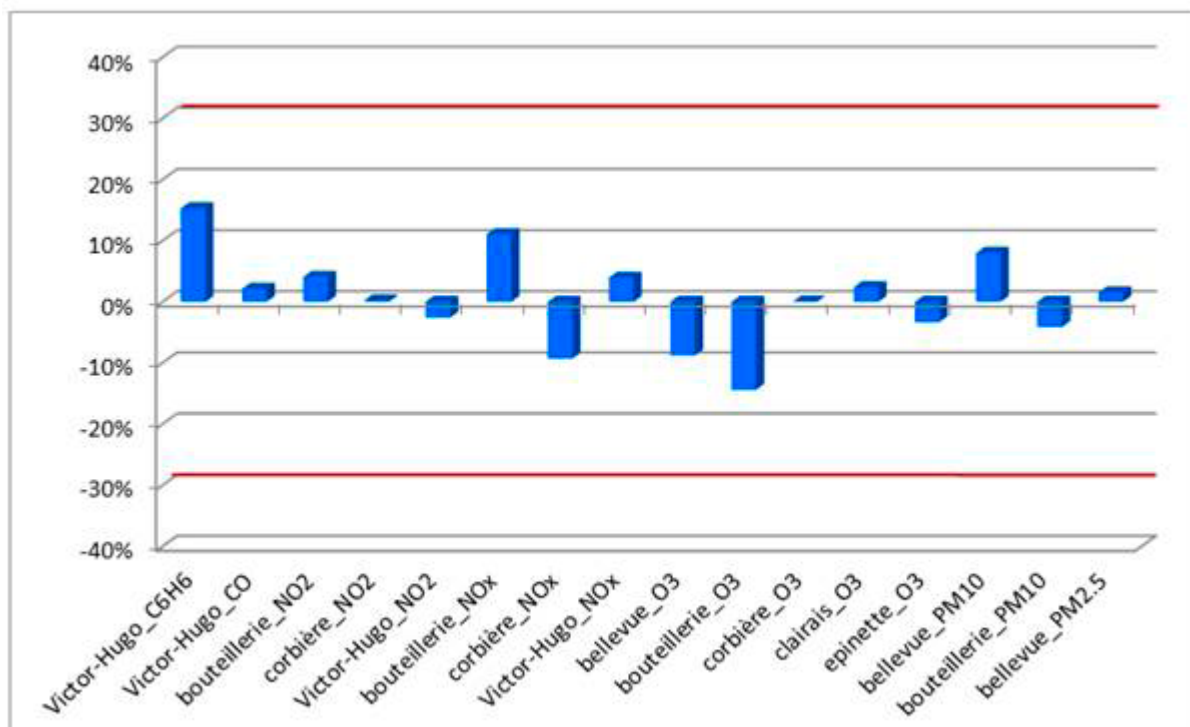


Figure 3. Biais mesure/modèle pour l'année 2008 sur les stations du réseau de surveillance de Nantes.

Measure/model bias for the year 2008 on the Nantes' air quality network stations.

Tableau I. Évolution des consommations et des émissions du routier entre 2002 et 2008.
Evolution of road energy consumptions and pollutant emissions between 2002 and 2008.

Consommation	GES éq CO ₂	CO	C ₆ H ₆	NOx	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2,5}	SO ₂	COV
+6 %	+8 %	-47 %	-51 %	-21 %	+37 %	-12 %	-17 %	-81 %	-52 %

5. Principaux résultats

Nous proposons de présenter deux résultats que nous jugeons intéressants pour la discussion : la comparaison avant (2002) et après (2008) mise en œuvre du PDU et la comparaison avec/sans Busway (Bus à Haut Niveau de Service, infrastructure emblématique du PDU nantais).

Concernant la modélisation des concentrations, nous nous focaliserons sur un polluant : le dioxyde d'azote (NO₂). Ce polluant est particulièrement intéressant pour évaluer l'impact d'une politique d'aménagement des transports en milieu urbain pour deux raisons :

- Il est principalement lié au trafic routier ;
- Les concentrations observées en milieu urbain peuvent dépasser les valeurs limites réglementaires.

Les concentrations en particules PM₁₀ ne sont pas présentées dans cet article. C'est un polluant qui fait l'objet d'un transport sur de grandes distances, induisant une forte contribution de la pollution extérieure au domaine étudié. L'agglomération nantaise ne présente pas de dépassement de valeur limite pour ce polluant.

5.1. Avant/après PDU

En comparant les modélisations réalisées pour les années 2002 et 2008, nous pouvons réaliser un bilan avant/après partiel¹ du PDU concernant les déplacements automobiles, les émissions, les concentrations et enfin les niveaux d'exposition.

5.1.1. Évolution des déplacements dans l'agglomération

Intéressons-nous dans un premier temps à l'évolution des déplacements dans l'agglomération.

Le modèle de trafic mis en œuvre dans le cadre du projet Eval-PDU calcule entre ces deux horizons

(1) Le PDU nantais portait sur dix années (2000-2010). Ce bilan ne représente que 6 années. L'année de départ, 2002, a été retenue parce qu'elle correspondait à l'année de la seule enquête de mobilité réalisée sur le territoire au cours de la période. Cette enquête était indispensable au paramétrage du modèle de trafic. L'année de fin, 2008, a été retenue quant à elle parce qu'elle coïncidait avec le début du programme de recherche.

une augmentation de 8,5 % des kilomètres parcourus par le trafic automobile dans l'agglomération. Cette augmentation est cohérente avec différentes études [17], [18] qui font état d'une augmentation de 20 % de la fréquentation du périphérique entre 2002 et 2008, accompagnée d'une diminution de 12 % des véhicules entrants/sortants du centre-ville (Ile de Nantes et intra-boulevard). En parallèle, la population de Nantes Métropole augmente de 6,3 %. La population de l'aire urbaine de Nantes augmente, elle, de 8,2 %. La baisse de la part modale voiture observée pour les habitants de la communauté urbaine (de 61,6 % à 57 % des déplacements) est annulée dans notre modélisation par l'allongement des distances et par l'importance croissante des flux d'échange avec le reste de l'aire urbaine, où la croissance démographique est plus importante. L'étalement urbain génère du trafic pendant que l'amélioration des transports collectifs et les contraintes sur le stationnement et la circulation dans l'intra-périphérique tendent à le réduire. Au final, le trafic, entendu comme les distances totales parcourues en voiture, augmente au rythme de la croissance démographique, l'évolution du comportement des habitants du centre de l'agglomération ne compense pas cette tendance haussière.

5.1.2. Évolution des consommations énergétiques et des émissions

Le tableau I ci-dessus présente l'évolution des consommations énergétiques et des émissions au niveau de l'agglomération entre 2002 et 2008 pour le secteur routier.

L'augmentation de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre entre les deux horizons est globalement imputable à l'augmentation des distances parcourues par les automobiles et du nombre de déplacements routiers dans l'agglomération.

Concernant les émissions de polluants, hormis le dioxyde d'azote, une baisse plus ou moins marquée est visible. Cette diminution est imputable à la fois à l'évolution technologique des motorisations, à l'abaissement des teneurs de certains composés dans les carburants (en particulier pour le SO₂) et aux actions du PDU.

L'augmentation des émissions de NO_2 est principalement liée à l'évolution du parc roulant et des technologies. En effet, les véhicules diesel récents, notamment ceux équipés de pots catalytiques, émettent d'avantage de NO_2 [19].

5.1.3. Évolution des concentrations

Entre 2002 et 2008, une diminution globale de 1 à $4 \mu\text{g.m}^{-3}$ des concentrations de NO_2 est modélisée sur l'ensemble de l'agglomération (figure 4). Localement, de fortes variations des concentrations sont constatées. Entre les deux horizons, des aménagements routiers ont été effectués. Ces aménagements (axe du Busway – cf. figure 7 –, périphérique Est...) sont visibles sur la cartographie au niveau des zones à forte variation des concentrations (en positif et négatif). Ils ont un impact direct sur les concentrations de proximité.

Concernant la diminution moyenne sur le territoire de Nantes Métropole de la concentration annuelle de NO_2 , d'autres facteurs explicatifs sont à prendre en considération, indépendants des actions menées dans le cadre du PDU :

- l'évolution qualitative des émissions de NO_x ;
- les particularités météorologiques ;
- l'évolution du réseau local de surveillance.

L'évolution du parc automobile ne modifie pas que le volume de NO_x émis, il en modifie la composition. La modélisation montre qu'en 2008, les NO_x émis sont composés à 83 % de NO et 17 % de NO_2 , alors qu'en 2002, le rapport était de 90 % de NO et 10 % de NO_2 . Dans l'atmosphère, des transformations physico-chimiques ont lieu. Ainsi, le NO se transforme en NO_2 à travers le cycle de formation/destruction de l'ozone troposphérique [20]. Si les émissions de NO_2 augmentent sur cette période, la baisse des émissions de NO_x compense cette variation et prend une part prédominante dans l'explication de l'évolution des concentrations atmosphériques de NO_2 .

L'année 2002 a été une année plus chaude avec $12,7^\circ\text{C}$ en moyenne annuelle contre $11,3^\circ\text{C}$ en 2008 (données Météo-France de la station de l'aéroport Nantes Atlantique). À l'inverse, l'ensoleillement a été plus élevé en 2008 avec 1 875 heures d'ensoleillement contre 1 689 en 2002.

Entre 2002 et 2008, le nombre de stations mesurant le NO_2 est passé de 10 à 3. Leur localisation a également changé. Ainsi, les stations permettant de vérifier le modèle et de définir la pollution de fond ne sont pas identiques entre les deux horizons, ce qui concourt à une forme d'incertitude dans l'analyse.

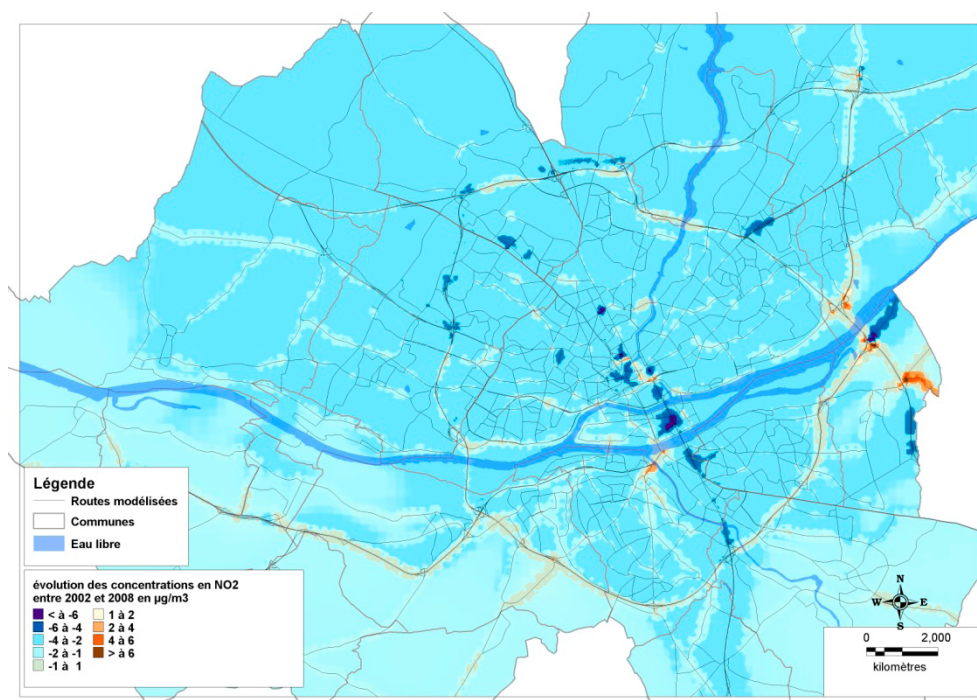


Figure 4. Cartographie de l'évolution des concentrations de NO_2 en 2002 et 2008 sur l'agglomération nantaise.

Map of the NO_2 rate evolution between 2002 and 2008 on the Nantes conurbation.

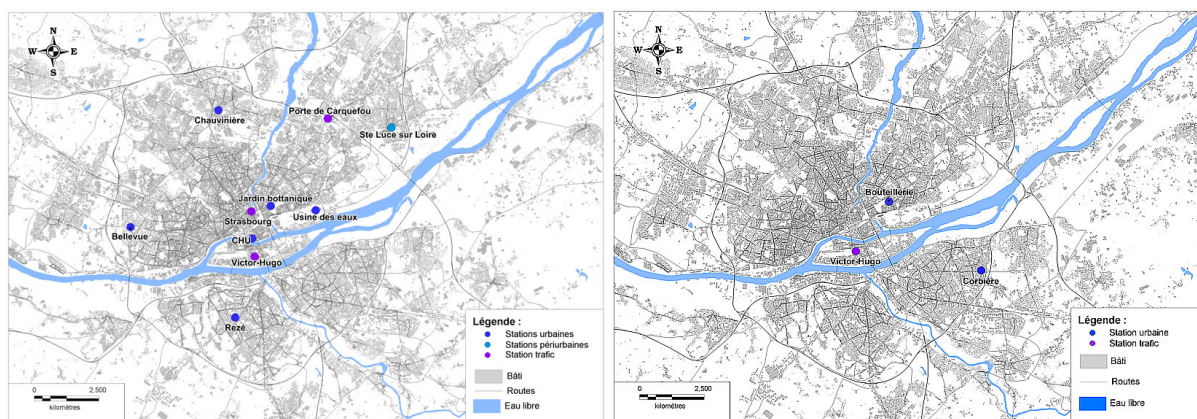


Figure 5. Cartographie du réseau de mesure du NO₂ en 2002 et 2008 sur l'agglomération nantaise.

Map of the NO₂ measure network in 2002 and 2008 on the Nantes' conurbation.

Cette comparaison des concentrations, si elle reflète bien la réalité, mêle plusieurs effets qu'il n'est pas possible de dissocier avec la méthode employée. Dans notre cas, nous cherchons à élaborer des méthodologies d'évaluation en étudiant des actions spécifiques d'un PDU, à travers les scénarios tests, par rapport à la situation de 2008. Ce qui neutralise les effets de météorologie, de parc et d'évolution du réseau de mesure. La comparaison avant/après Busway présentée en 5.2. se situe typiquement dans ce cadre.

5.1.4. Exposition de la population

Nous étudions ici un indicateur supplémentaire concernant l'exposition de la population. La méthode utilisée comptabilise en fait la population des logements exposés, faute de pouvoir déterminer plus précisément les personnes réellement exposées. L'évolution modélisée des concentrations en NO₂ a entraîné une amélioration de la qualité de l'air pour les résidents de Nantes Métropole. En effet, selon la modélisation, en 2002, 38 000 habitants possédaient un logement dans une zone dont les concentrations en NO₂ étaient supérieures à 40 µg.m⁻³. En 2008, 32 500 habitants sont concernés par un dépassement de la valeur limite, alors que la population de l'agglomération a augmenté de 6,3 %.

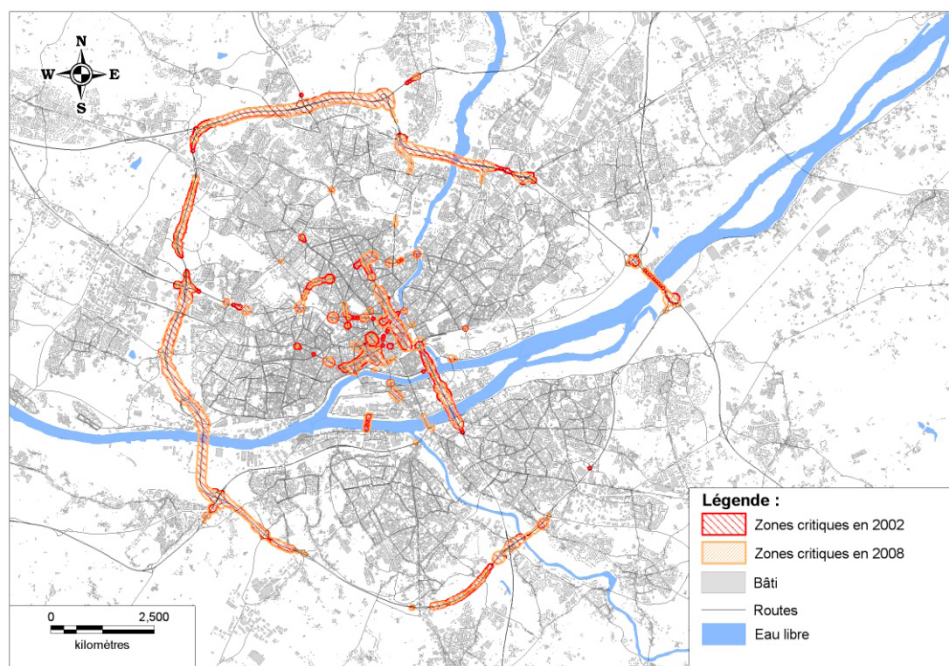


Figure 6. Évolution des zones à forte concentration en NO₂ (> 40 µg/m³) entre 2002 et 2008 sur l'agglomération nantaise.

Evolution of the high NO₂ rate (> 40 µg/m³) zones between 2002 and 2008 on the Nantes' conurbation.

5.2. Avec/sans Busway

En comparant la référence 2008 à un scénario dans lequel l'aménagement du BHNS n'aurait pas été réalisé, nous pouvons isoler son effet propre.

Le Busway a indéniablement permis de faire gagner de la clientèle aux transports en commun (plus rapides, fréquents, réguliers, confortables que les anciennes lignes de bus) et de réduire le trafic sur le boulevard. En 2008, la fréquentation du Busway était d'environ 24 000 voyages/jour contre 13 000 en 2003 pour les quatre lignes qu'il a remplacées (26-27-28-29). Parallèlement, les comptages sur le pont Clémenceau (bras sud de la Loire) font état d'une chute considérable du nombre de véhicules circulant sur cet axe (27 500 en 2002 et 16 250 en 2008). Toutefois la modélisation du trafic tend à montrer que les bénéfices réalisés sur cet axe se paient en contrepartie par des reports de trafic sur des itinéraires devenant alors compétitifs, alors que moins directs. Plusieurs hypothèses justifient ce constat :

- L'offre de transport liée à la mise en place du Busway n'est pas en mesure d'absorber l'intégralité du trafic initial contraint par la réduction de capacité de la voirie.
- Le Busway n'intéresse pas une partie des automobilistes du fait de préférences et contraintes personnelles (présence d'enfant à déposer à l'école, éloignement de la ligne par rapport au lieu de travail/habitation, rupture de charge, etc.). Cette dimension est prise en compte par le modèle de trafic à travers les matrices origine-destination et la paramétrisation des sensibilités aux choix modal, qui distingue la variabilité propre aux différentes chaînes d'activités [21].

Au final, si l'offre de transport liée au Busway persuade effectivement certains automobilistes d'abandonner leur véhicule au profit des transports en commun (report modal), il en conduit d'autres à réaliser davantage de kilomètres pour contourner cet axe ralenti. C'est donc plus de distances qui sont parcourues par les automobilistes (+0,5 %, ce qui représente environ 65 000 v.km par jour liés à l'« effet Busway »), donc *a priori* plus d'émissions, mais réparties différemment sur le territoire.

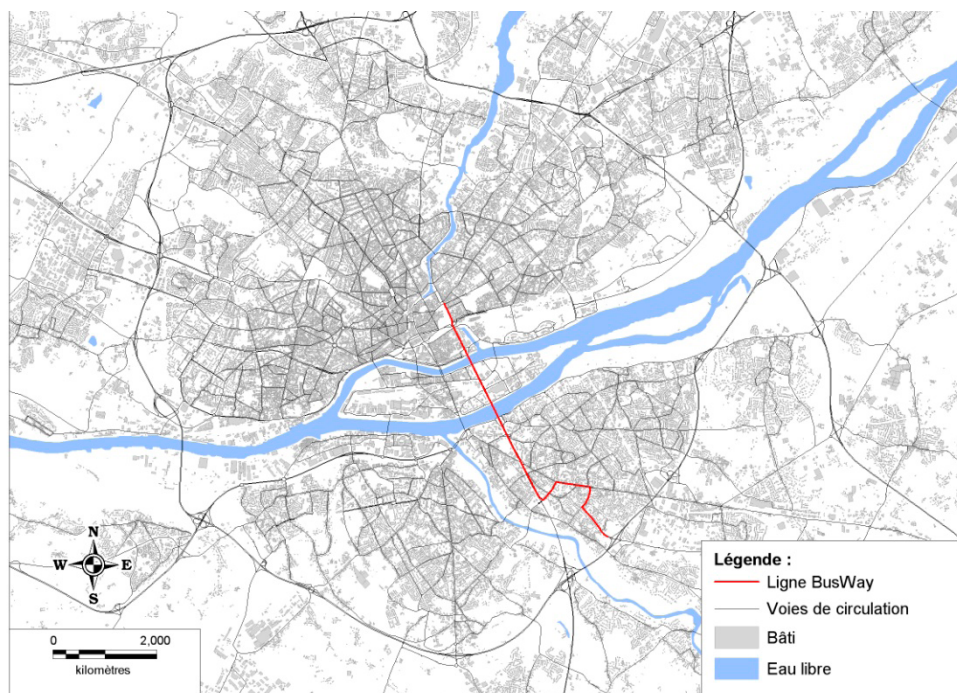


Figure 7. Cartographie de la ligne de Busway.
Map of the Busway line.

Tableau II. Évolution des consommations et des émissions du routier avant/après Busway.
Comparison of road energy consumptions and pollutant emissions with and without Busway.

Consommation	GES éq CO ₂	CO	C ₆ H ₆	NO _x	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2,5}	SO ₂	COV
<+1 %	<+1 %	<+1 %	<+1 %	<+1 %	<+1 %	<+1 %	<+1 %	<+1 %	<+1 %

La comparaison des émissions/concentrations entre la situation de référence et la situation « sans Busway », nous permet d'isoler un « effet Busway » et d'approfondir le constat ci-dessus au regard des émissions puis les concentrations.

En première approche, à l'échelle de l'ensemble de l'agglomération, l'impact du Busway sur les consommations et les émissions, présentées par le tableau II, est très peu perceptible, inférieur à +1 %. À cette échelle, il y a une très légère augmentation des consommations et des émissions.

En zoomant sur la zone intra-périphérique de l'agglomération (figure 8), un gain important, supérieur à 2 500 kg/km/an des émissions de NO_x, est modélisé sur l'axe du Busway. À l'inverse, l'augmentation des émissions (environ 500 kg/km/an) sur les itinéraires de contournement est calculée, conformément aux résultats de la modélisation du trafic.

La cartographie qui présente l'évolution des concentrations (figure 9) est conforme au résultat de la modélisation des émissions. Une baisse pouvant dépasser

10 % des concentrations en NO₂ est visible au niveau de l'axe du Busway. En revanche, une augmentation généralement inférieure à 5 % est observée sur les itinéraires de contournement, dont l'environnement est moins résidentiel.

La population résidant dans une zone aux concentrations de NO₂ supérieures à 40 µg.m⁻³ diminue de 1 300 habitants en raison de la mise en place du Busway (figure 10). Celle-ci présente un bilan positif en termes d'impact de la qualité de l'air malgré une très légère augmentation des émissions au niveau de l'agglomération dans ce scénario.

6. Atouts, enjeux, limites

Le recours à une chaîne de simulations successives du trafic, des émissions, des concentrations et de l'exposition de la population présente un des avantages majeurs de la méthodologie d'évaluation environnementale employée ici. Il permet l'étude de scénarios intégrés toutes choses égales par ailleurs et la comparaison de la réalité observée avec des situations de références hypothétiques.

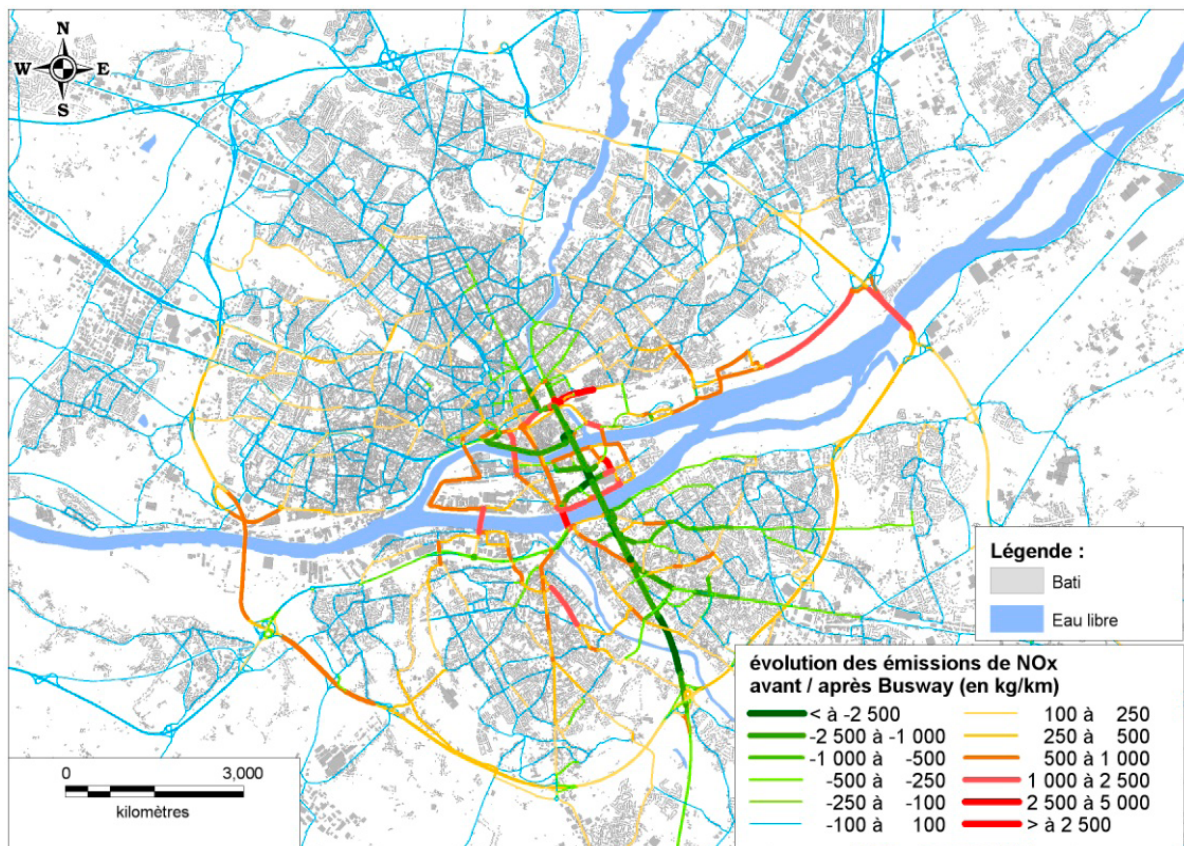


Figure 8. Évolution des émissions de NO_x avant/après Busway.
Comparison of NO_x emissions with/without Busway.

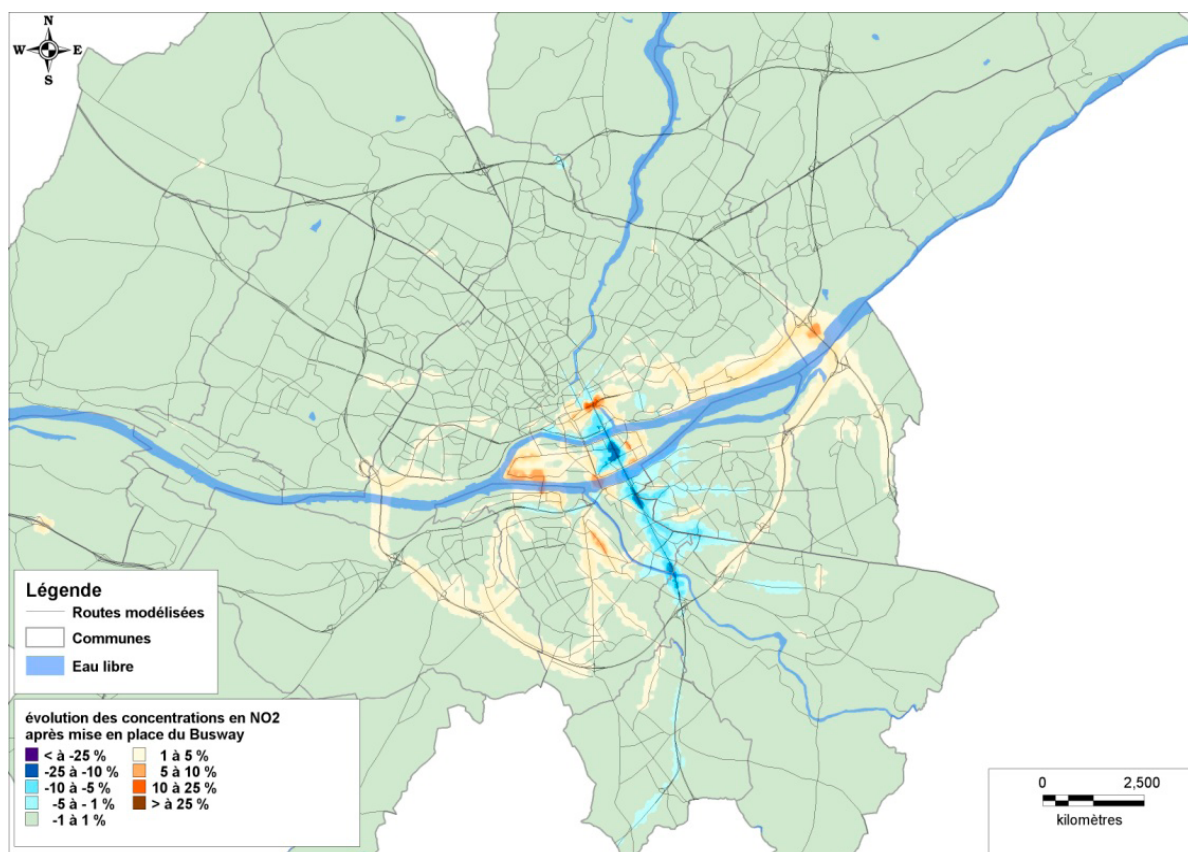


Figure 9. Évolution des concentrations en NO₂ entre avant et après le Busway.
Comparison of NO₂ rate with and without the Busway.

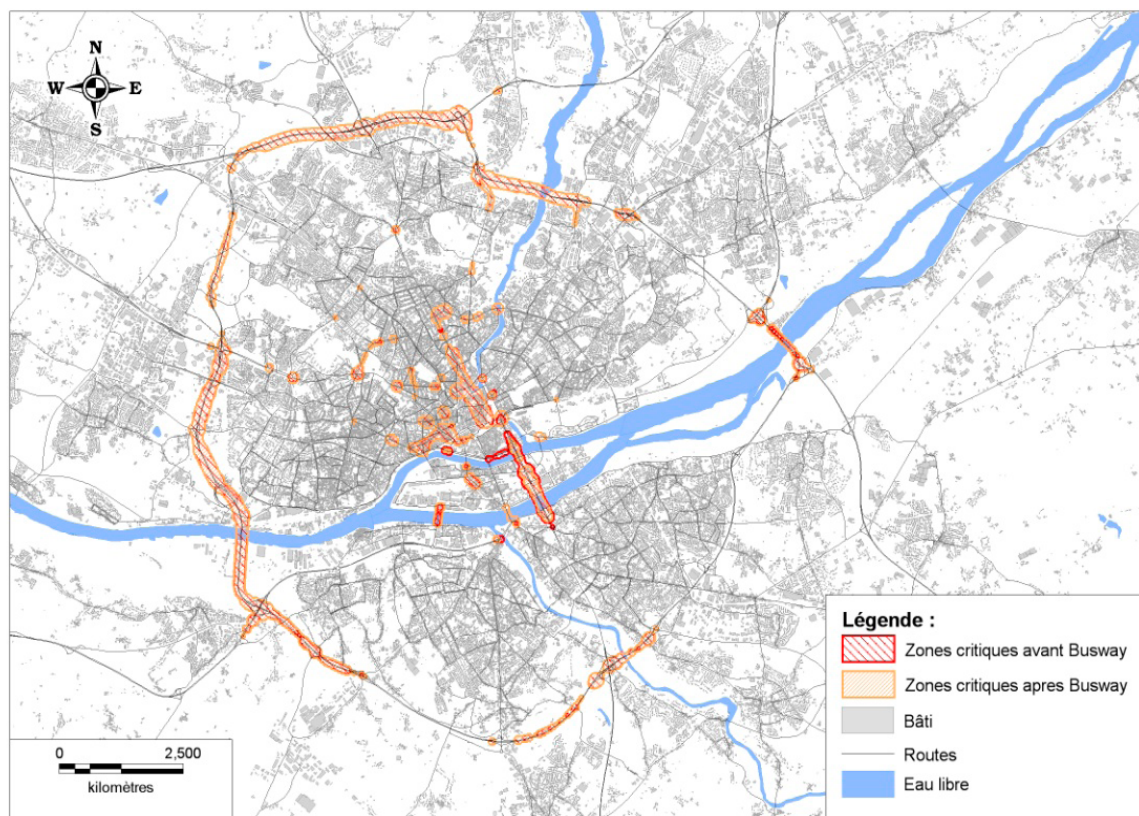


Figure 10. Évolution des zones à forte concentration en NO₂ (> 40 µg/m³) avant/après mise en place du Busway.
Comparison of the high NO₂ rate (> 40 µg/m³) zones with/without Busway.

En complément, le recours à la modélisation présente l'avantage de spatialiser l'approche sur l'ensemble d'un territoire et d'étudier plus finement certaines zones clés en lien avec des aménagements de voirie.

Cependant, chaque modèle présente ses propres limites, par exemple :

- le modèle de trafic considère 3 choix modaux (voiture, transport en commun, marche à pied) et ne permet pas de considérer les déplacements à vélo ;
- le modèle de calcul des émissions, basé sur la méthodologie COPERT, présente une approche par vitesse moyenne horaire de circulation, ne permettant pas de considérer plus finement la dynamique du trafic (arrêts, accélérations, etc.), ni son éventuelle évolution avec le temps ou les scénarios ;
- le modèle de dispersion, basé sur des équations gaussiennes, considère par tranche horaire une direction unique des vents sur l'ensemble du domaine d'étude. Le modèle présente également une description simplifiée du milieu urbain *via* un facteur de rugosité.

Chaque modèle comprend des incertitudes propres qui se cumulent tout au long de la chaîne de modélisation. Ces incertitudes ne peuvent pas être estimées pour le modèle de trafic et pour le modèle de dispersion, car la comparaison modèle/mesure est utilisée dans la procédure de calage. Cette dernière assure un réalisme du modèle pour la situation de référence (pour laquelle les mesures sont disponibles) mais cela interdit simultanément d'estimer des intervalles de confiance pour les scénarios testés. La complexité des modèles de calcul d'émission et les incertitudes qui pèsent sur les mesures qui permettent de les élaborer rendent également difficile l'appréciation de la précision de ce maillon. Enfin, de nombreuses données d'entrée complémentaires sont nécessaires, telles que la description du parc roulant lors du calcul d'émission ou la description des paramètres météorologiques lors du calcul des concentrations, et dont la précision n'est pas déterminée.

Il est également nécessaire de s'assurer de la cohérence entre les modèles. Les différents modèles ont été développés indépendamment, dans un objectif propre et défini. Les indicateurs en sorties de modèle ne peuvent pas être réutilisés directement dans le modèle suivant. Des ajustements sont nécessaires, comme le souligne la prise en compte des stations de comptage pour définir la variation temporelle du trafic lors du calcul des émissions (*cf.* 4.1.1).

Seule la comparaison mesure/modèle lors du calage permet de s'assurer en quelques zones de la validité de la modélisation. Lors de la réalisation des scénarios et tests, cette possibilité disparaît. Il est alors primordial de considérer les limites des outils lors de l'interprétation des résultats.

7. Conclusion

En termes d'impact sanitaire, il peut sembler raisonnable que les nuisances augmentent quelque peu au global, pour autant que leur répartition plus homogène permette de soulager les secteurs et les populations les plus exposées. Comme nous l'avons vu, si le bilan net du Busway est mitigé en termes d'émissions totales, leur redistribution participe d'un nivellement des niveaux de concentrations de certains polluants, ce qui permet de réduire les dépassements de seuils réglementaires. De plus, les contournements par le périphérique, qui constituent les plus grands allongements de parcours (donc les plus fortes hausses d'émissions) se réalisent dans des milieux moins peuplés, ce qui permet de réduire le nombre d'habitations exposées à des dépassements des seuils sanitaires. L'objectif de limitation de la pollution globale et des consommations énergétiques rentre ici en antagonisme avec la limitation de la pollution locale, qui reste un impératif de santé publique.

Notre méthode d'évaluation éclaire donc la décision politique sur les impacts environnementaux, parfois contradictoires, des actions menées. Il revient ensuite au politique de déterminer quelles sont les priorités, en connaissance de cause, ou du moins avec une meilleure connaissance des causes. Connaissance qui reste toutefois imparfaite et incertaine par définition.

Les auteurs tiennent à remercier leurs nombreux collègues du consortium Eval-PDU, piloté par l'IRSTV de Nantes et financé pour cette recherche par l'ANR. Ces remerciements se destinent en particulier à Michel André et Jacques Bognol pour leur lecture attentive et leurs remarques qui ont permis d'améliorer grandement la qualité de l'article.

Références bibliographiques

- [1] Jasanoff S. » Thin air », in Akrich M, Barthe Y, Muniesa F, Mustar F (dir.) *Débordements. Mélanges offerts à Michel Callon*. Presses des Mines, Paris 2011 : 191-202.
- [2] Bourdelais P (dir.). *Les hygiénistes : enjeux, modèles et pratiques*. Belin, Paris 2001 : 540 p.
- [3] Certu et CETE. *Évaluation environnementale des plans de déplacements urbains. Analyse des premières pratiques et préconisations*. Éditions du Certu, collection Dossiers, Lyon 2011 : 111 p.
- [4] Mestayer P, Abidi A, André M *et al.* « Urban mobility plan environmental impacts assessment : a methodology including socio-economic consequences », in Rauch S, Morrison GM (dir.) *Urban Environment. Proceedings of the 10th Urban Environment Symposium, Alliance for Global Sustainability Bookseries*, vol. 19, Springer, Dordrecht 2012 : 15-26.
- [5] Gualtieri G, Tartaglia M. Predicting urban traffic air pollution : a GIS framework - *Transportation Research Part D*, 3, 5, 1998 : 329-336.
- [6] Ambrosino G, Sassoli P, Carotenuto P, Romanazzo M. A modeling framework for impact assessment of urban transport systems. *Transportation Research Part D*, 4, 1999 : 73-79.
- [7] Brown AL, Affum JK. A GIS-based environmental modeling system for transportation planners. *Comput., Environ. Urban Syst.*, 26, 2002 : 577-590.
- [8] Affum JK, Brown AL, Chan YC. Integrating air pollution modeling with scenario testing in road transport planning : the TRAEMS approach. *Sci. Total Env.*, 312, 1-3, 2003 : 1-14.
- [9] Soleil L, Gaboriaud L, Noppe J, Vinot JP. Évaluation de l'impact sur la qualité de l'air de scénarios de déplacements urbains (PDU, DVA, mesures d'urgence). Étude pilote de Saint-Étienne. CERTU-ADEME, Lyon, 2002 : 150 p.
- [10] Lagache R, Declercq C, Sportisse B *et al.* Évaluation de l'impact du plan de déplacements urbains de Lille Métropole sur le trafic, les concentrations de polluants atmosphériques et la mortalité. « 2^e conférence Environnement et Transports », 12-14 juin 2006, Reims.
- [11] Hatzopoulou M, Miller EJ. Linking an activity-based travel demand model with traffic emission and dispersion models : Transport's contribution to air pollution in Toronto. *Transportation Research Part D*, 15, 2010 : 315-325.
- [12] EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook, chapter A.1.3.b. Road transport - European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, June 2009 : 129 p.
- [13] ATMO-France, Évaluation de l'exposition des populations à la pollution atmosphérique. Guide pour une modélisation avec une résolution spatiale fine des concentrations en milieu urbain, septembre 2010 : 125 p.
- [14] CITEPA, Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France, 3^e édition, février 2006 : 866 p.
- [15] Fouillé L, Broc JS, Bourges B *et al.* La place des modèles de trafic dans les récentes modélisations des impacts environnementaux des transports. Importance de l'explicitation des méthodes et hypothèses. *Recherche Transports Sécurité*, vol. 28, issue 3-4, décembre 2012 : 190-200.
- [16] Briggs D *et al.* A regression-based method for mapping traffic-related air pollution : application and testing in four urban environments. *Sci. Total Env.*, 253, 1-3, 2000 : 151-167.
- [17] AURAN, Comment se déplace-t-on aujourd'hui dans l'agglomération nantaise et son bassin de vie ? Tendances 2008, Novembre 2009 : 40 p.
- [18] AURAN et Nantes Métropole, Évaluation du PDU 2000-2010, 2009 : 32 p.

[19] AFSSET, Impact des technologies de post-traitement sur les émissions de NO₂ de véhicules diesel et aspects sanitaires associés, Saisine AFSSET n° 2006-009, AFSSET, Maisons-Alfort, août 2009 : 265 p.

[20] Boussez N, Étude du transport intercontinental de la pollution atmosphérique entre l'Amérique du Nord et l'Europe à l'aide du modèle de chimie-transport MOCAGE, thèse dirigée par JL Attié et VH Peuch. Université Toulouse III, Toulouse, 2008 : 21-26.

[21] Prado C, Projet Eval-PDU, Exploitation de l'EMD de Nantes. Estimation des caractéristiques de mobilité. Mémoire de stage d'ingénieur dirigé par P Mestayer, École Centrale de Nantes, 2009, 98 p.